

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.05.005

紫色土抗剪强度差异分析及土坎优化设计^①

张宏¹, 高明¹, 王谊¹,
韩文友², 韩晓飞¹, 王丹^{1,2}

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042

摘要: 选择钙质紫色土和中性紫色土为工程试样, 通过室内多级三轴剪切试验测定了含水率和干密度交互作用对土坎稳定性重要指标——土壤抗剪强度指标的影响, 确定了紫色土土坎坎高及外边坡稳定角的取值, 以优化土坎设计. 结果表明: 干密度和含水率交互作用对土壤粘聚力的影响下, 钙质紫色土和中性紫色土土坎土质的最优含水率分别为 11%, 8%, 最优干密度分别为 1.7, 1.68 g/cm³; 在紫色土最优干密度和含水率下, 考虑占地和稳定性因素, 钙质紫色土土坎高度不宜超过 2.0 m, 其外边坡坡度角可设计为 80°; 中性紫色土土坎高度不宜超过 1.5 m, 其外边坡坡度角可设计为 60°. 本文旨在为紫色土区国土整治土坎修筑工程提供理论指导.

关键词: 土壤干密度; 土壤含水率; 土壤抗剪强度; 紫色土土坎

中图分类号: S152.7; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)05-0031-07

土坎的修筑需要考虑到诸多因素, 其中土壤力学性质、坡度以及降雨等都是主要的影响因素. 目前在土坎设计时, 其设计参数主要采用土地开发整理项目工程设计标准中提供的范围值, 而不是针对具体环境条件下的参照值. 土坎设计的随意性可能造成土坎坡度过缓占地不经济或坡度过陡不稳定坍塌等现象^[1]. 土壤抗剪强度是土壤抗性的量度指标, 其对地基承载力和边坡稳定性也有着重要的影响. 梯田田埂的破坏绝大多数是属于剪切破坏, 土坡的坍塌都是沿着某一位面剪应力超过土壤的抗剪强度所造成的. 因而筑土坎的抗剪强度决定土坎外侧坡角的选择, 是影响埂坎稳定的关键因素^[2].

研究表明, 土壤的抗剪强度与土壤颗粒大小、孔隙比、含水率等条件密切相关. 土壤粘聚力和内摩擦角受含水率影响都比较大^[3-5]. 土的含水率和干密度变化是相关联的, 土体粘聚力受干密度、土体含水量以及粘粒含量的共同影响, 他们之间相互制约相互联系^[6]. 随着含水率的增大, 粘聚力呈先增大后减小的趋势, 内摩擦角 φ 随着含水率的增大逐渐减小^[7]. 干湿循环对抗剪强度指标也有重要影响, 随着干湿循环过程的发展, 抗剪强度迅速减小, 第二、三级循环起主要作用, 之后, 抗剪强度指标开始趋于稳定^[8]. 干密度粘聚力 c 有着明显影响, 而对内摩擦角 φ 影响不是很大^[9]. 紫色土是重庆市分布最广的土壤类型, 是一种特殊的侵蚀型的高生产力岩性土壤^[10-13], 针对其抗剪强度研究相对较少, 而这些因素影响抗剪强度指标的规律对丘陵山区土坎工程设计具有重要指导意义. 因此考虑影响紫色土抗剪强度指标的各主要因素, 包括土壤含水率、干密度, 以及干湿循环作用, 通过正交设计方法, 利用三轴压缩试验测定不同情况下土壤抗剪强度指标, 并应用 SPSS 及 1stOpt1.5 对试验数据进行回归分析, 得出粘聚力和内摩擦角与土壤质地、含水率、干密度, 以及干湿循环作用的函数关系, 建立了抗剪强度指标与这些影响因素的回归方程, 对不同含水率、干密度, 以及干湿循环作用下抗剪强度指标变化规律进行验证和讨论, 为土坎设计提供基础数据和设计依据.

① 收稿日期: 2014-03-23

基金项目: 科技部十二五科技支撑计划项目资助(2012BAD141318).

作者简介: 张宏(1991-), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事土地利用规划的研究.

通信作者: 高明, 研究员, 博士研究生导师.

1 材料与方法

1.1 土壤样品及性质

紫色土土壤 I 型取自潼南县桂林镇高何村, 土壤 II 型取自西南大学试验农场. 2010 年 5 月随机对 2 种类型土壤各取耕作层下 20~40 cm 土壤 30 kg 带回实验室风干备用, 2010 年 6 月至 2011 年 4 月进行工程试验和相关指标分析. 按坡度(8°, 15°, 20°)分别采 9 个环刀样, 用于测定土壤物理性状^[14], ρ_d 干密度, G_s 土粒体积质量, e 孔隙比, ω 含水率, I_p 塑性指数, I_L 液性指数, 其结果见表 1.

表 1 供试土壤的物理性质

土壤编号	$\rho_d /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	G_s	e	$\omega /$ %	I_p	I_L	颗粒组成/%			土壤类型
							<0.02 mm	0.02~0.002 mm	2~0.02 mm	
紫色土 I 型	1.35	2.7	0.99	15.47	18.3	0.74	59.19	20.77	20.03	钙质紫色土
紫色土 II 型	1.54	2.67	0.84	16.25	—	—	12.94	8.74	78.32	中性紫色土

1.2 样品处理与测定方法

先进行含水率和干密度交互作用对抗剪强度影响的测定, 其中涉及土壤类型为 2 种, 含水率处理分为 5%, 10%, 15%, 20% 共 4 个水平, 干密度处理分为 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 g/cm^3 共 5 个水平, 合计 40 个试验处理. 干湿循环试验所需试样, 在常规三轴试验及对抗剪强度指标进行分析处理后, 按计算的最优含水率配制土样, 并按计算的最优干密度击实制作土壤实验试样. 设计干湿循环为 6 次, 分别为 0 次, 1 次, 2 次, 3 次, 4 次, 5 次. 采用 TSZ 全自动三轴仪进行不固结不排水(UU)剪切试验, 三轴剪切试件的直径为 3.91 cm, 高度为 8 cm. 按照设计干容质量, 称取一定质量土样, 分 5~8 层均匀装入饱和器内击实, 各层土料数量相等, 各层接触面应刨毛, 击完最后一层, 将饱和器内地试样两端用平口刀削平, 取出试样称量, 与设计所计算的质量进行一致性比较. 传统三轴试验测定抗剪强度参数, 对同一种土的一组试验需要 3~4 个试样, 分别在不同的围压下进行试验^[15]. 为消除试样之间的误差, 本次试验采用多级剪, 即对一个试样在不同围压下测定. 按土工试验规程, 试验主要参数设定为轴向应变 5%, 10%, 15%, 20%; 对应的围压 σ_3 设定分别为 100, 200, 300, 400 kPa; 剪切速率设定为 0.8 mm/m. 通过厂商提供的土工试验微机采集处理系统进行数据采集和处理, 从而得到每个处理的抗剪强度指标, 即粘聚力 c 和内摩擦角 φ 值.

1.3 研究方法

1.3.1 土壤抗剪强度

梯田埂坎的破坏绝大多数属于剪切破坏, 土坡的坍塌都是沿某一面剪应力超过土的抗剪强度所造成的. 因而筑坎土的抗剪强度决定土坎外侧坡角的选择, 是影响埂坎稳定的关键因素. 土坎的抗剪强度与筑坎土的颗粒大小、孔隙比、含水率等组成条件有很大关系. 依据库仑定律, 土坎的抗剪强度表达式为:

$$T_f = \sigma \tan \varphi + C \quad (1)$$

式中: T_f 为土的抗剪强度, kPa; σ 为作用在剪切面上的法向应力, kPa; φ 为土的内摩擦角; C 为粘结强度, kPa.

要计算抗剪强度应先确定土的内摩擦角 φ .

1.3.2 土坎边坡稳定坡度角

土坎边坡稳定坡度角 θ 是粘性土的性质指标 γ, c, φ 与土坎高度 H 的函数, 即

$$\theta = f(\gamma, c, \varphi, H)$$

泰勒根据圆弧滑动法(图 1)的诸多计算资料, 得到粘性土土坡的安全系数等于 1 时, 上述 5 个参数间的关系.

泰勒表将土坎坡度角 θ 作为横坐标, 稳定系数 $N = c/\gamma H$ 作为纵坐标, 并用常用 φ 值系列曲线, 组合成粘性土坡计算图. 本文运用泰

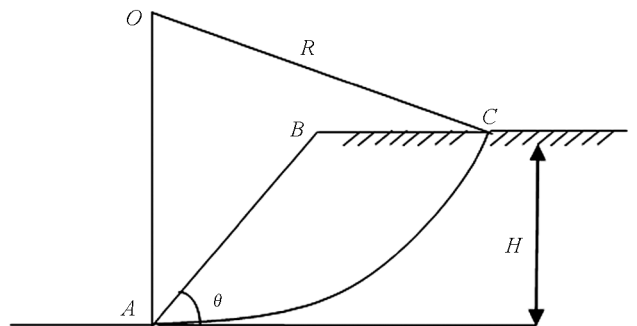


图 1 粘土土坎圆弧滑动分析示意图

勒表对粘土土坎稳定坡度角进行计算分析以得到不同土壤类型及不同高度土坎的边坡稳定坡度角。

2 结果与分析

2.1 紫色土土壤抗剪强度影响因素分析

紫色土土坎稳定性设计主要受土壤质地、干密度、含水率等因素的影响。土坎设计参数包括土坎边坡倾角、坎高、夯实度等。恰当的土坎高、边坡倾角是修建土坎梯田的关键。土坎稳定性是土坎设计必须考虑的因素,在适宜修建土坎地区,土壤抗剪强度影响着土坎的稳定性,而土坎稳定性又决定土坎设计参数。

2.1.1 土壤质地对土壤抗剪强度的影响

由表 2 可知,在同一干密度和含水率情况下,2 种紫色土的粘聚力和内摩擦角均不同,且除干密度为 1.3 g/cm^3 时同一含水率下紫色土 I 型粘聚力小于紫色土 II 型外,在同一干密度和含水率下,紫色土 I 型粘聚力和内摩擦角均是大于紫色土 II 型,即根据库伦理论计算出它们的抗剪强度就不相同,对应的土坎稳定性也就有一定差别。

表 2 不同类型紫色土的干密度和含水率对土壤粘聚力 C 和内摩擦角 φ 的影响

干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $W / \%$	紫色土 I 型		紫色土 II 型	
		粘聚力 C / kPa	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	粘聚力 C / kPa	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$
1.3	5	0.4	34.2	3.8	26.9
	10	7.8	28.6	8.1	25.6
	15	11.9	16.4	11.2	20.4
	20	3.4	12.5	7.9	7.8
1.4	5	1.9	31.8	5.5	28.3
	10	14.4	28.7	12.2	26
	15	30.9	19.4	12.1	20.6
	20	18.5	12.5	8.7	9
1.5	5	43.6	30	49.4	29.7
	10	74.6	28.6	27.9	26.1
	15	83.2	22.3	13.2	21.1
	20	33.8	13	18	9.2
1.6	5	89.4	33.8	77.5	31.4
	10	95.9	28.8	60.5	26.2
	15	98.3	22.4	52.4	21.4
	20	53.3	14	19.4	10
1.7	5	97.8	30.3	98.1	31.9
	10	161.3	30.6	113.7	26.8
	15	122.6	23.1	69.9	24.5
	20	67.8	13.3	22.7	10

2.1.2 含水率和干密度对紫色土土壤抗剪强度的影响

1) 含水率和干密度对紫色土土壤粘聚力的影响。由图 2 可知,在含水率 w 一定时,2 种类型紫色土土壤粘聚力 c 均随着干密度 ρ_d 的增加而变大,且级配越好的紫色土 I 型的土壤粘聚力 c 的增加幅度大于紫色土 II 型。当干密度 ρ_d 一定时,2 种紫色土的土壤粘聚力 c 均是先增加后减少。当干密度为 1.7 g/cm^3 时,含水率从 5% 到 10% 紫色土 I 型的粘聚力增幅较大,从 10% 到 20% 迅速减小,故在含水率 5%~15% 之间粘聚力 c 出现峰值;含水率从 5% 到 10% 紫色土 II 型的粘聚力小幅增加,而从 10% 到 20% 迅速减小,故在含水率 5%~15% 之间粘聚力 c 出现峰值。当干密度为 $1.3 \text{ g/cm}^3, 1.4 \text{ g/cm}^3, 1.5 \text{ g/cm}^3, 1.6 \text{ g/cm}^3$ 时,含水率从 5% 到 15% 紫色土 I 型的粘聚力缓慢增加,从 15% 到 20% 迅速减小,可见在含水率 10%~20% 之间粘聚力 c 出现峰值;当干密度为 $1.3 \text{ g/cm}^3, 1.4 \text{ g/cm}^3$ 紫色土 II 型粘聚力与紫色土 I 型变化趋势相同,而当干密度为 $1.5 \text{ g/cm}^3, 1.6 \text{ g/cm}^3$ 时,含水率从 5% 至 20% 紫色土 II 型粘聚力均呈现迅速减少的趋势。通

过牛顿法(BFGS)+通用全局优化算法(Universal Global Optimization-UGO)^[16]对于密度和含水率共同变化对粘聚力 c 表现的交互效应进行曲面拟合得出(图 3 所示):紫色土 I 型粘聚力 c 在干密度为 1.7 g/cm^3 , 含水率在 11%达到极大值, 此时粘聚力 c 为 154.59 kPa ;紫色土 II 型粘聚力 c 在干密度为 1.68 g/cm^3 , 含水率在 8%达到极大值, 此时粘聚力 c 为 126.38 kPa 。

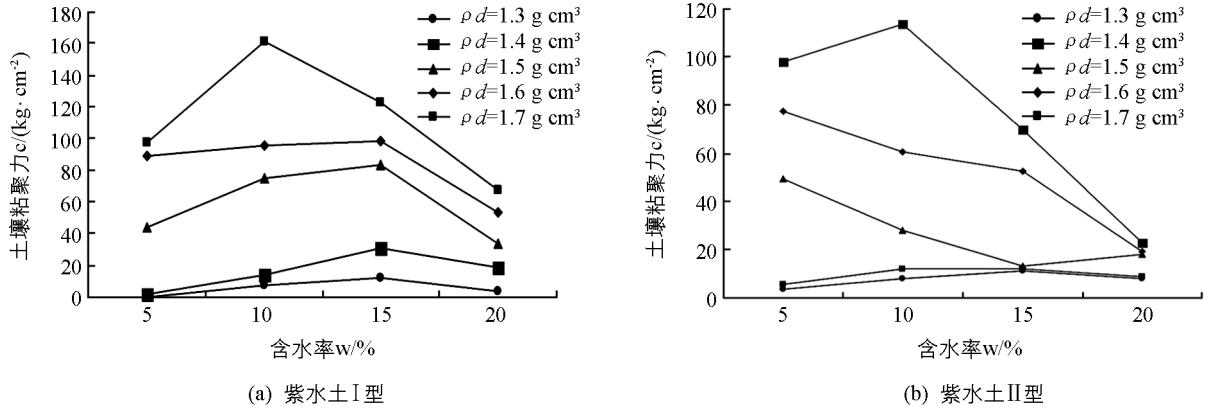


图 2 紫色土不同干密度下含水率对土壤粘聚力 c 的影响

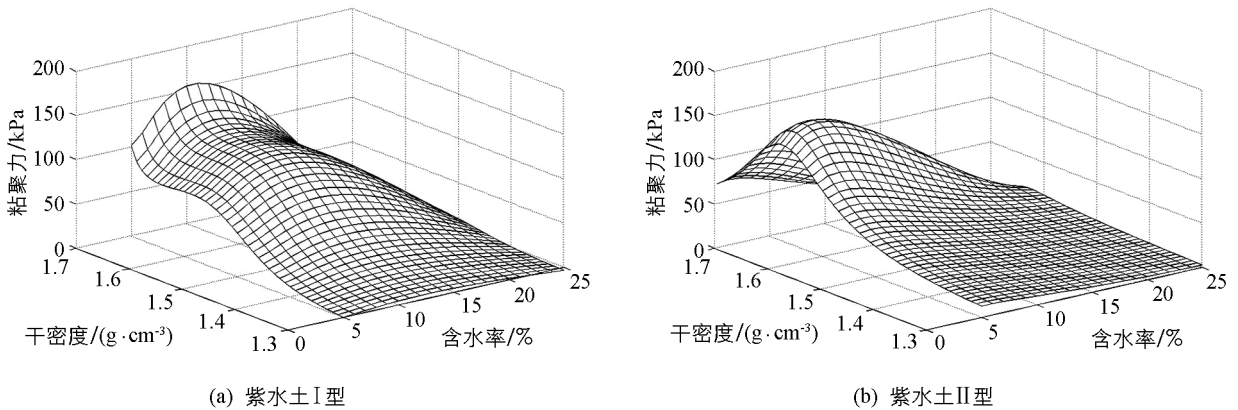


图 3 紫色土粘聚力 c 对干密度和含水率影响的响应面

2) 含水率和干密度对紫色土土壤内摩擦角的影响. 由图 4 可知, 2 种类型紫色土的内摩擦角均随着含水率的增加而呈减少趋势. 同一含水率水平下, 内摩擦角 φ 随干密度变化不明显, 土壤干密度为 1.7 g/cm^3 内摩擦角相对较大. 2 种类型紫色土进行比较可知, 在同一干密度和含水率下, 紫色土 I 型的内摩擦角比紫色土 II 型的内摩擦角大, 且随着含水率的增加, 紫色土 I 型的内摩擦角减少速率小于紫色土 II 型, 这主要是各土壤类型物理化学性质差异引起的. 同样通过牛顿法(BFGS)+通用全局优化算法(Universal Global Optimization-UGO)对干密度和含水率共同变化对内摩擦角 φ 表现的交互效应进行曲面拟合得出(如图 5 所示): 含水率和干密度的交互作用对内摩擦角 φ 影响相对较小, 相对而言, 含水率对内摩擦角 φ 的影响更明显. 当干密度为 1.7 g/cm^3 时, 在 7% 含水率情况下紫色土 I 型内摩擦角 φ 达到最大值 34.95° ; 而当干密度为 1.3 g/cm^3 时, 在 7% 含水率情况下紫色土 II 型内摩擦角 φ 达到最大值 31.55° 。

2.1.3 干湿循环对紫色土土壤抗剪强度的影响

如图 6 所示, 2 种类型紫色土的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 均是随着干湿循环次数的增加而呈减少趋势. 紫色土 I 型和紫色土 II 型的土壤粘聚力 c 均是大幅度减少, 其中在第 1 次干湿循环后土壤粘聚力减少幅度较大, 第 2, 3 循环后减少的幅度较小. 对于内摩擦角而言, 2 种紫色土均随着干湿循环次数的增加而缓慢减少. 随着干湿次数的增加, 紫色土 I 型的粘聚力 c 和内摩擦角 φ 的减少幅度均小于紫色土 II 型. 本实验表明随着干湿循环次数的增加, 土壤粘聚力 c 和内摩擦角 φ 均在减少, 由此计算出的土壤抗剪强度会随之减弱, 对应的土坎的稳定性也将降低, 且级配越低的紫色土土坎的稳定性随着干湿循环次数的降低的程度越大。

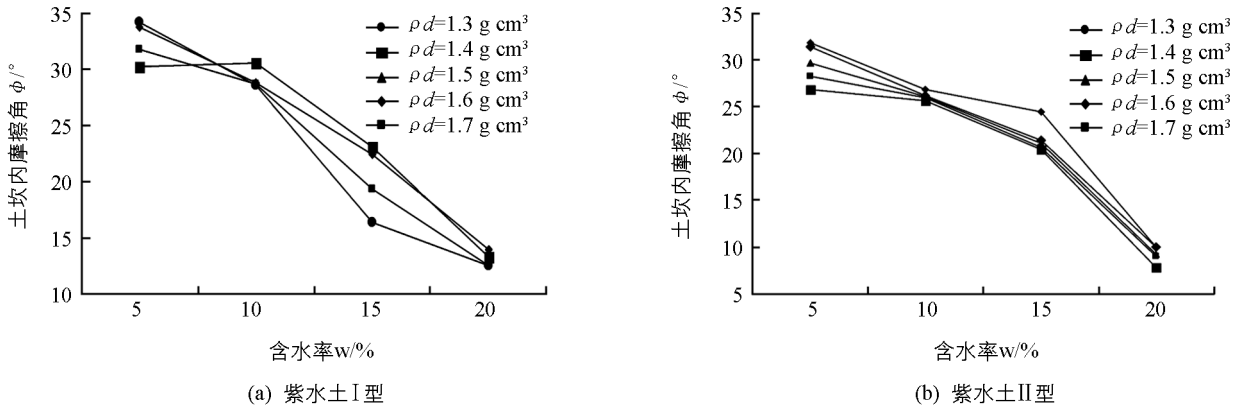


图 4 紫色土不同干密度下含水率对土壤内摩擦角 ϕ 的影响

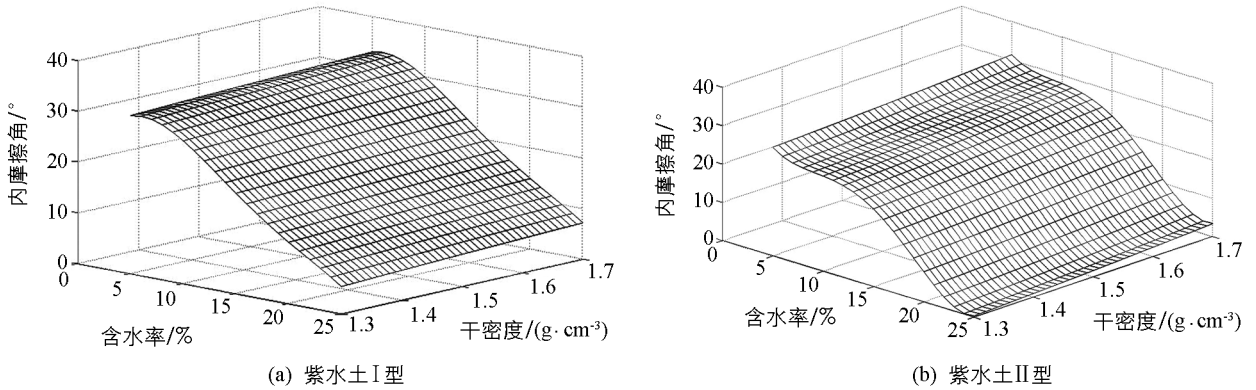


图 5 中性紫色土内摩擦角对干密度和含水率影响的响应面

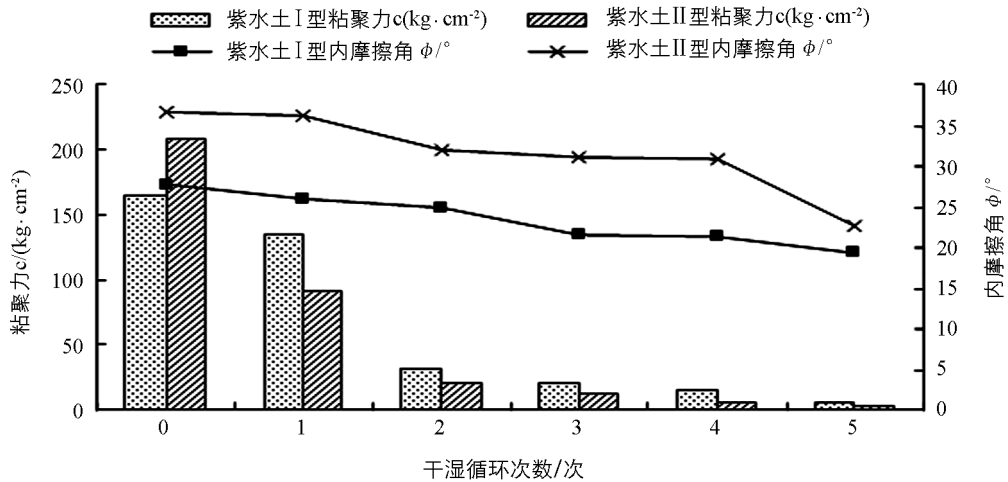


图 6 干湿循环对土壤粘聚力 C 和内摩擦角 ϕ 的影响

2.2 紫色土土坎优化设计

根据最优含水率和干密度制备试验土坎土壤, 紫色土I型的最优含水率为 11%, 最优干密度为 1.7 g/cm^3 , 重度为 18.87 kN/m^3 , 其相对体积质量为 1.89 g/cm^3 . 紫色土 II 型最优含水率为 8%, 最优干密度为 1.68 g/cm^3 , 重度为 18.17 kN/m^3 , 其相对体积质量为 1.82 g/cm^3 . 粘聚力 c 按第五次干湿循环结束后测定的不同值计算. 具体而言, 紫色土 I 型第五次循环结束后, 粘聚力 c 值为 6.1 kPa , 内摩擦角 ϕ 为 19.3° . 紫色土 II 型第五次循环结束后, 粘聚力 c 值为 3.1 kPa , 内摩擦角 ϕ 为 22.6° .

根据最优含水率和干密度制备试验土壤, 计算不同高度土坎边坡稳定坡度角 θ . 从图 7 可知, 随着坎高的增加, 2 种类型紫色土土坎的稳定坡度角均是呈现缓慢减小—快速减小—缓慢减小至恒定的变化趋势,

而土坎的稳定系数则是随着坎高的增加呈现出急剧降低—缓慢降低至恒定的变化趋势. 对于紫色土 I 型而言, 坎高在 0.5 m~2.0 m 时, 外边坡稳定坡度角为 $83^{\circ}\sim 85^{\circ}$; 坎高在 2.0 m~4 m 时, 外边坡稳定坡度角在 $53^{\circ}\sim 83^{\circ}$ 之间; 坎高在 4 m~5.5 m 时, 外边坡稳定坡度角在 $45^{\circ}\sim 53^{\circ}$ 之间; 对于紫色土 II 型而言, 坎高在 0.5 m~1.5 m 时, 外边坡稳定坡度角为 $61^{\circ}\sim 76^{\circ}$; 坎高在 1.5 m~2 m 时, 外边坡稳定坡度角在 $49^{\circ}\sim 61^{\circ}$ 之间; 坎高在 2 m~5.5 m 时, 外边坡稳定坡度角在 $36^{\circ}\sim 49^{\circ}$ 之间. 因此, 从占地和稳定性考虑, 对于紫色土 I 型而言, 土坎高度应在 2.0 m 以内, 其外边坡稳定角不小于 83° , 占地相对较少; 紫色土 II 型而言, 应在 1.5 m 以内修建土坎, 其外边坡稳定角应不小于 61° .

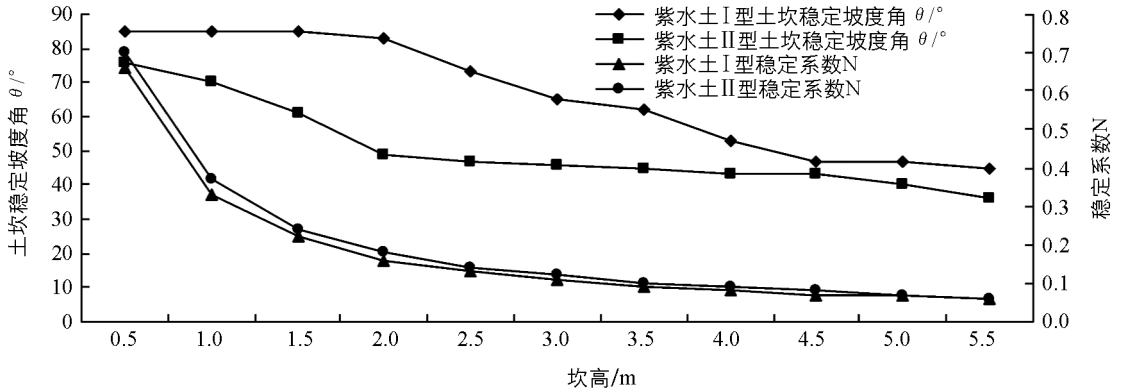


图 7 紫色土坎各设计高度土坎外边坡坡度角 θ 变化趋势图

3 结 论

1) 在相同含水率下, 2 种类型紫色土土壤粘聚力 c 均随着干密度 ρ_d 的增加而变大, 而在相同干密度下, 2 种类型紫色土粘聚力呈现出增加后减小的趋势. 2 种类型紫色土的内摩擦角均随着含水率的增加而呈减少趋势.

2) 通过含水率和干密度的交互作用对 2 种紫色土粘聚力和内摩擦角的研究发现, 含水率和干密度的交互作用能显著影响 2 种紫色土的粘聚力, 而交互作用对内摩擦角的影响不明显, 仅表现出含水率对内摩擦角的单一影响.

3) 在紫色土土坎土源保持最优干密度和最优含水率情况下, 考虑占地和稳定性因素, 建议钙质紫色土土坎修建高度不宜超过 2.0 m, 外边坡稳定坡度角为 $83^{\circ}\sim 85^{\circ}$, 建议取 80° ; 中性紫色土土坎修建高度不宜超过 1.5 m, 外边坡稳定坡度角为 $61^{\circ}\sim 76^{\circ}$, 建议取 60° .

参考文献:

- [1] 葛逸群. 砂质山区土坎梯田埂坎稳定性分析 [J]. 中国水土保持, 1999(7): 30-31.
- [2] 韩文友. 重庆丘陵山区土地整理土石坎工程优化设计 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [3] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究 [J]. 岩土力学, 2009(5): 1347-1351.
- [4] 唐益群, 余恬钰, 张晓晖, 等. 贵州石漠化地区降雨条件下红粘土剪切强度特性随含水量变化关系探讨 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 249-252.
- [5] 凌 华, 殷宗泽, 蔡正银. 非饱和土的应力—含水率—应变关系试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 651-655.
- [6] 顾成权, 孙 艳. 土体内聚力随含水量、粘粒含量及干密度变化关系探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 34-36.
- [7] 杨永红, 刘淑珍, 王成华. 土壤含水量减少对提高表浅层滑坡稳定性的影响 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 261-263.
- [8] 殷宗泽, 徐永福, 陈永战. 非饱和膨胀土的三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1998(3): 14-18.
- [9] 王兰民, 袁中夏. 干密度对击实黄土震陷性影响的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 75-80.
- [10] 谢 君, 杜 静, 刘 芸. 重庆紫色土坝的有效性及其影响因素分析 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2011.

36(2): 153-157.

- [11] 杨红薇, 张建强, 唐家良, 等. 紫色土坡地不同种植模式下水土和养分流失动态特征 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 615-619.
- [12] 史学正, 于东升, 邢廷炎. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性 K 值 [J]. 土壤学报, 1991, 34(4): 399-405.
- [13] 朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化紫色土的肥力恢复与重建 [J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 743-749.
- [14] 花可可, 魏朝富, 任镇江. 土壤液限和抗剪强度特征值及其影响因素研究——基于紫色土区 [J]. 农机化研究, 2011, 6(6): 105-110.
- [15] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程 SL237-1999 [S]. 1999.
- [16] 倪九派, 袁天泽, 高明, 等. 土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 72-77.

Optimum Engineering Design of Purple Soil Ridges Based on an Analysis of Purple Soil Shearing Strength

ZHANG Hong¹, GAO Ming¹, WANG Yi¹,
HAN Wen-you², HAN Xiao-fei¹, WANG Dan^{1,2}

1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Academy of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China

Abstract: In order to provide a theoretical guidance for building soil ridges in land consolidation in purple soil areas, a multiple triaxial shearing test in lab was conducted with calcareous purple soil and neutral purple soil as the experiment materials to study the effects of soil water content and soil dry density on soil shearing strength, which is the key indicator of ridge stability. The heights and outside slope angles of the two kinds of purple soil were determined so as to optimize soil ridge designing. Under the influence of the interaction between soil dry density and soil water content on soil cohesion, the optimal soil water content of calcareous purple soil and neutral purple soil was estimated to be 11% and 8% and the optimal soil dry density was 1.7 g/cm³ and 1.68 g/cm³, respectively. Taking into consideration the covering area and ridge stability, the height of the calcareous purple soil ridge and the neutral purple soil ridge should not exceed 2.0 m and 1.5 m, and their outside slope angles should be 80° and 60°, respectively, under the optimal soil water content and soil dry density.

Key words: soil dry density; soil water content; soil shearing strength; purple soil ridge

责任编辑 陈绍兰

