

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.03.002

竖向荷载作用下短肢剪力墙结构承载能力试验研究

卢学臣, 杨晓华, 周磊

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 短肢剪力墙结构是现今运用较普遍的抗侧力结构, 为了研究这种抗侧力能力较好的结构在竖向荷载作用下的承载能力, 以一个实际的短肢剪力墙工程结构为背景, 选取靠近顶层附近的三层结构进行简化, 结合结构模型试验的相似性原理, 按照 1:4 的缩尺比例制作了一个三层两跨短肢剪力墙结构试验模型。通过在试验模型第二层楼板施加竖向均布荷载的试验表明, 短肢剪力墙结构具有良好的承载性能, 竖向荷载作用下墙肢整体受弯, 连梁端部和墙板连接处为短肢剪力墙结构的薄弱区。结合试验结果阐述了短肢剪力墙中 L 型和 T 型截面在压弯复合作用下受力性能和破坏机理。

关键词: 短肢剪力墙; 竖向荷载; 弹性范围; 承载能力

中图分类号: TU312+1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)03-0006-06

Experiment Research on Bearing Behavior of Short Limb Shear Wall Structures Under Vertical Load

LU Xuechen, YANG Xiaohua, ZHOU Lei

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Short pier shear wall structure is commonly applied for the lateral load resistance. In order to study an improved bearing capacity of this structure to resist lateral force under vertical load, with a practical short leg shear wall structure taken as its background, with the three layer structure near the top layer much simplified, and with the similarity principle of structural model test adopted, a test model of three-storied short leg shear wall structure with two spans has been established with a scale ratio of 1:4. Experimental results of the second floor structure under the vertical load show that short leg shear wall structure exhibits a better bearing capacity under vertical load. Under the action of the vertical load, with the whole wall limb in a bending state, the end of tie-beam and the wallboard joint proves to be the weak area of short pier shear wall structure. Finally, based on the testing results, this paper expounds the mechanical properties and failure mechanism of L and T sections in short leg shear walls under the action of bending composite.

Keywords: short limb shear wall; vertical load; elastic range; bearing capacity

0 引言

短肢剪力墙是一种介于异形柱和剪力墙的抗侧力构件^[1], 其结构结合了框架结构和剪力墙结构的优点。由于短肢剪力墙不像框架结构那样在室内有突出

墙面的柱子, 非常适用办公和商业住宅建筑, 所以成为高层建筑结构广泛运用的结构体系之一。近年来, 国内外学者对短肢剪力墙结构进行了大量研究, 得到了一些有价值的理论, 但研究内容大多侧重于短肢剪力墙结构在水平荷载作用下的抗剪和抗震性能,

收稿日期: 2016-12-10

作者简介: 卢学臣(1990-), 女, 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高层建筑结构,

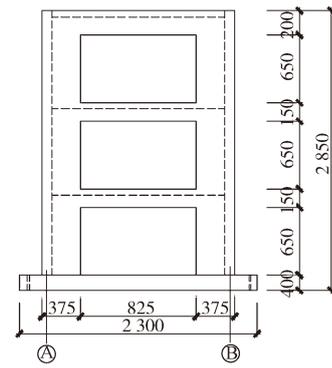
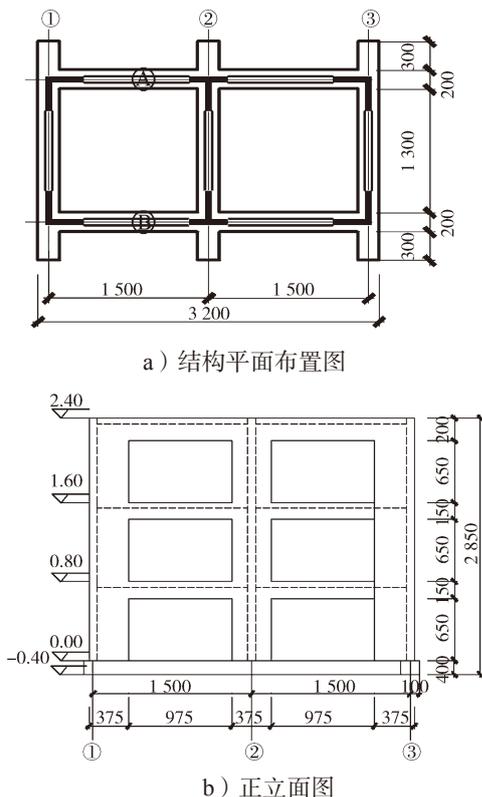
E-mail: 2206592317@qq.com

而利用整体结构模型对短肢剪力墙结构在竖向荷载作用下受力性能^[2-3]的研究较少。

本文以一个实际的短肢剪力墙工程结构为背景, 选取靠近顶层附近的三层结构进行简化, 结合结构模型试验的相似性原理, 按照 1:4 的缩尺比例制作了一个三层两跨短肢剪力墙结构试验模型^[4-6]。用堆载法模拟均布荷载对结构模型进行竖向荷载作用下的受力试验, 分析短肢剪力墙结构各构件的变形和受力情况, 了解这种抗侧能力较强的短肢剪力墙结构在竖向荷载作用下的受力性能, 以期为后续研究提供依据。

1 试验模型制作

课题组制作的短肢剪力墙结构试验模型完全按照国家现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[7]要求进行设计和施工, 结构试验模型共 3 层, 按照 1:4 的缩尺比例进行制作, 各楼层高度为 800 mm, 模型四角设置 L 型短肢剪力墙, 肢厚比为 5, 墙厚为 75 mm; 各肢长均为 375 mm, 模型中间设置 T 型短肢剪力墙, 墙厚为 75 mm; 其中翼缘部分肢长 375 mm, 腹板部分肢长为 375 mm, 连梁截面尺寸为 75 mm × 150 mm, 顶层连梁截面为 75 mm × 200 mm; 楼面板及屋面板板厚为 40 mm, 结构模型底部设置与试验平台固定的地基梁, 地基梁高为 400 mm, 结构模型总高度为 2 850 mm。结构试验模型如图 1 所示, 单位为 mm。



c) 侧立面图

图 1 结构试验模型

Fig. 1 A structural test model

根据结构模型试验相似性原理对结构试验模型进行配筋, 短肢剪力墙墙肢纵筋采用 C4 钢筋, 钢筋间距为 90 mm, 墙肢在转角处设有暗柱, 水平箍筋为 C4@100。墙肢配筋如图 2 所示, 单位为 mm。连梁上下各布置 3 根 C6 钢筋, 箍筋布置为 B4@150; 楼面板及屋面板受力钢筋为 B4@200, 按双向板要求设置; 结构试验模型混凝土强度等级为 C30。

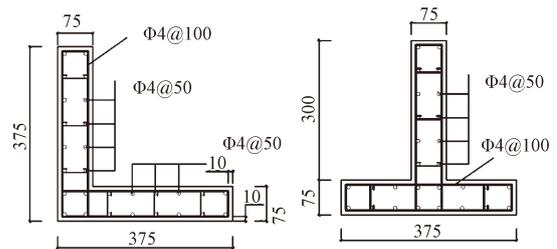


图 2 墙肢配筋图

Fig. 2 Reinforcement drawing of wall limbs

本次结构模型试验在湖南工业大学结构实验室完成, 根据实验室现有台座的要求将底层基础梁每端延伸出 300 mm, 设置固定锚栓, 以便固定。安装完成后的结构试验模型如图 3 所示。



图 3 模型试验现场图

Fig. 3 A scene diagram of model tests

2 试验目的和方法

2.1 试验目的

1) 测定各跨梁端、跨中底面以及节点核心区域钢筋在各加载阶段的应变, 了解结构整体受力性能;

2) 测定连梁和短肢剪力墙在各加载阶段的竖向位移, 根据竖向荷载 - 位移关系确定短肢剪力墙结构在荷载作用下的变形规律。

2.2 测点布置

2.2.1 位移测试

考虑到结构试验模型、试验现场固定条件和施加外荷载的对称性, 利用堆载法在结构试验模型的第二层楼板施加外荷载, 为测量各级竖向荷载作用下结构发生的位移, 在第二层一个格构区的周边梁跨中布置位移百分表测量其跨中挠度, 共布置 3 个挠度测点, 在结构第二层楼面短肢剪力墙和连梁连接边节点和中间节点处布置 2 个位移百分表, 在楼板底面中心和 1/4 跨位置上各布置一个位移测点。人工读取记录各级荷载作用下的竖向位移数值, 各百分表的量程均为 50 mm。

2.2.2 应变测试

以第二层楼板节点为主要研究对象, 在短肢剪力墙与连梁连接的边节点及中间节点的墙肢和连梁钢筋上设置钢筋应变片, 作为对比, 在施加外荷载的一层楼面节点相应位置也布置钢筋应变片。墙肢纵筋和梁纵筋应变片粘贴位置如图 4 所示。为测量连梁的受力情况, 在第二层连梁的中间位置的上侧和下侧纵向钢筋上粘贴应变片, 应变片的具体位置如图 5 所示, 单位为 mm。

为进一步分析和探讨短肢剪力墙结构受力和变形情况, 了解结构构件横截面上的变形规律, 在结构试验模型第二层楼面的部分连梁端部、连梁跨中、短肢剪力墙端顶面、楼层中间部位和墙端底面布置混凝土应变片, 用来测量在各加载阶段该处混凝土表面产生的应变。

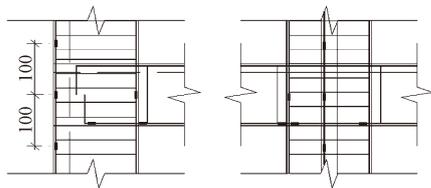


图 4 钢筋应变片在结构中位置

Fig. 4 Position in the structure of steel bar strain gauge

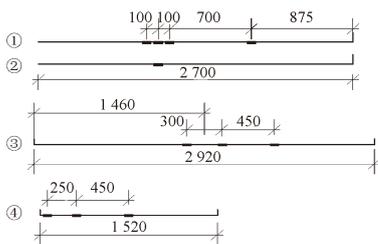


图 5 应变片位置标注

Fig. 5 Position of reinforcing strain gauges

2.3 加载方法和加载制度

2.3.1 加载方法

本试验采用堆集加载法模拟均布荷载^[8]。为了方便加载, 试验开始前在试验模型的第二层楼板上画出大小相同的方格, 荷载分级施加, 堆载物均匀地放置在楼板上所绘出的方格内。

2.3.2 加载制度

1) 预加载

在结构试验模型和设备安装完成后, 先进行预加载。预加载采用均布荷载方式, 将加载物均匀地放置在第二层楼板事先画好的方格内, 预加荷载为 1.5 kN/m², 加载后持荷 15~20 min 后卸载, 重复 3 次, 待一切正常后, 正式开始试验。

2) 正式加载

本次试验分 2 次完成, 第一次模拟荷载最不利荷载布置的情况, 只在第二层某一个区格楼面板上施加外荷载 (单跨加载); 第二次在第二层楼面板上同时施加外荷载 (满布加载), 外荷载逐级增加分级加入, 每级荷载增加 0.75 kN/m², 施加的最大荷载为 6.00 kN/m², 每级荷载施加完后, 持荷 20 min, 待结构变形稳定后, 开始读数。荷载施加示意图如图 6 所示。



图 6 第二层楼面加载示意图

Fig. 6 A loading diagram of the second floor

3 试验结果分析

3.1 结构竖向位移

表 1~2 分别给出了第二层梁跨中在各级均布荷载作用下第二层连梁跨中的挠度值。由表可知, 单跨布置荷载时, 中间横向连梁跨中最大挠度为 0.128 mm, 左侧边横梁和左下纵向边梁挠度相差不大。两跨同时加载时, 中间横向连梁跨中最大挠度达到 0.271 mm, 其最大挠度值约为左侧边横梁和左下纵向边梁跨中挠度最大值的 2 倍。

表1 单跨布置均布荷载第二层连梁跨中挠度

Table 1 The second floor beam midspan deflection under the single span arrangement of uniformly distributed load

加载工况 / (kN·m ⁻²)	不同位置的挠度 /mm		
	左侧横梁	中间横梁	左下纵梁
0.75	0.009	-0.014	0.029
1.50	0.016	0.002	0.041
2.25	0.033	0.026	0.064
3.00	0.072	0.053	0.071
3.75	0.077	0.062	0.090
4.50	0.099	0.078	0.099
5.25	0.102	0.106	0.107
6.00	0.109	0.128	0.114

表2 两跨同时布置均布荷载第二层连梁跨中挠度

Table 2 The second floor beam midspan deflection under the two cross arranged simultaneously distributed load

加载工况 / (kN·m ⁻²)	不同位置的挠度 /mm		
	左侧横梁	中间横梁	左下纵梁
0.75	0.080	0.047	0.014
1.50	0.090	0.072	0.026
2.25	0.095	0.092	0.021
3.00	0.115	0.131	0.053
3.75	0.125	0.134	0.100
4.50	0.130	0.185	0.094
5.25	0.140	0.200	0.115
6.00	0.150	0.271	0.139

表3~4给出的是第二层墙板连接处在各级均布荷载作用下的竖向位移。分析表中数据可知,单跨布置荷载时,墙板连接处的竖向位移在加载初期变化规律不明显,在中后期均为负值,说明墙板连接处随着荷载的增加而下沉,力也通过墙板传递给短肢剪力墙。左侧L型墙肢与中间T型墙肢板角连接处的竖向位移相近。两跨同时受到均布荷载时,中间支座上的负弯矩达到最大值,位移也达到最大值,为-0.186 mm。

表3 单跨布置均布荷载第二层墙板连接角处位移

Table 3 The second floor wall angle displacement under the second floor beam midspan deflection

加载工况 / (kN·m ⁻²)	不同位置的位移 /mm	
	左侧L型墙肢	T型墙肢
0.75	0.151	0.026
1.50	0.079	-0.010
2.25	0.080	-0.008
3.00	-0.010	-0.043
3.75	-0.029	-0.055
4.50	-0.039	-0.063
5.25	-0.067	-0.074
6.00	-0.058	-0.076

表4 满布均布荷载第二层墙板连接角处位移

Table 4 The second floor wall angle displacement under the two cross arranged uniformly distributed load

加载工况 / (kN·m ⁻²)	不同位置的位移 /mm	
	左侧L型墙肢	T型墙肢
0.75	0.004	-0.016
1.50	-0.012	-0.011
2.25	-0.020	-0.004
3.00	-0.032	-0.056
3.75	-0.045	-0.126
4.50	-0.054	-0.136
5.25	-0.075	-0.150
6.00	-0.084	-0.186

3.2 结构应变

对试验采集的结构第二层的混凝土应变和钢筋应变数据进行处理,分析梁跨中底面和梁端顶面的混凝土应变以及连梁跨中纵筋和墙肢纵筋的应变变化情况。

3.2.1 连梁跨中底面混凝土应变

连梁跨中底面混凝土在竖向均布荷载作用下的应变变化如图7所示。图中应变为微应变 $\mu\epsilon$ 的倍数。单跨加载时,混凝土应变随外加荷载基本保持线性变化。满布加载时,中间横梁和左侧横梁应变明显大于单跨加载,而纵梁的应变变化不大。

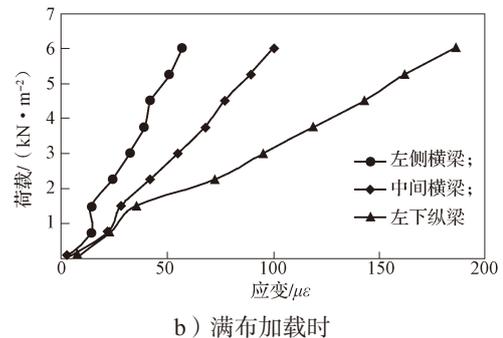
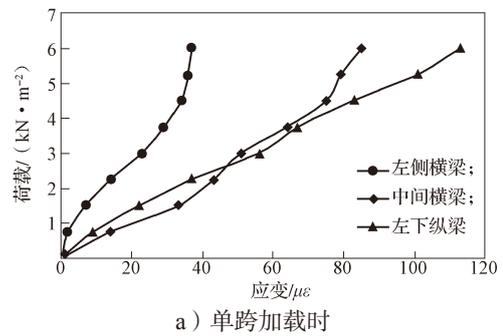


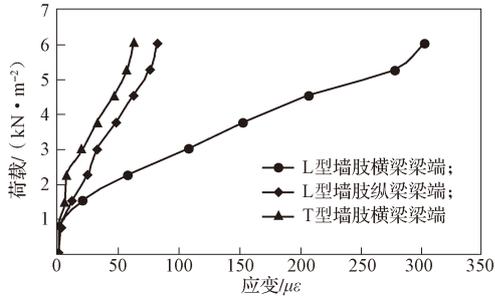
图7 连梁跨中底面混凝土应变

Fig. 7 Concrete strain in middle span of coupling beams

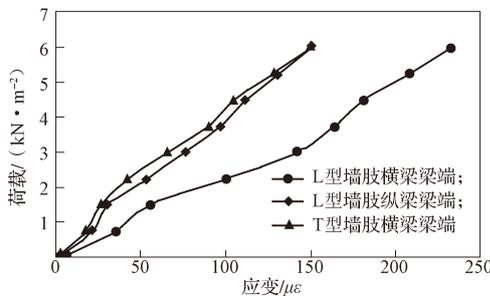
3.2.2 梁端顶面混凝土应变

图8给出了单跨加载和满布加载时连梁端部顶面混凝土应变与外荷载的关系曲线。单跨加载时(如图8a所示),角部L型墙肢两端纵梁和横梁顶面混

凝土应变完全不同，横梁混凝土应变远大于纵梁混凝土应变，而中间 T 型墙肢横梁混凝土应变略小于 L 型墙肢横梁混凝土应变。满布加载时(如图 8b 所示)，随着荷载的增加，连梁端部混凝土顶面混凝土应变呈线性变化，T 型墙肢横梁梁端顶面混凝土应变约为单跨加载时的 2 倍。



a) 单跨加载时



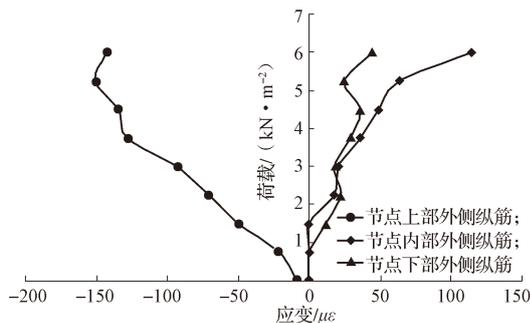
b) 满布加载时

图 8 连梁端顶面混凝土应变

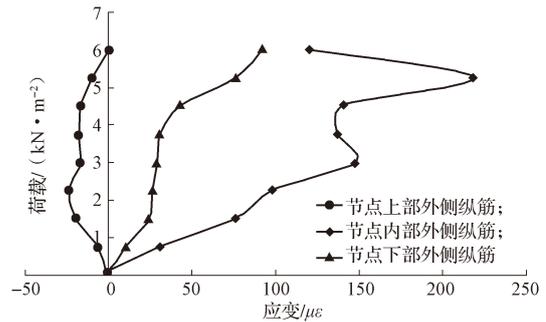
Fig. 8 Concrete strain on the top of beams with distributed load

3.2.3 墙肢纵筋应变

图 9a 和图 9b 分别给出了 T 型墙肢和 L 型墙肢中心暗柱节点外侧纵筋在节点核心区域上、中、下部位受竖向均布荷载作用下的应变曲线。在竖向荷载作用下两类墙肢的节点核心区都呈小偏心受压状态，节点核心区受压弯作用。T 型墙肢节点核心区沿翼缘(纵向梁)方向的两个弯矩大小相近，方向相反，弯矩作用效果相互抵消，在沿腹板(横向梁)方向存在弯矩作用。L 型墙肢节点核心区则同时受到双向弯矩作用。两类墙肢节点核心区外侧纵筋在上部处于受压状态，而在中部和下部处于受拉状态。



a) T 型墙肢中心暗柱节点



b) L 型墙肢中心暗柱节点

图 9 墙肢纵筋应变

Fig. 9 Longitudinal reinforcement strain of wall limbs

4 短肢剪力墙各类截面的受力性能和破坏机理

分析试验结果可知，短肢剪力墙结构中 L 型截面的墙肢处于双向压弯的受力状态，其截面中和轴的位置既不垂直于弯矩的作用平面也不平行于截面边缘，并会因很多因素的改变而改变，如混凝土的强度、钢筋配筋率、加载方式、加载密度、截面尺寸等。而 T 型截面的墙肢处于单向压弯的受力状态，有关文献指出^[9-10]，可根据截面的破坏特性和轴向力或相对偏心距的区别将截面的破坏形式分为两种主要的形式，即受压破坏和受拉破坏。轴压比较大，或者偏心距较小的截面，一般发生受压破坏；轴压比较小或者相对偏心距较大的截面，一般发生受拉破坏。

4.1 L 型截面

受压破坏的特征是混凝土先达到抗压强度，离轴向力较远一侧的钢筋，不管其处于受拉状态还是受压状态，都不会达到屈服强度，试件破坏之前没有明显的预兆，属于脆性破坏。受拉破坏的特征是受拉区钢筋先达到屈服强度而破坏。破坏前会出现一条开展和延伸都很明显的主裂缝，且主裂缝区域的受拉钢筋应力变化非常快，随着受拉钢筋的屈服，受压区的高度逐渐减小，最后受压区的混凝土达到极限抗压强度而破坏。这种破坏形式有明显的预兆，构件的破坏特征属于塑性破坏，其承载能力受受拉区钢筋的强度等级和配筋率的影响。

4.2 T 型截面

受压破坏最开始发生在受压较大的区域，该区域的受压纵筋达到屈服强度，然后混凝土出现竖向裂缝，随着外荷载继续增加，竖向裂缝延伸扩展直到混凝土被压碎。而受压较小或者处于受拉状态的区域内的纵筋不会达到屈服强度。如果受拉区域的混凝土出现水平裂缝，裂缝也不会开展太多；没有出现水平裂缝，受压破坏区会比较长，而破坏荷载

与产生竖向裂缝时的荷载十分相近, 以致没有明显的破坏征兆。

受拉破坏最开始发生在受拉区, 距离受拉区较远一侧的纵筋先达到受拉屈服强度, 这时混凝土会产生水平裂缝。随着外荷载继续增大, 受拉区域的纵向受拉钢筋先后达到屈服强度, 横向水平裂缝快速延伸, 受压区高度也快速降低, 然后受压区混凝土出现纵向裂缝, 裂缝继续增加直到混凝土被压碎试件破坏。破坏时, 混凝土的压碎区段一般会比较短, 距离中和轴较远的受压区纵筋也可达到受压屈服强度。

除上述两种主要的破坏形式外, 还有一种处于大小偏压分界的破坏形式, 即当受拉区钢筋屈服的同时, 受压区的混凝土达到极限抗压强度而被破坏。但在实际应用中这种破坏形式极少发生, 所以不作为主要的破坏形式。

5 结论

1) 在弹性范围内, 现浇混凝土短肢剪力墙结构变形特征与框架结构接近, 楼面荷载通过楼板传递给框支梁, 外加荷载的施加满足叠加原理。由试验结果可看出, 结构的最终变形与施加荷载的顺序无关。

2) 在竖向均布荷载作用下, 现浇混凝土短肢剪力墙结构呈现出较好的承载能力, 连梁与短肢剪力墙连接处存在应力集中现象, 在此处测得的混凝土应变和钢筋应变存在突变现象, 此处为短肢剪力墙结构的薄弱区域。

3) 通过墙肢节点内纵筋应力和应变分析可知, 在竖向均布荷载作用下, 墙肢节点区域呈现压弯复合受力状态。

参考文献:

- [1] 容柏生. 高层住宅建筑中的短肢剪力墙结构体系[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(6): 1-6.
RONG Baisheng. High-Rise Residential Building in the Short-Leg Shear Wall Structure[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 1-6.
- [2] 周天华, 管宇, 吴函恒, 等. 钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构竖向受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014(9): 27-34.
ZHOU Tianhua, GUAN Yu, WU Hanheng, et al. Research on Vertical Mechanical Behavior of Steel Frame-Prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall Fabricated Structure[J]. Journal of Building Structures 2014(9): 27-34.
- [3] 管宇, 周天华, 吴函恒. 多高层钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构竖向受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014(13): 64-72.
GUAN Yu, ZHOU Tianhua, WU Hanheng. Research on the Vertical Mechanical Behavior of Multi-Storey and High-Rise Steelframe-Prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall Fabricated Structure[J]. Journal of Building Structures, 2014(13): 64-72.
- [4] 周明华. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京: 东南大学出版社, 2010: 28-72.
ZHOU Minghua. Civil Engineering Structure Testing and Detection[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2010: 28-72.
- [5] 鲁楠. 短肢剪力墙节点受力性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
LU Nan. Seismic Performance of Joint of Short Limb Shear Wall[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [6] 李晓蕾. 高层建筑短肢剪力墙结构的力学模型与试验研究[D]. 西安: 西安建科技大学, 2011.
LI Xiaolei. Mechanical Model and Test Study of High-Rise Building on Short-Leg Shear Wall Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [7] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 79.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 79.
- [8] 杨晓华. 无粘结预应力现浇混凝土管式空心板柱结构承载能力及抗震性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
YANG Xiaohua. Seismic Performance and Load-Carrying Capacity of Unbonded Prestressed Concrete Cellular Slab-Colum Structures[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [9] 陈云霞, 刘超, 赵燕静, 等. L形、T形截面钢筋混凝土双向压弯构件正截面承载力的研究[J]. 建筑结构, 1991(1): 11-15.
CHEN Yunxia, LIU Chao, ZHAO Yanjing, et al. The Research on the Bearing Capacity of T and L-Shaped Section R. C. Members Subjected to Axial Compression[J]. Building Structures, 1991(1): 11-15.
- [10] 陈云霞, 高云海, 张玉秋, 等. T形截面钢筋砼压弯构件正截面承载力及延性[J]. 天津大学学报, 1998, 33(1): 1-10.
CHEN Yunxia, GAO Yunhai, ZHANG Yuqiu, et al. Strength and Ductility of T-Section R. C. Members Subjected to Axial Compression and Biaxial Bending[J]. Journal of Tianjin University, 1998, 33(1): 1-10.

(责任编辑: 申剑)