

# JTG

中华人民共和国强制性行业标准

JTG 3340—2026

## 公路水泥混凝土路面设计规范

Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavement

2026-06-24 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《交通运输部关于下达 2016 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》（交公路函〔2016〕234 号）的要求，由中交公路规划设计院有限公司承担《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG D40—2011）（以下简称“原规范”）的修订工作。

本次修订按继承和发展相结合的原则，充分吸收了近年来水泥混凝土路面的科研成果、工程建设经验，广泛征求了业内有关单位和专家的意见，是对原《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG D40—2011）的全面修订。经批准后以《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTG 3340—2026）（以下简称“本规范”）颁布实施。

修订后的规范分 8 章和 3 个附录，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 设计标准、4 结构组合设计、5 材料性质要求和设计参数、6 接缝设计、7 混凝土面层配筋设计、8 加铺层结构设计，附录 A 交通荷载分析、附录 B 混凝土板应力分析及厚度计算、附录 C 连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算。

本次修订的主要内容为：

1. 提高了四级公路设计使用年限，增加了连续配筋混凝土面层顶部车辆荷载作用下横向疲劳拉应力设计指标及计算方法，增补了贫混凝土、碾压混凝土强度标准值和面层交工验收的初始横向力系数要求。

2. 强调了粒料层的缓冲协调变形及排水功能设置，修订了路基顶面回弹模量值要求和路基顶面验收弯沉值的计算方法。

3. 增加了按照三个水平确定路面材料设计参数值的规定，给出了材料参数试验方法与推荐值范围。

4. 优化了传力杆尺寸要求，修订了连续配筋混凝土面层配筋率极重交通荷载等级的推荐值。

5. 增加了板底脱空状况评定的分级标准，细化了加铺改建方案。

6. 改进了荷载应力和荷载疲劳应力、温度应力和温度疲劳应力计算式，增补了全国各公路区划 50 年一遇的最大温度梯度和疲劳温度梯度的限值及预估公式。

本规范由刘伯莹负责起草第 1、2、4 章，刘伯莹、谈至明、杨学良负责起草第 3 章，张翥负责起草第 5 章，杨学良负责起草第 6 章，张洪亮负责起草第 7 章，朱洪洲负责起草第 8 章，周玉民负责起草附录 A 及附录 B 条文说明算例，谈至明负责起草附录 B，张洪亮负责起草附录 C。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：杨学良（地址：北京市东城区朝阳门内大街 296 号，中交公路规划设计院有限公司；邮编：100010；电话：010-57507575），以便下次修订时参考。



**主 编 单 位：**中交公路规划设计院有限公司

**参 编 单 位：**中国交通建设集团有限公司

同济大学

山西交通科学研究院集团有限公司

重庆交通大学

长安大学

贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司

**主 编：**刘伯莹

**主要参编人员：**杨学良 谈至明 周玉民 张洪亮 朱洪洲 张 脩  
张越峰 周细威

**主 审：**王选仓

**参与审查人员：**于 光 李 华 田 波 梁军林 白琦峰 张志耕  
李连生 顾兴宇 申俊敏 周绪利 熊剑平

**参 加 人 员：**张艳聪 王威娜 从志敏 姚 尧 朱孔法

# 目 次

|          |                    |           |
|----------|--------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>总则</b>          | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>术语和符号</b>       | <b>4</b>  |
| 2.1      | 术语                 | 4         |
| 2.2      | 符号                 | 5         |
| <b>3</b> | <b>设计标准</b>        | <b>7</b>  |
| <b>4</b> | <b>结构组合设计</b>      | <b>15</b> |
| 4.1      | 一般规定               | 15        |
| 4.2      | 路基                 | 17        |
| 4.3      | 基层和底基层             | 20        |
| 4.4      | 面层                 | 23        |
| 4.5      | 功能层                | 27        |
| 4.6      | 路肩                 | 29        |
| 4.7      | 路面排水               | 29        |
| <b>5</b> | <b>材料性质要求和设计参数</b> | <b>31</b> |
| 5.1      | 一般规定               | 31        |
| 5.2      | 粒料类材料              | 31        |
| 5.3      | 无机结合料稳定类材料         | 33        |
| 5.4      | 沥青结合料类材料           | 35        |
| 5.5      | 水泥混凝土材料            | 36        |
| 5.6      | 钢筋                 | 39        |
| 5.7      | 各类材料的泊松比           | 39        |
| <b>6</b> | <b>接缝设计</b>        | <b>40</b> |
| 6.1      | 一般规定               | 40        |
| 6.2      | 纵向接缝               | 41        |
| 6.3      | 横向接缝               | 43        |
| 6.4      | 交叉口接缝布设            | 47        |
| 6.5      | 端部处理               | 48        |
| 6.6      | 填缝材料               | 52        |
| <b>7</b> | <b>混凝土面层配筋设计</b>   | <b>54</b> |
| 7.1      | 普通混凝土面层配筋          | 54        |

|      |                          |     |
|------|--------------------------|-----|
| 7.2  | 钢筋混凝土面层配筋·····           | 56  |
| 7.3  | 连续配筋混凝土面层配筋·····         | 57  |
| 8    | 加铺层结构设计·····             | 60  |
| 8.1  | 一般规定·····                | 60  |
| 8.2  | 路面损坏状况调查评定·····          | 61  |
| 8.3  | 接缝传荷能力和板底脱空状况调查评定·····   | 62  |
| 8.4  | 旧混凝土路面结构参数调查·····        | 64  |
| 8.5  | 加铺方案选择·····              | 66  |
| 8.6  | 沥青加铺层结构设计·····           | 69  |
| 8.7  | 分离式混凝土加铺层结构设计·····       | 71  |
| 8.8  | 结合式混凝土加铺层结构设计·····       | 73  |
| 8.9  | 旧沥青路面加铺水泥混凝土面层结构设计·····  | 74  |
| 附录 A | 交通荷载分析·····              | 76  |
| 附录 B | 混凝土板应力分析及厚度计算·····       | 82  |
| 附录 C | 连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算····· | 107 |
|      | 本规范用词用语说明·····           | 116 |

# 1 总则

**1.0.1** 为适应交通运输发展的需要，提高水泥混凝土路面的设计质量和使用性能，保证工程安全可靠、经济合理，制定本规范。

## 条文说明

《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)发布实施以来，我国水泥混凝土路面建设积累了许多设计和实际使用经验。一方面，国内外在交通荷载作用、环境因素影响、材料、结构、路基以及试验和检测技术等方面取得了不少研究成果，与水泥混凝土路面建设相关的新材料、新装备、新工艺、新技术不断涌现，为提高水泥混凝土路面设计质量奠定了基础。另一方面，随着我国经济社会的快速发展，人们对水泥混凝土路面的使用性能和品质提出了新的更高需求，成为水泥混凝土路面技术进步的内在驱动力。为反映近年来水泥混凝土路面设计的经验积累、技术进步和更高需求，提高水泥混凝土路面的设计水平、工程质量和使用品质，对原规范进行修订，以适应我国水泥混凝土路面建设不断发展的需要。

**1.0.2** 本规范适用于各等级新建、改扩建公路及其所属站场、服务设施的水泥混凝土路面设计。

## 条文说明

其他应用场合和各类专用公路的水泥混凝土路面新建和改建设计，依据该公路水泥混凝土路面的使用要求和特性，参考使用。

**1.0.3** 水泥混凝土路面应根据公路等级、路面使用性能要求和所需承担的交通荷载，结合当地气候、水文、地质、材料、建设和养护条件、工程实践经验及环境保护要求等，通过勘察、试验检测、计算分析、技术经济比选进行设计。

## 条文说明

水泥混凝土路面设计需要考虑的因素众多，包括公路等级(工程重要性)、路面使用性能要求(抗疲劳强度、表面抗滑性能、表面平整度、耐久性、降噪、排水等)、所需承担的交通荷载、当地的气候、路基状况、材料与结构等，以及施工条件、养护条

件、工程实践经验和环境保护的要求,需通过材料试验、结构计算、技术经济比选及全寿命周期费用分析,并考虑其他非经济因素后,确定路面合适的结构组合及各层厚度。改扩建公路还需对旧路进行检测评价,结合交通运输的发展需要,确定最佳设计方案。

**1.0.4** 水泥混凝土路面设计内容应包括结构组合设计、结构层厚度设计、材料组成设计、接缝构造设计、钢筋配置设计及路表功能设计等。

### 条文说明

水泥混凝土路面设计内容由以下部分组成:

(1) 交通荷载分析——根据项目所在区域交通量数据,划分交通荷载等级。确定设计使用年限内车道设计轴载累计作用次数,参见附录 A,作为结构组合设计与厚度计算的基本依据。

(2) 结构组合设计——按使用要求和当地条件,选择行车道和路肩的结构层类型和层次以及各结构层的组成材料类型和厚度,并选择、布设路面表面和内部排水设施,组合成初步拟定的路面结构。

(3) 结构层厚度设计——通过力学计算和损坏预估分析,对初拟路面结构进行验证和修正,使之满足预定的使用性能要求,由此确定各结构层和路面结构所需的设计厚度。

(4) 材料组成设计——依据各结构层的功能要求和力学性质要求,选择合适的组成材料,进行混合料组成设计和性质测试。

(5) 接缝构造设计——确定面层板块的平面尺寸,选择和布设接缝的类型和位置,设计接缝的构造(传荷装置和填封)。

(6) 钢筋配置设计——确定特殊部位、钢筋混凝土面层或连续配筋混凝土面层的配筋量和钢筋布置。

(7) 路表功能设计——确定抗滑、耐磨及降噪要求的路表技术指标。

**1.0.5** 膨胀土、黄土等特殊土及沙漠、冻土等特殊地区的水泥混凝土路面设计,除应符合本规范的相关规定外,尚宜结合当地经验,采取相应技术处治措施。

### 条文说明

在我国境内,分布有面积不等的膨胀土、黄土、盐渍土和沙漠、季节性冻土等特殊地区,这些地区的水文、地质、气候等具有特殊性。比如膨胀土遇水膨胀,承载力大大下降;黄土具有洞穴、湿陷的特点,遇水塌陷;盐渍土遇水盐分溶解,若渗入混凝土中,容易腐蚀埋设其中的钢筋;沙漠地区干旱缺水、昼夜温差大、多风少雨;多年冻土遇水、热等融冻,路基承载力大大下降。因此,在这些特殊地区设计水泥混凝土路面

时，建议充分考虑其特殊性，切实结合当地成熟经验，采取相应工程措施。

**1.0.6** 水泥混凝土路面结构应按规定的安全等级和目标可靠度要求，在设计使用年限内承受预期的交通荷载作用，适应所处的自然环境，满足预定的使用性能要求。

**1.0.7** 水泥混凝土路面设计除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 水泥混凝土路面 cement concrete pavement

以水泥混凝土作面层(配筋或不配筋)的路面。

#### 2.1.2 普通混凝土路面 jointed plain concrete pavement

除接缝区和局部范围外,面层内不配筋的水泥混凝土路面,亦称素混凝土路面。

#### 2.1.3 钢筋混凝土路面 jointed reinforced concrete pavement

面层内配置纵、横向钢筋或钢筋网并设接缝的水泥混凝土路面。

#### 2.1.4 连续配筋混凝土路面 continuously reinforced concrete pavement

面层内配置纵向连续钢筋和横向钢筋,横向不设缩缝的水泥混凝土路面。

#### 2.1.5 钢纤维混凝土路面 steel fiber reinforced concrete pavement

在混凝土面层中掺入钢纤维的水泥混凝土路面。

#### 2.1.6 复合式路面 composite pavement

面层由不同材料类型和力学性质的结构层复合而成的路面。

#### 2.1.7 水泥混凝土预制块路面 precast concrete block pavement

面层由水泥混凝土预制块铺砌成的路面。

#### 2.1.8 贫混凝土 lean concrete

由粗、细级配集料与一定水泥和水拌和而成的一种水泥用量较低的混凝土,也称为经济混凝土(economic concrete)。

#### 2.1.9 碾压混凝土 rolled and compacted concrete

采用碾压成型的干硬性水泥混凝土。

### 2.1.10 路面设计使用年限 design service life of pavement

在正常的设计、施工、使用和养护条件下，路面不需要结构性维修的预定年限，简称设计使用年限。

### 2.1.11 安全等级 safety grade

根据路面结构的重要性和破坏可能产生后果的严重程度而划分的设计等级。

### 2.1.12 可靠度 reliability

路面结构在规定时间内和规定条件下完成预定功能的概率。要求设计结构物达到的可靠度称作目标可靠度。

### 2.1.13 可靠指标 reliability index

度量路面结构可靠度的一种数量指标。要求设计结构物具有的可靠度指标称作目标可靠指标。

### 2.1.14 可靠度系数 reliability coefficient

为保证所设计的结构具有规定的可靠度，而在极限状态设计表达式中采用的单一综合系数。

## 2.2 符号

### 2.2.1 作用及作用效应

$N$ ——轴载的作用次数；

$P$ ——轴载；

$l$ ——弯沉值；

$\sigma$ ——应力；

$\varepsilon$ ——应变。

### 2.2.2 设计参数和计算系数

$C$ ——温度应力系数；

$T$ ——温度；

$t$ ——时间；

$c_v$ ——变异系数；

$\gamma_r$ ——可靠度系数；

$\rho$ ——配筋率。



### 2.2.3 几何参数

$A$ ——面积；

$L$ ——间距；

$b$ ——宽度；

$d$ ——直径、轮距；

$h$ ——结构层厚度。

### 2.2.4 材料性能

$D$ ——弯曲刚度；

$E$ ——弹性模量；

$f$ ——强度；

$r$ ——相对刚度半径；

$\alpha$ ——线膨胀系数；

$\nu$ ——泊松比。

交通运输部信息公开  
浏览专用

### 3 设计标准

3.0.1 各级公路水泥混凝土路面结构的安全等级应根据公路等级选用，各安全等级下路面结构的设计使用年限、目标可靠度与可靠指标应不低于表 3.0.1 的规定。

表 3.0.1 可靠度设计标准

| 公路等级      | 高速公路 | 一级公路 | 二级公路 | 三级公路 | 四级公路 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 安全等级      | 一级   |      | 二级   | 三级   |      |
| 设计使用年限(a) | 30   |      | 20   | 15   |      |
| 目标可靠度(%)  | 95   | 90   | 85   | 80   | 70   |
| 目标可靠指标β   | 1.65 | 1.28 | 1.04 | 0.84 | 0.52 |

#### 条文说明

《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)规定的公路工程结构的设计安全等级为三个等级，根据结构破坏可能产生的后果的严重程度划分，一级为破坏后果很严重、二级为严重、三级为不严重。路面工程的安全等级仅考虑高速、一级和二级公路的路面，相应的安全等级要求规定为一级、二级和三级。为使本规范适用范围内的路面都能应用可靠度设计统一标准，本规范对《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)的规定作了调整，将一级公路路面的安全等级提升为一级，二级公路路面的安全等级提升为二级，三级和四级公路路面的安全等级列为三级，并相应地调整了路面结构的目标可靠指标和目标可靠度。

考虑到公路的地位和功能，二级及二级以下公路根据结构破坏可能产生的很严重后果，如具有政治、经济、国防或抢险救灾等作用，或其结构损坏危及人的生命、造成经济损失、对社会和环境产生影响等，可以提高一级设计安全等级。

此次修订三级公路的设计使用年限保持不变，依然为 15 年，根据调研成果，考虑到四级公路在低等级农村公路中的实际使用寿命及功能要求，将其设计使用年限提高到与三级公路一致。

目标可靠度是所设计路面结构所具有的可靠度水平。它的选取是一个工程经济问题：目标可靠度定得较高，则所设计的路面结构较厚，初期修建费用较高，但使用期间的养护费用和车辆运行费用较低；目标可靠度定得较低，初期修建费用可以降低，但养护费用和车辆运行费用需提高。通常采用“校准法”来确定目标可靠度。“校准法”是对按

现行设计规范或设计方法设计的已有路面进行隐含可靠度的分析，参照隐含可靠度制定目标可靠度，则所设计的路面结构接纳了以往的工程设计和使用经验，包含了与原有设计方法相等的可接受性和经济合理性。本规范的目标可靠度，是在分析了 30 余条已建公路混凝土路面的隐含可靠度，并结合国外的分析数据和沥青路面的隐含可靠度后制定的。

3.0.2 路面的材料性能和结构尺寸参数的变异水平可分为低、中和高三级，相应的变异系数应符合表 3.0.2 的规定。安全等级为一级时的变异水平等级宜为低级，安全等级为二级时的变异水平等级应不大于中级。

表 3.0.2 变异系数  $c_v$  的范围

| 变异水平等级              | 低            | 中            | 高            |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| 水泥混凝土弯拉强度 $f_{c,r}$ | [0.05, 0.10] | (0.10, 0.15] | (0.15, 0.20] |
| 基层顶面当量回弹模量 $E_t$    | [0.15, 0.25] | (0.25, 0.35] | (0.35, 0.55] |
| 水泥混凝土面层厚度 $h_c$     | [0.02, 0.04] | (0.04, 0.06] | (0.06, 0.08] |

条文说明

材料性能和结构尺寸参数的变异水平等级，按施工技术、施工质量控制和管理水平分为低、中、高三级。由滑模或轨道式机械化施工，并严格按规范和操作规程等进行施工质量控制和管理的工程，选用低变异水平等级；由滑模机械化施工，但施工质量控制和管理水平较弱的工程，或者采用小型机具施工，而施工质量控制严格和管理规范的工程，选用中低变异水平等级；采用小型机具施工，施工质量控制和管理水平较弱的工程，选用高变异水平等级。

各变异水平等级主要设计参数的变异系数变化范围，系依据代表性路段上采集的实际数据，经统计分析整理后提出的。这些路段的技术等级包括高速、一级和二级公路，施工方法包括机械化和小型机具，因而所提出的变化范围大体上代表我国公路混凝土路面施工技术及质量控制和管理的已有(可达到)水平。

按选定的变异等级进行设计，设计文件需提示施工时采取相应的质量控制和管理措施，以保证主要设计参数的变异系数符合表 3.0.2 中相应等级的规定。

3.0.3 水泥混凝土路面结构宜采用弹性地基板理论分析，根据路面结构组合和路基状况，简化为弹性地基单层板或双层板模型进行荷载应力和温度应力分析计算。

条文说明

路面结构分析有多层弹性层状体系理论、弹性地基板理论和弹性地基上固体理论等。对水泥混凝土路面而言，多层弹性层状体系理论仅适用于板中受荷的情形，板边、板角受荷时不适用；弹性地基上固体理论较为符合实际，但难于获得解析解，需要

采用有限元法、边界元法等数值方法求解。考虑到混凝土面层为有限尺寸的板块，其刚度(弹性模量)远大于面层下的结构层刚度，故而水泥混凝土路面结构分析推荐采用弹性地基板(薄板、中厚板)理论。

**3.0.4** 水泥混凝土路面结构设计应以面层板在设计使用年限内，在行车荷载和温度梯度综合作用下，不产生疲劳断裂作为设计标准；并以最重轴载和最大温度梯度综合作用下，不产生极限断裂作为验算标准。其极限状态表达式可分别采用式(3.0.4-1)和式(3.0.4-2)。

$$\gamma_r(\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) \leq f_{c,r} \quad (3.0.4-1)$$

$$\gamma_r(\sigma_{c,p,max} + \sigma_{c,t,max}) \leq f_{c,r} \quad (3.0.4-2)$$

式中： $\sigma_{c,pr}$ ——面层板在临界荷位处产生的车辆荷载疲劳应力(MPa)，计算方法见本规范附录 B；

$\sigma_{c,tr}$ ——面层板在临界荷位处产生的温度疲劳应力(MPa)，计算方法见本规范附录 B；

$\sigma_{c,p,max}$ ——最重轴载在临界荷位处产生的最大荷载应力(MPa)，计算方法见本规范附录 B；

$\sigma_{c,t,max}$ ——所在地区最大温度梯度在临界荷位处产生的最大温度翘曲应力(MPa)，计算方法见本规范附录 B；

$f_{c,r}$ ——水泥混凝土弯拉强度标准值(MPa)；

$\gamma_r$ ——可靠度系数，按式(3.0.4-3)计算；

$$\gamma_r = 1 + \psi_1 + \psi_2 \quad (3.0.4-3)$$

$\psi_1$ ——材料与结构参数变异水平影响系数，按表 3.0.4 取值；

$\psi_2$ ——材料参数确定水平的影响系数，水平一取 0，水平二取 0.05，水平三取 0.10。

**表 3.0.4 材料与结构参数变异水平影响系数**

| 变异水平等级 | 目标可靠度(%) |      |      |         |
|--------|----------|------|------|---------|
|        | 95       | 90   | 85   | 80 ~ 70 |
| 低      | 0.18     | 0.12 | 0.08 | 0.05    |
| 中      | 0.26     | 0.18 | 0.12 | 0.07    |
| 高      | 0.36     | 0.25 | 0.17 | 0.09    |

## 条文说明

按本规范设计的路面结构可以在设计使用年限内经受住行车荷载(以设计轴载表征)和温度梯度的综合疲劳作用。但轴载谱中存在一些特重轴载，在最重轴载和最大温

度梯度的综合作用下,有可能产生超出混凝土弯拉强度的极限断裂破坏。极限断裂破坏的验算作为一项验核标准,便是为了控制少数超重轴载对面层板的断裂破坏作用。

本次规范修订水泥混凝土路面结构可靠度系数 $\gamma_r$ 时有所调整,其内涵从原规范考虑结构重要性和施工变异性两个因素,扩展至计入路面材料参数确定水平的影响。

对于允许带裂缝工作的钢纤维混凝土路面,在控制最重轴载与最大温度梯度综合作用下不产生极限断裂时,式(3.0.4-2)中的水泥混凝土弯拉强度标准值 $f_{c,r}$ 改为 $(1 + R_{e,300})f_{f,c,r}$ ,其中, $f_{f,c,r}$ 、 $R_{e,300}$ 分别为钢纤维混凝土初裂强度、裂后弯曲韧性比。

**3.0.5** 贫混凝土或碾压混凝土基层应以设计使用年限内行车荷载不产生疲劳断裂作为设计标准。其极限状态设计表达式可采用式(3.0.5)。

$$\gamma_r \sigma_{b,pr} \leq f_{b,r} \quad (3.0.5)$$

式中: $\sigma_{b,pr}$ ——基层内产生的行车荷载疲劳应力(MPa),计算方法见本规范附录B;

$f_{b,r}$ ——基层材料的弯拉强度标准值(MPa),按表3.0.9取值。

#### 条文说明

贫混凝土或碾压混凝土基层弯曲刚度较大,会产生较大的层底拉应力,需要进行应力分析,以确定合适的层厚或所需的强度。在与混凝土面层组合成分离式双层板进行结构分析时,因基层经受的温度梯度较小,相应的温度翘曲应力可以忽略不计,因此,极限状态设计表达式中删除了温度梯度疲劳应力部分。

**3.0.6** 连续配筋混凝土应以纵向钢筋处的横向裂缝缝隙宽度和设计使用年限内横向裂缝密集区不产生行车荷载纵向疲劳断裂作为验算标准。其极限状态表达式可采用式(3.0.6)。

$$\begin{cases} b_j \leq 0.5 \text{ mm} \\ \gamma_r \sigma_{c,pr} \leq f_{c,r} \end{cases} \quad (3.0.6)$$

式中: $b_j$ ——纵向钢筋埋置深度处的横向裂缝缝隙平均宽度(mm),计算方法见本规范附录C;

$\sigma_{c,pr}$ ——混凝土面层顶部车辆荷载产生的疲劳拉应力(MPa),计算方法见本规范附录C。

#### 条文说明

连续配筋混凝土面层的纵向钢筋配筋率设计,主要考虑横向裂缝密集区在行车荷载作用下不产生纵向疲劳断裂,同时兼顾对裂缝缝隙宽度的控制。当横向裂缝密集区发生纵向疲劳断裂时,即形成冲断。冲断指由两个间距很小(一般小于0.6m)的横向裂缝、短的纵向裂缝和路面边缘(或纵向接缝)所围成的区域及出现剥落、破碎等严重病害的

Y形裂缝。本次规范修订单列出了连续配筋混凝土路面设计的两个准则，适用于连续配筋混凝土面层或复合式路面的连续配筋混凝土下面层。

冲断是连续配筋混凝土最主要的破坏形式，严重影响路面的平整度和使用寿命。连续配筋混凝土在使用前期，由于混凝土的干缩和温缩所产生的细微横向裂缝并不会降低路面的服务水平。随着连续配筋混凝土使用年限的增加，在车辆荷载以及环境因素的作用下，横向裂缝数量增多、间距变小，裂缝缝隙宽度增大，裂缝处的传荷系数降低，甚至会出现板底脱空现象，进而造成板顶的横向拉应力增大。在车辆荷载的反复作用下，混凝土的弯拉疲劳强度降低。当板顶的横向拉应力大于板的弯拉疲劳强度时，会出现垂直于横向裂缝的疲劳开裂，并向对向的横向裂缝延展而形成纵向裂缝，标志着冲断的产生。增加配筋量，可以减小裂缝缝隙宽度，提高裂缝处的传荷能力，进而减少冲断。

原规范试图通过控制横向裂缝缝隙宽度、横向裂缝间距、横向裂缝处钢筋所承受的拉应力来控制冲断。但国内外调查表明，冲断一般出现在裂缝间距较小的位置，大约90%的冲断出现在密集的横向裂缝区域，即横向裂缝间距为0.3~0.6m时。冲断与平均裂缝间距之间没有明显的相关性，故舍弃原规范的设计指标。

在密集的横向裂缝之间形成纵向裂缝，是冲断形成的必要条件。本规范假设横向裂缝间距为0.3m，计算连续配筋混凝土顶部的最大横向拉应力，控制其在路面设计使用年限内小于混凝土的弯拉疲劳强度，这样可以有效预防纵向裂缝的产生。当两个横向裂缝间距较大、裂缝缝隙宽度较大时，裂缝处传荷系数降低，裂缝处出现剥落，也可能产生冲断。因此，将平均裂缝间距对应的裂缝缝隙宽度也作为一项设计指标。

**3.0.7** 按疲劳断裂设计标准进行结构分析时，宜取100kN单轴-双轮组荷载作为设计轴载，对于极重交通荷载等级的水泥混凝土路面，可选用货车中主导车型的轴载作为设计轴载。各级轴载作用次数 $N_i$ 按式(3.0.7)换算为设计轴载的作用次数 $N_s$ 。

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_i \left( \frac{P_i}{P_s} \right)^{16} \quad (3.0.7)$$

式中： $P_i$ ——第 $i$ 级轴载重(kN)，多联轴按每根轴重独立计算；

$P_s$ ——设计轴载重(kN)；

$n$ ——各种轴型的轴载级位数；

$N_i$ —— $i$ 级轴载的作用次数；

$N_s$ ——设计轴载的作用次数。

### 条文说明

轴载换算公式[式(3.0.7)]是以疲劳损伤等效原则推导出的。由于水泥混凝土路面的疲劳损伤量对轴重很敏感，为减小轴载换算带来的误差，对于一些行驶特重轴载车辆或特种车辆的公路，建议选取货车中主导车型的轴载作为设计轴载。

多联轴驶过混凝土面层板时，临界荷位处会产生多次应力峰值，相邻轴引起负弯

矩, 应力峰值要比单轴作用时降低 7% ~ 17%。根据轴载调查发现, 多联轴各根轴之间的轴重差异较大。双联轴的前轴重与平均轴重之比平均为 1.03; 三联联轴的前轴重与平均轴重之比平均为 1.05。综合这两方面因素, 为了简化计算, 对多联轴的轴载换算作偏保守的处理, 忽略邻轴的影响(应力降低作用), 双联轴按 2 次单轴计, 三联联轴按 3 次单轴计, 从而避免考虑多联轴的轴重不均匀问题, 并可以直接利用称重站的轴载数据。

**3.0.8** 水泥混凝土路面设计车道在设计使用年限内所承受的设计轴载累计作用次数应按本规范附录 A 进行调查和分析, 按设计使用年限内设计车道临界荷位处所承受的 100kN 单轴-双轮组荷载累计作用次数分为 5 级, 交通荷载等级应按表 3.0.8 确定。

表 3.0.8 交通荷载分级

| 交通荷载等级                           | 极重               | 特重                        | 重               | 中等           | 轻    |
|----------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|--------------|------|
| 100kN 单轴-双轮组荷载累计作用次数 $N_e(10^4)$ | $>1 \times 10^6$ | $1 \times 10^6 \sim 2000$ | $2000 \sim 100$ | $100 \sim 3$ | $<3$ |

#### 条文说明

选用货车中主导车型的轴载作为设计轴载时, 交通荷载等级仍按 100kN 单轴-双轮组荷载累计作用次数确定。

**3.0.9** 水泥混凝土、钢纤维混凝土、贫混凝土、碾压混凝土的设计强度应采用 28d 龄期的弯拉强度, 其标准值应不低于表 3.0.9 的规定值。

表 3.0.9 水泥混凝土、钢纤维混凝土、贫混凝土、碾压混凝土的弯拉强度标准值 (MPa)

| 交通荷载等级     | 极重、特重、重 | 中等  | 轻   |
|------------|---------|-----|-----|
| 水泥混凝土      | 5.0     | 4.5 | 4.0 |
| 钢纤维混凝土     | 6.0     | 5.5 | 5.0 |
| 贫混凝土、碾压混凝土 | 2.5     | 2.0 | —   |

#### 条文说明

本次修订增补贫混凝土、碾压混凝土 28d 龄期的弯拉强度标准值, 用于贫混凝土、碾压混凝土作为基层时疲劳开裂破坏的控制。当碾压混凝土用作低等级公路的面层时, 其弯拉强度标准值建议不低于 3.5MPa。

**3.0.10** 在季节性冻土地区, 路面结构层的总厚度应不小于表 3.0.10 规定的最小防冻厚度。若路面结构层总厚度小于最小防冻厚度, 应增设防冻层, 使其满足最小防冻厚度的要求。

表 3.0.10 最小防冻厚度 (m)

| 路基干湿类型 | 路基土类别  | 当地最大冰冻深度 (m) |             |             |             |
|--------|--------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|        |        | 0.50 ~ 1.00  | 1.00 ~ 1.50 | 1.50 ~ 2.00 | > 2.00      |
| 中湿路基   | 冻胀土 I  | 0.30 ~ 0.50  | 0.40 ~ 0.60 | 0.50 ~ 0.70 | 0.60 ~ 0.95 |
|        | 冻胀土 II | 0.40 ~ 0.60  | 0.50 ~ 0.70 | 0.60 ~ 0.85 | 0.70 ~ 1.10 |
| 潮湿路基   | 冻胀土 I  | 0.40 ~ 0.60  | 0.50 ~ 0.70 | 0.60 ~ 0.90 | 0.75 ~ 1.20 |
|        | 冻胀土 II | 0.45 ~ 0.70  | 0.55 ~ 0.80 | 0.70 ~ 1.00 | 0.80 ~ 1.30 |

注：1. 当地最大冰冻深度，通过收集当地气象站不少于 10 年的年最大冻深数据，按最大值采用。

2. 冻胀土 I ——细粒土质砾 (GM、GC)，除极细粉土质砂外的细粒土质砂 (SM、SC)，塑性指数小于 12 的黏质土 (CL、CH)。

3. 冻胀土 II ——粉质土 (ML、MH)，极细粉土质砂 (SM)，塑性指数大于 12 小于 22 的黏质土 (CL)。

4. 冻深小或填方路段，或者防冻层采用隔温性能良好的材料，可采用低值；冻深大或挖方及地下水位高的路段，或者防冻层采用隔温性能稍差的材料，应采用高值。

5. 冻深小于 0.50m 的地区，可不考虑结构层防冻厚度。

### 条文说明

路基干湿类型划分，参见现行《公路路基设计规范》(JTG D30)。对于季节性冻土地区，路面冻胀病害时有发生，原因在于冬季气温下降，路基上层土体开始冻结，路基下部土体温度仍然较高，水分在土体内由温度较高处向温度较低处移动，使得路基上层土体水分增多并随温度降低冻结成冰，形成冰透镜体，体积膨胀致使路面发生胀起病害。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) 对中冻区和重冻区路基填料进行了规定，提出了季节性冻土地区路基容许总冻胀量要求。由于季节性冻土地区冰冻线深度差异较大，当道路多年最大冻深较大时，路基总冻胀量可能超出限值要求，特别是对于低等级公路。此时除改善路基土防冻性能外，要求路面结构层厚度满足最小防冻厚度的要求。季节性冰冻地区的干燥路基，由于路基工作区处于地下水毛细润湿面之上，因而可以不必考虑路面结构层最小防冻厚度要求。

当地最大冰冻深度与气象观测标准术语一致，数据可以直接从当地气象站获取，避免了通过当地标准冻深再考虑路基路面材料热物性、路基湿度、路基断面形式求取道路多年最大冻深。

表 3.0.10 的最小防冻厚度是根据防止冻胀病害发生确定的，在春季升温较快的地区，此最小防冻厚度对防止春融病害可能是不足的。因此，在春融多发地区建议根据当地经验适当增加防冻层的厚度。

**3.0.11** 路面表面的抗滑性能应满足行车安全要求，交工验收的初始构造深度及横向力系数应符合表 3.0.11 的规定。



表 3.0.11 公路混凝土面层抗滑性能要求

| 路段   | 高速公路、一级公路      |           | 二、三、四级公路       |           |
|------|----------------|-----------|----------------|-----------|
|      | 构造深度 $TD$ (mm) | 横向力系数 SFC | 构造深度 $TD$ (mm) | 横向力系数 SFC |
| 一般路段 | 0.70 ~ 1.10    | $\geq 50$ | 0.50 ~ 1.00    | —         |
| 特殊路段 | 0.80 ~ 1.20    | $\geq 55$ | 0.60 ~ 1.10    | $\geq 50$ |

注：高速和一级公路特殊路段包括立交匝道、平交口、弯道、变速车道、组合坡度不小于 3% 坡度段、桥面、隧道路面及收费站广场等处；其他公路特殊路段包括超高路段、组合坡度大于或等于 4% 坡度段、交叉口路段、桥面及其上下坡段、隧道路面及集镇附近路段等处。

### 条文说明

水泥混凝土路表可以采用拉毛、拉槽、压槽或刻槽等方法筑作表面构造，确保交工验收时表面抗滑性能指标满足要求。刻槽、拉槽等仅是提高宏观构造深度的措施，对于微观构造深度，更强调水泥混凝土路面在施工养生后未刻槽前的抗滑性能，为此需注重上层混凝土材料的选用，本次修订增补了交工验收时初始横向力系数的要求。

对于特长隧道水泥混凝土路面抗滑性能下降较快的问题，除做好材料的选择、严格要求施工及养生外，近年也有尝试露石混凝土的工程应用，相关要求见本规范第 4.4.7 条。

### 3.0.12 路基顶面回弹模量应符合表 3.0.12 的规定。

表 3.0.12 路基顶面回弹模量最小值

| 交通荷载等级     | 极重 | 特重 | 重  | 中、轻 |
|------------|----|----|----|-----|
| 回弹模量 (MPa) | 70 | 60 | 50 | 40  |

### 条文说明

本次修订明确了以平衡湿度状态下路基顶面动态回弹模量  $E_0$  为设计参数。根据路基设计规范推荐的标准状态下各类路基土动态回弹模量  $M_R$  参考值，考虑湿度及干湿循环或冻融循环调整系数，并经过结构组合验算核定后，确定表 3.0.12 的回弹模量分级要求。调整后的模量分级要求与《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 一致。

## 4 结构组合设计

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 水泥混凝土路面应依据公路等级、交通荷载、路基条件、当地温度和湿度状况、材料来源、使用性能要求，并结合地方经验进行结构组合设计。

#### 条文说明

路面结构是由多个层次组成的复合结构，各个结构层由不同类型和性质的材料组成。结构设计首先要选择层次、各层的类型和材料性质以及各层的厚度，组合成预期能满足使用性能要求的路面结构。选择和组合时主要考虑：

(1)公路等级和交通荷载——公路等级高或交通荷载等级高的路面结构需选用较多的结构层次及较强和较厚的结构层；反之，低等级公路或轻交通荷载的路面结构可以选用较少的结构层次及较弱和较薄的结构层。

(2)路基条件——对于较弱的路基，首先采取改善路基的措施，在满足规定的最低支承要求后再考虑路面结构；对于较强的路基，可以相应减少路面结构层的强度或厚度。

(3)当地温度和湿度状况——在季节性冻土地区，需考虑防冻层最小厚度的要求；在多雨潮湿地区，需考虑采用路面结构内部排水措施等。

(4)材料来源——结构层材料首选当地适宜的材料，避免超远距离大规模外运。对于改扩建项目，破除的旧路面尽可能再生利用，减少废弃。

(5)使用性能要求——水泥混凝土路面的使用性能要求包含结构性要求和功能性要求两个方面。混凝土路面结构设计，主要考虑满足结构性使用性能方面的要求，同时通过采用结构性措施(如接缝设置传力杆等)兼顾对平整度的要求。结构性要求主要体现为对结构承载能力和结构完好程度(损坏)的要求，而水泥混凝土路面的结构损坏主要有混凝土板块断裂和接缝错台两类。

(6)地方经验——包括了路基建造、结构层组合、材料选择、施工工艺等从设计到施工及管养各方面已有的使用经验，进行路面结构设计前需进行充分地调研。

**4.1.2** 路面结构可由面层、基层、底基层及必要的功能层组合而成，各结构层应满足相应的结构性能和功能要求。

## 条文说明

水泥路面结构由面层(板)、基层(上基层、下基层)、底基层和必要的功能层组合而成,功能层包括沥青夹层、防冻层、排水层等。各个结构层可以由不同类型和性质的材料组成,各具不同的力学特性。路面结构对各个结构层次有不同的结构性能和功能要求,为各个结构层所选择的组成材料需满足相应层位的要求。

本次修订保持与《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)一致,取消了垫层的概念,相应的层位按功能区分,统一归入功能层。为提高路床性能而在路床厚度范围内所做的各种措施,如采用低剂量无机结合料改良等,仍属于路基范畴。

**4.1.3** 结构组合应充分考虑各结构层之间的相互作用、层间结合条件和要求,保证结构组合的协调与平衡。

## 条文说明

选择和组合结构层时,需考虑结构层上下层次的相互作用以及层间结合条件和要求,如:

(1)上下层的刚度(模量)比,是否会引起上层底面产生过大的拉应力,是否会使混凝土面层产生过大的温度和湿度翘曲应力。

(2)无结合料的上层和其下层的集料粒径和级配,是否会引起水或细粒土的渗漏。

(3)下面层次的透水性,是否会引起渗入水的积滞和下层表面的冲刷。

(4)层次间采取结合或隔离措施,对层内应力状况的不同影响以及对缩缝的及早开裂和缝隙张开宽度的影响等等。

路面结构是个多层体系,整个结构的性能和寿命受制于系统内最薄弱的环节(层次)。因而,在考虑并合理处理上下层次的相互作用的同时,还需要顾及整个路面结构体系中各组成部分(层)性能的协调,以能提供平衡的路面结构组合。

**4.1.4** 结构组合应充分考虑地表水的渗入和冲刷作用,采取封堵和疏排措施,减少地表水入渗,防止渗入水积滞在路面结构内。

## 条文说明

路表水会沿面层板的接缝和裂缝渗入路面结构内,造成冲刷、唧泥、错台和板块断裂等损坏。除了采取路表排水、接缝填封或设置沥青类封层等措施以减少水的渗入外,组合设计时,还需考虑采取各种疏导和排除措施,防止渗入水积滞在路面结构内,如:

(1)路肩结构建议含透水性层次,以便横向排除路面结构内的渗入水。

(2)设置内部排水系统,如排水基层排水系统或路面边缘排水系统等。

(3)为减少面层底面脱空区内的积滞水对基层顶面的冲刷,建议选用抗冲刷能力强的材料做基层。

4.1.5 路面结构计算分析应按本规范附录 B 进行。

## 4.2 路基

4.2.1 路基应稳定、密实、均质，对路面结构提供均匀的支承，应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30)的有关规定。

### 条文说明

通过混凝土路面结构传到路床顶面的荷载应力很小，因而，对路基承载能力的要求并不高。但路基出现不均匀变形时，混凝土面层与下卧层之间会出现局部脱空，面层应力会由此增加而导致面层板的断裂。因此，对路基的基本要求是提供均匀的支承，即路基在环境和荷载作用下产生的不均匀变形要小。大量的调研表明水泥混凝土路面早期损坏或运营过程中的损坏基本由路基的不均匀沉降引起，特别是在软土、湿陷性黄土路段、高填方路段、细粒土填筑的路段。路基不均匀变形的主要来源为：

- (1) 膨胀性土(包括高液限细粒土)的不均匀收缩和膨胀变形。
  - (2) 软弱地基的不均匀沉降。
  - (3) 填挖交替或新老填土交替。
  - (4) 季节性冻土地区的不均匀冻胀。
  - (5) 排水不良的土质路堑、受水易于软化的软质岩路堑。
  - (6) 填料和填筑方式所导致的不均质。
  - (7) 填土因压实不足或不均匀而产生的压密变形，受湿度变化影响而产生的膨胀和收缩变形。
  - (8) 路表渗入水积滞在路面结构内，或者地表排水不畅，浸湿路基。
- 为控制路基的不均匀变形，建议在地基、填料、压实和排水等方面采取相应的措施。

4.2.2 路床填料应满足相应 CBR 强度及粒径等要求，对软土、湿陷性黄土、高填方等路段的路床宜选择耐风化、受水不易软化的粗粒土或稳定土。

### 条文说明

为增加路基稳定性，协调路面板与路基变形，减少不均匀沉降带来的基层脱空、面板纵向裂缝等病害，上述路段的路床材料性能需加强。受水易于软化、崩解的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、页岩等不建议用作路床填料。

4.2.3 新建道路路基宜采用落锤式弯沉仪进行验收，落锤式弯沉仪荷载为 50kN，荷载盘半径应为 150mm，路段内实测路基顶面弯沉代表值  $l_0$  应符合式(4.2.3-1)的要求，并按式(4.2.3-2)计算。路基顶面验收弯沉值  $l_g$  应按式(4.2.3-3)进行计算。

$$l_0 \leq l_g \quad (4.2.3-1)$$

$$l_0 = \bar{l}_0 + \beta \cdot s \quad (4.2.3-2)$$

$$l_g = \frac{168pr}{K_1 E'_0} \quad (4.2.3-3)$$

式中： $l_0$ 、 $\bar{l}_0$ ——路段内实测路基顶面弯沉代表值、平均值(0.01mm)；

$s$ ——路段内实测路基顶面弯沉标准差(0.01mm)；

$\beta$ ——目标可靠指标，根据公路等级按表 3.0.1 取值；

$E'_0$ ——交工验收状态下路基顶面回弹模量(MPa)，可按标准状态下的路基回弹模量值  $M_R$  取用；

$p$ ——落锤式弯沉仪承载板施加荷载(MPa)；

$r$ ——落锤式弯沉仪承载板半径(mm)， $r=150\text{mm}$ ；

$K_1$ ——季节影响系数，根据当地经验确定。当缺少经验时，可按 1.1 ~ 1.3 选用。

### 条文说明

路基是路面结构的基础。路面结构施工前需对路基进行验收，确保达到路面结构所要求的支承条件。新建路基顶面采用落锤式弯沉仪(FWD)进行验收，其量测的弯沉值意义和计算与本规范动态参数体系是一致的。对已建成的路基进行现场检测表明，路面中心区域下路基湿度的变化在建成后 2 ~ 5 年内才将逐渐趋于稳定的“波动”范围，即达到平衡湿度状况，因此交工验收弯沉值的计算不能使用平衡湿度状态下的模量  $E_0$  (通常还未达到)，而需使用交工验收状态下的模量  $E'_0$ ，或使用路基在最佳含水量条件下压实成型的模量，这个模量与标准试验下试件的模量相近，可以按  $M_R$  取用，即  $l_g = \frac{168pr}{M_R}$ 。

弯沉检测受检测时短时期内的路基土状态影响很大，即使已达到所谓的“平衡湿度”，其在短时间内也是波动的。为保证平衡湿度下的回弹模量满足设计要求，检测需在最不利季节进行，但实际检测通常在良好状态，因此实测路基顶面弯沉值需考虑季节修正， $l_g = \frac{168pr}{K_1 M_R}$ ，按各地经验， $K_1$  一般为 1.1 ~ 1.3。

路基填料在平衡湿度状态下的模量  $E_0$  与标准状态下模量  $M_R$  的关系为： $E_0 = K_s K_\eta M_R$ ，根据《公路路基设计规范》(JTJ D30—2015) 3.2.5 条， $K_s$  为路基回弹模量湿度调整系数， $K_\eta$  为干湿循环或冻融循环条件下路基模量折减系数，因此路基顶面验收弯沉值可以写为： $l_g = \frac{168pr}{K_1 E_0} K_s K_\eta$ 。公式适用于路基填料为未处治材料的情况，对采用粒料或无机结合料处治材料改善层的路基，根据路基分层情况采用弹性层状体系理论分析路基顶面竖向位移，并结合当地工程经验确定路基顶面验收弯沉值。

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)明确提出路基顶面采用落锤式弯沉仪(FWD)进行检测、验收,经过几年的使用,各地普遍反馈根据其式(B.7.1)计算的验收弯沉值偏大,往往不能很好地起到控制路基填筑质量的作用。本次修订从标准状态、平衡湿度状态下路基模量的本义出发,对式(B.7.1)进行了调整。根据以往贝克曼梁与落锤式弯沉仪(FWD)现场对比检测的研究成果,以及室内试槽、室外试验路段的检测数据,按本规范式(4.2.3-3)计算的验收弯沉值与路基实际检测弯沉值相当,能够较好地地区分路基填料和压实质量。

**4.2.4** 路基顶面回弹模量值不满足第3.0.12条要求时,宜通过改变填料或通过掺加适量的石灰、水泥等结合料进行改善。当路基工作区底面接近或低于地下水位时,宜采取更换填料、设置渗沟等措施。

#### 条文说明

路基工作区根据交通荷载等级,按路床顶面下80cm或120cm确定。地下水位高而标高受限制不能提高路基时,需采取相应的措施,提高填料的水稳定性;而在工作区接近地下水位或部分进入地下水位,路基处于过湿状态时,需采用降低地下水位的措施。

**4.2.5** 季节性冻土地地区的中湿、潮湿类路基,冰冻线深度范围内宜采用碎石、砂砾、中粗砂等抗冻性好的粗粒料。

#### 条文说明

路基土冻胀与三方面因素有关:路基土的冻胀性、冰冻线深度和离地下水位的距离。冰冻线深度范围内可以容许有部分冻胀类别为冻胀或强冻胀的填料,但这部分土层所产生的不均匀冻胀不能使路表面的不平整度超出容许值。冰冻线深度范围内即使采用砂砾料等粗粒料也不能完全避免冻结,但这些粗粒料的透水性能好,能够迅速排除春融时期的融化水,在含水率较高的条件下仍能保持较高的强度,从而保障路基强度不致下降较多。

**4.2.6** 水文地质条件不良的土质路堑、炭质岩及粉砂质泥岩等遇水易软化的软质岩路堑,应采取地下截、排水措施。

**4.2.7** 填挖交界或新老路基结合路段,应采取防止差异沉降的技术措施。

**4.2.8** 石质挖方或填石路床顶面应铺设整平层。整平层可采用碎石、低剂量无机结合料稳定粒料、贫混凝土等材料,其厚度可根据路床顶面平整程度确定,最小厚度应不小于150mm。

4.3 基层和底基层

4.3.1 基层和底基层应具有足够的强度、抗冲刷能力和适当的刚度。

条文说明

对水泥混凝土面层下基层的首要要求是抗冲刷能力。不耐冲刷的基层表面，在渗入水和荷载的共同作用下，会产生冲刷、唧泥、板底脱空和错台等病害，加速和加剧面层板的断裂。

提高基层的刚度，有利于改善接缝的传荷能力，但只能在基层未受冲刷的前提下才能得到保证。此外，提高基层刚度虽然可以增加路面结构的弯曲刚度，降低面层板的荷载应力，但也会增加面层板的温度翘曲变形(增加板底脱空区范围)和翘曲应力，对路面结构产生不利影响，并不一定能减薄面层厚度。

4.3.2 基层和底基层的材料可依据交通荷载等级、结构组合要求和材料供应，分别参照表 4.3.2-1 和表 4.3.2-2 选用。

表 4.3.2-1 基层材料类型

| 交通荷载等级 | 基层材料类型          |
|--------|-----------------|
| 极重、特重  | 贫混凝土、碾压混凝土      |
|        | 水泥稳定级配碎石        |
|        | 沥青混凝土           |
| 重      | 水泥稳定级配碎石或砾石     |
|        | 密级配沥青稳定碎石       |
| 中等     | 级配碎石            |
|        | 水泥稳定未筛分碎石或砾石、砂砾 |
| 轻      | 级配碎石            |
|        | 未筛分碎石或砾石、砂砾     |
|        | 水泥稳定土           |

表 4.3.2-2 底基层材料类型

| 交通荷载等级  | 底基层材料类型             |
|---------|---------------------|
| 极重、特重、重 | 级配碎石、水泥稳定级配碎石或砾石、砂砾 |
| 中等、轻    | 未筛分碎石或砾石、砂砾水泥稳定土    |

条文说明

基层和底基层可以按组成材料分为混凝土类(贫混凝土、碾压混凝土)、无机结合

料稳定类(水泥稳定级配碎石、水泥稳定砂和石灰粉煤灰稳定级配碎石等)、沥青混合料类(沥青混凝土、沥青碎石等)和粒料类(级配碎石、级配砾石、未筛分碎石等)四大类型。

基层的受冲刷程度与水的渗入、交通荷载作用和基层材料的抗冲刷能力有关。各类基层具有不同的抗冲刷能力,取决于基层材料中结合料的性质和含量以及细料(小于0.075mm)的含量。对于基层的抗冲刷能力,目前尚未有标准的试验方法和定量评定指标。一些试验研究结果表明,较耐冲刷的是贫混凝土(水泥剂量7%或8%)和沥青混凝土(沥青含量6%)基层,其次是水泥稳定级配碎石(水泥剂量5%)基层,再次是低剂量水泥稳定级配碎石(水泥剂量3.5%)和沥青稳定碎石(沥青含量3%)基层,较易冲刷的是石灰粉煤灰稳定碎石和级配碎石基层,各种稳定土、未筛分碎石、细粒土等均不耐冲刷。按照所承受的交通荷载等级和基层的抗冲刷能力,表4.3.2-1提出了各类基层的适用场合。

表4.3.2-2针对不同的交通荷载等级分别提出了适宜选用的底基层类型。通常情况下,底基层建议采用粒料类材料。采用无机结合料稳定碎石类底基层时,有可能因底基层与路床的模量比大而产生过大的拉应力,并为其收缩裂缝提供了水分下渗的通路及产生冲刷和唧泥的条件,此时无机结合料稳定碎石类底基层与路基之间宜加设一层粒料层。

**4.3.3 承受中等及以上交通荷载的路面,基层下应设置底基层。承受轻交通荷载时,可不设底基层。**

#### 条文说明

为增加路面结构的弯曲刚度,降低面层的荷载应力,承受中等及以上交通荷载时,往往选用刚度较大的基层。这时,为了缓解由于基层与路床的刚度比过大而产生的问题,在基层下需设置底基层。而对于承受轻交通荷载的路面,面层和基层通常能提供足够的弯曲刚度,因而可以不设底基层。

**4.3.4 多雨地区,路基由低透水性细粒土组成的高速公路、一级公路或者承受极重或特重交通荷载的二级公路,宜设置开级配沥青或水泥稳定碎石排水基层。排水基层下应设置不透水底基层,其顶面宜铺设沥青类封层或防水土工织物。**

#### 条文说明

多雨地区(年平均降水量1000mm以上),通过接缝或裂缝渗入混凝土路面内的水量较大。在混凝土路面结构内设置排水基层排水系统或纵向边缘排水系统以排出渗入水,可减少渗入水对基层的冲刷作用,从而降低唧泥、错台和板底脱空等病害出现的可能性和程度。

为防止排水基层内的水分下渗,在排水基层下需设置透水性小的底基层,如选用密



级配粒料或水泥稳定碎石，或在底基层上铺设沥青类封层或不透水的土工织物。

**4.3.5** 各种基层和底基层的结构层适宜压实厚度，可参考表 4.3.5 并按所选集料的公称最大粒径及压实设备确定；基层或底基层的设计层厚大于相应材料的适宜压实厚度上限时，宜分层铺设和压实。

表 4.3.5 基层和底基层适宜施工层厚参考范围

| 材料种类                |                 | 适宜施工层厚 (mm) |
|---------------------|-----------------|-------------|
| 贫混凝土、碾压混凝土          |                 | 120 ~ 200   |
| 无机结合料稳定粒料           |                 | 150 ~ 200   |
| 沥青混凝土               | 集料公称最大粒径 9.5mm  | 25 ~ 40     |
|                     | 集料公称最大粒径 13.2mm | 35 ~ 65     |
|                     | 集料公称最大粒径 16mm   | 40 ~ 70     |
|                     | 集料公称最大粒径 19mm   | 50 ~ 75     |
| 沥青稳定碎石              | 集料公称最大粒径 19mm   |             |
|                     | 集料公称最大粒径 26.5mm | 75 ~ 100    |
| 多孔隙水泥稳定碎石           |                 | 100 ~ 150   |
| 级配碎石、未筛分碎石、级配砾石或碎砾石 |                 | 100 ~ 200   |

条文说明

各类基层和底基层的厚度范围，依据结构层成型、施工方便(单层摊铺碾压)或排水要求等因素选择。增加基层或底基层的厚度，对于降低面层的应力或者减薄面层的厚度影响不大。因而，混凝土面层下的基层或底基层不必很厚。按设计轴载数和路床的强弱程度选定基层和底基层的厚度，如果设计厚度超出适宜厚度，可以按所提供的施工机具、施工条件决定是否需要采用分层铺筑和压实。

**4.3.6** 贫混凝土或碾压混凝土基层厚度应满足本规范第 3.0.5 条的要求。应设置横向接缝，可根据需求设置纵向接缝。

条文说明

贫混凝土或碾压混凝土基层与底基层的刚度可能比较大，有可能产生较大的层底拉应力，因此需要根据式(3.0.5)通过厚度调整来控制其疲劳开裂。贫混凝土或碾压混凝土的弯拉强度也是控制疲劳开裂的重要因素，这类基层不建议采用过大的强度值，致使基层与底基层的模量比仍处于高位，层底拉应力和相应的疲劳开裂得不到缓解。

碾压混凝土和贫混凝土基层会产生收缩裂缝，导致混凝土面层出现反射裂缝。因而对这两种基层规定了设置接缝的要求。设置横向接缝时需与面层板接缝对齐。

**4.3.7** 开级配沥青稳定碎石或水泥稳定碎石排水基层的计算厚度应满足排水要求，其设计厚度宜依据计算厚度按 10mm 向上取整后再增加 20mm。

**条文说明**

排水基层的计算厚度需满足路表水的设计渗入量需求，按现行《公路排水设计规范》(JTG/T D33) 计算确定。根据已有观测资料，因混凝土面层内水泥浆下渗而引起的排水基层堵塞深度约为 20mm 以内，故结构层厚度需预留出排水功能折减的厚度。

**4.3.8** 硬路肩采用混凝土面层时，其结构与厚度宜与行车道相同。基层的宽度比混凝土面层每侧宽出宜不小于 300mm。

**条文说明**

当采用小型机具施工时，基层的宽度比混凝土面层每侧宽出建议不小于 300mm。当采用滑模式摊铺机施工时，基层的宽度比混凝土面层每侧宽出建议不小于 600mm。

**4.4 面层**

**4.4.1** 水泥混凝土面层应具有足够的强度和耐久性，表面应抗滑、耐磨、平整。

**条文说明**

混凝土面层是路面结构的主要承重层，同时也是与行车直接接触的表面层。因而，一方面要求面层具有足够的承载能力和耐久性，另一方面要求面层具有良好的行驶质量。

**4.4.2** 面层宜采用设接缝的普通水泥混凝土板。当面层板的平面尺寸较大或形状不规则，路面结构下埋有地下设施，高填方、软土地基、填挖交界段等有可能产生不均匀沉降的路基段，宜采用接缝设置传力杆的钢筋混凝土面层。连续配筋混凝土、碾压混凝土和钢纤维混凝土等其他面层类型可依据适用条件参照表 4.4.2 选用。

**表 4.4.2 其他面层类型及适用条件**

| 面层类型      |                         | 适用条件                        |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|
| 连续配筋混凝土面层 |                         | 高速公路                        |
| 复合式面层     | 密级配沥青混合料上面层             | 极重、特重交通荷载等级的高速公路            |
|           | 连续配筋混凝土下面层、设传力杆普通混凝土下面层 |                             |
| 碾压混凝土面层   |                         | 二级及二级以下公路                   |
| 钢纤维混凝土面层  |                         | 标高受限制路段、混凝土加铺层              |
| 混凝土预制块面层  |                         | 二级及二级以下公路桥头引道沉降未稳定段、服务设施停车场 |

条文说明

由于表面平整度难以满足要求以及接缝处难以设置传力杆，碾压混凝土不建议用作高速或一级公路或者承受特重或重交通的二级公路的面层。

4.4.3 水泥混凝土面层厚度，可参照表 4.4.3 依据交通荷载等级、公路等级和变异水平等级，按式(3.0.4-1)、式(3.0.4-2)、式(3.0.6)计算确定。各种混凝土面层的设计厚度应依据计算厚度加 6mm 磨耗层后，按 10mm 向上取整。

表 4.4.3 水泥混凝土面层厚度的参考范围

|           |           |           |           |           |    |           |    |           |    |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| 交通荷载等级    | 极重        | 特重        |           |           |    | 重         |    |           |    |
| 公路等级      | —         | 高速        | 一级        |           | 二级 | 高速        | 一级 |           | 二级 |
| 变异水平等级    | 低         | 低         | 中         | 低         | 中  | 低         | 中  | 低         | 中  |
| 面层厚度 (mm) | ≥320      | 320 ~ 280 | 300 ~ 260 | 280 ~ 240 |    | 270 ~ 230 |    | 260 ~ 220 |    |
| 交通荷载等级    | 中等        |           |           |           |    | 轻         |    |           |    |
| 公路等级      | 二级        |           | 三、四级      |           |    | 三、四级      |    |           |    |
| 变异水平等级    | 高         | 中         | 高         | 中         |    | 高         | 中  |           |    |
| 面层厚度 (mm) | 250 ~ 220 | 240 ~ 210 |           | 230 ~ 200 |    | 220 ~ 190 |    | 210 ~ 180 |    |

条文说明

表 4.4.3 所建议的面层厚度参考范围，是在对标准的普通水泥混凝土路面结构和设定的条件进行计算分析后归纳而成的。标准路面结构是按本规范第 4.2、4.3 节对路床、底基层和基层的有关要求拟定的。设定的条件包括：设计安全等级和设计使用年限、各安全等级的目标可靠度和变异水平分级、变异系数变化范围以及不同目标可靠度和变异水平等级的可靠度系数。对于极重交通荷载等级，所提出的厚度参考值是依据各项有利的参数值计算得到的下限。对于轻交通荷载等级所提出的厚度参考范围高限，是依据各项不利的参数值计算得到的上限，其低限则为面层最小厚度的限值。表 4.4.3 供路面结构组合设计及初拟面层厚度时参考。在所建议的各级面层厚度参考范围内，设计轴载作用次数多、变异系数大、最大温度梯度大或者基层、底基层厚度或模量值低时，取高值。高速公路的施工水平只能达到中等变异水平等级时，参照低变异水平等级的厚度范围的高限或者高于此高限选用。

钢筋混凝土和连续配筋混凝土的初拟面层厚度也适用表 4.4.3 范围。对于连续配筋混凝土面层，由于钢筋对于路面结构的加强作用，厚度范围在表 4.4.3 的基础上可以减小 20mm。对于碾压混凝土面层，由于碾压混凝土设计弯拉强度较低，厚度范围在表 4.4.3 的基础上可以增加 20mm。对于重要的二级公路在交通荷载等级为特重、极重时，厚度在表 4.4.3 的基础上进一步提高。

针对小交通量农村公路(年平均日设计交通量小于或等于 1 000 辆小客车的公路)，当交通组成中有大型、重载车辆时，需按本规范要求要求进行设计。当交通组成中无大型、

重载车辆时，可以参照表 4-1 中典型结构按经验法设计，其中结构组合Ⅰ适用于双车道公路，年平均日设计交通量在 1 000 辆小客车及以下；结构组合Ⅱ适用于单车道公路，年平均日设计交通量在 400 辆小客车及以下。

表 4-1 小交通量农村公路水泥混凝土路面典型结构

| 结构层         | 材料                                                                             | 结构组合Ⅰ                   | 结构组合Ⅱ   |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|
|             |                                                                                | 厚度 (cm)                 |         |
| 面层          | 水泥混凝土 (C30 及以上)                                                                | 20 ~ 22                 | 18 ~ 20 |
| 基层          | 无机结合料 (水泥、石灰粉煤灰等) 稳定粒料 [ 级配碎 (砾) 石、级配砂砾、石屑 ] ；<br>级配碎 (砾) 石、级配砂砾、填隙碎石、泥结或泥灰结碎石 | 15 ~ 20                 |         |
| 底基层<br>或功能层 | 未筛分碎石、砂砾、石屑 ；<br>无机结合料 (水泥、石灰粉煤灰等) 稳定 (工业废渣、细粒土)                               | 10 ~ 20                 |         |
| 路床          | 天然路基土                                                                          | $E_0 \geq 40\text{MPa}$ |         |

注：1. 基层、底基层材料建议优先就地取材，充分利用当地筑路材料。  
2. 鉴于小交通量农村公路交通组成差异大、各地经济发展水平不均衡，采用典型经验法设计时在结合当地实践经验并经充分论证后，水泥混凝土面层厚度可以较典型值减薄 1 ~ 2cm。

4.4.4 钢纤维混凝土面层的厚度宜为普通混凝土面层厚度的 0.85 ~ 0.60 倍。重交通及以上交通荷载等级时，厚度应不小于 180mm；中等或轻交通荷载等级时，厚度应不小于 160mm。

条文说明

在行车荷载和温度梯度综合作用下，钢纤维混凝土路面板纵缝边缘中部板底首先产生裂缝，由于裂缝处的钢纤维桥接作用，裂缝缓慢从纵缝边缘中部板底向板内及板顶扩展，裂缝扩展期间板裂缝细小不影响路面使用性能，因此不建议将板底不产生裂缝作为具有良好韧性的钢纤维混凝土路面结构损坏的控制准则。本次规范在荷载疲劳应力系数  $k_f$  (B.2.5 条)，以及最重轴载的极限状态方程中的弯拉强度标准值推荐式  $(1 + R_{e.300})f_{t.c.r}$  (条文说明 3.0.4) 中计入了部分钢纤维混凝土的裂后韧性及寿命，即将控制纵缝边缘中部裂缝再向上扩展至贯通截面为其结构极限状态。

纵缝边缘中部裂缝向上扩展的同时也向板内横向扩展，它会削弱路面纵向弯曲刚度，使得纵缝边缘中部荷载应力减小，横缝边缘中部、路面板中部垂直行车方向荷载应力增加。当纵向弯曲刚度小于某值时，路面板临界荷位将转向横缝边缘中部或路面板中部；当横缝边缘中部或路面板中部的板底弯拉应力超过钢纤维混凝土初裂疲劳强度时，路面板将出现纵向裂缝，从而使路面板发生影响行车舒适与安全的，由纵、横向裂缝相交形成的冲断破坏。因此，钢纤维混凝土路面的结构极限状态定义为路面板不发生冲断破坏。

路面板纵缝中部出现裂缝后的结构响应，可以采用正交异性地基板模型分析。在考

察行车荷载与变温荷载综合作用时发现,横缝为非邻近胀缝的缩缝或有传力杆时,路面板中部板底纵向荷载与温度综合应力大多超过横缝边缘中部板底纵向综合应力,即钢纤维混凝土路面出现冲断破坏的临界荷载为板中。因此,控制不出现冲断破坏的钢纤维混凝土路面极限状态方程可以表示为:在板出现横向裂缝条件下板中部不出现纵向疲劳开裂。

当允许钢纤维混凝土路面带裂缝工作,且设计极限状态为不出现冲断破坏时,设计弯曲强度 $\geq 6.0\text{MPa}$ 、裂后弯曲韧性比 $R_{e.300}$ 为 $0.3 \sim 1.5$ 的钢纤维混凝土面层厚度,约为设计弯曲强度为 $5.0\text{MPa}$ 的普通混凝土面层厚度的 $0.85 \sim 0.60$ 倍,约为按控制板纵缝边缘中部贯通断裂时面板厚度的 $0.90 \sim 0.75$ 倍。

**4.4.5** 新建复合式路面的沥青混凝土上面层的厚度不宜小于 $40\text{mm}$ 。水泥混凝土下面层的计算厚度,应满足式(3.0.4-1)、式(3.0.4-2)、式(3.0.6)的要求。水泥混凝土表面应进行处理,层间设置黏层或应力吸收层。

#### 条文说明

对于新建水泥混凝土下面层+沥青上面层的复合式路面,水泥混凝土板底条件、接缝传荷能力较好,当交通荷载等级及气候、水文条件有利时,沥青混凝土上面层可以选择一层。当条件不利时,为延缓水泥板接缝产生的反射裂缝速率,沥青上面层建议选为两层。依据国内外的经验,增加 $40\text{mm}$ 厚的沥青混凝土上面层约可以减薄 $10\text{mm}$ 混凝土下面层。近年来,随着对水泥路面行车舒适性要求的提高以及材料性能的技术进步,水泥混凝土面板上采用超薄沥青磨耗层加铺时厚度可以做到 $1.0 \sim 1.5\text{cm}$ 。超薄磨耗层及黏结层多采用高比例、高性能聚合物改性沥青及聚合物改性乳化沥青,使用寿命通常为 $8 \sim 10$ 年。

水泥混凝土表面的处治及防水黏结层的设置是保证复合式路面耐久性的重要措施。为提高黏结性,水泥混凝土表面采用拉毛、抛丸、精铣刨等措施后先喷洒一层底层油(同黏层材料),可以选用改性乳化沥青PCR。为减缓接缝处的反射裂缝,也可以进一步增设应力吸收层。

**4.4.6** 预制梁顶面直接浇筑水泥混凝土桥面时,梁板顶面应洁净,并具有足够的粗糙度。水泥混凝土桥面宜采用双层钢筋网,底层钢筋网与梁板剪力钢筋焊接,厚度不宜小于 $150\text{mm}$ 。预制梁顶面单独设置调平层时,调平层表面应具有足够的粗糙度并预埋钢筋,桥面铺装层可采用单层钢筋网,与调平层预埋钢筋进行焊接,厚度不宜小于 $80\text{mm}$ 。

#### 条文说明

水泥混凝土桥面铺装有两种方式,即在预制梁上直接铺装或在水泥混凝土调平层上

铺装。两种方式都需保证铺装层与梁板或调平层的结合牢固，为此通常采用两种措施：首先需对预制梁顶面或调平层顶面进行处治，包括凿毛等措施以增加粗糙度；其次需使铺装层钢筋网与梁板剪力筋或调平层预埋钢筋焊接。施工过程中需长期保湿，避免早期收缩产生脱层。通过上述措施提高层间抗剪能力，保证不分层，防止桥面铺装早期破损。

**4.4.7** 露石混凝土面板厚度设计应与普通混凝土面板相同，分为露石混凝土上层和普通混凝土下层，层间应采用湿接方式联结。露石混凝土上层厚度应不小于 60mm，其公称最大粒径不宜超过 13.2mm，粗集料磨光值不应小于 42。

#### 条文说明

为改善水泥混凝土路面的使用功能，如提高抗滑性、降低噪声，国外水泥混凝土路面早已有对路表进行露石化处理的工程经验，如奥地利、比利时、德国、韩国等，近几年国内也在长隧道路面中进行了相关的技术探索，其中露石剂的配制、施工机具和工艺的选择是技术难点。粗集料在露石混凝土中发挥着独特的作用，是材料选择中最重要的环节之一，其抗磨光和耐磨耗及坚固性对路面抗滑力的大小及持久性起着决定性作用，因此技术性能要求较普通混凝土高，特别是磨光值指标。高性能粗集料仅设置于上层即可，采用湿法双层施工，两层厚度之和与普通水泥混凝土厚度相同。

**4.4.8** 混凝土预制块可采用矩形块或异形块。矩形块的长度宜为 200 ~ 250mm，宽度宜为 100 ~ 125mm，厚度宜为 80 ~ 150mm。预制块下砂垫层的厚度宜为 20 ~ 30mm。

#### 4.5 功能层

**4.5.1** 贫混凝土或碾压混凝土基层、无机结合料稳定级配碎石基层上应铺设隔离层。贫混凝土或碾压混凝土基层上隔离层宜采用沥青混凝土，层厚不宜小于 40mm。无机结合料稳定级配碎石基层上隔离层，对于重交通及以上交通荷载等级宜选用厚度不小于 20mm 的热拌沥青混凝土，中、轻交通荷载等级可选用封层和透层，其中封层可选用热沥青碎石封层、同步碎石封层，透层可采用渗透性良好的乳化沥青。

#### 条文说明

贫混凝土或碾压混凝土基层的刚度较大，虽然可以增加路面结构的弯曲刚度，降低面层板的荷载应力，但会使面层板产生过大的温度和湿度翘曲变形，从而增加板底脱空区的范围和板内的温度和湿度翘曲应力。经理论分析和实体工程验证，设置沥青混凝土隔离层能够有效缓解这种状况。但需注意的是，对于易出现极端低温天气的地区，考虑到沥青混凝土隔离层脆硬化下刚度也较大，可能并不适用。

为减缓无机结合料稳定碎石基层顶面遭受面层渗入水的冲刷作用,防止渗入水沿基层收缩裂缝下渗,同时为降低面层与基层的黏结程度,减小摩阻力,需在基层上铺设隔离层。可以选择沥青类材料,如 AC-10 沥青混凝土。对于封层和透层而言,最重要的是平整和防水。热沥青碎石封层厚度薄,如施工质量控制不严,则导致基层易受冲刷,适用中、轻交通荷载等级。对于膜层材料,施工过程中受机械影响易于起皱,不易展平,单层沥青表处质量较差,这两种封层的实际使用效果都不好,本次修订不再做推荐选择。

**4.5.2** 基层或底基层采用贫混凝土、碾压混凝土或无机结合料稳定类材料时,基层或底基层与路床之间宜设置厚度不小于 180mm 且与路基同宽的粒料层,其材料宜选用级配碎石、级配砾石等。

#### 条文说明

当基层底基层采用贫混凝土、碾压混凝土或无机结合料材料时,或路床未能采用粗粒土或改良土,特别是当路床由细粒土组成时,路面板及基层底基层与路基之间的刚度差可能过大,会引起基层或底基层因拉应力过大而开裂,并且会产生水沿裂缝的下渗,引起路床的冲刷和唧泥病害。因此,需在路床顶面设置一层粒料层。粒料层材料除了级配碎石、级配砾石外,还包括多类回收材料,如混凝土破碎料、其他建筑废料及工业废渣等,可以用于低等级水泥路面。粒料层需始终保持颗粒状态和透水性,因此需限制一定的细粒含量。为防止路基土侵入,还可以在路床顶面设置土工材料防水层。

**4.5.3** 季节性冻土地区,路面结构厚度不满足本规范第 3.0.10 条规定的最小防冻厚度要求时,路床顶面应增设防冻层。

#### 条文说明

防冻层主要设置在温度和湿度状况不良的路段上,以改善路面结构的使用性能。主要出现在季节性冻土地区路面结构厚度小于最小防冻厚度要求时,设置防冻层可以使路面结构免除或减轻冻胀和翻浆病害。

**4.5.4** 水文地质条件不良的土质路堑、裂隙水发育的岩质挖方路段,可在基层或底基层与路床间设置粒料排水层,粒料层应与边沟下渗沟相连接。

#### 条文说明

在水文条件不良的路段上,设置排水层可以疏干路床土,改善路面结构的支承条件。

**4.5.5** 防冻层或排水层宜采用碎石、砂砾等粒料类材料，厚度应不小于 150mm。

#### 条文说明

除碎石、砂砾等颗粒材料外，在供应条件许可时，防冻层还可以采用煤渣、矿渣等隔温性材料。

### 4.6 路肩

**4.6.1** 路肩铺面结构应具有一定的承载能力，其结构组合和材料选用应与行车道路面相协调，应加强横向排水，不应使渗入的路表水积滞在行车道路面结构内。

#### 条文说明

路肩为行车道路面结构提供侧向支承，同时也供车辆临时或紧急停靠。因此，路肩铺面需与行车道路面作为一个整体进行结构设计，协调结构层次和组成材料的选用，统一考虑路面和路肩结构的内部排水。这一方面是出于方便施工的考虑，另一方面是为了解决渗入行车道路面结构内的路表水的横向排流问题，避免行车道路面形成槽式结构。

**4.6.2** 行车道混凝土面层宜宽出外侧车道边缘线 0.5 ~ 0.75m，至路缘带范围。

#### 条文说明

行车道混凝土面层加宽后，可以减小车辆轮载作用于面层板边缘的概率，从而降低荷载应力，增加面层的疲劳寿命。

**4.6.3** 高速公路和一级公路以及承受极重、特重和重交通荷载等级的公路，路肩宜采用与行车道路面相同的结构组合和组成材料类型；其他公路路肩铺面的基层和底基层应采用与行车道路面结构相同的材料类型和厚度。

### 4.7 路面排水

**4.7.1** 行车道路面横坡坡度应不小于 1.5%，降雨强度较大地区坡度可适当增大。硬路肩坡度值宜与行车道横坡相同且不大于 5%，土路肩横坡宜为 3% ~ 4%。

**4.7.2** 行车道路面结构设置排水层时，应在排水层外侧边缘设置纵向集水沟和带孔集水管，并间隔 50 ~ 100m 设置横向排水管。

**4.7.3** 带孔集水管的管径宜采用 100 ~ 150mm。集水沟的宽度宜采用 300mm。集水



沟的深度应能保证集水管管顶低于排水层底面，并有足够厚度的回填料使集水管不被施工机械压裂。沟内回填料宜采用与排水层相同的透水性材料，或者不含细料的碎石或砾石。横向排水管不带孔，其管径宜与集水管相同。

**4.7.4** 集水沟和集水管的纵坡宜与路线纵坡相同，且不小于 0.3%。横向排水管的坡度不宜小于 2%。

**4.7.5** 横向排水管出口端应设端墙，端头宜用镀锌铁丝网或格栅包覆，出水口下方应铺设水泥混凝土防冲垫板或者进行坡面防护。在横向排水管上方的路肩边缘处应标明出水口位置。

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 5 材料性质要求和设计参数

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 路面材料应根据公路等级、交通荷载等级、气候条件、各结构层功能要求和当地材料特性等，在技术经济论证基础上进行设计并确定材料设计参数。

**5.1.2** 路面各结构层的原材料及混合料的技术要求应符合现行《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30)、《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20)和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)中的有关规定，并结合工程特点和当地经验确定。

**5.1.3** 路面结构层材料设计参数的确定可分为下列三个水平：

- 1 水平一：通过室内试验实测确定；
- 2 水平二：利用已有经验关系式或当地经验值确定；
- 3 水平三：参照本规范的推荐值确定。

#### 条文说明

增加了三水平材料设计参数取值方法。水平二目前仅列出沥青结合料类材料动态压缩模量的经验关系式，对于水泥混凝土路面，经验关系式较少。

**5.1.4** 高速公路和一级公路的施工图设计阶段宜采用水平一，其他设计阶段可采用水平二或水平三；二级及二级以下公路可采用水平二或水平三。

### 5.2 粒料类材料

**5.2.1** 粒料类材料作为路面结构层时，应满足公路等级、交通荷载等级对层位的要求。基层宜选用级配碎石，底基层可选用级配碎石或砂砾，级配及强度应符合现行《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20)的规定。

#### 条文说明

增加了粒料类材料选型的总体要求，吸纳《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T

F20—2015) 的修订成果。

5.2.2 粒料类材料用于防冻层时，最大粒径应不超过 53mm；小于 0.075mm 的颗粒含量不宜大于 5%，不满足要求时，可用天然砂替代部分细集料。

5.2.3 粒料类材料用于排水层时，级配应同时满足渗水和反滤的要求。

条文说明

粒料类材料用于排水层时，为保证排水层排水畅通，并防止路床细粒土渗入排水层内堵塞其孔隙，排水层材料的级配必须满足下述四项渗透和反滤要求(其中第一项为渗透水要求，其他三项为反滤要求)：

- (1)排水层材料通过率为 15% 时的粒径  $D_{15}$  不小于路床土通过率为 15% 时的粒径  $d_{15}$  的 5 倍( $D_{15} \geq 5d_{15}$ )。
- (2)排水层材料通过率为 15% 时的粒径  $D_{15}$  不大于路床土通过率为 85% 时的粒径  $d_{85}$  的 5 倍( $D_{15} \leq 5d_{85}$ )。
- (3)排水层材料通过率为 50% 时的粒径  $D_{50}$  不大于路床土通过率为 50% 时的粒径  $d_{50}$  的 25 倍( $D_{50} \leq 25d_{50}$ )。
- (4)排水层材料的均匀系数( $D_{60}/D_{10}$ )不大于 20。

5.2.4 结构验算时，粒料层回弹模量应在粒料类材料标准状态下回弹模量的基础上考虑湿度调整系数的影响。粒料类材料标准状态下的回弹模量应取用最佳含水率和与压实度要求相应的干密度条件下的标准值。

5.2.5 粒料类材料的回弹模量应依据相应的水平确定：

- 1 水平一：按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)附录 D 的方法，采用重复加载三轴压缩试验确定。
- 2 水平三：按照粒料类型和层位，可采用表 5.2.5 取值。

表 5.2.5 粒料层回弹模量 (MPa)

| 材料类型和层位 | 最佳含水率与压实度要求相应的干密度条件下的回弹模量 | 经湿度调整后的回弹模量 |
|---------|---------------------------|-------------|
| 级配碎石基层  | 200 ~ 400                 | 300 ~ 700   |
| 级配碎石底基层 | 180 ~ 250                 | 190 ~ 440   |
| 级配砾石基层  | 150 ~ 300                 | 250 ~ 600   |
| 级配砾石底基层 | 150 ~ 220                 | 160 ~ 380   |
| 未筛分碎石层  | 180 ~ 220                 | 200 ~ 400   |
| 天然砂砾层   | 105 ~ 135                 | 130 ~ 240   |

注：材料性能好、级配好或压实度大时取高值，反之取低值。

### 条文说明

参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017), 增加了粒料类材料的回弹模量在三个水平下的确定方法及典型取值范围。

## 5.3 无机结合料稳定类材料

**5.3.1** 无机结合料稳定类材料用于高速公路、一级公路基层、底基层时, 公称最大粒径不宜大于 31.5mm; 用于二级及以下公路基层、底基层时, 公称最大粒径不宜大于 37.5mm。

**5.3.2** 水泥稳定级配碎石或砾石用于高速公路、一级公路时, 小于 0.075mm 的颗粒含量应不大于 5%, 小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 50%。

### 条文说明

0.075mm 的颗粒含量不包括水泥。

**5.3.3** 石灰粉煤灰稳定类材料小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 60%, 石灰与粉煤灰的配比宜为 1:2 ~ 1:4; 水泥粉煤灰稳定类材料小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 50%, 水泥与粉煤灰的配比宜为 1:3 ~ 1:5。粒料与结合料的配比宜为 85:15 ~ 80:20。

### 条文说明

为减少无机结合料稳定粒料冲刷并保证混合料的匀质, 提出了控制细料含量和最大粒径的要求, 其级配还需综合考虑公路等级和基层层位。

**5.3.4** 开级配水泥稳定碎石材料小于 0.075mm 的颗粒含量应不大于 2%, 小于 2.36mm 的颗粒含量不宜大于 5%, 小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 10%。

### 条文说明

本条文开级配水泥稳定碎石材料组成的建议, 是依据近年来各地修筑试验路段的经验提出的。它们能达到 20% 左右的孔隙率和 1.0cm/s 以上的渗透系数, 其强度和模量值均能满足基层的要求。

**5.3.5** 无机结合料稳定类材料的 7d 无侧限抗压强度应符合现行《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20) 的规定。

### 5.3.6 无机结合料稳定类材料的弹性模量和弯拉强度应依据相应的水平确定：

1 水平一：无机结合料稳定类材料的压缩模量按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)附录 E 的方法，采用侧面法单轴压缩试验确定；弯拉强度按照现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441)的有关规定确定；水泥稳定类材料的试件龄期应采用 90d，水泥粉煤灰稳定类材料的试件龄期应采用 120d，石灰稳定类材料的试件龄期应采用 180d。

2 水平三：可采用表 5.3.6 取值。

表 5.3.6 无机结合料稳定类材料的弹性模量(MPa)

| 材料                             | 弯拉强度      | 弹性模量            |
|--------------------------------|-----------|-----------------|
| 水泥稳定粒料、水泥粉煤灰稳定粒料、<br>石灰粉煤灰稳定粒料 | 1.5 ~ 2.0 | 18 000 ~ 28 000 |
|                                | 0.9 ~ 1.5 | 14 000 ~ 20 000 |
| 水泥稳定土、水泥粉煤灰稳定土、<br>石灰粉煤灰稳定土    | 0.6 ~ 1.0 | 5 000 ~ 7 000   |
| 石灰土                            | 0.3 ~ 0.7 | 3 000 ~ 5 000   |

注：材料性能好、级配好或压实度大时取高值，反之取低值。

5.3.7 无机结合料稳定类结构层的弹性模量在结构验算时，应由无机结合料稳定类材料弹性模量值乘以模量调整系数 0.25 ~ 0.5。

#### 条文说明

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)无机结合料稳定类材料结构层动态模量取值为试件模量乘以 0.5 的修正系数，系根据相关配套专题研究成果综合确定：试验段 FWD 反算结构层的模量约为动态压缩模量的 37.4% ~ 60.8%，平均约为 49.1%。配套专题《石灰粉煤灰稳定碎石疲劳预估研究》专题结论是反算模量与室内动态抗压模量的比例为 0.503，与欧标抗压模量的比例为 0.598。本次修订中，无机结合料稳定类材料层动态模量取值采用与沥青路面同样的原则和方法，一方面考虑开放交通前及开放交通初期，由于干缩和温缩，无机结合料稳定类材料层彼时已产生微裂缝。微型缝的产生并不受上覆路面结构层影响，则模量调整系数最大值与沥青路面规范一致，按 0.5 控制；另一方面，考虑到水泥板相较沥青层对荷载动态响应的消减程度大，模量调整系数需予以降低。参考《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)中无机结合料稳定类材料层静态模量范围、静模量与动模量之间的关系，模量调整系数低限按 0.25 控制。计算分析时，当水泥混凝土面板较薄时，按高限取用，较厚时按低限取用。本次规范修订给出了模量调整系数的范围，有条件时建议结合水泥路面试验段 FWD 数据的积累和反算进一步修正和优化。

## 5.4 沥青结合料类材料

5.4.1 基层用沥青结合料宜采用 70 号、90 号或 110 号道路石油沥青。

5.4.2 基层沥青混合料公称最大粒径宜为 19.0mm 或 26.5mm，沥青稳定碎石公称最大粒径宜为 26.5mm 或 31.5mm，贫混凝土或碾压混凝土基层上的沥青混凝土层公称最大粒径宜为 9.5mm 或 13.2mm。

5.4.3 开级配沥青稳定碎石的集料公称最大粒径宜为 19.0mm 或 26.5mm。小于 0.075mm 的细粒含量应不大于 2%，小于 2.36mm 的颗粒含量不宜大于 15%，小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 20%。

### 条文说明

对排水基层多孔隙混合料组成的建议，是依据近年来各地修筑试验路的经验提出的。它们能达到 20% 左右的孔隙率和 1.0cm/s 以上的渗透系数，其强度和模量值均能满足基层的要求。

5.4.4 沥青结合料类材料的动态压缩模量应依据相应的水平确定：

1 水平一：沥青混合料动态压缩模量的测定应符合现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410) T0738 的有关规定，试验温度取 20℃，加载频率采用 5Hz。

2 水平二：常规级配的混合料采用式(5.4.4)计算动态压缩模量。

$$\lg E_a = 2.9548 + 0.0802G^* - 0.1272P_a - 0.0328V + 0.0376VCA_{DRC} \quad (5.4.4)$$

式中： $E_a$ ——沥青混合料动态压缩模量(MPa)；

$G^*$ ——60℃、10rad/s 下沥青动态剪切复数模量(kPa)；

$P_a$ ——沥青混合料的油石比(%)；

$V$ ——压实沥青混合料的空隙率(%)；

$VCA_{DRC}$ ——捣实状态下粗集料的松装间隙率(%)。

3 水平三：可采用表 5.4.4 取值。

表 5.4.4 常用沥青混合料基层 20℃条件下动态压缩模量(MPa)

| 沥青混合料类型        | 沥青种类           |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | 70 号道路石油沥青     | 90 号道路石油沥青     | 110 号道路石油沥青    |
| AC10/AC13      | 7 000 ~ 11 000 | 6 500 ~ 10 500 | 6 000 ~ 9 500  |
| AC16/AC20/AC25 | 8 000 ~ 12 000 | 7 500 ~ 11 500 | 6 500 ~ 11 000 |

注：1. 沥青混合料均为 5Hz 条件下动态压缩模量。

2. 沥青黏度大、级配好或空隙率小时取高值，反之取低值。

## 条文说明

参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),增加了沥青结合类材料的动态压缩模量在三个水平下的确定方法。

水平二中式(5.4.4)模量预估公式适用于采用道路石油沥青和常规级配的混合料。该公式来源于交通运输部西部交通建设科技项目“基于多指标的沥青路面结构设计方法研究”成果,其中沥青混合料动态压缩模量预估模型的加载频率为5Hz。

水平三中常用基层沥青混合料20℃条件下动态压缩模量取值为加载频率5Hz下的典型值范围,5Hz为路面基层典型试验工况。

## 5.5 水泥混凝土材料

**5.5.1** 厚度大于320mm的普通混凝土面层可分为上、下两层连续摊铺。上层厚度不宜小于60mm,宜采用高强、耐磨的混凝土材料,集料公称最大粒径不宜大于19mm,下层可采用再生混凝土材料。

### 条文说明

本条文是对耐磨混凝土、再生混凝土应用的总体指导建议,根据山西长临高速公路、广东粤赣高速公路等实体工程应用情况,将上层厚度“不小于总厚度的1/3”调整为“不宜小于60mm”。再生混凝土的收缩性一般较大,需重视再生混凝土材料设计。

**5.5.2** 水泥混凝土宜选用道路硅酸盐水泥、硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。水灰(胶)比宜不大于0.43,水泥用量应不小于300kg/m<sup>3</sup>;有抗冻要求时,应掺加引气剂,抗冻等级应不低于250,水灰(胶)比宜不大于0.42,水泥用量应不小于320kg/m<sup>3</sup>。混凝土集料公称最大粒径应不大于26.5mm。砂的细度模数宜为2.5~3.0,当采用机制砂时,应符合现行《公路工程 水泥混凝土用机制砂》(JT/T 819)的规定。

### 条文说明

近年来,水泥混凝土路面冻害问题较为普遍,对水泥类型、最低水泥用量、最大水灰比、抗冻等级进行规范,以期提高混凝土抗冻耐久性。混凝土中砂的细度模数原则上不小于2.5,河砂紧缺时这一规定可以放宽至2.0。

**5.5.3** 贫混凝土集料公称最大粒径不宜大于31.5mm,水泥用量在不掺粉煤灰时不宜大于200kg/m<sup>3</sup>。

条文说明

混凝土面层下采用贫混凝土基层，主要是为了增加基层的抗冲刷能力，并不要求它有很高的强度。高强度的贫混凝土并不能使面层厚度降低很多，反而会增加混凝土面层的温度翘曲应力，并产生会影响到面层的收缩裂缝。

5.5.4 碾压混凝土做基层时，集料公称最大粒径不宜大于 26.5mm；碾压混凝土做面层时，集料公称最大粒径不宜大于 19mm。

5.5.5 钢纤维混凝土集料公称最大粒径不宜大于 19mm。铣削型钢纤维的抗拉强度标准值不宜小于 700MPa，剪切型钢纤维的抗拉强度标准值不宜小于 1000 MPa。非冰冻地区水泥用量不应少于 360kg/m<sup>3</sup>，冰冻地区不应少于 380kg/m<sup>3</sup>。钢纤维体积率宜为 0.5% ~1.0%。

条文说明

水泥混凝土中掺加钢纤维有两大作用，第一是防止因硬化干缩引起的结构开裂；第二是提高混凝土的抗拉、抗弯强度，增加裂后韧性。防裂的钢纤维体积掺量为 0.25% ~ 0.4%，增强增韧的钢纤维体积掺量大于 0.4%，掺量上限由施工性能与造价决定。混凝土路面中掺加钢纤维是以增强增韧为目的，一般掺量为 0.5% ~ 1.0%，钢纤维类型推荐采用钢锭铣削型(≥700MPa)、高强(≥1 000MPa)或超高强(≥1 300MPa)的端钩钢丝型钢纤维，散装端钩钢丝型钢纤维的拌和均匀性稍差，建议采用联排装端钩钢丝型钢纤维。

5.5.6 非冰冻地区预制块混凝土的抗压强度不宜小于 50MPa，冰冻地区不宜小于 60MPa。

5.5.7 水泥混凝土的弯拉强度、劈裂抗拉强度和弹性模量应依据相应的水平确定：  
1 水平一：按现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420)实测。  
2 水平三：可采用表 5.5.7 取值。

表 5.5.7 水泥混凝土强度和弹性模量

|              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 弯拉强度 (MPa)   | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0  | 3.5  | 4.0  | 4.5  | 5.0  | 5.5  |
| 抗压强度 (MPa)   | 7    | 11   | 15   | 20   | 25   | 30   | 36   | 42   | 49   |
| 劈裂抗拉强度 (MPa) | 0.89 | 1.21 | 1.53 | 1.86 | 2.20 | 2.54 | 2.85 | 3.22 | 3.55 |
| 弹性模量 (GPa)   | 15   | 18   | 21   | 23   | 25   | 27   | 29   | 31   | 33   |

条文说明

水泥混凝土材料的弯拉强度、抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量随混合料组成材



料、养生条件和试验方法的不同而变化,难以在各项指标之间建立理论转换关系式。交通运输部公路科学研究所、江苏省交通运输厅和中国民用航空机场设计研究院、江苏省公路管理局等单位分别对弯拉强度和立方体抗压强度、弯拉强度和圆柱劈裂强度、弯拉强度和弯拉弹性模量的关系进行了试验研究,并给出了经验关系式。美国力学经验法设计指南也给出了由抗压强度、劈裂抗拉强度预估弯拉强度的经验关系式,以及抗压强度与弹性模量的关系式。

在考量各关系式预估结果可靠性的基础上,表 5.5.7 给出了水泥混凝土弯拉强度、抗压强度、劈裂抗拉强度以及弹性模量的对应值。建议根据当地混凝土弯拉强度、抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量的试验数据,建立本地区混凝土材料力学指标的经验换算公式,并以此进行混凝土路面设计取值。表中的劈裂抗拉强度值仅为本规范相关设计参数取值使用,不作为实际工程中水泥混凝土路面弯拉强度验收的间接标准。

#### 5.5.8 水泥混凝土的线膨胀系数应依据相应的水平确定:

- 1 水平一:按现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTJ 3420)实测。
- 2 水平三:可采用表 5.5.8 取值。

表 5.5.8 水泥混凝土线膨胀系数

| 粗集料类型                               | 石英岩 | 砂岩 | 砾石 | 花岗岩 | 玄武岩 | 石灰岩 |
|-------------------------------------|-----|----|----|-----|-----|-----|
| 线膨胀系数( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | 12  | 12 | 11 | 10  | 9   | 7   |

#### 条文说明

表 5.5.8 中的混凝土线膨胀系数主要参照国内外研究试验数据。若混凝土中不掺加粉煤灰,则线膨胀系数相应增加  $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

#### 5.5.9 钢筋混凝土路面面层与基层间的动态摩阻系数可按表 5.5.9 取值。

表 5.5.9 钢筋混凝土路面面层与基层间的动态摩阻系数

| 基层材料                          | 推荐值 |
|-------------------------------|-----|
| 级配碎石、级配砾石或砂砾石                 | 1.5 |
| 无机结合料稳定粒料、沥青混凝土、<br>沥青碎石、贫混凝土 | 1.8 |

5.5.10 连续配筋混凝土路面面层与基层间的静态摩阻系数可按表 5.5.10 取值。

表 5.5.10 连续配筋混凝土路面面层与基层间的静态摩阻系数

| 基层材料          | 推荐值 |
|---------------|-----|
| 级配碎石、级配砾石或砂砾石 | 2.5 |
| 沥青混凝土、沥青碎石    | 7.5 |
| 无机结合料稳定粒料     | 8.9 |
| 贫混凝土、碾压混凝土    | 8.5 |

### 条文说明

钢筋混凝土路面、连续配筋混凝土路面面层与基层层间滑动状态不同，一般钢筋混凝土路面面层与基层处于动态滑动状态，而连续配筋混凝土路面面层与基层处于静态滑动状态，因此，两类混凝土路面的面层、基层摩阻系数不同。

## 5.6 钢筋

### 5.6.1 钢筋强度和弹性模量可按表 5.6.1 取值。

表 5.6.1 钢筋强度和弹性模量

| 钢筋种类   | 钢筋直径 $d$ (mm) | 屈服强度 $f_{sy}$ (MPa) | 弹性模量 $E_s$ (MPa) |
|--------|---------------|---------------------|------------------|
| HPB300 | 6~22          | 300                 | 210 000          |
| HRB400 | 6~50          | 400                 | 200 000          |
| HRB500 |               | 500                 |                  |
| HRB600 |               | 600                 |                  |

### 条文说明

表 5.6.1 系根据《钢筋混凝土用钢》(GB 1499.1—2024、GB 1499.2—2024) 列出。

## 5.7 各类材料的泊松比

### 5.7.1 各类材料的泊松比宜按照表 5.7.1 确定。

表 5.7.1 泊松比推荐值

| 材料类别 | 路基  | 粒料   | 无机结合料<br>稳定材料 | 密级配沥青<br>混合料 | 开级配、半开<br>级配沥青混合料 | 水泥混凝土 |
|------|-----|------|---------------|--------------|-------------------|-------|
| 泊松比  | 0.4 | 0.35 | 0.25          | 0.25         | 0.4               | 0.15  |

## 6 接缝设计

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 普通水泥混凝土、钢筋混凝土、碾压混凝土和钢纤维混凝土面层板的平面布局宜采用矩形分块，其纵向和横向接缝应垂直相交，纵缝两侧的横缝应不相互错位。

#### 条文说明

一般路段上的混凝土板通常采用纵缝同横缝垂直相交的矩形形式，在横缝不设传力杆的中等和轻交通公路上，横缝也可以设置成与纵缝斜交，使车轴两侧的车轮不同时作用在横缝的一侧，从而减少轴载对横缝的影响，减小接缝处的挠度和应力。但斜缩缝的锐角板角容易断裂。国外有设置斜缩缝路段的经验，但斜度有一定限制，一般不大于1:10。当设置传力杆时，斜缝难以使传力杆准确定位。

**6.1.2** 纵向接缝的间距应结合路面或场区总宽度、行车道及硬路肩宽度、施工铺筑宽度等确定，避免纵向接缝与轮迹带重合。板宽应符合下列要求：

- 1 普通混凝土面板宜为3.0~4.5m。
- 2 碾压混凝土或钢纤维混凝土面板不宜超过8m。
- 3 钢筋混凝土、连续配筋混凝土面板不宜超过10m。

#### 条文说明

纵向接缝间距一般按车道线设置，这样可以使路面美观。带有路缘带的高速公路和一级公路，板宽可以按车道和路缘带的宽度确定，行车道(包括路缘带)宽度通常为3.75~4.5m，硬路肩宽度为2.5m或3.0m。车道和路缘带间不设纵缝，也可以考虑施工方法等因素适当调整。

收费站广场面板纵缝的布设因考虑收费岛宽度的影响，为避免纵向接缝过多而加大纵缝边部受荷概率，纵缝建议对中收费岛尖端，此时纵缝间距通常超过5m，整块板面积超过25m<sup>2</sup>，则面层板建议采用钢筋混凝土。

**6.1.3** 横向接缝的间距应按面层类型确定，板长应符合下列规定：

- 1 普通水泥混凝土面板宜为4~6m，长宽比宜为1:1~1:1.35，平面面积不宜大于

25m<sup>2</sup>。

2 碾压混凝土或钢纤维混凝土面层宜为 6 ~ 10m。

3 钢筋混凝土面层宜为 6 ~ 15m，面层板的长宽比不宜超过 2.5，平面面积不宜大于 45m<sup>2</sup>。

### 条文说明

横缝间距大小影响板内温度应力、接缝缝隙宽度和接缝传荷能力。国内外有关板块尺寸的使用经验，主要有三点：(1)板的最大尺寸一般为板厚的 18 ~ 24 倍；(2)板块长边(车辆行驶方向)与短边之比建议不大于 1.25；(3)板长和相对刚度半径的比例不超过 5。上述三种方式确定的普通混凝土路面的横缝间距是较为相近的，本条款给出的间距值是合适的。在普通混凝土面层的建议范围内，所选横缝间距随面层厚度减小而缩短，随基层刚度的增加而适当缩短。面层厚度越大、板块尺寸越大时，面层温度翘曲应力越大，易于发生板底脱空，此时需降低基层刚度。换言之，当选用无机结合料稳定类基层时，水泥板块划分建议适当减小板块尺寸，同时考虑面板与基层之间设置封层等。

对于高等级公路，通常硬路肩与行车道的路面结构相同，考虑纵缝两侧的横缝对齐，则行车道板块和硬路肩板块的长宽比不能同时满足 1.35 的要求。此时可以减小行车道和硬路肩的长宽比，行车道板块可以接近正方形。

贫混凝土或碾压混凝土基层需切缝，切缝间距为面板长度的 1 ~ 2 倍，且与面层接缝对齐。

## 6.2 纵向接缝

**6.2.1** 一次铺筑宽度小于路面宽度时，应设置纵向施工缝。纵向施工缝应采用设拉杆平缝形式，上部应锯切槽口，深度宜为 30 ~ 40mm，宽度宜为 3 ~ 8mm，槽内应灌塞填缝料，构造如图 6.2.1 所示。

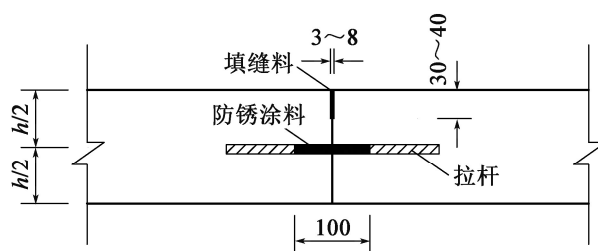


图 6.2.1 纵向施工缝构造(尺寸单位: mm)

注:  $h$  为水泥混凝土面板厚度。

**6.2.2** 普通水泥混凝土一次铺筑宽度大于 4.5m 时，或其他类型面层超过纵缝一般设置间距时，应设置纵向缩缝。纵向缩缝应采用设拉杆假缝形式，锯切的槽口深度应大

于施工缝的槽口深度。采用粒料基层时，槽口深度应为板厚的  $1/3$ ；采用稳定类基层时，槽口深度应为板厚的  $2/5$ 。其构造如图 6.2.2 所示。

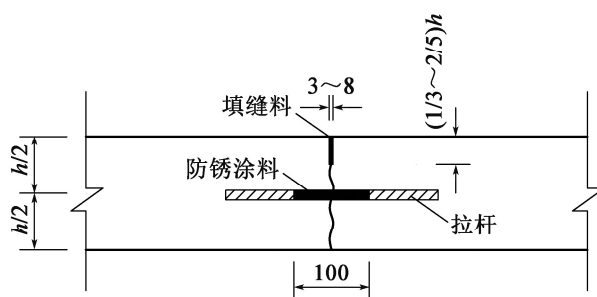


图 6.2.2 纵向缩缝构造(尺寸单位: mm)

**6.2.3** 行车道路面与混凝土硬路肩之间的纵向接缝应设置拉杆，二者的横向缩缝应连通。

#### 条文说明

纵向接缝，无论是施工缝或缩缝，均需在缝内设置拉杆，以保证接缝缝隙不张开。纵向施工缝有平缝和企口缝两种形式，但实践经验表明，企口缝的工作性能不好，易于在阴企口上沿发生剪切断裂损坏，对于承受重交通轴载的水泥混凝土路面，企口缝有明显的缺点，因此实践倾向于采用平缝。

对于铺筑超宽场区的水泥混凝土路面，可以视重载交通的车道位置，其附近纵向施工缝采用设传力杆平缝形式。

对于低等级道路，当路面宽度小于 6.0m 时，可以不设置纵向缩缝。纵向缩缝的槽口深度需大于纵向施工缝，以保证混凝土在干缩或温缩时能在槽口下位置处开裂。否则，会由于缩缝处截面的强度大于缩缝区外无拉杆的混凝土强度，导致缩缝区外的混凝土板出现纵向断裂。无机结合料类基层的刚度及基层与面层间的摩阻系数，大于粒料类基层，混凝土干缩或温缩时受摩阻约束而产生的应力要大些，因此无机结合料类基层上混凝土板缩缝的槽口深度要比采用粒料类基层时深一些。

**6.2.4** 纵缝应与路线中线平行。在路面等宽的路段内或路面变宽路段的等宽部分，纵缝的间距和形式应保持一致。路面变宽段的加宽部分与等宽部分之间，应以纵向施工缝隔开。加宽板在变宽段起终点处的宽度应不小于 1m。

#### 条文说明

纵缝与路线中线平行，板的长边与车辆行驶方向保持一致，可以使行车荷载尽量少驶经纵缝，减少板处于临界荷位受力状态的概率。在路面宽度变化的路段内，不可以使纵缝的横向位置随路面宽度一起变化。其等宽部分要保持与路面等宽路段相同的纵缝设置位置和形式，而把加宽部分作为向外接出的路面进行纵缝布置。此外，变宽段起点处

的加宽板的宽度建议由零增加到 1m 以上，避免出现锐角板。

**6.2.5** 拉杆应采用螺纹钢筋，设在板厚中央，并应对拉杆中部 100mm 范围内进行防锈处理。拉杆的直径、长度和间距，可参照表 6.2.5 选用。施工布设时，拉杆间距应根据横向接缝的实际位置予以调整，最外侧的拉杆距横向接缝或传力杆端部的距离应不小于 100mm。

表 6.2.5 拉杆直径、长度和间距 (mm)

| 面层厚度<br>(mm) | 钢筋直径<br>(mm) | 到自由边或未设拉杆纵缝的距离 (m) |         |         |         |         |         |
|--------------|--------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              |              | 3.00               | 3.50    | 3.75    | 4.50    | 6.00    | 7.50    |
| 200 ~ 250    | 14           | 700@900            | 700@800 | 700@700 | 700@600 | 700@500 | 700@400 |
| ≥260         | 16           | 800@800            | 800@700 | 800@600 | 800@500 | 800@400 | 800@300 |

条文说明

纵向接缝的拉杆间距与接缝形式、水泥板厚度、接缝到自由边距离、钢筋等级有关。缩缝所需的拉杆间距比平缝施工缝小，厚水泥面板所需的拉杆间距比薄水泥面板小，钢筋屈服强度较低时所要求的拉杆间距小。表 6.2.5 中的拉杆间距所针对的钢筋等级为 HRB400，接缝形式为缩缝或平缝施工缝。表 6.2.5 中的拉杆间距并不是所采用的缩缝间距的公倍数。为避免出现拉杆与缩缝的重合或与传力杆干扰，在施工布设时，依据具体情况调整缩缝附近的拉杆间距。

**6.2.6** 连续配筋混凝土面层的纵缝拉杆可由板内横向钢筋延伸穿过接缝代替。

6.3 横向接缝

**6.3.1** 每日施工结束或因临时原因中断施工时，必须设置横向施工缝，其位置宜选在缩缝或胀缝处。设在缩缝处的施工缝，应采用加传力杆的平缝形式，其构造如图 6.3.1 所示；设在胀缝处的施工缝，其构造应与胀缝相同。

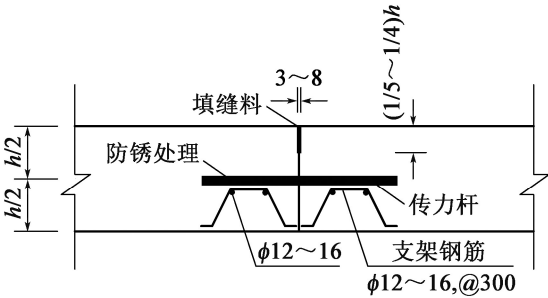


图 6.3.1 横向施工缝构造 (尺寸单位: mm)

**6.3.2** 横向缩缝可等间距或变间距布置,应采用假缝形式。极重、特重和重交通荷载公路的横向缩缝,中等和轻交通荷载公路邻近胀缝或自由端部的3条横向缩缝,收费广场的横向缩缝,应采用设传力杆假缝形式,其构造如图6.3.2 a)、6.3.2 b)所示。其他情况可采用不设传力杆假缝形式,其构造如图6.3.2 c)所示。传力杆的设置不应妨碍相邻混凝土板的自由伸缩,钢筋表面应作防锈处理,高速公路及一级公路的传力杆宜全长范围内采用喷塑处理,其他等级公路的传力杆可采用镀锌后涂敷沥青等方式处理。

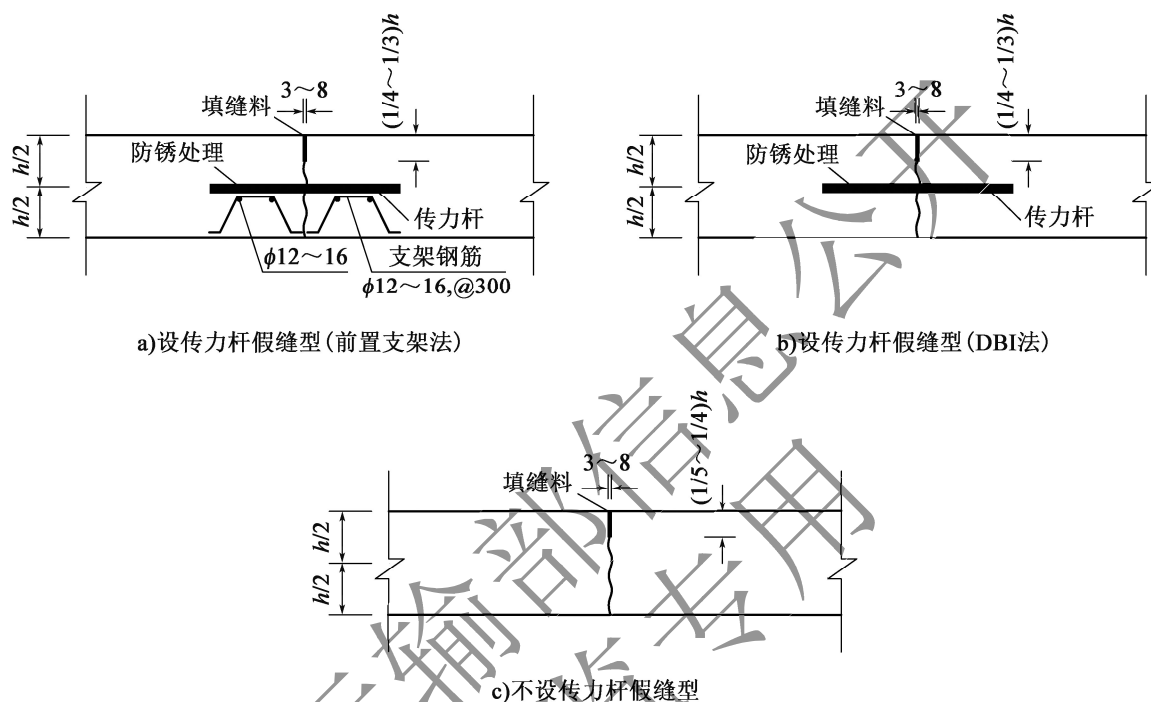


图 6.3.2 横向缩缝构造(尺寸单位: mm)

### 条文说明

一般情况下,横向缩缝都采用等间距布置。随机的不等间距横缝布置,可以降低车辆的共振响应,但设计时需兼顾面层板的长宽比,同时考虑施工便捷性,不建议使用。

接缝是混凝土路面的最薄弱处,容易产生唧泥和错台病害,除了基层不耐冲刷外,接缝传荷能力差也是一个重要原因。同时,在出现唧泥后,无传力杆的接缝由于板边挠度大而容易迅速产生板块断裂。国外各种接缝损坏预估模型显示,传力杆的设置与否对接缝碎裂损坏的影响最大,设置传力杆后,路面总费用增加5%~8%,但接缝寿命可以提高一倍以上。此外,接缝无传力杆的旧混凝土面层在考虑设置沥青加铺层时,往往会因接缝传荷能力差易产生反射裂缝而不得不加大加铺层的厚度。为了改善混凝土路面的行驶质量,保证混凝土路面的使用寿命,便于在使用后期铺设加铺层,本条规定了在承受极重、特重和重交通荷载的普通混凝土面层的所有横向缩缝内必须设置传力杆。中等和轻交通荷载公路的横向缩缝可以不设传力杆,但邻近胀缝或自由端部的3条横向缩缝必须采用设传力杆假缝形式,这是由于这些横缝的缝隙会随混凝土板的反复伸缩位移

而逐渐张开，需要设置传力杆以保证这些接缝的传荷能力。

接缝传荷能力除受交通荷载影响外，还需考虑项目区气候条件、基层受水条件等。对于易冲刷的基层，可能产生脱空，则建议设置传力杆。气候严寒区，不设传力杆的假缝宽度(非预切的槽口宽度，而是下部断裂的宽度)受低温影响而加大，此时在荷载作用下，接缝的传荷能力因材料嵌挤的失效而下降较快。

DBI 法在施工过程中难以保证传力杆的安装精度，特别是当传力杆的直径较大时。除非为了保证传力杆的安装精度，否则建议传力杆采用前置法施工。

**6.3.3** 横向缩缝顶部应锯切槽口，设置传力杆时槽口深度宜为面层厚度的  $1/4 \sim 1/3$ ，不设置传力杆时槽口深度宜为面层厚度的  $1/5 \sim 1/4$ 。槽口宽度应根据施工条件、填缝料性能等因素而定，宽度宜为  $3 \sim 8\text{mm}$ ，槽内应填塞填缝料。二级及二级以下公路的槽口可一次锯切成型。高速和一级公路槽口宜二次锯切成型，在第一次锯切缝的上部宜增设宽  $7 \sim 10\text{mm}$  的浅槽口，槽口下部应设置背衬垫条，上部应用填缝料灌填，其构造如图 6.3.3 所示。

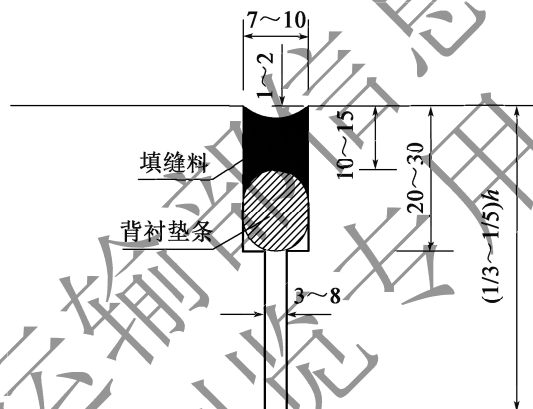


图 6.3.3 二次锯切槽口构造(尺寸单位: mm)

#### 条文说明

为保证混凝土在干缩或温缩时能在槽口下位置处开裂，防止在传力杆端部产生裂缝，当横向缩缝设置传力杆时，切缝深度建议比不设传力杆的假缝切缝深度稍大。当基层、底基层选择无机结合料材料而相对刚度较大时，接缝深度建议选择高限。一次锯切的槽口断面呈窄长形，设在槽口内的填缝料在混凝土板膨胀时易被挤出路面；而在混凝土板收缩时易因拉力较大而与槽壁脱开。为此，对高速公路、一级公路的缩缝，建议采用两次锯切槽口，以保证接缝填封效果和行驶质量。近年来国内修筑的高等级水泥混凝土路面的接缝多选用背衬垫条控制填缝深度和填缝料形状，并有较多的成功经验。

**6.3.4** 在邻近桥梁或其他固定构造物处，或者与其他道路相交处，应设置横向胀缝，胀缝条数应根据膨胀量大小而定。胀缝宽宜为  $20 \sim 25\text{mm}$ ，深宽比不宜大于 1，缝内应设置填缝板和可滑动的传力杆。胀缝的构造如图 6.3.4 所示。



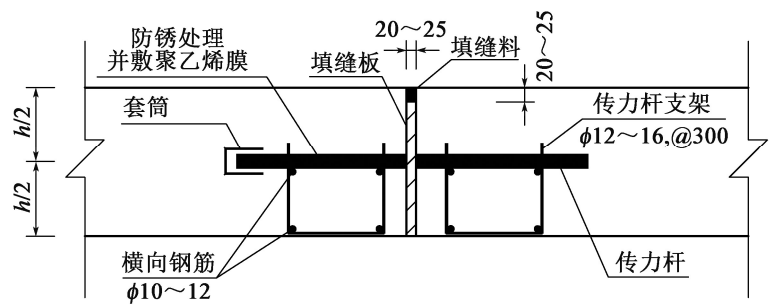


图 6.3.4 胀缝构造 (尺寸单位: mm)

条文说明

胀缝用于释放面板累积的膨胀隆起变形量。膨胀量大小取决于温度差(施工时温度与使用期最高温度之差)、集料的膨胀性(线膨胀系数)以及面层出现膨胀位移的活动区长度。胀缝的缝隙宽度为 20 ~ 25mm, 可供膨胀位移的有效间隙不到 10mm。高温施工, 可以不设胀缝; 常温或低温施工, 根据集料线膨胀系数、年温差及路面两端构造物间距预估实际膨胀量, 从而决定需要设置胀缝数。

传力杆进行防锈处理后, 外面再套 0.4mm 厚的聚乙烯膜。杆的一端加金属套, 内留 30mm 空隙, 填以泡沫塑料或纱头; 带套的杆端在相邻板交错布置。传力杆在基层预定位置上设置钢筋支架予以固定, 钢筋支架不仅是胀缝施工的需求, 同时也起到增强胀缝两侧抗拉强度、抵抗拉应力破坏的作用。

**6.3.5** 传力杆应采用光圆钢筋, 最小长度为 450mm。横向缩缝和胀缝传力杆的尺寸、间距可按表 6.3.5 选用。最外侧传力杆距纵向接缝或自由边的距离宜为 150 ~ 250mm。

表 6.3.5 传力杆尺寸和间距 (mm)

| 面层厚度 | 缩缝    |         | 胀缝    |         |
|------|-------|---------|-------|---------|
|      | 传力杆直径 | 传力杆最大间距 | 传力杆直径 | 传力杆最大间距 |
| ≤200 | 22    | 300     | 25    | 250     |
| 220  | 22    | 300     | 25    | 250     |
| 240  | 25    | 300     | 28    | 250     |
| 260  | 25    | 300     | 28    | 250     |
| 280  | 25    | 300     | 28    | 250     |
| 300  | 28    | 300     | 28    | 250     |
| ≥320 | 28    | 300     | 28    | 250     |

条文说明

传力杆材料, 除了光面钢筋外, 目前国外还进行了许多其他材料的尝试, 如不锈钢

钢筋、塑料纤维、充混凝土塑料纤维管等，其主要目的是防止普通钢筋的锈蚀，特别是冰雪地区融雪剂的使用对传力杆钢筋的侵蚀。这些材料的传力杆国内应用较少，其使用效果及适用范围有待研究与实践论证。

传力杆施工有两种方式：一是配合滑模摊铺施工的传力杆自动插入装置法(DBI法)，二是前置传力杆钢筋支架法。国内滑模摊铺施工的经验表明，对于DBI法，传力杆直径大于32mm时，传力杆难于插入，并且会导致路面平整度下降。

原规范中传力杆的尺寸设计依据源于美国AASHTO与波特兰水泥协会(PCA)给出的推荐值(传力杆直径推荐值约为面板厚度的1/8)，其工程经验、试验和研究成果主要集中在粒料基层，将其直接推广至我国路面设计存在着4点缺陷：(1)未考虑刚性或无机结合料稳定类基层传荷效应的影响，研究发现，刚性或无机结合料稳定类基层将起到分担传荷的作用，可以显著降低传力杆上传递的荷载值。当基层弯曲刚度与面层弯曲刚度比 $D_b/D_c=0.10$ 时，传力杆上传递的荷载值可以降低44%，当 $D_b/D_c=0.20$ 时，传力杆上传递的荷载值可以降低60%；(2)AASHTO和PCA是以板角一次性作用受荷的极限承载力作为传力杆的设计荷载，与实际行驶的车辆荷载不符，过于放大了传力杆承受的荷载值，使传力杆过粗；(3)AASHTO与PCA采用传力杆下缘混凝土的名义压应力作为设计指标，与实际混凝土破坏模式不符。试验研究发现，传力杆周围混凝土的破坏模式为拉应力破坏，且弹性极限允许拉应力值与传力杆直径无关，仅由水泥混凝土的弯拉强度 $f_t$ 决定；(4)传力杆尺寸设计仅考虑了传力杆的极限承载力，未考量疲劳荷载作用下传力杆传荷能力的衰减，与水泥混凝土路面的实际工作状态不符。

本规范的传力杆尺寸和间距推荐值主要基于我国水泥混凝土路面常见结构，纳入了刚性或无机结合料稳定类基层对传力杆传荷的分担效应，并利用承载力极限状态和正常使用极限状态双标准控制原则测算所得。其中，主要设计参数和标准为：

基层弯曲刚度 $D_b$ 与面层弯曲刚度 $D_c$ 之比 $D_b/D_c$ ：极重、特重交通大于0.15，重交通大于0.10，中等、轻交通大于0.05。若三级及以下等级公路采用粒料类基层时，传力杆直径建议在表6.3.5推荐值上加大一号；

设计极限轴载：极重、特重交通取300kN，重交通取250kN，中等及以下交通取150kN；

100kN单轴双轮组轴载作用次数：极重交通取 $5 \times 10^6$ 万次，特重交通取 $1 \times 10^6$ 万次，重交通取2000万次，中等及以下交通取100万次；

温度梯度统一取 $100^\circ\text{C}/\text{m}$ ；

混凝土的弯拉强度：极重、特重、重交通取5.0MPa，中等、轻交通取4.5MPa。

正常使用极限状态设计中使用末期接缝的弯沉传荷效率 $\text{LTE}_w$ ：缩缝大于85%，胀缝大于80%。

## 6.4 交叉口接缝布设

### 6.4.1 两条道路正交时，各条道路宜保持本身纵缝的连贯，而相交路段内各条道路

的横缝位置应按相对道路的纵缝间距作相应调整, 保证两条道路的纵横缝垂直相交, 互不错位。两条道路斜交时, 主要道路宜保持纵缝的连贯, 而相交路段内的横缝位置应按次要道路的纵缝间距作相应变动, 保证与次要道路的纵缝相连接。相交道路弯道加宽部分的接缝布置, 应不出现或少出现错缝和锐角板, 当出现错缝、锐角板时, 宜加设防裂钢筋和角隅补强钢筋。

### 条文说明

布设交叉口的接缝时, 不建议将交叉口孤立出来进行, 需先分清相交道路的主次, 保持主要道路的接缝位置和形式全线贯通一致。而后, 考虑次要道路的接缝布设如何与主要道路相协调, 并适当调整交叉口范围内主要道路的横缝位置, 胀缝需设置在次要道路上。

**6.4.2** 在次要道路弯道加宽段起终点断面处的横向接缝, 应采用胀缝形式。膨胀量大时, 应在直线段连续布置 2~3 条胀缝。

## 6.5 端部处理

**6.5.1** 水泥混凝土路面与桥涵、通道及隧道等构造物相衔接的胀缝无法设置传力杆时, 可在毗邻构造物的板端部内配置双层钢筋网; 或在长度为 6~10 倍板厚的范围内逐渐将板厚增加 20%, 如图 6.5.1 所示。

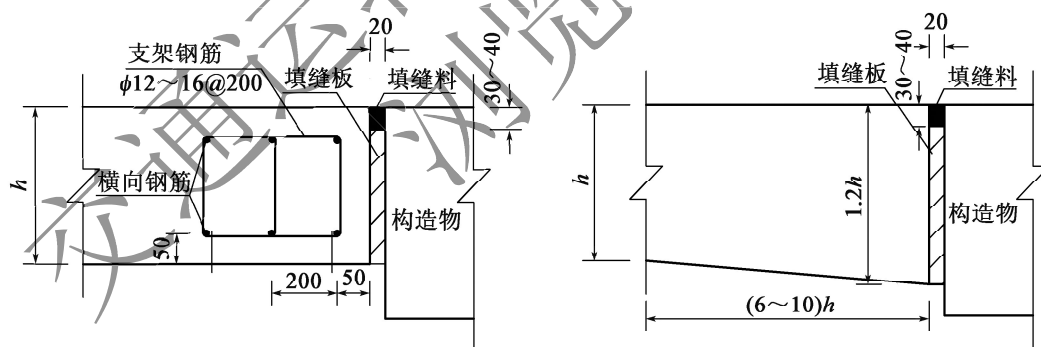


图 6.5.1 邻近构造物胀缝构造(尺寸单位: mm)

**6.5.2** 混凝土路面与桥梁相接应符合下列规定:

1 混凝土路面与桥梁相接时, 桥头应设置钢筋混凝土过渡板。桥头设有搭板时, 过渡板长可取正常路段 1~2 倍板长, 桥头未设搭板时, 过渡板长可取正常路段 2~3 倍板长。

2 过渡板与搭板间的横缝采用设拉杆平缝形式, 过渡板与混凝土面层板间的横缝采用设传力杆胀缝形式。膨胀量大时, 应连续设置 2~3 条设传力杆胀缝。当桥梁为斜

交时，钢筋混凝土板的锐角部分应采用钢筋网补强。

### 条文说明

本条文对搭板的设计未作具体规定，设计时，需与桥涵设计人员联系配合。软土路基或高填方路基桥头，可以由混凝土预制块面层或沥青面层铺筑过渡段，其长度建议不小于8m。过渡段是一项临时措施，待路基沉降稳定后，再铺筑混凝土面层。

**6.5.3** 混凝土路面与沥青路面相接时，应设置至少3m长的过渡段。过渡段路面结构应按阶梯状叠合布置，过渡板最薄处的厚度应不小于200mm，如图6.5.3所示，过渡板顶面应设横向拉槽，保证沥青层与过渡板的良好黏结。过渡板与混凝土面层板相接处的接缝内宜设置直径25mm、长700mm、间距400mm的拉杆。混凝土面层毗邻该接缝的1~2条横向接缝应采用胀缝形式。

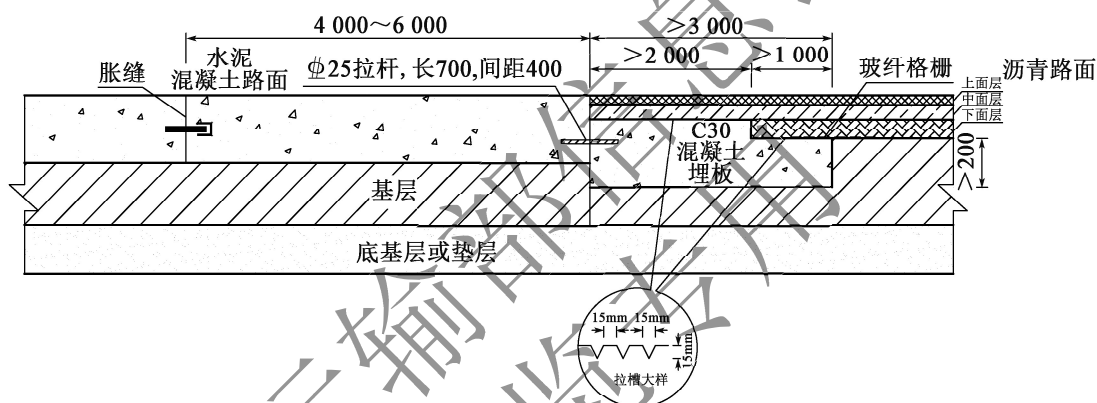


图 6.5.3 混凝土路面与沥青路面相接段的构造布置(尺寸单位: mm)

### 条文说明

在混凝土面层与沥青面层相接处，由于沥青面层难以抵御混凝土面层的膨胀推力，易于出现沥青面层的推移拥起，而形成接头处的不平整，引起跳车。过渡板上的沥青层较薄，上下层模量比较大，为防止沥青层发生剪切推移，沥青层最小厚度建议大于4cm。对过渡板表面需进行处理，以加强沥青层与过渡板的黏结。

**6.5.4** 连续配筋混凝土面层与其他类型路面或构造物相连接的端部，应设置锚固结构。端部锚固结构可采用钢筋混凝土地梁、宽翼缘工字钢梁或模数式伸缩缝等形式：

1 钢筋混凝土地梁依据路基土的强弱宜采用3~5个，梁宽400~600mm，梁高1200~1500mm，间距5000~6000mm；地梁与连续配筋混凝土面层应连成整体；其构造如图6.5.4-1所示。

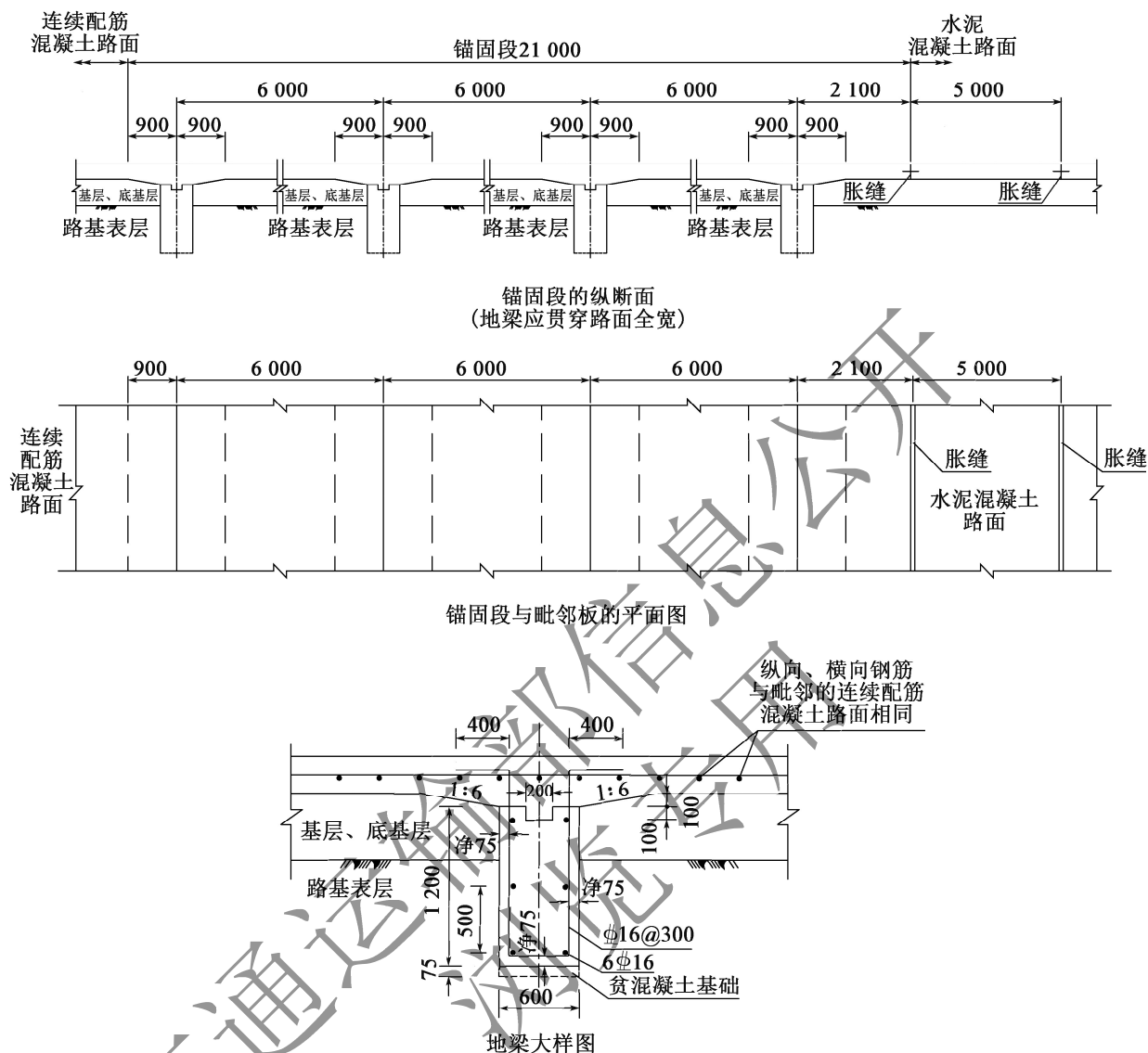


图 6.5.4-1 钢筋混凝土地梁锚固(尺寸单位: mm)

- 2 宽翼缘工字钢梁的底部应锚入钢筋混凝土枕梁内, 工字钢梁的尺寸、锚入深度应依据连续配筋混凝土路面厚度选择, 枕梁宜长 3 000mm、厚 200mm; 钢梁腹板与连续配筋混凝土面层端部间应填入胀缝材料; 其构造如图 6.5.4-2、图 6.5.4-3 所示。
- 3 模数式伸缩缝的锚固构件应与普通混凝土及连续配筋混凝土的钢筋网连接牢固, 必要时可增设钢筋笼, 确保钢筋网与伸缩缝形成稳固整体。伸缩缝安装后的缝宽依据温度确定, 一般控制在 25 ~ 35mm 范围内。安装就位后预留槽采用 C50 钢纤维混凝土浇筑, 其构造如图 6.5.4-2、图 6.5.4-4 所示。

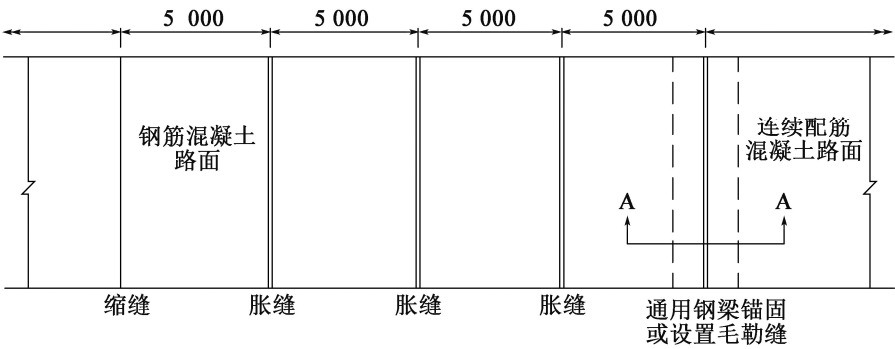


图 6.5.4-2 连续配筋混凝土段与毗邻板平面图(尺寸单位: mm)

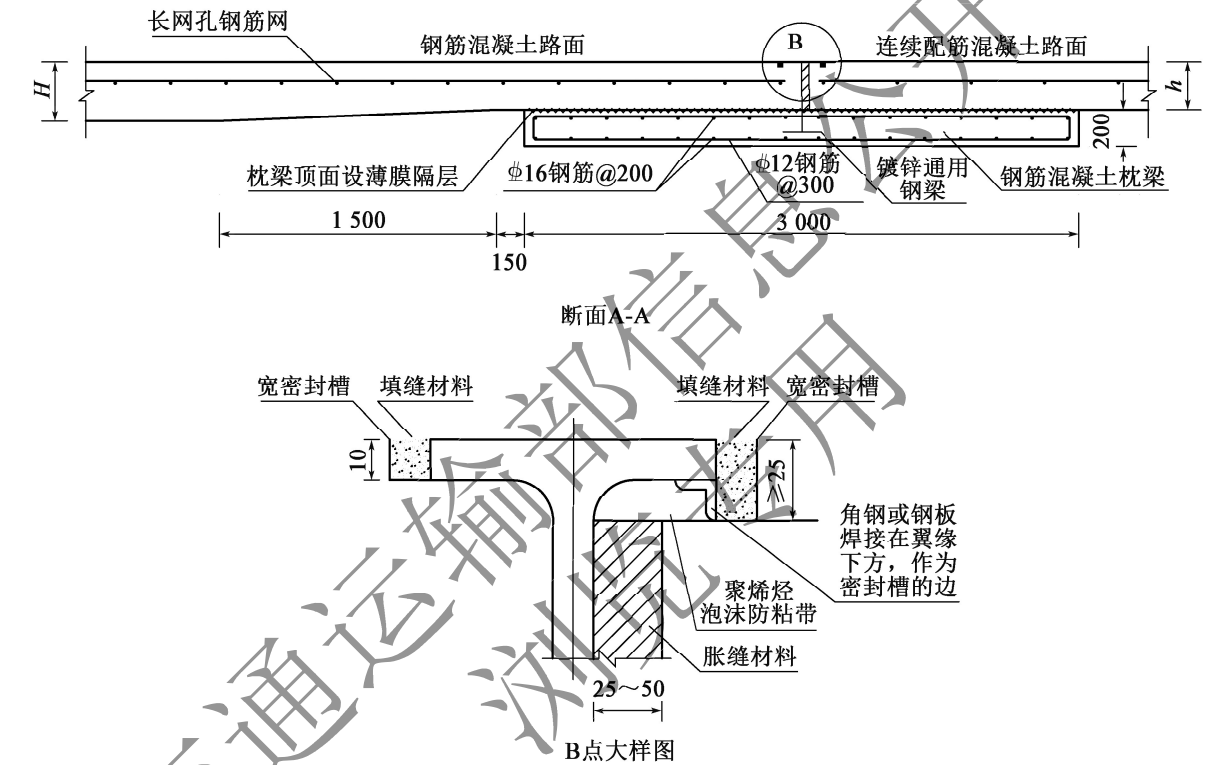


图 6.5.4-3 宽翼缘工字钢梁锚固(尺寸单位: mm)

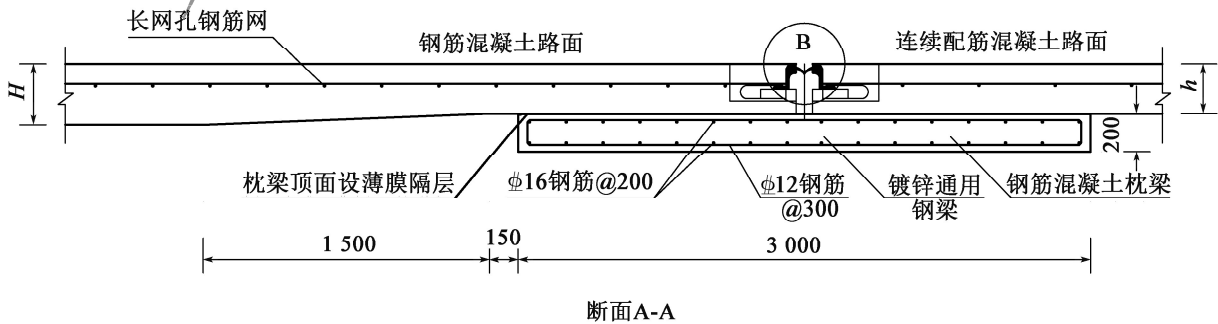


图 6.5.4-4

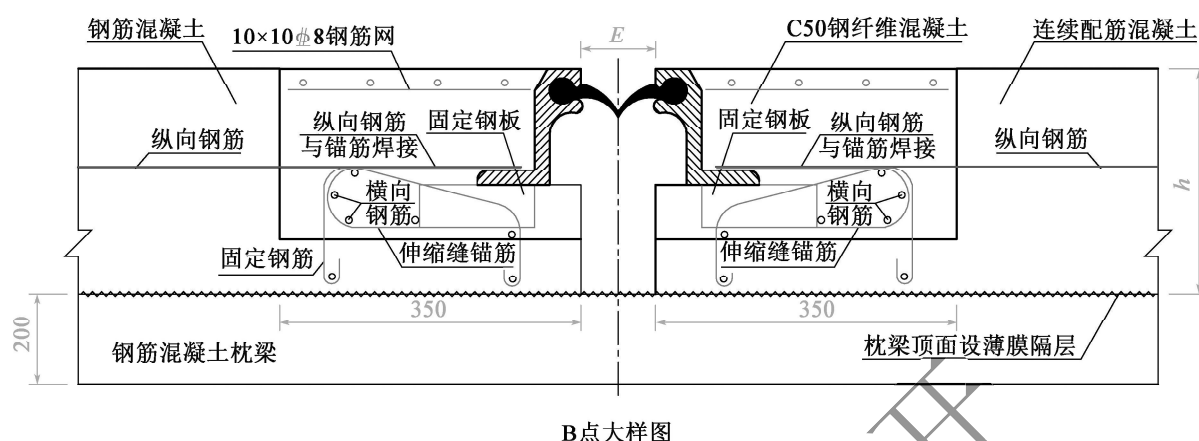


图 6.5.4-4 模数式伸缩缝(尺寸单位: mm)

注:  $H$  为钢筋混凝土面板厚度;  $h$  为连续配筋混凝土面板厚度。

### 条文说明

设置端部锚固结构是为了约束连续配筋混凝土面层的膨胀位移。端部锚固结构设计,需首先估算板端在温差作用下可能发生的位移量,根据位移控制要求(全部或部分)计算所需的约束力,由此验算锚固结构的强度、地基稳定性和纵向位移量是否满足控制要求。

国内外常见的端部锚固结构有两种,钢筋混凝土地梁及宽翼缘工字钢梁。通常土质情况较好的地段可以选择钢筋混凝土地梁,而在土质条件较差或在开挖困难的填石路基时,可以采用宽翼缘工字钢梁接缝。近年来我国有将模数式桥梁伸缩缝结构用于锚固端的经验,特别是用于已有锚固端的修复,实践证明效果较好,设计时可以作为一种选择,本次修订给出了参考图。

## 6.6 填缝材料

**6.6.1** 胀缝接缝板应选用能适应混凝土板膨胀收缩、施工时不易变形、复原率高和耐久性好的材料。高速公路和一级公路宜选用泡沫橡胶板、沥青纤维板;其他等级公路也可选用木材类或纤维类板。

**6.6.2** 填缝料应选用与混凝土接缝槽壁黏结力强、回弹性好、适应混凝土板收缩、不溶于水、不渗水、高温时不流淌、低温时不脆裂、耐老化、有一定抵抗砂石嵌入的能力、便于施工操作的材料。高速公路、一级公路、二级公路宜选用硅酮类、聚氨酯类填缝料;二级以下公路可选用橡胶沥青类或改性沥青类填缝料。

### 条文说明

填缝材料的质量和发挥效果对水泥混凝土路面正常使用和结构寿命至关重要。水泥

混凝土路面的填缝料主要有三种类型：加热施工类、常温施工类及预制密封条。加热施工类包括沥青类、橡胶沥青类；常温施工类包括聚氨酯类、硅酮类、聚硫类。国内外使用经验和研究结果都表明，无论是低温抗裂性，还是抗老化性能，常温类填缝料的性能一般优于加热类填缝料，而预制密封条仅适用于停车带(场)、站台等低速路段。当水泥路面加铺沥青层时，旧水泥板接缝填料如采用硅酮、聚氨酯类，则需考虑热沥青混合料摊铺过程中填料的不耐高温而失效问题。

各类填缝料的技术要求，参见现行《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30)。国内外研究表明，填缝料与混凝土槽壁的剥落脱离破坏主要是由接缝两侧弯沉差的剪切作用引起的，其关键影响因素是填缝料在低温和高速剪切状态下的劲度，然而现行规范中尚无反映填缝料在低温和高速剪切状态下材料性能的技术指标。从试验检测结果看，目前国内规范所提出的填缝料技术指标偏低，市场上多数材料易于满足要求，因此，设计时建议适当提高技术标准和指标。



## 7 混凝土面层配筋设计

### 7.1 普通混凝土面层配筋

**7.1.1** 普通混凝土面层基础薄弱的自由边缘、接缝为未设传力杆的平缝、主线与匝道相接处或与其他类型路面相接处，宜在面层边缘配置钢筋。钢筋可选用2根直径为12~16mm的螺纹钢，置于面层底面之上1/4厚度并不小于50mm处，间距为100mm，钢筋两端向上弯起，如图7.1.1所示。

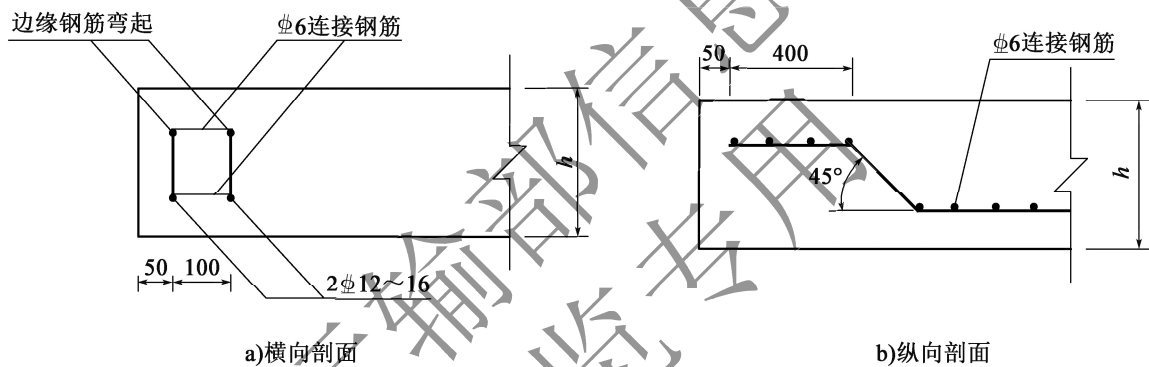


图7.1.1 边缘钢筋布置(尺寸单位: mm)

**7.1.2** 承受极重、特重或重交通的水泥混凝土面层的胀缝、施工缝和自由边的角隅以及承受极重交通的水泥混凝土面层缩缝的角隅，宜设置角隅钢筋。可选用2根直径为12~16mm的螺纹钢，置于面层上部，距顶面不小于50mm，距边缘为100mm，如图7.1.2所示。

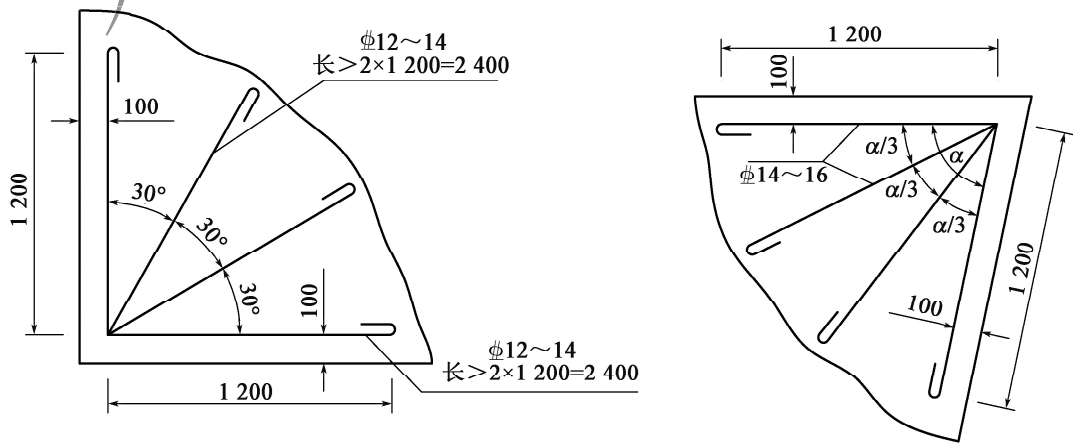
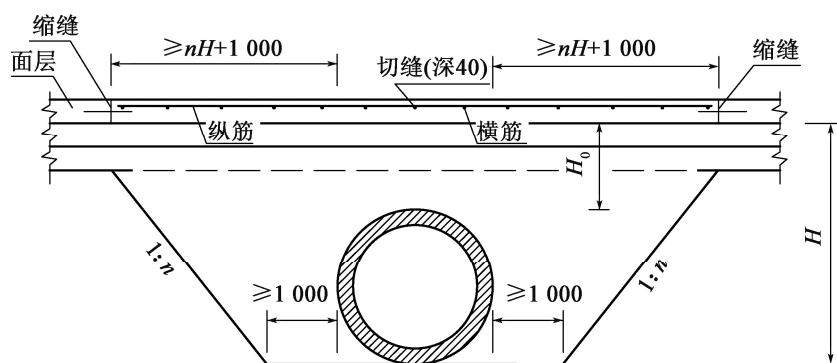


图7.1.2 角隅钢筋布置(尺寸单位: mm)



图 7.1.4 圆形状构造物横穿公路处的面层配筋( $H_0$  小于 1 200mm)(尺寸单位: mm)

### 条文说明

普通混凝土面层的布筋范围主要取决于桥涵台背后回填路基的范围,故每侧考虑取填筑高度加 1m 且不小于 4m 的宽度(图 7.1.3-1、图 7.1.3-2 和图 7.1.4)。对于构造物顶部及两侧的回填材料,鉴于压实困难以及为减少不均匀沉降,采用砂砾或稳定土等材料,易取得较好的效果。此外,各地有采用填料内分层加土工格栅或旋喷桩等措施的经验,设计时可以通过论证参考选用。

## 7.2 钢筋混凝土面层配筋

### 7.2.1 钢筋混凝土面层的配筋量应按式(7.2.1)确定。

$$A_s = \frac{16L_s h \mu}{f_{sy}} \quad (7.2.1)$$

式中:  $A_s$ ——每延米混凝土面层宽(或长)所需的钢筋面积( $\text{mm}^2$ );

$L_s$ ——计算纵向钢筋时,为横缝间距(m);计算横向钢筋时,为无拉杆的纵缝或自由边之间的距离(m);

$h$ ——面层厚度(mm);

$\mu$ ——面层与基层之间的动态摩阻系数,按表 5.5.9 选用;

$f_{sy}$ ——钢筋的屈服强度(MPa),按表 5.6.1 选用。

### 条文说明

钢筋混凝土面层的配筋量,主要依据平衡混凝土面层收缩受阻时产生的拉力的需要。当混凝土面层自两端向中央收缩时,层底的摩阻力为混凝土的质量乘以它与基层间的摩阻系数,这一摩阻力即为作用于混凝土面层中央的拉力,并假定应力沿面层断面均匀分布,由钢筋承受。混凝土的容重取  $24\text{kN/m}^3$ ,钢筋的容许应力取 0.75 倍屈服强度,据此推导出式(7.2.1)。

钢筋混凝土面层的配筋率与面层平面尺寸和气候因素有关,一般为 0.1% ~ 0.2%,

最低为 0.05%，最高可以达到 0.25% (单层) 或 0.35% (双层)。

对于钢筋混凝土路面，由于温度的升降，面层与基层间会产生多次相对滑动，面层与基层间的摩阻系数较低。对于连续配筋混凝土路面，由于纵向钢筋的存在，面层与基层间很难发生相对滑动，故二者间的摩阻系数较高。由于上述原因，两种路面的面层与基层间摩阻系数取值不同。

**7.2.2** 纵向和横向钢筋宜采用相同或相近的直径，直径差应不大于 4mm。钢筋的最小直径和最大间距，应符合表 7.2.2 的规定。钢筋的最小间距宜为集料最大粒径的 2 倍。

表 7.2.2 钢筋最小直径和最大间距 (mm)

| 钢筋类型 | 最小直径 | 纵向钢筋最大间距 | 横向钢筋最大间距 |
|------|------|----------|----------|
| 螺纹钢  | 12   | 300      | 500      |

#### 条文说明

采用螺纹钢能提供更优的握裹力，有效控制裂缝的出现和扩展，提高路面耐久性。因此，本次修订取消了光圆钢筋的推荐，并适当提高了配筋量。

#### 7.2.3 钢筋布置应符合下列规定：

- 1 纵向钢筋设在面层顶面下  $1/3 \sim 1/2$  厚度范围内，在不影响施工的情况下宜设在接近面板顶面下  $1/3$  厚度处。
- 2 横向钢筋应位于纵向钢筋之下；纵向钢筋的搭接长度应满足焊接或绑扎长度的要求，搭接位置应错开，各搭接端连线与纵向钢筋的夹角应小于  $60^\circ$ 。
- 3 边缘钢筋至纵缝或自由边的距离宜为 100 ~ 150mm。

#### 条文说明

钢筋的搭接长度参见现行《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30) 的要求。

### 7.3 连续配筋混凝土面层配筋

**7.3.1** 连续配筋混凝土面层或复合式路面的连续配筋混凝土下面层纵向配筋量应满足本规范第 3.0.6 条的要求。连续配筋混凝土面层纵向配筋率可按表 7.3.1 取值，复合式路面连续配筋混凝土下面层的纵向配筋率可在此基础上降低 0.1%，冰冻地区路面的配筋率宜高于一般地区 0.1%。所需配筋率的具体计算方法参见本规范附录 C。

表 7.3.1 连续配筋混凝土面层纵向配筋率推荐值

| 交通荷载等级 | 中等        | 重         | 特重或极重     |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 配筋率(%) | 0.6 ~ 0.7 | 0.7 ~ 0.8 | 0.8 ~ 0.9 |

### 条文说明

依据国内外经验提出的纵向钢筋配筋率范围可以供初步设计时或者设计配筋率初选时参考。国外规范推荐的配筋率多在 0.6% ~ 0.85%，为避免随交通荷载等级的提高配筋率增加过大，本次修订将极重荷载等级的配筋率调低一个档次。

沥青混凝土上面层可以降低连续配筋混凝土下面层顶面的荷载应力，进而减少下面层混凝土的冲断。因此，复合式面层的连续配筋混凝土下面层配筋率可以比单层式连续配筋混凝土面层适当降低。原规范规定的配筋率比用作上面层时降低 0.1%，本规范只是将其作为初拟值，是否合适需要进一步根据附录 C 的方法进行验算。

冰冻地区，为了减少含有除雪剂的融水渗入对钢筋的锈蚀作用，其配筋率可以适当增加，以减小裂缝的缝隙宽度。

**7.3.2** 横向钢筋用量按本规范第 7.2.1 条计算确定，并应满足施工时固定和保持纵向钢筋位置要求。

### 条文说明

连续配筋混凝土面层配置横向钢筋，主要用于固定纵向钢筋的位置。为了避免面层横向收缩受阻时出现的纵向裂缝，可按钢筋混凝土面层的配筋原则和要求，采用式(7.2.1)计算确定。此外，也可以按纵向钢筋用量的 1/5 ~ 1/8 取用。

**7.3.3** 连续配筋混凝土面层的纵向和横向钢筋均应采用螺纹钢筋，其直径为 12 ~ 20mm。当钢筋可能受到较严重腐蚀时，宜在钢筋外涂环氧树脂等防腐材料。

**7.3.4** 钢筋布置应符合下列规定：

1 纵向钢筋距面层顶面的最小距离为 90mm，最大距离为 1/2 面层厚度，在不影响施工的情况下距面层顶面宜接近 90mm。

2 纵向钢筋的间距宜不大于 250mm，宜不小于集料最大粒径的 2.5 倍。

3 纵向钢筋的焊接长度一般不小于 10 倍(单面焊)或 5 倍(双面焊)钢筋直径，焊接位置应错开，各焊接端连线与纵向钢筋的夹角应小于 60°。

4 边缘钢筋至纵缝或自由边的距离一般为 100 ~ 150mm。

5 横向钢筋位于纵向钢筋之下；横向钢筋间距宜为 300 ~ 600mm，直径大时取大值。

- 6 横向钢筋宜斜向设置，其与纵向钢筋的夹角可取  $60^\circ$ 。
- 7 相邻车道之间或车道与硬路肩之间的纵向接缝内，应设置拉杆，该拉杆可用加长的横向钢筋代替。

### 条文说明

纵向钢筋的埋置深度需尽量靠近面层顶面，使缝隙宽度较小，但位置过高会造成施工困难。为此，建议离面层顶面的距离不小于 90mm，但不大于  $1/2$  面层厚度。

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 8 加铺层结构设计

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 在进行旧水泥混凝土路面加铺层设计之前，应调查下列内容：

- 1 公路修建和养护技术资料：路面结构和材料组成、接缝构造、道路平纵面线形指标、路基、桥涵、隧道及养护历史等。
- 2 路面损坏状况：损坏类型、轻重程度、范围及修补措施等。
- 3 路面结构强度：路表弯沉、接缝传荷能力和混凝土强度等。
- 4 已承受的交通荷载及预计的交通需求：交通量、轴载组成及增长率等。
- 5 环境条件：沿线气候条件、地下水位以及路基和路面的排水状况等。
- 6 标高限制：沿线跨线桥、隧道的净空要求，以及沿线城镇标高要求等。

#### 条文说明

路面在使用过程中，由于行车荷载和环境因素的反复作用，其使用性能会逐渐降低。当路面的结构状况或表面功能不能满足使用要求时，需采取修复措施以恢复或提高其使用性能。在旧混凝土路面上铺设加铺层，是一项充分利用旧路面剩余强度，可以在较长时期内恢复或提高路面使用性能的有效技术措施。加铺层结构设计，必须建立在对旧路面的使用性能进行全面调查和确切评价的基础上，这要比新建路面的设计更为复杂。为此，本条文规定了加铺层设计之前需进行技术调查的主要内容。

**8.1.2** 地表或地下排水不良路段，应采取措施改善或增设地表或地下排水设施；旧混凝土路面结构排水不良路段，应完善排水设施。

#### 条文说明

沿接缝、裂缝渗入路面结构内的自由水，是造成混凝土路面唧泥、错台和板底脱空等病害的主要原因。对于旧路面结构内部排水不良的路段，增设边缘纵向排水系统，以便将旧混凝土面层-基层-路肩界面处积滞的自由水排离出路面结构，是保证加铺层使用寿命的有效措施之一。

**8.1.3** 加铺层设计应包括施工期间的交通组织方案与安全管理措施等。

### 条文说明

加铺层的铺筑通常是在边通车、边施工的条件下进行的,设计方案需综合考虑施工期间的交通组织管理、交通安全、通行车辆对施工质量和施工工期的影响等。

**8.1.4** 应考虑旧水泥混凝土路面病害发展情况进行动态设计,可根据不同路段病害状况开展分段设计。

### 条文说明

旧水泥混凝土路面加铺方案设计需要依据路况检测结果,若路况检测与加铺施工之间时间间隔较长(往往半年以上),旧路路面性能发生进一步衰变,因此需要根据旧路面实际状况进行动态设计,使加铺方案设计更符合实际。另外不同路段旧路路面损坏状况可能有较大差异,所以可以根据不同路段的旧路面实际状况开展分段设计。

**8.1.5** 废旧路面材料应充分利用,减少对环境的不良影响。

### 条文说明

挖除的水泥混凝土旧板的利用,可以分为3类:①再生集料,即用作贫混凝土基层集料、水泥稳定碎石基层集料、级配碎石垫层集料、路基及台背填筑(填换)碎石;②砌筑工程,即边沟、路肩墙、边坡防护工程等;③填筑路基,即填筑停车坪路基、改线段路基和匝道路基。

## 8.2 路面损坏状况调查评定

**8.2.1** 旧混凝土路面的损坏状况应采用断板率和平均错台量两项指标评定。断板率的调查和计算可按现行《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073.1)的规定进行。应采用错台仪量测接缝两侧板边的高程差,量测点的位置在错台严重车道的右侧边缘内300mm处,以调查路段内各条接缝高程差的平均值表示该路段的错台量。

### 条文说明

路面损坏状况是路面结构的物理状况和承载能力的表观反映。水泥混凝土路面的病害有面层断裂、变形、接缝损坏等多种损坏类型。其中,对混凝土路面结构性能和行车舒适性影响最大的是断裂类损坏和接缝错台两种,它们是决定加铺层结构形式及其厚度设计的主要因素。因此,加铺层设计中以断板率和平均错台量两项指标来表征旧混凝土路面的损坏状况。

对于断板率较低的高速和一级公路,采用断板率和平均错台量两项评定指标。对于断板率较高的其他等级公路,当错台病害对行车安全和行驶质量的影响并非主要因素



时,可以仅采用断板率作为评定指标。

**8.2.2** 路面损坏状况分为4个等级,各个等级的断板率和平均错台量的分级标准应符合表8.2.2的规定。当两项指标评价不一致时,以指标中较低的评定等级作为该路段的损坏状况评定等级。

表 8.2.2 路面损坏状况分级标准

| 等级        | 优良 | 中    | 次     | 差   |
|-----------|----|------|-------|-----|
| 断板率(%)    | ≤5 | 5~10 | 10~20 | >20 |
| 平均错台量(mm) | ≤3 | 3~7  | 7~12  | >12 |

### 8.3 接缝传荷能力和板底脱空状况调查评定

**8.3.1** 旧混凝土面层板的接缝传荷能力和板底脱空状况应采用弯沉测试法调查评定,弯沉测试宜采用落锤式弯沉仪。

#### 条文说明

路面表面在荷载作用下的弯沉量和弯沉曲线,反映了路面结构的承载能力。水泥混凝土路面的整体刚度大,弯沉量小,弯沉盆大(弯沉曲线曲率半径大)。落锤式弯沉仪(FWD)产生的脉冲力可以较好地模拟行车荷载对路面的作用,方便地测定弯沉曲线,并进行多级加载测试,具有测试速度快、精度高的优点,是进行混凝土路面弯沉量测较为理想的设备。

为了避免温度和温度梯度对量测结果的影响,接缝传荷能力和脱空的测定需避开晴天正午前后温度较高及夜晚或清晨显著负温度梯度时段。根据《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 3450—2019)采用落锤式弯沉仪(FWD)进行弯沉测试,当测试板边或板角位置时,承载板边缘距纵、横缝不大于200mm。

**8.3.2** 测定接缝传荷能力的试验荷载应采用设计轴载的一侧轮载。应将荷载施加在邻近接缝的路面表面,实测接缝两侧边缘的弯沉值,按式(8.3.2)计算接缝的传荷系数。

$$k_w = \frac{l_u}{l_l} \times 100 \quad (8.3.2)$$

式中:  $k_w$ ——接缝传荷系数(%);

$l_u$ ——未受荷板接缝边缘处的弯沉值(0.01mm);

$l_l$ ——受荷板接缝边缘处的弯沉值(0.01mm)。

**8.3.3** 旧混凝土面层的接缝传荷能力可分为四个等级,分级标准应符合表8.3.3的

规定。应以调查路段内各条接缝传荷系数的平均值表示该路段的接缝传荷能力。

表 8.3.3 接缝传荷能力分级标准

| 等级               | 优良        | 中       | 次       | 差      |
|------------------|-----------|---------|---------|--------|
| 接缝传荷系数 $k_w$ (%) | $\geq 80$ | 60 ~ 80 | 40 ~ 60 | $< 40$ |

### 条文说明

接缝是混凝土路面结构的最薄弱部位，混凝土路面的绝大多数损坏都发生在接缝附近。对于加铺层设计而言，旧面层接缝(或裂缝)处的弯沉量和弯沉差值是引起加铺层出现反射裂缝的主要原因。美国沥青协会(AI)就以接缝或裂缝处的板边平均弯沉量和弯沉差作为沥青混凝土加铺层设计的控制指标。接缝传荷系数是反映接缝边缘处相邻板传荷能力的指标。将接缝的传荷能力按传荷系数大小划分为优良、中、次、差四个等级，可以作为选择加铺层结构形式和采取反射裂缝防治措施的参考依据。

**8.3.4** 板底脱空可采用落锤式弯沉仪根据面层板角隅处与板中的弯沉测试结果，采用同板板中板角弯沉差和接缝两侧板角弯沉差两项指标判断板底脱空状态，分级标准应符合表 8.3.4 的规定。当两项指标评价不一致时，以指标中较低的评定等级作为该路段的损坏状况评定等级。现场可综合考虑唧泥和错台发展程度以及接缝传荷能力进行判别，或可采用雷达、声波检测仪器检测板底脱空状况。

表 8.3.4 板底脱空分级标准

| 等级        | 无或微脱空                 | 脱空                       |
|-----------|-----------------------|--------------------------|
| 同板板中板角弯沉差 | $< 10(0.01\text{mm})$ | $\geq 10(0.01\text{mm})$ |
| 接缝两侧板角弯沉差 | $< 6(0.01\text{mm})$  | $\geq 6(0.01\text{mm})$  |

### 条文说明

由唧泥引起的板底脱空，使板角隅和边缘失去部分支承，在行车荷载作用下将产生较大的弯沉和应力，最终导致加铺层损坏。板底脱空状况的评定是很复杂的，目前国内外还没有一致认可的方法。在板角隅处应用落锤式弯沉仪进行多级荷载作用下的弯沉测试，利用测定结果，可以点绘出荷载-弯沉关系曲线。当关系曲线的后延线与坐标线的相截点偏离坐标原点时，板底便可能存在脱空。由于此方法较复杂，近年来的工程实践一般采用同板板中板角弯沉差和接缝两侧板角弯沉差两项指标判断板底是否存在脱空。本规范中同板板中板角弯沉差取用同一块面板不同板角与板中心的弯沉差的最大值。根据夏汾等高速公路的现场检测数据，确定了板底脱空分级标准阈值。由于检测数据以高速公路为主，其他等级公路可以酌情放宽标准。

利用雷达检测板底脱空，需根据原路面结构设置必要的仪器参数，将测试采集的外业数据经仪器自带的软件处理后，通过剖面图确定脱空位置和范围，并与钻芯或其他脱

空检测手段进行标定, 然后才能进行全线雷达检测。

利用声波检测仪器对路面板进行敲击, 通过传声器采集该声音信号, 然后提取声音信号的频域特征, 通过声音的频率、峰值、带宽等信号特征判断路面是否脱空。

## 8.4 旧混凝土路面结构参数调查

**8.4.1** 旧混凝土面层厚度的标准值可根据钻孔芯样的量测高度按式(8.4.1)计算确定。

$$h_e = \bar{h}_e - t_\alpha \frac{s_h}{\sqrt{n}} \quad (8.4.1)$$

式中:  $h_e$ ——旧混凝土面层量测厚度的标准值(mm);

$\bar{h}_e$ ——旧混凝土面层量测厚度的均值(mm);

$s_h$ ——旧混凝土面层厚度量测值的标准差(mm);

$n$ ——钻孔芯样数量;

$t_\alpha$ —— $t$ 分布表中随测点数和置信度 $\alpha$ 而变的系数, 高速公路、一级公路保证率采用95%, 其他公路采用90%。

### 条文说明

采用超声波和雷达设备量测混凝土强度和厚度的非破损测试方法, 虽已在水工和建筑结构行业得到了广泛的应用, 但由于混凝土面层板与基层(尤其是贫混凝土和无机结合料稳定类基层)材料具有类似的介质特性, 这一非破损测试方法的实际量测精度在混凝土路面工程中还难以得到保证。所以, 本规范仍建议采用传统的钻孔取芯测试法量取路面板的厚度, 并在室内进行劈裂强度试验。标准芯样的直径为100mm。芯样的数量及其分布以能够代表评定路段的板厚和混凝土强度状况并满足统计分析的要求为准。旧混凝土面层厚度的标准值计算参见现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)。

**8.4.2** 旧混凝土面层的弯拉强度标准值, 可采用钻孔芯样的劈裂试验测定结果按式(8.4.2-1)和式(8.4.2-2)计算确定。

$$f_r = 1.87 f_{sp}^{0.87} \quad (8.4.2-1)$$

$$f_{sp} = \bar{f}_{sp} - t_\alpha \frac{s_{sp}}{\sqrt{n}} \quad (8.4.2-2)$$

式中:  $f_r$ ——旧混凝土面层的弯拉强度标准值(MPa);

$f_{sp}$ ——旧混凝土面层的劈裂强度标准值(MPa);

$\bar{f}_{sp}$ ——旧混凝土面层的劈裂强度测定值的均值(MPa);

$s_{sp}$ ——旧混凝土面层的劈裂强度测定值的标准差(MPa);

$n$ ——钻孔芯样数量；

$t_{\alpha}$ —— $t$  分布表中随测点数和保证率(或置信度  $\alpha$ ) 而变的系数，高速公路、一级公路保证率采用 95%，其他公路采用 90%。

### 条文说明

式(8.4.2-1)是 20 世纪 80 年代初，由江苏省交通运输厅和中国民用航空机场设计研究院等对石灰岩和花岗岩碎石混凝土进行弯拉强度和钻孔取样劈裂强度试验后，回归分析后整理得到的，试件样本数 204 个，相关系数 0.82。

美国力学经验法中提出水泥混凝土的劈裂强度一般变动于(0.6~0.7)弯拉强度的范围内，并建议劈裂强度采用 0.67 倍弯拉强度。式(8.4.2-1)反映的关系，劈裂强度变动于弯拉强度的 0.52~0.63 倍范围内，略低于美国力学经验法的建议值。

式(8.4.2-2)中旧混凝土面层的劈裂强度标准值计算与现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1)中厚度标准值计算原理一致。

**8.4.3** 旧混凝土面层的弯拉弹性模量标准值可按式(8.4.3)计算确定。

$$E_c = \frac{10^4}{0.09 + \frac{0.96}{f_r}} \quad (8.4.3)$$

式中： $E_c$ ——旧混凝土的弯拉弹性模量标准值(MPa)；

$f_r$ ——旧混凝土的弯拉强度标准值(MPa)。

**8.4.4** 旧混凝土路面基层顶面的当量回弹模量标准值，宜采用落锤式弯沉仪量测板中荷载作用下的弯沉曲线，按式(8.4.4-1)和式(8.4.4-2)确定。

$$E_t = 100e^{(3.60 + 24.0/l_0^{-0.057} - 15.6SI^{0.222})} \quad (8.4.4-1)$$

$$SI = \frac{l_0 + l_{300} + l_{600} + l_{900}}{l_0} \quad (8.4.4-2)$$

式中： $E_t$ ——基层顶面的当量回弹模量标准值(MPa)；

$SI$ ——路面结构的荷载扩散系数；

$l_0$ ——荷载中心处的弯沉值( $\mu m$ )；

$l_{300}$ 、 $l_{600}$ 、 $l_{900}$ ——分别为距离荷载中心 300mm、600mm 和 900mm 处的弯沉值( $\mu m$ )。

当采用落锤式弯沉仪的条件受限时，也可选择在清除断裂混凝土板后的基层顶面进行梁式弯沉测量，然后按本规范附录 B 的式(B.2.7-2)反算，或者根据基层钻芯的材料组成及性能情况依经验确定。

## 条文说明

旧混凝土面层下的基层顶面当量回弹模量是加铺层设计的重要参数之一。面层下的基层顶面模量难以直接测到,但混凝土路表弯沉是路面结构刚度特性的综合反映,因此,应用落锤式弯沉仪(荷载 50kN、承载板半径 150mm)实测路表弯沉盆,并按弹性地基板理论反算基层顶面模量的方法是实用可行的。

由板中荷载作用下测得的路表弯沉曲线可以方便地按式(8.4.4-2)计算出无量纲参数  $SI$ ,它反映了路面结构扩散荷载的能力。理论上, $SI$  与混凝土路面板的相对刚度半径存在对应的关系。基于这一特征,对常用的混凝土路面结构参数(板厚  $h=200, 230, 250, 280, 300, 330, 350\text{mm}$ ,混凝土弹性模量  $E_c=2.5 \times 10^4, 3.0 \times 10^4, 3.5 \times 10^4, 4.0 \times 10^4\text{MPa}$ ,地基综合模量  $E_t=100, 250, 500, 1000, 2000, 4000\text{MPa}$ ),进行了 168 组不同结构组合的混凝土路面结构有限元计算分析(板中荷载 100kN、荷载作用半径 150mm),依据计算结果进行回归分析后得到式(8.4.4-1)。

若测试荷载为非设计荷载(100kN)时,可以使用荷载修正后的基层顶面当量回弹模量计算公式:

$$E_t = 100e^{[3.60 + 24.03(1386/l_0/P)^{-0.057} - 15.63SI^{0.222}]} \quad (8-1)$$

式中:  $P$ ——测试荷载(kPa);

$SI$  和  $l_0$  与式(8.4.4-2)相同。

该回归公式具有非常显著的相关性,说明反算模量的方法在理论上是可行的。但是,由于路面结构理论模型与路面实际状况之间存在一定的差异,实际应用中还需要运用工程经验或辅以室内材料试验,对反算结果的合理性进行分析判断或作适当修正。

为评定基层顶面当量回弹模量而进行的弯沉测试,以板中为标准荷载位置,弯沉测点沿重载车道板的纵向中线布置,测点间距为 20~50m,评定路段内的总测点数不小于 30 点。按上述方法逐测点反算模量,再统计评定路段内基层顶面回弹模量的标准值。

## 8.5 加铺方案选择

**8.5.1** 应根据使用要求及旧混凝土路面的综合评定结果,并经技术经济比较后确定加铺方案。

**8.5.2** 加铺改建方案宜根据旧混凝土路面的损坏状况、接缝传荷能力以及板底脱空状况,按表 8.5.2 选择。

表 8.5.2 旧水泥混凝土路面加铺改建方案

| 路面损坏状况评价等级 |          | 优良     | 其他 | 中等以上 | 其他 | 次 | 差 |
|------------|----------|--------|----|------|----|---|---|
| 接缝传荷能力评价等级 |          | 优良     |    | 中    |    |   |   |
| 板底脱空状况     |          | 无或者微脱空 |    | 脱空   |    |   |   |
| 加铺改建方式     | 结合式混凝土加铺 | ★      |    |      |    |   |   |
|            | 分离式混凝土加铺 | ★      | ★  | ☆    |    |   |   |
|            | 沥青混凝土加铺  | ★      | ★  | ★    | ★  | ☆ |   |
|            | 破裂稳固改建   |        |    |      |    | ★ | ★ |
|            | 碎石化改建    |        |    |      |    | ★ | ★ |

注：★——各等级公路适宜加铺改建方案。

☆——二级及以下公路适宜加铺改建方案，高速、一级公路不宜采用。

### 条文说明

水泥混凝土路面接缝传荷能力不足和板底唧浆造成脱空往往是断板率较高的直接原因，因此面板损坏状况、接缝传荷能力及板底脱空严重程度一般具有一致性。实际工程中遇到特殊状况，如脱空严重但断板率较低等，可以根据实际状况分析路面病害原因及发展预期，选择合理的加铺方案。

结合式混凝土加铺为在经过彻底清理的旧水泥混凝土面层上，涂以黏结剂，然后铺筑水泥混凝土加铺层，使水泥混凝土加铺层与旧面层完全结合成整体，该结构只有一个中性面。设置结合式加铺层的主要目的是改善旧混凝土面层的表面功能，或者提高其承载能力或延长其使用寿命。结合式加铺层的厚度较薄，旧面层的接缝和发展性裂缝都会反射到加铺层上。所以只有当旧混凝土路面结构性能良好，其损坏状况和接缝传荷能力均评定为优良，且板底为无或者微脱空时，才能采用结合式加铺层。

分离式混凝土加铺为在经过彻底清理的旧水泥混凝土面层上设置隔离层，然后铺筑水泥混凝土加铺层，该结构具有两个中性面。由于加铺层与旧面层之间设置了隔离层，旧面层的接缝和裂缝一般不会影响到加铺层而使之产生反射裂缝。因而，分离式加铺层用于损坏较严重的混凝土路面，但需先对旧面层进行处治后再铺设隔离层。

旧混凝土面层的接缝或发展性裂缝往往在通车数年内会反射到沥青加铺层上。为了防止和控制反射裂缝，本条文要求对旧混凝土面层存在的进展性裂缝、错台和板底脱空等病害必须进行修复，并且使旧混凝土面层的结构损坏状况和接缝传荷能力均恢复到优良状况。

当调查评定的旧混凝土路面的断板率、平均错台量和接缝传荷能力均处于差级水平，尤其是当旧面层板下出现严重唧泥、脱空或地基沉降时，对旧混凝土路面进行大面积修复后再铺筑加铺层已不是一种经济有效的技术措施。这时建议对旧面层混凝土进行破碎、冲击碾压或打裂压稳等处理，并用作改建路面的基层、底基层。破碎稳定处理既减少了大面积挖补所产生的废旧混凝土碎块对环境的不利影响，又保留了旧路面一定程度的结构完整性。为避免破碎施工时对重要构造物构成危害，需对道路及周围构造物如

房屋、桥梁、涵洞、地下管线等进行详细调查,合理设计破碎施工方案。打裂压稳技术适用于旧混凝土路面整体结构坚固、有一定的平整度,或没有修补路段。碎石化技术适用于旧混凝土路面整体性与承载力较差的路段。

**8.5.3** 加铺时必须对旧水泥混凝土路面进行处治,应更换破碎板,换板应符合现行《公路养护技术标准》(JTJ 5110)的要求。对于极重、特重、重交通道路,换板时可增加单层钢筋网,修补和填封裂缝,压浆填封板底脱空,磨平错台,清除旧混凝土面层表面的松散碎屑、油迹或轮胎擦痕,剔除接缝中失效的填缝料和杂物,并重新封缝。

**8.5.4** 对于检测出现板底脱空的路段,应采用压浆材料填封板底脱空,浆体材料应具备流动性好、早期强度高、无离析、无泌水、无收缩等特性。

#### 条文说明

压浆加固技术关键在于评定脱空的位置和范围,以及浆体的配制。根据设计要求进行布孔压浆,避免盲目压浆所造成的经济损失与路面结构的损坏。压浆处治后,进行钻芯取样、注水试验和复灌试验等检验压浆效果。

压浆加固对压浆材料性能的要求较高,特别是对其无收缩乃至产生微膨胀的性能要求。对膨胀剂种类和剂量的选用是压浆配合比设计的重点。只有压浆材料满足流动性好、早期强度高、无离析、无泌水、无收缩等基本要求,通过压浆才能真正对脱空的水泥混凝土路面起到加固作用。

常用的压浆材料分为有机类和无机类。有机类主要是一些高分子聚合物,如环氧树脂类材料、聚氨脂类材料等;目前应用较多的是无机类压浆材料,主要是水泥浆类,无机类压浆材料已在工程中广泛应用,并已取得了一定的效果。

**8.5.5** 经综合处治后的旧混凝土路面应满足接缝传荷系数达到优良以上,板底脱空状态为无或微脱空,方可进行加铺。

#### 条文说明

旧水泥混凝土路面综合处治措施包括:换板、板底注浆、增设传力杆等。旧路面处治后的性能恢复对加铺层使用寿命影响显著,在加铺施工前需通过面板接缝传荷能力与脱空状态检测保障旧路面处治效果。

**8.5.6** 打裂压稳改建方案应使75%以上的旧混凝土板产生不规则开裂,相邻裂缝形成的块状面积为 $0.3 \sim 0.6\text{m}^2$ ;碎石化改建方案采用多锤头碎石化机械与共振碎石化机械,破碎后不同层位的颗粒粒径应满足相关规范技术要求。

### 条文说明

打裂压稳后的旧混凝土能够较好地改建路面面层提供足够的支撑，该层一般可以直接作为改建路面的基层。打裂时避免过度破坏，不能使路面板产生过大位移及大量的碎屑，打裂后旧路面顶面的回弹模量一般不小于 300MPa。

参照现行《公路水泥混凝土路面再生利用技术细则》(JTG/T F31)及工程实践经验，多锤头碎石化破碎后顶面最大粒径不大于 75mm，中部最大粒径不大于 225mm；共振碎石化破碎后顶面最大粒径不大于 50mm，中部最大粒径不大于 100mm，下部最大粒径不大于 180mm。碎石化后旧路面可以作为改建路面的粒料基层，碎石化后旧路面顶面的回弹模量一般不小于 200MPa。

## 8.6 沥青加铺层结构设计

**8.6.1** 沥青加铺层可按公路等级、交通荷载等级确定采用单层或两层及以上沥青层，至少有一层采用密级配沥青混合料，可根据需要设置调平层。

**8.6.2** 旧水泥混凝土面板表面宜采用强力清扫、喷砂打毛、精铣刨等方法处理，保持板表面清洁与干燥，处理后构造深度不宜小于 0.5mm。沥青加铺层与旧水泥混凝土面板之间应加强层间结合，避免层间滑移。高速公路、一级公路宜设置应力吸收层、橡胶沥青碎石封层，其他等级公路可撒布改性沥青，或设置改性沥青碎石封层。

### 条文说明

因沥青加铺层较薄，层间模量比大，需采取措施提高沥青混合料高温抗剪强度和加强层间结合，防止沥青层剪切、推移与产生反射裂缝。

**8.6.3** 应根据气温、荷载、旧混凝土路面承载能力、接缝传荷能力等合理选用下述减缓反射裂缝的措施：

- 1 增加沥青加铺层的厚度；
- 2 在加铺层沥青混合料中掺加纤维或橡胶等改性剂；
- 3 在旧混凝土板顶面或加铺层内设置应力吸收层、无纺土工织物；
- 4 沥青加铺层下层采用大粒径沥青碎石。

### 条文说明

防止和控制反射裂缝是沥青加铺层设计的重点。反射裂缝是由于旧混凝土面层在接缝或裂缝附近出现较大的位移，引起其上方沥青加铺层内出现应力集中所造成的，它包括因温度和湿度变化而产生的水平位移，以及因交通荷载作用而产生的竖向剪切位移。为此，本条规定沥青加铺层设计时需采取减缓反射裂缝措施。



预防和减缓反射裂缝的常用措施，主要有：

(1) 裂缝缓解层，包括大粒径开级配沥青碎石和级配碎石。大粒径沥青碎石的厚度一般为 80 ~ 120mm，级配碎石的厚度一般为 100 ~ 150mm。其作用为削弱拉应力、拉应变的传递能力，并且能消散、吸收由交通荷载及温度变化产生的荷载应力和温度应力。

沥青加铺层典型结构 I 可参考图 8-1。



图 8-1 沥青加铺层典型结构 I

(2) 应力吸收层，包括 STRATA、SAMI、ISAC 等，厚度为 20 ~ 30mm，其作用为降低旧混凝土面层与沥青加铺层之间的黏附阻力，从而减少温度下降引起的反射裂缝。

(3) 无纺土工织物，既有较高拉伸强度，又有一定变形延展能力，对于温度和荷载引起的反射裂缝都有一定的抑制作用。设计时需保证耐酸碱性和耐高温性好，与沥青亲油性好，使之与路面结构层形成良好黏结，并且厚度适宜，避免层间剥离。

沥青加铺层典型结构 II 可参考图 8-2。

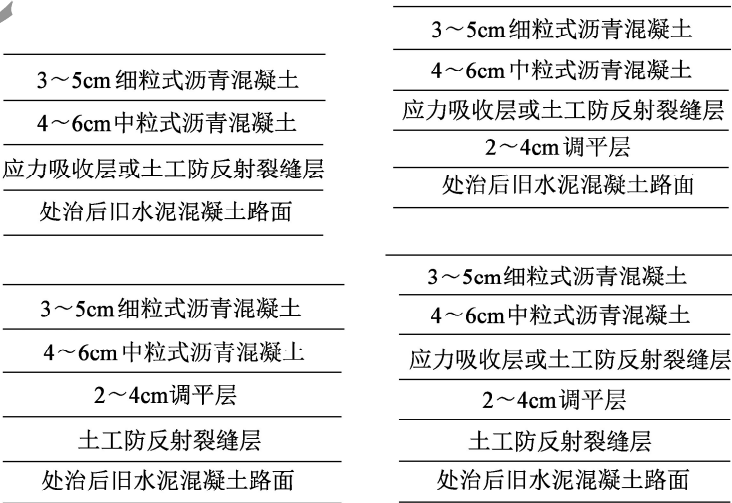


图 8-2 沥青加铺层典型结构 II

**8.6.4** 沥青加铺层厚度应满足减缓反射裂缝的要求，针对结构性加铺，高速公路、一级公路及极重、特重交通荷载等级的二级公路加铺不宜少于两层，厚度宜为 80 ~ 120mm，其他等级公路可采用单层加铺，厚度宜为 30 ~ 50mm。对于功能性加铺可不进行结构验算。混合料的公称最大粒径应与加铺层厚度相匹配。

**8.6.5** 沥青加铺层下旧混凝土板的应力分析，应将沥青加铺层与旧水泥混凝土板视为复合面层，按旧混凝土板下不同基层类型，分为两种情况。

1 当旧混凝土板下为粒料基层时，面层以下视为弹性地基，按弹性地基单层板模型进行计算。

2 当旧混凝土板下为无机结合料类基层、沥青类基层时，旧混凝土板下基层视为基层或复合基层，基层或底基层以下视为弹性地基，按弹性地基双层板模型进行计算。

**8.6.6** 沥青加铺层下旧混凝土板的应力计算方法见附录 B.2 和 B.3。旧混凝土板的厚度、混凝土的弯拉强度和弹性模量标准值以及基层顶面当量回弹模量标准值，应采用旧混凝土路面的实测值，按 8.4 节规定的方法确定，沥青加铺层的材料模量取 5.4.4 条中的 20℃ 动态压缩模量的 1/3 ~ 1/4，旧混凝土板的应力应满足式 (3.0.4-1) ~ 式 (3.0.4-3) 的要求。

### 条文说明

当沥青加铺层厚度较小时，加铺层对于降低旧混凝土板荷载应力的效果有限，加铺层下的旧混凝土路面仍起关键的承载作用，旧混凝土板的应力和混凝土弯拉强度在设计中起控制作用；当沥青加铺层厚度较大时，也可以按新建沥青路面进行加铺层结构设计。

沥青加铺层下旧混凝土路面结构、沥青混合料上面层与水泥混凝土下面层的复合面层板结构的不利季节为夏季，此时路表面温度高、混凝土板温度梯度大、路面结构整体抗弯刚度小，混凝土板的荷载应力与温度应力均处于高位，因此，沥青面层模量取夏季高温时的值。夏季高温时段沥青面层白天的层均温度约为 40 ~ 50℃，其模量约为 20℃ 模量的 1/3 ~ 1/4。

沥青加铺层结构病害主要为反射裂缝和车辙，目前国内尚无较成熟设计模型与方法，在高温地区，可按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 参考刚性基层沥青路面结构设计方法验算沥青混合料层永久变形量，以控制车辙。就反射裂缝而言，现有工程实践表明，沥青加铺层结构 3 ~ 5 年可能会出现反射裂缝，可以采用灌缝等方式进一步延长其寿命。

## 8.7 分离式混凝土加铺层结构设计

**8.7.1** 在旧混凝土面层与加铺层之间应设置隔离层。高速公路和一级公路宜选用厚

度不小于 20mm 的热拌沥青混凝土；其他等级公路可采用土工织物，厚度宜为 6 ~ 15mm。

**8.7.2** 分离式混凝土加铺层的接缝形式和位置，应按新建混凝土面层的要求布置。

**8.7.3** 加铺层可采用普通混凝土、钢纤维混凝土、钢筋混凝土和连续配筋混凝土。普通混凝土、钢筋混凝土和连续配筋混凝土加铺层的厚度不宜小于 180mm；钢纤维混凝土加铺层的厚度不宜小于 140mm。

### 条文说明

分离式加铺层与旧混凝土面层之间设置了隔离层，可以隔断加铺层与旧面层的黏结，使加铺层成为独立的结构受力层。隔离层既可以防止或延缓反射裂缝，需要时也可以起到调平层的作用。因此，分离式加铺层适用于损坏状况及接缝传荷能力评定为中级和次级的旧混凝土路面。同时，加铺层的接缝形式和位置也不必考虑与旧混凝土面层接缝相对应。相反，加铺层的接缝位置如能与旧面层接缝相互错开 1m 以上，使作用在加铺层板边的荷载能下传到旧面层板的中部，可以改善加铺层的受荷条件。

加铺层与旧混凝土面层之间必须保证完全隔离，因此，沥青混合料隔离层必须具有一定的厚度；同时，也不能采用松散粒料做隔离层。旧路面平整度较差时，建议采用较大的隔离层或夹层厚度。

**8.7.4** 分离式加铺层和旧混凝土面层应力分析，应按旧混凝土板下不同基层类型，分为两种情况。

1 当旧混凝土板下为粒料基层时，将分离式混凝土加铺层视为面层，旧混凝土板视为基层，面层以下视为弹性地基，按弹性地基双层板模型进行计算。

2 当旧混凝土板下为无机结合料类基层、沥青类基层时，将旧混凝土板与分离式混凝土加铺层视为复合面层，旧混凝土板下基层视为基层或复合基层，基层或底基层以下视为弹性地基，按弹性地基双层板模型进行计算。

**8.7.5** 分离式加铺层和旧混凝土面层应力计算方法见附录 B.2 和 B.3。旧混凝土板的厚度、混凝土的弯拉强度和弹性模量标准值以及基层顶面当量回弹模量标准值，应采用旧混凝土路面的实测值，按 8.4 节规定的方法确定。加铺层混凝土的弯拉强度标准值应符合表 3.0.9 的要求。加铺层的设计厚度，应按加铺层和旧混凝土板的应力分别满足式(3.0.4-1) ~ 式(3.0.4-3)的要求确定。

### 条文说明

分离式加铺层与旧混凝土面层之间设有隔离层，上下层板围绕各自的中性面弯曲，

分别承担一部分弯矩。因此，加铺层和旧混凝土面层的应力和混凝土弯拉强度在设计中均起控制作用。在设计时，须协调上下层的厚度(影响各自的应力值)和弯拉强度的比例关系，以获得优化的设计。

## 8.8 结合式混凝土加铺层结构设计

**8.8.1** 加铺层与旧混凝土面层应结合成整体。宜采用精铣刨、喷射高压水或钢珠、酸蚀等方法，打毛清理旧混凝土面层表面，并应用黏结剂处理结合界面。旧混凝土路面可植设剪力钉，并与加铺层中钢筋网焊接，以增强加铺层与旧水泥板结合性。高速公路及一级公路黏结剂可采用聚合物水泥、有机硅渗透型涂层，二级以下公路可采用水泥浆。

**8.8.2** 结合式加铺层厚度不宜小于 80mm，可按公路等级、交通荷载等级确定，加铺层的接缝形式和位置应与旧混凝土面层的接缝完全对应和对齐，加铺层内可不设拉杆或传力杆。

**8.8.3** 结合式加铺层宜采取布设钢筋网或掺加钢纤维等防裂措施。

### 条文说明

设置结合式加铺层的主要目的是改善旧混凝土面层的表面功能，或者提高其承载能力或延长其使用寿命。结合式加铺层的厚度较薄，旧面层的接缝和发展性裂缝都会反射到加铺层上。所以，只有当旧混凝土路面结构性能良好，其损坏状况和接缝传荷能力均评定为优良时，才能采用结合式加铺层。

结合式加铺层的厚度小，加铺层与旧混凝土面层的结合便成为这种加铺形式成功的关键。因此，一方面需采取措施彻底清理旧混凝土面层表面的污垢和水泥砂浆体，并使表面粗糙，另一方面需在清理后的表面涂以高强黏结剂，使加铺层与旧混凝土面层黏结为一个整体。

由于加铺层薄，层内不设拉杆和传力杆，加铺层的接缝形式和位置必须与旧混凝土面层完全对应，以防加铺层产生反射裂缝或与旧混凝土面层之间出现层间分离。

**8.8.4** 结合式加铺层和旧混凝土板的应力分析，应按旧混凝土板下不同基层类型，分为两种情况。

1 当旧混凝土板下为粒料基层时，旧混凝土板与结合式混凝土加铺层视为复合面层，面层以下视为弹性地基，按弹性地基单层板模型进行计算。

2 当旧混凝土板下为无机结合料类基层、沥青类基层时，旧混凝土板与结合式混凝土加铺层视为复合面层，旧混凝土板下基层视为基层或复合基层，按弹性地基双层板模型进行计算。

## 条文说明

结合式加铺层与旧混凝土板黏结在一起,围绕一个共享的中性面弯曲。加铺层处于受压状态,旧混凝土板处于受拉状态。因此,旧混凝土板的应力和混凝土弯拉强度在设计中起控制作用。

**8.8.5** 结合式加铺层和旧混凝土板的应力计算方法见附录 B.2 和 B.3。旧混凝土板的厚度、混凝土的弯拉强度和弹性模量标准值以及基层顶面当量回弹模量标准值,应采用旧混凝土路面的实测值,按 8.4 节规定的方法确定。加铺层的设计厚度,应按旧混凝土板的应力满足式(3.0.4-1)~式(3.0.4-3)的要求确定。

## 8.9 旧沥青路面加铺水泥混凝土面层结构设计

**8.9.1** 旧沥青路面可采用水泥混凝土加铺层。加铺层铺筑前应对较严重的车辙、拥包进行铣刨,对坑槽和网裂较严重的路段进行结构补强。

**8.9.2** 在旧沥青面层与水泥混凝土加铺层之间宜设置调平层。调平层材料可选用沥青混凝土。

**8.9.3** 加铺层可采用普通混凝土、钢纤维混凝土、钢筋混凝土和连续配筋混凝土,厚度根据公路等级、交通荷载等级确定。普通混凝土、钢筋混凝土和连续配筋混凝土加铺层的厚度不宜小于 180mm,钢纤维混凝土加铺层的厚度不宜小于 140mm。

**8.9.4** 旧沥青路面顶面的当量回弹模量可按附录 B 的式(B.2.7-1)~式(B.2.7-3)计算确定,并按照新建水泥混凝土路面进行加铺层设计。

## 条文说明

当旧沥青路面已出现较严重的结构性损坏,路面承载能力较差时,选用水泥混凝土路面加铺层结构是一种可行的技术方案,可以提高路面的结构承载力、延长路面的使用寿命。

对于旧沥青路面较严重的车辙、拥包等病害需进行铣刨,坑槽和网裂较严重的路段进行结构补强,并设置调平层,再按新建水泥混凝土路面进行加铺层设计。

**8.9.5** 超薄水泥混凝土加铺层厚度以 80~130mm 为宜,面板边长宜为 1.0~2.5m。切缝深度为面层板厚的 1/4~1/3,缝宽 3~5mm,无须封缝。

## 条文说明

超薄水泥混凝土加铺层适用于低等级公路，或低交通量、载重轻的道路，主要用于因低速交通和车辆频繁启动和制动而引起的功能性严重破坏的沥青路面维修。工程实践与现有研究表明，超薄水泥混凝土加铺层可以承受较大的荷载，一般高于轻交通荷载等级。超薄水泥混凝土加铺层已在美国得到了成功的应用。许多研究表明，当旧沥青路面和水泥混凝土之间黏结状况良好，且旧沥青路面有较强的结构承载力时，超薄水泥混凝土加铺层可以提供一个可靠的、持久的路面。目前在美国主要用于路面车辙严重地区，包括高等级公路的出入口及匝道、城市道路、县乡道路和汽车停车区等。

结合式加铺层的厚度小，加铺层与旧沥青混凝土面层的黏结便成为这种加铺形式成功的关键。因此在完成对旧路面的修补后，需彻底清理旧沥青面层表面的污垢和泥土等，并使表面粗糙。在黏结加铺层之前，务必保持旧路表面的干燥、清洁。

沥青层的刨铣厚度按损坏类型、严重程度及原沥青层的厚度确定。刨铣后的沥青混凝土面层保留 80 ~ 100mm 的厚度，因为旧路面仍要承担大部分荷载作用。

为降低水泥混凝土板收缩和翘曲所产生的应力，超薄水泥混凝土板的平面尺寸通常取面板厚度的 10 ~ 20 倍。此外纵缝需尽量避免设计在轮迹带处。

附录 A 交通荷载分析

A.1 车型分类

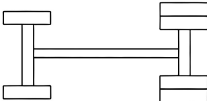
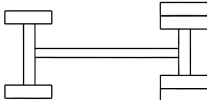
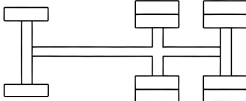
A.1.1 车辆轴型应根据表 A.1.1 规定按轮组和轴组类型分为 7 类。

表 A.1.1 轴型分类

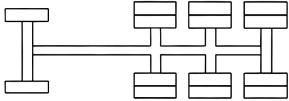
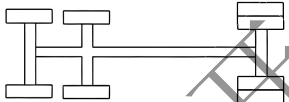
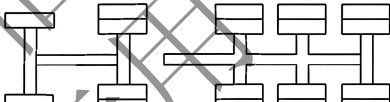
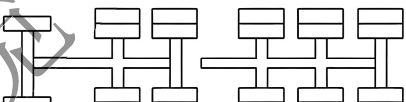
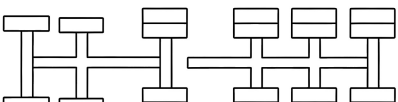
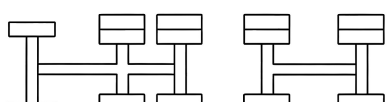
| 轴型编号 | 轴型说明             | 轴型编号 | 轴型说明       |
|------|------------------|------|------------|
| 1    | 单轴(每侧单轮胎)        | 5    | 双联轴(每侧双轮胎) |
| 2    | 单轴(每侧双轮胎)        | 6    | 三联轴(每侧单轮胎) |
| 3    | 双联轴(每侧单轮胎)       | 7    | 三联轴(每侧双轮胎) |
| 4    | 双联轴(每侧各一单轮胎、双轮胎) |      |            |

A.1.2 车辆类型应按表 A.1.2 所列轴型组合分为 11 类。

表 A.1.2 车辆类型分类

| 车型编号 | 说明                 |        | 主要车型及图示                                                                              | 其他车型   |
|------|--------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1 类  | 2 轴 4 轮车辆          | 11 型车  |  |        |
| 2 类  | 2 轴 6 轮及以上客车       | 12 型客车 |  | 15 型客车 |
| 3 类  | 2 轴 6 轮整体式货车       | 12 型货车 |  |        |
| 4 类  | 3 轴整体式货车<br>(非双前轴) | 15 型   |  |        |

续表 A. 1. 2

| 车型编号 | 说明                    | 主要车型及图示           |                                                                                      | 其他车型                                    |
|------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 5 类  | 4 轴及以上整体式货车<br>(非双前轴) | 17 型              |    |                                         |
| 6 类  | 双前轴整体式货车              | 112 型、<br>115 型   |    | 117 型                                   |
| 7 类  | 4 轴及以下半挂货车<br>(非双前轴)  | 125 型             |    | 122 型                                   |
| 8 类  | 5 轴半挂货车<br>(非双前轴)     | 127 型<br>155 型    |   |                                         |
| 9 类  | 6 轴及以上半挂货车<br>(非双前轴)  | 157 型             |  |                                         |
| 10 类 | 双前轴半挂式货车              | 1127 型            |  | 1122 型、<br>1125 型、<br>1155 型、<br>1157 型 |
| 11 类 | 全挂货车                  | 1522 型、<br>1222 型 |  |                                         |

条文说明

依据近年来我国货运和客运车辆的发展，结合车辆轮组和轴组组成情况的调查，将车辆轴型划分为 7 类。依据表 A. 1. 1 所列轴型组合的不同，结合实际货运和客运车辆



的调查分析,将车辆类型划分为11类,用于车辆分类。在我国,轴型3(每侧单轮胎的双联轴)、轴型4(每侧各一单轮胎、双轮胎的双联轴)和轴型6(每侧单轮胎的三联轴)所占比例非常小,为简化分析,可以将其分别归类到轴型5(每侧双轮胎的双联轴)和轴型7(每侧双轮胎的三联轴)。

## A.2 交通数据调查

**A.2.1** 交通数据调查应包括交通量 AADTF 及其年平均增长率  $g_r$ 、方向系数  $f_d$ 、车道系数  $f_l$ 、车辆类型组成、车辆轮迹横向分布系数  $\eta$ 、轴组组成和轴重等。

**A.2.2** 公路初期交通量和其他参数可参照可行性研究报告等有关交通量预测资料,结合当地交通观测站的观测和统计资料,或通过实地设立观测站点进行观测和统计。

**A.2.3** 交通量的年平均增长率  $g_r$  可依据公路等级和功能以及地区经济和交通发展情况,通过调查分析确定。

**A.2.4** 方向系数  $f_d$  宜根据不同方向上实测交通数据确定,无实测数据时,可在 0.5 ~ 0.6 范围内选取。

**A.2.5** 车道系数  $f_l$  可按下列三个水平确定,改建设计应采用水平一,新建路面设计可采用水平二和水平三。

1 水平一,根据现场交通量观测资料统计设计方向不同车道上车辆的数量,确定车道系数。

2 水平二,采用当地的经验值。

3 水平三,采用表 A.2.5 中的推荐值。

表 A.2.5 车道系数  $f_l$

| 单向车道数    | 1    | 2           | 3           | $\geq 4$    |
|----------|------|-------------|-------------|-------------|
| 高速公路     | —    | 0.70 ~ 0.85 | 0.45 ~ 0.60 | 0.40 ~ 0.50 |
| 其他等级公路 * | 1.00 | 0.50 ~ 0.75 | 0.50 ~ 0.75 | —           |

注: \* 表示交通受非机动车和行人影响较严重的取低限,反之取高限。

**A.2.6** 车辆轮迹横向分布系数  $\eta$  可按下列三个水平确定,改建设计应采用水平一,新建路面设计可采用水平二或水平三。

1 水平一,根据现场交通量观测资料统计车辆轮迹横向分布频率,确定临界荷位处车辆轮迹横向分布系数。

2 水平二,采用当地的经验值。

3 水平三,采用表 A.2.6 中的推荐值。

表 A.2.6 车辆轮迹横向分布系数  $\eta$ 

| 公路等级      |           | 纵缝边缘处       |
|-----------|-----------|-------------|
| 高速公路、一级公路 |           | 0.17 ~ 0.22 |
| 二级及二级以下公路 | 行车道宽 > 7m | 0.34 ~ 0.39 |
|           | 行车道宽 ≤ 7m | 0.54 ~ 0.62 |

注：车道或行车道较窄或者交通量较大时，取高值，反之取低值。

**A.2.7** 可通过实地设立站点进行各类车辆的轴型调查和轴重测定，或者利用该地区或相似类型公路已有称重站的车型、轴型和轴重测定统计资料，获取设计公路的车辆类型、轴型和轴重组成数据，以及最重轴载和货车中主导特重车型轴载。

### A.3 车辆当量设计轴载换算

**A.3.1** 设计车道的年平均日货车交通量 AADT 用式(A.3.1)计算。

$$AADT = AADTF \times f_d \times f_l \quad (\text{A.3.1})$$

式中：AADTF——2轴6轮及以上车辆的双向年平均日交通量(辆/d)；

AADT——2轴6轮及以上车辆设计车道的年平均日交通量[辆/(车道·d)]；

$f_d$ ——方向系数，实测，或在0.5~0.6之间取值；

$f_l$ ——车道系数，实测，或采用当地经验值，或按表A.2.5选用。

**A.3.2** 各类车辆按轴型称重和统计时，可采用以轴型为基础的轴载当量换算系数法计算分析设计车道初始年设计轴载日作用次数。随机统计3000辆2轴6轮及以上车辆中单轴、双联轴和三联轴等不同轴型出现的单轴次数，并分别称取其单轴轴重。按单轴轴重级位统计整理后得到轴载谱，并按式(A.3.2-1)计算确定不同轴重级位的设计轴载当量换算系数。

$$k_{p,i} = \left( \frac{P_i}{P_s} \right)^{16} \quad (\text{A.3.2-1})$$

式中： $k_{p,i}$ ——不同单轴轴重级位*i*的设计轴载当量换算系数；

$P_i$ ——单轴级位*i*的轴重(kN)；

$P_s$ ——设计轴载的轴重(kN)。

依据单轴轴载谱和相应的设计轴载当量换算系数，可以按式(A.3.2-2)计算得到设计车道初始年设计轴载日作用次数。

$$N_s = AADT \frac{n}{3000} \sum_i (k_{p,i} \times p_i) \quad (\text{A.3.2-2})$$

式中： $N_s$ ——设计车道初始年设计轴载日作用次数[轴次/(车道·d)]；

$n$ ——随机调查 3 000 辆 2 轴 6 轮及以上车辆中出现的单轴总轴数；  
 $p_i$ ——单轴轴重级位  $i$  的频率(以分数计)。

**A.3.3** 以车辆类型为基础进行各种轴型的轴载称重和统计时，可采用车辆当量轴载系数法计算分析设计车道使用初期的设计轴载日作用次数。

将 2 轴 6 轮及以上车辆分为整车、半挂和多挂 3 大类，每类车再按轴数细分。分别按车型称重后得到单轴轴载谱。由式(A.3.2-1)和式(A.3.3-1)计算得到各类车辆的设计轴载当量换算系数。

$$k_{p,k} = \sum_i k_{p,i} p_i \quad (\text{A.3.3-1})$$

式中： $k_{p,k}$ —— $k$  类车辆的设计轴载当量换算系数；  
 $p_i$ —— $k$  类车辆单轴轴重级位  $i$  的频率(以分数计)。

依据调查所得的车辆类型组成数据，可按式(A.3.3-2)计算确定设计车道初始年设计轴载日作用次数。

$$N_s = \text{AADT} \times \sum_k (k_{p,k} \times p_k) \quad (\text{A.3.3-2})$$

式中： $p_k$ —— $k$  类车辆的组成比例(以分数计)。

### 条文说明

无论是直接按车辆轴型称重统计，还是先以车辆类型为基础分析然后再按轴型进行称重统计，都需将货车的单轴(每侧双轮)、双联轴(每侧各一单轮胎、双轮胎)、双联轴(每侧双轮)和三联轴(每侧双轮)分别按 1 次、1 次、2 次和 3 次单轴双轮荷载统计轴重，进行轴重分级，获取单轴双轮的轴载谱，用于轴载换算。对于单轴(每侧单轮)、双联轴(每侧单轮)、三联轴(每侧单轮)轴载最大值，在路面板临界荷位处产生的荷载应力依次递减，约为单轴双轮 100kN 轴载产生荷载应力的 80%、60%、40% 不等，换算成当量单轴双轮设计荷载作用次数均远小于 1，可以略去不计。虽然会少算了这部分轴载(每侧单轮)的当量设计轴载作用次数，但对于双联轴(每侧双轮)、三联轴(每侧双轮)荷载，按 2 次和 3 次单轴双轮荷载换算，则多算了这部分多联轴载(每侧双轮)的当量设计轴载作用次数。总体而言，按这样的处理方法预估的当量设计轴载累计作用次数虽然较实际的多，但简单方便，设计也偏于安全。

## A.4 当量设计轴载累计作用次数

**A.4.1** 设计使用年限内水泥混凝土路面设计车道临界荷位处所承受的设计轴载累计作用次数，应按式(A.4.1)计算确定。

$$N_e = \frac{N_s \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta \quad (\text{A.4.1})$$

式中： $N_e$ ——设计使用年限内设计车道当量设计轴载累计作用次数；  
 $t$ ——设计使用年限(a)；  
 $g_r$ ——设计使用年限内货车交通量年平均增长率(以分数计)；  
 $N_s$ ——设计车道初始年设计轴载日作用次数[轴次/(车道·d)]；  
 $\eta$ ——临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数，按表 A. 2. 6 选用。

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 附录 B 混凝土板应力分析及厚度计算

### B.1 力学模型

**B.1.1** 按基层与面层类型和组合的不同,路面结构分析分别采用下述力学模型:

1 弹性地基单层板模型——在旧沥青路面、粒料基层或基岩上铺筑水泥混凝土面层,面层视为单层板,面层以下部分按弹性地基处理。

2 弹性地基双层板模型——在贫混凝土、碾压混凝土、无机结合料类基层、沥青类基层、旧混凝土路面(作为基层)上铺筑水泥混凝土面层,面层和基层视为双层板,板以下部分按弹性地基处理。当底基层为无机结合料稳定类材料时并入基层,为粒料时则归入弹性地基。

#### 条文说明

进行结构分析时采用了下述方案:①基层板与面层板的平面尺寸可以不相等;②荷载应力采用有限元法求解,基层板与面层板采用立方体弹性单元,层间水平光滑、竖向受压连续但不承受拉力;③温度翘曲应力用近似解析法求解,基层板与面层板采用薄板假定,层间为竖向线性弹簧相连。

水泥混凝土路面结构自上而下包含面层板、基层、底基层、功能层、路基等。为了结构分析方便且符合实际,把结构层体系分为地基和板两部分。碾压混凝土和贫混凝土基层的刚度接近于混凝土面层,与下卧的底基层和路床的刚度相差较大,若将这两种基层与下卧结构层和路基组合成弹性地基,按其等量弯沉的综合模量计算面层厚度,一方面会得到偏保守的计算结果,另一方面会忽视基层底面因弯拉应力超过其强度而出现开裂的可能性。将这两种基层与面层组合在一起,按分离式或半结合式双层板进行结构分析,可以凸现这两种基层的力学特性,并通过调节上、下层的厚度,使上、下层板的板底应力和强度处于协调或平衡状态。

无机结合料稳定碎石和沥青结合料类基层(或底基层)的刚度,也比粒料层和路床的刚度大很多。将这两种结构层与下卧结构层和路基组合成弹性地基,也会使地基综合模量和面层板的应力分析结果出现较大的偏差。为此,也将这两种结构层与面层组合在一起,按分离式双层板进行结构分析。

**B.1.2** 两种不同性能材料通过层间结合组成的复合面层或复合基层,可分别等效为

当量面层板或当量基层板，再按 B. 1. 1 条选择力学模型进行分析。

**B. 1. 3** 混凝土面层板的临界荷位位于纵缝边缘中部。基层板的临界荷位与面层板相同。

## B. 2 路面结构的荷载应力

**B. 2. 1** 设计轴载在临界荷位处产生的路面结构荷载疲劳应力应按式 (B. 2. 1) 确定。

$$\sigma_{i, pr} = k_r k_f k_c \sigma_{i, ps} \quad (\text{B. 2. 1})$$

式中： $\sigma_{i, pr}$ ——设计轴载在面层板临界荷位处产生的面层板 ( $i = c$ )、基层板 ( $i = b$ ) 荷载疲劳应力 (MPa)；

$\sigma_{i, ps}$ ——设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的面层板 ( $i = c$ )、基层板 ( $i = b$ ) 荷载应力 (MPa)，按 B. 2. 2 条确定；

$k_r$ ——考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数。为混凝土路肩时， $k_r = 0.85 \sim 0.90$  (路肩面层与路面面层等厚时取低值，减薄时取高值)，为柔性路肩或土路肩时， $k_r = 0.95$ ；若路肩侧有永久性的防撞隔离带可保证轮迹距纵缝 0.20m 以上时， $k_r = 0.80$ ；

$k_f$ ——考虑设计使用年限内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数，按 B. 2. 5 条确定；

$k_c$ ——考虑计算理论与实际差异以及动载等因素影响的综合系数，按公路等级查表 B. 2. 1 确定。

表 B. 2. 1 综合系数  $k_c$

| 公路等级  | 高速公路 | 一级公路 | 二级公路 | 三、四级公路 |
|-------|------|------|------|--------|
| $k_c$ | 1.10 | 1.05 | 1.00 | 0.95   |

### 条文说明

对原规范中考虑接缝传荷能力的应力折减系数  $k_r$  的内涵作了扩充，增加了对基层超宽于面层板、路肩因设防撞隔离带使轮载与纵缝边缘保持一定距离对荷载应力减少效应的考量。综合系数下调 0.05，取消了原规范对双层板荷载应力直接折减 5%。

**B. 2. 2** 设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的面层板和基层板的荷载应力  $\sigma_{c, ps}$ 、 $\sigma_{b, ps}$  可按式 (B. 2. 2-1) 计算。单面层板的荷载应力  $\sigma_{c, p}$  也可按式 (B. 2. 2-1) 计算，只需  $D_b$  取 0 即可。

$$\begin{cases} \sigma_{c, ps} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} \\ \sigma_{b, ps} = \frac{\varphi D_b}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_b^2} M_{cb} \end{cases} \quad (\text{B. 2. 2-1})$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp \left( -0.264 \frac{k_v}{k_{v0}} \right) \quad (\text{B. 2. 2-2})$$

$$D_i = \frac{E_i h_i^3}{12(1 - \nu_i^2)} \quad (\text{B. 2. 2-3})$$

$$k_v^{-1} = \frac{h_3}{E_3} + \frac{3}{5} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \quad [\text{B. 2. 2-4a}]$$

$$k_{v0}^{-1} = \frac{3}{5} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \quad [\text{B. 2. 2-4b}]$$

式中:  $P_s$ ——设计轴载的单轴重(MN);

$E_c$ 、 $h_c$ ——面层板的弹性模量(MPa)、厚度(m);

$E_b$ 、 $h_b$ ——基层板的弹性模量(MPa)、厚度(m);

$D_c$ 、 $D_b$ ——面层板与基层板的截面弯曲刚度( $\text{MPa} \times \text{m}^3$ ), 按式(B. 2. 2-3)计算;

$M_{cb}$ ——面层板和基层板的总弯矩系数, 按 B. 2. 3 条确定;

$\varphi$ ——面层板与基层板的弯矩分配系数, 按式(B. 2. 2-2)计算;

$k_v$ 、 $k_{v0}$ ——有、无夹层条件的双层板层间竖向弹簧系数( $\text{MPa}/\text{m}$ ), 按式[B. 2. 2-4a)]、式[B. 2. 2-4b)]计算;

$E_3$ 、 $h_3$ ——双层板层间夹层的弹性模量(MPa)、厚度(m)。

**B. 2. 3** 路面结构的弯矩系数  $M_{cb}$  应按式(B. 2. 3-1)计算。

$$M_{cb} = 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right] \quad (\text{B. 2. 3-1})$$

$$a = \sqrt{\frac{P_s}{2\pi q_s} + \left( \frac{d_s}{2} \right)^2} \quad (\text{B. 2. 3-2})$$

$$r_g^4 = \frac{D_c}{k_v} + \left[ \frac{2(D_c + D_b)(1 - \nu_t^2)}{E_t} \right]^{4/3} \quad (\text{B. 2. 3-3})$$

式中:  $P_s$ ——设计轴载的单轴重(MN);

$q_s$ ——设计轴载的接地压力(MPa), 通过实测取值; 当无实测数据时, 设计轴载  $P_s = 40\text{kN}$  时, 取  $q_s = 0.40\text{MPa}$ ,  $P_s = 240\text{kN}$  时, 取  $q_s = 0.95\text{MPa}$ , 设计轴载  $P_s$  在  $40 \sim 240\text{kN}$  之间或  $P_s > 240\text{kN}$  时, 按线性内插或外延计算;

$d_s$ ——双轮距, 一般可取为  $0.340\text{m}$ ;

$a$ ——一侧双轮载的当量荷载半径(mm), 按式(B. 2. 3-2)确定, 当设计轴载  $P_s = 100\text{kN}$ 、 $q_s = 0.572\text{MPa}$  时,  $a = 0.238\text{m}$ ;

$r_g$ ——计算荷载应力时双层板的当量相对刚度半径(mm), 按式(B. 2. 3-3)确定; 单层板时改为单层板相对刚度半径  $r_c$ (m), 仍可按式(B. 2. 3-3)计算, 取  $D_b = 0$ 、 $k_v \rightarrow \infty$ ;

$E_t$ 、 $\nu_t$ ——板底地基当量回弹模量(MPa)、泊松比, 新建道路按 B. 2. 6 条确定, 旧沥青混凝土路面上铺筑水泥混凝土面层按 B. 2. 7 条确定。

## 条文说明

本次修订对荷载应力回归式的形式作了调整,使得回归精度和推广性更好,单层板和双层板荷载应力计算式在形式上取得了统一。当基层厚度  $h_b = 0$  时即退化为单层板(单层板时无夹层,其竖向弹簧模量  $k_v \rightarrow \infty$ )。在路面结构参数:  $h_c = 0.17 \sim 0.40\text{m}$ 、 $E_c = 20\,000 \sim 40\,000\text{MPa}$ 、 $\nu_c = 0.15$ 、 $h_b = 0.14 \sim 0.22\text{m}$ 、 $E_b = 1\,500 \sim 20\,000\text{MPa}$ 、 $\nu_b = 0.25$ 、 $k_0 = 40 \sim 240\text{MPa/m}$  范围内,单层板的面层板荷载应力回归的相对误差小于 3%,双层板荷载应力回归的相对误差小于 5%。

**B.2.4** 两种不同材料复合而成的面层板或(和)基层板的荷载应力可按 B.2.2 条计算,只需用截面复合板综合弯曲刚度  $\tilde{D}_c$ 、 $\tilde{D}_b$  和当量厚度  $\tilde{h}_c$ 、 $\tilde{h}_b$  代替  $D_c$ 、 $D_b$  和  $h_c$ 、 $h_b$  即可。复合板综合弯曲刚度  $\tilde{D}_c$ 、 $\tilde{D}_b$  按式(B.2.4-1)确定,当量厚度  $\tilde{h}_c$ 、 $\tilde{h}_b$  按式(B.2.4-2)确定。

$$\tilde{D}_i = \frac{E_{i1}h_{i1}^3 + E_{i2}h_{i2}^3}{12(1-\nu_{i2}^2)} + \frac{(h_{i1} + h_{i2})^2}{4(1-\nu_{i2}^2)} \left( \frac{1}{E_{i1}h_{i1}} + \frac{1}{E_{i2}h_{i2}} \right)^{-1} \chi \quad (\text{B.2.4-1})$$

$$\tilde{h}_i = \sqrt{\frac{6\tilde{D}_i(1-\nu_{i2}^2)}{E_{i2}d_{xi}}} \quad (\text{B.2.4-2})$$

$$d_{xi} = \frac{1}{2} \left[ h_{i2} + \frac{E_{i1}h_{i1}(h_{i1} + h_{i2})}{E_{i1}h_{i1} + E_{i2}h_{i2}} \chi \right] \quad (\text{B.2.4-3})$$

式中:  $E_{ij}$ 、 $\nu_{ij}$ 、 $h_{ij}$ ——复合面层( $i=c$ )、复合基层( $i=b$ )的上层( $j=1$ )、下层( $j=2$ )的弹性模量(MPa)、泊松比与厚度(m);

$\tilde{h}_i$ ——复合面层( $i=c$ )、复合基层( $i=b$ )的当量厚度(m);

$d_{xi}$ ——复合面层板( $i=c$ )、复合基层板( $i=b$ )的中性轴至下层底部的距离(m),按式(B.2.4-3)计算;

$\chi$ ——复合层间结合状态系数,层间处于光滑状态,  $\chi=0$ ;层间处于完全结合状态,  $\chi=1$ ;层间处于半结合状态,  $0 < \chi < 1$ 。

## 条文说明

两种不同力学性能材料组成的层间连续的面层结构,上面层往往具有更佳的使用性能,例如新混凝土加铺层、舒适性好的沥青混凝土、低噪声的橡胶混凝土、多孔混凝土,耐磨露石混凝土、高强的钢纤维混凝土、黏结性好的聚合物混凝土等。原规范中基层和底基层同为刚性或无机结合料稳定类材料时,处理为水平光滑分离式叠合板,本次修订为层间连续的复合基层板。

复合面层的上面层材料往往较昂贵,其厚度由材料性能、摊铺与压实等施工要求,以及交通磨损厚度等因素确定。在计算路面结构厚度时,上面层厚度不作调整。上面层层厚可以先扣除磨损厚度与刻槽深度,然后与下面层一起满足路面结构极限状



态方程(3.0.4-1)~式(3.0.4-3)或(和)式(3.0.5)。

**B.2.5** 路面结构设计使用年限内的荷载疲劳应力系数  $k_f$ , 面层(基层)材料为普通混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土、碾压混凝土或贫混凝土时按式(B.2.5-1)计算; 为钢纤维混凝土时按式(B.2.5-2)计算。

$$k_f = N_e^\theta \quad (\text{B.2.5-1})$$

$$k_f = \left( \frac{N_e}{1 + a_f \lambda_f} \right)^{\theta(1 - b_f R_{e,300})} \quad (\text{B.2.5-2})$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \quad (\text{B.2.5-3})$$

式中:  $N_e$ ——设计使用年限内设计轴载累计作用次数, 按附录 A 的式(A.4.1)计算;

$\theta$ ——材料疲劳指数, 普通混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土、钢纤维混凝土:  $\theta=0.057$ ; 碾压混凝土和贫混凝土:  $\theta=0.065$ ;

$\lambda_f$ ——钢纤维含量特征值, 按式(B.2.5-3)计算;

$R_{e,300}$ ——四点弯曲试验跨中挠度为跨距 1/300 时的弯曲韧性比  $R_{e,300}$ , 与钢纤维含量特征值, 以及钢纤维端部形状和强度有关, 由试验确定;

$a_f$ 、 $b_f$ ——与钢纤维类型、形状和强度有关的参数, 应通过试验确定;

$\rho_f$ ——钢纤维的体积率(%);

$l_f$ ——钢纤维的长度(mm);

$d_f$ ——钢纤维的直径(mm)。

### 条文说明

对钢纤维混凝土弯曲疲劳方程形式作了调整, 通过纳入钢纤维混凝土的弯曲韧性比  $R_{e,300}$ , 计入了部分钢纤维混凝土梁裂后的承载能力, 即梁底开裂扩展为贯通截面裂缝的作用次数, 但未考虑路面板纵边边缘中部裂缝向板内扩展及板内应力重分布等板体效应。若不允许板底开裂扩展为贯通截面裂缝, 则  $b_f$  取零。新形式对钢锭铣削型、端钩钢丝型钢纤维类型具有良好的适用性, 但由于钢丝型钢纤维的类型众多, 尤其端部形状不一, 加之高强钢丝的应用, 其影响参数  $a_f$ 、 $b_f$  难以一一给出。其中, 钢锭铣削型和一段端钩钢丝型(1 300MPa)钢纤维混凝土:  $a_f \approx 8$ 、 $b_f \approx 0.2$ 。钢纤维混凝土的弯曲韧性比  $R_{e,300}$  除了与钢纤维性质有关之外, 还主要取决于钢纤维掺量和混凝土强度, 建议根据经验并经试配确定。

**B.2.6** 新建公路的粒料层顶面地基当量回弹模量  $E_t$  应按式(B.2.6-1)计算。

$$E_t = \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^\eta E_0 \quad (\text{B.2.6-1})$$

$$\eta = 0.86 + 0.26 \ln h_x \quad (\text{B.2.6-2})$$

$$E_x = \sum_{i=1}^n h_i^2 E_i / \sum_{i=1}^n h_i^2 \quad (\text{B.2.6-3})$$

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i \quad (\text{B. 2. 6-4})$$

式中:  $E_0$ ——路床顶综合回弹模量(MPa);

$\eta$ ——与粒料层总厚度  $h_x$  有关的回归系数, 按式(B. 2. 6-2)计算;

$E_x$ ——粒料层的当量回弹模量(MPa), 按式(B. 2. 6-3)计算;

$h_x$ ——粒料层的总厚度(m), 按式(B. 2. 6-4)计算;

$n$ ——粒料层的层数;

$E_i$ 、 $h_i$ ——第  $i$  结构层的回弹模量(MPa)与厚度(m)。

**B. 2. 7** 在旧沥青混凝土路面上铺筑水泥混凝土面层时, 原沥青混凝土路面顶面的地基综合当量回弹模量  $E_t$  可根据落锤式弯沉仪(荷载 50kN、承载板半径 150mm)中心点弯沉的测定结果按式(B. 2. 7-1), 或根据贝克曼梁(后轴重 100kN 的车辆)的弯沉测定结果, 按式(B. 2. 7-2)计算确定。

$$E_t = \frac{18\,600}{l_0} \quad (\text{B. 2. 7-1})$$

$$E_t = 13\,700 l_0^{-1.04} \quad (\text{B. 2. 7-2})$$

$$l_0 = \bar{l}_0 + 1.04s \quad (\text{B. 2. 7-3})$$

式中:  $l_0$ ——路段代表弯沉值(0.01mm), 按式(B. 2. 7-3)计算;

$\bar{l}_0$ ——路段弯沉平均值(0.01mm);

$s$ ——路段弯沉的标准差(0.01mm)。

**B. 2. 8** 最重轴载在面层板临界荷位处产生的最大荷载应力, 按式(B. 2. 8)计算。

$$\sigma_{c.p.\max} = k_r k_c \sigma_{c.p.m} \quad (\text{B. 2. 8})$$

式中:  $\sigma_{c.p.\max}$ ——最重轴载  $P_m$  在面层板临界荷位处产生的最大荷载应力(MPa);

$\sigma_{c.p.m}$ ——最重轴载  $P_m$  在四边自由板临界荷位处产生的最大荷载应力(MPa), 按式(B. 2. 2-1)计算, 式中的设计轴载  $P_s$  取用最重轴载  $P_m$ , 式(B. 2. 3-2)中的设计轴载接地压力  $q_s$  按最重轴载接地压力  $q_m$  取用;

$k_r$ ——考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数, 为混凝土路肩时,  $k_r = 0.85 \sim 0.90$  (路肩面层与路面面层等厚时取低值, 减薄时取高值), 为柔性路肩或土路肩时,  $k_r = 0.95$ ; 若路肩侧有永久性的防撞隔离带可保证轮迹距纵缝 0.20m 以上时,  $k_r = 0.80$ ;

$k_c$ ——考虑计算理论与实际差异以及动载等因素影响的综合系数, 按公路等级查表 B. 2. 1 确定。

### B. 3 路面结构的温度应力

**B. 3. 1** 路面结构设计使用年限内, 单层面层板或双层板的上面层板在临界荷位处的

温度疲劳应力按式(B.3.1-1)~式(B.3.1-8)计算。

$$\sigma_{c, tr} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g, r} \xi_{tr}}{2} C_L \quad (\text{B.3.1-1})$$

$$\xi_{tr} = \max \left\{ 0.2, -\frac{1\,000 f_{c, r}}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24 C_L \ln(h_c) - 0.153 \right\} \quad (\text{B.3.1-2})$$

$$C_L = 1 - \left( \frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t} \quad (\text{B.3.1-3})$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{8} r_{g, t}} \quad (\text{B.3.1-4})$$

$$\zeta = -\frac{(k_{v, t} r_{g, t}^4 - D_c) r_{\beta}^3}{(k_{v, t} r_{\beta}^4 - D_c) r_{g, t}^3} \quad (\text{B.3.1-5})$$

$$r_{\beta} = \left[ \frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_{v, t}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{B.3.1-6})$$

$$k_{v, t} = \frac{1}{2} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right)^{-1} \quad (\text{B.3.1-7})$$

$$r_{g, t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} \quad (\text{B.3.1-8})$$

式中： $\sigma_{c, tr}$ ——面层板临界荷位处的温度疲劳应力(MPa)；

$\alpha_c$ ——混凝土的线膨胀系数( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )，根据粗集料的岩性按表5.5.8取用；

$T_{g, r}$ ——基准路面结构( $h_c = 0.22\text{m}$ ,  $E_c = 31\,000\text{MPa}$ ,  $\alpha_c = 1 \times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $f_{c, r} = 5\text{MPa}$ 的无限大板)的疲劳温度梯度( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )，查表B.3.1取用；

$C_L$ ——混凝土面层板纵缝边缘中部的温度翘曲应力系数，按式(B.3.1-3)计算；

$\xi_{tr}$ ——非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数，按式(B.3.1-2)计算；

$L$ ——面层板的横缝间距，即板长(m)；

$r_{g, t}$ ——计算温度应力时双层板相对于路床的弯曲刚度半径(m)，按式(B.3.1-8)计算。单层板时为单层板相对于路床的弯曲刚度半径 $r_{c, t}$ ，仍可按式(B.3.1-8)计算，此时 $D_b = 0$ ；

$\zeta$ ——与双层板结构有关的参数，按式(B.3.1-5)计算，对于单层板， $\zeta = 0$ ；

$r_{\beta}$ ——层间接触状况参数(m)，按式(B.3.1-6)计算；

$k_{v, t}$ ——面层与基层之间竖向接触刚度(MPa/m)，无沥青类夹层时，可按式(B.3.1-7)计算，有沥青类夹层时，取 $3\,000\text{MPa}/\text{m}$ 。

表 B.3.1 疲劳温度梯度和最大温度梯度( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )

| 公路自然区划               | II        | III      | IV       | V        | VI        | VII       |
|----------------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 疲劳温度梯度 $T_{g, r}$    | 40 ~ 34   | 42 ~ 36  | 36 ~ 27  | 41 ~ 28  | 47 ~ 42   | 48 ~ 40   |
| 最大温度梯度 $T_{g, \max}$ | 110 ~ 100 | 109 ~ 94 | 103 ~ 89 | 110 ~ 90 | 112 ~ 105 | 113 ~ 103 |

注：海拔高时，取高值；湿度大时，取低值。

## 条文说明

原规范中最大温度梯度设计值和温度应力计算方法均源于 20 世纪 80、90 年代的研究成果,近几年路面温度场的实测和理论研究结果表明,原规范中的内容存在着两大缺陷:(1)原规范推荐的 50 年一遇的最大温度梯度值偏小 10%~20%;(2)原规范中对温度日变化简化为一次正弦函数过于粗糙,引起的偏差不容忽视。本次修订针对这两个缺陷进行了弥补,调整全国 50 年一遇的最大温度梯度推荐值,改进了疲劳温度应力的计算方法。其中,表 B.3.1 给出了全国各公路区划 50 年一遇的最大温度梯度的上、下限推荐值,全国基准路面结构的疲劳温度梯度的上、下限推荐值。当精度要求较高时,可以按式(B-1)、式(B-2)计算。

$$T_{g,r} = 60.1 - 0.359T_{a,y} - 0.284\rho_{wa,y} \quad (B-1)$$

$$T_{g,max} = 124.9 - 0.822T_{a,y} - 0.185\rho_{wa,y} \quad (B-2)$$

式中:  $\rho_{wa,y}$ ——年均湿度(%);

$T_{a,y}$ ——年均气温(℃)。

本次修订,单层板和双层板的温度应力计算式统一了形式,下层板对上层板翘曲变形的影响系数  $\zeta$  取零,即为单层板。另外,为避免过量外延造成不安全的偏差,非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数  $\xi_{ir}$  设了 0.2 的下限。

由于温度是日交变的,且温度应力高值发生在夏季日暴晒时,故在计算面层与基层之间竖向接触刚度  $k_v$  时,面层、基层模量计入了部分徐变量。沥青类夹层模量也需考虑高温和日交变的影响,  $k_v$  值大约在 2 000~4 000MPa/m 变化,对温度应力计算结果影响不大,为此,取统一值 3 000MPa/m。

**B.3.2** 单层面层板或双层板的上面层板在临界荷位处的最大温度应力  $\sigma_{c,t,max}$  按式(B.3.2-1)计算。

$$\sigma_{c,t,max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g,max}}{2} B_L \quad (B.3.2-1)$$

$$B_L = \max \{0.1, 1.93e^{-4.6h_c} C_L - 0.155(1 - C_L)\} \quad (B.3.2-2)$$

式中:  $B_L$ ——综合温度翘曲应力和内应力的温度应力系数,按式(B.3.2-2)计算;

$T_{g,max}$ ——板厚  $h_c = 0.22m$  单层面层板 50 年一遇的最大温度梯度(℃/m),查表 B.3.1 取用。

## 条文说明

为避免过量外延造成不安全的偏差,对考虑板厚及内应力对最大温度梯度影响的温度应力系数  $B_L$  设了 0.1 的下限。

**B.3.3** 两种不同弹性模量水泥混凝土复合面层板的疲劳温度应力按式(B.3.3-1)计算,最大温度应力按式(B.3.3-2)计算。

$$\sigma_{c, tr} = \frac{\alpha_c E_{c2} (h_{c1} + h_{c2}) T_{g, tr} \xi_{tr} \varphi_{t1}}{2} C_L \quad (\text{B.3.3-1})$$

$$\sigma_{c, t, max} = \frac{\alpha_c E_{c2} (h_{c1} + h_{c2}) T_{g, max} \varphi_{t1}}{2} B_L \quad (\text{B.3.3-2})$$

$$\varphi_{t1} = 1.77 - 0.27 \ln \left( \frac{h_{c1} E_{c1}}{h_{c2} E_{c2}} + 18 \frac{E_{c1}}{E_{c2}} - 2 \frac{h_{c1}}{h_{c2}} \right) \quad (\text{B.3.3-3})$$

式中:  $B_L$ ——面层复合板的温度应力系数,按式(B.3.2-2)计算,其中,面层板厚度  $h_c$  取面层复合板的总厚度( $h_{c1} + h_{c2}$ );

$\xi_{tr}$ ——非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数,按式(B.3.1-2)计算,其中,面层板厚度  $h_c$  取面层复合板的总厚度( $h_{c1} + h_{c2}$ );

$\varphi_{t1}$ ——面层复合板的最大温度应力修正系数,按式(B.3.3-3)计算。

**B.3.4** 沥青混合料上面层与水泥混凝土下面层的复合面层板,水泥混凝土下面层的疲劳温度应力、最大温度应力采用 B.3.3 条方法计算,其中疲劳温度梯度、最大温度梯度应乘以温度梯度修正系数  $\varphi_{t2}$ ,按式(B.3.4)计算。

$$\varphi_{t2} = \frac{4}{3} e^{-8h_a} \quad (\text{B.3.4})$$

式中:  $h_a$ ——沥青混合料上面层的厚度(m)。

### 条文说明

有沥青上面层的混凝土下层板结构在力学本质上可以视为复合面层结构。因此,本次修订将此结构纳入复合面层结构,沥青上面层对下层板的温度梯度的影响通过引入一个温度应力修正系数加以修正。原规范中温度应力修正系数以表格形式给出,本次修订改用更方便的回归式表示。

## B.4 混凝土板厚度计算流程

1 按第4章进行行车道路面结构的组合设计,初拟路面结构,包括路床、功能层、基层和面层的材料类型和厚度,并按表4.4.3所列的水泥混凝土面层厚度建议范围,依据交通荷载等级、公路等级和所选变异水平等级初选混凝土板厚度。

2 按照初拟路面结构的组合情况,选择相应的结构分析模型。

3 参照图 B.4 所示的混凝土路面板厚度计算流程,分别计算混凝土面层板(单层板或双层板的面层板)的最重轴载产生的最大荷载应力、设计轴载产生的荷载疲劳应力、最大温度梯度产生的最大温度应力及疲劳温度梯度产生的温度疲劳应力。

4 当荷载疲劳应力与温度疲劳应力之和与可靠度系数的乘积, 小于且接近于混凝土弯拉强度标准值, 同时, 最大荷载应力与最大温度应力之和与可靠度系数的乘积, 小于混凝土弯拉强度标准值, 即满足式(3.0.4-1)和式(3.0.4-2)时, 则初选厚度可作为混凝土板的计算厚度。

5 贫混凝土或碾压混凝土基层或者双层板的下面层板, 需计算其荷载疲劳应力, 并检算荷载疲劳应力与可靠度系数的乘积是否小于其材料的弯拉强度标准值, 即应满足式(3.0.5)。

6 若不能同时满足式(3.0.4)及式(3.0.5)时, 应改选混凝土面层板厚度或(和)调整基层类型或(和)厚度, 重新计算, 直到同时满足式(3.0.4)及式(3.0.5)。

7 计算厚度加 6mm 的磨损厚度和刻槽深度后, 应按 10mm 向上取整, 作为混凝土面层的设计厚度。

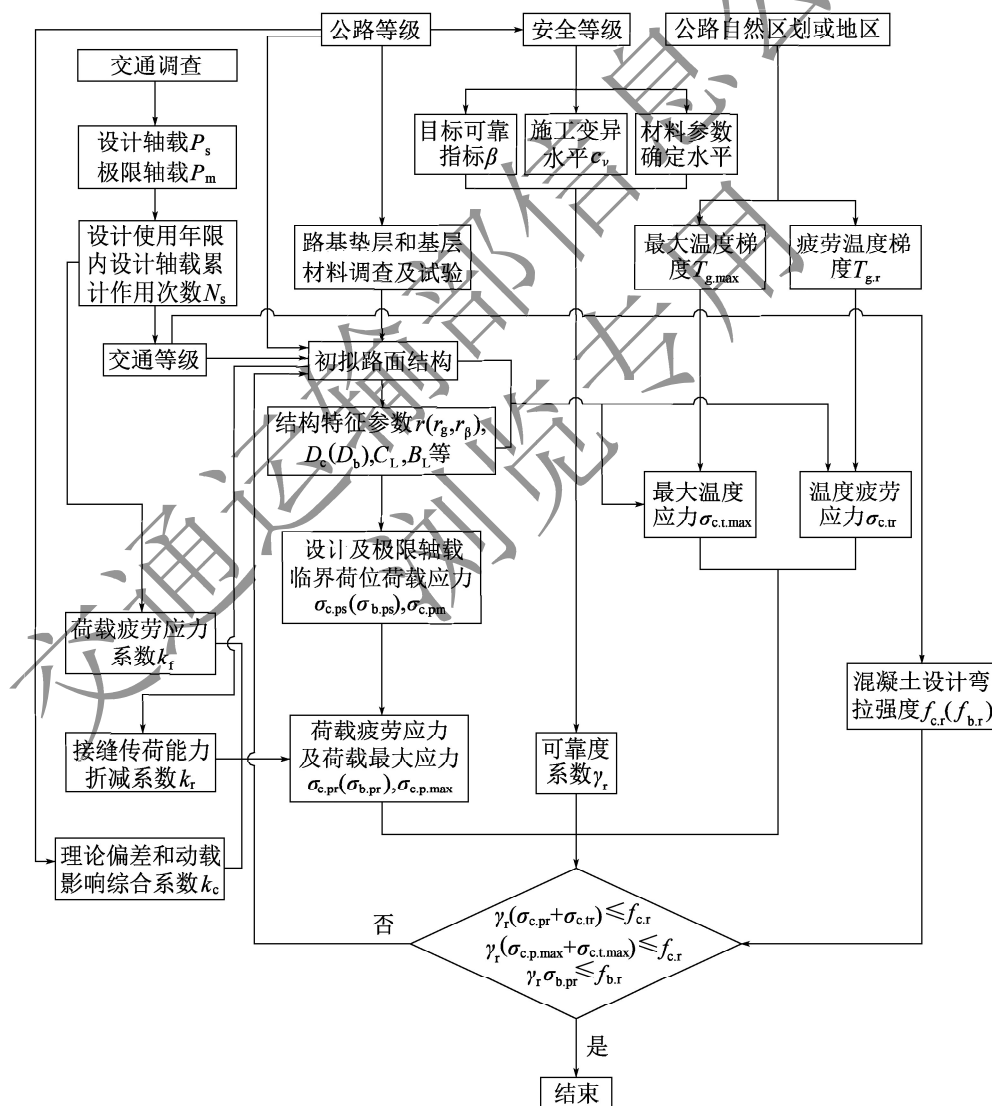


图 B.4 混凝土路面板厚度计算流程图

## 条文说明

## 示例 1 粒料基层上混凝土面板厚度计算

公路自然区划Ⅱ区拟新建一条二级公路,路面宽7m,路基为低液限黏土,路床顶距地下水位平均1.2m,当地的粗集料以花岗岩为主,拟采用普通混凝土路面。经交通调查得知,设计轴载 $P_s=100\text{kN}$ ,最重轴载 $P_m=180\text{kN}$ ,设计车道使用初期设计轴载的日作用次数为100次,交通量年平均增长率为5%。

## 1) 交通分析

由表3.0.1可知,二级公路的设计使用年限为20年,安全等级为二级。由附录A中的表A.2.6可知,临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数取0.62。按式(A.4.1)计算得到设计使用年限内设计车道设计轴载累计作用次数:

$$N_e = \frac{N_s \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{100 \times [(1 + 0.05)^{20} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.62 = 74.8 \times 10^4$$

由表3.0.8可知,属中等交通荷载等级。

## 2) 初拟路面结构

根据当地的施工技术水平,对照表3.0.2所示的水泥混凝土面层厚度、弯拉强度及基层顶面当量回弹模量的变异系数范围,二级公路施工质量变异水平选择中级。根据二级公路、中等交通荷载等级和中级变异水平,依据表4.4.3,初拟普通混凝土面层厚度为0.24m,基层选用级配碎石,厚0.20m。普通混凝土板的平面尺寸为4.5m×3.5m,纵缝为设拉杆平缝,横缝为不设传力杆的假缝,混凝土路肩面层与行车道混凝土面层等厚并设拉杆相连。

## 3) 路面材料参数确定

按水平三,确定路面材料参数。

依据表3.0.9,取普通混凝土面层的弯拉强度标准值为4.5MPa,相应弯拉弹性模量与泊松比为29GPa、0.15。查表5.5.8,粗集料为花岗岩的混凝土线膨胀系数 $\alpha_c = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

查《公路路基设计规范》(JTJ D30—2015)附录B及附录D,依据表B-1,取低液限黏土路基回弹模量70MPa,依据表D.0.1,取距地下水位1.2m时的湿度调整系数为0.857,由此得到路床顶综合回弹模量为 $70 \times 0.857 = 60\text{MPa}$ 。查本规范表5.2.5,取级配碎石基层回弹模量为300MPa。按附录B的式(B.2.6-1)~式(B.2.6-4)计算板底地基当量回弹模量如下:

$$E_x = \sum_{i=1}^n h_i^2 E_i / \sum_{i=1}^n h_i^2 = \frac{h_1^2 E_1}{h_1^2} = 300\text{MPa}$$

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i = h_1 = 0.20\text{m}$$

$$\eta = 0.86 + 0.26 \ln(h_x) = 0.86 + 0.26 \times \ln(0.20) = 0.442$$

$$E_t = \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^\eta E_0 = \left( \frac{300}{60} \right)^{0.442} \times 60 = 122.2\text{MPa}$$

板底地基当量回弹模量  $E_t$  取为 120MPa。

普通混凝土面层的弯曲刚度  $D_c$  按式 (B. 2. 2-3) 计算, 单层板相对刚度半径  $r_c$  按式 (B. 2. 3-3) 计算, 路面结构的弯矩系数  $M_{cb}$  按式 (B. 2. 3-1) 计算:

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1 - \nu_c^2)} = \frac{29\,000 \times 0.24^3}{12 \times (1 - 0.15^2)} = 34.177 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$D_b = 0 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$r_c = \left[ \frac{2D_c(1 - \nu_t^2)}{E_t} \right]^{1/3} = \left[ \frac{2 \times 34.177 \times (1 - 0.35^2)}{120} \right]^{1/3} = 0.793\,6 \text{ m}$$

$$P_s = 0.100 \text{ MN 时, } a = 0.238\,2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_c}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_c} \right)^2 - 0.096 \right] \\ &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{0.793\,6}{0.238\,2} \right) + 0.714 \left( \frac{0.238\,2}{0.793\,6} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.172\,3 \end{aligned}$$

$$P_m = 0.180 \text{ MN 时, } a = 0.255\,1 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_c}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_c} \right)^2 - 0.096 \right] \\ &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{0.793\,6}{0.255\,1} \right) + 0.714 \left( \frac{0.255\,1}{0.793\,6} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.163\,6 \end{aligned}$$

#### 4) 荷载应力

按式 (B. 2. 2-1) 计算设计轴载和最重荷载在面层板临界荷位处产生的荷载应力:

$$\sigma_{c,ps} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{6 \times 0.100}{0.24^2} \times 0.1723 = 1.795 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,pm} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{h_c^2} M_{cb} = \frac{6 \times 0.180}{0.24^2} \times 0.1636 = 3.067 \text{ MPa}$$

按式 (B. 2. 1) 计算设计轴载在面层板临界荷位处产生的荷载疲劳应力, 按式 (B. 2. 8) 计算最重轴载在面层板临界荷位处产生的最大荷载应力:

$$\sigma_{c,pr} = k_r k_f k_c \sigma_{c,ps} = 0.85 \times 2.162 \times 1.0 \times 1.795 = 3.297 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p,max} = k_r k_c \sigma_{c,pm} = 0.85 \times 1.0 \times 3.067 = 2.607 \text{ MPa}$$

其中, 考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数, 混凝土路肩  $k_r = 0.85$  (B. 2. 1 条); 综合系数  $k_c = 1.0$  (表 B. 2. 1); 疲劳应力系数  $k_f = N_e^0 = (74.8 \times 10^4)^{0.057} = 2.162$  [式 (B. 2. 5-1)]。

#### 5) 温度应力

由附录 B 的表 B. 3. 1 可知, 公路区划 II, 疲劳温度梯度和最大温度梯度取为  $40^\circ\text{C}/\text{m}$ ,  $110^\circ\text{C}/\text{m}$ 。按式 (B. 3. 1-8) 计算路面板 (单层板) 相对于路床的弯曲刚度半径  $r_{c,t}$  (m), 按式 (B. 3. 1-4) 计算  $t$ , 按式 (B. 3. 1-3) 计算温度翘曲应力系数  $C_L$ , 按式 (B. 3. 1-2) 计算非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数  $\xi_{tr}$ :

$$r_{c,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{34.177}{120}} = 0.954 \text{ m}$$



$$t = \frac{L}{\sqrt{8} r_{c,t}} = \frac{4.5}{\sqrt{8} \times 0.954} = 1.668$$

$$\begin{aligned} C_L &= 1 - \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t} \\ &= 1 - \frac{\sinh(1.668) \cos(1.668) + \cosh(1.668) \sin(1.668)}{\cos(1.668) \sin(1.668) + \sinh(1.668) \cosh(1.668)} \\ &= 0.641 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi_{tr} &= \max \left\{ 0.2, -\frac{1000f_{c,r}}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24C_L \ln(h_c) - 0.153 \right\} \\ &= \max \left\{ 0.2, -\frac{1000 \times 4.5}{29000 \times 0.24} [\ln(0.641) + 0.971] - 1.24 \times 0.641 \times \ln(0.24) - 0.153 \right\} \\ &= \max \{ 0.2, 0.641 \} = 0.641 \end{aligned}$$

按式(B.3.1-1)计算面层板临界荷位处的温度疲劳应力:

$$\sigma_{c, tr} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g,r} \xi_{tr}}{2} C_L = \frac{1 \times 10^{-5} \times 29000 \times 0.24 \times 40 \times 0.641}{2} \times 0.641 = 0.572 \text{ MPa}$$

再由式(B.3.2-1)计算面层板在临界荷位处的最大温度应力:

$$\sigma_{c, t, \max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g, \max}}{2} B_L = \frac{1 \times 10^{-5} \times 29000 \times 0.24 \times 110}{2} \times 0.354 = 1.357 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} B_L &= \max \{ 0.1, 1.93e^{-4.6h_c} C_L - 0.155(1 - C_L) \} \\ &= \max \{ 0.1, 1.93 \times e^{-4.6 \times 0.24} \times 0.641 - 0.155 \times (1 - 0.641) \} \\ &= \max \{ 0.1, 0.354 \} = 0.354 \end{aligned}$$

#### 6) 结构极限状态校核

查表3.0.2及表3.0.4可知, 二级公路、中等变异水平条件下, 取 $\psi_1 = 0.12$ ,  $\psi_2$ 按水平二取值,  $\psi_2 = 0.05$ , 可靠度系数 $\gamma_r$ 按式(3.0.4-3)计算为1.17。

按式(3.0.4-1)和式(3.0.4-2)校核路面结构极限状态是否满足要求:

$$\gamma_r(\sigma_{c, pr} + \sigma_{c, tr}) = 1.17 \times (3.297 + 0.572) = 4.527 > f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c, p, \max} + \sigma_{c, t, \max}) = 1.17 \times (2.607 + 1.357) = 4.638 > f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

初拟的路面结构不满足要求, 按每次厚度增加2mm, 重复以上计算。将混凝土面层厚度增至0.244m时, 得到荷载疲劳应力 $\sigma_{c, pr} = 3.230 \text{ MPa}$ , 最大荷载应力 $\sigma_{c, p, \max} = 2.554 \text{ MPa}$ , 温度疲劳应力 $\sigma_{c, tr} = 0.542 \text{ MPa}$ , 最大温度应力 $\sigma_{c, t, \max} = 1.287 \text{ MPa}$ , 然后再进行结构极限状态验算:

$$\gamma_r(\sigma_{c, pr} + \sigma_{c, tr}) = 1.17 \times (3.230 + 0.542) = 4.413 < f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c, p, \max} + \sigma_{c, t, \max}) = 1.17 \times (2.554 + 1.287) = 4.494 < f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

重拟的路面结构满足要求, 所选的计算厚度0.244m普通混凝土面层, 可以承受设计使用年限内设计轴载荷载和温度梯度的综合疲劳作用, 以及最重轴载在最大温度梯度时的一次极限作用。考虑面层磨损厚度与刻槽深度增加6mm, 并按10mm向上取整, 则普通混凝土面层设计厚度为0.25m。

## 示例2 水泥稳定粒料基层上混凝土面板厚度计算

公路自然区划Ⅳ区新建一条一级公路(初步设计),路基土为低液限粉土,路床顶距地下水位1.0m,当地粗集料以砾石为主。拟采用普通混凝土面层,基层采用水泥稳定砂砾。经交通调查分析得知,设计轴载为 $P_s=100\text{kN}$ ,最重轴载 $P_m=200\text{kN}$ ,设计车道使用初期设计轴载 $P_s$ 日作用次数为4 800,交通量年平均增长率为6%。

### 1) 交通分析

由表3.0.1可知,一级公路的设计使用年限为30年,安全等级为一级。由附录A中的表A.2.6可知,临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数取0.22。按式(A.4.1)计算得到设计使用年限内设计车道设计轴载累计作用次数:

$$N_e = \frac{N_s \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{4\,800 \times [(1 + 0.06)^{30} - 1] \times 365}{0.06} \times 0.22 = 3\,047 \times 10^4$$

由表3.0.8可知,属特重交通荷载等级。

### 2) 初拟路面结构

根据当地的施工技术水平,对照表3.0.2所示的水泥混凝土面层厚度、弯拉强度及基层顶面当量回弹模量的变异系数范围,一级公路施工质量变异水平选择低等级。根据一级公路、特重交通荷载等级和低变异水平等级,依据表4.4.3,初拟普通混凝土面层厚度为0.26m,水泥稳定砂砾基层0.20m,底基层选用级配砾石,厚0.18m。单向路幅宽度为 $2 \times 3.75\text{m}$ (行车道) +  $2.75\text{m}$ (硬路肩),行车道水泥混凝土面层板平面尺寸取 $5.0 \times 3.75\text{m}$ ,纵缝为设拉杆平缝,横缝为设传力杆的假缝。硬路肩面层采用与行车道面层等厚的混凝土,并设拉杆与行车道板相连。

### 3) 路面材料参数确定

按水平三,确定路面材料参数。

按表3.0.9,取普通混凝土面层的弯拉强度标准值为 $5.0\text{MPa}$ ,相应弯拉弹性模量与泊松比为 $31\text{GPa}$ 、 $0.15$ 。查表5.5.8,砾石粗集料的混凝土的线膨胀系数 $\alpha_c = 1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

查《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)附录B及附录D,依据表B-1,取低液限粉土路基回弹模量 $90\text{MPa}$ ,依据表D.0.1,取距地下水位1.0m时的湿度调整系数为0.9,由此得到路床顶综合回弹模量为 $90 \times 0.9 = 81\text{MPa}$ ,取为 $80\text{MPa}$ 。查本规范表5.3.6并考虑修正,水泥稳定砂砾基层的弹性模量及模量调整系数按中值 $23\,000 \times 0.375 = 8\,625$ ,计算采用 $9\,000\text{MPa}$ ,查表5.7.1,其泊松比取0.25。查表5.2.5,取级配砾石底基层回弹模量为 $250\text{MPa}$ ,查表5.7.1,其泊松比取0.35。

按附录B的式(B.2.6-1)~式(B.2.6-4)计算板底地基当量回弹模量如下:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n h_i^2 E_i}{\sum_{i=1}^n h_i^2} = \frac{h_1^2 E_1}{h_1^2} = 250\text{MPa}$$

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i = h_1 = 0.18\text{m}$$

$$\eta = 0.86 + 0.26 \ln(h_x) = 0.86 + 0.26 \times \ln(0.18) = 0.414$$

$$E_t = \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^\eta E_0 = \left( \frac{250}{80} \right)^{0.414} \times 80 = 128.2 \text{ MPa}$$

板底地基当量回弹模量  $E_t$  取为 125 MPa。

普通混凝土面层和基层的弯曲刚度  $D_c$ 、 $D_b$  按式(B.2.2-3)计算, 双层板总相对刚度半径  $r_g$  按式(B.2.3-3)计算, 路面结构的弯矩系数  $M_{cb}$  按式(B.2.3-1)计算:

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31\,000 \times 0.26^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 46.450 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{9\,000 \times 0.20^3}{12 \times (1-0.25^2)} = 6.400 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp \left( -0.264 \frac{k_v}{k_{v0}} \right) = 1 - 0.240 \times \exp \left( -0.264 \frac{54\,450}{54\,450} \right) = 0.816$$

$$k_v = k_{v0} = \left[ \frac{3}{5} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[ 0.6 \times \left( \frac{0.26}{31\,000} + \frac{0.20}{9\,000} \right) \right]^{-1} = 54\,450 \text{ MPa/m}$$

$$r_g = \left[ \frac{D_c}{k_v} + \left( \frac{2D_c(1-\nu_c^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[ \frac{46.450}{54\,450} + \left( \frac{2 \times 46.450 \times (1-0.15^2)}{125} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 0.905 \text{ m}$$

$$P_s = 0.100 \text{ MN 时, } a = 0.238 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right] \\ &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{0.905\,6}{0.238\,2} \right) + 0.714 \left( \frac{0.238\,2}{0.905\,6} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.189\,5 \end{aligned}$$

$$P_m = 0.200 \text{ MN 时, } a = 0.257\,8 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right] \\ &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{0.905\,6}{0.257\,8} \right) + 0.714 \left( \frac{0.257\,8}{0.905\,6} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.179\,1 \end{aligned}$$

#### 4) 荷载应力

按式(B.2.2-1)计算设计轴载和最重荷载在面层板临界荷位处产生的荷载应力:

$$\sigma_{c,ps} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{46.450}{46.450 + 0.816 \times 6.400} \times \frac{6 \times 0.100}{0.26^2} \times 0.189\,5 = 1.512 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,pm} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{h_c^2} M_{cb} = \frac{46.450}{46.450 + 0.816 \times 6.400} \times \frac{6 \times 0.200}{0.26^2} \times 0.179\,1 = 2.858 \text{ MPa}$$

按式(B.2.1)计算设计轴载在面层板临界荷位处产生的荷载疲劳应力, 按式(B.2.8)计算最重轴载在面层板临界荷位处产生的最大荷载应力:

$$\sigma_{c,pr} = k_r k_l k_c \sigma_{c,ps} = 0.85 \times 2.670 \times 1.05 \times 1.512 = 3.603 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p,max} = k_r k_c \sigma_{c,pm} = 0.85 \times 1.05 \times 2.858 = 2.550 \text{ MPa}$$

其中, 考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数, 混凝土路肩  $k_r = 0.85$  (B.2.1条); 综合系数  $k_c = 1.05$  (表 B.2.1); 疲劳应力系数  $k_l = N_e^\theta = (3\,047 \times 10^4)^{0.057} = 2.670$  [式(B.2.5-1)]。

## 5) 温度应力

由附录 B 的表 B.3.1 可知, 公路区划 IV, 疲劳温度梯度和最大温度梯度取为  $36^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,  $103^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。按式 (B.3.1-8) 计算路面板相对于路床的弯曲刚度半径  $r_{g,t}$  (m), 按式 (B.3.1-4) 计算  $t$ , 按式 (B.3.1-3) 计算温度翘曲应力系数  $C_L$ , 按式 (B.3.1-2) 计算非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数  $\xi_{tr}$ :

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{46.450 + 6.400}{125}} = 1.088\text{m}$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{8} r_{g,t}} = \frac{5.0}{\sqrt{8} \times 1.088} = 1.624$$

$$k_{v,t} = \frac{1}{2} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right)^{-1} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{0.26}{31\,000} + \frac{0.20}{9\,000} \right)^{-1} = 16\,334.9\text{MPa/m}$$

$$r_{\beta} = \left[ \frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_{v,t}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[ \frac{46.450 \times 6.400}{(46.450 + 6.400) \times 16\,334.9} \right]^{\frac{1}{4}} = 0.136\text{m}$$

$$\zeta = -\frac{(k_{v,t} r_{g,t}^4 - D_c) r_{\beta}^3}{(k_{v,t} r_{\beta}^4 - D_c) r_{g,t}^3} = \frac{(16\,334.9 \times 1.088^4 - 46.450) \times 0.136^3}{(16\,334.9 \times 0.136^4 - 46.450) \times 1.088^3} = 1.099$$

$$\begin{aligned} C_L &= 1 - \left( \frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t} \\ &= 1 - \left( \frac{1}{1 + 1.099} \right) \frac{\sinh(1.624) \cosh(1.624) + \cosh(1.624) \sinh(1.624)}{\cosh(1.624) \sinh(1.624) + \sinh(1.624) \cosh(1.624)} \\ &= 0.813 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi_{tr} &= \max \left\{ 0.2, -\frac{1\,000 f_{cr}}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24 C_L \ln(h_c) - 0.153 \right\} \\ &= \max \left\{ 0.2, -\frac{1\,000 \times 5.0}{31\,000 \times 0.26} [\ln(0.813) + 0.971] - 1.24 \times 0.813 \times \ln(0.26) - 0.153 \right\} \\ &= \max \{ 0.2, 0.731 \} = 0.731 \end{aligned}$$

按式 (B.3.1-1) 计算面层板临界荷位处的温度疲劳应力:

$$\sigma_{c,tr} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g,r} \xi_{tr}}{2} C_L = \frac{1.1 \times 10^{-5} \times 31\,000 \times 0.26 \times 36 \times 0.731}{2} \times 0.813 = 0.949\text{MPa}$$

再由式 (B.3.2-1) 计算面层板在临界荷位处的最大温度应力:

$$\sigma_{c,t,max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g,max}}{2} B_L = \frac{1.1 \times 10^{-5} \times 31\,000 \times 0.26 \times 103}{2} \times 0.446 = 2.034\text{MPa}$$

$$\begin{aligned} B_L &= \max \{ 0.1, 1.93 e^{-4.6 h_c} C_L - 0.155 (1 - C_L) \} \\ &= \max \{ 0.1, 1.93 \times e^{-4.6 \times 0.26} \times 0.813 - 0.155 \times (1 - 0.813) \} \\ &= \max \{ 0.1, 0.446 \} = 0.446 \end{aligned}$$

## 6) 结构极限状态校核

查表 3.0.2 及表 3.0.4 可知, 一级公路、低变异水平条件下, 取  $\psi_1 = 0.12$ ,  $\psi_2$  按水平一取值,  $\psi_2 = 0$ , 可靠度系数  $\gamma_r$  按式 (3.0.4-3) 计算为 1.12。

按式(3.0.4-1)和式(3.0.4-2)校核路面结构极限状态是否满足要求:

$$\gamma_r(\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.12 \times (3.603 + 0.949) = 5.098 > f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c,p,max} + \sigma_{c,t,max}) = 1.12 \times (2.550 + 2.034) = 5.134 > f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

初拟的路面结构不满足要求,按每次厚度增加2mm,重复以上计算。将混凝土面层厚度增至0.266m时,得到荷载疲劳应力 $\sigma_{c,pr} = 3.515 \text{ MPa}$ ,最大荷载应力 $\sigma_{c,p,max} = 2.489 \text{ MPa}$ ,温度疲劳应力 $\sigma_{c,tr} = 0.913 \text{ MPa}$ ,最大温度应力 $\sigma_{c,t,max} = 1.962 \text{ MPa}$ ,然后再进行结构极限状态验算:

$$\gamma_r(\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.12 \times (3.515 + 0.913) = 4.959 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c,p,max} + \sigma_{c,t,max}) = 1.12 \times (2.489 + 1.962) = 4.985 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

重拟的路面结构满足要求,所选的计算厚度0.266m普通混凝土面层,可以承受设计使用年限内设计轴载荷载和温度梯度的综合疲劳作用,以及最重轴载在最大温度梯度时的一次极限作用。考虑面层磨损厚度与刻槽深度增加6mm,并按10mm向上取整,则普通混凝土面层设计厚度为0.28m。

### 示例3 碾压混凝土基层上混凝土面板厚度计算

公路自然区划Ⅲ区新建一条高速公路,单向三车道,行车道宽11.75m。路基土为黄土(低液限粉土),路床顶距地下水位2.0m,当地粗集料主要为花岗岩。拟采用碾压混凝土做基层。经交通调查分析得知,设计轴载 $P_s = 100 \text{ kN}$ ,最重轴载 $P_m = 250 \text{ kN}$ ,设计车道使用初期设计轴载日作用次数为42 000,交通量年平均增长率为7%。

#### 1) 交通分析

由表3.0.1可知,高速公路的设计使用年限为30年,安全等级为一级。由附录A中的表A.2.6可知,临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数取0.22。按式(A.4.1)计算得到设计使用年限内设计车道设计轴载累计作用次数:

$$N_e = \frac{N_s \times [(1+g_r)^{30} - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{42\,000 \times [(1+0.07)^{30} - 1] \times 365}{0.07} \times 0.22 = 3.186 \times 10^8$$

由表3.0.8可知,属特重交通荷载等级。

#### 2) 初拟路面结构

根据当地的施工技术水平,对照表3.0.2所示的水泥混凝土面层厚度、弯拉强度及基层顶面当量回弹模量的变异系数范围,高速公路施工质量变异水平选择低等级。根据高速公路、特重交通荷载等级和低变异水平等级,依据表4.4.3,初拟普通混凝土面层厚度为0.30m,碾压混凝土基层0.18m,面层与基层之间设置40mm厚的沥青混凝土夹层,底基层选用级配碎石,厚0.20m。水泥混凝土上面层板的平面尺寸:长为5.0m,宽从中央分隔带至路肩依次为4m、4m、3.75m;纵缝为设拉杆平缝,横缝为设传力杆的假缝。碾压混凝土设纵缝一条、横缝间距5m。硬路肩宽3.50m,采用与行车道等厚混凝土并设拉杆与行车道板相连。

#### 3) 路面材料参数确定

按水平一,确定路面材料参数。

通过室内试验测定,普通混凝土面层的弯拉强度标准值为5.0MPa,相应的弯拉弹

性模量与泊松比为 31GPa、0.15，碾压混凝土弯拉强度标准值为 2.5MPa，相应弯拉弹性模量、泊松比为 27GPa、0.15。花岗岩为粗集料的混凝土线膨胀系数  $\alpha_c = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

查《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) 附录 B 及附录 D，依据表 B-1，取黄土 (低液限粉土) 路基回弹模量 75MPa，依据表 D.0.1，取距地下水位 2.0m 时的湿度调整系数为 1.1，由此得到路床顶综合回弹模量为  $75 \times 1.1 = 82.5\text{MPa}$ 。查本规范表 5.2.5，取级配碎石底基层回弹模量为 250MPa，查表 5.7.1，其泊松比取 0.35。查表 5.4.4，沥青混凝土夹层回弹模量取为 8 000MPa，查表 5.7.1，其泊松比取 0.25。

按附录 B 的式 (B.2.6-1) ~ 式 (B.2.6-4) 计算板底地基当量回弹模量如下：

$$E_x = \sum_{i=1}^n h_i^2 E_i / \sum_{i=1}^n h_i^2 = \frac{h_1^2 E_1}{h_1^2} = 250\text{MPa}$$

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i = h_1 = 0.20\text{m}$$

$$\eta = 0.86 + 0.26 \ln(h_x) = 0.86 + 0.26 \times \ln(0.20) = 0.442$$

$$E_t = \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^\eta E_0 = \left( \frac{250}{82.5} \right)^{0.442} \times 82.5 = 134.7\text{MPa}$$

板底地基当量回弹模量  $E_t$  取为 130MPa。

普通混凝土面层和基层的弯曲刚度  $D_c$ 、 $D_b$  按式 (B.2.2-3) 计算，双层板总相对刚度半径  $r_g$  按式 (B.2.3-3) 计算，路面结构的弯矩系数  $M_{cb}$  按式 (B.2.3-1) 计算：

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31\,000 \times 0.30^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 71.355\text{MN} \cdot \text{m}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{27\,000 \times 0.18^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 13.424\text{MN} \cdot \text{m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp \left( -0.264 \frac{k_v}{k_{v0}} \right) = 1 - 0.240 \times \exp \left( -0.264 \frac{67\,538}{101\,974} \right) = 0.799$$

$$k_v = \left[ \frac{h_c}{E_c} + \frac{3}{5} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{0.04}{8\,000} + 0.6 \times \left( \frac{0.30}{31\,000} + \frac{0.18}{27\,000} \right) \right]^{-1} = 67\,538\text{MPa/m}$$

$$k_{v0} = \left[ \frac{3}{5} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[ 0.6 \times \left( \frac{0.30}{31\,000} + \frac{0.18}{27\,000} \right) \right]^{-1} = 101\,974\text{MPa/m}$$

$$r_g = \left[ \frac{D_c}{k_v} + \left( \frac{2D_c(1-\nu_t^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[ \frac{71.355}{67\,538} + \left( \frac{2 \times 71.355 \times (1-0.35^2)}{130} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 1.046\,3\text{m}$$

$$P_s = 0.100\text{MN 时}, a = 0.238\,2\text{m}$$

$$M_{cb} = 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right]$$

$$= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{1.046\,3}{0.238\,2} \right) + 0.714 \left( \frac{0.238\,2}{1.046\,3} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.208\,9$$

$$P_m = 0.250\text{MN 时}, a = 0.263\,3\text{m}$$

$$\begin{aligned}
 M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right] \\
 &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{1.0463}{0.2633} \right) + 0.714 \left( \frac{0.2633}{1.0463} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.1953
 \end{aligned}$$

## 4) 荷载应力

按式(B.2.2-1)计算设计轴载和最重荷载在面层板、基层板临界荷位处产生的荷载应力:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{c,ps} &= \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{71.355}{71.355 + 0.799 \times 13.424} \times \frac{6 \times 0.100}{0.30^2} \times 0.2089 = 1.211 \text{ MPa} \\
 \sigma_{c,pm} &= \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{h_c^2} M_{cb} = \frac{71.355}{71.355 + 0.799 \times 13.424} \times \frac{6 \times 0.250}{0.30^2} \times 0.1953 = 2.830 \text{ MPa} \\
 \sigma_{b,ps} &= \frac{\varphi D_b}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{0.799 \times 13.424}{71.355 + 0.799 \times 13.424} \times \frac{6 \times 0.100}{0.18^2} \times 0.2089 = 0.505 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

按式(B.2.1)计算设计轴载在面层板、基层板临界荷位处产生的荷载疲劳应力,按式(B.2.8)计算最重轴载在面层板临界荷位处产生的最大荷载应力:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{c,pr} &= k_r k_f k_c \sigma_{c,ps} = 0.85 \times 3.053 \times 1.1 \times 1.211 = 3.456 \text{ MPa} \\
 \sigma_{c,p,max} &= k_r k_c \sigma_{c,pm} = 0.85 \times 1.1 \times 2.830 = 2.646 \text{ MPa} \\
 \sigma_{b,pr} &= k_r k_f k_c \sigma_{b,ps} = 0.85 \times 3.570 \times 1.1 \times 0.505 = 1.687 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

其中,考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数,混凝土路肩  $k_r = 0.85$  (B.2.1条);综合系数  $k_c = 1.1$  (表B.2.1);面层板疲劳应力系数  $k_f = N_e^\theta = (3.186 \times 10^8)^{0.057} = 3.053$ ,基层板疲劳应力系数  $k_f = N_e^\theta = (3.186 \times 10^8)^{0.065} = 3.570$  [式(B.2.5-1)]。

## 5) 温度应力

由附录B的表B.3.1可知,公路区划Ⅲ,疲劳温度梯度和最大温度梯度取为  $39^\circ\text{C}/\text{m}$ ,  $102^\circ\text{C}/\text{m}$ 。按式(B.3.1-8)计算路面板相对于路床的弯曲刚度半径  $r_{g,t}$  (m),按式(B.3.1-4)计算  $t$ ,按式(B.3.1-3)计算温度翘曲应力系数  $C_L$ ,按式(B.3.1-2)计算非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数  $\xi_{tr}$ :

$$\begin{aligned}
 r_{g,t} &= 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{71.355 + 13.424}{130}} = 1.257 \text{ m} \\
 t &= \frac{L}{\sqrt{8} r_{g,t}} = \frac{5.0}{\sqrt{8} \times 1.257} = 1.406
 \end{aligned}$$

按B.3.1条,面层与基层之间设沥青混凝土夹层的竖向接触刚度:

$$\begin{aligned}
 k_{v,t} &= 3000 \text{ MPa/m} \\
 r_\beta &= \left[ \frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_{v,t}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[ \frac{71.355 \times 13.424}{(71.355 + 13.424) \times 3000} \right]^{\frac{1}{4}} = 0.248 \text{ m} \\
 \zeta &= -\frac{(k_{v,t} r_{g,t}^4 - D_c) r_\beta^3}{(k_{v,t} r_\beta^4 - D_c) r_{g,t}^3} = \frac{(3000 \times 1.257^4 - 71.355) \times 0.248^3}{(3000 \times 0.248^4 - 71.355) \times 1.257^3} = 0.946
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_L &= 1 - \left( \frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t} \\
&= 1 - \left( \frac{1}{1 + 0.946} \right) \frac{\sinh(1.406) \cosh(1.406) + \cosh(1.406) \sinh(1.406)}{\cosh(1.406) \sinh(1.406) + \sinh(1.406) \cosh(1.406)} \\
&= 0.708
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\xi_{tr} &= \max \left\{ 0.2, -\frac{1000f_{c,r}}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24C_L \ln(h_c) - 0.153 \right\} \\
&= \max \left\{ 0.2, -\frac{1000 \times 5.0}{31000 \times 0.30} [\ln(0.708) + 0.971] - 1.24 \times 0.708 \times \ln(0.30) - 0.153 \right\} \\
&= \max \{ 0.2, 0.568 \} = 0.568
\end{aligned}$$

按式(B.3.1-1)计算面层板临界荷位处的温度疲劳应力:

$$\sigma_{c, tr} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g, r} \xi_{tr}}{2} C_L = \frac{1 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.30 \times 39 \times 0.568}{2} \times 0.708 = 0.729 \text{ MPa}$$

再由式(B.3.2-1)计算面层板在临界荷位处的最大温度应力:

$$\sigma_{c, t, \max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g, \max}}{2} B_L = \frac{1 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.30 \times 102}{2} \times 0.298 = 1.416 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
B_L &= \max \{ 0.1, 1.93e^{-4.6h_c} C_L - 0.155(1 - C_L) \} \\
&= \max \{ 0.1, 1.93 \times e^{-4.6 \times 0.30} \times 0.708 - 0.155 \times (1 - 0.708) \} \\
&= \max \{ 0.1, 0.298 \} = 0.298
\end{aligned}$$

#### 6) 结构极限状态校核

查表3.0.2及表3.0.4可知, 高速公路、低变异水平条件下, 取 $\psi_1 = 0.18$ ,  $\psi_2$ 按水平一取值,  $\psi_2 = 0$ , 可靠度系数 $\gamma_r$ 按式(3.0.4-3)计算为1.18。

按式(3.0.4-1)和式(3.0.4-2)校核路面结构极限状态是否满足要求:

$$\begin{aligned}
\gamma_r(\sigma_{c, pr} + \sigma_{c, tr}) &= 1.18 \times (3.456 + 0.729) = 4.938 < f_{c, r} = 5.0 \text{ MPa} \\
\gamma_r(\sigma_{c, p, \max} + \sigma_{c, t, \max}) &= 1.18 \times (2.646 + 1.416) = 4.793 < f_{c, r} = 5.0 \text{ MPa} \\
\gamma_r \sigma_{b, pr} &= 1.18 \times 1.687 = 1.991 < f_{b, r} = 2.5 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

虽然初拟的路面结构满足要求, 但结构强度尚略有富余。按每次厚度递减2mm, 重复以上计算。将普通混凝土面层厚度减至0.298m, 面层的荷载疲劳应力 $\sigma_{c, pr} = 3.480 \text{ MPa}$ , 最大荷载应力 $\sigma_{c, p, \max} = 2.665 \text{ MPa}$ , 温度疲劳应力 $\sigma_{c, tr} = 0.739 \text{ MPa}$ , 最大温度应力 $\sigma_{c, t, \max} = 1.438 \text{ MPa}$ , 基层的荷载疲劳应力 $\sigma_{b, pr} = 1.710 \text{ MPa}$ , 然后再进行结构极限状态验算:

$$\begin{aligned}
\gamma_r(\sigma_{c, pr} + \sigma_{c, tr}) &= 1.18 \times (3.480 + 0.739) = 4.978 < f_{c, r} = 5.0 \text{ MPa} \\
\gamma_r(\sigma_{c, p, \max} + \sigma_{c, t, \max}) &= 1.18 \times (2.665 + 1.438) = 4.842 < f_{c, r} = 5.0 \text{ MPa} \\
\gamma_r \sigma_{b, pr} &= 1.18 \times 1.710 = 2.018 < f_{b, r} = 2.5 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

重拟的路面结构满足要求, 所选的计算厚度0.298m普通混凝土面层、0.18m贫混凝土基层和0.04m沥青混凝土夹层组合, 可以承受设计使用年限内设计轴载荷载和温度梯度的综合疲劳作用, 以及最重轴载在最大温度梯度时的一次极限作用。考虑面层磨



损厚度与刻槽深度增加 6mm, 并按 10mm 向上取整, 则普通混凝土面层设计厚度为 0.31m, 贫混凝土基层设计厚度为 0.18m, 沥青混凝土夹层设计厚度为 0.04m。

#### 示例 4 面层复合板的厚度计算

公路自然区划 II 区某一城市新建一条穿城四车道一级公路(初步设计), 路基土为低液限黏土, 路床顶距地下水位 0.9m, 地区粗集料为石灰岩。拟采用面层复合板: 低噪声的橡胶水泥混凝土上面层 + 普通混凝土下面层, 基层选用水泥稳定碎石。经交通调查分析得知, 设计轴载  $P_s = 100\text{kN}$ , 最重轴载  $P_m = 190\text{kN}$ , 设计车道使用初期设计轴载  $P_s$  日作用次数为 750 次, 交通量年平均增长率为 5%。

##### 1) 交通分析

由表 3.0.1 可知, 一级公路的设计使用年限为 30 年, 安全等级为一级。由表 A.2.6 可知, 临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数取 0.22。按式(A.4.1)计算得到设计使用年限内设计车道设计轴载累计作用次数:

$$N_e = \frac{N_s \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{750 \times [(1 + 0.05)^{30} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.22 = 400 \times 10^4$$

由表 3.0.8 可知, 属重交通荷载等级。

##### 2) 初拟路面结构

根据当地的施工技术水平, 对照表 3.0.2 所示的水泥混凝土面层厚度、弯拉强度及基层顶面当量回弹模量的变异系数范围, 一级公路施工质量变异水平选择低等级。根据一级公路、重交通荷载等级和低变异水平等级, 依据表 4.4.3, 初拟面层复合板厚度为 0.25m, 其中, 橡胶水泥混凝土上面层设计厚度 0.08m, 考虑预留的面层磨损厚度与刻槽深度, 其计算厚度取为 0.074m, 普通水泥混凝土下面层厚 0.17m, 水泥稳定碎石基层 0.20m, 底基层选用级配碎石, 厚 0.20m。行车道水泥混凝土路面板的平面尺寸为 5.0m × 3.75m, 纵缝为设拉杆平缝, 横缝为设传力杆的假缝。硬路肩宽 3.0m, 采用与行车道等厚普通混凝土面层, 并设拉杆与行车道板相连。

##### 3) 路面材料参数确定

按水平三, 确定路面材料参数。

按表 3.0.9, 取普通混凝土下面层的弯拉强度标准值为 5.0MPa, 相应弯拉弹性模量与泊松比为 31GPa、0.15, 橡胶水泥混凝土上面层弯拉强度标准值为 4.5MPa, 弯拉弹性模量和泊松比为 27GPa、0.15。查表 5.5.8, 石灰岩为粗集料的混凝土线膨胀系数  $\alpha_c = 0.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

查《公路路基设计规范》(JTJ D30—2015)附录 B 及附录 D, 依据表 B-1, 取低液限黏土路基回弹模量 70MPa, 依据表 D.0.1, 取距地下水位 0.9m 时的湿度调整系数为 0.858, 由此得到路床顶综合回弹模量为  $70 \times 0.858 = 59.5\text{MPa}$ , 取为 60MPa。查本规范表 5.3.6 并考虑修正, 水泥稳定碎石基层的弹性模量及模量调整系数按中值  $23\,000 \times 0.375 = 8\,625$ , 计算采用 9 000MPa, 查表 5.7.1, 其泊松比取 0.25。查表 5.2.5, 取级配碎石底基层回弹模量为 250MPa, 查表 5.7.1, 其泊松比取 0.35。

按附录 B 的式(B.2.6-1) ~ 式(B.2.6-4)计算板底地基当量回弹模量如下:

$$E_x = \sum_{i=1}^n h_i^2 E_i / \sum_{i=1}^n h_i^2 = \frac{h_1^2 E_1}{h_1^2} = 250 \text{ MPa}$$

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i = h_1 = 0.20 \text{ m}$$

$$\eta = 0.86 + 0.26 \ln(h_x) = 0.86 + 0.26 \times \ln(0.20) = 0.442$$

$$E_t = \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^\eta E_0 = \left( \frac{250}{60} \right)^{0.442} \times 60 = 112.7 \text{ MPa}$$

板底地基当量回弹模量  $E_t$  取为 110 MPa。

混凝土面层复合板的综合弯曲刚度  $\tilde{D}_c$  [式(B.2.4-1)]、 $\tilde{h}_c$  当量厚度 [式(B.2.4-2)]，无机结合料稳定类基层板的弯曲刚度  $D_b$  [式(B.2.2-3)]，路面结构总相对刚度半径  $r_g$  [式(B.2.3-3)] 计算如下，上、下面层按完全结合设计， $\chi=1$ ：

$$\begin{aligned} \tilde{D}_c &= \frac{E_{c1} h_{c1}^3 + E_{c2} h_{c2}^3}{12(1-\nu_{c2}^2)} + \frac{(h_{c1} + h_{c2})^2}{4(1-\nu_{c2}^2)} \left( \frac{1}{E_{c1} h_{c1}} + \frac{1}{E_{c2} h_{c2}} \right)^{-1} \chi \\ &= \frac{27\,000 \times 0.074^3 + 31\,000 \times 0.17^3}{12(1-0.15^2)} + \frac{(0.074 + 0.17)^2}{4(1-0.15^2)} \left( \frac{1}{27\,000 \times 0.08} + \frac{1}{31\,000 \times 0.17} \right)^{-1} \\ &= 35.976 \text{ MN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$d_{xc} = \frac{1}{2} \left[ h_{c2} + \frac{E_{c1} h_{c1} (h_{c1} + h_{c2})}{E_{c1} h_{c1} + E_{c2} h_{c2}} \chi \right] = \frac{1}{2} \left[ 0.17 + \frac{27\,000 \times 0.074 \times (0.074 + 0.17)}{27\,000 \times 0.074 + 31\,000 \times 0.17} \right] = 0.119 \text{ m}$$

$$\tilde{h}_c = \sqrt{\frac{6\tilde{D}_c(1-\nu_{c2}^2)}{E_{c2} d_{xc}}} = \sqrt{\frac{6 \times 35.976 \times (1-0.15^2)}{31\,000 \times 0.119}} = 0.240 \text{ m}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{9\,000 \times 0.20^3}{12 \times (1-0.25^2)} = 6.400 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp \left( -0.264 \frac{k_v}{k_{v0}} \right) = 1 - 0.240 \times \exp \left( -0.264 \frac{55\,644}{55\,644} \right) = 0.816$$

$$k_{v0} = \left[ \frac{3}{5} \left( \frac{\tilde{h}_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[ 0.6 \times \left( \frac{0.240}{31\,000} + \frac{0.20}{9\,000} \right) \right]^{-1} = 55\,644 \text{ MPa/m}$$

$$r_g = \left[ \frac{\tilde{D}_c}{k_v} + \left( \frac{2\tilde{D}_c(1-\nu_t^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[ \frac{35.976}{55\,644} + \left( \frac{2 \times 35.976 \times (1-0.35^2)}{110} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 0.877\,9 \text{ m}$$

$$P_s = 0.100 \text{ MN 时}, a = 0.238\,2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right] \\ &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{0.877\,9}{0.238\,2} \right) + 0.714 \left( \frac{0.238\,2}{0.877\,9} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.185\,4 \end{aligned}$$

$$P_m = 0.190 \text{ MN 时}, a = 0.256\,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 M_{cb} &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left( \frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right] \\
 &= 0.147 \left[ \ln \left( \frac{0.8779}{0.2566} \right) + 0.714 \left( \frac{0.2566}{0.8779} \right)^2 - 0.096 \right] = 0.1757
 \end{aligned}$$

## 4) 荷载疲劳应力

按式(B.2.2-1)计算设计轴载和最重荷载在面层复合板临界荷位处产生的荷载应力:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{c,ps} &= \frac{\tilde{D}_c}{\tilde{D}_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{\tilde{h}_c^2} M_{cb} = \frac{35.976}{35.976 + 0.816 \times 6.400} \times \frac{6 \times 0.100}{0.240^2} \times 0.1854 = 1.692 \text{ MPa} \\
 \sigma_{c,pm} &= \frac{\tilde{D}_c}{\tilde{D}_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{\tilde{h}_c^2} M_{cb} = \frac{35.976}{35.976 + 0.816 \times 6.400} \times \frac{6 \times 0.190}{0.240^2} \times 0.1757 = 3.046 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

按式(B.2.1)计算设计轴载在面层复合板临界荷位处产生的荷载疲劳应力,按式(B.2.8)计算最重轴载在面层复合板临界荷位处产生的最大荷载应力:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{c,pr} &= k_r k_f k_c \sigma_{c,ps} = 0.85 \times 2.379 \times 1.05 \times 1.692 = 3.591 \text{ MPa} \\
 \sigma_{c,p,max} &= k_r k_c \sigma_{c,pm} = 0.85 \times 1.05 \times 3.046 = 2.719 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

其中,考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数,混凝土路肩  $k_r = 0.85$  (B.2.1条);综合系数  $k_c = 1.05$  (表B.2.1);面层板疲劳应力系数  $k_f = N_e^\theta = (400 \times 10^4)^{0.057} = 2.379$  [式(B.2.5-1)]。

## 5) 温度应力

由附录B的表B.3.1可知,公路区划II,疲劳温度梯度和最大温度梯度取为  $35^\circ\text{C}/\text{m}$ ,  $102^\circ\text{C}/\text{m}$ 。按式(B.3.1-8)计算路面板相对于路床的弯曲刚度半径  $r_{g,t}$  (m),按式(B.3.1-4)计算  $t$ ,按式(B.3.1-3)计算温度翘曲应力系数  $C_L$ ,按式(B.3.1-2)计算非标路面结构的疲劳温度梯度修正系数  $\xi_t$ :

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{\tilde{D}_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{35.976 + 6.400}{110}} = 1.055 \text{ m}$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{8} r_{g,t}} = \frac{5.0}{\sqrt{8} \times 1.055} = 1.676$$

$$k_{v,t} = \frac{1}{2} \left( \frac{\tilde{h}_c}{E_{c2}} + \frac{h_b}{E_b} \right)^{-1} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{0.240}{31000} + \frac{0.20}{9000} \right)^{-1} = 16693.3 \text{ MPa/m}$$

$$r_\beta = \left[ \frac{\tilde{D}_c D_b}{(\tilde{D}_c + D_b) k_{v,t}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{35.976 \times 6.400}{(35.976 + 6.400) \times 16693.3} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.134 \text{ m}$$

$$\zeta = - \frac{(k_{v,t} r_{g,t}^4 - \tilde{D}_c) r_\beta^3}{(k_{v,t} r_\beta^4 - \tilde{D}_c) r_{g,t}^3} = \frac{(16693.3 \times 1.055^4 - 35.976) \times 0.134^3}{(16693.3 \times 0.134^4 - 35.976) \times 1.055^3} = 1.395$$

$$\begin{aligned}
C_L &= 1 - \left( \frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t} \\
&= 1 - \left( \frac{1}{1 + 1.395} \right) \frac{\sinh(1.676) \cosh(1.676) + \cosh(1.676) \sinh(1.676)}{\cosh(1.676) \sinh(1.676) + \sinh(1.676) \cosh(1.676)} \\
&= 0.853
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\xi_{tr} &= \max \left\{ 0.2, -\frac{1000f_{c,r}}{E_{c2}\tilde{h}_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24C_L \ln(\tilde{h}_c) - 0.153 \right\} \\
&= \max \left\{ 0.2, -\frac{1000 \times 5.0}{31000 \times 0.240} [\ln(0.853) + 0.971] - 1.24 \times 0.853 \times \ln(0.240) - 0.153 \right\} \\
&= \max \{ 0.2, 0.811 \} = 0.811
\end{aligned}$$

按式(B.3.3-1)计算面层复合板临界荷位处的温度应力疲劳应力,按式(B.3.3-2)计算面层复合板在临界荷位处的最大温度应力,面层复合板的温度应力系数 $B_L$ 按式(B.3.2-2)计算,面层复合板的最大温度应力修正系数 $\varphi_{tl}$ 按式(B.3.3-3)计算:

$$\begin{aligned}
\sigma_{c, tr} &= \frac{\alpha_c E_{c2} (h_{c1} + h_{c2}) T_{g,r} \xi_{tr} \varphi_{tl}}{2} C_L \\
&= \frac{0.7 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.244 \times 35 \times 0.811 \times 1.035}{2} \times 0.853 = 0.663 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{c, t, \max} &= \frac{\alpha_c E_{c2} (h_{c1} + h_{c2}) T_{g, \max} \varphi_{tl} B_L}{2} \\
&= \frac{0.7 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.244 \times 102 \times 1.035}{2} \times 0.524 = 1.464 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_{tl} &= 1.77 - 0.27 \ln \left( \frac{h_{c1} E_{c1}}{h_{c2} E_{c2}} + 18 \frac{E_{c1}}{E_{c2}} - 2 \frac{h_{c1}}{h_{c2}} \right) \\
&= 1.77 - 0.27 \ln \left( \frac{0.074 \times 27000}{0.17 \times 31000} + 18 \times \frac{27000}{31000} - 2 \times \frac{0.074}{0.17} \right) \\
&= 1.035
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_L &= \max \{ 0.1, 1.93 e^{-4.6 \tilde{h}_c} C_L - 0.155 (1 - C_L) \} \\
&= \max \{ 0.1, 1.93 \times e^{-4.6 \times 0.240} \times 0.853 - 0.155 \times (1 - 0.853) \} \\
&= \max \{ 0.1, 0.524 \} = 0.524
\end{aligned}$$

#### 6) 结构极限状态校核

查表3.0.2及表3.0.4可知,一级公路、低变异水平条件下,取 $\psi_1 = 0.12$ , $\psi_2$ 按水平一取值, $\psi_2 = 0$ ,可靠度系数 $\gamma_r$ 按式(3.0.4-3)计算为1.12。

按式(3.0.4-1)和式(3.0.4-2)校核路面结构极限状态是否满足要求:

$$\gamma_r (\sigma_{c, pr} + \sigma_{c, tr}) = 1.12 \times (3.591 + 0.663) = 4.764 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r (\sigma_{c, p, \max} + \sigma_{c, t, \max}) = 1.12 \times (2.719 + 1.464) = 4.685 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

初拟的复合路面结构满足要求,但结构强度尚有富余。橡胶水泥混凝土上面层设计厚度0.08m不变,普通混凝土下面层计算厚度按每次厚度递减2mm,重复以上计算。

当减为 0.16m 时, 得到复合面层的荷载疲劳应力  $\sigma_{c, pr} = 3.744\text{MPa}$ , 最大荷载应力  $\sigma_{c, p, max} = 2.832\text{MPa}$ , 温度疲劳应力  $\sigma_{c, tr} = 0.694\text{MPa}$ , 最大温度应力  $\sigma_{c, t, max} = 1.530\text{MPa}$ , 然后再进行结构极限状态验算:

$$\gamma_r(\sigma_{c, pr} + \sigma_{c, tr}) = 1.12 \times (3.744 + 0.694) = 4.971 < f_{c, r} = 5.0\text{MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c, p, max} + \sigma_{c, t, max}) = 1.12 \times (2.832 + 1.530) = 4.885 < f_{c, r} = 5.0\text{MPa}$$

重拟的复合路面结构满足要求, 所选的设计厚度 0.08m 橡胶水泥混凝土上面层和计算厚度 0.16m 普通混凝土下面层复合, 可以承受设计使用年限内设计轴载荷载和温度梯度的综合疲劳作用, 以及最重轴载在最大温度梯度时的一次极限作用。因此, 复合式路面结构橡胶水泥混凝土上面层设计厚度为 0.08m, 普通水泥混凝土下面层设计厚度为 0.16m。

## 附录 C 连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算

## C.1 横向裂缝缝隙宽度计算

$$b_j = 1\,000L_d \left( \varepsilon_{sh} + \alpha_c \Delta T_\zeta - \frac{c_2 f_t}{E_c} \right) \quad (C.1-1)$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_\infty (1 - \varphi_a^3) \quad (C.1-2)$$

$$\varepsilon_\infty = a_1 (1.51 \times 10^{-4} w_0^{2.1} f_c^{-0.28} + 270) \times 10^{-6} \quad (C.1-3)$$

$$c_2 = c_a + \frac{c_b}{17\,000f_c} + 6.45 \times 10^{-4} \frac{c_c}{L_d^2} \quad (C.1-4)$$

$$c_a = 0.761 + 1\,770\varepsilon_{t\zeta} - 2 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta}^2 \quad (C.1-5)$$

$$c_b = 9 \times 10^8 \varepsilon_{t\zeta} + 149\,000 \quad (C.1-6)$$

$$c_c = 3 \times 10^9 \varepsilon_{t\zeta}^2 - 5 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta} + 2\,020 \quad (C.1-7)$$

$$\varepsilon_{t\zeta} = \alpha_c \Delta T_\zeta + \varepsilon_{sh} \quad (C.1-8)$$

$$L_d = \frac{f_t - C_L \sigma_0 \left( 1 - \frac{2\zeta_s}{h_c} \right)}{\frac{\mu\gamma_c}{2} + \frac{\sigma_{eg}\rho}{c_1 d_s}} \quad (C.1-9)$$

$$\sigma_0 = \frac{E_c \varepsilon_{td}}{2(1 - \nu_c)} \quad (C.1-10)$$

$$\varepsilon_{td} = \alpha_c h_c T_g (4.81h_c^2 - 5.42h_c + 1.96) + \varepsilon_\infty (0.245e^{-5.3k_1 h_c}) \quad (C.1-11)$$

$$\sigma_{eg} = 0.234f_c \quad (C.1-12)$$

$$c_1 = 0.577 - 9.50 \times 10^{-9} \frac{\ln \varepsilon_{t\zeta}}{\varepsilon_{t\zeta}^2} + 0.198L_d \times (\ln L_d + 3.67) \quad (C.1-13)$$

式中： $b_j$ ——钢筋埋置深度处的横向裂缝缝隙平均宽度(mm)；

$L_d$ ——横向裂缝平均间距(m)，按式(C.1-9)计算；

$\varepsilon_{sh}$ ——无约束条件下钢筋埋置深度处混凝土干缩应变，可近似按式(C.1-2)计算；

$\alpha_c$ ——混凝土线膨胀系数(1/℃)，按表5.5.8选用；

$\Delta T_\zeta$ ——钢筋埋置深度处混凝土温度与硬化时温度的最大温差(℃)，可近似取为路面施工月份日最高气温的月平均值与一年中最冷月份日最低气温的月平均值之差；

- $c_2$ ——与混凝土和钢筋之间黏结-滑移特性有关的系数,按式(C.1-4)计算;  
 $f_t$ ——混凝土抗拉强度(MPa),可按表5.5.7选用劈裂抗拉强度;  
 $E_c$ ——混凝土弹性模量(MPa),可按表5.5.7选用;  
 $\varepsilon_\infty$ ——无约束条件下混凝土的最大干缩应变,可近似按式(C.1-3)计算;  
 $\varphi_a$ ——年平均空气相对湿度;  
 $a_1$ ——养生条件系数,水中或盖麻布养生时, $a_1 = 1.0$ ,采用养生剂养生时, $a_1 = 1.2$ ;  
 $w_0$ ——混凝土单位用水量( $N/m^3$ );  
 $f_c$ ——混凝土抗压强度(MPa),可按表5.5.7选用;  
 $\varepsilon_{t\zeta}$ ——钢筋埋置深度处的混凝土最大总应变,按式(C.1-8)计算;  
 $C_L$ ——翘曲应力系数,按附录B式(B.3.1-3)计算,其中 $t = 1.29/r_g$ ;  
 $r_g$ ——面层板的相对刚度半径(m),按附录B式(B.2.3-3)计算;  
 $\sigma_0$ ——温度和湿度变形完全受约束时的翘曲应力,按式(C.1-10)计算;  
 $\zeta_s$ ——钢筋埋置深度(m);  
 $h_c$ ——混凝土面层厚度(m);  
 $\mu$ ——混凝土面层与基层间的摩阻系数,按表5.5.10选用;  
 $\gamma_c$ ——混凝土重度( $MN/m^3$ ),一般可取为 $0.024MN/m^3$ ;  
 $\sigma_{cg}$ ——混凝土与钢筋间的最大黏结应力,可近似按式(C.1-12)计算;  
 $\rho$ ——纵向钢筋配筋率,为钢筋横断面面积 $A_s$ 与混凝土横断面面积 $A_c$ 的比值;  
 $c_1$ ——混凝土和钢筋之间的黏结-滑移系数,按式(C.1-13)计算。由于式中含有未知量 $L_d$ ,计算需采用迭代方式。先假设 $L_d = L_{ds}$ ,计算出 $c_1$ 和相应的 $L_d$ ,如果 $|L_d - L_{ds}| < 0.005$ 计算结束;否则,令 $L_{ds} = L_d$ ,重复计算,直到满足要求为止;  
 $d_s$ ——纵向钢筋直径(m);  
 $\varepsilon_{td}$ ——无约束时混凝土面层顶面与底面间的最大当量应变差,按式(C.1-11)计算;  
 $\nu_c$ ——混凝土泊松比,一般可取为0.15;  
 $T_g$ ——混凝土面层顶面与底面间的最大负温度梯度的绝对值( $^{\circ}C/m$ ),可按该地区最大正温度梯度(查表B.3.1)的1/3取用;  
 $k_1$ ——与气候区划有关的系数,道路位于公路自然区划Ⅱ、Ⅳ和Ⅴ区, $k_1 = 0.4$ ;位于Ⅲ、Ⅵ和Ⅶ区, $k_1 = 0.68$ 。

## C.2 混凝土面层顶部车辆荷载横向疲劳拉应力计算

$$\sigma_{c,pr} = k_r k_j k_i k_c k_q \sigma_{c,ps} \quad (C.2-1)$$

$$\sigma_{c,ps} = 1.40 \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{P_s}{h_c^2} \quad (C.2-2)$$

$$k_j = 1 + \frac{1}{43 (100\rho)^{2.5}} \ln \left( \frac{N_e}{10^8} \right) \quad (\text{C. 2-3})$$

式中： $\sigma_{c, pr}$ ——车辆荷载作用下连续配筋混凝土面层顶部横向疲劳拉应力(MPa)；

$k_r$ ——考虑裂缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数，取值0.5~0.6。设混凝土路肩时取低值，设柔性路肩或土路肩时取高值；

$k_j$ ——考虑公路运营期间裂缝宽度增大与钢筋黏结滑移造成的应力影响系数，按式(C. 2-3)计算，当 $k_j < 1$ 时，按 $k_j = 1$ 取值；

$k_f$ ——考虑设计使用年限内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数，按(B. 2. 5-1)确定；

$k_c$ ——考虑计算理论与实际差异以及动载等因素影响的综合系数，按公路等级查表B. 2. 1确定；

$k_q$ ——考虑板底脱空影响的应力修正系数。采用贫水泥混凝土、沥青混凝土基层或透水基层时，取1.2~1.4；采用不透水沥青稳定碎石基层或无机结合料稳定类基层时，取1.2~1.6。降雨量较大时取高值，降雨量较小时取低值；

$\sigma_{c, ps}$ ——设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的板顶横向拉应力(MPa)；

$P_s$ ——设计轴载的单轴重(MN)；

$h_c$ ——混凝土面层厚度(m)；

$D_c$ 、 $D_b$ ——面层板与基层板的截面弯曲刚度( $\text{MPa} \times \text{m}^3$ )，按式(B. 2. 2-3)计算；当基层材料为粒料，即为单面层板时， $D_b$ 取0；

$\varphi$ ——面层板与基层板的弯矩分配系数，按式(B. 2. 2-2)计算；

$\rho$ ——纵向钢筋配筋率，为钢筋横断面面积 $A_s$ 与混凝土横断面面积 $A_c$ 的比值；

$N_e$ ——设计使用年限内设计轴载累计作用次数，按式(A. 4. 1)计算。

## 条文说明

除了引入考虑公路运营期间裂缝宽度增大与钢筋黏结滑移造成的应力影响系数以及考虑板底脱空影响的应力修正系数外，公式的形式整体上与普通水泥混凝土路面板底疲劳应力公式相似，但设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的拉应力的方向、位置和大小以及一些修正系数的取值不同。

在公路运营期的初期，由于连续配筋混凝土结构层中连续钢筋的传荷作用较强，其考虑裂缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数比普通水泥混凝土路面的小，约为0.5~0.6。

在公路运营过程中，在车辆荷载与环境因素作用下，横向裂缝宽度增大，混凝土与钢筋之间发生黏结滑移，造成裂缝处应力传荷系数降低，进而使得公路运营期末期的路面应力会增大。为了体现这个影响，在公式中引入了考虑公路运营期间裂缝宽度增大与钢筋黏结滑移造成的应力影响系数。该系数与设计轴载( $P_s = 100\text{kN}$ )累计作用次数、配筋率、板厚有关。板厚取0.18~0.35m，配筋率取0.6%~1.1%，设计轴载( $P_s =$



100kN) 累计作用次数取  $10^6 \sim 10^{11}$ , 计算出各种工况下的应力影响系数。由于本规范为不同交通荷载等级的水泥混凝土路面推荐了板厚, 相当于给出了设计轴载( $P_s = 100\text{kN}$ ) 累计作用次数和板厚之间的对应关系, 因此剔除掉板厚因素, 仅考虑设计轴载( $P_s = 100\text{kN}$ ) 累计作用次数和配筋率两个参变量, 在它们和该应力影响系数之间建立了回归公式。

现场调查表明, 连续配筋混凝土路面冲断处一般都伴随着板底脱空现象。板底脱空会增大板顶的横向拉应力和横向裂缝处的剪切应力, 因此在预估冲断时需要考虑板底脱空的影响。

由于混凝土面层顶面与底面间的最大负温度梯度的绝对值仅为正温度梯度的  $1/3$  左右, 且纵向接缝间距一般为一个车道的宽度, 该温度梯度在板顶面产生的横向拉应力小于  $0.1\text{MPa}$ , 故不再考虑温度翘曲应力。

### C.3 复合式路面中连续配筋混凝土下面层验算

**C.3.1** 连续配筋混凝土下面层横向裂缝缝宽的计算参照 C.1, 其中连续配筋混凝土下面层顶面与底面间的最大负温度梯度的绝对值  $T_g$  除按该地区最大正温度梯度(查表 B.3.1)  $1/3$  取用外, 还应乘以式(B.3.4)的温度梯度修正系数  $\varphi_{t2}$ 。

**C.3.2** 连续配筋混凝土下面层顶部的荷载疲劳应力按式(C.2-1)进行计算, 其中考虑板底脱空影响的应力修正系数取各范围的下限, 设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的板顶横向拉应力按式(C.3.2)计算, 其他参数取值同 C.2。

$$\sigma_{c,ps} = 1.40 \frac{h_{c2}}{\tilde{h}_c} \cdot \frac{\tilde{D}_c}{\tilde{D}_c + \varphi D_b} \cdot \frac{P_s}{\tilde{h}_c^2} \quad (\text{C.3.2})$$

式中:  $\tilde{D}_c$ 、 $\tilde{h}_c$ ——由沥青混凝土和连续配筋混凝土组成的复合板的综合弯曲刚度和当量厚度, 按式(B.2.4-1)、式(B.2.4-2)进行计算, 其中  $\chi = 0$ ;  
 $h_{c2}$ ——复合面层板连续配筋混凝土下面层厚度(m)。

#### 条文说明

复合式路面中连续配筋混凝土下面层顶部的荷载疲劳应力的计算公式与普通连续配筋混凝土面层的相近, 但由于沥青混凝土上面层的存在, 下面层的脱空量会小于普通连续配筋混凝土路面的脱空量, 故考虑板底脱空影响的应力修正系数取各范围的下限。设计轴载在连续配筋混凝土下面层四边自由板临界荷位处产生的板顶横向拉应力计算公式与式(C.2-2)相近, 用沥青混凝土上面层和连续配筋混凝土下面层组成的复合板的综合弯曲刚度和当量厚度来分别代替普通连续配筋混凝土面层板的弯曲刚度和厚度, 其中考虑到公路运营期的末期上下面层间可能会发生滑动, 层间按照光滑考虑。另外, 考虑到沥青混凝土上面层的存在会降低连续配筋混凝土层中的车辆荷载应力, 故对设计轴载在四边自由板临界荷位处产生的板顶横向拉应力的数值进行折减。其他修正系数的取值均不变。

#### C.4 板厚和纵向配筋率计算流程

- 1 按普通水泥混凝土进行结构组合设计，初选混凝土板厚度。
- 2 初拟连续配筋混凝土层的板厚和配筋率，按式(C.1-1)计算裂缝缝隙平均宽度 $b_j$ 。当 $b_j \leq 0.5\text{mm}$ 时，满足要求；否则应增大配筋率，重复上述计算至符合要求。
- 3 对于连续配筋混凝土路面，按式(C.2-1)计算连续配筋混凝土面层顶部横向荷载疲劳应力值；对于复合式路面，按式(C.2-1)计算连续配筋混凝土下面层顶部横向荷载疲劳应力值。检验荷载疲劳应力与可靠度系数的乘积是否小于混凝土的弯拉强度标准值，即是否满足式(3.0.6)。如果不满足，应增大配筋率，重复上述计算至符合要求。
- 4 当连续配筋混凝土做面层时，计算厚度加6mm磨损厚度后，按10mm向上取整，作为该层的设计厚度。当连续配筋混凝土做下面层时，仅需按10mm向上取整，作为该层的设计厚度。
- 5 进一步确定钢筋根数。在满足纵向钢筋间距要求的条件下，宜选用直径较小的钢筋。

#### 条文说明

计算出的连续配筋混凝土面层的厚度，可以低于表4.4.3中的厚度下限值，但二者的差值不建议超过3cm；连续配筋混凝土下面层的最小厚度可以在此基础上继续减薄约1/4的沥青层厚度。

#### 示例 连续配筋混凝土面层板厚和纵向钢筋率验算

公路自然区划Ⅲ区内拟新建一条一级公路，特重交通荷载等级，设计年限内设计车道设计轴载 $P_s=100\text{kN}$ ，累计作用次数为 $2.0 \times 10^7$ 次，设计年限30年，路基土为低液限黏土，路床顶距地下水位1m，采用带传力杆的水泥混凝土路肩。

##### 1) 初拟路面结构

依据3.0.2条，施工变异水平取低等级。根据一级公路、特重交通荷载等级和低变异水平等级，查表4.4.3，初拟混凝土面层厚度为0.26m。依据表4.3.2-1、表4.3.2-2和表4.3.5，基层选用水泥稳定级配碎石，厚0.18m，基层与面层间不设夹层；底基层选用级配碎石，厚0.18m。

##### 2) 路面材料参数确定

按水平一，通过室内试验确定路面材料参数。混凝土面层的弯拉强度标准值为5.0MPa，相应的弯拉弹性模量为31GPa，抗压强度为42MPa，劈裂抗拉强度为3.22MPa，泊松比为0.15。粗集料采用花岗岩，查表5.5.8，混凝土的线膨胀系数 $\alpha_c = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

查《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)附录B及附录D，依据表B-1，取低液限

黏土路基回弹模量 85MPa, 依据表 D.0.1, 取距地下水位 1.0m 时的湿度调整系数为 0.89, 由此得到路床顶综合回弹模量为  $85 \times 0.89 = 75.65\text{MPa}$ 。查本规范表 5.3.6 并考虑修正, 水泥稳定碎石基层的弹性模量及模量调整系数按中值计算, 即  $23\,000 \times 0.375 = 8\,625\text{MPa}$ , 计算采用  $9\,000\text{MPa}$ ; 查表 5.7.1, 其泊松比取 0.25; 查表 5.2.5, 取级配碎石底基层回弹模量为 250MPa, 查表 5.7.1, 其泊松比取 0.35; 查表 5.5.10, 混凝土面层与基层间摩阻系数  $\mu = 8.9$ 。

按式(B.2.6-1)~式(B.2.6-4)计算板底地基当量回弹模量  $E_t$  如下:

由于粒料层只有级配碎石底基层, 所以  $E_x = 250\text{MPa}$ ,  $h_x = 0.18\text{m}$

$$\eta = 0.86 + 0.26 \ln h_x = 0.86 + 0.26 \times \ln 0.18 = 0.414$$

$$E_t = \left( \frac{E_x}{E_0} \right)^\eta \times E_0 = \left( \frac{250}{75.65} \right)^{0.414} \times 75.65 = 124.088\text{MPa}$$

混凝土面层板的截面弯曲刚度  $D_c$  [式(B.2.2-3)]、无机结合料稳定类基层板的截面弯曲刚度  $D_b$  [式(B.2.2-3)]、无夹层条件的双层板层间竖向弹簧系数  $k_{v0}$  [式(B.2.2-4b)]、面层板与基层板的弯矩分配系数  $\varphi$  [式(B.2.2-2)]、路面结构总相对刚度半径  $r_g$  [式(B.2.3-3)] 计算为:

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31\,000 \times 0.26^3}{12(1-0.15^2)} = 46.450\text{MPa} \times \text{m}^3$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{9\,000 \times 0.18^3}{12(1-0.25^2)} = 4.666\text{MPa} \times \text{m}^3$$

$$k_v = k_{v0} = \left[ \frac{3}{5} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{3}{5} \left( \frac{0.26}{31\,000} + \frac{0.18}{9\,000} \right) \right]^{-1} = 58\,712.12\text{MPa/m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp \left( -0.264 \frac{k_v}{k_{v0}} \right) = 1 - 0.240 \exp \left( -0.264 \frac{58\,712.12}{58\,712.12} \right) = 0.816$$

$$r_g = \left\{ \frac{D_c}{k_v} + \left[ \frac{2(D_c + D_b)(1-\nu_t^2)}{E_t} \right]^{\frac{4}{3}} \right\}^{\frac{1}{4}} = \left\{ \frac{46.450}{58\,712.12} + \left[ \frac{2(46.450 + 4.666)(1-0.35^2)}{124.088} \right]^{\frac{4}{3}} \right\}^{\frac{1}{4}} = 0.898\text{m}$$

由表 B.3.1 可知, 取最大正温度梯度为  $95^\circ\text{C/m}$ , 最大负温度梯度按  $1/3$  正温度梯度取值,  $T_g = \frac{95}{3} = 31.67^\circ\text{C/m}$ 。年平均空气相对湿度  $\varphi_a$  取 40%; 取钢筋埋置深度处混凝土温度与硬化时温度的最大温差  $\Delta T_g = 30^\circ\text{C}$ 。

混凝土水灰比  $W/C = 0.4$ ; 混凝土用水量为  $1\,350\text{N/m}^3$ 。采用盖麻布养生,  $a_1 = 1.0$ 。

纵向钢筋拟采用 HRB400 螺纹钢筋, 钢筋的直径  $d_s = 16\text{mm}$ 。参考 7.3.1 条, 初拟配筋率  $\rho = 0.8\%$ , 按表 5.6.1, 取钢筋弹性模量为  $200\text{GPa}$ 。钢筋埋置深度  $\zeta_s = 0.1\text{m}$ 。

### 3) 计算平均横向裂缝间距

无约束条件下混凝土最大干缩应变 [式(C.1-3)]:

$$\varepsilon_\infty = a_1 (1.51 \times 10^{-4} w_0^{2.1} f_c^{-0.28} + 270) \times 10^{-6} = 1.0 \times (1.51 \times 10^{-4} \times 1350^{2.1} \times 42^{-0.28} + 270) \times$$

$$10^{-6} = 4.687 \times 10^{-4}$$

无约束条件下钢筋埋置深度处混凝土干缩应变[式(C.1-2)]:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{\infty} (1 - \varphi_a^3) = 4.687 \times 10^{-4} \times (1 - 0.4^3) = 4.39 \times 10^{-4}$$

钢筋埋置深度处混凝土最大总应变[式(C.1-8)]:

$$\varepsilon_{i\zeta} = \alpha_c \Delta T_{\zeta} + \varepsilon_{sh} = 1 \times 10^{-5} \times 30 + 4.39 \times 10^{-4} = 7.39 \times 10^{-4}$$

无约束时混凝土面层顶面与底面间的最大当量应变差,按式(C.1-11)计算,道路位于公路自然区划Ⅲ区,取 $k_1 = 0.68$ :

$$\varepsilon_{td} = \alpha_c h_c T_g (4.81 h_c^2 - 5.42 h_c + 1.96) + \varepsilon_{\infty} (0.245 e^{-5.3 k_1 h_c}) = 1 \times 10^{-5} \times 0.26 \times 31.67 \times (4.81 \times 0.26^2 - 5.42 \times 0.26 + 1.96) + 4.687 \times 10^{-4} \times (0.245 e^{-5.3 \times 0.68 \times 0.26}) = 11.7 \times 10^{-5}$$

温度和湿度变形完全受约束时的翘曲应力[式(C.1-10)]:

$$\sigma_0 = \frac{E_c \varepsilon_{td}}{2(1 - \nu_c)} = \frac{31\,000 \times 11.7 \times 10^{-5}}{2(1 - 0.15)} = 2.136 \text{ MPa}$$

由式(B.3.1-3)计算翘曲应力系数 $C_L$ ,其中:

$$t = \frac{1.29}{r_g} = \frac{1.29}{0.898} = 1.437$$

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \times \sqrt[3]{\frac{46.450 + 4.666}{124.088}} = 1.079 \text{ m}$$

$$k_{v,t} = \frac{1}{2} \left( \frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right)^{-1} = \frac{1}{2} \left( \frac{0.26}{31\,000} + \frac{0.18}{9\,000} \right)^{-1} = 17613.6 \text{ MPa/m}$$

$$r_{\beta} = \left[ \frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_{v,t}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[ \frac{46.450 \times 4.666}{(46.450 + 4.666) \times 17613.6} \right]^{\frac{1}{4}} = 0.125 \text{ m}$$

$$\zeta = - \frac{(k_{v,t} r_{g,t}^4 - D_c) r_{\beta}^3}{(k_{v,t} r_{\beta}^4 - D_c) r_{g,t}^3} = - \frac{(17613.6 \times 1.079^4 - 46.450) \times 0.125^3}{(17613.6 \times 0.125^4 - 46.450) \times 1.079^3} = 0.868$$

$$C_L = 1 - \left( \frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cosh t + \cosh t \sinh t}{\cosh t \sinh t + \sinh t \cosh t}$$

$$= 1 - \left( \frac{1}{1 + 0.868} \right) \frac{\sinh(1.437) \cosh(1.437) + \cosh(1.437) \sinh(1.437)}{\cosh(1.437) \sinh(1.437) + \sinh(1.437) \cosh(1.437)}$$

$$= 0.709$$

设平均裂缝间距初始值为0.7m,经式(C.1-13)迭代计算得到 $c_1 = 1.11$ ,按式(C.1-12)计算混凝土与钢筋间的最大黏结应力:

$$\sigma_{cg} = 0.234 f_c = 0.234 \times 42 = 9.828$$

按式(C.1-9)计算平均裂缝间距:

$$L_d = \frac{f_t - C_L \sigma_0 \left( 1 - \frac{2\zeta_s}{h_c} \right)}{\frac{\mu \gamma_c}{2} + \frac{\sigma_{cg} \rho}{c_1 d_s}} = \frac{3.22 - 0.709 \times 2.136 \times \left( 1 - \frac{2 \times 0.1}{0.26} \right)}{\frac{8.9 \times 0.024}{2} + \frac{9.828 \times 0.008}{1.11 \times 0.016}} = 0.632 \text{ m}$$

#### 4) 计算横向裂缝缝宽

参考式(C.1-4)~式(C.1-7),得:

$$c_a = 0.761 + 1770\varepsilon_{t\zeta} - 2 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta}^2 = 0.761 + 1770 \times 7.39 \times 10^{-4} - 2 \times 10^6 \times (7.39 \times 10^{-4})^2 = 0.977$$

$$c_b = 9 \times 10^8 \varepsilon_{t\zeta} + 149000 = 9 \times 10^8 \times 7.39 \times 10^{-4} + 149000 = 81.382 \times 10^4$$

$$c_c = 3 \times 10^9 \varepsilon_{t\zeta}^2 - 5 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta} + 2020 = 3 \times 10^9 \times (7.39 \times 10^{-4})^2 - 5 \times 10^6 \times 7.39 \times 10^{-4} + 2020 = -36.461$$

$$c_2 = c_a + \frac{c_b}{17000f_c} + 6.45 \times 10^{-4} \frac{c_c}{L_d^2} = 0.977 + \frac{81.382 \times 10^4}{17000 \times 42} + 6.45 \times 10^{-4} \times \frac{-36.461}{0.632^2} = 2.058$$

横向裂缝缝隙平均宽度，按式(C.1-1)计算：

$$b_j = 1000L_d \left( \varepsilon_{sh} + \alpha_c \Delta T_{\zeta} - \frac{c_2 f_t}{E_c} \right) = 1000 \times 0.632 \times \left( 4.39 \times 10^{-4} + 1 \times 10^{-5} \times 30 - \frac{2.058 \times 3.22}{31000} \right) = 0.33\text{mm}$$

满足缝隙平均宽度小于0.50mm的要求。

### 5) 计算荷载应力

按式(C.2-2)计算设计轴载在面层板临界荷位处产生的荷载应力：

$$\sigma_{c,ps} = 1.40 \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{P_s}{h_c^2} = 1.40 \frac{46.450}{46.450 + 0.816 \times 4.666} \frac{0.1}{0.26^2} = 1.914\text{MPa}$$

车辆荷载作用下连续配筋混凝土板顶横向疲劳拉应力按式(C.2-1)计算：其中，考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数， $k_t = 0.5$ ；考虑裂缝宽度增大与钢筋黏结滑移造成的应力影响系数按式(C.2-3)计算， $k_j = 1 + \frac{1}{43(100\rho)^{2.5}} \ln \left( \frac{N_e}{10^8} \right) = 1 + \frac{1}{43 \times 0.8^{2.5}} \ln \left( \frac{2 \times 10^7}{10^8} \right) = 0.935 < 1$ ， $k_j$ 取1；按式(B.2.5-1)计算疲劳应力系数， $k_f = N_e^{\theta} = (2 \times 10^7)^{0.057} = 2.607$ ；综合系数 $k_c = 1.05$ (表B.2.1)；考虑板底脱空影响的应力修正系数 $k_q = 1.4$ (C.2)，则根据式(C.2-1)可得：

$$\sigma_{c,pr} = k_r k_j k_f k_c k_q \sigma_{c,ps} = 0.50 \times 1 \times 2.607 \times 1.05 \times 1.4 \times 1.914 = 3.67\text{MPa}$$

### 6) 结构极限状态校核

查表3.0.1及3.0.4条，一级公路、低变异水平条件下， $\psi_1 = 0.12$ ， $\psi_2 = 0$ ， $\gamma_r$ 按式(3.0.4-3)计算得到可靠度系数 $\gamma_r = 1.12$ 。

按式(3.0.6)校核路面结构极限状态是否满足要求：

$$\gamma_r \sigma_{c,pr} = 1.12 \times 3.67 = 4.11\text{MPa} < f_{c,r} = 5.0\text{MPa}$$

满足结构极限状态要求，但由于考虑可靠度以后的荷载疲劳应力与混凝土弯拉强度相差较大，从经济性考虑可适当降低板厚，经试算，当板厚为0.24m时：

$$b_j = 0.346\text{mm}$$

$$\gamma_r \sigma_{c,pr} = 1.12 \times 4.22 = 4.72\text{MPa} < f_{c,r} = 5.0\text{MPa}$$

满足式(3.0.6)的要求，即所选的混凝土面层计算厚度0.24m可以承受设计使用年限内设计轴载荷载的综合疲劳作用，即设计使用年限内横向裂缝密集区不产生行车荷载纵向疲劳断裂。计算厚度加6mm磨损厚度和刻槽深度后，按10mm向上取整，取

0.25m 作为该层的设计厚度。

7) 计算钢筋配制间距以及根数

$$\text{纵向钢筋的配置间距: } \frac{\pi d_s^2}{4\rho h_c} = \frac{3.14 \times 0.016^2}{4 \times 0.8\% \times 0.25} = 0.10\text{m}$$

$$\text{每延米纵向钢筋根数: } \frac{1}{0.10} = 10 \text{ 根}$$

交通运输部信息公开  
浏览专用

## 本规范用词用语说明

1 本规范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“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定”。
- 2) 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) 当引用本规范中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”“应符合本规范第×.×节的有关规定”“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。