

陕南土坎梯田田坎强度试验研究

杨娟¹, 李光录^{1,2}, 魏舟², 张腾², 李柏桥¹, 付玉¹

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以陕南土坎梯田田坎为研究对象,通过室内常规三轴剪切试验,对当地梯田田坎的变形和抗剪强度规律进行了研究,分析了田坎土体的应力—应变关系及抗剪强度特性,探究了田坎产生破坏的形式及其产生这种破坏的原因。结果显示:所采土样洋县的为膨胀土,黑山无膨胀性或较弱膨胀性;土样的强度变形关系在较高围压下呈硬化型,随着围压升高结构破坏程度升高,应变强化程度增强,低围压下则呈现出弱软化特性;在土层 120 cm 范围内的田坎土样,其抗剪强度参数沿深度分布无明显规律性,抗剪强度参数对含水率变化敏感,分析认为由于含水率不同致使土层之间存在的抗剪强度差异可能会导致田坎失稳。

关键词:梯田田坎; 应力—应变; 粘聚力; 内摩擦角

中图分类号: S281

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0360-04

Experimental Study on Strength of Terraced Field Ridge in Southern Shaanxi Province

YANG Juan¹, LI Guanglu^{1,2}, WEI Zhou², ZHANG Teng², LI Baiqiao¹, FU Yu¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Terraced field ridge in southern Shaanxi was selected as the study site. A study on strength characteristics of local terraced field ridge was carried out. The stress-strain relationship and shear strength characteristics of ridge soil were analyzed, and the failure mode and cause of retaining wall of terraced field ridge were explored. The results showed that soil samples of Yang County were expansive soil, while soil samples taken from Heishan were not expansive or weak expansion. Strength-deformation relationship of soil samples presented a hardening type at high confining pressure, structure failure and strain hardening level enhanced with the increase of confining pressure, while a weak softening characteristic was observed under low confining pressure. The distribution of shear strength parameters had no obvious regularity within 120 cm depth of soil layer, and they were sensitive to changes in moisture, maybe due to the different moisture contents resulting in differences for shear strength between different soils, which may lead to the instability of ridge.

Keywords: terraced field ridge; stress-strain; cohesion; internal friction angle

陕南秦巴山区,土坎梯田垮坎现象极为严重,调查显示,一般当年修的梯地,在翌年雨季中就有 30%~40% 的田坎发生崩塌或滑塌,严重者甚至高达 80%^[1],主要由土壤黏粒含量高、雨多强度大等自然因素和修筑质量差、无植物护埂,甚至破坏地边埂等不合理的人为因素造成^[2]。有学者总结^[3]:梯地坎坡变形破坏可归纳为剥落、鼓胀、溜塌、浅层座落 4 种基本类型,其共同的特征是发生在坎坡浅表工程,单个

变形破坏规模较小。土坎梯地垮坎严重的根本原因在于土质问题^[4]。

我国学者朱建强等^[2],首先从填筑土的击实特性方面入手,研究了其与其他主要物性指标之间的关系,并提出改善陕南地区土的击实特性的方法,后又研究了填筑土的击实特性与抗剪强度之间的关系,指出仅提高干密度并不能解决膨胀土分布区土坎梯地的垮坎问题,含水量对填筑土抗剪强度影响较大;李

收稿日期:2014-12-02

修回日期:2015-03-21

资助项目:水利部科技推广计划项目“PP 织物袋在陕南地区坡耕地治理中的应用与推广”(TG1308);陕西省水保局重点科技示范“PP 织物袋梯田筑坎技术的试验与推广”(20101003)

第一作者:杨娟(1990—),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail: yangjuan901128@nwsuaf.edu.cn

通信作者:李光录(1964—),男,甘肃永靖人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与土地利用研究。E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn

光录、高霞等^[5-7] 分别对 PP 织物袋这种新型梯田筑坎方式进行了论证,对田坎稳定性进行了分析,但对梯田垮坎原因的研究甚少。

陕南地区土坎梯田遇水强度衰减幅度大,风干后遇水崩解快,随着含水率的增加,土壤会发生软化,强度明显降低,导致土坎垮塌。本试验以陕南土坎梯田为研究对象,通过对样地土壤基本物理性质的测定,确定供试土质是否是膨胀性土;通过室内常规三轴剪切试验,对当地梯田田坎的变形和抗剪强度规律进行研究,并探索这些规律与梯田垮坎原因之间的关系。基于对土体力学指标的测定,为以后当地梯田的建设提供一些指导性建议。

1 试验材料及方法

1.1 研究地概况

试验用土取自陕西省西南部的汉中洋县(汉江流域)和陕西省东南部商州区的黑山镇(丹江流域),洋县

平均海拔为 618 m,属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,四季分明,气候温和湿润。年平均气温 14.5℃,最高气温 38.7℃,最低气温 -10.1℃,形成东北高陡,南部低缓,中部低平的地势。年平均降雨量 839.7 mm,主要集中在 7—10 月份。土体遇水强度衰减快,抗风化能力差;商州区平均海拔 880 m,属暖温带半湿润季风山地气候,年平均气温 13.5℃,年均降雨量 758 mm。两试验地的基本物理性指标详见表 1。

根据国家标准“膨胀土地区建筑技术规范”^[8] 中依据自由膨胀率大小划分膨胀土的膨胀潜势方法, $40 \leq \delta_{ef} < 65$ 为弱膨胀土, $65 \leq \delta_{ef} < 90$ 为中膨胀土; $\delta_{ef} \geq 90$ 的为强膨胀土。初步判断洋县土壤为弱膨胀土或中等膨胀土,而黑山的则无膨胀性或者膨胀性很弱。膨胀土是有别于普通黏土的一类特殊性黏土,具有吸水膨胀强度锐减、失水收缩变硬并伴随收缩裂隙的高塑性,主要由亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成,抗风化能力差,遇水易崩解。

表 1 样地土壤基本物理性指标

试验地	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	自由 膨胀率/ $\%$	$<0.002\text{ mm}$ 颗粒含量/ $\%$	最大干密度 $P_d/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含水率 $W_{op}/\%$
洋县	45.5	17.6	27.9	67	24.9	1.90	17.4
商州区	31.9	16.5	15.4	35	16.8	1.87	15

1.2 试验设备及土样制备

两个试验地分别选取坎高为 1.6 m 的土坎梯田,每 30 cm 的深度取土。试验仪器采用应力—应变控制式非饱和三轴仪,为重塑土的固结不排水三轴剪切试验,采用压实方法将重塑土制成圆柱状试样,试样直径与高度分别为 39.1 mm 和 80.0 mm,截面积为 12 cm³。在试样周围贴上滤纸条,使试样既能通过两端透水石排水,又能通过滤纸条排水,加速固结过程,固结时间一般需要 6~10 h。将风干过的散土配置成每层土的天然含水率,见表 2。试验按照土工试验方法标准^[9]所规定的方法和步骤进行,按 50,100,200,300 kPa 设定相应围压,剪切速率为 0.160 mm/min。试样在各级压力下的抗剪强度取峰值作为强度,对无明显峰值者,取轴向应变 $\epsilon_1=15\%$ 的应力值作为破坏峰值。

1.3 数据统计

首先通过 SPSS 软件对数据进行筛选,然后在 Excel 中,以轴向应变 ϵ_1 为横坐标,偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 为纵坐标,进行线性回归,绘制应力—应变曲线;通过 Excel 的线性拟合函数直接求得三轴试验的抗剪强度指标,并利用 Excel 内置的 VBA 语言编写程序绘制莫尔应力圆。

其轴向应变 ϵ_1 之间的关系曲线一般分为应变硬化型和应变软化型两种类型^[10],还有一种介于两者之间的情况,是理想化的弹性理想塑性应力—应变关系。

表 2 每层土样初始参数

试验地	坎高/ m	土层 深度/cm	天然 含水率/ $\%$	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
洋县	1.6	30	18.52	1.57
		60	14.55	1.65
		90	13.05	1.70
		120	14.67	1.75
		150	14.15	1.78
商州区	1.6	30	16.71	1.61
		60	15.86	1.63
		90	14.05	1.85
		120	22.59	1.68
		150	18.24	1.84

进行了两种土质的梯田沿坎深方向的常规三轴固结不排水剪切试验,土体的应力—应变曲线实际上反映的是土的力学特性。在不同围压条件下,不同土层深其偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 与轴向应变 ϵ_1 关系曲线如图 1 所示,土样应力—应变关系经历了弹性、屈服、应变强化 3 个阶段。土样的变形强度关系在高围压下呈硬化型,随着围压升高结构破坏程度升高,应变强化程度增强;低围压下则呈现出弱软化特性。弹性阶段的应力—应变线接近直线,其应变范围较小(1.5%以内),

2 结果与分析

2.1 应力—应变特性分析

常规三轴试验中,土样所受的偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 与

弹性区域的极限应力普遍较小,表明土体被压密后,可恢复变形很快就发挥出来,土体的弹性抗力对其整体强度的贡献程度较小;屈服阶段,土粒之间的接触、咬合、摩擦进一步增强,土体的抗力不断上升,同时由于土粒的滑移、破损,土体来不及适应新的组织构成,抗力增长速度减慢,并产生非弹性变形,应力—应变线为曲线;应变强化阶段,土体内部结构进行重新组合,从而形成一定的后继力量,并吸收了一定的变形能,土体非弹性变形持续增长,抗力增速减小,此时的强度虽然提高到一定的程度但已逐渐破坏。

从图 1 中可以看出,30 cm 土层处,在应力—应变关系达到屈服状态后,膨胀土(洋县)变化过程相对较慢,而非膨胀土(黑山)的变化依然较快;在 60, 90, 120, 150 cm 土层深度处,膨胀土(洋县)的抗剪强度值高于非膨胀土黑山的,这主要是由黑山的土壤为石渣土,60 cm 以上的土层含砂砾较多、地表表层土含砂砾较少造成的;而洋县为弱、中性膨胀土,含砂砾极少,变化较为规律。在土层深度上的变化:相同应变条件下,30—90 cm 处抗剪强度逐渐增加,120—150 cm 处的抗剪强度较小且比较接近。

在雨季随着降雨的入渗、土体有效应力状态的变化,其抗剪强度会下降,田坎局部土体容易产生剪切滑移,尤其在抗剪强度差异较大的层面之间,剪切变形由局部迅速扩展,田坎产生滑动。

2.2 抗剪强度特性分析

由于常规三轴试验结果无法像分析直剪试验成果那样直接利用线性回归公式进行统计,故采用 Excel 对试验数据进行记录和处理,通过 Excel 的线性拟合函数直接求得三轴试验的抗剪强度指标,以 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为圆心, $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 为半径绘制莫尔应力圆^[11]。

对试验结果进行记录和处理,通过 Excel 的线性拟合函数直接求得三轴试验的抗剪强度指标。以 90 cm 土层深为例,分别将两种土质的三轴试验结果在 $\tau-\sigma$ 应力平面上,绘制莫尔应力圆和强度包线,如图 2 所示。以这种方式可得到田坎不同土层深度下试样的抗剪强度指标 c, φ 值,见表 3。

固结不排水试验,土的不排水剪切强度随固结压力的增大而增加。数据显示,在 90 cm 深度内,两种土质的抗剪强度指标均随田坎土层深度的增加而增大,超过此深度, c, φ 值均有一定程度的下降,但 φ 值整体上变化不明显。以膨胀土为例分析,从表 2 中每层土的含水量上看,含水量为 13.05%, 14.15%, 14.55%, 14.67%, 18.52% 所对应的粘聚力 c 值分别为 131.84, 115.31, 114.62, 113.85, 107.75 kPa, 可见,粘聚力 c 值与含水率成负相关关系,这与大量试验研究结果相一致^[12-13],而非膨胀土地区含水量与粘聚力 c 值之间的

关系表现一致。两种土质均是表层土的含水量较大,在 90 cm 处降为最低,这是由水的入渗能力所导致的,黑山(非膨胀土)在 120 cm 土层深度处水分异常偏大,这是因为该层砂砾性颗粒较多,天然含水率较大。

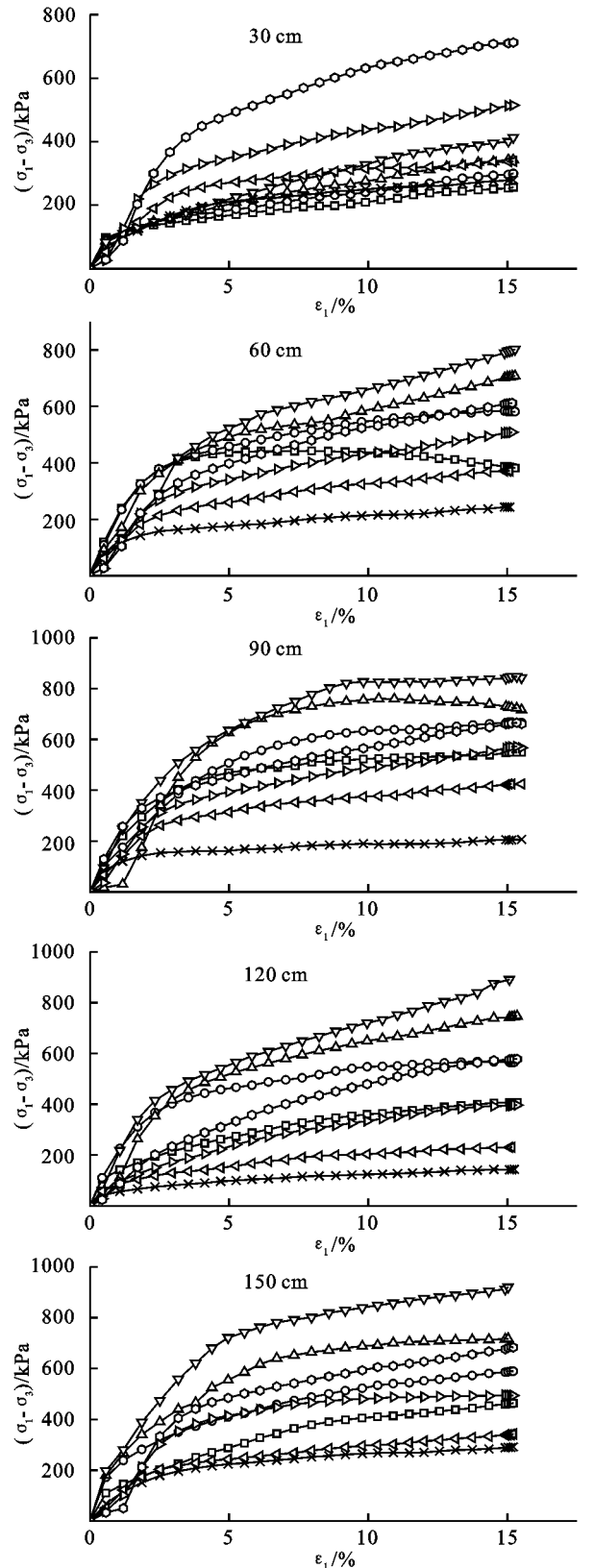


图 1 不同土层深不同围压下应力—应变关系

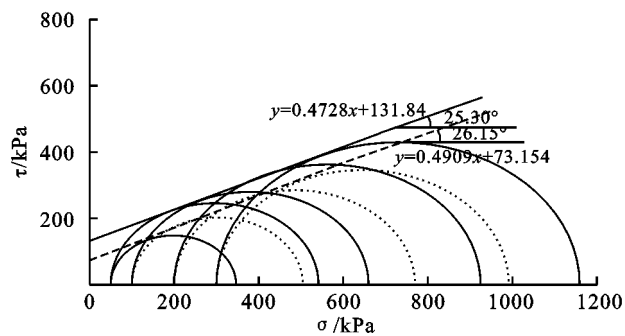


图 2 90 cm 土层深的摩尔应力圆

表 3 抗剪强度指标的比较

试验地	土层 深度/cm	天然 含水率/%	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
洋县	30	18.52	107.75	28.42
	60	14.55	114.62	24.72
	90	13.05	131.84	25.30
	120	14.67	113.85	28.23
	150	14.15	115.31	28.33
黑山	30	16.71	52.28	27.93
	60	15.86	62.77	25.12
	90	14.05	73.15	26.15
	120	22.59	56.43	27.68
	150	18.24	59.72	26.39

粘聚力又叫内聚力,是表征土体内部的胶结、吸力等吸附作用的一个综合量值,内摩擦角则是反映土粒之间咬合、摩擦作用的综合量值,田坎的稳定性受粘聚力、内摩擦角影响较大。膨胀土的抗剪强度参数受含水率、干湿循环的影响很大^[14-15],膨胀土初次失水干缩产生微小裂缝,土体的整体联结程度下降,与相同含水率状态相比,粘聚力减小;降雨作用下,水沿微小裂缝进入土体,与无裂缝状态相比入渗深度增加,再次失水干缩开裂,开裂深度、宽度、长度增加。如此往复,达到一定的开裂深度,土体被分割成许多小块,很容易发生滑塌。加之抗剪强度沿着深度不同,可能存在含水率较高的软弱面,且暴露的软弱面抵抗侵蚀能力较弱,在雨水的浸润、软化、冲蚀条件下,田坎中下部先破坏,从而导致整个田坎的滑塌,这与 PP 织物袋这种筑坎方式梯田田坎的破坏形式相似^[7]。

从图 2 莫尔应力圆可以看到,同一土层深两种土质的强度包线基本接近平行,两种土质的内摩擦角 φ 值变化并不明显;而粘聚力 c 值相差较大,因此认为主要是粘聚力的变化对梯田垮坎产生影响。颗粒之间的摩擦强度相差不大,初步分析为两种土质的土壤经过筛后,颗粒大小、粗细相似的原因造成的。

3 结论

(1) 应力—应变关系上:土样的变形强度关系在较

高围压下呈硬化型,随着围压升高结构破坏程度升高,应变强化程度增强,低围压下则呈现出弱软化特性;

(2) 强度特性上:梯田田坎的抗剪强度随含水量变化而变化,粘聚力 c 值的变化对梯田垮坎的影响大于内摩擦角 φ 对其的影响;

(3) 在土层 120 cm 范围内的田坎土,其抗剪强度参数沿深度分布无明显规律性,抗剪强度参数对含水率变化敏感,分析认为由于含水率不同致使土层之间存在的抗剪强度差异可能会导致田坎失稳;

(4) 在修筑梯田时,必须充分认识膨胀土易风化、吸水软化的规律。含水量对土的抗剪强度的影响较大,雨季梯田垮坎较严重,在膨胀土分布区土坎梯田的建设必须重视排水的问题,可在梯田与其上部陡坡地接合部位修建排水沟,疏导降雨径流或以排水固坎为中心建立农业、工程、生物措施相结合的综合防治体系。

以上结论,是对一特定地区、特定类型的土进行试验研究而得出的,不同地区、不同类型的土是否具有相同的规律,有待进一步的研究加以验证。

参考文献:

[1] 朱建强. 陕南土坎梯地垮坎的原因分析及防治对策[J]. 水土保持通报, 1994, 14(3): 44-47.

[2] 朱建强, 李靖. 陕南坡改梯填筑土的击实特性与抗剪强度试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 36-40.

[3] 朱建强, 李靖. 陕西南部土坎梯地建设研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(2): 19-24.

[4] 朱建强, 李靖. 陕南膨胀土分布区土坎梯地建设探讨[J]. 中国水土保持, 1998(12): 34-35.

[5] 李光录, 柳诗众, 邓民兴, 等. 陕南秦巴山区 PP 织物袋梯田筑坎结构和坎型研究[J]. 中国水土保持, 2012(9): 44-45.

[6] 高霞, 李光录, 柳诗众, 等. 陕南秦巴山区 PP 织物袋筑坎梯田田坎稳定性分析[J]. 中国水土保持, 2013(12): 21-23.

[7] 高霞, 李光录, 王新功. 陕南秦巴山区 PP 织物袋梯田筑坎土压力分布研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 37-41.

[8] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. 膨胀土地区建筑技术规范 GBJ112—87[S]. 北京: 中国计划出版社, 1989.

[9] 南京水利科学研究所. 土工试验方法标准 GB/T50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

[10] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1983.

[11] 陈立宏, 唐松涛, 张洪涛. 常规三轴试验数据处理的电子表格法[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 54-57.

[12] 缪林昌, 仲晓晨. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 71-75.

[13] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50.

[14] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376-1384.

[15] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.