

# 黑方台台缘剖面土体的物理力学性质分析

杨永强<sup>1,2</sup>, 梁收运<sup>1</sup>, 徐超<sup>2</sup>, 张帆宇<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院地质工程系, 甘肃 兰州 730000; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 黑方台台缘频繁发生的黄土滑坡, 作为农业引水灌溉诱发的地质环境破坏问题备受关注。台缘剖面的地质结构及土体的物理力学性质是决定斜坡变形破坏的基本条件。通过野外调查, 选择典型的台缘边坡剖面, 系统采集样品, 进行土体的基本物理力学性质试验, 获得了土体物理力学指标随深度的变化规律, 探讨了剖面上土体性质差异对滑坡形成发育的影响。结果表明: 垂向上各土层性质差异及其耦合作用决定了滑坡剪出口及泉水的出露位置, 进而影响到斜坡的变形破坏过程和滑坡的有关特征。

**关键词:** 黄土滑坡; 台缘剖面; 土体物理力学性质; 斜坡变形破坏

文章编号: 1003-8035(2014)03-0127-08

中图分类号: P642.1

文献标识码: A

## 0 引言

黑方台隶属甘肃省永靖县盐锅峡镇, 1963年以来, 为安置黄河三峡库区移民, 大规模开垦土地, 提水灌溉农业, 导致台缘滑坡频发, 形成沿台缘的密集滑坡群<sup>[1]</sup>, 给人民生命财产造成严重损失, 作为库区移民农业引水灌溉而诱发地质环境破坏问题备受多方关注。

黑方台黄土滑坡的早期研究<sup>[2-5]</sup>, 多是宏观上, 对台缘滑坡的基本要素、分布特征、规模、危害和浅部土体土性的研究, 在系统分析滑坡形成机制方面尚不成熟。此后王家鼎、许领等<sup>[6-10]</sup>基于野外调查, 采用室内试验分析及数值模拟等方法, 研究了灌溉作用下黑方台黄土滑坡群特征、土性特征、滑坡形成机理、运动特征及斜坡稳定性, 提出了饱和黄土具有静态液化特征。许领等<sup>[11]</sup>研究了地下水位上升诱发高速远程滑坡机制、缘边地裂缝成因、滑坡高陡后壁成因及其稳定性、黄土滑坡演化机制等, 提出了考虑阶地土层差异特征的黄土滑坡双液化层滑动机制, 并认为土体内部微观变形的积累是滑坡发生的内在机制, 地下水作用是主要诱因。IKONOS影像及DEM等先进技术的应用, 为黑方台滑坡周界、分布特征、期次、变形速率等特征参数确定提供了新方法<sup>[12-13]</sup>。武彩霞等<sup>[14]</sup>将斜坡土体分为五层, 依据现场试验监测, 模拟了台缘顶裂缝水文地质条件对斜坡稳定性的影响, 结果表明, 由于土体性质的差异及台缘裂缝的发育, 短期灌溉仅引起浅部土体含水量增加, 强度降低, 发生局部的滑塌, 并未引起地下水位显著上升; 长期灌溉会加速地下水位上升, 易引起深部大范围的高速远程

滑坡。综上所述, 黄土斜坡变形破坏特征主要受土体性质及其各土层相互作用等因素控制。

然而从已有研究成果来看, 黑方台黄土滑坡研究, 尚缺乏对斜坡剖面土质结构, 特别是下部土体性质的垂向不均匀性及其物理力学性质差异对滑坡形成发育影响的研究; 而已有斜坡土体性质的试验研究及数值模拟也存在多方面的局限, 包括研究对象的精细性、试验样品的代表性、试验内容、计算模型及参数的选取等。因此, 为系统分析台缘斜坡变形破坏特征, 需对斜坡剖面各土层物理力学及水理性质进行精细的研究, 深入认识斜坡剖面土层的地质结构及物理力学性质变化规律。基于此, 选择典型边坡剖面, 进行精细分层取样和室内试验, 通过对不同深度土体物理力学性质差异性的深入研究, 认识台缘斜坡失稳和黄土滑坡剪出口位置问题, 探究土体不均匀性对滑坡形成发育的影响。

## 1 地质背景

黑方台为黄河T<sub>4</sub>级基座阶地, 台缘T<sub>4</sub>级阶地坡脚与T<sub>2</sub>级阶地差100~133m。以虎狼沟为界, 东侧为黑台, 西侧为方台。黑台东西长约5.5km, 南北宽

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072213); 西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金资助项目(201207)

作者简介: 杨永强(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事地基处理方面的研究工作。

E-mail: 12yangyq@tongji.edu.cn

0.55~3km,面积约12km<sup>2</sup>。台缘斜坡整体呈上陡下缓,平均坡度约35°,台缘滑坡分布广泛(图1)。天然条件下,大气降水很难补给地下水,长期的大水漫灌破坏了黑方台地下水均衡,改变了天然状态下的水文地质条件。

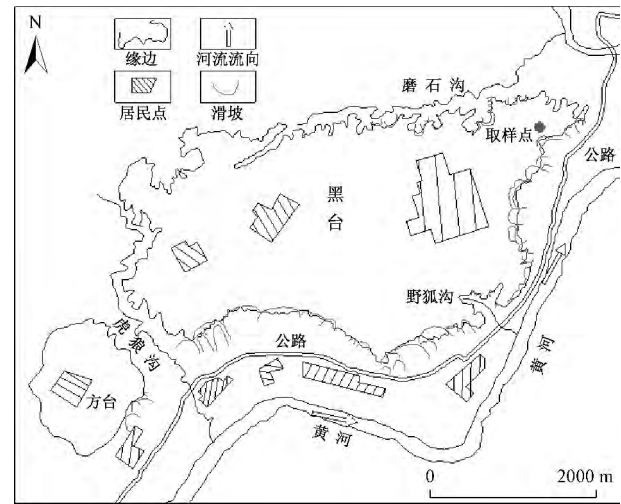
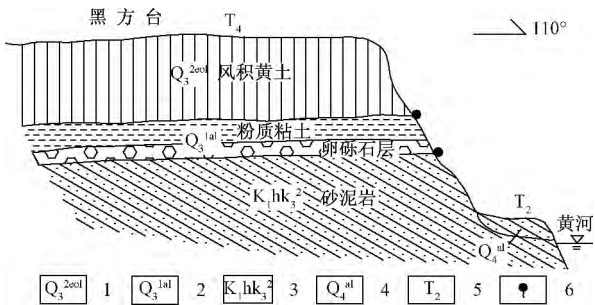


图1 黑方台台缘滑坡分布图  
Fig. 1 Distribution of loess landslides in Heifang platform margin

黑方台台缘滑坡类型以黄土滑坡和黄土—基岩滑坡为主。黑台以台地东南角偏北侧的野狐沟为界,以东(台地东侧与北侧)主要为黄土滑坡,以西(台地南侧)为黄土—基岩滑坡(图1)。黄土滑坡形态特征明显,后缘裂缝发育,剪出口、周界清晰,剪出口多位于冲积层(Q<sub>3</sub><sup>1al</sup>)与风成黄土(Q<sub>3</sub><sup>2eol</sup>)接触面附近,新滑坡置于老滑坡之上,构成多级旋转滑坡,缘边地下水活动强烈,多泉水出露。黑方台台缘地层露头清晰。据野外调查及文献[15],由新到老出露的地层为:①上更新统风积黄土(Q<sub>3</sub><sup>2eol</sup>),质地均一,疏松多孔,垂直节理发育,具有强湿陷性,厚度在22~55m之间;②上更新统冲积层(Q<sub>3</sub><sup>1al</sup>),上部为黏土层,下部为卵石层(4~4.7m);③下白垩统河口群(K<sub>1</sub>hk)紫红色~暗红色泥岩、砂质泥岩,为T<sub>4</sub>级阶地基座(图2)。

2 样品采集与试验

采样点为黑台东北角焦家村附近由于修路而新开的一个高边坡,该剖面从上到下揭露出风成黄土层、漫滩相粉砂土和黏土层、T<sub>4</sub>级阶地冲积砾石层及下部的白垩纪红层基岩基座,为研究台地下部土体的工程性质提供了有利条件。



1—上更新统风积黄土;2—上更新统冲积层;3—白垩系泥岩层;  
4—全新统冲积物;5—阶地;6—泉水

图2 黑方台台缘地质剖面示意图

Fig. 2 Geological sketch cross-section in Heifang platform margin

根据肉眼可辨的斜坡土体表面特征差异对其分层,并按照0.2~1.5m间距,进行样品采集;除去表面20cm厚土层,由下往上对各分层取样,小心切出30cm×30cm×30cm土样,粗加工成直径12cm,高度15cm圆柱体,装入铁皮圆筒,密封,送回室内再精加工成试验所需尺寸,共计取样14个。鉴于上部风成黄土已有一些试验资料,以较大取样间距,仅取2个样品;漫滩相沉积的黄土状土、红色黏土夹灰白色粉砂土及灰白色粉砂土夹红色黏土层,具有清晰的水平层理,为重点研究对象,取样间距为0.2~0.3m,以期全面分析其土性特征;灰白色细砂土,土层薄,松散状,仅满足垂向取一个样品(图3表1)。图3左侧为同一地点分为上、下部取样边坡剖面照片,右侧为与左侧相应的综合柱状地质剖面示意图。

表1 边坡土体物理性质测试样品采集汇总

Table 1 Test sample collection summary of slope soil		
样品编号	距下部卵石层 顶面斜距(m)	样品特征
SJ-14	11	风成黄土
SJ-13	7.7	风成黄土
SJ-12	6.3	黄土状土中的红色夹层黏土
SJ-11	5.8	黄土状土,具水平层理
SJ-10	4.5	黄土状土,具水平层理
SJ-09	2.8	红色黏土夹灰白色粉砂土
SJ-08	2.5	红色黏土夹灰白色粉砂土
SJ-07	2.3	红色黏土夹灰白色粉砂土
SJ-06	2.1	红色黏土夹灰白色粉砂土
SJ-05	1.1	灰白色细砂土夹红色黏土层
SJ-04	0.8	灰白色细砂土夹红色薄层黏土
SJ-03	0.6	灰白色细砂土夹红色薄层黏土
SJ-02	0.3	灰白色细砂土夹红色薄层黏土
SJ-01	0.1	灰白色细砂土 松散

注:采样日期为2011年11月12日。

为认识不同深度土体物理力学性质及其差异性,确定试验内容包括: 颗分试验、液塑限试验、比重试

验、天然密度及天然含水量测定、直剪试验(快剪)、固结实验(快速法)及渗透试验。

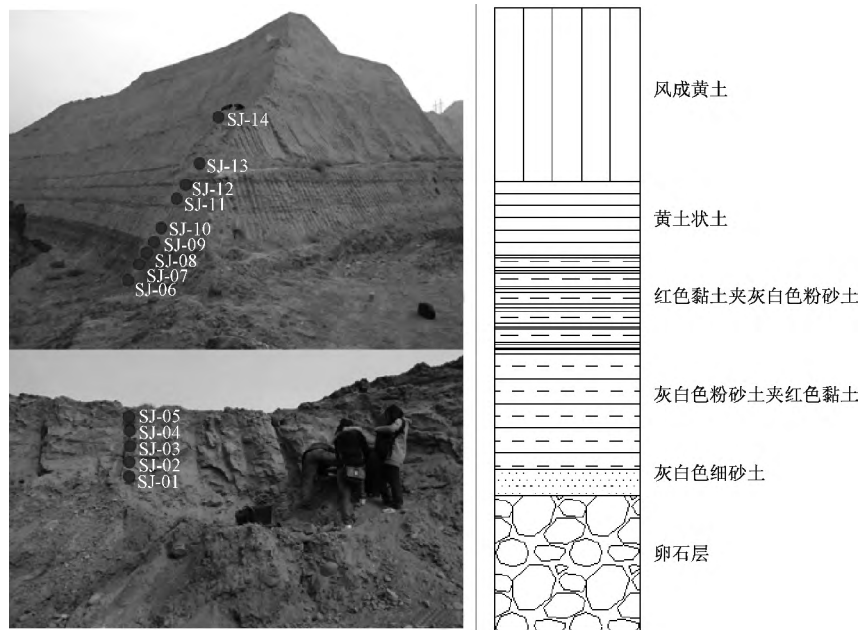


图3 焦家村附近取样边坡剖面图

Fig. 3 Photo and columnar section of sampling slope near Jiaojia village

### 3 结果与分析

#### 3.1 粒度组成与成分

颗分试验(筛析法和比重瓶法)表明,台缘土体总体上以粉粒为主,粒径 $<0.075\text{mm}$ 的颗粒含量达83.22%,小于 $<0.005\text{mm}$ 的黏粒含量达13.5%。

据相关文献<sup>[16]</sup>,黄土的矿物成分以石英、长石和云母等碎屑矿物为主(占碎屑矿物的95%以上),含少量云母类矿物和易溶盐,重矿物(比重 $>2.9$ )含量3%~5%;黄土化学成分以 $\text{SiO}_2$ (50%~60%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (8%~15%)和 $\text{CaO}$ (4%~12%)为主, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 等 $<6\%$ 。

#### 3.2 物理性质

采用常规土工试验方法对土体比重、天然密度、天然含水量、孔隙比、液塑限等值进行了测定,各指标大小随深度变化特征见图4。

结果表明,取样深度范围内,土体比重随深度变化范围为2.69~2.78,均值为2.735;土体天然密度随取样深度的增加,整体呈增大趋势,局部而言,深部土体天然密度变异性大,这与土样砂质成分及黏土成分的含量变化有关;土样天然含水量曲线,随取样深度变化出现大小两个峰值,小峰值对应土层为黄土状

土,大峰值对应土层为黏土夹粉砂土层,这与土层黏粒含量有关,黏粒中所含黏土矿物具有强烈吸水性,因此,土体黏粒含量越高,土体含水率便相应提高;土样孔隙比随取样深度增加,呈逐渐变小的趋势,符合土体沉积固结的一般规律,局部而言,下部土层孔隙比出现明显波动,这是由于下部土层均含砂,砂土孔隙比大于黏土,黏土中砂质成分的含量变化必然直接影响整个土层孔隙比大小变化;土层液塑限的变化表现为,随着取样深度的增加,土体黏粒含量的增加,可塑性得到明显提高。

前人研究表明<sup>[16-19]</sup>,黑方台黄土的颗粒比重为2.69~2.71,天然密度 $1.34\sim1.86\text{g}/\text{cm}^3$ ,含水率3.6%~17.1%,孔隙比0.98~1.11,塑限16.1%~18.7%,液限24.9%~28%。对比采集样品的试验结果,上部风成黄土物理参数的测试结果与已有研究一致,但下部的冲积粉质黏土(或粉砂土)的性质显著区别于上部土体。

边坡土体物理性质垂向变化引起的上下不均匀及其耦合作用影响着边坡的稳定性与变形破坏特征。风成黄土巨厚的包气带及下部土层弱透水性,使得短期灌溉仅造成浅部土体含水量升高,强度降低,出现轻微滑塌,而在长期灌溉作用下,下部土层良好的可

塑性性能便得到发挥,使得边坡整体上可出现较大的蠕动滑移变形,形成缘边一定范围内裂缝的发育,且该类裂缝往往活动性明显<sup>[20]</sup>;同时,黄土状土、红色黏土夹灰白色粉砂土及灰白色粉砂土夹红色黏土,由于夹层的交替出现,土体物理性质波动变化明显,极大地增加了斜坡土体的不均性,这种不均性及其与地下水等耦合作用,使斜坡变形失稳特征有别于均质土坡。

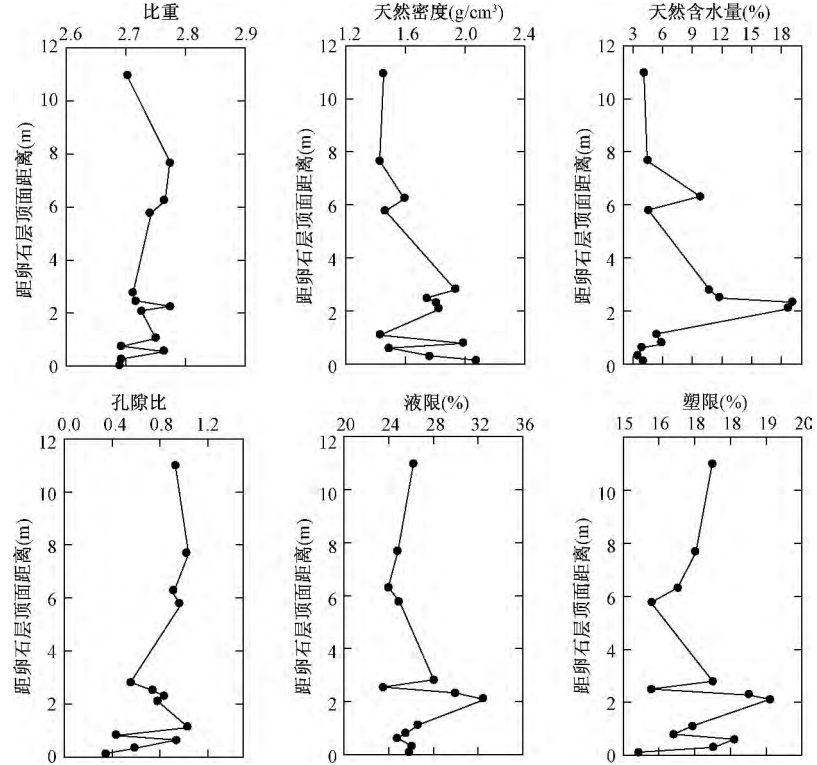


图4 土体物理性质随距卵石层顶面距离变化曲线

Fig. 4 Physical properties of slope soil with distance from the top surface of gravel layer

3.3 渗透性质

采用变水头法进行代表性样品的垂直渗透系数测定,结果见表2。

表2 土层垂直渗透系数

Table 2 Vertical permeability coefficient of the soil		
样品号	土层	渗透系数( cm/s)
SJ-12	黄土状土夹红色薄层黏土	$4.22 \times 10^{-5}$
SJ-06	红色黏土夹灰白色细砂土	$5.09 \times 10^{-5}$
SJ-04	灰白色细砂土夹红色薄层黏土	$9.49 \times 10^{-6}$
SJ-01	灰白色细砂土	松散状
文献 <sup>[14]</sup>	风成黄土	$4.83 \times 10^{-4}$

测试结果表明,斜坡剖面土体的渗透性随深度增大逐渐降低,上部风成黄土的渗透性能远大于除卵石层顶面的灰白色细砂土层(SJ-01)外的下部黏土层,说明水分透过渗透性相对良好的风成黄土后,渗透阻力增大,导致渗透路径随之发生变化,由垂向下

渗为主转变为侧向渗流排出为主,仅有通过低渗透性土层的构造裂隙下渗的水,通过渗透性良好的细砂土及卵石层,并从红层泥岩顶面排出。

3.4 强度性质

直剪(快剪)试验对土层强度指标及剪切特征测定结果见表3及图5。

已有研究<sup>[16-18]</sup>表明,黄土粘聚力2.1~54kPa,内摩擦角16.2°~32°,与所取样品风成黄土的试验测试结果较为一致,但与下部冲积土层差别较大。

表3 各土层强度指标

Table 3 Strength index of the soil		
土层	c/(kPa)	φ/(°)
风成黄土	22.27	14.50
黄土状土	22.37	28.46
红色黏土夹灰白色粉砂土	59.38	28.84
灰白色粉砂土夹薄层红色黏土	6.11	31.71

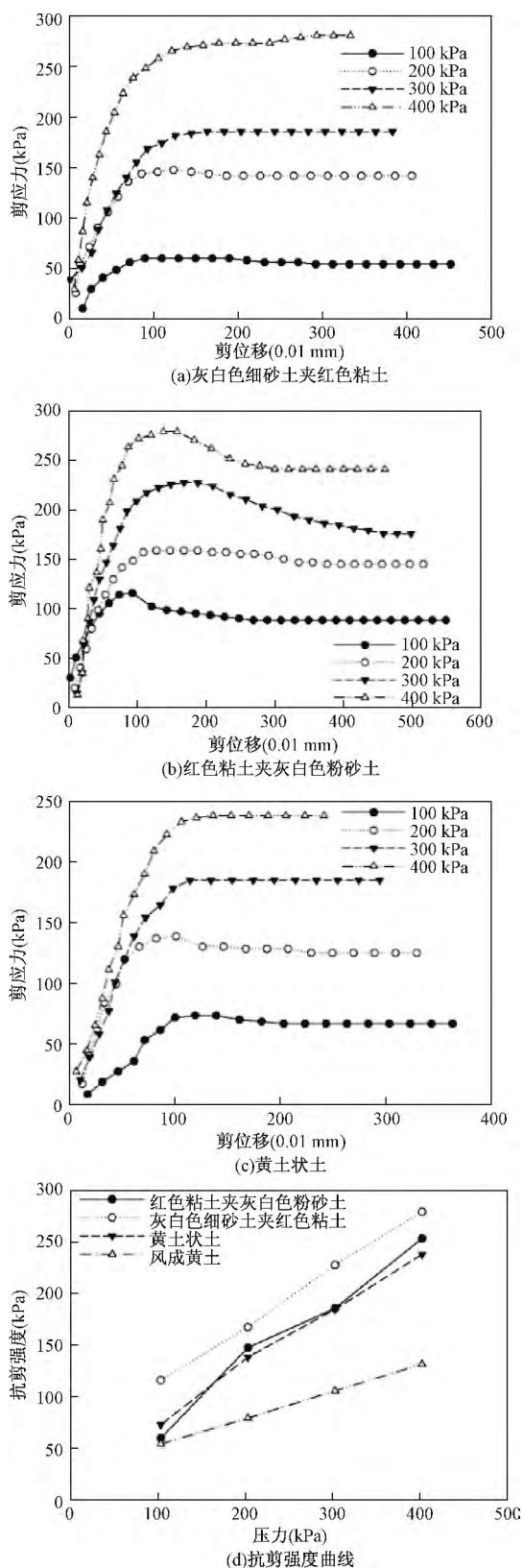


图5 土体剪切位移及抗剪强度曲线

Fig. 5 The shear displacement and shear strength curve of the soil

剪切位移特征曲线,有助于了解土体的变形特性,并根据各土层抗剪强度特征曲线,推断边坡土体的剪出特征。

图5表明,灰白色细砂土夹红色薄层黏土(SJ-02~SJ-05)与黄土状土(SJ-11),在各级压力作用下,剪切位移曲线经过短暂的直线阶段即进入弹塑性阶段,然后随剪位移的增加,剪应力几乎不变(图5, a、c),说明两类土属硬化型土;而红色黏土夹灰白色砂土(SJ-08)则具有明显的峰值(图5 b),为应变软化型土,这与红色黏土夹灰白色砂土的微观结构性有关。图5(d)表明,同等压力下,风成黄土的强度远低于下部的冲积土层(注:细砂土室内难以制样,未予测定)。

经快速固结试验测定,黄土状土压缩系数为 $0.22\text{MPa}^{-1}$ 左右,灰白色细砂土夹红色薄层黏土的压缩系数为 $0.09\text{MPa}^{-1}$ 左右,红色黏土夹灰白色粉砂土的压缩系数为 $0.14\text{MPa}^{-1}$ ,另据文献[15],黑方台风成黄土压缩系数在 $0.43\sim 0.47\text{MPa}^{-1}$ ,表明风成黄土压缩性明显大于下部冲积土层,较为疏松,成为斜坡浅部土体在短期灌溉水作用下,易发生滑塌现象的原因之一。

### 3.5 土性差异对滑坡形成的影响

由野外调查及室内试验结果分析可知,垂向上土体物理力学及渗透性质的差异及其与地下水等耦合作用,影响着台缘斜坡的变形破坏过程。

风成黄土具有良好的渗透性,而冲积黏土层对水有阻隔作用,致使泉水多沿黄土状土中红黏土夹层附近出露,仅有通过下卧土层构造裂隙渗漏的水,从红层泥岩顶面出露成泉,长期的引水灌溉,不仅会造成台地土体含水量急剧增加,地下水位显著升高,使得风成黄土与下部冲积土层接触面附近的土层实际上长期处于饱和状态,而且会补给泉水,造成土体结构不断被侵蚀破坏,强度降低;此外,长期灌溉水作用下,黏粒含量较高的黏土层,含水量增加,可塑性得到提高,形成缘边一定范围内裂缝发育分布,切割缘边坡体,为地表水入渗提供了良好通道。上述斜坡土体的不均性及其与地下水耦合作用,一定程度上降低了斜坡的稳定性,影响着斜坡的失稳与破坏方式。

此外,处于饱和状态的土体,由于土中水分季节性变化,使得近地表土体中盐分含量随之发生周期性变化,进而改变并破坏土体的结构,导致抗剪强度不断降低,有利于斜坡浅表层的变形破坏。杨具瑞

等<sup>[19]</sup>研究认为,黄土的粘聚力与内摩擦角随含水量增加而明显降低,实际上,当剪切力达到抗剪强度的60%时,即开始出现剪切破坏,对受灌溉水影响的黄土,其比例会更低。

而直剪试验表明,风成黄土的抗剪强度远小于下部的冲积土层。因此,下部饱和的风成黄土,受泉水侵蚀及水分季节变化影响,天然结构不断遭到破坏,土性恶化,强度显著降低,在自身压力及裂缝切割和下部可塑性较大的漫滩相粉质黏土层蠕动变形带动下,极易失去稳定,沿风成黄土与下部冲积土层界面附近剪出。

实际上,剪切面附近处于饱和状态的风成黄土,在随下部可塑性较大的漫滩相粉质黏土层蠕动变形过程中,受剪切作用,孔隙水压力上升,导致土体发生轻微液化,使得土体强度显著降低,若这种液化趋势持续,将导致更大范围的剪切变形,液化区域扩大,土体强度进一步降低,并最终导致斜坡失稳破坏。

#### 4 结论

(1) 黑方台台缘斜坡土层的物理力学性质在垂向上具有一定的波动变化规律,这种不均匀性及其耦合作用影响着边坡稳定与变形破坏特征。

(2) 上部风成黄土良好的渗透性及下部粉质黏土的阻水作用,使泉水多沿黄土状土中红黏土夹层附近出露,并使一定厚度的黄土处于饱和状态。

(3) 风成黄土较高的压缩性、较低的强度、泉水侵蚀及水分季节变化等因素及其耦合作用,使得黄土滑坡常从黄土状土层部位剪出。

(4) 受垂向上各土层性质差异及其耦合作用影响,斜坡呈蠕动—轻微液化—剪切变形—重度液化—剪切破坏的渐进性破坏的过程。

致谢: 本文在野外调查、取样、试验分析过程中,得到了吴万炯、周建基、魏丽娟和樊成意等同学的帮助!

#### 参考文献:

- [1] 樊成意,梁收运. 黄土台缘滑坡滑距与滑体形态的关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 18 - 24.  
FAN Chengyi, LIANG Shouyun. Relationship between sliding distance and sliding-body form of loess landslides on platform [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2013, 24(1): 18 - 24.
- [2] 赵尚学,李鸿琰,马东涛. 盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(1): 19 - 22.  
ZHAO Shangxue, LI Honglian, MA Dongtao. Study on the landslides at the edge of loess terrace in Yanguoxia reservoir region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(1): 19 - 22.
- [3] 王恭先. 甘肃省永靖县黄茨滑坡的滑动机理与临滑预报[J]. 灾害学, 1997, 12(3): 23 - 27.  
WANG Gongxian. Sliding mechanism and prediction sliding of Huangci landslide in Yongjing county, Gansu province [J]. Journal of Catastrophology, 1997, 12(3): 23 - 27.
- [4] 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.  
WANG Jiading, LIU Yue. A further study on the mechanism of high speed loess landslide in state of creeping and sliding liquefaction [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1999, 29(1): 79 - 82.
- [5] 吴玮江,王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 36 - 40.  
WU Weijiang, WANG Nianqin. Basic types and active features of loess landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2002, 13(2): 36 - 40.
- [6] 王志荣,吴玮江,周自强. 甘肃黄土台塬区农业过量灌溉引起的滑坡灾害[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(9): 43 - 46.  
WANG Zhirong, WU Weijiang, ZHOU Ziqiang. Landslide induced by over-irrigation in loess platform areas in Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2004, 15(9): 43 - 46.
- [7] 王家鼎,惠泱河. 黑方台台缘灌溉水诱发黄土滑坡群的系统分析[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 10 - 13.  
WANG Jiading, HUI Yanghe. System analysis on Heifangtai loess landslide in crowds induced by irrigated water [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2001, 21(3): 10 - 13.
- [8] 王家鼎,惠泱河. 黄土地区灌溉水诱发滑坡群的研究[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 305 - 310.  
WANG Jiading, HUI Yanghe. Landslides in crowds induced by irrigated water in loess area [J]. Scientia Geographica Sinica 2002, 22(3): 305 - 310.
- [9] 许领,戴福初,邝国麟,等. 黑方台黄土滑坡类型与发

- 育规律[J]. 山地学报 2008 26(3):364 – 371.
- XU Ling ,DAI Fuchu ,KUANG Guolin ,et al. Types and characteristics of loess landslides at Heifang plateau , China[J]. Journal of Mountain Science 2008 , 26(3) : 364 – 371.
- [10] 武彩霞 ,许领 ,戴福初 ,等. 黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究 [J]. 岩土力学 , 2011 , 32 ( 6 ) : 1767 – 1773.
- WU Caixia ,XU Ling ,DAI Fuchu ,et al. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau[J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 , 32 ( 6 ) : 1767 – 1773.
- [11] 许领 ,戴福初 ,邝国麟 ,等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报 2009 31(2):287 – 293.
- XU Ling ,DAI Fuchu ,KUANG Guolin ,et al. Analysis of some special engineering-geological problems of loess landslide [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009 31(2):287 – 293.
- [12] 许领 ,戴福初 ,邝国麟 ,等. IKONOS 影像在黑方台黄土滑坡调查中的应用 [J]. 遥感学报 ,2009 ,13 ( 4 ) : 729 – 734.
- XU Ling ,DAI Fuchu ,KUANG Guolin ,et al. Application of IKONOS image in loess landslide survey in Heifangtai [J]. Journal of Remote Sensing ,2009 ,13 ( 4 ) : 729 – 734.
- [13] 薛强 ,张茂省 ,唐亚明 ,等. 基于 DEM 的黑方台焦家滑坡变形分析 [J]. 水文地质工程地质 ,2011 ,38 ( 1 ) : 133 – 138.
- XUE Qiang ,ZHANG Maosheng ,TANG Yaming ,et al. Deformation analysis of the Jiaojia landslide at Heifang platform based on DEM[J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2011 38(1):133 – 138.
- [14] 武彩霞 ,戴福初 ,闵弘 ,等. 台塬顶裂缝对黄土斜坡水文响应的影响 [J]. 吉林大学学报( 地球科学版) , 2011 41(5):1512 – 1519.
- WU Caixia ,DAI Fuchu ,MIN Hong ,et al. Influence of cracks at the platform on hydrologic response of loess slope [J]. Journal of Jilin University ( Earth Science Edition) 2011 41(5):1512 – 1519.
- [15] 余志山. 黄河三峡移民区黑方台滑坡群稳定性分析 [J]. 水电能源科学 2010 28(5):43 – 46.
- YU Zhishan. Stability analysis of Heifangtai slide group of Three Gorges zone of migration in Yellow River [J]. Water Resources and Power 2010 28(5):43 – 46.
- [16] 张雨晴. 甘肃黑方台黄土滑坡系统分析 [硕士学位论文] [D]. 西安: 西北大学 2007.
- ZHANG Yuqing. Systematic analysis on loess landslides in Heifangtai , Gansu province , China [ D ]. Xi'an: Northwest University 2007.
- [17] 何维山 ,许琦 ,刘长春. 黑方台黄土塬区地面变形成因分析 [J]. 东华理工大学学报( 自然科学版) 2010 33 (3):281 – 286.
- HE Weishan , XU Qi , LIU Changchun. Ground deformation in Heifangtai loess yuan [J]. Journal of East China Institute of Technology 2010 33(3):281 – 286.
- [18] 陈春利 ,邢鲜丽 ,李萍 ,等. 甘肃黑方台黄土边坡稳定性的可靠度分析 [J]. 工程地质学报 ,2011 ,19 ( 4 ) : 550 – 554.
- CHEN Chunli ,XING Xianli ,LI Ping ,et al. Analysis on loess slope stability of Heifangtai ,Gansu province [J]. Journal of Engineering Geology 2011 ,19(4):550 – 554.
- [19] 杨具瑞 ,方铎 ,成自勇. 黑方台滑坡灾害研究 [J]. 水土保持学报 2003 ,17(5):172 – 174.
- YANG Jurui , FANG Duo , CHENG Ziyong. Studied landslide of Heifang platform [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2003 ,17(5):172 – 174.
- [20] 许领 ,戴福初. 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析 [J]. 水文地质工程地质 2008(5):28 – 32.
- XU Ling , DAI Fuchu. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang Plateau [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology 2008(5):28 – 32.

## Analysis of the physico-mechanical properties of the soil in Heifang platform margin profile

YANG Yong-qiang<sup>1,2</sup>, LIANG Shou-yun<sup>1</sup>, XU Chao<sup>2</sup>, ZHANG Fan-yu<sup>1</sup>

(1. Department of Geological Engineering, School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Loess landslides disasters are serious in Heifang platform margin, and it causes great concerns as a geological environment problem induced by agricultural irrigation. It is the basic conditions that the geological structure of the platform margin profile and the physico-mechanical properties of the soil determine the slope deformation and failure. In consideration of that, typical platform margin slope profile is selected through field investigation, and samples are collected systematically. The acknowledgement of the change rule of the physico-mechanical properties of the slope soil with depth is gained based on a series of basic soil tests. The effects of the differences of soil properties on the formation and development of the loess landslides are explored. The results shows that the vertical differences in soil properties and their interaction determine the locations of shear outlet of landslide and spring head, and thus affect the deformation and failure processes of the slope and other characteristics of the loess landslides.

**Key words:** loess landslides; platform margin profile; soil physico-mechanical properties; slope deformation and failure

### 封面照片说明

#### 云南鲁甸 6.5 级地震引发地质灾害与排查防范

2014 年 8 月 3 日云南鲁甸发生 6.5 级地震,最高烈度为 IX 度,Ⅵ度区及以上总面积为 10350km<sup>2</sup>,为地质灾害高易发区。据震中区龙头山镇地表破裂带、牛栏江流域岸坡山体震裂迹线及区内断裂构造分布初步判断,地震活动是由深部构造应力作用下的 NE 向断裂与 NW 向断裂复合的局部破裂表现。由于震区房屋建筑物结构的差异性分布,导致其震动响应分布与地表破裂表现有所不同。据现场调查,地震引发大量滑坡崩塌现象,地质灾害隐患激增,点多面广,呈“三线耦合”的分布规律(河谷岸坡一线、公路沿线斜坡、断裂带沿线)。崩滑坡体多为层状结构的强风化灰岩(如王家坡崩塌、甘家寨滑坡)或者松散结构的残坡积、崩坡积物(如牛栏江红石岩堰塞坝左侧滑坡)。滑坡崩塌不仅直接造成灾情,且带来严重的江河堰塞、通道阻断链式危害。由于斜坡高陡、居民点散布和道路通行困难,进一步加剧了灾情险情,给应急排查带来了困难。遇降雨过程,牛栏江流域支流沟谷泥石流风险大。封面照片拍摄点地处曲靖会泽、昭通巧家、鲁甸三县交界部位,拍摄影像为鲁甸县火德红王家坡村民小组牛栏江下游 V 形谷。远处可见左右岸对冲型崩滑堆积,形成红石岩堰塞坝体;近处为王家坡村民小组上方 400 米部位的高位山体滑移式崩塌所形成铲刮堆积段;在近现状水位岸坡,可见水位抬升作用导致的坡体下滑。综上形成三点认识:1. 西南山区地震新增地质灾害隐患具有隐蔽性,且余震降雨作用致使其演化快速,震后排查宜按 72 小时、7 日和 30 日三阶段动态部署;2. 山区地震烈度评估应充分考虑地表破裂、山体震裂和滑坡崩塌反映,为灾后重建提供科学依据;3. 山区防震减灾应提高建筑物的结构性抗震能力。

陈红旗 张楠 中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急技术指导中心) 供稿