

# 侧向冲击对钢管混凝土受压承载力影响研究

章琪<sup>1\*</sup> 蒋庆<sup>2</sup> 陆新征<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 为研究侧向冲击作用对钢管混凝土结构性能的影响, 首先基于 ABAQUS 的非线性有限元静态、动态计算方法, 采用实体、壳体单元对钢管混凝土结构受压承载力及受侧向撞击后的变形进行了数值模拟, 数值模拟结果与已有试验结果吻合较好。同时为了验证准静态计算方法的有效性, 采用静态、准静态计算对受撞击前钢管混凝土结构的受压承载力进行了模拟, 模拟结果同样吻合良好, 且准静态计算降低了分析难度。最后用准静态计算方法给出了构件受撞击后剩余受压承载力的拟合计算公式。结果表明: 撞击速度越大, 构件局部变形越大, 屈服荷载越低; 约束效应系数为影响钢管混凝土构件抗冲击性能的重要因素, 拟合计算公式具有一定的参考价值。

**关键词** 工程结构, 剩余受压承载力, 有限元法, 侧向冲击, 钢管混凝土

## Lateral Impact Effects on the Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tubes

ZHANG Qi<sup>1\*</sup> JIANG Qing<sup>2</sup> LU Xinzheng<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** To study the compressive performance of concrete filled steel tubes (CFSTs) after lateral impact, the CFSTs were modeled with shell and solid elements. Deflections and compressive strength were analyzed by using ABAQUS/Standard and ABAQUS/Explicit respectively. Simulation results agree well with experimental data. The compressive strengths of CFSTs before impact obtained by the quasi-static method and static method were compared. The results indicate that the quasi-static method can be used to effectively predict the compressive strengths of CFSTs with less computational difficulties. Finally, the formula to calculate the residual compressive strength of impacted CFSTs was proposed based on the computational results. Calculation results show that with the increase of impact speed, deflection increases but yield stress decreases. Confinement is an important factor for CFSTs' impact resistance. The proposed formula can be referred for other engineering projects.

**Keywords** engineering structure, residual compressive strength, finite element analysis, lateral impact, concrete filled steel tube

## 0 引言

钢管混凝土构件具有较高的强度和较好的塑性性能<sup>[1]</sup>, 因此被广泛应用于框架柱、桥墩、设备

支架等工程结构的竖向构件。随着钢管混凝土应用的普及和交通业的迅猛发展, 交通工具撞击钢管混凝土柱的事故也越来越多。据北京市政处桥通所统计<sup>[2]</sup>, 北京市内千所桥梁有将近一半被车辆撞过。此外, 据美国 1966 年至 2005 年统计<sup>[3]</sup>,

收稿日期: 2012-10-10

基金项目: 清华大学自主研究项目(2010THZ02-1, 2011THZ03, 20121087911), 教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-10-0528), 铁道部科技研究开发计划重点课题(2012G003-j)

\* 联系作者, Email: zhangqi@yahoo.com.cn

其中 14% 的桥梁破坏是撞击所造成的,因此,钢管混凝土竖向构件受撞击后的剩余受压承载力研究具有重要的理论价值和现实意义。文献[4]研究表明,钢管构件中部受撞击比靠近支座端受撞击更易破坏,固支支座相对于其他支座能提供更好的抗冲击性能。文献[5]研究表明,钢管混凝土具有很大的截面抗弯性能并能减小非撞击部位破坏。文献[6]提出固支钢管混凝土受撞击简化模型,该模型可以较好地预测构件变形。

本文针对具有良好抗冲击性能的圆形钢管混凝土构件,采用基于 ABAQUS 的非线性有限元方法,分析了侧向冲击力对圆形钢管混凝土受压承载力的影响,提出了撞击后剩余竖向受压承载力的计算公式。其成果可供相关工程设计参考。

## 2 数值模型及验证

本文首先采用静态、动态计算方法对文献

[7 8]中的钢管混凝土受压承载力试验和侧向撞击试验结果做了对比分析。

### 2.1 有限元模型

本文中混凝土采用 ABAQUS 提供的损伤塑性模型,钢材使用基于 von Mises 屈服准则的理想弹塑性模型,混凝土、冲击体用 C3D8R 单元划分,钢管使用 S4R 单元划分,所有构件均使用六面体单元扫略生成网格。对冲击体定义初始速度产生撞击,而后采取位移加载的方法施加轴力来得到结构的极限受压承载力。

### 2.2 数值模型验证

混凝土采用韩林海圆钢管混凝土本构模型<sup>[9]</sup>,损伤塑性参数取自文献[10],其他参数取自文献[7 8]以及《钢筋混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)<sup>[11]</sup>,材料参见表 1。

表 1

试验材料参数

Table 1

Material parameters of concrete – filled steel tubes

构件编号	钢管直径 /mm	钢管厚 /mm	计算长度 /mm	钢管屈服强度 /MPa	混凝土圆柱体抗压强度 /MPa
CU-070	280	4.0	840	272.6	31.15
CU-150	300	2.0	900	341.7	27.23
A1	114	3.5	1 200	274.0	41.00
A2	114	3.5	1 200	274.0	41.00
A3	114	3.5	1 200	274.0	41.00

图 1、图 2 将钢管混凝土轴压荷载—平均纵向应变计算结果与试验结果做了对比,表 2 将冲击力作用下钢管混凝土构件跨中挠度计算结果与试验结果做了比较,可见计算结果与试验结果吻合良好,误差在可接受范围内。

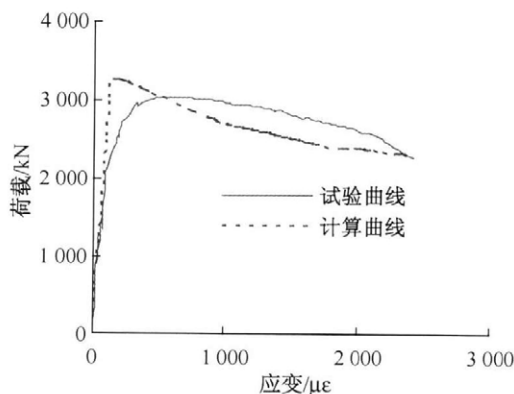


图 1 CU-070 构件试验荷载—应变曲线

Fig. 1 Forces-strain curves of CU-070

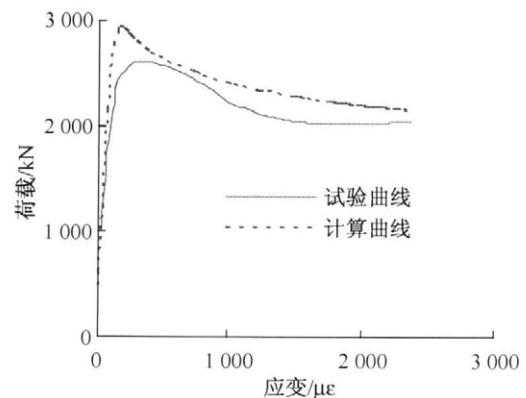


图 2 CU-150 构件试验荷载—应变曲线

Fig. 2 Forces-strain curves of CU-150

## 3 侧向冲击对钢管混凝土受压承载力的影响

### 3.1 有限元模型

数值模拟中混凝土、钢管本构同 2.2 节,其他

参数见表 3 ,钢管混凝土下端固支上端简支。冲击体参数取值参照中国一汽 J5K 平头柴油载货汽车<sup>[12]</sup> ,汽车车头距离地面约为 600 mm ,车头底部至车头前方挡风玻璃以下距离约为 1 000 mm ,

满载时质量为 10 t 左右。因此 ,冲击体设为边长 1 000 mm 的立方体。偏于安全 ,冲击体设定为接近刚体 ,质量取 10.56 t ,冲击体底部距离钢管混凝土柱底固支端 600 mm。

表 2 试验与数值模拟所得跨中挠度对比

Table 2 Comparisons of mid-span deflection between testing and numerical simulation results

来源	构件编号	冲击速度 / ( m · s <sup>-1</sup> )	最大挠度试验值 /mm	最大挠度模拟值 /mm	相对误差
文献[8]	A1	10.8	83.50	89.53	7.22%
文献[8]	A2	12.5	115.50	118.60	2.68%
文献[8]	A3	12.8	122.10	125.50	2.46%

计算构件受撞击后剩余受压承载力时 ,可将模型先在 ABAQUS/Explicit 中完成撞击计算后导入 ABAQUS/Standard 做静力计算 ,或者在 ABAQUS/Explicit 中准静态下完成受压计算。由

于 ABAQUS/Standard 中计算收敛难度较大 ,此后本文在 ABAQUS/Explicit 准静态下完成撞击后的受压计算。

表 3 试材料参数

Table 3 Material parameters of concrete-filled steel tubes

构件编号	钢管直径 /mm	钢管厚 /mm	长度 /mm	钢管屈服强度 /MPa	混凝土圆柱体抗压强度 /MPa	长细比	约束效应系数
B	1000	22	4 928	345	41	19.71	0.91
C	800	16	4 000	345	41	20.00	0.88
D	600	30	4 000	345	41	26.67	2.42
E	400	20	4 000	345	41	40.00	1.11

### 3.2 有限元结果分析

#### 3.2.1 撞击结果分析

构件 B 受到 60 km/h 的速度撞击后塑性应变云如图 3 所示。

撞击使钢管混凝土出现局部破坏与整体变形。局部变形主要集中在被冲击体撞击部位 ,高度略大于冲击体与构件接触高度 ,受撞击部位的钢管和混凝土同时产生较大应力 ,造成钢管屈服 ,混凝土开裂。构件变形使得受撞击面背面受拉 ,在靠近固支支座端钢管产生较大的塑性变形。各构件在受撞击方向最大位移如表 4 所示。

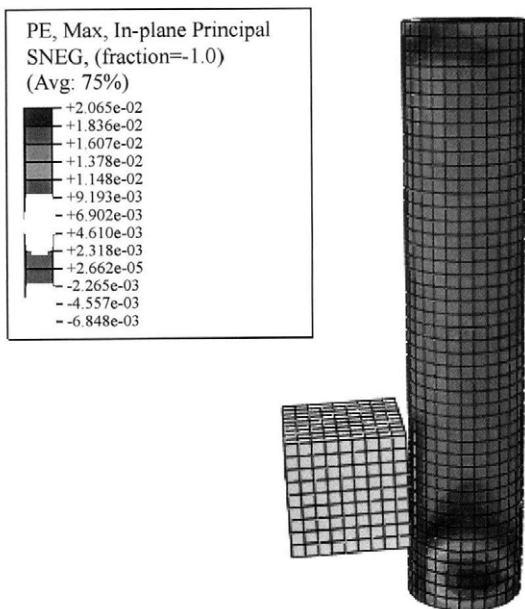


图 3 构件 B 受撞击后塑性应变云图( 60 km/h)

Fig.3 Plastic strain of CFT after impact at 60 km/h

表 4 撞击方向构件最大位移

Table 4 Maximum displacement mm

构件名称	构件 B	构件 C	构件 D	构件 E
60 km/h	28.59	58.36	47.42	138.43
90 km/h	55.50	104.18	96.71	232.39

通过对比构件 B、C、E 位移可得 ,随着构件截面的减小 ,其局部变形增大 ,这是不同构件具有不同侧向刚度造成的结果。对于构件 D ,由于其钢管很厚 ,约束效应系数远大于其他构件 ,从而在一定程度上弥补了长细比过大造成的不足 ,局部变形介于构件 B、C 之间。对于同一个构件而言 ,90 km/h 的撞击速度造成的局部变形几乎均为 60 km/h 撞击速度造成的局部变形的 2 倍。

#### 3.2.2 轴压结果分析

通过比较钢管混凝土柱受撞击前后竖向荷载—应变曲线,可以得到撞击后钢管混凝土受压承载力受影响情况。为了保证准静态模拟的准确性,本文还同时对比了钢管混凝土受撞击之前静态和准静态计算结果(图4—图7)。

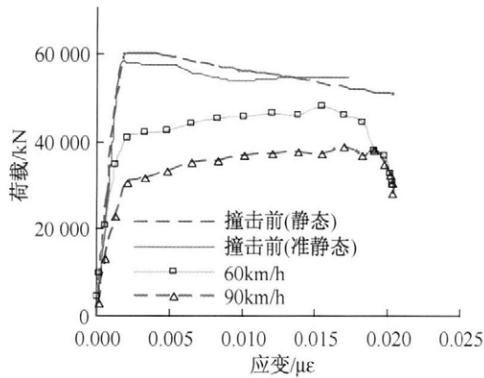


图4 构件B荷载—应变曲线

Fig.4 Force-strain curves of B

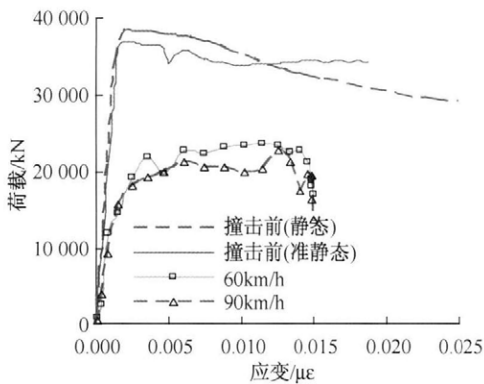


图5 构件C荷载—应变曲线

Fig.5 Force-strain curves of C

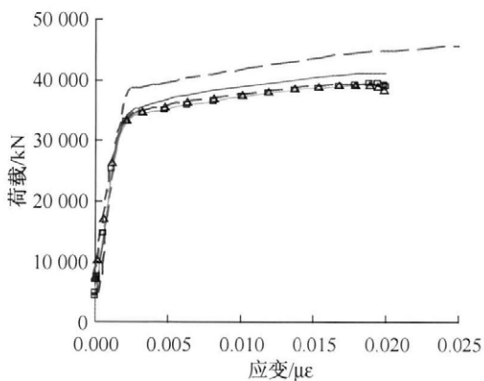


图6 构件D荷载—应变曲线

Fig.6 Force-strain curves of D

撞击前静态和准静态计算结果基本吻合,证明准静态计算方法可行。各构件在受撞击前具有良好的延性,由于构件B、C约束效应系数小于1,

屈服后荷载—应变曲线呈现缓慢下降趋势,构件E、D约束效应系数大于1,屈服后荷载—应变曲线仍有上升段,此结果与文献[9]结论一致。在总体呈弹性阶段时,钢管和混凝土分别单独受力,进入塑性阶段后,由于混凝土裂缝增多,横向变形逐渐增大,当其横向变形系数大于钢管泊松比时,钢管才对混凝土产生约束作用。

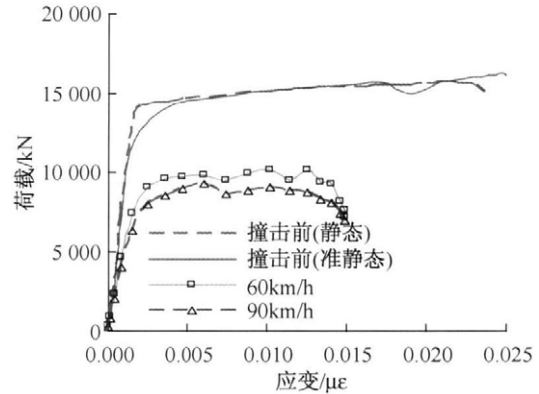


图7 构件E荷载—应变曲线

Fig.7 Force-strain curves of E

构件B、C、E受撞击后屈服荷载均减少三分之一以上,屈服应变也大大减少,均提前达到破坏,撞击速度越大,构件受压承载力损失越多,对结构造成很大的威胁。但构件D由于具有很厚的钢管,表现出良好的抗冲击性能,其屈服荷载几乎没有减少,撞击后受压承载力甚至高于具有最大直径的构件B。

### 3.3 钢管混凝土柱损坏机理

构件C、E受到撞击后,尽管60 km/h的撞击速度产生最大变形仅为90 km/h的撞击速度产生最大变形的50%左右,但两种不同撞击速度对构件受压承载力影响几乎相同,此现象说明整体损伤对构件受压承载力起到主导作用。对于构件B,不同变形造成的受压承载力降低程度有明显差异,说明构件B为局部破坏与整体破坏共同作用。

撞击使钢管混凝土同时产生整体与局部损伤,撞击后受压构件提前进入屈服阶段,延性大大减少,由于撞击已经使混凝土产生裂缝,受压时混凝土横向变形加剧,钢管提前发挥对混凝土的约束作用并且提前屈服。

### 3.4 钢管混凝土柱抗冲击性能影响因素

以钢管混凝土柱剩余受压承载力大小为抗冲击性能优劣评判标准,其性能决定因素为约束效

应系数。在本文算例中,构件 B、C、E 受撞击后混凝土受压承载力降低幅度极大,而钢管受压承载力降低幅度较小,钢管受压承载力几乎决定了构件极限受压承载力;对于构件 D,其钢管和混凝土剩余受压承载力降低幅度则很小。

图 8 是由数据拟合得出不同构件剩余受压承载力与撞击速度的关系。随着撞击速度增加,各构件剩余受压承载力基本成线性降低,构件 D、E 降低幅度较小。

将构件约束效应系数( $\xi$ )、长细比( $\lambda$ )、撞击体质量( $M$ )和撞击速度( $V$ )同时拟合得到剩余受压承载力降低系数 $k$ (式(1)) $k$ 为钢管混凝土受撞击后与撞击前受压承载力比值。

$$k = 1 / (0.097\lambda / \xi)^{0.001MV} \quad (1)$$

式中  $\xi$  范围为 0.91 ~ 2.42;  $V$  范围为 0 ~ 100 km/h;  $\lambda > 10.4\xi$ ;

此表达式可供工程参考。拟合结果与有限元计算结果见表 5。

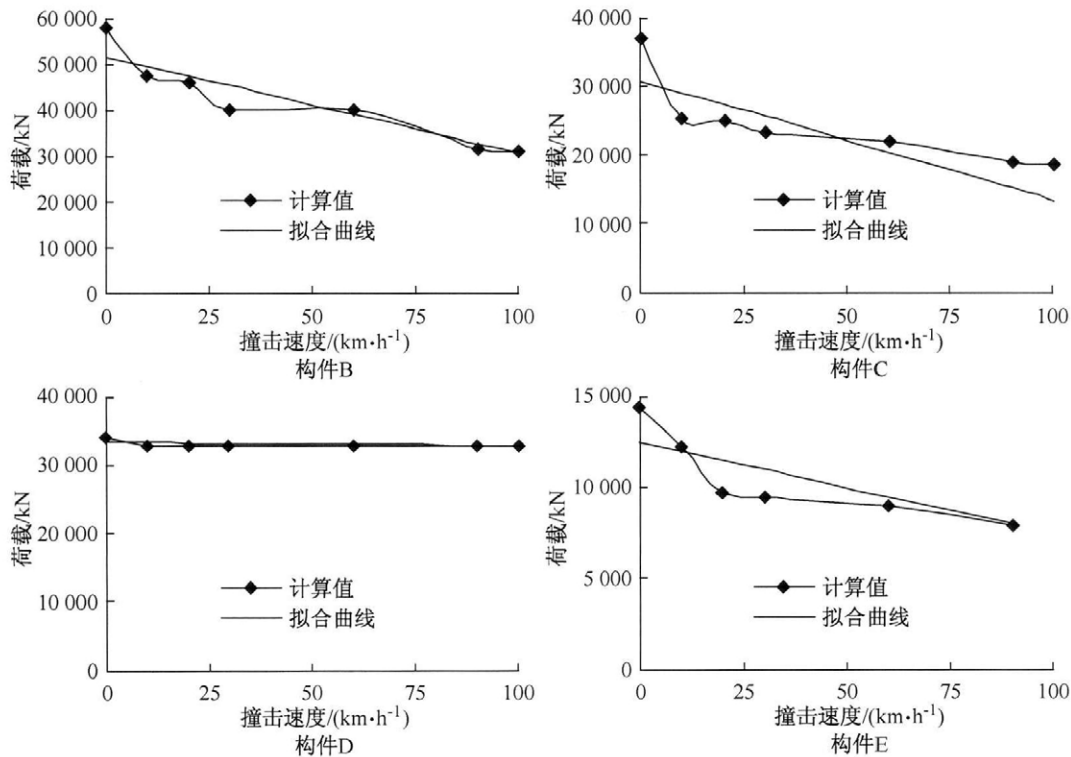


图 8 撞击速度 - 剩余受压承载力关系

Fig. 8 Impact velocity-residual loading capacity relationship

表 5 构件剩余受压承载力  
Table 5 Residual loading capacity

构件名称	撞击速度 / (km · h <sup>-1</sup> )	剩余受压承载力 (有限元计算) / 10 <sup>6</sup> N	剩余受压承载力 (拟合结果) / 10 <sup>6</sup> N	构件名称	撞击速度 / (km · h <sup>-1</sup> )	剩余受压承载力 (有限元计算) / 10 <sup>6</sup> N	剩余受压承载力 (拟合结果) / 10 <sup>6</sup> N
构件 B	0	58.2	58.2	构件 D	0	36.7	36.7
	10	47.4	53.8		10	25.1	33.8
	20	45.9	49.8		20	25	31.1
	30	40	46		30	23.2	28.6
	60	40	36.4		60	21.9	22.2
	90	31.4	28.7		90	19.1	17.3
	100	31	26.6		100	18.8	15.9
构件 C	0	34.0	34.0	构件 E	0	14.4	14.4
	10	33.0	33.8		10	12.3	12.6
	20	33.0	33.5		20	9.72	11.1
	30	33.0	33.3		30	9.5	9.7
	60	33.0	32.6		60	9	6.5
	90	33.0	31.9		90	7.9	4.4
	100	33.0	31.7		100		撞击破坏

## 4 结 论

本文采用基于非线性有限元方法对圆形钢管混凝土受撞击对轴向受压承载力的影响做出了分析,得到以下结论:

(1) 用静态、准静态计算方法能够很好地模拟钢管混凝土轴向受压的力学行为,动态计算方法能够很好地模拟撞击过程力学行为。

(2) 撞击速度越大,构件局部变形越大,屈服荷载越低。

(3) 约束效应系数为影响抗冲击性能的重要因素。

(4) 构件剩余受压承载力计算公式具有一定参考价值。

## 参考文献

- [1] 韩林海,杨有福. 现代钢管混凝土结构技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
Han Linhai, Yang Youfu. Modern technology of concrete filled steel tubular structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 裴小吟,文传勇,张永水. 城市桥梁被车辆撞击后损伤分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(1): 21.  
Pei Xiaoyin, Wen Chuanyong, Zhang Yongshui. Analysis on damage of urban bridges caused by vehicle collision [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences Edition), 2011, 30(1): 21. (in Chinese)
- [3] Sharma H, Hurlbauss S, Gardoni P. Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact [J]. USA International Journal of Impact Engineering, 2010, 43: 52-62.
- [4] Khedmati M R, Nazari M. A numerical investigation into strength and deformation characteristics of pre-loaded tubular members under lateral impact loads [J]. Marine Structures, 2012, 25: 33-57.
- [5] Bambacha M R, Janaa H, Zhao X L, et al. Hollow and concrete filled steel hollow sections under transverse impact loads [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 2859-2870.
- [6] Qu H Y, Li G Q, Chen S W, et al. Analysis of circular concrete-filled steel tube specimen under lateral impact [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(5): 941-951.
- [7] Huang C S, Yeh Y K, Liu G Y, et al. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(9): 1222-1230.
- [8] 李文亮. 侧向冲击钢管混凝土构件的试验研究和仿真数值分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.  
Li Wenliang. Experiment research and simulation numerical analysis on steel tube-confined concrete under the lateral impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 韩林海. 钢管混凝土结构 - 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structure [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [10] 雷拓, 钱江, 刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究 [J]. 结构工程师, 2008, 24(2): 22-27.  
Lei Tuo, Qian Jiang, Liu Chengqing. Application of damaged plasticity model for concrete [J]. Structural Engineers, 2008, 24(2): 22-27. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 钢筋混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50010—2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)