

考虑填充墙平面刚度分布的 RC 框架结构抗地震倒塌能力研究

祝岳, 杨伟松*, 张纪刚, 王向英

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:为研究填充墙对 RC 框架结构抗震性能的影响,以汶川地震中发生倒塌的漩口中学教学楼 A 为原型,基于 ABAQUS 软件建立了有限元模型,对结构底层各柱的剪力进行分析,发现由于填充墙的布置使得结构平面刚度分布不均,造成地震剪力在各榀框架之间分布不均匀。为了定量地考虑平面各轴线刚度分布对结构抗震性能的影响,设计了 4 个沿轴线各榀填充墙框架不同刚度分布的结构模型,通过 IDA(增量动力分析)分析对比评估 4 个模型的抗地震倒塌能力。结果表明:平面刚度均匀分布的结构模型倒塌概率最低,具有良好的地震韧性;当某轴线的刚度高于平面各轴线平均刚度的 30% 时,结构的倒塌概率大幅提高,抗倒塌安全储备不足,建议在设计中平面各轴线的刚度不应超过此限值。

关键词:填充墙 RC 框架结构;刚度效应;IDA 分析;平面布置;抗地震倒塌

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)01-0010-09

Study on the seismic collapse resistance of RC frame structure considering infill wall plane stiffness distribution

ZHU Yue, YANG Weisong*, ZHANG Jigang, WANG Xiangying

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to study the influence of infill walls on the seismic performance of RC frame structure, the Teaching Building A of Xuankou Middle School which collapsed in the Wenchuan earthquake was taken as the prototype and a finite element model based on ABAQUS software was constructed for the shear analysis of each column at the ground floor. It was found that the arrangement of the infill walls made the structural plane stiffness unevenly distributed, resulting in the uneven distribution of seismic shear forces among the bays of frames. In order to quantitatively examine the influence of the stiffness distribution of each axis of the plane on the seismic performance of the structure, four structural models with different stiffness distribution of infill wall frames along each bay of the axis were designed, and the seismic collapse resistance of the four models were evaluated through IDA analysis. The results show that the structural model with uniformly distributed plane stiffness has the lowest collapse probability and good seismic toughness; when the stiffness of an axis is higher than 30% of the average stiffness of each axis of the plane, the collapse probability of the structure increases significantly and the collapse safety reserve is insufficient. It

收稿日期: 2022-11-04

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME029; ZR2020ME246)

作者简介: 祝岳(1998-), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为结构抗震。E-mail: zy12586@163.com。

* 通信作者: 杨伟松(1986-), 女, 山东烟台人。博士, 副教授, 主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: yws_qtech2015@163.com。

is recommended that the stiffness of each axis of the plane should not exceed the limit of 30% in the design.

Key words: infill wall RC frame structure; stiffness effect; IDA analysis; floor plan; seismic collapse resistance

2022 年 9 月 5 日,四川省甘孜州泸定县发生 6.8 级地震,震源深度 16 km。从震害现象来看,填充墙 RC 框架结构损坏严重,造成了大量人员伤亡和财产损失。目前我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中将填充墙视为非结构构件,在计算地震作用时,仅对周期进行折减来粗略地考虑填充墙的刚度贡献,不计入抗震承载力。然而,历次的震害及研究^[1-5]表明,这种简化处理方式并不能真实地反映填充墙 RC 框架结构的抗震性能。填充墙与框架相互作用,以及填充墙的刚度效应带来的地震作用分布不均,对结构的抗地震倒塌性能有显著影响。

众多学者对填充墙 RC 框架结构进行了大量研究,童岳生等^[6]测得多条砖填充墙 RC 框架结构水平往复荷载作用下的荷载-位移曲线,经分析后提出了三折线刚度及其计算方法。黄群贤^[7]基于试验结果引入填充墙刚度折减系数,以此来考虑填充墙的参与程度,经过理论推导给出了填充墙初始抗侧刚度的计算公式。曹万林等^[8]通过对 3 个三层两跨轻质填充墙框架模型的试验研究,表明满布填充墙框架结构的抗侧刚度是空框架的 10 倍左右,填充墙对框架具有明显的刚度效应。杨伟松等^[9]进行了一个 1:4 缩尺的外廊式框架结构的振动台试验,指出半高填充墙的设置会增大该榀框架柱刚度,半高填充墙对柱的约束使结构破坏机制和损伤分布产生较大影响。LI 等^[10]进行了一个带有填充墙的两层四跨 RC 框架结构的拟静力试验,发现砌体填充墙可以通过不同的荷载路径来提高结构初始刚度和承载力。MORFIDIS 等^[11]对比了框架和填充墙框架结构在地震作用下的地震响应,发现填充墙框架结构的地震响应更大。王海东等^[12]通过数值模拟研究填充墙刚度效应对 RC 框架结构抗震性能的影响,发现填充墙的刚度效应增大了结构的基底剪力,加剧结构底层薄弱,对结构底层造成明显不利影响。

填充墙的增加提高了结构的初始刚度,并且填充墙的不合理布置导致框架结构在平面内刚度不均匀,可能引发结构在平面内的某轴线发生集中破坏,进而造成结构整体抗倒塌能力下降。而对于竖向刚度、剪力均匀布置的抗震概念设计要求目前在相关规范中有明确要求,平面布置上则更易忽视填充墙的刚度效应。综上所述,对于如何确定填充墙弹性刚度的理论和试验研究有了初步进展,而考虑填充墙的刚度效应如何对框架结构进行平面布置的相关研究较少,本文以汶川地震中发生倒塌的漩口中学教学楼 A 为原型,基于 ABAQUS 软件对有限元模型进行地震韧性评估,对如何考虑框架结构平面内的刚度分布提出建议。

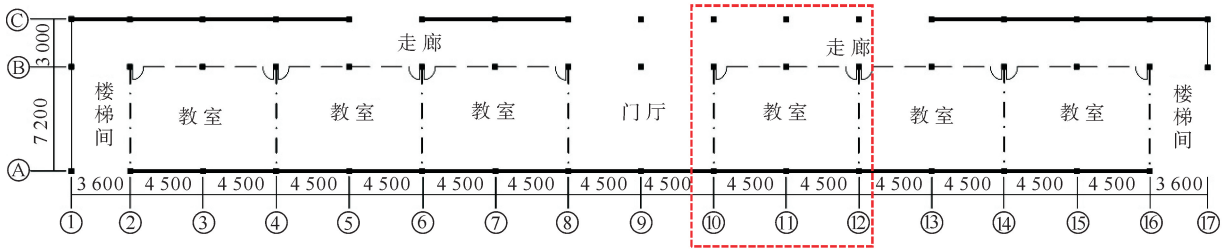
1 原型结构震害分析

1.1 原型结构概况

在汶川地震中,位于震中映秀镇的漩口中学教学楼倒塌严重。其中教学楼 A 为 5 层的外廊式填充墙框架结构,底层层高 4.05 m,2—5 层层高 3.6 m,④⑤轴柱截面尺寸为 400 mm×400 mm,③轴柱截面尺寸为 350 mm×350 mm,梁截面尺寸分别为 250 mm×400 mm,200 mm×350 mm,250 mm×600 mm 和 250 mm×350 mm,混凝土强度等级为 C30,梁柱纵筋采用 HRB335,楼板和箍筋采用 HPB235,填充墙采用混凝土空心砌块砌筑,半高填充墙高度 900 mm。抗震设防烈度为 7 度,设计基本加速度为 0.1g,抗震设防类别为丙类,设计使用年限为 50 年。结构底层平面图与梁柱截面尺寸及配筋如图 1 所示。

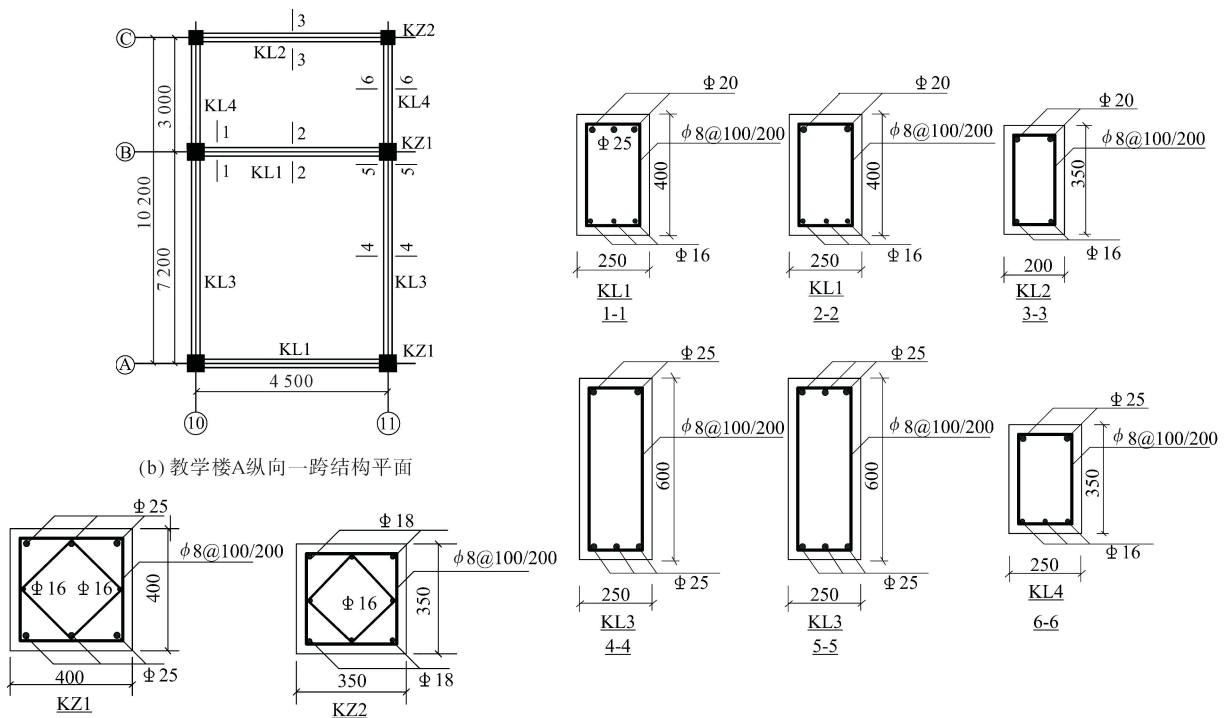
从震害调查以及后续研究中发现^[13-15],教学楼 A 的倒塌始于教室侧底层边柱的率先失效,结构底层垮塌,后续上部各层向教室侧发生连续倒塌。由于教学楼 A 的纵向两侧有别的结构起到支撑作用,且纵向跨数较多刚度较大,而其横向并无其他结构支撑,且仅为两跨刚度较低,因此整体结构的倒塌方向基本沿横向(图 2)。外廊侧框架柱整体损伤较轻,在结构倒塌后仍然保持直立,柱顶由于上部各层的倒塌而出铰,柱底损伤很轻(图 3)。教学楼 A 在平面上的损伤很不均匀,④轴损伤严重,而③轴损伤较轻,没有形成预期的结构整体损伤的模式。漩口中学内与教学楼 A 结构设计相似的 5 栋外廊式填充墙框架结构在地

震中倒塌了4栋,说明该结构体系在遭遇极震时抗地震倒塌性能上的不足。



(a) 教学楼A底层平面(红线框出的三榀框架作为下文建立有限元模型的原型结构)

—— ① ③轴半高填充墙位置; - - - ②轴开大面积门窗洞口墙体位置; ···· 横向满布填充墙位置



(b) 教学楼A纵向一跨结构平面

(c) 柱截面尺寸及配筋

(d) 梁截面尺寸及配筋

图1 原型结构平面及主要截面尺寸及配筋(单位:mm)



图2 教学楼A震后倒塌情况



图3 教学楼A外廊侧框架柱损伤

1.2 有限元模拟概述

为探究漩口中学教学楼的倒塌原因,验证造成原型结构损伤分布的因素,以图 1 中红线框出的三榀框架结构为原型,建立等比例的有限元模型,分析模型在弹性阶段底层各柱水平剪力分布情况。采用等效斜撑+ABAQUS+PQ-Fiber 的建模方法建立模型,如图 4 所示,其中框架梁、框架柱及等效斜撑采用 B31 梁单元模拟,楼板采用 S4R 分层壳单元模拟。采用文献[16]提出的双斜撑模型模拟半高填充墙,满布填充墙用双向四斜撑模型模拟。等效斜撑厚度等于原型结构的墙厚,宽度按照规范 TMS 402-13^[17] 的建议取值,双斜撑模型的宽度按照式(1)计算,双向四斜撑模型的宽度取式(1)计算值的一半。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{0.3}{\lambda \cos\theta} \\ \lambda &= \left[\frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fc} I_{col} H_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{H_{inf}}{L_{inf}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: α 为等效斜撑宽度; θ 为等效斜撑对水平面的角度; λ 为填充墙特征刚度参数; H_{inf} 为填充墙高度; L_{inf} 为填充墙长度; E_m 为填充墙弹性模量; t_{inf} 为填充墙厚度; E_{fc} 为填充墙外围框架构件弹性模量; I_{col} 为填充墙约束框架柱惯性矩。

选取汶川地震中卧龙台的地震记录作为模型的输入地震动,其有效地震动持时为 140 s,东西向和南北向的峰值加速度分别为 957.7 和 652.8 cm/s^2 。为了使模型保持弹性,输入到模型的双向地震动峰值加速度调整为 0.08g。

1.3 模拟结果分析

通过对模型输入双向地震动,得到模型纵向④③轴的底层层间位移以及横向⑩⑫轴的底层层间位移,如图 5 所示。由图 5 可以看出,模型纵向、横向两轴线层间位移的幅值和相位基本一致,表明模型在双向地震动输入下未发生扭转,可以认为此时模型的反应是线性的。

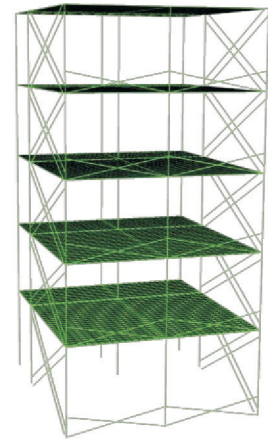


图 4 有限元模型

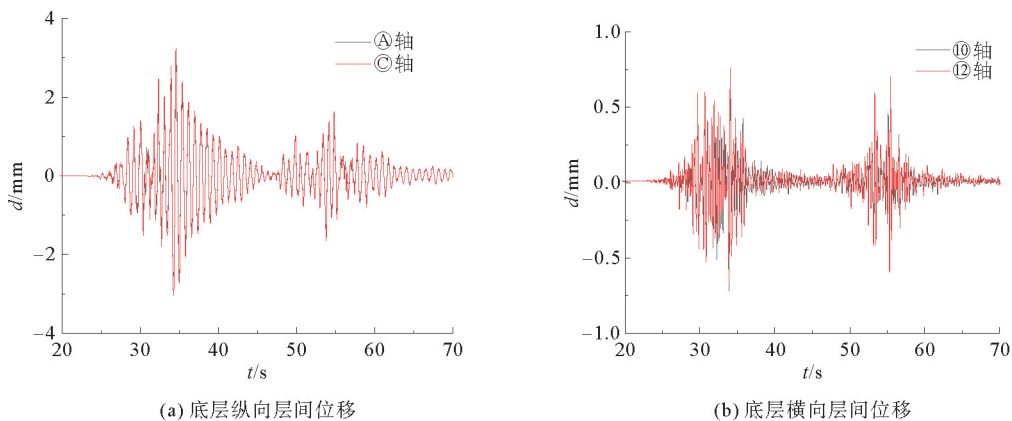


图 5 模型底层纵、横向层间位移

在线弹性条件下,可以根据应变值计算出不同条件约束柱的剪力分布情况,计算依据如下:

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{M_t + M_b}{H_c} \\ M_t &= \epsilon_t WE \\ M_b &= \epsilon_b WE \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: V 为框架柱水平剪力; M_t, M_b 分别为柱顶部、底部弯矩; ϵ_t, ϵ_b 分别为柱顶部、底部混凝土应变; W 为框架柱弯曲截面系数; E 为混凝土弹性模量; H_e 为框架柱有效自由高度。

提取模型底层柱不同位置沿纵向应变的时程曲线, 选取同一时刻各柱不同位置的应变数值, 根据式(2)计算出底层各柱的剪力, 见表1。由表1可知, ①轴柱的应变响应最大, 与此相对应, ①轴柱的水平剪力最大, 比②③轴柱的水平剪力分别多100%, 335%。这表明: 由于半高填充墙的设置使得结构底层各柱分担的水平地震剪力很不均匀, 模型在①轴布置的半高填充墙使①轴的抗侧刚度提高, 并且①轴各柱受到半高填充墙的约束使其有效自由高度降低, 承担的水平地震剪力显著增大。因此, 在设计阶段应当充分考虑填充墙对框架刚度的提高作用, 以及填充墙对框架柱的约束效应。

表1 同一时刻模型底层各柱的应变及剪力

柱编号	柱顶部应变/ $\mu\epsilon$	柱中矮墙约束处应变/ $\mu\epsilon$	柱底部应变/ $\mu\epsilon$	柱剪力/kN
①⑩	76	98	88	20.25
①⑪	79	91	100	19.78
①⑫	74	95	87	19.66
②⑩	72	—	64	11.92
②⑪	53	—	49	8.94
②⑫	68	—	66	11.75
③⑩	50	—	31	4.69
③⑪	44	—	36	4.63
③⑫	46	—	32	4.52

注: ①轴柱受半高填充墙约束, 自由高度为2750 mm; ②③轴柱未受约束, 自由高度分别为3650, 700 mm

2 整体结构模型的建立

结构抗震概念设计中平面刚度连续均匀是设计原则之一, 其目的是确保结构各轴线的抗侧力构件分担地震剪力大小均匀, 共同承担地震作用, 提高结构的整体抗震性能。但是实际上由于建筑的功能需求布置满布填充墙及开大面积门窗洞口而形成半高填充墙的情况较为常见, 填充墙提供较大刚度使得结构各轴线刚度不平衡, 导致框架结构的抗震性能未能达到预期效果。以濰口中学教学楼A为原型, 设计了4个沿轴线各榀填充墙框架不同刚度分布的结构模型, 基于IDA(增量动力分析)对比评估各模型的抗地震倒塌能力。

按照等效斜撑+ABAQUS+PQ-Fiber建立4个填充墙框架结构模型。在各模型整体刚度保持一致的情况下, 通过满布填充墙的不同布置方案来调整模型各轴线的刚度分布。其中模型A各轴刚度保持平衡; 模型B, C, D的①轴刚度偏大, 分别高于各轴线平均刚度的30%, 40%, 50%, ②③轴刚度偏小且保持一致。4个模型除了填充墙的布置方案有区别外, 其余结构参数完全相同, 各模型的参数见表2, 以模型A为例示于图6。填充墙的初始刚度采用文献[7]提出的公式计算:

$$K_w = \frac{\alpha}{\frac{3H_w}{E_w A_w} + \frac{H_w^3}{3E_w I_w}} \quad (3)$$

$$\alpha = 1.38 - \frac{0.38}{n}$$

式中: K_w 为填充墙的抗侧刚度; H_w 为填充墙高度; E_w 为填充墙砌体的弹性模量; A_w 为填充墙顶部截面面积; I_w 为填充墙截面惯性矩; n 为填充墙高宽比; α 为考虑填充墙与框架的边界条件以及填充墙参与程度的刚度折减系数, 且 $\alpha \leq 1$ 。

表 2 模型参数

模型	①轴布置 填充墙数量/片	②轴布置 填充墙数量/片	③轴布置 填充墙数量/片	④轴刚度高于平均值 的比例/%
A	25	25	30	0
B	36	19	25	30
C	40	17	23	40
D	44	15	21	50

3 模型抗地震倒塌能力分析

3.1 增量动力分析

为评价填充墙的布置方式对整体结构抗地震倒塌性能的影响,对 4 个整体结构模型进行增量动力分析(IDA)。参考美国规范 ATC-63^[18]建议的地震动等级大于 6.5,PGA(地震动的峰值加速度)均大于 0.2g,

PGV(地震动的峰值速度)均大于 15 m/s 等选取原则,在其推荐的地震动数据库中选取了 20 条地震动记录(表 3),其加速度反应谱与抗震规范反应谱的对比如图 7 所示。

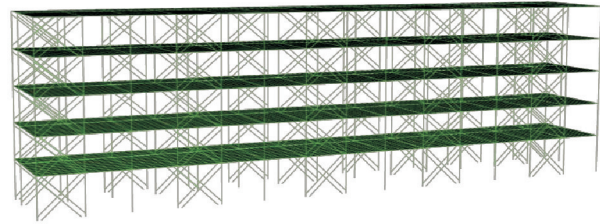


图 6 整体结构模型

表 3 地震动记录

地震名称	年份	记录台站	震级	PGA/g	分量
Northridge-01	1994	Beverly_Hills-14145_Mulhol	6.7	0.417	MUL009
Northridge-01	1994	Canyon_Country-WLC	6.7	0.410	LOS000
Duzce-Turkey	1999	Bolu	7.1	0.727	BOL000
Imperial_Valley-06	1979	El_Centro_Array_#11	6.5	0.364	E11140
Kobe-Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	0.509	NIS000
Kocaeli-Turkey	1999	Arcelik	7.5	0.219	ARC000
Landers	1992	Yermo_Fire_Station	7.3	0.245	YER270
Loma_Prieta	1989	Capitola	6.9	0.529	CAP000
Superstition_Hills-02	1987	Poe_Road_(temp)	6.5	0.446	B-POE270
Cape_Mendocino	1992	Rio_Dell_Overpass-FF	7.0	0.385	RIO270
San_Fernando	1971	LA-Hollywood_Stor_FF	6.6	0.210	PEL090
Friuli-Italy-01	1976	Tolmezzo	6.5	0.351	A-TMZ000
Imperial_Valley-06	1979	Bonds_Corner	6.5	0.588	H-BCR140
Imperial_Valley-06	1979	Chihuahua	6.5	0.270	H-CHI012
Nahanni-Canada	1985	Site_1	6.8	0.978	S1010
Nahanni-Canada	1985	Site_2	6.8	0.489	S2240
Loma_Prieta	1989	BRAN	6.9	0.481	BRN000
Loma_Prieta	1989	Corralitos	6.9	0.644	CLS000
Cape_Mendocino	1992	Cape_Mendocino	7.0	1.497	CPM000
Kocaeli-Turkey	1999	Yarimca	7.5	0.268	YPT060

参考 VAMVATSIKOS 等^[19] 提出的建议,以结构第一周期反应谱加速度 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标,最大层间位移角(θ_{max})作为结构损伤指标,以 IDA 曲线斜率小于初始斜率的 20% 或 θ_{max} 大于 1/19 作为结构倒塌判定标准。

3.2 模型的 IDA 曲线簇分析

采用变步长法对 4 个模型进行 IDA 分析,4 个模型的 IDA 曲线簇如图 8 所示。由图 8 可知,在相同的地震动强度作用下,模型 A 的最大层间位移角明显小于其余 3 个模型。说明在平面刚度均匀分布的情况下可以有效提高结构的稳定性,降低结构在同等地震动作用下的倒塌概率,提高结构的抗地震倒塌能力。

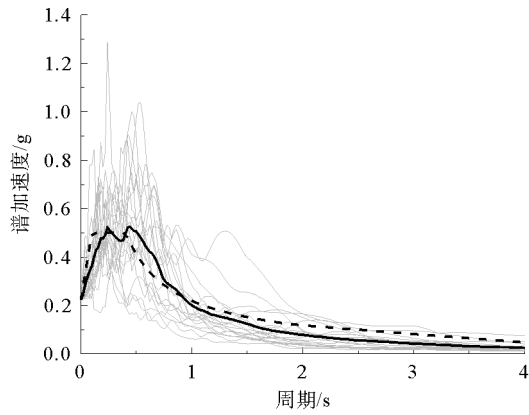


图7 地震动加速度对比

— 20条地震波; ——— 平均反应谱; - - - 规范反应谱

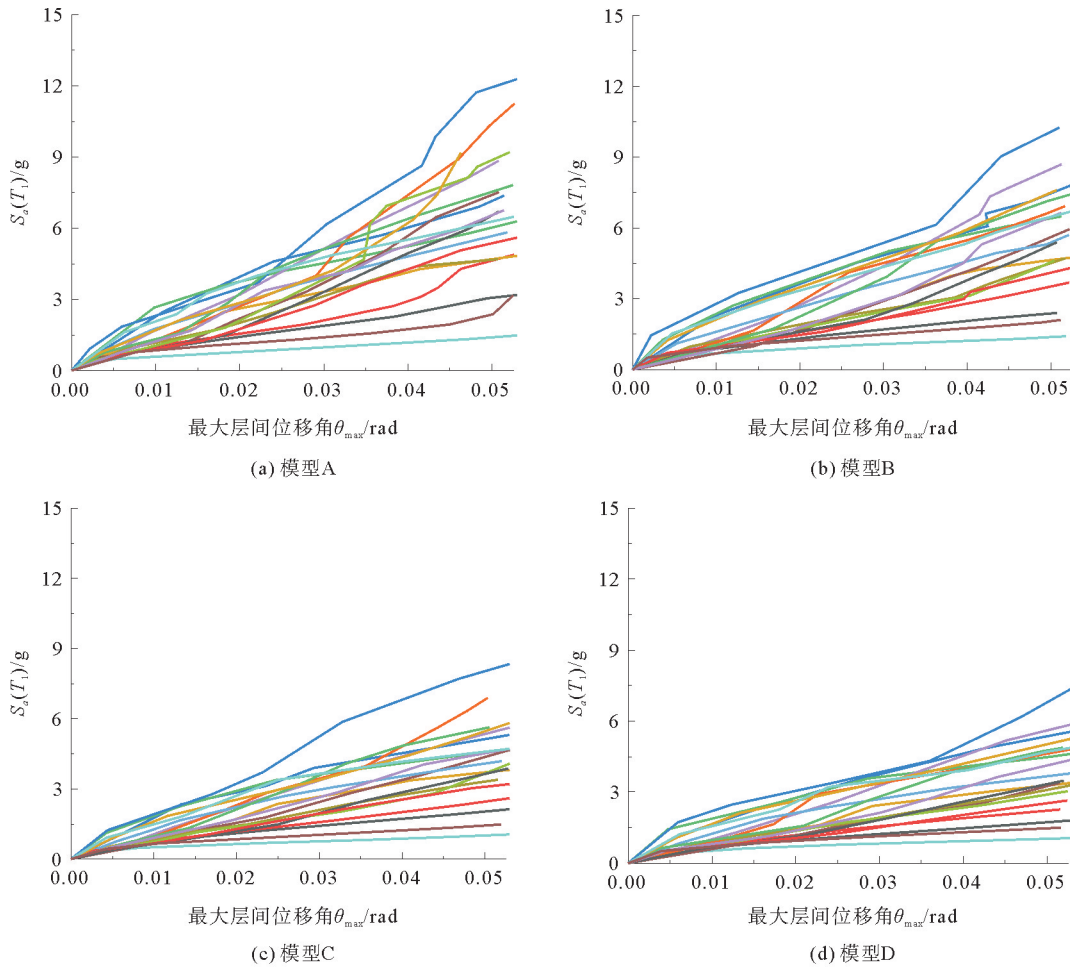


图8 各模型IDA曲线簇

— 1; — 2; — 3; — 4; — 5; — 6; — 7; — 8; — 9; — 10; — 11;
— 12; — 13; — 14; — 15; — 16; — 17; — 18; — 19; — 20

3.3 模型的倒塌概率对比

根据各模型的 IDA 分析结果,按照对数正态分布拟合得到各模型的倒塌易损性曲线,如图 9 所示。对 4 个模型结构的抗地震倒塌能力进行分析,参照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),输入的地震

动 PGA 取值分别为 220,400 与 620 cm/s^2 ,基本相当于设防烈度 7 度 0.1g 地区的“罕遇地震”、8 度 0.2g 地区的“罕遇地震”和“极罕遇地震”,不同地震作用大小分别记作 MCE,ME-I,ME-II。各模型在不同地震作用下的倒塌概率见表 4。

由表 4 可知,在 MCE 作用下,4 个模型的倒塌概率均较低,在 1% 内。在 ME-I 作用下,4 个模型的倒塌概率均有所增大,其中模型 A 的倒塌概率最低为 0.55%,模型 B,C,D 的倒塌概率分别为 2.06%,4.11%,6.36%,相较于模型 A 分别提高了 1.51%,3.56%,5.81%。在 ME-II 作用下,模型 A 的倒塌概率升至 1.77%,模型 B 的倒塌概率为 5.36%,比模型 A 高 3.59%,而模型 C,D 的倒塌概率大幅提升至 9.43%,13.42%,较模型 A 分别提高了 7.66%,11.65%。

以上分析结果表明:在不同地震作用下,4 个模型的倒塌概率依次提高。当各轴线刚度均匀分布时,模型倒塌概率最低,具有良好的抗地震倒塌能力;当某轴线刚度超过各轴线平均刚度的 30% 时,模型的倒塌概率提升明显,抗地震倒塌能力不足。

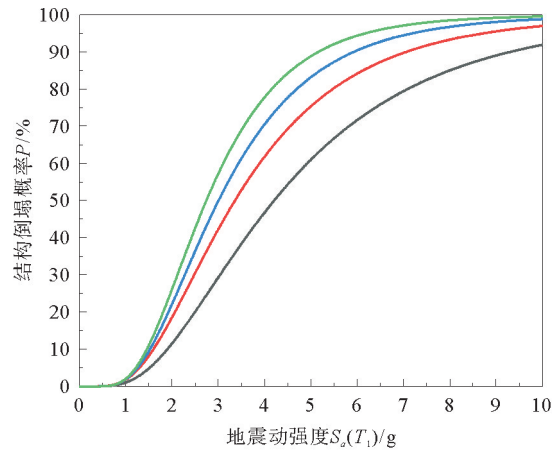


图 9 模型倒塌易损性曲线对比

— A; — B; — C; — D

表 4 不同地震作用下各模型的倒塌概率 %

地震作用	模型 A	模型 B	模型 C	模型 D
MCE	0.01	0.09	0.24	0.48
ME-I	0.55	2.06	4.11	6.36
ME-II	1.77	5.36	9.43	13.42

3.4 结构的倒塌储备系数 CMR 对比

美国规范 ATC-63 推荐采用结构倒塌储备系数(CMR)来比较不同结构的抗地震倒塌能力的差异。当采用 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标时,则在各类地震作用下的结构倒塌储备系数计算公式如下:

$$R_{CM,MCE} = S_a(T_1)_{50\%collapse} / S_a(T_1)_{MCE} \tag{4}$$

$$R_{CM,ME-I} = S_a(T_1)_{50\%collapse} / S_a(T_1)_{ME-I} \tag{5}$$

$$R_{CM,ME-II} = S_a(T_1)_{50\%collapse} / S_a(T_1)_{ME-II} \tag{6}$$

式中: R_{CM} 为结构倒塌储备系数(CMR); $S_a(T_1)_{50\%collapse}$ 为结构倒塌概率为 50% 对应的 $S_a(T_1)$; $S_a(T_1)_{MCE}$, $S_a(T_1)_{ME-I}$, $S_a(T_1)_{ME-II}$ 分别为对应设防烈度 7 度 0.1g 地区的“罕遇地震”、8 度 0.2g 地区的“罕遇地震”和“极罕遇地震”作用下结构的 $S_a(T_1)$ 。

表 5 为 4 个模型在不用地震作用下的结构倒塌储备系数(CMR)对比。由表 5 可以看出:随着地震烈度的提高,4 个模型的 CMR 降低,结构安全储备下降;在同一地震烈度下,4 个模型的 CMR 依次降低。在 MCE 和 ME-I 作用下,4 个模型的 CMR 均大于 2,安全系数较高;在 ME-II 作用下,模型 C,D 的 CMR 小于 2,分别为 1.83,1.68,此时结构的抗倒塌安全储备不足,发生倒塌的风险较高;而模型 A,B 的 CMR 为 2.56,2.08,安全储备相对充分。

表 5 不同地震作用下各模型的 CMR

地震作用	模型 A	模型 B	模型 C	模型 D
MCE	7.22	5.86	5.17	4.73
ME-I	3.97	3.23	2.85	2.60
ME-II	2.56	2.08	1.83	1.68

综上所述,当平面刚度均匀分布时,结构抗倒塌安全储备充分,具有良好的抗地震倒塌能力;当某轴线刚度超出平面各轴线平均刚度的30%时,结构在ME-II作用下的抗倒塌安全储备明显不足,有较高的倒塌风险,建议在设计中平面各轴线的刚度不应超过此限值。

4 结论及建议

1) 通过对濰口中学教学楼A的有限元模拟可知,填充墙的布置会增大④榀框架的抗侧刚度,造成地震剪力在各榀框架之间分布不均匀;半高填充墙的设置会对框架柱产生约束效应,对结构的损伤机制产生较大影响。

2) 通过对4个沿轴线各榀填充墙框架不同刚度分布的模型进行IDA分析可知,平面刚度均匀分布的模型层间位移角最小,提高了结构稳定性,明显改善了结构的抗地震倒塌能力。

3) 通过对不同地震作用下各模型的抗地震倒塌能力分析可知,平面刚度均匀分布的结构在不同地震作用下的倒塌概率最低,结构抗倒塌安全储备充分;当某轴线刚度高于平面各轴线平均刚度的30%时,结构的倒塌概率明显提升,没有足够的抗倒塌安全储备,抗地震倒塌能力不足。

4) 建议在设计阶段应当充分考虑填充墙对主体结构的刚度提升作用,避免半高填充墙直接约束框架柱造成整体刚度提高,尽量使结构的平面上各榀结构刚度均匀布置。当为了满足建筑功能的需求,出现填充墙不均匀布置造成平面刚度不均的情况时,建议平面各榀框架的刚度不应超过其平均刚度的30%。

参考文献(References):

- [1] 郭迅. 汶川地震对我国城乡建筑抗震的启示[J]. 城市与减灾, 2018(3):30-35.
GUO Xun. Insights from the Wenchuan earthquake on the seismic resistance of urban and rural buildings in China[J]. Cities and Disaster Mitigation, 2018(3):30-35.
- [2] 王波,郭迅,宣越. 基于新视角的震害分析:以四川长宁6.0级地震为例[J]. 震灾防御技术, 2020, 15(3):496-509.
WANG Bo, GUO Xun, XUAN Yue. Seismic damage analysis based on new perspectives: An example of 6.0 magnitude earthquake in Changning, Sichuan[J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2020, 15(3):496-509.
- [3] 林超,郭子雄,黄群贤,等. 不同拉结构造填充墙框架抗震性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6):1271-1280.
LIN Chao, GUO Zixiong, HUANG Qunxian, et al. Experimental study on seismic performance of infill wall frames with different tension structures[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2018, 26(6):1271-1280.
- [4] STAVRIDIS A, KOUTROMANOS I, SHING P B. Shake-table tests of a three-story reinforced concrete frame with masonry infill walls[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(6):1089-1108.
- [5] 汪梦甫,黄青山,邹文奇. 新型外廊式钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1):135-143.
WANG Mengfu, HUANG Qingshan, WU Wenqi. Experimental study on seismic performance of new external corridor type reinforced concrete frame structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(1):135-143.
- [6] 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]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1985(4):21-35.
TONG Yuesheng, QIAN Guofang, LIANG Xingwen, et al. Stiffness of reinforced concrete frames with brick infill walls and its application[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 1985(4):21-35.
- [7] 黄群贤. 新型砌体填充墙框架结构抗震性能与弹塑性地震反应分析方法研究[D]. 泉州:华侨大学, 2011.
HUANG Qunxian. Research on seismic performance and elastic-plastic seismic response analysis method of new masonry infill wall frame structure[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2011.
- [8] 曹万林,王光远,吴建有,等. 轻质填充墙异型柱框架结构层刚度及其衰减过程的研究[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(5):20-31.
CAO Wanlin, WANG Guangyuan, WU Jianyou, et al. Study on the stiffness of light weight infill wall shaped column frame structure layer and its decay process[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(5):20-31.
- [9] 杨伟松,陶柱,郭迅,等. 填充墙外廊式RC框架结构倒塌振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10):160-171.
YANG Weisong, TAO Zhu, GUO Xun, et al. Infill wall exterior gallery type RC frame structure collapse shaking table test study[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10):160-171.
- [10] LI Shuang, SHAN Sidi, ZHAI Changhai, et al. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59:57-68.
- [11] MORFIDIS K, KOSTINAKIS 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.