

DOI: 10.11779/CJGE2022S2016

重载堆场桩网复合地基离心模型试验与数值模拟研究

李 威^{1, 2}, 周春儿³, 吴加武³, 董华钢³, 任红磊^{*1, 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏南京 210029;
3. 广东省航运规划设计院有限公司, 广东广州 510050)

摘要: 以某码头重载堆场 CFG 桩网复合地基为研究背景, 开展离心模型试验及三维数值模拟计算, 研究重载作用下桩网复合地基变形及受力特性。结果表明: 离心模型及数值模拟得出的地基变形、桩顶轴力、孔隙水压力及桩土应力比结果具有较好的一致性, 两种方法可互为补充验证; 重载作用下, 桩网复合地基发生的位移以竖向沉降分量为主, 水平位移分量较小, 位移变化速率满足堆场稳定性控制要求; 复合地基中桩土应力比介于 20~40 之间, CFG 桩分担了一半以上的上覆堆场荷载, 发挥了极其关键的荷载分担作用。

关键词: CFG 桩; 变形; 桩土应力比; 离心模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0071-05

作者简介: 李 威(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程数值模拟等方面的研究工作。E-mail: liwei@nhri.cn。

Centrifugal model tests and numerical simulations of pile-net composite foundation for heavy-load storage yard

LI Wei^{1, 2}, ZHOU Chun-er³, WU Jia-wu³, DONG Hua-gang³, REN Hong-lei^{1, 2}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Guangdong Province Planning & Design Institute for Water Transportation Co., Ltd., Guangzhou 510050, China)

Abstract: Based on the research background of pile-net composite foundation of the heavy-load storage yard of a wharf, the centrifugal model tests and three-dimensional numerical simulations are carried out to study the deformation and stress characteristics of the pile-net composite foundation under heavy loads. The results show that the values of foundation deformation, axial force at pile top, pore water pressure and pile-soil stress ratio obtained by the centrifugal model and numerical simulation are in good agreement, and the two methods can be complemented and verified for each other. Under the heavy loads, the displacement of the pile-net composite foundation is mainly the vertical settlement component, and the horizontal displacement component is small. The change rate of displacement meets the control requirements of yard stability. The pile-soil stress ratio in the composite foundation is between 20 and 40, and the CFG piles share more than half of the loads of the overlying storage yard, playing a key role in load sharing.

Key words: CFG pile; deformation; pile-soil stress ratio; centrifugal model test; numerical simulation

0 引言

随着地基处理技术的发展, CFG (Cement Fly-ash Gravel) 桩网复合地基已成为常见的有效的地基处理方式, 并被广泛应用于各工程领域软土地基处理中^[1-2]。

离心模型试验^[3-4]通过离心力创造一个与原型应力水平相同的应力场, 从而使原型的性状在模型中再现。相比模型试验及现场试验, 数值模拟可针对不同方案进行模拟, 具有更高的灵活性及经济性。张树明等^[5]通过数值模拟方法结合离心模型试验, 探究不同加固范围与不同边坡坡率对 CFG 桩网复合地基受力

变形特性的影响。姜彦斌等^[6]通过数值模拟, 对比了几种管桩复合地基单桩建模方法, 并基于轴对称接触模型结果对桩网复合地基受力及变形进行了研究。

众多学者采用离心模型试验或数值模拟等手段研究软土地基处理中的桩土相互作用问题, 且有较多成果, 但对于离心试验结果与精细化数值模拟结果之间的关系缺乏进一步的分析。且为减少计算时间, 提高

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项项目(Y321002); 江苏水利科技项目(2018019)

收稿日期: 2022-12-08

*通信作者(E-mail: 1987766238@qq.com)

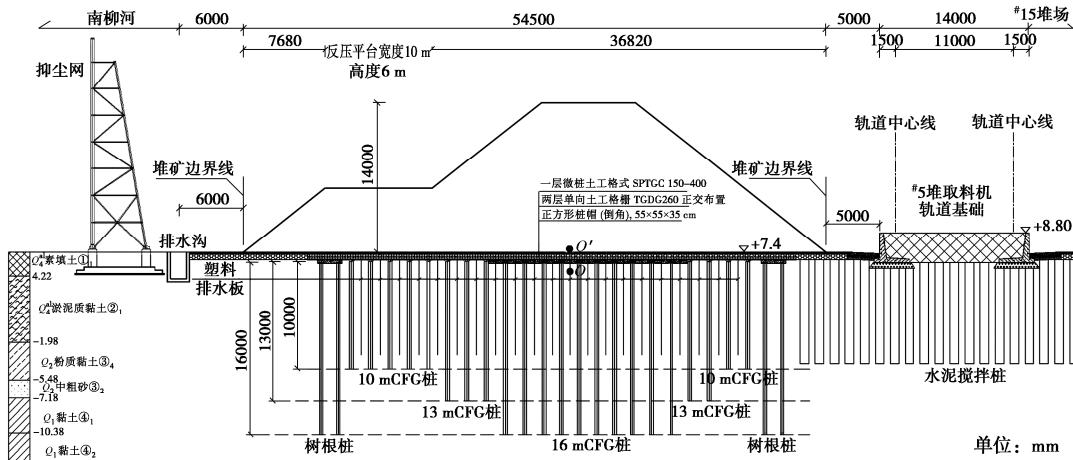


图 1 复合地基剖面图

Fig. 1 Profile of composite foundation

收敛性，众多学者有限元建模时常采用单桩模型或平面模型，不考虑桩土接触，忽略地基固结过程等，导致计算结果与实际情况不符。

本文针对某重载堆场 CFG 桩网复合地基，建立离心试验模型及全断面三维数值模型，通过离心试验及瞬态流固耦合计算，研究重载作用下桩网复合地基变形及受力特性，并对试验及计算结果进行比较，为现场加固处理方案的验证提供参考。

1 试验模型与数值模型的建立

1.1 工程背景

某散货码头重载堆场，堆场东西两侧距防尘墙基础分别为 47, 77 m，南侧距排水沟 6 m，北侧距离取料机轨道梁基础 5 m，面积为 69291 m²。堆场设计按一次性达到承载 350 kPa 的要求使用，即矿石堆载体最大高度 14 m，重度 25 kN/m³。

堆场地基土层自上而下依次为素填土层（2.48 m），淤泥质黏土层（6.20 m），粉质黏土层（3.20 m），中粗砂层（2.00 m）以及黏土层，地下水埋深 2.5 m。淤泥质黏土强度低、压缩性高且承载力不足。

采用 CFG 桩网复合地基，两端分别布设 2 排 16 m 长的树根桩，中间布设 10, 13, 16 m 三种不同长度的 CFG 桩，其中，16 m CFG 桩按 1.65, 1.80 m 两种间距布置，其余桩间距均为 1.80 m。CFG 桩间布设塑料排水板，穿透淤泥质黏土层，堆场地基层分布及复合地基方案图见图 1。

1.2 离心模型试验

试验在南京水利科学研究院 NHRI-400 g·t 大型土工离心机上进行，采用大型平面应变模型箱，其净空尺寸为 1200 mm(长)×400 mm(宽)×800 mm(高)，模型比尺为 70。土样取自现场，在按照相似比尺模拟原型地基土层的基础上，逐根模拟了原型中的每一根桩。

试验过程中采用重度为 60 kN/m³ 的铅丸模拟原型矿石荷载，堆高 83 mm。

试验过程中通过激光位移传感器、微型孔隙水压计、微型土压力盒及轴力传感器分别测量表层位移、孔压、土压力以及桩顶轴力，并通过 PIV 技术对土层剖面位移进行测量，图 2 为模型布置图。

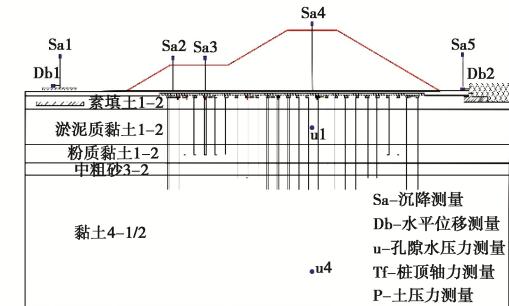


图 2 模型布置图

Fig. 2 Layout of model

1.3 数值模型建立

三维模型中，土体、桩及堆场上部矿石堆载采用实体建模，桩土之间设置摩擦接触，排水板通过等效砂井代替，土工格栅采用膜单元模拟。模型在深度方向取最长桩的两倍桩长，长度方向取堆载宽度的 3 倍，共划分单元 532048 个，节点 579819 个。模型四周进行法向约束，底部约束 3 个方向，地表设为排水边界。桩等结构模型及整体模型分别如图 3 (a), (b) 所示。

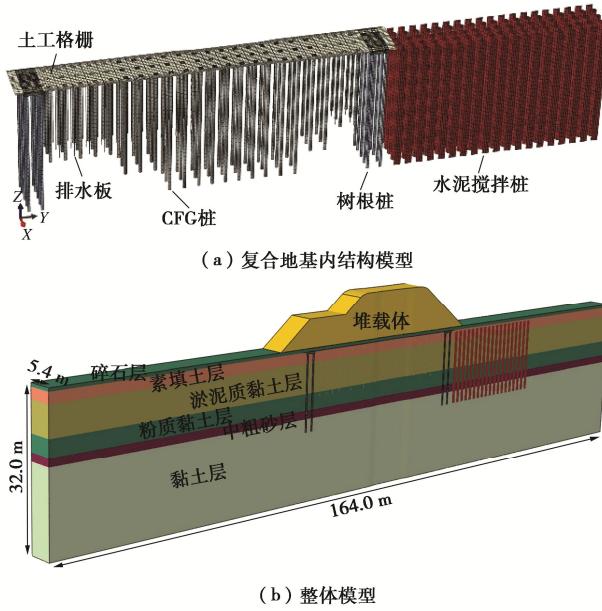


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

计算过程中, 土体的本构模型采用南水模型, 混凝土采用线弹性模型, 计算参数如表 1 所示。

1.4 加载过程

离心模型试验及数值模拟试堆期加载过程曲线如图 4 所示, 总持续时间为 45 d。

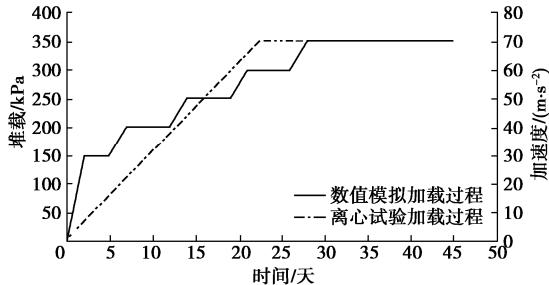


图 4 加载过程线

Fig. 4 Curves of loading process

堆载前, 启动离心机至设计加速度 70g, 保持设计加速度运行 120 min, 模型地基达到自重应力状态, 使桩土密切接触。堆载模拟阶段, 铺设铅丸堆载体至缩尺高度后, 启动离心机按 0.1764 g/s 加速至 70g, 此时堆载满足原型要求, 而后恒载运行。离心加速度从

1g 升至 70g 的时长, 换算到原型时间尺度, 就是原型堆载期时长, 为 22.5 d。

数值模拟第一步为地应力平衡, 第二步依据堆载方案模拟分布加载过程, 初次加载由 0 kPa 加载值 150 kPa, 观察 5 d, 后续每 2 d 加载增量 50 kPa, 观察 5 d, 直至加载至 350 kPa, 加载过程为 28 d。

2 桩网复合地基变形特性

2.1 地基沉降分析

图 5 (a), (b) 分别为 350 kPa 堆载作用下试堆期结束时试验及数值计算地层沉降等值线图。试验及数值结果揭示的地基沉降分布规律较为一致, 350 kPa 堆载作用对地基影响范围深远, 地面 30 m 以下范围仍有位移, 堆场中部沉降大于两侧沉降。

图 6 为各沉降测点沉降发展过程曲线。由于试验加载过程与数值计算模拟的现场堆载过程不完全相同, 离心试验加载为单调加载, 数值计算为分级加载且各分级荷载间存在间歇, 故试验曲线相比数值计算曲线无台阶阶段, 但各测点试验与模拟沉降变化总体趋势相同, 且试堆期 45 d 结束时沉降量值较为接近。

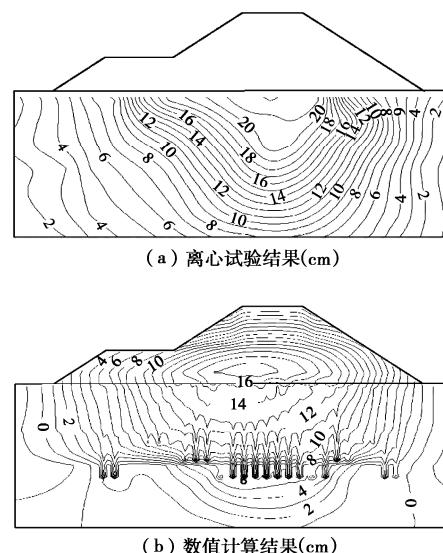


图 5 沉降等值线图

Fig. 5 Contours of settlement

表 1 土的计算参数

Table 1 Parameters of soils

土层参数	K	n	R_f	c/kPa	$\varphi_c/(^\circ)$	K_{ur}/K	c_d	n_d	R_d	CFG 桩
复合垫层	400.0	0.300	0.70	25.0	0.0	3.5	0.005	0.67	0.69	$\gamma=24$
素填土① ₂	186.2	0.794	0.70	25.1	18.7	4.0	0.010	0.60	0.69	kN/m^3 ,
淤泥质黏土② ₁	87.6	0.832	0.80	9.9	12.2	5.0	0.040	0.80	0.69	$E=30 GPa$,
粉质黏土③ ₄	250.0	0.700	0.70	27.2	17.7	4.0	0.005	0.58	0.69	$\nu=0.2$
中粗砂③ ₂	250.0	0.700	0.70	0.0	30.0	4.0	0.005	0.58	0.69	$J_{2\%}=210$
黏土④ ₁	110.0	0.809	0.75	32.6	14.8	8.0	0.025	0.75	0.69	$kN/m, E=2$
黏土④ ₂	136.2	0.794	0.70	32.6	14.8	8.0	0.020	0.75	0.69	$GPa, \nu=0.3$

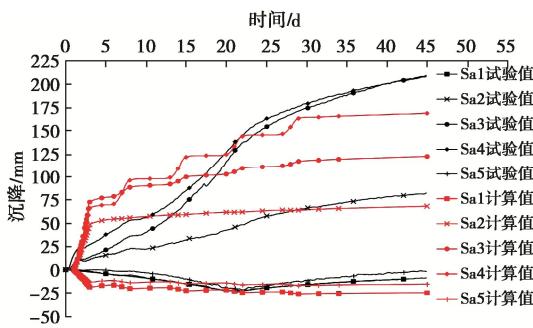


图 6 各测点沉降过程线

Fig. 6 Development curves of settlement

由图 6 可知,位于防尘网基础和轨道梁基础上测点 Sa1 和 Sa5,加载期表现隆起,恒载期随着超孔压的消散,隆起量减小;堆载期堆场区域三个测点 Sa2、Sa3 和 Sa4 均为沉降,加载期沉降变化明显,恒载超孔压消散阶段,沉降继续发展,但变化速率明显减小。试验及数值结果显示,加载期堆场区及防尘网、轨道梁基础最大平均沉降速率为 6.62, -0.98 mm/d, 分别小于试堆期沉降稳定性控制标准规定的 10, 5 mm/d。

2.2 地基水平位移分析

图 7(a), (b) 分别为 350 kPa 堆载作用下试堆期结束时试验及数值计算地层水平位移等值线图。正值指向右侧,负值指向左侧。试验结果及数值计算结果反映的地基水平位移分布规律大体一致,堆体中心处水平位移较小,两侧水平位移较大且分别指向两侧,水平位移明显小于沉降值,由此说明堆载作用下,桩网复合地基是稳定的。

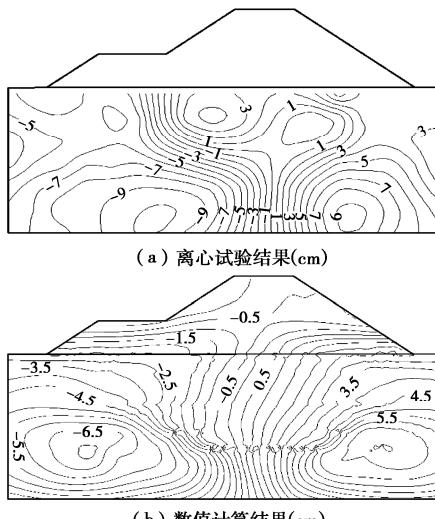


图 7 水平位移等值线图

Fig. 7 Contours of horizontal displacement

由图 8 各水平位移测点水平位移发展过程曲线可知,数值计算结果规律性更强,离心试验结果具有一定的波动性,试堆期结束时试验及数值计算得到的各测点水平位移较为一致。试堆期,两侧点水平位移平均变化速率为 0.22, 0.49 mm/d, 均小于防尘网基础及轨道梁基础水平位移稳定控制标准 (2 mm/d)。

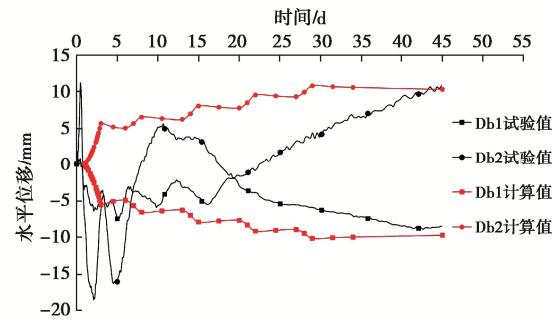


图 8 各测点水平位移过程线

Fig. 8 Development curves of horizontal displacement

3 桩网复合地基受力特性

3.1 地基孔隙水压力分析

图 9 为各测点孔隙水压力发展过程曲线。由图 9 可知,离心试验及数值计算所得孔压变化规律与加载方式一致,加载方式的不同也导致试验及计算孔压结果变化规律的不同。

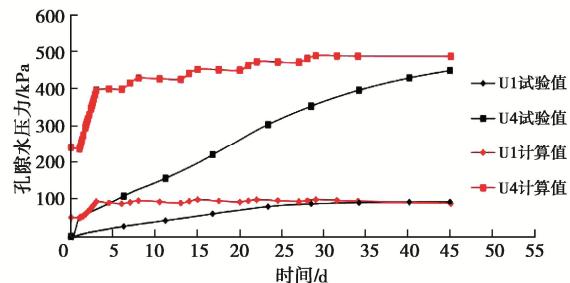


图 9 孔隙水压力发展过程曲线

Fig. 9 Development curves of pore water pressure

加载起始点模型试验自 1g 加速度开始加载,初始孔压较小故对应试验孔压结果接近于零,而数值计算结果为地下水位引起的孔压;加载过程中,试验及计算所得孔压结果均不断增加,堆载完成时计算孔压达最大值,试验孔压未达峰值。主要因为离心试验中,孔压传感器周边布置了较多模拟原型塑料排水板的编织玻纤管排水通道,孔压传递消散路径较计算更为复杂,导致孔隙水压力反应滞后。恒载期,试验所得孔压因滞后效应继续增加,计算孔压则因超孔压的消散出现缓慢减小的现象,且试堆期结束时试验孔压结果与计算孔压结果在量值上较为一致。

3.2 桩顶轴力分析

图 10 为 CFG 桩桩顶轴力发展过程曲线,Tf1、Tf2、Tf3 及 Tf4 分别对应模型左侧至右侧的 10 m CFG 桩、13 m CFG 桩、间距 1.65 m 的 16 m CFG 桩以及间距 1.8 m 的 16 m CFG 桩。

由图 10 可知,桩顶轴力的发展与加载过程密切相关,加载过程的不同导致了试验曲线与计算曲线存在一定差别。但试验结果与计算结果反映的规律较为一致,桩顶轴力与堆载同步变化,荷载达到最大值 350 kPa, 各测点桩顶端轴力达到峰值。

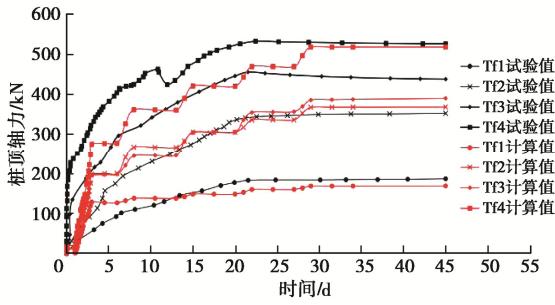


图 10 桩顶轴力发展过程曲线

Fig.10 Development curve of axial force at pile tip

3.3 桩土应力比分析

为分析桩间土及桩基承担荷载情况, 对桩土应力比进行分析。

离心试验中, 因微型土压力盒与桩间土两者刚度相差较大等原因, 上覆竖向压力分布在刚度较大的土压力盒体上存在明显的应力集中现象, 土压力实测值明显高于实际值。故根据桩顶端轴力测点处置换率和上覆堆载体的竖向压力, 推求出平均桩间土压力, 进而求得桩土应力比^[7]。

针对数值计算结果, 考虑桩间土竖向应力的分布不均匀性, 桩间土应力取相邻桩中心区域多点应力的平均值, 再根据桩顶应力求得桩土应力比。

图 11 为 4 种规格桩所处区域在试堆期结束时桩土应力比试验值与计算值比较图。由图可知, 桩土应力比试验结果与计算结果较为一致, 桩土应力比介于 20~40, 桩土共同并且合理地承担堆场上部荷载。

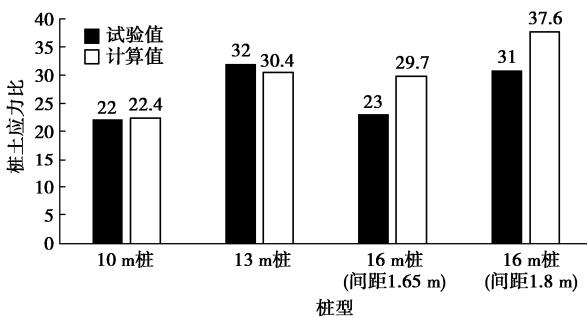


图 11 桩土应力比分布

Fig.11 Distribution of pile-soil stress ratio

4 结 论

(1) 离心模型试验结果与数值模拟结果具有较好的一致性, 两种方法可互为补充验证。

(2) 堆载作用下复合地基内水平位移近似对称分布, 地基中心水平位移接近于 0, 最大水平位移发生在地基两侧树根桩底部位置; 最大沉降发生在堆体底部中间位置, 向堆体两侧坡脚沉降逐渐减小, 堆体外地表隆起。

(3) 桩顶轴力与堆载同步变化, 堆载达到最大值时, 各测点桩顶端轴力达到峰值, 且桩土共同并且

合理地承担堆场上部荷载。

参考文献:

- [1] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. CFG Pile Composite Foundation Technology and Engineering Practice[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 何 宁, 娄 炎, 娄 斌. CFG 桩复合地基加固桥头深厚软基[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 89 - 94. (HE Ning, LOU Yan, LOU Bin. Improvement of deep and thick soft foundation at the end of a bridge by using CFG pile composite foundation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 89 - 94. (in Chinese))
- [3] 蔡正银, 徐光明. 港口工程离心模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020. (CAI Zheng-yin, XU Guang-ming. Centrifugal Simulation Technology of Port Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese))
- [4] 顾行文, 谭祥韶, 黄炜旺, 等. 倾斜软土 CFG 桩复合地基上的路堤破坏模式研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 111 - 115. (GU Xing-wen, TAN Xiang-shao, HUANG Wei-wang, et al. Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by CFG Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 111 - 115. (in Chinese))
- [5] 张树明, 蒋关鲁, 廖祎来, 等. 加固范围及边坡坡率对 CFG 桩-网复合地基受力变形特性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 192 - 202. (ZHANG Shu-ming, JIANG Guan-lu, LIAO Yi-lai, et al. Effect of the strengthening area and the slope rate on bearing and deforming behaviors of CFG pile-geogrid composite foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 192 - 202. (in Chinese))
- [6] 姜彦彬, 何 宁, 林志强, 等. 路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 43 - 51. (JIANG Yan-bin, HE Ning, LIN Zhi-qiang, et al. Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 43 - 51. (in Chinese))
- [7] 姜彦彬, 何 宁, 何 煜, 等. 复合地基离心模型试验桩土应力分布测试分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 85 - 89. (JIANG Yan-bin, HE Ning, HE Bin, et al. Distribution of pile-soil stress in centrifugal modelling of composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 85 - 89. (in Chinese))