

王璋, 倪万魁, 姜骞, 等. 泥岩上覆黄土地震滑坡动力变形分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 225–229. [WANG Zhang, NI Wankui, JIANG Qian, et al. Dynamic Deformation Analysis of Seismic Loess Landslide covered on Mud Rock [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 225–229. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.01.039.]

泥岩上覆黄土地震滑坡动力变形分析*

王璋, 倪万魁, 姜骞, 徐龙帅

(长安大学, 地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054)

摘要:以宁夏海原县九彩乡滑坡为例, 通过对其工程地质特性进行调查, 得出了滑坡成因。通过实验得出黄土与滑带土在静力状态与动力状态下的力学强度参数, 然后运用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立了斜坡数值分析模型, 加入震级与海原大地震相近的汶川地震的地震荷载, 分析泥岩上覆的薄层黄土滑坡在地震作用下的破化模式。在模拟过程中可以得出: ①在地震荷载的作用下, 斜坡水平位移最大处发生在坡体后部较陡的部位, 坡体中部和坡脚处的位移相对较小; ②根据最大剪应变云图与监测点位移图, 斜坡的大变形主要发生在地震加载的 5~10s 的区间内, 10s 后的变形趋于稳定。

关键词:地震黄土滑坡; 动力响应; 破坏模式; 九彩乡滑坡; 宁夏海原

中图分类号: X43; P642; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2018)01–0225–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.01.039

我国黄土分布广, 厚度大, 面积为 63.53 万 km², 占全国陆地总面积的 6.63%^[1], 拥有世界上最大的黄土地貌——黄土高原。加之我国处于世界上两个最大地震集中发生的地带——东部为西太平洋地震带, 西南为欧亚地震带, 地震断裂带十分发育。因此我国地震频发, 并且大多为震源深度在 20km 以内的浅源地震。仅仅 2015 年, 中国大陆地震共造成灾害事件 12 次, 全年地震共造成 33 人死亡, 1 217 人受伤, 直接经济损失 180 亿元。地震灾害共造成 414.28 万 m² 的房屋毁坏和严重破坏, 957.88 万 m² 的房屋中等及以下破坏, 共 133.56 万人受灾^[2]。因此对地震作用下黄土地区产生的各种地质灾害的研究会十分重要, 尤其是地震所引起的滑坡, 前人在这方面做出了大量的工作。胡广韬提出了边坡动力失稳机制的坡体波动振荡加速效应假说^[3]。毛彦龙提出了坡体波动振荡破坏岩坡岩土体时的三种效应^[5]。王家鼎^[5–7]对地震滑坡做出了深入研究, 他首先提出了饱和黄土导致高速滑坡的过程, 接着理论上分析了该类滑坡的成因, 之后又提出了一种新的地震诱发高速黄土滑坡的机理。顾成壮深入揭示了地震滑坡的启程动力学机理, 得出地震触发斜坡破坏主

要是其“波动振荡链”综合效应所致, 地震滑坡启程阶段经历了“先启动, 后加速至启程”的过程^[8]。邓龙胜针对海原县及附近地区由海原地震所引起的黄土滑坡展开调查, 提出了黄土地震滑坡的四种类型^[9]。赵文琛对地震所引起的黄土层内滑坡进行了机制分析^[10]。

本文以海原县九彩乡滑坡为例, 运用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立了斜坡数值分析模型, 加入地震荷载, 分析滑坡在地震作用下的破化模式, 得出地震作用下斜坡的动应力响应规律和变化规律。

1 滑坡工程地质特征

1.1 滑坡基本特征

该滑坡为一小角度黄土泥岩接触面滑坡, 滑坡前缘受水流冲刷严重, 下切较深, 现场测绘平面图见图 1, 剖面图见图 2。

滑坡在平面上呈不规则状, 滑体上下部分较薄, 中间厚, 两侧稍低, 整体倾向南东。滑坡两侧以冲沟为界, 坡体长 500 m, 宽 700 m, 面积 35

* 收稿日 2017–05–08 期; 修回日期: 2017–06–30

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程“陕北城乡山地建筑灾害防治关键技术与示范工程”(2014KTDZ03–01–02)

第一作者简介: 王璋(1992–), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害等方向的研究。

E-mail: 568027164@qq.com

通讯作者: 倪万魁(1965–), 男, 宁夏固原人, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土力学、非饱和土力学等。

E-mail: 1326763493@qq.com

万 m^2 ，滑坡平均厚约 5 m，体积 17 万 m^3 ，总体地势北高南低。滑体在剖面上为呈多级阶梯状，上陡下缓，整体坡度 12° ，滑坡后壁呈波浪状。滑坡前缘高程 1 815 m，坡体后缘高程 1 917 m，坡体高差为 102 m。

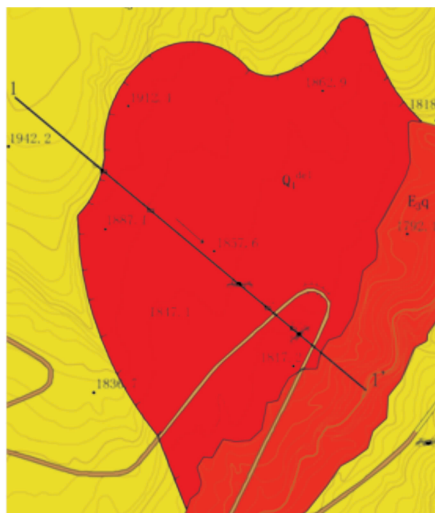


图1 滑坡工程地质平面示意图

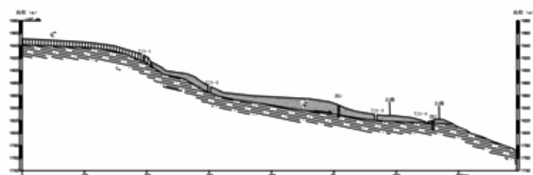


图2 滑坡工程地质剖面示意图

1.2 滑坡地层特征

滑体：滑体主要物质为 Q_4 粉土，土体内部节理裂隙发育，表面可见发育有冲沟和落水洞，表层植物根系较多，整体上土层疏松，强度差。

滑动带(面)：滑坡体上部为滑动后的黄土和原生黄土之间的接触面，接触面光滑，含水量大；中部至下部为强风化的岩石面与粉土夹碎石土接触带，接触带粗糙，滑带土层疏松，土体强度差，土中含水量较大。不同位置的滑带土其物质组成略有差别：在滑体前部，岩性为碎石土，风化基岩在上覆土体巨大推力作用下形成可见镜面和擦痕；滑体后部为粉土与泥岩混杂，状态坚硬致密，呈褐红色，表面光滑，擦痕清晰。

滑床：为古近系渐新统清水营组 (E_{3q}) 红色砂质泥岩，滑带部位岩体受侵蚀严重，强度较低。

河谷：第四系冲积物 (Q_4^{al}) 分布于河漫滩、阶地。下部为砂砾卵石层，密实，受细粒物质充填，透水性较差，但压缩性较低，上部为粉土，土质疏松。

1.3 海原 8.5 级地震

滑坡区域位于南、西华山北麓深大断裂北侧，岩体极为破碎。新构造运动表现为较强烈的间歇

性升降运动，致使冲沟深切，阶地发育。1920 年海原大地震震级达 8.5 级，波及范围极大，并且当时九彩乡位于 X 度区^[11]。该地区因强震而导致地质环境很差，土体松散，地质灾害及隐患多数都与地震有关。

1.4 滑坡工程地质综合分析

根据勘察资料及现场调查访问得知，九彩乡滑坡为地震滑坡，滑坡轮廓清晰，整体坡度平缓。受雨水侵蚀，滑坡体上冲沟、落水洞发育，坡面破碎，滑坡前缘受流水侵蚀形成陡坎，剪出口和滑带清晰可见。在剪出口可以观察到滑面附近的基岩破碎，受滑坡影响部分滑入冲沟。在天然工况下滑坡整体的稳定性较好，未见明显复活的迹象，在汶川地震时，也保持稳定，对道路未产生明显破坏，所以判定九彩乡滑坡整体处于基本稳定状态。但该滑坡处于高烈度区，且整个坡体黄土受地震影响严重，土体松散，坡体破碎，暴雨会集中沿裂缝和落水洞贯入，因此滑坡在未来强烈地震和集中降雨条件下有局部复活的可能。

2 斜坡数值模型建立

2.1 地质模型的概化。

根据现场调查与勘察资料，通过 Extrusion 模块建立的 FLAC^{3D} 模型共有 8 170 个单元。在黄土与基岩之间的滑带建立接触面单元。

2.2 模型的边界条件。

模型范围内没有发育断层、褶皱等构造，为重点分析黄土在地震作用下的破坏模式，在计算中未施加水平构造应力，模型底面为固定约束边界。而坡面则不设任何边界限制，在斜坡的左右边界上，固定其 X 方向上的位移和速度，整个模型将与纸面垂直的 Y 方向位移和速度固定。

在地震动力条件下，滑坡采用自由边界场。为了防止向上的面波在边界上产生扭曲，通过在主体网格的侧边界设置阻尼器与自由场网格进行耦合，将自由场网格的不平衡力施加到主体网格的边界上，使自由场边界提供了与无限场地相同的效果^[12]。

2.3 模型准则。

本次计算过程中，初始应力计算采用的是常用的弹塑性模型，屈服准则为摩尔 - 库伦准则，动力计算采用“动态多步”来进行计算。

2.4 物理力学参数的选取。

在 FLAC^{3D} 程序中，岩土体的变形参数采用的是剪切模量 G 和体积模量 K ，该参数按公式(1)和公式(2)确定。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} ; \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

式中: μ 为岩土体的泊松比, E 为其弹性模量。

接触面粘结力与内摩擦角采用黄土残余强度参数, 抗拉强度为 0, 法向刚度 K_n 和剪切刚度 K_s 根据公式(3)确定。

$$K_s = K_n = 10 \max \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \quad (3)$$

式中: K 是体积模量, G 是剪切模量, Δz_{\min} 是接触面法向方向上连续区域的最小尺寸。

根据实验, 土体动力力学参数选取见表 1。

表 1 岩土动力力学参数

岩土类型	泊松比	阻尼比	弹性模量/MPa	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
黄土	0.32	0.162	131.6	2	25.78	1.91
砂质泥岩	0.232	0.168	436.64	150	40	2.33

2.5 模型的建立以及离散化。

根据上述分析及计算方案对地质原型的概化与分析, 结合试验数据与经验数据, 建立模型如图 3 所示。

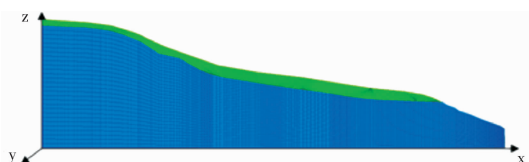


图 3 滑坡数值模拟模型

3 斜坡地震动力响应数值模拟

3.1 静力分析结果

静力分析首先进行初始应力场模型计算, 计算完成后利用摩尔库伦模型再次进行弹塑性计算, 图 4 是计算完成后的最大剪应变增量图。从图中可以看出, 斜坡天然状态下坡顶的最大剪应变增量大于坡体中部及下部, 其主要分布在地层浅部范围内, 且数值较小, 因此不会影响坡体的稳定性。结合图 5 可以看出静力计算后的水平位移也只是在坡体较陡的部分出现最大值, 也仅仅是 1.9 mm 的位移, 对坡体的稳定性不会产生影响。通过强度折减法对坡体稳定性进行计算, 天然状态下坡体稳定性达到了 3.48。

3.2 地震波输入

由于缺乏 1920 年海原大地震地震波的原始数据记录, 本文采用汶川地震波来代替。汶川地震震级与海原大地震相近, 所以本次截取汶川 8 级地震地震波的前 20 s 作为模拟地震波, 并对其进行

滤波和基线校正。处理后的地震波峰值加速度为 2.496 m/s^2 , 波形图见图 6。因为九彩乡地处 X 度地震烈度区, 该区地震峰值加速度大于 0.4 g , 所以在地震波加载时对其进行 1.7 倍增幅。

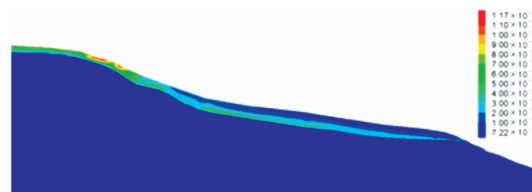


图 4 静力计算最大剪应变增量图

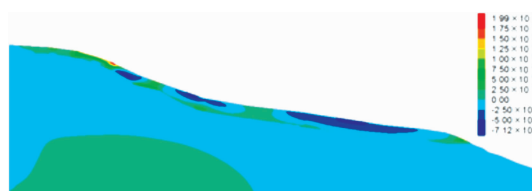


图 5 静力计算水平位移图/m

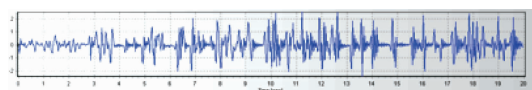


图 6 汶川 8 级地震地震波波波形图

3.3 监测点的布置

本次监测点布置在现存滑坡的滑面位置, 共布置了三个, 分别位于接触面的前部、中部和后部, 监测接触面水平和竖向位移的变化情况, 布置情况见图 7。

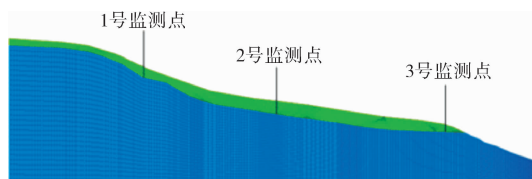


图 7 监测点布置图

3.4 动力结果分析

图 8 为斜坡动力计算后的水平位移云图。从图中可以看出斜坡坡顶处水平位移较小, 只有 5 cm, 位移最大处发生在坡体后部较陡的部位, 该处的水平位移达到了 48.9 cm, 从坡体中部到坡脚处的位移逐渐减小, 从 30 cm 减小到 10 cm。基岩整体顺着破面有着较小的位移。图 9 为斜坡动力计算后的竖向位移云图。从坡体后部较陡处到坡脚处的土体都产生了向下的位移, 而且位移从上部到下部逐渐减小。图 10 为斜坡动力计算后的位移矢量云图, 根据图中位移矢量及图 8、图 9 所示, 斜坡在地震作用下坡体后部产生斜向下的位移, 水平位移和竖向位移在整个坡体前部角度小, 产生的

位移以竖向震陷为主,并且越靠近坡脚受坡体后部的水平推力越小,产生的水平位移也越小。

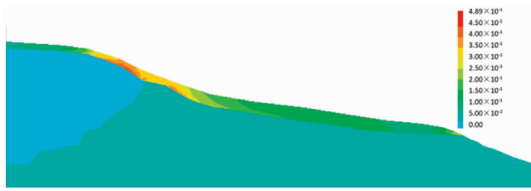


图8 动力计算水平位移云图/m

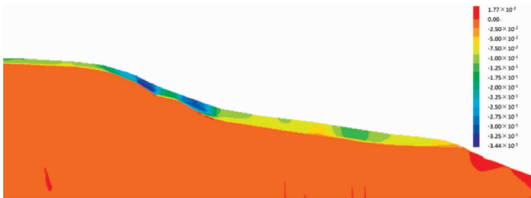


图9 动力计算竖向位移云图/m

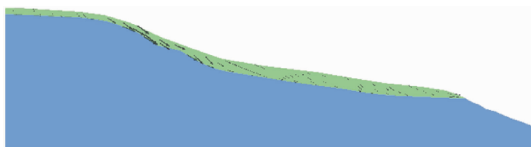
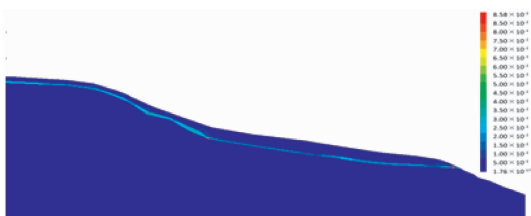


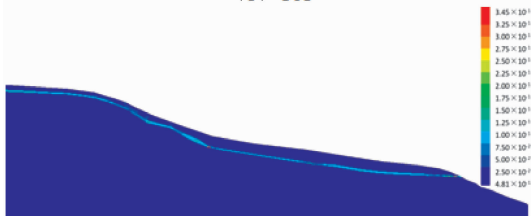
图10 动力计算位移矢量云图



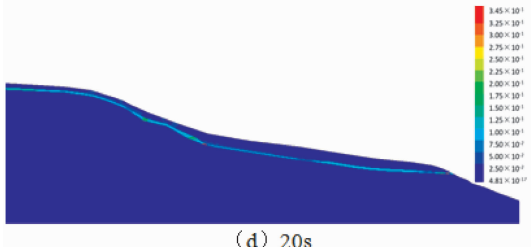
(a) 5s



(b) 10s



(c) 15s



(d) 20s

图11 动力计算不同时段最大剪应变云图

图11是动力加载过程中5s、10s、15s、20s时的最大剪应变增量云图。前5s的最大剪应变增量相对较小,5s到10s的过程中是最大剪应变增量增大的主要时段,增大了3倍左右,表明这段时间内滑体部分剪应变迅速增大,产生较大的变形。10s到20s的过程最大剪应变增量已经相对稳定,变化量不大,但是这段时间内剪应变在坡体后部稳定增长,表明坡体的滑动处于持续变形阶段。由此可知,该斜坡在地震作用下的主要在5~10s内贯通了黄土与基岩的接触面,滑坡开始启动,10~20s内滑坡滑速逐渐趋于稳定。

3.5 监测点位移分析

从图12中可以看出5s前的竖向位移增量较小,5~10s时1号点的位移增加迅速,10~20s时的位移变化逐渐平缓,而2、3号点变化一直相对较缓。从图13中可以看出,1号点的水平位移增加量从5s开始急剧增大,并且增大趋势一直不变。2、3号受地震荷载往复运动,整体是面面临空面产生位移。根据坡形和监测点位移图可以推断出,

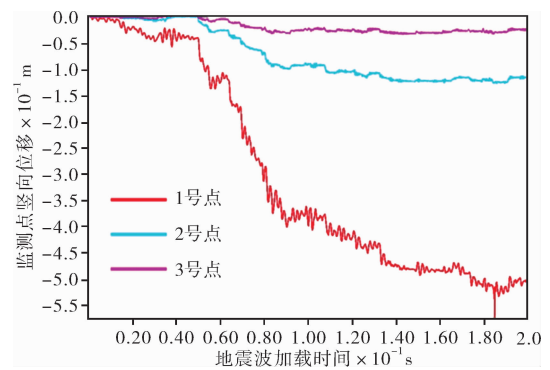


图12 斜坡监测点的竖向位移监测图/m

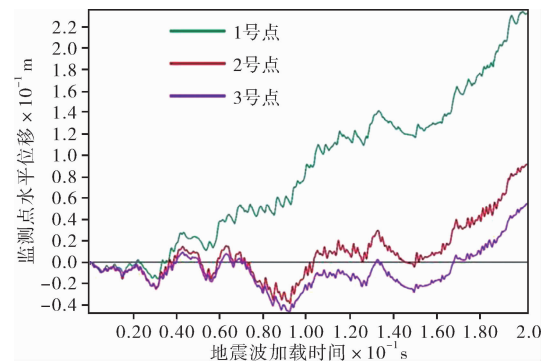


图13 斜坡监测点的水平位移监测图/m

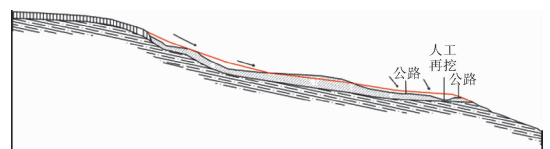


图14 九彩虹滑坡原始坡形与现状的对比图

受地震和地形影响 1 号点产生较大的面向临空面的水平和竖向位移; 2、3 号点的竖向和水平位移主要受上部土体推动而产生, 并且存在一定的震陷量。

3.6 滑坡形成过程分析

图 14 为九彩乡滑坡原始坡形与现状的对比图, 红色线表示的原始坡面线, 黑色线表示现在的坡面线。根据上述分析及现场测绘可知, 原始斜坡在地震荷载的作用下, 后缘较陡处发生的变形位移最大, 坡体中前部较为平缓, 位移小, 因此, 坡体后部的土体往下滑动, 推动整个坡体, 并且后部土体在中部堆积形成一个较厚的平缓部位; 下部土体产生震陷作用。后期经过雨水侵蚀, 尤其是人类活动的改造, 下部滑体形成了如今的状态。

4 结论

(1) 九彩乡滑坡根据滑坡的滑动面和层面关系、运动方式及滑动深度, 可将其归为顺层滑坡。

(2) 九彩乡滑坡后缘较陡, 在地震荷载的作用下, 后缘较陡处的变形大, 并且以水平向运动为主, 产生了较大的下滑推力, 推动整个土体向前滑动, 堆积在滑体中部, 形成推移式的滑动方式。

(3) 九彩乡滑坡前缘平缓, 由于中部土体阻隔, 受后缘下滑推力影响相对较小, 在地震荷载作用

下, 前缘土体受主要产生竖向震陷作用。

参考文献:

- [1] 严西华. 黄土高路堑边坡稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [2] 陈通, 郑通彦. 2015 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 133–137.
- [3] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [4] 毛彦龙, 胡广韬, 赵法锁, 等. 地震动触发滑坡体滑动的机理[J]. 地球科学与环境学报, 1998, 20(4): 45–48.
- [5] 王家鼎, 刘悦. 高速黄土滑坡蠕变、滑动液化机理的进一步研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1999, 29(1): 79–82.
- [6] 王家鼎. 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] 王家鼎, 白铭学, 肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 445–449.
- [8] 顾成壮, 胡卸文, 罗刚, 等. 地震滑坡启程动力学机理[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 567–572.
- [9] 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.
- [10] 赵文琛, 吴志坚, 王谦, 等. 基于应力分析的黄土层内滑坡地震失稳机制[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 224–228.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB18306–2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [12] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

Dynamic Deformation Analysis of Seismic Loess Landslide Covered on Mud Rock

WANG Zhang, NI Wankui, JIANG Qian and XU Longshuai

(Chang'an University, School of Geology Engineering and Geomatics, Xi'an 710054, China)

Abstract: Taking Jiucai landslide of Haiyuan county as an example, we investigated its engineering geologic condition, then we unraveled the cause of landslide. Through experiment, we got the strength parameters of loess and slip soil in static and dynamic condition respectively, after which we built up slope – data – analysis model via FLAC3D software and input the earthquake load of Wenchuan earthquake whose load is similar with that of Haiyuan earthquake. We analyzed sliding mechanism of the thin loess slope on mud rock under earthquake load, and came to conclusion: ①when earthquake happens, the maximum horizontal displacement is found in the cliff part in slope, while horizontal displacement in middle part and base of slope is smaller. ②according to cloud pictures of shear strain and displacement diagram of monitoring points, maximum displacement of slope happens in the first 5th to 10th second after imposition of earthquake load, and displacement of slope become stable after 10th second.

Key words: seismic loess landslide; dynamic response; destruction mode; Jiucai landslide; HaiYuan of NingXia Province