

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.01.002

铰接板桥铰缝疲劳性能试验研究

唐先习¹,尹月酉¹,国伟²,徐岳³

(1.兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050;

2.山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250013; 3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究不同构造的铰接板桥铰缝的疲劳性能,采用深铰缝和浅铰缝两种形式的铰接板桥进行试验研究,通过对跨中铰缝顶底部混凝土的横向应变规律及铰缝内部横向连接钢筋的应变规律进行对比分析,对铰缝的疲劳性能进行研究。试验结果表明,在200万次疲劳荷载以前,由于疲劳幅值相对较小,随着疲劳次数的增加,完成一定疲劳循环后施加静载时铰缝混凝土及钢筋的应变值逐渐减小,应变值的变化趋于更加稳定。当疲劳次数超过200万次后,由于疲劳幅值的增加,疲劳荷载对浅铰缝的破坏产生较大的影响,而对深铰缝则未产生较明显的影响。因此,超过一定幅值疲劳荷载是造成浅铰缝破坏的一个主要因素,深铰缝构造的抗疲劳破坏性能要远好于浅铰缝构造的抗疲劳破坏性能。

关键词:桥梁工程;铰接板桥;铰缝;疲劳性能;横向应变

中图分类号:U446.1

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2015)01-0006-05

Experimental Research on Fatigue Performance of Hinge Joints of Hinged Slab Bridge

TANG Xian-xi¹, YIN Yue-you¹, GUO Wei², XU Yue³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250013, China;

3. School of Highways, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: For the research on fatigue performance of hinge joints with different structures, two hinged slab bridges with deep hinge joints and shallow hinge joints were adopted in the experiments. Based on the results of the transverse strains regularity of hinge joints at the middle span of hinged slab, the researches on the fatigue performance of the hinge joints were carried out. The transverse strains of hinge joints include the concrete transverse strain at the bottom and the top of hinge joints, and the transverse strain of the connection steels in hinge joints. The experimental results suggest that, within 2×10^6 times of fatigue load, due to the relatively small fatigue amplitudes, the concrete and reinforcement strain values of hinge joints decrease as static load applied after the fatigue cycle of certain numbers, with the increasing of fatigue cycle number, the changes of the strain values tend to be more stable. When the fatigue cycle number is more than 2×10^6 times, as the fatigue amplitudes increase, the influence on the damage of shallow hinge joints by fatigue load is great, but no obvious influence on deep hinge joints. Therefore, the fatigue load with certain fatigue amplitude is a major factor which causes the destruction of shallow hinge joints, and the fatigue damage resistance performance of deep hinge joints is much better than shallow hinge joints.

Keywords: bridge engineering; hinged slab bridge; hinge joints; fatigue performance; transverse strain

铰缝是装配式铰接板桥横向连接的主要结构形式,在铰接板桥的内力传递中起着重要的作用。铰缝的结构构造形式由早期的浅铰缝发展为现在的深

铰缝,传递的内力也由早期设计时只考虑竖向剪力一个方面发展为现在考虑竖向剪力和横向弯矩两个方面^[1-2],而且铰缝内部的受力状态也发生了变化。

收稿日期:2014-10-17

修稿日期:2014-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51168030,51208242)

作者简介:唐先习(1972—),男,山东济宁人,博士,副教授,主要从事大跨度桥梁施工与桥梁耐久性研究。E-mail: 695913483@qq.com

由于荷载的反复作用导致的疲劳效应,使铰缝内部应力的发展规律变的更为复杂。

在板桥铰缝的研究方面,俞博、叶见曙等^[3]通过将铰接板桥比拟成横向抗弯及抗扭刚度为零的正交异性板,对铰接板桥铰缝的剪力进行了计算分析,得出铰缝剪力峰值主要与板的截面特性与跨径有关。卫军等^[4]通过对空心板铰缝的耐久性试验及静载试验,提出了铰缝协同工作系数的概念,并给出了协同工作系数的影响因素。项贻强等^[5]通过建立有限元模型进行数值分析,得出铰缝处横向应力超标为铰缝破坏的主要原因,并提出两种解决方案。唐先习等^[6-8]通过数值分析及试验研究,分析了静力作用下铰接板桥铰缝破坏的原因,对铰缝设计时仅考虑竖向剪力的强度验算方法提出了不同看法,同时还对疲劳荷载作用下不同构造铰缝的极限承载力进行了研究。钱寅泉等^[9]则采用相对位移法对铰缝破损程度进行检测,取得了良好的效果。潘钻峰等^[10]则研究了横向预应力对抑制装配式板桥铰缝破坏所产生的作用。

但以上研究,并未系统地分析铰缝在复杂受力状况下应力应变的变化规律,比如不同构造的铰缝在疲劳荷载作用下其内部横向应变的变化规律等,而这些内容对铰接板桥铰缝的研究具有重要的意义。因此,本文主要研究不同构造的铰缝在疲劳荷载作用下的混凝土及钢筋的横向应变性能,进而研究导致铰缝破坏的疲劳方面的原因。

1 试验概况

试验的构件是采用将两片钢筋混凝土板通过铰缝进行连接形成钢筋混凝土板桥结构。按照铰缝深度与铰接板板厚的对比关系,铰缝分为浅铰缝和深铰缝,本文研究中取一组浅铰缝板桥结构和一组深铰缝板桥结构进行疲劳性能对比试验。在浅铰缝中,在铰缝上部沿纵向按一定间距放置 12 根横向连接钢筋,钢筋为直径 8 mm 的圆钢;在深铰缝中,在铰缝上部 and 下部沿纵向按一定间距各放置 12 根横向连接钢筋,钢筋为直径 8 mm 的圆钢。试验过程中取跨中部位铰缝顶底部混凝土的横向应变和铰缝内部横向连接钢筋的应变进行分析,其中铰缝顶底部混凝土横向应变采用 HJ 型应变测量传感器进行测量,钢筋的应变采用应变片进行测量,浅铰缝及深铰缝的构造布置及应变测量设备布设见图 1 和图 2。

在试验过程中,浅铰缝与深铰缝板桥结构的施加荷载的位置取相同位置。加载位置取在铰接板跨中位置的一块板中部。加载布置图见图 3、图 4。

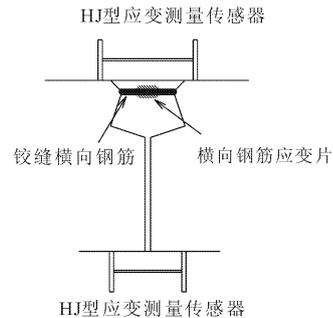


图 1 浅铰缝横断面示意图

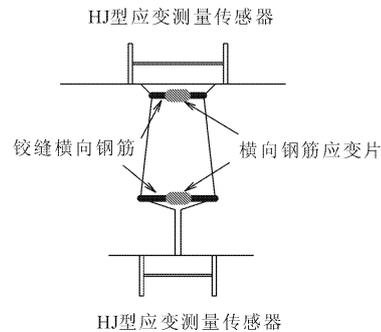


图 2 深铰缝横断面示意图

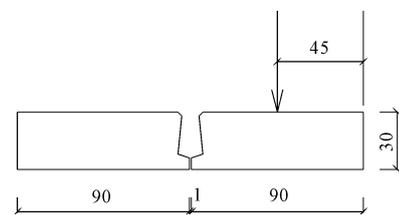


图 3 加载布置横断面示意图(单位:cm)



图 4 加载布置纵断面示意图(单位:cm)

对于试验时疲劳荷载幅值及疲劳次数的确定,经过对试验时采用构件的计算,结合其他钢筋混凝土结构疲劳试验时疲劳荷载的确定方法^[11-14],理论上确定疲劳荷载幅值的上限值为 136 kN,下限值为 27.2 kN,加载频率为 3 Hz。在进行实际试验时,出于安全方面以及试验具体情况的考虑,在进行疲劳循环时,将疲劳幅值进行了调整,试验过程中采用的疲劳幅值见图 5。在施加疲劳荷载以前、疲劳 1 万次、5 万次、10 万次、30 万次、50 万次、100 万次、150 万次、200 万次后,分别对试验梁进行静力加载,观测一定次数的疲劳循环作用后铰缝及铰接板性能的变化情况。当疲劳次数达到 250 万次后,因试验

板桥结构尚未完全破坏,施加静载直至结构破坏^[15-16]。疲劳试验加载装置见图 6。

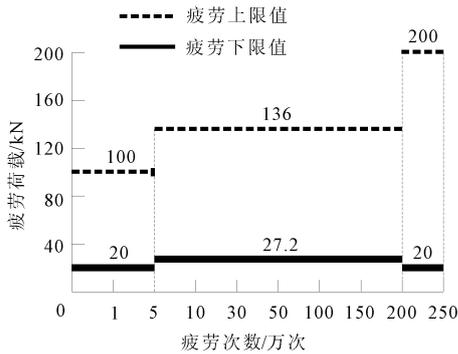


图 5 疲劳幅值图

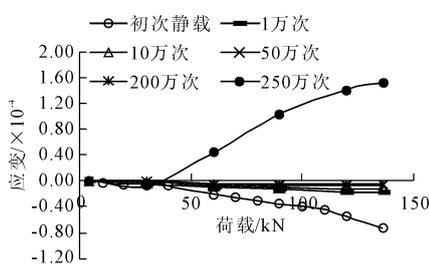


图 6 疲劳试验加载装置

2 试验结果及分析

2.1 浅铰缝疲劳试验

根据有限元模型分析结果,施加荷载时,跨中铰

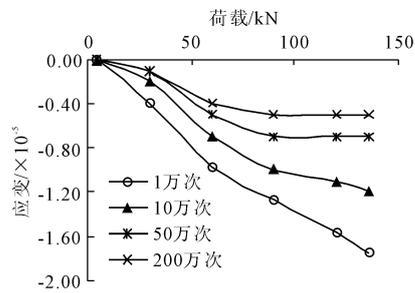


(a) 各种具有代表性的静载工况

缝顶部出现横向拉应变,底部出现横向压应变,应变值均较小。在实际试验过程中,由于铰接板一端靠近铰缝处的支座与铰接板接触不密实而导致出现轻微下沉现象,从而使疲劳试验中跨中铰缝上部出现横向压应变,铰缝下部出现横向拉应变。疲劳 5 万次以后,铰缝底部开始出现裂缝。但经过疲劳试验的验证可以看出,虽然铰缝底部出现了纵向裂缝,但作为铰接板之间的竖向传力机构,铰缝仍然起到了竖向传力的作用,保证了两片板之间的共同受力。

图 7 为不同疲劳次数后施加静载时跨中铰缝顶部混凝土荷载-横向应变曲线,其中图 7(a)是在各种具有代表性的静载工况作用下的曲线。由图 7(a)可以看出,初次静载时铰缝顶混凝土横向应变数值较大,主要是因为静载预压的荷载值仅为 30 kN,而初次静载的荷载值加到 136 kN,在 30 kN 到 136 kN 之间施加初次静载时,在试件制作、安装过程中产生的缝隙可能会在施加荷载时有所减小,从而造成应变值较大。对于 250 万次疲劳后的静载,由于 200 万次~250 万次疲劳时的疲劳幅值较大,250 万次疲劳结束后跨中铰缝的顶部和底部均出现铰缝混凝土与板混凝土之间的纵向裂缝,导致 250 万次后施加静载时铰缝顶部和底部均出现受拉现象。

图 7(b)是不含有初次静载和 250 万次疲劳荷载作用后静载的几种有代表性的静载工况作用下的荷载-横向应变曲线。由图 7(b)可以看出,从开始施加疲劳荷载到 200 万次疲劳荷载结束,随着疲劳次数的不断增加,施加静载时铰缝混凝土的应变值的变化越来越小。



(b) 不包括初次静载工况和250万次疲劳循环后的静载工况

图 7 浅铰缝板桥跨中铰缝顶混凝土荷载-横向应变曲线

图 8 是不同疲劳次数后施加静载时跨中铰缝底部混凝土荷载-横向应变曲线。其中图 8(a)是在各种有代表性的静载工况作用下的曲线。由图 8(a)可以看出,当施加初次静载时,铰缝底混凝土横向应变值相对较小,但随着静载值的增大应变值增加较快,经过一定疲劳循环后应变值变化规律较为稳定,250 万次后横向应变值又加大,横向应变值变化原

因与铰缝顶混凝土横向应变值变化原因相同。图 8(b)是在不含初次静载和 250 万次疲劳荷载作用后静载的几种有代表性的静载工况作用下的荷载-横向应变曲线。由图 8(b)可以看出,从开始施加疲劳荷载到 200 万次疲劳荷载结束,疲劳次数对铰缝混凝土应变的影响呈现出一定的规律性,但规律性不如铰缝顶部混凝土变化规律明显。

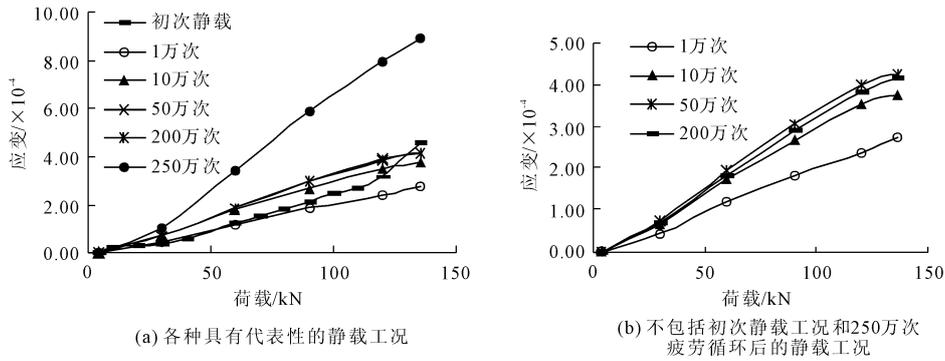


图 8 浅铰缝板桥跨中铰缝底混凝土荷载—横向应变曲线

图 9 是不同疲劳次数后施加静载时跨中铰缝内钢筋的荷载—横向应变曲线。其中图 9(a)是在各种有代表性的静载工况作用下的曲线,图 9(b)是在不含 250 万次疲劳荷载作用后静载的几种有代表性

的静载工况作用下的曲线。从图 9(a)和图 9(b)可以看出,铰缝内钢筋应变与铰缝顶混凝土应变规律大体相同。

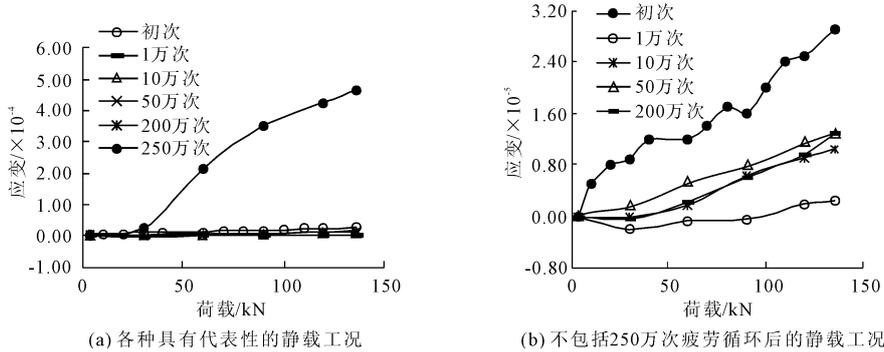


图 9 浅铰缝板桥跨中铰缝内钢筋荷载—横向应变曲线

图 10 为不同疲劳次数后施加 136 kN 荷载时浅铰缝混凝土及钢筋随疲劳次数变化的横向应变曲线。由图 10 可见,对于铰缝底混凝土,疲劳 1 万次后的横向应变小于初次加载时的横向应变,这是因为疲劳荷载的作用使试件在制作、安装过程中产生的缝隙进一步进行密合。从 1 万次到 5 万次疲劳,横向应变的变化不大。5 万次疲劳后,铰缝底部产生裂缝,所以从 5 万次到 30 万次疲劳过程中,横向应变不断加大,到 30 万次后,一直到 200 万次,横向应变的变化不大。到 250 万次疲劳时,由于铰缝顶部均已开裂,所以铰缝底应变加大较多。而对于铰缝顶混凝土,随着疲劳次数的增加,横向压应力逐渐减小,但减小幅度较小,当疲劳次数达到 30 万次后,则保持稳定状态,到 250 万次后,由于铰缝顶混凝土的开裂,压应变变成了拉应变。对于铰缝内的钢筋横向应变,变化趋势与铰缝顶混凝土变化趋势大体相同,只是在 250 万次疲劳荷载以前,铰缝顶混凝土应变为压应变,而横向钢筋应变为拉应变。

应变,采用与浅铰缝应变相同的分析方法,用铰缝顶部混凝土以及铰缝内部钢筋横向应变随疲劳荷载的变化状况进行分析。

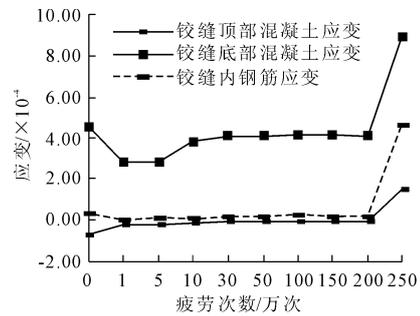


图 10 浅铰缝板桥跨中铰缝疲劳次数—横向应变曲线

2.2 深铰缝疲劳试验

对于深铰缝铰接板疲劳试验过程中的铰缝静载

图 11~图 14 为不同疲劳次数后施加静载时跨中深铰缝顶部混凝土及铰缝内上下部钢筋的荷载—横向应变曲线,静载施加工况与浅铰缝疲劳试验的静载施加工况相同。由图 11~图 14 可见,初次加载时铰缝混凝土的横向应变值变化较大,且随着荷载的增大,混凝土应变值增大的幅度呈增加趋势,但相对于浅铰缝,总的增加值较小。随着疲劳次数的增加,应变的变化规律发生改变,增加幅度随荷载

的增加呈减缓趋势,说明随着疲劳次数的增加,铰缝混凝土横向应变趋于更加稳定。而钢筋的应变变化规律则没有这么明显。

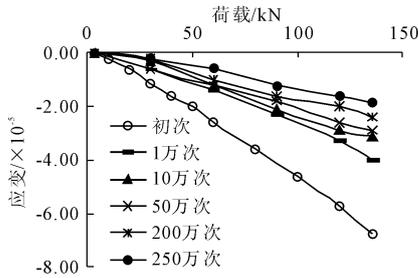


图 11 深铰缝板桥跨中铰缝底混凝土荷载—横向应变曲线

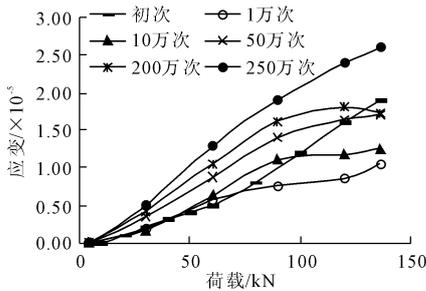


图 12 深铰缝板桥跨中铰缝顶混凝土荷载—横向应变曲线

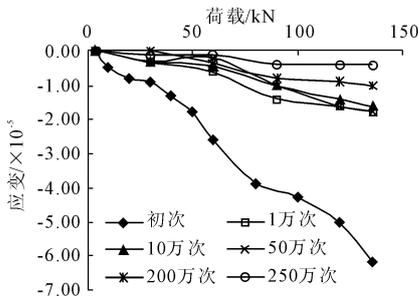


图 13 深铰缝板桥跨中铰缝下部钢筋荷载—横向应变曲线

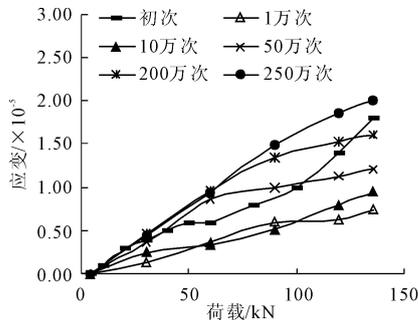


图 14 深铰缝板桥跨中铰缝上部钢筋荷载—横向应变曲线

图 15 为不同疲劳次数后施加 136 kN 荷载时深铰缝顶底部混凝土及铰缝内上下部钢筋随疲劳次数的横向应变曲线。由图 15 可见,随着疲劳次数的增加,施加荷载为 136 kN 时,铰缝混凝土及钢筋横向应变值的数值也趋于稳定。对于深铰缝与浅铰缝在疲劳荷载后的应变,最大的区别就在于疲劳荷载施

加到 250 万次以后,在静载工况作用下,浅铰缝的应变发生突变,而深铰缝的应变未出现较大变化。主要原因就是 200 万次~250 万次的疲劳荷载幅值加大,造成 250 万次疲劳循环结束后浅铰缝跨中顶部和底部均出现铰缝与板之间的纵向通缝,而深铰缝与板之间则未出现裂缝。这说明在疲劳荷载作用下,深铰缝性能要好于浅铰缝。

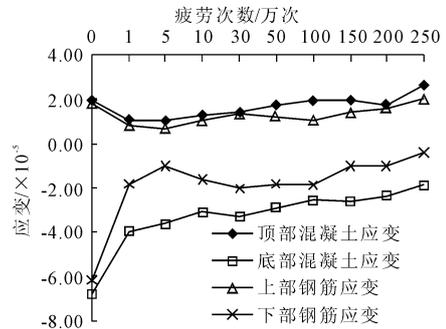


图 15 深铰缝板桥疲劳试验跨中铰缝疲劳次数—横向应变曲线

3 结 论

(1) 通过对不超过 200 万次的疲劳荷载不同作用次数后铰缝混凝土及钢筋横向应变的对比分析可知,随着疲劳次数的增加,铰缝混凝土及钢筋的应变值逐渐减小,应变值的变化趋于更加稳定。因此,一定幅值的疲劳荷载对铰缝的应变性能影响较小。

(2) 通过对浅铰缝 200 万次~250 万次疲劳前后应变值变化情况及铰缝开裂情况的对比分析可知,当疲劳荷载的幅值超过一定值后,疲劳荷载对浅铰缝的破坏产生较大的影响。而对深铰缝而言,这种影响则不明显。结合浅铰缝与深铰缝的构造形式及铰缝内部横向连接钢筋的布置形式可知,深铰缝的抗疲劳能力远大于浅铰缝。

(3) 由以上对试验结果的分析总结,结合公路交通的实际情况可得,对于板桥的浅铰缝来说,通常情况下的车辆荷载不会对铰缝的疲劳破坏造成太大的影响,而超载车辆往往会对桥梁的疲劳破坏产生较大的影响。因此,超载车辆的疲劳作用是造成浅铰缝破坏的一个主要原因,同时,现阶段板桥采用的深铰缝构造形式具有较强的抵抗超载车辆的疲劳破坏的功能。

(4) 在以上的试验中,仅考虑了经过一定疲劳循环次数后施加静载时铰缝钢筋及混凝土的横向应变情况,而对于疲劳循环过程中铰缝的横向应变情况则未进行研究,今后的研究应该在这方面进行加强。

(下转第 15 页)

- [6] 韩 明. 某型发动机无失效数据的 Bayes 可靠性分析[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 216-219.
- [7] 宁江凡, 鄢小清, 张土峰. 液体火箭发动机无失效条件下的可靠性分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 22-25.
- [8] 韩 明. 无失效数据下液体火箭发动机的 E-Bayes 可靠性分析[J]. 航空学报, 2011, 32(12): 2213-2219.
- [9] 韩 明. Weibull 分布可靠性参数的置信限[J]. 机械强度, 2009, 31(1): 59-62.
- [10] 韩 明. 失效概率的 E-Bayes 估计及其性质[J]. 数学物理学报: A 辑, 2007, 27(3): 488-495.
- [11] Vanmarcke Erik H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [12] 徐 斌, 王大通, 高大钊. 用相关函数法求静探曲线相关距离的讨论[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 55-58.

(上接第 10 页)

参考文献:

- [1] 易建国. 混凝土筒支梁(板)桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] 刘培文, 周 卫, 张君纬, 等. 公路小桥涵设计示例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 俞 博, 叶见曙, 张 剑, 等. 装配式混凝土铰接板桥铰缝剪力计算[J]. 深圳大学学报理工版, 2011, 28(1): 60-64.
- [4] 卫 军, 李 沛, 徐 岳, 等. 空心板铰缝协同工作性能影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 29-33.
- [5] 项贻强, 邢 骋, 邵林海, 等. 铰接预应力混凝土空心板梁桥的空间受力行为及加固分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(4): 734-738.
- [6] Tang Xian-xi, Xu Yue, Zhu Xin-yang, et al. Experimental research and numerical analysis of transverse strain of hinge joints in hinge plates[C]//2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, IEEE, 2011: 324-327.
- [7] Tang Xian-xi, Xu Yue, Zou Cun-jun, et al. Numerical analysis of reasonable hinge joints size of reinforced concrete hinged plates[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163-167: 1180-1185.
- [8] Tang Xian-xi, Xu Yue, Xu Zhi, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of hinged plates with different configuration hinge joints[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163-167: 1186-1191.
- [9] 钱寅泉, 周正茂, 葛玮明, 等. 基于相对位移法的铰缝破损程度检测[J]. 公路交通科技, 2012, 29(7): 76-81.
- [10] 潘钻峰, Chung C. Fu, 吕志涛. 装配式板桥的横向预应力设计[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(6): 1264-1270.
- [11] 刘立新, 汪小林, 于秋波, 等. 疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的挠度研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2007, 28(4): 4-7.
- [12] 周绪红, 林新元, 谭冬莲, 等. 波纹钢腹板组合箱梁疲劳试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 33-38, 69.
- [13] Singh S, Singh A, Bajaj V. Flexural fatigue strength of hybrid fibrous concrete beams[J]. Construction Materials, 2012, 165(2): 99-110.
- [14] Singh S P. Fatigue strength of hybrid steel-polypropylene fibrous concrete beams in flexure[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 2446-2452.
- [15] 唐先习, 孙焕重, 朱彦鹏, 等. 疲劳荷载作用下铰接板桥挠度试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(2): 65-70.
- [16] 唐先习, 梁金宝, 唐先周, 等. 疲劳荷载作用下受压混凝土应变性能试验研究[C]//第 22 届全国结构工程学术会议论文集(2). 乌鲁木齐, 北京: 《工程力学》杂志社, 2013: 108-112.