

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.067

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 钢筋混凝土掉层框架结构多点输入地震响应特征分析

刘立平<sup>1</sup>, 李瑞锋<sup>1</sup>, 李维斯<sup>2</sup>, 姜伟<sup>3</sup>, 李英民<sup>1</sup>

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

2. 深业鹏基集团有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 恒大地产集团重庆有限公司, 重庆 400045)

**摘要:** 山地建筑不同标高基础的地震动存在差异, 其对山地建筑地震响应的影响程度有待研究。以自贡地形台阵为背景, 以该台阵采集的汶川地震记录为输入, 设计4组空间钢筋混凝土(RC)掉层框架结构。分别按上接地地震动的一致输入、下接地地震动的一致输入、上接地与下接地不同地震动的多点输入开展了算例结构的弹性和弹塑性时程分析。将一致输入结构响应与多点输入结构响应之比定义为结构地震响应差异系数, 从结构地震响应差异系数、破坏特征等方面分析了多点输入对岩石地基基础上的空间RC掉层框架结构地震响应的影响。结果表明: 弹性分析时, 基本周期较长的RC掉层框架结构侧向变形和层剪力的地震响应差异系数在0.85~1.12之间, 基本周期较短结构的侧向变形和层剪力的地震响应差异系数在0.38~1.22之间, 按一致输入地震动设计的RC掉层框架结构可能偏不安全; 弹塑性分析时, 多点输入下RC掉层框架结构的地震响应与一致输入下的有明显差异, 最小差异系数可到0.27; 在极罕遇地震作用时, 多点输入下RC掉层框架结构底部的破坏状态比一致输入下严重, 宜对其掉层部分和坎上1层进行适当的抗震加强。

**关键词:** 山地建筑; 掉层框架结构; 多点输入; 地震响应; 有限元模拟

**中图分类号:** TU311.3; TU323.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)06-0071-10

## Characteristic analysis of multipoint input seismic response of reinforced concrete frame structures supported by stepped foundations

Liu Liping<sup>1</sup>, Li Ruifeng<sup>1</sup>, Li Weisi<sup>2</sup>, Jiang Wei<sup>3</sup>, Li Yingmin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountainous Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Shum Yip Holdings Company Limited, Shenzhen 518000, Guangdong, P. R. China; 3. Evergrande Real Estate Group Chongqing Co, Ltd, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The ground motions of foundations in mountainous regions vary at different elevation, and the degree of impacts on the seismic response of buildings in the areaneeds to be studied. By forming the Wenchuan earthquake records from Zigong observation array as the inputs, four RC (reinforced concrete) frame structures supported by stepped foundations were designed based on Chinese National Standard for seismic design of buildings. The elastic and elastoplastic time history analysis of the structure of the calculation example was carried out by inputting the ground motion signal at upper surface of the foundation, at lower surface or the multiple points at both surfaces. Structural seismic response difference

**收稿日期:** 2019-12-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51878101, 51638002)

**作者简介:** 刘立平(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗震分析及设计理论研究, E-mail: liuliping@cqu.edu.cn.

**Received:** 2019-12-20

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878101, 51638002)

**Author brief:** Liu Liping (1971-), PhD, professor, main research interests: seismic analysis and design theory of structures, E-mail: liuliping@cqu.edu.cn.

coefficient is defined as the ratio of the response to the single excitation signal at one surface over the response to the multi-point excitation inputs at both surfaces. The influence of multipoint input on the seismic response of the spatial RC frame structures supported by stepped foundations is analyzed in the aspects of structural seismic response difference coefficients and failure modes. The results are following: In the elastic analysis, the difference coefficient of seismic response of lateral deformation and storey shear of RC frame structure with long 1st natural period is between 0.85 and 1.12, while the value is between 0.38 and 1.22 for similar structures with relatively shorter 1st natural period. Thus, the RC frame structures supported by stepped foundations designed only based on the single ground motion signal on one surface may be unsafe. In the elastoplastic analysis, the seismic response of the RC frame structures supported by stepped foundations with both long and short periods under multi-input is obviously different from that under uniform input, and the minimum difference coefficient can reach 0.27; The failure state of the bottom of the RC frame structure under multi-point input is more severe than that under single input under the extremely rare earthquake. Proper seismic strengthening should be carried out for the step part and the first floor above the sill of the RC frame structures supported by stepped foundations.

**Keywords:** mountainous building; structures supported by stepped foundation; multipoint input; seismic response; finite element simulation

山地建筑结构能较好地契合地形而减少对山地和坡地的扰动,是一类环境友好型的结构形式。近年来,随着人口的增长和城镇化的发展,建设用地日趋紧张,山地建筑结构因能合理利用山地和坡地而有着越来越广泛的需求和应用<sup>[1]</sup>。掉层框架结构是山地建筑中一种常见的结构形式。与常规结构相比,掉层结构具有天生竖向不规则性和不同标高接地端地震动存在差异的特点。在汶川地震、Sikkim 地震和尼泊尔地震中,RC(钢筋混凝土)掉层框架结构出现了比常规结构更严重的破坏现象<sup>[2-5]</sup>。近年来,学者们开展了掉层结构地震响应、平面掉层框架结构拟静力试验、空间掉层框架结构抗震和隔震振动台试验研究,发现掉层框架结构的上接地柱是抗震的薄弱部位,隔震能减轻上接地柱的破坏并提高结构的抗震性能<sup>[6-10]</sup>。Welsh-Huggins 等<sup>[11]</sup>、Surana 等<sup>[12]</sup>采用易损性分析方法对印度山区 RC 掉层结构的抗震性能进行了研究,发现 RC 掉层结构的地震损伤概率高于普通平地结构,建议采取提高上接地柱抗剪能力和延性等措施来改善结构的抗震性能。Tamboli 等<sup>[13]</sup>采用反应谱法对 4 种不同接地方式和不同层数的 RC 掉层结构和退台-掉层结构的抗震性能进行了分析。上述研究大多是人为给定地震动,采用单向、一致输入进行结构地震响应分析。但地震动从基岩经土层传到地表时,地震动的相位、频谱和幅值会发生改变,局部突出场地的放大

效应,掉层结构不同标高基础的地震动存在差异<sup>[14-16]</sup>,这种地震动差异性对掉层结构地震响应的影响应加以关注。赵瑞仙等<sup>[17]</sup>基于土-结动力相互作用,分析了局部场地条件导致的地震动差异对掉层结构地震响应的影响,并建议陡坎高度较高的掉层结构宜考虑坎上和坎下不同地震动输入对结构地震响应的影响,但其研究是基于人为给定的地震动输入而未采用真实地震所采集的地震动。姜伟<sup>[18]</sup>基于自贡地形台阵记录的地震动,分析多点输入对平面掉层框架结构的弹性地震响应,研究发现,在不同场地条件下,多点输入相比一致输入下的结构响应均有一定的放大效果,有软弱土层存在时,放大效果更为显著。但该研究未分析空间掉层框架结构地震响应,也未分析罕遇地震下结构的破坏状态。以上研究表明,位于土质边坡上的掉层结构,或位于岩质边坡上且掉层高差较大的掉层结构宜考虑多点输入的影响。

笔者以自贡地形台阵的地形为背景、以在汶川地震中的实际地震动为输入,设计了 4 组空间 RC 掉层框架结构,分别按上接地地震动的一致输入、下接地地震动的一致输入、上接地与下接地不同地震动的多点输入,对比 RC 掉层框架结构在 3 种工况下弹性分析和弹塑性分析的地震响应和破坏特征的差异,研究多点输入对岩石地基上的空间 RC 掉层框架结构地震响应的影响程度。

### 1 自贡地形台阵及典型强震记录

自贡地形台阵是为观测不规则性地形对地表地震动放大在空间分布上的非均匀性影响,于 2007 年建于四川省自贡市自流井区西山公园内。西山公园位于自贡市城市中心区西缘,地处自流进凹陷区内,构造形态为复式向斜,由系统北东向背斜和向斜组成<sup>[19]</sup>。公园区域内多数地表基岩裸露,主要为侏罗系地层和第四系地层,以人工填土、粘土、粉砂土、淤泥质粘土为主。该地形台阵基本沿西山公园的山脊轴线布设,共有 8 个台站,编号为 0#~7#。除 0# 台站位于土层外,其他台站均位于基岩上。8 个台站的平面布置和高差情况如图 1<sup>[20]</sup>。

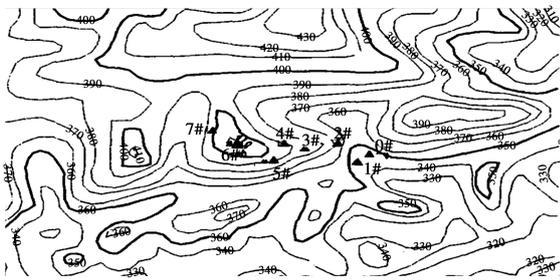


图 1 自贡地形台阵的空间布置

Fig. 1 Topographic map of Zigong observation array

在汶川地震中,自贡地形台阵获得了较为完整的主震记录,下面以 6# 和 7# 台站汶川地震记录为例分析其地震动特性。由于所记录的原始地震数据存在基线漂移和时移偏差,采用 BAP 带滤波以修正基线漂移,利用 Zerva 研究的时程相关函数来估计时移并进行修正<sup>[21-22]</sup>。修正后的 6# 和 7# 台站汶川地震动加速度时程如图 2 所示,图 2 中 EW、NS 和 UD 分别为东西水平向、南北水平向和竖向地震动。由图 2 可见,6# 和 7# 台站 3 个方向的地震动加速度时程有较为明显的差异,NS 向地震动差异最大,EW 向地震动差异次之,UD 向地震动差异最小;因台站高程和局部突出地形对地震动的影响,6# 台站的地震动加速度时程总体上大于 7# 站点。

图 3 是 6# 和 7# 台站地震动 EW、NS、UD 方向 0.05 阻尼比的加速度反应谱。由图 3 可见,6# 和 7# 台站汶川地震记录的加速度反应谱存在差异,不同周期的反应谱差异性不同。当周期大于 1 s 时,2 个台站地震动在 3 个方向的反应谱值差异较小;而当周期接近或小于 0.5 s 时,6# 台站地震动在 3 个方向的反应谱值都较明显大于 7# 台站。

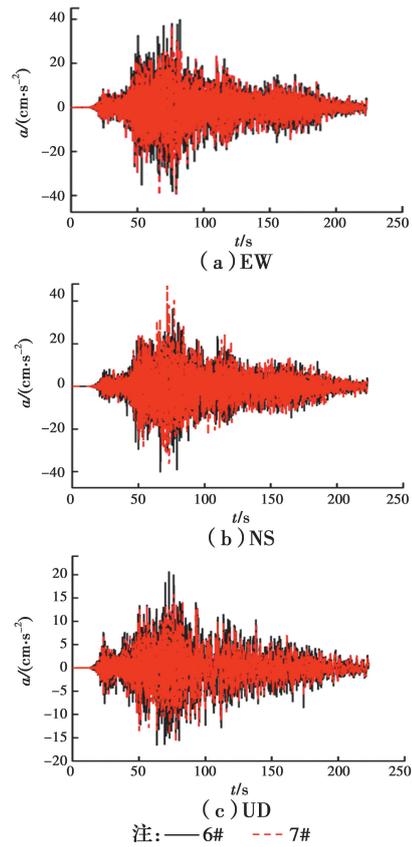


图 2 6#、7# 台站加速度时程

Fig. 2 Acceleration time history at station 6/7

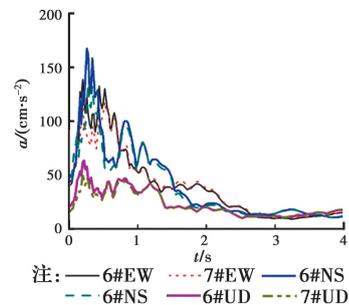


图 3 6#、7# 台站加速度反应谱

Fig. 3 Acceleration response spectrum at station 6/7

### 2 基于自贡地形台阵场地的掉层框架结构算例设计

自贡地形台阵 6# 和 7# 台站间高差 20 m,符合一般的掉层建筑尺寸,因此,以 6# 和 7# 台站间的场地进行掉层框架结构算例设计。这 2 个台站均位于基岩上,场地类别为 I<sub>1</sub> 类。自贡市抗震设防烈度取 7 度(0.1g),设计地震分组为第 1 组。根据场地的高差,不变掉层层数和跨度,以非掉层层数为变量,设计了 3 个空间 RC 掉层框架结构。该组算例的顺坡向跨数均为 7 跨,横坡向跨数均为 3 跨,两个

方向的跨度均为 6 m,层高均为 3 m,掉层数均为 6 层,上部非掉层层数分别为 4、7、10 层,相应的模型编号为 M1、M2 和 M3,结构总高度分别为 30、39、48 m。模型 M2 的结构布置如图 4 所示。模型 M1 和模型 M3 的结构布置与模型 M2 的类似,仅上部楼层分别是 4 层和 7 层。在模型 M1 的基础,增加梁柱截面尺寸形成了具有较小周期的模型 M1-S。4 个模型的混凝土等级均为 C40,受力钢筋均为 HRB400,箍筋均为 HRB335,楼面和屋面附加恒载分别为 2.0、4.0 kN/m<sup>2</sup>,楼面和屋面活载均为 2.0 kN/m<sup>2</sup>,楼板厚均为 120 mm。根据现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[23]</sup>的最低要求对模型 M1、M2、M3 和 M1-S 进行了结构设计。4 个模型的梁柱截面尺寸见表 1。表 1 中梁号 L-1 位于模型的一 6F~一 1F 楼层,梁编号为 L-2 位于 0F 及以上楼层;表 1 中柱的编号对应于图 4(b)。图 4(b)中括号内符号为一 6F~一 1F 柱的编号,括号外符号为 0F 及以上楼层柱的编号,A 轴上柱的编号与 D 轴上的相同,B 轴上柱的编号与 C 轴上的相同。4 个模型的基本周期见表 2,可见模型 M1-S 的周期最短,为 0.46 s,模型 M3 的周期最长,为 2.24 s。

表 1 模型 M1、M2、M3 和 M1-S 的梁柱截面尺寸

Table 1 Basic design parameters of the falling frame structures

梁柱编号	模型 M1	模型 M1-S	模型 M2	模型 M3
L-1	250×400	300×500	300×440	250×450
L-2	200×350	300×500	200×400	250×400
Z-1	450×500	600×600	550×550	600×600
Z-2	400×350	600×600	450×450	550×550
Z-3	450×500	600×600	500×500	600×600
Z-4	300×350	500×500	400×400	500×500
Z-5	300×250	500×500	300×350	400×350

注:表中长度单位均为 mm。

表 3 模型 M2 和 M1-S 的梁柱配筋表

Table 3 The parameters in reinforcement of model M2\M1-S

柱编号	模型 M2 柱筋	模型 M1-S 柱筋	梁编号	模型 M2 梁筋	模型 M1-S 梁筋
1	1C16\2C14\2C14	1C20\2C18\2C18	I	3C16\3C16	3C16\3C16
2	1C16\2C16\2C16	1C20\2C18\2C18	II	3C20\3C18	3C8\3C16
3	1C16\2C18\2C18		III	3C16\3C14	2C18\3C16
4	1C16\2C14\2C14		IV	3C22\4C16	4C16\3C16
5	1C16\1C12\1C12		V	4C18\4C16	4C18\4C16
6	1C16\2C12\1C12		VI	4C20\4C16	3C18\2C18
7	1C16\1C12\3C16		VII	3C18\3C16	3C20\3C16
8	1C16\1C12\2C18		VIII	3C20\4C16	3C22\3C16

说明:表中柱的配筋 1C16\2C14\2C14 表示柱角筋布置 1C16,顺坡向单侧布置 2C14,横坡向单侧布置 2C14。梁的配筋 3C16\3C16 表示梁上部布置 3C16,下部布置 3C16。

表 2 模型 M1、M2、M3 和 M1-S 的基本周期

Table 2 Periods of each falling frame structure

模型	非掉层层数	第一振型周期/s	频率/Hz
M1	4	1.56	0.641
M1-S	4	0.46	2.174
M2	7	1.76	0.568
M3	10	2.24	0.446

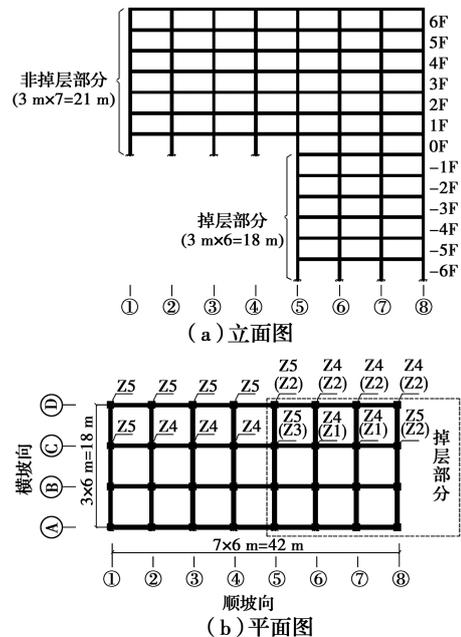


图 4 模型 M2 的结构布置图

Fig. 4 Schematic diagram of model M2

对模型 M2 和模型 M1-S 进行弹塑性分析(在 4.1 节弹性分析结果中,多点输入对模型 M2、M1-S 顺坡向侧向位移的影响程度相对较大,限于篇幅,以侧向位移为地震响应的关注点,从 4 个模型中列出了具有代表性的模型 M-2、M1-S 的弹塑性分析结果)。模型 M2 和模型 M1-S 的梁柱配筋详见表 3,梁柱配筋编号所对应的结构部位见图 5。在图 5 中,

括号外符号是 M2 模型梁柱配筋编号,括号内符号是 M1-S 梁柱配筋编号。模型 M2 和模型 M1-S 的 A 轴梁柱配筋与 D 轴的相同,B 轴梁柱配筋与 C 轴的相同。

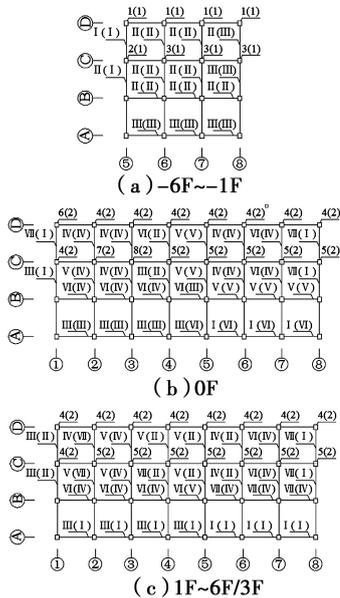


图 5 模型 M2 和模型 M1-S 配筋图

Fig. 5 Reinforcement graph of model M2\M1-S

### 3 分析模型及验证

基于模型 M1、M2、M3 和 M1-S,建立相应的弹性动力时程分析模型和弹塑性动力时程分析模型,考查在一致输入和多点输入下模型的地震响应。

#### 3.1 地震动输入

选取自贡地形台阵 6# 和 7# 台站的汶川地震三向地震记录为分析用地震动输入。因模型顺坡向大致呈东西走向,则顺坡向输入 EW 向地震动,横坡向输入 NS 向地震动,竖向输入 UD 向地震动。将抗震设防烈度提高一度所对应的罕遇地震定义为极罕遇地震。按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中提供的时程分析所用地震加速度时程的最大值,将多遇地震、罕遇地震、极罕遇地震 EW 向地震动峰值分别乘一缩放系数,调整为  $35、220、310 \text{ cm/s}^2$  [23]。NS、UD 向地震动均乘以 EW 向地震动的缩放系数进行调整。上接地一致输入采用 6# 台阵地震动输入,下接地一致输入采用 7# 台阵地震动输入。在一致输入的工况下,分别将 6#、7# 加速度时程乘以一缩放系数(表 4)。在多点输入的工况下,上、下

接地端采用 6#、7# 台阵的地震动输入,输入的加速度时程均乘以下接地一致输入时的缩放系数进行调整。

表 4 地震动输入及缩放系数表

Table 4 Table of seismic input and scaling factors

输入工况	上接地输	下接地输	缩放系数 (多遇/罕遇/极罕遇)
	入地震动	入地震动	
上接地			
一致输入	6#	6#	(0.86/5.43/7.64)
下接地			
一致输入	7#	7#	(0.87/5.48/7.73)
多点输入	6#	7#	(0.87/5.48/7.73)

#### 3.2 分析模型

结构弹性动力时程分析模型采用有限元程序 SAP2000 进行建模,阻尼比设为 0.05,通过大质量法实现地震动多点输入。大质量法是在结构支座节点处某施加地震动的方向添加一个大质量点,并释放节点该方向的约束,在大质量点处施加力的时程模拟基础运动 [24]。结构弹塑性动力时程分析模型采用有限元程序 PERFORM-3D 的纤维模型进行建模,通过大刚度法实现地震动多点输入 [25]。大刚度法是在结构支座节点处某施加地震动的方向添加一个大刚度弹簧,同时也需释放节点该方向的约束,并在大刚度弹簧处施加位移的时程模拟基础运动 [23],在结构周期区段施加 7% 的模态阻尼,同时叠加 0.1% 的瑞雷阻尼(只考虑  $\beta_K$  项)以消除高频振动 [23];混凝土本构采用 Scott-Kent-Park 模型,钢筋本构采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型 [8]。在 PERFORM-3D 中定义梁柱的 3 个性能水准(10 轻微破坏立即入住、LS 中度破坏生命安全、CP 严重损坏倒塌防止),监控构件的变形以及结构的破坏状态。

#### 3.3 模型验证

为验证结构弹塑性分析模型的有效性,根据文献 [26] 的 RC 平面掉层框架结构拟静力试验,按结构弹塑性分析模拟方法进行模拟,将模拟与试验的结构滞回曲线、破坏模式分别列于图 6 和图 7。由图 6 可见,试验与模型滞回曲线的形状相似、结构刚度和结构承载力接近,两者吻合良好。图 8 是模拟与试验的结构破坏模式对比,图中圆圈标注出了有出绞现象的梁端或柱端。由图 7 可见,试验与模拟

梁柱的出纹情况基本一致,模型能准确模拟结构的破坏模式。说明模拟方法能有效地模拟具有不等高约束的 RC 掉层框架结构的弹塑性地震响应。

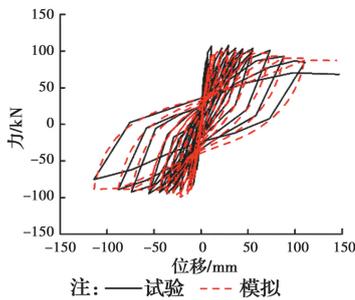


图 6 模拟与试验的结构滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curve of structures simulated and tested

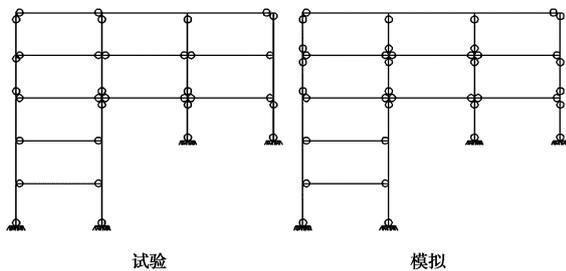


图 7 模拟与试验的结构破坏模式

Fig. 7 Failure mode of structures simulated and tested

## 4 结果与分析

弹性时程分析结果主要考查结构侧向位移和层剪力,弹塑性时程分析结果主要研究结构侧向位移和破坏状态。通过结构地震响应差异系数  $S$  来分析多点输入对结构地震响应的影 响程度,地震响应差异系数  $S$  定义为

$$S = \frac{\text{上接地或下接地一致输入地震响应}}{\text{多点输入地震响应}} \quad (1)$$

### 4.1 弹性分析结构响应对比分析

根据一致输入和多点输入的模型 M1、M2、M3 和 M1-S 弹性时程分析的各层水平位移时程的峰值,按式(1)计算各模型弹性分析的侧向位移差异系数  $S$ ,并绘于图 8。图中 6# 是上接地一致输入的计算结果,7# 是下接地一致输入的计算结果(下同)。由图 8 可见,多点输入下模型 M1、M2、M3 和 M1-S 的侧向位移响应较一致输入下的均有一定差异。相对于一致输入,多点输入对顺坡向侧向位移的影响大于横坡向;对掉层部分侧向位移的影响大于非掉层部分。具体而言,多点输入下模型 M1、M2 和 M3 的侧向位移响应与一致输入下的差异较小,3 个模型的侧向位移差异系数在 0.86~1.12 之间(图 8(a)

~图 8(f));多点输入下模型 M1-S 的侧向位移响应与一致输入下的有明显差异(图 8(g)~图 8(h)),在顺坡向掉层部位的一 2、-3 楼层处,上接地一致输入与多点输入的结构侧向位移差异系数分别为 0.53、0.42,下接地一致输入与多点输入的结构侧向位移差异系数分别为 0.38、0.37,具有明显的放大作用。

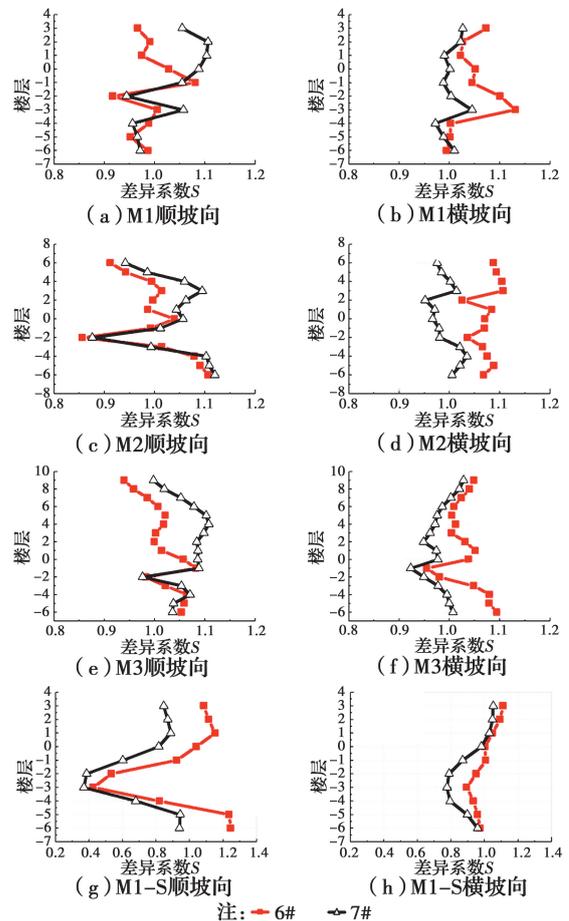


图 8 模型 M1、M2、M3 和 M1-S 弹性侧向位移差异系数  $S$

Fig. 8 Differential coefficient  $S$  of story ratio in elastic analysis model M1\M2\M3\M1-S

图 9 为由一致输入和多点输入结果按式(1)计算的模型 M1、M2、M3 和 M1-S 顺坡向弹性层剪力差异系数  $S$ 。由图 9 可见,模型 M1、M2 和 M3 各层的层剪力差异系数均在 0.85~1.10 之间,而模型 M1-S 各层的层剪力差异系数在 0.43~0.92 之间。说明多点输入下的层剪力与一致输入下的具有一定差异,且在模型 M1-S 中的差异大于在模型 M1、M2 和 M3 中的差异。对模型 M1-S,其在 -2、-3 楼层上接地一致输入的差异系数分别为 0.43、0.50,在 -2、-3 层的下接地一致输入的差异系数分别为 0.44、0.57,多点输入对该模型掉层部分的层剪力具有明显的放大效应。

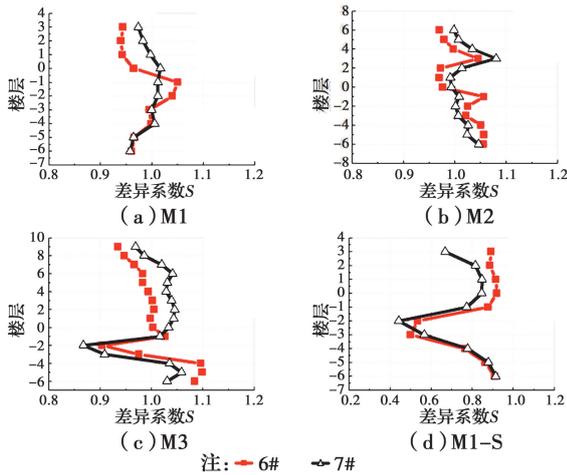


图 9 模型 M1、M2、M3 和 M1-S 顺坡向弹性层剪力差异系数 S  
 Fig. 9 Differential coefficient S of shear force along the slope of model M1\M2\M3\M1-S

多点输入下 RC 掉层框架结构的侧向位移和层剪力与一致输入下均有一定的差异,且在模型 M1、M2、M3 中的差异小于在模型 M1-S 中的差异。这主要是因为多点输入采用的是位于基岩上的 6# 和 7# 台站的地震动,其时程曲线和反应谱存在差异,且在反应谱周期小于 1 s 时的差异性更明显,导致多点输入对岩石地基上的短周期结构地震响应影响显著。

#### 4.2 弹塑性分析结构响应对比分析

根据一致输入和多点输入下模型 M2 和 M1-S 弹塑性时程分析的各层水平位移时程峰值,按式(1)计算各模型的弹塑性侧向位移差异系数 S,见图 10 和图 11。由图可见,在罕遇地震和极罕遇地震下,多点输入下模型 M2 掉层部分楼层的侧向位移与一

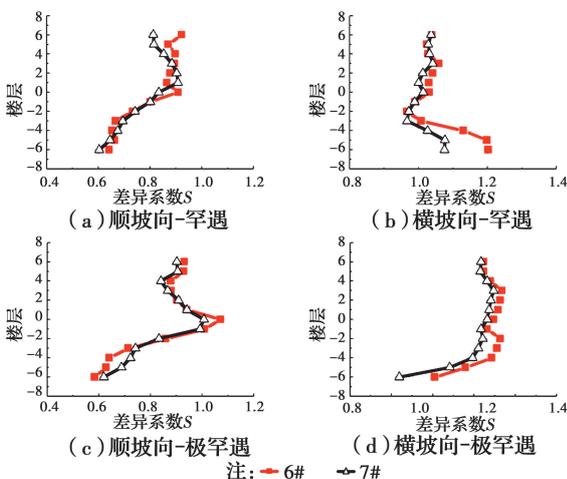


图 10 模型 M2 弹塑性侧向位移差异系数 S  
 Fig. 10 Differential coefficient S of story ratio in elastic-plastic analysis model M2

致输入下的有显著差异。具体而言,沿顺坡向模型 M2 掉层部分的侧向位移差异系数出现均远小于 1 的值,在罕遇地震下最小差异系数可达 0.60,在极罕遇地震下最小差异系数可达 0.58;沿顺坡向模型 M1-S 的掉层部分和坎上 1 层(0F 楼层)的侧向位移差异系数,在罕遇地震下分布于 0.27~0.66 之间,在极罕遇地震下分布于 0.38~0.69 之间。多点输入对横坡向的结构弹塑性时程响应的影响要小于顺坡向的,模型 M2 和 M1-S 横坡向的侧向位移差异系数均在 0.8~1.2 之间;但在极罕遇地震下,多点输入下掉层结构的横坡向响应与一致输入下的有较大差异,其中,模型 M2 横坡向差异系数最小达 0.64,模型 M1-S 横坡向最小和最大差异系数分别为 0.70、1.28。

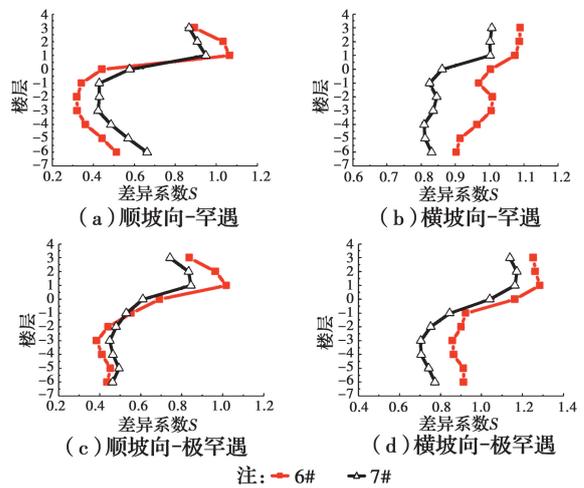


图 11 模型 M1-S 弹塑性侧向位移差异系数 S  
 Fig. 11 Differential coefficient S of story ratio in elastic-plastic analysis model M1-S

图 12~图 15 是模型 M2 和 M1-S 在罕遇地震和极罕遇地震作用时柱和梁的性能水准统计结果,图例 6#、7#、Multi 分别代表上接地一致输入、下接地一致输入和多点输入。由图可见,模型 M2、M1-S 的坎上一层(0F 楼层)以上楼层达到 LS、CP 性能水准的梁和柱的数量无显著差异,说明多点输入下坎上一层以上楼层的破坏状态与一致输入下的差异不大。在坎上一层(0F 楼层),多点输入下的破坏状态与一致输入下的有一定差异。其中,在罕遇地震下 M2 模型和 M1-S 模型达到 CP 水准梁的数量上,多点输入均大于一致输入,最大差异可达 12。但在坎上一层达到 LS、CP 水准柱的数量上,多点输入与一致输入无较大差异。罕遇地震下,多点输入对结构掉层部分破坏较轻,3 种地震动输入工况在

掉层部分达到各性能水准梁柱的数量差异不大,模型 M2、M1-S 模型只在达到 LS、CP 水准的梁数量上略大于一致输入,但最大数量差异不超过 6。在极罕遇地震下,多点输入对 M2、M1-S 模型掉层部分楼层的破坏状态均有明显放大效果,放大效果最显著的楼层位于掉层底部。在掉层底部楼层,多点输入达到 LS、CP 性能水准的梁柱数量明显大于一致输入,其中, M2 模型在-6 楼层达到 CP 状态梁柱数量上,多点输入均明显多于上一致输入,其最大差异可达 16。M1-S 模型在-5 楼层达到 LS、CP 水准梁的数量上,多点输入多于一致输入,其最大差异可达 12。

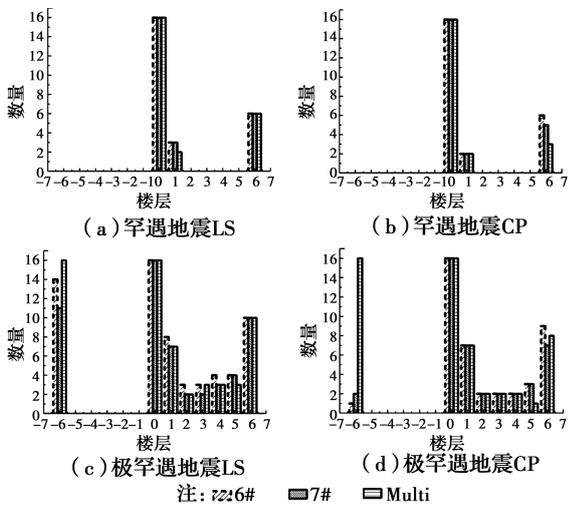


图 12 M2 模型按楼层统计的不同性能水准的柱数量  
Fig. 12 Number of Columns of M2 model with different performance levels according to floor statistics

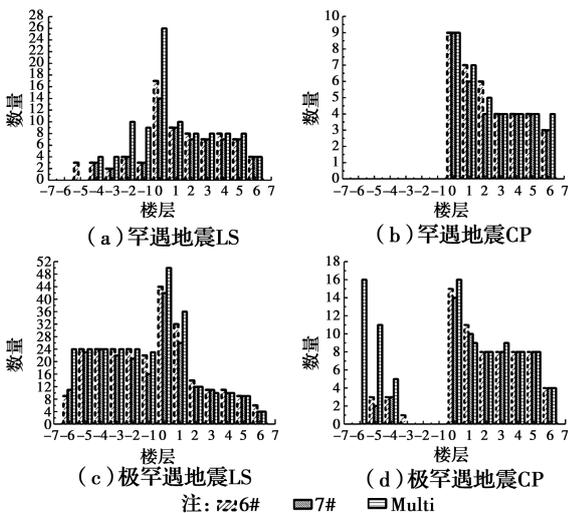


图 13 M2 模型按楼层统计的不同性能水准的梁数量  
Fig. 13 Number of beams of M2 model with different performance levels according to floor statistics

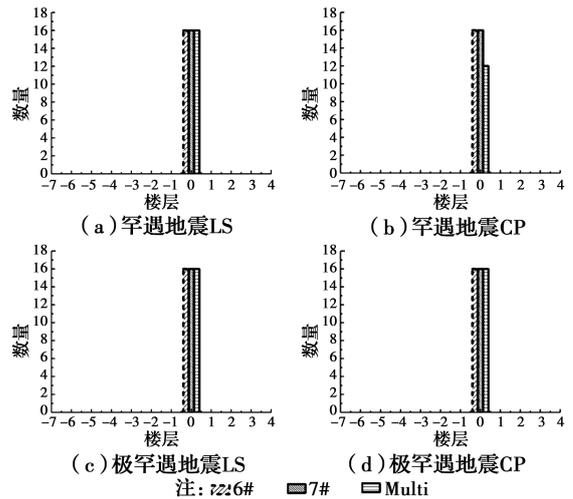


图 14 M1-S 模型按楼层统计的不同性能水准的柱数量  
Fig. 14 Number of Columns of M1-S model with different performance levels according to floor statistics

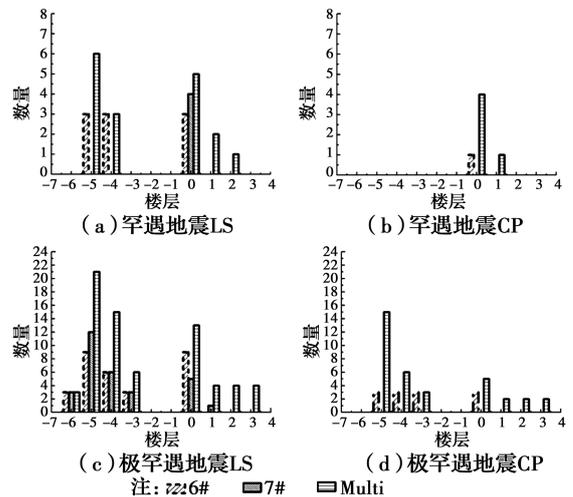


图 15 M1-S 模型按楼层统计的不同性能水准的梁数量  
Fig. 15 Number of beams of M1-S model with different performance levels according to floor statistics

### 5 结论

基于自贡地形台阵的实际地形和实际地震动的 4 个位于岩石地基上的空间 RC 掉层框架结构的弹性和弹塑性地震时程分析,得到如下结论:

- 1) 多遇地震时(弹性分析),对于结构基本周期较长的 M1、M2、M3 模型(基本周期均大于 1.5 s),多点输入下结构沿顺坡向地震响应与一致输入下有一定差异,地震响应差异系数在 0.85~1.12 之间。对于结构基本周期较短的 M1-S 模型(基本周期为 0.46 s),多点输入下结构沿顺坡向地震响应与一致输入下有显著差异,差异最大的楼层位于掉层部分,最小地震响应差异系数可到 0.38。因此,对岩石地

基上的短周期 RC 掉层框架结构,按一致输入进行结构抗震设计可能偏不安全,宜考虑多点输入对其掉层部分结构地震响应的影响。

2)罕遇地震和极罕遇地震时(弹塑性分析),多点输入对不同周期 RC 掉层框架结构沿顺坡向地震响应均较一致输入下有明显差异。对于结构基本周期较长的 M2 模型,差异较大的部位为掉层下部楼层,沿顺坡向最小地震响应差异系数为 0.58;对于结构基本周期较短的 M1-S 模型,差异较大的部位为掉层部分和坎上一层,沿顺坡向最小地震响应差异系数达到 0.27。在极罕遇状态时多点输入下掉层底部楼层的破坏状态比一致输入下严重。为了防止大震下结构倒塌,对采用一致输入设计的岩石地基 RC 掉层框架结构的掉层部分和坎上一层,宜进行适当的抗震加强。

3)多点输入对 RC 掉层框架结构横坡向地震响应影响明显小于顺坡向。多遇地震和罕遇地震作用时沿横坡向地震响应差异均在 0.8~1.2 之间;极罕遇地震时沿横坡向最小地震响应差异系数可达 0.64,最大可达 1.28。对岩石地基上的短周期 RC 掉层框架结构,主要考虑多点输入对结构顺坡向的影响。

#### 参考文献:

- [1] 宗轩. 图说山地建筑设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.  
ZONG X. Graphic illustration of hillside architecture design[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.
- [2] 李英民, 刘立平. 汶川地震建筑震害与思考[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.  
LI Y M, LIU L P. Earthquake damage and consideration of buildings in Wenchuan earthquake [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [3] VIJAYA N, RUPEN G, MURTY C V R. Performance of RC buildings along hill slopes of Himalayas during 2011 Sikkim Earthquake [C]//15WCEE, Lisboa, 2012.
- [4] 潘毅, 王忠凯, 曲哲, 等. 尼泊尔自建 RC 框架结构的抗震能力分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 304-312.  
PAN Y, WANG Z K, QU Z, et al. Seismic performance of owner-built RC frame structures in Nepal [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 304-312. (in Chinese)
- [5] BRET L, SURYA N S, JOHN B, et al. M7.8 Gorkha, Nepal Earthquake on April 25, 2015 and its aftershocks [R]. EERI Earthquake Reconnaissance Team Report, 2016.
- [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 G, LI A Q, CHEN S F. 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] 刘立平, 李安亮, 李英民, 等. 扭转控制指标在不等高地框架结构中的适用性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(Sup1): 680-685.  
LIU L P, LI A L, LI Y M, et al. Feasibility of torsional control index in frame structure with uneven height grounding column ends [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup1): 680-685. (in Chinese)
- [8] 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 J, LI Y M, LAI Y Y, 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)
- [9] 李英民, 唐洋洋, 姜宝龙, 等. 山地掉层 RC 框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0528.  
LI Y M, TANG Y Y, JIANG B L, et al. Shaking table test of RC frame structure on a slope and supported by foundations with different elevations [J]. Journal of Building Structures, DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0528. (in Chinese)
- [10] 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, DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0142.  
ZHANG L F, TAO Z, PAN W, et al. Shaking table test for an isolated step-terrace frame structure [J]. Journal of Building Structures, DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0142. (in Chinese)
- [11] WELSH-HUGGINS S J, RODGERS J, HOLMES W, et al. Seismic vulnerability of reinforced concrete hillside buildings in northeast India [C]//16WCEE, Santiago Chile, January 9-13, 2017.
- [12] SURANA M, SINGH Y, LANG D H. Seismic

- characterization and vulnerability of building stock in hilly regions [J]. *Natural Hazards Review*, 2018, 19(1): 04017024.
- [13] TAMBOLI N V, AJAY S. Study of seismic behavior of multi-storied R. C. C. Buildings resting on sloping ground and bracing system [J]. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 2017, 3(4): 317-324.
- [14] 刘立平, 杨实君, 李英民. 软夹层参数对边坡动力特性的影响分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(5): 31-34.  
LIU L P, YANG S J, LI Y M. Influence of soft soil layer on dynamic characteristic of the slope [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007, 30(5): 31-34. (in Chinese)
- [15] 李英民, 王肖巍, 宋维举. 动态子结构法在凸起地形地震动响应中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(6): 156-161, 170.  
LI Y M, WANG X W, SONG W J. Application of dynamic substructure method to protruding topography on characteristics of ground motion [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(6): 156-161, 170. (in Chinese)
- [16] 杨柏坡, 杨笑梅. 复杂场地上结构地震反应的研究[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(2): 10-15.  
YANG B P, YANG X M. Seismic response of structures on complex sites [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, 17(2): 10-15. (in Chinese)
- [17] 赵瑞仙. 掉层结构的非线性抗震性能分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
ZHAO R X. Study on the nonlinear seismic performance of structure supported by foundations with different locations [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [18] 姜伟. 山地地震动特性及其对掉层框架结构的地震响应影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
JIANG W. Characteristics of earthquake ground motion in mountainous area and their impact on seismic response of frame structure supported by stepped foundation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [19] 杨秋梅. 自贡市城市环境地质分区评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.  
YANG Q M. The divisional evaluation of urban environmental geology in Zigong City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [20] 杨宇, 李小军, 贺秋梅. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. *震灾防御技术*, 2011, 6(4): 436-447.  
YANG Y, LI X J, HE Q M. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan park [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2011, 6(4): 436-447. (in Chinese)
- [21] WANG G Q, BOORE D M, TANG G, et al. Comparisons of ground motions from collocated and closely spaced one-sample-per-second global positioning system and accelerograph recordings of the 2003 M 6.5 San Simeon, California, earthquake in the parkfield region [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(1B): 76-90.
- [22] ZERVA A, ZERVAS V. Spatial variation of seismic ground motions: an overview [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, 55(3): 271-297.
- [23] 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)
- [24] ZHOU G L, LI X J. Improved large mass method for structural base excitation analysis [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 29-32: 1588-1593.
- [25] Perform-3D user guide [M]. Computer and Structures, Inc., 2011.
- [26] 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 B T. Quasi-static experimental study on seismic performance of typical mountain cliff-structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)