

新型装配－现浇式密柱结构墙体的轴心受压性能

余 瑞, 应惠清

(同济大学 土木工程学院, 200092 上海)

摘 要: 为提升新型装配－现浇式密柱结构的抗震性能, 通过对2榀模型在竖向荷载作用下的试验及有限元分析, 研究了其在正常使用阶段和承载极限状态时墙体各截面应力、裂缝、变形、破坏形态及平面外位移。结果表明: 结构在正常使用荷载下具有较大的承载能力和刚度, 破坏具有一定的延时, 未出现平面外失稳; 预制外壳与现浇柱联结性能良好, 不会出现滑移错动; 预制外壳的增加能显著提高结构承载性能, 采用“最优尺寸”的截面设计能更好地发挥结构抗压性能。新型结构满足住宅在竖向荷载组合作用下的可靠性要求, 一般层高的墙体在重力荷载作用下不会发生平面外失稳破坏。

关键词: 住宅产业化; 装配式外墙; 竖向荷载; 承载力; 平面外失稳

中图分类号: TU352.59

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0115-07

Mechanics behaviors of new structure with assembly-situ walls under vertical loads

YU Rui, YING Hui-qing

(College of Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China)

Abstract: To improve the seismic performance of new structure with assembly-situ walls, experiment and finite element analysis were applied to 2 models under vertical loads, the stress, cracks, deflection, failure patterns and out-of-plane displacement were studied. Results indicate that the structure shows superior strength and rigidity under normal loads, the out-of-plane instability does not happen but a lag appears as destruction. In addition, the composition between precast shell and cast-in-situ columns shows excellent connection performance and does not slip. The precast shell can significantly improve bearing properties. Meanwhile the “optimal size” section has capability to promote compressive behavior. In conclusion, the new structure is testified to meet reliability requirements; the out-of-plane instability does not appear in normal storey height structures under gravity loads.

Key words: housing industrialization; fabricated external wall; vertical loads; bearing capacity; out-of-plane instability

新型装配－现浇式密柱结构体系是一种崭新的产业化住宅结构形式, 其由装配式外墙、预制叠合楼板、预制楼梯、预制阳台等构件共同组成。

装配式外墙是该结构体系的关键承重及抗震构件, 国内外对其抗震性能尚无试验研究。前期已

进行了4榀不同尺寸设置的装配式外墙低周反复加载试验, 得出了抗震性能的相对“最优尺寸”及“最差尺寸”参数^[1]。本文利用上述研究成果建立2榀装配式外墙模型, 对比其在竖向荷载作用下的受力性能、破坏机理及接触滑移等特性, 以确定合理的构件尺寸; 同时, 考虑到预制外壳今后可由轻质高强材料替代, 前期进行了纯密柱结构(无预制外壳)的竖向极限承载试验, 本文还分析了预制外壳增加后结构承载性能的增强程度; 最后, 利用有限元软件 ANSYS 建立装配式外墙模型, 对

收稿日期: 2011-10-18.

基金项目: 上海市科技发展基金资助项目(07dz12017-03).

作者简介: 余 瑞(1982—), 男, 工程师, 博士研究生;

应惠清(1946—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 余 瑞, badaqiao@163.com.

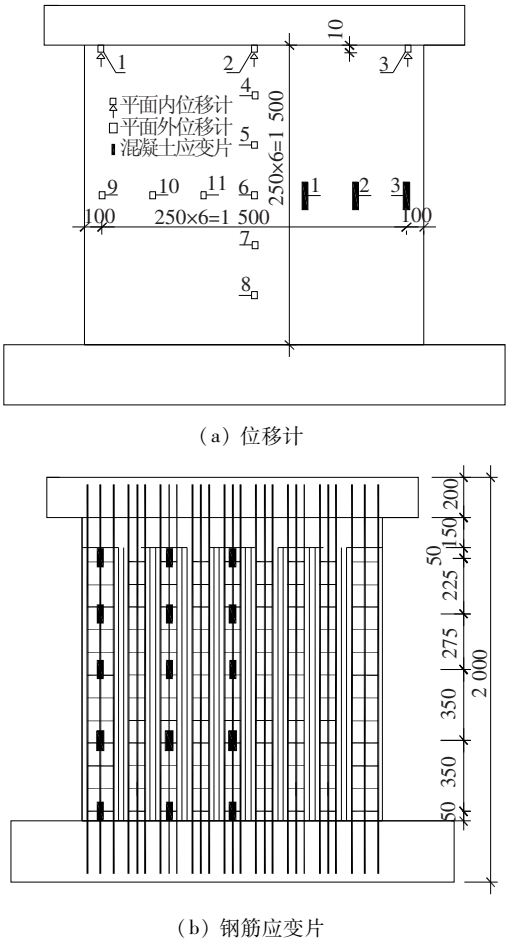


图 3 试件测点布置 (mm)

2 结果及分析

2.1 破坏过程

VCM4:在荷载控制阶段,混凝土开裂前构件处于弹性阶段,荷载 - 位移曲线为一条斜率不变的直线;竖向荷载达到 2 000 kN 时,东侧密柱间隙处出现第一条细微的竖向裂缝;竖向荷载达到 2 800 kN 时,试件底部部分钢筋率先开始屈服,竖向裂缝增多并伴有少量斜裂缝;竖向荷载达到 4 236.5 kN 时,荷载 - 位移曲线出现拐点,构件开始屈服,此时位移为 7.74 mm;此后采用位移加载,每级加载 0.5 mm,加至 9.68 mm 时,西侧顶端混凝土突然被压碎,顶部混凝土外壳部分脱落,试件发生压溃破坏。

VCM3 的破坏过程与 VCM4 类似,不再累述。

2.2 试验曲线及特征值

荷载 - 位移曲线见图 4,其中 ZYM1 (“最优尺寸”)及 ZYM2 (“最差尺寸”)指纯密柱结构。可以看出:VCM3 与 VCM4 在试件屈服前均处于弹性阶段,二者刚度值大致相同,极限荷载与极限位移也比较接近;同纯密柱结构相比,增加混凝土外壳后的装配式外墙在极限荷载与极限位移方面有

大幅度的提升。
表 3 显示了 4 片试件的极限荷载与极限位移值,可以看出:VCM3 与 VCM4 的极限荷载与极限位移相差仅为 4.32% 与 -5.62%,差异值远小于纯密柱结构的 19.6% 与 -21.9%,说明壳体增加后,不同截面尺寸的纯密柱结构的竖向承载性能更趋于一致。

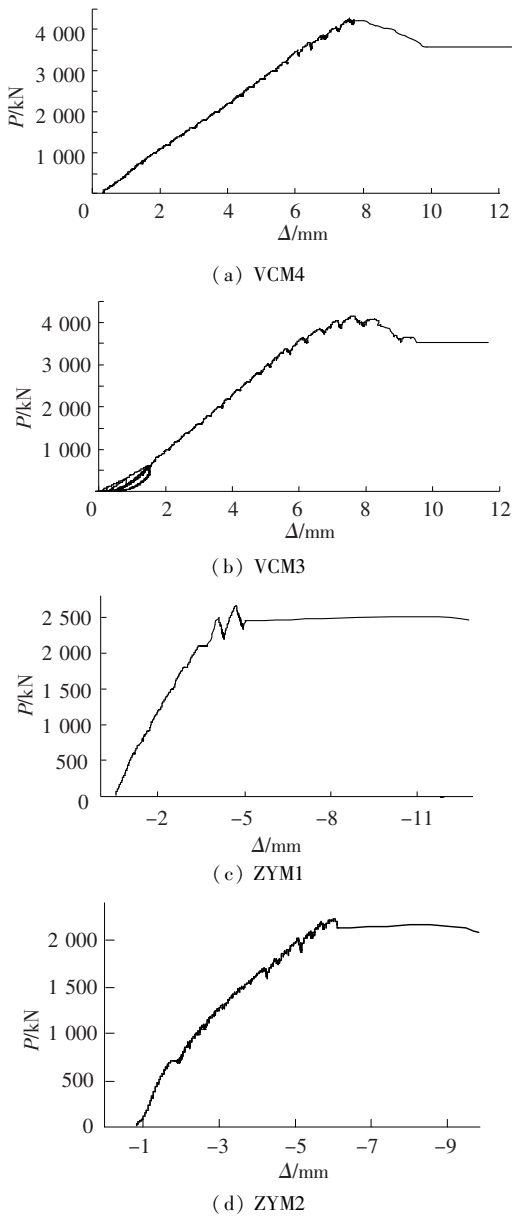


图 4 试件荷载 - 位移曲线

表 3 极限荷载与极限位移

试件编号	极限荷载	极限荷载	极限位移	极限位移
	N_{max} / kN	增长幅度/%	S_{max} / mm	增长幅度/%
VCM4	4 255.0	58.5	7.73	108.0
ZYM1	2 665.0		3.71	
VCM3	4 078.5	83.0	8.19	72.4
ZYM2	2 229.0		4.75	

2.3 钢筋应变

选取距墙体顶端 200 及 425 mm 处钢筋应变进行绘图分析, 见图 5. 可以看出: 在 VCM4 及 VCM3 中, 顶部钢筋(VCM4-1-9、VCM4-5-9、

VCM3-1-9、VCM3-5-9) 在墙体接近破坏时才达到屈服, 其余部位钢筋 (VCM4-1-7、VCM4-5-7、VCM3-1-7、VCM3-5-7) 均未屈服.

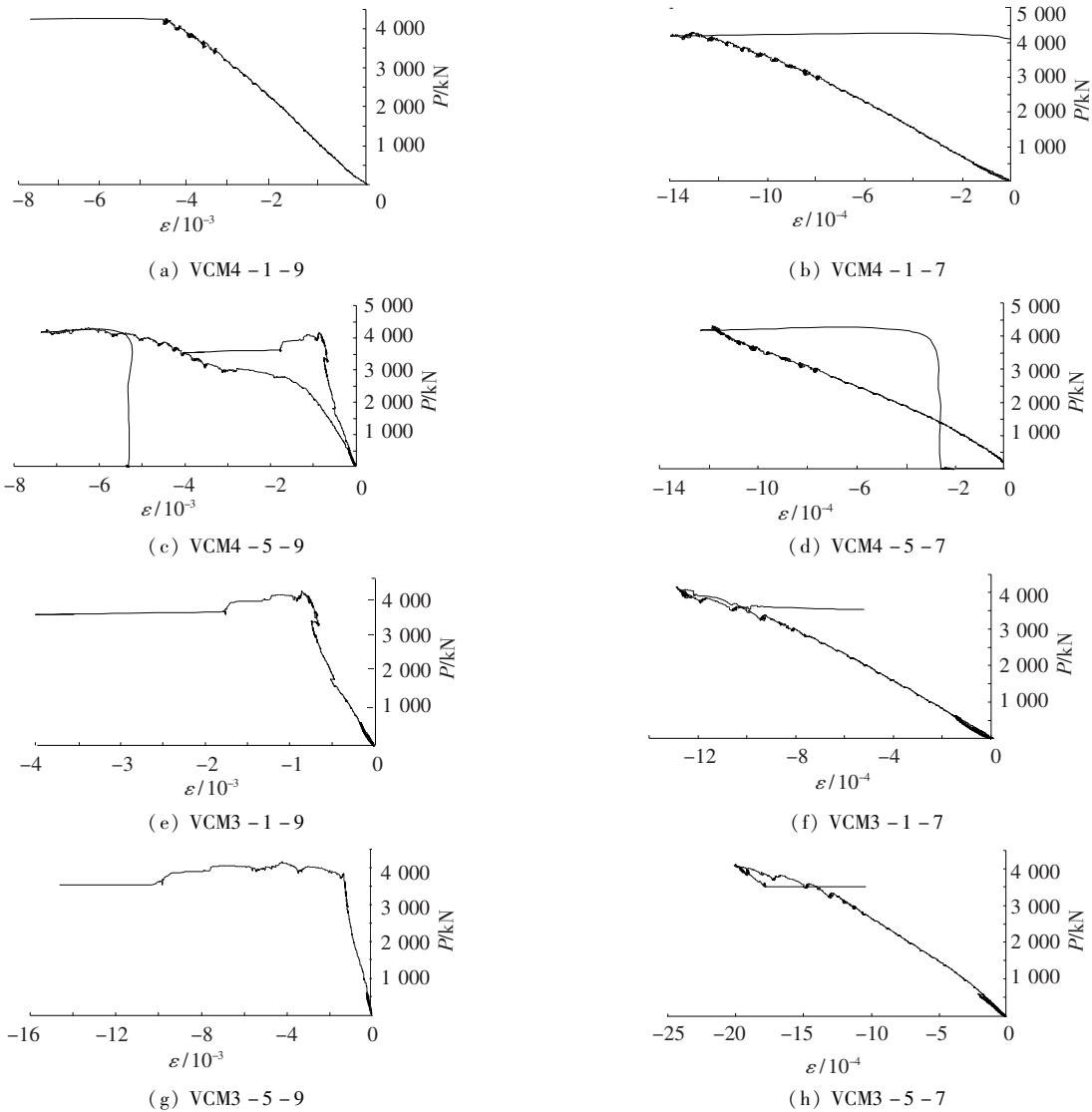


图 5 钢筋应变随荷载变化曲线

2.4 混凝土应变

混凝土应变片粘贴于墙身中部(见图 3), 破坏时顶部混凝土被压碎, 中部混凝土均未出现破坏, 墙体仍能保持一定的形态而不至于倒塌. 图 6 显示了临近破坏时, VCM4 与 VCM3 的混凝土应变随墙体宽度的分布情况. 可以看出: 二者竖向应变均呈中间大、两端小的分布形态, 产生的差异可能是由于试件浇筑及安装的平整度不够、仪表量测误差、加载偏心及尺寸效应^[4]等原因造成的. 根据试验结果, 尽管竖向应变出现了局部差异, 但是总体仍接近于均匀分布, 因此试验结论可用于同理论分析的对比^[5].

2.5 平面外稳定

为了监测平面外位移以判断结构是否失稳,

在墙身中部及沿墙高布置平面外位移计(见图 3). 图 7 显示了临近破坏时试件的平面外位移情况, 可以看出: VCM4 与 VCM3 的最大平面外位移为 5.551 mm 和 4.647 mm, 墙身中部平面外位移为 2.914 mm 和 2.104 mm, VCM4 具有更好的延性; 由于底部加载梁的约束作用, 二者在竖向荷载作用下的平面外变形呈由底向上逐渐增大的趋势, 并非两端小中间大, 说明构件刚度沿墙身分布比较均匀, 其变形形式类似于剪力墙^[6]; 试件达到极限承载力时, 平面外位移值均较小, 失稳现象不明显, 可认为试件在竖向荷载作用下不会发生失稳破坏.

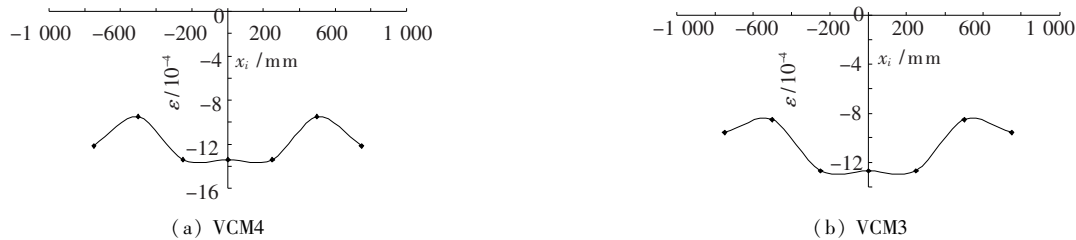


图 6 混凝土应变随宽度分布

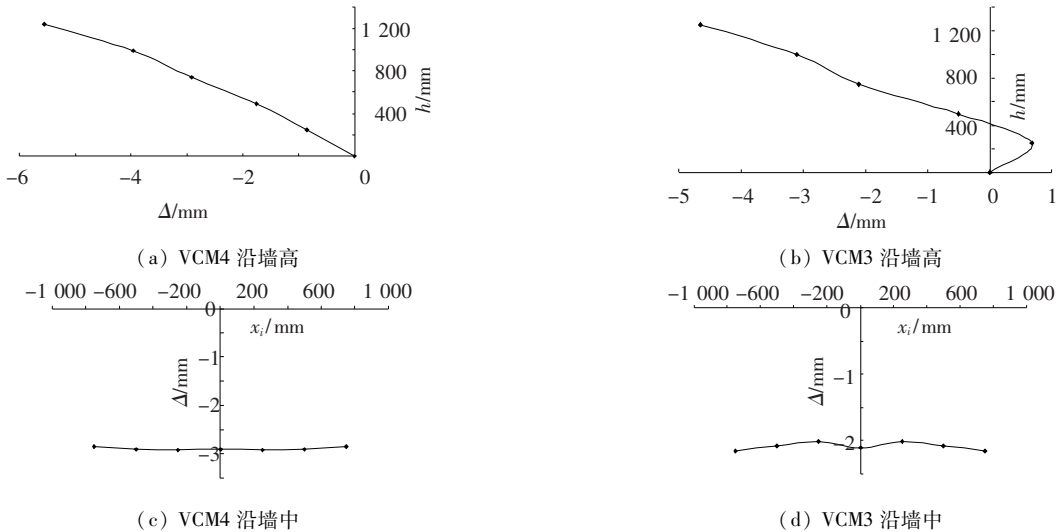


图 7 平面外位移

2.6 破坏形态

图 8(a) ~ (d) 显示了装配 - 现浇式密柱结构墙体表面的破坏形态,可以看出:墙体顶部竖向钢筋已屈服,壳体顶部混凝土被压碎,混凝土外壳出现局部脱落. 从外观来看,这种破坏是由于局部应力集中导致的,混凝土达到极限压应变而被压坏,构件未出现异常裂缝及破坏现象,属正常受压破坏. 由于 VCM4 的极限承载力大于 VCM3,其破坏程度也更加严重.

图 8(e) ~ (f) 显示了纯密柱结构表面的破坏形态,可以看出:纯密柱结构的破坏部位多出现于试件根部,破坏形式表现为底部混凝土被压碎,底部钢筋屈服,相邻密柱间产生相对错动,破坏裂缝形式以水平为主.

两种结构相比,由于混凝土外壳的环向约束作用,装配 - 现浇式密柱结构的破坏部位发生了变化,多出现于试件顶部,破坏形式表现为顶部混凝土被压碎,顶部部分钢筋被压断,破坏裂缝形式以竖向为主,其破坏程度也更加彻底.

此外,为研究预制与现浇部分的联结性能,将部分预制外壳凿除,见图 9. 可以看出:预制外壳与现浇柱能保持较好的整体联接性能,二者工作界面没有明显的裂缝或错动;预制外壳局部被压坏,但其内部铁丝网片仍保持完整,仅产生局部大变形,说明铁丝网片可维持较好的工作状态;相邻铁丝网片采用扎丝绑扎连接,试件破坏时,其搭接部位的部分扎丝被拉断,导致铁丝网片发生错移,在以后的试验及应用中,应对此连接部位采取加强措施.

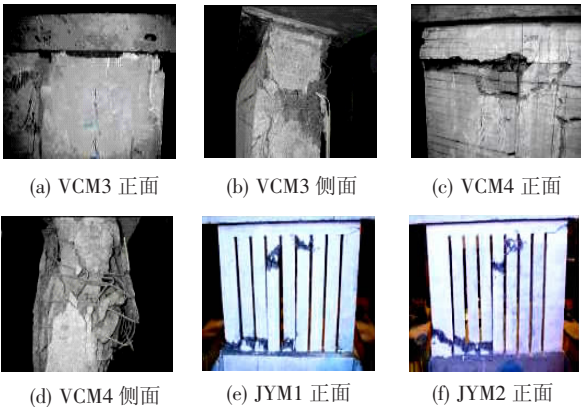


图 8 表面破坏形态

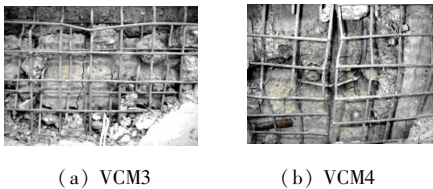


图 9 内部破坏形态

2.7 试验结果分析

1) 结构在试验过程中表现出承载力较高的特点,试件达到极限荷载时没有立即破坏,而是发生延时破坏,且破坏后仍具有一定的承载能力;原因在于预制外壳的环向约束及密柱间隙(见图 1)

的存在缓解了泊松比效应增加的横向应力,减缓了破坏进程。

2)密柱间隙内配筋较少,削弱了墙体的平面外抗弯刚度,因此理论上为试件的薄弱部位。但是,由试验得出的极限平面外位移及变形规律可知,试件并未失稳,密柱间隙处并未发生较大的位移,说明预制外壳较好地限制了间隙的变形,一般层高的墙体在重力荷载作用下不会发生平面外失稳破坏。

3)在试验过程中,预制外壳与现浇柱始终共同受力,二者工作界面没有出现明显的裂缝或错动滑移,表明其复合作用良好;与纯密柱结构相比,预制外壳的增加可以显著提高结构的承载能力。

4)尽管预制外壳破坏时局部被压坏,但其内部铁丝网片均未发生破坏,说明外壳配筋能满足实际需要,但需注意对相邻网片的搭接采取加强措施。

5)VCM4 的承载性能优于 VCM3,综合相关研究成果,设计及应用时宜优先采用“最优尺寸”。

3 数值模拟

前述已从试验角度证明了装配式外墙具备良好的承载及变形能力,为进一步研究其内部破坏特征,参照 VCM4 的构件尺寸建立有限元模型,并对其特征值屈曲及非线性极限承载模拟计算,从而对装配式外墙的破坏机理有更深入的认识。

3.1 特征值屈曲分析

采用整体式建模,混凝土本构采用单线型应

力应变直线,关闭破坏准则。施加约束时,为模拟墙体实际工作情况,将其下端固结;顶部加载面水平方向上平面外位移设置为零,耦合平面内位移及竖向位移^[7]。施加荷载时,先对顶部加载面上所有节点施加 Z 向单位荷载,而后进行屈曲分析,求出弹性屈曲荷载值。根据计算结果可知:

1)第 1 阶模态变形为沿高度方向的微小转动,属典型的悬臂结构失稳,与试验结果相符。

2)第 2 阶模态变形为平面外扭转,第 3 阶为墙体腹部弯曲;而纯密柱结构的前 3 阶屈曲变形均为平面外扭转,失稳破坏更加严重,说明预制外壳较好地约束了密柱变形,改进了墙体的稳定性能。

3)前 3 阶的屈曲特征值分别为 5 876.5、6 406.9 和 6 508.3 kN,均大于试验所得的极限承载力,但三者相差不大,取其平均值 6 263.9 kN 作为非线性极限承载力的上限。

3.2 非线性极限承载分析

采用分离式建模,混凝土模型关闭压碎选项;墙体约束状态为底部固结,上加载面水平方向位移为零且竖向位移耦合,顶部加载面上施加均布荷载;计算方法采用弧长法^[8]。根据计算结果可知:

1)图 10 显示了极限荷载作用下的应力分布情况,可以看出:墙体表面应力分布比较均匀,不存在应力集中的部位;预制外壳的应力较大处集中在四角及中部,符合试验的最终破坏形态;纯密柱结构中部存在明显的应力集中,而对于装配式外墙中的柱体,由于预制外壳的约束作用,其应力分布比较均匀,仅是端柱局部出现应力集中。

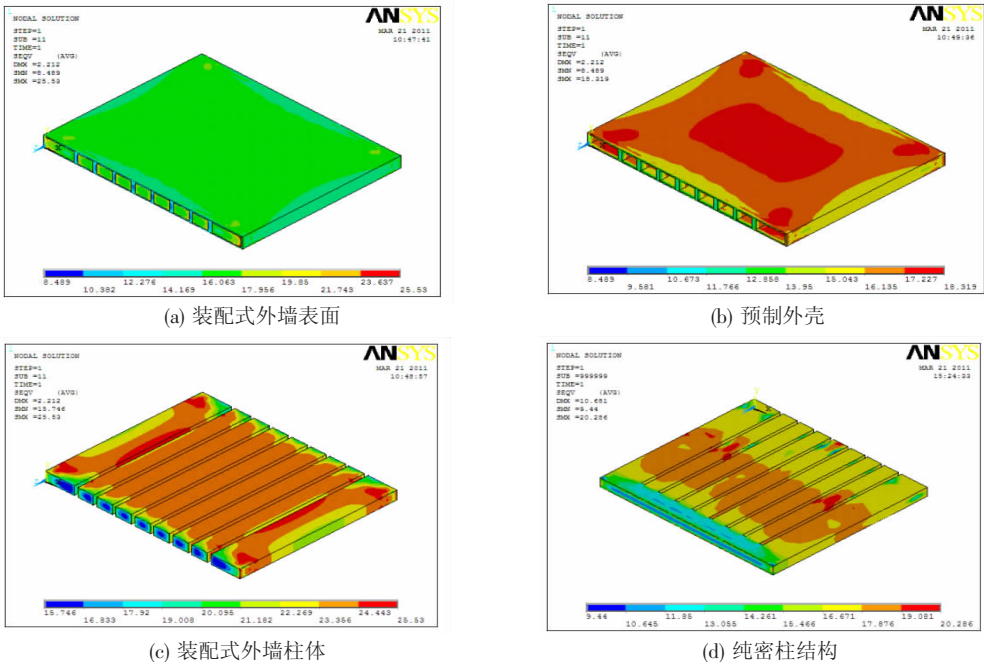


图 10 应力分布

2)图 11 显示了极限荷载作用下预制外壳与现浇柱的接触状态,可以看出:即使结构破坏,预制外壳与现浇柱的联结仍较为紧密,只有端柱局部出现滑移,这是由于其接触面较大所致;接触单元的总

应力分布比较均匀;二者接触面仅在端柱局部产生微小滑移,这与墙体最终破坏形式类似;接触裂缝间距较小,最大仅为 0.08 mm,说明预制外壳与现浇柱联结紧密,不会产生明显的滑移错动.

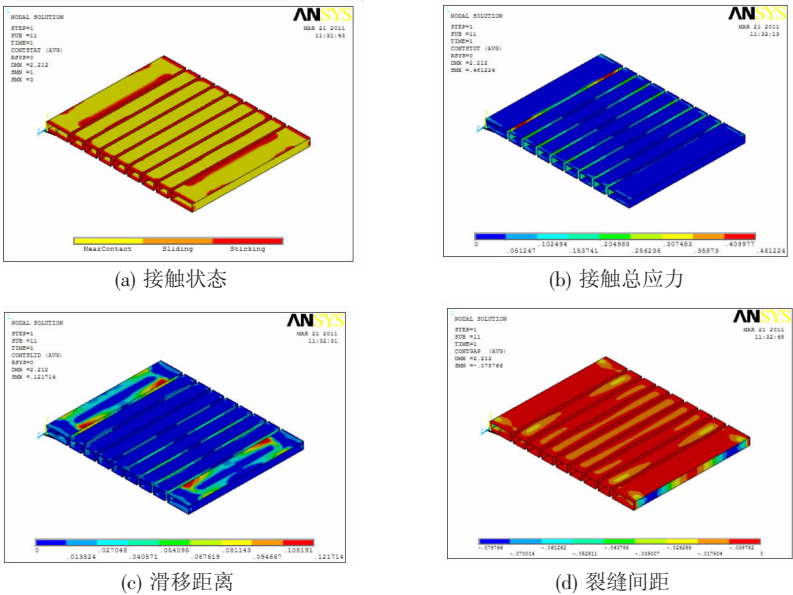


图 11 接触状态分析

3)墙体临近破坏时,位移急剧增加,而荷载仅少量增加,没有出现强化段;破坏时混凝土达到极限强度发生压溃破坏,未出现失稳,属典型的脆性破坏.表 4 显示了试验值与模拟值的对比,可以看出其相差不大,说明可采用 ANSYS 计算装配式外墙在竖向荷载作用下的内力^[9].

表 4 试验值与模拟值对比

极限位移 $S_{\max}$ /mm			极限承载力 $N_{\max}$ /kN		
试验值	模拟值	模拟值/ 试验值	试验值	模拟值	模拟值/ 试验值
7.73	8.50	1.10	4 255.0	5 013.8	1.17

4 结 论

- 1)在轴向压力作用下,装配式外墙表现出良好的承载性能,结构破坏有一定的延时,未出现平面外失稳.
- 2)预制外壳与现浇柱始终共同受力,二者工作界面没有发生明显的裂缝或滑移,其联结性能良好;预制外壳的密柱间隙及其内部铁丝网片搭接处为薄弱部位,应予加强.
- 3)对比试验和数值模拟结果可知:二者极限荷载与极限位移相差不大,破坏部位与破坏模式也基本一致,说明采用 ANSYS 有限元分析可有效模拟墙体竖向加载过程.
- 4)同纯密柱结构相比,预制外壳的增加能大幅提高抗压性能;同时,采用“最优尺寸”的截面

设计能更好地发挥结构的承载能力,宜优先采用.

参考文献:

[1] 刘正勇. 装配式施工法密柱墙理论分析与试验研究 [D]. 上海:同济大学,2010.

[2] 王新玲,曹双寅,张海东. 竖向荷载下新型住宅复合结构试验研究 [J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005,35(增刊 I): 61-65.

[3] 王琼梅,王刚,许淑芳. 轴压空心剪力墙试件承载力试验研究 [J]. 建筑科学,2006,22(3): 48-51.

[4] LEE J H,YOON Y S,COOK W D, et al. Benefits of using puddled HSC with fibers in slabs to transmit HSC column loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133 (12):1843-1847.

[5] LEE J H,YANG J M,YOON Y S. Strategic slab-column joint details for improved transmission of HSC column loads [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60: 85-91.

[6] 刘元珍,李珠. 保温墙模复合剪力墙轴心受压性能研究 [J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008, 43(3): 341-347.

[7] 聂祺,李云贵,林春哲. 钢筋混凝土剪力墙非线性分析单元模型 [J]. 工程力学,2010,27(11): 71-75.

[8] AYOUB A, FILIPPOU C. Nonlinear finite element analysis of RC shear panels and walls [J]. Journal of Structural Engineering,1998, 124 (3):1561-1574.

[9] 江见鲸. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.

(编辑 赵丽莹)