

在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估

赵煜^{1,2}, 贺拴海², 李春风², 葛耀君¹

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 长安大学 公路旧桥检测与加固交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对目前大量存在的在役预应力混凝土箱梁桥跨中下挠和开裂的现象, 基于主要受力裂缝的外观统计特征, 通过构造两类损伤单元, 即正裂缝区损伤单元和斜裂缝区损伤单元, 采用刚度折减和引入平面刚架模型的方法, 建立了基于裂缝统计特征参数的损伤预应力混凝土箱梁计算模型, 提出了基于截面刚度变化的预应力混凝土箱梁桥截面有效刚度折减系数和基于混凝土受压区应力变化程度的承载力折减系数, 从而实现了对在役预应力混凝土结构开裂损伤后, 在其使用过程中的受力性能评价。

关键词: 桥梁工程; 预应力混凝土箱梁; 裂缝特征; 有效刚度; 承载力

中图分类号: U 448.21

文献标识码: A

Evaluating System of Bearing Capacity for Existing Cracked Prestressed Concrete Box Girder Based on Crack Feature

ZHAO Yu^{1,2}, HE Shuanhai², LI Chunfeng², GE Yaojun¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: According to the over deformation and cracking of the prestressed concrete(PC) box girder bridge, vertical crack and oblique crack damage element were constituted based on primary appearance statistical cracks caused by force, two damage elements. Then the simulation calculation model of damaged PC bridges was put forward by reducing the rigidity and introducing planer rigid model. Finally, the rigidity reduction coefficient and capacity reduction coefficient were proposed to assess the structure capacity of existing damaged PC bridges.

Key words: bridge engineering; prestressed concrete box girder; crack feature; effective stiffness; bearing capacity

自 20 世纪 80 年代, 我国开始了大规模的预应力混凝土连续梁、连续刚构桥的建设, 目前已建成大跨径预应力连续梁、连续刚构桥数百座, 最大跨径达 270 m. 随着营运时间的增长, 相当一部分桥梁出现了跨中下挠和开裂等病害, 且日趋严重。

针对大跨径预应力混凝土箱梁桥出现的开裂与下挠病害, 国内外学者和工程技术人员开展了一系列的工作^[1-7], 主要集中在基于外观调查和荷载试验的检算系数修正法的研究、动力损伤评估方法的研究、桥梁下挠开裂原因的分析、影响结构下挠和开裂的主要因素的分析, 以及提出相应的处置对策, 而从裂缝损伤特征出发, 通过构造损伤模型的方式进行损伤结构受力性能评估的方法, 目前国内研究较少, 急需开展相关研究工作。

本文从在役预应力混凝土结构开裂损伤后的外观调查入手, 根据主要裂缝的分布特征, 提出基于裂缝统计特征参数的预应力混凝土箱梁桥开裂损伤后的有效刚度和承载力评估方法(定义为条件承载力, 反映损伤结构在使用阶段相对于设计状态的控制截面应力变化程度), 对此类桥梁的使用状态评估进行了探索。

1 裂缝统计特征参数的建立

受混凝土强度的离散性、荷载的可变性以及工作环境的多样性等多种因素的影响, 预应力混凝土箱梁桥裂缝的出现和开展具有较大的随机性. 理论研究和工程经验表明, 少数重要受力裂缝对桥梁结构承载力有较大影响, 而多数非受力裂缝对结构承载力影响很小, 可以忽略不计. 因此, 研究中将受弯段横向裂缝(以下称为正裂缝)和剪弯段斜裂缝(以下称为斜裂缝)作为研究和外观调查对象, 建立裂缝

收稿日期: 2009-05-31

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目(2006 318 223 27)

作者简介: 赵煜(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为桥梁评估与可靠度. E-mail: zhaoyury@126.com

分布的数学模型^[8].

1.1 正裂缝统计参数

取一开裂梁段,表示此梁段内的裂缝统计参数有:裂缝平均高度 \bar{h}_{cr} ,裂缝平均统计间距 \bar{l}_{cr} 和裂缝总宽度 Δ_{cr} 等,这些量分别表示如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{h}_{cr} &= \frac{\sum_{i=1}^n h_{cri}}{n} \\ \bar{l}_{cr} &= \frac{\sum_{i=1}^{n-1} l_{cri}}{n-1} = \frac{l_{cr}}{n-1} \\ \Delta_{cr} &= \sum_{i=1}^n \delta_{cri} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: h_{cri} 为裂缝高度,表示受拉区混凝土退出工作的程度,隐含受压区混凝土面积; δ_{cri} 为裂缝宽度,表示裂缝开展的程度,隐含梁变形曲率的大小; l_{cri} 为裂缝间距,表示梁段内裂缝的多少; l_{cr} 为开裂范围.

1.2 斜裂缝统计参数

取一开裂梁段,选择形心轴处的水平线为基准线,相邻两条斜裂缝与基准线的交点之间的距离定义为斜裂缝间距 l_{cri} ,基准线与斜裂缝之间的锐角定义为斜裂缝的倾角 θ_{cri} ,将斜裂缝总长度在竖向的投影长度定义为斜裂缝高度 h_{cri} ,建立梁段内的斜裂缝统计参数如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{h}_{cr} &= \frac{\sum_{i=1}^n h_{cri}}{n} \\ \bar{l}_{cr} &= \frac{\sum_{i=1}^{n-1} l_{cri}}{n-1} = \frac{l_{cr}}{n-1} \\ \bar{\theta}_{cr} &= \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{cri}}{n} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: h_{cri} 为裂缝高度,指斜裂缝总长度在垂直方向的投影长度; θ_{cri} 为裂缝倾角,表示裂缝开展的方向,隐含该裂缝处的主应力方向; l_{cri} 为裂缝间距,表示梁段内裂缝的条数; l_{cr} 为开裂范围.

2 基于主要裂缝统计特征的损伤预应力混凝土箱梁计算模型

2.1 基本思路

根据本文研究的裂缝特征参数,引入单元模型修正的方法,考虑正裂缝和斜裂缝对单元特性的影

响,建立开裂损伤结构的有限元模型.基本思路如图1所示.

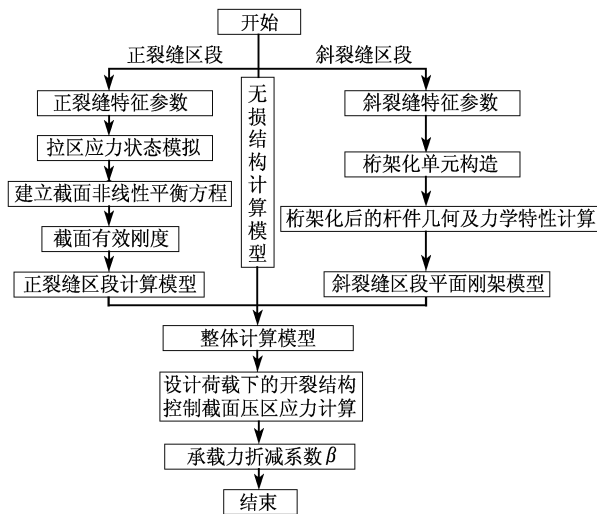


图1 开裂预应力结构损伤评估基本思路

Fig.1 General assessment layout of cracked PC structure

2.2 正裂缝区段计算模型

2.2.1 基本假定

(1) 混凝土开裂后,不计受拉区混凝土作用,拉力由预应力钢束承受.

(2) 忽略普通钢筋影响.

(3) 正常使用状态下,正裂缝属于拉区混凝土压应力储备丧失后的真实裂缝,其裂缝特征可由恒载下的残余裂缝分布特征测量和统计.

(4) 假定引起受拉区混凝土压应力储备丧失的原因为预应力钢束有效预应力值的损失(忽略引起预应力钢束应力损失的原因).

2.2.2 正裂缝区的单元特性简化与拉区状态的模拟

正裂缝区的单元特性简化可按以下方法进行:

根据外观调查得到的裂缝特征,将相似裂缝进行合并处理,其原则是:相似高度(差值小于梁高的1/10)裂缝合并、开裂区域截面折减、折减自重补偿.从而得到正裂缝区域的阶梯型折减刚度如图2所示.

得到简化单元特征后,即可对结构进行分析计算求解内力分布.

拉区应力状态的模拟按以下方法进行:

(1) 根据裂缝总宽度 Δ_{cr} 与开裂范围 l_{cr} 的比值确定正裂缝处截面下缘的平均拉应变,进而确定受拉侧边缘混凝土名义拉应力(应变)状态.

平均拉应变为

$$\overline{\varepsilon}_{cr} = \Delta_{cr} / l_{cr} \quad (3)$$

名义拉应力为

$$\sigma_{nt} = E_c \overline{\varepsilon}_{cr} \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量.

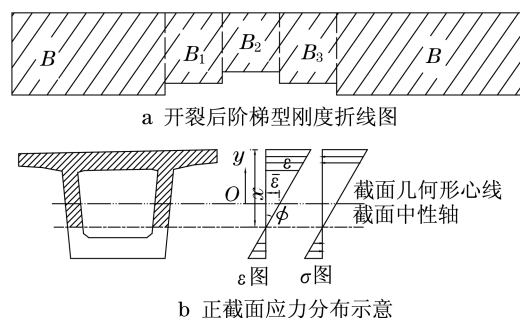


图2 正裂缝区域单元特征简化示意图

Fig.2 Simplified element characteristic of bending crack zone

(2) 根据截面内、外力平衡关系,通过减小预应力大小,使得截面下缘的混凝土边缘拉应力等于名义拉应力,达到如图3所示的截面混凝土及钢筋的应力(应变)平衡状态.图中, σ_{cc} 为压区边缘应力; σ_{nt} 为拉区边缘名义应力; α_{E_s} 为普通钢筋与混凝土弹性模量比; α_{E_p} 为预应力钢筋与混凝土弹性模量比.

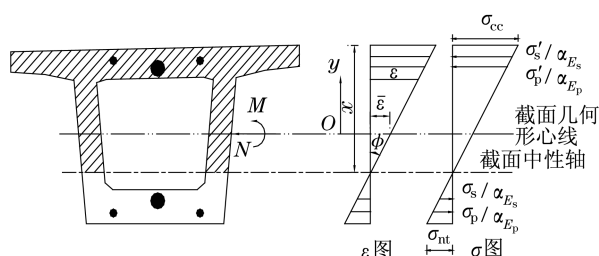


图3 正裂缝区段截面应力(应变)平衡状态

Fig.3 Balanced state of perpendicular stress for cracked section

(3) 进行截面平衡分析,见2.2.3.

2.2.3 正裂缝区应力状态的截面分析法

2.2.3.1 截面内力平衡

依据图3所示的截面应力分布状态建立水平方向力的平衡方程和对截面几何形心取矩的力矩平衡方程,以代数形式表示为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_{ci} A_{ci} + A'_s \Delta\sigma'_s + A'_p \Delta\sigma'_p + \\ A_s \Delta\sigma_s + A_p \Delta\sigma_p = N_{p0} \\ \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_{ci} A_{ci} y_i + A'_s \Delta\sigma'_s (c - a'_s) + \\ A'_p \Delta\sigma'_p (c - a'_p) - A_s \Delta\sigma_s (h_s - c) - \end{cases}$$

$$A_p \Delta\sigma_p (h_p - c) = M_0 \quad (5)$$

式中: N_{p0} 为混凝土法向应力等于零时预应力钢筋和普通钢筋的合力; M_0 为截面总弯矩 $M_0 = M_p + M_k$, M_p 为有效预应力产生的总预矩,以上缘受压为正, $M_p = N_{p0} e_{N0}$, e_{N0} 为预应力偏心距, M_k 为结构恒载及相应活载产生的弯矩(包括次内力),以上缘受压为正; A_{ci} 为压区分层混凝土面积; $\Delta\sigma_{ci}$ 为压区分层混凝土应力增量; A'_s 为压区普通钢筋面积; $\Delta\sigma'_s$ 为压区普通钢筋应力增量; A'_p 为压区预应力钢筋面积; $\Delta\sigma'_p$ 为压区预应力钢筋应力增量; A_s 为拉区普通钢筋面积; $\Delta\sigma_s$ 为拉区普通钢筋应力增量; A_p 为拉区预应力钢筋面积; $\Delta\sigma_p$ 为拉区预应力钢筋应力增量; y_i 为压区第 i 分层混凝土到截面几何形心的距离; c 为截面形心轴到压区边缘的距离; a'_s 为压区普通钢筋保护层厚度; a'_p 为压区预应力钢筋保护层厚度; h_s 为拉区普通钢筋保护层厚度; h_p 为拉区预应力钢筋保护层厚度.

2.2.3.2 截面应变分析

由平截面假定,截面上距离形心轴 y_i 处的混凝土应变为

$$\varepsilon_i = \bar{\varepsilon} + \varphi y_i \quad (6)$$

式中: $\bar{\varepsilon}$ 为全梁截面形心处截面正应变,以压为正; φ 为全梁截面弯曲曲率,以梁截面上缘受压为正.

2.2.3.3 截面分析试算

在式(5)中,先假定 x 的一个已知值,变化 φ 的值,设相对误差 $N_t = |N_j - N_{p0}| / |N_{p0}|$, $M_t = |M_j - M_0| / |M_0|$, N_j, M_j 为假定的 x, φ 对应的计算轴力与弯矩.当 $N_t \leq 1\%$ 和 $M_t \leq 1\%$ 同时成立时,即认为迭代收敛,此时的 x 和 φ 为一组近似取值.否则,重新选择假定值再计算.

对于受弯构件的确定截面,将截面沿着与弯矩作用面垂直的方向划分为数个等宽的窄条带,假设在受压区高度 x 范围内划分为 n 个等宽窄条带,则每一窄条带宽度为 $dy = x/n$,每一条带内的应变均匀,应力相等.经过迭代计算,当满足允许误差时输出结果.

2.3 斜裂缝区段计算模型

2.3.1 基本假定

(1) 裂缝产生于剪弯区段,属于主拉应力过大造成的受拉斜向裂缝.

(2) 忽略普通钢筋的影响和纵向预应力筋的销栓作用.

(3) 不计开裂区混凝土的受拉作用.

(4) 预应力筋在节点处变形协调,其他点忽略其协调性.

2.3.2 斜裂缝区的单元计算模型

假设斜裂缝出现后垂直于斜裂缝方向不受力,则可以将斜裂缝之间的混凝土部分看作受压斜杆,此时,箱梁斜裂缝以上部分则表现为Ⅱ形刚架,而斜裂缝以下部分则为槽形刚架,将Ⅱ形刚架和槽形刚架分别看作上下弦杆,则斜裂缝区域可以简化为平

面桁架模型.采用索单元模拟预应力钢束,预加应力可通过对初应变法或降温法来实现.通过刚臂单元将预应力钢束和梁体单元联系起来,无损梁段与斜裂缝区的过渡段可采用两根斜向刚臂单元连接.由于上下弦杆截面特征为刚架,因此,本文称之为平面刚架模型,如图4所示.

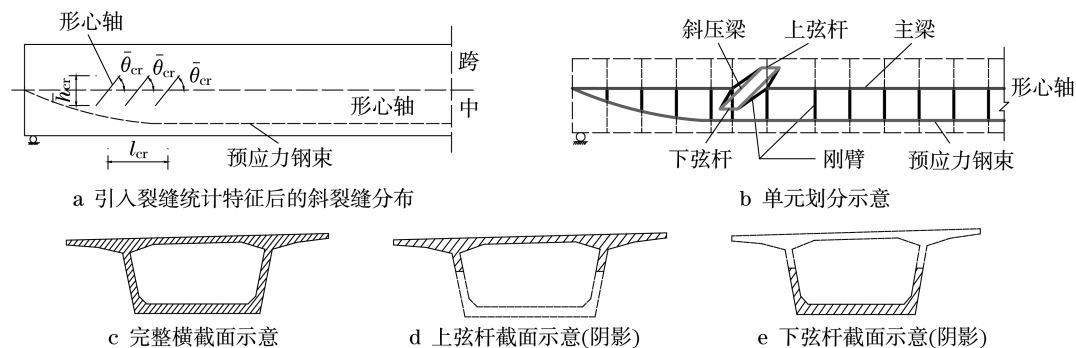


图4 平面刚架模型建立示意图

Fig.4 Plan rigid frame model

按照上述斜裂缝区单元离散方法,将斜裂缝区域离散化,从而建立如图4b所示的平面刚架模型.上、下、斜杆按照引入裂缝统计特征后的离散单元特征计入相应的几何特征.

3 预应力混凝土箱梁开裂后刚度和承载力的折减

3.1 刚度折减系数 α

若截面的初始抗弯刚度为 $E_c I_0$,开裂后的抗弯刚度记为 $\alpha E_c I_0$,则折减系数可由开裂截面受压区边缘的压应变 ϵ_c 和开裂截面受压区边缘的拉应变 ϵ_t 来表达.由截面弯曲曲率 $\varphi = \frac{\epsilon_c - \epsilon_t}{h}$,组合计算弯矩 $M_j = \alpha \varphi E_c I_0$ 可得到

$$\alpha = \frac{M_j}{\varphi E_c I_0} \quad (8)$$

式中: α 为截面抗弯刚度折减系数; φ 为截面弯曲曲率; ϵ_c 为开裂截面受压区边缘的压应变; ϵ_t 为开裂截面受拉区边缘的拉应变; $E_c I_0$ 为全截面抗弯刚度, E_c 为混凝土弹性模量; I_0 为截面抗弯惯矩.

3.2 承载力折减系数 β

本文以压区边缘应力的变化量来间接反映结构正常使用性能的变化,即以混凝土受压区边缘的最大压应力为判断的标准,对开裂结构逐步加载,当开裂应力状态下混凝土压区边缘的最大压应力值等于

设计状态下混凝土压区边缘压应力时停止计算,此时开裂结构对应的外荷载值 F_{kl} 定义为开裂结构的条件承载力.因此,承载力折减系数 β 为

$$\beta = F_{kl} / F_{sj} \quad (9)$$

式中: β 为承载力折减系数; F_{sj} 为开裂前桥梁结构的设计荷载; F_{kl} 为开裂后桥梁结构对应于设计状态的开裂服务荷载.

4 简支预应力箱梁开裂损伤后承载力评估示例

某单箱单室截面简支箱梁模型,计算跨径 770 cm,梁高 40 cm,C50 混凝土,配置两束 $7\Phi_5^s$ 低松弛钢绞线,标准强度 1 860 MPa,公称直径 15.24 mm,弹性模量 $E_y = 1.95 \times 10^5$ MPa.为达到试验目的,按照部分预应力混凝土 B 类构件建立结构预应力状态,经过低频反复荷载 20 万次作用得到模型箱梁开裂状态.限于篇幅,本文只给出计算结果,具体计算过程详见文献[9].

按照本文提出的正裂缝统计方法建立裂缝统计参数,建立拉区名义拉应力状态,进行截面非线性迭代求解,得到刚度折减系数 $\alpha = 0.64$,承载力折减系数 $\beta = 77.8\%$.此时,跨中截面下缘实测应力 3.01 MPa,理论应力 3.09 MPa;上缘实测应力 -2.71 MPa,理论应力 -2.72 MPa;跨中截面实测挠度 2.74 mm,理论挠度 2.79 mm;实测裂缝开展规律与理论

计算受压区高度变化趋势一致. 各级荷载 P 下的跨中挠度 f 与截面边缘应力 σ 变化规律如图 5 所示.

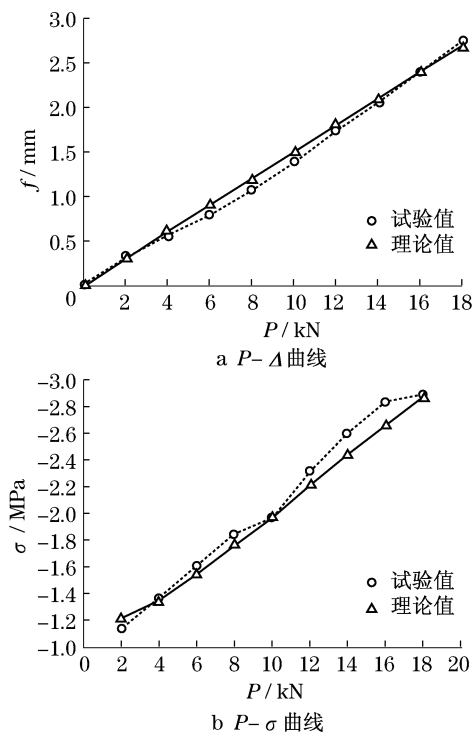


图 5 荷载作用下模型梁应力与挠度变化曲线

Fig.5 Curves of stress and deflection of model beam under test load

计算表明, 结构开裂使得简支箱梁抗弯刚度明显减小, 在内力不变的前提下, 控制截面压区的应力增大. 若以设计状态为参考标准, 则结构上的作用荷载仅为设计服役荷载的 77.8%.

5 结论

(1) 通过构造两类损伤模型, 采用刚度折减和引入平面刚架模型的方法, 提出基于裂缝统计特征的损伤预应力混凝土箱梁计算模型, 引入截面刚度折减系数 $\alpha = \frac{M_j}{\phi E_c I_0}$ 和承载力折减系数 $\beta = F_{kl}/F_{sj}$, 建立了开裂预应力混凝土箱梁承载力评估方法.

(2) 工程初步应用结果表明, 所提出的基于裂缝统计参数的开裂预应力混凝土箱梁桥承载力评估方法是可行的, 可以用来对弯曲段和剪弯段开裂预应力箱梁进行刚度状态和正常使用阶段的安全性评价. 评价方法不仅可以用于静定的预应力混凝土结构, 而且可以用于超静定预应力混凝土梁式结构.

(3) 在役预应力混凝土箱梁桥开裂损伤影响因素众多, 开裂形式复杂, 对其进行受力性能分析难度很大. 本文引入主要裂缝参数, 提出两类损伤模型的构建方法, 采用平面有限元的方式对在役预应力混凝土箱梁桥开裂损伤后的承载力评价方法进行了探讨, 虽然引入的一些基本假定与实际情况有所偏差, 但对初步建立损伤预应力混凝土结构安全评估体系具有较大的参考价值.

参考文献:

- [1] Santiago Rodriguez. Design of long span concrete box girder bridges challenges and solutions[C]//Proceedings of the 2004 Structures Congress—Building on the Past: Securing the Future. Nashville TN USA:ASCE,2004:361-371.
- [2] Rafael Manzanarez, Miroslav Olmer. Parrotts ferry bridge retrofit[R]. [S.l.]:International,1994.
- [3] 王法武, 石雷飞. 大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制研究[J]. 中外公路, 2006, 26(4):107.
WANG Fawu, SHI Leifei. Control method for the longstanding deformation of large span prestressed concrete beam bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(4):107.
- [4] 谢峻, 王国亮, 郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1):47.
XIE Jun, WANG Guoliang, ZHENG Xiaohua. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(1):47.
- [5] 张峰, 叶见曙. 预应力混凝土梁开裂后的结构行为[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(4):584.
ZHANG Feng, YE Jianshu. Structure behavior of cracked prestressed concrete beam[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(4):584.
- [6] Kwak H G, Kim S P. Nonlinear analysis of RC beam subject to cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(12):1436.
- [7] Karabinis A I, Kiousis P D. Plasticity model for reinforced concrete elements subjected to overloads [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11):1251.
- [8] 赵煜, 任伟, 李春风, 等. 预应力混凝土简支箱梁裂缝损伤参数影响分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2):58.
ZHAO Yu, REN Wei, LI Chunfeng, et al. Parameter influence analysis of existing simply-supported box girder bridge based on feature[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2010, 30(2):58.
- [9] 于晓光. 预应力混凝土箱梁开裂模型试验研究[D]. 西安: 长安大学土木工程学院, 2007.
YU Xiaoguang. The cracked model test study of pre-stressed concrete box girder[D]. Xi'an: Chang'an University. School of Civil Engineering, 2007.