

多台地掉层 RC 框架结构扭转效应及控制研究

韩军^{1,2}, 徐雯燕¹, 夏纯皇¹, 刘立平^{1,2}, 李英民^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 山地掉层结构考虑坡地开挖工程量、边坡稳定性等因素, 常需设置多个接地端, 导致结构平面和立面不规则, 扭转效应显著。为研究 3 个不等高接地端的多台地掉层钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 框架结构的扭转效应及控制措施, 通过拟静力试验和振动台试验结果验证了有限元模型的可靠性, 对建立的 16 个不同结构参数的有限元算例模型进行了弹性和弹塑性动力有限元分析, 研究了此类框架结构扭转效应受接地端跨数、总掉层数、中接地端掉层数等因素的影响程度; 通过算例分析对比了不同扭转控制措施的效果。研究表明: 弹性状态下, 3 台地掉层 RC 框架结构在中接地层和上接地层处扭转效应显著, 总体扭转效应小于对应的 2 台地掉层 RC 框架结构; 而当结构进入弹塑性状态后, 通过降低结构掉层部分长度在顺坡向总长度上的占比, 可有效缓解结构的扭转效应; 在 3 台地掉层 RC 框架结构中设置水平接地构件、钢支撑和黏滞阻尼器均能改善扭转效应, 对于岩质边坡, 设置水平接地构件对各扭转效应指标的改善最好。

关键词: 掉层 RC 框架结构; 多台地; 有限元分析; 扭转效应; 抗扭设计

中图分类号: TU4

文献标识码: A

Research on the torsional effect and control of RC frame structure with multiple different elevations

HAN Jun^{1,2}, XU Wenyan¹, XIA Chunhuang¹, LIU Liping^{1,2}, LI Yingmin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: Considering factors such as slope excavation quantity and slope stability, RC frame structures supported by foundations with different elevations (FSSFDEs) often occur, resulting in irregular structures and significant torsion. To study the torsional effects and corresponding control measures for FSSFDEs, the reliability of the finite element model was verified using pseudo-static tests and shaking table tests. Sixteen finite element models with varying structural parameters were analyzed using both elastic and elastoplastic dynamic finite element analysis. The study examined the influence of factors such as the total number of dropped stories, the number of spans and the number of dropped stories at the intermediate ground embedding end, and the number of spans at the upper ground end on the torsional effects of the structures. Additionally, the effectiveness of different torsional control measures was compared through case analysis. The main conclusions are as follows: In the elastic state, the torsional effect of RC frame structures with three different ground elevations is significant in the stories at the intermediate and upper ground ends, and it is smaller than that of structures with two different ground elevations. In the plastic state, it is beneficial to improve the torsional effect of the structure by decreasing the size ratio of the part under upper embedding end corresponding to the overall structure. Setting up horizontal grounding components, steel support or viscosity damping in the RC FSSFDEs can improve the torsion resistance. Setting up horizontal grounding

收稿日期: 2023-09-19; 修回日期: 2023-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51638002); 重庆市建设科技项目 (城科学 2021 第 1-5)

作者简介: 韩军 (1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震研究。E-mail: hanjun009@126.com

components provides the best improvement on torsion effects for structures on rock slope.

Key words: RC frame structure supported by foundations with different elevations (FSSFDE); multiple different elevations; finite element analysis; torsional effect; torsion resistance design

0 引言

掉层结构是山地建筑中最广泛应用的结构类型。相较常规结构,掉层结构在结构上具有明显的不规则性,内力分布和形变特征也明显不同,这很大程度上是底部嵌入高度不同引起的。接地层的竖向构件具有较大的抗侧刚度,引发了结构偏心现象,显著增强了结构在地震作用下的扭转效应。同时上接地构件分配的地震剪力大导致破坏严重,需对山地掉层结构的扭转效应及抗震性能进行研究。

目前已有学者对 2 台地掉层结构的扭转效应、抗震性能和控制措施等进行了研究。李英民等^[1]对扭转效应的研究发现结构的扭转非线性反应受弹性最大层间位移角的控制最为明显。刘立平等^[2]指出位移比适用于不等高接地框架结构扭转效应的判别。唐洋洋等^[3]建议,掉层结构的扭转效应可用单一楼层刚度中心的偏心率量化。相关研究表明,山地掉层结构与普通框架结构相比,由于上接地层柱具有更大的侧向刚度,承担更大的水平地震作用,掉层框架结构的破坏模式通常表现为上接地端柱率先发生破坏,成为结构的薄弱部位。这种破坏模式也是掉层框架结构在地震作用下的主要破坏模式^[4-7]。为改善上接地端震害严重的问题,韩军等^[8]指出当掉层部分跨数较多,上接地柱采用隔震支座或滑动支座时,掉层结构表现出良好的抗震性能;刘流等^[9]采用了一种基于割集理论的失效模式评估方法,进行了偏于安全的掉层结构抗倒易损性分析。在山地掉层结构的实际设计中,现有研究^[10-18]表明,设置水平接地构件、合理布置钢支撑和金属阻尼器、对竖向构件加强配筋等措施能提高掉层框架的总体抗震性能。此外,因山地结构和边坡存在复杂的相互作用,王一功等^[19]研究了岩质场地和土质场地对多层接地框架的受力情况和破坏形式的不同影响;陈欣等^[20]针对山地结构桩基与土质边坡的相互作用,认为底部在滑动面下的桩基对边坡抗滑移有利。

上述研究均针对 2 个不等高接地端的掉层结构。在实际工程中,场地内可能存在较大高差,受开挖工程量、边坡稳定性和其他因素影响,通常会存在 3 个或更多不等高的接地端,而此类框架结构的扭转效应可能与 2 接地端框架结构显著不同。因此,研究具有 3 个不等接地端的多台地掉层钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 框架结构的扭转效应变得尤为重要,并基于研究提出改进措施,为设计提供参考。

基于有限元模型实验验证,本文设计了不同的多台地掉层 RC 框架结构算例模型进行有限元分析,比较了掉层 RC 框架在不同结构状态(弹性、弹塑性阶段)下的扭转效应,阐明了不同结构参数(如掉层总数和接地端跨数)对结构扭转效应的影响,并提出了一系列抗扭措施。

1 有限元模型及验证

1.1 有限元模型建立

本文使用 SAP2000 分析软件建立掉层框架结构算例模型,框架混凝土采用 Mander 本构模型,钢筋采用三折线本构模型^[21]。为研究框架结构屈服及屈服后的行为,在梁和柱两端分别设置塑性铰,位置设置在构件总长度 10%和 90%的位置上。此外,采用 Hilber-Hughes-Taylor 数值积分方法进行弹塑性时程分析,隐式求解结构的运动微分方程。

选取在重庆大学土木工程学院结构实验楼完成的 1:4 缩尺掉层框架结构拟静力试验^[22]和 1:8 缩尺掉层框架结构振动台试验^[17]进行有限元模型验证。通过对拟静力试验的对比,验证模型能否准确地模拟结构在低周往复荷载下的受力行为,同时对数值模型的材料本构、单元和参数设置等合理性进行验证;并与振动台试验进行对比,验证有限元模型的动力响应,进一步说明有限元建模的合理性与准确性。

1.2 拟静力试验模拟

采用 5 层 3 跨、掉层为 2 层 1 跨的拟静力试验对有限元模型进行验证,如图 1 所示。模型各层高度为 750 mm,跨度均为 1500 mm,梁截面尺寸为 100 mm×150 mm,柱截面尺寸为 150 mm×150 mm。混凝土强度 C30,纵筋为 HRB400,箍筋为 HRB335。试验过程中,模型在恒定轴压力下,采用位移控制的水平低周往复加

载制度。框架柱所承受的荷载分别为 $P_1 = 5 \text{ kN}$, $P_2 = 10 \text{ kN}$, $P_3 = 9.3 \text{ kN}$ 和 $P_4 = 4.7 \text{ kN}$ 。水平载荷的加载过程中,顶层和第3层始终保持 2:1 的位移比。通过对比掉层 RC 框架结构低周往复加载的试验结果与模拟结果,得到了滞回曲线的对比图,如图 2 所示。对比试验和模拟中低周往复载荷作用下掉层 RC 框架结构的滞回曲线可知,其水平推力峰值为 100 kN 左右。在模拟中,滞回曲线的捏缩效应更不显著,但与试验结果整体吻合得较好,验证了有限元模拟方法的可靠性。



图 1 拟静力试验 1/4 缩尺模型

Fig. 1 1/4 scale model for pseudo-static test

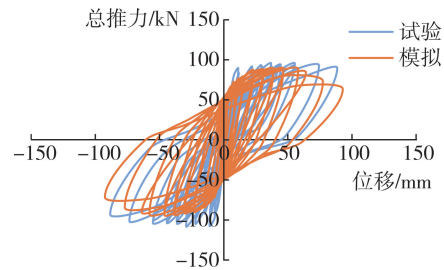


图 2 滞回曲线对比

Fig. 2 Comparison of hysteresis curves

1.3 振动台试验模拟

振动台试验中的掉层结构模型共 6 层,沿顺坡向设置 3 跨、横坡向设置 2 跨,掉层设计为 2 层 1 跨,如图 3 所示。模型每层高 375 mm,每跨 750 mm,采用混凝土整体浇筑方法,立方体抗压强度 8.9 MPa,弹性模量 9900 MPa,引入镀锌铁丝以代替 HRB400 钢筋。

试验中共选取 4 条地震波加载,如表 1 所示。加载方向以顺坡向为主方向,顺坡向、横坡向按 1:0.85 的比例双向加载,过程中逐级增大峰值加速度。



图 3 振动台试验 1/8 缩尺模型

Fig. 3 1/8 scale model for shake table test

表 1 地震波信息

Table 1 Information of earthquake waves

地震时间	地震发生地点	震级	台站信息	PGA/(cm/s ²)
2008 年 5 月	Wenchuan	8.0	051CXQ	167
2008 年 6 月	Iwate-Miyagi Nairiku	6.9	Kami Miyagi Miyazaki City	153
1994 年 1 月	Northridge	6.7	Fairview Ave, El Monte	123
1952 年 7 月	Kern County	7.3	Taft Lincoln School Tunnel	176

掉层 RC 框架结构振动台试验实测结构横坡向、顺坡向一阶自振周期分别为 0.177 s 和 0.148 s,数值模拟结果分别为 0.185 s 和 0.159 s,模拟与试验结果基本吻合,动力特性相似。有限元模型在地震波作用下部分工况的层扭转角、顶层位移与试验模型数据见表 2 与表 3。在弹性阶段单向加载时误差在 3% 以内,双向地震动输入时误差为 2.3% ~ 10.9%。工况 33 下结构的位移角约为 1/72,已经进入了较强的非线性,误差最大在 25% 以内。天然波 2 加载(工况 24)有限元模型顶层位移时程曲线与试验值对比结果见图 4。由图可知,对于顺坡向与横坡向,模拟与试验得到的时程曲线的趋势和幅值相近,因此可以认为,有限元分析模型能够有效模拟掉层结构在地震作用下的响应特性。

表 2 掉层框架结构扭转角对比

Table 2 Comparison of torsional angles of FSSFDE

地震强度		最大层扭转角 /($\times 10^{-3}$ rad)	楼层
0.12 g	计算值	2.12	6
	实验值	2.38	5
0.33 g	计算值	5.35	6
	实验值	6.94	6

表 3 掉层框架顶层位移对比

Table 3 Comparison of top floor displacements of FSSFDE

工况	天然波 2	x 向顶层位移			y 向顶层位移		
	加载方向	计算值/mm	试验值/mm	误差/%	计算值/mm	试验值/mm	误差/%
10	x 单向	1.30	1.34	2.9	—	—	—
11	y 单向	—	—	—	1.99	2.03	1.9
12	xy 双向	1.46	1.64	10.9	1.69	1.73	2.3
13	yx 双向	1.28	1.57	18.5	1.67	2.16	22.7
24	xyz 三向	1.49	1.56	4.5	1.65	2.17	23.9
25	yxz 三向	1.30	1.32	1.5	1.70	1.69	0.6
33	xyz 三向	4.71	5.22	24.3	5.21	6.83	23.7

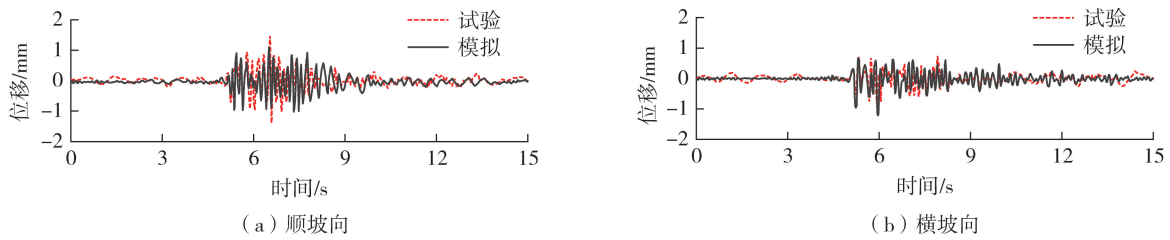


图 4 工况 24 顶层位移时程结果对比

Fig. 4 Comparison of top displacement time-history results in test condition 24

2 算例设计

2.1 模型概况

为研究 3 台地掉层 RC 框架在不同结构状态(弹性、弹塑性阶段)下的扭转效应及对应控制方法,分析上接地端跨数、中接地端跨数、中接地端掉层数以及总掉层层数等多个设计参数对该类结构扭转效应的影响规律,设计了 16 个不同算例模型进行动力时程分析。

各个算例的命名规则为 $DxKy-DxKy-FxKy$, 其中, D 为掉层数, K 为跨数, F 为上接地端以上楼层数。以 3 台地掉层框架结构 D6K3-D3K3-F4K4 为例,表示上接地端以上部分为 4 层 4 跨、第 1 台和第 2 台均掉 3 层 3 跨的三接地端结构,如图 5 所示。

算例模型的抗震设防烈度为 7 度 ($0.15g$), 场地类别为 II 类, 设计地震分组为第 2 组, 结构阻尼比为 0.05, 特征周期为 0.40 s, 为标准抗震设防类建筑。模型框架混凝土强度等级为 C30, 主筋 HRB400, 箍筋 HPB300, 沿 X 向 10 跨, Y 向 5 跨, 柱距 6 m×6 m, 层高 3.3 m, 板厚 100 mm, 梁截面尺寸 250 mm×600 mm。模型柱截面尺寸见表 4。

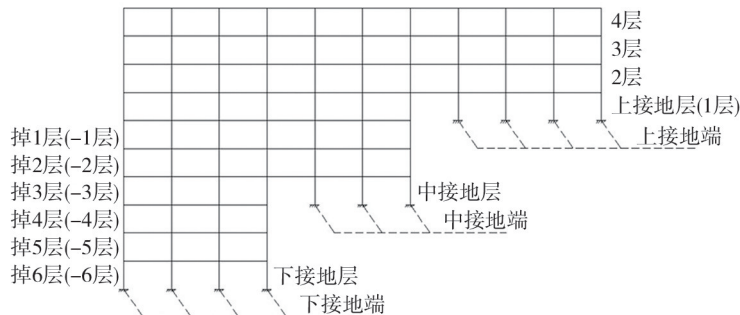


图 5 掉层 RC 框架结构命名规则

Fig. 5 Naming rule of FSSFDE

表4 模型命名及截面尺寸

Table 4 Naming and cross-sectional dimensions of models

算例编号	命名	柱截面尺寸/mm
A1	D4K6-F4K4	550(1)/600(1)
A2	D4K4-D2K2-F4K4	550(1)/500(1)/550(1)
A3	D4K3-D2K3-F4K4	550(1)/500(1)/550(1)
A4	D4K2-D2K4-F4K4	550(1)/500(1)/550(1)
B1	D6K6-F4K4	600(1~3)/500(1)/700(1),600(2)
B2	D6K4-D3K2-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
B3	D6K3-D3K3-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
B4	D6K2-D3K4-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
C1	D8K6-F4K4	650(1),600(2~5)/500(1)/700(1),600(2)
C2	D8K4-D4K2-F4K4	650(1),600(2~4)/600(1)/700(1),600(2)
C3	D8K3-D4K3-F4K4	650(1),600(2~4)/600(1)/700(1),600(2)
C4	D8K2-D4K4-F4K4	650(1),600(2~4)/600(1)/700(1),600(2)
D1	D6K3-D2K3-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
D2	D6K3-D3K3-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
D3	D6K3-D4K3-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
E1	D6K3-D3K3-F4K2	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
E2	D6K3-D3K3-F4K3	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)
E3	D6K3-D3K3-F4K4	600(1~3)/600(1)/700(1),600(2)

注:算例模型 B3、D2、E3 为同一模型;算例层间位移角均符合规范限值,抗震等级为二级,基本周期在 0.7128~0.8694 s 之间;柱截面尺寸 550(1)/500(1)/550(1) 意为下接地端柱 550 mm,中接地端柱 500 mm,上接地端柱 550 mm;650(1),600(2~4)/600(1)/700(1),600(2) 意为下接地端以上 4 层 650 mm(1 层),600 mm(2~4 层),中接地端 600 mm(1 层),上接地端以上 700 mm(1 层),600 mm(2 层);其余未注明柱截面尺寸均为 500 mm。

2.2 地震波选取

按双频段选波法选择 7 条地震波,包括 5 条天然波,2 条人工波,所选地震波信息见表 5,反应谱平均值与设计反应谱对比如图 6 所示。输入多遇地震和罕遇地震时,将 7 条地震波的 PGA 按 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[23] 分别调幅至 55、310 cm/s^2 。文中给出的结果为 7 条地震波取平均值后的结果。对三维掉层框架结构进行双向地震动输入动力时程分析。

表5 地震波信息

Table 5 Seismic wave information

编号	台站信息	方向	PGA/(cm/s^2)	持时/s
USA00707	洛杉矶比弗利大道	N31W	107.7	38.92
USA00721	洛杉矶威尔榭大道	NORTH	153.6	41.92
USA01975	索尔顿湖野生动物保护区	UP	473.6	39.12
USA02593	加州布劳雷机场	315	216.5	37.89
USA02619	埃尔森特罗布罗克曼路	140	138.6	39.07
ACC1			310.0	40.00
ACC2			310.0	40.00

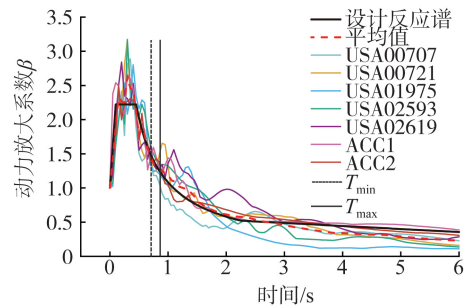


图6 地震波反应谱

Fig. 6 Response spectrum of the seismic waves

3 多台地掉层 RC 框架结构扭转效应

3.1 多台地掉层 RC 框架结构弹性扭转效应

限于篇幅,图 7 仅列出了掉层为 6 层的算例模型 B1 和 B3 在多遇地震作用下各层的扭转效应。掉层为 4 层、8 层时其扭转效应规律与掉层为 6 层时规律相似。

在量化结构扭转特性时,常用层间扭转角指标。对于掉层框架结构,接地层包含了柔性边和刚性边层间扭转角,分别对应非接地部分和接地部分,其中,柔性边层间扭转角可由某层与下一层的扭转角之差来表示,刚性边层间扭转角等同于接地层扭转角。考虑到楼板视为刚体,除中、上接地层外,其余各楼层的层间扭转角均保持一致。

3 台地掉层 RC 框架结构的层间扭转角在上接地层、中接地层处达到最大值,扭转效应在中接地层、上接地层处最为显著。接地层刚性边层间扭转角明显大于柔性边层间扭转角。相较于 2 台地掉层框架结构,

3 台地掉层框架结构上接地层刚性边、柔性边层间扭转角分别减小了 19.9%、3.6%,3 台地掉层框架结构的掉层部分占总结构的比例较小,结构偏心率减小,扭转效应减小。

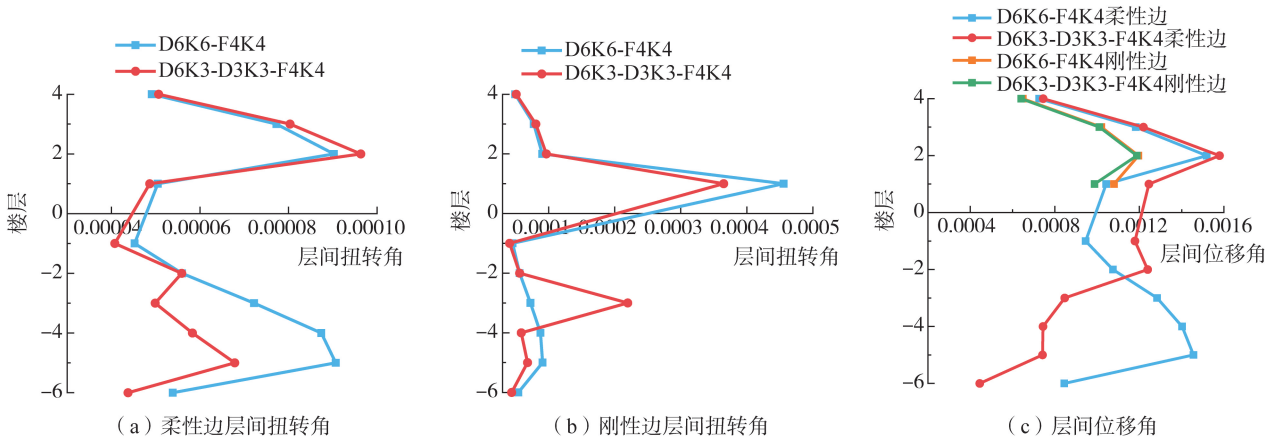


图 7 掉 6 层结构的扭转效应

Fig.7 Torsional effect of structures with 6 floors under upper embedding end

3.2 多台地掉层 RC 框架结构弹塑性扭转效应

3.2.1 中接地端跨数对掉层结构扭转效应的影响

选用 A1、A2、A3、A4(总掉层数为 4 层);B1、B2、B3、B4(总掉层数为 6 层);C1、C2、C3、C4(总掉层数为 8 层)共 3 组 12 个算例模型。每组的模型掉层部分总跨数与上接地端跨数不变,改变中接地端跨数。

图 8 给出了罕遇地震作用下不同算例模型的层间扭转角。2 台地掉层框架结构与 3 台地掉层框架结构的层间扭转角变化趋势基本相同,柔性边最大层间扭转角大都出现在下接地层上一层。相较于 2 台地掉层框架结构,掉 4 层、6 层、8 层的 3 台地掉层框架结构上接地层刚性边层间扭转角分别减小了 28.4%、3.8%、26.4%。当总跨数一定时,中接地端跨数设置越多,掉层结构的偏心率减小,使得中接地层及以下楼层的柔性边层间扭转角和上、下接地层刚性边层间扭转角均会减小,扭转效应得到改善。

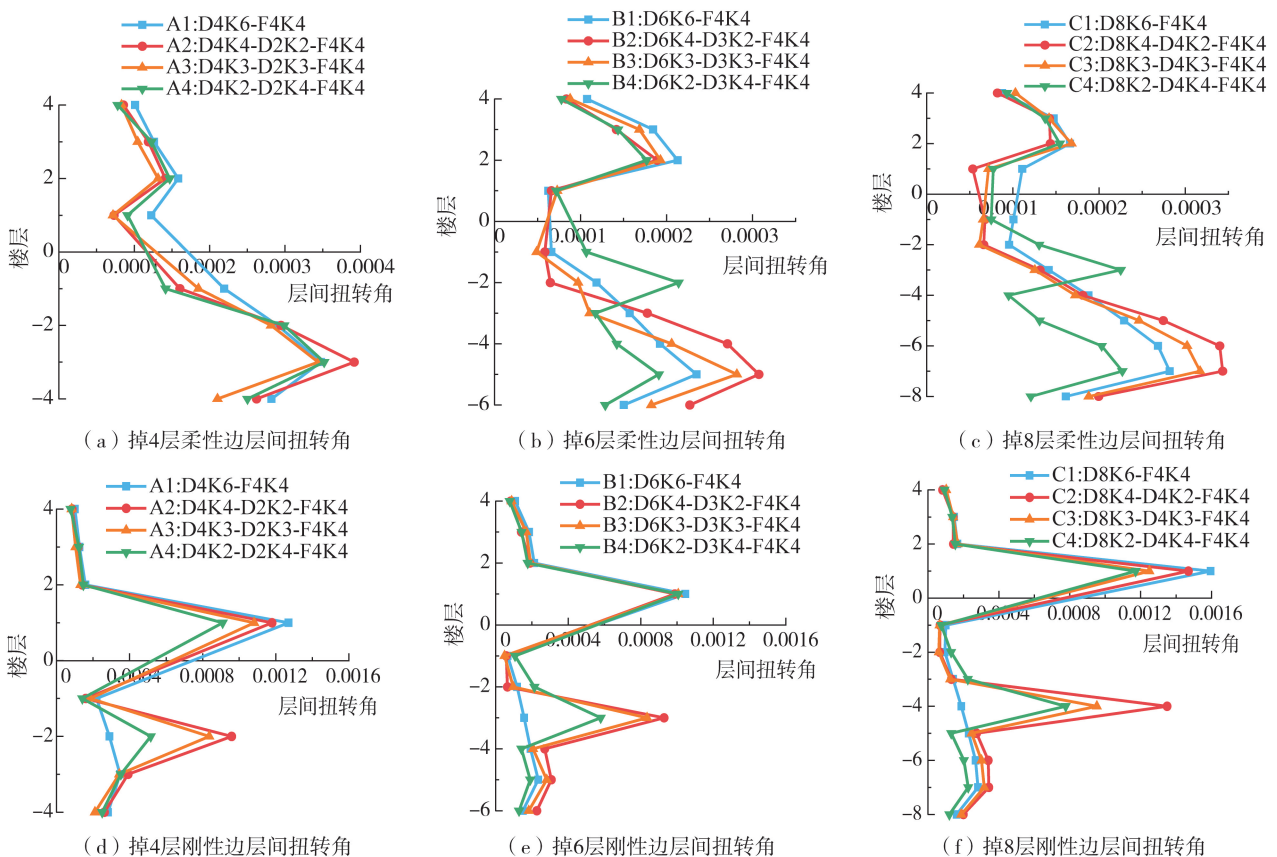


图 8 不同模型层间扭转角

Fig.8 Inter-story torsional angle of different models

图9给出了在罕遇地震作用下不同算例模型的层间位移角。3台地掉层框架结构相较于2台地掉层框架结构,随中接地端跨数增加,下接地层至中接地层的楼层层间位移角减小,中接地层至上接地层上一层的楼层层间位移角增大,其余楼层层间位移角变化趋势基本不受中接地端跨数的影响。中接地端跨数越多,中接地层部分刚度变大,分配的剪力进一步增加,导致在罕遇地震作用下塑性发展程度较大,层间位移角增大。相较规范中结构在弹塑性状态下的层间位移角限值(0.02)相比,各算例模型均有一定安全冗余。

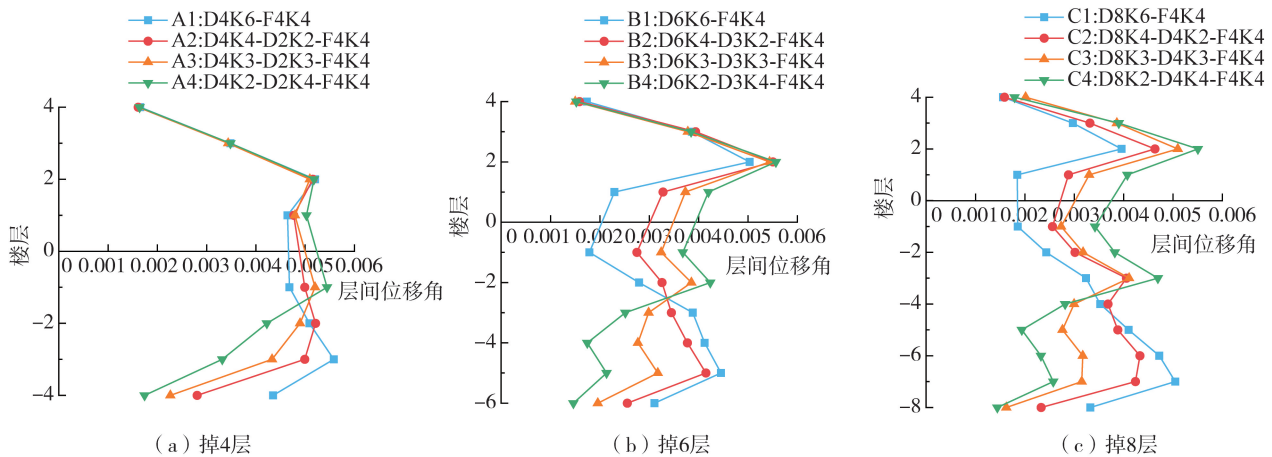


图9 不同模型层间位移角

Fig. 9 Inter-story drift angles of different models

3.2.2 总掉层数对掉层结构扭转效应的影响

本节对比了不同总掉层数的掉层框架结构在弹塑性状态下的扭转效应,在中接地端跨数相同的情况下,选用了4组共12个模型:A1-B1-C1、A2-B2-C2、A3-B3-C3和A4-B4-C4,分别对应不同的中接地端跨数(0、2、3、4),分析了总掉层数为4层、6层、8层时的3台地掉层框架结构的地震响应。

由图10可知,随总掉层数的改变,对于接地层刚性边层间扭转角。大部分模型呈先减小后增大的趋势。而2台地掉层结构的研究结果表明^[24-25],结构扭转效应随掉层数的增加而增大。对于4层掉层结构,其所掉的层数相对较少,故上接地端所受的地震作用相对较小。因此,在设计时上接地端柱的截面尺寸和配筋也相应较小,在一定程度上减弱了结构的扭转效应。

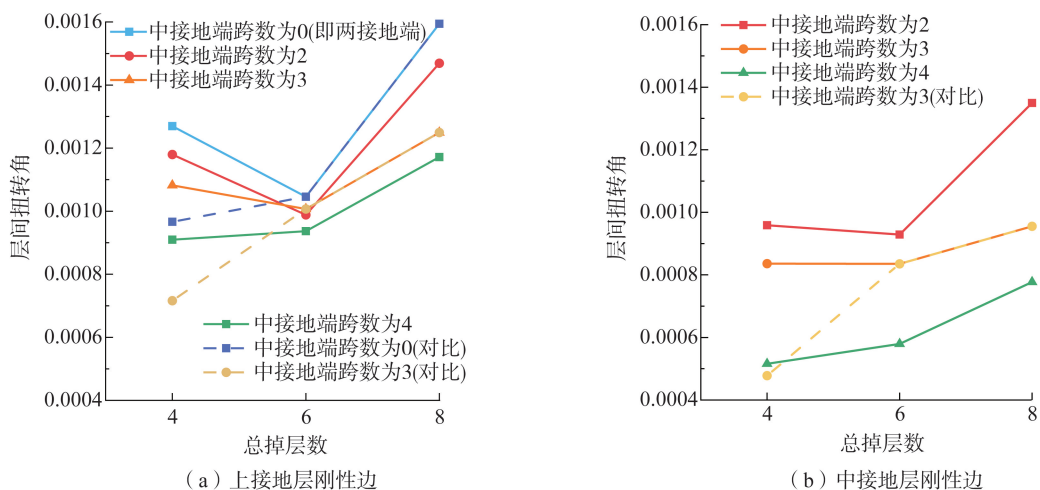


图10 接地层刚性边层间扭转角

Fig. 10 Inter-story torsional angle of the rigid side of the embedding story

对原设计掉4层框架结构的接地端柱,采取增大截面尺寸并调整配筋与掉6层框架结构的相同。改进后的模型层间扭转角和层间位移角如图11所示。此时,随着总掉层数的逐步增加,掉层部分的层间扭转角和层间位移角也呈现出逐渐增大的趋势。扭转指标在掉层部分明显减小。当框架结构柱截面及配筋相同时,掉层结构扭转效应随掉层数的增加而增大。

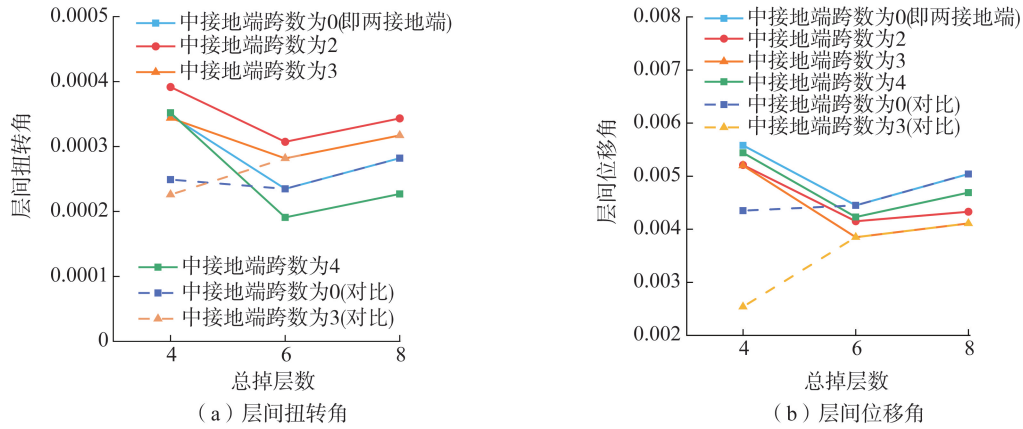


图 11 掉层部分最大层间扭转角、层间位移角

Fig. 11 The maximum inter-story torsional angle and inter-story drift angle of the part under upper embedding end

3.2.3 中接地端掉层数对掉层结构扭转效应的影响

选取 D1、D2、D3 共 3 个模型,在掉层部分和上接地部分跨数不变时,研究中接地端掉层数对 3 台地掉层框架结构弹塑性扭转效应的影响。图 12 给出了 D1~D3 模型的层间扭转角和位移角,对于不同的中接地端掉层数,层间扭转角均有相近的变化趋势,接地层刚性边的层间扭转角最大。当掉层框架结构的总层数与上接地部分的层数一定时,中接地端掉层数由掉 2 层增加至掉 4 层时,掉层部分在总体结构中占比增大,上接地层偏心率增大,上接地层刚性边层间扭转角分别为 0.000 83、0.001 01、0.001 13,中接地层刚性边层间扭转角分别为 0.000 83、0.000 84、0.000 87,刚性边层间扭转角增大,掉层部分的扭转效应没有明显的变化。

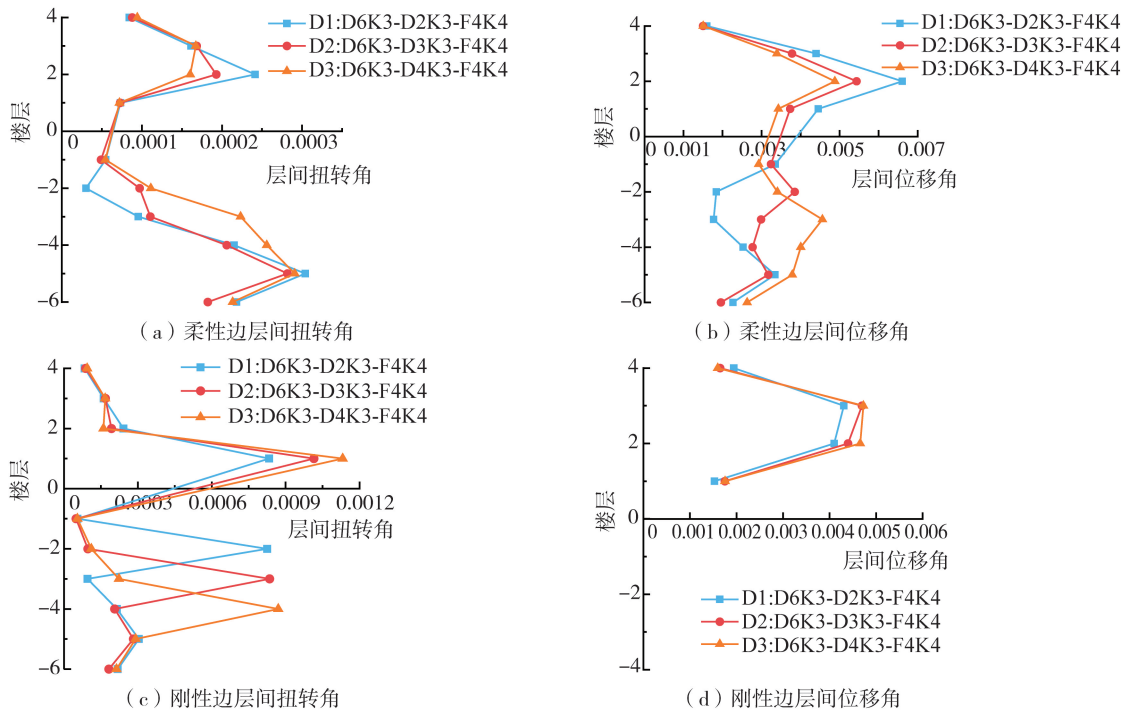


图 12 D 组掉层结构的扭转效应

Fig. 12 Torsional effect of D Group RC FSSFDE

3.2.4 上接地端跨数对掉层结构扭转效应的影响

选取 E1、E2、E3 共 3 个模型,当结构掉层部分相同时,研究上接地端跨数对 3 台地掉层 RC 框架结构弹塑性扭转效应的影响。图 13 给出了 E1~E3 算例模型的层间扭转角和层间位移角。当上接地端跨数由 2 跨增加至 4 跨时,上接地层处刚性边层间扭转角减小了 35.3%。柔性边扭转角在中接地上层差距最大,E3 仅为 E1 的 29.8%。上接地层及以下部分的扭转指标呈减小趋势;上接地层以上楼层的各指标略微增加。当掉层部分跨数不变,随上接地端跨数的增加,结构的顺坡向掉层部分尺寸与总尺寸的比值减小,结构偏心率减小,有利于改善结构的扭转效应。

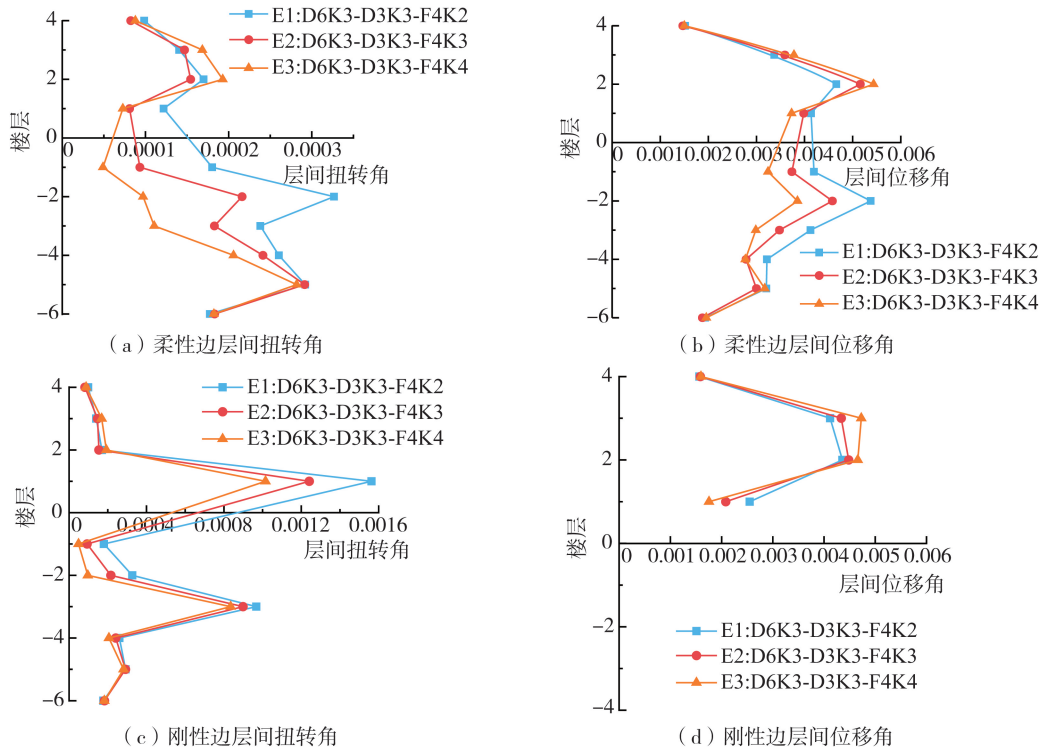


图 13 E 组掉层结构的扭转效应

Fig. 13 Torsional effect of E Group RC FSSFDE

3.2.5 填充墙对掉层框架扭转效应的影响

在抗震分析中,填充墙通常被视为非结构构件,其对结构抗震性能的影响经常被忽视。然而,填充墙的存在可能改变结构体系的质量、刚度分布等,也可能对主体结构构件的局部约束条件产生不利影响。为探讨填充墙对多台地掉层框架结构扭转效应的影响,选取 B3 模型,沿其顺坡向与横坡向设置填充墙(表 6),填充墙采用等效斜压杆模型^[26]。

模型层间位移角与层间扭转角见图 14。沿顺坡向设置填充墙会增大上接地层及以上楼层的层间扭转角,

但上接地层以下楼层扭转效应减小。沿横向布置填充墙会降低上接地层及以上楼层的层间扭转角和层间位移角,中接地掉层部分的层间扭转角会略微增大,但层间位移角仍小于未布置填充墙的框架结构。总的来说,在实际工程中有横向均布布置填充墙约束的多台地掉层框架结构较未考虑填充墙影响时扭转效应减弱。

表 6 结构填充墙布置位置

Table 6 Arrangement location of the structural infill wall

模型编号	填充墙布置位置	布置数量/道
B3	未布置	0
B3-S2	顺坡向最外侧	2
B3-H2	横坡向最外侧	2
B3-H4	横坡向均匀布置	4
B3-SH6	顺坡向最外侧	2
	横坡向均匀布置	4

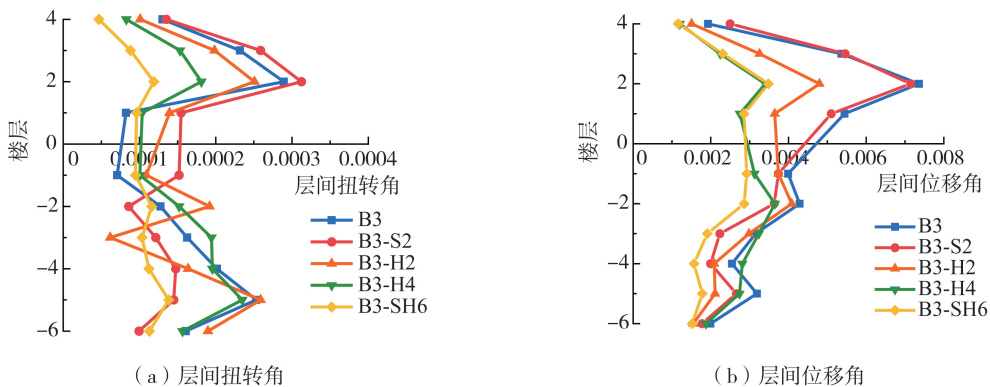


图 14 布置填充墙的掉层结构的扭转效应

Fig. 14 Torsional effect of RC frame structure with infill wall supported by different elevations foundations

4 多台地掉层框架结构扭转控制措施

4.1 扭转控制措施

1) 设置水平接地构件

为增加掉层结构横坡向的侧向刚度,限制其在地震作用下的扭转响应,在掉层的上、中接地端的水平位置设置了和岩质边坡固接的接地构件,模型 B3-1 见图 15。

2) 设置钢支撑

在结构的适当位置设置钢支撑,以提升其整体刚度,并使刚度分布更均衡,从而减小结构整体的扭转效应。在模型 B3 中采用了两种钢支撑布置方案:模型 B3-2 采用自底层至上接地层上一层的双向支撑布置,模型 B3-3 则采用自底层至顶层的双向支撑布置。钢支撑均采用方管截面设计,选用 Q235 钢,截面外边长 180 mm、壁厚为 5 mm。模型 B3-3 的钢支撑布置立面图见图 16,模型 B3-2 的支撑布置方式与图 16 相同,仅在布置层数上有差异。

3) 设置黏滞阻尼器

黏滞阻尼器是一种速度相关的能量耗散装置,可在不增加结构刚度的情况下提供附加阻尼,显著降低地震作用。在地震作用下,掉层结构的柔性边可能产生显著的位移,而刚性边则因其接地端的刚度较高而位移较小。通过在柔性边安装黏滞阻尼器,可以有效耗散能量、减少振动,并缩小柔性边与刚性边之间的位移差,进而达到限制掉层结构扭转效应的目的。在模型 B3 上布置基于 Maxwell 模型的黏滞阻尼单元,非线性连接属性设定为 amper-Exponential。经初步计算,确定阻尼系数 $C = 2\,000 \text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})$,刚度 $K = 10^6 \text{ kN}/\text{m}$,阻尼指数 $\alpha = 0.4$ 。设计了 2 种模型方案:B3-4 模型采用自底层至上接地层上一层的黏滞阻尼器双向布置,而 B3-5 型则从底层至顶层双向布置黏滞阻尼器。B3-4 和 B3-5 模型的阻尼器布置位置与 B3-2 和 B3-3 模型的相同。

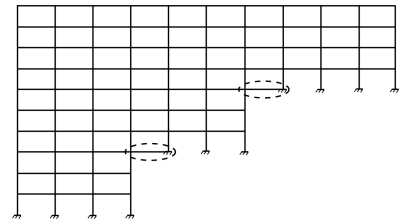


图 15 模型 B3-1 简图

Fig. 15 Diagram of model B3-1

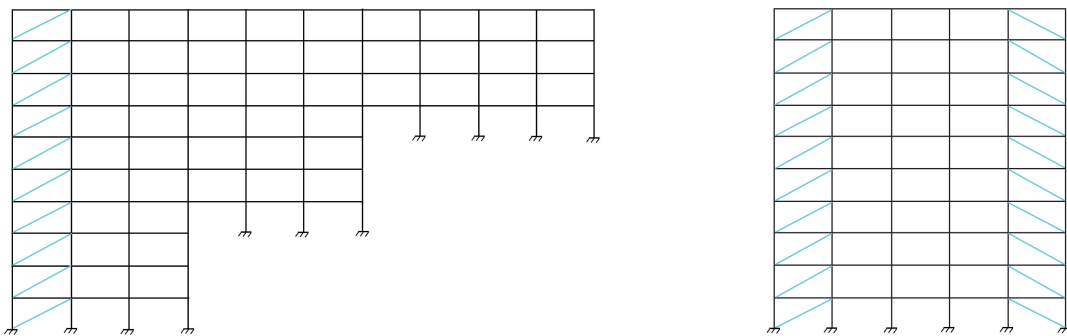


图 16 模型 B3-3 立面图

Fig. 16 Elevation view of model B3-3

4.2 扭转效应控制效果对比

对模型结构分别进行 Pushover 弹塑性静力分析^[27]和时程分析,图 17、图 18 给出了设置抗扭措施的算例模型层间扭转角及层间位移角在罕遇地震作用下随楼层变化规律。3 种扭转控制措施均能有效限制结构的扭转,其中,中接地层的刚性边层间扭转角减小了 21.0%~82.5%不等,上接地层刚性边扭转角减小了 11.1%~70.1%,其中设置水平接地构件对各扭转效应指标的改善最好,尤其是对接地层刚性边和掉层部分的影响效果显著。表 7 和表 8 为地震作用下,模型 B3 至 B3-5 的各类构件转角变形中,塑性转角所占比例。由统计结果可知,设置水平接地构件、钢支撑、黏滞阻尼器可以降低梁、柱截面进入塑性的程度,相较于自底层至上接地层上一层布置的方案,采用自底层至顶层方式布置的钢支撑与阻尼器在扭转控制方面展现出略微更优的性能。

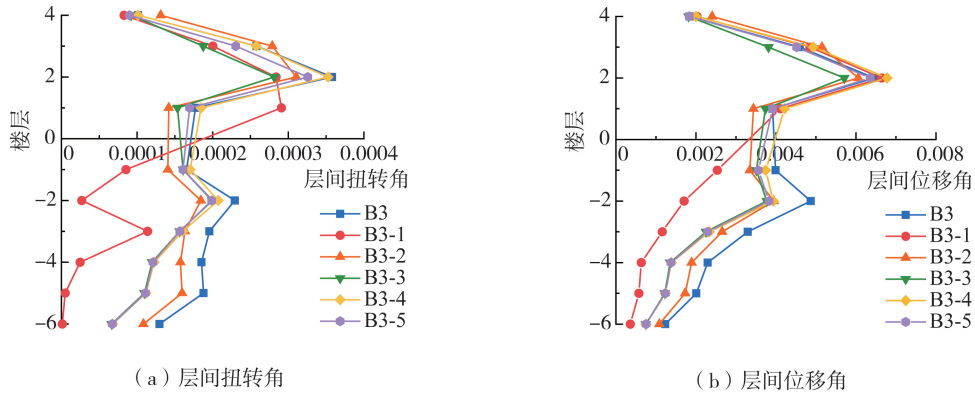


图 17 Pushover 分析得到的掉层结构扭转效应
Fig. 17 Structural torsional effects obtained from Pushover analysis

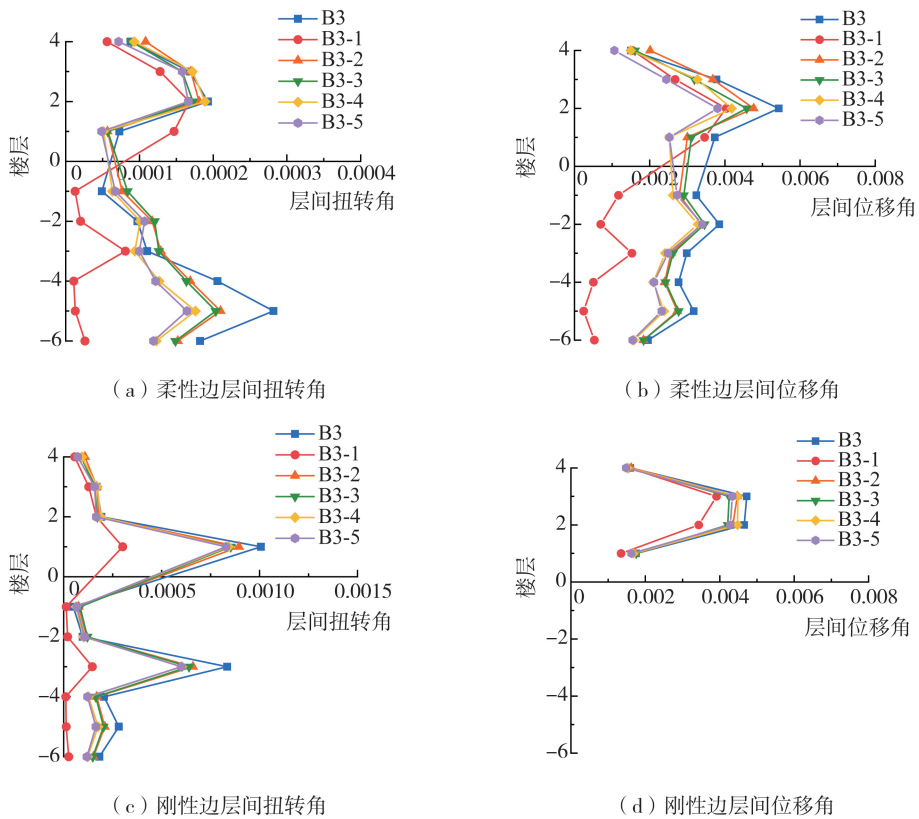


图 18 时程分析得到的掉层结构扭转效应
Fig. 18 Structural torsional effects obtained from time-history analysis

表 7 梁端截面塑性转角所占比例

Table 7 Proportion of plastic rotation at the beam end section

%

模型	梁端截面转角								
	结构所有梁端截面			中接地端以上 2 层			上接地端以上 2 层		
	0-B	B-IO	IO-LS	0-B	B-IO	IO-LS	0-B	B-IO	IO-LS
B3	19.6	79.7	0.7	19.2	80.8	0	0	93.3	6.7
B3-1	50.2	49.2	0.6	75.0	25.0	0	14.6	85.4	0
B3-2	20.1	79.5	0.5	22.5	77.5	0	0	95.7	4.3
B3-3	21.3	78.3	0.4	23.3	76.7	0	0	96.4	3.7
B3-4	21.6	77.9	0.6	23.3	76.7	0	0	93.9	6.1
B3-5	21.1	78.4	0.6	24.2	75.8	0	0	94.5	5.5

表8 柱端截面塑性转角所占比例

Table 8 Proportion of plastic rotation at the column end section

%

模型	柱端截面转角								
	结构所有柱端截面			中接地端以上2层			上接地端以上2层		
	0-B	B-IO	IO-LS	0-B	B-IO	IO-LS	0-B	B-IO	IO-LS
B3	74.4	22.9	2.7	63.9	25.0	11.1	52.1	30.2	17.7
B3-1	79.8	17.8	2.4	95.8	4.2	0	57.3	42.7	0
B3-2	75.0	22.9	2.2	62.5	29.2	8.3	55.2	32.3	12.5
B3-3	77.0	21.3	1.7	63.9	27.8	8.3	57.3	34.4	8.3
B3-4	77.3	20.0	2.7	62.5	29.2	8.3	53.1	29.2	17.7
B3-5	77.7	19.9	2.5	65.3	26.4	8.3	55.2	29.2	15.6

5 结论

本文通过对3台地掉层 RC 框架结构在弹性及弹塑性状态下的扭转效应进行研究,得到以下结论:

1) 弹性状态下,3台地掉层 RC 框架结构在中接地层和上接地层处扭转效应显著,总体扭转效应小于对应的2台地掉层 RC 框架结构,上接地层刚性边、柔性边层间扭转角分别减小了19.9%、3.6%。

2) 弹塑性状态下,当结构横坡向布置不变时,通过改变总掉层层数、中接地端跨数、中接地端掉层层数及上地端跨数,减小顺坡向结构的掉层部分尺寸与相应方向上总尺寸的比值,使得结构质心与刚心的偏心率减小,有利于改善3台地掉层 RC 框架结构的扭转效应。

3) 当3台地掉层 RC 框架结构柱截面及配筋相同时,其扭转效应随掉层数的增加而增大;但当掉层框架结构跨数较多时,按现行规范设计的掉层框架结构,随总掉层数增加,结构接地端柱尺寸和配筋都会相应增大较多。

4) 3台地掉层框架结构的扭转效应可通过设置水平接地构件、设置钢支撑和黏滞阻尼器等措施予以改善。3种扭转控制措施均能有效限制结构的扭转,其中,中接地层的刚性边层间扭转角减小了21.0%~82.5%不等,上接地层刚性边扭转角减小了11.1%~70.1%,其中设置水平接地构件对各扭转效应指标的改善最好。对于岩质边坡,建议优先选择设置水平接地构件,减小掉层结构的扭转效应。若采用设置钢支撑或阻尼器控制掉层 RC 框架结构扭转,综合考虑经济性等因素,宜从结构底部开始连续布置至上接地层上一层处。

参考文献:

- [1] 李英民, 韩军, 刘建伟. 建筑结构抗震设计扭转周期比控制指标研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 77-85.
LI Yingmin, HAN Jun, LIU Jianwei. Study on torsional period ratio control index for seismic design of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 77-85. (in Chinese)
- [2] 刘立平, 李安亮, 李英民, 等. 扭转控制指标在不等高接地框架结构中的适用性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增刊1): 680-685.
LIU Liping, LI Anliang, LI Yingmin, et al. Feasibility of torsional control index in frame structure with uneven height grounding column ends[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup. 1): 680-685. (in Chinese)
- [3] 唐洋洋, 李英民, 姜宝龙, 等. 山地掉层结构扭转效应控制参数的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 122-128.
TANG Yangyang, LI Yingmin, JIANG Baolong, et al. Study on control parameters of torsional effect of the structure supported by foundations with different elevations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 122-128. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 杨佑发, 杨天行, 陈前. 山地典型掉层框架结构抗连续倒塌性能分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(11): 66-72.
YANG Youfa, YANG Tianhang, CHEN Qian. Analysis on progressive collapse resistant capacity of typical mountainous step-terrace frame structures[J]. Building Structure, 2021, 51(11): 66-72. (in Chinese)
- [6] 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)

- [7] SURANA M, SINGH Y, LANG D H. Seismic characterization and vulnerability of building stock in hilly regions[J]. *Natural Hazards Review*, 2018, 19(1): 4017024.
- [8] 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(增刊2): 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(Sup. 2): 93-100. (in Chinese)
- [9] 刘流, 姬淑艳, 李英民. 基于构件性能的掉层框架结构抗倒塌能力评估方法研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(5): 1610-1620.
LIU Liu, JI Shuyan, LI Yingmin. Different component-performance-based measures on evaluating collapse capacity for split-foundation frame[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(5): 1610-1620. (in Chinese)
- [10] XU G, LI A Q. Seismic performance and improvements of stepback steel frames[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, 25(2): 163-187.
- [11] 徐军, 李英民, 赖永余, 等. 设有接地梁的掉层钢筋混凝土框架抗震性能试验及有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(12): 60-68.
XU Jun, LI Yingmin, LAI Yongyu, et al. Experiment and finite element analysis of seismic behavior of split-foundation RC frame with earthing beam[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(12): 60-68. (in Chinese)
- [12] 唐洋洋, 李英民, 姜宝龙, 等. 设置水平接地构件的掉层 RC 框架结构振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(3): 28-37, 43.
TANG Yangyang, LI Yingmin, JIANG Baolong, et al. Shaking table test of RC frame structures supported by different elevation grounds with horizontal embedding members[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(3): 28-37, 43. (in Chinese)
- [13] CHEN X Y, WU Y T, ZHONG M S, et al. Seismic collapse safety of 3D steel moment frames supported on two ground levels[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2022, 22(3n04): 2240018.
- [14] 漆文佳, 李英民, 王斌. 钢支撑布置方案对掉层框架结构抗震性能影响研究[J]. *特种结构*, 2019, 36(5): 22-30.
QI Wenjia, LI Yingmin, WANG Bin. Study on influence of steel bracing layout schemes on seismic performance of step-terrace frame structures[J]. *Special Structures*, 2019, 36(5): 22-30. (in Chinese)
- [15] 刘立平, 李瑞锋, 殷尧日, 等. 钢支撑-钢筋混凝土掉层框架结构抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(1): 182-192.
LIU Liping, LI Ruiheng, YIN Yaori, et al. Experimental study on seismic performance of reinforced concrete split-foundation frame structures with steel braces[J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(1): 182-192. (in Chinese)
- [16] 韩军, 张岩, 范天霖, 等. 布置金属阻尼器的 RC 掉层框架结构减震性能分析[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(增刊1): 209-218.
HAN Jun, ZHANG Yan, FAN Tianlin, et al. Study on damping performance of RC frame structure supported by foundations with different elevations with metal damper[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(Sup. 1): 209-218. (in Chinese)
- [17] 唐洋洋, 李英民, 韩军, 等. 配筋加强的掉层框架结构振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(19): 226-233.
TANG Yangyang, LI Yingmin, HAN Jun, et al. Shaking table test for strengthened-reinforcement frame structure supported by foundations with different elevations[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(19): 226-233. (in Chinese)
- [18] 张龙飞, 陶忠, 潘文, 等. 山地掉层框架隔震结构振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(9): 24-32, 44.
ZHANG Longfei, TAO Zhong, PAN Wen, et al. Shaking table test on isolated step-terrace frame structure in mountainous area[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(9): 24-32, 44. (in Chinese)
- [19] 王一功, 杨佑发. 多层接地框架土-结构共同作用分析[J]. *世界地震工程*, 2005, 21(3): 88-93.
WANG Yigong, YANG Youfa. A study on dynamic interaction problem of multistory frames located at hillside sites with different slopes[J]. *World Earthquake Engineering*, 2005, 21(3): 88-93. (in Chinese)
- [20] 陈欣, 韩军. 山地城市建筑桩基与土质边坡相互作用研究[J]. *暖通空调*, 2018, 35(3): 85-88, 96.
CHEN Xin, HAN Jun. Study on the interaction between building pile foundation and soil slope in the mountains[J]. *Special Structures*, 2018, 35(3): 85-88, 96. (in Chinese)
- [21] 邓夕胜, 林嘉聪, 蒋红雨, 等. 不同底部层高的 RC 框架结构地震易损性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(3): 115-123.
DENG Xisheng, LIN Jiacao, JIANG Hongyu, et al. Seismic vulnerability analysis of RC frame structures with different bottom heights[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(3): 115-123. (in Chinese)
- [22] 杨伯韬. 典型山地掉层框架结构抗震性能拟静力试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
YANG Baitao. Quasi-static experimental study on seismic performance of typical mountain falling-off frame structures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [23] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [24] 沈程. 山地掉层结构横坡向扭转效应分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
SHEN Cheng. Torison effect analysis of cliff-structure on cross slope[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [25] 杨楷. 基于梁柱刚度比、柱梁强度比对框架结构破坏模式的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
YANG Kai. Study on effects of failure modes of RC frame structures from beam-column's flexural stiffness ratio and column-beam's flexural strength ratio[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [26] 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 Yingmin, HAN Jun, TIAN Qixiang, 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)
- [27] ATC 40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 1996.