



CECS XXX: 2020

中国工程建设协会标准

公路斜向预应力混凝土路面
技术规范

Technical specification for cross-tensioned prestressed concrete pavement of
highway

(征求意见稿)

中国工程建设协会标准

公路斜向预应力混凝土路面 技术规范

Technical specification for cross-tensioned prestressed concrete
pavement of highway
(征求意见稿)

征求意见稿

主编单位：长安大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20XX 年 XX 月 XX 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2019 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>通知》的要求，编制组在广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外有关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制本规程。

本规程共分为 7 章，主要内容包括：总则，术语、符号，路面结构设计，材料，施工方法和技术要求，质量检查与验收。

本规程由中国工程建设标准化协会管理，由长安大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请寄往解释单位（地址：陕西省西安市陕西省西安市碑林区二环南路中段 126 号，邮编：710064）。

主编单位：长安大学

参编单位：陕西省交通建设集团公司

西安汉河环保科技有限公司

陕西中霖集团工程设计研究有限公司

主要起草人：张东省、韩森、徐鸥明、张威、韩霄、韩微微、刘亚敏、高巍、张浩、桂学、贾德生、董仕豪、刘百林。

主要审查人：王秉纲

目 录

1 总则.....	5
2 术语、符号.....	5
2.1 术语.....	5
2.2 符号.....	6
3 基本规定.....	8
3.1 设计参数.....	8
3.2 结构构造与组合.....	9
4 路面结构设计.....	10
4.1 几何尺寸.....	10
4.2 预应力筋配置.....	10
4.3 构造钢筋配置.....	11
4.4 滑动功能层.....	12
4.5 接缝.....	12
4.6 锚固区.....	15
5 材料.....	16
5.1 混凝土材料.....	16
5.2 普通钢筋.....	16
5.3 预应力筋.....	16
5.4 缓凝胶粘材料.....	17
5.5 锚具.....	17
5.6 滑动功能层材料.....	17
5.7 接缝材料.....	17
6 施工方法和技术要求.....	17
6.1 施工机具.....	17
6.2 施工准备.....	18
6.3 施工工序.....	18
6.4 滑动功能层铺设.....	20
6.5 预应力筋加工和构造钢筋布置.....	20
6.6 斜向预应力混凝土路面浇筑.....	21
6.7 预应力筋张拉.....	21
6.8 养生.....	22
7 质量检查与验收.....	22
7.1 一般要求.....	22
7.2 滑动功能层的施工质量检查与验收.....	22
7.3 钢筋加工及安装.....	23
7.4 预应力筋的布置和张拉.....	23
7.5 水泥混凝土面板的质量检查与验收.....	24
附 录 A（规范性附录） 斜向预应力混凝土路面面板应力分析及计算 流程....	26

A.1 力学模型	26
A.2 荷载疲劳应力分析	26
A.3 温度疲劳应力分析	29
A.4 斜向预应力混凝土路面计算流程	31
附录 B 斜向预应力混凝土路面计算示例	错误!未定义书签。
B.1 交通资料	错误!未定义书签。
B.2 计算温度疲劳应力 σ_{tr}	35
B.3 纵向预应力值 σ_{py} 计算	35
B.4 预应力筋布置间距 l 计算	35
附录 C 斜向预应力混凝土路面预应力筋张拉记录表	39

征求意见稿

公路斜向预应力混凝土路面技术规范

1 总则

1.0.1 为规范公路斜向预应力混凝土路面的设计、施工及验收,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斜向预应力混凝土路面设计、施工及质量检验评定、验收等工作。适用场合有复合式路面、桥头沉陷防治路面、重载交通路面、收费广场及隧道路面等。

1.0.3 本规范规定了公路斜向预应力混凝土路面的设计及施工程序。

1.0.4 各等级公路应用斜向预应力混凝土路面设计、施工及质量评定方法,除应符合本规范规定外,尚应符合国家和行业现行有关标准规范的规定。

2 术语、符号

2.1 术语

下列术语和定义适用于本规范。

2.1.1 斜向预应力混凝土路面 Cross-tensioned prestressed concrete pavement

是在公路水泥混凝土路面板内设置双斜向预应力筋,采用后张法在路面两侧或一侧施加斜向预压应力的水泥混凝土路面。

2.1.2 滑动功能层 Sliding function layer

是在路面基层顶面设置的用于斜向预应力路面张拉时可微滑动的功能层。

2.1.3 缓凝胶粘材料 Retard-bonded adhesive material

是涂敷在预应力钢绞线表面、有一定厚度的专用胶粘材料,具有良好的防腐性能,且具有缓凝特性。

2.1.4 临界荷位 Critical load position

是斜向预应力混凝土路面在荷载和温度综合作用下产生最大疲劳损坏的位置。

2.1.5 斜向预应力路面板等价弯拉应力 Equivalent bending tensile stress of inclined prestressed pavement slab

是指在斜向预应力混凝土路面板内混凝土抗弯拉应力与斜向预应力的纵向分力叠加形成的应力。

2.2 符号

下列符号和代号适用于本规范。

2.2.1 材料性能

D_b ——混凝土路面板下整体性基层截面弯曲刚度, 单位为兆牛·米(MN·m);

D_c ——混凝土面层的截面弯曲刚度, 单位为兆牛·米(MN·m);

E_b ——混凝土路面板下整体性基层弯拉弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_c ——混凝土面层弯拉弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_i ——第 i 结构层的回弹模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_o ——路床顶面综合回弹模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_t ——板底地基当量回弹模量, 单位为兆帕 (MPa);

E_x ——粒料层的当量回弹模量, 单位为兆帕 (MPa);

f_r ——混凝土弯拉强度标准值, 单位为兆帕 (MPa);

ν_b ——混凝土路面板下整体性基层的泊松比;

ν_c ——混凝土面层的泊松比;

α_c ——混凝土的线胀系数;

γ_g ——混凝土路面双层板的总相对刚度半径, 单位为米 (m)。

2.2.2 作用、作用效应及承载力

N_e ——使用年限内车道的标准轴载累计作用次数, 单位为轴次/车道;

N_i ——各类轴型 i 级轴载的作用次数, 单位为轴次/(车道·日);

N_s ——设计轴载的作用次数, 单位为轴次/(车道·日);

P_s ——设计轴载重, 单位为千牛(kN);

σ_{con} ——预应力筋容许张拉控制应力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_l ——预应力总损失值, 单位为兆帕 (MPa);

σ_{pr} ——荷载疲劳应力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_{ps} ——荷载应力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_{py} ——有效预应力引起的混凝土面层中的纵向平均压应力，单位为兆帕 (MPa) (MPa);

$\sigma_{t, max}$ ——最大温度梯度时混凝土面层产生的最大温度应力，单位为兆帕 (MPa) (MPa);

σ_{tr} ——温度疲劳应力，单位为兆帕 (MPa)。

2.2.3 几何参数

A_p ——预应力筋公称截面积单位为平方毫米 (mm^2);

h_b ——混凝土路面板下整体性基层相当板的厚度，单位为毫米 (mm);

h_c ——混凝土面层的厚度，单位为毫米 (mm);

h_x ——粒料基层的总厚度，单位为毫米 (mm);

l ——预应力筋布置间距，单位为毫米 (mm);

θ ——预应力筋与路面的纵向夹角，单位为度 ($^\circ$)。

2.2.4 计算系数

C_V ——变异系数;

g_r ——交通量年平均增长率 (%);

k_c ——考虑偏载和动载等因素对路面疲劳损坏影响的综合系数;

k_f ——考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数;

k_t ——温度疲劳应力系数;

T_g ——混凝土面板的最大温度梯度标准值，单位为摄氏度/米 ($^\circ\text{C}/\text{m}$);

t ——设计使用年限，单位为年 (a);

γ ——可靠度系数。

条文说明：本节所列符号为本规范中的主要符号。为便于查阅，符号按“材料性能”，“作用、作用效应及承载力”，“几何参数”及“计算系数”等分类列出，并依先拉丁字母、后希腊字母的顺序排列。

3 基本规定

根据斜向预应力混凝土路面的受力特征及特殊结构构造,规定斜向预应力混凝土路面的设计参数和结构构造要求。

3.1 设计参数

3.1.1 斜向预应力混凝土路面结构的设计安全等级及相应的设计基准期、目标可靠指标与目标可靠度,应符合《公路水泥混凝土路面设计规范》JTGD40-2011 中 3.1 的要求。

3.1.2 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、中和高三个等级,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。二级以下公路变异水平等级应为高级。变异系数范围应符合《公路水泥混凝土路面设计规范》JTGD40-2011 中 3.2 的要求。

3.1.3 斜向预应力混凝土路面结构设计应以面层在设计基准期内,在行车荷载、温度梯度和基底摩擦力的综合作用下,不产生疲劳断裂为设计标准,其设计表达式如公式(1):

$$\sigma_{py} \geq \gamma(\sigma_{pr} + \sigma_F + \sigma_{tr}) - f_r \quad (1)$$

式中:

σ_{py} ——有效预应力引起的混凝土中的纵向平均压应力,单位为兆帕(MPa);

σ_F ——由基层摩阻引起的纵向拉应力;

γ ——可靠度系数,按 3.1.1 取值;

σ_{pr} ——荷载疲劳应力(按附录 A 的要求计算,计算方法参见附录 B),单位为兆帕(MPa);

σ_{tr} ——温度疲劳应力(按附录 A 的要求计算,计算方法参见附录 B),单位为兆帕(MPa);

f_r ——混凝土弯拉强度标准值,单位为兆帕(MPa)。

条文说明:路面中所施加的预应力大小主要由交通荷载、温度引起的翘曲约束、板收缩期间的板底摩擦约束决定。在车轮荷载的重复作用下,尽管荷载应力、温度应力及摩阻应力之和小于混凝土的极限弯拉强度,预应力路面板仍会发生疲劳破坏,因此,在进行路面设计时,以疲劳设计准则计算所施加预应力值的大小。

3.1.5 斜向预应力混凝土路面设计车道在设计基准期内所承受的设计轴载累

计作用次数应按《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40-2011 中附录 A 的要求进行调查和分析,按设计基准期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,分级范围应符合《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40-2011 中 3.7 的要求。

3.1.6 斜向预应力混凝土路面水泥混凝土的设计强度应采用 28 天龄期弯拉强度。各交通荷载等级要求的水泥混凝土弯拉强度标准值不得低于表 1 的要求。

表1 水泥混凝土弯拉强度标准值

交通荷载等级	弯拉强度标准值 MPa
极重、特重、重	≥ 5.0
中 等	4.5
轻	4.0

条文说明:在可靠度设计方法中,各项设计参数通常都应选用均值作为标准值。考虑到混凝土强度值在工程中的应用习惯,本规范的强度标准值按随机变量分布函数的 85%分位值取值。这一取值标准所产生的影响,已在可靠度系数的推演中考虑。

3.2 结构构造与组合

3.2.1 斜向预应力混凝土路面的路基、基层、路面横向坡度、路肩、排水及材料选型应符合《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40-2011、《公路路基施工技术规范》JTG F10 和《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20 的有关要求。

3.2.2 斜向预应力混凝土路面面板与基层之间应设滑动功能层。

条文说明:国家标准 GB50422-2007《预应力混凝土路面工程技术规范》规定在预应力混凝土路面面板与基层之间须设置滑动层。在预应力二次张拉之前,滑动层的铺设能有效地降低路面板板底摩擦系数,减少预应力损失,增大路面板板内有效预压应力值,减小路面板板内温度应力,防止路面板由于在水泥混凝土初始浇筑后干、温缩现象引起开裂,在二次张拉之后,滑动层要求逐渐固结,形成一定的强度,与路面板之间形成啮合状态,给路面板提供一定的摩擦阻力,使超长路面板在温度作用下不至于板端位移过大而造成拱起、胀缝挤碎等病害,同时由于摩擦阻力的存在,会提高路面板承载能力。滑动层铺设的关键是确定最优的滑动层材料类型和合理的结构参数。

3.2.3 斜向预应力混凝土可作为复合式路面的基层。

4 路面结构设计

通过对斜向预应力混凝土路面进行受力模拟与分析,规定斜向预应力混凝土路面几何尺寸、预应力筋配置、构造钢筋配置、滑动功能层、接缝及锚固区等技术要求。

按疲劳断裂设计标准进行结构分析时,以 100kN 单轴-双轮组荷载作为设计轴载,对极重交通荷载等级的斜向预应力混凝土路面,宜选用货车中占主要份额的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《公路水泥混凝土路面设计规范》JTG D40-2011 中公式(3.6)换算为设计轴载的作用次数 N_s 。

4.1 几何尺寸

4.1.1 斜向预应力混凝土路面板厚应根据公路等级、交通荷载、当地温度及使用性能要求确定,板厚宜为 160mm~260mm。

条文说明:板厚采用试算法进行,通常设定一个容许范围,只要符合此范围内要求的板厚即可通过,由于混凝土对超载很敏感,同时,增加板厚可使路面使用寿命有较大的延长。

4.1.2 斜向预应力混凝土路面板宽应根据公路等级及应用场合确定,高速公路或一级公路板宽应为单幅路面宽度,二级及以下公路应为单幅或全幅路面宽度,收费广场板宽宜为 2~3 倍车道宽度。

4.1.3 斜向预应力混凝土路面板长:当斜向预应力路面做面层时,预应力筋连续不断开,每 15~20 米切割缩缝,以防止基层沉降产生不规则裂纹,影响美观。当斜向预应力混凝土做复合路面基层时,可以通过两构造物(桥梁或隧道)之间的长度为板长。

4.2 预应力筋配置

4.2.1 预应力筋的配置应符合下列要求:

a) 预应力筋与路面纵向夹角宜为 $30^\circ \sim 45^\circ$,高速公路或一级公路路面整幅施工时取大值,二级公路及以下单幅施工时取小值;

b) 预应力筋宜配置在路面面板厚 $1/2$ 下 20mm~40mm 范围内,混凝土板厚者取大值。

4.2.2 预应力筋的布置间距宜为 500mm~1000mm。

条文说明：

根据板厚和预应力值的大小和张拉设备要求，拟定预应力筋布置角度，通过下式计算预应力筋布置间距 l ：

$$l = \frac{2(\sigma_{con} - \sigma_l) \times A_p \times \cos\alpha}{\sigma_{py} \times h \times \tan\alpha}$$

4.2.3 预应力损失值计算应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关要求。预应力总损失也可按预应力筋张拉控制应力的 20% 确定。

条文说明：根据弹性设计准则计算最小纵向预压应力，根据疲劳准则计算最小纵向预压应力，张拉控制应力为预应力筋极限抗拉强度的 85%。

4.3 构造钢筋配置

4.3.1 斜向预应力混凝土路面板端应布置距板底 50mm 的补强钢筋网，见图 1。

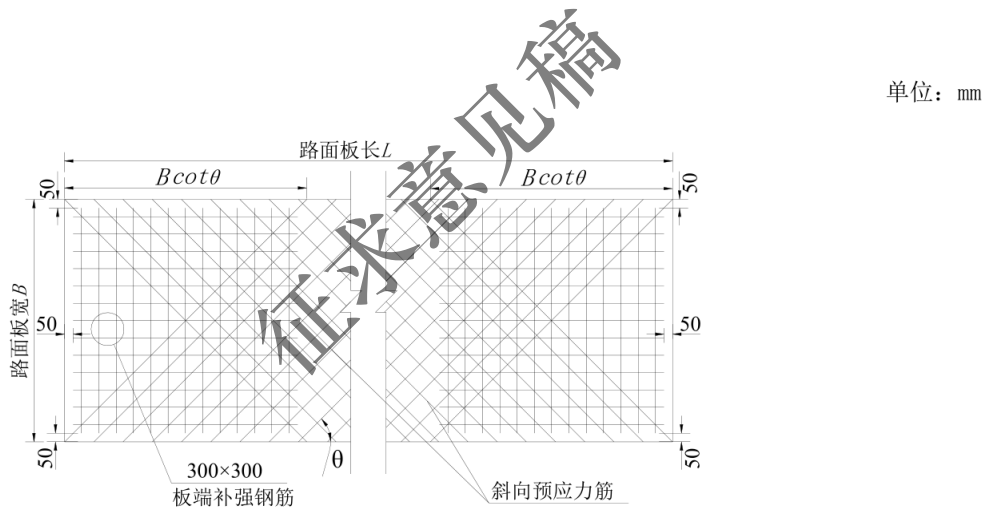


图1 板端补强钢筋网构造

条文说明：由于在斜向预应力混凝土路面两端有部分区域未能布置预应力筋，这些区域应力分布不均匀，因此路面板两端设置由间距 300mm 的 $\phi 12$ 钢筋组成 $B\cot\theta$ 长度的板端补强钢筋，另外，在板端处设置 4--5m 的钢筋混凝土路面板，预应力路面和钢筋混凝土板间应设置胀缝，防止板端和接缝处发生破坏。

4.3.2 斜向预应力混凝土路面锚固区应布置构造钢筋，见图 2。

单位：mm

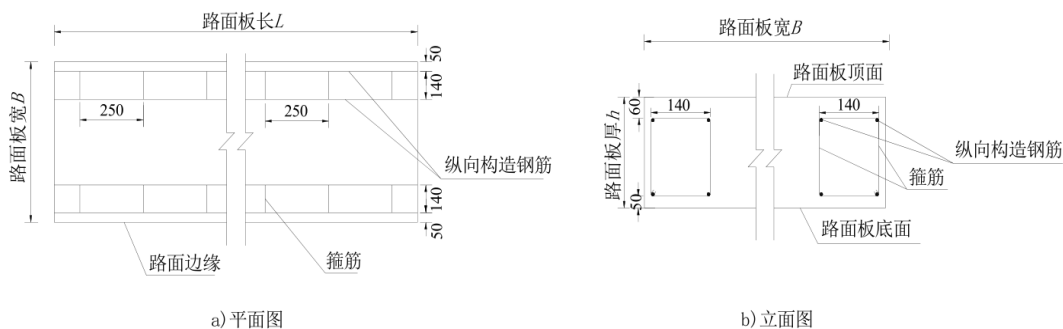


图2 锚固区构造钢

4.3.3 斜向预应力混凝土路面预应力筋下应设置架立钢筋架，架立钢筋架应保证预应力筋稳妥牢固。

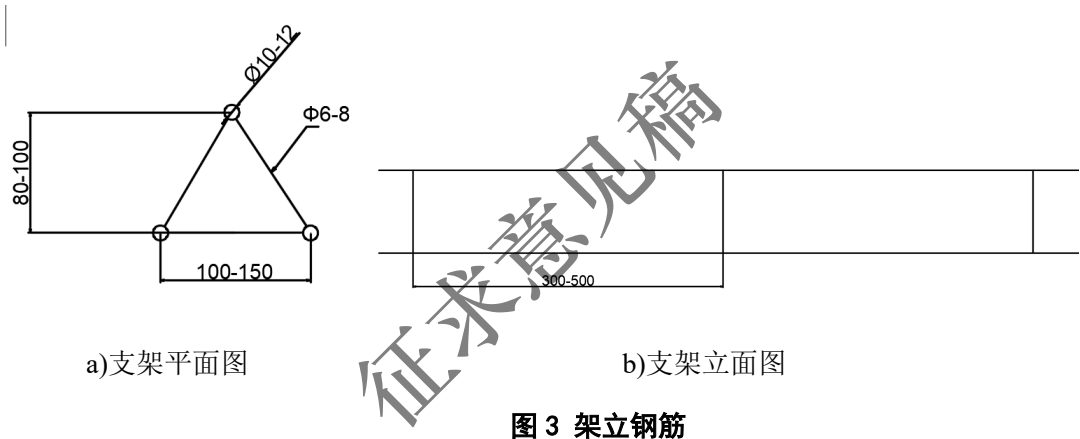


图3 架立钢筋

4.4 滑动功能层

- 4.4.1** 滑动功能层应铺设在基层的顶面，基层应平整无坑凹。
- 4.4.2** 滑动功能层材料应为天然砂上铺设双层聚乙烯薄膜，薄膜厚度不小于 0.2mm，砂层厚度不大于 5mm。
- 4.4.3** 聚乙烯薄膜之间的搭接宜采用粘贴方式，搭接宽度不应小于 300mm。

4.5 接缝

- 4.5.1** 斜向预应力混凝土路面纵向接缝应符合下列要求：
- a) 纵向施工缝不宜设置拉杆。但两幅路面预应力筋应用专用套管连接。
 - b) 纵向施工缝上部应锯切槽口，深度宜为 30mm~40mm，宽度宜为 3mm~5mm，槽内应灌塞填缝料。
- 4.5.2** 斜向预应力混凝土路面横向接缝应符合下列要求：

a) 斜向预应力直接作为路面面层时，每日施工结束时，应设置横向施工缝，施工缝应在路面横断面上与另一副路面的切割缝对齐，施工缝上部应锯切槽口，深度宜为 30mm~40mm，宽度宜为 3mm~5mm，槽内应灌塞填缝料，预应力筋连续布置不间断，不设传力杆。

b) 与其他水泥混凝土路面相接时，应按普通水泥混凝土路面胀缝设置，胀缝处应设传力杆，缝内应填塞填缝料，传力杆应采用光圆钢筋，胀缝宽度宜为 5mm~10mm，尺寸和间距见表 2，其构造如图 4 所示，传力杆的设置不应妨碍相邻混凝土板自由伸缩，钢筋表面应作防锈处理。

条文说明：斜向预应力混凝土路面板收缩和伸长变形受到基层顶面的摩擦力约束。长预应力路面板之间的胀缩只在板端一定范围进行，板端位移量一般为 5--10mm，因此，胀缝宽度取 5--10mm。长板和寒冷地区取大值

表2 传力杆尺寸和间距

单位：mm

面层厚度	传力杆直径	传力杆最小长度	传力杆最大间距
≤180	22	350	300
200	25	350	300
220	28	400	300
240	30	400	300
260	32	450	300

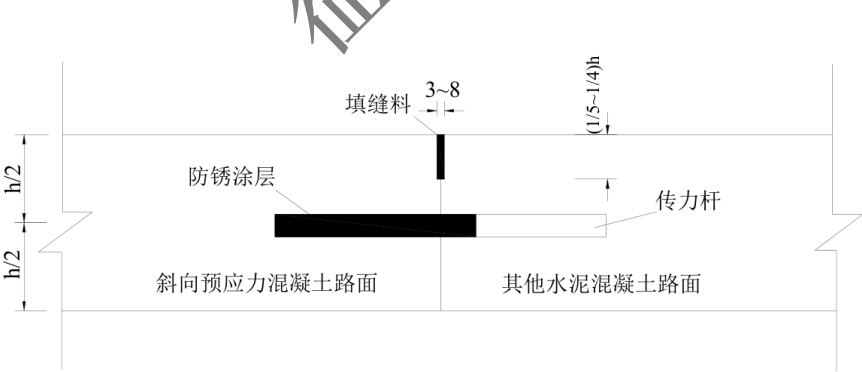


图4 横缝构造

c) 在邻近桥梁或其他固定构造物处，应设置横向胀缝，胀缝处应设置可滑动的传力杆，缝内应填充填缝料。胀缝宽度宜为 20mm~25mm，传力杆应采用光圆钢筋，尺寸和间距应符合表 2 的要求，胀缝构造见图 5。宜与其他构造物公用胀缝，胀缝构造同其他构造物胀缝。

单位：mm

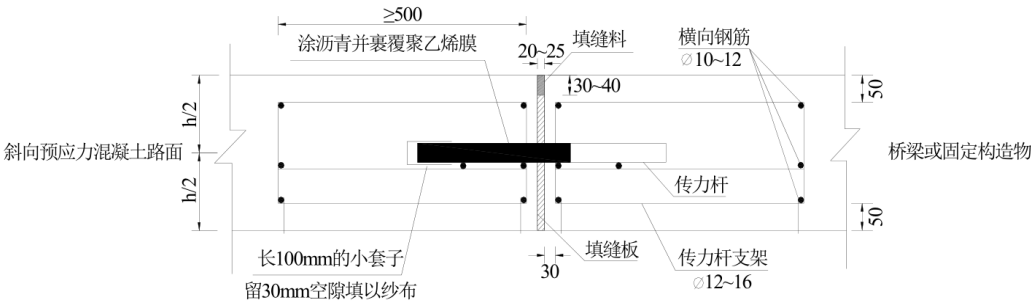


图5 胀缝构造

条文说明：因斜向预应力混凝土路面路面板较长，考虑到温度热胀时会对构造物或桥梁产生影响，因此斜向预应力路面在和构造物或桥梁结合处应设置胀缝。胀缝的形式选择可参照桥梁中的伸缩缝设置。

4.5.3 斜向预应力混凝土路面与沥青路面相接时，应设置不小于 3m 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（见图 6）。过渡板顶面应设横向拉槽，沥青面层与过渡板之间应粘结良好。过渡板与预应力混凝土面层板相接处宜设置直径 25mm、长 700mm、间距 400mm 的拉杆，过渡板混凝土的强度等级应与斜向预应力混凝土强度等级相同。

单位：mm

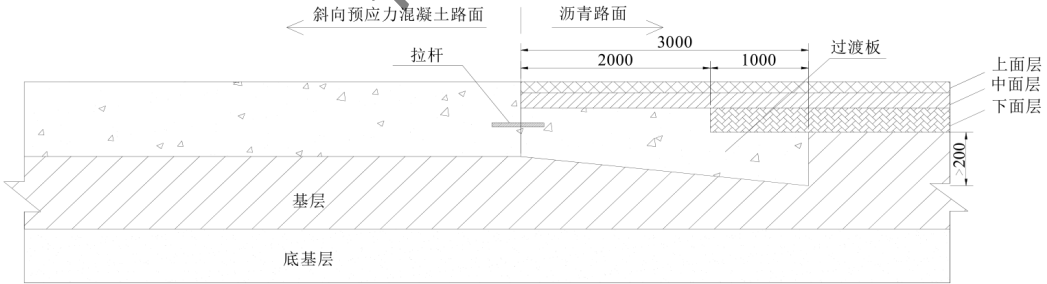


图6 斜向预应力混凝土路面与沥青路面相接段的构造布置

条文说明：在混凝土面层与沥青面层相接处，由于沥青面层难以抵御混凝土面层的膨胀推力，易于出现沥青面层的推移拥起，而形成接头处的不平整，引起跳车。过渡板上的沥青层较薄，上下层模量比较大，为了防止沥青层发生剪切推移，沥青层最小厚度应大于 40mm。对于过渡板表面应进行拉毛处理，以加强沥青层与过渡板的黏结。

4.6 锚固区

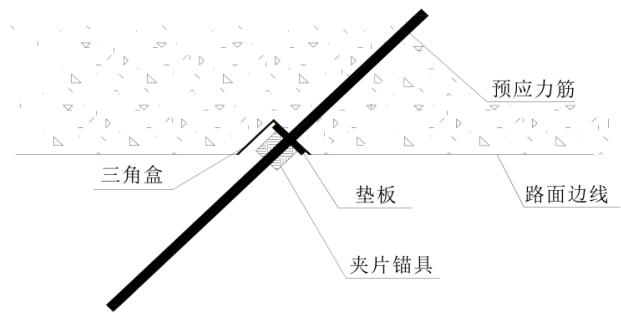
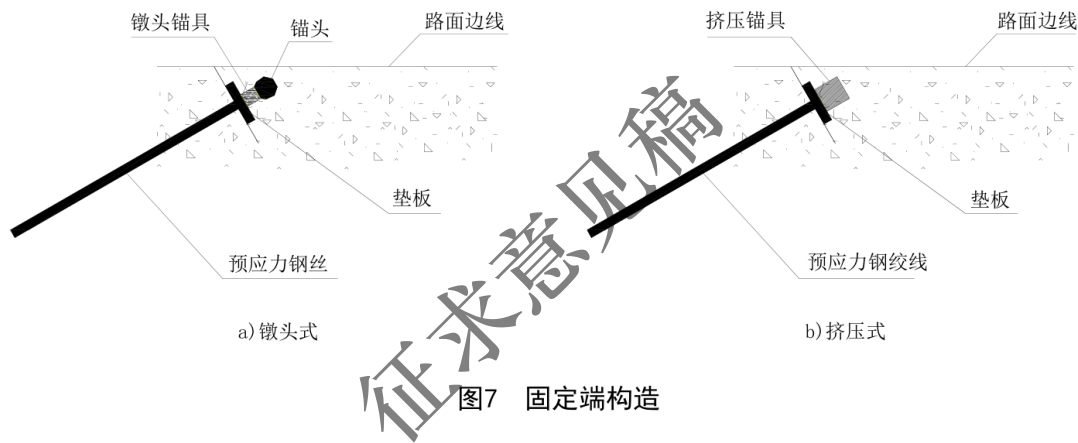
4.6.1 斜向预应力混凝土路面锚固区局部受压承载力验算，应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关要求。

4.6.2 预应力筋的锚具应根据结构特点和张拉施工方法，按表 3 选用。

表3 锚具选用

预应力筋品种	张拉端	固定端
预应力钢绞线	夹片锚具	挤压锚具
预应力钢丝	夹片锚具	镦头锚具

4.6.3 斜向预应力混凝土路面锚固区形式有固定端与张拉端两种，其构造分别见图 7 和图 8。



5 材料

5.1 混凝土材料

5.1.1 斜向预应力路面混凝土用水泥应采用道路硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，水泥的技术要求应符合《通用硅酸盐水泥》GB 175 和《道路硅酸盐水泥》GB 13693 的要求，推荐使用低坍度混凝土，以降低收缩裂缝宽度，不得使用早强型水泥。

条文说明：考虑到斜向预应力混凝土应具有一定的弹性，混凝土强度不宜过高，斜向预应力路面做复合路面时，混凝土强度宜为 C25。直接做面层时，混凝土强度等级不应低于 C30，也不宜高于 C35。应采用收缩、徐变小的混凝土，减少由混凝土收缩和徐变引起的预应力损失，增大板内有效预应力。

5.1.2 斜向预应力混凝土路面使用的粗集料、细集料应符合《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F3-2014 的相关要求。

5.1.3 清洗集料、拌和混凝土及养生所用的水应符合《混凝土用水标准》JGJ 63-2006 的相关要求。

5.2 预应力筋

5.2.1 斜向预应力混凝土路面用预应力筋可选用预应力钢丝或钢绞线，预应力钢丝性能应符合《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223 的相关要求，钢绞线性能应符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的相关要求。

5.2.2 斜向预应力路面用钢丝或钢绞线做为预应力筋时，钢丝或钢绞线表面应涂敷缓凝胶粘材料。

5.2.3 预应力筋中间不得有接头。

5.3 普通钢筋

斜向预应力混凝土路面用普通钢筋可根据使用部位和功能确定，其等级及规格应符合表 4 的要求。

表4 钢筋等级及规格

部位和功能	钢筋等级	钢筋直径 mm	外形
板端补强钢筋	HRB335	12	螺纹
纵向构造钢筋	HRB335	12	螺纹
箍筋	HPB235	6	光圆
架立钢筋	HPB235	6	光圆

5.4 缓凝胶粘材料

5.4.1 缓凝胶粘材料应无毒、无害、无污染，有防腐功能，常温下呈半固态，在混凝土内 具有先无粘结后固化的特性。

5.4.2 缓凝胶粘材料的缓凝期应在 7 天~14 天。

5.5 锚具

5.5.1 斜向预应力混凝土路面用锚具应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的相关要求。

5.5.2 锚具夹片应具有良好的自锚性能、松锚性能和重复使用性能。锚具性能应符合《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的相关要求。

5.6 滑动功能层材料

5.6.1 滑动功能层的材料可选用土工织布、油毛毡、聚乙烯薄膜，细粒状材料可选用粒径相近的细砂或石屑。

5.6.2 细粒状材料用于滑动功能层时，细粒状材料的厚度不大于 5mm,其上应铺设防水材料。

5.7 接缝材料

5.7.1 斜向预应力混凝土路面胀缝板宜采用塑胶、橡胶泡沫板或沥青纤维板。

5.7.2 斜向预应力混凝土路面纵向与横向切割缝（施工缝）填缝料应优选耐老化性能好的树脂类、橡胶类或改性沥青类。填缝料包括常温施工式和加热施工式，其技术指标应符合《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 的要求。

6 施工方法和技术要求

6.1 施工机具

6.1.1 斜向预应力混凝土路面施工机具应满足施工进度和质量的要求。

6.1.2 混凝土可采用工厂生产或现场拌制。现场混凝土拌合机应采用强制式水泥混凝土搅拌机或搅拌站。

6.1.3 混凝土的运输机具及运输要求应符合《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 的相关要求。

6.1.4 混凝土的摊铺成型可采用滑模摊铺机、三辊轴整平机或小型机具铺筑，所需的摊铺成型机应按《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 的相关要求选用。

6.2 施工准备

6.2.1 开工前，建设单位应组织设计、施工、监理单位进行技术交底。

6.2.2 斜向预应力混凝土路面面板施工前，路基及基层工程质量应符合《公路路基施工技术规范》JTG F10 和《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20 的相关要求。

6.2.3 材料进场时应按相关要求进行现场验收。预应力混凝土路面面施工前，应检查所需材料的储量、性能，确保所有材料的数量和质量。

6.2.4 斜向预应力混凝土的配合比设计应符合《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 的相关要求。

6.3 施工工序

6.3.1 斜向预应力混凝土路面板的施工应由经审查批准的施工组织设计和施工技术方案。

6.3.2 斜向预应力混凝土路面的施工可按图 9 所示的工序进行。

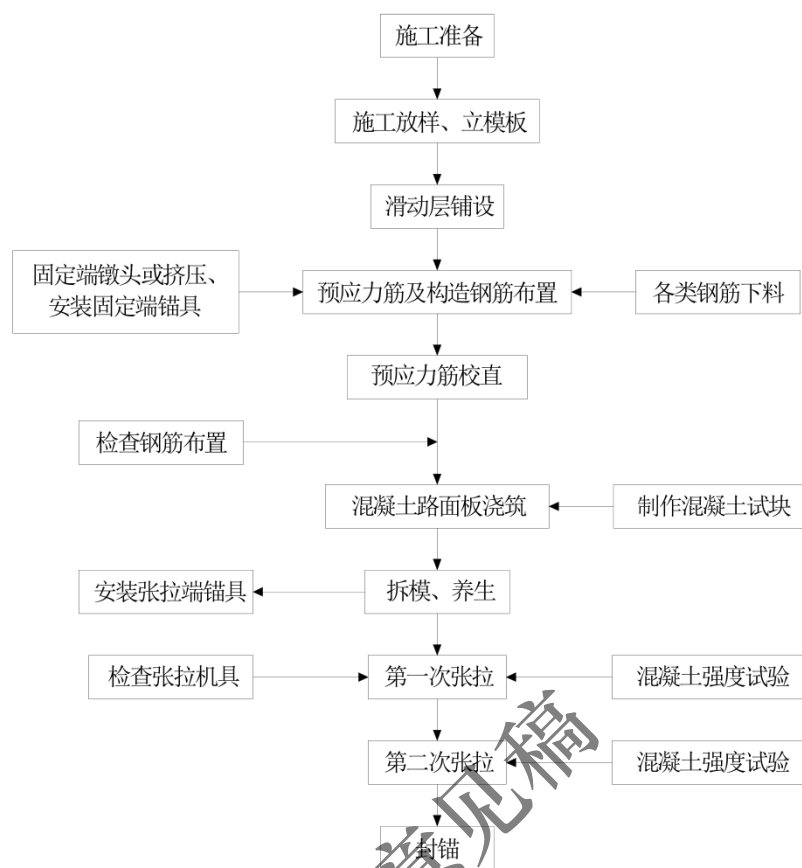


图9 斜向预应力混凝土路面面板施工工序

条文说明：

斜向预应力混凝土路面施工要严格按照施工工序进行，为保证路面施工质量和施工进度，应注意以下几点：

- ② 混凝土路面固定端的垫板与锚具要紧密接触，不得留有缝隙。
- ② 预应力筋铺设完毕后要进行人工校直，采用钢筋支撑架将预应力筋支撑至设计位置，误差须控制在 30mm 以内，支撑架与预应力筋之间用细铁丝绑扎，以免浇筑混凝土时跑位。
- ③ 固定端锚具需包裹约 10mm 厚的弹性材料，如塑料泡沫等，使固定端有一定的活动余地，避免预应力筋张拉时固定端锚具发生偏移，而使混凝土破碎。
- ④ 混凝土浇筑时，应避免由于混凝土的大量倾倒，预应力筋跑位，严禁踏压碰撞预应力筋。
- ⑤ 固定端、张拉端混凝土必须振捣密实，保证混凝土的强度，以免预应力筋张拉时混凝土发生破坏。

⑥预应力筋张拉时要严格控制加力速度和张拉力大小，保证持荷时间。

⑦通过理论计算分析和试验路的铺筑效果可知，斜向预应力混凝土路面铺筑应避免在高温季节施工，以减少温度效应的影响，并且应在混凝土路面长度范围内一次浇筑完成。

6.4 滑动功能层铺设

6.4.1 滑动功能层铺设前，应清扫斜向预应力混凝土板范围内的杂物，全面检查基层质量，对发现的破损处应进行修补。

6.4.2 滑动功能层铺设时，应先撒布符合滑动功能层技术要求的天然砂，厚度应均匀，天然砂撒布合格后，再敷设防水材料，防水材料应宽于路面宽度100mm，安装模板时两端向上折起，以防止混凝土模板底部漏浆。

6.4.3 防水材料铺设完成后，应做好保护工作，不得穿钉鞋作业或使用尖锐物打击。若防水材料破损，应及时进行修补。

6.5 预应力筋加工和构造钢筋布置

6.5.1 施工前，应按照图纸要求加工预应力筋，应用专用设备在钢绞线上敷设缓凝粘结层。并按图纸要求截取相应长度。

6.5.2 应检查预应力筋、构造钢筋的规格、尺寸和数量。

6.5.3 预应力筋和构造钢筋下料应使用机械切割，不得使用电焊或者气割下料。

6.5.4 预应力筋和构造钢筋布置应符合下列要求：

a) 应按设计位置标定预应力筋与构造钢筋，先布置板端补强钢筋网与锚固区构造钢筋，再布置预应力筋；

b) 预应力筋应与垫板垂直，预应力筋交叉处应绑扎定位；

c) 应用架立钢筋将预应力筋架至设计位置，不得使用水泥混凝土块架立预应力筋；

d) 应逐根检查预应力筋绑扎和定位情况，允许偏差应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的相关要求；

e) 用高强钢丝做预应力筋时，预应力筋铺设完毕后，应将缓凝胶粘材料均匀涂刷在预应力筋上。

6.5.5 预应力筋配套锚具的安装应符合《无粘结预应力混凝土结构技术规程》

JGJ 92 的相关要求。

6.6 斜向预应力混凝土路面浇筑

6.6.1 斜向预应力混凝土路面浇筑应符合《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 的相关要求。

6.6.2 浇筑混凝土时，应符合以下要求：

- a) 预应力筋布置完毕后，应进行验收，当确认合格后方可浇筑混凝土；
- b) 浇筑时，宜选用布料机、挖掘机、吊斗或其他转运设备配合摊铺；
- c) 混凝土应全面振捣密实，锚固区混凝土应加强振捣。以防混凝土面板张拉区出现蜂窝和麻面。

6.7 预应力筋张拉

6.7.1 斜向预应力混凝土路面采用后张法施工。

6.7.2 预应力筋的张拉应符合下列要求：

- a) 张拉前应进行张拉设备校验；
- b) 高速公路、一级公路斜向预应力混凝土路面的预应力筋宜采用两端张拉；当张拉位置受限时，可采用一端张拉，一端张拉长度不宜大于 10 米，二级公路、收费广场斜向预应力混凝土路面的预应力筋可一端张拉，张拉顺序为沿路面纵向从施工缝中间向两端依次对称张拉；
- c) 预应力施加应采用二次张拉工艺。第一次张拉宜在面板浇筑完成 24h 后，且混凝土强度不得低于设计抗压强度的 30%，第一次张拉应力宜为 $0.3 \sigma_{con} \sim 0.5 \sigma_{con}$ ；第二次张拉宜在面板浇筑完成 6d~7d 后，且混凝土强度不得低于设计抗压强度的 75%，第二次应采用超张拉，张拉应力宜为 $1.05 \sigma_{con}$ ，持荷 2min，再卸荷至 σ_{con} 后锚固，或应在第二次张拉时直接张拉至 $1.03 \sigma_{con}$ 后锚固，并实测预应力筋伸长量；
- d) 锚固后应切除过长的预应力筋，应采用机械方法裁剪，不得采用电弧割断。预应力筋切断后露出锚具外的长度应为 30mm~50mm，并应用与路面相同强度等级的混凝土及时封锚；
- e) 预应力筋张拉应详细填写张拉记录，张拉记录表见附录 C。

条文说明：预应力筋分两次张拉。预应力路面板在强度形成初期施加一定的预应力可以消除因温度降低产生的收缩裂缝，一旦混凝土具有足够的强度能够防

止在锚具下出现超限应力，应尽早对混凝土施加初始预应力。

6.8 养生

斜向预应力混凝土路面养生应符合《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 的相关要求，其中不同气温条件下斜向预应力混凝土路面养生龄期应按《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30-2014 中表 11.4.6 关于配筋混凝土的要求取值。

7 质量检查与验收

7.1 一般要求

7.1.1 斜向预应力混凝土路面的施工质量控制、管理与检查应严格要求，对每个施工环节进行严格控制，对于出现的问题，应立即进行纠正。

7.1.2 斜向预应力混凝土钢筋工程及模板应符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《公路水泥混凝土路面施工技术细则》JTG/T F30 及本规范的相关要求。

7.1.3 斜向预应力混凝土路面基层的质量检查验收应符合《公路路面基层施工技术细则》JTG/T F20 的要求。

7.2 滑动功能层的施工质量检查与验收

7.2.1 实测项目检查

滑动功能层的实测项目应按表 5 的要求执行。

表5 滑动层实测项目检查

项次	检查项目	允许偏差 mm	检查方法和频率
1	细粒状材料层厚度	±3	尺量，每 200m 每车道 2 处
2	细粒状材料层宽度	0， + 50	尺量，每 200m 测 4 点
3	聚乙烯薄膜宽度	0， + 50	尺量，每 200m 测 4 点

7.2.2 外观鉴定

天然砂应采用 2.36 mm 筛进行筛分，且无泥块，聚乙烯薄膜表面应平整无破损。

7.3 钢筋加工及安装

7.3.1 实测项目

钢筋加工及安装的实测项目应符合表 6、表 7 的要求。

表6 锚固区构造钢筋实测项目检查

项次	检查项目		允许偏差 mm	检查方法和频率
1	箍筋间距		±10	尺量，每 50m 检查 5~10 个间距
2	纵向构造钢筋	长	±30	尺量，按 30%抽查
		宽、高	±10	

表7 板端补强钢筋网实测项目检查

项次	检查项目	允许偏差 mm	检查方法和频率
1	网的长、宽	±10	尺量，全部
2	网眼尺寸	±10	尺量，抽查 3 个网眼
3	对角线差	15	尺量，抽查 3 个网眼对角线

7.3.2 外观鉴定

钢筋表面应无铁锈及焊渣。

7.4 预应力筋的布置和张拉

7.4.1 实测项目

预应力筋布置和张拉的实测项目应符合表 8、表 9 的要求。

表8 预应力筋网眼实测项目检查

项次	检查项目	允许偏差 mm	检查方法和频率
1	网眼尺寸	±20	尺量，每 10m 抽查 3 个网眼
2	对角线差	30	尺量，每 10m 抽查 3 个网眼对角线

表9 预应力筋实测项目检查

项次	检查项目	允许偏差或规定值	检查方法和频率
1	预应力筋位置允许偏差	±10mm	尺量，每 50m 抽查 3 处
2	预应力角度允许偏差	±5°	尺量，每 50m 抽查 3 处
3	张拉应力值	符合设计要求 (Mpa)	查油表读数，全部
4	张拉伸长率	符合设计要求 (%)，无设计要求时 ±6%	尺量，全部

7.4.2 外观鉴定

预应力筋表面应保持清洁，不得有明显的锈迹。

7.5 水泥混凝土面板的质量检查与验收

7.5.1 实测项目

斜向预应力混凝土面层的实测项目应按表 10 的要求执行。

表10 斜向预应力混凝土面层实测项目检查

项次	检查项目		规定值或允许偏差		检查方法和频率
			高速公路、一级公路	其他公路	
1	弯拉强度 MPa		符合设计要求		标准小梁法或钻芯劈裂法， /
2	板厚度 mm	代表值	-5		挖验或钻芯法， 每 200m 每车道两处
		合格值	-10		
3	平整度 mm	σ	≤ 1.32	≤ 2.00	采用平整度仪全线每车道连续检测，每 100m 计算 σ 、IRI
		IRI	≤ 2.20	≤ 3.30	
		最大间隙 h	≤ 3	≤ 5	3m 直尺，半幅车道板带每 200m 测 2 处×10 尺
4	抗滑构造深度 mm		一般路段不小于 0.7 且 不大于 1.1；特殊路段不 小于 0.8 且不大于 1.2	一般路段不小于 0.5 且不大于 1.0； 特殊路段不小于 0.6 且不大于 1.1	铺砂法，每 200m 测 1 处
5	相邻板高差 mm		2	3	尺测，每条 2 点
6	纵缝顺直度 mm		10		每 20m 拉线，每 200m 测 4 处

表 10 斜向预应力混凝土面层实测项目检查 (续)

项次	检查项目	规定值或允许偏差		检查方法和频率
		高速公路、一级公路	其他公路	
7	中线平面偏位 mm	20		经纬仪, 每 200m 测 4 点
8	路面宽度 mm	± 20		抽量, 每 200m 测 4 处
9	纵断高程 mm	± 10	± 15	水准仪, 每 200m 测 4 断面
10	横坡 %	± 0.15	± 0.25	水准仪, 每 200m 测 4 断面
注: 表中 σ 为平整度仪测定的标准差; IRI 为国际平整度指数; h 为 3m 直尺与面层的最大间隙。				

7.5.2 外观鉴定

斜向预应力混凝土面板的外观鉴定应包括以下内容:

- a) 对于高速公路和一级公路, 混凝土板表面的脱皮、印痕、裂纹和缺边掉角等病害现象的缺陷面积不得超过受检面积的 0.2%, 其他公路不得超过 0.3%;

- b) 路面板侧边应直顺、曲线圆滑；
- c) 接缝填筑应饱满密实，不得污染路面；
- d) 胀缝应无明显缺陷。

征求意见稿

附录 A（规范性附录）

斜向预应力混凝土路面面板应力分析及计算

流程

A.1 力学模型

斜向预应力混凝土路面结构分析应采用弹性地基板模型，适用于无机结合料类基层或沥青类基层上混凝土面层，旧混凝土路面上加铺分离式混凝土面层；面层和基层或者新旧面层设计分析时作为分离式双层板，基层底面以下或者旧面层底面以下部分应按弹性地基处理。

斜向预应力混凝土面层板的临界荷位位于板长边缘中部。

A.2 荷载疲劳应力分析

A.2.1 标准轴载在临界荷位处产生的荷载疲劳应力按公式（A.1）计算。

$$\sigma_{pr} = k_f k_c \sigma_{ps} \quad (\text{A.1})$$

式中：

σ_{pr} ——设计轴载在面层板临界荷位处产生的荷载疲劳应力，单位为兆帕（MPa）；

k_f ——考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数，按公式（A.6）计算确定；

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，查表 A.1 按公路等级确定；

σ_{ps} ——荷载应力，单位为兆帕（MPa）。

表A.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	1.15	1.10	1.05	1.00

A. 2. 2 设计轴载在临界荷位处产生的荷载应力按公式 (A. 2) 计算。

$$\sigma_{ps} = \frac{1.45 \times 10^{-3}}{1 + D_b/D_c} r_g^{0.65} h_c^{-2} P_s^{0.94} \quad (\text{A.2})$$

式中:

σ_{ps} ——荷载应力, 单位为兆帕 (MPa);

D_b ——下层板的截面弯曲刚度, 按公式(A.3)计算, 单位为兆牛·米(MN·m);

D_c ——上层板的截面弯曲刚度, 按公式(A.4)计算, 单位为兆牛·米(MN·m);

r_g ——双层板的总相对刚度半径, 按公式 (A.5) 计算, 单位为米 (m);

h_c ——上层板的厚度, 单位为米 (m);

P_s ——设计轴载重, 单位为千牛 (kN)。

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1 - \nu_b^2)} \quad (\text{A.3})$$

式中:

D_b ——下层板的截面弯曲刚度, 单位为兆牛·米 (MN·m);

E_b ——下层板的弯拉弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

h_b ——下层板的厚度, 单位为米 (m);

ν_b ——下层板的泊松比。

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1 - \nu_c^2)} \quad (\text{A.4})$$

式中:

D_c ——上层板的截面弯曲刚度, 单位为兆牛·米 (MN·m);

E_c ——上层板的弯拉弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

h_c ——上层板的厚度, 单位为米 (m);

ν_c ——上层板的泊松比。

$$r_g = 1.21[(D_c + D_b)/E_t]^{1/3} \quad (\text{A.5})$$

式中:

r_g ——双层板的总相对刚度半径, 单位为米 (m);

D_c ——上层板的截面弯曲刚度, 按公式(A.4)计算, 单位为兆牛·米(MN·m);

D_b ——下层板的截面弯曲刚度,按公式(A.3)计算,单位为兆牛·米(MN·m);
 E_t ——板底地基当量回弹模量,单位为兆帕(MPa)。

A. 2. 3 设计基准期内的荷载疲劳应力系数按公式(A. 6)计算。

$$k_f = (N_e)^\lambda \quad (\text{A.6})$$

式中:

k_f —— 设计基准期内的荷载疲劳应力系数;
 N_e —— 设计基准期内设计轴载累计作用次数,按 JTG D40-2011 中附录 A 的公式(A.5)计算;
 λ —— 材料疲劳指数,在斜向预应力混凝土路面中, $\lambda=0.057$ 。

A. 2. 4 新建公路的板底地基当量回弹模量 E_t 应按公式(A. 7)计算。

$$E_t = \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^\alpha E_0 \quad (\text{A.7})$$

式中:

E_t ——板底地基当量回弹模量,单位为兆帕(MPa);
 E_x ——粒料层的当量回弹模量,按公式(A.9)计算,单位为兆帕(MPa);
 E_0 ——路床顶综合回弹模量,单位为兆帕(MPa);
 α ——与粒料层总厚度 h_x 有关的回归系数,按公式(A.8)计算。

$$\alpha = 0.86 + 0.26 \ln h_x \quad (\text{A.8})$$

式中:

α ——与粒料层总厚度 h_x 有关的回归系数;
 h_x ——粒料层的总厚度,按公式(A.10)计算,单位为米(m)。

$$E_x = \sum_{i=1}^n (h_i^2 E_i) / \sum_{i=1}^n h_i^2 \quad (\text{A.9})$$

式中:

E_x ——粒料层的当量回弹模量,单位为兆帕(MPa);
 h_i ——第 i 结构层的厚度,单位为米(m);

E_i ——第 i 结构层的回弹模量, 单位为兆帕 (MPa)。

$$h_x = \sum_{i=1}^n h_i \quad (\text{A.10})$$

式中:

h_x ——粒料层的总厚度, 单位为米 (m);

h_i ——第 i 结构层的厚度, 单位为米 (m)。

A.3 温度疲劳应力分析

A.3.1 在面层板临界荷位处产生的温度疲劳应力按公式 (A.11) 计算。

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{t, \max} \quad (\text{A.11})$$

式中:

σ_{tr} —— 面层临界荷位处的温度疲劳应力, 单位为兆帕 (MPa);

k_t —— 考虑温度应力累计疲劳作用的温度疲劳应力系数, 按公式 (A.13) 确定;

$\sigma_{t, \max}$ —— 最大温度梯度时面层板产生的最大温度应力, 按公式 (A.12) 确定, 单位为兆帕 (MPa)。

A.3.2 最大温度梯度时混凝土面层板最大温度应力 $\sigma_{t, \max}$ 应按公式 (A.12) 计算。

$$\sigma_{t, \max} = \frac{E_c \alpha_c \Delta T}{(1 - \nu_c) - r f x \pm \sigma_{\text{com}}} \quad (\text{A.12})$$

式中:

$\sigma_{t, \max}$ ——最大温度梯度时面层板产生的最大温度应力, 单位为兆帕 (MPa);

E_c —— 混凝土面层弯拉弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

α_c —— 混凝土的线膨胀系数, 根据粗集料的岩性按 JTG D40-2011 中表 E.0.3-2 取用;

h_c —— 上层板的厚度, 单位为米 (m);

T_g —— 公路所在地 50 年一遇的最大温度梯度, 查 JTG D40-2011 中表

3.0.10 取用，单位为摄氏度每米（℃/m）；

ν_c —— 上层板的泊松比；

ΔT —— 斜向预应力混凝土路面混凝土凝结平均温度与环境最高平均温度的温差（℃）；

x —— 斜向预应力混凝土路面自由端温度影响胀缩区域长度；

$$x = \frac{\alpha \Delta T + \sqrt{(\alpha \Delta T)^2 - rf \frac{\sigma_{com}}{E^2}}}{rf} E$$

r —— 斜向预应力混凝土路面混凝土的单位重度（MN/m³）；

f —— 斜向预应力混凝土路面与基底摩擦系数；

α —— 斜向预应力混凝土路面混凝土温度膨胀系数（1/℃）；

σ_{com} —— 斜向预应力混凝土路面板内纵向有效预应力。

A. 3. 3 温度疲劳应力系数 k_t ，应按公式（A. 13）计算。

$$k_t = \frac{f_r}{\sigma_{t,max}} \left[a_t \left(\frac{\sigma_{t,max}}{f_r} \right)^{b_t} - c_t \right] \quad (A.13)$$

式中：

k_t —— 温度疲劳应力系数；

f_r —— 混凝土弯拉强度标准值，单位为兆帕（MPa）；

$\sigma_{t,max}$ —— 最大温度梯度时面层板产生的最大温度应力，按公式（A.12）确定，单位为兆帕（MPa）；

a_t —— 回归系数，按所在地区的公路自然区划查表 A.2 确定；

b_t —— 回归系数，按所在地区的公路自然区划查表 A.2 确定；

c_t —— 回归系数，按所在地区的公路自然区划查表 A.2 确定。

表A. 2 回归系数 a_t 、 b_t 和 c_t

系数	公路自然区划					
	II	III	IV	V	VI	VII

a_t	0.828	0.855	0.841	0.871	0.837	0.834
b_t	1.323	1.355	1.323	1.287	1.382	1.270
c_t	0.041	0.041	0.058	0.071	0.038	0.052

A. 4 摩阻应力分析

斜向预应力混凝土路面面板较长，在两施工缝之间不设置缩缝，因而在进行斜向预应力混凝土路面设计计算时，应计算摩阻应力，基层摩阻引起的应力 σ_F 可按公式（A.14）计算：

$$\sigma_F = frx \quad (\text{A.14})$$

A. 5 斜向预应力混凝土路面计算流程

斜向预应力混凝土路面计算流程按下列程序进行：

- 收集交通资料，计算使用初期设计车道所承受的标准轴载作用次数 N_s ，确定公路的交通等级及设计使用年限。根据公路的交通组织和车道宽度，选定轮迹横向分布系数 η 。然后计算设计车道使用年限内的标准轴载累计作用次数 N_e ；
- 初拟路面板厚。一般公路预应力路面板厚应略大于相应素混凝土路面的0.65倍。考虑到交通量大和重载影响，公路预应力混凝土路面的板厚宜取相应素混凝土路面板厚的0.7倍~0.75倍；
- 计算荷载疲劳应力 σ_{pr} 。首先计算标准轴载产生的荷载应力 σ_{ps} ，然后按照交通等级，选定综合系数 k_c ，计算疲劳荷载应力系数 k_f ；
- 计算温度疲劳应力 σ_{tr} 。按公路所在自然区划表选取温度梯度，然后计算最大温度梯度时的温度应力 $\sigma_{t,max}$ ，再计算温度疲劳应力系数 k_t ；
- 确定纵向预应力值 σ_{py} 。根据公式（1），设 $[\gamma(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) - f]_r = \sigma_0$ ， σ_{py} 取值应大于等于 σ_0 ；
- 拟定预应力筋与路面纵向夹角，按照公式（2）计算预应力筋布置间距 l 。如果求得的预应力筋布置间距 $l < 0.5\text{m}$ ，则需减小预应力筋与路面纵向夹角，重新进行计算，直至满足所求的预应力筋布置间距 $l \geq 0.5\text{m}$ ；若角度调整到最小，求得的预应力筋布置间距仍不满足要求，则需增加路面板厚，重复第2步以后的计算，直至所求的预应力筋布置间距 $l \geq 0.5\text{m}$ 为止。如果求得的预应力筋布置间距 $l > 1\text{m}$ ，则取预应力筋布置间距为1m。

附录 B 斜向预应力混凝土路面计算示例

选取国道 G210 陕西省宜君县南山岭试验路作为计算示例。南山岭试验路为山岭二级公路，路基宽度 10m，路面宽度 9.0m，原路面为 7cm 沥青混凝土路面，路面因重载交通影响，出现局部坑槽和网裂、车辙病害，需要大修。为配合斜向预应力混凝土路面研究，拟采用斜向预应力混凝土路面 100m 作为试验段。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 5%。

B.1 轴载计算

根据试验路交通组成及轴载，设计年限取 30 年，安全等级为一级，临界荷载处的车辆轮迹横向分布系数取较大值 0.62。按式 (A.2) 计算得到设计基准期内设计车道设计轴载累计作用次数，通过交通量调查和计算可得设计使用年限内车道的标准轴载累计作用次数：

$$N_e = \frac{Ns[(1+g_r)^t - 1] \times 365}{g_r} \times \eta = \frac{100 \times [(1+0.05)^{30} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.62 = 150.4 \times 10^4$$

根据 JTG D40-2011 表 3.0.7 可知，属重交通荷载等级。

B.2 初拟路面结构

试验路如果按照普通二级混凝土路面设计，混凝土板厚需 25cm。采用斜向预应力混凝土路面，考虑结构的安全性，若斜向预应力混凝土路面很薄，可能产生以下不利影响：使用期间在行车荷载作用下会产生过大的挠度，在预应力施加时可能产生较大的反拱，高温天气会因热胀而拱起，而且不利于施工。因此斜向预应力混凝土路面板厚取 20cm，施工质量变异水平选择中级，基层对原路面结构挖除重铺，试验路总长 100m。试验路分两幅施工，单幅路面宽度 4.5m。路面结构如表 B.1 所示。

表 B.1 斜向预应力混凝土路面试验路结构

结构层	厚度(cm)	材料
面层	20	斜向预应力混凝土路面面层
滑动层	0.5	细砂与聚乙烯薄膜

基层	25	水泥稳定碎石
----	----	--------

B.3 路面材料参数确定

斜向预应力混凝土路面在路面板厚度拟定的情况下，试验路设计参数确定如下：

混凝土设计弯拉强度 $f_r = 5.0 \text{ MPa}$ ；

相应的弯拉弹性模量与泊松比为 $3.1 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、0.15；

路面板长 $L = 100 \text{ m}$ ；

路面板宽 $\omega = 4.5 \text{ m}$ ；

路面板厚 $h = 0.2 \text{ m}$ ；

基层顶面当量回弹模量 $E_t = 165 \text{ MPa}$ ；

斜向预应力混凝土路面滑动层摩擦系数 $f = 0.5$ （滑动层设置：基层顶面铺 0.5cm 细砂层，其上铺设两层聚乙烯薄膜）；

板内最大温度梯度 $T_g = 0.92^\circ \text{C/cm}$ （铜川属于公路自然区划 III， $T_g = 0.92^\circ \text{C/cm}$ ）；

混凝土密度 $r = 2500 \text{ kg/m}^3$ ；

混凝土线膨胀系数 $\alpha_c = 8 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ ；

混凝土泊松比 $\nu_c = 0.15$ ；

路面混凝土终凝温度与最低温度差为 30°C ；

预应力筋（采用 $\phi 15.2$ ）标准强度 $R_y^b = 1860 \text{ MPa}$ ；

公称截面面积 $A_p = 140 \text{ mm}^2$ 。

取低液限黏土路基回弹模量 80 MPa ，取距地下水位 1.3 m 时的湿度调整系数为 0.75，由此得到路床顶综合回弹模量为 $80 \times 0.75 = 60 (\text{MPa})$ ，水泥稳定砂砾基层回弹模量为 2000 MPa ，泊松比取 0.20，级配砾石底基层回弹模量取 250 MPa ，泊松比取 0.35，计算板底地基当量回弹模量如下：

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

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

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

$$E_t = \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^\alpha E_0 = \left(\frac{250}{60} \right)^{0.414} \times 60 = 112.7(MPa)$$

板底地基当量回弹模量 E_t 取为 $110 MPa$ 。

混凝土面板层的弯曲刚度 D_c 、半刚性基层板的弯曲刚度 D_b ，路面结构总相对刚度半径 r_g 为：

$$D_c = \frac{E_c h_c^3}{12(1-\nu_c^2)} = \frac{31000 \times 0.20^3}{12(1-0.15^2)} = 21.1(MN \cdot m)$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1-\nu_b^2)} = \frac{2000 \times 0.20^3}{12(1-0.20^2)} = 1.39(MN \cdot m)$$

$$r_g = 1.21 \left(\frac{D_c}{E_t} \right)^{1/3} = 1.21 \times \left(\frac{21.1 + 1.39}{110} \right)^{1/3} = 0.713(m)$$

B.4 荷载疲劳应力计算

由于试验路采用水泥稳定粒料类基层，适用于弹性地基双层板模型应力，荷载应力按式 (A.2) 计算，标准轴载和最重荷载在临界荷位处产生的荷载应力计算如下：

$$\sigma_{ps} = \frac{1.45 \times 10^{-3}}{1 + \frac{D_b}{D_c}} r_g^{0.65} h_c^{-2} P_s^{0.94} = \frac{1.45 \times 10^{-3}}{1 + \frac{1.39}{21.1}} \times 0.713^{0.65} \times 0.20^{-2} \times 100^{0.94} = 1.942(MPa)$$

$$\sigma_{pm} = \frac{1.45 \times 10^{-3}}{1 + \frac{D_b}{D_c}} r_g^{0.65} h_c^{-2} P_m^{0.94} = \frac{1.45 \times 10^{-3}}{1 + \frac{1.39}{21.1}} \times 0.713^{0.65} \times 0.20^{-2} \times 100^{0.94} = 2.105(MPa)$$

按式 (A.1) 计算面层标准荷载疲劳应力，取面层 $k_f = N_e^\lambda = (150 \times 10^4)^{0.057} = 2.249$ ； k_r 为考虑接缝传荷能力的应力折减系数，当采用混凝土路肩时， $k_r = 0.87 \sim 0.92$ ，由于预应力混凝土路面为整板，本次 k_f 取值 0.87； k_c 为综合系数，查表取值为 1.05。

$$\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps} = 0.87 \times 1.05 \times 2.105 = 1.923(MPa)$$

面层最大荷载应力:

$$\sigma_{p,\max} = k_r k_c \sigma_{pm} = 0.87 \times 1.05 \times 2.105 = 1.923(MPa)$$

B.5 温度疲劳应力计算

最大温度涨缩应力,按斜向预应力混凝土路面设计步骤,按式(A.12)计算:

$$\sigma_{t,\max} = \frac{E_c \alpha_c \Delta T}{(1 - \nu_c) - rfx \pm \sigma_{com}}$$

其中: $E_c=31000MPa$, $\alpha_c=8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$,斜向预应力混凝土路面板内纵向有效预应力 σ_{com} 计算取 $3.0MPa$ 。

斜向预应力混凝土温度影响区域长度为:

$$x = \frac{\alpha \Delta T + \sqrt{(\alpha \Delta T)^2 - rf \frac{\sigma_{com}}{E^2}}}{rf} E$$

$$= \frac{8 \times 10^{-6} \times 30 + \sqrt{(8 \times 10^{-6} \times 30)^2 - 2.5 \times 0.5 \times \frac{3.0}{31000^2}}}{2.5 \times 0.5} \times 31000 = 11.65(m)$$

则最大温度伸缩应力为:

$$\sigma_{t,\max} = \frac{E_c \alpha_c \Delta T}{(1 - \nu_c) - rfx \pm \sigma_{com}} = \frac{31000 \times 8 \times 10^{-6} \times 30}{(1 - 0.15) - 2.5 \times 0.5 \times 11.65 + 3.0} = -2.81(MPa)$$

负号表示温度降低时混凝土中出现的最大拉应力。

由表 A.2 查得式中: $a_t = 0.855$ 、 $b_t = 1.355$ 、 $c_t = 0.041$, 则:

$$k_t = \frac{f_t}{\sigma_{t,\max}} \left[a_t \left(\frac{\sigma_{t,\max}}{f_r} \right)^{b_t} - c_t \right] = 0.624$$

因此,求得温度疲劳应力:

$$\sigma_{tr} = k_t \sigma_{t,\max} = 0.624 \times 2.81 = 1.75(MPa)$$

B.6 计算路面与路基摩阻力

按式(A.14),斜向预应力混凝土路面试验段路面与基层的摩阻力计算为:

$$\sigma_t = frx = 0.5 \times 2.5 \times 0.2 \times 11.65 = 2.91(MPa)$$

B.7 计算斜向预应力混凝土路面有效纵向预应力 σ_{py} ，验算纵向预应力 σ_{pe}

$$\begin{aligned}\sigma_{py} &\geq \gamma_r (\sigma_{pr} + \sigma_{tr} + \sigma_f) - f_r \\ &= 1.13 \times (3.99 + 1.75 + 2.91) - 5.0 \\ &= 4.77(\text{MPa})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{pe} &\geq (\sigma_{p,\max} + \sigma_{t,\max} + \sigma_f) - f_r \\ &= (1.923 + 2.81 + 2.91) - 5.0 \\ &= 2.64(\text{MPa})\end{aligned}$$

B.8 计算斜向预应力混凝土路面斜向预应力筋间距

由于 $\sigma_{py} \geq \sigma_{pe}$ ，以 σ_{py} 进行斜向预应力间距计算。

$$\begin{aligned}l &= \frac{2(\sigma_{con} - \sigma_1) \times A_p \times \cos^2 \alpha}{\sigma_{py} \times h \times \sin \alpha} \\ &= \frac{2 \times (1860 - 0.2 \times 1860) \times 140 \times \cos^2 45^\circ}{4.77 \times 200 \times \sin 45^\circ} \\ &= 437(\text{mm}) \\ &= 44(\text{cm})\end{aligned}$$

式中:

- l —— 斜向预应力筋路面纵向布设间距;
- σ_{con} —— 预应力筋张拉控制应力, 取 1860MPa;
- σ_1 —— 预应力总损失值, 取控制应力 20%;
- A_p —— 预应力筋公称截面积, 取 140mm²;
- α —— 斜向预应力筋与路面纵向的夹角。
- σ_{py} —— 斜向预应力在板长方向的分向应力, 即纵向应力, 其值为 4.77MPa。

B.9 斜向预应力混凝土路面温度伸缩量

$$\begin{aligned}\Delta L &= \alpha \Delta T x - \frac{rfx^2}{4E} - \frac{\sigma_{com}}{E} \\ &= 8 \times 10^{-6} \times 30 \times 11.65 - \frac{2.5 \times 0.2 \times 0.5 \times 11.65^2}{4 \times 3.1 \times 10^4} - \frac{4.77}{3.1 \times 10^4} \\ &= 23.61 \times 10^{-4}(\text{m})\end{aligned}$$

$$=2.4\text{mm}$$

式中:

α —— 斜向预应力混凝土路面混凝土温度膨胀系数($^{\circ}\text{C}$);

ΔT —— 斜向预应力混凝土路面混凝土凝结平均温度与环境最高温度的温差, 计算取 30°C ;

ΔL —— 斜向预应力混凝土路面自由端温度涨缩量。

B. 10 斜向预应力混凝土两施工缝之间最大长度计算

斜向预应力混凝土两施工缝之间最大长度计算为:

$$L_1 = 2 \times \frac{f_r + \sigma_{com}}{\gamma f h} = 2 \times \frac{5.0 \times 4.77}{2.5 \times 0.5 \times 0.2} = 78.2(\text{m})$$

式中: L_1 —— 斜向预应力混凝土路面两施工缝之间最大长度;

γ —— 斜向预应力混凝土路面混凝土的重度(MN/m^3)。

B. 11 斜向预应力混凝土路面板不拱起最小长度计算

斜向预应力混凝土路面板不拱起最小长度计算公式为

$$L = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

其中:

$$a = g = 2.5 \times 0.2 = 0.5$$

$$b = 0.5$$

$$c = -2\Delta f \alpha \Delta T E = 2 \times 10^{-3} \times 8 \times 10^{-6} \times 30 \times 3.1 \times 10^9 = -1488$$

将 a、b、c 值代入得:

$$L = \frac{-0.5 \pm \sqrt{(0.5)^2 + 4 \times 0.5 \times 1488}}{2 \times 0.5}$$

$$= 54(\text{m}) (\text{此处 } L \text{ 取正值, 为 } 54\text{m})$$

式中:

L —— 斜向预应力混凝土路面板不拱起最小长度, 即两施工缝之间的最小距离; 即斜向预应力混凝土路面两施工缝间的最小距离小于 54m 可拱起;

Δf —— 假设斜向预应力混凝土路面拱起高度, 一般计算取 1mm;

g —— 斜向预应力混凝土路面板单位重度，即混凝土重度×混凝土板厚；

通过以上计算,得出斜向预应力混凝土路面试验工程的基本参数为:路面混凝土板的计算厚度 20cm。实际施工厚度 21cm，其中 1cm 为预留磨耗厚度。混凝土设计弯拉强度 $f_t=5.0\text{Mpa}$ ，相应的弯拉弹性模量与泊松比为 31GPa、0.15。斜向预应力混凝土路面两施工缝之间最大长度 75m,最短长度 54m,路面板宽 4.5m。

斜向预应力筋(采用 $\phi 15.2$)标准强度 $R_y^b = 1860\text{MPa}$,公称截面面积 $A_p = 140\text{mm}^2$ ，斜向预应力筋间距 45cm，最大张拉力 220kN。

征求意见稿

附录 C 斜向预应力混凝土路面预应力筋张拉记录表

斜向预应力混凝土路面预应力筋张拉记录表如表 C.1 所示。

表 C.1 斜向预应力混凝土路面预应力筋张拉记录表

合同段_____

工程名称		桩号范围		张拉日期	
千斤顶编号		油压表编号			
预应力筋编号		张拉前长度 (mm)	张拉后长度 (mm)	实际伸长量 (mm)	滑断丝情况及处理措施
张拉人				记录人	