

# JTG

中华人民共和国强制性行业标准

JTG 3442—2026

## 公路工程无结合料粒料试验规程

Test Methods of Unbound Mixture for Highway Engineering

2026-07-13 发布

2026-10-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

## 前 言

根据交通运输部公路工程行业标准制修订项目计划的要求，由交通运输部公路科学研究院承担《公路工程无结合料粒料试验规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

本规程编写组以近年来国内外公路工程无结合料粒料试验方法的研究成果和实践经验为依托，在调研、试验并广泛征求有关单位意见建议的基础上，经过反复修改完善，完成了本规程的编制工作。

本规程由 10 章 25 个试验方法构成，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 取样方法、4 含水率试验、5 级配试验、6 成型与密度试验、7 强度试验、8 回弹模量试验、9 永久变形试验、10 其他试验。

本规程由严二虎、周震宇负责起草第 1、2、3 章，孟书涛、徐剑负责起草第 4、5 章，黄学文、冯德成、黄颂昌、王龙负责起草第 6 章，潘向阳、高晓影负责起草第 7 章，陈礼彪、杨金栋、秦永春负责起草第 8 章，李杰、曾峰、李东钊负责起草第 9 章，陶俊、杨富宇、敖登榜负责起草第 10 章。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规程日常管理组，联系人：严二虎（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话及传真：010-62079576；电子邮件：eh.yan@rioh.cn），以便修订时参考。

**主 编 单 位：**交通运输部公路科学研究院

**参 编 单 位：**北京交科公路勘察设计研究院

哈尔滨工业大学

福建省高速公路建设总指挥部

安徽省交通控股集团有限公司

中国路桥工程有限责任公司

新疆交投建设管理有限责任公司

贵州交通投资集团有限公司

**主 编：**严二虎

**主要参编人员：**孟书涛 徐 剑 黄学文 潘向阳 冯德成 黄颂昌

陈礼彪 杨金栋 李 杰 曾 峰 王 龙 周震宇

陶 俊 高晓影 杨富宇 敖登榜 秦永春 李东钊

**主 审：**黄晓明

**参与审查人员：**于 光 薛忠军 杨丽英 马士杰 齐永生 鞠 军  
王玉果 梁剑军 张 超 董元帅 钱国平 朱洪州

**参 加 人 员：**王志军 龚 演 罗恺彦 曾 蔚 张 威 宋澄宇  
甫尔海提·艾尼瓦尔 安自学 王方立 李 山  
曾靖翔 王 爽 谢亭亭 焦俊滔 靳晓曜

交通运输部信息公开  
浏览专用

# 目 次

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>1 总则</b>                   | 1   |
| <b>2 术语和符号</b>                | 2   |
| 2.1 术语                        | 2   |
| 2.2 符号                        | 3   |
| <b>3 取样方法</b>                 | 5   |
| T 1201—2026 取样法               | 5   |
| <b>4 含水率试验</b>                | 13  |
| T 1206—2026 含水率试验（烘干法）        | 13  |
| T 1207—2026 含水率试验（酒精燃烧法）      | 16  |
| T 1208—2026 含水率试验（微波炉加热法）     | 19  |
| T 1209—2026 含水率试验（砂浴法）        | 23  |
| <b>5 级配试验</b>                 | 27  |
| T 1215—2026 筛分试验              | 27  |
| <b>6 成型与密度试验</b>              | 35  |
| T 1220—2026 重型击实试验            | 35  |
| T 1221—2026 振动压实试验            | 44  |
| T 1222—2026 振动台压实试验           | 57  |
| T 1223—2026 表面振动压实试验          | 64  |
| T 1224—2026 振动锤压实试验           | 72  |
| T 1225—2026 轮碾成型试验            | 80  |
| T 1226—2026 最大干密度和最佳含水率试验     | 85  |
| T 1227—2026 三轴试验试件成型方法        | 92  |
| T 1228—2026 固体体积率试验           | 102 |
| <b>7 强度试验</b>                 | 106 |
| T 1235—2026 承载比试验             | 106 |
| T 1236—2026 抗剪强度试验（静三轴法）      | 115 |
| <b>8 回弹模量试验</b>               | 123 |
| T 1245—2026 抗压回弹模量试验          | 123 |
| T 1246—2026 贯入回弹模量试验（重复加载贯入法） | 128 |

|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| T 1247—2026 | 动态回弹模量试验 (动态三轴法) ..... | 134        |
| <b>9</b>    | <b>永久变形试验</b> .....    | <b>153</b> |
| T 1255—2026 | 永久变形试验 (动态三轴法) .....   | 153        |
| T 1256—2026 | 永久变形试验 (车辙仪法) .....    | 159        |
| <b>10</b>   | <b>其他试验</b> .....      | <b>162</b> |
| T 1265—2026 | 管吸试验 .....             | 162        |
| T 1266—2026 | 冻胀高度试验 .....           | 169        |
| T 1267—2026 | 常水头渗透试验方法 .....        | 182        |

交通运输部信息公开  
浏览专用

# 1 总则

**1.0.1** 为适应公路建设和管理需要，统一和规范公路工程无结合料粒料试验方法，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于公路工程无结合料粒料的试验。

**1.0.3** 本规程试验方法规定的仪器设备，均应检定、校准合格，并进行有效性确认。仪器设备的操作尚应遵从其产品使用要求。

**1.0.4** 本规程采用国家法定计量单位制。

**1.0.5** 试验应遵守安全和环境保护的规定。

**1.0.6** 公路工程无结合料粒料试验除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 无结合料粒料 unbound mixture

不掺任何结合料的粗细集料组成的混合料，主要类型有级配碎石、级配砾石、未筛分碎石、天然砂砾和填隙碎石等。

#### 2.1.2 含水率 water content

水的质量与集料颗粒质量的比值，以百分比表示。

#### 2.1.3 固体体积率 solid volume rate

混合料的干密度与其毛体积密度之比，以百分比表示。

#### 2.1.4 承载比 California bearing ratio

在规定贯入量条件下，试件单位压力与标准荷载强度之比，以百分比表示。

#### 2.1.5 抗剪强度 shear strength

在剪切面上所能承受的极限剪切应力。

#### 2.1.6 回弹模量 resilient modulus

在荷载作用下，轴向应力与其相应的轴向回弹应变之比。

#### 2.1.7 动态回弹模量 dynamic resilient modulus

在重复荷载作用下，重复轴向应力幅值与其相应的轴向回弹应变幅值之比。

#### 2.1.8 永久变形 permanent deformation

混合料在一定应力条件下经过重复加载、卸载作用产生的竖向不可恢复的累计变形。

#### 2.1.9 渗透系数 coefficient of permeability

稳态层流条件下，水流通过试件时，水流速度与水力梯度的比值。

**2.1.10 恒重 constant mass**

烘干过程中, 在规定温度条件下间隔不小于 2h 连续两次称量, 其质量变化不大于试样质量的 0.1% 时达到的状态。

**2.1.11 轻集料 lightweight aggregate**

堆积密度小于  $1.2\text{g/cm}^3$  的多孔集料。

**2.2 符号**

$A_c$ ——永久应变变化率;  
 $c$ ——黏聚力;  
 CBR——承载比;  
 DV——管吸试验测定的试件表面介电值;  
 $E$ ——回弹模量;  
 $k$ ——渗透系数;  
 $M_r$ ——动态回弹模量;  
 RD——车辙仪法测定的永久变形量;  
 SSR—— $45^\circ + \varphi/2$  剪切面剪切应力与剪切强度之比;  
 $T$ ——温度;  
 $t$ ——时间;  
 $V_{fh}$ ——冻胀高度;  
 $V_G$ ——固体体积率;  
 $w$ ——含水率;  
 $w_B$ ——泌水状态含水率;  
 $w_{opt}$ ——最佳含水率;  
 $w_{ZAV}$ ——0% 空隙率时混合料含水率, 饱和状态下混合料含水率;  
 $\varepsilon_1$ ——轴向应变;  
 $\varepsilon_1^p$ ——轴向永久应变量;  
 $\theta$ ——体应力;  
 $\mu$ ——泊松比;  
 $\rho_d$ ——干密度;  
 $\rho_{dB}$ ——泌水状态下的干密度;  
 $\rho_{dmax}$ ——最大干密度;  
 $\rho_w$ ——湿密度;  
 $\sigma$ ——正应力;  
 $\sigma_f$ —— $45^\circ + \varphi/2$  剪切面主应力值;  
 $\sigma_1$ ——轴向应力 (第一主应力);

$\sigma_3$ ——径向应力 (第三主应力);

$\tau$ ——剪应力;

$\tau_f$ —— $45^\circ + \varphi/2$  剪切面剪切应力值;

$\tau_{\max}$ ——抗剪强度;

$\tau_{\text{oct}}$ ——八面体剪应力;

$\varphi$ ——内摩擦角。

交通运输部信息公开  
浏览专用

### 3 取样方法

#### T 1201—2026 取样法

##### 1 适用范围

本方法适用于无结合料粒料材料的取样。

##### 2 仪器

**2.1 接料器：**长方体金属容器，长度稍大于运输机皮带的宽度，宽度不小于 200mm、深度不小于 400mm。

**2.2 带开槽的取样管（图 T 1201-1）：**材质为不锈钢或黄铜，分内管和外管，内管直径不小于 30mm，有效长度为 1.0 ~ 2.0m，长度可根据需要增加。内、外管沿长度方向有开槽，槽口宽度不小于所取集料公称最大粒径的 3 倍，且不小于 10mm。通过旋转内管可实现开槽的打开、闭合；同时外管一端有尖端，便于取样。

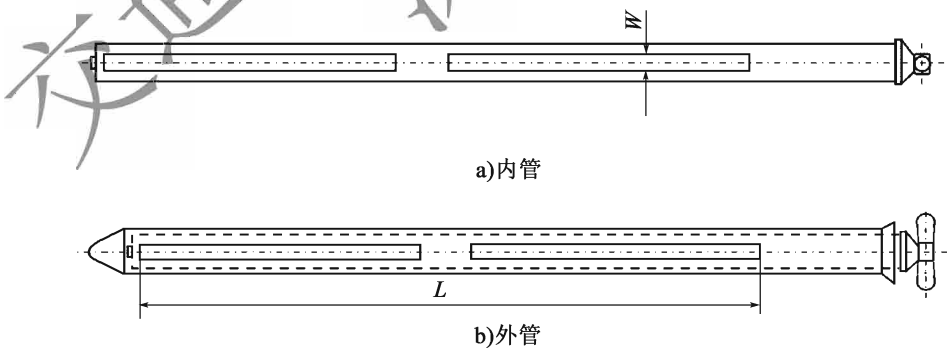


图 T 1201-1 带开槽的取样管示意图  
 $W$ -开槽宽度； $L$ -有效长度

**2.3 带气孔的取样管（图 T 1201-2）：**材质为不锈钢或黄铜；有效长度  $L_1$ ，对于填料为 520mm，对于细集料可根据需要增加；内径不小于 25mm；前端角度  $\theta$  为  $25^\circ \sim 30^\circ$ 。

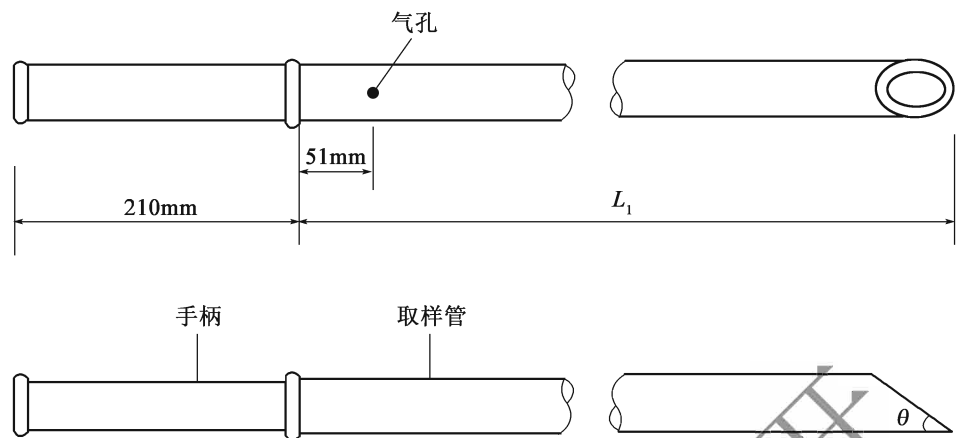


图 T 1201-2 带气孔的取样管示意图

**2.4 分料器** (图 T 1201-3): 采用格槽二分器。分料器上有偶数个等宽的格槽, 粗集料用分料器不少于 8 个格槽, 格槽的宽度不小于集料最大粒径的 150%; 细集料和填料用分料器不少于 12 个格槽, 格槽宽度为 15 ~ 20mm。每个分料器配备不少于 2 个接料斗。

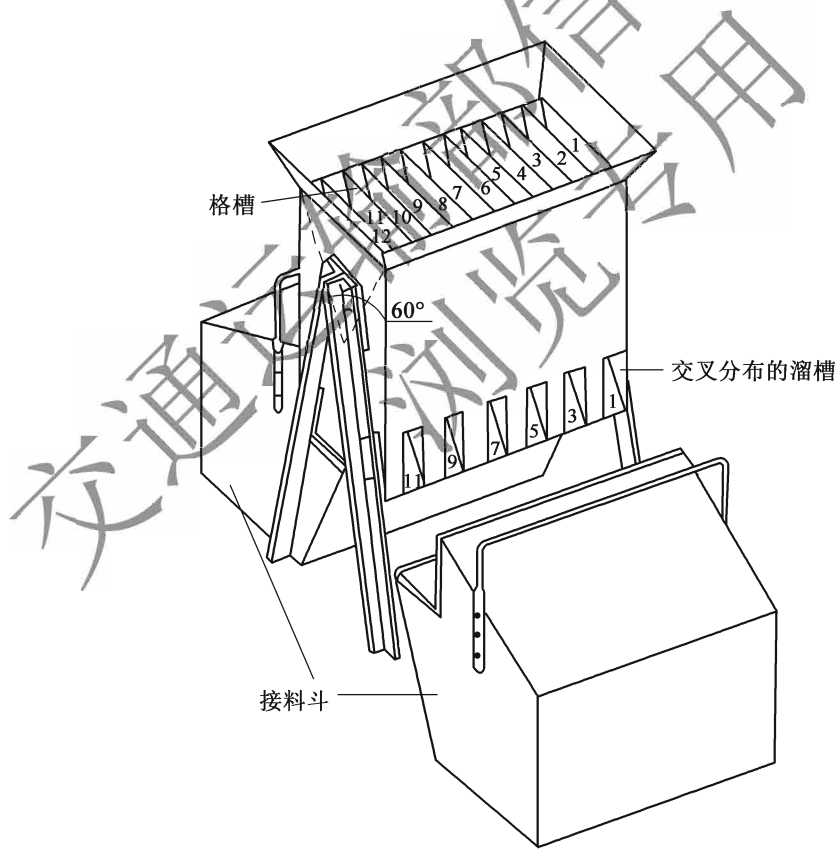


图 T 1201-3 分料器示意图

**2.5 装料容器。**

**2.6 料铲：**金属材质，宜为方形平底料铲，铲中最小宽度不小于集料公称最大粒径的3倍，且铲口宽度不小于60mm。

**2.7 铁锹：**平头铁锹，锹头宽不小于150mm，两侧外缘卷起高度不小于10mm，以防止材料从侧面滚落。

**2.8 其他：**金属盘、金属盆、铁或铝制方盒（带盖）、毛刷、塑料袋等。

### 3 取样方法

#### 3.1 拌和站取样

##### 3.1.1 拌和站皮带运输机上取样：

(1) 在拌和站，在各料仓料均落到运输机皮带上后、进入拌和缸之前取样。

(2) 取样时，在运输机骤停状态下，在输送带上随机截取一段，用料铲和毛刷取全断面材料。一次取样的长度应不小于输送带上料宽的3倍；间隔多次取样；取至少3份等量材料组成一份样品。

(3) 也可用接料器在皮带运输机的端部出料处连续接一定时间内的全部材料；间隔多次取样；取至少3份等量材料组成一份样品。

##### 3.1.2 运料车中取样：

(1) 在拌和站，随机选择至少3辆运输车进行取样。取样时，运料车料斗中至少装料一半以上。

(2) 在选定的运料车车斗顶部至少1处取样。在取样处开一个深、宽均不小于300mm的槽，槽底应水平，且应距车厢边缘不小于300mm。沿槽底等间距3个点用铁锹或料铲取3份等量材料。取样时每处取相同铲（或锹）数的满铲（或锹）材料。取至少9份等量材料组成一份样品。

(3) 也可用取样管在车斗顶面至少3个位置取样，取样位置应均布、间距尽量大，但应距车厢边缘不小于50mm。取样管插入混合料中，至整个取样管填满混合料，然后拔出取样管，将管中混合料倒入接样容器（铁或铝制方盒或塑料袋）中。

##### 3.1.3 待拌和站生产稳定后取样，不宜在初始生产或生产结束时取样。

#### 3.2 现场取样

##### 3.2.1 摊铺后松散混合料取样：

(1) 在摊铺后选择一个长方形未碾压区域，用铲（或锹）取全深松散混合料。

(2) 取样位置应位于摊铺宽度两侧的  $1/2 \sim 1/3$  位置, 每侧各取 2 次。取至少 4 份等量材料组成一份样品。

(3) 应在生产稳定后取样。不要在一车料初始摊铺或摊铺结束时取样。

(4) 取样位置应填补松散混合料, 再进行压实。

### 3.2.2 路面上压实混合料取样:

(1) 按随机取样原则确定取样点。

(2) 按《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450) 中 T 0921 方法挖坑, 取试坑中全部材料为一份试样。

### 3.3 取单档集料按比例配制无结合料粒料取样

根据现场情况, 按照《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) 中 T 0301 方法取单档集料样品, 在室内按比例配制无结合料粒料。

## 4 取样数量

### 4.1 取样数量应根据试验项目和样品规格确定。

4.2 按 3.1 拌和站取样或 3.2.1 现场取样时, 一次取样的最小样品质量应满足表 T 1201-1 的要求, 同时应满足每一单项试验所需的最小样品质量要求。各试验项目所需的最小样品质量应不小于相应单项试验试样总质量的 4 倍。

表 T 1201-1 一次取样的最小样品质量

| 公称最大粒径 (mm)    | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16 | 19 | 26.5 | 31.5 | 37.5 | 53 | 63 | 75 |
|----------------|------|-----|------|----|----|------|------|------|----|----|----|
| 一份样品的最小质量 (kg) | 15   | 20  | 30   | 35 | 40 | 50   | 55   | 60   | 70 | 75 | 80 |

4.3 按 3.2.2 现场取路面压实的无结合料粒料样品时, 现场一次取样的最小样品质量按一份试样质量确定。

注: 此时取样无须进行缩分, 一份样品即为一份试样。

4.4 按 3.3 取单档集料时, 各档集料取样最小样品质量应满足表 T 1201-1 的要求, 同时各试验项目所需的某一单档集料最小样品质量应不小于单项试验总试样中按配比计算该档集料质量的 4 倍。

## 5 样品的缩分

5.1 按 3.1.1、3.1.2、3.2.1 取的无结合料粒料样品, 按 3.3 取的单档集料样品应

进行缩分。样品的缩分可在现场取样后立即进行，也可在样品运输到室内后进行。

## 5.2 分料器法缩分样品

5.2.1 将样品倾倒在一处洁净的平台上（少量样品可放在金属盘中），并搅拌均匀。

5.2.2 样品缩分时应处于稍干燥的自由流动状态。

5.2.3 将样品装入金属盘（或接料器等）中，沿全长度方向均匀摊平；倾斜金属盘（或接料器等），使样品从分料器中线正上方匀速流入分料器中；应使样品尽可能等量、均匀通过各格槽，落入两个接料斗。取其中一个接料斗中的样品，重复缩分直至得到满足要求数量的一份试样为止。

5.2.4 应避免颗粒的散失，每次缩分时需借助毛刷收集粉料等所有颗粒。

## 5.3 四分法缩分样品

5.3.1 缩分之前，样品应倾倒在一处洁净的平台上（少量样品可放在金属盘中），并搅拌均匀。

5.3.2 按图 T 1201-4 所示进行四分法缩分。在平台上将第一满铲样品堆成锥体状；取第二满铲样品放在前述锥体顶部，并使样品颗粒沿锥体各个方向滚落、均匀分布，将所有样品按照上述方法逐层堆成大锥体状；然后用铲子将锥状颗粒翻面，按照以上方法再次逐层堆成大锥体状。重复不少于3次。

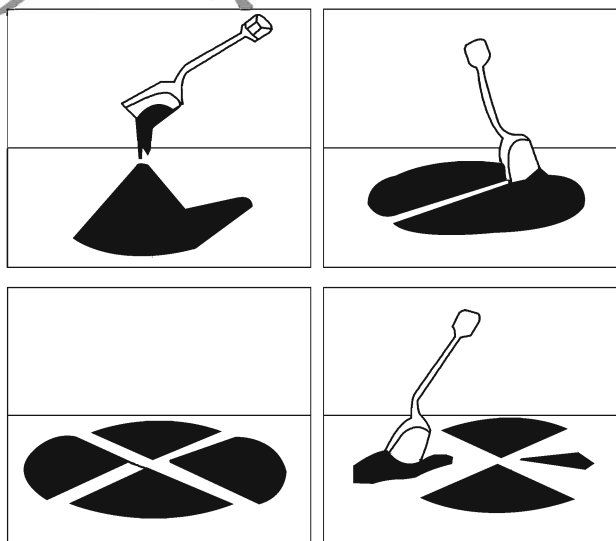


图 T 1201-4 四分法示意图

**5.3.3** 在最后一次逐层堆成大锥体状后，不断用料铲垂直插入锥体顶面向四周摊平集料，摊平成直径与厚度比为4~8的圆饼状。再沿直角相交的两条对角线将样品分成4份。取一对角线的样品，重复上述过程直至得到满足要求数量的试样为止。

**5.3.4** 应避免颗粒的散失，每次缩分时需借助毛刷收集粉料等所有颗粒。

#### **5.4 分铲法缩分样品**

**5.4.1** 确定一份试样质量  $m_{\text{试样}}$ ，所取样品总质量  $m_{\text{样品}}$ ，取缩分试样的份数  $n = \text{试验所需试样份数} + 2$ 。

**5.4.2** 确定一铲样品的最大质量  $m_{\text{铲}} = m_{\text{试样}}/10$ 。

**5.4.3** 采用料铲依次取出  $n$  铲样品，放在洁净的平台上；每铲质量等量，且不大于  $m_{\text{铲}}$ 。每铲样品单独放，堆放  $n$  个小料堆。

**5.4.4** 再取  $n$  铲样品，依次堆放在前述小料堆上。

**5.4.5** 重复步骤5.4.4，将样品完全缩分，得到  $n$  堆等量的样品；每堆样品分铲不少于10次。

**5.4.6** 从  $n$  堆样品中随机选择一堆作为一份试样。

#### **5.5 缩分方法选择**

**5.5.1** 样品缩分优先采用分料器法，没有分料器时可采用分铲法、四分法。样品的缩分也可将以上方法结合起来使用。

**5.5.2** 潮湿的样品不得直接采用分料器法缩分。潮湿样品经风干、烘干，使含水率低于吸水率后可采用分料器法缩分；烘干温度应满足本规程相应试验方法的要求。

注：烘干后结团的样品也不宜采用分料器法缩分。

**5.5.3** 测定含水率的样品，或含有粒径大于53mm颗粒的样品，不得采用分料器法缩分。

**5.5.4** 过于干燥（颗粒表面无自由水）的样品不得采用分铲法、四分法缩分。过于干燥的样品经洒适量水、适当拌和后可采用分铲法、四分法缩分。

**5.6** 当同一规格样品分多个包装（或容器）时，应按照如下方法之一进行缩分：

（1）将所有包装（或容器）中样品倒在一个平台上，混合后充分搅拌均匀，再进行一步缩分。

（2）当样品总量较大时，将各包装（或容器）中样品分别搅拌均匀，各包装（或容器）样品按照同样方法缩分同样次数取部分样品，然后将各缩分得到的样品混合、拌匀，再进行一步缩分。

**5.7** 当一单项试验需要多份试样时，应按照如下方法之一进行缩分：

（1）分料器法、四分法：将样品混合、搅拌均匀，按照试验要求的份数分成等量的多份子样；取一份子样按照 5.2 或 5.3 缩分出一份试样；逐份子样缩分得到满足试验要求的多份试样。

（2）分料器法、四分法：按照 5.2 或 5.3 缩分出一份试样后，收集所有剩余样品，充分混合、搅拌均匀后再缩分一份试样；重复前述方法直至得到满足要求份数的试样。

（3）分铲法：将样品按照 5.4 分成  $n$  个小料堆，随机选择几堆作为试样，一小堆为一份试样。

**5.8** 缩分一份试样质量要求：

（1）当试验规定试样质量范围时，缩分得到的一份试样质量应满足规定质量范围要求。

（2）对于含水率等试验规定试样最小质量时，缩分得到的一份试样质量宜为规定数量的 100% ~ 150%。

（3）对于重型击实等试验仅规定试验质量定值时，缩分得到的一份试样质量与规定值之差应在规定值的  $\pm 5\%$  范围内。

**5.9** 当缩分的一份试样质量不满足要求时，不得通过随意增减颗粒使其达到要求。当试样质量小于规定值时，应重新缩分试样。当试样质量略大于规定值时，可将试样倾倒在一洁净的平台上，搅拌均匀后排成一直线，用平底料铲从一端开始取一定长度内所有颗粒，使其满足规定质量要求。

**5.10** 当一次取样同时进行多项试验时，先缩分出一项试验所需试样后，收集所有剩余样品，充分混合、拌匀后再按以上方法缩分得到其他项试验用试样。

**5.11** 按 3.2.2 所取的样品不进行缩分。

## 6 样品的包装和储存

**6.1** 样品应采用合适方法进行包装，防止材料运输和储存过程中散失、污染；单个

包装样品质量宜不超过 25kg。

**6.2** 对于用于测定含水率的样品，应及时存放在耐腐蚀、密封的容器中，容器应洁净、干燥、防潮、密闭、不易破损，且不与材料发生反应。

**6.3** 每个样品包装应附独立的标识。标识应清晰、耐久，标明样品名称、编号、规格、数量，取样方法、日期、地点与位置，取样单位、用途和检验项目等。

**6.4** 样品填写取样单后，储存于干燥、通风的环境中。储存环境温度宜控制在 3 ~ 35℃，且避免阳光直射。

#### 条文说明

3 取样方法根据取样目的进行选择。在配合比设计时，一般按照 3.3 取各档集料，再按比例室内配制集料混合料；在施工中进行混合料级配、含水率等检验，或施工过程中确定标准密度等试验时，可以按 3.1.1、3.1.2 或 3.2.1 进行取样，缩分试样后进行混合料试验；当进行现场施工均匀性、混合料性能检验时，可以按 3.2.2 取样直接进行混合料试验。

4.2 表 T 1201-1 规定的样品最小质量要求，主要是为了使取样具有代表性。取样时应从不同位置取多份材料，一个位置取样满足代表性应具备一定的数量，因此几个不同位置取样加起来应满足一定数量要求。

5.5 需要根据试验时实际情况选择合适的样品缩分方法。缩分时应优先选择分料器法；但对于潮湿的样品，样品易结团、缩分试样不均匀，此时不得采用分料器法，同时，对于含水率试验用样品也不得采用分料器法。过于干燥（颗粒表面无自由水）的样品采用分铲法、四分法进行缩分时容易导致粉料散失，因此不得采用分铲法或四分法缩分过于干燥的样品。

样品缩分可以将几种方法组合应用，例如，当样品量较大时，可以将所有样品混合后，用四分法进行粗分，然后采用分料器法或分铲法缩分至满足要求的试样。

5.11 当按照 3.2.2 现场取压实混合料时，往往是检验单点的级配、含水率、性能等，此时应按照相关试验要求的一份试样质量取一份样品做试验，不再进行样品缩分。

## 4 含水率试验

### T 1206—2026 含水率试验（烘干法）

#### 1 适用范围

1.1 本方法适用于测定无结合料粒料的含水率。

1.2 本方法是含水率试验的标准方法。

#### 2 仪器与材料

2.1 烘箱：鼓风干燥箱，最大加热温度不小于 $200^{\circ}\text{C}$ ，控温精度为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。支撑架与干燥箱顶部、底部的距离均不小于 $10\text{cm}$ ；支撑架之间距离满足试验要求，且不小于 $7\text{cm}$ ，并用水平仪检验支撑架水平度。烘干能力不小于 $25\text{g/h}$ 。烘干能力验证方法：清空烘箱， $1\text{L}$ 玻璃烧杯盛 $500\text{g}$ 自来水（起始水温为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ）放入烘箱，在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 $4\text{h}$ ，计算每小时水质量损失。应检验烘箱中各支撑架的四角及中部，每次仅检验一个部位。

2.2 天平：量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 $0.1\%$ 。

2.3 密封容器：带盖的玻璃器皿、金属罐、金属桶，或能够封口的塑料袋；样品需长期储存时，不得采用塑料袋。

2.4 金属容器：平底金属盘，或铁或铝制等金属方盒（带盖），能容纳足够的试样。

2.5 干燥器（可选）：直径 $200 \sim 250\text{mm}$ ，内装变色硅胶作为干燥剂。

注：不宜采用氯化钙作为干燥剂，因为一些材料烘干后能从氯化钙中吸收水分。

2.6 计时器：秒表或电子计时器，最小分度值 $0.1\text{s}$ ，最大允许误差 $\pm 0.10\text{s/h}$ 。

## 2.7 隔热垫。

## 3 试验准备

按本规程 T 1201 方法准备样品，储存在密封容器中，并尽快进行含水率试验。试验时，取出样品，立即采用四分法缩分至表 T 1206-1 要求质量的试样两份。

表 T 1206-1 烘干法测定含水率所需要的试样数量

|                |      |     |      |     |     |      |      |      |     |     |     |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
| 公称最大粒径 (mm)    | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16  | 19  | 26.5 | 31.5 | 37.5 | 53  | 63  | 75  |
| 一份试样的最小质量 (kg) | 0.2  | 0.3 | 0.5  | 0.7 | 1.2 | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0 | 5.0 | 6.0 |
| 轻集料材料的最小数量 (L) | 1    |     | 2    |     |     |      |      |      |     |     |     |

注：现场挖坑灌砂法测定压实度时，宜将试坑中全部取出的材料，直接分成两份试样测定含水率；若每份试样大于表中数量的 2 倍，则按每份不超过表中数量的 2 倍，分成多份试样；若全部取出的材料质量不大于表中质量的 2 倍，也可将整个样品作为一份试样测定含水率，直接作为样品含水率试验结果。

## 4 试验步骤

4.1 取洁净干燥的金属容器，称其质量 ( $m_1$ )。

4.2 将缩分的试样立即置于金属容器中，均匀松铺摊平，立即称量试样和金属容器的总质量 ( $m_2$ )；然后放入预热至  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  的烘箱中烘干至恒重。在试样烘干过程中，中途不应再新放入湿的试样。

注：烘干时间受材料类型、试样数量、含水率状况以及烘箱烘干能力等影响。一般而言，在  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  连续烘干 12~16h 就会达到恒重。若有疑义，可以在烘干 12~16h 后进行检验：冷却或直接称量试样质量；再烘干不少于 2h，再次冷却或直接称量试样质量。检验试样质量变化不超过试样质量的 0.1% 即达到恒重。

4.3 对于温度敏感性材料、轻质材料，可根据材料性质选择合适的温度和烘干时间。当试样采用较低温度烘干时，需要更长的烘干时间。

注：对于温度敏感性再生材料试样，烘干温度宜为  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。对于含石膏或其他带有结晶结合水矿物的试样，或有机质含量大于 5% 的试样，烘干温度约为  $60^{\circ}\text{C}$ 。对于温度敏感性材料，也可在真空干燥器中烘干，真空度约 1.33kPa，温度为 23~30 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.4 取出试样，连同金属容器放入干燥器中冷却；冷却至室温后，立即称取试样与金属容器的总质量 ( $m_3$ )。如果是带盖的铁或铝制等金属方盒，可取出盛有试样的金属容器用盖密封，直接在空气中冷却（无须放入干燥器中）较短时间，然后称量试样、

金属容器和盖的质量 ( $m_3$ )；此条件下应称量金属容器和盖的质量 ( $m_1$ )。

注：试样也可以不冷却，从烘箱中取出后立即称量试样与金属容器的总质量 ( $m_3$ )。对于轻质集料等易吸湿材料，应从烘箱中取出试样后直接称量质量 ( $m_3$ )。

热试样称量时，天平应采用隔热垫，防止托盘的高温损伤天平。

## 5 结果整理

5.1 试样的含水率按式 (T 1206-1) 计算，精确至 0.1%。

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (\text{T 1206-1})$$

式中： $w$ ——试样的含水率 (%)；

$m_1$ ——金属容器（或带盖）质量 (g)；

$m_2$ ——未烘干的试样与金属容器（或带盖）总质量 (g)；

$m_3$ ——烘干后的试样与金属容器（或带盖）总质量 (g)。

5.2 取两份试样含水率的算术平均值作为样品的试验结果，精确至 0.1%。

## 6 允许误差

含水率重复性试验的允许误差为 0.5%，再现性试验的允许误差为 0.7%。

## 7 报告

7.1 试验项目名称和执行标准。

7.2 样品的编号、名称、产地和规格。

7.3 接样日期、样品描述。

7.4 试验日期、样品缩分方法。

7.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

7.6 烘干温度及时间。

7.7 含水率试验结果。

## 7.8 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 烘干法测定含水率试验方法较为成熟，已经得到大量应用，是含水率标准试验方法。

4.2 烘干过程中，可以按照本规程术语 2.1.10 恒重的定义，在规定温度条件下烘干、冷却后称量，间隔不少于 2h 连续两次称量，其质量变化不大于试样质量的 0.1% 则达到恒重，一般需要几小时至十多个小时。烘干至恒重的时间，因原材料类型、级配、试样数量而改变；但是反复冷却比较烦琐，实际试验时，可以按一晚（12 ~ 16h）进行烘干，就足以达到恒重。

对于连续两次烘干、称量时间，AASHTO T 265 要求为 1h，EN 1097-5 要求不少于 1h，ASTM D2216 要求不少于 2h，本规程规定为不少于 2h，其规定与《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG 3410）要求一致。

同一个烘箱内，烘干过程中再新放入湿的试样时，先放入的干燥试样会吸收新放入的湿试样的水分。

4.3 对于温度敏感性材料，高温条件下长时间烘干过程中逐渐分解或失去结合水而不断损失质量，会影响试验结果。对于这些材料，需降低温度、延长时间烘干至恒重，或者改变试验方法。

4.4 烘干后试样，一般不再用于其他试验。

7 本规程的报告，包含原始记录表、检测报告、检查报告等。

## T 1207—2026 含水率试验（酒精燃烧法）

### 1 适用范围

1.1 本方法适用于现场快速测定无结合料粒料的含水率。

1.2 本方法不适用于含大量有机质，或高岭土、云母、蒙脱石、石膏及其他含结合水材料，或水可溶性固体物质的无结合料粒料。

1.3 本方法适用于公称粒径不大于 53mm 的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 金属容器：铁或铝制方盒，带盖，能容纳足够试样。

2.2 刮刀：长、宽分别为 100mm、20mm。

**2.3 搅拌棒：**长不小于 200mm，直径为 3 ~ 5mm。

**2.4 天平：**最大称量 5kg，感量不大于 0.1g；最大称量 2kg，感量不大于 0.01g；最大称量 500g，感量不大于 1mg。

**2.5 酒精：**乙醇体积分数不小于 95%。

**2.6 其他：**毛刷、隔热垫等。

### 3 试验准备

按本规程 T 1201 方法准备样品，储存在密封容器中，或现场立即进行试验。采用四分法将样品缩分至表 T 1207-1 要求质量的试样两份。

**表 T 1207-1 酒精燃烧法测定含水率所需要的试样质量**

| 公称最大粒径 (mm)    | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16  | 19  | 26.5 | 31.5 | 37.5 | 53  |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|
| 一份试样的最小质量 (kg) | 0.3  | 0.3 | 0.3  | 0.5 | 1.0 | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0 |

注：若一份试样数量大于一次燃烧试验的数量，一份试样可再分成多份分别进行烘干。在试验允许的前提下，经审慎判断后可采用小于表中要求数量的试样，但试验报告中必须注明。

### 4 试验步骤

**4.1** 取干燥、洁净的金属容器，称其质量 ( $m_1$ )。

**4.2** 向金属容器中加入试样，立即称取试样与金属容器的质量 ( $m_2$ )。

**4.3** 向金属容器中加入酒精至浸没试样，搅拌均匀后点火燃烧，并采用搅拌棒不断翻拌试样。翻拌过程中注意勿使试样损失。

**4.4** 待火焰熄灭，加盖密闭数分钟，确认火焰完全熄灭；再次加入酒精、燃烧。

**4.5** 重复燃烧 3 次后，立即称量试样与金属容器的质量 ( $m_3$ )。称量时应在天平与金属容器之间放置隔热垫。

### 5 结果整理

**5.1** 试样含水率按式 (T 1207-1) 计算，精确至 0.1%。

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (\text{T 1207-1})$$

式中:  $w$ ——试样的含水率 (%) ;

$m_1$ ——金属容器的质量 (g) ;

$m_2$ ——燃烧前试样与金属容器总质量 (g) ;

$m_3$ ——燃烧后试样与金属容器总质量 (g) 。

5.2 取两份试样含水率的算术平均值作为试验结果, 精确至 0.1% 。

## 6 允许误差

含水率重复性试验的允许误差为 0.5% 。

## 7 报告

7.1 试验项目名称和执行标准。

7.2 样品的编号、名称、产地和规格。

7.3 接样日期、样品描述。

7.4 试验日期、样品缩分方法。

7.5 含水率试验结果。

7.6 要说明的其他内容。

### 条文说明

1.1 本规程规定了四种含水率试验方法, 其中本规程 T 1206 烘干法是标准方法。酒精燃烧法属于简易测定方法, 适用于现场没有烘箱或试样较少的条件下快速测定含水率。采用酒精燃烧法时, 需要用烘干法进行校验, 当两者测定结果差异较大时, 应查明原因, 重做试验; 若差异仍然较大, 则以烘干法试验数据为准。

1.2 含有机质, 或高岭土、云母、蒙脱石、石膏及其他含结合水的材料, 或水可溶性固体物质的无结合料粒料, 在燃烧过程中逐渐分解或失去结合水而影响结果, 使测得的含水率比实际的含水率大, 有机质或结合水等物质含量越高, 误差越大。

2.5 酒精纯度对试验结果有影响, 酒精中的杂质燃烧后会增加试样质量, 导致测定含水率偏低, 因此需要严格控制酒精纯度。同时禁止使用固体酒精, 一方面固体酒精

与试样不能搅拌均匀，造成试样受热不均匀；另一方面，固体酒精采用各种不同的固化剂，燃烧后可能有残渣生成，造成试验数据不准确。

4.4 现场含水率试验时，很难判断燃烧是否完全熄灭。如果燃烧未完全熄灭，会给再次加入酒精带来安全隐患。为此要求加盖密闭数分钟，确认完全熄灭后再次加入酒精。同时再次加入酒精时，不宜将大桶酒精直接向容器中倾倒，应从大桶中向塑料瓶等倒出适量酒精，然后再将塑料瓶中酒精倒入容器中。

4.5 烘干后试样，一般不再用于其他试验。

## **T 1208—2026 含水率试验（微波炉加热法）**

### **1 适用范围**

1.1 本方法适用于试验室或现场快速测定无结合料粒料的含水率。

1.2 本方法不适用于含大量有机质，或高岭土、云母、蒙脱石、石膏及其他含结合水材料，或水可溶性固体物质，或钢渣等含金属物质的无结合料粒料。

1.3 本方法适用于公称粒径不大于 53mm 的无结合料粒料。

### **2 仪器与材料**

2.1 微波炉：额定功率不小于 700W，有多个加热档，室内试验时宜采用通风橱。

注：现在已有内置天平和电脑控制的专用微波炉，此类设备非常适合于本试验。

2.2 天平：最大称量 5kg，感量不大于 0.1g；最大称量 2kg，感量不大于 0.01g；最大称量 500g，感量不大于 1mg。

2.3 容器：耐微波加热材料制成，加热前后无质量损失、无变形，如瓷蒸发皿、硅酸硼玻璃皿。也可采用纸质杯、纸盒，但是需要微波预加热干燥。不得采用金属或吸湿性材料。

2.4 容器取放工具：隔热手套或夹具，用于从微波炉中取出高温容器。

2.5 吸热材料：放置于微波炉内吸收多余微波能量的液体或固体，防止过度加热试样及损坏微波炉。若玻璃杯中放入水或沸点高于水的不燃油，也可采用吸湿的多孔砖等。

**2.6 搅拌棒：**短玻璃棒，用于翻拌试样，可直接留在试样容器内加热，减少试样黏附在搅拌棒上造成试样损耗。

**2.7 容器盖（可选）：**多孔非金属盖，防止一些粒料材料局部过热产生喷射、飞溅。

**2.8 干燥器（可选）：**直径为 200 ~ 250mm，内装变色硅胶作为干燥剂。

**2.9 计时器：**秒表或电子计时器，最小分度值 0.1s，最大允许误差  $\pm 0.10\text{s/h}$ 。

**2.10 其他：**厚纸巾、隔热垫。

### 3 试验准备

#### 3.1 微波炉使用安全

试验之前，试验人员应查阅微波炉使用说明书，熟知微波炉安全操作相关要求。微波炉安装与使用全过程，应严格遵循厂家操作说明书。

#### 3.2 试样准备

按本规程 T 1201 方法准备样品，储存在密封容器中，或现场立即进行试验。采用四分法将样品缩分至表 T 1208-1 要求质量的试样两份。

表 T 1208-1 微波炉加热法测定含水率所需要的试样质量

| 公称最大粒径 (mm)    | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16  | 19  | 26.5 | 31.5 | 37.5 | 53 |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|----|
| 一份试样的最小质量 (kg) | 0.3  | 0.3 | 0.3  | 0.5 | 0.5 | 1.0  | 1.5  | 2    | 3  |

注：在试验允许的前提下，经审慎判断后可采用小于表中要求数量的试样，但试验报告中必须注明。

#### 3.3 加热模式和初始加热时间的确定

**3.3.1** 对于每种样品，在用于快速测定之前，应通过室内试验确定加热模式和加热时间。

**3.3.2** 选择一种微波炉加热模式，取一份试样按本方法第 4 节测定不同时间下的含水率，直至连续两次称量质量变化小于试样质量的 0.1%，并绘制含水率-加热时间曲线。同时取试样按本规程 T 1206 烘干法测定含水率。

**3.3.3** 若微波炉试验终点时的含水率与烘干法测定含水率之差大于1%，则微波炉加热强度过高，可调整加热模式，降低加热强度，重新绘制含水率-加热时间曲线；当微波炉试验终点时的含水率小于烘干法测定含水率，或加热至终点时间过长，则微波炉加热强度过低，可调整加热模式，提高加热强度，重新绘制含水率-加热时间曲线。

**3.3.4** 在微波炉加热法测定的含水率-加热时间曲线上，确定烘干法测定含水率对应的加热时间，并将此时间作为初始加热时间。

## 4 试验步骤

**4.1** 清理容器，称其质量 ( $m_1$ )。

**4.2** 取一份试样，立即称取试样与容器质量 ( $m_2$ )。当一份试样数量大于微波炉一次加热数量（一般不超过1000g）时，一份试样可以分成等质量的多份分别进行试验，然后合并计算。

**4.3** 把试样和容器放入微波炉内，在容器上覆盖一层厚纸巾，必要时盖上容器盖；同时将吸热材料放入微波炉中。设定加热模式和加热时间（可设定为本方法3.3确定的加热模式和初始加热时间），加热至设定时间。

注：微波炉宜配备功率调节档位，一般可采用“高”档位加热模式，但部分材料使用“高”档位模式会造成加热强度过大。适配功率档位需结合单台设备、试样材料类型与试样数量，通过试验确定。微波炉输出功率会随使用年限、损耗程度衰减，因此每台设备均需单独确定适配的加热模式与加热时长。

**4.4** 加热完成后，从微波炉内取出试样和容器，立即称量试样与容器的质量。称量时应在天平与容器之间放置纸板等隔热。也可将试样放入干燥器中适当冷却，再称量质量。

**4.5** 用搅拌棒小心翻拌试样，注意不损失试样。把试样和容器重新放回微波炉加热1~2min。

**4.6** 重复步骤4.4、4.5，直至连续两次称量质量变化小于试样质量的0.1%。

**4.7** 记录最后称量的试样与容器质量 ( $m_3$ )。

**4.8** 当施工过程中采用同一微波炉测定同一种粒料材料时，可固定加热模式、加热时间和循环次数，每个循环均需小心翻拌试样，但无须重复检验是否达到恒重。施工过

程中应进行加热模式、加热时间和循环次数的周期检验。

注：试验时试样不宜一次性加热，而需要分段间歇加热配合翻拌，可降低试样过热、局部干化风险，所得含水率结果与烘干法的检测值更为接近。

## 5 结果整理

5.1 试样含水率按式 (T 1208-1) 计算，精确至 0.1%。

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (\text{T 1208-1})$$

式中： $w$ ——试样的含水率 (%)；

$m_1$ ——容器的质量 (g)；

$m_2$ ——烘干前试样与容器质量 (g)；

$m_3$ ——烘干后试样与容器质量 (g)。

5.2 取两份试样含水率的算术平均值作为试验结果，精确至 0.1%。

## 6 报告

6.1 试验项目名称和执行标准。

6.2 样品的编号、名称、产地和规格。

6.3 接样日期、样品描述。

6.4 试验日期、样品缩分方法。

6.5 微波炉型号、加热档位和加热时间。

6.6 含水率试验结果。

6.7 要说明的其他内容。

### 条文说明

1.1 本规程规定了四种含水率试验方法，其中本规程 T 1206 烘干法是标准方法。微波炉加热法属于快速测定方法，可以适用于室内或现场施工过程中快速测定含水率。采用微波炉加热法时，需要用烘干法进行校验，当两者测定结果差异较大时，应重新试

验确定微波炉加热模式和加热时间。若试验过程中两者存在较大差异，则以烘干法试验数据为准。

1.2 含有机质，或高岭土、云母、蒙脱石、石膏及其他含结合水材料，或水可溶性固体物质的无结合料粒料在燃烧过程中逐渐分解而影响结果。有机质会分解而不断损失，使测得的含水率比实际的含水率大。有机质含量越高，误差越大。

含钢渣等金属物质的无结合料粒料，不能采用微波炉加热，否则加热时易产生电火花而发生事故。

3.1 微波炉安装与使用全过程，应严格遵循厂家操作说明书。取用高温容器应使用隔热手套或夹具，部分材料蓄热能力强，操作不当易造成严重烫伤。加热、拌和及称量过程中集料颗粒存在崩溅风险，建议佩戴合适的护目镜。需重点保持炉门密封垫与门联锁装置，使其清洁、工况完好。

高有机质、含油或含煤等材料，在微波加热过程中可能起火燃烧或产生有害烟气，因此微波炉宜配备窒息式灭火器材，在通风橱或通风良好条件下使用。试样达到恒重后仍持续开机加热，也会造成微波炉损坏、提前报废。

一些材料加热时可能发生蒸汽爆沸，或多孔、易碎团聚体因热应力崩裂，建议试样容器加盖防护，避免人员受伤、设备损坏；厚纸中也可满足防护需求，同时能防止烘干过程中试样在炉内飞溅散落。禁止在微波炉内使用金属容器，否则会产生电弧并损坏设备。严禁将试样直接放置于微波炉配套的玻璃内胆托盘上；试样局部集中受热易造成玻璃托盘炸裂，存在操作人员受伤风险。

3.3 不同微波炉加热能力有差异，某一加热模式对于一些样品来说合适，但是对于另一些样品可能加热过快、误差较大。同时微波炉的烘干能力会随着试样数量增加而减小，因此每一个微波炉针对不同试样都需要试验确定合适的加热模式和初始加热时间。

4.2 一次加热试样质量不少于300g，更少的样品不提倡使用微波加热方法，因为其加热速度太快而不好控制。一次加热试样质量大于1000g时，试样加热不均匀误差较大，此时试样可以分成多份进行测试。

4.7 烘干后的试样，不再用于其他试验。

## T 1209—2026 含水率试验（砂浴法）

### 1 适用范围

1.1 本方法适用于现场快速测定无结合料粒料的含水率。

1.2 本方法不适用于含大量有机质，或高岭土、云母、蒙脱石、石膏及其他含结合水材料，或水可溶性固体物质的无结合料粒料。

## 2 仪器与材料

**2.1** 天平：最大称量 5kg，感量不大于 0.1g；最大称量 2kg，感量不大于 0.01g；最大称量 500g，感量不大于 1mg。

**2.2** 金属方盘：若干，边长为 200 ~ 250mm，深为 50 ~ 70mm。

**2.3** 砂浴：能放入金属方盘，其中放有洁净的砂，砂深不小于 25mm。

**2.4** 加热砂浴的设备：1 套。

**2.5** 计时器：秒表或电子计时器，最小分度值 0.1s，最大允许误差  $\pm 0.10\text{s/h}$ 。

**2.6** 调土刀：刀片长约 100mm，宽约 20mm。

**2.7** 其他：白纸片等。

## 3 试验准备

按本规程 T 1201 方法准备样品，储存在密封容器中，或现场立即进行试验。采用四分法将样品缩分至表 T 1209-1 要求质量的试样两份。

表 T 1209-1 砂浴法测定含水率所需要的试样质量

| 公称最大粒径 (mm)    | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16  | 19  | 26.5 | 31.5 | 37.5 | 53  |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|-----|
| 一份试样的最小质量 (kg) | 0.3  | 0.3 | 0.3  | 0.5 | 1.0 | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0 |

## 4 试验步骤

**4.1** 取干燥、洁净金属方盘，称其质量 ( $m_1$ )。

**4.2** 取一份试样，移入金属方盘、均匀摊平，称取金属方盘和试样的质量 ( $m_2$ )。

**4.3** 将金属容器放在已加热的砂浴内，应注意砂浴温度不要过高。在加热过程中应持续用调土刀搅拌试样，以加快水分蒸发。

**4.4** 加热一段时间（一般为 1h）后，从砂浴中取出金属方盘，立即称量试样与方盘

的质量 ( $m_3$ )。称量时应在天平与容器之间放置隔热垫。

**4.5** 沙浴加热时应防止试样加热温度过高。试验时可将一张白纸片放入试样中拌和,如白纸片变成黄色,则表示加热温度过高。

**4.6** 烘干时间随试样数量、类型及沙浴加热温度等条件而变化,可通过试验确定合适的加热时间。保持一定的沙浴加热温度,持续加热;当间隔不少于 5min 的连续两次称量,其质量变化不大于试样质量的 0.1% 时,即认为试样被烘干,取其时间作为现场沙浴试验时间。

## 5 结果整理

**5.1** 试样含水率按式 (T 1209-1) 计算,精确至 0.1%。

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (\text{T 1209-1})$$

式中:  $w$ ——试样的含水率 (%);

$m_1$ ——金属方盘的质量 (g);

$m_2$ ——加热前试样与金属方盘的总质量 (g);

$m_3$ ——加热后试样与金属方盘的总质量 (g)。

**5.2** 取两份试样含水率的算术平均值作为试验结果,精确至 0.1%。

## 6 允许误差

含水率重复性试验的允许误差为 0.5%。

## 7 报告

**7.1** 试验项目名称和执行标准。

**7.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**7.3** 接样日期、样品描述。

**7.4** 试验日期、样品缩分方法。

**7.5** 加热时间。

### 7.6 含水率试验结果。

### 7.7 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1.1 砂浴法测定含水率的精度较低，因此本方法适用于施工现场即时快速测定无结合料粒料的含水率，为施工质量控制提供参考数据。

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 5 级配试验

### T 1215—2026 筛分试验

#### 1 适用范围

- 1.1 本方法适用于测定无结合料粒料的颗粒组成。
- 1.2 本方法中水洗法筛分试验是标准方法。
- 1.3 干筛法筛分试验仅适用于轻集料无结合料粒料。

#### 2 仪器与材料

2.1 试验筛：方孔筛，孔径根据集料规格选用。2. 36mm 及以下孔径试验筛，应采用满足《试验筛技术要求和检验 第1部分：金属丝编织网试验筛》（GB/T 6003.1）要求的金属丝编织网试验筛，其筛框直径为 300mm。4. 75mm 及以上孔径试验筛，应采用满足《试验筛技术要求和检验 第2部分：金属穿孔板试验筛》（GB/T 6003.2）要求的金属穿孔板试验筛，其中 4. 75 ~ 37. 5mm 孔径试验筛，其筛框直径为 300mm；53mm 及以上孔径试验筛，筛框直径应不小于 300mm。

2.2 摇筛机。

2.3 天平：量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0. 1%。

2.4 烘箱：鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2. 1 的要求。

2.5 盛水容器：浸泡试样用容器，如不锈钢盆。

2.6 温度计：量程 0 ~ 200℃，分度值 1℃。

2.7 筛分标准样品：规格为 0~0.6mm 的洁净石英石粉，分为 A 和 B 两组，其级配应满足表 T 1215-1 的要求。每组标准样品应有精确的标称值，其中 0.3mm 和 0.15mm 筛孔通过率精度为 ±1%，0.075mm 筛孔通过率精度为 ±2%。

注：标准样品应由专业单位生产、专业单位定值，稳定性试验应不少于 2 年，应附相关定值证书。

表 T 1215-1 筛分标准样品级配范围

| 组别  | 下列筛孔通过率范围 (%) |       |        |         |
|-----|---------------|-------|--------|---------|
|     | 0.6mm         | 0.3mm | 0.15mm | 0.075mm |
| A 组 | 100           | 65~75 | 35~45  | 10~20   |
| B 组 | 100           | 75~85 | 65~75  | 45~55   |

2.8 其他：金属盘、铲子、毛刷、搅棒等。

3 试验准备

3.1 新试验筛或每使用半年应进行一次标定。采用筛分标准样品，其中 A 组每份为 200g±2g，B 组每份为 100g±1g，按本方法进行水洗法筛分试验，测定 A、B 组通过率与其相应的标称值之差，允许误差应满足表 T 1215-2 的要求。

表 T 1215-2 试验筛通过率允许误差

| 组别  | 下列筛孔通过率允许误差 (%) |        |         |
|-----|-----------------|--------|---------|
|     | 0.3mm           | 0.15mm | 0.075mm |
| A 组 | ±2              | ±2     | ±2      |
| B 组 | ±2              | ±2     | ±3      |

3.2 将样品缩分至表 T 1215-3 要求质量的试样两份，105℃±5℃ 烘干至恒重，并冷却至室温。

表 T 1215-3 粗集料筛分试验的试样质量

| 公称最大粒径 (mm)    | 4.75 | 9.5 | 13.2 | 16  | 19  | 26.5 | 31.5 | 37.5 | 53   | 63   | 75   |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| 一份试样的最小质量 (kg) | 0.5  | 1.0 | 1.0  | 1.5 | 2.0 | 4.0  | 5.0  | 6.5  | 11.0 | 17.0 | 25.0 |

4 水洗法试验步骤

4.1 取一份干燥试样，称其总质量 ( $m_0$ )。将试样移入盛水容器中摊平，加入水至

高出试样 150mm。根据需要可将浸没试样静置一定时间，便于细粉从大颗粒表面分离。

**4.2** 根据集料粒径选择 4.75mm、0.075mm，或 2.36mm、0.075mm 组成一组套筛，其底部为 0.075mm 试验筛。试验前筛子的两面应先用水润湿。

**4.3** 用搅棒充分搅动试样，使细粉完全脱离颗粒表面、悬浮在水中，但应注意颗粒不得溅出容器。搅动后立即将浑浊液缓缓倒在套筛上，滤去小于 0.075mm 的颗粒。倾倒时防止将粗颗粒一起倒出而损坏筛面。

**4.4** 采用水冲洗等方法，将两只筛上颗粒并入容器中。再次加水至容器中，重复 4.3 的步骤，直至浸没的水目测清澈为止。

**4.5** 将两只筛上及容器中的试样全部回收到一个金属盘中。当容器和筛上沾附有集料颗粒时，在容器中加入水、搅动使细粉悬浮在水中，并快速全部倒在套筛上；再将筛子倒扣在金属盘上，用少量的水并助以毛刷将颗粒刷入金属盘中。待细粉沉淀后，泌去金属盘中的水，注意不得散失颗粒。

**4.6** 将金属盘连同试样一起置于  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘干至恒重，称取水洗后的干燥试样总质量 ( $m_{\text{洗}}$ )。

注：烘干时间受材料类型、试样数量、含水率状况以及烘箱烘干能力等影响，一般而言，在  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  连续烘干 16h 足以达到恒重。若有疑义，可以在烘干 12~16h 后进行检验：冷却或直接称量试样质量；再烘干不小于 2h，再次冷却或直接称量试样质量；检验试样质量变化不超过试样质量的 0.1% 时即达到恒重。对于温度敏感性材料，可按本规程 T 1206 中要求确定烘干温度，并应适当延长烘干时间。

**4.7** 将回收的干燥集料按本方法第 5 节中干筛法试验步骤进行筛分，称取每号筛的分计筛余量 ( $m_i$ ) 和筛底质量 ( $m_{\text{底}}$ )。

## 5 干筛法试验步骤

**5.1** 取一份干燥试样，称其总质量 ( $m_0$ )。

**5.2** 将试样移至按筛孔大小从上到下组合的套筛（附筛底）上，盖上筛盖后采用摇筛机或人工筛分约 10min。

**5.3** 试样经套筛筛分一定时间后，取下各号筛，加筛底和筛盖后再逐个进行人工补筛。人工补筛时，需使集料在筛面上同时有水平方向及上下方向的不停顿的运动，使小

于筛孔的颗粒通过筛孔。将通过的颗粒并入下一号筛，并和下一号筛中的试样一起过筛，依次进行，直至各号筛全部筛完为止。

**5.4** 人工补筛时应筛至每分钟各号筛的分计筛余量变化小于试样总质量的 0.1%，并按照如下方式确认：将单个筛（含筛底和筛盖），一只手拿着筛子（含筛底和筛盖），使筛面稍微倾斜；将筛子一侧斜向上猛力敲击另一只手的掌根，每分钟约 150 次；同时每 25 次旋转一次筛面，每次旋转约 60°。

**5.5** 各号筛的分计筛余量不得超过按以下要求确定的剩留量，否则应将该号筛上的筛余试样分成两小份或数小份，分别进行筛分，并以其筛余量之和作为该号筛的分计筛余量。

(1) 对于筛孔小于 4.75mm 的试验筛，剩留量 (g) 为  $7\,000\text{g}/\text{m}^2 \times \text{筛框面积} (\text{m}^2)$ 。

(2) 对于筛孔不小于 4.75mm 的试验筛，剩留量 (g) 为  $2\,500\text{g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2) \times \text{筛孔直径} (\text{mm}) \times \text{筛框面积} (\text{m}^2)$ 。

(3) 对于轻集料，剩留量为筛上满铺一层时试样的质量。

**5.6** 当筛余颗粒粒径大于 19mm 时，筛分过程中允许用手指拨动颗粒，但不得逐颗塞过筛孔。当筛上的颗粒粒径大于 37.5mm 时，可采用人工转动颗粒逐个确定其可通过的最小筛孔，但不得逐颗塞过筛孔。

**5.7** 称取每号筛的分计筛余量 ( $m_i$ ) 和筛底质量 ( $m_{\text{底}}$ )。

## 6 结果整理

### 6.1 水洗法筛分

**6.1.1** 试样的筛分损耗率按式 (T 1215-1) 计算，精确至 0.01%。

$$P_s = \frac{m_{\text{洗}} - m_{\text{底}} - \sum m_i}{m_{\text{洗}}} \times 100 \quad (\text{T 1215-1})$$

式中： $P_s$ ——试样的筛分损耗率 (%)；

$m_{\text{洗}}$ ——水洗后的干燥试样总质量 (g)；

$m_{\text{底}}$ ——筛底质量 (g)；

$m_i$ ——各号筛的分计筛余量 (g)；

$i$ ——依次为 0.075mm、0.15mm、…，直至集料最大粒径的排序。

**6.1.2** 试样的各号筛分计筛余率按式 (T 1215-2) 计算，精确至 0.01%。

$$P'_i = \frac{m_i}{m_0 - (m_{\text{洗}} - m_{\text{底}} - \sum m_i)} \times 100 \quad (\text{T 1215-2})$$

式中:  $P'_i$ ——试样的各号筛分计筛余率 (%) ;

$m_0$ ——筛分前的干燥试样总质量 (g)。

**6.1.3** 试样的各号筛筛余率 $A_i$ 为该号筛及以上各号筛的分计筛余率之和, 精确至 0.01%。

**6.1.4** 试样的各号筛通过率 $P_i$ 为 100 减去该号筛的筛余率, 精确至 0.01%。

## 6.2 干筛法筛分

**6.2.1** 试样的筛分损耗率按式 (T 1215-3) 计算, 精确至 0.01%。

$$P_s = \frac{m_0 - (m_{\text{底}} + \sum m_i)}{m_0} \times 100 \quad (\text{T 1215-3})$$

式中:  $P_s$ ——试样的筛分损耗率 (%) ;

$m_0$ ——筛分前的干燥试样总质量 (g) ;

$m_{\text{底}}$ ——筛底质量 (g) ;

$m_i$ ——各号筛的分计筛余量 (g) ;

$i$ ——依次为 0.075mm、0.15mm、... , 直至集料最大粒径的排序。

**6.2.2** 试样的各号筛分计筛余率按式 (T 1215-4) 计算, 精确至 0.01%。

$$P'_i = \frac{m_i}{m_{\text{底}} + \sum m_i} \times 100 \quad (\text{T 1215-4})$$

式中:  $P'_i$ ——试样的各号筛分计筛余率 (%)。

**6.2.3** 试样的各号筛筛余率 $A_i$ 为该号筛及以上各号筛的分计筛余率之和, 精确至 0.01%。

**6.2.4** 试样的各号筛通过率 $P_i$ 为 100 减去该号筛的筛余率, 精确至 0.01%。

**6.3** 取两份试样各号筛通过率的算术平均值作为试验结果, 精确至 0.1%。必要时, 取两份试样各号筛筛余率的算术平均值作为试验结果, 精确至 0.1%。

## 7 允许误差

**7.1** 一份试样的筛分损耗率应不大于 0.5%。

7.2 0.075mm 筛孔通过率重复性试验的允许误差为 1%。

## 8 报告

8.1 试验项目名称和执行标准。

8.2 样品的编号、名称、产地和规格。

8.3 接样日期、样品描述。

8.4 试验日期、样品缩分方法。

8.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

8.6 试验方法（干筛法或水洗法）。

8.7 筛分数据可作表格式记录。同时可根据各筛孔通过率绘制级配曲线，其横坐标为筛孔尺寸的 0.45 次方，纵坐标为通过率。

8.8 各号筛的通过率、筛余率（必要时）试验结果。

8.9 要说明的其他内容。

### 条文说明

1.3 轻集料水洗后结团，无法筛分，因此应采用干筛法筛分。

2.1 对于无结合料粒料，200mm 筛框相应的允许筛留量过小，筛分时颗粒干扰大、影响试验精度，因此应采用直径不小于 300mm 的筛框。

3.1 对集料、矿粉筛分进行比对试验发现，各试验室 0.3mm、0.15mm 和 0.075mm 通过率变异大、离群比例高，分析认为试验检测值异常主要是试验筛质量造成的。目前试验筛价格差异大，质量参差不齐；对于细集料，不同试验筛测定的 0.075mm 通过率相差可达 5% ~ 7%（绝对值），而对于矿粉，不同试验筛测定的 0.075mm 通过率相差可达 6% ~ 15%（绝对值）。试验筛质量直接影响试验测量值的可靠性。

为了消除试验筛质量导致的系统误差，习惯引入标准样品进行试验筛的标定。《水泥细度检验方法 筛析法》（GB/T 1345）要求采用标准样品进行试验筛标定，并采用修正系数进行修正，修正系数为 0.8 ~ 1.2。《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）中规定采用粉煤灰细度标准样品进行试验筛标定，修正系数为 0.8 ~ 1.2，标准

样品标定允许误差为  $\pm 2.5\%$ 。同时，还有粒化高炉矿渣粉细度标准样品。

级配是路面材料的重要质量指标，为了提高筛分试验结果的可靠性，本规程引入筛分标准样品，其中 A 组标准样品主要代表机制砂、石屑等细集料，或各类混合料，B 组标准样品主要代表矿粉、消石灰、粉煤灰、水泥等填料。

本规程中规定采用筛分标准样品进行试验筛标定，同样适用于《公路工程集料试验规程》(JTG 3432)、《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410) 和《公路路面纤维材料应用技术规范》(JTG/T 3682) 等标准中材料试验用试验筛标定。

5.5 当一次筛分筛面上颗粒过多时，颗粒之间干扰会影响筛分结果，因此应分两次或多次进行筛分，然后合并计算。

8.7 筛分数据可按表 T 1215-4 或表 T 1215-5 进行记录。

表 T 1215-4 水洗法筛分记录表格示例

| 项目                          |              | 第 1 组                  |                  |            |            | 第 2 组                  |                  |            |            | 平均         |   |
|-----------------------------|--------------|------------------------|------------------|------------|------------|------------------------|------------------|------------|------------|------------|---|
| 干燥试样总质量 $m_0$ (g)           |              |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            | — |
| 水洗后筛上总质量 $m_{\text{洗}}$ (g) |              |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
| 水洗后<br>干筛法<br>筛分            | 筛孔尺寸<br>(mm) | 分计<br>筛余量<br>$m_i$ (g) | 分计筛<br>余率<br>(%) | 筛余率<br>(%) | 通过率<br>(%) | 分计筛<br>余量<br>$m_i$ (g) | 分计筛<br>余率<br>(%) | 筛余率<br>(%) | 通过率<br>(%) | 通过率<br>(%) |   |
|                             | 75           |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 63           |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 53           |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 37.5         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 31.5         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 26.5         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 19           |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 16           |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 13.2         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 9.5          |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 4.75         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 2.36         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 1.18         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 0.6          |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 0.3          |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
|                             | 0.15         |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
| 0.075                       |              |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |   |
| 筛底质量 $m_{\text{底}}$ (g)     |              |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            | —          |   |

续表 T 1215-4

| 项目                                                                         | 第 1 组 | 第 2 组 | 平均 |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|----|
| 筛分后总质量<br>$\Sigma m_i + m_{\text{底}}$ (g)                                  |       |       | —  |
| 扣除损耗后试样<br>总质量 $m_0 - (m_{\text{耗}} -$<br>$\Sigma m_i - m_{\text{底}})$ (g) |       |       | —  |
| 损耗率 (%)                                                                    |       |       | —  |

表 T 1215-5 干筛法筛分记录表

| 项目                                        | 第 1 组                  |                  |            |            | 第 2 组                  |                  |            |            | 平均         |
|-------------------------------------------|------------------------|------------------|------------|------------|------------------------|------------------|------------|------------|------------|
| 干燥试样<br>总质量<br>$m_0$ (g)                  |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            | —          |
| 筛孔尺寸<br>(mm)                              | 分计筛<br>余量<br>$m_i$ (g) | 分计<br>筛余率<br>(%) | 筛余率<br>(%) | 通过率<br>(%) | 分计<br>筛余量<br>$m_i$ (g) | 分计<br>筛余率<br>(%) | 筛余率<br>(%) | 通过率<br>(%) | 通过率<br>(%) |
| 75                                        |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 63                                        |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 53                                        |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 37.5                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 31.5                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 26.5                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 19                                        |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 16                                        |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 13.2                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 9.5                                       |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 4.75                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 2.36                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 1.18                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 0.6                                       |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 0.3                                       |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 0.15                                      |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 0.075                                     |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            |            |
| 筛底质量<br>$m_{\text{底}}$ (g)                |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            | —          |
| 筛分后总质量<br>$\Sigma m_i + m_{\text{底}}$ (g) |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            | —          |
| 损耗率 (%)                                   |                        |                  |            |            |                        |                  |            |            | —          |

## 6 成型与密度试验

### T 1220—2026 重型击实试验

#### 1 适用范围

**1.1** 本方法适用于重型击实法成型无结合料粒料圆柱形试件，测定试件密度和含水率。

**1.2** 本方法适用于 63mm 筛的筛余率不大于 25% 的无结合料粒料。

#### 2 仪器与材料

**2.1** 多功能电动击实仪：击实仪主要由击锤、导筒、试模、击锤提升装置、落高调整装置、击数计数装置、基座等组成。

**2.1.1** 试模：试模示意图如图 T 1220-1 所示，应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成，由击实筒、可拆卸的套筒、可拆卸的底板、垫块和拉杆等组成，击实筒内壁光滑，表面粗糙度  $R_a$  为  $3.2\mu\text{m}$ 。试模相关尺寸应满足表 T 1220-1 的要求。

表 T 1220-1 试模尺寸要求

| 试模类别 | 击实筒           |               |            | 垫块            |              | 套筒            |            |            | 底板         |               |
|------|---------------|---------------|------------|---------------|--------------|---------------|------------|------------|------------|---------------|
|      | 内径<br>(mm)    | 高度<br>(mm)    | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm)    | 高度<br>(mm)   | 内径<br>(mm)    | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 中心处厚度<br>(mm) |
| A    | $100 \pm 0.5$ | $127 \pm 0.5$ | $\geq 7.5$ | —             | —            | $100 \pm 0.5$ | $\geq 50$  | $\geq 7.5$ | $\geq 180$ | $\geq 10.5$   |
| B    | $152 \pm 0.5$ | $170 \pm 0.5$ | $\geq 9.5$ | $151 \pm 0.2$ | $50 \pm 0.2$ | $152 \pm 0.5$ | $\geq 50$  | $\geq 9.5$ | $\geq 230$ | $\geq 13.5$   |
| C    | $250 \pm 1.0$ | $200 \pm 1.0$ | $\geq 14$  | —             | —            | $250 \pm 1.0$ | $\geq 50$  | $\geq 14$  | $\geq 330$ | $\geq 19.5$   |

**2.1.2** 击锤：应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成，锤击表面应淬火处理，并满足表 T 1220-2 的要求。击锤能在导筒内至设定高度时自由垂直下落，无卡滞现象。

锤击间的平面角分度应均匀，锤与试模内壁最小间距应为 2 ~ 3mm，锤击面应套叠，击迹应均匀分布于整个试件表面。

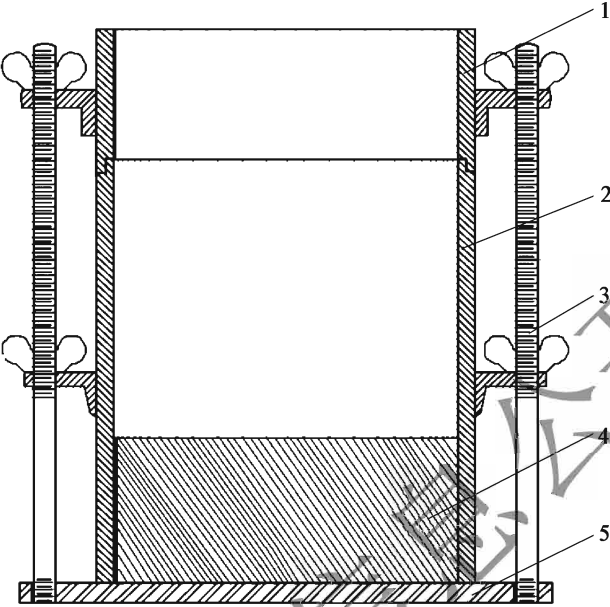


图 T 1220-1 试模示意图  
1-套筒；2-击实筒；3-拉杆；4-垫块；5-底板

表 T 1220-2 击锤技术要求

| 试模类别 | 锤的质量 (kg)      | 锤底直径 (mm)     | 落高 (mm)     | 锤击速率 (次/min) |
|------|----------------|---------------|-------------|--------------|
| A    | $4.5 \pm 0.04$ | $50 \pm 0.5$  | $450 \pm 3$ | 20 ~ 30      |
| B    | $4.5 \pm 0.04$ | $50 \pm 0.5$  | $450 \pm 3$ | 20 ~ 30      |
| C    | $15 \pm 0.04$  | $125 \pm 0.5$ | $600 \pm 3$ | 20 ~ 30      |

2.1.3 导筒应采用耐腐蚀的金属制成，壁厚为 2 ~ 3mm (C 类试模时为 6mm)，两端应设置均匀分布的排气孔，筒高应根据落高尺寸要求设计。

2.1.4 计数装置应能自动测记击数，击实至设定击数时应能自动停止击实。

2.2 试验筛：孔径为 63mm、37.5mm 及 19mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

2.3 天平：量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

2.4 烘箱：鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

**2.5 金属盘：**长约 600mm，宽约 400mm，深不小于 70mm。

**2.6 刮平尺：**30mm × 50mm × 310mm，表面平整，其中刮平工作面长度方向上水平度不大于  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

**2.7 刮土刀：**长 150 ~ 200mm，宽约 20mm 的刮刀。

**2.8 拌和机（可选）：**容积不小于 10L 或不小于 30L。

**2.9 捣棒：**木质捣棒，捣实端为平面，直径为 50mm。

**2.10 滤纸：**快速滤纸，直径比击实筒直径小 1 ~ 3mm。

**2.11 其他：**平底铲、量筒、喷水壶、游标卡尺、脱模器、带盖铝盒、螺丝刀等。

### 3 试验准备

**3.1 检查击实仪器，**各部件是否有松动，击锤表面是否磨损，击锤提升装置是否运转正常。拼装试模，击实筒、套筒、底座和垫块是否紧密连接；击实筒是否有凹痕、磨损。

**3.2 试模容积的标定：**准确测量击实筒的内径、高度和垫块（仅限试模 B）的高度，尺寸不符合时不得使用。在击实筒底部测定内径 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次；计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。测定击实筒高度 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度；按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度，计算试模容积，精确至  $0.01\text{cm}^3$ 。

### 4 试样拌制

**4.1 取各单档集料样品试验室内拌制试样**

**4.1.1 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品，**风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干，必要时将细集料用橡胶锤等敲散，防止结团。

**4.1.2 根据混合料级配，按表 T 1220-3 确定重型击实试验条件，**选定击实类型、试模类型、一份试样的质量及相应击实层数、击实次数。

表 T 1220-3 重型击实试验条件

| 击实类型 | 样品相应筛孔 (mm)<br>通过率 (%) |          |          | 试模类型 | 试件内径<br>(mm) | 试件高<br>(mm) | 一份试样的<br>质量<br>(kg) | 击实层数 | 每层击实<br>次数 |
|------|------------------------|----------|----------|------|--------------|-------------|---------------------|------|------------|
|      | 63                     | 37.5     | 19       |      |              |             |                     |      |            |
| 甲    | 100                    | 100      | 95 ~ 100 | A    | 100          | 127         | 2.5                 | 5    | 27         |
| 乙    | 100                    | 100      | 95 ~ 100 | B    | 152          | 120         | 5.5                 | 3    | 98         |
|      | 100                    | 95 ~ 100 | —        | B    | 152          | 120         | 5.5                 | 3    | 98         |
| 丙    | 100                    | 75 ~ 95  | —        | B    | 152          | 120         | 5.5                 | 3    | 98         |
| 丁    | 95 ~ 100               | —        | —        | C    | 250          | 200         | 25                  | 3    | 99         |
| 戊    | 75 ~ 95                | —        | —        | C    | 250          | 200         | 25                  | 3    | 99         |

注：对于 19mm 筛孔通过率为 95% ~ 100% 的混合料，可根据实际情况，选择甲类或乙类击实。

**4.1.3** 按混合料配比称配一份试样，按照本规程 T 1206 方法测定含水率，即原有含水率（风干含水率）。当采用丙类击实时需剔除试样中 37.5mm（戊类击实为 63mm）筛上颗粒。

注：也可取各档集料测定含水率，按配比计算混合料原有含水率。

**4.1.4** 按混合料配比和表 T 1220-3 要求的数量，称配一份试样，称取试样质量 ( $m$ )。当采用丙类击实时，需剔除试样中 37.5mm（戊类击实为 63mm）筛上颗粒。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

**4.1.5** 将搅拌均匀的试样移入拌和机内摊平，称取预定含水率相应的水量均匀喷洒在试样上，拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润备用。浸润时间一般不少于 2 ~ 4h。现场不具备拌和机时，也可在金属盘内摊平，用平底铲充分拌和均匀。

注：对于再生集料或工业矿渣等特殊材料，浸润时间可根据情况适当延长。

加水量按式 (T 1220-1) 计算，精确至 0.1g。

$$m_{w_m} = \frac{m}{1 + 0.01 w_0} \times 0.01 (w_m - w_0) \quad (\text{T 1220-1})$$

式中： $m_{w_m}$ ——含水率为  $w_m$  时的加水量 (g)；

$m$ ——一份试样的质量 (g)；

$w_0$ ——试样原有含水率（风干含水率）(%)；

$w_m$ ——预定的含水率 (%)。

**4.1.6** 应拌制不少于 2 份试样。

**4.1.7** 当采用丙类击实时，取样品筛出 37.5mm（戊类击实为 63mm）以上颗粒，按《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) 中 T 0304 或 T 0308 方法测定其吸水率、毛体积

密度。

#### 4.2 直接取混合料样品拌制不同含水率的试样

4.2.1 按本规程 T 1201 方法取样，将样品风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干状态，必要时用橡胶锤等敲散，防止结团。取样按本规程 T 1215 方法测定 63mm、37.5mm 及 19mm 筛孔通过率。当采用丙类击实时应剔除样品中 37.5mm（戊类击实为 63mm）筛上颗粒。

4.2.2 根据样品级配，按照表 T 1220-3 确定相应试验条件，选定击实类型、试模类型和一份试样的质量。

4.2.3 取样缩分一份试样，按本规程 T 1206 方法测定含水率，即原有含水率（风干含水率）。

4.2.4 取样缩分得到满足要求质量的一份试样，一份试样质量应满足表 T 1220-3 的要求。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

4.2.5 按本方法 4.1.5 拌制预定含水率的试样，拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润。

4.2.6 应拌制不少于 2 份试样。

4.2.7 当采用丙类击实时，取样品筛出 37.5mm（戊类击实为 63mm）以上颗粒，按 JTG 3432 中 T 0304 或 T 0308 方法测定吸水率、毛体积密度。

#### 4.3 直接取混合料样品拌制试样

4.3.1 现场取样品置于密闭容器中运输、储存。

4.3.2 根据样品级配，按照表 T 1220-3 确定相应试验条件，选定击实类型、试模类型和一份试样的质量。当采用丙类击实时，应剔除样品中 37.5mm（戊类击实为 63mm）筛上颗粒。

4.3.3 取样缩分得到满足要求质量的一份试样。一份试样质量应满足表 T 1220-3 的要求。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

**4.3.4** 将试样拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润备用。

注：样品从现场拌制完成到击实成型时间应不少于本方法 4.1.5 确定的浸润时间。

**4.3.5** 应拌制不少于 2 份试样。

**4.3.6** 当采用丙类击实时，取样品筛出 37.5mm（戊类击实为 63mm）以上颗粒，按 JTG 3432 中 T 0304 或 T 0308 方法测定吸水率、毛体积密度。

## 5 试验步骤

**5.1** 称取干燥洁净试模（不含套筒）质量（ $m_1$ ）。将试样倒在金属盘中拌匀、摊平；成型过程中注意覆盖，防止水分损失。

**5.2** 击实筒、套筒内壁薄涂一层隔离剂（凡士林或润滑油）。将试模组装好，并在击实仪基座上固定，在击实筒底部放一张快速滤纸。按表 T 1220-3 试验条件，用简易四分法缩分一部分混合料，移入击实筒中；加入的第一层混合料应使击实后的试件略高于击实筒高度的 1/3（对于击实类型甲为 1/5）。整平击实筒内试样表面使其厚度均匀，用捣棒平面端将表面蓬松颗粒稍加压紧；设定所需锤击次数，完成第一层的击实。击实时，击锤应匀速，均匀覆盖整个试样表面。

**5.3** 完成第一层击实后，检查第一层击实试件高度，根据高度调整各层混合料数量。取下套筒，采用刮土刀或螺丝刀将击实筒内已经击实的试件表面“拉毛”，深约 6mm；然后再装上套筒，重复上述方法进行其余各层击实。完成最后一层击实后，试件高出击实筒顶面高度应不超过 6mm，否则该试件作废。

**5.4** 用刮平刀沿套筒内壁削刮，使试件与套筒脱离，扭动、卸下套筒。用刮土刀沿击实筒顶修平试件，用刮平尺检验试件表面与试模顶部边缘正好齐平，表面不平整处用较细颗粒修补。当修平过程中碰到粗颗粒时，将粗颗粒取出，再用细料填补，稍用力压平。擦净击实筒外壁，称量试件和试模（不含套筒）的质量（ $m_2$ ）。

**5.5** 将击实筒内整个试件移入一个或多个大金属盘中（注意把击实筒表面和底板的黏附物一同移入大金属盘中，必要时进行冲洗），必要时用橡胶锤将试件敲散，按本规程 T 1206 测定含水率（ $w_a$ ），精确至 0.1%。烘干后的混合料应废弃，不得重复利用。

## 6 结果整理

6.1 试件的湿密度按式 (T 1220-2) 计算, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_w = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{T 1220-2})$$

式中:  $\rho_w$ ——试件的湿密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$m_1$ ——试模 (不含套筒) 的质量 (g);

$m_2$ ——试件和试模 (不含套筒) 的质量 (g);

$V$ ——试模的体积 ( $\text{cm}^3$ ), 根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算得到。

6.2 试件的干密度按式 (T 1220-3) 计算, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w_a} \quad (\text{T 1220-3})$$

式中:  $\rho_d$ ——试件的干密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$w_a$ ——试件的实测含水率 (%)。

6.3 对于击实类型丙、戊, 应根据超粒径颗粒 (丙为  $37.5\text{mm}$ 、戊为  $63\text{mm}$ ) 含量进行干密度和含水率的校正。

校正后的试件干密度按式 (T 1220-4) 计算, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho'_d = \frac{1}{\frac{1 - 0.01P}{\rho_d} + \frac{0.01P}{\rho_b}} \quad (\text{T 1220-4})$$

式中:  $\rho'_d$ ——校正后的试件干密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$P$ ——样品中超粒径颗粒质量百分比 (%);

$\rho_b$ ——超粒径颗粒的毛体积密度 ( $\text{g/cm}^3$ )。

校正后的试件含水率按式 (T 1220-5) 计算, 精确至  $0.1\%$  :

$$w' = w_a (1 - 0.01P) + 0.01Pw_c \quad (\text{T 1220-5})$$

式中:  $w'$ ——校正后的试件含水率 (%);

$w_c$ ——超粒径颗粒的吸水率 (%)。

6.4 同一含水率条件下, 取两个试件的算术平均值作为干密度的试验结果, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

注: 当试验用于确定最大干密度和最佳含水率时, 无须计算同一含水率下的干密度平均值。

## 7 允许误差

干密度重复性试验的允许误差为  $0.030\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 8 报告

8.1 试验项目名称和执行标准。

8.2 样品的编号、名称、产地和规格。

8.3 接样日期、样品描述。

8.4 试验日期、样品缩分方法。

8.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

8.6 击实类型和试模类型。

8.7 含水率及其相应的干密度试验结果。

8.8 当含有超粒径颗粒时，报告超粒径颗粒含量、毛体积密度和含水率试验结果。

8.9 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 本规程采用重型击实标准，击实功为  $2.67 \sim 2.69\text{MJ}/\text{m}^3$ 。

2.1 本方法中规定了三种试模，其中 A 和 B 相应的试模均与《公路土工试验规程》(JTG 3430) 中 T 0131 方法和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441) 中 T 0804 方法一致。对于底基层、垫层用无结合料粒料，其材料颗粒粒径较大，当 37.5mm 粒径颗粒含量较高时，直径 100mm 的 A、直径 150mm 的 B 试模不适合，因此增加了直径 250mm 的 C 试模。

4.1 本规程针对三种工程场景，规定了三种试样准备方法，4.1 方法主要用于配合比设计、验证或其他室内试验需要时，取各单档集料、加水按比例室内配制不同含水率的试样，确定最大干密度、最佳含水率等；4.2 方法适用于从拌和站等取混合料样品，加水室内拌制不同含水率的试样；4.3 方法适用于从拌和站或摊铺现场取混合料，按照实际含水率直接拌制试样，以检验其质量。

4.1.1 对于室内拌制混合料，或现场取样，若各档集料或混合料采用高温烘干，会改变集料孔隙内含水率状态，同时也容易结团，影响试验结果。本规程规定各档集料或混合料宜风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  低温烘干。低温烘干，主要是加速风干，将表面自由水烘干。

JTG 3430（如承载比试验）、JTG 3441（如击实试验）中规定样品风干，或  $50^{\circ}\text{C}$  烘箱烘干。根据 EN 13286-2 等的规定，可将样品风干，或  $45 \sim 50^{\circ}\text{C}$  烘干；JIS A 1210 中要求可将样品风干，或低于  $50^{\circ}\text{C}$  烘干；AASHTO T 180、T 307 中要求烘干温度不超过  $60^{\circ}\text{C}$ 。

4.1.2 混合料粒径应与试模直径相匹配，因此试验时需要根据混合料级配确定击实类型；当超粒径含量不超过 5% 时，一般不需要进行密度、含水率修正；当超粒径含量为 5% ~ 25% 时，需要修正；当超粒径含量超过 25% 时，应选择更大尺寸的试模。不同标准对试模尺寸和混合料规格的要求不尽相同，见表 T 1220-4。

表 T 1220-4 各标准中试模适应的材料规格

| 标准号                | 100 (102) mm 试模                              |                                             | 150 (152) mm 试模                                    |                                             | 250mm 试模               |                       | 300mm 试模          |
|--------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
|                    | 密度、<br>含水率<br>不修正                            | 密度、<br>含水率<br>修正                            | 密度、<br>含水率<br>不修正                                  | 密度、<br>含水率<br>修正                            | 密度、<br>含水率<br>不修正      | 密度、<br>含水率<br>修正      | 密度、<br>含水率<br>不修正 |
| ASTM<br>D1557      | 9.5mm 通过率<br>95% ~ 100%                      | 9.5mm 通过率<br>70% ~ 95%                      | 19mm 通过率<br>95% ~ 100%                             | 19mm 通过率<br>70% ~ 95%                       | —                      | —                     | —                 |
| AASHTO<br>T 180    | 19mm 通过率<br>95% ~ 100%                       | 19mm 通过率<br>70% ~ 95%                       | 19mm 通过率<br>95% ~ 100%                             | 19mm 通过率<br>70% ~ 95%                       | —                      | —                     | —                 |
| BS 1377-4          | 20mm 通过率<br>95% ~ 100%<br>37.5mm 通过率<br>100% | —                                           | 20mm 通过率<br>70% ~ 100%<br>37.5mm 通过率<br>95% ~ 100% | —                                           | —                      | —                     | —                 |
| EN<br>13286-2      | 16mm 通过率<br>95% ~ 100%                       | —                                           | 31.5mm<br>通过率<br>95% ~ 100%                        | 31.5mm 通过率<br>75% ~ 95%<br>63mm<br>通过率 100% | 63mm 通过率<br>95% ~ 100% | 63mm 通过率<br>75% ~ 95% | —                 |
| JIS A 1210         | 最大粒径<br>19mm                                 | —                                           | 最大粒径<br>37.5mm                                     | —                                           | —                      | —                     | —                 |
| JTG 3441<br>T 0804 | 19mm 通过率<br>95% ~ 100%<br>26.5mm<br>通过率 100% | 19mm 通过率<br>70% ~ 95%<br>26.5mm<br>通过率 100% | 37.5mm 通过率<br>95% ~ 100%<br>53mm<br>通过率 100%       | 37.5mm 通过率<br>70% ~ 95%<br>53mm<br>通过率 100% | —                      | —                     | —                 |
| JTG 3430<br>T 0131 | 20mm 通过率<br>100%                             | —                                           | 40mm 通过率<br>97% ~ 100%                             | 40mm 通过率<br>70% ~ 97%                       | —                      | —                     | —                 |
| GB/T<br>50123      | 20mm<br>通过率 100%                             | —                                           | 20mm<br>通过率 100%                                   | —                                           | —                      | —                     | 60mm 通过率<br>100%  |

4.1.5 浸润时间,又称为养生时间,俗称闷料时间。本方法结合无结合料粒料自身的特点,规定无结合料粒料的浸润时间不少于2~4h。

不同标准的浸润时间规定不尽相同。EN 13286-2、AASHTO T 180 并未作规定, ASTM D1557 规定浸润时间,对于砂、砾石等,不需要养生;粉土质砂、砾石为3h,其他需要16h。JTG 3441 中 T 0804 规定,对于黏质土为12~24h,粉质土为12h,砂土、砂砾土、级配砾石为4h左右,含土少的未筛分碎石、砂砾和砂为2h。JTG 3430 中 T 0131 要求焖料一夜。《土工试验方法标准》(GB/T 50123) 中针对高液限土、低液限土规定分别不少于24h和12h。无结合料粒料主要是级配碎石、级配砾石或未筛分碎石,粉料含量较低,因此需要的浸润时间较短。

试样准备又分为干法和湿法,湿法的试验过程较干法更接近施工实际过程,因此本规程仅规定了湿法,根据实际情况,也可采用干法,但应在报告中注明。

5.5 对于无结合料粒料,特别是级配较粗时,试件中含水率分布往往不均匀,因此需要取整个试件的混合料测定含水率。

6.3 对于超粒径含量超过5%的混合料应进行干密度和含水率的修正,否则干密度结果偏低、含水率结果偏大。超粒径颗粒的吸水率一般为1%~2%,再生集料、工业矿渣的吸水率可能会高一些。

## T 1221—2026 振动压实试验

### 1 适用范围

1.1 本方法适用于振动压实法成型无结合料粒料圆柱形试件,测定干密度和含水率。

1.2 本方法适用于37.5mm筛孔筛余率不大于25%的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 振动压实成型机:可采用如图 T 1221-1、图 T 1221-2 所示结构。

注:单电机配重加载型振动压实成型机,按电机和振动压头结构关系,又分为左右结构式和上下结构式,两种结构式均可采用。图 T 1221-2 中所示为左右结构式。

2.1.1 加载系统:振动频率为 $10\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ ,振幅为 $27.5\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 。对于同步电机气压加载型振动压实成型机,试验时通过加载气缸施加 $100\text{kPa} \pm 10\text{kPa}$ 的静压力;单电机配重加载型振动压实成型机,通过配重施加 $100\text{kPa} \pm 10\text{kPa}$ 的静压力。

注:振动频率一般指振动压头振动频率;若振动压头振动频率不满足 $10\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ 的要求,经检验电动机传动轴的转动频率为28~30Hz的,也允许使用。

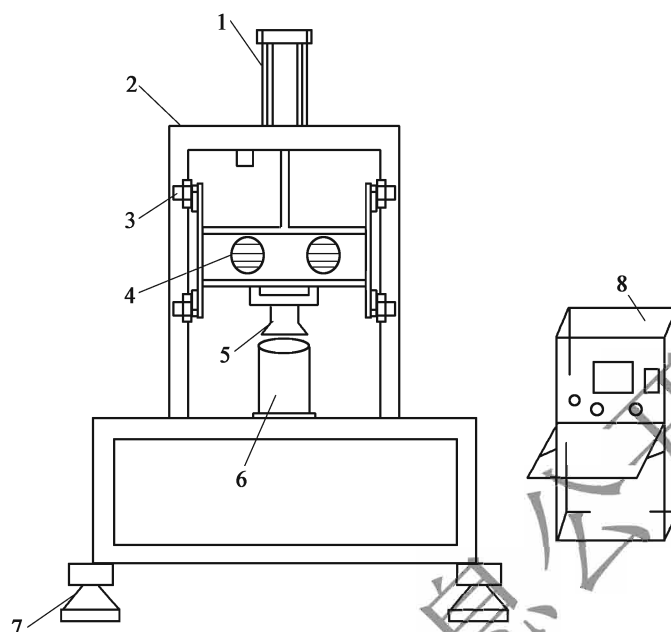


图 T 1221-1 同步电机气压加载型振动压实成型机结构示意图

1-加载气缸；2-支撑框架；3-减震器；4-同步振动电机；5-振动压头；6-试模；7-底座；8-电气控制箱

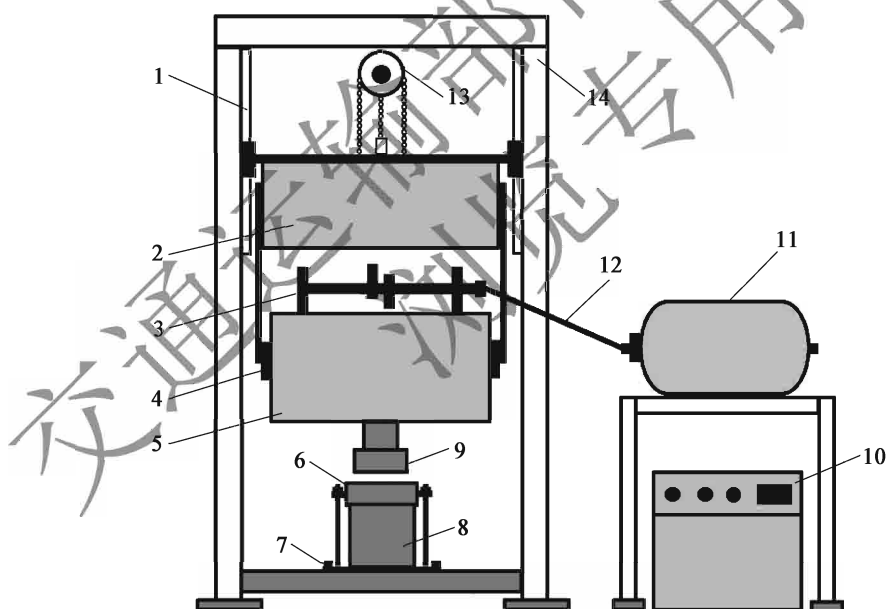


图 T 1221-2 单电机配重加载型振动压实成型机结构示意图

1-滑动导向柱；2-上车系统；3-激振器；4-减振块；5-下车系统；6-套筒；7-底座；8-试模；9-振动压头；10-电气控制箱；11-电机；12-传动轴；13-升降装置；14-支撑框架

**2.1.2 振动压头：**圆柱体，应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成，振压表面应淬火处理，直径为 148 ~ 150mm，厚度不小于 20mm。

**2.1.3 试模：**应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成，由击实筒、可拆卸的套筒、可拆卸的底板、垫块和拉杆等组成，击实筒内壁光滑，表面粗糙度  $R_a$  为  $3.2\mu\text{m}$ 。试模相关尺寸应满足表 T 1221-1 的要求。

**表 T 1221-1 试模尺寸要求**

| 击实筒           |               |            | 垫块            |              | 套筒            |            |            | 底板         |                |
|---------------|---------------|------------|---------------|--------------|---------------|------------|------------|------------|----------------|
| 内径<br>(mm)    | 高度<br>(mm)    | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm)    | 高度<br>(mm)   | 内径<br>(mm)    | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 中心处<br>厚度 (mm) |
| $152 \pm 0.5$ | $170 \pm 0.5$ | $\geq 9.5$ | $151 \pm 0.2$ | $50 \pm 0.2$ | $152 \pm 0.5$ | $\geq 50$  | $\geq 9.5$ | $\geq 230$ | $\geq 13.5$    |

**2.1.4 测高装置：**在支撑框架上安装测量标尺，量程  $0 \sim 300\text{mm}$ ，分度值  $0.5\text{mm}$ ；或安装激光测距仪，量程  $0 \sim 500\text{mm}$ ，分度值  $0.1\text{mm}$ 。

**2.1.5 整个系统**应按本方法第 3 节检验，压实系数应符合  $1 \pm 0.02$  的要求。

注：满足《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441) 中 T 0842 规定的振动压实机和试模也允许使用，但应检验其压实系数，并应符合  $1 \pm 0.02$  的要求。

**2.2 试验筛：**孔径为  $37.5\text{mm}$  的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.3 天平：**量程满足称量要求，感量不大于称量质量的  $0.1\%$ 。

**2.4 烘箱：**鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 方法中 2.1 的要求。

**2.5 金属盘：**尺寸为  $400\text{mm} \times 600\text{mm}$ 、深不小于  $70\text{mm}$ 。

**2.6 刮平尺：** $30\text{mm} \times 50\text{mm} \times 310\text{mm}$ ，表面平整，其中刮平工作面长度方向上水平度为  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

**2.7 刮土刀：**长  $150 \sim 200\text{mm}$ 、宽约  $20\text{mm}$  的刮刀。

**2.8 拌和机（可选）：**容积不小于  $10\text{L}$ 。

**2.9 捣棒：**木质捣棒，捣实端为平面，直径为  $50\text{mm}$ 。

**2.10 滤纸：**快速滤纸，直径比击实筒直径小约  $1 \sim 3\text{mm}$ 。

**2.11 标准砂：**规格 NS S202101，洁净的石英砂，二氧化硅含量不小于  $95\%$ ，

1. 18mm 筛孔通过率为 100%，0.3mm 筛孔通过率小于 5%，密度标称值控制精度为  $\pm 0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。

注：标准砂应由专业单位生产、专业单位定值，稳定性试验不少于 2 年，应附相关定值证书。

2.12 其他：平底铲、量筒、喷水壶、游标卡尺、脱模器、带盖铝盒等。

### 3 振动压实成型机压实性能检验

3.1 称取  $4\,200\text{g} \pm 5\text{g}$  干燥的标准砂，加  $147\text{g} \pm 1\text{g}$  水，拌和均匀后装入塑料袋中养生  $30\text{min} \pm 5\text{min}$ ；检查振动压头的直径。

3.2 将养生后的标准砂分成两等份；在试模底部放入垫块和滤纸，取一份养生的标准砂放入试模中，启动成型机振动压实 60s；将另一份养生的标准砂放入试模中，再在表面放滤纸，启动成型机再振动压实 60s。将试件表面刮平，测定试模内潮湿试件质量。将整个试件打散、 $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干测含水率，计算试件干密度，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

3.3 按以上方法，测定 3 个试件干密度，取平均值作为成型机干密度试验结果，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ ，如有两次结果之差大于  $0.020\text{g}/\text{cm}^3$ ，应重新进行试验。

3.4 计算振动压实成型机成型试件干密度与标准砂密度标称值之比，记为压实系数，应满足  $1 \pm 0.02$  的要求。

3.5 振动压实成型机首次使用或使用中每半年标定一次。

### 4 试验准备

4.1 检查振动压实成型机各部件是否有松动，压头表面是否磨损。拼装试模，检查击实筒、套筒、底座和垫块是否紧密连接，击实筒是否有凹痕、磨损。

4.2 试模容积的标定：准确测量击实筒的内径、高度和垫块的高度，尺寸不符合时不得使用。在击实筒底部测定内径 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次；计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。测定击实筒高度 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度；按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算试模容积，精确至  $0.01\text{cm}^3$ 。

## 5 试样拌制

### 5.1 取各单档集料样品试验室内拌制试样

**5.1.1** 按本规程 T 1201 方法取各单档集料样品，风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，必要时将细集料用橡胶锤等敲散，防止结团。

**5.1.2** 按混合料配比称配一份试样；当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。按本规程 T 1206 方法测定含水率，即原有含水率（风干含水率）。

注：也可取各档集料测定含水率，按配比计算混合料原有含水率。

**5.1.3** 按混合料配比称配一份试样；当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。一份试样质量为 5.5kg。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

**5.1.4** 称取试样质量 ( $m$ ) 后移入拌和机内摊平，称取预定含水率相应的加水量均匀地喷洒在试样上，拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润备用。浸润时间一般不少于 2~4h。现场不具备拌和机时，也可以在金属盘内，将试样均匀摊平，用平底铲充分拌和均匀。

注：对于再生集料或工业矿渣材料，浸润时间可根据情况适当延长。

加水量按式 (T 1221-1) 计算，精确至 0.1g。

$$m_{w_m} = \frac{m}{1 + 0.01 w_0} \times 0.01 (w_m - w_0) \quad (\text{T 1221-1})$$

式中： $m_{w_m}$ ——含水率为  $w_m$  时的加水量 (g)；

$m$ ——一份试样的质量 (g)；

$w_0$ ——试样原有含水率（风干含水率）(%)；

$w_m$ ——预定的含水率 (%)。

**5.1.5** 应拌制不少于 2 份试样。

**5.1.6** 当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，取样筛出 37.5mm 以上颗粒按《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) 中 T 0304 或 T 0308 方法测定其吸水率、毛体积密度。

### 5.2 直接取混合料样品拌制不同含水率的试样

**5.2.1** 将样品风干，必要时在  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干状态；必要时用橡胶锤等敲散，

防止结团。取样按本规程 T 1215 方法测定 37.5mm 筛孔通过率。当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除样品中 37.5mm 筛上颗粒。

**5.2.2** 取样缩分一份试样，按本规程 T 1206 方法测定含水率，即原有含水率（风干含水率）。

**5.2.3** 取样缩分一份质量为 5.5kg 的试样。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

**5.2.4** 按本方法 5.1 要求，拌制预定的含水率的试样，拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润。

**5.2.5** 应拌制不少于 2 份试样。

**5.2.6** 当样品 37.5mm 筛余率大于 5% 时，取样筛出 37.5mm 以上颗粒按 JTG 3432 中 T 0304 或 T 0308 方法测定其吸水率、毛体积密度。

**5.3** 直接取混合料样品拌制试样

**5.3.1** 现场取样置于密闭容器中储存。

**5.3.2** 取样缩分得到满足要求质量的一份试样，当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。一份试样质量为 5.5kg。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

**5.3.3** 将试样拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润备用。

注：样品从现场拌制到击实成型时间应不少于 2~4h。

**5.3.4** 应拌制不少于 2 份试样。

**5.3.5** 当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，取样筛出 37.5mm 以上颗粒按 JTG 3432 中 T 0304 或 T 0308 方法测定其吸水率、毛体积密度。

## 6 试验步骤

**6.1** 称取干燥试模（不含套筒）质量（ $m_1$ ）。将试样倒在金属盘中拌匀、摊平；成型过程中注意覆盖，防止水分损失。

**6.2** 击实筒、套筒内壁薄涂一层隔离剂（凡士林或润滑油）。将试模组装好，并在成型机上就位，在击实筒底部放一张滤纸。将浸润后的试样堆成圆饼状，用刮土刀等分成4个等量扇形，取对角的两个扇形混合料依次移入击实筒内，然后整平表面使厚度均匀；将另外两个扇形混合料依次移入击实筒内，整平表面使厚度均匀，并用捣棒平面端将表面蓬松颗粒稍加压紧，再在表面放一张滤纸。用螺栓将试模底板与成型机底板固定在一起。

**6.3** 操作成型机放下加载系统，使振动压头与试样表面紧密接触，但不得接触击实筒内壁。对于同步电机气压加载型振动压实成型机，加载气缸施加压力使得试件顶面静压力为  $100\text{kPa} \pm 10\text{kPa}$ （含加载系统的自重压力）。对于其他振动压实成型机，加载系统自重施加于试件顶面静压力为  $100\text{kPa} \pm 10\text{kPa}$ 。检查压实机螺栓及相关连接处，确定没有任何物品放在成型机上。

**6.4** 启动振动压实成型机连续振动压实 120s。

注：若振动压实过程中成型机出现振动压头回弹跳起，或大量试样从振动压头与试模侧壁中挤出，则应停止振动压实。

**6.5** 操作成型机提升加载系统，松开固定螺栓，将试模连同试件从压实机上取下。

**6.6** 用刮土刀沿套筒内壁削刮，使试件与套筒脱离，扭动、卸下套筒。检查成型试件高度。成型试件顶面高度不得低于试模，同时也不得高于击实筒顶面 6mm，否则该试件作废。用刮土刀沿击实筒顶修平试件，用刮平尺检验试件表面与试模顶部边缘正好齐平，表面不平整处用较细颗粒修补，当修平过程中碰到粗颗粒时，将粗颗粒取出，用细料填补，稍用力压平。擦净击实筒外壁，称量试件和试模（不含套筒）的质量（ $m_2$ ）。

**6.7** 将击实筒内整个试件移入一个或多个大金属盘中（注意把击实筒表面和底板的黏附物一同移入大金属盘中，必要时进行冲洗），用橡胶锤将试件敲散，按本规程 T 1206 测定含水率（ $w_a$ ），精确至 0.1%。烘干后的混合料应废弃，不得重复利用。

## 7 结果整理

**7.1** 试件的湿密度按式（T 1221-2）计算，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_w = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{T 1221-2})$$

式中： $\rho_w$ ——试件的湿密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）；

$m_1$ ——试模（不含套筒）的质量（g）；

$m_2$ ——试件和试模（不含套筒）的质量（g）；

$V$ ——试模的体积（ $\text{cm}^3$ ），根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算得到。

**7.2** 试件的干密度按式（T 1221-3）计算，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01 w_a} \quad (\text{T 1221-3})$$

式中： $\rho_d$ ——试件干密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）；

$w_a$ ——试件的实测含水率（%）。

**7.3** 当  $37.5\text{mm}$  超粒径颗粒含量超过 5% 时，应进行干密度和含水率的校正。

校正后的试件干密度按式（T 1221-4）计算，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho'_d = \frac{1}{\frac{1 - 0.01P}{\rho_d} + \frac{0.01P}{\rho_b}} \quad (\text{T 1221-4})$$

式中： $\rho'_d$ ——校正后的试件干密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）；

$P$ ——样品中超粒径颗粒质量百分比（%）；

$\rho_b$ ——超粒径颗粒的毛体积密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）。

校正后的试件含水率按式（T 1221-5）计算，精确至 0.1%。

$$w' = w_a (1 - 0.01P) + 0.01Pw_c \quad (\text{T 1221-5})$$

式中： $w'$ ——校正后的试件含水率（%）；

$w_c$ ——超粒径颗粒的吸水率（%）。

**7.4** 同一含水率条件下，取两个试件的算术平均值作为干密度的试验结果，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

注：当试验用于确定最大干密度和最佳含水率时，无须计算同一含水率下的干密度平均值。

## 8 允许误差

干密度重复性试验的允许误差为  $0.030\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 9 报告

**9.1** 试验项目名称和执行标准。

**9.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

9.3 接样日期、样品描述。

9.4 试验日期、样品缩分方法。

9.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

9.6 振动压实成型机类型和试验参数。

9.7 含水率及其相应的干密度试验结果。

9.8 当含有超粒径颗粒时，报告超粒径颗粒含量、毛体积密度和含水率试验结果。

9.9 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1.1 本方法主要用于成型圆柱形试件测定干密度，用于确定最大干密度、最佳含水率，或成型试件用于测定 CBR 等试验。

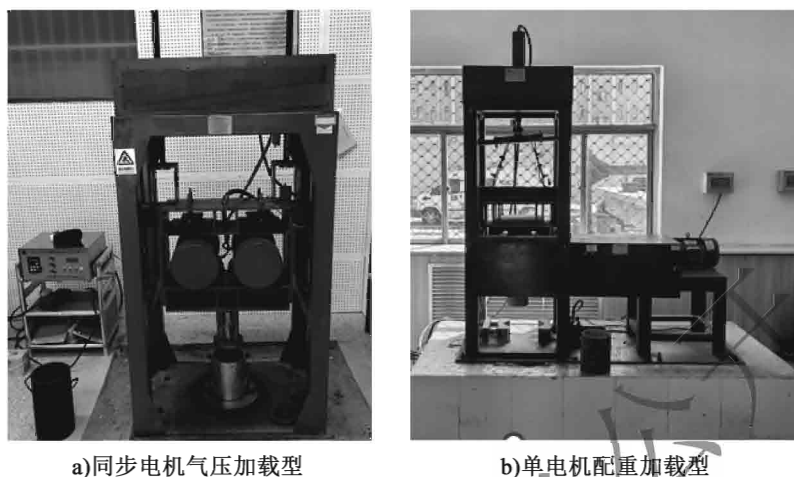
本规程共规定了 5 种圆柱形试件成型方法，包括重型击实、振动压实、振动台压实、表面振动压实和振动锤压实。根据应用调研，目前级配碎石等粒料采用试验成型最常用方法是重型击实，其次为振动压实，同时少量应用表面振动压实和振动台压实。而根据对欧美 16 个国家的调研，目前粒料材料试验成型方法依次有重型击实（16 个国家）、振动锤压实（10 个国家）、振动台压实（8 个国家）和旋转压实（4 个国家）。

振动压实、表面振动压实和振动锤压实方法原理基本相同，实际上国外统称为振动锤压实方法（vibrating hammer）。振动锤压实方法，在欧美主要采用商业化电锤（或电镐、锤钻），试验时手持电锤锤击成型试件，非常简单。我国表面振动压实，实际上是在英国、瑞典振动锤压实法基础上做了改进，增加了 H 形支架，并采用振动电机代替了商业化电锤，名义激振力为 2.5 ~ 4.2kN。表面振动压实对于水稳碎石、级配碎石等基层材料来说，激振力不够，在其基础上改进而开发了振动压实方法，即采用电机加配重块构成振动成型装置，名义激振力增加至约 6.85kN。根据我国 15 家甲级试验室比对试验，采用标准砂进行验证，标准砂试件干密度，振动压实成型结果明显大于表面振动压实成型结果。

按我国工程习惯，将国际上振动锤法分为三种方法：振动压实（图 T 1221-3）、表面振动压实（图 T 1221-4）和振动锤压实（图 T 1221-5）。每种方法均有一定的适用条件，在应用时注意按材料类型选择合适的试验方法。

2.1 根据振动压实理论，每一种材料都有不同的自振频率，激振频率与自振频率一致时可达到最好的压实效果。由于目前底基层、基层施工均采用振动压路机压实为主，室内采用振动压实成型机成型试件进行试验，其压实效果更有代表性，与现场具有

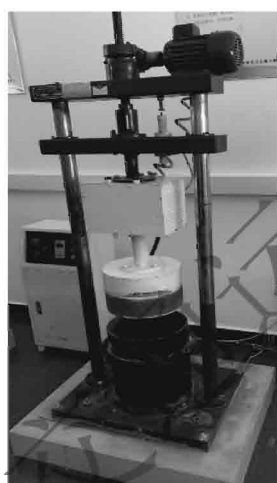
更好的相关性。因此振动压实成型方法在公路工程中的应用日益增加。然而振动压实试验中振动压实试验机难以保证压实效果的一致性，对试验结果影响较大。



a)同步电机气压加载型

b)单电机配重加载型

图 T 1221-3 振动压实成型机



a)280mm钢制夯



b)152mm钢制夯

图 T 1221-4 表面振动压实成型机



图 T 1221-5 振动锤压实试验机

影响振动压实试验机压实效果的主要参数是静压力、频率、激振力和振幅，相关标准对振动压实成型机参数要求见表 T 1221-2。

表 T 1221-2 不同标准中振动压实成型机的参数要求

| 参数  | JTG 3441                                                 | JJG (交通) 088 | JT/T 977                                                       |
|-----|----------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------|
| 静压力 | 约 0.1 MPa<br>(上车 3 块、每块质量约 4.5 kg,<br>下车 6 块、每块约 5.5 kg) | 0.1 MPa      | 振动系统、上配重、下配重合计<br>306kg $\pm$ 2.1kg, 压力约为 182kPa<br>$\pm$ 1kPa |
| 频率  | 28 ~ 30Hz                                                | 10Hz         | 28 ~ 30Hz                                                      |

续表 T 1221-2

| 参数   | JTG 3441  | JJG (交通) 088   | JT/T 977                                                                                            |
|------|-----------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 激振力  | 约为 6 800N | —              | 下配重箱平行安装两根偏心轴, 每根偏心轴上有一个固定偏心块 (1.654kg ± 0.005kg) 和一个活动偏心块 (2.088kg ± 0.005kg), 最大偏心距为 25mm ± 0.1mm |
| 振幅   | —         | 27.5mm ± 2.5mm | —                                                                                                   |
| 压实系数 | —         | 1 ± 0.02       | —                                                                                                   |

根据调研, 相关标准制定性能参数时主要基于以下考虑:

(1) 大多数大中型振动压路机的静线压力约为 300N/cm, 接地静压力与压实材料及其压实状况有关, 一般为 80 ~ 140kPa。从表 T 1221-3 中可见, 《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441)、《振动压实成型机》[JJG (交通) 088] 规定较为一致, 约为 100kPa, 而《室内振动压实机》(JT/T 977) 规定的系统压力较大, 为 182kPa。

(2) 目前工程上大中型振动压路机的振动频率为 25 ~ 55Hz, 压实路基一般为 25 ~ 30Hz, 压实底基层一般为 25 ~ 40Hz, 压实基层一般为 33 ~ 55Hz。JTG 3441、JT/T 977 均规定振动压实试验机的振动频率为 28 ~ 30Hz, 但是值得注意的是, 其规定的振动频率为电动机传动轴的转动频率, 而不是振动压实成型机振动压头振动频率。JJG (交通) 088 规定的振动频率实际上是振动压头振动频率, 要比电动机传动轴的转动频率低, 为 10Hz。

(3) 振幅直接影响压实深度, 同样的振动质量及振动频率, 提高振幅可以增加压实影响深度。但振幅过高, 击实时会造成剧烈跳动, 影响压实质量和稳定性, 也会影响减震带寿命。目前国内标准仅 JJG (交通) 088 规定振动振幅, 为 27.5mm ± 2.5mm。

(4) 振动击实的激振力直接影响试验结果, 激振力过小, 振动压实效率低; 但是激振力过大, 振动作用很快会转化为冲击作用, 造成振实的效果不稳定。从表 T 1221-3 中可见, JTG 3441 规定的激振力为 6 850N ± 50N, 这个只是名义激振力, 不是实测激振力。JT/T 977 没有规定激振力, 仅规定激振器设置要求。

为了规范振动压实试验机的振动参数, 对国内 17 家综合甲级检测机构 6 个典型品牌试验机进行调研 (表 T 1221-3), 并实测了振动参数, 得出以下结论:

(1) 实测静压力均满足 100kPa ± 10kPa 的要求。

(2) 实测振动压头的振动频率和振幅, 分别为 9.1 ~ 11.0Hz、25.4 ~ 29.5mm (除 C 型外), 其数值与 JJG (交通) 088 规定值基本接近, 与 JTG 3441、JT/T 977 规定的名义值差异较大。实测振动频率低于名义频率, 主要原因在于名义频率为电动机传动轴的转动频率, 这也表明振动压实成型机所配电机功率低于理论频率所需的理论功率。

表 T 1221-3 标准砂条件下振动压实成型机频率、振幅实测值

| 成型机编号 | 振动频率 (Hz) | 振幅 (mm) | 型号编号 |
|-------|-----------|---------|------|
| 1 号   | 10.4      | 29.5    | A    |
| 2 号   | 10.2      | 29.2    | A    |
| 3 号   | 10.1      | 25.4    | B    |
| 4 号   | 11.0      | 25.8    | B    |
| 5 号   | 10.9      | 25.6    | B    |
| 6 号   | 9.4       | 26.2    | B    |
| 7 号   | 9.1       | 23.6    | C    |
| 8 号   | 10.4      | 22.5    | C    |
| 9 号   | 9.2       | 28.7    | D    |
| 10 号  | 9.4       | 28.9    | D    |
| 11 号  | 9.7       | 28.3    | D    |
| 12 号  | 9.2       | 26.5    | E    |
| 13 号  | 9.8       | 26.9    | E    |
| 14 号  | 10.4      | 26.7    | E    |
| 15 号  | 10.1      | 27.7    | F    |
| 16 号  | 10.4      | 27.6    | F    |
| 17 号  | 9.1       | 28.1    | F    |

(3) 振动成型试验过程中, 激振力与振动系统质量、振动频率、振幅直接相关, 同时也与被压实材料类型、状态相关, 其值不稳定, 很难实测。

(4) 振动压实试验机最为关键的是激振器, 目前国内市场振动压实试验机主要采用单电机配重加载型振动压实成型机, 其动力主要由单电机提供, 频率控制采用变频器进行调频, 激振力装置主要采用偏心块的质量、偏心距或偏心块偏角来控制。电机、变频器专业化生产程度高, 而激振力装置标准化程度低, 不同厂家生产的装置参数和质量差异性非常大。目前市场上振动压实成型机从几千元到几万元都有, 振动压实成型效果千差万别, 质量参差不齐。

(5) 通过调节振动压实成型机上、下车的配重块数、偏心块夹角和变频器的频率, 来调整振动压实成型机的压实参数是极其不现实的, 一方面试验人员不具备相关经验, 另一方面随意调整参数, 导致其成型能力出现极大波动。

根据调查和实测振动压实成型机的振动参数数据, 借鉴 JJG (交通) 088 的规定, 在我国单电机配重加载型成型机基础上, 新增加了同步电机气压加载型成型机, 其采用专业生产同步振动电机代替了单电机配重加载型振动压实成型机电机、变频器和激振力装置, 有利于振动压实参数的标准化, 设备结构更简单、噪声更低, 稳定性更好。

重型击实试验中, 规定了试模、击锤等参数, 击实功是统一的, 从而能保证不同厂家生产的设备击实效果的一致性。但是, 对于振动压实成型机, 仅规定静压力、振动频

率、振幅是无法保证压实功的，若没有一个标准的“压实功”就无法保证不同设备压实效果的一致性，甚至同一厂家的同一批设备也难以确保一致。为了解决这一问题，提出采用标准砂来进行振动压实成型机的标定，检验不同设备振动压实效果的一致性。为此，本规程编写组筛选了 26 种天然砂，在此基础上开发了标准砂 (NSS 202001)，并对国内 17 家综合甲级检测机构 6 个典型型号的振动压实成型机压实系数进行检验，数据见表 T 1221-4。

表 T 1221-4 标准砂检验振动压实成型机压实系数

| 成型机编号 | 压实系数 | 型号编号 |
|-------|------|------|
| 1 号   | 1.02 | A    |
| 2 号   | 1.02 | A    |
| 3 号   | 0.99 | B    |
| 4 号   | 0.99 | B    |
| 5 号   | 0.99 | B    |
| 6 号   | 0.99 | B    |
| 7 号   | 0.94 | C    |
| 8 号   | 0.94 | C    |
| 9 号   | 1.01 | D    |
| 10 号  | 1.01 | D    |
| 11 号  | 1.02 | D    |
| 12 号  | 1.00 | E    |
| 13 号  | 1.00 | E    |
| 14 号  | 1.00 | E    |
| 15 号  | 1.00 | F    |
| 16 号  | 1.01 | F    |
| 17 号  | 1.01 | F    |

表 T 1221-4 数据表明，相同型号的振动压实成型机的压实系数较为接近，而不同型号之间的压实系数是有差异的，说明不同厂家、不同型号设备由于设备参数的差异，会导致试验结果的巨大差异，这表明用标准砂检验振动压实成型机试验结果一致性是可行的。

2.1.5 本方法规定的振动压实试验试模，与 T 1220 重型击实试验和 T 1235 承载比试验试模是一致的，与《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441) 中 T 0804 击实试验试模也是一致的，但是与 JTG 3441 中 T 0805 振动压实试验试模略有不同，主要是垫块高度和底板尺寸上有差异。同时，本方法规定的振动压实成型机在结构上、主要性能参数上，都与 JTG 3441 中 T 0805 振动压实机有所不同。为了便于不同试验方法之间设备共用，本方法允许采用 JTG 3441 中 T 0805 规定的振动压实机和试模，前提是其压实系数应检验合格。

5.1~5.3 振动压实成型试验的试样准备分为三种情况, 5.1 方法主要用于配合比设计、验证, 或其他室内试验需要时, 取各单档集料、加水按比例室内配制不同含水率的试样, 确定最大干密度等; 5.2 方法适用于从拌和站等取混合料样品, 加水室内拌制不同含水率的试样; 5.3 方法适用于从拌和站或摊铺现场取混合料, 按照实际含水率直接拌制试样。

6.2 同步电机气压加载型振动压实成型机, 静压力主要通过加载气缸施加荷载使压头施加压力达到  $100\text{kPa} \pm 10\text{kPa}$ , 因此每次试验时需要操作气压装置进行加载。对于单电机配重加载型成型机, 静压力主要通过配重使压头施加压力达到  $100\text{kPa} \pm 10\text{kPa}$ , 每台试验机是固定的, 不需要每次试验再操作施加配重。

## T 1222—2026 振动台压实试验

### 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于振动台压实法成型无黏性、自由排水的无结合料粒料试件, 以确定无结合料粒料的最大干密度。

1.2 本方法适用于最大粒径不大于  $75\text{mm}$ , 且  $0.075\text{mm}$  筛孔通过率不大于 15% 的无黏性、自由排水的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 振动台: 振动台试验装置示意图如图 T 1222-1 所示。振动台试验装置固定于混凝土基础上, 基础质量不少于  $450\text{kg}$ 。振动台面尺寸约为  $760\text{mm} \times 760\text{mm}$ , 且具有足够刚度。振动台最大负荷应能承受试模、试样、加重底板及加重块等总重。振荡器采用电磁振荡器, 净质量不小于  $45\text{kg}$ 。振动台采用正弦双振幅垂直振动, 振动频率或振幅可调, 振动频率为  $50\text{Hz}$  时振幅(峰-峰)为  $0.48\text{mm} \pm 0.08\text{mm}$ 。

2.2 试模: 应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成, 由带筒底的击实筒、可拆卸的套筒和提手等组成, 击实筒内壁光滑, 表面粗糙度  $R_a$  为  $3.2\mu\text{m}$ 。试模相关尺寸应满足表 T 1222-1 的要求。

表 T 1222-1 试模尺寸

| 试模类型 | 击实筒           |               |            |           | 套筒            |            |            |
|------|---------------|---------------|------------|-----------|---------------|------------|------------|
|      | 内径(mm)        | 高度(mm)        | 壁厚(mm)     | 底部厚度(mm)  | 内径(mm)        | 高度(mm)     | 壁厚(mm)     |
| A    | $152 \pm 0.5$ | $155 \pm 0.5$ | $\geq 9.5$ | $\geq 10$ | $152 \pm 0.5$ | $\geq 305$ | $\geq 9.5$ |
| B    | $280 \pm 0.5$ | $230 \pm 0.5$ | $\geq 9.5$ | $\geq 10$ | $280 \pm 0.5$ | $\geq 200$ | $\geq 9.5$ |

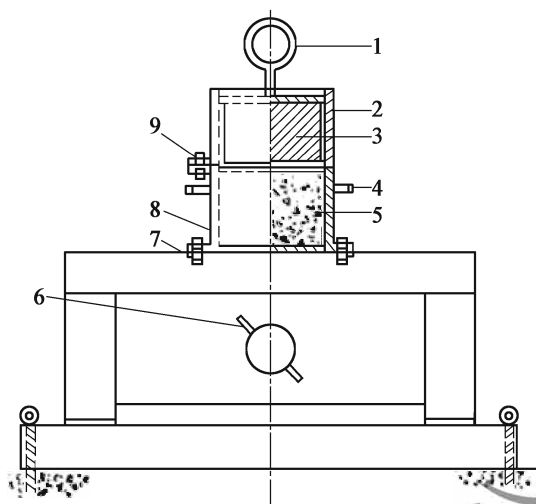


图 T 1222-1 振动台试验装置示意图

1-吊把；2-套筒；3-铅块；4-提手；5-试样；6-振动器；7-振动台面；8-击实筒；9-连接螺栓

**2.3 加重块：**外部为圆形钢管，内部加铅块。对于 A 试模，外径 148mm，带厚 12 ~ 15mm、外径  $150\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$  的钢底板，加重块和底板总质量为  $25.0\text{kg} \pm 0.2\text{kg}$ 。对于 B 试模，外径 275mm，带厚 12 ~ 15mm、外径  $276\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$  的钢底板，加重块和底板总质量为  $85.0\text{kg} \pm 0.5\text{kg}$ 。钢底板应有未穿通的提吊螺孔。

**2.4 试验筛：**孔径为 0.075mm、37.5mm 及 75mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.5 天平：**量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

**2.6 烘箱：**鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

**2.7 金属盘：**尺寸为 800mm × 500mm、深不小于 80mm 的金属盘。

**2.8 升降机：**起重质量不小于 140kg。

**2.9 振幅测定装置：**变形数据采集频率不小于 1000Hz，采用电子位移传感器，精度为 0.015mm，同时便于固定安装在试模外侧，测定击实筒顶部端部的位移。

**2.10 拌和机(可选)：**容积不小于 20L。

**2.11 其他工具：**平底铲、量筒、喷水壶、橡皮锤、秒表、钢直尺、游标卡尺、脱模器、带盖铝盒、纸巾等。

### 3 试验准备

**3.1** 检查振动台、起吊机、加重块，各部件是否有松动、运转正常。拼装试模，击实筒、套筒和底座是否紧密连接；击实筒是否有凹痕、磨损。

**3.2** 击实筒容积和横截面面积的标定：

(1) 在击实筒顶部边缘涂抹薄薄的油脂或凡士林。称取击实筒和玻璃片的质量。

(2) 用  $23^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$  的水装满容量筒至稍微溢出，用玻璃片沿容量筒表面迅速滑行，紧贴上部边缘水面，玻璃片与水面之间不得有空隙。擦干玻璃片上部及容量筒外壁的水，称取容量筒、玻璃片和水的总质量。同时，快速测定容量筒中水的温度  $T$ 。

(3) 按本方法 6.1 计算击实筒容积，精确至  $0.1\text{cm}^3$ 。

(4) 测定击实筒高度 3 次；每转动  $120^{\circ}$  测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度。采用击实筒容积除以击实筒的高度，得到击实筒的横截面积，精确至  $0.1\text{cm}^2$ 。

**3.3** 加重块底板厚度的标定。测定加重块底板厚度 3 次；每转动  $120^{\circ}$  测一次，计算 3 个测定平均值为加重块底板厚度，精确至  $0.1\text{cm}$ 。

**3.4** 振动台振幅的标定：

(1) 取  $7\text{kg}$  (对于 B 试模为  $36\text{kg}$ ) 的无结合料粒料。

注：可以采用典型基层或底基层级配碎石，采用规范中级配中值。

(2) 安装振幅测定装置，按照本方法 5 进行试验，设定频率为  $50\text{Hz}$ ，加上加重块，测定振动台振动时击实筒顶部端面垂直位移，连续测定不少于 10 次。振幅采样频率不小于  $1000\text{Hz}$ 。

(3) 如果振幅不在要求的范围，调整振动台重新试验，使得振幅满足要求。绘制振幅时间曲线，评价双振幅(峰-峰)。

### 4 试样拌制

**4.1** 取各单档集料样品试验室内拌制试样

**4.1.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品，风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，将细集料用橡胶锤等敲散，防止结团。

**4.1.2** 根据混合料的最大粒径，按表 T 1222-2 确定试模类型和一份试样的质量。

表 T 1222-2 振动台成型条件

| 样品的最大<br>粒径 (mm) | 试模类型 | 试件内径<br>(mm) | 试件高<br>(mm) | 一份试样的<br>质量 (kg) | 初振时间 (不放<br>加重块) (min) | 振实时间 (放<br>加重块) (min) |
|------------------|------|--------------|-------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| ≤31.5            | A    | 152          | 155         | 7                | 6                      | 10                    |
| 37.5 ~ 75        | B    | 280          | 230         | 36               | 6                      | 10                    |

注：对于最大粒径不大于 31.5mm 的样品，也可采用 B 试模进行试验。

4.1.3 取样按混合料配比称配一份试样，当试样中含有 75mm (对于 A 试模为 31.5mm) 筛上颗粒时，剔除试样中 75mm (对于 A 试模为 31.5mm) 以上颗粒。一份试样质量应满足表 T 1222-2 的要求。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。向试样中喷洒适量水，使试样湿润，拌和均匀后浸润不少于 30min。

注：初始加水量可按每 4.5kg 试样加入 800g 水确定。

4.1.4 振实试验前，向试样中再加足够的水，使试样表面有少量自由水聚集，振实过程中保持饱和，但金属盘上无自由水聚集。

4.1.5 应拌制不少于 3 份试样。

4.2 直接取混合料样品拌制试样

4.2.1 按本规程 T 1201 取样，剔除 75mm (对于 A 试模为 31.5mm) 筛上颗粒后缩分至满足表 T 1222-2 要求质量的一份试样。

4.2.2 将试样放在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。当试样干燥时，向试样中喷洒适量水，使试样湿润，拌和均匀后浸润不少于 30min。

注：初始加水量可按每 4.5kg 试样加入 800g 水确定。

4.2.3 振实试验前，向试样中再加足够的水，使试样表面有少量自由水聚集，振实过程中保持饱和，但金属盘上无自由水聚集。

4.2.4 应拌制不少于 3 份试样。

5 试验步骤

5.1 称量干燥击实筒和加重块底板的质量。将试样倒在金属盘中拌匀、摊平；成型

过程中注意覆盖，防止水分损失。

**5.2** 将击实筒在振动台上固定，击实筒内壁薄涂一层隔离剂(凡士林或润滑油)。启动振动台，用金属铲徐徐加入击实筒。每加入一铲试样，观察试样表面是否有自由水聚集；若无，可采用海绵蘸水挤入等方式加入足量水。装满击实筒后，整平表面。整个振动时间为6min，振动过程中随时调整振幅或频率，以防止表面颗粒过于跳跃、抖松。振动最后1min时，吸去试样表面的所有自由水，但注意不要带走颗粒。

**5.3** 将加重块底板放在试样表面上，轻轻转动几下，使其与试样表面紧密接触。卸除加重块底板把手。将套筒紧密固定在试模上。采用起吊机将加重块置于加重块底板上，注意加重块不与套筒内壁接触。

**5.4** 设定振动台参数。振动频率为50Hz，双振幅为0.48mm。

**5.5** 启动振动台进行振实，在 $50\text{Hz} \pm 2\text{Hz}$ 下振实 $10\text{min} \pm 15\text{s}$ 。

**5.6** 擦去加重块表面和击实筒表面、内侧壁的泥水。采用游标卡尺测定击实筒顶部端面至加重块底板顶面的垂直高差，测定4次，每转动 $90^\circ$ 测一次，计算4个测定平均值。

**5.7** 卸去加重块底板，并从振动台面上卸下击实筒，然后用台秤称量击实筒、加重块底板和试样的总质量，扣除干燥击实筒、加重块底板的质量即为潮湿试样的质量。将击实筒内整个试件移入大金属盘中(注意把击实筒表面和底板的黏附物一同移入大金属盘中，必要时进行冲洗)，必要时用橡胶锤将试件敲散，在 $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 温度烘干至恒重，冷却至室温后称量干燥试样的质量。

**5.8** 按照以上步骤完成3份试样试验。

## 6 结果整理

**6.1** 击实筒的容积按式(T 1222-1)计算，精确至 $0.1\text{cm}^3$ 。

$$V_c = \frac{m_3 - m_1}{\rho_T} \quad (\text{T 1222-1})$$

式中： $V_c$ ——标定的击实筒容积( $\text{cm}^3$ )；

$m_1$ ——容量筒、玻璃片的质量(g)；

$m_3$ ——容量筒、玻璃片与水的总质量(g)；

$\rho_T$ ——温度  $T$  时水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

## 6.2 振实试样体积按式(T 1222-2)计算, 精确至 $0.1\text{cm}^3$ 。

$$V = V_c - A_h(R + H) \quad (\text{T 1222-2})$$

式中:  $V$ ——振实试样体积( $\text{cm}^3$ );

$A_h$ ——标定的击实筒横断面面积( $\text{cm}^2$ );

$R$ ——击实筒顶部端面至加重块底板顶面的高差( $\text{cm}$ );

$H$ ——加重块底板厚度( $\text{cm}$ )。

## 6.3 最大干密度按式(T 1222-3)计算, 精确至 $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ :

$$\rho_{d\max} = \frac{M_d}{V} \quad (\text{T 1222-3})$$

式中:  $\rho_{d\max}$ ——最大干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$M_d$ ——干燥试样的质量( $\text{g}$ )。

## 6.4 试件实测的含水率按式(T 1222-4)计算, 精确至 $0.1\%$ :

$$w_a = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (\text{T 1222-4})$$

式中:  $w_a$ ——试件的实测含水率( $\%$ );

$M_w$ ——潮湿试样的质量( $\text{g}$ )。

**6.5** 取 3 个试件的算术平均值作为试验结果, 最大干密度精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ , 含水率精确至  $0.1\%$ 。

## 7 允许误差

最大干密度重复性试验的允许误差为  $0.030\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 8 报告

**8.1** 试验项目名称和执行标准。

**8.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**8.3** 接样日期、样品描述。

**8.4** 试验日期、样品缩分方法。

8.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

8.6 振动台试验振幅和频率。

8.7 试模直径，最大干密度及含水率试验结果。

8.8 当含有 75mm 超粒径颗粒时，报告超粒径颗粒含量。

8.9 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1.1 对于垫层或开级配、间断级配的粒料材料，多属于无黏结、自由排水材料，其干密度-含水率曲线无明显峰值，无法得到最大干密度和最佳含水率。实际上一些粉料含量低、级配较粗的密级配的粒料材料，也具有无黏结、自由排水材料特性。

对于无黏结、自由排水材料，一般要求进行振动台压实试验或表面振动压实试验，以确定最大干密度。振动台压实试验，由于试验装备标准化程度高，利于各参数控制，同时其可适用于测定最大粒径为 75mm 的材料，因此应用较为广泛，如《土工试验方法标准》(GB/T 50123)、ASTM D4256 和 EN 13286-5，均规定了振动台压实试验法。根据相关文献，振动台压实试验测定的最大干密度明显高于重型击实试验结果，但是会低于表面振动压实试验结果。

1.2 振动台压实试验时材料的最大粒径应与试模尺寸相匹配，试模尺寸应不小于混合料最大粒径的 3 倍。结合我国工程实际，对于振动台成型试验，规定最大粒径不大于 31.5mm 的可采用直径 152mm、高 155mm，或直径 280mm、高 230mm 的试模；对于最大粒径为 37.5~75mm 的，应采用直径 280mm、高 230mm 的试模，不要求采用相似级配法进行处理。

各标准对试模尺寸与混合料最大粒径的要求不尽一致。ASTM D4256 规定直径 152mm、高 155mm 的试模适用于 19mm 粒径及以下颗粒，直径 280mm、高 230mm 的试模适用于最大粒径为 37.5~75mm 的颗粒。EN 13286-5 规定，所有粒径材料均采用直径 280mm、高 230mm 的试模，允许最大粒径为 80mm。GB/T 50123 中 61 方法规定，所有粒径材料均采用直径 300mm、高 340mm 的试模，允许最大粒径为 60mm。

2.1 振动台可 adopt 电磁、偏心或凸轮振动器，其中电磁振动器振动台得到的密度普遍大于偏心或凸轮振动器的振动台。考虑电磁振动器振动台控制精度更高，更有利于振动台生产标准化，因此本方法规定采用电磁振动器。ASTM D4256 中规定，电磁、偏心或凸轮振动器都可以采用，但是相应配重等要求不同。EN 13286-5 规定仅采用电磁振动器。

振动台的振动参数对最大干密度试验结果有影响，随着振幅增加(或频率降低)，干密度先增加，然后下降，会存在一个峰值，对于不同材料、不同级配其振幅(频率)

峰值是不同的。因此,理论上来说目前固定振幅(或频率)的试验方法并不能得到无黏结、自由排水材料理论上的最大干密度。但是为了试验结果的一致性,需要确定一个统一标准。本方法结合我国工程实践,统一采用振动台成型标准为:频率 50Hz、双振幅(峰-峰)为  $0.48\text{mm} \pm 0.08\text{mm}$ 、时间为  $10\text{min} \pm 15\text{s}$ 。

各标准对振动台的振动参数的规定不尽相同。ASTM D4256 规定振动台为类正弦双振幅的垂直振动,可采用 60Hz 时双振幅(峰-峰)为  $0.33\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 、振压  $8\text{min} \pm 15\text{s}$ ;或 50Hz 时双振幅(峰-峰)为  $0.48\text{mm} \pm 0.08\text{mm}$ 、振压  $10\text{min} \pm 15\text{s}$ ,试验时根据经验选择其中一个频率(振幅)进行试验。而 EN 13286-5 仅规定 50Hz 时单振幅(单峰值,即峰-峰振幅的一半)为  $0.40\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 、振压  $12\text{min} \pm 15\text{s}$ 。GB/T 50123 中 61 方法中规定 40~60Hz 时最优振幅为  $0.64\text{mm}$ 、振压 8min。

2.3 根据静压力对试验结果的影响规律,统一按照静压力 13.8kPa 来计算确定加重块和加重块底板的总质量。

ASTM D4256、EN 13286-5 均要求表面静压力为 13.8kPa。GB/T 50123 中 61 方法要求表面静压力为 14kPa。

4.1.4 振动台压实试验确定最大干密度有干法和湿法,本方法仅规定了湿法。干法简单、效率高,但是对于一些材料,干法测定值会明显低于湿法测定值,从而影响现场施工控制。ASTM D4256 规定,需用两种方法测定最大干密度,若湿法测定值比干法测定值高,则取湿法测定值作为试验结果。EN 13286-5 仅规定了湿法。同时进行干法、湿法试验,其试验工作量成倍增加,因此本方法仅规定了湿法。

5.5 本方法规定一份试样一次装料、一次压实成型。ASTM D4256、EN 13286-5 和 GB/T 50123 中 61 方法均规定仅振实一次。多层振实,振实功增加,同时导致材料集料破碎、层间分离,影响试验结果。

5.8 本方法根据实际工程应用,规定拌制 3 个试样,一个试样仅振实一次。

ASTM D4256 规定,对同一份试样,第一次振实测定最大干密度之后,拌匀后可再次振实,直至得到一致的最大干密度。EN 13286-5 规定一份试样仅测定一次。在实际试验时,特别是湿法,振实过程中粉料会流失,同时每次振实会导致集料破碎而使得最大干密度有所增加;而且采用湿法时,一份试样重复利用,也无法测定其含水率,影响最大干密度计算。

## T 1223—2026 表面振动压实试验

### 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于表面振动压实法成型无黏性、自由排水的无结合料粒料试件,以确定最大干密度。

**1.2** 本方法适用于最大粒径不大于 75mm，且 0.075mm 筛孔通过率不大于 15% 的无黏性、自由排水的无结合料粒料。

## 2 仪器与材料

**2.1** 表面振动成型机：结构示意图如图 T 1223-1 所示，振实能力应按照本方法 3.1 检验合格。振动器的功率为 0.75 ~ 2.2kW，振动频率为 30 ~ 50Hz。钢制夯，如图 T 1223-2 所示，其与振动电机紧密连接，且有一厚度为 15 ~ 40mm 的夯板。振动器、钢制夯(必要时设置配重块)在试样表面产生 18 ~ 24kPa 的静压力。表面振动成型机固定于混凝土基础上，混凝土质量不小于 450kg。试模应采用合适方式固定，对于  $\phi 152\text{mm}$  试模，应采用试模中心与钢制夯中心对中固定；对于  $\phi 280\text{mm}$  试模，应采用试模内壁与钢制夯外边缘间距为 2 ~ 3mm 的位置固定，使其在成型时通过转动试模来调整表面振动压实位置，能够实现如图 T 1223-3 所示位置和次序进行成型。

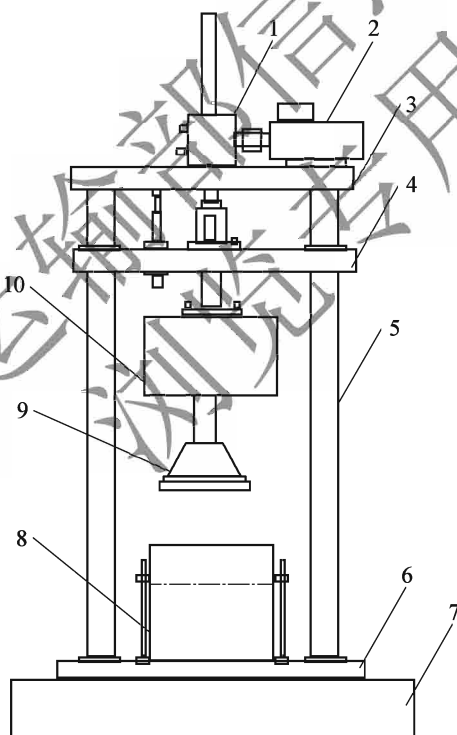
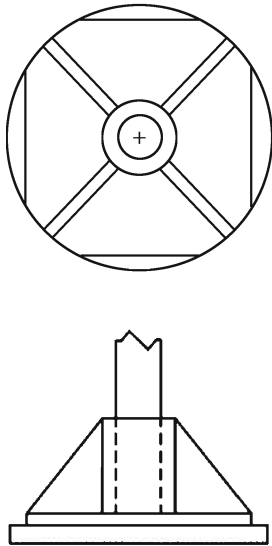


图 T 1223-1 表面振动成型机装置示意图

1-升降机；2-电机；3-横架；4-可垂直自由移动支架；5-立柱；6-基座；7-混凝土基础；8-试模；9-钢制夯；10-振动器

**2.2** 试模：应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成，由带筒底的击实筒、可拆卸的套筒和拉杆等组成，击实筒内壁光滑，表面粗糙度  $R_a$  为  $3.2\mu\text{m}$ 。试模相关尺寸应满足表 T 1223-1 的要求。



(直径 146mm ± 0.5mm)  
图 T 1223-2 钢制夯示意图

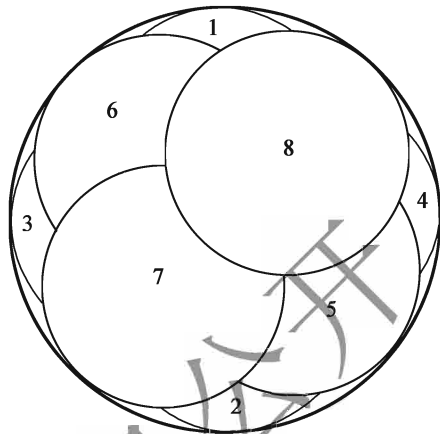


图 T 1223-3  $\phi 280\text{mm}$  试模表面振动压实位置和次序示意图

表 T 1223-1 试模尺寸

| 试模类型 | 击实筒       |           |         |           | 套筒        |         |         |
|------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|---------|
|      | 内径 (mm)   | 高度 (mm)   | 壁厚 (mm) | 底部厚度 (mm) | 内径 (mm)   | 高度 (mm) | 壁厚 (mm) |
| A    | 152 ± 0.5 | 116 ± 0.5 | ≥ 9.5   | ≥ 10      | 152 ± 0.5 | ≥ 60    | ≥ 9.5   |
| B    | 280 ± 0.5 | 230 ± 0.5 | ≥ 9.5   | ≥ 10      | 280 ± 0.5 | ≥ 90    | ≥ 9.5   |

2.3 试验筛：孔径为 0.075mm、37.5mm 和 75mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

2.4 天平：量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

2.5 烘箱：鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

2.6 金属盘：尺寸为 800mm × 500mm、深不小于 80mm 的金属盘。

2.7 标准砂：规格 NS S202101，洁净的石英砂，二氧化硅含量不小于 95%，1.18mm 筛孔通过率为 100%，0.3mm 筛孔通过率小于 5%，密度标称值控制精度为  $\pm 0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。

注：标准砂应由专业单位生产、专业单位定值，稳定性试验不少于 2 年，应附相关定值证书。

**2.8** 拌和机(可选): 容积不小于 20L。

**2.9** 刮平尺: 30mm × 50mm × 310mm, 表面平整, 其中刮平工作面长度方向上水平度为  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

**2.10** 其他工具: 刮土刀、平底铲、量筒、喷水壶、橡皮锤、秒表、钢直尺、游标卡尺、脱模器、带盖铝盒、击实筒布套、纸巾等。

### 3 表面振动压实成型机压实性能检验

**3.1** 将振动器、钢制夯(含配重块)从成型机上卸除, 放到地秤上称量总质量, 总质量应为 30 ~ 40kg; 检查夯板的直径。

**3.2** 称取  $4\,200\text{g} \pm 5\text{g}$  干燥的标准砂, 加  $147\text{g} \pm 1\text{g}$  水, 拌和均匀后装入塑料袋中养生  $30\text{min} \pm 5\text{min}$ 。

**3.3** 将养生后的标准砂分成三等份, 采用 A 试模, 按本方法第 6 节试验步骤进行表面振动压实试验, 每层压实  $60\text{s} \pm 2\text{s}$ 。测定试件的干密度, 精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**3.4** 按照以上方法, 测定 3 个试件干密度, 取平均值作为表面振动压实成型机干密度试验结果, 精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ , 如有两次结果之差大于  $0.020\text{g}/\text{cm}^3$ , 应重新进行试验。

**3.5** 计算表面振动压实成型机成型试件的干密度, 应不小于标准砂干密度标称值。

**3.6** 表面振动压实成型机首次使用或使用中每半年标定一次。

### 4 试验准备

**4.1** 检查振动器、升降机等各部件是否有松动、运转正常, 夯板击实表面是否磨损。拼装试模, 击实筒、套筒和底座、基础是否紧密连接; 击实筒是否有凹痕、磨损。

**4.2** 击实筒容积和横截面面积的标定:

(1) 在击实筒顶部边缘涂抹薄薄的油脂或凡士林。称取击实筒和玻璃片的质量。

(2) 用  $23^\circ\text{C} \pm 2.0^\circ\text{C}$  的水装满容量筒至稍微溢出, 用玻璃片沿容量筒表面迅速滑行, 紧贴上部边缘水面, 玻璃片与水面之间不得有空隙。擦干玻璃片上部及容量筒外壁的

水,称取容量筒、玻璃片和水的总质量。同时,快速测定容量筒中水的温度  $T$ 。

(3)按本方法 7.1 计算击实筒容积,精确至  $0.1\text{cm}^3$ 。

## 5 试样拌制

### 5.1 取各单档集料样品试验室内拌制试样

**5.1.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品,风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干,将细集料用橡胶锤等敲散,防止结团。

**5.1.2** 根据混合料的最大粒径,按表 T 1223-2 确定试模类型和一份试样的质量。

表 T 1223-2 表面振动压实条件

| 样品的最大粒径<br>(mm) | 试模类型 | 试件内径<br>(mm) | 试件高<br>(mm) | 一份试样的质量<br>(kg) |
|-----------------|------|--------------|-------------|-----------------|
| $\leq 31.5$     | A    | 152          | 116         | 5.5             |
| 37.5 ~ 75       | B    | 280          | 230         | 36              |

注:对于最大粒径不大于 31.5mm 的样品,也可以采用 B 试模进行试验。

**5.1.3** 取样按混合料配比称配一份试样,当试样中含有 75mm (对于 A 试模为 31.5mm) 筛上颗粒时,剔除试样中 75mm (对于 A 试模为 31.5mm) 以上颗粒。一份试样质量应满足表 T 1223-2 的要求。将试样在金属盘内摊平,充分搅拌至均匀。向试样中喷洒适量水,使试样湿润,拌和均匀后浸润不少于 30min。

注:初始加水量可按每 4.5kg 试样加入 800g 水确定。

**5.1.4** 振实试验前,向试样中再加足够的水,使试样表面有少量自由水聚集,振实过程中保持饱和,但金属盘上无自由水聚集。

**5.1.5** 应拌制不少于 3 份试样。

### 5.2 直接取混合料样品拌制试样

**5.2.1** 按本规程 T 1201 取样,剔除 75mm (A 试模为 31.5mm) 筛上颗粒后缩分至满足表 T 1223-2 要求质量的一份试样。

**5.2.2** 将试样放在金属盘内摊平,充分搅拌至均匀。当试样干燥时,向试样中喷洒

适量水，使试样湿润，拌和均匀后浸润不少于 30min。

注：初始加水量可按每 4.5kg 试样加入 800g 水确定。

**5.2.3** 振实试验前，向试样中再加足够的水，使试样表面有少量自由水聚集，振实过程中保持饱和，但金属盘上无自由水聚集。

**5.2.4** 应拌制不少于 3 份试样。

## 6 试验步骤

**6.1** 称量干燥击实筒的质量。将试样倒在金属盘中拌匀、摊平；成型过程中注意覆盖，防止水分损失。

**6.2** 将击实筒在基座上固定，安装套筒，并与击实筒紧密固定。击实筒、套筒内壁薄涂一层隔离剂（凡士林或润滑油）。

**6.3** 将试样分成三等份。取一等份试样，用金属铲徐徐加入击实筒中（加入的第一层混合料应使击实后的试件略高于击实筒高度的  $1/3$ ），装料后整平表面。可用橡皮锤敲击几次击实筒筒壁，使试样下沉。操作升降机，下降移动支架放下钢制夯，钢制夯不得接触击实筒内壁。对于 A 试模，启动振动器振动  $180s \pm 5s$ ；对于 B 试模，按图 T 1223-3 位置和次序，依次振动压实，每个位置振动压实  $156s \pm 5s$ 。

**6.4** 操作升降机，抬起振动器。观察试样表面是否有自由水聚集；若无，可采用海绵蘸水挤入等方式加入足量水；若表面自由水过多，应用干燥毛巾等吸除。采用刮土刀或螺丝刀将击实筒内已经击实的试件表面“拉毛”，深约 6mm。

**6.5** 按步骤 6.3 和 6.4，进行第二层和第三层试样振实。第三层试样表面无须“拉毛”处理。

**6.6** 拆除套筒，从基座上移走击实筒。成型试件顶面高度不得低于击实筒，同时也不得高于击实筒顶面超过 6mm，否则该试件作废。用刮土刀沿击实筒顶修平试件，用刮平尺检验试件表面与试模顶部边缘正好齐平，表面不平整处用较细颗粒修补，当修平过程中碰到粗颗粒时，将粗颗粒取出，用细料填补，稍用力压平。擦净击实筒表面、内侧壁的泥水，称量试件和击实筒的质量。

**6.7** 将击实筒内整个试件移入一个或多个大金属盘中（注意把击实筒表面和底板的黏附物一同移入大金属盘中，必要时进行冲洗），必要时用橡胶锤将试件敲散，在

105℃ ±5℃ 温度烘干至恒重, 冷却至室温后称量干燥试样的质量, 计算含水率, 精确至 0.1%。烘干后的试样应废弃, 不得重复利用。

**6.8** 按照以上步骤完成 3 份试样试验。

## 7 结果整理

**7.1** 击实筒的容积按式(T 1223-1)计算, 精确至 0.1 cm<sup>3</sup>。

$$V_c = \frac{m_3 - m_1}{\rho_T} \quad (\text{T 1223-1})$$

式中:  $V_c$ ——标定的击实筒容积(cm<sup>3</sup>);

$m_1$ ——容量筒、玻璃片的质量(g);

$m_3$ ——容量筒、玻璃片与水的总质量(g);

$\rho_T$ ——温度  $T$  时水的密度(g/cm<sup>3</sup>)。

**7.2** 最大干密度按式(T 1223-2)计算, 精确至 0.001 g/cm<sup>3</sup>。

$$\rho_{dmax} = \frac{M_d}{V_c} \quad (\text{T 1223-2})$$

式中:  $\rho_{dmax}$ ——最大干密度(g/cm<sup>3</sup>);

$M_d$ ——干燥试样的质量(g)。

**7.3** 试件的实测含水率按式(T 1223-3)计算, 精确至 0.1%:

$$w_a = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (\text{T 1223-3})$$

式中:  $w_a$ ——试件的实测含水率(%);

$M_w$ ——潮湿试样的质量(g)。

**7.4** 取 3 个试件的算术平均值作为最大干密度试验结果, 精确至 0.001 g/cm<sup>3</sup>。

## 8 允许误差

最大干密度重复性试验的允许误差为 0.050 g/cm<sup>3</sup>。

## 9 报告

- 9.1 试验项目名称和执行标准。
- 9.2 样品的编号、名称、产地和规格。
- 9.3 接样日期、样品描述。
- 9.4 试验日期、样品缩分方法。
- 9.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 9.6 振动台试验振幅和频率。
- 9.7 试模直径，含水率及最大干密度试验结果。
- 9.8 当含有 75mm 超粒径颗粒时，报告超粒径颗粒含量。
- 9.9 要说明的其他内容。

### 条文说明

1.1 振动台压实试验和表面振动压实试验均可确定无黏性、自由排水材料的最大干密度。根据相关文献，表面振动压实试验测定的最大干密度明显高于振动台压实试验的最大干密度。

2.1 对于  $\phi 280\text{mm}$  试模和  $\phi 152\text{mm}$  试模，其成型试件的容积相差 5.7 倍。当表面振动压实成型机功率一定时， $\phi 280\text{mm}$  试模成型时单位体积击实功要低于  $\phi 152\text{mm}$  试模成型时单位体积击实功，这会影响压实效果。对于  $\phi 280\text{mm}$  试模，若增加表面振动压实成型机功率，就会导致表面振动压实成型机外形过大、结构复杂。为此，本规程规定， $\phi 280\text{mm}$  试模和  $\phi 152\text{mm}$  试模采用相同的振动器和夯锤，但是  $\phi 280\text{mm}$  试模相应增加每层的压实位置，即每层在 8 个位置进行压实，从而确保  $\phi 280\text{mm}$  单位体积击实功与  $\phi 152\text{mm}$  单位体积击实功相同。

3 表面振动压实没有一个标准的“压实功”就很难保证不同厂家生产设备压实效果的一致性，甚至同一厂家出厂同一批设备也难以一致。目前我国很多表面振动成型设备厂家自行组装振动器，这与国际上要求采用商业化电锤相比，生产标准化明显不足，影响试验结果的可靠性和一致性。为了解决这一问题，提出采用标准砂来进行振动压实成型机成型效果的检验，确保不同设备振动压实效果的一致性。

5.1.4 表面振动压实试验有干法和湿法, 本方法仅规定了湿法, 这与本规程 T 1222 振动台压实试验规定相同。

6.4 不同标准规定的湿法不尽相同。BS 1377-4 中 4.3 规定的湿法, 要求采用温水浸泡试样, 冷却后试验, 振实时要求加水浸没试样。而本方法、ASTM D7382 和《公路土工试验规程》(JTG 3430) 中 T 0133 要求加水至表面有自由水, 但不得聚集大量自由水。

## T 1224—2026 振动锤压实试验

### 1 适用范围

1.1 本方法适用于振动锤压实法成型无结合料粒料试件。

1.2 本方法适用于成型直径  $\times$  高为 152mm  $\times$  120mm 的圆柱形试件, 用于最佳含水率和最大干密度试验。

1.3 本方法适用于 37.5mm 筛孔筛余率不大于 10% 的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 振动锤: 结构示意图如图 T 1224-1 所示, 由电镐(或电锤、锤钻, 振动时关闭旋转功能)、连接杆和钢制夯锤组成, 振实能力应按照本方法 3.1 检验。电镐(或电锤、锤钻)的功率为 0.7 ~ 1.2kW, 振动频率为 30 ~ 60Hz。钢制夯锤, 有一厚度不小于 15mm 的夯板, 直径为 149 ~ 150mm, 通过连接杆紧密固定在电镐(或电锤、锤钻)上, 连接杆长度应满足成型要求。

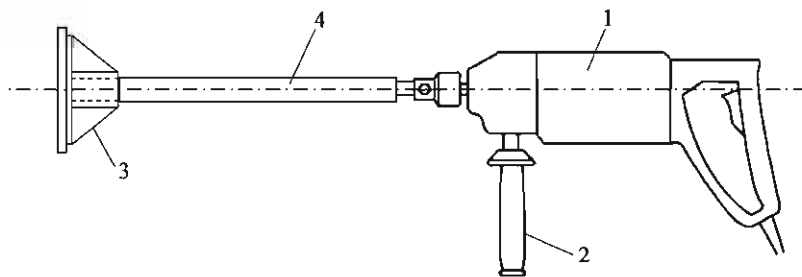


图 T 1224-1 振动锤结构示意图

1-电镐; 2-侧柄; 3-钢制夯锤; 4-连接杆

2.2 试模(最佳含水率和最大干密度试验): 应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成, 由击实筒, 可拆卸的套筒, 可拆卸的底板、垫块和拉杆等组成, 击实筒内壁光滑,

表面粗糙度  $R_a$  为  $3.2\mu\text{m}$ 。试模相关尺寸应满足表 T 1224-1 的要求。

表 T 1224-1 试模尺寸要求

| 击实筒           |               |            | 垫块            |              | 套筒            |            |            | 底板         |               |
|---------------|---------------|------------|---------------|--------------|---------------|------------|------------|------------|---------------|
| 内径<br>(mm)    | 高度<br>(mm)    | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm)    | 高度<br>(mm)   | 内径<br>(mm)    | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 中心处<br>厚度(mm) |
| $152 \pm 0.5$ | $170 \pm 0.5$ | $\geq 9.5$ | $151 \pm 0.2$ | $50 \pm 0.2$ | $152 \pm 0.5$ | $\geq 50$  | $\geq 9.5$ | $\geq 230$ | $\geq 13.5$   |

**2.3 底座和基础：**底座为  $560\text{mm} \times 560\text{mm}$ ，厚度不小于  $25\text{mm}$ ；底座固定在质量不小于  $50\text{kg}$  的混凝土基础上，试验时将试模在底座上夹紧。

**2.4 固定基础支撑导向架：**结构示意图如图 T 1224-2 所示。导向架高约  $1\,200\text{mm}$ ，固定在基础上。振动锤通过导向孔固定在移动支架上，振动锤击实时松开固定器，振动锤带动整个移动支架沿立柱上下自由垂直振动。振动锤、钢制夯锤和支撑支架的总质量为  $35\text{kg} \pm 5\text{kg}$ 。

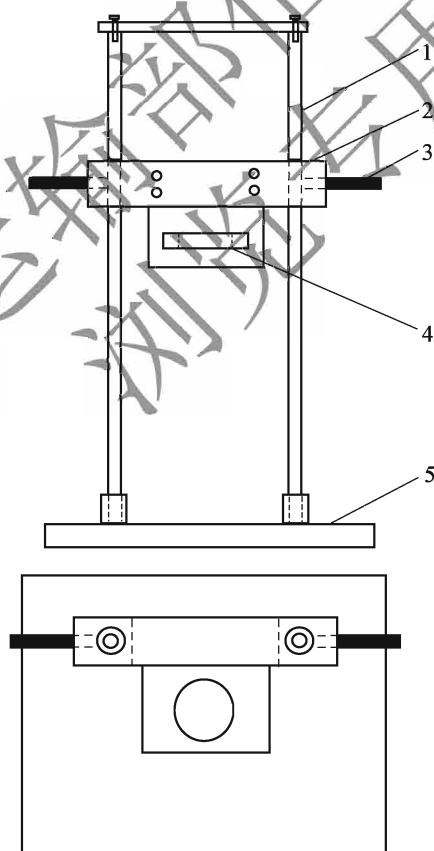


图 T 1224-2 支撑导向架结构示意图

1-立柱；2-可垂直移动支架；3-固定器；4-导向孔；5-底座

**2.5** 试验筛：孔径为 0.075mm、37.5mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.6** 天平：量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

**2.7** 烘箱：鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

**2.8** 金属盘：尺寸为 800mm×500mm、深不小于 80mm 的金属盘。

**2.9** 标准砂：规格 NS S202101，洁净的石英砂，二氧化硅含量不小于 95%，1.18mm 筛孔通过率为 100%，0.3mm 筛孔通过率小于 5%，密度标称值控制精度为  $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 。

注：标准砂应由专业单位生产、专业单位定值，稳定性试验不少于 2 年，应附相关定值证书。

**2.10** 拌和机：必要时配备，容积不小于 20L。

**2.11** 刮平尺：30mm×50mm×310mm，表面平整，其中刮平工作面长度方向上水平度为  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

**2.12** 其他工具：平底铲、量筒、喷水壶、橡皮锤、秒表、脱模器等。

### 3 振动锤压实性能检验

**3.1** 将振动锤、钢制夯锤和移动支架放到地秤上称量总质量；检查夯板的直径。

**3.2** 称取  $4200\text{g} \pm 5\text{g}$  干燥的标准砂，加  $147\text{g} \pm 1\text{g}$  水，拌和均匀后装入塑料袋中养生  $30\text{min} \pm 5\text{min}$ 。

**3.3** 将养生后的标准砂分成三等份，按本方法 6 进行振动锤压实试验，每层压实  $60\text{s} \pm 2\text{s}$ 。测定试件的干密度，精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

**3.4** 按照以上方法，测定 3 个试件干密度，取平均值作为振动锤的干密度试验结果，精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。如有两次结果之差大于  $0.020\text{g/cm}^3$ ，应重新进行试验。

**3.5** 计算振动锤成型试件的干密度，应不小于标准砂干密度标称值。

**3.6** 振动锤首次使用或使用中每一年检验一次。

## 4 试验准备

4.1 检查振动锤各部件是否有松动、运转正常，夯锤表面是否磨损。检查击实筒是否有凹痕、磨损。

4.2 试模尺寸的标定：

(1) 在击实筒底部测定内径 3 次，每转动 120°测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次；计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。

(2) 测定击实筒高度 3 次，每转动 120°测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度；按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算试模容积，精确至 0.01 cm<sup>3</sup>。

(3) 击实筒的内径、高度和垫块的高度，尺寸不符合时不得使用。

## 5 试样拌制

5.1 取各单档集料样品试验室内拌制试样

5.1.1 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品，风干或 50℃ ± 5℃ 烘干至表干，必要时将细集料用橡胶锤等敲散，防止结团。

5.1.2 按混合料配比称配一份试样；当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。按照本规程 T 1206 方法测定含水率，即原有含水率（风干含水率）。

注：也可取各档集料测定含水率，按配比计算混合料原有含水率。

5.1.3 按混合料配比称配一份试样；当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。一份试样质量为 5.5kg。将试样在金属盘内摊平，充分搅拌至均匀。

5.1.4 称取试样质量( $m$ )后移入拌和机内摊平，称取预定含水率相应的加水量均匀地喷洒在试样上，拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润备用。浸润时间一般为 2 ~ 4h。现场不具备拌和机时，也可以在金属盘内摊平，用小铲充分拌和均匀。

注：对于再生集料或工业矿渣材料，浸润时间可根据情况适当延长。

加水量按式(T 1224-1)计算，精确至 0.1g。

$$m_{w_m} = \frac{m}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w_m - w_0) \quad (\text{T 1224-1})$$

式中:  $m_{w_m}$ ——含水率为  $w_m$  时的加水量(g);  
 $m$ ——一份试样的质量(g);  
 $w_0$ ——试样原有含水率(风干含水率)(%);  
 $w_m$ ——预定的含水率(%).

#### 5.1.5 应拌制不少于2份试样。

5.1.6 当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 取样筛出 37.5mm 以上颗粒按《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) 中 T 0304 或 T 0308 方法测定吸水率、毛体积密度。

#### 5.2 直接取混合料样品拌制不同含水率的试样

5.2.1 将样品风干, 必要时  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干状态; 必要时用橡胶锤等敲散, 防止结团。取样按本规程 T 1215 方法测定 37.5mm 筛孔通过率。当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 应剔除样品中 37.5mm 筛上颗粒。

5.2.2 取样缩分一份试样, 按本规程 T 1206 方法测定含水率, 即原有含水率(风干含水率)。

5.2.3 取样缩分一份质量为 5.5kg 的试样。将试样在金属盘内摊平, 充分搅拌至均匀。

5.2.4 按 5.1.4 拌制预定的含水率的试样, 拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润。

#### 5.2.5 应拌制不少于2份试样。

5.2.6 当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 取样筛出 37.5mm 以上颗粒按 JTG 3432 中 T 0304 或 T 0308 方法测定吸水率、毛体积密度。

#### 5.3 直接取混合料样品拌制试样

##### 5.3.1 现场取样置于密闭容器中储存。

5.3.2 取样缩分得到满足要求质量的一份试样, 当样品 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。一份试样质量为 5.5kg。将试样在金属盘内摊平, 充分搅拌至均匀。

**5.3.3** 将试样拌和均匀后装入密闭容器或塑料袋内浸润备用。

注：样品从现场拌制到击实成型时间应不少于2~4h。

**5.3.4** 应拌制不少于2份试样。

**5.3.5** 当样品37.5mm筛孔筛余率大于5%时，取样筛出37.5mm以上颗粒按JTG 3432中T 0304或T 0308方法测定吸水率、毛体积密度。

## 6 试验步骤

**6.1** 称量干燥击实筒的质量。将试样倒在金属盘中拌匀、摊平；成型过程中注意覆盖，防止水分损失。

**6.2** 将击实筒在基座上固定，安装套筒，并与击实筒紧密固定。击实筒、套筒内壁薄涂一层隔离剂（凡士林或润滑油）。

**6.3** 将试样分成三等份。取一等份试样，用金属铲徐徐加入击实筒中（加入的第一层混合料应使击实后的试件略高于击实筒高度的1/3），装料后整平表面。可用橡皮锤敲击几次击实筒筒壁，使试样下沉。插入振动夯锤，振动锤压实 $60s \pm 2s$ 。

**6.4** 抬起振动夯锤，采用刮土刀或螺丝刀将击实筒内已经击实的试件表面“拉毛”，深约6mm。

**6.5** 按步骤6.3和6.4，进行第二层和第三层试样振实。第三层试样表面无须“拉毛”处理。

**6.6** 拆除套筒，从基座上移走击实筒。成型试件顶面高度不得低于击实筒，同时也不得高于击实筒顶面超过6mm，否则该试件作废。用刮土刀沿击实筒顶修平试件，用刮平尺检验试件表面与试模顶部边缘正好齐平，表面不平整处用较细颗粒修补，当修平过程中碰到粗颗粒时，将粗颗粒取出，用细料填补，稍用力压平。擦净击实筒表面、内侧壁的泥水，称量试件和击实筒的质量。

**6.7** 将击实筒内整个试件移入大金属盘中（注意把击实筒表面和底板的黏附物一同移入大金属盘中，必要时进行冲洗），必要时用橡胶锤将试件敲散，在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 温度烘干至恒重，冷却至室温后称量干燥试样的质量，计算含水率，精确至0.1%。烘干后的试样应废弃，不得重复利用。

## 6.8 按照以上步骤完成 2 份试样试验。

## 7 结果整理

### 7.1 试件的湿密度按式(T 1224-2)计算, 精确至 $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_w = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{T 1224-2})$$

式中:  $\rho_w$ ——试件的湿密度( $\text{g/cm}^3$ );

$m_1$ ——试模(不含套筒)的质量( $\text{g}$ );

$m_2$ ——试件和试模(不含套筒)的质量( $\text{g}$ );

$V$ ——试模的体积( $\text{cm}^3$ ), 根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算得到。

### 7.2 试件的干密度按式(T 1224-3)计算, 精确至 $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w_a} \quad (\text{T 1224-3})$$

式中:  $\rho_d$ ——试件干密度( $\text{g/cm}^3$ );

$w_a$ ——试件的实测含水率(%)。

### 7.3 当 37.5mm 超粒径颗粒含量超过 5% 时, 应进行干密度和含水率的校正。

校正后的试件干密度按式(T 1224-4)计算, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho'_d = \frac{1}{\frac{1 - 0.01P}{\rho_d} + \frac{0.01P}{\rho_b}} \quad (\text{T 1224-4})$$

式中:  $\rho'_d$ ——校正后的试件干密度( $\text{g/cm}^3$ );

$P$ ——样品中超粒径颗粒质量百分比(%);

$\rho_b$ ——超粒径颗粒的毛体积密度( $\text{g/cm}^3$ )。

校正后的试件含水率按式(T 1224-5)计算, 精确至 0.1%。

$$w' = w_a(1 - 0.01P) + 0.01Pw_c \quad (\text{T 1224-5})$$

式中:  $w'$ ——校正后的试件含水率(%);

$w_c$ ——超粒径颗粒的吸水率(%).

### 7.4 同一含水率条件下, 取两个试件的算术平均值作为干密度的试验结果, 精确至 $0.001\text{g/cm}^3$ 。

注：当试验用于确定最大干密度和最佳含水率时，无须计算同一含水率下的干密度平均值。

## 8 允许误差

干密度重复性试验的允许误差为  $0.050\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 9 报告

- 9.1 试验项目名称和执行标准。
- 9.2 样品的编号、名称、产地和规格。
- 9.3 接样日期、样品描述。
- 9.4 试验日期、样品缩分方法。
- 9.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 9.6 振动锤频率等参数。
- 9.7 试件尺寸，含水率及干密度试验结果。
- 9.8 当含有  $37.5\text{mm}$  超粒径颗粒时，报告超粒径颗粒含量。
- 9.9 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 振动锤法简单实用，国际上广泛用于无结合料粒料材料试验，包括最大干密度、最佳含水率，以及 CBR、三轴、冻胀、渗透等试验，相应的试验方法有 EN 13286-4、EN 13286-7、BS 1377-4、AASHTO T 307 和 EN 13286-7 等。振动锤压实试验主要参数对照见表 T 1224-2。

本规程制定了 4 项振动锤压实方法，分别用于确定最佳含水率与最大干密度、成型三轴试验试件、成型冻胀试验试件和成型渗透试验试件。

本方法为振动锤法成型试件用于最佳含水率与最大干密度试验。

表 T 1224-2 振动锤压实试验主要参数对照

| 来源           | EN 13286-4                                                       | BS 1377-4(3.7)                                       | ASTM D7382                                                                    |
|--------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 目的           | 确定最佳含水率和最大干密度                                                    | 确定最佳含水率和最大干密度                                        | 确定最大干密度                                                                       |
| 混合料规格        | 40mm 筛孔通过率不大于 5%，直接成型；40mm 筛孔通过率为 5% ~ 10% 时，采用 20 ~ 40mm 等量集料代替 | 37.5mm 筛孔通过率 100%，20mm 筛孔通过率大于 70%                   | 最大粒径不超过 50mm，0.075mm 筛孔通过率不超过 15%                                             |
| 试件直径和高度 (mm) | $\phi 150 \times 127$                                            | $\phi 152 \times 127$                                | $\phi 152 \times 116$ (19mm 筛孔通过率不小于 70%) 或 $\phi 280 \times 230$ (最大粒径 50mm) |
| 振动器          | 电镐、电锤，功率不小于 0.6kW，频率 25 ~ 60Hz                                   | 电镐、电锤，功率 0.6 ~ 0.8kW，频率 25 ~ 60Hz                    | 电镐、电锤，频率 53 ~ 58Hz，自重 5.4 ~ 9.1kg，功率 0.5 ~ 0.7kW                              |
| 夯锤           | 直径 145mm $\pm$ 2mm，厚度不小于 10mm，连杆 + 锤质量不大于 3kg                    | 直径 145mm $\pm$ 2mm，厚度不小于 10mm，连杆 + 锤质量不大于 3kg        | 直径 146mm $\pm$ 0.2mm，厚度 9.5mm                                                 |
| 静压力          | 防止振动时夯锤跳起，要求振动锤及附加质量为 30 ~ 40kg，即静压力为 18.2 ~ 24.2kPa             | 防止振动时夯锤跳起，要求振动锤及附加质量为 30 ~ 40kg，即静压力为 18.2 ~ 24.2kPa | 17 ~ 34kPa                                                                    |
| 振实能力验证       | 标准砂检验，最大干密度不小于 1.74g/cm <sup>3</sup>                             | 标准砂检验，最大干密度不小于 1.74g/cm <sup>3</sup>                 | 标准砂检验，最大干密度不小于 1.76g/cm <sup>3</sup>                                          |
| 支架           | 手动或采用支架                                                          | 手动或采用支架                                              | 采用支架                                                                          |
| 振实           | 3 层，每层 60s $\pm$ 2s                                              | 3 层，每层 60s $\pm$ 2s                                  | 152mm: 3 层，每层 60s；<br>280mm: 3 层，每层 8 处，每处 52s                                |

## T 1225—2026 轮碾成型试验

## 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于试验室用轮碾法成型无结合料粒料试件，用于永久变形试验(车辙仪法)。

1.2 本方法适用于最大粒径不大于 53mm 的无结合料粒料。

## 2 仪器与材料

**2.1** 轮碾成型机和试模：应符合《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410) 中 T 0703 的相关要求。

**2.2** 天平：量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

**2.3** 试验筛：孔径为 0.075mm 和 37.5mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.4** 烘箱：鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

**2.5** 金属盘：尺寸为 800mm × 500mm、深不小于 80mm 的金属盘。

**2.6** 拌和机：必要时配备，容积不小于 20L。

**2.7** 水平靠尺：长不小于 300mm。

**2.8** 塑料膜：厚度约 0.4mm，长 × 宽略大于 300mm × 300mm。

**2.9** 密封材料：柔性双组分环氧树脂密封胶或黏结剂，能够封水，固化后常温条件下不黏轮。

**2.10** 其他工具：平底铲、刮土刀、量筒、喷水壶、橡皮锤等。

## 3 试验准备

**3.1** 检查轮碾成型机、拌和机是否运行正常。

**3.2** 检查试模表面是否有凹痕、磨损，拼装试模。

**3.3** 试模有效容积的标定：用游标卡尺准确测量试模的长、宽、高，尺寸不符合要求时不得使用。测定试模高度时，先测定第一层试模，然后安装第二层试模，单层厚度和双层厚度均应满足要求。根据实测的长、宽、高计算试模的有效容积，精确至 0.01cm<sup>3</sup>。

## 4 试样拌制

**4.1** 根据样品公称最大粒径选择试模尺寸,其中公称最大粒径不大于31.5mm时采用长300mm、宽300mm、厚100mm的试模,公称最大粒径大于31.5mm时采用长300mm、宽300mm、厚150mm的试模。

### 4.2 确定混合料成型条件

**4.2.1** 根据设计标准或工程实际情况,可选择如下方法确定最大干密度和最佳含水率。

- (1) T 1220 重型击实试验;
- (2) T 1221 振动压实试验;
- (3) T 1224 振动锤压实试验。

**4.2.2** 根据材料应用层位,采用工程规定的压实度标准。

**4.2.3** 取最佳含水率作为混合料拌制时目标含水率,记为 $w_{m0}$ 。采用最大干密度乘以压实度标准作为目标干密度,记为 $\rho_{d0}$ 。当采用其他条件时,应在报告中注明。

**4.2.4** 室内压实试件含水率与目标含水率之差不应超过 $\pm 1\%$ ,成型试件干密度与目标干密度之差不应超过 $\pm 2\%$ 。

### 4.3 取各单档集料样品试验室内拌制试样

**4.3.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品,风干或 $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘干至表干,必要时将细集料用橡胶锤等敲散,防止结团。

**4.3.2** 按混合料配比配制一份试样,按本规程 T 1206 方法测定含水率,即原有含水率(风干含水率),记为 $w_0$ 。

**4.3.3** 一个试件所需的试样干质量按式(T 1225-1)计算。

$$m_d = V\rho_{d0} + \delta \quad (\text{T 1225-1})$$

式中: $m_d$ ——一个试件所需试样的干质量(g);

$V$ ——一个试模的容积( $\text{cm}^3$ );

$\rho_{d0}$ ——样品的目标干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\delta$ ——试件成型过程中试样损耗质量(g),约为50g。

4.3.4 称取的一份自然含水率的试样质量按式(T 1225-2)计算。

$$m_{ad} = (m_d + 500) \times \left(1 + \frac{w_0}{100}\right) \quad (\text{T 1225-2})$$

式中:  $m_{ad}$ ——称取的一份自然含水率的试样干质量(g), 含一份成型试样、一份含水率试样;

500——含水率试验所需的一份干燥试样质量(g);

$w_0$ ——试样原有含水率(风干含水率)(%)。

4.3.5 按混合料配比称配一份试样; 当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。试样质量应满足  $m_{ad} \pm 10\text{g}$  的要求。将试样在金属盘内摊平, 充分搅拌至均匀。

4.3.6 称取目标含水率相应的水量均匀地喷洒在试样上, 拌和均匀后装入密闭容器或双层塑料袋内, 称量容器(塑料袋)和试样总质量。将试样在  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  下浸润不少于 12h。现场不具备拌和机时, 也可以在金属盘内用平底铲充分拌和均匀。

加水量按式(T 1225-3)计算, 精确至 0.1g。

$$m_{w_m} = \frac{m_{ad'}}{1 + 0.01w_0} \times \frac{w_{m0} - w_0}{100} \quad (\text{T 1225-3})$$

式中:  $m_{w_m}$ ——含水率为  $w_m$  时的加水量(g);

$m_{ad'}$ ——实际称取的一份自然含水率的试样干质量(g);

$w_{m0}$ ——目标含水率(%)。

#### 4.4 直接取混合料样品拌制试样

4.4.1 按本规程 T 1201 取样, 将样品风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干状态, 必要时用橡胶锤等敲散, 防止结团。当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 应剔除样品中 37.5mm 筛上颗粒。

4.4.2 取一份试样, 按本规程 T 1206 方法测定含水率, 即原有含水率(风干含水率), 记为  $w_0$ 。

4.4.3 称取一份试样, 按照本方法 4.3 的要求拌制试样。

4.5 应拌制不少于 3 份试样。

## 5 试验步骤

**5.1** 将成型用的试模内壁擦拭洁净，并四壁涂抹隔离剂。将试样倒在金属盘中拌匀、摊平；成型过程中注意覆盖，防止水分损失。

**5.2** 取一个试模放在平地上，取下第2层试模。将拌制的试样分成两等份，用料铲取一份试样由边至中按顺序转圈装入第一层试模中，中部要略高于四周。用小型击实锤由边至中转圈夯实一遍，整平成凸圆弧形。

**5.3** 将盛有试样的试模置于轮碾机的平台上，试样表面平铺一张塑料膜，轻轻放下碾压轮，调整总荷载为9kN(线荷载为300N/cm)。

**5.4** 启动轮碾机，碾压2个往返(4次)后停止；卸除荷载，抬起碾压轮，将试件调转方向，再加相同荷载碾压至试件表面与试模顶部边缘正好齐平，采用水平靠尺沿长度方向检验。

**5.5** 记录总碾压次数。若碾压超过30个往返(60次)，则停止试验。适当增加总荷载，继续压实至试件表面与试模顶部边缘正好齐平，采用水平靠尺沿长度方向检验。此时需在报告中予以说明。

**5.6** 第一层碾压完成后，从轮碾机的平台上移出试模、放在平地上，取走塑料膜，采用刮土刀或螺丝刀将击实筒内已经击实的试件表面“拉毛”。安装第2层试模，装入第2份试样，再平铺一张塑料膜，按以上方法压实至试件表面与试模顶部边缘正好齐平，采用水平靠尺沿长度方向检验。

**5.7** 按照上述方法成型3块试件。

**5.8** 压实成型后试件，立即采用密封材料涂抹一薄层，进行整个试件密封；涂抹后表面应平整。在试模上进行编号标识，待密封材料固化后尽快进行后续永久变形试验。

## 6 报告

**6.1** 试验项目名称和执行标准。

**6.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

- 6.3 接样日期、样品描述。
- 6.4 试验日期、样品缩分方法。
- 6.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 6.6 混合料压实度标准、最佳含水率及最大干密度。
- 6.7 试件尺寸、含水率及碾压次数。
- 6.8 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1 本方法成型板块状试件用于车辙试验，该试验方法与沥青混合料轮碾成型试验基本相同，只是无结合料粒料无须加热。

4.1 为了使成型的试件压实均匀，试件尺寸应与样品的公称最大粒径相匹配。根据碾压厚度与混合料公称最大粒径3倍关系，当公称最大粒径不大于31.5mm时，采用10cm厚度的试模；当公称最大粒径为37.5~53mm时，可采用15cm厚度的试模。

### T 1226—2026 最大干密度和最佳含水率试验

#### 1 适用范围

1.1 本方法适用于室内成型不同含水率的试件，测定干密度，根据干密度-含水率曲线，确定其最佳含水率和最大干密度。

1.2 本方法也适用于无黏性、自由排水混合料确定最大干密度、有效压实含水率范围或最佳含水率。

#### 2 仪器与材料

2.1 重型击实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1220 的规定。

2.2 振动压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1221 的规定。

2.3 振动台压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1222 的规定。

**2.4** 表面振动压实试验相关仪具与材料应符合本规程 T 1223 的规定。

**2.5** 振动锤压实试验相关仪具与材料应符合本规程 T 1224 的规定。

### 3 成型方法选择

**3.1** 对于一般无结合料粒料，可选择如下成型方法确定最大干密度和最佳含水率。

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验；
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验；
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

**3.2** 对于无黏性、自由排水无结合料粒料，可选择如下成型方法确定最大干密度、有效压实含水率范围或最佳含水率。

- (1) 振动台压实试验(确定最大干密度和有效压实含水率范围)；
- (2) 表面振动压实试验(确定最大干密度和有效压实含水率范围)；
- (3) 重型击实试验(仅限 B 试模，确定最大干密度和最佳含水率)；
- (4) 振动压实试验(确定最大干密度和最佳含水率)；
- (5) 振动锤压实试验(确定最大干密度和最佳含水率)。

### 4 试验步骤

#### 4.1 一般无结合料粒料试验步骤

**4.1.1** 按本规程 T 1220、T 1221 或 T 1224 进行试验。

**4.1.2** 拌制不少于 10 份试样。预定不少于 5 个含水率，依次相差 0.5% ~ 2%。

**4.1.3** 将试样分成 2 组。将每组试样按照预定含水率成型试件，测定试件含水率、干密度，必要时进行含水率、干密度修正。

**4.1.4** 必要时测定样品的表观相对密度。若样品是单档集料，取各单档集料测定表观密度；若样品是混合料，则用 4.75mm 试验筛过筛，取 4.75mm 以上颗粒和 4.75mm 以下颗粒，分别测定表观密度。

#### 4.2 无黏性、自由排水无结合料粒料试验步骤

**4.2.1** 振动台压实法：

- (1)按本规程 T 1222 进行试验。
- (2)拌制 3 份试样,在饱和状态下成型试件,测定试件含水率、干密度。
- (3)若样品是单档集料,取各单档集料测定表观密度;若样品是混合料,则用 4.75mm 试验筛过筛,取 4.75mm 以上颗粒和 4.75mm 以下颗粒,分别测定表观密度。

#### 4.2.2 表面振动压实法:

- (1)按本规程 T 1223 进行试验。
- (2)拌制 3 份试样,在饱和状态下成型试件,测定试件含水率、干密度。
- (3)若样品是单档集料,取各单档集料测定表观密度;若样品是混合料,则用 4.75mm 试验筛过筛,取 4.75mm 以上颗粒和 4.75mm 以下颗粒,分别测定表观密度。

#### 4.2.3 重型击实法:

- (1)按本规程 T 1220 进行试验。
- (2)称取不少于 10 份试样,每份试样 9kg。预定不少于 5 个含水率,宜依次相差 0.5% ~2%。
- (3)将试样分成 2 组。将每组试样按照预定的不同含水率加水拌制。每份拌制的试样中缩分 1/3 混合料,按本规程 T 1206 测定初始含水率;剩余 2/3 混合料成型试件,测定试件含水率、干密度,必要时进行含水率、干密度修正。

#### 4.2.4 振动压实法:

- (1)按本规程 T 1221 进行试验。
- (2)其他同本方法 4.2.3。

#### 4.2.5 振动锤压实法:

- (1)按本规程 T 1224 进行试验。
- (2)其他同本方法 4.2.3。

## 5 结果整理

### 5.1 一般无结合料粒料

5.1.1 根据第一组试样试验结果,以干密度为纵坐标,试件含水率为横坐标,绘制干密度-含水率曲线,如图 T 1226-1 所示。

5.1.2 必要时绘制 0% 空隙率时的干密度曲线,即 100% 饱和密度曲线。

按式(T 1226-1)计算不同空隙率下的干密度,精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$$\rho_d = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{1}{\rho_{sa}} + \frac{w}{100\rho_{wa}}} \quad (\text{T 1226-1})$$

式中:  $\rho_d$ ——材料干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V_a$ ——空隙率(%);

$\rho_{sa}$ ——材料表观密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 按式(T 1226-2)计算;

$w$ ——含水率(%);

$\rho_{wa}$ ——水的密度, 取  $1\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_{sa} = \frac{100}{\frac{P_1}{\rho_{sa1}} + \frac{P_2}{\rho_{sa2}} + \cdots + \frac{P_n}{\rho_{san}}} \quad (\text{T 1226-2})$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\cdots$   $P_n$ ——各单档集料的质量百分比(%); 或 4.75mm 以上颗粒、4.75mm 以下颗粒质量百分比(%), 其和为 100%;

$\rho_{sa1}$ 、 $\rho_{sa2}$ 、 $\cdots$   $\rho_{san}$ ——各单档集料的表观密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 或 4.75mm 以上颗粒、4.75mm 以下颗粒的表观密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

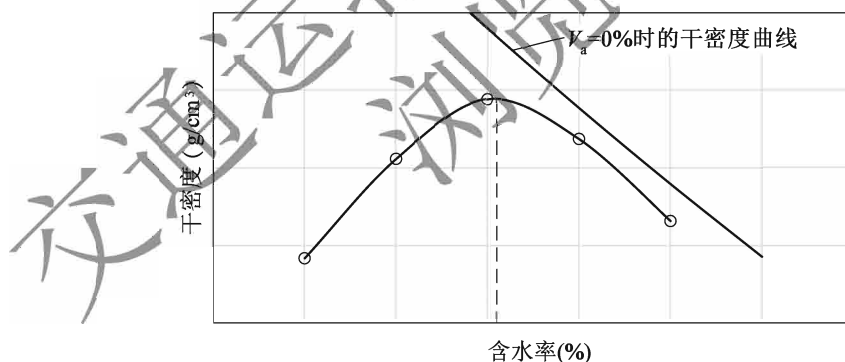


图 T 1226-1 干密度-含水率关系曲线

**5.1.3** 采用最小二乘法进行干密度-含水率曲线拟合, 确定峰值点对应的干密度和含水率, 即为第一组试样的最大干密度、最佳含水率。如曲线的峰值点不明显, 或相关性系数( $R^2$ )小于 0.95, 应进行补点或重做。干密度-含水率曲线中, 最佳含水率两侧均至少两个含水率, 且最佳含水率  $\pm 1\%$  含水率范围内至少有 3 个含水率。

注: 不要求拟合曲线通过测点。

**5.1.4** 绘制第二组试样的干密度-含水率曲线，确定第二组试样的最大干密度、最佳含水率。

**5.1.5** 当两组最大干密度之差不大于  $0.030\text{g/cm}^3$ ，且最佳含水率之差不大于 1% 时，取两组最大干密度的算术平均值作为最大干密度试验结果，记为  $\rho_{\text{dmax}}$ ，精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ ；取两组最佳含水率的算术平均值作为最佳含水率试验结果，记为  $w_{\text{op}}$ ，精确至 0.1%。否则，该试验结果无效。

**5.1.6** 若干密度-含水率曲线不能得出峰值点，则可按自由排水无结合料粒料进行试验。

## **5.2 自由排水无结合料粒料(振动台压实法)**

**5.2.1** 若 3 个试件最大干密度之差不大于  $0.030\text{g/cm}^3$ ，取 3 个试件最大干密度的算术平均值作为最大干密度试验结果，记为  $\rho_{\text{dmax}}$ ，精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ ；否则，该试验结果无效。

**5.2.2** 饱和状态下混合料含水率按式(T 1226-3)计算，精确至 0.1%。

$$w_{\text{ZAV}} = \left( \frac{1}{\rho_{\text{dmax}}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \times 100 \rho_w \quad (\text{T 1226-3})$$

式中： $w_{\text{ZAV}}$ ——0% 空隙率时的混合料含水率(%)。

**5.2.3** 取  $0.8w_{\text{ZAV}} \sim w_{\text{ZAV}}$  含水率作为有效压实含水率范围。

## **5.3 自由排水无结合料粒料(表面振动压实法)**

**5.3.1** 若 3 个试件最大干密度之差不大于  $0.050\text{g/cm}^3$ ，取 3 个试件最大干密度的算术平均值作为最大干密度试验结果，记为  $\rho_{\text{dmax}}$ ，精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ ；否则，该试验结果无效。

**5.3.2** 饱和状态下混合料含水率按式(T 1226-3)计算，精确至 0.1%。

**5.3.3** 取  $0.8w_{\text{ZAV}} \sim w_{\text{ZAV}}$  含水率作为有效压实含水率范围。

## **5.4 自由排水无结合料粒料(重型击实法、振动压实法、振动锤压实法)**

#### 5.4.1 试件水分损失率按式(T 1226-4)计算, 精确至0.1%。

$$S_w = w_i - w_{ia} \quad (\text{T 1226-4})$$

式中:  $S_w$ ——试件水分损失率(%);

$w_i$ ——成型之前的初始含水率(%);

$w_{ia}$ ——成型之后实测的试件含水率(%)。

#### 5.4.2 根据第一组试样试验结果, 确定泌水状态含水率, 记为 $w_B$ :

(1) 当某一初始含水率相应的试件水分损失率为0.3%~0.5%, 则取  $w_B = w_i$ 。

(2) 当某一初始含水率相应的试件水分损失率小于0.3%, 而其相邻初始含水率相应的试件水分损失率大于0.5%, 且两个相邻初始含水率之差不大于1%时, 取  $w_B = (w_i + w_{i+1})/2$ 。

(3) 若无符合以上条件含水率, 则进行补点。

5.4.3 根据第一组试样试验结果, 以干密度为纵坐标, 实测的试件含水率为横坐标, 绘制干密度-含水率曲线(图 T 1226-2)。采用最小二乘法进行干密度-含水率曲线拟合, 确定  $w_B$  含水率对应的干密度作为第一组的最大干密度。

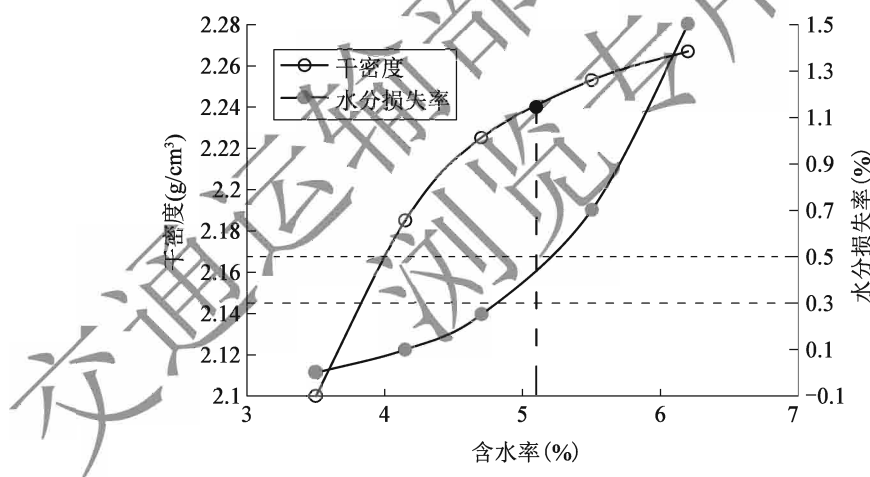


图 T 1226-2 干密度-含水率曲线

计算示例:  $w_1 = 3.5\%$ ,  $S_{3.5} = 0\%$ ;  $w_2 = 4.15\%$ ,  $S_{4.15} = 0.1\%$ ;  $w_3 = 4.7\%$ ,  $S_{4.7} = 0.25\%$ ;  $w_4 = 5.5\%$ ,  $S_{5.5} = 0.7\%$ ;  $w_5 = 6.2\%$ ,  $S_{6.2} = 1.5\%$ , 则  $w_B = (4.7\% + 5.5\%)/2 = 5.1\%$ 。

#### 5.4.4 按同样方法, 根据第二组试样试验结果确定最大干密度、泌水状态含水率。

5.4.5 当两组试样的最大干密度之差不大于  $0.030\text{g/cm}^3$ , 且泌水状态含水率之差不大于1%时, 取两组最大干密度的算术平均值作为最大干密度试验结果, 记为  $\rho_{dB}$ , 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ ; 取两组泌水状态含水率的算术平均值作为最佳含水率试验结果, 记为  $w_{op}$ , 精确至0.1%。否则, 该试验结果无效。

## 6 报告

- 6.1 试验项目名称和执行标准。
- 6.2 样品的编号、名称、产地和规格。
- 6.3 接样日期、样品描述。
- 6.4 试验日期、样品缩分方法。
- 6.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 6.6 成型方法和成型主要参数。
- 6.7 绘制干密度-含水率曲线(振动台压实法和表面振动压实法不需要)。
- 6.8 含水率及其相应的干密度试验结果,最大干密度、最佳含水率或有效压实含水率范围。
- 6.9 泌水状态含水率(必要时),绘制水分损失率-含水率曲线(必要时)。
- 6.10 当含有超粒径颗粒时,报告超粒径颗粒含量,毛体积密度和含水率试验结果。
- 6.11 要说明的其他内容。

### 条文说明

3.1 对于一般无结合料粒料,根据相关标准要求或工程实际情况,选择重型击实、振动压实或振动锤压实中的一种成型方法。需要针对不同成型方法确定不同的现场压实度控制标准,例如国际上对于粒料基层和底基层,重型击实法的压实度标准为98%和95%,相应振动压实法的压实度标准可为95%和93%。

3.2 对于无黏性、自由排水材料,其干密度-含水率曲线没有峰值,无法按照峰值来确定最大干密度和最佳含水率。

对于无黏性、自由排水材料,最大干密度是现场工程碾压控制的重要指标,一般采用振动台压实或表面振动压实来确定最大干密度。根据大量工程实践,按最大干密度计算的饱和状态含水率 $w_{ZAV}$ 可作为压实的最大含水率, $0.8w_{ZAV}$ 可作为最小含水率,因此

将  $0.8w_{ZAV} \sim w_{ZAV}$  作为此类混合料有效压实含水率范围,以指导工程碾压含水率的控制。

对于无黏性、自由排水材料,当含水率逐渐增加超过某一临界值,混合料压实成型过程中部分自由水开始泌出、聚集,此状态对应的含水率称为泌水含水率,接近无黏性、自由排水材料碾压时的最佳含水率。此泌水含水率和其相应的干密度可以用于工程碾压含水率和压实度的控制,根据工程应用习惯,将此泌水含水率和其相应的干密度称为最佳含水率和最大干密度。

对于无黏性、自由排水材料,表面振动压实试验确定的干密度最大,其次为振动台压实试验,重型击实测定的干密度最低,且往往比现场的干密度偏低。但是,无论是表面振动压实、振动台压实试验,还是重型击实试验,均无法得到最大干密度的绝对值,仅仅是相对值。在工程应用时,需要针对不同成型方法确定不同的现场压实度控制标准。

4.2.3 无结合料粒料最佳含水率一般为 4%~10%,级配碎石、级配砾石、未筛分碎石等一般为 4%~6%,粉料偏高、塑限指数较高的砂砾土可达 10%。因此,对于级配碎石、级配砾石、未筛分碎石,最佳含水率较低,设定 5~6 个不同含水率的间隔宜为 0.5%~1.0%;预定最佳含水率相邻的两个含水率,其与预定的最佳含水率间隔宜为  $\pm 0.5\%$ ;距离预定最佳含水率较远的测点含水率可间隔  $\pm 1.0\%$ 。对于其他无结合料粒料,含水率间隔可选 1.0%~2.0%。

5.1.6 对于垫层或开级配、间断级配的粒料材料,多属于无黏性、自由排水材料,其干密度-含水率曲线无明显峰值,无法得到最大干密度和最佳含水率。实际上一些粉料含量低、级配较粗的密级配的粒料材料,也具有无黏性、自由排水材料特性。凡是无法得到最大干密度和最佳含水率的粒料,均可按无黏性、自由排水材料进行试验。

## T 1227—2026 三轴试验试件成型方法

### 1 适用范围

1.1 本方法适用于振动锤压实法、重型击实法成型无结合料粒料试件,用于三轴试验。

1.2 本方法适用于成型直径  $\times$  高为 152mm  $\times$  305mm 的圆柱形试件。

1.3 本方法适用于 37.5mm 筛余率不大于 10% 的无结合料粒料。

注:三轴试验试件的成型宜优先采用振动锤压实法。

### 2 仪器与材料

2.1 试模:采用如图 T 1227-1 试模,由击实筒、上下压盘和多孔垫块等组成。

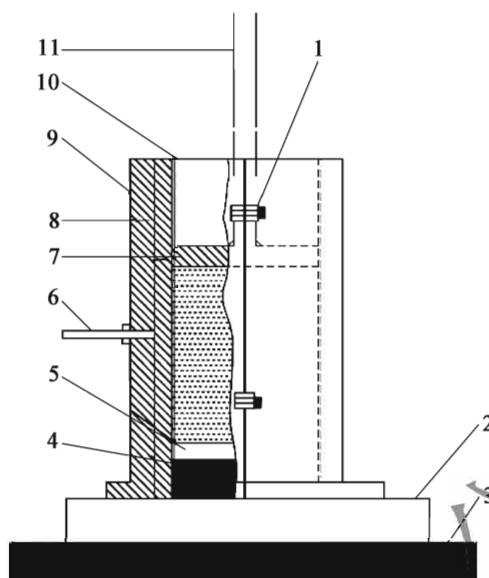


图 T 1227-1 试模结构示意图

1-试模夹具；2-底座；3-基础；4-下压盘；5-多孔垫块；6-真空接口；7-分板；8-多孔塑料衬垫（必要时）；9-铝或钢对开击实筒；10-乳胶膜；11-连接杆

(1) 击实筒：由铝或钢制的对开击实筒，内壁光滑，表面粗糙度  $R_a$  为  $3.2\mu\text{m}$ ；击实筒高度不小于  $381\text{mm}$ ，内径为  $152\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ，壁厚不小于  $9.5\text{mm}$ 。

(2) 上下压盘：直接采用三轴室的上下压盘，由刚性、耐腐蚀、不透水材料制成，直径等于或略大于试件内径，内部设计排水通道。上下压盘的侧面应光滑、无划痕。

(3) 多孔垫块：厚  $6\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，直径等于或略小于击实筒内径，铜或不锈钢材质。当多孔垫块有堵塞时，需要更换新多孔垫块。

**2.2 底座和基础：**宜拆除三轴室后，直接将试模固定在三轴仪三轴室底座上或升降台上，进行试件成型。对于静三轴抗剪强度试验，必要时可采用专用底座和基础，底座为  $560\text{mm} \times 560\text{mm}$ ，厚度不小于  $25\text{mm}$ ；底座固定在质量不少于  $50\text{kg}$  混凝土基础上，试验时将试模在底座上夹紧。

**2.3 乳胶膜：** $0.25 \sim 0.80\text{mm}$  厚的乳胶膜，未扩展时原始直径应不小于试件直径的  $95\%$ ，一个试件上套有 2 个或以上乳胶膜时，其总厚度不超过试件直径的  $0.8\%$ 。乳胶膜长度略长于试件高度、上下压盘厚度之和。

**2.4 真空源：**带气泡室和可调压的真空源。

**2.5 试验筛：**孔径为  $0.075\text{mm}$ 、 $37.5\text{mm}$  的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.6 天平：**量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

**2.7 烘箱：**鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 方法中 2.1 的要求。

**2.8 金属盘：**尺寸为 800mm × 500mm、深度不小于 80mm 的金属盘。

**2.9 标准砂：**规格 NS S202101，洁净的石英砂，二氧化硅含量不小于 95%，1.18mm 通过率为 100%，0.3mm 通过率小于 5%，密度标称值控制精度为  $\pm 0.02\text{g/cm}^3$ 。

注：标准砂应由专业单位生产、专业单位定值，稳定性试验不少于 2 年，应附相关定值证书。

**2.10 拌和机（可选）：**容积不小于 20L。

**2.11 刮平尺：**30mm × 50mm × 310mm，表面平整，其中刮平工作面长度方向上水平度不大于  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

**2.12 滤纸：**直径 150mm 滤纸。

**2.13 振动锤**应符合本规程 T 1224 的规定。

**2.14 多功能电动击实仪**应符合本规程 T 1220 的规定。

**2.15 其他工具：**平底铲、量筒、喷水壶、橡皮锤、秒表、钢直尺、游标卡尺、脱模器、O 形密封圈、张膜器等。

### 3 成型仪具性能检验

**3.1** 按本规程 T 1224 检验振动锤的压实性能。

### 4 试验准备

**4.1** 检查击实筒、上下压盘等是否有凹痕、磨损。拼装试模，检查各部分是否紧密连接。

**4.2 试模尺寸的标定。**

(1) 在击实筒底部测定内径 3 次，每转动 120°测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次；计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。按同样方法测定上下压盘和多孔

垫块的直径。不满足要求的，不得使用。

(2) 测定击实筒高度 3 次，每转动 120°测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度。按照同样的方法测定上下压盘和两个多孔板的高度。不满足要求的，不得使用。

(3) 测定乳胶膜的厚度，不满足要求的，不得使用。

**4.3** 检查成型机各部件是否松动、运转正常，夯锤（或压头）表面是否磨损。

## 5 试样拌制

### 5.1 确定混合料成型条件

**5.1.1** 根据设计标准或工程实际情况，可选择如下方法确定最大干密度和最佳含水率。

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验；
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验；
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

**5.1.2** 根据材料层位，采用工程规定的压实度标准。

**5.1.3** 取 (90% ~ 100%)  $w_p$  作为混合料拌制时目标含水率，记为  $w_{m0}$ 。采用最大干密度乘以压实度标准作为目标干密度，记为  $\rho_{d0}$ 。当采用其他条件时应在报告中注明。

**5.1.4** 室内压实试件含水率与目标含水率之差不应超过  $\pm 0.5\%$ ，成型试件干密度与目标干密度之差不应超过  $\pm 1.0\%$ 。

### 5.2 试验室取各单档集料样品拌制试样

**5.2.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品，风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干，必要时将细集料用橡胶锤等敲散，防止结团。

**5.2.2** 按混合料配比称配一份含水率试验试样；当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时，应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。试样质量应满足本规程表 T 1206-1 的要求。按本规程 T 1206 测定含水率，即原有含水率（风干含水率），记为  $w_0$ 。

**5.2.3** 一个试件所需干燥试样的质量按式 (T 1227-1) 计算，精确至 1g；

$$m_d = 3.14d^2 \times 30.5\rho_{d0} + \delta \quad (\text{T 1227-1})$$

式中： $m_d$ ——一个试件所需干燥试样的质量 (g)；

$d$ ——击实筒实测半径减去乳胶膜厚度 (cm);

30.5——试件高度 (cm);

$\rho_{d0}$ ——目标干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\delta$ ——试件成型过程中试样损耗质量 (g), 为 50g。

**5.2.4** 称取的一份自然含水率的试样质量按式 (T 1227-2) 计算。

$$m_{ad} = (m_d + 500) \times \left(1 + \frac{w_0}{100}\right) \quad (\text{T 1227-2})$$

式中:  $m_{ad}$ ——称取的一份自然含水率的试样干质量 (g), 含一份成型试样和一份含水率试样;

500——含水率试验所需的一份干燥试样质量 (g);

$w_0$ ——试样原有含水率 (风干含水率) (%)。

**5.2.5** 按混合料配比称配一份试样; 当 37.5mm 筛余率大于 5% 时, 应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。试样质量应满足  $m_{ad} \pm 10\text{g}$  的要求。将试样在金属盘内摊平, 充分搅拌至均匀。

**5.2.6** 称取目标含水率相应的水量, 将其均匀地喷洒在试样上, 拌和均匀后装入密闭容器或双层塑料袋内, 称量容器 (塑料袋) 和试样总质量。将试样在  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  下浸润不小于 6h。现场不具备拌和机时, 也可以在金属盘内用平底铲充分拌和至均匀。

加水量按式 (T 1227-3) 计算, 精确至 0.1g。

$$m_{w_m} = \frac{m'_{ad}}{1 + 0.01w_0} \times \frac{w_{m0} - w_0}{100} \quad (\text{T 1227-3})$$

式中:  $m_{w_m}$ ——含水率为  $w_m$  时的加水量 (g);

$m'_{ad}$ ——实际称取的一份自然含水率的试样干质量 (g);

$w_{m0}$ ——目标含水率 (%)。

### 5.3 直接取混合料样品拌制试样

**5.3.1** 按本规程 T 1201 取样, 将样品风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干状态, 必要时用橡胶锤等敲散, 防止结团。当 37.5mm 筛孔筛余率大于 5% 时, 应剔除样品中 37.5mm 筛上颗粒。

**5.3.2** 取一份试样, 按本规程 T 1206 测定含水率, 即原有含水率 (风干含水率), 记为  $w_0$ 。

**5.3.3** 称取一份试样, 按照本方法 5.2 的要求拌制试样。

## 6 试验步骤（振动锤法）

**6.1** 击实筒内壁、上下压盘侧面薄涂一层隔离剂（凡士林或润滑油）。将多孔板和滤纸适当预湿。将下压盘对中放在底座上，再对中放上多孔板和滤纸；套上乳胶膜，用 O 形密封圈将乳胶膜底端在下压盘上固定、密封。

**6.2** 对中放上击实筒，拉伸乳胶膜套在击实筒内壁上，锁紧试模夹具固定击实筒，注意不要挤压乳胶膜。

**6.3** 将多余长度乳胶膜翻开套在击实筒上边缘，并折叠好；施加足够的真空使乳胶膜与击实筒内壁紧密贴合，并在成型过程中维持真空；如果乳胶膜有褶皱，释放真空，调整乳胶膜，再施加真空；必要时采用多孔塑料衬垫来使乳胶膜与击实筒内壁紧密贴合。

**6.4** 测量多孔板至击实筒端部的距离，记为  $l_0$ 。

**6.5** 取一份拌制好的试样，缩分出一份质量为  $500 \times (1 + w_{m0}/100)$  的子样，测定含水率 ( $w_a$ )。称量剩余试样质量 ( $m_1$ )，将其分成 6 等份。振动锤击实过程中，需覆盖试样，防止水分丢失。

**6.6** 取一等份试样，用金属铲徐徐加入击实筒中，装料后整平表面；插入振动夯锤，振动压实试样。用人工保持向下按压振动锤防止夯锤弹跳。振动压实时，不断采用钢直尺量取试件顶面距击实筒端部的距离，至与  $l_0$  之差约为 50mm 时停止压实。

**6.7** 在压实好的试样表面拉毛，深度约 6mm；再取一等份试样，加入击实筒中，装料后整平表面；插入振动夯锤，振动压实试样。振动压实时，不断采用钢直尺量取试件顶面距击实筒端部的距离，至与  $l_0$  之差约为 100mm 时停止压实。

**6.8** 采用以上步骤，分层装料、振动压实，控制每层压实高度约为 50mm，直至压实完第 6 层。振动锤压实最后一层时，控制压实高度约为 53mm，然后放上预湿滤纸、预湿多孔板和上压盘，采用振动锤继续压实至预定的试件高度，且上压盘表面水平。

**6.9** 将乳胶膜从击实筒边缘向下翻滚，盖在上压盘上，用 O 形密封圈将乳胶膜顶端在下压盘上固定、密封。试件养生、水分平衡不少于 12h。

6.10 成型后试件不宜放置超过 5d。

## 7 试验步骤 (重型击实法)

7.1 按本方法 6 的试验步骤, 分 6 层, 采用多功能电动击实仪分层击实成型试件, 并按要求进行密封、养生。

## 8 结果整理

8.1 试件的湿密度按式 (T 1227-4) 计算, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_w = \frac{m_1}{3.14d^2 \times 30.5} \quad (\text{T 1227-4})$$

式中:  $\rho_w$ ——试件的湿密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$m_1$ ——击实之前称量的试样总质量 (g)。

8.2 试件的干密度按式 (T 1227-5) 计算, 精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w_a} \quad (\text{T 1227-5})$$

式中:  $\rho_d$ ——试件干密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$w_a$ ——试件的实测含水率 (%)。

## 9 报告

9.1 试验项目名称和执行标准。

9.2 样品的编号、名称、产地和规格。

9.3 接样日期、样品描述。

9.4 试验日期、样品缩分方法。

9.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

9.6 成型方法, 成型设备主要参数。

9.7 试件尺寸, 含水率及干密度试验结果。

9.8 当含有 37.5mm 超粒径颗粒时，报告超粒径颗粒含量。

9.9 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1 三轴试验对成型试件要求较高，成型和试件处理较为复杂。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)，要求粒料类材料用动态三轴法进行回弹模量试验时，采用振动压实、冲击和静载压实法成型试件，但是未规定明确的试验方法。实际上设计规范是直译了 NCHRP 1-28 报告方法，其振动压实并非我国的振动压实，而是振动锤压实试验，冲击试验则为我国重型击实试验，静载压实为我国的静压成型试验。

对于动态三轴试验，按美国 NCHRP 1-28 报告，当最大粒径大于 19mm 时，采用振动锤或重型击实；当最大粒径小于 19mm 且 0.075mm 通过率小于 10% 时，可采用振动锤；当最大粒径大于 19mm 且 0.075mm 筛孔通过率大于 10% 时，采用重型击实或捣实成型方法。按美国 AASHTO T 307，对于基层等粒料类材料（0.075mm 筛孔通过率小于 20%、塑性指数小于 10%）采用振动锤法，对于土类材料（0.075mm 筛孔通过率不小于 20% 或塑性指数大于 10%），则采用静压法或捣实法。按欧盟 EN 13286-7，对于基层、底基层粒料材料，可采用横向振动成型（法国振动成型方法，成型时施加垂直压力，同时沿试模直径方向施加横向振动）、振动锤成型和重型击实法，见表 T 1227-1。

对于静态三轴，美国得克萨斯州 Tex-117-E 方法在国际上应用较多，其规定采用重型击实成型试件，而澳大利亚一般采用重型击实或静压法成型试件。

三轴试验，一般要求试件直径不小于最大粒径的 5 倍，试样高度为直径的 2 倍。最大粒径不大于 19mm 的试件尺寸，一般采用 100mm × 200mm；最大粒径不大于 37.5mm 的试件尺寸，一般采用 150mm × 300mm（法国 160mm × 320mm、美国 152mm × 305mm，表 T 1227-2）；最大粒径大于 37.5mm 的试件尺寸，一般采用 200mm × 400mm、300mm × 600mm，个别采用 400mm × 800mm。

表 T 1227-1 动态三轴试验试件成型参数对照表

| 来源                 | 最大粒径<br>(mm) | 试件尺寸<br>(直径 × 高度)<br>(mm) | 成型方式                                        | 含水率、压实度                                                   | 养生                   |
|--------------------|--------------|---------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|
| 美国<br>AASHTO T 307 | 37.5         | 152 × 305                 | 振动锤 6 层                                     | 现场干密度、含水率；若没有现场数据，则采用击实试验的 $w_{op}$ 和 $100\% \rho_{dmax}$ | 无要求，<br>5d 内完成<br>试验 |
| 美国<br>NCHRP 1-28   | 25.4<br>9.5  | 152 × 305<br>102 × 203    | 振动锤 6 层，击实<br>6（152mm 试模）~<br>8 层（102mm 试模） | 现场干密度、含水率；若没有现场数据，则采用击实试验的 $w_{op}$ 和 $95\% \rho_{dmax}$  | 不明确                  |

续表 T 1227-1

| 来源               | 最大粒径<br>(mm)              | 试件尺寸<br>(直径×高度)<br>(mm)                     | 成型方式                                 | 含水率、压实度                                                                                                        | 养生         |
|------------------|---------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 欧盟<br>EN 13286-7 | 31.5 (横向振动)<br>37.5 (振动锤) | 满足 5×10 倍<br>要求, 如<br>160×320               | 横向振动 1 层, 或<br>振动锤 6~7 层, 重<br>型击实多层 | 现场干密度、含水率; 若没有<br>现场数据, 则采用最佳含水率和<br>压实度乘以最大干密度, 如 95%<br>$\rho_{dmax}$ 、97% $\rho_{dmax}$ 、100% $\rho_{dmax}$ | 24h        |
| 芬兰               | 32<br>60                  | 150×300、<br>200×400、<br>300×600             | 振动锤多层                                | $w_{op} - 2\%$                                                                                                 | 12h        |
| 法国               | 31.5                      | 160×320                                     | 横向振动 1 层                             | $w_{op} - 2\%$ , 97% $\rho_{dmax}$                                                                             | 48h        |
| 德国               | 64                        | 150×300、<br>200×400、<br>300×490             | 击实多层                                 | —                                                                                                              | 12h        |
| 葡萄牙              | 40 (振动锤)<br>31.5 (横向振动)   | 160×320、<br>300×600                         | 振动锤多层<br>横向振动 1 层                    | $w_{op} \pm 2\%$                                                                                               | 12h<br>48h |
| 荷兰               | 60 (一般为 40)               | 300×600                                     | 振动或击实多层                              | $w_{op}$ , (95%~100%) $\rho_{dmax}$                                                                            | 24h        |
| 挪威               | 20<br>32<br>63            | 100×200、<br>150×300、<br>300×600、<br>400×800 | 击实、振动锤多层                             | $w_{op}$ 或稍低                                                                                                   | 24h        |
| 瑞典               | 31.5 (横向振动)<br>60 (振动锤)   | 150×300、<br>300×600                         | 横向振动 1 层<br>振动锤多层                    | (60%~90%) $w_{op}$                                                                                             | 24h        |
| 英国               | 20                        | 150×300                                     | 振动锤多层                                | $w_{op}$                                                                                                       | 未规定        |
| 澳大利亚             | 26.5                      | 100×200                                     | 击实, 或静压, 或<br>振动锤                    | 80% $w_{op}$ , 98% $\rho_{dmax}$                                                                               | 未规定        |
| 新西兰              | 40                        | 150×300                                     | 击实, 或静压, 或<br>振动锤                    | $w_{op}$ , 95% $\rho_{dmax}$ 或现场压实度                                                                            | 未规定        |
| JTG D50          | 19<br>26.5                | 100×200、<br>150×300                         | 击实成型、振动锤<br>成型、静压成型                  | 现场干密度、最佳含水率;<br>若没有现场干密度则采用击实<br>试验的 95% $\rho_{dmax}$                                                         | 未规定        |

注:  $w_{op}$ -最佳含水率;  $\rho_{dmax}$ -最大干密度。

表 T 1227-2 振动锤成型三轴试件主要参数对照表

| 来源           | AASHTO T 307          | EN 13286-7            |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| 目的           | 成型三轴试件                | 成型三轴试件                |
| 混合料规格        | 最大颗粒粒径为 37.5mm        | 最大颗粒粒径为 37.5mm        |
| 试件直径和高度 (mm) | $\phi 152 \times 305$ | $\phi 160 \times 320$ |

续表 T 1227-2

| 来源     | AASHTO T 307                          | EN 13286-7                                            |
|--------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 振动器    | 电镐、电锤, 功率 0.75 ~ 1.25kW, 频率 30 ~ 50Hz | 电镐、电锤, 功率不小于 0.6kW, 频率 25 ~ 60Hz                      |
| 夯锤     | 板直径 146mm, 厚度不小于 13mm                 | 直径 145mm ± 2mm, 厚度不小于 10mm, 连杆 + 锤质量不大于 3kg           |
| 静压力    | —                                     | 防止振动时夯锤跳起, 要求振动锤及附加质量为 30 ~ 40kg, 即静压力 18.2 ~ 24.2kPa |
| 振实能力验证 | —                                     | 标准砂检验, 最大干密度不小于 1.74g/cm <sup>3</sup>                 |
| 支架     | 手动                                    | 手动                                                    |
| 振实     | 6 层, 压实至要求高度                          | 6 ~ 7 层, 压实至要求高度                                      |

对于无结合料粒料材料, 试模尺寸绝大部分采用 150mm × 300mm、152mm × 305mm (法国 160mm × 320mm), 成型方法主要采用振动锤, 其次是重型击实法。我国基层、底基层、垫层等无结合料粒料, 最大粒径均大于 19mm, 结合我国工程实践, 对于粒料材料, 三轴试件统一采用 152mm 试模。

5.1 对于成型试件的干密度和含水率标准, 国际上都是以现场实测干密度和含水率为目标, 或者室内试验测定的最佳含水率和最大干密度换算得到。一般而言, 现场以最佳含水率进行粒料拌和摊铺、碾压成型, 在运输、碾压过程中含水率会有所下降。同时当含水率的值较高时, 室内成型试件时容易产生水和粉料上移情况, 击实表面出现泥浆, 影响成型试件均匀性, 对三轴试验影响较大, 因此往往以稍低于最佳含水率的值作为成型含水率进行控制。

试件干密度, 往往通过最大干密度乘以压实度得到。根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20), 对于重型击实压实度标准, 基层和底基层分别不小于 98%、96%。因此成型时可按材料层位, 分别按重型击实压实度 98% 和 96% 来确定目标干密度。对于振动成型、振动锤成型确定的最大干密度, 往往比重型击实得到的最大干密度大, 因此相应的压实度值需要降低。

试件成型时, 若粉料和水上移, 表面出现泥浆, 可能是含水率偏高或干密度偏高; 若粉料上移, 表面有灰尘, 可能是含水率偏低, 或干密度偏大。对于以上情况, 应予以复核。

6.9 对于粒料材料, 成型过程中水分和粉料会迁移到表面, 影响试件均匀性, 因此成型试件后宜适当养生, 一般密封静置不少于 12h。试件也不宜放置时间过长, 容易造成试件水分的损失或不均匀。

9.6 成型方法对试验结果影响较大, 即使成型试件的干密度相同, 试验结果差异也会较大, 因此需要针对不同成型方法制定相应的评价指标。试验报告中应明确成型方法及设备相关参数。

## T 1228—2026 固体体积率试验

### 1 目的与适用范围

本方法适用于无结合料粒料固体体积率的试验。

### 2 仪器与材料

**2.1 浸水天平：**可悬挂吊篮测定试样水中质量，感量不大于称量质量的 0.1%。

**2.2 吊篮：**耐锈蚀材料制成，直径、高度不小于 150mm 的网篮，四周及底部为 1 ~ 2mm 的筛网或密集孔眼；或耐锈蚀材料制成，直径不小于 200mm、孔径不大于 1.18mm 的筛网。

**2.3 溢流水槽：**有溢流孔，能够使水面保持恒定高度；耐锈蚀材料制成的水槽，容积应足够大；挂上吊篮、加水至溢流孔位置时，应保证吊篮底部与水槽底部、四周侧壁间距均不小于 50mm。

**2.4 吊线：**耐锈蚀、不吸湿的细线，连接浸水天平和吊篮；线直径不大于 1mm，其长度应该保证水槽加水至溢流孔位置时，吊篮顶部离水面距离不小于 50mm。

**2.5 烘箱：**鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

**2.6 吸湿软布：**纯棉毛巾，或纯棉的汗衫布等。

**2.7 温度计：**量程 0 ~ 50℃，分度值 0.1℃；量程 0 ~ 200℃，分度值 1℃。

**2.8 试验筛：**孔径为 4.75mm、2.36mm 的方孔筛，应满足《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) T 0302 中 2.1 的要求。

**2.9 盛水容器：**浸泡试样用容器，如不锈钢盆。

**2.10 恒温水槽：**恒温 23℃ ± 2℃。

**2.11 试验用水：**饮用水，使用之前煮沸后冷却至室温。

2.12 其他：金属盘、刷子等。

2.13 重型击实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1220 的规定。

2.14 振动压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1221 的规定。

2.15 振动锤压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1224 的规定。

### 3 试验准备

3.1 根据设计标准或工程实际情况，选择如下成型方法：

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验；
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验；
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

### 4 试验步骤

4.1 取各单档集料样品进行试验

4.1.1 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品。

4.1.2 取各单档集料，按《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) 中 T 0304 网篮法测定粗集料的毛体积密度、T 0330 坍落筒法测定细集料的毛体积密度。

4.1.3 取各单档集料，按配比配制混合料，按照选定的成型方法，确定混合料的最大干密度和最佳含水率。

注：若已知最大干密度和最佳含水率，可采用已有数据。

4.2 取混合料样品进行试验

4.2.1 按本规程 T 1201 取混合料样品。

4.2.2 将混合料样品用 0.075mm、4.75mm 试验筛过筛，取 4.75mm 以上颗粒和 0.075 ~ 4.75mm 颗粒，分别按《公路工程集料试验规程》(JTG 3432) 中 T 0304 网篮法测定粗集料的毛体积密度、T 0330 坍落筒法测定细集料的毛体积密度。

注：若已知生产混合料的各单档集料毛体积密度，可采用各单档集料毛体积密度数据。

**4.2.3** 取混合料样品,在目标含水率(一般为最佳含水率)条件下拌制混合料并养生;按照选定的成型方法成型试件,确定混合料的干密度。

**4.2.4** 每种混合料应成型不少于2个试件,取目标含水率条件下不同试件干密度算术平均值作为样品干密度试验结果。

## 5 结果整理

**5.1** 单档集料样品的合成毛体积密度 $\rho_{sb}$ 按式(T 1228-1)计算,精确至 $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{\rho_{b1}} + \frac{P_2}{\rho_{b2}} + \cdots + \frac{P_n}{\rho_{bn}}} \quad (\text{T 1228-1})$$

式中: $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\cdots$ 、 $P_n$ ——各单档集料的质量百分比(%),总和为100%;

$\rho_{b1}$ 、 $\rho_{b2}$ 、 $\cdots$ 、 $\rho_{bn}$ ——各单档集料的毛体积密度( $\text{g/cm}^3$ )。

**5.2** 混合料样品的合成毛体积密度 $\rho_{sb}$ 按式(T 1228-2)计算,精确至 $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{\rho_{b1}} + \frac{P_2}{\rho_{b2}}} \quad (\text{T 1228-2})$$

式中: $P_1$ 、 $P_2$ ——样品中4.75mm以上颗粒、4.75mm以下颗粒质量百分比(%),总和为100%;

$\rho_{b1}$ 、 $\rho_{b2}$ ——4.75mm以上颗粒、0.075~4.75mm颗粒的毛体积密度( $\text{g/cm}^3$ )。

**5.3** 固体体积率按式(T 1228-3)计算,精确至0.1%。

$$V_G = \frac{\rho_d}{\rho_{sb}} \times 100 \quad (\text{T 1228-3})$$

式中: $V_G$ ——固体体积率(%);

$\rho_d$ ——样品的(最大)干密度( $\text{g/cm}^3$ )。

## 6 报告

**6.1** 试验项目名称和执行标准。

**6.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**6.3** 接样日期、样品描述。

6.4 试验日期、样品缩分方法。

6.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

6.6 成型方法和成型主要参数。

6.7 最佳含水率，样品合成毛体积密度和（最大）干密度，固体体积率试验结果。

6.8 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1 固体体积率是级配碎石等无结合料粒料配合比设计中一个关键指标，固体体积率与其抗变形能力非常密切，固体体积率越低，抗变形能力越差；因此提高固体体积率对于提高级配碎石的抗变形能力具有重要意义。

3 重型击实和振动压实得到的试件干密度不同，振动压实试件干密度比重型击实试件干密度大，因此振动压实方法得到的固体体积率要大于重型击实方法得到的固体体积率。因此，需要根据不同成型方法确定固体体积率标准。例如，对于级配碎石基层，重型击实法固体体积率指标为不小于85%，则振动压实法固体体积率指标为不小于86.5%。

4.1 本方法适用于配合比设计阶段，取各档集料拌制混合料，成型试件后测定固体体积率。

4.2 本方法适合施工过程中从拌和机或工程现场取混合料进行试验，用于混合料性能检验或质量控制。

## 7 强度试验

### T 1235—2026 承载比试验

#### 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于在规定的试模内制件后，对无结合料粒料进行贯入试验，计算承载比 (CBR)。

1.2 本方法适用于无结合料粒料中粒径不大于 37.5mm 颗粒部分。

#### 2 仪器与材料

2.1 加载装置：路面材料强度试验仪或压力机、万能试验机等加载装置，加载能力不小于 150kN，加载速率为 0 ~ 5mm/min 可调。升降工作台升降距离不小于 200mm，测量装置距升降工作台面高度不小于 300mm。

2.2 应力测量装置：可采用数显应力传感器或应力环式传感器。数显应力传感器量程不低于 150kN，准确度等级 0.5 级。应力环式传感器规格应包括 30kN、50kN（或 60kN）、100kN、150kN，按需要配套使用，精度为 1.0%。

2.3 位移测量装置：两个数显式位移传感器或表盘刻度式位移传感器，量程不低于 20mm，分度值不大于 0.01mm。

2.4 贯入杆：金属柱，贯入端面直径  $50\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，长度约 100mm，贯入端应采用硬化钢材质。

2.5 试验筛：孔径为 37.5mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

2.6 试模：示意图如图 T 1235-1 所示。应采用性能不低于 Q235 碳素结构钢制成，由击实筒、可拆卸的套筒、可拆卸的底板、垫块和拉杆等组成，击实筒内壁光滑，表面

粗糙度 Ra 为 3.2μm。垫块底部应设有螺孔，便于安装提柄将垫块从试模中取出。试模相关尺寸应满足表 T 1235-1 的要求。

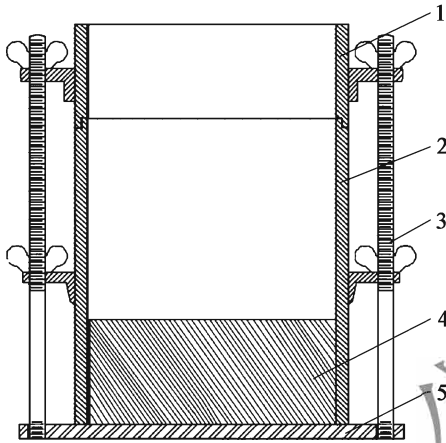


图 T 1235-1 试模示意图  
1-套筒；2-击实筒；3-拉杆；4-垫块；5-底板

表 T 1235-1 试模尺寸要求

| 击实筒        |            |            | 垫块         |            | 套筒         |            |            | 底板         |                   |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| 内径<br>(mm) | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 高度<br>(mm) | 内径<br>(mm) | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 中心处<br>厚度<br>(mm) |
| 152 ± 0.5  | 170 ± 0.5  | ≥9.5       | 151 ± 0.2  | 50 ± 0.2   | 152 ± 0.5  | ≥50        | ≥9.5       | ≥230       | ≥13.5             |

2.7 多孔底板：金属底板，带拉杆，尺寸与试模的底板和拉杆的尺寸相同，直径不小于 230mm，厚度不小于 13.5mm，底部中心 φ152mm 区域均匀分布直径不大于 2mm 的穿孔。

2.8 荷载板：4 块外径 149mm ± 1mm、内径 53mm ± 1mm 的半圆环金属块，每块质量 1.25kg ± 0.1kg。

2.9 水槽：能够同时容纳不少于 3 个试件，深度不小于 200mm，底部为开孔平台。

2.10 滤纸：快速滤纸，直径 150 ~ 151mm。

2.11 重型击实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1220 的规定。

2.12 振动压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1221 的规定。

2.13 振动锤压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1224 的规定。

### 3 试验准备

3.1 定期进行应力测量装置、位移测量装置等标定。

3.2 根据设计标准或工程实际情况，选择如下成型方法：

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验（击实类型乙类）；
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验；
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

3.3 按照选定的成型方法，确定混合料的最大干密度和最佳含水率。

注：若已知最大干密度和最佳含水率，可采用已有数据。

3.4 检查击实仪器，各部件是否有松动，击锤表面是否磨损，击锤提升装置是否运转正常。拼装试模，检查击实筒、套筒、底座和垫块是否紧密连接，击实筒是否有凹痕、磨损。

3.5 击实筒容积的标定：准确测量击实筒的内径、高度和垫块的高度，尺寸不符合时不得使用。在击实筒底部测定内径 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次；计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。测定击实筒高度 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度；按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算试模容积，精确至  $0.01\text{cm}^3$ 。

3.6 检查加载装置是否运转正常。检查应力测量装置、位移测量装置是否符合要求。用游标卡尺测定贯入杆贯入端面直径，每转动  $120^\circ$  测一次，计算 3 个测定平均值为贯入杆的直径。

### 4 试件成型方法

4.1 取各单档集料样品进行试验

4.1.1 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品。当试样中有粒径大于  $37.5\text{mm}$  的颗粒时，应予以筛除。

4.1.2 将各单档集料的样品风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干，根据混合料中各档集料的配比和预定的含水率（一般为最佳含水率），采用本规程 T 1220 重型击实试验（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实试验方法，拌制 3 份试样；每份试

样增加 500g，用于测定试样含水率。

注：本试验成型标准含水率采用最佳含水率，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实标准压实功。当采用非最佳含水率，或非标准压实功时，需要在报告中注明。

**4.1.3** 称取干燥击实筒和垫块的质量。取一份养生试样放在金属盘中，简易四分法缩分 500g 混合料，按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ )，精确至 0.1%。剩余试样按本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实成型试件。称取成型后击实筒、垫块和湿试样的总质量。

**4.1.4** 卸除试模的拉杆。在试件顶面放一滤纸，多孔底板通过拉杆固定在试模上，注意使击实筒中心与多孔底板中心对中。将试件和试模上下颠倒调换方向，移除垫块，通过拉杆使试模与多孔底板紧密固定。

## **4.2 取混合料样品进行试验**

**4.2.1** 按本规程 T 1201 取混合料样品。当样品中有粒径大于 37.5mm 颗粒时，应予以筛除。

**4.2.2** 将样品风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，采用本规程 T 1220 重型击实试验（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实成型试件，按目标含水率（一般为最佳含水率），拌制 3 份试样；每份试样增加 500g，用于测定试样含水率。

注：本试验成型标准含水率采用最佳含水率，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实标准压实功。当采用非最佳含水率或非标准压实功时，需要在报告中注明。

**4.2.3** 按步骤 4.1.3、4.1.4 成型试件，进行试件处理。

**4.3** 每种混合料应至少成型 3 个试件。

## **5 试件养生**

**5.1** 成型的试件，应立即浸泡养生。

**5.2** 将试模和试件移入水槽中。当水槽中有多个试件时，试件之间不得接触，保持均匀距离。在试件表面放一快速滤纸，安装多孔顶板、荷载板。

**5.3** 向水槽中加水,使水能够自由进到试件的顶部和底部。饱水期间,保持水面高出试件表面 25mm 以上。静置浸泡至  $96\text{h} \pm 30\text{min}$  结束。

**5.4** 浸泡结束后,从水槽中取出试件,移除顶面的水,静置排水  $15\text{min} \pm 30\text{s}$ ,然后移走荷载板、多孔顶板和滤纸。

## 6 贯入试验步骤

**6.1** 选择合适量程的应力测量装置。

**6.2** 将试件放在加载装置升降台上,并进行固定,调整偏球座,对中、整平后,放置 2 块半圆环荷载板。

**6.3** 下降贯入杆,施加 45N 荷载,放置另外 2 块半圆环荷载板。将应力传感器和位移传感器调零。

**6.4** 启动加载装置使贯入杆以  $1.00 \sim 1.25\text{mm/min}$  的速度压入试件,记录变形量为 0.25mm、0.5mm 及之后每增加 0.5mm 时的荷载读数,直至变形量达到 7.5~10mm,结束加载。

**6.5** 操作加载装置,提升贯入杆。移走位移传感器、荷载板、多孔顶板和滤纸,移除试件。

## 7 结果整理

**7.1** 试件的湿密度按式 (T 1235-1) 计算,精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_w = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{T 1235-1})$$

式中:  $\rho_w$ ——试件的湿密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$m_1$ ——击实筒、垫块的质量 (g);

$m_2$ ——试件和击实筒、垫块的质量 (g);

$V$ ——击实筒的容积 ( $\text{cm}^3$ )。

**7.2** 试件的干密度按式 (T 1235-2) 计算,精确至  $0.001\text{g/cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01 w_a} \quad (\text{T 1235-2})$$

式中:  $\rho_d$ ——试件干密度 ( $\text{g/cm}^3$ );

$w_a$ ——试件的实测含水率 (%)。

**7.3** 若一个试件的实测含水率与预定的含水率之差大于  $\pm 0.5\%$ ，或实测干密度与预定的干密度之差大于预定的干密度的  $\pm 0.5\%$ ，则该试件结果无效。

**7.4** 根据实测贯入杆直径，将实测的荷载转换为相应的压力值。

**7.5** 以贯入量 ( $l$ ) 为横坐标，压力 ( $p$ ) 为纵坐标，绘制  $l$ - $p$  曲线，如图 T 1235-2 所示。当曲线开始段为上凹时，需要进行修正：将  $l$ - $p$  曲线最后一点记为 E 点；将  $l$ - $p$  曲线的直线段进行外延，使其与横坐标轴交于 O' 点，外延段起点为拐点，记为 S；或作  $l$ - $p$  曲线的斜率最大的切线，切线与  $l$ - $p$  曲线重合段的中点为拐点，记为 S，切线与横坐标轴交于 O' 点；以 O' 点为坐标系原点，以 O'S 直线段、SE 曲线段组成的曲线 O'SE 作为修正后的  $l$ - $p$  曲线。

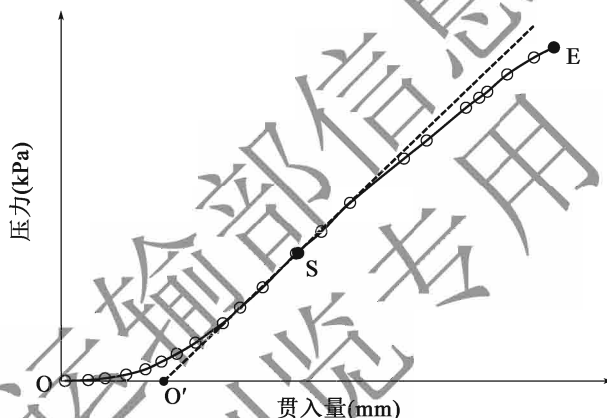


图 T 1235-2 CBR 试验压力-贯入量曲线

**7.6** 根据  $l$ - $p$  曲线或修正后的  $l$ - $p$  曲线，确定贯入量为 2.5mm、5.0mm 时的压力，分别记为  $p_{2.5}$ 、 $p_{5.0}$ 。当 OO' 点距离大于 2.5mm 时，按图 T 1235-3 所示，在 O 为原点的坐标系中，确定 O'SE 曲线上 5mm、7.5mm 贯入量对应的压力作为  $p_{2.5}$ 、 $p_{5.0}$ 。

**7.7** 试件的贯入量为 2.5mm、5.0mm 时 CBR 值按式 (T 1235-3)、(T 1235-4) 分别计算，精确至 0.1%。

$$CBR_{2.5} = \frac{p_{2.5}}{7\,000} \times 100 \quad (\text{T 1235-3})$$

$$CBR_{5.0} = \frac{p_{5.0}}{10\,500} \times 100 \quad (\text{T 1235-4})$$

式中： $CBR_{2.5}$ 、 $CBR_{5.0}$ ——贯入量为 2.5mm、5.0mm 时的承载比 (%)；

$p_{2.5}$ 、 $p_{5.0}$ ——贯入量为 2.5mm、5.0mm 时的压力，通过本方法 7.6 确定 (kPa)；

7 000、10 500——贯入量为 2.5mm、5.0mm 时的标准压力 (kPa)。

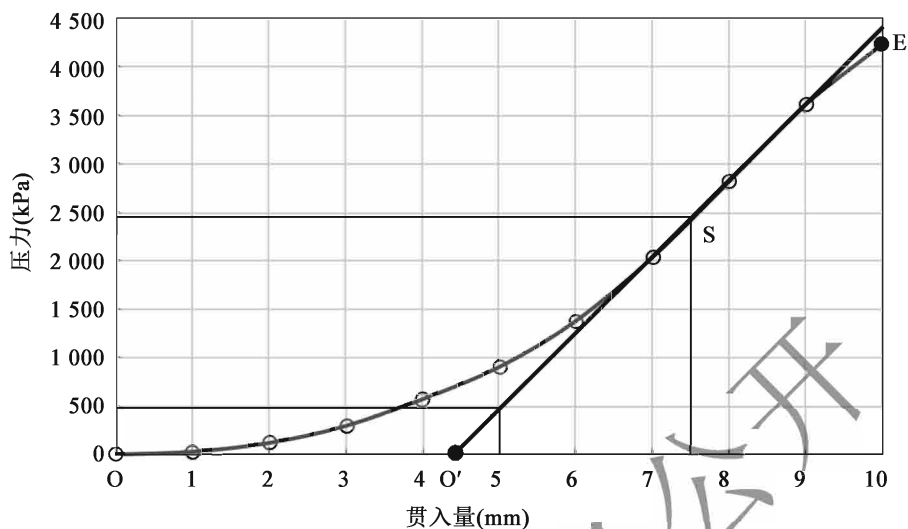


图 T 1235-3 当  $OO'$  间距大于 2.5mm 时确定贯入量相应压力示意图

**7.8** 一个试件，以  $CBR_{2.5}$  和  $CBR_{5.0}$  中最大值作为该试件的 CBR 测定值。取三个试件 CBR 测定值的算术平均值作为该样品的 CBR 试验结果，精确至 0.1%。

## 8 允许误差

承载比 CBR 重复性试验的相对允许误差为 24%。

## 9 报告

**9.1** 试验项目名称和执行标准。

**9.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**9.3** 接样日期、样品描述。

**9.4** 试验日期、样品缩分方法。

**9.5** 主要仪器设备的名称、型号及编号。

**9.6** 成型方法，成型主要参数和试件浸泡时间。

**9.7** 含水率， $l-p$  曲线，CBR 试验结果。

## 9.8 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 CBR 试验方法在世界范围内应用非常广泛,是无结合料粒料最基本的强度指标。根据我国工程实践,本方法规定采用无结合料粒料中不大于 37.5mm 颗粒部分进行 CBR 试验。对于全部颗粒小于 37.5mm 的混合料,可直接进行 CBR 试验;对于含有 37.5mm 以上颗粒的混合料,取 37.5mm 筛下物进行试验。

不同标准对 CBR 试验的混合料规格要求不尽相同。《公路土工试验规程》(JTG 3430) T 0134 规定最大粒径不超过 40mm,且 20~40mm 颗粒含量不超过 5%。日本 JIS A 1211 标准规定,取样品 37.5mm 筛下物进行试验。而美国 ASTM D1883 和 AASHTO T 193 规定最大粒径不大于 19mm;当最大粒径大于 19mm 时,筛除 19mm 以上颗粒,用等质量的 4.75~19mm 颗粒代替,此时适合最大粒径不大于 75mm 的混合料。

欧盟 EN 13286-47 则规定,取混合料中颗粒不大于 22.4mm 部分进行试验。BIS 1377-4 要求最大粒径不大于 20mm;当 20mm 以上颗粒含量不大于 25% 时,取 20mm 筛下物进行 CBR 试验;当 20mm 以上颗粒含量大于 25% 时,不适合进行 CBR 试验。

我国在进行级配碎石等粒料材料 CBR 试验时,允许保留更大粒径,未进行筛除或用等质量的 4.75~19mm 颗粒代替,导致粒料材料 CBR 试验结果较大。在欧美,其级配碎石基层 CBR 标准往往为不小于 80%,而我国基层施工细则中要求的 CBR 值高达 200%,其中主要原因应该是相关 CBR 试验成型试件对粗颗粒要求不同造成的,而并非是说我国标准要高于国际标准。实际上,由于我国 CBR 试件未剔除 19mm 以上粗颗粒,级配碎石 CBR 测定值往往高达 300%~400%,甚至达到 500%。

2.1 对无结合料粒料,特别是级配碎石,CBR 能够达到 400%,振动压实成型试件的 CBR 甚至达到 500%;此时 5mm 变形荷载达到 100~125kN,因此要求路强仪的最大荷载不小于 150kN。

2.7 对于级配碎石等混合料, CBR 高达 400%,此时多孔底板承受了非常大的压力,为了防止试模变形,本方法要求采用金属底板,不得采用塑料等材质的多孔板。

2.9 本方法规定荷载板为 4 个半圆环,每个质量为 1.25kg,总质量为 5.0kg,此规定与 JTG 3430 中 T 0134、JIS A 1211 基本相同。而美国 ASTM D1883、AASHTO T 193 则采用圆环,每个质量 2.27kg;试验时,施加的荷载板质量与其上各层路面材料质量等效,至少 4.54kg,如果超过这个值,按照 2.27kg 增量增加;如果没有规定,则采用 4.54kg。EN 13286-47 规定根据条件和相关规定来确定荷载板质量,2kg 荷载板相当于 700mm 路面作用。BS 1377-4 中指出一个 2kg 荷载板相当于 70mm 路面自重静压作用,但是荷载板数量不重要,可采用任何数量的荷载板。

3.1 本方法规定 CBR 试验可采用重型击实、振动压实和振动锤压实三种成型方法。一般而言振动压实成型试件的 CBR 值要大于振动锤压实成型试件的 CBR 值,而振

动锤压实成型试件的 CBR 值又大于重型击实成型试件的 CBR 值。例如,爱尔兰规定,对于级配碎石基层,当采用重型击实标准时, CBR 应不小于 80%,而当采用振动锤击实标准时, CBR 应不小于 150%。

4.1.2 本方法根据无结合料粒料工程实际情况,规定试件成型时,在预定含水率(一般为最佳含水率)条件下采用标准的重型击实和振动压实方法成型 3 个试件。

目前 CBR 试件成型标准主要有 2 种。第一种是按现场压实度来确定,一般为最大干密度的 95%~100%,此时击实不同次数成型 3 个不同压实度的试件,按照 CBR-压实度曲线来确定预定压实度的 CBR 值。第二种是采用标准压实标准,相当于最大干密度条件下成型试件,直接测定 CBR 值。第一种方法比较烦琐,需要成型 9 个试件,同时每次成型时还须测定含水率,计算干密度;而第二种方法较为简单,只需成型 3 个试件,一般无须测定试件的含水率和干密度。而对于垫层、底基层和基层等粒料材料,不同层位的压实度标准差别不大,而且底基层和基层采用的粒料材料差异不大,因此工程上习惯按标准成型方法成型试件,此时选择第二种方法。

EN 13286-47 针对粒料材料仅规定了第二种方法。而 ASTM D1883、AASHTO T 193、BS 1377-4 和 JIS A 1211 试验方法同时针对路基土和粒料材料,因此两种方法都有规定,可根据工程需要选用。

7.5 CBR 贯入试验时,  $l-p$  曲线多呈现 S 形,初始时为上凹,这主要是因为试件不平整,初始贯入时压力上升过慢,因此需要进行原点修正。修正时一般在变曲率点(也称拐点或最大曲率点)画一切线,与横坐标相交于  $O'$  点,将坐标原点平移到相交点  $O'$  点。对于粗集料含量较高的无结合料粒料,特别是级配碎石,其  $l-p$  曲线很少呈现 S 形,其初始曲线上凹,但是之后为直线,在曲线末端不再弯曲,此时可将  $l-p$  曲线的直线段外延进行原点修正,本方法与 ASTM D1883、AASHTO T 193 和 JIS A 1211 基本一致。

7.6 在  $l-p$  曲线修正时,若  $OO'$  点距离大于 2.5mm,若仍然按 7.5 的方法进行修正,则由于粒料材料的应力增强效益导致修正后 CBR 值过大,此时应按 7.6 中规定方法进行修正。本修正方法与 EN 13286-47 方法规定的相同。

7.8 对于土,往往  $CBR_{5.0}$  小于  $CBR_{2.5}$ ,而对于无结合料粒料,由于具有应力增强性而导致  $CBR_{5.0}$  大于  $CBR_{2.5}$ ,因此本方法不再要求当  $CBR_{5.0}$  大于  $CBR_{2.5}$  时重新试验。实际上,由于 CBR 试验时采用 3 个平行试件,3 个试件的 CBR 试验结果足以相互验证。

EN 13286-47 和 BS 1377-4 也规定直接取  $CBR_{5.0}$  和  $CBR_{2.5}$  中最大值作为试件试验结果。JIS A 1211 规定,当 3 个试件的  $CBR_{5.0}$  均大于  $CBR_{2.5}$  时,直接选择  $CBR_{5.0}$  作为试件试验结果。大量试验中尚未出现一个试件  $CBR_{5.0}$  大于  $CBR_{2.5}$ ,而另外两个试件  $CBR_{5.0}$  小于  $CBR_{2.5}$  的情况;也未出现一个试件  $CBR_{5.0}$  小于  $CBR_{2.5}$ ,而另外两个试件  $CBR_{5.0}$  大于  $CBR_{2.5}$  的情况。

## T 1236—2026 抗剪强度试验（静三轴法）

### 1 适用范围

1.1 本试验方法适用于采用静三轴法测定无结合料粒料抗剪强度。

1.2 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 三轴试验仪：应变控制式三轴仪，由三轴室、轴向加压系统、周围压力系统、反压力系统、轴向变形测量系统、数据采集系统和主机组成。

2.1.1 三轴室：不锈钢圆柱体三轴室，尺寸满足试验要求，钢筒上宜镶有机玻璃窗口。

2.1.2 轴向加压系统：包括加压框架、加压设备和轴向压力测量装置。加压设备应为顶部加载式，宜采用闭路电-液压或电-气压装置加载，轴向最大加载应力为 1 500kPa，控制精度为  $\pm 2\text{kPa}$ ；轴向加载速率在 0 ~ 5mm/min 可调。轴向压力测量装置宜采用压力传感器，量程不小于 30kN，精度  $\pm 30\text{N}$ 。

2.1.3 围压系统：包括加压系统、恒压装置和围压测量装置。介质可采用空气或水等，最大围压不小于 210kPa，围压控制精度为  $\pm 1\text{kPa}$ ；围压测量采用压力传感器，测量精度为  $\pm 1\text{kPa}$ 。

2.1.4 轴向变形测量装置：位移传感器，或大量程百分表，精度为  $\pm 0.025\text{mm}$ 。

2.1.5 数据采集系统：试验过程中自动采集并储存应力和位移等数据。

2.2 上、下压盘：刚性、耐腐蚀、不透水材料制成，直径等于或略大于试件的初始直径，内部设计排水通道。上下压盘与橡皮圈接触的侧面应光滑、无划痕。

2.3 真空源：带气泡室和可调压的真空源。

2.4 乳胶膜：0.25 ~ 0.80mm 厚的乳胶膜，未扩展时原始直径应不小于试件直径的

95%，一个试件上套有 2 个或以上乳胶膜时，其总厚度不超过试件直径的 0.8%。乳胶膜长度略长于试件高度、上下压盘厚度之和。

**2.5 多孔垫块：**厚  $6\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，直径等于或略小于试件的初始直径，铜或不锈钢材质。当多孔垫块有堵塞时，需要更换新多孔垫块。

**2.6 天平：**最大称量不小于 10kg，感量不大于 0.5g；最大称量不小于 5kg，感量不大于 0.1g。

**2.7 试件成型仪具：**应满足本规程 T 1227 的规定。

**2.8 其他：**烘箱、瓷盘等。

### 3 试验准备

**3.1 定期进行应力测量装置、变形测量装置的标定。**

**3.2 仪器检查**

**3.2.1 检查轴向加压系统、周围压力系统是否运行正常。**

**3.2.2 检查三轴室密封不泄漏。**

**3.3 试件制备**

**3.3.1 按本规程 T 1227 取样成型不少于 9 个试件。**

注：试验用围压不少于 3 级，每个围压水平测试 3 个试件。

**3.3.2 试件密封养生、水分平衡不少于 12h。试件成型后放置不得超过 5d。**

### 4 试验步骤

**4.1 按如下要求进行试件安装。**

**4.1.1 将上下压盘排水管接口与三轴室排水接口连接；三轴室排水接口与真空源连接，接上气泡室，施加 5 ~ 10kPa 真空使试件能够站立，打开试模夹具，卸除对开击实筒内真空，拆除对开击实筒。**

**4.1.2** 观察气泡室，如果存在气泡，应检查并消除引起泄漏的原因，如连接不良，乳胶膜有洞，上下压盘与乳胶膜之间密封不严等。对因乳胶膜有孔洞引起的泄漏，可采用在乳胶膜表面涂抹液态乳胶或套装新乳胶膜等方法来消除。套装新乳胶膜时，采用张膜器辅助套装，用 O 形密封圈将乳胶膜上下两端在压盘上固定、密封。

**4.1.3** 测量试件高度和直径。高度应测定 3 次（每转动 120°测定 1 次），取平均值作为初始高度，其值应符合  $306\text{mm} \pm 5\text{mm}$  要求。直径应在上、中、下三个部位各测定 3 次（每转动 120°测定 1 次），取所有测定值平均值。

**4.1.4** 若不在三轴室底座上成型试件，则在三轴试验前，将养生好的试件置于三轴室底座或三轴仪升降台上，再按以上方法进行脱模、检查乳胶膜泄漏、测量尺寸。

**4.2** 按如下要求进行三轴室安装。

**4.2.1** 内置式三轴仪按照如下要求安装：

- (1) 安装位移测量装置，并与试件轴线平行。
- (2) 安装三轴室，盖上三轴室顶板，插入加载杆，在加载杆底部安装荷载传感器；将加载钢球放在上压盘凹槽上；缓慢操作加载装置至荷载传感器底部与钢球稍有接触，侧向移动试件，同时慢慢旋转钢球，进行加载杆、钢球、试件轴向对中。
- (3) 打开数据采集系统，检验采集系统是否正常工作；手动检验各荷载、位移测量装置是否正常工作。
- (4) 用水平仪检查三轴室顶板，确定其表面水平后，充分固定顶板。

**4.2.2** 外置式三轴仪按照如下要求安装：

- (1) 安装三轴室，盖上三轴室顶板，用水平仪检查三轴室顶板，确定其表面水平后，均匀拧紧固定立柱固定顶板。将加载钢球放在三轴室加载杆顶面凹槽上；缓慢操作升降台至荷载传感器底部与钢球稍有接触，侧向移动三轴室，同时慢慢旋转钢球，进行加载杆、钢球、试件轴向对中。将三轴室在三轴仪升降台上固定。
- (2) 安装位移测量装置，并使其与试件轴线平行。
- (3) 打开数据采集系统，检验采集系统是否正常工作；手动检验各荷载、位移测量装置是否正常工作。

**4.3** 按照要求进行荷载传感器读数调零（压力环传感器为记录初始读数）。操作轴向加压系统，施加 3 ~ 5kPa 压力，使上压盘与轴向加压系统垂直正接触。

**4.4** 将三轴室压力接口与压力源连接，施加预定的围压。同时卸除试件内真空，移走真空源，打开底部和顶部的所有排水管，在整个试验过程中保持全开，与大气连通。

待围压稳定后, 按照要求进行位移传感器读数调零 (使用百分表时记录初始读数)。

**4.5** 按应变  $1\%/min \sim 2\%/min$  速率进行轴向加压。每  $0.5mm$  轴向变形, 测记一次轴向荷载和轴向变形数值。

注: 选择合适的速率, 使得加压破坏在  $5 \sim 10min$  内完成。

**4.6** 当荷载传感器读数不再增加 (每  $0.5mm$  变形对应的轴向压力增加小于  $5kPa$ ) 或降低时, 停止轴向加载, 记录最大轴向荷载数值。试验过程中, 当轴向变形超过  $15\%$  时, 即可停止轴向加载, 采用变形  $15\%$  对应的轴向荷载作为最大轴向荷载。

**4.7** 试验结束后, 卸除围压, 拆除三轴室, 取出试件。整个试件移入大金属盘中, 脱去乳胶膜, 拍照记录试件破坏情况, 称量试件总质量。用橡胶锤将试件敲散, 按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ ), 精确至  $0.1\%$ 。烘干后的混合料应废弃, 不得重复利用。

**4.8** 取养生好的试件, 设定围压按照以上步骤进行不少于 9 个试件试验。试验用围压不少于 3 级, 分别为  $30kPa$ 、 $60kPa$  和  $100kPa$ , 每个围压水平测试 3 个试件。

**4.9** 多孔垫块清洗后在  $60^\circ C$  烘干后备用。

## 5 结果整理

**5.1** 轴向应变按式 (T 1236-1) 计算:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (T 1236-1)$$

式中:  $\varepsilon_1$ ——轴向应变 ( $\%$ );

$\Delta h$ ——试件的轴向变形 ( $mm$ );

$h_0$ ——试件的初始高度 ( $mm$ )。

**5.2** 校正后试样面积按式 (T 1236-2) 计算:

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1/100} \quad (T 1236-2)$$

式中:  $A$ ——试样的校正断面积 ( $mm^2$ );

$A_0$ ——试样的初始断面积 ( $mm^2$ )。

**5.3** 试件剪切强度按式 (T 1236-3) 计算:

$$\sigma'_{1maxi} = \frac{P_{max}}{A} \times 10^3 + \sigma_{3i} \quad (T 1236-3)$$

式中： $\sigma'_{1\max i}$ ——试件的剪切强度（kPa）；  
 $\sigma_{3i}$ ——试验时施加的围压（kPa）；  
 $P_{\max}$ ——实测的试件最大轴向荷载（N）。

5.4 取3个试件剪切强度的平均值作为各围压 $\sigma_{3i}$ 下粒料材料剪切强度 $\sigma_{1\max i}$ 。

5.5 根据计算法确定抗剪强度参数 $c$ 、 $\varphi$ ，必要时采用作图法校核。

5.5.1 计算法：

按式（T 1236-4）～式（T 1236-8）计算抗剪强度参数 $c$ 、 $\varphi$ 和相关性系数 $r$ 。相关性系数 $r$ 应不小于0.99。

$$\varphi = \arcsin m \quad (\text{T 1236-4})$$

$$c = \frac{b}{\cos \varphi} \quad (\text{T 1236-5})$$

式中： $c$ ——黏聚力（kPa）；

$\varphi$ ——内摩擦角（°）；

$m$ ——按式（T 1236-6）计算；

$b$ ——按式（T 1236-7）计算；

$$m = \frac{\sum (p_i \times q_i) - \frac{1}{n} \times (\sum p_i) \times (\sum q_i)}{\sum (p_i)^2 - \frac{1}{n} \times (\sum p_i)^2} \quad (\text{T 1236-6})$$

$$b = \frac{1}{n} \times \sum q_i - \frac{m}{n} \times \sum p_i \quad (\text{T 1236-7})$$

$$r = \frac{\sum (p_i \times q_i) - \frac{1}{n} \times (\sum p_i) \times (\sum q_i)}{\sqrt{\left[ \sum (p_i)^2 - \frac{1}{n} \times (\sum p_i)^2 \right] \times \left[ \sum (q_i)^2 - \frac{1}{n} \times (\sum q_i)^2 \right]}} \quad (\text{T 1236-8})$$

$n$ ——试验采用围压级数；

$p_i$ ——各级莫尔圆的圆心横坐标，即 $(\sigma_{1\max i} + \sigma_{3i}) / 2$ ；

$q_i$ ——各级莫尔圆的半径，即 $(\sigma_{1\max i} - \sigma_{3i}) / 2$ 。

5.5.2 作图法：

以主应力 $\sigma$ 为横坐标，剪应力 $\tau$ 为纵坐标，在横坐标轴上以 $(\sigma_{1\max i} + \sigma_{3i}) / 2$ 点为圆心，以 $(\sigma_{1\max i} - \sigma_{3i}) / 2$ 为半径，绘制不同围压下的莫尔圆，作各莫尔圆的包络线，包络线的倾角为内摩擦角 $\varphi$ ，包络线在纵坐标上的截距为黏聚力 $c$ ，如图 T 1236-1 所示。

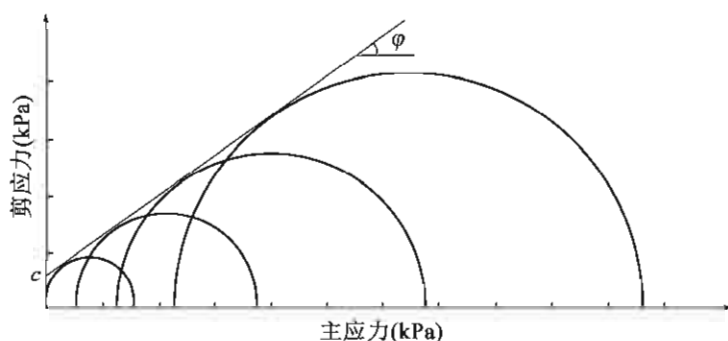


图 T 1236-1 确定抗剪强度参数的莫尔圆包络线示意图

### 5.6 抗剪强度按式 (T 1236-9) 计算:

$$\tau_{\max} = c + \sigma_f \tan \varphi \quad (\text{T 1236-9})$$

式中:  $\tau_{\max}$ ——粒料材料的抗剪强度 (kPa);

$\sigma_f$ —— $45^\circ + \varphi/2$  剪切面主应力值, 根据路面的实际应力条件按式 (T 1236-10) 计算确定 (kPa)。

$$\sigma_f = \sigma_3 + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \left( 1 + \sqrt{\frac{\tan^2 \varphi}{1 + \tan^2 \varphi}} \right) \quad (\text{T 1236-10})$$

### 5.7 抗剪强度比按式 (T 1236-11) 计算:

$$\text{SSR} = \frac{\tau_f}{\tau_{\max}} \quad (\text{T 1236-11})$$

式中: SSR—— $45^\circ + \varphi/2$  剪切面剪切应力与剪切强度的比值;

$\tau_f$ —— $45^\circ + \varphi/2$  剪切面剪切应力值, 根据路面的实际应力条件按式 (T 1236-12) 计算确定 (kPa)。

$$\tau_f = \sqrt{\left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 - \left( \sigma_f - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2} \quad (\text{T 1236-12})$$

## 6 报告

### 6.1 试验项目名称和执行标准。

### 6.2 样品的编号、名称、产地和规格。

### 6.3 接样日期、样品描述。

6.4 试验日期、样品缩分方法。

6.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

6.6 成型方法，成型主要参数。

6.7 含水率，干密度，含水率损失，围压等级、相应的剪切强度，抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  和抗剪强度比（必要时）等试验结果。

6.8 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1 剪切强度是粒料材料最显著的力学性能之一，一般认为其与现场抗永久性能密切相关。根据试验得出  $c$ 、 $\varphi$ ，可以按式（T 1236-9）计算路面结构在行车荷载作用下是否产生剪切破坏。

澳大利亚相关标准，在粒料材料设计时，直接规定  $c$  不大于 150kPa、 $\varphi$  不小于  $45^\circ$ 。而根据相关文献，认为 SSR 与重复永久变形试验相关性非常好，提出当 SSR 大于 0.7 或 0.75 时，路面材料发生永久变形风险较高。

4.8 剪切强度试验时围压水平和轴向加载速率是主要控制参数。美国得克萨斯州 Tex-117-E 方法国际应用较多，其针对不同材料选择围压，对于土类，建议采用 0kPa、20.6kPa、34.5kPa、69kPa、103.5kPa 和 138kPa；对于粒料基层，则采用 0kPa、20.6kPa、103.4kPa，但是加载速度均为应变  $(2\% \pm 0.3\%) / \text{min}$ 。查阅文献，美国伊利诺伊州等一些州采用 34.5kPa、68.9kPa、103.4kPa，加载速度为应变  $1\% / \text{min}$ 。澳大利亚 AS 1289.6.4.1 认为需要根据材料情况选定围压，加载速率按应变  $(1\% \sim 2\%) / \text{min}$  选定，而南澳大利亚等地方标准要求采用 30kPa、60kPa、90kPa。粒料材料在路面结构中的水平应力取决于其层位，理论上试验围压应与材料在实际路面工程中应力水平相符，但是对于粒料材料，由于应力增强作用比路基土明显，当围压大于 100kPa 时，需要施加的轴向应力非常大，往往超过 1500kPa，这就会超过传感器荷载测量量程和加载系统的加载能力。因此，粒料材料的围压不宜过大。同时，粒料材料黏结力较小，采用 0kPa 围压，试件在自身重力作用下容易破坏，试验可操作性差，因此不进行 0kPa 围压试验。

一些文献和标准中允许一个试件在测定一个低应力的围压之后，卸除轴向荷载，放置 2h 以上，继续测定更高应力的围压，即一个试件测定所有围压条件的最大轴向应力。目前我国相关试验研究不多，因此规定一个试件只进行一个围压水平的测试。

5.6 粒料材料在行车荷载作用下，最不利剪切面为  $45^\circ + \varphi/2$  剪切面，因此按此剪切面法向主应力计算剪切强度，相关示意图如图 T 1236-2 所示。

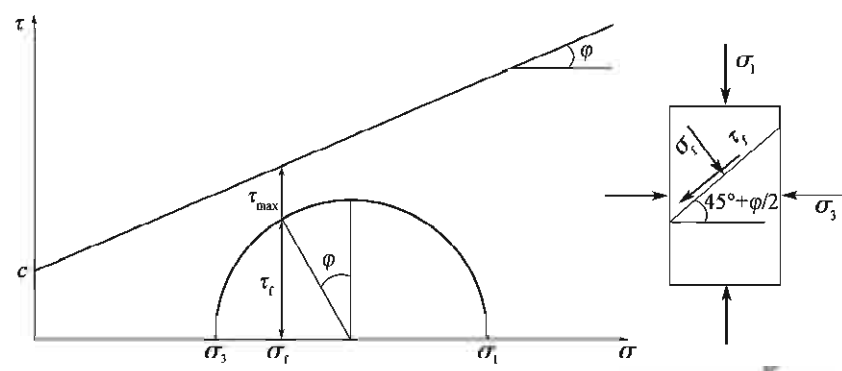


图 T 1236-2 剪切强度计算示意图

## 8 回弹模量试验

### T 1245—2026 抗压回弹模量试验

#### 1 适用范围

1.1 本方法适用于测定无结合料粒料的抗压回弹模量。

1.2 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 的无结合料粒料。

#### 2 仪器与材料

2.1 加载装置：路面材料强度试验仪或压力机、万能试验机等加载装置，加载能力不小于 50kN，加载速率为 0~5mm/min 可调。升降工作台升降距离不小于 200mm，测量装置距升降工作台面高度不小于 300mm。

2.2 应力测量装置：可采用数显应力传感器或应力环式传感器。数显应力传感器量程不低于 30kN，准确度等级 0.5 级。应力环式传感器规格可为 30kN，精度为 1.0%。

2.3 位移测量装置：两个数显式位移传感器或两块千分表，量程不小于 2mm，分度值不大于 0.001mm，同时带用于固定位移测量装置的支架和表夹。

2.4 承载板：用钢板制成的空心圆柱体，直径  $50\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，高 80mm。两侧带有位移测量支架。贯入端应采用硬化钢。

2.5 试模：应满足本规程 T 1235 的要求，在与底板的拉杆连接的定位板上多一个内径 5mm、深 5mm 的螺孔，用来安装位移测量支架。

2.6 秒表 1 只。

2.7 滤纸：快速滤纸，直径 150~151mm。

**2.8** 重型击实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1220 的规定。

**2.9** 振动压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1221 的规定。

**2.10** 振动锤压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1224 的规定。

### 3 试验准备

**3.1** 定期进行应力测量装置、位移测量装置等标定。

**3.2** 根据设计标准或工程实际情况，选择如下成型方法：

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验（击实类型乙类）；
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验；
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

**3.3** 按照选定的成型方法，确定混合料的最大干密度和最佳含水率。

注：若已知最大干密度和最佳含水率，可采用已有数据。

**3.4** 检查击实仪器各部件是否有松动，击锤表面是否磨损，击锤提升装置是否运转正常。拼装试模，检查击实筒、套筒、底座和垫块是否紧密连接，击实筒是否有凹痕、磨损。

**3.5** 击实筒容积的标定：准确测量击实筒的内径、高度和垫块的高度，尺寸不符合时不得使用。在击实筒底部测定内径 3 次，每转动 120°测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次，计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。测定击实筒高度 3 次，每转动 120°测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度；按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算试模容积，精确至 0.01cm<sup>3</sup>。

**3.6** 检查加载装置是否运转正常。检查应力测量装置、位移测量装置是否符合要求。用游标卡尺测定承载板直径，每转动 120°测一次，计算 3 个测定平均值为承载板的直径。

### 4 试件成型步骤

**4.1** 取各单档集料样品进行试验

**4.1.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品。当试样中有大于 37.5mm 颗粒时，应

予以筛除。

**4.1.2** 将各单档集料的样品风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，根据混合料中各档集料的配比和预定的含水率（一般为最佳含水率），采用本规程 T 1220 重型击实试验（击实类型乙类）、T 1221 振动压实试验或 T 1224 振动锤压实试验方法，拌制 3 份试样；每份试样增加 500g，用于测定试样含水率。

注：本方法成型标准含水率采用最佳含水率，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实标准压实功。当采用非最佳含水率或非标准压实功时，需要在报告中注明。

**4.1.3** 称取干燥击实筒和垫块的质量。取一份养生试样放在金属盘中，用简易四分法缩分 500g 混合料，按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ )，精确至 0.1%。剩余试样按本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实成型试件。称取成型后击实筒、垫块和湿试样的总质量。

**4.1.4** 卸除试模的拉杆。在试件顶面放一滤纸，多孔底板通过拉杆固定在试模上，注意使击实筒中心与多孔底板中心对中。将试件和试模上下颠倒调换方向，移除垫块，通过拉杆使试模与多孔底板紧密固定。

## **4.2 取混合料样品进行试验**

**4.2.1** 按本规程 T 1201 取混合料样品。当样品中有大于 37.5mm 颗粒时，应予以筛除。

**4.2.2** 将样品风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实成型试件，按预定的含水率（一般为最佳含水率），拌制 3 份试样；每份试样增加 500g，用于测定试样含水率。

注：本试验成型标准含水率采用最佳含水率，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实标准压实功。当采用非最佳含水率，或非标准压实功时，需要在报告中注明。

**4.2.3** 按步骤 4.1.3、4.1.4 成型试件，进行试件处理。

**4.3** 每种混合料应至少成型 3 个试件。

## **5 试件养生**

**5.1** 试件成型后称量总质量（连同试模），立即用塑料袋等密封养生、水分平衡不

少于 12h。

**5.2** 在抗压回弹模量测定前,再次称量试件(连同试模)质量,前后两次的质量差为水分损失量,计算含水率损失不大于 0.5%。

## 6 抗压回弹模量试验步骤

**6.1** 将试件(连同试模)放在加载装置升降台上,并进行固定。将承载板放在试件中央位置。安装位移测量装置。

**6.2** 调整偏球座及试件、承载板位置,使试件、承载板、贯入杆对中。采用预定最大单位压力  $P_{\max}$  进行预压,  $P_{\max}$  可取 300 ~ 500kPa。预压进行 1~2 次,每次预压 1min。预压后调正承载板位置,并将千分表调到接近满量程的位置,准备试验。

**6.3** 将预定最大单位压力分成 4~6 等份,计算每级加载的压力。

**6.4** 操作加载装置上升,加载速率为 1mm/min,加载至第 1 级(最小)荷载,静置 1min 后,测记位移读数和荷载读数。操作加载装置下降卸载,完全卸载后静置 1min,再次测记位移读数。

注:加载后静置期间,荷载读数会有所下降,因此应以测量的实际荷载为该加载等级。

**6.5** 按 6.4 步骤完成逐级加载、卸载,直至最后一级(最大)荷载。

**6.6** 试验结束后,整个试件脱模移入大金属盘中,称量试件总质量。用橡胶锤将试件敲散,按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ ),精确至 0.1%。烘干后的混合料应废弃,不得重复利用。

## 7 结果整理

**7.1** 各级荷载的回弹变形按 (T 1245-1) 计算:

$$l = l_1 - l_2 \quad (\text{T 1245-1})$$

式中:  $l$ ——回弹变形 (0.001mm);

$l_1$ ——加载静置 1min 后的变形量 (0.001mm);

$l_2$ ——卸载静置 1min 后的变形量 (0.001mm)。

**7.2** 以回弹变形 ( $l$ ) 为横坐标,加载压力 ( $p$ ) 为纵坐标,绘制  $l$ - $p$  曲线,如

图 T 1245-1 所示。当曲线开始段为上凹时, 需要进行修正: 将  $l-p$  曲线最后一点记为 E 点; 将  $l-p$  曲线的直线段进行外延, 使其与横坐标轴交于 O' 点, 外延段起点为拐点, 记为 S; 或作  $l-p$  曲线的斜率最大的切线, 切线与  $l-p$  曲线重合段的中点为拐点, 记为 S, 切线与横坐标轴交于 O' 点; 以 O' 点为坐标系原点, 以 O'S 直线段、SE 曲线段组成的曲线 O'SE 作为修正后的  $l-p$  曲线。

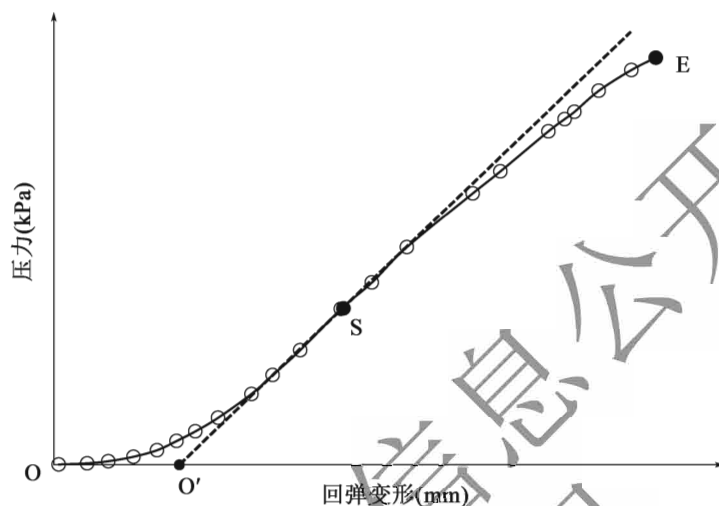


图 T 1245-1 抗压回弹模量试验加载压力-回弹变形曲线

7.3 各级荷载下的回弹模量按 (T 1245-2) 计算:

$$E_i = \frac{\pi p_i D}{4 l_i} (1 - \mu^2) \quad (\text{T 1245-2})$$

式中:  $E_i$ ——第  $i$  级荷载下的回弹模量 (kPa);  
 $p_i$ ——施加第  $i$  级荷载时的实测压力 (kPa);  
 $D$ ——实测承载板直径 (mm);  
 $l_i$ ——第  $i$  级荷载时修正后的回弹变形 (mm);  
 $\mu$ ——泊松比, 取 0.35。

7.4 取 3 个试件相应荷载等级下的回弹模量平均值作为试验结果, 精确至 1MPa。

## 8 允许误差

抗压回弹模量重复性试验的允许误差为 5%。

## 9 报告

9.1 试验项目名称和执行标准。

9.2 样品的编号、名称、产地和规格。

9.3 接样日期、样品描述。

9.4 试验日期、样品缩分方法。

9.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

9.6 成型方法，成型主要参数。

9.7 含水率，干密度，含水率损失，荷载等级， $l-p$  曲线，回弹模量结果。

9.8 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1 本规程规定了三种回弹模量试验方法，分别为抗压回弹模量、动态贯入回弹模量和动态回弹模量，其中抗压回弹模量属于静态回弹模量，动态贯入回弹模量和动态回弹模量属于动态模量，三种试验方法测定结果不等效。与静态模量相比较，动态模量试验过程更接近无结合料粒料材料在移动行车荷载作用下的力学行为，因此更加准确。在工程应用时，可根据要求选择相应的回弹模量试验方法。但在路面结构设计和性能预估时，一般按本规程 T 1247 方法测定动态回弹模量；当不具备动态三轴试验条件时，可按本规程 T 1246 方法测定动态贯入回弹模量代替动态回弹模量。

抗压回弹模量主要有杠杆压力仪法和强度仪法，两者试验方法基本相同，仅仪器有所不同。根据调研和征求意见，杠杆压力仪应用非常少，不建议采用，同时回弹模量试验时可以采用压力机、万能试验机等，不局限于强度仪，因此本方法在传统强度仪基础上，增加了压力机、万能试验机等加载装置。

6.2 考虑粒料材料模量具有应力依赖性，应力水平对其有较大影响，根据无结合料粒料在路面结构中的层位及受力状态，取最大加载压力为 300 ~ 500kPa。

7.2 由于试件在开始受压阶段，承载板与试件之间接触不可能完全紧密，使开始阶段的回弹变形值增大而使曲线呈上凹趋势，因此需要进行原点修正。

### T 1246—2026 贯入回弹模量试验（重复加载贯入法）

#### 1 目的和适用范围

1.1 本方法适用于重复加载贯入法测定无结合料粒料的回弹模量和塑性变形，以评

价粒料材料的承载能力和抗永久变形能力。

**1.2** 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 的无结合料粒料。

## **2 仪器与材料**

### **2.1 加载系统：**

(1) 加载装置：动态材料试验机，加载能力不小于 50kN，应力控制模式，加载波形为半正弦波，频率为 0.1Hz。升降工作台升降距离不小于 200mm，测量装置距升降工作台面高度不小于 300mm。

(2) 应力测量装置：采用数显应力传感器，量程不低于 30kN，准确度等级 0.5 级。

(3) 位移测量装置：可采用线性差动位移传感器，量程不低于 10mm。

(4) 贯入杆：金属柱，贯入端面直径  $50\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，长度约 100mm，贯入端应采用硬化钢。

(5) 数据采集系统：试验过程中自动采集并储存应力和位移等数据。

**2.2** 试验筛：孔径为 37.5mm 的方孔筛，应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.3** 试模、多孔底板：同本规程 T 1235 的要求。

**2.4** 水槽：能够同时容纳不少于 3 个试件，深度不小于 200mm，底部为开孔平台。

**2.5** 滤纸：快速滤纸，直径 150~151mm。

**2.6** 深度尺：量程 30cm，精度 0.02mm。

**2.7** 重型击实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1220 的规定。

**2.8** 振动压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1221 的规定。

**2.9** 振动锤压实试验相关仪器与材料应符合本规程 T 1224 的规定。

## **3 试验准备**

**3.1** 定期进行应力测量装置、位移测量装置等标定。

**3.2** 根据设计标准或工程实际情况,选择如下成型方法。

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验 (击实类型乙类);
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验;
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

**3.3** 按照选定的成型方法,确定混合料的最大干密度和最佳含水率。

注:若已知最大干密度和最佳含水率,可采用已有数据。

**3.4** 检查击实仪器各部件是否有松动,击锤表面是否磨损,击锤提升装置是否运转正常。拼装试模,检查击实筒、套筒、底座和垫块是否紧密连接;击实筒是否有凹痕、磨损。

**3.5** 击实筒容积的标定:准确测量击实筒的内径、高度和垫块的高度,尺寸不符合时不得使用。在击实筒底部测定内径 3 次,每转动  $120^\circ$  测一次;按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次;计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。测定击实筒高度 3 次,每转动  $120^\circ$  测一次,计算 3 个测定平均值为击实筒的高度;按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算试模容积,精确至  $0.01\text{cm}^3$ 。

**3.6** 检查加载装置是否运转正常。检查应力测量装置、位移测量装置是否符合要求。用游标卡尺测定贯入杆贯入端面直径,每转动  $120^\circ$  测一次,计算 3 个测定平均值为贯入杆的直径。

## 4 试件成型步骤

**4.1** 取各单档集料样品进行试验

**4.1.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品。当试样中有大于  $37.5\text{mm}$  颗粒时,应予以筛除。

**4.1.2** 将各单档集料的样品风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干,根据混合料中各档集料的配比和预定的含水率 (一般为最佳含水率),采用本规程 T 1220 重型击实试验 (击实类型乙类)、T 1221 振动压实试验或 T 1224 振动锤压实试验方法,拌制 3 份试样;每份试样增加  $500\text{g}$ ,用于测定试样含水率。

注:本试验成型标准含水率采用最佳含水率,采用本规程 T 1220 (击实类型乙类) 重型击实、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实标准压实功。当采用非最佳含水率,或非标准压实功时,需要在报告中注明。

**4.1.3** 称取干燥击实筒和垫块的质量。取一份养生试样放在金属盘中，用简易四分法缩分 500g 混合料，按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ )，精确至 0.1%。剩余试样按本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实成型试件。称取成型后击实筒、垫块和湿试样的总质量。

**4.1.4** 卸除试模的拉杆。在试件顶面放一滤纸，多孔底板通过拉杆固定在试模上，注意使击实筒中心与多孔底板中心对中。将试件和试模上下颠倒调换方向，移除垫块，通过拉杆使试模与多孔底板紧密固定。

## **4.2 取混合料样品进行试验**

**4.2.1** 按本规程 T 1201 取混合料样品。当样品中有粒径大于 37.5mm 颗粒时，应予以筛除。

**4.2.2** 将样品风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实成型试件，按预定的含水率（一般为最佳含水率），拌制 3 份试样；每份试样增加 500g，用于测定试样含水率。

注：本试验成型标准含水率采用最佳含水率，采用本规程 T 1220 重型击实（击实类型乙类）、T 1221 振动压实或 T 1224 振动锤压实标准压实功。当采用非最佳含水率，或非标准压实功时，需要在报告中注明。

**4.2.3** 按步骤 4.1.3、4.1.4 成型试件，进行试件处理。

**4.3** 每种混合料应成型至少 3 个试件。

## **5 试件浸泡养生**

**5.1** 成型的试件，应立即浸泡养生。

**5.2** 将试模和试件移入水槽中。当水槽中有多个试件时，试件之间不得接触，保持均匀距离。在试件表面放一快速滤纸，安装多孔顶板、荷载板；将百分表支架放置在试模顶部，将百分表固定在合适高度，调整调节杆使百分表表头处于合适位置。

**5.3** 向水槽中加水，使水能够自由进到试件的顶部和底部。饱水期间，保持水面高出试件表面 25mm 以上。当加水使水位达到试件顶部时，开始计时，读取百分表初始读数。静置浸泡至  $96\text{h} \pm 30\text{min}$  结束，读取百分表最终读数。

**5.4** 浸泡结束后, 移除百分表及其支架, 从水槽中取出试件, 移除顶面的水, 静置排水  $15\text{min} \pm 30\text{s}$ 。移走加荷板、多孔顶板和滤纸。

## 6 贯入回弹模量试验步骤

**6.1** 将试件放在加载装置升降台上, 并进行固定, 调整偏球座, 对中、整平后, 按照荷载和位移测量装置, 开启数据采集系统。

**6.2** 下降贯入杆接触至试件表面, 施加  $35\text{N}$  荷载保持贯入杆和试件正接触。荷载和位移测量装置清零。按应力控制模式, 设置频率  $0.1\text{Hz}$ 、半正弦波的  $3\text{kN}$  动态荷载, 加载  $50$  次进行预压。

**6.3** 预压完成后, 卸载至荷载传感器显示约  $35\text{N}$ , 保持贯入杆和试件正接触。荷载和位移测量装置清零。按应力控制模式, 设置频率  $0.1\text{Hz}$ 、半正弦波的  $20\text{kN}$  动态荷载, 启动加载装置, 重复加载、卸载  $200$  次, 连续采集应力、贯入量。

**6.4** 操作加载装置, 提升贯入杆, 移除试件。

## 7 结果整理

**7.1** 以贯入量 ( $l$ ) 为横坐标, 应力 ( $p$ ) 为纵坐标, 绘制  $l$ - $p$  曲线, 如图 T 1246-1 所示。根据  $l$ - $p$  曲线, 计算每次加载的回弹变形。

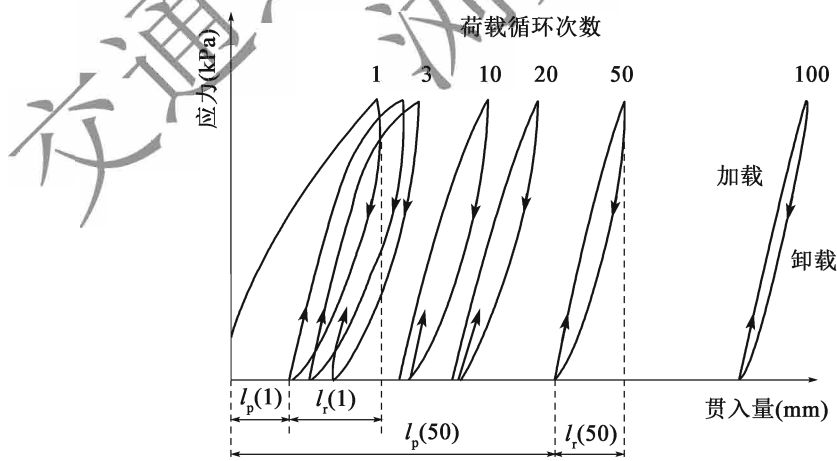


图 T 1246-1 重复加载贯入量-应力曲线示意图

$l_p(1)$ -加载第 1 次永久变形;  $l_r(1)$ -加载第 1 次回弹变形;  $l_p(50)$ -加载第 50 次永久变形;  $l_r(50)$ -加载第 50 次回弹变形

7.2 试件贯入回弹模量按式 (T 1246-1) 计算, 精确至 0.1:

$$E = \frac{P_{\max}}{D l_r} (1 - \mu^2) \times 1\,000 \quad (\text{T 1246-1})$$

式中:  $E$ ——试件贯入回弹模量 (MPa);

$\mu$ ——泊松比, 取 0.35;

$D$ ——实测贯入杆直径 (mm);

$P_{\max}$ ——半正弦波最大荷载幅值 (kN);

$l_r$ ——试件回弹变形, 取最后 5 次 (第 196 ~ 200 次) 回弹变形平均值 (mm)。

7.3 取加载最后 5 次 (第 196 ~ 200 次) 累计永久变形平均值作为试件永久变形结果。

7.4 取 3 个试件的贯入回弹模量平均值作为样品贯入回弹模量试验结果, 精确至 1 MPa。取 3 个试件的永久变形平均值作为样品永久变形试验结果, 精确至 0.01 mm。

## 8 允许误差

贯入回弹模量重复性试验的允许误差为 5%。

## 9 报告

9.1 试验项目名称和执行标准。

9.2 样品的编号、名称、产地和规格。

9.3 接样日期、样品描述。

9.4 试验日期、样品缩分方法。

9.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

9.6 成型方法, 成型主要参数。

9.7 含水率, 干密度, 最大荷载幅值,  $l$ - $p$  曲线, 贯入回弹模量和永久变形结果。

9.8 要说明的其他内容。

## 条文说明

1 此方法即重复加载承载比 RL-CBR 试验,由哈尔滨工业大学根据其多年研究提出。

传统 CBR 试验属于静态贯入试验,其变形包含了回弹变形和永久变形两部分。采用重复加载法实现动态加载,可以分离出回弹变形和永久变形,能够更加合理评价混合料性能。

根据调研,该方法在荷兰等国家得到应用。与动态三轴法相比,该方法试件成型和加载试验较为简单,可以在不具备三轴试验条件时作为替代方法。

## T 1247—2026 动态回弹模量试验 (动态三轴法)

### 1 适用范围

1.1 本方法适用于动态三轴法测试无结合料粒料的动态回弹模量。

1.2 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 三轴压力室 (简称三轴室):根据位移测量装置和荷载传感器的位置分为内置式三轴室和外置式三轴室,有条件时宜采用内置式。

2.1.1 内置式三轴室,典型结构如图 T 1247-1 所示。

2.1.2 外置式三轴室,典型结构如图 T 1247-2 所示。

2.1.3 三轴室应采用聚碳酸酯、丙烯酸或其他透明材料制成。

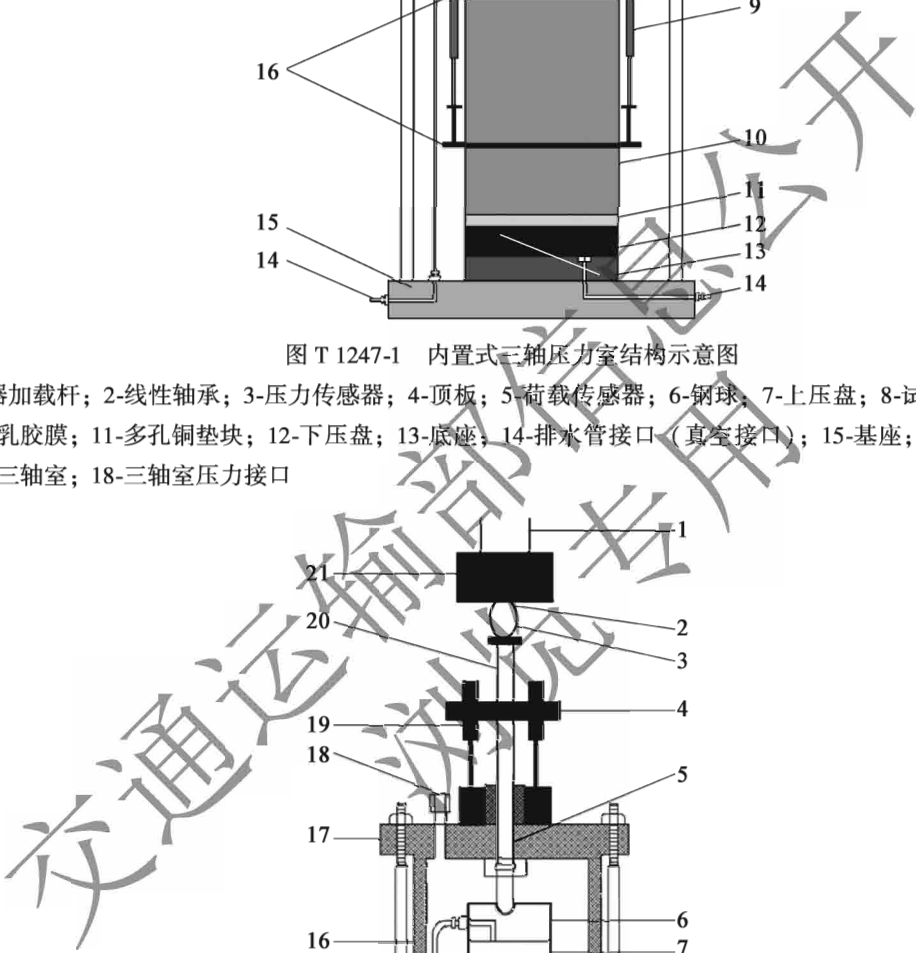
#### 2.2 加载装置

##### 2.2.1 轴向加载器:

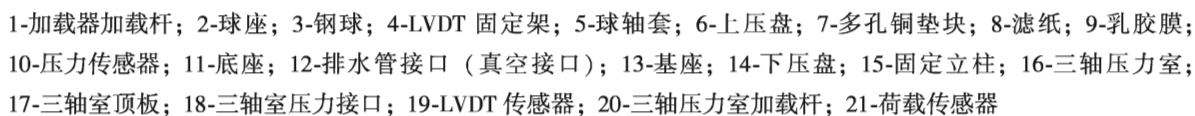
(1) 应为顶部加载式,宜采用闭环电-液或电-气伺服加载装置,能够产生图 T 1247-3 所示轴向重复的半正弦脉冲荷载,最大偏应力应不小于 600kPa,加载应力控制精度为  $\pm 2\text{kPa}$  (或  $\pm 1\%$ ,取两者中较大值)。

(2) 一个重复循环周期包括加载期和恢复期。对于电-气伺服加载器,加载期为 0.1s,恢复期为 0.9~3.0s;对于电-液伺服加载器,加载期为 0.1s,恢复期为 0.9s。

(3) 允许采用其他加载波形,但应在报告中说明。



1-加载器加载杆; 2-线性轴承; 3-压力传感器; 4-顶板; 5-荷载传感器; 6-钢球; 7-上压盘; 8-试件; 9-LVDT 传感器; 10-乳胶膜; 11-多孔铜垫块; 12-下压盘; 13-底座; 14-排水管接口(真空接口); 15-基座; 16-位移传感器夹具; 17-三轴室; 18-三轴室压力接口



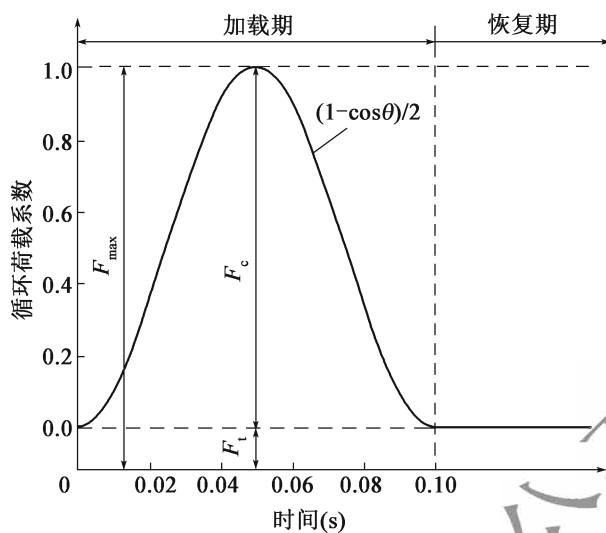


图 T 1247-3 半正弦形加载波

### 2.2.2 压力系统:

- (1) 三轴室围压的介质宜采用空气, 围压也可采用抽真空方式在试件内部形成局部真空的方式施加, 施加的最大围压应不小于 150kPa;
- (2) 施加的围压控制精度为  $\pm 2\text{kPa}$ 。

## 2.3 荷载传感器

**2.3.1** 应采用电子荷载传感器。荷载传感器可按图 T 1247-1 和图 T 1247-2 中的位置安装。对于内置式三轴室, 荷载传感器也可与上压盘直接连接, 荷载传感器上方放钢球, 通过钢球与加载杆连接。

**2.3.2** 荷载传感器, 对于 152mm 试件, 量程不小于 22kN, 精度为  $\pm 22\text{N}$ 。

## 2.4 压力传感器

**2.4.1** 三轴室围压应采用压力传感器进行测定。

**2.4.2** 压力传感器的量程应不小于 210kPa, 精度为  $\pm 1.0\text{kPa}$ 。

## 2.5 位移测量装置

**2.5.1** 试件的变形可采用线性差动位移传感器进行测量。

### 2.5.2 线性差动位移传感器应满足表 T 1247-1 的要求。

表 T 1247-1 位移传感器技术要求

| 最小量程<br>(mm) | 最小 AC 输出电压<br>(mV) | 最小灵敏度 (mV/V@0.025mm) |
|--------------|--------------------|----------------------|
| $\pm 6.0$    | 6                  | 2.1                  |

### 2.5.3 线性差动位移传感器还应满足以下要求：

(1) 线性达到全量程的  $\pm 0.25\%$ ，重复性达到全量程的  $\pm 1\%$ ，传感器长度满足相应测量要求。

(2) 对于内置式三轴室，采用两个或三个夹持式线性差动位移传感器，测定不大于高度 1/2 中段的轴向变形量；必要时，采用两个或三个回弹式线性差动位移传感器，测定径向变形量。线性差动位移传感器采用夹具，按图 T 1247-1 固定在试件上。

(3) 对于外置式三轴室，采用两个回弹式线性差动位移传感器，测定轴向变形量，按照图 T 1247-2 采用固定架固定在加载杆上。

(4) 线性差动位移传感器固定夹具可采用如图 T 1247-4 或图 T 1247-5 的夹具。夹具上可打孔减轻质量，对于 152mm 直径的夹具，质量应不大于 250g。对于卡环式夹具，需配置 4 个直径 12mm 金属杆，用于夹具在试件上水平固定时定位。

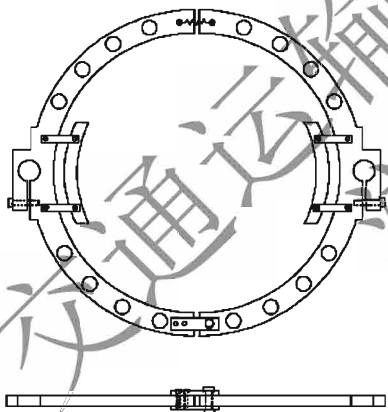


图 T 1247-4 卡环式位移传感器夹具示意图

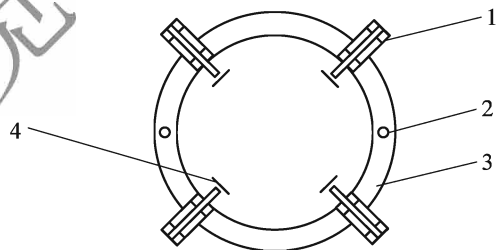


图 T 1247-5 固定环式位移传感器夹具示意图  
1-回弹式螺栓固定器；2-轴向线性差动位移传感器固定孔；3-固定环；4-边长约 10mm 的塑料等垫片，通过胶粘在试件乳胶膜上

## 2.6 数据采集系统

2.6.1 采用数字模拟 (A/D) 数据采集系统，自动同时采集变形、荷载和压力等数据，并能记录、储存、处理和实时显示数据，配备信号激励、调节和采集装置。

**2.6.2** 数据采集系统满足或优于以下要求：A/D 转换时间为  $25\mu\text{s}$ ；分辨率为 12 位；单通道或多通道输入输出为  $30\text{kHz}$ ；测量精度为全量程的  $\pm 0.02\%$ ；非线性度为  $\pm 0.5\%$ 。信号洁净、无噪声，采用接地的屏蔽电缆连接。不建议对采集的输出信号进行过滤。如果采用滤波器过滤，应选择合适的频率，不能减弱信号，频率应高于  $10\sim 20\text{Hz}$ 。每个传感器需单独连线，每个位移传感器一个加载期至少记录 200 个数据点。

**2.6.3** 设定的半正弦波形和响应的波形应该能够实时显示，便于必要的增减调整使两者一致。

**2.7** 上下压盘：刚性、耐腐蚀、不透水材料制成，直径等于或略大于试件的初始直径，内部设计排水通道。上下压盘与橡皮圈接触的侧面应光滑、无划痕。

**2.8** 真空源：带气泡室和可调压的真空源。

**2.9** 乳胶膜： $0.25\sim 0.80\text{mm}$  厚的乳胶膜，未扩展时原始直径应不小于试件直径的  $95\%$ ，一个试件上套有 2 个或以上乳胶膜时，其总厚度不超过试件直径的  $0.8\%$ 。乳胶膜长度略长于试件高度、上下压盘厚度之和。

**2.10** 多孔垫块：厚  $6\text{mm}\pm 0.2\text{mm}$ ，直径等于或略小于试件的初始直径，铜或不锈钢材质。当多孔垫块堵塞时，需要更换新多孔垫块。

**2.11** 试件成型仪具：应满足本规程 T 1227 的规定。

**2.12** 其他工具包括测径器、千分尺、分度值  $0.5\text{mm}$  的钢尺、O 形密封圈、张膜器、天平、金属盘、脱模仪。

### 3 试验准备

**3.1** 定期进行应力测量装置、位移测量装置等标定。

**3.2** 仪器检查

**3.2.1** 检查轴向加压系统、周围压力系统是否运行正常。

**3.2.2** 检查三轴室密封不泄露。

### 3.3 试件制备

3.3.1 按本规程 T 1227 取样成型试件。

3.3.2 试件密封养生、水分平衡不少于 12h。试件成型后放置不得超过 5d。

## 4 试验步骤

### 4.1 试件安装

4.1.1 将上下压盘排水管接口与三轴室排水接口连接；三轴室排水接口与真空源连接，接上气泡室，施加 7 ~ 10kPa 真空使试件能够站立，打开试模夹具，卸除对开击实筒内真空，拆除对开击实筒。

4.1.2 观察气泡室，如果存在气泡，应检查并消除引起泄漏的原因，如连接不良，乳胶膜有洞，上下压盘与乳胶膜之间密封不严等。对因乳胶膜有孔洞引起的泄漏，可在乳胶膜表面涂抹液态乳胶或套装新乳胶膜等方法来消除。若胶乳膜破损，可在乳胶膜表面涂抹液态乳胶或套装新乳胶膜。套装新乳胶膜时，采用张膜器辅助套装，用 O 形密封圈将乳胶膜上下两端在压盘上固定、密封。

4.1.3 测量试件高度和直径。高度应测定 3 次（每转动 120°测定 1 次）取平均值作为初始高度，其值应符合  $306\text{mm} \pm 5\text{mm}$  要求。直径应在上、中、下三个部位各测定 3 次（每转动 120°测定 1 次），取所有测定值平均值。

4.1.4 若不在三轴室底座上成型试件，则在三轴试验前，将养生好的试件置于三轴室底座或三轴仪升降台上，再按以上方法进行脱模、检查乳胶膜泄漏、测量尺寸。

### 4.2 三轴室安装

4.2.1 内置式三轴仪按照如下要求安装：

(1) 如图 T 1247-1 所示，采用夹具将 2 个线性差动位移传感器固定在试件上。先将两个夹具分别水平固定在试件高度的 1/4 和 3/4 位置，上、下夹具保持平行，并与试件轴线垂直；将两个轴向位移传感器在试件两侧对称安装，并与试件轴线平行。当采用其他试件高度时，应在报告中说明。

(2) 对于卡环式夹具，其固定在试件上时需采用 4 个直径 12mm 金属杆定位。

(3) 对于固定环式夹具，先沿试件四周将垫片粘在乳胶膜上，调整回弹式螺栓固定器，通过弹簧施加压力将螺栓顶在垫片上进行对中、固定，然后安装两个轴向位移传

感器。

(4) 安装三轴室，盖上三轴室顶板，插入加载杆，在加载杆底部安装荷载传感器；将加载钢球放在上压盘凹槽上；缓慢操作加载装置至荷载传感器底部与钢球稍有接触，侧向移动试件，同时慢慢旋转钢球，进行加载杆、钢球、试件轴向对中。

(5) 打开数据采集系统，检验采集系统是否工作正常；手动各荷载、位移传感器，检验是否工作正常。必要时对位移传感器杆（或轴）进行清洁和润滑。

(6) 用水平仪检查三轴室顶板，确定其表面水平后，充分固定顶板。

(7) 按照要求进行位移传感器和荷载传感器读数调零。

#### 4.2.2 外置式三轴仪按照如下要求安装：

(1) 安装三轴室，盖上三轴室顶板，用水平仪检查三轴室顶板，确定其表面水平后，均匀拧紧固定立柱固定顶板。将加载钢球放在三轴室加载杆顶面凹槽上；缓慢操作升降台至荷载传感器底部与钢球稍有接触，侧向移动三轴室，同时慢慢旋转钢球，进行加载杆、钢球、试件轴向对中。将三轴室在三轴仪升降台上固定。

(2) 如图 T 1247-2 所示，采用支架将 2 个线性差动位移传感器固定在三轴室加载杆上。

(3) 两个传感器与三轴室加载杆等距，且不大于 51mm。测试过程中传感器与支撑面始终保持垂直正接触。

(4) 打开数据采集系统，检验采集系统是否工作正常；手动各荷载、位移传感器，检验是否工作正常。必要时对位移传感器杆（或轴）进行清洁和润滑。

(5) 按照要求进行位移传感器和荷载传感器读数调零。

#### 4.3 预加载

4.3.1 将三轴室压力接口与压力源连接，按表 T 1247-2 中序列“0-预载”应力条件，通过三轴室施加围压 105kPa。同时卸除试件内真空，移走真空源，打开底部和顶部的所有排水管，在整个试验过程中保持全开，与大气连通。

4.3.2 待卸除试件内真空后，再次调整施加的围压，使其稳定在 105kPa。按表 T 1247-2 中序列“0-预载”应力条件，操作加载装置或升降台，施加静态的接触荷载，使上压盘、钢球、加载杆等保持垂直正接触。

4.3.3 施加静态的接触荷载后，按表 T 1247-2 中“0-预载”序列应力条件，施加重复的半正弦脉冲垂直轴向荷载。

(1) 重复作用不少于 1 000 次直至垂直永久变形稳定，即垂直永久变形率小于  $10^{-7}$ /次，回弹模量变化率小于 5kPa/次。停止半正弦脉冲垂直轴向荷载，但是围压和静态的接触荷载维持不变。

(2) 预加载过程中, 若试件的永久应变大于 5%, 应停止预载, 分析试件变形过大原因, 必要时重新制备试件测试; 如预加载试件永久应变再次达到 5%, 则停止试验, 并在报告中说明。

(3) 若预加载过程中, 两个垂直位移传感器读数中最大读数与最小读数的比值大于 1.2, 则停止试验。轻敲三轴室底座, 或拧紧一侧固定立柱, 必要时重新安装试件和三轴室, 使加载杆、钢球、试件竖向同轴, 再预加载, 应使两个垂直位移传感器读数满足要求。

(4) 注意观察显示的半正弦脉冲垂直轴向荷载波形与设定的一致性。

#### 4.4 动态回弹模量试验

4.4.1 将围压和接触应力缓慢降至表 T 1247-2 的加载序列 1 的条件, 静置约 1h 至试件轴向应变稳定, 如应变变化率小于  $10^{-4}/\text{min}$ 。

4.4.2 按表 T 1247-2 中序列 1 的应力条件, 施加重复的半正弦脉冲垂直轴向荷载, 重复作用 100 次, 记录每个位移传感器加载最后 5 次的回弹变形平均值、累计永久应变平均值, 以及相应应力条件。

4.4.3 按表 T 1247-2 的序列 2 至 25 应力条件, 依序进行试验。此时不再要求相邻序列之间静置, 先后调整围压、接触应力后立即自动施加重复的半正弦脉冲垂直轴向荷载进行试验。

表 T 1247-2 加载序列

| 加载序列号 | 围压 $S_3$<br>(kPa) | 接触应力 $S_1$<br>(kPa) | 循环应力 $S_e$<br>(kPa) | 最大轴向应力 $S_{\max}$<br>(kPa) | 荷载作用次数        |
|-------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| 0-预载  | 105               | 21                  | 210                 | 231                        | $\geq 1\ 000$ |
| 1     | 20                | 4                   | 10                  | 14                         | 100           |
| 2     | 20                | 4                   | 20                  | 24                         | 100           |
| 3     | 20                | 4                   | 40                  | 44                         | 100           |
| 4     | 20                | 4                   | 60                  | 64                         | 100           |
| 5     | 20                | 4                   | 80                  | 84                         | 100           |
| 6     | 40                | 8                   | 20                  | 28                         | 100           |
| 7     | 40                | 8                   | 40                  | 48                         | 100           |
| 8     | 40                | 8                   | 80                  | 88                         | 100           |
| 9     | 40                | 8                   | 120                 | 128                        | 100           |
| 10    | 40                | 8                   | 160                 | 168                        | 100           |
| 11    | 70                | 14                  | 35                  | 49                         | 100           |

续表 T 1247-2

| 加载序列号 | 围压 $S_3$<br>(kPa) | 接触应力 $S_t$<br>(kPa) | 循环应力 $S_c$<br>(kPa) | 最大轴向应力 $S_{max}$<br>(kPa) | 荷载作用次数 |
|-------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|--------|
| 12    | 70                | 14                  | 70                  | 84                        | 100    |
| 13    | 70                | 14                  | 140                 | 154                       | 100    |
| 14    | 70                | 14                  | 210                 | 224                       | 100    |
| 15    | 70                | 14                  | 280                 | 294                       | 100    |
| 16    | 105               | 21                  | 50                  | 71                        | 100    |
| 17    | 105               | 21                  | 105                 | 126                       | 100    |
| 18    | 105               | 21                  | 210                 | 231                       | 100    |
| 19    | 105               | 21                  | 315                 | 336                       | 100    |
| 20    | 105               | 21                  | 420                 | 441                       | 100    |
| 21    | 140               | 28                  | 70                  | 98                        | 100    |
| 22    | 140               | 28                  | 140                 | 168                       | 100    |
| 23    | 140               | 28                  | 280                 | 308                       | 100    |
| 24    | 140               | 28                  | 420                 | 448                       | 100    |
| 25    | 140               | 28                  | 560                 | 588                       | 100    |

**4.4.4** 试验过程中, 如果试件永久应变达到 5%, 应停止试验, 并在报告中予以说明。

**4.5** 试验结束后, 卸除围压、接触应力, 卸除位移传感器、三轴室; 取出试件。整个试件移入大金属盘中, 脱去乳胶膜, 拍照记录试件破坏情况, 称量试件总质量。用橡胶锤将整个试件敲散, 按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ ), 精确至 0.1%。并计算试件干密度, 精确至 0.001g/cm<sup>3</sup>。烘干后的混合料应废弃, 不得重复利用。

## 5 结果整理

**5.1** 最大荷载按式 (T 1247-1) 计算:

$$F_{max} = F_c + F_t \quad (\text{T 1247-1})$$

式中:  $F_{max}$ ——最大荷载 (N), 试件上施加的最大轴向总荷载, 不包括围压作用力;

$F_t$ ——接触荷载 (N), 重复加载过程中试件上施加的恒定的轴向荷载, 以使上压盘、钢球、加载杆等保持垂直正接触;

$F_c$ ——循环荷载 (N), 加载过程中, 试件上施加的半正弦脉冲轴向荷载的最大幅值。

注：接触荷载在一个加载序列是保持恒定的。接触荷载包括加载杆施加的静载（即荷载传感器显示的荷载）和上压盘及其至钢球之间所有配置自重之和，在实际施加接触荷载时荷载传感器显示的荷载应等于序列对应接触应力扣除配置自重。对于内置式三轴室，配置自重为上压盘的自重；当荷载传感器设置在钢球下方时，应包括上压盘和荷载传感器的自重。对于外置式三轴室，配置自重包括上压盘、三轴室加载杆及固定在三轴室加载杆上的位移测量系统自重。

## 5.2 最大轴向应力按式（T 1247-2）计算：

$$S_{\max} = \frac{F_{\max}}{A} \times 1\,000 \quad (\text{T 1247-2})$$

式中： $S_{\max}$ ——最大轴向应力（kPa），不包括围压；

$A$ ——试件的初始横截面面积（ $\text{mm}^2$ ）。

## 5.3 循环应力按式（T 1247-3）计算：

$$S_c = \frac{F_c}{A} \times 1\,000 \quad (\text{T 1247-3})$$

式中： $S_c$ ——循环轴向应力（kPa）。

## 5.4 接触应力按式（T 1247-4）计算：

$$S_t = \frac{F_t}{A} \times 1\,000 \quad (\text{T 1247-4})$$

式中： $S_t$ ——接触轴向应力（kPa），一般按围压的 20% 取值，即  $S_t = 0.2S_3$ 。

## 5.5 轴向应变按式（T 1247-5）计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{H_0} \quad (\text{T 1247-5})$$

式中： $\varepsilon_1$ ——试件的轴向应变（ $\text{mm/mm}$ ）；

$\Delta l$ ——测定的试件轴向变形（ $\text{mm}$ ）；

$H_0$ ——试件的初始高度（外置式三轴室）或初始的位移传感器测点间距（内置式三轴室）（ $\text{mm}$ ）。

5.6 以轴向应变（ $\varepsilon_1$ ）为横坐标，循环应力（ $S_c$ ）为纵坐标，绘制  $\varepsilon_1$ - $S_c$  曲线，如图 T 1247-6 所示。根据  $\varepsilon_1$ - $S_c$  曲线，计算每次加载应力的回弹变形  $\varepsilon_{ir}$  和永久变形  $\varepsilon_{ip}$ 。

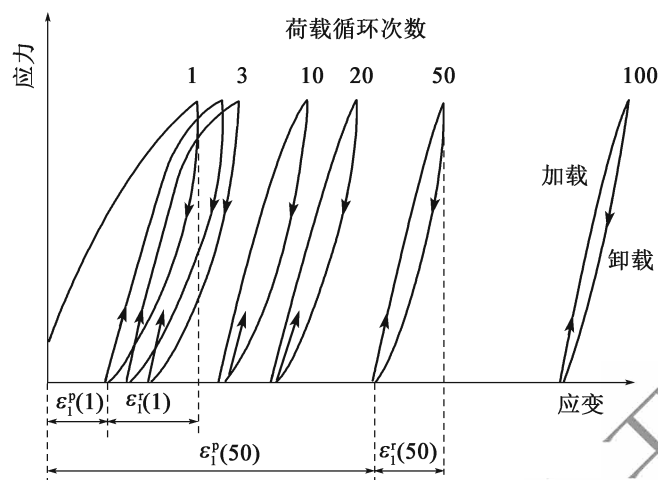


图 T 1247-6 重复加载应变-应力曲线示意图

$\varepsilon_1^p(1)$ -加载第 1 次永久变形； $\varepsilon_1^e(1)$ -加载第 1 次回弹变形； $\varepsilon_1^p(50)$ -加载第 50 次永久变形； $\varepsilon_1^e(50)$ -加载第 50 次回弹变形

注：预加载阶段是以预加载第 1 个半正弦脉冲轴向荷载的状态为起点；而回弹模量试验阶段是以第 1 个序列加载第 1 个半正弦脉冲轴向荷载的状态为起点。

### 5.7 各加载序列的动态回弹模量按式 (T 1247-6) 计算：

$$M_{vj} = \frac{S_{vj}}{\varepsilon_j^r} \times \frac{1}{1000} \quad (\text{T 1247-6})$$

式中： $M_{vj}$ ——第  $j$  个加载序列时动态回弹模量 (MPa)；

$S_{vj}$ ——第  $j$  个加载序列时循环轴向应力 (kPa)；

$\varepsilon_j^r$ ——第  $j$  个加载序列时，最后 5 次的轴向回弹应变平均值 (mm/mm)。

5.8 按各加载序列的  $M_{vj}$ 、 $S_{vj}$  和  $S_{3j}$  数值，按式 (T 1247-7) 采用非线性拟合，确定材料参数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  和回归相关性系数。

$$M_r = k_1 p_a \left( \frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (\text{T 1247-7})$$

式中： $M_r$ ——动态回弹模量 (MPa)；

$\theta$ ——体应力 (kPa)， $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ， $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为相应的主应力；

$\tau_{\text{oct}}$ ——八面体剪应力 (kPa)， $\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$ ；

$k_i$ ——材料参数， $k_1$ 、 $k_2 \geq 0$ ， $k_3 \leq 0$ ；

$p_a$ ——标准大气压 (kPa)，取 101.35 kPa。

## 6 报告

- 6.1 试验项目名称和执行标准。
- 6.2 样品的编号、名称、产地和规格。
- 6.3 接样日期、样品描述。
- 6.4 试验日期、样品缩分方法。
- 6.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 6.6 试件成型方法和成型主要参数；试件初始长度、直径（扣除乳胶膜厚度）和体积；总乳胶膜厚度。
- 6.7 最佳含水率、最大干密度、压实度标准、试件的含水率和干密度。
- 6.8 三轴室的类型，位移传感器类型和测量方式，轴向位移传感器测点距离（内置中段式三轴室）；预加载重复次数及预加载阶段的总轴向永久应变。
- 6.9 回弹模量试验终止条件，是完成全部序列，还是仅完成部分序列，记录完成的序列号。
- 6.10 回弹模量试验各序列的应力条件， $\varepsilon_1$ - $S_0$  曲线，各序列相应的最后 5 次回弹变形值、回弹变形平均值、动态回弹模量和第 100 次的累计永久变形。
- 6.11 回弹模量回归的材料参数 $k_1$ 、 $k_2$ 和 $k_3$ ，以及相关系数。
- 6.12 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 动态三轴试验是粒料材料最重要的试验方法之一，测定回弹变形和累计永久应变，进行动态模量和永久变形建模，评价粒料材料力学行为。

不同标准中对于动态三轴参数要求各异，各种动态三轴试验参数对照表见表 T 1247-3。

表 T 1247-3 动态三轴仪参数对照表

| 来源               | 驱动方式  | 加载波形            | 加载频率<br>(Hz)                                                                    | 三轴室<br>介质    | 位移测量<br>安装方式                    | 荷载测量<br>安装方式 | 围压方式                    |
|------------------|-------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| AASHTO<br>T 307  | 液压、气动 | 半正弦             | 液压: 1 (加载<br>0.1s、恢复 0.9s);<br>气动: 0.32 ~ 1<br>(加载 0.1s、恢复<br>0.9 ~ 3s)         | 空气           | 外置式端部                           | 外置式          | 多级 CCP                  |
| NCHRP<br>1-28    | 液压    | 半正弦             | 1 (加载 0.1s、恢<br>复 0.9s) 或 1.5 ~ 2<br>(加载 0.1 ~ 0.15s、<br>恢复 0.4s, 适合于<br>无塑性粒料) | 空气           | 内置式, 中段 1/2<br>高度, 仅软土采用<br>全长式 | 内置式          | 多级 CCP                  |
| 欧盟<br>EN 13286-7 | 未规定   | 未规定             | 0.2 ~ 10                                                                        | 水、空气、<br>硅油等 | 内置式, 中段法<br>测定不大于 1/2 高<br>度变形  | 内置式          | 多级<br>CCP<br>或多级<br>VCP |
| 芬兰               | 液压    | 半正弦             | 10 (直径 150mm)<br>≤ 20 (直径 200mm、<br>300mm)                                      | 空气<br>或液体    | 内置式或外置式                         | 内置式          | 多级 CCP                  |
| 法国               | 气动    | on-off<br>(近梯形) | ≤ 0.5                                                                           | 空气           | 内置式, 中段 1/3<br>高度               | 内置式          | —                       |
| 德国               | 液压    | —               | 0.1                                                                             | 空气<br>或液体    | 内置式                             | 内置式          | —                       |
| 葡萄牙              | 气动或液压 | on-off<br>(近梯形) | ≤ 0.5                                                                           | 空气           | 内置式                             | 内置式          | —                       |
| 荷兰               | 液压    | 半正弦             | 1 ~ 5                                                                           | 空气           | 内置式, 中段 1/3<br>高度               | 内置式          | 多级 CCP                  |
| 挪威               | 液压    | 半正弦<br>或其他      | 0 ~ 10                                                                          | 液体           | 内置式或外置式                         | 内置式          | —                       |
| 瑞典               | 液压    | 正弦              | 5 (直径 300mm),<br>10 (直径 150mm)                                                  | 空气           | 外置式                             | 外置式          | 多级 CCP                  |
| 瑞士               | 液压    | —               | —                                                                               | 液体           | 内置式或外置式                         | 内置式          | —                       |
| 英国               | 液压    | 正弦              | ≤ 20                                                                            | 液体           | 内置式, 中段 1/2<br>高度               | 内置式          | —                       |
| 澳大利亚             | 液压    | 梯形              | 0.3                                                                             | 液体<br>或空气    | 外置式                             | 外置式          | 多级 CCP                  |
| JTG D50          | 气动或液压 | 半正弦             | 1                                                                               | 宜空气          | 外置式或内置式                         | 外置式<br>或内置式  | 多级 CCP                  |

(1) 轴向加载方式, 主要分为液压式和气动式两种。

目前除了法国、葡萄牙为气动外, 其他地区主要采用液压式。一般认为荷载驱动方

式对结果影响不大，只是影响试验便利性。液压式三轴仪比气动式复杂一些，但是可以容易实现半正弦或正弦等多种波形，同时加载频率较高，可达 20Hz。而气动式三轴仪设备简单，设备费低，但是实现波形较为单一、加载频率不高，一般为 0.5Hz 以下。《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）规定液压和气动两种驱动方式均可。本标准与 JTG D50 规定相同。

动态三轴试验，按荷载级数和围压加载模式，分为多级 VCP、多级 CCP、单级 VCP 和单级 CCP。多级 CCP，应力水平为多级，轴向应力重复加载，而同一级应力水平条件下围压保持恒定，因此仅需要一个轴向荷载加载器。多级 VCP 指轴向、围压均按相同波形同步重复加载，此时需要增加一个围压动态加载器。多级 VCP、CCP，可得到不同应力水平下动态模量，从而构建动态模量方程。单级荷载 VCP 模式主要应用到永久变形，动态模量很少应用。单级荷载 CCP，主要是澳大利亚、新西兰在使用，只有一级轴向应力水平重复加载 50 000 次，围压恒定不变化，既可以得到动态模量，也可以得到累计永久变形量。单级 VCP 和 CCP 方法简单，主要应用于混合料性能设计。VCP 与现场的应力条件更加接近，是国际发展方向，但是对三轴仪要求较高，设备更加复杂、昂贵。目前欧盟 VCP 是主流，但是美国、我国、澳大利亚则没有 VCP。根据我国实际情况，仅规定了多级 CCP。

三轴室围压分为气压、液压（油液或水压）。欧盟、澳大利亚以液压为主（图 T 1247-7 ~ 图 T 1247-10），而美国以气压为主。气压作为介质操作简单，无须考虑三轴室密水，但是施加围压荷载能力受限，特别适合 CCP，用于 VCP 则加载频率受限；液压操作较为复杂一些，但是可以施加更高水平的围压，特别适合 VCP，加载频率不受限。我国动三轴绝大部分为 CCP，因此采用气压较为合适。

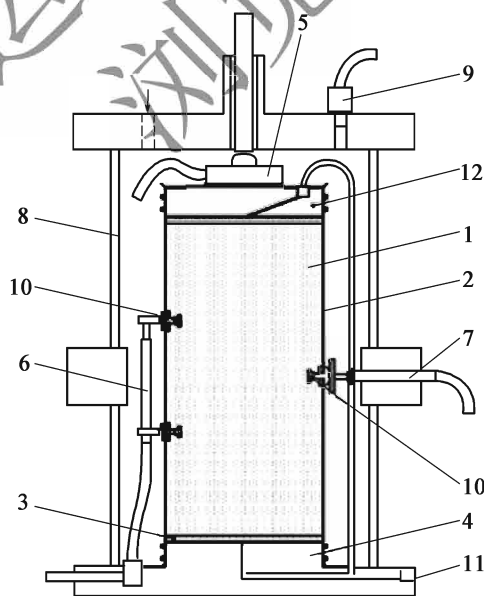


图 T 1247-7 法国动三轴试验仪结构示意图

1-试件；2-橡皮膜；3-多孔金属板；4-下压盘；5-荷载传感器；6-轴向位移传感器；7-径向位移传感器；8-三轴室壁；9-气压传感器；10-支撑径向位移传感器螺柱；11-排水环路；12-上压盘

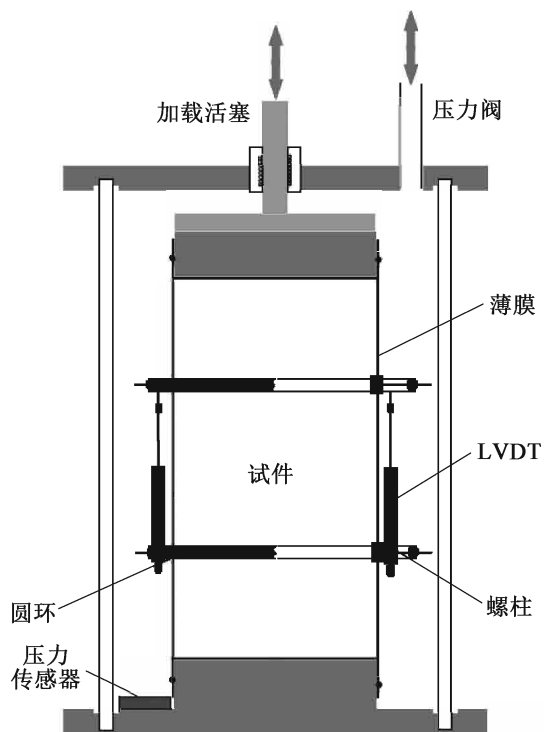


图 T 1247-8 英国动态三轴室示意图

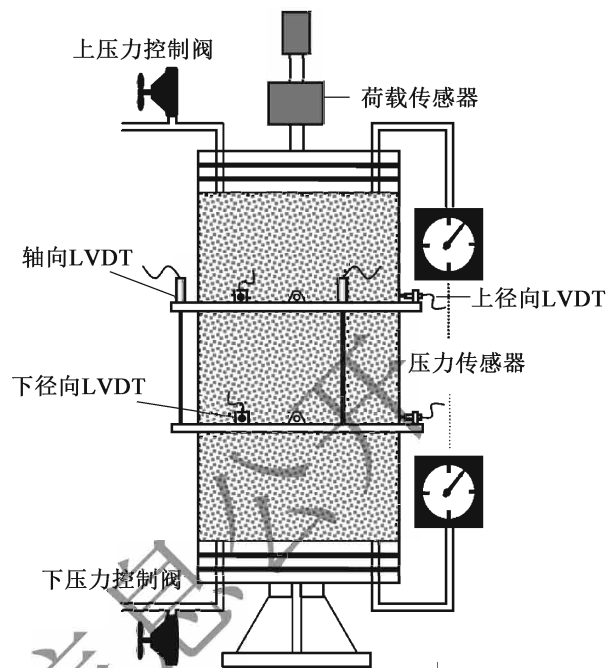


图 T 1247-9 荷兰动态三轴室示意图

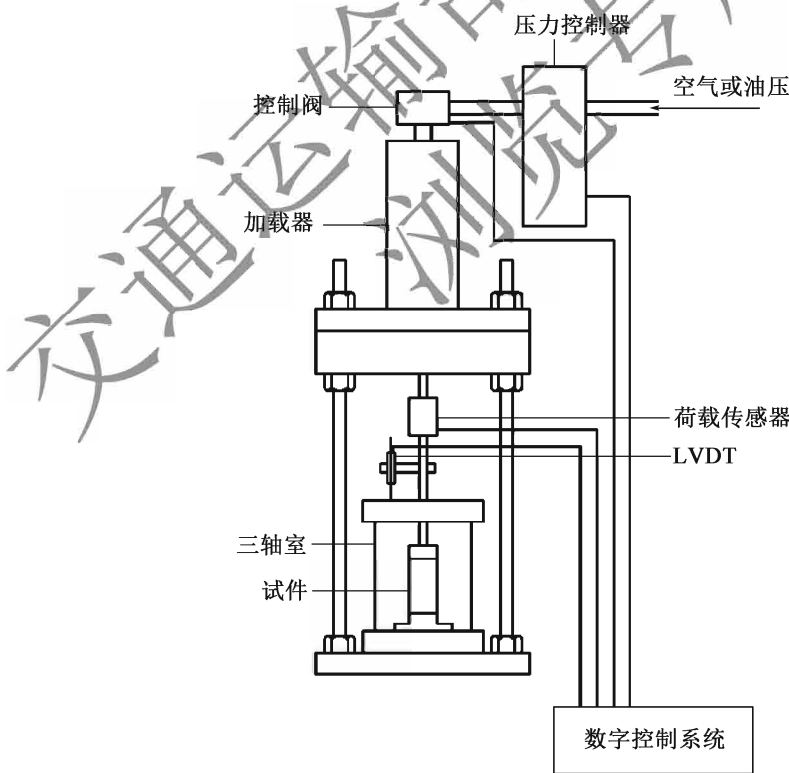


图 T 1247-10 澳大利亚 CCP 三轴试验系统示意图

(2) 按测量装置安装方式分为内置式和外置式两种形式。

位移、轴向应力测量装置安装于三轴室之外则为外置式，否则为内置式。对于内置式，又分为内置中段式和内置全高式。图 T 1247-1 所示为内置中段式，将位移测量装置安装在试件中部，测量试件高度不超过 1/2 中段（一般为 1/4 ~ 3/4，或 1/3 ~ 2/3 中段）的变形。全高式即采用位移传感器测量上压盘到底座的试件全高度变形。欧洲以内置中段式为主，少量外置式，没有内置全高式，EN 13286-7 规定应采用内置中段式。美国两种方法都有应用，调查的 31 个州中有 26 个为外置式；AASHTO T 307 规定了外置式，NCHRP 1-28 规定了内置中段式和内置全高式，但是内置全高式仅用于软土。

采用内置式还是外置式，理论上不会影响试验结果，但是会影响试验操作性和准确性。外置式和内置全高式，均便于安装位移测量装置，但是其受端部效应影响测量结果变异大，同时测量变形较大，容易超出 LVDT 的线性范围。内置中段式克服了端部效应而较为准确，因此国际上倾向于采用内置中段式。

JTG D50 中规定了外置式、内置中段式和内置全高式。本标准规定宜采用内置中段式，也可采用外置式，但没有规定内置全高式。

(3) 加载波形和加载频率。

一个加载循环，往往包括加载期和恢复期，加载频率是一个加载循环时间的倒数。但是各标准对加载波形和频率规定差异非常大。

加载波形主要有半正弦、正弦、梯形、近梯形（图 T 1247-11 ~ 图 T 1247-14），加载频率在 0.1 ~ 20Hz。理论上，三轴试验时加载波形和频率应该与移动荷载作用下竖向应力脉冲波形一致，此波形与半正弦波最接近，大多数试验方法采用半正弦波，按照车速 72km/h 计算不同路面深度处作用时间为 0.05 ~ 0.15s，同时加载后有一定恢复期。而大量研究表明，动态三轴试验结果对波形和频率不敏感，但是加载频率会影响试验效率，同时加载频率会影响变形、应力的采集精度，从而也会影响试验精度。各试验标准中规定的波形、频率差异，主要是受早期三轴仪加载装置的影响。早期受加载装置的限制，一些标准甚至规定了当量正弦波、矩形波及三角形波，其所围面积与半正弦波相等。

JTG D50 规定了半正弦波。本规程规定了标准波形和频率，相关要求同 JTG D50，同时规定可采用非标准波形和频率，但报告中应予以说明。

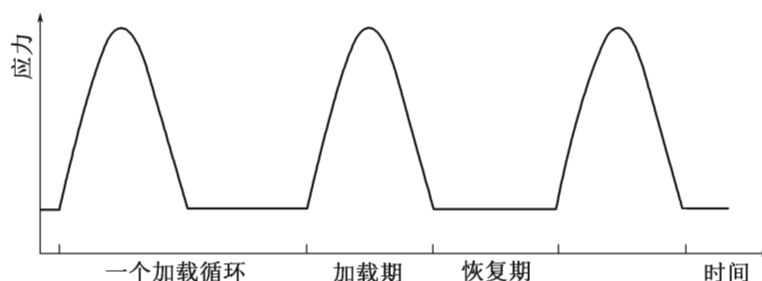


图 T 1247-11 英国动态三轴加载波形（正弦）

注：加载期和恢复期相等，各占一个加载期的 50%。

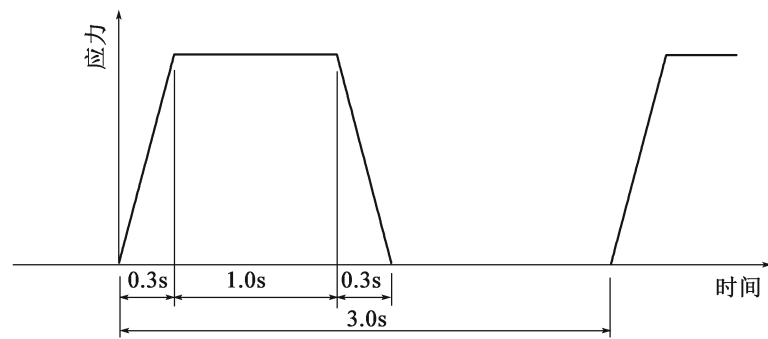


图 T 1247-12 澳大利亚动态三轴加载波形（梯形）

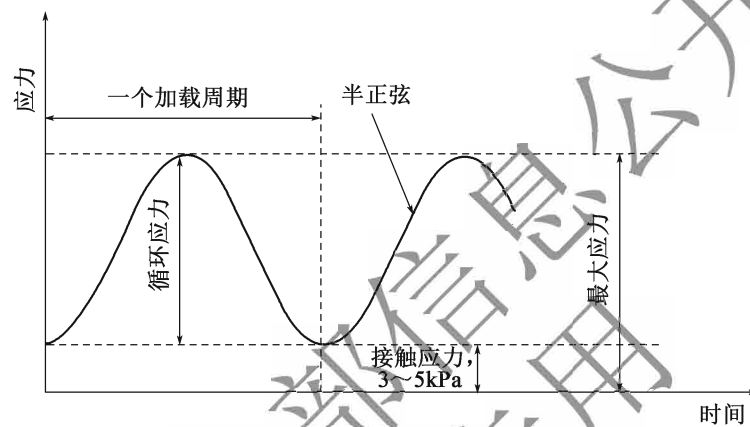


图 T 1247-13 荷兰动态三轴加载波形（半正弦）

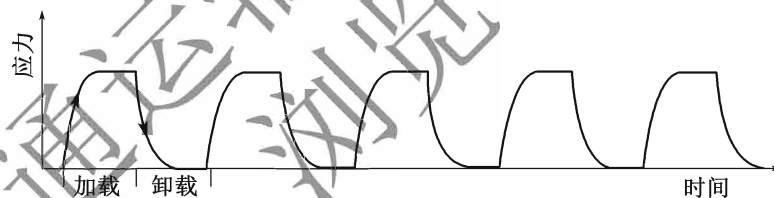


图 T 1247-14 法国动态三轴加载波形（近梯形波形）

4.1.1 对于粒料材料，黏聚力非常低，脱模时如果不施加真空，试件容易散，且无法安装传感器。脱模时施加的真空应一直保持，直至三轴室施加侧向围压后方可卸除，否则会影响传感器安装稳定性。AASHTO T 307 规定脱模时真空约为 7kPa，EN 13286-7 规定脱模时真空约为 10kPa，而 JTG D50 和 NCHRP 1-28 规定为 35kPa。根据粒料动态三轴试验实践，规定脱模时真空约为 7~10kPa。

4.3 试件预载主要模拟施工期间路用材料碾压时承受的应力历史；消除压实阶段与加载阶段、初始加载与重复加载等差异因素带来的影响，减小后续所测回弹模量的变异性；降低试件自身缺陷带来的有害影响，消除试件端部与压盘之间原有的不良接触等。应预加载至变形稳定、动态模量测定稳定，若预加载达不到稳定或永久变形过大，需要查明原因，如果是试件成型有缺陷，则需要重新成型试件。

4.4.1 动态三轴试验应力水平对照表见表 T 1247-4。粒料材料具有应力依赖性, 试验用应力水平应能够覆盖路面材料服役期荷载作用下的应力条件。但是, 采用较高应力水平时试件开始损坏或传感器易受扰动, 因此实际应力水平不宜过高, 一般认为  $\sigma_d$  不宜大于 600kPa。为了使上压盘、钢球、加载杆等保持垂直正接触, 需要操作加载装置施加接触荷载, AASHTO T 307 规定为最大轴向荷载的 10%, NCHRP 1-28 规定为围压的 20%, EN 13286-7 规定为不超过 5kPa (大试件不超过 10kPa), 法国要求为 10kPa。其中, AASHTO T 307 规定的接触荷载最大, 其次是 NCHRP 1-28, EN 13286-7 最低。

本规程预加载和动态模量试验加载应力水平按 JTG D50 进行规定, 但是适当调整了应力路径, 以便于提高试验效率。动态三轴试验时, 当累计永久变形量过大或试验数据波动较大时, 应停止试验, 分析原因, 剔除波动、无效数据。

表 T 1247-4 动态三轴回弹模量试验应力水平对照表

| 来源           | 预加载                                                                                                                                                                         | 加载条件                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AASHTO T 307 | CCP: $\sigma_3 = 103.4\text{kPa}$ , $\sigma_d = 103.4\text{kPa}$ 。作用 1 000 次, 或达到稳定                                                                                         | 多级 CCP, 15 级: $\sigma_3 = 20.7 \sim 137.9\text{kPa}$ , $\sigma_d = 20.7 \sim 275.8\text{kPa}$ , 每级作用 100 次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| NCHRP 1-28   | CCP: $\sigma_3 = 103.5\text{kPa}$ , $\sigma_d = 227.7\text{kPa}$ 。作用 500 ~ 1 000 次, 直至稳定                                                                                    | 多级 CCP, 30 级: $\sigma_3 = 20.7 \sim 138\text{kPa}$ , $\sigma_d = 14.5 \sim 993.6\text{kPa}$ , 每级作用 100 次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| EN 13286-7   | VCP: $\sigma_3 = 110\text{kPa}$ , $\sigma_d = 300\text{kPa}$ (高应力为 600kPa);<br>CCP: $\sigma_3 = 70\text{kPa}$ , $\sigma_d = 200\text{kPa}$ (高应力为 340kPa)。作用 20 000 次, 或达到稳定 | 多级 VCP, 19 级: $\sigma_3 = 10 \sim 260\text{kPa}$ (高应力为 277kPa), $\sigma_d = 0 \sim 300\text{kPa}$ (高应力为 600kPa), 每级作用 100 次;<br>多级 CCP, 29 级: $\sigma_3 = 20 \sim 150\text{kPa}$ , $\sigma_d = 0 \sim 300\text{kPa}$ (高应力为 475kPa), 每级作用 100 次                                                                                                                                                                                              |
| 芬兰           | 1 000, $\sigma_3 = 103\text{kPa}$ , $q_c \leq 103\text{kPa}$                                                                                                                | 多级 CCP, 每级加载 100 次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 法国           | 20 000, 或达到稳定, $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ , $\sigma_d = 600\text{kPa}$                                                                                                      | 多级 VCP, 22 级: $\sigma_3 = 10 \sim 250\text{kPa}$ , $\sigma_d = 0 \sim 600\text{kPa}$ , 每级加载 100 次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 德国           | —                                                                                                                                                                           | 多级 VCP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 葡萄牙          | 20 000, 或达到稳定, $\sigma_{3c} = 300\text{kPa}$ , $q_c \leq 600\text{kPa}$                                                                                                     | 多级 VCP, 22 级: $\sigma_3 = 10 \sim 250\text{kPa}$ , $\sigma_d = 0 \sim 600\text{kPa}$ , 每级加载 100 次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 荷兰           | 20 000, 或达到稳定                                                                                                                                                               | 多级 CCP, $\sigma_3 = 6\text{kPa}$ 、 $12\text{kPa}$ 、 $24\text{kPa}$ 、 $36\text{kPa}$ 、 $48\text{kPa}$ 、 $72\text{kPa}$ , 对应不同的 $q_c$ 水平                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 挪威           | —                                                                                                                                                                           | 多级 CCP, 部分 VCP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 瑞典           | 每个应力水平, 测量动态模量之前均进行 1 000 次                                                                                                                                                 | 多级 CCP, 基层: $\sigma_3 = 60\text{kPa}$ , $q_c = 120\text{kPa}$ 、 $220\text{kPa}$ 、 $420\text{kPa}$ ; $\sigma_3 = 120\text{kPa}$ , $q_c = 420\text{kPa}$ 、 $620\text{kPa}$ 、 $820\text{kPa}$ 、 $1\,020\text{kPa}$ 、 $1\,220\text{kPa}$ ;<br>垫层: $\sigma_3 = 10\text{kPa}$ , $q_c = 30\text{kPa}$ 、 $50\text{kPa}$ 、 $70\text{kPa}$ ;<br>$\sigma_3 = 20\text{kPa}$ , $q_c = 70\text{kPa}$ 、 $90\text{kPa}$ 、 $120\text{kPa}$ 、 $170\text{kPa}$ |

续表 T 1247-4

| 来源      | 预加载                                                                                                                                                                                                                                                            | 加载条件                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 瑞士      | —                                                                                                                                                                                                                                                              | 多级 VCP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 英国      | —                                                                                                                                                                                                                                                              | 多级 VCP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 澳大利亚    | CCP: 路面下 0 ~ 100mm: $\sigma_1 = 0.43p$ , $\sigma_3/\sigma_1 = 0.167$ ;<br>路面下 100 ~ 200mm: $\sigma_1 = 0.2p$ , $\sigma_3/\sigma_1 = 0.1$ ;<br>路面下大于 200mm: $\sigma_1 = 0.1p$ , $\sigma_3/\sigma_1 = 0.1$ ;<br>$p = 550 \sim 700\text{kPa}$ , 作用 1 000 次, 或达到稳定 | 多级 CCP, 路面下 0 ~ 100mm: 11 级, $\sigma_1/p = 0.43 \sim 1.0$ , $\sigma_3/\sigma_1 = 0.05 \sim 0.67$ 。路面下 100 ~ 200mm: 9 级, $\sigma_1/p = 0.2 \sim 0.6$ , $\sigma_3/\sigma_1 = 0.05 \sim 0.1$ ; 路面下 200mm 以上: 9 级, $\sigma_1/p = 0.1 \sim 0.4$ , $\sigma_3/\sigma_1 = 0.05 \sim 0.1$ 。每级作用 50 ~ 200 次, 直至稳定。<br>南澳大利亚, 单级 CCP, $\sigma_3 = 196\text{kPa}$ , $\sigma_d = 460\text{kPa}$ , 作用 50 000 次 |
| JTG D50 | CCP: $\sigma_3 = 105\text{kPa}$ , $\sigma_d = 231\text{kPa}$ , 作用不少于 1 000 次, 直至稳定                                                                                                                                                                             | 多级 CCP, 25 级: $\sigma_3 = 20 \sim 140\text{kPa}$ , $\sigma_d = 14 \sim 588\text{kPa}$ , 每级作用 100 次                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

5.8 粒料材料动态模量模型很多。芬兰采用 Uzan 模型, 法国、葡萄牙、荷兰采用 Boyce 模型, 德国采用 Dresdner 模型。美国早期采用  $k-\theta$  模型或 Uzan 模型, 目前主要采用 AASHTO 2002 模型。AASHTO 2002 模型也称万能模型, 当  $k_3 = 0$  时为粒料材料。本标准采用了 AASHTO 2002 模型。

动态模量试验结果, 一般作为结构设计时粒料材料动态模量确定依据, 根据有限元模型计算结构中粒料材料的应力水平, 按照试验标定的模型, 计算相应的动态模量用于结构计算。

动态模量也可以作为材料配合比设计参数, 例如南澳大利亚州, 要求在  $0.8w_{op}$ ,  $98\%\rho_{dmax}$  条件下, 采用  $\sigma_3 = 196\text{kPa}$ 、 $\sigma_d = 460\text{kPa}$  应力水平重复加载 50 000 次, 测定的动态回弹模量不小于 300MPa。NCHRP 1-28 要求计算  $\sigma_3 = 35\text{kPa}$ 、 $\sigma_c = 103\text{kPa}$  应力条件下动态模量。而法国, 对于粒料基层, 按  $w_{op} - 2\%$ 、 $97\%\rho_{dmax}$  条件下  $\sigma_3 = 83.3\text{kPa}$ 、 $\sigma_d = 500\text{kPa}$  应力水平的动态回弹模量  $E_c$ 、永久变形率  $A_c$  进行分类,  $E_c \geq 500\text{MPa}$ 、 $A_c \leq 100 \times 10^{-4}$  为 C1 级;  $E_c \geq 300\text{MPa}$ 、 $A_c \leq 150 \times 10^{-4}$  为 C2 级;  $E_c \geq 120\text{MPa}$ 、 $A_c \leq 200 \times 10^{-4}$  为 C3 级;  $E_c \leq 120\text{MPa}$ 、 $A_c \geq 200 \times 10^{-4}$  为 C4 级。

## 9 永久变形试验

### T 1255—2026 永久变形试验（动态三轴法）

#### 1 适用范围

- 1.1 本方法适用于动态三轴法测定无结合料粒料的永久变形。
- 1.2 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 无结合料粒料。

#### 2 仪器与材料

- 2.1 仪器与材料同本规程 T 1247 中 2.1 的规定。

#### 3 试验准备

- 3.1 定期进行应力测量装置、位移测量装置等标定。
- 3.2 仪器检查
  - 3.2.1 检查轴向加压系统、周围压力系统是否运行正常。
  - 3.2.2 检查三轴室密封不泄露。
- 3.3 试件制备
  - 3.3.1 按本规程 T 1227 取样成型试件。
  - 3.3.2 试件密封养生、水分平衡不少于 12h。试件成型后放置不得超过 5d。

## 4 试验步骤

### 4.1 试件安装

**4.1.1** 将上、下压盘排水管接口与三轴室排水接口连接；三轴室排水接口与真空源连接，接上气泡室，施加 7 ~ 10kPa 真空使试件能够站立，打开试模夹具，卸除对开击实筒内真空，拆除对开击实筒。

**4.1.2** 观察气泡室，如果存在气泡，应检查并消除引起泄漏的原因，如连接不良，乳胶膜有洞，上、下压盘与乳胶膜之间密封不严等。对因乳胶膜有孔洞引起的泄漏，可在乳胶膜表面涂抹液态乳胶或套装新乳胶膜等方法来消除。若乳胶膜破损，可在乳胶膜表面涂抹液态乳胶或套装新乳胶膜。套装新乳胶膜时，采用张膜器辅助套装，用 O 形密封圈将乳胶膜上下两端在压盘上固定、密封。

**4.1.3** 测量试件高度和直径。高度应测定 3 次（每转动 120°测定 1 次）取平均值作为初始高度，其值应符合  $306\text{mm} \pm 5\text{mm}$  要求。直径应在上、中、下三个部位各测定 3 次（每转动 120°测定 1 次），取所有测定值平均值。

**4.1.4** 若不在三轴室底座上成型试件，则在三轴试验前，将养生好的试件置于三轴室底座或三轴仪升降台上，再按以上方法进行脱模、检查乳胶膜泄漏、测量尺寸。

### 4.2 三轴室安装

**4.2.1** 内置式三轴仪按照如下要求安装：

(1) 如图 T 1247-1 所示采用夹具将 2 个线性差动位移传感器固定在试件上。先将两个夹具分别水平固定在试件高度的 1/4 和 3/4 位置，上、下夹具保持平行，并与试件轴线垂直；将两个轴向位移传感器在试件两侧对称安装，并与试件轴线平行。当采用其他试件高度时，应在报告中说明。

(2) 对于卡环式夹具，其固定在试件上时需采用 4 个直径 12mm 金属杆定位。

(3) 对于固定环式夹具，先沿试件四周将垫片粘在乳胶膜上，调整回弹式螺栓固定器，通过弹簧施加压力将螺栓顶在垫片上进行对中、固定，然后安装两个轴向位移传感器。

(4) 对于非接触式接近传感器等其他类型位移传感器，采用其他合适的方式进行安装，测定约中段 1/2 高度试件变形。

(5) 安装三轴室，盖上三轴室顶板，插入加载杆，在加载杆底部安装荷载传感器；将加载钢球放在上压盘凹槽上；缓慢操作加载装置至荷载传感器底部与钢球稍有接触，

侧向移动试件，同时慢慢旋转钢球，进行加载杆、钢球、试件轴向对中。

(6) 打开数据采集系统，检验采集系统是否工作正常；手动各荷载、位移传感器，检验是否工作正常。必要时对位移传感器杆（或轴）进行清洁和润滑。

(7) 用水平仪检查三轴室顶板，确定其表面水平后，充分固定顶板。

(8) 按照要求进行位移传感器和荷载传感器读数调零。

#### 4.2.2 外置式三轴仪按照如下要求安装：

(1) 安装三轴室，盖上三轴室顶板，用水平仪检查三轴室顶板，确定其表面水平后，均匀拧紧固定立柱固定顶板。将加载钢球放在三轴室加载杆顶面凹槽上；缓慢操作升降台至荷载传感器底部与钢球稍有接触，侧向移动三轴室，同时慢慢旋转钢球，进行加载杆、钢球、试件轴向对中。将三轴室在三轴仪升降台上固定。

(2) 如图 T 1247-2 所示采用支架将 2 个线性差动位移传感器固定在三轴室加载杆上。

(3) 两个传感器与三轴室加载杆等距，且不大于 51mm。测试过程中传感器与支撑面始终保持垂直正接触。

(4) 对于非接触式接近传感器等其他类型位移传感器，采用其他合适的方式进行安装，测定约中段 1/2 高度试件变形。

(5) 打开数据采集系统，检验采集系统是否工作正常；手动各荷载、位移传感器，检验是否工作正常。必要时对位移传感器杆（或轴）进行清洁和润滑。

(6) 按照要求进行位移传感器和荷载传感器读数调零。

#### 4.3 重复加载

4.3.1 将三轴室压力接口与压力源连接，通过三轴室施加围压 85kPa。同时卸除试件内真空，移走真空源，打开底部和顶部的所有排水管，在整个试验过程中保持全开，与大气连通。

4.3.2 待卸除试件内真空后，再次调整施加的围压，使其稳定在 85kPa。操作加载装置或升降台，施加静态的接触荷载 17kPa，使上压盘、钢球、加载杆等保持垂直正接触。

4.3.3 施加静态的接触荷载后，施加重复的半正弦脉冲垂直轴向荷载，使最大轴向应力达 500kPa，重复作用 20 000 ~ 50 000 次。

4.3.4 至少记录如下加载循环数据：1 ~ 10、11 ~ 20、41 ~ 50、91 ~ 100、191 ~ 200、391 ~ 400、991 ~ 1 000、2 991 ~ 3 000、4 991 ~ 5 000、7 491 ~ 7 500、9 991 ~ 10 000、12 491 ~ 12 500、14 991 ~ 15 000、19 991 ~ 20 000。

注：数据处理时，取各次数段的平均值作为该数段永久变形结果，取相应次数段末尾次数作为对应加载次数，例如取 4 991 ~ 5 000 相应的永久变形算术平均值作为加载 5 000 次时的永久变形值结果。

**4.3.5** 加载过程中，若试件的永久应变大于 2%，应停止试验，并在报告中说明。

**4.3.6** 若加载过程中，两个垂直位移传感器读数中最大读数与最小读数的比值大于 1.2，则停止试验。轻敲三轴室底座，或拧紧一侧固定立柱，必要时重新安装试件和三轴室，使加载杆、钢球、试件竖向同轴，再预加载，应使两个垂直位移传感器读数满足要求。

**4.3.7** 注意观察显示的半正弦脉冲垂直轴向荷载波形与设定的一致性。

**4.4** 试验结束后，卸除围压、接触应力，卸除位移传感器、三轴室；取出试件。整个试件移入大金属盘中，脱去乳胶膜，拍照记录试件破坏情况，称量试件总质量。用橡胶锤将整个试件敲散，按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_a$ )，精确至 0.1%。并计算试件干密度，精确至 0.001 g/cm<sup>3</sup>。烘干后的混合料应废弃，不得重复利用。

## 5 结果整理

**5.1** 按本规程 T 1247 中方法计算最大荷载  $F_{\max}$ 、最大轴向应力  $S_{\max}$ 、循环应力  $S_c$ 、接触应力  $S_t$ 、轴向应变  $\epsilon_1$ 、永久变形  $\epsilon_1^p(i)$  等参数。

**5.2** 永久变形量按式 (T 1255-1) 计算。

$$\epsilon_1^p = \epsilon_1^p(20\,000) - \epsilon_1^p(100) \quad (\text{T 1255-1})$$

式中： $\epsilon_1^p$ ——轴向永久应变 (mm/mm)；

$\epsilon_1^p(100)$ ——加载第 100 次时永久应变 (mm/mm)；

$\epsilon_1^p(20\,000)$ ——加载第 20 000 次时永久应变 (mm/mm)。

**5.3** 绘制永久变形  $\epsilon_1^p(i)$ -加载次数  $i$  曲线，按式 (T 1255-2) 进行曲线拟合，得到材料回归常数。

$$\epsilon_1^p(i) = \epsilon_1^p(100) + A_c \left[ 1 - \left( \frac{i}{100} \right)^{-B} \right] \quad (\text{T 1255-2})$$

式中： $\epsilon_1^p(i)$ ——加载第  $i$  次时永久应变 (mm/mm)；

$A_c$ ——永久应变变化率；

$B$ ——材料回归常数；

$i$ ——加载第  $i$  次。

## 6 报告

- 6.1 试验项目名称和执行标准。
- 6.2 样品的编号、名称、产地和规格。
- 6.3 接样日期、样品描述。
- 6.4 试验日期、样品缩分方法。
- 6.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 6.6 试件成型方法和成型主要参数；试件初始长度、直径（扣除乳胶膜厚度）和体积；总乳胶膜厚度。
- 6.7 最佳含水率、最大干密度、压实度标准、试件的含水率和干密度。
- 6.8 三轴室的类型，位移传感器类型和测量方式，轴向位移传感器测点距离（内置中段式三轴室）。
- 6.9 加载应水平件、各加载次数时永久变形，永久应变变量 $\varepsilon_1^p$ 。
- 6.10  $\varepsilon_1^p(i)$ - $i$  曲线，永久应变变化率 $A_e$ 。
- 6.11 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 动态三轴法永久变形试验是评价粒料材料抗永久变形能力的重要试验。按应力级数和围压控制方式，分为多级 VCP、CCP，单级 VCP、CCP 四种情况。其中以单级 VCP、CCP 较为简单。单一应力水平，加载次数为 20 000 ~ 800 000 次不等，也较为成熟，在法国、澳大利亚、新西兰和欧盟等标准中得到广泛应用。而多级 VCP、CCP 较为复杂，采用多个应力水平，加载次数为 20 000 ~ 1 000 000 次不等，目前主要用于一些机构研究，还没有到应用阶段。动态三轴法测定永久变形参数对照见表 T 1255-1。

对于单级 VCP 或单级 CCP，主要采用永久应变变化率（法国多级 VCP）、永久应变变形量（欧盟多级 VCP 或多级 CCP）、永久应变变化率平均值（南澳大利亚）、永久应变变化率趋势（新西兰）4 个指标，本标准采用单级 CCP 方法。

表 T 1255-1 动态三轴法测定永久变形参数对照表

| 来源               | 预加载        | 加载条件                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 芬兰               | 在回弹模量之后直接做 | 多级 CCP, 不同的 $\sigma_1/\sigma_3$ , 加载 2 万 ~ 100 万次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 法国               | 无          | 单级 VCP, 根据要求在 22 级或相关规范中选择一个应力水平等级, 加载 80 000 次。对于粒料基层、底基层, $w_{op} - 2\%$ 、 $97\% \rho_{dmax}$ 条件下, $\sigma_3 = 83.3 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 500 \text{ kPa}$ 加载 20 000 次的动态回弹模量 $E_o$ 、永久应变变化率 $A_o$ 分类: $E_o \geq 500 \text{ MPa}$ 、 $A_o \leq 100 \times 10^{-4}$ 为 C1 级; $E_o \geq 300 \text{ MPa}$ 、 $A_o \leq 150 \times 10^{-4}$ 为 C2 级; $E_o \geq 120 \text{ MPa}$ 、 $A_o \leq 200 \times 10^{-4}$ 为 C3 级; $E_o \leq 120 \text{ MPa}$ 、 $A_o \geq 200 \times 10^{-4}$ 为 C4 级                                                                                                                                                                          |
| 葡萄牙              | 无          | 单级 CCP, 加载 2 万次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 荷兰               | 无          | 多级 CCP, 每级一个试件、加载 100 万次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 挪威               | 无          | 多级 CCP, 每级平均加载次数不同                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 瑞典               | 无          | 多级 CCP, 每级加载 1 000 ~ 100 000 次                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 英国               | 无          | 多级 VCP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 欧盟<br>EN 13286-7 | 无          | 单级 VCP 或单级 CCP: 采用实际情况选择应力水平, 在 $w_{op} - 2\%$ 、 $97\% \rho_{dmax}$ 条件下单个应力水平加载 20 000 次, 取 20 000 次与 100 次轴向永久应变之差 $\varepsilon_1^o$ 作为评价指标, 同时测定 $\sigma_3 = 83.3 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 500 \text{ kPa}$ 下动态回弹模量 $E_o$ , 按 $\varepsilon_1^o \leq 2.5 \times 10^{-3}$ 、 $E_o \geq 500 \text{ MPa}$ 为 C1 级, $\varepsilon_1^o \leq 6 \times 10^{-3}$ 、 $E_o \geq 250 \text{ MPa}$ 为 C2 级, $\varepsilon_1^o \geq 6 \times 10^{-3}$ 、 $E_o < 250 \text{ MPa}$ 为 C3 级。<br>多级 VCP 或 CCP, $\sigma_3$ 为 20kPa、50kPa、70kPa、150kPa, $\sigma_d/\sigma_3$ 为 1 ~ 10, 各级加载 10 000 次, 计算第 5 000 次与第 1 000 次的轴向永久变形之差, 当大于 $0.4 \times 10^{-3}$ 时试验结束, 此时的应力水平为该材料能够承受的最大荷载 |
| 澳大利亚             | 无          | 单级 CCP, 作用 50 000 次。路面下 0 ~ 100mm: $\sigma_3 = 197 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 460 \text{ kPa}$ ; 路面下 100 ~ 200mm: $\sigma_3 = 25 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 326 \text{ kPa}$ ; 路面下 200mm 以上: $\sigma_3 = 28 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 252 \text{ kPa}$ 。<br>澳大利亚: 单级 CCP, $0.8w_{op}$ 、 $98\% \rho_{dmax}$ 条件下 $\sigma_3 = 196 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 460 \text{ kPa}$ 应力水平重复加载 50 000 次, 计算 50 000 与 20 000 时永久变形率平均值应不大于 $10^{-8}$ , 50 000 次时动态模量不小于 300MPa                                                                                                                                                                                               |
| 新西兰              | 无          | 单级 CCP, $w_{op}$ 、 $95\% \rho_{dmax}$ 或现场压实度条件下 $\sigma_3 = 125 \text{ kPa}$ 、 $\sigma_d = 425 \text{ kPa}$ , 加载 50 000 次, 要求变形率随着加载次数增加而降低, 即加载为稳定状态                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

理论上, 粒料材料由于应力依赖性, 应该按照其层位确定永久变形应力水平。但是, 永久变形试验一般用于材料设计, 应力水平变化, 不利于不同材料之间的横向比较。因此宜进行应力水平统一, 但是材料要求可以按照层位和交通荷载分别确定, 例如法国, 对于基层、大交通量, 可以采用 C1 级 GNT, 对于底基层、轻交通, 可以采用 C3 级 GNT。

5.3 粒料材料的永久变形模型较多。

VESYS 模型按式 (T 1255-3) 计算:

$$\varepsilon_1^p(i) = \varepsilon_1^p(100) + \varepsilon_1^r \frac{\mu}{a} i^a \quad (\text{T 1255-3})$$

式中:  $\varepsilon_1^r$ ——轴向回弹应变;

$\mu$ ——材料泊松比;

$a$ ——材料常数。

荷兰模型按式 (T 1255-4) 计算:

$$\varepsilon_1^p(i) = a i^b + c (e^{di} - 1) \quad (\text{T 1255-4})$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ——材料常数。

瑞典模型按式 (T 1255-5) 计算:

$$\varepsilon_1^p(i) = a i^b \left( \frac{\sigma_v}{\sigma_h} \right)^c \quad (\text{T 1255-5})$$

式中:  $a$ ——材料常数, 1~11;

$b$ ——材料常数, 0.4~0.5;

$c$ ——材料常数, 0.4~2;

法国模型适合单级 VCP 或单级 CCP, VESYS、荷兰模型、瑞典模型适合多级 CCP 或多级 VCP。

## T 1256—2026 永久变形试验 (车辙仪法)

### 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于车辙仪法测定无结合料粒料永久变形量达到 10mm 时运行次数, 用于混合料设计和质量评价。

1.2 本方法适用于用轮碾成型机碾压成型的长 300mm、宽 300mm、高 100mm 或 150mm 的板块状试件。

1.3 本方法适用于 37.5mm 筛余率不大于 10% 的无结合料粒料。

### 2 仪器与材料

2.1 车辙试验机及试模: 应符合《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410) 中 T 0719 的规定。

**2.2 天平：**最大称量不小于 15kg，感量不大于 5g。

### 3 方法与步骤

#### 3.1 试验准备

**3.1.1** 按本规程 T 1225 成型 3 个试件，采用密封材料表面密封，密封材料进行充分固化。待密封材料固化后可开始试验。

注：一般固化一昼夜。

**3.1.2** 调整车辙试验机加载装置，使总荷载达到  $780\text{N} \pm 20\text{N}$ 。

#### 3.2 试验步骤

**3.2.1** 将试件连同试模固定在轮辙试验机的试件台上，试验轮在试件的中央部位，其行走方向需与试件碾压方向一致。打开变形测量装置，启动试验机，使试验轮往返行走，同时连续测定试件变形量。

**3.2.2** 待试验时间达到 2h，或变形量达到 15mm 时停止试验。

### 4 结果整理

**4.1** 绘制变形量  $RD_0$ -运行次数 ( $N$ ，往返一次计为 2 次) 曲线，以  $RD = aN^b$  进行曲线拟合，计算  $RD = 10\text{mm}$  条件下运行次数，作为一个试件的试验结果。

**4.2** 以 3 个试件  $RD = 10\text{mm}$  对应的运行次数平均值作为该样品的试验结果。

### 5 报告

**5.1** 试验项目名称和执行标准。

**5.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**5.3** 接样日期、样品描述。

**5.4** 试验日期、样品缩分方法。

**5.5** 主要仪器设备的名称、型号及编号。

**5.6** 成型方法，密封材料类型、成型主要参数和固化时间。

**5.7** 含水率，RD-N 曲线，单个试件 10mm 变形量的运行次数及其平均值等试验结果。

**5.8** 要说明的其他内容。

#### 条文说明

1 本试验采用车辙试验模拟行车荷载对级配碎石等粒料材料动态作用，检验级配碎石等粒料基层的变形行为及直接承受行车荷载作用时的稳定性。

2 级配碎石粒径较大，为此适当增加了试件厚度，采用 10cm 和 15cm。为了使各层压实均匀性，试件分 2 层进行压实。

3.1 粒料材料成型试件含水率对永久变形试验结果影响非常大，成型试件密封、封水非常重要。国内早期采用报纸或者涂刷乳化沥青进行密封。报纸密封性能差且吸水，车辙试验时容易破碎影响试验。乳化沥青，渗透性较好，会深入粒料材料内部，起稳定、加强作用，从而影响试验结果。本规程采用柔性环氧树脂密封胶涂抹薄层，对试验影响较小，且试验验证表明，不同的柔性环氧树脂密封胶材料的试验结果的一致性均较好。

4 沥青混合料车辙试验可以采用运行 1h 后变形量，或者动稳定度，或者变形率等残留来评价不同样品的抗永久变形能力，但是对于部分材料，其在很短时间内变形量达到 15mm，这些材料产生过早破坏导致无法得到 1h 完整的变形量或变形率数据，因此级配碎石车辙永久变形试验不宜采用上述指标。通过充分验证，采用 10mm 变形量的运行次数指标来评价不同粒料材料的抗永久变形能力。

10 其他试验

T 1265—2026 管吸试验

1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于测定毛细水上升达到稳定时试件表面介电值，以评价无结合料粒料材料水敏感性。

1.2 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 无结合料粒料。

2 仪器与材料

2.1 烘箱：鼓风干燥箱，应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

2.2 天平：量程 10kg，感量不大于 0.5g；量程 5kg，感量不大于 0.1g。

2.3 重型击实装置：试模相关尺寸应满足表 T 1265-1 的要求，采用 4.5kg 击锤，相关仪器与材料其他要求应符合本规程 T 1220 的规定。试模示意图如图 T 1265-1 所示。

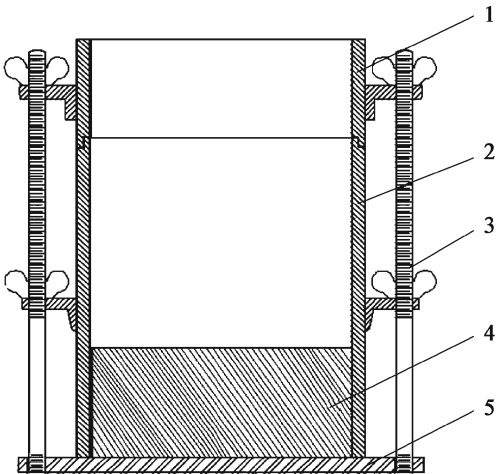


图 T 1265-1 试模示意图

1-套筒；2-击实筒；3-拉杆；4-垫块；5-底板

表 T 1265-1 试模尺寸要求

| 击实筒        |            |            | 垫块         |            | 套筒         |            |            | 底板         |                   |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| 内径<br>(mm) | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 高度<br>(mm) | 内径<br>(mm) | 高度<br>(mm) | 壁厚<br>(mm) | 直径<br>(mm) | 中心处<br>厚度<br>(mm) |
| 152 ± 0.5  | 220 ± 1    | 10 ± 0.5   | 151 ± 0.2  | 20 ± 0.2   | 152 ± 0.5  | ≥ 50       | 10 ± 0.5   | ≥ 230      | ≥ 13.5            |

2.4 带探头的介电计：介电值量程 0 ~ 50，灵敏度 0.1，精度为 ±0.5。

2.5 塑料或钢制的平底水槽：能够同时容纳多个试件，深度满足浸泡高度要求。

2.6 橡胶膜：内径 150mm，高度 300mm，厚度约 0.6mm。

2.7 张膜器。

2.8 塑料片：塑料膜裁剪出直径 150mm 塑料片，厚度尽量薄，无孔洞。

2.9 滤纸：直径 150mm，通用滤纸。

2.10 环形配重：质量  $2.3\text{kg} \pm 0.2\text{kg}$ ，环形内径要大于介电计的手柄，但是小于探头直径。

2.11 多孔石：厚 50mm，直径  $151\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ，洁净、无堵塞。

2.12 其他：天平、金属盘、脱模仪等。

### 3 试验准备

3.1 按本规程 T 1220 取样确定混合料的最大干密度和最佳含水率。

注：若已知最大干密度和最佳含水率，可采用已有数据。

3.2 检查击实仪器，各部件是否有松动，击锤表面是否磨损，击锤提升装置是否运转正常。拼装试模，检查击实筒、套筒、底座和垫块是否紧密连接；击实筒是否有凹痕、磨损。

**3.3 击实筒容积的标定：**准确测量击实筒的内径、高度和垫块的高度，尺寸不符合时不得使用。在击实筒底部测定内径 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次；按同样方法在击实筒顶部测定内径 3 次；计算 6 个测定平均值为击实筒的内径。测定击实筒高度 3 次，每转动  $120^\circ$  测一次，计算 3 个测定平均值为击实筒的高度；按同样方法测定垫块的高度。根据实测的击实筒的内径、高度和垫块的高度计算试模容积，精确至  $0.01\text{cm}^3$ 。

**3.4 将洁净的多孔石放入烘箱中， $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至恒重。冷却至室温，逐个称量质量 ( $m_1$ )。**

## 4 试件成型步骤

### 4.1 取各单档集料样品进行试验

**4.1.1 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品。当试样中有大于  $37.5\text{mm}$  颗粒时，应予以筛除。**

**4.1.2 将样品风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干，根据混合料中各档集料的配比和预定的含水率（一般为最佳含水率），采用本规程 T 1220 重型击实试验方法，拌制 2 份试样，每份试样质量为  $9.5\text{kg}$ 。**

注：本试验成型试件时采用最佳含水率。当采用非最佳含水率时需要在报告中注明。

**4.1.3 称取干燥击实筒和垫块的质量 ( $m_2$ )。取一份养生试样放在金属盘中，简易四分法缩分  $500\text{g}$  混合料按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_{ad}$ )，精确至  $0.1\%$ 。剩余试样按本规程 T 1220 成型试件，成型试件时分 4 层击实，每层击实 122 次。称取成型后击实筒、垫块和湿试样的总质量 ( $m_3$ )。**

注：本试验成型采用标准压实功。当采用非标准压实功时，需要在报告中注明。

**4.1.4 卸除试模的拉杆。取一个多孔石放在水平平台上，上面对中放上滤纸；将试模上下颠倒使试件底部朝上，并轻轻对中放在多孔石上；将装有试件的试模连同多孔石放在脱模仪上进行脱模。**

**4.1.5 脱模后，将试件连同多孔石放入烘箱中， $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  鼓风干燥  $48\text{h} \pm 2\text{h}$ 。**

**4.1.6 将试件连同多孔石从烘箱中取出，在室温下冷却不少于  $2\text{h}$ 。再次称量试件和多孔石的质量 ( $m_4$ )。**

## 4.2 取混合料样品进行试验

**4.2.1** 按本规程 T 1201 取各混合料样品。当样品中有大于 37.5mm 颗粒时，应予以筛除，并计算其含量。

**4.2.2** 将样品风干或  $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至表干，按本规程 T 1220 拌制 2 份试样，每份试样质量为 9.5kg。

注：本试验成型试件时采用最佳含水率。当采用非最佳含水率时需要在报告中注明。

**4.2.3** 按步骤 4.1.3 ~ 4.1.6 成型试件，并进行试件干燥处理。

**4.3** 每个混合料应至少成型 2 个试件。

## 5 管吸试验步骤

**5.1** 按如图 T 1265-2 所示位置在试件表面做标记。将介电计放在标记位置上，将配重穿过介电计手柄压在介电计上，使介电计探头与试件表面充分接触，读取介电计读数。注意试验时不要损坏试件表面。取 5 个位置介电值平均值作为第 1 天的试验结果。

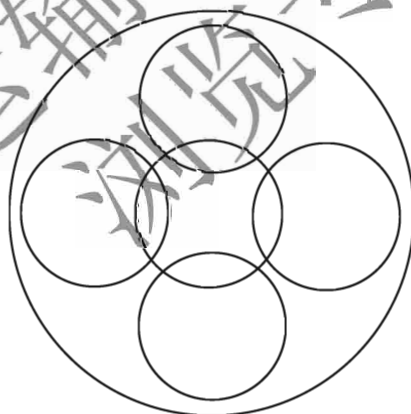


图 T 1265-2 试件表面介电值测试位置示意图

**5.2** 在试件表面对中放置塑料片，再对中放置一个多孔石。借助张膜器，将橡胶膜套在试件侧面并向下卷至盖住下部多孔石上半部高度，向上卷至盖住上部多孔石全高度，以阻止试件内部水分蒸发。

**5.3** 将试件放入水槽中，加自来水至图 T 1265-3 高度，管吸  $24\text{h} \pm 2\text{h}$ 。注意管吸试验过程中保持水位高度。

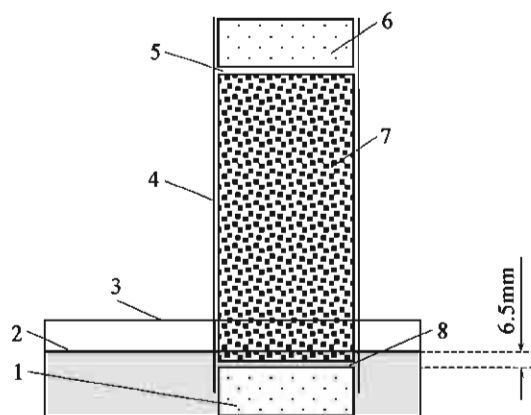


图 T 1265-3 管吸试验示意图

1-下部多孔石; 2-水位; 3-平底水槽; 4-橡胶膜; 5-塑料片; 6-上部多孔石; 7-试件; 8-滤纸

**5.4** 将上部橡胶膜向下卷至试件表面以下约 15mm 处, 取走上部多孔石和塑料片。按步骤 5.1 在标记处测定介电值, 取平均值作为第 2 天的试验结果。

**5.5** 将塑料片、多孔石对中放回试件表面, 将上部橡胶膜细心向上卷至完全覆盖上部多孔石全高度, 管吸  $24\text{h} \pm 2\text{h}$  后, 重复步骤 5.4, 直至测定第 10 天的介电值。

**5.6** 若第 10 天的介电值与第 9 天的介电值之差小于 0.5, 则停止试验; 否则, 继续进行管吸试验, 直至相邻两天的介电值之差小于 0.5。

**5.7** 管吸试验完成后, 将整个试件移入大金属盘中, 必要时用橡胶锤将试件敲散, 按本规程 T 1206 测定含水率 ( $w_d$ ), 记录整个干燥试件的质量 ( $m_s$ )。烘干后的混合料应废弃, 不得重复利用。

## 6 结果整理

**6.1** 试件的湿密度按式 (T 1265-1) 计算, 精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_w = \frac{m_3 - m_2}{V} \quad (\text{T 1265-1})$$

式中:  $\rho_w$ ——试件的湿密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_2$ ——击实筒、垫块的质量 (g);

$m_3$ ——试件和击实筒、垫块的质量 (g);

$V$ ——击实筒容积 ( $\text{cm}^3$ )。

**6.2** 试件的干密度按式 (T 1265-2) 计算, 精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w_{a0}} \quad (\text{T 1265-2})$$

式中： $\rho_d$ ——试件干密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）；  
 $w_{a0}$ ——试件的初始含水率（%）。

**6.3** 若一个试件的初始含水率与预定的含水率之差大于  $\pm 0.5\%$ ，或实测干密度与预定的干密度之差大于预定的干密度  $\pm 0.5\%$ ，则该试件无效。

**6.4** 试件 48h 干燥后含水率按式（T 1265-3）计算，精确至 0.1%。

$$w_{a2} = \frac{m_4 - m_1 - m_5 - m_6}{m_5} \times 100 \quad (\text{T 1265-3})$$

式中： $w_{a2}$ ——试件 48h 干燥后含水率（%）；  
 $m_1$ ——下部多孔石的质量（g）；  
 $m_4$ ——48h 干燥后试件、多孔石和橡胶膜的总质量（g）；  
 $m_5$ ——整个干燥试件的质量（g）；  
 $m_6$ ——橡胶膜的质量（g）。

**6.5** 管吸试验时试件吸水率按式（T 1265-4）计算，精确至 0.1%。

$$\Delta w_a = w_{a2} - w_{a1} \quad (\text{T 1265-4})$$

式中： $\Delta w_a$ ——管吸试验时试件吸水率（%）；  
 $w_{a1}$ ——管吸试验完成后含水率（%）。

**6.6** 以时间为横坐标，一个试件的介电值算术平均值为纵坐标，绘制介电值-时间关系曲线。

**6.7** 取两个试件的最后 3 天的介电值的算术平均值作为样品的介电值试验结果，记作 DV，精确至 0.1。

## 7 报告

**7.1** 试验项目名称和执行标准。

**7.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**7.3** 接样日期、样品描述。

#### 7.4 试验日期、样品缩分方法。

#### 7.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。

#### 7.6 成型方法，成型主要参数和试件浸泡时间。

7.7 初始含水率，干密度，48h 干燥后含水率，管吸后含水率，管吸试验吸水率，介电值-时间曲线，介电值试验结果。

#### 7.8 要说明的其他内容。

### 条文说明

粒料中自由水含量对材料的强度及其水敏感性、抗冻融性能有着重要影响。具有高吸水能力的材料，在工程服役期间可能会吸收过多的水分，这些水分可能会在结构内部迁移，降低模量和抗变形能力，导致冻胀发生，且聚集过多的水分还可能软化路基。

毛细管水上升高度试验可以用于评价材料的吸水能力。《公路土工试验规程》(JTG 3430) 中 T 0128 毛细管水上升高度试验，间隔一定时间目测毛细管水上升高度，待上升稳定后测定不同层位的含水率，根据含水率-高度曲线确定塑限对应的高度作为强烈毛细管水上升高度。该试验方法主要针对路基土，试验时有机玻璃管内径 40~45mm 过小，因此该方法不适合粒料材料。EN 1097-10 毛细管水上升高度试验中，针对粒料材料进行了调整，透明管内径按粒径增加至 125 (公称最大粒径为 8mm) ~ 170mm (公称最大粒径为 32mm)，高度不小于 200mm，试验时 24h ± 2h、48h ± 4h、72h ± 4h、168h ± 4h，以及之后每间隔 168h ± 8h 称量试样质量、计算吸收水的质量，直至相邻 168h 两次吸水率之差小于 0.02g/cm<sup>3</sup> 时停止试验，确定含水率小于 0.5% 或相邻两层含水率之差小于 0.3% 相应的层位中间位置距水面距离作为强烈毛细管水上升高度。但是，无论是 JTG 3430 中 T 0128 还是 EN 1097-10，由于试验时采用捣棒将试件捣实，对于粒料材料无法达到要求的密实度，试验结果与现场符合性差。而且该试验过程较为复杂。

管吸试验由芬兰国家公路局和美国得克萨斯州交通研究所开发，其主要测定不同时间的试件表面介电值。试件表面测定的介电值主要受自由水影响，受结合水的影响非常小。因此管吸试验时介电值变化率越来越低可以反映粒料材料底部水分通过毛细管不断向上迁移直至达到平衡、稳定的状态，同时最终表面的介电值就是毛细水上升达到稳定的最终状态，即稳定状态下介电值可评价用粒料材料的强烈毛细管水上升高度。

研究表明管吸试验稳定状态下的介电值与粒料材料的水敏感性、冰冻敏感性相关。根据美国得克萨斯州 Tex-144-E，当介电值小于 10 时，可评定为不具有水敏感性；当介电值为 10~16 时，具有轻微水敏感性；当介电值大于 16 时，具有显著水敏感性。

T 1266—2026 冻胀高度试验

1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于测定无结合料粒料冻结过程中的冻胀高度，评价无结合料粒料的抗冰冻敏感性。

1.2 本方法适用于公称最大粒径不大于 37.5mm 无结合料粒料。

2 仪器与材料

2.1 冻胀试验机：包括试验箱、温度控制系统、温度监测系统、变形量测系统、恒定水位装置等。

2.1.1 试验箱：试验箱由冷冻室、水槽、试件托架、冷却系统、铰链盖等组成，结构示意图如图 T 1266-1 所示。

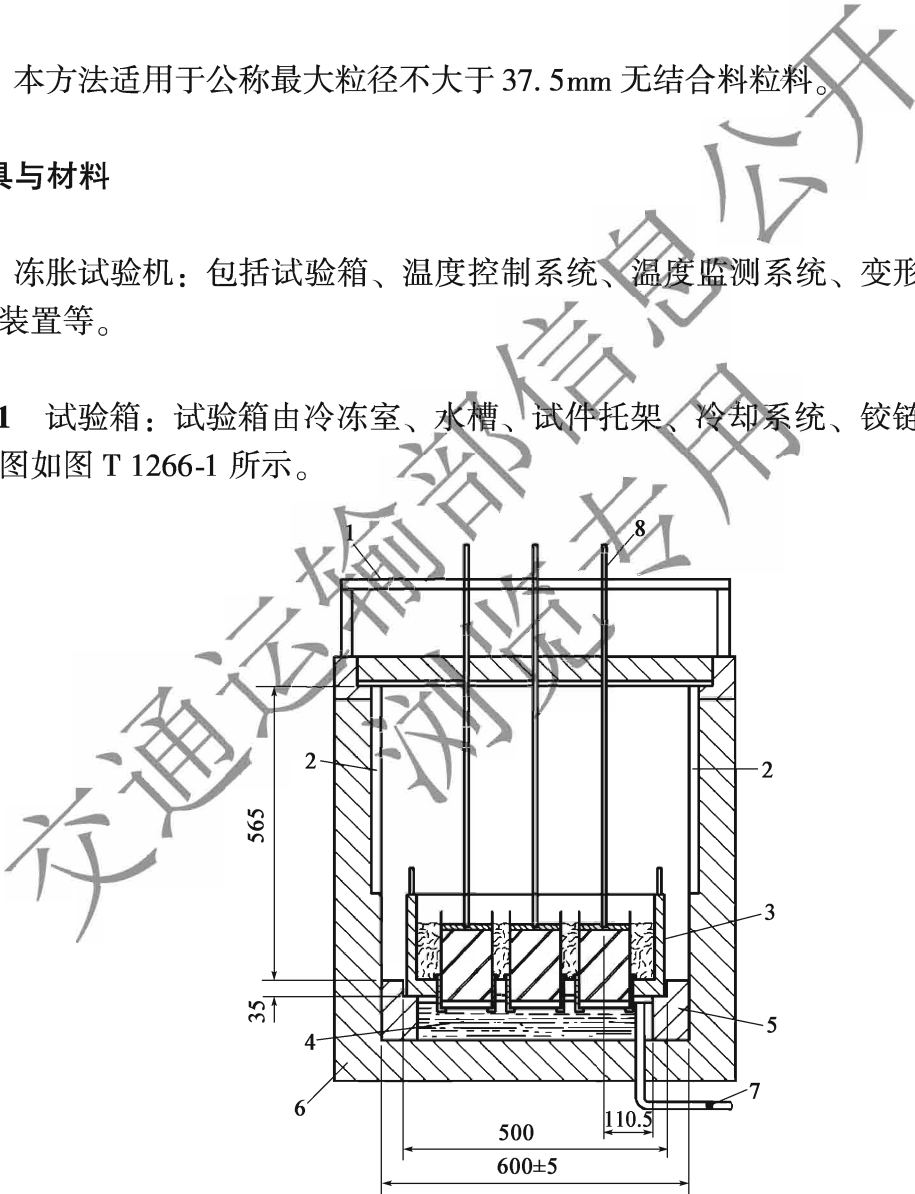


图 T 1266-1 试验箱结构示意图（尺寸单位：mm）

1-支撑架；2-制冷循环管路；3-试件托架；4-水槽；5-固体绝缘材料；6-绝缘材料；7-溢流管；8-黄铜棒

- (1) 冷冻室：内壁为不锈钢，且光滑。
- (2) 水槽：位于冷冻室下部，带有溢流管，并配有一个独立的排水阀，并采用不

吸水隔热介质将冷冻室和水槽两侧相连。水槽内水缓慢循环保持温度均匀。外接恒定水位装置, 试验时保持水位深度稳定在 8 ~ 11 mm。

(3) 试件托架: 如图 T 1266-2 所示, 位于水槽正上方, 可容纳 9 个试件, 采用胶合板材质, 表面防水处理, 达到《防腐木材的使用分类和要求》(GB/T 27651) 中防腐等级 C5。

(4) 冷却系统: 位于水槽上方, 安装在冷冻室侧面。

(5) 铰链盖, 底面为不锈钢, 底部安装内部照明灯, 盖上有 9 个直径为 10 ~ 15 mm 的孔, 孔中心与试件盒中心对中, 便于放置铜棒。

注: 当尺寸小于 25 mm 时, 精度为  $\pm 1$  mm; 当尺寸为 25 ~ 100 mm 时, 精度为  $\pm 5$  mm; 当尺寸大于 100 mm 时, 精度为  $\pm 10$  mm。支撑架和铜棒尺寸根据设备可以调整。

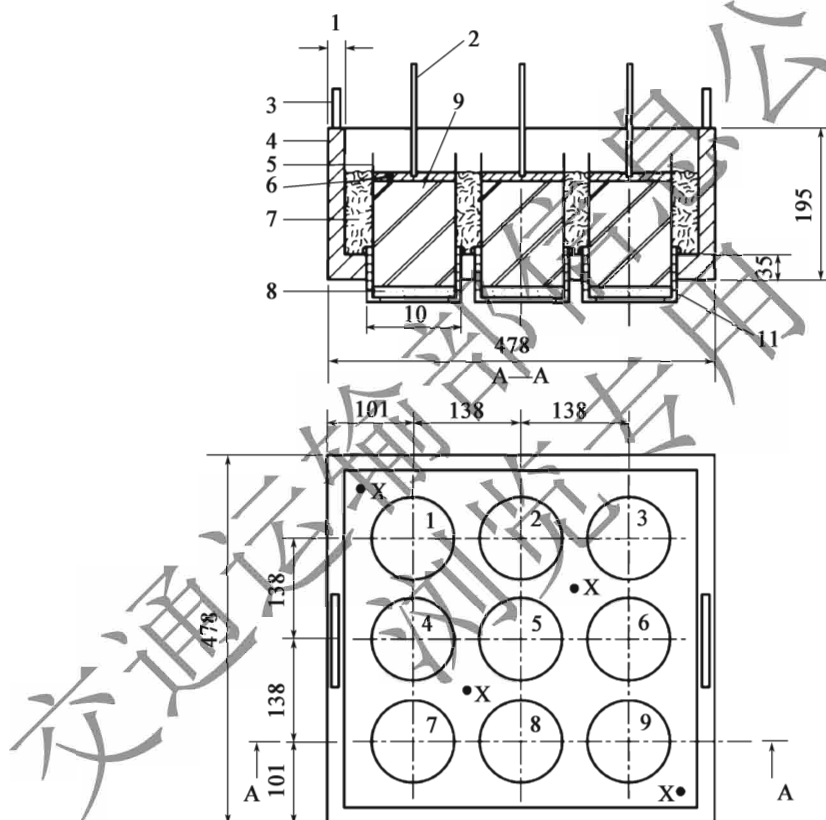


图 T 1266-2 试件托架结构示意图 (尺寸单位: mm)

1-厚度一般为 19 mm; 2-黄铜棒; 3-手柄; 4-试件托架; 5-蜡纸; 6-刚性圆盘; 7-填充砂; 8-多孔盘; 9-试件; 10-直径一般为 112 mm; 11-试件盒; X-温度传感器位置

**2.1.2 温度控制系统:** 空冷系统对冷冻室气温和水槽中水温进行控制, 开始试验时在 4 ~ 14 h 之内使冷冻室气温降至  $-18 \sim -16^{\circ}\text{C}$ , 之后保持稳定; 而水槽中水温在 4 ~ 14 h 之内达到  $3.0 \sim 4.5^{\circ}\text{C}$ , 之后保持稳定。

**2.1.3 温度监测系统:** 水槽和冷冻室各均匀布设 5 个热敏电阻温度计, 精度不小于

0.1℃。冷冻室4个温度计布设如图 T 1266-2 所示,第5个温度计连接到5号位置的硬圆盘上。选择一个开关,用于切换各温度计进行温度测量。温度记录器1个,用于连续记录试验过程中的水温和气温。

**2.1.4 变形量测系统:**黄铜棒,9根,长750mm,直径6.0mm。刚性可拆卸的金属支撑架,位于铰链盖上方,用以支撑铜棒。支撑架的水平杆上有直径6.5mm孔,其中心与试件盒、铰链盖上的孔中心对中。支撑架竖直杆高出铰链盖顶部的高度为125~175mm。钢尺,用于测量支撑架水平杆上方铜条竖直位移,精度为0.5mm。

**2.1.5 恒定水位装置:**将水槽中的水保持在恒定水位,如图 T 1266-3 所示。

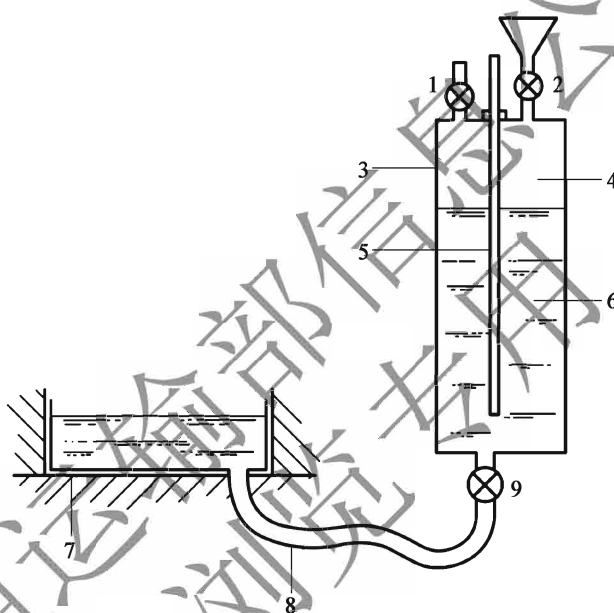


图 T 1266-3 恒定水位装置示意图

1-通气口 V; 2-加水口 F; 3-密封容器, 容积6~8L; 4-真空; 5-毛细管, 内径约3.0mm; 6-水; 7-水槽; 8-塑料软管; 9-出水口 O

**2.2 硬圆盘:**9个以上,材料为棉增强酚醛纸,直径为95.0mm,厚度为5.0mm,中间凹槽直径为10.0mm,其中一边的深度为2.0mm。

**2.3 多孔盘:**9个以上,厚为13.0mm,直径为101.6mm,最大孔径为110μm。

**2.4 试件盒:**不少于9个,铜制,如图 T 1266-4 所示。

**2.5 试模:**低碳钢击实筒和端部螺塞,结构及尺寸符合图 T 1266-5 的要求。

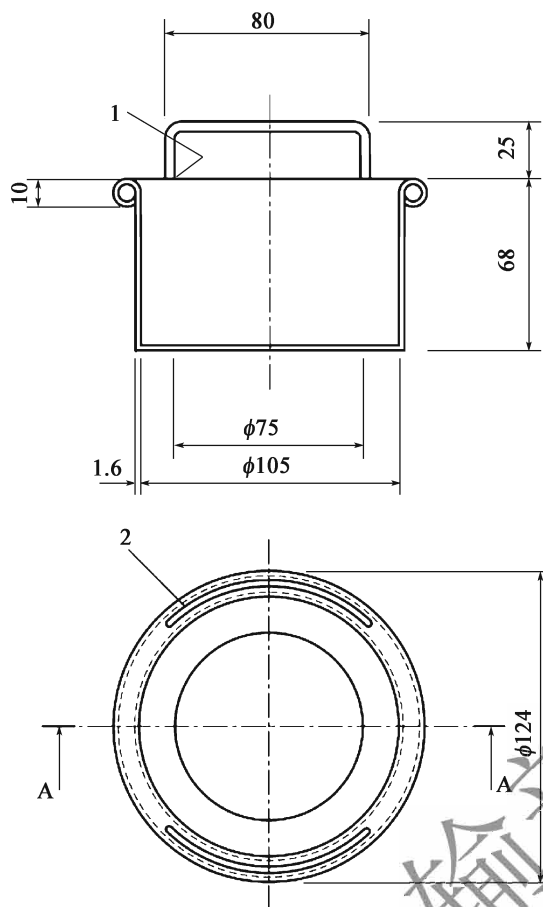


图 T 1266-4 试件盒示意图 (尺寸单位: mm)

1-银焊; 2-两个手柄,  $\phi 3.0$  黄铜棒材质

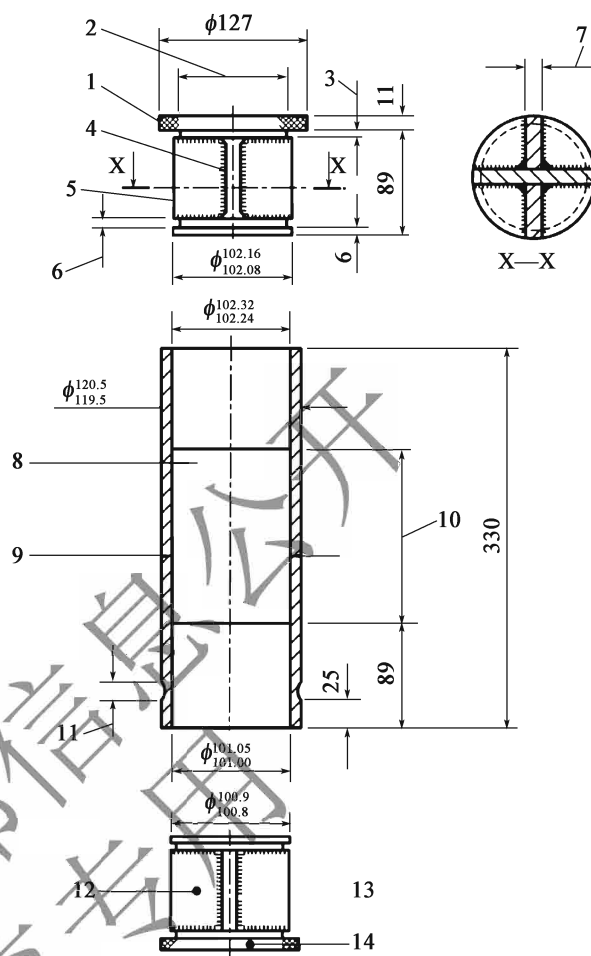


图 T 1266-5 击实筒和端部螺塞示意图 (尺寸单位: mm)

1-中菱形滚花; 2-切削直径  $\phi 95\text{mm}$ ; 3-切削  $3.0\text{mm}$ ; 4-所有焊缝均为  $5\text{mm}$  连续倒角; 5-上部端部螺塞 (大); 6-切削  $6.0\text{mm}$ ; 7-肋板宽度  $13\text{mm}$ ; 8-击实筒; 9-连续抛光锥形; 10-锥形长度为  $152.4\text{mm}$ ; 11-用油漆标识较小的孔, 槽宽  $\times$  深为  $12\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ ; 12-下部端部螺塞 (小); 13-端部螺塞其他尺寸同端部螺塞 (大); 14-油漆标识便于识别

**2.6 手持式夯锤：**低碳钢质，质量为 1 100 ~ 1 200g，结构及尺寸符合图 T 1266-6 的要求。

**2.7 振动锤：**满足本规程 T 1224 的要求，连接杆和钢制夯锤结构及尺寸符合图 T 1266-7 的要求，钢制夯锤采用低碳钢质，质量不超过 3 000g。

**2.8 深度计：**量程 250mm，分辨率 1mm。

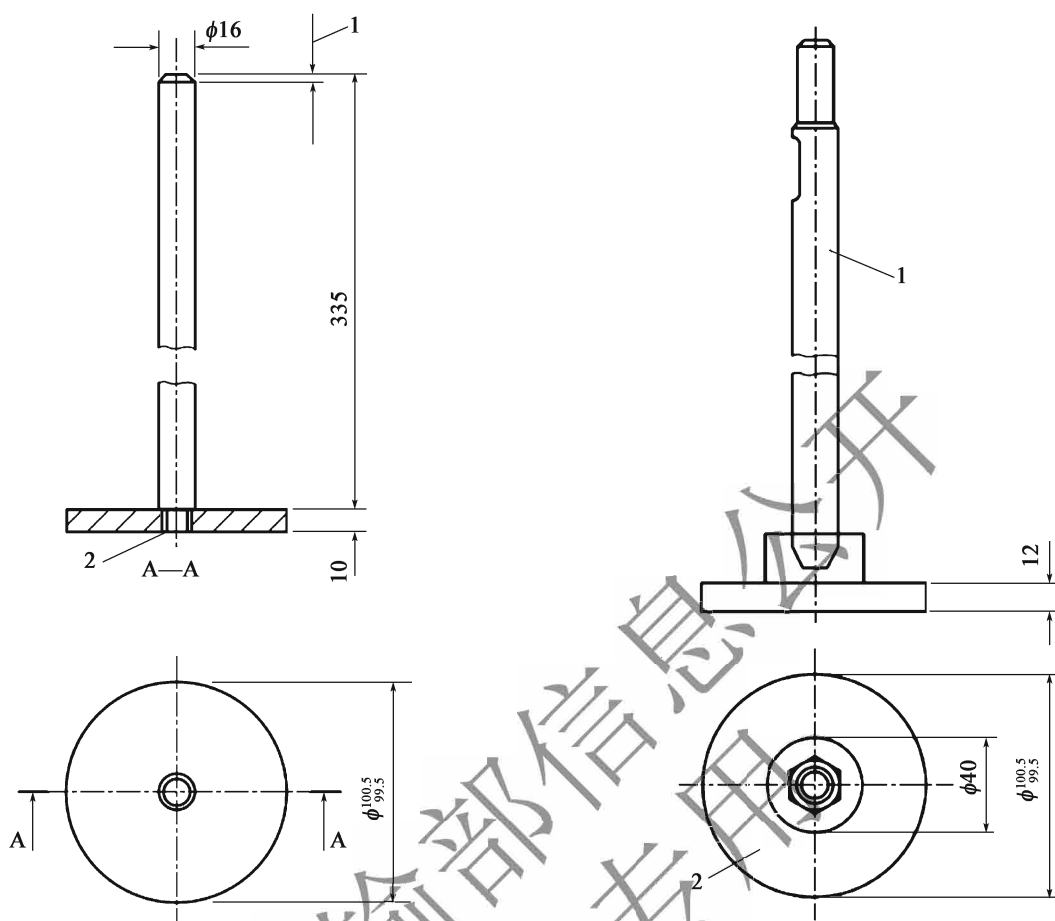


图 T 1266-6 手持式夯锤示意图 (尺寸单位: mm)

图 T 1266-7 夯锤和连接杆示意图 (尺寸单位: mm)

1-倒角  $1.5 \times 45^\circ$ ; 2-M10 螺纹与装配端面齐平, 并用工业黏剂固定

1-连接杆; 2-钢制夯锤

**2.9 脱模装置:** 采用压力机或专用脱模仪, 同时配推出杆、挤压筒, 其尺寸符合图 T 1266-8 和图 T 1266-9 的要求。

**2.10 试验筛:** 筛孔为 1.18mm、2.36mm、4.75mm、37.5mm 的标准方孔筛, 应满足本规程 T 1215 中 2.1 的要求。

**2.11 蜡纸:** 尺寸约为  $350\text{mm} \times 200\text{mm}$ , 厚度为  $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 。

**2.12 填充砂:** 约 30kg 干燥清洁的石英砂, 粒径为  $1.18 \sim 2.36\text{mm}$  或  $2.36 \sim 4.75\text{mm}$ 。

**2.13 试验水:** 材料拌和成型采用自来水, 水槽、恒定水位装置采用  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  的蒸馏水或去离子水。

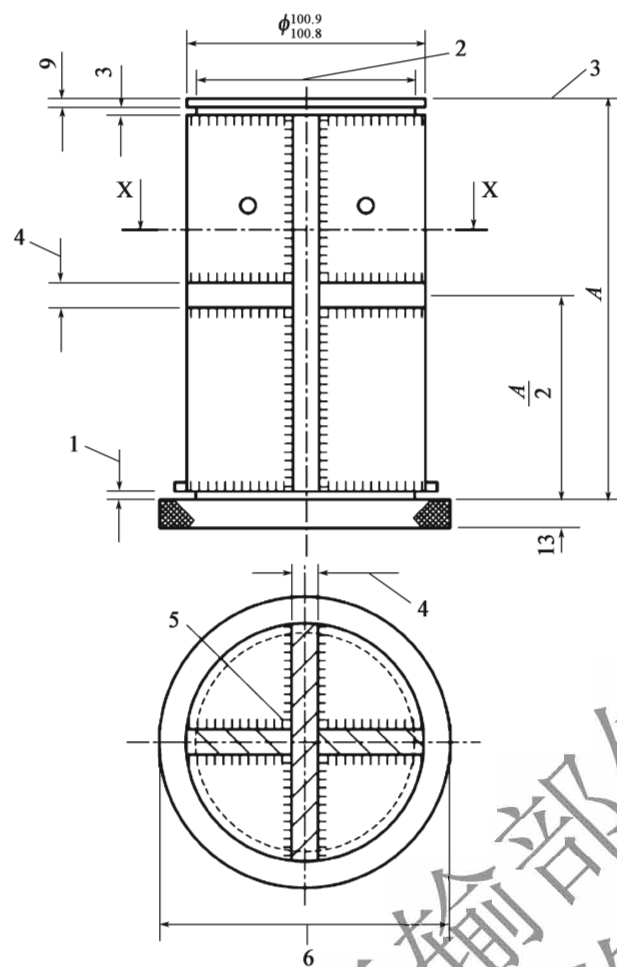


图 T 1266-8 推出杆示意图 (尺寸单位: mm)  
1-切削宽度 3mm; 2-切削直径  $\phi 95$ mm; 3-A 尺寸, 长推出杆 330mm, 短推出杆 1740mm; 4-肋板宽 13mm; 5-所有焊缝连续 5mm 倒角; 6-中菱形滚花, 直径  $\phi 127$ mm

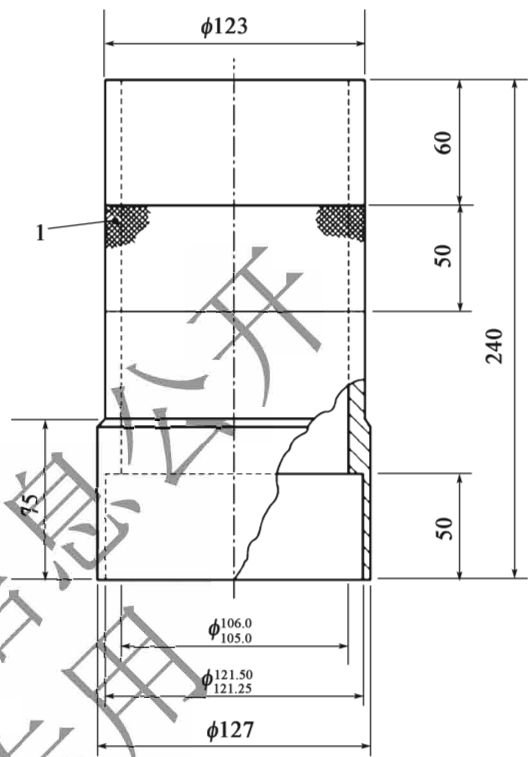


图 T 1266-9 挤压筒示意图 (尺寸单位: mm)  
1-中菱形滚花

**2.14 吸水材料:** 手术棉或类似的吸水材料。

**2.15 标准集料:** 标准砂, 规格 NS S202102, 洁净的石英砂, 二氧化硅含量不小于 95%, 0.6mm 筛孔通过率为 100%, 0.3mm 筛孔通过率为 0%。标准矿粉, 规格 NS S202103, 石灰岩矿粉, 0.3mm 筛孔通过率为 100%, 0.075mm 筛孔通过率为 75% ~ 90%。标准砂和标准矿粉, 按本方法 5.15 成型标准试件, 其冻胀高度标称值控制精度为  $\pm 5$ mm。

**2.16 烘箱:** 鼓风干燥箱, 应满足本规程 T 1206 中 2.1 的要求。

**2.17 天平:** 最大称量不小于 15kg, 感量不大于 1g。

**2.18** 拌和机（可选）：容积不小于 10L 或不小于 20L。

**2.19** 容器：9 个带盖容器，能够容纳 15kg 粒料材料。

**2.20** 其他：平底铲、刮刀、烧杯、透明胶带（厚度为 0.1 ~ 0.25mm）。

### 3 冻胀试验机标定

**3.1** 新的试验机或控制系统有调整，或每 2 年需要进行一次标定。

**3.2** 进行试验箱和试件托架调平。

**3.3** 检查粗砂、试验箱、水槽、恒定水位装置是否洁净、干燥。

**3.4** 检查所有温度传感器是否正常。

**3.5** 恒定水位装置标定：

(1) 打开 F、V 和 O 接口，关闭水槽排水阀，在溢流管出口下方放置一个接水容器。试件托架中放置一个试件盒。倒入  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  蒸馏水或去离子水至恰好淹没试件盒底部开口，检查恒定水位装置与水槽之间接管是否堵塞。

(2) 调整恒定水位装置上毛细管高度，使其稍高于水槽水位约 5mm。

(3) 关闭 O 接口，通过 F 接口漏斗向恒定水位装置中加入  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  蒸馏水或去离子水，空气从 V 接口排出。

(4) 关闭 F 和 V 接口，在试件托架中放置另一个试件盒和多孔盘。

(5) 打开 O 接口，当水流入水槽时，空气应该通过毛细管产生气泡。当气泡停止时，水槽中水位高出多孔盘顶部约 1mm，即多孔盘顶部看起来是湿的，但没有被水浸没。如果水位过低，关闭 O 接口，并稍微提高毛细管高度；再次打开 O 接口，检查水槽中新的水位是否满足要求。重复直至达到要求的水位。

(6) 如果调整使得水位浸没了多孔盘顶部或者气泡停止前水产生溢流，则毛细管高度过高，此时关闭 O 接口，打开水槽排水口排水使得水位淹没试件盒底部开口。重新调整毛细管高度使水槽水位满足要求。

(7) 关闭 O 接口，打开水槽排水口排水使水位下降至正好淹没试件盒底部开口。移走 2 个试件盒、多孔盘，进行干燥。必要时，打开 V 和 F，关闭 O，恒定水位装置加满水。

(8) 关闭恒定水位装置所有接口。

(9) 检查水槽循环系统是否工作正常。

### 3.6 温度控制系统标定:

(1) 取代表性粒料材料,按本方法 5 制备 9 个试件,也可使用已经试验过的试件。  
(2) 按照本方法 6 安装试件和传感器,静置 20h 使初始温度稳定。  
(3) 打开温控系统,再静置 20h,记录各传感器温度。计算水槽和冷冻室温度达到试验温度的初始冷冻时间,初始冷冻时间应满足 4~14h。

(4) 确定平均温度。观察温度控制系统,直到温控器使制冷开关关闭。此时,依次记录 10 个温度传感器的温度作为 1 组温度数据,应该在 50s 内完成所有传感器温度的测定。然后以等时间间隔连续测定不少于 20 次,同时出现 3 个完整的温控循环,即关—开—关—开—关—开—关。如果 3 个温控循环小于 1h,则连续测定直至 1h 后第一次出现制冷开关关闭。

(5) 根据一次连续测定温度数据,计算如下参数:

- ①计算一组水槽 5 个传感器的温度平均值作为瞬时水温,记为 IWT。
- ②计算一组水槽 5 个传感器的温度最大值与最小值之差作为水温极差,记为 IWR。
- ③计算所有组的瞬时水温平均值作为平均水温,记为 MWT,并计算标准差。
- ④计算所有组的水温极差平均值作为平均水温极差,记为 WMR。
- ⑤计算一组冷冻室 4 个传感器的气温平均值作为瞬时气温,记为 IAT。
- ⑥计算一组冷冻室 4 个传感器的气温最大值与最小值之差作为气温极差,记为 IAR。
- ⑦计算所有组的瞬时气温平均值作为平均气温,记为 MAT,并计算标准差。
- ⑧计算所有组的气温极差平均值作为平均气温极差,记为 AMR。
- ⑨计算位于硬圆盘正下方温度传感器温度平均值,记为 5AW。

(6) 确定平均温度稳定性。如果第 1 次平均温度检查满足要求,则按照步骤 (4) 和 (5),再测定 5 次(即共计 6 次),要求相邻 2 次的时间间隔控制在 3~20h。如果任何一次检查时平均温度不满足要求,应调整温度控制系统,静置 20h 以上,按照以上步骤重新检查。总的调试应在 250h 内完成。

(7) 温度控制系统温控要求:

- ①每次的 MWT 平均水温满足 3~4.5℃;6 次的 MWT 平均水温极差不大于 0.5℃,6 次的 MWT 平均水温标准差不超过 0.3℃。
- ②每次的 MAT 平均气温满足 -18~-16℃;6 次的 MAT 平均气温极差不大于 0.5℃,6 次的 MAT 平均水温标准差不超过 0.8℃。
- ③每次的水温极差 IWR 不超过 0.5℃;每次的气温极差 IAR 不超过 2.7℃。
- ④每次的硬圆盘正下方温度 5AW 为 -2~-8℃。

注:当粒料材料较粗时,在位置 5 安装热电偶温度传感器时,为了增加接触,可在接触处撒一薄层细砂。

## 4 试验准备

4.1 按本规程 T 1201 取代表性样品,按本规程 T 1226 确定样品的最佳含水率  $w_{op}$  和

最大干密度值  $\rho_{dmax}$ 。

**4.2** 取样品缩分不少于 5kg 试样一份或按比例称配不少于 5kg 试样一份，筛除 37.5mm 以上颗粒后放入烘箱中  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重，然后室温自然冷却。按  $1360 \times \rho_{dmax}$  计算一份干集料质量，称量一份干集料后移入拌和机中；按  $13.6 \times w_{op}$  计算一份水的质量，称量一份水后移入拌和机中。充分搅拌后，按照如下 5 试验步骤成型试件，立即脱模。

**4.3** 如果脱模时发现试件坍塌，则取样增加压实度，必要时调整含水率，使得试件脱模时不产生坍塌。但是，注意增加的压实功应不至于导致集料颗粒破碎。

**4.4** 调整干密度和含水率使得脱模得到完整试件，则记录此时的条件作为冻胀试验成型试件的干密度  $\rho_d$  和含水率  $w_0$ 。

## 5 试件制备

**5.1** 取样品缩分不少于 15kg 子样一份或按比例称配不少于 15kg 子样一份，筛除其中 37.5mm 以上颗粒后放入烘箱中  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重，然后室温自然冷却。

**5.2** 按  $1360 \times \rho_d$  计算一份干集料质量，称量一份干集料后移入拌和机中；按  $13.6 \times w_0$  计算一份水的质量，称量一份水后移入拌和机中。充分搅拌后，在密封容器中储存 4h 以上备用。拌制 3 份试样。

**5.3** 按式 (T 1266-1) 计算击实一层所需的试样的质量，精确至 1g。

$$m_{1/3} = 412\rho_d \left(1 + \frac{w_0}{100}\right) \quad (\text{T 1266-1})$$

**5.4** 将下部端部螺塞垂直放入击实筒中。取出一份试样，简易缩分后称取  $m_{1/3} \pm 2\text{g}$  的试样，放入击实筒中，用料铲将试样表面整平。

**5.5** 将手持式夯锤插入击实筒中，夯锤底面与击实筒底部齐平，让手持式夯锤自由下落锤击试件，共锤击 25 次。

**5.6** 将钢制夯锤垂直放置在试件顶面，启动夯锤击实试件。采用深度尺随时测定试件顶面至击实筒上部顶部距离，当深度尺测定高度为 183 ~ 189mm 时停止锤击。

**5.7** 采用刮土刀或螺丝刀将击实筒内已经击实的试件表面“拉毛”，第二次称取

$m_{1/3} \pm 2g$  的试样, 人工锤击 25 次, 再用钢制夯锤锤击至深度尺测定高度为 133 ~ 139mm 时停止锤击。

**5.8** 采用刮土刀或螺丝刀将击实筒内已经击实的试件表面再次“拉毛”, 再次称取  $m_{1/3} \pm 2g$  的试样, 擦除击实筒上部内部侧壁的混合料, 垂直放入上部端部螺塞。将钢制夯锤垂直放置于上部端部螺塞顶面, 启动夯锤击实试件, 直至上部端部螺塞顶面与击实筒上部表面间距小于 4mm。

**5.9** 对于部分难以压实的试样, 当钢制夯锤在上部端部螺塞顶面锤击达到 60s 仍然无法完成压实时, 则停止锤击。将击实筒连同端部螺塞上下颠倒, 将钢制夯锤垂直放置下部端部螺塞顶面锤击, 直至上部端部螺塞顶面与击实筒上部表面间距小于 4mm。对于部分粗级配粒料材料, 当锤击达到 60s 仍然无法完成压实时, 则停止锤击。将击实筒连同端部螺塞上下颠倒, 取出上部端部螺塞, 将钢制夯锤垂直放置在试件顶面, 启动夯锤击实试件, 直至上部端部螺塞顶面与击实筒上部表面间距小于 4mm。

**5.10** 顺时针和逆时针旋转端部螺塞一两次, 必要时采用橡胶锤轻敲, 取下击实筒两端的端部螺塞。将试模连同试件对中放置在短推出杆上, 试模、试件连同短推出杆一起放在脱模仪上, 脱模至短推出杆与击实筒底部齐平, 从脱模仪上取下试模连同试件, 使用长推出杆手动缓慢挤出试件。

**5.11** 当长推出杆手动无法脱模时, 可采用脱模净高度不小于 780mm 的脱模仪, 按照图 T 1266-10 所示采用长推出杆进行一次性脱模。

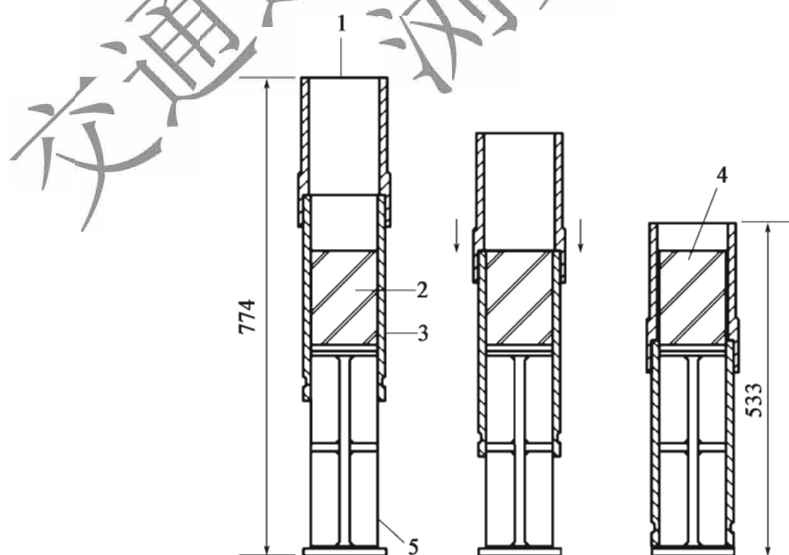


图 T 1266-10 脱模示意图 (尺寸单位: mm)

1-挤压筒; 2-试件; 3-击实筒; 4-脱出的试件; 5-长推出杆

**5.12** 脱模后立即用蜡纸包裹试件曲面，蜡纸下部边缘与试件底部齐平，但蜡纸上部边缘要比试件顶面高出约 50mm；然后用一小块胶带固定，注意不得采用胶带缠绕试件。取一个硬圆盘，凹槽朝上，放在试件顶部。将试件轻放在多孔盘上，然后一起放入一个试件盒中。

**5.13** 按照以上步骤成型不少于 3 个试件。

**5.14** 取标准砂不少于 8kg 和标准矿粉不少于 1.5kg，在烘箱中  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重，放入密闭容器中冷却至室温。称取  $2\,338\text{g} \pm 1\text{g}$  标准砂和  $412\text{g} \pm 1\text{g}$  矿粉，放在塑料袋中拌和 30s。将拌和好的混合料放入拌和锅中，然后称取 250mL 蒸馏水或去离子水放入拌和锅中。拌和 5min 后放入塑料袋中静置 16h 以上。称取  $2\,562\text{g} \pm 1\text{g}$  混合料，按步骤 5.4 ~ 5.13 成型标准试件。按同样方法成型共计 3 个试件。

## 6 冻胀试验步骤

**6.1** 按图 T 1266-2 所示试件托架位置进行编号。将 3 个装有试件的试件盒放入试件托架中，第 1 个试件放入 1 或 2 的位置，第 2 个试件放入 4 或 6 位置，第 3 个试件放入 8 或 9 位置。将 3 个装有标准试件的试件盒依次放入试件托架中第 3、5、7 的位置。

**6.2** 在 1、3、5、7、9 试件盒位置放置热电偶温度传感器，传感器测头不得接触到试件盒。当试件盒放置试件后，传感器测头位于试件底部正下方，并浸入水槽深度为 5 ~ 10mm。将另外一个热电偶温度传感器放在 5 的位置，测头位于硬圆盘正下方并与试件顶面接触。

注：当粒料材料较粗时，在位置 5 安装热电偶温度传感器时，为了增加接触，可在接触处撒一薄层细砂。

**6.3** 一次冻胀试验试件托架中可放置 9 个试件，当少于 9 个试件时，空缺位置可放置以前试验用过的试件。当 9 个位置放置试件后，在图中“X”的 4 个位置放置热电偶传感器，测头应位于各试件底部表面以上 250mm 处。

**6.4** 在试件周围放置粗砂直至粗砂与试样顶端齐平。小心清除任何不小心溅到硬圆盘上的砂粒，特别不得进入凹槽内。当放置粗砂后，蜡纸顶面高度比粗砂顶面高出约 50mm。

**6.5** 检查温度传感器的位置、各控制传感器，关闭试验箱。将支撑架放在试验箱上，将铜棒穿过支撑架和铰链盖的孔，将其放置在试件顶部对应的硬圆盘中间凹槽中。打开恒定水位装置出水口 O 阀，让水流入水槽，并在试验过程中恒定。开启水槽循环系统。

**6.6** 试件脱模后安装到试验箱、加水应在一天内完成。

**6.7** 所有试件安装、加水完成后，静置  $115\text{h} \pm 5\text{h}$ ，记录试验箱的温度。

**6.8** 检查铜棒的位置，用手术棉塞住铜棒与铰链盖上孔之间的间隙，防止铜棒上的凝结水流入试验箱。手术棉不应塞入孔中太紧，以致影响冻胀试验时黄铜棒的垂直移动。测量每个铜棒顶面与支撑架水平杆顶面的垂直距离，作为铜棒的零点高度。记录每个温度传感器的温度。

**6.9** 启动冷冻系统开始冻结试验，同时计时， $4 \sim 14\text{h}$  达到要求的温度，并在整个试验过程中维持恒定。

**6.10** 每间隔不超过  $5\text{s}$  记录 10 个温度传感器的温度。按 3.6 中方法计算瞬时水温和瞬时气温。如果瞬时水温不满足  $3.0 \sim 4.5^\circ\text{C}$ ，或者瞬时气温不满足  $-18 \sim -16^\circ\text{C}$ ，则按 3.6 中方法计算每  $24\text{h}$  的平均水温和平均气温。若平均水温不满足  $3 \sim 4.5^\circ\text{C}$ ，或平均水温不满足  $-18 \sim -16^\circ\text{C}$ ，应停止试验。

注：如果试验中多次出现瞬时水温或瞬时气温不满足要求，则该试验机在进行下一次冻胀试验前应对温度控制系统进行标定。

**6.11** 每  $24\text{h} \pm 2\text{h}$  旋转一次铜棒防止被黏住，检查手术棉，必要时予以更换。测量每个铜棒顶面与支撑架水平杆顶面的垂直距离，取测定的垂直距离减去零点高度作为冻胀值。每  $24\text{h} \pm 2\text{h}$  测量一次冻胀值，直至试验不少于  $96\text{h}$ ，停止冻结试验。

**6.12** 按照以下要求关闭试验系统。

(1) 关闭冷却系统，清除铜棒与铰链盖上孔之间的间隙手术棉，移走铜棒和支撑架。打开铰链盖。

(2) 移走试件上部的温度传感器，从试件盒中移走试件；清理、烘干硬圆盘和试件盒。

(3) 移走粗砂，必要时干燥、筛分便于再利用。

(4) 检查多孔盘是否堵塞，必要时在沸水或超声波水槽中清洁。

(5) 移走试件托架，冷却至室温后清理、烘干。

(6) 待水槽中温度上升至  $0^\circ\text{C}$  以上，关闭水槽循环，排出水槽和恒定水位装置中水。

## 7 结果整理

**7.1** 取每个试件冻胀最大值作为该试件的冻胀高度，精确至  $0.5\text{mm}$ 。

**7.2** 若 9 个试件中有 2 个或以上的冻胀高度出现下降并达到不小于 1mm 时, 则该 9 个试件试验无效。

**7.3** 若 3 个标准试件的冻胀高度不满足标称值  $\pm 5\text{mm}$ , 或三个标准试件冻胀高度中最大值与最小值之差大于 6mm, 则该 9 个试件试验无效。

**7.4** 若一个样品的 3 个试件冻胀高度小于 18mm, 其最大值与最小值之差大于 6mm, 则该样品的 3 个试件试验无效。

**7.5** 取一个样品的 3 个试件算术平均值作为该样品的冻胀高度试验结果, 记为  $V_{\text{th}}$ , 准确值为 0.1mm。

## 8 报告

**8.1** 试验项目名称和执行标准。

**8.2** 样品的编号、名称、产地和规格。

**8.3** 接样日期、样品描述。

**8.4** 试验日期、样品缩分方法。

**8.5** 主要仪器设备的名称、型号及编号。

**8.6** 成型方法, 最大干密度、最佳含水率; 冻胀试验时试件能够完整脱模的干密度  $\rho_d$  和含水率  $w_0$ 。

**8.7** 每个试件冻胀高度、样品的冻胀高度。

**8.8** 要说明的其他内容。

### 条文说明

级配碎石等粒料材料在寒区工程应用的一个主要病害就是冻胀破坏, 因此对于寒区工程应用的粒料材料需要评价其冻胀敏感性。冻胀试验是最常用的评价方法。

《公路土工试验规程》(JTG 3430) 中 T 0187 方法和《土工试验方法标准》(GB/T 50123) 的 37 方法, 其冻胀率试验原理与本标准相同, 但是试验条件不同。首先是成型试件尺寸和方法不同。JTG 3430 和 GB/T 50123 中冻胀试验方法主要用

于黏质土和砂质土,试件尺寸为直径100mm,高50mm,高度太小,不适合粒料材料;同时其采用玻璃管试模、砝码静态加压成型试件,试件密度难以控制。本方法和 BS 812-124 采用高度100mm试件,金属试模且采用振动锤进行锤实,以控制试件压实度。

同时,试件浸泡水位高度不同。GB/T 50123 中要求水位应高于底板和试件接触面5mm;JTG 3430 要求水位应低于顶板与试件接触面10mm;而本方法规定水位应高出底部多孔盘与试件接触面约1mm。可见 GB/T 50123 和本方法规定试件底部仅稍接触水位,而 JTG 3430 试验方法似乎是试件浸泡在水中。

冻胀温度条件不同。GB/T 50123 中冻胀试验要求,底部水温维持在1℃;上部温度-15℃恒温30min,然后调整至-2℃,再匀速降温持续降温72h,其中黏土降温速度为0.3℃/h,砂土降温速度为0.2℃/h。JTG 3430 中冻胀试验要求,顶部温度维持为1℃,底部温度-15℃恒温30min,其他要求同 GB/T 50123。而本方法要求顶部空气温度为-18~-16℃,而底部水温为3~4.5℃,维持温度梯度,持续96h。可见 GB/T 50123 和本方法规定试件底部恒温,且为正温度,而上部为负温,这样形成的温度梯度可使试件中水分发生冻结,形成冰晶体而增加试件高度,测量试验期间的试样高度变化用来评价无结合料粒料的抗冻胀能力。这样的冻结条件与材料在实际路面结构层位中的冻结顺序是一致的。而 JTG 3430 试验方法似乎是上部试件恒温,且为正温度,下部试件为负温,温度梯度与工程实际不符。

冻胀高度在欧美得到了应用,特别是英国、瑞士、斯洛文尼亚、瑞典、挪威、荷兰、法国应用较多。例如英国 *Series 800 Specification for Highway Works Road Pavements-Unbound, Cement and Other Hydraulically Bound Mixtures* 中规定,当粒料材料(一般是级配碎石底基层或垫层)距离路表45cm(年均冻胀指数小于50的地区为35cm)时,要求其混合料为非冻胀敏感性材料,即冻胀高度不大于15mm。

## T 1267—2026 常水头渗透试验方法

### 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于测定无结合料粒料材料稳态时渗透系数。

1.2 本方法适用于最大粒径不大于37.5mm且0.075mm筛孔通过率小于10%的无结合料粒料材料。

1.3 本方法适用于渗透系数为 $10^{-5} \sim 10^{-2}$  m/s 的无结合料粒料材料。

## 2 仪器与材料

**2.1 常水头渗透仪：**结构示意图如图 T 1267-1 所示，由压力计管、常水头过滤槽、渗透室和量筒等组成。

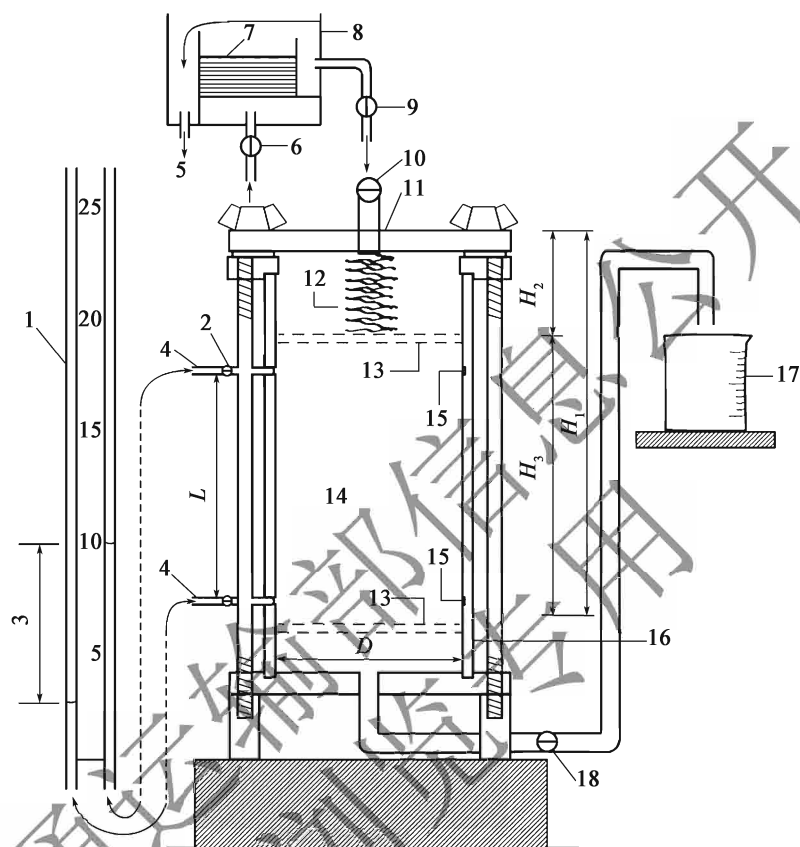


图 T 1267-1 常水头渗透仪示意图

1-压力计管；2-压力计阀；3-水压头  $\Delta h$ ；4-压力计出水口；5-溢流口；6-自来水阀；7-细砂网或多孔盘；8-常水头过滤槽（缩小了尺寸比例）；9-过滤槽；10-进水口；11-顶板；12-弹簧；13-多孔盘；14-试件；15-压力表槽；16-渗透室；17-带刻度的量筒；18-出水口

**2.1.1 渗透室：**金属制成，包括直径为  $225\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$  的圆柱体试筒，上顶板和下底板。顶板有进水接口，底板有出水接口，试筒外壁有进水、出水接口。

**2.1.2 多孔盘：**试件底部和顶部均放置多孔盘，材质为碳化硅、氧化铝等非腐蚀性材料，孔径应足够小（应小于混合料通过率 90% 相应的孔径），以防止集料颗粒通过孔流失。多孔盘渗透性必须至少比待测材料渗透性高一个数量级。多孔盘应具有足够的厚度和强度，使其在正常使用过程中不会弯曲、压缩或变形。顶部应配备一个合适的弹簧等装置，当渗透仪顶板就位时，可施加 22 ~ 45N 总压力，以限制试件在浸泡、渗透试

验时体积膨胀。

**2.1.3 压力计管：**带刻度，用于测定水压头损失，与压力计管相连接的上下两个压力计出水口垂直距离  $L$ ，应不小于渗透室的直径。

**2.1.4 常压头过滤槽：**用于去除自来水中气泡，提供稳态的常压头水流。

**2.1.5 量筒：**容积 250mL。

**2.2 振动锤：**满足本规程 T 1224 的要求，但钢制夯锤直径为 100mm。

**2.3 温度计：**精度为 0.5℃。

**2.4 天平：**量程满足称量要求，感量不大于称量质量的 0.1%。

**2.5 秒表：**最小分度 1s。

**2.6 游标卡尺：**精度 0.1mm。

**2.7 水：**自来水，试验时水温宜高于室温 3~4℃。

**2.8 其他：**拌和锅、料铲、游标卡尺、金属盘、真空泵和刮平尺。

### 3 试验准备

**3.1 检查渗透仪各部件**是否完整、满足试验要求。

**3.2 检查成型机各部件**是否有松动、运转正常，夯锤（或压头）表面是否磨损。渗透室内壁涂一层硅油等疏水材料，以防止有通道和空腔可能引起表面产生绕渗。

**3.3 测量试筒的内径  $d$ 。**在试筒底部测定内径 1 次，再转动 90°测 1 次；按同样方法在试筒顶部测定内径 2 次；计算 4 个测定平均值为渗透室的内径。根据内径  $d$  计算试筒截面面积。

**3.4 测量预期试件高度  $h_1$ 。**将底部多孔盘放进试筒，测量多孔盘表面距上部压力计出水口垂直高度，每转动 90°测 1 次，共测量 4 次取平均值，平均值 + 2cm 即为预期试件高度。

**3.5** 测量试筒的有效高度  $H_1$ 。将底部、顶部两个多孔盘放进试筒，测量顶部多孔盘表面距试筒顶部端面垂直高度，每转动  $90^\circ$  测 1 次，共测量 4 次取平均值。

**3.6** 测量上下两个压力计出水口垂直距离  $L$ ，测量 2 次取平均值。

## 4 试样拌制

### 4.1 确定混合料成型条件

**4.1.1** 根据设计标准或工程实际情况，可选择如下方法确定最大干密度和最佳含水率。

- (1) 本规程 T 1220 重型击实试验；
- (2) 本规程 T 1221 振动压实试验；
- (3) 本规程 T 1224 振动锤压实试验。

**4.1.2** 根据材料层位，采用工程规定的压实度标准。

**4.1.3** 取  $(90\% \sim 100\%) w_{op}$  作为混合料拌制时目标含水率，记为  $w_{m0}$ 。采用最大干密度乘以压实度标准作为目标干密度，记为  $\rho_{d0}$ 。当采用其他条件时应在报告中注明。

**4.1.4** 室内压实试件含水率与目标含水率之差不应超过  $\pm 1.0\%$ ，成型试件干密度与目标干密度之差不应超过  $\pm 2.0\%$ 。

### 4.2 试验室取各单档集料样品拌制试样

**4.2.1** 按本规程 T 1201 取各单档集料的样品，风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干，必要时将细集料用橡胶锤等敲散，防止结团。

**4.2.2** 按混合料配比称配一份含水率试验试样；当  $37.5\text{mm}$  筛余率大于  $5\%$  时，应剔除试样中  $37.5\text{mm}$  筛上颗粒。试样质量应满足本规程表 T 1206-1 的要求。按照本规程 T 1206 方法测定含水率，即原有含水率（风干含水率），记为  $w_0$ 。

**4.2.3** 一个试件所需干燥试样的质量按式（T 1267-1）计算，精确至  $1\text{g}$ ：

$$m_d = 3.14d^2h_1\rho_{d0} + \delta \quad (\text{T 1267-1})$$

式中： $m_d$ ——一个试件所需干燥试样的质量（g）；

$d$ ——渗透室的内径（cm）；

$h_1$ ——预期试件高度（cm）；

$\rho_{d0}$ ——目标干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\delta$ ——试件成型过程中试样损耗质量, 为 50g。

**4.2.4** 称取的一份自然含水率的试样质量按式 (T 1267-2) 计算。

$$m_{ad} = (m_d + 500) \times \left(1 + \frac{w_0}{100}\right) \quad (\text{T 1267-2})$$

式中:  $m_{ad}$ ——称取的一份自然含水率的试样干质量 (g), 含一份成型试样和一份含水率试样;

500——含水率试验所需的一份干燥试样质量 (g);

$w_0$ ——试样原有含水率 (风干含水率) (%)。

**4.2.5** 按混合料配比称配一份试样; 当 37.5mm 筛余率大于 5% 时, 应剔除试样中 37.5mm 筛上颗粒。试样质量应满足  $m_{ad} \pm 10\text{g}$  的要求。将试样在金属盘内摊平, 充分搅拌至均匀。

**4.2.6** 称取目标含水率相应的水量均匀地喷洒在试样上, 拌和均匀后装入密闭容器或双层塑料袋内, 称量容器 (塑料袋) 和试样总质量。将试样在  $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  下浸润 16 ~ 24h。现场不具备拌和机时, 也可以在金属盘内用小铲充分拌和至均匀。

加水量按式 (T 1267-3) 计算, 精确至 0.1g。

$$m_{wm} = \frac{m'_{ad}}{1 + 0.01w_0} \times \frac{w_{m0} - w_0}{100} \quad (\text{T 1267-3})$$

式中:  $m_{wm}$ ——含水率为  $w_m$  时的加水量 (g);

$m'_{ad}$ ——实际称取的一份自然含水率的试样干质量 (g);

$w_{m0}$ ——目标含水率 (%)。

### 4.3 直接取混合料样品拌制试样

**4.3.1** 按本规程 T 1201 取样, 将样品风干或  $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  烘干至表干状态, 必要时用橡胶锤等敲散, 防止结团。当 37.5mm 筛余率大于 5% 时, 应剔除样品中 37.5mm 筛上颗粒。

**4.3.2** 取一份试样, 按照本规程 T 1206 测定含水率, 即原有含水率 (风干含水率), 记为  $w_0$ 。

**4.3.3** 称取一份试样, 按照本方法 4.2 拌制试样。

## 5 试件成型

**5.1** 将试筒安放在水泥混凝土等基础上，必要时予以固定。在试筒侧面薄涂一层防水材料。将多孔盘适当预湿后在试筒底部对中放好。

**5.2** 取一份拌制好的试样，缩分出质量为  $500 \times (1 + w_{m0}/100)$  的一份子样，测定含水率 ( $w_a$ )。

**5.3** 剩余试样称量总质量 ( $m_1$ )。采用简易缩分法将试样分成 6~8 等份。振动锤击实过程中，试样覆盖，防止干燥、水分丢失。

注：1 等份试样数量应使压实后厚度约为 1.5 倍样品最大颗粒粒径，同时不小于 30mm。

**5.4** 取 1 等份试样，用金属铲徐徐加入试筒中，装料后整平表面；插入振动夯锤，振动压实试样，振动压实表面尽量分布均匀。用人工保持向下按压振动锤防止夯锤弹跳，同时振动力不宜过大。振动压实时，不断采用钢直尺量取试件顶面距试筒顶部端面的距离，至与  $H_1$  之差达到分层压实厚度停止压实。

**5.5** 在压实好的试件表面拉毛。再取 1 等份试样，加入试筒中，装料后整平表面，再次振动至要求的分层厚度。

**5.6** 采用以上步骤，分层装料、振动压实，控制每层压实厚度，直至最后一层，且高出上部压力计出水口 2cm。然后放上预湿的顶部多孔盘，用振动锤在多孔盘中间稍微振动压实一下，或用木锤在多孔盘中间稍微锤击压实一下，使多孔盘与试件表面紧密接触，且多孔盘应安装水平。

**5.7** 测量顶部多孔盘表面距试筒顶部端面的距离，记为  $H_2$ ，计算  $H_1 - H_2$  为试件高度。

**5.8** 按照以上步骤成型不少于 3 个试件。成型后试件无须养生即可进行渗透试验。

## 6 渗透试验步骤

**6.1** 轻轻打开常压头过滤槽进水口，连接水源，加满水。

**6.2** 放上密封圈、安装顶板，通过弹簧在试件表面施加一定压力。关闭渗水仪所有

阀门，使渗透仪处于密封状态。

**6.3** 连接渗水仪进水口与真空源，缓慢打开渗水仪进水口阀门，缓慢抽真空直至真空度不小于 67kPa。抽真空 15min 以上以去除试件中气泡。连接渗水仪出水口与常压头过滤槽出水口，打开常压头过滤槽出水口阀门，缓慢打开渗水仪出水口阀门，抽真空使去气泡水缓慢上升、去除试件残留气泡，并达到饱和。

**6.4** 待试件饱和、渗水仪充满水后，关闭常压头过滤槽出水口阀门、渗水仪出水口阀门和渗水仪进水口阀门。停止抽真空，移走真空源。连接常压头过滤槽出水口与渗水仪进水口，缓慢打开常压头过滤槽出水口阀门、渗水仪进水口阀门，缓慢打开下部、上部压力计出水口阀门，使水自由流动。连接压力计管与压力计出水口，让水进入压力计管、去除管中空气。

**6.5** 关闭渗水仪进水口阀门、打开渗水仪出水口阀门，让压力计管中水位在零水头条件下达到稳定。

**6.6** 缓慢打开渗水仪进水口阀门，观察压力计管水位。待压力计管水位无明显变化时，测定一定时间  $t$  内水流量  $Q$ 、水压头  $\Delta h$  和出水口的水温度，计算渗流流速和水力梯度。

**6.7** 按 0.5cm 增量增加水压头，重复试验，以确定渗透系数保持不变的层流区域。当渗透系数产生明显变化时，表明进入湍流条件，可以降低 1cm 水压头，再复核一次渗透系数。

注：粒料材料水力梯度一般为 0.2 ~ 0.5，粒径越大、压实度越小，则水力梯度越小，否则水力梯度越大。水力梯度不宜过大，以免产生不稳定的湍流，甚至产生粉料的迁移、离析。

**6.8** 一个试件可按以上方法重复测定 3 次以上。

**6.9** 渗透试验结束后，关闭常压头过滤槽出水口阀门、渗水仪进水口阀门，排干渗透仪中水。观察渗水仪中是否出现明暗相间的水平条纹，如果有说明粉料产生了迁移、离析，应在报告中予以说明。

## 7 结果整理

**7.1** 试件的湿密度按式 (T 1267-4) 计算，精确至 0.001g/cm<sup>3</sup>。

$$\rho_w = \frac{m_1}{3.14d^2 (H_1 - H_2)} \quad (\text{T 1267-4})$$

式中： $\rho_w$ ——试件的湿密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $d$ ——实测试筒的内径 ( $\text{cm}$ )；  
 $H_1$ ——试筒的有效高度 (试筒高度减去底部、顶部多孔盘厚度) ( $\text{cm}$ )；  
 $H_2$ ——成型试件后，顶部多孔盘表面距试筒顶部端面的距离 ( $\text{cm}$ )；  
 $m_1$ ——击实之前称量的试样总质量 ( $\text{g}$ )。

**7.2** 试件的干密度按式 (T 1267-5) 计算，精确至  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w_a} \quad (\text{T 1267-5})$$

式中： $\rho_d$ ——试件干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；  
 $w_a$ ——试件的实测含水率 (%)。

**7.3** 水力梯度按 (T 1267-6) 计算。

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{T 1267-6})$$

式中： $i$ ——水力梯度；  
 $\Delta h$ ——水压头，为压力计管上水位差 ( $\text{cm}$ )；  
 $L$ ——上下两个压力计出水口垂直间距离 ( $\text{cm}$ )。

**7.4** 渗流流速按 (T 1267-7) 计算。

$$v = \frac{Q}{3.14d^2t} \quad (\text{T 1267-7})$$

式中： $v$ ——渗流流速 [ $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]；  
 $Q$ ——稳态条件下， $t$  时间内排水口流出的水体积 ( $\text{cm}^3$ )；  
 $t$ ——测定水流量的时间 ( $\text{s}$ )。

**7.5** 渗透系数按式 (T 1267-8) 计算，取 3 位有效数字。

$$k = R_T \frac{v}{i} \times \frac{1}{100} \quad (\text{T 1267-8})$$

式中： $k$ ——标准温度  $20^\circ\text{C}$  时渗透系数 ( $\text{m}/\text{s}$ )；  
 $R_T$ ——水温  $T$  时水黏度与  $20^\circ\text{C}$  水黏度比，按式 (T 1267-9) 计算。

$$R_T = 0.024\,09 \times 10^{\frac{247.8}{T+133}} \quad (\text{T 1267-9})$$

式中： $T$ ——试验时水温 ( $^\circ\text{C}$ )。

**7.6** 取一个试件测定 3 次以上的渗透系数平均值作为试验结果，取 3 位有效数字。

## 8 报告

- 8.1 试验项目名称和执行标准。
- 8.2 样品的编号、名称、产地和规格。
- 8.3 接样日期、样品描述。
- 8.4 试验日期、样品缩分方法。
- 8.5 主要仪器设备的名称、型号及编号。
- 8.6 试件成型方法和成型主要参数，试件高度，试筒直径；
- 8.7 最佳含水率，最大干密度，压实度标准，试件的含水率和干密度；
- 8.8 水温、水力梯度、水流流速、渗透系数；
- 8.9 要说明的其他内容。

### 条文说明

1 渗透系数是粒料材料重要水力学参数。粒料材料渗透性能影响结构的排水能力。粒料材料渗透性能差、排水能力不足时，会导致结构内部水排不出去、孔隙水压力过大而产生导致泵吸压力，容易导致唧浆等结构性水损坏。

渗透试验分为常水头渗透试验和变水头渗透试验。一般按材料渗透系数进行选择，渗透系数大于  $10^{-5}$  m/s 的材料适合采用常水头渗透试验，否则适合采用变压头渗透试验。常水头渗透试验测定渗透系数范围为  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  m/s，绝大部分粒料材料渗透系数符合此范围，因此粒料材料适合常水头渗透试验。

当粒料材料中 0.075mm 通过率对渗透系数影响较大，随着 0.075mm 通过率增加，渗透系数会迅速增加，同时当粒料材料中 0.075mm 通过率过高时，会产生固结效应，对渗透系数结果产生影响，因此粒料材料中 0.075mm 通过率大于 10% 时不适合采用本方法。

2 常水头渗透仪试筒内径（高度）与材料最大粒径之比，一般要求为不小于 8 ~ 12 倍，主要是控制试筒内壁与试件的间隙，同时增大有效水流长度。如 BS 1377-5 要求试件最小尺寸不小于最大粒径的 12 倍，ASTM D2434 规定试件最小尺寸为最大粒径的 8 倍或 12 倍，AASHTO T 215 规定 2mm 通过率大于 65% 时采用 76mm 直径，2mm 通过率

小于65%时采用114mm直径；9.5mm通过率大于65%时采用152mm直径，9.5mm通过率小于65%时采用229mm直径。JIS A 1218 则规定对于砂、砾石，试件最小尺寸不小于材料最大粒径的10倍，但是对于级配材料，试件最小尺寸与材料最大粒径之比可放宽至5倍。ISO 17892-11 则试件尺寸（直径、高度）不小于材料最大粒径的6倍。

目前国内常水头渗透仪无法满足粒料材料渗透试验要求。首先，试筒内径一般为100mm，内径过小；多为透明塑料管、强度低，只适合木锤锤击成型试件，对于粒料材料为了控制压实度要求采用振动锤成型时容易破裂；底座没有特殊设计，无法固定在基础上。

粒料材料级配、压实度对渗透系数试验结果影响较大，为了模拟现场实际，本规程采用振动锤在试筒内成型。考虑粒料材料为级配料，试件最小尺寸与材料最大粒径之比放宽至5~6倍。我国绝大部分工程粒料材料最大粒径为不大于37.5mm，因此本标准对于粒料材料统一试件尺寸为37.5mm的6倍，即为225mm。同时，为了振动锤成型试件的需要，采用金属渗透室，加强了底座设计。

5 试件压实度对渗透试验结果影响较大。传统采用木锤，人工操作，达不到工程压实度要求，同时难以保证压实的均匀性和一致性。为此，要求采用振动锤进行分层击实，用高度控制其压实度，使其达到要求的密实度。

6 渗透试验时控制水力梯度，使得渗透水流达到稳定的层流状态。只有在层流状态下的渗透系数才是稳定的，具有可比性。AASHTO T 215、ASTM D2434 中建议，认为低压实度材料的水力梯度为0.2~0.3，高压实度材料的水力梯度为0.3~0.5。ISO 17892-11 则建议渗透系数大于 $10^{-5}$  m/s 时，水力梯度不大于1。

7 渗透系数与水的动力黏滞系数成反比，而水的动力黏滞系数受温度影响较大。因此需要测定试验时的水温，进行渗透系数的温度修正。《公路土工试验规程》（JTG 3430）、AASHTO T 215、ASTM D2434、BS 1377-5 中采用标准温度为20℃，JIS A 1218 中采用标准温度为15℃，ISO 17892-11 中没有明确，但是给出10℃、15℃、20℃、25℃、30℃这5个标准温度。