

中华人民共和国行业标准

公路水泥混凝土路面设计规范

Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavement

JTG 3340—202*

(征求意见稿)

主编部门：中交公路规划设计院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期： 202*年 **月**日

人民交通出版社股份有限公司

202*·北京

前 言

《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)(以下简称原《规范》)发布实施以来,随着相关科研成果的完成、工程经验的积累,部分内容需修订完善。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)要求,由中交公路规划设计院有限公司为主编单位,负责本规范的修订工作。

本规范充分吸收了近年来水泥混凝土路面的科研成果和技术资料、工程建设经验,广泛征求了业内有关单位和专家的意见。修订后的规范分 8 章和 3 个附录,主要内容包括设计依据、结构组合设计、接缝设计、混凝土面层配筋设计、材料组成要求和加铺层结构设计等。本次修订相较原《规范》的主要变化有:

- 1 对水泥路面设计依据予以补全,明确了设计要求(疲劳开裂、极限断裂、抗滑)及考虑因素(交通荷载、材料、路基等);
- 2 完善结构组合设计,强调粒料层缓冲协调变形及排水的功能,强调路基均匀、稳定承载的作用,增补了路床顶面验收弯沉值的计算方法;
- 3 调整了传力杆尺寸和间距设计、调整了连续配筋混凝土路面板厚和配筋率设计指标;
- 4 按照三个水平确定结构层材料设计参数的取值,修改了材料参数试验方法与典型取值范围;
- 5 通过对断板率分级标准、平均接缝传荷能力的修订,完善了加铺方案的设计;
- 6 修订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,增补了全国疲劳温度梯度等值线图。

请有关单位和个人在使用本规范的过程中将发现的问题函告中交公路规划设计院有限公司(地址:北京市德胜门外大街 85 号,邮编:100088),以便下次修订时研用。

主编单位:中交公路规划设计院有限公司

参编单位:中国交通建设股份有限公司

同济大学

山西省交通科学研究院

重庆交通大学

长安大学

主编:刘伯莹

主要参编人员：

参加人员：

主审：王选仓

参与审查人员：

目 录

1	总则.....	- 1 -
2	术语、符号.....	- 2 -
2.1	术语.....	- 2 -
2.2	符号.....	- 3 -
3	设计依据.....	- 4 -
4	结构组合设计.....	- 8 -
4.1	一般规定.....	- 8 -
4.2	路基.....	- 8 -
4.3	垫层.....	- 9 -
4.4	基层和底基层.....	- 10 -
4.5	面层.....	- 11 -
4.6	路肩.....	- 12 -
4.7	路面排水.....	- 12 -
5	接缝设计.....	- 13 -
5.1	一般规定.....	- 13 -
5.2	纵向接缝.....	- 13 -
5.3	横向接缝.....	- 14 -
5.4	交叉口接缝布设.....	- 16 -
5.5	端部处理.....	- 17 -
5.6	填缝材料.....	- 20 -
6	混凝土面层配筋设计.....	- 21 -
6.1	普通混凝土面层配筋.....	- 21 -
6.2	钢筋混凝土面层配筋.....	- 23 -
6.3	连续配筋混凝土面层配筋.....	- 23 -
7	材料组成要求和设计参数.....	- 25 -
7.1	一般规定.....	- 25 -
7.2	粒料类材料.....	- 25 -
7.3	无机结合料稳定类材料.....	- 26 -
7.4	沥青结合料类材料.....	- 28 -
7.5	水泥混凝土材料.....	- 29 -
7.6	钢筋.....	- 31 -
7.7	泊松比.....	- 31 -
8	加铺层结构设计.....	- 32 -
8.1	一般规定.....	- 32 -
8.2	路面损坏状况调查评定.....	- 32 -
8.3	接缝传荷能力和板底脱空状况调查评定.....	- 32 -
8.4	旧混凝土路面结构参数调查.....	- 33 -
8.5	加铺方案选择.....	- 34 -
8.6	沥青加铺层结构设计.....	- 35 -
8.7	分离式混凝土加铺层结构设计.....	- 36 -
8.8	结合式混凝土加铺层结构设计.....	- 36 -
8.9	旧沥青路面加铺水泥混凝土路面结构设计.....	- 37 -

附录 A	交通荷载分析.....	- 38 -
A.1	车型分类.....	- 38 -
A.2	交通数据调查.....	- 39 -
A.3	车辆当量设计轴载换算.....	- 40 -
A.4	当量设计轴载累计作用次数.....	- 41 -
附录 B	混凝土板应力分析及厚度计算.....	- 42 -
B.1	力学模型.....	- 42 -
B.2	路面结构的荷载应力.....	- 42 -
B.3	路面结构的温度应力.....	- 46 -
B.4	混凝土板厚度计算流程.....	- 49 -
附录 C	连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算.....	- 51 -
C.1	横向裂缝缝宽按照式 (C.1-1) 计算确定。.....	- 51 -
C.2	横向裂缝初始弯沉传荷系数按照式 (C.2-1) 计算确定。.....	- 53 -
C.3	车辆荷载横向疲劳拉应力按照式 (C.3-1) 计算确定。.....	- 53 -
C.4	复合式路面中连续配筋混凝土下面层验算.....	- 54 -
C.5	板厚和纵向配筋率计算流程。.....	- 55 -

本规范用词说明

附件《公路水泥混凝土路面设计规范》条文说明

1	总则.....	- 58 -
2	术语、符号.....	- 60 -
3	设计依据.....	- 61 -
4	结构组合设计.....	- 65 -
5	接缝设计.....	- 72 -
6	混凝土面层配筋设计.....	- 76 -
7	材料组成与参数要求.....	- 78 -
8	加铺层结构设计.....	- 82 -
附录 A	交通荷载分析.....	- 90 -
附录 B	混凝土板应力分析及厚度计算.....	- 91 -
附录 C	连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算.....	- 108 -

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。

1.0.2 本规范适用于各等级新建和改（扩）建公路的水泥混凝土路面设计。

1.0.3 水泥混凝土路面设计应根据公路等级、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、计算、技术经济比选后综合确定。

1.0.4 水泥混凝土路面设计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、钢筋配置设计等内容。

1.0.5 沙漠、膨胀土、黄土、盐渍土和多年性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，尚应考虑地区的特殊性，结合当地经验和成果，采用相应的技术措施。

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，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语、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，面层内均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

面层由两层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 concrete block pavement

面层由水泥混凝土预制块铺砌成的路面。

2.1.8 设计使用年限 design service life of pavement

在正常设计、施工、使用和养护条件下，路面满足使用要求的预定年限。

2.1.9 安全等级 safety classes

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。

2.1.10 可靠度 reliability

路面结构在规定的时间内和规定的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。

2.1.11 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。

2.1.12 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

σ ——应力

ε ——应变

l ——弯沉值

2.2.2 设计参数和计算系数

C ——温度应力系数

C_v ——变异系数

γ_r ——可靠度系数

ρ ——配筋率

t ——时间

T ——温度

2.2.3 几何参数

A ——面积

b ——宽度

d ——直径、轮距

h ——结构层厚度

L ——间距

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

α ——线膨胀系数

ν ——泊松比

3 设计依据

3.0.1 各级公路水泥混凝土路面结构的设计安全等级及相应的设计使用年限、目标可靠度与目标可靠指标，应符合表 3.0.1 的规定。二级及二级以下公路路面结构破坏可能产生很严重后果时，可提高一级安全等级。

表 3.0.1 可靠度设计标准

公路等级	高速	一级	二级	三级	四级
安全等级	一级		二级	三级	
设计使用年限 (a)	30		20	15	10
目标可靠度 (%)	95	90	85	80	70
目标可靠指标 β	1.64	1.28	1.04	0.84	0.52

3.0.2 各安全等级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，应按公路等级以及所采用的施工技术和所能达到的施工质量控制和管理水平，通过调研确定变异水平等级和相应的变异系数，高速公路、一级公路的变异水平等级宜为低级，二级公路的变异水平等级应不大于中级。确有困难时可按表 3.0.2 规定的主要设计参数变异系数范围选择相应的变异系数。

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 C_{vf}	0.05~0.10	0.10~0.15	0.15~0.20
基层顶面当量回弹模量 C_{vE}	0.15~0.25	0.25~0.35	0.35~0.55
水泥混凝土面层厚度 C_{vh}	0.02~0.04	0.04~0.06	0.06~0.08

3.0.3 水泥混凝土路面结构分析宜采用弹性地基板理论。路面结构当量处理为面层板、基层板（如有）和地基三层（或二层）结构，面层板为一次浇筑、或第一层终凝前连续浇筑的混凝土面层、或经层间连续处理的复合面层；基层板为刚性或半刚性材料基层，当基层与底基层同为刚性或半刚性材料则合并为当量基层板；粒料类结构层与路基共同视作多层弹性地基，以地基顶面当量回弹模量表征。

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。其极限状态设计表达式可分别采用式 (3.0.4-1) 和式 (3.0.4-2)。

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

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

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

$$\psi_1 = \sqrt{\beta \left[(\beta - 1.04) C_{vf}^2 + 4\beta C_{vh}^2 + (\beta - 1.04) C_{vE}^2 / 16 \right]} \quad (3.0.4-4)$$

式中： $\sigma_{c,pr}$ ——面层板在临界荷位处产生的行车荷载疲劳应力(MPa)，计算方法见附录 B；
 $\sigma_{c,tr}$ ——面层板在临界荷位处产生的温度梯度疲劳应力(MPa)，计算方法见附录 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)，计算方法见附录 B；
 $f_{c,r}$ ——水泥混凝土弯拉强度标准值(MPa)，按 3.0.8 取值；
 γ_r ——可靠度系数，按式(3.0.4-3) 计算；
 β ——目标可靠指标，按表 3.0.1 取值；
 ψ_1 ——施工变异水平系数，按式(3.0.4-4)计算，缺乏资料时，按表 3.0.4 取值；
 ψ_2 ——材料参数确定水平系数，水平一：取 0，水平二：5%，水平三：取 10%。

表 3.0.4 可靠度系数

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

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)，计算方法见附录 B；
 $f_{b,r}$ ——基层材料的弯拉强度标准值(MPa)。

3.0.6 按疲劳断裂设计标准进行结构分析时，通常取 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，宜选用货车中主导特重车型的轴载作为设计轴载。各级轴载作用次数 N_i ，可按式 (3.0.6) 换算为设计轴载的作用次数 N_s ：

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_i \left(\frac{P_i}{P_s} \right)^{16} \quad (3.0.6)$$

式中： P_i ——第 i 级轴载重(kN)，联轴按每一根轴载单独计；
 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。

3.0.7 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应以纵向钢筋埋置深度处的横向裂缝缝隙宽度、横向裂缝处初始弯沉传荷系数以及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 (3.0.7)。

$$\begin{cases} b_j \leq 0.5mm \\ k_{ij} \geq 95\% \\ \gamma_r \sigma_{c,pr} \leq f_{c,r} \end{cases} \quad (3.0.7)$$

式中： b_j ——纵向钢筋埋置深度处的横向裂缝缝隙宽度（mm），计算方法见附录 C；
 k_{ij} ——横向裂缝处初始弯沉传荷系数，计算方法见附录 C；

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设计轴载累计作用次数分为 5 级，分级范围如表 3.0.8。

表 3.0.8 交通荷载分级

交通荷载等级	极重	特重	重	中等	轻
设计使用年限内设计车道承受设计轴载（100kN）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

3.0.9 水泥混凝土、钢纤维混凝土、碾压混凝土、贫混凝土的设计强度应采用 28 天龄期的弯拉强度。各交通荷载等级要求的材料弯拉强度标准值不得低于表 3.0.9 的规定。

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

交通荷载等级	极重、特重、重	中等	轻
水泥混凝土的弯拉强度标准值（MPa）	5.0	4.5	4.0
钢纤维混凝土的弯拉强度标准值（MPa）	6.0	5.5	5.0
碾压混凝土的弯拉强度标准值（MPa）	4.0	3.5	/
贫混凝土的弯拉强度标准值（MPa）	2.5	2.0	/

3.0.10 在季节性冰冻地区，路面结构层的总厚度不应小于表 3.0.10 规定的最小防冻厚度。

表 3.0.10 水泥混凝土路面结构层最小防冻厚度（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	易冻胀土	0.30~0.50	0.40~0.60	0.50~0.70	0.60~0.95
	很易冻胀土	0.40~0.60	0.50~0.70	0.60~0.85	0.70~1.10
潮湿路基	易冻胀土	0.40~0.60	0.50~0.70	0.60~0.90	0.75~1.20
	很易冻胀土	0.45~0.70	0.55~0.80	0.70~1.00	0.80~1.30

- 注：1. 易冻胀土——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 的粘质土（CL、CH）；
 2. 很易冻胀土——粉质土（ML、MH），极细粉土质砂（SM），塑性指数大于 12 小于 22 的粘质土（CL）；
 3. 冻深小或填方路段，或者基、垫层采用隔温性能良好的材料时，可采用低值；冻深大或挖方及地下水位高的路段，或者基、垫层采用隔温性能稍差的材料时，应采用高值；
 4. 冻深小于 0.50m 的地区，可不考虑结构层防冻厚度。

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满足表 3.0.11 的规定。

表 3.0.11 各级公路混凝土面层抗滑性能要求

公路等级	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	≥50	0.50~1.00	--
特殊路段	0.80~1.20	≥55	0.60~1.10	≥50

注：1. 特殊路段——对于高速和一级公路系指立交、平交或变速车道等处，对于其他公路系指急弯、陡坡、交叉口或集镇附近；

2. 年降雨量 600mm 以下的地区，表列数值可适当降低。

3.0.12 路床应具有足够强度、均匀和稳定性，其顶面回弹模量应不小于表 3.0.12 的规定。不满足要求时，应采取改变填料、或采用水泥、粉煤灰或石灰等结合料进行处治等措施。

表 3.0.12 路床顶面回弹模量最小值要求

交通等级	极重	特重	重	中、轻
回弹模量 (MPa)	70	60	50	40

4 结构组合设计

4.1 一般规定

4.1.1 应依据公路等级、交通荷载、路基条件、当地温度和湿度状况以及使用性能要求,选择及组合与之相适应的水泥混凝土路面结构。

4.1.2 路面结构组合设计,应使各个结构层的力学特性及其组成材料性质满足相应的功能要求。

4.1.3 应充分考虑各相邻结构层的相互作用、层间结合条件和要求,以及结构组合的协调与平衡。

4.1.4 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。基层应选用抗冲刷能力强的材料。

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。

4.2.2 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,路段实测代表弯沉值 l_0 应符合式(4.2.2-1)的要求。路床顶面验收弯沉值 l_g 应按式(4.2.2-3)进行计算。

$$l_0 \leq l_g \quad (4.2.2-1)$$

$$l_0 = \bar{l}_0 + \beta \cdot s \quad (4.2.2-2)$$

式中: l_0 ——路段内实测路床顶面弯沉平均值(0.01mm);

s ——路段内实测路基顶面弯沉标准差(0.01mm);

β ——目标可靠指标,根据公路等级按表 3.0.1 取值;

$$l_g = \frac{18621}{E_0} K_s K_\eta K_x \quad (4.2.2-3)$$

$$K_x = \left(\frac{E_0}{E_x} \right)^{0.2+0.47h_x} \quad (4.2.2-4)$$

式中: E_0 ——平衡湿度状态下路基顶面回弹模量(MPa);

K_s ——路基回弹模量湿度调整系数,按《公路路基设计规范》(JTGD30)规定选用;

K_η ——干湿循环或冻融循环条件下路基土模量折减系数,按《公路路基设计规范》

(JTG D30) 规定选用;

K_x ——当路床采用无机结合料进行改良处治时,改良层修正系数,按式(4.2.2-4)

计算;

E_x ——路床采用无机结合料改良层的回弹模量(MPa);

h_x ——路床采用无机结合料改良层的厚度(m)。

4.2.3 路床填料应满足下述要求:

1 路床填料性能应满足 CBR 强度、粒径等方面要求,软土、湿陷性黄土路段、高填方路段、细粒土填筑路段等,宜选择耐风化、受水不易软化的粗粒类土。

2 当路床填料性能不满足 CBR 强度、粒径等方面要求时,可通过掺加水泥、粉煤灰或石灰等结合料进行改善,结合料掺量不宜太高,模量不宜太大,不应形成板体效应。

4.2.4 因条件限制路床未采用粗粒土填筑或未掺加结合料改良时,路床顶面应设置一层粒料层,并不宜小于 200mm。根据结构层的不同组合,粒料层可作为路面结构的垫层、底基层或基层。粒料层应有充分的压实及长期稳定性,可选用级配碎石、级配砾石、未筛分碎石、砂砾等材料。

4.2.5 季节性冰冻地区的中湿类、潮湿类路基,当冰冻线深度达到路基的易冻胀土层时,在易冻胀土层上应设置防冻垫层或用不易冻胀土置换冰冻线深度范围内的易冻胀土。

4.2.6 水文地质条件不良的土质路堑、炭质页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 对路堤下的软弱地基进行加固处治后,其工后沉降量应符合现行《公路路基设计规范》(JTG D30)的规定。

4.2.8 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。

4.2.9 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、低剂量水泥稳定粒料等材料,其厚度可根据路床顶面不平整程度确定,最小厚度不小于 100mm。

4.3 垫层

4.3.1 遇有下述情况时,应在基层或底基层下设置垫层:

1 季节性冰冻地区,路面结构厚度小于最小防冻厚度要求(表 3.0.9)时,应设置防冻垫层,使路面结构厚度符合要求;

2 水文地质条件不良的土质路堑,路床土湿度较大时,宜设置排水垫层。

4.3.2 垫层应与路基同宽,厚度不得小于 200mm。

4.3.3 防冻垫层和排水垫层宜采用碎石、砂砾等颗粒材料。

4.4 基层和底基层

4.4.1 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。

4.4.2 基层和底基层的材料可依据交通荷载等级、结构层组合要求和材料供应条件分别参照表 4.4.2-1 和表 4.4.2-2 选用。

表 4.4.2-1 各交通荷载等级的基层材料类型

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	密级配沥青稳定碎石
	水泥稳定级配碎石（砾石）
中等、轻	级配碎石
	水泥（石灰、粉煤灰）稳定碎石（砂砾、土）

表 4.4.2-2 各交通荷载等级的底基层材料类型

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、砂砾）、石灰、粉煤灰稳定（级配碎石、砂砾）
中等、轻	未筛分碎石、级配砾石、砂砾、水泥稳定土，或不设

4.4.3 承受极重、特重或重交通荷载的路面，基层下应设置底基层。承受中等或轻交通荷载时，可不设底基层。

4.4.4 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，基层与路基之间宜至少设置一层粒料层，根据结构组合的不同，该层可作为底基层或垫层。

4.4.5 贫混凝土或碾压混凝土基层上应铺设沥青混凝土夹层，层厚不宜小于 40mm。无机结合料稳定级配碎石基层上应设置透层和封层，重交通及其以上交通等级的封层宜采用厚度不小于 20mm 的热拌沥青混凝土，中、轻交通等级的封层可选用（改性）热沥青碎石封层。透层可采用渗透性良好的稀释沥青或乳化沥青。

4.4.6 多雨地区，路基由低透水性细粒土组成的高速公路和一级公路或者承受极重或特重交通荷载的二级公路，宜设置由开级配沥青稳定碎石或开级配水泥稳定碎石组成的排水基层。排水基层下应设置由密级配粒料或水泥稳定碎石组成的不透水底基层。底基层顶面宜铺设沥青类封层或防水土工织物。

4.4.7 各种基层和底基层的结构层适宜压实厚度,应按所选集料的公称最大粒径和压实效果的要求而定。基层或底基层的设计层厚超出相应材料的适宜压实厚度范围时,宜分层铺设和压实。

4.4.8 贫混凝土或碾压混凝土基层的计算厚度应满足式(3.0.5)的要求。基层设计厚度应依据计算厚度按10mm向上取整。

4.4.9 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除表面水设计渗入量的需要。排水基层的设计厚度宜依据计算厚度按10mm向上取整后再增加20mm。

4.4.10 硬路肩采用混凝土面层,其结构与厚度应与行车道相同。基层的宽度应比混凝土面层每侧应宽出300mm(小型机具施工时)或650mm(滑模式摊铺机施工时)。

4.4.11 碾压混凝土基层应设置与混凝土面层相对应的接缝。贫混凝土基层弯拉强度大于1.5MPa时,应设置与面层相对应的横向缩缝;一次摊铺宽度大于7.5m时,应设置纵向缩缝。

4.5 面层

4.5.1 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。

4.5.2 面层宜采用设接缝的普通水泥混凝土。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,应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选用。

4.5.3 普通水泥混凝土、钢筋混凝土、碾压混凝土和连续配筋混凝土面层的计算厚度,可依据交通荷载等级、公路等级和变异水平等级,按式(3.0.4-1)、式(3.0.4-2)、式(3.0.7)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。

4.5.4 钢纤维混凝土面层厚度宜为普通混凝土面层厚度的0.75~0.65倍,按钢纤维掺量确定。特重或重交通荷载时,其最小厚度应为180mm;中等或轻交通荷载时,其最小厚度应为160mm。

4.5.5 新建复合式路面的沥青混凝土上面层的厚度不宜小于40mm。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(3.0.7)的要求。混凝土下面层与沥青混凝土上面层之间应设置黏层。

4.5.6 预制梁顶面直接浇筑水泥混凝土桥面铺装时,梁板顶面应清洗干净,并具有足够的粗糙度,铺装层宜采用双层钢筋网,底层钢筋网与梁板剪力钢筋焊接,最小厚度不宜小于150mm。预制梁顶面设置调平层时,调平层表面应具有足够的粗糙度并预埋钢筋;铺装层采用单层钢筋网,与调平层预埋钢筋进行焊接,最小厚度不宜小于100mm。

4.5.7 露石混凝土面板厚度设计同于普通混凝土。上部抗滑功能层采用“湿接湿”方式与下层相接,厚度不小于60mm,粗集料最大粒径不超过13.2mm,磨光值应不小于42。

4.5.8 混凝土预制块可采用矩形块或异形块。矩形块的长度宜为 200mm~250mm，宽度宜为 100mm~125mm，厚度宜为 80mm~150mm。预制块下砂垫层的厚度宜为 30mm~50mm。

4.6 路肩

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

4.6.2 行车道混凝土面层宜宽出外侧车道边缘线 0.6m。

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，路肩铺面应采用与行车道路面相同的结构层组合和组成材料类型。其他等级公路，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。

4.6.4 路肩面层可选用水泥混凝土或沥青类材料。路肩面层选用沥青类材料时，中等交通荷载以上等级公路，应采用热拌沥青混合料，低等级公路和轻交通荷载等级公路，可以采用沥青表面处治。

4.6.5 路肩混凝土面层与行车道面层应设置拉杆相连，二者的横向缩缝应连通。行车道面层为连续配筋混凝土时，路肩混凝土面层的横向缩缝间距应为 4.5m。

4.7 路面排水

4.7.1 行车道路面横坡坡度不应小于 1.5%，硬路肩坡度值宜与行车道横坡相同，土路肩横坡应比行车道或硬路肩的横坡值大 1%或 2%。

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

4.7.3 排水基层的纵向边缘集水沟，当路肩采用沥青面层时，可设在路肩内侧边缘内；当路肩采用水泥混凝土面层时，可设在路肩下或路肩外侧边缘内。排水垫层的纵向边缘集水沟宜设在路床边缘。

4.7.4 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基层或垫层相同的透水性材料，或者不含细料的碎石或砾石粒料。横向排水管不带孔，其管径与集水管相同。

4.7.5 集水沟和集水管的纵坡与路线纵坡宜相同，且不宜小于 0.3%。横向排水管的坡度不宜小于 5%。

4.7.6 横向排水管出口端应设端墙，端头宜用镀锌铁丝网或格栅罩住，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设置标志标明出水口位置。

5 接缝设计

5.1 一般规定

5.1.1 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，纵缝两侧的横缝不得相互错位。

5.1.2 纵向接缝的间距（即板宽）宜在 3.0m~4.5m 范围内选用。

5.1.3 横向接缝的间距（即板长）应按面层类型和厚度选定：

1 普通水泥混凝土面层宜为 4m~5m，面层板的长宽比宜为 1~1.35，平面面积不宜大于 25m²。

2 碾压混凝土或钢纤维混凝土面层宜为 6m~10m。

3 钢筋混凝土面层宜为 6m~15m，面层板的长宽比不宜超过 2.5，平面面积不宜大于 45m²。

5.2 纵向接缝

5.2.1 纵向接缝的布设应视路面总宽度、行车道及硬路肩宽度以及施工铺筑宽度而定：

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 30mm~40mm，宽度宜为 3mm~8mm，槽内应灌塞填缝料，构造如图 5.2.1 a) 所示；

2 一次铺筑宽度大于 4.5m 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；采用半刚性基层时，槽口深度应为板厚的 2/5。其构造如图 5.2.1 b) 所示；

3 钢筋混凝土路面、连续配筋混凝土路面的纵缝设置可与普通混凝土路面相同；

4 碾压混凝土面层一次摊铺宽度大于 7.5m 时，应设置纵向缩缝，缩缝构造如图 5.2.1 b) 所示；钢纤维混凝土面层在摊铺宽度小于 7.5m 时，可不设纵向缩缝；

5 行车道路面与混凝土硬路肩之间的纵向接缝必须设置拉杆。

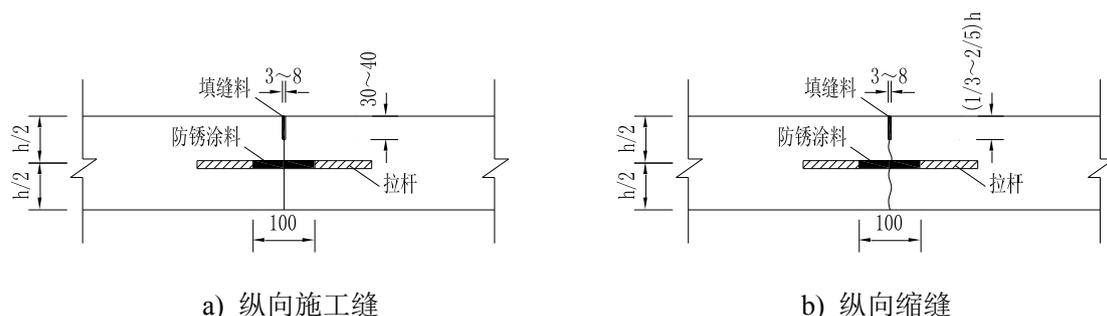


图 5.2.1 纵缝构造（尺寸单位：mm）

5.2.2 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不应小于 1m。

5.2.3 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 5.2.3 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不得小于 100mm。

表 5.2.3 拉杆直径、长度和间距（mm）

面层厚度 (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	14×700×800	14×700×700	14×700×600	14×700×500	14×700×400
≥260	16×800×800	16×800×700	16×800×600	16×800×500	16×800×400	16×800×300

注：拉杆尺寸数字为直径×长度×间距。

5.2.4 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。

5.3 横向接缝

5.3.1 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 5.3.1 所示；设在胀缝处的施工缝，其构造应与胀缝相同，其构造如图 5.3.4 所示。

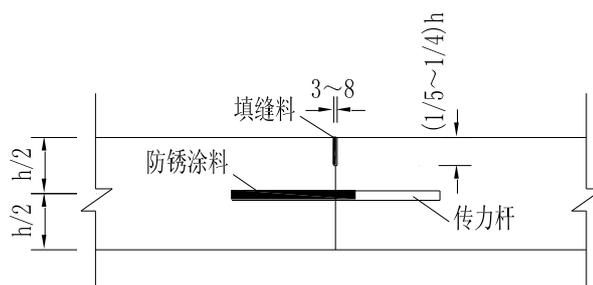


图 5.3.1 横向施工缝构造（尺寸单位：mm）

5.3.2 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 5.3.2a)、5.3.2b) 所示。其他情况可采用不设传力杆假缝形式，其构造如图 5.3.2c) 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敷涂沥青等方式处理。

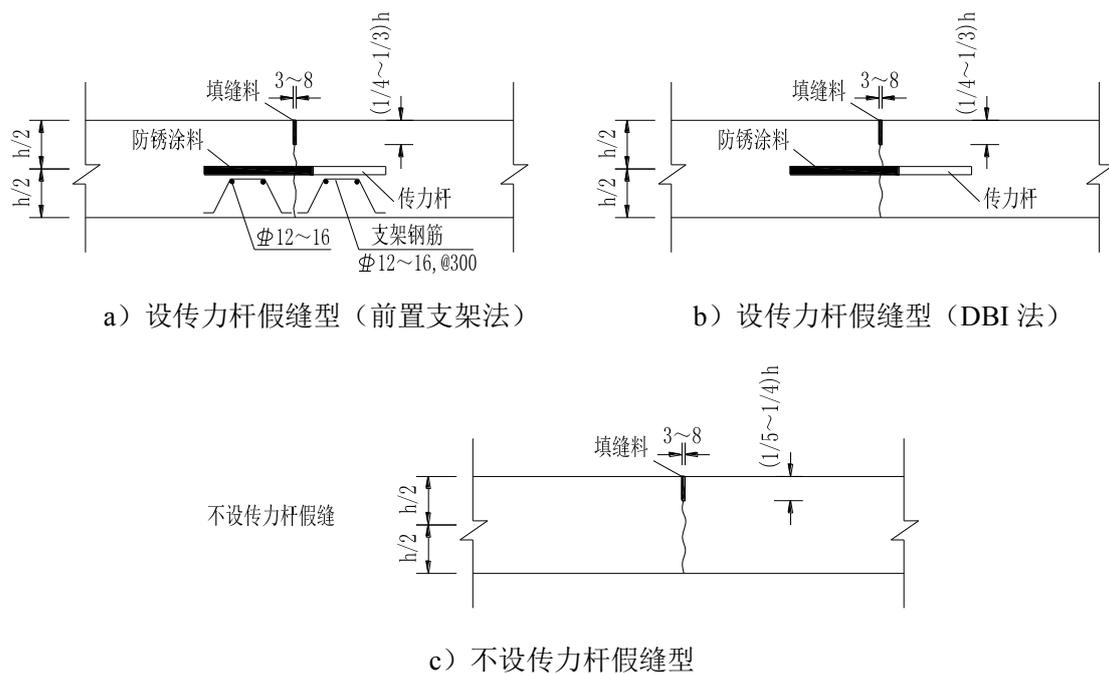


图 5.3.2 横向缩缝构造（尺寸单位：mm）

5.3.3 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 5.3.3 所示。

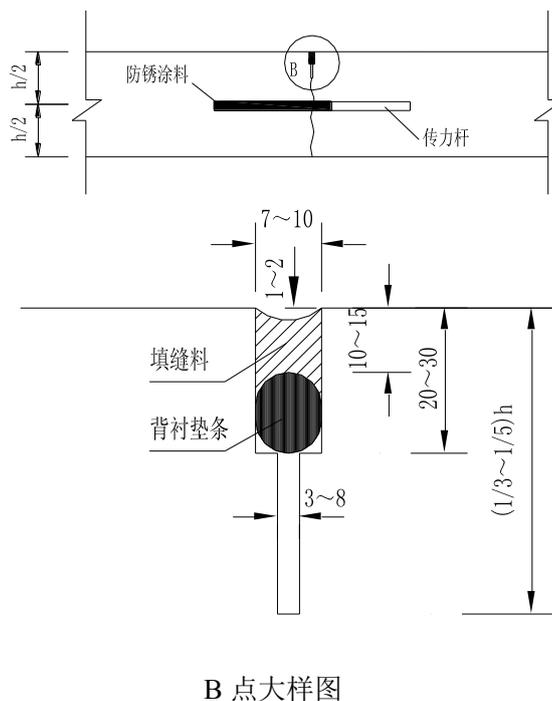


图 5.3.3 二次锯切槽口构造（尺寸单位：mm）

5.3.4 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。设置的胀缝条数，应根据膨胀量大小而定。胀缝宽宜为 20~25mm，缝内应设置填缝板和可滑动的传力杆，胀缝的构造如图 5.3.4 所示。

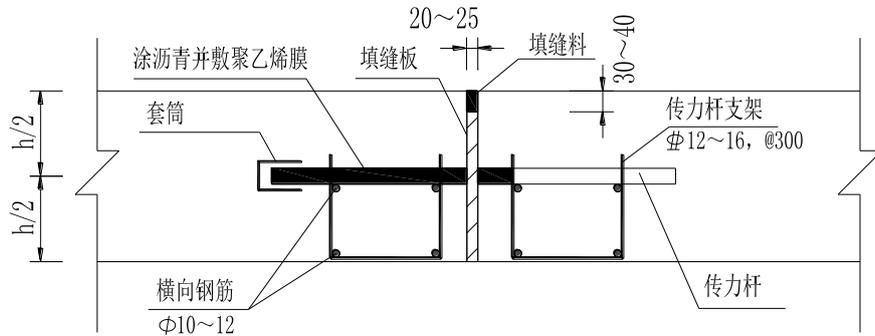


图 5.3.4 胀缝构造（尺寸单位：mm）

5.3.5 传力杆应采用光圆钢筋，最小长度为 400mm。横向缩缝和胀缝传力杆的尺寸、间距可按表 5.3.5 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 5.3.5 传力杆尺寸和间距(mm)

面层厚度 (mm)	缩缝		胀缝	
	传力杆直径 (mm)	传力杆最大间距 (mm)	传力杆直径 (mm)	传力杆最大间距 (mm)
≤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

5.4 交叉口接缝布设

5.4.1 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变动，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。

5.4.2 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。

5.5 端部处理

5.5.1 混凝土路面与桥涵、通道及隧道等固定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5.5.1所示。

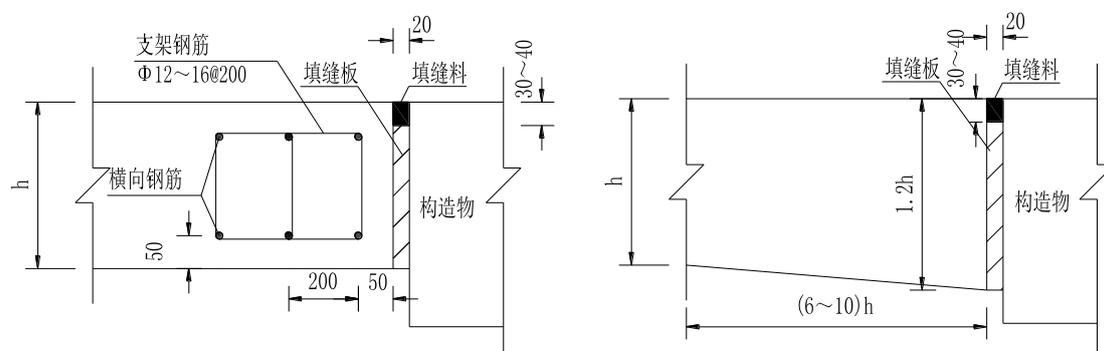


图 5.5.1 临近构造物胀缝构造（尺寸单位：mm）

5.5.2 混凝土路面与桥梁相接应符合以下规定：

1 桥头设有搭板时，应在搭板与混凝土面层板之间设置长6~10m的钢筋混凝土面层过渡板。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。

2 桥头未设搭板时，宜在混凝土面层与桥台之间设置长10~15m的钢筋混凝土面层板；或设置由混凝土预制块面层或沥青面层铺筑的过渡段，其长度应不小于8m。

5.5.3 混凝土路面与沥青路面相接时，应设置至少3m长的过渡段。过渡段的路面应采用两种路面呈阶梯状叠合布置，其下面铺设的变厚度混凝土过渡板的厚度不得小于200mm，如图5.5.3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粘结。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。

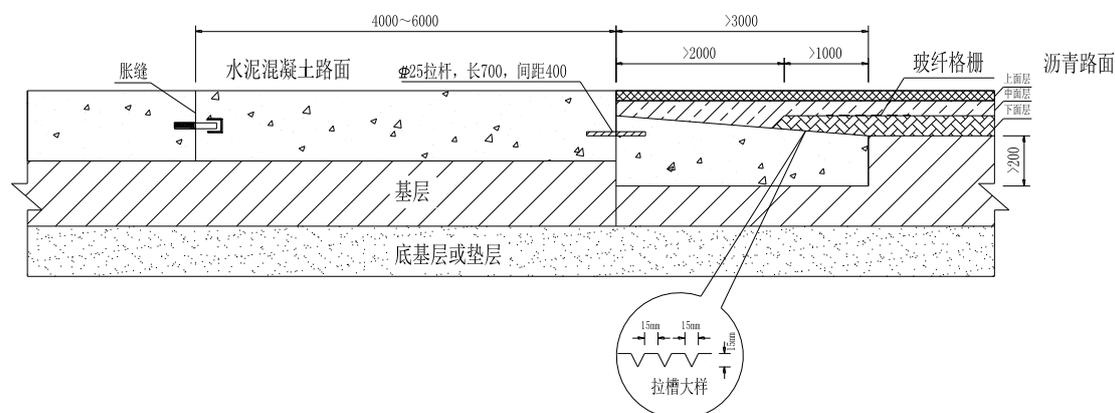


图 5.5.3 混凝土路面与沥青路面相接段的构造布置（尺寸单位：mm）

5.5.4 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、宽翼缘工字钢梁或毛勒缝等形式：

1 钢筋混凝土地梁依据路基土的强弱宜采用 3~5 个，梁宽 400mm~600mm，梁高 1200mm~1500mm，间距 5000mm~6000mm；地梁与连续配筋混凝土面层应连成整体；其构造如图 5.5.4-1 所示；

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 3000mm、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 5.5.4-2、图 5.5.4-3 所示。

3 毛勒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，确保钢筋网与毛勒缝形成稳固整体。毛勒缝安装后的缝宽依据温度确定，一般控制在 25mm~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 5.5.4-2、图 5.5.4-4 所示。

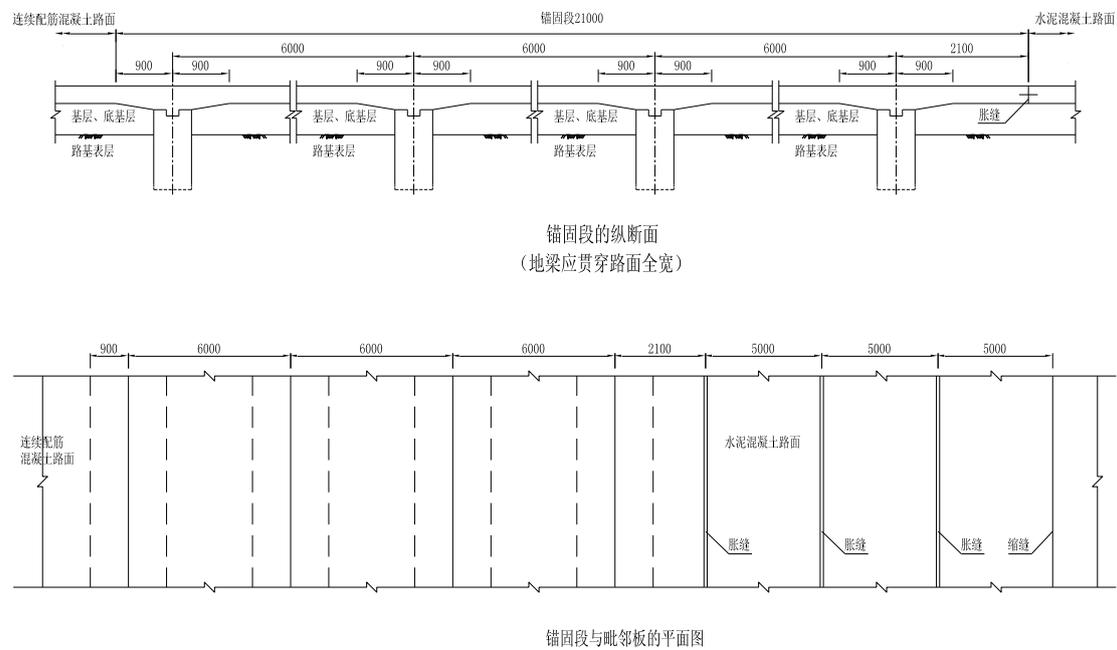


图 5.5.4-1 钢筋混凝土地梁锚固（尺寸单位：mm）

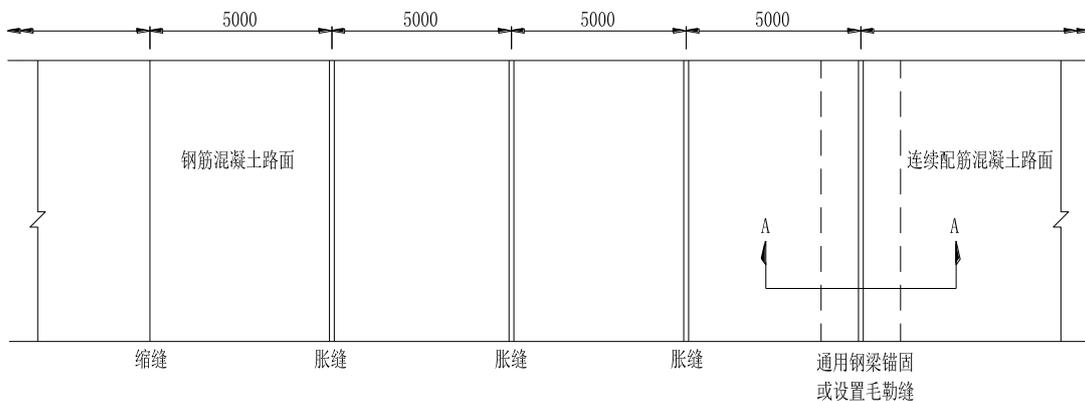
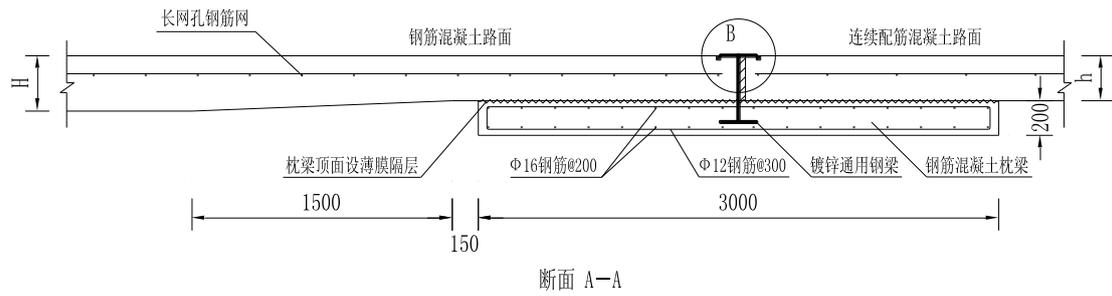
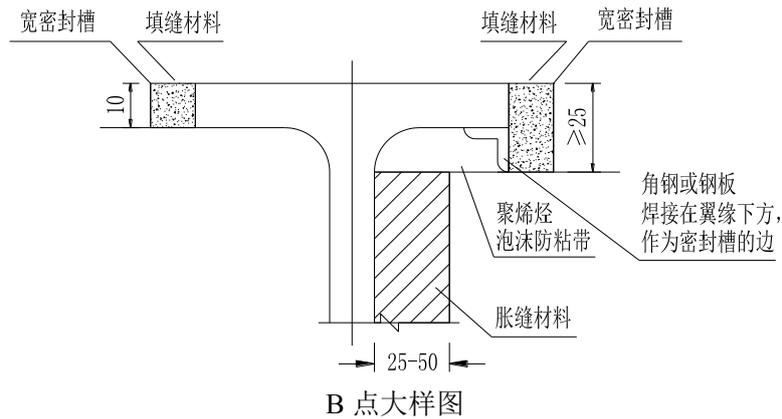


图 5.5.4-2 连续配筋混凝土段与毗邻板平面图（尺寸单位：mm）

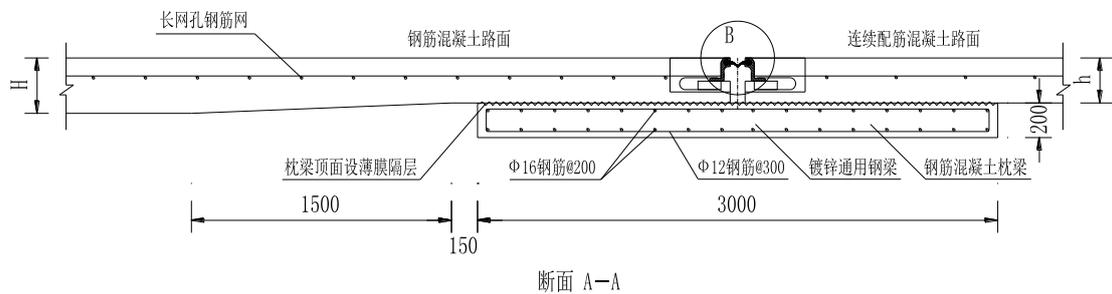


断面 A-A

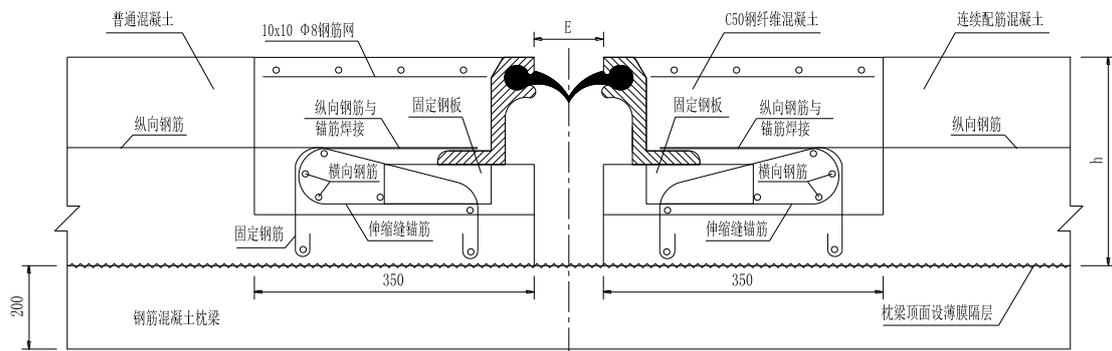


B 点大样图

图 5.5.4-3 宽翼缘工字钢梁锚固 (尺寸单位: mm)



断面 A-A



B 点大样图

图 5.5.4-4 毛勒缝 (尺寸单位: mm)

5.6 填缝材料

5.6.1 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。

5.6.2 填缝料应选用与混凝土接缝槽壁粘结力强、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、一级公路宜选用硅酮类、聚氨酯类填缝料；二级及二级以下公路可选用聚氨酯类、橡胶沥青类或改性沥青类填缝料。

6 混凝土面层配筋设计

6.1 普通混凝土面层配筋

6.1.1 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它类型路面相接处，可在面层边缘的下部配置钢筋。可选用2根直径为12~16mm的螺纹钢筋，置于面层底面之上1/4厚度处并不小于50mm，间距为100mm，钢筋两端向上弯起，如图6.1.1所示。

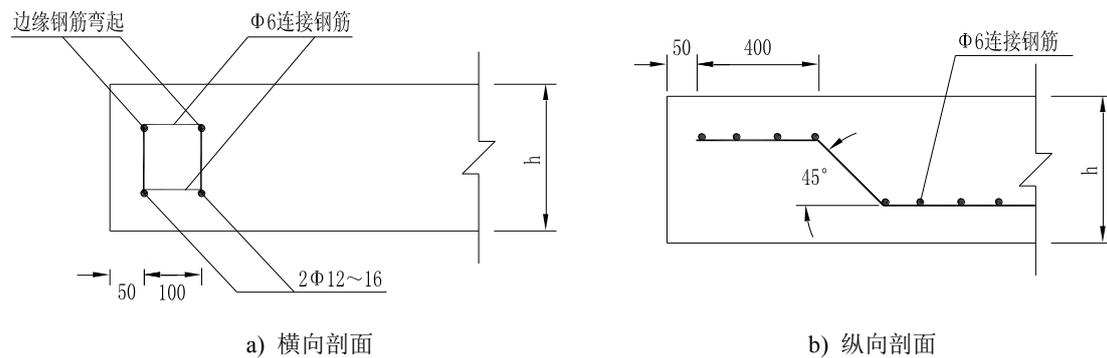


图 6.1.1 边缘钢筋布置 (尺寸单位: mm)

6.1.2 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，宜配置角隅钢筋。可选用2根直径为12~16mm的螺纹钢筋，置于面层上部，距顶面不小于50mm，距边缘为100mm，如图6.1.2所示。

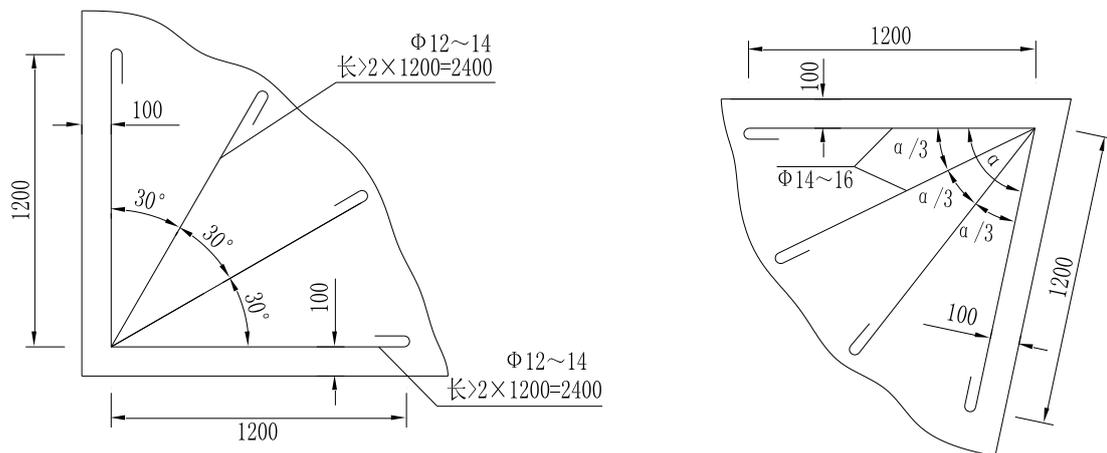
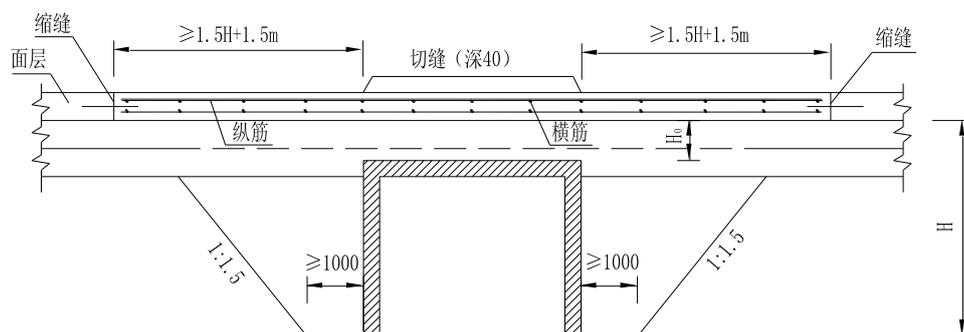


图 6.1.2 角隅钢筋布置 (尺寸单位: mm)

6.1.3 混凝土面层下有箱形构造物横向穿越，其顶面至混凝土面层底面的间距小于800mm时，在构造物顶宽及两侧各 $1.5H+1.5m$ 且不小于4m的范围内，混凝土面层内应布设双层钢筋网，上下层钢筋网应分别设置在距面层顶面和底面1/4~1/3厚度处，如图6.1.3-1所示。构造物顶面至面层底面的距离在800~1600mm时，应在上述长度范围内的混凝土面层中应布设单层钢筋网。钢筋网应设在距顶面1/4~1/3厚度处，如图6.1.3-2所示。钢筋直径宜

为 12mm，纵向钢筋间距宜为 100mm，横向钢筋间距宜为 200mm。配筋混凝土面层与相邻混凝土面层之间应设置设传力杆的缩缝。



注： H 为面层底面到构造物底面的距离； H_0 为面层底面到构造物顶面的距离

图 6.1.3-1 箱形构造物横穿公路处的面层配筋 (H_0 小于 800mm) (尺寸单位: mm)

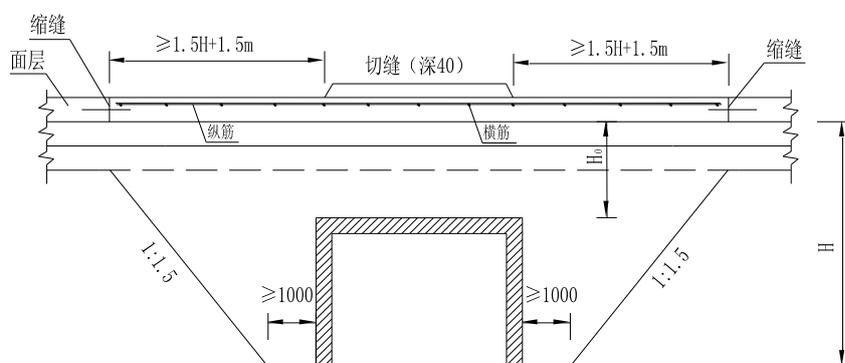


图 6.1.3-2 箱形构造物横穿公路处的面层配筋 (H_0 为 800~1600mm) (尺寸单位: mm)

6.1.4 混凝土面层下有圆形管状构造物横向穿越，其顶面至面层底面的距离小于 1200mm 时，在构造物两侧各 $1.5H+1.5m$ ，且不小于 4m 的范围内，混凝土面层内应布设单层钢筋网，钢筋网应设在距面层顶面 $1/4\sim 1/3$ 厚度处，如图 6.1.4 所示。钢筋尺寸和间距及传力杆接缝设置与 6.1.3 条相同。

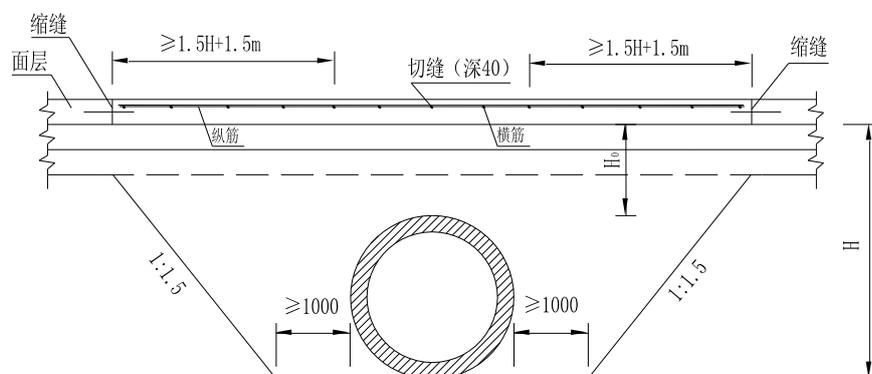


图 6.1.4 圆形管状构造物横穿公路处的面层配筋 (H_0 小于 1200mm) (尺寸单位: mm)

6.2 钢筋混凝土面层配筋

6.2.1 钢筋混凝土面层的配筋量应按式(6.2.1)确定。

$$A_s = \frac{16L_s h \mu}{f_{sy}} \quad (6.2.1)$$

式中： A_s ——每延米混凝土面层宽（或长）所需的钢筋面积（ 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）；

μ ——面层与基层之间的动态摩阻系数，按表 7.5.10 选用；

f_{sy} ——钢筋的屈服强度（MPa），按表 7.6.1 选用。

6.2.2 纵向和横向钢筋宜采用相同或相近的直径，直径差不应大于 4mm。钢筋的最小直径和最大间距，应符合表 6.2.2 的规定。钢筋的最小间距宜为集料最大粒径的 2 倍。

表 6.2.2 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
光圆钢筋	8	150	300
螺纹钢筋	12	350	600

6.2.3 钢筋布置应符合下列要求：

1 纵向钢筋应设在面层顶面下 1/3~1/2 厚度范围内，在不影响施工的情况下宜设在接近面层顶面下 1/3 厚度处；

2 横向钢筋应位于纵向钢筋之下；

3 纵向钢筋的搭接长度宜大于 35 倍钢筋直径，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°；

4 边缘钢筋至纵缝或自由边的距离宜为 100~150mm。

6.3 连续配筋混凝土面层配筋

6.3.1 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 3.0.7 条的要求。初拟纵向配筋率：对于连续配筋混凝土面层，中等交通荷载等级宜为 0.60%~0.70%，重交通荷载等级宜为 0.70%~0.80%，特重交通荷载等级宜为 0.80%~0.85%，极重交通荷载等级宜为 0.85%~0.90%。复合式连续配筋混凝土下面层的纵向配筋率可以在此基础上降低 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附录 C。

6.3.2 横向钢筋用量按照 6.2.1 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。

6.3.3 连续配筋混凝土面层的纵向和横向钢筋均应采用螺纹钢，其直径为 12 mm~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。

6.3.4 钢筋布置应符合下列要求：

1 纵向钢筋距面层顶面的最小距离为 90mm，最大深度为 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 纵向钢筋的间距不大于 250mm，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 mm~150mm；

5 横向钢筋位于纵向钢筋之下；横向钢筋间距一般为 300 mm~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°；

7 相邻车道之间或车道与硬路肩之间的纵向接缝内，必须设置拉杆，该拉杆可用加长的横向钢筋代替。

7 材料组成要求和设计参数

7.1 一般规定

7.1.1 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。

7.1.2 路面各结构层组成材料的原材料品质和技术指标要求、以及混合料组成设计方法，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)中有关条款的规定，并结合工程特点和当地经验确定。

7.1.3 路面结构层材料设计参数的确定可分为下列三个水平：

水平一：通过室内试验实测确定；

水平二：利用已有经验关系式确定；

水平三：参照典型数值确定。

7.1.4 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。

7.2 粒料类材料

7.2.1 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，级配应符合现行《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20)的规定。

7.2.2 级配碎石用于基层、底基层时，CBR 值应符合表 7.2.2 的规定。

表 7.2.2 级配碎石的 CBR 值要求 (%)

结构层	公路等级	极重、特重交通	重交通	中等、轻交通
基层	高速、一级公路	≥200	≥180	≥160
	二级及以下公路	≥160	≥140	≥120
底基层	高速、一级公路	≥120	≥100	≥80
	二级及以下公路	≥100	≥80	≥60

7.2.3 天然砂砾用于基层时，CBR 值不应小于 80。天然砂砾用于底基层时，对于极重、特重和重交通荷载等级，CBR 值不应小于 80；对于中等交通荷载等级，CBR 值不应小于 60；对于轻交通荷载等级，CBR 值不应小于 40。

7.2.4 高速公路和一级公路基层粒料公称最大粒径不宜大于 26.5mm；底基层采用级配碎

石或砂砾时，公称最大粒径不宜大于 31.5mm；底基层采用天然砂砾时，公称最大粒径不宜大于 53.0mm。二级及二级以下公路的基层、底基层粒料公称最大粒径不宜大于 53.0mm。

7.2.5 粒料类材料用于防冻层时，最大粒径不应超过 53.0mm；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。

7.2.6 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。

7.2.7 结构验算时，粒料层的回弹模量应在粒料类材料的回弹模量基础上考虑湿度调整系数的影响，粒料类材料的回弹模量应取用最佳含水率与压实度要求相应的干密度条件下的标准值。

7.2.8 粒料类材料的回弹模量应依据相应的水平确定：

水平一：按照现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50) 附录 D 的方法，采用重复加载三轴压缩试验确定。

水平三：按照粒料类型和层位参照表 7.2.8 确定。

表 7.2.8 粒料层回弹模量参考值 (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。

7.3 无机结合料稳定类材料

7.3.1 无机结合料稳定类材料用于高速公路、一级公路基层时，公称最大粒径不宜大于 31.5mm；用于高速公路、一级公路底基层或二级及以下公路基层时，公称最大粒径不宜大于 37.5mm；用于二级及二级以下公路的底基层时，公称最大粒径不宜大于 53.0mm。

7.3.2 水泥稳定类材料小于 0.075mm 的颗粒含量不得大于 5%，小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 50%，液限应小于 28%，塑性指数应小于 5。承受极重、特重和重交通荷载等级时，水泥剂量宜为 4%~6%；中等和轻交通荷载等级时，水泥剂量宜为 4%。

7.3.3 石灰粉煤灰稳定类材料小于 0.075mm 的颗粒含量不得大于 7%，小于 4.75mm 的颗粒含量不宜大于 50%。石灰与粉煤灰的配比宜为 1:2~1:4；粒料与结合料的配比宜为 85:15~80:20。

7.3.4 开级配水泥稳定碎石材料小于 0.075mm 的颗粒含量不得大于 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%。水泥剂量宜为 9.5%~11%。

7.3.5 无机结合料稳定类材料的 7d 无侧限抗压强度代表值应符合表 7.3.5 的要求。

表 7.3.5 无机结合料稳定类材料的 7d 无侧限抗压强度 (MPa)

材料	结构层	公路等级	极重、特重交通	重交通	中等、轻交通
水泥稳定类	基层	高速、一级公路	5.0~7.0	4.0~6.0	3.0~5.0
		二级及以下公路	4.0~6.0	3.0~5.0	2.0~4.0
	底基层	高速、一级公路	3.0~5.0	2.5~4.5	2.0~4.0
		二级及以下公路	2.5~4.5	2.0~4.0	1.0~3.0
水泥粉煤灰稳定类	基层	高速、一级公路	4.0~5.0	3.5~4.5	3.0~4.0
		二级及以下公路	3.5~4.5	3.0~4.0	2.5~3.5
	底基层	高速、一级公路	2.5~3.5	2.0~3.0	1.5~2.5
		二级及以下公路	2.0~3.0	1.5~2.5	1.0~2.0
石灰粉煤灰稳定类	基层	高速、一级公路	≥1.1	≥1.0	≥0.9
		二级及以下公路	≥0.9	≥0.8	≥0.7
	底基层	高速、一级公路	≥0.8	≥0.7	≥0.6
		二级及以下公路	≥0.7	≥0.6	≥0.5
石灰稳定类	基层	二级及以下公路	-	-	≥0.8 ¹
	底基层	高速、一级公路	-	-	≥0.8
		二级及以下公路	-	-	0.5~0.7 ²

注：1.在低塑性土（塑性指数小于 7）地区，石灰稳定砂砾和碎石的 7d 龄期无侧限抗压强度应大于 0.5MPa（100g 平衡锥测液限）。

2.低限用于塑性指数小于 7 的黏土，高限用于塑性指数大于或等于 7 的黏土。

7.3.6 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：

水平一：无机结合料稳定类材料的压缩模量按照现行《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）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 E51）的有关规定确定；水泥稳定类材料的试件龄期应采用 90d，石灰稳定类材料的试件龄期应采用 180d。

水平三：按照表 7.3.6 的参考值确定。

表 7.3.6 无机结合料稳定类材料的弹性模量参考值 (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、石灰粉煤灰稳定粒料	1.5~2.0	18000~28000
	0.9~1.5	14000~20000
水泥稳定土、水泥粉煤灰稳定土、石灰粉煤灰稳定土	0.6~1.0	5000~7000
石灰土	0.3~0.7	3000~5000

注：材料性能好、级配好或压实度大时取高值，反之取低值。

7.3.7 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 0.5。

7.4 沥青结合料类材料

7.4.1 沥青结合料类材料为水泥混凝土路面基层材料,其材料组成和性质要求应符合现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)的规定。

7.4.2 沥青混凝土基层宜采用集料公称最大粒径为 19.0mm 或 26.5mm 的混合料,沥青稳定碎石基层宜采用集料公称最大粒径为 26.5mm 或 31.5mm 的混合料,沥青混凝土夹层宜采用集料公称最大粒径为 9.5mm 或 13.2mm 的混合料。各种沥青混合料的沥青用量宜适当增大。

7.4.3 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 的细粒含量不得大于 2%;小于 0.6mm 的颗粒含量不宜大于 5%;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%。沥青标号宜选用 50 A 或 70A,沥青用量宜为 2.5%~3.5%。

7.4.4 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:

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 E20) T0738 的有关规定,试验温度取 20℃,基层沥青混合料的加载频率采用 5Hz。

水平二: 采用式 7.4.4 计算沥青混合料动态压缩模量,该式适用于采用道路石油沥青和常规级配的的混合料。

$$\lg E_a = 4.49 + 0.0082G^* - 0.1245P_a - 0.0386V + 0.0178VCA_{DRC} \quad (7.4.4)$$

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 (%)。

水平三: 按照表 7.4.4 的典型范围确定。

表 7.4.4 常用沥青混合料基层 20℃条件下动态压缩模量参考值 (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	SBS 改性沥青
AC10/AC13	7000~11000	6500~10500	6000~9500	7500~11500

AC16/AC20/AC25	8000~12000	7500~11500	6500~11000	8000~12000
ATB25	7000~11000	-	-	-

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。

7.5 水泥混凝土材料

7.5.1 厚度大于 300mm 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。

7.5.2 水泥混凝土集料公称最大粒径不应大于 26.5mm。砂的细度模数不宜小于 2.5；高速公路面层用砂的硅质砂或石英砂的含量不宜低于 25%。水泥含量不得少于 300kg/m³（非冰冻地区）或 320kg/m³（冰冻地区）。冰冻地区的混凝土中必须掺加引气剂。

7.5.3 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得少于 170kg/m³，28d 弯拉强度标准值宜控制在 2.0MPa~2.5MPa 范围内。

7.5.4 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，水泥用量不得少于 360kg/m³（非冰冻地区）或 380kg/m³（冰冻地区）。

7.5.5 钢纤维混凝土集料公称最大粒径宜为钢纤维长度的 1/2~2/3，并不宜大于 16mm。钢纤维的抗拉强度标准值不宜小于 600 级（600MPa~1000MPa）。水泥用量不得少于 360kg/m³（非冰冻地区）或 380kg/m³（冰冻地区）。钢纤维体积率宜为 0.6%~1.0%。

7.5.6 混凝土预制块的抗压强度不宜低于 50MPa（非冰冻地区）或 60MPa（冰冻地区）。

7.5.7 水泥混凝土配合比设计时的适配弯拉强度的均值，应按式（7.5.7）确定。

$$f_m = \frac{f_r}{1-1.04C_{vf}} + ts \quad (7.5.7)$$

式中： f_m ——混凝土适配弯拉强度的均值；

f_r ——混凝土弯拉强度标准值；

C_{vf} ——混凝土弯拉强度的变异系数，参照表 3.0.2 取用；

s ——混凝土弯拉强度试验样本的标准差；

t ——保证率系数，按样本数和判别概率参照表 7.5.7 确定。

表 7.5.7 保证率系数

公路等级	判别概率	样本数			
		6	9	15	20
高速公路	0.05	0.79	0.61	0.45	0.39
一级公路	0.10	0.59	0.46	0.35	0.30
二级公路	0.15	0.46	0.37	0.28	0.24

三、四级公路	0.20	0.37	0.29	0.22	0.19
--------	------	------	------	------	------

7.5.8 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：

水平一：水泥混凝土的弯拉强度、劈裂抗拉强度和弹性模量的测定应符合现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30)的有关规定。

水平三：按照表 7.5.8 的参考值范围取用。

表 7.5.8 水泥混凝土强度和弹性模量参考值

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

7.5.9 水泥混凝土的线膨胀系数应依据相应的水平确定：

水平一：水泥混凝土线膨胀系数的测定应符合现行《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30)的有关规定。

水平三：按照表 7.5.9 的代表值确定水泥混凝土的线膨胀系数。

表 7.5.9 水泥混凝土线膨胀系数代表值

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

7.5.10 钢筋水泥混凝土路面面层与基层间的动态摩阻系数参考表 7.5.10 取值：

表 7.5.10 钢筋混凝土路面面层与基层间的动态摩阻系数参考值

基层材料	代表值
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、 沥青碎石、贫混凝土、	1.8

7.5.11 连续配筋混凝土路面面层与基层间的静态摩阻系数参考表 7.5.11 取值。

表 7.5.11 连续配筋混凝土路面面层与基层间的静态摩阻系数参考值

基层材料	代表值
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

7.6 钢筋

7.6.1 钢筋强度和弹性模量经验参考值参考表 7.6.1 取值。

表 7.6.1 钢筋强度和弹性模量参考值

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	

7.7 泊松比

7.7.1 各类材料的泊松比按照表 7.7.1 确定。

表 7.7.1 泊松比代表值

材料类别	路基	粒料	无机结合料 稳定材料	密级配沥青混 合料	开级配、半开级 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

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、板底脱空状况、面层厚度和混凝土强度等。
- 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。

8.1.2 地表或地下排水不良路段，应采取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。

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。

8.1.4 应考虑旧水泥混凝土路面病害发展情况进行加铺层结构的动态设计。

8.1.5 废旧路面材料应充分利用，减少对环境的不良影响。

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《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平均错台量。

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见表 8.2.2。

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	5~15	15~30	>30
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。

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。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。

$$k_w = \frac{w_u}{w_l} \times 100 \quad (\%) \quad (8.3.2)$$

式中： k_w ——接缝传荷系数（%）；

w_u ——未受荷板接缝边缘处的弯沉值（0.01mm）；

w_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分为 4 个等级，分级标准见表 8.3.3。以调查路段内各条接缝传荷系数的平均值表示该路段的平均接缝传荷能力。

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 (%)	≥ 80	60~80	40~60	< 40

8.3.4 板底脱空可根据面层板角隅处的弯沉测试结果，并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。

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。

$$h_e = \bar{h}_e - 1.04s_h \quad (8.4.1)$$

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）。

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。

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

$$f_{sp} = \bar{f}_{sp} - 1.04s_{sp} \quad (8.4.2-2)$$

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）。

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（荷载 50kN、承载板半径 150mm）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。

$$E_t = 100e^{(3.60+24.03w_0^{-0.057}-15.63SI^{0.222})} \quad (8.4.4-1)$$

$$SI = \frac{w_0 + w_{300} + w_{600} + w_{900}}{w_0} \quad (8.4.4-2)$$

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；

w_0 ——荷载中心处的弯沉值（ μm ）；

w_{300} 、 w_{600} 、 w_{900} ——分别为距离荷载中心 300mm、600mm 和 900mm 处的弯沉值（ μm ）。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，而后按附录 B（式 B.2.5）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。

8.5 加铺方案选择

8.5.1 根据使用要求及旧混凝土路面的综合评定结果，可选用分离式或结合式水泥混凝土加铺及沥青混凝土加铺方案，并经技术经济比较后确定。

8.5.2 当旧混凝土路面的损坏状况、接缝传荷能力评定等级为优良，面层板的平面尺寸及

接缝布置合理，路拱横坡符合要求时，宜采用结合式混凝土加铺方案，也可采用分离式混凝土加铺方案或沥青混凝土加铺方案。

8.5.3 当旧混凝土路面的损坏状况、接缝传荷能力评定等级为中等及以上，或者新旧混凝土板的平面尺寸不同、接缝形式或位置不对应或路拱横坡不一致时，宜采用分离式混凝土加铺方案，也可采用沥青混凝土加铺方案。

8.5.4 当旧混凝土路面的损坏状况和接缝传荷能力评定等级为次等及以上时，可采用沥青混凝土加铺方案。

8.5.5 当旧混凝土路面的损坏状况评定等级为差，且板底脱空状况严重时，可通过经济技术分析，选用打裂压稳方案或碎石化方案处治旧水泥混凝土路面，根据公路等级和交通状况，将处治后的旧路面用做改建路面的基层或底基层。

8.5.6 加铺时必须对旧水泥混凝土路面进行处治，应更换破碎板，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。

8.5.7 对于检测有明显板底脱空的路段，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。

8.5.8 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，板角弯沉值小于15（0.01mm），方可进行加铺。

8.6 沥青加铺层结构设计

8.6.1 沥青加铺层宜采用两层或两层以上沥青层，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 路面边缘宜设置内部排水系统。

8.6.3 原水泥混凝土面板表面可采用刻槽、铣刨等方法处理，刻槽或铣刨后构造深度不宜小于1.0mm。沥青加铺层与原水泥混凝土面板之间宜洒布改性沥青等，加强层间结合，避免层间滑移。

8.6.4 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、聚酯玻纤布或者土工织物夹层。
- 4 沥青加铺层下层可采用大粒径沥青碎石。

8.6.5 沥青加铺层厚度应满足减缓反射裂缝的要求，高速公路和一级公路的加铺厚度不宜小于 100mm，其他等级公路加铺厚度不宜小于 80mm。混合料的公称最大粒径应与加铺层厚度相匹配。

8.6.6 沥青加铺层下旧混凝土板的应力分析按附录 B 进行。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。旧混凝土板的应力应满足式（3.0.4）的要求。

8.6.7 沥青混合料技术要求应符合《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40）的规定。

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。隔离层材料宜选用沥青混凝土，厚度不宜小于 40mm。

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。

8.7.4 加铺层和旧混凝土面层应力分析，应按分离式双层板进行，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 3.0.8 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）的要求确定。

8.8 结合式混凝土加铺层结构设计

8.8.1 采用铣刨、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，并在清理后的表面涂敷黏结剂，使加铺层与旧混凝土面层结合成整体。

8.8.2 结合式加铺层厚度不宜小于 80mm，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采用钢纤维混凝土等防裂措施。

8.8.4 加铺层和旧混凝土板的应力分析，应按结合式双层板进行，计算方法见附录 B.2。

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）的要求确定。

8.9 旧沥青路面加铺水泥混凝土路面结构设计

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应设置调平层。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。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 式（B.2.7）计算确定，并按照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的厚度宜为 80mm~130mm，面板平面长度和宽度宜为 1.0m~2.5m。切缝深度为面层板厚的 1/4~1/3，缝宽 3mm~5mm，无需封缝。

附录A 交通荷载分析

A.1 车型分类

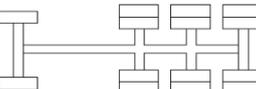
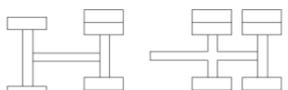
A.1.1 车辆轴型应根据表 A.1.1 规定按轮组和轴组类型分为 7 类。

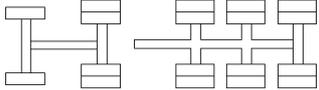
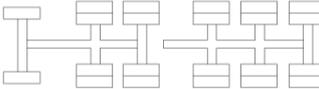
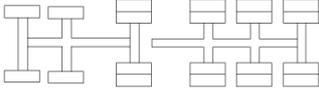
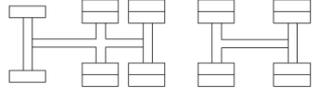
表 A.1.1 轴型分类

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（非双前轴）	15 型		
5 类	4 轴及以上整体式货车（非双前轴）	17 型		
6 类	双前轴整体式货车	112 型 115 型		117 型
7 类	4 轴及以下半挂货车（非双前轴）	125 型		122 型

8类	5轴半挂货车 (非双前轴)	127型 155型		
9类	6轴及以上半挂货车 (非双前轴)	157型		
10类	双前轴半挂式货车	1127型		1122型 1125型 1155型 1157型
11类	全挂货车	1522型 1222型		

A.2 交通数据调查

A.2.1 交通数据调查应包括交通量 AADTT 及其年平均增长率 g_r 、方向系数 DDF 、车道系数 LDF 、车辆类型组成、车辆轮迹横向分布系数 η 、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 DDF 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 LDF 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 LDF

单向车道数	1	2	3	≥ 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：* 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 η 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。

A.2.6 车辆轮迹横向分布系数 η

公路等级		纵缝边缘处
高速公路、一级公路、收费站		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：车道或行车道较宽或者交通量较大时，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 $ADTT$ 用式 (A.3.1) 计算。

$$AADT = AADTT \times DDF \times LDF \quad (A.3.1)$$

式中： $ADTT$ ——设计车道上 2 轴 6 轮及以上车辆年平均日交通量 (辆/车道/d)；

$AADTT$ ——2 轴 6 轮及以上车辆的双向年平均日交通量 (辆/d)；

DDF ——方向系数，实测或在 0.5~0.6 范围内选取；

LDF ——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。

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

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。

$$N_1 = ADTT \frac{n}{3000} \times \sum_i (k_{p,i} \times p_i) \quad (A.3.2-2)$$

式中： N_1 ——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 3000 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。

$$N_1 = ADTT \times \sum_k (k_{p,k} \times p_k) \quad (\text{A.3.3-2})$$

式中： p_k —— k 类车辆的组成比例（以分数计）。

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。

$$N_e = \frac{N_1 \times \left[(1 + g_r)^t - 1 \right] \times 365}{g_r} \times \eta \quad (\text{A.4.1})$$

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（次）；
 t ——设计使用年限（年）；
 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_1 ——设计车道初始年设计轴载日作用次数（轴次/车道/d）；
 η ——临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数，按表 A.2.6 选用。

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，当底基层为刚性或半刚性材料时则并入基层板，为粒料时则归入弹性地基。

3 复合板模型——由两种不同性能材料通过层间粘结组成的面层或基层，如果仅有面层则视为单层板，如果有面层和基层则视为双层板，面层或基层以下部分按弹性地基处理。

B.1.2 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的相同。

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，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），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 ——考虑设计使用期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数，按B.2.4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

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 $\sigma_{c.p_s}$ 、 $\sigma_{b.p_s}$ 可按式(B.2.2-1)计算。单面层板的荷载应力 $\sigma_{c.p_s}$ 也可按式(B.2.2-1)计算,此时 D_b 取0。

$$\sigma_{c.p_s} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} \quad (\text{B.2.2-1})$$

$$\sigma_{b.p_s} = \frac{\varphi D_b}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_b^2} M_{cb}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp\left(-0.264 \frac{k_v}{k_{v0}}\right) \quad (\text{B.2.2-2})$$

$$D_i = \frac{E_i h_i^3}{12(1 - \nu_i^2)} \quad (\text{B.2.2-3})$$

$$k_v^{-1} = \frac{h_3}{E_3} + \frac{3}{5} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \quad (\text{B.2.2-4a})$$

$$k_{v0}^{-1} = \frac{3}{5} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \quad (\text{B.2.2-4b})$$

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 ——分别为面层板与基层板的截面弯曲刚度(MPa×m³)，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；

φ ——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} ——分别为有、无夹层条件的双层板层间竖向弹簧系数(MN/m)，按式(B.2.2-4)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)；

d_s ——双轮距，一般可取为0.340m；

a ——一侧双轮载的当量荷载半径(mm)，按式(B.2.3-2) 确定，当常用轴载 $P_s=0.100\text{MN}$ 、 $q_s=0.57\text{MPa}$ 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 、 ν_t ——板底地基当量回弹模量(MPa)、泊松比，新建道路按B.2.5条确定，旧沥青混凝土路面上铺筑水泥混凝土面层按B.2.6条确定。

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.2.3 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。

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

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

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

式中： E_{ij} 、 ν_{ij} 、 h_{ij} ——复合面层($i=c$)、复合基层($i=b$)的上层($j=1$)、下层($j=1$)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.2.3-3) 计算。

B.2.5 路面结构设计使用期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；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 中式 (A.2.5) 计算；
 θ ——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： $\theta=0.065$ ；
 λ_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；
 ρ_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)。

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)；
 η ——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) 的中心点弯沉的测定结果按式 (B.2.7-1) 确定。

$$E_t = 18621/w_0 \quad (\text{B.2.7-1})$$

$$w_0 = \bar{w} + 1.04s_w \quad (\text{B.2.7-2})$$

式中： w_0 ——路段代表弯沉值 (0.01mm)，按式 (B.2.7-2) 计算；

\bar{w} ——路段弯沉平均值 (0.01mm)；

s_w ——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 (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 、 k_c ——同 B. 2. 1。

B.3 路面结构的温度应力

B.3.1 路面结构设计使用期内，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) 计算。

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

$$\xi_{tr} = -\frac{1000f_r}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24C_L \ln(h_c) - 0.153 \quad (\text{B.3.1-2})$$

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

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

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

$$l_\beta = \left(\frac{D_c D_b}{(D_c + D_b)k_{v,t}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{B.3.1-6})$$

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

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

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

α_c ——混凝土的线膨胀系数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)，根据粗集料的岩性按表E.3.2取用；

$T_{g,t}$ ——基准路面结构($h_c=0.22\text{m}$ ， $E_c=31000\text{MPa}$ ， $\alpha_c=1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ， $f_r=5\text{MPa}$ 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；

ζ_{lr} ——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 $r_{g,t}$ (m)，仍可按式(B.3.1-8)计算，此时 $D_b=0$ ；

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

l_β ——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3000MPa/m。

表 B. 3. 1 疲劳温度梯度和最大温度梯度

公路自然区划	II	III	IV	V	VI	VII
疲劳温度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	40~34	42~36	36~27	41~28	47~42	48~40

最大温度梯度 (°C/m)	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。

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 (°C/m)，查表B.3.1取用。

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，最大温度应力式(B.3.3-2)计算

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

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

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

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 ($h_{c1} + h_{c2}$)；

ξ_{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 ($h_{c1} + h_{c2}$)；

φ_{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、最大温度应力应分别在式 (B.3.3-1)、式 (B.3.3-2) 上乘以温度梯度修正系数 φ_{t2} 。

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

式中： h_a ——沥青混合料上面层厚度 (m)。

B.4 混凝土板厚度计算流程

1 按第 4 章进行路面结构组合设计，初拟路面结构，包括路床、底基层、基层和面层的材料类型和厚度，并按附录表 4.5.3 所列的水泥混凝土面层厚度建议范围，依据交通等级、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），应改选混凝土面层板厚度或（和）整调基层类型或（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 磨损厚度后，应按 10mm 向上取整，作为混凝土面层的设计厚度。

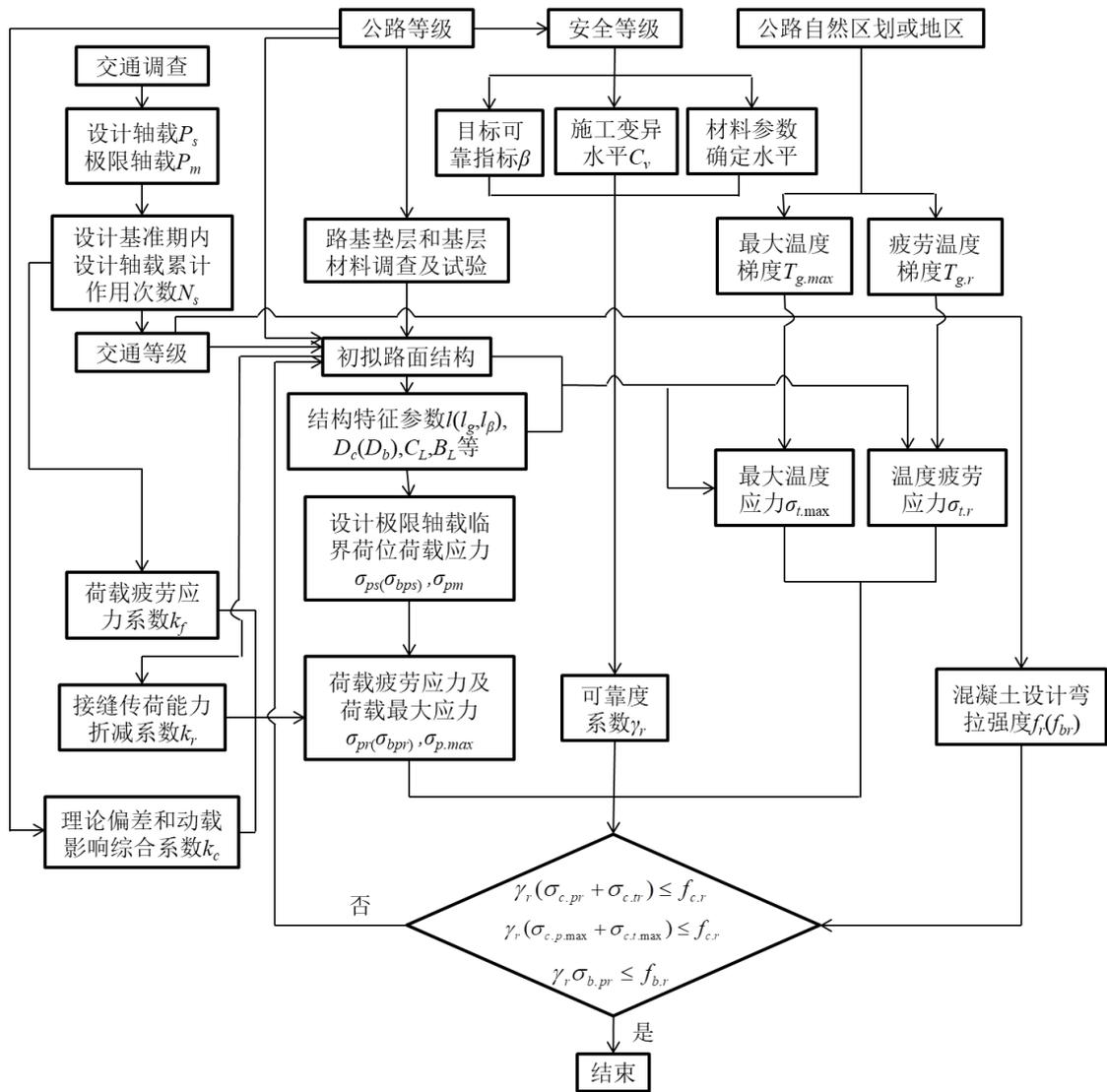


图 B.4 混凝土路面板厚度计算流程图

附录C 连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算

C.1 横向裂缝缝隙宽度按照式 (C.1-1) 计算确定。

$$b_j = 1000L_d \left(\varepsilon_{sh} + \alpha_c \Delta T_\zeta - \frac{c_2 f_t}{E_c} \right) \quad (\text{C.1-1})$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_\infty (1 - \varphi_a^3) \quad (\text{C.1-2})$$

$$\varepsilon_\infty = a_1 (1.51 \times 10^{-4} w_0^{2.1} f_c^{-0.28} + 270) \times 10^{-6} \quad (\text{C.1-3})$$

$$c_2 = c_a + \frac{c_a}{17000 f_c} + 6.45 \times 10^{-4} \frac{c_c}{L_d^2} \quad (\text{C.1-4})$$

$$c_a = 0.761 + 1770 \varepsilon_{t\zeta} - 2 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta}^2 \quad (\text{C.1-5})$$

$$c_b = 9 \times 10^8 \varepsilon_{t\zeta} + 149000 \quad (\text{C.1-6})$$

$$c_c = 3 \times 10^9 \varepsilon_{t\zeta}^2 - 5 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta} + 2020 \quad (\text{C.1-7})$$

$$\varepsilon_{t\zeta} = \alpha_c \Delta T_\zeta + \varepsilon_{sh} \quad (\text{C.1-8})$$

$$L_d = \frac{f_t - C_L \sigma_0 \left(1 - \frac{2\zeta_s}{h_c} \right)}{\frac{\mu\gamma_c + \frac{\sigma_{cg}\rho}{c_1 d_s}}{2}} \quad (\text{C.1-9})$$

$$\sigma_0 = \frac{E_c \varepsilon_{id}}{2(1 - \nu_c)} \quad (\text{C.1-10})$$

$$\varepsilon_{id} = \alpha_c h_c T_g (4.81 h_c^2 - 5.42 h_c + 1.96) + \varepsilon_\infty (0.245 e^{-5.3k_1 h_c}) \quad (\text{C.1-11})$$

$$\sigma_{cg} = 0.234 f_c \quad (\text{C.1-12})$$

$$c_1 = 0.577 - 9.50 \times 10^{-9} \frac{\ln \varepsilon_{t\zeta}}{\varepsilon_{t\zeta}^2} + 0.198 L_d \times (\ln L_d + 3.67) \quad (\text{C.1-13})$$

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；

ε_{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；

α_c ——混凝土线膨胀系数 (1/°C)，按表 7.5.9 选用；

ΔT_{ζ} ——钢筋埋置深度处混凝土温度与硬化时温度的最大温差 (°C)，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粘结-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 7.5.8 选用；

E_c ——混凝土弹性模量 (MPa)，可按表 7.5.8 选用；

ε_{∞} ——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；

φ_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 7.5.8 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；

σ_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；

ζ_s ——钢筋埋置深度 (m)；

h_c ——混凝土面层厚度 (m)；

μ ——混凝土面层与基层间的摩阻系数，按表 7.5.11 选用；

γ_c ——混凝土重度 (KN/m^3)，一般可取为 $24\text{KN}/\text{m}^3$ ；

σ_{cg} ——混凝土与钢筋间的最大粘结应力，可近似按式 (C.1-12) 计算；

ρ ——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粘结-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)；

ε_{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；

v_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（℃/m），可按该地区最大正温度梯度（查表 B.3.1）的 1/4 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 横向裂缝初始弯沉传荷系数按照式（C.2-1）计算确定。

$$k_{i,j} = 100 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{1 + 10^{\left[\left(0.214 - 0.183 \frac{a}{r_g} - \log(J_c) - R \right) / 1.18 \right]}} \right] \left(1 - \frac{k_{b,j}}{100} \right) \right\} \quad (\text{C.2-1})$$

$$\text{Log}(J_c) = -2.2e^{-\frac{J_s+11.26}{0.35}} - 28.85e^{-\frac{s-0.35}{0.38}} + 49.8e^{-\frac{J_s+11.26}{7.56}} \times e^{-\frac{s-0.35}{0.38}} \quad (\text{C.2-2})$$

$$S = 1.97h_c e^{-1.26b_j} \quad (\text{C.2-3})$$

式中： $k_{i,j}$ ——横向裂缝处初始弯沉传荷系数，按式（C.2-1）计算；

a ——单轴单侧双轮载的当量荷载半径(m)，按式(B.2.3-2)确定；

R ——加固钢筋所提供的残余荷载传递能力， $R=2.5\rho-1.25$ ；

$k_{b,j}$ ——基层对于裂缝处弯沉传荷系数的贡献；当使用粒料基层时，取 20%，当使用沥青处治或水泥处治基层时，取 30%，当使用贫混凝土基层时，取 40%；

E_t ——基层顶面当量回弹模量（MPa），按式（B.2.6-1）计算；

J_c ——横向裂缝的刚度，按式（C.2-2）计算；

s ——横向裂缝的抗剪切能力，按式（C.2-3）计算；

J_s ——行车道和路肩间的传荷系数，取值可按表 C.2 取用。

表 C.2 行车道和路肩间传荷系数

路肩类型	J_s
粒料	0.04
沥青混凝土	0.04
设拉杆的水泥混凝土	4

C.3 车辆荷载横向疲劳拉应力按照式（C.3-1）计算确定。

$$\sigma_{c.pr} = k_r k_f k_c k_q \sigma_{c.ps} \quad (\text{C.3-1})$$

$$\sigma_{c,ps} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} \quad (\text{C.3-2})$$

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 ——考虑接缝传荷、基层超宽和荷载内移等效应的应力折减系数，取 0.5~0.6；

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 1.1~1.3；采用沥青稳定碎石基层或无机结合料稳定类基层时，取 1.3~1.7。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 ——路面板厚度（m）；

M_{cb} ——面层板和基层板的总弯矩系数，按 B.2.3 条确定；

$D_c、D_b$ ——分别为面层板与基层板的截面弯曲刚度(MPa×m³)，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；

φ ——面层板与基层板的弯矩分配系数，按式（B.2.2-2）计算；

C.4 复合式路面中连续配筋混凝土下面层验算

C.4.1 横向裂缝缝隙宽度的计算参照 C.1，其中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 除应按该地区最大正温度梯度（查表 B.3.1）1/4 取用外，还应乘以式(B.3.4)的温度梯度修正系数 φ_{t2} 。

C.4.2 横向裂缝初始弯沉传荷系数的计算按照 C.2 执行。

C.4.3 连续配筋混凝土下面层顶部的荷载疲劳应力按式（C.3-1）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.4-1）计算，其它参数取值同 C.3。

$$\sigma_{c,ps} = \frac{h_c - d_{xc}}{\tilde{h}_c} \cdot \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \cdot \frac{6P_s}{\tilde{h}_c^2} \cdot M_{cb} \quad (\text{C.4-1})$$

式中： $\tilde{D}_c、\tilde{h}_c$ ——分别为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；

d_{xc} ——复合面层板的中性轴至下层底部的距离 (m)，按式 (B.2.4-3) 计算。

C.5 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_f 。当 $b_f \leq 0.5\text{mm}$ 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 按式 (C.2-1) 计算连续配筋混凝土层的裂缝初始弯沉传荷系数 $k_{i,j}$ 。当 $k_{i,j} \geq 95\%$ 时，满足要求；否则应增大板厚，重复上述计算至符合要求。
- 4 对于连续配筋混凝土路面，按式 (C.3-1) 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.4-1) 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 (3.0.7)。如果不满足，应增大板厚，重复上述计算至符合要求。
- 5 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。
- 6 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。

用词和用语说明

对执行规范条文严格程度的用词，采用以下写法：

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”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

附件

公路水泥混凝土路面设计规范

(JTG 3340—202*)

条文说明
(征求意见稿)

202* 北京

《公路水泥混凝土路面设计规范》条文说明

1 总则

1.0.1 《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2011)(以下简称原规范)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施工的实践经验,国内外取得了不少研究成果,使水泥混凝土路面的技术水平得到了提高。为反映近年来的进展,提高水泥混凝土路面的工程质量、使用品质和设计水平,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 本规范主要适用于等级公路的水泥混凝土路面新建和改建设计。等外公路和各类专用公路的水泥混凝土路面新建和改建设计,可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 水泥混凝土路面设计需要考虑的因素众多,包括公路的等级(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)、所需承受的交通荷载、材料与结构、当地的气候、路基(水文、地质)等,以及施工条件(建设)、养护条件、工程实践经验和环境保护的要求,只有通过深入的勘察,掌握当地的水文地质情况,通过试验确定材料和结构的实际性能,进而通过结构计算才能确定路面合适的结构组合及各层的厚度。

1.0.4 水泥混凝土路面设计内容由六部分组成:

1 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,并选择和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。

2 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。

3 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。

4 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)。

5 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。

6 设计方案的技术经济论证——对高等级、极重和特重交通荷载或有特定使用要求的公路混凝土路面提出的各备选设计方案,进行寿命周期费用分析,依据资金筹措情况、目标可靠度要求以及其他非经济因素,选择费用-效果最佳方案。

此外,还需进行路面表面特性设计,提供满足抗滑、耐磨或低噪声要求的路面表面的技术措施。

1.0.5 在我国境内,分布有面积不等的沙漠、膨胀土、黄土、盐渍土和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,比如沙漠干旱缺水、昼夜温差大、多风

少雨；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；多年性冻土遇水、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，应充分考虑其特殊性，切实结合当地的成熟经验和已取得的研究成果，采取相应的工程措施，防治该地区的一些特殊路面病害。

1.0.7 与本规范相关的标准和规范较多，如《公路工程结构可靠度设计统一标准》（GB/T 50283）、《公路自然区划标准》（JTJ 003）、《公路沥青路面设计规范》（JTGD50）、《公路排水设计规范》（JTJ 018）、《公路路基设计规范》（JTG D30）、《公路水泥混凝土路面施工技术规范》（JTG F30）、《公路路面基层施工技术规范》（JTJ 034）、《公路水泥混凝土路面养护技术规范》（JTJ 073.1）等。

2 术语、符号

2.1 术语

本节对本规范中出现的主要术语作了规定。其他有关公路工程专业性名词术语,可参阅《道路工程术语标准》(GBJ124)和《公路工程名词术语》(JTJ 002)。

2.2 符号

本节所列符号为本规范中的主要符号。为便于查阅,符号按“作用及作用效应”、“设计参数和计算系数”、“几何参数”及“材料性能”等分类列出,并依先拉丁字母、后希腊字母的顺序排列。

3 设计依据

3.0.1 公路工程结构的设计安全等级，系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。《公路工程结构可靠度设计统一标准》（GB/T 50283）规定的公路工程结构的设计安全等级为三个等级，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。本规范适用于各等级公路的水泥混凝土路面设计。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《公路工程结构可靠度设计统一标准》（GB/T 50283）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，条文还规定二级及二级以下公路可根据结构破坏可能产生的严重后果（如具有政治、经济、国防或抢险救灾重要作用，以及危及人的生命、造成经济损失、对社会和环境产生影响等），提高一级设计安全等级。

考虑到三、四级公路的实际使用寿命及功能要求，此次修订将三级公路的设计使用年限调低至 15 年，四级公路的设计使用年限调整为 10 年。

目标可靠度是所设计路面结构应具有的可可靠度水平。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 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，可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，可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，可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 20 世纪 90 年代在广东、浙江、安徽、河北和黑龙江等省的新建和已建混凝土路面 150 个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，所提出的变化范围可大体上代表我国公路混凝土路面施工技术及管理水平的已有（可达到）水平。

按选定的变异等级进行设计，同时设计文件也应提示施工时就应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不大于表 3.0.2 中相应等级的规定。

表 3.0.2 所列的材料性能和结构尺寸参数的变异水平等级为建议采用的，也可按施工技术、施工质量控制和管理要求达到和可能达到的具体水平，选用其他等级。降低选用的变异水平等级，需增加混凝土面层的设计厚度要求；而提高变异水平等级，则可降低混凝土面层的设计厚度或混凝土的设计强度要求。可通过技术经济分析和比较予以确定。但对于高速公路的路面，为保证优良的行驶质量，不宜采用高变异水平等级。

3.0.3 水泥混凝土路面结构分析基础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。对于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，但其解析解很难得到，需要采用数值方法（比如有限元法、边界元法等）求解，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。

通常，水泥混凝土路面结构自上而下包含面层板（一种或两种不同材料复合而成）、半刚性（或刚性）材料或粒料材料构成的基层和底基层（如果有）、垫层、路基等。为了结构分析方便且符合实际，通常简化为双层板或单层板模型。

3.0.4 本规范选定的水泥混凝土结构厚度设计方法，仅考虑满足路面的结构性能要求，并以设计使用年限内行车荷载和温度梯度综合作用产生的面层板疲劳断裂作为设计标准。

按荷载疲劳应力和温度梯度疲劳应力设计的面层板厚度，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。但在轴载谱中存在一些特重的轴载时，在最重轴载和最大温度梯度的综合作用下，有可能出现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。

路面结构可靠度可定义为，在规定的时段内，在规定的条件下，路面结构性使用性能满足预定水平要求的概率。因而，混凝土路面结构可靠度也可定义为，在规定的设计使用年限内，在规定的交通和环境条件下，行车荷载疲劳应力和温度梯度疲劳应力的总和不超过混凝土弯拉强度的概率，或者，最重轴载应力和最大温度翘曲应力的总和不超过混凝土弯拉强度的概率。据此，列出了式（3.0.4-1）和式（3.0.4-2）所示的极限状态设计表达式。

本次规范修订水泥混凝土路面结构可靠度系数 γ_r 有所调整，其内涵从原规范考虑结构重要性和施工变异性二个因素，扩展至计入路面材料参数确定水平的影响。式（3.0.4-4）中，混凝土强度、路床顶面回弹模量设计标准值是 85%分位值，板厚设计标准值是 50%分位值，因此，在混凝土强度、路床顶面回弹模量变异系数前项中有（ $\beta-1.04$ ），而板厚变异系数无此项。

3.0.5 贫混凝土或碾压混凝土基层具有比底基层大得多的刚度，因而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，由于基层经受的温度梯度小，相应的温度翘曲应力可以忽略不计，极限状态设计表达式中便删除了温度梯度疲劳应力部分。

3.0.6 目前，公路上的超载现象较为严重，特别是一些行驶特重轴载车辆或特种车辆的公路。由于水泥混凝土路面的疲劳损伤量对轴重很敏感（与轴重比成 16 次方的关系），对于特重轴载采用 100kN 设计轴载进行设计时，基准期内的设计轴载累计作用次数往往会达到天文数字。为了避免出现这种情况，对于极重交通等级的公路，建议选取货车中主导特重型车型的轴载作为设计轴载。

轴载换算公式是以等效疲劳损伤原则推导出的。对于同一个路面结构，轴载 P_i 和设计轴载 P_s 产生相同疲劳损伤时，相应的作用次数 N_i 和 N_s 之间的关系为：

$$\frac{N_i}{N_s} = \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{ps}} \right)^{1/\theta} \quad (1)$$

式中： σ_{pi} 、 σ_{ps} ——相应为轴载 P_i 和设计轴载 P_s 在同一个路面结构内产生的荷载应力；

θ ——材料疲劳指数，取值见附录 B.2.3 条。

以轴载与应力的关系式代入上式，即可得到轴载换算公式（3.0.6）。

双联轴驶过混凝土面层板时，临界荷位处会出现二次应力峰值；三联轴驶过时，则会出现三次应力峰值。由于相邻轴产生负弯矩，应力峰值要比单轴作用时小（约降低 10%~14%）。邻轴的应力影响（降低）程度，与基层刚度和接缝传荷能力等因素有关，计算分析较为复杂。同时，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，并可直接利用称重站的轴载数据。

3.0.7 连续配筋混凝土面层的纵向钢筋配筋率设计，主要考虑对冲断破坏进行控制，同时兼顾裂缝缝宽度和裂缝处传荷系数的控制。

冲断是指由两个间距很小（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 型裂缝。国内外众多学者的研究表明，冲断是 CRCP 最主要的破坏形式，严重影响路面的平整度和使用寿命。CRCP 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 CRCP 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，裂缝缝宽增大，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，可以减小裂缝缝宽，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宽、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（横向裂缝间距为 0.3~0.6m），冲断与平均裂缝间距之间没有明显的相关性，故不能通过控制横向裂缝缝宽、横向裂缝间距、横向裂缝处钢筋所承受的拉应力来有效控制冲断。

当两个横向裂缝间距较大时，裂缝缝宽较大，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宽也作为一项设计指标。根据美国力学经验法设计指南，对其提出容许值。

密集的横向裂缝之间纵向裂缝的形成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，这样可有效预防纵向裂缝的产生。

裂缝处传荷系数对板顶的应力影响较大，因而对于冲断影响较大，故将裂缝传荷系数也单独作为一项设计指标，参考美国力学经验法设计指南，对其提出容许值。

3.0.8 交通荷载分为 5 个等级，除了按设计使用年限内 100kN 设计轴载的累计作用次数分为特重、重、中等和轻 4 个等级外，极重级用以考虑承受特重轴载车辆或特种车辆作用（设计轴载超过 100kN）时的特殊情况。

3.0.9 除了列出水泥混凝土材料的弯拉强度标准值之外，本次规范修订增补了钢纤维混凝土、碾压混凝土、贫混凝土的弯拉强度标准值，以便这些材料用于铺筑基层时对其进行疲劳

断裂的检验与控制。

3.0.10 路基干湿类型划分，参见现行《公路路基设计规范》(JTG D30)。

对于季节性冰冻地区，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，形成冰棱体，体积膨胀致使路面发生胀起病害。为了防止路基上层土冻结，依据路基土的干湿类型和路基土的种类，要求路面结构层厚度满足最小防冻厚度的要求（表 3.0.10），以此来保证季节性冰冻地区的路面不发生冻胀病害。季节性冰冻地区的干燥路基，由于最大冰冻深度线达不到地下水毛细润湿区，因而可以不必考虑路面结构层最小防冻厚度要求。

路基土的冻胀性分类参见 4.2.5 条文说明。

3.0.11 路面表面抗滑性能是水泥混凝土路面设计的重要内容，本次修订增补了交工验收时初始横向力系数的要求。水泥混凝土路表应采用拉毛、拉槽、压槽或刻槽等方法筑做表面构造，确保交工验收时表面抗滑性能指标满足要求。

4 结构组合设计

4.1 组合原则和要求

4.1.1 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要求以及各层的厚度,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,应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——在季节性冰冻地区,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 已有公路路面的使用经验。

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。

4.1.2 路面结构层由面层、基层和底基层、垫层等结构层次组成,对各个结构层次有不同的功能要求。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。因而,为各个结构层所选择的组成材料,其性质要求和力学特性要满足各结构层的功能要求。

4.1.3 选择和组合结构层时,应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,会否引起上层底面产生过大的拉应力,会否使混凝土面层产生过大的温度和湿度翘曲应力;

2 无结合料的上层和下层的集料粒径和级配,会否引起水或细粒土的渗漏;

3 下面层次的透水性,会否引起渗入水的积滞和下层表面的冲刷;

4 层次间采用结合或隔离措施,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 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,还应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 路肩结构应含透水性层次,以便横向排除路面结构内的渗入水;

2 设置内部排水系统(排水基层排水系统或路面边缘排水系统)等。

为减少面层底面脱空区内的积滞水对基层顶面的冲刷,应选用抗冲刷能力强的材料做基层。基层采用无机结合料稳定类材料时,由于会产生收缩裂缝,还应考虑底基层的抗冲刷能

力。

4.2 路基

4.2.1 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。

路基不均匀变形主要在下述情况下出现：

- 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 季节性冰冻地区的不均匀冻胀；
- 5 排水不良的土质路堑、受水易于软化的软质岩路堑；
- 6 填料和填筑方式产生的不均质；
- 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，应在地基、填料、压实和排水等方面采取相应的措施。

4.2.2 路基是路面结构的基础。路面结构施工前应对路基进行验收，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，弯沉值的意义和计算与本规范参数体系是一致的。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约 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需将平衡湿度状态下的模量调整到近似标准状态下的路基回弹模量值 M_R 。本次规范修订在《公路沥青路面设计规范》（JTG D50）式（B.7.1）的基础上增加了相应的调整系数。弯沉验收应在不利季节进行，当在非不利季节进行验收时，应考虑折减系数 K_η 。路床顶面处治层修正系数 K_x 是以处治层顶面用 $D=0.76\text{m}$ 承载板测得路床顶面当量回弹模量达到路床最小回弹模量要求值为条件，回归弹性层状体系理论解的结果得到的，适用范围为粒料和灰土处治层： $h_x=0.1\sim 0.4\text{m}$ ， $E_x=100\sim 400\text{MPa}$ 。

4.2.3 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均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。为增加路基稳定性，协调路面板与路基变形，减少差异沉降带来的基层脱空、面板纵向裂缝等病害，这些路段的路床材料性能应加强。粗粒土按土的工程分类标准指的是通过 0.075mm 筛孔的质量小于 50% 的土。受水易于软化、崩解的土原岩一般包括泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、页岩等。

4.2.4 当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，路面板或无机结合料稳定类结构层与路基之间的刚度差可能过大，会引起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。对于低等级公路或交通量较小的道路，粒料类结构层直接作为基层，对于高等级公路或交通量较大的公路，粒料层可作为半刚性基层下的底基层，或为满足气候、水文条件而设置的垫层。粒料层材料还包括多类回收材料，对于低等级、等外级的水泥路面，也可选用废旧沥青混合

料、混凝土破碎料和其他建筑废料。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，还可在路基顶面设置土工材料防水层。

4.2.5 路基土冻胀与三方面因素有关：路基土的易冻胀性、冰冻线的深度和离地下水位的距离。

美国陆军工程师团按土的冻胀性将其分为4类：

- 1 无冻胀到低冻胀土——小于 0.075mm 颗粒少于 10%的含细料砾石；
- 2 低冻胀到中等冻胀土——小于 0.075mm 颗粒占 10%~20%的含细料砾石，小于 0.075mm 颗粒占 6%~15%的含细料砂；
- 3 易冻胀土——小于 0.075mm 颗粒超过 20%的含细料砾石，小于 0.075mm 颗粒超过 15%的含细料砂（不包括很细粉质砂），塑性指数小于 12 的粘土；
- 4 很易冻胀土——粉质土，小于 0.075mm 颗粒超过 15%的很细粉质砂，塑性指数大于 12 的粘土。

地下水位距路床顶 1.5~3m 时，易冻胀土或很易冻胀土路基会由于地下水的充分供应而出现冻胀。

季节性冰冻地区可以采用两种方案防止路基产生冻胀：

- 1 整个冰冻线深度内采用不易冻胀的填料；
- 2 容许冰冻线深达部分易冻胀土层内，但这部分土层所产生的不均匀冻胀不会使路表面的不平整度超出容许值。

4.3 垫层

4.3.1 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，功能层包括夹层、隔离层及垫层等。垫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。主要出现在季节性冰冻地区路面结构厚度小于最小防冻厚度要求时，设置防冻垫层可以使路面结构免除或减轻冻胀和翻浆病害。在路床土湿度较大的挖方路段上，设置排水垫层可以疏干路床土，改善路面结构的支承条件。为改善路基支承条件（如减少不均匀变形）而设置的其他层次，属于路基范畴。

4.3.3 除砂、砂砾等颗粒材料外，在供应条件许可时，防冻垫层还可采用煤渣、矿渣等隔温性材料。

4.4 基层和底基层

4.4.1 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，导致路面不平整，并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。然而，其作用只能在基层未受冲刷的前提下才能得到保证，同时，其效果不如在接缝内设置传力杆。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。

4.4.2 基层和底基层可以按组成材料分为无机结合料类（包括贫混凝土、碾压混凝土、水泥稳定碎石、开级配水泥稳定碎石和石灰-粉煤灰稳定碎石等）、沥青结合料类（包括沥青混凝土、沥青稳定碎石和开级配沥青稳定碎石等）和粒料类（包括级配碎石、级配砾石、未筛分碎石等）三大类型。

基层的受冲刷程度与水的渗入、交通荷载作用的繁重程度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，它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，最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，其次是水泥稳定碎石（水泥剂量5%）基层，再次是低剂量水泥稳定碎石（水泥剂量3.5%）和沥青稳定碎石（沥青含量3%）基层，较易冲刷的是二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4.4.2-1提出了各类基层的适用场合。

表4.4.2-2还针对各类基层的特性分别提出了适宜选用的底基层类型。通常情况下，底基层宜采用粒料类材料。基层采用无机结合料类材料时，底基层没有必要再采用刚度（模量）较大的无机结合料稳定碎石类底基层，以提高路面结构的弯曲刚度。并且，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。

4.4.3 为增加路面结构的弯曲刚度，降低面层的荷载应力，承受极重、特重或重交通荷载时，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，在基层下应设置底基层。而对于承受中等或轻交通荷载的路面，面层和基层通常可提供足够的弯曲刚度，因而可以不设底基层。

4.4.4 无机结合料类基层会出现收缩裂缝，为水的下渗和下卧层（底基层或路床）遭受冲刷提供条件。为了避免或减轻因冲刷而产生的脱空和唧泥等病害，应控制粒料中小于0.075mm的细料含量。

4.4.5 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，设置沥青混凝土夹层能够有效缓解这种状况。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，应在基层上铺设透层和封层。此外，设置封层还可降低面层与基层的粘结程度，减小摩阻力。对于封层和透层而言，最重要的是平整和防水，可选择沥青类材料。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，本次修订予以删除。

4.4.6 多雨地区（年平均降水量800mm~1000mm以上），通过接缝或裂缝渗入混凝土路面内的水量相当大。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（如密级配粒料或水泥稳定碎石），或者，在底基层上铺设沥青类封层或不透水的土工织物。

4.4.7 各类基层和底基层的厚度范围，应依据结构层成型、施工方便（单层摊铺碾压）或排水要求等因素选择，一般适宜压实厚度参见表4.4.7。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条件决定是否需要采用分层铺筑和压实。

表 4.4.7 各种材料基层和底基层的结构层适宜施工层厚

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	50~75
	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

4.4.8 贫混凝土或碾压混凝土基层与底基层的刚度比较大,有可能产生较大的层底拉应力。因而,需要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调节因素,这类基层不宜采用过大的强度值,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。

4.4.9 路表水的设计渗入量和排水基层的厚度计算,可参阅现行《公路排水设计规范》(JTGD33)。按部分观测资料,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。

4.4.11 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。

4.5 面层

4.5.1 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。

4.5.2 其他面层类型可依据适用条件按表 4.5.2 选用。

表 4.5.2 其他面层类型选择

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、 服务区停车场

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，碾压混凝土不宜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。

4.5.3 表 4.5.3 所建议的面层厚度参考范围，是在对标准的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 4.2~4.4 节对路床、垫层、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。所提出的表 4.5.3 可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、垫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，可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。

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，厚度范围可在表 4.5.3 的基础上减小 20mm。

表 4.5.3 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		

4.5.5 依据国外的经验，增加 40mm 厚的沥青混凝土上面层约可减薄 10mm 混凝土下面层。对于隧道复合式路面或水泥混凝土桥面板上的沥青铺装，水泥混凝土表面的处治及防水粘结层的设置是保证复合式路面耐久性的重要措施。为提高粘结性，水泥混凝土表面可采用抛丸、精铣刨等措施后先喷洒一层底层油（同黏层材料），可选用改性乳化沥青 PCR，然后再实施封层，封层可采用热喷 SBS 改性沥青同步碎石封层。

4.5.6 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，两种方式都应保证铺装层与梁板或调平层的结合牢固，为此一方面需对预制梁顶面或调平层顶面进行处治，增加粗糙度，另一方面需使铺装层钢筋网与梁板剪力筋或调平层预埋钢筋焊接。通过两方面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。

4.5.7 为改善水泥混凝土路面的使用功能，如提高抗滑性、降低噪音，国外水泥混凝土路面早已有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一环之一，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为高,特别是磨光值指标。高性能粗集料仅设置于表层即可,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。目前国内露石混凝土还未达到大规模推广的条件,在应用时需进行尝试和技术积累。

4.6 路肩

4.6.1 路肩为行车道路面结构提供侧向支承,同时,它也供车辆临时或紧急停靠,并在路面改建或维修时作为便道使用。此外,观测资料表明,在主车道上行驶的车辆中,有6%~9%的车辆右侧车轮越出车道线行驶在路肩上。因此,路肩铺面结构应具有足够的承载能力。

路肩铺面应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 行车道混凝土面层加宽后,可以减少车辆轮载作用于面层板边缘的几率,从而降低荷载应力,增加面层的疲劳寿命。

5 接缝设计

5.1 一般规定

5.1.1 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。

5.1.2 纵向接缝间距一般按车道线设置,这样可使路面美观。带有路缘带的高速公路和一级公路,板宽可按车道和路缘带的宽度确定,车道和路缘带间不设纵缝,也可考虑施工方法等因素适当调整。

5.1.3 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)与短边之比不宜大于 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,所选横缝间距应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,此时应降低基层刚度。换言之,当选用半刚性基层时,水泥板块划分应尽量选择小板,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,行车道(包括路缘带)宽度通常为 3.75m~4.5m,硬路肩宽度为 2.5m 或 3.0m。纵缝通常按车道线设置,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。此时可减小行车道和硬路肩的长宽比,行车道板块可接近正方形。

5.2 纵向接缝

5.2.1 纵向接缝,无论是施工缝或缩缝,均应在缝内设置拉杆,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。

对于低等级道路,当路面宽度小于 6.0m 时,可不设置纵向缩缝。纵向缩缝的槽口深度应大于纵向施工缝,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擦系数,大于粒料类基层,混凝土干缩或温缩时受摩擦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。

5.2.2 纵缝与路线中线平行,板的长边与车辆行驶方向保持一致,可使行车荷载尽量少驶纵缝,减少板处于临界荷位受力状态的几率。在路面宽度变化的路段内,不可使纵缝的横向位置随路面宽度一起变化。其等宽部分必须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应由零增加到 1m 以上，以避免出现锐角板。

5.2.3 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 5.2.3 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 5.2.3 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，应依据具体情况调整缩缝附近的拉杆间距。

5.3 横向接缝

5.3.2 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，通常与斜向接缝配合，可导致车辆的共振响应，乘车舒适性较差，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，还应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，则宜设置传力杆。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。除非保证传力杆的安装精度，否则建议传力杆采用前置法施工。

5.3.3 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，切缝深度宜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，接缝深度宜选择高限。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。而国外的经验，如美国各州也多选用背衬垫条，因此本条款对原规范的浅槽口构造做了相应修订。

5.3.4 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 20mm~25mm，可供膨胀位移的有效间隙不到 10mm。因而，应依据对膨胀量的实际估计来决定需要设置胀缝数。

传力杆一半以上长度的表面涂敷沥青膜，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。

传力杆应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。

5.3.5 对于传力杆的材料，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。这些传力杆材料的国内应用较少，有待进一步研究，特别是在尺寸、间距、长期性能方面以及在胀缝中的应用效果等方面。

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) 未考虑刚性或半刚性基层传荷效应的影响，研究发现，刚性或半刚性基层将起到分担传荷的作用，可显著降低传力杆上传递的荷载值。当基层刚度与面层刚度比 $D_b/D_c=0.10$ 时，传力杆上传递的荷载值可降低 44%，当 $D_b/D_c=0.20$ 时，传力杆上传递的荷载值可降低 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，纳入了刚性或半刚性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，传力杆直径宜在表中推荐值上加大一号；

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；

标准轴载作用次数：极重交通取 5×10^6 万次，特重交通取 1×10^6 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 LTE_w ：缩缝大于 85%，胀缝大于 80%。

5.4 交叉口接缝布设

5.4.1 布设交叉口的接缝时，不能将交叉口孤立出来进行，应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。

5.4.2 应将胀缝设置在次要道路上。

5.5 端部处理

5.5.2 本条文对搭板的设计未作具体规定,设计时,应与桥涵设计人员联系配合。在混凝土面层与桥台之间铺筑混凝土预制块面层或沥青面层过渡段,是一项过渡措施,待路基沉降稳定后,再铺筑水泥混凝土面层。

5.5.3 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,沥青层最小厚度应大于 4cm。对过渡板表面应进行处理,以加强沥青层与过渡板的粘结。图 5.5.3 依据国内外的经验,并参照英国标准图制定。

5.5.4 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,应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,由此可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,可采用宽翼缘工字钢梁接缝。近年来我国有将桥梁伸缩缝(毛勒缝)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,设计时可作为一种选择,本次修订给出了参考图。

5.6 填缝材料

5.6.1 胀缝接缝板的技术要求,参见现行《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30)。

5.6.2 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(场)带、站台等低速路段。

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规范》(JTG 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,设计时应适当提高技术标准 and 指标。

6 混凝土面层配筋设计

6.1 普通混凝土面层配筋

6.1.3~6.1.4 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 6.1.3 和图 6.1.4)。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,设计时可通过论证参考选用。

6.2 钢筋混凝土面层配筋

6.2.1 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。据此推导出式(6.2.1),混凝土的容重取为 24kN/m^3 ,钢筋的容许应力取 0.75 倍屈服强度。

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%,最高可达 0.25%。

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,导致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。

6.3 连续配筋混凝土面层配筋

6.3.1 条文依据国内外经验,提出的纵向钢筋配筋率范围可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%,原规范推荐的配筋率偏于保守,本次修订进行了调整。

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%,本版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,其配筋率可适当增加,以减小裂缝的缝隙宽度。

6.3.2 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,也可按钢筋混凝土面层的配筋原则和要求,采用式(6.2.1)计算确定。此外,也可按纵向钢筋用量的 1/5~1/8 取用。

6.3.4 纵向钢筋的埋置深度宜尽量靠近面层顶面,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。

7 材料组成与参数要求

本次修订调整了原规范按材料结构层位由下至上展开的章节叙述方式,根据材料类型将组成要求和设计参数放在一起,方便查阅。

为保证水泥混凝土路面、沥青路面规范路面结构层位组成的一致性,删除了垫层材料章节,按照材料类型将防冻层、排水层材料纳入粒料章节。

7.1 一般规定

7.1.1 增加了路面材料设计的总体要求。

7.1.2 在《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTGF30)、《公路路面基层施工技术规范》(JTGT F20)和《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40)中,对各种原材料的品质和各项技术指标都做出了明确的规定,对各类混合料的组成设计也提出了相应的方法。本规范对此不再做一般性重述。

7.1.3 新增三水平材料设计参数取值方法。水平一:通过室内试验实测确定;水平二:利用已有经验关系式确定;水平三:参照典型数值确定。

7.1.4 明确了三水平材料设计参数取值方法的适用范围。

7.2 粒料类材料

7.2.1 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》(JTGT F20)的修订成果。

7.2.6 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。

7.2.8 参考《公路沥青路面设计规范》(JTGD50),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。

7.3 无机结合料稳定类材料

7.3.1~7.3.3 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，其级配还应综合考虑公路等级和基层层位加以确定。而水泥稳定粒料中水泥用量可根据公路等级采用水泥剂量和强度双指标控制。

7.3.4 本条文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。

7.3.5 参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)，增加了无机结合料稳定类材料的 7d 无侧限抗压强度要求。

7.3.6~7.3.7 参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)，增加了无机结合料稳定类材料的弹性模量和弯拉强度的确定方法。

7.4 沥青结合料类材料

7.4.2 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。

7.4.4 参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)，增加了沥青结合类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(7.4.4)模量预估公式来源于交通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为 5Hz 下的典型值范围。

7.5 水泥混凝土材料

7.5.1 该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、广东粤冠高速等实体工程应用情况，将上层厚度应不小于总厚度的 1/3 调整为不小于 60mm。再生混凝土的收缩性一般较大，应重视再生混凝土材料设计。

7.5.2 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放宽至 2.0，但路面的抗滑性能和平整度应满足规范要求。

7.5.3 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。

7.5.7 混凝土性质参数的变异性，一部分来自实验室的试验误差，另一部分来自混合料组成的变异和施工(拌和、摊铺、振捣和养生)质量控制和管理的变异。后一部分变异性的影响，已反映在结构设计内(条文 3.0.4)。而前一部分变异性的影响，应在混凝土配合比设计时考虑，计入混凝土试配弯拉强度的要求值。

7.5.8 确定了水泥混凝土材料的弯拉强度和弹性模量在第一、第三水平下的取值方法和数据。对于第二水平，由于水泥混凝土材料（包括普通混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土、碾压混凝土和贫混凝土等）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，这些因素对各项强度和弹性模量指标有不同程度的影响，难以在各项指标之间建立理论转换关系式。一些研究者通过大量试验在各项指标间建立了许多经验关系式。

20 世纪 90 年代初，交通部公路科学研究所等单位对碎石混凝土和卵石混凝土进行了弯拉强度和立方体抗压强度试验，依据测定结果整理出下述回归关系式：

$$f_r = 0.443f_c^{0.71} \quad (n = 306, R = 0.86) \quad (1)$$

利用这个关系式，由抗压强度预估弯拉强度时，会得到偏高的弯拉强度值，而由弯拉强度预估抗压强度时，则会得到偏低的抗压强度值。比较其他研究者的一些试验结果，选用处于中间值的经验关系式：

$$f_r = 0.438f_c^{2/3} \quad (2)$$

式中的抗压强度为圆柱体试件的试验结果，立方体试件的强度一般比圆柱体试件大 10%~15%，则依据式 (2) 并考虑到立方体试件的强度增大后，计算列出了表 7.5.8 中的弯拉强度与抗压强度值的对应关系。

美国力学经验法设计指给出如下由抗压强度预估弯拉强度的公式：

$$f_r = 0.7888f_c^{0.5} \quad (3)$$

20 世纪 80 年代初，由江苏省交通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下述经验关系式：

$$f_r = 1.87f_{sp}^{0.87} \quad (n = 204, R = 0.82) \quad (4)$$

美国力学经验法设计指南中提出，水泥混凝土的劈裂强度一般变动于 0.6~0.7 倍弯拉强度的范围内，并建议劈裂强度采用 0.67 倍弯拉强度，即式 (5)。

$$f_{sp} = 0.67f_r \quad (5)$$

式 (4) 反映的关系，劈裂强度变动于弯拉强度的 (0.52~0.63) 范围，略低于美国力学经验法的建议值。综合这两方面的数据，列出了表 7.5.8 中的弯拉强度与抗拉（劈裂）强度值的对应关系。

20 世纪 80 年代中期，江苏省公路管理局等单位对花岗岩碎石混凝土、石灰岩碎石混凝土和砾石混凝土进行了弯拉强度和弯拉弹性模量（挠度法）试验，由测定结果回归分析得到下述经验关系式：

$$E_r = 1.44f_r^{0.46} \quad (6)$$

依据式 (6)，列出了表 7.5.8 中弯拉弹性模量值的经验取值。美国力学经验法设计指南给出的抗压强度与弹性模量的换算公式：

$$E_c = 0.044\gamma_c^{1.5}f_c^{0.5} \quad (\gamma_c \text{ 为混凝土重度}) \quad (7)$$

建议在实践中根据当地实测混凝土抗压强度、弯拉强度、劈裂抗拉强度及弹性模量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。

7.5.9 表 7.5.9 中的混凝土线膨胀系数，主要参照国外的试验数据。国外在混凝土中通常掺加粉煤灰。若混凝土中不掺加粉煤灰，表中混凝土线膨胀系数可相应增加 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

7.5.10~7.5.11 钢筋混凝土路面与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。

表 7.5.10 中的钢筋混凝土路面面层与基层间动态摩阻系数经验参考值，依据 1993 版本美国 AASHTO 路面设计指南列出。表 7.5.11 中的连续配筋混凝土路面面层与基层间静态摩阻系数经验参考值，依据美国 AASHTO 力学经验法路面设计指南列出。

7.6 钢筋

表 7.6.1 系根据《钢筋混凝土用钢》(GB/T 1499.1、GB/T 1499.2) 列出，其中，HPB300 取自 GB/T 1499.1—热轧光圆钢筋，HRB400、HRB500、HRB600 取自 GB/T 1499.2—热轧带肋钢筋。

《钢筋混凝土用钢》(GB/T 1499.1、GB/T 1499.2) 取消了 HPB235 热轧光圆钢筋、HRB335 热轧带肋钢筋两种牌号，增加了 HRB600 热轧带肋钢筋牌号。根据《钢筋混凝土用钢》(GB/T 1499.2-2018)，钢筋强度和弹性模量经验参考值做了相应调整。

7.7 泊松比

新增了各类材料泊松比典型值的汇总表，表 7.7.1 系根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D 70) 列出。

8 加铺层结构设计

8.1 一般规定

8.1.1 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,它要比新建路面的设计更为复杂。为此,本条规定了加铺层设计之前应对旧混凝土路面进行技术调查的主要内容。

8.1.2 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肇因。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 加铺层的铺筑通常是在边通车、边施工的条件下进行的,设计方案应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 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。

8.1.5 挖除的水泥混凝土旧板的利用,可分为3类:①再生集料,即可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 路面损坏状况是路面结构的物理状况和承载能力的表现反映。水泥混凝土路面的病害有面层断裂、变形、接缝损坏、表层损坏和修补损坏5大类,共17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。

错台量调查宜采用错台仪测试。对于断板率较低的高速和一级公路,应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它等级公路,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,可仅采用断板率作为评定指标。

8.2.2 依据断板率和平均错台量两项指标将路面损坏状况划分为优良、中、次、差四个等级,以便合理选择加铺层的结构形式。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。

8.3 接缝传荷能力和板底脱空状况调查评定

8.3.1 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。弯沉测试是一项无破损试验，具有测点数量多、对交通干扰少的优点，在旧混凝土路面的接缝传荷能力、板底脱空状况以及基层顶面当量回弹模量等的调查评定中得到了广泛的应用。

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）产生的脉冲力可较好地模拟行车荷载对路面的作用，可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，接缝传荷能力的测定应选择在接缝缝隙张开而板角未出现向上翘曲变形的时刻，板角弯沉测定应选择在白天正温度梯度的时段，而板中弯沉的测定则应选择在出现负温度梯度或正温度梯度很小的夜间至清晨时段进行。

其测定位置如图 8-1 所示。

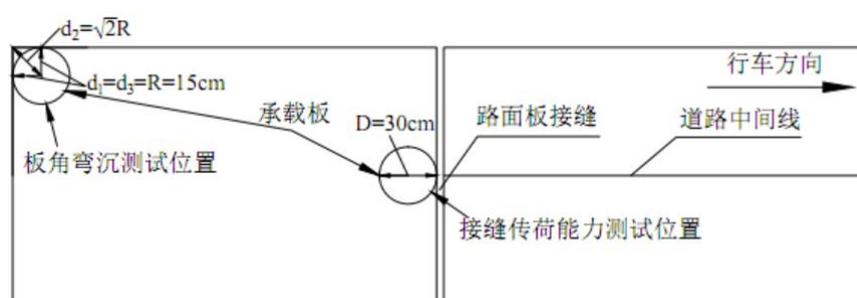


图 8-1 接缝传荷能力与板角弯沉测试荷载位置示意图

8.3.2~8.3.3 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 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 FWD 仪进行多级荷载作用下的弯沉测试，利用测定结果，可点绘出荷载—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，近年来多采用板角弯沉值来评估板底脱空状况，工程检测经验表明，当采用半刚性基层的水泥混凝土路面板板角弯沉值 ≥ 15 （0.01mm），采用粒料基层的水泥混凝土路面板板角弯沉值 ≥ 80 （0.01mm），板底可能存在脱空。

利用雷达检测板底脱空，应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，并与钻芯或其它脱空检测手段进行标定，方可进行全线雷达检测。

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 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应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。

8.4.2 式(8.4.2-1)是 20 世纪 80 年代初,由江苏省交通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。

原规范推荐的关系式是 20 世纪 80 年代后期,由空军工程设计研究局在使用 20 年以上的机场旧碎石和卵石混凝土道面上分别锯切标准小梁试件和钻取圆柱体试件进行弯拉强度和劈裂强度试验,对试验结果进行回归分析后整理得到的。试件样本数 114 个,相关系数 0.66。该关系式存在公式形式上的缺点,当劈裂强度为零时,弯拉强度不为零,当弯拉强度小于 2.64MPa 时,劈裂强度为负值。这可能是由于旧道面的强度变化范围很小,再用线性回归整理,使公式形式不合理,并在外延应用时会出现问题。

8.4.4 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 FWD 仪实测路表弯沉,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一一对应的关系。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的有限元计算分析(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:

$$E_t = 100e^{(3.60+24.03(1386w_0/P)^{-0.057}-15.63SI^{0.222})}$$

式中: P —测试荷载(KPa);

SI 和 w_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之以室内材料试验,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,应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 20m~50m,评定路段内的总测点数应不小于 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 按路段综合评定结果，参照表 8.5.1 选定采用何种加铺结构或改建方案。

表 8.5.1 旧水泥混凝土路面加铺改建方案

接缝传荷能力评价等级		优良		中		次	差
		优良	其他	中等以上	其他		
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。

8.5.2 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。

8.5.3 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，但应先对旧面层进行处治后再铺设隔离层。

8.5.4 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。

8.5.5 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，应对旧面层混凝土进行破碎、冲击碾压及打裂压稳等处理，并用作改建路面的基层、底基层或垫层。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，应在路况调查时对道路及周围构造物如房屋、桥梁、涵洞、地下管线等的位置与状态进行详细调查，合理设计破碎施工方案。

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。打裂时应避免过度破坏，不宜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。

碎石化后旧路面表面最大尺寸不应超过 75mm，中间层不应超过 225mm，底部不应超过 375mm，可作为改建路面的基层或底基层，其碎石化后旧路面顶面的回弹模量一般不小于 200MPa。

8.5.7 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，应进行钻芯取样、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相当高的，特别要满足压浆材料无收缩乃至产生微膨胀，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。

8.5.8 旧水泥混凝土路面处治后，加铺前应检测面板接缝传荷能力与板角弯沉。本条文规定了接缝传荷能力和板角弯沉值要求，其目的在于控制板底脱空处治效果。也有工程实践认为应满足接缝或裂缝处的板边弯沉小于 0.20mm，弯沉差小于 0.06mm，在正常的基础支承状态下，弯沉差为 0.06mm 时所对应的传荷系数为 75%。

8.6 沥青加铺层结构设计

8.6.3 因沥青加铺层较薄，层间模量比大，应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、推移与反射裂缝。沥青加铺层与原水泥混凝土面板之间宜洒布同标号热沥青或改性沥青。原水泥混凝土面板可采用刻槽、铣刨等方法处理。

8.6.4 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应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 80mm~120mm，级配碎石的厚度一般为 100mm~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可参考图 8-2。

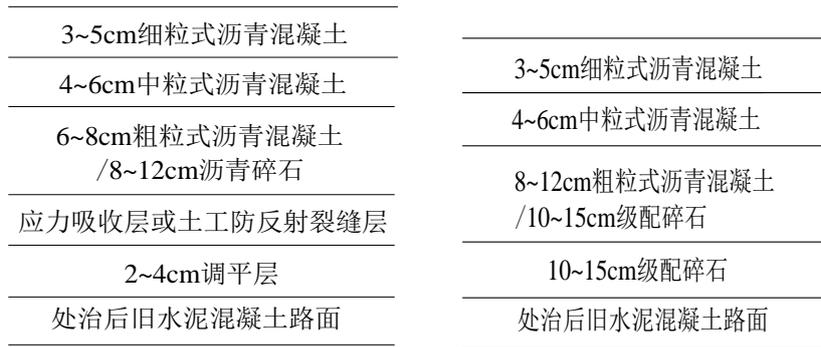


图 8-2 沥青加铺层典型结构 I

(2) 应力吸收层，包括 STRATA、SAMI、ISAC 等，厚度为 20mm~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) 聚酯玻纤布，由玻璃纤维和聚酯纤维组成的一种玻纤复合防裂材料，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；

(4) 土工织物夹层，包括聚丙烯或聚脂织物以及聚乙烯、聚脂无纺布，其作用原理与粘胶沥青应力吸收夹层相同；

沥青加铺层典型结构可参考图 8-3。

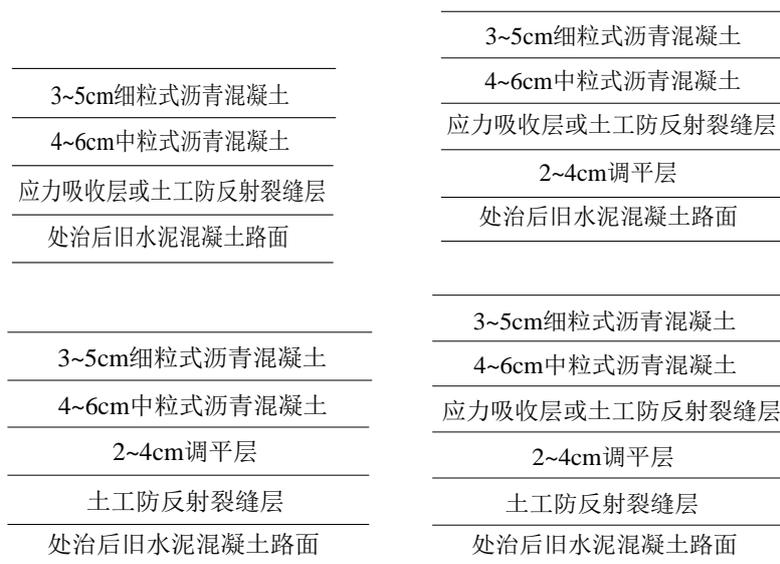


图 8-3 沥青加铺层典型结构 II

8.6.6~8.6.7 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很有限，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，也可按新建沥青路面进行加铺层结构设计。

8.7 分离式混凝土加铺层结构设计

8.7.1~8.7.3 分离式加铺层与旧混凝土面层之间设置了隔离层，可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，加铺层的接缝型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。

8.7.4 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

8.8.1~8.8.3 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乳胶和环氧树脂等高强度的黏结剂，使加铺层与旧混凝土面层黏结为一个整体。高速公路、一级公路可采用聚合物水泥、有机硅渗透型涂层等处理，二级及以下公路可采用水泥浆处理。

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。

8.9 旧沥青路面加铺水泥混凝土路面结构设计

8.9.1~8.9.4 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、拥包等病害应进行铣刨，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。

沥青层的铣刨厚度按损坏类型、严重程度及原沥青层的厚度确定。铣刨后的沥青混凝土面层应保留 80mm~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宜为 1m~2.5m，通常取面板厚度的 10 倍~20 倍。此外纵缝应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

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,在原规范的基础上增加了双联轴(每侧单轮胎)、双联轴(每侧各一单轮胎、双轮胎)和三联轴(每侧单轮胎)三种轴型,其余的四种基本轴型如单轴(每侧单轮胎)、单轴(每侧双轮胎)、双联轴(每侧双轮胎)和三联轴(每侧双轮胎)则不变,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。

A.2 交通数据调查

交通数据调查是确定道路设施规模(容量)以及路面结构设计的基础,包括交通量AADTT及增长率 g_r 、方向系数DDF、车道系数LDF、车辆类型组成、车辆轮迹横向分布系数 η 、轴组组成和轴重等。可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.3 车辆当量设计轴载换算

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)荷载,在路面板临界荷位处产生的荷载应力均较上述四种轴型的荷载应力小不少,换算成当量单轴双轮荷载作用次数很小,可略去不计,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倍(实际平均1.8倍左右)和3倍(实际平均2.6倍左右)单轴双轮荷载换算成当量设计轴载作用次数,则多算了这部分轴载(每侧双轮)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。

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 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。

B.2 路面结构的荷载应力

B.2.1 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~B.2.3 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： $h_c=0.17\text{m} \sim 0.40\text{m}$ 、 $E_c=20000\text{MPa} \sim 40000\text{MPa}$ 、 $\nu_c=0.15$ 、 $h_b=0.14\text{m} \sim 0.22\text{m}$ 、 $E_b=1500\text{MPa} \sim 20000\text{MPa}$ 、 $\nu_b=0.25$ 、 $k_0=40 \sim 240\text{MPa/m}$ 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%。

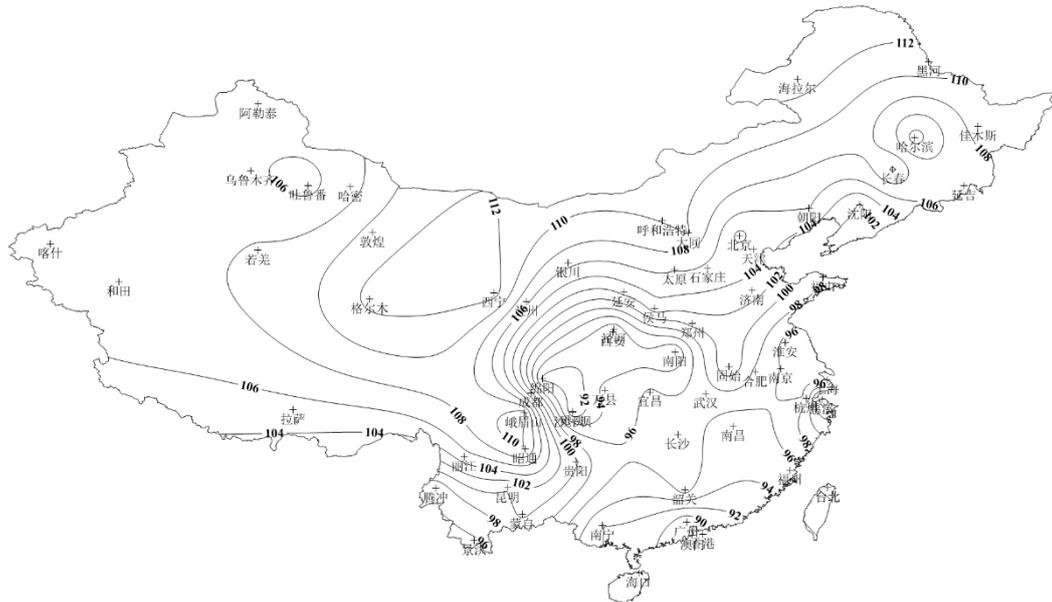
B.2.4 两种不同力学性能材料组成的层间连续的面层结构，上面层往往具有更佳的使用性能，例如新混凝土加铺层，舒适性好的沥青混凝土，低噪声的橡胶混凝土、多孔混凝土，耐磨露石混凝土，高强的钢纤维混凝土，粘结性好的聚合物混凝土等。原规范中基层和底基层同为刚性或半刚性材料时，处理为水平光滑分离式叠合板，本次修订为层间连续的复合基层板。

B.2.5 对钢纤维混凝土弯曲疲劳方程形式作了调整，新形式对钢锭铣削型、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 3D 钢丝型钢纤维混凝土： $a_f \approx 8$ 、 $b_f \approx 0.2$ ；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，主要取决于钢纤维掺量和混凝土强度，应根据经验并经试配确定。

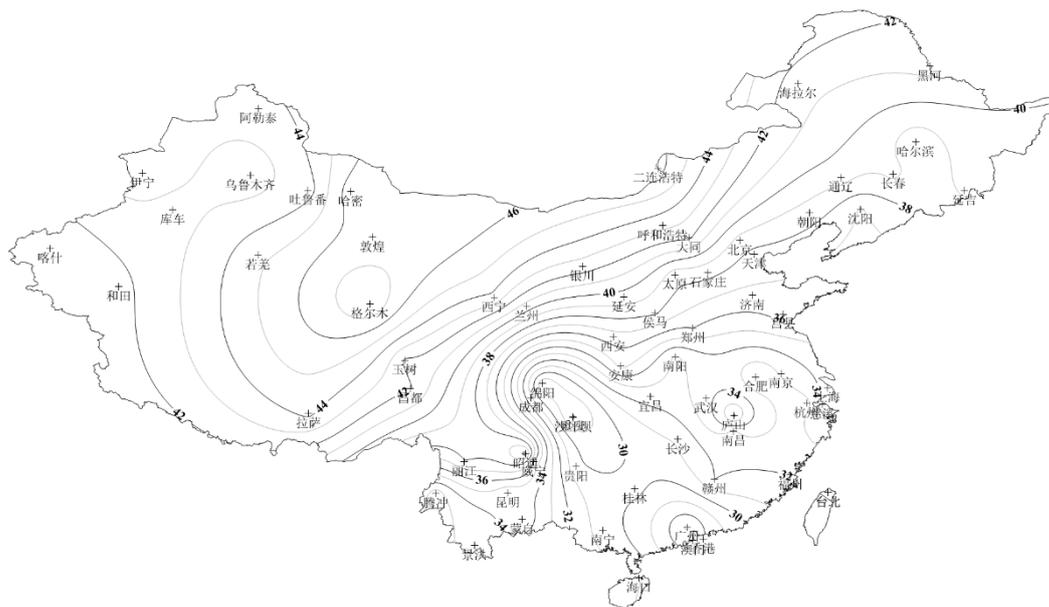
B.3 路面结构的温度应力

B.3.1 原规范中最大温度梯度设计值和温度应力计算方法均源上世纪八、九十年代的研究成果，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，可由图 B.3.1-1、B.3.1-2 查取。



B.3.1-1 全国 50 年一遇的最大温度梯度等值线



B.3.1-2 全国基准路面结构的疲劳温度梯度等值线

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 ζ 取零，即为单层板。另外，为避免过量外延造成不安全的偏差，对综合温度翘曲应力和内应力的温度应力系数 B_L 设了 0.1 的下限。

由于温度是日较差，且温度应力高值发生在夏季日暴晒时，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除变量。沥青类夹层模量需考虑高温和日交变值影响， k_v 值大约在 2000~4000MPa/m 变化，对温度应力计算结果影响不大，为此，取统一值 3000MPa/m。

B.3.4 原规范“附录 C 有沥青上面层的混凝土下层板应力分析”，但有沥青上面层的混凝土下层板结构在力学本质可视为复合面层结构，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是表格形式给出，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

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，路基为低液限粘土，路床顶距地下水水位平均 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 $P_m=150\text{kN}$ ，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 3.0.1，二级公路的设计使用年限为 20 年，安全等级为二级。由附录 A 表 A.2.6，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：

$$N_e = \frac{N_1 \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{100 \times [(1 + 0.05)^{20} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.62 = 74.8 \times 10^4 \text{ 次}$$

由表 3.0.8 可知，属中等交通荷载等级。

2) 初拟路面结构

由表 3.0.2，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，依据条文说明表 4.5.3，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 4.5×3.5m，纵缝为设拉杆平缝，横缝为不设传力杆的假缝，路肩面层与行车道面层等厚并设拉杆相连。

3) 路面材料参数确定

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 7.5.9，粗集料为花岗岩的混凝土热膨胀系数 $\alpha_c=1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

查现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 附录 B 及附录 D，依据表 B-1，取低液限粘土路基回弹模量 70MPa，依据表 D.0.1，取距地下水水位 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 $70 \times 0.857 = 60\text{MPa}$ 。查表 7.2.8，取级配碎石基层回弹模量为 300MPa。按附录 B 式 (B.2.6) 计算板底地基当量回弹模量如下：

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

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

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

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

板底地基当量回弹模量 E_t 取为 120 MPa。

普通混凝土面层的弯曲刚度 D_c 按式 (B.2.2-3) 计算, 相对刚度半径 r 按式 (B.2.3-3) 计算, 路面结构的弯矩系数 M_{cb} 应按式 (B.2.3-1) 计算:

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{29000 \times 0.24^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 34.18 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

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

$$r = \left(\frac{2D_c(1-\nu_t^2)}{E_t} \right)^{1/3} = \left(\frac{2 \times 34.18 \times (1-0.35^2)}{120} \right)^{1/3} = 0.794 \text{ m}$$

$$M_{cb} = 0.147 \left(\ln\left(\frac{r}{a}\right) + 0.714\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.147 \left(\ln\left(\frac{0.794}{0.238}\right) + 0.714\left(\frac{0.238}{0.794}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.172$$

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:

$$\sigma_{c,p_s} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{6 \times 0.100}{0.24^2} \times 0.172 = 1.794 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p_m} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{h_c^2} M_{cb} = \frac{6 \times 0.150}{0.24^2} \times 0.172 = 2.287 \text{ MPa}$$

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, 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:

$$\sigma_{c,p_r} = k_r k_f k_c \sigma_{c,p_s} = 0.85 \times 2.162 \times 1.0 \times 1.794 = 3.296 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p,\max} = k_r k_c \sigma_{c,p_m} = 0.85 \times 1.0 \times 2.287 = 2.287 \text{ MPa}$$

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 $k_f = N_e^{-\lambda} = (74.8 \times 10^4)^{-0.057} = 2.162$ (式 (B.2.5-1))。

5) 温度应力

由附录 B 表 B.3.1, 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 $r_{g,t}$ (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 ζ_{tr} :

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{34.18}{120}} = 0.954 \text{ m}$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{8}l_{g,t}} = \frac{4.5}{\sqrt{8} \times 0.954} = 1.668$$

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

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

按式 (B.3.1-1) 计算面层板临界荷位处的温度应力疲劳应力:

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

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, 二级公路、中等变异水平条件下, $\psi_1=0.12$, $\psi_2=0.05$, 可靠度系数 γ_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:

$$\gamma_r (\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.17 \times (3.296 + 0.572) = 4.526 > f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r (\sigma_{c,pmax} + \sigma_{c,tmax}) = 1.17 \times (2.287 + 1.357) = 4.263 < f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

显然, 初拟的路面结构基本满足要求。将混凝土面层厚度增至 0.25m。重复以上计算, 得到荷载疲劳应力 $\sigma_{c,pr} = 3.131 \text{ MPa}$, 最大荷载应力 $\sigma_{c,pmax} = 2.172 \text{ MPa}$, 温度疲劳应力

$\sigma_{c,tr} = 0.500 \text{ MPa}$, 最大温度应力 $\sigma_{c,tmax} = 1.182 \text{ MPa}$, 然后再进行结构极限状态验算:

$$\gamma_r(\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.17 \times (3.131 + 0.500) = 4.248 < f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c,pmax} + \sigma_{c,tmax}) = 1.17 \times (2.172 + 1.182) = 3.924 < f_{c,r} = 4.5 \text{ MPa}$$

满足结构极限状态要求，所选的普通混凝土面层计算厚度 0.25m 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。强度还有富余，取设计厚度为 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，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 $P_m=180\text{kN}$ ，设计车道使用初期标准轴载日作用次数为 3200，交通量年平均增长率为 5%。

1) 交通分析

由表 3.0.1，一级公路的设计使用年限为 30 年，安全等级为一级。由附录 A 表 A.2.6，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标准荷载累计作用次数：

$$N_e = \frac{N_1 \times [(1 + g_r)^f - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{3200 \times [(1 + 0.05)^{30} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.22 = 1707 \times 10^4 \text{ 次}$$

由表 3.0.8 可知，属重交通荷载等级。

2) 初拟路面结构

由表 3.0.2，施工变异水平取低等级。根据一级公路重交通荷载等级和低变异水平等级，依据条文说明表 4.5.3，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 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

按表 3.0.9，取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。查表 7.5.9，砾石粗集料的混凝土的热膨胀系数 $\alpha_c=1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

查现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 附录 B 及附录 D，依据表 B-1，取低液限粉土路基回弹模量 90MPa，依据表 D.0.1，取距地下水位 1.0m 时的湿度调整系数为 0.889，由此得到路床顶综合回弹模量为 $90 \times 0.889=80\text{MPa}$ 。查表 7.3.6 并考虑修正，水泥稳定砂砾基层的弹性模量 $18000 \times 0.5=9000\text{MPa}$ ，查表 7.7.1，其泊松比取 0.25，查表 7.2.8，取级配砾石底基层回弹模量为 250MPa，查表 7.7.1，其泊松比取 0.35。

按附录 B 式 (B.2.6) 计算板底地基当量回弹模量如下：

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

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

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

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

板底地基综合回弹模量 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, 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} 应按式 (B.2.3-1) 计算:

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31000 \times 0.26^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 46.45 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{9000 \times 0.20^3}{12 \times (1-0.25^2)} = 6.40 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp\left(-0.264 \frac{k_v}{k_{v,0}}\right) = 1 - 0.240 \times \exp\left(-0.264 \frac{54450}{54450}\right) = 0.816$$

$$k_v = k_{v,0} = \left[\frac{3}{5} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[0.6 \times \left(\frac{0.26}{31000} + \frac{0.20}{9000} \right) \right]^{-1} = 54450 \text{ MPa/m}$$

$$r_g = \left[\frac{D_c}{k_v} + \left(\frac{2D_c(1-\nu_t^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[\frac{46.45}{54450} + \left(\frac{2 \times 46.45 \times (1-0.35^2)}{125} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 0.906 \text{ m}$$

$$M_{cb} = 0.147 \left(\ln\left(\frac{r_g}{a}\right) + 0.714 \left(\frac{a}{r_g}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.147 \left(\ln\left(\frac{0.906}{0.238}\right) + 0.714 \left(\frac{0.238}{0.906}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.189$$

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:

$$\sigma_{c,p_s} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{46.45}{46.45 + 0.816 \times 6.40} \times \frac{6 \times 0.100}{0.26^2} \times 0.189 = 1.511 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p_m} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{h_c^2} M_{cb} = \frac{46.45}{46.45 + 0.816 \times 6.40} \times \frac{6 \times 0.180}{0.26^2} \times 0.189 = 2.721 \text{ MPa}$$

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, 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:

$$\sigma_{c,pr} = k_r k_f k_c \sigma_{c,p_s} = 0.85 \times 2.584 \times 1.05 \times 1.511 = 3.485 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p,\max} = k_r k_c \sigma_{c,p_m} = 0.85 \times 1.05 \times 2.721 = 2.428 \text{ MPa}$$

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 $k_f = N_e^{-\lambda} = (1707 \times 10^4)^{0.057} = 2.584$ (式 (B.2.5-1))。

5) 温度应力

由附录 B 表 B.3.1, 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 ξ_{tr} :

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{46.45 + 6.40}{125}} = 1.088 \text{ m}$$

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

$$k_{v,t} = \frac{1}{2} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right)^{-1} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{0.26}{31000} + \frac{0.20}{9000} \right)^{-1} = 16334.9 \text{ MPa/m}$$

$$r_\beta = \left(\frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_{v,t}} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{46.45 \times 6.40}{(46.45 + 6.40) \times 16334.9} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.136 \text{ m}$$

$$\zeta = - \frac{(k_{v,t} l_{g,t}^4 - D_c) l_\beta^3}{(k_{v,t} l_\beta^4 - D_c) l_{g,t}^3} = \frac{(16334.9 \times 1.088^4 - 46.45) \times 0.136^3}{(16334.9 \times 0.136^4 - 46.45) \times 1.088^3} = 1.099$$

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

$$\begin{aligned} \xi_{tr} &= - \frac{1000 f_{c,r}}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24 C_L \ln(h_c) - 0.153 \\ &= - \frac{1000 \times 5.0}{31000 \times 0.26} [\ln(0.813) + 0.971] - 1.24 \times 0.813 \times \ln(0.26) - 0.153 \\ &= 0.731 \end{aligned}$$

按式 (B.3.1-1) 计算面层板临界荷位处的温度应力疲劳应力:

$$\sigma_{c,tr} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g,r} \xi_{tr}}{2} C_L = \frac{1.1 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.26 \times 36 \times 0.731}{2} \times 0.813 = 0.949 \text{ MPa}$$

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:

$$\sigma_{c,t,max} = \frac{\alpha_c E_c h_c T_{g,max}}{2} B_L = \frac{1.1 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.26 \times 103}{2} \times 0.446 = 2.034 \text{ MPa}$$

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

6) 结构极限状态校核

查表 3.0.2 及表 3.0.4, 一级公路、低变异水平条件下, $\psi_1=0.12$, $\psi_2=0$, 可靠度系数 γ_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:

$$\begin{aligned} \gamma_r (\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) &= 1.12 \times (3.485 + 0.949) = 4.966 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa} \\ \gamma_r (\sigma_{c,pmax} + \sigma_{c,tmax}) &= 1.12 \times (2.428 + 2.034) = 4.997 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

满足结构极限状态要求, 所选的普通混凝土面层计算厚度 0.26m 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。考虑抗滑构造深度, 取面层设计厚度为 0.27m,

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 42000, 交通量年平均增长率为 7%。

1) 交通分析

由表 3.0.1, 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 表 A.2.6, 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标准荷载累计作用次数:

$$N_e = \frac{N_1 \times \left[(1 + g_r)^t - 1 \right] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{42000 \times \left[(1 + 0.07)^{30} - 1 \right] \times 365}{0.07} \times 0.22 = 3.186 \times 10^8 \text{ 次}$$

由表 3.0.8 可知, 属特重交通荷载等级。

2) 初拟路面结构

由表 3.0.2, 相应于安全等级一级的变异水平等级宜为低级。根据高速公路特重交通荷载等级和低变异水平等级, 查条文说明表 4.5.3, 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

按表 3.0.9, 取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 4.0MPa, 相应弯拉弹性模量、泊松比为 27GPa、0.15。查表 7.5.9, 花岗岩为粗集料的混凝土热膨胀系数 $\alpha_c=1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

查现行《公路路基设计规范》(JTG D30) 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 $75 \times 1.1 = 82.5\text{MPa}$ 。查表 7.2.8, 取级配碎石底基层回弹模量为 250MPa, 查表 7.7.1, 其泊松比取 0.35。查表 7.4.4, 沥青混凝土夹层回弹模量取为 8000MPa, 查表 7.7.1, 其泊松比取 0.25。

按附录 B 式 (B.2.6) 计算板底地基当量回弹模量如下:

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

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

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

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

板底地基综合回弹模量 E_t 取为 130 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, 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} 应按式 (B.2.3-1) 计算:

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31000 \times 0.30^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 71.36 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{27000 \times 0.18^3}{12 \times (1-0.15^2)} = 13.42 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp\left(-0.264 \frac{k_v}{k_{v0}}\right) = 1 - 0.240 \times \exp\left(-0.264 \frac{67538}{101974}\right) = 0.799$$

$$k_v = \left[\frac{h_3}{E_3} + \frac{3}{5} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[\frac{0.04}{8000} + 0.6 \times \left(\frac{0.30}{31000} + \frac{0.18}{27000} \right) \right]^{-1} = 67538 \text{ MPa/m}$$

$$k_{v0} = \left[\frac{3}{5} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[0.6 \times \left(\frac{0.30}{31000} + \frac{0.18}{27000} \right) \right]^{-1} = 101974 \text{ MPa/m}$$

$$r_g = \left[\frac{D_c}{k_v} + \left(\frac{2D_c(1-\nu_c^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[\frac{71.36}{67538} + \left(\frac{2 \times 71.36 \times (1-0.35^2)}{130} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 1.046 \text{ m}$$

$$M_{cb} = 0.147 \left(\ln\left(\frac{r_g}{a}\right) + 0.714\left(\frac{a}{r_g}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.147 \left(\ln\left(\frac{1.046}{0.238}\right) + 0.714\left(\frac{0.238}{1.046}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.209$$

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:

$$\sigma_{c,p_s} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{71.36}{71.36 + 0.799 \times 13.42} \times \frac{6 \times 0.100}{0.30^2} \times 0.209 = 1.210 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p_m} = \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{h_c^2} M_{cb} = \frac{71.36}{71.36 + 0.799 \times 13.42} \times \frac{6 \times 0.250}{0.30^2} \times 0.209 = 3.026 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{b,p_s} = \frac{\varphi D_b}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} = \frac{0.799 \times 13.42}{71.36 + 0.799 \times 13.42} \times \frac{6 \times 0.100}{0.18^2} \times 0.209 = 0.505 \text{ MPa}$$

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, 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:

$$\sigma_{c,p_r} = k_r k_f k_c \sigma_{c,p_s} = 0.85 \times 3.053 \times 1.1 \times 1.210 = 3.455 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p_{\max}} = k_r k_c \sigma_{c,p_m} = 0.85 \times 1.1 \times 1.263 = 1.181 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{b,p_r} = k_r k_f k_c \sigma_{b,p_s} = 0.85 \times 3.570 \times 1.1 \times 0.505 = 1.686 \text{ MPa}$$

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 $k_c = 1.1$ (表 B.2.1); 面层板疲劳应力系数 $k_f = N_e^{-\lambda} = (3.186 \times 10^8)^{0.057} = 3.053$,

基层板疲劳应力系数 $k_f = N_e^{-\lambda} = (3.186 \times 10^8)^{0.065} = 3.570$ (式 (B.2.5-1))。

5) 温度应力

由附录 B 表 B.3.1, 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 ζ_{tr} :

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{D_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{71.36 + 13.42}{130}} = 1.257 \text{ m}$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{8} l_{g,t}} = \frac{5.0}{\sqrt{8} \times 1.257} = 1.406$$

$$k_{v,t} = 3000 \text{ MPa/m}$$

$$r_\beta = \left(\frac{D_c D_b}{(D_c + D_b) k_{v,t}} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{71.36 \times 13.42}{(71.36 + 13.42) \times 3000} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.248 \text{ m}$$

$$\zeta = - \frac{(k_{v,t} l_{g,t}^4 - D_c) l_\beta^3}{(k_{v,t} l_\beta^4 - D_c) l_{g,t}^3} = \frac{(3000 \times 1.257^4 - 71.36) \times 0.248^3}{(3000 \times 0.248^4 - 71.36) \times 1.257^3} = 0.946$$

$$C_L = 1 - \left(\frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cos t + \cosh t \sin t}{\cos t \sin t + \sinh t \cosh t}$$

$$= 1 - \left(\frac{1}{1 + 0.946} \right) \frac{\sinh(1.406) \cos(1.406) + \cosh(1.406) \sin(1.406)}{\cos(1.406) \sin(1.406) + \sinh(1.406) \cosh(1.406)}$$

$$= 0.708$$

$$\xi_{tr} = - \frac{1000 f_{c,r}}{E_c h_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24 C_L \ln(h_c) - 0.153$$

$$= - \frac{1000 \times 5.0}{31000 \times 0.30} [\ln(0.708) + 0.971] - 1.24 \times 0.708 \times \ln(0.30) - 0.153$$

$$= 0.568$$

按式 (B.3.1-1) 计算面层板临界荷位处的温度应力疲劳应力:

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

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:

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

$$B_L = \max [0.1, 1.93 e^{-4.6 h_c} C_L - 0.155 (1 - C_L)]$$

$$= \max [0.1, 1.93 \times e^{-4.6 \times 0.30} \times 0.708 - 0.155 \times (1 - 0.708)]$$

$$= \max [0.1, 0.298] = 0.298$$

6) 结构极限状态校核

查表 3.0.2 及表 3.0.4, 高速公路、低变异水平条件下, $\psi_1=0.18$, $\psi_2=0.10$, 可靠度系数 γ_r

按式 (3.0.4-3) 计算为 1.28。

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:

$$\gamma_r (\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.28 \times (3.455 + 0.729) = 5.356 > f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r (\sigma_{c,p,max} + \sigma_{c,t,max}) = 1.28 \times (2.829 + 1.416) = 5.434 > f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r \sigma_{b,pr} = 1.28 \times 1.686 = 2.158 < f_{b,r} = 4.0 \text{ MPa}$$

面层板不满足结构极限状态要求, 但基层板满足结构极限状态要求。

结构材料参数保持不变,增大普通混凝土面层厚度到 0.32m,其他结构层厚度保持不变,再校核路面结构极限状态是否满足要求:

$$\gamma_r(\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.28 \times (3.220 + 0.627) = 4.924 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r(\sigma_{c,pmax} + \sigma_{c,tmax}) = 1.28 \times (2.637 + 1.194) = 4.904 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r \sigma_{b,pr} = 1.28 \times 1.474 = 1.887 < f_{b,r} = 4.0 \text{ MPa}$$

修改后的结构组合及厚度,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。考虑抗滑构造深度,取面层设计厚度为 0.33m,贫混凝土基层设计厚度为 0.18m,沥青混凝土夹层设计厚度 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,路基土为低液限粘土,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:低噪音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 $P_s=100\text{kN}$,极限轴载 $P_m=180\text{kN}$,设计车道使用初期标准轴载日作用次数为 750,交通量年平均增长率为 5%。

1) 交通分析

由表 3.0.1,一级公路的设计使用年限为 30 年,安全等级为二级。由表 A.2.6,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标准荷载累计作用次数:

$$N_e = \frac{N_1 \times [(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{750 \times [(1 + 0.05)^{30} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.22 = 400 \times 10^4 \text{ 次}$$

由表 3.0.8 可知,属重交通荷载等级。

2) 初拟路面结构

由表 3.0.2,相应于安全等级二级的变异水平等级为低-中级。根据一级公路重交通荷载等级和中等变异水平等级,查条文说明表 4.5.3,初拟面层复合板厚度为 0.25m,其中,橡胶水泥混凝土上面厚 0.08m,普通水泥混凝土下面厚 0.17m,水泥稳定碎石基层 0.20m,底基层选用级配砾石,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,相应的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 7.5.9,石灰岩为粗集料的混凝土热膨胀系数 $\alpha_c=0.7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

查现行《公路路基设计规范》(JTG D30)附录 B 及附录 D,依据表 B-1,取低液限粘土路基回弹模量 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 $70 \times 0.858 = 60$ MPa。查表 7.3.6 并考虑修正, 水泥稳定碎石基层的弹性模量 $18000 \times 0.5 = 9000$ MPa, 查表 7.7.1, 其泊松比取 0.25, 查表 7.2.8, 取级配碎石底基层回弹模量为 250 MPa, 查表 7.7.1, 其泊松比取 0.35。

按附录 B 式 (B.2.6) 计算板底地基当量回弹模量如下:

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

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

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

$$E_i = \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^\alpha E_0 = \left(\frac{250}{60} \right)^{0.442} \times 60 = 112.7 \text{ MPa}$$

板底地基综合回弹模量 E_i 取为 110 MPa。

混凝土面层复合板的等效弯曲刚度 \tilde{D}_c (式 (B.2.4-1))、 \tilde{h}_c 等效厚度 (式 (B.2.4-2)), 半刚性基层板的弯曲刚度 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:

$$\begin{aligned} \tilde{D}_c &= \frac{E_{c1} h_{c1}^3 + E_{c2} h_{c2}^3}{12(1-\nu_{c2}^2)} + \frac{(h_{c1} + h_{c2})^2}{4(1-\nu_{c2}^2)} \left(\frac{1}{E_{c1} h_{c1}} + \frac{1}{E_{c2} h_{c2}} \right)^{-1} \\ &= \frac{27000 \times 0.08^3 + 31000 \times 0.17^3}{12(1-0.15^2)} + \frac{(0.08+0.17)^2}{4(1-0.15^2)} \left(\frac{1}{27000 \times 0.08} + \frac{1}{31000 \times 0.17} \right)^{-1} = 38.65 \text{ MN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

$$d_{xc} = \frac{1}{2} \left(h_{c2} + \frac{E_{c1} h_{c1} (h_{c1} + h_{c2})}{E_{c1} h_{c1} + E_{c2} h_{c2}} \right) = \frac{1}{2} \left(0.17 + \frac{27000 \times 0.08 \times (0.08 + 0.17)}{27000 \times 0.08 + 31000 \times 0.17} \right) = 0.121 \text{ m}$$

$$\tilde{h}_c = \sqrt{\frac{6\tilde{D}_c(1-\nu_{c2}^2)}{E_{c2} d_{xc}}} = \sqrt{\frac{6 \times 38.65 \times (1-0.15^2)}{31000 \times 0.121}} = 0.245 \text{ m}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{9000 \times 0.20^3}{12 \times (1-0.25^2)} = 6.40 \text{ MN}\cdot\text{m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp\left(-0.264 \frac{k_v}{k_{v0}}\right) = 1 - 0.240 \times \exp\left(-0.264 \frac{55295}{55295}\right) = 0.816$$

$$k_v = \left[\frac{3}{5} \left(\frac{\tilde{h}_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[0.6 \times \left(\frac{0.245}{31000} + \frac{0.20}{9000} \right) \right]^{-1} = 55295 \text{ MPa/m}$$

$$r_g = \left[\frac{\tilde{D}_c}{k_v} + \left(\frac{2\tilde{D}_c(1-\nu_t^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[\frac{38.65}{55295} + \left(\frac{2 \times 38.65 \times (1-0.35^2)}{110} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 0.896 \text{ m}$$

$$M_{cb} = 0.147 \left(\ln\left(\frac{r_g}{a}\right) + 0.714\left(\frac{a}{r_g}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.147 \left(\ln\left(\frac{0.896}{0.238}\right) + 0.714\left(\frac{0.238}{0.896}\right)^2 - 0.096 \right) = 0.188$$

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:

$$\sigma_{c.p_s} = \frac{\tilde{D}_c}{\tilde{D}_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{\tilde{h}_c^2} M_{cb} = \frac{38.65}{38.65 + 0.816 \times 6.40} \times \frac{6 \times 0.100}{0.245^2} \times 0.188 = 1.649 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c.p_m} = \frac{\tilde{D}_c}{\tilde{D}_c + \varphi D_b} \frac{6P_m}{\tilde{h}_c^2} M_{cb} = \frac{38.65}{38.65 + 0.816 \times 6.40} \times \frac{6 \times 0.180}{0.245^2} \times 0.188 = 2.968 \text{ MPa}$$

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, 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:

$$\sigma_{c,p_r} = k_r k_f k_c \sigma_{c.p_s} = 0.85 \times 2.379 \times 1.05 \times 1.649 = 3.501 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,p_{\max}} = k_r k_c \sigma_{c.p_m} = 0.85 \times 1.05 \times 2.968 = 2.649 \text{ MPa}$$

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); 面层板疲劳应力系数 $k_f = N_e^{-\lambda} = (400 \times 10^4)^{0.057} = 2.379$ (式 (B.2.5-1))。

5) 温度应力

由附录 B 表 B.3.1, 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 ζ_{tr} :

$$r_{g,t} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{\tilde{D}_c + D_b}{E_t}} = 1.45 \sqrt[3]{\frac{38.65 + 6.40}{110}} = 1.077 \text{ m}$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{8} l_{g,t}} = \frac{5.0}{\sqrt{8} \times 1.077} = 1.642$$

$$k_{v,t} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{h}_c}{E_{c2}} + \frac{h_b}{E_b} \right)^{-1} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{0.245}{31000} + \frac{0.20}{9000} \right)^{-1} = 16588.5 \text{ MPa/m}$$

$$r_\beta = \left(\frac{\tilde{D}_c D_b}{(\tilde{D}_c + D_b) k_{v,t}} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{38.65 \times 6.40}{(38.65 + 6.40) \times 16588.5} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.135 \text{ m}$$

$$\zeta = -\frac{(k_{v,t}l_{g,t}^4 - \tilde{D}_c)l_{\beta}^3}{(k_{v,t}l_{\beta}^4 - \tilde{D}_c)l_{g,t}^3} = \frac{(16588.5 \times 1.077^4 - 38.65) \times 0.135^3}{(16588.5 \times 0.135^4 - 38.65) \times 1.077^3} = 1.320$$

$$C_L = 1 - \left(\frac{1}{1 + \zeta} \right) \frac{\sinh t \cos t + \cosh t \sin t}{\cos t \sin t + \sinh t \cosh t}$$

$$= 1 - \left(\frac{1}{1 + 1.320} \right) \frac{\sinh(1.642) \cos(1.642) + \cosh(1.642) \sin(1.642)}{\cos(1.642) \sin(1.642) + \sinh(1.642) \cosh(1.642)}$$

$$= 0.837$$

$$\xi_{tr} = -\frac{1000f_{c,r}}{E_{c2}\tilde{h}_c} [\ln(C_L) + 0.971] - 1.24C_L \ln(\tilde{h}_c) - 0.153$$

$$= -\frac{1000 \times 5.0}{31000 \times 0.245} [\ln(0.837) + 0.971] - 1.24 \times 0.837 \times \ln(0.245) - 0.153$$

$$= 0.783$$

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 φ_{t1} 按式 (B.3.3-3) 计算:

$$\sigma_{c,tr} = \frac{\alpha_c E_{c2} (h_{c1} + h_{c2}) T_{g,r} \xi_{tr} \varphi_{t1}}{2} C_L = \frac{0.7 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.25 \times 35 \times 0.783 \times 1.036}{2} \times 0.837 = 0.645 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,t,max} = \frac{\alpha_c E_{c2} (h_{c1} + h_{c2}) T_{g,max} \varphi_{t1}}{2} B_L = \frac{0.7 \times 10^{-5} \times 31000 \times 0.25 \times 102 \times 1.036}{2} \times 0.497 = 1.424 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{t1} = 1.77 - 0.27 \ln \left(\frac{h_{c1} E_{c1}}{h_{c2} E_{c2}} + 18 \frac{E_{c1}}{E_{c2}} - 2 \frac{h_{c1}}{h_{c2}} \right)$$

$$= 1.77 - 0.27 \ln \left(\frac{0.08 \times 27000}{0.17 \times 31000} + 18 \times \frac{27000}{31000} - 2 \times \frac{0.08}{0.17} \right)$$

$$= 1.036$$

$$B_L = \max \left[0.1, 1.93e^{-4.6\tilde{h}_c} C_L - 0.155(1 - C_L) \right]$$

$$= \max \left[0.1, 1.93 \times e^{-4.6 \times 0.245} \times 0.837 - 0.155 \times (1 - 0.837) \right]$$

$$= \max [0.1, 0.497] = 0.497$$

6) 结构极限状态校核

查表 3.0.2 及表 3.0.4, 一级公路、低变异水平条件下, $\psi_1=0.12$, $\psi_2=0.10$, 可靠度系数 γ_r 按式 (3.0.4-3) 计算为 1.22。

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:

$$\gamma_r (\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.22 \times (3.501 + 0.645) = 5.058 > f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r (\sigma_{c,pmax} + \sigma_{c,tmax}) = 1.22 \times (2.649 + 1.424) = 4.969 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

面层复合板不满足结构抗疲劳断裂要求,但满足结构在最重轴载和最大温度梯度综合作用下不产生极限断裂要求。

结构材料参数保持不变,增大普通混凝土下面层厚度到 0.18m,其他结构层厚度保持不变,再校核复合板路面结构极限状态是否满足要求:

$$\gamma_r (\sigma_{c,pr} + \sigma_{c,tr}) = 1.22 \times (3.359 + 0.609) = 4.841 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_r (\sigma_{c,pmax} + \sigma_{c,tmax}) = 1.22 \times (2.542 + 1.348) = 4.746 < f_{c,r} = 5.0 \text{ MPa}$$

修改后的复合板结构组合及厚度,即 0.08m 厚的橡胶水泥混凝土与 0.18m 厚的普通混凝土复合而成面层复合板,可以承受设计基准期内荷载应力和温度应力的综合疲劳作用,最重轴载在最大温度梯度时的一次作用。

附录C 连续配筋混凝土面层板厚和纵向配筋率验算

C.3 车辆荷载横向疲劳拉应力计算

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。

由于连续配筋混凝土结构层中连续钢筋的传荷作用较强，其接缝传荷、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要小，参阅国内外相关资料，近似取0.5~0.6。

根据美国力学一经验法中脱空的预估方法，计算出脱空的宽度约为0.2m~0.5m。根据1986版AASHTO规范，采用粒料基层时由于不均匀支撑产生的应力会达到2倍以上。但我国多采用无机结合料或者沥青结合料稳定类基层，基层抗冲刷能力较高，而且连续配筋也有助于增强抗冲刷能力。综上，近似拟定了考虑板底脱空影响的应力修正系数的值。

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1/4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0.1MPa，故不再考虑温度翘曲应力。

C.4 复合式路面中连续配筋混凝土下面层验算

C.4.3 计算公式与连续配筋混凝土面层的相近，但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，故对连续配筋混凝土层顶部横向拉应力的数值进行折减，其它修正系数的取值均不变。

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标准轴载累计作用次数为 2.5×10^7 次，路基土为低液限黏土，路床顶距地下水位1m，路肩类型为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4.5.3，初拟普通混凝土面层厚度为0.26m。依据表4.4.7，基层选用水泥稳定级配碎石，厚0.18m；底基层选用级配碎石，厚0.18m。

(2) 路面参数材料确定

按表3.0.9以及表7.5.8，取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。查表7.5.9，粗集料为花岗岩的混凝土的热膨胀系数 $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

查现行《公路路基设计规范》(JTG D30)附录B及附录D，依据表B-1，取低液限粉土路基回弹模量90MPa，依据表D.0.1，取距地下水位1.0m时的湿度调整系数为0.889，由此得到路床顶综合回弹模量为 $90 \times 0.889 = 80\text{MPa}$ 。查表7.3.6并考虑修正，水泥稳定级配碎石基

层的弹性模量 $20000 \times 0.1 = 2000 \text{MPa}$ ，查表 7.7.1，其泊松比取 0.2，查表 7.2.8，取级配碎石底基层回弹模量为 250MPa ，查表 7.7.1，其泊松比取 0.35。查表 7.5.11，混凝土面层与基层间摩擦系数 $\mu = 8.9$ 。

按式 (B.2.6-1) ~ 式 (B.2.6-4) 计算板底地基综合回弹模量 E_t 如下：

由于粒料层只有级配碎石底基层，所以 $E_x = 250 \text{MPa}$ ， $h_x = 0.18 \text{m}$

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

$$E_t = \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^\eta \cdot E_0 = \left(\frac{250}{80} \right)^{0.414} \times 80 = 128.242 \text{MPa}$$

板底地基综合回弹模量 E_t 取为 128.242MPa

混凝土面层板的截面弯曲刚度 D_c [式 (B.2.2-3)]、半刚性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 φ [式 (B.2.2-2)]、路面结构总相对刚度半径 r_g [式 (B.2.3-3)]、路面结构的弯矩系数 M_{cb} [式 (B.2.3-1)] 计算为：

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31000 \times 0.26^3}{12(1-0.15^2)} = 46.449 \text{MPa} \times \text{m}^3$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{2000 \times 0.18^3}{12(1-0.2^2)} = 1.103 \text{MPa} \times \text{m}^3$$

$$k_v = k_{v0} = \left[\frac{3}{5} \left(\frac{h_c}{E_c} + \frac{h_b}{E_b} \right) \right]^{-1} = \left[\frac{3}{5} \left(\frac{0.26}{31000} + \frac{0.18}{2000} \right) \right]^{-1} = 16939.89 \text{MN/m}$$

$$\varphi = 1 - 0.240 \exp \left(-0.264 \frac{k_v}{k_{v0}} \right) = 1 - 0.240 \times \exp \left(-0.264 \frac{16939.89}{16939.89} \right) = 0.816$$

$$r_g = \left[\frac{D_c}{k_{v0}} + \left(\frac{2(D_c + D_b)(1-\nu_t^2)}{E_t} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = \left[\frac{46.449}{16939.89} + \left(\frac{2(46.449 + 1.103)(1-0.35^2)}{128.242} \right)^{4/3} \right]^{1/4} = 0.867 \text{m}$$

$$\begin{aligned} M_{cb} &= 0.147 \left(\ln \left(\frac{r_g}{a} \right) + 0.714 \left(\frac{a}{r_g} \right)^2 - 0.096 \right) \\ &= 0.147 \left(\ln \left(\frac{0.867}{0.238} \right) + 0.714 \left(\frac{0.238}{0.867} \right)^2 - 0.096 \right) \\ &= 0.197 \end{aligned}$$

由表 B.3.1，取最大正温度梯度为 95°C/m ，最大负温度梯度按 1/4 正温度梯度取值，

$T_g = -95/4 = -23.75^\circ\text{C}/\text{m}$ 。年平均空气相对湿度 φ_a 为 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 $\Delta T_\zeta = 30^\circ\text{C}$ 。

混凝土水灰比 $W/C=0.4$ ；混凝土用水量为 $1350\text{N}/\text{m}^3$ 。采用盖麻布养生， $a_1=1.0$ 。

配筋设计拟采用 HRB400 螺纹钢，参考 6.3.1 条，初拟配筋率 $\rho=0.8\%$ ，钢筋的直径 $d_s=16\text{mm}$ 。按表 7.6.1，取钢筋弹性模量为 200GPa 。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)]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\infty &= a_1 \cdot (1.51 \times 10^{-4} w_0^{2.1} f_c^{-0.28} + 270) \times 10^{-6} \\ &= 1.0 \times (1.51 \times 10^{-4} \times 1350^{2.1} \times 42^{-0.28} + 270) \times 10^{-6} = 4.687 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

无约束条件下钢筋埋置深度处混凝土干缩应变[式 (C.1-3)]:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_\infty (1 - \varphi_a^3) = 4.687 \times 10^{-4} \times (1 - 0.4^3) = 4.439 \times 10^{-4}$$

钢筋埋置深度处混凝土最大总应变[式 (C.1-8)]:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_\infty (1 - \varphi_a^3) = 4.687 \times 10^{-4} \times (1 - 0.4^3) = 4.439 \times 10^{-4}$$

道路位于公路自然区划 III 区，取 $k_1=0.68$ ；

$$\varepsilon_{\zeta} = \alpha_c \cdot \Delta T_\zeta + \varepsilon_{sh} = 1 \times 10^{-5} \times 30 + 4.439 \times 10^{-4} = 7.387 \times 10^{-4}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{td} &= \alpha_c h_c T_g (4.81 h_c^2 - 5.42 h_c + 1.96) + \varepsilon_\infty (0.245 e^{-5.3 k_1 h_c}) \\ &= 1 \times 10^{-5} \times 0.26 \times 23.75 \times (4.81 \times 0.26^2 - 5.42 \times 0.26 + 1.96) + \\ &4.687 \times 10^{-4} \times (0.245 e^{-5.3 \times 0.68 \times 0.26}) \\ &= 9.908 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

温度和湿度变形完全受约束时的翘曲应力[式 (C.1-10)]:

$$\sigma_0 = \frac{E_c \varepsilon_{td}}{2(1-\nu_c)} = \frac{31000 \times 9.908 \times 10^{-5}}{2(1-0.15)} = 1.807 \text{MPa}$$

由于混凝土板相对刚度半径为 0.867m ，由式(B.3.1-3)计算得到翘曲应力系数 $C_L=0.544$ ，设平均裂缝间距初始值为 0.7m ，经迭代计算得到 $c_1=1.275$ ，按式 (C.1-9) 计算得：

$$\begin{aligned}L_d &= \frac{f_t - C_L \sigma_0 \left(1 - \frac{2\zeta_s}{h_c}\right)}{\frac{\mu\gamma_c}{2} + \frac{\sigma_{cg}\rho}{c_1 d_s}} = \frac{3.22 - 0.544 \times 1.807 \left(1 - \frac{2 \times 0.1}{0.26}\right)}{\frac{8.9 \times 0.024}{2} + \frac{9.828 \times 0.007}{1.275 \times 0.016}} \\ &= 0.779 \approx 0.78\text{m}\end{aligned}$$

(3) 计算横向裂缝缝隙宽度

(参考式 (C.1-5) ~式 (C.1-5))

$$\begin{aligned} c_a &= 0.761 + 1770\varepsilon_{t\zeta} - 2 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta}^2 \\ &= 0.761 + 1770 \times (7.387 \times 10^{-4}) - 2 \times 10^6 \times (7.387 \times 10^{-4})^2 = 0.977 \end{aligned}$$

$$c_b = 9 \times 10^8 \varepsilon_{t\zeta} + 149000 = 9 \times 10^8 \times 7.387 \times 10^{-4} + 149000 = 81.382 \times 10^4$$

$$c_c = 3 \times 10^9 \varepsilon_{t\zeta}^2 - 5 \times 10^6 \varepsilon_{t\zeta} + 2020 = 3 \times 10^9 \times (7.387 \times 10^{-4})^2 - 5 \times 10^6 \times (7.387 \times 10^{-4}) + 2020 = -36.461$$

$$\begin{aligned} c_2 &= c_a + \frac{c_b}{17000f_c} + 6.45 \times 10^{-4} \frac{c_c}{L_d^2} = 0.977 + \frac{81.382 \times 10^4}{17000 \times 42} + 6.45 \times 10^{-4} \times \frac{-36.461}{0.78^2} \\ &= 2.087 \end{aligned}$$

横向裂缝缝隙平均宽度，按式 (C.1-1) 计算：

$$\begin{aligned} b_j &= 1000L_d \left(\varepsilon_{sh} + \alpha_c \Delta T_\zeta - \frac{c_2 f_t}{E_c} \right) \\ &= 1000 \times 0.78 \times \left(4.439 \times 10^{-4} + 30 \times 1 \times 10^{-5} - \frac{2.087 \times 3.22}{31000} \right) = 0.407 \text{mm} \end{aligned}$$

满足缝隙平均宽度小于 0.50mm 的要求

(4) 计算横向裂缝处的初始弯沉传荷系数

裂缝处的初始抗剪能力，按式 (C.2-3) 计算：

$$S = 1.97h_c e^{-1.26b_j} = 1.97 \times 0.26 \times e^{-1.26 \times 0.407} = 0.307$$

路肩类型采用带传力杆的水泥混凝土路肩，取 $J_s = 4$

横向裂缝的刚度，按式 (C.2-2) 计算：

$$\begin{aligned} \text{Log}(J_c) &= -2.2e^{-e^{-\frac{J_s+11.26}{7.56}}} - 28.85e^{-e^{-\frac{s-0.35}{0.38}}} + 49.8e^{-e^{-\frac{J_s+11.26}{7.56}}} \cdot e^{-e^{-\frac{s-0.35}{0.38}}} \\ &= -2.2e^{-e^{-\frac{4+11.26}{7.56}}} - 28.85e^{-e^{-\frac{0.307-0.35}{0.38}}} + 49.8e^{-e^{-\frac{4+11.26}{7.56}}} \cdot e^{-e^{-\frac{0.307-0.35}{0.38}}} \\ &= 2.882 \end{aligned}$$

横向裂缝处初始的弯沉传荷系数按式 (C.2-1) 计算：

由于采用水泥稳定碎石基层，取 $k_{b,j} = 30\%$ ，

$$R = 2.5\rho - 1.25 = 0.75$$

$$\begin{aligned}
k_{i,j} &= 100 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{1 + 10^{\left[\frac{0.214 - 0.183 \frac{a}{r_g} - \log(J_c) - R \right] / 1.18}} \right] \left(1 - \frac{k_{b,j}}{100} \right) \right\} \\
&= 100 \times \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{1 + 10^{[(0.214 - 0.238 / 0.867 - 2.882 - 0.75) / 1.18]}} \right] \left(1 - \frac{30}{100} \right) \right\} \\
&= 99.98\%
\end{aligned}$$

(满足初始弯沉传荷系数大于 95%的要求)

(5) 荷载应力

按式 (B.2.2-1) 计算设计轴载在面层板临界荷位处产生的荷载应力:

$$\begin{aligned}
\sigma_{c,ps} &= \frac{D_c}{D_c + \varphi D_b} \frac{6P_s}{h_c^2} M_{cb} \\
&= \frac{46.449}{46.449 + 0.816 \times 1.103} \times \frac{6 \times 100 \times 10^{-3}}{0.26^2} \times 0.197 \\
&= 1.714 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

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.3-1) 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, 混凝土路肩 $k_r = 0.5$ (C.2.1 条); 疲劳应力系数 $k_f = N_e^\lambda = (2500 \times 10^4)^{0.057} = 2.640$ (式 (B.2.5-1)); 综合系数 $k_c = 1.1$ (表 B.2.1); 考虑板底脱空影响的应力修正系数 $k_q = 1.5$ (C.3.1 条)。

$$\sigma_{c,pr} = k_r k_f k_c k_q \sigma_{c,ps} = 0.5 \times 2.640 \times 1.1 \times 1.5 \times 1.714 = 3.733 \text{ MPa}$$

(6) 结构极限状态校核

查表 3.0.2 及表 3.0.4, 一级公路、低变异水平条件下, $\psi_1 = 0.12$, $\psi_2 = 0$, γ_r 按式 (3.0.4-3) 计算得到可靠度系数 $\gamma_r = 1.12$ 。

按式 (3.0.5) 校核路面结构极限状态是否满足要求:

$$\gamma_r \sigma_{c,pr} = 1.12 \times 3.733 = 4.18 \text{ MPa} < f_r = 5.0 \text{ MPa}$$

满足结构极限状态要求, 所选的普通混凝土面层计算厚度 0.26m 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。

综上初拟的板厚和配筋率满足裂缝缝宽、裂缝处弯沉传荷系数以及横向裂缝密集区不产生行车荷载纵向疲劳断裂的要求, 因此设计是合理的。

(7) 计算钢筋配制间距以及根数

$$\text{纵向钢筋的配置间距: } \frac{\pi \cdot d_s^2}{4 \cdot \rho \cdot h_c} = \frac{3.14 \times 0.016^2}{4 \times 0.8\% \times 0.26} = 0.097 \text{ m}$$

$$\text{每延米纵向钢筋根数: } \frac{1}{0.097} = 10.310 \approx 11 \text{ 根}$$