

文章编号:1009-3087(2014)02-0052-07

加筋粗粒土大型三轴试验研究

石熊¹,张家生^{1*},孟飞¹,王嵩²,邓国栋¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 四川省冶金地质勘查局 水文工程大队, 四川 成都 611730)

摘要:采用大型三轴剪切仪,对粗粒土、加筋粗粒土强度变形特性进行了试验研究。试验结果表明:不同围压条件下粗粒土和加筋粗粒土剪切的应力-应变关系类似,应力应变关系表现为应变硬化型;当轴向应变较小时,加筋效果不明显,随着轴向应变的逐渐增大,加筋效果逐渐发挥;粗粒土加筋后的内聚力 c 有明显增加,但是内摩擦角 φ 基本不变,侧向变形减小,体积变形增大;对邓肯-张模型的适用性进行分析,表明邓肯-张模型中切线弹性模量能很好适用于加筋粗粒土,但不能很好地反映加筋粗粒土变形特性。在试验的基础上提出了轴向应变与侧向应变的二次函数关系,建立了粗粒土的体积应变与轴向应变的函数方程,并对粗粒土以及加筋粗粒土的三轴试验体积应变数据进行了预测。

关键词:加筋粗粒土;大型三轴试验;体积应变

中图分类号:TU44

文献标志码:A

Large-scale Triaxial Test of Reinforced Coarse-grained Soils

SHI Xiong¹, ZHANG Jiasheng^{1*}, MENG Fei¹, WANG Song², DENG Guodong¹

(1. School of Civil Eng. of Central South Univ., Changsha 410075, China;

2. Inst. of Hydrogeology Eng., Sichuan Provincial Bureau of Metallurgical & Geological Prospecting, Chengdu 611730, China)

Abstract: The strength and deformation characteristics of coarse-grained soils and reinforced coarse-grained soils were studied based on large-scale triaxial shearing tests. Experimental results showed that the stress-strain relationships of coarse-grained soils and reinforced coarse-grained soils are similar under different confining pressures, both showing strain hardening. Reinforcement effect is not obvious when the axial strain is small, and the reinforcement effect gradually starts to work with the increment of axial strain. Reinforced coarse-grained soil has a larger cohesion c , while the inner friction angle φ nearly keeps changeless. And its axial strain decreases, volumetric strain increases. Applicability analysis of Duncan-Chang model showed that Duncan-Chang model can reflect the tangent elastic moduli of reinforced coarse-grained soils, but can't reflect its deformation well. A function was put forward to fit axial strain and lateral strain, and a volumetric strain function was established for coarse-grained soils and reinforced coarse-grained soils, and then the volumetric strain of the soil-sample was predicted.

Key words: reinforced coarse-grained soil; large scale triaxial test; volumetric strain

加筋土是在土中加入筋材而形成的一种复合体。由于其具有增强土体的抗拉、抗剪强度和整体稳定性等优点,得到了广泛的运用。加筋土体的强度和变形特性不仅取决于筋材性质、土体的强度特征、级配、密实度、试验围压、排水条件,还与筋材与土体的相互作用特性有关,而且土体在不同加荷速率、应力水平、应

力应变状态以及边界条件下,筋材强度的发挥的效果也会有较大的差别,描述其强度和变形过程中的应力-应变关系非常复杂和困难^[1-3]。因此有必要对加筋土的强度和变形特性进行较深入的研究与分析。

许多学者通过室内试验对土工材料加筋土机理进行研究,由于试验仪器和试验方法的差异,不同的研究人员关于土工合成材料加筋土机理的观点并不完全相同。保华富等^[4-5]采用高压应变式大型三轴仪对聚合物土工格栅加筋碎石土进行固结排水试验,分析认为加筋能够提高碎石土的强度、刚度以及破坏轴应变,且随着围压的增大,加筋效果随围压的增大而逐渐降低;赵川等^[6-7]结合三轴剪切试验结果,认为碎石土加筋

收稿日期:2013-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378514);高速铁路建造技术国家工程实验室基金资助项目(2008G031-Q)

作者简介:石熊(1985—),男,博士生.研究方向:高速铁路路基动力学. E-mail: shixiong126@126.com

* 通信联系人 E-mail: jszhang_csu@vip.163.com

后抗剪强度增强,力增幅较大,而内摩擦角增幅较小,而且随着加筋层数的增多,效果越明显,黏聚碎石土加筋前呈应变软化型,加筋后为应变硬化型。黄仙枝等^[8]对土工带加筋碎石土进行固结排水剪试验,结果表明黏聚力增加,而内摩擦角不变,侧向变形较小,加筋作用的发挥随着围压的增大而减小。汪明元等^[9-10]对土工格栅加筋膨胀土进行了三轴固结排水剪试验,试样均呈应变硬化型,加筋后的硬化程度提高;加筋土的黏聚力有较大提高,但提高幅度与加筋层数的关系不显著;加筋土的内摩擦角也有不同程度提高,其提高幅度随加筋层数增多而增大。

邓肯-张模型^[11]以其简单实用和多年应用积累的经验,得到了广泛应用并为工程界所熟悉,但其对粗粒土体变特性的预测和描述往往与实际不相符合,且不能反映粗粒土的剪胀性^[12-13]。许多学者对此进行了大量的研究工作,程展林等^[14-16]分析了邓肯-张模型、Rowe 剪胀模型^[17]、三参数 K-G 模型对堆石料的适用性,并提出了改进模型;张嘎等^[18]通过大型三轴试验研究了邓肯-张模型对粗粒土的适用性,结果表明模型难以描述粗颗粒土的体变特性,并基于试验结果提出了改进模型。

作者采用大型三轴仪,对粗粒土、加筋粗粒土强度变形特性进行了试验研究,分析粗粒土与加筋粗粒土的应力应变特性、剪胀性、抗剪强度,并对比分析加筋效果。在试验的基础上,提出了轴向应变与侧向应变的关系式,式中参数均可由常规三轴试验确定,并利用此关系式对三轴试验中试样的体积应变进行了预测。

1 试验方案

1.1 试验土样

试料为土石混合料,其颗粒级配曲线和击实试验曲线分别见图 1、2,可得土样的最大干密度为 2.23 g/cm³,最优含水率为 6.50%,细粒含量为 16.65%;黏土的物理指标见表 1。

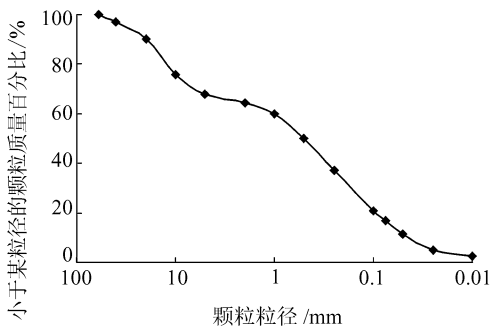


图 1 土料颗粒级配曲线图

Fig. 1 Particle size distribution curve of soil material

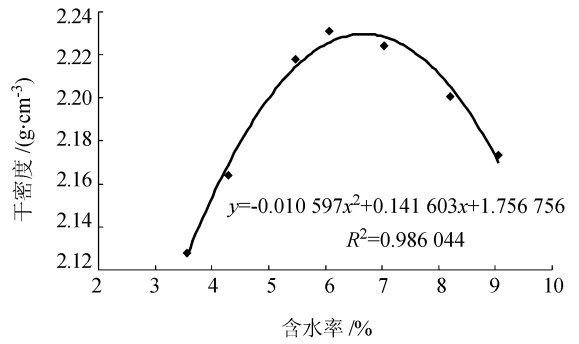


图 2 击实试验曲线

Fig. 2 Compaction test result

表 1 黏土的物理状态指标

Tab. 1 Physical state indexes of clay

比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.75	36.1	20.2	15.9

1.2 试验方案

采用四川大学华西岩土仪器研究所研制的 SZ30-4 型大型三轴剪切仪,试样直径 $D = 300$ mm,高度 $H = 600$ mm,为击实试样,分 5 层击实,压实度 95%,试验采用的围压为 200、400 和 800 kPa。控制轴向变形速率在 0.2 mm/min 左右,剪切过程中若出现峰值应力,则继续剪切轴向累积应变至 5% 后停止试验;若不出现峰值应力,则剪切至轴向累积应变达 16.7% (轴向位移压缩量为 100 mm) 时停止试验,加筋粗粒土所用土料及实验方法与粗粒土试验相同,但在试样中部处加一层土工格栅。

2 试验结果分析

2.1 应力应变关系分析

依据试验方案,对粗粒土、加筋粗粒土分别在围压为 200、400、800 kPa 条件下进行固结排水剪切三轴压缩试验,主应力差与轴向应变的关系曲线如图 3 所示。

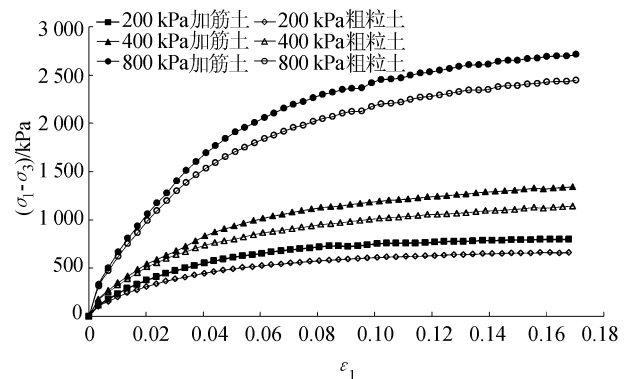


图 3 不同围压下应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different confining pressures

由图3可以看出,不同围压条件下粗粒土和加筋粗粒土剪切的应力-应变关系类似, $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 关系曲线呈明显非线性,主应力差随轴向应变的增大而增大,没有明显的峰值,试验均呈应变硬化现象。围压越高,应力应变曲线愈陡,应变硬化特性越明显,峰值强度也越大。围压越大,强度越高。

图3表明在相同条件下加筋粗粒土比粗粒土强度高。当轴向应变较小时,粗粒土与加筋粗粒土的应力应变曲线非常接近,加筋效果不明显,随着轴向应变的逐渐增大,加筋效果逐渐发挥。粗粒土和加筋粗粒土不同围压下的莫尔应力圆和抗剪强度包线见图4和5,可得其抗剪强度指标,见表2。

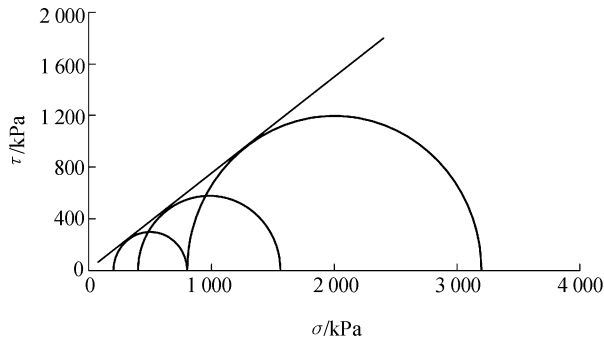


图4 粗粒土试样莫尔圆包络线

Fig. 4 Mohr envelope of coarse-grained soils

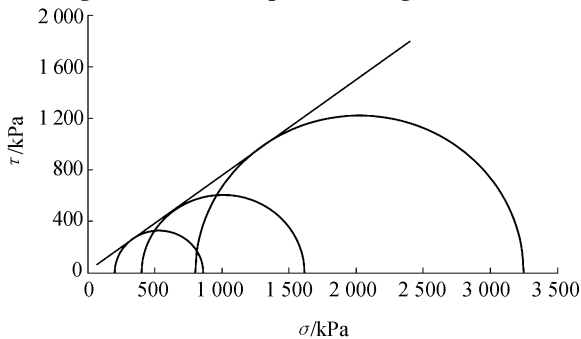


图5 加筋粗粒土试样莫尔圆包络线

Fig. 5 Mohr envelope of reinforced coarse-grained soils

表2 三轴试验粗粒土和加筋土抗剪强度指标

Tab. 2 Indexes of shearing strength in triaxial test

土样类型	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
粗粒土	9.05	35.76
加筋土	15.41	36.65

表2结果表明粗粒土加筋后的内聚力 c 有明显增加,但是内摩擦角 φ 基本不变;加筋粗粒土强度的提高主要体现在增大了粗粒土的黏聚力。

2.2 变形特性分析

不同围压条件下粗粒土和加筋粗粒土体积应变 ε_v 和轴向应变 ε_1 关系曲线见图6,侧向应变 ε_2 和轴

向应变 ε_1 关系曲线见图7,其中 ε_1 以压缩为正, ε_2 以膨胀为正, ε_v 以减小为正。

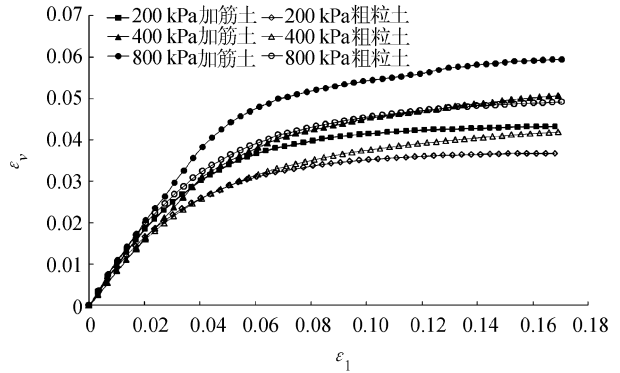


图6 体变与轴向应变关系曲线

Fig. 6 Volumetric strain and axial strain curves

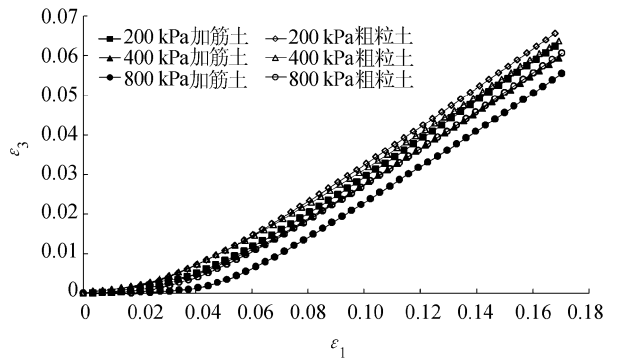


图7 侧向应变与轴向应变关系曲线

Fig. 7 Lateral strain and axial strain curves

粗粒土和加筋粗粒土 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_1$ 关系曲线表明围压越低,剪胀作用越明显,试样越容易由剪缩发展到剪胀,反之围压越高,则剪缩作用越明显,且围压越高,累积体应变越大。分析认为,土体的剪缩主要是由颗粒压碎和颗粒间胶结作用破坏等因素引起的,而土体的剪胀主要是由于颗粒间的相互翻越、抬起等引起的。低围压下,径向对土体约束较小,颗粒间的翻越更为容易,容易发生剪胀;高围压下,径向约束较大,颗粒间翻越所需阻力增大,不易发生剪胀。

图6表明当轴向应变较小时,加筋效果不明显,随着轴向应变的逐渐增大,加筋效果逐渐发挥,且在轴向应变相同情况下加筋粗粒土的体积应变比粗粒土要高,且围压越高,其差值越大,而图7结果表明同样的轴向应变条件下,加筋粗粒土的侧向应变要比粗粒土要小,差值也随着围压的增加而增大。

这是因为当试样受偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 作用时,试件内产生了剪应变,粗粒土中土工格栅加筋使得格栅网孔内的碎石所受的阻力增加,同时与界面两侧碎石的咬合、镶嵌作用力增加,限制了土体的侧向膨胀变形,从而使得试样侧向应变减小,体积应变增

加。因此,只有当格栅与土结合面产生相对位移时,加筋作用才能发挥,在剪切刚开始阶段,由于结合面不存在相对位移,故加筋作用无法发挥,图6和7实验结果也验证了此点。

试验结果表明,粗粒土加筋后,侧向变形减小,体积变形增大,使得加筋粗粒土获得了一定的准黏聚力,因此土体的抗剪强度增强。

3 邓肯 - 张模型的适用性分析

3.1 切线弹性模量

模型认为土在剪切时受到的主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)与轴向应变 ϵ_1 成双曲线关系,曲线起始段的斜率为切线弹性模量 E_t ,即认为 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_1 成线性关系。粗粒土与加筋粗粒土的 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 线性拟合见图8、9。

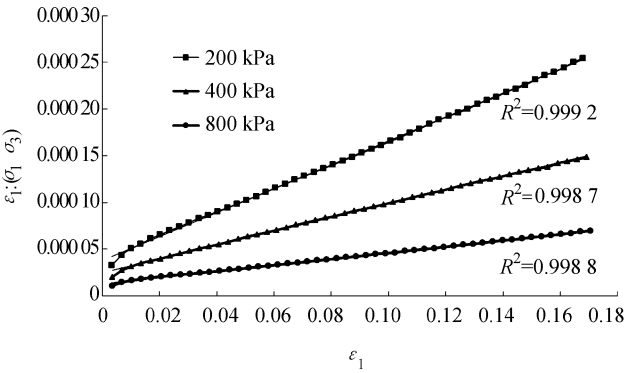


图8 粗粒土 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 线性拟合

Fig. 8 Linear fitting of $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ for coarse-grained soils

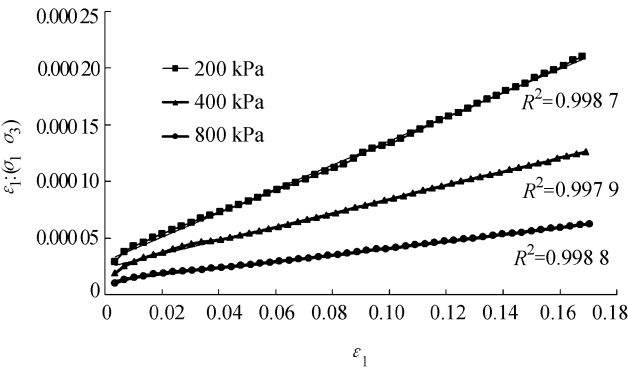


图9 加筋粗粒土 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 线性拟合

Fig. 9 Linear fitting of $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ for reinforced coarse-grained soils

由图8、9可知粗粒土与加筋粗粒土 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_1 成线性关系,即 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_1 的双曲线关系能够较好地成立,说明邓肯 - 张模型能较合理地确定粗粒土与加筋粗粒土的强度和切线弹性模量。

3.2 切线泊松比

模型认为,试样剪切过程中,轴向应变 ϵ_1 与侧向应变 ϵ_3 呈双曲线关系,曲线起始段的斜率为切线泊松比,即认为 $-\epsilon_3/\epsilon_1$ 与 ϵ_3 成线性关系。粗粒土与加筋粗粒土的 $-\epsilon_3/\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 线性拟合见图10、11。

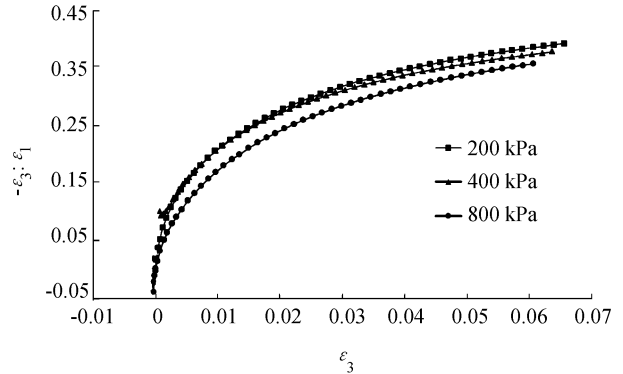


图10 粗粒土 $-\epsilon_3/\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 关系曲线

Fig. 10 $-\epsilon_3/\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ curves of coarse-grained soils

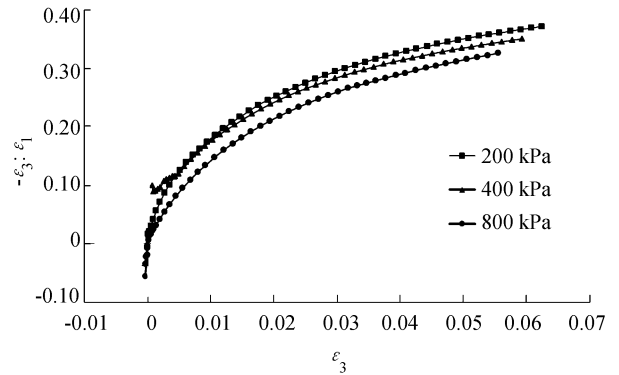


图11 加筋粗粒土 $-\epsilon_3/\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 关系曲线

Fig. 11 $-\epsilon_3/\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ curves of reinforced coarse-grained soils

由图10和11可知粗粒土与加筋粗粒土 $-\epsilon_3/\epsilon_1$ 与 ϵ_3 成明显的非线性关系,而且较为明显的曲线,即 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_1 的双曲线关系不明显,说明粗粒土与加筋粗粒土的变形特性和泊松比参数难以根据邓肯 - 张模型来描述和确定。

三轴试验结果表明由邓肯 - 张模型中初始弹性模量对于试验土样是适用的,但其对轴向应变 ϵ_1 和侧向应变 ϵ_3 之间的关系假设为双曲线关系并不完全适用。

4 修正的邓肯 - 张模型

4.1 $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 函数关系改进

试验结果分析表明随着轴向应变 ϵ_1 的发展,主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 趋于稳定,但体积应变和侧向应变仍在继续发展, ϵ_1^2 与 ϵ_3 具有明显的抛物线关系,可以采用常数项为0的抛物线方程拟合轴向应变与侧向应变之间的函数关系:

$$\varepsilon_1^2 = L\varepsilon_3^2 + T\varepsilon_3 \quad (1)$$

试验参数 L, T 可通过 ε_1^2 与 ε_3 的拟合求得, 见图 12 和 13。得到不同围压下参数 L, T 的值见表 3。

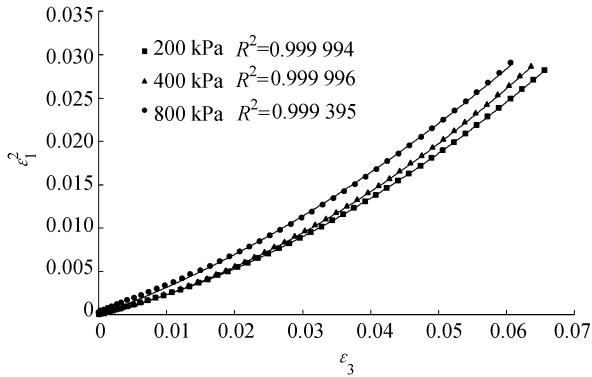


图 12 粗粒土 $\varepsilon_1^2 \sim \varepsilon_3$ 线性拟合

Fig. 12 Linear fitting of $\varepsilon_1^2 \sim \varepsilon_3$ for coarse-grained soils

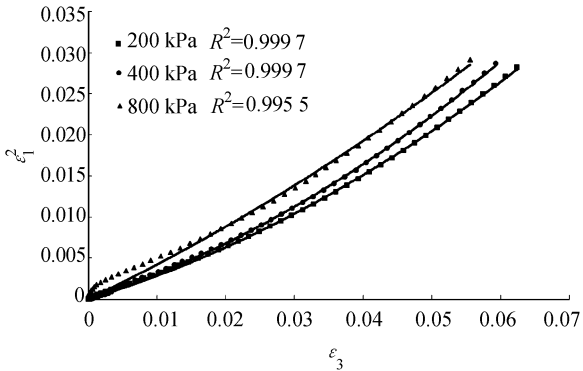


图 13 加筋粗粒土 $\varepsilon_1^2 \sim \varepsilon_3$ 线性拟合

Fig. 13 Linear fitting of $\varepsilon_1^2 \sim \varepsilon_3$ for reinforced coarse-grained soils

表 3 非线性拟合参数

Tab. 3 Parameters of nonlinear fitting

	围压/kPa	L	T
粗粒土	200	3.503	0.174
	400	3.745	0.198
	800	3.498	0.260
加筋粗粒土	200	3.149	0.242
	400	3.585	0.291
	800	3.210	0.332

由图 12、13 可以看出, 式(1)可以较准确地拟合试验得到的轴向应变和侧向应变数据。通过表 3 可看出, 不同围压下, 参数 L 值变化不大, 可取不同围压下的平均值作为该土样的 L 值; 试验中粗粒土和加筋粗粒土的 L 值分别为 3.582 和 3.315; 参数 T 值随围压的增大而逐渐增大, 经分析, T 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 呈线性关系, 关系式可表示为:

$$T = F \lg(\sigma_3/p_a) + G \quad (2)$$

图 14 为 T 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的拟合曲线, 可见两者

之间成线性关系。由图可得粗粒土的参数 F 和 G 的值分别为 0.149 8 和 0.199 2, 加筋粗粒土对应参数分别为 0.143 3 和 0.124 7。

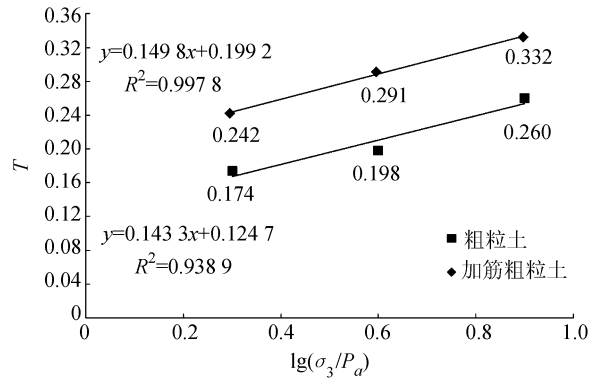


图 14 $T \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ 线性拟合

Fig. 14 Linear fitting of $T \sim \lg(\sigma_3/p_a)$

通过侧向应变 ε_3 与轴向应变 ε_1 的关系式(1), 即可得出切线泊松比表达式:

$$\nu_t = \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_3}{\sqrt{L\varepsilon_1^2 + 0.25T^2}} = \frac{1}{\sqrt{L + \left(\frac{G + F \lg(\sigma_3/p_a)}{2\varepsilon_1}\right)^2}}$$

4.2 体积应变 ε_v 预测

对于一定的围压 σ_3 与轴向应变 ε_1 , 可由式(1)求得相应的侧向应变 ε_3 , 得到试样在不同围压下的体积应变表达式:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = \varepsilon_1 + (T - \sqrt{T^2 + 4L\varepsilon_1^2})/L.$$

根据实验得出的粗粒土与加筋粗粒土的参数 L, F 和 G , 即可预测试样在不同围压下体积应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 的曲线, 将预测曲线与实测数据进行对比分析, 见图 15、16。

通过对比, 可以看出, 所推导的体积应变曲线与试验结果吻合较好, 能够较好地反映粗粒土与加筋粗粒土随着应力水平升高逐渐由剪缩转为剪胀, 以及在低围压时剪胀、高围压时剪缩的体积应变特性。

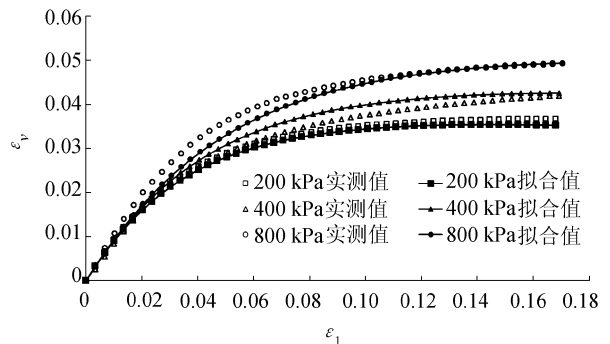


图 15 粗粒土体积应变拟合曲线

Fig. 15 Volumetric strain fitting curves for reinforced coarse-grained soils

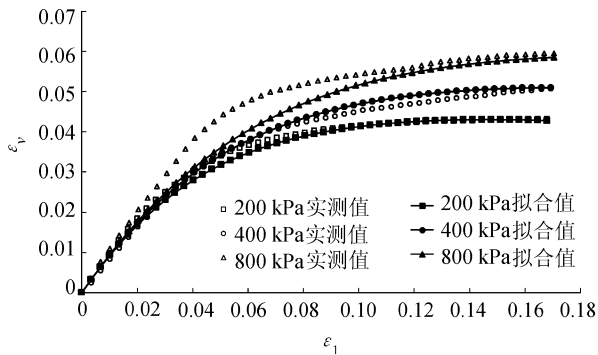


图 16 加筋粗粒土体积应变拟合曲线

Fig. 16 Volumetric strain fitting curves for reinforced coarse-grained soils

5 结论

1) 三轴试验结果表明不同围压条件下粗粒土和加筋粗粒土剪切的应力-应变关系类似,应力应变关系表现为应变硬化型,当轴向应变较小时,加筋效果不明显,随着轴向应变的逐渐增大,加筋效果逐渐发挥。

2) 粗粒土加筋后的内聚力 c 有明显增加,而内摩擦角 φ 基本不变。这是由于加筋后土体侧向变形减小,体积变形增大,使得加筋粗粒土获得了一定的准粘聚力,因此土体的抗剪强度增强。

3) 利用三轴试验结果对邓肯-张模型的适用性进行分析研究,表明邓肯-张模型中切线弹性模量能很好适用于粗粒土与加筋粗粒土,但不能很好地反映粗粒土及加筋粗粒土变形特性。

4) 在粗粒土及加筋粗粒土三轴剪切试验的基础上,提出了 ε_1 与 ε_3 的二次函数关系,建立了粗粒土的体积应变与轴向应变的函数方程,并对粗粒土以及加筋粗粒土的三轴试验体积应变数据进行了预测。结果表明改进模型能较为合理地描述粗粒土的体积应变特性。

参考文献:

[1] Xu Wangguo, Zhang Jiasheng, He Jianqing. Research on large-scale triaxial tests on reinforced soft rock composed of coarse-grained soil as embankment fillings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 535 - 541. [徐望国, 张家生, 贺建清. 加筋软岩粗粒土路堤填料大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 535 - 541.]

[2] Yan Shuwang, Barr B. Finite-element modelling of soil geogrid interaction with application to interpret the pullout be-

haviour of geogrids [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 56 - 61. [闫澍旺, Barr B. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 56 - 61.]

- [3] Guo Yan. The development of geosynthetic reinforced soil [J]. Hunnan Agricultural Machinery, 2011, 38(3): 226 - 227. [郭妍. 土工材料加筋土的发展[J]. 湖南农机, 2011, 38(3): 226 - 227.]
- [4] Bao Huafu, Zhou Yitang, Zhao Chuan, et al. Study on geogrid reinforced stone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 82 - 86. [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): 82 - 86.]
- [5] Bao Huafu, Gong Tao. The effects of reinforcement on strength and deformation of soil-gravel material [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(6): 76 - 80. [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, 32(6): 76 - 80.]
- [6] Zhao Chuan, Zhou Yitang. Experimental study on polymer geogrid reinforced crushed gravel by large-scale triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 419 - 422. [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.]
- [7] Zhao Chuan, Zhou Yitang, Yu Yongqiang, et al. Experimental study on constitutive model of polymer geogrid reinforced crushed gravel [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(1): 33 - 38. [赵川, 周亦唐, 余永强, 等. 土工格栅加筋碎石土本构模型试验研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2002, 35(1): 33 - 38.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Wang Mingyuan, Yu Yanhua, Li Qiren. Consolidation and drain shear test for expansive soils reinforced with geogrids [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(2): 64 - 68. [汪明元, 于嫣华, 李齐仁.

- 土工格栅加筋膨胀土的固结排水剪特性[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(2):64-68.]
- [10] Wang Mingyuan, Yu Yanhua, Gong Xiaonan. Effect of water content on strength and deformation characteristics of reinforced expansive soils [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(6): 138-142. [汪明元, 于嫣华, 龚晓南. 含水量对加筋膨胀土强度与变形特性的影响[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2009, 48(6): 138-142.]
- [11] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 1970, 96(5):1629-1653.
- [12] Meng Fei, Zhang Jiasheng, Hu Qifan, et al. Large-scale test study on volumetric strain law of coarse-grain soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(6): 139-142. [孟飞, 张家生, 胡奇凡, 等. 粗粒土体变规律大型三轴试验研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(6): 139-142.]
- [13] Chen Xiaobin. Study of dilatancy effect of redstone coarse grained soil by large scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl 1): 3145-3149. [陈晓斌. 红砂岩粗粒土剪胀效应大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 3145-3149.]
- [14] Cheng Zhanlin, Jiang Jingshan, Ding Hongshun, et al. Non-linear dilatancy model for coarse-grained soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 460-467. [程展林, 姜景山, 丁红顺, 等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 460-467.]
- [15] Cheng Zhanlin, Ding Hongshun, Wu Liangping. Experimental study on mechanical behaviour of granular material[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1151-1158. [程展林, 丁红顺, 吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1151-1158.]
- [16] Cheng Zhanlin, Chen Ou, Zuo Yongzhen, et al. Discussion of the coarse-grained soil dilatancy model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(6): 39-49. [程展林, 陈鸥, 左永振, 等. 再论粗粒土剪胀性模型[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(6): 39-49.]
- [17] Rowe P W. The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear [J]. Geotechnique, 1969, 19(1): 75-86.
- [18] Zhang Ga, Zhang Jianmin. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591. [张嘎, 张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591.]

(编辑 张琼)