

DOI: 10.11779/CJGE2020S2033

桩承式路堤离心模型试验过程的地基变形分析

姜彦彬^{1,2}, 何斌¹, 钱亚俊¹, 汪璋淳¹, 何宁¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 桩承式路堤离心模型地基变形与试验过程紧密相关, 通过激光测距法和图像分析法分别研究了各试验阶段复合地基沉降及断面变形的特点及机理。结果表明: 1g 下制模并使用提高离心加速度的方法模拟路堤堆载无法排除填筑阶段复合地基自身形变, 因此高估了路堤填筑阶段的地基沉降量, 并使得最终预测沉降预测偏大。在离心减速阶段及放置阶段, 地基均有回弹, 使用拆模后的断面变形测试数据将低估路中位置的沉降量, 并高估坡脚水平位移及坡外隆起。本研究丰富了对桩承式路堤离心模型试验过程变形机理的认识。

关键词: 离心模型试验; 沉降; 断面变形; 桩承式路堤; 试验过程; 离心加速阶段

中图分类号: TU431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S2-0185-05

作者简介: 姜彦彬(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事软土地基加固方面的研究。E-mail: tumujyb@163.com。

Deformation of centrifugal modelling process of piled embankments

JIANG Yan-bin^{1,2}, HE Bin¹, QIAN Ya-jun¹, WANG Zhang-chun¹, HE Ning¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. School of Architectural Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: The deformation of centrifuge modelling of piled embankments is closely related to the test process. The characteristics and mechanism of settlement and sectional deformation of composite foundation at each testing stage are investigated by the laser ranging method and the image analysis method. The results show that it is impossible to eliminate the deformation of the composite foundation itself during the filling stage by preparing the model under 1g and adopting the method of increasing the centrifugal acceleration to simulate the embankment surcharge. Therefore, the settlements of the foundation during the filling stage and the final settlement are both overestimated in the tests. The foundation rebound is shown at the centrifugal deceleration stage and placement stage under 1g. As a result, the settlement near the centerline of the road will be underestimated, and the horizontal displacement at the slope toe and the uplift outside the slope will be overestimated based on the measured deformation after the centrifugal tests. This study may enrich the understanding of centrifugal deformation process tests on piled embankments.

Key words: centrifugal modelling test; settlement; cross-sectional deformation; piled embankment; testing process; centrifugal acceleration stage

0 引言

土工离心模型试验借助离心机的高速旋转为模型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, 是以自重为主要荷载的岩土工程技术研究中最先进、最有效的手段之一, 广泛应用于岩土工程工作机理、方案论证及方法验证等研究^[1]。桩承式路堤通过土拱效应将路堤荷载向桩顶集中并通过刚性桩传递至压缩性更小的深层地基, 具有稳定性好、工期短等优点, 在土性差、工后沉降要求高的高速铁路、高速公路的软基处理工程中得到了广泛的重视和应用^[2-3]。目前, 土工离心模型试验已逐步用于探索桩承式路堤应力分布、荷载传递等工作机制^[4]。

离心加速度由零增至设计值的加速过程是离心试验的必经环节, 而桩承式路堤离心模型试验通常以逐级提高离心加速度的方法模拟路堤堆载^[4-6], 模型与试验系统随离心加速变化具有相对运动的特征, 试验结果受制样、试验方法及数据采集等操作流程影响, 系统在离心试验过程中的变形发展具有明显的连续性和一定的复杂性, 变形测试表现出与试验过程的相关性。现有桩承式路堤离心模型试验研究欠缺对试验全过程的变形分析, 对系统的变形发展及各阶段变形规律认识尚不够深入。

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2018YFC1508505, 2018YFC1508506); 国家自然科学基金面上项目 (51579152); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目 (Y317008)

收稿日期: 2020-08-07

本文以桩承式路堤离心模型的沉降及断面变形为主要研究内容，分析了沉降变形的全局发展特点，探讨了不同测试阶段的变形规律及机理。

1 试验概况

(1) 离心模型试验

本次试验平台为南京水利科学研究院 400 g·t 大型土工离心机，在最大离心加速度 200g 时，最大载重能力为 2 t，其最大旋转半径为 5.5 m，挂篮空间为 1.1 m×1.1 m×1.14 m。所用离心试验模型箱有效内部尺寸为 700 mm×350 mm×450 mm（长×宽×高）。桩承式路堤离心模型及几何参数如图 1 和表 1 所示，相似比尺为 60，利用对称性，取半幅路堤建立离心模型。对应的原型软土地基包括 9.6 m 厚的软弱土层和其下 9.0 m 厚的粉质黏土持力层，路堤堆载高度 6.0 m。原型桩为 PCC 桩，外径为 1.2 m，壁厚 0.15 m，桩间距为 3.48 m，桩长 12.0 m，穿过软土层后嵌入持力层 2.4 m。PCC 桩复合地基离心模型的物理力学参数及具体制备方法参考文献[7]，1g 下堆载模型路堤后使用在 2 h 内将离心加速度线性提高至 60g 的方法模拟路堤堆载，按照相似比尺对时间的平方进行积分，对应于现场在 100 d 内将路堤堆载至 6.0 m。

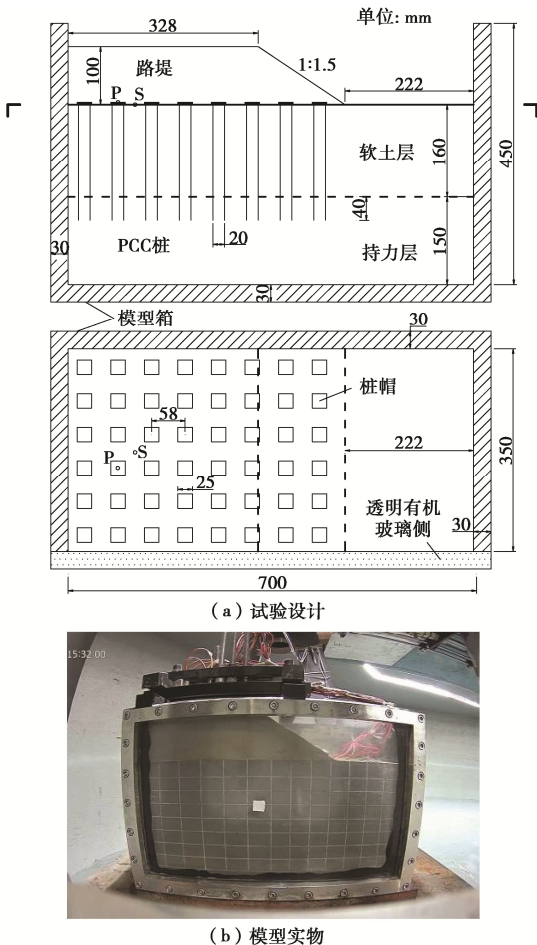


图 1 桩承式路堤离心模型试验

Fig. 1 Centrifuge modelling of piled embankments

表 1 离心模型几何参数

Table 1 Geometric parameters of centrifugal model

桩间距 /mm	桩帽 边长 /mm	置换率 /%	软土 层厚 /mm	持力 层厚 /mm	垫层+ 路堤厚 /mm
58	25	18.6	160	150	100

(2) 变形测试

本次离心模型试验使用激光测距仪测量路堤下复合地基的桩顶及桩间土沉降（图 1（a）所示 P、S 点）。沉降尼龙柱的底盘位于桩顶及桩间土位置，穿过路堤土后连接顶部激光反射片，使用固定在模型箱顶部的激光测距传感器实时测量与反射片的相对距离可获得地基沉降。在复合地基有机玻璃内侧模型横断面布置横竖正交的网格（图 1（b）），使用高清摄像头实时采集网格图像（图 2（b））并经过数据处理后可以获得断面变形。此外，试验结束后拆除模型箱的有机玻璃面可人工测量模型最终状态的断面网格坐标。

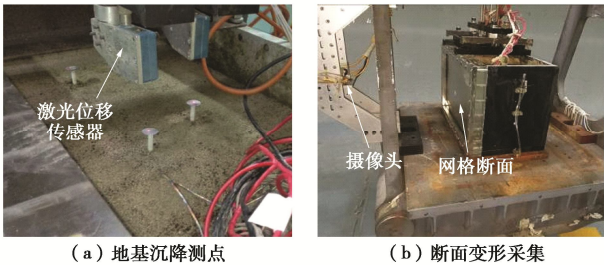


图 2 离心模型试验变形测试

Fig. 2 Deformation testing in the centrifugal modelling

2 沉降分析

(1) 全过程沉降发展

从离心机加速至停机静置，根据加速度的不同可将离心试验分为加速（0~ T_1 ）、60g 稳定（ T_1 ~ T_2 ）、减速（ T_2 ~ T_3 ）和静置（ T_3 ~）共 4 个阶段，图 3 为路中桩顶与桩间土顶面测点（对应图 1（a）所示的 P、S 点）沉降在试验全过程的变化曲线。严格来讲，只有 60g 稳定阶段的离心试验数据才能够按照试验比尺换算为对应原型的结果，因此，通常将离心机达到设定离心加速度的 T_1 时刻作为试验起点，只分析 60g 下（ T_1 ~ T_2 时刻）试验过程的总变形。然而，本文采用线性提高的加速度的方法模拟路堤荷载填筑， $T_1=2$ h，离心加速阶段的地基沉降对应路堤填筑期沉降， T_1 时刻桩顶及桩间土顶面沉降分别为 11.7 mm 和 13.7 mm，若按照 $N=60$ 的相似比尺换算对应现场路堤堆载阶段的沉降量分别为 702 mm 和 822 mm，可见填筑阶段相对较大。

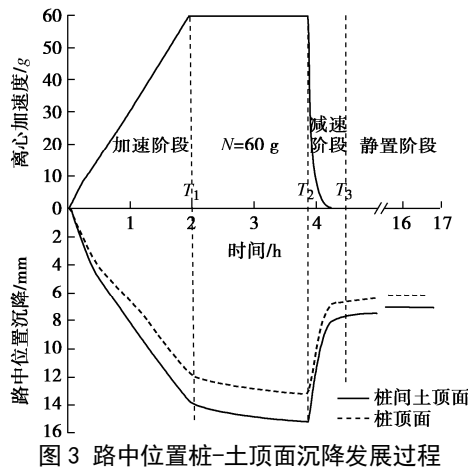


图3 路中位置桩-土顶面沉降发展过程

Fig. 3 Settlement development of pile-top and soil-top on subsurface at central line of embankment

本文离心试验的 $60g$ 稳定阶段持续时间为 115 min ，按照相似原理，对应路堤堆载完成后地基预压固结 288 d ，此间地基沉降明显放缓（图3）。以离心加速度刚达到 $60g$ 为起点，基于堆载完成后的沉降曲线，使用局部坐标系法^[8]可预测最终沉降。以桩间土 S 点的沉降为例，假定 $60g$ 下的沉降 S_t 与固结时间 t 具有式（1）所示的双曲线关系，整理后如式（2）所示，则 t/S_t 与 t 具有线性关系（图4），斜率为 $1/S_\infty$ ，截距为 α/S_∞ 。其中 S_t ， S_∞ 分别为以堆载结束时刻为起点对应 t 时刻的沉降及最终沉降， α 为系数。

$$S_t = \frac{t}{\alpha + t} S_\infty, \quad (1)$$

$$\frac{t}{S_t} = \frac{1}{S_\infty} t + \frac{\alpha}{S_\infty}. \quad (2)$$

按照式（2）对路中位置离心机加速度达到 $60g$ 后的桩间土沉降进行拟合，可求得在排水固结阶段的路中桩间土对应现场尺寸的最终沉降为 114 mm ，则桩间土最终总沉降为 936 mm 。试验结束时刻对应现场桩间土沉降为 910 mm ，此时固结度为 97.2% ，以图3的 T_2 时刻为对应现场通车时间，则现场工后沉降仅为 26 mm ，可满足桥头路段对工后沉降的要求。

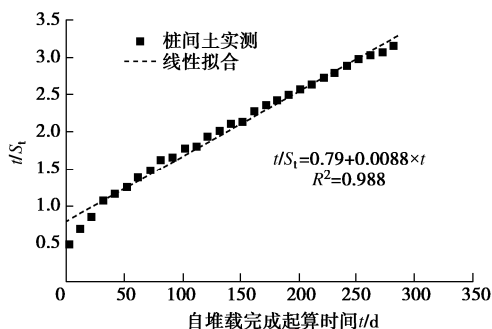
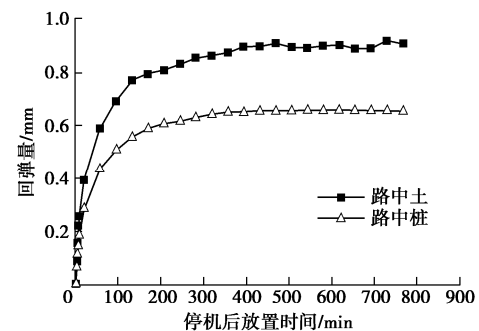


图4 桩间土沉降预测（以堆载结束为起点）

Fig. 4 Prediction of settlement of soils between piles (starting from end of filling)

离心机减速过程中，模型应力水平下降，在图3所示减速阶段（ $T_2 \sim T_3$ ）地基发生回弹，桩间土和桩

顶的回弹量分别为 7.2 mm 、 6.4 mm 。至离心机停转后的放置阶段，模型中的总应力不再变化，路中位置的桩土测点回弹量如图5所示。离心机停转后地基回弹先快后慢，持续采集地基回弹量 12.8 h ，回弹基本稳定，此时桩、土回弹量分别为 0.7 mm 和 0.9 mm 。停机后模型内部黏性土颗粒外的薄膜水在不同方向厚薄存在差异，土体内部颗粒各方向的受力并不平衡，薄膜水的迁移伴随着颗粒位置调整，而由于薄膜水黏滞性大，其迁移及伴随的颗粒调整缓慢，因此黏土体积流变缓慢发生^[8]，宏观表现为地表缓慢且少量的回弹。

图5 停机后 $1g$ 下放置地基回弹Fig. 5 Foundation rebounds under $1g$ after shutdown

（2）讨论

实际上，桩承式路堤离心模型在离心加速前经历了较为繁琐的模型制样准备阶段^[7]，包括分层静压固结、插桩、预固结及制模阶段（图6），待模型制备完毕，传感器布置到位后才进入图3所示离心试验。理论上，只有在设计加速度 $60g$ 下的变形才能够严格按照相似比尺换算为原型的变形，然而，限于模型的复杂性及设备的局限性，目前绝大多数桩承式路堤离心模型试验均无法避免 $1g$ 制模及离心加速过程^[4-6]。因此，基于试验全过程的变形分析的重要性不言而喻。

在图3所示 $T_2 \sim T_3$ 减速阶段，模型由高应力状态进入低应力状态，路堤下的复合地基发生回弹变形，主要包括离心加速度减小导致路堤荷载减小引起的回弹 Δ_1 ，以及复合地基自身重度减小回弹 Δ_2 两部分。类似地， $0 \sim T_1$ 加速阶段复合地基变形主要包括路堤荷载的增加量 Δe 和复合地基自身压缩量 Δc 。因此，相比于在 $60g$ 下进行路堤堆载的理想工况，采用提高离心加速度模拟路堤堆载的方法显然高估了路堤填筑阶段的地基沉降量，高估量近似等于离心加速过程中由于模型重度增加而引起的复合地基自身压缩量 Δc 。因此，路堤堆载阶段的原型路中位置的桩、土沉降量小于 702 mm 和 822 mm 。

由图5可知，即使停机后模型不再有外力增量， $1g$ 下放置较长时间，地表仍有回弹。因此，图6所示静压固结后的地基在 t_3 时刻之前的 $1g$ 制样阶段，复合地基同样有着不可忽略的回弹量，且上述回弹量在

离心加速阶段将再次被压缩。上述分析再次证明离心加速过程中复合地基由于自身重度增加将产生不可忽略的自身压缩 ΔC ,使得路堤填筑阶段变形预测偏大。因此,可在没有路堤荷载作用的情况下,重复上述试验过程,获得复合地基在升速过程中的自身沉降变形(即 ΔC)。进而,在路堤荷载作用下测得的沉降变形中扣除 ΔC ,可近似预测理想工况下路堤填筑过程中原型地基沉降变形 Δe 。

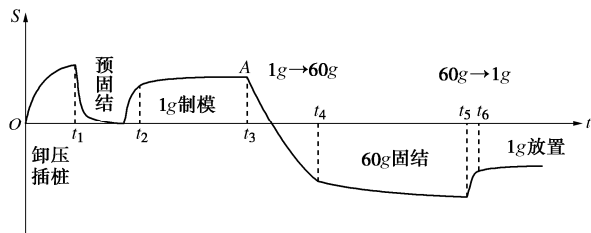


图 6 考虑制模过程的地表沉降(回弹)示意图
Fig. 6 Schematic diagram of ground settlement (rebound) considering the model preparation progress

3 断面变形分析

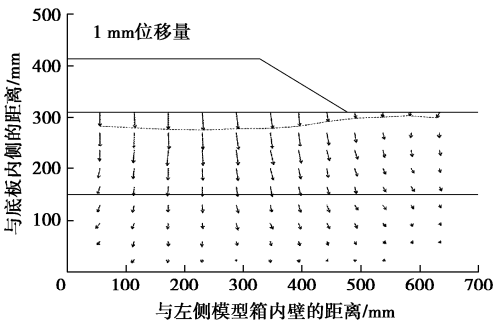
(1) 分析方法

本文离心试验使用鱼眼镜头采集断面图像(图 2(b)),变形分析前应先纠正鱼眼图像畸变。当离心加速度改变时,模型箱、镜头、复合地基三者之间存在两两相对位移,只有复合地基相对模型箱的变形才是真正的断面位移。假定每张鱼眼图像与未畸变的二维网格之间存在固定的函数映射关系 f ,可将 f 具体为鱼眼网格像素坐标与其未畸变坐标之间的二元三次非线性多项式函数,基于初始网格可求解函数 f ,进而进行断面变形分析。

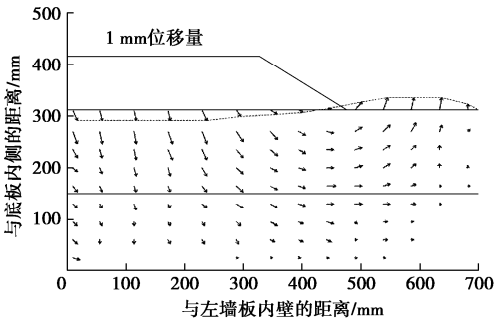
$$S = f_x(x, y)$$
$$= A + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + C_1y + C_2y^2 + C_3y^3 + D_1xy + D_2x^2y + D_3xy^2 \quad (3)$$

(2) 断面变形分析

图 7 分别为离心机减速前(T_2 时刻)及拆模后的断面变形矢量图。可见路面之下的地基以竖向沉降为主,边坡附近的区域有较为明显的向坡外的水平位移。表 2 对比分析了 60g 下的断面与拆模后的断面关键变形参数,可知拆模后的路中桩间土沉降量为 60g 下的 42%; 60g 下的坡脚水平位移 H 仅为 0.6 mm,而拆模后测得 H 为 3.0 mm。拆模后所测坡外最大上浮量为 6.0 mm,而 60g 下对应位置则沉降 2.5 mm。显然,经历离心减速阶段及 1g 放置阶段后,模型的变形有了进一步发展,使用拆模后的断面变形测试数据将低估路中沉降量,并高估坡脚水平位移及坡外隆起。因此,原则上不应使用停机后的变形测试数据来评价 N_g 下的变形量。



(a) 加速度减小前 T_2 时刻



(b) 拆模后测试

图 7 断面变形矢量图

Fig. 7 Deformation vectors of front cross-section

表 2 断面变形分析

Table 2 Analysis of cross-sectional deformation

类型	路中土沉降 S	坡脚水平位移 H	坡外最大上浮 V	H/S
60g	11.9 mm	0.6 mm	-2.5 mm (沉降)	0.05
拆模后	5.0 mm	3.0 mm	6.0 mm	0.6

路堤堆载完成时刻(对应离心加速度刚达到 60g)路肩下及坡脚断面对应原型工况的地基水平位移如图 8 所示。可见边坡下软土层侧移较持力层明显,地基最大水平位移发生在 4~6 m 深度范围内,且最大水平位移在 140 mm 以内。坡脚处地基水平位移 H 与路中最大地表沉降 S 的比值 H/S 是重要的用于评价路堤稳定性的指标^[9]。60g 下的 H/S 为 0.05,在 Chai 等^[10]建议的临界值 0.5 以内,说明本文离心模型试验中的路堤边坡稳定性得到了满足。

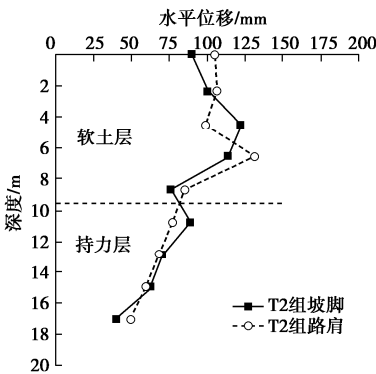


图 8 堆载完成时边坡下地基水平位移(原型尺寸)

Fig. 8 Lateral deformations of foundation below slope after filling (prototype)

4 结论与展望

桩承式路堤离心模型试验变形与试验过程紧密相关, 本文探讨分析了离心机试验过程各阶段复合地基沉降及断面变形规律及机理。主要结论如下:

(1) 桩承式路堤离心模型试验过程包括模型准备、加速、稳定、减速及放置阶段。采用 $1g$ 下制模并使用提高离心加速度的方法模拟路堤堆载, 将高估路堤填筑阶段的地基沉降量及最终沉降量, 误差为离心加速阶段复合地基自身压缩量。

(2) 离心机减速及放置阶段, 地基均有回弹, 使用拆模后的断面变形测试数据将低估路中位置沉降量, 并高估坡脚水平位移及坡外隆起。因此, 应慎重使用停机后的测试数据评价原型变形。

(3) 需进一步开展有原型数据对照的高重力场下路堤堆载理想工况桩承式路堤离心模型试验, 量化离心模型试验路堤堆载模拟过程中的变形预测误差。

参考文献:

- [1] 《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会. 岩土离心模拟技术的原理和工程应用[M]. 武汉: 长江出版社, 2011. (The Compiling Group. Principle and Engineering Application of Centrifugal Simulation Technology[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2011. (in Chinese))
- [2] ZHENG J, CHEN B, LU Y, et al. The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls[J]. *Geosynthetics International*, 2009, **16**(1): 1 - 10.
- [3] 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 study on pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment[J]. *Hydro-science and Engineering*, 2018(2): 43 - 51. (in Chinese))
- [4] 黄俊杰, 王 薇, 苏 谦, 等. 素混凝土桩复合地基支承路堤变形破坏模式[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1653 - 1661. (HUANG Jun-jie, WANG Wei, SU Qian, et al. Deformation and failure modes of embankments on soft ground reinforced by plain concrete piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(5): 1653 - 1661. (in Chinese))
- [5] ELLIS E, ASLAM R. Arching in piled embankments: comparison of centrifuge tests and predictive methods - part 1 of 2[J]. *Ground Engineering*, 2009, **42**(6): 34 - 38.
- [6] WANG C, WANG B, GUO P, et al. Experimental analysis on settlement controlling of geogrid-reinforced pile-raft-supported embankments in high-speed railway[J]. *Acta Geotechnica*, 2013, **10**: 1 - 12.
- [7] 姜彦彬, 何 宁, 耿之周, 等. PCC 桩复合地基离心模型制备及桩土接触模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 91 - 98. (JIANG Yan-bin, HE Ning, GENG Zhi-zhou, et al. Simulating the PCC pile composite foundation for centrifuge modelling and pile-soil interaction[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 91 - 98. (in Chinese))
- [8] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 85 - 369. (YIN Zong-ze. *Geotechnical Theory*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 85 - 369. (in Chinese))
- [9] INDRARATNA B, BALASUBRAMANIAM A S, BALACHANDRA S. Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, **118**(7): 981 - 995.
- [10] CHAI J, MIURA N, SHEN S. Performance of embankments with and without reinforcement on soft subsoil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(4): 838 - 848.

(编校: 黄贤沙)