

DOI: 10.11779/CJGE2019S2042

岷县漳县 6.6 级地震永光村滑坡致灾机制分析

吴志坚^{1,2}, 陈豫津³, 王 谦², 赵多银², 张 丹⁴

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省科学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 2013 年 7 月 22 日甘肃省定西市岷县漳县 MS6.6 级地震, 诱发了大量黄土滑坡和崩塌灾害。基于对岷县梅川镇永光村西侧泥流状黄土滑坡的现场勘察、探井取样和高密度面波勘探, 得到了该滑坡的地形条件和土层分布特点。通过对滑坡体土样进行室内动三轴液化试验, 验证了该滑坡土体在地震作用下发生液化的可能。结合动力有限元法和强度折减法, 分析了该滑坡在地震作用下的动力响应特征和动力稳定性的影响因素。结果表明: 震前的持续强降雨, 导致滑坡体表层黄土含水率升高, 抗剪强度降低, 在强地震荷载作用下, 黄土层之间存在拉应力效应, 表层土体发生液化, 造成该斜坡失稳瞬间发生, 发生长距离滑移。

关键词: 岷县漳县地震; 黄土滑坡; 动力稳定性; 致灾机制

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0165-04

作者简介: 吴志坚(1974—), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与冻土工程领域的研究。E-mail: zhijianlz@163.com。

Disaster-causing mechanism of Yongguang landslide under Minxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquake

WU Zhi-jian^{1,2}, CHEN Yu-jin³, WANG Qian², ZHAO Duo-yin², ZHANG Dan⁴

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Key Laboratory of Loess

Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730070,

China; 4. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Minxian-Zhangxian MS6.6 earthquake induced a large number of loess landslides and collapses on July 22, 2013. Based on the field borehole survey, soil sampling and surface wave investigation, the topography and distribution of soil layers of the west Yongguang loess landslide are identified. Moreover, the liquefaction probability of the landslide loess is proven through dynamic triaxial liquefaction tests. The dynamic response characteristics and stability influence factors of the landslide under strong earthquake effect are analyzed combining the dynamic finite element method and the strength reduction method. The results show that the water content increases and shear strength decreases at the loess on the slope surface because of heavy rain before the earthquake, and tensile stress and liquefaction occur in the surface of loess slope, which causes the collapse instantaneously and long sliding distance.

Key words: Minxian-Zhangxian Ms6.6 earthquake; loess landslide; dynamic stability; disaster-causing mechanism

0 引 言

2013 年 7 月 22 日, 甘肃省定西市岷县、漳县交界处发生 Ms6.6 级地震, 震源深度 20 km。震中地处青藏高原东北边缘, 是甘南高原向黄土高原、陇南山地的过渡地带, 地质构造复杂、山岭起伏、河流纵横, 极震区黄土广泛分布, 土质疏松, 土层覆盖较厚。极震区(Ⅷ度)及其周边(Ⅶ度)区发现的地震地质灾害包括黄土滑坡、崩塌、震陷等, 灾害呈现成片、密集分布特点, 在宏观地理分布上具有一定线性特征。本次地震触发次生地质灾害多为黄土崩塌, 偶有一些

中型的深层滑坡与泥流状滑坡^[1]。

此次地震造成人员伤亡最大的地震地质灾害为永光村西侧泥流状滑坡, 该滑坡在地震发生同时触发失稳, 最大滑移距离约 1000 m, 造成了 12 人死亡。通过现场勘察、探井取样、面波测试并结合动三轴液化试验, 分析了该滑坡体的场地条件、土体的物性指标, 讨论了滑坡土体发生液化的条件及震时液化的可能,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472297); 南京工业大学引进人才科研启动费项目(39831115)

收稿日期: 2019-04-28

结合动力有限元和强度折减法分析了该黄土滑坡的影响因素和致灾机制。

1 永光村黄土地震滑坡特征

永光村泥流状滑坡在平面上近似呈现 L 型，大致南北走向(图 1)。通过现场开挖探井取样和测试发现，该滑坡为土层内部滑移，土类为 Q₃ 马兰黄土，粉质含量不均，表层覆盖层较厚，土体含水量较高。滑坡后缘宽约 100 m，高度 30 m 左右；滑坡体前缘在冲沟出口位置的宽度约为 13 m，最大滑移距离约为 1 km。滑坡整体落差约为 253 m，平均坡度 18°，滑坡体面积约 4.2×10⁴ m²，土方量约为 40×10⁴ m³。

滑坡体失稳之后，冲破原有前端凹形地势，滑移进入与之交角约 30°的大型冲沟，顺沟向下游滑冲，止于永光村和永星村分叉路口北侧的拱桥前。在滑坡土体进入冲沟的位置，可明显看到滑体受阻形成的土堆，并且有部分泥流回溯入该冲沟上游，最大距离约为 20 m。该滑坡呈现出滑速快、滑距远和类泥流状的滑动特征。



图 1 永光村滑坡体航空影像(底图由甘肃省测绘局提供)
Fig.1 Aerial image of Yongguang landslides

2 滑坡土体动三轴液化试验

黄土在浸水作用下，通常会表现出显著的强度弱化和崩解特性，当浸水至饱和状态下则具有液化土特性。当地震前 20 d 内降雨过程以密集型多日小雨、中雨加独立型单日暴雨叠加的模式复发。为了分析该滑坡土体在当时地震力作用下是否出现液化现象，采取了滑坡体后缘和塬底 5 m 深处的土样，在中国地震局黄土地震工程重点实验室 WF-12440 型动三轴扭剪试验系统上进行 2 组动三轴液化试验。

2.1 试验方法

试验过程分饱和、固结和循环剪切 3 个步骤进行。其中饱和方法采用低压反压饱和法，固结时采用等压固结。循环剪切时施加的动应力为频率 1 Hz 的正弦波，其幅值按照地震峰值加速度进行换算。试样的固结和振

动液化均在不排水条件下进行，试样孔压均匀。

采用应变标准作为饱和黄土液化的破坏标准^[2]，即：孔压比 $U_d/\sigma'/0 \geq 0.2$ ，且轴向应变 ε_d 达到 3%。

2.2 试验结果

现场土样的物性参数如表 1 所示，计算得到的动三轴液化试验条件如表 2 所示。

表 1 土样的物性指标

Table 1 Physical indices of soil samples					
位置	土样编号	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 $w/\%$	初始孔隙比 e
黄土塬底	YG-1	2.01	1.61	24.53	0.686
滑坡体后缘	YG-2	1.4	1.35	4.04	1.007

表 2 土样动三轴液化试验条件

Table 2 Conditions and results of liquefaction test					
土样编号	围压 σ/kPa	动应力 σ_3/kPa	饱和度 $S_r/\%$	含水率 $w/\%$	破坏震次
YG-1	138	28	98.6	25.01	25
YG-2	1338	32	92.39	34.34	3

两组试样的动应力、动应变和动孔隙水压力变化曲线分别如图 2、3 所示。

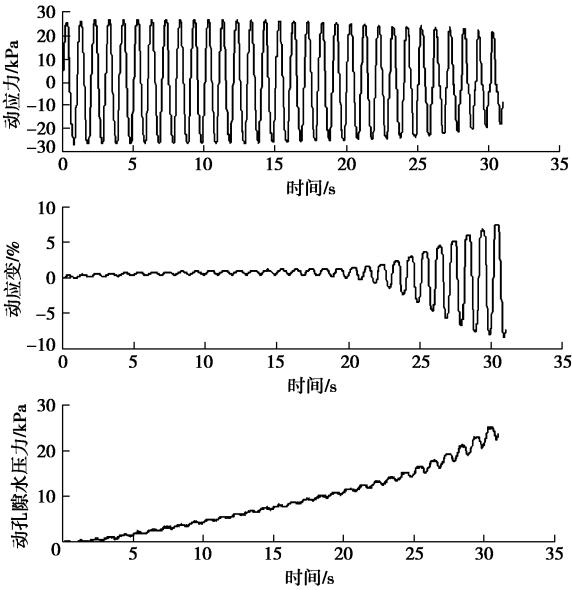


图 2 YG-1 试样动应力、动应变和动孔隙水压力发展曲线
Fig. 2 Progress curves of dynamic stress, dynamic strain and dynamic pore water pressure of YG-1 specimen

试验结果表明：震前该滑坡部分土体的含水率高达 24.53%，处于近饱和状态。YG-1 试样在循环荷载作用下动应力出现了明显的衰减，产生了双幅动残余应变，动孔隙水压力明显增加，孔隙水压力比达到了 0.2 以上，可以判定该试样产生了液化；YG-2 试样动应力在 3 个周期内明显衰减，动残余应变显著增加，动孔隙水压力有所增加，但由于动应力较大，而孔隙水压力的发展相对于残余应变发展具有滞后效应，因

此孔隙水压力尚未出现明显反应, 试样即已由于残余应变过大而产生破坏, 可判定试样发生了液化。

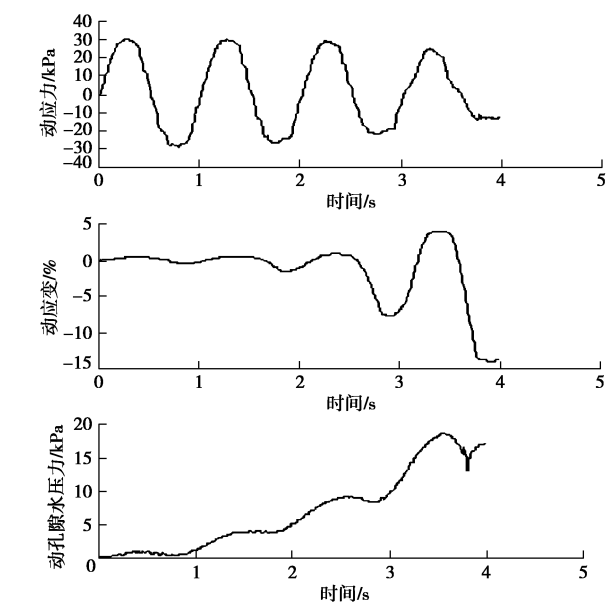


图 3 YG-2 试样动应力、动应变和动孔隙水压力发展曲线
Fig. 3 Progress curves of dynamic stress, dynamic strain and dynamic pore water pressure of YG-2 specimen

3 滑坡高密度面波勘探

在永光村西侧泥流状滑坡的顶部布设一条面波测线, 具体位置见图 1。

滑坡体顶部地下构造反演结果如图 4 所示。该滑坡体的地下构造从上到下大体可分为 4 层, 地表附近 v_s 约为 160~200 m/s 的软弱覆土层, 厚度约为 5~10 m; v_s 约为 200~300 m/s 的土层, 厚度约为 7~10 m; $v_s \approx 300 \sim 400$ m/s 的土层, 厚度约为 17~25 m; v_s 大于 400 m/s 的下伏较坚硬土层。该滑坡体表层土质较松散、黄土覆盖较厚。

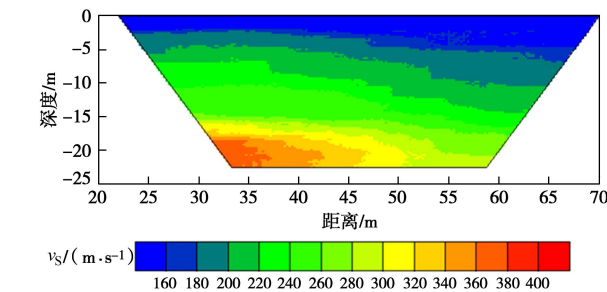


图 4 滑坡体顶部地下构造反演结果
Fig. 4 Inversion results of underground structures

4 滑坡稳定性分析

采用抗剪强度折减系数法进行稳定性分析, 利用有限元软件 ABAQUS 实现将强度折减法与弹塑性有

限元方法相结合, 在给定判断依据的条件下, 通过调整折减系数对边坡的稳定性进行分析, 求得边坡的稳定安全系数^[3-4]。

4.1 滑坡建模与输入地震波

根据现场调查及高密度面波勘探结果建立简化的二维有限元斜坡计算模型, 模型网格划分如图 5。其中, 模型的边界尺寸: 水平向 1200 m; 模型高度 410 m; 边坡坡面垂直高度 170 m; 坡脚角度约 18°。模型土体均采用四边形四节点平面应变单元划分, 节点总个数为 18145, 单元总个数为 16542。模型参数根据现场采集土样的室内试验结果选取, 如表 3 所示。其中第一层含水率为 20%~25%, 第二层含水率为 7%~8%。根据应变张量计算应力张量, 并根据 Mohr-Coulomb 模型判断计算后的应力是否符合强度准则, 若应力达到屈服条件, 则根据相应的塑性流变法则进行调整, 使实际的应力符合屈服准则^[5]。

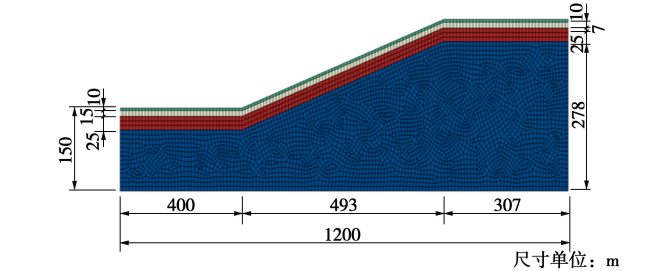


图 5 简化模型的网格划分
Fig. 5 Simplified finite element model for slope

表 3 各层材料参数

Table 3 Parameters of soils

层数	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量 /MPa	泊松 比 ν	剪切 波速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	c /kPa	φ ($^{\circ}$)
1	1380	26.1	0.28	200	15.9	17.5
2	1410	35.8	0.28	300	22.7	23.0
3	1490	56.4	0.28	400	26.1	24.8
4	1800	100	0.28	800		

模型左右边界采用粘弹性边界条件, 底部为人工边界。从底部施加水平向地震荷载, 输入地震波为此次地震距震中 18 km 岷县台记录的主震加速度时程。峰值加速度为 220 gal, 地震波的卓越频谱在 4.5~5.5 Hz 之间, 持时为 40 s, 如图 6 所示。

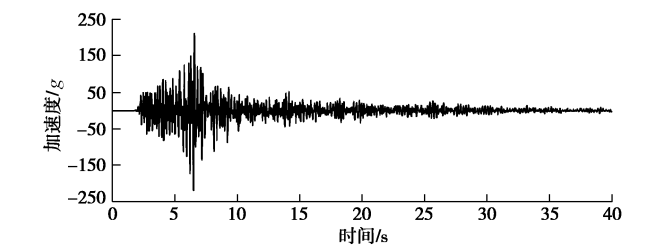


图 6 输入地震荷载
Fig. 6 Input earthquake loads

4.2 地震动响应

图 7 为坡体最大位移分布图。可以看出在地震荷载作用下, 边坡产生较大水平位移, 整体斜坡位移呈现出剪切响应。最大位移集中在斜坡坡面, 坡顶和坡底的最大位移差可达 80 cm。

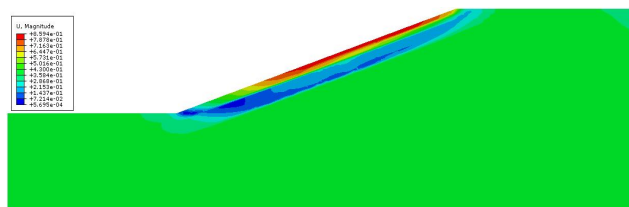


图 7 地震力作用下边坡最大位移分布

Fig.7 Distribution of maximum distance under earthquake load

图 8 为 Mises 应力分布云图。在地震作用下, 斜坡模型应力分布呈水平层状分布, 无应力集中现象, 同时随着深度增加, 应力在垂直方向上逐渐增加。

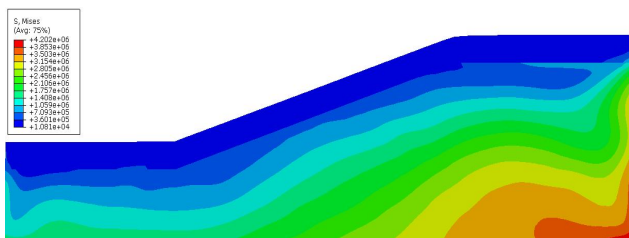


图 8 地震力作用下边坡 Mises 应力分布

Fig. 8 Distribution of Mises stress under earthquake load

计算过程中, 对土体进行强度折减, 并依次采用动力有限元法计算斜坡在地震荷载作用下的动力响应, 直至计算不收敛, 所得 $F_s=1.00$ 。图 9 为等效塑性应变云图, 灰色部分为未发生变形时的状态, 蓝色为失稳产生后的状态。从图中可以得出应变最大值为 0.2。在地震荷载作用下, 坡面上高程较大的处易沿着塑性应变区整体滑移。可见, 滑动面贯通于表层马兰黄土和下部较硬土体交界面, 大部分位于黄土层中, 该结果与该滑坡现场调查结果一致。

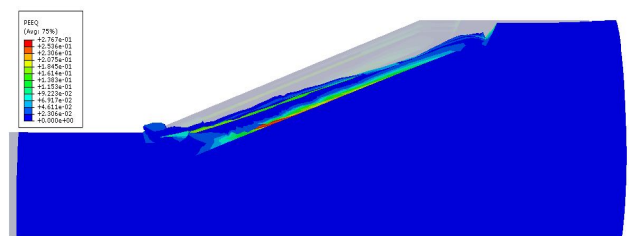


图 9 动力稳定极限状态下的边坡塑性区

Fig. 9 Plastic zones of slope under dynamic critical condition

5 结 论

(1) 该滑坡体表层为十余米厚的 Q_3 松散黄土覆盖, 震前土体处于近饱和状态, 具备了液化的前提条

件。在模拟地震烈度为 VIII 度的地震力作用下, 滑坡土体最小在 4 个周期内就发生了动应力明显衰减、动残余应变持续增大和孔隙水压力显著上升的液化破坏现象。

(2) 地震作用下, 整个滑坡体位移表现出剪切响应, 最大相对位移达 80 cm, 土体的等效塑性应变特征与其动态响应特征一致, 滑动面贯通于表层马兰黄土和下部较硬土层交界面处。

(3) 该黄土地震滑坡为降雨与地震耦合作用所致。滑坡发生时, 在强地震荷载下, 土层内部出现拉应力效应, 近地表土体发生液化, 引起上部土体瞬间失稳, 快速滑移达 1000 m。

参考文献:

- [1] 王兰民, 吴志坚. 岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 401 - 412. (WANG Lan-min, WU Zhi-jian. Earthquake damage characteristics of the Minxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquake and Its lessons[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 401 - 412. (in Chinese))
- [2] 袁中夏, 王兰民, 王 平. 黄土液化机理和判别标准的再研究[J]. 地震工程和工程振动, 2004, 24(4): 164 - 168. (YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, WANG Ping. Further study on mechanism and discrimination criterion of loess liquefaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(4): 164 - 168. (in Chinese))
- [3] 李荣建, 郑 文, 王莉平, 等. 非饱和土边坡稳定性分析方法研究进展[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊 1): 2 - 9. (LI Rong-jian, ZHENG Wen, WANG Li-ping, et al. Progress and developing trend on stability analyses of unsaturated soil slope[J]. Northwestern Srtsmoloocttal Journal, 2011, 33(S1): 2 - 9. (in Chinese))
- [4] 车爱兰, 吴志坚, 彭 冬, 等. 黄土斜坡震害面波勘探调查及其动力稳定性分析—以甘肃岷县、漳县 Ms6.6 地震为例[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 724 - 729. (CHE Ai-lan, WU Zhi-jian, PENG Dong, et al. Surface wave investigation and dynamic stability analysis for earthquake-induced loess landslides[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 724 - 729. (in Chinese))
- [5] 林 杭, 熊 威, 李正明. 边坡剪应变滑动面程序嵌入及参数分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 52 - 56. (LIN Hang, XIONG Wei, LI Zheng-ming. Embedded program for slip surface by shear strain of slopes and parametric analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 52 - 56. (in Chinese))