

考虑填充墙影响的底层薄弱结构抗震性能分析

李 刚*, 卢 华

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 填充墙既有减小结构周期而增大地震力的不利一面, 也有增大结构层间侧移刚度的有利一面。汶川地震中, 具有填充墙的底层薄弱结构破坏严重。根据等效刚度原则, 把具有填充墙的框架转化为等效的纯框架, 对七层底层薄弱结构进行小震下的弹性分析和大震下的弹塑性 Pushover 分析。结果表明, 尽管填充墙使得结构中、上部层间角位移不同程度地减小, 但却使得底层相对更加薄弱, 层间变形比不考虑填充墙时大, 填充墙对于底层薄弱结构有不利的影响。

关键词: 底层薄弱结构; Pushover 分析; 填充墙; 等效刚度; 汶川地震

中图分类号: TU312.3 **文献标志码:** A

0 引 言

底层薄弱结构具有下部为大空间以供商业应用, 上部为许多小空间以供居民住宅用的特点, 给人们的生活带来了方便。然而, 历次震害表明, 底层薄弱结构(如底层框架结构)上刚下柔的侧向刚度布置, 使房屋侧向变形在相对薄弱的底层产生变形集中现象, 结构破坏严重, 汶川地震的震害也充分说明了这一点^[1]。结构中的填充墙在抗震设计中往往被当做一种非传力构件, 认为它只起到隔离、保护的作用, 设计中通过周期折减来考虑填充墙的影响。汶川地震中, 由于楼板的增强作用、框架梁上增加砌体或填充墙的增强作用等, 框架梁或屋盖的实际刚度增大, 许多框架发生“强梁弱柱”破坏模式^[2,3]。实际上强震作用下, 填充墙对结构抗震性能的利弊仍不清晰^[4]。

填充墙既有减小结构周期而增大地震力的不利一面, 也有对结构层间侧移刚度贡献的有利一面。然而, 对于底层无填充墙、上部有较多填充墙的框架结构, 填充墙对上部结构侧移刚度的贡献, 使得侧移刚度薄弱的底层更加相对薄弱, 这会对这类底层薄弱结构的抗震性能产生怎么样的影响? 本文根据等效刚度原则, 对此进行研究。

1 静力弹塑性 Pushover 分析方法

Pushover 分析方法近年来引起了地震工程界的广泛兴趣, 它是按一定的水平荷载加载方式, 对结构施加单调递增的水平荷载, 逐步将结构推至一个给定的目标位移, 来研究分析结构的非线性性能, 从而判断结构及构件的变形受力是否满足设计要求^[5]。我国新的抗震设计规范将 Pushover 分析方法作为大震下结构弹塑性变形分析的一种方法^[6]。本文结合抗震规范, 采用以下倒三角加载模式:

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{ek} (1 - \delta_n); i = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_{ek} &= \alpha_1 G_{eq} \\ \Delta F_n &= \delta_n F_{ek} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: F_i 、 G_i 和 H_i 分别表示第 i 层的地震作用、重量和距地面高度; F_{ek} 为总地震作用; G_{eq} 为结构等效总重力荷载; δ_n 、 ΔF_n 分别为顶部附加地震作用系数和地震作用; α_1 为结构第 1 阶振型的地震影响系数; N 为结构总层数。

2 考虑填充墙影响的方法

(1) 周期折减法

我国抗震规范规定 8 度 5 层以下、7 度 8 层以下的填充墙框架同时考虑填充墙的刚度和承载力,其他结构只考虑填充墙刚度对框架周期的影响,即只分析钢筋混凝土框架的刚度,计算结构的作用时(底部剪力法),视填充墙的多少对周期乘以小于 1.0 的折减系数^[6,7]. 这种方法考虑了填充墙的刚度导致结构周期的缩小,而在位移分析模型中又将之忽略,这样将导致结构水平位移偏大.

(2) 剪力分配法

我国的抗震规范^[6]指出,在框架结构抗震分析中当考虑填充墙影响时,每层框架和填充墙的剪力可按它们的刚度比来分配,这样,框架和填充墙就可以分开来算,避开了因填充墙问题而给框架结构计算带来的不便. 这种分配剪力法是针对底部剪力法而提出的,但它使用的周期折减系数为 1.0,也就是说不考虑填充墙对框架周期的影响,用这种方法算出来的层间变形会偏小.

(3) 有限元法

随着计算机及有限元软件的发展,用与实际结构较为接近的三维模型来模拟结构已经比较方便,用梁单元来模拟框架梁、柱构件,用板壳单元来模拟楼板,用墙单元或类似壳单元来模拟填充墙,整个填充墙框架结构完全用有限元来分析. 这种方法在处理填充墙与框架梁、柱的连接关系时较为困难.

(4) 等效框架法

本文利用等效刚度的原理,把具有填充墙的框架转化为等效的纯框架,进行抗震分析. 先计算填充墙的层间侧移刚度 K_w 与填充墙相连接的柱的层间侧移刚度 K_f ,然后再按等侧移刚度原则,重新折算柱的截面尺寸,使新得到的柱的层间侧移刚度 K'_f 等于 K_w 与 K_f 之和,这样在计算模型中,就没有必要用墙单元来模拟填充墙,只需用梁单元来模拟框架构件(三维模型). 这种计算模式既考虑了填充墙的存在对结构周期的影响,又考虑到了它对结构刚度的贡献,与实际较为相符. 填充墙的 K_w 和柱的 K_f 可按式计算^[8]:

$$K_w = \frac{3\phi_k E_w I_w^t}{H_w(\phi_m + \gamma\phi_v)}; \gamma = \frac{9I_w^t}{A_w^t H_w} \quad (3)$$

$$K_f = \alpha \frac{12E_c I_c}{H_c^3} \quad (4)$$

式中: ϕ_k 为填充墙层间侧移刚度折减系数; E_w 为填充墙砌体弹性模量; A_w^t 、 I_w^t 分别为填充墙砌体水平截面积和惯性矩; H_w 为填充墙的高度; ϕ_m 、 ϕ_v 为洞口影响系数; I_c 、 H_c 为柱的惯性矩和高度; α 为考虑了梁柱刚度比值对侧移刚度影响的修正系数.

上式中,填充墙层间侧移刚度折减系数 ϕ_k 是一个关键的参数,小震时结构上、中、下部依次取 1.0、0.6、0.3^[9],大震时取 0.60、0.25、0^[5]. 另外,当不考虑填充墙的影响时系数 α 一般是小于 1.0 的,但当考虑填充墙的影响后,填充墙不但体现出抗侧刚度的作用,对梁的转动还有较大的约束作用,而且梁侧与楼板相连接,实际上它难以转动,即具有剪切型模型的特点. 因此,假设框架结构当考虑填充墙的影响时,梁的转动很小,可忽略,即 $\alpha = 1.0$. 这样,在利用等抗侧刚度来处理填充墙的刚度转换时,就可以运用下面的公式:

$$\frac{12E_c I_c^*}{H_c^3} = \frac{12E_c I_c}{H_c^3} + \frac{3\phi_k E_w I_w^t}{H_w(\phi_m + \gamma\phi_v)} \quad (5)$$

式中: I_c^* 为经等抗侧刚度转换后得到的等效框架柱的惯性矩. 另外,还提出一个比较保守的假设: 结构的重力主要由框架承担,这样原框架和等效框架相应柱的面积不变. 因此,可以根据以上面积和惯性矩的条件求出等效框架柱的截面尺寸. 采用等效框架对填充墙处理,就可以根据填充墙折减后的等效框架模型用有限元软件进行模态分析,以及弹塑性静力 Pushover 分析.

3 算例分析

七层商住楼,为考虑不同薄弱底层的影响,底层高度分别取为 4~7 m; 2 至 6 层为 2.8 m,顶层为 3.3 m. 底层不设有填充墙,而 2 至 7 层均有填充墙,而且布局一致. 设防烈度为 7 度(基本加速度为 0.15g),场地周期为 0.35 s,同时考虑风的影响,基本风压为 0.8 kPa. 混凝土框架材料: 1 至 3 层梁、柱均为 C30, 4 至 7 层梁、柱均为 C25; 填充墙材料 MU7.5,砂浆 M0.5. 限于篇幅,各层柱、梁、墙的具体尺寸略去. 为考虑填充墙的影响,把结构分为 3 个层次: 下部(1、2 层)、中部(3、4、5 层)、上部(5、6、7 层).

采用通过 ISO9000 质量认证的 ANSYS 有限元软件进行分析,梁单元和质点单元分别选用

Beam189 和 Mass21 单元,模型如图 1 所示.

本文在基于 ANSYS 的 Pushover 分析中,恢复力模型用混凝土材料的本构模型,如图 2 所示.采用抗震规范的底部剪力法算出的倒三角荷载作为非线性静力分析最终的推力来控制加载(对于

大震情况,地震作用力还应根据等效阻尼来调整^[10]),结果见表 1.表 2~4 和图 3、4 为小震和大震下考虑和不考虑填充墙时部分计算结果(图中,F 代表纯框架,W 代表考虑填充墙,S、L 分别表示小震和大震的情况).

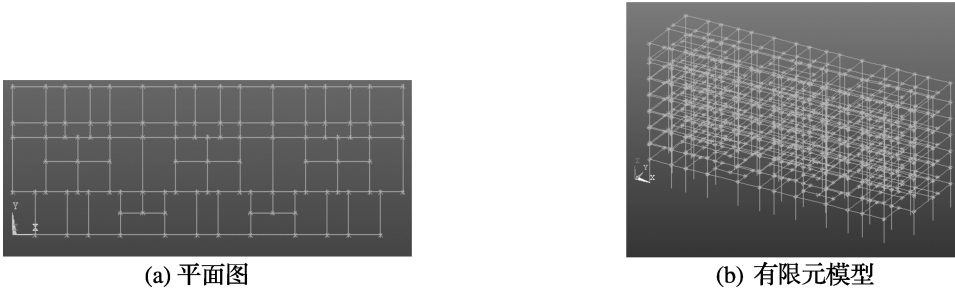


图 1 七层底层薄弱结构平面图及有限元模型

Fig. 1 Plan and FE model of 7-story structure with weak story

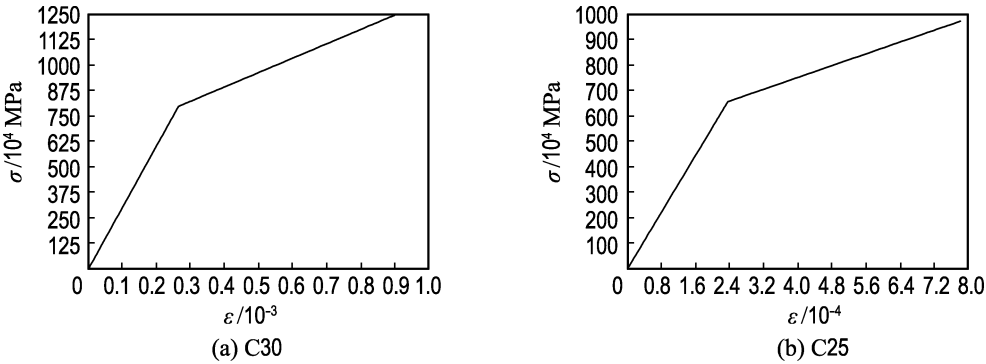


图 2 混凝土 C30 及 C25 本构关系

Fig. 2 Constitution relationship of concrete C30 and C25

表 1 结构受到的总地震力 (kN)

Tab. 1 Total earthquake load imposing on the structure (kN)

底层 层高/m	小震下			大震下		
	不考虑	考虑	比值	不考虑	考虑	比值
4	1 809.312	2 812.130	1.554 3	10 855.870	15 012.670	1.382 9
5	1 640.299	2 263.163	1.379 7	9 841.739	12 434.060	1.263 4
6	1 468.539	1 863.167	1.268 7	8 811.236	10 433.390	1.184 1
7	1 307.920	1 566.147	1.197 4	7 847.520	8 886.363	1.132 4

表 2 结构基本周期的比较 (s)

Tab. 2 Comparison of the structural 1st period (s)

底层 层高/m	小震下			大震下		
	不考虑	考虑	比值	不考虑	考虑	比值
4	1.072 9	0.657 3	0.612 6	1.072 9	0.748 4	0.697 5
5	1.201 6	0.840 3	0.699 3	1.201 6	0.926 7	0.771 2
6	1.364 6	1.047 5	0.767 6	1.364 6	1.131 0	0.828 8
7	1.558 7	1.275 9	0.818 6	1.558 7	1.357 6	0.871 0

表 3 小震下、大震下底层为 5 m 时的层间角位移(0.001 rad)
Tab.3 Story drift ratio under the total earthquake (5 m, 0.001 rad)

层数	小震下			大震下		
	不考虑	考虑	比值	不考虑	考虑	比值
1	1.042	1.293	1.240	15.918	21.346	1.341
2	0.717	0.327	0.456	7.755	8.161	1.052
3	0.629	0.064	0.101	5.946	0.621	0.104
4	0.621	0.059	0.095	6.383	0.662	0.104
5	0.552	0.050	0.091	5.150	0.477	0.093
6	0.453	0.029	0.063	3.651	0.213	0.058
7	0.356	0.016	0.046	2.664	0.122	0.046

表 4 结构底层角位移 (0.001 rad)
Tab.4 Story drift ratio of the low story (0.001 rad)

底层 层高/m	小震下			大震下		
	不考虑	考虑	比值	不考虑	考虑	比值
4	0.808	1.103	1.366	11.577	17.567	1.517
5	1.042	1.293	1.240	15.918	21.346	1.341
6	1.262	1.494	1.184	20.042	24.634	1.229
7	1.463	1.620	1.107	23.713	27.561	1.162

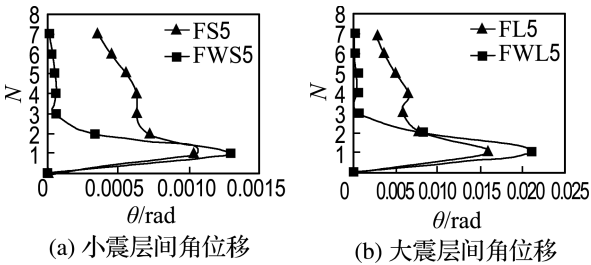


图 3 底层 5 m 时的各层间角位移
Fig.3 Comparison of story drift ratio of the low story (5 m)

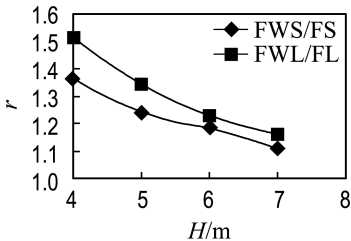


Fig.4 Comparison of story drift ratio of low story

4 结 论

(1)结构基本周期:随着底层高度的增加,结构的周期逐渐增加. 对于小震,结构底层从 4~7 m 变化时考虑与不考虑填充墙的结构基本周期之比分别为 0.612 6、0.699 3、0.767 6、0.818 6,对于大震,比值依次为 0.697 5、0.771 2、

0.828 8、0.871 0. 这说明小震时填充墙对框架周期的影响要比大震时大一些,主要原因是底层的高度较高,没有填充墙的影响,而第 2 层尽管有填充墙,但对于小震,填充墙刚度折减系数为 0.3,填充墙起的作用较小;对于大震,填充墙刚度折减系数为 0,填充墙不起作用.

(2)结构地震作用:框架结构在考虑填充墙后,由于周期的降低,结构的地震作用力有所增加,这是填充墙对框架结构不利的一面.

(3)结构层间角位移:小震下,结构的最大层间角位移都出现在底层,且都没有超过弹性极限角位移,均满足小震防设要求. 考虑填充墙和不考虑填充墙的层间角位移的比值(以底层 5 m 为例):第 1 层的比值为 1.240,这是由于考虑填充墙后总地震作用力增加,第 1 层总刚度不变引起的;第 2 层由于填充墙刚度的贡献,比值降到了 0.456;中部(3、4、5 层),约为 0.1 左右;而上部(6、7 层)比值降到了最低,约为 0.06 左右. 大震下,结构的最大层间角位移也都发生在底层. 当不考虑填充墙影响时,结构层间角位移随着底层高度的增加而增加,底层高度为 4、5 m 时分别为 0.011 6 和 0.016 0,小于弹塑性极限角位移(1/50),满足大震防设要求;底层高度为 6、7 m 时,层间角位移分别为 0.020 0 和 0.023 7,超过了弹塑性层间角限值,不满足大震防设要求. 当考虑填充墙的影响后,底部两层间的角位移要比不考虑填充墙时有所增大,比值(底层层高为 5 m 时)分别为 1.341 和 1.052;中部各层比值大约为 0.1,上部比值约为 0.05. 这是因为大震下底部两层的填充墙刚度折减系数取 0.

值得注意,在考虑填充墙影响的底层薄弱结构的弹性分析(小震下)和弹塑性 Pushover 分析(大震下)中,尽管填充墙对中、上部框架的抗侧移有利,使得中、上部层间角位移不同程度地减小,

但是,由于填充墙对中上部框架层间侧移刚度的贡献,使得底层相对更加薄弱,层间变形比不考虑填充墙时更大,而薄弱层变形是决定结构震害的主要因素.因此,填充墙对于底层薄弱结构有不利的影响.

Pushover 分析方法近年来在工程界得到广泛应用.然而,Pushover 方法把实际结构等效为单自由度体系,并假定等效侧向力分布保持不变.另外,Pushover 分析忽视了地震动持时和循环往复效应、结构动力特性的逐渐变化过程,以及非线性结构响应依赖于加载路径和变形需求依赖于地震动特性的事实.因此,研究者不断对 Pushover 分析方法进行改进,例如,提出了考虑侧向力分布变化的自适应 Pushover 分析方法,考虑高阶振型影响的模态 Pushover 分析等.另外,由于结构整体破坏主要由结构层间变形来衡量,本文主要考虑了填充墙对结构刚度及周期的影响,没有考虑填充墙对结构强度及对构件的破坏模式等的影响.

参考文献：

[1] 李 翔,吕西林,李建中,等.汶川地震中广元市底层

框架结构房屋震害调查与分析[J]. 结构工程师, 2008, **24**(3):12-15

[2] 清华大学土木工程结构专家组等.汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, **29**(4):1-9

[3] 熊立红,杜修力,陆 鸣,等.5·12汶川地震中多层房屋典型震害规律研究[J]. 北京工业大学学报, 2008, **34**(11):1166-1172

[4] 滕 军,李祚华,和雪峰.基于汶川震害分析的强地震作用下结构地震累积损伤研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, **30**(6):7-14

[5] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G D P K. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J]. **Engineering Structures**, 1998, **20**(4-6):452-464

[6] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001

[7] 高小旺,龚思礼,苏经宇.建筑抗震设计规范理解与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002

[8] 童岳生,钱国芳.砖填充墙钢筋混凝土框架房屋的抗震实用计算方法[J], 建筑结构学报, 1987(1):43-52

[9] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等. 抗震工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000

[10] 卢 华.性能设计中的能力谱方法研究与工程应用 [D]. 大连:大连理工大学, 2005

Seismic capacity analysis of structures with lower weak story considering effect of infill walls

LI Gang* , LU Hua

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the frames filled with infill walls, infill walls have both negative effect (decreasing the structural period and increasing the earthquake action) and positive effect (increasing the story lateral stiffness) on the structure. There were a lot of failure phenomena occurring in this kind of building in Wenchuan earthquake. The method of equivalent stiffness is employed to transform the original frame with infill walls to the equivalent frame, and the elastic analysis under the minor earthquake and nonlinear static Pushover analysis under the severe earthquake of a 7-story building structure with the lower weak story is performed using the proposed method. The results show that the infill walls may reduce the story drift ratio of the middle and upper stories to some degree, however, they made the weak lower story much weaker relatively and cause the drift ratio of the weak story to become larger. Thus, the effect of infill walls is negative to the structures filled with infill walls with the lower weak story.

Key words: structure with lower weak story; Pushover analysis; infill wall; equivalent stiffness; Wenchuan earthquake