

DOI: 10.11779/CJGE202201006

# 筋箍碎石桩桩 - 土界面摩擦特性试验研究及离散元模拟

张玲<sup>1, 2, 3</sup>, 徐泽宇<sup>1, 2, 3</sup>, 姚攀<sup>1, 2, 3</sup>, 赵明华<sup>1, 2, 3</sup>, 陈龙<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410082;  
3. 湖南大学建筑安全与环境国际联合研究中心, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 筋箍碎石桩复合地基桩 - 土界面摩擦特性对其荷载传递机理极为重要。首先通过室内大型直剪试验, 研究了法向应力、软土含水率、碎石料相对密实度、筋材设置等因素对筋箍碎石桩桩 - 土界面摩擦特性的影响。在此基础上, 采用离散元方法分析了筋材设置、筋材开孔率、筋材抗拉刚度等因素对界面摩擦特性的影响。室内试验及数值分析结果表明: 桩土界面抗剪强度随法向应力、碎石料相对密实度、筋材开孔率、筋材抗拉刚度的增大而增大, 随软土含水率的增加而降低; 界面摩擦系数则随法向应力、软土含水率的增大而减小, 随碎石料相对密实度、筋材开孔率的增大而提高, 筋材抗拉刚度对其影响较小。

**关键词:** 筋箍碎石桩; 桩 - 土界面; 直剪试验; 室内试验; 离散元模型

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2022)01 - 0072 - 10

**作者简介:** 张玲(1982 - ), 女, 浙江临海人, 副教授, 博士生导师, 主要从事桩基础和特殊土地基处理方面等研究工作。E-mail: zhanglhd@163.com。

## Experimental study and discrete element simulation on interface friction of geo-encased stone columns

ZHANG Ling<sup>1, 2, 3</sup>, XU Ze-yu<sup>1, 2, 3</sup>, YAO Pan<sup>1, 2, 3</sup>, ZHAO Ming-hua<sup>1, 2, 3</sup>, CHEN Long<sup>1, 2, 3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The friction characteristics of the column-soil interface is important to the load transfer mechanism of geo-encased stone columns. In this study, model tests are conducted using a large direct shear device to investigate the effects of the normal stress, water content of soft soil, relative density of stone materials and geosynthetic on the characteristics of the column-soil interface. On this basis, the discrete element method is adopted to study the influences of geosynthetic application, aperture ratio of geosynthetic and geosynthetic stiffness. The results indicate the interfacial shear strength increases with the increase of the normal stress, relative density of stone materials, aperture ratio of geosynthetic and geosynthetic stiffness, and decreases with the increase of the water content in soft soil. The interfacial friction coefficient decreases with the increase of the normal stress and water content in soft soil, and increases with the increase of the relative density of stone materials and the aperture ratio of geosynthetics. The influences of geosynthetic stiffness are insignificant to the interfacial friction angle.

**Key words:** geo-encased stone column; column-soil interface; direct shear test; laboratory test; discrete element model

## 0 引言

筋箍碎石桩是在普通碎石桩外包裹土工格栅等抗拉性能良好的筋材形成的一种新型桩体(图1), 其作为竖向增强体可置换部分软基以形成复合地基, 支承上部结构荷载, 加速软土地基固结, 减小地基总沉降与差异沉降, 提高地基承载力和整体稳定性<sup>[1-3]</sup>。筋箍碎石桩复合地基技术已成功应用于公(铁)路路基处治工程实践。

路堤荷载下, 由于桩土刚度差异, 桩 - 土界面处

将产生竖向相对剪切位移。研究筋箍碎石桩桩 - 土界面摩擦特性对复合地基荷载传递机理至关重要, 是准确预测承载变形特性的前提。Castro等<sup>[4]</sup>和Pulko等<sup>[5]</sup>基于轴对称单元体模型, 视碎石桩为弹塑性材料, 推导出筋箍碎石桩复合地基沉降计算解析解, 但未考虑桩 - 土界面摩擦阻力。桩承式路堤系统中, 桩 - 土间

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078205); 湖南省基金项目(2020JJ3013); 湖南省研究生科研创新项目(QL20210108)  
收稿日期: 2021 - 03 - 23

存在差异沉降<sup>[6-7]</sup>, 桩 - 土界面摩擦效应对其承载变形特性的影响不容忽视<sup>[8]</sup>。因此采用等应变假设、忽略桩土界面摩擦效应不能准确反映筋箍碎石桩的荷载传递机理。Zhang等<sup>[9-10]</sup>、Zhou等<sup>[11]</sup>提出了考虑桩 - 土界面剪切滑移的复合地基沉降及桩身鼓胀变形计算方法, 其中界面摩阻力参考Wu等<sup>[12]</sup>提出的桩土界面极限摩阻力表达式。Deb等<sup>[13]</sup>、Zhou等<sup>[14]</sup>将桩周土的剪切变形视为以桩轴线为轴心的同心圆, 得到桩 - 土界面及径向相邻土体单元间的竖向摩阻力。总的来说, 目前筋箍碎石桩桩 - 土界面摩阻力表达式大多参考刚性桩桩土界面摩阻力的理论推导, 基于室内试验或数值模拟的筋箍碎石桩界面摩擦效应研究的相关成果甚少。近年来, 国内外学者针对筋箍碎石桩承载变形机理开展了大量试验研究<sup>[15-23]</sup>。然由于测试难度问题, 目前试验研究大多未关注到桩 - 土间剪切滑移和由此产生的界面摩擦问题。



图 1 筋箍碎石桩工程图片

Fig. 1 Geo-encased stone column in engineering practice

界面摩擦特性的研究通常可借助室内直剪试验。Liu等<sup>[24]</sup>通过大型直剪试验定量分析了砂土中加筋体对筋土界面抗剪强度的贡献; 徐超等<sup>[25]</sup>开展了直剪试验研究了法向应力、剪切速率和筋材性质对筋 - 土界面强度的影响; 凌天清等<sup>[26]</sup>通过室内试验获得了筋材类型、填料压实度等因素对筋土界面强度的影响规律。然而, 现有研究主要涉及筋 - 土界面摩擦特性, 仅考虑两种材料, 即上、下剪切盒内为同一性质土样, 盒间布置土工材料。而筋箍碎石桩桩 - 土界面摩擦特性涉及碎石 - 筋材 - 土3种材料之间复杂的相互作用, 相关研究鲜有报道。

综上所述, 有必要开展筋箍碎石桩桩 - 土界面摩擦特性研究。本研究拟采用大型直剪仪, 分析法向应力、桩周软土含水率、碎石料相对密实度、筋材设置等因素对桩 - 土界面抗剪强度特性以及界面摩擦特性的影响。此外, 基于离散元数值方法模拟室内大型直剪试验, 进一步揭示筋箍碎石桩桩 - 土界面摩擦特性,

为准确预测筋箍碎石桩复合地基承载变形特性提供依据。

## 1 室内直剪试验

### 1.1 试验设备

试验采用 Geotest 摩擦 - 剪切仪 S2450, 剪切盒尺寸为 300 mm×300 mm×75 mm。水平及竖向位移均由 LVDT 传感器进行测量。本试验使用文献[27]建议的剪切速率 (2 mm/min), 当剪切位移达到 60 mm 时停止试验。

### 1.2 试验材料

本次直剪试验所用材料如图 2 所示。



图 2 试验材料

Fig. 2 Materials used in tests

桩周土取自湘江枯水期的淤泥质土, 天然含水率  $w$  在 30%~60%, 其他主要物理参数如表 1 所示。根据本试验方案, 将软土制成 4 种不同含水率 ( $w=25\%$ , 30%, 35%, 40%) 的土样。由直剪试验可得:  $w$  从 25%增大至 40%, 黏聚力由 16.36 kPa 减小至 3.20 kPa, 内摩擦角由 13.21° 减小至 0.61°。碎石料选自湖南益阳段石灰岩采石场, 碎石颗粒级配曲线见图 3, 相对密实度  $D_r=0.5$  时的物理力学参数见表 2。试验所用土工格栅由聚丙烯材料切割而成, 格栅网孔尺寸为 8 mm×8 mm, 肋宽 8 mm, 力学参数见表 3。

表 1 软土物理参数

Table 1 Physical properties of soft soil

土粒相对质量密度 $G_s$	最大干密度 $\rho_{dmax} / (g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	塑性指数 $I_p$
2.55	1.73	45.8	19.6	26.3

表 2 碎石料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of stone particles

不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	黏聚力 $c / kPa$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	最大干密度 $\rho_{max} / (g \cdot cm^{-3})$	最小干密度 $\rho_{min} / (g \cdot cm^{-3})$
6.22	2.34	4	42	1.719	1.607

表 3 土工格栅力学参数

Table 3 Mechanical properties of geogrids

拉伸强度 $(kN \cdot m^{-1})$	伸长率 $\%$	抗拉刚度 $(kN \cdot m^{-1})$
42.0	16.0	262.5

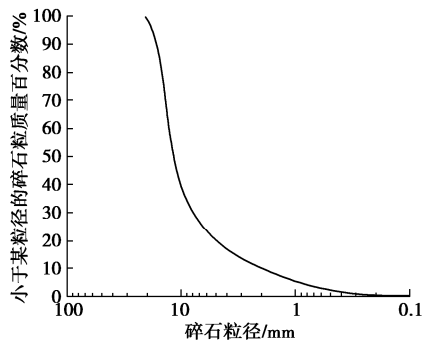


图3 碎石料颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of stone particles

### 1.3 试验方案

碎石桩外增设土工格栅套筒, 通过筋材的环箍效应, 可与碎石料形成刚度较大的整体, 且由于碎石多棱角, 套筒与碎石接触面较粗糙, 故路堤荷载下桩土相对滑移可能主要出现在筋材和软土界面处或紧挨桩身的桩周土局部范围内。为尽可能模拟上述实际可能出现的滑动剪切面, 参考普通加筋土直剪试验试样布置形式, 再考虑到一般情况下, 软土的压缩量大于碎石料, 直剪试验试样布置如图4所示, 直剪仪上盒充填软土, 下盒充填碎石料, 碎石料和软土之间铺设土工格栅, 筋材的四角用钢条固定在直剪仪下盒。此外, 室内直剪试验由于仪器尺寸限制, 所采用材料与实际工程中筋箍碎石桩中的材料类型、尺寸、规格有所差异, 同时直剪试验难以模拟桩体鼓胀导致的碎石挤出格栅套筒的现象, 故结果可能与实际工程情况有一定偏差。本文直剪试验可反映筋箍碎石桩桩-筋-土发生相对剪切位移时的界面摩擦特性。

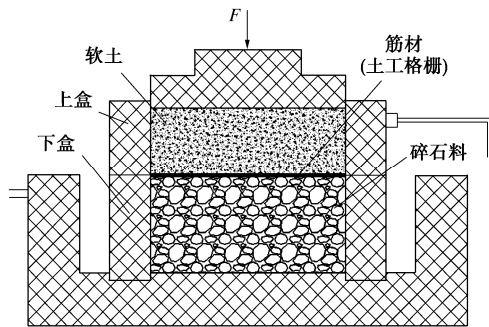


图4 直剪试验试样布置示意图

Fig. 4 Arrangement of sample in the shear test

试验方案见表4, A组研究软土含水率的影响,  $w=25\%$ ,  $30\%$ ,  $35\%$ ,  $40\%$ ; B组研究碎石料相对密实度的影响,  $D_r=0.3$ ,  $0.5$ ,  $0.8$ ; C组研究筋材设置情况的影响。每组试验通过控制碎石料相对密实度和软土的含水率以保证试验结果的可比性。碎石料按照所选颗粒级配采用搅拌机拌和均匀, 根据碎石料相对密实度和填筑体积称量出所需质量, 随后分层压实填入剪切盒中。软土按设定好的含水率配置土样, 放置24h后再分层压实填入剪切盒。

表4 试验方案

Table 4 Test programs of shear tests

组名	软土含水率 $w/\%$	碎石料相对密实度 $D_r$	筋材	法向应力/kPa
A	25, 30, 35, 40	0.5	有	25, 50, 100, 150, 200
B	30	0.3, 0.5, 0.8	有	25, 50, 100, 150, 200
C31-T35	30	0.5	有, 无	25, 50, 100, 150, 200

## 2 桩-土界面强度特性分析

本次直剪试验所得应力-位移曲线均无峰值, 依据《公路土工试验规程: JTGE40—2007》, 取沿剪切方向应变达10% (30 mm) 时对应的剪切应力作为界面抗剪强度。

### 2.1 桩周土含水率对界面抗剪强度特性的影响

图5为碎石料相对密实度  $D_r=0.5$ , 设置土工格栅加筋材料, 软土含水率分别为25%, 30%, 35%, 40%时, 桩-土界面抗剪强度与法向应力关系曲线。界面抗剪强度随法向应力呈线性增加。根据莫尔库仑强度准则, 界面抗剪强度与法向应力的关系为

$$\tau_{ps} = c_{ps} + \sigma \tan \varphi_{ps} \quad (1)$$

式中,  $\tau_{ps}$  为桩-土界面抗剪强度,  $\sigma$  为法向应力,  $c_{ps}$  为界面黏聚力,  $\varphi_{ps}$  为界面摩擦角。

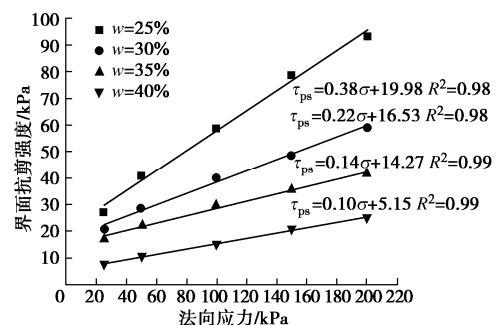


图5 不同软土含水率时界面抗剪强度与法向应力的关系曲线

Fig. 5 Relationship between interfacial shear strength and normal stress under different water contents of soil

表5为不同含水率下界面抗剪强度指标: 界面黏聚力  $c_{ps}$  (对应图5拟合直线的截距) 和界面摩擦角  $\varphi_{ps}$  (对应图5拟合直线与x轴的夹角)。由图5及表5可见, 软土含水率对界面抗剪强度  $\tau_{ps}$  及抗剪强度指标 ( $c_{ps}$ 、 $\varphi_{ps}$ ) 存在明显影响: ①同一法向应力下, 界面抗剪强度随软土含水率增加而减小。例如: 图5中法向应力  $\sigma=150$  kPa,  $w$  从25%增加到40%时, 界面抗剪强度  $\tau_{ps}$  由82 kPa减至21 kPa, 降低74.4%。②随含水率  $w$  增加, 界面黏聚力  $c_{ps}$  及界面摩擦角  $\varphi_{ps}$  逐渐减小。 $w$  从25%增加到40%时,  $c_{ps}$  从19.98 kPa减至5.15 kPa, 降低74.22%;  $\varphi_{ps}$  从20.81°减至5.71°, 降低72.56%。上述现象可从两个方面解释: ①宏观方面,

随含水率增加, 软土抗剪强度和抗剪强度指标减小, 而桩土界面抗剪强度与软土抗剪强度正相关<sup>[28]</sup>; ②细观方面, 软土含水率增加时, 水在较大颗粒表面形成润滑剂, 降低土颗粒间的摩擦阻力。对细小颗粒而言, 结合水膜随含水率的增加而增厚, 甚至会形成富余的自由水, 使土粒间的电分子引力减弱, 因此表现出土样抗剪强度指标随含水率增加而降低的现象。虽然直剪试验无法测定出剪切过程中的排水固结情况, 但不同含水率情况下的直剪试验可间接反映筋箍碎石桩排水固结对界面摩擦效应的影响。设置筋箍碎石桩可加速软土排水固结, 强化桩土界面摩擦性能, 提高桩侧摩擦阻力和地基承载力。

表 5 不同软土含水率下的桩 - 土界面抗剪强度指标

Table 5 Shear strength properties of column-soil interface under different water contents of soil

含水率 $w/\%$	界面黏聚力 $c_{ps}/\text{kPa}$	界面摩擦角 $\varphi_{ps}/(^{\circ})$
25	19.98	20.81
30	16.53	12.41
35	14.27	7.97
40	5.15	5.71

### 2.2 碎石料相对密度对界面抗剪强度的影响

图 6 为软土含水率  $w=30\%$ , 设置加筋材料, 碎石料相对密度  $D_r=0.3, 0.5, 0.8$  时, 界面抗剪强度与法向应力关系。由图 6 可得: ①界面抗剪强度随碎石料相对密度增加而提高。当法向应力  $\sigma=100 \text{ kPa}$ ,  $D_r$  从 0.3 增大至 0.8 时, 界面抗剪强度由 33.4 kPa 增大至 44.8 kPa, 提高 34.13%。②碎石料相对密度  $D_r$  对桩土界面抗剪强度的影响主要表现在界面黏聚力  $c_{ps}$  的增长, 对界面摩擦角  $\varphi_{ps}$  的影响较小。例如, 当  $D_r$  从 0.3 增大至 0.8 时,  $c_{ps}$  从 11.89 kPa 增加至 21.44 kPa, 增加 80.32%; 对应的  $\varphi_{ps}$  从  $11.97^{\circ}$  增加至  $12.41^{\circ}$ , 仅增加 3.67%。这是因为碎石颗粒相对密度越大, 颗粒间孔隙小、接触更紧密, 碎石颗粒间的咬合、嵌锁作用越强, 界面附近的碎石颗粒在剪应力作用下难以发生旋转、滑移, 故碎石相对密度的增加强化了颗粒嵌锁形成的桩土界面黏聚力。

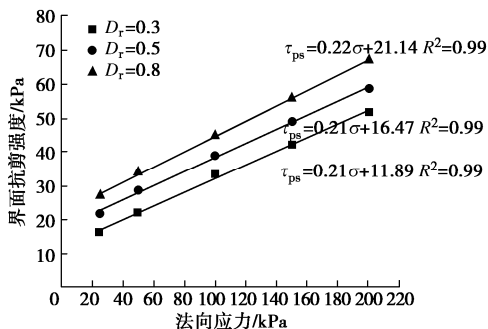


图 6 不同碎石料相对密度下界面抗剪强度与法向应力的关系曲线

Fig. 6 Relationship between interfacial shear strength and normal stress under different relative compactnesses of stone

### 2.3 筋材对界面抗剪强度的影响

图 7 为软土含水率  $w=30\%$ , 碎石料相对密度  $D_r=0.5$  时, 有、无加筋两种情况下, 桩 - 土界面抗剪强度与法向应力的关系曲线。

由图 7 可见, 有筋材时的界面抗剪强度低于无筋材时的情况。例如, 当  $\sigma=200 \text{ kPa}$  时, 无筋材与有筋材时的桩 - 土界面抗剪强度分别是 77.6, 59.0 kPa, 后者较前者降低了 23.97%。此外, 筋材铺设情况对界面抗剪强度指标也存在明显影响。无筋材和有筋材时的界面黏聚力  $c_{ps}$  分别为 22.32, 16.34 kPa, 后者较前者减小 26.79%; 相应的界面摩擦角  $\varphi_{ps}$  分别为  $15.65^{\circ}$ ,  $12.13^{\circ}$ , 后者较前者减小 22.49%。以上结果表明, 就本文所选筋材, 土工格栅不仅未能提高桩土界面摩擦性能, 反而弱化了界面的抗剪强度和抗剪强度参数。原因是本文所选筋材的表面较为光滑, 且缺少鼓出节点和加强肋, 无法约束界面附近颗粒位移, 而筋材面积占整个桩土界面的 74%, 筋材降低了碎石 - 软土的接触面积, 使得筋 - 土界面抗剪强度增长幅度小于界面抗剪强度减小的幅度, 所以表现为桩土界面抗剪强度因加筋而降低的现象。

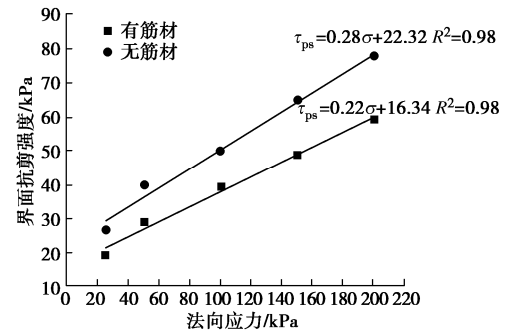


图 7 有无铺设筋材时界面抗剪强度与法向应力关系曲线

Fig. 7 Relationship between interfacial shear strength and normal stress with or without geogrids

## 3 桩 - 土界面摩擦特性分析

桩 - 土界面特性除界面强度特性 (抗剪强度  $\tau_{ps}$ , 界面抗剪强度指标  $c_{ps}$ 、 $\varphi_{ps}$ ), 还包括界面摩擦系数  $\mu$ 。参考文献<sup>[29]</sup>, 界面摩擦系数  $\mu$  定义为界面最大剪应力  $\tau_{max}$  和对应法向应力  $\sigma$  的比值:

$$\mu = \frac{\tau_{max}}{\sigma} \quad (2)$$

### 3.1 软土含水率的影响

图 8 为不同软土含水率时桩 - 土界面摩擦系数与法向应力的关系曲线。由图 8 可见: 界面摩擦系数随法向应力增大而减小, 如  $w=30\%$  时,  $\sigma=25 \text{ kPa}$  和  $200 \text{ kPa}$  时界面摩擦系数分别为 0.72 和 0.33, 减小 54.17%。虽然界面摩擦系数随法向应力增大而减小, 但并不意

味界面强度降低,相反,由前所述,界面强度随法向应力增大而提高。产生上述规律的原因是,随法向应力 $\sigma$ 增大,界面最大剪应力 $\tau_{\max}$ 增量较小,导致 $\tau_{\max}/\sigma$ 的比值降低。界面摩擦系数在法向应力较大时趋于稳定,说明此时法向应力增量引起的界面最大剪应力 $\tau_{\max}$ 增量变大,因此界面摩擦系数不会继续降低。以上现象与文献[29]所得结论类似,符合客观规律。由于界面摩擦系数不是一个常量,故分析筋箍碎石桩荷载传递时,需考虑桩体所受围压随深度增大这一因素,对所选界面摩擦系数进行适当折减。另外,桩-土界面摩擦系数随含水率增大而减小,例如:法向应力 $\sigma=150$  kPa时,软土含水率 $w$ 从25%增大到40%时,摩擦系数从0.58降低至0.14,降低75.9%。原因是含水率的增加导致软土颗粒间的粒间引力和粒间摩擦力减弱。这从侧面也反映出:实际工程中,经筋箍碎石桩排水固结后,桩周软土含水率降低,桩土摩擦系数提高,即摩擦系数将随桩周软土固结度的增加而提高。

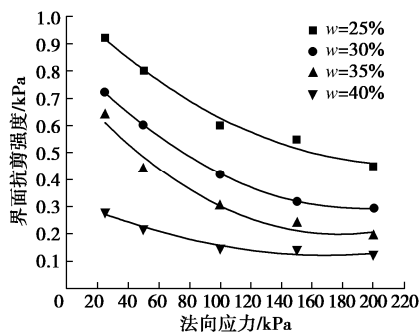


图8 不同软土含水率时界面摩擦系数与法向应力的关系曲线

Fig. 8 Relationship between interfacial friction coefficient and normal stress under different water contents of soil

### 3.2 碎石料相对密度的影响

图9给出了不同碎石料相对密实度下界面摩擦系数与法向应力关系曲线。由图9可知,对于相同法向应力,摩擦系数随碎石料相对密实度的增加而增加,但增长幅度较小。如 $\sigma=200$  kPa,相对密实度 $D_r$ 从0.3增加到0.5时,界面摩擦系数从0.26增加到0.29,增长11.54%。这是由于界面抗剪强度随相对密实度的增加而增加,而摩擦系数定义为界面抗剪强度与法向应力的比值,故界面摩擦系数会随相对密实度的增加而增加。

### 3.3 土工格栅的影响

图10是桩土界面有、无筋材情况下界面摩擦系数与法向应力关系曲线。可以看出,无筋材时界面摩擦系数大于有筋材时。法向应力 $\sigma=200$  kPa时,无、有筋材的界面摩擦系数分别是0.41和0.30,后者较前者降低26.83%。原因是本试验所用筋材表面光滑且缺乏鼓出节点和加强肋,使加筋材料对界面附近颗粒的约束能力不强,难以形成较大的格栅被动阻力<sup>[30]</sup>。

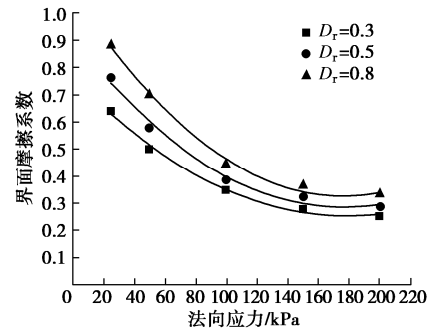


图9 不同碎石料相对密实度下摩擦系数与法向应力关系曲线

Fig. 9 Relationship between interfacial friction coefficient and normal stress under different stone relative compactnesses

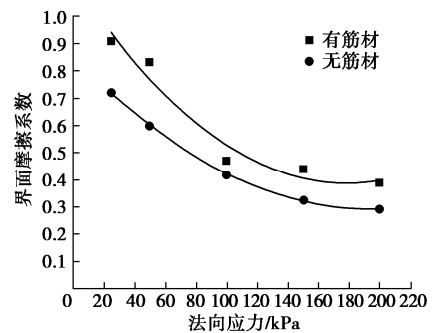


图10 有筋材铺设时界面摩擦系数与法向应力关系曲线

Fig. 10 Relationship between the interfacial friction coefficient and the normal stress with or without geogrids

## 4 离散元数值分析

### 4.1 数值模型的建立与验证

本文采用PFC<sup>3D</sup>颗粒流软件建立数值模型,模型长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 0.15\text{ m}$ ,与室内模型试验尺寸一致,如图11所示。参考文献[31],软土和筋材颗粒间的接触采用平行黏结模型,碎石颗粒间的接触采用接触黏结模型。在数值试验前对各材料参数进行标定。对碎石和黏土颗粒进行数值三轴试验,如图12所示。由于软土、碎石粒径较小,若按原尺寸模拟,在离散元中极难实现,为提高数值模型计算效率,参考文献[32]中的处理办法,以材料的重要力学参数(即碎石的摩擦角,软土的黏聚力)为判断依据,在多次尝试的基础上,合理放大颗粒粒径。本文数值直剪试验中取软土粒径范围 $3\sim 5\text{ mm}$ ,颗粒数目为15268个,碎石粒径范围 $6\sim 10\text{ mm}$ ,颗粒数目为2115个。

图13为室内试验和数值试验得到的碎石材料在不同围压下的内摩擦角,室内试验和数值试验在围压100, 200, 300 kPa条件下内摩擦角值分别为 $50.9^\circ$ ,  $44.2^\circ$ ,  $41.8^\circ$ 和 $53.4^\circ$ ,  $44.7^\circ$ ,  $40.0^\circ$ ,可见两种情况下碎石料摩擦角随围压增大而减小,其演化趋势一致且获得的摩擦角值相当接近。



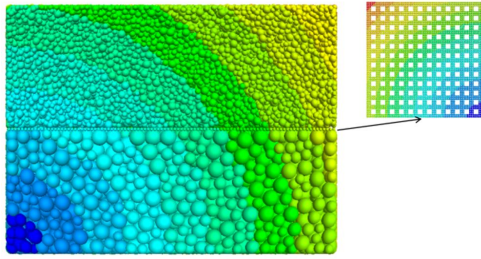


图 11 颗粒流数值模型图

Fig. 11 Numerical model used in particle flow analysis

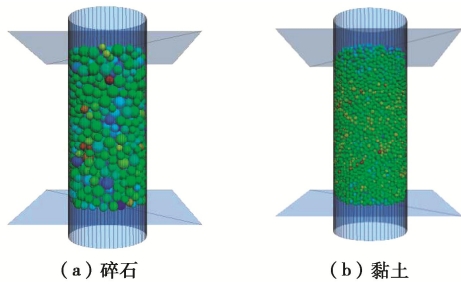


图 12 数值三轴试验

Fig. 12 Numerical triaxial tests

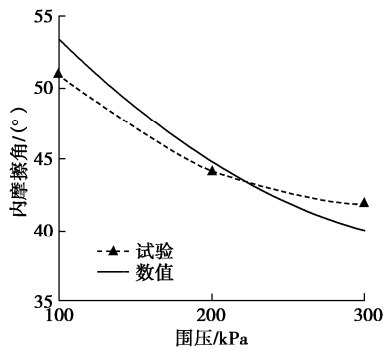


图 13 不同围压下碎石料内摩擦角室内试验和数值试验结果  
Fig. 13 Results of laboratory and numerical tests on friction angle of stone materials under different confining pressures

参考 Gu 等<sup>[33]</sup>提出的方法以黏聚力为判别依据对黏土材料进行标定。考虑到黏土材料模拟的复杂性, 仅标定含水率  $w=40\%$  的细观参数, 其黏聚力  $c_u$  为 3.2 kPa。黏土的数值三轴试验模型如图 12 (b), 黏土三轴试验的应力应变关系曲线如图 14 所示, 最大竖向应力值为 6.4 kPa, 此时轴向应变为 0.9%。由于不固结不排水三轴试验中, 试样有效围压为零, 取竖向应力最大值的一半即为黏土黏聚力, 可得黏聚力为 3.2 kPa, 与室内三轴试验所得黏聚力一致。同时根据理论公式<sup>[34]</sup>, 黏土弹性模量可估算得:  $E=200c_u=640$  kPa; 由图 14 得弹性模量  $E$  为最大竖向应力与轴向应变的比值, 即 710 kPa, 由此可见离散元结果与理论值比较接近。

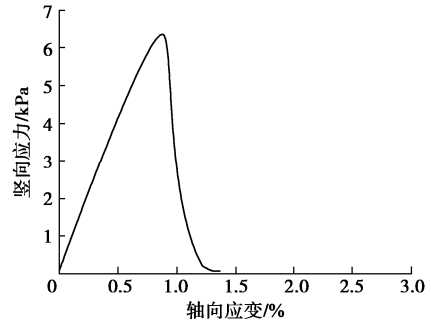
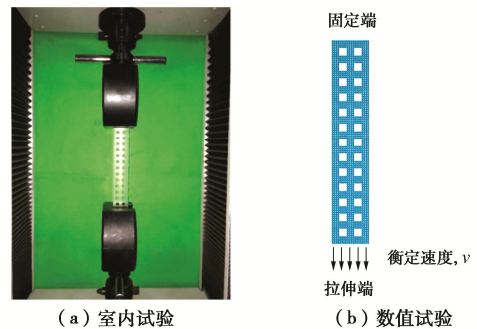


图 14 黏土数值三轴试验应力 - 应变曲线

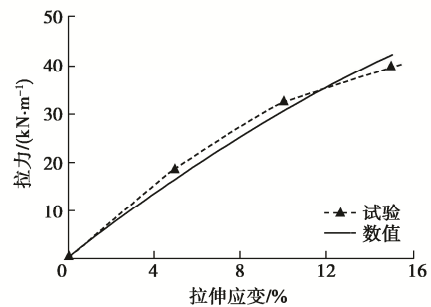
Fig. 14 Stress-strain curve of clay obtained by numerical triaxial tests

土工格栅网孔尺寸为  $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ , 肋宽为 8 mm, 肋条由四个直径为 2 mm 的 ball 颗粒黏结而成。对土工格栅进行数值拉拔试验, 对比室内拉拔试验结果完成标定, 如图 15 所示。离散元拉拔模型与室内试验保持一致, 土工格栅上端固定, 下端施加恒定速度, 并记录应力 - 应变关系, 结果如图 15 (c) 所示。可知离散元结果与室内拉拔试验结果接近, 离散元方法能准确模拟土工格栅特性。各材料的细观参数见表 6~8。



(a) 室内试验

(b) 数值试验



(c) 试验结果对比

图 15 土工格栅筋材拉拔试验

Fig. 15 Tensile tests on geogrids

表 6 碎石细观力学参数

Table 6 Micromechanical properties of crushed stone

参数	$k_n$	$k_s$	$f_{ric}$	$C_{b\_tenf}$	$C_{b\_shearf}$
取值	$6\times 10^7$	$1\times 10^7$	0.8	300	150

注:  $k_n$ ,  $k_s$  分别为法向和切向刚度;  $f_{ric}$  为摩擦系数;  $C_{b\_tenf}$  分别为法向和  $C_{b\_shearf}$  切向黏接刚度。

表7 软土细观力学参数

Table 7 Micromechanical properties of soft soil

$\mu_b$	$k_n$	$k_s$	$k_{npb}$	$k_{spb}$
0.25	$4 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	3.2	3.2

表8 土工格栅细观力学参数

Table 8 Micromechanical properties of geogrid

$\mu_b$	$k_{npb}$	$k_{spb}$	$t_{pb}$	$c_{pb}$
0.5	$1.65 \times 10^{11}$	$1.65 \times 10^5$	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$

注：表7~8中 $\mu_b$ 、 $k_{npb}$ 、 $k_{spb}$ 、 $t_{pb}$ 、 $c_{pb}$ 分别为颗粒摩擦系数、平行黏接法向刚度、平行黏接剪切刚度、平行黏接法向强度、平行黏接剪切强度。

在各材料（软土、碎石料、土工格栅）细观力学参数得到合理标定的前提下，通过对比室内试验得到的应力应变曲线验证本文所建数值模型的合理性，如图16所示。基于此，采用该数值模型进一步分析筋材设置、筋材开孔率和筋材抗拉刚度等因素对桩土界面摩擦特性的影响。

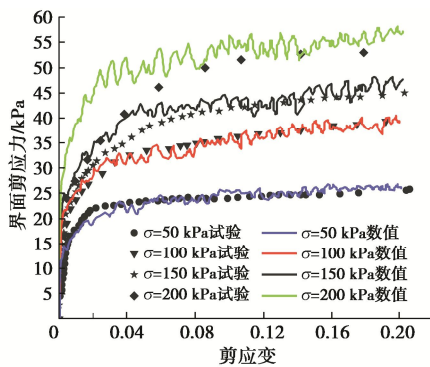


图16 颗粒流数值拟合结果与直剪试验的对比分析

Fig. 16 Comparison between numerical and experimental results

#### 4.2 筋材设置的影响

由图17可见，有加筋时碎石料相对密实度对界面的黏聚力有较大影响，界面黏聚力随相对密实度增加而增加；无加筋时，碎石料相对密实度对黏聚力的影响较小，且界面黏聚力随相对密实度增加反而略有减小。无加筋时（碎石-黏土界面），当碎石料相对密实度 $D_r$ 从0.3增至0.8时，界面黏聚力 $c_{ps}$ 从18.66 kPa减至16.83 kPa，降低9.81%，而加筋时， $c_{ps}$ 从11.89 kPa增至21.14 kPa，提高78%。原因可能是碎石料属于散体材料，自身没有黏聚力，碎石-黏土界面的黏聚力主要来自黏土黏聚力的贡献，当碎石料相对密实度增加时，剪切过程中碎石料会发生剪胀，碎石料在桩土界面所占比例增加，黏土所占比例减小，故而使得碎石-黏土界面黏聚力减小。但对于有加筋的情况（碎石-筋材-黏土复合界面），筋材可限制碎石料剪胀变形，同时为碎石料提供似黏聚力，碎石料相对密实度越大，

碎石-筋材界面压力越大，筋材约束效应越明显，相应的似黏聚力越大。

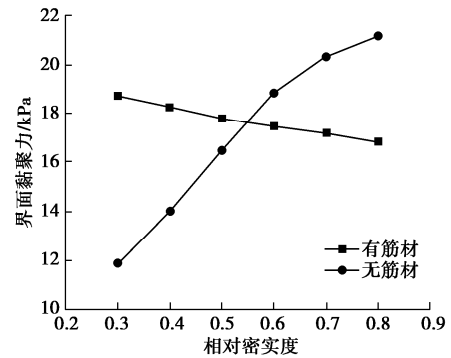


图17 界面黏聚力与碎石料相对密实度的关系曲线

Fig. 17 Relationship between interfacial cohesion and relative compactness of stone

此外，相对密实度较小（ $D_r < 0.55$ ）时，无加筋时碎石-黏土界面黏聚力大于有加筋时碎石-筋材-黏土复合界面黏聚力。原因可能是复合界面的黏聚力主要来自两个部分：黏土自身黏聚力和筋材设置引起的似黏聚力。对于碎石-黏土界面，增设筋材后，界面处黏土所占比例减小，黏土黏聚力对界面黏聚力的贡献骤减。当碎石料相对密实度较小时，筋材设置引起的似黏聚力增量不足以补偿黏土黏聚力衰减量，故此时无加筋时界面黏聚力大于有加筋时的情况，且相对密实度越小，两者的差异越大。随着相对密实度增加，筋材设置引起的似黏聚力逐渐发挥并占主导地位，故碎石料相对密实度较大（图17中 $D_r > 0.55$ ）时，无加筋时界面黏聚力小于有加筋时的情况，且相对密实度越大，两者的差异越大。

图18为桩土界面摩擦角随碎石料相对密实度的变化情况。图18中，有加筋时（碎石-筋材-黏土复合界面），碎石料相对密实度的变化对界面摩擦角的影响较小；但无加筋时（碎石-黏土界面），界面摩擦角随相对密实度的增加而显著提高，当碎石料相对密实度 $D_r$ 从0.3增至0.8时，碎石-黏土界面摩擦角从 $12.91^\circ$ 增至 $19.95^\circ$ ，提高54.53%。原因可能是碎石-黏土界面摩擦主要来自土粒间表面粗糙产生的滑动摩擦以及土粒间相互嵌入所产生的咬合摩擦，碎石料密实度越高，剪切面上碎石颗粒所占比例越大，其对界面摩擦的贡献越大，故而摩擦角越大；但在碎石-黏土界面铺设土工格栅后，格栅表面相对光滑，且减少了界面上的碎石颗粒所占面积，导致加筋时界面摩擦角减小。

#### 4.3 筋材开孔率的影响

本节主要讨论剪切面上筋材面积对桩土界面摩擦特性的影响。引入“开孔率 $R_H$ ”表征此特点，即筋材

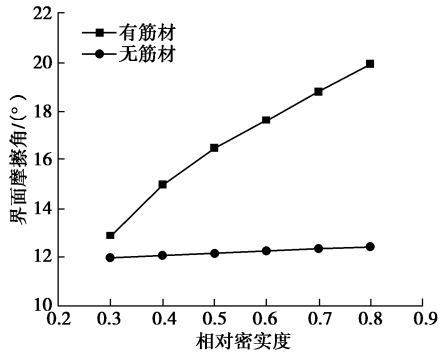


图 18 界面摩擦角与碎石料相对密实度的关系曲线

Fig. 18 Relationship between interfacial friction angle and relative compactness of stone

网孔面积与整个直剪面积的比值。图 19 给出了碎石 - 筋材 - 黏土复合界面的黏聚力和摩擦角随筋材开孔率的变化情况。由图 19 可见, 界面黏聚力和摩擦角均随开孔率的增大而增大。例如, 当开孔率从 0 增大到 0.44 时, 对应的界面黏聚力从 21.2 kPa 增大至 22.5 kPa, 提高 6.13%, 界面摩擦角从 11.3° 增大至 14.2°, 提高 25.66%。这是由于开孔率增大, 增加了剪切面上碎石与黏土的接触面积, 进一步印证了界面强度与碎石 - 黏土接触面积呈正相关。

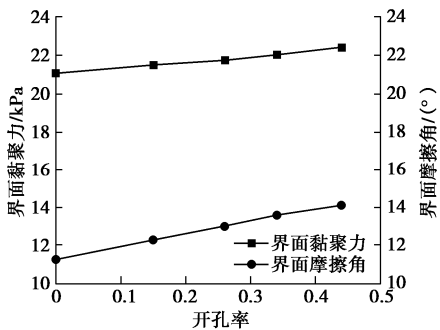


图 19 筋材开孔率对界面黏聚力和界面摩擦角的影响

Fig. 19 Influences of aperture ratio of geosynthetics on interfacial cohesion and friction angle

#### 4.4 筋材抗拉刚度的影响

图 20 是土工格栅抗拉刚度从 1 kN/m 增加至 20 kN/m, 筋箍碎石桩桩土界面摩擦角及界面黏聚力的变化情况。由图 20 可见, 筋箍碎石桩桩 - 土界面黏聚力随格栅抗拉刚度的变化较小, 但界面摩擦角随格栅刚度增加而增大。格栅抗拉强度从 1 kN/m 增加至 20 kN/m, 界面黏聚力在 16.5~18.5 kPa 范围内变化, 而界面摩擦角从 12.57° 增至 14.78°, 增加了 17.58%。即格栅抗拉刚度对碎石 - 筋材 - 黏土复合界面抗剪强度的影响主要反映在对界面摩擦角的增长上。

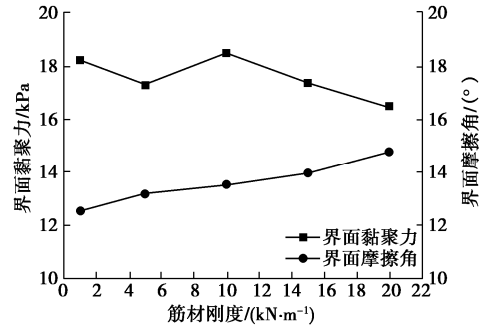


图 20 筋材抗拉刚度对界面黏聚力和界面摩擦角的影响

Fig. 20 Influences of geosynthetic stiffness on interfacial cohesion and friction angle

## 5 结 论

本文基于室内大型直剪试验和离散元数值模拟试验, 对筋箍碎石桩桩土界面摩擦特性展开研究, 主要得到以下 5 点结论。

- (1) 桩 - 土界面抗剪强度随法向应力的增大而线性增大, 符合莫尔库仑强度准则; 但桩 - 土界面摩擦系数随法向应力的增大而减小, 且逐渐趋于稳定。
- (2) 筋箍碎石桩桩 - 土界面抗剪强度和界面摩擦系数均随桩周软土含水率的增大而减小。因此, 使用排水性能良好的筋箍碎石桩, 可使桩 - 土界面摩擦性能随固结度的增长而不断强化, 有利于提高地基承载力。
- (3) 桩 - 土界面抗剪强度和界面摩擦系数随碎石料相对密实度的增加而增加, 主要表现为界面黏聚力的增加, 而对界面摩擦角的影响较小。
- (4) 因本试验中所选用筋材表面光滑, 此类筋材的设置弱化了桩 - 土界面的抗剪强度和摩擦系数。界面抗剪强度和界面摩擦系数随开孔率增大而提高。
- (5) 增大土工格栅抗拉刚度提高了界面摩擦角, 然而对界面黏聚力及界面摩擦系数影响较小。

### 参考文献:

[1] ALMEIDA M S S, HOSSEINPOUR I, RICCIO M, et al. Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(3): 04014116.

[2] SCHNAID F, WINTER D, SILVA A E F, et al. Geotextile encased columns (GEC) used as pressure-relief system. Instrumented bridge abutment case study on soft soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(3): 227 - 236.

[3] NAGULA S S, NGUYEN D M, GRABE J. Numerical modelling and validation of geosynthetic encased columns in soft soils with installation effect[J]. Geotextiles and



- Geomembranes, 2018, **46**(6): 790 - 800.
- [4] CASTRO J, SAGASETA C. Deformation and consolidation around encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(3): 268 - 276.
- [5] PULKO B, MAJES B, LOGAR J. Geosynthetic-encased stone columns: analytical calculation model[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(1): 29 - 39.
- [6] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(1): 44 - 53.
- [7] HUANG J, HAN J, OZTOPRAK S. Coupled mechanical and hydraulic modeling of geosynthetic-reinforced column-supported embankments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(8): 1011 - 1021.
- [8] 曹文贵, 赵聚才, 贺敏, 等. 柔性基础下筋箍碎石桩复合地基变形机理及其沉降分析方法[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 818 - 826. (CAO Wen-gui, ZHAO Ju-cai, HE Min. Deformation mechanism and settlement analysis method of reinforced hoop-gravel-pile composite ground under flexible foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 818 - 826. (in Chinese))
- [9] ZHANG L, ZHAO M H, SHI C J, et al. Settlement calculation of composite foundation reinforced with stone columns[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, **13**(3): 248 - 256.
- [10] ZHANG L, ZHAO M H. Deformation analysis of geotextile-encased stone columns[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, **15**(3): 04014053.
- [11] ZHOU Y, KONG G Q, YANG Q, et al. Deformation analysis of geosynthetic-encased stone column using cavity expansion models with emphasis on boundary condition[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(6): 831 - 842.
- [12] WU C S, HONG Y S. The behavior of a laminated reinforced granular column[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, **26**(4): 302 - 316.
- [13] DEB K, MOHAPATRA S R. Analysis of stone column-supported geosynthetic-reinforced embankments[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, **37**(5): 2943 - 2960.
- [14] ZHOU Y, KONG G Q. Deformation analysis of geosynthetic-encased stone column-supported embankment considering radial bulging[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, **19**(6): 04019057.
- [15] 高明军, 刘汉龙, 左威龙. 格栅碎石桩技术及现场试验研究[J]. 西部探矿工程, 2008, **20**(12): 11 - 14. (GAO Ming-jun, LIU Han-long, ZUO Wei-long. The technique of geogrid stone cased pile and field experiment[J]. West-China Exploration Engineering, 2008, **20**(12): 11 - 14. (in Chinese))
- [16] 赵明华, 顾美湘, 张玲, 等. 竖向土工加筋体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))
- [17] OUYANG F, ZHANG J J, LIAO W M, et al. Characteristics of the stress and deformation of geosynthetic-encased stone column composite ground based on large-scale model tests[J]. Geosynthetics International, 2016: 1 - 13.
- [18] MIRANDA M, DA COSTA A, CASTRO J, et al. Influence of geotextile encasement on the behaviour of stone columns: Laboratory study[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, **45**(1): 14 - 22.
- [19] GHAZAVI M, NAZARI A J. Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **38**: 26 - 36.
- [20] ALI K, SHAHU J T, SHARMA K G. Model tests on single and groups of stone columns with different geosynthetic reinforcement arrangement[J]. Geosynthetics International, 2014, **21**(2): 103 - 118.
- [21] 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 test of embankment on composite foundation reinforced with geosynthetic-encased stone columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, **28**(9): 1 - 8. (in Chinese))
- [22] 欧阳芳, 张建经, 付晓, 等. 包裹碎石桩承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(7): 1929 - 1936. (OUYANG Fang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Experimental analysis of bearing behavior of geosynthetic encased stone columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 1929 - 1936. (in Chinese))
- [23] 张玲, 徐泽宇, 赵明华. 循环荷载作用下筋箍碎石桩复合地基工作性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(12): 2198 - 2205. (ZHANG Ling, XU Ze-yu, ZHAO Ming-hua. Experimental research on behaviors of geogrid-encased stone column-improved composite foundation under cyclic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(12):

- 2198 - 2205. (in Chinese))
- [24] LIU C N, HO Y H, HUANG J W. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, **27**(1): 19 - 30.
- [25] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(10): 3101 - 3106. (XU Chao, MENG Fan-xiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(10): 3101 - 3106. (in Chinese))
- [26] 凌天清, 周滨, 吴春波, 等. 筋土界面摩擦特性影响因素分析[J]. *交通运输工程学报*, 2009, **9**(5): 7 - 12. (LING Tian-qing, ZHOU Bin, WU Chun-bo, et al. Study of influence factors on tendons-soil interface characteristic[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, **9**(5): 7 - 12. (in Chinese))
- [27] 杨广庆, 李广信, 张保俭. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(8): 948 - 952. (YANG Guang-qing, LI Guang-xin, ZHANG Bao-jian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(8): 948 - 952. (in Chinese))
- [28] 闫澍旺, 林澍, 贾沼霖, 等. 海洋土与钢桩界面剪切强度的大型直剪试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(3): 495 - 501. (YAN Shu-wang, LIN Shu, JIA Zhao-lin, et al. Large-scale direct shear tests on shear strength of interface between marine soil and steel piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(3): 495 - 501. (in Chinese))
- [29] 王家全, 周健, 黄柳云, 等. 土工合成材料大型直剪界面作用宏观细观研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(5): 908 - 915. (WANG Jia-quan, ZHOU Jian, HUANG Liu-yun, et al. Macroscopic and mesoscopic studies of interface interaction on geosynthetics by use of large direct shear tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(5): 908 - 915. (in Chinese))
- [30] 王协群, 张俊峰, 邹维列, 等. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. *土木工程学报*, 2013, **46**(4): 141 - 149. (WANG Xie-qun, ZHANG Jun-feng, ZOU Wei-lie, et al. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, **46**(4): 141 - 149. (in Chinese))
- [31] GU M, HAN J, ZHAO M H. Three-dimensional discrete-element method analysis of stresses and deformations of a single geogrid-encased stone column[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, **17**(9): 04017070.
- [32] 顾美湘. 筋箍碎石桩复合地基承载变形特性的三维离散元和模型试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017. (GU Mei-xiang. Three-Dimensional DEM Analysis and Model Tests on Geosynthetic Encased Stone Columns[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese))
- [33] GU M, HAN J, ZHAO M H. Three-dimensional DEM analysis of axially loaded geogrid-encased stone column in clay bed[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, **20**(3): 04019180.
- [34] HAN J. *Principles and Practice of Ground Improvement*[M]. Hoboken: Wiley, 2015: 133 - 156.