

# 格宾网加筋红砂岩粗粒土的强度和变形特性

蒋建清<sup>1,2</sup>, 杨果林<sup>1</sup>, 李 昀<sup>1</sup>, 许桂林<sup>1</sup>, 王亮亮<sup>1</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

**摘要:** 开展了不同加筋层数、不同压实度、不同含水率的格宾网加筋红砂岩粗粒土大三轴试验, 分析格宾网层数、试样含水率和压实度对红砂岩粗粒土应力应变关系、强度和变形特性的影响, 引入强度比参数评价加筋效果, 并与土工格栅加筋方案进行对比。试验结果表明: 格宾网加筋能明显提高红砂岩粗粒土的峰值强度和土体延性; 格宾网加筋使红砂岩粗粒土的黏聚力大幅提升, 但其内摩擦角提高幅度不大; 在同一压实度下, 加筋和未加筋土体的黏聚力随含水率变化呈现非线性变化关系, 且在最佳含水率附近达到峰值; 在同一含水率下, 黏聚力和内摩擦角随试样压实度的增加而增大; 加筋效果与加筋层数、土体含水率和压实度有关, 格宾网加筋的作用发挥随围压增大而减小。

**关键词:** 强度; 变形; 大三轴试验; 格宾网; 加筋土; 红砂岩粗粒土

中图分类号: TU472.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)07-1079-08

**作者简介:** 蒋建清(1979-), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程和结构工程方面的研究。E-mail: lh201314@163.com。

## Strength and deformation characteristics of red-sandstone granular soil reinforced with gabion mesh

JIANG Jian-qing<sup>1,2</sup>, YANG Guo-lin<sup>1</sup>, LI Yun<sup>1</sup>, XU Gui-lin<sup>1</sup>, WANG Liang-liang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract:** Large-scale triaxial tests are carried out on gabion mesh reinforced red-sandstone granular soil with different reinforcement layers, compaction degrees and water contents. The effects of gabion mesh reinforcement layers, water content and compaction on the stress-strain relationship and strength properties of red-sandstone granular soil are analyzed. The reinforcing effects are evaluated by introducing the strength ratio parameter. A comparison between the geogrid and the gabion mesh reinforced red-sandstone granular soil is conducted. The experimental results show that the peak strength, cohesion and ductility of the red-sandstone granular soil are obviously improved by gabion mesh reinforcements, but its internal friction angle is not greatly improved. The cohesions of the reinforced soil and the plain soil exhibit non-linear relationships with their water content under the same compaction, moreover, there is a maximum value near the optimum water content. The cohesion and internal friction angle increase with the increase of compaction under the same water content. The reinforcing effect relates with the number of gabion mesh layers, water content and compaction of soil, and the effect of the gabion mesh reinforced soil decreases with the increase of the confine pressure.

**Key words:** strength; deformation; large-scale triaxial test; gabion mesh; reinforced soil; red-sandstone granular soil

## 0 引 言

红层软岩主要是指侏罗纪到新近纪的陆相红色岩系, 岩性为泥岩、砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩、粉砂岩等, 俗称红砂岩。除台湾省外, 中国其它省市均有红层分布<sup>[1]</sup>, 那么它必然是土木工程建设中不可避免的一类岩土体。工程实践表明<sup>[2-4]</sup>, 区域性分布的红层软岩土已经对既有公路、铁路的路基和边坡工程产生了不同程度的不良影响, 例如, 对湖南省境内多条高速公路在营运期间路面破损状况进行统计, 发现红砂

岩粗粒土填土路基路段存在较多的路面结构破坏病害<sup>[5]</sup>, 给行车舒适性和安全性造成了极不利的影 响。因此, 如何提高红砂岩粗粒土路基承载能力、稳定能力和减小其变形显得非常重要, 加筋技术为之提供了一条可靠的途经。工程实践证明<sup>[6-10]</sup>, 运用加筋土技术处理路堤边坡, 明显改善路堤内部的应力分布和减

基金项目: 湖南省科技厅科技项目(200612)

收稿日期: 2009-04-08

少边坡的裂隙,从而增加边坡的稳定性和路堤整体性,减少土方、节约占地、降低工程造价和利于环境保护。

然而,要在红砂岩粗粒土中合理地运用加筋技术,则需正确评价其加筋体的强度与变形特性。自从1970年开始,国外许多学者用三轴、直剪和拉拔试验对加筋土的强度和变形进行了研究<sup>[11-15]</sup>,填料主要是砂土,加筋材料基本都是土工织物;国内学者近年来也进行了这方面的试验研究<sup>[16-20]</sup>。但采用大型三轴仪对格宾网加筋红砂岩粗粒土进行试验研究尚未见相关文献,用格宾网加强红砂岩粗粒土的加筋效果如何、其强度和变形特性如何等,这些问题尚需进一步研究。

鉴于此,本文通过室内大三轴试验,研究格宾网加筋红砂岩粗粒土的强度和变形特性,分析格宾网加筋层数、填料含水率、压实度、围压等对其强度和变形的影响,并对加筋和未加筋红砂岩粗粒土的应力应变特性进行对比,探讨加筋效果。给红层地区红层软岩填料利用及其加筋处治提供重要参考。

## 1 室内大三轴试验

### 1.1 试验概况

在中南大学岩土实验室大三轴试验仪器上完成所有试样的三轴试验,试验设备如图1所示。试验仪器的主要结构包括压力室系统、量测系统、加压系统三部分。压力室内土样饱和采用上端排水,并与排水测量管连接。压力室下端与孔隙水压力量测元件连接,可以观测试验过程中土样孔隙水压力变化。量测系统在试验过程中,量测土样随时间变化的轴向压力、围压、孔隙水压力、土样轴向应变以及体积应变等。加压系统提供稳定的试验围压和试验轴压。

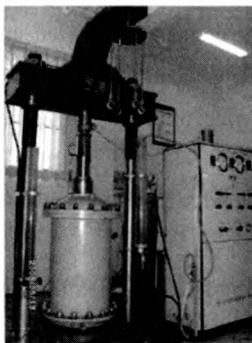


图1 大三轴试验装置

Fig. 1 Large-scale triaxial test device

本次实验主要进行了未加筋和格宾网加筋红砂岩粗粒土不固结不排水大三轴试验,三轴试样尺寸统一为高度600 mm、直径300 mm,主要试验工况汇总在表1。目前,关于土工格栅在加筋土工程中应用的报

道比较多。因此,为比较格宾网加筋试样与土工格栅加筋试样的加筋效果、以及丰富红砂岩填料加筋加固方案,同时制作了土工格栅加筋红砂岩粗粒土三轴试样,进行了部分试验工况的对比试验,限于篇幅,仅选用含水率14%、压实度93%条件下格宾网(二层)加筋试样与土工格栅(二层)加筋试样的结果进行对比分析。

表1 主要试验工况

Table 1 Main test cases

试验工况序号	加筋材料	含水率/%	压实度/%	筋材布置	
				层数	每层高度/mm
1~5	无	14	87		
	无	14	90		
	无	14	93	—	—
	无	17	93		
	无	22	93		
6~12	格宾网	14	87	2	200
	格宾网	14	90	2	200
	格宾网	14	93	1	300
	格宾网	14	93	2	200
	格宾网	14	93	3	150
	格宾网	17	93	2	200
	格宾网	22	93	2	200

注:每一工况分别进行100, 200, 300, 400 kPa 4种围压的试验。

### 1.2 试验材料

红砂岩粗粒土选用湘南衡阳盆地红层软岩风化体,多为紫红色钙泥质砂岩,棱角锐,易风化,浸水易崩解,在外力作用下较易破碎。将其运至实验室风干,通过筛分试验测定风干土样的代表性级配(见图2),限制粒径 $d_{60}$ 和有效粒径 $d_{10}$ 分别为17.18 mm和0.9 mm,不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 分别为19.09和2.99,颗粒最大粒径60 mm,土样级配良好,制样时严格按照代表性级配称量各粒组土料质量用于试样配制。通过常规土工试验,测得红砂岩粗粒土的主要物理指标:液限 $w_L=34.5\%$ ,塑限 $w_p=22.5\%$ ,塑性指数 $I_p=12$ ,粗料含量 $P_5=44.6\%$ ,击实试验颗粒破碎率 $B_g=23.5\%$ ,最优含水率18.13%,最大干密度 $1.73 \text{ g/cm}^3$ 。从试验用红层软岩风化体的颗粒组成看,粒径大于0.075 mm颗粒含量质量大于总质量的50%,粒径在2~60 mm颗粒含量在85%左右,根据《土工试验规程》<sup>[21]</sup>,可将其归于砾类粗粒土,为表述方便,本文称之为红砂岩粗粒土。需要注意的是红砂岩粗粒土中的细粒含量会随时间逐渐增加,工程力学性质也将相应发生变化。

格宾网由双绞合金属丝六边形单元组成(钢丝直径为 2.2 mm), 用于试验中的格宾网单元如图 3 所示, 参照《公路土工合成材料试验规程》<sup>[22]</sup>, 通过拉伸试验测得格宾网在 2%, 5%, 10% 时的拉伸强度分别为 15.8, 19.9, 26.4 kN/m, 极限抗拉强度 34.7 kN/m, 最大负荷下的伸长率为 17.5%。土工格栅选用高密度聚乙烯单向整体拉伸格栅, 在每卷格栅中剪出用于试验的圆盘形土工格栅单元, 其直径略小于试样直径。

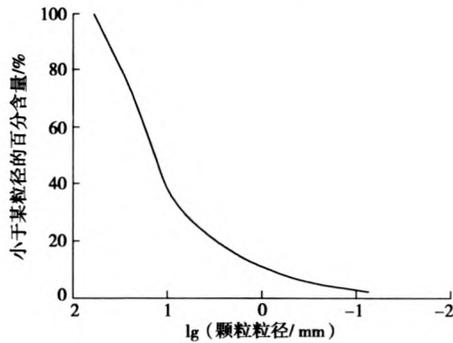


图 2 土样颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain size curve of red-sandstone granular soil

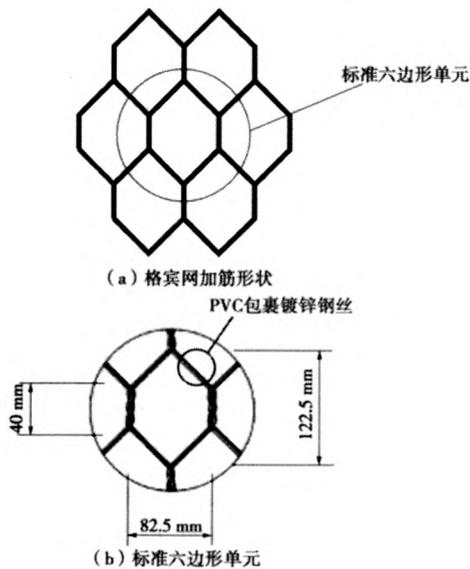


图 3 格宾网加筋单元

Fig. 3 Details of gabiion mesh element

### 1.3 试样制备和试验程序

首先, 打开三轴仪器底座进水阀门将底座充水, 在其上垫上土工布, 然后, 套上乳胶膜并将其扎紧在底座。接下来, 安装成型筒, 把乳胶膜临时固定在其上。之后, 紧贴乳胶膜内层放置两层橡皮膜, 以防止土样中的尖锐颗粒在击实和加载过程中刺破乳胶膜。

根据试样的含水率、压实度、试样体积以及土样代表性级配, 计算一个试样所需各粒组风干土样质量和达到规定含水率的加水量。所需水量均匀喷洒至土

样后, 用不透水橡皮膜将其覆盖适当长时间。每个试样的土料分层填入成型筒并用锤击实。筋材布置的位置如图 4 所示(土工格栅布置位置同格宾网)。土样按压实度要求击实成型后, 拆去成型筒, 测定其直径  $D_0$  及高度  $H_0$ , 在试样顶部放上顶帽, 并将其与乳胶膜扎紧。检查各进水、排水、排气线路后, 安装压力室, 向压力室充满水并将其密封, 将整个压力室移至加载装置处。

按文献[21]中关于粗粒土三轴试验的规定加载, 所有试样均加载至轴向应变达到 15%, 并按要求采集相关数据。

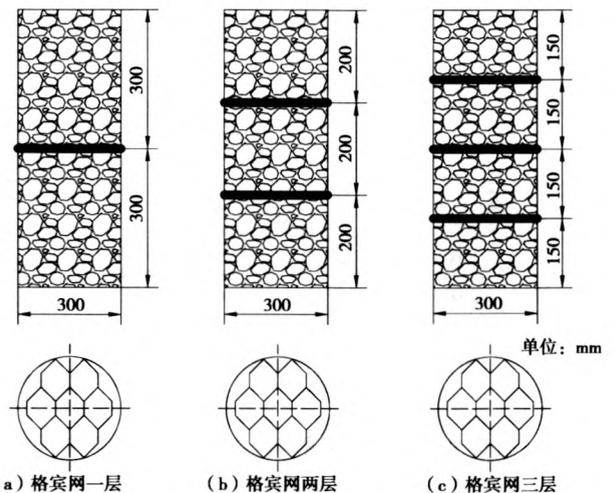


图 4 格宾网加筋层的布置

Fig. 4 Arrangement of gabiion mesh reinforcement layers

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 加筋层数对格宾网加筋红砂岩粗粒土强度和应力-应变特性的影响

图 5 (a) 为不同加筋层数的试件, 在 93% 压实度、围压 100 kPa 条件下的一组应力-应变曲线。由图可见, 轴向应变较小时, 格宾网加筋试样与素土试样的应力-应变曲线几乎重合。当轴向应变增大到 1.2% 左右时, 各应力-应变曲线逐渐开始分离, 说明筋材的作用要土体变形达到一定幅度后才发挥, 随后加筋试样主应力差随轴向应变增长逐渐增大; 而素土试样主应力差增大到一定程度后, 随轴向应变增长而逐渐降低, 呈随应变软化模式。因此, 加筋改变了红砂岩粗粒土的应力-应变特性, 加筋后土的应变软化得到改善, 土体延性提高。同样可以看出, 试样最大主应力差随着加筋层数的增加而增大, 峰值强度也相应得到一定幅度的提高。

从图 5 (b) 可知, 与素土试样相比, 格宾网加筋一、二、三层黏聚力分别增长 16, 34.87, 46.74 kPa, 加筋后试样的黏聚力得到不同幅度提高。但加筋对试

样内摩擦角的提高贡献不大,加筋后内摩擦角的增量范围为 $0^{\circ} \sim 4^{\circ}$ ,  $p-q$ 平面内的强度包络线基本平行(图中 $p, q$ 分别代表 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ,  $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 分别是最大轴压和围压)。

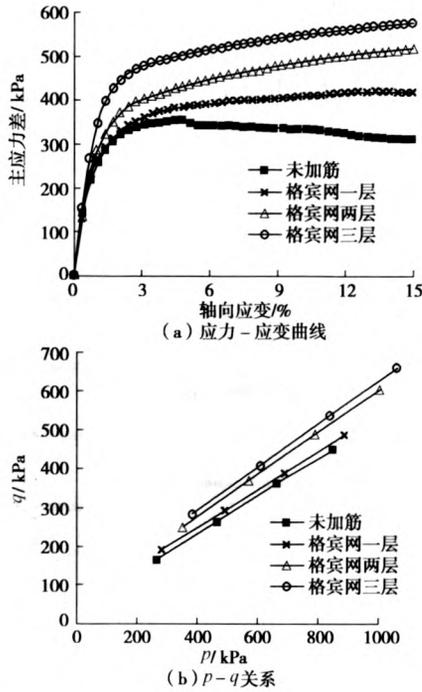


图5 加筋层数对强度和应力应变关系的影响

Fig. 5 Effect of reinforcement layers on strength and stress-strain

### 2.2 含水率对格宾网加筋红砂岩粗粒土强度和应力-应变特性的影响

为了比较直观地说明含水率对应力应变曲线的影响,绘制围压为100 kPa时不同含水率试样的应力-应变曲线,如图6(a)所示。在相同围压下,主应力差随含水率的增加而降低。含水率为14%时,加筋和未加筋试样最大主应力差分别为519 kPa和335 kPa;含水率为17%时,加筋和未加筋试样最大主应力差分别为440 kPa和300 kPa;当含水率提高到22%时,加筋和未加筋试样最大主应力差分别为350 kPa和258 kPa。可见,含水率的变化对加筋和未加筋试样的力学性质影响都比较大,其原因主要是:试样含水率越大,一方面红砂岩颗粒表面水膜就越厚,起到了润滑的作用,使得颗粒之间以及格宾网与颗粒之间的摩擦阻力就越小,从而压缩性就越强;另一方面,红砂岩颗粒在压缩时越易受到水的作用而解体、破碎,从而强度进一步降低。

从图6(b)、(c)可以看出,在同一压实度下,加筋试样和未加筋试样的黏聚力随含水率变化呈现非线性变化关系,且在最佳含水率附近达到峰值。当含水率小于最佳含水率时,黏聚力随含水率增加而增大,其增长幅度在加筋前后变化不大;当含水率大于最佳

含水率时,随含水率增加内聚力迅速减小,其减小趋势在加筋后更为明显。 $p-q$ 平面内试样强度包络线的倾角随含水率降低有少量的增加,其增长幅度在加筋前后变化不大。

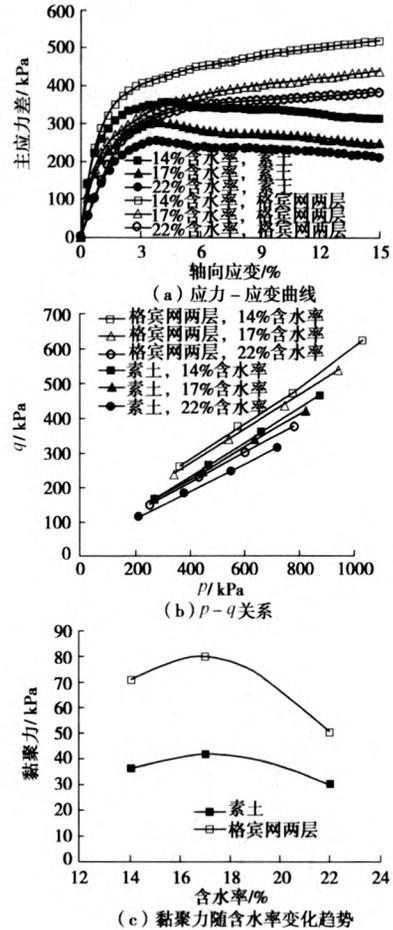


图6 含水率对强度和应力应变关系的影响

Fig. 6 Effect of water content on strength and stress-strain

### 2.3 压实度对格宾网加筋红砂岩粗粒土强度和应力-应变特性的影响

图7(a)为不同压实度的格宾网加筋红砂岩粗粒土试样,在围压100 kPa条件下的应力-应变曲线。对素土试样和加筋试样而言,其峰值应力均随压实度的提高而增加。在压实度为87%时,素土试样随着轴向应变的增大,主应力差逐渐增大,其应力-应变曲线呈现随应变硬化型;随着压实度的提高,素红砂岩试样的应力-应变曲线出现明显的峰值,峰值后强度降低,呈随应变软化型。可以看出,加筋后试样的应力应变曲线变得平缓,主应力差明显大于素土试样,与素土试样相比,格宾网加筋试样应力-应变曲线在低压实度和高压实度时均表现为明显的应变硬化型。其主要原因如下:当试样处于密实状态时,大小颗粒相互填充密实,颗粒挤得很紧,颗粒间的摩擦力大,在剪切破坏的过程中,颗粒在剪切面要发生移动或滚

动, 甚至翻越邻近颗粒, 发生剪胀变形, 克服剪胀变形做功的咬合力增大, 形成应力值增高, 至峰点达最大值; 但在峰点后, 因剪胀变形的增大, 结构变松, 剪胀变形引起的咬合力逐渐降低以至于消失, 形成应力减小现象, 这是素土试样在高压实度时应力应变关系呈软化型的主要原因。然而, 对于格宾网加筋试样, 在高压实度时格宾网六边形网孔的“环箍”效应有效约束试样剪胀变形, 使得其主应力随应变增长而逐渐增大。相反, 试样压实度低时, 剪切中呈剪缩变形, 试样密度逐渐增加, 应力值相应增高, 应力应变曲线表现为硬化型, 没有明显的峰值强度, 但相比之下强度较小。

从图 7 (b) 可以看出, 在同一含水率下, 格宾加筋试样和素土试样的强度参数 ( $c$  和  $\varphi$ ) 随试样压实度的增加而增大。当压实度从 87%~93%变化时, 加筋试样和未加筋试样的黏聚力变化范围分别为 39~70.87 kPa 和 26~36 kPa, 加筋试样黏聚力受土体压实度的影响程度大于非加筋试样; 加筋试样和未加筋试样的内摩擦角变化范围分别为 28°~33°、26°~30°, 压实度对试样内摩擦角也产生了一定的影响。

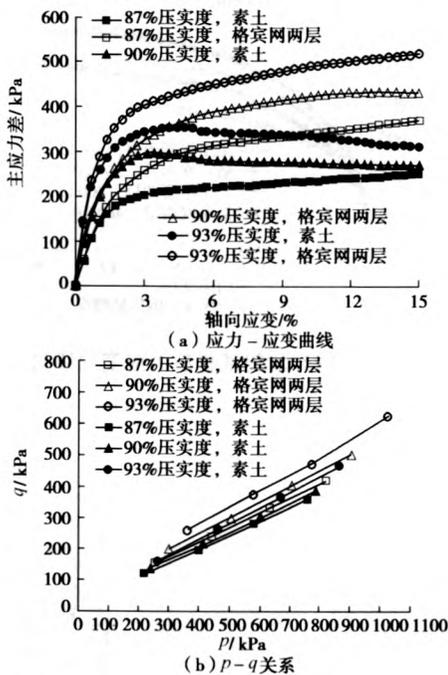


图 7 压实度对强度和应力应变关系的影响

Fig. 7 Effect of compaction on strength and stress-strain

### 2.4 围压对格宾网加筋红砂岩粗粒土应力 - 应变特性的影响

图 8 为 93%压实度的试样, 在不同围压作用下的一组应力 - 应变曲线。可以看出, 对于素土试样, 围压愈大, 在剪切过程中对土体颗粒的约束力越大, 应力达到最大值时的应变值越大, 应力应变关系为硬化

型; 相反, 围压越小, 对土颗粒的阻力越小, 在较小的应变下应力达到最大值, 应力应变关系呈软化型。由于格宾网对试样侧向变形和剪胀的约束, 加筋试样围压从 100 kPa 增长至 400 kPa, 其应力应变关系均呈硬化型。

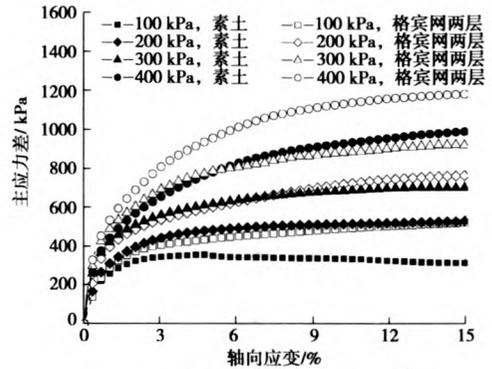


图 8 不同围压下加筋和未加筋试样应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of reinforced and unreinforced soil under different confining pressures

### 2.5 格宾网加筋效果

引入评价加筋效果的强度比参数  $R_\sigma$ , 并将其定义为  $R_\sigma = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$ , 其中  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f^R$  为格宾网加筋试样主应力差最大值,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为素红砂岩粗粒土试样主应力差最大值。根据上面的公式可计算出各组试样的强度比参数 (图 9)。可以看出:

(1) 格宾网加筋红砂岩粗粒土的强度比参数随着围压的增大而减小, 可见在低围压下加筋的效果更好。这是由于低围压时试样的侧向变形较大, 加筋材料发挥加筋作用比在高围压下要早些, 加筋对土体的约束力也越大, 所以加筋效果更好。

(2) 从图 9 (a) 可以看出, 随着加筋层数增加, 强度比参数不断增大。当加筋层数由一层变为二层时, 强度比参数增长幅度明显大于其由二层变为三层的情况, 这种规律当试样围压较大时变得缓和。

(3) 从图 9 (b)、(c) 可以看出, 在相同围压情况下, 强度比参数随试样压实度增加提高、随含水率增加而降低。

加筋试样和未加筋试样试验完成后 (均达到 15% 的轴向应变) 典型的状态如图 10 所示。

从侧面观察, 未加筋试样侧向变形中间大、上下端小, 其变化是渐变的, 呈鼓状; 格宾网加筋试样在筋材位置附近侧向变形明显减小, 清楚地表明格宾网对土体侧向变形的约束作用, 鼓胀程度降低。也就是说, 在同等轴向应变条件下, 格宾网加筋红砂岩粗粒土的侧向应变要小于未加筋土体的侧向应变, 那么在红砂岩粗粒土中铺设格宾网可以有效地约束土体的侧向剪胀

变形,从而可以增强土体的内部稳定性。这主要是两方面的原因:

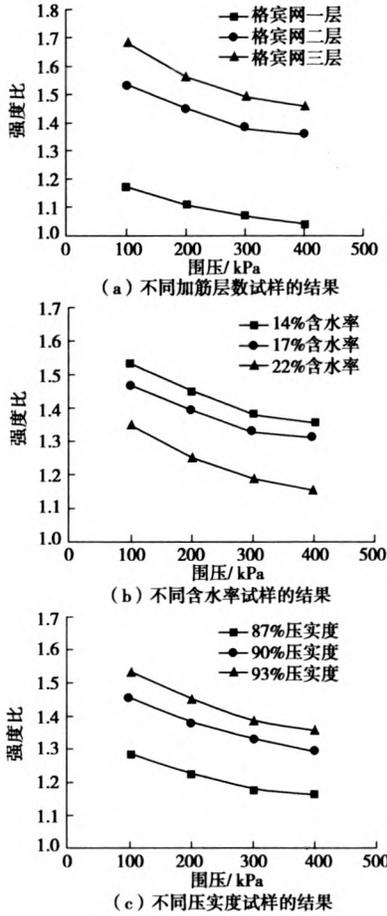


图9 强度比参数与围压关系图

Fig. 9 Strength ratios versus confining pressures

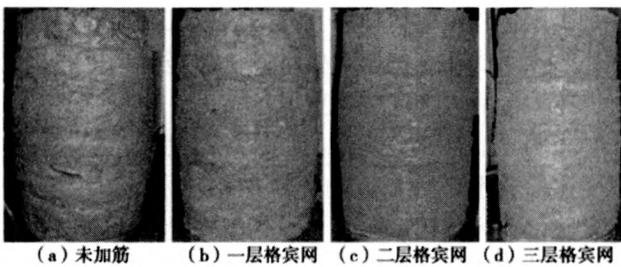


图10 格宾网加筋试样三轴试验后形态

Fig. 10 Configurations of specimens reinforced with gabion mesh after triaxial tests

(1) 因为加筋土是由土与筋材组成的复合体,它们共同受力、协调变形,当受到轴向荷载作用时,土体发生侧向膨胀,产生侧向剪应变,由于格宾网的弹性模量远高于土体的弹性模量,致使土体与格宾网之间产生相互错动或有相互错动趋势,从而在土体与加筋材料的交界面上产生了一个平行于界面的切向力,相当于由于加筋作用而得到一个同围压 $\sigma_3$ 方向一致、分布形式相同的 $\Delta\sigma_3$ 的作用,当加筋层数增多时, $\Delta\sigma_3$

的值也在增大,故减小了试样的侧向剪胀变形。

(2) 由于格宾网是由六边形单元组成的网状结构,其网孔限制了孔内土体向外扩散,形成了“环箍”作用,孔内的受限土体与其上下的自由土体间产生较大的摩擦阻力与咬合力(“摩擦阻力”与“咬合力”可合称为“剪阻力”),形成了土体加强区域,增强了对试件的侧向约束作用,从而使试件的抗压强度得到了明显提高。

### 2.6 与土工格栅加筋方案对比

14%含水率、93%压实度的格宾网加筋红砂岩试样和土工格栅加筋试样在不同围压下的应力-应变曲线见图11。

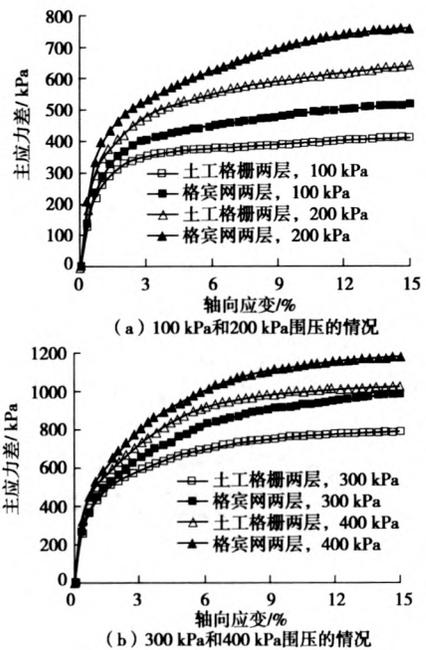


图11 不同材料加筋试样应力应变曲线对比

Fig. 11 Stress-strain curves of specimens reinforced by different reinforcements

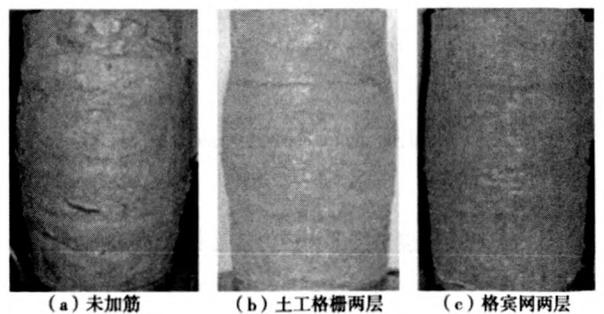


图12 不同材料加筋试样试验后形态

Fig. 12 Configurations of specimens reinforced by different reinforcements after triaxial tests

从图可以看出,围压从100 kPa增长至400 kPa,土工格栅加筋试样应力应变关系亦均呈硬化型趋势。

其他条件相同的状态下, 格宾网加筋试样获得了比土工格栅加筋试样更高的主应力差。从不同材料加筋后试样试验后形态(图12)可知, 与素土试样相比, 土工格栅和格宾网加筋试样的侧向鼓胀明显减小, 但同时也可以发现, 格宾网对试样侧向变形的约束效果更为明显。也就是说, 与土工格栅加固方案相比, 格宾网加固红砂岩获得了更好的强度特性、更佳的约束土体变形的能力。

### 3 结 论

(1) 红砂岩粗粒土经格宾网加筋后峰值强度得到提高, 在大变形下格宾网加筋土体仍能继续承担荷载, 土体延性得到改善。素红砂岩粗粒土及其格宾网加筋体的主应力差与轴向应变关系曲线均具有明显的非线性。在红砂岩粗粒土中铺设格宾网可以有效地约束土体的侧向变形, 增强土体的内部稳定性。

(2) 格宾网加筋红砂岩粗粒土的黏聚力与加筋前相比得到大幅提升, 但两者内摩擦角相差不大。而且, 两者的强度都受到含水率和压实度的影响。在同一压实度下, 格宾网加筋试样和未加筋试样的黏聚力随含水率变化呈现非线性变化关系, 且在最佳含水率附近达到峰值。在同一含水率下, 格宾网加筋试样和素土试样的强度参数( $c$ 和 $\varphi$ )随试样压实度的增加而增大。

(3) 格宾网加筋红砂岩粗粒土的强度比参数随围压的增加而降低, 在低围压下的加筋效果更加显著, 同时, 加筋效果受加筋层数、含水率和压实度的影响。格宾网加筋机理可用等效围压和格宾网的“环箍”效应等解释。

(4) 与土工格栅加固方案相比, 格宾网加固红砂岩获得了更好的强度特性、更佳的约束土体变形的能力。

#### 参考文献:

- [1] 郭永春, 谢 强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007(6): 67 - 71. (GUO Yong-chun, XIE Qiang, WEN Jiang-quan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007(6): 67 - 71. (in Chinese))
- [2] 万维方. “滇中红层”地区路基病害整治及对策[J]. 石家庄铁道学院学报, 2004, 17(增刊): 105 - 107. (WAN Wei-fang. Measures against the subgrade diseases in the red stratum of mid-yunnan area[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2004, 17(S): 105 - 107. (in Chinese))
- [3] 彭瑞华. 湘黔铁路红层边坡稳定性评估[J]. 土工基础, 2006, 20(4): 44 - 48. (PENG Rui-hu. Evaluation of red stratum slope stability in xiangqian railway[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(4): 44 - 48. (in Chinese))
- [4] 孙乔宝, 刘涌江, 李华昆, 等. 安楚高速公路红层软岩公路路堤病害处治方法[J]. 公路交通科技, 2005, 25(6): 50 - 53. (SUN Qiao-bao, LIU Yong-jiang, LI Hua-kun, et al. The red beds embankment disaster treatment of Anning-Chuxiong highway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 25(6): 50 - 53. (in Chinese))
- [5] 陈晓斌. 高速公路粗粒土路堤填料流变性质研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 2 - 6. (CHEN Xiao-bin. Research on rheological properties of highway embankment granular soil fillings [D]. Changsha: Central South University, 2007: 2 - 6. (in Chinese))
- [6] FRAGASZY R J, LAWTON E. Bearing capacity of reinforces and subgrades[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(11): 1501 - 1507.
- [7] SHARMA J S, BOLTON M D. Centrifugal and numerical modelling of reinforced embankments on soft clay installed with wick drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(1): 23 - 44.
- [8] CHAI J C, MIURA N, BERGADO D T, LONG P V. Finite element analysis of embankment failure on soft subsoil[J]. Geotechnical Engineering, 1997, 28(2): 249 - 276.
- [9] YU H S, SLOAN S W. Finite element limit analysis of reinforced soils[J]. Computers and Structures, 1997, 63(3): 567 - 577.
- [10] ROWE R K, SKINNER G D. Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(7): 387 - 412.
- [11] BATHURST R J, KARPURAPU R. Large scale triaxial tests on geocell reinforced granular soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(3): 296 - 303.
- [12] RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R, LATHA G M. Behaviour of sand confined with single and multiple geocells[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17(1): 171 - 184.
- [13] CHANDRASEKARAN B, BROMS B B, WONG K S. Strength of fabric reinforced sand under axisymmetric loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1989, 7(8): 293 - 310.
- [14] HAERI S M, NOURZAD R, OSKROUCH A M. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of

- sands[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, **18**(6): 385 - 402.
- [15] BORGES J L, CARDOSO A S. Structural behaviour and parametric study of reinforced embankments on soft clays[J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, **28**(3): 209 - 233.
- [16] 张孟喜, 闵兴. 单层立体加筋砂土性状的三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(8): 931 - 936. (ZHANG Meng-xi, MIN Xing. Triaxial tests on sand reinforced with one-layer 3D reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(8): 931 - 936. (in Chinese))
- [17] 杜运兴, 尚守平, 周芬. CFRP 加筋中砂的试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2005, **32**(6): 28 - 31. (DU Yun-xing, SHANG Shou-ping, ZHOU Fen. Experimental study of medium sand reinforced with CFR[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2005, **32**(6): 28 - 31. (in Chinese))
- [18] 保华富, 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 Hua-fu, ZHOU Yi-tang, ZHAO Chuan, et al. Study on geoid reinforced stone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(2): 217 - 221. (in Chinese))
- [19] 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 Yi-tang. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, **22**(4): 419 - 422. (in Chinese))
- [20] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(10): 2041 - 2045. (CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(10): 2041 - 2045. (in Chinese))
- [21] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [22] JTJ060—98 公路土工合成材料试验规程[S]. 1999. (JTJ060—98 Technical specifications for application of geosynthetics in highway[S]. 1999. (in Chinese))