

生土填充墙钢框架结构抗剪性能分析

郝际平^{1,3}, 刘 斌¹, 邵大余¹, 钟炜辉¹, 李月晨¹, 申 薇²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663;
3. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:利用 ABAQUS 有限元软件, 对一榀钢框架和一榀生土填充墙钢框架的抗剪性能进行对比分析, 在此基础上对生土填充墙钢框架的抗剪性能进行参数分析. 对比分析结果表明: 生土填充墙钢框架是一种较好的抗侧力结构体系, 其初始刚度和抗剪承载力均明显高于纯钢框架, 并且生土填充墙可以降低钢框架屈服后刚度退化严重的不利影响; 参数分析结果表明: 框架柱轴压比、墙体高厚比和钢框架梁柱线刚度比是影响生土填充墙钢框架抗剪性能的主要因素, 推导了生土填充墙钢框架初始刚度和抗剪承载力的理论计算公式, 其计算结果与有限元分析较为吻合

关键词:生土填充墙; 钢框架; 抗剪性能; 参数分析

中图分类号: TU 392.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)05-0609-06

传统生土建筑低碳环保、价格低廉、施工方便, 在我国中西部农村住宅中应用较为广泛^[1], 但抗剪承载力较低、结构整体性较差、脆性较强^[2]. 文献[3]在传统生土材料的基础上掺入适量石灰和麦秸, 提高了生土材料的抗剪强度, 在一定程度上限制了生土墙体的开裂, 改进了生土墙体的抗剪性能.

钢框架是一种延性较好的结构形式, 但抗侧刚度较小. 在现行的钢框架设计中, 通常忽略填充墙对结构抗剪性能的影响, 但研究表明填充墙可以显著提高钢框架的抗侧刚度和抗剪承载力^[4,5], 因此将填充墙和钢框架作为一个整体结构进行研究是必要的. 在填充墙钢框架结构体系中填充墙可以提高整体结构的抗侧刚度, 钢框架对墙体的约束作用可以防止墙体在遭遇地震时倒塌, 二者取长补短, 使结构的整体性能有所提高.

本文以单层单跨生土填充墙钢框架为典型试件, 利用与纯钢框架抗剪性能的分析对比和参数分析, 研究生土填充墙对整体结构抗剪性能的影响. 该研究对低层生土填充墙钢框架结构在我国农村住宅的应用进行了有益探索, 也为同类填充墙钢框架的设计理论提供依据.

1 钢框架与生土填充墙钢框架的对比分析

1.1 有限元模型的建立

钢框架与生土填充墙钢框架的对比分析采用单层单跨计算模型. 钢框架(试件 SJ-1)跨度为 4 200 mm, 高度为 3 600 mm, 梁柱节点与柱脚形式均采用刚接, 框架柱截面尺寸为 H250×200×6×10, 框架梁截面尺寸为 H250×200×6×8. 钢框架采用 Q235B 钢材, 按两折线弹塑性材料本构关系进行分析, 弹性模量 E 取 2.06×10^5 N/mm², 切线模量取 $0.02E$, 泊松比取 0.3.

生土填充墙钢框架(试件 SJ-2)中钢框架与试件 SJ-1 相同. 内填的生土墙体厚度取 200 mm, 与钢框架通过泥浆连接, 在有限元分析中采用面-面接触模拟, 切向摩擦系数取 0.8. 生土填充墙材料采用 Drucker-Prager 本构模型, 弹性模量取 55.77 N/mm², 泊松比取 0.283, 应力-应变曲线通过试验数据拟合为抛物线型曲线^[6], 其曲线方程为:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 2.332 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - 0.697 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{1.56} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-03-25 修改稿日期: 2013-09-05

基金项目: 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项基金资助项目(2009ZDKG-66); 住房和城乡建设部科学技术基金资助项目(2012-K2-17)

作者简介: 郝际平(1959-), 男, 山西襄垣人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构力学与结构工程研究.

式中: σ_0 为生土材料的最大压应力, ϵ_0 为生土材料最大压应力对应的压应变。

在试件 SJ-1 和 SJ-2 的梁端施加单调水平荷载, 并考虑框架柱承受轴压比为 0.3 的竖向荷载, 计算模型见图 1。

1.2 抗剪承载力分析

文献[3]中生土墙在圈梁和构造柱约束下的水平方向低周往复试验结果表明, 生土墙达到极限状态时墙体开裂但并未发生脆性破坏, 极限侧移角可以达到 $1/65 \sim 1/46$, 基本满足《建筑抗震设计规范》(GB-50011-2010) 中弹塑性层间侧移角 $1/50$ 的要求^[7]。本文在分析中将侧移角为 $1/50$ 对应的水平荷载作为生土填充墙的抗剪承载力。

经有限元软件分析得到结构的荷

载-位移曲线, 如图 2 所示, 图中横坐标为侧移角(顶部侧移与框架高度的比值)。分析结果表明当试件 SJ-1 的侧移角达到 $1/132$ 时, 结构开始屈服, 屈服荷载为 95.56 kN; 当侧移达到 $1/42$ 时, 结构达到极限状态, 抗剪承载力为 116.22 kN。试件 SJ-2 的屈服荷载为 121.60 kN, 对应的侧移角为 $1/188$; 当结构侧移角达到 $1/50$ 时, 侧向荷载为 229.82 kN。由于生土填充墙与钢框架共同承受水平荷载, 使试件 SJ-2 的抗剪承载力是试件 SJ-1 的抗剪承载力的 1.98 倍。

1.3 应力分析

试件 SJ-1 的侧移角达到 $1/50$ 时结构的变形与应力分布见图 3, 可以看出, 框架梁柱节点区和柱脚均达到屈服。试件 SJ-2 的侧移角达到 $1/50$ 时结构的变形与应力分布见图 4, 从图中可见, 框架部分的变形和应力分布与试件 SJ-1 相近; 生土填充墙的应力分布形成一个斜向压力带, 作用与侧向支撑相似, 使整体结构的抗侧刚度和抗剪承载力有明显提高。

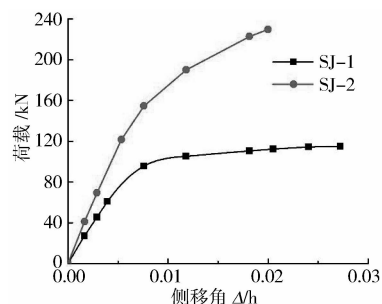


图 2 试件的荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of specimens

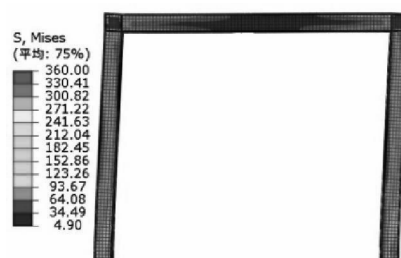
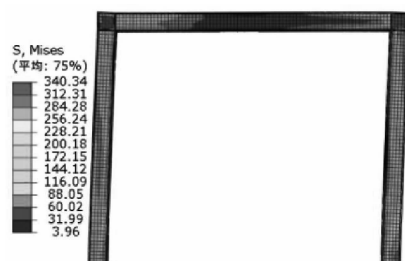
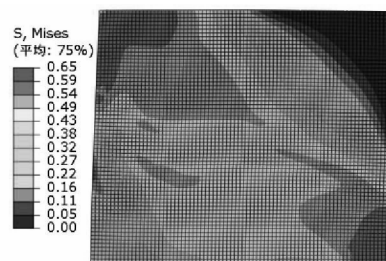


图 3 试件 SJ-1 的变形与应力分布

Fig. 3 Displacement and stress-distribution of SJ-1



(a) 试件 SJ-2 中钢框架变形与应力分布



(b) 试件 SJ-2 中生土填充墙变形与应力分布

图 4 试件 SJ-2 的变形与应力分布

Fig. 4 Displacement and stress-distribution of SJ-2

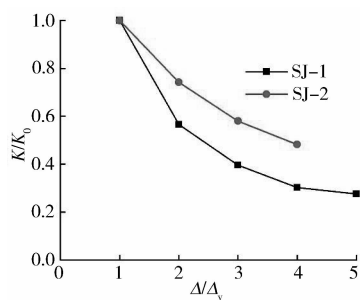


图5 试件刚度退化曲线

Fig. 5 Stiffness degradation curves of specimens

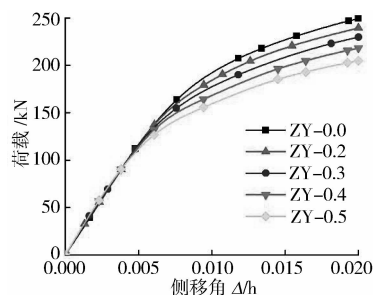


图6 不同轴压比试件的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of specimens with different axial compression ratio

1.4 刚度分析

试件 SJ-1 的初始刚度分别为 4 577.69 kN/m; 试件 SJ-2 的初始刚度为 6 950.03 kN/m, 较试件 SJ-1 提高了 51.8 %。试件 SJ-1 和 SJ-2 的刚度退化曲线见图 5, 可以看出: 纯钢框架屈服后刚度退化严重, 生土填充墙钢框架中由于填充墙对整体结构的支撑作用, 使结构的刚度退化较平缓。

2 生土填充墙钢框架的参数分析

将试件 SJ-2 作为基本试件, 分析框架柱轴压比、墙体高厚比和钢框架梁柱线刚度比对生土填充墙钢框架抗剪性能的影响。其中试件 SJ-2 的框架柱轴压比为 0.3, 墙体高厚比为 17.3, 梁柱线刚度比为 0.74。

2.1 框架柱轴压比

生土填充墙钢框架在不同轴压比情况下的荷载-位移曲线见图 6, 其中试件编号中数字代表框架柱的轴压比。从图 6 可见, 轴压比对结构的初始刚度影响甚微, 可以忽略不计; 轴压比对整体结构的抗剪承载力有较大影响。试件 ZY-0.2、ZY-0.3、ZY-0.4、ZY-0.5 的抗剪承载力与试件 ZY-0.0 相比分别减小了 3.98 %、7.84 %、12.54 % 和 17.86 %。

2.2 墙体高厚比

对不同高厚比试件进行有限元分析, 得到试件的荷载-位移曲线, 如图 7 所示, 其中试件编号中数字代表生土填充墙的高厚比。从图 7 可见, 墙体高厚比越小, 结构的初始刚度和抗剪承载力越大, 具体数据见表 1。

2.3 钢框架梁柱线刚度比

对不同钢框架梁柱线刚度比试件进行有限元分析, 得到试件的荷载-位移曲线, 如图 8 所示, 其中试件编号中数字代表钢框架梁柱线刚度比。从图 8 可见, 墙体钢框架梁柱线刚度比越小, 结构的初始刚度和抗剪承载力越大, 具体数据见表 2。

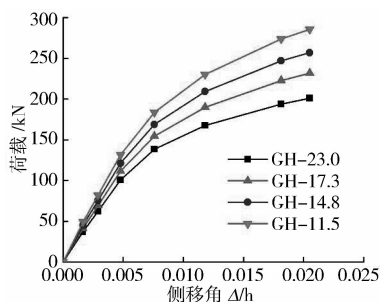


图7 不同墙体高厚比试件的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of specimens with different depth-thickness ratio

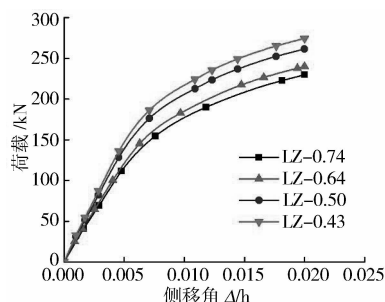


图8 不同柱线刚度比试件的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of specimens with different beam-to-column linear stiffness ratio

3 生土填充墙钢框架抗剪性能的理论计算

3.1 生土填充墙钢框架初始刚度计算

生土填充墙钢框架的初始刚度可按纯钢框架和生土填充墙的初始刚度相加计算,即

$$K_0 = K_{0f} + K_{0w} \quad (2)$$

式中: K_0 为生土填充墙的初始刚度; K_{0f} 为钢框架的初始刚度; K_{0w} 为生土填充墙的初始刚度。

钢框架的初始刚度 K_{0f} 采用 D 值法计算:

$$K_{0f} = \frac{12E_c I_c}{h^3} \left(\frac{6\alpha + 1}{3\alpha + 2} \right) \quad (3)$$

式中: E_c 为框架柱的弹性模量; I_c 为框架柱截面的惯性矩; h 为框架柱高度; α 为框架梁线刚度与框架柱线刚度之比。

生土填充墙的初始刚度 K_{0w} 应考虑生土填充墙的弯曲刚度和剪切刚度,可按式计算^[8]:

$$K_{0w} = \frac{1}{\frac{H^3}{3E_w I_w} + \frac{1.2H}{0.39E_w A_w}} \quad (4)$$

式中: E_w 为墙体的弹性模量; I_w 为墙体截面的惯性矩; A_w 为墙体的截面面积; H 为墙体高度; $0.39E_w$ 为墙体的剪切模量。

3.2 生土填充墙钢框架抗剪承载力计算

生土填充墙钢框架的抗剪承载力等于钢框架和生土填充墙抗剪承载力之和,即

$$F_u = F_{uf} + F_{uw} \quad (5)$$

式中: F_u 为生土填充墙的抗剪承载力; F_{uf} 为钢框架的抗剪承载力; F_{uw} 为生土填充墙的抗剪承载力。

3.2.1 钢框架抗剪承载力计算

利用机动法,求解钢框架的抗剪承载力^[9],钢框架的破坏机构见图9。

由虚功原理得:

$$F_{uf} \Delta = 2(M_{pc} \theta + M_{pb} \theta)$$

$$\text{解得: } F_{uf} = \frac{2(M_{pc} + M_{pb})}{h} \quad (6)$$

式中: M_{pc} 为框架柱截面的塑性铰弯矩; M_{pb} 为框架梁端截面的塑性铰弯矩; Δ 为柱顶虚位移; θ 为柱端和梁端处虚转角。 M_{pc} 的计算需考虑框架柱轴力对框架柱截面塑性铰弯矩的不利影响,可按式计算:

$$M_{pc} = 1.11M_p (1 - P/P_y) \quad (7)$$

式中: M_p 为无轴力情况下框架柱截面的塑性铰弯矩; P/P_y 为框架柱的轴压比。

3.2.2 生土填充墙抗剪承载力计算

根据文献^[10]提出的生土墙体抗剪承载力计算公式并在有限元分析结果基础上进行修正,得到生土填充墙钢框架中墙体的抗剪承载力计算公式:

$$F_{uw} = 0.55f_v A_w \quad (8)$$

式中: f_v 为生土的抗剪强度平均值,根据试验数据取 0.253 N/mm^2 ^[6]; A_w 为墙体的截面面积。

3.3 理论计算公式与有限元结果对比

钢框架、生土填充墙和整体结构的初始刚度按式(2)~(4)计算,抗剪承载力按式(5)~(8)计算。对

表1 不同墙体高厚比试件的力学指标

Tab.1 Mechanical behaviors of specimens with different depth-thickness ratio

试件编号	GH-23.0	GH-17.3	GH-14.8	GH-11.5
初始刚度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	6 228.14	6 950.03	7 596.37	8 272.54
抗剪承载力/ kN	201.05	229.82	257.13	285.68

表2 不同梁柱线刚度比试件的力学指标

Tab.2 Mechanical behaviors of specimens with different beam-to-column linear stiffness ratio

试件编号	LZ-0.74	LZ-0.64	LZ-0.50	LZ-0.43
初始刚度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	6 950.03	7 951.98	8 778.69	9 274.25
抗剪承载力/ kN	229.82	239.99	261.51	274.60

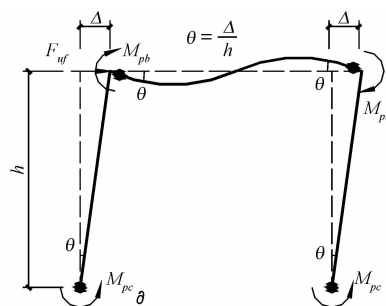


图9 钢框架破坏机构图

Fig.9 Collapse mechanism of the steel frame

不同框架柱轴压比、墙体高厚比和钢框架梁柱线刚度比的生土填充墙钢框架的有限元分析结果与理论计算结果进行对比,具体数据见表 3 和表 4。从表中可以看出,钢框架初始刚度和抗剪承载力以及生土填充墙初始刚度的理论计算结果与有限元分析结果较为吻合;生土填充墙抗剪承载力的理论计算结果均略小于有限元结果,式(8)的计算结果较为保守且偏于安全。

表 3 生土填充墙钢框架的初始刚度
Tab. 3 Initial stiffness of steel frames with adobe infilled walls

试件编号	有限元结果/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$			理论计算结果/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$			误差计算/%		
	钢框架	生土墙	整体结构	钢框架	生土墙	整体结构	钢框架	生土墙	整体结构
SJ-2	4 577.69	2 372.34	6 950.03	4 743.19	2 208.92	6 952.11	3.62	-6.89	0.03
GH-23.0	4 450.17	1 777.97	6 228.14	4 743.19	1 657.03	6 400.22	6.58	-6.80	2.76
GH-13.8	4 618.48	2 977.89	7 596.37	4 743.19	2 761.11	7 504.30	2.70	-7.28	-1.21
GH-11.5	4 705.85	3 566.69	8 272.54	4 743.19	3 313.32	8 056.51	0.79	-7.10	-2.61
LZ-0.64	5 494.55	2 457.42	7 951.98	5 355.46	2 208.92	7 564.38	-2.53	-10.11	-4.87
LZ-0.50	6 403.34	2 375.35	8 778.69	6 399.52	2 208.92	8 608.44	-0.06	-7.01	-1.94
LZ-0.43	6 919.53	2 354.72	9 274.25	7 063.72	2 208.92	9 272.64	2.08	-6.19	-0.02

注:计算误差(%)=(理论计算结果-有限元结果)/有限元结果

表 4 生土填充墙钢框架的抗剪承载力
Tab. 4 Shear capacity of steel frames with adobe infilled walls

试件编号	有限元结果/kN			理论计算结果/kN			误差计算/%		
	钢框架	生土墙	整体结构	钢框架	生土墙	整体结构	钢框架	生土墙	整体结构
SJ-2	112.26	117.56	229.82	117.71	109.93	227.64	4.85	-6.49	-0.95
ZY-0.0	130.04	119.32	249.36	139.42	109.93	249.35	7.21	-7.87	0.01
ZY-0.2	121.38	118.05	239.43	131.42	109.93	241.35	8.27	-6.88	0.80
ZY-0.4	101.66	116.42	218.08	100.89	109.93	210.82	-0.76	-5.58	-3.33
ZY-0.5	86.87	117.95	204.82	84.07	109.93	194.00	-3.22	-6.80	-5.28
GH-23.0	110.00	91.05	201.05	117.71	82.45	200.16	7.01	-9.45	-0.44
GH-13.8	108.68	148.45	257.13	117.71	137.41	255.12	8.31	-7.44	-0.78
GH-11.5	108.81	176.87	285.68	117.71	164.89	282.60	8.18	-6.77	-1.08
LZ-0.64	123.61	116.38	239.99	131.55	109.93	241.48	6.42	-5.55	0.62
LZ-0.50	145.94	115.57	261.51	140.73	109.93	250.66	-3.57	-4.88	-4.15
LZ-0.43	159.36	115.24	274.60	151.96	109.93	261.89	-4.64	-4.61	-4.63

注:计算误差(%)=(理论计算结果-有限元结果)/有限元结果

4 结 语

(1)通过钢框架与生土填充墙钢框架抗剪性能的对比分析,表明生土填充墙钢框架的初始刚度和抗剪承载力均明显高于纯钢框架。(2)框架柱轴压比、墙体高宽比和钢框架梁柱线刚度比是影响生土填充墙抗剪性能的主要因素。框架柱轴压比越大,结构的抗剪承载越低。增大墙体高厚比和降低钢框架梁柱线刚度比可以提高整体结构的初始刚度和抗剪承载力。(3)本文推导的生土填充墙钢框架初始刚度和抗剪承载力计算公式与有限元分析结果较为吻合,为生土填充墙钢框架的设计工作提供一定参考。

参考文献 References

[1] 王 军,李东军.走向生土建筑的未来[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2001,33(2):147-149.
WANG Jun, LI Dong-jun. To the future of the immature soil buildings[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2001, 33(2):147-149.

[2] 阿肯江·托呼提,元国庆,陈汉清.新疆新疆地区传统土坯房屋震害及抗震技术措施[J].工业建筑,2008,38(增刊):189-193.
AKENJIANG T, YUAN Guo-qing, CHEN Han-qing. Seismic damage and seismic countermeasures of xinjiang tra-

- ditional adobe house[J]. *Industrial Construction*, 2008, 38(S): 189-193.
- [3] 刘挺. 生土结构房屋的墙体受力性能试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
LIU Ting. Experimental study on bearing performance of raw-soil structure walls[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [4] 张溶. 空腔砌块复合墙体钢框架抗震性能试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
ZHANG Rong. Experimental research on seismic behavior of steel frame with cavity sandwich panel infill[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [5] 田洁, 周楠. 填充墙框架结构在地震作用下的滞回特性与损伤分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(2): 189-195.
TIAN Jie, ZHOU Nan. Hysteretic response and damage analysis of masonry infilled frames under severe earthquake [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 189-195.
- [6] 潘兴庆. 云南农村民居典型土坯砌体基本力学性能试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
PAN Xing-qing. Basic mechanics characteristics of adobe masonry of rural houses in Yunnan province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [8] 童岳生, 钱国芳, 梁兴文, 等. 砖填充墙钢筋混凝土框架的刚度及其应用[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1985, 44(4): 21-35.
TONG Yue-sheng, QIAN Guo-fang, LIANG Xing-wen, et al. The stiffness of brick infilled reinforced concrete frame and its application[J]. J. Xi'an Institute of Metallurgy And Construction Engineering, 1985, 44(4): 21-35.
- [9] JEFFREY B, MICHEL B. Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls[J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(11): 1448-1456.
- [10] 陈汉清. 木柱梁-土坯组合墙体数值模拟及抗震性能分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2009.
CHEN Han-qing. Numerical simulation of composite adobe wall with timber frame and analysis of seismic resistance behavior[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2009.

Analysis on the shear performance of steel frames with adobe infilled walls

HAO Ji-ping^{1,3}, LIU Bin¹, SHAO Da-yu¹, ZHONG Wei-hui¹, LI Yue-chen¹, SHEN Wei²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China;

3. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Comparison of shear performance with a steel frame and a steel frame with an adobe infilled wall is made in this paper by using finite element analysis software ABAQUS. On this basis, parameter analysis on shear performance of steel frames with adobe infilled walls are carried out. The results indicate that the initial stiffness and shear capacity of steel frames with adobe infilled walls are higher than pure steel frames and the adobe infilled walls can reduce the adverse effect on the stiffness degradation of pure steel frames after yielding. The axial compression ratio of columns, depth-thickness ratio of walls and beam-to-column linear stiffness ratio of steel frames are the main factors influencing the shear performance of steel frames with adobe infilled walls. Theoretical calculation formulas for initial stiffness and shear capacity of steel frames with adobe infilled walls are derived. The calculated results turn out to agree with the finite element analysis well.

Key words: adobe infilled walls; steel frames; shear performance; parameter analysis