

近远震作用下黄土滑坡动力响应与变形 ——以甘肃天水震区黎坪村滑坡为例

车福东¹, 王涛¹, 辛鹏¹, 张泽林², 梁昌玉¹, 刘甲美¹

CHE Fudong¹, WANG Tao¹, XIN Peng¹, ZHANG Zelin², LIANG Changyu¹, LIU Jiamei¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

摘要:中国黄土高原区地震滑坡灾害效应重、潜在风险高,地震滑坡响应和变形机理是研究热点之一。以天水震区黎坪村大型黄土滑坡为例,采用标准正弦波探讨了近远震地震动要素对滑坡动力响应的影响特征,采用汶川远震和岷县近震地震动时程记录反演了滑坡实际变形特征。结果显示,测点 PGA 放大系数随振幅的变化规律与坡体位置有关,测点 PGA 放大系数在坡体位置大于 0.75 倍坡高时,随振幅的增加而减小;当小于 0.75 倍坡高时,随振幅的增加而显著增强;测点 PGA 放大系数与频率变化呈负相关性,即随着频率的增加而减小。坡体变形与振幅和持时变化呈正相关性,即测点最大水平和竖直位移随着振幅和持时增加而增加,滑坡急剧变形的临界幅值约为 0.05 g;坡体变形与频率变化呈负相关性,坡体测点最大水平和竖直位移随频率变大呈下降趋势,滑坡急剧变形临界频率约为 5 Hz;对比分析显示,振幅对坡体失稳的影响程度大于频率的影响程度。相比岷县近震,坡体主滑体滑动与汶川远震产生的高幅值、低频率及长持时的地震波作用密不可分,表明在地震滑坡稳定性研究时,如果忽视远场强震影响,可能导致潜在安全风险。关于近震和远震作用下滑坡动力响应及其变形差异研究方法对地震滑坡稳定性分析研究具有借鉴意义。

关键词:近远震;黄土滑坡;地震动;动力响应;变形

中图分类号:P642.13⁺1;P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)12-1981-12

Che F D, Wang T, Xin P, Zhang Z L, Liang C Y, Liu J M. Investigation of dynamic response and deformation characteristics of loess landslide under near and far earthquakes: A case study of Liping landslide in Tianshui earthquake area, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1981-1992

Abstract: Seismic landslides in the loess plateau of China have severe disastrous effects and high potential risks. The response and deformation mechanism of seismic landslides is one of the hot topics of research. Taking the large-scale loess landslide in Liping Village in the Tianshui earthquake area as an example, the authors used the standard sine wave to explore the characteristics of the dynamic response influence on the landslide from local and remote earthquake ground motion elements, and inverted the actual Wenchuan remote earthquake and the local earthquake in Minxian County. According to the results obtained, the variation of PGA amplification factor at the measuring point with amplitude is related to the position of monitoring point: when the height of monitoring point is greater than 0.75 times overall height of the slope, the PGA amplification factor of monitoring point basically decreases with the increase

收稿日期:2020-09-02; **修订日期:**2020-10-20

资助项目:国家自然科学基金项目《考虑地震动场地效应的潜在地震滑坡危险性预测研究》(批准号:41572313)、《陇中盆地地震耦合作用下黄土-泥岩接触面滑坡液化-滑移机制及危险性定量评价研究》(批准号:41972301)、国家重点研发计划课题《地震及地震滑坡危险性分析方法研究及算法研发》(编号:2018YFC1504601)和中国地质调查局项目《渭河中上游城镇灾害地质调查》(编号:DD20190717)

作者简介:车福东(1994-),在读硕士生,从事滑坡动力响应及稳定性研究。E-mail:2947343784@qq.com

通讯作者:王涛(1982-),博士,副研究员,从事地震滑坡形成机理及危险性评估研究。E-mail:wangtaoig@cags.ac.cn

of amplitude; when the height of monitoring point is less than 0.75 times overall height of the slope, the PGA amplification factor of monitoring point increases significantly with the increase of amplitude; the PGA amplification factor at the measuring point is negatively correlated with the frequency. Slope deformation is positively correlated with amplitude and duration: when the amplitude and duration increase, the maximum horizontal and vertical displacement of monitoring points shows an increasing trend, the critical amplitude of the slope body's sharp deformation is about 0.05 g; when slope deformation is negatively correlated with frequency, the frequency increases, the maximum horizontal and vertical displacement of monitoring points decreases, the critical frequency of rapid deformation is about 5 Hz; the impact of amplitude on slope instability is greater than that of frequency on slope instability. Compared with the local earthquake in Minxian, the movement of main sliding body is inseparable from the high amplitude, low frequency, and long-lasting seismic waves generated by the Wenchuan earthquake. If the strong far earthquakes is ignored in the study of earthquake landslide stability Impact, significant safety risks may occur. In this paper, the research method about dynamic response and deformation difference of landslides caused by near and far earthquakes has certain reference significance for the research on earthquake landslide stability.

Key words: near and far earthquakes; loess landslide; ground motion; dynamic response; deformation

中国是世界上地震地质灾害最严重的国家之一,且主要分布在西部山区。西北黄土高原及周缘地震构造十分发育,历史强震频发,岩土体工程特性较差、人员密集区及设施分布较分散,较西南地区,地震黄土滑坡的灾害效应更严重,如 1920 年海原 8.5 级地震诱发滑坡掩埋伊斯兰教首领马元章一家及教徒 600 人^[1]、1718 年通渭地震诱发赵家窑滑坡致死 3 万多人^[2-3]。根据全国地震危险性区划统计^[4],黄土高原Ⅶ度及以上基本烈度区面积占比约 64%。21 世纪以来,中国在黄土高原规划了关中平原、兰州-西宁等多处国家级城市群,伴随经济社会快速发展,地震地质灾害风险也必然升高,因此地震黄土滑坡形成机理及风险研究意义重大。

众多学者围绕地震黄土滑坡机理研究取得了丰富进展。从工程地质分析角度,彭建兵等^[5]分析了黄土高原滑坡的成因及分布,认为地震除可直接诱发滑坡外,还可损坏土体结构、生成裂隙,为后续水的入渗及结构面扩展、贯通乃至坡体滑动创造条件;王家鼎等^[6]分析了海原地震黄土滑坡的高速运移特征,揭示了运动过程中的黄土解体、粉尘化效应等现象,推导了滑体斜抛过程滑距与滑速的计算公式;邓龙胜等^[7]认为海原大地震发育 4 种破坏模式的地震滑坡,着重探讨了在近场条件下频率高、周期短的地震波常引起较低矮的斜坡体产生共振效应。从动力学试验研究角度,王兰民^[8]通过剪切波速测试法、动三轴试验、微细观结构观测等手段,分析了黄土动力学特征及其液化机理,总结了群发性黄土地震液化机制;王峻^[9]通过试验揭示了黄土静力学和动力学特性,并将结果用于分析 1995 年甘肃永登 5.8 级群发地震滑坡成因,认为黄土体易损

性大,发生区域性严重滑坡灾害的几率较大;王谦等^[10]采用静、动三轴试验手段,分析了 2013 年岷县-漳县地震区黄土的岩土特性,通过对其稳定性和黄土震陷性的研判,预测了灾区后续重建场地的灾害风险;谢睿等^[11]基于海原地震下石碑塬滑坡黄土液化特性及其在动力学试验中应变与孔压增长的变化规律,总结了动应力与围压对孔压变化规律的影响;从数值模拟坡体响应角度,言志信等^[12]利用有限差分方法,模拟了顺层岩质边坡在不同地震动参数工况下的动力响应情况;张泽林等^[13-15]采用颗粒流数值方法模拟了天水震区郑家磨滑坡的 5 段式运动过程,同时利用有限差分方法分析了黄土-泥岩滑坡加速度显著放大效应及变形破坏模式;孙萍等^[16]利用有限差分方法对天水震区典型黄土-泥岩滑坡进行了稳定性评价,认为该历史地震滑坡在后面持续的地震动力作用下可能会引发再次滑动。上述研究进展对黄土高原区的地震滑坡动力学响应及变形失稳特性研究思路和方法具有借鉴意义。以往研究一般结合地震诱发实例,开展近场地震条件下滑坡形成机理反演居多^[12, 17-19],然而对远场地震作用或近震与远震作用对比研究报道很少^[20-21]。

事实上,由于黄土高原区域地震空间分布十分广泛,导致地震诱发黄土滑坡的分布随机性大,因此在分析地震作用对滑坡影响时,须综合考虑近震和远震作用的影响。对于特定滑坡,究竟近场较弱地震作用影响更显著,还是远场较强地震作用更易导致滑坡失稳,有必要深入研究。为此,本文以天水震区黎坪村大型黄土滑坡为例,探讨了其在 2008 年汶川远震(震中距约 380 km)和 2013 年岷县近震(震中距约 80 km)2 期作用下的动力响应规律和变

形失稳特征, 以期开展近远震等多工况作用下地震黄土滑坡稳定性研究提供参考。

1 滑坡发育特征

受 2008 年 5 月 12 日四川省汶川县 8.0 级地震影响, 甘肃省天水震区黎坪村诱发一滑坡, 该滑坡位于西秦岭北缘断裂带地区、秦岭北缘与黄土丘陵地貌过渡带, 武山县城关镇, 渭河右岸次级支沟中(图 1)。坡脚高程约 1520 m, 坡顶约 1770 m, 坡高约 254 m; 滑坡平面呈矩形状, 后壁宽约 1200 m, 滑体长约 950 m, 滑体厚约 82~95 m, 主滑方向约为 103° ; 该滑坡体积约为 $4.75 \times 10^6 \text{ m}^3$, 属大型滑坡(图 2)。

滑坡体平面形态具有分区特征且局部变形较明显。受多期活动影响, 滑坡体上发育次级滑体, 后壁陡坎较模糊。滑体北侧壁清晰, 受流水侵蚀作用强烈, 南侧壁受滑坡推挤作用, 边界模糊不清。该滑坡体后缘高程较高, 汶川地震期间, 坡体后缘处受到拉张作用影响, 形成多条呈不规则圆弧形拉张裂缝(图版 I-a); 图版 I-d 显示滑体中部分为南北 2 区, 北区下滑最大高差达 90 m, 南区下滑最大高差约为 60 m, 北区较南区活动剧烈; 该滑坡形成时间较长, 且受临近滑体活动影响, 滑体整体性较差, 中上部发生隆起, 前缘临空高度大, 高差约 104 m, 多发育宽约数十厘米、长约数米的裂缝; 图版 I-e 为坡体前缘部位发育的群发性黄土溜滑。

该滑坡在剖面上表现为地层下硬上软、滑体深层多级、旋转平移式滑动的发育特征。黄土(Q_3^{col})、泥岩(N)为滑坡的主要易滑地层, 上覆黄土层角度不整合覆盖于下部泥岩风化层上(图版 I-f)。新近系泥岩地层为近水平层状, 产状为 $331^\circ \angle 6^\circ$ 。沿坡体中轴线方向布设 ZK1 和 ZK2 两个钻孔(图 3)。ZK1 位于滑坡的后缘, 穿透整个滑坡体, 孔口高程约为 1695 m, 孔深约为 105 m。滑体内发育多组剪切面, 坡面下约 25 m 处见泥岩层面, 层面

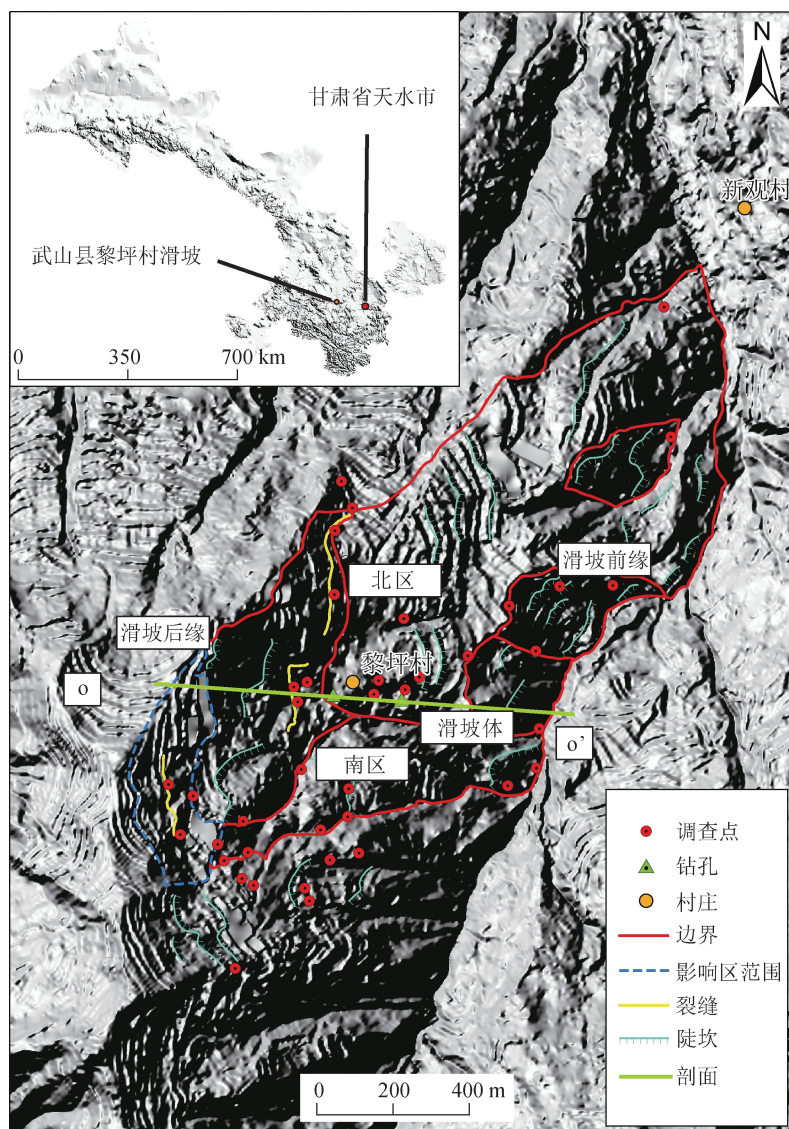


图 1 黎坪村滑坡平面图

Fig. 1 Planview of Liping landslide

陡倾, 见擦痕且较光滑, 此处为滑面, 同时也是黄土和泥岩的分界面。在钻孔取样过程中, 又在坡面下约 100 m 处再次揭露滑面, 且较破碎, 继续往下延伸取样约为 5 m, 下部泥岩明显较硬, 颜色为棕红色、红褐色, 风化程度为弱风化-微风化; ZK2 位于滑坡的中部靠坡体前缘, 钻孔穿透整个滑坡体, 孔口高程约为 1645 m, 孔深约为 110 m, 在钻探过程中, 分别在 13.4 m 处、23.7 m 处和 107 m 处揭露滑面。底部滑面呈近水平状, 岩心相对完整, 滑面擦痕明显。调查显示, 滑动面位于黄土层、黄土-泥岩地层分界面及深部泥岩层中(呈近水平状)。另外, 再往下部发育弱风化泥岩, 与其上部风化程度较强的泥岩层之

图版 I Plate I



a~f.黎坪村滑坡发育特征现场照片;a.滑坡体后缘拉裂缝,镜向 NE;b.地震时倒塌的外墙,镜向 NW;c.滑坡体中部居民家地面裂缝,镜向 NE;d.滑坡体中部的垂向位错陡坎,镜向 W;e.滑坡体前缘黄土溜滑,镜向 NW;f.滑体侧缘地层剖面,镜向 NW

间局部发育层间错动,伴有泥岩破碎和局部裂缝交错现象,但并未全部贯通形成宏观滑动带。

较之 2008 年汶川 8.0 级地震引发黎坪村滑坡滑动(图版 I -b、c),2013 年岷县 6.6 级地震在此处震感不强。首先并未造成黎坪村滑坡主滑体发生滑动,其次,后缘仅见微小裂缝,中部微鼓,前缘未见类似汶川地震时大面积黄土溜滑,但局部有小范围黄土溜滑出现。整体看,2013 年岷县地震对黎坪村滑坡产生的影响程度远小于 2008 年汶川地震。

2 滑坡模型及参数设置

2.1 滑坡模型及边界条件

本文采用中国科学院力学研究所开发的基于连续介质力学离散元方法的 GDEM 数值模拟软件进行滑坡地质力学建模^[22]。坡体整体(图 3)尺寸

长 950 m,高 300 m。此顺层缓倾滑坡体由 3 层岩土体组成,上层为地表第四系黄土,厚度介于 10~25 m 之间;中层为新近系泥岩,风化较严重,上部尤甚,厚度为 70~83 m;下层为较新鲜的泥岩;同时上层与中层之间的接触面(黄土与泥岩接触面)在坡体前缘陡坎处出露。

为了反映动力条件下坡表及内部响应情况,在坡表和坡内布设多条监测线,2 条横测线(测线 1 和 2)、2 条纵测线(测线 3 和 4)及 1 条坡面测线(测线 5)(图 4)。在每条测线上布设多个位置测点,通过对坡体模型加载地震波,监测不同位置的加速度、速度及位移数据,进而分析坡体动力响应特性。为了便于数据进行统一对比及更好地体现地震动放大效应,以基点 10 为基准点,用相对放大系数(监测点加速度、速度及位移时程曲线的峰值与基点加速度、

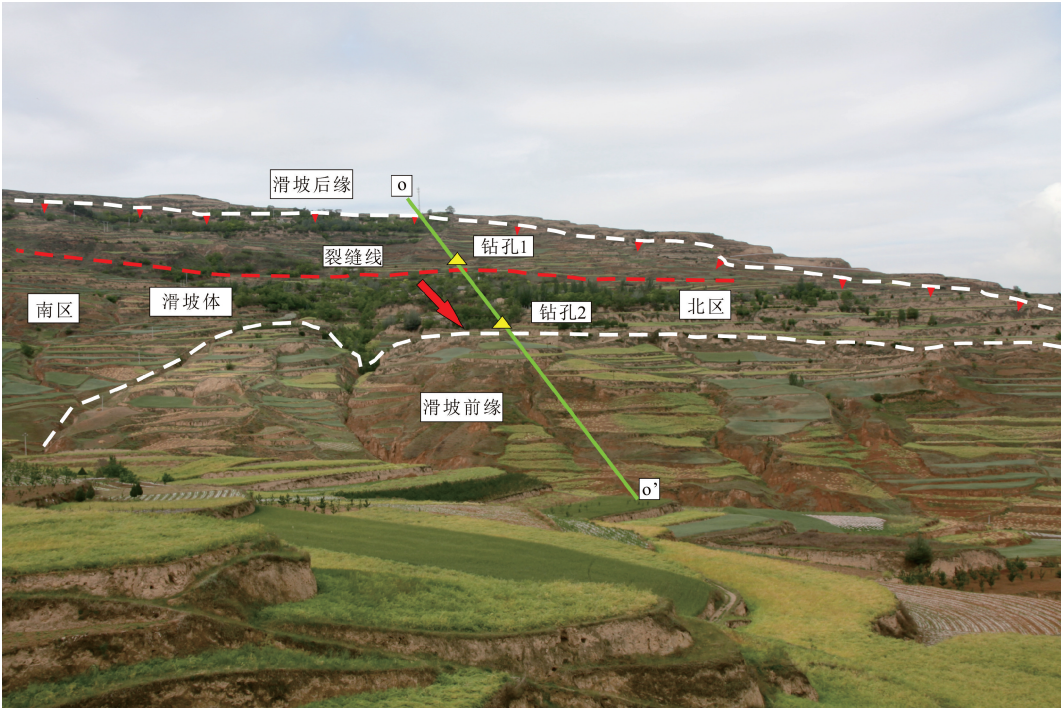


图 2 黎坪村滑坡全貌图(镜向 NW)
Fig. 2 Fullmap of Liping landslide

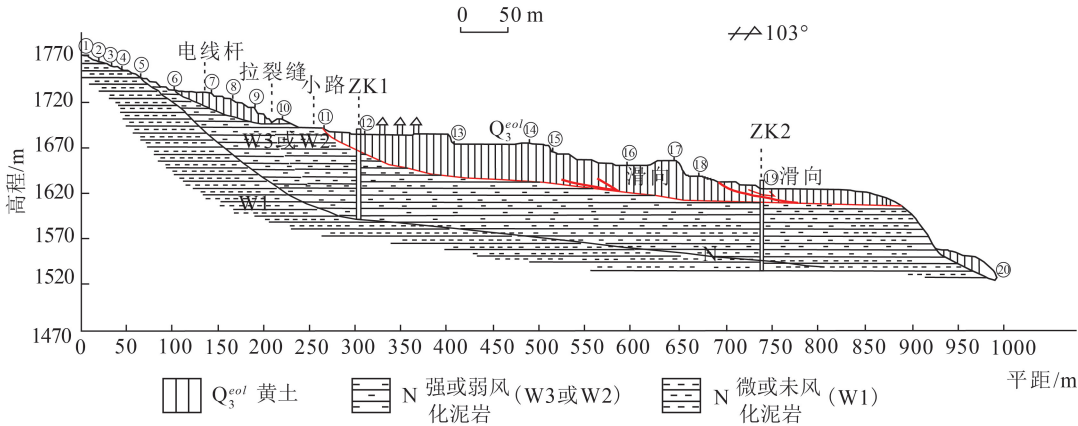


图 3 黎坪村滑坡工程地质剖面
Fig. 3 Engineering geological section of Liping landslide

速度及位移时程峰值之比)进行表征。本次数值计算坡体内部均按照弹塑性体处理,基于摩尔-库伦强度准则,模型底部采用静态边界,2个边侧设置自由场边界。在进行坡体模型动力计算之前,先进行静力计算并达到坡体静力平衡后,再进入下阶段运算^[12]。

在开始进行数值计算前,先进行坡体模型测

试,在边界布设监测点,输入地震动时程后,观察监测点的加速度和速度时程曲线,与输入测试波的加速度和速度时程曲线基本一致且它们的傅里叶谱吻合程度较好,证明地震波的输入及坡体模型测试状态正常,然后进行模拟分析^[12]。

2.2 岩土体物理力学参数

对滑坡体进行现场勘察取样,通过室内土工试

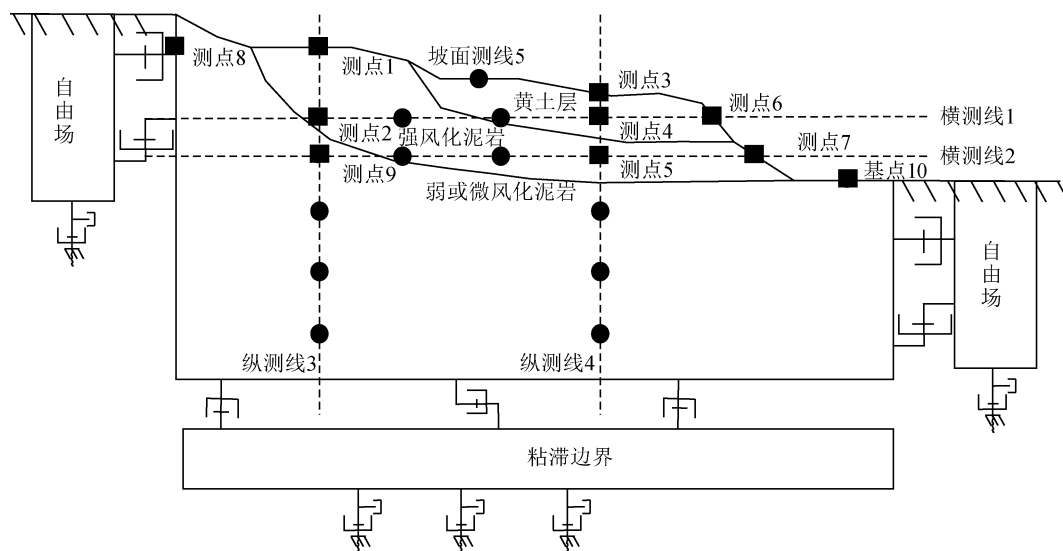


图4 滑坡体数值模型和测线及监测点位置

Fig. 4 Numerical model of landslide and location of survey lines and monitoring points

验^[23],获取滑坡岩土体的基本物理和力学强度参数(表1)。

2.3 数值模拟工况

为揭示滑坡地震动响应规律和实际地震作用下的变形特征,本文制定了针对不同地震动工况的综合模拟方案^[12, 24-27]。为分析坡体对不同近远震地震动要素的响应规律,确保得到各单一变量的结论稳定可靠,选用标准正弦波作为输入波,通过“固定其他、调整其一”的方式模拟。为反演实际远震和近震作用对黎坪村滑坡的影响,选用岷县台站记录的汶川8.0级远震和岷县6.6级近震产生的实际地震波,作为动力输入,并对地震波进行滤波和基线校正,探讨滑坡实际变形特征(图5)。

基于标准波输入的模拟工况,重点考虑振幅、频率和持时3个地震动要素。振幅的设计是根据2次实际地震波波谱的峰值(图5),在2个临界值周围进行插值取值。频率的设计是根据2次实际地震波卓越频率,在邻近周围插值取值,地震波傅里叶变换频谱显示汶川地震波卓越频率约为5.3 Hz,而岷县地震波卓越频率约为9.1 Hz(图6),经现场地脉动测试,场地卓越频率介于0.1~2 Hz之间。持时的设计是根据2次实际地震波较强烈作用阶段时间作为临界,然后插值取值。需要注意的是,汶川地震波尽管持时120~150 s,但截取强烈作用时间约为50 s;岷县地震波持时较短,强烈作用阶段约为10 s,为方便对照,同理截取岷县地震波作用阶段约50 s(表2)。

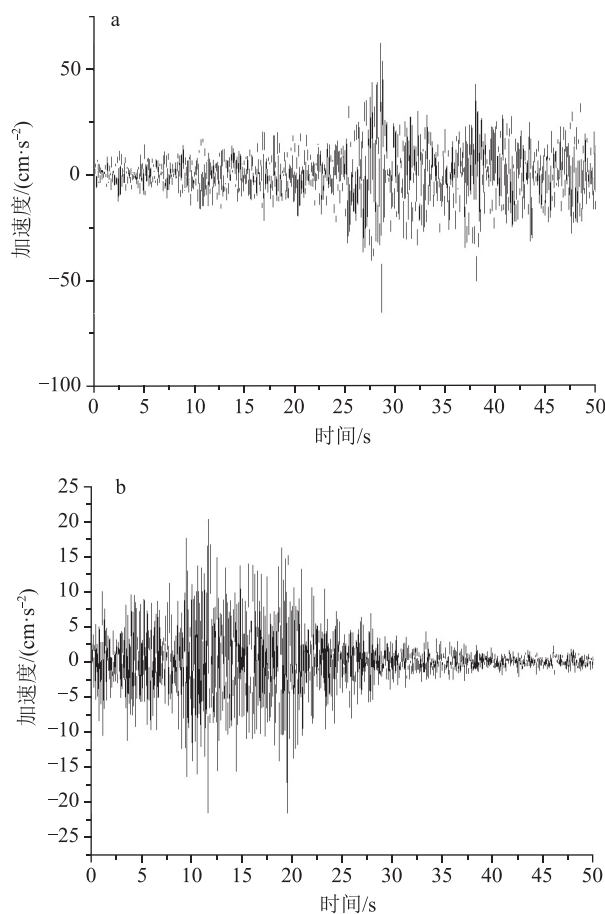


图5 2008年汶川地震波(a)和2013年岷县地震波(b)
加速度时程(经过基线校正与滤波)

Fig. 5 Acceleration time history of Wenchuan earthquake wave in 2008(a) and Minxian earthquake wave in 2013(b) (baseline correction and filtering)

3 近远震地震动要素对动力响应的影响

刻画地震惯性力的要素主要包括振幅、频率、持时等,本文将近远震作用具象化为振幅的大小、频率的高低和持时的长短等地震动要素变化,用于分析其对滑坡动力响应的影响特征。

3.1 振幅大小的影响

为了研究不同振幅(0.0125 g、0.025 g、0.05 g、0.1 g及0.2 g)变化对坡体动力响应特征,设定 TS-05、TS-08、TS-09、TS-10 和 TS-11 工况条件,然后对坡体模型施加相应振幅的振动波。

为了更好地描述监测点位置及坡体宏观响应分析,选用了占高比(以坡体模型左下角顶点处为原点,测点的纵坐标与坡体模型左边界长度的比值即为占高比)和水平比(以坡体模型左下角顶点处为

表 1 岩土体物理力学性质参数
Table 1 Physical and mechanical properties
of rock and soil mass

层位 序号	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 /MPa	泊松 比	黏聚力 /MPa	抗拉强 /MPa	内摩擦角 /°
1	1973	64.5	0.25	0.04	0.03	20
2	2320	78.4	0.15	0.92	1.12	25
3	2657	83.3	0.13	1.2	1.37	29

表 2 考虑不同地震动参数及实际地震动时程设计的工况
Table 2 Design conditions considering different ground
motion parameters and actual ground motion records

工况 编号	波类型	幅值 /g	频率 /Hz	持时 /s
TS-01	汶川地震波	0.066	主频约 5.3	50
TS-02	岷县地震波	0.022	主频约 9.1	50
TS-03	正弦波	0.05	0.5	30
TS-04	正弦波	0.05	1	30
TS-05	正弦波	0.05	2	30
TS-06	正弦波	0.05	6	30
TS-07	正弦波	0.05	10	30
TS-08	正弦波	0.0125	2	30
TS-09	正弦波	0.025	2	30
TS-10	正弦波	0.1	2	30
TS-11	正弦波	0.2	2	30
TS-12	正弦波	0.05	2	10
TS-13	正弦波	0.05	2	50

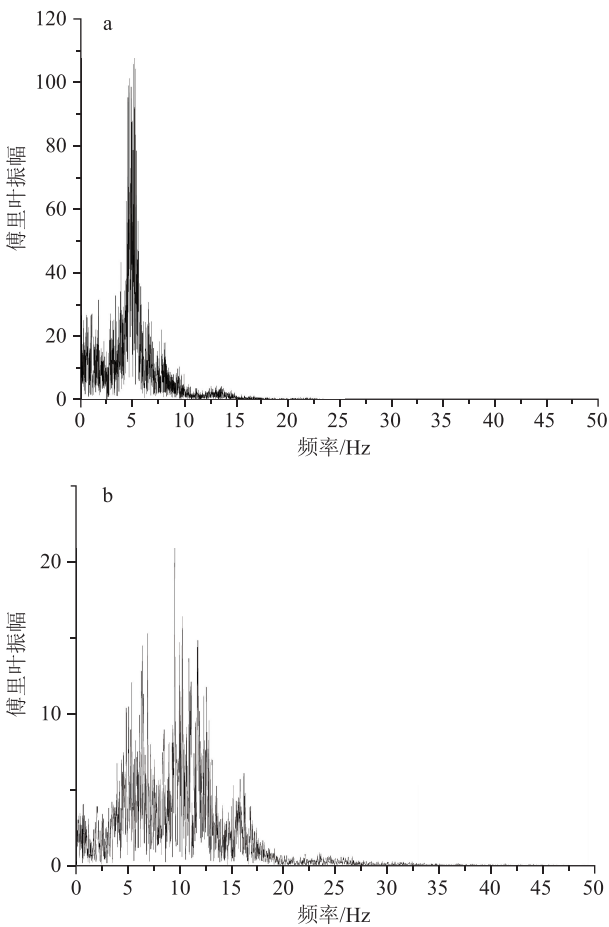


图 6 2008 年汶川(a)和 2013 年岷县(b)地震波傅里叶变换频谱
Fig. 6 Spectra of the Fourier Transform of the 2008 Wenchuan
earthquake wave(a) and the 2013 Minxian earthquake wave(b)

原点,测点的横坐标与坡体模型下边界长度的比值即为水平比)进行表征。

当监测点高度超过 0.75 倍坡高时,随振幅增加,测点 PGA 放大系数基本呈减小趋势;当监测点高度不超过 0.75 倍坡高时,随振幅增加,测点 PGA 放大系数基本呈非线性增加趋势,由振幅 0.0125 g 到 0.2 g PGA 放大系数的增加量绝对值占比可达 50%(图 7)。分析是因为测点高度超过 0.75 倍坡高时,测点存在于黄土与强风化泥岩层中,当振幅持续增加,震动加强,剪应变区增大^[27],刚度减小,阻尼增大,使该区测点的 PGA 放大系数逐渐减小;而测点高度不超过 0.75 倍坡高时,测点存在于弱或微风化泥岩层中,此处岩土体应力应变特性状态偏于弹性状态,随着振幅的增加,该处测点 PGA 放大系数逐渐增大。根据测点监测数据(图 7),以监测点

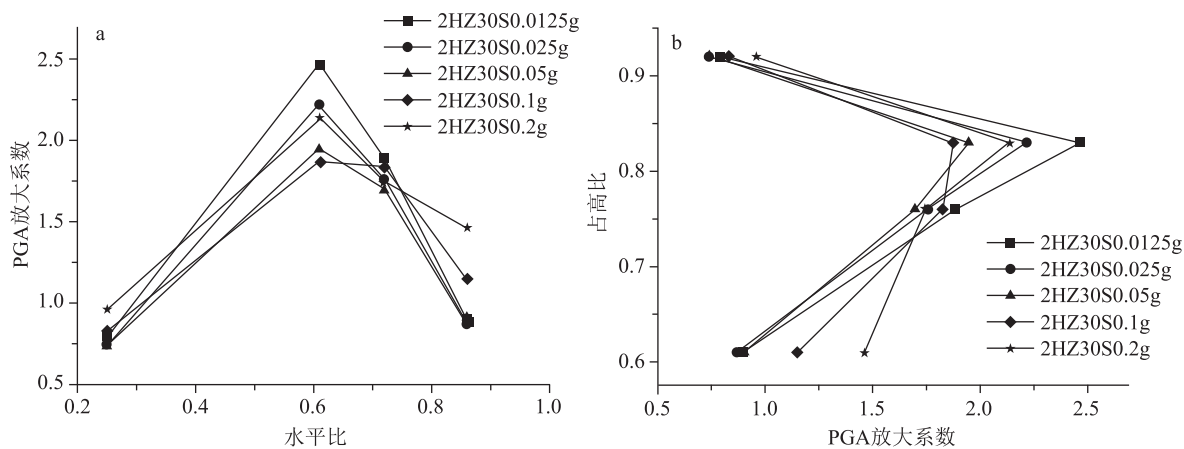


图7 不同振幅条件下PGA放大系数与水平比(a)、占高比(b)关系

Fig. 7 Relationship between PGA amplification factor, horizontal ratio (a), and ratio of heights (b) under different amplitude conditions

3 为例(位置:水平比为 0.61, 占高比为 0.83), 在高度超过 0.75 倍坡高时, 发现随着振幅增加, PGA 放大系数逐渐变小, 但此组工况(按照振幅由小到大顺序)下最大加速度分别为 0.65 m/s^2 、 1.31 m/s^2 、 2.65 m/s^2 、 5.06 m/s^2 、 10.40 m/s^2 (与每种工况一一对应), 是逐渐增加的; 测点水平和竖直最大位移量总体呈非线性增加趋势, 且随着振幅逐渐增加, 水平坡体最大位移与竖直坡体最大位移之差加大, 特别是在 0.2 g 振幅工况下(图 8), 前者比后者大 3 倍左右。

3.2 频率高低的影响

TS-03、TS-04、TS-05、TS-06 及 TS-07 这组工况是为了研究不同频率(0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 6 Hz, 10 Hz)震波对坡体的影响。随着频率的增加, 测点 PGA 放大系数基本呈现减小趋势, 岩土体强度强弱转换区尤为明显(图 9)。较该组其他工况,

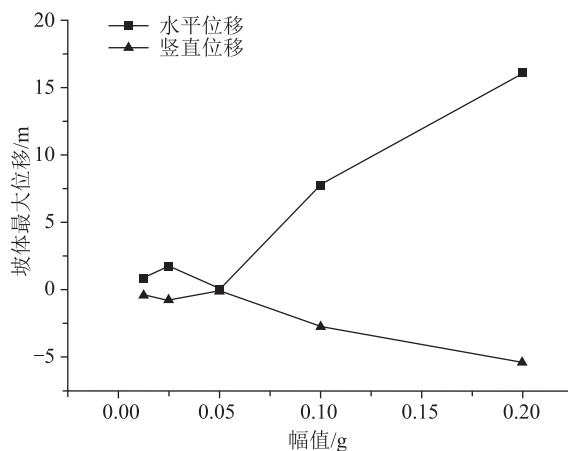


图8 不同振幅条件下坡体最大位移

Fig. 8 Maximum displacement of landslide under different amplitude conditions

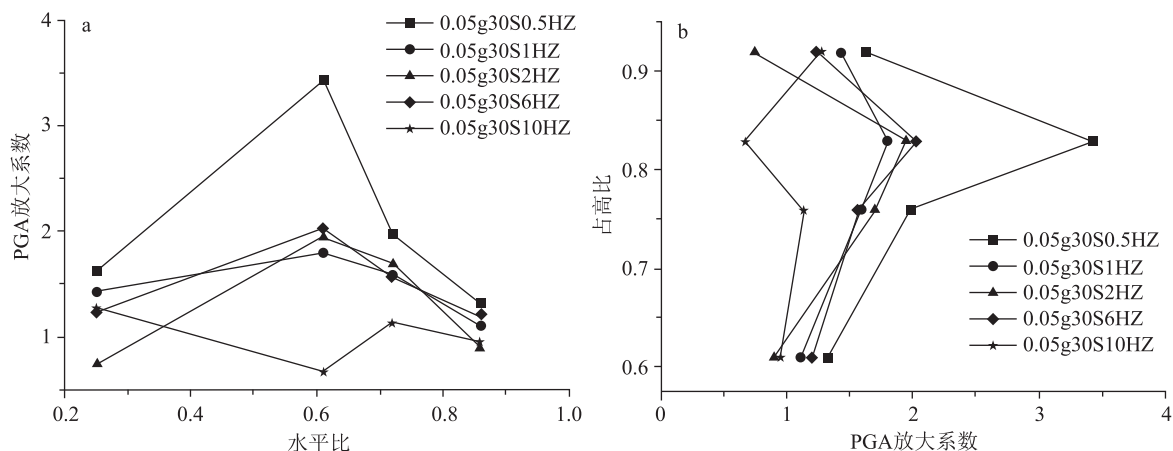


图9 不同频率条件下PGA放大系数与水平比(a)、占高比(b)关系

Fig. 9 Relationship between PGA amplification factor, horizontal ratio (a), and ratio of heights (b) under different frequency conditions

0.5 Hz 工况下坡面测线上各点 PGA 放大系数达到最大值;而在同一坡面测线上,特别是测点 3 和 6 的 PGA 放大系数较大,另外 2 点 PGA 放大系数变化在 0.5~1.5 范围,不显著。分析是因为测点 3 和 6 场地卓越频率范围为 0.2~0.5 Hz,而后者测点 1 和 7 场地卓越频率范围为 1.2~1.7 Hz 与 10~11 Hz,对比发现,前者更接近此工况波频,故其 PGA 放大系数较大,又因坡体垂直放大作用^[27]明显,故测点 3 的 PGA 放大系数比测点 6 的 PGA 放大系数大。

坡体最大竖直和水平位移基本随着频率的增加而减小(图 10)。因该坡体场地卓越频率范围大部分在 0.2~1 Hz 之间,而增加的波频逐渐远离此范围,所以导致测点的 PGA 放大系数减小。

3.3 持时长短的影响

通过工况 TS-5、TS-12 及 TS-13 进行不同持时影响条件下的测试。结果显示(图 11),相同频谱条件下,坡体的水平与竖直最大位移量随持时的增加而增大;从 10 s 到 50 s 过程看,水平最大位移量增大约 3 倍,而 50 s 地震作用结束时,水平最大位移量约为竖直最大位移量的 2~3 倍。主要是因为震动波不断输入坡体,坡体各部分位置点剪应变和位移不断增加,使岩土体内部损伤不断积累^[27],最终形成潜在滑移面,累计位移逐渐增大,导致最大位移量(竖直与水平)的增加。

在不同振幅、频率及持时条件下,经与前面坡体测点最大位移结果比较,发现在振幅影响下坡体测点最大位移量约为在频率影响下测点最大位移

量的 2 倍,而在持时影响下坡体测点最大位移量约为在频率影响下测点最大位移量的 0.5~0.6 倍,故结合前述分析,认为振幅对坡体失稳影响程度要大于频率对坡体失稳影响程度,持时对坡体失稳影响程度较小;经多工况测试,从最大位移数据图(图 8、图 10)可认为该坡体位移急剧变形临界幅值约为 0.05 g,临界频率约为 5 Hz。

4 汶川远震和岷县近震作用下滑坡变形特征

前文揭示了不同地震动要素下坡体的动力响应特征及规律,通过 TS-01 及 TS-02 两种实际地震工况,现在重点对黎坪村滑坡近远震作用下响应与宏观变形失稳进行对比分析。

4.1 加速度响应特征

从坡体水平方向分析(图 12-a),无论是横测线 1 还是横测线 2,2008 年汶川地震下坡体测线测点 PGA 放大系数均超过 2013 年岷县地震下同测线测点 PGA 放大系数,且横测线测点 PGA 放大系数最大差约 2 倍及纵测线测点 PGA 放大系数最大差约 3 倍,反映了前者对坡体作用后产生的影响较强。野外调查显示,2008 年汶川地震黎坪村滑坡有明显的水平滑动迹象。

从坡体竖直方向分析(图 12-b),2 条纵测线上测点 PGA 放大系数随高度增大先变小后变大,其中 2008 年汶川地震纵测线 3 上测点 PGA 放大系数最大;随着坡体高度增大,坡体下部风化程度较低的

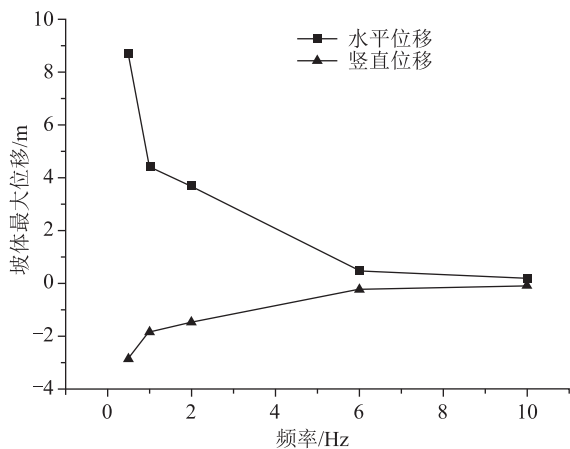


图 10 不同频率条件下坡体最大位移

Fig. 10 Maximum displacement of landslide under different frequency conditions

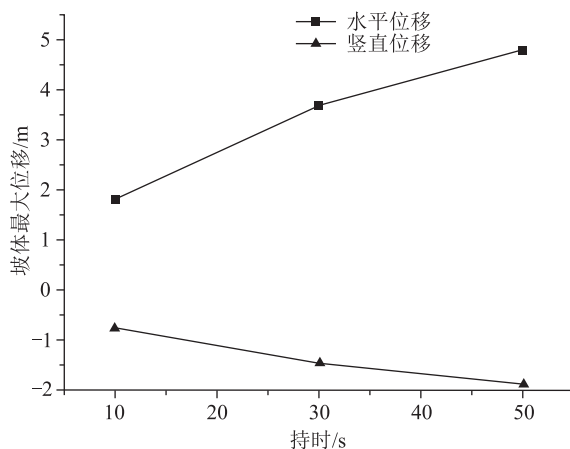


图 11 不同持时条件下坡体最大位移

Fig. 11 Maximum displacement of landslide under different frequency duration spans

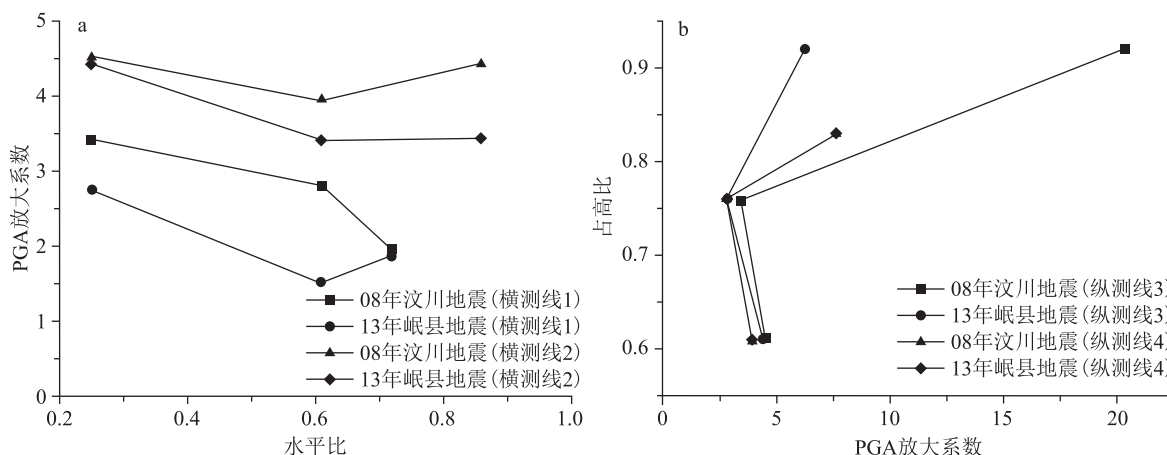


图 12 两次地震工况水平和竖直测线上测点 PGA 放大系数与水平比(a)、占高比(b)的关系

Fig. 12 Relationship between PGA amplification factor, horizontal ratio(a), and ratio of heights(b) on the horizontal and vertical lines on the two seismic conditions

泥岩或基岩逐渐向岩土体性质较弱的浅表泥岩层或黄土层过渡,此时刚度减小,阻尼增大,造成岩土体滤波作用显著,能量下降,导致测点 PGA 放大系数先减小;浅表层岩土体风化较严重,考虑到坡体垂直放大作用^[27]及特定频率地震波显著放大作用,测点 PGA 放大系数后变大。

据现场地脉动测试结果,场地卓越频率在 0.2~1 Hz 范围内,汶川地震较岷县地震产生了较多高幅值、低频率及持时较长的地震波,更接近场地卓越频率,故相对于汶川地震,岷县地震时测点 PGA 放大系数未出现显著增大且汶川地震在坡体产生了较强破坏效应,这与汶川地震后现场发现坡体后缘

大拉张裂缝效果(图版 I-a)吻合。

所以对照前述发育特征及响应分析,汶川地震时该滑坡主要滑动形式为拉裂-剪切滑移模式^[16]。

位于坡体前缘表层的 2 次不同地震测点 6 和 7 的 PGA 放大系数大小却相近(图 13),这是由岩土体临空面放大作用^[27](坡体前缘的黄土溜滑现象,图版 I-e)和频谱的差异(对不同频率地震波选择放大作用)共同作用导致的。坡体分为 3 层岩土体,存在“下硬上软”的特点,从下往上,刚度减小,表层黄土物理力学性质较弱,阻尼较大,具有显著的滤波作用,从而导致波的能量逐渐下降,地震动要素参数的减小^[27],当地震波频率减小到接近于场地卓越频

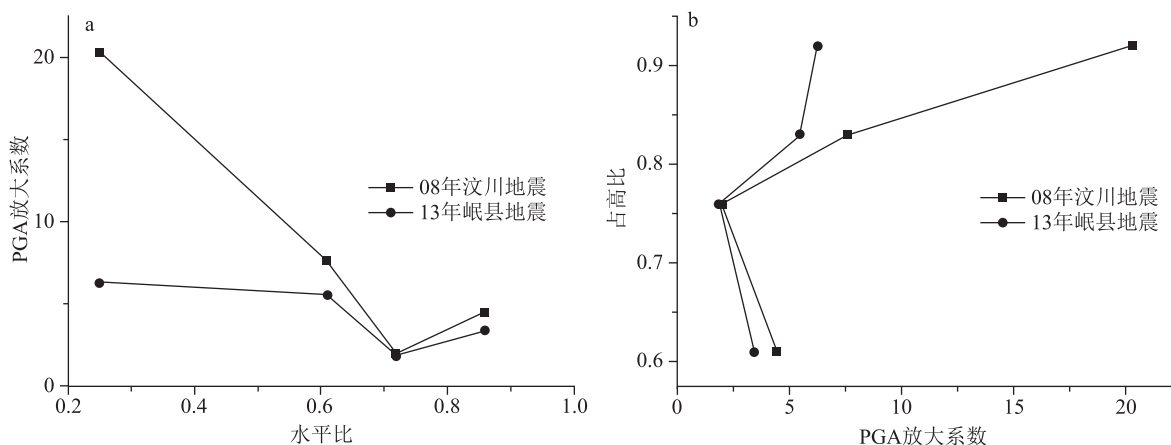


图 13 两次地震工况坡面测线测点 PGA 放大系数与水平比(a)、占高比(b)的关系

Fig. 13 Relationship between PGA amplification factor and horizontal ratio(a), and ratio of heights(b) of the landslide surface line between the two earthquake conditions

率,较易产生共振破坏效应,但关于波频和场地卓越频率之间的关系及造成坡体内部影响还有待深化。

4.2 水平位移场特征

通过坡体中设置的测点,可以监测实际地震波作用的完整过程及其产生的永久位移。2 种实际工况下的水平位移显示(图 14),汶川地震对坡体产生的影响程度大于岷县地震的影响,在坡肩、坡脚还有一些临空面附近的地方水平位移较大。

现场调查发现,汶川地震使坡肩靠顶部前缘黄土变形相对剧烈,发生了大规模黄土溜滑;坡体中后部(黄土与泥岩接触界面)在震动过程中产生了拉裂缝,裂缝扩展向下延伸,同时上部滑体产生了水平方向的位移,滑体中裂缝相互交错逐渐贯通,最终导致向坡前扩展,滑体滑动,据现场调查资料,当时该滑坡后缘裂缝延展长度可达 900 m 左右,最宽的裂缝为 2~4 m,深度为 3~6 m^[28]。以后缘裂缝为例,较之模拟结果,现场调查最宽后缘处拉裂缝 2~4 m,然而图 14 显示后缘为 1.6~1.9 m,两者略有差距但相差不大,这与震动过程中岩土体参数劣化等多种条件有关,同时坡顶中部局部隆起(中鼓)且明显下错,前缘部分黄土发生溜滑,且前者整体综合变形强度大于后

者,这些均证明了此次数值模拟结果较可靠。

5 结 论

基于黎坪村大型黄土滑坡勘察和室内土工试验,设计了滑坡概化数值模型,利用连续介质力学的离散元数值模拟的方法,选取不同地震动要素设置,开展岷县近震(80 km)和汶川远震(380 km)条件下大型黄土滑坡地震动力响应规律及变形研究,初步得到以下认识。

(1)采用标准正弦波揭示了近远震地震动要素对滑坡动力响应的影响特征。测点 PGA 放大系数随振幅的变化规律与坡体位置有关,测点 PGA 放大系数在坡体位置大于 0.75 倍坡高时,随振幅的增加而减小;当小于 0.75 倍坡高时,随振幅的增加而显著增强;测点 PGA 放大系数与频率变化呈负相关性,即随着频率的增加而减小。

(2)坡体变形与振幅和持时变化呈正相关性,即测点最大水平和竖直位移随着振幅和持时增加而增加,该坡体急剧变形(局部失稳)临界幅值约为 0.05 g;坡体变形与频率变化呈负相关性,坡体测点最大水平和竖直位移频率变大呈下降趋势,急剧变形(局部失稳)临界频率约为 5 Hz;对比显示,振幅

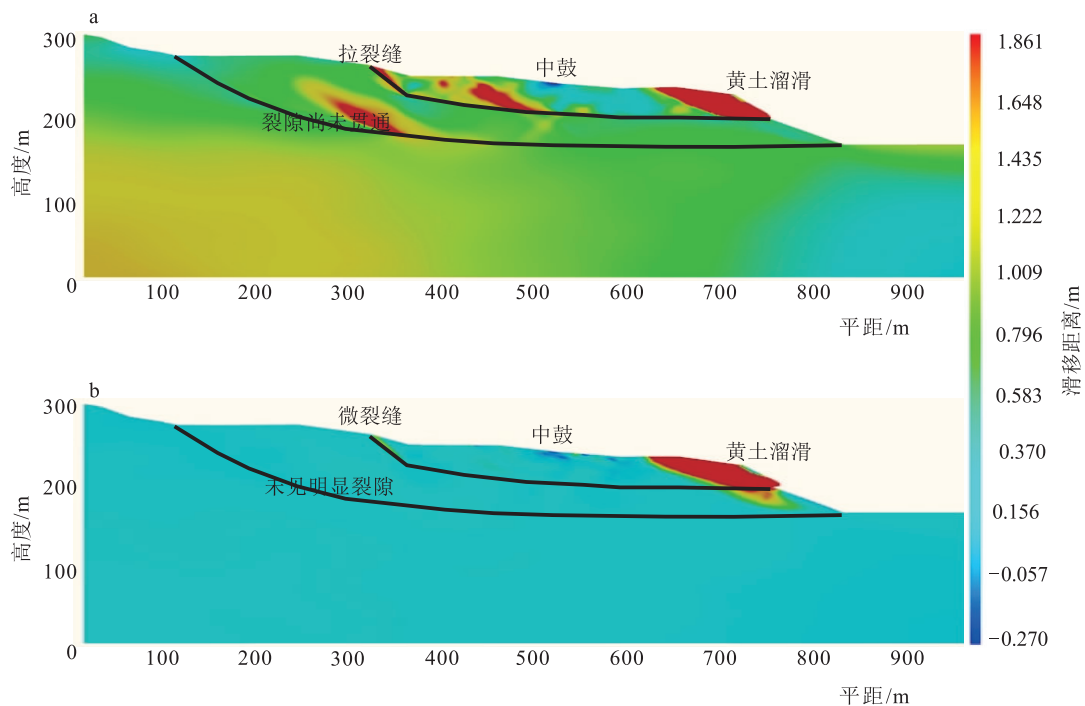


图 14 汶川(a)和岷县(b)地震工况水平位移场分布

Fig. 14 Distribution of horizontal displacement field under Wenchuan(a) and Minxian(b) earthquake conditions

对坡体失稳影响程度大于频率对坡体失稳影响程度。滑坡附近台站记录的汶川地震波幅值约为0.066 g,主频约为5.3 Hz,持时较长;而岷县地震波传到处台站幅值约为0.022 g,主频约为9.1 Hz,持时较短。相比之下,2008年汶川地震导致滑坡主滑体滑动是不难理解的。

(3)对比黎坪村滑坡的近远震响应可知,汶川远震使主滑体发生了拉裂-剪切滑移式滑动,而岷县近震对滑坡整体影响虽有震感,但相对较弱;结合前述工况,可知滑坡较大变形与高幅值、低频率以及长持时地震波作用密不可分。由此可见,在地震滑坡稳定性评价时,远场强震的影响举足轻重;忽视该因素可能导致结论片面甚至重大安全风险。

本文初步探讨了研究近远震作用下滑坡动力响应与变形特征思路及方法,后续将结合地脉动测试及岩土体动力学参数试验,深化对地震动作用方式、地震波频率与场地卓越频率两者关系、岩土体性质劣化等方面研究,以便为黄土高原地震滑坡稳定性分析提供借鉴。

致谢:中国科学院力学研究所冯春副研究员、王心泉、朱心广博士,在数值模拟方面给予了指导与帮助,中国地质科学院地质力学研究所栗泽桐、胡乐、赵建磊硕士在室内试验和野外勘查过程中给予了协助,审稿专家对本文细节定量方面的把控及核心问题的阐述等方面提供了宝贵的意见和建议,在此谨表谢意。

参考文献

- [1] 袁丽侠.宁夏海原地震诱发黄土滑坡的形成机制研究[D].西北大学博士学位论文,2005.
- [2] Sun P, Shao T Q, Shi J S, et al. Giant Landslides Triggered by the 1718 Tongwei Earthquake in Pan'an, Gansu Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(1): 309-310.
- [3] 王兰民, 孙军杰.黄土高原城镇建设中的地震安全问题[J].地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 115-122.
- [4] 高孟潭等. GB18306—2015 中国地震动参数区划图[M]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] Peng J B, Wang S K, Wang Q Y, et al. Distribution and genetic types of loess landslides in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 329-350.
- [6] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670-674.
- [7] 邓龙胜, 范文. 宁夏海原8.5级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 30-37.
- [8] 王兰民. 黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 1-19.
- [9] 王峻. 黄土易损性与地震黄土滑坡关系探讨[J]. 甘肃科学学报, 2008, 20(2): 36-40.
- [10] 王谦, 王兰民, 王峻, 等. 岷县漳县地震灾后重建场地黄土震害预测[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 137-142.
- [11] 谢睿, 裴向军. 强震作用下饱和黄土液化特征试验研究[J]. 路基工程, 2014, (2): 49-52.
- [12] 言志信, 张森, 张学东, 等. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3522-3528.
- [13] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. The role of seismic triggering in a deep-seated mudstone landslide, China: Historical reconstruction and mechanism analysis[J]. Engineering Geology, 2017, 226: 122-135.
- [14] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2403-2412.
- [15] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震作用下黄土滑坡加速度深度放大效应及震后变形模式研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 102-110.
- [16] 孙萍, 祝恩珍, 张帅, 等. 地震作用下甘肃天水地区黄土-泥岩接触面滑坡机理[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 218-226.
- [17] 刘汉香, 许强, 范宣梅. 地震动参数对斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(2): 41-47.
- [18] 邓龙胜, 范文. 黄土边坡动力响应的影响效应研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 483-490.
- [19] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Dynamics characteristic of red clay in a deep-seated landslide, Northwest China: An experiment study[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 254-268.
- [20] 陈永明, 石玉成. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J]. 地震研究, 2006, 29(3): 276-280, 318.
- [21] 黄帅, 宋波, 蔡德钧, 等. 近远场地震下高陡边坡的动力响应及永久位移分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 768-773.
- [22] 杨长卫. 岩质边坡的地震动特性及基覆型边坡的滑坡成因、稳定性判识、危害范围评价体系的研究[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2014.
- [23] 王雷, 赵法锁, 程晓辉, 等. 黄土基岩接触面滑坡滑带土物理力学特性及微观结构[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(3): 450-458.
- [24] 邓亚虹, 徐召, 孙科, 等. 一种考虑波动效应的拟动力地震边坡稳定性分析方法[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(5): 620-630.
- [25] 王阿丹, 王昌业, 李萍, 等. 西安白鹿原北缘黄土边坡稳定的可靠度分析[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 104-110.
- [26] 贺汇文, 龙建辉, 苏生瑞, 等. 某高速公路滑坡的数值模拟及后缘坡体稳定性分析[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 183-187.
- [27] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 918-923.
- [28] 邢爱国, 吴志坚, 陈龙珠, 等. 汶川地震在甘肃省的次生典型边坡灾害特征[J]. 西北地震学报, 2010, 32(1): 95-98.