#### DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-04

李同录,李颖喆,赵丹旗,等.对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):25-32.

LI Tonglu, LI Yingzhe, ZHAO Danqi, *et al.* Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 25-32.

# 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考

李同录<sup>1,2</sup>,李颖喆<sup>1</sup>,赵丹旗<sup>1</sup>,胡向阳<sup>3</sup>,李 萍<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西西安 710054;

2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃 正宁 745399;

3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:水对斜坡作用包括地表水流动作用和地表水入渗作用,地表水流动作用,如水库、河流的岸坡破坏,由水动力侵蚀 所引起。目前黄土中地表水入渗影响下的斜坡稳定性分析存在一些概念含糊的问题,如忽略了入渗过程的应力路径,只 考虑其破坏时的应力状态,这会导致对其破机理和稳定性计算参数取值的误判,文章只针对该类问题进行辨析讨论。黄 土中地表水的入渗一般有降雨和灌溉两种,伴随降雨入渗多引起斜坡浅层破坏;灌溉导致地下水位上升则引起深层滑 移。地表水入渗对斜坡总应力改变不大,水致斜坡破坏主要是孔隙水压力上升,土体有效应力降低所致。非饱和黄土中 的初始孔隙水压力为负值,降雨入渗后的浅层黄土仍处于非饱和状态,孔压最大升到0;灌溉会引起地下水位抬升,潜水 位下为正的孔隙水压力。明确了孔压变化过程,就可以用有效强度评价边坡稳定性。同时,目前一些观点认为关于流动 性黄土滑坡是静态引起,这颠倒了因果关系,是滑移引起了液化,而不是液化导致的滑移。

关键词:黄土斜坡;浅层破坏;深层滑移;降雨;灌溉

中图分类号: P642.13<sup>+</sup>1;TU413.6<sup>+</sup>2 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2022)02-0025-08

# Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis

LI Tonglu<sup>1,2</sup>, LI Yingzhe<sup>1</sup>, ZHAO Danqi<sup>1</sup>, HU Xiangyang<sup>3</sup>, LI Ping<sup>1,2</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Observation and Research Station of Water Cycle and Geological Environment for the Chinese Loess Plateau,

Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China; 3. Power China Northwest Engineering

Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The action on water slope includes surface water flow and surface water infiltration, and surface water flow, such as slope damage of reservoir and river banks, is caused by hydrodynamic erosion. At present, there are some vague concepts in slope stability analysis under the influence of surface water infiltration in loess. For example, ignoring the stress path in the infiltration process and only considering the stress state at the time of its failure will lead to misjudgment of its failure mechanism and the value of stability calculation parameters. This paper aims to analyses and clarify the issues. There are two sources of groundwater in loess, those are rainfall and irrigation. Rainfall infiltration produces shallow slope failure during

收稿日期: 2022-01-31; 修订日期: 2022-03-13 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/ 基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0111900); 国家自然科学基金专项资助项目(42041006)

第一作者: 李同录(1965-), 男, 甘肃正宁人, 教授, 主要从事黄土工程地质、地质灾害防治工作。E-mail: dcdgx08@chd.edu.cn

中国地质灾害与防治学报

raining time, while irrigation causes groundwater level rising to trigger deep seated slide. Surface water infiltration can make a remarkable rising of pore water pressure, but minor change of the total stress, and a consequent decreasing of effective stress in the slope, which is the cause of slope failure triggered by water. The initial pore water pressure in unsaturated loess is negative, and the shallow loess after rainfall infiltration is still in unsaturated state, and the pore water pressure rises to 0 at the maximum. Irrigation will cause the groundwater level to rise, and the pore water pressure under the water table will be positive. When the change process of pore water pressure is made clear, the slope stability can be evaluated by effective strength. At the same time, at present, some opinions think that the landslide of flowing loess is caused by static state, which reverses the causality, and it is the slip that causes liquefaction, not the slip caused by liquefaction.

Keywords: loess slope; shallow failure; deep seated slide; rainfall; irrigation

## 0 引言

斜坡破坏是黄土地区最常见的一种不良地质现 象。一方面沟豁纵横的黄土地貌成为自然和工程高陡 斜坡最为集中的区域;另一方面黄土疏松的结构使其工 程性质性十分脆弱,在各种营力作用下容易破坏。降 雨、地震、水库浸没、河流侵蚀等自然因素;农田灌溉、 坡脚开挖、坡顶加载、采矿等人为因素作用,都可能诱 发其破坏<sup>[1]</sup>。在这些影响因素中,水是最敏感的因素, 其中降雨和农业灌溉引起的斜坡破坏最为普遍。一般 来说,降雨诱发的一般为浅层斜坡破坏,伴随降雨过程 发生<sup>[2]</sup>。灌溉一般在台塬平坦的顶部,受地形条件限 制,很少影响到边缘斜坡浅层,但会引起地下水位上升, 诱发深层滑移<sup>[3]</sup>,滑坡可能在灌溉数年到数十年以后才 发生。

针对降雨引起的浅层滑坡和灌溉引起的深层滑坡 有大量的研究报道,取得了丰硕的成果<sup>[4-7]</sup>。但对黄土 斜坡而言,有一定的特殊性,如降雨引起浅层黄土滑坡 和地下水没有水力联系;而深层滑坡和降雨又有没有直 接联系。另一方面,人们基于常规应力路径下的抗剪强 度对斜坡稳定性分析较多,较少考虑其实际应力路径和 相应抗剪强度。文中主要针对这些特殊情形进行分析, 因为各种坡稳定性评价方法已经很成熟,这里不涉及具 体方法,只探讨一些原则性问题。

## 1 降雨诱发斜坡浅层破坏模式及评价原则

降雨诱发的浅层斜坡破坏因坡度不同分为三种模式,一种是直立边坡坡脚崩塌,由毛细水上升引起;二是 直立边坡坡顶滑塌,是降雨下渗引起;第三种是陡倾斜 坡浅层滑移,也是降雨坡面直接入渗引起。

1.1 直立边坡坡脚崩塌

调查发现,高度较低的黄土边坡,如坡高不大于 15 m的直立坡比斜坡更稳定,直立坡立面在降雨时淋 不到雨水,黄土保持干燥状态,具有较高的强度;而较陡 斜坡由于坡面渗水而更容易滑移。但是直立坡的坡脚 和坡顶由于浸水容易破坏。坡脚破坏是由于毛细水上 升引起的。坡脚的平地接受降雨,毛细水则顺坡脚向上 爬升。毛细上升高度和降雨持时与土的性质有关<sup>[8]</sup>。 我们在陇东陕甘交界处, 2021年秋 50余天断续降雨 后,野外测得马兰黄土毛细上升最大高度为1.5m。这 种崩塌一般发生在周围被垂直节理切割,与斜坡母体割 离的黄土柱中。多数直立斜坡的黄土是一个整体,干黄 土强度高,黏结力足以克服坡脚强度降低所丧失的支撑 力。因此,这类崩塌在野外见到的比较少,即使发生,规 模较小,崩塌高度多为5~10m,较高边坡一般不是从 顶到底整体崩塌,而是从坡中拉裂,下面部分塌落,主要 发生在公路侧缘人工斜坡上。图1(a)为陕西黄陵至寇 家河村道边的直立边坡,可以看出,在干燥状态下, 12 m 高的直立坡可以稳定。降雨时自坡顶下来的落水 冲刷,并使排水渠的水溢出,浸湿了坡脚,自下而上的垂 直裂隙切割,形成孤立块体,边坡自顶向下崩塌。 图 1(b)为另一处小崩塌,直立边坡高 8.0 m,干燥时很 稳定,坡脚被毛细水浸湿,边坡下半部拉裂崩塌,顶部仍 然稳定。



图 1 人工直立边坡由于坡脚毛细水上升引起的崩塌 Fig. 1 Collapses cased by capillary rising at the foot of vertical cutting slopes

毛细水浸湿部分的黄土可以认为是接近饱和的,这 部分土的应力状态可概化为单轴受压,用饱和单轴抗压 强度和上覆自重判定其稳定性。黄土的饱和单轴抗

· 26 ·

压强度很低, 陇东取的马兰黄土试样测得其饱和单轴抗 压强度在 30~40 kPa<sup>[9]</sup>, 马兰黄土的饱和重度一般为 18.0 kN/m<sup>3</sup>左右, 该强度能够支撑的黄土直立高度为 1.5~2.5 m。

1.2 直立边坡顶部小型滑塌

直立边坡的小型滑塌发生在坡顶,坡顶直接被降雨 浸湿,湿润锋以上部分接近饱和,沿湿润锋向临空面剪 出,掉落到坡脚。而湿润锋以下的黄土立面处于干燥状 态,具有很高的稳定性。这类滑塌规模小,一般数方到 数十方,淹埋坡脚的排水渠和部分路面,不会造成大的 灾害。然而黄土地区植被发育,公路沿线坡顶的树木随 滑塌倒下,阻断道路,影响交通。

2021年10月初降雨期间,我们对G211国道在店 子河两侧路段进行了调查,在10km路段内,共发生这 类小型滑塌50多处,滑塌体填埋路边排水渠,并未阻断 道路,但倒下的大树挡住道路,形成高密度致灾点,使该 段国道封闭两个星期。从直立斜坡剖面上可见湿润锋 的深度在1.5~2.0m,剪出口距坡顶在2m以内,滑动 面约30°~35°,可见其规模不大,但数量多,有一定致灾 性。图2(a)为店子河村窑洞开挖在直立边坡上,坡高 6m,窑洞洞顶高3m,跨度3m,上覆土层3m。可以看 出,黄土在干燥情况下,窑洞和边坡都稳定。这次降雨 导致顶部1.5m的土层浸湿,窑洞顶部被浸湿的部分外 侧边坡滑塌,下部干燥部分边坡和其中的窑洞仍是稳定 的。图2(b)为G211K506+190m处的一个直立边坡, 坡高7.7m,坡顶被浸湿的部分随树一起滑下,树阻断道 路,下部干燥部分稳定。



图 2 直立斜坡顶部的小型滑塌 Fig. 2 The small collapses occurring on the top of vertical slopes

该类滑塌是先滑移, 再垂直下落, 为典型的滑塌类型。我们采样用固结慢剪试验测得重塑黄土有效内摩擦角为 30°, 黏聚力为 0<sup>[10]</sup>。坡顶的原状黄土虽然接近饱和, 其中的水分属于悬挂毛细水, 具有一定的基质吸力, 相应可产生一定的黏聚力, 这与其剪出面倾角 30°~35°较为吻合。

1.3 陡倾斜坡浅层滑移

黄土地区降雨持时超过一定时间,则会引发大范围

大面积浅层滑移。图 3(a)为 2013 年 7 月陕北地区连续 降雨引起的黄土梁区大范围浅层滑移;图 3(b)为 2021 年 8 月至 10 月陇东陕甘边界地区 50 余天断断续 续降雨后,黄土塬边沟谷中大面积浅层滑移。现场调查 表明,这类浅层滑移发生在坡度 35°~75°的斜坡上,低 于 35°的斜坡很少滑移,坡度大于 75°则以崩塌的形式 破坏。浅层滑移的厚度相当于湿润锋的深度,一般不超 过 2 m。该类滑坡大多转化为流态或泥流,顺坡滑移较 远的距离。若发生在道路边坡上,则淹埋道路,影响交 通。如图 4(a)为 G211 国道 K504+670 m~K504+780 m 处发生的一处浅层滑坡,斜坡坡度 39°,坡高 70 m,滑体 宽度 110 m,厚度 1.5~2.0 m。滑体掉落在国道上,淹埋 路面,可以看出,滑体已转化为流态,如图 4(b)所示。



图 3 伴随降雨发生的大面积浅层滑移 Fig. 3 The shallow slides occurring in the raining period



图 4 G211 国道 K504+670 m—K504+780 m 处的浅层滑坡 Fig. 4 The shallow slide occurring on the highway G211 K504+670 m—K504+780 m

该类滑坡是由于降雨入渗,湿润锋下移,黄土强度 降低所致。降雨加载对斜坡稳定性不敏感,强度衰减是 主要原因。该类斜坡稳定性评价可采用无限边坡模型, 滑体厚度等于湿润锋的深度。对其浸湿黄土的含水率 测试结果表明,其饱和度一般在 85%~90%,不完全饱 和,重度取饱和重度对稳定性评价结果影响不大,但对 强度参数的取值需要注意。

浅层浸湿的黄土和地下水没有水力联系,其水分属 于悬挂毛细水,没有正的孔隙水压力,仅有较小的负孔 隙水压力,即基质吸力。初始状态为较干的黄土时,其 中有很低的负孔隙水压力(高吸力),降雨入渗浅层土的 含水率增高,孔隙水压力也增加(基质吸力降低),这一 点和饱和土的逻辑是一致的,当土完全饱和时,其孔隙 水压力升高到 0,同时基质吸力也降低到 0。 Vanapalli 等<sup>[11]</sup>指出, 当非饱和土含水率在进气值到 饱和之间时, 其吸力产生的摩擦角 φ<sup>b</sup>和有效内摩擦角 φ'相等, 此时非饱和强度退化为饱和强度。因此该类斜 坡破坏时的强度参数按饱和时测得的有效强度参数 取值。

黄土颗粒均匀,其有效内摩擦角比较稳定,如上所述,我们对重塑黄土慢剪试验测得的有效内摩擦角约为 30°<sup>[10]</sup>。调查表明,浅层滑移发生在 35°以上斜坡,考虑毛细饱和的原状黄土有一定的基质吸力(黏聚力),实测参数和实际情况比较吻合。

大多浅层滑移转化为流动性滑坡,这是其破坏后 剪切滑移所引起。浅层马兰黄土结构疏松,斜坡在剪 切滑移过程中发生剪缩,瞬间会产生较高的孔隙水压 力。我们对流动性滑坡滑体和滑床物理参数的对比发 现,当黄土的饱和含水率大于液限时,一旦扰动,则会由 固态转化为流态。对该调查点浅层滑坡附近原状土的 本物理指标测定表明,其饱和含水率为 34.5%,而液限 为 33.6%,可见该饱和黄土可以转化泥流。

该类滑坡破坏前应力改变很小。强度参数中,基质 吸力对有效摩擦角影响不大,但会使有效黏聚力大幅减 小。斜坡稳定性评价依然用有效强度参数。滑坡破坏 的瞬间,导致孔隙水压力上升,黏聚力和摩擦强度都会 降低,滑坡转为流态,因此破坏后的运动学过程可近似 采用固结快剪或三轴总应力强度指标。滑体厚度不足 2 m,试验正应力控制在 50 kPa 以内,围压控制在 30 kPa 以内。

该类斜坡植被的影响也是值得注意的问题。自 20世纪末退耕还林以来,黄土地区植被恢复良好,主要 树种为刺槐、国槐、椿树等乔木和沙棘、酸枣和柠条等 灌木。对 2013 年陕北和 2021 年陇东大面积滑坡调查 发现,树木茂密的斜坡更易滑动,而种植藤类植物的人 工斜坡破坏相对较少。坡顶滑塌和浅层滑移使大量的 树连根被拔起,对植物根系观察测量发现,树根很少被 剪断,多是根土一起滑下。现场对滑下的树根统计表 明,根密集发育段的深度一般在 0.8~1.2 m,以下只有 零星主根末端被拔断。根系的抗剪和抗拉强度远大于 散粒土,因此只要湿润锋在主根系以上,即使很陡的坡 也不易滑动;一旦进入湿润锋以下,根系的锚固作用消 失,而树本身有加载作用。对于深层滑坡,这种作用微 不足道;而浅层滑坡,这种作用占到下滑力的很大一部 分,此时有植被比没有植被更容易滑。2013年陕北和 2021年陇东降雨后测得的湿润锋深度为 1.5~2.0 m, 低 于主根系深度。

由此可见, 植被对浅层滑坡具有双重的作用, 当湿 润锋高于主根系底界时, 根系锚固有稳定斜坡的作用; 湿润锋低于主根系底界时, 锚固作用消失, 斜坡更容易 滑动<sup>[12-15]</sup>。湿润锋深度取决于降雨持续时间, 一般降 雨湿润锋深度不足 1 m, 遇到较为罕见的极端降雨, 则 诱发大量浅层滑坡。

### 2 灌溉引起的深层滑坡

黄土深层滑坡和地下水位抬升有直接关系。自然 环境下,黄土中的地下水补给和排泄已经形成了动态平 衡,地下水位在短期内浮动很小。只有人工灌溉区才可 能引起地下水的大幅上升。目前,黄土地区最活跃的三 个滑坡带,即陕西渭惠渠穿过的宝鸡—长兴滑坡带、泾 阳南塬灌区北缘滑坡带<sup>[16]</sup>、甘肃黑方台灌区周缘滑坡 带<sup>[17]</sup>都和灌溉有关。宝鸡—长兴滑坡带是渭惠渠从宝 鸡北塬的斜坡中部穿过,20世纪70年代引水渠通水 后,渠底漏水,引发了170余处深层滑坡。泾阳南塬滑 坡带是渭惠渠的末端灌区,自20世纪70年代开始灌 溉,塬上的地下水位上升超过20m,在渭河南岸的塬边 形成了多于50处滑坡。甘肃黑方台周缘滑坡带也是 20世纪60年代末开始,抽取黄河水在台塬顶灌溉,2个 没有地下水的旱台,目前地下水位上升多于20m,台塬 周缘发生多于70处滑坡<sup>[18]</sup>。

灌溉引起的深层黄土滑坡主要是由于地下水位上 升引起。间歇性的灌溉和间歇性降雨在黄土中的入渗 特点是相同的。灌溉形成的湿润锋比降雨的深,但相对 黄土厚度还是很浅。黑方台地区大水漫灌,湿润锋深度 最大到4m<sup>[19]</sup>,灌溉时湿润锋以上土层接近饱和,随停 和灌而发生干湿变化,其中渗流的性质为瞬态流。湿润 锋以下土层含水率急剧降低,在灌溉持续多年后,则形 成一种稳定态,含水率不随时间变化,上面的顺态流过 渡为稳定流,并持续补给地下水<sup>[20-22]</sup>。

斜坡由初始的稳定状态发展到不稳定,是应力和强 度随边界条件发生改变所致。灌溉引起斜坡应力和强 度发生了以下三方面的改变:一是水的加载作用。灌溉 水增加了斜坡的垂直荷载,改变了斜坡中的应力;二是 降低了黄土的非饱和强度,灌溉不仅使湿润锋以上黄土 接近饱和,而且使湿润锋以下的剖面含水率提高,水位 以上部分黄土基质吸力降低,表现在宏观强度参数上是 黏聚力的减小;三是提高了孔隙水压力,降低了饱和土 的强度。灌溉改变了原有的水文平衡,使地下水位持续 抬升,以达到新的补排平衡,水位抬升,导致水位以下坡 体孔隙水压力上升,有效应力降低。以上三方面的变化 中,第一方面对斜坡稳定性最不敏感,因为荷载增量不 大,荷载增加同时增加了抗滑力和下滑力。第二方面有 一定影响,但不显著,对于深层滑坡来讲,黏聚力对抗滑 力的贡献比摩擦角小得多。因此,这类滑坡最主要的原 因是第三方面,即地下水位抬升。

即使地表大水漫灌,地表水穿过厚层非饱和黄土使 地下水位抬升也是一个缓慢的过程。其在 p-q(平均应 力-偏应力)坐标下的应力路径是剪应力基本不变,孔隙 水压力升高引起有效应力降低的过程。如图 5 为一组 马兰黄土(CSD-1、CSD-2、CSD-3)试样孔隙水压力上升 引起破坏的应力路径及平均应力与轴应变的关系。由 于现场取样将原位应力释放,先将土样固结恢复到原位 初始应力状态。以试样 CSD-3 为例,图中的 B<sub>3</sub> 为土样 的初始应力状态,  $B_3$ - $D_3$  段为常剪应力剪切阶段, 偏应 力不变, 增加孔压, 平均有效应力减小, 应力路径水平左 移达到破坏线。可以看出  $C'_3 为 \epsilon_a$ -p'曲线上轴应变加 速的起点, 以此为界将常剪应力剪切阶段分为两段。  $B_3$ - $C_3$  段, 随着孔压增大, 试样仍处于稳定状态, 几乎没 有产生轴向变形。 $C_3$ - $D_3$  段, 轴向变形加速发展,试验过 程中可观察到试样中部开始鼓胀。CSD-1、CSD-2、 CSD-3 在  $D_i$ (*i*=1, 2, 3) 点的应变分别为 10.3%、15.4%、 16.4%。 $D_3$ - $E_3$  段为破坏阶段, 偏应力不能维持不变的状 态, 沿破坏线下降。该阶段轴向变形失控, 突然增长, 试 样快速破坏。由于孔压升高路径下偏应力为常数, 因此 取 $\epsilon_a$ -p'曲线加速点  $C'_i$ 对应的有效平均有效应力点  $C_i$ 为等效峰值应力点, 其连线即为 CSD 路径的等效峰 值破坏线; 取失稳下降点  $D_i$ 为残余破坏点, 从而确定残 余破坏线的位置。





由于破坏前孔压上升过程很缓慢,并且是静水压 力,在发生显著破坏前,不会产生超孔隙水压力,因此这 类斜坡稳定性评价时,水位以下部分应采用有效峰值抗 剪强度参数,应力也采用有效应力。具体来说,地下水 位以下部分,采用饱和重度、有效黏聚力和有效内摩擦 角,滑动面上的采用有效正应力正应力。地下水位到湿 润锋之间,含水率随时间变化小,采用天然重度和相应 含水率下的有效黏聚力和有效内摩擦角。该层土为非 饱和带,存在基质吸力,即负孔压,基质产生的抗剪强度 相当于相应含水率下的有效黏聚力,因此用相应含水率 的常规的慢剪或固结排水(气)剪试验测得的强度参数 包含了吸力的影响。湿润锋以上含水率随时间是变化 的,按最不利的情况取饱和重度及有效黏聚力和有效内 摩擦角。该层土在降雨时也不全饱和,属于毛细悬挂 水, 孔隙水压力为负, 因其值很小, 孔压可以取 0, 重度 近似取饱和重度。

## 3 讨论

如上所述,降雨诱发的一般是浅层滑坡,而灌溉引 起地下水位上升诱发的是深层滑坡。这是由于黄土沉 积过程非常缓慢,在此过程中,降雨垂直补给和侧向泉 水排泄已形成一种平衡,若没有人为抽取或灌溉补给地 下水,自然条件下地下水位是相对稳定的。图6统计 了1983年至今黄土地区大型深层滑坡和黄土高原中部 延安地区的月降雨统计,可以看出深层滑坡各个月份都 有分布,主要集中在春季和秋后,并不是在降雨最集中 的月份,深层滑坡和降雨也没有直接关联。灌溉打破了 地下水补给与排泄的平衡,引起地下水位上升,以建立





新的平衡。如果新的平衡水位高于斜坡临界地下水 位,在达到平衡之前,就会引起滑坡。

根据以上分析,黄土滑坡气象预警,只适用于浅层 滑坡。而且降雨序列不能限定在一次或几次短期降雨, 从陕北和陇东两次大面积浅层滑坡前的降雨情况看,至 少要考虑30天以上的降雨序列。对深层黄土滑坡做气 象预警是没有意义的,即便是个别深层滑坡发生在降雨 期间,也可能是巧合。深层滑坡预警应基于地下水位监 测,将地下水参数用于传统的稳定性分析方法,建立预 警模型。

目前,在灌溉引起的深层滑坡中,有大量流动性滑 坡,黑方台和泾阳南塬滑坡带最为集中,宝鸡-常兴滑 坡带也有这类滑坡。一些学者把静态液化的概念引入 到流动性滑坡中,认为这种流动性滑坡是由静态液化引 起<sup>[23-25]</sup>。静态液化的本来是相对震动液化提出来的, 是指施加静载的过程中,由于孔隙水压力来不及排出, 产生超孔隙水压力,导致土体出现类似流态的破坏。然 而,灌溉引起滑坡的过程并没有加载,孔隙水压力在破 坏前是一个缓慢积累的过程,所谓的液化是破坏后才发 生的。这类斜坡在破坏后,因滑体和滑床物质及水文条 件的差异,表现出不同的运动形式,其中包括了流动性 滑坡。Sassa<sup>[26]</sup>通过理论分析和试验,将滑坡破坏后运 动中的孔隙水压力分为三种情况。一种是饱和滑体在 不透水的滑床上运动,滑动面上的孔隙水压力决定于滑 体中的孔压,滑床既不产生孔压,也不消散孔压;第二种 是饱和滑体在饱和滑床上运动,滑床会形成超孔隙水压 力高于滑体,滑坡剪切带发生在滑床中;第三种为饱和 滑体在非饱和的滑床上运动,滑动过程中滑体孔隙水压 力消散,剪切发生在滑体中。地下水位引起的深层黄土 滑坡中,这三种情况都有发生。第一种情况发生在黄土 滑坡沿第三系泥岩或更老的基岩顶面滑动,如宝鸡--常 兴滑坡带的卧龙寺滑坡,这类滑坡速度缓慢,或滑滑停 停。第二种情况以泾阳南塬滑坡群最为典型,黄土斜坡 坡脚以外为平坦的泾河一级阶地,滑坡发生时,黄土并 没有液化,黄土滑坡巨大的势能冲击到前缘阶地上,导 致阶地上的砂卵石液化,发生远程滑移。液化发生在滑 床上,而不是滑体中,更不是静态液化(图 7)。第三种 情况以黑方台的流动性滑坡坡群最为典型。该处为黄 河三级阶地,基底为白垩系砂泥岩,上覆卵石层和一厚 层黏土夹粉土层,顶部为 20~40 m 的马兰黄土。这类 滑坡开始滑动后,疏松饱和的马兰黄土因剪缩而形成超 孔隙水压力发生液化,液化的滑体转化为流态。但黄土 下面的斜坡为干燥坚硬的泥岩,饱和滑体遇到干燥的坡 面,孔隙水压力迅速消散,甚形成负孔压,因此部分滑体 一路残留斜坡表面,部分滑至坡底(图 8)。这类滑坡与 第二类不同的是,液化发生在滑体中,滑移面也在滑体 中。陕西华县高炉村滑坡也属于这种情形,只是滑床为 干燥的黄土沟谷。



图 7 一级阶地滑床饱和砂卵石层液化(泾阳南塬北坡形成的滑坡群) Fig. 7 Liquefaction occurring in the saturated sands and pebbles of the first terrace of the sliding path(Landslide group on the north side of the South Jingyang loess highland)



图 8 黄土滑体液化(黑方台黄土台塬顶部灌溉在盐锅峡镇 一侧形成的滑坡群)

Fig. 8 Liquefaction occurring in the saturated loess sliding mass(Landslide group on the Yanguoxia town side of Heifangtai highland )

泾阳南塬高速远程滑坡和黑方台流动性滑坡,成为 静态液化滑坡的"确凿证据"。笔者认为,这种认识颠 倒了因果关系。我们看到的液化是结果而不是原因。 虽然黄土从破坏到液化发生在一瞬间,但破坏前仍是静 止孔隙水压力,在荷载不增加的情况下,地下水位上升 不会产生超孔隙水压力。斜坡一旦破坏,致密的老黄土 有可能发生剪涨,如泾阳南塬,孔隙水压力不仅不升, 还可能下降,因此泾阳南塬的黄土并没有液化的,液化 发生在阶地卵石层上。对于疏松的马兰黄土,如黑方 台,因剪缩而产生超孔隙水压力,导致黄土液化,形成流 动性滑坡。根据我们对华县高楼村滑坡的试验研究,当 黄土的饱和含水率小于液限时会发生液化。液化后的 黄土似摩擦角很低,一般不超过15°。实际上,无论黑方 台,还是泾阳南塬,破坏前的斜坡坡度在45°~55°,如果 按似摩擦角来评价稳定性,显然不客观。因此破坏前的 稳定性评价,采用上述有效强度参数比较符合实际;破 坏后的运动学过程,可按液化后的参数分析。

### 4 结论

文中针对降雨和灌溉两类诱发因素,各自产生的浅 层和深层两类斜坡破坏模式进行了分析,并提出了稳定 性评价和参数取值的原则,得出了以下结论:

(1)降雨引起的斜坡浅层破坏分为三类。第一类是 直立斜坡毛细上升引起的坡脚崩塌,第二类是直立斜坡 雨水入渗引起的坡顶滑塌,第三类是陡倾斜坡浅层滑 移。直立斜坡毛细上升引起的坡脚崩塌可用黄土饱和 单轴抗压强度评价其稳定性;坡顶滑塌可用简单土坡模 型,取有效强度参数分析其稳定性;陡倾斜坡浅层滑移 发生在 35°~75°斜坡,可采用无限边坡模型,取有效强 度参数分析其稳定性。

(2)灌溉引起的深层滑坡采用传统的土坡稳定性分 析模型。地下水位以下采用饱和重度和有效强度参数, 并按孔压升高的常剪应力路径测定参数,孔压按静止孔 隙水压力考虑;水位以上至湿润锋之间,采用天然重度, 采用相应含水率下的有效黏聚力和有效摩擦角;湿润锋 以上采用饱和重度和有效强度参数,孔隙水压力取 0。

(3)灌溉引起的深层滑坡是地下水位缓慢上升触 发,破坏前没有超孔隙水压力产生,因此不存在静态液 化现象。由于滑坡破坏导致了液化,而不是液化引起破 坏。滑坡破坏后,由于滑体和滑床土的性质不同,产生 了不同性质的液化现象。泾阳南塬滑坡是饱和砂砾石 的滑床液化;黑方台滑坡则是黄土滑体液化,都产生了 远程滑移。

(4)降雨只和浅层滑坡有关,对深层滑坡没有影响。浅层滑坡可进行气象预警,但不能限定在一次或几次短期降雨,降雨序列至少要延伸到一个月以上。黄土深层滑坡多和灌溉有关,深层滑坡预警应基于地下水位监测。

#### 参考文献(References):

[1] 张茂省,李同录.黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究

[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540. [ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540. (in Chinese with English abstract)]

- WANG G L, LI T L, XING X L, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China
   [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(12): 7933 7944.
- [3] 习羽,李同录,邢鲜丽.灌渠渗漏诱发的黄土滑坡泥流触发机理分析[J].地球科学与环境学报,2017,39(1): 135-142. [XI Yu, LI Tonglu, XING Xianli. Analysis of the triggering mechanism of a loess flowslide induced by water canal leakage [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(1): 135-142. (in Chinese with English abstract)]
- [4] TU X B, KWONG A K L, DAI F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides [J]. Engineering Geology, 2009, 105(1/2): 134-150.
- XU L, DAI F C, THAM L G, et al. Field testing of irrigation effects on the stability of a cliff edge in loess, North-west China [J]. Engineering Geology, 2011, 120(1/2/3/4): 10 17.
- [6] 邢鲜丽,李同录,李萍,等.黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J].水文地质工程地质,2014,41(3):53-59.[XING Xianli, LI Tonglu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2014,41(3):53-59. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李同录, 习羽, 侯晓坤.水致黄土深层滑坡灾变机理
  [J].工程地质学报, 2018, 26(5): 1113-1120. [LI Tonglu, XI Yu, HOU Xiaokun. Mechanism of surface water infiltration induced deep loess landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1113-1120. (in Chinese with English abstract)]]
- [8] 李萍,李同录,侯晓坤,等.黄土中毛细上升速率的现场 测试[J].河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 503-507. [LI Ping, LI Tonglu, HOU Xiaokun, et al. Field experiment on rate of capillary rise in loess [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(6): 503-507. (in Chinese with English abstract)]]
- [9] 李宝平,杨倩,张玉,平高权,等.初始固结应力对平面应 变黄土剪切破坏特性影响[J].水文地质工程地质, 2020,47(5):92-99. [LI Baoping, YANG Qian, ZHANG Yu, PING Gaoquan, et al. Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5):92-99. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 强菲,李萍,李同录.黄土完全软化强度与残余强度的对 比试验研究[J].工程地质学报,2014,22(5):832-838.

[ QIANG Fei, LI Ping, LI Tonglu. Comparative test study between fully softened and residual strengths of loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 832 – 838. (in Chinese with English abstract)]

- [11] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379 – 392.
- [12] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J]. 岩土 工程学报, 2017, 39(1):1-47. [WU Hongwei. Atmosphereplant-soil interactions: Theories and mechanisms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1):1-47. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 徐则民,黄润秋,唐正光,等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 438-450. [XU Zemin, HUANG Runqiu, TANG Zhengguang, et al. Limitations of biotechnical slope protection and contribution of vegetation to deep seated landslide preparation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 438-450. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J].北京林业大学学报,1998,20(3):10-17. [SUN Changzhong, HUANG Baolong, CHEN Haibin, et al. Study on the interaction between artificial vegetation and its water environment in the Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(3):10-17. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等.子午岭林区浅层滑坡侵蚀与 植被的关系—以富县"7·21"特大暴雨为例[J].生态 学报,2016,36(15):4635-4643.[HANYong,ZHENGFenli, XU Ximeng, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the "7·21" disaster in Fuxian County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15):4635-4643. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 许领,戴福初,闵弘,等. 泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(1):
  155-160. [XU Ling, DAI Fuchu, MIN Hong, et al. Loess landslide types and topographic features at south Jingyang plateau, China [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(1): 155-160. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 程秀娟,张茂省,朱立峰,等.季节性冻融作用及其对斜坡土体强度的影响-以甘肃永靖黑方台地区为例[J]. 地质通报, 2013, 32(6):904-909. [CHENGXiujuan,ZHANG Maosheng, ZHU Lifeng, et al. Seasonal freeze-thaw action and its effect on the slope soil strengthin Heifangtai area Gansu

Province [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(6): 904 – 909. (in Chinese with English abstract)]

- [18] 亓星,许强,李斌,等.甘肃黑方台黄土滑坡地表水入 渗机制初步研究[J].工程地质学报,2016,24(3):418-424. [QI Xing, XU Qiang, LI Bin, et al. Preliminary study on mechanism of surface water infiltration at Heifangtai loess landslides in Gansu[J]. Journal of Engineering Geology, 2016,24(3):418-424. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 金艳丽,戴福初.地下水位上升下黄土斜坡稳定性分析
  [J].工程地质学报,2007,15(5):599-606. [JIN Yanli, DAI Fuchu. Analysis of loess slope stability due to groundwater rise [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(5):599-606. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.[ZHANG Changliang, LI Ping, LI Tonglu, et al. In-situ observation on rainfall infiltration in loess [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(6):728-734. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHANG C I, LI T L, LI P. Rainfall infiltration in Chinese loess by in situ observation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(9): 06014002.
- [22] 李萍,李同录,付昱凯,等.非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3551-3560.[LIPing,LITonglu,FUYukai, et al. Insitu observation on regularities of rainfall infiltration in loess[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2014,45(10):3551-3560. (in Chinese with English abstract)]
- [23] ZHANG Y G, LI T L, SHEN W, et al. Hydraulic model of transition of transient to steady flows in the vadose zone [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2019, 24(12): 04019052.
- [24] 金艳丽,戴福初.饱和黄土的静态液化特性试验研究
  [J].岩土力学, 2008, 29(12): 3293 3298. [JINYanli, DAI
  Fuchu. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3293 3298. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张一希,许强,刘方洲,等.不同地区饱和原状黄土静态 液化特性试验研究[J].地质科技情报,2018,37(5):229-233. [ZHANG Yixi, XU Qiang, LIU Fangzhou, et al. Experimental investigation of static liquefaction of undisturbed saturated loess in different regions [J]. Geological Science and Technology Information,2018,37(5):229-233. (in Chinese with English abstract)]
- SASSA K. Geotechnical model for the motion of slides [C].
   Proceedings of 5th International Symposium on landslides, 1988,
   I: 37 56.