

文章编号:1674-2974(2016)01-0083-06

预应力与外包水泥基灌注料加固大跨度 RC 空间桁架性能试验研究*

卜良桃[†], 刘尚凯, 刘婵娟, 吴康权
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:以某岛外引水渡槽桁架为工程背景,提出了采用预应力与外包水泥基灌注料对钢筋混凝土桁架下弦杆进行加固的方法,并采用分级加载的试验方法,在加固后的桁架上进行了原位静载试验,测试了桁架主要控制截面在各级荷载作用下的挠度、应变(应力)等数值变化,将测试结果与有限元软件计算结果进行比较分析,研究了桁架加固后的力学性能.试验结果表明,预应力与外包水泥基灌注料加固桁架能够较大程度地提高桁架结构承载力,且新增结构层与原结构共同工作及变形协调较好,加固效果较为理想.

关键词:桁架结构;预应力;加固;静载试验

中图分类号:TU317.1

文献标识码:A

Experimental Study on the Performance of Prestressed Force and Outsourcing Cement Filling Material Strengthening Large Span RC Space Truss

BU Liang-tao[†], LIU Shang-kai, LIU Chan-juan, WU Kan-quan
(College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Based on the engineering background of an island water diversion aqueducts truss, this paper put forward a method using prestressed force and outsourcing cement filling material to strengthen the bottom chord of reinforced concrete truss, used the hierarchical load test method to carry out in-situ static load experiment on the strengthened truss, tests deflection, strain(stress) value and their changes of the main control section of truss at different levels of loads, made a comparative analysis of the test results, calculated the value of finite element method, and obtained the mechanical performance of the truss after reinforcement. The experimental results show that the use of prestressed force and outsourcing cement filling material to strengthen truss can improve the bearing capacity of truss structures to a great extent, and new structural layers can work with the original structural layers and their deformation coordination is good. The reinforcement effect is also ideal.

Key words: truss structure; prestressed force; reinforcement; static load test

* 收稿日期:2015-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278187), National Natrual Science Foundqation of China(51278187); 国家火炬计划项目(SQ2013GHD200083B00)

作者简介:卜良桃(1963-),男,湖南南县人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: plt63@163.com

国内外体外预应力技术用于桥梁加固方面的实践证明,该技术可保证结构的整体性,新旧体系协同工作良好,不仅克服了其他加固方法加固材料存在的应力滞后问题,还可减小挠度和裂缝宽度,提高桥梁承载能力^[1-3]. 由于增设的体外预应力钢筋布置于混凝土截面之外,因而保证了新增体外预应力钢筋在结构的使用期限内不发生锈蚀,才能使加固后的结构具有良好的耐久性. 本文以某岛外引水渡槽工程桁架为例,针对其质量缺陷,提出了预应力与外包水泥基灌注料对桁架下弦杆进行加固的方法,并采用分级加载的试验方法,在加固后的桁架上进行了原位静载试验,测试了桁架主要控制截面在各级荷载作用下的挠度、应变(应力)等数值变化,将测试结果与有限元软件计算结果进行比较分析,研究了桁架结构加固后的力学性能. 试验结果表明,预应力与外包水泥基灌注料加固桁架程度地提高桁架结构承载力,且新增结构层与原结构共同工作及变形协调较好,加固效果较为理想.

1 工程概况

某排架柱-钢筋混凝土桁架拱式引水渡槽,设计

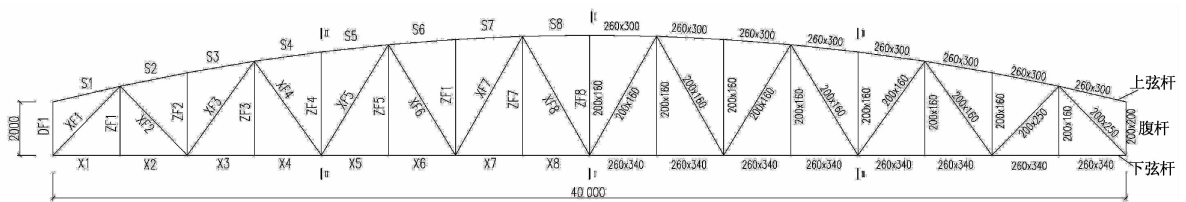


图1 桁架立面布置及杆件编号示意图(单位:mm)
Fig. 1 Truss surface layout and bar code(Unit:mm)

2 加固方案

下弦杆为关键加固部可位,若采取加固措施,初步分析可对桁架的薄弱杆件采取2种加固方案,即粘贴碳纤维布加固法^[4]、预应力与外包水泥基灌注料加固法.

方案1,粘贴碳纤维布加固法主要是靠粘贴碳纤维布来增加杆件抗拉能力,应用配套树脂胶黏剂将碳纤维粘贴于承载力不满足要求的混凝土构件外部相应部位,以达到构件满足承载力要求的一种补强加固方法. 其加固原理是利用其配套树脂的剪切强度将混凝土构件承载的荷载传递给碳纤维布,使

使用年限50年,设计水流量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$,桁架单跨跨度为40.2 m,共102跨. 上部承重结构主要采用简支梁型下承式桁架,由两榀平行钢筋混凝土主桁架以及主桁架间钢结构横向联系(连杆、支撑等)形成支承引水渡槽的承重体系. 桁架内搁置渡槽,渡槽槽身采用厚9.5 cm 预制钢筋砼结构,单节长度2.5 m. 桁架支座立柱采用钢筋混凝土双柱式结构,立柱基础采用钻孔灌注桩或扩展基础. 桁架拱由上、下弦杆、腹杆(竖杆、斜杆)组成,其中上弦杆为2次抛物线曲杆,截面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$;下弦杆截面尺寸为 $260 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$;竖杆截面尺寸为 $200 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$;斜杆截面尺寸有 $200 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 和 $200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 2种;杆件混凝土强度等级为C35. 桁架立面布置及杆件编号示意图如图1所示.

在本工程试通水引水后,渡槽有1跨出现垮塌事故,经相关单位现场检测及计算复核,该桁架存在钢筋混凝土主桁架的下弦拉杆原设计主筋配置偏少、节点施工质量差、混凝土强度偏低等问题,需对钢筋混凝土桁架进行加固处理.

后粘贴碳纤维布和原钢筋混凝土构件共同承受荷载作用力. 碳纤维布的抗拉强度较高,但却是“被动”地增加构件的抗拉承载力,只有在桁架结构受力较大时才能得以体现,且施工成本较高,耐老化性能差.

方案2,预应力与外包水泥基灌注料加固法特点有:1)新增预应力筋能弥补原设计配筋不足;2)体外施加预应力法“主动”补充预应力,新增预应力筋能较快的与原结构共同参与工作,结构承载力能够得到较大的提高;3)外包水泥基灌注料属于无机材料,与原结构材性接近,不会形成不相容的隔离层,抗老化、风化性能好,耐久性较好. 经方案对比论证,该桁架采用方案2进行加固^[5-6]. 即在下弦杆四周对称安装4根预应力筋后外包C60水泥基灌注料.

C60 水泥基灌注料由湖南固力工程新材料有限公司提供,预应力筋采用直径 15.2 mm (1×7),强度标准值为 1 860 MPa 的低松弛有粘结预应力钢绞线,其性能应满足《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T5224-2003)的规定。张拉端采用夹片式锚具,固定端采用挤压锚,其性能必须满足《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的要求并达到 I 类锚具的要求。经计算,预应力筋张拉控制应力为 930

MPa。张拉时应采用应力控制,应变校核的方法进行。实测伸长值与计算值的偏差应在 -6%~+6% 范围之内。施工中做现场施加预应力记录。

该桁架加固除主要对下弦杆采用预应力与外包水泥基灌注料加固外,还对竖杆进行了加强处理,同时对斜杆和上弦杆表面施工缺陷采用了高性能水泥复合砂浆修补^[7-9],以提高其耐久性。加固方案见图 2。

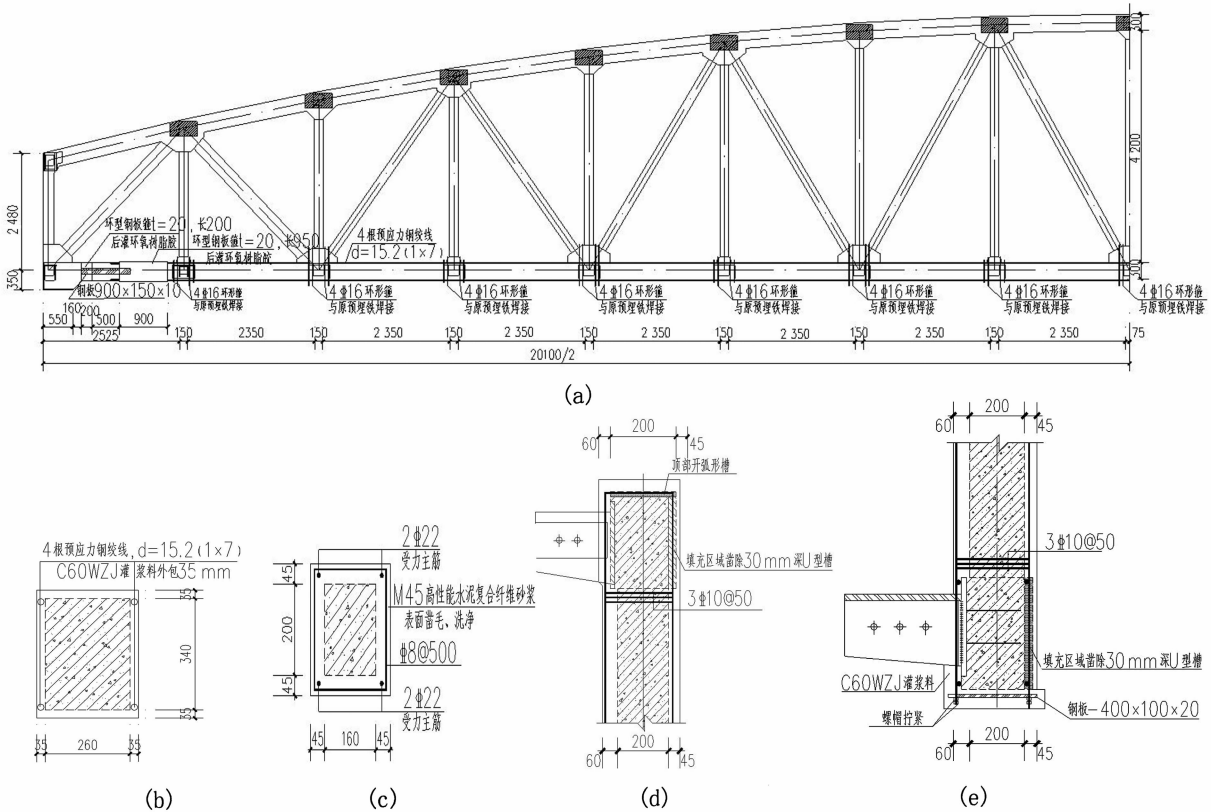


图 2 加固方案简图
 Fig. 2 Brief picture of strengthening project

3 静载试验

采用原位静水试验、分级加载的方法^[10-12],测试了试验跨其中一榀桁架主要控制截面在各级静力水荷载作用下的挠度、应变(应力)等数值的变化,并将测试结果与理论计算结果进行了比较。

挠度测试布置 3 个测试位置,分别位于桁架下弦杆左右 1/4 跨和跨中。所采用的仪表为机械式千分表。

应变(应力)测试采用全自动数据采集 BZ2205C 静态应变仪。选取主要控制截面为桁架下弦杆受力最大的跨中截面(即下弦杆的第 8 根)。本

试验分别粘贴了 4 片应变片,原结构钢筋应变片 2 片,新增预应力筋应变片 2 片,均沿着钢筋受力方向粘贴。应变片粘贴的具体位置及编号如图 3 所示, S₁~S₂ 为新增预应力筋应变片, S₃~S₄ 为原结构钢筋应变片。

试验开始之前,在渡槽内侧先标注好水深刻度。将粘土分装入塑料编织袋,然后在所试验槽身段两端用分装好的土袋堆砌成挡水坝,与渡槽上边缘平齐。然后用 1 台功率为 1 500 W 的抽水泵从下游向槽身内注水。从空槽到设计水深历时 24 h。由于抽水流量小,加载时间长,水深变化缓慢,因此,可以认为这种荷载为静力荷载,不必考虑加速度及惯性力的作用。

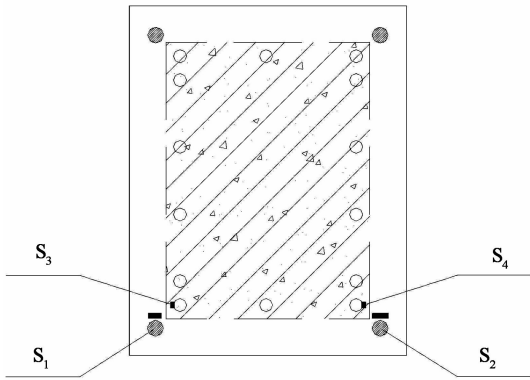


图3 应变片粘贴位置示意图

Fig. 3 The paste location of the strain gauge

本试验加载分段分级进行. 以每 200 mm 水深荷载为一级. 每级荷载持荷 20 min, 测读各仪器仪表读数, 同时在加载过程中随时观测各控制测点的应变、挠度变化情况, 保证试验安全顺利进行, 按此加载方式直至满槽(水深 1.5 m). 最后在水荷载卸载完成并稳定 20 min 后, 测读各测点的残余变形.

在试验加载过程中, 对本试验安全作出如下预案, 若加载试验发生下列情形之一, 立即终止试验并将水迅速放掉:

- 1) 控制测点变形达到或超过规范允许值;
- 2) 控制测点应变值达到或超过计算理论值;
- 3) 由于水荷载试验导致结构出现非正常局部损伤, 影响到渡槽工程桁架结构的承载力和正常使用.

从现场测试情况来看, 加载过程非常顺利, 加载效果比较理想; 上述情况实际并未发生. 现场静载试验如图 4 所示.



图4 现场静载试验

Fig. 4 The static load test on site

4 试验结果

4.1 挠度测试结果

桁架在不同水深作用下, 各测点挠度与水深关

系见图 5. 从图中可以看出, 桁架各测点挠度随着水深的不断增加而增大. 试验数据表明: 实测挠度值与水深(荷载)基本呈线性关系.

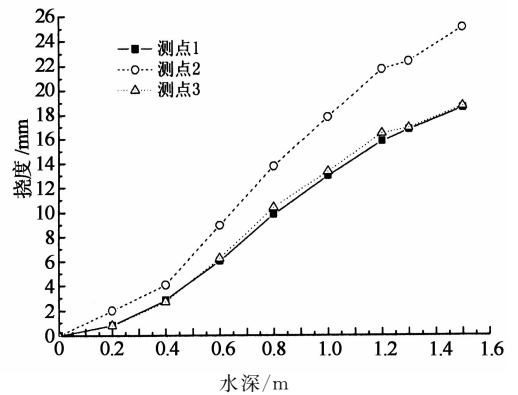


图5 测点挠度-水深关系

Fig. 5 The relationship between the deflection of measuring point and the depth of water

4.2 应变(应力)测试结果

桁架在不同水深作用下, 应变值随水深变化实测值如图 6 所示, 图 7 所示. 应变测试值均为正值, 表明桁架下弦杆处于受拉状态. 随着水深的抬高(荷载的增大), 拉应变呈现出逐渐增长的趋势. 根据应变结果, 渡槽满槽(水深 1.5 m)时, 该测点出现峰值应力分别为: $\sigma_1 = 130.26 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 128.70 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 127.80 \text{ MPa}$, $\sigma_4 = 129.40 \text{ MPa}$.

从图 6 及图 7 可以看出, 应变值与水深基本呈线性关系, 应变随着水深增加而逐渐增大. 试验结果表明: 加固预应力筋与原结构钢筋共同工作, 变形协调较好.

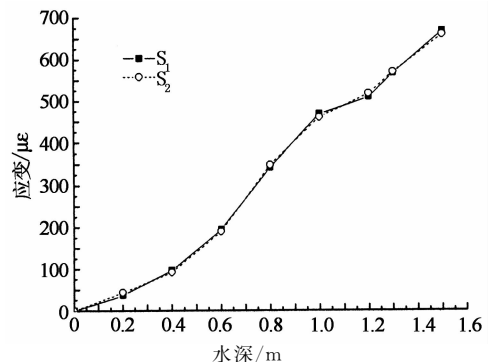


图6 S1, S2 应变-水深图

Fig. 6 S1, S2 deflection-water depth

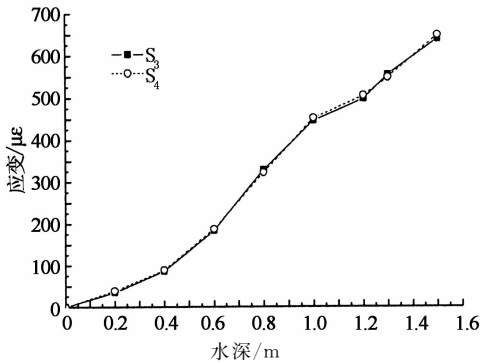


图 7 S_3, S_4 应变-水深图
Fig. 7 S_3, S_4 deflection-water depth

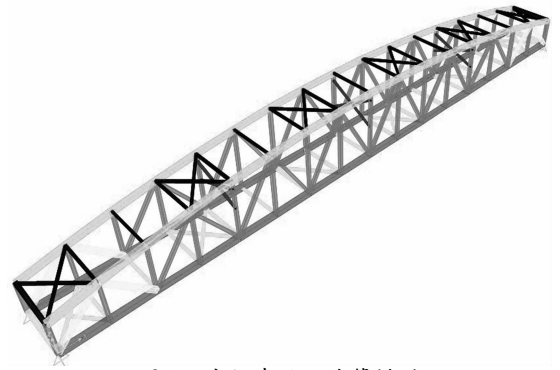


图 8 空间有限元计算模型
Fig. 8 Space finite element calculation model

5 试验结果和理论计算的比较与分析

5.1 有限元模型的建立与修正

该桁架为空间桁架体系,结构受力较为复杂,计算时采用结构分析软件 SAP2000 进行,该程序在静动力计算方面具有速度快,精度高的特点.空间有限元计算模型见图 8.

试验前,根据原设计要求及静水试验的水加载方案,按照分级加载方式,逐步进行结构计算,获取测点的挠度、应变(应力)等控制数据,为在试验过程中设置安全预警值提供依据.

试验后,根据试验过程中实际测量的加载方式、测试当天的温度及风压变化等参数,在计算过程中,对有限元模型的参数进行修正,使模型与实际加载

状况尽量一致,然后对试验加载过程进行精细化分析,计算出各控制截面的挠度、应力(应变)等结果,为结构的实际受力状况评价提供理论依据.

5.2 挠度测试结果与计算分析

在渡槽满槽(水深 1.5 m)时,荷载作用下的挠度实测值与有限元计算值如表 1 所示,挠度校验系数在 0.958~0.968 之间,表明试验实测值与有限元计算值比较吻合.卸载后相对残余变形在 7.90%~8.64%之间,满足规范规定的残余变形小于 20%的要求.

5.3 应变(应力)测试结果与计算分析

在渡槽满槽(水深 1.5 m)时,荷载作用下的应力实测值与有限元计算值如表 2 所示,桁架结构应力校验系数在 0.866~0.905 之间,表明试验实测值与有限元计算值比较吻合.

表 1 挠度(满槽)试验实测值与有限元计算值比较
Tab. 1 The comparison of deflection(full tank) experimental value and finite calculation value

测点编号	挠度实测值 /mm	挠度计算值 /mm	校验系数	卸载残余值 /mm	相对残余变形 /%
测点 1(左 1/4 跨)	18.632	19.440	0.958	1.472	7.90
测点 2(1/2 跨)	25.152	25.988	0.968	2.170	8.62
测点 3(右 1/4 跨)	18.760	19.440	0.965	1.621	8.64

表 2 应力(满槽)试验实测值与有限元计算值比较
Tab. 2 The comparison of stress(full tank) experimental value and finite calculation value

应变片编号	试验所得数据/MPa	有限元分析数据/MPa	校验系数
S1	130.26	143.91	0.905
S2	128.70	143.91	0.894
S3	127.80	147.60	0.866
S4	129.40	147.60	0.877

5 结 论

1)对某大跨度钢筋混凝土空间桁架加固后进行静载试验,通过测试结构挠度、应变(应力)及残余变形等各项指标,并与有限元计算结果进行对比分析结果表明,该桁架静载试验结果与有限元计算结果比较吻合,桁架下弦杆在整个静载试验过程中处于弹性工作状态。

2)采用预应力与外包水泥基灌注料加固大跨度空间桁架结构能够在较大程度上提高桁架结构承载力,且新增结构层与原结构共同工作及变形协调较好,加固效果较为理想,为同类工程提供了可靠的试验依据。

参考文献

- [1] 乔墩. 体外预应力技术及其在桥梁工程中的应用[J]. 重庆交通大学学报, 1992, 11(3): 46-55.
QIAO Dun. The technology of external prestressed tendons and its application in bridge engineering [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1992, 11(3): 46-55. (In Chinese)
- [2] 艾军, 史丽远. 公路梁桥体外预应力加固设计与施工方法研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(5): 771-774.
AI Jun, SHI Li-yuan. Discussion of design and construction method on extraneous prestressed strengthening technique for bridge[J]. Journal of Southeast University: Natural Sciences, 2002, 32(5): 771-774. (In Chinese)
- [3] 朱典文, 唐小兵, 张万平. 桥梁结构的体外预应力加固技术[J]. 交通科技, 2002(6): 38-41.
ZHU Dian-wen, TANG Xiao-bing, ZHANG Wan-ping. The concrete bridge with external prestressing[J]. Transportation Science & Technology, 2002(6): 38-41. (In Chinese)
- [4] 李新生, 王刚, 郭英. 大跨度预应力混凝土桁架桥梁加固技术研究[J]. 世界桥梁, 2010(4): 68-70.
LI Xing-sheng, WANG Gang, GUO Ying. Research of strengthening techniques for long span prestressed concrete truss bridges[J]. Bridge of the World, 2010(4): 68-70. (In Chinese)
- [5] GB 50367-2013 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 35-36.
GB 50367-2013 Design code for strengthening concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 35-36. (In Chinese)
- [6] JGJ/T 279-2012 建筑结构体外预应力加固技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 8-10.
JGJ/T 279-2012 Technical specification for strengthening building structures with external prestressing tendons [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 8-10. (In Chinese)
- [7] 卜良桃, 叶蓁, 周子范, 等. 钢筋网复合砂浆加固受弯足尺寸RC梁二次受力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 94-100.
BU Liang-tao, YE Zhen, ZHOU Zi-fan, et al. Experimental study on RC beam reinforced by reinforcing steel bar mesh mortar subject to secondary load[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5): 94-100. (In Chinese)
- [8] 卜良桃, 叶蓁, 胡尚瑜. HPF 加固 RC 足尺梁二次受力抗弯试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2007, 34(3): 15-19.
BU Liang-tao, YE Zhen, HU Shang-yu. Experimental study of RC beam strengthened by ferrocement mortar subject to secondary load[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(3): 15-19. (In Chinese)
- [9] 卜良桃, 陈军, 鲁晨. PVC-ECC 加固 RC 足尺梁二次受力试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(1): 1-7.
BU Liang-tao, CHEN Jun, LU Chen. Experiment on full-scale RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite mortar in flexure subjected to secondary load[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(1): 1-7. (In Chinese)
- [10] GB/T 50784-2013 混凝土结构现场检测技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 61-64.
GB/T 50784-2013 Technical standard for in-site inspection of concrete structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 61-64. (In Chinese)
- [11] GB/T 50152-2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 14-20.
GB/T 50152-2012 Standard methods for testing of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 14-20. (In Chinese)
- [12] 彭大文, 丁文胜. 大型钢管桁架结构的静载试验研究[J]. 上海应用技术学院学报: 自然科学版, 2010, 10(3): 180-185.
PENG Da-weng, DING Wen-sheng. The research of static loading test on large-size steel tube truss structure[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology: Natural Science, 2010, 10(3): 180-185. (In Chinese)