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. [ZHAO Wenchen，WU Zhijian，WANG Qian，et al. Seismic Instability Mechanism of Landslide in the Loess Layer Based on Stress Analysis [J]. Journal of Catastrophology，2016，31(4)：224－228. doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2016.04.040.]

基于应力分析的黄土层内滑坡地震失稳机制*

赵文琛[1]，吴志坚[1,2]，王　谦[1,2]，陈豫津[1]

（1. 中国地震局兰州地震研究所 黄土地震工程重点实验室，甘肃 兰州 730000；
2. 甘肃省 岩土防灾工程技术研究中心，甘肃 兰州 730000）

摘　要：针对黄土高原地区黄土层内地震滑坡灾害易发多发和破坏性强的特点，选取三处典型滑坡进行考察，得出了此类滑坡的失稳破坏特征。进一步结合斜坡不同部位土体的受力特点和剪切破坏形式，将地震作用以应力形式引入，分析得到了该类滑坡发生时不同部位土体的剪切破坏形式及应力状态变化下剪应力的变化规律。从而基于应力分析给出了具有坡顶土体首先发生小主应力减小主导的拉张型剪切破坏，坡面土体随后发生大主应力增加主导的压剪型剪切破坏，黄土震陷降低滑面摩擦阻力加速滑体滑移特点的黄土层内滑坡地震失稳机制，进而针对此类滑坡地震失稳机制提出了相应的加固及防护措施。

关键词：黄土层；地震滑坡；剪切破坏；剪应力；地震失稳机制

中图分类号：P642.13；X43　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2016)04－0224－05

doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2016.04.040

黄土特有的多孔隙和弱胶结的结构特性及黄土高原地区新构造运动活跃和强震多发背景决定了该区黄土地震滑坡灾害十分发育[1]，尤其是历次强震诱发的黄土层内滑坡，数量多，规模大，造成了极大的人员伤亡和财产损失[1－4]。因此，深入研究地震作用下黄土层内滑坡失稳机制，对于提高黄土高原地区的斜坡防护治理能力以及城镇场址规划具有迫切的现实和科学意义。

土质边坡失稳滑动源于其内部分土体发生剪切破坏，而土体剪切破坏的发生和破坏类型受应力状态控制。在地基基础等承受垂直向荷载的工程类型中，土体失稳时发生因竖向荷载过大导致的形式较为单一的剪切破坏[5]。与之不同，边坡体内不同部位土体的应力状态差异明显，失稳时剪切破坏的形式也不尽相同。此外，土体剪切破坏的发生与否则取决于其剪应力的大小和变化趋势，剪应力原本就大且增长快的土体接近破坏的速度更快。已有的黄土斜坡地震失稳机理大多偏重于以地震惯性力和孔隙水压力为根本诱发原因进行定性分析[6－9]，而少有关注土体破坏具体形式和过程的基于应力分析的失稳机制。

因此，深入分析黄土层内地震滑坡失稳前后斜坡不同部位土体应力状态变化和剪应力变化趋势，明确土体剪切破坏的形式，对于揭示黄土层内滑坡地震失稳机制以及提出有效的防护治理措施具有重要的研究意义。

1　黄土层内滑坡地震失稳破坏特征

1.1　典型黄土层内地震滑坡

1.1.1　华县地震凤陵渡凤凰咀滑坡

1556 年 1 月 23 日，陕西华县地区发生了 8 $\frac{1}{4}$ 级地震，震中位置位于陕西华县(34.5°N、109.7°E)，震中烈度 XI 度。极震区南部位于沟深塬高、土性松散的黄土塬边地区，由于距发震断裂很近，地震时诱发了大量黄土滑坡[10]。据史料记载：潼关(旧城)附近，地震时“山多崩断，潼关道壅，河逆流，清三日”[11]，此次地震诱发的滑坡曾经堵塞黄河，造成堰塞湖而使河水逆流，可见滑坡规模之大。

凤凰嘴咀古滑坡(图 1)是大地震诱发的一处典

* 收稿日期：2016－02－19　　修回日期：2016－04－18
基金项目：国家自然科学基金(41472297，51478444)；青海省交通建设科技项目“铁路建设对雅丹地貌的环境影响与减轻技术研究”
第一作者简介：赵文琛(1991－)，男，青海西宁人，硕士，主要从事岩土地震工程方面的研究. E-mail：wenchenzhao1219@126.com
通讯作者：吴志坚(1974－)，男，安徽安庆人，研究员，博士，主要从事岩土地震工程与冻土工程领域的研究.
E-mail：zhijianlz@163.com

型滑坡遗迹，滑坡整体呈“环谷”状，平面形态接近“圈椅”形，纵长约 100 m，横宽约 290 m。滑坡整体落差约为 60 m，平均坡度 30°，滑坡体土方量约为 80×10^4 m^3。滑坡后壁高于一级滑坡台 10 m，上部陡峭接近直立，存在大量拉张型裂缝，下部坡度稍缓，壁面整体清晰，容易辨识。滑坡左侧壁保存完整，右侧壁上下两段因开挖上山便道遭到破坏，中段尚存。滑体自滑坡台以下部分因边坡改造治理破坏严重，特征较难识别。



图 1　风陵渡凤凰咀滑坡

1.1.2　永登地震七山乡圪垯沟滑坡

1995 年 7 月 22 日甘肃省永登县七山发生了 5.8 级地震，震中位置位于永登县圪达沟至马家山城之间(36.4°N、103.2°E)，震源深度 10 km，极震区地震烈度为Ⅷ度。该地震震级虽然不大，但由于震源浅，且发生在黄土覆盖层较厚的丘陵地区，故其震害与震级相比偏于严重，黄土斜坡失稳现象随处可见[12]。Ⅷ度区主要以圪垯沟的破坏最为严重，山体滑坡造成该村 6 人死亡。

圪垯沟滑坡(图 2)沿高约 40 m 的黄土梁南侧面产生滑动，坡度较陡，后缘轮廓清晰，后壁及左右侧壁均保存较为完整，后壁上部梁顶存在大量裂缝。滑体向南覆盖于村内民居之上，造成房毁人亡。圪垯沟黄土滑坡整体形态呈“长弓”状，宽约 160 m，高约 40 m。滑坡平均坡度 40°，滑坡体土方量约为 15×10^4 m^3。滑坡后缘轮廓清晰，滑坡后壁壁面较为粗糙。滑坡后缘梁顶存在大量拉张型裂缝，裂缝最大深度达 50 cm。



图 2　永登圪垯沟滑坡

1.1.3　岷县漳县地震岷县维新乡堡子村滑坡

2013 年 7 月 22 日，甘肃省定西市岷县、漳县交界处(34.5°N、104.2°E)发生 6.6 级地震，震源深度 20 km，最大烈度为Ⅷ度。地震触发了大量滑坡，多以小型黄土崖崩(崩塌、崩落、崩滑)为主，包括深层滑坡、泥流状滑坡等类型较为少见的滑坡。滑坡造成了严重的灾害，包括人员伤亡、电缆、管线、公路与铁路等基础设施损毁，居民点损毁等[13]。

堡子村滑坡(图 3)位于岷县维新乡，属于黄土层内滑坡。该滑坡后缘近乎直立，倾角约 70°，最高点至坡脚高差约 200 m，滑移距离不足 100 m。滑坡后缘能够明显观察到的滑移后壁面长约 150 m，高约 80 m，滑坡体土层厚度近 30 m，滑体总土方量约 $70\times10^4\sim100\times10^4$ m^3。掩埋了十二户农居，造成 2 人死亡[14]。



图 3　维新乡堡子村滑坡

1.2　黄土层内地震滑坡破坏特征

根据上述三处典型黄土层内地震滑坡失稳滑动情况，可将此类滑坡特征归纳如下：黄土层内地震滑坡多发于黄土梁、塬边，为滑体重心较高的凸面型滑坡；滑坡土体干燥；滑坡后缘存在明显的拉裂特征；滑裂面上部陡峭下部平缓且大多贯通至顶部；滑带土土体性质与周围土体土性相近，无明显地质软弱带；滑裂面多沿坡面下部及坡脚处剪出，剪出口不低于地面线；滑速高，历时短。

2　黄土层内滑坡地震失稳土体剪切破坏形式及剪应力变化特征

2.1　黄土层内滑坡地震失稳土体受力特点及剪切破坏形式

位于边坡体内不同部位的土体，应力状态差异明显，失稳时滑裂面上的土体虽然都发生剪切破坏，但剪切破坏的类型却不尽相同。

对于静力条件下的黄土滑坡，“典型黄土斜坡”渐进变形破坏模式将土体破坏分为三个区域，即坡顶拉张破坏区、破体中部剪切破坏区和坡脚压剪破坏区[15]。

地震作用下，由于黄土中垂直节理发育[16]，故坡顶边缘土体受地震横竖向拉张作用影响强烈[17~19]，水平向小主应力被削弱减小，垂直节理极易发展为土体内部竖向裂隙，从而降低土体强

度，使土体发生因水平向主压应力减小的拉张型剪切破坏并沿竖向裂隙开裂，形成高陡且多有竖向裂痕的滑坡后壁。图 4 为取自圪垯沟滑坡顶部含有竖向裂缝和表面平整土体以下 2 m 深处土样在相同围压下的静三轴试验应力 - 应变曲线，试样的天然含水率和密度均相近，可以看出，前者强度明显低于后者，而且由于竖向隐蔽裂隙的存在，使得前者在达到一定应变时应力骤降，导致强度进一步降低。

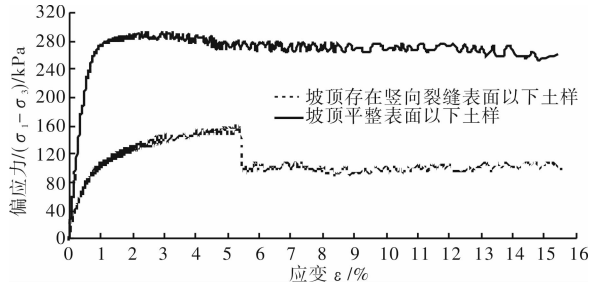


图 4 滑坡顶部土体应力应变曲线

不同于主滑带，由软弱带破坏发展而成的的滑坡，黄土层内地震滑坡滑带土土体组成与周围土体并无差异，因此没有沿软弱带发生蠕动的可能。加之黄土结构性强，受力破坏变形小的特点，故此类滑坡坡面土体内很难产生拉应力，主要发生因顶部失稳土体的挤压，沿滑面方向大主应力增加，垂直于滑面方向小主应力减小而导致的剪切破坏。

2.2 黄土层内滑坡地震失稳土体剪应力变化特征

土体剪应力受应力状态控制，斜坡不同部位土体受力特点和应力水平本就不同，故在边坡失稳前，其剪应力水平不同，在边坡失稳过程中，随着应力状态变化的不同，其剪应力的变化趋势更是不尽相同。

为半定量化分析黄土层内滑坡地震失稳过程中不同受力段土体的应力状态变化，分别选取位于坡顶及坡面且埋深均为 h，铅垂向应力 σ_z 相等的 T、M 两点处的土体，将地震作用以应力的形式引入，分析计算两处土体在地震作用下边坡失稳前后的应力状态，揭示其剪应力变化规律。

处在地震作用下的土体，其应力状态是由地震形成的动应力和自重形成的静应力的叠加，且动应力的大小和方向都在时刻变化。将地震作用下的垂直动应力 σ_n 和水平动应力 σ_s 定义为[17]。

$$\sigma_n = \rho c_n v_n; \tag{1}$$

$$\sigma_s = \rho c_s v_s; \tag{2}$$

$$c_n = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho}; \tag{3}$$

$$c_s = \sqrt{G/P}。 \tag{4}$$

式中：ρ 为土体密度；v_n 为土体中质点的竖向振动速度；v_s 为质点的水平向振动速度；c_n 为纵波波速；c_s 为剪切波速；K 为体积变形模量；G 为剪切模量。

取动应力最大值和最不利于稳定的方向，则边坡一点土体应力状态如图 5 所示[17]，一般认为地震以横向作用为主，故取 $\sigma_s > \sigma_n$[20]。

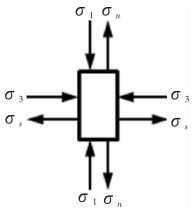


图 5 地震作用下土体应力状态

图 6 为边坡稳定时（σ_0）、静力条件下开始失稳时（σ）和地震作用下开始失稳时（σ_e）两个部位土体的应力状态。受滑裂面形成及滑动的影响，坡顶 T 点土体小主应力 σ_{3t} 逐渐减小；受坡顶失稳土体的挤压，坡面 M 点土体大主应力 σ_{1m} 大幅增加，小主应力 σ_{3m} 也有所增大。受地震横竖向拉张作用（σ_s 和 σ_n）影响，坡顶 T 点土体大主应力 σ_{1t} 和小主应力 σ_{3t} 均被削弱，坡面 M 点土体大主应力 σ_{1m} 和小主应力 σ_{3m} 也都被削弱。

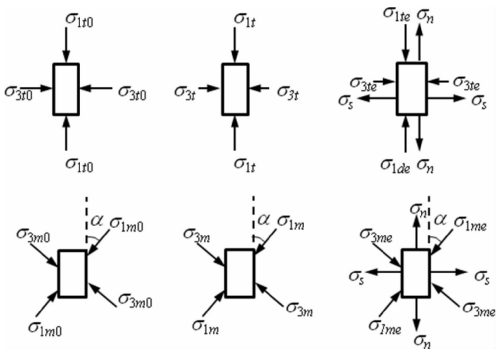


图 6 地震作用下斜坡失稳前后不同部位土体应力变化

考虑到边坡土体应力状态的复杂性，为方便定量计算，假定土体均质，且满足摩尔 - 库伦强度准则，将位于坡面附近土体水平向应力 σ_x 定义为与土体埋深 z 有关的函数[21]：

$$\sigma_x = K_0 \gamma z(1 - \sin\beta)。 \tag{5}$$

式中：K_0 为侧应力系数；γ 为土体重度；β 为坡角。

坡顶（T 点）土体剪应力计算结果为：

$$\tau_{t0} = (\sigma_{1t0} - \sigma_{3t0})/2 = (\sigma_{tz} - \sigma_{tx})/2 = (\gamma h - K_0 \gamma h)/2; \tag{6}$$

$$\tau_t = (\sigma_{1t} - \sigma_{3t})/2 = (\sigma_{tz} - \sigma_{tx} + \Delta\sigma_{3t})/2 = (\gamma h - tK_0 \gamma h)/2; \tag{7}$$

$$\tau_{te} = (\sigma_{1te} - \sigma_{3te})/2 = (\sigma_{tz} - \sigma_n - \sigma_{tx} + \Delta\sigma_{3t} + \sigma_s)/2 = (\gamma h - tK_0 \gamma h)/2 + (\sigma_s - \sigma_n)/2。 \tag{8}$$

式中：$t = \sigma_{3te}/\sigma_{3t0}$，$0 < t < 1$。

坡面（M 点）土体剪应力计算结果为：

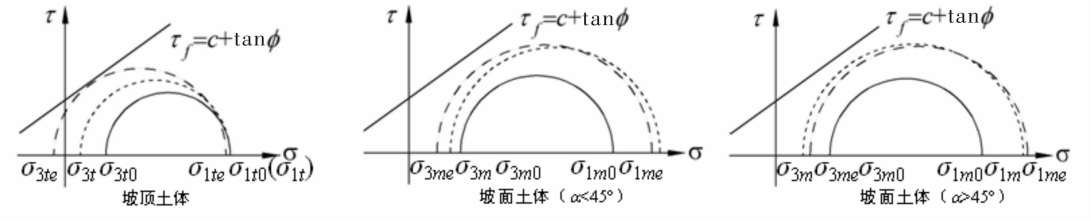


图 7　斜坡失稳前后不同部位土体剪应力变化

$$\tau_{m0}=(\sigma_{1m0}-\sigma_{3m0})/2=(\sigma_{mz}-\sigma_{mx})/2\ \cos\alpha[\gamma h-K_0\gamma h(1-\sin\beta)]/2\cos\alpha; \tag{9}$$

$$\tau_m=(\sigma_{1m}-\sigma_{3m})/2=(\sigma_{mz}-\sigma_{mx})/2\cos\alpha+(\Delta\sigma_{1m}+\Delta\sigma_{3m})/2=[m_1\gamma h-m_3K_0\gamma h(1-\sin\beta)]/2\cos\alpha; \tag{10}$$

$$\tau_{me}=(\sigma_{1me}-\sigma_{3me})/2=(\sigma_{mz}-\sigma_{mx})/2\cos\alpha+(\Delta\sigma_{1m}+\Delta\sigma_{3m})/2+(\cos\alpha-\sin\alpha)(\sigma_s-\sigma_n)/2=[m_1\gamma h-m_3K_0\gamma h(1-\sin\beta)]/2\cos\alpha+(\cos\alpha-\sin\alpha)(\sigma_s-\sigma_n)/2。 \tag{11}$$

式中：$m_1=\sigma_{1me}/\sigma_{1m0}$，$m_1>1$，$m_3=\sigma_{3me}/\sigma_{3m0}$，$0<m_3<1$；$\alpha$ 为坡面土体大主应力方向与竖直方向的夹角。

根据以上剪应力计算结果，分别作出三种状态时坡顶与坡面土体的摩尔圆(图 7)，可以看出，与无地震作用时边坡失稳时(σ)相比，地震作用下(σ_e)两处土体剪应力受到的影响不同：坡顶土体得到较大幅度增长，坡面土体与 α 有关，当 $\alpha<45°$时呈现出小幅增长，当 $\alpha>45°$时呈现出小幅降低。总体来看，地震作用下边坡失稳过程中剪应力大小及变化趋势表现为：坡顶土体初始剪应力较小但增长迅速，坡面土体初始剪应力较大但增长较慢。

3　黄土层内滑坡地震失稳机制

斜坡失稳由土体剪切破坏引起，而土体剪切破坏受剪应力控制，故斜坡失稳机制与土体剪切破坏形式和剪应力水平及其变化趋势有关。

静力条件下的大多数黄土滑坡是多种内外因素综合作用的结果，具有相当长的形成过程，是长期的、渐进的或间歇性的，呈渐进变形破坏模式[15]，失稳源于软弱带蠕动。而地震诱发的黄土层内滑坡发生过程历时短、滑动速度快且无软弱带，失稳机制与黄土自身特性和地震作用下所处的应力状态有着密切联系。

黄土层内地震滑坡无软弱滑动带和顶部多有拉张裂缝的特征以及图 7 所示的地震作用下坡顶和坡面土体剪应力初始水平和变化趋势表明，此类斜坡失稳源于顶部土体发生因水平向主压应力减小的拉张型剪切破坏。加之黄土多孔隙弱胶结、天然含水率低和动力易损的特点，使得此种破坏表现为脆性破坏[5]，破坏速度快，能量释放突然，坡顶破裂面较陡且延伸迅速。如图 8 所示一些位于圪垯沟的顶部存在大量深长拉张型裂缝但整体却未发生失稳的黄土斜坡的存在，也说明地震作用下此类边坡的失稳始于坡顶土体的破坏。



图 8　未失稳黄土斜坡顶部裂缝

由于此类滑坡多为凸面型滑坡且顶部滑裂面较陡，故滑体上部重量大、重心高，在顶部土体破裂面迅速向下延伸的同时，坡顶土体突然失去水平支撑，导致坡面土体所承受的下滑推力急剧增大，当顶部土体的破裂面延伸到一定深度时，坡面土体发生因大主应力增加小主应力减小而导致的剪切破坏，紧接坡顶滑裂面形成坡面剪切滑裂面。

地震作用下黄土具有明显的震陷性，在此失稳过程中，黄土结构性的破坏会在破裂面上产生大量颗粒，从而有效降低了滑裂面的摩擦阻力，加速了滑坡的发生，使得此类滑坡具有高滑速和历时短的特征。

4　结论与讨论

（1）黄土层内地震滑坡多发于黄土梁、塬边，为滑体重心较高的凸面型滑坡；滑坡土体干燥；滑坡后缘存在明显的拉裂特征；滑裂面上部粗糙陡峭下部光滑平缓且大多贯通至顶部；滑裂面处土体性质与周围土体土性相近，少有明显地质软弱带；滑裂面多沿坡面下部及坡脚处剪出，剪出口不低于地面线；滑速高，历时短。

（2）斜坡失稳时不同部位土体剪切破坏形式不同，黄土层内地震滑坡坡顶土体主要发生因水平向主压应力减小的拉张型剪切破坏，坡面土体主要发生因顶部失稳土体的挤压，沿滑面方向大主

应力增加，垂直于滑面方向小主应力减小而导致的剪切破坏。

（3）地震作用下，黄土层内滑坡不同部位土体剪应力大小及变化趋势表现为：坡顶土体初始剪应力较小，但迅速接近破坏，坡面土体初始剪应力较大，但接近破坏的速度较慢。

（4）黄土层内地震滑坡表现为：坡顶土体首先发生因水平向主压应力减小的拉张型剪切脆性破坏，坡面土体紧随其后发生因大主应力增加小主应力减小而导致的剪切破坏，震陷性降低滑面摩擦阻力加速滑体滑移的失稳机制。

（5）鉴于上述黄土层内地震滑坡失稳机制和破坏特点，城镇村落选址时应尽量避开黄土覆盖层较厚的塬边和梁峁密集沟壑区，对于人口聚居地区已经存在且有潜在滑坡威胁的此类天然及人工高陡黄土斜坡，建议采取坡顶放坡、坡面上部锚杆锚固、坡顶裂缝回填、坡顶边缘土性改良、坡顶种植根系发达的耐旱植物等对坡顶地震易损土体的加固和防护措施。

参考文献：

[1] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京：地震出版社，1999.

[2] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京：地震出版社，2003.

[3] 王恭先. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京：中国铁道出版社，2004.

[4] 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.

[5] 梁庆国，赵磊，安亚芳，等. 兰州 Q4 黄土各向异性的初步研究[J]. 岩土力学，2012，33(1)：17－23.

[6] Kramer S L. Effects of earthquakes on dams and embankments Geotechnical Earthquake Engineering[M]. USA，New Jersey：Prentice Hall，1995.

[7] 李天池. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测的探讨(节录)[C]//滑坡文集(第二集)北京：中国铁道出版社，1979：127－132.

[8] 祁生文，伍法权，刘春玲，等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(16)：2792－2797.

[9] 范立民，李勇，宁奎斌，等. 黄土沟壑区小型滑坡致大灾及其机理[J]. 灾害学，2015，30(3)：67－70.

[10] 吕艳，董颖，冯希杰，等. 1556 年陕西关中华县特大地震地质灾害遗迹发育特征[J]. 地质工程学报，2014，22(2)：300－308.

[11] 原廷宏，冯希杰. 一五五六年华县特大地震[M]. 北京：地震出版社，2010.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 徐舜华，吴志坚，孙军杰，等. 岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特征及诱发机制[J]. 地震工程学报，2013，35(3)：471－476.

[15] 徐张建，林在贯，张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(7)：1297－1312.

[16] 聂忠权，范文，陈党明. 黄土崩塌体的地震稳定性评价——以陕西咸阳为例[J]. 灾害学，2014，29(4)：93－97.

[17] 言志信，张森，张学东，等. 地震边坡失稳机理及稳定性分析[J]. 工程地质学报，2010，18(6)：844－850.

[18] 郑颖人，叶海林，黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(8)：1714－1723.

[19] 钟秀梅，王谦，张国信，等. 天水市水眼寨滑坡特征及稳定性分析[J]. 地震工程学报，2014，36(4)：887－891.

[20] 叶海林，黄润秋，郑颖人. 地震作用下边坡稳定性安全评价的研究[J]. 地下空间与工程学报，2009，5(6)：1248－1257.

[21] 王国体. 以土体应力状态计算边坡安全系数的方法[J]. 中国工程科学，2006，8(12)：80－84.

Seismic Instability Mechanism of Landslide in the Loess Layer Based on Stress Analysis

ZHAO Wenchen[1], WU Zhijian[1,2], WANG Qian[1,2] and CHEN Yujin[1]

(1. *Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou* 730000, *China*; 2. *Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: In view of the disaster－prone and destructive characteristics of the seismic landslide in the loess layer in the Loess Plateau, three typical landslides are investigated, and the characteristics of instability and failure of this kind of landslide are obtained. By further considering the stress characteristics and shear failure type of soil in different parts of the slope, and introducing the earthquake effect in the form of stress, the shear failure types and shear stress variation law under the change of stress state of soil in different parts of such landslide are analyzed during its instability. Thus the seismic instability mechanism of such landslides with a feature of top soil occurs tension shearing damage led by reduction of minor principal stress first, followed by inclined surface soil occurs compression shearing damage led by increase of principal stress, and loess seismic subsidence reduce friction and speed slip is proposed based on stress analysis, and then the reinforcement and protective measures are put forward correspondingly.

Key words: loess layer; seismic landslide; shear failure; shear stress; seismic instability mechanism