

PC 多梁式梁的横向受力非线性分析

张 剑¹, 叶见曙², 艾 军¹, 周储伟¹, 石杏喜³

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016, jianzhang78@126.com; 2. 东南大学 交通学院, 南京 210096; 3. 南京理工大学 理学院, 南京 210094)

摘 要: 为研究破坏全过程中预应力钢筋应力变化、主梁和横隔板裂缝发展及其对荷载横向受力分布的影响, 建立 PC 多梁式梁的计算模型, 利用弥散裂缝模型等来描述混凝土的材料非线性性能, 根据 PC 多梁式梁的结构受力机理和受力特点, 设计了中载加载和偏载加载工况, 并对横向受力性能指标进行相应的计算分析和综合评价. 研究表明: 建立的 PC 多梁式梁力学计算模型是正确的, 主梁和横隔板开裂顺序与荷载布置方式有关, 中载作用下横隔板先于主梁开裂, 偏载作用下主梁先于横隔板开裂; 横隔板开裂削弱整体横向联系, 使主梁协同受力性能减弱, 荷载横向分布趋于不利变化; 预应力钢筋应力在结构处于弹性阶段增长缓慢, 其后应力迅速发展直至屈服.

关键词: PC 多梁式梁; 力学性能; 非线性; 壳单元; 弥散裂缝模型

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)12-1967-05

Nonlinear analysis on mechanical performance of PC multi-girder structures under lateral loading

ZHANG Jian¹, YE Jian-shu², AI Jun¹, ZHOU Chu-wei¹, SHI Xing-xi³

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China, jianzhang78@126.com; 2. College of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A computational model is studied to analyze the mechanical performance of PC multi-girder structure, which includes the propagation of cracks within the beam and diaphragm, the cracking pattern, the distribution of transverse loads and the stress redistribution in the prestressed steels. In the study, the nonlinearity of concrete material is described by using smeared crack model and other corresponding criteria. According to the mechanical characteristics of PC multi-girder structure, two typical loadcases defined as symmetric loadcase and offset loadcase are designed and then the lateral mechanical performances are analyzed and clarified in detail. Numerical results testify that the computational model is correct and the occurrence of cracks is closely related with the disposal of the acted loads. When subjected to symmetric loads, the PC multi-girder structure firstly produces cracks in its diaphragm and then in its beam; under offset loads, the crack appears earlier in the beam than in the diaphragm. Cracks in the diaphragm weaken the transverse connections between the beams, which leads to unfavorable change of the transverse loads distribution. The stress in the prestressed bar increases slowly in the elastic stage and then fast until the yielding stress is reached.

Key words: PC multi-girder structure; mechanical performance; nonlinearity; shell element; smeared crack model

收稿日期: 2009-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472045, 10772078);
国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z106);
江苏省交通科学研究计划项目(09Y012).

作者简介: 张 剑(1978—), 博士, 讲师.

在公路与城市道路中, 中小跨径桥梁占的比例很大, 基本上都是采用钢筋混凝土和预应力混凝土梁板式桥. 除了一些小跨径桥采用整体板外,

绝大部分采用多梁式梁结构,即在一孔跨中由多根主梁组成上部结构^[1-3].对于 PC 多梁式梁桥的受力性能评估,目前常采用结构承载力检算方法和荷载试验方法.一般基于桥梁结构设计理论进行结构检算.多梁式梁的主梁按弹性进行荷载效应计算和组合,而主梁的承载力按结构承载能力极限状态计算.从桥梁设计方法来看,对于车辆等活载作用是借助于荷载横向分布理论和梁板内力影响线,将内力分配到某一根主梁上,对最不利荷载效应组合的主梁,进行设计配筋计算.在活载作用下,由于荷载横向分布不均匀而使各主梁实际受力不一致,多梁式梁达到极限承载力而破坏时,主梁一般不会同时达到相应的极限承载力^[4].多梁式梁的横向受力性能研究一直受到国内外学者普遍重视^[5-6],文献[7]对纤维增强材料筋多梁式梁进行了受力分析,文献[8]开创性地进行了一个五梁式梁有机玻璃模型试验,对结构处于弹性状态的荷载横向分布性能进行了系统研究.其后荷载横向分布计算理论逐渐发展趋于成熟,目前主要有梁格系法、板梁系法和各向异性板法等计算方法,但这些方法均是针对主梁和横隔板均处于未开裂的弹性阶段而言的,而实际桥梁由于设计等级偏低或超重车辆作用常常会使桥梁处于带裂缝工作^[9-10].因此,多梁式梁通过横隔板横向联系形成整体结构来承受荷载,从开始受力直至破坏全过程中,结构各部件的受力状态变化及相互影响也需要进一步研究,目前这方面的研究成果未见正式报道.

本文研究了 PC 多梁式梁在不同荷载作用下,主梁和横隔板的裂缝发展及横隔板出现受力裂缝对主梁荷载横向分布影响等规律,具体研究了荷载横向分布系数的变化规律,为工程设计提供参考.

1 材料模型

1.1 混凝土受拉非线性模型

混凝土由于抗拉强度较低而易出现裂缝,表现出较强的受拉非线性,裂缝的正确处理是钢筋混凝土结构分析的关键问题,也是较难处理的问题.弥散裂缝模型认为混凝土某单元(实际上为某点)的主拉应力或主拉应变超过混凝土的极限抗拉强度或极限拉应变,则认为单元(这一点的附近区域)开裂,且认为在整个单元(这一点的附近区域)内出现无数条平行的微小裂缝,裂缝方向垂直于主拉应力,开裂并不影响材料的连续性,因此可继续按连续介质处理,只是将开裂单元处

理为正交异性材料.该模型只需将材料本构矩阵加以修正,无需改变单元形式或重新划分单元网格,具有一定的计算精度,且易于非线性有限元程序的实现.因此本文采用弥散裂缝模型模拟混凝土的受拉非线性.

混凝土在产生破裂面之前,在拉应力下呈现弹性变形,其开裂受制于最大拉应力准则.当最大主应力达到了规定的混凝土抗拉应力 f_t 时,就会在垂直于最大主应力的平面内产生裂纹.裂纹出现后,垂直于裂纹面方向的弹性模量减小,同时采用开裂的剪切模量.对于壳单元,若取 1 和 2 分别表示结构面开裂坐标系的 2 个方向,则在 1 方向开裂混凝土的本构关系式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12}^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{13}^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当在 2 方向的拉伸应力达到 f_t 时,就会形成垂直于第一个开裂面的另一开裂面,其本构关系式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{12}^c}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{13}^c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为结构面开裂坐标系 1 方向和 2 方向的正应力; τ_{12} 、 τ_{13} 和 τ_{23} 为结构面开裂坐标系中剪应力; ε_1 、 ε_2 为结构面开裂坐标系中正应变; γ_{12} 、 γ_{13} 和 γ_{23} 为结构面开裂坐标系中剪应变. E 为 2 方向未开裂混凝土的弹性模量.混凝土开裂后由于裂面存在拉伸刚化效应,故存在裂面抗拉弹性模量 E_1 和 E_2 ;同时混凝土裂面存在骨料咬合作用,开裂的混凝土粗糙表面可以传递相当大的剪应力^[11],可分别用开裂剪切模量 G_{12}^c 、 G_{13}^c 和 G_{23}^c 予以描述.

1.2 混凝土受压非线性模型

混凝土的压碎断裂由应变控制,Owen 双参数压碎模型表达式为

$$F(I'_1, J'_2) = (\alpha I'_1 + 3\beta J'_2)^{1/2} = \varepsilon_u \quad (3)$$

式中: I'_1 为应变张量第一不变量; J'_2 为应变偏量第二不变量; ε_u 为混凝土极限压应变; α 、 β 为材料参数,由单轴抗压试验和双轴等压试验标定.混凝土屈服准则、流动法则见文献[12].

1.3 钢筋材料模型

PC 多梁式梁中钢筋包括普通钢筋和预应力钢筋. 钢筋的材料非线性均采用双折线弹塑性模型模拟, 其中弹塑性模量 $E_p = \lambda E_s$, 其中 E_s 是钢筋的弹性模量, λ 为钢筋弹性模量折减系数. 本文中钢筋和混凝土之间处理为完全粘结, 普通钢筋和预应力钢筋在非线单元中分别采用层单元和组合单元来实现, 具体表达式见文献[13].

2 PC 多梁式梁横向受力

2.1 实桥分析

文献[14]进行了沪宁高速公路一座 PC 多梁式梁的全过程试验研究. 多梁式梁由 6 片单梁组成(如图 1 所示), 沿纵向设有 5 道横隔板(2 道端横隔板, 3 道中横隔板). 桥梁所用材料为 50 号混凝土和强度级别为 1 600 MPa 高强钢丝. 采用在现场整体拼装式大型钢模板预制施工, 孔道采用金属波纹管成型. 桥梁支座采用板式橡胶支座. 试验采用图 2 所示的钢材加载方案, 以确保试验顺利进行. 同时为提高加载效率, 采用偏载加载方式. PC 多梁式梁是典型的工程薄壁结构, 钢筋弹性模量折减系数 λ 取为 0.01, 建立相应的计算模型. 文献[13]结合全过程试验资料, 对非线性壳单元计算结果进行了详细研究, 本文根据文献[15]模拟车轮的中载和偏载加载方式, 对 PC 多梁式梁的主梁和横隔板开裂顺序、横隔板开裂后主梁荷载横向分布系数变化等横向受力性能展开研究.

2.2 横向受力分析

分别采用图 3 和图 4 所示的中载加载和偏载加载方式. 中载加载时外加荷载作用于主梁 G3 和主梁 G4 上, 偏载加载时外加荷载作用于主梁 G1 和主梁 G2 上, 其中加载点均为主梁肋板和顶板的交点处. 各加载点每级加载量 p 为 5 t, 每级共加载 20 t.

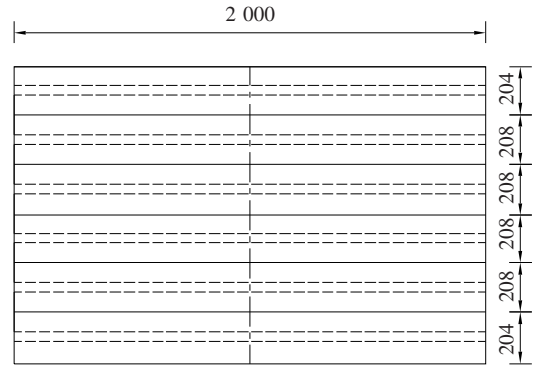


图 1 PC 多梁式梁的尺寸布置(mm)

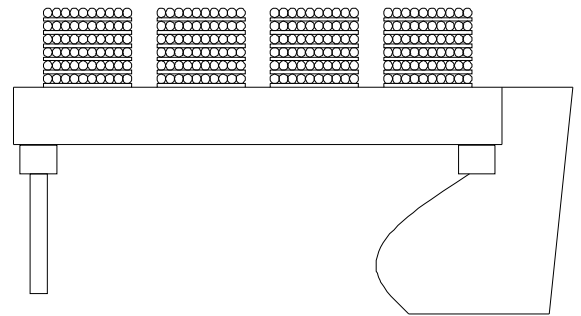


图 2 PC 多梁式梁的偏载加载

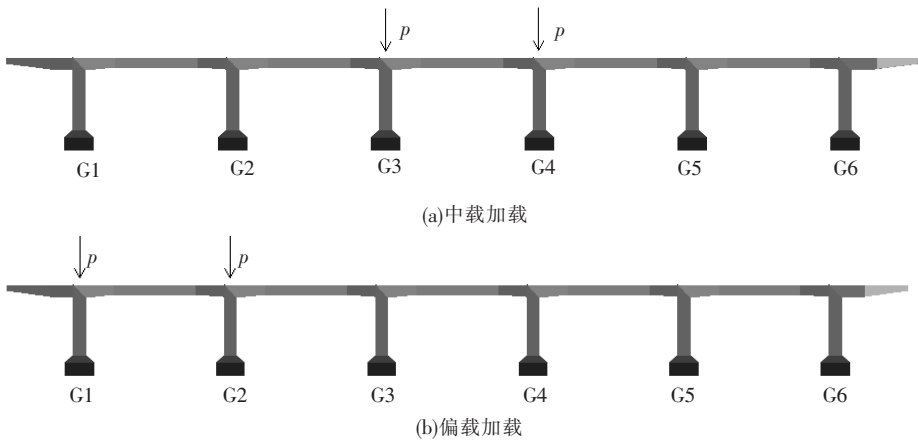


图 3 两种工况的加载方式(截面视图)

由非线性组合壳单元计算程序, 可得到两种工况下在破坏全过程中, 各主梁梁底预应力钢筋应力随加载等级的变化, 如图 5 所示. 本文采用文献[8]计算荷载横向分布系数的方法, 可得两种工况下各主梁的荷载横向分布系数的变化趋势,

如图 6 所示. 主梁和横隔板的开裂顺序及出现裂缝位置见表 1.

由图 5 分析可知, 中载加载时, 主梁 G3 和主梁 G4 的梁底预应力钢筋在加载第 28 级时同时屈服; 直至加载第 30 级结构破坏, 其余 4 根主梁

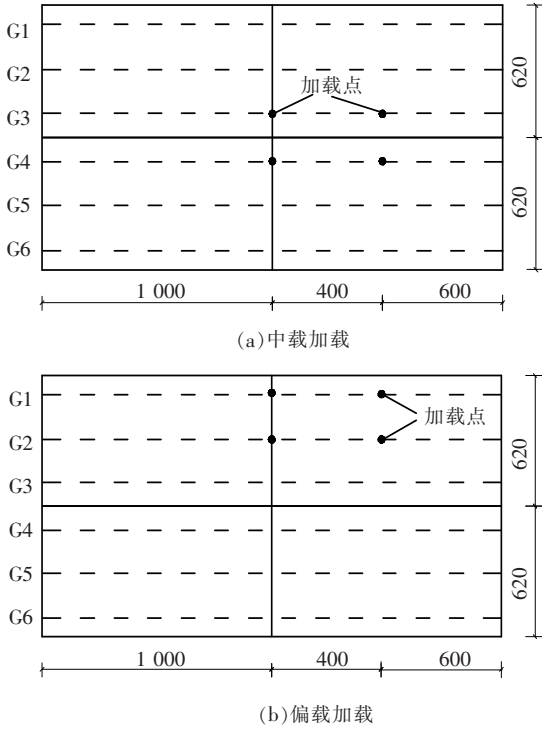


图 4 两种工况的加载方式平面视图(mm)

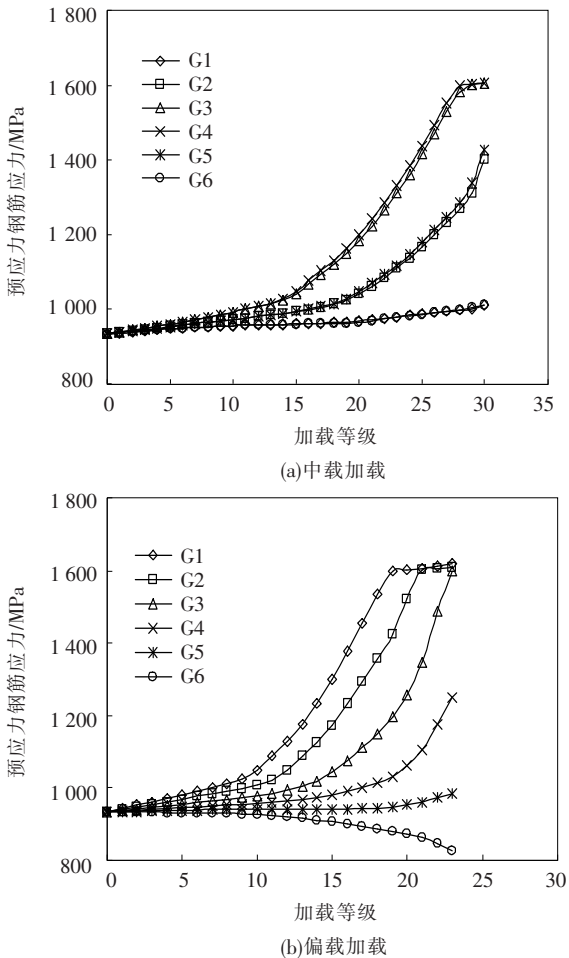


图 5 预应力钢筋应力变化曲线

的预应力钢筋均未屈服。偏载加载时,主梁 G1 预应力钢筋应力增加较为迅速;在加载第 19 级,主

梁 G1 的预应力钢筋首先屈服,其后主梁 G2 和主梁 G3 的预应力钢筋在加载第 21 级和第 23 级也相继屈服,直至加载第 23 级结构破坏时,其余 3 根主梁的预应力钢筋均未屈服。

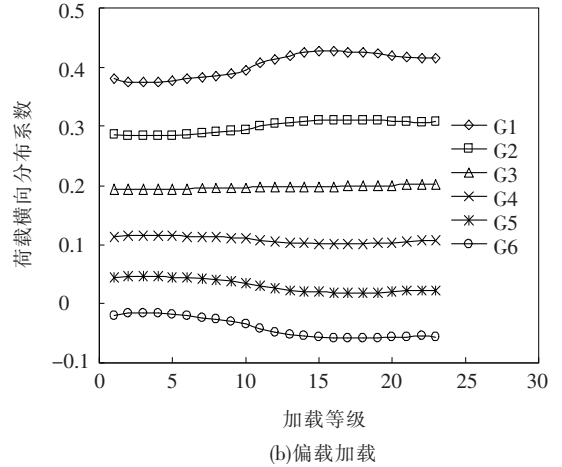
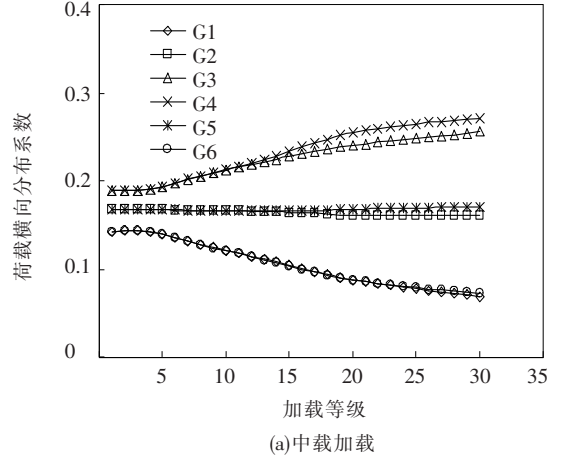


图 6 荷载横向分布系数变化曲线

表 1 主梁和横隔板开始出现裂缝的顺序和位置

加载方式	位置	加载等级	力学现象	裂缝位置
中载加载	主梁	14	开裂	G3;G4
	横隔板	3	开裂	G3—G4
	预应力钢筋	28	屈服	G3、G4
偏载加载	主梁	9	开裂	G1
	横隔板	11	开裂	G1—G2
	预应力钢筋	19	屈服	G1

由图 6 和表 1 的结果分析可知:1)中载加载时,在加载第 3 级,主梁 G3—G4 之间横隔板开始出现裂缝,此时主梁完好均未开裂;在加载第 14 级,主梁 G3 和主梁 G4 跨中开始出现裂缝,横隔板先于主梁开裂,这时由于横隔板起到重要的横向联系作用,各主梁协同受力较平均,使得主梁出现裂缝较晚。2)偏载加载时,在加载第 9 级,偏载处主梁 G1 跨中开始出现裂缝,横隔板均未开裂;在加载第 11 级,此时主梁 G1—G2 之间的横隔板开始出现裂缝,主梁先于横隔板出现裂缝,此时尽

管横隔板起到一定的横向联系作用,但由于偏载作用使得边梁分得荷载过大,故边梁首先出现受力裂缝. 3) 从图 6 曲线变化趋势可以看出,对于 PC 多梁式梁,横隔板起着重要的横向联系作用,横隔板开裂使得主梁荷载横向分布系数趋于不利变化,同时 PC 多梁式梁整体协同受力性能减弱. 4) 相对于中载加载而言,偏载加载时横隔板出现开裂较迟,横向联系破坏程度相对较弱,故其荷载横向分布系数劣化程度没有中载加载时严重.

3 结 论

1) PC 多梁式梁的主梁和横隔板的开裂顺序与具体加载方式有关. 中载加载时各主梁协同受力较平均,使得主梁出现裂缝较晚,横隔板先于主梁开裂,而偏载加载时,由于偏载作用使得边梁分得荷载过大,故边梁先于横隔板出现受力裂缝.

2) 主梁预应力钢筋在结构处于弹性阶段应力增长缓慢,其后随着混凝土的开裂,应力增长较为迅速,直至结构破坏. 此时部分预应力钢筋已进入塑性强化阶段.

3) 对于 PC 多梁式梁,横隔板在各主梁间起着重要的横向联系作用. 横隔板的开裂使得主梁荷载横向分布系数趋于劣化,不利于 PC 多梁式梁整体协同受力. 因此,不仅要重视主梁出现受力裂缝,横隔板出现受力裂缝也应予以重视.

参考文献:

[1] DARMAWAN M S, STEWART M G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders [J]. *Structural Safety*, 2007, 29(1): 16-31.

[2] JANG I H. Time-dependent nonlinear analysis of curved nonprismatic prestressed concrete box girder bridges [D]. West Lafayette: Prudue University, 2003.

[3] DENG L Z, MICHEL G, ALES Z, *et al.* Nonlinear flexural behavior of prestressed concrete girder bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(4):

276-284.

[4] 汪光庐. 整体多片式 T 梁结构空间分析 [D]. 上海: 同济大学, 2002.

[5] HAMED E, FROSTIG Y. Free vibrations of cracked prestressed concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(11): 1611-1621.

[6] 李海生. 多梁式混凝土梁桥的有限元模型修正技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2009.

[7] PADMARAJAIAH S K, RAMASWAMY A. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2002, 24(2): 229-241.

[8] 李国豪, 石洞. 公路桥梁荷载横向分布计算 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 1987.

[9] YANG Z J, CHEN J F. Fully automatic modeling of cohesive discrete crack propagation in concrete beams using local arc-length methods [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(3/4): 801-826.

[10] 张剑, 叶见曙, 余波. 基于 Ottosen 准则的 PC 多梁式梁桥全过程分析 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(9): 24-29.

[11] HINTON E, OWEN D R J. *Finite element software for plates and shells* [M]. Swansea: Pineridge Press Ltd, 1984.

[12] 方自虎, 孙臻. 钢筋混凝土结构的三维有限元非线性分析 [J]. *计算力学学报*, 2006, 23(3): 377-380.

[13] 张剑, 黄剑峰, 叶见曙, 等. 多肋式梁桥在全过程中应力重分布研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(10): 1656-1661.

[14] 张宇峰. 沪宁高速公路扩建工程桥梁极限状态实桥试验研究 [R]. 南京: 江苏省交通科学研究所, 2006.

[15] SONG H W, YOU D W, BYUN K J, *et al.* Finite element failure analysis of reinforced concrete T-girder bridges [J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(2): 151-162.

(编辑 魏希柱)