

DOI: 10.11779/CJGE2024S20042

再生骨料强夯桩承载性能的三维离散-连续耦合数值模拟

李双宝^{1,2}, 郭伟¹, 王鑫^{*1}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 建立了三维离散-连续耦合数值模型对再生骨料强夯桩的承载性能进行模拟, 研究了再生骨料强夯桩的承载变形机理、桩体破坏模式及荷载传递规律, 并分析了不同桩长和不同孔隙率的再生骨料强夯桩的承载性能。结果表明: 再生骨料强夯桩破坏时在水平方向表现为鼓胀变形, 鼓胀变形主要集中在3倍桩径范围内。桩周土体形成贯通地表的连续剪切滑裂面, 地表会有隆起和抬升。全长桩底部3倍桩径长度并不承担荷载, 有效长度为7倍桩径。随着孔隙率减小, 再生骨料强夯桩的承载性能逐渐提高。

关键词: 地基处理; 再生骨料; 碎石桩; 承载性能; 数值模拟

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)S2-0242-05

作者简介: 李双宝(1996—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事地基处理等方面的研究工作。E-mail: lishuangbao@tju.edu.cn。

Three-dimensional discrete-continuous coupling numerical simulation of bearing capacity of recycled aggregate dynamic compaction columns

LI Shuangbao^{1,2}, GUO Wei¹, WANG Xin¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corporation Limited, Jinan 250013, China)

Abstract: A three-dimensional discrete-continuous coupling numerical model is established to simulate the bearing capacity of recycled aggregate dynamic compaction columns. The bearing deformation mechanism, column failure mode and load transfer law are studied. The bearing capacity of recycled aggregate columns with different column lengths and different porosities is analyzed. The results show that the recycled aggregate column exhibits bulging deformation in the horizontal direction when it is destroyed, and the bulging deformation is mainly concentrated in the depth of 3 times the column diameter. The soil around the column forms a continuous shear slip surface through the surface, and the surface will have uplift. The bottom 3 times the column diameter diameter of the full-length column does not carry the load and the effective length is 7 times the column diameter. With the decrease of porosity, the bearing capacity of the recycled aggregate column is gradually improved.

Key words: foundation improvement; recycled aggregate; stone column; bearing capacity; numerical simulation

0 引言

中国大规模的基础设施建设工程每年产生大量的建筑垃圾, 建筑垃圾可通过破碎、清洗、筛分、分级等二次处理后生产出再生骨料^[1-2]。再生骨料可用于道路铺筑、工程回填、地基加固等岩土工程领域^[3-4]。

强夯碎石桩因其具有提高地基承载力、减小地基沉降和加速地基固结排水等优点常应用于软土地基加固中, 施工工序如图1所示: 首先将钢套筒打至设计深度并筒内清泥, 套筒内分层填入碎石并使用夯锤夯实, 上拔套筒一定高度并再次填料和夯实, 直到形成

串珠状的散体桩复合地基^[5]。许多学者对碎石桩的承载性能、荷载传递、破坏模式等进行了研究^[6-8]。受桩长、桩周土体、加载方式的影响, 碎石桩可能出现的破坏有3种: 鼓胀破坏、刺入破坏和剪切破坏。基于有限单元法和有限差分法等已广泛应用于碎石桩宏观特性的研究^[9-10], 然而碎石桩由散体材料组成, 连续方法不能准确地模拟其特性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52171273, 52108335); 天津市科技计划项目(20JCJQJC00220)

收稿日期: 2024-06-22

*通信作者(E-mail: wangxin1997@tju.edu.cn)

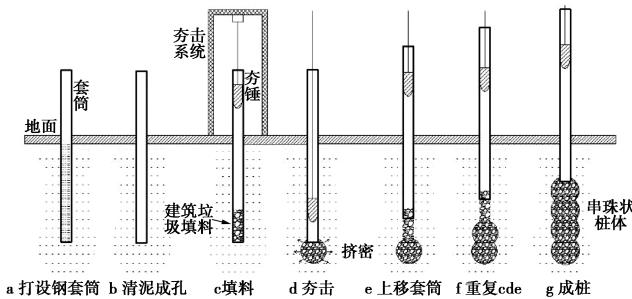


图 1 强夯桩安装过程

Fig. 1 Installation process of dynamic compaction column

通过建立三维离散-连续耦合数值模型对再生骨料强夯桩的承载性能进行模拟, 研究了再生骨料强夯桩的承载变形机理、桩体破坏模式及荷载传递规律。并分析了不同桩长和不同孔隙率的再生骨料强夯桩的承载性能。以期能为再生骨料强夯桩的推广应用提供参考。

1 离散-连续耦合数值模型

1.1 数值模型建立

再生骨料强夯桩按图 1 所示方法进行成桩, 具体细节详见文献[11]。试验选用的再生骨料相对质量密度为 2.62, 内摩擦角为 39 度, 粒径范围为 0.6~9.5 mm, 桩周土体为天津路基地表土, 相对质量密度为 2.65, 厚度为 60 cm, 含水率为 15%, 土体黏聚力为 20 kPa, 内摩擦角为 32 度。成桩后桩长为 60 cm, 桩径为 6 cm。成桩完成后进行加载试验, 采用位移加载的方式施加荷载, 加载速度为 1 mm/min, 加载至 5 cm 时停止加载。

采用 FLAC-PFC 耦合方法进行承载模拟, 如图 2 (a) 所示, 耦合数值模型包括 3 部分: 有限差分模型 (桩周土)、离散元模型 (散体桩) 和耦合墙。模型的建立步骤与室内模型试验一致, 分为土基填筑、成桩和加载三步。首先建立桩周土的有限差分模型, 采用的本构模型为莫尔-库仑, 所用参数见表 1,

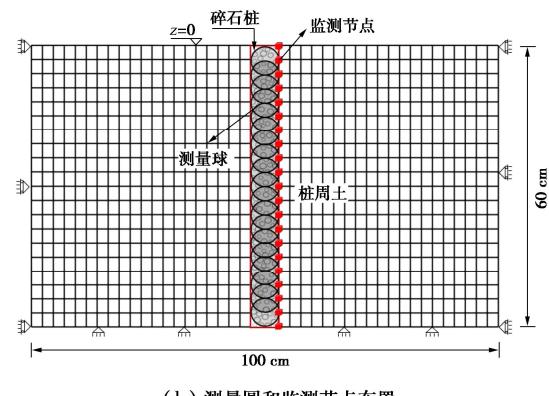
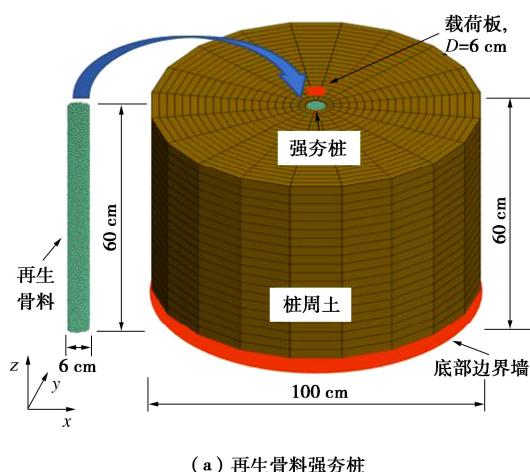


图 2 离散-连续耦合数值模型

Fig. 2 Discrete-continuous coupled numerical model

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of soils

c/kPa	$\phi/(\circ)$	E/MPa	ν	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
20	32	10	0.4	1830

接下来先把散体桩区域进行挖空, 然后在桩底、桩顶和桩侧生成墙形成封闭区域使得颗粒在此区域内生成, 桩底墙直径为 25 cm, 桩顶墙直径为 6 cm, 桩侧耦合墙直径为 6 cm、高为 60 cm, 颗粒之间采用抗转动线性接触模型 (rrlinear model), 颗粒细观参数通过直剪试验进行标定后列于表 2。

表 2 再生骨料标定参数

Table 2 Calibration parameters of recycled aggregates

接触类型	Ball-ball	Ball-wall
有效模量 E^*/Pa	2.0×10^7	5.0×10^7
刚度比 k^*	1.5	1.5
抗转动摩擦系数 μ_r	0.5	—
摩擦系数 μ	0.5	0.5
阻尼比	0.7	0.7
孔隙比	0.86	—

最后在再生骨料强夯桩上方生成与桩径相同的加载板, 以 1 mm/min 的恒定速率对碎石桩进行轴向加载, 直至位移达到 5 cm。如图 2 (b) 所示, 在桩内布置 19 个测量圆, 球体中心垂直位置位于 -3~ -57 cm 处 (土表 $z=0$), 获得测量圆内应力状态 (轴向和径向应力) 和微观特征 (孔隙率和配位数)。在桩周土有限差分模型中布置 21 个监测节点, 获取连续-离散界面节点处的侧向变形。

1.2 数值模型验证

图 3 (a) 为模型试验与数值模拟的荷载-沉降曲线对比图, 两者曲线变化趋势相同, 吻合程度较好。从图 3 可以看出, 在加载初期沉降达到 5 mm 之前曲线基本呈线性增加, 桩顶应力在较小的沉降量下即迅

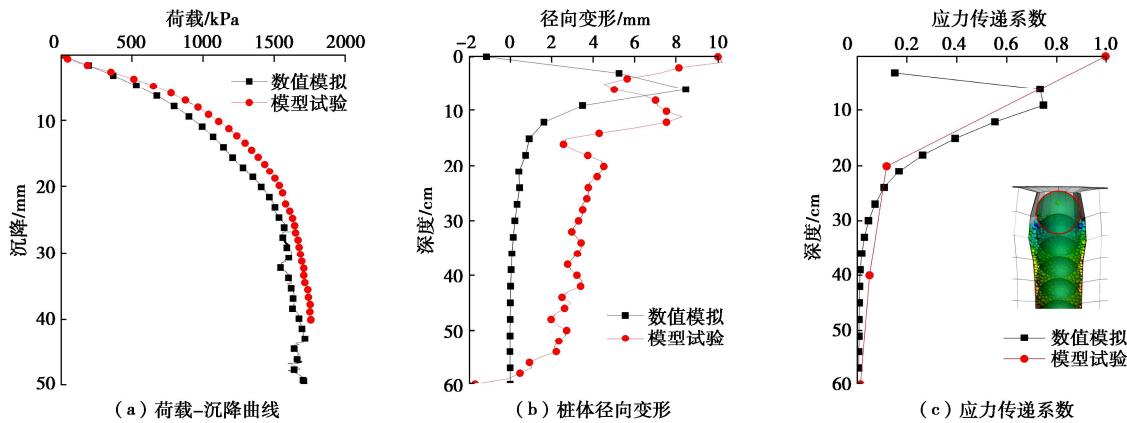


图 3 模型试验与数值模拟对比

Fig. 3 Comparison between model tests and numerical simulations

速增加到约 750 kPa；当沉降超过 10 mm 时，非线性变形明显发展；当桩顶应力超过 1500 kPa 后沉降迅速发展，沉降超过 20 mm 后 $p-s$ 曲线几乎竖直，预示着再生骨料强夯桩丧失了承载能力。

图 3 (b) 为模型试验与数值模拟的桩体径向变形对比图，从图中可以看出，两者曲线整体变化趋势相同，桩体径向变形都主要发生在桩身 20 cm (约 3 倍桩径) 及以上，桩身 20 cm 以下变形较小，最大变形量均为 9 mm 左右，桩体呈现上部凸出中下部小的形态。

图 3 (c) 为模型试验与数值模拟的桩身应力传递系数对比图，两条曲线均为桩体最终破坏时测得，从图中可以看出随埋深增加应力传递系数逐渐减小，超过 3 倍桩径后传递系数均小于 0.2，表明大部分荷载均由碎石桩上部承担，模拟和试验具有较好的一致性。数值模拟中上部第一个和第二个数据监测点异常减小是因为此时颗粒大部分被加载板下压，在测量球中的颗粒较少，所以其平均应力较小使得传递系数较小。

2 结果分析

2.1 桩周土变形和应力

图 4 给出了不同桩顶沉降下 (18, 34, 50 mm) 桩周土体的变形和应力云图。从图 4 (a) 可以看出桩体压缩主要产生在桩体上部，随着沉降增加该段区域内碎石产生剧烈鼓胀变形，从而引起桩周土体产生水平位移。土体水平应力在桩体鼓胀导致的水平挤压下增长剧烈。

图 4 (b) 显示桩周上部土体附近产生了较大的竖直应力增量，增加的竖向应力主要由桩侧摩阻力及变形后的桩体与土体挤压产生，并通过土体剪应力以一定扩散角度传递到远离桩体的土体区域。图 4 (c) 显示桩周土体在靠近桩体压缩段也出现了较大的竖向位

移，但位移量明显小于碎石沉降量。因此可以判断在桩体压缩强烈的范围内，桩体和桩周土体产生了较大相对位移。加载结束后土地表面产生了明显的隆起。

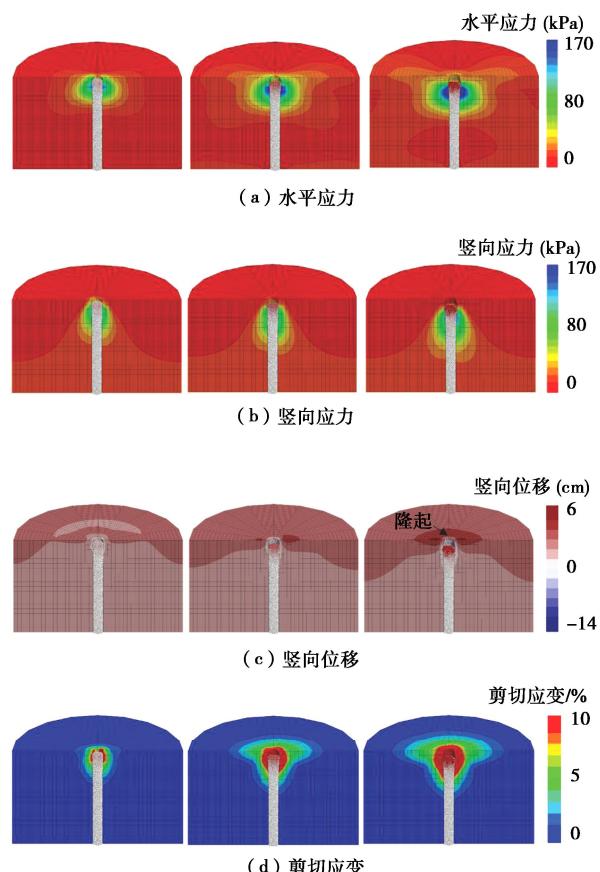


图 4 不同沉降下桩周土变形和应力

Fig. 4 Deformations and stresses of soil around column under different settlements

图 4 (d) 为不同沉降下桩周土体剪切应变分布，土体剪切应变大小直接反映桩体变形对土体的扰动强弱。随着桩体沉降量的增加，土体剪切扰动区域在桩体水平鼓胀推动下向四周扩展，最终观察到贯通地表

的连续剪切滑动面。

2.2 桩体变形和应力

图 5 (a) 为不同沉降时桩体鼓胀变形沿桩身分布图, 桩体鼓胀变形整体呈现上部突出中下部小的形态。随着沉降增加鼓胀变形逐渐增加, 主要鼓胀变形发生在桩体 3 倍桩径的埋深范围内, 径向应变最大为 14%, 最大鼓胀变形位置大约在 1.5 倍桩径处。图 5 (b) 为桩体水平应力沿桩身分布图, 从图中可以看出水平应力随沉降增大而增大, 随埋深增大发生较大衰减。与径向应变变化规律一致。

图 6 显示了再生骨料颗粒在不同沉降下接触力的分布。随沉降增大, 桩顶处直接承受荷载的强接触力链越来越明显, 且其接触力值越来越大。接触力链主要集中在桩体的上部, 大概 3 倍桩径深度内, 这与径向应变一致。在加载过程中, 强接触力链承担桩顶荷载后再通过若干弱接触力链向下部及桩周土体传递荷载。

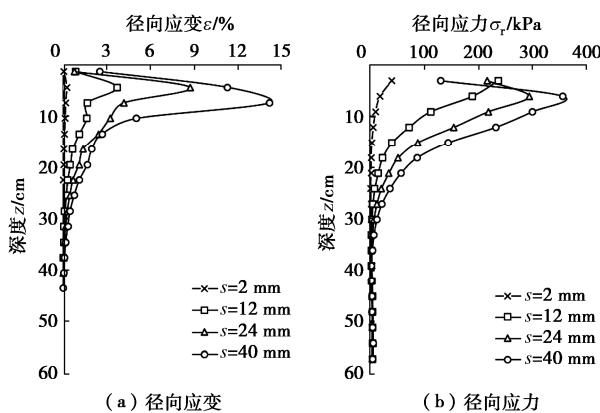


图 5 不同沉降下桩体变形和应力

Fig. 5 Column deformations and stresses under different settlements

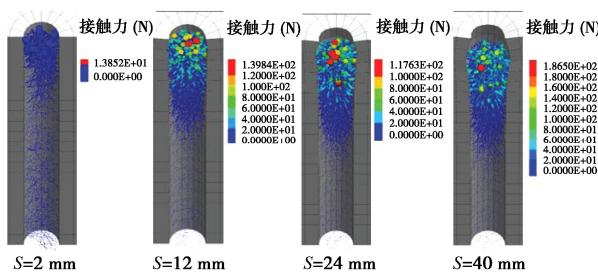


图 6 不同沉降下颗粒间接触力链

Fig. 6 Contact force chains between particles under different settlements

2.3 破坏模式

再生骨料强夯桩的破坏模式示意图如图 7 所示。随着荷载的增加, 再生骨料强夯桩最大鼓胀变形 (1.5 倍孔径) 附近的土体首先进入屈服状态, 接下来的荷载会使石柱产生较大的鼓胀变形并挤压石柱周围土

体, 造成土体塑性区以半球形式向周边扩展。随着荷载继续增加, 桩周土体在桩体鼓胀变形的挤压下形成贯通地表的连续滑裂面, 地表发生隆起变形, 影响范围约为 18 cm (3 倍桩径)。桩体则最终因为鼓胀段 (3 倍桩径) 径向应变无法限制而丧失承载力。

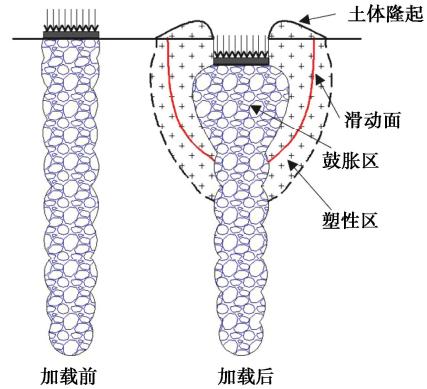


图 7 再生骨料强夯桩破坏模式

Fig. 7 Failure modes of recycled aggregate column

3 参数分析

3.1 桩体长度的影响

其他条件不变, 只改变桩体长度, 得到不同长度下再生骨料强夯桩的荷载-沉降曲线如图 8 所示。可以看出桩长过小时, 再生骨料强夯桩的承载力很低, 只有 540 kPa, 在桩顶沉降 20 mm 时便发生破坏, 破坏形式为刺入破坏。随着桩长的增加, 承载力逐渐提高。桩长 7d 时与全长桩 (10d) 时承载力接近, 这说明全长桩底部 3 倍桩径并不承担荷载, 有效长度为 7d。从 5d 开始, 再生骨料强夯桩发生鼓胀破坏。

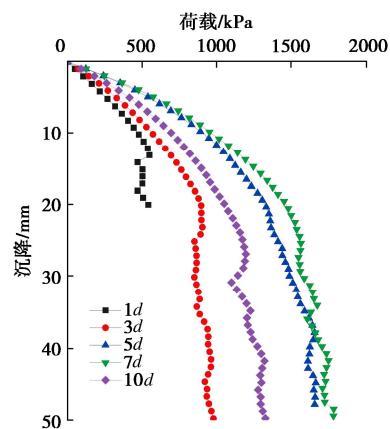


图 8 不同长度下桩体荷载-沉降曲线

Fig. 8 Load-settlement curves under different column lengths

3.2 孔隙率的影响

其他条件不变 (桩长为 10d), 只改变孔隙率, 得到不同孔隙率下再生骨料强夯桩的荷载-沉降曲线如图 9 所示。

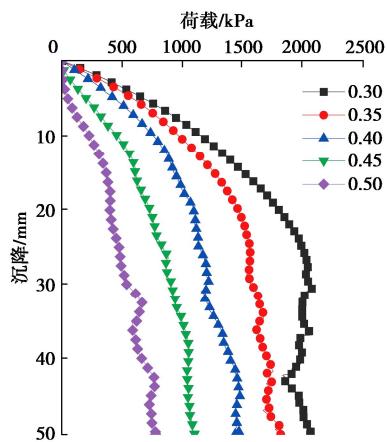


图9 不同孔隙率下桩体荷载-沉降曲线

Fig. 9 Load-settlement curves under different porosities

随着孔隙率减小，再生骨料强夯桩的承载性能逐渐提高。在孔隙率为0.3, 0.35时，曲线随着沉降增加先为线性增加，然后快速发展，最后曲线趋于竖直，而孔隙率为0.4, 0.45, 0.5时，曲线近似线性变化，原因是桩体孔隙率较大时，颗粒间咬合力较弱，颗粒向桩周土位移时，桩周土能提供较强的侧限作用，当增加到一定沉降后，桩体被压密，此时颗粒不断挤向土体，因侧限作用失效产生破坏。

4 结 论

通过建立三维离散-连续耦合数值模型对再生骨料强夯桩的承载性能进行模拟，研究了再生骨料强夯桩的承载变形机理、桩体破坏模式及荷载传递规律。并分析了不同桩长和不同孔隙率的再生骨料强夯桩的承载性能。主要得到以下3点结论。

(1) 桩周土体受颗粒挤压变形导致桩体上部位置位移和应力发展迅速。在水平方向表现为鼓胀变形，在竖直方向上地表会有隆起和抬升。鼓胀变形主要集中在3倍桩径范围内。

(2) 竖向荷载使桩体产生较大的鼓胀变形并挤压石柱周围土体，造成土体塑性区以半球形式向周边扩展。随着荷载继续增加，桩周土体在桩体鼓胀变形的挤压下形成贯通地表的连续剪切滑裂面。

(3) 桩长小于 $3d$ ，桩体发生刺入破坏，大于 $3d$ 时发生鼓胀破坏。全长桩底部3倍桩径并不承担荷载，有效长度为 $7d$ 。随着孔隙率减小，再生骨料强夯桩的承载性能逐渐提高。

参考文献：

[1] KIM J. Influence of quality of recycled aggregates on the

mechanical properties of recycled aggregate concretes: an overview[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127071.

- [2] KATZ A, BAUM H. A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites[J]. Waste Management, 2011, 31(2): 353-358.
- [3] SOLEIMANBEIGI A, EDIL T B. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(5): 04015011.
- [4] WANG X, GUO W, REN Y X, et al. Installation behavior of an underwater rammed stone column in clay[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(5): 3213-3228.
- [5] GUO W, WANG X, REN Y, et al. Experimental study on underwater rammed stone column[J]. Applied Ocean Research, 2023, 140: 103740.
- [6] OU Y 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, 2017, 24(3): 1-13.
- [7] 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 Minghua, GU Meixiang, 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))
- [8] 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 Zeyu, ZHAO Minghua. 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))
- [9] MIRANDA M, FERNÁNDEZ-RUIZ J, CASTRO J. Critical length of encased stone columns[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(5): 1312-1323.
- [10] TAN X, FENG L J, HU Z B, et al. Failure modes and ultimate bearing capacity of the isolated stone column in soft soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2629-2642.
- [11] WANG X, LI S B, FENG S Z, et al. Model tests of using recycled aggregate in rammed stone columns[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 38: 18271.

(编校：黄贤沙)