

DOI: 10.11779/CJGE201712009

土工织物散体桩桩体大三轴试验研究

陈建峰¹, 王兴涛¹, 曾岳¹, 叶观宝¹, 冯守中², 李丽华³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 武汉广益交通科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074;
3. 常州泰勒思达新材料有限公司, 江苏 常州 213021)

摘要: 对密实状态的土工织物散体桩桩体进行大三轴试验, 研究其在不同围压和不同聚丙烯土工编织布筋材强度下的应力-应变特性, 并据此提出桩体强度及模量理论计算公式。研究结果表明: 土工织物散体桩桩体在三轴压缩下呈剪胀破坏, 其剪切带上主要是筋材的横向筋丝产生断裂, 且桩体剪切角与碎石的莫尔-库伦理论破裂角比较接近; 在加载初期, 土工织物散体桩应力-应变曲线下凹, 而后近似线性增长至峰值应力, 随后应力随应变减小并趋于稳定, 表现为应变软化特性; 同一筋材强度、不同围压的土工织物散体桩桩体强度所对应的轴向应变值比较接近; 土工织物散体桩桩体的似黏聚力随筋材强度呈较好的线性增长关系, 其较碎石的似黏聚力大很多, 而筋材对桩体碎石的内摩擦角影响不大; 建立了土工织物散体桩桩体强度及模量的理论计算公式, 并采用试验值对理论公式进行修正, 经修正后的结果与试验值吻合很好。

关键词: 土工织物散体桩; 大三轴试验; 应力-应变曲线; 强度; 模量

中图分类号: TU416.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2212-07

作者简介: 陈建峰(1972-), 男, 浙江余姚人, 教授, 工学博士, 主要从事加筋土结构与边坡支护、岩体力学与工程等方面的教学与研究工作。E-mail: jf_chen@tongji.edu.cn。

Large triaxial compression tests on geosynthetic-encased granular columns

CHEN Jian-feng¹, WANG Xing-tao¹, ZENG Yue¹, YE Guan-bao¹, FENG Shou-zhong², LI Li-hua³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Wuhan Guangyi Transportation Science and Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 3. Changzhou Telystar New Material Co., Ltd., Changzhou 213021, China)

Abstract: Large triaxial compression tests are performed on geosynthetic-encased granular columns (GEGC) with gravels in dense state. The stress-strain characteristics of GEGC with different strengths of polypropylene woven geotextiles and different confining pressures are investigated. The theoretical formulas to compute the strength and modulus of GEGC are then proposed. The results show that the GEGC exhibits dilative shear failure under triaxial compression, and mainly the horizontal textile slices at the shear band break. The shear angle is close to the rupture angle of the Mohr-Coulomb strength theory. The stress-strain curve of GEGC at the preliminary loading stage is concave down, then its stress approximately increases linearly up to a peak stress, and subsequently decreases to a stable value, showing strain softening characteristics. The axial strains corresponding to the strengths of GEGC with the same reinforcement strength under different confining pressures are even close. The quasi-cohesion of the GEGC has a good linear relationship with the strength of reinforcements, and it is much larger than that of the gravels, but the strength of reinforcements has little effect on the internal friction angle of the gravels of GEGC. Theoretical formulas are established to compute the strength and modulus of the GEGC. The formulas are verified through the test data, and the correction factors for the formulas are obtained. The results of the modified formulas agree well with the test ones.

Key words: geosynthetic-encased stone column; large triaxial compression test; stress-strain curve; strength; modulus

0 引言

土工织物散体桩, 又称为加筋碎石桩, 其是在碎石桩外面包裹土工合成材料^[1]。与传统的碎石桩相比, 用土工合成材料包裹碎石桩, 不仅可以保留碎石桩本身的置换作用和排水作用, 而且还可限制桩体的侧向

变形, 从而提高地基的承载力, 因而是一种新型的软土地基处理方法^[2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572266); 上海市浦江人才计划(14PJD032)

收稿日期: 2016-09-09

然而目前还没有土工织物散体桩的设计计算方法, 缺少桩体在土体中的模量及桩身强度的确定方法。土工织物散体桩桩体在土体中不同深度处受到不同侧向压力作用, 这可以通过三轴压缩试验来进行模拟, 但目前对土工织物散体桩的三轴压缩试验的研究还很少。Rajagopal 等^[3]对单个及多个尺寸为 100 mm×200 mm 土工格室包裹的砂土进行了一系列三轴压缩试验, 研究土工格室围裹对砂土强度及刚度的影响; Wu 等^[4]对尺寸为 70 mm×140 mm 土工布套筒加筋砂桩进行了三轴压缩试验, 研究了砂桩偏应力和体应变变化规律, 并采用不同轴向应变下的似黏聚力和摩擦角来解释套筒的加固效应; Miranda 等^[5]对尺寸为 100 mm×200 mm 碎石桩及土工布套筒加筋碎石桩进行了三轴压缩试验, 研究了加筋对碎石桩偏应力、体应变、桩体强度以及碎石摩擦角的影响。

上述研究均采用小尺寸试样进行试验, 存在尺寸效应, 且采用的筋材强度低、填料粒径小, 与实际土工织物散体桩材料并不一致, 也未提出土工织物散体桩模量及强度确定方法。本文采用大三轴试验 (尺寸 300 mm×600 mm) 研究实际土工织物散体桩桩体在不同围压和不同筋材强度下的应力-应变特性, 并据此提出土工织物散体桩桩体模量及强度计算公式。

1 桩体大三轴试验

1.1 桩体材料力学特性

(1) 碎石

本文碎石原料为石灰石, 图 1 为碎石级配曲线。碎石的平均粒径 $d_{50}=24$ mm, 不均匀系数 $C_u=7.31$, 曲率系数 $C_c=1.65$, 其级配良好。根据《公路土工试验规程》^[6]最大和最小干密度试验方法, 得出碎石最大干密度 $\rho_{dmax}=2.05 \times 10^3$ kg/m³, 最小干密度 $\rho_{dmin}=1.37 \times 10^3$ kg/m³。

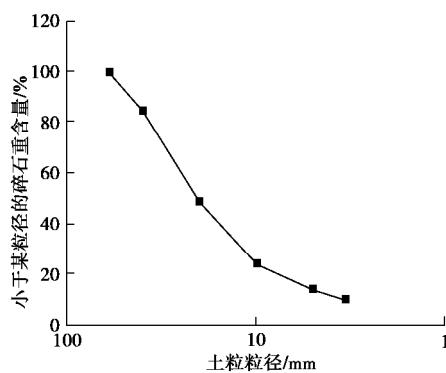


图 1 碎石级配曲线

Fig. 1 Grading curves of stone sizes

本文土工织物散体桩桩体碎石相对密实度 D_r 控

制为 0.70, 属于密实状态, 其对应的碎石干密度 $\rho_{d0}=1.78 \times 10^3$ kg/m³, 这满足工程上对散体材料桩桩体密实度的要求^[7]。对 $D_r=0.70$ 的碎石进行大三轴试验, 得到如图 2 所示的碎石应力应变曲线和莫尔-库仑强度包线, 可以得到碎石的似黏聚力 $c=16.3$ kPa, 内摩擦角 $\phi=44.7^\circ$ 。一般认为无黏性土 $c=0$, 而碎石产生似黏聚力的原因是在轴向荷载挤压下碎石颗粒间互相咬合嵌挂所产生的一种咬合力, 这与黏性土的黏聚力有着本质的不同^[8]。

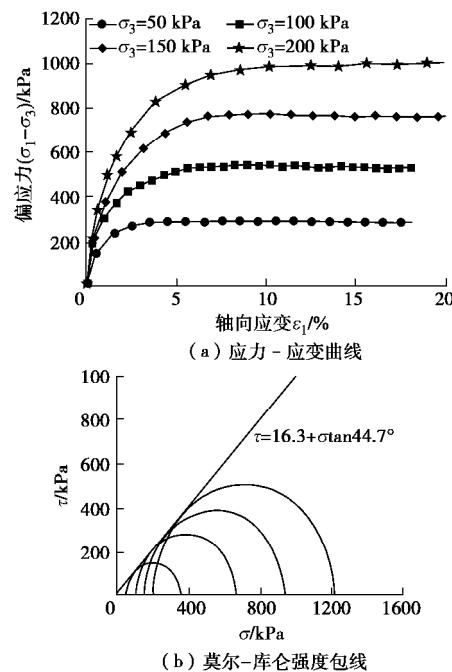


图 2 碎石大三轴试验成果

Fig. 2 Results of large triaxial tests on gravels

(2) 筋材

聚丙烯土工编织布具有优越的透水性、过滤性、耐用性和经济性, 可以加工成土工管袋、软体排等产品, 已广泛应用于软土围堰和软土堤坝填筑等工程^[9-10]。本文采用的聚丙烯土工编织布由常州泰勒思达新材料有限公司生产。

加筋套筒通常采用平缝、丁缝、包缝方式缝制, 然而接缝处的强度一般只有筋材强度的 14.5%~85%, 且接缝强度离散性很大^[11-12]。为了消除接缝对试验结果产生的偏差, 本文采用无接缝编织布套筒, 其采用圆织机直接编织而成。对 4 种不同型号的编织布进行宽条拉伸试验得到编织布应力-应变曲线, 如图 3 所示, 得出其力学性质如表 1 所示, 这 4 种编织布的强度分别为 33, 43, 52, 67 kN/m, 对应的应变 ϵ_r 分别为 14.8%, 15.5%, 16.2%, 16.8%, 拉伸模量分别为 223, 277, 321, 399 kN/m。

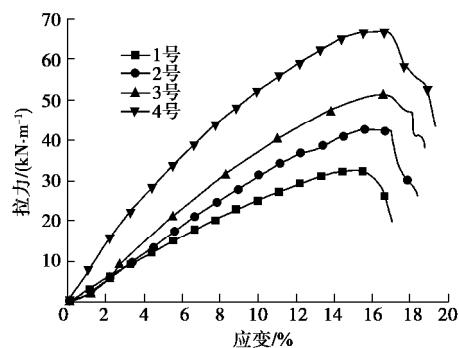


图 3 编织布应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of geotextiles

表 1 编织布的力学性质

Table 1 Mechanical characteristics of woven textiles

型号	拉伸强度 T ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	拉伸强度对应 的应变 $\epsilon/\%$	拉伸模量* ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
1 号	33	14.8	223
2 号	43	15.5	277
3 号	52	16.2	321
4 号	67	16.8	399

*拉伸模量取编织布拉伸强度与其对应的应变值的比值。

1.2 试验方案及试样制备

本文试验仪器采用美国 GCTS 公司生产的 BS01011 型大三轴仪。三轴试样尺寸为 $300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 最大轴向荷载为 1000 kN , 最大试验围压可达 6 MPa 。对每种筋材强度下的土工织物散体桩分别施加 $50, 100, 150, 200 \text{ kPa}$ 围压进行大三轴试验, 轴向变形速率控制为 0.36 mm/min 。共进行了 16 组试验。

试样制备过程如下: 首先将土工编织布套筒放入内衬橡皮膜的制样筒内, 如图 4 所示, 然后按密度控制法将总质量为 75.4 kg 的碎石分 4 层填入制样筒内并击实, 使试样的相对密实度达到 0.70。

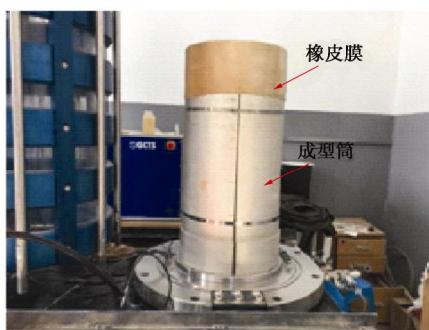


图 4 土工织物散体桩试样制备

Fig. 4 Preparation of GEGC

1.3 结果分析

图 5 为筋材强度 33 kN/m 、围压 150 kPa 下的土工织物散体桩三轴试验完成后的试样。由图 5 (a) 可见, 试验后土工织物散体桩发生明显的鼓胀和压缩变

形, 且中间部位鼓胀显著; 检查编织布套筒, 如图 5 (b) 所示, 可以发现其上有明显的剪切带, 剪切角约为 65.4° , 而碎石的莫尔-库仑理论破裂角为 $45^\circ + j/2$, 即 67.4° , 两者比较接近; 并且可以发现编织布上的剪切带其横向筋丝发生断裂, 而纵向筋丝基本完整, 说明土工织物散体桩是在筋材横向筋丝断裂时而达到其强度值。

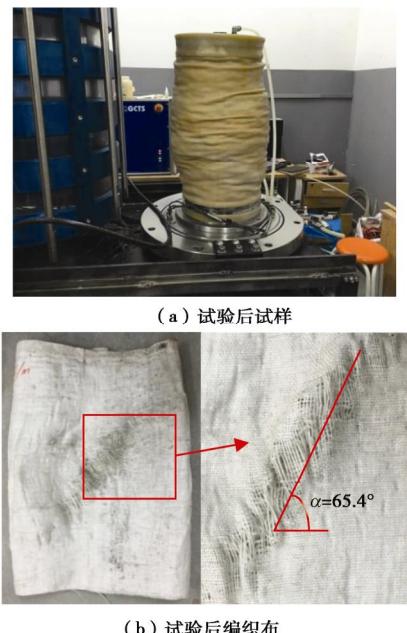


图 5 土工织物散体桩试验后试样情况

Fig. 5 Sample of GEGC after tests

图 6 为不同筋材强度下土工织物散体桩应力 - 应变曲线。由图可见, 在加载初期, 土工织物散体桩应力 - 应变曲线下凹, 且下凹段对应的应变随围压的增大而明显增大, 而后近似线性增长至峰值应力。产生这种现象的原因是围压和编织布对桩体约束作用发挥的时差性造成的。当围压较小时, 编织布对桩体的约束能够很快起作用, 曲线经过较小的下凹阶段后即进入线性阶段; 而当围压较大时, 编织布对桩体的约束作用由于围压较大而未即时发挥, 曲线经过相对较大的下凹变形阶段后编织布才发挥约束作用, 然后进入线性阶段。而达到峰值应力后应力随轴向应变的增大而减小并最终趋向稳定, 表现为应变软化特性, 这不同于如图 2 所示的碎石的应力 - 应变曲线关系, 后者表现为应变硬化特性。这表明, 加筋明显改变了碎石的应力 - 应变关系, 土工织物散体桩峰值应力后出现应变软化应是编织布横向筋丝断裂导致的。

另外可以看到, 对于同一强度筋材, 不同围压下桩体峰值应力所对应的轴向应变值基本一致, $33, 43, 52, 67 \text{ kN}$ 筋材强度下桩体峰值应力所对应的轴向应变值分别约为 $15.1\%, 15.7\%, 15.9\%$ 和 16.6% 。

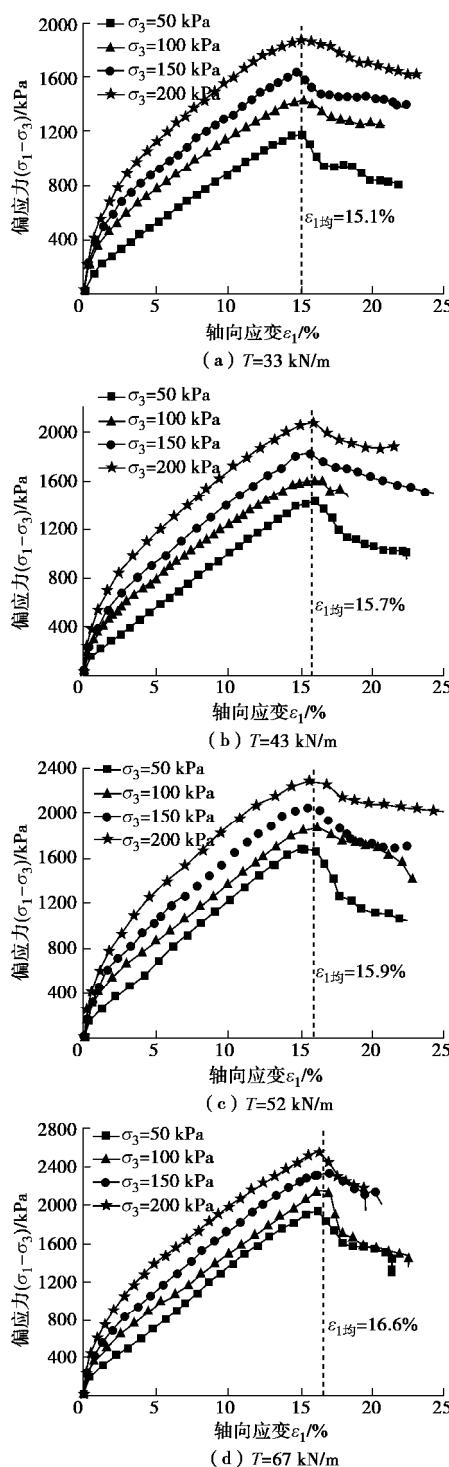


图 6 不同筋材强度下土工织物散体桩应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of GEGC with different reinforcement strengths

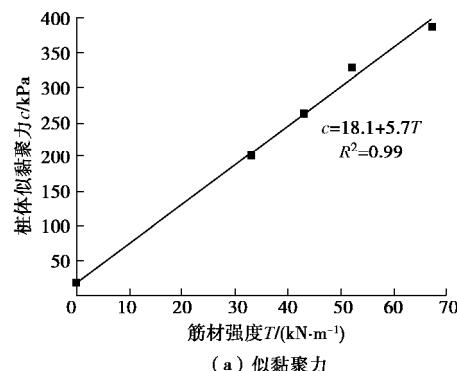
表 2 为通过图 6 曲线获得的不同筋材强度下土工织物散体桩桩体强度参数, 其中筋材强度为 0 的情况为碎石大三轴试验结果。图 7 为根据表 2 数据绘制的土工织物散体桩桩体似黏聚力和内摩擦角与筋材强度的关系曲线。由图 7 (a) 可见, 似黏聚力 c 随筋材强度 T 呈很好的线性增长关系, 即 $c=18.1+5.7T$; 土工织物散体桩桩体的似黏聚力要比碎石的似黏聚力大很

多, 其原因是筋材给桩体碎石提供了很大的侧向约束作用, 碎石需要克服该约束作用才被剪切破坏, 因此相当于筋材给予碎石一个附加应力, 其表现为似黏聚力。由图 7 (b) 可见, 筋材强度 33 kN 下桩体的内摩擦角与碎石的内摩擦角基本接近, 虽然随着筋材强度增大, 其内摩擦角略有减小, 但很快趋于稳定。由此, 筋材对桩体碎石的内摩擦角影响不大, 而主要给予桩体碎石一个与筋材强度成线性增长关系的似黏聚力。

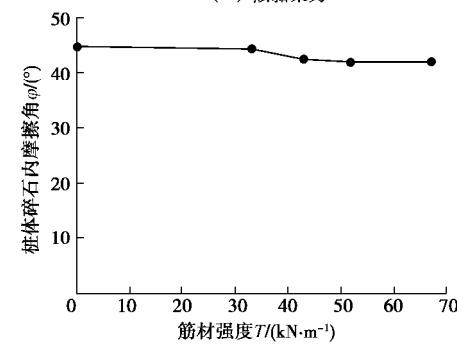
表 2 不同筋材强度下桩体强度参数

Table 2 Mechanical characteristics of GEGC with different reinforcement strengths

筋材强度 $T/(kN\cdot m^{-1})$	似黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $j/(^\circ)$
0	16.3	44.7
33	201	44.3
43	263	42.6
52	329	42.0
67	387	42.1



(a) 似黏聚力



(b) 内摩擦角

图 7 土工织物散体桩桩体强度参数与筋材强度关系
Fig. 7 Relationship between strength parameters of GEGC and strength of reinforcement

2 桩体强度及模量计算公式

目前尚缺少土工织物散体桩桩体强度及模量的计算公式。本文以下通过土工织物散体桩受力和变形分析简图, 推导桩体强度和模量理论计算公式, 再采用试验值对理论计算公式进行校核, 以给出相应的修正系数。

2.1 桩体强度计算公式

图 8 为土工织物散体桩桩体极限状态受力示意

筋材拉伸强度对应的应变 e_r 为

$$e_r = \frac{R - R_0}{R_0} \quad , \quad (10)$$

则

$$R = (1 + e_r)R_0 \quad . \quad (11)$$

土工织物散体桩桩体强度对应的轴向应变 e_1 为

$$e_1 = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad . \quad (12)$$

将式 (9)、(11) 代入式 (12), 可得

$$e_1 = 1 - \frac{r_{d0}}{r_{dmax}(1 + e_r)^2} \quad . \quad (13)$$

土工织物散体桩桩体模量 E_p 为

$$E_p = \frac{P_p}{e_1} = \frac{P_p}{1 - \frac{r_{d0}}{r_{dmax}(1 + e_r)^2}} \quad . \quad (14)$$

将桩体强度理论公式 (6) 代入式 (14) 得

$$E_p = \frac{\left(P_{rl} + \frac{T}{R} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{j}{2} \right)}{1 - \frac{r_{d0}}{r_{dmax}(1 + e_r)^2}} \quad , \quad (15)$$

式中, 桩体碎石初始干密度 r_{d0} 则按下式取值:

$$r_{d0} = \frac{r_{dmax} r_{dmin}}{r_{dmax} - (r_{dmax} - r_{dmin}) D_r} \quad . \quad (16)$$

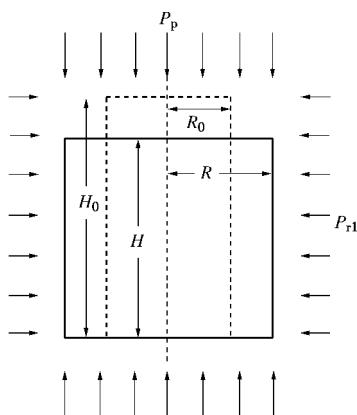


图 11 土工织物散体桩破坏时三轴压缩变形简化分析图

Fig. 11 Diagram of deformation of GESC subjected to triaxial loading under failure for simplified analysis

由此, 式 (15) 建立了土工织物散体桩桩体模量理论计算公式。采用式 (15) 计算同本文大三轴试验条件一致的桩体模量值。图 12 为桩体模量理论值与试验值的比较。由图可见, 桩体模量的理论值比试验值低不少, 这是由于实际桩体受围压和轴向荷载作用, 其间部位发生剪胀破坏, 且只有该部位筋材被拉断, 而其他部位筋材并没有达到拉伸强度对应的应变, 这使得试验中桩体的径向应变要比理论公式假设的径向应变小, 因而轴向应变也小; 另外, 试验中的桩体在破坏时其碎石可能还未完全达到理论假设的最大干密

度, 从而试验获得的桩体轴向应变要小于理论假设得出的轴向应变, 这导致试验获得的桩体模量更大。桩体模量理论值与试验值之间也呈较好的线性拟合关系, 可以得到试验值是理论值的 $1/0.524 \approx 1.91$ 倍, 因此可取桩体模量理论公式的修正系数 $k=1.91$ 。桩体模量的理论修正公式为

$$E_p = k \frac{\left(P_{rl} + \frac{T}{R} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{j}{2} \right)}{e_1} \quad . \quad (17)$$

对理论值均乘以修正系数 $k=1.91$, 修正后的结果如图 13 所示, 两者吻合很好。

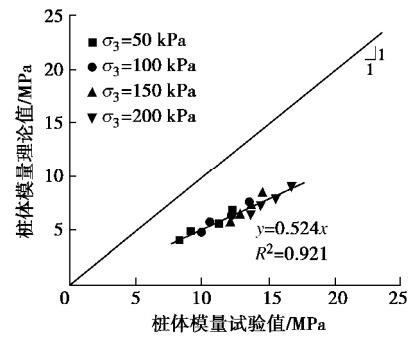


图 12 桩体模量理论值与试验值比较

Fig. 12 Comparison between theoretical and measured modulus of GEGC

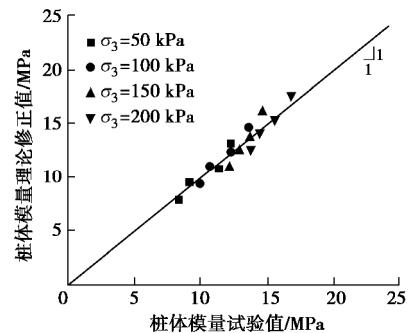


图 13 桩体模量理论修正值与试验值比较

Fig. 13 Comparison between modified theoretical and measured modulus of GEGC

3 结 论

本文对碎石相对密实度为 0.70 的土工织物散体桩桩体进行大三轴试验, 研究其在不同围压和不同聚丙烯土工编织布筋材强度下的应力 - 应变的特性, 并据此提出桩体强度及模量计算公式。论文得出如下主要结论:

(1) 三轴压缩下土工织物散体桩呈剪胀破坏, 桩体上有明显的剪切带, 其剪切角与碎石的莫尔 - 库仑理论破裂角比较接近; 且编织布上剪切带处的横向筋丝发生断裂, 而纵向筋丝基本完整, 说明土工织物散体桩在筋材横向筋丝断裂时达到其强度值。

(2) 在加载初期, 土工织物散体桩应力-应变曲线下凹, 且下凹段对应的应变随围压的增大而明显增大, 而后近似线性增长至峰值应力, 随后应力随轴向应变的增大而减小并最终趋于稳定, 表现为应变软化特性, 而碎石表现为应变硬化特性。同一筋材强度、不同围压的土工织物散体桩桩体强度所对应的轴向应变值比较接近。

(3) 土工织物散体桩桩体的似黏聚力随筋材强度呈较好的线性增长关系, 其较碎石的似黏聚力大很多。而筋材对桩体碎石的内摩擦角影响不大, 其内摩擦角随筋材强度增大会略有减小, 但很快趋于稳定。

(4) 建立了土工织物散体桩桩体强度及模量的理论计算公式, 采用试验值对理论公式进行修正, 得到强度和模量理论公式的修正系数分别为 0.86 和 1.91。经修正后的结果与试验值吻合很好。

参考文献:

- [1] RAITHEL M, KÜSTER V, LINDMARK A. Geotextile encased columns, a foundation system for earth structures, illustrated by a dyke project for a works extension in hamburg[C]// Nordic Geotechnical Meeting NGM 2004. Ystad, 2004: 1 - 10.
- [2] 陈建峰, 王波, 魏静, 等. 加筋碎石桩复合地基路堤模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 1 - 8. (CHEN Jian-feng, WANG Bo, WEI Jing, et al. Model tests of embankments on soft foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 1 - 8. (in Chinese))
- [3] RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R, LATHA G M. Behaviour of sand confined with single and multiple geocells[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17(3): 171 - 184.
- [4] WU C S, HONG Y S. Laboratory tests on geosynthetic-encapsulated sand columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(2): 107 - 120.
- [5] MIRANDA M, COSTA A D. Laboratory analysis of encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44: 269 - 277.
- [6] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 2007. (JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. 2007. (in Chinese))
- [7] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2013. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2013. (in Chinese))
- [8] 甘霖, 袁光国. 大型高压三轴试验测试及粗粒土的强度特性[J]. 大坝观测与土工测试, 1997, 21(3): 9 - 12. (GAN Lin, YUAN Guang-guo. Large high pressure triaxial test and strength properties of coarse-grained soil[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1997, 21(3): 9 - 12. (in Chinese))
- [9] 阮龙飞, 王永庆. 中远船务启东海工基地坞口围堰工程的设计与施工[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 90 - 94. (RUAN Long-fei, WANG Yong-qing. Design and construction of dock-gate cofferdam of cosco Qidong marine base[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 90 - 94. (in Chinese))
- [10] 李传旦. 加筋系袋式软体排在界牌水道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 1995(11): 32 - 35. (LI Chuan-dan. Application of mattress with reinforced strip and tied sand bag in Jiepai waterway regulation works[J]. Port & Waterway Engineering, 1995(11): 32 - 35. (in Chinese))
- [11] 杨艳燕, 黄婧. 应用不同缝纫方法的土工织物接缝强度比较研究[J]. 科技创业月刊, 2007, 20(6): 176 - 177. (YANG Yan-qing, HUANG Jing. Comparison of the strength applied different seaming methods in geotextile[J]. Pioneering with Science & Technology Monthly, 2007, 20(6): 176 - 177. (in Chinese))
- [12] 陆士强. 土工合成材料应用原理[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994: 1 - 21. (LU Shi-qiang. Application principles of geosynthetic materials[M]. Beijing: China Water Power Press, 1994: 1 - 21. (in Chinese))
- [13] 秦尚林, 陈善雄, 韩卓, 等. 巨粒土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 189 - 193. (QIN Shang-lin, CHEN Shan-xiong, HAN Zhuo, et al. Large-scale triaxial test study of behavior of over coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 189 - 193. (in Chinese))