

DOI: 10.11779/CJGE2022S2019

超大荷载下 CFG 桩网复合地基离心模型试验研究

王年香^{1, 2}, 周春儿³, 董华钢³, 李珍³, 何元塘³

(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: 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和桩土应力特性, 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表面变形、孔隙水压力、桩顶轴力、桩土应力比的变化规律。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, 桩土应力比 20~36。典型区 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; 变形; 桩土应力; 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(2022)S2-0087-05

作者简介: 王年香(1963—), 男, 江西信丰人, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事岩土工程基本理论和试验研究工作。E-mail: nxwang@nhri.cn。

Centrifugal model tests on CFG pile-net composite foundation under super-large loads

WANG Nian-xiang^{1, 2}, ZHOU Chun-er³, DONG Hua-gang³, LI Zhen³, HE Yuan-tang³

(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 and Design Institute for Water Transportation Co. LTD, Guangzhou 510050, China)

Abstract: CFG pile-net composite foundation is widely used to reinforce soft soil foundation. Geotechnical centrifuge model test was carried out to study the deformation and pile-soil stress characteristics of CFG pile-net composite foundation under super large load in the storage yard of a wharf. The foundation, CFG piles, root piles, reinforced cushions, dust nets, track beam foundation and ore loads are simulated. The variation laws of the surface deformations, pore water pressures and loads at the top of the CFG piles and the pile-soil stress ratio 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 displacements and settlements of the dust net foundation and the track beam foundation are small. The pile-soil stress ratio is 20~36. The test results show that the CFG pile-net composite foundation in the typical zone 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; deformation; pile-soil stress; 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^[1]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^[2-3]。

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^[4]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^[5]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^[6]通过开展全尺寸现场路基填筑试验, 对比分析了天然地基和 CFG 桩网复合地基在路基荷载下的侧向变形

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y321006, Y321007)

收稿日期: 2022-12-01

规律; Liu 等^[7]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^[8]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^[9], 在港口码头工程中也得到广泛应用^[10]。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和桩土应力变化规律, 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 m²。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了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。堆场产生了不同程度的损坏, 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。

典型区地基土层自上而下为: 素填土①₂, 淤泥质黏土②₁, 粉质黏土③₄, 中粗砂层③₂, 黏土层④₁以及黏土层④₂, 表 1 列出了其主要物理力学性质指标, 淤泥质黏土②₁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、 ϕ 300 mm 的树根桩, 三角形布置, 间距 1.4 m \times 1.6 m, 桩身强度 C30, 内插 ϕ 133 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 10, 14, 16, ϕ 350 mm 的 CFG 桩, 正方形布置, 其中, 16 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。

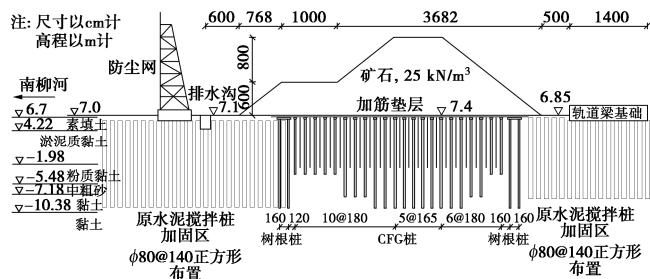


图 1 复合地基剖面图

Fig. 1 Profile of composite foundation

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 ⁻³)	不排水 强度/kPa
素填土① ₂	2.48	32.0	1.91	25
淤泥质黏土② ₁	6.20	50.8	1.72	31
粉质黏土③ ₄	3.50	31.0	1.92	41
中粗砂③ ₂	1.70		1.85	
黏土④ ₁ 、④ ₂		42.3	1.77	51

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 \times 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 \times 800 mm \times 400 mm (长 \times 高 \times 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。

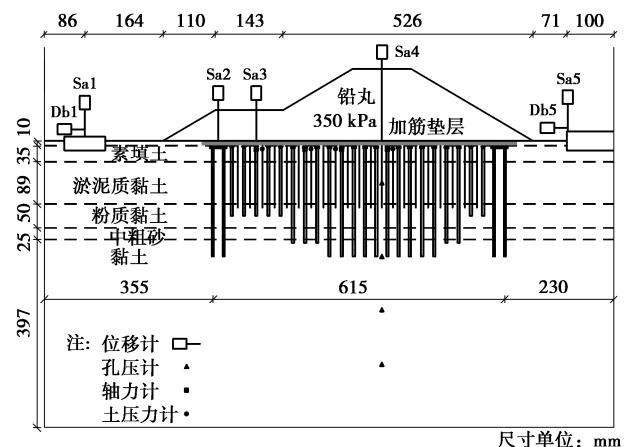


图 2 离心模型试验布置图

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 桩和树根桩。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 10 m CFG 桩上方, Sa4 位于长 16 m CFG 桩上方, 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。

地基孔隙水压力采用进口微型孔隙水压力计测量。布置在堆载最高平台中心线下, 埋深分别对应淤泥质黏土层中点 (U1)、1 倍桩长深度 (U2)、1.5 倍桩长深度 (U3) 和 2 倍桩长深度 (U4)。

桩顶轴力采用应变式微型力传感器测量。在不同长度 CFG 桩顶共布置了 4 组轴力测点, Tf1 和 Tf2 分别位于 10, 14 m 桩长上, Tf3 和 Tf4 分别位于间距 1.8 m 和 1.65 m 的 16 m 桩长上, 每组布置 2 个测点进行平行测试。

桩间土土压力采用应变式微型土压力盒测量。微型土压力盒布置在桩顶轴力测点的桩间土中, P1、P2、P3 和 P4 四组土压力测点对应 Tf1、Tf2、Tf3 和 Tf4 四组桩顶轴力测点, 每组布置 2 个测点进行平行测试。

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 120 min, 期间进行数据采集。

3 复合地基变形性状

以后分析时作了如下约定, 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。堆载期指堆载高度从 0 到达 14 m 的时间, 试堆期为 45 d, 恒载时间是指堆载高度达 14 m 以后的运行时间。

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变形特征值。从此可以看出, 堆载期, 随着堆载高度的增加, 复合地基表面竖向位移明显增大。防尘网基础和轨道梁基础均出现隆起, 最大隆起量约分别为 22 mm 和 20 mm, 隆起速率为 0.98, 0.89 mm/d。堆载区域 3 个测点沉降量分别为 50, 139, 149 mm, 沉降速率为 2.22, 6.18, 6.62 mm/d。堆载区及防尘网基础和轨道梁基础堆载期竖向变形均在稳定控制标准之内。

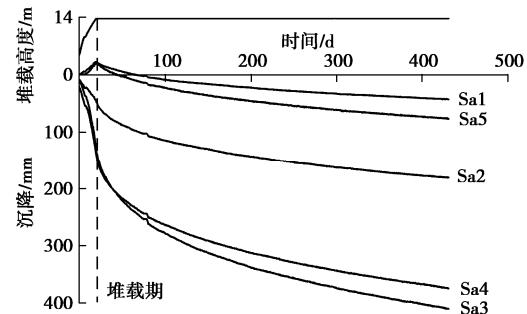


图 3 复合地基表面沉降过程线

Fig. 3 Surface settlement-time curves of composite foundation

表 2 复合地基表面变形特征值

Table 2 Surface deformations of composite foundation (mm)

测点	时间节点				
	堆载期	试堆期	恒载 365 d	恒载 408 d	
沉降	Sa1	-22	-9	39	42
	Sa2	50	82	175	181
	Sa3	139	210	399	411
	Sa4	149	208	366	375
	Sa5	-20	-2	71	76
水平位移	Db1	-4	-9	-28	-30
	Db5	0	11	44	45

堆载高度达 14 m 后, 进入恒载运行。防尘网基础和轨道梁基础隆起量随时间逐渐减小, 堆载区域沉降仍随时间增大, 但沉降增量随时间逐渐减小。恒载运行 408 d, 5 个沉降测点处的沉降量分别为 42, 181, 411, 375, 76 mm, 平均沉降速率较小, 表明 CFG 桩网复合地基沉降变形已趋于稳定。在堆载范围内沉降呈中心大、两边小的锅形分布, 最大沉降量试堆期前在堆载体最高处, 试堆期后略向南柳河一侧偏离。

从表2列出的防尘网基础和轨道梁基础不同时间的水平位移可以看出,堆载期,水平位移很小,恒载期,水平位移缓慢增加,恒载365 d后,水平位移量分别为-28 mm和44 mm,基本稳定,且方向均指向堆场中心,对堆场地基稳定有利。

图4为复合地基孔隙水压力增长和消散过程线,表3列出了不同时间和位置地基孔隙水压力和孔隙水压力系数。从此可以看出,随着堆场荷载的增加,地基土层中U1和U4两测点孔隙水压力迅速增大,到堆载期,孔隙水压力并未达到峰值,而是继续增大,过了45 d试堆期,增大的速率才有所放缓,测点U1在恒载32 d达到最大值,测点U4在恒载85 d达到最大值,之后孔隙水压力开始消散,但消散速率很缓慢。

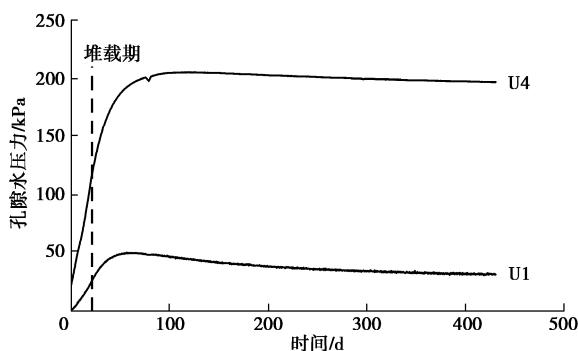


图4 复合地基孔隙水压力增长和消散过程线

Fig. 4 Pore water pressure-time curves of composite foundation

表3 复合地基孔隙水压力特征值

Table 3 Pore water pressures of composite foundation

时间节点	测点			
	U1		U4	
	孔压/kPa	孔压系数	孔压/kPa	孔压系数
堆载期	27	0.08	117	0.34
试堆期	48	0.14	180	0.51
峰值	50	0.14	205	0.59
	(恒载32 d)		(恒载85 d)	
恒载365 d	33	0.09	198	0.57
恒载408 d	32	0.09	197	0.56

孔隙水压力系数可以清晰地反映出两测点所在土层在堆载后的孔隙水压力反应,测点U1位于打设了塑料排水板的淤泥质黏土层中,其孔隙水压力反应远小于位于无排水板的黏土层中的测点U4,前者孔隙水压力系数只有0.14,远低于稳定控制值0.6,后者达0.59,基本达稳定控制值,但鉴于埋深较大,不会对复合地基的稳定性构成实质性的影响,只是土层中累积的超静孔隙水压力的消散时间会比较漫长。

4 桩土应力分析

4.1 CFG桩桩顶轴力

图5为复合地基CFG桩桩顶轴力过程线,表4列出了不同时间和位置CFG桩桩顶轴力特征值。从此可以看出,堆载期,桩顶轴力随堆载高度的增加几乎线性增大,上部荷载越大,桩顶轴力也越大;恒载期,随着桩间土和桩端土层沉降的增加,加筋垫层网逐渐发挥调整上部荷载和桩土沉降的作用,桩顶轴力也随之逐渐调整。上部荷载较小的Tf1和Tf2测点,桩顶轴力随时间略有增大,上部荷载较大的Tf3和Tf4测点,桩顶轴力随时间开始明显减小然后趋于恒值,表明加筋垫层网调整上部荷载的作用还是比较明显的。

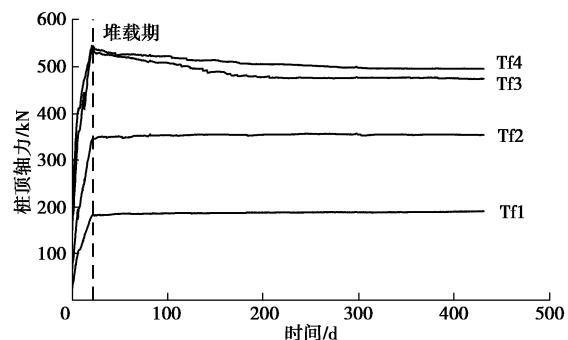


图5 复合地基CFG桩桩顶轴力过程线

Fig. 5 Load-time curves at top of CFG piles

表4 复合地基CFG桩顶轴力特征值

Table 4 Loads at top of CFG piles

测点	Tf1	Tf2	Tf3	Tf4
桩长、间距/m	10, 1.8	14, 1.8	16, 1.8	16, 1.65
上覆荷载/kPa	150	232	319	350
轴力/kN	184	344	539	543
试堆期	185	349	522	528
恒载365 d	190	354	475	496
恒载408 d	191	353	474	495

4.2 桩土应力比

表5列出了不同时间和位置桩土应力比特征值。从此可以看出,堆载期,桩土应力比20~36,桩越长,桩土应力比越大。恒载期,由于桩间土和CFG桩的沉降差变大,加上加筋垫层网逐渐发挥调整上部荷载的作用,桩土应力比也逐渐调整。上部堆载较小区域的桩土应力比略有增大,上部堆载较大区域的桩土应力比明显减小,桩土应力比21~29,表明加筋垫层网调整上部荷载的作用还是比较明显的。

表5 复合地基桩土应力比特征值

Table 5 Pile-soil stress ratios of composite foundation

时间节点	测点	Tf1	Tf2	Tf3	Tf4	
		桩身应力/MPa	1.92	3.58	5.61	5.66
		桩间土压力/kPa	96	130	157	156
恒载408 d	桩土应力比	20	28	36	36	
	桩身应力/MPa	1.99	3.68	4.94	5.16	
	桩间土压力/kPa	94	127	178	174	

5 结 论

(1) 复合地基最大沉降堆载期为 149 mm, 试堆期为 210 mm, 恒载 408 d 为 411 mm, 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与沉降均不大, 不会影响设备的正常使用。

(3) 堆载期, 桩顶轴力随堆载高度的增加线性增大, 恒载期, 受加筋垫层网调整上部荷载和桩土沉降的作用, 桩顶轴力也随之逐渐调整, 然后趋于稳定。

(4) 堆载期桩土应力比 20~36, 恒载期桩土应力比逐渐调整, 恒载 408 d 为 21~29。

(5) 结果表明, 典型区 CFG 桩网复合地基在 350 kPa 荷载作用下是稳定安全的, 满足使用要求, 设计方案合理、可行。

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 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))
- [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 Ji-cai, LI Neng-hui, 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 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] 潘高峰, 刘先峰, 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 Gao-feng, LIU Xian-feng, YUAN Sheng-yang, 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 Yan-bin, HE Ning, LIN Zhi-jiang, 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 Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Centrifugal 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 Zheng-yin, XU Guang-ming. Centrifugal Simulation Technology of Port Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)