

文章编号: 1001-7372(2000)01-0022-05

# 预应力混凝土路面设计方法研究

钱振东, 黄卫, 牛赫东

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 对预应力混凝土路面设计进行研究, 提出设计准则, 并根据中国国情及交通状况, 提出有关预应力路面板厚、预应力值大小、纵向预应力筋配置等的设计程序; 介绍了为减小预应力损失、防止局部受压破坏以及为减小板底摩擦而采取的一些措施; 讨论了路用材料的选择, 并介绍了预应力试验路的设计。测试及使用结果表明设计方法是可行且有效的。

**关键词:** 路面设计; 预应力; 接缝

**中图分类号:** U 416.216.1

**文献标识码:** A

## Research on prestressed concrete pavement design

Q IAN Zhen-dong, HUANG Wei, N I U He-dong

(Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** This paper develops a design method of an experimental section of PCP, which is for long period observation and research in order to accumulate experience in design, construction and maintenance. The paper presents the design procedure of slab thickness, arrangement of longitudinal prestress reinforcements and lateral reinforcements, and value of prestress etc., which correspond to China's traffic status and traffic capacity. In order to reduce prestress loss and prevent local compression damage, the slab tip subjected to prestressing force is reinforced. The sliding layer and other measures are added to reduce friction coefficient on the sub-base. In addition, how to select the materials is discussed in detail. In the end, the authors introduce the design of experimental road. Preliminary observation of the experimental road is carried out. The results show that the design method is credible and effective.

**Key words:** pavement design; prestress; joint

在中国, 优质沥青主要依靠进口, 价格昂贵, 而水泥资源相对丰富, 因此, 水泥混凝土路面近几年得到迅速发展。从中国路面的现状来看, 普通混凝土路面常发生挤碎、拱起、错台、唧泥等病害, 很有必要对现有混凝土路面进行结构和技术的革新。由于预应力混凝土路面具有很多传统的混凝土路面无法比拟的优点, 加之近代预应力技术有了新的发展。为改善传统路面的不足, 适应交通运输的发展, 有必要开展特殊混凝土路面的研究工作。预应力混凝土路面是种预先加入预应力增加受拉强度的路面。它的长期

使用性能明显比其它的混凝土路面好, 并且, 由于板长长, 接缝少, 改善了行车舒适性。中国预应力混凝土路面的研究尚属起步阶段, 由东南大学交通学院和江苏省交通厅共同承担预应力混凝土试验路的设计。

试验路段位于南京新机场高速公路 B 标段禄口互通式立交 B 匝道上 (BK0+080~BK0+180), 为禄口开发区与宁溧公路间的连接道路。路基宽度 19 m, 路面宽度 14.4 m (2×7.2 m), 中央分隔带宽 1.6 m, 土路肩宽 1.5 m。试验路全长 100 m, 路面板

收稿日期: 1999-03-29

作者简介: 钱振东(1969-), 女, 工学博士后



© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

宽为 7.2(单幅)。采用后张法施工。该试验路竣工于 1997 年 6 月 30 日, 测试工作将长期定时进行。

根据国外的设计经验, 结合中国现行规范, 认为预应力路面的设计标准为: 以使用年限末期混凝土板出现疲劳开裂为临界状态, 采用国外与国内相结合的方法进行设计。

合理的预应力路面设计应妥善地考虑下列因素: 路面使用年限和使用特征; 交通量和交通组成; 临界荷位; 混凝土强度与疲劳破坏; 土基和基层, 即地基刚度和基层顶面摩阻系数; 荷载应力计算方法; 预应力路面接缝设计; 板端锚固区的设计; 预应力损失的计算; 10 排水设计。

## 1 预应力路面设计依据

### 1.1 预应力路面的基本设计准则

一般认为, 路面中所施加的预应力大小主要由以下 3 个因素所决定: 交通荷载、由温度和湿度所引起的翘曲约束、板收缩期间的板底摩擦约束。

基本的设计方程为

$$f_i + f_p = f_{\Delta T} + f_F + f_L \quad (1)$$

式中:  $f_p$  为由预应力引起的混凝土中的压应力;  $f_i$  为混凝土的容许弯曲应力(混凝土抗折模量/安全系数);  $f_{\Delta T}$  为由温度差引起的应力;  $f_F$  为由路基摩阻引起的应力;  $f_L$  为由荷载引起的弯曲应力。

如果假设温度梯度线性变化, 那么温度应力为

$$f_{\Delta T} = \frac{E_c \alpha \Delta T}{2(1 - \nu_c)} \quad (2)$$

式中:  $E_c$ 、 $\alpha$ 、 $\nu_c$  分别为混凝土的弹性模量、温度膨胀系数和泊松比。

路基摩阻引起的应力为

$$f_F = \mu \rho X \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为面板与基层间的摩阻系数;  $\rho$  为混凝土的密度;  $X$  为距千斤顶的距离。当  $X = L/2$  ( $L$  为板长),  $f_F$  达到最大, 取  $f_F = \mu \rho L/2$ 。

荷载应力用威斯特卡德(Westgaard)公式计算

$$f_L = \frac{0.275P}{h^2} (1 + \nu_c) \left[ \log_{10} \left( \frac{E_c h^3}{K b^4} \right) - 0.44 \right] \quad (4)$$

式中:  $P$  为轮载;  $K$  为地基反应模量;  $h$  为路面板厚;  $b$  为当量轮压半径。

### 1.2 重复荷载与混凝土的疲劳特性

在车轮荷载的重复作用下, 尽管荷载应力小于混凝土的极限抗弯拉强度, 路面板仍会产生疲劳破坏, 为此, 在设计时, 应以混凝土的疲劳特性为另一主要依据。在非预应力板中, 混凝土的疲劳是以应力

比  $SR$  (承受多次重复荷载最后达到破坏的应力  $f_i$  与一次达到破坏的应力  $f_{om}$  的比值) 来衡量的。对于预应力路面, 应力比应是净工作张拉力与净开裂应力的比值<sup>[3]</sup>, 由式(5)进行计算。不同应力比的容许重复荷载次数如表 1 所示。

$$SR = \frac{f_{\Delta T} + f_L + f_F + f_p}{f_{om} + f_p + f_F} \quad (5)$$

式中:  $f_{om}$  为混凝土设计弯拉强度(MPa); 其余符号意义同前。

表 1 应力比和荷载容许重复次数

应力比	容许重复次数	应力比	容许重复次数
0.51	400 000	0.63	14 000
0.52	300 000	0.64	11 000
0.53	240 000	0.65	8 000
0.54	180 000	0.66	6 000
0.55	130 000	0.67	4 500
0.56	100 000	0.68	3 500
0.57	75 000	0.69	2 500
0.58	57 000	0.70	2 000
0.59	42 000	0.71	1 500
0.60	32 000	0.72	1 100
0.61	24 000	0.73	850
0.62	18 000	0.74	650

注: 当应力比不大于 0.50 时, 混凝土能经受无数次应力重复而不发生破坏。

## 2 预应力路面设计

### 2.1 预应力路面的结构构造和组合设计

路基、垫层、基层、路面横向坡度、路肩、排水及材料选型与要求等与普通混凝土路面相同。尽管预应力路面在较弱的地基上, 仍然表现出令人满意的性能, 但考虑到路面板较薄, 为了防止路面的破坏, 仍采用较强的地基, 同普通混凝土路面。

与普通混凝土路面不同, 预应力混凝土路面因其板长长, 为防止过多的预应力损失和板底的不利约束, 需对基层顶面进行处理, 采用加铺滑动层来减小摩擦系数。

#### 2.1.1 临界荷位

根据有限元分析可知<sup>[2]</sup>, 产生最大综合损坏的临界荷位, 应选用板的纵缝边缘中部。

#### 2.1.2 推荐设计程序

由于预应力路面的板厚和板端预应力值均为未知, 因此, 必须给定一个量, 方能计算求解。推荐下列设计步骤:

(1) 收集交通资料, 根据普通混凝土路面设计参数的确定方法, 计算设计车道使用年限内的标准轴载累计作用次数  $N_e$ , 确定基层顶面的综合回弹模量  $E_s$ 、地基反应模量  $K$  及基层顶面的摩擦系数  $\mu$ , 确定混凝土的设计强度  $f_{cm}$  和混凝土面板的最大温度梯度计算值  $T_{go}$ 。

(2) 预应力路面一般采用矩形, 最合适的板长一般为 90~210 m, 过长需足够大的预应力克服板底摩擦阻力和预应力损失; 过短则需较多的接缝和张拉点。根据当地环境状况选择适当的板长。气候干燥炎热的地方, 建议取小值。结合路面的交通量和预应力筋所需的最小保护层, 假定一个初始板厚。一般地, 对于公路来说, 预应力路面板厚应略大于相应素混凝土路面的 0.65 倍; 对于机场而言, 应是 0.6 倍<sup>[3]</sup>。对于中国公路而言, 考虑到运输繁忙和超载现象严重, 建议预应力路面的板厚取相应素混凝土路面板厚的 0.7~0.75 倍。

(3) 根据两个设计依据式(1)和式(5)可知, 须由式(6)进行计算确定所需的预应力值  $f_p$  (式中: 应力比  $SR$  根据  $N_e$  查表 2 来确定)。

$$\left. \begin{aligned} f_p &= f_{\Delta T} + f_F + f_L - f_{cm} \\ f_p &= \frac{f_{\Delta T} + (1 + SR)f_F + f_L + SR \times f_{cm}}{(1 + SR)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: 符号意义同前。

从预应力筋的实际间距和经济使用方面考虑, 如果求得的预应力值  $f_p > 4.5 \text{ MPa}$ , 则需增大路面板厚, 重新计算。

(4) 预应力筋的布置可按式(7)进行确定。

$$Y_l = \frac{f A_s}{f_p h} \quad (7)$$

式中:  $Y_l$  为预应力筋间距 (cm);  $f_s$  为预应力筋中的容许张拉应力 (扣除预应力损失) (MPa);  $A_s$  为预应力筋截面积 ( $\text{cm}^2$ );  $h$  为所选路面板厚 (cm);  $f_p$  为由(3)确定的预应力值 (MPa)。

(5) 根据(4)的计算结果, 结合所推荐的临界荷位, 采用有限元程序进行验算, 验算标准为控制由荷载应力和温度应力综合疲劳作用所产生的疲劳断裂, 即

$$0.95\sigma_c \quad \sigma_c + \sigma_t \quad 1.03\sigma_s \quad (8)$$

式中:  $\sigma_c$  为标准轴载产生的最大纵向荷载应力;  $\sigma_t$  为等效温度梯度所产生的最大横向温度翘曲应力;  $\sigma_s$  为混凝土的等价抗弯拉疲劳强度,  $\sigma_s = f_{cm} + f_p - f_F, f_{cm}, f_F, f_p$  含义同前。

板厚计算采用试算法进行。如果满足式(8)则该

板厚及预应力配置即获通过; 否则, 增大板厚, 转向(3), 重新进行。

(6) 对于横向预应力的确定, 根据(5)的计算所得的最大横向应力与混凝土的容许弯拉强度 (建议取 0.8 倍的抗弯拉强度) 的比较而定。对于横向预应力各国意见不统一, 一般认为, 当板宽不超过 7 m 时, 可不设横向预应力, 但为了安全起见, 要求在横向配置一定数量的防止开裂并起到固定、支撑纵向预应力钢索的构造钢筋。横向钢筋配置可按中国刚性路面设计规范中连续配筋混凝土路面选用。横向钢筋采用螺纹钢筋, 其最小配筋率为纵向配筋率  $\beta$  的 1/8。并且布置应符合: 横向钢筋间距不大于 80 cm; 横向钢筋位于纵向钢筋之下。

$$\beta = \frac{E_s f_{cm}}{2E_s f_{sy} - E_s f_{cm}} (1.3 - 0.2\mu) \times 100 \quad (9)$$

式中:  $E_s$  为钢筋弹性模量 (MPa);  $f_{sy}$  为钢筋屈服强度 (MPa); 其余符号同前。

## 2.2 接缝设计

预应力混凝土路面的接缝设计应遵循以下原则<sup>[4]</sup>: 接缝必须能容许板端发生位移, 能够不被压坏; 交通荷载不会使接缝产生过大的挠度的应力;

接缝材料必须耐磨、抗疲劳和防腐; 接缝应密封防止水和不可压缩的杂物进入; 损坏部分的修补应当方便易行; 接缝的施工程序应与预应力的张拉方法相协调; 接缝的建造费用应尽量低。

一般在板端接缝下设置钢筋混凝土枕梁, 以提供接缝处较强的地基和路面的连续性。因预应力路面对接缝的要求较高, 接缝的形式选择可参照桥梁中的伸缩缝。

## 2.3 预应力路面板端部锚固区设计

锚固区设计时既要保证在张拉钢筋时锚具下锚固区的混凝土不开裂和不产生过大的变形, 又要求计算锚具下所需配置的间接钢筋须满足局部受压承载力的要求。表 2 为各类钢筋的张拉控制应力允许值。

表 2 张拉控制应力允许值 [ $\sigma_{con}$ ]

钢筋种类	后张预应力
碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线	$0.75 f_{pk}$
冷拔低碳钢丝、热处理钢筋	$0.7 f_{pk}$
冷拉钢筋	$0.9 f_{pyk}$

注: 表中  $f_{pk}$  及  $f_{pyk}$  表示预应力钢筋的强度标准值。

## 3 试验路的初步设计

试验路的概况前面已经介绍, 该路段如果按照

普通混凝土路面设计, 板厚需 24 cm。为了安全考虑(板如很薄, 在使用期间会产生过大的挠度, 在施加预应力时可能会产生过大反拱, 并且不利于施工), 板厚取保守值 20 cm, 板长 100 m。在板厚确定的情况下, 设计的主要问题就是确定施加预应力的大小。

试验路的设计参数: 单轴荷载  $P = 100 \text{ kN}$ , 混凝土弯拉强度  $f_{cm} = 5.0 \text{ MPa}$ , 混凝土弯拉弹性模量  $E_c = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 轮胎压力  $p = 0.7 \text{ MPa}$ , 路面板长  $L = 100 \text{ m}$ , 路面板厚  $h = 20 \text{ cm}$ , 地基反应模量  $K = 2.21 \text{ MPa}$ , 摩擦系数  $\mu = 0.8$  (有细砂层)。根据《规范》<sup>[1]</sup> 知, 板内最大温度梯度  $T_g = 0.9 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$  (南京地区), 混凝土的容重  $\rho = 0.0024 \text{ kg}/\text{cm}^3$ , 混凝土的线膨胀系数  $\alpha = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ , 混凝土的泊松比  $\nu = 0.15$ , 预应力筋 (采用  $U\Phi 15$ ) 标准强度  $R_y^b = 1860 \text{ MPa}$ , 公称截面面积  $A_p = 140 \text{ mm}^2$ 。

### 3.1 纵向预应力筋设计

根据以上设计原理, 可计算该路段所需最小的预应力。取强度安全系数为 1.2, 则混凝土的容许弯拉应力  $f_t = 4.17 \text{ MPa}$ , 温度应力  $f_{\Delta T} = 3.18 \text{ MPa}$ , 路基摩阻引起的应力  $f_F = 0.96 \text{ MPa}$ , 荷载应力  $f_L = 1.89 \text{ MPa}$ 。混凝土所需最小预压应力  $f_p = f_{\Delta T} + f_F + f_L - f_t = 1.86 \text{ MPa}$ 。

对于在一般气候环境下使用的预应力混凝土结构采用后张法预应力总损失为 20%<sup>[4]</sup>。采用后张拉, 张拉的控制应力为  $\sigma_{con} = 0.75 \times R_y^b = 1395 \text{ MPa}$ 。

考虑混凝土板内部的预应力损失后, 有效预应力为  $f_s = 0.8 \times 1395 = 1116 \text{ MPa}$ 。

$$1.86 \frac{f A_p}{h \cdot dis} = \frac{1116 \times 140}{200 \times dis} \Rightarrow dis = 420 \text{ mm}$$

实际取  $dis = 285 \text{ mm}$ , 纵向共需配置 25 根无粘结预应力钢绞线  $U\Phi 15$  ( $28.5 \times 24 + 2 \times 18 = 720 \text{ cm}$ )。

### 3.2 横向配筋设计

在此试验中, 不设横向预应力, 仅配置足够的钢筋, 其配筋设计参考连续配筋混凝土路面的配筋设计。

采用  $\Phi 2$  的 II 级螺纹钢筋为横向钢筋,  $E_s = 200000 \text{ MPa}$ ,  $f_{sy} = 335 \text{ MPa}$ , 则有  $\beta = 0.00895$ , 于是横向钢筋数量最少应为 198 根, 在此取为 200 根, 间距为 50 cm ( $(200 - 1) \times 50 + 2 \times 25 = 10000 \text{ cm}$ )。

### 3.3 板的端部设计

(1) 为防止板在端部发生局部承压破坏, 因此, 在板端设置由间距 20 cm 的  $\Phi 10$  钢筋组成的  $6 \text{ m} \times$

7 m 的双层双向钢筋网。另外, 在板端 (包括伸缩缝) 处设置有  $2 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$  的钢筋混凝土枕梁, 以加固基层, 防止板端和接缝处发生破坏。

(2) 对于 100 m 长的预应力混凝土路面, 伸缩缝的设计就显得非常重要。由于板底设置了滑动层, 其摩擦系数较小 ( $\mu = 0.8$ ), 又因其板很长, 所以季节性温度变化将引起板端较大的位移。假定预应力对温度引起的位移影响可忽略, 按照素混凝土板较小初步计算, 在年温差最大 (与路面合拢温度  $T = 20$  相比)  $\Delta T = 40$  时, 板端位移可计算如下: 滑动区长度  $L = \frac{\alpha E_c \Delta T}{\rho \mu} = 625 \text{ m} > 100/2.0 \text{ m}$ , 取  $L = 50 \text{ m}$ , 则  $\Delta = 19.2 \text{ mm}$ ; 经综合比较, 采用 GQF-C-80 型伸缩缝 (伸缩范围为 14~94 mm) 足以满足要求。

(3) 预应力混凝土路面与普通混凝土路面之间设置  $4 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$  的后浇带 (包括后浇混凝土封锚、伸缩缝的预留位置、后浇混凝土路面), 以便有充分的空间放置预应力筋的张拉设备。预应力混凝土路面与伸缩缝、伸缩缝与后浇混凝土路面之间均应设置连接钢筋, 从而使伸缩缝能正常工作。

### 3.4 试验路用材料

基于高效混凝土的要求, 并从减少预应力损失角度考虑, 采用以下材料:

(1) 水泥混凝土标号为 C<sub>40</sub>, 要求采用 525 号普通硅酸盐水泥。

(2) 细集料。采用细度模数  $M_x = 2.6$  的中砂, 砂的含泥量  $< 3\%$ , 不得混有石灰、煤渣、草根等杂物。

(3) 粗集料。粗集料的最大粒径不得超过 40 mm, 范围为 5~31.5 mm, 石料强度 3 级, 针片状含量 10%, 含泥量 1%, 采用连续集配, 集配范围符合有关规范规定。

(4) 减水剂。掺加缓凝型高效减水剂 BC-1, 掺量为 0.3%, 减水率为 37%, 以降低水灰比, 增加施工和易性并保证混凝土拌和物摊铺振捣时间。

(5) 路用混凝土。由于工程较大, 工期较紧, 采用泵送水泥混凝土, 水灰比为 0.46, 水、水泥、砂与碎石的配合比为  $W : C : S : G = 220 : 478 : 630 : 1072$ , 并掺加减水剂。经测试, 强度可达到 48.6 MPa, 初始塌落度为 180~200 mm, 满足设计与施工要求。

(6) 锚具。结合工程的要求, 无粘结筋承受长期的振动荷载及疲劳荷载, 所以必须采用 I 类锚具。经综合对比, 采用 TBM-1 型夹片锚具, 锚夹具分批进行外观检查, 不得有裂纹、伤痕、锈蚀, 尺寸不得超过

允许偏差。

(7)为减少路基摩阻引起的预应力损失,采用 CEF-200 型土工布。

### 3.5 试验路的观测

在进行预应力筋张拉、汽车荷载作用及连续观测中,测得的板底土压力盒的变化图如图 1 所示。限于篇幅,这里只给出断面 1(距板端 125 mm)处的土压力盒变化图,其它断面基本类似。

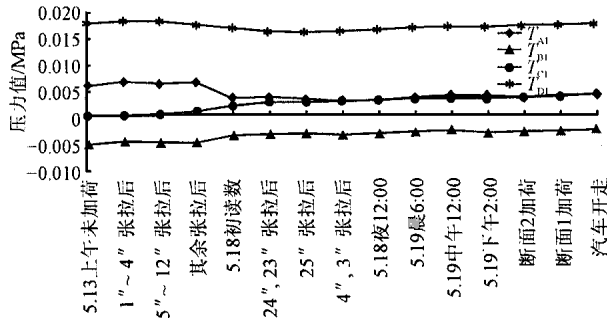


图1 断面1处的压力盒变化图

测试点A、D 是对称布置,各距板边为 0.6 m; B、C 两点对称布置,各距板边 2.6 m。从图 1 可见,两组曲线反应相同规律,说明该断面的测试结果比较理想。易知:如果整块板施工符合设计要求,预应力筋的张拉以及温度效应不会导致路面板底出现脱空或局部压力分布不均现象。从图中容易看出,此次荷载试验比较失败,未能反映实际受力状态,主要原因是汽车荷载太小,采用东风-140,总重约有  $1.0 \times 10^4$  kg 左右。从图 2 中可见,B、D 截面沿板长的测试规律基本一致,而且与有限元程序计算值的趋势也相同(采用温克勒地基,  $E_k = 2 \text{ MPa/cm}$ ,混凝土容重为  $24 \text{ kN/m}^3$ ,板底摩阻系数取 0.8),说明设计方法是可行的。截面 A 的土压力变化比较奇特,按理应与其相对称的 D 截面变化趋势相同,这主要是施

工造成的(基层顶面各断面的标高不同,或预应力筋跑位等)。

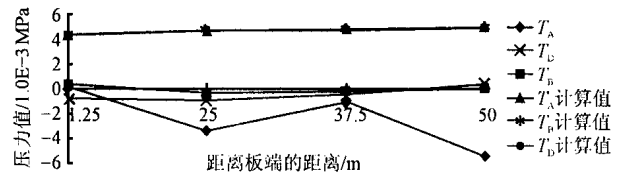


图2 土压力盒沿板长的变化图

本次荷载试验采用东风-140,满载渣土,采用千斤顶大致标磅,约有  $1.0 \times 10^4$  kg 左右,但经测试发现影响很小,说明汽车荷载不够大。

## 4 结 语

笔者研究了预应力混凝土路面的设计方法,提出纵向预应力设计、横向配筋设计、板端部设计的设计程序及路用材料选用。本文的研究内容可为新编中国刚性路面设计规范提供参考。另外,介绍了预应力混凝土试验路的结构设计,分析了试验路的一些测试结果。测试及实用结果表明本文的设计方法是可行且有效的。

### 参考文献:

- [1] JTJ012-94,公路水泥混凝土路面设计规范[S]
- [2] 牛赫东 预应力混凝土路面荷载分析及设计研究[D] 南京:东南大学,1998
- [3] ACI Comm ittee 325 Recommendations for designing prestressed concrete pavements [J] ACI Structural Journal, 1988, 85(4): 451—471.
- [4] STOCK A F. The design of prestressed concrete pavements [J] The Structural Engineer, 1988, 66 (7): 169—175

## 《中国公路学报》被美国工程信息公司(Ei 公司) 《工程索引》收录情况查询

作者若需查询本人发表在《中国公路学报》上的作品被美国工程信息公司(Ei 公司)的《工程索引》收录情况,可在下列单位的网络信息部门检索查询:

清华大学	华南理工大学	中国科学院	北京大学	西安交通大学	大连海事大学
天津大学	中国矿业大学	华中理工大学	东南大学	上海交通大学	北京理工大学
苏州大学	中南工业大学	哈尔滨工业大学	四川大学	北京邮电大学	北京航空航天大学

《中国公路学报》编辑部