

DOI: 10.11779/CJGE201901016

不同填料土工织物散体桩桩体单轴压缩试验

陈建峰¹, 花嘉嘉¹, 冯守中²

(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)

摘要: 选用碎石、圆砾和砂 3 种填料, 以及 5 种不同强度的聚丙烯土工编织布套筒, 制备成 15 组尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 填料压实度 $\lambda=0.9$ 的土工织物散体桩, 对桩体进行单轴压缩试验, 以研究不同填料土工织物散体桩在轴向荷载作用下的强度特性。研究表明: 不同填料桩体在单轴压缩下具有不同的破坏模式, 碎石填料局部刺破编织布套筒形成较大破口, 圆砾填料致套筒横向筋丝断裂、纵向筋丝分离, 而砂填料致套筒横向筋丝断裂较均匀且无明显破口。桩体强度与筋材和填料强度均呈正相关关系, 3 种填料桩体轴向应力-应变曲线在加载初期因填料受到初始压密而略有上凹, 而后近似线性增长至桩体强度, 峰值强度后呈现应变软化现象; 综合本文试验数据及前期所做的单轴、三轴压缩试验数据, 修正了桩体强度理论计算公式, 得到的桩体强度修正值与试验值吻合较好。

关键词: 土工织物散体桩; 单轴压缩试验; 应力-应变曲线; 桩体强度; 填料

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)01-0148-06

作者简介: 陈建峰(1972-), 男, 浙江余姚人, 工学博士, 教授, 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。

Uniaxial compression tests on geosynthetic-encased stone columns with different fills

CHEN Jian-feng¹, HUA Jia-jia¹, FENG Shou-zhong²

(1. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Wuhan Guangyi Transportation Science and Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: 15 samples of geosynthetic-encased stone columns (GESC) with a dimension of $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ and degree of compaction of 0.9 are made using three types of fills of crushed stone, pebble and sand and five different strength woven sleeves made of polypropylene geotextiles. The uniaxial compression tests are performed on the samples to investigate the characteristics of strength of GESC. The results show that different failure modes happen to the GESC body with different fills under uniaxial compression. The crushed stone can partly puncture the woven sleeves to produce obvious holes and pebble is extruded to break the transverse polypropylene slices, while the longitudinal slices are separated. The sand evenly breaks the transverse slices with no obvious holes on sleeves. The strength of the GESC body has a positive relationship with the strength of the sleeves and the fills. The stress-strain curve of GESC body at preliminary loading stage is mildly concave down due to the initial densification, then increases linearly up to the peak stress, and subsequently decreases, showing strain-softening characteristics. Based on the present data and those of uniaxial and triaxial compression tests carried out by the authors before, the theoretical formula for the strength of the GESC body is amended, and the results of the modified formulas are proved to be in good agreement with the experimental ones.

Key words: geosynthetic-encased stone column; uniaxial compression test; stress-strain curve; strength of GESC; fill

0 引言

碎石桩具有透水性能好、抗液化能力强等优点, 被广泛应用于软土地基处理。但当软土强度很低(一般不排水抗剪强度小于 15 kPa)时, 桩体在轴向荷载下极易发生鼓胀破坏^[1]。土工织物散体桩又称为加筋碎石桩, 其是用土工合成材料套筒包裹散体填料(碎石、砾石、砂等)桩体, 能显著提高散体填料桩体在

软土中的承载力, 并减小地基沉降量^[2-5]。

土工织物散体桩已在软土地基堤坝或路堤工程中得到应用^[6-9], 但目前还缺少土工织物散体桩复合地基的设计计算方法^[10]。然而按复合地基理论进行地基承载力计算时, 需要首先确定桩体本身的强度。土工织

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572266, 41772289)

收稿日期: 2018-01-01

物散体桩不是刚性桩,但也非一般的柔性桩,其强度应与组成桩体的土工合成材料及散体填料的物理力学性质相关,这应该可以通过对桩体进行单轴压缩或三轴压缩试验得出这些量值之间的相关关系。

目前对土工织物散体桩桩体已开展了一些单轴压缩和三轴压缩试验。Wu 等^[11]对土工织物散体桩进行了三轴压缩试验,发现随着筋材强度的提高,桩体似黏聚力也得到提高;Gniel 等^[12]对土工织物散体桩进行单轴压缩试验,发现桩体刚度和承载力随着筋材刚度的增大均得到提高;Miranda 等^[13]对土工织物散体桩进行了三轴压缩试验,结果表明在低围压下土工织物对提高桩体承载力的效果较高围压下更为显著;陈建峰等^[14]对采用不同压实度碎石和不同强度聚丙烯编织布制备而成的土工织物散体桩进行单轴压缩试验,发现桩体强度与筋材强度呈较好的线性关系,而跟碎石的压实度没有相关关系;陈建峰等^[15]进而对采用同一压实度碎石和不同强度聚丙烯编织布制备而成的土工织物散体桩进行不同围压下的大三轴试验,得出桩体的似黏聚力随筋材强度呈较好的线性增长关系,而筋材对桩体碎石的内摩擦角影响不大。

上述研究均对一种散体填料的土工织物散体桩进行了单轴和三轴压缩试验,没有研究不同散体填料对桩体强度的影响。在实际应用中,土工织物散体桩桩体填料种类不限于碎石,另可采用砂和砾石等填料。本文选用 3 种相同压实度的碎石、圆砾和砂填料,以及 5 种不同强度的聚丙烯编织布套筒,对桩体进行大尺寸($\phi 300\text{ mm}\times 600\text{ mm}$)单轴压缩试验,以研究不同填料土工织物散体桩在轴向荷载作用下的强度特性。

1 桩体材料力学性能

1.1 筋材

本文采用常州泰勒思达新材料有限公司试制的 5 种强度无缝聚丙烯土工编织布套筒。无缝套筒采用圆织机加工而成,其直径为 300 mm。对这 5 种聚丙烯编织布筋材进行了宽条拉伸试验,得到试验曲线如图 1 所示。表 1 列出了编织布强度、对应的拉伸率及拉伸模量。

表 1 筋材力学指标

Table 1 Mechanical properties of woven textiles			
筋材编号	拉伸强度 $T/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	对应伸长率 $\varepsilon_r/\%$	拉伸模量 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
1	25.2	19.7	128
2	45.3	14.3	317
3	50.2	11.2	446
4	71.0	22.4	316
5	101.0	25.1	402

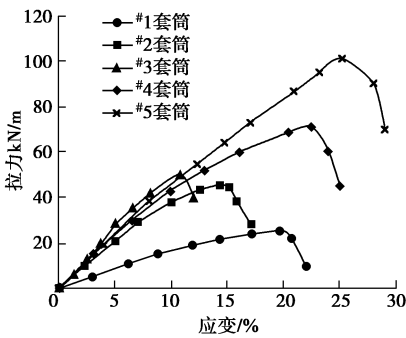


图 1 筋材拉伸试验曲线

Fig. 1 Tensile curves of woven textiles

1.2 填料

本文试验采用碎石、圆砾和砂 3 种填料,见图 2 所示。对这 3 种填料分别进行级配试验和最大、最小干密度试验,图 3 为级配试验曲线。土工织物散体桩桩体单轴压缩试验中,将 3 种填料压实度均控制为 $\lambda=0.9$,故对该压实度下的 3 种填料进行了法向应力分别为 100, 200, 300, 400 kPa 下的大型直剪试验,得到如图 4 所示的填料抗剪强度与法向应力的关系曲线。

表 2 列出了通过上述试验获得的 3 种填料物理力学指标。可见,除最小干密度 ρ_{dmin} 外,碎石、圆砾和砂的物理力学指标依次降低。

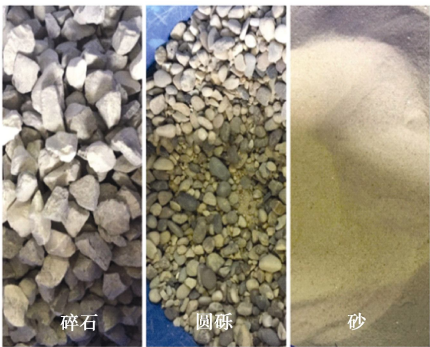


图 2 土工织物散体桩填料

Fig. 2 Fills of GESCs

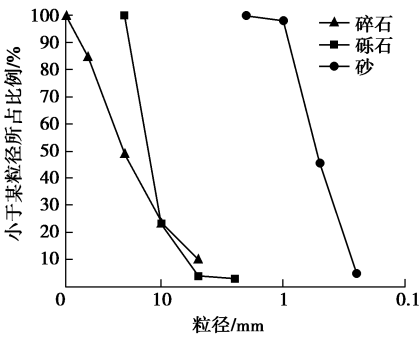


图 3 填料级配曲线

Fig. 3 Grading curves of fills

表 2 填料物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical properties of fills							
填料	平均粒径 d_{50}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	最大干密度 $\rho_{d\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho_{d\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	似黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
碎石	21.8	7.3	1.7	2.05	1.39	10.9	44.7
圆砾	13.5	2.2	1.2	1.87	1.46	6.41	39.3
砂	0.6	1.4	1.0	1.81	1.42	2.53	31.0

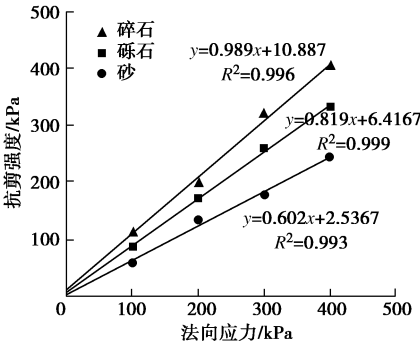


图 4 填料抗剪强度 - 法向应力曲线

Fig. 4 Shear strength-normal stress curves of fills

2 试验结果分析

2.1 试验概况

本文单轴压缩试验中，桩体高度 $H=600\text{ mm}$ ，半径 $R_0=150\text{ mm}$ ，桩体填料压实度 $\lambda=0.9$ 。根据干密度 $\rho_d=\lambda\rho_{d\max}$ 和桩体体积来计算所需填料质量，将聚丙烯编织布套筒紧贴对开制样筒内壁放置，分 4 层放入填料并击实，每层压实高度约为 150 mm ，直至试样制备完成。图 5 为碎石填料桩体试样的制备。



图 5 土工织物散体桩试样的制备

Fig. 5 Preparation of GESC sample

采用 WDW-600KN 型伺服控制电子万能试验机进行桩体的单轴压缩试验，加载速率控制为 3.6 mm/min 。在加载过程中，土工织物散体桩桩体轴向不断压缩，伴随径向变形不断增大。图 6 为 3 种填料土工织物散体桩桩体破坏情况。由图可见，碎石和圆砾填料桩体中部鼓出显著，而砂填料桩体径向膨胀通长比较均匀，原因是砂填料颗粒细小且比较均匀，颗粒间的摩擦力（摩擦角）小，在轴向压力下砂颗粒更易径向移动。

桩体在达到峰值应力（强度）时，3 种填料桩体均在中间部位开始破坏。碎石填料桩体中间部位筋丝裂开成较大的破口，如图 6（a）所示；圆砾填料桩体中间部位横向筋丝断裂，纵向筋丝分离呈纱网状，如图 6（b）所示；而砂填料桩体中间部位横向筋丝断裂较为均匀、分散，无明显破口，最终砂填料从各自的破口中漏出而导致桩体失效，如图 6（c）所示。这是由于碎石填料颗粒较大且有棱角，容易在套筒中产生应力集中而刺破编织布形成破口；而砂填料颗粒小，其均匀挤胀套筒而不形成明显的应力集中，导致横向筋丝较为均匀崩断。

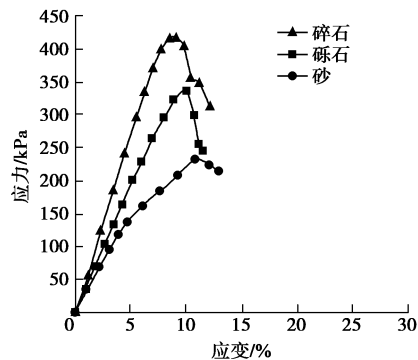


图 6 土工织物散体桩桩体破坏情况

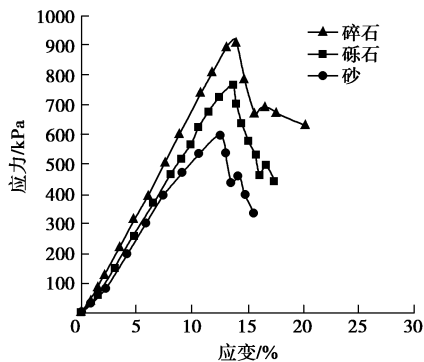
Fig. 6 Failure of GESC body

2.2 桩体轴向应力 - 应变关系和强度特性

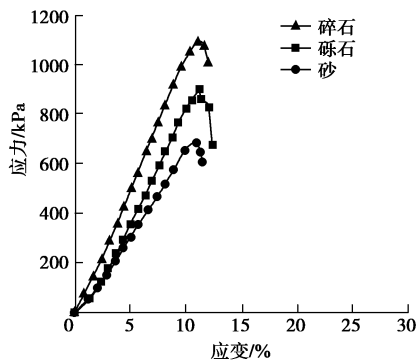
图 7 为不同筋材强度下 3 种填料桩体轴向应力 - 应变曲线。由图可见, 桩体应力 - 应变曲线在加载初期因填料受到初始压密而略有上凹, 而后近似线性增长至桩体强度, 峰值强度后则应力随应变降低, 呈现应变软化现象。



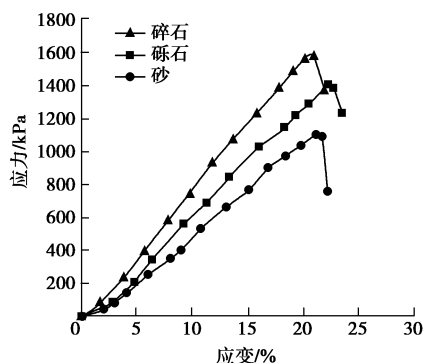
(a) $T=25.2 \text{ kN/m}$



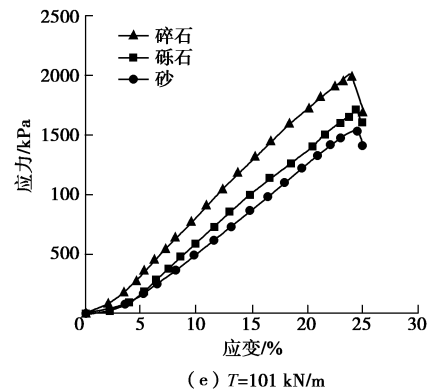
(b) $T=45.3 \text{ kN/m}$



(c) $T=50.2 \text{ kN/m}$



(d) $T=71.0 \text{ kN/m}$



(e) $T=101 \text{ kN/m}$

图 7 土工织物散体桩应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of GESCs body

图 8 为不同填料桩体强度与筋材强度之间的关系。由图 8 可见, 对于同一种填料的桩体, 其强度与筋材强度呈较好的线性关系, 这与笔者^[14]对同一种不同压实度碎石填料土工织物散体桩进行单轴压缩试验所得出的结果一致; 而对于同一种筋材强度的桩体, 其强度则随砂、圆砾、碎石填料依次增大。这表明, 土工织物散体桩单轴压缩强度跟筋材强度和填料性质均相关, 其随筋材和填料强度的增大而增大。

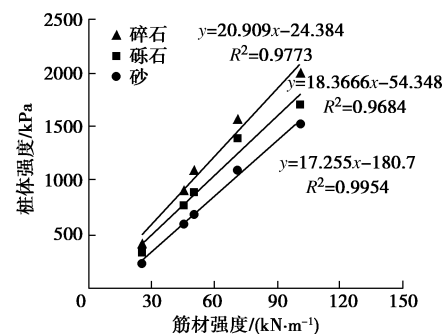


图 8 不同填料桩体强度与筋材强度关系

Fig. 8 Relationship between strength of GESCs with different fills and that of reinforcements

2.3 桩体强度分析

根据莫尔-库仑强度理论和极限平衡原理推导出土工织物散体桩强度理论公式如下^[15]:

$$p_0 = \left(p_{r1} + \frac{T}{R} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

式中 p_0 为桩体强度理论值 (kPa); p_{r1} 为围压 (kPa), 单轴压缩试验条件下, $p_{r1}=0$; T 为筋材强度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$); R 为桩体半径 (m), $R=(1+\varepsilon_r)R_0$, 其中 ε_r 为套筒筋材在拉伸强度下的伸长率, R_0 为桩体初始半径; φ 为填料内摩擦角 ($^\circ$)。

根据式 (1) 计算本文 3 种不同填料和 5 种不同强度筋材的桩体强度理论值 p_0 。图 9 为理论值 p_0 与试验值的比较, 可见, 数据点位于 1:1 线之上, 表明理论值较试验值偏大一些。但这 3 种不同填料的偏大程度

还是略有差异, 碎石填料偏大程度最大, 圆砾填料其次, 砂填料的理论值则与试验值最接近。其原因是, 按理论公式 (1), 桩体强度是编织布在填料的纯挤胀压力下达到其拉伸强度 T 时得到的, 但实际试验中填料对编织布都会有不同程度的损伤, 如 2.1 节所述, 碎石填料颗粒较大且有棱角, 其刺破编织布形成破口而导致桩体破坏, 故桩体破坏是在编织布小于其拉伸强度的应力下发生的; 砂填料颗粒小, 其均匀挤胀套筒而不形成明显的应力集中, 致横向筋丝断裂较为均匀, 故接近桩体理论强度的状态; 而圆砾填料对编织布的损伤介于碎石和砂之间。

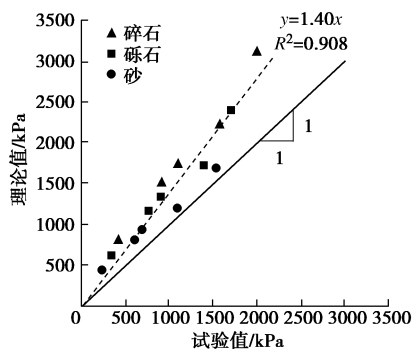


图 9 桩体强度理论值和试验值的关系

Fig. 9 Comparison between theoretical and measured strengths of GESCs

将笔者前期所做的采用 3 种不同压实度 ($\lambda = 0.78, 0.84, 0.9$) 碎石和 4 种不同强度筋材 ($T=33, 43, 52, 65 \text{ kN/m}$) 的共 12 组单轴压缩试验数据^[14], 以及采用同一压实度 ($\lambda=0.87$) 碎石、4 种不同围压 ($\sigma_3=50, 100, 150, 200 \text{ kPa}$) 和 4 种不同强度筋材 ($T=33, 43, 52, 65 \text{ kN/m}$) 的共 16 组大三轴试验数据^[15], 连同本文 15 组试验数据一起, 与采用式 (1) 计算的相应理论值进行比较, 如图 10 所示。由图 10 可见, 同上述规律一致, 桩体强度理论值均偏大于试验值, 但随着数据点的增加, 二者的线性关系较图 9 更好一些, 线性相关性 R^2 达到 0.913。

根据图 10 线性拟合公式, 其试验均值是理论均值的 $1/1.51 \approx 0.66$ 倍, 因此对式 (1) 进行修正, 给出折减系数 $\lambda = 0.66$, 即对理论值均乘以折减系数 $\lambda = 0.66$, 修正公式为

$$p_p = \lambda \left(p_{r1} + \frac{T}{R} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

式中, p_p 为桩体强度理论修正值 (kPa)。

修正后的结果如图 11 所示, 数据点均集中在 1:1 线上及附近。为判断强度理论修正值的离散程度, 统计强度试验值与理论修正值比值的平均值 $\mu = 0.986$, 标准差 $\sigma = 0.123$, 得到强度试验值与理论修正

值比值的变异系数 $\text{COV}=12.5\%$ 。一般岩土工程极限状态设计可靠度标定可接受的变异系数范围为 $\text{COV} \leq 30\%$ ^[16], 因此本文得到的土工织物散体桩桩体强度理论修正值的离散程度不大, 结果可信。

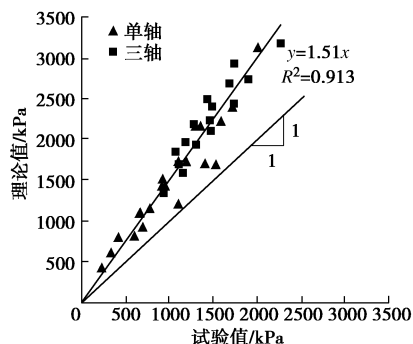


图 10 桩体强度理论值和综合试验值的关系

Fig. 10 Comparison between theoretical and comprehensive measured strengths of GESCs

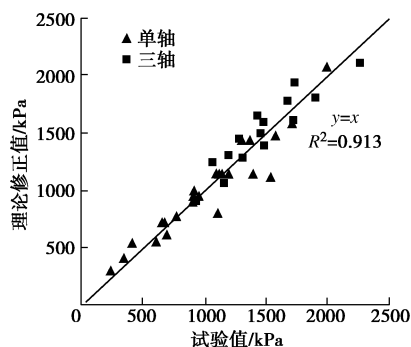


图 11 桩体强度理论修正值和试验值的关系

Fig. 11 Comparison between modified theoretical and measured strengths of GESC body

3 结 论

本文选用 3 种相同压实度的碎石、圆砾和砂填料, 以及 5 种不同强度的无缝聚丙烯编织布套筒, 对桩体进行大尺寸单轴压缩试验, 以研究不同填料土工织物散体桩在轴向荷载作用下的强度特性。本文得出如下 3 点结论。

(1) 不同填料土工织物散体桩桩体在单轴压缩下具有不同的破坏模式。碎石和圆砾填料桩体中部鼓出显著, 碎石填料局部刺破套筒编织布形成较大破口, 圆砾填料致套筒横向筋丝断裂、纵向筋丝分离; 而砂填料桩体通长鼓胀比较均匀, 套筒横向筋丝较均匀断裂, 且无明显破口。

(2) 桩体强度与筋材和填料强度均呈正相关关系。3 种填料桩体轴向应力 - 应变曲线在加载初期因填料受到初始压密而略有上凹, 而后近似线性增长至

桩体强度, 峰值强度后呈现应变软化现象。

(3) 综合本文及前期所做的单轴、三轴压缩试验共 43 组数据, 修正了桩体强度理论计算公式, 得到的桩体强度修正值与试验值吻合较好。

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. Linköping, 2004: 1 – 10.
- [2] MURUGESAN S, RAJAGOPAL K. Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **136**(1): 129 – 139.
- [3] GNIEL J, BOUAZZA A. Construction of geogrid encased stone columns: a new proposal based on laboratory testing[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(1): 108 – 118.
- [4] 赵明华, 顾美湘, 张 玲, 等. 竖向土工加筋对碎石桩承载变形影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1587 – 1593. ((ZHAO Ming-hua, GU Mei-xiang, ZHANG Ling, et al. Model tests on influence of vertical geosynthetic-encasement on performance of stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1587 – 1593. (in Chinese))
- [5] 陈建峰, 王 波, 魏 静, 等. 加筋碎石桩复合地基路堤模型试验[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))
- [6] RAITHEL M, KIRCHNER A, SCHADE C, et al. Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns-state of the art[C]// Proceedings of GeoFrontiers. Reston, 2005: 1 – 11.
- [7] LEE D Y, YOO C, PARK S, et al. Field load tests of geogrid encased stone columns in soft ground[C]// Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, 2008: 521 – 524.
- [8] GNIEL J, BOUAZZA A. Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(3): 167 – 175.
- [9] ARAUJO G L S, PALMEIRA E M, CUNHA R P. Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil[J]. Geosynthetics International, 2009, **16**(6): 433 – 451.
- [10] CHEN J F, LI L Y, XUE J F, et al. Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, **43**(5): 424 – 431.
- [11] WU C S, HONG Y S. A simplified approach for evaluating the bearing performance of encased granular columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(4): 339 – 347.
- [12] GNIEL J, BOUAZZA A. Construction of geogrid encased stone columns: a new proposal based on laboratory testing[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(1): 108 – 118.
- [13] MIRANDA M, COSTA A D. Laboratory analysis of encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, **44**(3): 269 – 277.
- [14] 陈建峰, 曾 岳, 冯守中, 等. 土工织物散体桩单轴压缩试验研究[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(6): 181 – 187. (CHEN Jian-feng, ZENG Yue, FENG Shou-zhong, et al. Uniaxial compression test of geosynthetic-encased stone columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(6): 181 – 187. (in Chinese))
- [15] 陈建峰, 王兴涛, 曾 岳, 等. 土工织物散体桩桩体大三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(12): 2212 – 2218. (CHEN Jian-feng, WANG Xing-tao, ZENG Yue, et al. Study on large triaxial compression tests of geosynthetic-encased stone column body[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(12): 2212 – 2218. (in Chinese))
- [16] BATHURST R J, ALLEN T M, WALTERS D L. Reinforcement loads in geosynthetic walls and the case for a new working stress design method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, **23**(4): 287 – 322.