

# 钢筋混凝土拱桥构件重要性评价及 超载导致倒塌破坏模拟

卢 啸, 陆新征, 叶列平, 何水涛

(清华大学 土木工程系 土木工程安全与耐久教育部重点实验室 北京 100084)

**摘要:** 针对近年来频频发生的拱桥倒塌事故,以某钢筋混凝土拱桥为例,建立相应的有限元模型,采用基于广义刚度的构件重要性评价方法分析拱桥各构件的重要性,指出保证结构安全的关键部位。利用清华大学开发的TECS程序模拟拱桥因超载导致倒塌的过程,其仿真结果可供拱桥倒塌事故原因分析和抗倒塌能力评定参考。

**关键词:** 拱桥;重要性评价;超载;倒塌;TECS

中图分类号: U448.34; U447; TB115 文献标志码: A

## Component importance evaluation and overload-induced collapse simulation for reinforced concrete arch bridge

LU Xiao, LU Xinzheng, YE Lieping, HE Shuitao

(Key Lab. of Civil Eng. Safety & Durability of China Education Ministry, Dept. of Civil Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**Abstract:** As to the fact that collapse accidents of arch bridges happened frequently in recent years, a finite element model is built for a typical reinforced concrete arch bridge, and the importance of the arch bridge components are evaluated by component importance evaluation method based on generalized structural stiffness, so that the critical regions for arch bridge safety are identified. The process of collapse induced by overloading is simulated using the program of TECS developed by Tsinghua University. The simulation results of overloading collapse can provide references for the cause analysis of arch bridge collapse and collapse resistance capacity evaluation of arch bridge.

**Key words:** arch bridge; importance evaluation; overload; collapse; TECS

## 0 引言

拱桥的发展历史悠久,是桥梁的基本体系之一,具有跨越能力大、外形美观等特点。在条件允许的情况下,修建拱桥往往经济、合理。

近年来,由于种种原因,拱桥倒塌事故屡屡发生,造成重大的人员伤亡和经济损失。<sup>[1]</sup>2001年11月,四川省宜宾市的宜宾南门大桥发生悬索及桥面断裂事故,桥两端同时塌陷,1辆公交车和1辆出租车掉入长江,致2人死亡、2人受伤;2005年11月,

收稿日期: 2010-06-23 修回日期: 2010-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(50808106);交通运输部西部交通建设科技项目(2008-318-223-43)

作者简介: 卢 啸(1986—),男,湖南常德人,博士研究生,研究方向为结构非线性分析与防灾减灾,(E-mail) x-lu08@mails.tsinghua.edu.cn;  
陆新征(1978—),男,安徽芜湖人,副教授,博士,研究方向为结构非线性分析与防灾减灾,(E-mail) luxz@tsinghua.edu.cn

务川县务彭公路上正在施工的珍珠大桥悬拼钢拱架突然垮塌,19名现场施工人员落入河谷,致16人死亡、3人重伤;2007年8月,湖南省湘西土家族苗族自治州凤凰县在建的堤溪沅江大桥在拆除拱圈支架时,瞬间发生坍塌,致64人死亡、22人受伤,直接经济损失3974.7万元。

通过对倒塌过程的模拟,深入研究倒塌机理,确定关系桥梁结构安全的关键部位,对指导桥梁设计和施工、减少工程事故具有重要意义。本文以某钢筋混凝土拱桥为例,采用基于广义刚度的构件重要性评价方法分析拱桥各构件的重要性,并指出关键部位。利用清华大学开发的TECS程序模拟拱桥因超载倒塌的过程,其结论可供拱桥倒塌事故原因分析和抗倒塌能力评定参考。

## 1 桥梁及有限元模型

某钢筋混凝土组合桁架拱桥立面示意图1,其跨径约为138m,设计载荷为公路I级<sup>[2]</sup>。用MSC Marc建立钢筋混凝土桁架拱桥的有限元模型。由于该桁架组合式拱桥的主拱圈截面以及立柱截面均采用中空的箱形截面,故采用MSC Marc提供的75号厚壳单元模拟,不仅能保证分析精度,而且能直接反映杆件的局部应力分布情况。同时,为尽可能地避免单元畸形带来的计算收敛性问题,采用规则的四边形网格,且单元的宽长比均限定在1:3的范围内。完整的桥梁有限元模型见图2。

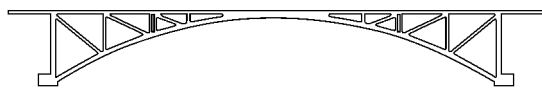


图1 某混凝土组合桁架拱桥立面示意

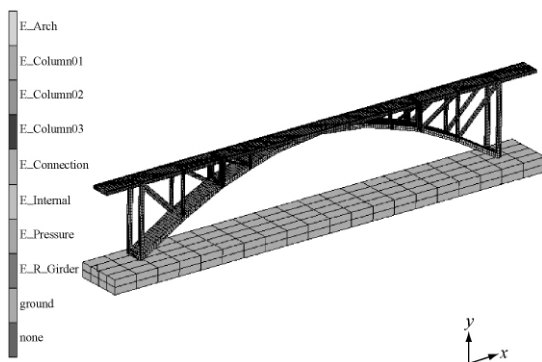


图2 完整的桥梁有限元模型

本文中,车辆仅起到载荷的作用,因此尽可能简化其模型,各种材料本构均采用弹性本构,但车辆的轴重以及轴间距均严格按照《公路桥涵设计通用规范》<sup>[2]</sup>(JTG D60—2004)建模。卡车有限元模型见图3。另外,采用MSC Marc中提供的摩尔库仑接触关系<sup>[3]</sup>模拟卡车与桥面的相互作用关系。

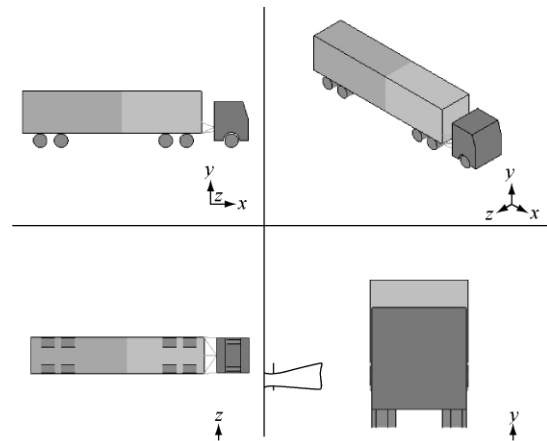


图3 卡车有限元模型

## 2 重要性评价

桥梁结构是由多种结构构件组成的有机整体,不同构件的功能不同,对整个结构安全的贡献程度也不同。结构构件(或子结构)的重要性程度主要体现在其损伤或失效后对整个结构系统的影响程度,而结构构件的重要性评价就是一种确定各个构件(或子结构)重要性程度的方法。结构构件的重要性评价对结构的系统设计及安全鉴定尤其是结构抗连续倒塌能力评价有着重要的指导作用。<sup>[4]</sup>

大量文献<sup>[5-10]</sup>研究表明,结构构件的重要性评价不仅取决于结构系统自身的力学性能,也取决于作用载荷情况,还与所选取的结构性能的评价指标有关。根据评价中是否考虑载荷作用影响,结构构件重要性评价方法可分为2类:(1)与载荷作用无关的评价方法,这类方法主要评价结构系统的自身属性,从结构系统的拓扑关系和刚度分布分析结构构件的重要性层次,从而获得结构安全性和易损性的信息。柳承茂等<sup>[5]</sup>、胡晓斌<sup>[6]</sup>、NAFDAY<sup>[7]</sup>和AGARWAL等<sup>[8]</sup>从这个方面进行了一些重要性评价方法的研究。(2)与载荷作用相关的评价方法,这类方法既包含结构系统的自身属性,又包含结构上的载荷作用属性(载荷分布、量值和传力路径等)的影响。GHARAIBEH等<sup>[9]</sup>、张雷明等<sup>[10]</sup>和叶列平等<sup>[4]</sup>从这个角度提出重要性评价方法。其中,文献[4]的方法经过多个桥梁工程中的试用,表明其具有便捷可靠的优点<sup>[11]</sup>,故采用文献[4]建议的基于结构广义刚度的重要性指标进行构件的重要性评价,结构广义刚度同时考虑外载荷属性和结构刚度属性,以构件损失所导致的结构广义刚度损失率作为衡量构件在结构中的重要程度指标,其简化后的表达式为

$$I = 1 - \frac{K_f}{K_0} = 1 - \frac{U_0}{U_f} \quad (1)$$

式中： $K_0$  和  $K_f$  分别为结构完整和某构件失效后的结构广义刚度； $U_0$  和  $U_f$  分别为结构完整和某构件失效后的结构总应变能。

考虑到文献[4]提出的重要性指标基于杆系模型，而本文的分析模型是壳单元模型，故单元大小划分不当会使分析得到的结构重要性因数失真。为排除单元划分对重要性因数的影响，对原来的重要性指标进行简单的修正，用原重要性因数  $I$  除以单元体积  $V$ ，得单位体积重要性因数

$$\Gamma = \left(1 - \frac{U_0}{U_f}\right) / V \quad (2)$$

利用式(2)，通过在模型中逐个删除单元计算删除单元前后结构的应变能变化和删除的单元体积，即可得每个单元的重要性指标，其分布见图4。

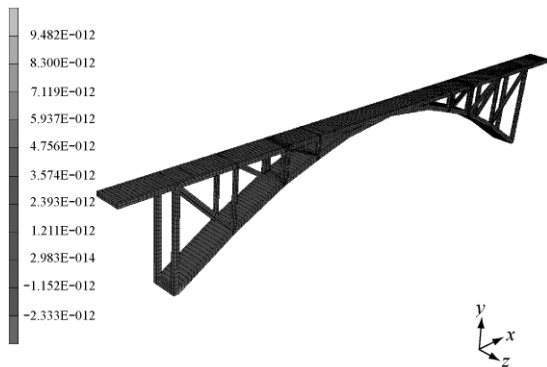


图4 拱桥构件重要性因数分布

将所有单元的重要性指标按降序排列，分别选取累积体积百分率占前10%（称为“最重要部位”）和后10%（称为“最不重要部位”）的单元，其分布见图5，其中：区域1表示前10%的单元，即关键区域；区域2表示后10%的单元。可见，该拱桥的关键区域主要分布在主拱圈拱脚  $L/6$  范围内、拱顶、2根长立柱及2根斜腹杆的两端，这与根据经验判断的结构关键部位相吻合。这些关键区域在设计、施工和正常使用的过程中都应予以特殊关注。

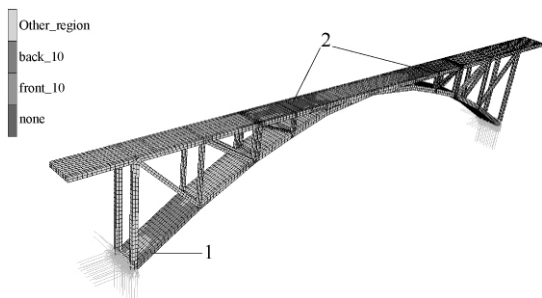


图5 最重要和最不重要部位的单元

### 3 TECS 程序简介

结构的倒塌过程非常复杂，包含几何非线性、材

料非线性和接触非线性等。本文在模拟钢筋混凝土拱桥超载倒塌时采用清华大学在 MSC Marc 上开发的 TECS 程序进行计算分析，主要用到 TECS 程序的分层壳单元模块和生死单元模块。文献[12-14]验证 TECS 程序在结构倒塌分析中的适用性。

#### 3.1 分层壳单元模块

分层壳单元是模拟钢筋混凝土结构的高效单元类型。它基于复合材料力学原理，将1个壳单元划分为很多层（见图6），各层可根据需要设置不同的厚度和材料（混凝土和钢筋等）。在有限元计算时，首先得到壳单元中心层的应变和曲率，然后根据各层材料之间满足平截面的假定，由中心层应变和曲率得到各层的应变，进而由各层材料本构方程得各层相应的应力，并积分得整个壳单元的内力。分层壳单元考虑面内弯曲、面内剪切和面外弯曲之间的耦合作用，较全面地反映壳体结构的空间力学性能，非常适用于模拟薄壁截面组成的钢筋混凝土桥梁。

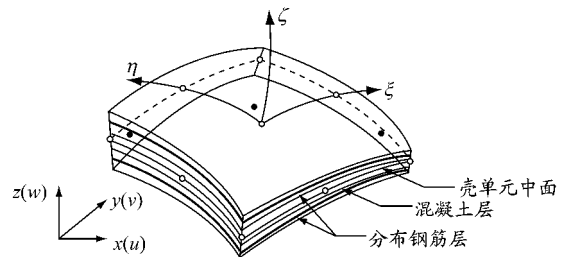


图6 分层壳单元

比较基于分层壳单元 T 梁（见图7）和基于实体单元 T 梁（见图8）的计算结果。基于分层壳单元建模，混凝土、分布钢筋（包括顶板横向钢筋和腹板箍筋等）采用分层壳单元；基于实体单元建模，混凝土采用六面体单元，分布钢筋（包括顶板横向钢筋、腹板箍筋等）采用 MSC Marc 自带的 3D Rebar 单元<sup>[3]</sup>。

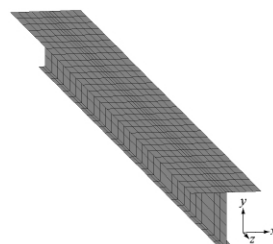


图7 分层壳单元 T 梁

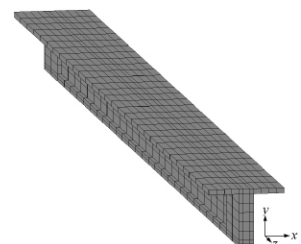


图8 实体单元 T 梁

图9为实体单元和分层壳单元模型的载荷一位移曲线对比，可知2种建模方法的计算结果相差不大，相对误差在5%以内；分层壳模型的单元和节点数量远小于实体单元，计算效率较高。

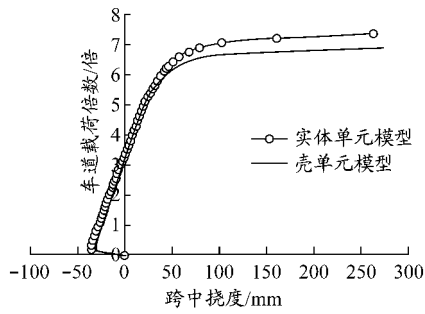


图 9 载荷—位移曲线对比

### 3.2 生死单元模块

在结构倒塌破坏过程中, 构件将破碎断裂, 整个结构也从 1 个连续体过渡到 1 个散粒体. 为模拟上述破坏过程, 采用 TECS 程序中的“生死单元”模块, 由于 TECS 程序中的构件模型都直接基于材料本构关系, 故可根据材料的失效准则控制单元失效, 即当材料变形超过一定水平时才将单元删除, 不再参与结构刚度阵和质量阵的集成, 这样, 单元的失效标准更加明确. TECS 程序可根据研究的需要自由设定单元的失效准则, 在本文中, 如果单元内所有钢筋应变超过拉断应变或所有混凝土达到压碎应变且钢筋压曲, 则删除相应单元.

### 4 超载倒塌过程模拟

标准车的总轴重为 55 t, 为模拟超载工况, 特意将模型中的标准车后 4 轴轴重增加 1 倍, 形成总轴重为 107 t 的特重卡车, 并由 5 辆特重卡车组成的车队驶上桥梁构成超载工况, 见图 10.

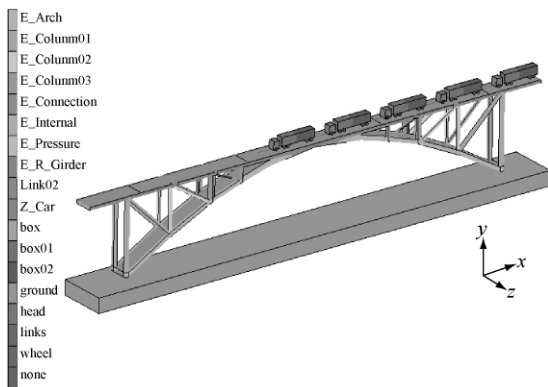


图 10 超载工况

当车队开上桥梁后, 右侧第 1 榀桁架斜腹杆由于受较大的轴力作用, 最先达到屈服, 同时右侧主拱拱脚出现受压屈服 (见图 11(a)), 与石拱桥有所不同, 钢筋混凝土拱桥具有一定的延性, 可实现内力重分布, 在斜腹杆屈服后, 结构并未马上倒塌. 当车队完全开上桥梁后, 在  $t = 6.9$  s 时桥梁右侧拱脚开始

出现混凝土压坏现象, 见图 11(b). 由图 4~5 的构件重要性评价可知, 拱脚是非常重要的构件, 拱脚一旦开始破坏, 整个结构的安全性将受到极大影响. 实际模拟结果也表明, 在拱脚压坏后桥梁开始进入倒塌状态.

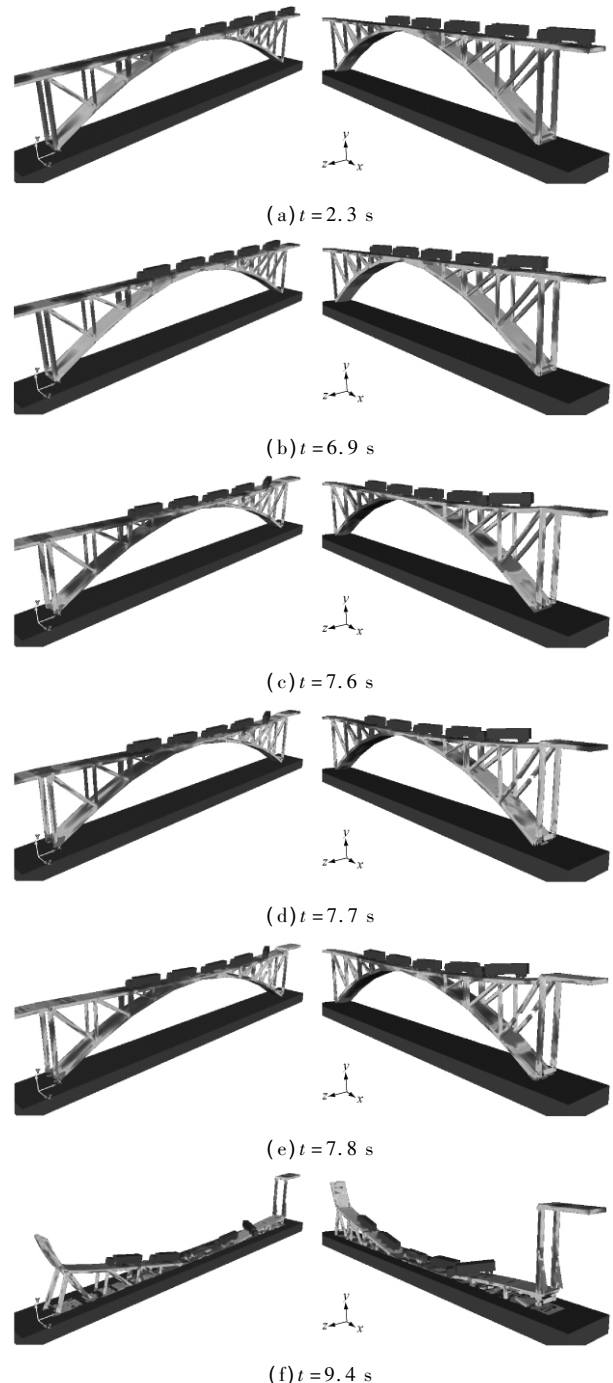


图 11 超载倒塌过程模拟

倒塌的具体过程为:

- (1) 随着最右侧拱脚的压坏和斜腹杆的屈服 (见图 11(b)), 整个桁架拱最右侧榀已基本没有抗剪承载力, 所有剪力都集中于顶部主梁内, 于是右侧桥面主梁发生剪坏 (见图 11(c));
- (2) 然后右侧第 1 榀斜腹杆由于拉伸变形太

大,达到钢筋的拉断应变,出现腹杆拉断现象(见图11(d));

(3)随着主拱变形的增加,左侧拱脚在轴力和附加弯矩的共同作用下开始发生破坏(见图11(e));

(4)最后整个桥梁完全倒塌破坏(见图11(f)).

由上述分析可知,在超载工况下斜腹杆的承载力储备最小,最先发生屈服.由于斜腹杆的构件重要性地位较低(见图4~5),且结构具备一定的内力重分布能力,桥梁并不立即倒塌.之后拱脚发生压碎,

由于拱脚的重要性很高,故桥梁马上进入倒塌过程.

## 5 结论

本文对钢筋混凝土拱桥进行结构重要性评价及超载倒塌过程的模拟,得以下结论:

(1)由文献[4]的重要性评价方法得到的钢筋混凝土拱桥的关键区域与实际工程经验较吻合,且评价方法简便易行,无需复杂的非线性有限元计算;

(2)基于非线性有限元分析可有效地模拟钢筋混凝土拱桥的倒塌过程,并理解倒塌破坏的机理.

## 参考文献:

- [1] 陈明宪. 从凤凰堤溪大桥事故谈石拱桥[J]. 公路工程, 2008, 33(3): 1-9.
- [2] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] MSC. Software. Manual of MSC Marc: Volume A: Theory and user information[K]. 2005: 25-27.
- [4] 叶列平, 林旭川, 曲哲, 等. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 1-6.
- [5] 柳承茂, 刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 746-750.
- [6] 胡晓斌. 新型多面体空间刚架结构抗连续倒塌性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [7] NAFDAY A M. System safety performance metrics for skeletal structures[J]. J Struct Eng, 2008, 134(3): 499-504.
- [8] AGARWAL J, BLOCKLEY D, WOODMAN N. Vulnerability of 3-dimension trusses[J]. Struct Safety, 2001, 23(3): 203-220.
- [9] GHARAIBEH E S, FRANGOPOL D M, ONOUFRIOU T. Reliability-based importance assessment of structural members with applications to complex structures[J]. Computers & Structures, 2002, 80(12): 1113-1131.
- [10] 张雷明, 刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 45-49.
- [11] LU Xiao, LU Xinzhen, YE Lieping. A Preliminary Study on the Application of Computer Simulation in the Progressive Collapse of Bridges[C]// Int Conf Computing in Civil & Building Eng, UK: Univ of Nottingham, 2010.
- [12] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(S): 131-140.
- [13] 林旭川, 陆新征, 缪志伟, 等. 基于分层壳单元的RC核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 51-56.
- [14] 陆新征, 叶列平, 缪志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 271-278.

(编辑 陈锋杰)

(上接第25页) 得添加钢纤维层的界面平均剪应力较无钢纤维层的大约减小一半,从而增强各材料之间的变形协调性.

MFRP具有高强度、抗腐蚀性、高延展性和界面协调性好等优点,从根本上解决单一材料或HFRP

锚杆的脆性问题,使锚杆在突变载荷或岩体流变作用下不会发生脆性断裂,有一定的后续承载能力.在岩土工程锚固系统中,用MFRP锚杆替代传统锚杆有重要的潜在应用价值.

## 参考文献:

- [1] 黄志怀, 李国维, 王思敬, 等. 不同围岩条件玻璃纤维增强塑料锚杆结构破坏机制现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1008-1018.
- [2] 李明, 张起森, 何唯平. FRP锚杆的研究与应用综述[J]. 中外公路, 2005, 25(6): 140-143.
- [3] YOU Young-jun, PARK Young-hwan, KIM Hyeong-yeol, et al. Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions[J]. Composite Structures, 2007, 80(2): 117-122.
- [4] 郑百林, 李伟, 张伟伟, 等. 增强混凝土中FRP包覆筋研究(I): 微结构设计[J]. 复合材料学报, 2004, 21(1): 33-37.
- [5] CUI Yihua, TAO Jie. A new type of ductile composite reinforcing bar with high tensile elastic modulus for use in reinforced concrete structures[J]. Can J Civil Eng, 2009, 36(6): 672-675.
- [6] 徐新生, 郑永峰. FRP筋力学性能试验研究及混杂效应分析[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(6): 705-710.

(编辑 陈锋杰)