

文章编号:1673-2049(2012)01-0121-06

砌体填充墙平面外受力分析及简化模型

江明姝¹, 蔡贤辉², 仲伟秋¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116023)

摘要:采用 ANSYS 分析软件, 对顶端刚接和脱开的 2 种填充墙进行平面外受力变形性能的非线性数值模拟分析, 考察了均布荷载和层间位移作用下, 墙体开裂过程中的应力变化和破坏模式, 验证了顶端刚接墙体在开裂后期存在明显的拱作用。结果表明:顶端刚接的填充墙在均布荷载作用下宜按三铰拱模型考虑, 在层间位移作用下宜按两铰拱考虑;而顶端脱开、钢筋拉结的填充墙在均布荷载和层间位移作用下均可按顶端铰支、底端固接的模型考虑。

关键词:砌体填充墙;平面外受力;ANSYS 分析;均布荷载;层间位移

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Mechanics Analysis and Simplified Models of Masonry Infill Wall Under Out-of-plane Action

GANG Ming-shu¹, CAI Xian-hui², ZHONG Wei-qiu¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024,

Liaoning, China; 2. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian

University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: Two kinds of infill walls were numerically simulated and analyzed in nonlinear way by using ANSYS analysis software, one of which was rigidly connected to top beam; the other was connected to beam with reinforcement. Under uniformly distributed load and story displacement, the infill wall cracked. In the process of cracking, the stress changing and failure modes of walls were inspected. The arch effect of rigidly connected wall was obviously represented in late cracking period. Results show that the infill wall rigidly connected on top can be considered with three hinge arch model under uniformly distributed load, and can be considered with two hinge model under story displacement. The wall separated from top beam and connected by reinforcement can be simplified with the model of hinge joint on the top and consolidation on the bottom under uniformly distributed load and story displacement.

Key words: masonry infill wall; out-of-plane action; ANSYS analysis; uniformly distributed load; story displacement

0 引言

近些年来,地震灾害在世界各地频繁发生,建筑结构的破坏和倒塌给国家的经济财产造成了巨大的

损失,给人民的生命安全带来了严重的威胁,而填充墙的破坏、倒塌造成的危害也不容小觑,日益引起建筑行业相关人士的广泛关注。在四川汶川地震中框架结构的填充墙普遍开裂,与柱子刚性连接时的填

充墙拉结筋构造措施并不能确保地震作用下填充墙的整体性^[1],墙体出平面的倒塌破坏导致重大经济损失乃至人员伤亡,抗震设计规范的修订有必要对填充墙的抗震设计要求作出更严格、更具体的规定^[2]。

对于填充墙平面外的研究最早要追溯到 20 世纪 50 年代,研究墙体的平面外性能主要是关心爆炸对墙体的影响而不是地震作用。Abrams 等^[3]于 1956 年提出了拱作用理论,阐释了边界连接良好的墙体的实际平面外承载力比传统的弹性和弹塑性分析得到的承载力大得多的原因。文献[3]中对无筋砌体填充墙平面外强度做了试验研究和数值分析,考虑了不同的砂浆类型,通过改变墙体的厚度研究拱作用对承载力的影响。文献[4]于 2010 年用 4 个足尺的单层结构的振动台试验研究了钢筋混凝土框架中无筋砌体墙的平面外性能,建立了考虑拱作用的强度计算公式。文献[5]中通过足尺墙体试验,考察了高跨比和连接方式对墙体平面外承载力的影响,总结了不同连接方式的破坏模式。文献[6]中通过研究指出填充墙的平面外强度与填充墙的边界条件有关,填充墙的高厚比不宜太小。文献[7]在论述填充墙与梁柱刚性连接的弊端基础上,提出了一种满足规范要求的墙体连接构造,即用拉结筋与框架柱连接,并通过了静力试验验证。文献[8]中通过振动台试验,验证了与框架梁、柱脱开并用钢筋拉接的填充墙具有良好的平面外抗震性能。文献[9]中从规范层面给出了与框架柱、梁脱开的框架砌块填充墙的设计及构造方法。

中国规范规定填充墙与柱柔性连接,与梁紧密结合,在实际施工中墙顶往往采用斜砌顶紧的施工方式,形成实际意义上的刚性连接。因此,本文中笔者针对墙体与框架梁之间刚性连接和脱开、钢筋拉结 2 种连接方式,分析均布荷载和顶端水平位移这 2 种出平面的作用下填充墙的破坏发展和应力状态变化过程,进而提出符合中国工程特点的简化计算模型,以便工程设计应用。

1 ANSYS 有限元模型的建立

1.1 单元类型的选择

砌体填充墙由块体材料和砂浆砌筑而成,具有各向异性等非均匀性质。为简单起见,按各向同性的均质材料考虑,墙体单元采用 Solid65 单元^[10],拉结筋采用 Beam4 单元。

1.2 材料本构关系的确定

块体材料选用 MU5 的混凝土砌块,Mb5 的砂浆。考虑材料的非线性,其本构关系模型^[11]为

$$\frac{\sigma}{f_m} = \begin{cases} 1.15 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 0.15 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} & 0 \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \leq 1 \\ 1.6 - 0.6 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} & 1 < \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \leq 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为砌体所受的压应力; ϵ 为 σ 对应的压应变; f_m 为砌体平均抗压强度; ϵ_0 为 f_m 对应的平均压应变。

破坏准则采用混凝土的破坏准则,其中张开裂缝剪切传递系数 $\beta_t=0.5$,闭合裂缝剪切传递系数 $\beta_c=1$ 。钢筋采用理想弹塑性模型,且采用双线性等向强化模型模拟,屈服强度 $f_y=235$ MPa。

1.3 结构几何模型

考虑填充墙两侧与框架柱之间采用柔性连接,当墙体较宽,两侧柔性连接的影响相对较小,可以仅考虑出现最大应力的中间截面,分析时对中间截面按平面应变问题考虑。为了便于比较,对 2 种连接方式的墙体建立相同的分析模型,鉴于拉结筋在实际工程中的布置情况,墙体长度取 400 mm,高度取 3.0 m,厚度按外墙取 300 mm。墙体上下均布置钢筋混凝土梁,混凝土梁不考虑其非线性行为和破坏。下部混凝土梁的底部自由度全部约束,上部梁顶面竖向位移和水平位移约束。

当墙顶与梁脱开、钢筋拉结时,间隙宽度取为 30 mm,400 mm 宽度方向布置直径 6 mm 的双肢拉结筋,肢距 240 mm。其实际构造和分析模型侧视图如图 1 所示。

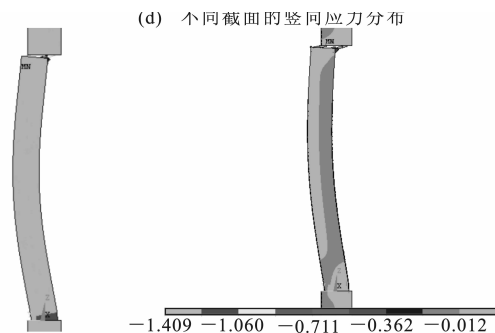


图 1 顶端脱开、拉结筋连接填充墙模型

Fig. 1 Models of Infill Wall Separated from Top Beam and Connected to Beam with Reinforcement

2 均布荷载作用下填充墙平面外受力分析

2.1 与梁底固接的填充墙

加载过程分为 2 个荷载步,先施加重力荷载,然后对墙面施加水平均布荷载,每个荷载子步为 0.69 kPa。当均布外荷载为 2.06 kPa 时,墙体在顶端连接处突然开裂,开裂程度达到墙体厚度的 87%,是瞬时的脆性开裂,但由于重力作用,墙体底端未发生

裂缝;当荷载为 2.75 kPa 时,墙体底端也发生开裂,但开裂范围为墙体厚度的 57%,这样原本两端固接的墙体,由于顶端和底端发生较大范围的开裂使得约束转动的作用减弱,趋向于形成塑性铰;随着荷载的增加,顶端裂缝因为底端裂缝的扩展有闭合的趋势,且在跨中逐渐出现裂缝;当荷载为 4.81 kPa 时,跨中开裂范围占墙体厚度的 40%;当荷载继续增加时,裂缝发展缓慢,至均布荷载为 16.5 kPa 时,跨中开裂占墙体厚度的 50%,顶端开裂减小到墙体厚度的 77%,底端开裂范围扩大到与墙顶接近,继续增大荷载,跨中开裂范围不断扩大,而顶端和底端裂缝范围变化不大;当施加荷载为 19.25 kPa 时,跨中开裂范围过大,约为墙体厚度的 50%,墙体形成机构,程序自动终止,认为达到极限状态,此时的最大位移发生在跨中,为 3.425 mm。该荷载时的墙体最终裂缝和竖向应力、竖向应变等见图 2,其中, q 为均布荷载,根据图 2(b)的竖向应力云图,可见墙体存在明显的拱作用。

根据墙体的裂缝发展过程,墙体顶端、底端最先开裂,然后跨中开裂,但裂缝沿厚度发展到一定程度时,随着荷载的继续增加扩展缓慢;分析墙体的竖向应力,可见明显的拱形压力区[图 2(b)]。由此可见,墙体在开裂后期形成明显的三铰拱机制,且具有较高的承载力。

2.2 与框架梁用拉结筋连接的填充墙

加载过程分为 2 个荷载步:第 1 荷载步为重力,只有 1 个荷载子步;第 2 荷载步对墙面施加水平均布荷载,每个荷载子步为 0.05 kPa。

极限荷载前一步($q=1.4$ kPa),墙体底端的应变均没有达到极限拉应变,即还没有开裂,而当施加一个荷载子步为 0.5 kPa,均布荷载为 1.5 kPa 时,墙体不能继续承载,此时的最大位移发生在墙体高度 2/3 处,最大位移为 0.47 mm,底端瞬间开裂,墙体裂缝见图 3(a),2 根拉结筋的应力都达到屈服强度,拉结筋不能约束墙体的变形,从图 3(c)极限荷载时底端应变曲线看,开裂程度为墙体厚度的 4/5,而此时的跨中部位尚处于完好状态,说明整个墙体结构的破坏是脆性开裂。另外,由于墙体顶端与框架梁之间脱开,梁与墙体之间不产生相互挤压的作用,所以未发现拱作用存在。

3 层间位移作用下填充墙平面外受力分析

3.1 与框架梁固接的填充墙

混凝土梁的顶端施加水平位移,混凝土梁顶的

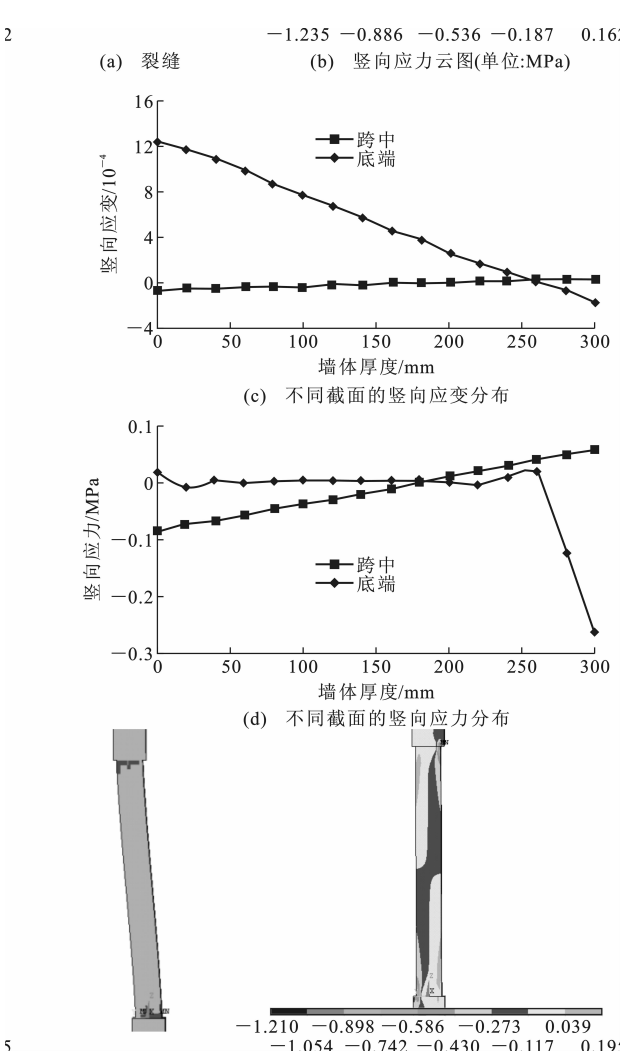


图 2 均布荷载 $q=19.25$ kPa 时的顶端固接墙体分析结果

Fig. 2 Analysis Results of Fixed Wall on Top Under Uniformly Distributed Load $q=19.25$ kPa

竖向位移保持约束状态。先施加重力荷载,然后分步施加梁顶水平位移,至程序自动终止。计算得到的极限位移为 5.5 mm。

从墙体的裂缝发展过程和应变变化来看,墙体的第 1 次开裂发生在顶端,开裂范围超过了墙体厚度的 2/3,为瞬间的脆性开裂,此时底端仍然处于弹性阶段,对应施加的墙顶水平位移 $U=0.786$ mm。当顶端位移增大到 1.89 mm 时,底端出现裂缝,开裂范围为墙体厚度的 1/2,此时顶端的开裂范围减小,体现了结构耗能过程中的应力重分布。随着墙体顶端位移的继续增加,底端开裂范围不断扩大,而顶端裂缝有闭合的趋势。当墙顶水平位移 $U=4.4$ mm 时,底端的开裂范围逐渐与顶端开裂范围逼近,两端相当于出现了塑性铰。极限状态墙顶水平位移 $U=5.5$ mm,底端开裂范围与顶端开裂范围相当,均达到墙体厚度的 3/4。

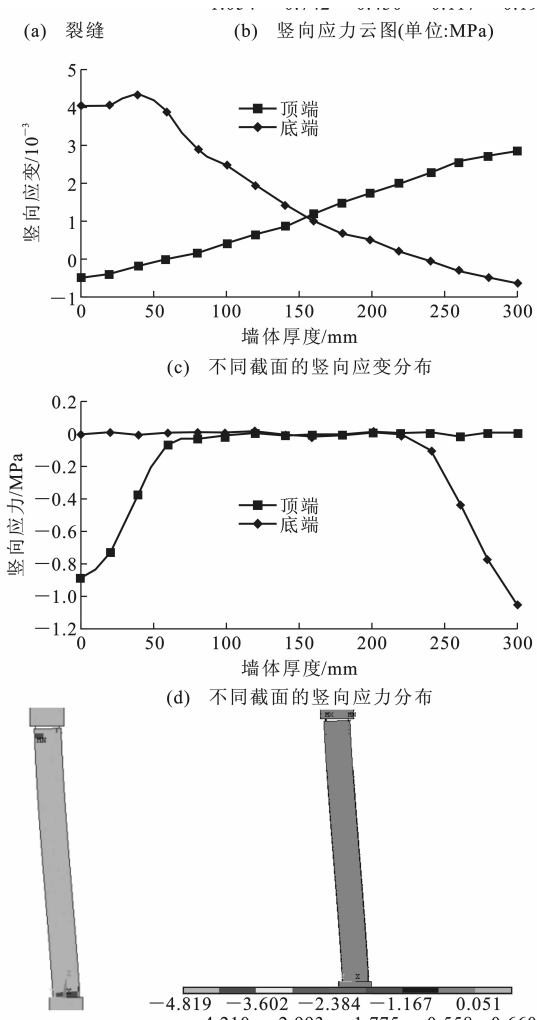


图 3 均布荷载 $q=1.5\text{ kPa}$ 时的顶端脱开墙体分析结果

Fig. 3 Analysis Results of Separated Wall from Top Under Uniformly Distributed Load $q=1.5\text{ kPa}$

图 4 为墙顶水平位移 $U=5.5\text{ mm}$ 时的顶端固接墙体分析结果。墙体顶端和底端的应力、应变呈现反对称分布,从墙体的竖向应力分布云图上看,墙体顶端的受压区到底端受压区之间形成一个明显的受压带,此时墙体受力相当于一个二力杆受压。

3.2 与框架梁拉结筋连接的填充墙

该填充墙模型和模型坐标与均布荷载作用下相同,只是施加荷载的第 2 荷载步为框架梁顶端位移,程序极限位移为 3 mm 。

在整个受力过程中,一根拉结筋受拉,另一根拉结筋受压。墙体的破坏形式为:拉结筋周围的墙体单元首先发生破坏,对拉结筋的锚固松动,导致拉结筋不能充分发挥对墙体的约束作用;随着框架梁位移的增大,当墙顶水平位移 $U=1.5\text{ mm}$ 时,墙体底端开裂,裂缝范围为墙体厚度的 $2/3$ 。开裂的瞬间,受拉钢筋对墙体的约束作用减小,主要由受压钢筋

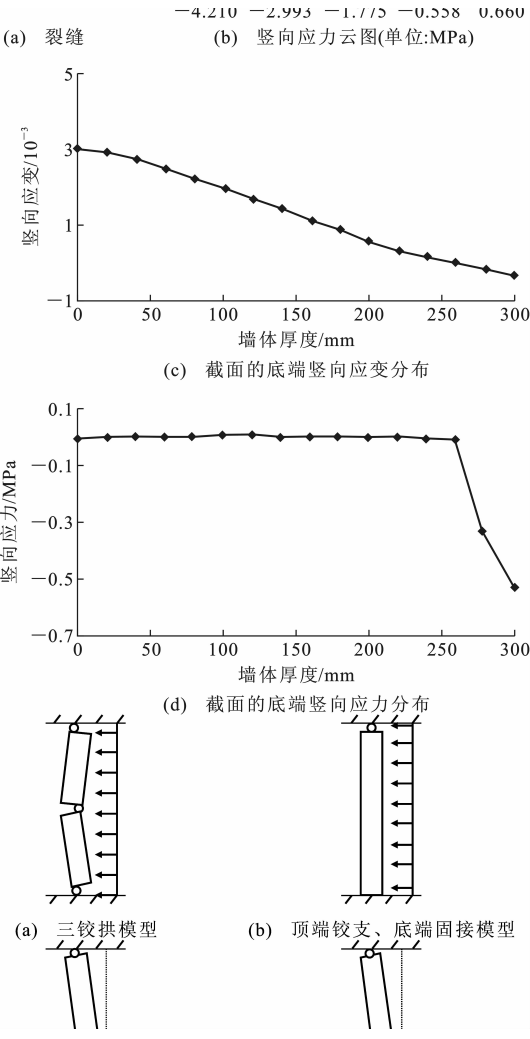


图 4 墙顶水平位移 $U=5.5\text{ mm}$ 时的顶端固接墙体分析结果

Fig. 4 Analysis Results of Fixed Wall on Top Under Horizontal Displacement $U=5.5\text{ mm}$

的压力维持墙体的变形和稳定,此时墙体顶端拉结筋的作用相当于墙体和框架梁铰接。框架梁的位移不断增大,墙体底端的裂缝不断开展,受压钢筋的轴力也不断增大,当极限位移为 3 mm 时,受压拉结筋的总应力超过屈服应力,根据墙体底端应变[图 5(c)],墙体底端开裂范围达到墙体厚度的 $5/6$,近似为一个塑性铰,程序停止计算。从图 5(b)可见,顶端用拉结筋连接的墙体不存在拱作用。

4 填充墙的简化计算模型分析

4.1 均布荷载下与框架梁固接的填充墙的简化模型

根据前面的分析,墙体首先在顶端发生开裂,然后在底端发生开裂,最后才在中部发生开裂;在墙体中部发生开裂后,墙体并未脆性地快速达到极限状态,而是继续承受了大约 4 倍的均布荷载,显示出了

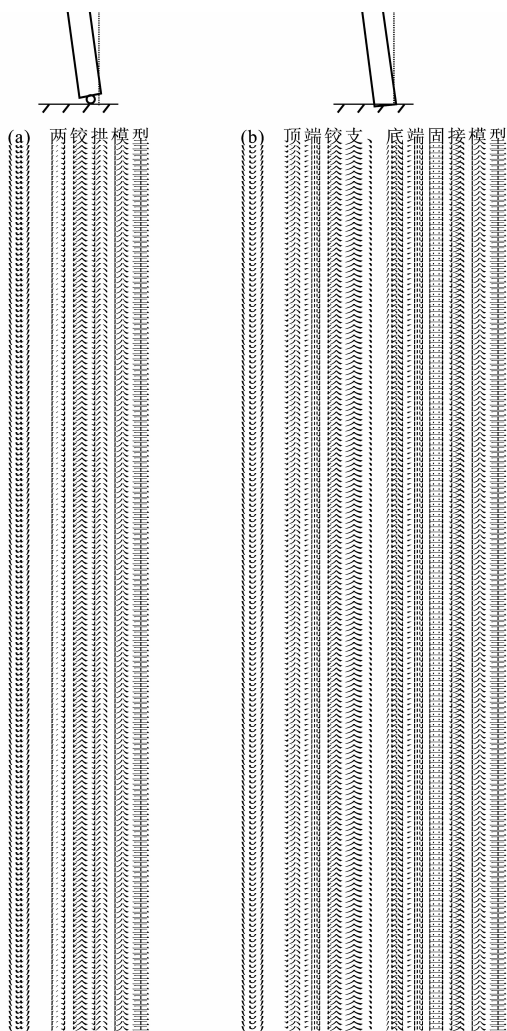


图 5 墙顶水平位移 $U=3\text{ mm}$ 时的顶端脱离墙体分析结果
Fig. 5 Analysis Results of Separated Wall from Top Under Horizontal Displacement $U=3\text{ mm}$

良好的后期承载能力。这种良好的后期承载能力可归因于拱作用的存在。根据墙体开裂的部位和范围,墙体顶端和底端深度开裂后,相当于形成了塑性铰,这时如果简单地把墙体中截面的弯曲极限状态作为构件的极限状态,即将墙体简化成两端铰支的弯曲构件来进行分析,是明显过于保守的。根据有限元分析结果及竖向应力云图所揭示的明显拱作用,可以将墙体按考虑拱作用的二连杆[或称三铰拱,见图 6(a)]简化,这时等效杆件的受压破坏对应于墙体的承载力极限状态。

4.2 均布荷载下与框架梁脱开、钢筋拉结的填充墙

由于拉结筋的变形使拉结筋周围的墙体单元首先被拉坏,墙体对拉结筋的锚固松动,约束减弱;随着荷载增加,墙体根部瞬间脆性开裂,开裂范围达到墙体厚度的 $4/5$,相当于在根部形成塑性铰,此时顶部拉结筋屈服。若继续加载,墙体将在下一计算步

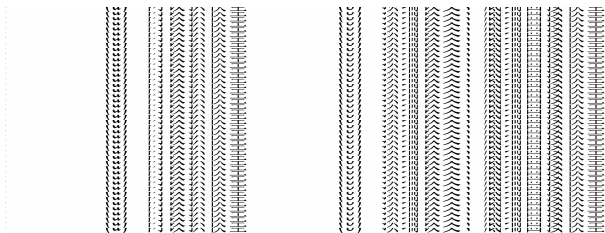


图 6 均布荷载下的简化模型

Fig. 6 Simplified Models Under Uniformly Distributed Load
时在中间部位形成裂缝,并迅速发展形成塑性铰,使构件成为一个机构,ANSYS 自动终止,认为达到极限状态。由于墙体的破坏属典型脆性破坏,这里取破坏前的状态作为墙体的极限状态。这样,在采用钢筋网片等加强措施保证拉结筋对墙体的拉结作用的前提下,墙体顶部的拉结简化为铰接,底部按固接考虑,即墙体极限状态时的简化模型按顶端铰支、底端固接的构件考虑。此时,墙体根部考虑自重和弯曲组合的破坏状态对应于墙体承载力的极限状态。

4.3 顶端水平位移下与框架梁底固接的填充墙

在水平位移作用下,墙体顶端先出现深裂缝,然后底端迅速开裂,在水平位移继续加大过程中,2 处裂缝的开裂深度趋向接近,最终随着水平位移的增大同步缓慢扩展。在此过程中,墙体中部始终不出现裂缝,墙体的竖向应力分布云图呈现反对称分布,两端之间存在明显的受压区,即存在明显拱作用。这时可将顶端和底端简化为铰支,将墙体简化为考虑拱作用的二力杆[或称两铰拱,见图 7(a)],此时等效杆件的受压破坏对应于墙体的承载力极限状态。

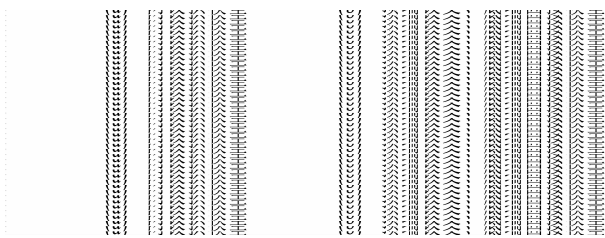


图 7 层间位移下的简化模型

Fig. 7 Simplified Models Under Story Displacement

4.4 顶端水平位移下与框架梁脱开、钢筋拉结的填充墙

分析该墙体的应力状态未发现有拱作用存在。墙体先在拉结筋的锚固部位开裂,然后底部快速开裂,开裂深度超过墙体厚度的 $4/5$,相当于在墙体根部形成塑性铰。由于不存在拱作用,继续加载时构件等同于两端铰接的机构,这时取根部塑性铰形成时的状态为墙体的承载力极限状态。这样,在采用钢筋网片等加强措施保证拉结筋对墙体的拉结作用

的前提下,墙体按顶端铰支、底端固接的构件考虑。此时,墙体根部考虑自重和弯曲组合的破坏状态对应于墙体承载力的极限状态。

5 结 语

(1)分析结果表明,在出平面的均布荷载或顶部水平位移作用下,与梁底固接的填充墙存在明显的拱作用,构件表现出良好的后期承载能力,在模型简化时应考虑拱作用的影响。

(2)对于不同的荷载作用,不同连接方式的填充墙应采用不同的承载力计算简化模型。均布荷载下,刚性连接的填充墙宜简化为三铰拱模型,柔性连接的墙体宜简化为顶端铰支、底端固接的模型;层间位移作用下,刚性连接的填充墙宜简化为两铰拱模型,柔性连接的填充墙宜简化为顶端铰支、底端固接的模型。

(3)实际工程中的填充墙,一般需要同时考虑出平面的水平分布荷载和层间位移的影响,内力计算较为复杂。这时,宜根据具体情况选用合适的简化模型。如地震作用下与梁底刚性连接的填充墙受到层间位移和惯性力 2 种作用,在建筑的上部一般由惯性力起控制作用,这时应采用三铰拱模型;而在建筑的下部,由于不存在二次振动问题^[12],结构的层间位移对填充墙受力起控制作用,这时应按两铰拱模型简化。

参考文献:

References:

- [1] 侯 爽,杨 伟.汶川地震都江堰市填充墙震害分析[J].大连理工大学学报,2009,49(5):754-757.
HOU Shuang, YANG Wei. Infill Damage Assessment of Dujiangyan City Subjected to Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 754-757.
- [2] 张敏政.从汶川地震看抗震设防和抗震设计[J].土木工程学报,2009,42(5):21-24.
ZHANG Min-zheng. Reflection on the Seismic Fortification and Design in Light of the Wenchuan Earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 21-24.
- [3] ABRAMS D P, ANGEL R, UZARSKI J. Out-of-plane Strength of Unreinforced Masonry Infill Panels[J]. Earthquake Spectra, 1996, 12(4): 825-844.
- [4] TU Y, CHUANG T, LIU P, et al. Out-of-plane Shaking Table Tests on Unreinforced Masonry Panels in RC Frames[J]. Engineering Structures, 2010, 32(12): 3925-3935.
- [5] DRYSDALE R G, ESSAWY A S. Out-of-plane Bending of Concrete Block Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(1): 121-133.
- [6] 黄 靓,施楚贤,熊 辉.带砌体填充墙结构在地震作用下的安全性质疑[J].建筑结构,2005,35(3):57-60,65.
HUANG Liang, SHI Chu-xian, XIONG Hui. Query on Safety of Structure with the Infill Panels in Earthquake[J]. Building Structure, 2005, 35(3): 57-60, 65.
- [7] 李哲明,宁文奎,宋玉普,等.非承重抗震墙体实验研究[J].建筑结构,2004,34(8):31-34.
LI Zhe-ming, NING Wen-kui, SONG Yu-pu, et al. Experimental Study on a New Type of Infill Wall[J]. Building Structure, 2004, 34(8): 31-34.
- [8] 程 云,刘 明,王长玉,等.填充墙与柱脱开构造方式的平面外稳定研究[J].华中科技大学学报:城市科学版,2008,25(4):238-241.
CHENG Yun, LIU Ming, WANG Chang-yu, et al. Out-of-plane Stability Test on Disconnection of Structure Between Infill Wall and Frame[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(4): 238-241.
- [9] 苑振芳,王振惠,李 彤,等.论与框架柱脱开的砌块填充墙设计应用[J].建筑砌块与砌块建筑,2009(6):3-7.
YUAN Zhen-fang, WANG Zhen-hui, LI Tong, et al. Design Application on Disconnection of Structure Between Infill Wall and Frame[J]. Building Block & Block Building, 2009(6): 3-7.
- [10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
WANG Xin-min. ANSYS Numerical Analysis of Building and Civil Engineering Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [11] 刘桂秋.砌体结构基本受力性能的研究[D].长沙:湖南大学,2005.
LIU Gui-qiu. The Research on the Basic Mechanical Behavior of Masonry Structure[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [12] 程 云.砌块填充墙平面外抗震性能的试验与理论研究[D].大连:大连理工大学,2010.
CHENG Yun. The Study of Shaking Table Test on Out-of-plane Performance of Infill Masonry Wall[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.