

## 考虑 SSI 和填充墙刚度效应的 RC 框架结构抗震性能研究

王海东<sup>†</sup>, 刘举

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 以满足现行设计规范要求的一 10 层填充墙竖向布置不规则的钢筋混凝土框架结构为研究对象, 运用 SAP2000 模拟计算不同场地条件下该结构在地震作用下的响应规律. 分别对在刚性地基假定上不考虑填充墙的刚度效应、在土-结构相互作用 (SSI) 基础上不考虑填充墙的刚度效应、在刚性地基假定上考虑填充墙的刚度效应以及同时考虑 SSI 和填充墙的刚度效应 4 种不同情况进行动力时程分析, 对比研究该结构的抗震性能. 对比结果表明: 1) 在大震作用下, 在 SSI 效应的基础上考虑填充墙的刚度效应会使 SSI 效应更加显著, 对 RC 框架结构的层间位移角响应存在不利影响, 采用刚性地基假定、忽略填充墙的刚度效应对结构是偏于不安全的. 2) 对结构进行倒塌分析, 在 SSI 效应基础上考虑填充墙的刚度效应使结构的塑性变形向楼层底层集中更加明显, 结构倒塌的峰值明显降低, 且随着场地土变软, 结构的倒塌峰值越低. 因此, 建议设计人员在同类钢筋混凝土框架结构的设计中增加底层柱的延性确保结构在地震作用下的变形需求.

**关键词:** 土-结构相互作用; 填充墙; RC 框架结构

**中图分类号:** TU375.4; P315.92

**文献标志码:** A

## Seismic Performance of RC Frames Considering SSI Effect and Stiffness of Infill Wall

WANG Haidong<sup>†</sup>, LIU Ju

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In this paper, a 10-story RC frame structure satisfying the current design codes was taken as a study example, and the structural response regulation under different site condition subjected to earthquake actions was simulated and calculated by SAP2000. Four kinds of cases namely considering the rigid foundation assumption without the influence of stiffness effects of the infill walls, soil-structure interaction without the influence of the stiffness effects of the infill walls, rigid foundation assumption together with the influence of the stiffness effects of the infill walls, and soil-structure interaction together with the influence of the stiffness effects of the infill walls, were examined in the dynamic time history analysis, respectively, and the seismic performance of this structure was studied comparatively. The comparison of the results showed that: (1) For the RC frame structure under rare earthquakes,

\* 收稿日期: 2018-01-30

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-13-0190), Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-13-0190)

作者简介: 王海东 (1976—), 男, 湖南长沙人, 湖南大学副教授, 博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: whdwang@hnu.edu.cn

considering the SSI effect with the stiffness of infill walls has negative influence on the structural response of the inter layer drift ratio. The structure with the rigid foundation assumption is not safe when the stiffness effect of the infill walls is not considered.(2)For structural collapse analysis, considering the stiffness effect of the infill walls with the SSI effect obviously generates the structural plastic deformation concentrated on the bottom story and decreases the peak values of the collapsed structure. The softer site soil results in the lower peak values of the collapse. It is suggested that designers should increase the ductility of columns to ensure the deformation demands under seismic action.

**Key words:** soil-structure interaction; infill wall; RC frame structure

众多学者已分别对土-结构相互作用(简称为 SSI)和填充墙的刚度效应进行了大量的研究.在 SSI 效应研究方面,通过查阅汶川地震<sup>[1]</sup>相关文献,可以发现高层结构受基础和地面条件影响非常大.Galal 等指出在考虑 SSI 效应时结构的抗震需求与刚性地基假定时存在明显的差异<sup>[2]</sup>.Rajeev 等指出高层结构进入非线性状态时,结构变柔,SSI 效应的影响更加显著<sup>[3]</sup>.岳庆霞等指出考虑 SSI 效应结构变柔,结构的顶层位移增加,抗倒塌能力降低<sup>[4]</sup>.王海东等指出地震作用下考虑重力二阶效应与 SSI 效应之后,塑性较主要集中在结构的底部楼层,变形集中效应明显<sup>[5]</sup>.另外,在考虑填充墙刚度效应研究方面,李英民等指出均匀满布填充墙对框架结构抗震总体上是有益的,而填充墙平、立面不均匀布置对框架结构抗震不利<sup>[6]</sup>.易伟建等通过对某高层建筑结构模型采用等效斜撑修正填充墙模型并优化等效斜撑宽度,使得计算频率与实测固有频率更相符<sup>[7]</sup>.仇一颗等通过对高层建筑结构进行随机振动测试并与 SAP2000 中建模分析结果对比,得出在刚性基础条件下得出规范规定的周期折减系数取值偏于保守<sup>[8]</sup>.黄华等通过对 29 个框架填充墙模型进行地震分析,指出随着薄弱层的位置不同,填充墙对框架抗侧移刚度的参与率不同,同时提出了采用截面面积比的经验公式来评定薄弱层<sup>[9]</sup>.黄靓等通过对比带节能砌体填充墙的 RC 框架与纯框架的试验结果,指出填充墙的存在使得框架结构的强度和刚度退化加快,但却表现出来较强的抗倒塌能力<sup>[10]</sup>.阎红霞等在多遇地震作用下通过对比纯框架计算模型和考虑填充墙布置的结构计算模型,填充墙不均匀布置时各种性能指标都有很大差异<sup>[11]</sup>.Daniele 等通过从不同角度研究了填充墙对结构周期响应的影响,分析不同高度的结构模型,提出了一个新的线性结构周期响应规律<sup>[12]</sup>.Konstantinos 等通过对比纯框架、框架填充墙结构在连续地震作用下的地震响应,发现

框架填充墙结构地震响应会更大<sup>[13]</sup>.这些研究都表明,对于框架填充墙结构,仅考虑 SSI 效应后,结构周期变长,结构的变形向底部楼层集中,结构的抗倒塌能力降低;仅考虑填充墙的刚度效应后,结构的周期会减小,基底剪力会增大,但并未对竖向不规则布置的填充墙的刚度效应对考虑 SSI 效应的结构底层造成的不利影响进行研究.

《建筑抗震设计规范》中规定,一般条件下不计入地基与结构相互作用的影响<sup>[14]</sup>,同时《高层建筑混凝土结构技术规程》还规定通过结构的自振周期折减系数来间接考虑填充墙对结构整体刚度的影响<sup>[15]</sup>.然而,大量的地震灾害调查也表明,有停车场、临街的窗户、在建筑的一楼的购物区和大堂等底层为空框架的填充墙竖向不规则布置的框架结构建筑是震害比较严重的一类建筑,这表明当该类结构进入弹塑性状态后,这种评估方式是不合理的.

为了研究同时考虑 SSI 和填充墙刚度效应对 RC 框架结构抗震性能的影响,本文通过设计建立一 10 层钢筋混凝土框架结构,计算结构在地震作用下在弹性、弹塑性等不同阶段的地震响应,以获得同时考虑填充墙刚度效应与 SSI 效应对 RC 框架结构地震反应影响的规律,为 RC 框架的设计提供一定的参考依据.

## 1 模型介绍

### 1.1 计算模型与参数

参照文献[5],设计一 10 层对称框架,消除扭转效应,且框架的设防烈度为 7 度,其平面布置图、立面图如图 1 所示,各层梁柱截面信息与配筋情况如表 1 所示.柱混凝土强度等级为 C40,梁混凝土强度等级为 C35,采用 C35 现浇楼板,楼板厚度为 100 mm,混凝土自重为 25 kN/m<sup>3</sup>;2~10 层梁上满布 240 mm 厚由 MU10 烧结普通砖和 M5 砂浆砌筑而成的填充

墙,墙厚 240 mm,密度为 19 kN/m<sup>3</sup>,首层为不布置填充墙;楼面和可上人屋面活载均为 2 kN/m<sup>2</sup>.

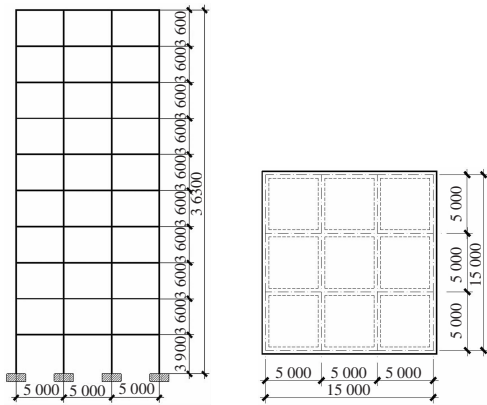


图 1 结构立面图与平面布置图(单位:mm)<sup>[5]</sup>  
Fig.1 Structural elevation and plan(unit:mm)<sup>[5]</sup>

表 1 框架梁、柱截面及配筋表

Tab.1 The section of frame beam and column and reinforcement

构件	楼层	截面尺寸/(mm × mm)	配筋
框架柱	1	700 × 700	16Φ25, 10@Φ100
	2~10	600 × 600	12Φ25, 10@Φ100
框架梁	2~4	250 × 700	5Φ25
			4Φ25
	5~屋面	250 × 700	4Φ25
			3Φ25

在有限元分析中,选择中间一榀框架进行分析,依据《高层建筑混凝土结构技术规程》中规定考虑现浇楼板对于梁刚度的贡献,采用 T 形截面梁进行分析,梁两侧的有效翼缘宽度各取 6 倍楼板厚

度;混凝土采用 mander 的无约束混凝土本构关系模型,强度等级 C35 弹性模量为 31 500 N/m<sup>2</sup>,峰值应变为 0.002,强度等级 C40 弹性模量为 32 500 N/m<sup>2</sup>,峰值应变也为 0.002;钢筋采用 Park 的钢筋本构关系模型,纵筋采用 HRB400,弹性模量为 200 000 N/m<sup>2</sup>,屈服应力为 360 N/mm<sup>2</sup>,考虑极限强度 540 N/mm<sup>2</sup>,箍筋采用 HRB335,弹性模量为 200 000 N/mm<sup>2</sup>,屈服应力为 300 N/mm<sup>2</sup>,考虑极限强度 450 N/mm<sup>2</sup>;梁柱均使用集中塑性铰模型,梁采用在距离梁端 0.1 倍梁长处布置考虑弯矩的 M3 铰;柱采用在距离柱头和柱脚 0.1 倍柱长处布置轴力与弯矩相互作用的 P-M2-M3 耦合铰,其具体铰模型参数详见文献[16].

### 1.2 SSI 效应的实现

本文模型采用柱下独立基础,基础尺寸 4 m × 4 m,厚度为 1 m,基础埋深为 1.8 m,并依据 ATC40 和 FEMA440 中的简化方法,采用土弹簧模型来模拟土对结构的作用<sup>[5]</sup>.土弹簧简化模型选用 ATC40 中的简化模型如图 2 所示;土弹簧简化模型的部分刚度计算公式,如表 2 所示;不同场地的土体的具体参数如表 3 所示.

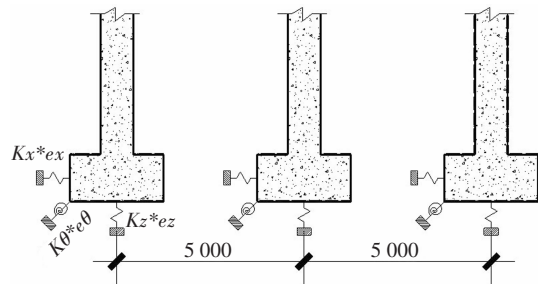


图 2 土弹簧模型(单位:mm)  
Fig.2 Soil spring model (unit:mm)

表 2 土弹簧刚度公式及深度修正系数表

Tab.2 Expressions for spring stiffness and their embedment factors

	刚度系数	深度系数 e
竖向刚度 $K_z$	$\frac{GL}{1-\nu} \left[ 0.73 + 1.54 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.75} \right]$	$\left[ 1 + 0.095 \frac{D}{B} \left( 1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[ 1 + 0.2 \left( \frac{2L+2B}{LB} \right) d \right]^{0.67}$
水平 y 向刚度 $K_y$	$\frac{GL}{2-\nu} \left[ 2 + 2.5 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.85} \right]$	$\left[ 1 + 0.15 \left( \frac{2D}{B} \right)^{0.5} \right] \left[ 1 + 0.52 \left( \frac{D-d/2}{BL^2} \right) \times 16 \times (L+B)d \right]^{0.4}$
水平 x 向刚度 $K_x$	$\frac{GL}{2-\nu} \left[ 2 + 2.5 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] - \frac{GL}{0.75-\nu} \left[ 0.1 \left( 1 - \frac{B}{L} \right) \right]$	$\left[ 1 + 0.15 \left( \frac{2D}{L} \right)^{0.5} \right] \left[ 1 + 0.52 \left( \frac{D-d/2}{LB^2} \right) \times 16 \times (L+B)d \right]^{0.4}$
转动刚度 $K_{\theta_x}$	$\frac{G}{1-\nu} I_x^{0.75} \left( \frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[ 2.4 + 0.5 \frac{B}{L} \right]$	$1 + 2.52 \frac{d}{B} \left( 1 + \frac{2d}{B} \left( \frac{d}{D} \right)^{-0.2} \left( \frac{B}{L} \right)^{0.85} \right)$
转动刚度 $K_{\theta_y}$	$\frac{G}{1-\nu} I_y^{0.75} \left( \frac{L}{B} \right)^{0.75} \left[ 3 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.15} \right]$	$1 + 0.92 \left( \frac{2d}{L} \right)^{0.6} \left( 1.5 + \left( \frac{2d}{L} \right)^{1.9} \left( \frac{d}{D} \right)^{-0.6} \right)$

注:G 为土体有效剪切模量;ν 为土体泊松比;L 为基础长度;B 为基础宽度;D 为基础埋深;d 为基础深度;I<sub>x</sub>、I<sub>y</sub> 分别为绕相关轴的截面惯性矩.

表3 土体参数表  
Tab.3 Soil Parameters

土体类型	剪切波速范围 $/(m \cdot s^{-1})$	剪切波速 $/(m \cdot s^{-1})$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	土层泊松比	土层初始剪切模量 $G_0/(10^4 kN \cdot m^{-2})$	土层有效剪切模量 $G=0.42G_0/(10^4 kN \cdot m^{-2})$	黏聚力 $/kPa$	内摩擦角 $/(^{\circ})$
II	$250 < \nu_s \leq 500$	400	1 800	0.3	28.8	12.096	60	30
III	$150 < \nu_s \leq 250$	200	1 700	0.35	6.8	2.856	25	12
IV	$\nu_s \leq 150$	150	1 600	0.4	3.6	1.512	20	5

### 1.3 填充墙的实现

本文研究填充墙对框架结构整体的影响,采用FEMA356建议的对角受压斜撑有限元模型来模拟填充墙,其具体简化模型如图3所示<sup>[17]</sup>.

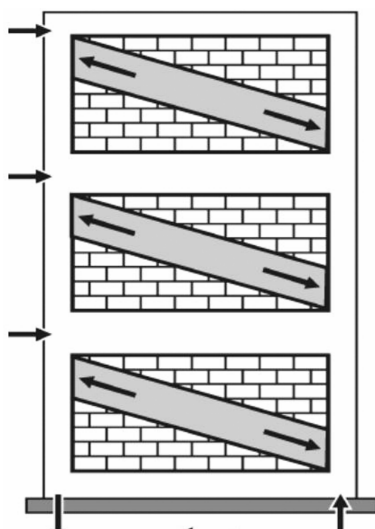
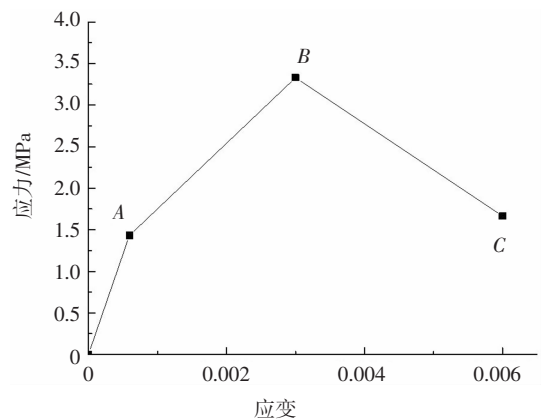


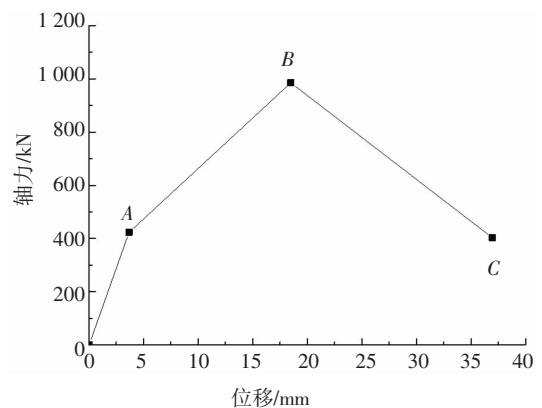
图3 填充墙的斜压杆模型<sup>[17]</sup>

Fig.3 Compression strut model of infilled wall<sup>[17]</sup>

框架填充墙结构所采用的填充墙为厚 240 mm 的 MU10 烧结普通砖和 M5 砂浆的砌体墙,按照我国《砌体结构设计规范》,填充墙的砌体抗压强度平均值  $f_m$  为 3.33 MPa,初始弹性模量  $E_{m0}$  为 2 400 MPa<sup>[18]</sup>.依据文献[6],取  $\sigma = 0.43 f_m$  处的割线模量为初始弹性模量,此阶段的特征点为点 A;峰值应力  $f_m$  对应的应变  $\varepsilon_0 = 0.003$ ,此阶段的特征点为点 B; $\varepsilon = 0.006$ ,此阶段的特征点为点 C;斜压杆的宽度取为 0.2 倍对角线长度,厚度同墙厚,不考虑填充墙即等效压杆的受拉性能<sup>[6]</sup>.填充墙的应力-应变关系曲线如图 4(a)所示.填充墙的滞回模型假定卸载为初始刚度相等的线性卸载,再加载时考虑刚度退化效应,在结构分析程序中使用连接单元来模拟填充墙的双对角等效压杆,连接单元的力-位移关系如图 4(b)所示.



(a)等效压杆应力-应变关系



(b)等效压杆的力-位移关系

图4 等效压杆力学模型

Fig.4 Mechanical model of equivalent strut

## 2 结果与分析

填充墙刚度效应和 SSI 效应都分别会对结构响应分析产生重要的影响,因此本文分别在 II 类、III 类、IV 类场地对在刚性地基上不考虑填充墙刚度效应(简称模型 M1)、在 SSI 效应的基础上不考虑填充墙刚度效应(简称模型 M2)、在刚性地基上考虑填充墙刚度效应(简称模型 M3)、在 SSI 效应的基础上考虑填充墙刚度效应(简称模型 M4)进行计算分析.

### 2.1 模型规则性和基本周期分析

为了说明考虑填充墙刚度后,不会造成结构竖

向不规则,表 4 列出了模型 M1、M3 的 2 层、1 层的层间侧移刚度及其比值.从表中可以发现,模型 M1 的 2 层刚度明显小于 1 层,模型 M3 在 2 层布置填充墙使得 2 层的抗侧移刚度明显大于 1 层,这表明填充墙的初始弹性抗侧移刚度和框架的抗侧移刚度在同一个数量,填充墙的刚度效应不应忽略.依据《高层建筑混凝土结构技术规程》规定,框架结构楼层与相邻上部楼层的侧移刚度比不应小于 0.7,否则判定结构竖向不规则<sup>[15]</sup>.同时,黄靓等也指出底部为“薄弱层”的框架填充墙结构上一层与“薄弱层”的层间刚度比控制在 1~2 之间<sup>[9]</sup>.模型 M3 的  $K_2/K_1$  为 1.384 满足了相关要求,这说明本文考虑填充墙刚度效应前后模型均为竖向规则.

表 4 2 层、1 层层刚度及其比值

Tab.4 Stiffness of 2 layer and 1 layer and its ratio

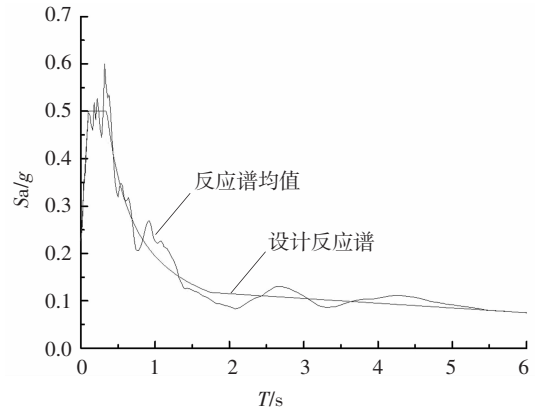
模型	楼层	刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )	刚度比 $K_2/K_1$
M1	1	328 424.6	0.781
	2	256 410.3	
M3	1	328 424.6	1.384
	2	454 545.5	

表 5 列出了不同模型计算地震波和结构的自振周期,其中  $T_1 \sim T_4$  分别表示模型 M1~M4 的自振周期.考虑到时程分析的不确定性与地震波的随机性,分别对每种场地均采用 3 条相应场地的地震波,图 5 给出了本文采用的不同场地的地震动反应谱均值与设计反应谱的比较.通过比较可以发现不同场地上的 3 条地震波的反应谱均值与设计反应谱在统计意义上相符,这说明选波是合理的.

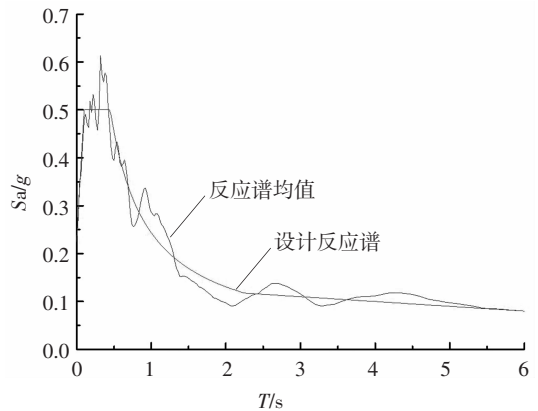
表 5 计算用地震波及结构自振周期比较

Tab.5 Seismic waves for calculation and natural vibration period of structure

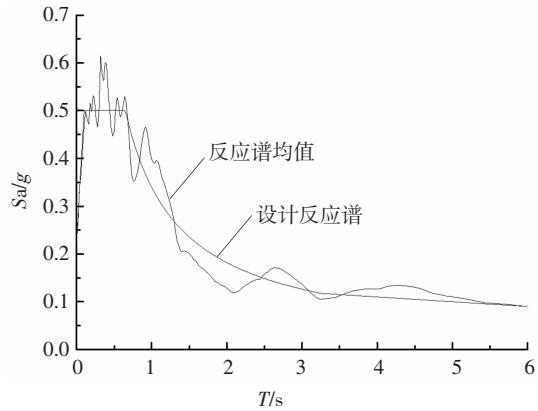
场地类型	地震动	$T_1/s$	$T_2/T_1$	$T_3/T_1$	$T_4/T_1$
TangShan					
II 类场地	Whittier(P700)		1.180		0.852
	兰州波				
Northbridge(P1024)					
III 类场地	San Fernando(P068)	0.945	1.211	0.649	0.903
	Northbridge(P959)				
上海波					
IV 类场地	天津波		1.242		0.932
	Loma Prieta(P808)				



(a) II 类场地



(b) III 类场地



(c) IV 类场地

图 5 不同场地的地震动反应谱均值与设计反应谱的比较  
Fig.5 Comparison of target spectrum and spectra of ground motions on different sites

由表 5 的结构自振周期比较可得如下结论:1) 只考虑 SSI 效应,RC 框架结构的自振周期增长在 18.0%~24.2%之间,而且随着场地土越软,结构基本周期越长;2) 只考虑填充墙刚度效应后 RC 框架结构的周期折减系数为 0.649,与《高规》<sup>[15]</sup>中规定高层框架结构考虑到填充墙的作用取 0.6~0.7 的周期折减系数一致,也说明了模型的合理性;3) 同时考虑 SSI 效应和填充墙刚度效应后,RC 框架结构的周期折减系数在 0.852~0.932 之间,结构的周期在反应

谱的下降段,这说明结构处在弹性阶段时,在考虑填充墙刚度效应的基础上,考虑SSI效应对结构存在有利的影响。

### 2.2 多遇、罕遇地震作用下结构反应分析

为了消除单一地震波的不确定性,在7度多遇(35 gal)、罕遇(220 gal)地震作用下,分别在Ⅱ、Ⅲ、

Ⅳ类场地各采用3条地震波分析结构模型M1~M4,所有结果均采用多条地震作用下的平均结果来讨论.图6~图8给出了3种不同场地条件下结构各楼层的最大层间位移角均值以及各层柱分担的层间最大剪力均值;表6列出了不同条件下最大层间位移角增大系数和底层剪力增大系数。

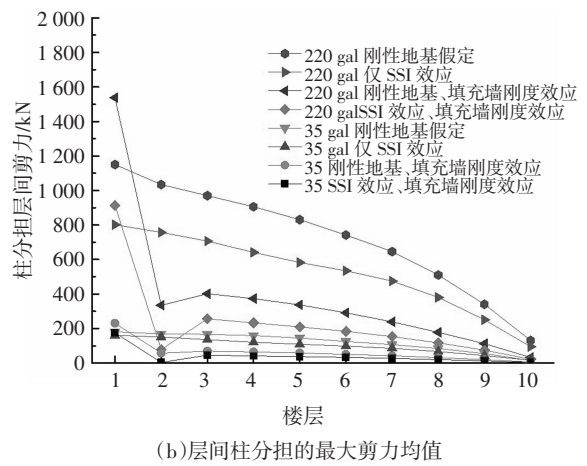
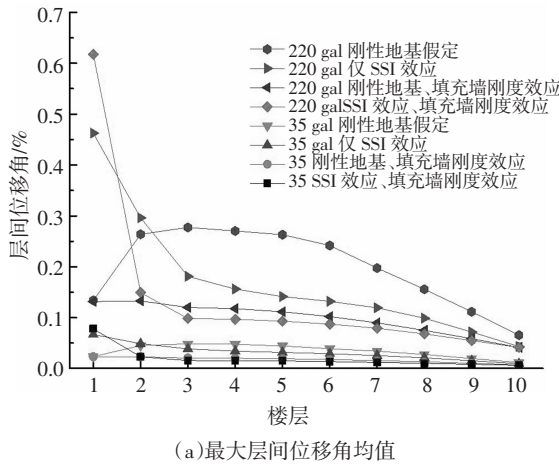


图6 Ⅱ类场地层间位移角均值与层间柱分担的剪力均值  
Fig.6 Inter-layer drift ratios and shears of inter-layer columns on site II

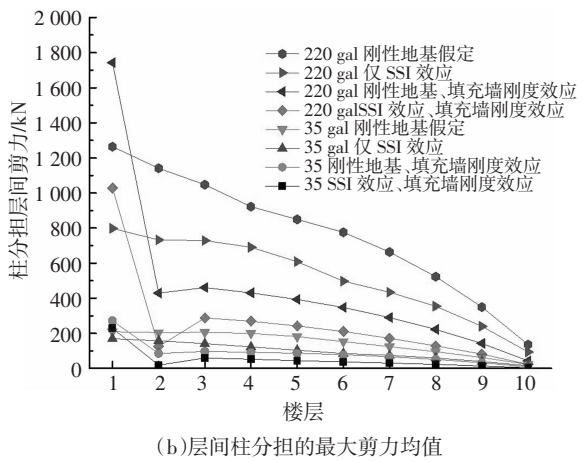
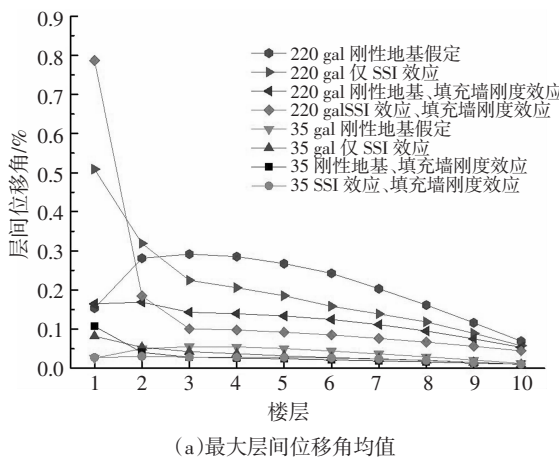


图7 Ⅲ类场地层间位移角均值与层间柱分担的剪力均值  
Fig.7 Inter-layer drift ratios and shears of inter-layer columns on site III

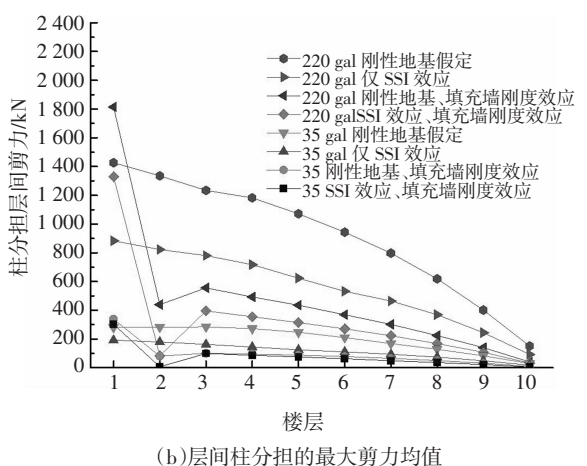
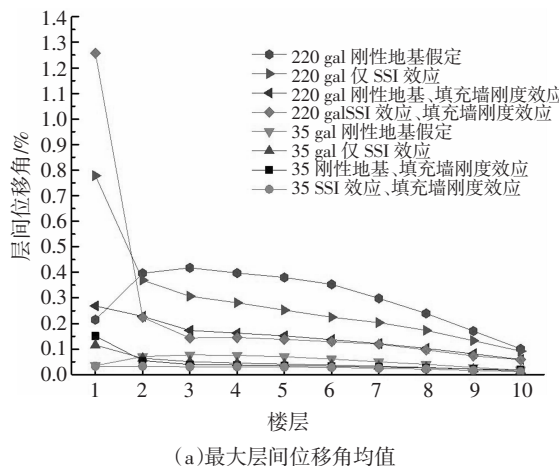


图8 Ⅳ类场地层间位移角均值与层间柱分担的剪力均值  
Fig.8 Inter-layer drift ratios and shears of inter-layer columns on site IV

表 6 不同条件下最大层间位移角增大系数和底层剪力增大系数

Tab.6 The magnification factors of the biggest inter-layer drift ratio and the base shear in different conditions

场地类型	PGA/gal	$\theta_2/\theta_1$	$F_2/F_1$	$\theta_3/\theta_1$	$F_3/F_1$	$\theta_4/\theta_1$	$F_4/F_1$
II	35	1.382	0.887	0.479	1.270	1.612	1.132
	220	1.668	0.697	0.479	1.337	2.228	0.795
III	35	1.478	0.806	0.551	1.294	1.939	1.091
	220	1.744	0.632	0.580	1.378	2.696	0.814
IV	35	1.511	0.677	0.430	1.188	1.961	1.063
	220	1.862	0.619	0.643	1.272	3.011	0.932

注: $\theta_1 \sim \theta_4$  分别为模型 M1~M4 在同场地条件和多条地震作用下的平均最大层间位移角; $F_1 \sim F_4$  分别为模型 M1~M4 在同场地条件和多条地震作用下框架柱所承受的平均基底剪力。

通过对比上述结果可知:1)在 7 度多遇地震作用时,最大层间位移角取值均小于弹性层间位移角限值 1/550,满足我国现行规范中“小震不坏”的要求;结构在 7 度罕遇地震作用下,各结构出现了塑性铰,结构处于弹塑性阶段,但其最大层间位移角均未超过规范规定的弹塑性层间位移角限值 1/50,满足我国现行规范中“大震不倒”的要求<sup>[1]</sup>。2)在多遇地震作用下,模型 M4 的基底剪力大于模型 M1;而在罕遇地震作用下,模型 M4 的基底剪力会小于模型 M1,这种基底剪力的逆转变小表明结构从弹性状态进入弹塑性状态后,SSI 效应更加显著。3)在同类场地条件下,从不同模型最大层间位移角的比较可以看出,考虑 SSI 和填充墙刚度效应会使该结构在底层出现最大的层间位移角。在刚性地基上考虑填充墙的刚度效应,其最大层间位移角与规范中仅采用刚性地基假定相比较,层间位移角增大系数在 0.430~0.643 之间,这表明在刚性地基上考虑填充墙的刚度效应,该结构不会在底层形成薄弱层,对层间位移角的评估存在明显的有利影响,而在考虑 SSI 效应的基础上考虑填充墙刚度效应,其最大层间位移角与规范中仅采用刚性地基假定相比较,层间位移角增大系数在 1.612~3.011 之间,结构在底层形成薄弱层,这表明规范中采用忽略 SSI 和填充墙刚度效应的方法可能无法发现某些结构存在的薄弱层,进而在地震作用下对层间位移角的评估是不安全的。因此,建议在对底层无填充墙或者填充墙较少的框架结构验算弹塑性变形时,需考虑 SSI 和填充墙刚度效应带来的不利影响。4)考虑填充墙

的刚度效应后结构的二层及以上楼层的框架柱分担的地震剪力减小,但首层的框架却承受着更大的剪力,这主要是由于考虑填充墙的刚度效应后,结构的刚度变大,基底剪力变大,底层框架柱的层间剪力变大,而二层及以上楼层的填充墙分担的大部分的地震剪力,使得二层及以上框架柱所承担的水平剪力减小所致。特别是二层框架柱分担的水平地震剪力最小,大部分地震力被填充墙分担,该层填充墙的破坏会非常严重。

2.3 倒塌及耗能分析

为了进一步研究填充墙刚度效应对 RC 框架的影响,本文分别在 II、III、IV 类场地上选择一条地震波对模型 M1 和模型 M4 进行倒塌能力分析,地震波峰值从 250 gal 开始,以 50 gal 的增量逐级增加,直到结构框架柱破坏、结构发生倒塌为止。表 7 列出了不同场地条件下结构倒塌的地震波峰值和结构倒塌的时间。图 9~图 11 分别给出了 II、III、IV 类场地上不同模型框架柱失效时结构的塑性铰分布。

表 7 地震作用下框架柱失效时间

Tab.7 The collapsed time of frame column under earthquake

场地类型	地震波	模型	地震波峰值/gal	框架柱失效时间/s
II	TangShan	刚性地基假定	650	6.0
		SSI 效应、填充墙刚度效应	450	8.2
III	Northbridge (P1024)	刚性地基假定	600	12.2
		SSI 效应、填充墙刚度效应	400	12.1
IV	上海波	刚性地基假定	500	4.6
		SSI 效应、填充墙刚度效应	300	3.3

从图表结果中可以很明显地发现:1)在不同场地条件下,随着场地土变软,结构的倒塌峰值逐渐降低,这主要是因为结构进入塑形后,结构变柔,SSI 效应增加,受场地土的影响增大。2)考虑 SSI 和填充墙刚度效应后,结构的抗倒塌能力大幅降低,完全不可忽略其影响,这是因为考虑 SSI 和填充墙的刚度效应,结构倒塌时塑性铰主要集中于结构的底部两层,而不考虑 SSI 与填充墙刚度效应的结构塑性铰沿结构各楼层大量分布,致使框架结构耗能能力会明显减弱,结构的变形主要在底部,表现出类似薄弱层的效应。

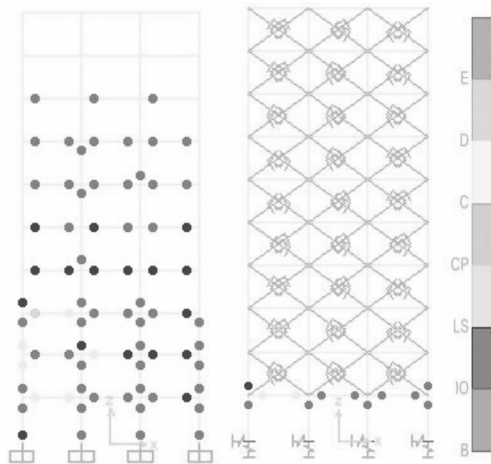


图9 II类场地结构塑性铰分布

Fig.9 Plastic hinge of structures on site II

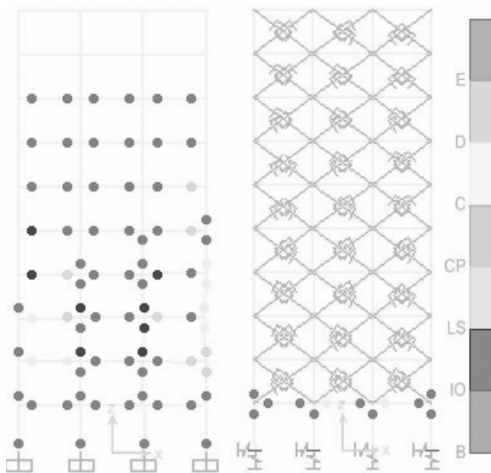


图10 III类场地结构塑性铰分布

Fig.10 Plastic hinge of structures on site III

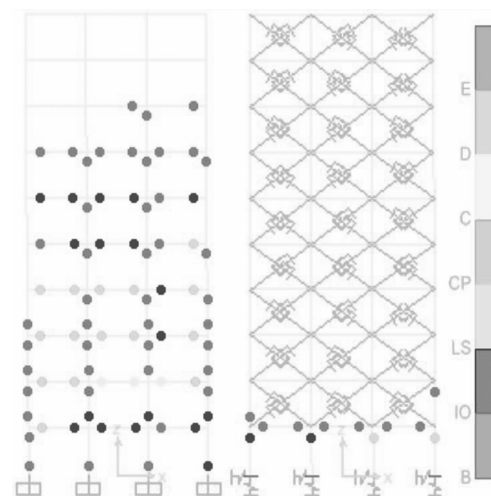


图11 IV类场地结构塑性铰分布

Fig.11 Plastic hinge of structures on site IV

### 3 结论

根据上述研究得出如下结论:

同时考虑 SSI 和填充墙的刚度效应的结构模型的层间位移角最大;且层间位移角增大系数在 1.612~3.011 之间,随着场地土变软,该系数逐渐增大,结构在底层形成薄弱层,而规范中忽略 SSI 和填充墙刚度效应可能无法发现某些结构存在的薄弱层,进而在地震作用下对层间位移角的评估是不安全的.因此,建议在对底层无填充墙或者填充墙较少的框架结构验算弹塑性变形时,需考虑 SSI 和填充墙刚度效应带来的不利影响.

弹性状态下,在考虑填充墙刚度效应的基础上,RC 框架结构考虑 SSI 效应变成有利的影响,而 RC 框架结构进入弹塑性状态后,结构变柔,SSI 效应更加显著,填充墙的刚度效应也会加剧结构底层的薄弱,对结构的底层会造成明显的不利影响.

填充墙的刚度效应增大了结构的基底剪力,也使得 SSI 效应显著,底层柱的层间位移角增加,与此同时也分担所在楼层的地震剪力,使得该层柱分担层间剪力减小,所在层的层间位移角减小.

考虑 SSI 和填充墙的刚度效应,RC 框架结构的变形向底部楼层集中更加显著,耗能能力降低,结构的抗倒塌能力降低,且场地土越软,结构倒塌地震波峰值越低,建议设计人员在设计中增加底层框架柱的延性,确保该类结构在地震作用下的变形需求.

### 参考文献

- [1] 孙柏涛,张桂欣.汶川 8.0 级地震中各类建筑结构地震易损性统计分析[J].土木工程学报,2012,45(5):26—30.  
SUN B T,ZHANG G X. Statistical analysis of the seismic vulnerability of various types of building structures in Wenchuan M8.0 earthquake [J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(5):26—30. (In Chinese)
- [2] GALAL K,NAIMI M. Effect of soil conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near-fault earthquakes [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings,2008,17(3): 541—562.
- [3] RAJEEV P,TEFAMARIAM S. Seismic fragilities of non-ductile reinforced concrete frames with consideration of soil structure



- interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 40: 78—86.
- [4] 岳庆霞, 叶列平, 陆征新. 土结构相互作用对框架结构倒塌的影响研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 1—6.  
YUE Q X, YE L P, LU Z X. Research on the influence of soil-structure interaction[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 1—6. (In Chinese)
- [5] 王海东, 盛旺成. 考虑土-结构相互作用与重力二阶效应影响的钢筋混凝土框架结构地震反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(3): 170—177.  
WANG H D, SHENG W C. Seismic response of RC frame considering soil-structure interaction and gravity second-order effect [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(3): 170—177. (In Chinese)
- [6] 李英民, 韩军, 田启祥, 等. 填充墙对框架结构抗震性能的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(3): 51—58.  
LI Y M, HAN J, TIAN Q X, *et al.* Study on influence of infilled walls on seismic performance of RC frame structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, 29(3): 51—58. (In Chinese)
- [7] 易伟建, 周云, 覃廖辉. 大底盘双塔楼高层建筑的随机振动测试及模型修正研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(2): 65—72.  
YI W J, ZHOU Y, QIN L H. Measurement of ambient vibration of a twin-tower building with enlarged base and model modification [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(2): 65—72. (In Chinese)
- [8] 仇一颗, 周祎, 周云, 等. 实测高层建筑抗震分析中填充墙刚度的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 8—17.  
QIU Y K, ZHOU Y, ZHOU Y, *et al.* Influence of infill wall stiffness on seismic analysis of high-rise building [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2018, 45(3): 8—17. (In Chinese)
- [9] 黄华, 叶燕霞. 填充墙对框架结构抗震性能影响分析[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(S1): 156—162.  
HUANG H, YE Y X. Influence of filled wall on seismic performance of frame structure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(S1): 156—162. (In Chinese)
- [10] 黄靓, 易宏伟, 王辉, 等. 带节能砌体填充墙的 RC 框架抗震试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(1): 15—20.  
HUANG L, YI H W, WANG H, *et al.* Experimental research on seismic of rc frames with energy conservation masonry infill walls [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2014, 41(1): 15—20. (In Chinese)
- [11] 阎红霞, 杨庆山. 多遇地震下填充墙侧向刚度对 RC 框架结构抗震性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(A1): 54—60.  
YAN H X, YANG Q S. The influence of infill wall lateral stiffness on the seismic performance of RC frame structures under small earthquakes [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(A1): 54—60. (In Chinese)
- [12] DANIELE R T, TAKSIAH A M, BAMBANG B. The use of steel damper for enhancing the seismic performance of rc frame with soft first story [J]. *Journal of Civil Engineering Research*, 2014, 4(3A): 191—202.
- [13] KONSTANTINOS M, KONSTANTINOS K. The role of masonry infills on the damage response of R/C buildings subjected to seismic sequences [J]. *Engineering Structures*, 2017, 131: 459—476.
- [14] GB 50011—2016 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 31—47.  
GB 50011—2016 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2016: 31—47. (In Chinese)
- [15] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 29—41.  
JGJ 3—2010 Technical specification for concrete structures of tall buildings [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010: 29—41. (In Chinese)
- [16] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 500—533.  
Beijing jin-tu-mu software technology company, China institute of building standard design&research. Chinese use guide for SAP2000 [M]. Beijing: China Communications Press, 2006: 500—533. (In Chinese)
- [17] FEMA. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Report FEMA356 [R]. Washington DC: FEMA356, 2000: 7—1—7—29.
- [18] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 11—20.  
GB 50003—2011 Code for design of masonry structures [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2011: 11—20. (In Chinese)
- [19] 黄靓, 施楚贤, 吕伟荣. 对框架填充墙结构抗震设计的思考[J]. *建筑结构*, 2005, 35(8): 27—29.  
HUAGN L, SHI C X, LÜ W R. Some aspects of seismic design method of infilled wall-frame structures [J]. *Building Structure*, 2005, 35(8): 27—29. (In Chinese)