

DOI: 10.11779/CJGE2022S2043

考虑垫层影响的树根桩单桩承载力试验研究

任国峰^{1,2}, 刘超³, 林显才³, 曹昌浩⁴, 连长秋⁴

(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. 湛江港(集团)股份有限公司, 广东 湛江 524068; 4. 广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

摘要:某码头堆场软土地基发生了推移, 采用了树根桩网复合地基进行加固。通过离心模型试验, 研究了垫层对树根桩单桩承载特性的影响, 对比分析了离心模型试验和现场静载试验的单桩承载变形差异, 并与规范方法计算的单桩竖向极限承载力进行了比较。结果表明, 垫层对树根桩单桩极限承载力影响显著, 加筋垫层单桩极限承载力最大, 其次是砂垫层, 无垫层最小; 离心模型试验和现场静载试验的 $Q-s$ 曲线均存在比较明显的差异, 离心模型试验得出的单桩极限承载力大于现场静载试验, 单桩竖向极限承载力计算值低于离心模型和现场静载试验值。

关键词: 树根桩; 单桩承载力; 离心模型试验; 现场静载试验; 垫层

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0198-05

作者简介:任国峰(1986—), 河南周口人, 高级工程师, 主要从事软土地基离心模型试验研究工作。E-mail: gfren@nhri.cn。

Bearing capacity of single root pile considering cushion effects

REN Guo-feng^{1,2}, LIU Chao³, LIN Xian-cai³, CAO Chang-hao⁴, LIAN Chang-qi⁴

(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. Zhanjiang Port (Group) Co. LTD, Zhanjiang 524068,

China; 4. Guangdong Province Planning and Design Institute for Water Transportation Co. LTD, Guangzhou 510050, China)

Abstract: For the slipped soft soil foundation in the storage yard of a wharf, the root pile-net composite foundation is used. The centrifugal model test are carried out to study the effects of cushions on the bearing behaviors of single root pile. The bearing deformation difference of single pile between the centrifugal model tests and the field static loading tests is compared and analyzed. The test results of the vertical ultimate bearing capacity of single pile are compared with the calculated ones by the China's code method. The results show that the cushions have significant effects on the ultimate bearing capacity of single root pile which is the largest under reinforced cushion layer, followed by sand cushion layer and non-cushion. There are obvious differences between the $Q-S$ curves of the centrifugal model tests and field static loading tests. The ultimate bearing capacity of single pile of the centrifugal model tests is greater than that of the field static loading tests. The calculated values of the vertical ultimate bearing capacity of single pile are lower than those of the centrifugal model tests and the field static loading tests.

Key words: root pile; bearing capacity of single pile; centrifugal model test; field static loading test; cushion

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, 树根桩^[1-3]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。

单桩承载特性决定桩网复合地基的承载力特性。众多学者通过室内模型试验、现场试验及数值模拟等方法研究单桩承载力特性。左宏亮等^[4]通过现场试验研究了螺杆灌注桩单桩竖向承载力, 实测结果比规范

计算得到的承载力要大。马天忠等^[5]通过室内模型试验研究了黄土地区单桩、4根和8根长短组合桩基础的承载性状。郅彬等^[6]进行了CFG桩复合地基现场静载荷试验, 研究了复合地基承载性状和桩土间相互作用。孙广利等^[7]通过数值计算分析了桩径对复合地基承载力的影响。姜雷^[8]基于桩间土拱效应, 探讨了CFG复合地基承载力计算方法。

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容

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

表 1 土的物理力学性质指标
Table 1 Indices of soil

土名	厚度 /m	含水率 /%	密度 (g·cm ⁻³)	不排水强 度/kPa	地基承载 力特征值 /kPa	混凝土预制桩		泥浆护壁钻（冲）孔桩	
						桩的极限侧 阻力标准值 /kPa	桩的极限端 阻力标准值 /kPa	桩的极限侧 阻力标准值 /kPa	桩的极限端 阻力标准值 /kPa
素填土① ₂	2.87	32.0	1.91	25	150	28		25	
粉细砂② ₂	3.20		1.85		90	30		25	
淤泥质黏土② ₁	9.90	50.8	1.72	40	60	22		20	
粉质黏土③ ₄	5.80	31.0	1.92	55	210	65	1000	60	450
黏土④ ₁	1.50	42.3	1.77	67	200	65	900	60	500
黏土④ ₂		42.3	1.77	67	220	75	1400	60	700

重变大，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]。本文通过离心模型试验研究垫层对树根桩单桩承载力的影响，并与现场静载试验结果及规范推荐的经验方法计算结果进行对比。

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。由于堆场沿其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。

钻探资料显示，推移区地基土层自上而下为：①₂素填土：灰褐色、浅灰色、灰黄色，湿-饱和，稍密为主，局部松散或中密，主要为碎石、中粗砂及少量黏性土回填。该层广泛分布，厚度不均匀。②₂粉细砂：灰色，饱和，松散，以粉细砂为主，级配不良，混少量淤泥质土。该层零星分布。②₁淤泥-淤泥质土：灰色，饱和，流塑-软塑，较黏腻，稍具臭味，土质不均匀，混少量粉细砂，经堆场长期堆载后局部排水固结，呈粉质黏土性质。该层广泛分布，厚度不均匀。③₄粉质黏土：灰黄色、褐黄色、灰白色，饱和，可塑，黏性较好，切面较光滑，局部混多量中粗砂，呈砂混黏性土状。该层广泛分布，厚度变化较大。④₁黏土：灰色，饱和，可塑，黏性较好，切面较光滑，局部混少量中粗砂，局部间（夹）薄层粉细砂。该层广泛分

布，厚度变化较大。④₂黏土：灰色，湿，硬塑，黏性较好，切面较光滑，局部混少量中粗砂，局部间（夹）薄层粉细砂。该层广泛分布，厚度变化较大，所有钻孔未揭穿该层。

表 1 列出了其主要物理力学性质指标，淤泥质粘土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，堆场地基采用树根桩网复合地基。

2 离心模型试验研究

2.1 试验方法

试验在南京水利科学研究院 NHRI400gt 大型土工离心机上进行。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，配有 64 路高精度数据采集系统。模型箱的有效尺寸为 1200 mm×700 mm×400 mm（长高宽），其一侧为有机玻璃，便于试验中进行监控。

试验模拟了地基、树根桩，模型比尺 $n=70$ ，模型布置如图 1 所示。树根桩桩长 25 m，桩径 300 mm，间距 1.5 m，正方形布置，桩身强度 C30。

试验土料取自现场，模型中的黏土地基以不排水强度作为主要模拟量。粉细砂层和素填土地基则控制其密实度，采用分层压密而成。

树根桩采用直径 5 mm 实心竹棒来模拟，满足按抗压刚度相似要求。每组试验分别布置了 4 根桩，间距 21 mm、正方形布置，载荷板为边长 50 mm、厚 5 mm 的方形铝合金板，载荷板与加载系统固定连接；砂垫层采用中粗砂模拟；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 塑料网格模拟。

采用伺服电机按等应变方式分别对无垫层、砂垫层、加筋垫层树根桩进行加载，试验压桩速率为 0.0055 mm/s，加载过程中测试沉降和荷载。总沉降量超过 5 mm 时或荷载变化不大时，终止加载。

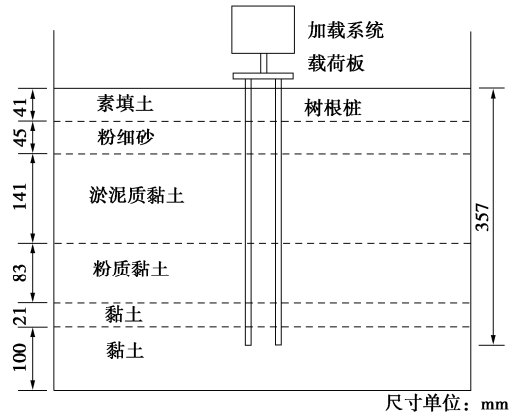


图1 离心模型试验布置图

Fig. 1 Layout of centrifugal model tests

2.2 试验结果分析

图2给出了无垫层、砂垫层、加筋垫层树根桩单桩离心模型试验的 $Q-s$ 曲线，从图中可以看出： $Q-s$ 曲线都存在拐点，无垫层和砂垫层拐点较为明显。对于无垫层和砂垫层，以拐点为界，可以分成两个近似直线段；拐点前，随着荷载的增加，沉降线性增大，这阶段侧阻力和端阻力逐渐增大；拐点处，桩侧阻力和端阻力达到极限状态；拐点后，沉降继续增大，无垫层荷载不再增加，砂垫层荷载随沉降继续线性增加，但荷载增加幅度减缓。对于加筋垫层，荷载随沉降增加非线性增长，侧阻力和端阻力均未达到极限状态。

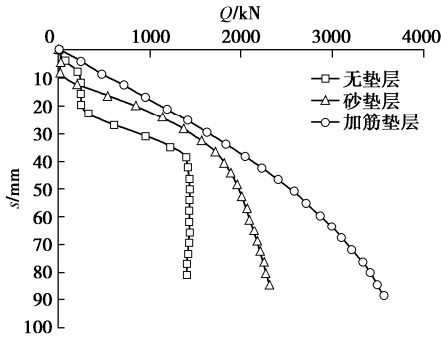


图2 树根桩单桩离心模型试验 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 $Q-s$ curves of centrifugal model tests on single root pile

试验桩间距与桩径之比为5，可以不考虑群桩效应，取拐点处的荷载为极限承载力，无垫层、砂垫层、加筋垫层树根桩对应的单桩竖向极限承载力分别为1421、1821、2575 kN，对应的沉降为38.57、40.45、50.85 mm。

3 现场静载试验研究

3.1 试验方法

推移区树根桩进行了3根无垫层单桩竖向抗压静载试验，以检验单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求。树根桩桩身强度C30，内插 $\phi 133$ mm、壁厚5 mm

的无缝钢管，桩径300 mm，桩长25 m，采用钻机正循环回转钻进、自然造浆护壁的成孔工艺成孔，投放碎石，注浆成桩的施工工艺。

试验采用快速荷载法，加载分为10级，每级荷载为预估极限承载力的1/10，其中第一级取分级荷载的2倍，每级荷载施加后按第5、15、30、45、60、75 min测读桩顶沉降量，某级荷载作用下，试桩桩顶总沉降量超过40 mm时或桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的2倍，终止加载^[1]。

3.2 试验结果分析

图3给出了树根桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线，从图中可以看出：① $Q-s$ 曲线初始阶段，近似为直线，且斜率较小。这阶段侧阻力随沉降的增大而线性增长，端阻力未发挥作用。② $Q-s$ 曲线非线性变化阶段，随着荷载的增加，沉降增量也逐渐增大。这阶段侧阻力随沉降增加非线性增长，端阻力也逐渐发挥。③ $Q-s$ 曲线存在明显拐点，拐点后沉降增量显著增大，这阶段侧阻力和端阻力均已达到极限状态。

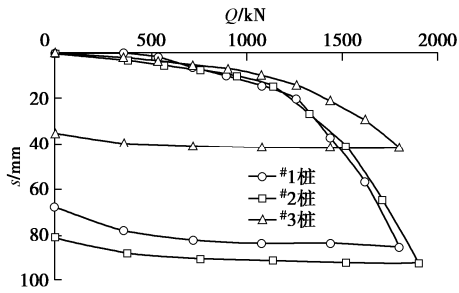
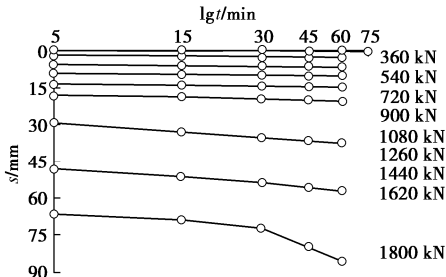


图3 树根桩单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线

Fig. 3 $Q-s$ curves of static tests on single root pile

图4给出了树根桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线，从图中可以看出，荷载较小时，沉降增量较小， $s-lgt$ 曲线较平缓，随着荷载的增加，沉降增量越来越大， $s-lgt$ 曲线越来越陡，甚至出现明显向下弯曲。

根据《建筑基桩检测技术规范》^[1]建议的单桩竖向受压承载力确定方法，取 $Q-s$ 曲线发生明显陡降的起点对应的荷载值或取 $s-lgt$ 曲线尾部明显向下弯曲的前一级荷载值作为单桩的竖向承载力，综合分析图3、4，3根树根桩试桩单桩的竖向极限承载力分别为1260、1140、1260 kN，对应的沉降分别为19.97、14.43、13.96 mm。



(a) #1桩

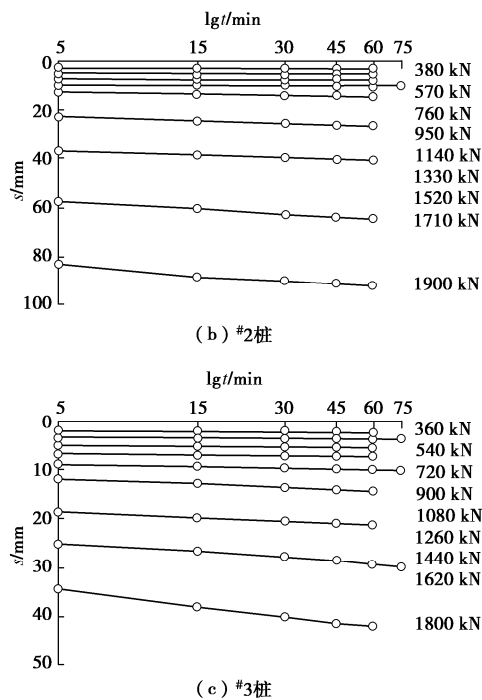


图 4 树根桩单桩静荷载试验 $s - \lg t$ 曲线
Fig. 4 $s - \lg t$ curves of static tests on single root pile

4 试验与计算结果对比分析

对比图 2 离心模型试验和图 3 现场静载试验#2 桩 $Q - s$ 曲线,发现两者虽都存在明显拐点,但仍有比较明显的差异。离心模型试验无垫层和砂垫层 $Q - s$ 曲线拐点很明显,拐点前后几乎是两段直线,拐点前沉降随荷载线性增加,无垫层时拐点后荷载基本不再增加。现场静载试验 $Q - s$ 曲线拐点没有那么明显,拐点前后是两段曲线,沉降随荷载是非线性增加的,拐点后增加的速率明显大于拐点前,这一点和加筋垫层离心模型试验 $Q - s$ 曲线类似。

由于离心模型试验和现场静载试验的 $Q - s$ 曲线存在比较明显的差异,由此确定的单桩极限承载力也有差异。由表 2 可知,对比无垫层离心模型试验结果和现场静载试验结果,前者得出的单桩极限承载力比后者得出的偏大 20%,极限荷载下沉降偏大 62%,砂垫层和加筋垫层离心模型试验的单桩极限承载力比现场静载试验的分别大 37%和 56%,砂垫层和加筋垫层单桩极限承载力比无垫层分别大 22%和 45%,极限荷载下沉降分别偏大 64%和 72%。从表 2 还可看出,无垫层离心模型试验的最大荷载比极限荷载只大 1.4%,两者基本接近,砂垫层和加筋垫层离心模型试验的最大荷载比极限荷载分别大 21%和 28%,现场静载试验的最大荷载比极限荷载大 35%。无垫层离心模型试验的最大荷载比现场静载试验的偏小 20%,砂垫层和加筋垫层离心模型试验的最大荷载比现场静载试验的分

别大 18%和 47%,砂垫层和加筋垫层最大荷载比无垫层分别大 38%和 60%。无垫层离心模型试验的最大沉降远小于现场静载试验,砂垫层和加筋垫层离心模型试验的最大沉降基本接近现场静载试验。

表2 离心模型试验与现场静载试验结果对比
Table 2 Comparison of results between centrifugal model tests and field static loading tests

试验方法与 垫层类别	现场静 载试验	离心模型试验		
		无垫层	砂垫层	加筋垫层
桩长/m	25	25	25	25
单桩极限承 载力/kN	1140	1421	1821	2575
沉降/mm	14.43	38.57	40.45	50.85
最大荷载/kN	1900	1441	2312	3561
最大沉降/mm	92.00	50.12	84.91	89.05

《复合地基技术规范》^[12]给出的单桩竖向极限承载力标准值计算公式为

$$Q_u = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha_p q_p A_p \quad , \quad (1)$$

式中: u_p 为桩的周长 (m); q_{si} 为桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值 (kPa); l_i 为桩长范围内第 i 层土的厚度 (m); α_p 为桩端端阻力发挥系数,本工程取 $\alpha_p = 1$; q_p 为桩端极限端阻力标准值 (kPa); A_p 为桩的截面积 (m²)。

采用表 1 计算参数,由式 (1) 计算的单桩竖向极限承载力标准值列于表 3,由此可知,单桩竖向极限承载力计算值低于试验值,按泥浆护壁钻 (冲) 孔桩计算参数计算值比现场静载试验值低 22%,比离心模型试验值低 37%;按混凝土预制桩计算参数计算值比现场静载试验值低 9%,比离心模型试验值低 27%。

表3 试验与计算的单桩极限承载力对比
Table 3 Test and calculated ultimate bearing capacities of single pile (kN)

离心模型试 验 (无垫层)	现场静载 试验	按浆护壁钻 孔桩计算	按混凝土预 制桩计算
1421	1140	889	1039

5 结 论

- (1) 离心模型试验中无垫层和砂垫层 $Q - s$ 曲线拐点很明显,拐点前后几乎是两段直线,拐点前沉降随荷载线性增加,拐点后,沉降继续增大,无垫层荷载不再增加,砂垫层荷载随沉降继续线性增加,但荷载增加幅度减缓。对于加筋垫层,拐点前后荷载随沉降增加非线性增长。
- (2) 现场静载试验 $Q - s$ 曲线拐点没有那么明显,拐点前后是两段曲线,沉降随荷载是非线性增加的,拐点后增加的速率明显大于拐点前,变化规律与加筋

垫层离心模型试验 $Q-s$ 曲线类似。

(3) 荷载较小时, 树根桩单桩静荷载试验 $s-lgt$ 曲线较平缓, 随着荷载的增加, $s-lgt$ 曲线越来越陡, 甚至出现明显向下弯曲。

(4) 无垫层离心模型试验得出的单桩极限承载力比现场静载试验得出的偏大 20%, 砂垫层和加筋垫层离心模型试验的单桩极限承载力比现场静载试验的分别大 37% 和 56%, 砂垫层和加筋垫层单桩极限承载力比无垫层分别大 22% 和 45%, 砂垫层和加筋垫层最大荷载比无垫层分别大 38% 和 60%; 单桩竖向极限承载力计算值低于离心模型和现场静载试验值, 按泥浆护壁钻(冲)孔桩计算, 分别低 37% 和 22%, 按混凝土预制桩计算, 分别低 27% 和 9%。

参考文献:

- [1] 孙少锐, 吴继敏, 魏继红, 等. 树根桩加固边坡的稳定性分析与评价[J]. 岩土力学, 2003, **24**(5): 776-780. (SUN Shao-rui, WU Ji-min, WEI Ji-hong, et al. Stability analysis and evaluation of slope reinforced with root piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(5): 776-780. (in Chinese))
- [2] 王 辉, 陈剑平, 阙金声. 树根桩在基础加固中的设计与应用研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(增刊 2): 1290-1294. (WANG Hui, CHEN Jian-ping, QUE Jin-sheng. Research on design and application of root piles to Strengthening foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(S2): 1290-1294. (in Chinese))
- [3] 邱发波, 刘志强, 严松宏. 树根桩加固隧道软基的数值分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, **34**(2): 270-272. (QIU Fa-bo, LIU Zhi-qiang, YAN Song-hong. Numerical analysis of root pile in reinforcement tunnel basis[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, **34**(2): 270-272. (in Chinese))
- [4] 左宏亮, 金宁政, 许成云. 黏性土地区螺杆灌注桩竖向承载力静载试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, **32**(2): 225-231. (ZUO Hong-liang, JIN Ning-zheng, XU Cheng-yun. Experiment on vertical bearing capacity of screw grout pile in cohesive area[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, **32**(2): 225-231. (in Chinese))
- [5] 马天忠, 朱彦鹏, 任永忠, 等. 黄土地区长短组合桩的承载力及变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 1): 259-265, 92. (MA Tian-zhong, ZHU Yan-peng, REN Yong-zhong, et al. Bearing capacity and displacement characteristics of long-short composite piles in loess areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 259-265, 92. (in Chinese))
- [6] 郅 彬, 李 戈, 王永鑫, 等. CFG 桩复合地基承载性状试验研究[J]. 建筑结构, 2017, **47**(23): 100-102, 71. (ZHI Bin, LI Ge, WANG Yong-xin, et al. Experimental research on load-bearing property of CFG pile composite foundation[J]. Building Structure, 2017, **47**(23): 100-102, 71. (in Chinese))
- [7] 孙广利, 付健阳. CFG 桩复合地基承载力数值模拟与现场试验[J]. 吉林建筑大学学报, 2021, **38**(4): 27-31. (SUN Guang-li, FU Jian-yang. Bearing capacity numerical simulation and field test of CFG pile composite foundation[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2021, **38**(4): 27-31. (in Chinese))
- [8] 姜 雷. 基于土拱效应的 CFG 桩复合地基承载力设计方法[J]. 高速铁路技术, 2021, **12**(4): 73-76, 102. (JIANG Lei. Design method for bearing capacity of CFG pile composite foundation based on soil arching effect[J]. High Speed Railway Technology, 2021, **12**(4): 73-76, 102. (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))
- [11] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [12] 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Technical Code for Composite Foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)