

单排配筋剪力墙结构单元工作性能试验研究

杨兴民, 曹万林, 张建伟, 张彬彬

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 为研究双向单排配筋混凝土剪力墙和双向双排配筋混凝土剪力墙空间力学性能的差异, 对 1 个 1/2 缩尺的双向单排配筋混凝土剪力墙结构单元模型进行了单向重复竖向荷载下的试验研究. 模型的一侧墙体为双向双排钢筋, 另一侧为双向单排配筋, 对应楼板中心位置施加竖向荷载, 通过传力装置向楼板均衡施加荷载. 在试验的基础上, 分析了试件的承载力、滞回特性、刚度、墙体平面外工作性能、破坏特征, 并用屈服线分析法计算了模型的竖向承载能力. 试验表明, 即使在楼板严重破坏的情况下, 由于剪力墙的腹板与翼缘的共同工作, 楼板两侧墙体的滞回曲线和墙体平面外挠度都比较接近, 两侧墙体与楼板的相互作用差异不大, 两侧墙体平面外的工作性能相近. 研究结果表明, 经过合理设计的双向单排配筋剪力墙可以满足抗震要求.

关键词: 双向单排配筋; 混凝土剪力墙结构; 墙体平面外工作性能; 屈服线法; 试验研究

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)01-0072-08

在黏土砖禁用和国家墙改政策的推动下, 出现了多种新型多层建筑结构体系, 如混凝土小型空心砌块结构^[1]、异形柱框架结构^[2-3]、多层钢结构^[4-5]等, 然而这些新型的结构仍存在着诸多质量缺陷. 砌体结构的抗剪、抗拉强度主要由砌块与砂浆的黏结强度来决定, 使得砌体的抗剪、抗拉强度较低, 其在结构或构件中存在着裂缝开展过早、过大、抗震性能较差等问题. 住宅建筑的平面布局决定了钢结构的柱网间距较小, 加之多层建筑的总高度低, 钢材强度高、质量轻的材料性能优势难以发挥, 每建筑平方米用钢量较高. 异形柱框架结构中柱肢截面的高厚比较小, 在一定条件下会对结构抗震性能产生一些不利影响. 钢筋混凝土剪力墙结构是住宅建筑中常用的结构形式, 具有良好的抗震性能和防火性能, 因此研究较为经济适用的多层住宅混凝土剪力墙结构, 确定其合理的配筋构造与墙体厚度是目前工程中亟待解决的问题. 现行混凝土结构设计规范^[6]、建筑抗震设计规范^[7]和高层建筑混凝土结构技术规程^[8]中有关剪力墙的配筋方式与构造也主要是针对高层建筑结构的, 因此有必要研究更为经济合理的多层剪力墙住宅结构的设计方法. 实践表明, 厚度 140 mm 的剪力墙即可满足多层混凝土剪力墙住宅结构的要求, 这种情况下采用部分免拆模施工的双向单排配筋混凝土剪力墙不仅施工较为简便, 而且可以解决混凝土剪力墙开裂的问题. 双向单排配筋剪力墙的工作性能、特别是单排配筋剪力墙的平面外工作性能是工程界极为关注的问题. 为此, 本文设计了一个混凝土剪力墙结构单元, 用以比较双向单排配筋混凝土剪力墙与双向双排配筋混凝土剪力墙的工作性能.

1 试验概况

混凝土剪力墙结构单元为 SWST(1), 按照 1:2 缩尺, 模型的层高为 1 500 mm, 墙肢厚度为 70 mm, 一面墙体采用双向双排配筋, 竖直分布筋和水平分布筋均为 $\phi 4@178$, 一面墙体采用双向单排配筋, 竖直分布筋和水平分布筋均为 $\phi 4@89$, 混凝土强度等级为 C20. 试件配筋图见图 1.

混凝土剪力墙结构单元为 SWST(1) 的楼板和墙体均采用 C20 商品混凝土浇注, 混凝土立方体抗压强度实测值为 21.52 MPa. 钢筋的力学性能见表 1.

收稿日期: 2008-12-15.

基金项目: 北京市科技攻关课题(Y06050600007022); 北京市属市管高校拔尖创新人才基金资助项目(05004311200501).

作者简介: 杨兴民(1979—), 男, 河北沧州人, 博士研究生.

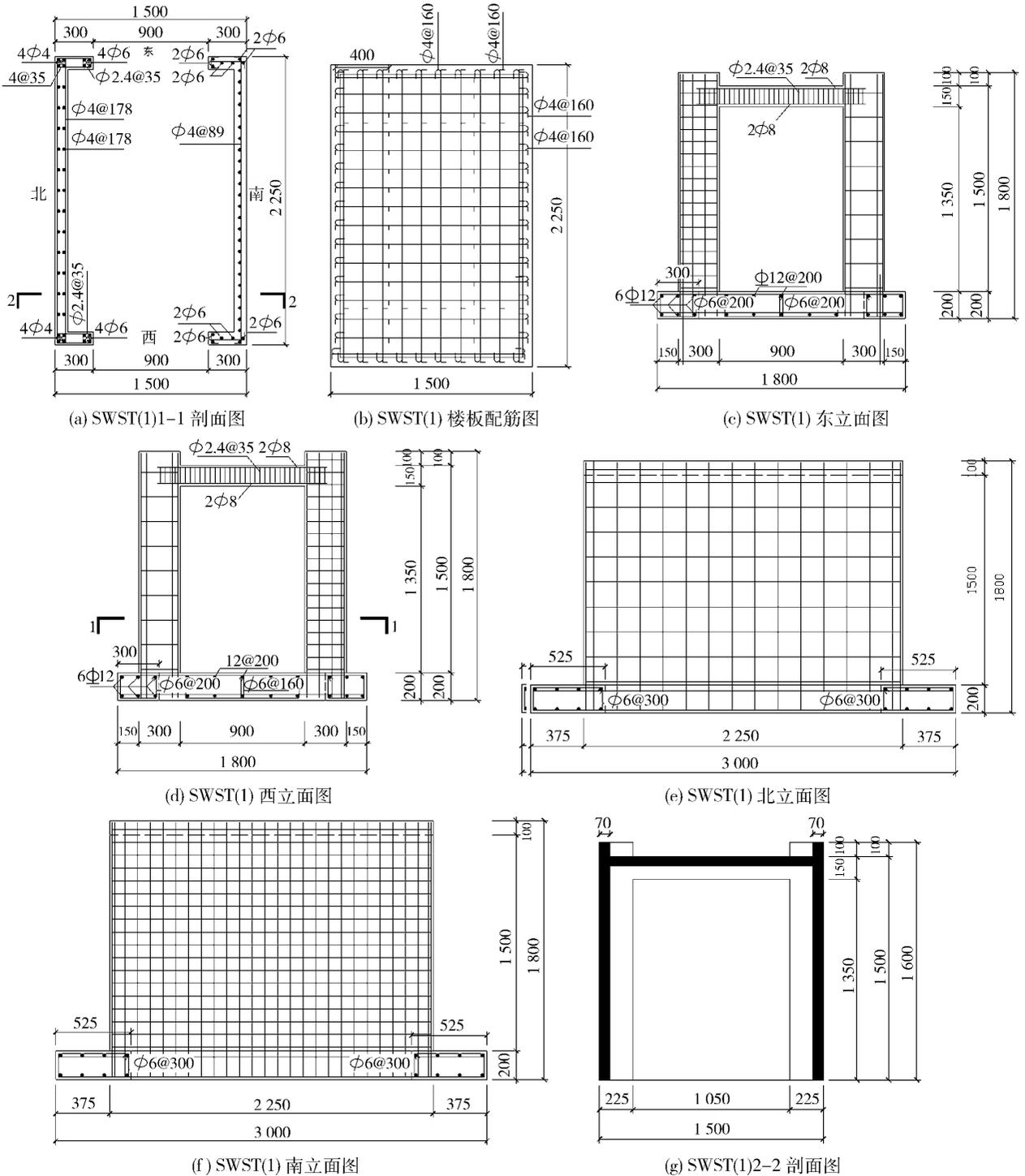


图 1 SWST(1) 配筋图(单位: mm)

Fig. 1 Steel bar details of SWST(1)

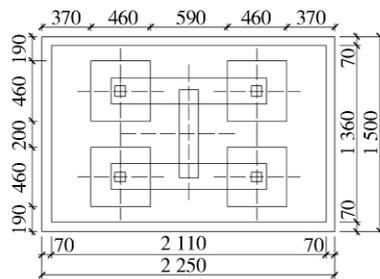
在楼板顶部加单向重复荷载,以研究双排配筋墙体和单排配筋墙体与楼板共同工作性能的差异。在楼板顶部放置 4 块钢板,钢板上铺砂子找平,4 块钢板上再各放 1 块小钢板,在小钢板上沿墙体长边放置 2 根梁,在 2 根梁中间再横搭 1 根短钢梁,在短钢梁中部加竖向荷载。在不同阶段采用不同的指标控制加载,加载的弹性阶段采用荷载控制,加载的弹塑性阶段采用位移控制。在楼板底部的形心处布置百分表 ⑧,靠近双排钢筋墙体的西侧钢板形心下面布置百分表 ⑦,靠近单排钢筋墙体西侧的钢板形心下面布置表 ⑨。沿双排配筋墙体从上至下在 4 等分线处布置 3 个百分表,从上到下编号依次为表 ①、表 ②、表 ③;沿单

排配筋墙体从上至下在4等分线处布置3个百分表,从上到下编号依次为表④、表⑤、表⑥。用IMP数据采集系统采集各百分表位移、竖向荷载和钢筋的应变,并用百分表位移和相应的竖向荷载绘制滞回曲线,人工测绘裂缝。试验加载方案、加载现场和电子位移计布置见图2。

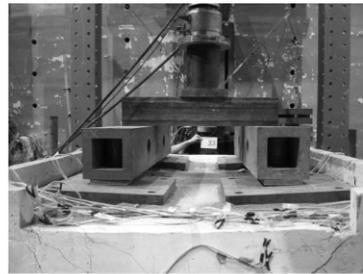
表1 钢筋的力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel bars

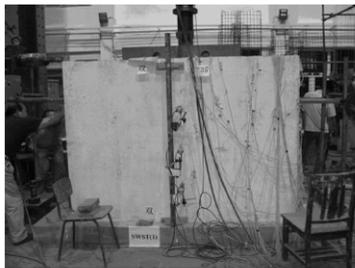
钢筋	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	延伸率/%	弹性模量/GPa
$\phi 2.4$	238.69	320.56	21.37	188
$\phi 4$	632.76	753.62	13.28	190
$\phi 6$	400.26	550.59	19.67	201
$\phi 8$	352.95	460.30	17.61	199



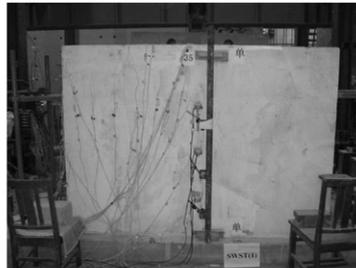
(a) 试验加载布置图



(b) 试验现场加图



(c) 双排配筋墙体



(d) 单排配筋墙体



(e) 楼板底部

图2 加载方案、百分表布置和现场加载图

Fig. 2 Loading arrangement, arrangement of the dial indicator and Loading photograph of experimental scene

2 试验结果及分析

2.1 承载力

剪力墙结构单元 SWST(1) 的开裂竖直荷载 F_c 、楼板屈服线贯通时竖直荷载 F_y 、极限竖直荷载 F_u 的实测值及其比值见表2。

表2 SWST(1) 的开裂荷载、楼板屈服线贯通时荷载、极限荷载的实测值及其实测值

Table 2 Experimental results of cracking load, load when yield line across the slab and ultimate load

试件编号	F_c /kN	F_y /kN	F_u /kN	μ_{cy}	μ_{cu}	μ_{yu}
SWST(1)	34.97	108.81	200.50	0.321	0.174	0.543

若取楼板的均布活荷载为 2.0 kN/m^2 混凝土的重度为 25 kN/m^3 楼板上铺装的质量为楼板质量的0.2倍,则楼板面荷载为 4.96 kN/m^2 楼板竖向荷载为 14.23 kN , 小于试验所得的开裂荷载。

2.2 滞回曲线和骨架曲线

图 3 为试件在单向重复荷载作用下的“竖直荷载 F -百分表竖直位移 U ”滞回曲线及其骨架曲线。

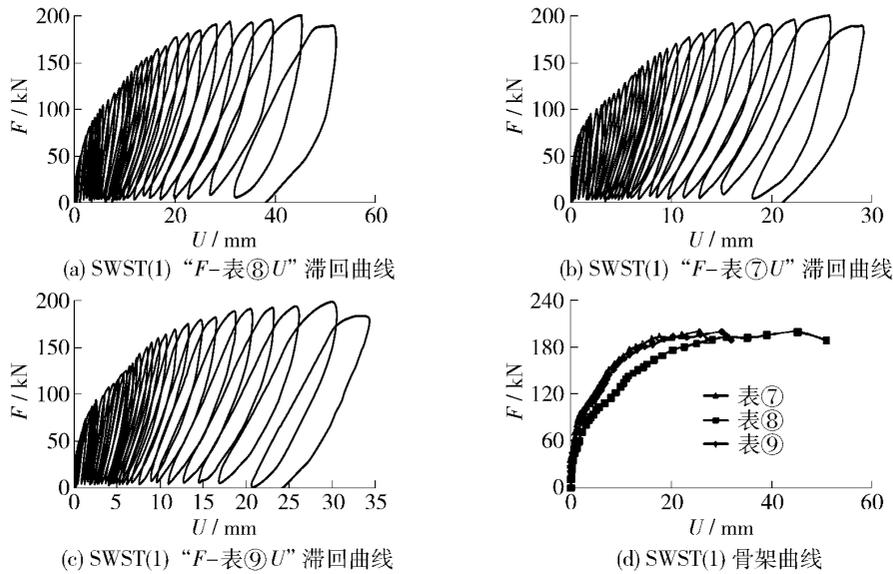


图 3 SWST(1) “ $F-U$ ”滞回曲线和骨架曲线

Fig. 3 Hysteretic curves of SWST(1) and skeleton curve about $F-U$

图 3 中 F 为楼板中心处所加的竖向荷载,表⑧为竖向荷载加载点中心处楼板底部中间位置的百分表,表⑦为靠近双排钢筋墙体西侧的钢板中心处的百分表,表⑨为靠近单排钢筋墙体西侧的钢板中心处的百分表,表⑦、表⑨对称布置。

根据实测结果,在极限竖向荷载作用下,表⑧的竖向位移为 50.78 mm,表⑦的竖向位移为 27.19 mm,表⑨的竖向位移为 32.04 mm。表⑦和表⑨的最大位移差值为 4.85 mm,相差 17%。

由图 3 可见,在楼板严重破坏的情况下,楼板两侧表 7、表 9 对应的滞回曲线仍相近,说明墙体和楼板共同工作的性能接近。

2.3 各阶段刚度实测值及衰减分析

剪力墙结构单元 SWST(1) 的初始弹性刚度 K_0 、试件开裂割线刚度 K_c 和试件屈服线贯通时的割线刚度 K_y 及其比值见表 3。刚度 K -表⑧ U 关系曲线见图 4。 β_{co} 表示试件从初始阶段到开裂时刚度的衰减,为开裂刚度 K_c 与初始刚度 K_0 的比值; β_{yc} 表示试件从开裂到屈服线贯通时刚度的衰减,为试件屈服线贯通时的割线刚度 K_y 与开裂刚度 K_c 的比值; β_{yo} 表示试件从初始阶段到试件屈服线贯通时刚度的衰减,为试件屈服线贯通时的割线刚度 K_y 与初始刚度 K_0 的比值。

由图 4 刚度衰减曲线可见,刚度均随位移增大而减小。

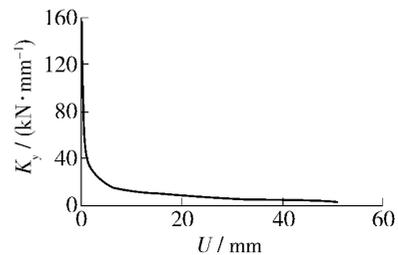


图 4 刚度 K -表⑧ U 关系曲线

Fig. 4 Stiffness attenuation curve of the specimen about $K-U$ of dial indicator 8

表 3 试件刚度实测值及其衰减系数

Table 3 Experimental results of stiffness and its attenuation coefficient

试件编号	$K_0 / (kN \cdot mm^{-1})$	$K_c / (kN \cdot mm^{-1})$	$K_y / (kN \cdot mm^{-1})$	β_{co}	β_{yc}	β_{yo}
SWST(1)	155.36	94.33	20.05	0.607	0.213	0.131

刚度退化过程大体分3阶段:刚度速降阶段,此时裂缝从微裂发展到肉眼可见;刚度次速降阶段,此时结构从开裂到屈服线贯通;刚度缓降阶段,此时结构从屈服线贯通到最大弹塑性变形.

2.4 墙体挠度骨架曲线实测值及分析

图5为试件在单向重复荷载作用下的“竖直荷载 F -墙体挠度 U ”骨架曲线.

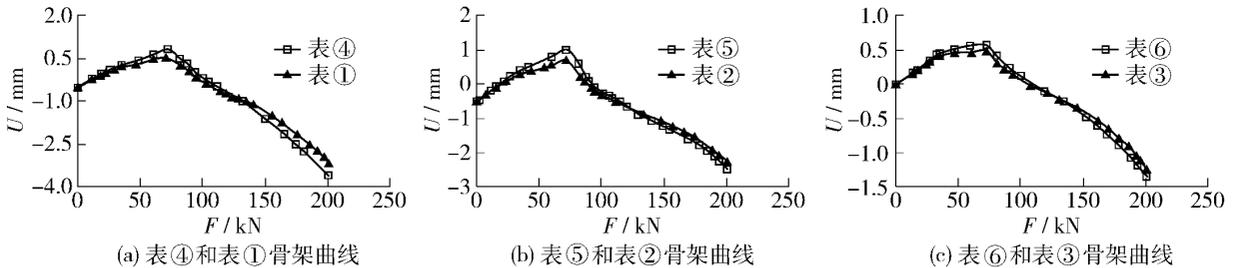


图5 墙体平面外挠度骨架曲线

Fig. 5 Out-plane skeleton curves of the shear wall

图5中 F 为对应楼板中心处所加的竖向荷载;表④为单排配筋墙体上部的百分表,表①为双排配筋墙体上部的百分表;表⑤为单排配筋墙体中部的百分表,表②为双排配筋墙体中部的百分表;表⑥为单排配筋墙体下部的百分表,表③为双排配筋墙体下部的百分表.

实测表明,由于墙体翼缘和腹板共同工作,两侧墙体仅出现微裂缝,墙体在平面外基本处于弹性.

由图5(b)可见,单排配筋墙体平面外正向挠度最大值为1.50 mm,是墙体高度的1/1 000;双排配筋墙体平面外正向挠度最大值为1.21 mm,是墙体高度的1/1 240;二者相差19.3%.

由图5(a)可见,单排配筋墙体平面外负向挠度最大值为3.11 mm,是墙体高度的1/482;双排配筋墙体平面外负向挠度最大值为2.69 mm,是墙体高度的1/558;二者相差13.5%.

墙体平面外正挠度在开裂后增长减慢,当裂缝发展到一定程度时,正挠度达到最大值,随着竖向荷载的继续加大,楼板的塑性铰充分发展,正挠度不断减小.当荷载继续加大时,楼板的竖向位移迅速增大,由于几何非线性的影响,致使两侧墙体向内受拉,故两侧墙体负挠度出现并逐渐增大.

2.5 破坏形态

图6为楼板和墙体的破坏形态.由图6可见:

- 1) 单排配筋墙体和双排配筋墙体出现的裂缝均较少,单排配筋墙体相对裂缝多一些;
- 2) 楼板上部周边均出现裂缝,裂缝宽度均较大;楼板出现比较明显的8条裂缝,与楼板屈服线对应.

2.6 承载力计算

楼板在竖向荷载的作用下,楼板上部周边均出现裂缝,底面有很多裂缝,中部裂缝较宽.本文采用屈服线理论计算竖向承载能力,屈服线见图7.楼板上部四边上均有负屈服线,楼板底部有8条正屈服线.屈服线理论假定屈服线间的板近似是一平面.试验表明,本文试验的楼板屈服可近似引用屈服线理论,下面验证这一假设. A 点和 B 点、 C 点和 D 点位于表⑦和表⑨的连线上, A 点在板3负屈服线处, B 点在板3正屈服线处, C 点在板5正屈服线处, D 点在板5负屈服线处, B 和 C 的位移均和百分表⑧的位移相同,板3和板5的变形连线图见图8.板3位于双排配筋剪力墙一侧,板5位于单排配筋剪力墙一侧.由图8可见,板3和板5的变形连线图接近一条直线,说明屈服线间的板可近似为一平面.

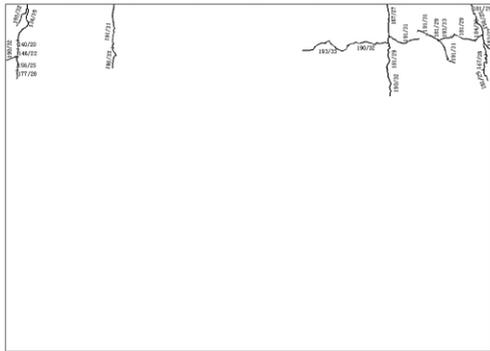
下面计算楼板的竖向承载力:

外功是楼板全部刚性区域内外力所做的功,其一般表达式为

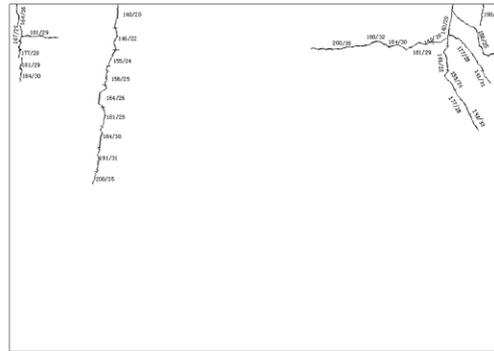
$$\text{外功} = \sum \left[\int_A q \Delta d_A \right]$$



(a) 楼板底部



(b) 双排配筋墙体 (北双)



(c) 单排配筋墙体 (南单)

图 6 SWST(1) 破坏形态

Fig. 6 Failure pattern of SWST(1)

式中 q 为单位面积上的荷载; Δ 为移动的距离; d_A 为一个微小面积单元.

内功是由屈服线转动所吸收的能量, 其一般表达式为

$$\text{内功} = \sum \left[\theta \int_s M_n d_s \right]$$

式中 θ 是屈服线的转角; M_n 为屈服线上的弯矩; d_s 是一个屈服线上的一个微小长度.

楼板顶部的竖向荷载经过 4 块钢板扩散后, 近似看成均布荷载, 设为 q , 则外功为

$$W_1 = 1\,469\,800q$$

对板建立力的平衡方程, 可以求出屈服线上的弯矩 M_n 为

$$\begin{cases} M_n = f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s) \\ f_c b x = f_y A_s - f_y' A_s' \end{cases} \quad (1)$$

由式(1) 可得每毫米长度上的 $M_n = 2\,734.7 \text{ N}\cdot\text{mm}$; 内功为 $W_2 = 32.69M_n$.

由 $W_1 = W_2$, 可以解得 $q = 0.0608 \text{ N/mm}^2$

则由屈服线法算得楼板的竖向承载力为 $F = 174.47 \text{ kN}$, 实测竖向承载力为 200.50 kN , 计算值与实测值相差 12.98% .

计算值比实测值略低一些, 这是因为:

- 1) 计算板的抵抗弯矩时, 忽略了钢筋应变硬化影响, 配筋率低的板, 钢筋的应变硬化将有效地增加板

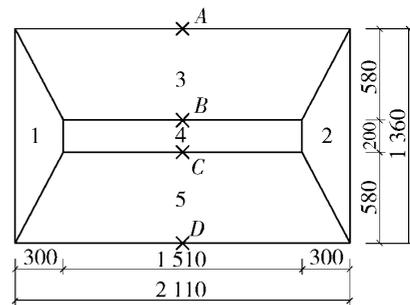


图 7 屈服线模式

Fig. 7 Pattern of yield line

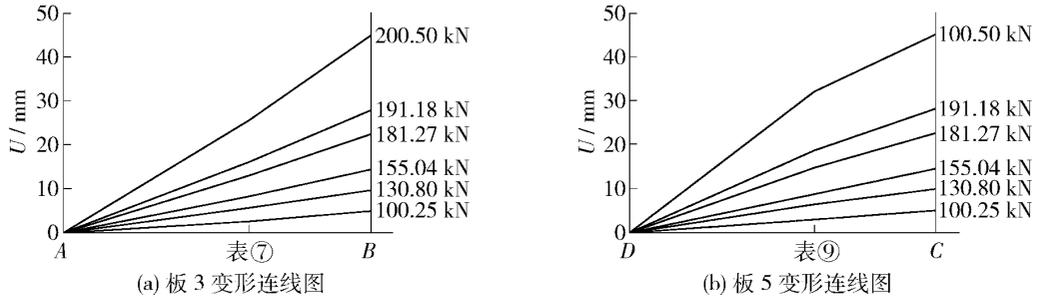


图8 板变形连线图

Fig. 8 Deflection curves of the slab

的抵抗弯矩,即提高了板的强度;

2) 屈服线理论将板的实际工作状态予以理想化,它假定竖向荷载仅由板的弯曲承受,试验表明,楼板的一部分荷载由弯曲承受,另一部分荷载则由板平面内的诸力承受.

3 结论

1) 在竖向极限荷载作用下,楼板两侧滞回曲线相近,说明双向单排配筋墙体和双向双排配筋墙体与楼板共同工作的性能接近.

2) 由于剪力墙腹板与翼缘的共同工作,对于双向单排配筋剪力墙和双向双排配筋剪力墙,由于楼板变形影响所产生的平面外变形均较小,且二者接近.

3) 经过合理设计,双向单排配筋剪力墙可以应用于多层剪力墙住宅结构.

参考文献:

- [1] 韩亚伟,王薇薇. 混凝土小型空心砌块现状及发展趋势[J]. 建筑节能,2007(9): 41-43.
HAN Ya-wei, WANG Wei-wei. The existing condition and development of concrete small-sized hollow block[J]. Construction Conserves Energy, 2007(9): 41-43. (in Chinese)
- [2] 曹万林,徐金荣. 钢筋混凝土异形柱框架结构抗震设计的若干措施[J]. 世界地震工程,2002,18(1): 62-65.
CAO Wan-lin, XU Jin-rong. Some construction measures of seismic design of R. C. frame structure with special-shape columns[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(1): 62-65. (in Chinese)
- [3] 王铁成,张学辉,康谷胎. 两种混凝土异形柱框架抗震性能试验对比[J]. 天津大学学报,2007,40(7): 791-798.
WANG Tie-cheng, ZHANG Xue-hui, KANG Gu-yi. Experimental comparison of seismic behavior of two RC frames with specially shaped columns[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(7): 791-798. (in Chinese)
- [4] 刘晓,沈祖炎. 多层钢结构住宅综合经济指标分析[J]. 建筑钢结构进展,2003(1): 60-63.
LIU Xiao, SHEN Zu-yan. Analysis of the overall economic benefits for multiple story steel residences[J]. Progress in Steel Building Structures, 2003(1): 60-63. (in Chinese)
- [5] 张运田,郁银泉. 钢结构住宅建筑体系研究进展[J]. 钢结构住宅建筑,2002,17(6): 22-23, 28.
ZHANG Yun-tian, YU Yin-quan. Advance in research on residential building system of steel structure[J]. Steel Construction, 2002, 17(6): 22-23, 28. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国建设部 GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2002: 189-197.
Ministry of Construction of the People's Republic of China GB50010—2002 Code for Design of Concrete Structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 189-197. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国建设部 GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社,2008: 57-62.
Ministry of Construction of the People's Republic of China GB50011—2001 Code for Seismic Design of Buildings[S]. 2nd edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 57-62. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国建设部 JGJ3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2002: 68-70.
Ministry of Construction of the People's Republic of China JGJ3—2002 Technical specification for concrete structures of tall

building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press ,2002: 68-70. (in Chinese)

Experimental Study on Working Performance of RC Shear Wall Structure Units With Bi-directional Single Row of Steel Bars

YANG Xing-min , CAO Wan-lin , ZHANG Jian-wei , ZHANG Bin-bin

(College of Architecture and Civil Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China)

Abstract: To make comparative study on spatial mechanical properties of RC shear wall with single row of steel bars and that with double rows of steel bars , an experiment has been introduced in the article , in which low cyclic reversed unidirectional load has been applied to a model of 1/2 scale. In the model , bi-directional steel bars of double rows have been designed to one side while those of single row to another. What's more , a vertical load has been exerted in the center of the slab evenly with a set of force-transmitting structure. Based on the experiment , the load-carrying capacity , hysteretic behavior , stiffness , out-plane performance of the shear wall and failure phenomena have been discussed. Besides , vertical load-carrying capacity has been calculated with yield-line theory. It's shown that hysteretic behavior and out-plane deflection of both sides are much similar while the slab under a vertical load. And that still goes well when the slab seriously damaged under extreme load , as the result of the collaboration of the web and flange. That is to say that the binding force on the slab of both sides is almost the same , so does to the out-plane performance of the shear wall. Therefore , rational designed RC shear wall with single row of steel bars can satisfy seismic demand.

Key words: bi-directional single row of steel bars; RC shear wall structure; out-plane working performance of the shear wall; yield line theory; experimental research

(责任编辑 苗艳玲)