

文章编号:1672-6561(2012)04-0095-07

## 陕西泾阳南塬黄土滑坡滑带土残余剪切强度特性

李 文<sup>1</sup>, 龙建辉<sup>2</sup>, 李同录<sup>3</sup>, 李 萍<sup>3</sup>, 张常亮<sup>3</sup>

(1. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**为探求陕西泾阳南塬高速远程黄土滑坡的复活机理,从大型黄土滑坡滑带采集原状黄土试样、古土壤试样(原状土),部分制备重塑试样(重塑土),进行不同体积含水率下的反复剪切试验,从而获得滑带土残余剪切强度指标与体积含水率、黏粒含量之间的关系。结果表明:原状土和重塑土的剪应力-位移曲线均为硬化型;在不同的垂直压力下,原状土和重塑土的残余剪切强度差值变化较大;当剪切强度达到峰值强度以后,随着剪切位移的继续增大,原状土和重塑土的残余剪切强度都有一定程度的损失,这种损失因垂直压力的不同而不同;对同类土,通过反复剪切试验获得的内聚力和内摩擦角随体积含水率的增加而降低;相关性分析表明,该区滑带土的黏粒含量较低,对残余剪切强度的内摩擦角影响很小,尤其是当天然体积含水率较低时,体积含水率的变化对残余剪切强度的影响远远大于黏粒含量的影响。

**关键词:**黄土;古土壤;滑带土;原状土;重塑土;残余剪切强度

**中图分类号:**P642.13 **文献标志码:**A

## Residual Shear Strength Characteristics of Landslide Soil in Loess Landslide of Jingyang Southern Highland, Shaanxi

LI Wen<sup>1</sup>, LONG Jian-hui<sup>2</sup>, LI Tong-lu<sup>3</sup>, LI Ping<sup>3</sup>, ZHANG Chang-liang<sup>3</sup>

(1. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 3. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to find the reactivation mechanism of high-speed long-distance loess landslide in Jingyang southern highland of Shaanxi, the undisturbed loess and paleosol samples were collected from sliding zones of large loess landslides, and the remolded soils were prepared from part undisturbed soils; repeated shear tests under different volumetric moisture contents were designed, and the relationships between indexes of residual shear strength and volumetric moisture content, and cosmid content were discussed. The results showed that the shear stress-displacement curves of undisturbed soil and remolded soil were both hardening type; the difference of residual shear strengths between undisturbed soil and remolded soil was significant under different vertical pressures; when shear strength reached to peak strength, the residual shear strengths of undisturbed soil and remolded soil lost a little with the continues increase of shear displacement, and the loss was different because of the different vertical pressures; for the same kind of soils, the cohesions and internal friction angles from repeated shear tests decreased with the increase of volumetric moisture content; correlation analysis indicated that cosmid

收稿日期:2012-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(40772181)

作者简介:李 文(1986-),女,山东潍坊人,工学硕士,E-mail: kx0726082@163.com。

content was low in landslide soil and had little effect on internal friction angle of residual shear strength, and especially when natural volumetric moisture content was lower, the impact of the change of volumetric moisture content on residual shear strength was significantly more than the impact of cosmid content.

**Key words:** loess; paleosol; landslide soil; undisturbed soil; remolded soil; residual shear strength

## 0 引言

陕西泾阳地区泾河南岸黄土台塬高程为 430~450 m, 由于台塬的抬升和泾河不断侧蚀, 沿河黄土边坡高陡, 一般坡高为 40~80 m, 坡度为  $40^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 。从 1976 年“提渭漫灌”以来, 塬边崩塌滑坡灾害频繁发生, 造成严重的人员伤亡和经济损失<sup>[1]</sup>。雷祥义曾研究该区黄土滑坡与人类活动的关系<sup>[2]</sup>; 许领等对该区黄土滑坡地表水的入渗途径进行了勘察, 并对该区黄土滑坡特征参数做了统计分析, 测得滑坡后壁陡坎高度与马兰黄土厚度一致, 并受黄土垂直节理控制, 最后总结了该区黄土滑坡典型的工程地质问题<sup>[3-5]</sup>; 金艳丽等基于饱和黄土应力路径试验分析了灌溉诱发黄土滑坡机理<sup>[6]</sup>; 宁社教等从地下水、节理等宏观现象以及黄土微观结构角度对南塬的滑坡机制进行了初步分析<sup>[7-8]</sup>, 但对其中的工程地质问题研究不够深入; 龙建辉等针对黄土滑坡滑带土的特征作了详细研究, 发现其物理性质指标、电阻率特性、细观微观结构特征有明显差异<sup>[9-11]</sup>。近年来, 通过对巨型黄土滑坡剪出口滑带土进行原位剪切试验及不同含水率和围压下的三轴剪切试验<sup>[12]</sup>, 使得黄土滑坡滑带土的强度研究取得了很大进展<sup>[12-23]</sup>。基于此, 笔者通过对不同成分的滑坡滑带土进行不同体积含水率下的反复剪切试验, 获得滑带土残余剪切强度指标与体积含水率、黏粒含量之间的关系, 为滑坡的稳定性评价提供参考。

## 1 滑坡变形阶段分析

泾河滑坡多为高速远程滑坡, 可将剪出口以上的滑动面称为滑带, 剪出口以下的远距离滑动面称为滑道(图 1)。泾河地区滑坡在发生与发展过程中主要经历了 3 个阶段: 第 1 阶段为滑坡启动阶段, 该阶段是指没有任何变形迹象的边坡开始有较明显变形迹象的过程, 一般表现为边坡后缘拉裂及错动, 泾河南缘边坡拉裂及错动明显, 垂直错距有些达 1 m 以上, 滑坡启动时的强度应为该区原状黄土一定体积含水率下的峰值强度; 第 2 阶段为坡体在滑带上

的蠕动, 由于该区地下水在坡脚以下 1 m 埋深处, 在滑带内的蠕动基本是在地下水位以上进行的, 因此其强度接近黄土在一定体积含水率下的残余剪切强度; 第 3 阶段为变形边坡在滑带与滑道内快速滑动的过程, 这一过程有地下水的参与, 土体发生液化, 强度极低, 在滑道上的内摩擦角仅有  $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$ <sup>[24]</sup>。

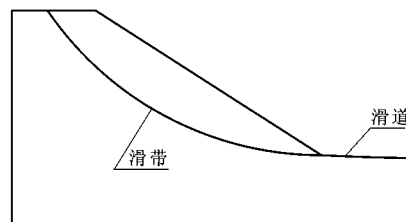


图 1 滑坡的结构

Fig. 1 Structure of Landslide

如何合理确定滑坡发展各阶段土体抗剪强度的指标值, 一直是滑坡分析的一个重要问题<sup>[25-26]</sup>。刘小丽等在研究滑带土的抗剪强度特性时曾总结了 5 种特征强度, 即峰值抗剪强度、残余抗剪强度、滑坡启动强度、完全软化强度以及流变研究中的长期抗剪强度<sup>[27]</sup>。滑带土的峰值抗剪强度是应力-应变曲线上的最高应力点对应的抗剪强度值; 残余抗剪强度是指滑带土以缓慢的剪切速度经历足够大位移后所达到的最小稳定抗剪强度; 滑坡启动强度可认为是滑坡整体失稳启动时滑带土的平均抗剪强度; 完全软化强度则指滑带土完全软化后的抗剪强度; 滑带土的长期抗剪强度是一个与土的流变性质相关的概念, 指长期荷载作用下滑带土抵抗破坏的强度。笔者主要研究滑坡在发生与发展过程中第 2 阶段的特征强度, 即滑带土的残余剪切强度, 通过残余剪切强度曲线特征研究滑坡的抗剪强度机理。

## 2 滑带土反复剪切试验

### 2.1 取样及试验

滑坡的滑带土样取自泾阳地区泾河南塬 9 个典型高速远程黄土滑坡的已滑后壁土。为了全面了解滑带土的强度特性, 结合该区滑带土的发育特点, 按

黄土和古土壤分别取样。由于有些滑坡已有几十年的历史,所取的原状滑带土样视为未扰动土(原状土),并按其原始的体积含水率和密度,采用压样法分别制成相应的重塑土样(重塑土)。本试验选取原状土和重塑土共进行16组黄土试验,8组古土壤试验。仪器选用国产ZJ型四联应变控制式直剪仪,试验操作严格按照《土工试验规程》(SL237—1999)进行<sup>[28]</sup>,试验方案见表1。

## 2.2 试验结果及分析

不同垂直压力( $\sigma$ )下滑带土反复剪切试验剪应力( $\tau$ )-位移( $s$ )曲线如图2。从图2可以看出以下结果。

(1)在低垂直压力下,对于黄土和古土壤,无论是天然状态还是饱水状态,其原状土与重塑土的残

表1 滑带土反复剪切试验方案

Tab. 1 Schemes for Repeated Shear Tests of Landslide Soil

土样编号	土样类型	试验方法
1-1, 4-1, 6-1, 7-1, 9-1	黄土, 原状土	天然体积含水率下反复剪切试验
2-1, 3-1, 8-1	黄土, 原状土	饱水状态下反复剪切试验
2-2, 3-2, 5-2, 8-2	古土壤, 原状土	饱水状态下反复剪切试验
s1-1, s4-1, s6-1, s7-1, s9-1	黄土, 重塑土	天然体积含水率下反复剪切试验
s2-1, s3-1, s8-1	黄土, 重塑土	饱水状态下反复剪切试验
s2-2, s3-2, s5-2, s8-2	古土壤, 重塑土	饱水状态下反复剪切试验

余抗剪强度曲线基本吻合;随着垂直压力的增大,原状土残余抗剪强度略高于重塑土。其中,当 $\sigma=100$  kPa

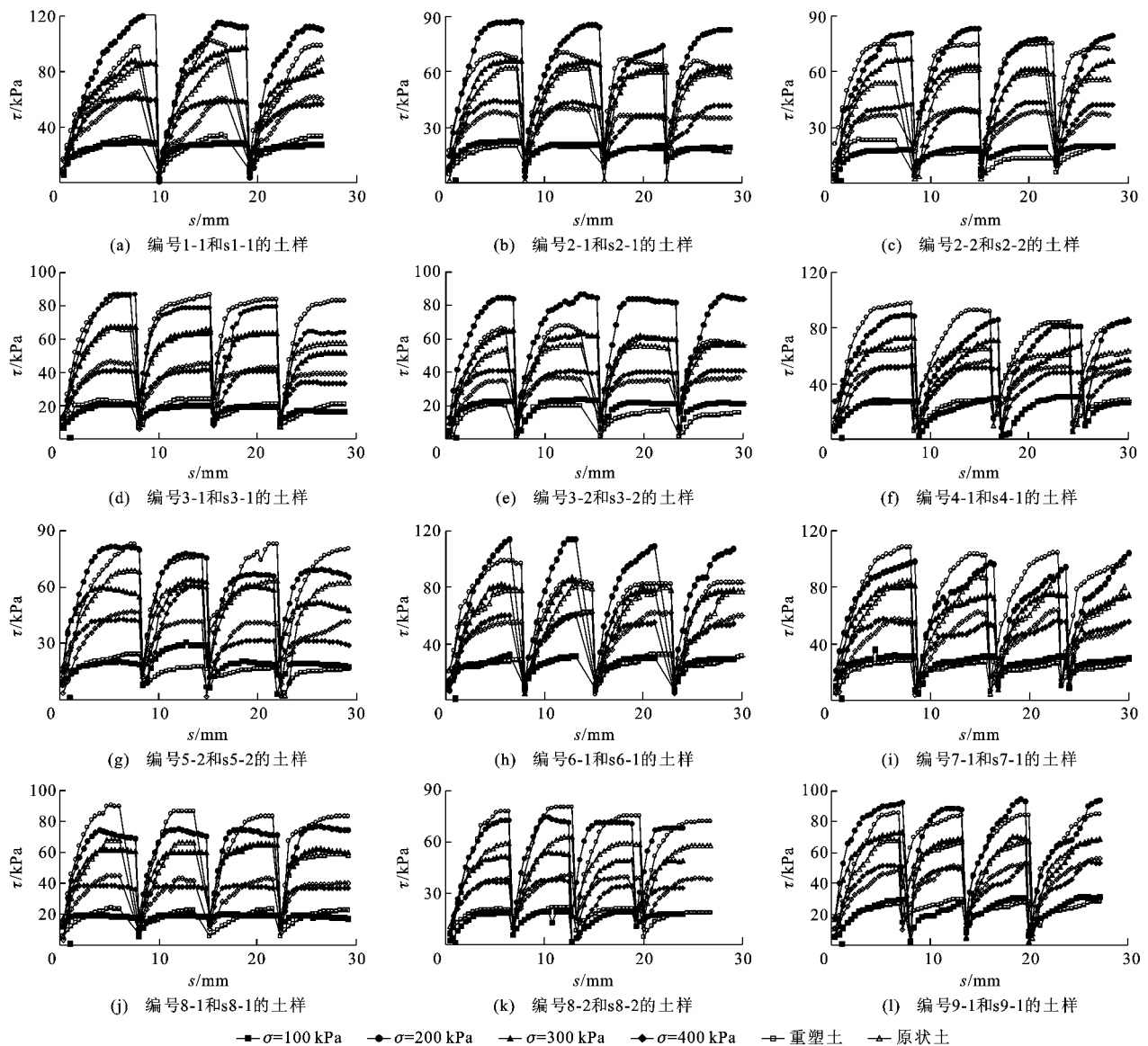


图2 反复剪切试验剪应力-位移曲线

Fig. 2 Shear Stress-displacement Curves of Repeated Shear Tests

时,原状土和重塑土的残余剪切强度曲线基本一致;当  $\sigma=200$  kPa 时,原状土与重塑土的残余剪切强度均值之差为 9 kPa;当  $\sigma=300$  kPa 时,原状土与重塑土的残余剪切强度均值之差为 16 kPa;当  $\sigma=400$  kPa 时,原状土与重塑土的残余剪切强度的均值之差为 20 kPa。

(2)就强度曲线特征而言,原状土和重塑土在天然状态和饱水状态下的剪切过程均表现出硬化型。

(3)土样达到峰值强度以后,随着剪切位移的继续增大,其抗剪强度在不同垂直压力下呈现不同程度的损失。这与 Skempton 所研究的伦敦黏土性质有一定的相似性<sup>[29]</sup>。其中,当  $\sigma=100$  kPa 时,土样

的抗剪强度损失 7 kPa;当  $\sigma=200$  Pa 时,土样的抗剪强度损失 11 kPa;当  $\sigma=300$  kPa 时,土样的抗剪强度损失 27 kPa;当  $\sigma=400$  kPa 时,土样的抗剪强度损失 38 kPa。

依据摩尔-库伦准则,对不同垂直压力下的反复剪切试验测得的剪应力和应变进行计算,所得的峰值强度及残余剪切强度参数详见表 2。将表 2 中不同体积含水率下的峰值强度内摩擦角、内聚力及残余剪切强度内摩擦角、内聚力用散点图的方式表述出来,并用线性函数对其变化趋势进行拟合(图 3~4),可以得出同种类型土的残余剪切强度随体积含水率的升高而降低。

表 2 不同土峰值强度和残余剪切强度的内聚力与内摩擦角

Tab. 2 Cohesions and Internal Friction Angles of Peak Strength and Residual Shear Strength for Different Soils

土壤类型	状态	原状土					重塑土				
		土样编号	$c'_d$ /kPa	$c'_r$ /kPa	$\varphi'_d$ (°)	$\varphi'_r$ (°)	土样编号	$c'_d$ /kPa	$c'_r$ /kPa	$\varphi'_d$ (°)	$\varphi'_r$ (°)
黄土	天然状态	1-1	13.2	3.6	14.5	14.0	s1-1	15.2	12.4	13.3	9.9
		4-1	12.6	10.0	11.1	9.5	s4-1	7.7	6.5	12.4	10.9
		6-1	4.8	2.3	15.4	14.3	s6-1	13.8	13.3	12.4	10.2
		7-1	10.3	9.6	12.8	11.7	s7-1	7.2	5.8	14.6	13.0
		9-1	11.4	4.8	11.8	11.9	s9-1	14.4	7.5	10.1	10.6
	饱水状态	2-1	0.5	0.0	12.3	11.4	s2-1	0.0	0.0	12.0	11.6
		3-1	0.0	0.0	12.8	12.2	s3-1	4.0	0.0	11.8	11.8
		8-1	4.1	0.2	11.2	10.4	s8-1	1.0	0.2	12.5	11.6
古土壤	饱水状态	2-2	1.3	0.0	16.5	11.4	s2-2	5.4	0.0	10.1	11.3
		3-2	1.6	0.0	11.9	11.4	s3-2	4.8	3.1	9.7	8.9
		5-2	0.8	0.0	11.4	9.2	s5-2	7.4	0.0	11.1	11.3
		8-2	1.5	0.1	10.3	9.5	s8-2	2.1	1.0	11.2	10.2

注: $c'_d$ 、 $\varphi'_d$  分别为反复剪切试验中峰值强度对应的内聚力和内摩擦角; $c'_r$ 、 $\varphi'_r$  分别为反复剪切试验中残余剪切强度对应的内聚力和内摩擦角。

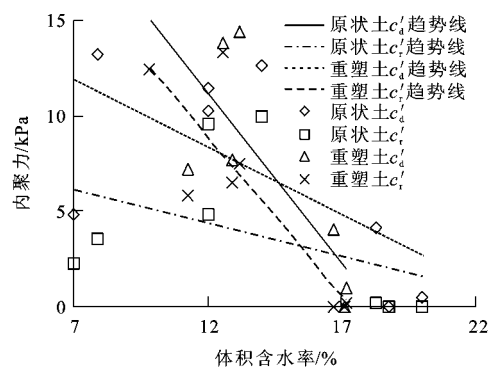


图 3 内聚力随体积含水率的变化

Fig. 3 Changes of Cohesion with Volumetric Moisture Content

图 5 为原状土和重塑土的峰值强度<sup>[30]</sup>和残余剪切强度指标内聚力( $c$ )与内摩擦角( $\varphi$ )之差的关系

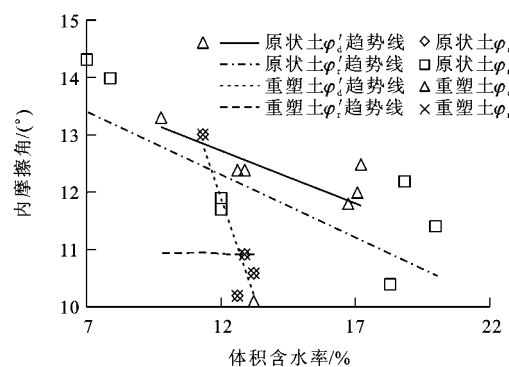


图 4 内摩擦角随体积含水率的变化

Fig. 4 Changes of Internal Friction Angle with Volumetric Moisture Content

曲线。从图 5 可以看出,差值点主要分布在第二象限和第四象限,即二者呈负相关关系。 $c$  的差值  $\Delta c$

主要取值范围 $[-4, 4]$ ,  $\varphi$  的差值  $\Delta\varphi$  取值范围 $[-2, 3]$ 。根据摩尔-库伦准则,有

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

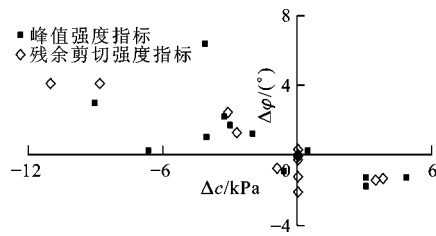


图5 峰值强度和残余剪切强度的内聚力差值和内摩擦角差值之间的关系

Fig. 5 Relationship Between Difference Value of Cohesion and That of Internal Friction Angle for Peak Strength and Residual Shear Strength

假定  $\varphi$  由  $12^\circ$  降为  $10^\circ$ ,  $\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2 = 0.04$ , 可知当  $\sigma$  较小 ( $\sigma$  为 100 或 200 kPa) 时,  $\sigma \tan \varphi$  为 4~8 kPa, 与  $c$  的变化范围基本一致, 故  $\tau$  的差异不明显; 当  $\sigma$  较大时,  $\sigma \tan \varphi$  的变化范围比  $c$  的大,  $\tau$  的差异明显。对于饱和黄土和古土壤, 由于土样在饱水过程中  $c$  已经基本为 0,  $\varphi$  的影响更为明显。在确定滑带土的残余剪切强度指标试验方案中, 可只选择饱水重塑土的反复剪切试验。滑坡开始滑动时, 滑带土体积含水率通常很高, 接近饱和状态, 且滑坡在运动过程中, 各方向受力较复杂, 故重塑土的反复剪切试验所得的强度参数更有实际意义。

### 3 黏粒含量对残余剪切强度的影响

研究表明, 古土壤中的黏粒含量 (尤其是扁平矿物的黏粒含量) 对残余剪切强度有重要影响。为了研究泾阳南塬黄土滑带土的残余剪切强度形成机制, 对所取的 12 组样本采用比重计法进行土的颗分试验 (图 6)。

Skempton 认为, 只有当黏土矿物为扁平状且黏

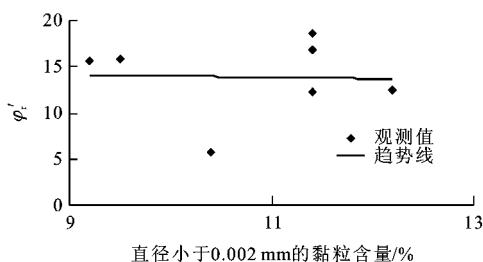


图6 滑带土残余剪切强度的内摩擦角与黏粒含量的关系

Fig. 6 Relationship Between Internal Friction Angle of Residual Shear Strength and Cosmid Content for Landslide Soil

粒 (直径小于 0.002 mm) 含量 (质量分数, 后文同) 超过 20%~25% 时, 才能发生颗粒的定向排列, 否则, 对于超固结黏土而言, 其强度的降低则完全由体积含水率的增加所致<sup>[29,31]</sup>, 此时残余剪切强度与软化强度在数值上基本相等。此处的软化强度是指重塑土在正常固结下的峰值强度<sup>[30]</sup>。

图 6 显示了土中黏粒含量及其对应的残余剪切强度指标内摩擦角的关系。泾阳南塬滑带土中以粉粒为主, 古土壤黏粒含量比黄土稍高, 但两者的含量均小于 20%; 龙建辉等取剪切面进行扫描电镜分析, 发现黏土颗粒的定向排列不明显<sup>[10]</sup>。

从图 6 还可以看出, 随着黏粒含量增大, 残余摩擦角有较小的下降趋势, 黏粒含量不足以反映其与残余剪切强度的相关性; 总体来说, 由于该滑坡区滑带土的黏粒含量 (小于 30%) 较低, 大部分土样的试验结果没有呈现出定向排列的趋势。

### 4 结 语

(1) 反复剪切试验中测得的原状土和重塑土剪应力-位移曲线均为硬化型。土体结构被破坏后, 在外力作用下的二次固结仍会产生一定的结构强度。

(2) 在不同的垂直压力下, 原状土和重塑土的残余剪切强度差值变化较大。随着垂直压力的增大, 原状土残余抗剪强度略高于重塑土。当剪切强度达到峰值强度以后, 随着剪切位移的继续增大, 原状土和重塑土的残余剪切强度都有一定程度的损失, 该损失亦因垂直压力不同而不同。垂直压力越大, 残余剪切强度损失越大。在较大的垂直压力下, 随着剪切位移的增大, 土体结构破坏越大, 软化强度越低。

(3) 对同类土, 通过反复剪切试验获得的内聚力和内摩擦角随体积含水率的增加而降低。由此可见, 滑带土体积含水率增加, 将使边坡稳定性明显降低。

(4) 对滑带土的黏粒含量及残余剪切强度进行相关性统计分析, 认为该区土的黏粒含量较低, 对残余剪切强度的影响很小, 尤其是当天然体积含水率较低时, 体积含水率的变化对残余剪切强度的影响远远大于黏粒含量的影响。

(5) 滑带土的上覆土压力、滑距、二次固结及体积含水率对滑坡的稳定性有重要影响。对于滑带土上覆土压力较大、滑距远、失稳年代较新的滑坡进行治理时, 应对室内试验所得的剪切强度指标进行适度折减; 此外, 可以通过采取减小滑带土的上覆土压力, 做好坡体防水排水设计等有效措施治理滑坡, 预防滑坡的二次发生。

## 参考文献:

## References:

- [1] LIAO H J, SU L J, LI Z D, et al. Testing Study on the Strength and Deformation Characteristics of Soil in Loess Landslides[C]//CHEN Z Y. Landslides and Engineered Slopes. London: Taylor and Francis Group, 2008:443-447.
- [2] 雷祥义. 陕西泾阳南塬黄土滑坡灾害与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1):56-64.  
LEI Xiang-yi. The Hazards of Loess Landslides in the Southern Tableland of Jingyang County, Shaanxi and Their Relationship with the Channel Water into Fields [J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1):56-64.
- [3] 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, 35(5):28-32.  
XU Ling, DAI Fu-chu. Statistical Analysis of the Characteristic Parameters of Loess Landslides at the South Jingyang Plateau[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(5):28-32.
- [4] 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 Fu-chu, KWONG A K L, et al. Analysis of Some Special Engineering-geological Problems of Loess Landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2):287-293.
- [5] 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, 2010, 35(1):155-160.  
XU Ling, DAI Fu-chu, MIN Hong, et al. Loess Landslide Types and Topographic Features at South Jingyang Plateau, China[J]. Earth Science, 2010, 35(1):155-160.
- [6] 金艳丽, 戴福初. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10):1493-1499.  
JIN Yan-li, DAI Fu-chu. The Mechanism of Irrigation-induced Landslides of Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10):1493-1499.
- [7] 宁社教, 康金栓, 陶 虹, 等. 黄土塬大型滑坡成功预报的基本做法[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6):110-112.  
NING She-jiao, KANG Jin-shuan, TAO Hong, et al. Basic Steps of Successful Forecast Large Landslides at Loess Tableland[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(6):110-112.
- [8] 范立民, 岳 明, 冉广庆. 泾河南岸崩岸型滑坡的发育规律[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(5):33-35.  
FAN Li-min, YUE Ming, RAN Guang-qing. Development Pattern of Slumping Bank Type Landslides at the South Bank of Jinghe, Shaanxi Province[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(5):33-35.
- [9] 龙建辉, 李同录, 雷晓峰, 等. 黄土滑坡滑带土的物理特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2):289-293.  
LONG Jian-hui, LI Tong-lu, LEI Xiao-feng, et al. Study on Physical Properties of Soil in Sliding Zone of Loess Landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2):289-293.
- [10] 龙建辉. 高速远程黄土滑坡预测预报方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.  
LONG Jian-hui. Research on Forecasting Methods of the Loess Landslide with High Speed and Long-run Distance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [11] 龙建辉, 郭文斌, 李 萍, 等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7):1023-1028.  
LONG Jian-hui, GUO Wen-bin, LI Ping, et al. Creep Property of Soil in Sliding Zone of Loess Landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7):1023-1028.
- [12] 罗丽娟, 赵法锁, 陈新建, 等. 巨型黄土滑坡剪出口滑带土的原位剪切试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(4):459-464.  
LUO Li-juan, ZHAO Fa-suo, CHEN Xin-jian, et al. In-situ Shear Experiment on the Shear Crack of Giant Loess Landslide[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(4):459-464.
- [13] 罗丽娟, 赵法锁, 胡江洋, 等. 基于剩余推力法的黄土高边坡稳定性可靠度分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4):27-31.  
LUO Li-juan, ZHAO Fa-suo, HU Jiang-yang, et al. Reliability of High Loess Slope Stability Based on Residual Thrust Method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4):27-31.
- [14] 雷晓峰, 肖 曼, 张 林, 等. 公路黄土边坡强度参数的选取及应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(4):27-33.  
LEI Xiao-feng, XIAO Man, ZHANG Lin, et al. Selection and Application of Strength Parameters of Highway Loess Slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4):27-33.
- [15] 李 萍, 王秉纲, 李同录, 等. 陕西地区黄土路堑高边坡可靠度研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6):18-25.  
LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu, et al. Study of Reliability for Loess Cutting High Slopes in Shaanxi Province[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6):18-25.

- [16] 张常亮,王阿丹,邢鲜丽,等. 侵蚀作用诱发黄土滑坡的机制研究[J]. 岩土力学,2012,33(5):1585-1592.  
ZHANG Chang-liang, WANG A-dan, XING Xian-li, et al. Research on Mechanism of Loess Landslides Caused by Erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(5):1585-1592.
- [17] 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 Mao-sheng, LI Tong-lu. Triggering Factors and Forming Mechanism of Loess Landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.
- [18] 张茂省,李林,唐亚明,等. 基于风险理念的黄土滑坡调查与编图研究[J]. 工程地质学报,2011,19(1):43-51.  
ZHANG Mao-sheng, LI Lin, TANG Ya-ming. Risk Management Based Landslide Investigation and Mapping in Loess Area[J]. Journal of Engineering Geology, 2011,19(1):43-51.
- [19] 李萍,赵纪飞,李同录. 山西乡宁—吉县地区黄土高边坡可靠度研究[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(2):81-89.  
LI Ping, ZHAO Ji-fei, LI Tong-lu. Study on Reliability for Loess High Slopes in Xiangning-Jixian Area of Shanxi Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012,34(2):81-89.
- [20] 王阿丹,王昌业,李萍,等. 西安白鹿塬北缘黄土边坡稳定的可靠度分析[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(1):104-110.  
WANG A-dan, WANG Chang-ye, LI Ping, et al. Reliability Analysis for Stability of Loess Slopes Along the Northern Edge of Bailuyuan, Xi'an[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 104-110.
- [21] 李萍,张波,李同录. 黄土高原边坡特征与破坏规律的分区研究[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(3):89-98.  
LI Ping, ZHANG Bo, LI Tong-lu. Study on Regionalization for Characteristic and Destruction Rule of Slope in Loess Plateau[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012,34(3):89-98.
- [22] 黄高花,王飞,杨勤科. 陕西北部山丘区公路开挖边坡侵蚀调查与评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):31-33.  
HUANG Gao-hua, WANG Fei, YANG Qin-ke. Evaluation of Cutting-slope Erosion of Highway in North Shaanxi[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,26(2):31-33.
- [23] 叶万军,杨更社,郭西山. 黄土边坡剥落病害的类型及其发育特征[J]. 西安科技大学学报,2010,30(1):52-57.  
YE Wan-jun, YANG Geng-she, GUO Xi-shan. Style of Spalling Hazard in Loess Slope and Its Development Characteristic[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010,30(1):52-57.
- [24] 章健. 黄土滑坡运动模式及滑距预测方法研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
ZHANG Jian. Study on Kinematical Model and Sliding Distance Forecasting of Loess Landslides [J]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [25] 李同录,王刘华,张常亮,等. 土质边坡空间临界滑动面搜索的优化算法[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(3):300-305.  
LI Tong-lu, WANG Liu-hua, ZHANG Chang-liang, et al. Optimistic Method for Searching the Spatial Critical Slip Surface of Earth Slopes [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011,33(3):300-305.
- [26] 康亚明,杨明成,胡艳香,等. 基于重度增加法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(4):49-53.  
KANG Ya-ming, YANG Ming-cheng, HU Yan-xiang, et al. 3D FEM Analysis of Slope Stability Based on Gravity Increase Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006,23(4):49-53.
- [27] 刘小丽,邓建辉,李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学,2004,25(11):1849-1854.  
LIU Xiao-li, DENG Jian-hui, LI Guang-tao. Shear Strength Properties of Slip Soils of Landslides: An Overview[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1849-1854.
- [28] SL237—1999,土工试验规程[S].  
SL237—1999, Specification of Soil Test[S].
- [29] SKEMPTON A W. Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory [J]. Geotechnique, 1985,35(1):1-18.
- [30] LESHCHINSKY D. Design Dilemma: Use Peak or Residual Strength of Soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001,19(2):111-125.
- [31] SKEMPTON A W. Long-term Stability of Clay Slopes [J]. Geotechnique, 1964,14(2):77-102.