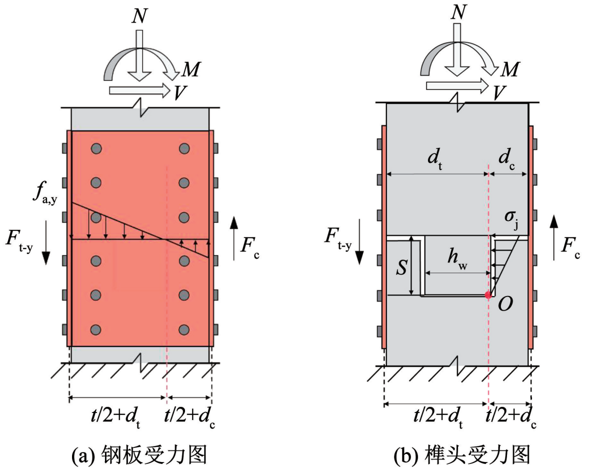
图 16　装配柱节点示意

Fig. 16　Schematic diagram of precast column joint

在整个试验加载过程中，装配节点的受弯承载过程主要可简化为 3 个阶段，首先在受弯前期表现为前后左右 4 块耗能钢板的弹性阶段内承载和榫头与凹槽内壁的线形挤压承载，这一阶段结束时为屈服状态；其次是耗能钢板到达屈服后的强化阶段内承载和榫头与凹槽内壁的双折线挤压承载，这一阶段结束时为峰值状态；最后是耗能钢板的强度退化和二阶弯矩效应引起的承载下降段。

4.2　屈服状态

RECJD 的屈服阶段受力如图 17 所示。



(a) 钢板受力图　(b) 榫头受力图

图 17　屈服状态下节点受力示意

Fig. 17　Schematic diagram of joint stress under yield state

节点抗弯在到达屈服状态时，其特征主要表现为：左侧耗能钢板受拉到达屈服点、右侧耗能钢板受压到达临界失稳状态、榫头右侧压应力由于橡胶挤压呈三角形分布。因此，节点在屈服状态下的受弯承载力 M_{j-y} 按下式计算：

$$M_{j-y}=M_{N-y}+M_{h-y}+M_{s-y} \tag{3}$$

轴压力 N 产生绕点(4) O 的抵抗弯矩 M_{N-y}，在屈服状态下节点转动较小，由于凹槽底部的橡胶，可近似认为榫头底部的压应力为三角形分布，因此，M_{N-y} 可按下式计算：

$$M_{N-y}=N\frac{h_w}{3} \tag{4}$$

式中 h_w 为榫头的截面高度。

左侧耗能钢板受拉屈服和右侧耗能钢板受压屈曲引起的绕 O 点的抵抗弯矩 M_{b-y} 按下式计算：

$$M_{b-y}=F_{t-y}\left(d_t+\frac{t}{2}\right)+F_c\left(d_c+\frac{t}{2}\right) \tag{5}$$

式中：F_{t-y} 为左侧耗能钢板因受拉到达屈服时的拉力；d_t 为点 O 到左侧耗能钢板内表面的距离，为 290 mm。拉力 F_{t-y}、临界失稳力 F_c 分别按式(6)、(7)计算：

$$F_{t-y}=f_{ay}b_{lt} \tag{6}$$

$$F_c=\sigma_c bt \tag{7}$$

式中：f_{ay} 为耗能钢板材料的屈服强度；b_{lt} 为左侧耗能钢板的截面净宽(即钢板宽度减去螺栓孔直径的宽度)；t 为钢板厚度；b 为右侧耗能钢板宽度；σ_c 为右侧耗能钢板截面均匀受压产生的临界失稳应力。

前后两侧的两块耗能钢板承受压和拉联合作用，其应力分布近似为线性分布，见图 17(a)，其中，最大拉应力为 f_{ay}，中性轴竖直经过 O 点，因此，前后两侧耗能钢板绕点 O 的抵抗弯矩 M_{h-y} 可按下式计算：

$$M_{h-y}=2f_{ay}t\frac{d_t^3+d_c^3}{3d_t} \tag{8}$$

由于节点的转动，榫头右侧会受到挤压橡胶产生的侧向分布压应力作用，其分布近似为三角形，最大压应力为 σ_j，因此，榫头侧向分布压应力引起的绕点 O 的弯矩 M_{s-y} 可按下式计算：

$$M_{s-y}=\frac{\sigma_j b_w s^2}{3} \tag{9}$$

式中：s 为榫头的长度；b_w 为榫头的截面宽度。

综上，装配节点的屈服弯矩计算如下：

$$M_{j-y}=N\frac{h_w}{3}+f_{ay}b_lt\left(d_t+\frac{t}{2}\right)+\sigma_c bt\left(d_c+\frac{t}{2}\right)+2f_{a,y}t\frac{d_t^3+d_c^3}{3d_t}+\frac{\sigma_j b_w s^2}{3} \tag{10}$$

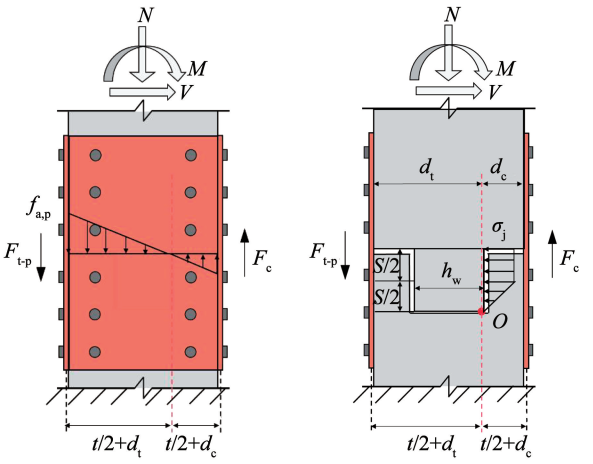
节点在到达屈服状态时的转角变形为 θ_{j-p}，主要表现为左侧耗能钢板受拉变形引起的绕点 O 的转动，可按下式近似计算：

$$\theta_{j-y}=\frac{\varepsilon_{a,y}d}{\frac{t}{2}+d_t} \tag{11}$$

式中：d 为中间两行相邻螺栓的间距，$\varepsilon_{a,y}$ 为耗能钢板材料的屈服应变，其取值见表 2。

4.3　极限状态

峰值状态下装配节点处的受力计算简图如图 18所示。



(a) 钢板受力图 (b) 榫头受力图

图 18 屈服状态下节点受力示意

Fig. 18 Schematic diagram of joint stress under peak state

强化承载阶段的最终时刻为峰值承载状态，近似认为节点此时主要特征为：左侧耗能钢板受拉到达强化后的极限强度 $f_{a,u}$，竖向轴压力因水平位移产生较大的附加弯矩，且榫头侧向压应力分布近似改变为双折线。假定右侧耗能钢板仍为受压屈曲状态，此状态下的节点受力计算简图见图 18。则节点峰值受弯承载力 M_{j-p} 的计算如下：

$$M_{j-p} = M_{N-p} + M_{h-p} + M_{b-p} + M_{s-p} \tag{12}$$

在峰值状态下，榫头转动角度较大，考虑到轴压力引起的二阶弯矩效应，轴压力产生的绕点 O 的抵抗弯矩 M_{N-p} 会减小，因此，轴压力引起的抵抗弯矩 M_{N-p} 按下式近似计算：

$$M_{N-p} = N\frac{h_w}{6} \tag{13}$$

左侧耗能钢板受拉和右侧耗能钢板受压屈曲绕点 O 转动引起的抵抗弯矩 M_{b-p} 按下式计算：

$$M_{b-p} = F_{t-p}\left(d_t + \frac{t}{2}\right) + F_c\left(d_c + \frac{t}{2}\right) \tag{14}$$

$$F_{t-p} = f_{a,u}b_1 t \tag{15}$$

式中：F_{t-p} 为左侧耗能钢板截面受拉产生的拉力，$f_{a,u}$ 为耗能钢板材料的极限强度。

前后两侧耗能钢板受到线性分布的拉压应力作用，其最大拉应力到达钢板材料极限强度 $f_{a,u}$，且其中性轴竖直过点 O，如图 18(b) 所示。因此，两块钢板因受弯而引起的绕点 O 的抵抗弯矩 M_{h-p} 按下式计算：

$$M_{h-p} = 2f_{a,u}t\frac{d_t^3 + d_c^3}{3d_t} \tag{16}$$

榫头右侧受到的橡胶挤压应力近似认为是沿榫头长度呈双折线分布，如图 18(b) 所示，因此，引起的榫头绕点 O 的抵抗弯矩 M_{s-p} 计算如下：

$$M_{s-p} = \frac{11\sigma_j b_w s^2}{24} \tag{17}$$

故峰值状态下节点弯矩承载力的计算如下：

$$M_{j-p} = N\frac{h_w}{6} + f_{a,u}b_1 t\left(d_t + \frac{t}{2}\right) + \sigma_c bt\left(d_c + \frac{t}{2}\right) + 2f_{a,u}t\frac{d_t^3 + d_c^3}{3d_t} + \frac{11\sigma_j b_w s^2}{24} \tag{18}$$

节点到达峰值承载状态时，装配节点的转角变形 θ_{j-p} 仍以左侧耗能钢板受拉引起的变形为主，此时耗能钢板受拉到达峰值应变，转动计算如下：

$$\theta_{j-p} = \frac{\varepsilon_{a,p}d}{\frac{t}{2} + d_t} \tag{19}$$

式中：$\varepsilon_{a,p}$ 为耗能钢板材料峰值强度对应的应变，其大小见表 2；d 为中间两行相邻螺栓间距。

采用薄板小挠度理论[24]得到 σ_c 的表达式：

$$\sigma_c = k\frac{\pi^2 Et^2}{12(1-\upsilon^2)b^2} \tag{20}$$

已知受压侧钢板的 $a=100$ mm，$b=400$ mm，$t=4$ mm，$E=181.004$ GPa，$\upsilon=0.3$，求得 $K=9.107\ 2$，$\sigma_c=148.98$ N/mm^2。

4.4 骨架曲线模型

由试验可知，装配柱破坏均以节点部位破坏为主，因此，装配柱的水平承载力即可由节点受弯承载力确定。装配柱在屈服状态和峰值状态下的水平承载力 V_y、V_p 如下：

$$V_y = \frac{M_{j-y}}{H_1} \tag{21}$$

$$V_p = \frac{M_{j-p}}{H_1} \tag{22}$$

各特征点的理论荷载值与试验荷载值对比见表 4。可以看出，试件 RECJZ-1、RECJZ-2 的受弯承载力计算公式还是比较符合试验结果的，试件 RECJZ-1 的理论屈服荷载与试验的屈服荷载均值相差 20%，主要是由螺栓杆的滑移和榫头在凹槽内的少量侧移引起的。

表 4 特征点荷载对比

Tab. 4 Comparison of characteristic point loads

试件编号	水平荷载理论值/kN			水平荷载试验均值/kN			误差/%		
	屈服	峰值	极限	屈服	峰值	极限	屈服	峰值	破坏
RECJZ-1	266.33	294.50	250.33	209.09	305.49	259.66	20.7	3.73	3.72
RECJZ-2	273.03	308.80	260.48	254.15	328.65	279.36	4.08	6.42	7.24

混凝土上柱为一弹性悬臂梁,且在屈服状态时就已经到达其弹性极限转角 θ_{c-y},随后在峰值和极限状态下都保持不变。装配柱特征点下对应的水平位移可按下式计算:

$$\Delta_y = H_1\theta_{j-y} + H_1\theta_{c-y} \tag{23}$$

$$\Delta_p = H_1\theta_{j-p} + H_1\theta_{c-y} \tag{24}$$

式中:Δ_y、Δ_p 分别为屈服状态、峰值状态下的加载点水平位移;θ_{j-y}、θ_{j-p} 分别为对应状态下的节点转角变形。

关于混凝土上柱的转角变形弹性极限值 θ_{c-y} 的计算,只需对混凝土上柱进行积分即可,即

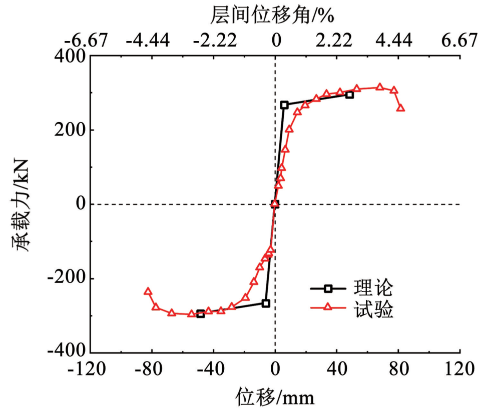
$$\theta_{c-y} = \int_0^{H_c} \frac{M_{c-y}}{H_c K'_{c-y}} x\mathrm{d}x = \frac{M_{c-y}H_c}{2K'_{c-y}} = \frac{H_c\theta'_{c-y}}{2} \tag{25}$$

$$K'_{c-y} = \frac{M_c}{\theta'_{c-y}} \tag{26}$$

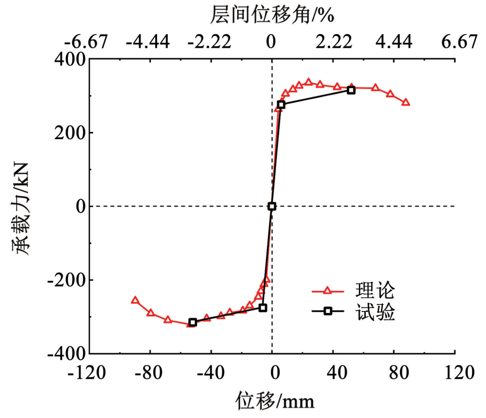
$$\theta'_{c-y} = \frac{\varepsilon_{s,y} + \varepsilon_{cu}}{h} \tag{27}$$

式中:H_c 为混凝土上柱高度;K'_{c-y} 为混凝土截面转动刚度,计算见式(26);M_{c-y} 为受拉钢筋屈服时的混凝土截面最大弯矩;θ'_{c-y} 为受拉纵筋屈服时的混凝土截面转角,计算见式(27);$\varepsilon_{s,y}$ 为钢筋屈服应变,取 0.002 113;ε_{cu} 为混凝土极限应变,取 0.003 3。

图 19 为得到的骨架曲线模型。



(a) RECJZ-1



(b) RECJZ-2

图 19　骨架曲线模型

Fig. 19　Skeleton curve model diagram

由图 19 可以看出,骨架曲线模型和试验得到的骨架曲线整体趋势保持一致,且理论计算的节点屈服荷载、峰值荷载与试验结果较为接近。可知装配柱的理论承载力公式与试验结果较为吻合。

5　结　论

提出了一种"榫卯 + 连接钢板"的新型柱间连接节点,通过对 3 个试件的拟静力加载试验及结果分析,得到如下主要结论:

1) 在柱截面尺寸、剪跨比、纵筋配筋率、混凝土强度均相同的情况下,现浇柱试件 XJZ 为压弯破坏,破坏集中在柱下端塑性铰区,震后难以修复。而新型连接节点柱 RECJZ 试件的破坏集中在连接钢板部位,柱内纵筋应变远小于其屈服应变,试件破坏时纵筋尚处于弹性阶段,震后只需更换外包连接钢板,即可恢复其承载功能。

2) 在榫卯长度、连接钢板厚度、连接螺栓间距均合适时,新型连接节点柱 RECJZ 试件的初始刚度和水平极限承载力均等同于或略高于现浇柱试件 XJZ。

3) 新型连接节点柱 RECJZ 试件的极限变形是现浇试件 XJZ 的 2 倍多,前者的耗能系数约是后者的 5 倍,说明新型连接节点柱 RECJZ 试件有良好的变形和耗能能力。

4) 推导了 RECJ 柱的承载力计算公式,并给出了三折线抗侧骨架曲线模型,与试验骨架曲线进行对比验证了公式和模型的可行性。

5) 榫卯长度、连接钢板厚度、连接螺栓间距是影响这种柱刚度和承载力的关键参数,其合理取值范围尚需进一步研究。

参考文献

[1] 清华大学土木工程结构专家组, 西南交通大学土木工程结构专家组, 北京交通大学土木工程结构专家组, 等. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1

Civil Engineering Structure Expert Group of Tsinghua University, Civil Engineering Structure Expert Group of Southwest Jiaotong University, Civil Engineering Structure Expert Group of Beijing Jiaotong University, et al. Analysis of building damage in wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2008.04.001

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016

Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016

[3] 周绪红, 刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010

ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng. Performance and design of steel tube confined concrete column[M]. Beijing: Science Press, 2010

[4] 姜子钦, 杨晓峰, 张爱林, 等. 可恢复功能装配式中柱节点耗能装置试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 15

JIANG Ziqin, YANG Xiaofeng, ZHANG Ailin, et al. Experimental study on energy dissipation device of assembled central column node with recoverable function[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 15. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0598

[5] WU Chenglong, LIU Jiming, TAN Wenya, et al. Seismic behavior of composite interior joints of prefabricated H-shaped steel reinforced concrete column-steel beam[J]. Structures, 2020, 23: 558. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.11.008

[6] LU Zhiwei, HUANG Jun, DAI Shaobin, et al. Experimental study on a precast beam-column joint with double grouted splice sleeves [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109589. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109589

[7] 吴刚, 冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 1
WU Gang, FENG Decheng. Research progress on basic performance of prefabricated concrete frame joints [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 1. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.02.001

[8] 李青宁, 郑先超, 颜志勇, 等. 高强螺旋箍筋约束混凝土柱连接抗震性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 90
LI Qingning, ZHENG Xianchao, YAN Zhiyong, et al. Experimental study and theoretical analysis of seismic performance of concrete column connections confined by high-strength spiral stirrups [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 90. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.08.011

[9] 郑先超. 新型装配式混合结构抗震体系试验及理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013
ZHENG Xianchao. Experimental and theoretical analysis of seismic system of new prefabricated hybrid structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013

[10] 郑先超, 阎利, 李青宁, 等. 局部外包钢管栓杆式高强箍筋约束混凝土柱与柱连接试验研究与有限元分析[J]. 结构工程师, 2015, 31(4):182
ZHENG Xianchao, YAN Li, LI Qingning, et al. Experimental study and finite element analysis of connection between concrete column and column confined by locally-clad steel pipe bolt-type high-strength stirrups[J]. Structural Engineer, 2015, 31(4):182. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2015.04.026

[11] 张兴虎, 应一辉, 潘树宾, 等. 装配整体式浆锚插筋及钢板箍连接柱试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(3): 310
ZHANG Xinghu, YING Yihui, PAN Shubin, et al. Experimental study on assembly of integral grout anchor inserts and steel plate hoop connecting column [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2012, 44(3): 310. DOI:10.15986/j.1006-7930.2012.03.018

[12] 应一辉. 装配整体式浆锚插筋连接混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012
YING Yihui. Experimental study on the seismic performance of assembled monolithic grout-anchored and reinforced concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012

[13] 张微敬, 王桂洁, 张晨骋, 等. 钢筋机械连接的装配式框架抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 47
ZHANG Weijing, WANG Guijie, ZHANG Chencheng, et al. Experimental study and finite element analysis of seismic performance of prefabricated frames with mechanical connections of steel bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 47. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2019.05.005

[14] 马哲昊, 张纪刚, 梁海志, 等. 人工消能塑性铰装配式钢筋混凝土框架结构抗震性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 535
MA Zhehao, ZHANG Jigang, LIANG Haizhi, et al. Seismic performance of artificial energy dissipation plastic hinge assembly reinforced concrete frame structure [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 535. DOI: 10.11990/jheu.201812084

[15] 吕英婷, 郭子雄, 黄婷婷, 等. 装配式震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 1
LV Yingting, GUO Zixiong, HUANG Tingting, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated seismic damaged replaceable composite columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 1. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2020.04.001

[16] 李春雨, 童超, 吴京, 等. 可更换耗能连接件的装配式混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 69
LI Chunyu, TONG Chao, WU Jing, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated concrete frame structures with replaceable energy-consuming connections[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 69. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2020.0151

[17] 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 等. 震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 45
LIU Yang, GUO Zixiong, JIA Leipeng, et al. Experimental study on seismic performance of replaceable composite columns damaged by earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 45. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0150

[18] 罗青儿, 张仟朋, 程文瀼, 等. 装配整体式钢筋混凝土框架柱榫式接头的试验研究[J]. 工业建筑, 2008(10): 48
LUO Qinger, ZHANG Qianpeng, CHENG Wenying, et al. Experimental study on the tenon joints of assembled monolithic reinforced concrete frame columns [J]. Industrial Construction, 2008(10): 48. DOI:10.13204/j.gyjz2008.10.014

[19] 汪梅, 梁书亭, 李刻铭, 等. 新型全装配式干式连接框架柱的试验研究[J]. 建筑技术, 2010, 41(1): 52
WANG Mei, LIANG Shuting, LI Keming, et al. Experimental research on a new type of fully assembled dry connection frame column[J]. Building Technology, 2010, 41(1): 52. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2010.01.016

[20] 汪梅, 吴炯, 何孝春, 等. 钢筋混凝土全预制柱的受力分析[J]. 特种结构, 2011, 28(5): 9
WANG Mei, WU Jiong, HE Xiaochun, et al. Force analysis of reinforced concrete fully precast columns[J]. Special Structure, 2011, 28(5): 9. DOI:10.3969/j.issn.1001-3598.2011.05.003

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of physical and mechanical properties of concrete: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019

[22] 国家市场管理总局. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010
State Administration for Market Regulation. Tensile test of metallic materials part 1: room temperature test method: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010

[23] ACI. Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2005

[24] TIMOSHENKO S P. Theory of elasticity[M]. Beijing: Science Press, 1970

（编辑　刘　彤）