

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.025

轨道交通先张法预制 U 型梁静载 试验方法与性能研究

王晓磊

(中铁三局集团广东建设工程有限公司, 广东 广州 510630)

摘要: 目前我国轨道交通行业尚无关于预制 U 型梁的相关试验规程。对成批预制的先张法 U 型梁, 需按照一定抽样频率进行静载试验, 测试 U 型梁的力学性能, 进行受力性能的评定。提出了一种可适用于多种跨径的预制 U 型梁静载试验方法。该方法采用反力架进行荷载加载, 提出加载弯矩与设计最大弯矩相等、支点剪力与设计最大剪力近似相等的同时加载原则。然后以深圳市城市轨道交通 6 号线工程先张法预制 U 型梁为例, 进行了试验方案设计, 通过合理布置加载点, 在保证跨中弯矩加载效率均为 1.0 的前提下, 同时确保支点剪力加载效率在 0.81~0.95。为避免道床板横向弯曲受损, 加载弯矩超过 1.0 倍的设计荷载值后, 保持道床板加载力不变, 继续增加的荷载值通过腹板顶部千斤顶加载。分析试验结果表明该先张法 U 型梁的试验方法经济合理, 为今后先张法预制 U 型梁的静载试验检测推广使用提供借鉴。

关键词: 轨道交通; 预制 U 型梁; 静载试验; 力学性能; 试验方法

中图分类号: U441.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)03-0162-07

Static Load Test Method and Performance of Rail Transit Pre-tensioned Precast U-shaped Beam

WANG Xiaolei

(Guangdong Construction Engineering Company Limited of China Railway Third Group,
Guangzhou, Guangdong 510630, China)

Abstract: Relevant test standards were not proposed for prefabricated U-shaped beams in the rail transit field at present. For batch prefabricated U-shaped beams, the static load test should be carried out at a certain sampling frequency to test and evaluate the mechanical properties. A new static test method is proposed which can be applied to multi span precast U-shaped beam. Reaction frame loading was used and a loading principle was recommended of which the loading bending moment is equal to the maximum design bending moment and the loading shear is approximately equal to the maximum design shear at the same time. The prefabricated U-shaped beam of Shenzhen urban rail transit line 6 project was taken as an example, the test scheme is designed, which can ensure the load efficiency of 1.0 and the shear load efficiency of 0.81~0.95. In order to avoid premature lateral damage of the bed plate, the increased load is loaded through the top jack of the web after the loading moment exceeding 1 times the design value, and the load force of the bed plate is maintained. The test results show that the test method of pre-tension U-shaped beam is economical and reasonable, which can provide valuable references for static load test of prefabricated U-shaped beam in the future.

Keywords: rail transit, pre-cast U-shaped beam, static load test; mechanical behavior method of test

收稿日期: 2021-12-10

修稿日期: 2022-02-07

基金项目: 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjA2535)

作者简介: 王晓磊(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事桥梁施工技术、结构检测和工程管理方面的工作。

E-mail: 1552932491@qq.com

轨道交通U型梁结构起源于铁路桥梁的槽形梁。国外最早报道的是1952年建造的跨度48.6m的罗什尔汉桥,随后日本和苏联均做了铁路槽形梁的标准设计^[1]。因为铁路活载较大,所以铁路槽形梁一般比较厚重,逐渐淘汰。城市轨道交通列车活载远小于铁路,U梁总结构轻薄,造型美观,得以广泛应用。

法国SYSTRA公司在总结城市轨道交通高架形式的基础上,开发了双线U型梁结构,并先后应用在智利圣地亚戈5号线、迪拜城市轨道交通等多条轨道交通项目中,其标准跨径有28m、32m、36m,取消横向预应力,施工方案为节段预制拼装^[2-3]。

近十几年国内的城市轨道交通建设中,预制U型梁因其建筑高度低、结构轻巧美观、腹板可作为隔音屏等优点,在城市轨道交通高架桥上得到广泛采用^[4]。目前,我国城市轨道交通U型梁桥的施工主要选用后张法预制工艺^[5-8],而先张法预制的预应力混凝土U型梁具有预应力筋及混凝土间粘结性良好、整体性高、成批预制效率高等优点,近几年来先张法在越来越多的工程得到应用^[9-12]。例如,深圳市城市轨道交通6线工程采用标准跨径分别为25m、26m、27m、28m、29m、30m和35m七种简支U梁,其中35m采用先、后张混张工艺预制,其他跨径采用先张法工艺预制。

随着预制U型梁在轨道交通中的广泛应用,相应的设计与施工规范逐步得到完善,但国内外关于预制U型梁的试验研究和荷载试验检测研究较少,没有相关规范。近几年来,国内学者开展了一些预制U型梁的试验研究^[10-13]。在国内工程实践中,通常采用铁路和公路行业预制梁的试验规范^[14],对轨道交通预制U型梁行分批抽检试验,评定其是否满足规范、达到设计使用性能。

本文依据已有的试验研究成果,以深圳市城市轨道交通6号线先张法预制U型梁为例,进行试验方案设计,提出一种能够适用于多种跨径U型梁静载试验方法。该方法在保证跨中弯矩加载效率均为1.0的前提下,同时确保支点剪力加载效率不小于0.8,进行预制U型梁的荷载试验,并分析U型梁的力学性能。

1 加载方案设计

1.1 试验内容

《简支梁试验方法预应力混凝土梁静载弯曲试

验》^[14](TB/T 2092—2018)(后简称《简支梁试验方法》)中规定了不同跨径预应力混凝土梁静载弯曲试验的加载截面布置方法:在跨中加载的基础上每间隔4m设置一个加载截面,根据跨径不同共设置3~7个奇数加载截面。各加载点的加载值则根据不同加载等级下跨中弯矩设计值进行反算。对于简支梁,跨中为最不利抗弯截面,支点与变截面处为最不利抗剪截面。上述加载方式只能确保跨中弯矩的加载效率,而无法兼顾支点剪力的加载效率。

参照铁路和公路的试验规程,确定轨道交通预制U型梁的静载试验的主要内容为:(1)1.0倍设计荷载加载,测试U型梁控制截面的应变和挠度;(2)1.2倍设计荷载加载,测试U型梁控制截面的应变和挠度。目的在于评价U型梁在两个加载状态下的强度和刚度等是否满足规范^[16-19]要求。

1.2 梁体加载程序

U型试验梁常规抽检的加载工况包含3个工况,以加载系数 K 表示。加载系数 K 定义如下:

(1)工况1:模拟二期恒载加载,其理论加载内力= K 倍二期恒载内力,并分为四个加载等级, K 依次为0.3、0.6、0.8、1.0。

(2)工况2:模拟列车活载加载,其理论加载内力=二期恒载内力+ K 倍列车活载内力(含动力系数),并分为四个加载等级, K 依次为0.3、0.6、0.8、1.0。

(3)工况3:模拟开裂荷载加载,其理论加载内力=($K-1$)倍梁体自重内力+ K 倍二期恒载内力+ K 倍列车活载内力(含动力系数),并分为两个加载等级, K 依次为1.1、1.2。

各截面加载系统由两对千斤顶和一个反力架组成,如图1所示。为避免道床板横向过早破坏,加载分为两个阶段:

(1) $K \leq 1.0$ 时,仅通过道床板千斤顶加载。

(2) $1.0 \leq K \leq 1.2$ 时,保持道床板加载力,增加的荷载通过腹板顶部千斤顶加载。

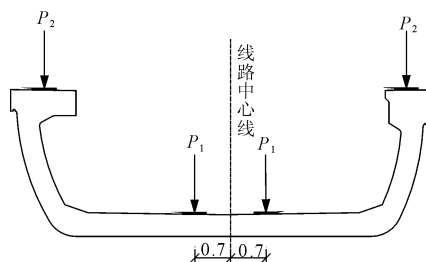


图1 横向加载示意图(单位:m)

1.3 加载截面间距及加载值计算

依据梁体跨径与场地条件不同,等效集中荷载采用 3 个或 5 个截面等间距加载。标准跨径 25 m 的梁体,一般选用三截面加载;标准跨径 30 m 的梁体,一般选用五截面加载。三截面加载纵向布置如图 2 所示,五截面加载参见图 3。每个截面反力架横向加载点布置参见图 1。

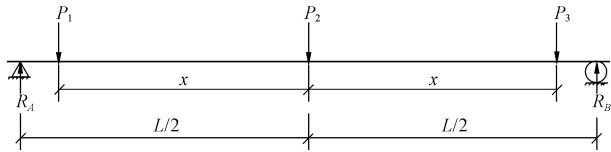


图 2 三个截面加载纵向布置示意图

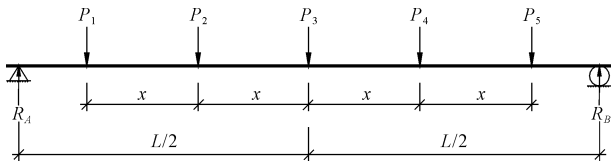


图 3 五个截面加载纵向布置示意图

(1) 计算相邻加载截面理论间距。根据试验荷载下支点最大剪力理论值(实际值)与设计荷载下剪力完全(近似)相等的原则,并参考纵向加载布置(见图 2、图 3),计算加载等级为 K 时,各加载截面所施加的荷载理论值 P_{KL} ,见公式(1)~公式(3)。

$$R_A = R_B = R_K \quad (1)$$

$$P_{KL} = 2R_K/n \quad (2)$$

$$P_i = P_{KL} \quad (3)$$

式中: R_A, R_B 分别为设计荷载下,支点 A 及支点 B 的最大剪力值,可采用结构力学或有限元方法计算, kN; R_K 为加载等级为 K 时,设计荷载下支点最大剪力值, kN; P_{KL} 为加载等级为 K 时,每个加载截面所施加的荷载理论值, kN; n 为加载截面数:三截面加载 $n = 3$,五截面加载 $n = 5$; P_i 为第 i 个加载截面所施加的荷载理论总值, kN。

根据跨中最大弯矩与设计荷载下弯矩相等原则,见公式(4),计算加载等级为 K 时,相邻加载截面理论间距 x_{KL} ,见公式(5)。

$$M_K = R_K \times \frac{L}{2} - \frac{(n-1)(n+1)}{8} \times P_{KL} \times x_{KL} R_K \times \frac{L}{2} - \frac{(n-1)(n+1)}{8} \times \frac{2R_K}{n} \times x_{KL} \quad (4)$$

$$x_{KL} = \frac{2n(R_K L - 2M_K)}{(n^2 - 1)R_K} \quad (5)$$

式中: L 为计算跨径, m; M_K 是加载等级为 K 时,设计荷载下跨中最大弯矩值加上未完成预应力损失的补

偿弯矩之和, kN·m; 设计荷载下跨中最大弯矩值可采用结构力学或有限元方法计算,未完成预应力损失的补偿弯矩计算参见后文。其他符号含义同前。

(2) 确定加载截面实际间距 x_K 。根据公式(5)计算得到的各加载等级下相邻加载截面理论间距 x_{KL} 。参考 x_{KL} 平均值,确定加载截面纵向实际间距 x_K 。为了布置方便, x_K 一般取 0.5 m 的倍数。

(3) 计算各加载截面所施加荷载的实际值 P_K 。根据跨中弯矩相等原则,见公式(6),计算加载等级为 K 时,各加载截面所施加荷载的实际值 P_K ,见公式(7)。

$$M_K = \frac{n}{2} \times P_K \times \frac{L}{2} - \frac{(n-1)(n+1)}{8} \times P_K \times x_K \quad (6)$$

$$P_K = \frac{8M_K}{2nL - (n^2 - 1)x_K} \quad (7)$$

式中:相关符号含义同前文。

1.4 未完成的预应力损失值

(1) 计算未完成的预应力损失 $\Delta\sigma_s$ 。未完成的预应力损失 $\Delta\sigma_s$,计算见公式(8)。

$$\Delta\sigma_s = (1 - \eta_1)\Delta\sigma_{1,6} + (1 - \eta_2)\Delta\sigma_{1,5} \quad (8)$$

式中: $\Delta\sigma_{1,1}, \Delta\sigma_{1,6}$ 为由于钢筋松弛、混凝土收缩徐变引起的应力损失值, MPa; η_1, η_2 分别为收缩徐变与松弛损失完成率,参照文献[19]取值计算; $\Delta\sigma_s$ 为未完成的预应力损失值, MPa。

(2) 计算未完成的预应力损失的补偿弯矩 ΔM_s 。未完成的预应力损失的补偿弯矩 ΔM_s ,计算见公式(9):

$$\Delta M_s = \Delta\sigma_s \times A_p \times \left(\frac{W_0}{A_0} + e_0 \right) \times 10^3 \quad (9)$$

式中: ΔM_s 为未完成的预应力损失的补偿弯矩, kN·m; $\Delta\sigma_s$ 为未完成的预应力损失值, MPa; A_p 为跨中截面预应力钢筋截面积, m²; A_0 为跨中截面换算截面面积, m²; W_0 为对跨中截面下缘换算截面抵抗矩, m³; e_0 为跨中截面预应力合力中心至换算截面重心距离, m。

公式(9)适用于不允许出现拉应力的预应力梁,对于允许出现拉应力和允许开裂的预应力梁还应考虑普通钢筋的影响。

1.5 各加载点加载值计算方法

各截面通过 2 对千斤顶(4 个加载点)进行加载(见图 1):一对千斤顶加载在道床板上,横向间距 1.4 m,以模拟列车轮轨荷载,加载值均为 P_b ;另一对加载在两侧腹板上,宜位于梁体顶面翼缘板中心

线处,加载值均为 P_1 。加载力数值需满足:

$$2P_b + 2P_1 = P_K \quad (10)$$

当 $K \leq 1.0$ 时,仅通过道床板的千斤顶加载 P_b ;当 $K > 1.0$ 时,道床板加载力 P_b 保持不变,增加的荷载通过腹板千斤顶加载 P_1 。

2 试验设计参数及加载方案

2.1 预制U型梁工程概况

深圳市城市轨道交通6号线工程高架桥,采用先张法工厂化预制预应力混凝土简支U型梁。U梁混凝土等级为C55。纵向预应力钢筋采用高强低松弛1860 MPa级钢绞线,公称直径15.2 mm,普通钢筋采用HPB300和HRB400。

正常生产条件下成批预支的先张法U型梁需按照一定抽样比例进行常规抽检试验。本次试验选择了5.0 m线间距直线段U梁,计算跨径28.7 m,跨中截面尺寸如图4所示。静载试验测试现场如图5所示。

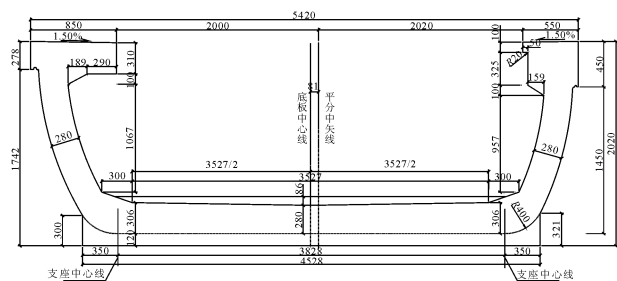


图4 预制U型梁跨中截面构造图(单位:mm)



图5 预制U型梁静载测试现场

2.2 试验装置及加载方案

静载试验采用门式反力架、千斤顶和压力传感器组成的成套试验装置系统,整体工作能力不应小于1.5倍的最大试验荷载。试验前对门式反力架及试验台座进行了专项设计,确保其能满足试验梁跨度、支承方式、加载状态符合试验加载计算图式的要求,且有足够的刚度和稳定性。

U型梁计算跨径 $L = 28.7$ m,取加载截面数 $n =$

5。将上述参数代入到公式(5),可计算出各加载级下加载截面间距理论值 x_{KL} ,列于表1。参考 x_{KL} 的平均值,并结合待测梁计算跨径,最终确定相邻加载截面实际间距 $x_k = 5.5$ m,沿纵桥向共设置5个等间距的门式反力架,如图6所示。如图1每个反力架横向设置4个加载点,腹板加载点设置纵向分配梁;底板加载点设置纵向分配梁和横向分配梁,试验中在每个千斤顶与反力架之间布置压力传感器,校核千斤顶加载误差,现场试验如图7所示。

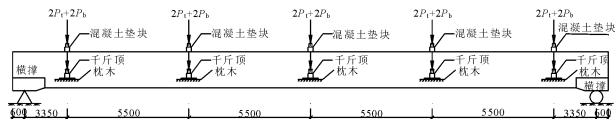


图6 试验U梁加载点纵向布置示意图(单位:mm)

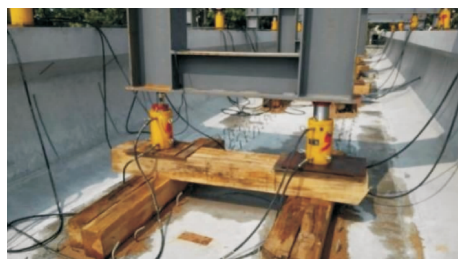


图7 试验现场反力架、千斤顶及压力传感器

(1) 相邻加载截面间距设计。本次静载试验的加载方案设计遵循跨中弯矩与设计荷载下最大弯矩相等、支点剪力与设计荷载下最大剪力近似相等的原则。

首先采用有限元软件MIDAS/Civil,分别计算加载等级为 K 时,不同倍数设计荷载作用下,跨中最大弯矩值加上未完成预应力损失的补偿弯矩之和 M_K 以及支点最大剪力值 R_K 。建立的有限元模型共41个节点,40个单元,如图8所示。

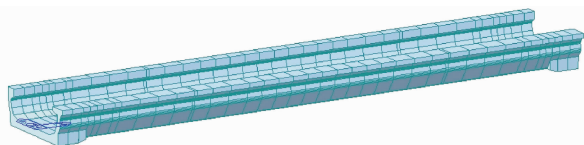


图8 预制U型梁的MIDAS有限元模型

在此基础上,根据公式(7)计算单个加载截面所施加的荷载总值 P_K ,并根据公式(10)计算腹板顶面、道床板单个加载点的加载值 P_1 、 P_b 。在此基础上计算出弯矩及剪力加载效率。上述计算结果均列于表1。

表 1 反力架加载荷载值汇总表

加载工况	加载分级 K	设计荷载下 $M_K / (\text{kN} \cdot \text{m})$	设计荷载下 R_K / kN	x_{KL} /m	P_K /kN	P_b /kN	P_1 /kN	加载效率	
								弯矩	剪力
二期恒载	二恒 0.3	1037.9	144.7	6.0	53.6	26.8	0.0	1.0	0.93
	二恒 0.6	2075.7	289.3	6.0	107.1	53.6	0.0	1.0	0.93
	二恒 0.8	2767.6	385.8	6.0	142.8	71.4	0.0	1.0	0.93
	二恒 1.0	3459.5	482.2	6.0	178.6	89.3	0.0	1.0	0.93
二期恒载 + 活载	活载 0.3	4575.1	679.6	6.3	236.1	118.1	0.0	1.0	0.87
	活载 0.6	5690.7	877.0	6.6	293.7	146.9	0.0	1.0	0.84
	活载 0.8	6434.5	1008.6	6.6	332.1	166.1	0.0	1.0	0.82
	活载 1.0	7178.2	1140.2	6.7	370.5	185.2	0.0	1.0	0.81
恒载 + 活载	设计荷载 1.1	8575.6	1348.9	6.7	442.6	185.2	36.1	1.0	0.82
	设计荷载 1.2	9972.9	1557.7	6.6	514.7	185.2	72.1	1.0	0.83

(2) 加载方案效果分析。由表 1 可知,基于本文提出的静载试验的设计方法,能够在保证跨中弯矩加载效率均为 1.00 的前提下,同时确保支点剪力加载效率在 0.81~0.93 范围内,均在 0.80 以上,满足剪力近似相等的要求。

考虑试验加载弯矩图与设计荷载弯矩图并不完全重合,弯矩图面积不同将引起主梁挠度的误差,故计算验证了试验荷载下的 U 梁跨中的挠度和最大设计荷载下 U 梁跨中的挠度误差,分析结果列于表 2。由表 2 可知,试验荷载下,预制 U 梁跨中实测挠度小于理论计算值 20%,满足文献[14-15]的要求。

表 2 试验荷载挠度与设计荷载比较表

加载分级 K	试验加载跨中 挠度值① /mm	设计荷载最大 跨中挠度值② /mm	误差百分比 ①-② /② /%
活载 1.0	14.6	17.60	17.0
设计荷载 1.2	20.3	24.50	10.0

2.3 梁体测点布置

试验现场电测位移计及应变片布置如图 9 所示。



图 9 试验 U 梁跨中底板测点布置

(1) 挠度测点。U 梁支点、跨中截面布置竖向挠度测点,采用电测位移计,如图 10、图 11 所示。

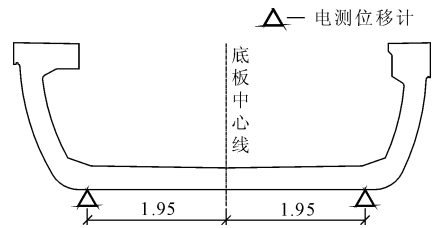


图 10 支点截面挠度测点布置图

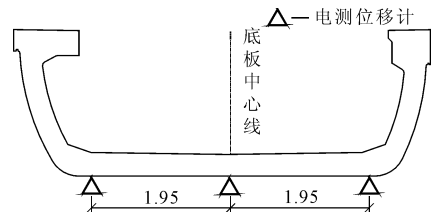


图 11 跨中截面挠度测点布置图(单位:m)

(2) 应变测点。U 梁跨中道床板下缘布置横向应变片,道床板下缘、上缘及腹板上缘布置纵向应变片,如图 12 所示。

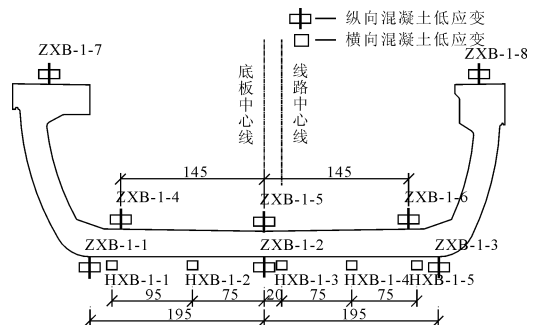


图 12 跨中截面的应变测点布置(单位:cm)

3 试验结果及分析

3.1 梁体刚度分析

本项目静载试验共测试了2片预制U型梁。在1.0倍设计活载作用下,跨中截面挠度实测值见表3。依据规范^[14]中对实测静活载挠度值的评定标准: $f_{\text{实测}} \leq 1.05(f_{\text{设计}}/\psi)$ (其中 ψ 为等效荷载加载挠度修正系数,取 $\psi = 1.0613$,计算跨径为28.7 m)。分析试验数据可知,1.0倍活载作用下,实测挠度最大值8.42 mm $< 1.05(f_{\text{设计}}/\psi) = 14.2$ mm,故梁体竖向刚度满足规范要求。同时,根据各片试验梁跨中挠度测点最大值可计算得实测挠跨比,列于表3。对比可知,梁体竖向刚度均能满足轨道交通行业规范^[16-17]的挠跨比限值小于1/2000的要求。

表3 试验梁跨中静活载挠度实测值

测点位置	1#梁挠度实测值/mm		2#梁挠度实测值/mm	
	循环1	循环2	循环1	循环2
DM2-1	7.51	7.37	8.42	7.76
DM2-2	7.83	7.68	7.87	7.83
DM2-3	7.78	7.55	—	7.22
实测平均值	7.71	7.53	8.15	7.60
实测挠跨比	1/3665		1/3409	

3.2 应力分析

以1#梁为例进行应力分析。将测得的混凝土应变增量,按照 $\sigma = E_c \varepsilon$ 换算成混凝土应力增量,并列于表4。由表4可以得知,试验荷载作用下,跨中截面混凝土纵向应力增量校验系数为0.59~0.90,所有测点校验系数不大于1.0,参照文献^[16],梁体应力校验系数满足要求。

表4 跨中截面混凝土纵向应力实测值

加载等级K	测点位置	测点编号	循环1实测应力值①/MPa	循环2实测应力值②/MPa	计算应力值③/MPa	循环1校验系数①/③	循环2校验系数②/③
1.0	腹板顶面	ZW1	-4.84	-4.80	-7.70	0.63	0.62
		ZW7	-5.54	-5.17	-8.30	0.67	0.62
		ZW2	3.37	3.60	5.00	0.67	0.72
	底板下表面	ZW3	4.46	4.69	5.20	0.86	0.90
		ZW4	3.82	4.16	5.20	0.73	0.80
		ZW5	3.88	4.17	5.40	0.72	0.77
1.2	腹板顶面	ZW6	3.18	3.54	5.30	0.60	0.67
		ZW1	—	-6.74	-11.40	—	0.59
		ZW7	—	-6.97	-10.70	—	0.65
	底板下表面	ZW2	—	5.09	6.90	—	0.74
		ZW3	—	5.98	7.10	—	0.84
		ZW4	—	5.57	7.20	—	0.77
		ZW5	—	5.49	7.42	—	0.74
		ZW6	—	4.98	7.36	—	0.68

注:(压应力为“-”,拉应力为“+”);“—”代表该工况未加载测量。

3.3 抗裂性分析

抗裂性试验主要通过正常运营荷载($K = 1.0$ 设计荷载)及抗裂荷载($K = 1.2$ 设计荷载)下分别持荷20 min后,观测梁体(梁体底板下缘、倒角及圆弧过渡段)是否出现裂缝以及裂缝的宽度限值是否满足规范要求。主梁为全预应力结构,在正常运营荷载($K = 1.0$ 设计荷载)及抗裂荷载($K = 1.2$ 设计荷载)的试验荷载作用下,2片试验梁均未发现因纵向弯曲而形成的横向裂缝,表明主梁的纵向弯曲抗裂性合格。

道床板为钢筋混凝土结构。在正常运营荷载下,2片试验均未发现裂缝;在抗裂荷载作用下,仅

2#梁在跨中位置附近发现纵向裂缝,最大裂缝宽度为0.03 mm。道床板横向弯曲的裂缝位置与现场照片如图13所示。依据相应规范^[16-17],U型梁道床板在横向弯曲状态下的纵向裂缝宽度均小于0.2 mm,满足钢筋混凝土结构抗裂性要求。

4 结论

(1) 本文提出的静载试验方法,能够在保证跨中弯矩加载效率均为1.00的前提下,同时确保支点剪力加载效率在0.81~0.95,满足剪力近似相等的要求。跨中挠度的加载误差小于5%,现场试验荷载加载效率均接近1.00且不大于1.05,满足相关参考的试验规程要求。

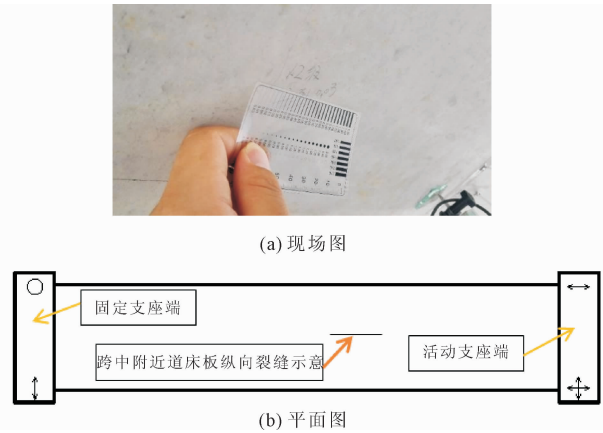


图 13 道床板跨中附近的横向弯曲裂缝位置与实测图

(2) 通过实际的荷载试验实施,以及对荷载试验结果的分析,表明加载试验过程安全有效可靠,对预制 U 型梁的试验结果评定,都可满足相应规范的要求。

(3) 多片预制梁的荷载试验,采用反力架进行试验加载,相对于传统的堆载试验加载,仅需一次性的试验台座和加载系统费用。试验过程简单快捷,数据采集快速可靠,为今后先张法预制 U 型梁的静载试验检测推广使用提供借鉴。

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.
- [2] Smith D A, Hewson N R, Henty C R. Design of the dubai metro light rail viaducts-superstructure[J]. Bridge Engineering, 2010,162(2):55-62.
- [3] 朱琛. 迪拜地铁线轻轨高架桥设计[J]. 世界桥梁, 2011(2):1-4.
- [4] 汪建文. 麦加地铁 25mU 形先张梁施工技术[J]. 铁道标准设计,2010(6):72-75.
- [5] 王彬力. 城市轨道交通 U 型梁系统结构受力行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [6] 何紫薇,郭小宏. 重庆轨道交通 U 型梁预制质量控制[J]. 重庆建筑,2013,12(5):45-48.
- [7] 赵建军,李伟. 上海城市轨道交通高架区间 U 形梁设计与施工[J]. 城市道桥与防洪,2009(5):113-116, 10-11.
- [8] 熊伟,魏尚书. 广州地铁 4 号线箱梁节段预制施工技术[J]. 铁道标准设计,2007(7):53-57.
- [9] 张吉,陆元春,吴定俊. 槽形梁结构在轨道交通中的应用与发展[J]. 铁道标准设计,2013(10):78-82.
- [10] 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.
- [11] 宋郁民,吴定俊,黄舰. 先张法预制 U 形梁静载试验研究[J]. 建筑技术. 2017,48(8):883-886.
- [12] 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.
- [13] 王利伟,宋郁民,吴定俊,等. 预应力混凝土预制 U 型梁道床板受力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020,18(5):60-66.
- [14] 国家铁路局. 简支梁试验方法预应力混凝土梁静载弯曲试验:TB/T 2092—2018[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [16] 北京市规划委员会. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通桥梁设计规范:GB/T 5123—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [18] 国家铁路局. 铁路桥涵设计规范:TB 10002—2017[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [19] 国家铁路局. 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.