

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.004

钢管混凝土隔板贯通式节点的性能

李 波¹, 杨庆山¹, 冯少华¹, 陈一欧², 卫 东²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

摘 要:隔板贯通式节点是一种新型钢管混凝土柱-钢梁连接形式。以中海广场为工程背景,进行了钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的拟静力试验,并结合数值模拟结果对该类节点的性能进行了研究。试验结果表明,钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点具有较好的刚度、承载能力和延性,能够满足“强柱弱梁,强节点弱构件”的抗震设计原则。数值模拟与试验结果相吻合,可以采用本文所建立的数值模型模拟钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的性能。采用数值的方法,重点研究了隔板尺寸对该节点性能的影响,并提出设计建议。

关键词:钢管混凝土;隔板贯通;节点;试验;数值分析

中图分类号:TU528.59 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0019-06

Analysis on the Behavior of Diaphragm Through Connection between Steel Beam and Concrete-filled Steel Tubular Column

LI Bo¹, YANG Qingsha¹, FENG Shaohuan¹, CHEN Yiou², WEI Dong²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China;

2. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, P. R. China)

Abstract:Diaphragm through connection is a new kind of connection between steel beam and concrete-filled steel tubular column. Quasi-static test and numerical simulation had been carried out to investigate the behaviors of diaphragm through connection used in Zhonghai Square. The results show that, the bearing capacity, rigid and ductility of the diaphragm through connection are excellent, and the seismic principle, i. e., ‘strong column but weak beam’ and ‘strong connection but weak component’, is reached. The numerical model of diaphragm through connection was provided, and the results drawn from the model agreed with the test results. Influences of diaphragm dimension on the behaviors of the diaphragm through connection with praposed the numerical model had been investigated, and the design suggestion was provided based on the analysis.

Key words:concrete-filled steel tubular; diaphragm through; connection; test; numerical analysis

钢管混凝土柱的出现,解决了超高层建筑中混凝土柱的“胖柱问题”问题、高强混凝土柱的脆性破坏问题以及钢柱易出现的局部屈曲问题,因而被广泛应用于各类超高层建筑之中^[1]。然而,由于钢管中需要浇注混凝土,这使得钢管混凝土柱与钢梁的连接节点较普通钢结构连接节点更为复杂,受力合

理而又构造简单的连接形式一直是关于钢管混凝土柱研究的重点^[2-5]。

隔板贯通式节点(图 1)是一种新型钢管混凝土柱-钢梁连接形式,其主要特点是钢管混凝土柱钢管在隔板处断开,并且隔板在钢管管壁内伸、外挑距离较小。这样极大简化了施工,并且不影响建筑功能,

收稿日期:2012-04-08

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815021);中央高校基本科研业务费(2011JBM262)

作者简介:李波(1978-),博士,副教授,主要从事结构风工程、钢结构研究,(E-mail)lio77@163.com。

近年来得到了广泛应用。国家标准图集《钢管混凝土结构构造》(06SG524)虽给出了隔板贯通式节点的基本形式,但由于缺乏相关系统研究,并未给出节点构造细节。另一方面,通过合理的构造,减小钢管和隔板连接处的应力集中,使节点破坏先出现在梁上,形成“强节点弱构件”的延性机制一直以来是设计过程中的难点。针对上述情况,一些学者采用试验和数值的方法对隔板贯通式节点的性能进行了研究^[6-8],旨在验证该种节点具有较好的性能。

中海广场是位于北京 CBD 地区的一栋地标性超高层建筑,结构整体采用框架-核心筒结构体系。其中,外框架采用的是由钢管混凝土柱与钢梁组成的框架结构。为了满足建筑与便于施工的要求,框架部分采用了隔板贯通式节点。将以中海广场为工程背景,进行钢管混凝土柱与钢梁隔板贯通式节点拟静力试验,得到该种节点的主要性能指标;并在此基础上建立数值分析模型,重点考察不同参数对节点性能的影响,提炼该类节点的设计建议。

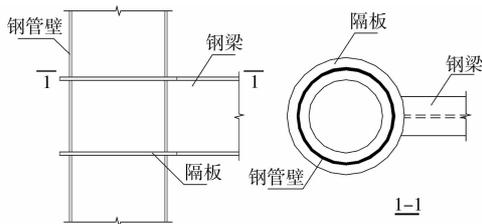


图 1 隔板贯通式节点

1 试验研究

1.1 试验装置^[9-11]

试验以中海广场钢管混凝土柱-钢梁框架的典型连接节点及其受力状态为背景,选取了该项工程最为常用的钢管混凝土柱-单钢梁连接节点进行研究。受试验室场地约束,试件按原型 1/2 比例缩尺。钢管混凝土柱的钢管截面为 PIPE457×18,混凝土强度为 C60,柱高 1 500 mm。钢梁截面为 H275×115×10×20,梁长 2 000 mm。隔板厚度为 20 mm,内径 291 mm(内伸 65 mm),外径 517 mm(外挑 30 mm)。钢材材质均为 Q345B,试件所有连接焊缝均通过超声波探伤检测,未发现超标缺陷。

试验试件采用垂直柱、水平梁的放置方式,如图 2 所示。试验中,先在钢管混凝土柱柱顶通过液压作动器分级施加 120 t 轴力;然后在距梁端 300 mm 处(该处梁上设置有加劲肋),通过 MTS 电液伺服作动器分级施加往复荷载,直至试件破坏。按《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101-96)的要求,钢梁屈服前,梁端采用荷载控制分级加载,每级荷载 30 kN,

每级循环 2 周;钢梁屈服后,按梁端位移控制分级加载,每级荷载为试件屈服时的最大位移,每级循环 2 周。



图 2 试验装置

在钢梁和隔板布置应变片和应变花如图 3,用以监测试验过程中关键部位的应力变化。

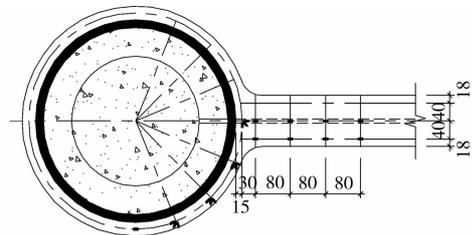
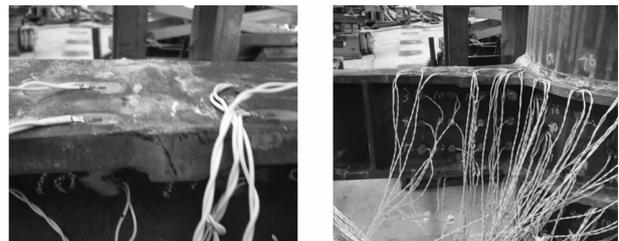


图 3 典型应变片布置

1.2 试验结果与分析

在加载过程中,首先,在钢梁翼缘对接焊缝处出现裂缝(图 4(a));随后,钢梁与隔板连接处的梁腹板以及梁翼缘处出现铁屑脱落,发生局部失稳(图 4(b)),而钢梁对接焊缝处的裂缝不再扩展;继续加载,钢梁处的局部变形缓慢增大;整个试验过程,试件未发生明显断裂。



(a) 钢梁对接焊缝断裂

(b) 钢梁局部失稳

图 4 试验试件破坏形式

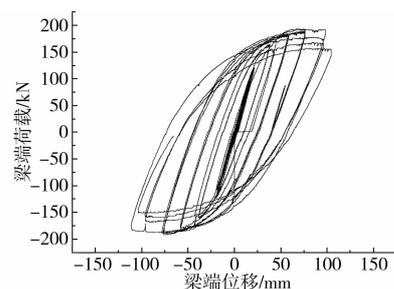


图 5 试验试件滞回曲线

滞回曲线是结构抗震性能的综合体现,通过滞回曲线还可以确定结构的主要性能参数。图5给出了本次试验的滞回曲线,由滞回曲线可以得到试件的屈服荷载为126.9 kN,屈服位移为25.51 mm,极限承载力为192 kN,极限位移为82.91 mm,据此可以得到节点的位移延性系数为3.25。

通过试验可以看出,钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点承载能力较强,以至距节点区较远的钢梁对接焊缝出现裂缝;钢梁与隔板连接处钢梁屈服后,试验试件主要通过该处塑性变形耗能,钢梁对接焊缝处裂缝不再扩展。试件滞回曲线饱满,该种节点具有良好的耗能性能。综上所述,中海广场钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的刚度、强度、延性均能满足设计要求。

2 数值分析模型

建立钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的数值分析模型,然后通过与试验结果对比,验证数值模型的有效性。

2.1 数值模型的建立^[12-14]

数值分析采用 ANSYS 软件进行。钢管中混凝土选用 Solid65 单元模拟,考虑到钢管混凝土结构中混凝土材料在实际结构中的受力状态,采用三向受力状态下的本构关系。钢管、钢梁、加劲肋、隔板采用 shell181 单元模拟。钢材采用理想弹塑性模型,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3,屈服强度为 353.6 MPa,满足 Von-Mises 屈服准则。为了提高计算效率,对节点核心区的网格进行加密(图6)。

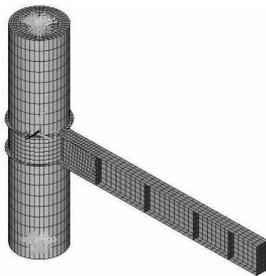


图6 数值模型

在钢管混凝土柱柱底截面施加3个方向平动和3个方向转动自由度约束;在柱顶截面,除允许其发生竖向位移外,约束其他方向位移和转角。试件的加载与试验保持一致,并采用牛顿-拉普森方法进行迭代求解。分析中考虑了初始缺陷、大变形等非线性因素的影响。

2.2 数值模型的有效性

图7给出了试验试件与数值模型梁端加载点荷

载-位移滞回曲线及骨架线对比图。可以看出,试件屈服前,数值模拟结果与试验结果吻合较好;试件屈服后,由于数值模型中采用了是基于试件材性试验的理想弹塑性模型,以及 ANSYS 分析软件对材料本构关系下降段模拟的不足^[15],导致两者之间存在一定差别。但是,试件的屈服状态是研究的重点,因此,可以认为采用的数值模型能够较好的模拟钢管混凝土柱-钢梁贯通式节点的整体性能。

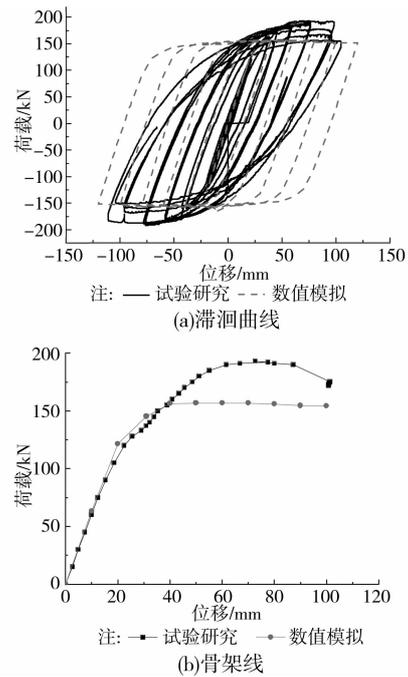


图7 荷载-位移曲线

图8给出了不同加载阶段,隔板典型测点的应力分布。可以看出,数值分析结果和试验结果基本一致,这说明,可以采用本文所建立的数值模拟来研究钢管混凝土柱-钢梁贯通式节点隔板的力学行为。另一方面,隔板上的应力分布很不均匀,随着离钢梁距离的增加,隔板上应力快速衰减。由于布置的测点数量有限,无法得到节点区应力分布。

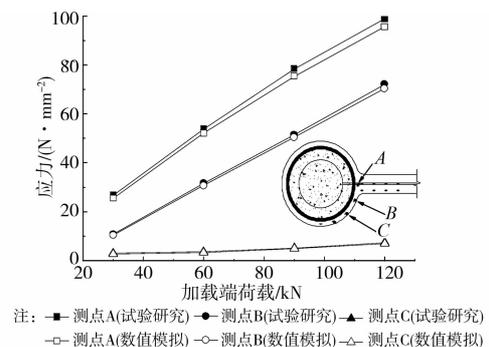


图8 隔板应力分布

3 节点性能研究

采用上节建立的数值模型研究不同因素对钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点性能的影响。

3.1 研究参数

在试验的基础上,选定了 3 种典型钢管,3 种典型钢梁作为对象,系统研究了不同隔板尺寸、梁截面对节点性能的影响(表 1),其中,隔板厚度与钢梁翼缘相同。

表 1 参数列表

钢管截面	P457×10、P457×14、P457×18
钢梁截面	H275×115×8×12
	H400×200×8×12 H500×200×8×12
隔板外挑宽度 a	$h/12$ 、 $h/10$ 、 $h/8$ 、 $h/6$
隔板内伸宽度 b	$0.5a$ 、 $1.0a$ 、 $1.5a$ 、 $2.0a$

注: h 为钢梁高度, a 为隔板外挑宽度, b 为隔板内伸宽度。

3.2 隔板尺寸对节点性能影响

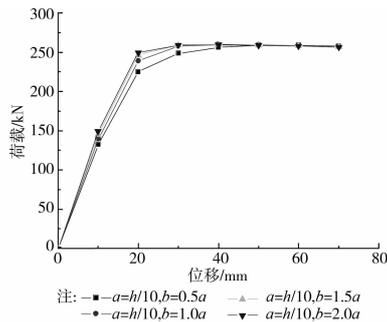


图 9 荷载-位移曲线

图 9 给出了钢管截面为 P457×10、钢梁截面为 H400×200×8×12、隔板外挑宽度 $a = h/10$ 时,隔板内伸宽度 b 分别取 $0.5a$ 、 $1.0a$ 、 $1.5a$ 、 $2.0a$ 4 种情况下的荷载-位移曲线。由图可以看出,增加隔板内伸宽度可以小幅提高节点的刚度、屈服荷载。节点屈服后,隔板内伸宽度对节点整体性能影响较小。

图 10 给出了上述 4 种工况,加载位移为 60 mm 时,隔板 Von-Mises 折算应力分布。可以看出,当隔板内伸宽度 $b = 0.5a$ 时,钢管内隔板的应力激增,隔板与钢管连接处出现明显的应力集中,梁下侧(受压区)与隔板连接处屈曲;当隔板内伸宽度 $b = 1.0a$ 、 $1.5a$ 时,隔板应力沿与梁轴线 45° 方向扩散,距隔板一定距离的梁全截面屈服,形成塑性铰;当隔板内伸宽度 $b = 2.0a$ 时,钢管内隔板应力水平较低,利用率不高,梁上塑性铰位置大致不变。这说明,当隔板外挑宽度一定时,改变隔板内伸宽度会影响节点的屈服荷载和破坏形式。

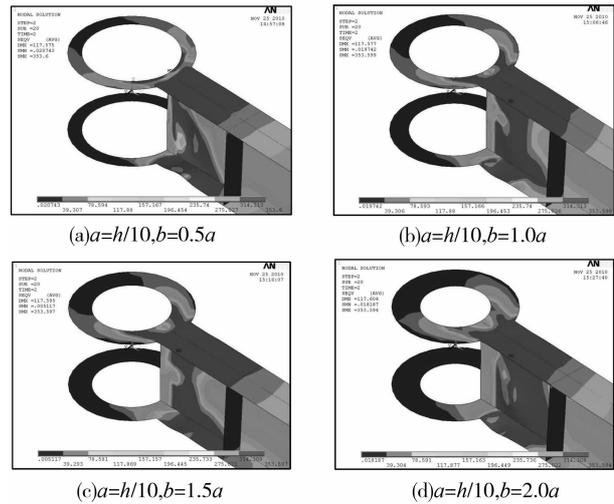


图 10 应力分布

图 11 给出了钢管截面为 P457×10、钢梁截面为 H400×200×8×12、隔板外挑宽度 $a = h/12$ 、 $h/10$ 、 $h/8$ 、 $h/6$ (隔板内伸宽度 $b = 1.0a$) 时,4 种情况下的荷载-位移曲线。由图可以看出,增加隔板的外挑宽度也可小幅提高节点刚度、屈服荷载,但提高程度较增加隔板内伸宽度小。节点屈服后,隔板外挑宽度对节点整体性能影响较小。

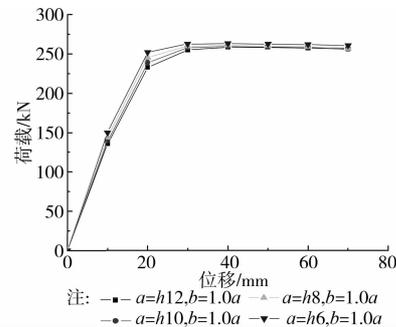


图 11 荷载-位移曲线

图 12 给出了上述 4 种工况,加载位移为 60 mm 时,隔板 Von-Mises 折算应力分布。可以看出,隔板上应力分布基本相同,随着隔板外挑宽度的增加,隔板应力与梁轴线的夹角逐渐减小;除隔板外挑宽度 $a = h/12$ 外,距隔板一定距离的梁全截面均屈服,形成塑性铰;隔板外挑宽度 $a = h/12$ 时,钢管内隔板的应力激增,隔板与钢管连接处出现明显的应力集中。这说明,当隔板内伸宽度与外挑宽度相同时,改变外挑宽度对节点性能影响不大,但隔板外挑宽度不宜过小。

通过参数分析可以得出,钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的隔板外挑宽度宜大于 $h/10$,用以缓解钢管与隔板连接处的应力集中,防止连接焊缝出

脆性断裂。隔板的内伸宽度不宜小于外挑宽度,用以保证隔板的刚度及应力传递。

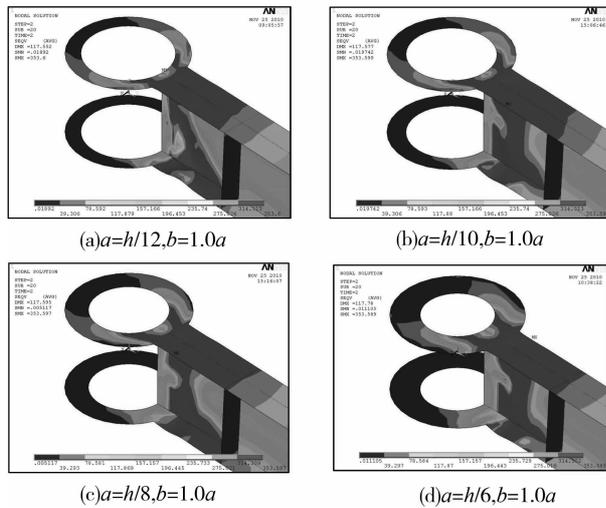


图12 应力分布

3.3 钢梁截面对节点性能的影响

图13给出了钢管截面为P457×10、钢梁截面为H275×115×8×12、H400×200×8×12、H400×200×10×16、H500×200×10×16 3种工况(隔板外挑宽度 $a=h/10$,隔板内伸宽度 $b=0.5a$),试件屈服后隔板的Von-Mises折算应力分布图。

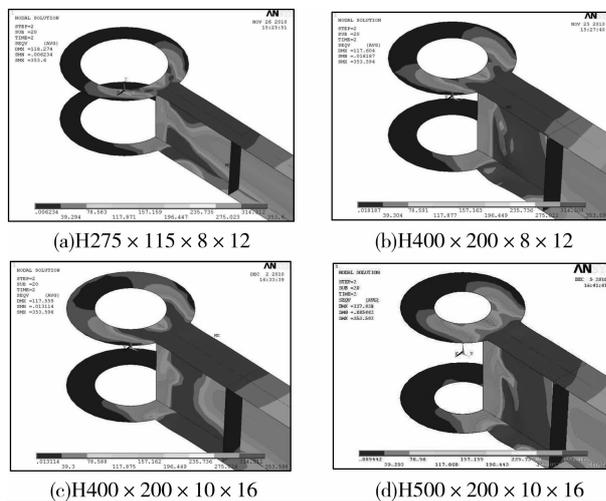


图13 应力分布

由图13可以看出,4种情况均在距隔板一定距离的梁上出现塑性铰;但节点区应力分布有一定差别。当梁截面为H400×200×8×12、H500×200×10×16时(梁腹板宽厚比较小),梁腹板均出现明显屈曲,使得节点的承载能力下降;当梁截面为H275×115×8×12、H400×200×10×16时(梁腹板宽厚比较大),节点区应力扩散更为充分。这说明,钢梁腹板宽厚比对钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点有

一定影响,提高钢梁腹板宽厚比,能够在一定程度上提高该种节点的承载能力。另一方面,增加梁翼缘厚度有利于克服钢管对隔板应力的“截断”作用。

通过参数分析可以得出,为了防止节点承载力大幅下降,宜按塑性要求控制钢梁翼缘、腹板的宽厚比。

4 结论

采用试验与数值模拟相结合的方法对钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的性能进行了研究,得到了如下结论:

1)以中海广场为工程背景的钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点拟静力试验表明,该种节点能够满足“强节点弱构件”的抗震设计原则,节点的刚度、强度、延性均能满足设计要求。

2)数值分析结果和试验研究结果较为吻合,本文所建立的数值模型能够模拟钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的力学性能。

3)通过大量的参数分析,确定了不同参数对钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点性能的影响规律。根据研究成果,建议钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通式节点的隔板与钢梁翼缘同厚,以利于施工;隔板外挑宽度宜大于 $h/10$,隔板内伸宽度不宜小于外挑宽度;为了防止节点承载力大幅下降,宜按塑性要求控制钢梁翼缘、腹板的宽厚比。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] Liu W, Han L H. Seismic performance of CFST column to steel beam joints with RC slab[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(1): 127-139.
- [3] Jones M H, Wang Y C. Shear and bending behaviors of fin plate connection to concrete filled rectangular steel tubular column [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 348-359.
- [4] 黄超, 韩小雷, 季静. 钢管混凝土平面相贯节点轴压承载力理论研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 128-134.
- [5] HUANG Chao, HAN Xiaolei, JI Jing. Theoretical investigation into axial bearing capacity of planar intersecting connections of concrete-filled steel tube [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(7): 128-134.
- [5] 赵必大, 王伟, 陈以一. 钢管混凝土柱-箱梁内加劲节点的性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(1): 15-21.

ZHAO Bida, WANG Wei, CHEN Yiyi. Study on the

- behavior of inner-stiffened CFT column to box beam joint [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(1): 15-21.
- [6] 陈以一, 李刚, 庄磊. H 形钢梁与钢管柱隔板贯通式连接节点抗震性能试验[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(1): 23-30.
CHEN Yiyi, LI Gang, ZHUANG Lei. Experimental study on the seismic performance of diaphragm through type joint connecting H beam and tube column in steel frame [J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(1): 23-30.
- [7] 姜忻良, 苗继奎, 陈志华. 方钢管混凝土柱-钢梁隔板贯通节点抗震性能研究[J]. 天津大学学报, 2009, 42(3): 194-200.
JIANG Xiliang, MIAO Jikui, CHEN Zhihua. Experiment on seismic performance of diaphragm through joint between concrete-filled square steel tubular column and steel beam [J]. Journal of Tianjing University, 2009, 42(3): 194-200.
- [8] 王砾瑶, 张勇, 边永丰. 钢管混凝土柱与钢梁隔板贯通式节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 398-403.
WANG Liyao, ZHANG Yong, BIAN Yongfeng. Studies on seismic behaviors of steel beam to concrete-filled steel tubular column connections with through diaphragms [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S1): 398-403.
- [9] 邱法维, 钱稼茹, 陈志鹏. 结构抗震试验方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [10] Silvana D N, Debs E, Lucia H C. An experimental study of connection between I-beams and concrete filled steel tubular columns [J]. Steel and Composite Structures, 2004, 4(4): 305-315.
- [11] Kang C H, Shin K J, Oh Y S. Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements [J]. Engineering Structures, 2001, 23(9): 1194-1201.
- [12] Han L H, Wang W D, Zhao X L. Behaviour of steel beam to concrete-filled SHS column frames: finite element model and verifications [J]. Engineering Structures, 2008, 30(6): 1647-1658.
- [13] Yamada M, Hayashi A, Nozawa S H. Ultimate strength of T-shaped socket joints between steel beam and concrete-filled tubular column [J]. Structural Engineering and Earthquake Engineering, 2005, 22(2): 121-136.
- [14] Moaveni S. Finite element analysis theory and application with ansys (the 3rd edn) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
- [15] Li B, Yang Q, Yang N. An investigation on aseismic connection with opening in beam web in steel moment frames [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(3): 583-595.
- [16] Qiu F W, Qian J R, Chen Z P. Structure seismic test method [M]. Beijing: Science Press, 2000.

(编辑 胡 玲)