

马利军,王红雨,柴鹏翔,等.土工袋材与沟坡土的界面摩擦特性试验研究[J].水利水电技术,2020,51(9):173-180.

MA Lijun, WANG Hongyu, CHAI Pengxiang, et al. Experimental study on frictional characteristics of interface between geobag material and agro-ditch slope soil [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(9): 173-180.

土工袋材与沟坡土的界面摩擦特性试验研究

马利军¹, 王红雨^{1,2}, 柴鹏翔¹, 孙晓荣¹, 麦文慧¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 教育部
节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为探究土与土工合成材料筋土界面的摩擦特性, 本文以砌护沟坡的土工袋袋材无纺土工布为加筋材料, 农田排水沟边坡土为填料, 开展了土工布与土界面的室内直剪试验, 分析了压实度、含水率及不同法向应力对筋土界面摩擦特性的影响。试验结果表明: 土与土工布的界面抗剪强度随着含水率的增加先增大后降低, 随着压实度的增大而增大。筋土界面摩擦系数随着含水率的增加先增大后减小, 随着压实度的增大而增大。摩擦系数与法向应力具有一定的反比关系, 并随着法向应力的增大呈递减趋势。研究结果对于土工袋技术在农田排水沟边坡治理以及类似工程中的应用具有一定的参考价值。

关键词: 土工织物; 筋土界面; 抗剪强度; 摩擦特性; 影响因素

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.09.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV93

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)09-0173-08



听语音
聊科研
与作者互动

Experimental study on frictional characteristics of interface between geobag material and agro-ditch slope soil

MA Lijun¹, WANG Hongyu^{1,2}, CHAI Pengxiang¹, SUN Xiaorong¹, MAI Wenhui¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
2. Engineering Research Center for Water Saving Irrigation and Water Resources Regulation,
Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: In order to explore the frictional characteristics of the interface between the soil and the geosynthetic reinforcement material, an indoor direct shear test is conducted through taking the non-woven geotextile of the geobag for protecting the agro-ditch slope as the reinforcing material and taking the geo-ditch slope soil as the filling material, and then the impacts from compactness and water content as well as different normal stresses on the frictional characteristics of the interface between the soil and the geosynthetic reinforcement material are analyzed. The experiment result shows that the shearing strength of the interface between the soil and the geotextile increases at first and then decreases along with the increase of water content, and increases along with the increase of the compactness. Meanwhile, the frictional coefficient of the interface between the soil and the geosynthetic reinforcement material increases at first and then decreases along with the increase of water content, and increases along with the increase of the compactness. The frictional coefficient has a certain inverse relationship with the normal stress and exhibits a decline trend

收稿日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41462010); 宁夏农业综合开发办公室科技项目(QNFKJ201500); 宁夏大学研究生创新项目(GIP2019-08)

作者简介: 马利军(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事灌区水工建筑物结构方面研究。E-mail: 649215904@qq.com

通信作者: 王红雨(1961—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利工程、岩土工程的教学与研究。E-mail: why_nxts@163.com

along with the increase of the normal stress. The study result has a certain referential value for the application of the geobag technology to the treatment of the agro-ditch slope and the similar project concerned.

Keywords: geotextile; interface between soil and geosynthetic reinforcement material; shearing strength; frictional characteristics; impacting factor

农田水利工程中, 各级排水沟道是灌排系统的重要组成部分, 由于特殊的地理环境和地质条件, 宁夏北部引黄灌区排水沟道坍塌、滑移破坏严重, 排水不畅, 导致土壤积盐, 作物根区水气失调, 已成为阻碍宁夏引黄灌区高标准农田基本建设和现代农业可持续发展的瓶颈^[1-4]。目前, 灌区农田排水沟道边坡的治理主要有柳桩草土护坡、干砌石护坡、格宾石笼护坡及浆砌石护坡等多种措施, 但传统的治理措施要么存在工程造价较高、石材匮乏的弊端, 要么治理效果不佳^[5, 6]。为此, 课题组提出采用土工合成材料制成的土工袋砌护沟道边坡, 内部填充沟道边坡原土, 治理滑塌难题。

土工袋作为护坡体, 袋体织物作为土体的加固材料与土接触形成复合体, 必然受到周围土体的约束, 当复合体在外荷载的作用下受力或发生变形时, 两者之间通过界面产生摩擦而起到加固作用^[7-10]。在前人的研究分析中, 没有考虑土工袋与充填颗粒之间的摩擦作用, 对于农田排水沟道等涉水边坡而言, 随着水从袋体的流出, 颗粒与土工袋袋体织物的摩擦作用显著增强, 在土工布张力的作用下, 会使土工袋袋体的抗剪强度发生改变^[11, 12]。因此, 两者之间的摩擦作用, 对袋体受力特性、加筋边坡结构的稳定性、耐久性有着较大的影响^[13-16]。

本文的直剪试验以无纺土工布为加筋材料, 填料采用宁夏青铜峡河西灌区邵刚镇东方红村营桥三队农田排水沟道边坡土壤, 对筋土界面的摩擦特性开展试验研究, 以期对宁夏引黄灌区农田排水沟道边坡的防护设计及治理提供基础数据与参考依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验土壤

试验用土取自宁夏青铜峡河西灌区邵刚镇东方红村营桥三队排水沟边坡。分别在排水沟同一断面南、北边坡的顶部、中部及底部位置各挖 0.5 m×0.5 m 的剖面进行取样, 每处土样不少于 5 kg, 现场经密封保存后运回室内, 之后将取回的试验用土自然风干,

分别去除原料土样中的杂物后, 碾碎, 并过 2 mm 筛, 边坡不同位置土样按 1:1 进行混合、拌匀, 形成混合土样。参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[17]对混合试样进行击实、液塑限等常规土工试验, 土体物理力学指标如表 1 所列。依据《建筑地基基础设计规范》(GB 5007—2011) 中的分类标准, 该排水沟边坡土壤的塑性指数为 14.2 ($10 < I_p \leq 17$), 属于粉质黏土。

表 1 农田排水沟边坡土壤物理力学指标

液限 $W_L / \%$	塑限 $W_p / \%$	塑性 指数 I_p	最优含水率 $W_{op} / \%$	最大干密度 $\rho / g \cdot cm^{-3}$	渗透系数 $/ cm \cdot s^{-1}$
16.3	30.5	14.2	13.32	1.799	4.63×10^{-5}

1.1.2 无纺土工布

试验所用土工织物, 为仪征市海城非织造材料有限公司生产的白色人革基布, 其性能符合国家相关标准, 试验前根据剪切盒及下盒内刚性基础的尺寸将无纺土工布裁剪成圆形试样备用。土工布的力学性能与基本参数如表 2 所列。

表 2 土工织物基本力学参数

指 标	方 向	平均值
单位面积质量 / $g \cdot m^{-2}$		161.0
厚 度 / mm		0.7
断裂强度 / $kN \cdot m^{-1}$	经向	7.18
	纬向	5.22
伸长率 / %	经向	44.0
	纬向	80.0

1.2 试验方法

筋土界面摩擦试验方法参考《土工布及其有关产品摩擦特性的测定第 1 部分(直接剪切试验)》(GB/T 17635.1—1998)^[18]。

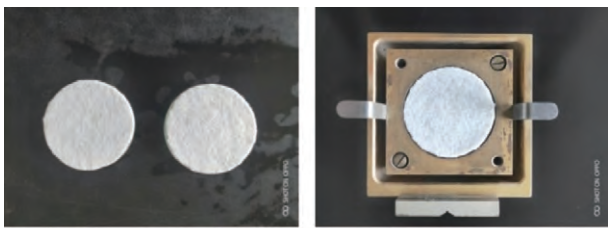
1.2.1 试样制备

试验均采用重塑土样, 按照试验方案预定的目标含水率及压实度, 配制成 8%、12%、16%、20% 四种含水率的土料, 同一种含水率的土料制备成压实度为 80%、85%、90%、95% 的四种试样, 然后用密封袋对土体进行密封, 静置 24 h 后备用, 以确保试样土体内部水分均匀分布。单个试样称量时精确到 0.01 g, 同时湿土质量计算如下

$$\rho V \lambda (1 + \omega\%) = M \quad (1)$$

式中, ρ 为实验土壤的最大干密度(g/cm^3); V 为环切体积(cm^3), ω 为土壤含水率(%); M 为装入模具土样的质量(g); λ 为土体压实度(%)。

试验将剪切好的土工布试样对正玻璃块用鱼珠胶进行粘贴, 粘贴时应使试样无张力的平铺于刚性基础表面并完全接触, 粘合后土工布试样应平整, 没有褶皱或折叠。接着在粘贴好的土工布试样上部施加 200 N 的荷载静置 24 h 备用, 目的是为了防止土工布在剪切过程中与刚性基座产生相对滑移, 对试验结果造成干扰与影响。土工布安置如图 1 所示。



(a) 土工布与钢化玻璃对正粘贴 (b) 土工布试样放置在下盒内

图 1 土工布安置示意

1.2.2 剪切试验

试验仪器采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪, 依据标准规定的方法进行土与土工布筋土界面摩擦特性的测定, 采用不固结不排水快剪实验, 剪切速率控制在 0.8 mm/min, 竖向压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa, 然后保持竖向压力不变进行水平剪切。试验开始前, 先将粘贴好的土工布试样放入下盒, 上盒回填土料采用直径 61.8 mm 的环刀, 与自制模具配合使用, 将计算好的土料分三层放置并压实成 1 cm 的土样, 上盒回填土样完成后, 立即开始试验, 为不影响试验结果, 每组试验结束后需更换新的土工布试样。相同含水率及压实度状态下的 4 个试样为一组, 每组不同方案下的土与土工布接触试样均做 3 次平行试验, 将 3 次结果的平均值作为该条件下的结果, 试验设计 16 组, 共计 192 个试样。直剪摩擦试验装置如图 2 所示。

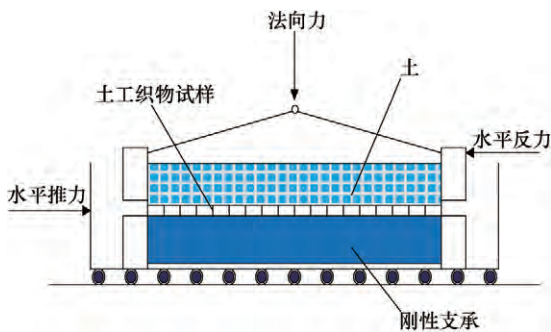


图 2 直剪摩擦试验装置示意

按照式(2) 计算农田排水沟边坡土与土工布界面间的抗剪力。按式(3) 计算土—土工织物的界面摩擦系数

$$\tau_f = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$f = \frac{\tau_f}{\sigma} \quad (3)$$

式中, τ_f 为抗剪力(kPa); F 为实测峰值水平推力(kN); A 为试样面积(m^2); f 为界面摩擦系数; σ 为法向应力(kPa)。

2 土与土工布筋土界面抗剪强度试验结果分析

2.1 筋土界面抗剪强度基本规律

为了讨论土与土工布两者筋土界面抗剪强度的变化规律, 以法向应力 300 kPa 为例(见图 3), 压实度为 80%, 筋土界面的最大剪应力为 146.08 kPa; 压实度为 85%, 筋土界面的最大剪应力为 169.39 kPa; 压实度为 90%, 筋土界面的最大剪应力为 164.72 kPa; 压实度为 95%, 筋土界面的最大剪应力为 191.14 kPa, 界面的抗剪应力呈现上升趋势。

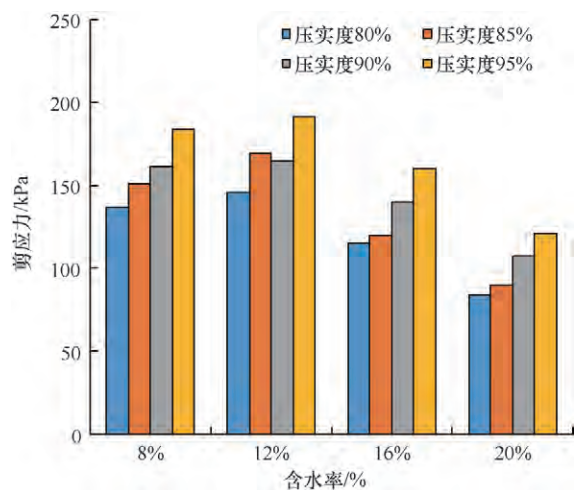


图 3 法向应力为 300 kPa 时筋土界面剪应力变化

当压实度一定, 低含水率下的界面抗剪强度要大于高含水率下的界面抗剪强度, 且在土体含水率为 12% 时达到最大, 含水率 20% 时达到最小。筋土界面的抗剪应力整体上随着压实度的增大而增大, 随着含水率的增加先增大后减小。筋土界面的抗剪应力与法向应力具有很好的线性相关关系, 符合莫尔库伦强度准则, 可表示为

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (4)$$

式中, τ_f 为界面抗剪强度; σ_n 为法向应力; c 为界面黏聚力; φ 为界面内摩擦角。

表3 不同压实度不同含水率土与土工织物筋土界面剪应力

压实度 /%	含水率 /%	剪应力 /kPa				黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / (°)
		$\sigma_n = 100$	$\sigma_n = 200$	$\sigma_n = 300$	$\sigma_n = 400$		
80	8	60.61	113.44	136.75	170.94	31.85	19.49
	12	77.70	116.55	146.08	184.93	43.51	19.34
	16	54.39	90.13	115.00	152.29	23.31	17.64
	20	45.07	68.38	83.92	124.32	17.09	14.20
85	8	65.27	115.00	150.74	177.16	34.18	20.35
	12	76.15	122.77	169.39	183.37	44.28	20.20
	16	57.50	99.46	119.66	160.06	27.19	18.11
	20	51.28	74.59	90.13	136.75	20.20	15.22
90	8	65.27	127.43	161.62	184.93	36.51	21.45
	12	82.36	128.98	164.72	200.47	46.62	21.31
	16	69.93	111.89	139.86	180.26	35.74	19.75
	20	55.94	80.81	107.23	142.97	24.86	16.01
95	8	79.25	141.41	183.37	211.34	44.28	23.65
	12	93.24	152.29	191.14	222.22	58.27	23.03
	16	69.93	118.10	160.06	183.37	37.29	20.91
	20	62.16	97.90	121.21	167.83	27.19	18.78

对其进行线性拟合, 可得到不同压实度与含水率条件下筋土界面的黏聚力 c 值和内摩擦角 φ 值, 计算结果如表 3 所列。

2.2 含水率对筋土界面强度指标的影响

界面黏聚力与内摩擦角随含水率的变化规律如图 4 和图 5 所示。

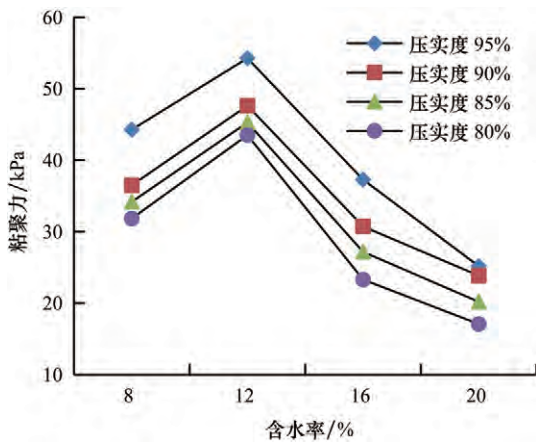


图4 筋土界面黏聚力随含水率的变化曲线

由图 4 可以看出界面黏聚力随着含水率的增大呈现出的变化规律。在不同的压实度下, 界面黏聚力总是先增大后减小, 当土体含水率低于 12%, 界面黏聚力随着含水率的增加而增加, 增幅为 21.3% ~ 36.6%, 当含水率超过 12% 后, 界面黏聚力持续减小, 且降幅明显, 降幅为 46.7% ~ 60.72%。这是由于随着土体含水率的增加, 土壤颗粒与土工布表面间的相互作用会逐渐由吸附向润滑作用过渡, 说明在含水率增大的过程中, 筋土界面间存在一个界限含水率, 此界限含水率应处于最优含水率附近。当含水率

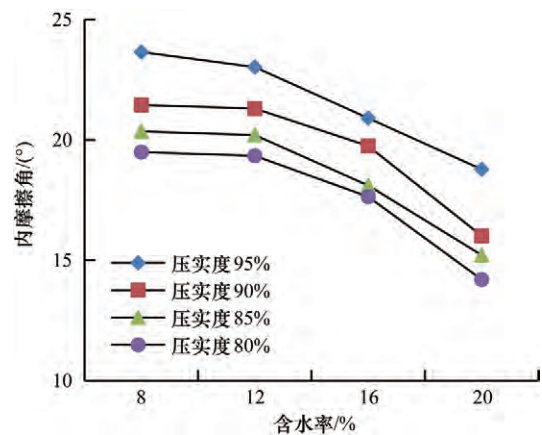


图5 筋土界面内摩擦角随含水率的变化曲线

小于界限含水率时, 此时二者界面间的相互作用主要为吸附, 当含水率大于界限含水率时, 吸附作用减弱, 吸附力逐渐消失, 此时二者界面间的自由水主要起润滑作用。

由图 5 可知, 在低含水率(8% ~ 12%) 时, 界面内摩擦角缓慢减小, 高含水率(12% ~ 20%) 时, 界面内摩擦角快速减小至最小值。其主要原因是由于高含水率增强了土与土工布表面的润滑作用, 摩擦阻力减小, 所以内摩擦角减小。

理论上而言, 随着土壤密实度的增加, 土壤抗剪强度相应增加, 而最优含水率会有所减小。试验中设置的 4 个不同含水率, 其筋土界面抗剪强度最大时的土壤含水率在 12% 左右, 即: 低密实度, 如压实度为 80%、85% 时, 界限含水率会高于 12%; 高密实度, 如压实度为 90%、95% 时, 界限含水率会低于 12%。

2.3 压实度对筋土界面强度指标的影响

不同含水率下筋土界面间的黏聚力、内摩擦角与压实度的关系曲线,如图6、图7所示。以含水率8%为例,压实度由80%上升至95%,界面黏聚力增加了3.3%~21.3%,界面内摩擦角增加了4.4%~10.3%,说明随着压实度的增加,界面黏聚力和内摩擦角均随之增加。

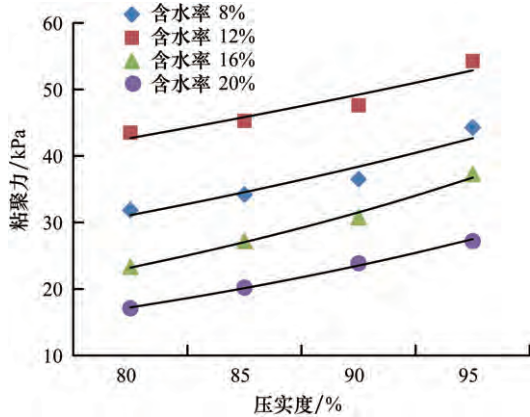


图6 筋土界面黏聚力随压实度的变化曲线

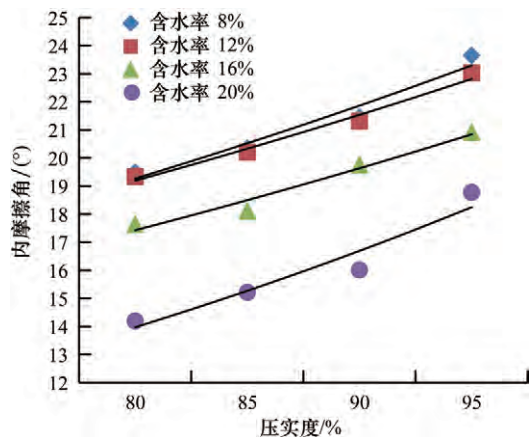


图7 筋土界面内摩擦角随压实度的变化曲线

其主要原因有:(1)随着压实度的增加,土体颗粒间的距离与孔隙减小,使土颗粒排列更加紧密,有效接触面积增大,导致界面间的咬合力和摩阻力增加,筋土界面间的相互作用增强;(2)随着压实度的增加,土体颗粒之间的水分减少,结合水相对增加,使筋土界面间留存的自由水减少,润滑作用减弱,能够抑制相对滑移的产生。因此界面黏聚力与内摩擦角均随着压实度的增大而增大。

对不同含水率下压实度与界面抗剪强度参数的变化规律进行分析,得到黏聚力随着压实度的变化呈指数函数增长,采用最小二乘法对其拟合,得出

$$c(S) = ae^{bs} \quad (5)$$

式中, a, b 均为指数函数系数; S 为土体压实度。各拟合公式如表4所列。

表4 不同含水率下压实度与界面抗剪强度参数的拟合公式

含水率/%	$c(S)$	$\varphi(S)$	$c(R^2)$	$\varphi(R^2)$
8	$27.98e^{0.105S}$	$18.08e^{0.063S}$	0.923	0.961
12	$39.74e^{0.071S}$	$18.11e^{0.057S}$	0.916	0.982
16	$19.90e^{0.153S}$	$16.41e^{0.057S}$	0.992	0.964
20	$14.73e^{0.156S}$	$12.78e^{0.059S}$	0.996	0.933

同上所述方法,对图7中界面内摩擦角与压实度的关系曲线进行拟合,得出内摩擦角随压实度的变化也呈指数函数增长,拟合结果如表4所列。

3 土与土工布筋土界面摩擦系数影响因素分析

3.1 含水率对界面摩擦系数的影响

图8为筋土界面摩擦系数与含水率的关系曲线,可以看出筋土界面摩擦系数随着含水率的变化呈现出一定的规律性,在不同的压实度下,摩擦系数都是随着含水率的增加先增大后减小。在界限含水率以下时,摩擦系数会随着含水率的增大而增大,超过界限含水率时,摩擦系数又会随着含水率的增大而降低。这是由于筋土的界限含水率与土体的最优含水率相近,当土体含水率处于最优含水率以下时,随着含水率的增加,土样密度也会随之增大,当土体含水率处于最优含水率时,压实后的土体干密度最大,对筋土界面间的相互摩擦是有利的。当土体含水率高于最佳含水率时,一方面土体的密度有所减小,另一方面土体中的弱结合水膜增厚,界面间的自由水增多,有利于土工布表面的润滑,而且在剪切过程中界面附近的土颗粒会重新进行排列,所需的外力相也应减小,界面间自由水赋存越多,润滑作用越明显,因此,土与土工布筋土界面摩擦系数在高含水率时会迅速减小至最小值。

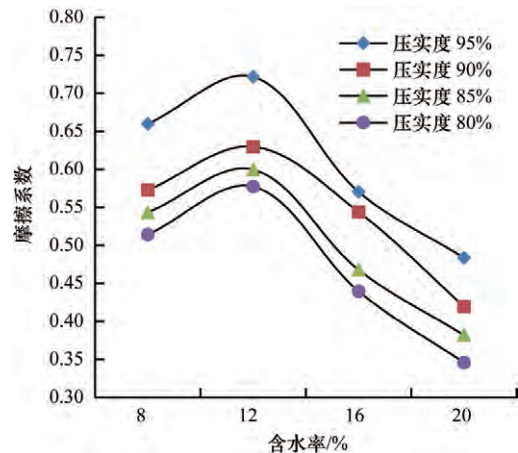


图8 筋土界面摩擦系数随含水率的变化曲线

3.2 压实度对界面摩擦系数的影响

压实度对筋土界面摩擦系数的影响规律如图9所示。由图9可知, 含水率一定时, 提高压实度会导致筋土界面的摩擦系数增大。土体的压实度越大, 颗粒之间的排列更加紧密, 加之部分土颗粒会嵌固在织物表面, 使得土与土工织物间的摩阻力增强, 产生相对位移时需要的剪应力越大, 故筋土界面的摩擦系数会随着压实度的增大而增大。对筋土界面摩擦系数与压实度的关系曲线拟合可知, 摩擦系数随压实度的变化呈指数函数增长, 不同含水率下压实度与摩擦系数的拟合公式如表5所列。

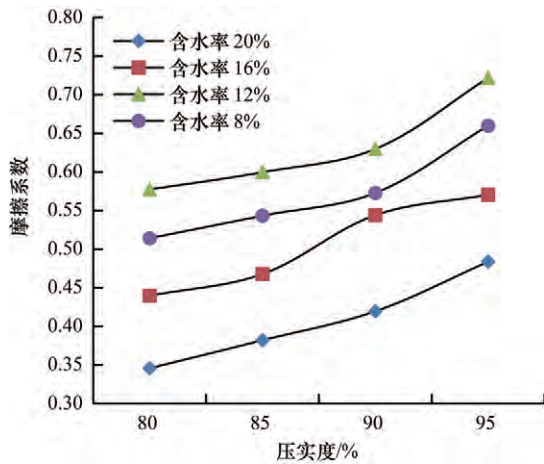


图9 筋土界面摩擦系数随压实度的变化曲线

表5 不同含水率下压实度与摩擦系数的拟合公式

含水率/%	$f(S)$	$f(R^2)$
8	$0.466e^{0.080S}$	0.905
12	$0.526e^{0.071S}$	0.933
16	$0.398e^{0.093S}$	0.958
20	$0.307e^{0.110S}$	0.990

3.3 法向应力对界面摩擦系数的影响

为了研究法向应力对筋土界面摩擦系数的影响, 本试验设置土体含水率为12%, 探究了不同压实度下界面摩擦系数随法向应力的变化规律, 如图10所示。

由图10可知, 在土体含水率和压实度保持不变的情况下, 筋土界面的摩擦系数随着法向应力的增加而降低, 在100~200 kPa时筋土界面摩擦系数下降幅度要大于300~400 kPa时的下降幅度; 当法向应力一定时, 高压实度下的筋土界面摩擦系数要高于低压实度下的摩擦系数。利用最小二乘法对其拟合, 结果如表6所列。据相关系数可知, 拟合结果较好。

由图10可知, 界面摩擦系数与法向应力呈一

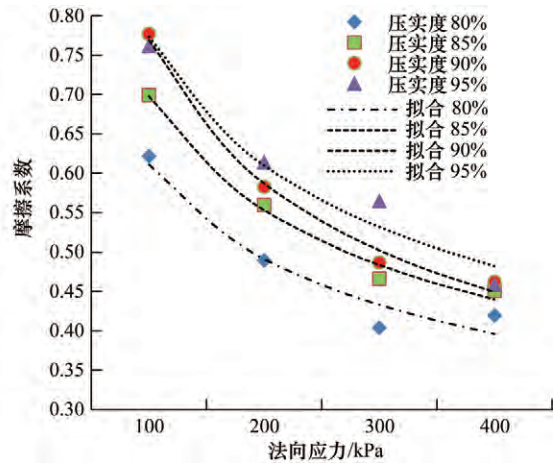


图10 筋土界面摩擦系数随法向应力的变化曲线

表6 不同压实度下法向应力与摩擦系数的拟合公式

压实度/%	$f(\sigma)$	$f(R^2)$
80	$0.611\sigma^{-0.31S}$	0.925
85	$0.697\sigma^{-0.33S}$	0.982
90	$0.768\sigma^{-0.38S}$	0.988
95	$0.733\sigma^{-0.34S}$	0.951

定的反比关系, 且随着法向应力的增加而减小。这是由于法向应力较低时, 界面抗剪应力增长较快, 法向应力越高, 界面抗剪应力增长越缓慢, 而各级法向应力是以相同的速率递增的, 所以界面抗剪应力与各级法向应力的比值是随着各级法向应力的增加而减小的, 即界面摩擦系数减小。由公式(3)与公式(4)可以得到

$$f = \frac{\tau_f}{\sigma} = \frac{c}{\sigma} + \tan\varphi \quad (6)$$

由式(6)可知, 当土体含水率与压实度保持不变, 在相同条件下, 界面的黏聚力与内摩擦角是一定的, 即式(6)中的 c 与 $\tan\varphi$ 是定值, 此时界面间的摩擦系数只与各级法向应力有关, 且摩擦系数是随着法向应力的增加而减小的。因此, 界面摩擦系数与法向应力呈反比关系, 试验与理论推导结论一致。

4 讨论

4.1 界面摩擦系数对土工袋摩擦加筋作用的影响

土工袋加筋是由土工袋袋体与土体颗粒之间的摩擦力起主要作用, 取加筋复合体的一段微元体分析, 筋体左截面受力为 T_1 , 右截面受力为 T_2 , 如图11所示。设 dF 为土体颗粒与筋材在该微元段上产生的总摩擦力, 略去该段微元体筋材与土颗粒重量, 则

$$dF = 2\sigma f b d l \quad (7)$$

式中, σ 为法向应力; f 为土颗粒与筋材间的摩擦系

数; b 为筋材的宽度; dl 为微元体的长度。

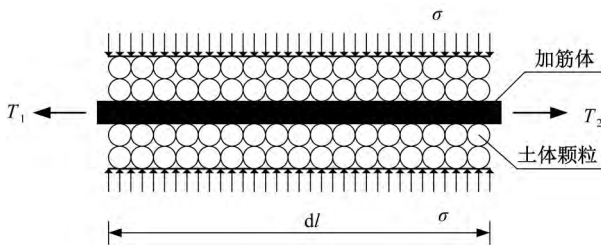


图 11 摩擦加筋受力分析

边坡土的水平推力在该微元段所引起的拉力为 $dT = T_1 - T_2$, 若 $dF > dT$, 土工袋体与边坡土体之间便不会产生相互错动。因此, 要使整个土工袋加筋复合结构的内部稳定得到保证, 需满足上式要求。

土工袋砌护农田排水沟道, 其边坡的稳定性是关键。设计时可通过采取增大加筋体的宽度和长度提高筋土间的整体稳定, 但该方法会造成工程投资增加, 建筑材料浪费; 另一途径是考虑筋材的自身特性, 选用表面粗糙、强度和弹性模量足够的土工合成材料作为加筋材料, 使筋土间产生较大的摩擦力, 提高复合体结构的整体稳定性。

4.2 土工袋砌护农田排水沟道的建议

土工袋作为一种特殊的筋材, 在农田水利工程中应用较少, 尚处于摸索探究的阶段, 筋土界面间的摩擦特性直接影响筋土结构的稳定性验算与筋材布设。因此, 摩擦系数的合理选择与筋土复合体整体稳定性的提高, 应是土工袋砌护农田排水沟道工程中不容忽视的问题。依据本文试验结果, 提出以下设计与施工建议:

(1) 农田排水沟道边坡土体的天然含水率远高于最优含水率, 实际工程中, 很难将回填土料的含水率控制在最优含水率附近, 因此, 设计中筋土界面间的摩擦系数应取低值。农田排水沟道边坡的平均天然含水率为 25% 左右, 据本实验结果预测知, 不同压实度, 天然含水率下的摩擦系数约为 0.25~0.38, 而最优含水率下摩擦系数的 50% 恰好与此范围接近, 为给设计人员提供一个合理且具有统一标准的设计取值, 因而建议取最优含水率下摩擦系数的 50% 进行稳定验算。其次, 加筋体材料还应具备良好的透水性, 使水份及时排出, 减少边坡内部赋存的水份。

(2) 提高边坡回填土料的压实度会增大袋体织物与填料间的摩擦系数。因此, 在工程施工中, 应提高回填土料的压实度, 使土工袋筋土复合体的整体稳定性增加, 建议回填土料的压实度控制在 90% 以上。

5 结论

本文通过开展土工布与土筋土界面的室内直剪试验, 研究了含水率、压实度及法向应力对筋土界面摩擦特性的影响规律, 结论如下:

(1) 在相同含水率下, 筋土界面的抗剪应力与法向应力呈线性相关, 符合莫尔库伦强度准则, 能够反映土工布与土筋土界面的强度特性; 筋土界面的抗剪应力整体随压实度的增大而增大, 随含水率的增大先增大后减小。

(2) 不同压实度下, 随含水率的增大, 界面黏聚力与摩擦系数均先增大后减小, 在界限含水率 (12%) 附近达到最大值, 超过界限含水率后快速减小; 界面内摩擦角随着含水率的增大呈递减趋势。压实度对界面摩擦系数的影响实质是筋土界面内摩擦角和黏聚力共同作用的结果, 且界面内摩擦角的贡献率大于界面黏聚力的贡献率。

(3) 随着法向应力的增加, 筋土界面抗剪应力增长趋势变缓, 摩擦系数随着法向应力的增长而降低, 呈反比关系。

(4) 设计中建议摩擦系数取最优含水率下的 50% 进行稳定性验算, 施工中应严格控制回填土料的压实性控制在 90% 以上。

承泄田间地下水是农田排水沟道的主要功能之一。因此, 在后续研究中需要进一步考虑渗流条件下土与袋体间摩擦作用的特性以及土工袋砌护体的长期稳定性。

参考文献:

- [1] 张庆华, 毛伟兵, 宋学东, 等. 小型农田水利工程运行现状综合评价指标体系研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 114-118.
- [2] 罗琳, 胡智丹, 庞靖鹏, 等. 新形势下我国农田水利发展思路初探[J]. 水利发展研究, 2018, 18(1): 19-21.
- [3] 帅雨婷, 张展羽, 冯宝平, 等. 基于 PSO-GRA 耦合决策的排水沟系统多目标规划模型[J]. 中国农村水利水电, 2018(9): 187-192.
- [4] 陆海明, 孙金华, 邹鹰, 等. 农田排水沟渠的环境效应与生态功能综述[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 719-725.
- [5] 张力, 王红雨, 王小东, 等. 土工袋砌护农田排水沟道固坡效果监测[J]. 中国农村水利水电, 2018(10): 205-210.
- [6] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏回族自治区高标准农田水利建设导则[Z]. 银川: 宁夏回族自治区水利厅, 2012.
- [7] 丁鲁强, 李大勇, 陈福全. 土工格栅与饱和细砂的界面特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(11): 101-106.
- [8] 刘开富, 许家培, 周青松, 等. 土工格栅-土体界面特性大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 185-188.

- [9] 魏红卫, 喻泽红, 邹银生. 土工合成材料加筋土抗剪作用的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 555-562.
- [10] 凌天清, 周滨, 吴春波, 等. 筋土界面摩擦特性影响因素分析[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 7-12.
- [11] 任秋兵, 王艳巧, 李娴, 等. 土工袋参数对土质边坡加固效果及特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3215-3221.
- [12] 符思华, 刘小文, 刘星志, 等. 尾矿充填模袋界面摩擦性能试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 83-88.
- [13] 谢宝璋, 张向东, 杜常博. 不同含水率下尾矿与土工格栅界面特性的试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 127-133.
- [14] 刘湘元, 彭立, 杜勇立, 等. 有纺土工布与粘土的界面摩擦特性试验研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 229-232.
- [15] 熊甜甜, 廖红建, 杨博, 等. 加筋土筋土界面抗剪强度影响因素试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 629-634.
- [16] 易富, 杜常博, 张利阳. 金尾矿与土工格栅界面摩擦特性的试验[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2217-2221.
- [17] 水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [18] 国家质量技术监督局. 土工布及其有关产品摩擦特性的测定第1部分(直接剪切试验): GB/T 17635.1—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

(责任编辑 尹美娥)