

DOI: 10.11779/CJGE2024S10048

# 超大堆载下桩网复合地基变形特性离心模型试验研究

张军杰<sup>1</sup>, 顾行文<sup>2,3</sup>, 任国峰<sup>\*2,3</sup>, 周春儿<sup>4</sup>, 王年香<sup>2,3</sup>

(1. 河南省核技术应用中心, 河南 郑州 450000; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 3. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

**摘要:** CFG 桩网复合地基广泛应用于处理软土地基。采用土工离心模型试验研究某码头堆场超大荷载下 CFG 桩网复合地基的变形特性, 试验模拟了地基、CFG 桩、树根桩、加筋垫层、防尘网和轨道梁基础、矿石堆载等, 分析了超大荷载作用下复合地基沉降、防尘网和轨道梁基础水平位移、地基剖面位移的变化规律。试验结果表明, 复合地基的沉降速率在稳定控制标准之内, 沉降量满足堆场使用要求, 防尘网基础和轨道梁基础水平位移和沉降均很小, 复合地基沉降分量远大于水平位移分量。CFG 桩网复合地基在 350 kPa 荷载作用下是稳定安全的, 达到了预期加固效果。

**关键词:** CFG 桩桩网复合地基; 水平位移; 沉降; 超大荷载; 离心模型试验

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0212-05

**作者简介:** 张军杰(1973—), 陕西宝鸡人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事地质灾害治理、山水林田湖草地地质环境治理及岩土工程勘察工作。E-mail: 445149227@qq.com。

## Centrifugal model tests on deformation characteristics of pile-net composite foundation under super-large loads

ZHANG Junjie<sup>1</sup>, GU Xingwen<sup>2,3</sup>, REN Guofeng<sup>2,3</sup>, ZHOU Chun'er<sup>4</sup>, WANG Nianxiang<sup>2,3</sup>

(1. Henan Nuclear Technology Application Center, Zhengzhou 450000, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China; 4. Guangdong Province Planning & Design Institute for Water Transportation Co., Ltd., Guangzhou 510050, China)

**Abstract:** The CFG pile-net composite foundation is widely used to reinforce soft soil foundation. The geotechnical centrifugal model tests are carried out to study the deformation characteristics of the CFG pile-net composite foundation under super to large loads in the storage yard of a wharf. The foundation, CFG piles, root piles, reinforced cushion, dust net foundation, track beam foundation and ore loads are simulated in the tests. The variation laws of surface settlement, horizontal displacement of track beam foundation and displacement of foundation profile of the composite foundation are analyzed under super-large loads. The settlement rate of the composite foundation is within the stability control standard, and the settlement meets the requirements of the storage yard. The horizontal displacement and settlement of the dust net foundation and the track beam foundation are small. The settlement component of composite foundation is much larger than the horizontal displacement one. The test results show that the CFG pile-net composite foundation is stable and safe under the load of 350 kPa, and the foundation reinforcement has achieved the expected effects.

**Key words:** CFG pile-net composite foundation; horizontal displacement; settlement; super-large load; centrifugal model test

## 0 引言

软土地基处理是新建港口码头、老旧堆场码头改造等工程建设的重点和难点, 其对地基变形要求十分严格。若地基处理不当, 后期在长时间高强度堆载下极易产生不均匀沉降等灾害, 严重影响码头和堆场等工程的正常使用。随着地基处理技术的发展, CFG 桩网复合地基<sup>[1]</sup>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<sup>[2-3]</sup>。

针对桩网复合地基的研究, 众多学者在室内模型

试验、现场试验及数值模拟等方面均取得了较多的科研成果。顾行文等<sup>[4]</sup>通过离心模型试验对倾斜软土 CFG 桩复合地基上的路堤破坏模式进行了研究; 张树明等<sup>[5]</sup>过离心模型试验 研究了加固范围及边坡坡率对 CFG 桩-网复合地基受力变形特性的影响。潘高峰等<sup>[6]</sup>通过开展全尺寸现场路基填筑试验, 对比分析了

基金项目: 国家重点研发计划“交通基础设施”重点专项2023年度项目(2023YFB2604200)

收稿日期: 2024-04-29

\*通信作者 (E-mail: gfren@nhri.cn)

天然地基和 CFG 桩网复合地基在路基荷载下的侧向变形规律; Liu 等<sup>[7]</sup>通过现场试验研究了荷载作用下不同深度桩网结构路堤侧向变形发展规律。姜彦斌等<sup>[8]</sup>结合管桩复合地基现场试验段工程, 建立有限元数值模型, 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对桩网复合地基受力变形进行了研究。

土工离心模型试验技术是一项崭新的土工物理模型技术, 通过施加在模型上的离心惯性力使模型的重度变大, 从而使模型的应力与原型一致, 这样就可以用模型反映、表示原型。离心模型是各类物理模型中相似性最好的模型, 在国内外受到广泛重视, 试验技术飞速发展与进步, 研究内容涉及几乎所有的岩土工程研究领域, 已成为岩土工程技术研究中的最主要、最有效、最广泛应用的研究手段<sup>[9]</sup>, 在港口码头工程中也得到广泛应用<sup>[10]</sup>。本文利用离心模型试验技术, 研究某码头堆场 CFG 桩网复合地基的变形特性, 验证复合地基的加固效果。

## 1 工程概况

某码头散货#16 堆场, 堆场东侧距防尘网基础 47 m, 西侧距防尘网基础 77 m, 南侧距排水沟 6 m, 北侧距离#5 堆取料机轨道梁基础 5 m, 堆矿范围为长 1271.4 m, 宽 54.5 m 的矩形, 实际堆场面积为 69291 m<sup>2</sup>。堆场地基采用真空联合堆载预压加固, 轨道梁基础和靠近南柳河侧岸坡均采用水泥搅拌桩复合地基加固。近期, 堆场沿堆场纵向中部发生往南柳河一侧的岸坡推移现象, 推移区长度约 148 m, 往南柳河推移推出 0~20 m。堆场产生不同程度的损坏, 必须重新进行加固处理, 以满足一次性达到承载 350 kPa 的使用要求。

地基土层自上而下为: 素填土①<sub>2</sub>, 淤泥质黏土②<sub>1</sub>, 粉质黏土③<sub>4</sub>, 中粗砂层③<sub>2</sub>, 黏土层④<sub>1</sub>以及黏土层④<sub>2</sub>, 表 1 列出了其主要物理力学性质指标, 淤泥质黏土②<sub>1</sub>含水率大、抗剪强度低, 不能满足堆场的变形和承载力要求, 堆场地基采用桩网复合地基, 设计方案如图 1 所示。堆场地基两侧分别布设 2 排长 16 m、Φ300 mm 的树根桩, 三角形布置, 间距 1.4 m×1.6 m, 桩身强度 C30, 内插 Φ133 mm、壁厚 5 mm 的无缝钢管, 桩顶采用钢筋混凝土板块连成整体。中间布设长 13, 15, 18 m、Φ350 mm 的 CFG 桩, 正方形布置, 其中, 18 m 桩长的中间 6 排 CFG 桩间距为 1.65 m, 桩身强度 C30, 其余 CFG 桩间距为 1.80 m, 桩身强度 C25。为加强地基排水, CFG 桩间布设 B 型塑料排水板, 穿透淤泥质黏土层。桩间土压实后, 铺设加筋垫层, 自下向上为: 10 cm 厚碎石土, 一层编织土工布, 两层单向土工格

栅, 10 cm 厚碎石, 一层土工格室, 碎石土, 5 cm 厚中粗砂层, 15 cm 厚六角块。

表 1 土的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土名	厚度/m	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	不排水强度/kPa
素填土① <sub>2</sub>	2.03	32.0	1.91	25
淤泥质黏土② <sub>1</sub>	6.70	50.8	1.72	31
粉质黏土③ <sub>4</sub>	5.20	31.0	1.92	41
中粗砂③ <sub>2</sub>	2.00		1.85	
黏土④ <sub>1</sub> 、④ <sub>2</sub>		42.3	1.77	51

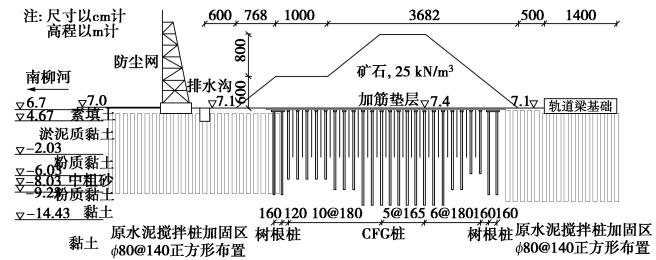


图 1 复合地基剖面图

Fig. 1 Profile of composite foundation

## 2 离心模型试验方法

### 2.1 试验设备与模型布置

试验在南京水利科学研究院 NHRI400 g·t 土工离心机上进行。该机最大半径 5.5 m, 吊篮平台的尺寸为 1100 mm×1100 mm, 最大加速度 200g, 最大负荷 2000 kg, 容量 400 g·t。模型箱的有效尺寸为 1200 mm×800 mm×400 mm (长×高×宽), 其一侧为有机玻璃, 便于试验中进行监控。

取标准剖面按平面问题进行试验, 模拟地基、CFG 桩、树根桩、加筋垫层、防尘网和轨道梁基础、矿石堆载等, 综合各种因素, 取模型比尺  $n=70$ , 模型布置如图 2 所示。

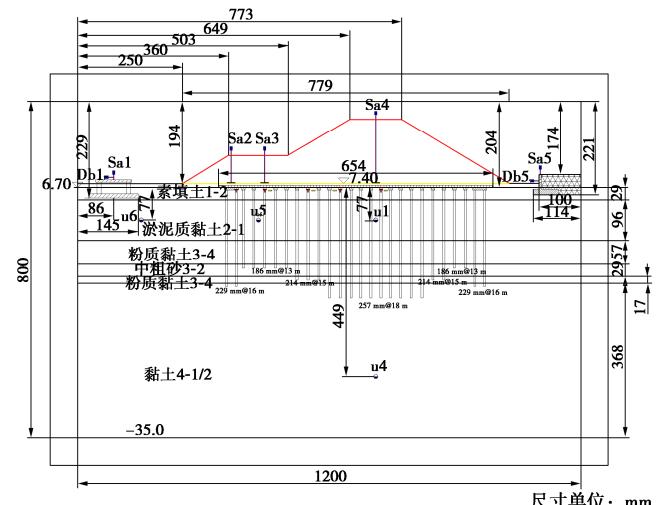


图 2 离心模型试验布置图

Fig. 2 Layout of centrifugal model tests

## 2.2 材料模拟技术

试验土料取自现场，试验主要研究堆场地基的稳定和变形问题，以地基强度指标作为主要模拟量，而其它诸如含水率、重度等参数都作为次要参数近似地满足相似律。为模拟成层地基，根据重度及厚度求得各层土所需的湿土重，然后经过浸饱、拌成泥浆，从底层至上层分层静压固结，按控制强度施加预压荷载和作用时间，直至形成整个天然地基土层。至于模型中的中粗砂层和素填土，则控制其密实度，采用分层压密而成。

塑料排水板采用直径 3 mm 的透水编织玻纤管内灌装中细砂的微型袋装砂井来模拟。

试验中，逐根模拟原型中的每一根 CFG 柱和树根桩。桩体受力状态主要为受压，其次为受弯，因此，采用直径 5 mm 实心竹棒来模拟，满足按抗压刚度相似要求。模型桩帽采用铝合金按几何相似加工制作。

加筋垫层的模拟，土工合成材料按 2% 应变时的单宽拉伸力相似原则确定模型材料，通过不同材料拉伸试验，土工布采用土工滤膜模拟，土工格栅和土工格室采用孔径 4 mm 塑料网格来模拟。

## 2.3 测试技术

沉降和水平位移采用激光位移传感器测量。5 个地基表面沉降测点：Sa1 位于防尘网基础，Sa2 位于树根桩上方，Sa3 位于长 13 m CFG 柱上方，Sa4 位于长 18 m CFG 柱上方，Sa5 位于轨道梁基础左挡墙墙顶。2 个水平位移测点：Db1 位于防尘网基础中心线，Db5 位于轨道梁基础左侧挡墙侧壁。

## 2.4 试验程序

试验准备：制作模型复合地基中的结构物。

制作模型：制备地基，插入模型桩，插入排水滤芯条，埋设和安装传感器，铺设加筋垫层。

恢复自重应力：按堆载速率控制离心机加速度上升速率至 70g，并运行 120 min，期间进行数据采集。

模型试验：铺设堆载体，按堆载速率控制离心机加速度上升速率至 70g，并运行 205 min，相当于模拟了原型 32 d 堆载过程，恒载固结 698 d，期间进行数据采集。

## 3 复合地基变形性状

后面分析时作了如下定义：沉降向下为正，水平位移指向南柳河侧为正、指向轨道梁侧为负。堆载期为 32 d 完成堆载时，试堆期为开始堆载至 45 d 时，恒载时间是指完成堆载后的运行时间，两年责任期指开始堆载到 2 a 时。

### 3.1 沉降变化规律

图 3 为复合地基表面沉降过程线，表 2 列出了不

同时间和位置的沉降特征值。从此可以看出，堆载期至 32 d，防尘网基础和轨道梁基础沉降量分别约为 39, 49 mm，沉降速率分别为 1.22, 1.53 mm/d。堆载区域 3 个测点沉降量分别为 91, 169, 218 mm，沉降速率为 2.84, 5.28, 6.81 mm/d。堆载区及防尘网基础和轨道梁基础堆载期沉降变形均在稳定控制标准之内。

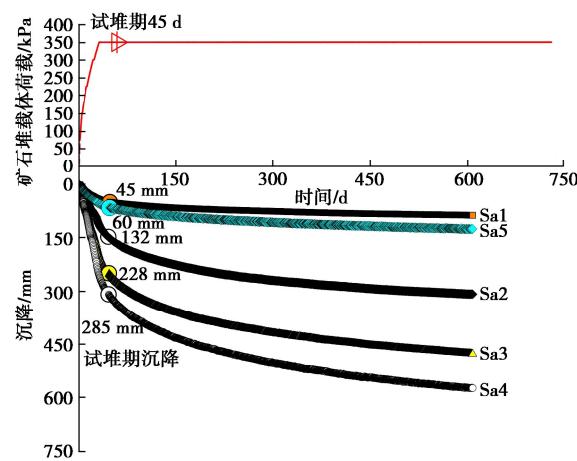


图 3 复合地基表面沉降过程线

Fig. 3 Surface settlement-time curves of composite foundation

表 2 复合地基表面沉降特征值

Table 2 Surface settlements of composite foundation 单位：mm

测点	时间节点			
	堆载期 32 d	试堆期 45 d	恒载 365 d	两年责 任期
Sa1	39	45	77	86
Sa2	91	132	275	309
沉降	169	228	428	479
Sa4	218	285	513	573
Sa5	49	60	108	124

堆载高度达 14 m 后，进入恒载运行，地基土层受恒载 350 kPa 作用受压发生排水固结，沉降增长速率随着时间越来越小，沉降逐渐趋稳。试堆期 45 d 结束时，5 个沉降测点处的沉降量分别为 45, 132, 228, 285, 60 mm。堆载期到试堆期间隔 13 d，这期间 5 个沉降测点处的沉降增量分别为 6, 41, 59, 67, 11 mm，沉降速率依次为 0.46, 3.15, 4.54, 5.15, 0.85 mm/d；两年责任期时堆场表面 5 个沉降测点最终沉降量分别为 86, 309, 479, 573, 124 mm。综上所述，在整个堆载期、试堆期、恒载期以及两年责任期内，桩网复合地基堆场区和防尘网基础及轨道梁基础沉降变形均在稳定控制标准之内。

图 4 给出了复合地基在堆载期 32 d、试堆期 45 d、恒载 1 a 的 397 d 和两年责任期 730 d 等 4 个时间节点的表面沉降剖面图，从图 4 中可见，整个试堆期沉降发展较快，尤其是在堆载期有较大的瞬间沉降发生，而恒载运行期尤其是恒载运行后期，沉降发展缓慢渐趋稳定。桩网复合地基在各个时间节点沉降分布大致

呈锅底形, 沉降剖面的锅底中心位于堆载体最高处的正下方, 即位于 10 排桩长 18 m CFG 桩的正上方堆场区表面发生的沉降量最大。

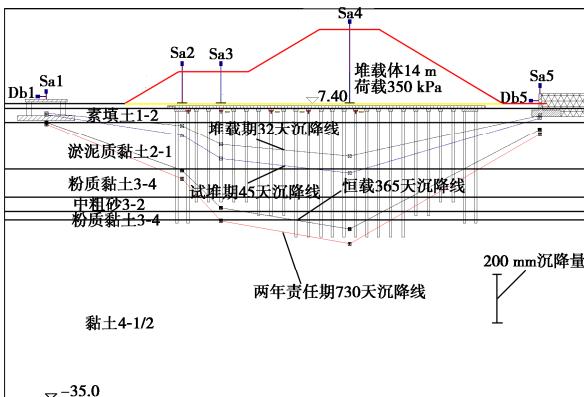


图 4 复合地基表面沉降剖面图

Fig. 4 Surface settlement profile of composite foundation

### 3.2 水平位移变化规律

如图 5 所示, 随着矿石堆载体高度升高, 堆场荷载逐渐增大, 防尘网和轨道梁两基础的水平位移反应迅速, 表 3 列出了不同时间和位置的水平位移特征值。堆载期防尘网和轨道梁两基础分别水平位移了 13, 32 mm, 位移速率为 0.41, 1.00 mm/d, 方向均指向南柳河一侧。恒载 13 d 至试堆期 45 d, 防尘网和轨道梁两基础的水平位移分别达 14, 36 mm, 位移速率为 0.08, 0.62 mm/d。防尘网基础和轨道梁基础在堆载期和试堆期内的水平位移变形满足稳定控制要求。

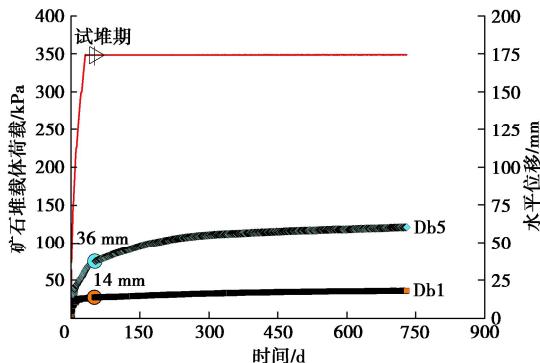


图 5 防尘网和轨道梁基础水平位移过程线

Fig. 5 Horizontal displacement-time curves of foundation

至恒载作用 365 d 时, 防尘网基础和轨道梁基础的水平位移继续增大, 位移量分别达 17, 57 mm。试堆期至恒载作用 365 d 的时长为 352 d, 防尘网基础和轨道梁基础的水平位移增量分别是 3, 21 mm, 水平位移速率为 0.01, 0.06 mm/d; 至两年责任期 730 d 时, 防尘网基础和轨道梁基础的水平位移量分别达 18, 61 mm。恒载作用 365 d 至两年责任期, 防尘网基础和轨道梁基础的水平位移增量分别是 1, 4 mm, 水平位移速率为 0.00, 0.01 mm/d, 表明两基础近乎处于稳定状态。

综上, 在整个堆载期、试堆期、恒载期以及两年责任期内, 防尘网基础和轨道梁基础的水平位移变形均满足稳定控制要求。

表 3 防尘网和轨道梁基础水平位移特征值

Table 3 Horizontal displacements of foundation 单位: mm

测点	时间节点			
	堆载期 32 d	试堆期 45 d	恒载 365 d	两年责 任期
水平位移 Db1	13	14	17	18
水平位移 Db5	32	36	57	61

### 3.3 复合地基整体位移

图 6, 7 分别为试堆期和两年责任期复合地基剖面位移矢量图, 从此可以发现, 受堆场 350 kPa 荷载作用影响, 地面以下 30 m 深度范围都能观测到位移; 堆场中部地基在 350 kPa 荷载作用发生的位移方向近乎竖向, 表明 CFG 桩桩网复合地基中心区域地基位移变形主要为沉降, 堆场中部以外两侧地基在不足 350 kPa 荷载作用发生的位移方向略偏离中垂线, 表明两侧区域地基位移除了垂直沉降外, 还有侧向位移分量, 且分别指向堆场两侧, 但水平位移分量远小于竖向沉降分量, 复合地基在堆场荷载作用下是稳定的。

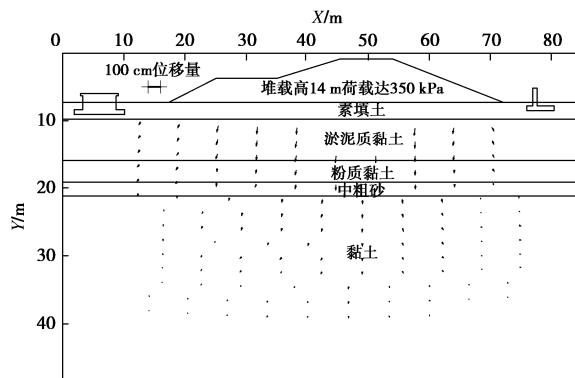


图 6 复合地基试堆期 45 d 剖面位移矢量图

Fig. 6 Vectors of section displacement of composite foundation for forty-five days

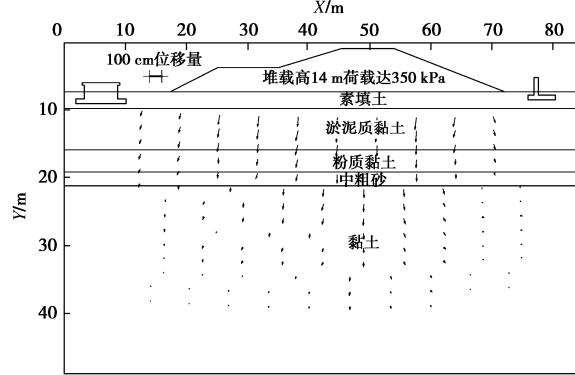


图 7 复合地基两年责任期剖面位移矢量图

Fig. 7 Vectors of section displacement of composite foundation for two years

图 6, 7 比较分析可知, 两年责任期的位移量大于

试堆期的位移量，这种差异在较浅的素填土层和淤泥质黏土层以及粉质黏土层尤为明显。试堆期和两年责任期间隔期间地基土层尤其高压缩性的淤泥质黏土层在堆场荷载作用下固结压缩变形，进而引发淤泥质黏土层和上覆土层发生了较为明显的沉降增量。

需要说明的是，结合图 4、6 与图 7 分析可知，堆载主要引起地基沉降以及地基整体趋于南柳河位移趋势，由此引起防尘网和轨道梁基础均向南柳河位移。

## 4 结 论

(1) 复合地基最大沉降堆载期为 218 mm，试堆期为 285 mm，恒载 365 d 为 513 mm，两年责任期为 573 mm，沉降分布大致呈锅底形，沉降速率在稳定控制标准之内，沉降量满足使用要求。

(2) 防尘网和轨道梁基础的水平位移不大，堆载 1 a 后两基础基本处于稳定状态，不影响设备正常使用。

(3) 复合地基断面上发生的位移，以竖向沉降分量为主，水平位移分量为次，复合地基堆场和两侧建筑物都是稳定安全的。

## 参考文献：

- [1] 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 Hanlong, ZHAO Minghua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115. (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] 李继才, 郎能惠, 丛 建, 等. 大型储罐 CFG 桩复合地基变形性状和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1111-1116. (LI Jicai, LI Nenghui, CONG Jian, et al. Deformation behaviors and variable rigidity design with equilibrium settlement for CFG pile composite foundation of large storage tanks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1111-1116. (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 Xingwen, TAN Xiangshao, HUANG Weiwang, 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, 廖伟来, 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 Shuming, JIANG Guanlu, LIAO Yilai, 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] 潘高峰, 刘先锋, 袁胜洋, 等. 云桂客专 CFG 桩网结构路堤侧向变形规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 2): 1-11. (PAN Gaofeng, LIU Xianfeng, YUAN Shengyang, et al. Lateral deformation of embankment with the CFG pile-net structure for Yun-Gui passenger dedicated line[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S2): 1-11. (in Chinese))
- [7] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: Case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1483-1493.
- [8] 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 Yanbin, HE Ning, LIN Zhiqiang, 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))
- [9] 王年香, 章为民. 土工离心模型试验技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Geotechnical Centrifuge Model Test Technology and Its Application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [10] 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 Zhengyin, XU Guangming. Centrifugal Simulation Technology of Port Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)