

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.03.003

短肢剪力墙结构扭转效应试验研究

杨晓华, 周磊, 卢学臣

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对按国家现行《异形柱结构设计规范》设计的一个三层短肢剪力墙空间结构施加偏心的低周水平反复荷载, 研究短肢剪力墙结构在扭转作用下的裂缝发展及结构受力情况。试验结果表明, 短肢剪力墙空间结构属于典型的“强墙肢弱连梁”结构, 连梁端部是结构薄弱区域, 梁端首先出现塑性铰, 较好地耗散了地震能量; 靠近节点附近的外边缘墙肢部位受到扭矩和楼层较大弯矩的双重作用, 受拉作用被强化, 是墙肢的薄弱部位; 在墙肢连梁相交位置处的节点受弯曲-剪切-扭转共同作用, 前期主要通过节点内部的斜压杆机构传递剪力。

关键词: 短肢剪力墙空间结构; 拟静力试验; 扭转效应; 节点

中图分类号: TU398⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2017)03-0012-07

An Experimental Study on the Torsion Effect of Short-Pier Shear Wall Structures

YANG Xiaohua, ZHOU Lei, LU Xuechen

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

Abstract: An eccentric low cyclic horizontal loading has been applied to the spatial structure of a three-storied short-per shear wall, which has been designed according to the current national *Design Specification for Special-Shaped Column Structures*. A research has been made of the crack development and structural stress of the structures under the torsional loading. Experimental results show that the short-pier shear wall structure is a typical structure with strong limbs and weak beams, its tie-beam end being the weak region of the structure. The plastic hinges at the end of the tie-beam effectively consume the seismic energy, and the part near the outer edge of the wall limbs, also a weak component of short-limb shear wall structure, whose tension has been strengthened under the double effects of the torque and the relatively large bending moment of the storey. The shear force is transferred through the baroclinic rod mechanism inside the joint of beams, which has been under the multiple effects of bending, shear and torsion.

Keywords: short-pier shear wall structure; pseudo static test; torsion effect; joint

0 引言

理论研究及地震灾害调查表明, 地震时地面运动是多维的, 不仅有平动分量, 也有转动分量。造成结

构的地震反应是多维的^[1], 由此引起的结构扭转效应往往是造成结构破坏的一个重要因素^[2]。空间节点的地震反应具有多维特性, 破坏机制复杂^[3]。在短肢剪

收稿日期: 2016-11-30

作者简介: 杨晓华(1963-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事建筑工程及结构计算方法方面的研究, E-mail: yangsheep@126.com

通信作者: 周磊(1992-), 男, 江苏无锡人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高层建筑结构, E-mail: 690032140@qq.com

力墙研究方面, 对单个墙肢构件或对单个节点构件进行的研究较多^[4-9], 而利用三维空间结构模型在水平地震荷载作用下结构节点抗扭转的研究较少^[10-11]。由此得出的相关结论, 并不能充分说明节点扭转破坏的机理。本文对一按异形柱规范设计的三层短肢剪力墙空间结构施加偏心模拟水平地震作用的循环荷载, 对受扭转作用的空间结构节点进行研究, 通过分析结构变形和裂缝开展情况, 研究整体结构的变形情况及节点核心区剪切机理。

1 试验概况

1.1 试件设计

结构模型试验选取一个典型的实际工程, 按 1:4 缩尺比例设计一个两跨三层短肢剪力墙空间结构模型, 短肢剪力墙肢厚比为 5。结构模型基本尺寸如图 1 所示, 墙肢及连梁配筋情况如图 2 所示。实测混凝土立方体抗压强度为 25.74 MPa; 实测钢筋的屈服强度为 301 MPa, 极限强度为 350 MPa, 弹性模量为 2.15×10^5 MPa。试验过程中对模型结构顶层施加一个偏心的水平往复集中荷载, 并为此预先设计一套加载装置来防止结构模型发生局部承压破坏。试验荷载通过电动伺服加载系统施加在顶层偏离中间节点位置 400 mm 处的分配钢梁上, 分配钢梁采用螺杆与对应结构侧面的反向荷载传递装置固定连接, 具体加载装置如图 3 所示。

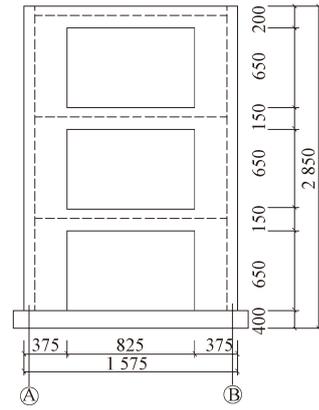
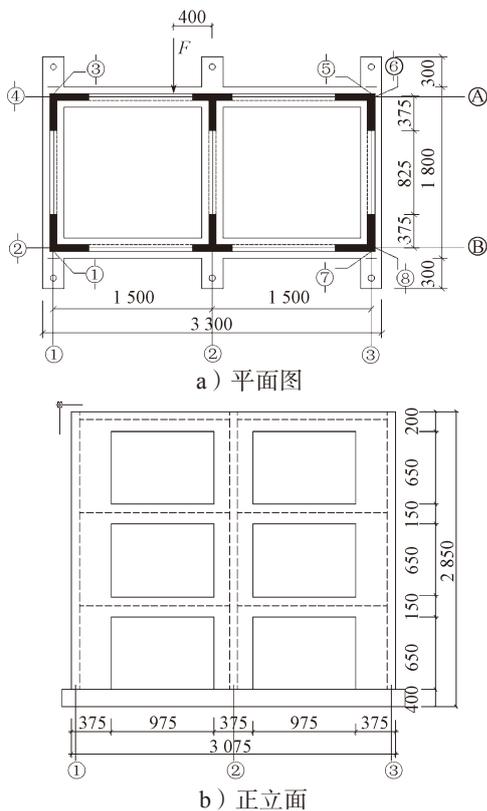


图 1 结构试验模型

Fig. 1 A structural testing model

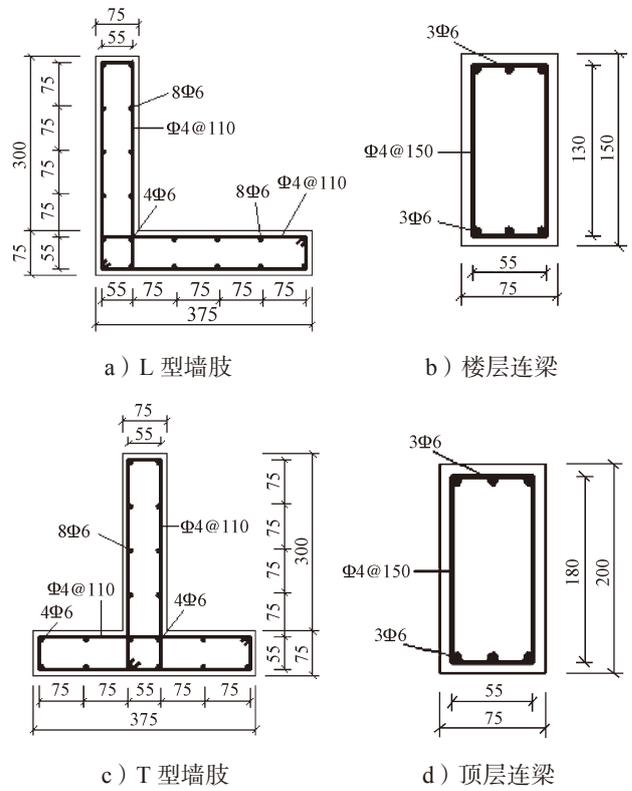
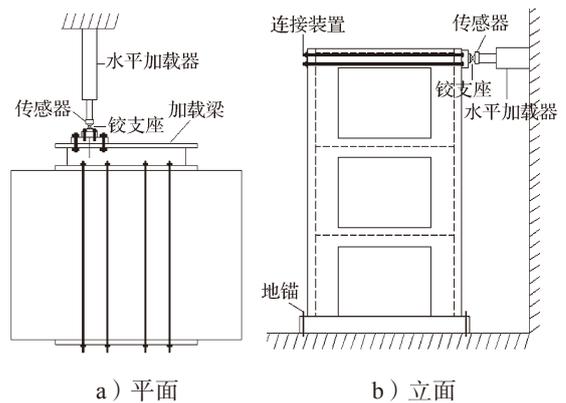
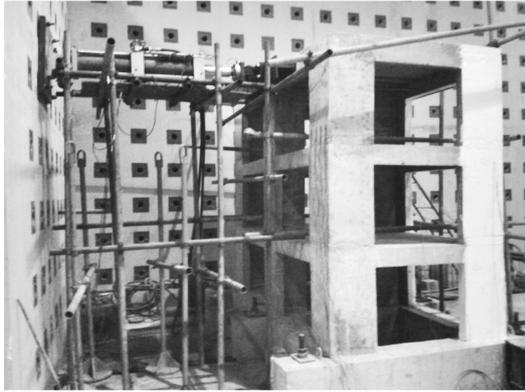


图 2 墙肢及连梁配筋图

Fig. 2 A diagram of the coupling beams of the shear wall





c) 实物

图3 试验加载装置图

Fig. 3 Test loading devices

1.2 加载方案

模型结构试验在湖南工业大学土木工程结构实验室进行,加载制度如图4所示。本次试验主要研究短肢剪力墙空间节点在水平地震荷载作用下的受力性能和裂缝开展情况,以及抵抗水平扭转的效应。加载过程采用荷载控制加载,每级荷载峰值增加20 kN,每级荷载作用下往复循环3~5次。由于试验设备条件限制,试验最大加载到113 kN时,无法继续加载,因此,本次试验的最大水平循环荷载为100 kN。

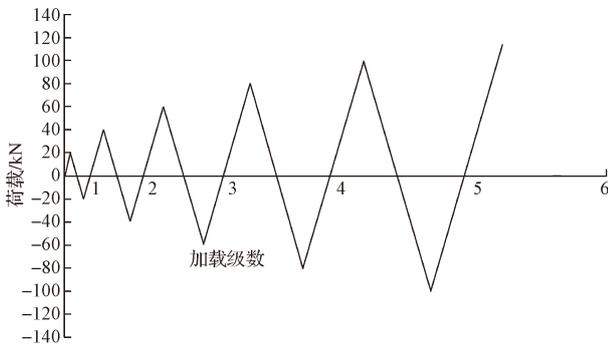


图4 低周反复试验加载制度

Fig. 4 Low cyclic loading system

1.3 测量仪器布置及测量内容

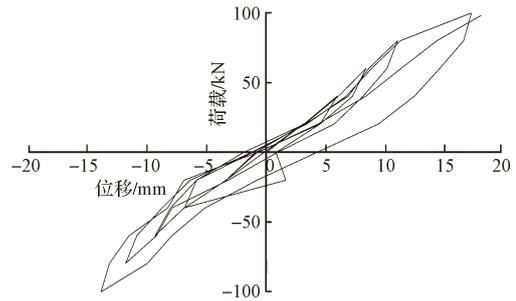
在结构试验模型顶层4个角节点上,对应梁中心位置处安装位移计(测点编号及位置如图1所示),主要测量结构在2个方向上的侧向位移和顶层节点的扭转变形。在短肢剪力墙肢及与连梁节点上设置钢筋和混凝土应变片,通过电阻应变仪采集各级荷载下钢筋混凝土的应变值。在整个试验过程中及时观测裂缝的出现和发展情况。

2 试验结果与分析

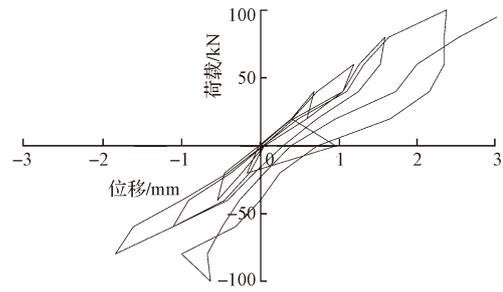
2.1 荷载位移曲线

结构顶层各测点的荷载位移曲线如图5所示。

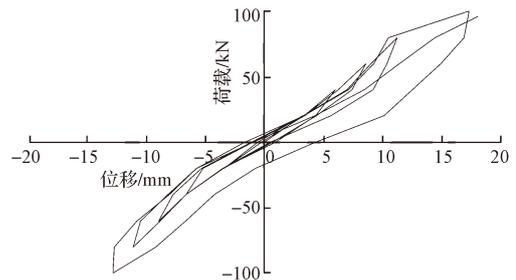
1~4号4个测点位于结构模型左侧①轴线附近,水平偏心荷载偏向这一侧,其中:1,2号测点设置在结构模型的后面,3,4号测点设置在结构模型的前面。5~8号测点位于结构模型右侧③轴线附近,其中:7,8号测点设置在结构模型的后面,5,6号测点设置在结构模型的前面。测点编号为奇数时测得的是此位置沿外加荷载作用方向上的位移,测点编号为偶数时测得的是此位置垂直于外加荷载作用方向上的位移。由编号为1,3,5,7测点最大位移绘制的骨架曲线如图6所示。



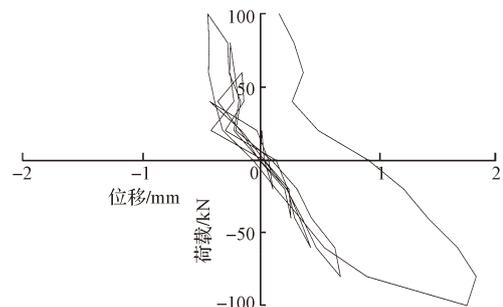
a) 1号测点



b) 2号测点



c) 3号测点



d) 4号测点

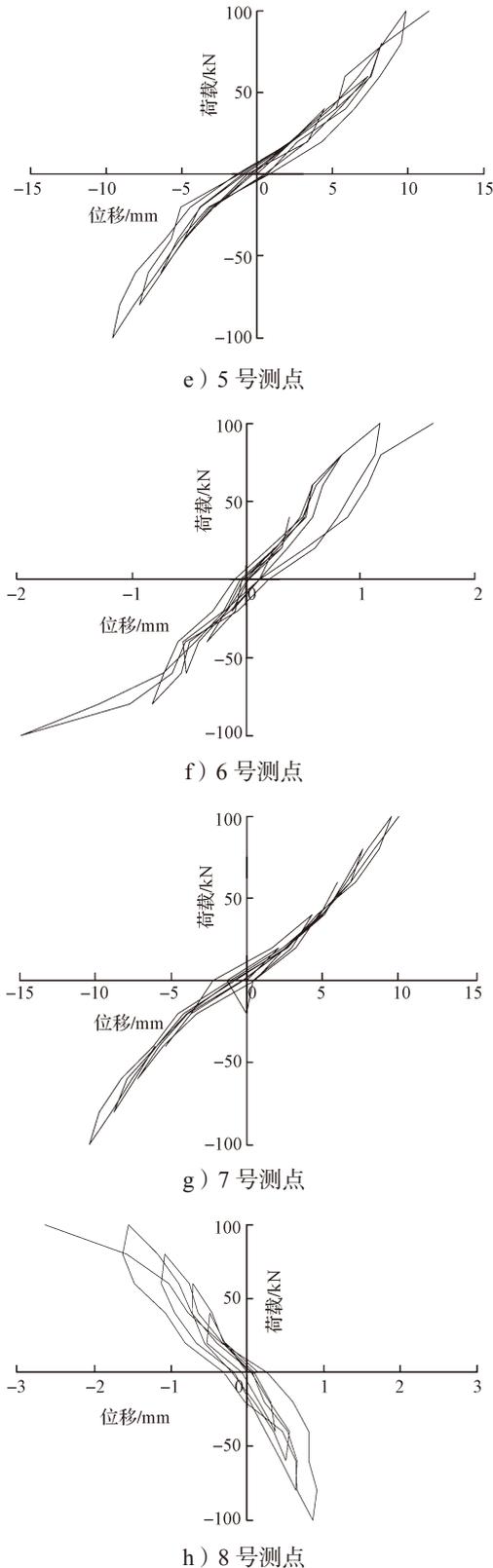


图5 测点荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of gauging points

施加水平荷载为单个偏心荷载, 结构变形沿荷载作用方向为组合变形, 是水平平移和扭转变形的叠加。由图5可以看出, 由于荷载偏心距不大, 编号

为奇数的测点给出的同轴线上, 结构前后平行于荷载作用方向上的位移曲线相近, 扭转变形并不明显; 编号为偶数的测点给出的同轴线上, 结构前后垂直荷载作用方向上的位移曲线完全不同, 在相同荷载作用下, 位移的方向相反, 表明整体结构产生了水平扭转变形。由图5和图6可知, 在水平偏心荷载作用下, 结构左右两侧位移变化差异较明显。靠近偏心荷载作用的结构模型左侧部分区域在荷载峰值达到80 kN以后进入了塑性变形阶段, 力-位移曲线出现滞回环, 骨架曲线出现拐点; 远离偏心荷载作用的结构模型右侧测点位移小于左侧, 该区域结构仍处于弹性状态, 力-位移曲线滞回现象不明显, 骨架曲线近似于直线。

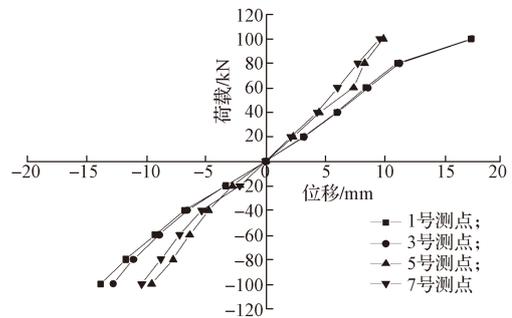


图6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves

2.2 裂缝发展

各级加载下结构裂缝的发展情况如下所述, 结构裂缝如图7所示。

第一级加载 (± 20 kN), 结构未出现裂缝, 结构处于弹性状态, 最大位移约 3.0 mm。

第二级加载 (± 40 kN), 正向加载过程中, ①号轴线三层靠近加载位置一侧梁端底部出现首条裂缝, 紧接着连梁另一端上部出现裂缝, 加载方向改变后, 随正向荷载的减小, 裂缝慢慢闭合。反向加载过程中, 同一连梁远离加载位置一侧梁端底部出现裂缝, 正向加载时原连梁上部出现的裂缝也随着反向力的增大而愈发明显。

第三级加载 (± 60 kN), 随着正向荷载逐渐增加, 二层①号轴线连梁出现裂缝, 三层①号轴线位置连梁已产生的裂缝进一步扩展发育, 顶层边连梁与短肢剪力墙垂直交点附近出现首条剪切斜裂缝。接着中间②号轴线二层和三层连梁端部也产生裂缝, 随后顶层中间②号轴线位置连梁与短肢剪力墙垂直交点附近也出现剪切裂缝。反向加载过程中, 与集中加载点较近的①号轴线墙肢在距底部约 100 mm 的位置出现水平裂缝, 卸载后闭合。

第四级加载 (± 80 kN), ①号轴线二层和三层

连梁端部附近所产生的梁裂缝上下基本贯通，顶层边连梁与短肢剪力墙垂直交点附近出现的剪切斜裂缝向墙肢节点内部延伸，①号轴线墙肢在距底部约 100 mm 位置的水平裂缝扩展加长。

第五级加载 (± 100 kN)，随着荷载的增加，在距集中加载点较近的①号边轴线和中间②号轴线位置连梁端部，裂缝进一步发育扩展，剪切斜裂缝继续向节点外缘角部延伸。短肢剪力墙在距离墙底 150 mm 和 200 mm 位置处出现新的水平裂缝。随着结构侧移的不断增大，与加载方向垂直 B 轴线边节点附近的连梁端部出现微小裂缝，不明显，卸载后闭合。



a) ②号轴线二层梁端裂缝



b) ①号轴线梁端裂缝 c) ①号轴线墙肢底部裂缝



d) ②号轴线三层梁端裂缝



e) ②号轴线顶层梁端剪切裂缝

图 7 结构裂缝图

Fig. 7 A map of structural cracks

从结构试验模型裂缝发展情况来看，裂缝首先出现在梁端，并随着荷载的增加而逐渐扩大，部分裂缝上下贯通，形成塑性铰。上部结构短肢剪力墙体并未

产生明显裂缝，后期由于变形较大而产生的结构底层短肢剪力墙肢水平裂缝也并未发育完全。这说明短肢剪力墙结构是属于典型的强墙肢弱梁结构，满足地震区的使用要求。

2.3 钢筋受力情况

2.3.1 节点内外连梁纵筋

二、三层②轴线位置处 T 节点内外梁端纵筋应力变化如图 8 所示。

由图 8 可知，节点内外连梁纵筋应力差距明显，钢筋与混凝土之间的黏结性能良好。②号轴线位置二三层靠近节点位置梁端底部纵筋受拉应力值相近，且在第五级正向加载时均达到屈服。二三层连梁跨中应力很小，忽略不计，可认为该位置连梁反弯点位于跨中。

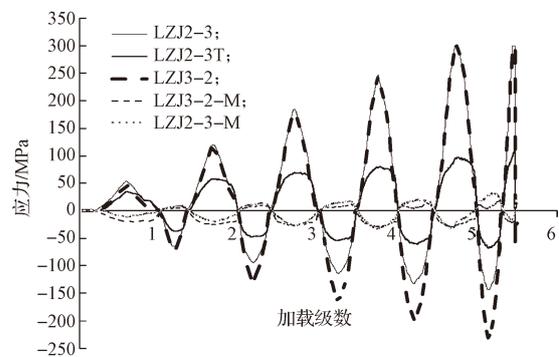


图 8 二、三层②轴线 T 节点内外梁端纵筋应力图

Fig. 8 Stress diagram of longitudinal bars inside and outside T-shaped joints at ② axis on the second and third floor

2.3.2 节点两边连梁纵筋

二、三层 B 轴线位置处 T 节点两边梁端纵筋应力随加载级数的变化过程如图 9 所示。

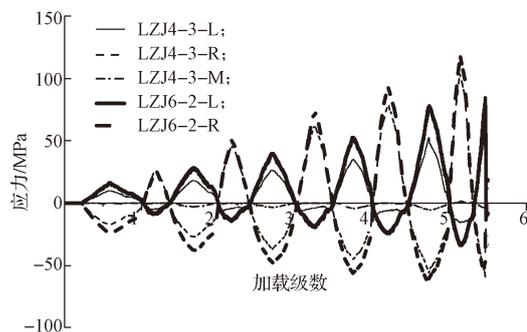


图 9 二、三层 B 轴线 T 节点外两边梁端纵筋应力图

Fig. 9 Stress diagram of longitudinal bars at either side of T-shaped joints at B axis on the second and third floor

由图 9 可知，在加载过程中，由于结构受到的扭转作用，节点外左右梁端应力差异明显，钢筋都处于弹性应力阶段，二层 B 轴线位置连梁反弯点同样位于跨中附近。

2.3.3 墙肢纵筋

二、三层 B 轴线位置处 T 节点墙肢纵筋应力变化如图 10 所示。

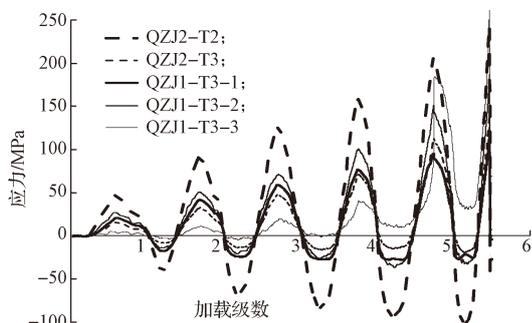


图 10 二、三层 B 轴线 T 节点墙肢纵筋应力图

Fig. 10 Stress diagram of longitudinal bars of T-shaped joints at axis B

由图 10 可知, 底层墙肢受弯程度大于上部墙肢, B 轴线二层 T 节点腹板角部墙筋应力始终大于三层。由于结构墙肢钢筋在绑扎定位浇筑过程中纵筋不可避免地发生了弯曲, 翼缘边部墙肢纵筋上的原用于测量节点以上部位的钢筋应变片进入节点内部, 仅节点下部的应变片位置仍在节点外。对比图 10 中各曲线的变化过程可知, 节点下部纵筋后期在弯矩和扭矩的共同作用下全程受拉, 并且受拉应力迅速增加, 而上部和中部贴片位置纵筋拉压应力状态明显, 且压应力呈现有层次地递增; 扭矩在节点平面内通过连梁和楼板得到了分散, 表现不明显。这表明靠近节点的墙肢部位受到扭矩和楼层较大弯矩的叠加作用, 受拉作用被强化, 是墙肢的薄弱部位。

2.3.4 墙肢箍筋

二、三层 L 形和 T 形节点区墙肢箍筋应力变化如图 11 所示。

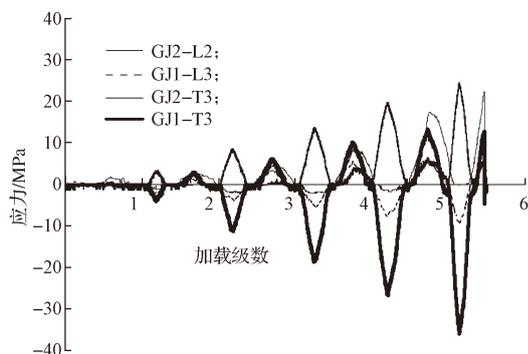


图 11 二、三层 L 形和 T 形节点区墙肢箍筋应力图

Fig. 11 Stress diagram of longitudinal bars at the L-shaped and T-shaped joint areas on the second and third floor

由图 11 可知, 节点区墙肢箍筋受拉压应力值普遍较小, 受力作用不明显, 节点区剪力主要通过墙肢

纵筋和混凝土组成的斜压杆机构传递。

3 结论

通过对短肢剪力墙空间结构施加偏心的往复水平荷载, 观察研究结构的整体变形及其内部节点位置各钢筋的应力情况, 可得出如下结论:

1) 整体结构模型产生的变形为弯曲 - 剪切 - 扭转组合变形。连梁反弯点位于跨中; 梁端是结构的薄弱部位, 裂缝主要产生在此部位; 裂缝包括直裂缝和斜裂缝。塑性铰首先出现在连梁两端, 塑性铰的出现能很好地耗散地震能量, 形成了典型的“强墙肢弱连梁”结构, 具有良好的抗震性能。由于靠近边节点附近墙肢部位受到扭矩和楼层较大弯矩的双重作用, 其受拉作用被强化, 是短肢剪力墙结构的薄弱部位, 设计时应予以考虑。

2) 短肢剪力墙结构在承受水平地震荷载作用时, 短肢剪力墙和连梁的相交节点承受弯曲 - 剪切 - 扭转组合力作用, 在受力前期主要通过节点内部斜压杆机构传递剪力, 节点约束作用并不明显。

参考文献:

- [1] 李宏男. 结构多维抗震理论与设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 55.
LI Hongnan. Multidimensional Aseismic Theory and Design Methods [M]. Beijing: Science Press, 1998: 55.
- [2] 徐培福, 黄吉峰, 韦承基. 高层建筑结构的扭转反应控制 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(7): 1-8.
XU Peifu, HUANG Jifeng, WEI Chengji. Control of Torsional Response of Tall Building Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(7): 1-8.
- [3] 傅剑平. 钢筋混凝土框架节点抗震性能与设计方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
FU Jianping. Seismic Behavior and Design of Joints in a Reinforced Concrete Frame [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [4] 黄东升, 程文灏, 彭飞. 对称双肢短肢剪力墙的低周反复荷载试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 51-56.
HUANG Dongsheng, CHENG Wenrang, PENG Fei. Low-Cycle Loading Experiment Study on Symmetric Double Short-Pier Shear Walls [J]. Journal of Building Structure, 2005, 26(3): 51-56.
- [5] 彭飞, 程文灏, 陆和燕, 等. 对称双肢短肢剪力墙的拟静力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 64-69.

- PENG Fei, CHENG Wenrang, LU Heyan, et al. Quasi-Static Test Research of Symmetric Double Short-Limb Shear Walls[J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(1): 64-69.
- [6] 都洪钢. T形截面短肢剪力墙中间层中节点抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
DU Honggang. Experimental Research on the Seismic Behavior of Interior Joints of T-Shaped Short Pier Shear Wall[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [7] 况建刚. T型短肢剪力墙中间层端节点抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
KUANG Jiangan. Experimental Research on Seismic Behavior of Exterior Joints of T Shape Short Pier Shear Wall[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [8] 王飞. 短肢墙预应力楼盖结构顶层端节点抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
WANG Fei. The Earthquake-Resistant Experimental Researches on Top Story Knee Joint of Concrete Structures with Short Shear Wall and Unbonded Tendons Prestressed Floor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [9] 冯建平, 吴修文. T形截面柱框架边节点的抗震性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 123-130.
FENG Jianping, WU Xiuwen. Seismic Behavior of Exterior Beam-T Column Joints[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 1995, 23(3): 123-130
- [10] 程绍革, 陈善阳, 刘经纬. 高层建筑短肢剪力墙结构振动台试验研究[J]. 建筑科学, 2000, 16(1): 12-16.
CHENG Shaoge, CHEN Shanyang, LIU Jingwei. A Shaking Table Test on Shear Wall Structure with Framed Short Pillars for High-Rise Buildings[J]. Building Science, 2000, 16(1): 12-16.
- [11] 张晋, 吕志涛. 短肢剪力墙筒体结构模型振动台试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(6): 4-8
ZHANG Jin, Lü Zhitao. Earthquake Simulation Test of Short-Leg Shear Wall-Tube Model[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2001, 31(6): 4-8.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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: 35.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Concrete Structure Design: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 35.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 80.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Buildings: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 80.

(责任编辑: 邓光辉)