

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^{*}

邓龙胜, 范 文

(长安大学 地质工程系, 陕西 西安 710054)

摘 要: 海原地震是我国黄土地区影响深远的大震, 其诱发的黄土滑坡不计其数。对海原地震中黄土滑坡密集发育的西吉、海原、固原地区开展调研工作, 研究强震作用下黄土滑坡的基本特征、破坏类型, 以及该地区黄土地震滑坡密集发育的成因机理。西-海-固地区黄土地震滑坡具有集中发育、扎堆群发的分布规律, 且易发生在坡高较低、坡度较缓、山梁单薄、地貌破碎的斜坡地带, 并具有方向性和运动液化的特点; 考虑黄土特殊的结构特征及动力特性, 黄土地震滑坡的破坏类型可分为振动软化——剪切破坏、振动液化——流动破坏、振动崩塌破坏及震后蠕变破坏四种; 西吉县西南部黄土地震滑坡密集发育是因为该区处于海原地震地壳破裂带的几何投影中心, 并受该区岩土分布特、地貌特征, 以及所遭受地震波频谱特征控制。

关键词: 海原 8.5 级地震; 黄土; 地震滑坡; 破坏类型; 密集发育机理; 宁夏

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0030-08

黄土由于其大孔隙的架空结构, 具有强烈的地震易损性, 在强震作用下极易产生液化、震陷、地震滑坡等地震地质灾害。我国是世界上黄土最发育的地区, 并且黄土地区具备强震频发的地质构造背景, 在历史上曾发生多次破坏性地震, 均引发大量地震滑坡。

1920 年海原 8.5 级地震是我国黄土地区影响深远的大震, 其诱发的黄土滑坡不计其数, 大量研究人员开展了研究工作。朱海之^[1]、张振中等^[2]对海原地震引起的大规模黄土滑坡进行了现场调查研究, 将黄土滑坡类型分为黄土震陷型滑坡、黄土液化型滑坡和地震力诱发型滑坡。白铭学等^[3]对海原地震引起饱和黄土层液化导致大规模滑移进行了调查、实验与理论研究, 对这种现象进行了解释。

很多学者基于地震液化来研究地震滑坡的破坏机理。Sassa^[4]基于现场滑坡模拟试验以及室内试验, 提出了结构破坏-孔压上升-液化的土质滑坡发生机理。Sassa^[5]之后又指出, 当饱和度超过 85% 时足以产生超孔压, 导致滑坡发生。王兰民等^[6-8]提出了随机地震荷载作用下黄土地震滑坡

的预测方法。王家鼎^[9-10]根据现场及室内试验, 提出了“饱和黄土蠕(滑)动液化”以及饱和黄土的蠕动液化机理。

本文在前人研究的基础上, 对海原地震诱发黄土滑坡比较发育的西吉、海原、固原、静宁一带开展调研工作, 据此研究黄土地震滑坡的基本特征, 在此基础上, 进行破坏类型划分, 并深入探讨了海原地震中西-海-固地区黄土地震滑坡密集发育的成因机理, 为黄土地震滑坡的深入研究提供基础。

1 海原地震概况

1920 年 12 月 16 日发生于海原断裂上的 8.5 级地震, 是由于南华山-西华山北麓-六盘山东麓大断裂两侧地块不均匀相对运动, 造成地块之间的强烈挤压和错动诱发的, 地震的地表破裂带东起固原硝口, 向西北经海原县李俊堡、小南川、西安州、干盐池以及靖远县边沟、李家沟、邵家水, 尔后在红山峡以北穿过黄河, 一直延伸到景泰县的兴泉堡, 全长 220 km。西段走向为北偏西

^{*} 收稿日期: 2012-11-14

修回日期: 2012-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(40972181); 长安大学中央高校基金(CHD2011JC172)

作者简介: 邓龙胜(1981-), 男, 云南镇雄人, 博士, 讲师, 主要从事黄土动力特性及黄土地震滑坡方面的研究。

E-mail: dlsh@chd.edu.cn

60°~65°,东段长轴走向为北偏西45°,呈弯曲弧形,变形带宽十几米到一百多米不等。地震时,强烈的地震动持续了10 min以上,当时世界上有96个地震台记录到这次地震。海原地震的震源深度约为17 km,其宏观震中位于海原县的干盐池附近,震中烈度达到XI~XII度,其极震区西起景泰,经靖远、海原、西吉到固原一带,面积达2万余km²,烈度大于VII的面积约15万km²[11]。

海原地震造成234 117人死亡^[11],还造成了规模巨大、数量众多的地震滑坡,这些地震滑坡主要分布在南、西华山以南,祖厉河以东、六盘山以西、静宁县城以北的地区,即海原县的南部、西吉县的大部、静宁县的西北部和会宁县东部,是震区人民生命财产损失的最主要的因素之一。

2 黄土地震滑坡的特征分析

在前人研究的基础上,对西吉、海原、固原、静宁及会宁一带黄土地震滑坡的分布规律、特征等进行调查和总结,共调查105个点200余个滑坡。

2.1 分布特征

根据调查资料,研究区的黄土地震滑坡在大范围上具有集中发育、扎堆群发的分布特点(图1)。在西吉、海原、固原、静宁及会宁范围内,地震滑坡集中分布在西吉县西南部的夏家大路、兴平镇、平峰镇和苏堡镇党家岔村一带,在其它地区只有零星的分布。而在上述的滑坡密集分布区内,地震滑坡的分布也不均匀,具有小范围扎堆群发的特点,在这些集中发育点之外,却残留了大片完整的山梁。如图2所示,在吉强镇夏家大路面积约5 km²的范围内,密集发育了地震滑坡21个。

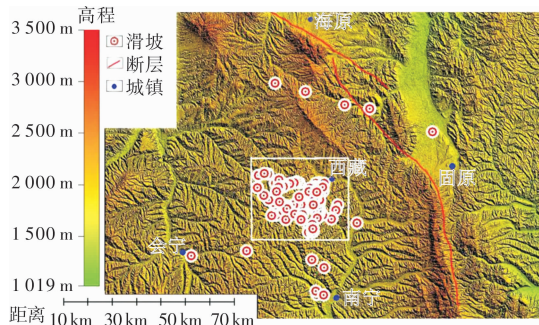


图1 调查区黄土地震滑坡分布

2.2 形态特征

研究区地震滑坡在平面形态上主要表现为长舌形、不规则多段弧形及扇形,其中以前两种较为广泛(图3、图4)。

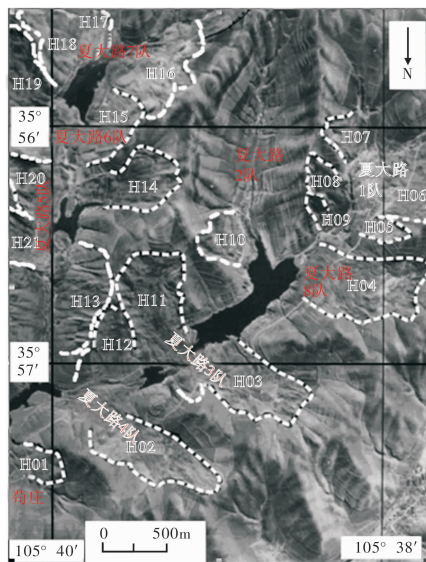


图2 夏家大路地震滑坡分布图

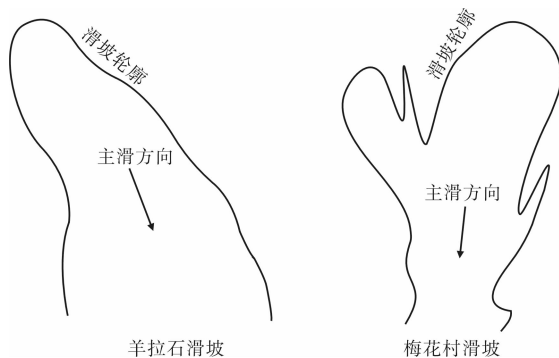


图3 羊拉石长舌形滑坡 图4 梅花村多段弧形滑坡

在滑体的剖面形态上,多数滑坡没有滑体堆积的凸形地貌及阶梯状地貌,主要表现为裸露的光滑的弧形滑床、流线形及波浪形的微地貌特征。具有光滑的弧形滑床微地貌特征的滑坡主要指滑坡失稳后,滑体完全或绝大部分脱离滑床,裸露出全部或大部分弧形的光滑滑床,此时滑体往往将坡前闭塞或弯度较大的沟谷填平,形成平坦的山间滑体堆积小平原,或者滑体沿坡前缓倾的沟谷长距离运移,逐步解体并缓慢堆积(图5);具有流线形及波浪形的微地貌特征的滑坡,主要是指在滑坡失稳时滑体同步解体,并在缓倾的滑床上逐渐堆积,形成波浪形或流线形的缓坡堆积地貌,这种滑坡在形态上看,往往像土流,其前缘往往有扇形或煎饼形地貌特点(图6)。



图5 韩脑村光滑弧形滑床地貌



图6 石碑梁波浪形地貌

为了分析研究区黄土地震滑坡的原始坡度特征, 选取滑坡两侧坡形保存完整且地形较单一的 26 个滑坡进行统计, 结果表明, 原始坡度主要集中在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 其滑坡数量占总数的 62%, 很少发现原始坡度大于 25° 的滑坡, 研究区地震滑坡原始坡度 - 频度统计图如图 12 所示。因此, 对于西吉地区, 黄土地震滑坡在原始坡度上具有缓坡的特点。

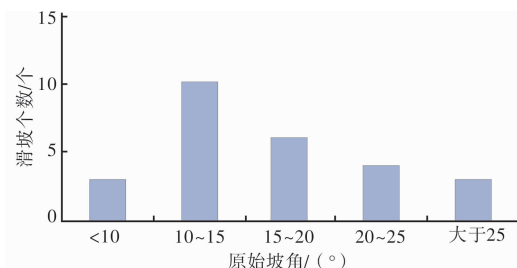


图 12 滑坡原始坡度 - 频度统计图

2.4 地貌特征

从局部地貌特征上看, 在地貌被河流及水系切割比较破碎、比较单薄的山梁, 黄土地震滑坡发生的概率远大于地貌完整、浑圆的山梁, 这主要是因为单薄山梁的刚度较小, 水平抗震能力较差, 地震时, 边坡更容易产生较大的位移, 从而导致边坡的失稳。

2.5 滑向特征

地震滑坡的主滑方向, 主要受到地震波的传播方向和振动方向控制, 即地震力的作用方向。根据对研究区 105 个滑坡的主滑方向进行调查统计, 其主要集中在 $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 和 $270^{\circ} \sim 310^{\circ}$, 具有明显的方向性, 其主滑方向 - 频度统计图如图 13 所示。图 14 中给出了研究区地震滑坡的主滑方向与断层走向的关系图, 由图可见, 主滑方向与海原断裂的整体走向小角度相交, 近似平行, 这说明滑坡受到沿断层走向方向的地震作用比较显著。

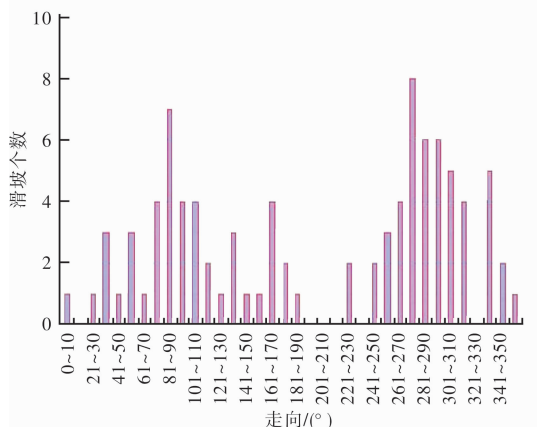


图 13 研究区滑坡主滑方向 - 频度图

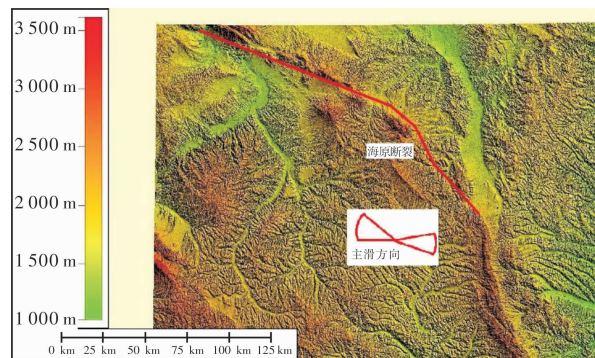


图 14 研究区滑坡主滑方向与断层走向关系图

由于弧形构造带的存在, 垂直于断层传播的地震动和沿断层走向传播的地震动的矢量叠加, 控制着滑坡的主滑方向。

2.6 运动特征

研究区多数黄土地震滑坡在坡前没有凸形及阶梯状堆积地貌, 而是留下波浪形或流线型堆积体及光滑的滑床, 在形态上像黄土流, 并且, 很多滑坡的滑体物质, 脱离母体之后滑向坡前沟谷, 并在沟谷中拐弯之后长距离运移。如图 15 所示的党家岔滑坡, 其滑体脱离滑床之后, 发生拐弯沿 BC 方向移动, 并在 C 点拐弯之后运移了 2 km 多到 D 点。而这些滑坡在拐弯处并没有冲上对面坡面堆积的痕迹, 这说明滑体的运移动能不大, 而滑体长距离运移的能量来源于斜坡失稳后, 在滑移过程中滑带黄土的运动液化。



图 15 党家岔长距离拐弯运移的滑体

3 黄土地震滑坡的破坏类型

在前人研究的基础上, 对研究区黄土边坡破坏特征进行详细调查分析, 并考虑黄土特殊的结构特征及动力特性, 将强震作用下黄土边坡破坏类型划分为振动软化——剪切破坏、振动液

化——流动破坏、振动崩塌破坏及震后蠕变破坏四种破坏类型。

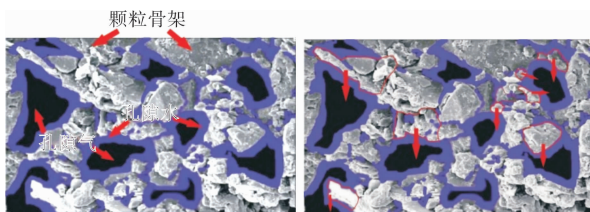
3.1 振动软化——剪切破坏

(1) 破坏机理

黄土是一种弱胶结大孔隙架空结构的结构性土,黄土颗粒主要由粉粒和粘粒组成,孔隙水分子在电场的作用下会以水膜的形式包裹在土粒周围,而在孔隙水膜的外围,则包含了大量的孔隙气,如图 16a 所示。

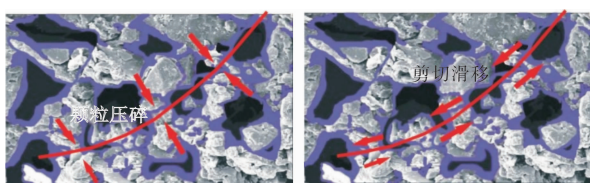
黄土的这种干燥、疏松的特征及架空孔隙结构,使黄土具有极强的地震易损性。由于黄土颗粒间的弱胶结力,土体颗粒间的主要作用力为静电力和分子力,则在强震作用下,孔隙骨架周围嵌固不牢的土体颗粒将会克服这种作用力首先脱离母体,造成孔隙骨架的结构损伤,使孔隙结构的骨架变得更单薄或增加骨架颗粒的自由度,如图 16b 所示。这种黄土孔隙骨架的振动损伤,会造成如下两种现象的发生:第一种现象是振动结构损伤导致颗粒的压碎破坏,如图 16c 所示。因为损伤造成有效断面积的减小,致使颗粒间有效应力增加。当地震动荷载较小时,骨架损伤较小,这使土体骨架产生较大的弹性变形,若地震荷载较大,骨架损伤较大,则骨架颗粒受压屈服,发生破坏,但这种现象极为少见。

第二种现象是振动导致颗粒的剪切滑移以及骨架结构的脆性破坏,如图 16d 所示。当地震剪切波在黄土层中从基岩向地表传播时,土体颗粒的振动方向与传播方向垂直,这会导致骨架颗粒发生翻转、剪切和滑移;当地震纵波向地表传播,孔隙骨架颗粒会发生反复的挤压、脱离和滑移、翻转等现象;面波对地表黄土具有同样的扰动作用。但不管那种扰动,都会导致孔隙骨架的剪切滑移,或者导致孔隙骨架产生脆性破坏。



(a) 黄土架空孔隙结构

(b) 黄土颗粒脱离骨架母体



(c) 结构损伤颗粒压碎

(d) 结构损伤颗粒滑移

图 16 黄土振动破坏微观图

无论以上那种现象,都会产生一定的孔隙体积收缩,而孔隙体积的收缩必然会导致孔隙气压和孔隙水压的升高。对于饱和度较低的黄土,其孔隙成分主要是孔隙气,孔隙水较少,因此,孔隙体积的收缩主要是孔隙气体体积的收缩。孔隙气的等温压缩性 C 可定义为单位体积的固定质量气体由于压力变化而引起的体积变化,即:

$$C = -\frac{dv_{\text{气}}}{v_{\text{气}} du_{\text{气}}} \quad (3)$$

式中: $v_{\text{气}}$ 为孔隙气体积; $u_{\text{气}}$ 为孔隙气压力。

根据等温及不排气压缩过程中孔隙气体积与压力之间的关系以及 Boyle 定理有:

$$\frac{d\bar{u}_{\text{气}}}{dv_{\text{气}}} = -\frac{\bar{u}_{\text{气}}}{v_{\text{气}}} \quad (4)$$

式中: $\bar{u}_{\text{气}}$ 为孔隙气压力,以绝对压力计。

在地震作用下,低饱和度黄土的孔隙气体积 $v_{\text{气}}$ 较大,而初始孔隙气压力 $\bar{u}_{\text{气}}$ 较小,因此,孔隙体积的变化引起孔隙压力的增量较小。因此,地震动虽然会导致孔隙水压和孔隙气压较大的上升,但由于气体的压缩性,气压不可能达到等于上覆压力。

实际上,对于低饱和度的黄土斜坡,由于弱透水层的存在以及孔隙水分布的空间不均匀性,地震作用必然会导致斜坡孔隙压力(孔隙水压力和孔隙气压力)的不均匀增长,有效应力的不均匀降低。则在含水量相对较高或孔隙骨架破坏较严重的地带,形成软弱带并逐渐发展。当这种由于地震造成结构损伤引起孔隙压力的上升发展到一定程度时,和地震动力的共同作用将导致土体的抗剪强度不足,从而引起斜坡发生滑坡破坏,把这种破坏类型叫做振动软化——剪切破坏。研究区绝大多数黄土地震滑坡均属于这种类型,如夏家大路滑坡群、韩脑村滑坡群等。

若斜坡坡度极缓或场地平坦,不发生剪切破坏,则由于孔隙骨架的损伤将使土体产生一定的残余变形,形成地表震陷。如海原地震时甘肃会宁县境内白草园平坦场地的黄土层被震酥,裂缝遍地。

(2) 现象解释

用以上的振动软化——剪切破坏机理,能很容易的解释滑坡的流线型、波浪形地貌、黄土流形态、长距离运移和运动液化等特征。

若将式(4)代入式(3)中,则有:

$$C = \frac{1}{u_{\text{气}}} \quad (5)$$

可见,孔隙气的压缩性因孔隙气压力的增大而减小。

因此,对于研究区的缓坡斜坡,当振动引起

结构损伤, 导致抗剪强度不足产生剪切破坏之后, 在滑动的过程中, 可能出现如下三种情况:

①滑体短距离运移缓坡堆积

对于坡前沟谷狭窄的边坡, 剪切破坏之后只发生短距离的移动就受到对面土体的阻碍而停止, 而仅靠地震动作用致使如此低饱和度的黄土体液化, 显然具有较大的难度, 因此, 这类滑坡一般在坡前呈缓坡堆积。

②滑带土运动液化

对于具有开阔运移空间的滑坡, 由于滑动过程中滑带土剧烈的剪切作用破坏其架空结构, 产生较大的剪缩, 而孔隙气受到强烈的压缩之后, 其压缩性将极大的减小。因此, 在滑动剪切的过程中, 由于剪缩的加剧, 会导致孔隙压力的快速上升, 致使滑带土的有效应力急剧降低, 并逐渐发展, 接近液化状态。同时, 在这个过程中的非均匀运动及振动, 会产生剪缩、震陷等现象, 致使滑体解体, 形成流线型及波浪型地貌, 使滑坡具有黄土流的特征。这也就是研究区长距离运移的滑坡往往发生在地貌开阔地段的原因。

③滑体震陷及运动液化

对于缓坡上的浅层黄土地震滑坡, 在滑体运移过程中, 震动作用致使滑体的逐步解体, 并进一步导致结构破坏, 产生剪缩和震陷, 从而引起滑体孔隙压力的大幅度上升, 有效应力的急剧降低, 导致滑体黄土接近流动状态, 形成流线形及波浪形地貌, 并使滑坡具有黄土流的特征。在夏家大路滑坡, 其原始含水量只有 15%, 却在开挖出的滑体黄土中发现残留的粉土脉。

3.2 振动液化——流动破坏

对于高饱和度的黄土斜坡, 地震作用会导致孔隙压力的迅速上升, 有效应力的急剧降低, 并导致边坡的流动破坏。从本质上讲, 它也是一种剪切破坏, 只是由于其有效应力降低的程度和速度比较大, 其破坏机理有一定的差异。这种破坏类型的斜坡, 其坡度往往更为平缓, 其流动地貌特征更为明显。最典型的例子就是海原地震引发的固原石碑梁黄土滑坡, 原始坡度只有 5° , 却发生了大面积长距离的流滑, 至今还残留有大片的波浪型地貌(图 17)。



图 17 石碑梁滑坡波浪型地貌

3.3 振动崩塌破坏

对于大量坡度较陡的黄土斜坡, 往往发育有大量的垂直节理。当坡脚受到侵蚀时, 由于地震作用破坏了黄土的结构, 降低了胶结力, 同时, 水平地震力加大了黄土块体脱离母体的作用力, 因此, 容易使大量的节理发育成张性裂缝, 使得受节理切割的块体发生翻转、转动及滑动的滑塌型复合破坏(图 18a)。对于坡脚稳定的黄土块体, 在地震力的作用下, 张性裂缝继续发展, 在水平地震荷载的反复作用下, 块体发生旋转、弯折折断、滚动的崩塌破坏(图 18b)。以上这两种破坏类型都以张拉破坏为主, 并且主要发育在节理发育陡坡的浅表层。

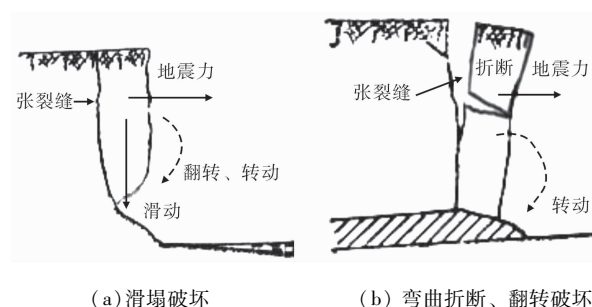


图 18 振动崩塌破坏

3.4 震后蠕变破坏

震后蠕变破坏型滑坡主要是指在地震中没有发生破坏, 但是, 由于地震作用在一定程度上破坏了黄土的结构, 并在坡面或边坡后缘形成了一定数量和规模的张拉微裂缝及产生断续的滑动面, 此时, 边坡已处于一种准失稳状态。在地震之后, 由于黄土的蠕变变形以及地表水入渗和地下水渗流的共同作用, 导致边坡失稳, 发生破坏。

4 西吉县西南部黄土地震滑坡密集发育的成因及机理

根据调查资料, 在海原断裂 220 km 长破裂带两侧的大范围区域内, 黄土地震滑坡主要集中分布在西吉县的西南部, 而在别的地方只有零星分布。本文从以下及方面, 总结西吉县西南部黄土地震滑坡密集发育的成因及机理:

4.1 滑坡高发区处于地壳破裂带的几何投影中心

如图 19 所示, 红线 AB 为海原断裂的地表破裂线, 在海原县、李俊堡及固原之间形成了近似弧形的破裂带, 该破裂带对滑坡高发区形成半包围状。若将海原断裂的平均倾角取为 60° , 震源深度取为 17 km, 则海原地震的地壳破裂点在地面的

投影将往西南方向偏移 10 km, 如图 19 中品红线 CD 所示。由于弧形破裂带的存在, 使震中投影点到场区距离小于 70 km 的破裂长度超过 100 km, 而滑坡高发区则处于该弧形破裂带的几何投影中心, 若每一点地壳破裂产生一个脉冲引起场区震动, 地震脉冲几乎同时从弧形带向滑坡高发区传播, 产生振动叠加作用, 因此, 该地区遭受了更多、更强的脉冲叠加作用, 即承受了更强持时的强震作用。

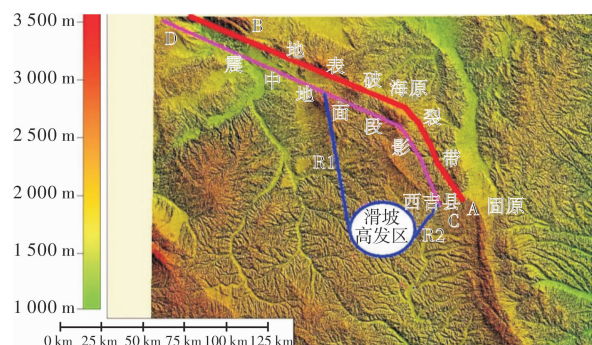


图 19 滑坡高发区及弧形地壳破裂带分布图

4.2 研究区岩土分布特征

在滑坡密集发育区以北更靠近震中的地带, 为南华山、西华山及月亮山山脉, 主要为基岩山区, 第四纪覆盖层很薄, 地质条件较好, 因此, 地震滑坡发育较少。在滑坡密集发育区具有较厚的黄土覆盖层, 而黄土本身具有强烈的地震易损性, 地震作用容易破坏黄土的架空孔隙结构, 使黄土体内孔隙压力上升, 有效应力降低, 从而容易发生剪切破坏。因此, 滑坡高发区的分布与研究区的岩土分布特征相关。

4.3 地貌特征

滑坡主要发育于地貌切割破碎、山梁单薄的地带。滑坡高发区由于受到葫芦河、祖厉河, 特别是烂泥河的主干河流及支流的强烈切割, 形成极其单薄的黄土梁, 地形地貌相当破碎。

另外, 根据前面滑坡主滑方向的统计分析认为, 地震力主方向为与断层走向小角度相交的方向, 而滑坡高发区由于受到烂泥河支沟的切割, 大多数的山梁走向均与地震力主方向垂直或大角度相交, 如图 20 所示。而当边坡受到指向坡外的地震力时, 比边坡受到平行于边坡走向地震力时, 更容易发生破坏。

因此, 该区域地震滑坡高度发育的原因, 不但是因为该区域的黄土梁受到了强烈的切割, 山梁比较单薄和破碎, 还因为这些黄土梁的走向与地震力的主方向垂直或大角度相交, 容易失稳。所以该区地震滑坡异常发育的原因和该区的地貌

特征和水系发育规律相关。



图 20 滑坡高发区的地貌特征

4.4 地震波频谱特征

边坡的破坏程度, 边坡对地震动产生的位移、速度及加速度响应的大小, 与地震动时程的频谱特性和边坡的自震周期相关, 而边坡的自震周期主要由坡高、覆盖层厚度等控制。滑坡高发区地震滑坡如此密集发育的一大原因是场地遭遇的地震动时程中, 包含了大量与边坡自震周期具有相同周期成分的波, 使边坡在动力作用下发生共振, 从而导致大规模的失稳破坏, 即近场区的地震波中包含了大量的短周期、高频率成分的波, 使低、矮的边坡容易发生共振。

在滑坡高发区以南、以西的静宁、会宁一带, 虽然同样表现为单薄、破碎的地貌特征, 具有较厚的黄土覆盖层和较矮的坡高, 但是, 由于其逐渐远离地壳破裂带, 则地震动的强度产生了衰减, 地震动时程的频谱特性发生了改变, 虽然仍发育一定数量的黄土地震滑坡, 但滑坡密度已大大减小。

5 结论

通过本文的研究, 可得如下结论:

(1) 研究区的黄土地震滑坡具有集中发育、扎堆群发的分布规律, 对于坡高较低、坡度较缓、山梁单薄、地貌破碎的斜坡更易发生失稳破坏, 并具有方向性和运动液化的特点。

(2) 考虑黄土特殊的结构性及动力特性, 强震作用下黄土斜坡破坏类型可分为振动软化——剪切破坏、振动液化——流动破坏、振动崩塌破坏及震后蠕变破坏四种破坏类型。

(3) 西吉县西南部黄土地震滑坡密集发育是因为该区处于海原地震地壳破裂带的几何投影中心, 并与该区岩土分布特、地貌特征, 以及所遭受地

震波频谱特征相关。

参考文献:

- [1] Zhu H. Some types of seismic landslides in the Loess Area in China [J]. Proc. International Field Workshop on Loess Geomorphological Processes and Hazards, 1989: 64-71.
- [2] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 17-18.
- [3] 白铭学, 张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化移动[J]. 工程勘察, 1990(6): 1-5.
- [4] Sasaa K. The mechanism starting liquefied landslides and debris flows [C] // 4th International Symposium Landslide. Toronto, 1984: 349-354.
- [5] Sassa K. The mechanism of debris flows [C] // 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985: 1173-1176.
- [6] Wang Lanmin. Analysis of loess seismic landslides under irregular seismic loading[J]. proceedings of the First International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, 1991(1): 511-518.
- [7] Wang Lanmin, Sun Chongshao, Yuan Zhongxia. Zonation on seismic geotechnical hazards in loess areas of China[M]. Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard (Revised Version), Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE, 1999.
- [8] Yuan Z X, Wang L M. Collapsibility and seismic settlement of loess[J]. Engineering Geology, 2009, doi: 10. 1016/j. enggeo. 2008. 12. 002.
- [9] 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化[J]. 地质论评, 1992, 38(6): 532-539.
- [10] 王家鼎, 刘悦. 高速黄土滑坡、蠕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.
- [11] 国家地震局兰州地震研究所, 宁夏回族自治区地震队. 一九二〇年海原大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1980.

Deformation Breakage Characteristics and Development Mechanism of Loess Landslide Triggered by Haiyuan M8.5 Earthquake in Ningxia

Deng Longsheng, Fan Wen

(College of Geological Engineering and Geomatic, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Haiyuan earthquake is one of the most important earthquakes that happened in loess region of China, which triggered innumerable loess landslides. Investigations are carried out to study the basic characteristics, breakage types and dense development mechanism of loess landslides triggered by Hai Yuan earthquake in regions of Xiji, Haiyuan and Guyuan, where loess landslides are densely developed. The landslides in those regions display a dense and group development orderliness, are apt to occur on slope with lower height and dip angle, thin mountain and fragmentized physiognomy, and show the defined direction and movement liquefaction characteristics. Based on the especial structure and dynamical characteristic, breakage types of loess earthquake landslide should be reduced to four types as shear breakage for vibration soften, flow breakage for vibration liquefaction vibration landslide, and creep breakage after earthquake. And then, the reason of loess earthquake landslide dense development in region of Xiji county should be concluded that it is located on the geometry projection center of fracture zone of Haiyuan earthquake, cooperating with the distribution of stratum, physiognomy and frequency compose of earthquake wave encountered.

Key words: Haiyuan M8.5 earthquake; loess; landslide triggered by earthquake; breakage types; dense development mechanism; Ning Xia