

# 预应力混凝土预制 U 型梁道床板受力特性研究

王利伟<sup>1</sup>, 宋郁民<sup>2</sup>, 吴定俊<sup>3</sup>, 张晓惠<sup>4</sup>

(1. 青岛市政工程设计研究院有限责任公司, 山东 青岛 266100;

2. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620;

3. 同济大学 桥工程系, 上海 200092; 4. 中国铁建投资集团有限公司, 北京 100855)

**摘要:** 轨道交通 U 型梁的道床板在列车活载作用下处于横向弯曲受力状态, 且与两侧腹板形成开口薄壁结构, 受力较为复杂。为研究道床板横向弯曲、剪力滞效应以及腹板与底板连接处梗斜的应力状态等受力特性, 选取现场实际工程的预制 U 型梁, 对道床板横向弯曲性能、剪力滞效应和梗斜处的应力状态进行试验研究, 并结合线弹性和非线性有限元计算分析结果, 总结了预应力混凝土预制 U 型梁道床板的受力特性, 为预应力混凝土预制 U 型梁道床板的设计和施工提供借鉴。

**关键词:** 轨道交通; U 型梁; 道床板; 横向弯曲; 受力特性

中图分类号: TU378.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)05-0060-07

## Mechanical Properties of Track Bed Slab of Pre-stressed Concrete Pre-casted U-shape Girder

WANG Liwei<sup>1</sup>, SONG Yumin<sup>2</sup>, WU Dingjun<sup>3</sup>, ZHANG Xiaohui<sup>4</sup>

(1. Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266100, China;

2. Urban Rail Transit College of Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

3. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100855, China)

**Abstract:** Track bed slab of rail transit U-shape girder is the state of transverse bending force, which could form an open thin-walled structure with web on both sides, so its force is more complex. Currently, study focusing on force characteristics of track bed slab is relatively limited. This paper mainly analyzes the transverse bending, shear lag effect and stress state of stem slant at the connection of web and baste board. A pre-stressing concrete pre-casting U-shape girder is selected in the actual beam field, and then experimental study on force characteristics is done for transverse bending, shear lag effect and stress state of stem slant. Combined with the result of finite element analysis, the force characteristics of track bed slab of pre-stressing concrete pre-casting U-shape girder are summarized. The conclusion can provide reference for design and construction of track bed slab of pre-stressing concrete pre-casting U-shape girder.

**Keywords:** rail transit; U-shape Girder; track bed slab; transverse bending; force characteristics

城市轨道交通高架桥广泛采用预制 U 型梁, 因其行车道板(道床板)位于两腹板底部, 作为下承式结构, 其显著优点是建筑高度低。与传统箱梁、工字梁等上承式梁相比, 具有建筑高度低、工厂化预制质

量好、节约建筑材料等优点<sup>[1-2]</sup>。随着我国城市轨道交通快速发展, 许多城市在轨道交通高架桥中, 广泛采用预应力混凝土预制 U 型梁<sup>[3]</sup>。特别是后张法预制 U 型梁领域形成了完善的设计与施工体系,

相应科研成果很多<sup>[4-6]</sup>。近几年,先张法预制U型梁方兴未艾,其应用和研究也逐步增多<sup>[7-8]</sup>。青岛地铁8号线采用混张法预制U型梁,更是推进了预应力混凝土预制U型梁在轨道交通高架桥中的广泛应用<sup>[9]</sup>。U型梁作为一种开口薄壁结构,其受力特性具有显著的空间特性:纵向弯曲受力由两侧腹板和底板共同承担,按照全预应力混凝土结构设计;道床板直接承受列车荷载,并将荷载传递给腹板,呈现横向弯曲特性,按照钢筋混凝土结构设计<sup>[10-11]</sup>。然而道床板的受力特性,以及道床板与腹板连接处的受力特性,并未详细研究。实际工程中,道床板与腹板连接处(下文称之为梗斜)较容易出现纵向裂缝的病害,但其原因并未得到详细研究。

本文依托青岛地铁“先张法预应力混凝土预制U型梁综合力学性能研究”科研项目,选取实体浇筑的预制U型梁,对道床板的横向弯曲、剪力滞效应和道床板与腹板连接处(梗斜)的受力特性,进行研究,并结合有限元分析,研究道床板的受力性能。该U型标准跨径为30 m,梁整体外观呈“U”型,腹板为弧形设计,计算跨径28.7 m,梁端1.2 m道床板加厚为0.4 m。跨中截面道床板宽4.08 m,厚0.26 m;端部截面道床板板宽4.68 m,厚0.4 m;在腹板与道床板连接处做梗斜加厚。端部加厚段上下缘均配有受力钢筋,而非加厚段只在下缘配置受力钢筋,上缘为构造配筋。道床板构造和配筋如图1和图2所示。

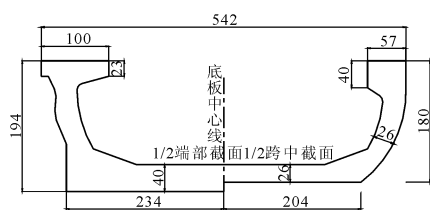


图1 先张法U型梁半立面图(单位:cm)

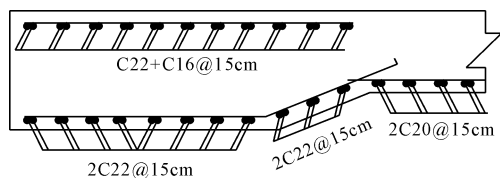


图2 道床板钢筋布置图

## 1 道床板试验与有限元分析简介

### 1.1 试验方案与测试内容

U型梁道床板的试验包括:道床板弯曲性能静载试验、剪力滞效应试验和梗斜处应力状态测试。

道床板弯曲性能静载试验是主梁荷载试验的附属内容。加载方法采用钢结构门式反力架,配合同步千斤顶系统进行加载。横向加载点模拟列车轮对,加载点间距1.4 m,如图3所示。

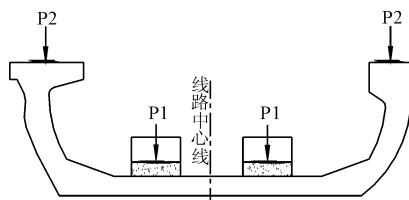


图3 反力架加载点横向布置图

图3中底板上的加载力 $P_1$ 模拟轮轨荷载,最大加载值为列车轴重1.2倍。腹板上的加载力 $P_2$ 为超过1.2倍设计荷载后的加载值。

试验采用混凝土表面粘贴应变片、钢筋焊接钢筋计和混凝土内埋置应变计三种测试手段。其中应变片在半跨U型梁上选取3个测试截面:跨中截面、1/4截面和距支点0.5 m截面,如图4所示。钢筋计和混凝土应变计在右半跨上选取3个测试截面:跨中截面、中加载面、边加载面,如图5所示。

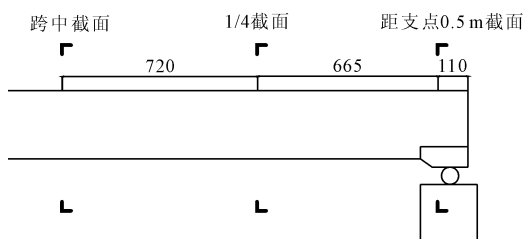


图4 混凝土横向应变片测试截面(单位:cm)

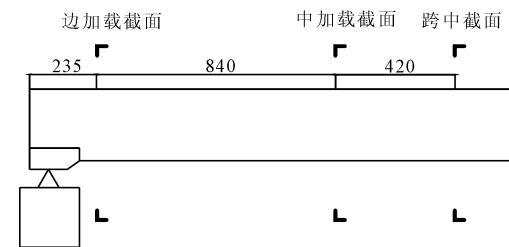


图5 钢筋计和混凝土应变计测试截面(单位:cm)

各混凝土应变测试截面的应变片测点布置及编号如图6所示。

钢筋计的布置,除测试道床板跨中上下缘钢筋应力外,也考虑测试梗斜处钢筋应力,因此每个测试截面道床板下缘布置3个钢筋应力计,道床板上缘布置1个钢筋应力计,左右梗斜各布置1个钢筋应力计,同时,在道床板中线上、下缘混凝土内每截面布置一个横向钢弦应变计,测试道床板横向弯曲时混凝土的应力。如图7所示。

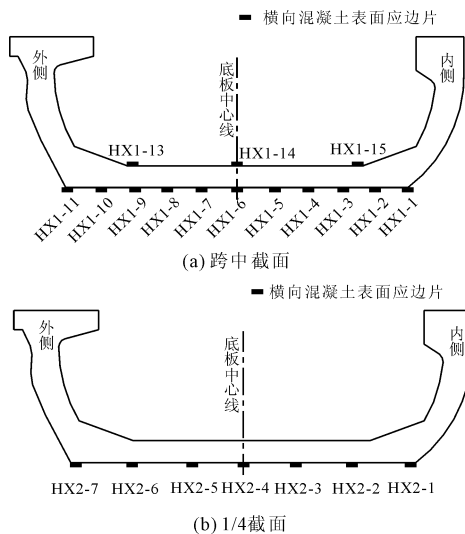


图 6 横向弯曲混凝土应变片布置

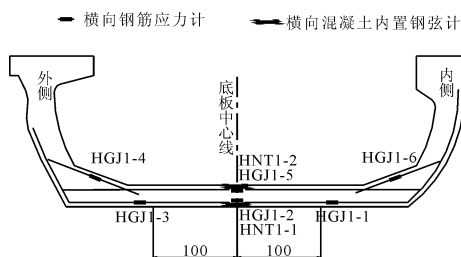


图 7 钢筋应力计测点布置(长度单位:cm)

为测试梗斜的应力状态,还在多个截面的混凝土梗斜处粘贴两个横向应变片,测试道床板和腹板连接处梗斜的应力状态如图 8 所示。

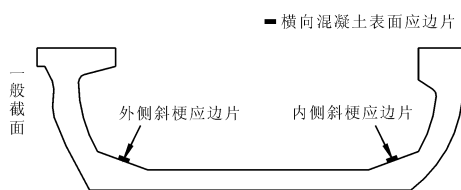


图 8 跨中截面的梗斜应变片和应变计测点布置

## 1.2 道床板有限元分析模型

有限元分析分别采用了线弹性和非线性分析。采用 ANSYS 建立空间实体有限元模型,混凝土采用 Solid 45 单元,预应力钢绞线和普通钢筋均采用 Link 8 单元。其中预应力在 Link 8 单元施加压力,预应力按照设计张拉控制应力施加。ANSYS 有限元模型如图 9、图 10 所示。

线弹性分析相关计算参数依据规范和设计资料。非线性有限元分析关于混凝土和普通钢筋非线性分析的本构关系分别为:混凝土选择多线性等向强化 MISO 模型,初始弹性模量为  $3.60 \times 10^4$  MPa,极限压应变为  $1\ 872\ \mu\epsilon$ ,泊松比为 0.2;普通钢筋选

择双线性等向强化模型 BISO 模型,弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3,屈服强度 400 MPa。本构关系图如图 11 所示。

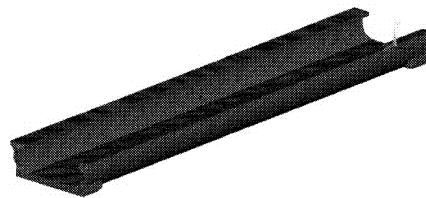


图 9 ANSYS 实体模型

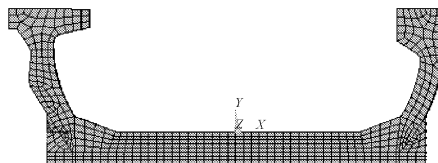
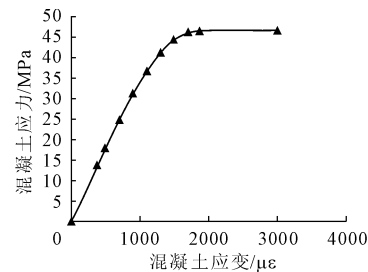
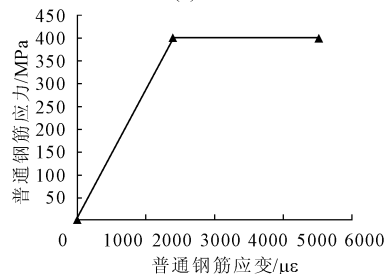


图 10 单元划分示意图



(a) 混凝土



(b) 普通钢筋

图 11 非线性分析的本构关系

## 2 道床板剪力滞效应及其有效宽度分析

### 2.1 剪力滞效应分析

根据 ANSYS 有限元分析结果,绘制自重作用下 U 型梁跨中和 1/4 截面道床板下缘混凝土纵向应力分布曲线(如图 12 所示),以及加载等级  $K = 1.0$  时,U 型梁跨中和 1/4 截面道床板下缘混凝土纵向应力分布曲线(如图 13 所示)。

预应力钢绞线放张前后,分别读取了各关键截面道床板内布置的钢弦应变计的应变值,求得各个测点混凝土应变增量,并乘以放张时混凝土弹性模量  $0.9E = 3.24 \times 10^4$  MPa,得到实际混凝土应力。

分别绘制跨中和 1/4 截面道床板混凝土正应力分布曲线,如图 14 所示。

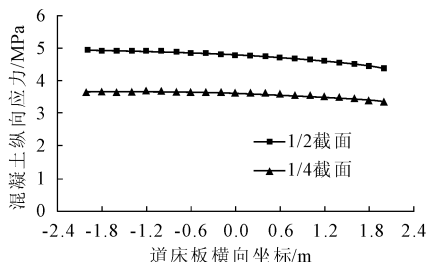


图 12 自重作用下道床板混凝土纵向应力分布曲线

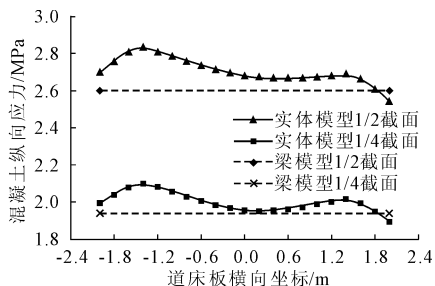
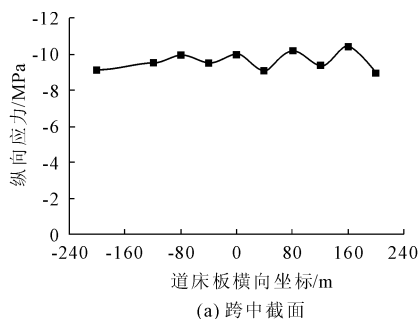
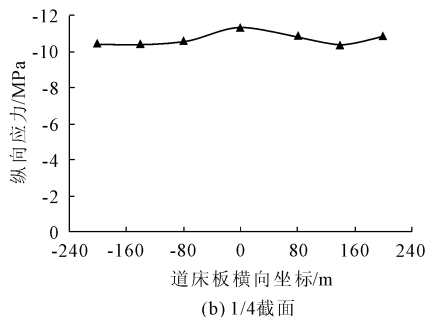


图 13  $K=1.0$  试验荷载作用下道床板混凝土纵向应力分布曲线



(a) 跨中截面



(b) 1/4 截面

图 14 预应力放张后道床板混凝土纵向应力分布曲线

研究荷载试验时,加载等级  $K=1.0$  时,跨中和 1/4 截面道床板内置钢弦应变计的应变增量,并换算成为混凝土应力,绘制道床板混凝土纵向正应力分布曲线,如图 15 所示。

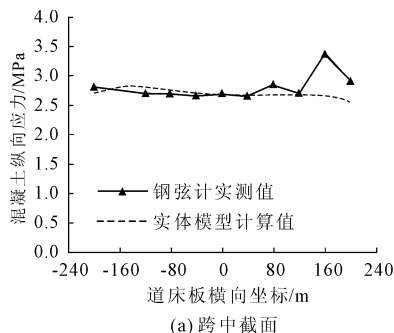
依据有限元分析和试验测试结果,可得出:

(1) 由图 15 可知底板纵向正应力的有限元分析与实测结果跨中非常吻合,四分之一截面存在差

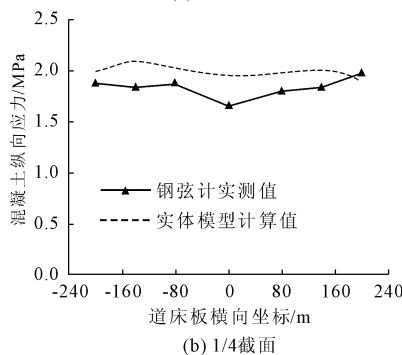
异,原因是该截面位于试验加载区段。

(2) 依据有限元分析,需考虑剪力滞效应,可求得跨中截面剪滞系数  $\xi=1.09$ ,1/4 截面剪滞系数  $\xi=1.08$ 。

(3) 从试验结果分析可看出道床板纵向正应力分布变化不大,基本可不考虑剪力滞效应的影响。



(a) 跨中截面



(b) 1/4 截面

图 15 加载等级  $K=1.0$  时道床板混凝土纵向应力分布曲线

## 2.2 道床板有效宽度分析

剪力滞效应反应在工程应用中的实用计算方法就是采用“有效宽度”计算 T 型梁和箱梁翼缘板的正应力。铁路桥规关于 T 型梁和箱梁的翼缘板的有效计算宽度,有详细的规定<sup>[12-13]</sup>。但目前,U 型梁道床板有效宽度没有明确的规范条文规定,可借助有效宽度的概念来考虑剪力滞效应。

由于 U 型梁道床板位于受拉区,可借鉴规范关于箱形截面底板有效宽度的分析方法<sup>[12-13]</sup>,即:

$$\begin{cases} b_{\text{eff}} = \alpha \lambda_i b_i \\ \lambda_i = b_i / L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $b_{\text{eff}}$  为有效宽度; $b_i$  为底板的 1/2 宽度,本文取 1.78 m; $L$  为简支梁跨度,取 28.7 m; $\lambda_i$  为宽跨比,本文取 0.062。

定义令  $\psi$  为 U 型梁道床板有效宽度与实际宽度比,即有效宽度折减系数:

$$\psi = b_{\text{eff}} / b \quad (2)$$

查规范有效宽度折减系数表<sup>[12]</sup>,计算得  $\psi = 0.97$ ,  $b_{\text{eff}} = 3.453$  m。

按照道床板纵向应力均匀分布,以实际总应力面积和最大应力与有效宽度的乘积相等为原则,可求出道床板有效宽度:

$$b_e = \int_0^b \sigma(x) dx / \sigma_{\max} \quad (3)$$

式中: $\sigma(x)$  为道床板纵向应力分布; $\sigma_{\max}$  为道床板纵向应力最大值; $b$  为道床板实际宽度; $b_e$  为道床板的有效宽度。

依据有限元分析的结果图 14,可积分求得跨中截面的  $b_e \approx 3.414$  m,四分之一截面  $b_e \approx 3.303$  m。则跨中截面的有效宽度折减系数为 0.959,四分之一跨截面的有效宽度折减系数为 0.927,略小于按照箱梁有效宽度计算条文的计算结果 0.966。有以下结论和建议:

(1) 恒载作用下 U 型梁道床板的剪力滞效应可以忽略不计。

(2) 活载作用下,应考虑剪力滞效应,且可采用有效宽度折减系数来求道床板的计算宽度,可参照铁路桥规关于箱梁底板的有效宽度计算方法。

(3) 对于轨道交通常见的单线 30 m 标准跨径的预制 U 型梁,可偏安全的取折减系数  $\psi$  为 0.92。

### 3 横向弯曲力学性能分析

#### 3.1 线弹性有限元分析

分别取出在  $K = 1.0$  荷载等级下,跨中截面和中加载截面(存在应力集中现象)的横向弯曲正应力如图 16、图 17 和图 18 所示。

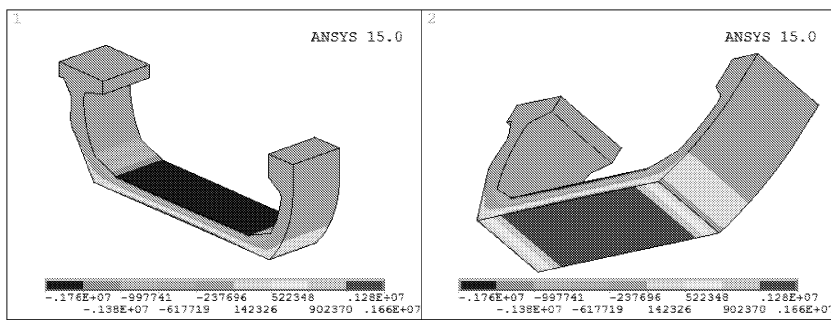


图 16 跨中截面横向应力云图(单位:MPa)

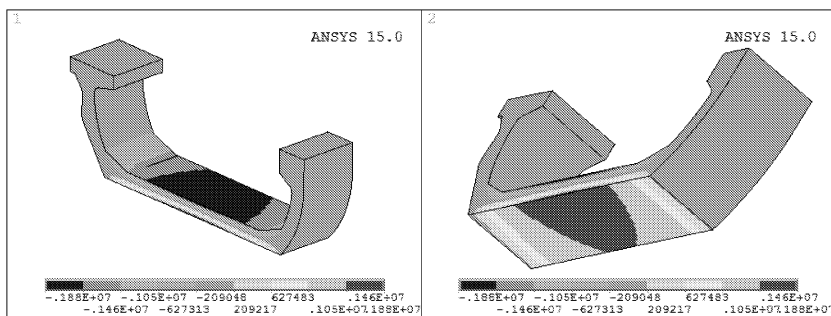


图 17 1/4 截面横向应力云图(单位:MPa)

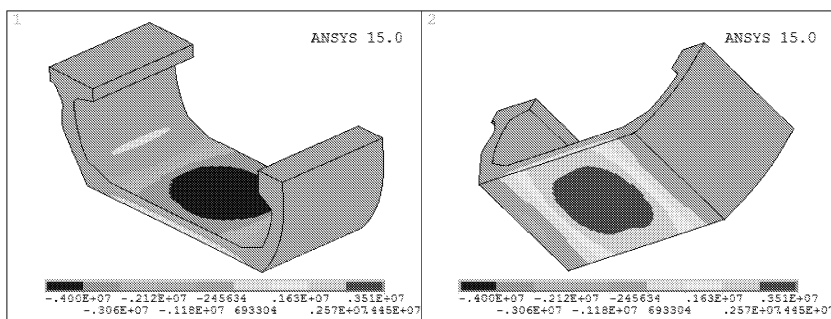


图 18 中部反力架加载位置横向应力云图(单位:MPa)

从图16—图18的线弹性有限元分析结果可知:

(1) 即使加载截面存在应力集中现象,道床板上缘混凝土最大压应力4.0 MPa,远小于混凝土抗压设计强度<sup>[14-15]</sup>。

(2) 非加载截面的跨中截面和1/4截面的道床板的下缘混凝土拉应力最大1.88 MPa,并未超过极限抗拉强度<sup>[14-15]</sup>。

(3) 反力架加载位置的上缘最大压应力-4.00 MPa,下缘最大拉应力4.45 MPa,超过了C55混凝土极限抗拉强度3.3 MPa<sup>[14-15]</sup>。

### 3.2 非线性有限元分析

由于道床板的厚度较小,非线性有限元分析的网格划分时,道床板划分三层。ANSYS处理开裂单元时,令整个开裂的混凝土单元都退出工作,由钢筋承担全部拉应力,因此非线性分析关注了受拉区钢筋应力变化过程。

分析结果,绘制跨中截面底板下缘中心线和内外腹板处横向钢筋荷载-应力曲线如图19所示。

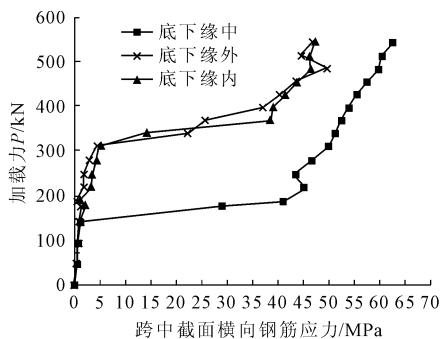


图19 跨中截面横向钢筋荷载-应力曲线

从图19可以得知:

(1) 当加载力达到160 kN时,即0.5倍的正常运营荷载时,钢筋的应力骤然增大。试验时该加载状态下跨中截面道床板中心线首先出现纵向裂缝。

(2) 当加载力达到300 kN~400 kN时,即1.0倍~1.2倍设计荷载以后,道床板下缘的内外侧,也就是即腹板的下缘,混凝土开裂退出工作,钢筋应力骤然增大,这与主梁的抗裂性试验结果吻合。

### 3.3 抗裂性能试验分析

道床板抗裂性能主要是通过观测底板下缘的纵向裂缝而判断,主要结果如下:

(1) 从开始加载到在等效列车活载( $K=1.0$ )作用下,在梁底没有发现纵向裂缝。

(2) 加载等级为 $K=1.1$ 倍设计荷载后,在梁底发现多条纵向裂缝,且均出现在4个反力架加载

截面道床板中心线附近,这与有限元分析结果相符,且最大裂缝宽度为0.08 mm,

(3) 加载等级 $K=1.2$ 倍设计荷载后,加载截面底缘纵向裂缝条数增多,既有裂缝宽度增加,最大裂缝宽度为0.1 mm。

根据试验观测,U型梁道床板横向受力按钢筋混凝土结构设计,设计荷载下裂缝宽度要求小于0.2 mm,所以横向弯曲抗裂性满足规范要求。

### 3.4 强度试验分析

#### 3.4.1 加载过程的钢筋和混凝土应力分析

道床板强度的试验分析,主要依据钢筋应力与混凝土应力测试结果判断。由于道床板主要承受承轨台自重和列车轮载,所以试验分析仅考虑加载等级 $K \leq 1.2$ 的情形。

根据图7,将试验时道床板中心线上下缘的钢筋应力计和内置混凝土钢弦应变计的测试结果一起分析,得出如下结论:

(1) 道床板上缘混凝土横向压应力增量较小;当 $K=1.0$ 时,道床板下缘最大拉应力增量1.91 MPa。

(2) 试验荷载加载到 $K=1.2$ 倍设计荷载时,中部加载截面道床板中心线上缘钢筋压应力增量-23.0 MPa,下缘钢筋拉应力增量27.3 MPa。

(3) 加载截面梗斜上缘的钢筋受拉,跨中截面梗斜上缘的钢筋受压,与有限元分析结果相符。在 $K=1.2$ 时,梗斜处钢筋最大拉应力增量3.6 MPa,最大压应力增量-11.9 MPa。

#### 3.4.2 考虑恒载效应后的钢筋应力分析

试验加载之前,道床板的恒载效应已使横向弯曲受力钢筋产生了应力。但由于钢筋计安装工艺和混凝土收缩等原因,准确测试恒载作用下的钢筋应力较为困难。但掌握钢筋的最大应力情况,是设计师和研究者所关注的。本文则将理论计算所得的恒载作用下的钢筋应力与活载模拟加试验所测得的钢筋应力增量叠加,近似的认为是钢筋实际应力。经过分析后,得到钢筋在两个工况下的应力,分析结果表明:

(1) 叠加恒载应力后,钢筋应力总的分布规律是:道床板下缘受拉,上缘受压。梗斜处钢筋受拉,跨中截面梗斜钢筋受压。

(2) 各横截面最大钢筋应力仍在道床板中心线处, $K=1.2$ 时,跨中钢筋最大拉应力40.3 MPa,最大压应力-40.5 MPa;中加载截面钢筋最大拉应力40.1 MPa,最大压应力-46.4 MPa;边加载截面钢

筋最大拉应力 21.9 MPa,最大压应力 -24.3 MPa。

(3) 各截面钢筋应力均远小于规范给定的 HRB400 钢筋的容许应力 210 MPa,因此道床板设计时强度不控制设计,而是裂缝宽度控制设计。

(4) 试验 U 型梁的道床板横向弯曲受力钢筋应力较小,可以进一步优化设计,节约钢筋用量。

表 1 梗斜表面混凝土应力增量

加载工况	应力增量/MPa							
	跨中截面		中加载截面		边加载截面		距支点 0.5 m 截面	
	外梗斜	内梗斜	外梗斜	内梗斜	外梗斜	内梗斜	外梗斜	内梗斜
K = 1.0 倍设计荷载	-0.65	-0.68	0.40	0.47	0.36	0.54	-0.25	-0.54
K = 1.2 倍设计荷载	-0.79	-1.55	1.91	1.01	0.47	0.94	-0.58	-0.61

依据表 1,并结合梗斜处的钢筋应力,可得出:

(1) 梗斜处混凝土与钢筋应力状态相同,或同为压应力,或同为拉应力,与有限元结果分析也一致,说明测试结果可信。

(2) 两加载截面梗斜上缘的钢筋与混凝土受拉,跨中和距支点 0.5 m 截面的梗斜处钢筋和混凝土处于受压状态,与有限元分析结果吻合。说明预制 U 型梁的梗斜仅在列车通过时产生拉应力。

(3) 加载工况为  $K = 1.0$  设计荷载时,加载截面的梗斜处最大拉应力增量 0.54 MPa,小于 C55 混凝土的容许拉应力,说明试验梁在正常运营列车荷载下,不会出现开裂。

(4) 加载工况为  $K = 1.2$  设计荷载时,梗斜处混凝土表面的最大拉应力 1.91 MPa,但仍小于 C55 混凝土极限抗拉强度。梗斜处钢筋的最大拉应力 3.6 MPa,最大压应力 -11.9 MPa,应力较小。故依靠增大梗斜处钢筋用量而避免梗斜出现裂缝的效果不明显。

## 5 结 论

(1) 对于轨道交通常见的单线 30 m 标准跨径的预制 U 型梁,活载作用下,应考虑剪力滞效应,可偏安全的取折减系数  $\psi$  为 0.92。

(2) 道床板设计时强度不控制设计,而是裂缝宽度控制设计。现阶段国内常见预制 U 型梁道床板的横向抗弯受力钢筋配筋设计,可经过优化以节约钢筋用量。

(3) 活载作用下,道床板与腹板连接处的梗斜会出现拉应力。实测表明梗斜处钢筋应力较小,为避免槽型梁和预制 U 型梁梗斜处出现裂缝的问题,依靠增加钢筋用量效果不明显。

## 4 梗斜处受力状态分析

依据图 8,测试了加载过程中,跨中截面、中部和端部反力架加载截面、距支点 0.5 m 截面处,表面的混凝土的应变增量。如表 1 所示(拉应力为正,压应力为负)。

## 参考文献:

- [1] 胡匡璋,江新元,陆光闯. 槽形梁[M]. 北京:中国铁道出版社,1987:1-10.
- [2] 耿冬梅. 城市轨道交通 U 型梁整体道床施工技术研究与应[J]. 铁道建筑技术,2020(1):141-144.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2018 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通,2019(4):16-34.
- [4] Smith D A, Hewson N R, Henty C R. Design of the Dubai Metro light rail viaducts-superstructure [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2009,162(2):55-62.
- [5] 谭程龙,宋郁民,沈哲亮. 轨道交通先张法预制 U 型梁静载试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(5):85-88.
- [6] 宋晓东,李奇,吴定俊. 轨道交通混凝土桥梁中低频噪声预测方法[J]. 铁道学报,2018,40(3):126-131.
- [7] 高杰,黄颖. 既有预应力混凝土简支梁预应力损失的有限元模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):65-70.
- [8] 刘世龙. 城市轨道交通先张法 U 形梁综合力学性能试验研究[D]. 上海:同济大学,2016.
- [9] 魏亮道. 青岛市红岛-胶南城际轨道交通先张 U 梁设计[J]. 铁道标准设计,2017,61(7):101-107.
- [10] 刘孟龙,宋郁民,吴定俊. 轨道交通预制 U 形梁力学性能研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(3):75-79.
- [11] 王成波. 轨道交通混张法预制 U 型梁力学性能研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2019.
- [12] 地铁设计规范:GB 50517—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [13] 铁路桥涵混凝土结构设计规范:TB 10092—2017[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [14] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [15] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.