

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230329004

柱脚不同连接形式钢框架-摇摆墙结构抗震性能对比分析*

蔡新江¹, 陈磊¹, 毛小勇¹, 田石柱¹, 王文晋²

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

2. 中建八局第三建设有限公司苏南分公司, 江苏 苏州 215021)

摘要: 增设摇摆墙后框架结构地震下柱脚仍会发生一定程度的塑性损伤, 将柱脚设置为铰接或提高后有望减轻上述缺陷。以三层、六层和九层钢框架为基准模型, 分别建立柱脚固接、铰接及提高三种框架-摇摆墙结构模型并进行动力弹塑性时程分析, 对比各结构最大侧向位移、层间位移角、峰值加速度、层间剪力、墙体剪力和弯矩等; 进一步建立耗能连梁固接和铰接的对比模型, 研究连梁连接方式对结构抗震性能的影响。结果表明: 三层模型中柱脚固接时侧向位移、层间位移角、加速度、层间剪力及摇摆墙墙体剪力的控制效果最优, 六层、九层模型中分别对应柱脚提高和柱脚铰接效果最好; 摇摆墙墙体剪力图和弯矩图分别呈现“C形”和“反C形”, 柱脚固接时墙体弯矩均为最小, 与层数无关。柱脚固接耗能连梁两端采用固接最优, 柱脚铰接和柱脚提高时耗能连梁两端采用铰接形式效果更优。此分析可为框架-摇摆墙结构进一步推广应用提供参考。

关键词: 钢框架-摇摆墙; 柱脚形式; 变形; 加速度; 内力; 连接形式

中图分类号: TU391; TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1062-10

Comparative Analysis of Seismic Performance of Steel Frame-Rocking Wall Structures with Different Connection Forms of Column Foot

CAI Xinjiang¹, CHEN Lei¹, MAO Xiaoyong¹, TIAN Shizhu¹, WANG Wenjin²

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. China Construction Eighth Bureau Third Construction Co., Ltd., Sunan Branch, Suzhou 215021, China)

Abstract: After the rocking wall is introduced into frame structure, the column foot will still undergo a certain degree of plastic damage during earthquakes. Adjusting the column foot to be hinged or uplifted can potentially mitigate these defects. Using the three-story, six-story, and nine-story steel frames as the benchmark models, this study established three kinds of frame-rocking wall structure models with fixed, hinged and uplifted column feet, respectively, followed by dynamic elastoplastic time history analysis. The maximum lateral displacement, inter-story drift, peak acceleration, inter-story shear force, wall shear force, and bending moment of each structure were compared. The comparative model of fixed and hinged energy-dissipating coupling beams was further established to study the effects of coupling beam connection modes on the structure's seismic performance. The results showed that in

* 收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778395)、江苏省自然科学基金(BK20171221)、江苏高校“青蓝工程”(2018)、江苏省“333工程”(2018)、江苏高校境外研修计划资助

作者简介: 蔡新江(1981—), 男, 教授, 硕导, 博士。主要从事结构抗震与抗火分析研究。E-mail: caixinjiang@usts.edu.cn

the three-story model, fixed column foot achieved optimal control of lateral displacement, inter-story drift, acceleration, inter-story shear force and rocking wall shear force. In the six-story and nine-story models, the best performance was achieved with uplifted and hinged column feet, respectively. The shear force and bending moment diagrams of the rocking wall exhibited "C-shaped" and "reverse C-shaped" patterns, respectively, with the smallest wall bending moment observed when the column foot was fixed, regardless of the number of stories. For energy-dissipating coupling beam, fixed connections at both ends were optimal for fixed column foot, while hinged connections at both ends of the energy-dissipating coupling beam were better for hinged and uplifted column feet. This analysis provides a reference for further application and development of steel frame-rocking wall structures.

Keywords: steel frame-rocking wall; column foot form; deformation; acceleration; internal force; connection form

0 引 言

汶川地震中,部分框架结构呈现层破坏模式,即底层破坏而上部结构较为完整的现象。框架-摇摆墙结构可以改善结构变形模式,使层间位移趋于均匀,降低层破坏模式出现的概率,充分发挥结构抗震性能。

G.W. Housner^[1]发现地震作用下,高位水槽基础弱化后的抬起和摇摆现象,减轻了结构的地震损伤。Y. Kurama等^[2]采用纤维模型法对无粘结预应力自复位墙体进行了力学性能分析,结果表明附加自复位摇摆墙能够有效减小结构在地震下的损伤。J.J. Ajrab等^[3]对六层框架-摇摆墙结构加设了预应力钢绞线和耗能减震装置,以此减小震后残余变形。A. Wada等^[4]针对日本东京工业大学G3教学楼提出了一种采用摇摆墙加固的方案,加固后结构的地震反应显著降低。曲哲等^[5]分析了框架结构、支撑框架结构、摇摆结构的损伤机理和损伤控制效果,并提出了摇摆墙刚度的确定方法。赵江等^[6]采用静力及动力弹塑性时程分析,对比了常规框架-摇摆墙结构和预应力框架-摇摆墙结构,结果表明预应力框架-摇摆墙结构的抗震性能更优。张富文等^[7]对摇摆墙与基础和框架连接方式做了对比,结果表明摇摆墙与框架的连接方式对结构抗震性能有较大影响。何晴光等^[8]研究发现在摇摆框架中选择合适的自复位耗能支撑设计参数以及安装角度和位置能有效提高自复位结构整体抗震性能。

常规框架结构的柱脚形式大多为刚性连接,而为了减小柱脚损伤,部分框架也采用了柱脚铰接和

柱脚脱离形式^[9]。H. Tagawa等^[10-11]研究了框架柱脚铰接时结构的抗震性能,结果显示铰接时结构柱脚的损伤较小,抗震性能优越。包恩和等^[12]研究了柱脚刚接、半刚接以及铰接形式下对钢框架结构的破坏机制和损伤分布的影响。刘尚等^[13]对柱脚可抬起的连柱钢框架进行循环荷载试验,结果显示柱脚可抬起的连柱框架具有良好的耗能能力。张国伟等^[14]放松了混凝土柱和基础之间的约束,试验结果显示柱脚向上抬起,基底剪力减小,变形能力增强。

综上所述,现有研究中框架-摇摆墙结构的柱脚连接形式多为固接,其他柱脚连接形式的框架-摇摆墙结构抗震性能的研究尚未深入。本文以三层、六层和九层钢框架为基准模型,分别增设摇摆墙,研究柱脚固接、柱脚铰接和柱脚脱离对不同层数框架-摇摆墙结构抗震性能的影响,为框架-摇摆墙结构的进一步推广应用提供研究参考。

1 钢框架-摇摆墙结构计算模型

1.1 结构建模

分别选用三层四跨、六层四跨、九层四跨钢框架作为基准模型,通过PKPM验证结构的正确性。在框架外侧增设摇摆墙形成框架-摇摆墙结构,以九层为例,九层基准框架与柱脚不同连接形式框架-摇摆墙结构示意图如图1所示,其余模型与九层结构加设摇摆墙的形式相同。抗震设防烈度为7度(0.15g),场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第一组,三组模型跨度均为4.8m,底层层高3.8m,其他层层高3.6m,耗能连梁长0.8m。结构中耗能连梁部分

采用截面尺寸为H250×125×6×9的Q235B级钢,耗能连梁沿建筑高度均匀分布,具体布置位置如图1所示。框架柱与框架梁均采用Q345B级钢。参考文献[15],框架-摇摆墙结构中框架的抗剪刚度与摇摆墙的抗弯刚度之比 λ 应满足 $1 < \lambda < 10$,因此可设计出摇摆墙的截面尺寸为1500×250 mm,高度随基准框架的高度变化。各层梁、柱截面尺寸与材料参数见表1。

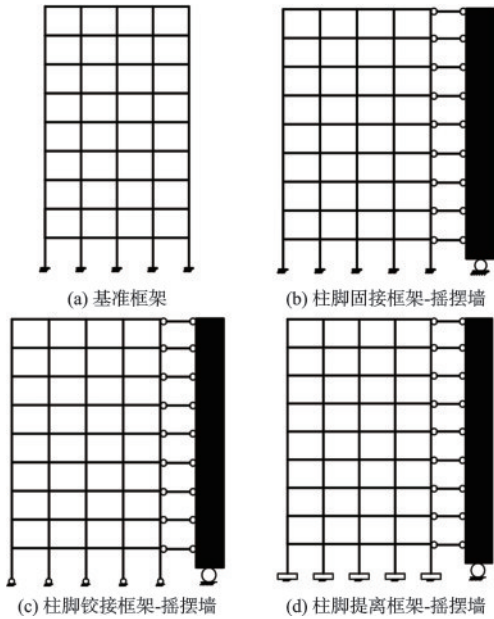


图1 九层基准框架与柱脚不同连接形式框架-摇摆墙结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of frame-rocking wall structure with different connection forms between nine-story benchmark frame and column feet

表1 各层梁、柱截面尺寸与材料参数

Table 1 Beam and column section dimensions and material parameters of each story

构件	截面尺寸/mm	Es/MPa	泊松比
3层柱	H250×250×9×14	206 000	0.3
3层梁	H300×150×6.5×9	206 000	0.3
6层柱	H350×350×16×16	206 000	0.3
6层梁	H400×200×8×13	206 000	0.3
9层柱	H400×400×20×20	206 000	0.3
9层梁	H400×200×8×13	206 000	0.3

采用ABAQUS有限元软件建模,其中九层不同柱脚连接形似框架-摇摆墙模型如图2所示。各构件均采用C3D8R实体单元,钢材采用二折线强化

模型与Von-Mises屈服准则,混凝土本构模型采用ABAQUS中的混凝土塑性损伤模型(Concrete Damaged Plastic Model),钢材的应力-应变曲线如图3所示。梁柱节点采用绑定(Tie)来模拟焊接,由于耗能连梁端板与柱翼缘采用焊接连接或采用高强螺栓连接对结构整体的抗震性能影响不大^[16],因此将连梁端板与柱翼缘也采用绑定约束(Tie)来简化模拟。连梁与端板间用MPC约束来模拟铰接。在ABAQUS中,柱脚固接形式通过约束柱脚全部自由度来实现,即令 $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=$

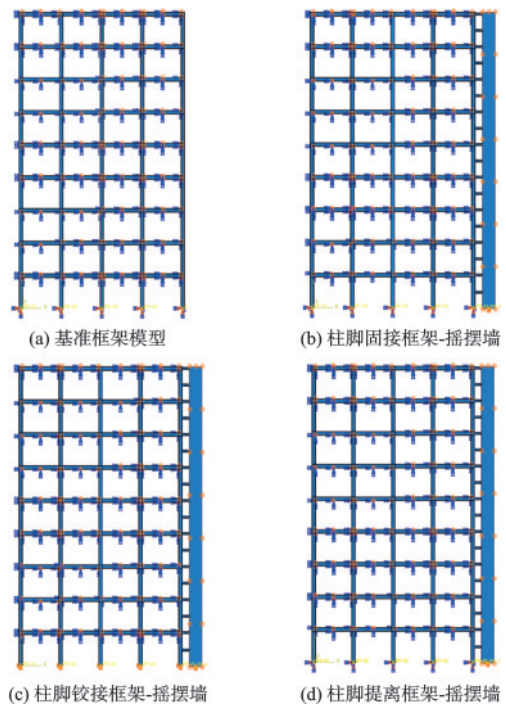


图2 九层柱脚固接、柱脚铰接及柱脚提高框架-摇摆墙模型
Fig.2 Nine-story column foot fixed, column foot hinged and column foot uplifted frame-rocking wall model

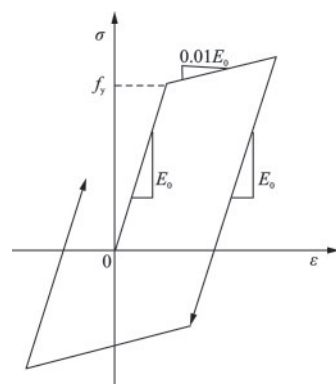


图3 钢材应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve of steel

$UR_3=0$;通过约束柱脚位移自由度,放松转动自由度来实现柱脚铰接形式,即令 $U_1=U_2=U_3=0$;在柱脚提高中,柱脚处的弹簧较为复杂,选用Spring2单元代替柱脚可提高时柱脚处的弹簧和螺栓,选取弹簧长度为80 mm,刚度为191.5 N/mm,同时为了使柱脚提高的钢框架—摇摆墙模型收敛,框架柱与基础之间的接触设置为切向无摩擦,法向硬接触^[17]。为防止结构发生面外失稳破坏,约束框架梁及墙面外自由度。

1.2 模型的验证

为验证本文钢框架—摇摆墙结构建模方法的准确性,本文选取文献[18]中所设计的框架—摇摆墙结构抗震试验进行对比验证,与试验一致,选取三层框架—摇摆墙为例,采用拟静力低周反复荷载模拟研究,摇摆墙不施加竖向荷载,水平荷载为倒三角分布,一、二、三层水平荷载之比为1:2:3,绘制模型基底剪力—顶点位移骨架曲线。如图4所示,试验结果与有限元模型较为吻合,因此可验证本文有限元模拟方法的准确性。

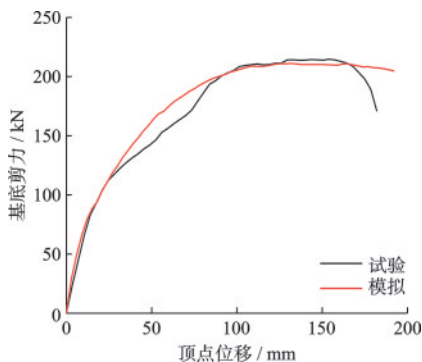


图4 数值模拟结果与试验结果

Fig.4 Numerical simulation results and experimental results

1.3 框架柱脚形式

常规钢框架设计中,框架柱脚一般采用固接形式,有时也会采用铰接形式来减小柱脚损伤。而近年来对摇摆构件研究发现^[19],通过放松上部结构与基础的连接约束,使结构的受拉能力较弱,在地震作用下向上抬起,可起到耗散地震能量的作用,其中提高柱脚通过螺栓、垫板、弹簧与基础相连。

本文设计了固结、铰接及提高三种形式,不同柱脚构造示意如图5所示。

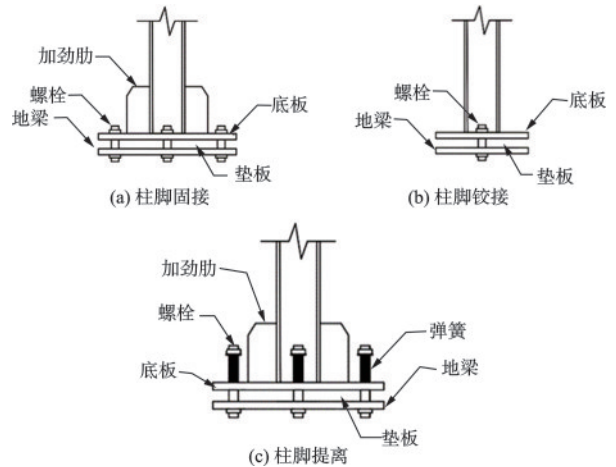


图5 柱脚固接、柱脚铰接及柱脚提高构造示意

Fig.5 Schematic diagrams of fixed, hinged, and uplifted column foot configurations

1.4 地震波的选择

充分考虑结构所在场地的场地类别和特征周期的影响,利用软件Spectrum—2010生成规范反应谱^[20],按照规范要求选取的地震动反应谱与规范反应谱在结构主要周期处相差不超过20%,从太平洋地震工程研究中心(PEER)^[21]选取了三条地震记录,限于篇幅本文仅展示El-Centro波的结果,持时20 s,并将其调幅至310 cm/s²(罕遇地震)。

2 大震下弹塑性时程分析结果

提取各结构最大侧向位移、层间位移角、峰值加速度、层间剪力、墙体剪力和弯矩进行对比分析。

2.1 最大侧向位移

各模型最大侧向位移如图6所示。由图6可知,在各个模型中,钢框架—摇摆墙结构的层间侧移曲线均呈现为连续增长的均匀曲线,而基准框架曲线会出现一定程度的弯曲,原因是基准框架变形模式为剪切型,附加摇摆墙后,框架部分侧向变形得到有效控制,层变形更为均匀。在三层模型中,柱脚固接时,框架—摇摆墙结构的侧向位移减小最多;六层模型中,柱脚提高对结构的侧向变形控制最明显;九层模型中,柱脚铰接对结构侧向位移控制效果最好。分析以上原因,这是因为在三层结构中,结构的高度较低,柱脚抬升以及摇摆墙的转动是耗能连梁非弹性转角的主要部分,随着结构高度的增加,框架柱的弯曲变形也成为了耗能连梁非弹性转

角不可忽略的一部分,连梁的转动角度增大,塑性发展更充分,因此六层柱脚提高框架-摇摆墙结构的效果更好,而随着楼层的继续增大,柱脚提高引起

的转动达到限值,而柱脚铰接的转动的效果增大,耗能连梁的塑性发展进一步增加,在九层结构中,柱脚铰接框架-摇摆墙的效果更明显。

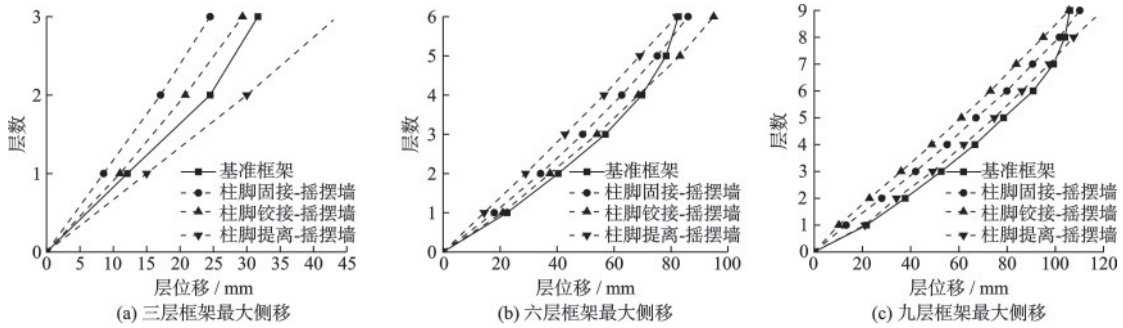


图6 各模型最大侧向位移

Fig.6 Maximum lateral displacement of each model

2.2 框架层间位移角

各模型层间位移角如图7所示。由图7可知,所有结构的最大层间位移角均小于1/50,满足《建筑抗震设计规范》^[22]限值要求。在三层模型中,柱脚固接时层间位移角最小,最大层间位移角减小33.8%;六层模型中,柱脚提高时层间位移控制效果最明显,最大层间位移角减小26.3%;九层模型中,柱脚铰接时层间位移角的控制效果最好,最大层间位移角减小20.0%。

为了描述结构各楼层层间变形的不均匀程度,采用层间位移集中系数(DCF)^[23]来表征,DCF可按公式(1)计算,其结果越接近于1,表明层变形越均匀。

$$D_{cf} = \frac{\max(\Delta_i)}{(\sum \Delta_i h_i) / H} \quad (1)$$

式中, Δ_i 表示第*i*层的最大层间位移角; h_i 表示第*i*层的楼层高度; H 表示结构总高度。计算结果见表2。

由表2可知,与基准模型相比,附加摇摆墙后,

表2 各模型的层间位移集中系数

Table 2 Drift concentration factor of each model

结构类型	三层结构	六层结构	九层结构
基准框架	1.24	1.44	1.45
柱脚固接-摇摆墙	1.12	1.21	1.19
柱脚铰接-摇摆墙	1.06	1.10	1.14
柱脚提高-摇摆墙	1.07	1.11	1.16

三种不同柱脚形式框架-摇摆墙的层间位移集中系数均明显降低,可见附加摇摆墙能有效控制框架结构的“层变形机制”,实现“整体屈服机制”,充分发挥各个楼层的抗震承载能力,提高整体结构的抗震性能。在三种模型中,柱脚固接时层间位移集中系数减小最少,柱脚铰接时层间位移集中系数最接近于“1”,柱脚提高时与柱脚铰接时控制效果相差不大,且与结构层数无关,主要是因为柱脚为铰接和提离时,削弱了柱脚的固定控制作用,当摇摆墙在遭遇地震发生摇摆时,框架会随着摇摆墙共同发生摇摆,结构的变形更趋向于整体变形。

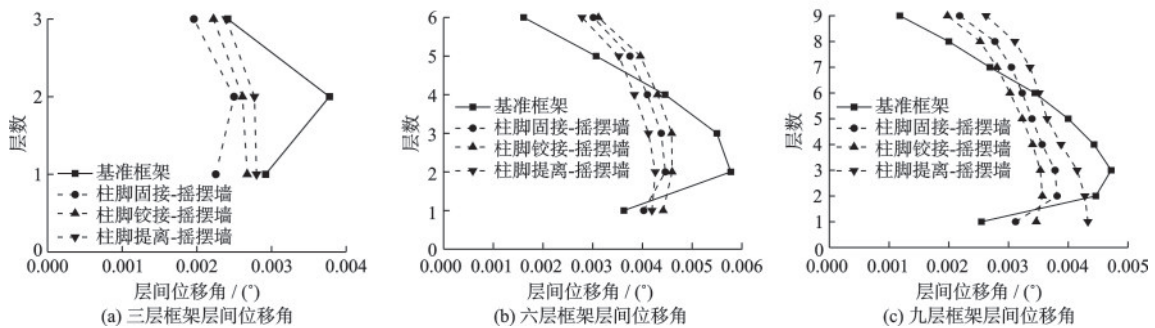


图7 各模型层间位移角

Fig.7 Inter-story drift angle of each model

2.3 峰值加速度

各模型峰值加速度如图8所示。由图8可知,在柱脚不同连接形式框架-摇摆墙结构中,框架部分主要承担结构自重引起的竖向荷载,摇摆墙为整体结构提高抗侧刚度的同时也作为第一道抗震防线,结构在地震下产生的惯性力由耗能连梁传递给摆

墙,此时耗能连梁通过变形耗能将减小结构的峰值加速度,因此当连梁的变形较大时,结构的峰值加速度减小较多。在六层和九层模型中,各层峰值加速度较基准框架结构均有所减小,其中六层模型柱脚提高时效果最好,最大峰值加速度减小35.75%,九层模型柱脚铰接时柱脚铰接效果最好,最大峰值加速度减小37.48%。

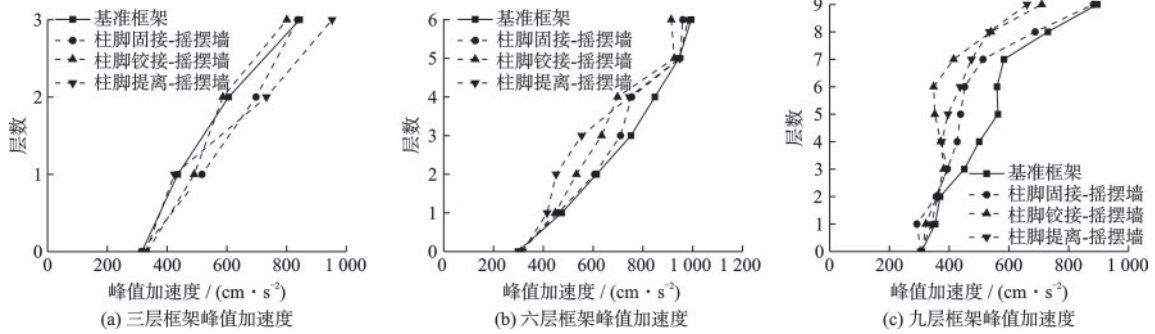


图8 各模型峰值加速度

Fig.8 Peak acceleration of each model

2.4 框架层间剪力

各模型层间剪力如图9所示。由图9可知,基准框架和柱脚固接框架-摇摆墙结构的最大剪力出现在结构底层,而柱脚铰接和柱脚提高框架-摇摆墙结构的最大剪力出现在上部楼层,原因在于,基准框架、柱脚固接框架-摇摆墙的柱脚均与基础刚性连接,柱底的刚度较大,后两种结构则放松了柱脚与基础之间的约束,在经历水平地震作用时,可发生一定的转动或抬升,减小了柱底剪力。基准框架顶层剪力较底层剪力减小较多,框架-摇摆墙结构的层间剪力虽呈下降趋势,但层间剪力分布更为均匀。

在三层模型中,除底层外,柱脚固接时框架-摇摆墙层间剪力最小,柱脚提高时层间剪力最大;在六层模型中,柱脚提高时框架-摇摆墙层间剪力值最小,柱脚固接时层间剪力最大;在九层模型中,柱脚铰接时框架-摇摆墙的层间剪力最小,柱脚固接时层间剪力最大。由此可见,在三种柱脚形式中,随着楼层数的增加,柱脚铰接和柱脚提高时框架-摇摆墙的层间剪力较柱脚固接时减小更显著,抗震性能提升更明显,主体框架的损伤更小。因此在低层框架-摇摆墙结构中,框架柱脚可采用固接形式,而在中高层结构中,框架柱脚可采用铰接或提高形式。

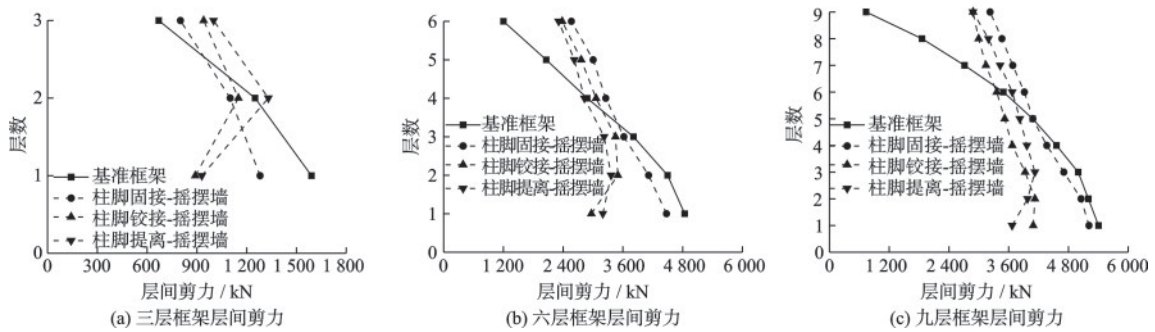


图9 各模型层间剪力

Fig.9 Inter-story shear force of each model

2.5 摇摆墙墙体内力

2.5.1 摇摆墙墙体剪力

各模型摇摆墙墙体剪力如图10所示。由图10可

知,与基准框架不同,摇摆墙体所受剪力的最大值出现在底层,且在三种模型中,柱脚固接时框架-摇摆墙底层墙体所受剪力最小,与层数无关。摇摆墙体的剪力分布基本呈现“C形”,底层和顶层剪力较

大,而中间层剪力较小。在三层模型中,柱脚固接时摇摆墙体各层的层间剪力值最小,墙体损伤最小。在六层模型中,除底层外,柱脚提离时框架-摇摆墙的墙体剪力最小,柱脚固接时墙体剪力最大;在九层模型中,除底层外,柱脚铰接时框架-摇摆墙的墙体剪力最小,柱脚固接时墙体剪力最大。三层结构中,由于结构高度较小,柱脚固接限制了框架柱的转动,耗能连梁的非弹性转角减小,框架传递

给摇摆墙的地震能量减小,因此在三层结构中,柱脚固接框架-摇摆墙结构的墙体剪力最小。而随着层数增加,柱脚提离和柱脚铰接时,连梁转角增大,传递的地震能量增大,其墙体承担的剪力增大。结合各模型的层间剪力如图9所示,在框架-摇摆墙结构中,当框架柱脚为固接形式时,整体结构的剪力主要由框架承担,当柱脚为铰接或提离时,整体结构的剪力主要由墙体来承担。

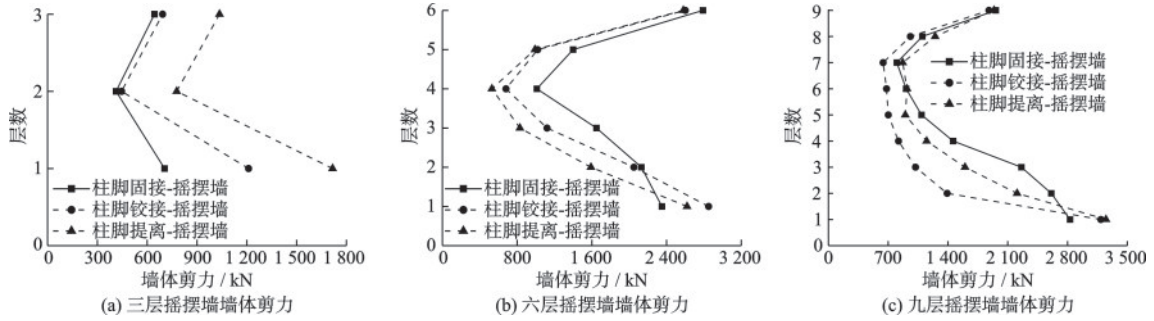


图10 各模型摇摆墙墙体剪力
Fig.10 Shear force of rocking-wall in each model

2.5.2 摇摆墙墙体弯矩

各模型摇摆墙墙体弯矩如图11所示。由图11可知,与摇摆墙体剪力不同,墙体弯矩呈现“反C形”,底部和顶部弯矩较小,弯矩较大值出现在对应中间楼层的墙体处。在三种模型中,柱脚固接时摇摆墙在底层的弯矩均为最小,柱脚铰接和柱脚提离形式时底层弯矩相差不大。与墙体剪力不同,在三种模型中,柱脚固接时墙体所承受的弯矩较其他两种柱脚形式均为最小,原因是当框架柱脚采用固接形式时,而摇摆墙底为铰接,框架部分的水平刚度

要大于摇摆墙的刚度,因此框架部分承担的弯矩要比摇摆墙所承担的弯矩大;而当框架柱脚采用铰接或提离时,框架部分的刚度减少较多,此时摇摆墙所承担的弯矩增大,因此,当框架柱脚采用铰接或提离形式时,要加强墙体结构的设计以避免损坏。由图10各模型摇摆墙体剪力和图11各模型摇摆墙体弯矩可知,墙体在底层所受的剪力最大,而在底层所受的弯矩却较小,避免墙体在剪力最大处同时弯矩也最大的情况,从而减轻了墙体的损伤破坏,减少了墙体设计的强度和刚度需求。

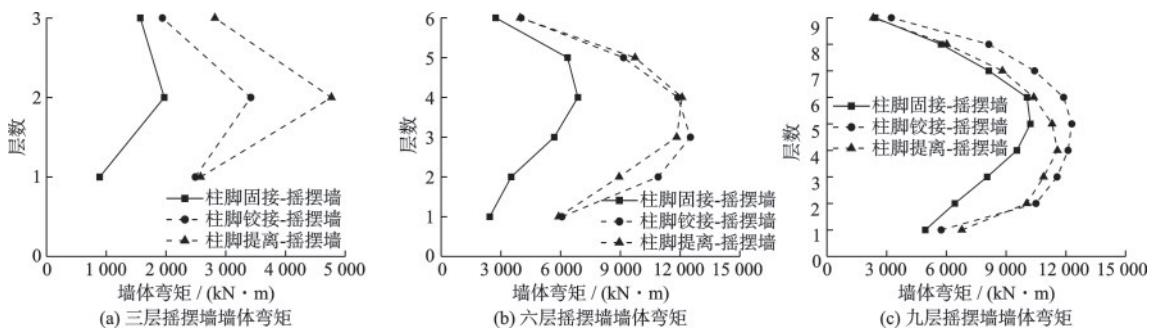


图11 各模型摇摆墙墙体弯矩
Fig.11 Bending moment of rocking-wall in each model

3 耗能连梁连接方式的影响

框架与摇摆墙之间的连接件形式是框架-摇

摆墙结构中最关键的部分之一。连梁与框架和摇摆墙之间通常有刚接和铰接两种连接方式,前文的钢框架-摇摆墙结构模型所采用的均为铰接连接,此处设计对比模型,将耗能连梁与框架和摇

摆墙之间设计为刚性连接,有限元中将端板与柱翼缘和耗能连梁之间的MPC约束改为绑定(Tie)约束,其余参数均保持一致。对比分析连接方式对柱脚不同连接形式框架-摇摆墙结构抗震性能的影响。

通过动力弹性时程分析,各模型的动力响应如图12所示,给出了九层模型柱脚不同连接形式的框架-摇摆墙结构在连接件铰接与刚接形式下的最大侧向位移、层间位移角、峰值加速度、框架层间剪力以及墙体剪力、弯矩的对比。

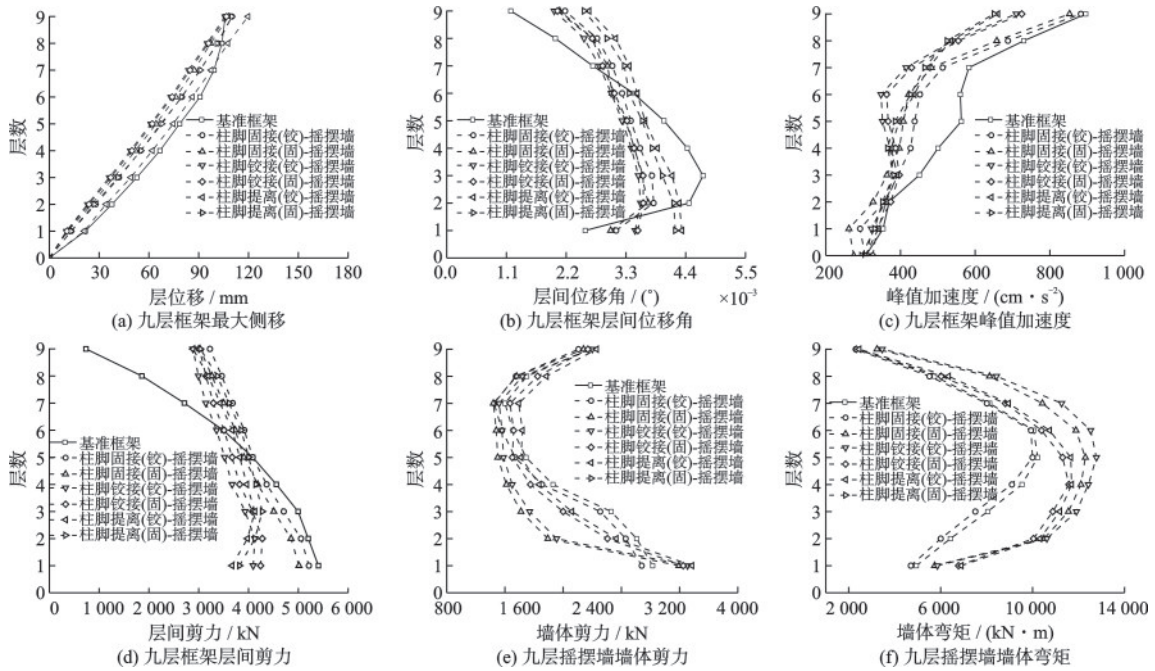


图12 九层模型的位移、加速度及内力

Fig.12 Displacement, acceleration and internal force of the nine-story model

由以上计算结果可知:

当连梁与摇摆墙、框架之间采用刚性连接时,柱脚固接和柱脚提高钢框架-摇摆墙的最大侧向位移较铰接时有所减小,而柱脚铰接钢框架-摇摆墙的最大侧向位移有所增加。

与结构最大侧向位移的规律相同,当连梁刚接时,柱脚固接和柱脚提高框架-摇摆墙结构的最大层间位移角以及最大峰值加速度都有所减小,柱脚铰接框架-摇摆墙结构略有增加,但依然控制在1/50以内,满足《抗规》限值要求。

连梁采用刚性连接时,柱脚固接框架-摇摆墙结构的层间剪力、墙体剪力和弯矩都有所减小,柱脚铰接和柱脚提高框架-摇摆墙结构的剪力会增大,可见当连梁采用刚接时,在柱脚固接框架-摇摆墙结构中能更好地发挥连梁的剪切耗能效果。

综上,当连梁采用刚性连接时,三种柱脚形式框架-摇摆墙结构的动力响应差别不大,当柱脚采用固接形式时,连梁采用刚性连接能更好地发挥其剪切耗能作用,当柱脚为铰接和提离时连梁可以采用

铰接连接适当减小结构在罕遇地震下的地震反应。

4 结论

本文通过对三种不同层数钢框架结构、柱脚固接、柱脚铰接及柱脚提高框架-摇摆墙结构进行弹性时程分析,对比了各结构在地震下的动力响应,所得结论如下:

(1) 不同柱脚形式框架-摇摆墙结构均能基本消除钢框架结构变形集中问题,改变结构的破坏模式,遏制结构薄弱层的出现,实现“整体屈服机制”。罕遇地震作用下,三层和六层柱脚固接框架-摇摆墙结构最大层间位移角分别减小33.8%和26.3%,九层柱脚铰接钢框架-摇摆墙结构最大层间位移角减小20%。柱脚铰接形式对结构层变形均匀程度最好且与结构层数无关。

(2) 在三层模型中,三种不同柱脚形式的框架-摇摆墙结构较基准框架各层的峰值加速度减小不明显,六层模型中,柱脚提高时峰值加速度减小

最多,九层模型中,柱脚铰接时峰值加速度减小最多。

(3) 基准框架和柱脚固接框架-摇摆墙结构的最大剪力均出现在楼层底部,当框架柱脚铰接或脱离时,最大剪力不在柱脚出现,可避免底层框架柱在罕遇地震下发生损伤。

(4) 框架柱脚固接时,结构剪力主要由框架来承担,当柱脚为铰接或脱离时,则由摇摆墙主要承担。摇摆墙体剪力近似“C形”,弯矩近似“反C形”,剪力和弯矩不会同时达到最大,减小了墙体设计的困难。

(5) 综合各种数据分析可知,在三层模型中,柱脚固接框架-摇摆墙较基准框架结构性能提升较明显,在六层模型中,柱脚脱离则更适合作为框架的柱脚形式,在九层模型中,柱脚铰接时框架-摇摆墙具有更好地抗震性能。

(6) 在不同柱脚连接形式框架-摇摆墙结构中,当柱脚形式为固接时,可考虑将连梁与框架和墙体刚性连接以充分发挥连梁的剪切耗能,而当结构柱脚设计为铰接和脱离时,连梁可与框架和墙体铰接以减小地震反应。

参考文献:

- [1] Housner G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 403-417.
- [2] Kurama Y, Sause R, Pessiki S, et al. Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 622-633.
- [3] Ajrab J J, Pekcan G, Mander B. Rocking wall-frame structures with supplemental tendon systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6): 895-903.
- [4] Wada A, Qu Z, Ito H, et al. Seismic retrofit using rocking walls and steel dampers [C]//Proceedings of ATC Conference on improving the seismic performance of existing buildings and other structures. San Francisco. 2009: 1010-1021.
- [5] 曲哲, 叶列平. 摇摆墙-框架体系的抗震损伤机制控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 40-50.
Qu Z, Ye L P. Seismic damage mechanism control of rocking wall-frame system [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(4): 40-50. (in Chinese)
- [6] 赵江, 李文武, 周攀. 预应力RC框架-摇摆墙结构抗震减振性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1213-1221.
Zhao J, Li W W, Zhou P. Research on the seismic performance and vibration reduction of prestressed rocking wall-frame system [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1213-1221. (in Chinese)
- [7] 张富文, 李向民, 许清风, 等. 框架-摇摆墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 73-81.
Zhang F W, Li X M, Xu Q F, et al. Experimental study on seismic behavior of frame-rocking wall structure [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(8): 73-81. (in Chinese)
- [8] 何晴光, 王鹤. 自复位耗能摇摆框架的抗震性能参数分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 290-300.
He Q G, Wang H. Analysis on seismic performance factors of self-centering energy dissipation rocking frame [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 290-300. (in Chinese)
- [9] 郑年文, 王国波. 地震作用下结构的脱离摇摆效应研究现状及进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1395-1407.
Zheng N W, Wang G B. State-of the art on uplift and rocking effect of structure under earthquakes [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1395-1407. (in Chinese)
- [10] Tagawa H, Macrae G, Lowes L. Evaluation of multi-story structures using dynamic stability coefficients [J]. Journal of Structural & Construction Engineering, 2007, 72(8): 57-64.
- [11] Tagawa H, Macrae G, Lowes L. Continuous column effects of gravity columns in U.S steel moment-resisting frame structures [J]. Journal of Structural & Construction Engineering, 2010, 75(4): 761-770.
- [12] 包恩和, 赵亚涛, 张梓涵, 等. 不同柱脚形式常规低层钢框架的损伤机理分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 173-179.
Bao E H, Zhao Y T, Zhang Z H, et al. Damage mechanism analysis of conventional low-level steel frames with different type of column base [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 173-179. (in Chinese)
- [13] 刘尚, 赵宝成. 柱脚可抬起的连柱支撑钢结构抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(3): 37-45.
Liu S, Zhao B C. Study on seismic performance of

- linked column steel braced frame with lifting column base [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2017, 39(3): 37-45. (in Chinese)
- [14] 张国伟, 赵紫薇, 吴继丰, 等. 摇摆减震框架结构抗震性能研究试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(11): 73-80.
Zhang G W, Zhao Z W, Wu J F, et al. Experimental research on seismic behavior of rocking damping frame structure [J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(11): 73-80. (in Chinese)
- [15] Pan P, Wu S, Nie X. A distributed parameter model of a frame pin-supported wall structure [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(10): 1643-1659.
- [16] 唐成杰, 赵宝成. Y形偏心支撑竖向布置方式对结构抗震性能的影响[J]. *建筑科学*, 2016, 32(7): 93-100.
Tang C J, Zhao B C. Effects of vertical layout of Y-shaped eccentrically braces on seismic performance of structure [J]. *Building Science*, 2016, 32(7): 93-100. (in Chinese)
- [17] 陈云, 陈超, 徐子凡, 等. 装配式自复位摇摆钢框架抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(12): 23-34.
Chen Y, Chen C, Xu Z F, et al. Seismic performance study on prefabricated self-centering rocking steel frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(12): 23-34. (in Chinese)
- [18] 张富文, 李向民, 陈玲珠, 等. 一种框架摇摆墙结构的实现形式及其有限元分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(17): 213-217.
Zhang F W, Li X M, Chen L Z, et al. Design and finite element analysis for a new frame-rocking wall structure [J]. *Journal of vibration and shock*, 2016, 35(17): 213-217. (in Chinese)
- [19] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(9): 1-10.
Zhou Y, Lyu X L. State-of-the-art on rocking and self-centering structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(9): 1-10. (in Chinese)
- [20] 韩小雷, 崔济东, 李静, 等. 强震作用下基于构件性能的钢筋混凝土框架结构抗倒塌能力评估[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(12): 27-34.
Han X L, Cui J D, Li J, et al. Component-performance-based collapse resistant capacity evaluation of reinforced concrete frame structures under strong earthquake actions [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(12): 27-34. (in Chinese)
- [21] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [DB/OL]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center. [2014-01-10]. [https:// peer. berkeley. edu/smcat/index. html](https://peer.berkeley.edu/smcat/index.html).
- [22] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [23] Gregory A M, Yoshihir O K, Charles R. Effect of column stiffness on braced frame seismic behavior [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(3): 381-388.

(本文编辑:周小潭)