

文章编号:1671-8879(2016)06-0056-06

# 先张法 PC 空心板梁桥梁底开裂成因敏感性分析

冯 祁

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为深入研究与探讨先张法 PC 空心板桥梁底的开裂成因,量化分析多种开裂因素对梁底主拉应力的影响及其敏感性,明确该类桥梁在设计、施工与运营过程中控制梁底开裂现象的侧重点,依托某  $3\times 20$  m 的空心板简支梁桥作为工程背景,利用 MIDAS FEA 中相应的旋转裂缝模型,建立了多梁与单梁有限元模型,多梁结构考虑 1 片边梁与 2 片中梁、单梁结构仅考虑中梁单板受力的情况,通过有限元仿真分析预应力钢束偏位、预应力损失、超载、混凝土强度降低、整体温差以及支座脱空等各因素对底板主拉应力的影响,并利用线性回归模型分析比较了各影响因素的开裂敏感性。研究表明:各影响因素对先张法 PC 空心板梁底开裂的敏感性由预应力损失、超载、整体温差、支座脱空、预应力钢束偏位至混凝土强度依次减小;单板受力对梁底受力更加不利,加剧了各影响因素作用下梁底裂缝的产生。所得结论可对已有先张法 PC 空心板梁桥的开裂分析提供参考依据。

**关键词:**桥梁工程;开裂成因;先张法 PC 空心板梁桥;主拉应力;敏感性分析

**中图分类号:**U443.3 **文献标志码:**A

## Sensitivity analysis of cracking factors for the bottom slab crack of the pre-tensioned PC hollow slab girder bridge

FENG Qi

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To profoundly study the crack mechanism, quantify the influence and sensitivity of different factors on the principal tension stress of bottom beam cracks in PC hollow girders and the control of the bottom slab crack of these girders in designing, constructing and operating processes, a  $3\times 20$  m simply supported bridge was used as the background to establish the multi-beam and the single-beam finite element model by MIDAS FEA with its relevant rotating crack model. The multi-beam model considered one side girder and two middle girders, while the single-beam girder only considered the single beam bearing situation. Factors such as prestress tendon position deviation, prestress losing, overloading, concrete strength reduction, overall temperature difference and bearing separation were analyzed to check the influence on the principal tension stress and a linear regression model was used to compare the sensibility among different factors. The results show that the prestress loss factor plays the key influencing role to the principal tensile stress of bottom beam and it is also influenced by the factors of overload,

收稿日期:2016-06-21

基金项目:陕西省科技重点项目(2014SZS19-Z02);陕西省人力资源与社会保障厅项目(110000160004)

作者简介:冯 祁(1978-),男,福建平潭人,工程师,工学博士研究生,E-mail:312890756@qq.com。

overall temperature difference and bearing separation. Effects of prestress tendon position and concrete strength are not significant. The single beam bearing can lead to a bad bottom stress situation for the bottom beam which will aggravate the crack phenomenon. The comparison and conclusion can provide reference for the crack phenomenon of prestressed concrete hollow slab beam bridge. 4 tabs, 9 figs, 20 refs.

**Key words:** bridge engineering; cracking factor; pre-tensioned PC hollow girder bridge; principal tensile stress; sensitivity analysis

## 0 引 言

先张法 PC 空心板梁桥以其施工简便、自重较轻、受力明确、用材经济等特点,在中国高速公路工程中取得了广泛的应用,但梁底裂缝的出现会对其刚度、承载力以及耐久性能产生不利影响<sup>[1-4]</sup>。

传统桥梁设计中采用的线性杆系与平面理论对混凝土桥梁开裂的研究不够严密且精度较低,很多学者针对先张法 PC 空心板梁桥的开裂问题进行了相关研究。赵卫国等从设计和施工的角度对先张法预应力混凝土空心板梁的底板开裂进行了分析,并针对不同的裂缝提出了控制措施<sup>[5]</sup>;黄松雄等从混凝土材料本身、设计施工方面分析总结了预应力空心板裂缝产生的影响因素<sup>[6-7]</sup>;郭铭德等认为空心板梁底纵向裂缝是由空心板内外温差导致的<sup>[8]</sup>;石桂萍等认为空心板裂缝的产生主要是由台座与基础的不均匀沉降及施工养护中的温度控制措施不足所致<sup>[9]</sup>。现有研究主要基于设计与施工中的关键技术点进行讨论,进而得到影响开裂的主要因素,对于导致开裂的主拉应力量化分析与影响因素间的敏感性比较相对较少。为此,本文以福建高速公路某  $3 \times 20$  m 跨径先张法预应力混凝土简支空心板梁桥为例,利用 MIDAS FEA 软件建立了相应三梁与单梁结构的三维实体单元模型,基于牛顿拉普森方法进行非线性运算,分析预应力筋偏位、混凝土强度降低、预应力损失、整体温差、超载与支座脱空等因素对底板主拉应力的影响,并比较各影响因素对先张法 PC 简支空心板梁桥梁底开裂的敏感性程度。

## 1 工程概述

实桥案例中桥梁全长为 75.8 m, 桥跨组合为 3×20 m, 设计荷载为汽车-超 20 级。上部结构为先张法 PC 简支空心板梁, 箱梁采用 C50 混凝土, 预应力筋采用  $\Phi_15.24$  钢绞线, 钢束张拉控制应力为 1 339 MPa, 下部结构为柱式墩, 支座为圆板式橡胶支座, 其一般截面尺寸及钢筋位置如图 1 所示。通

过近些年的观测,该桥梁底病害主要体现为:①梁底裂缝增长快,发展迅速,数量成倍增加;②裂缝宽度超标,约 20% 的裂缝超过了规范的规定。该桥梁在安全使用性能上存在较大隐患,耐久性问题突出。

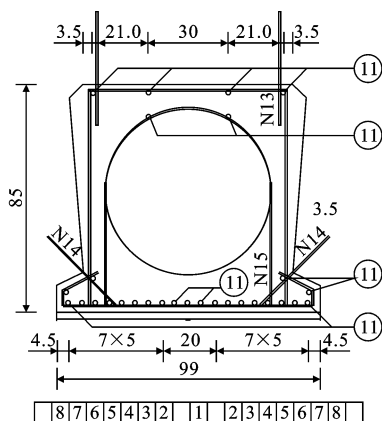


图 1 中板截面及主筋位置示意

Fig. 1 Size of cross-section and main steel

## 2 多梁结构梁底主拉应力影响因素分析

空心板梁桥的上部结构通常由多片预制梁现场安装组成,通过现浇的铰缝混凝土形成横向连接,并借助桥面铺装形成整体受力的桥跨结构,该桥采用“中企口”铰缝构造,其整体性好、刚度大,上部结构可作为整体参与工作<sup>[10-12]</sup>。本文利用 MIDAS FEA 软件建立对应模型,梁体混凝土受压特性选用 Thorenfeldt 模型进行模拟,受拉特性选用常量模型进行模拟,普通钢筋和预应力钢束选用给定的钢筋特性杆系单元进行模拟,并假设所有的普通钢筋和预应力筋与混凝土之间粘结良好,不存在粘结滑移,分析模型采用旋转裂缝模型,不考虑横向效应<sup>[13-14]</sup>。模型选取 1 片边梁和 2 片中梁组成整体式上部结构,采用弹簧连接单元模拟圆板式橡胶支座,计算单元总数为 71 086(下页图 2、图 3)。

### 2.1 预应力筋偏位

考虑到实际工程中预应力钢筋放线位置可能存

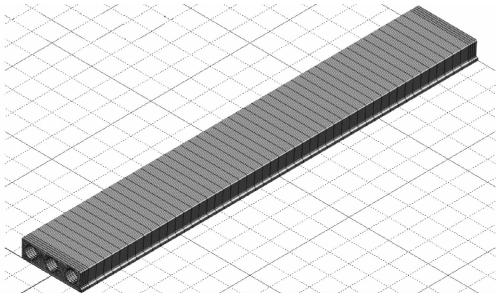


图 2 三梁有限元模型  
Fig. 2 Three beams finite element model

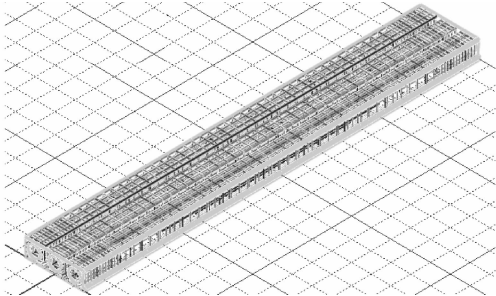


图 3 钢筋单元  
Fig. 3 Reinforcing steel bar element

在偏差,主梁模型中分别按照预应力钢筋原设计位置以及分别上移 3、6、9、12、15 mm 这 5 种情况进行比较,考察在设计不利荷载作用下的影响程度。图 4 列出了 5 种不同预应力钢筋位置情况下空心板梁桥梁底的主拉应力数据。

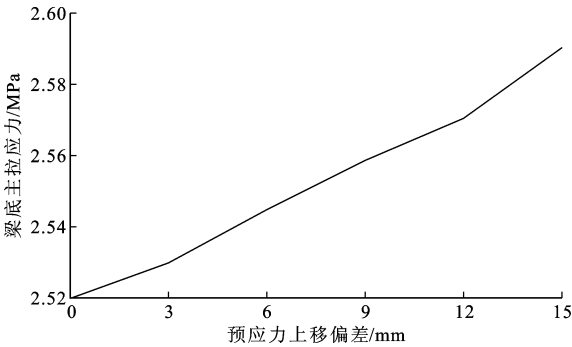


图 4 预应力钢束上移时梁底主拉应力变化  
Fig. 4 Principal tensile stress variation with the moving up of prestressed steel

由图 4 可得,随着预应力钢束位置的提升,梁底主拉应力呈增长趋势,由设计位置时的 2.52 MPa 增长为 2.59 MPa;小幅度的预应力钢束位置提升对梁底主拉应力的影响不大,提升 15 mm 后主拉应力增长率为 2.78%。

2.2 预应力损失

在桥梁事故调查中,常存在预应力筋张拉不到位或钢束张拉应力退化的现象,这主要是由于混凝

土桥梁的设计不精确、施工质量不到位所导致的<sup>[15]</sup>。因此在理论计算预应力损失值的基础上,设计预应力损失分别为 10%、20%、30%、40%、50% 这 5 种情况进行计算,以验证预应力损失对梁底主拉应力的影响,如图 5 所示。

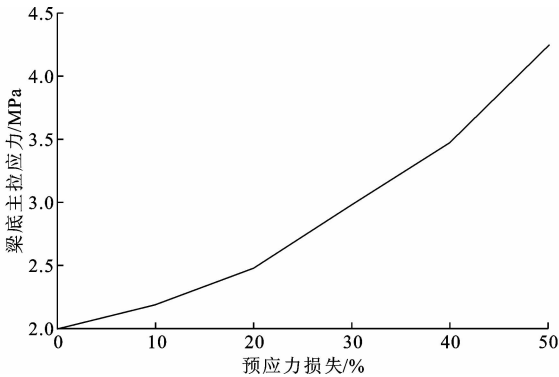


图 5 不同预应力损失情况下梁底主拉应力变化  
Fig. 5 Principal tensile stress variation with different prestress losses

由图 5 可知,随着钢束预应力损失的增加,结构的梁底主拉应力呈增长趋势,由设计荷载下的 2.52 MPa 增长为 4.31 MPa;预应力损失对梁底主拉应力的影响较大,梁底主拉应力增长的速度随预应力的损失而增快;在预应力损失 50% 的情况下,梁底主拉应力相对增加了 71.03%,严重超出了混凝土的极限抗拉强度。

2.3 超载

在高速公路的运行当中,车辆超载超限现象时常发生,超载会对桥梁结构造成严重损伤,最为直接的就是导致裂缝病害的产生<sup>[16]</sup>。分析中采用原桥设计荷载为参考依据,逐步增加至超载 100%,验证超载对结构主拉应力的影响,如图 6 所示。

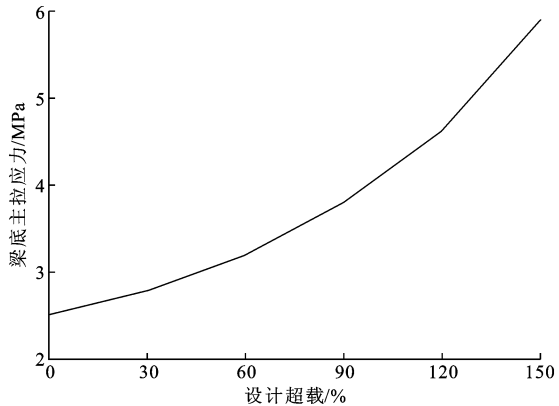


图 6 超载情况下梁底主拉应力变化  
Fig. 6 Principal tensile stress variation with overload conditions

从图 6 中可知,随着汽车荷载的增大,梁底主拉应力呈增长趋势;梁底主拉应力随着超载幅度的增加,增

长趋势逐渐变快;汽车超载对梁底主拉应力的影响较大,由设计荷载下的 2.52 MPa 增长为 5.91 MPa,增幅 134.80%,超过了混凝土的极限抗拉强度,导致结构开裂。

2.4 混凝土强度

实际工程中由于水泥砂石的选材、振捣以及各个施工细节的不同往往会使混凝土的强度参差不齐。模型分别采用 C40、C45、C50、C55 及 C60 等 5 种不同强度等级的混凝土进行比较,如表 1 所示。

表 1 不同混凝土强度下梁底主拉应力及相对差值  
Tab.1 Principal tensile stress and relative difference with different concrete strengths

混凝土等级	梁底主拉应力/MPa	相对差值/%
C40	2.517	-0.13
C45	2.519	-0.04
C50	2.520	0.00
C55	2.521	0.04
C60	2.523	0.13

由表 1 可知,在预应力结构的实体单元分析中,混凝土强度对梁底的力学行为影响较小,但高强度混凝土对应较高的极限抗拉强度,可以在某种程度上延缓结构裂缝的出现。

2.5 整体温差

年温变化引起结构物的温度变化是长期缓慢的,它使结构物整体发生均匀的温度变化,所以在考虑年温对结构物的影响时,均以结构物的平均温度为依据,一般以最高与最低月平均温度的变化值作为年温变化幅度。分析中采用年平均温度为参考依据,将整体温差依次取±5℃、±10℃、±15℃及±20℃进行比较分析,如图 7 所示。

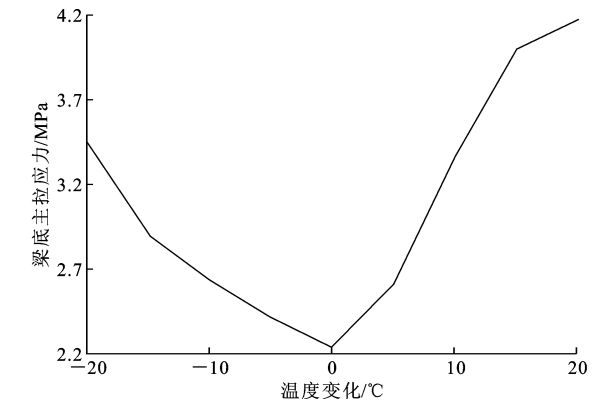


图 7 不同整体温差情况下梁底主拉应力变化  
Fig. 7 Principal tensile stress variation with different overall temperature differences

从图 7 中可以得出,随着温差的增大,梁底主拉应力均呈增长趋势;温差改变对结构受力影响显著,

其中降温 20℃使得梁底主拉应力由 2.332 MPa 升至 3.451 MPa,增幅为 46.9%;升温 20℃使得梁底主拉应力由 2.332 MPa 升至 4.163 MPa,增幅为 77.7%,升温作用对结构的不利影响相对于降温作用要高;整体升温在达到一定程度时会使混凝土达到极限抗拉强度,对梁底受力不利。

2.6 单板受力

对于 PC 空心板梁桥,铰缝承担着在梁板间传递内力并约束位移的关键作用,但在不利荷载作用下且施工方法无法保证其强度时,铰缝将发生破坏,使梁间联系作用削弱,梁体受力分配不均,甚至单板受力<sup>[17-18]</sup>。模型考虑单板受力情况下的荷载作用,利用软件建立了独立的中板单梁模型,进行各影响因素的主拉应力分析,模型中其余各参数与三梁模型保持一致,计算单元总数为 63 514,如图 8、图 9 所示。

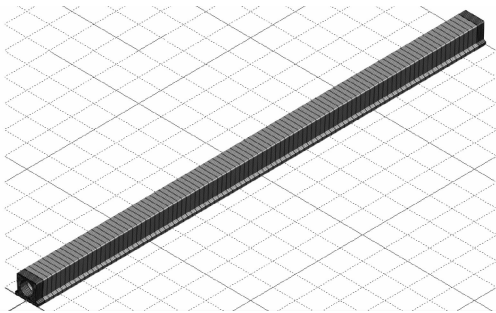


图 8 单梁有限元模型  
Fig. 8 Single beam finite element model

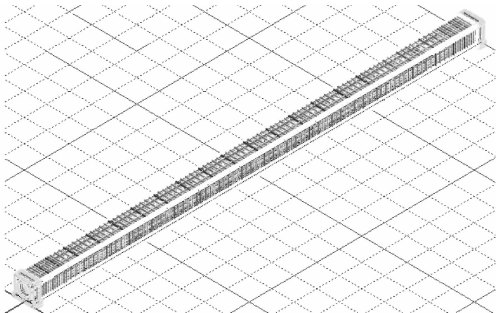


图 9 单梁钢筋单元  
Fig. 9 Reinforcing steel bar element

通过对单梁结构的研究分析发现,梁底主拉应力在不同设计因素下,其变化趋势与多梁结构的基本相同。下页表 2 列出了各影响因素最不利影响情况下的主拉应力与相应的相对差值,从表中可以得出超载与预应力损失对单梁结构梁底主拉应力影响较大,主拉应力相对增大了 155.15%与 96.36%。

2.7 支座脱空

支座脱空会对梁体产生严重影响<sup>[19-20]</sup>。单梁模型分别考虑单支座脱空与对角支座脱空 2 种情

表 2 不同影响因素下梁底主拉应力及相对差值

Tab. 2 Principal tensile stress of beam bottom and relative difference with different influence factors

影响因素	预应力筋上移 15mm	预应力损失 50%	超载 150%	整体升温 20℃	整体降温 20℃
梁底主拉应力/MPa	3.39	6.53	8.42	5.01	4.14
主拉应力相对差值/%	2.73	96.36	155.15	47.10	25.80

况,并考虑偏心荷载工况进行比较计算,其计算结果见表 3。可以得出,支座脱空对梁底主拉应力的影响明显,其中单支座脱空施加偏心荷载与对角支座脱空施加对称荷载 2 种工况最为不利,主拉应力分别增大了 62.7%与 54.5%,容易造成底板开裂。

表 3 考虑支座脱空情况下梁底主拉应力及相对差值

Tab. 3 Principal tensile stress variation of beam bottom and relative difference with the change of support separation

支座状态	主拉应力/MPa		相对差值/%	
	对称加载	偏心加载	对称加载	偏心加载
未脱空	3.30	3.62	0.0	0.0
单支座脱空	4.49	5.88	36.0	62.7
对角支座脱空	5.10	4.89	54.5	35.2

3 各因素开裂敏感性分析

比较各影响因素对梁底主拉应力的影响程度,采用古典线性回归模型对已有的计算结果进行线性拟合,其拟合函数表达形式为

$$y=ax+b \tag{1}$$

式中: $x$  为拟合直线中设计影响因素的取值; $y$  为各不同设计影响因素下的梁底主拉应力; $a$  为各不同影响因素对梁底主拉应力的影响程度; $b$  为回归得到的截距系数。

对于不同的因素, $a$  绝对值越大,对应的该因素的影响作用越敏感; $a$  绝对值越小,甚至接近于 0,则该因素的影响作用较小。

表 4 各影响因素作用下拟合直线斜率取值

Tab. 4 Slope values of fitting line under different affected factors

设计影响因素	$a_1$	$a_2$	排序
钢束上移	0.005	0.006	5
预应力损失	3.389	6.336	1
设计超载	2.078	3.454	2
整体升温	0.052	0.088	3
整体降温	0.030	0.042	4

注: $a_1$ 、 $a_2$  分别代表三梁与单梁结构在不同设计影响因素作用下梁底主拉应力拟合直线的斜率。

从表中数据可以得出:对于三梁与单梁结构,各设计影响因素的影响程度排序是一致的;单梁结构各影响因素下的斜率均大于三梁结构,表明单梁的受力情况更容易导致梁底裂缝的产生;预应力损失是导致此类结构梁底开裂的主要因素,超载影响次

之,其余设计影响因素对应的斜率较小,对开裂的影响较小。

4 结 语

(1)基于 PC 空心板梁桥三梁与单梁有限元模型的分析结果可以得出,预应力损失、超载、整体温差与支座脱空等因素均会对此类桥梁的梁底裂缝发展产生显著影响,其中预应力损失的影响程度最高。

(2)预应力钢束位置偏差、混凝土强度的变化对梁体主拉应力的影响较小,在可控范围内不易引起梁底开裂。

(3)基于 2 类有限元模型的计算分析表明,对于单梁与多梁结构,各个因素对底板开裂的影响程度排序基本一致,但单板受力对应的不利荷载将对梁底开裂带来严重影响。

(4)目前研究仅对影响梁体开裂的因素进行了单独分析,而实际上预应力混凝土梁桥的开裂是由多种影响因素综合导致的,如何合理考虑多影响因素的共同交互作用是研究此类桥梁开裂问题的下一步重点。

参考文献:

References:

[1] 刘凤山,杨 琪. 装配式简支空心板梁桥体外横向预应力加固效果分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014,31(9):79-82,85.  
LIU Feng-shan,YANG Qi. Analysis on reinforcement effect of external transverse prestress on fabricated simply-supported hollow-slab bridge [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014,31(9): 79-82,85. (in Chinese)  
[2] 郝 轶,闫淑杰. 先张法预应力空心板早期裂缝成因及预防控制[J]. 交通标准化,2011(23):90-92.  
HAO Yi,YAN Shu-jie. Causes and preventive control of early crack of prestressed hollow slab with pretensioning method [J]. Transportation Standardization, 2011(23):90-92. (in Chinese)  
[3] 周志祥,任 超,彭兴国,等. 预应力砼空心板桥纵向裂缝分析[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(2):8-11.  
ZHOU Zhi-xiang,REN Chao,PENG Xing-guo,et al. Research on longitudinal cracks of prestressed con-

- crete box-beams[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(2): 8-11. (in Chinese)
- [4] 朱汉华,陈孟冲,袁迎捷. 预应力混凝土连续箱梁桥裂缝分析与防治[M]. 北京:人民交通出版社,2006.  
ZHU Han-hua, CHEN Meng-chong, YUAN Ying-jie. Analysis and prevention of cracks of prestressed concrete continuous box girder bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 赵卫国,薛文. 先张法预应力混凝土空心板梁纵向裂缝分析[J]. 公路, 2006(10): 52-53.  
ZHAO Wei-guo, XUE Wen. Longitudinal crack analysis for prestressed concrete hollow slabs girder bridge[J]. Highway, 2006(10): 52-53. (in Chinese)
- [6] 黄松雄,袁新利. 桥梁工程预应力空心板裂缝原因分析及控制[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(3): 79, 81.  
HUANG Song-xiong, YUAN Xin-li. Causes and control of prestressed concrete hollow slab cracks in bridge engineering[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2010, 33(3): 79, 81. (in Chinese)
- [7] 韩常瑾. 浅谈预应力空心板裂缝产生原因及控制[J]. 青海交通科技, 2011(6): 54-55.  
HAN Chang-jin. Introduction to prestressed concrete hollow slab cracks causes and control[J]. Qinghai Traffic Science and Technology, 2011(6): 54-55. (in Chinese)
- [8] 郭铭德,吕锦刚. 空心板梁底板纵向裂缝问题的分析[J]. 广东科技, 2006(5): 112-113.  
GUO Ming-de, LU Jin-gang. Analysis on longitudinal bottom crack problem for slabs girder bridge[J]. Guangdong Science and Technology, 2006(5): 112-113. (in Chinese)
- [9] 石桂萍,王卫东. 公路桥预应力混凝土空心板梁裂缝原因分析[J]. 电学学报, 2003, 18(2): 113-115.  
SHI Gui-ping, WANG Wei-dong. An analysis on causes of crack in prestressed concrete hollow slab girder of highway bridge[J]. Journal of Electric Power, 2003, 18(2): 113-115. (in Chinese)
- [10] 杨吉新,杨吉旺,李克银,等. 预应力空心板数值分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2005, 29(3): 360-362.  
YANG Ji-xin, YANG Ji-wang, LI Ke-yin, et al. Numerical analysis of pre-stressed concrete hollow beam[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2005, 29(3): 360-362. (in Chinese)
- [11] LOTFI V, ESPANDAR R. Seismic analysis of concrete arch dams by combined discrete crack and non-orthogonal smeared crack technique[J]. Engineering Structures, 2004, 26(1): 27-37.
- [12] 王萍,柯在田. 公路预应力混凝土桥梁裂缝分析[J]. 公路, 2005(6): 14-17.  
WANG Ping, KE Zai-tian. Analysis on highway prestressed concrete bridge cracks[J]. Highway, 2005(6): 14-17. (in Chinese)
- [13] COPE R J, RAO P V, CLARK L A, et al. Modeling of reinforced concrete behavior for finite element analysis of bridge slabs[M]. Swansea: Pineridge Press, 1980.
- [14] SOUZA R A D. Smeared rotating crack model for reinforced concrete membrane elements discussion[J]. ACI Structural Journal, 2011, 108(3): 378-379.
- [15] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96. (in Chinese)
- [16] 王仁建,张小草. 先张法预应力空心板早期裂缝[J]. 交通世界, 2011, 4(21): 226-227.  
WANG Ren-jian, ZHANG Xiao-cai. Early cracks for prestressed concrete hollow slab girder bridge[J]. Transpoworld, 2011, 4(21): 226-227. (in Chinese)
- [17] NI H J, NI Y S, TIAN J. Contrastive analysis on hinge joint reinforcement measures of hollow plate and deduction design parameter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 578-579: 1379-1395.
- [18] LENG Y L, ZHANG J Q, JIANG R N, et al. Experimental research on transverse load distribution of prefabricated hollow slab concrete bridges with hinge joint cracks[J]. IABSE Symposium Report, 2013, 99(7): 1694-1700.
- [19] 杨怀庆. 支座脱空的原因及处置方法[J]. 交通世界, 2012, 5(9): 238-239.  
YANG Huai-qing. Causes for bearing separation and remedy method[J]. Transpoworld, 2012, 5(9): 238-239. (in Chinese)
- [20] 朱小青,陈淮,于品德. 支座脱空对西张村大桥受力性能的影响[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(5): 70-73.  
ZHU Xiao-qing, CHEN Huai, YU Pin-de. Influence of bearing hanging in the air on the structural performance of Xizhangcun Bridge[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2010, 31(5): 70-73. (in Chinese)