

DOI: 10.11779/CJGE2017S1022

倾斜软土 CFG 桩复合地基上的路堤破坏模式研究

顾行文^{1, 2}, 谭祥韶³, 黄炜旺³, 任国峰^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要: 通过 4 组土工离心模型试验, 研究了山区底面倾斜的软土层 CFG 桩复合地基路堤破坏模式。试验模拟了 4 种地基: 倾斜天然软基, 水平 CFG 桩复合地基, 倾斜 CFG 桩复合地基, 以及施工有缺陷的 CFG 桩复合地基。试验结果表明: ①路堤荷载作用下, CFG 桩易发生多次桩体断裂, 最终形成能够随软土移动的刚性短桩; ②底面倾斜的复合地基上, CFG 桩的断裂更集中在下坡方向, 路堤破坏的影响范围远大于水平地基的情况; ③缺陷 CFG 桩复合地基路堤变形显著增大。

关键词: CFG 桩; 复合地基; 离心模型试验; 失稳模式

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S1 - 0111 - 05

作者简介: 顾行文(1981 -), 男, 江苏建湖人, 高级工程师, 主要从事土工离心模型试验研究工作。E-mail: xweng@nhri.cn。

Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by CFG Piles

GU Xing-wen^{1, 2}, TAN Xiang-shao³, HUANG Wei-wang³, REN Guo-feng^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic

Engineering, Nanjing 210029, China; 3. CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Survey & Design Institute Co., Ltd.,

Guangzhou 510000, China)

Abstract: Four groups of centrifugal model tests are performed to investigate the failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by CFG piles. The tests simulate four kinds of grounds: natural inclined soft ground, normal CFG composite ground, inclined CFG composite ground, and inclined defect CFG composite ground. The results show that the failure mechanisms are as follows: (1) CFG piles are prone to fracture into many rigid short piles moving with soil failure; (2) For the inclined ground, fractures of CFG piles occur more greatly along the downhill direction, and the deformation is larger; (3) For the defect CFG pile composite ground, the deformation is significantly larger.

Key words: CFG pile; composite ground; centrifugal model test; failure mode

0 引 言

随着社会发展, 作为纽带的公路、铁路必将在许多山区修建, 必然会遇到山区倾斜软土地基问题。

与一般软土地基不同, 山区软基具有其自身的工程特点, 包括软土厚度变化大、富含有机质、软土底面倾斜、下卧硬土层较薄等, 这些工程特点导致山区软土地基的处理方式、失稳破坏模式、沉降特点等与平原软土地基有所不同^[1-2]。同时, 因地形影响、抵御山洪、泥石流等自然灾害、土石方处理利用等原因, 往往需要在山区软基上修筑具高大路堤。深厚倾斜软基对高填方路堤变形稳定性有何影响? 工程质量如何保证? 这方面的研究工作尚未有深入的开展。

在以往的工程实践中, 复合地基是山区软基处理的主要方法之一。在实际应用中, 验算结果满足规范

要求, 甚至安全系数还较高的部分复合地基路堤发生失稳滑塌的情况却时有发生。例如, 福建罗长高速公路, 通车 15 个月后在 K215+130—K215+200 的一侧路基产生了滑塌(图 1), 该处即为 CFG 桩复合地基^[3]。

本文通过 4 组离心模型试验, 探讨 CFG 桩支承路堤时, 软土底面倾斜对破坏模式的影响; 以及 CFG 桩存在桩身上部断裂缺陷时, 对山区复合地基路堤失稳破坏模式的影响。

1 试验原理和设备

1.1 离心模型试验原理

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。中国岩土力学研究的开拓者、两院院士黄文熙先生称“离心模型是土工模型试验技术发展的里程碑”^[4]。离心模型方法在国内外受到高度重视,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、最有效的研究手段。离心模型试验方法在岩土工程、岩土力学研究中的作用与意义主要表现为以下的5个方面^[5]:①新现象研究;②模拟原型;③参数研究;④验证新理论和新方法;⑤用于教学与工程师的培训。



图1 路基滑塌案例

Fig. 1 Case of embankment failure

1.2 试验设备

(1) 土工离心机

试验在南京水利科学研究院NHRI400gt土工离心机上进行。该机建于1992年,最大半径5.5m,最大加速度200g,最大负荷2000kg,容量400g·t,吊篮平台尺寸为1100mm×1100mm。

(2) 固结仪

山区软基强度非常低,只能采用泥浆固结的方式制备。本文利用试验室的NHRI600型离心模型专用固结仪(图2)制备山区软基,期间用袖珍贯入仪监测模型地基的土体强度,直至强度达到目标值^[6]。

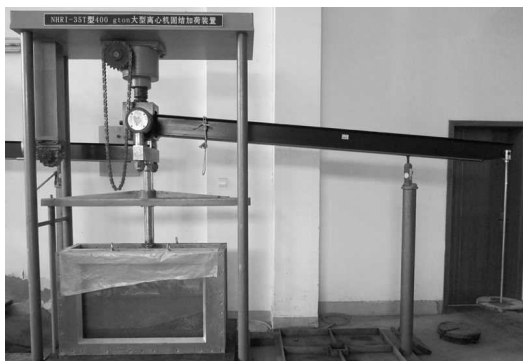


图2 在NHRI600型固结仪上固结山区软基

Fig. 2 Foundation consolidation on NHRI600 type oedometer

(3) 数据图像采集(PIV)系统

该系统由高清摄像机、支持POE供电的Hub、无线路由器、监视PC机组成。试验时,摄像机透过模型箱一侧的有机玻璃板,实时记录土体在试验过程中的变化。然后应用PIV技术,分析土体的位移情况。

2 试验方案

2.1 模型设计

通过4组离心模型试验,探讨山区软土层底面倾斜的CFG桩复合地基路堤失稳破坏特点。模型相似率 $n=100$,采用分级加载,模拟路堤分层填筑过程^[7]。每加载10g为一级,加载时间为2min,加载后运行5min。模型设计见图3~5,4组模型的情况为:M1为底面倾斜天然软基上的路堤试验;M2研究底面水平CFG桩复合软基上的路堤破坏特性;M3探讨底面倾斜CFG桩复合软基上的路堤破坏特性;M4模拟底面倾斜的缺陷CFG桩复合软基上的路堤破坏特性,除桩顶下4m处存在断裂外,与M3布置一致。

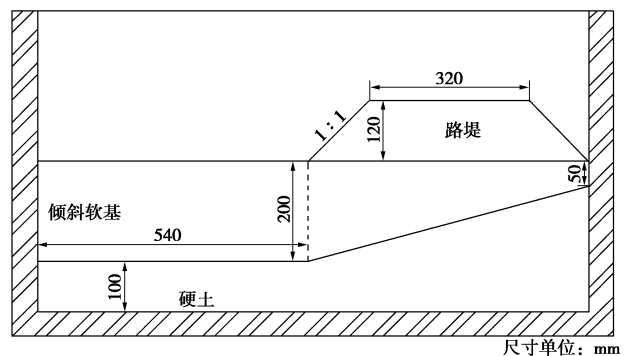


图3 M1模型布置图

Fig. 3 Model setup of M1

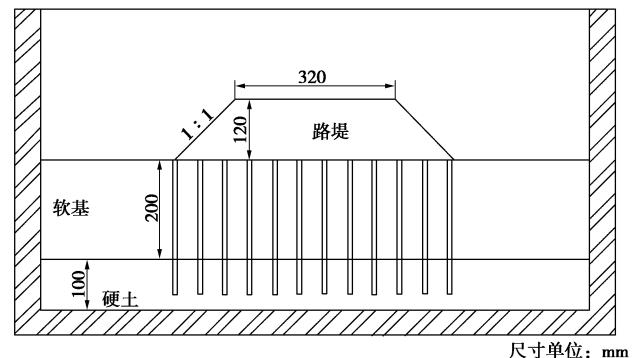


图4 M2模型布置图

Fig. 4 Model setup of M2

各组试验的土层参数均为:硬土层密度 2.0 g/cm^3 ,含水率22.0%;软基不排水强度12kPa;路堤压实度98%,顶宽32m,高12m,坡比1:1。CFG桩参数均为:桩径1m,方形布置,桩间距5m,桩端进入下卧硬土层7倍桩径。

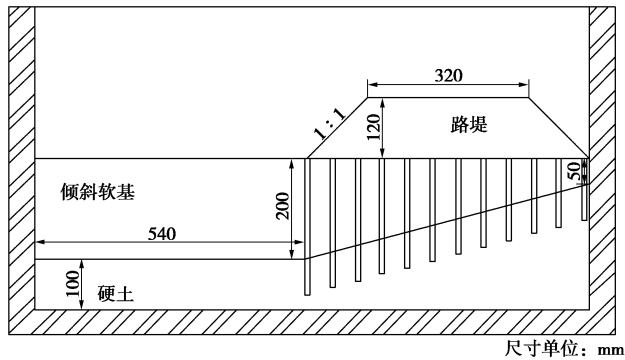


图 5 M3、M4 模型布置图

Fig. 5 Model setup of M3 & M4

2.2 模型 CFG 桩制备

原型 CFG 桩桩身抗压强度为 25 MPa。模型 CFG 桩采用水泥砂浆灌入内径为 10 mm 的透明硬塑料管, 振捣密实并置于标准养护箱养护 7 d 成桩后剥去外管制成。水泥砂浆桩制作前进行了不同配比的水泥砂浆试块强度试验, 按立方体抗压强度相似原则, 选用水泥 (P.042.5)、黄砂、水的配合比为 1 : 3 : 0.5。

2.3 试验程序

①制备下卧硬土层; ②固结软土层 (图 2); ③软基中的 CFG 施工模拟 (除 M1), 先引孔再插入预制模型 CFG 桩; ④制备路堤; ⑤在模型土体的侧面布置变形观测标记 (40 mm × 40 mm); 然后在土体表面贴上涂有硅油的薄膜, 以减小土体与模型边界侧摩阻力, 装上有机玻璃面, 如图 6; ⑥称模型质量; 将模型置于离心机吊篮上, 固定线缆; 调整配重; 关闭离心机机室; ⑦按设计过程启动离心机运行模型; ⑧停机, 量测变形网格, 拆模。

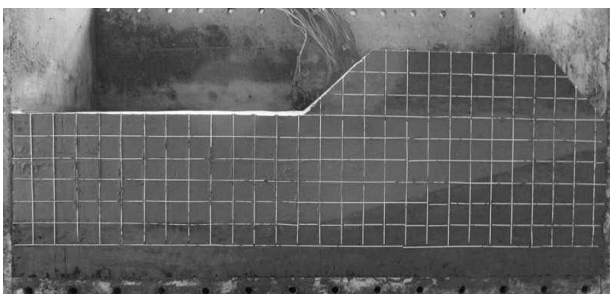


图 6 制备完成的模型及变形网格

Fig. 6 Model and displacement meshes

3 试验结果

3.1 M1 试验结果分析

模型 M1 模拟了底面倾斜天然软基上填筑路堤的过程。随着填筑过程, 路堤和路基沿倾斜下坡方向发生较大变形。离心加速度升至 18g 左右时路堤出现裂缝, 之后裂缝不断发展, 并出现明显滑动带。加速度

加至 60g (填筑高度 7.2 m) 并维持 5 min 后路堤顶面产生贯通裂缝数条, 最宽处达 2.4 cm, 如图 7, 试验停止。图 8 是土体变形矢量图。

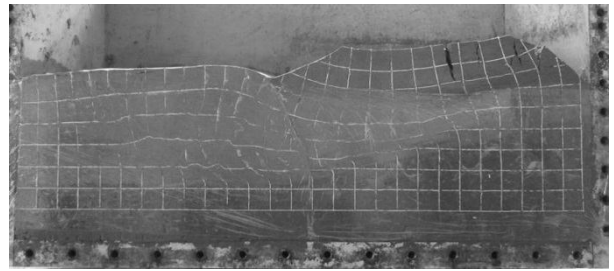


图 7 试验后的 M1 剖面变形

Fig. 7 Sectional deformations of tested M1

由试验结果可知, 在底面倾斜的天然软基上填筑路堤, 随着填筑过程, 沉降迅速向倾斜下坡发展, 并沿下卧硬土层形成近似折线的滑动面, 路堤顶面易出现较大贯通裂缝。与平原软基上的路堤对称沉降不同, 底面倾斜软基上的路堤工程土体变形、滑动带受倾斜的底面硬土层影响较大, 路堤稳定性较差。因此, 在山区软基上填筑高大路堤, 需要对天然地基采用一定的地基处理技术进行加固处理, 以提高地基稳定性。

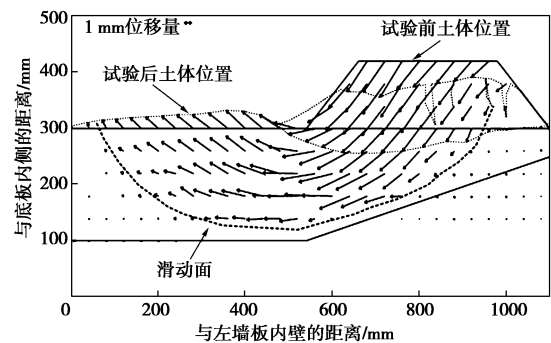


图 8 试验后的整体变形

Fig. 8 Deformation fields of tested M1

3.2 M2 试验结果分析

模型 M2 模拟了在底面水平的 CFG 桩复合软基上填筑路堤的过程。试验过程中的土体位移发展表明, 土体随填筑过程发生对称变形, 路堤坡脚产生较大的对称隆起, 并出现对称滑动带。加速度加至 90g (填筑高度 10.8 m) 并维持 5 min 后停止试验。

试验后土体变形及 CFG 桩情况如图 9。各排桩破坏和位移情况基本一致: 均在软硬土层交界面断裂; 在软土层内发生多次断裂, 形成刚性短桩; 短桩基本随着土体产生位移, 没有绕流现象。土体位移向路堤两侧对称发展; 越靠近路堤坡脚, 桩的断裂程度和倾倒位移越大。最大桩顶水平位移约 2.9 cm。试验后桩土位移及滑动面情况 (图 10), 同样说明了上述特征。

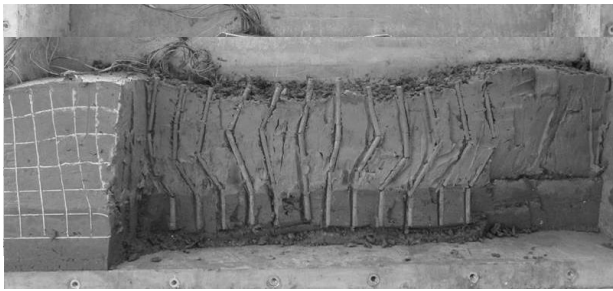


图9 试验后的M2剖面变形和CFG桩

Fig. 9 Sectional deformations and CFG piles of tested M2

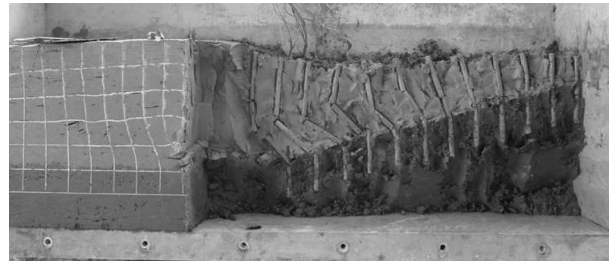


图11 试验后的M3剖面变形和CFG桩

Fig. 11 Sectional deformations and CFG piles of tested M3

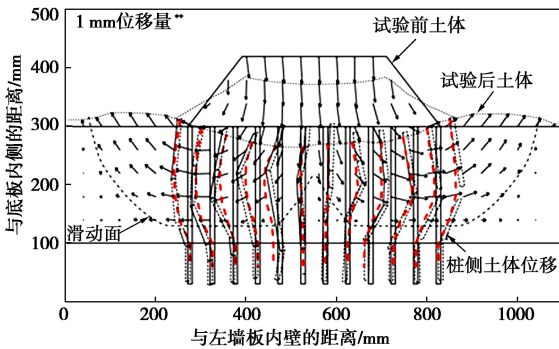


图10 试验后的整体变形

Fig. 10 Deformation fields of tested M2

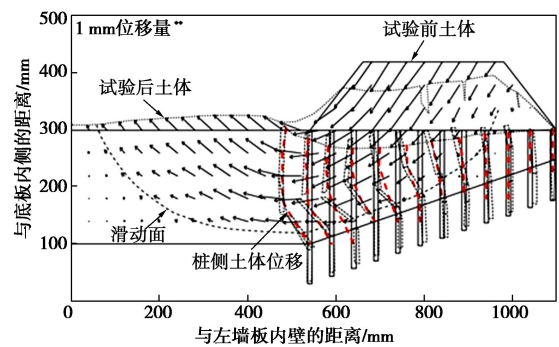


图12 试验后的整体变形

Fig. 12 Deformation fields of tested M3

因此，在底面水平的CFG桩复合软土地基上，随着填筑过程，CFG桩易断裂成可以随软土移动的刚性短桩，在桩体断裂后表现一定天然地基的特性。

3.3 M3试验结果分析

模型M3模拟了底面倾斜的CFG桩复合软基上填筑路堤的过程。随着填筑过程，土体变形不断向倾斜下坡方向发展，出现明显滑动带，加速度至100g（填筑高度12m）并维持5min后停止试验。

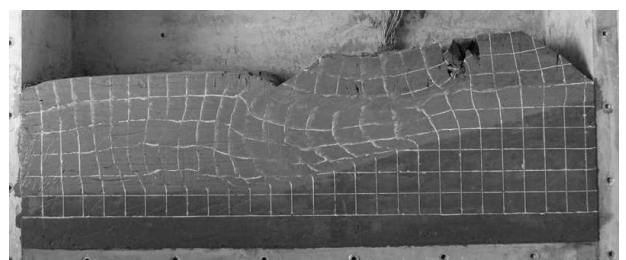
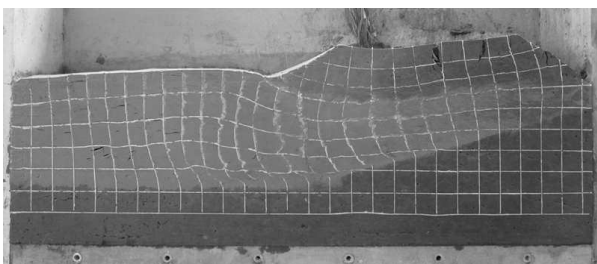
试验后土体变形及CFG桩情况如图11，试验后的桩土位移及滑动面情况如图12。与M1所模拟的天然倾斜软基情况相比，M3的稳定性得到了较大的提高，土体沉降和坡脚隆起量及隆起范围都大大减小。各排桩破坏和位移情况基本一致。与M2相同点有：桩在土层交界面断裂；均多次断裂形成刚性短桩；短桩基本随着土体产生位移，没有绕流现象。不同处有：土体变形向倾斜下坡方向非对称发展；越向下坡方向，桩的断裂程度和倾倒位移越大。最大桩顶水平位移（6cm）约是M2（2.9cm）的2倍。

因此，在底面倾斜软土地基上，采用CFG桩复合地基，能够有效减小土体变形，增加土体稳定性；但CFG桩易断裂成可以随软土移动的刚性短桩，在桩体断裂后表现一定天然地基的特性。

3.4 M4试验结果分析

M4探讨施工质量缺陷对于软土底面倾斜的CFG桩复合地基上路堤稳定性的影响。随着填筑过程，土体产生向下坡方向发展的较大变形，最终出现明显滑动带，加速度加至100g（填筑高度12m）并维持5min后停止试验。

试验后土体变形及CFG桩情况如图13，试验后的桩土位移及滑动面情况如图14。试验后开挖暴露桩体，见图14。各排桩破坏和位移情况与M3基本相同。M3和M4在同一滑动平面上，断裂而成短桩数目均为36根，说明缺陷CFG桩不影响破坏模式。但M4最大桩顶水平位移（11cm）约是M3（6cm）的两倍，说明缺陷桩对于变形量有较大影响。



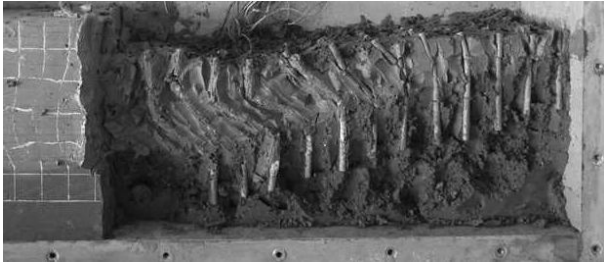


图 13 试验后的 M4 剖面变形和 CFG 桩

Fig. 13 Sectional deformations and CFG piles of tested M4

试验后的桩土位移及滑动面情况如图 20。与 M1、M3 相比, 缺陷 CFG 桩复合地基上路堤的稳定性仅仅比天然地基情况略好, 大大差于正常 CFG 桩复合地基情况; 缺陷桩伴随土体位移发生断裂, 之后与桩侧土体位移同步, 没有绕流现象; 桩顶没有刺入路堤土。可知缺陷 CFG 桩对倾斜软土复合地基整体稳定性有较大的不利影响。

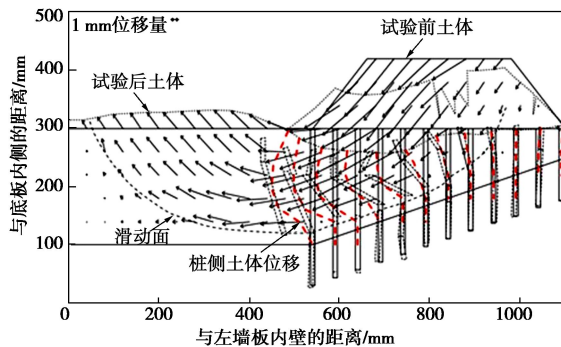


图 14 试验后的整体变形

Fig. 14 Deformation fields of tested M4

4 结论与讨论

本文通过 4 组离心模型试验, 得到以下初步结论:

(1) 随着路堤填筑过程, CFG 桩复合地基中的桩体易发生多次断裂, 形成随软土移动的刚性短桩, 不发生绕流现象。这一破坏特点在底面水平和倾斜的复合地基中是一样。

(2) 底面倾斜的 CFG 桩复合地基上, 路堤的稳定性和破坏模式明显受到软土底面倾斜的影响。土体变形和桩体断裂集中在下坡方向, 破坏影响范围远大于水平地基的情况。

(3) 在底面倾斜的 CFG 桩复合地基上, 缺陷 CFG 桩不改变土体的破坏模式, 但导致土体变形显著增大, 稳定性显著变差。说明 CFG 桩的成桩质量控制非常重要。

限于笔者水平及时间, 在以下方面可做更为深入的研究: CFG 桩在失稳破坏过程中, 桩体的多次断裂, 是一瞬间的同时断裂, 还是渐近发展的? 如是渐近发展, 断裂区域如何发展? 桩体断裂的具体原因, 是受拉、受弯、还是受剪?

参考文献:

- [1] 魏永幸, 罗 强, 邱延峻. 斜坡软弱地基填方工程技术研究与探讨[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (WEI Yong-xing, LUO Qiang, QIU Yan-jun. Research and discussion on filling engineering techniques on sloped soft soil foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 魏永幸. 基于填方工程的斜坡软弱地基及其成因[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(1): 56 - 63. (WEI Yong-xing. Embankment-based sloped soft soil foundation and its cause of formation[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, 17(1): 56 - 63. (in Chinese))
- [3] 黄炜旺. 山区复合地基路堤离心模型试验研究 [D]. 广州: 广州大学, 2015. (HUANG Wei-wang. Research on embankment stability on montanic composite foundation by centrifugal model tests[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015. (in Chinese))
- [4] 朱维新. 土工离心模型试验研究状况[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 82 - 90. (ZHU Wei-xin. State of geotechnical centrifuge modeling test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 82 - 90. (in Chinese))
- [5] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute. Technical manual of geotechnical test[M]. Beijing: China Communication Press, 2003. (in Chinese))
- [6] CECS54:93 袖珍贯入仪试验规程[S]. 1993. (CECS54:93 Pocket penetrometer test procedures[S]. 1993. (in Chinese))
- [7] 章为民, 徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法[J]. 水利学报, 1997(2): 10 - 13. (ZHANG Wei-min, XU Guang-ming. Simulation method of earth and rockfill dam filling process with centrifuge[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(2): 10 - 13. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)