

台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义

许领¹⁾, 戴福初¹⁾, 邝国麟²⁾, 谭国焯²⁾, 涂新斌¹⁾

1) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029;

2) 香港大学, 香港

内容提要: 黄土滑坡是我国西北地区非常严重的地质灾害现象, 后缘裂缝是黄土滑坡典型特征之一。陕西省泾阳南塬自1976年大面积农业灌溉以来, 发生了27处50余起黄土滑坡。研究区塬边裂缝发育, 滑坡密集分布的太平至蒋刘段目前共分布着28条裂缝, 总延展长度为1424m。塬边地形形态控制着裂缝的发育、成因机制, 因此, 根据裂缝所处塬边地形形态, 将南塬裂缝发育模式分为: “U”模式、“W”模式和“Z”模式。裂缝形成后对塬边滑坡的发展产生重要影响, 使得坡体土体应力状态接近破坏界面, 只需较小的孔压增量和荷载即可诱发滑坡, 同时, 改变了地表水的入渗途径, 极大地增加了地面灌溉和降雨诱发滑坡的概率。同时, 裂缝的形成对于黄土滑坡的演化和群体性分布具有重要的意义。

关键词: 黄土台塬; 黄土滑坡; 台缘裂缝; 发育特征; 泾阳南塬

我国黄土面积631000 km², 约占我国陆地面积的6.6%。黄土滑坡是黄土地区严重的地质灾害现象。1920年12月16日宁夏海原8.5级地震, 造成200000人死亡(张振中, 1999)。据不完全统计, 陕西省已发生黄土滑坡1131处, 兰州地区1300处, 甘肃省东部4576处(王念秦, 2005)。黄土滑坡已造成了巨大的经济损失和人员伤亡。

对陕西南塬、甘肃黑方台以及陕西白鹿原等台缘黄土滑坡考察表明, 后缘裂缝发育是黄土滑坡的普遍特征, 对黄土滑坡酝酿、发展、发生、演化、分布具有非常重要的影响。一直以来, 台缘裂缝成因机制未受到足够重视, 然而, 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的作用机制是黄土滑坡研究不可回避的重要内容。

赵尚学等(1995)在对黑方台黄土滑坡区的研究中认为, 台缘弧形或直线形拉张裂缝, 是黄土节理发育、地表水入渗造成的一种湿陷裂缝。王家鼎(1999)通过对大量黄土滑坡的考察, 发现湿陷坑边缘多为滑坡的后缘裂缝。湿陷性不足以解释“湿陷坑”的线性或者串珠状展布的规律性特征, 以及其导致的后缘裂缝的线性特征。吴玮江(2005)对天水锻压机床厂滑坡现场调查时, 发现了相当多的新

鲜裂缝, 其认为前期滑坡对垂直节理的牵引拉张可形成后缘裂缝。

可见, 当台缘裂缝成因机制容纳了黄土自身性质(如垂直渗透性、节理发育及湿陷性), 其内容就变得非常复杂, 同时, 现阶段的裂缝发育机制不可回避塬边地貌演化的影响。在对南塬滑坡裂缝调查和特征测量的基础上, 以泾阳黄土台缘滑坡裂缝作为研究内容, 分析了裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义。

1 裂缝发育情况

南塬位于宝鸡峡引渭灌溉区的下游, 自从1976年大面积农业灌溉以来, 南塬共发生了27处50余起黄土滑坡(图1)。作者于2005至2007上半年对南塬进行了多次考察, 对地裂缝特征参数进行了测量。

1.1 裂缝发育规模

南塬太平—蒋刘段塬边发育28条裂缝, 总延展长度为1424m(裂缝延展长度为裂缝两端点连线的直线距离)。图2为南塬裂缝特征统计直方图。由图可知, 裂缝距塬边距除一条为18.7m外, 其余主要在2~14m不等, 平均值为8.1m; 裂缝延展长度

注: 本文为香港研究资助局项目(编号 RGC-HKU7176/05E)的成果。

收稿日期: 2008-04-25; 改回日期: 2008-06-19; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 许领, 1982年生。博士研究生。研究方向: 黄土滑坡机理与防治。Email: suyu820@163.com。

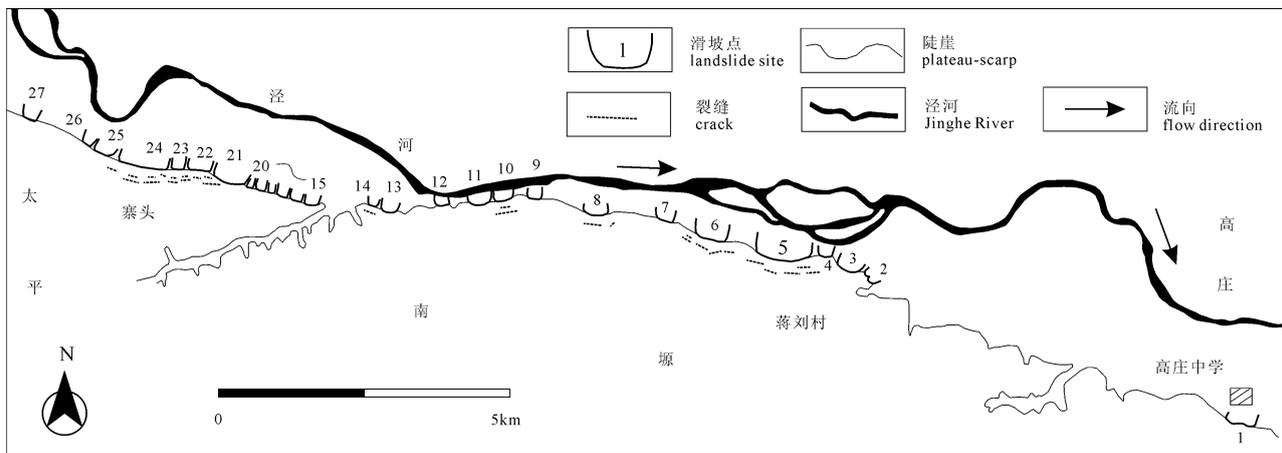


图1 泾阳南塬黄土滑坡与台缘裂缝分布图

Fig. 1 Distribution of loess landslides and cracks along the edge of South Jingyang Plateau

主要集中在 10~70m 之间,仅有 3 条大于 70m,最长一条为 208m,平均为 50.9m。塬边裂缝多已张口(平均张开宽度为 47.6cm),并发生垂直错动(平均为 48.0cm)。可见,研究区裂缝活动特征明显,滑坡形势依然严峻。

1.2 裂缝发育类型

塬边地形形态可分为 3 种:“U”、“W”和“Z”形。塬边地形形态一定程度上反映了历史滑坡发育

情况,并且决定着地下水径流特征及裂缝的发育、成因机制。因此,可相应地将塬边裂缝发育分为 3 种模式,从而为进一步针对性地讨论裂缝成因机制提供了新的思路。为了方便下文裂缝成因机制的讨论,这里将塬边地裂缝发育模式分为:“U”模式、“W”模式和“Z”模式(图 3),裂缝类型分布如图 4 所示。

(1)“U”模式是发生在滑坡后缘的一种裂缝模

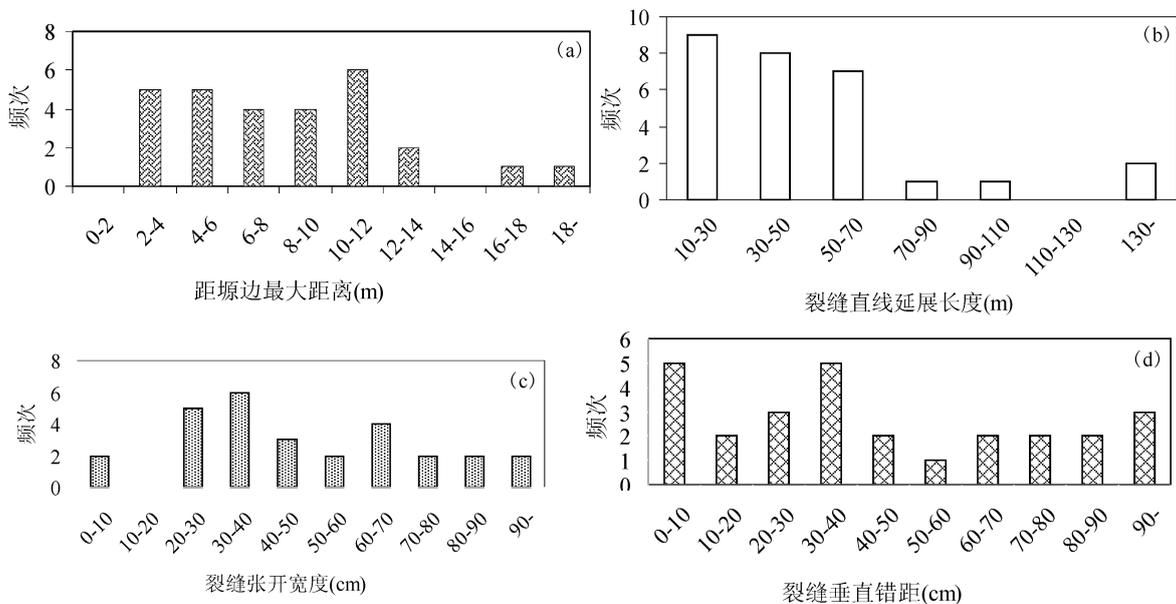


图2 泾阳南塬塬边裂缝特征统计

Fig. 2 Statistics for the features of cracks developed at the edge of South Jingyang Plateau

注:“距塬边最大距离”为裂缝上点到塬边最大距离;“裂缝延展长度”为裂缝两端点连线直线距离 (Note: maximum distance from plateau scarp was defined by the maximum distance between the point on the crack and the scarp; crack extending length was defined by the distance of two end points of the crack)

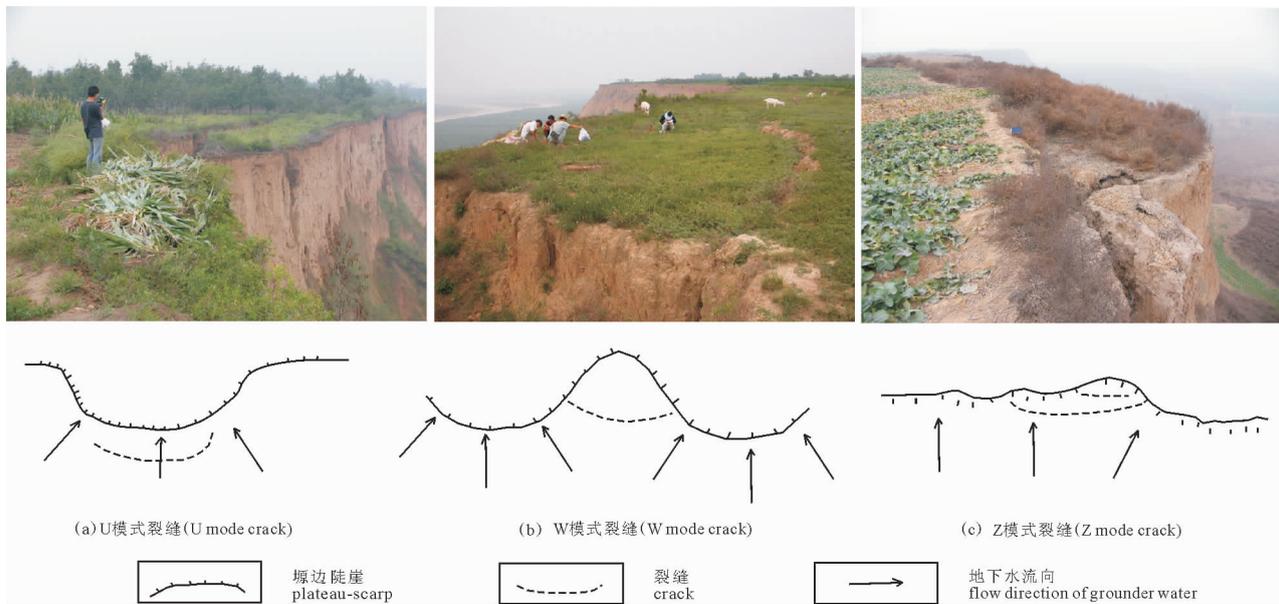


图 3 塬边地形形态特征与裂缝模式

Fig. 3 Landform of the edge of South Jingyang Plateau and cracks developing modes

距塬边距多在 4 ~ 16.1m, 平均在 8.2m, 延展直线长度大约在 16 ~ 115m, 平均 42.6m。由于塬边凸向塬外, 此类裂缝模式不利于地下水的汇集。此类裂缝占研究区裂缝类型的 50%。

(3)“Z”模式多为塬边的自然不规则形态或者一边为天然塬边一边为滑坡后缘(或者凹地形)组合形态。此类裂缝最大距塬边距多在 4 ~ 16.3m 不等, 平均 8.0m, 延展直线长度在 13.2 ~ 208m, 平均 69.8m, 最大值 208m 即为此类裂缝。该类型裂缝弧形特征不明显, 近似直线。

1.3 裂缝发育与滑坡的相关性

自 1976 年大面积农业灌溉以来, 南塬黄土滑坡频发, 目前塬边地形地貌多为滑坡改造。调查表明, 塬边裂缝发育情况与历史滑坡具有相关性。根据图 1 可从下面 3 个层面进行说明:

(1)南塬滑坡主要集中在长约 15km 的太平—蒋刘塬边发育。没有滑坡发育的塬边地段, 裂缝不发育。

(2)当前塬边裂缝主要发育在历史滑坡附近(两侧或者后缘), 如图中编号 5、6、8、10、14、22、23 的滑坡点。其中滑坡 5、23 处发生了 3 期滑坡演化, 滑坡 6、22 发生了 2 期滑坡演化, 此处塬边地形地貌受滑坡影响强烈。

(3)滑坡密集的塬边, 地段裂缝特别发育。滑坡点 24 裂缝特别发育, 此处实际为一个滑坡群(由

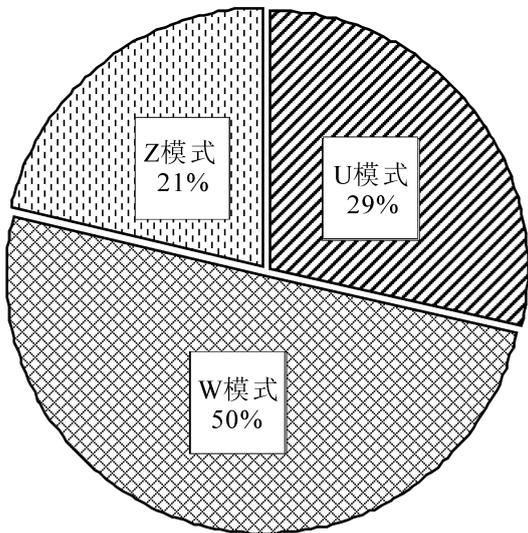


图 4 裂缝类型分布图

Fig. 4 Distribution of cracks types of South Jingyang Plateau

式; 此类裂缝平行于滑坡后缘, 最大距塬边距在 2 ~ 13m 不等, 平均 8.1m, 延展直线长度在 27 ~ 100m, 平均 57m。由于塬边凹向塬内, 因此, 此类裂缝模式有利于地下水的汇集, 径流增强作用明显。

(2)“W”模式为两处凹地形或者滑坡之间凸出部分的一类裂缝发育模式; 此类裂缝弧形特征明显, 两端高角度斜角于两侧凹地形塬边。此类裂缝最大

于滑坡周界难以区分,将3处多期滑坡合并一处),此处裂缝发育强烈。

由塬边裂缝发育与滑坡发育相关性可知,塬边裂缝自身也经历着发生、发展、消失,以及新的裂缝又不断产生的过程,因此,当前裂缝发育情况反映了现阶段塬边地形地貌条件,成因机制受其影响。因此,也造成当前裂缝发育规模差别较大,形成机制也不尽相同。

2 裂缝成因机制

农业灌溉造成研究区地下水位大幅度抬升是造成南塬黄土滑坡的根本原因(雷祥义,1992)。根据调查走访,裂缝的发展亦是随着灌溉的开始而逐渐出现的。因此,本文首先对初始塬边条件下的单一滑坡裂缝成因机制进行讨论,即滑坡酝酿→裂缝产生的形成机制;其次,在上述分析的基础上,对当前三类裂缝成因机制进行探讨。

作者曾对泾阳东风滑坡后壁取样,开展了基于饱和黄土 ICU/ACU 及 CSD 三轴试验(戴福初等,2008),饱和黄土应力应变特征如下:

(1)ICU/ACU 在小应变条件下($< 2\%$, ACU 更小)即达峰值强度,其后呈强烈应变软化特征,达到临界状态。

(2)CSD 增湿路径下,起初变形极小,当应力路径穿过状态边界,即将达到临界状态线时,土体发生脆性剪缩破坏,孔隙水压力升高,黄土发生静态液化。

基于饱和黄土应力应变特征,将滑坡后缘裂缝形成过程概括如下:首先,长期农业灌溉导致黄土台缘地下水升高,底部局部饱水黄土随着孔隙水压力的升高发生静态液化(图5 ab)或者沿着不排水剪切路径达到峰值后,发生应变软化(ac),造成上部黄土应力路径由b(c)向d发展,趋近破坏线。上述过程由黄土边坡底部向上不断发展,最终,在地表形成裂缝。由于应力路径达到峰值状态点或者破坏前所需应变较小,从而造成塬边裂缝垂直错距较小(实测平均值48.0cm),与实际较符。

随着塬边滑坡改造,当前裂缝形成除了上述主要机制外,地形、地貌因素也对当前裂缝形成具有重要作用。当前类型裂缝成因机制初步讨论如下:

(1)“U”模式是发生在前期滑坡后缘的一种裂缝模式(图3)。当其距塬边距较小时(如2~4m),为前期滑坡滑动时对于后壁的一种牵引拉张或者发生卸荷作用而形成;当距塬边距较大时(如13m),

成因机制类似于前面分析的初始塬边条件下的滑坡裂缝成因机制,但是,历史滑坡后缘对地下水径流增强作用将更为突出(图3)。早期滑坡高陡的厚壁也对此类裂缝的形成具有重要影响。

(2)“W”模式为两处凹地形或者滑坡之间凸出部分(图3)。当其距塬边较小时(如2~4m),为重力作用下垂直节理的侧向拉张或者发生最大抗剪强度破坏而形成;当距塬边距较大时(如13m),其成因机制类似于前面分析的初始塬边条件下的单一滑坡裂缝成因机制,但是,其地下水对坡体的影响范围较初始塬边条件下要小,重力荷载作用将更加突出。

(3)“Z”模式多为塬边的自然不规则形态或者一边为天然塬边一边为滑坡后缘(或者凹地形)组合形态(图3)。前者距塬边距较小,为节理的侧向拉张而形成,一般发展为黄土崩塌掉块;后者一般距塬边距较大,成因机制为初始塬边条件下裂缝成因机制,多发展为较大规模的滑坡。

3 裂缝诱发滑坡机制

地裂缝的形成初期,尽管 q 的增加使得应力路径有向破坏线移动的趋势,但是,裂缝造成了排水条件,应力路径不会到达破坏线,土体软化失稳或者液化不会发生,这就解释了裂缝形成后可长时间存在,而不发生滑坡的原因,只是此时应力路径更接近破坏线了。随着裂缝的发展,应力路径CD继续向上发展(图5),因此,在后期的农业灌溉或者降雨条件,即使很小的孔压上升,即可达到破坏线(图5),土体破坏,从而发生滑坡。因此,这也合理地解释了裂缝出现后,降雨或者灌溉更易诱发滑坡的原因。裂缝的形成还改变了地表水的入渗途径(许领,2008)。由图5可知,裂缝形成应力路径的转移本已经使得滑坡对环境的敏感性剧增,因此,裂缝汇集地表水灌入坡体对黄土滑坡具有极其重要作用,可直接诱发滑坡。

4 地裂缝与滑坡演化

滑坡演化是滑坡活动强度逐渐衰减的过程,反映的是塬边地质条件改变,滑坡趋于平衡态的一种走势。裂缝一旦形成,滑坡可能的发育规模已初步确定。假设滑坡方量等于裂缝延展长度×最大距塬边距×塬边高差,因此,若取塬边高差为70m,则滑坡平均方量为 $50.9\text{ m} \times 8.1\text{ m} \times 70\text{ m} = 28860.3\text{ m}^3$,最大值为 $208\text{ m} \times 18.7\text{ m} \times 70\text{ m} = 272272\text{ m}^3$,而实际上,裂缝可能发展形成的黄土滑坡方量要小于上

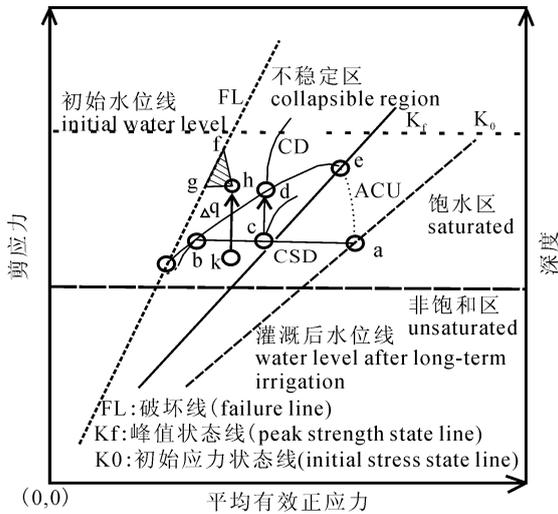


图 5 裂缝发展及其对黄土滑坡的意义

Fig. 5 Cracks developing mechanisms and their significance to loess landslides

述值。因此,按目前裂缝发育水平来看,其规模较早期频繁发生的远程流滑要小的多,因此,当前裂缝发育规模是现阶段黄土滑坡演化趋势的一种体现和反映。而实际上,近年来,南塬滑坡规模逐渐变小,滑坡演化趋于平衡,与裂缝反映情况一致。

“U”裂缝是与滑坡演化有关的一种裂缝模式,此类裂缝的发展可形成后期的演化滑坡。但此类裂缝不足以解释象头 2 期、蒋刘 2 期等较大规模的滑坡,这主要是由于裂缝的发育只能反映现阶段塬边地形地貌条件,如果用于解释近期发生的演化滑坡,则具有很好的一致性。这似乎说明裂缝同滑坡演化一样,亦具有演化性,但问题在于早期滑坡演化阶段,“U”模式裂缝成因机制并不明确,但认为裂缝加速了滑坡演化过程是合理的。

5 地裂缝与滑坡群

1987 年全国滑坡学术讨论会上,勒泽先(1989)根据对西北黄土滑坡大量区域性考察,认为黄土滑坡具有“群体性”发育特征。南塬黄土滑坡“群体性”特征明显,如太平乡寨头村黄土滑坡群。

南塬黄土滑坡群形成的前提是要具有个体滑坡发生条件(如灌溉造成地下水位升高);其次,前期滑坡改变了塬边环境地质条件(地下水径流集中、塬边坡度增加)造成黄土滑坡演化,同时,塬边裂缝的发育为滑坡横向扩展提供了重要动力来源,这主要体现在 W 模式裂缝发育,由图 6 可见,该模式裂缝占裂缝总数的 50%;黄土滑坡演化和横向扩展又

突出了滑坡诱发因素并加剧地裂缝发育,在上述因素相互作用下,最终导致黄土滑坡集中分布,形成黄土滑坡群。

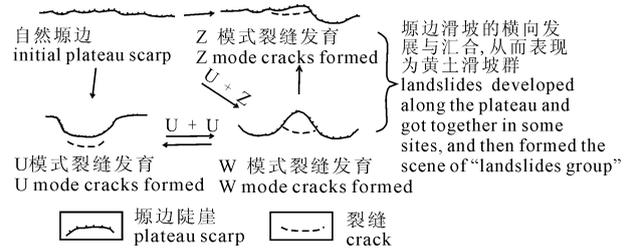


图 6 黄土滑坡群及其形成机制概念模型
Fig. 6 Group-distribution of Loess landslides and conceptual model

6 结语

通过对陕西省泾阳县南塬黄土滑坡现场调查和地裂缝特征测量,分析了滑坡后缘裂缝的发育特征、形成机制,探讨了其对黄土滑坡发生、演化、集群分布的作用机制和意义。

(1)初步查明南塬滑坡裂缝发育情况。发育有 28 条裂缝,总延展长度为 1424m。裂缝距塬边距除一条为 18.7 m 外,其余主要在 2 ~ 14m 不等,平均值为 8.1m;裂缝延展长度主要集中在 10 ~ 70m 之间,仅有 3 条大于 70m,最长一条为 208m,平均为 50.9m。塬边裂缝多已张口(平均为 47.6cm),并发生垂直错动(平均为 48.0cm)。

(2)按照裂缝发育位置所处塬边形态,南塬滑坡裂缝发育模式分为:“U”模式、“W”模式和“Z”模式,分别具有不同的地下水径流特征。

(3)塬边裂缝自身也经历着发生、发展、消失,以及新的裂缝又不断产生的过程,因此,当前裂缝发育情况仅能反映现阶段塬边地形地貌条件。现阶段裂缝的发展与滑坡关系密切,因此,裂缝成因机制的探讨必须与裂缝发育位置、塬边形态及其自身发育规模联系起来。

(4)初始塬边条件下,塬边裂缝成因为黄土边内部土体微观(小应变)变形的宏观积累,是内部机制的外在表现。历史滑坡对塬边地形、地貌的改造对裂缝成因具有一定的影响。其中对于距塬边较小的裂缝,为黄土节理的侧向拉张(如部分“U”、“Z”、“W”模式)或者重力作用下土体最大剪切强度破坏(“W”模式)所形成;距塬边距离较大的“W”、“U”、“Z”类似于初始塬边条件下的裂缝成因机制,但重

力荷载和塬边地下水对滑坡的作用程度有所不同。

(5) 裂缝的形成, 一定情况下有利于局部地下水的消散和排泄, 使滑坡趋于稳定; 但另一方面, 使坡体底部土体的应力状态发生转移, 向破坏线移动, 后期仅需较小的超孔压水压力或者外部荷载即可诱发滑坡。同时, 裂缝形成后能够汇集地表水灌入坡体, 可直接诱发滑坡。

(6) 裂缝的形成对于黄土滑坡的演化和群体性分布具有重要意义。现阶段地裂缝发育规模体现了滑坡演化趋势, 裂缝的形成加速了滑坡演化; 裂缝(尤其是“W”模式裂缝)是滑坡“群体性”分布横向扩展的动力机制, 黄土滑坡演化和横向扩展又突出了滑坡诱发因素并加剧地裂缝发育, 最终导致黄土滑坡集中分布, 形成黄土滑坡群。

参 考 文 献 / References

勒泽先, 韩庆宪. 1989. 黄土高原滑坡分布的“群体性”. 见: 1987年

- 全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集. 成都: 四川科学技术出版社, 123~128.
- 金艳丽, 戴福初. 2007. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究. 岩土工程学报, 29(10): 1493~1499.
- 王家鼎, 张倬元. 1999. 典型高速滑坡群的系统工程地质研究. 四川科学技术出版社, 51~52.
- 王家鼎. 1992. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化. 地质论评, 38(6): 532~539.
- 王念秦, 张倬元. 2005. 黄土滑坡灾害研究. 兰州: 兰州大学出版社.
- 吴玮江, 王念秦. 2006. 甘肃滑坡灾害. 兰州: 兰州大学出版社.
- 许领, 李宏杰, 李维朝. 2008. 台缘黄土滑坡地表水入渗问题分析. 中国地质灾害与防治学报, 19(2): 32~34.
- 赵尚学, 李鸿璜, 马东涛. 1995. 盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究. 水土保持通报, 15(1): 19~23.
- 张振中. 1999. 黄土地震灾害预测. 北京: 地震出版社.

Characteristics and Forming Mechanisms of the Plateau-Edge Cracks and Their Significance to Loess Landslides

XU Ling¹⁾, DAI Fuchu¹⁾, A. K. L. KWONG²⁾, L. G. THAM²⁾, TU Xinbin¹⁾

Institute of Geology and Geographic, Chinese Academy of Science, Beijing, 100029;

2) University of Hong Kong, Hong Kong

Abstract: Loess landslide is the most catastrophic geohazard in Northwestern China. Plateau-edge crack is one of the representative characteristics for most loess landslides. Groundwater table in the South Jingyang Plateau, Shaanxi Province has been significantly raised since 1976 and more than 50 landslide events have occurred at 27 sites, resulting in large economic loss and numerous deaths. Based on field survey and measurements of cracks at South Jingyang Plateau, it can be concluded that 28 cracks with a total length of 1424 m were developed at the edge of the study area. Based on the topographic features, the cracks can be classified as "U" model, "W" model and "Z" model. At the initial stage, cracks are caused by the accumulated small strain of the slope soils. The present features of cracks can only reflect the present geological conditions. The forming mechanisms of "U" model, "W" model and "Z" model cracks are, thus, very similar to but not the above mentioned mechanism. Cracks developed change soil stress state and make it to be near the collapse surface, and then a small load or water infiltration can induce landslides. Cracks that can collect surface water and increase the possibility of rain or irrigation-induced landslides. Cracks also have important significance to loess Landslides evolution and "group distribution" characteristics.

Key words: loess Plateau; loess landslide; Plateau-edge cracks; Developing characteristics; South Jingyang Plateau

