

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.11.002

核心剪力墙嵌固位置对掉层框剪结构抗震性能的影响

夏洪流^{a,b}, 吴寒^a, 张九荔^a, 刘立平^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:对掉层框剪结构中的核心剪力墙采取 2 种不同的嵌固位置, 设计不同掉层层数的算例模型, 进行多遇地震和罕遇地震作用下掉层框剪结构的抗震性能分析, 考察核心剪力墙不同嵌固位置对掉层框剪结构上、下接地部位剪力分配和抗震性能的影响规律。结果表明: 掉层结构上、下接地部位剪力分配极不均匀, 各接地部位传递的剪力占比受掉层层数和核心剪力墙嵌固位置影响; 通过选择核心剪力墙的嵌固位置, 可在一定程度上协调剪力传递的不均匀性, 当掉层层数较多时, 将核心剪力墙嵌固在上接地端更合理; 当上接地部位仅有少量剪力墙时, 易形成塑性变形集中, 设计中应重点关注此类构件的延性。

关键词:掉层结构; 框架-剪力墙; 嵌固端; 抗震性能

中图分类号: TU 973+.16

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)11-010-09

Influence of the fixed end of the core shear-wall on the seismic performance of frame-shear wall structure on the slope

XIA Hongliu^{a,b}, WU Han^a, ZHANG Jiuli^a, LIU Liping^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The seismic performance of frame-shear wall structure on the slope under frequent and rare earthquake was analyzed through a number of calculating examples with different floors and two fixed ends of the core shear walls. The effect laws of different fixed ends of the core shear walls for the shear distribution and seismic performance of the upper and lower grounding parts of the structures were discussed. It is found that the shear distribution of the upper and lower grounding parts of the structure is extremely uneven. The shear force ratio transmitted by each grounding part is affected by number of layers and the fixed end of the core shear wall. Selecting the fixed end of the core shear wall can coordinate the unevenness of shear transmission to some extent, and when there are a number of layers, it is more reasonable to embed the core shear wall on the upper ground, while when there is only a small amount of shear wall at the upper ground, plastic deformation is liable to be concentrated, and the design should focus on the ductility of such components.

Keywords: step-terrace structure; framed shear wall; fixed end; seismic performance

收稿日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51878101, 51478067)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51878101, 51478067).

作者简介: 夏洪流(1970—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构地震反应分析研究, (E-mail) xiahongliu@cqu.edu.cn。

掉层结构作为山地建筑中的典型结构形式而被广泛应用。掉层结构是指在同一结构单元具有 2 个及以上不同标高的嵌固端,且在最高接地点以下按层高设置楼板的结构体系^[1],如图 1 所示。掉层结构竖向的严重不规则性^[2-3],决定了其地震响应的复杂性和抗震设计的特殊性。针对掉层结构抗震方面的研究包括坡地结构的地震动输入、结构抗侧刚度及控制、掉层结构弹塑性抗震性能分析和抗震构造措施等方面,文献[4]研究了不同上接地柱底约束条件对掉层框架结构受力特点及抗震性能的影响,提出相应的设计建议。以上掉层结构抗震性能的研究主要是针对掉层框架结构,未进一步对掉层框剪结构抗震性能进行分析。由于钢筋混凝土剪力墙是高层结构的主要抗侧力构件之一^[5],因此,平地结构中地震中剪力墙的震害调查受到全世界地震工程和结构工程专业人士越来越多的关注^[6-8],针对剪力墙的数量和布置等方式对结构抗震性能的改进进行了大量研究^[9-11]。文献[12]指出剪力墙布置要应尽可能地使剪力墙最终实现一种弯曲破坏的形态,而非剪切破坏的形态,提高剪力墙结构的延性承载力,文献[13]基于剪力墙的动力特性探讨了剪力墙布置引起的反向剪切等问题。文献[14]结合上述两部分内容,研究了掉层框架剪力墙结构体系中剪力墙布置对结构的抗侧刚度和抗震性能的影响,但是未对核心剪力墙嵌固在上、下接地端对掉层框剪结构的抗震性能进行分析。因此,文中建立不同掉层层数、中部核心剪力墙嵌固位置不同的框架-剪力墙结构算例,对山地掉层框剪结构的楼层地震剪力分布特性进行研究,通过对比分析结构算例在罕遇地震作用下的地震响应,提出掉层框剪结构核心剪力墙嵌固部位的建议。

1 结构算例模型及参数

利用结构设计软件 Satwe 建立试算模型,并通过试算,检验各项指标均满足现行规范要求。该模型弹性时程分析基于 SAP2000 软件进行,对比显示,2 种模型在结构动力反应分析上具有较好的一致性^[15]。

文中共建立 7 个算例模型。其中,作为对比的常规结构算例(记为 NOR)为 30 层框剪结构;为分析核心剪力墙分别嵌固于上、下接地端对结构抗震性能的影响,分别设计了上接地层及以上部分 30 层,掉层层数分别为 2 层、4 层和 6 层,所有结构横向共 3 跨,楼层层高均为 3.6 m,跨度均为 7 m,核心剪力墙分别嵌固于上接地端和下接地端的算例共 6 个。上接地层及以上部分所有柱的截面尺寸均为 800 mm×800 mm,上接地 1~10 层剪力墙厚度为 300 mm,上接地 11~20 层剪力墙厚度为 250 mm,上接地 21~30 层剪力墙厚度为 200 mm,掉层部分柱截面尺寸均为 800 mm×800 mm,剪力墙厚度均为 300 mm,所有楼层梁的截面尺寸为 200 mm×700 mm,梁、柱采用 C40 混凝土。模型编号按 D-* -n 表示,其中 D 代表掉层结构,* 代表掉层层数,n 为 1 时代表核心剪力墙嵌固在上接地端,n 为 2 时代表核心剪力墙嵌固在下接地端,分别记为模型 I 组、模型 II 组,算例详细描述及分组说明详见表 1,算例模型整体结构示意图以 D-6-1、D-6-2 为例表示,如图 2 所示。

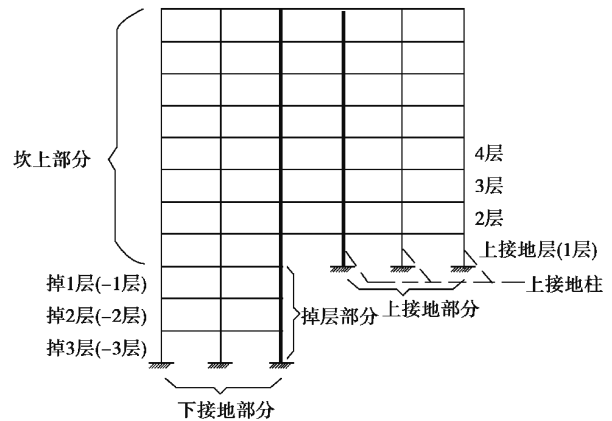


图 1 掉层结构各部位示意图(加粗部分为剪力墙)

Fig. 1 Schematic diagram of each part of structure

表 1 算例详细描述及分组说明

Table 1 Detailed description of the example and group description

模型编号	算例模型定义	分组
NOR	平地框剪结构	NOR
D-2-1	掉层层数为 2 层,核心剪力墙嵌固于上接地端	模型 I 组,记做 D-* -1
D-4-1	掉层层数为 4 层,核心剪力墙嵌固于上接地端	模型 I 组,记做 D-* -1
D-6-1	掉层层数为 6 层,核心剪力墙嵌固于上接地端	模型 I 组,记做 D-* -1
D-2-2	掉层层数为 2 层,核心剪力墙嵌固于下接地端	模型 II 组,记做 D-* -2
D-4-2	掉层层数为 4 层,核心剪力墙嵌固于下接地端	模型 II 组,记做 D-* -2
D-6-2	掉层层数为 6 层,核心剪力墙嵌固于下接地端	模型 II 组,记做 D-* -2

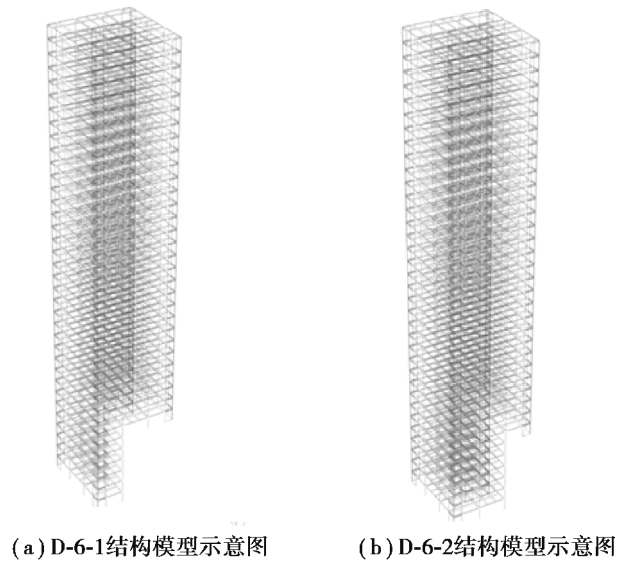
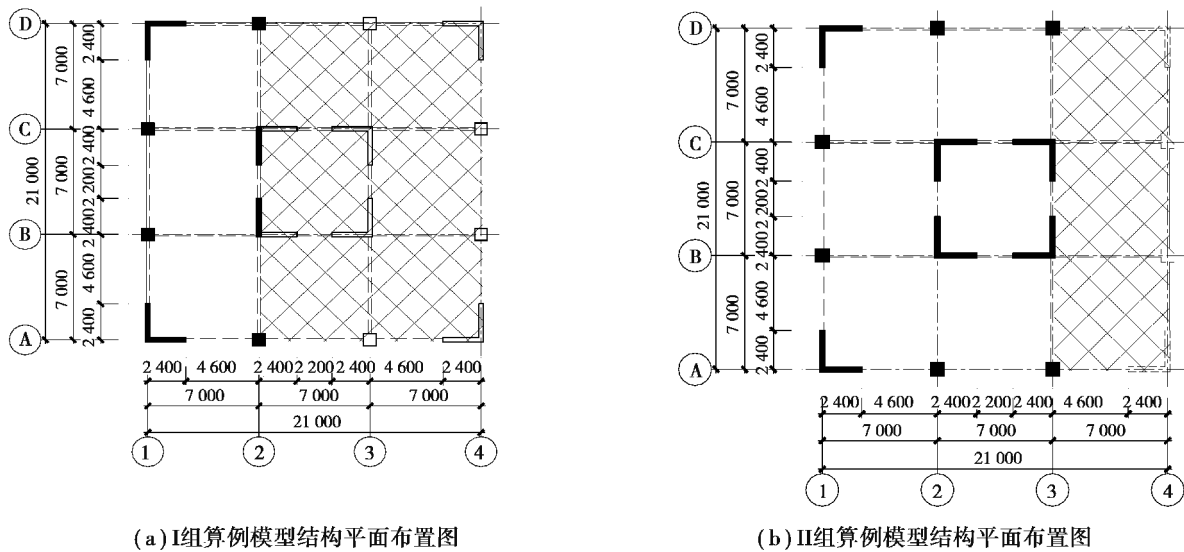


图 2 部分算例模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of some examples

算例分析时抗震设防烈度取为 7 度 $0.1g$, 设计地震分组为第二组, 场地类别为 IV 类。模型不考虑填充墙荷载, 荷载取值信息: 楼面活载标准值为 2.0 kN/m^2 , 恒载标准值为 5.5 kN/m^2 (包括楼板自重), 楼面屋面恒载为 7.0 kN/m^2 , 基本风压取值为 0.38 kN/m^2 (仅结构设计时考虑, 动力时程分析时不考虑) 结构平面布置见图 3 所示。



注: 图中阴影部分表示嵌固于上接地端的区域

图 3 算例模型结构平面布置图

Fig. 3 The structure floor plan of model

2 基于弹性的掉层框剪结构抗震性能分析

由于掉层结构具有多个不等高基底约束的特殊受力特性, 接地约束部位的层概念并不清晰, 为了了解接地部位传递剪力的情况, 研究掉层结构接地部位的剪力分配很有必要。针对此问题, 文中将接地部位简化为上、下 2 个接地端, 其中上接地部位传递的剪力记为 V_s , 下接地部位传递的剪力记为 V_D , 上、下接地端传递的基底总剪力为 V , 上接地部位剪力比 λ , 具体阐述如下:

①基底总剪力 V ,其定义为上接地部位传递的剪力 V_s 与下接地部位传递的剪力 V_D 之和,为

$$V = V_s + V_D. \tag{1}$$

②上接地部位剪力传递比 λ ,其定义为上接地部位传递的剪力 V_s 与基底总剪力 V 的比值,为

$$\lambda = V_s/V. \tag{2}$$

根据规范^[16]规定,按 7 度、多遇地震作用和 IV 类场地对地震波进行选波和调幅,所选取的 2 条天然地震动(ITA00613、RSN6622)和 1 条人工地震动(ACC1)的加速度反应谱如图 4,所选地震波反应谱与目标反应谱具有较好的一致性。

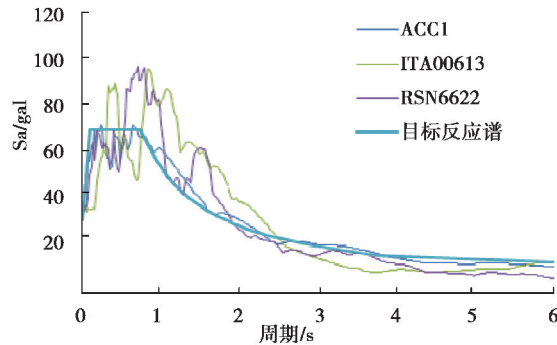


图 4 各地震波反应谱曲线

Fig. 4 Seismic wave response spectrum curve

根据时程分析,得到各模型在各条地震波输入下的上、下接地部位传递的剪力,按照前文定义,计算各算例模型上、下接地部位传递的剪力的平均值、基底总剪力及上接地部位剪力比,其汇总结果如表 2 所示。

表 2 基底总剪力及上接地部位剪力比汇总表

Table 2 calculation results of the base shear and upper ground part shear ratio

对应剪力及剪力比	地震波	D-2-1	D-2-2	D-4-1	D-4-2	D-6-1	D-6-2
V_s	ACC1	1 961.05	1 762.80	2 259.60	1 801.00	2 377.30	1 903.20
V_s	RSN6622	1 673.64	1 402.24	1 924.92	1 409.74	2 048.19	1 520.92
V_s	ITA00613	1 728.28	1 584.95	1 886.61	1 602.32	1 934.04	1 641.83
V_s	平均值	1 787.66	1 583.33	2 023.71	1 604.35	2 119.84	1 688.65
V_D	ACC1	640.72	885.70	385.44	866.50	248.49	733.93
V_D	RSN6622	656.92	933.42	400.11	913.55	265.56	782.95
V_D	ITA00613	469.91	800.33	317.15	765.35	240.13	712.61
V_D	平均值	589.18	873.15	367.57	848.47	251.39	743.16
基底剪力 V	平均值	2 376.84	2 456.48	2 391.28	2 452.82	2 371.23	2 431.81
λ	平均值	0.75	0.64	0.85	0.65	0.89	0.69

表 2 给出了多波输入下不同掉层层数和不同核心剪力墙嵌固位置时,各算例上、下接地端传递的剪力,并计算了平均值和上接地端剪力传递比。为进一步详细分析,图 4 给出了地震波输入下各接地部位传递剪力的对比图。

由图 5(a)可见,核心剪力墙嵌固位置一定时,随掉层层数增加,I、II 组算例模型上接地部位传递的剪力增大,下接地部位传递的剪力减小;当掉层层数相同时,I 组算例模型上接地部位传递的剪力大于 II 组算例模型,且随着掉层层数增多,差值增大。I 组算例模型下接地部位传递的剪力显著小于 II 组算例模型,且 I 组算例模型下接地部位传递的剪力随掉层层数增大,减小速率较快,降幅明显,由此表明,当核心剪力墙嵌固在下

接地端时,掉层部分刚度有所增大,但总体增大的程度有限,掉层层数对上、下接地部位传递的剪力影响程度亦有限。

图 5(b)给出了上接地部位传递的剪力占基底总剪力的比例,由图可见:I、II 组算例模型上接地部位传递的剪力占基底总剪力的比例均超过 60%。

且随掉层层数增加而增加,但核心剪力墙嵌固在下接地端的上接地部位传递的剪力的增长速率较平缓; I 组算例模型占基底总剪力的比例大于 II 组算例模型,且随层数增加,效果更明显,说明上、下接地部位传递的剪力分配极不均匀,上接地部位承担了基底总剪力中的绝大部分剪力,当核心剪力墙嵌固在下接地端时,能够一定程度上改善上、下接地部位剪力分布不均匀的情况,但是随着掉层层数的增大,通过核心剪力墙嵌固在下接地端的方式来改善剪力分布不均匀的效果逐渐变差,且付出的代价更大。

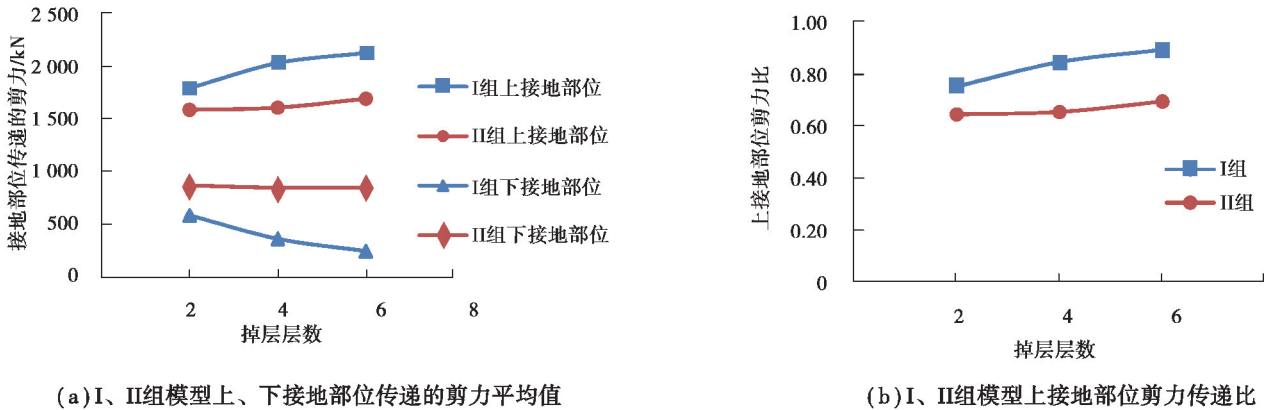


图 5 I、II 组模型上、下接地部位传递的剪力对比图

Fig. 5 Comparison of shear forces by the upper and lower ground parts of the I and II models

图 6 对比了核心剪力墙嵌固位置不同时,各算例模型多波输入下层间剪力平均值沿楼层的分布图。由图 6 可见,无论核心剪力墙嵌固于上接地端还是下接地端,不同掉层层数算例模型在上接地面 1 层以上的楼层层间剪力差别很小,且规律一致,因此,可认为核心剪力墙嵌固位置对上接地面 1 层以上的楼层剪力无影响;掉层部位的楼层层间剪力受核心剪力墙嵌固位置的影响较大,当核心剪力墙嵌固于上接地端时,掉层部位的楼层层间剪力显著小于核心剪力墙嵌固于下接地端的对应情况,这主要是由于核心剪力墙嵌固于上接地端时,上接地面结构刚度明显增长,水平地震作用产生的剪力主要经由上接地端传递。

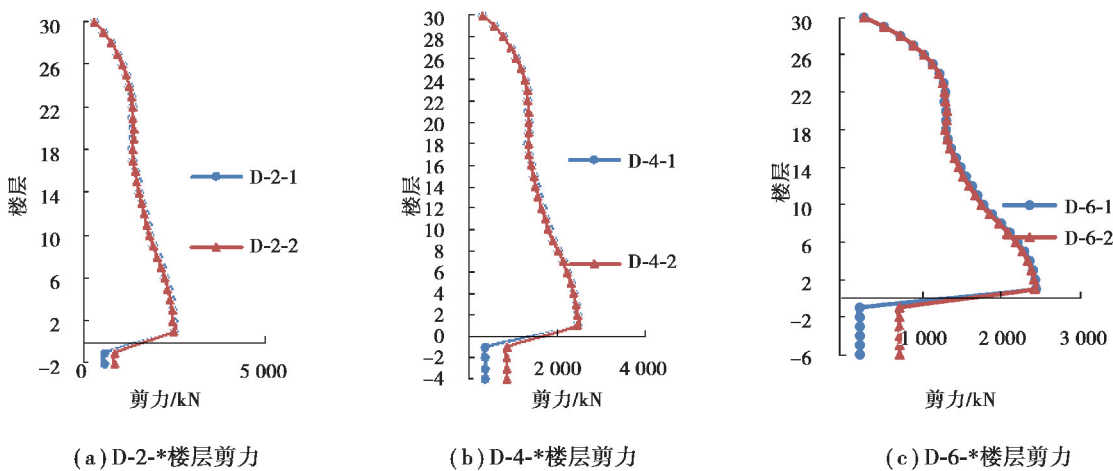


图 6 I、II 组模型的层间剪力沿楼层分布规律

Fig. 6 Story shear force of different models number

3 基于弹塑性的掉层框剪结构弹塑性抗震性能分析

弹塑性分析基于 Perform 3D 软件建立的 7 个算例模型进行,地震动输入的加速度峰值调整至罕遇地震水平,弹塑性时程分析的结果取各条波计算结果的平均值,主要分析核心剪力墙嵌固位置对结构抗震性能的影响。

表 3 给出了罕遇烈度下各模型上、下接地层剪力墙剪力之和占上、下接地层总剪力的比值。由表 3 可见,位于上、下接地层的剪力墙承担了 80% 以上的剪力,剪力墙可作为抗震的第一道防线;掉层层数增加,上、下接地层剪力墙剪力之和占上、下接地层总剪力比值减小。

表 3 上、下接地层剪力墙传递的剪力的比例
Table 3 Proportion of shear force t by the upper and lower ground shear walls

模型	上接地层剪力墙 剪力之和	占上接地层总 剪力比值/%	下接地层剪力墙 剪力之和	占下接地层总 剪力比值/%
D-2-1	6 259.17	83.51	1 965.43	93.24
D-2-2	6 087.87	81.90	4 524.03	93.72
D-4-1	6 195.00	82.75	1 310.46	87.88
D-4-2	6 046.60	81.46	3 977.87	93.41
D-6-1	6 219.67	82.85	1 334.70	86.72
D-6-2	6 067.50	80.86	4 801.67	92.56

图 7 给出了各模型剪力墙、框架柱层间剪力沿楼层的分布,各模型结构在罕遇地震作用下层间剪力分配规律与多遇地震作用下基本相同,核心剪力墙嵌固位置对上接地层 1 层以上的剪力墙、框架柱的层间剪力无影响。对于掉层部分,各模型结构框架柱层间剪力相差很小,在核心剪力墙嵌固位置一定时,随掉层层数增加,剪力墙的层间剪力在相同楼层处减小。

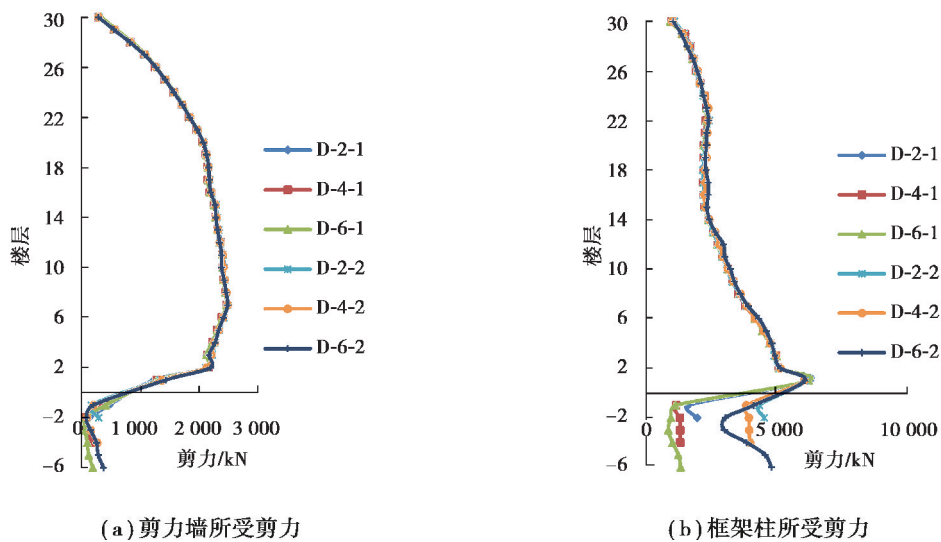


图 7 I、II 组模型剪力墙、框架柱的层间剪力对比

Fig. 7 shear forces of story between shear walls and frame columns of I and II models

由前文分析可以看出,在结构上、下接地层,剪力墙作为主要抗侧力构件,承担了 80% 以上的剪力,上接地层 1 层以上层间剪力受核心剪力墙嵌固位置影响很小,因此,在罕遇地震作用下,重点研究结构上接地 1 层、2 层及掉层部分剪力墙进入塑性的情况。

图 8 给出了上接地层剪力墙编号示意图,文中算例不考虑结构的扭转变形,且结构对称,因此,通过分析 A、B 轴线上的关键墙肢(Q1、Q2、Q3、Q4)的弹塑性性能,可总体把握结构的弹塑性性能。

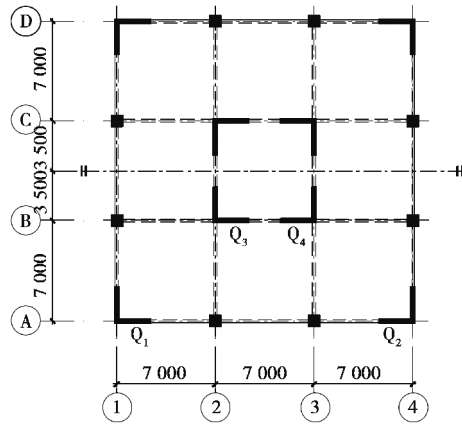
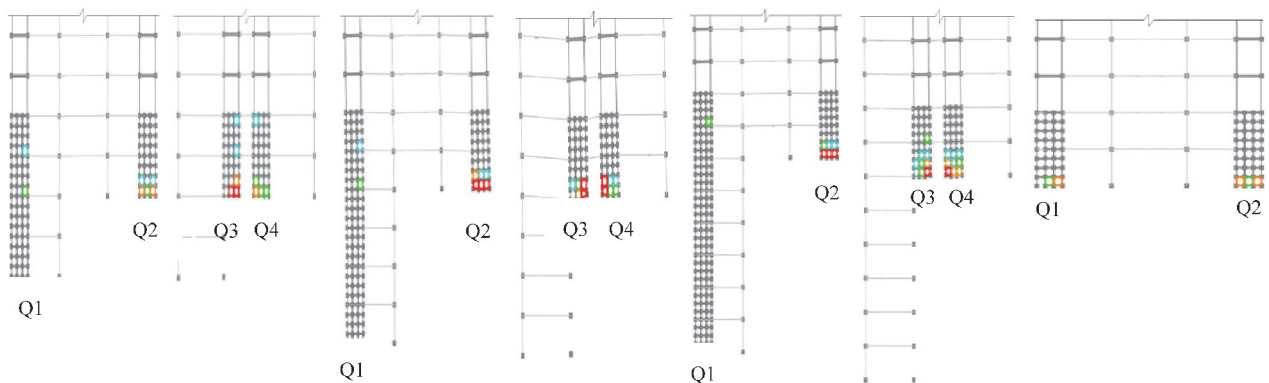


图 8 上接地层剪力墙编号示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the ground shear-wall

图 9 为各模型关键墙肢弹塑性应变图,图 10 为剪力墙在地震作用下的屈服程度。由图 9 可见,I 组模型各剪力墙中的薄弱位置一般位于上接地部位中的 Q3 剪力墙,随着掉层层数的增加,Q2、Q3、Q4 墙肢塑性程度增大,上部接地部位剪力墙进入塑性程度分布较为均匀;对于 II 组模型,Q1、Q3、Q4 剪力墙均未屈服,且掉层层数对其影响不大,上接地部位剪力墙中的薄弱位置在 Q2 处,且塑性变形很大(详见图 10),损伤程度远大于其余墙肢,说明当上接地部位只有少量剪力墙时,上接地剪力墙塑性变形集中,下接地部位剪力墙刚度得不到充分利用。对于平地模型,各剪力墙进入塑性程度较均匀,其中 Q1 进入塑性程度最大,大于 I、II 2 组算例模型,Q2 剪力墙则均小于掉层结构算例模型,而 Q3、Q4 进入塑性程度介于 2 组算例模型之间,上述结果表明,掉层结构上、下接地部位约束特性的差异,会导致结构上接地剪力墙进入塑性的程度增大,因此,设计中应重点关注上接地竖向构件的延性。

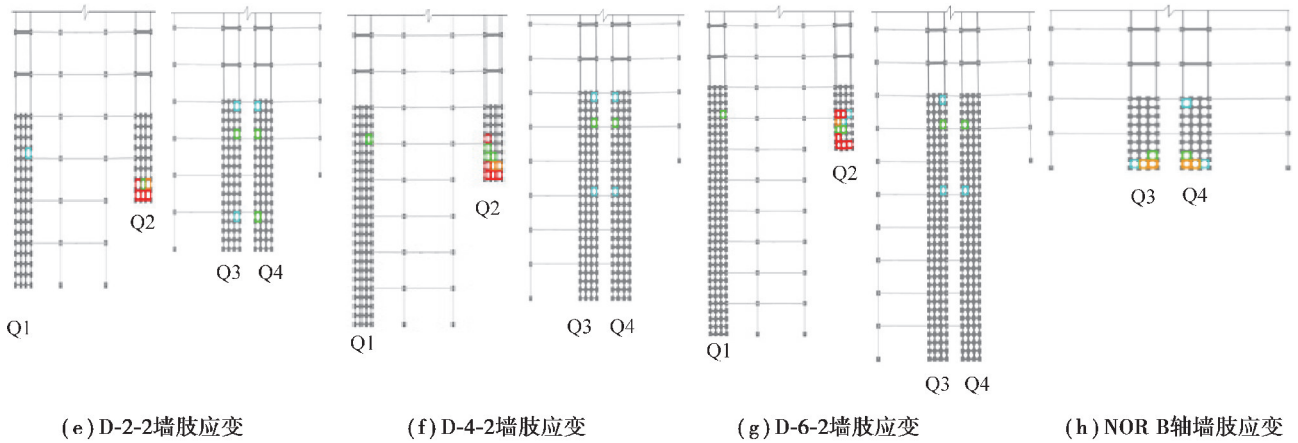


(a) D-2-1 墙肢应变

(b) D-4-1 墙肢应变

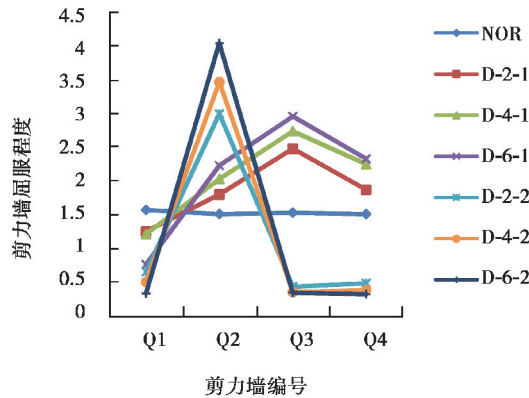
(c) D-6-1 墙肢应变

(d) NOR A 轴墙肢应变



注:剪力墙应变用 ϵ_w 表示,钢筋屈服应变用 ϵ_y 表示,蓝色墙体: $0.8\epsilon_y \leq \epsilon_w \leq 1.0\epsilon_y$;绿色墙体: $0.8\epsilon_y \leq \epsilon_w \leq 1.5\epsilon_y$ 橙色墙体: $1.5\epsilon_y \leq \epsilon_w \leq 2.0\epsilon_y$;红色墙体: $\epsilon_w > 2.0\epsilon_y$ 。

图 9 各模型罕遇地震作用下墙肢应变
Fig. 9 Distribution of shear wall strains of different models



注:屈服程度数值指剪力墙最大纤维应变与钢筋屈服应变的比值

图 10 剪力墙屈服程度
Fig. 10 Shell wall yielding degree

4 结 论

1)当核心剪力墙嵌固位置一定,随掉层层数增加,掉层框剪结构上接地部位传递的剪力占比增大,下接地部位传递的剪力占比相应减小;当掉层层数相同,核心剪力墙嵌固在上接地端时,上接地部位传递的剪力大于核心剪力墙嵌固在下接地端的情况,且随着掉层层数增多,差值增大。

2)当核心剪力墙嵌固在下接地端时,在一定程度上能够改善上、下接地部部位传递的剪力的不均匀性,当掉层层数较少时,掉层刚度相对较大,核心剪力墙的刚度贡献效果更明显;当掉层层数较多时,通过将核心剪力墙嵌固在下接地端的方式来改善剪力传递不均性的效果减弱,且需代价更大。此时,建议应选择将核心剪力墙嵌固在上接地端更合理。

3)当掉层结构上接地部位仅有少量剪力墙时,上接地剪力墙进入塑性程度很高,且塑性变形集中,上接地竖向构件损伤严重,设计中应重点关注此类构件的延性。

参考文献:

[1] 王丽萍. 山地建筑设计地震动输入与侧向刚度控制方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

- WANG Liping. Design ground motion input and control method of lateral stiffness for building structures on the slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.(in Chinese)
- [2] 伍云天, 林雪斌, 李英民, 等. 山地城市掉层框架结构抗地震倒塌能力研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 82-89.
WU Yuntian, LIN Xuebin, LI Yingmin, et al. Seismic collapse-resistant capacity of moment frames supported by stepped foundation in mountainous city[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 82-89.(in Chinese)
- [3] 徐刚, 李爱群, 陈素芳. 山地掉层框架结构地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 341-347.
XU Gang, LI Aiqun, CHEN Sufang. Seismic vulnerability analysis of moment frames supported by stepped foundation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 341-347.(in Chinese)
- [4] 韩军, 李英民, 唐格林, 等. 坡地掉层结构上接地支座形式对框架结构抗震性能的影响分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(S2): 93-100.
HAN Jun, LI Yingmin, TANG Gelin, et al. Influence of ground support types on the seismic performance of structures supported by foundations at different ground levels[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2): 93-100.(in Chinese)
- [5] 蒋欢军, 王斌, 吕西林. 提高钢筋混凝土剪力墙抗震性能的思想与方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 167-174.
JIANG Huanjun, WANG Bin, LU Xilin. Concepts and measures for improving seismic performance of reinforced concrete shear wall[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(2): 167-174.(in Chinese)
- [6] Wallace J W, Massone L M, Bonelli P, et al. Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): S281-S299.
- [7] Wallace J W. Behavior. Design and modeling of structural walls and coupling beams: Lessons from recent laboratory tests and earthquakes[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6(1): 3-18.
- [8] Telleen K, Maffei J, Heintz J. Template lessons for concrete wall design, based on studies of the 2010 Chile earthquake [C]//National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, United States, NCEE, 2012.
- [9] Kam W Y, Pampanin S, Elwood K. Seismic performance of reinforced concrete buildings in the 22 February Christchurch (Lyttelton) earthquake[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011, 44(4): 239-278.
- [10] Massone L M, Bonelli P, Lagos R, et al. Seismic design and construction practices for RC structural wall buildings [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): S245-S256.
- [11] 周颖, 吕西林. 智利地震钢筋混凝土高层建筑震害对我国高层结构设计的启示[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 17-23.
ZHOU Ying, LU Xilin. Lessons learnt from damages of reinforced concrete tall buildings in Chile Earthquake and revelations to structural design in China[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 17-23.(in Chinese)
- [12] Kim T, Foutch D A. Application of FEMA methodology to RC shear wall buildings governed by flexure[J]. Engineering Structures, 2007, 29(10): 2514-2522.
- [13] Rad B R, Adebar P. Seismic design of high-rise concrete walls: reverse shear due to diaphragms below flexural hinge [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(8): 916-924.
- [14] 吴广. 剪力墙布置形式对掉层框架剪力墙结构受力特性和抗震性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
WU Guang. Influence research on force characteristics and seismic performance of step-terrace frame shear wall structure with different shear-wall arrangement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.(in Chinese)
- [15] 张九荔. 楼层最小地震剪力系数在掉层结构设计中适用性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG Jiuli. Study on the applicability of minimum floor seismic shear coefficient to step-terrace structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.(in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)