

公路隧道工程现场测试规程

Field Test Methods of Highway Tunnel Engineering

2026-06-18 发布

2026-09-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

前 言

根据《交通运输部关于下达 2020 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》(交公路函〔2020〕471 号)的要求,由招商局重庆交通科研设计院有限公司承担《公路隧道工程现场测试规程》(JTG/T 3530—2026)(以下简称“本规程”)的制定工作。

为适应我国公路隧道工程建设需要,规范和统一隧道土建工程现场测试的方法和技术要求,提升公路隧道施工质量和管理水平,同时完善公路隧道技术标准体系,在总结近年来公路隧道工程现场测试成熟经验和借鉴其他相关标准、技术成果的基础上,完成了本规程的编制工作。

本规程分为 12 章、2 个附录,主要包括:1 总则,2 术语和符号,3 现场抽样,4 结构与安装尺寸,5 轮廓尺寸,6 厚度与平整度,7 混凝土抗压强度,8 锚杆拔力、长度与锚固密实度,9 排水沟缺陷,10 防水板接缝密实性,11 衬砌外观质量缺陷,12 衬砌背部密实性,附录 A 测试参数与测试方法对应表,附录 B 现场测试记录表格。

本规程第 1 章由吴梦军起草,第 2 章由吴梦军、胡学兵起草,第 3 章由刘永华、丁浩起草,第 4 章由刘永华、张琦起草,第 5 章由刘秋卓、王安民起草,第 6 章由郭鸿雁、漆贵荣起草,第 7 章由沈小俊、李建军起草,第 8 章由陈力华、叶建虎起草,第 9 章由胡学兵、曹鹏起草,第 10 章由胡学兵、陈力华起草,第 11 章由刘学增、丁浩起草,第 12 章由刘学增、师刚起草,附录 A 和附录 B 由严孝平起草。

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:胡学兵(地址:重庆市南岸区学府大道 33 号,招商局重庆交通科研设计院有限公司;邮政编码:400067;电话:023-62653128;传真:023-62653128;电子邮箱:huxuebing@cqhk.com),以便修订时研用。

主 编 单 位:招商局重庆交通科研设计院有限公司

参 编 单 位:重庆市交通规划和技术发展中心

同济大学

浙江数智交院科技股份有限公司

贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司

云南省交通规划设计研究院股份有限公司

主 编:吴梦军

主要参编人员:胡学兵 沈小俊 刘秋卓 张 琦 刘学增 丁 浩

严孝平 漆贵荣 刘永华 王安民 叶建虎 郭鸿雁
李建军 曹 鹏 陈力华

主 审：窦光武

参与审查人员：朱光仪 韩常领 李玉文 李志厚 郭小红 祝存芳
刘新荣 杨永顺 余 健 张 胜 万明富 胡 平
邱 娟 张学富 肖了林 许前顺 魏志新 李 斌
赵 辉 赵喜忠 郑金龙 易 立

参 加 人 员：方 林 王道良 师 刚

交通运输部信息公开
浏览专用

目次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 现场抽样	5
T 0501—2026 选点方法	5
T 0502—2026 切割取样方法	7
T 0503—2026 钻芯取样方法	10
4 结构与安装尺寸	13
T 0511—2026 尺量法	13
T 0512—2026 全站仪测试隧道偏位	15
T 0513—2026 全站仪测试钢架偏差和倾斜度	17
T 0514—2026 垂球测试钢架倾斜度	20
T 0515—2026 地质雷达测试钢架间距	22
5 轮廓尺寸	26
T 0521—2026 全站仪测试开挖轮廓尺寸	26
T 0522—2026 全站仪测试初期支护内轮廓尺寸	29
T 0523—2026 全站仪测试二次衬砌内轮廓尺寸	30
T 0524—2026 激光断面仪测试轮廓尺寸	31
6 厚度与平整度	34
T 0531—2026 凿孔测试混凝土厚度	34
T 0532—2026 地质雷达测试混凝土厚度	36
T 0533—2026 钻芯测试混凝土厚度	38
T 0534—2026 钢筋探测仪测试钢筋保护层厚度	39
T 0535—2026 两米直尺测试衬砌混凝土墙面平整度	41
7 混凝土抗压强度	44
T 0541—2026 喷大板切割测试喷射混凝土强度	44
T 0542—2026 凿方切割测试喷射混凝土强度	46
T 0543—2026 钻芯测试混凝土强度	47

T 0544—2026	回弹法测试衬砌混凝土强度	50
T 0545—2026	超声-回弹综合法测试衬砌混凝土强度	55
8	锚杆拔力、长度与锚固密实度	62
T 0551—2026	锚杆拉拔仪测试锚杆拔力	62
T 0552—2026	锚杆无损检测仪测试锚杆长度与锚固密实度	64
9	排水沟缺陷	69
T 0561—2026	视频检测仪测试排水沟缺陷	69
10	防水板接缝密实性	72
T 0571—2026	目测法测试防水板接缝外观质量	72
T 0572—2026	负压法测试局部接点密实性	73
T 0573—2026	充气法测试焊缝密实性	75
11	衬砌外观质量缺陷	77
T 0581—2026	人工调查法测试外观质量缺陷	77
T 0582—2026	图像法测试外观质量缺陷	85
12	衬砌背部密实性	88
T 0591—2026	冲击回波法测试衬砌背部密实性	88
T 0592—2026	地质雷达测试衬砌背部密实性	93
T 0593—2026	敲击法测试背部密实性	95
附录 A	测试参数与测试方法对应表	97
附录 B	现场测试记录表格	100
	本规程用词用语说明	109

1 总则

1.0.1 为规范和统一公路隧道土建工程现场测试方法和技术要求，提升公路隧道施工质量和管理水平，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路隧道土建工程的现场测试。

条文说明

由于隧道路面测试技术要求与公路路面一致，因此，本规程未包含隧道路面测试相关内容。当需要开展隧道路面测试时，参照现行《公路路基路面现场测试规程》（JTG 3450）的有关规定执行。

1.0.3 本规程测试方法规定的仪器设备应经计量技术机构检验合格后使用，保证准确可靠。仪器设备的操作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 公路隧道工程现场测试应选择成熟、可靠、安全、经济、适用的测试技术，并贯彻国家技术政策，积极稳妥地采用新技术、新方法和新设备。

1.0.6 公路隧道工程现场测试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 轮廓 outline

沿隧道横断面方向的边缘线，包括隧道开挖轮廓、初期支护轮廓和二次衬砌轮廓。

2.1.2 内轮廓 inner outline

隧道锚喷支护、初期支护、二次衬砌等临空侧横断面方向的边缘线。

2.1.3 内轮廓宽度 inner outline-width

隧道内轮廓水平向对应的最大宽度。

2.1.4 内轮廓高度 inner outline-height

隧道内轮廓轴线处对应的竖直向高度。

2.1.5 侵线 invasion of inner outline

隧道实际内轮廓侵入隧道设计内轮廓内。

2.1.6 隧道偏位 axis deviation

隧道施工轴线偏离设计轴线的水平向距离。

2.1.7 横向偏差 lateral deviation

横向方向偏离隧道轴线的距离。

2.1.8 竖向偏差 vertical deviation

实际高程与设计高程的差值。

2.1.9 倾斜度 inclination

钢架所在平面与隧道轴线竖直线的夹角。

2.1.10 锚固密实度 compactness of rock bolt

锚杆孔中填充黏结物的密实程度。

2.1.11 墙面平整度 planeness

隧道衬砌表面相邻两凸面之间的凹深。

2.1.12 错台 faulting of slab ends

结构施工缝、变形缝或裂缝两侧出现的径向相对位移。

2.1.13 外观质量 quality of appearance

通过观察或测试所反映的外在质量及功能状态。

2.1.14 背部密实性 compactness behind lining

二次衬砌或初期支护背后是否存在空洞、空隙或松散等情况。

2.1.15 空洞 void

二次衬砌内部或衬砌与围岩、初期支护之间，因回填不密实或脱空发展形成的无填充物空穴。

2.1.16 不密实 inadequate compaction

衬砌混凝土因浇筑、振捣不充分等原因，内部存在蜂窝、麻面、疏松等现象，密实度未达到设计及规范要求的质量缺陷。

2.2 符号

b_c ——裂缝宽度；

C_b ——相同材质和规格的锚杆杆体波速平均值；

C_m ——同类锚杆的波速平均值；

C_t ——杆系波速平均值；

c ——混凝土错台测试时，支护结构的错台量；

c_c ——钢筋保护层厚度修正量；

c_m^t ——钢筋保护层厚度测试值；

D_{AS} ——钢架平均间距；

$\bar{F}$ ——锚杆拔力平均值；

$F_{\min}$ ——锚杆拔力最小值；

f_c ——芯样抗压强度；

f_{cu} ——试件抗压强度；

- $f_{cu,e}$ ——混凝土抗压强度推定值;
 $f_{cu,min}^c$ ——结构或构件最小的测区混凝土抗压强度换算值;
 h_c ——采用裂缝测深仪探测裂缝深度时,各测点裂缝深度平均值;
 h_p ——混凝土表面剥落剥离深度;
 L_{imax} ——高程最大值测点与测试断面设计拱顶之间的水平距离;
 l'_i ——采用裂缝测深仪探测裂缝深度时,第*i*点的发射和接收换能器内边缘间距;
 mf_{cu}^c ——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的平均值;
 P_T ——凿孔测试混凝土厚度时,一个测试段落内实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数的占比;
 $P_{t=15}$ ——充气法测试隧道防水板焊缝的密实性时,15min后压力值;
 Q ——渗漏水量测试时,24h内的渗漏水量;
 R_m ——测区平均回弹值;
 R_T ——凿孔测试混凝土厚度时,一个测试段落内实测最小厚度与设计厚度比值;
 $S_{f_{cu}^c}$ ——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的标准差;
 $\bar{T}$ ——凿孔测试混凝土厚度时,一个测试段落内实测厚度的平均值;
 v ——电磁波速;
 v_a ——修正后的平测时混凝土中声速代表值;
 v_d ——对测测区混凝土中声速代表值;
 v_k ——测试时空气中的声速计算值;
 v_{pp} ——平测时代表性构件混凝土中平测声速代表值;
 v_0 ——空气中声速实测值;
 α ——钢架倾斜度;
 Δ_{DT} ——隧道轴线偏位值;
 Δ_{SH} ——钢架横向偏差;
 Δ_{SV} ——钢架竖向偏差;
 ΔC_{savg} ——拱部或边墙超挖平均值;
 ΔC_{smax} ——拱部或边墙超挖最大值;
 ΔC_{xavg} ——仰拱、隧底超挖平均值;
 ΔC_{xmax} ——仰拱、隧底超挖最大值;
 ΔH ——内轮廓高度偏差;
 ΔT_i ——凿孔测试混凝土厚度时,第*i*个测点厚度偏差;
 ΔZ ——测试时激光断面仪相对于路面设计高程的高差;
 ε_r ——相对介电常数;
 λ ——平测声速修正系数。

3 现场抽样

T 0501—2026 选点方法

1 适用范围

1.1 本方法适用于公路隧道现场进行抽样试验时的个体选择，以评价样本的各类技术指标。

1.2 选点方法包括均匀法、随机法、定向法、连续法、综合法，适用条件如下：

- (1) 均匀法和连续法适用于全面评价测试对象整体质量；
- (2) 随机法适用于随机验证工程质量一致性；
- (3) 定向法适用于工程有明显质量缺陷时的针对性测试；
- (4) 综合法适用于兼顾整体质量测试与重点核查。

条文说明

正确规范地选择测试位置是保证现场测试结果可靠性和代表性的前提，使用不同的选点方法，选取不同的测点可能导致不同的测试结论，因此本规程列出了公路隧道现场测试时常用的抽样选点方法，现场选点时同时按现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的有关规定执行。

2 方法与步骤

2.1 均匀法

将隧道测试段落沿纵向或横向进行等间距划分，并在划分点处做好标记，如图 T 0501-1 所示。

2.2 随机法

按照数理统计原理选定现场测试时的测试区间、测试断面和测点。

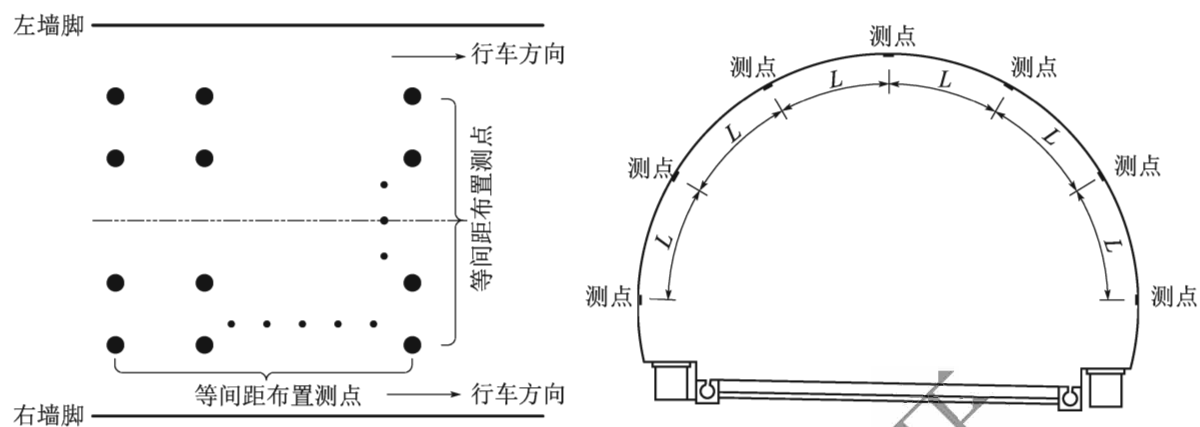


图 T 0501-1 均匀法选点示意图

2.3 定向法

将具有某种特征或指定的位置作为测点，如图 T 0501-2 所示。

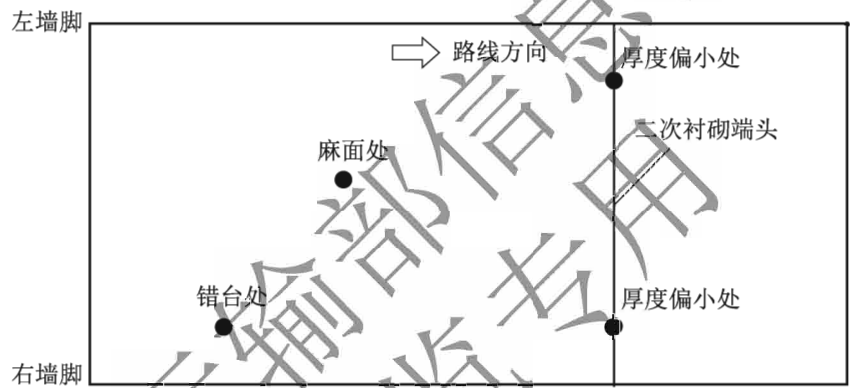


图 T 0501-2 定向法选点示意图

条文说明

某种特征主要指结构物厚度明显偏小、混凝土开裂、蜂窝麻面、严重错台、安装尺寸不符等明显不符合规范或设计要求的情况。

2.4 连续法

按相应标准的规定，沿环向或纵向连续、均匀布置测点、测线或测区，如图 T 0501-3 所示。

条文说明

相应标准主要指现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 以及其他的公路隧道物探或质量检测标准。连续法主要用于喷射混凝土厚度、二次衬砌厚度、拱背密实状况、钢架榀数、主筋间距等的测试。

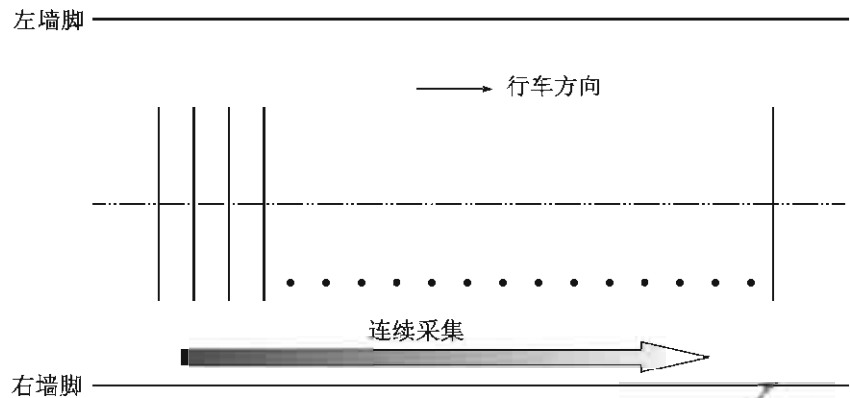


图 T 0501-3 连续法选点示意图

2.5 综合法

同时按照上述两种及以上选点方法的规定，确定测点位置。

条文说明

采用综合法确定测点位置时，一般先按均匀法或连续法选择测区，然后按随机法或定向法在测区内选择测点。

T 0502—2026 切割取样方法

1 适用范围

本方法适用于喷大板法时喷射混凝土立方体试样的制取。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 混凝土切割机：由液压泵或电力驱动，附金刚石锯片，配有淋水冷却装置，宜集成翻转台。大板试件可移动时，可采用电动碟锯机或马路切割机。
- (2) 直角尺：长度不小于 500mm，分度值不大于 1mm。
- (3) 游标量角器：分度值不大于 0.1°。
- (4) 其他：盛样器（或盛样袋）、铁盘、试样标签、毛刷、滑石笔、记号笔、抹布等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查取样所需的仪器与材料。

(2) 用直角尺测量混凝土板件尺寸，核实其是否满足取样要求。

3.2 取样步骤

(1) 从试模内取出混凝土板件，固定在切割作业场地上。

(2) 用直角尺、滑石笔或记号笔按图 T 0502-1 标记切割边线和切割中线。切割边线与板件边缘距离约为 120mm，用量角器测量各切割线交角，确保各交角为 90°。

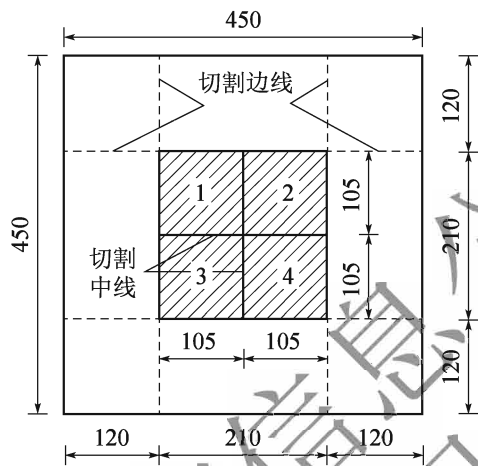


图 T 0502-1 切割线位置示意图 (尺寸单位: mm)

(3) 将混凝土切割机的锯片对准切割边线，开放冷却水，启动马达，压下锯片开始切割，缓慢向前推进，直至四边全部切割完毕。试样应保持边角完整，尺寸不小于 210mm × 210mm × 120mm。

(4) 固定切割好的试样，将锯片对准切割中线，重复上述步骤，切割制取 4 个约为 105mm × 105mm × 120mm 的试样。

(5) 用毛刷和抹布清理试样表面灰尘，按图 T 0502-2 在 4 个试样的长或宽方向四周均标记厚度切割线，厚度切割线与混凝土板件顶面的距离约为 15mm。

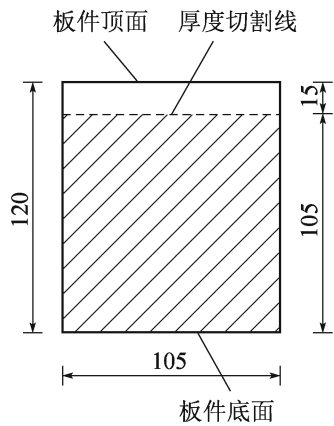


图 T 0502-2 厚度切割线位置示意图 (尺寸单位: mm)

(6) 将锯片对准厚度方向切割边线，按步骤 (3) 进行切割，试样应保持边角完整，尺寸不小于 105mm × 105mm × 105mm。

(7) 切割完毕后,用清水将试样漂洗干净,用抹布擦干试样表面明水,妥善放置于盛样器或盛样袋中。

(8) 填写样品标签,一式两份,一份粘贴在试样上,另一份作为记录备查。试样标签如图 T 0502-3 所示。

隧道名称:	_____
试样编号:	_____
试样部位:	桩号 K + _____ 位置: _____
制样日期:	_____
取样日期:	_____
取样人:	_____
保管人:	_____

图 T 0502-3 试样标签示例

条文说明

根据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)、《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)和《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)中对喷射混凝土抗压强度标准试块制作的要求,为确保得到合适的芯样,规定喷大板法的混凝土板件尺寸为 $450\text{mm} \times 450\text{mm} \times 120\text{mm}$ 。

试模中间部位的喷射混凝土密实性及均匀性要优于模板四周的混凝土,喷射混凝土状态更接近现场实际,现场取样时从模板中标记为1、2、3、4的部位取出四个试样,随机选取其中的三个试样开展强度测试。

小试样不好固定,用混凝土切割机沿厚度切割线方向难以开展切割作业时,一般采用角磨机,配合石器切割片等进行厚度方向的切割作业。操作时按照角磨机的安全操作规程进行作业,避免发生伤人等安全事故。

由于强度试验对试件尺寸的精度要求较高,使用本方法制取的小试样尺寸精度可能难以达到要求,因此后期进行强度试验前仍需对小试样尺寸进行精确修整。

4 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

(1) 取样基础信息,包括取样时间、取样单位、取样人员、取样温度、设备型号等。

(2) 试样信息,提供全部试样的桩号、部位、数量、状态等信息。

(3) 试样照片,提供所有小试样样品的照片信息。

T 0503—2026 钻芯取样方法

1 适用范围

本方法适用于使用取芯机在现场钻取喷射混凝土、二次衬砌混凝土、仰拱混凝土及仰拱填充混凝土的代表性试样。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 混凝土钻孔取芯机：配备淋水冷却装置。钻头直径宜大于集料最大粒径的 3 倍，宜为 100mm，钻头长度宜大于取芯位置结构物的设计厚度。
- (2) 钢卷尺：分度值不大于 1mm。
- (3) 其他：盛样器或盛样袋、喷漆、试样标签、毛刷、棉纱、抹布等。

条文说明

《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03: 2007) 规定, “抗压试验的芯样试验宜使用标准芯样试件, 其公称直径不宜小于骨料最大粒径的 3 倍; 也可采用小直径芯样试件, 但其公称直径不应小于 70mm 且不得小于骨料最大粒径的 2 倍”。据此, 对钻头的直径进行了规定。

根据《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03: 2007) 对芯样直径和《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019) 附录 C 对圆柱体标准试件尺寸的相关规定, 对钻头直径的要求进行了相关规定。

由于混凝土内的水泥水化状态及养护条件不一样, 混凝土顶层、中间部位及底层混凝土力学性能可能不一致。结构中间部位的混凝土具有较好的可靠性和代表性, 为获取结构中间部位的混凝土试样, 对钻头长度进行了相关规定。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 核实并标记现场桩号, 确定取芯位置, 并收集该位置的混凝土厚度、集料最大粒径等资料。
- (2) 准备并检查取样所需的仪器与材料。

条文说明

隧道现场经常存在桩号标记缺失或与实际桩号不符合的情况, 为确保钻孔桩号和位

置的准确性，因此提出了核实并标记现场桩号的规定。

3.2 取样步骤

- (1) 用钢卷尺和喷漆现场标记钻孔位置，布设作业场地。钻孔位置应远离管线，避开存在裂缝、蜂窝等缺陷部位，同时应避开预埋件、钢架、钢筋等物体。
- (2) 将取芯机垂直对准混凝土钻孔位置，放下钻头，牢固安放取芯机，确保取芯机在运转过程中不发生移动。
- (3) 开放冷却水，启动马达，徐徐压下钻杆。
- (4) 钻至试验所需厚度时上抬钻杆，拔出钻头，停止转动，取出芯样。
- (5) 将芯样用清水漂洗干净，用抹布擦干试样表面明水，用钢卷尺量测芯样长度，确认满足要求后将芯样妥善放置于盛样器或盛样袋中。
- (6) 填写样品标签，一式两份，一份粘贴在试样上，另一份作为记录备查。试样标签如图 T 0503 所示。

隧道名称:		
试样编号:		
试样部位:	桩号 K +	位置:
施工日期:		
取样日期:		
取样人:		
保管人:		

图 T 0503 试样标签示例

- (7) 用毛刷清理钻孔，用棉纱等材料吸走钻孔内的水分，待干燥后用同强度等级混凝土密实填补取芯孔。

条文说明

钻孔过程中遇预埋件或钢筋时可能导致无法钻进，因此要提前了解钻孔段落的结构物状态。芯样取出后若出现破损，不能作为试验芯样时，要分析破损原因并进行记录，适当调整钻孔位置，重新钻孔。

由于钻芯为破坏性工作，测试完成后须进行芯孔的回填。为保证填补的密实性，填补混凝土中一般掺加占水泥质量 8% ~ 12% 的微膨胀剂，以及占水泥质量 3% ~ 5% 的快凝早强剂，并在孔洞表面用环氧树脂胶进行密封。

4 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 取样基础信息，包括取样时间、取样单位、取样人员、取样温度、设备型号等。
- (2) 芯样信息，提供全部芯样的类型、桩号、部位、数量、状态等信息。
- (3) 芯样照片，提供所有芯样的照片信息。

交通运输部信息公开
浏览专用

4 结构与安装尺寸

T 0511—2026 尺量法

1 适用范围

适合采用尺量法开展现场测试的主要内容如表 T 0511 所示。

表 T 0511 尺量法测试内容统计表

序号	分部工程	分项工程	测试内容
1	总体	总体实测项目	行车道宽度、内轮廓宽度、边坡或仰坡坡度
2	衬砌	明洞	混凝土厚度
3		明洞防水层	搭接长度、卷材向隧道暗洞延伸长度、卷材向基底的横向延伸长度、缝宽
4		明洞回填	回填压实、每层回填层厚、坡度
5		锚杆	孔位、孔深、孔径
6		钢筋网	网格尺寸、搭接长度
7		钢架	间距、拼装偏差、安装偏差、连接钢筋间距
8		仰拱	厚度、钢筋保护层厚度
9		衬砌钢筋	主筋间距、两层钢筋间距、箍筋间距、钢筋长度、钢筋保护层厚度
10		混凝土衬砌	衬砌厚度
11		防水层	搭接长度、缝宽、固定点间距
12		止水带	纵向偏离、偏离衬砌中线、固定点间距
13		排水沟（管）	断面尺寸或管径、壁厚、基础厚度
14		超前锚杆	长度、孔位、孔深和孔径
15		超前小导管及管棚	长度、孔位、孔深和孔径

2 仪器与材料技术要求

(1) 钢卷尺、钢直尺：分度值不大于 1mm。

- (2) 游标卡尺：量程不小于 150mm，分度值不大于 0.1mm。
- (3) 其他：粉笔、记号笔、喷漆等。

条文说明

使用钢卷尺进行测试时，要注意根据测试对象的尺寸选取规格适宜、刻度清晰的钢卷尺，避免多次转测导致误差过大。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 确定测试对象的桩号、位置及数量。
- (3) 收集测试对象的设计参数。
- (4) 使用钢卷尺、记号笔或喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。

3.2 测试步骤

- (1) 按本规程 T 0501 规定的方法确定取样的位置，并使用粉笔、记号笔或喷漆做好标记。
- (2) 使用钢卷尺或游标卡尺进行测试。采用钢卷尺测试时，应拉紧钢卷尺，保持尺面平整不扭曲。
- (3) 读取测试结构物尺寸的起止点读数，填写现场记录表，以 m 计，使用钢卷尺时准确至 1mm，使用游标卡尺时准确至 0.1mm。

条文说明

丈量法测试时起止点位置的确定和钢卷尺的摆设角度等因素都将影响测试结果，如测试仰拱或二次衬砌混凝土厚度时，要在测试部位固定钢卷尺起点端，旋转钢卷尺末端，取最小读数作为仰拱或衬砌混凝土的厚度值；测试钢架间距时，要按照起始钢架左侧到其相邻钢架左侧，或起始钢架右侧到其相邻钢架右侧，或起始钢架中间到其相邻钢架中间的方式读取间距数据。

有些测试项目在施工结束后，难以进行测试，因此，丈量法测试时要掌握现场施工动态，及时开展现场测试工作，如测试钢架间距时，要在喷射混凝土施作前进行测试；测试防水层或止水带的实测项目时，要在二次衬砌模板台车就位前开展测试；测试二次衬砌钢筋间距时，一般在钢筋绑扎、调整完毕后选取衬砌顶部外露的钢筋进行测试。

4 数据处理

(1) 根据现场记录表, 计算测试对象的结构或安装尺寸, 获得实测值, 以 m 计, 准确至 1mm 或 0.1mm。

(2) 计算实测值与设计值或规范值之间的差值。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 包括测试时间、单位、人员、温度和设备等。
- (2) 测试位置信息, 包括测试段落起止点桩号和部位等。
- (3) 测试内容、实测值、差值等。

T 0512—2026 全站仪测试隧道偏位

1 适用范围

本方法适用于未偏转隧道在二次衬砌浇筑后采用全站仪测试隧道轴线偏位。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 全站仪: 测角精度优于 $2''$, 测距精度优于 $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}L$ (L 为测距, 单位为 mm)。
- (2) 钢卷尺: 分度值不大于 1mm。
- (3) 其他: 记号笔、喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 收集隧道平纵曲线要素、高程等资料, 并将上述资料输入全站仪或测量软件。
- (3) 确定轴线偏位测试段落及测试断面桩号, 计算测试断面设计拱顶处的实测高程值 H_s 。
- (4) 使用钢卷尺、记号笔或喷漆补充完善测试段落的里程桩号, 宜按整 10m 的形式标记。

3.2 测试步骤

- (1) 根据控制点位置和测试段落起止桩号，选定全站仪架设位置。
- (2) 架设、整平全站仪，后视控制点，采用后方交会法测量全站仪的坐标值。
- (3) 使用全站仪放样出测试断面的设计拱顶位置。
- (4) 以设计拱顶为基点，先将测点向左侧偏移不大于 5mm，测量并记录该点的高程值 H_i ，以及该点与设计拱顶之间的水平偏距离 L_i 。如 $H_i > H_s$ ，则继续向左偏移不大于 5mm，测量该测点的高程 H_i ，以及该点与设计拱顶之间的水平距离 L_i ，直至 $H_i < H_s$ 。取 H_i 最大值对应的测点为隧道实际拱顶位置，该点与设计拱顶之间的水平距离 L_{imax} 即为隧道偏位值。
- (5) 如果第一次测点向左偏移时测得的 $H_i < H_s$ ，则将测点向右侧偏移不大于 5mm，重复上述步骤，直至 H_i 小于 H_s ，取 H_i 最大值对应的测点为隧道实际拱顶位置，该点与设计拱顶之间的水平距离 L_{imax} 即为隧道偏位值。
- (6) 如果第一次测点向左偏移时测得的 H_i 和第一次测点向右偏移是测得的 H_i 均小于 H_s ，则 L_{imax} 为 0。

条文说明

因控制点坐标现场复核测试工作量过大，因此一般不需对控制点进行放样复核，只需对隧道轴线点设计坐标进行验算复核，合格后就近选取测试段落附近的控制点使用即可。

测取的高程值最大测点不一定为隧道实际拱顶点，为减小误差，同时考虑测量工作的难易程度，结合《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017) 中隧道偏位规定值或允许偏差的要求，提出了相邻测点之间偏移距离的要求。

4 数据处理

隧道轴线偏位值应按式 (T 0512) 计算。

$$\Delta_{DT} = L_{imax} \quad (\text{T 0512})$$

式中： Δ_{DT} ——隧道轴线偏位值 (m)，准确至 0.001m；

L_{imax} ——高程最大值测点与测试断面设计拱顶之间的水平距离 (m)，准确至 0.001m。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试断面桩号、控制点坐标值、各测点坐标和高程值及偏移距等。

(3) 各断面隧道偏位值。

T 0513—2026 全站仪测试钢架偏差和倾斜度

1 适用范围

本方法适用于采用全站仪测试钢架横向偏差、竖向偏差及钢架倾斜度，宜在喷射混凝土施作前测试。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 全站仪：测角精度优于 $2''$ ，测距精度优于 $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}L$ (L 为测距，单位为 mm)。
- (2) 钢卷尺：分度值不大于 1mm。
- (3) 其他：喷漆、记号笔等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 收集隧道横断面、平纵曲线、高程、支护结构等设计参数，并将上述参数输入全站仪或测量软件。
- (3) 使用钢卷尺、记号笔或喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。
- (4) 确定测试钢架的里程桩号，计算测试断面设计拱顶处钢架临空侧中间位置的平面坐标值 (X_T 、 Y_T)、高程值 (H_T) 和相较于测设线的偏移距 (L_T)。

3.2 测试步骤

- (1) 选定合适位置，架设、整平全站仪，后视控制点，采用后方交会法测量全站仪的坐标值。
- (2) 使用全站仪放样出测试断面设计拱顶位置钢架临空侧的中间点，用记号笔做好标记。
- (3) 按 T 0512 测试步骤 (4)，以钢架设计拱顶为基点，向左或向右偏移测点，相邻测点之间的偏移距离不宜大于 0.003m，测量并记录各测点平面坐标值 (X_i 、 Y_i)、高程值 (H_i) 和相较于测设线的偏移距 (L_i)。
- (4) 后一测点高程值小于前一测点时，即可停止测量该侧测点的平面坐标值 (X_i 、

Y_i)、高程值 (H_i) 和相较于测设线的偏移距 (L_i)。

(5) 钢架高程值最大的测点即为拱顶点 P ，记录该测点平面坐标值 (X_p 、 Y_p)、高程值 (H_p) 和相较于测设线的偏移距 (L_p)。

(6) 调整全站仪垂直角度为 0° ，锁止竖向旋钮，测量钢架左侧拱脚部位测点，用记号笔做标记 F ，并记录点 F 的平面坐标值 (X_F 、 Y_F) 和高程值 (H_F)。

(7) 水平旋转全站仪，测量钢架右侧拱脚部位测点，用记号笔做标记 F' ，并记录点 F' 的平面坐标值 ($X_{F'}$ 、 $Y_{F'}$) 和高程值 ($H_{F'}$)。

条文说明

一般采用钢架宽度方向的中间点位置作为测试对象。测试时，为保障全站仪的量测精度，一般控制全站仪距离待测钢架在 30m 以内。

测得的高程值最大测点不一定为钢架实际拱顶点。为减小点位误差，同时考虑测量工作的难易程度，结合《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017) 中钢架偏差规定值或允许偏差的要求，提出了相邻测点之间的偏移距离要求。

由于钢架有一定厚度和宽度，测量时同一环钢架拱顶和拱脚测点一般位于钢架同一侧。测试时拱顶和拱脚测点位置关系如图 T 0513 所示。

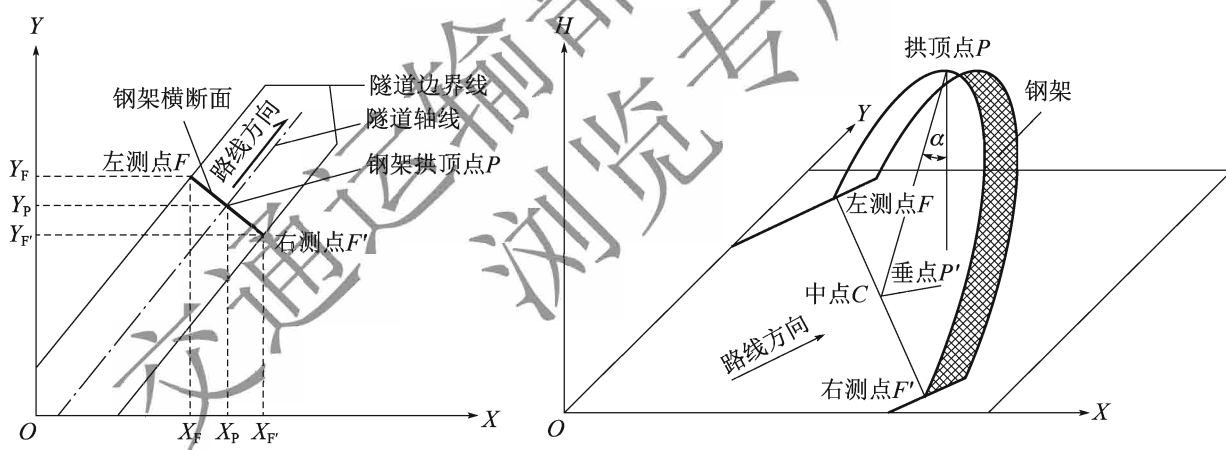


图 T 0513 各测点位置关系示意图

4 数据处理

4.1 钢架横向偏差应按式 (T 0513-1) 计算。

$$\Delta_{SH} = L_p - L_T \quad (\text{T 0513-1})$$

式中： Δ_{SH} ——钢架横向偏差 (m)，准确至 0.001m；

L_p —— P 点相较于测设线的偏移距 (m)；

L_T ——设计隧道轴线相较于测设线的偏移距 (m)。

4.2 钢架竖向偏差应按式 (T 0513-2) 计算。

$$\Delta_{SV} = H_P - H_T \quad (\text{T 0513-2})$$

式中: Δ_{SV} ——钢架竖向偏差 (m), 准确至 0.001m;

H_P —— P 点的实测高程值 (m);

H_T ——钢架拱顶部位的设计高程值 (m)。

4.3 钢架倾斜度按下列步骤进行计算。

(1) 测点 FF' 连线中点 C 的坐标值应按式 (T 0513-3) 计算。

$$Y_C = \frac{Y_{F'} + Y_F}{2} \quad X_C = \frac{X_{F'} + X_F}{2} \quad (\text{T 0513-3})$$

拱顶点 P 在 XOY 平面上的垂点 P' 与测点 FF' 连线中点 C 之间的距离应按式 (T 0513-4) 计算:

$$D_{P'C} = \pm \sqrt{(Y_C - Y_P)^2 + (X_C - X_P)^2} \quad (\text{T 0513-4})$$

式中: $D_{P'C}$ —— P 点在 XOY 平面上的投影点 P' 与 C 点之间的距离 (m), 准确至 0.001m, 其中, 当 P' 位于拱脚连线的小桩号一侧时, $D_{P'C}$ 取正值, 反之 $D_{P'C}$ 取负值;

Y_C ——测点 FF' 连线中点 C 的 Y 坐标值 (m);

Y_P ——钢架拱顶点 P 的 Y 坐标值 (m);

X_C ——测点 FF' 连线中点 C 的 X 坐标值 (m);

X_P ——钢架拱顶点 P 的 X 坐标值 (m)。

(2) 测点 FF' 连线中点 C 的高程值应按式 (T 0513-5) 计算。

$$H_C = \frac{H_{F'} + H_F}{2} \quad (\text{T 0513-5})$$

钢架拱顶点 P 与 C 点的高差值 Δ_H 应按式 (T 0513-6) 计算:

$$\Delta_H = |H_P - H_C| \quad (\text{T 0513-6})$$

式中: Δ_H —— P 点与 C 点高程之差 (m), 准确至 0.001m;

H_P —— P 点高程值 (m);

H_C —— C 点高程值 (mm)。

(3) 钢架倾斜度应按式 (T 0513-7) 计算。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{D_{P'C}}{\Delta_H} \quad (\text{T 0513-7})$$

式中: α ——钢架倾斜度 ($^\circ$), 准确至 0.1 $^\circ$ 。

条文说明

拱顶点 P 与其在 XOY 平面上的投影点 P' 两个点的平面坐标值相同, P' 的平面坐标值 ($X_{P'}$, $Y_{P'}$) 等于拱顶点 P 的平面坐标值 (X_P , Y_P), 因此式 (T 0513-4) 中取 (X_P ,

Y_p) 进行计算。

《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017) 表 10.10.2 中,明确了钢架倾斜度规定值或允许偏差为 $\pm 2^\circ$ 。因此,本规程在条文中明确了 $D_{p'c}$ 取正负值的规则,以保证式 (T 0514) 的计算结果满足《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017) 表 10.10.2 中评定标准的要求。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息,包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息,包括测试钢架的断面桩号。
- (3) 钢架设计拱顶的高程值及相较于测设线的偏移距离。
- (4) 钢架拱顶点 P 、测点 F 和 F' 、 FF' 连线中点 C 的坐标值及高程值。
- (5) 钢架横向偏差和竖向偏差、倾斜度等。

T 0514—2026 垂球测试钢架倾斜度

1 适用范围

本方法适用于使用一定重量的垂球测试钢架倾斜度,宜在喷射混凝土施作前测试。

条文说明

洞内风速过大,会使得垂球持续晃动,导致测读数据不准确,因此,使用本方法测试时,洞内风速以不致垂球晃动为宜。

2 仪具与材料技术要求

- (1) 活尖垂球:重量不小于 500g。
- (2) 钢卷尺:分度值不大于 1mm。
- (3) 其他:细线、喷漆、记号笔等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪具与材料。
- (2) 确定测试钢架的里程桩号。

(3) 使用钢卷尺、记号笔或喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。

3.2 测试步骤

- (1) 目测确定钢架拱顶点位置 P ，用记号笔做标记。
- (2) 在钢架拱顶标记点处使用细线悬吊垂球。
- (3) 用细线连接钢架左右侧拱脚部位测点，调整细线高度，使细线基本处于水平状态并拉紧，拱脚测点应与拱顶测点位于钢架的同一侧。
- (4) 目测调整垂球尖高度，使其与左右拱脚连线高度相同。
- (5) 用钢卷尺测量垂球尖到拱脚连线的垂直距离 Δ_Y ，若垂球尖位于拱脚连线的小桩号一侧，则 Δ_Y 取正值，反之则 Δ_Y 取负值。
- (6) 用钢卷尺测量钢架拱顶点 P 到垂球尖的距离 Δ_H 。

条文说明

测试现场通常采用目测的方法确定拱顶位置及拱脚连线是否水平，拱顶和拱脚测点位置关系如图 T 0514 所示。

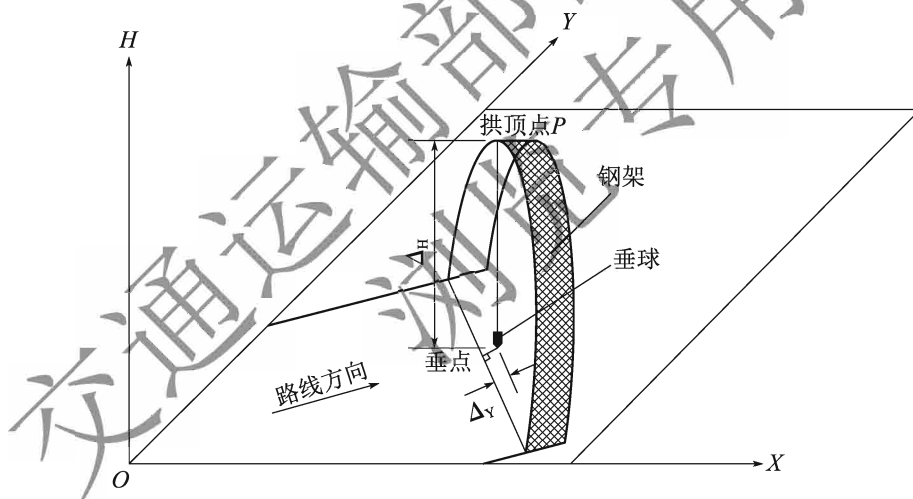


图 T 0514 垂球法测试钢架倾斜度测点位置关系示意图

《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1—2017）表 10.10.2 中，明确了钢架倾斜度规定值或允许偏差为 $\pm 2^\circ$ 。因此，本规程在条文中明确了 Δ_Y 取正负值的规则，以保证式（T 0514）的计算结果满足《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1—2017）表 10.10.2 中评定标准的要求。

4 数据处理

钢架倾斜度应按式（T 0514）计算。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta_Y}{\Delta_H} \quad (\text{T 0514})$$

式中： α ——钢架倾斜度（°），准确至 0.1°；
 Δ_Y ——垂球尖到拱脚连线的距离（m）；
 Δ_H ——钢架拱顶标记点 P 到垂球尖的距离（m）。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，主要包括测试钢架断面桩号。
- (3) 钢架倾斜度。

T 0515—2026 地质雷达测试钢架间距

1 适用范围

本方法适用于使用地质雷达测试龄期不小于 7d 的喷射混凝土内钢架的间距。

条文说明

混凝土龄期的长短会影响地质雷达的探测效果，龄期太短，混凝土内水泥水化不完全，含水率大，导致探测效果不好。

水、混凝土和钢材等三种材料的相对介电常数一般为 80、8 和无穷大，三者之间差异很大，同时上述三种材料的雷达波反射强度及信号形态差异也较大。根据已有雷达测试技术经验，喷射混凝土龄期达到 7d 后，其内部含水对测试效果的影响较小，此时开展钢架间距测试是合适的。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 地质雷达主机：系统增益不低于 150dB，信噪比不低于 60dB，模/数转换不低于 16 位，采样间隔一般不大于 0.2ns。
- (2) 地质雷达天线：垂直分辨率应高于 2cm，探测深度应满足测试要求。
- (3) 全站仪：测角精度优于 2″，测距精度优于 $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}L$ （ L 为测距，单位为 mm）。
- (4) 其他：记号笔、喷漆等。

条文说明

地质雷达主机的信号叠加次数可选择手动或自动叠加，数据的触发和采集模式为距离/时间/手动，一般具有点测与连续测量、手动或自动位置标记功能，且具有现场数据处理功能。

探测深度与分辨率是地质雷达天线选择的重要因素。在测试过程中，地质雷达天线频率的选择，既要满足分辨率的要求，又要满足测试深度的要求。常见频率的雷达天线探测深度见表 T 0515。

表 T 0515 地质雷达天线探测深度

天线种类	主频 (MHz)	脉宽 (ns)	可达深度 (m)	参考值 (m)
单体屏蔽天线	1 500	0.8	0.2 ~ 0.5	0.3
	900	1	0.1 ~ 1.0	0.7
	400	2.5	1.0 ~ 5.0	3.0
	200	5	1.0 ~ 9.0	5.0
	100	10	4.0 ~ 25.0	8.0
	100 (加强型)	10	5.0 ~ 30.0	10.0
低频组合天线	80	12	5.0 ~ 60.0	30.0
	40	25		
	35	30		
	20	50		
	16	60		
空气耦合天线	1 000	1	0.3 ~ 0.8	0.5
	2 200	0.43	0.15 ~ 0.3	0.3

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 确定测试段落，使用钢卷尺、记号笔（或喷漆）补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。
- (3) 选定测线位置。测线应避开预留洞室、锚杆或导管出露部位、电缆及管线架设部位、行走不便部位等区域。

条文说明

测试结构物表面条件较好时，地质雷达信号清晰、易于解释，但在条件不好的情况下，地质雷达在接收有效信号的同时，也不可避免地接收到各种干扰信号。产生干扰信号的因素很多，隧道内常见的干扰有电缆线、衬砌表面金属物体、天线耦合不好、地下异常的多次波等。在现场测试时需注意尽量避开上述干扰源，如确实无法避开，则需准

确记录干扰源的类型及位置,以便于处理雷达数据时准确、快速地判识异常,从而减小干扰物造成的影响。

3.2 测试步骤

(1) 选定合适位置,架立、整平全站仪。

(2) 后视控制点,使用全站仪放样测试段落的起点和终点位置,用喷漆做好标记。起点和终点连线的坡度应与隧道纵坡一致。

(3) 以标记的起点和终点连线作为测线,标记测线位置。测线宜设置于隧道左右边墙位置。进行仰拱钢架测试时,测线宜布设于路面边线位置。

(4) 将雷达天线放置于测试段落,调整雷达天线的方向并密贴于混凝土表面,启动地质雷达,前后移动雷达天线,调试参数直至符合技术要求。

(5) 重新将雷达天线放置于测试起点外3~5m的位置,做好测试准备。

(6) 以3~5km/h的速度沿测线匀速移动雷达天线,开展地质雷达测试。雷达天线通过里程桩号标记时应做好记录,每条测线宜不间断完成测试。

条文说明

地质雷达天线行走的距离直接影响钢架间距的测试结果,因此使用全站仪放样测试段落的起点和终点位置,起点和终点的连线坡度尽量与隧道纵坡一致,从而使得地质雷达天线行走的距离尽量等于测试段落长度。开展钢架间距测试时,测试段落的路面通常不平整,为控制天线沿标记测线匀速移动,一般将测线布置在边墙部位,人工移动雷达天线进行测试。测试时地质雷达天线移动速度从0加速至约3~5km/h需要一定距离,且地质雷达主机获得稳定的数据信号也需要一定的天线行程,因此规定测试时天线起点距离测试段落起点约3~5m,测试现场可根据实际情况进行调整。地质雷达天线沿标记测线匀速移动可以减小测试误差,在同一条测线上不中断测试也有利于减小因标记里程桩号等产生的测试误差,且便于后期数据处理和逐根提取钢架间距数据。地质雷达法测试结果的数据处理与解释不仅可以获取混凝土层厚度参数,同时也可以获取初期支护钢架间距以及混凝土背后的密实性等参数,具体流程如图T 0515所示。

地质雷达在结构物表面条件理想的情况下检测时,可得清晰、易于解释的雷达记录,但在条件不好的情况下,地质雷达在接收有效信号的同时,也不可避免地接收到各种干扰信号。产生干扰信号的原因很多,隧道常见的干扰有电缆、衬砌表面金属物体、天线耦合不好,地下异常的多次波等,干扰波一般都有特殊形状,易于辨别和确认。在现场检测过程中应准确记录表面干扰物体的位置,数据解释即可快速排除干扰物造成的干扰异常,以便对有效异常进行准确判识。

4 数据处理

4.1 使用雷达配套软件处理数据,根据数据处理结果,人工判读并记录首末钢架之

间的长度，准确至 0.01m，钢架位置信息及数量 Q_s ，准确至 1 根。

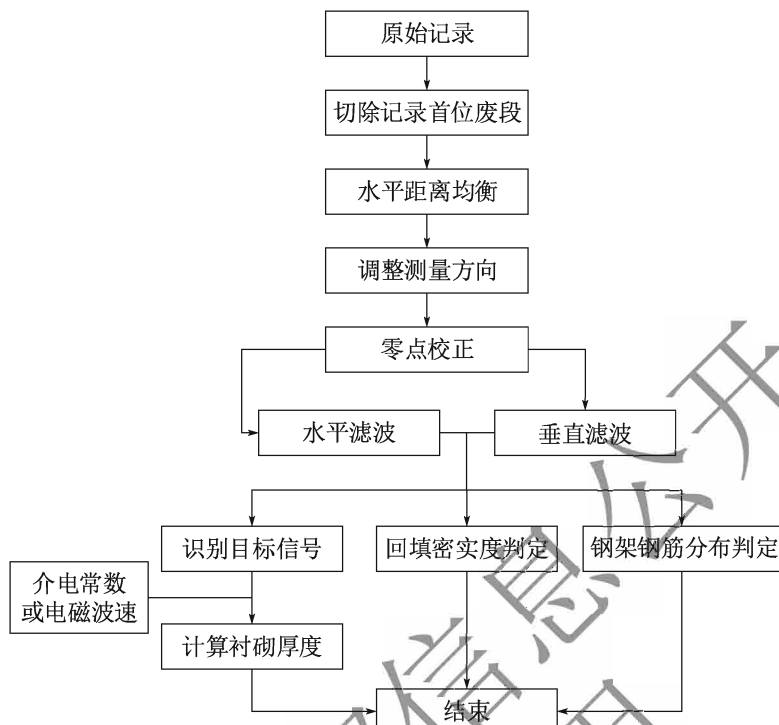


图 T 0515 雷达法测试数据处理与解释流程示意图

4.2 钢架平均间距应按式 (T 0515) 计算：

$$D_{AS} = \frac{L_s}{Q_s - 1} \quad (T 0515)$$

式中： D_{AS} ——钢架平均间距 (m)，准确至 0.01m；
 L_s ——首末钢架之间的长度 (m)；
 Q_s ——钢架数量。

4.3 检测段落衬砌类型有变化时，应逐段计算钢架平均间距。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落桩号、测线数量及位置。
- (3) 测试段落钢架设计数量、实测数量及平均间距。

5 轮廓尺寸

T 0521—2026 全站仪测试开挖轮廓尺寸

1 适用范围

本方法适用于使用全站仪测试隧道开挖轮廓尺寸。

条文说明

在实际工作中，已基本不再使用水准仪测试仰拱、隧底超欠挖项目，而是使用全站仪完成该项目测试。全站仪测试精度满足现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 相关评定要求，其结果可以作为评定依据。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 全站仪：测角精度优于 $2''$ ，测距精度优于 $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}L$ (L 为测距，单位为 mm)。
- (2) 钢卷尺：分度值不大于 1mm。
- (3) 钢垫板：长 × 宽为 50mm × 50mm。
- (4) 其他：反射棱镜、喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 收集隧道横断面、平纵曲线、高程、支护结构等设计参数，并将上述参数输入全站仪或测量软件。
- (3) 确定轮廓测试断面桩号。
- (4) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。

3.2 测试步骤

(1) 根据控制点位置和测试断面桩号，选定适宜位置安设全站仪。全站仪架设位置宜在距离测试断面 30m 范围内选取。

(2) 后视控制点，采用后方交会法测量全站仪的坐标值。

(3) 测试拱部或边墙超欠挖项目时，转动全站仪镜头对准待测断面拱顶位置，进行测试，记录该测点的里程桩号、偏位值、高差值及超欠挖值 ΔC_{si} ，准确至 0.001m。转动镜头至下一个测点，按上述测试步骤进行测试和记录，直至完成该断面所有测点的测试。

(4) 测试仰拱、隧底超欠挖项目时，在测试段落内随机选取测点，清理底部测点周围虚渣。当全站仪镜头与测点间视野存在干扰时，宜在测点处放置钢垫板，并在钢垫板上架设反射棱镜，使用钢卷尺量取反射棱镜高度并记录，将反射棱镜高度输入全站仪。

(5) 转动全站仪镜头对准测点或反射棱镜，完成该测点的测试，并记录测量软件中显示的该测点的里程桩号、偏位值、高差值及超欠挖数值 ΔC_{xj} ，准确至 0.001m。重复上述步骤，逐点循环测试直至完成该段落所有测点的测试。每个断面测点数量宜为 35 个点。

条文说明

因控制点坐标现场复核测试工作量过大，因此可不对控制点进行放样复核，只需对隧道轴线点设计坐标进行验算复核，合格后就近选取测试段落附近的控制点使用即可。有些全站仪内置有相关的隧道测量放样软件，这将有利于测试工作的开展。如全站仪未配置相关软件，可下载相关应用程序。

在准备工作中，将隧道平纵曲线要素、高程等资料输入测量软件后，测量时软件会自动显示测试点的相关结果数据。隧道开挖轮廓尺寸的测试频率，参照现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1) 的有关规定执行。

4 数据处理

4.1 将测试结果数据导入后处理软件，绘制测试断面轮廓曲线。

4.2 提取超欠挖数值 ΔC_{si} 和 ΔC_{xj} ，当超欠挖数值为“+”时，为超挖；当超欠挖数值为“-”时，为欠挖。

4.3 拱部或边墙超挖的平均值和最大值应按式 (T 0521-1) 和式 (T 0521-2) 计算。

$$\Delta C_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta D_{si}}{n_p} \quad (\text{T 0521-1})$$

$$\Delta C_{s\max} = \max \Delta C_{si} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{T 0521-2})$$

式中: $\Delta C_{s\text{avg}}$ ——拱部或边墙超挖平均值 (m), 准确至 0.001m;

$\Delta C_{s\max}$ ——拱部或边墙超挖最大值 (m), 准确至 0.001m;

n ——测试点数量;

n_p ——测试结果为超挖的测试点数量;

ΔD_{si} ——测试结果为超挖的结果值, 其中, 当 $\Delta C_{si} \leq 0$ 时, $\Delta D_{si} = 0$, 当 $\Delta C_{si} > 0$ 时, $\Delta D_{si} = \Delta C_{si}$;

ΔC_{si} ——拱部或边墙各测点测试结果值 (m)。

4.4 仰拱、隧底超挖的平均值和最大值应按式 (T 0521-3) 和式 (T 0521-4) 计算。

$$\Delta C_{x\text{avg}} = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta D_{xj}}{m_p} \quad (\text{T 0521-3})$$

$$\Delta C_{x\max} = \max \Delta C_{xj} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{T 0521-4})$$

式中: $\Delta C_{x\text{avg}}$ ——仰拱、隧底超挖平均值 (m), 准确至 0.001m;

$\Delta C_{x\max}$ ——仰拱、隧底超挖最大值 (m), 准确至 0.001m;

m ——测试点数量;

m_p ——测试结果为超挖的测试点数量;

ΔD_{xj} ——测试结果为超挖的数据结果值, 其中, 当 $\Delta c_{xj} \leq 0$ 时, $\Delta D_{xj} = 0$, 当 $\Delta c_{xj} > 0$ 时, $\Delta D_{xj} = \Delta c_{xj}$;

ΔC_{xj} ——仰拱、隧底各测点测试结果值 (m)。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括段落起止桩号、测试断面位置桩号等。
- (3) 实测和设计开挖轮廓曲线, 超欠挖数值和位置。
- (4) 测试断面中拱部或边墙超挖的平均值和最大值。
- (5) 测试段落中仰拱、隧底超挖的平均值和最大值。

T 0522—2026 全站仪测试初期支护内轮廓尺寸

1 适用范围

本方法适用于使用全站仪测试隧道初期支护内轮廓尺寸。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 全站仪：测角精度优于 $2''$ ，测距精度优于 $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}L$ (L 为测距，单位为 mm)。
- (2) 钢卷尺：分度值不大于 1mm。
- (3) 其他：棱镜、喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 收集隧道横断面、平纵曲线、高程、支护结构等设计参数，并将上述参数输入全站仪或测量软件。
- (3) 确定内轮廓测试断面桩号。
- (4) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。
- (5) 收集现场测试控制点。

3.2 测试步骤

- (1) 根据控制点位置和测试断面桩号，选定适宜位置安设全站仪。全站仪架设位置宜在距离测试点 30m 范围内。
- (2) 后视控制点，采用后方交会法测量全站仪的坐标值。
- (3) 转动全站仪镜头对准待测断面拱顶位置，进行测试，记录该测点的里程桩号、偏位值、高差值及超欠挖值。转动镜头至下一个测点，按上述测试步骤进行测试和记录，直至完成该断面所有测点的测试。每个断面测点数量宜为 35 个点。

条文说明

因控制点坐标现场复核测试工作量过大，且一般已经施工单位复核过，因此一般直接采用，但需对隧道轴线点设计坐标进行验算复核，合格后选取测试段落附近的控制点使用即可。

4 数据处理

4.1 将断面测试数据同步至测量软件中。

4.2 在软件中将测试断面内轮廓与设计内轮廓进行对比,记录测试断面中存在侵线位置的偏位值、高差值及侵线值。

条文说明

不同的测量软件对各功能的命名可能不同,但具体功能一般相同,数据处理时一般针对不同的测量软件选择相应的功能。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息,包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息,包括段落起止桩号、测试断面位置桩号等。
- (3) 实测和设计初期支护内轮廓曲线,侵线值和位置。

T 0523—2026 全站仪测试二次衬砌内轮廓尺寸

1 适用范围

本方法适用于使用全站仪测试隧道二次衬砌内轮廓尺寸。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 全站仪:测角精度优于 $2''$,测距精度优于 $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6}L$ (L 为测距,单位为mm)。
- (2) 钢卷尺:分度值不大于1mm。
- (3) 其他:棱镜、喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。

(2) 收集隧道横断面、平纵曲线、高程、支护结构等设计参数，并将上述参数输入测量软件。

(3) 确定轮廓测试断面桩号。

(4) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。

(5) 收集现场测试控制点。

3.2 测试步骤

(1) 根据控制点位置和测试断面桩号，选定适宜位置安设全站仪。全站仪架设位置宜在距离测试点 30m 范围内选取。

(2) 后视控制点，采用后方交会法测量全站仪的坐标值。

(3) 转动全站仪镜头，对准待测断面拱顶位置进行测试，记录该测点的里程桩号、偏位值、高差值及超欠挖值。转动镜头至下一个测点，按上述测试步骤进行测试和记录，直至完成该断面所有测点的测试。每个断面测点数量宜为 35 个点。

4 数据处理

4.1 将断面测试数据同步至测量软件中。

4.2 在软件中将测试断面轮廓与设计二次衬砌轮廓进行对比，记录测试断面中存在侵线的位置、偏位值、高差值及侵线值。

4.3 在软件中查看并记录内轮廓高度、内轮廓宽度及侵线情况。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

(1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。

(2) 测试位置信息，包括段落起止桩号、测试断面位置桩号。

(3) 实测和设计内轮廓断面曲线，侵线数值和侵线位置。

(4) 实测和设计内轮廓高度、高度偏差。

T 0524—2026 激光断面仪测试轮廓尺寸

1 适用范围

本方法适用于使用激光断面仪测试隧道开挖轮廓、初期支护内轮廓、二次衬砌内轮廓。

2 仪器与材料技术要求

(1) 隧道激光断面仪，其技术指标应符合下列要求：

①测试半径：1~45m。

②测试精度：测角精度优于 0.1° ，测距精度优于 $1\text{mm} + 1 \times 10^{-6}L$ （ L 为测距，单位为mm）。

③方位角范围： $30^\circ \sim 330^\circ$ （仪器测头垂直向下为 0° ），连续测试 $60^\circ \sim 300^\circ$ 。

④定位测试方式：具有垂直向下激光定心标志、测距功能。

(2) 钢卷尺：分度值不大于1mm。

(3) 其他：全站仪、测钉、喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

(1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。

(2) 确定轮廓测试断面桩号。

(3) 收集测试断面的轮廓设计参数。

3.2 测试步骤

(1) 根据测试需求，利用隧道内的控制点，使用全站仪按一定间距确定仪器架设点 A ，使用测钉和喷漆进行标记。仪器架设点 A 宜位于测试断面的隧道轴线上。记录 A 点的实际高程 H_1 ，准确至1mm。

(2) 使用全站仪放样出 A 点所在断面轮廓上的任一点 B ，该点宜位于边墙部位，使用测钉和喷漆进行标记。

(3) 将激光断面仪架设于 A 点位置，对中、调平，调整激光点使其对准 B 点。

(4) 将仪器归零，输入测试断面桩号、测试起始和终止角度、测试点数等参数，开始测试。测试宜选择“等角测量”模式。

(5) 测试完成后，保存角度、距离等结果数据。

(6) 将全站仪移动至下一架设点，重复(2)~(5)的步骤，完成剩余断面内轮廓尺寸的测试。

条文说明

开始测量时，激光出光方向一般指向隧道大桩号方向的右侧。测试断面的选取参照现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)的有关规定。

4 数据处理

4.1 在后处理软件中编辑隧道设计轮廓曲线。

条文说明

测试断面隧道实测轮廓线一般与隧道设计轮廓线进行对比，直观显示实际断面与设计断面的偏差情况。

4.2 根据设计资料和全站仪架设点的具体位置，计算全站仪架设点的设计高程 H_2 ，准确至 1mm。

4.3 导入测试结果数据，激光断面仪相对于路面设计高程的高差应按式（T 0524）计算。

$$\Delta Z = H_2 - H_1 \quad (\text{T 0524})$$

式中： ΔZ ——测试时激光断面仪相对于路面设计高程的高差（m），准确至 0.001m；

H_2 ——测试时仪器架设点的设计高程（m）；

H_1 ——测试时仪器架设点的实际高程（m）。

4.4 根据 ΔZ 值的计算结果，完成当前测试断面的编辑，通过标准断面曲线和测试断面曲线的对比结果生成相关结果图表。

4.5 在软件中查看并记录轮廓高度、轮廓宽度及侵线情况。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括段落起止桩号、测试断面位置桩号。
- (3) 实测和设计开挖轮廓曲线，超欠挖数值和超欠挖位置。
- (4) 实测和设计内轮廓断面曲线，侵线数值和侵线位置。
- (5) 实测和设计内轮廓高度、高度偏差。

6 厚度与平整度

T 0531—2026 凿孔测试混凝土厚度

1 适用范围

本方法适用于使用凿孔测试喷射混凝土厚度、钢架保护层厚度、喷射混凝土钢筋网保护层厚度。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 冲击钻或风钻：成孔直径不宜小于 30mm。
- (2) 手持式内窥镜：探头工作长度不宜小于 300mm。
- (3) 钢卷尺或钢直尺：分度值不大于 1mm。
- (4) 酒精酚酞溶液：浓度 1% ~ 2%。
- (5) 其他：电筒、带直角钩的高强度铁丝。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查取样所需的仪器与材料。
- (2) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。

3.2 测试步骤

- (1) 按本规程 T 0501 规定的方法确定测试的位置，用喷漆标记出具体测点位置。
- (2) 使用冲击钻或风钻在测点位置沿垂直于混凝土面的方向凿孔，孔深至岩面以下。
- (3) 用高压风清除孔内残渣，用电筒及内窥镜辅助探查凿孔，找出喷射混凝土与围岩交界面、钢架或钢筋网与喷射混凝土交界面。当喷射混凝土与围岩交界面难以分辨时，可用酒精酚酞溶液涂抹孔壁，查找交界面位置。
- (4) 在凿孔内插入钢卷尺，深入至喷射混凝土与围岩交界面、钢架或钢筋网与喷

射混凝土交界面，并用内窥镜辅助读取喷射混凝土厚度、钢架保护层厚度及钢筋网保护层实测厚度，记为 T_{li} ，准确值 0.001m。

条文说明

凿孔时一般采用以下方法判断是否凿至岩面：当围岩较为完整或喷射混凝土与围岩黏结较好时，通过钻孔粉末、反馈力等因素来判断；当围岩破碎时，通过带直角钩的高强度铁丝钩取界面方式来判断。成孔后准确找出围岩与喷射混凝土交界面是决定测试结果准确性的关键，当喷射混凝土与围岩黏结紧密，颜色相近不易分辨时，采用酚酞试验涂抹孔壁，碱性混凝土即呈现红色。

4 数据处理

4.1 各测点的厚度偏差应按式 (T 0531-1) 计算。

$$\Delta T_i = T_{li} - T_{0i} \quad (\text{T 0531-1})$$

式中： ΔT_i ——第 i 个测点厚度偏差 (m)，准确至 0.001m；

T_{li} ——第 i 个测点实测厚度 (m)；

T_{0i} ——第 i 个测点设计厚度 (m)。

4.2 一个测试段落内实测厚度平均值应按式 (T 0531-2) 计算。

$$\bar{T} = \frac{\sum T_{li}}{n} \quad (\text{T 0531-2})$$

式中： $\bar{T}$ ——一个测试段落内实测厚度平均值 (m)，准确至 0.001m；

T_{li} ——第 i 个测点实测厚度 (m)；

n ——一个测试段落内的总测试点数。

4.3 一个测试段落内实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数的占比率应按式 (T 0531-3) 计算。

$$P_T = \frac{n_T}{n} \times 100 \quad (\text{T 0531-3})$$

式中： P_T ——一个测试段落内实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数的占比 (%)，准确至 0.1%；

n_T ——一个测试段落内实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数；

n ——一个测试段落内的总测试点数。

4.4 一个测试段落内实测最小厚度与设计厚度的比值应按式 (T 0531-4) 计算。

$$R_T = \frac{T_{lmin}}{T_0} \quad (\text{T 0531-4})$$

式中： R_T ——一个测试段落内实测最小厚度与设计厚度比值，准确至 0.1；

$T_{\min}$ ——一个测试段落内实测最小厚度 (m)；

T_0 ——设计厚度值 (m)。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息：包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息：包括测试段落里程桩号、测点位置。
- (3) 保护层实测厚度、喷层实测厚度、厚度偏差、实测厚度平均值。
- (4) 喷层实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数的占比，以及喷层实测最小厚度与设计厚度比值。

T 0532—2026 地质雷达测试混凝土厚度

1 适用范围

本方法适用于使用地质雷达测试隧道喷射混凝土厚度与模筑混凝土衬砌厚度。

2 仪器与材料技术要求

按本规程 T 0515 的技术要求选取仪器与材料。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

除按本规程 T 0515 进行准备工作外，还应在隧道现场选取不少于 1 处进行介电常数的标定，每处实测不少于 3 次，取平均值作为该隧道的介电常数。当隧道长度大于 3km、衬砌材料或含水率变化较大时，应适当增加标定处数。

条文说明

介电常数取值直接影响厚度测试结果的准确性，而介电常数的取值主要受混凝土强度等级与混凝土含水率影响，因此规定在采用地质雷达法进行混凝土衬砌厚度测试前进行介电常数或电磁波速标定。通常一座隧道衬砌混凝土强度等级是相同的，介电常数标定 1 处即可。当隧道混凝土强度等级或含水率发生变化时，则需要增加标定处数。通常介电常数标定采用下列方法：

- (1) 在已知厚度部位，如明洞处测量；
- (2) 在材料及配合比与隧道相同的其他预制件上测量；
- (3) 钻孔实测。

求取参数时一般具备以下条件：

- (1) 标定目标体的厚度一般不小于0.15m，且厚度已知；
- (2) 标定记录界面反射信号清晰、准确。

标定结果按式（T 0532-1）、式（T 0532-2）计算。

$$\varepsilon_r = \left(\frac{ct}{2d} \times 10^{-9} \right)^2 \quad (\text{T 0532-1})$$

$$v = \frac{2d}{t} \times 10^9 \quad (\text{T 0532-2})$$

式中： ε_r ——相对介电常数；

v ——电磁波速（m/s）；

c ——光在真空中的传播速度（m/s）；

t ——双程旅行时间（ns）；

d ——标定目标体厚度或距离（m）。

3.2 测试步骤

- (1) 选定合适位置，架立、整平全站仪。
- (2) 后视控制点，使用全站仪放样测试段落的起点和终点位置，用喷漆做好标记。起点和终点连线的坡度应与隧道纵坡一致。
- (3) 以标记的起点和终点连线作为测线，标记测线位置。
- (4) 将雷达天线放置于测试段落，调整雷达天线的方向并密贴于混凝土表面，启动地质雷达，前后移动雷达天线，调试参数直至符合技术要求。
- (5) 重新将雷达天线放置于测试起点外3~5m的位置，做好测试准备。
- (6) 以3~5km/h的速度沿测线匀速移动雷达天线，开展地质雷达测试。雷达天线通过里程桩号标记时应做好记录，每条测线宜不间断完成测试。

4 数据处理

4.1 使用雷达配套软件处理数据，根据数据处理结果，人工判读喷层与围岩界面、喷层与衬砌界面距离，记录喷层或衬砌厚度 T_{li} ，准确至0.001m。

4.2 按式（T 0531-1）计算厚度偏差。

4.3 按式（T 0531-2）计算实测厚度平均值。

4.4 按式 (T 0531-3) 计算实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数的占比。

4.5 按式 (T 0531-4) 计算实测最小厚度与设计厚度比值。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点数量及位置。
- (3) 各测点位置实测厚度、设计厚度、厚度偏差、厚度平均值。
- (4) 实测厚度大于或等于设计厚度的测试点数的占比以及实测最小厚度与设计厚度比值。

T 0533—2026 钻芯测试混凝土厚度

1 适用范围

本方法适用于使用钻芯测试隧道喷射混凝土与模筑混凝土衬砌厚度。

条文说明

本方法在测试衬砌厚度时极易破坏防水层，因此，一般优先选用无损测试的方法。当需对无损测试的结果进行验证或有特殊检查要求时，采用此方法，同时，一般将混凝土强度测试与混凝土厚度测试同步开展。

2 仪器与材料技术要求

(1) 混凝土钻孔取芯机及钻头：钻孔深度不得小于待测结构层的设计厚度，仅进行混凝土厚度测试时，成孔直径不宜大于 100mm；当芯样作为混凝土强度测试时，成孔直径宜为 100mm 或 150mm。

(2) 钢卷尺或钢直尺：分度值不大于 1mm。

(3) 其他：电筒。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

(1) 准备并检查取样所需的仪器与材料。

- (2) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。
- (3) 收集结构设计厚度等参数。

3.2 测试步骤

- (1) 选取测点位置，并进行标记。
- (2) 在选定的待测点位置沿垂直于结构面方向用钻孔取芯机进行钻孔，钻孔深度应超过测试层底面。
- (3) 取出芯样，清除孔内残渣，用电筒辅助探查钻孔，找出结构层交界面。
- (4) 用钢板尺或钢卷尺沿孔壁圆周对称的十字方向四处量取钻孔表面至交界面长度，并取其平均值，即为混凝土层的厚度，记为 T_{t} ，准确至 0.001m。
- (5) 按本规程 T 0503 的有关规定对取芯孔进行处理。

4 数据处理

按式 (T 0531-1) 计算厚度偏差。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点数量及位置。
- (3) 各测点位置混凝土实测厚度、设计厚度与厚度偏差。

T 0534—2026 钢筋探测仪测试钢筋保护层厚度

1 适用范围

本方法适用于使用钢筋探测仪测试隧道衬砌内临空侧最外层钢筋的保护层厚度。

条文说明

钢筋保护层是为了保证钢筋与其周围混凝土能共同工作，并使钢筋充分发挥其抗拉强度，以及防止钢筋受到锈蚀，以保证衬砌结构构件在设计使用年限内钢筋不发生降低结构可靠度的锈蚀。本节内容在《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017) 测试方法的基础上，引入钢筋探测仪进行钢筋保护层厚度测试，其基本原理是根据钢筋对仪器探头所发生的电磁场的感应强度来判定钢筋的位置。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 钢筋探测仪：测试精度应优于 1mm。
- (2) 钢卷尺：分度值不大于 1mm。
- (3) 其他：喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查取样所需的仪器与材料。
- (2) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。
- (3) 收集衬砌结构钢筋相关的设计参数，如钢筋直径、间距与设计保护层厚度等。

3.2 测试步骤

- (1) 按本规程 T 0501 规定的方法确定测试的位置，使用喷漆标记出具体测区位置。
- (2) 设定仪器的钢筋直径参数。
- (3) 将探头放置于任一测区位置，沿纵向前后移动探头，根据仪器提示初步确定不少于 3 根钢筋的位置，并用喷漆做标记。重复上述步骤标记出该模混凝土内其他测区处钢筋的位置。
- (4) 将探头放在与钢筋轴线重合的测试面上读取钢筋保护层厚度测试值。
- (5) 应对同一根钢筋同一测点测试 2 次，读取 2 个保护层厚度值，分别记为 c_1^l 、 c_2^l ，准确至 0.001m，两次读数相差不应大于 1mm，否则，该次测试数据无效，应查明原因，在该处重新进行 2 次测试，仍不符合规定时，应更换钢筋探测仪进行测试。
- (6) 当实际钢筋保护层厚度值小于仪器最小示值时，应采用在探头下附加垫块的方法进行测试。垫块对仪器测试结果不应产生干扰，表面应光滑平整，垫块的厚度记为 c_0 ，准确至 0.001m，无垫块时取 0，其各方向厚度值偏差不应大于 0.001m。垫块应与探头紧密接触，不得有间隙。
- (7) 当遇到下列情况之一时，应进行凿孔测试验证：①认为相邻钢筋对检测结果有影响；②钢筋公称直径未知或有异议。对同一种规格钢筋保护层厚度测试验证点数不应小于 3 个。其中，第 i 个测试验证测点处钢筋探测仪器示值记为 c_{i1}^l 、 c_{i2}^l ，准确至 0.001m，凿孔测试验证实测值记为 c_i^z ，准确至 0.001m。

条文说明

大多数钢筋探测仪要求已知钢筋公称直径，方能准确检测钢筋保护层厚度。当保护层厚度过小时，有些钢筋探测仪无法进行测试或示值偏差较大，此时采用在探头下附加

垫块的方法来人为增大保护层厚度的测试值。

4 数据处理

4.1 当采用凿孔测试验证钢筋保护层厚度时，应先按式（T 0534-1）计算钢筋保护层厚度的修正量。

$$c_c = \frac{\sum_{i=1}^n (2c_i^z - c_{i1}^1 - c_{i2}^1)}{2n} \quad (\text{T 0534-1})$$

式中：\$c_c\$——钢筋保护层厚度修正量（m），准确至0.001m；

\$c_i^z\$——第 \$i\$ 个测试验证测点处钢筋保护层厚度凿孔实测值（m）；

\$c_{i1}^1\$、\$c_{i2}^1\$——第 \$i\$ 个测试验证点处钢筋保护层厚度钢筋探测仪器示值（m）；

\$n\$——凿孔测试验证点数。

4.2 钢筋保护层厚度测试值应按式（T 0534-2）计算。

$$c_m^1 = \frac{c_1^1 + c_2^1 + 2c_c - 2c_0}{2} \quad (\text{T 0534-2})$$

式中：\$c_m^1\$——钢筋保护层厚度测试值（m），准确至0.001m；

\$c_1^1\$、\$c_2^1\$——第1、2次钢筋保护层厚度钢筋探测仪器示值（m）；

\$c_c\$——钢筋保护层厚度修正量（m），当没有进行凿孔测试验证时，取0；

\$c_0\$——探头垫块厚度（m）。

4.3 按式（T 0534-1）计算厚度偏差。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点位置等。
- (3) 钢筋保护层厚度实测值和设计值、厚度偏差。

T 0535—2026 两米直尺测试衬砌混凝土墙面平整度

1 适用范围

本方法适用于使用两米直尺测试隧道衬砌混凝土墙面平整度。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 两米直尺：宜选用铝合金材料。
- (2) 楔形塞尺：塞尺的长度与高度之比不应小于 10，宽度不应大于 15mm，边部有刻度标记，分度值不大于 0.2mm。
- (3) 深度尺：测试杆端头直径不应小于 10mm，分度值不大于 0.2mm。
- (4) 其他：皮尺或钢尺、粉笔、喷漆等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查取样所需的仪器与材料。
- (2) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整 10m 的形式标记。
- (3) 划分测试单元，每一个测试单元应具备连续测 5 尺的条件。

3.2 测试步骤

- (1) 目测测试单元内混凝土墙面的平整情况，选取平整性较差的位置作为测试对象。
- (2) 两手握紧两米直尺中间部位或两端 1/3 处，沿隧道纵向将直尺侧面紧靠选取的被测衬砌混凝土表面。
- (3) 目测直尺底面与衬砌混凝土表面之间间隙情况，确定最大间隙位置。
- (4) 用楔形塞尺塞进最大间隙处，测试间隙的高度，即为最大间隙测试值，记为 h_i ，准确值 1mm，或者用深度尺在最大间隙处测试直尺顶面距衬砌混凝土表面的深度，该深度减去尺高即为最大间隙测试值，记为 h ，准确至 1mm。

4 数据处理

衬砌混凝土墙面平整度应按式 (T 0535) 计算。

$$h = \max (h_i) \quad (\text{T 0535})$$

式中： h ——衬砌混凝土墙面平整度，准确至 1mm；

h_i ——第 i 尺的最大间隙测试值 (mm)， $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。

- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测试部位、测点位置及数量等。
- (3) 每尺的最大间隙测试值与衬砌混凝土墙面平整度。

条文说明

测试部位主要是指测试对象所在的隧道纵向与横向位置，如纵向上是否位于施工缝、变形缝，横向上是否位于拱顶、拱腰或边墙等位置。

交通运输部信息公开
浏览专用

7 混凝土抗压强度

T 0541—2026 喷大板切割测试喷射混凝土强度

1 适用范围

本方法适用于使用喷大板切割测试隧道喷射混凝土抗压强度。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 压力试验机：符合现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420)的规定。
- (2) 模具：内空尺寸宜为 $450\text{mm} \times 450\text{mm} \times 120\text{mm}$ 。
- (3) 钢直尺：长度不小于 500mm 、分度值不大于 1mm 。
- (4) 游标卡尺：量程不小于 200mm 、分度值不大于 0.1mm 。
- (5) 游标量角器：分度值不大于 0.1° 。
- (6) 塞尺：分度值 0.2mm 。
- (7) 其他：混凝土切割机、磨平等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

按所需组数准备模具，保持试模内清洁，涂刷脱模剂。

3.2 测试步骤

(1) 试件制备步骤。

①在喷射作业面附近，将模具敞开一侧朝上，以与水平夹角 80° 左右置于隧道边墙脚。先在模具外的边墙上喷射，待操作正常后将喷头移至模具位置由下而上逐层向模具内喷满混凝土。

②将喷满混凝土的模具移至平整可靠的地方，用三角抹具刮平混凝土表面。

③在潮湿环境中养护 1d 后脱模。将混凝土板件移至试验室，在标准养护条件下养

护 7d，按本规程 T 0502 规定的方法取样，板件周边 120mm 范围内的混凝土不得用作试件。试样端面应在磨平机上磨平，加工成边长为 100mm 的立方体试件，每组试件不应少于 3 个。

④试块的边长采用游标卡尺进行测量，准确至 0.1mm，允许偏差为 $\pm 1\text{mm}$ 。

⑤相邻面夹角采用游标量角器测量，准确至 0.1° ，允许偏差为 $\pm 0.5^\circ$ 。

⑥试件承压面的平面度可采用钢直尺和塞尺测量，测量时，将钢直尺立起横放在承压面上，缓慢旋转 360° ，用塞尺测量钢直尺和承压面之间的最大间隙作为平面度，结果准确至 0.02mm。

⑦将加工后满足尺寸和角度偏差要求的试件继续在标准条件下养护至 28d 龄期。

条文说明

根据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015) 附录 L 规定：“立方体试块的边长允许偏差应为 $\pm 10\text{mm}$ ，直角允许偏差应为 $\pm 2^\circ$ ”；而《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019) 基本规定中，对试件的尺寸测量与公差规定为：“试件承压面的平面度公差不得超过 $0.0005d$ ， d 为试件边长”，“试件的相邻面间的夹角应为 90° ，其公差不得超过 0.5° ”，“试件各边长、直径和高的尺寸公差不得超过 1mm”。为满足国标要求，采用《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB 50081—2019) 制定的相关标准。

(2) 试件抗压测试步骤

①至试验龄期时，取出试件，检查其外观质量。

②量出试件尺寸，选取 3 个试件。

③将试件置于压力机中，试件中心应与压力机承压板几何对中。

④试验过程中应连续均匀加荷，强度等级小于 C30 的混凝土取 $0.3 \sim 0.5\text{MPa/s}$ 的加荷速度；强度等级大于或等于 C30，且小于 C60 时，则取 $0.5 \sim 0.8\text{MPa/s}$ 的加荷速度。手动控制压力机加荷速度时，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门，直至试件破坏，记下破坏荷载 F ，准确至 1N。

条文说明

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019) 对加荷速度的规定，考虑到目前国内公路隧道喷射混凝土强度未达到 C60 强度等级，因此暂不考虑强度等级大于或等于 C60 强度等级的加荷速度。

4 数据处理

4.1 试件抗压强度应按式 (T 0541) 计算。

$$f_{cu} = F/A \quad (T\ 0541)$$

式中: f_{cu} ——试件抗压强度 (MPa), 准确至 0.1 MPa;

F ——极限荷载 (N);

A ——受压面积 (mm^2), 为试件与压力机上下接触面的平均值。

4.2 以 3 个试件测值的算术平均值作为测定值, 计算准确至 0.1 MPa。3 个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值之差超过中间值的 15%, 则取中间值为测定值; 如最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%, 则该组试验结果无效。

4.3 立方体试件混凝土抗压强度推定值计算方法: 标准试验方法所测得抗压强度测定值乘以系数 0.95 为试件的抗压强度推定值。

条文说明

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019) 的规定, “混凝土强度等级小于 C60 时, 用非标准试件测得的强度值均应乘以尺寸换算系数, 对 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 试件可取为 1.05; 对 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试件可取为 0.95”, 考虑到喷大板切割法试验试模尺寸因素, 本规程采用边长 100mm 的非标准立方体试件, 其强度尺寸换算系数取 0.95。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括测试桩号、测试部位。
- (3) 强度等级、抗压强度测定值与推定值。

T 0542—2026 凿方切割测试喷射混凝土强度

1 适用范围

本方法适用于使用凿方切割测试厚度大于 120mm 的隧道喷射混凝土抗压强度。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 凿岩机、锯切机、磨平机、压力机等。
- (2) 钢板尺: 长度不小于 300mm, 分度值 1mm。

- (3) 钢卷尺：分度值不大于 1mm。
- (4) 游标卡尺：量程不小于 200mm，分度值不大于 0.1mm。
- (5) 游标量角器：分度值不大于 0.1°。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

按照本规程 T 0501 的方法或抽样方案确定测试位置，选取喷射混凝土龄期 3d 以上适合凿岩机钻孔且厚度大于 120mm 的位置，用红油漆或记号笔做好标记。

3.2 测试步骤

- (1) 用凿岩机或取芯机打密排钻孔，取出长约 350mm、宽约 150mm 的混凝土块。
- (2) 取出的混凝土块加工成边长 100mm 的立方体试件，每组 3 块，边长采用游标卡尺进行测量，精确至 0.1mm，允许偏差为 $\pm 1\text{mm}$ ，相邻面夹角采用游标量角器测量，夹角应为 90° ，精确至 0.1°，允许偏差为 $\pm 2^\circ$ 。
- (3) 加工后的试件应继续在标准条件下养护至 28d 龄期。
- (4) 试件抗压试验步骤按本规程 T 0541 第 3 条的有关规定执行。

4 数据处理

抗压强度的计算和推定按本规程 T 0541 第 4 条的方法进行数据处理。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试位置信息，包括测试位置、数量等。
- (2) 凿方取样信息、养护条件。
- (3) 测试方法、测试设备型号、测试单位、测试人员、测试环境条件。
- (4) 强度等级、抗压强度测定值与推定值。

T 0543—2026 钻芯测试混凝土强度

1 适用范围

本方法适用于使用钻芯测试隧道初期支护、二次衬砌，以及明洞、仰拱、仰拱回填等混凝土抗压强度。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 压力试验机：符合现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420) 的规定。
- (2) 钢直尺：量程不小于 300mm，分度值不大于 1mm。
- (3) 游标卡尺：量程不小于 200mm，分度值不大于 0.1mm。
- (4) 游标量角器：分度值不大于 0.1°。
- (5) 塞尺：分度值 0.2mm。
- (6) 其他：滑石笔或记号笔、混凝土切割机、磨平等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 按本规程 T 0503 的方法钻取芯样，芯样直径宜为混凝土所用集料最大粒径的 3 倍以上，不宜小于最大粒径的 2 倍，一般为 $\phi 150\text{mm} \pm 10\text{mm}$ 或 $\phi 100\text{mm} \pm 10\text{mm}$ ，特殊部位可采用 $\phi 75\text{mm}$ 直径芯样，芯样试件内不宜含有钢筋、钢纤维等异物，不得有空洞等较严重缺陷。
- (2) 用钢直尺和滑石笔或记号笔在芯样上初步标记切割线范围。
- (3) 准备并检查测试所需的仪器与材料。

3.2 测试步骤

3.2.1 根据芯样直径，在切割线范围内量取适宜的两条切割线。

3.2.2 按本规程 T 0502 规定的方法进行芯样切割，切割端面采用磨平机磨平。

3.2.3 芯样测量

- (1) 用游标卡尺在试件两端及中部 3 个位置相互垂直的两个方向上分别测取芯样直径，分别计为 D_i ，准确至 0.1mm。
- (2) 用游标卡尺在芯样端面两个垂直直径方向测量芯样高度，分别记为 h_1 和 h_2 ，准确至 0.1mm。
- (3) 用游标量角器测量芯样试件两个端面与芯样轴线的夹角，准确至 0.1°。
- (4) 试件承压面的平面度可采用钢直尺和塞尺测量，测量时，将钢直尺立起横放在承压面上，缓慢旋转 360°，用塞尺测量钢直尺和承压面之间的最大间隙作为平面度，结果准确至 0.02mm。
- (5) 芯样试件尺寸偏差应同时满足下列要求：

- ①芯样试件的实际高径比为 0.95 ~ 1.05。
- ②沿芯样试件高度的任一直径与平均直径相差不大于 0.15mm。
- ③芯样试件端面与轴线的不垂直度不大于 2°。
- ④平整度在每 0.1m 长度内不超过 0.1mm。

3.2.4 加工后的试件如龄期小于 28d, 应继续在标准条件下养护至 28d 龄期。

3.2.5 对加工好的芯样试件按照现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420) 的要求进行抗压强度试验, 记下破坏荷载 F 。

条文说明

现场钻取的芯样可能出现局部不顺直或残缺现象, 要根据具体情况截取较顺直且无残缺的芯样段, 作为试件。抗压芯样试件内不宜含有钢筋, 也可含有一根直径不大于 10mm 的钢筋, 且钢筋应与芯样试件的轴线垂直并离端面 10mm 以上, 否则应另取芯样试验。

4 数据处理

4.1 试件芯样直径应按式 (T 0543-1) 计算。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^6 D_i}{6} \quad (\text{T 0543-1})$$

式中: D ——试件芯样直径 (mm), 准确至 0.1mm;

D_i ——测取的试件芯样直径 (mm)。

4.2 试件芯样高度应按式 (T 0543-2) 计算。

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (\text{T 0543-2})$$

式中: h ——试件芯样高度 (mm), 准确至 0.1mm;

h_1 、 h_2 ——测取的试件芯样高度 (mm)。

4.3 芯样抗压强度值应按式 (T 0543-3) 计算。

$$f_c = 4F / \pi D^2 \quad (\text{T 0543-3})$$

式中: f_c ——芯样抗压强度值 (MPa), 准确至 0.1MPa;

F ——极限荷载 (N);

D ——试件芯样直径 (mm)。

4.4 以 3 个试件测值的算术平均值作为测定值, 计算准确至 0.1MPa。3 个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值之差超过中间值的 15%, 则取中间值为测定值; 如最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%, 则该组试验结果无效。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括测试桩号、测试部位。
- (3) 强度等级、抗压强度测定值。
- (4) 报告中应明确强度测试结果是测试时的“龄期强度”, 进行质量评定时应考虑龄期影响。

T 0544—2026 回弹法测试衬砌混凝土强度

1 适用范围

1.1 本方法适用于使用回弹仪测试隧道衬砌、管沟等混凝土抗压强度。

1.2 所测试的混凝土应处于干燥状态、龄期不超过 1 000d 且不少于 14d, 厚度不小于 100mm, 设计强度为 10~60MPa。

条文说明

考虑到仰拱混凝土可回弹的工作面只有浇筑顶面和端面, 顶面通常不平整, 很难打磨, 端面暴露时机通常很短暂, 因此, 适用范围未包含仰拱和仰拱回填混凝土。

2 仪器与材料技术要求

(1) 混凝土回弹仪: 指针直读式混凝土回弹仪、数字显示式或自记录式回弹仪, 除应符合现行《回弹仪》(GB/T 9138) 的有关规定外, 尚应符合下列技术要求:

- ①水平弹击时, 在弹击锤脱钩的瞬间, 回弹仪的标称能量应为 2.207J。
- ②弹击锤与弹击杆碰撞的瞬间, 弹击拉簧处于自由状态, 且弹击锤起跳点应位于指针指示刻度尺上的“0”处。
- ③在洛氏硬度为 (60 ± 2) HRC 的钢砧上, 回弹仪的率定值应为 80 ± 2 。
- ④数字式回弹仪应带有指针直读示值系统, 数字显示的回弹值与指针直读示值相差不应超过 1。

- (2) 酒精酚酞溶液：浓度 1% ~ 2%。
- (3) 碳化深度测定仪：分度值不小于 0.25mm。
- (4) 钢砧：洛氏硬度 (60 ± 2) HRC。
- (5) 其他：手提式砂轮或磨石、凿子、锤、吸耳球等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 按本规程 T 0501 规定的方法确定测试位置。
- (2) 确定测试时环境温度为 $-4 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 回弹仪率定。

①回弹仪在检测前后，均应在钢砧上做率定试验，测试过程中回弹值不确定时也应进行率定。

②回弹仪率定试验，宜在温度为 $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行。率定时钢砧表面应干燥、清洁，钢砧应稳固地平放在刚度大的地面上，回弹仪向下弹击时，弹击杆应分 4 次旋转，每次旋转约 90° ，取连续向下弹击 3 次的稳定回弹结果的平均值作为率定值。

- (4) 测区及测点布置。

①混凝土强度可按单个构件或按批量进行测试，单个构件的测试测区数不宜少于 10 个；当受检构件数量大于 30 个且不需要提供单个构件推定强度时，每个构件的测区数量可适当减少，但不应少于 5 个。批量测试时，可按本规程 T 0501 规定的方法确定构件，抽检数量不宜少于同批构件总数的 30% 且不少于 10 件。当检验批受检构件数量大于 30 个时，抽样构件数量可适当调整，并不得少于国家现行有关标准规定的最少抽样数量。

②测区混凝土表面应为混凝土原浆面，并应清洁、平整，不应有疏松层、浮浆、油垢、涂层以及蜂窝麻面，不得布置在气孔或外露石子上。

③测区应均匀分布，并应避开预埋件。相邻两测区间距不应大于 2m，测区离构件端部或施工缝边缘的距离不宜大于 0.5m，且不宜小于 0.2m。测区面积不宜大于 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ ，每一个测区测试 16 个测点，相邻两测点的间距不宜小于 30mm。测区应有清晰的编号，并宜在记录纸上绘制测区布置示意图和描述外观质量情况。测区的面积不宜大于 0.04m^2 。

④衬砌测区可选在边墙、拱腰或拱顶部位，当测区位于拱腰或拱顶时分别按非水平方向和底面修正值进行修正；管沟测区可选在靠近隧道路面中线的侧面。

条文说明

回弹法测试混凝土抗压强度技术已成熟应用多年，结合隧道工程实际情况，并保持与《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 的一致性，一般每模衬砌或明洞、每 20 ~ 50m 长度的管沟为一个构件。

衬砌拱顶部位属于泵送混凝土浇筑的底面，因此测区位于拱顶时一般参照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 附录 D 对浇筑面的回弹值进行修正。

当检测条件与《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 第 6.2.1 条和第 6.2.2 条的适用条件有较大差异时，一般采用在构件上钻取的混凝土芯样或同条件试件对测区混凝土强度换算值进行修正，修正方法和修正量参照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 第 4.1.6 条执行。

3.2 测试步骤

(1) 回弹值测试。

①回弹测试前应将测区范围内混凝土表面浮浆打磨干净。

②将回弹仪的弹击杆垂直顶住混凝土表面，轻压仪器，使按钮松开，弹击杆徐徐伸出，并使挂钩挂上弹击锤。

③手持回弹仪对混凝土表面缓慢均匀施压，待弹击锤脱钩，冲击弹击杆后，击锤即带动指针向后移动到达一定位置，指针刻度线在刻度尺上的示值即为该点的回弹值，同一测点只弹击一次。

④使用上述方法在混凝土表面依次读数并记录回弹值，如条件不利于读数，可按下按钮，锁住机芯，将回弹仪移至他处读数，准确至 1 个单位。

⑤使用完毕后应将弹击杆压入仪器内，经弹击后按下按钮，锁住机芯，待下一次使用。

(2) 碳化深度测试。

①回弹值测量完毕后，应在有代表性的测区上测量碳化深度值，测点数不应少于构件测区数的 30%，应取其平均值作为该构件每个测区的碳化深度值。当碳化深度值极差大于 2.0mm 时，在每一测区分别测量碳化深度值。

②测量碳化深度值时，可用合适的工具在测区表面形成直径约为 15mm 的孔洞（其深度略大于混凝土的碳化深度），然后用吸耳球吹去孔洞中的粉末和碎屑（不得用液体冲洗），并立即用酒精酚酞溶液洒在孔洞内壁的边缘处，当已碳化与未碳化界线清楚时（未碳化部分变成紫红色），用碳化深度测定仪测试已碳化与未碳化交界面至混凝土表面的垂直距离 d_i 三次，每次读数应准确至 0.25mm。

4 数据处理

4.1 测区回弹平均值计算

计算测区平均回弹值时，应从测区的 16 个回弹值中剔除 3 个最大值和 3 个最小值，其余的 10 个回弹值按式 (T 0544-1) 计算。

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_i}{10} \quad (\text{T 0544-1})$$

式中： R_m ——测区平均回弹值，准确至 0.1，无量纲；
 R_i ——第 i 个测点的回弹值。

4.2 回弹值修正值计算

非水平方向测试混凝土浇筑侧面时，测区的平均回弹值应按式 (T 0544-2) 修正。

$$R_m = R_{ma} + R_{aa} \quad (\text{T 0544-2})$$

式中： R_{ma} ——非水平方向测试时测区的平均回弹值，准确至 0.1；
 R_{aa} ——非水平方向测试时回弹值修正值，按《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 附录 C 取值。

条文说明

衬砌拱顶部位属于泵送混凝土浇筑的底面，因此测区位于拱顶时一般参照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 附录 D 对浇筑面的回弹值进行修正。

当检测条件与《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 第 6.2.1 条和第 6.2.2 条的适用条件有较大差异时，一般采用在构件上钻取的混凝土芯样或同条件试件对测区混凝土强度换算值进行修正，修正方法和修正量参照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 第 4.1.6 条执行。

4.3 碳化深度计算

取三次测量的平均值 d_m 作为碳化深度测试结果，准确至 0.5mm。

4.4 混凝土强度推定值计算

(1) 构件第 i 个测区混凝土强度换算值，根据求得的平均回弹值 (R_m) 及碳化深度值，查找混凝土测区强度换算表确定混凝土强度推定值；泵送混凝土可根据曲线方程 $f = 0.034488R_m^{1.9400}10^{(-0.0173d_m)}$ 计算得出；当有地区或专用测强曲线时，混凝土强度的换算值宜按地区测强曲线或专用测强曲线计算或查表得出。

(2) 结构或构件测区混凝土抗压强度平均值应根据各测区的混凝土抗压强度换算值计算。当测区数为 10 个及以上时，还应计算强度标准差。平均值及标准差应按式 (T 0544-3) 和式 (T 0544-4) 计算。

$$m_{f_{cu}^c} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c}{n} \quad (\text{T 0544-3})$$

$$S_{f_{cu}^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n (m_{f_{cu}^c})^2}{n-1}} \quad (\text{T 0544-4})$$

式中： $m_{f_{cu}^c}$ ——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的平均值 (MPa)，准确

至 0.1MPa;

n ——对于单个测试的构件,取该构件的测区数,对批量测试的构件,取所有被抽检构件测区数之和;

$S_{f_{cu}^c}$ ——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的标准差 (MPa),准确至 0.01MPa。

(3) 构件的现龄期混凝土强度推定值 ($f_{cu,e}$) 应符合下列规定:

①当构件测区数小于 10 个时,应按式 (T 0544-5) 计算。

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^c \quad (T\ 0544-5)$$

式中: $f_{cu,e}$ ——混凝土抗压强度推定值;

$f_{cu,min}^c$ ——结构或构件最小的测区混凝土抗压强度换算值。

②当构件的测区混凝土抗压强度换算值中出现小于 10.0MPa 的值时,构件混凝土强度推定值 ($f_{cu,e}$) 应为最小抗压强度换算值。

③当构件测区数为 10 个及以上时,应按式 (T 0544-6) 计算。

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}^c} - 1.645S_{f_{cu}^c} \quad (T\ 0544-6)$$

④当批量测试时,应按式 (T 0544-7) 计算。

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}^c} - kS_{f_{cu}^c} \quad (T\ 0544-7)$$

式中: k ——推定系数,宜取 1.645。当需要进行推定强度区间时,可按国家现行有关标准的规定取值。

(4) 对批量测试的构件,当该批构件混凝土抗压强度标准差出现下列情况之一时,该批构件应全部按单个构件测试:

①该批构件混凝土抗压强度换算值的平均值 $m_{f_{cu}^c}$ 小于 25MPa、 $S_{f_{cu}^c}$ 大于 4.5MPa;

②该批构件混凝土抗压强度换算值的平均值 $m_{f_{cu}^c}$ 不小于 25MPa 且不大于 60MPa、 $S_{f_{cu}^c}$ 大于 5.5MPa。

条文说明

混凝土测区强度换算值参考现行《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23) 确定。鼓励各地根据气候和原材料特点,因地制宜地制定和采用专用测强曲线和地区测强曲线。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息,包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息,包括测试桩号、测区位置、测试部位。
- (3) 各测区混凝土回弹代表值 (修正值)。
- (4) 各测区的抗压强度换算值、标准差、最小值。

(5) 抗压强度推定值。

(6) 报告中应明确强度测试结果是测试时的“龄期强度”，进行质量评定时应考虑龄期影响。

T 0545—2026 超声-回弹综合法测试衬砌混凝土强度

1 适用范围

1.1 本方法适用于超声-回弹综合法测试正常使用状态下隧道衬砌混凝土抗压强度。

1.2 所测试的混凝土结构或构件应处于干燥状态、厚度不小于0.1m，龄期不应超过2 000d且不少于14d，混凝土的密度宜为 $1.9 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ ，环境温度为 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

1.3 本方法不适用于以下情况的混凝土抗压强度测试：

- (1) 隐蔽或外露局部缺陷区。
- (2) 伸缩缝、沉降缝、衬砌裂缝等区域周边。
- (3) 角隅钢筋和边缘钢筋处，特别是超声波与钢筋方向相同时。
- (4) 距结构边线小于100mm的部位。

2 仪器与材料技术要求

(1) 混凝土回弹仪：应符合本规程T 0544规定的技术要求。

(2) 超声波检测仪：除应符合现行《混凝土超声波检测仪》(JG/T 5004)的有关规定外，尚应符合下列技术要求：

①宜为数字式，可对接收的超声波波形进行数字化采集和存储，具有清晰、稳定的示波装置。

②具备手动游标测读和自动测读两种声参量测读功能，且自动测读时可标记出声时、幅度的测读位置，具备对各测点的波形和测读声参量进行存储功能。

③声时范围应为 $0.1 \sim 999.9 \mu\text{s}$ ，声时分辨率为 $0.1 \mu\text{s}$ ；声时显示调节在 $20 \sim 30 \mu\text{s}$ 范围内时，1h内每5min测读一次的声时允许误差为 $\pm 0.2 \mu\text{s}$ 。实测空气声速的相对测量允许误差为 $\pm 0.5\%$ 。

④幅度测量范围宜不小于80db、幅度分辨率为1db。

⑤仪器信号接收系统的频带宽度为 $(10 \sim 250) \times 10^3 \text{ Hz}$ 。

⑥信噪比为3:1时，接收灵敏度不大于 $50 \mu\text{V}$ 。

(3) 数字式超声波检测仪除满足超声波检测仪的要求外，尚应符合下列规定：

①环境温度 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

②空气相对湿度不大于 80%。

③电源电压波动范围在标称值 $\pm 10\%$ 内。

④连续工作时间不应少于 4h。

(4) 换能器：为厚度振动形式压电材料，其频率在 $(50 \sim 100) \times 10^3 \text{ Hz}$ 范围内，实测主频与标称频率相差的允许误差不超过 $\pm 10\%$ 。

(5) 耦合剂：采用易于变形，有较大的声阻，有较好黏性且不流淌的材料，通常采用黄蜡油、凡士林等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

(1) 按本规程 T 0501 规定的方法确定测试位置。

(2) 按本规程 T 0544 的有关规定进行回弹仪的率定。

(3) 超声波检测仪校核。

(4) 测区和测点布置。

①现场选定测区并进行编号，记录测区位置和外观质量情况。

②测区尺寸宜为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，采用平测时宜为 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，测试面应清洁、干燥、平整，不得有蜂窝、麻面，对浮浆和油垢以及粗糙处应清洗或用砂轮片磨平，并擦净残留粉尘。

③每个测区的测点宜在测区范围内均匀分布，相邻两测点的距离不小于 0.03m ，相邻两测区的间距不宜大于 2m ，且应避开钢筋密集区和预埋件，不得布置在气孔或外露石子上。

条文说明

超声波监测仪的校核步骤如下：

(1) 取常用平面换能器一对，接于超声波仪器上。

(2) 开机预热 10min 。

(3) 在空气中将两个换能器的辐射面对准，依次改变两个换能器辐射面之间的距离 L (如 50mm , 60mm , 70mm , 80mm , 90mm , 100mm , 110mm , 120mm , ……)。

(4) 在保持首波幅度一致的条件下，读取各间距所对应的声时值 t_1 、 t_2 、 t_3 、…… t_n ，准确至 $0.1\mu\text{s}$ ，超声测距测量应准确至 1mm ，且测量误差不超过 $\pm 1\%$ ，声速计算准确至 0.01km/s 。

(5) 同时测量空气温度 T_k ，准确至 0.5°C 。

(6) 测量时注意下列事项：

①两个换能器辐射面的轴线始终保持在同一直线上。

②换能器辐射面间距的测量误差不超过 $\pm 1\%$ ，且测量精度为 0.5mm 。

③换能器辐射面一般要悬空相对放置；若置于地板或桌面上，一般在换能器下面垫

置吸声材料。

(7) 空气中声速计算值 v_k 按式 (7-1) 计算。

$$v_k = 331.4 \sqrt{1 + 0.00367 T_k} \quad (7-1)$$

式中：331.4——0℃时空气中的声速值 (m/s)；

v_k ——温度为 T_k 时空气中的声速计算值 (m/s)；

T_k ——测试时空气的温度 (℃)。

(8) 误差计算

①空气中声速计算值 v_k 与空气中声速实测值 v_0 之间的相对误差 e_r ，按式 (7-2) 计算。

$$e_r = (v_k - v_0) / v_k \times 100\% \quad (7-2)$$

②计算所得的 e_r 值一般不超过 $\pm 0.5\%$ ，否则，需检查仪器各部位的连接后重测，或更换超声波检测仪。

3.2 测试步骤

(1) 现场超声-回弹测试时，超声测试应采用超声平测法，并应先进行回弹测试，后进行超声测试。

(2) 每一测区应布置一排超声测点，发射测点和接收测点的连线与附近钢筋轴线宜呈 $40^\circ \sim 50^\circ$ ，如图 T 0545 所示。

(3) 在超声波的发射测点和接收测点之间测读 10 个回弹值，回弹测试按本规程 T 0544 的测试步骤进行，不进行碳化深度的测试和修正。每一测点回弹值的测读记录为 R_i ($i=1 \sim 10$)，应精确至 1，且同一测点应只允许弹击一次。

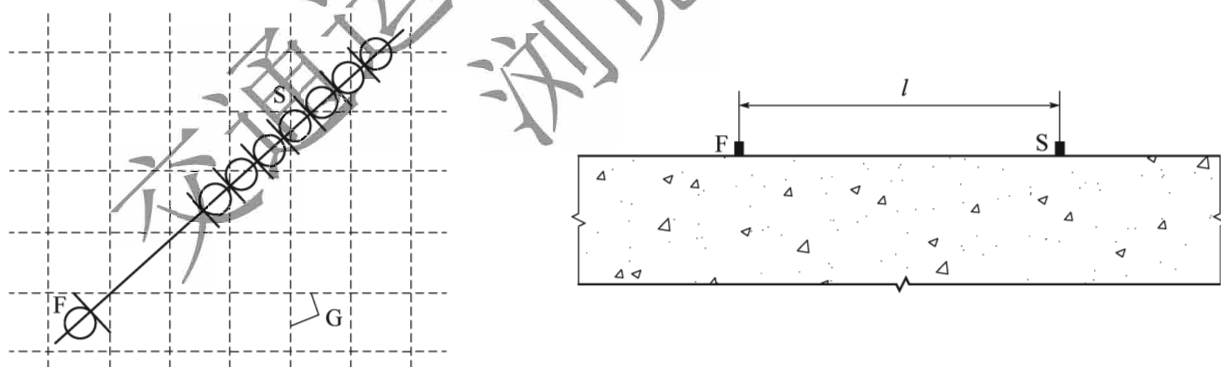


图 T 0545 超声波平测方法换能器布置示意图

F-发射换能器；S-接收换能器；G-钢筋轴线

(4) 换能器辐射面通过耦合剂与混凝土测试面耦合良好，开机预热 10min，以两个换能器内边距分别为 200mm、250mm、300mm、350mm、400mm、450mm、500mm 进行平测，逐点测读相应声时值 (t)。

(5) 应选取有代表性且具有对测条件的构件，在构件上采用对测法得到对测测区混凝土中声速代表值 (v_d)，并采用平测法得到平测时代表性构件混凝土中平测声速代

表值 (v_{pp})。

4 数据处理

4.1 计算混凝土抗压强度换算值时, 非同一测区内的回弹值和声速值不得混用。

4.2 测区回弹代表值计算。

从测区的 10 个回弹值中剔除 1 个最大值和 1 个最小值, 并应用剩余的 8 个有效回弹值按式 (T 0545-1) 计算。

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i}{8} \quad (\text{T 0545-1})$$

式中: R_m ——测区平均回弹值, 准确至 0.1, 无量纲;

R_i ——第 i 个测点的回弹值。

4.3 回弹值修正值计算。

非水平方向测得的回弹值, 应按式 (T 0545-2) 进行修正。

$$R_{ma} = R_m + R_{a\alpha} \quad (\text{T 0545-2})$$

式中: R_{ma} ——非水平方向测区回弹代表值, 准确至 0.1;

$R_{a\alpha}$ ——测试角度为 α 时的测区回弹修正值, 可按《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011) 附录 C 取值。

4.4 测区混凝土中声速代表值计算。

通过两个换能器内边距分别为 200mm、250mm、300mm、350mm、400mm、450mm、500mm 进行平测时测读的相应声时值 (t), 用回归分析方法求出式 (T 0545-3) 直线方程。

$$l = a + bt \quad (\text{T 0545-3})$$

式中: b ——平测测区混凝土中声速代表值 (v_p)

4.5 测区混凝土中声速代表值修正系数计算。

将代表性且具备对测条件的构件测得的对测测区混凝土中声速代表值 (v_d) 及平测时混凝土中平测声速代表值 (v_{pp}), 应按式 (T 0545-4) 计算平测声速修正系数。

$$\lambda = v_d / v_{pp} \quad (\text{T 0545-4})$$

式中: λ ——平测声速修正系数;

v_d ——对测测区混凝土中声速代表值 (km/s);

v_{pp} ——平测时代表性构件混凝土中平测声速代表值 (km/s)。

4.6 测区混凝土中声速代表值修正计算。

(1) 平测时，修正后的混凝土中声速代表值应按式 (T 0545-5) 计算。

$$v_a = \lambda v_p \quad (\text{T 0545-5})$$

式中：\$v_a\$——修正后的平测时混凝土中声速代表值 (km/s)；

\$\lambda\$——平测声速修正系数；

\$v_p\$——平测测区混凝土中声速代表值 (km/s)。

(2) 当测区为混凝土浇筑的顶面或底面时，应按式 (T 0545-6) 进行修正。

$$v_a = \lambda \beta v_p \quad (\text{T 0545-6})$$

式中：\$\beta\$——超声测试面的声速修正系数，顶面平测 \$\beta = 1.05\$，底面平测 \$\beta = 0.95\$。

4.7 混凝土强度推定值计算。

(1) 结构或构件中第 \$i\$ 个测区的混凝土抗压强度换算值，可按本规程 T 0544 和本节的有关规定求得修正后的测区回弹代表值（确认是否为平均值）\$R_{ai}\$ 和声速代表值 \$v_{ai}\$ 后，优先采用专用测强曲线或地区测强曲线换算而得。

(2) 当无专用和地区测强曲线时，按全国统一测区混凝土抗压强度换算公式 (T 0545-7) 计算。

$$f_{cu,i}^c = 0.0286 v_{ai}^{1.999} R_{ai}^{1.155} \quad (\text{T 0545-7})$$

式中：\$f_{cu,i}^c\$——第 \$i\$ 个测区混凝土抗压强度换算值 (MPa)，准确至 0.1 MPa。

(3) 当结构或构件中的测区数不少于 10 个时，各测区混凝土抗压强度换算值的平均值和标准差应按式 (T 0545-8)、式 (T 0545-9) 计算。

$$m_{f_{cu}^c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c \quad (\text{T 0545-8})$$

$$s_{f_{cu}^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n (m_{f_{cu}^c})^2}{n-1}} \quad (\text{T 0545-9})$$

式中：\$f_{cu,i}^c\$——结构或构件第 \$i\$ 个测区的混凝土抗压强度换算值 (MPa)；

\$m_{f_{cu}^c}\$——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的平均值 (MPa)，准确至 0.1 MPa；

\$s_{f_{cu}^c}\$——结构或构件测区混凝土抗压强度换算值的标准差 (MPa)，准确至 0.01 MPa；

\$n\$——测区数，对单个测试的构件，取一个构件的测区数；对批量测试的构件，取被抽检构件测区数之总和。

(4) 当结构或构件所采用的材料及其龄期与制定测强曲线所采用的材料及其龄期

有较大差异时,应采用同条件立方体试件或从结构或构件测区中钻取的混凝土芯样试件的抗压强度进行修正。试件数量不应少于4个。此时,采用式(T 0545-5)计算测区混凝土抗压强度换算值应乘以修正系数 η 。

①采用同条件立方体试件时,修正系数应按式(T 0545-10)计算。

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{cu,i}^o}{f_{cu,i}^c} \quad (\text{T 0545-10})$$

②混凝土芯样试件修正系数应按式(T 0545-11)计算。

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_{cor,i}^o}{f_{cu,i}^c} \quad (\text{T 0545-11})$$

式中: η ——修正系数,准确至0.01;

$f_{cu,i}^c$ ——对应于第*i*个立方体试件或芯样试件的混凝土抗压强度换算值(MPa),准确至0.1MPa;

$f_{cu,i}^o$ ——第*i*个混凝土立方体(边长150mm)试件的抗压强度实测值(MPa),准确至0.1MPa;

$f_{cor,i}^o$ ——第*i*个混凝土芯样($\phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$)试件的抗压强度实测值(MPa),准确至0.1MPa;

n ——试件数。

(5) 结构或构件混凝土抗压强度推定值 $f_{cu,e}$,应按下列规定确定:

①当结构或构件的测区抗压强度换算值中出现小于10MPa的值时,该构件的混凝土抗压强度推定值 $f_{cu,e}$ 取小于10MPa。

②当结构或构件中测区数少于10个时,混凝土抗压强度推定值 $f_{cu,e}$ 应按式(T 0545-12)计算。

$$f_{cu,e} = f_{cu,\min}^c \quad (\text{T 0545-12})$$

式中: $f_{cu,\min}^c$ ——结构或构件最小的测区混凝土抗压强度换算值(MPa),准确至0.1MPa。

③当结构或构件中测区数不少于10个或按批量测试时,混凝土抗压强度推定值 $f_{cu,e}$ 应按式(T 0545-13)计算。

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}^c} - 1.645 s_{f_{cu}^c} \quad (\text{T 0545-13})$$

(6) 对按批量测试的构件,当一批构件的测区混凝土抗压强度标准差出现下列情况之一时,该批构件应全部重新按单个构件进行测试:

①一批构件的混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{cu}^c} < 25.0\text{MPa}$ 时,标准差 $s_{f_{cu}^c} > 4.50\text{MPa}$;

②一批构件的混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{cu}^c} = 25.0 \sim 50.0\text{MPa}$ 时,标准差 $s_{f_{cu}^c} > 5.50\text{MPa}$;

③一批构件的混凝土抗压强度平均值 $m_{f_{cu}^c} > 50.0\text{MPa}$ 时,标准差 $s_{f_{cu}^c} > 6.50\text{MPa}$ 。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试桩号、测区位置、测试部位。
- (3) 各测区混凝土回弹代表值（修正值）。
- (4) 修正后的混凝土中声速代表值。
- (5) 各测区的抗压强度换算值、标准差。
- (6) 抗压强度推定值。
- (7) 报告中应明确强度测试结果是测试时的“龄期强度”，进行质量评定时应考虑龄期影响。

8 锚杆拔力、长度与锚固密实度

T 0551—2026 锚杆拉拔仪测试锚杆拔力

1 适用范围

本方法适用于使用锚杆拉拔仪测试隧道全长黏结型锚杆拔力。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 锚杆拉拔仪：量程宜为拟施加最大拔力值的 1.5 ~ 3.0 倍，分度值 1kN。锚杆拉拔仪包含油压表、油压泵、油压千斤顶、夹具、加压手柄等部件。
- (2) 其他：加长杆及连接套筒、钢垫凳、秒表。

条文说明

现场测试时，先确定被测锚杆的设计拔力值，然后根据设计拔力值选取适宜的锚杆拉拔仪量程。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 确定测试段落及待测试锚杆，确认待测试锚杆的外露长度满足测试需求。
- (2) 根据待测试锚杆的设计拔力值，选定测试所需的仪器与材料。
- (3) 布设作业场地。

3.2 测试步骤

- (1) 取下锚杆垫板，以锚杆为中心，清除锚杆周边喷射混凝土。
- (2) 若锚杆外露长度过短不便于施加拉拔力，应采用连接套筒在锚杆端部连接加长杆，接长锚杆。
- (3) 整平喷射混凝土基面，使喷射混凝土基面垂直于锚杆。

- (4) 检查锚杆轴力计油量，调试锚杆拉拔仪。
- (5) 安放钢垫凳，钢垫凳穿过锚杆并紧贴喷射混凝土表面。
- (6) 根据加长杆或锚杆直径选择合适尺寸的夹具，安装油压千斤顶，并连接油压泵，夹具夹紧加长杆或锚杆，锚杆拉拔仪现场安装如图 T 0551 所示。

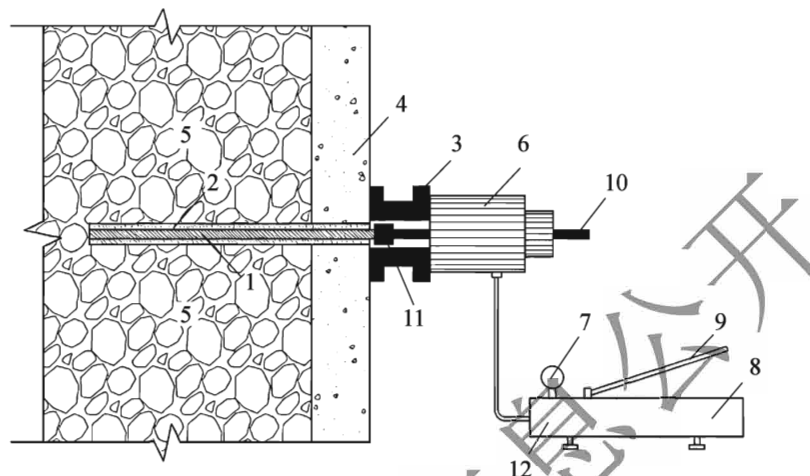


图 T 0551 锚杆拉拔仪现场安装图

1-锚杆；2-黏结材料；3-钢垫凳；4-初期支护；5-围岩；6-油压千斤顶；7-油压表；8-油泵；9-加压手柄；10-加长杆；11-连接套筒；12-卸荷阀

- (7) 撬动加压手柄给千斤顶均匀供油，1~2min 内加载到不小于 1.2 倍设计值时停止加载，读取并记录当前拔力值。
- (8) 持荷 2min，若锚杆未被拔出，读取并记录当前拔力值，该值作为锚杆拔力值 F_i 。
- (9) 若未施加到 1.2 倍设计值，由于锚杆发生破坏无法继续加载，记录最大拔力值，该值作为锚杆拔力值 F_i 。
- (10) 拧松卸荷阀，逐步卸载，使油压表读数归零。
- (11) 卸下各零部件，清理试验设备。
- (12) 恢复锚杆垫板。

条文说明

锚杆端头外露长度不够时，采用连接套筒连接锚杆和加长杆，并保证锚杆端及加长杆端有足够的套丝长度。安装锚杆拉拔设备时，千斤顶与锚杆尽量在同一轴线上，避免偏心受拉。锚杆拉拔过程中，在拉拔方向一定范围内设置安全警戒，避免人员进入。

锚杆拔力极限值一般大于锚杆拔力设计值，根据现行《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086)，验收试验拔力取锚杆拉力设计值的 1.2 倍，因此现场测试时，锚杆拔力加载到不小于设计值 1.2 倍时即可停止加载，不做破坏性试验。现场加载时根据需要采取分级加载的方式，加载速率控制在 50~100kN/min。

4 数据处理

4.1 锚杆拔力平均值应按式 (T 0551-1) 计算。

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \quad (\text{T 0551-1})$$

式中: $\bar{F}$ ——拔力平均值 (kN);

n ——一个检验批抽检的锚杆根数 ($n \geq 3$);

F_i ——第 i 根的锚杆拔力值 (kN)。

4.2 锚杆最小拔力值应按式 (T 0551-2) 计算。

$$F_{\min} = \min \{F_1, F_2, \dots, F_n\} \quad (\text{T 0551-2})$$

式中: $F_{\min}$ ——拔力最小值 (kN)。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 包括测试时间、单位、人员及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括测试桩号、测试部位、锚杆施作日期。
- (3) 抽测锚杆拉拔力的实测值、平均值、最小值。

T 0552—2026 锚杆无损检测仪测试锚杆长度与锚固密实度

1 适用范围

本方法适用于使用无损检测仪测试隧道全长黏结型锚杆长度、锚固密实度和小导管长度、锚固密实度, 其中锚杆锚固时间不宜少于 7d。

条文说明

现场测试过程中, 因为受锚杆周围应力波的信号反射、端部反射不明显等各种因素影响, 可能导致本方法判读的锚杆长度与锚固密实度测试误差较大, 特别是当锚杆锚固密实度较好时, 锚杆杆底信号十分微弱, 杆长一般难以确定。所以, 本测试方法仅用于锚杆质量的定性分析, 如需准确评定锚杆的施工质量, 还需辅以其他手段验证锚杆施工质量。

2 仪器与材料技术要求

(1) 激发设备：激振器激振频率不应超过 (1 ~ 10) kHz，宜使用超磁致伸缩声波振源。

(2) 接收传感器：感应面直径应小于锚杆直径，可通过强力磁座或其他方式与杆头耦合；宜采用加速度型，加速度传感器的电压灵敏度宜不超过 50 ~ 200mV/g；频率响应范围与激振器激振频率适应。

(3) 采集仪。

①检测仪器的采集器应有现场显示、输入、保存实测波形信号、检测参数的功能，宜有对现场检测信号进行分析处理、与计算机进行数据通信的功能，一屏应能显示不少于三条波形。

②采集器模拟放大的频率宽带与激振器激振频率范围匹配，应具有滤波频率可调功能，模拟数字转化器不应低于 16 位，采集间隔应小于 25μs。

③采集器宜采用轻便节能、手持式操作设计，应能与超磁致伸缩声波振源或其他瞬态冲击震源匹配工作。

④分析软件宜具有数字滤波、幅频谱分析、瞬时相位谱分析、能量计算等信号处理功能，以及锚杆杆长计算、缺陷位置计算和密实度分析功能，具有检测波形、计算参数、分析结果导入相应电子文档的功能。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 确定测试段落及抽检锚杆，确认待测试锚杆的外露长度满足测试需求。
- (2) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (3) 获得与待检锚杆相同材质和规格的杆体波速平均值。
- (4) 获得杆系波速平均值。
- (5) 布设作业场地。

条文说明

测试前应清除外露端周边浮浆，保持外露端周边喷射混凝土表面平整。此外，还需调直锚杆外露部分，使外露部分与锚固部分呈直线，并记录被测锚杆的外露端长度。测试工作前需要停止对测试数据有明显干扰的机械振动、电焊等施工作业。

测试自由状态下工程所用各种材质和规格的锚杆杆体波速值，杆体波速平均值按式 (8-1) 计算。

$$C_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{bi} \quad (8-1)$$

$$C_{bi} = \frac{2L}{\Delta t_e} \quad (8-2)$$

或

$$C_{bi} = 2L \cdot \Delta f \quad (8-3)$$

式中： C_b ——相同材质和规格的锚杆杆体波速平均值 (m/s)；

C_{bi} ——相同材质和规格的第 i 根锚杆的杆体波速值 (m/s)，满足 $|C_{bi} - C_b|/C_b \leq 5\%$ ，否则增加测试数量，剔除某些偏移过大的数据；

L ——杆体长度 (m)；

Δt_e ——杆底反射波旅行时间 (s)；

Δf ——幅频曲线上杆底相邻谐振峰间的频差 (Hz)；

n ——参加波速平均值计算的相同材质和规格的锚杆数量， $n \geq 3$ 。

在现场锚杆试验中选取不少于 5 根相同材质和规格的同类型锚杆的杆系波速值，按式 (8-4) 计算杆系波速平均值。

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{ui} \quad (8-4)$$

$$C_{ui} = \frac{2L}{\Delta t_e} \quad (8-5)$$

或

$$C_{ui} = 2L \cdot \Delta f \quad (8-6)$$

式中： C_i ——杆系波速平均值 (m/s)；

C_{ui} ——第 i 根试验锚杆的杆系波速值 (m/s)，满足 $|C_{ui} - C_i|/C_i \leq 5\%$ ；否则增加测试数量，剔除某些偏移过大的数据；

L ——杆体长度 (m)；

Δt_e ——杆底反射波旅行时间 (s)；

Δf ——幅频曲线上杆底相邻谐振峰间的频差 (Hz)；

n ——参与波速平均值计算的试验锚杆的锚杆数量 ($n \geq 5$)。

3.2 测试步骤

(1) 仪器设备调试及设定测试参数，包括：采样时间间隔、预设杆长、预设波速、记录点数、工程及项目名称等。

(2) 对实心锚杆宜采用端发端收方式进行数据激发与接收，其测试步骤如下：

①在锚杆端面固定接收传感器，传感器轴心应与锚杆平行。

②用激振器激振锚杆端头靠近中心的位置，激振器激振时应避免触及接收传感器，并记录波形。

③按步骤②多次激振锚杆端头，并记录波形，直至有效波形记录不少于 3 个。

(3) 对中空锚杆宜采用端发侧收方式进行数据激发与接收，其测试步骤如下：

①在锚杆端部侧壁固定接收传感器，传感器轴心应与锚杆平行。

②用激振器激振锚杆端头靠近中心的位置，激振器激振时应避免触及接收传感器，并记录波形。

③按步骤②多次激振锚杆端头，并记录波形，直至有效波形记录不少于3个。

(4) 测试记录：同一根锚杆的有效波形记录不少于3个，且一致性较好，有明显的底端反射。

条文说明

有效波形一般具备波形一致性较好，具有明显的底端反射信号。

4 数据处理

4.1 锚杆杆体长度计算

(1) 锚杆杆底反射信号识别可采用时域反射波法、幅频域频差法等。

(2) 杆底反射波与杆端入射首波波峰间的时间差即为杆底反射时差，若有多次杆底反射信号，则应取各次时差的平均值。

(3) 时间域杆体长度应按式 (T 0552-1) 计算。

$$L = \frac{1}{2} C_m \times \Delta t_e \quad (\text{T 0552-1})$$

式中：L——杆体长度；

C_m ——同类锚杆的波速平均值，若无锚杆模拟试验资料，应按下列原则取值：当锚固密实度小于30%时，取杆体波速平均值 C_b ，当锚固密实度大于或等于30%时，取杆系波速平均值 C_t (m/s)；

Δt_e ——时域杆底反射波旅行时间。

(4) 频率域杆体长度应按式 (T 0552-2) 计算。

$$L = \frac{C_m}{2\Delta f} \quad (\text{T 0552-2})$$

式中： Δf ——幅频曲线上杆底相邻谐振峰间的频差。

4.2 缺陷判断及缺陷位置计算

(1) 时间域缺陷反射波信号到达时间应小于杆底反射时间；若缺陷反射波信号的相位与杆端入射波信号反相，二次反射信号的相位与入射波信号同相，依次交替出现，则缺陷界面的波阻抗差值为正；若各次缺陷反射波信号均与杆端入射波同相，则缺陷界面的波阻抗差值为负。

(2) 频率域缺陷频差值应大于杆底频差值。

(3) 锚杆缺陷反射信号识别可采用时域反射波法、幅频域频差法等。

(4) 缺陷反射波信号与杆端入射首波信号的时间差即为缺陷反射时差，若同一缺陷有多次反射信号，则应取各次缺陷反射时差的平均值。

(5) 缺陷位置应按式 (T 0552-3) 或式 (T 0552-4) 计算。

$$x = \frac{1}{2} \times \Delta t_x \times C_m \quad (\text{T 0552-3})$$

$$x = \frac{1}{2} \times \frac{C_m}{\Delta f_x} \quad (\text{T 0552-4})$$

式中: x ——锚杆杆端至缺陷界面的距离 (m);

Δt_x ——缺陷反射波旅行时间 (s);

Δf_x ——频率曲线上缺陷相邻谐振峰间的频差 (Hz)。

4.3 锚固密实度判定

锚杆锚固密实度按表 T 0552 进行判定。

表 T 0552 锚固密实度评判标准

质量等级	波形特征	时域信号特征	幅频信号特征	密实度 D
A	波形规则, 呈指数快速衰减, 持续时间短	$2L/C_m$ 时刻前无缺陷反射波, 杆反射波信号微弱或没有	呈单峰形态, 或可见微弱的杆底谐振峰, 其相邻频差 $\Delta f \approx C_m/2L$	$\geq 90\%$
B	波形较规则, 呈较快速衰减, 持续时间较短	$2L/C_m$ 时刻前有较弱的缺陷反射波, 或可见较清晰的杆底反射波	呈单峰或不对称的双峰形态, 或可见较弱的谐振峰, 其相邻频差 $\Delta f \geq C_m/2L$	90% ~ 80%
C	波形欠规则, 呈逐步衰减或间歇衰减趋势形态, 持续时间较长	$2L/C_m$ 时刻前可见明显的缺陷反射波或清晰的杆底反射波, 但无杆底多次反射波	呈不对称多峰形态, 可见谐振峰, 其相邻频差 $\Delta f \geq C_m/2L$	80% ~ 75%
D	波形不规则, 呈慢速衰减或间歇增强后衰减形态, 持续时间长	$2L/C_m$ 时刻前可见明显的缺陷反射波及多次反射波, 或清晰的、多次杆底反射波信号	呈多峰形态, 杆底谐振峰明显、连续, 或相邻频差 $\Delta f > C_m/2L$	75%

4.4 现场验证

锚杆长度无损检测结果宜进行现场验证, 验证比例宜不小于抽检数量的 10%。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试的基础信息, 包括测试时间、取样单位、人员及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括测试段落, 抽检锚杆的桩号及部位。
- (3) 现场测试的波形图, 锚杆长度及锚固密实度测试判读值, 缺陷位置与范围。

9 排水沟缺陷

T 0561—2026 视频检测仪测试排水沟缺陷

1 适用范围

本方法适用于使用视频检测仪测试隧道中心排水沟、路侧暗埋排水沟内壁表面质量与沟内堵塞情况。

2 仪器与材料技术要求

视频检测仪，由视频采集器、爬行器、主控制器、电缆盘等系统组成，能在 0 ~ 50℃ 的气温条件下和潮湿的环境中正常工作，其主要技术指标宜符合表 T 0561 的规定。

表 T 0561 视频检测仪的主要技术指标

项目	技术指标
视频采集器	图像传感器
	≥1/4"CCD，彩色
	灵敏度（最低感光度）
	≤3lx
	视角
	≥45°
	分辨率
	≥640 × 480
	图像变形
	≤ ±5%
电缆抗拉力	≥2kN
防水性能	IP68
工作温度	0 ~ 50℃
存储	录像编码格式：MPEG4、AVI；照片格式：JPEG

各系统宜具有下列功能：

(1) 视频采集器：具有平扫、仰俯、旋转与变焦等功能，且摄像镜头高度和灯光强度可调。

(2) 爬行器：具有前进、后退、空挡、变速、防侧翻等功能，且轮径大小、轮间距可调，爬坡能力宜大于 2.5°，越障高度不小于 0.1m，单次爬行距离不小于 200m。

(3) 主控制器：具有在监视器上同步显示日期、时间、断面大小、爬行距离等信息的功能。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 收集待测试水沟及其检查井的尺寸、位置等资料。
- (2) 准备并检查测试所需的仪器与材料，根据越障要求和管径大小配置测试设备。

3.2 测试步骤

- (1) 打开检查井。
- (2) 连接主控制器与爬行器。
- (3) 将爬行器放入检查井中，调整爬行器姿态确保其能在排水沟内正常行进。
- (4) 驱动爬行器沿排水沟行进，爬行器的行进速度不应大于 0.15m/s 。行进时应注意调整摄像头高度、摄像方向、镜头焦距、灯光亮度等，确保能观测到排水沟四周全部管壁状态。发现缺陷时，可停止爬行器行进，调整摄像头，获取清晰影像，并记录缺陷状态。
- (5) 完成影像数据采集，退出爬行器。
- (6) 恢复检查井。

条文说明

在爬行器行进过程中，摄像镜头一般保持在最短焦距位置，以免损坏摄像镜头；当使用变焦功能时，爬行器要保持在静止状态。当需要爬行器继续行进时，先将镜头的焦距恢复到最短焦距位置。

测试过程中的摄像资料不能产生画面暂停、间断记录、画面剪接的现象。

4 数据处理

浏览数据文件，查找出水沟缺陷，记录缺陷位置桩号、部位、类型、范围等内容。

条文说明

缺陷类型可分为内壁表观质量和沟内堵塞情况：内壁表观质量是指沟内壁存在的如开裂、破损、变形、腐蚀、渗漏等缺陷；沟内堵塞情况是指导致排水沟过水断面发生变化，影响排水畅通性能的缺陷，如沉淀淤积、结垢、障碍物、浮渣等。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，如测试对象、测试段落等。
- (3) 排水沟缺陷位置桩号、部位、类型、范围、影像资料等。

交通运输部信息公开
浏览专用

10 防水板接缝密实性

T 0571—2026 目测法测试防水板接缝外观质量

1 适用范围

本方法适用于目测测试隧道防水板焊缝、粘缝的外观检查。

条文说明

隧道防水板的接缝按结合方式一般分为焊接和粘接，按接缝部位一般分为环向接缝、纵向接缝、局部接点。防水板接缝部位的外观检查包含各种结合方式、各种接缝部位的外观检查。

外观检查主要检查接缝内是否有气泡、空隙、烤焦、焊穿、熔浆溢出等可能影响防水效果的外观质量。

2 仪器与材料技术要求

放大镜、强光手电筒、平口螺丝刀、相机。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查所需的仪器与材料。
- (2) 确定测试段落。
- (3) 布设作业场地。

3.2 测试步骤

(1) 从接缝一端起，沿着接缝走向观察接缝内是否有气泡、空隙、烤焦、焊穿、熔浆溢出等现象，用水彩笔在检查位置做出目测合格与否的标识。光线昏暗处可采用强光手电筒照射，防水板细小缺陷应辅以放大镜观察。

(2) 对目测不合格的位置用平口螺丝刀沿熔浆或粘胶溢出部位的外边缘稍用力戳, 核实是否有虚焊、漏焊、焊接或粘接不牢的现象。

(3) 对外观检查不合格的部位拍照记录。

4 数据处理

防水板接缝外观质量合格率按式 (T 0571) 计算。

$$\alpha = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (\text{T 0571})$$

式中: α ——防水板接缝外观质量合格率;

m ——合格的接缝数量;

n ——抽检的接缝数量。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 包括测试时间、单位、人员及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括测试段落起止点桩号、测试部位等。
- (3) 缺陷部位的照片、位置、缺陷情况描述及外观检查结论。

T 0572—2026 负压法测试局部接点密实性

1 适用范围

本方法适用于使用负压法测试隧道防水板局部焊点或粘点密实性。

条文说明

由于基面不平整, 或二次衬砌钢筋施工等原因, 容易导致防水板被刺破或灼伤而出现局部破损, 一般在局部破损处周边增加一块防水板进行焊接或粘贴进行修补, 修补范围一般较小, 一般采用负压法测试防水板焊点或粘点密实性。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 真空罩: 尺寸能覆盖焊点及粘点即可。
- (2) 真空泵: 最大工作压强不小于 0.09MPa。
- (3) 大气压力表: 量程范围 0.05 ~ 0.12MPa, 精度等级优于 2.5 级。

- (4) 真空表：量程范围 $-0.1 \sim 0\text{MPa}$ ，精度等级优于 1.0 级。
- (5) 其他：秒表、肥皂水、强光手电筒、水彩笔、抹布、相机等。

条文说明

压力表的精度等级以允许误差占压力表量程的百分率来表示，如量程 0.1MPa 的压力表精度等级为 2.5 级，则对应的允许误差为 2.5kPa 。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。
- (2) 确定测试的段落和部位。
- (3) 布设作业场地。

3.2 测试步骤

- (1) 用大气压力表测试待测区域所处的环境大气压值。
- (2) 将待测试部位及周边的防水板用抹布擦拭干净。
- (3) 沿焊点或粘点周边涂抹肥皂水。
- (4) 安装真空罩，保持真空罩底座与防水板密贴不透气，在真空罩上安装真空表。
- (5) 用真空泵抽取真空罩内的空气，使真空罩中形成的负压低于环境大气压 90%。
- (6) 持续抽气，保证真空罩内持续负压 15min，观察焊点或粘点周边是否有气泡。
- (7) 测试完毕，用水彩笔做好是否有气泡的标志。

4 数据处理

若有气泡，说明密实性不合格，并统计不合格点数；若无气泡，说明密实性合格。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落起止点桩号、测试部位。
- (3) 缺陷部位的照片、位置、缺陷情况描述及外观检查结论。

T 0573—2026 充气法测试焊缝密实性

1 适用范围

本方法适用于使用充气法测试隧道防水板焊缝的密实性。

2 仪器与材料技术要求

(1) 隧道防水板焊缝气密性检测仪包含打气筒或电动充气泵、大气压力表、注射针等，各设备性能应能满足下列要求：

①打气筒或电动充气泵：最大工作压力不小于0.25MPa。

②大气压力表：测量范围0~0.6MPa，精准优于1级。

③注射针：5号。

(2) 其他：焊缝专用夹、肥皂水、秒表、强光手电筒、放大镜。

条文说明

隧道防水板焊缝密实性检测仪有充气筒式检测仪和隧道防水板焊缝密实性检测仪，充气筒式检测仪的充气设备、大气压力表和5号注射针为分体式，现场测试时需组装；隧道防水板焊缝密实性检测仪一般配备电动恒压充气泵，且充气设备、大气压力表和5号注射针一般为一体式。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

(1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。

(2) 确定测试的段落和部位。

(3) 布设作业场地。

3.2 测试步骤

(1) 将待测试焊缝的两端采用焊缝专用夹夹紧，保证端头不漏气。

(2) 采用充气筒式检测仪时，先将5号注射针与气压表连接，然后将注射针插入需测试的焊缝内，用打气筒进行充气，当大气压力表达达到0.25MPa时停止充气，记录初始压力值 P_0 ；采用隧道防水板焊缝密实性检测仪时，先将5号注射针与气压表连接，然后将注射针插入需测试的焊缝内，接通电源，打开开关，充气泵开始工作，当大气压

力表达到 0.25MPa 时自动停止充气，记录初始压力值 P_0 。

(3) 保持 5 号注射针或充气泵不漏气，用秒表分别记录 2min、15min 大气压力表的读数值 $P_{t=2}$ 、 $P_{t=15}$ 。

(4) 判定焊缝密实性情况。

(5) 若密实性合格，排放焊缝内气体，并采用塑料片热熔封堵针眼，试验结束。

(6) 若密实性不合格，用强光手电筒辅以放大镜检查可疑部位，用肥皂水涂在可疑部位焊缝上，重新对焊缝进行充气，有气泡的地方即为焊缝焊接不密实处，作出标记和记录。

条文说明

为了验证焊缝两端在充气过程中是否漏气，采用专用夹夹紧焊缝的两端，端头附近部位涂抹肥皂水。

电动恒压隧道防水板气密性检测仪出厂时工作参数一般已设定好，当焊缝内的气压达到 0.25MPa 时，会自动停止充气。

4 数据处理

焊缝焊接密实性合格标准，应按式 (T 0573) 确定。

$$P_{t=15} \geq 0.9P_0 \quad (\text{T 0573})$$

式中： $P_{t=15}$ ——15min 后压力值 (MPa)；

P_0 ——初始压力值 (MPa)，不应小于 0.25MPa。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落起止点桩号、测试部位。
- (3) 测试的压力初始值、压力最终值、充气时间，测试结论。

11 衬砌外观质量缺陷

T 0581—2026 人工调查法测试外观质量缺陷

1 适用范围

本方法适用于使用人工调查测试隧道衬砌裂缝、剥落剥离、蜂窝麻面、渗漏水 and 错台等外观质量缺陷。

2 仪器与材料技术要求

- (1) 裂缝测宽仪：量程不小于 5mm，精度优于 0.01mm。
- (2) 裂缝测深仪：量程不小于 500mm，精度优于 5mm。
- (3) 游标卡尺：量程不小于 150mm，分度值不大于 0.1mm。
- (4) 钢卷尺、皮尺、直尺：分度值不大于 1mm。
- (5) 量角器：分度值 1°。
- (6) 水尺：分度值不大于 1mm。
- (7) 测针：分度值不大于 0.1mm。
- (8) 其他：高空作业车、小锤、量筒、量杯、流量计、计量堰、取芯钻机、毛刷、电筒、秒表、温度计、相机、粉笔等。

条文说明

裂缝测宽仪是利用光学或电子放大技术，将结构物上的裂缝图像放大，通过人工或者自动读数的方法，测量结构物裂缝宽度的仪器。根据大量裂缝宽度仪的调研，目前该产品的测试范围一般为 0~12mm，精度大部分可以达到 0.01mm。根据现行《公路隧道养护技术规范》(JTG H12) 的有关规定，衬砌裂缝宽度大于 5mm 时，其技术状况值评定为 3 或 4，因此，测试范围至少要满足 5mm 的要求。对于宽度大于 5mm 的裂缝，在满足测试精度的前提下，采用尺量法等直接测试更加便捷。衬砌裂缝宽度设计允许值一般为 0.2mm，故精度取其允许值的 1/20，即 0.01mm。

裂缝测深仪是利用声波在混凝土内传播，穿过裂缝时，在裂缝端点产生衍射，根据

首波反相, 衍射角与裂缝深度的几何关系及超声波在混凝土中的传播速度计算出裂缝的深度。根据调研, 裂缝测深仪的系列产品测试范围一般为 $0 \sim 500\text{mm}$, 测试精度一般为 5mm 。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 准备并检查测试所需的器具与材料。
- (2) 确定测试方案、测试方向和里程桩号标记方法等, 宜使用钢卷尺和喷漆按每 10m 标记隧道里程桩号。
- (3) 按隧道线路、测试方向进行现场调查, 记录外观质量缺陷类型及位置, 并进行标识和编号。纵向位置可采用缺陷中心位置里程桩号标识; 环向位置宜采用拱顶、拱腰、边墙等标识, 也可采用钢卷尺或皮尺测试缺陷中心位置与左(右)墙底线的距离。
- (4) 清理缺陷位置衬砌表层杂物和尘土, 当裂缝表层混凝土较坚硬难以清除时, 可采用小锤破碎后清理。

3.2 裂缝测试步骤

- (1) 判断裂缝的走向及分布情况, 标记应进行裂缝深度测试的裂缝。
- (2) 采用量角器或地质罗盘测量裂缝发展方向与隧道轴线的夹角。
- (3) 采用皮尺沿裂缝走向测量裂缝长度。
- (4) 采用裂缝测宽仪对准裂缝最宽处, 裂缝图像清晰后判读裂缝宽度 b_i 。
- (5) 用裂缝测深仪采用单面平测法测试裂缝深度, 操作步骤如下:
 - ①采用不跨缝测试法时, 先获取计算混凝土波速所需的参数, 然后将发射和接收换能器置于裂缝最宽处附近同一侧, 且宜避开钢筋, 测读两个换能器内边缘的间距 l'_1 及其声时值 t_1 , 然后同时向裂缝外侧移动发射和接收换能器, 移动不少于 2 次, 每次移动的距离宜为 $0.5l'_1$, 同时记录下两个换能器内边缘的间距 l'_i 及其声时值 t_i 。两个换能器与衬砌表面之间宜采用耦合剂黏结。
 - ②采用跨缝测试法时, 先获取计算混凝土波速所需的参数, 然后将发射和接收换能器垂直对称置于裂缝最宽处两侧, 且宜避开钢筋, 测读两个换能器内边缘的间距 l'_1 及其声时值 t_1 , 并观察首波相位的变化, 然后同时向外侧移动发射和接收换能器, 移动不少于 2 次, 每次移动的距离宜为 $0.5l'_1$, 同时记录下两个换能器内边缘的间距 l'_i 及其声时值 t_i 。两个换能器与衬砌表面之间宜采用耦合剂黏结。跨缝测试如图 T 0581-1 所示。
- (6) 当测试中出现可疑区域或测点时, 可采用钻芯法验证。

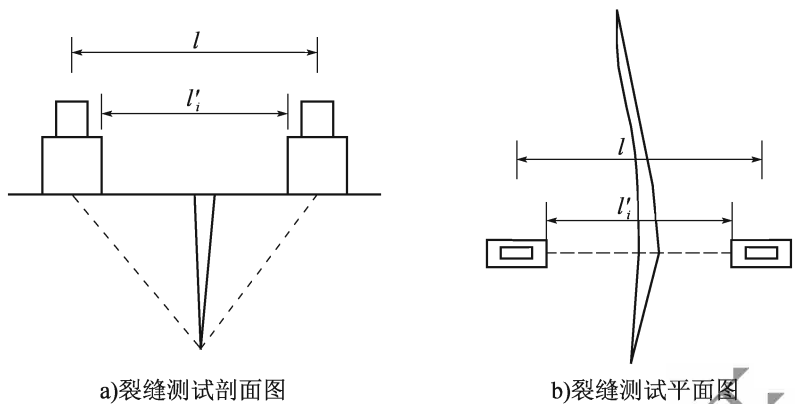


图 T 0581-1 跨缝测试

条文说明

声波通过裂缝时，一部分被空气层反射，一部分经连通点穿过裂缝传播到接收换能器，所以通过裂缝和不通过裂缝的测点声时差异不明显，而裂缝使声波反射或绕射，波幅将明显减小，根据波幅的突变，判定裂缝深度或是否贯穿。当有钢筋垂直穿过裂缝并与换能器连线大致平行，且钢筋与换能器连线间的距离较小时，则沿钢筋传播的声波首先到达接收换能器，使得声波传播“短路”，计算的裂缝深度变小，甚至为负，测试结果不能反映裂缝深度。当换能器与钢筋距离大于或等于裂缝深度的1.5倍，可基本避开钢筋对测试的影响。但由于预先无法得知裂缝深度，故一般考虑避开钢筋，以避免钢筋对测试结果的影响。

测距以换能器内边缘为准，两个换能器内边缘间距 l' 分别取100mm、150mm、200mm、250mm、……，读取其声时值 t_i 。为了提高测距的准确性，以“时-距”法来求得声波的实际传播距离，以消除仪器初始读数及声波传播路径误差的影响。

由于钻芯法测试直观、可靠、精度高，一般作为无损检测方法的校验依据。

3.3 渗漏水测试步骤

3.3.1 渗漏水面积测试

测试时，用粉笔勾画出渗漏水的范围，然后用钢卷尺、直尺或皮尺等测量其纵、横两个方向的最长距离，应分别连续测读不少于2次。

3.3.2 渗漏水水量测试

(1) 渗漏水呈明显滴漏状态时，应按下列步骤开展测试：

①采用形状规则且有刻度的容器在滴漏处收集渗漏水，或用带有密封缘口的规定尺寸方框，安装在滴漏处的隧道内表面。

②将渗漏水引入量测容器内，记录某一时刻 t_0 时的容器内渗漏水体积 V_0 。

③测读一定时间后某一时刻 t_i 的渗漏水体积 V_i 。

④若上述测试困难时，可通过目测计取一定时间内的滴落数目，计算渗漏水量。

(2) 渗漏水呈线漏或喷水状态时，应按下列步骤开展测试：

①采用渗漏水处附近的集水井或尺寸已知的水槽、水池等集水，记录某一时刻 t_0 的集水井、水槽或水池内初始水位 h_0 。

②测读一定时间后某一时刻 t_i 的水位 h_i ，计算该段时间内渗漏水体积。

(3) 渗漏水呈涌流状态时，宜采用流速法或堰测法测试，应按下列步骤开展测试：

①流速法测试时，将渗漏水引入长度不小于 15m、不弯曲、断面一致且有一定纵坡的沟槽，采用浮标或流速计测定水流速度，由流速与断面面积的乘积来计算流量。采用浮标测量流速时，测定沟槽宽度和槽内水面高度，将浮标放入沟槽内流动的水面上游，使浮标流经被测距离 L ，记录流过时间 t_i ，重复数次。当水深大于 100mm、流速不小于 0.05m/s 时，宜采用流速计测量流速 v 。

②堰测法测试时，应在距离渗漏水处不少于 2m 处的排水沟直线段设置计量堰，如图 T 0581-2 所示，记录堰口宽度 b 、堰槽宽度 B 、堰槽深度 h 、堰槽底至堰口下缘距离 D 。堰板应平正且顶部水平，水尺或测针设置在堰口上游 3~5 倍堰上水头处，尺身零点高程与堰口高差不应大于 1mm。将渗漏水引入计量堰，测量溢流层高度 h ，利用流量与各溢流层高度的单值函数关系计算流量。

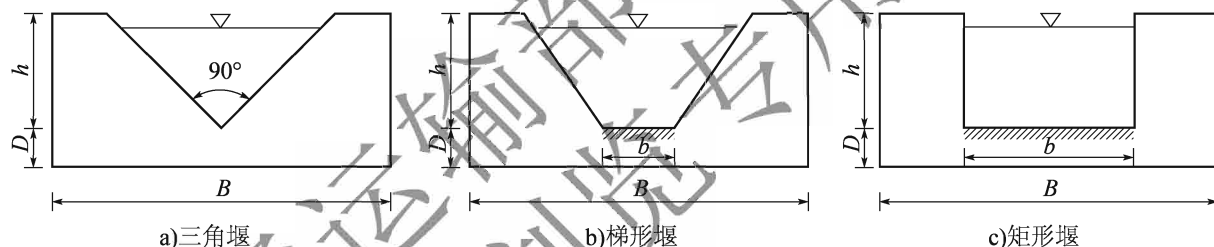


图 T 0581-2 计量堰剖面图

3.3.3 渗漏水浑浊时，应目测渗漏水浑浊程度及其颜色等特征。

条文说明

根据《地下防水工程质量验收规范》(GB 50208—2011)的有关规定，当滴落速度为 3~4 滴/min 时，24h 的渗水量为 1L，取渗漏水点每分钟或数分钟内的滴落数目作为该点的渗漏水，滴落速度至少为 1 滴/min，即滴漏；滴落速度大于 300 滴/min，即形成连续线流。

堰测法是利用薄壁式计量堰测定渗漏水流量的方法。根据计量堰溢流口的形状不同，通常分为三角堰、梯形堰和矩形堰。涌水量小于 60L/min 时，采用三角堰；涌水量大于 60L/min 时，采用梯形堰或矩形堰，但这种测量方法精确度较低。

渗漏水的浑浊状态对于间接判断隧道的安全性至关重要。出水点浑浊程度高，则说明渗漏水中泥沙含量大，根据理论分析和工程经验，当隧道出水点的泥沙含量大于

1‰, 最大泥沙颗粒粒径大于 0.1mm 时, 易造成土体流失和结构背后空洞, 影响结构稳定性, 同时容易沉积在排水盲管周围, 造成排水系统堵塞, 从而引起水压升高, 破坏二次衬砌。

3.4 剥落剥离、蜂窝麻面测试步骤

(1) 剥落剥离、蜂窝麻面面积测试宜采用钢卷尺或直尺, 测量剥落剥离、蜂窝麻面区纵、横两个方向的最长距离, 纵向、横向宜分别测读 2 次。

(2) 剥落剥离深度测试宜采用直尺和游标卡尺, 操作步骤如下:

①在剥落剥离区目测确定深度较大位置 M , 用记号笔做标记。

②将直尺紧贴或靠近 M 点, 沿隧道纵向放置, 且直尺一端或两端背面应紧贴完好的隧道壁。

③采用游标卡尺测量 M 点至直尺的距离, 即 M 点的深度 h_0 。

④以 M 为基点, 向 M 点的四周偏移不大于 10mm, 测量并记录该点的深度 h_1 及偏移距 D_{h1} , 如 $h_1 > h_0$, 则按上述方法继续偏移, 相邻测点间距不宜大于 10mm, 测量并记录深度 h_i 及偏移距 D_{hi} , 直至 $h_i < h_0$ 。认为最大 h_i ($i=0, 1, 2, \dots, n, n$ 为整数, $n \geq 3$) 即为该剥落剥离的深度 h_p 。

3.5 错台测试步骤

(1) 目测确定错台量较大位置 W , 用记号笔做标记。

(2) 直尺纵向应沿错台一侧边缘放置, 采用游标卡尺测量 W 点至直尺的距离, 即 W 点错台量 c_0 。

(3) 以 W 为基点, 沿直尺向 W 一侧偏移不大于 5mm, 测量并记录该点的错台量 c_1 及偏移距 D_1 , 如 $c_1 > c_0$, 则按上述方法继续偏移, 相邻测点间距不宜大于 5mm, 测量并记录错台量 c_i 及偏移距 D_i , 直至 $c_i < c_0$ 。

(4) 以 W 为基点, 沿直尺向 W 另一侧重复步骤 (3), 直至 $c_i < c_0$ 。认为最大 c_i ($i=0, 1, 2, \dots, n, n$ 为整数) 即为该错台的错台量。

4 数据处理

4.1 裂缝宽度应按式 (T 0581-1) 计算。

$$b_c = \max(b_i) \quad (\text{T 0581-1})$$

式中: b_c ——裂缝宽度 (mm), 准确至 0.1mm;

b_i ——第 i 次测读的裂缝宽度 (mm), $i=1, 2, \dots, n, n \geq 3$ 。

4.2 裂缝的深度数据处理步骤如下:

(1) 利用采集的两个换能器内边缘不同间距 l'_i 及其对应声时值 t_i , 采用回归分析法, 按式 (T 0581-2) 计算得出声时 t_i 与测距间的回归直线方程。

$$l'_i = \alpha + \beta t_i \quad (\text{T 0581-2})$$

式中: l'_i ——第 i 点的发射和接收换能器内边缘间距 (mm), $i = 1, 2, \dots, n, n \geq 3$;
 t_i ——第 i 点的发射和接收换能器测试时读取的声时值 (μs), $i = 1, 2, 3, \dots, n, n \geq 2$;
 α ——回归系数, 为距离-声时曲线在距离轴上的截距 (mm);
 β ——回归系数 ($\text{mm}/\mu\text{s}$)。

(2) 各测点声波实际传播距离应按式 (T 0581-3) 计算。

$$l_i = l'_i + |\alpha| \quad (\text{T 0581-3})$$

式中: l_i ——第 i 点声波实际传播距离 (mm), $i = 1, 2, 3, \dots, n, n \geq 2$ 。

(3) 混凝土声速值应按式 (T 0581-4) 计算。

$$v = \frac{l'_n - l'_1}{t_n - t_1} \quad \text{或} \quad v = \beta \quad (\text{T 0581-4})$$

式中: v ——混凝土声速值 (km/s)。

(4) 各测点的裂缝深度值应按式 (T 0581-5) 计算。

$$h_{ci} = \frac{l_i}{2} \times \sqrt{\left(\frac{t_i^0 v}{l_i}\right)^2 - 1} \quad (\text{T 0581-5})$$

(5) 各测点裂缝深度的平均值作为裂缝深度应按式 (T 0581-6) 计算。

$$h_c = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n h_{ci} \quad (\text{T 0581-6})$$

式中: h_{ci} ——第 i 点计算的裂缝深度值 (mm);

t_i^0 ——第 i 点跨缝测试时的声时值 (μs);

h_c ——各测点裂缝深度平均值 (mm)。

(6) 可用首波反相时对应的测距及两个相邻测距的测量值按式 (T 0581-5) 和式 (T 0581-6) 计算裂缝深度值 h_c 。

(7) 无首波反相时, 宜以不同测距按式 (T 0581-5) 和式 (T 0581-6) 计算裂缝深度值 h_c 。当测距 l_i 小于 h_c 或大于 $3h_c$ 时, 应剔除该组数据, 然后取余下 h_{ci} 的平均值, 作为裂缝深度值 h_c 。

条文说明

混凝土的声速一般在 $3\,500 \sim 4\,500 \text{ m/s}$ 之间, 如果超过这个范围, 需要查找探头表面是否抹耦合剂, 测试区域是否存在细小裂缝, 检测仪工作是否正常等。

跨缝测试时, 读取首波声时时, 注意观察首波相位的变化, 因为首波出现反相位的测距与被测裂缝深度存在一定关系, 记录反相位的测距, 有助于裂缝深度的分析判断。

4.3 剥落剥离深度测试时, 每次测读值 h_i , 应按式 (T 0581-7) 计算各次测读值的最大值作为剥落剥离深度值 h_p 。

$$h_p = \max(h_i) \quad (\text{T 0581-7})$$

式中: h_p ——剥落剥离深度 (mm), 准确至 1mm;

h_i ——第 i 次测读的剥落剥离深度 (mm), $i=0, 1, 2, \dots, n; n \geq 3$ 。

4.4 剥落剥离、渗漏水面积测试时, 纵向每次测读值分别为 L_1 、 L_2 , 横向每次测读值为 B_1 、 B_2 , 渗漏水面积应按式 (T 0581-8) 计算。

$$S = \frac{L_1 + L_2}{2} \times \frac{B_1 + B_2}{2} \quad (\text{T 0581-8})$$

式中: S ——渗漏水面积 (m^2), 准确至 0.1m^2 。

L_1 、 L_2 ——渗漏水区纵向的最长距离 (m);

B_1 、 B_2 ——渗漏水区横向的最长距离 (m)。

4.5 渗漏水量测试时, 数据处理如下:

(1) 容积法测试时, 渗漏水量应按式 (T 0581-9) 或式 (T 0581-10) 计算。

$$Q = 43\,200 \times \sum_{i=1}^n \frac{V_i - V_0}{t_i - t_0} \quad (\text{T 0581-9})$$

或

$$Q = 43\,200 \times \sum_{i=1}^n \frac{h_i - h_0}{t_i - t_0} \times S \quad (\text{T 0581-10})$$

式中: Q ——24h 内的渗漏水量 (m^3), 准确至 0.1m^3 ;

V_i ——两次读数之差不大于其平均值 5% 的渗漏水体积测读数 (m^3);

V_0 ——量测容器的渗漏水初始体积 (m^3);

h_i ——2 次读数之差不大于其平均值 5% 的渗漏水水位测读数 (m);

h_0 ——集水井或水槽的初始水位 (m);

t_0 ——初始体积 (水位) 测读时刻 (s);

t_i ——一定时间后渗漏水体积 (水位) 测读时刻 (s);

S ——集水井或水槽底面积 (m^2)。

(2) 浮标测试时, 渗漏水量应按式 (T 0581-11) 计算。

$$Q = 60\,480 \times \frac{L \times S}{t} \quad (\text{T 0581-11})$$

式中: L ——浮标流经部分的沟槽长度 (m);

t ——浮标流经这段距离的时间 (s);

S ——沟槽截面积 (m^2)。

(3) 流速计法测试时, 渗漏水量应按式 (T 0581-12) 计算。

$$Q = 86\,400 \times v \times S \quad (\text{T 0581-12})$$

式中: v ——流速仪测读的水流流速 (m/s);

S ——沟槽截面积 (m^2)。

(4) 三角堰测法测试时, 渗漏水量应按式 (T 0581-13) 计算。

$$Q = 24C_1 \cdot h^{0.4} \quad (\text{T 0581-13})$$

$$C_1 = 4\,874.4 + \frac{14.4}{h} + (504 + 702D^{-4.5}) \left(\frac{h}{B} - 0.09 \right)^2 \quad (\text{T 0581-14})$$

式中: h ——堰上水头高度 (m);

C_1 ——90°三角堰流量系数, 可近似取 0.014;

B ——堰槽宽度 (m);

D ——堰槽底至堰口下缘距离 (m)。

(5) 梯形堰测法测试时, 渗漏水量应按式 (T 0581-15) 计算。

$$Q = 24C_2 \cdot b \cdot h^{1.5} \quad (\text{T 0581-15})$$

$$C_2 = 6\,426 + \frac{10.62}{h} + \frac{853.2}{D} - 1\,540.8 \left[(B-b) \frac{hB}{D} \right]^{0.5} + 122.4 \left(\frac{B}{D} \right)^{0.5} \quad (\text{T 0581-16})$$

式中: b ——堰口宽度 (m);

C_2 ——梯形堰流量系数, 可近似取 0.0186。

(6) 矩形堰测法测试时, 渗漏水量应按式 (T 0581-17) 计算。

$$Q = 24C_3 \cdot B \cdot h^{1.5} \quad (\text{T 0581-17})$$

$$C = 6\,426 + \frac{10.62}{h} + \frac{853.2}{D} - 1\,540.8 \left[(B-b) \frac{hB}{D} \right]^{0.5} + 122.4 \left(\frac{B}{D} \right)^{0.5} \quad (\text{T 0581-18})$$

式中: C_3 ——矩形堰流量系数, 可近似取 0.018。

4.6 错台量应按式 (T 0581-19) 计算。

$$c = \max(c_i) \quad (\text{T 0581-19})$$

式中: c ——错台量 (mm), 准确至 1mm;

c_i ——第 i 次测读的错台量 (mm), $i=0, 1, 2, \dots, n$; $n \geq 3$ 。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容:

- (1) 测试基础信息, 如测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息, 包括测试段落里程桩号、测点及测线数量、位置。
- (3) 测试段落缺陷数量、特征参数。
- (4) 测试段落缺陷展布图、照片及影像资料。

T 0582—2026 图像法测试外观质量缺陷

1 适用范围

本方法适用于使用图像法测试隧道衬砌表面裂缝、剥落剥离、蜂窝麻面、渗漏水、错台等外观质量缺陷。

条文说明

经过多年研究和实践应用，基于图像法的公路隧道快速测试技术已取得长足进步。经过调研，国内已开发了多种测试装备，主要以移动车载装置为载体，也有以轨道为载体，搭载相机、激光扫描仪、红外热像仪、定位系统等，通过数字图像检测、三维激光扫描检测、红外热成像检测等方法实现结构病害的快速采集，已成功应用于隧道的日常及定期检查工作中，并取得了良好的效果。

2 仪器与材料技术要求

图像法测试可采用轨道式、车载式或其他载体搭载图像采集装备开展测试，其技术指标应符合下列要求：

- (1) 分辨力：裂缝的宽度应优于 0.2mm ，渗漏水、剥落剥离、蜂窝麻面的面积应优于 0.01m^2 。
- (2) 里程定位精度：优于 1‰ 。
- (3) 作业环境： $-20 \sim +45^{\circ}\text{C}$ 。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

- (1) 收集隧道设计与竣工图纸、运营过程中的处治设计图纸等资料，了解隧址区工程地质条件、周边环境、结构特征等隧道基本情况。
- (2) 确定测试方案、交通组织方案、应急预案等。
- (3) 应根据隧道断面轮廓调试采集参数。
- (4) 应检查载具及测试系统运转正常。
- (5) 宜在隧道边墙每间隔 $100 \sim 200\text{m}$ 设置里程标识。

条文说明

测试过程中,如果采用距离传感器,即编码器进行里程定位时,存在一定误差,隧道长度越长,则误差累积越大,为保障图像拼接中病害位置的准确性,需要在隧道边墙每隔100~200m范围设置清晰的标识点,根据这些标识点进行缺陷位置的修正。

目前对于两车道公路隧道,测试模式主要有全幅和半幅两种。全幅测试效率高,但车流量大时,测试速度要相对稳定,避免相邻车道被遮挡、图像拍摄不全;半幅测试需要多测试一次,效率低,图像拼接工作量增加,往往因定位不准导致病害错位;根据现场实际情况,选择不同类型的测试模式。

3.2 测试步骤

(1) 采用车载式图像采集装备开展测试时,按下列步骤开展测试:

- ①距隧道洞口50~100m时,启动测试系统,确认所有测试设备准备就绪。
- ②检测车进洞测试时,宜沿车道中心线行驶,距离偏差宜控制在 $\pm 0.2\text{m}$ 范围内。
- ③测试过程中,应关注数据采集质量。
- ④检测车驶出隧道后,应停止数据采集和记录,并应恢复仪器至初始状态。
- ⑤测试完成后,检查测试数据文件的完整性,存在问题时应重新测试。
- ⑥关闭测试系统电源,结束测试。

(2) 采用轨道式或其他载体搭载图像采集装备开展测试时,宜按照产品要求开展测试。

条文说明

检测车直线行驶的稳定性和速度的均匀性,对图像的质量影响较大。根据现场测试装备的焦距,当车辆偏离车道中心线0.2m以内时,图像的清晰度受影响较小,车辆偏离车道中心线大于0.2m时,对图像的质量影响较大。

4 数据处理

4.1 采集数据应以隧道单洞为单元进行处理。

4.2 应对原始数据进行备份。

4.3 对图像数据进行拼接。拼接之前,核实隧道内的里程标识,并对里程进行校正。

4.4 对外观质量缺陷进行自动或人工识别。

4.5 生成外观质量缺陷二维展布图。每幅展布图的纵向长度可取 30m、50m 或 100m。

4.6 对有异议的数据进行人工复核。

条文说明

外观质量缺陷展布图纵向长度的划分，需要兼顾效率和成图效果，当图幅较大时，处理速度快；图幅较小时，信息量大，则处理速度慢。一般以隧道纵向 30m 或 50m 区段为一张图幅，具体长度根据实际需求确定。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，如测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点及测线数量及位置。
- (3) 测试段落缺陷类型、缺陷数量、缺陷特征参数、缺陷展布图等。

12 衬砌背部密实性

T 0591—2026 冲击回波法测试衬砌背部密实性

1 适用范围

本方法适用于使用冲击回波法测试隧道二次衬砌内部与背部不密实、空洞、脱空等。

条文说明

冲击回波法是通过瞬时机机械冲击（电磁激振）或人工锤击隧道衬砌表面，激发产生的弹性波传播至声阻抗不同的两种介质（衬砌/围岩或衬砌/空气）分界面时发生反射，由安置在冲击点附近的宽频传感器接收弹性波信号，经过时域波形或频域分析后获得结构响应图谱，一般要求测试混凝土龄期大于14d、抗压强度标准值不小于15MPa。当隧道衬砌背后不密实，或者衬砌背后出现空洞时，分界面两侧介质的声阻抗差会发生变化，从而导致分界面处的反射效应产生差异，系统的振动响应发生改变。与超声波相比，冲击器激发的弹性波能量大，波长较长，测试深度达1m以上。根据冲击方式的不同分为单点式、扫描式等测试方法。

2 仪器与材料技术要求

(1) 冲击器（锤）：应为钢球型或电磁激振的圆柱型。

(2) 接收传感器：应选用收垂直位移相应的宽带换能器，并具有接收微弱反射信号的高灵敏度，其工作频率带宽宜为 $(5 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^5)$ Hz。扫描式冲击回波仪应在滚轮上均布接收传感元件。

(3) 数据采集系统：宜具备信号放大、显示功能和现场数据处理，且增益可调节，频率带宽宜不低于 1.0×10^5 Hz，具有实时滤波功能，系统增益不低于128db，A/D转换精度不应低于16位，最小采样间隔不大于 $1\mu\text{s}$ ，记录点数不少于1024点，信号叠加次数可选择或自动叠加。

(4) 数据处理和分析系统：应具有时间域窗口选择、数字滤波、时域分析、频谱

分析等功能，宜具有二维或三维图形分析功能。

(5) 游标卡尺：量程不小于 150mm，分度值不大于 0.1mm。

(6) 钢卷尺、皮尺或直尺：分度值不大于 1mm。

(7) 工作环境温度：-5 ~ 40℃。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

(1) 准备并检查测试所需的仪器与材料。

(2) 收集隧道结构的设计图纸、设计变更、施工记录、交竣工验收、混凝土设计强度等级、混凝土试块抗压强度试验报告等资料。

(3) 根据设计图纸中衬砌钢筋的直径和分布状况及保护层厚度、构件尺寸边界范围、管道的材质和布设、预埋件位置，制定测试方案。对存在钢筋的混凝土构件，在冲击回波测试前应采用钢筋扫描仪按现行《混凝土中钢筋检测技术标准》(JGJ/T 152) 的有关规定检测钢筋的分布和保护层厚度，并在衬砌上标明钢筋的分布状况。

(4) 宜使用钢卷尺和喷漆设置测试段落的里程碑号，可每间隔 10m 设置一个标记。

(5) 测区衬砌表面应平整、清洁、干燥，且应避开蜂窝麻面部位，不应有施工缝、饰面层、浮浆、油垢等，可采用砂轮磨平或用高强度的快凝砂浆抹平，抹平砂浆应与混凝土黏结良好。

(6) 测试时周边环境不应有机械振动和高振幅电噪声干扰源。

3.2 测试步骤

3.2.1 测区衬砌厚度未知时，可采用两个接收传感器进行表面波速测试，不宜少于 3 个测点，应按下列步骤开展测试：

(1) 应采用人工或机械的方式将冲击回波仪的两个接收传感器压在衬砌表面，也可采用热熔胶或耦合剂使传感器和衬砌表面保持密贴，两个传感器间距宜为 0.3m。

(2) 在两个传感器连线外侧 (0.15 ± 0.01) m 处用冲击器锤击衬砌表面，激发冲击弹性波，如图 T 0591-1 所示。当衬砌表面有沟槽或裂缝时，冲击器和传感器应位于沟槽或裂缝同侧。

(3) 测试时，应及时观察采集到的时域曲线波形的变动情况，接收的波形应完整，波幅大小应适宜，不应有削峰现象。当两个传感器获取的波形都有效时，保存有效波形进行分析。当波形无法分辨时，应在同一测点重复测试或在其他测点重新测试；当所接收的信号软弱时，应更换大尺寸的冲击器。

(4) 同一测点应至少测读 2 次，该测点的各次测读中有两次测得的时间差相同时，可进行下一个测点的测试。

(5) 在同一时间坐标上显示两个传感器获取的时域波形，分别读取第一个和第二

个传感器直达波的初至时间值 t_1 和 t_2 ，计算两个传感器接收到直达波的初至时间差 Δt 。

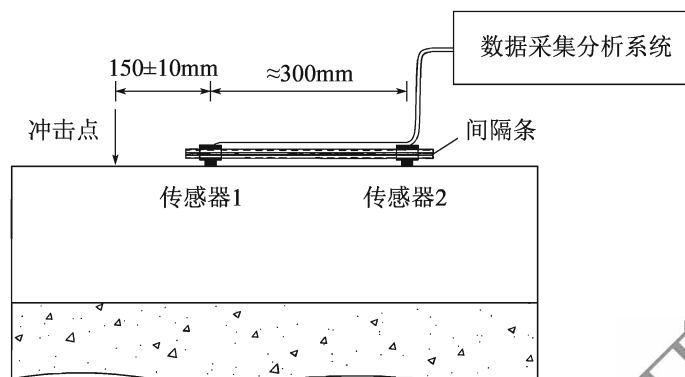


图 T 0591-1 两个接收传感器直达波测试混凝土波速示意图

3.2.2 当测区衬砌厚度已知或能直接测量衬砌厚度时，可采用单个接收传感器进行表观波速测试，不宜少于 3 个测点，应按下列步骤开展测试：

(1) 获取待测衬砌的实际厚度值 H 。

(2) 采用本规程 T 0591 第 3.2.1 条步骤 (1) 的方式，将单个接收传感器与衬砌表面保持紧密结合，冲击点与接收传感器间距不应大于 $0.4H$ 。用冲击器在冲击点锤击衬砌表面，当衬砌表面有沟槽或裂缝时，冲击器和传感器应位于沟槽或裂缝同侧，如图 T 0591-2 所示。

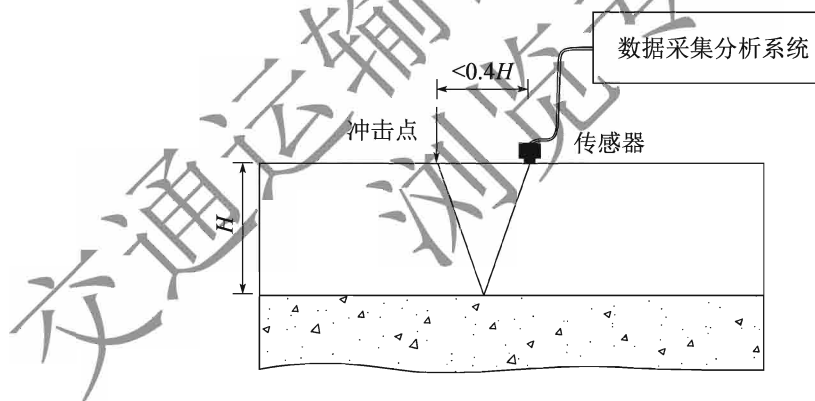


图 T 0591-2 单个接收传感器反射波测试混凝土波速示意图

(3) 测试时，应及时观察采集到的时域曲线波形的变动情况，接收的波形应全面完整，波幅大小应适宜，不应有削峰现象。当波形无法分辨时，应在同一测点重复测试或在其他测点重新测试；当所接收的信号较弱时，应更换大尺寸的弹击锤。

(4) 对获取的有效波形进行快速傅里叶变换 (FFT) 分析，获得频谱曲线，当出现与厚度值 H 对应的一个有效波形的频谱图中只有单一峰值频率时，读取该峰值频率 f ；当所得振幅谱图无明显峰值时，应查明原因或改变冲击器（锤）的规格重复测试。

3.2.3 采用单点式回波仪测试时，应按下列步骤开展测试：

(1) 在测区内采用均布法布置测点，不应少于 10 个测点，测点间距不应大于

0.5m，并标明测点编号和位置。

(2) 按本规程 T 0591 第 3.2.2 条步骤 (2) ~ (4) 及图 T 0591-3 进行测试。

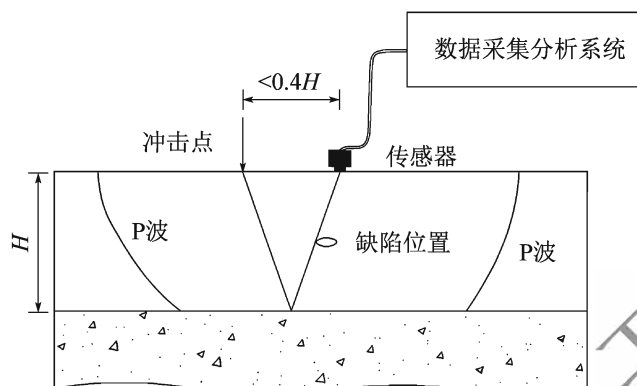


图 T 0591-3 冲击回波测试混凝土厚度和缺陷示意图

3.2.4 采用扫描式回波仪测试时，应按下列步骤开展测试：

(1) 采用连续法布置测线，纵向测线宜在拱顶、左右拱腰、左右边墙布置 5 条测线，大断面隧道应在拱腰部位增加布置 2 条测线，有仰拱地段每车道应增加布置 1 条测线，环向测线间距宜为 8 ~ 12m，并标明测线的间距和扫描方向。

(2) 扫描器应紧贴衬砌混凝土表面沿测线扫描方向匀速滚动，移动速度不宜大于 0.1m/s。当衬砌表面有沟槽或裂缝时，扫描方向宜平行于沟槽或裂缝。

3.2.5 当测试区域出现数据可疑的区域或测点时，应对其复测或加密测试；当仍不能确定时，可取芯验证。

条文说明

冲击器激振点与接收传感器拾振点间距为衬砌厚度的 0.4 倍时，横波对测点响应贡献较小，且激振点与拾振点的间距也不宜过小，过小的间距会使瑞利波对测点响应影响变大，信号难于解释。

4 数据处理

4.1 当测区衬砌厚度未知时，各测点表观波速与其平均值的差不超过平均值的 5% 时，取各测点测试的表观波速平均值作为待测衬砌混凝土表观波速值，衬砌混凝土表观波速可按式 (T 0591-1) 计算。

$$v_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k \frac{L}{\Delta t_i} \quad (\text{T 0591-1})$$

$$\Delta t_i = t_{i2} - t_{i1} \quad (\text{T 0591-2})$$

式中： v_p ——衬砌混凝土的表观波速 (m/s)；

- L ——两个接收传感器间的直线距离 (m)，一般情况 $L=0.3\text{m}$ ；
 Δt_i ——第 i 个测点的第一个和第二个传感器接收到直达波的初至时间差 (μs)；
 t_{i1} ——第 i 个测点的第一个传感器接收到直达波的初至时间 (μs)；
 t_{i2} ——第 i 个测点的第二个传感器接收到直达波的初至时间 (μs)；
 k ——衬砌横截面的几何形状系数，可取 0.96 或通过现场试验确定。

4.2 当测区衬砌厚度已知或能直接测量衬砌厚度时，各测点表观波速与平均值的差不超过平均值的 5%，取各测点测试的表观波速平均值作为待测衬砌混凝土表观波速值，衬砌混凝土表观波速可按式 (T 0591-3) 计算。

$$v_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 2Hf_i \quad (\text{T 0591-3})$$

式中： v_p ——衬砌混凝土表观波速 (m/s)；

H ——衬砌实际厚度或直接测量的厚度 (m)；

f ——第 i 个测点振幅谱中衬砌厚度 H 对应的频率值 (Hz)。

4.3 应以频域分析为主，对信号作快速傅里叶变换 (FFT) 分析，找出频谱图中衬砌设计厚度所对应的频率值，并根据钢筋直径、保护层厚度、管线布设、预埋件位置等情况综合分析，确定内部缺陷位置对应的频率值，应按式 (T 0591-4) 计算衬砌厚度、内部缺陷深度。

$$T = \frac{v_p}{2f} \text{ 或 } T_c = \frac{v_p}{2f_c} \quad (\text{T 0591-4})$$

式中： T ——衬砌厚度计算值 (m)；

T_c ——衬砌内部缺陷深度 (m)；

f_c ——测试部位内部缺陷在频谱图中对应的峰值频率 (Hz)。

4.4 应以时域分析为辅，当衬砌内部缺陷深度大于 0.2m 时，可对近冲击器 (锤) 通道作零偏移距分析，即点反射分析。按时域分析的形态、能量、相位等特征，识别厚度、内部缺陷等反射波到达时间，可采用数据处理分析系统进行时间或窗口选择、数字滤波、信号增益等处理。点反射时的界面厚度、内部缺陷深度按式 (T 0591-5) 计算。

$$T \text{ 或 } T_c = \frac{v_p \cdot t}{2} \quad (\text{T 0591-5})$$

式中： t ——反射波到达时间 (s)。

4.5 衬砌内部和背部密实状况判定方法应符合下列规定：

- (1) 充填片石、夹泥等异物：直达波形态畸变且表观波速较正常混凝土偏低。
- (2) 充填卵石、金属材料 and 构件等异物：直达波形态畸变且表观波速明显较正常混凝土偏高。

(3) 衬砌表面脱空：表观波速正常，直达波形严重畸变，有强低频信号叠加，频域分析的频谱图中衬砌厚度相应峰值频率难以辨认，且振幅也远低于高频峰值的振幅。

(4) 密实：时域分析反射波仅有单一的底部界面反射波出现，能量弱，不易识别，直达和反射波速度值在正常范围且差异不大；频域分析的频谱图中只有单峰形态且主频率峰值与厚度对应的主频率峰值相近，峰值频率与正常混凝土基本一致。

(5) 不密实：时域分析反射波在衬砌内部、背部的界面出现多个不规则反射波，厚度底面的反射界面波形有叠加现象，反射波能量较强，直达波观测速度偏低；频域分析的频谱图中有多个峰值频率出现，呈不对称双峰或多峰形态，结构和构件厚度相应峰值频率的振幅较高，但其值明显低于正常混凝土。

(6) 空洞：时域分析反射波在衬砌内部、背部的界面反射波能量强，且与首波同相位，甚至出现多次反射，直达和反射波速度值偏低；频域分析的频谱图中有多个峰值频率出现，衬砌厚度相应峰值频率的振幅较低，甚至难以辨认。

(7) 二次衬砌背后脱空：时域分析的动力响应时间明显长于无脱空区域，界面处的反射波能量强，且与直达波同相，甚至出现多次反射，直达和反射波速度值正常；频域分析的频谱图中得到多个峰值频率，局部呈对称双峰或多峰形态，结合面相应峰值频率的振幅相对较无脱空区域要高。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，如测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点及测线数量及位置。
- (3) 测试段落相对振幅平面成像图，不同深度的频谱分析幅值图，不密实的范围、程度，脱空或空洞的范围、深度等。

T 0592—2026 地质雷达测试衬砌背部密实性

1 适用范围

本方法适用于测试公路隧道衬砌内部和背部的不密实、空洞、脱空等。

2 仪器与材料技术要求

按本规程 T 0515 的技术要求选取仪器与材料。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

按照本规程 T 0532 规定的内容进行准备工作。

3.2 测试步骤

按照本规程 T 0515 规定的测试步骤开展现场测试。

4 数据处理

4.1 除按照本规程 T 0532 规定的有关内容执行外，尚应符合下列规定：

- (1) 应采用频率滤波、空间滤波等压制干扰波，突出有效反射波。
- (2) 应分析现场记录的干扰体造成的雷达波形异常，剔除干扰异常波形。
- (3) 宜对图像进行增强处理。

4.2 衬砌背部密实状况判定应符合下列规定：

- (1) 密实：反射信号弱，图像均匀且反射界面不明显。
- (2) 不密实：反射界面出现不连续的强反射，同相轴呈局部绕射弧形，波形分散，多次波明显且杂乱错位。
- (3) 空洞：反射界面反射信号强烈，三振相明显，两组信号时程差大，存在多次反射波，同相轴呈弧形或三角形。
- (4) 二次衬砌背部脱空：层间界面的反射波较强，出现有一定长度且清晰而连续的同相轴。

4.3 在数据处理图片上标注出衬砌背部不密实、空洞、二次衬砌背部脱空的类别及大小。

4.4 整理记录衬砌背部不密实、空洞、二次衬砌背部脱空的横断面位置、深度位置及大小。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

- (1) 测试基础信息，如测试时间、单位、人员、温度及设备。
- (2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点及测线数量及位置。
- (3) 测试段落地质雷达图谱，不密实的范围、程度，脱空或空洞的范围、深度等。

T 0593—2026 敲击法测试背部密实性

1 适用范围

本方法适用于测试公路隧道衬砌内部和背部的空洞、脱空。

条文说明

敲击法测试简单、方便、经济，同时可有效发现衬砌空洞、脱空等隐患，因此，一般采用此法进行衬砌空洞、脱空等的普查，或对怀疑有空洞、脱空的部位进行初步确认测试。

2 仪器与材料技术要求

(1) 车辆检查平台：宜采用高空作业车，平台应可在平面、垂直面上自由控制，升起高度不小于6m；检查平台应设置安全可靠的护栏。

(2) 检查槌：直径30mm的空心钢管，长度2~4.5m，一端焊接平头钢筋，一端焊接尖头钢筋。

(3) 钢卷尺或钢直尺：分度值不大于1mm。

(4) 其他：粉笔、记号笔、喷漆、头部矿灯、探照灯、对讲机、照相机、安全带等。

3 方法与步骤

3.1 准备工作

(1) 使用钢卷尺和喷漆补充完善测试段落的里程桩号，宜按整10m的形式标记。

(2) 按本规程T 0501的方法，确定敲击测试布线位置。

(3) 车辆检查平台就位，测试平台的稳定性。

条文说明

敲击测试一般布设5条测线：隧道拱顶、左右两侧拱腰、左右两侧水沟盖板上1.5m，沿隧道纵向一般按每段模筑混凝土设置两个测试断面，平均距离为5~6m。

3.2 测试步骤

(1) 车辆检查平台就位后，应按不大于2km/h的行驶速度行驶，待到达敲击检查

点附近后停稳车辆。

(2) 现场测试人员采用检查槌平头端敲击待检位置混凝土表面。

(3) 凭敲击声音辨别是否存在空洞，声音异常时在敲击点周围多次仔细敲击，确认空洞范围，并做好标记。

4 数据处理

(1) 敲击声音清脆，发出“铛、铛、铛”的声音，说明衬砌混凝土比较密实。

(2) 敲击声音沉闷，出现“咚、咚、咚”的声音，说明衬砌混凝土存在空洞或脱空。

5 报告

本方法报告应包含下列技术内容：

(1) 测试基础信息，包括测试时间、单位、人员及设备。

(2) 测试位置信息，包括测试段落里程桩号、测点及测线数量及位置。

(3) 测试段落不密实或空洞的位置、范围。

附录 A 测试参数与测试方法对应表

表 A 测试参数与测试方法对应表

序号	测试对象	测试参数	测试方法
1	隧道总体	行车道宽度	T 0511
		内轮廓宽度	T 0511、T 0522、T 0523、T 0524
		内轮廓高度	T 0522、T 0523、T 0524
		隧道偏位	T 0512
2	明洞浇筑	混凝土强度	T 0543、T 0544、T 0545
		混凝土厚度	T 0511、T 0532、T 0533
		墙面平整度	T 0535
3	明洞防水层	搭接长度	T 0511
		卷材向隧道暗洞延伸长度	T 0511
		卷材向基底的横向延伸长度	T 0511
		缝宽	T 0511
		焊缝密实性	T 0573
4	明洞回填	回填压实	T 0511
		每层回填层厚	T 0511
		坡度	T 0511
5	洞身开挖	拱部超挖	T 0521、T 0524
		边墙超挖	T 0521、T 0524
		仰拱、隧底超挖	T 0521、T 0524
6	喷射混凝土	喷射混凝土强度	T 0541、T 0542、T 0543
		喷层厚度	T 0531、T 0532、T 0533
		喷层与围岩接触状况	T 0592
7	锚杆	抗拔力	T 0551
		孔位	T 0511
		孔深	T 0511
		孔径	T 0511
		长度	T 0552
		锚固密实度	T 0552

续表 A

序号	测试对象	测试参数		测试方法
8	钢筋网	钢筋网喷射混凝土保护层厚度		T 0531、T 0534
		网格尺寸		T 0511
		搭接长度		T 0511
9	钢架	间距		T 0511、T 0515
		喷射混凝土保护层厚度		T 0531
		倾斜度		T 0513、T 0514
		拼装偏差		T 0511
		安装偏差		T 0511、T 0513
		连接钢筋间距		T 0511
10	仰拱	混凝土强度		T 0543
		厚度		T 0511、T 0533
		钢筋保护层厚度		T 0531、T 0534
11	仰拱回填	混凝土强度		T 0543
12	衬砌钢筋	主筋间距		T 0511
		两层钢筋间距		T 0511
		箍筋间距		T 0511
		钢筋长度		T 0511
		钢筋保护层厚度		T 0531、T 0534
13	混凝土衬砌	混凝土强度		T 0543、T 0544、T 0545
		衬砌厚度		T 0511、T 0532、T 0533
		墙面平整度		T 0535
		衬砌背部密实状况		T 0591、T 0592、T 0593
		钢筋保护层厚度		T 0531、T 0534
		外观质量缺陷		T 0581、T 0582
14	防水层	搭接长度		T 0511
		缝宽		T 0511
		固定点间距		T 0511
		密实性	焊点及粘点	T 0572
			焊缝	T 0573
		防水板搭接部位外观质量		T 0571
15	止水带	纵向偏离		T 0511
		偏离衬砌中线		T 0511
		固定点间距		T 0511
16	排水	混凝土强度		T 0543、T 0544
		断面尺寸或管径		T 0511

续表 A

序号	测试对象	测试参数	测试方法
16	排水	壁厚	T 0511
		基础厚度	T 0511
		排水沟缺陷	T 0561
17	超前锚杆	长度	T 0511、T 0552
		孔位	T 0511
		孔深	T 0511
		孔径	T 0511
18	超前小导管	长度	T 0511
		孔位	T 0511
		孔深	T 0511
		锚固密实度	T 0552
19	管棚	长度	T 0511
		孔位	T 0511
		孔深	T 0511

附录 B 现场测试记录表格

表 B-1 钢架间距现场测试记录表（尺量法）

检测单位名称：记录编号：

工程名称						
工程部位/用途						
样品信息						
现场测试日期				试验条件		
检测依据				判定依据		
主要仪器设备名称及编号						
隧道名称				幅别		
测点号	测点桩号	测点部位	设计间距（m）	实测间距（m）	差值（m）	备注
示意图						
附加声明：						

表 B-2 开挖轮廓尺寸现场测试记录表（全站仪法）

检测单位名称：

记录编号：

工程名称					
工程部位/用途					
样品信息					
现场测试日期		试验条件			
检测依据		判定依据			
主要仪器设备名称及编号					
隧道名称		幅别			
桩号	点号	偏中 (m)	高差 (m)	超 (+)、 欠 (-) (m)	备注
示意图					
附加声明：					

表 B-3 隧道喷射混凝土厚度现场测试记录表 (凿孔法)

检测单位名称:

记录编号:

工程名称					
工程部位/用途					
样品信息					
现场测试日期		试验条件			
检测依据		判定依据			
主要仪器设备名称及编号					
隧道名称		幅别		桩号	
				设计厚度 (m)	
测点部位	厚度 (m)	测点部位	厚度 (m)	测点部位	厚度 (m)
平均值 (m)			最小厚度 (m)		
合格率 (%)					
隧道名称		幅别		桩号	
				设计厚度 (m)	
测点部位	厚度 (m)	测点部位	厚度 (m)	测点部位	厚度 (m)
平均值 (m)			最小厚度 (m)		
合格率 (%)					
附加声明:					

检测:

记录:

复核:

日期:

年

月

日

表 B-4 隧道混凝土厚度、背部密实状况现场测试记录表（地质雷达法）

检测单位名称：

记录编号：

工程名称				
工程部位/用途				
样品信息				
现场测试日期		试验条件		
检测依据		判定依据		
主要仪器设备名称及编号				
介电常数标定	已知厚度 d (m)	双程时间 t (ns)	介电常数	介电常数平均值
采集参数	采样方式	天线频率 (Hz)	时窗长度 (ns)	扫描样点数
隧道名称	幅别	测线位置	起讫桩号	电子文件名
测线布置示意图				
电子文档存储名称及路径				
附加声明：				

检测：

记录：

复核：

日期：

年

月

日

表 B-5 隧道混凝土厚度现场测试记录表（钻芯法）

检测单位名称：

记录编号：

工程名称									
工程部位/用途									
样品信息									
现场测试日期				试验条件					
检测依据				判定依据					
主要仪器设备名称及编号									
隧道名称				幅别					
序号	取芯桩号	取芯部位	设计厚度 (m)	芯样厚度 (m)					
				测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	均值	偏差
附加声明：									

检测：

记录：

复核：

日期： 年 月 日

— 104 —

表 B-6 衬砌混凝土墙面平整度现场测试记录表

检测单位名称：

记录编号：

工程名称									
工程部位/用途									
样品信息									
现场测试日期					试验条件				
检测依据					判定依据				
主要仪器设备名称及编号									
隧道名称	幅别	起讫桩号	测点位置	设计要求	最大间隙 (mm)				
					第 1 尺	第 2 尺	第 3 尺	第 4 尺	第 5 尺
示意图									
附加声明：									

检测：

记录：

复核：

日期：

年

月

日

表 B-7 防水层焊缝气密性现场测试记录表（充气法）

检测单位名称：记录编号：

工程名称					
工程部位/用途					
样品信息					
现场测试日期		试验条件			
检测依据		判定依据			
主要仪器设备名称及编号					
隧道名称		幅别			
序号	桩号	焊缝位置	压力表读数 (MPa)		
			P_0	$P_{t=2}$	$P_{t=15}$
附加声明：					

表 B-8 隧道锚杆长度、锚固密实度现场测试记录表

检测单位名称：

记录编号：

工程名称							
工程部位/用途							
样品信息							
现场测试日期				试验条件			
检测依据				判定依据			
主要仪器设备名称及编号							
隧道名称			幅别		锚杆类型	标定波速 (m/s)	
序(编)号	检测桩号	检测部位		设计长度(m)	外露长度(m)	电子数据 文件名	
锚杆布置示意图							
存储文件名及路径							
附加声明：							

检测：

记录：

复核：

日期：

年

月

日

表 B-9 钢筋保护层厚度现场测试记录表 (钢筋探测仪法)

检测单位名称: _____ 记录编号: _____

工程名称											
工程部位/用途											
样品信息											
现场测试日期				试验条件							
检测依据				判定依据							
主要仪器设备名称及编号											
隧道名称	幅别	厚度 (mm)	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7		
桩号	检测结果	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7			
	单值										
	凿孔实测值 (mm)										
	修正量 (mm)										
	保护层厚度 (mm)										
	偏差 (mm)										
测点布置示意图											
附加声明:											

检测: _____ 记录: _____ 复核: _____ 日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。
- 3) 当引用本规程中的其他规定时，表述为“应符合本规程第×章的有关规定”、“应符合本规程第×.×节的有关规定”、“应符合本规程第×.×.×条的有关规定”或“应按本规程第×.×.×条的有关规定执行”。