

钢管混凝土柱- 钢梁平面框架的滞回关系

王文达^{1,2}, 韩林海²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 为研究钢管混凝土框架抗震性能, 进行了钢管混凝土柱- 钢梁平面框架往复加载时荷载- 位移滞回关系的计算。考虑了材料和几何非线性, 基于非线性纤维梁- 柱单元理论, 在OpenSees 求解平台上, 建立了数值计算模型。核心混凝土的应力- 应变关系考虑了钢管约束效应; 钢材的应力- 应变关系采用双线性强化模型。结果表明: 在钢材强度为 235~ 420MPa、混凝土强度为 30~ 90MPa 范围内, 理论计算结果和试验结果吻合较好。

关键词: 钢管混凝土柱; 框架; 材料非线性; 几何非线性; 滞回性能

中图分类号: TU 398

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2009)12-1934-05

Hysteresis relationship in concrete filled steel tubular columns and steel beam planar frames

WANG Wenda^{1,2}, HAN Linhai²

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2 Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The hysteresis relationship in concrete-filled steel tubular (CFST) frames during seismic loads was analyzed for composite frames having CFST columns and H-shape steel beams. The model was based on fiber nonlinear beam-column element theory and the OpenSees Software, nonlinear material and geometric conditions to simulate the hysteresis of the reverse lateral loading versus the lateral displacement. The stress-strain relationship of the confined core concrete was considered, with a bilinear stress-strain model with strain hardening for the steel. The numerical results agree well with experimental results with steel yield strength of 235- 420MPa and concrete cube compression strength of 30 - 90MPa.

Key words: concrete filled steel tubular (CFST) column; frame; material nonlinear; geometric nonlinear; hysteretic behavior

有重要的理论意义和应用价值。对钢管混凝土柱- 钢梁框架抗震性能研究主要集中在试验研究方面, 理论研究相对较少^[1- 3], 且主要集中在单调加载情况, 对其滞回曲线的理论计算较少, 且多采用梁单元, 对于钢管混凝土中钢管和混凝土的相互作用和框架的非线性特征并不能很合理地进行模拟。钢管混凝土框架在往复荷载下的滞回计算涉及到合理的材料本构模型的选取、钢材和混凝土的加卸载准则、非线性方程的求解策略等问题, 需要考虑几何和材料双重非线性, 并应合理地考虑钢管和混凝土之间的相互作用。

本文基于非线性纤维梁- 柱单元理论, 建立了综合考虑几何和材料非线性的数值计算模型。考虑相应的加卸载准则, 基于OpenSees^[4]求解平台进行了钢管混凝土柱- 钢梁平面框架往复加载时荷载- 位移滞回曲线的计算。

1 非线性纤维梁- 柱单元理论模型

非线性纤维梁- 柱单元理论中将结构构件沿长度离散为梁柱单元, 并将结点处截面划分成纤维单元, 结点处的变形通过数值积分获得, 每一荷载步更新坐标以使增量荷载变形响应能充分描述二阶效应。由于纤维划分得很小, 单元内的残余应力可假定为常数, 因此可以直接跟踪纤维单元内的应力状态以反映塑性的发展。当某单元形心处正应力达到材料单轴应力强度, 即认为此单元屈服。该方法中必须对非线性方程组的迭代算法进行优化, 否则将存在耗时多及计算效率低的缺点, 因此寻求相同理论基

收稿日期: 2008-12-26

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目
(20070003087);

甘肃省高等学校研究生导师科研项目 (0703B-05)

作者简介: 王文达(1976—), 男(汉), 甘肃, 博士后。

E-mail: wangwd@lut.cn

通讯联系人: 韩林海, 教授, E-mail: lhhan@tsinghua.edu.cn

钢管混凝土柱与钢梁框架结构是钢管混凝土结构中常用的结构形式之一, 深入研究其抗震性能具

础的求解平台来解决计算效率尤为关键。本文通过 OpenSees^[4]平台来进行钢管混凝土框架的滞回曲线计算。

1.1 基本假定

本文采用的基本假定为:

- 1) 截面的应变状态符合平截面假定;
- 2) 核心混凝土与钢管之间应变协调;
- 3) 剪切变形很小, 可以忽略不计;
- 4) 不考虑出平面外的荷载与位移。

1.2 单调加载时材料模型

进行钢管混凝土框架滞回计算时, 核心混凝土单轴受压应力- 应变关系采用文[5]中考虑钢管约束效应的核心混凝土应力- 应变关系, 受拉混凝土的应力- 应变关系也采用该文中模型。单调荷载下的低碳软钢, 应力- 应变关系采用二次塑流模型, 高强钢材采用双线性强化模型, 具体表达可参见文[5]。

1.3 往复加载时材料模型

混凝土应力- 应变滞回曲线的骨架线基本上接近于其单向加载时的曲线, 因此本文中暂以文[5]中考虑钢管约束效应的核心混凝土单轴应力- 应变曲

线代替其滞回曲线的骨架线。

采用OpenSees 系统中Concrete02 模型模拟钢管混凝土柱中核心混凝土, 可考虑混凝土具有线性软化的受拉应力- 应变关系。Concrete02 模型的输入参数为: 混凝土受压峰值强度 f_c 及对应应变 ϵ_0 , 破坏应力 σ_{cu} 及应变 ϵ_{cu} , 混凝土抗拉强度 f_t 及受拉曲线中线性下降段的斜率 E_{ct} , 以及卸载段斜率 E_u 等, 如图 1a 所示。受拉曲线下降段的斜率 $E_{ct} = 0.1E_c$, E_u 主要反映了卸载时混凝土的刚度退化, 可取 $E_u = 0.1E_c$ ^[4]。

采用OpenSees 中双线性随动强化模型Steel02 模型模拟钢管和钢梁, 该模型在往复荷载下应力- 应变曲线由弹性段和强化段组成, 如图 1b 所示, 其中强化段模量取值为 $0.01E_s$, E_s 为钢材弹性模量, 加卸载刚度采用初始弹性模量 E_s ^[4]。

1.4 单元的离散

采用OpenSees 程序中的非线性纤维梁柱单元来模拟钢管混凝土框架中的钢梁及框架柱。框架单元离散, 柱及梁截面的单元划分如图 2 所示, 当柱构件为对称截面时可取一半截面。图 2 中下角标 s, c 分别代表钢管及混凝土微单元, i 表示当前微单元。

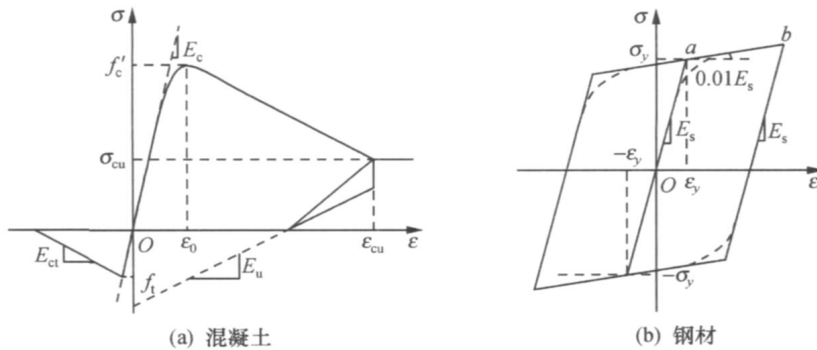


图1 往复荷载下材料应力- 应变关系 (OpenSees 平台)

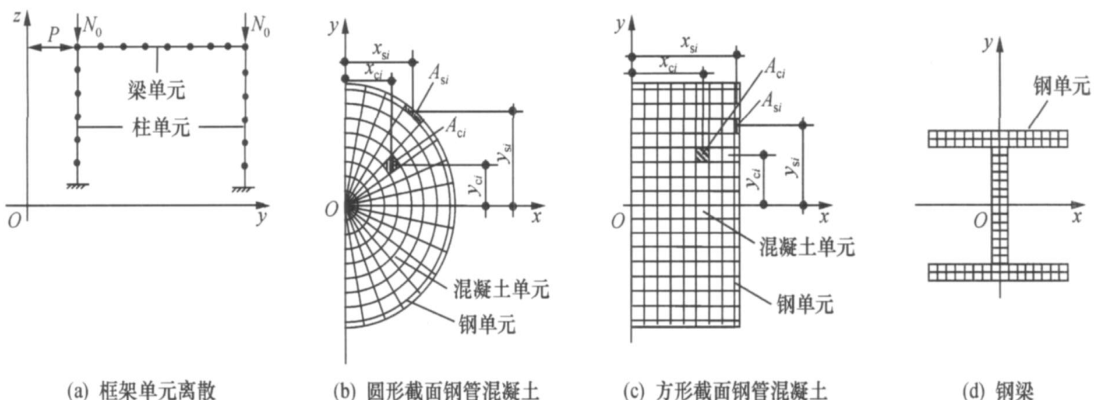


图2 钢管混凝土框架及构件的纤维梁- 柱单元截面划分

1.5 非线性方程的建立

钢管混凝土框架的非线性分析可分别在截面层次和单元纵轴层次上分别建立有限元表达式进行求解。如图2a所示离散后的框架中的梁-柱单元, 结点处截面又划分为一系列的材料纤维单元, 每个单元的几何特性由其面积和 y 坐标(即距形心轴的距离)定义。假定在每个纤维单元内(如果面积足够小)应力均匀分布, 大小与单元中心的应力相同, 方向沿杆件轴线, 这样材料纤维单元内的应力-应变全曲线即可采用图1所示的材料本构模型来描述。

确定了微单元形心的几何特性和相应的材料切线模量, 然后利用求得的材料切线模量和相应的单元几何特性确定各个单元的贡献, 最后将各单元的贡献迭加, 从而获得截面切线刚度矩阵^[2]。按照以上方法可得到截面线性刚度方程为

$$\begin{Bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_c \begin{Bmatrix} \epsilon_0 \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

表示成矩阵形式为

$$\sigma = D \epsilon \quad (2)$$

式中: $A = \iint dA$, 为材料截面的面积; $S_y = \iint y dA$, 为材料截面对 y 轴的面积矩; $S_z = \iint z dA$, 为材料截面对 z 轴的面积矩; $J_{yy} = \iint y^2 dA$, 为材料截面对 y 轴的惯性矩; $J_{zz} = \iint z^2 dA$, 为材料截面对 z 轴的惯性矩; $J_{yz} = \iint yz dA$, 为材料截面的极惯性矩; E 为单元材料的弹性模量, 下标 s 和 c 分别代表钢管单元和混凝土单元。

则钢管混凝土截面线性刚度矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_c \quad (3)$$

当钢管混凝土中钢管和混凝土的应力-应变关系为非线性时, 可采用类似于切线刚度矩阵 D 的形式表达钢管混凝土截面的非线性刚度矩阵:

$$D_t = \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_c$$

$$\begin{bmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EJ_{yy} & -EJ_{yz} \\ ES_y & -EJ_{yz} & EJ_{zz} \end{bmatrix}_c \quad (4)$$

式中: $EA = \iint E_t(y, z) dA$, $ES_y = \iint E_t(y, z) y dA$, $ES_z = \iint E_t(y, z) z dA$, $EJ_{yy} = \iint E_t(y, z) y^2 dA$, $EJ_{zz} = \iint E_t(y, z) z^2 dA$, $EJ_{yz} = \iint E_t(y, z) yz dA$ 。

当 $E_t(y, z) = E$ 为常数时, 式(4)与式(3)形式相同, 即非线性刚度矩阵退化为线性刚度矩阵。当材料为非线性时, $E_t(y, z)$ 不是常数, 此时式(4)中的各个系数需由数值积分求得。此时在截面上采用合成法, 将每个单元的贡献采用直接迭加, 在单元长度方向采用六点 Gauss-Labotto 积分法^[2, 4]。

钢梁为单一材料, 其非线性刚度矩阵在上述方程中只需考虑相应的钢单元即可。

1.6 方程的求解

钢管混凝土柱-钢梁框架结构荷载-位移滞回曲线的计算过程可归纳如下:

- 1) 将钢管混凝土框架中的梁、柱构件离散为非线性纤维梁-柱单元, 并划分结点处截面的纤维单元, 确定模型信息、边界条件等, 单元离散方式如图2所示;
- 2) 确定材料模型中的相关输入参数;
- 3) 求解钢管混凝土截面的线性刚度矩阵 D , 如式(3)所示, 建立其线性刚度方程;
- 4) 求解钢管混凝土截面的非线性刚度矩阵 D_t , 如式(4)所示, 采用数值积分方法确定其参数并建立其非线性刚度方程;
- 5) 调用OpenSees求解平台, 采用位移增量法求解非线性方程, 进行框架的滞回计算;
- 6) 结果后处理, 得到框架的荷载-位移滞回曲线。

OpenSees系统通过脚本编程语言Tcl语言来定义所分析问题的几何模型及材料模型, 非线性方程组的求解方法等。本文选用Newton-Raphson法求解器^[4]。

2 算例验证

2.1 钢管混凝土压弯构件滞回曲线计算

为验证本文数值计算方法, 进行了不同轴压比时钢管混凝土压弯构件的荷载(P)-位移(Δ)滞回曲线计算, 并与文[5]中的数值方法进行了对比, 2种方法的计算结果总体上吻合较好。图3给出部分算例, 图中 N_0 为柱轴力。算例的基本条件为: 圆柱

截面, 直径 $D = 400\text{mm}$, 壁厚 $t = 4\text{mm}$; 方柱截面, 边长 $B = 400\text{mm}$, 壁厚 $t = 4\text{mm}$, 计算长度 $L_0 = 3000\text{mm}$, C60 混凝土, Q345 钢材。

2.2 钢管混凝土框架滞回曲线计算

采用OpenSees 对有关研究者完成的钢管混凝土框架的 $P-\Delta$ 滞回曲线进行了计算, 钢梁为工字形, 算例的基本参数如表1 所示。图4 为文[6- 8]中部分框架实测 $P-\Delta$ 滞回曲线与理论计算曲线的对比。

可见二者总体上吻合较好, 表明本文理论模型可较好地预测钢管混凝土柱- 钢梁框架的 $P-\Delta$ 滞回曲线。为便于对比, 将文[2]中采用非线性有限元计算得到文献[6- 8]试件的单调加载 $P-\Delta$ 曲线也列于图4 中。可见本文计算方法得到的滞回曲线的骨架线趋势和有限元计算的单调荷载 $P-\Delta$ 曲线也总体上吻合良好。

表1 算例框架试件的参数汇总

试件编号	跨度/m × 高度/m	柱截面		钢梁截面		柱钢材强度 f_y/MPa	混凝土强度 f_c/MPa	梁钢材强度 f_y/MPa	柱轴压力 N_0/kN	文献
		直径或边长/mm × 壁厚/mm	$H/\text{mm} \times B/\text{mm} \times t_w/\text{mm} \times t_f/\text{mm}$							
30SCC	1.5 × 1.0	125 × 5.8	125 × 150 × 16 × 25	403.3	18.55	400.0	200	[6]		
CFST1	1.8 × 1.2	∅219 × 8.0	140 × 80 × 5.5 × 9.1	331.6	24.06	331.6	400	[7]		
CF-12	2.5 × 1.45	∅140 × 2.0	150 × 70 × 3.44 × 3.44	327.7	35.45	303.0	205	[8]		
CF-22	2.5 × 1.45	∅140 × 3.34	160 × 80 × 3.44 × 3.44	352.0	35.45	303.0	273	[8]		
SF-11	2.5 × 1.45	120 × 3.46	160 × 80 × 3.44 × 3.44	404.0	35.45	303.0	285	[8]		
SF-22	2.5 × 1.45	140 × 4.0	180 × 80 × 4.34 × 4.34	361.0	35.45	361.6	375	[8]		

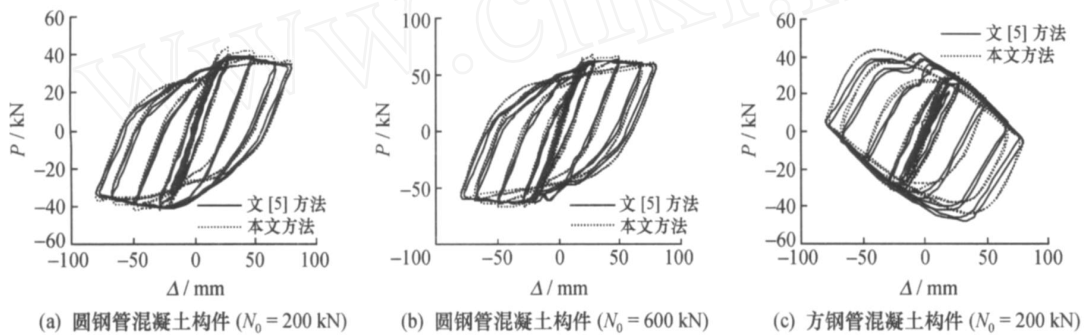
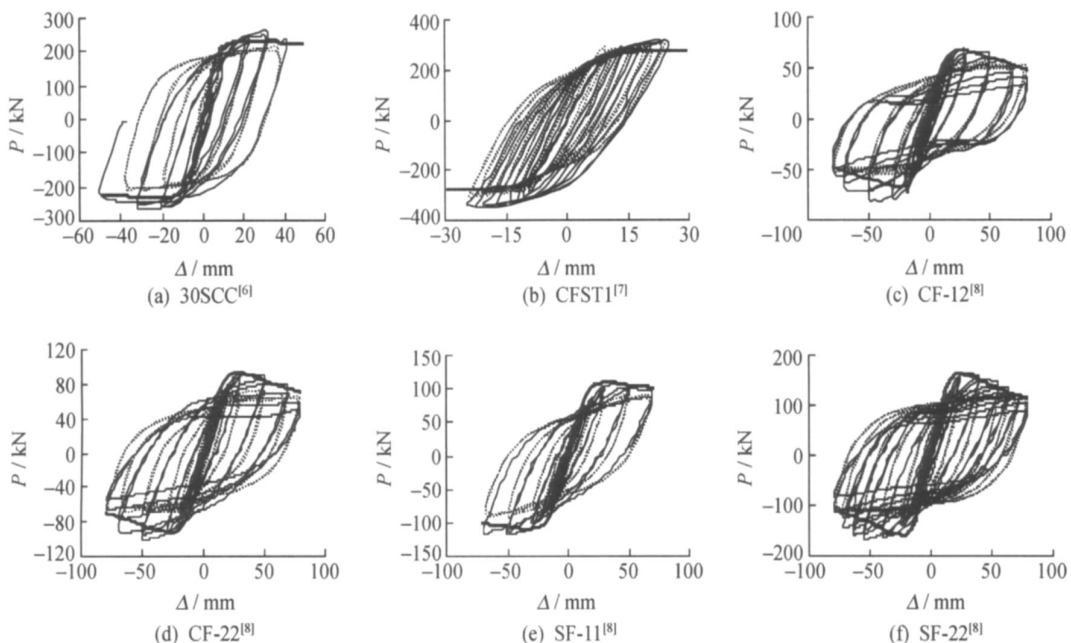


图3 钢管混凝土压弯构件 $P-\Delta$ 滞回曲线对比



实线为试验曲线, 虚线为本文理论计算曲线, 粗实线为文[2]计算的单调加载曲线

图4 框架理论与试验 $P-\Delta$ 滞回曲线比较

3 结 语

理论计算结果得到了试验研究的验证。和试验结果的比较结果表明,本文方法在钢材强度 $f_y = 235 \sim 420 \text{ MPa}$, 混凝土强度 $f_{cu} = 30 \sim 90 \text{ MPa}$ 范围内均可取得较为满意的计算结果。本文的数值计算方法可为进一步进行钢管混凝土框架滞回性能分析和动力时程分析等提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 张文福 单层钢管混凝土框架恢复力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000
ZHANG Wenfu. Research on resilience performance of single floor concrete-filled steel tubular frame [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000 (in Chinese)
- [2] 王文达, 韩林海 钢管混凝土框架力学性能的非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 75 - 83
WANG Wenda, HAN Linhai. Nonlinear finite element analysis on mechanics performance of concrete filled steel tubular frame [J]. *J Building Struct*, 2008, 29(6): 75 - 83 (in Chinese)
- [3] HAN Linhai, WANG Wenda, ZHAO Xiaoling. Behaviour of steel beam to concrete-filled SHS column frames: Finite element model and verifications [J]. *Eng Struct*, 2008, 30(6): 1647 - 1658

- [4] Mazzoni S, McKenna F, Fenves GL, et al. Open system for earthquake engineering simulation user manual (Ver. 1. 7. 0) [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley, 2006
- [5] 韩林海 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 第2版 北京: 科学出版社, 2007.
HAN Linhai. Concrete-Filled Steel Tubular Structures: Theory and Application [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [6] Kawaguchi J, Morino S, Sugimoto T. Elasto-plastic behavior of concrete-filled steel tubular frames [C]//Proc Eng Foundation Conf on Steel and Concrete Composite Construction III, ASCE, New York, USA, 1997: 272 - 281.
- [7] 李斌, 薛刚, 张园 钢管混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 53 - 56
LI Bin, XUE Gang, ZHANG Yuan. Experimental study on behaviors of concrete filled steel tubular frame [J]. *Earthquake Eng and Eng Vibration*, 2002, 22(5): 53 - 56 (in Chinese)
- [8] 王文达, 韩林海, 陶忠 钢管混凝土柱- 钢梁平面框架抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 48 - 58
WANG Wenda, HAN Linhai, TAO Zhong. Experimental research on seismic behaviour of concrete-filled CHS and SHS columns and steel beam planar frames [J]. *J Building Struct*, 2006, 27(3): 48 - 58 (in Chinese)

(上接第1933页)

3 结 论

本文研究了箱形截面钢- 混凝土连续组合梁桥的荷载横向分配规律。通过理论分析、有限元模型计算并结合现场实测,总结了箱形组合梁桥的荷载横向分配规律,指出采用考虑箱梁组合梁抗扭刚度的修正偏心压力法来计算连续组合箱梁桥的荷载横向分配系数较为合理且偏于安全,而横向联系梁对组合梁桥荷载横向分配系数的影响不大。本文成果可供设计此类桥梁参考。

参考文献 (References)

- [1] 范立础 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989
FAN Lichu. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 1989 (in Chinese)
- [2] 贺栓海, 谢仁物 公路桥梁荷载横向分布计算方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996
HE Shuanhai, XIE Renwu. Calculation Method of Lateral Load Distribution in Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 1996 (in Chinese)
- [3] 丘皓 对箱形组合梁设计计算方法的一点看法[J]. 湖南交通科技, 2000, 26(3): 54 - 55

- QIU Hao. Suggestions for design of box-section composite steel-concrete girder [J]. *Hunan Traffic Technology*, 2000, 26(3): 54 - 55 (in Chinese)
- [4] 白宝玉, 王丽荣 桥梁工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005
BAI Baoyu, WANG Lirong. Bridge Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005
- [5] 邵旭东, 顾安邦 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
SHAO Xudong, GU Anbang. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004 (in Chinese)
- [6] Zokaie T. AASHTO-LRFD live load distribution specifications [J]. *J Bridge Eng*, 2000, 5(2): 131 - 138
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Standard specifications for highway bridges [S]. Washington, 1996
- [8] Bakht B, Moses F. Lateral distribution factors for highway bridges [J]. *J Structural Eng*, 1988, 114(8): 1785 - 1803
- [9] 聂建国 钢- 混凝土组合梁结构: 试验、理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004
NIE Jianguo. Steel-Concrete Composite Beam Structure: Tests, Principles and Applications [M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD bridge design specifications [S]. Washington, 1998
- [11] Tarhini K M, Frederick G R. Lateral load distribution in I-girder bridges [J]. *Computers and Structures*, 1995, 54(2): 351 - 354