

# 哈尔滨西客站轨道层预应力混凝土结构设计

郑文忠, 游涛, 王英, 闫凯

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

**摘要:** 针对靠近支座处集中荷载大的大跨度预应力混凝土结构设计时摩擦损失大的问题, 采用对比分析方法提出无粘结预应力筋与有粘结预应力筋混合配筋、分段张拉梁侧锚固以及直线配筋共3种配筋方案, 计算结果表明, 无粘结预应力筋与有粘结预应力筋混合配筋和分段张拉梁侧锚固方法大幅度减小了预应力摩擦损失, 有效控制结构裂缝和挠度. 非预应力筋和预应力筋的面积通过改进名义拉应力控制裂缝宽度的方法计算, 预应力强度比视为已知条件, 可保证框架梁端混合配筋时预应力强度比满足规范的限值. 为满足相对受压区高度限值的要求, 在梁截面尺寸不变的前提下, 建议采用梁端受压区配置一定数量受压钢筋的方法.

**关键词:** 轨道层; 梁; 预应力; 摩擦损失; 配筋形式

中图分类号: TU378.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0007-06

## Prestressed concrete structure design for railway floor of Harbin West Railway Station

ZHENG Wen-zhong, YOU Tao, WANG Ying, YAN Kai

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** Focus on the problem that the prestressed stress loss due to friction is great, for the reason that the prestressed concrete structures are super long in length and the force is complicated, in the paper, the hybrid reinforcement by both bonded and unbonded strands, the scheme of sectional stretching of the strands and straight bonded strands are proposed to reduce the loss of prestressed stress due to friction. Calculation result shows that the hybrid reinforcement by both bonded and unbonded strands and the scheme of sectional stretching of the strands can reduce prestressed loss, crack width and deflection. In order to determine the area of non-prestressed steel bar and prestressed steel bar, the crack width control method using improved nominal tensile stress is applied. Taking the ratio of prestressed strength as known condition to ensure total reinforcement ratio not exceed the limit. Compression reinforcements are set in compression zones in the ends of beams to meet the requirement relative of the heights equivalent compression zones for taking the dimensions of beams cross sections as constant.

**Key words:** railway floor; beam; prestressed stress; friction loss; reinforcement scheme

### 1 工程概况

哈尔滨西客站是哈大高速铁路专线的组成部

分, 总建筑面积达 69 996.3 m<sup>2</sup>, 为东北地区重要交通枢纽之一. 该客运站由上到下按功能分为商业层、候车层、轨道层和出站层. 轨道层位于标高 ±0 处, 其上铺设有 22 条列车轨道, 结构采用梁柱框架结构, 轨道层横向梁 1 500 mm × 2 500 mm、站台梁 900 mm × 3 400 mm 采用普通钢筋混凝土, 纵向梁 1 600 mm × 2 700 mm, 采用预应力钢筋混凝土. 结构布置及局部位置关系见图 1、2.

收稿日期: 2011-06-05.

基金项目: 国家教育部长江学者奖励计划资助(2009-37); 黑龙江省科技攻关项目(GC09C205); 黑龙江省科技推广项目(TC10A0101).

作者简介: 郑文忠(1965—), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授.

通信作者: 郑文忠, zhengwenzhong@hit.edu.cn.

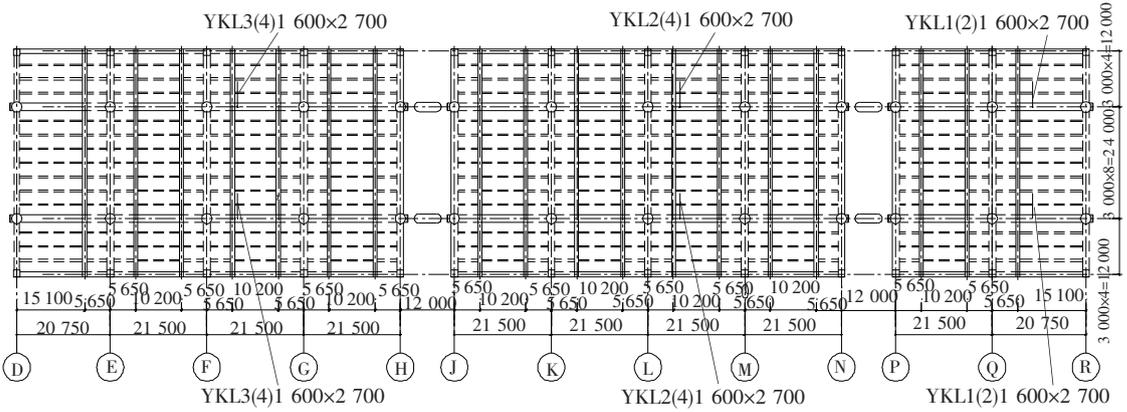


图 1 哈尔滨西客站轨道层结构布置 (m)

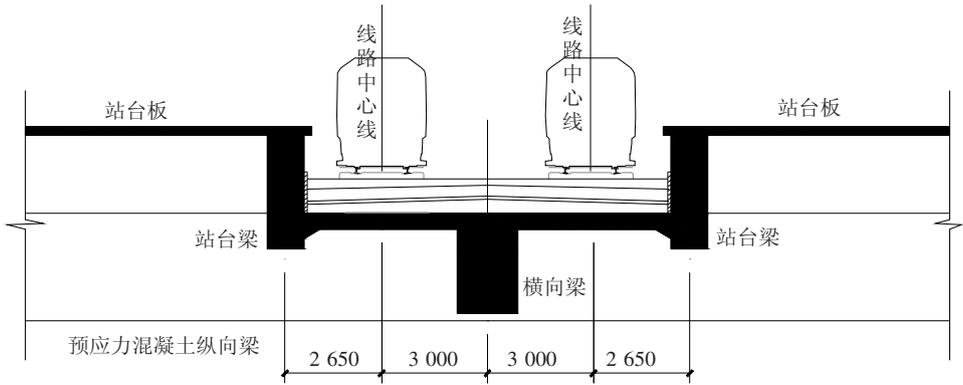


图 2 轨道层局部位置关系 (m)

工程结构抗震构造等级为二级,混凝土设计强度等级为 C50,预应力筋采用抗拉强度标准值为  $f_{ptk} = 1860 \text{ N/mm}^2$  的  $\phi^*15$  低松弛钢绞线. 预应力筋的张拉控制应力为  $0.75f_{ptk}$ , 当浇筑的混凝土立方体抗压强度达到其设计强度等级时张拉. 非预应力纵筋和箍筋均采用 HRB335 级钢筋.

## 2 内力计算

轨道层除了承担结构自重和站台活荷载以外,还要承担列车停靠和进出站时所产生的列车荷载. 当列车停靠站台时,列车荷载对于结构为静

荷载;当列车进出站时,列车荷载对于结构为动荷载,此时需要荷载乘以动力放大系数. 根据《铁路桥涵设计基本规范》<sup>[1]</sup>,铁路列车竖向静荷载采用“中-活载”计算,见图 3.

由于轨道层各框架梁处于不同标高上,因而建立模型时不考虑板的有利作用,采用平面框架模型,并人工导入荷载,见图 4. 预应力混凝土纵向框架梁所受荷载为:结构自重、站台梁承担的站台活荷载以及列车活荷载,8 条列车轨道设置于纵向梁,考虑列车活荷载的最不利布置,最终得到纵向梁各控制截面的内力见表 1.

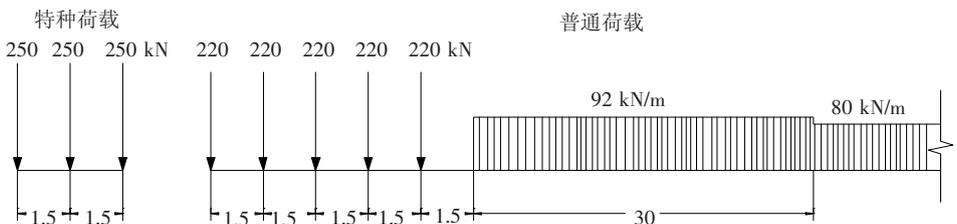


图 3 “中-活载”示意 (距离单位 m)

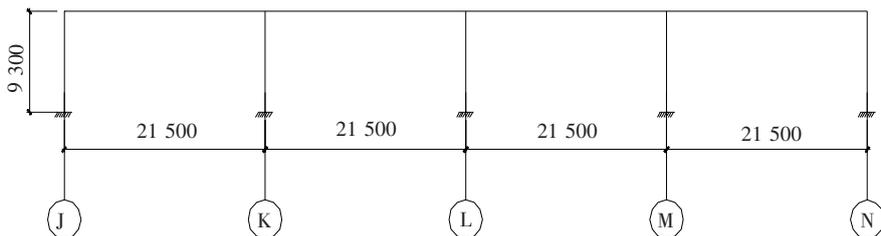


图 4 预应力纵向梁简化计算模型 (m)

表 1 纵向梁各控制截面内力

数值 类型	J,N 支座 剪力/kN	J,N 支座 弯矩/ (kN·m)	J~K、 M~N 跨弯矩/ (kN·m)	K,M 支座 左剪力/ kN	K,M 支座 右剪力/ kN	K,M 支座 左弯矩/ (kN·m)	K,M 支座 右弯矩/ (kN·m)	K~L、 L~M 跨弯矩/ (kN·m)	L 支座 剪力/ kN	L 支座 弯矩/ (kN·m)
设计值	7 574.48	-16 030.58	23 500.81	9 221.08	8 445.58	-38 965.57	-36 344.03	14 744.45	8 507.38	-34 299.05
标准值	6 017.17	-12 696.30	18 618.58	7 349.79	6 718.95	-30 998.33	-28 900.48	11 568.66	6 764.79	-25 841.40

### 3 预应力混凝土梁配筋计算

轨道层预应力混凝土纵向框架梁一方面为 4 跨共 86 m 的大梁, 结构超长; 另一方面在靠近支座处受到较大集中荷载的作用, 在选取线型时采用抛物线与直线的组合线型, 这样将导致曲线布筋时的转角曲率较大. 上述两方面均会引起较大预应力摩擦损失, 而轨道层作用有列车动荷载, 为了保证结构的整体性, 不宜设置后浇带, 为减小预应力摩擦损失, 设计时采用改进预应力梁的配筋形式, 提出了无粘结预应力筋与有粘结预应力筋混合配筋、分段张拉梁侧锚固以及直线配筋 3 种配筋方案.

#### 3.1 直线配筋方案

预应力孔道摩擦损失由管道偏差及孔道弯曲两部分影响组成, 直线配置预应力筋孔道摩擦损失理论上可降至最低, 为此有粘结预应力筋束通长布置于预应力混凝土梁的上部和下部, 计算流程见图 5.

根据承载能力要求, 计算得到预应力混凝土梁下部需配置  $90\phi^s 15 (A_p = 12\ 510\ \text{mm}^2)$ , 下部需配置  $117\phi^s 15 (A_p = 16\ 263\ \text{mm}^2)$ . 由实际配筋可以分析得到在端部预加力作用下结构的综合弯矩图, 见图 6.

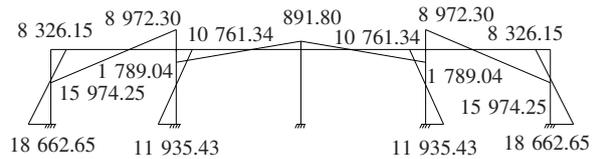


图 6 直线配筋预应力混凝土梁综合弯矩 (kN·m)

由图 6 可知, 预应力筋的张拉使支座处出现负弯矩, 且外荷载效应使支座处出现负弯矩, 对预应力混凝土梁抗裂验算, 外荷载弯矩与综合弯矩叠加, 对支座梁截面的抗裂性能更为不利, 因此该工程不宜采用直线配筋方案.

#### 3.2 无粘结预应力筋与有粘结预应力筋混合配筋方案

有粘结预应力筋的孔道摩擦损失比无粘结预应力筋大, 故在满足承载能力极限状态和正常使用极限状态下, 无粘结预应力筋代替部分有粘结预应力筋, 进而形成以有粘结预应力筋为主、无粘结预应力筋为辅的混合配置预应力筋方案, 能够减小预应力摩擦损失, 进而提高预应力梁的整体工作性能.

在抗震设防区对配置预应力筋的混凝土梁, 理论上应优先选择有粘结预应力筋配置方案. 对于跨度大、外荷载大的预应力梁, 当以裂缝宽度和挠度限制控制进行配筋计算时, 可采用有粘结预应力筋和无粘结预应力筋混合配筋的方案, 其中无粘结预应力筋的数量应按以下原则计算确定<sup>[2]</sup>:

1) 预应力混凝土梁在水平地震和竖向荷载作用下, 其承载能力由非预应力筋和有粘结预应力筋共同承担, 裂缝宽度和挠度的限值要求由无粘结预应力筋和有粘结预应力筋共同满足. 因此即使预应力混凝土梁经历地震时某跨无粘结预应力筋失效, 也不会引起整体结构连续性倒塌.

2) 有粘结预应力筋面积 ( $A_{p1}$ ) 和无粘结预应力筋面积 ( $A_{p2}$ ) 的总面积  $A_p = A_{p1} + A_{p2}$ , 应满足所

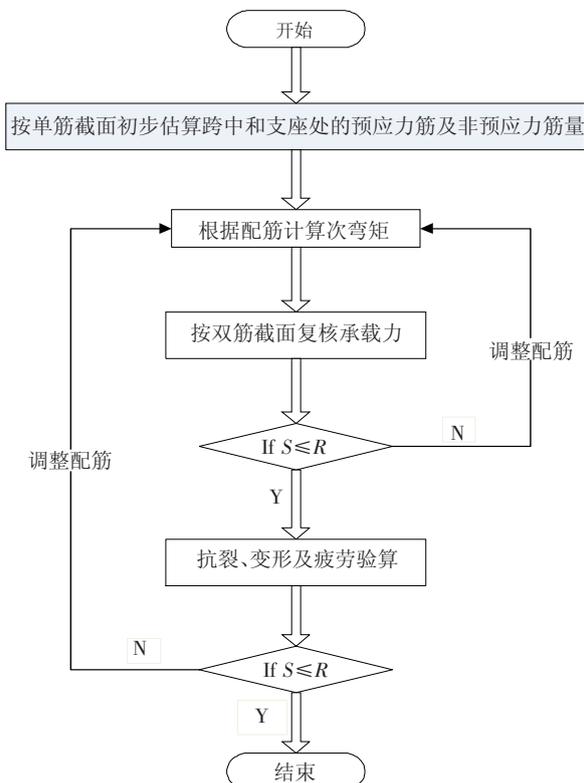
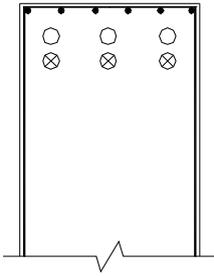


图 5 直线配筋预应力混凝土梁计算流程

选择的预应力度以及使用性能双重要求,预应力度对预应力混凝土结构的抗震性能和使用性能有较为重要的影响。

对于预应力混凝土梁,在满足截面构造要求前提下,采用无粘结预应力筋和有粘结预应力筋混合配置预应力筋方案时,应尽可能将有粘结预应力筋配置于靠近预应力混凝土梁受力较大的受拉边缘,将无粘结预应力筋配置于预应力混凝土梁的内侧,使内力臂增大,预应力筋面积减小.本工程受力较大的位置为轨道层纵梁支座处,故采用的预应力筋配置方式见图7.



○——有粘结预应力筋;⊗——无粘结预应力筋  
图7 支座截面预应力筋配置

根据第一条原则可以确定预应力筋量:按预应力混凝土梁单筋截面承载力公式可以确定各控制截面所需有粘结预应力筋量,并取最大值为  $90b\phi^{15}(A_p = 12\ 510\ \text{mm}^2)$ ;按截面抗裂要求补足无粘结预应力筋量  $30U\phi^{15}(A_p = 4\ 170\ \text{mm}^2)$ . 依据与预应力筋共同作用以满足承载力极限状态要求,以及满足最小配筋率和第二条要求的原則,计算确定非预应力筋的数量,计算得到非预应力筋的用量和总面积为  $51\ \phi^{25}(A_s = 25\ 041\ \text{mm}^2)$ .

无粘结预应力筋和有粘结预应力筋混合配置预应力筋方案的预应力筋线型见图8. 张拉端设置在边跨梁端中心轴附近,以便梁端截面负弯矩承载力设计值不致于超强过多,并且预应力偏心引起的弯矩小,预应力筋在框架柱顶部引起的次弯矩对整体受力性能较为有利。

由以上分析可以看出,采用无粘结预应力筋和有粘结预应力筋混合配置预应力筋的方式可以有效减小预应力孔道摩擦损失,与完全配置有粘结预应力筋相比,该方案的预应力筋用量大为减小,在满足正常使用状态条件下,预应力混凝土梁截面承载力设计值超强相对减小,可改善预应力混凝土梁截面延性,提高结构整体抗震性能。

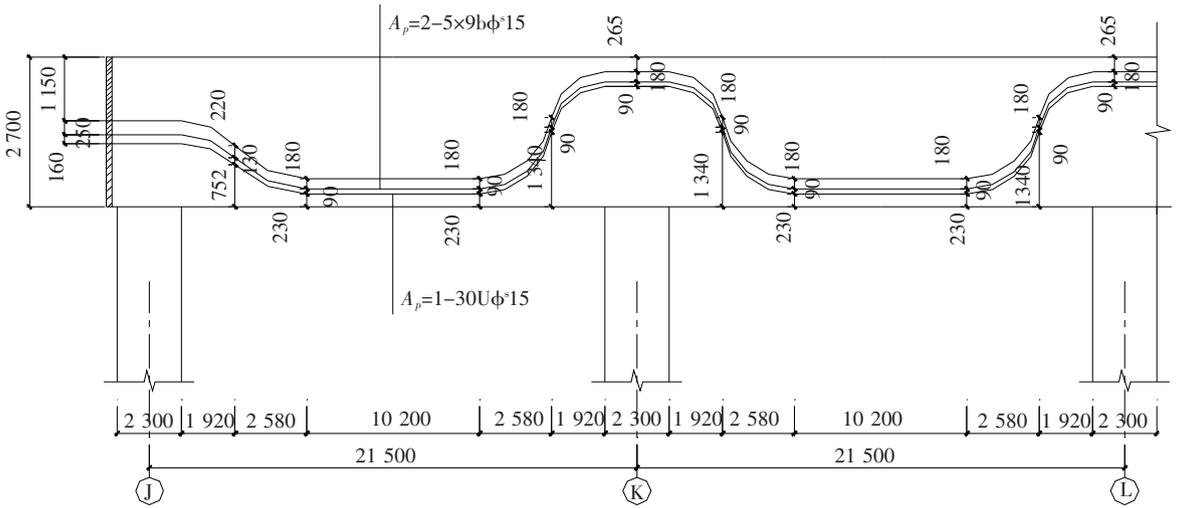


图8 混合配筋预应力筋线型(m)

### 3.3 分段张拉梁侧锚固配筋方案

梁中部支座处的弯矩较大,若梁中预应力筋通长布置,为了保证裂缝宽度控制能够满足要求需要配置大量预应力筋,而在靠近张拉端的控制截面由于预应力损失较小,所需筋量也较少,按中部支座截面抗裂要求配置的预应力筋就会超量,这样将导致预应力混凝土框架梁各跨的预应力水平相差较大,对结构性能不利<sup>[3-5]</sup>.

分段张拉梁侧锚固配筋方案是将4跨预应力混凝土梁分成左右两部分,①~④轴和⑤~⑧轴分

别布置预应力筋束,然后各自进行两端张拉,中部的张拉端设置在梁侧,但须在梁侧设置张拉用的混凝土小牛腿.混凝土小牛腿的计算可采用三角形桁架计算模型<sup>[6-7]</sup>,梁侧面与预应力筋张拉面的夹角为  $17^\circ$ ,按张拉控制应力和余弦定理即可计算小牛腿承担的竖向分力  $F_v = A_p \sigma_{con} \cos 17^\circ = 153\ 75\ \text{kN}$ ,综合考虑计算结果和构造要求,确定水平拉筋为  $14\ \phi^{20}(A_s = 4\ 398\ \text{mm}^2)$ . 混凝土小牛腿的详图见图9. 该方法将有粘结预应力筋的长度减少一半,预应力摩擦损失将大为减小,使设

计经济合理.

预应力梁中同一高度每排布设预应力筋 4 束, 位于梁截面外侧的 2 束预应力筋首先伸出梁的侧面并于靠近①轴的混凝土小牛腿端部张拉; 位于梁截面内侧的 2 束预应力筋后伸出梁的侧面并于第 2 排混凝土小牛腿端部张拉. 预应力筋应分批对称张拉, 同一高度的预应力筋束同一时刻对称张拉, 可避免张拉预应力阶段预应力使梁中出现较大的侧向力. 分段张拉梁侧锚固配筋的预应力筋布置见图 10.

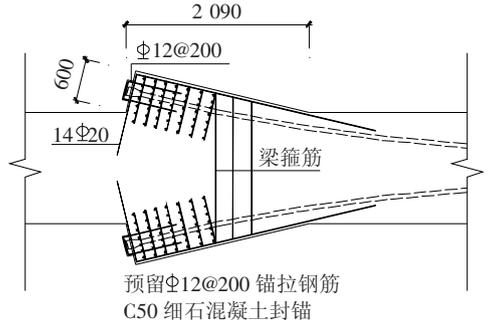


图 9 梁侧张拉用小牛腿构造详图

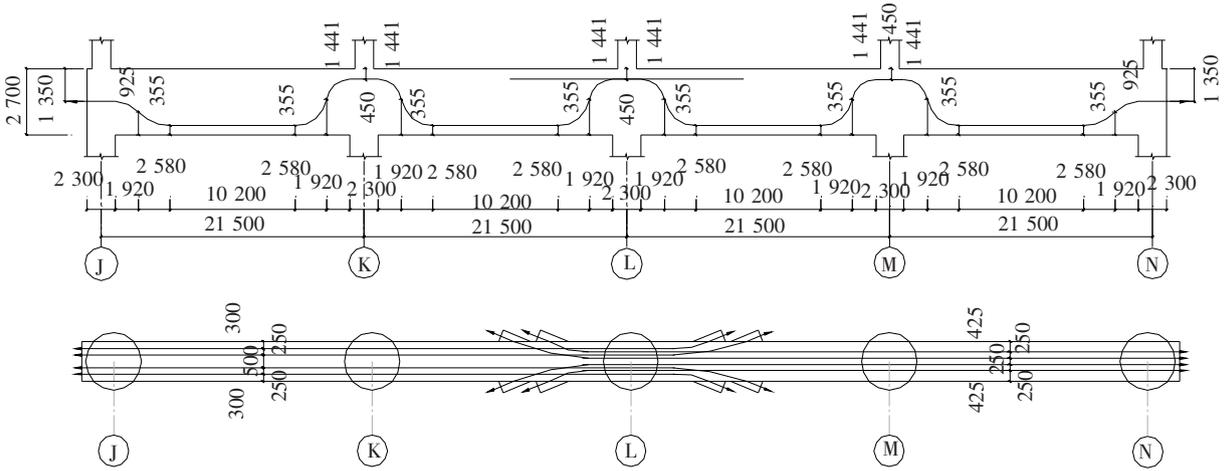


图 10 预应力筋立面及平面布置

①~④轴和⑧~⑩轴的预应力梁分别进行配筋计算, 由式(1)、(2)确定非预应力筋及预应力筋用量, 并由式(3)限定非预应力筋用量<sup>[8]</sup>:

$$A_s = \frac{(1 - \lambda) A_p f_{py} h_p}{\lambda f_y h_s} \quad (1)$$

$$A_p = \frac{\frac{M_s}{W} - \beta[\sigma_{ct1}]}{(1 - \lambda) f_{py} h_p + \lambda f_y h_s \cdot 100\sigma_i + \frac{N_p}{A} + \frac{M_p}{W}} \quad (2)$$

$$A_s \leq \frac{\{0.25f_{cuk} - \beta[\sigma_{ct1}]\} (1 - \lambda) f_{py} h_p A}{[(1 - \lambda) f_{py} h_p + \lambda f_y h_s] \cdot 100\sigma_i} \quad (3)$$

经计算, 预应力混凝土梁中需配置预应力筋量为  $108\phi^{15}$  ( $A_p = 15\ 012\ \text{mm}^2$ ), 非预应力筋量为  $45\ \phi^{25}$  ( $A_s = 22\ 095\ \text{mm}^2$ ).

根据文献[9], 对于二、三级抗震等级的预应力混凝土框架梁端截面相对受压区高度  $x/h_0$  不应大于 0.35. 由于在④轴支座截面处, 左右两侧的预应力筋在此处通过, 该截面的相对受压区高度将超过规范限值, 因而在保证预应力混凝土梁截面大小不变的条件下, 可将一定数量的受压钢

筋设置于梁的端部. 经分析, 梁端受压区需配置  $30\ \phi^{25}$  的受压钢筋, 梁端及支座非预应力筋配置见图 11.

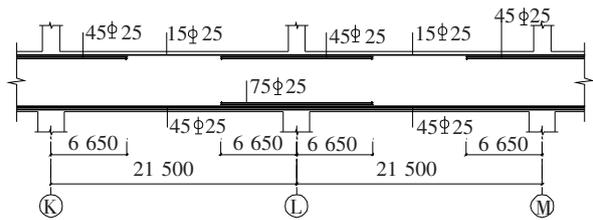


图 11 梁端及支座非预应力筋配置(m)

#### 4 疲劳验算

列车客运站的轨道层结构承担列车荷载的重复循环作用, 在使用荷载作用下预应力混凝土梁截面允许开裂, 为此应对该预应力混凝土梁疲劳验算.

根据文献[10], 对承受疲劳荷载作用的构件, 应验算钢筋应力幅, 其允许值  $[\Delta\sigma]$  若无试验依据可按表 2 选取.

表 2 钢筋应力幅允许值  $[\Delta\sigma]$  MPa

光面钢筋	带肋钢筋	钢绞线	预应力螺纹钢筋
150	150	140	80

对于允许开裂的预应力混凝土构件,其开裂截面的非预应力筋和预应力筋的应力幅可按下式计算

$$\Delta\sigma_p = \Delta\sigma_{p1} + \Delta\sigma_{p2} - \sigma_{pg}, \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{s2} - \sigma_{sg}. \quad (5)$$

式中: $\Delta\sigma_{p1}$  为消压后预应力筋的应力增量(MPa);  $\Delta\sigma_{s2}$ ,  $\Delta\sigma_{p2}$  分别为消压后按开裂截面计算的非预应力筋和预应力筋的应力增量(MPa);  $\sigma_{sg}$ ,  $\sigma_{pg}$  分别为由恒载引起的非预应力筋及预应力筋中的应力(MPa).

按照规范提供的公式,对各项进行计算,最终得到预应力筋及非预应力筋的疲劳应力幅为

$$\Delta\sigma_p = 119 \text{ MPa} < 140 \text{ MPa},$$

$$\Delta\sigma_s = 102 \text{ MPa} < 150 \text{ MPa}.$$

两者均满足规范限值要求,说明轨道层预应力混凝土梁不会发生疲劳破坏.

## 5 结 语

哈尔滨西客站轨道层预应力结构为超长结构,受力复杂,本文对比分析了无粘结预应力筋和有粘结预应力筋混合配筋方案、分段张拉梁侧锚固配筋方案以及直线配筋3种方案.计算结果表明:前2种方案一方面可以大大减小预应力摩擦损失,减少预应力筋用量,使设计更加经济合理;另一方面又缓解了承载力设计值超强过多对结构的不利影响,改善构件截面延性,提高抗震性能.

## 参考文献:

- [1] TB10002.1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [2] 肖常安,李莉. 对梁中采用有粘结预应力筋与无粘结预应力筋结合配筋的探讨[J]. 工业建筑,1999, 29(10): 37-40.
- [3] IBELL T J, BURGOYNE C J. Experimental investigation of behaviour of anchorage zones[J]. Magazine of Concrete Research, 1993, 45(165): 281-291.
- [4] IBELL T J, BURGOYNE C J. Plasticity analysis of anchorage zones[J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 46(166): 39-48.
- [5] ROBERTS-WOLLMANN C L, BREEN J E. Design and test specifications for local tendon anchorage zones[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(6): 867-87.
- [6] 贾金青,孙洪梅. 一种新型牛腿的设计与应用[J]. 建筑结构,2002, 32(3): 29-30.
- [7] ACI 318M-05. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2005.
- [8] 张昊宇,郑文忠. 对名义拉应力控制预应力混凝土受弯构件裂缝宽度方法的2点改进[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(6): 25-30.
- [9] JGJ140—2004 预应力混凝土结构抗震设计规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [10] TB10002.3—2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.

(编辑 赵丽莹)