

高速铁路无砟轨道简支槽型梁静载弯曲试验研究

王起才^{1,2}, 薛彦瑾¹, 张戎令^{1,2}, 刘正楠¹, 何志刚¹, 王冲¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 道路工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 预应力混凝土槽型梁是一种新型桥梁结构, 由道床板、主梁及端横梁等部分组成。对高速铁路无砟轨道16 m后张法预应力混凝土简支槽型梁1:1模型进行静载弯曲试验研究, 该试验是国内首次进行的大规模实桥静载试验。对槽型梁的裂缝发展规律、变形特征、支座沉降、应力发展规律等基本受力性能进行分析。试验结果表明: 槽型梁在静载作用下其裂缝宽度、刚度、抗裂情况和预应力满足要求; 槽型梁的应力变化符合平截面假定, 且受力过程表现出一定的空间形态; 试验桥梁的静载弯曲试验合格, 其研究成果可为此类桥梁的设计与维护提供参考。

关键词: 高速铁路; 槽型梁; 试验研究; 刚度; 抗裂度

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0463-05

Static load bending experimental study on simply supported groove beam of ballastless track of high-speed railway

WANG Qicai^{1,2}, XUE Yanjin¹, ZHANG Ronling^{1,2}, LIU Zhengnan¹, HE Zhigang¹, WANG chong¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Road and bridge engineering disaster prevention and control technology national local joint engineering laboratory, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Prestressed concrete groove beam is a new bridge structure composed of the bed plate, main girder and end beam etc. The 1:1 model of 16m post tensioned prestressed concrete simply supported beam which is suitable for the ballastless track of high-speed railway was used to study the static load bending test. This experiment is the first large-scale real bridge static load test in China. In this paper, analyzed are the characteristics of crack distribution, deformation, bearing settlement, stress development and other basic mechanical properties of the beam. The experimental results showed that groove beam meet the requirements of the crack width, stiffness, cracking situation and prestress degree under static load. The stress variation of the groove beam accords with the flat section assumption, and the stress process shows a certain space form. The static bending test of the test bridge is qualified, and the research results can provide reference for the design and maintenance of the bridge.

Key words: high speed railway; groove beam; experimental study; stiffness; crack resistance

预应力混凝土槽型梁是一种新型桥梁结构, 由道床板、主梁及端横梁等部分组成, 适用于公路、铁路桥梁及城市轨道交通建设^[1]。槽型梁桥属下承式开口薄壁结构^[2], 与普通桥梁相比, 主要有以下优点^[3-8]: 利用底板支承轨道及列车, 降低轨道标高, 在满足桥下净空的前提下显著降低结构建筑高度; 结构高度减薄, 高跨比减小, 结构体量较小, 显得轻巧、美观; 主梁腹板将隔音屏障功能与结构受力功能合二为一, 节省了隔音板并抑制了噪音的传播; 主梁还可作为挡板, 防止车辆倾覆; 与同跨度的钢梁相比, 可节省钢材且抗震性能优越, 因此槽型梁适用于高速铁路与城市轨道交通桥梁。由于槽型梁具有比较明显的优点, 所以各国都对这种桥梁做了相关研究, 并建造了各种类型的槽型梁桥^[9-10]。

目前, 国内外许多专家对槽型梁的静力行为进行了相关研究。聂建国等^[11]在简支槽形梁考虑空间受力的理论解中综合考虑了槽形梁在整体弯曲、局

部弯曲、剪力滞效应和主梁扭转作用的基础上, 用势能驻值原理导出了简支槽形梁在均布荷载作用下的解析解。戴公连^[12]以沪昆高铁某独塔斜拉桥为研究对象, 将模型试验与数值模拟相结合, 研究了槽形截面斜拉桥的塔梁固接结构模型的试验方法、受力状态、极限承载能力以及传力机理等。段敬民^[13]综合考虑了槽形梁的剪切变形和剪滞翘曲应力的自平衡条件, 以最小势能原理为基础建立了槽形结构三个广义位移的控制微分方程和自然边界条件, 获得了相应广义位移的闭合解, 并提出了一种对槽形梁静力学特性的准确分析方法。田杨^[14]分析了一跨双线铁路曲线简支槽形梁, 发现曲线槽形梁的受力呈现明显的空间特性, 并且在竖向荷载作用下, 曲线外侧主梁下缘承受的拉力较大, 曲线内侧相对较小, 道床板的剪力滞现象也比较显著。

尽管各专家对槽型梁在荷载作用下的力学特性研究较多, 但对槽型梁实桥的静载弯曲试验却研

收稿日期: 2015-11-24

修改稿日期: 2016-07-10

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT_15R29); 铁道部科技研究开发计划项目(2012G011-A); 中国科协青年人才托举工程资助项目; 陇原青年创新人才扶持计划资助项目

作者简介: 王起才(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁工程与混凝土结构耐久性及新型工程材料的研究与开发; E-mail: wangqc@mail.lzjtu.cn

究较少. 为此, 本文对高铁无砟轨道16 m后张法预应力混凝土槽型梁进行1:1模型静载弯曲试验, 该研究成果可为高速铁路无砟轨道预应力混凝土槽型梁桥的设计和安全运营提供一定的技术参考.

1 试验概况

1.1 构件设计及材料性能

试验梁为兰新高铁无砟轨道16m后张法全预应力混凝土等高度简支槽形梁, 截面几何尺寸如图1所示. 桥梁全长16 500 mm, 计算跨度15 900 mm, 高2 000 mm, 宽6 380 mm, 跨中道床板厚450 mm, 距梁右侧2 205 mm处设 $\phi 100$ 泄水孔, 梁体设2%坡度, 为防止发生次生破坏(非结构性破坏), 对支座处

两端混凝土做加厚处理, 其厚度为800 mm, 槽形梁其他设计参数见表1.

1.2 试验方法

根据《预应力混凝土铁路桥简支梁静载弯曲试验方法及评定标准》(TB/T2092—2003)^[15], 纵向采用三点等效静力集中荷载模拟活载, 跨中设一集中荷载, 其余两个荷载左右对称布置, 各荷载纵向间距均为4 m, 横向采用四点静力加载, 两个集中荷载作用在道床板上, 距线路中心线两侧各717.5 mm, 对称线路中心线布置, 另外两个集中力作用在腹板中线上. 各加载点采用油压千斤顶, 由油压表读数确定各级加载值的大小. 试验梁横向加载如图2所示, 腹板加载如图3所示.

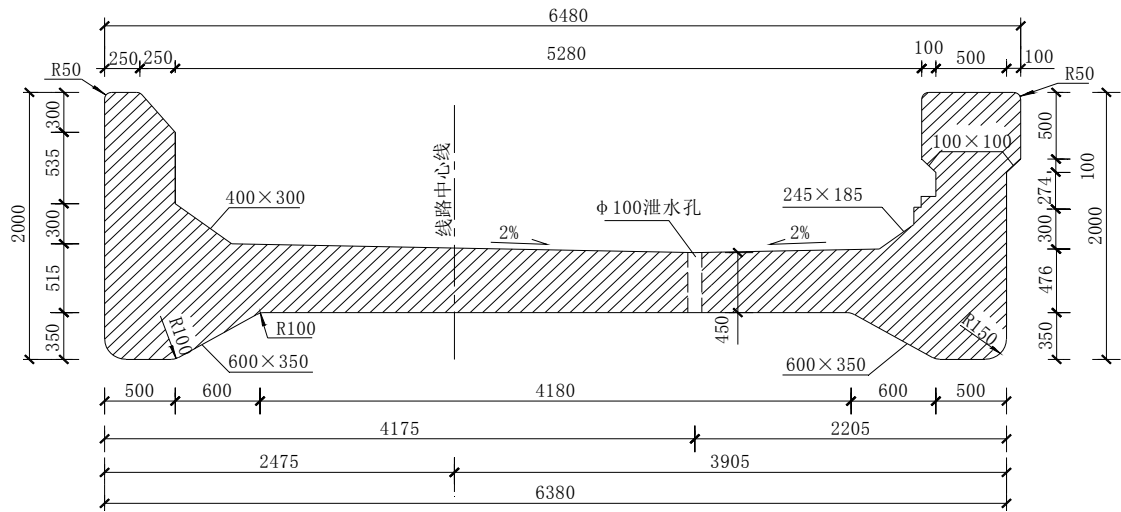


图1 槽型梁横断面图 单位 (mm)
Fig.1 Cross section of the groove beam unit (mm)

表1 试验梁设计参数
Tab.1 Test beam design parameters

L/m	f_c/MPa	$E_{设}/MPa$	f_{28}/MPa	$f_{终}/MPa$	E_{28}/MPa	$E_{终}/MPa$	t/d	防水层	$T/^{\circ}C$
15.9	C55	3.60×10^4	64.4	62.8	37.6×10^4	37.6×10^4	63	无	>0

注: L 为计算跨度; f_c 为混凝土强度设计值; $E_{设}$ 为混凝土弹性模量设计值; f_{28} 为梁体28 d混凝土强度; $f_{终}$ 为梁体终张拉时混凝土强度; E_{28} 为梁体28 d混凝土弹性模量; $E_{终}$ 为梁体终张拉时混凝土弹性模量; t 为终张拉到静载试验的天数; T 为试验环境温度.



图2 试验梁横向加载图
Fig.2 Test transverse load diagram

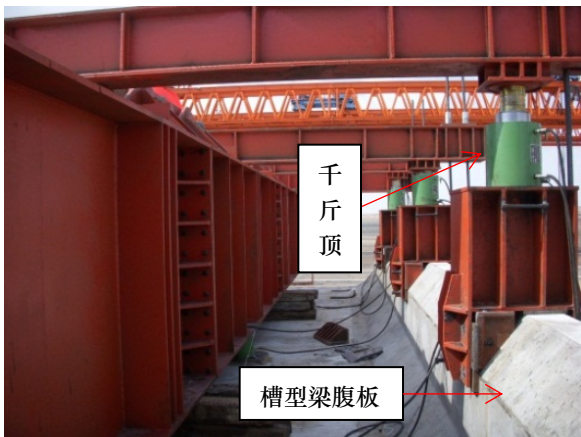


图3 试验梁腹板加载图
Fig.3 Test beam web loading diagram

1.3 加载程序及测点布置

静载弯曲试验加载程序分两阶段进行, 预加载阶段(第一循环加载)和正式加载阶段(第二循环加载)。预加载和正式加载均采用分级加载, 每级加载值不大于开裂加载量理论值的10%, 加载完成后持荷持续一定时间, 然后记录本级荷载下的结构响应。当总荷载加至理论开裂荷载的80%时, 对加载分级进行加密, 进一步减小每级荷载增量, 以准确捕捉开裂荷载。预加载的目的是检验整个试验装置的可靠性、安全性及消除试验装置和梁体的非弹性变形。预加载值不宜超过梁体开裂试验荷载计算值的80%。第二循环加载等级及加载时间见表2所示。

在试验梁跨中底板沿横向等间距布置4个挠度测点, 在南侧及北侧腹板跨中各布置一个挠度测点。在梁体底板中心线下侧钢筋中布置钢筋应变测点MSZ-1, 在底板上表面距梁体中心线2 390 mm处左右各对称布置钢筋应变测点, 分别为MSZ-2和MSZ-3。在槽型梁跨中截面布置混凝土应变测点, 图4为梁体跨中截面混凝土应变测点布置立面图, 图5为梁体跨中截面混凝土应变测点布置平面图,

其中“M”表示跨中截面, “H”表示横向应变测点, “Z”表示纵向应变测点。

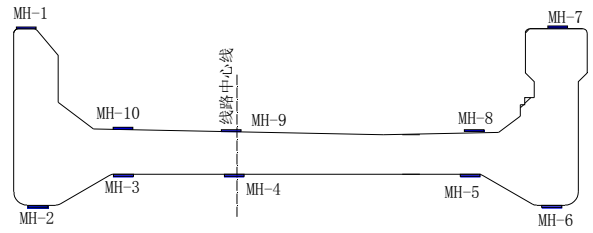


图4 梁体跨中截面混凝土应变测点布置立面图
Fig.4 Vertical section of the concrete strain gauge in the cross section of beam

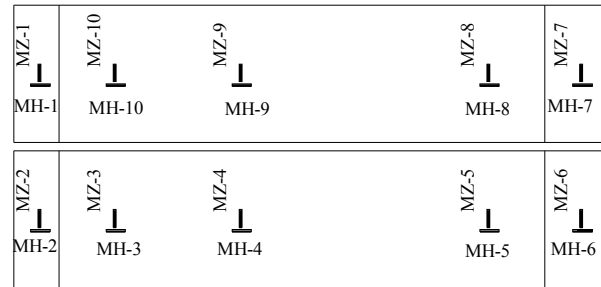


图5 混凝土应变测点布置平面图
Fig.5 The layout plan of concrete strain gauge
注: 上图为梁体跨中上表面混凝土应变测点布置图, 下图为梁体跨中下表面混凝土应变测点布置图。

表2 第二循环加载														
Tab.2 Second cyclic loading														
加载等级	基数	0.6	0.8	静活载级	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2	1.1	静活载级	0.6	基数	初始
加载时间	3	3	3	3	5	5	5	5	20	1	1	1	1	10

注: 基数级为试验设备就位后梁体的受力状态, 相当于梁体工况在自重+预应力+二期恒载作用下的受力状态; 静活载级为梁体受静活载时的受力状态, 相当于梁体在工况在自重+预应力+二期恒载+活载作用下的受力状态, 加载时间为min, 加载等级指抗裂安全系数。

2 结果与讨论

2.1 主要试验现象

试验加载前, 用40倍放大镜在梁体两侧跨中8 m区段下翼缘及梁底面仔细查找裂纹。对初始裂纹(表面收缩裂纹及表面损伤裂纹)及局部缺陷, 用蓝色铅笔标记。第一循环加载结束时, 梁体除初始裂缝外, 其跨中底板、南侧腹板及北侧腹板均未出现明显的横向裂缝和纵向裂缝。第二循环加载时, 当加载到1.05级时, 梁体底板、底板和腹板交界处出现纵向裂缝, 随着荷载的增大, 底板和腹板处的纵向裂缝沿斜向延伸, 裂缝的宽度在逐渐增大, 且裂缝的条数也在增多。当加载结束时, 在底板与腹板低交界处出现4条纵向裂缝, 其裂缝最长达3.6 cm, 最宽为0.1 mm, 在底板跨中出现两条纵向裂缝, 最长为14 cm, 最宽为0.16 mm, 梁体跨中底板千斤

顶作用位置处也出现了纵向裂纹, 梁体跨中底板、南侧腹板及北侧腹板未出现明显的受力横向裂纹。加载到1.2级时, 将槽型梁混凝土各部分展开, 其裂缝分布的俯视图如图6所示。表3为第二循环加载荷载值。

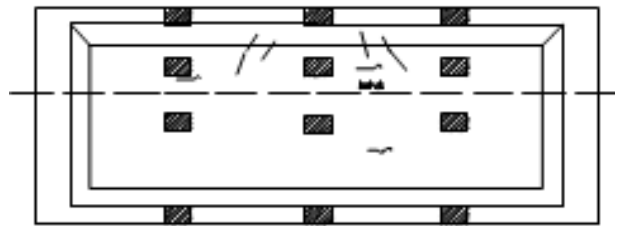


图6 槽型梁混凝土裂缝分布展开图
Fig.6 Groove beam concrete cracks distribution diagram

表3 第二循环加载荷载值(kN)
Tab.3 Second cyclic loading load value (kN)

加载系数K	K_a	0.8	K_b	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2
总荷载	139.87	263.41	347.00	388.44	419.70	450.96	482.22	513.47
腹板	0.00	68.66	152.25	193.69	224.95	256.21	287.47	318.72
底板	139.87	194.75	194.75	194.75	194.75	194.75	194.75	194.75

注： K_a 、 K_b 指梁体抗裂安全系数。

2.2 荷载-位移曲线

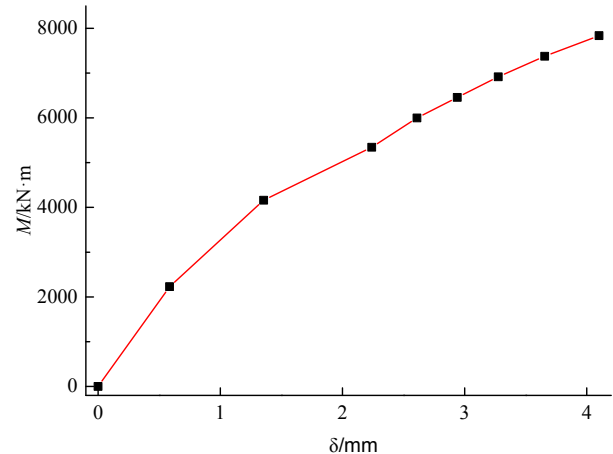


图7 槽型梁跨中弯矩-挠度曲线

Fig.7 Shaped beam span moment-deflection curve

图7为槽型梁跨中弯矩-挠度曲线。当加载等级小于0.8级时,弯矩-挠度曲线基本呈直线,即槽型梁各截面的应力水平较低,远未达到屈服。此后,随着加载等级的提高,曲线逐渐弯曲,斜率减小,表明梁的刚度有一定程度的降低。随着荷载的增加,梁底板跨中的挠度在逐渐增大,梁的刚度也在显降低,当加载等级为1.2级时,梁底板跨中挠度达到最大值4.1 mm。当槽型梁在静活载作用下时,其挠度值为1.6 mm,满足 ψ_f 实测 $<1.05f$ 设计的要求,即静载试验时梁体的刚度满足要求。

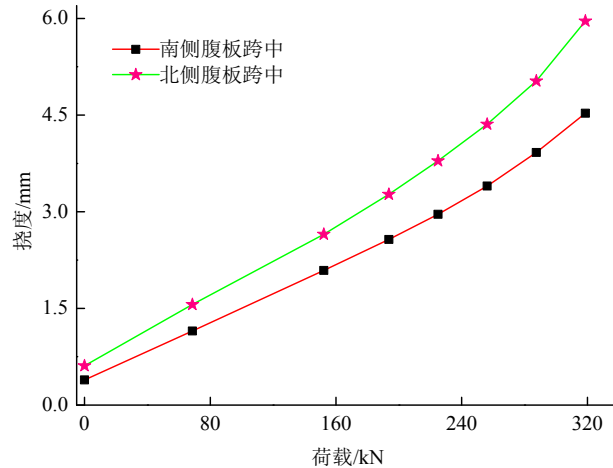


图8 腹板荷载-跨中挠度

Fig.8 Web load - span deflection

图8为第二循环加载过程中,南、北两侧腹板

荷载-跨中挠度曲线。随着腹板荷载的增加,南侧腹板跨中和北侧腹板跨中的挠度值都在增加。在加载初始阶段,由于梁体受自重、二期恒载等作用,其南、北两侧腹板跨中都出现不同程度的挠度,其中南侧腹板跨中挠度值为0.39 mm,北侧腹板跨中挠度值为0.61 mm,即北侧腹板挠度是南侧腹板挠度的1.56倍。随着加载等级的提高,北侧腹板跨中挠度的增长趋势大于南侧腹板跨中挠度的增长趋势,并且在相同的荷载情况下,北侧腹板跨中挠度值始终大于南侧腹板跨中挠度值,且随着荷载的增大,两者挠度的差值也越来越大。这是因为对梁体进行加载时,底板采用非对称加载,使得底板承受的荷载主要偏向于北侧腹板,故北侧腹板挠度始终大于南侧腹板挠度。当荷载为318.7 kN时,南、北两侧腹板跨中挠度达到最大值,分别为4.53 mm和5.54 mm,即北侧腹板挠度是南侧腹板挠度的1.2倍。

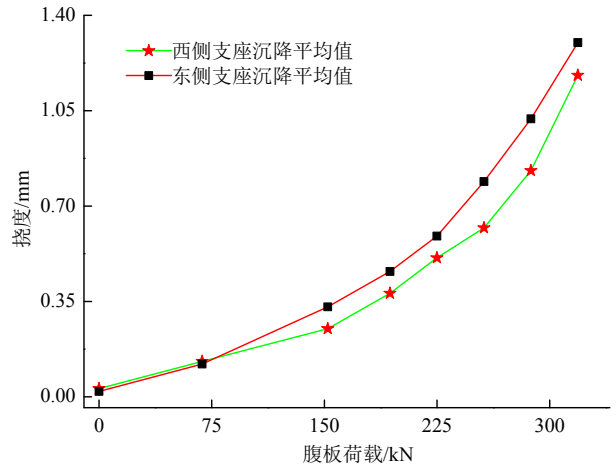


图9 腹板荷载-支座沉降曲线

Fig.9 Web load - bearing settlement curve

从图9可见,随着腹板荷载的增加,东、西两侧支座均出现不同程度的沉降。当腹板荷载在0~68.7 kN时,东、西两侧的支座沉降值基本相同。荷载在152.3 kN时,东侧支座沉降值发生突变,且比西侧支座沉降值要大,造成这一现象的主要原因是东、西两侧加载千斤顶的不一致性。当试验荷载在318.7 kN时,东、西两侧支座沉降达到最大值,分别为1.30 mm和1.18 mm,从整个试验过程来看,虽然

东、西两侧支座沉降不同,但沉降的差值很小,最大差值也仅为0.19 mm,所以可认为东、西侧支座沉降不会对结构产生影响。

2.3 荷载-应力曲线

槽型梁加载到1.2级时跨中截面混凝土应力实测结果(不包含自重的影响)见表4。从表4可见跨中截面混凝土横向最大应力为4.62 MPa,最小应力为-4.54 MPa;跨中截面混凝土纵向最大应力为12.46 MPa,最小应力为-5.04 MPa。

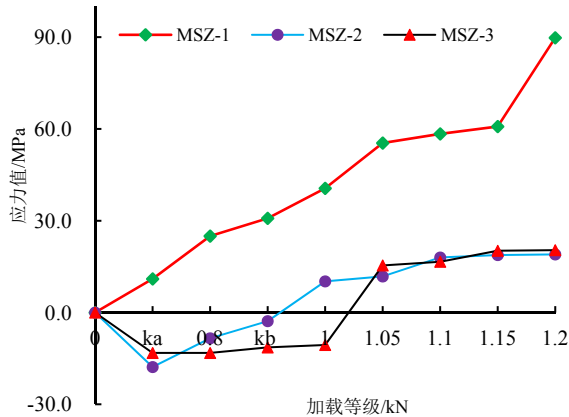


图10 荷载-钢筋应力曲线
Fig.10 Load - reinforced stress curve

如图10所示,随着加载等级的增加,MSZ-1处的钢筋应力值也在增大,当加载等级在0-1.05级时,MSZ-1处的钢筋应力值的增长幅度较快,当加载等级为1.05级时,MSZ-1处的钢筋应力发生突变,且突变后的应力值随加载等级的增加其增长幅度较缓,即加载等级在1.05~1.15之间时,MSZ-1处的钢筋应力值的变化很小。当加载等级在1.15级时,MSZ-1处的钢筋应力值发生急剧突变,突变后的应力值随加载等级的增加增长幅度很大,在加载等级为1.2时,MSZ-1处的钢筋应力值达到最大,其值为89.8 MPa。即整个试验过程中MSZ-1处受拉钢筋的应力变化由弹性阶段、屈服阶段和强化阶段组成。当加载等级在0~ka级时,MSZ-2和MSZ-3处的钢筋应力处于受压状态,且MSZ-2处的钢筋应力值大于MSZ-3处的钢筋应力值,当加载等级在ka级时,MSZ-2和MSZ-3处的钢筋应力发生突变。当加载等级为ka~1.0级时,MSZ-2处的钢筋应力值随加载等级的增大在减小,且MSZ-2处的钢筋应力值在这个加载过程中由受压状态变为受拉状态,而MSZ-3处的钢筋应力值随加载等级的增大其值没有发生很大变化,仍处于受压状态。当加载等级在1.0~1.05级时,MSZ-3处的钢筋应力值由受压状态变为受拉状态。当加载等级在1.05~1.2级时,MSZ-2和MSZ-3处的钢筋应力随加载等级的增大,应力值也在增

大,但增长幅度较缓,在1.2级时达到最大值,分别为19.0 MPa和20.4 MPa。由于MSZ-2和MSZ-3对称梁体中心线布置,出现上述情况的原因是加载位置不同和槽型梁的空间受力特性所引起的。

表4 静载弯曲试验跨中混凝土应力值(MPa)

Tab.4 Static load bending stress test span concrete (MPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
横向	3.98	4.62	1.53	—	-3.41	—	-4.54	2.27	2.70
纵向	-5.04	5.96	4.19	12.46	1.99	2.77	4.22	2.27	2.99

3 结论

通过对高速铁路无砟轨道16 m后张法预应力混凝土简支槽型梁的静载弯曲试验,获取了该桥梁的裂缝发展规律、变形特性、支座沉降、应力发展规律,通过对这些结果的分析得出如下主要结论:

- (1) 槽型梁在静载试验结束后,其裂缝宽度、刚度、抗裂情况和预应力度满足试验要求。
- (2) 当加载等级为1.2级时,MSZ-1处钢筋应力达到最大为89.8 MPa,且整个试验过程中,MSZ-1处钢筋应力变化符合平截面假定,而MSZ-2和MSZ-3在整个过程中先处于受压状态后处于受拉状态,表现出一定的空间受力特性。
- (3) 本试验是国内进行的大规模实桥静载弯曲试验,而对于高速铁路无砟轨道16 m后张法预应力混凝土简支槽型梁的静载弯曲试验研究,目前国内尚未见相关报道,因此该研究成果可为此类桥梁设计和安全运营提供一定的技术参考。

参考文献 References

[1] 胥为捷,薛伟辰. 预应力混凝土槽型梁的研究与应用[J]. 建筑结构, 2006, 36(S1): 100-105.
XU Weijie, XUE Weichen. Research and applications of prestressed U-shaped concrete girder[J]. Journal of Building Structure, 2006, 36(S1): 100-105.

[2] 黄侨,陈卓异,杨明. 槽型梁桥力学性能的研究现状与展望[J]. 中外公路, 2013, 33(6): 131-135.
HUAN Qiao, CHEN Zhouyi, YANG Ming. Groove mechanical properties research Status and Prospects beam bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(6): 131-135.

[3] 胡匡璋,江新元,陆光闻. 槽形梁[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
HU Kuangzhang, JIANG Xinyuan, LU Guanglun. Trough girder[M]. Beijing: China Railway Press, 1987.

[4] 张士铎. 箱型薄壁梁剪力滞效应[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
ZHANG Shiduo. Shear lag effect of box type thin walled beams[M]. Beijing: People's Communications Press, 1998.