

DOI: 10.11779/CJGE2018S2001

# 高聚物碎石桩模型试验及数值分析

王复明<sup>1, 2, 3</sup>, 方宏远<sup>\*1, 2, 3</sup>, 曹凯<sup>1, 2, 3</sup>, 马少春<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001;

3. 水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001; 4. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004)

**摘要:** 为了使新型的高聚物碎石桩在工程中的应用和推广, 通过对 3 种不同高聚物密度的高聚物碎石桩模型分别进行了模型试验和有限元扩展分析, 研究了其承载特性。结果表明: 高聚物碎石桩的承载能力分别随着高聚物密度、桩长、桩径的增加而增加; 在同一级桩顶荷载作用下, 得到模型桩的桩侧摩阻力会随着高聚物密度的增加而增大; 在相同高聚物密度下, 得出桩径越大, 桩端阻力的荷载分担比越小。另外, 高聚物碎石桩的承载能力优于碎石桩和 CFG 桩。  
**关键词:** 高聚物碎石桩; 模型试验; 高聚物密度; 承载力; 桩端阻力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S2-0001-05

**作者简介:** 王复明(1957-), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事岩土工程无损检测与快速修复技术研究。E-mail: fuming573@126.com。

## Model tests and numerical analyses of polymer gravel piles

WANG Fu-ming<sup>1, 2, 3</sup>, FANG Hong-yuan<sup>1, 2, 3</sup>, CAO Kai<sup>1, 2, 3</sup>, MA Shao-chun<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Conservancy and Transportation Infrastructure Safety, Henan Province, Zhengzhou 450001, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** In order to apply and popularize the new type polymer gravel piles in engineering, model tests and finite element analyses are carried out on three kinds of polymer gravel piles with different polymer densities, and their bearing characteristics are studied. The results show that the bearing capacity of polymer gravel piles increases with the increase of polymer density, pile length and pile diameter. Under the same pile top load, the pile friction resistance of the model pile increases with the increase of polymer density. Under the same polymer density, it is found that the larger the pile diameter, the smaller the load sharing ratio of the pile tip resistance. In addition, the loading capacity of the polymer gravel piles is better than that of the gravel piles and CFG piles.

**Key words:** polymer gravel pile; model test; polymer density; bearing capacity; pile-end resistance

## 0 引言

随着中国经济的发展, 高速公路也步入了快速发展期。在高速公路修建过程中, 经常会遇到软土问题, 而碎石桩处理技术作为一种常用处理手段, 已经在工程中得到了大量应用<sup>[1]</sup>。由于碎石桩桩身由碎石组成, 没有胶结强度, 需要桩周土的围箍作用才能提供侧向约束力, 并将桩顶荷载向下传递<sup>[2]</sup>。在竖向荷载作用下, 当桩周土体强度较低不能提供足够的侧向约束力时, 碎石桩易发生侧向鼓胀破坏而导致整个复合地基失效<sup>[3]</sup>。多年来, 为了改善碎石桩的工作性能, 国内外学者进行了大量的研究<sup>[4-6]</sup>, 大部分都是通过添加筋箍或增加竖向土工加筋体或在碎石桩中进行水泥浆液注浆等方式<sup>[7-10]</sup>, 虽然碎石桩的一些受力性得到了不

同程度的改善, 但施工工序相对复杂, 甚至还会影响施工的工期等。因此, 面对当今更复杂的结构与地基基础工程等, 开发既能克服散体桩的特点、施工方便的新型桩基迫在眉睫。

为了解决以上难题, 本文提出了一种新型的高聚物碎石桩。高聚物材料具有以下特点: ①无水反应, 适应性好; ②具有较好的抗压性能; ③成型较快, 不需养生; ④良好的化学稳定性等。可以利用高聚物的黏结性将碎石黏结起来, 形成一个完整整体, 成为一

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0802400); 河南省重大科技专项项目(171100310100); 郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1621323001)

**收稿日期:** 2018-07-22

**\*通讯作者:** (fanghongyuan1982@163.com)

种新型桩体—高聚物碎石桩。既能改善碎石桩散体材料的缺点，又能克服浆固碎石桩需要较长时间养护的问题。本文基于室内模型试验对不同浆液密度下的高聚物碎石桩的承载特性进行了研究，并通过数值模拟的方法进行相应的补充和完善，研究成果可为高聚物碎石桩的大力推广和实际工程应用提供重要参考。

## 1 模型试验

### 1.1 试验方案

模型桩试验共设计了 3 类试件，桩号分别为#1、#2、#3。桩径  $D$ 、桩长  $L$  及入土深度  $L_0$  分别为 100，800，700 mm。具体布置如图 1 所示，尺寸满足模型桩试验要求，可消除边界条件的影响。

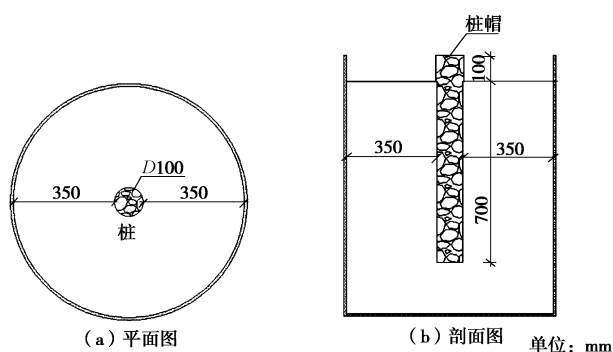


图 1 模型桩布置

Fig. 1 Layout of model pile

### 1.2 试验方案

填筑模型土前，首先在模型筒中填入 200 mm 细沙，并击实作为持力层及排水通道。模型土以分层填入的方法填入到模型筒中，每层填入高度 $\leq 150$  mm。当填土高度与模型筒顶部齐平时，完成填土。在上方放上重物进行预压 15 d 后，高聚物碎石桩方可制作。碎石粒径 $\leq 26.5$  mm，高聚物密度通过注浆量来控制，即注一枪为 0.125 kg。桩的具体制作过程为：成孔→下管→投石→注浆→成桩。需要注意的是：采用辅助成孔设备进行成孔；采用直径为 10 mm 的 PVC 管为注浆管（离孔底约 100 mm 处）；需要贴着注浆管壁投碎石，直到孔口投满为止，才可按照试验设定的高聚物密度进行注浆。为防止浆液溢出，在孔口加封孔装置进行封堵。反应 15~20 min 后，高聚物碎石桩制作完成。

### 1.3 试验装置

模型试验装置主要包括模型筒、成孔辅助设备和注浆设备。模型筒尺寸为：内径 800 mm，高度 1000 mm，壁厚 10 mm。加载架以螺栓连接方式固定于模型筒的顶部，还可辅助成孔设备确保桩孔垂直，具体如图 2，3 所示。在注浆前已将多功能注浆系统温度调到 90℃ 以上，以保证浆液充分反应，达到试验预定要

求。加载装置主要由千斤顶、反力架和数显压力表组成。测量项目主要有：桩顶压力（采用 1 个精度为 0.01 kN 的数显压力表进行测定）；桩顶位移（采用 2 个量程均为 30 mm 的百分表进行测定）；桩端底部应力（采用 1 个土压力盒进行测定）。



图 2 试验装置

Fig. 2 Test devices



图 3 成孔辅助装置

Fig. 3 Devices for making holes

### 1.4 桩土属性

#### (1) 模型土

试验用土采用郑州本地粉土配置。由于原状土取土时的扰动及取出后水分的蒸发，势必会造成土的性能的改变。为了较好的模拟自然地层的情况，模型土层根据原状土的颗粒级配曲线和重度进行相应配制。原状土和配置好的模型用土的试验参数见表 1。

表 1 模型试验粉土参数

| Table 1 Parameters of silt for model tests |                                      |        |      |       |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|--------|------|-------|
| 土样                                         | $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $w/\%$ | $e$  | $I_p$ |
| 原状土                                        | 1.86                                 | 21.0   | 0.71 | 8.1   |
| 模型土                                        | 1.84                                 | 20.7   | 0.68 | 8.0   |

#### (2) 模型桩

模型桩弹性模量：在桩制作过程中，预留并制作试件。通过压缩试验并根据公式  $E = F/A \cdot L/\Delta L$  计算高聚物碎石混合料的弹性模量。高聚物密度  $\rho_g$  分别为 0.4，0.5，0.6  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，对应的弹性模量  $E$  分别为 625，798，1176 MPa。其中： $F$  为施加的轴向荷载， $A$  为试件的横截面面积， $L$  为试件的轴向高度， $\Delta L$  为试件的轴向压缩量。

## 2 试验结果分析

### 2.1 模型桩 $Q-s$ 曲线

通过试验可得到模型桩的  $Q-s$  曲线，如图 4 所示。不同高聚物密度下模型桩均为缓变型曲线，无明显

显拐点。根据《建筑桩基技术规范》，取 $s=(0.03\sim0.06)D$ （ $D$ 为桩端直径）对应的荷载值，即 6 mm 沉降量对应的桩顶荷载值为极限承载力。可得到#1、#2、#3 桩极限承载力分别为 4.91, 5.49, 5.86 kN。随着高聚物密度的增加，桩的承载能力得到了不同程度的提高，#2、#3 桩相比#1 桩承载力分别提高了 11.8%和 19.3%。原因是随着高聚物密度的增大，桩体本身的强度也在增加，竖向荷载作用下抵抗变形破坏的能力也相应得到了提升。高聚物浆液在反应时体积会发生膨胀，对周围土体产生挤密作用，随着高聚物密度的增大，这种挤密作用也会相应加强，且随着高聚物密度的增大，高聚物对土体的劈裂作用也会增强，产生更多的类似棘突状的结构如图 5，增大了桩身与土体的接触面积。

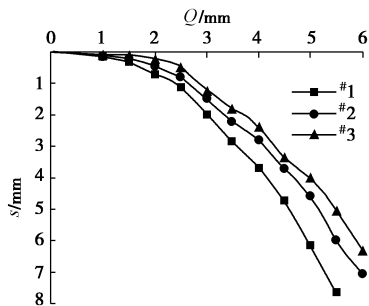


图 4 模型桩的  $Q-s$  曲线  
Fig. 4  $Q-s$  curves of model piles

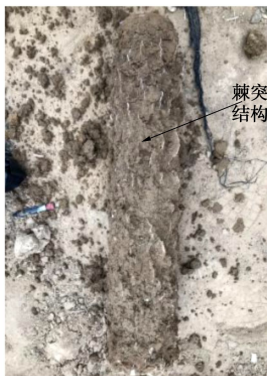


图 5 桩的棘突结构  
Fig. 5 Spinous structure of pile

2.2 桩端阻力特性

高聚物碎石模型桩的桩端阻力可以通过桩端的土压力计测得的应变值，并通过如下公式计算得到。

桩端单位面积阻力： $q_b = k\varepsilon$ ；

桩端阻力： $Q_b = q_b A$ 。

式中  $q_b$  为桩端单位面积阻力； $Q_b$  为桩端阻力； $k$  为土压力计的率系数，取为 0.054 kPa/ $\mu\varepsilon$ ； $\varepsilon$  为土压力盒测得的桩端应变值； $A$  为桩端面积。

根据计算得到的桩端阻力与相应的桩端荷载可绘出桩顶荷载  $Q$  - 桩端阻力  $Q_b$  的关系曲线图，如图 6 所示。可以看出：①随着桩顶荷载的增大，桩端阻力

也在逐渐增加。当达到极限承载力时，#1、#2、#3 桩的极限端阻力分别为 1.62, 1.71, 1.74 kN，相应的占桩的极限承载力百分比分别为 33.0%、31.1%和 29.7%。②在同一级桩顶荷载作用下，模型桩#1、#2、#3 的桩端阻力依次减小。说明在同一级桩顶荷载作用下，随着高聚物密度的增大，桩端荷载的分担比在逐渐减小，摩阻力的分担比在逐渐增加，即高聚物密度的增加会导致模型桩的桩侧摩阻力增大。

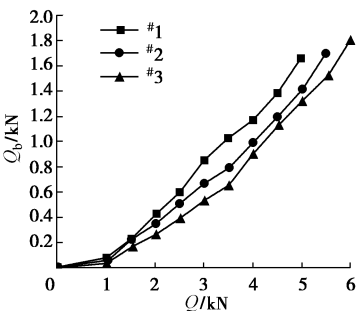


图 6  $Q-Q_b$  曲线图  
Fig. 6  $Q-Q_b$  curves

3 数值模拟分析

由于高聚物碎石桩模型试验采用现场注浆的方法，无法在桩身黏贴应变片进行桩身轴力和桩侧摩阻力的量测，模型试验只对桩端阻力进行了监测。为了获取桩身轴力和桩侧摩阻力的变化规律，采用有限元数值模拟的方法对室内模型试验进行进一步补充。

3.1 模型的建立

以#1 模型桩试验为例，土体区域设定为直径 800 mm，高 900 mm。假定为弹塑性材料，屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则，并采用相关联的流动法则。高聚物碎石桩假定为弹性材料，桩的尺寸为直径 100 mm，高度 700 mm。土体和桩的材料参数如表 2 所示。

表 2 桩和土体材料参数

| Table 2 Material parameters of piles and soils |                                                 |                        |              |                       |                            |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|
| 材料                                             | 密度 $\rho$<br>/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松比<br>$\nu$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(^\circ)$ |
| 高聚物                                            |                                                 |                        |              |                       |                            |
| 碎石桩                                            | 2000                                            | 600                    | 0.30         | —                     | —                          |
| 碎石桩                                            | 2100                                            | 120                    | 0.20         | —                     | 40                         |
| CFG 桩                                          | 2200                                            | 10000                  | 0.20         | —                     | —                          |
| 饱和粉土                                           | 1800                                            | 8                      | 0.42         | 12                    | 30                         |
| 细砂                                             | 2000                                            | 15                     | 0.35         | 3                     | 30                         |

3.2 桩土接触面特性设置

在数值模拟中，通常用摩擦系数  $\mu$  来反映桩土接触面的特性，根据以往经验，在浆固碎石桩中将摩擦角取为普通灌注桩的 1.3 倍。由于高聚物材料相比水泥材料与土体之间具有更好的黏结性，所以本文将摩擦角进行适当提高（1.4 倍），即  $\mu = 1.4 \cdot 0.7 \cdot \tan \varphi =$

0.56。采用 ABAQUS 建立模型桩和土体有限元实体模型如图 7 所示。

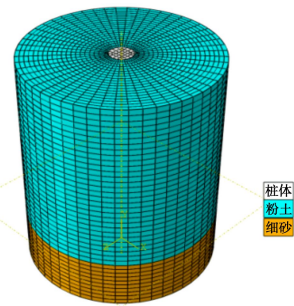


图 7 模型建立及网格划分

Fig. 7 Modeling and meshing

### 3.3 模拟结果对比与分析

#### (1) 承载特性分析

将有限元模拟和模型试验分析得到的桩顶荷载  $Q$  和桩顶沉降  $s$  数据绘制成  $Q-s$  曲线如图 8 所示。桩极限承载力计算值和试验值分别为 4.18, 4.91 kN, 吻合性较好。在同级荷载下, 桩顶沉降计算值略大于试验值。原因在于, 计算时桩土接触面相对是规则的, 而模型试验中桩土接触面呈棘突状。

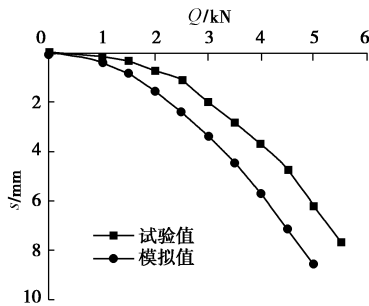


图 8 #1 桩  $Q-s$  曲线

Fig. 8  $Q-s$  curves of model pile No. 1

#### (2) 桩端阻力分析

桩顶荷载-桩端阻力曲线如图 9 所示, 随着桩顶荷载的增大, 桩端阻力逐渐增大, 说明桩端阻力在逐步发挥作用, 且占的比例在慢慢增加。在同级荷载作用下, 桩端阻力模拟值大于试验值。由于土压力盒上面细沙的缓冲作用, 导致测得的桩端阻力偏小; 高聚物碎石桩在桩周会产生一定的劈裂作用, 模拟较难实现。

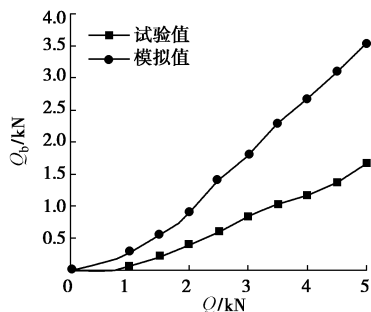


图 9 #1 桩  $Q-Q_b$  曲线

Fig. 9  $Q-Q_b$  curves of model pile No. 1

### 3.4 不同工况分析

为了对高聚物碎石桩的承载性能有更深入的认识, 选取不同桩长、不同桩径、不同桩体材料 3 种工况分别对高聚物碎石桩的承载性能进行研究。

#### (1) 不同桩长对承载性能的影响

设定桩径为 100 mm, 选取桩长  $h$  分别为 600, 700, 800 mm, 计算得到的  $Q-s$  曲线如图 10 所示。桩长为 600, 700, 800 mm 对应的极限承载力依次分别是 3.85, 4.18, 4.37 kN。随着桩长的增加, 桩的极限承载力逐渐增加, 后两种与第一种相比分别增加了 8.6% 和 13.5%。说明在相同荷载下, 桩长越长, 沉降量越小。

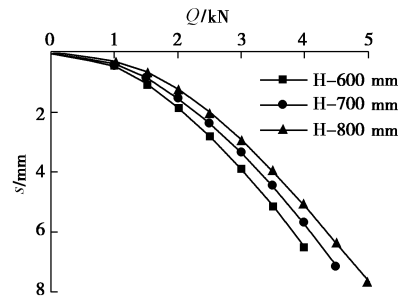


图 10 不同桩长的  $Q-s$  曲线

Fig. 10  $Q-s$  curves of piles with different lengths

#### (2) 不同桩径对承载性能的影响

设定桩长为 700 mm, 桩径  $D$  分别选为 60, 80, 100 mm, 计算得到的  $Q-s$  曲线如图 11 所示, 均为缓变型。3 种情况下对应的桩极限承载力分别为 1.67, 2.51, 4.18 kN。随着桩径的增大而增大, 桩径由 80 mm 至 100 mm 极限承载力增长幅度与 60 mm 至 80 mm 相比增长较大。在相同桩顶荷载作用下, 桩径越大, 桩顶沉降越小, 即桩的承载性能因桩径的增大得到了提高。

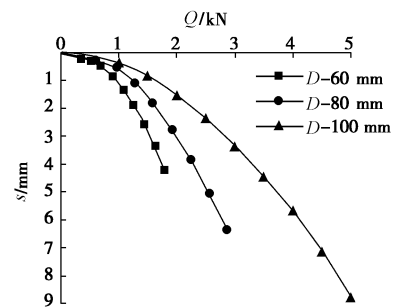


图 11 不同桩径的  $Q-s$  曲线

Fig. 11  $Q-s$  curves of piles with different diameters

#### (3) 不同桩体材料下的承载特性分析

分别选取桩型为碎石桩、CFG 桩和高聚物碎石桩, 其桩长均取 700 mm, 桩径取为 100 mm, 其余材料参数均不作变化。

不同桩体材料下的  $Q-s$  曲线如图 12 所示, 可以得到碎石桩、CFG 桩和高聚物碎石桩的极限承载力依次为 2.27, 3.76, 4.18 kN。后者分别为前两者的 1.84 倍和 1.11 倍, 高聚物碎石桩的承载能力较碎石桩有较

大程度提高。在同一荷载作用下, 高聚物碎石桩的沉降量与 CFG 桩沉降量相差不大, 相比碎石桩, 有较大幅度的减小。同时, 在同一荷载作用下, 碎石桩、CFG 桩和高聚物碎石桩的桩顶沉降依次减小。

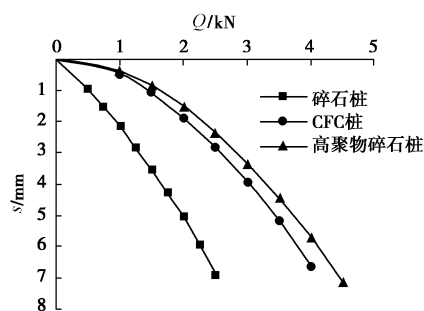


图 12 不同桩体的  $Q-s$  曲线

Fig. 12  $Q-s$  curves of piles with different materials

## 4 结 论

通过对 3 种不同高聚物密度下的高聚物碎石桩进行模型试验和扩展数值分析, 研究了其承载特性, 主要得出以下结论:

(1) 通过对不同高聚物密度下的模型桩进行试验研究, 得出随着高聚物密度的不断增加, 增强了桩周土体的挤密作用; 桩身表面呈现棘突状, 增大了桩身与土体的接触面积, 有助于提高桩基础的整体承载能力。

(2) 通过对高聚物碎石桩进行桩端阻力特性研究, 得出同级桩顶竖向荷载作用下, 增加高聚物的密度能改善模型桩的桩侧摩阻力。

(3) 通过对比分析, 找出桩顶沉降的计算值略大于试验值的根本原因, 计算时在桩与土体接触面选择了具有滑移作用的理想接触单元, 忽略了由于高聚物碎石桩桩身呈现棘突状导致桩土相互嵌入而表现出相对较强的抗滑移能力。

(4) 通过对高聚物碎石桩不同工况进行扩展分析, 找出影响其承载性能的主要因素。增加桩长、加大桩径以及提高桩体材料性能, 在一定程度上均能改善桩的承载能力。通过比较发现, 高聚物碎石桩的承载能力优于碎石桩和 CFG 桩, 具有良好的应用价值和发展前景。

## 参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及其运用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 1 - 9. (GONG Xiao-nan. Theory and its application of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 1 - 9. (in Chinese))
- [2] 左威龙, 刘汉龙, 陈永辉. 浆固碎石桩成桩注浆影响范围现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3329 - 3332.

(ZUO Wei-long, LIU Han-long, CHEN Yong-hui, et al. Field testing analysis of grouting impact range of grouting gravel pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3329 - 3332. (in Chinese))

- [3] 陈昌富, 吴梦婷. 基于滑块平衡法顶部加箍碎石桩承载力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1253 - 1260. (CHEN Chang-fu, WU Meng-ting. Computational method of bearing capacity of upper geosynthetic-encased stone column based on block limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1253 - 1260. (in Chinese))
- [4] WU L. Performance of geosynthetic-reinforced and cement-fly ash-gravel pile-supported embankments over completely decomposed granite soil: a case study[J]. Advances in Material Science and Engineering, 2018: 1 - 11.
- [5] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96 - 115. (LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96 - 115. (in Chinese))
- [6] BUTLANSKA J, ARROYO M. Homogeneity and symmetry in DEM models of cone penetration[C]// American Institute of Physics Conference Proceedings. New York, 2009: 425 - 429.
- [7] 赵明华, 何玮茜, 衡 帅, 等. 基于圆孔扩张理论的筋箍碎石桩承载力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1785 - 1792. (ZHAO Ming-hua, HE Wei-xi, HENG Shuai, et al. Calculation method of geogrid-encased stone columns' bearing capacity based on cavity expansion theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1785 - 1792. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] WU L J, JIANG G L, LIU X F, et al. Performance of geogrid-reinforced pile-supported embankments over decomposed granite soil[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering. England, 2017.
- [10] BRIANÇON L, SIMON B. Pile-supported embankment over soft soil for South Europe Atlantic high speed line[J]. Geosynthetic International, 2017, 24(3): 293 - 305.