

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0089-05

不同截面钢管混凝土结构抗冲击性能比较

章 琪¹, 蒋 庆², 陆新征²

(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: 为改善钢管混凝土构件抗冲击性能, 该文采用基于 ABAQUS 的动力非线性有限元方法, 对不同类型钢管混凝土跨中受冲击过程进行了仿真模拟, 比较了不同构件抗冲击性能差异及破坏模式。结果表明: 对于相同外径的实心钢管混凝土, 增大钢管厚度能够明显改善其抗冲击性能; 在一定范围内减少核心混凝土而以钢管代之, 能够起到增强抗冲击性能的作用; 相同钢材与混凝土用量的构件中, 实心钢管混凝土抗冲击性能最佳。

关键词: 工程结构; 抗冲击性能; 有限元法; 侧向冲击; 破坏模式

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S092

COMPARISON OF IMPACT RESISTANCE OF DIFFERENT CONCRETE FILLED STEEL TUBE SECTIONS

ZHANG Qi¹, JIANG Qing², LU Xin-zheng²

(1. College of Water Resources & 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: The impact resistance of different concrete filled steel tube sections under lateral impact loading is evaluated by using the finite element analysis based on ABAQUS. The different impact resistances and failure models are compared with each other. The results show that by increasing steel tube thickness, the impact resistance is obviously improved for a concrete filled steel tube that have an identical outer diameter, and that the impact resistance is also improved by using steel tubes to replace the core concrete to some extent. With the same steel ratio and concrete, the concrete filled steel tube section has the best impact resistance, compared with the hollow concrete filled steel tube section and other sections.

Key words: engineering structure; impact resistance; finite element analysis; lateral impact; failure mode

钢管混凝土由于可以使混凝土处于多向受压的应力状态, 同时混凝土能够延缓钢管局部屈曲, 因此钢管混凝土具有较高强度和较好的塑性性能^[1], 近年来在工程中得到大量应用, 并延伸出很多新的钢管混凝土截面形式, 如中空夹层钢管混凝土、混凝土内插 H 型钢钢管混凝土等。钢管混凝土结构被广泛应用在框架柱、桥墩、设备支架等工程结构的竖向构件中。

随着交通业迅猛发展和交通密度的快速增长, 交通工具撞击竖向结构构件的事故不断增多。此

外, 恐怖袭击也可能造成车辆撞击建筑物和桥梁、船舶撞击桥墩等事故。据北京市政处桥通所统计^[2], 北京市内桥梁有将近一半被车辆撞击过。此类现象在其他国家同样存在, 例如, 据美国 1966 年~2005 年统计^[3], 其中 14% 的桥梁破坏是撞击造成的, 撞击是造成桥梁破坏的第二大原因, 远远高于地震造成的破坏。因此, 深入研究撞击导致构件破坏的机理, 切实提高竖向构件的防撞击能力, 具有重要的理论价值和现实意义。

本文针对目前工程中广泛使用的钢管混凝土

收稿日期: 2012-05-31; 修改日期: 2012-12-25

基金项目: 铁道部科技研究开发计划重点课题(2012G003-J); 清华大学自主研究项目(2012TH Z06); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0528)

通讯作者: 陆新征(1978), 男, 安徽人, 教授, 工学博士, 主要从事防灾减灾和非线性计算研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn)。

作者简介: 章 琪(1990), 男, 湖北人, 本科生, 主要从事非线性计算研究(E-mail: zhangqi@yahoo.com.cn);

蒋 庆(1984), 男, 安徽人, 助研, 工学博士, 主要从事防灾减灾和非线性计算研究(E-mail: ahhjq@163.com)。

构件,采用基于 ABAQUS 的动力非线性有限元方法,比较了不同类型钢管混凝土截面抗冲击能力的差异,其成果可供相关工程设计参考。

1 钢管混凝土抗冲击性能研究现状

最早采用钢管混凝土的工程之一是 1879 年英国的赛文铁路桥墩^[4],随着钢管混凝土的广泛应用,其抗冲击性能越来越受到重视。很多研究者对钢管或钢管混凝土抗冲击性做出了探讨。文献[5]对钢管的冲击研究表明,冲击物体的形状将会影响钢管的破坏形式。文献[6]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,冲击产生大于构件半径的凹口后,变形所需的撞击力会明显减小,固支支座相对于其他支座能提供更好的抗冲击性能。此外,轴向预应力会削弱其抗冲击性能。文献[7]研究表明,钢管混凝土能够大大提升截面抗弯性能,并减小非撞击部位破坏。文献[8]提出固支钢管混凝土简化模型,并且指出钢管混凝土跨中受撞击时,跨中截面弯矩会迅速增长至最大值。文献[9]研究表明,钢管混凝土外包碳纤维对试件的抗冲击性能有一定的改善。文献[10]对钢管混凝土短柱轴向冲击动力特性进行了探讨,并对侧向冲击载荷作用下的挠度进行了分析与数值模拟。文献[11]研究表明,实心钢管混凝土具有良好的抗冲击性能,若混凝土中空且内无钢管,随着空心率的增加,其抗冲击性能将减小。

2 数值模型及验证

为确定并验证计算模型的合理性,本文首先对文献[12-13]中的钢管混凝土撞击试验进行了研究。

2.1 有限元模型

在本文中混凝土采用 ABAQUS 中提供的损伤塑性(concrete damaged plasticity)模型,钢材使用基于 von Mises 屈服准则的理想弹塑性(plasticity)模型,混凝土使用 C3D8R 单元,钢管使用 S4R 壳体单元以节约计算成本,壳体厚度上设置 9 个积分点。冲击体用 C3D8R 单元划分,所有构件均使用六面体单元扫略生成网格并用 enhanced 控制线性减缩单元沙漏变形。由于试验观察钢管与混凝土之间在撞击时粘结良好^[14],故钢管和混凝土之间选择绑定约束连接,其他接触使用通用接触,对冲击体定义初始速度产生撞击。

2.2 实心钢管混凝土数值模型验证

钢管采用文献[12-13]中的材料数据,混凝土采用《混凝土结构设计规范》中混凝土的应力-应变曲线^[15]以及文献[16]中塑性损伤参数,参数具体取值参见表 1 和表 2。钢管直径为 114mm,厚度分别为 3.5mm、3.8mm,总长 1800mm,一端固支一端简支,每端约束长度为 300mm,撞击体质量为 202.8kg。冲击体尺寸为 30mm×80mm×80mm,冲击面为 30mm×80mm,撞击部位位于构件跨中。

表 1 钢管试验材料参数

Table 1 Material parameters of steel

来源	厚度/ mm	密度/ ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)	弹性模量/ GPa	屈服 强度	抗拉 强度	泊松比	伸长率
文献[12]	3.5	7.85	206	274	355	0.3	0.40
文献[13]	3.8	7.85	206	298	365	0.3	0.34

表 2 混凝土试验材料参数

Table 2 Material parameters of concrete

材料	泊松比	密度/ ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)	弹性模量/ GPa	e	α_f	K_e	μ	φ (°)
C50混凝土	0.2	2.50	34.50	0.1	1.16	2/3	0.0005	30

注: e 为流动势偏心率; α_f 为双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度比; K_e 为拉、压子午线上第二应力不变量的比值; μ 为粘性系数; φ 为膨胀角。

表 3 将文献[12-13]中撞击试验测得的跨中挠度值与本文数值模拟结果做了对比分析,数值模拟结果和试验结果平均误差为 5.1%,只有一组误差超过 10%,表明数值模拟结果和试验结果吻合良好。

表 3 试验与数值模拟所得跨中挠度对比

Table 3 Comparisons of deflection of mid-span between tests and numerical simulations

来源	构件 编号	冲击速度/ (m/s)	最大挠度 试验值/mm	最大挠度 模拟值/mm	相对 误差/(%)
文献[12]	A1	10.8	83.00	86.55	4.27
文献[12]	A2	12.5	115.50	112.10	2.94
文献[12]	A3	12.8	122.10	118.20	3.19
文献[13]	B1	7.67	34.98	40.56	15.90
文献[13]	B2	11.37	78.86	85.22	8.06
文献[13]	B3	12.25	96.96	97.79	0.86
文献[13]	B4	12.96	107.64	107.00	0.60

3 不同截面类型对比

3.1 不同截面的分析对象

除传统的实心钢管混凝土截面以外,近年来还发展出很多新型钢管混凝土截面,如中空夹心钢管混凝土、内插型钢钢管混凝土等。为了对比不同截

面形式钢管混凝土构件的抗冲击性能,本文采用有限元软件对其进行了分析。构件长度统一设为1800mm,一端300mm处为简支支座,另一端300mm处为固支支座。一共有6种截面形式:构件A、构件B、构件C、构件D外径为150mm,其中构件A为实心钢管混凝土,钢管壁厚3.5mm;构件B为空心夹层钢管混凝土,其空心率为0.486,外层钢管壁厚3.5mm,内层钢管壁厚为12.65mm;构件C为实心钢管混凝土,其钢管厚度为8.725mm;构件D为内插双H型钢钢管混凝土,H型钢高100mm,宽50mm,翼缘厚7mm,腹板厚5mm,外层钢管壁厚3.5mm;构件E为空心夹层钢管混凝土,其外径为156.38mm,空心率为0.485,外层钢管壁厚3.34mm,内层钢管壁厚12.56mm;构件F为空心率0.726的空心夹层钢管混凝土,外径为199.8mm,外层钢管壁厚3.5mm,内层钢管壁厚4mm,构件F空心率很大,具有很大的静态抗弯承载力,各构件截面如图1。构件B、构件C、构件D三组钢管混凝土钢管外径、总用钢量相同。构件C、构件D、构件E钢材和混凝土用量均相同,但外径不同。数值模拟中混凝土为C50,钢材为Q235,冲击体质量为202.8kg,冲击体尺寸为30mm×80mm×80mm,冲击面尺寸为30mm×80mm,冲击速度分别为12.8m/s、15m/s、17m/s。

土,其外径为156.38mm,空心率为0.485,外层钢管壁厚3.34mm,内层钢管壁厚12.56mm;构件F为空心率0.726的空心夹层钢管混凝土,外径为199.8mm,外层钢管壁厚3.5mm,内层钢管壁厚4mm,构件F空心率很大,具有很大的静态抗弯承载力,各构件截面如图1。构件B、构件C、构件D三组钢管混凝土钢管外径、总用钢量相同。构件C、构件D、构件E钢材和混凝土用量均相同,但外径不同。数值模拟中混凝土为C50,钢材为Q235,冲击体质量为202.8kg,冲击体尺寸为30mm×80mm×80mm,冲击面尺寸为30mm×80mm,冲击速度分别为12.8m/s、15m/s、17m/s。

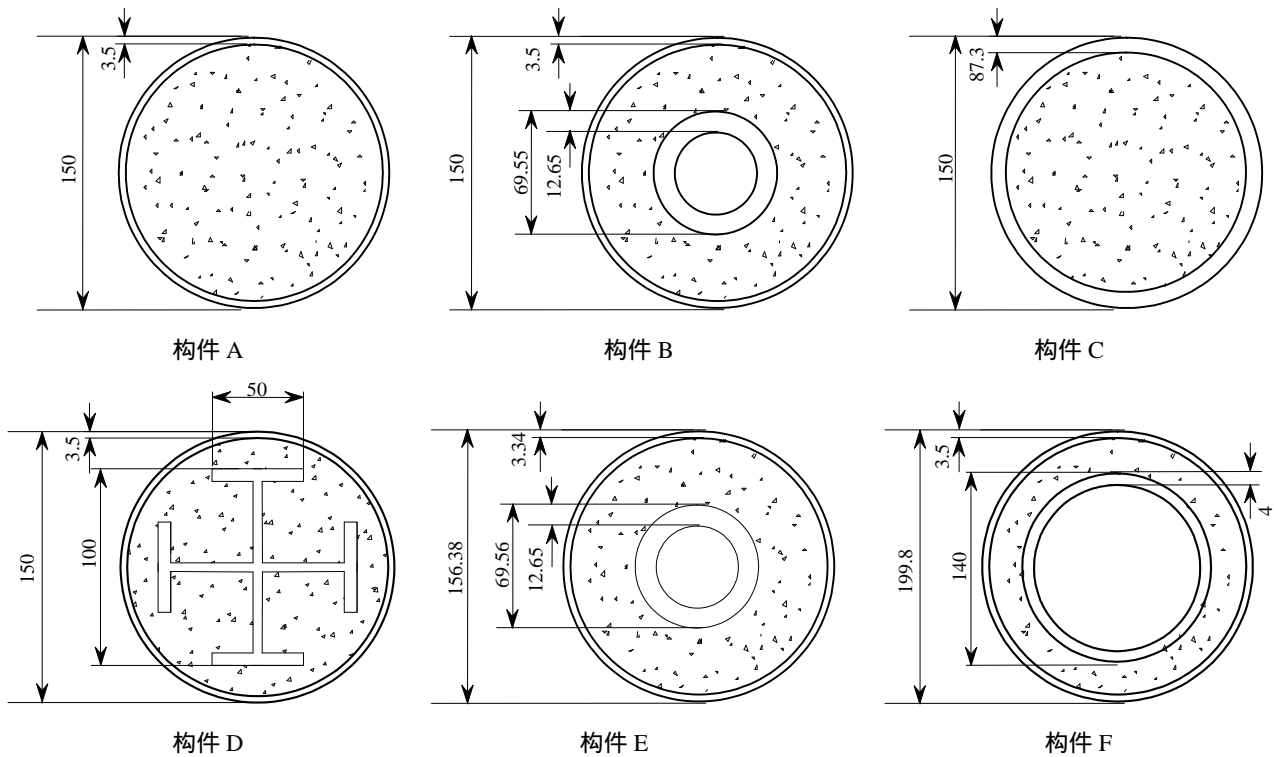


图1 钢管混凝土截面图

Fig.1 Concrete filled steel tube sections

3.2 破坏模式对比

在冲击作用下,钢管混凝土柱可能出现的破坏模式包括:整体弯曲破坏;局部冲切破坏;前两者破坏的结合。发生整体弯曲破坏时,冲击力先使撞击部位出现凹陷,然后变形向周围扩展,形成整体构件的弯曲。当发生局部冲切破坏时,构件受撞击部位产生较大变形,而撞击区域以外影响甚微,冲击体刚度大或者冲击速度快均可造成局部冲切破坏,此外,构件受冲击方向厚度不足也易造成局部冲切破坏。不同构件撞击变形如图2所示,挠度时程曲线如图3和图4所示。从图2中可以看

出,构件A、构件B、构件C、构件D、构件E以整体弯曲破坏为主,受撞击部位截面被撞扁,整个构件弯曲明显。构件A除整体弯曲明显外,被撞击区域陷凹也较为明显,由图3和图4可得,构件A跨中挠度最大;构件B变形稍小于A;构件C整体和局部变形均较小,表现出良好的抗冲击性能;构件D靠近撞击区域的H型钢翼缘被撞扁,总体变形程度与E相近;构件F是局部冲切破坏,在撞击区域产生明显凹口,但在跨中底部和其他区域只发生了很小的变形。尽管F构件跨中挠度不是很大,但是此截面形式不能充分利用材料强度,抗冲击性

能较差。

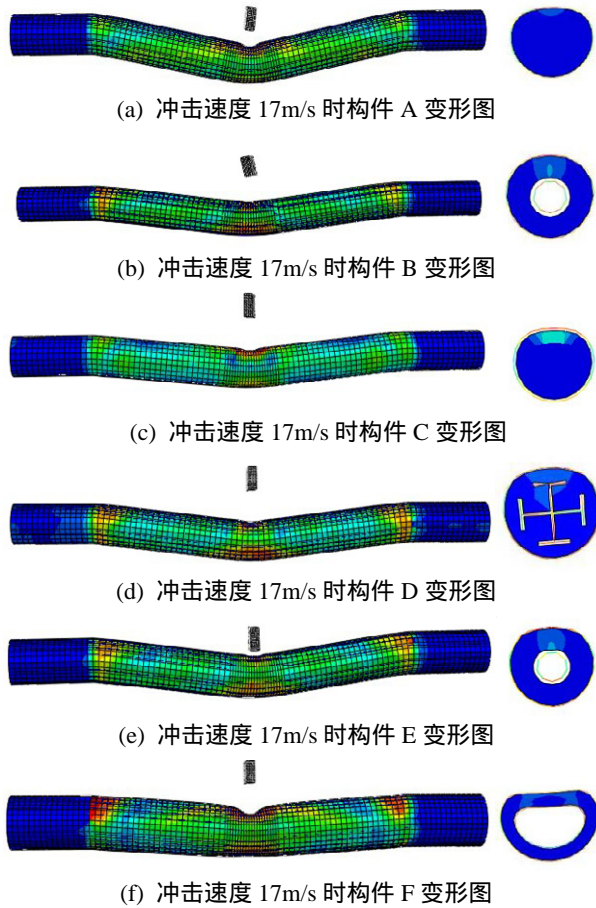


图 2 构件整体与截面最终变形图

Fig.2 Final deformation of the tubes and cross sections

3.3 跨中挠度对比

由图 3、图 4 和表 4 可知，构件 A、构件 B、构件 F、构件 E、构件 D、构件 C 跨中最大挠度递减，且挠度最小者最先达到其最大值。由构件 A 和构件 C 对比可知，外径相同的实心钢管混凝土，增大钢管厚度对跨中挠度的减小起到非常明显的作用，本次模拟中当钢管厚度增大近 2.5 倍时，跨中挠度减少 1/2 左右。由构件 B、构件 C、构件 D 对

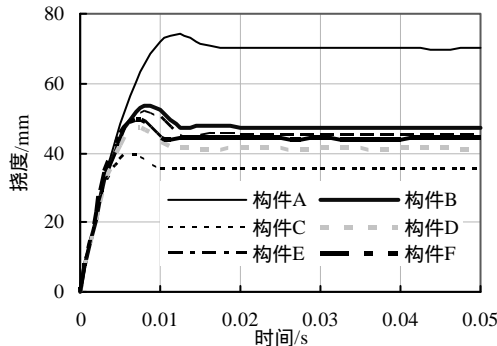


图 3 撞击速度 12.8m/s 时构件跨中接触节点挠度时程曲线
Fig.3 Displacement time history curves at middle span under impact velocity of 12.8m/s

比可得，在用钢量相同的条件下，实心钢管混凝土在冲击力作用下产生挠度最小，其次是双 H 型钢内插混凝土，空心夹层钢管混凝土变形最大。由构件 C、构件 D、构件 E 对比可知，相同混凝土与钢材用量的构件中，实心钢管混凝土抗冲击性能仍然最好。不同速度撞击的变形结果均呈现出类似规律。

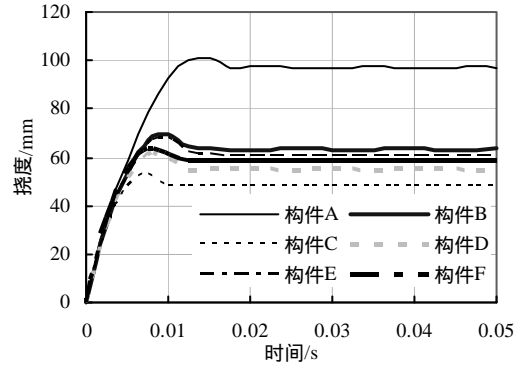


图 4 撞击速度 15m/s 时构件跨中接触节点挠度时程曲线
Fig.4 Displacement time history curves at contact point under impact velocity of 15m/s

表 4 构件在不同冲击速度下跨中挠度最大值

Table 4 Deflection of mid-span under different impact speed

冲击速度/ (m/s)	截面 A 模拟值	截面 B 模拟值	截面 C 模拟值	截面 D 模拟值	截面 E 模拟值	截面 F 模拟值
12.8	71.70	48.26	35.52	42.53	45.62	48.47
15	98.44	64.61	48.72	56.88	61.80	63.66
17	125.50	79.56	62.02	72.87	77.29	77.54

3.4 冲击荷载和跨中弯矩对比

由于冲击体刚度很大，整个撞击过程能够在很短时间内完成，在 2ms 左右就已经产生了最大冲击力，如图 5 所示。

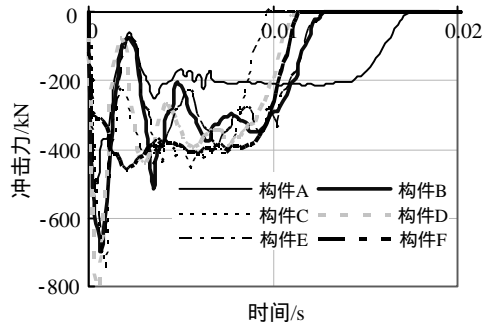


图 5 撞击速度 15m/s 四种构件冲击力时程曲线
Fig.5 Impact force time history curves under impact velocity of 15m/s

分析得到构件的典型跨中弯矩-挠度曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出，构件 A、构件 B、构件 C、构件 D、构件 E 跨中几乎同时产生塑性铰。构件 F 刚度明显较小。构件 C、构件 F、构件 D、构件 E、构件 B、构件 A 极限抗弯承载力递减。

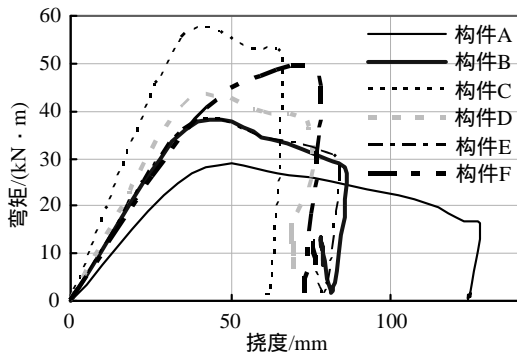


图6 撞击速度 17m/s 四种构件跨中弯矩-挠度曲线
Fig.6 Moment -displacement curves at Mid-span under impact velocity of 17m/s

4 结论

本文采用基于动力非线性有限元方法比较了不同钢管混凝土构件的抗冲击能力，得到以下结论：

- (1) 外径相同的实心钢管混凝土，增大钢管厚度可显著减小构件挠度。
- (2) 在一定范围内若适当减少核心混凝土，以空心钢管代替，能够提高构件的抗冲击性能。
- (3) 在相同混凝土与钢材用量的构件中，实心钢管混凝土抗冲击性能最好，内插双 H 型钢钢管混凝土次之，空心钢管混凝土较差。

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: 5-7.
Han Linhai, Yang Youfu. Modern technology of concrete filled steel tubular structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 5-7. (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), 2011, 30(1): 21. (in Chinese)
- [3] Sharma H, Hurlbeaus S, Gardoni P. Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 43: 52-62.
- [4] 张晨. 钢管混凝土柱在冲击荷载作用下的动力分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
Zhang Chen. Dynamic analysis of concrete filled steel tube columns under impact load [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [5] Zhang T G, Stronge W J. Rupture of thin ductile tubes by oblique impact of blunt missiles: Experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(7): 571-587.

- [6] Khedmati M R, Nazari M. A numerical investigation into strength and deformation characteristics of preloaded tubular members under lateral impact loads [J]. Marine Structures, 2012, 25: 33-57.
- [7] Bambacha M R, Jamaa H, Zhao X L, Grzebieta R H. Hollow and concrete filled steel hollow sections under transverse impact loads [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 2859-2870.
- [8] Qu H Y, Li G Q, Chen S W, Sun J Y, Sozen M A. Analysis of circular concrete-filled steel tube specimen under lateral impact [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(5): 941-951.
- [9] Shan J H, Chen R, Zhang W X, Xiao Y, Yi W J, Lu F Y. Behavior of concrete filled tubes and confined concrete filled tubes under high speed impact [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(2): 209-218.
- [10] 李珠, 李宝成, 李永刚, 任够平. 钢管混凝土短柱轴向冲击动力特性的探讨[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(4): 383-385.
Li Zhu, Li Baocheng, Li Yonggang, Ren Goupeng. The research of the dynamic property of steel tube-confined concrete short column under axial impact [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(4): 383-385. (in Chinese)
- [11] 余敏, 查晓雄. 实空心钢管混凝土柱在汽车撞击下的性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(1): 58-63.
Yu Min, Zha Xiaoxiong. Behaviour of solid and hollow concrete filled steel tube columns under vehicle impact [J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(1): 58-63. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 王博. 固简支钢管混凝土构件在侧向冲击荷载作用下响应的分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
Wang Bo. The research of steel tube-confined concrete component in fix-simply support under the lateral impact load [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 王蕊, 李珠, 任够平, 张善元. 钢管混凝土梁在侧向冲击荷载作用下动力响应的试验研究和数值模拟[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 34-39.
Wang Rui, Li Zhu, Ren Goupeng, Zhang Shanyuan. Experimental study and numerical simulation of the dynamic response of concrete filled steel tubes under lateral impact load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 34-39. (in Chinese)
- [15] 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.
GB 50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [16] 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)