

加筋软岩粗粒土路堤填料大型三轴试验研究

徐望国^{1, 2}, 张家生¹, 贺建清²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为研究加筋粗粒土填料的强度变形特性及加筋效果, 进行加筋强风化软岩粗粒土固结不排水和固结排水大三轴试验。试验表明: 加筋填料的应力-应变关系表现为应变硬化型; 轴向应变较小($\epsilon_a < 1\%$)时, 加筋填料效果不明显, 随着轴向应变的逐渐增大加筋效果逐渐发挥。加筋填料的孔隙水压力均高于素填料, 随着加筋层数的增加均有不同程度的提高。加筋效果系数均 > 1.0 , 一层加筋填料加筋效果系数为 1.09~1.21, 二层加筋填料加筋效果系数为 1.30~1.71, 三层加筋填料加筋效果系数为 1.31~1.72。加筋前后填料的内摩擦角 ϕ 基本不变, 填料的黏聚力增大。加筋填料的本构关系可以用 Duncan-Chang 模型来描述, 依据试验结果求得模型参数。

关键词: 土力学; 路基填料; 软岩粗粒土; 加筋土; 大型三轴试验

中图分类号: TU 192

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)03 - 0535 - 07

RESEARCH ON LARGE-SCALE TRIAXIAL TESTS ON REINFORCED SOFT ROCK COMPOSED OF COARSE-GRAINED SOIL AS EMBANKMENT FILLINGS

XU Wangguo^{1, 2}, ZHANG Jiasheng¹, HE Jianqing²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: In order to study the strength and deformation properties of soft rock composed of coarse-grained soil, as well as its reinforcement effect as fillings, large-scale consolidated drained and undrained triaxial tests are carried out for reinforced intense-weathered rock. The results show that the stress-strain relationship of geotextile-reinforced fillings is of strain hardening. The geotextile-reinforced fillings have little effect while the triaxial strain is less than 1%, and the reinforcing effect becomes more remarkable with the increase of triaxial strain. The pore water pressures of geotextile-reinforced soil samples are higher than those of pure coarse-grained soil samples; and they increase with the increase of geotextile layers. The coefficients of reinforcing effect are all more than 1.0, being 1.09 - 1.21 while with one layer of geotextile; 1.30 - 1.71 with two layers of geotextile and 1.31 - 1.72 with three layers of geotextile. The internal friction angle ϕ of fillings before and after reinforcements is nearly constant, while the cohesion force of the fillings increases with the increase of geotextile layers. The constitutive relation can be described with the Duncan-Chang model; and the parameters of Duncan-Chang model for geotextile-reinforced soil are obtained through tests.

Key words: soil mechanics; embankment fillings; soft rock composed of coarse-grained soil; geotextile-reinforced soil; large-scale triaxial test

收稿日期: 2009 - 08 - 10; **修回日期:** 2009 - 10 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874043)

作者简介: 徐望国(1964 -), 男, 博士, 1989年毕业于湘潭矿业学院地质勘察专业, 现任副教授, 主要从事道路工程领域方面的教学与研究工作。
E-mail: kongci618@tom.com

1 引言

随着我国高速公路建设不断向山区延伸，面临的地形地质条件更加复杂，路基高填深挖工程和隧道工程不可避免。由于山区缺乏优良的土质填料，同时为了充分利用路堑和隧道开挖产生的弃渣，减少弃渣对沿线生态环境的破坏和诱发地质灾害，填方路堤将成为山区高等级公路较普遍的路基型式^[1]。在路堤填料中加铺土工合成材料，不仅可以增加边坡的稳定性和路堤整体性，同时还可以改变坡比，适当提高边坡坡度，减少土方、节约占地、降低工程造价，是一项很有发展前途的工程措施^[2~4]。

国内外对加筋砂性土的研究相对较多，得出了不少有益结论。而对于加筋软岩粗粒土，因其崩解泥化，透水性相对较差，孔隙水不能迅速排出，固结需要较长的时间，尤其在施工期短，或在快速施荷条件下，固结排水并不充分，由于孔隙水压力的影响，筋材与土体的作用相对复杂^[5~7]。因此，进行不排水条件下的加筋土三轴试验，考虑排水条件和土体饱和度等因素对加筋黏性土体的强度和变形特性以及加筋效果的影响很有必要。

本文模拟山区公路路堤加筋工况，分别进行了加不同间距的土工格栅与不加土工格栅的软岩粗粒土的固结不排水大三轴试验，以对比研究加筋前后软岩粗粒土的应力-应变关系、强度特性、破坏形态及加筋效果；同时通过固结排水大三轴试验，对加筋软岩粗粒土的变形特性和模型参数进行了研究。

2 试验方案

2.1 试验土样

试验土样取自张桑公路 K34+970~K35+070 段高填路堤中使用的填料，为灰黄色强风化泥质页岩碎石料，几何形状极不规则，呈棱角状，其典型的颗粒级配曲线如图 1 所示。

加筋材料为山东肥城联谊工程塑料有限公司生产的型号为 GSZ80-80 的钢塑双向土工格栅，其拉伸力学指标见表 1。

为保证试样在试验过程中呈饱和状态，先将试样放在桶中泡水，让其充分崩解，然后沥干，测定其含水率，按 95% 的压实度控制干密度，计算并称取试验所需要的土样，分 3 层装料振实成形，在试样制备过程中每层格栅按“井”字型摆放。

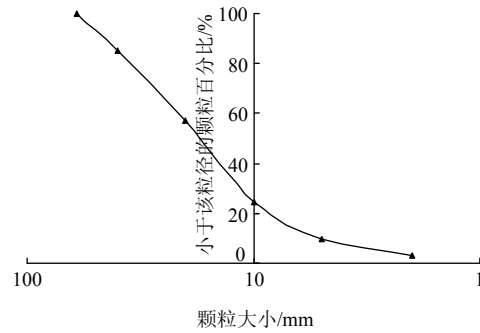


图 1 填料的颗粒级配曲线

Fig.1 Test granule gradation curve of granular soil fillings

表 1 加筋材料拉伸力学指标

Table 1 Tensile parameters of geotextile samples

极限抗拉强度 (/kN·m ⁻¹)		断裂伸长率 /%		2%伸长拉伸力 (/kN·m ⁻¹)	
纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
81.2	2.5	82	2.8	68.3	68.9

2.2 试验方案

试验仪器采用 SZ30-4 型大型高压三轴剪切仪，试样高 $H=600\text{mm}$ ，直径 $D=300\text{mm}$ 。试验按加筋情况共分 4 组：素填料、单层加筋、二层加筋、三层加筋，等间距布筋，试样布筋情况如图 2 所示，具体试验内容见表 2。

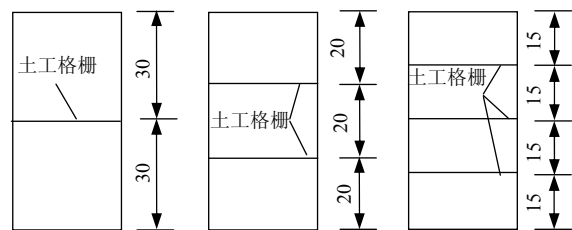


图 2 大型三轴试验的试件(单位: cm)

Fig.2 Specimens of large-scale triaxial shear test(unit: cm)

表 2 加筋填料大三轴试验内容

Table 2 Testing plan of geotextile-soil in large-scale triaxial shear tests

试验方法	土类名称	干密度 ρ_d (/g·cm ⁻³)	固结围压 σ_3/kPa
固结不排水 剪切试验	素填料	1.84	50, 100, 150, 200
	单层加筋土	1.84	50, 100, 150, 200
	双层加筋土	1.84	50, 100, 150, 200
固结排水 剪切试验	素填料	1.84	50, 100, 150, 200
	单层加筋土	1.84	50, 100, 150, 200
	双层加筋土	1.84	50, 100, 150, 200
	三层加筋土	1.84	50, 100, 150, 200

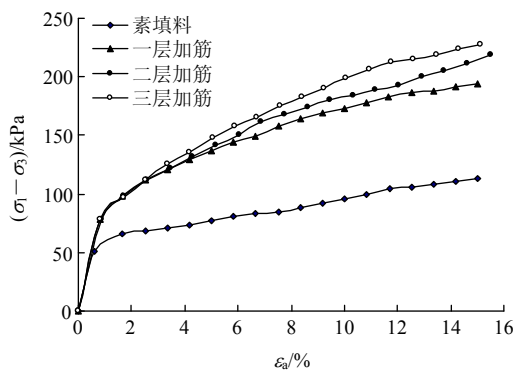
试样安装完成后先进行抽气饱和, 当排水管中无气泡后进行水头饱和, 饱和时间在 20 h 以上, 待饱和度达到 99%后, 施加围压进行固结排水, 同时量测固结排水量, 精度控制为 0.1 mL, 直至排水量趋于稳定。

3 试验结果分析

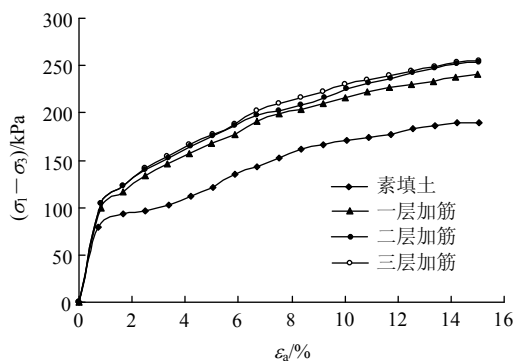
3.1 应力 - 应变关系

按试验设计方案, 此次大型三轴试验历时 30 d, 取得了一系列试验数据。其中, 不同围压下强风化软岩填料素土与加筋土填料主应力差与轴向应变的关系曲线如图 3 所示。

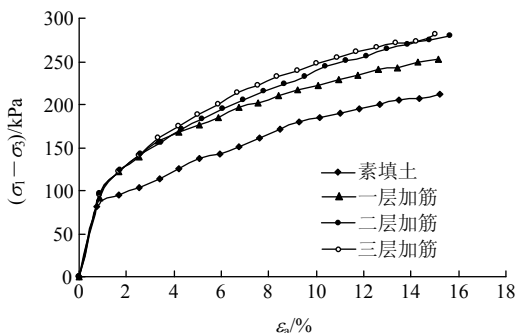
试验表明当轴向应变较小($\epsilon_a < 1\%$)时, 加筋填料与素填料的应力与应变关系曲线很接近; 随着轴向应变的逐渐增大, 加筋填料与素填料的应力与应



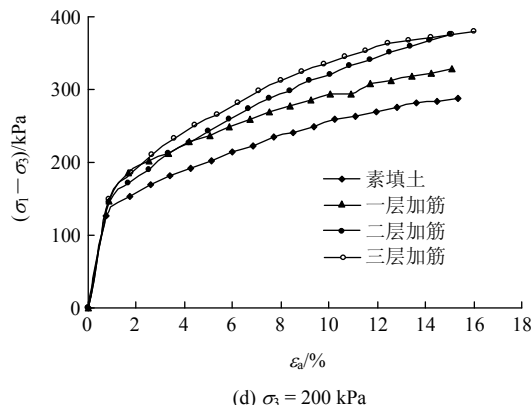
(a) $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$



(d) $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$

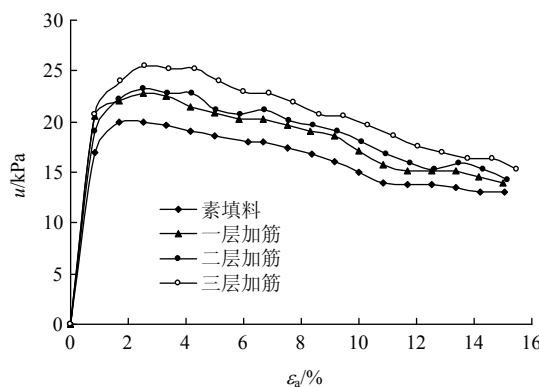
图 3 主应力差与轴向应变关系(CU 试验)

Fig.3 Relationship between principal stress difference and axial strain(CU test)

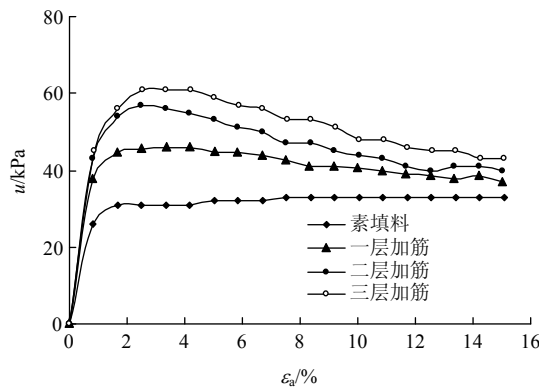
变关系曲线距离逐渐加大, 说明加筋作用只有当轴向应变较大时才比较明显。且不论加筋与否, 主应力差随轴向应变的增大而增大, 没有明显的峰值, 应力 - 应变关系表现为应变硬化型。

3.2 孔隙水压力变化

在固结不排水条件下, 加筋是否对孔隙水压力有所影响, 也是本试验研究的主要内容。试验结果表明了不同围压下强风化软岩填料试件加筋前后在剪切过程中孔隙水压力与轴向应变关系(见图 4)。



(a) $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$

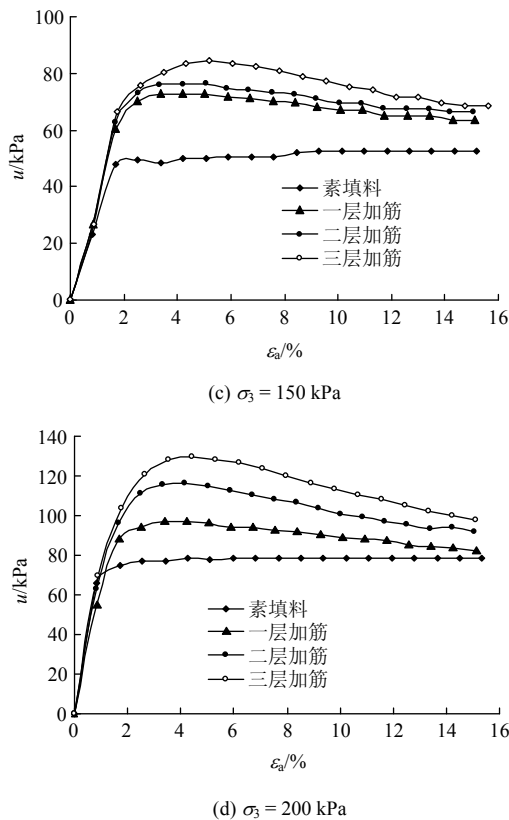


图4 孔隙水压力与轴向应变关系

Fig.4 Relationship between pore water pressure and axial strain

由图4可以看出,在固结不排水试验过程中存在较大的超静孔隙水压力,并随着围压的增加逐渐增大。在轴向应变相同的条件下,加筋填料的孔隙水压力均高于素填料,随着加筋层数的增加均有不同程度的提高。填料加筋时,加荷初期,孔隙水压力随着轴向应变线性增加,直至出现峰值,然后缓慢降低,最后逐渐趋于水平,表现出较大的剪胀性。不加筋时,孔隙水压力与轴向应变的关系曲线在低围压下(50 kPa)有明显的峰值,但随着围压的提高,表现为加荷初期随轴向应变线性增加,然后逐渐趋于水平。

3.3 填料加筋效果

为了更好地评价固结不排水条件下强风化软岩填料的加筋效果,引入评价土工合成材料加筋效果的强度加筋效果系数 R_σ :

$$R_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (1)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R$ 为加筋填料的破坏主应力差, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为不加筋填料的破坏主应力差。由于不论加筋与否,填料的应力-应变关系为硬化型,主应力差没有出现峰值,取 $\epsilon_a = 15\%$ 时的主应力差为其

破坏主应力差^[8]。图5为试验得到的强度加筋效果系数与围压的关系。

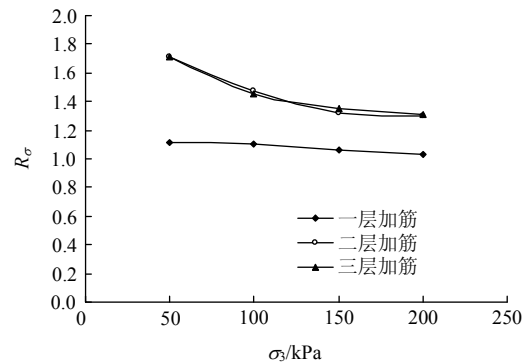


图5 强度加筋效果系数与围压的关系

Fig.5 Relationship between geotextile reinforced effect coefficient and confining pressure

从图5中可以看出,在不同围压下,加筋填料的强度加筋效果系数均 > 1.0 , 达到最大主应力差时,加筋填料的强度明显高于素填料。一层加筋填料较素填料破坏强度提高了 $1.09 \sim 1.21$, 二层加筋填料较素填料破坏强度提高了 $1.30 \sim 1.71$, 三层加筋填料较素填料破坏强度提高了 $1.31 \sim 1.72$, 说明在固结不排水条件下,土工合成材料可以提高强风化软岩填料的抗剪强度。本次试验结果表明,二层、三层加筋效果好于一层加筋,三层加筋效果与二层加筋很接近,主要原因是三层加筋填料的第一、三加筋层距试样上下端部较近,受端部边界效应影响,试样端部侧向变形较小,筋带作用小。随着围压逐渐增大,土工合成材料的强度加筋效果系数 R_σ 逐渐减小,这是由于围压较低时,其剪胀势较大,而加筋能明显限制土样的侧向膨胀,从而达到提高复合体强度的目的,在高围压下,试样的剪胀势较弱,限制了填料的侧向外移,因而加筋效果有所降低。图6为破坏的大三轴试验试件。



图6 破坏的大三轴试验试件

Fig.6 Damaged specimen of large-scale triaxial shear test

3.4 抗剪强度指标分析

目前对土工合成材料的加筋机制有 2 种理论的解释, 即等效围压原理和准黏聚力原理。其中等效围压原理^[9~11]中:

$$(\sigma_1)_f^R = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3)K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_3 = \frac{T_f}{\Delta H} \quad (3)$$

准黏聚力原理^[12]中:

$$(\sigma_1)_f^R = \sigma_3 K_p + 2(c + c_R)\sqrt{K_p} \quad (4)$$

$$c_R = \frac{T_f \sqrt{K_p}}{2\Delta H} \quad (5)$$

$$K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6)$$

式中: $\Delta\sigma_3$ 为等效围压; $(\sigma_1)_f^R$ 为加筋土破坏时的大主应力; σ_3 为围压; K_p 为被动土压力系数; c , ϕ 分别为素土的黏聚力和内摩擦角; T_f 为加筋土破坏时单位宽度上的等效拉力; ΔH 为筋的间距。

图 7 为各种填料的抗剪强度包线, 其强度指标见表 3。

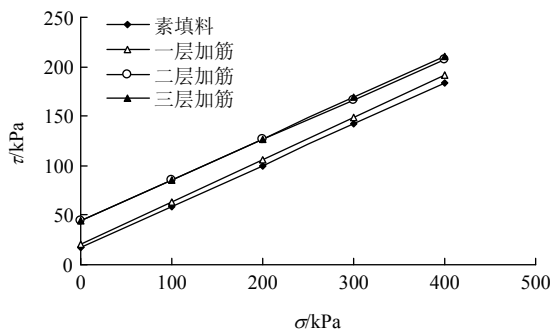


图 7 各种填料的抗剪强度包线

Fig.7 Shearing strength envelope curves of geotextile-soil samples

表 3 各种填料的抗剪强度指标

Table 3 Shearing strength parameters of geotextile-soil samples

填料种类	总应力法		有效应力法	
	c/kPa	$\phi/(^\circ)$	c'/kPa	$\phi'/(^\circ)$
素填料	16.94	22.58	10.46	30.60
加一层筋填料	20.10	23.26	11.76	33.26
加二层筋填料	44.93	22.13	27.84	33.84
加三层筋填料	43.66	22.66	26.89	34.67

从图 7 和表 3 中可以看出, 不论填料加筋与否, 其莫尔-库仑强度包线近乎平行, 即加筋前后填料的内摩擦角 ϕ 值基本相同。由于加筋作用, 填料黏聚力 c 值有不同程度的提高, 加筋填料强度的提高主要体现在增大了填料的黏聚力。显然, 准黏聚力原理仍适用于加筋强风化软岩填料。

4 Duncan-Chang 模型参数

Duncan-Chang 模型属于非线性弹性模型, 是基于虎克定律并根据三轴压缩试验成果提出的, 包括 E-v 模型和 E-B 模型^[13, 14]。E-v 模型和 E-B 模型均假定偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ϵ_a 成双曲线关系, 切线弹性模量的计算公式和模型参数都是相同的。这 2 个模型的差别在于对体变的描述不同: E-v 模型假设轴向应变 ϵ_a 与侧向应变 ϵ_s 满足双曲线关系, 而 E-B 模型则假设体应变 ϵ_v 与轴向应变 ϵ_a 满足双曲线关系, 由 2 个模型对体变特性的不同假设, 可推得不同的切线泊松比 ν_t 的计算公式。

大量的三轴试验结果^[15, 16]表明, 加筋填料的主应力差随轴向应变的增加, 开始增加较快, 而后增长速率逐渐变缓, 呈现双曲线的形态, 应力-应变曲线主要为硬化型。只有高密度、低围压下, 粗颗粒较多才出现应变软化状态, 此时剪切过程中出现剪胀现象; 对于低密度、高围压, 粗颗粒愈少, 愈容易出现应变硬化现象。由于强风化软岩填料粗颗粒较软, 容易破碎, 且一般含有一定细颗粒, 所以即使有剪胀现象, 主应力差的峰值强度与峰值后的残余强度相差也较小(见图 8)。这表明加筋填料的强度和切线模量仍可根据 Duncan-Chang 模型来合理地确定。

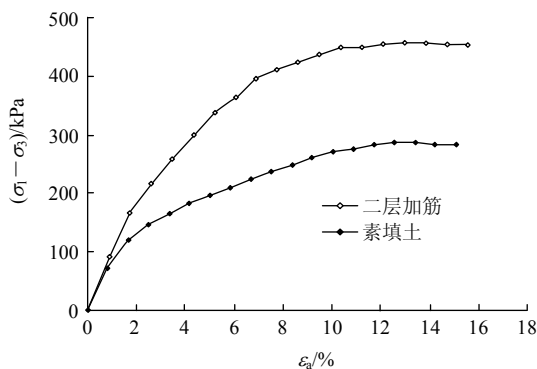


图 8 主应力差与轴向应变关系(CD 试验, $\sigma_3 = 100$ kPa)

Fig.8 Relationship between principal stress difference and axial strain(CD test, $\sigma_3 = 100$ kPa)

图 9 给出了加二层筋填料三轴试验测得的 ε_a 和 $-\varepsilon_3$ 关系曲线, 而图 10 给出了 $-\varepsilon_3/\varepsilon_a$ 与 $-\varepsilon_3$ 的关系, 并采用直线进行拟合。从图 10 中可以看出, $-\varepsilon_3/\varepsilon_a$ 与 $-\varepsilon_3$ 存在显著的线性相关性。也就是说, ε_a 与 $-\varepsilon_3$ 表现出明显的双曲线性, 这意味着 ε_a 与 $-\varepsilon_3$ 关系的双曲线假设适用于加筋与不加筋强风化软岩填料, E-v 模型能较准确地描述其体变特性。

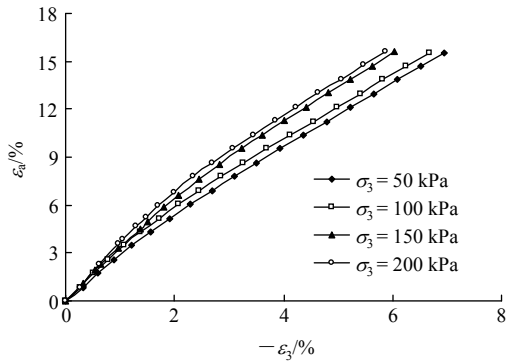


图 9 ε_a 与 $-\varepsilon_3$ 的关系曲线

Fig.9 Relation curves between ε_a and $-\varepsilon_3$

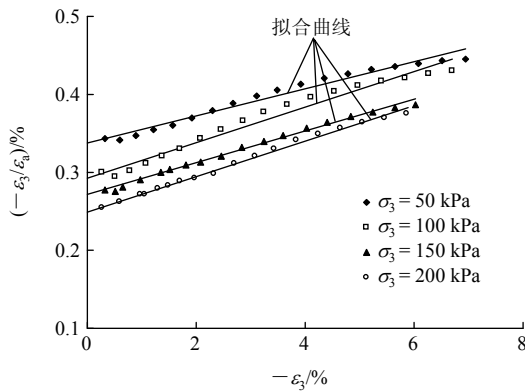


图 10 $-\varepsilon_3/\varepsilon_a$ 与 $-\varepsilon_3$ 的关系曲线

Fig.10 Relation curves between $-\varepsilon_3/\varepsilon_a$ and $-\varepsilon_3$

由 Duncan-Chang 模型, 切线模量 E_t 和切线泊松比 ν_t 的计算公式^[17, 18]为

$$E_t = E_i \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 \quad (7)$$

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (8)$$

$$\nu_t = \frac{\nu_i}{\left\{ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]} \right\}^2} \quad (9)$$

$$\nu_i = G - F \lg(\sigma_3 / p_a) \quad (10)$$

式中: E_i 为起始变形模量; p_a 为大气压(101.4 kPa); K, n 均为模量参数, K 是确定 E_i 的主要参数, n 反映 E_i 随 σ_3 的变化程度; R_f 称为破坏比, 反映软岩填料抗剪强度与极限强度之比; c 和 ϕ 反映填料强度大小; D, G, F 为泊松比参数, D 反映泊松比随 σ_3 增大的比率, G 是确定 ν_i 的主要参数, F 反映 ν_i 随 σ_3 的变化比率。上述参数均可由试验结果整理得到。

依据本试验结果求得了 Duncan-Chang 模型参数, 表 4 列出了强风化软岩填料及不同加筋层时的 Duncan-Chang 模型参数。

表 4 Duncan-Chang 模型参数

Table 4 Parameters of Duncan-Chang model

参数	c/kPa	$\phi(^{\circ})$	R_f	K	n	D	G	F
素土	9.01	33.3	0.65	55	0.502	0.012	0.325	0.125
加一层筋	35.50	33.7	0.61	85	0.203	0.021	0.277	0.050
加二层筋	39.60	34.5	0.53	97	0.275	0.022	0.203	0.080
加三层筋	41.20	33.5	0.51	105	0.211	0.032	0.201	0.060

5 结 论

(1) 试验应力 - 应变关系表现为应变硬化型, 试验表明当轴向应变较小($\varepsilon_a < 1\%$)时, 加筋填料与素填料的应力 - 应变关系曲线很接近, 随着轴向应变的逐渐增大, 加筋填料与素填料的应力 - 应变关系曲线距离逐渐加大, 说明加筋作用只有当轴向应变较大时才比较明显。

(2) 在轴向应变相同的条件下, 加筋填料的孔隙水压力均高于素填料, 随着加筋层数的增加均有不同程度的提高。

(3) 加筋效果明显, 在不同围压下, 加筋填料的强度加筋效果系数均 > 1.0 , 达到最大主应力差时, 加筋填料的强度明显高于素填料。一层加筋填料加筋效果系数 1.09~1.21, 二层加筋填料加筋效果系数 1.30~1.71, 三层加筋填料加筋效果系数 1.31~1.72。

(4) 准黏聚力原理仍适用于加筋强风化软岩填料, 试验结果表明加筋前后填料的内摩擦角 ϕ 值基本相同, 加筋填料强度的提高主要体现在增大了填料的黏聚力。

(5) 加筋填料的本构关系可以用 Duncan-Chang 模型来描述, 依据试验结果求得了 Duncan-Chang 模型参数。

参考文献(References):

- [1] 杨成忠. 陡坡上高填石路堤稳定性和沉降观测理论及应用研究[博士学位论文][D]. 南京: 南京林业大学, 2008.(YANG Chengzhong. Study on the theory and application of stability analysis and settlement prediction for high rockfill abrupt slope embankment[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.(in Chinese))
- [2] 宝华富, 周亦唐, 赵川, 等. 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 217 - 221.(BAO Huaifu, ZHOU Yitang, ZHAO Chuan, et al. Study of geogrid reinforced stone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 217 - 221.(in Chinese))
- [3] KOERNER R M. Emerging and future development of geosynthetic applications[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 126(4): 293 - 306.
- [4] 魏红卫. 加筋高陡路堤稳定性及其涵管受力特性研究[博士学位论文][D]. 长沙: 湖南大学, 2005.(WEI Hongwei. Analysis of abrupt reinforced embankment stability and the performances of culvert[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Hunan University, 2005.(in Chinese))
- [5] 赵明华, 刘晓明, 苏永华. 含崩解软岩红层材料路用工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 667 - 671.(ZHAO Minghua, LIU Xiaoming, SU Yonghua. Experimental studies of engineering properties of red bed material containing slaking rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 667 - 671.(in Chinese))
- [6] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 复杂应力下强风化软岩湿化变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 925 - 930.(LIU Xinxi, XIA Yuanyou, LIU Zude, et al. Experimental study of slaking deformation of intense weathering soft rock under complicated stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 925 - 930.(in Chinese))
- [7] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 强风化软岩路基填筑适宜性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 903 - 907.(LIU Xinxi, XIA Yuanyou, LIU Zude, et al. Study of suitability for embankment of high weathered soft rock subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 903 - 907.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E40 - 2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.(The Professional Compilation Group of People's Republic of China. JTG E40 - 2007 Test method of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.(in Chinese))
- [9] JEWELL R A. Reinforcement bond capacity[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 513 - 518.
- [10] ABRAMENTO M. Analysis of pullout tests for planar reinforcements in soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 12(6): 476 - 785.
- [11] SRIDHARAN A, SINGH H R. Effect of soil parameters on the friction coefficient in reinforced earth[J]. Indian Geotechnical Journal, 1988, 18(1): 323 - 329.
- [12] 保华富, 龚涛. 土工格栅加筋碎石土的强度和变形特性[J]. 水利学报, 2001, (6): 76 - 79, 85.(BAO Huaifu, GONG Tao. The effects of reinforcement on strength and deformation of soil-gravel material[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (6): 76 - 79, 85.(in Chinese))
- [13] 赵川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 419 - 422.(ZHAO Chuan, ZHOU Yitang. Experimental study of polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 419 - 422.(in Chinese))
- [14] 李晓俊, 白晓红, 黄仙枝. 土工带加筋碎石土本构关系的三轴研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 57 - 60.(LI Xiaojun, BAI Xiaohong, HUANG Xianzhi. Experimental study of constitutive relation of geobelt reinforced crushed gravel under triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 57 - 60.(in Chinese))
- [15] ANDRAWES K Z, MCGOWN A. Tension resistant inclusions in soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, 106(GT12): 1 313 - 1 326.
- [16] 刘松玉, 童立元, 邱钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 505 - 510.(LIU Songyu, TONG Liyuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 505 - 510.(in Chinese))
- [17] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.(LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.(in Chinese))
- [18] 黄仙枝, 白晓红. 土工带加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 124 - 128.(HUANG Xianzhi, BAI Xiaohong. Experimental study on geobelt reinforced gravel by large-scale triaxial test[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 124 - 128.(in Chinese))