

DOI: 10.11779/CJGE2024S20017

# 局部开挖条件下土工织物加固边坡的离心模型试验研究

刘 曜, 刘素嘉, 张 嘎

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 土工织物加筋是工程中加固土体的有效方式。进行了坡脚开挖条件下素土坡与土工织物加筋土坡的离心模型试验, 测量了边坡的位移变化, 分析了土体的变形破坏过程与土工织物的作用。试验结果表明土工织物加筋减小了滑动体的位移, 提高了土坡的稳定性, 改变了滑裂面的形态。土工织物加筋使边坡变形均匀化, 牵拉外侧土体, 从而延迟并减轻了边坡破坏。

**关键词:** 边坡; 土工织物; 开挖; 加筋; 离心模型试验

中图分类号: TV22

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0135-05

**作者简介:** 刘 曜 (2004—), 女, 本科, 主要从事边坡工程方面的研究。E-mail: liuyao22@mails.tsinghua.edu.cn。

## Centrifuge modeling of geotextile reinforced slope under partial excavation

LIU Yao, LIU Sujia, ZHANG Ga

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The geotextile reinforcement is an effective way to strengthen soils in engineering. The centrifuge modeling of plain soil slope and geotextile-reinforced slope under excavation of slope foot is carried out, the displacement change of slopes is measured, and the deformation and failure process of soils and the action of geotextile are analyzed. The test results show that the geotextile reinforcement reduces the displacement of the sliding body, improves the stability of the soil slopes and changes the shape of the slip surface. The geotextile reinforcement homogenizes the slope deformation and pulls the outer soil, thus delaying and reducing the slope failure.

**Key words:** side slope; geotextile; excavation; reinforcement; centrifuge modeling

## 0 引 言

边坡开挖过程可能会导致土体失稳, 进而引发滑坡、塌方等工程灾害<sup>[1]</sup>。低质量的边坡开挖可能造成施工过程中的生命财产损失, 影响工程的安全性及稳定性。加筋技术是土木工程领域中常用的一种技术, 通过向土体中添加加筋材料可增强土体的抗拉性能和变形能力, 以提高边坡等结构整体的抗震、抗滑稳定性能。土工织物具有较好的抗拉强度、抗腐蚀性抗渗能力等综合性能<sup>[2]</sup>, 能同时发挥加筋、反滤、隔离等作用<sup>[3]</sup>, 已被广泛应用于工程中。

孙天祯等<sup>[4]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分法建模分析了边坡在开挖等工况下的稳定性及不稳定因素; 刘飞禹等<sup>[5]</sup>利用直剪试验建立了土石混合料-土工织物界面的界面剪胀系数经验公式; 王由国等<sup>[6]</sup>采用有限元方法分析了土工织物加筋法加固软基边坡的效果; 燕太祥等<sup>[7]</sup>利用离心模型试验研究了土工织物加固后防波堤软基的破坏机理。目前关于土工织物加筋效果的研究大多聚焦土工织物的局部响应, 缺乏对整体加筋土坡整体的力学响应过程研究, 特别是开挖条件下土坡

变形破坏耦合机理及当中土工织物的加固作用机制。

本文采用离心模型试验方法, 开展坡脚开挖模型试验, 分别对素土坡和土工织物加筋土坡在坡脚开挖工况下的变形破坏过程进行还原。测量了边坡位移的时程与空间分布, 研究了土工织物加筋在开挖条件下对边坡的加固作用和机理。

## 1 试验设备与条件

### 1.1 设备

本文在清华大学土工离心机开展离心模型试验。离心机最大加载能力为 50g·t, 有效半径 2 m, 最大加速度 250g。开挖设备安装在 60 cm×20 cm×50 cm 的铝合金模型箱上, 一侧面装有透明有机玻璃, 固定有摄像头以拍摄记录试验过程中的土坡变形破坏过程。

开挖模拟设备主要由一个 U 形钢制刀片、两个电动机、和一组带滑块的轨道组成。试验中钢刀片将部分

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFC3007001)

收稿日期: 2024-06-21

土从坡脚上竖直切下并水平推开以再现开挖过程<sup>[8]</sup>。

## 1.2 非接触位移测量系统

本试验采用 GIAS-c (geoimage analysis system for centrifuge) 测量系统, 该系统可捕获离心模型试验过程中边坡的高分辨率图像。基于所采集图像的像素灰度分布, 采用图像相关算法, 可在不扰动试验模型的情况下确定标定点的位移矢量, 从而获得土体的变形过程<sup>[9]</sup>。

需要指出, 本文的结果数据均按模型尺寸表示。坐标系以水平指向坡外、竖直向下为正, 高程指与距坡脚的竖直距离大小。

## 1.3 试验模型

本文分别对未加筋的素土坡和土工织物加筋土坡进行试验。加筋土坡模型照片和结构示意图分别由图 1, 2 给出。控制两土坡除加筋外其他条件均相同。土坡采用干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , 初始含水率 18% 的黏土制备。土坡坡度为 1.5:1, 坡高为 300 mm, 坡顶宽 200 mm。土工织物采用弹性模量与抗拉强度分别为 39.7, 3.15 kN/m<sup>2</sup> 的医用纱布来模拟, 单层平均厚度为 0.14 mm。由模量相似准则, 以 50g 离心加速度换算后, 可得该条件下原型  $E_{ptp}$  为 0.28 kN, 符合实际土工织物该项指标情况<sup>[10]</sup>。



图 1 加筋土坡模型照片

Fig. 1 Photo of reinforced slope model

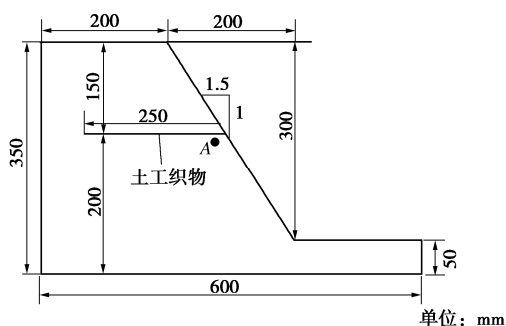


图 2 加筋土坡模型示意图

Fig. 2 Schematic view of reinforced slope model

制样时按水平地基分七层制样, 按干密度控制击实, 每层 5 cm, 为便于后续的图像分析, 在土坡侧面上布上白色水磨石从而形成随机分布的像素灰度差。将

水平垫层铺满模型箱底, 以防止坡底与箱底的直接相互作用影响试验。在第 4 次层制样后铺设与模型箱内径同宽、长 250 mm 的土工织物, 距离坡脚 150 mm, 坡面处无包裹, 之后继续逐层制样击实。

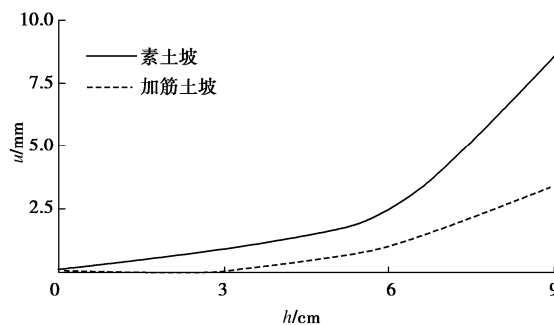
## 1.4 试验过程

完成制样并安装好开挖设备后, 将模型箱放入离心机中, 以 10g 为梯度逐级缓慢增加到 50g 的离心加速度, 每级加速度增加前保证土坡沉降稳定。待土坡在 50g 离心场中沉降稳定后, 控制开挖刀片从坡脚处开始开挖。刀片从坡面以上竖直下切插入土体, 下降至坡底后水平向坡外推开, 上提刀片, 完成一次开挖, 待土体稳定后再进行下一次开挖。开挖从 3 cm 高程处开始, 每次开挖高程增加 3 cm, 两土坡均在第三次开挖即开挖 9 cm 后产生破坏。采用图像采集与位移测量系统对边坡开挖过程进行记录。

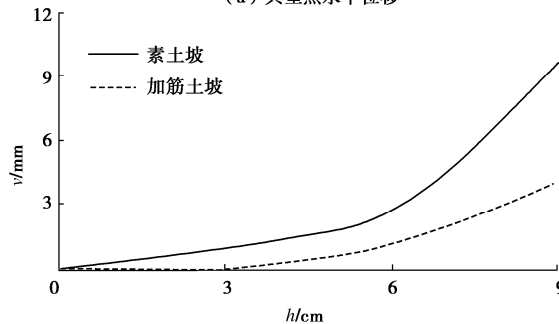
## 2 边坡响应

### 2.1 变形特性

图 3 为两土坡典型点 A 水平位移  $u$  与竖向位移  $v$  随开挖高度的变化 (点 A 位置见图 2)。从图 3 中可以看出, 从初始状态到第三次开挖时刻, 两土坡典型点的位移都在不断积累, 且第二、三次开挖之间的位移变化幅度较第二次开挖前大, 可见两土坡在最后一次开挖前都在不断积累形变。



(a) 典型点水平位移



(b) 典型点竖向位移

图 3 素土坡与加筋土坡典型点位移历程

Fig. 3 Displacement process of typical points of plain soil slope and reinforced soil slope

从图 3 还可以观察到加筋土坡典型点位移的积累量与增长速度在整个开挖过程中都明显小于素土坡,

说明在前两次开挖未破坏时, 土工织物加筋能明显减小开挖过程中边坡的形变, 减缓形变的速率。

图 4 给出了第 3 次开挖后两土坡典型点的水平位移  $u$  与竖向位移  $v$  随时间的变化过程。对比可以看出, 加筋土坡典型点的位移远小于素土坡, 即加筋土坡最后一次开挖后的变形远小于素土坡。结合图 3 分析结果, 说明土工织物加筋在开挖全程均起到减小形变的作用, 可提高土坡的刚性。

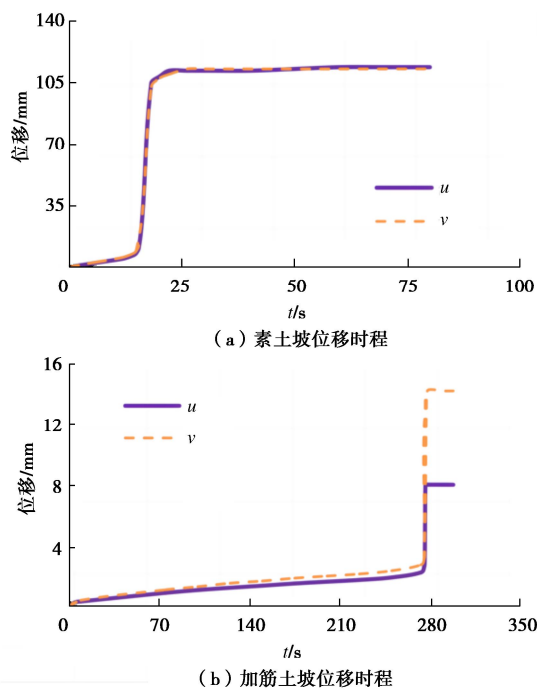


图 4 素土坡与加筋土坡典型点水平、竖向位移时程

Fig. 4 Horizontal and vertical displacement process of typical points of plain soil slope and reinforced soil slope

2.2 破坏特性

图 5 给出了在加筋土坡破坏后照片上勾勒出的加筋土坡滑裂面。滑裂面从坡面中上部延伸至坡脚, 头尾处大致呈弧线状, 中部与坡面大致平行, 整体为一平滑曲线。

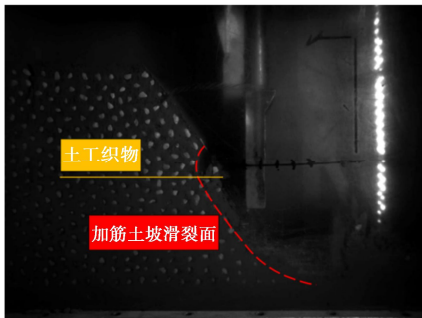


图 5 加筋土坡滑裂面形态

Fig. 5 Morphology of crack surface of reinforced slope

图 6 给出了素土坡与加筋土坡滑裂面的滑裂面形

态。对比观察, 发现素土坡滑裂面的长度、深度均明显大于加筋土坡, 由坡顶延伸至坡脚, 整个坡面均为滑动体。可见, 加筋土坡可明显减小滑裂面范围, 使土坡破坏部分更浅、更小, 同时可阻挡滑裂面延伸至坡顶, 增强坡顶处的稳定性。

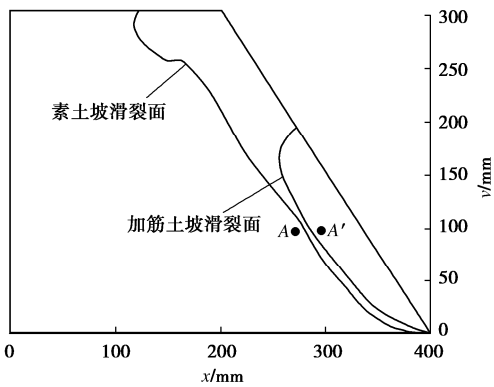


图 6 素土坡与加筋土坡滑裂面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of slip surface of plain soil slope and reinforced soil slope

图 7 为素土坡与加筋土坡典型点对在第 3 次开挖即开挖高度 9 cm 后的切向相对位移与法向相对位移时程。可以勘察两土坡均在第 3 次开挖后破坏, 素土坡破坏时刻约为 17.4 s, 而加筋土坡破坏时刻约为 260.5 s, 明显晚于素土坡。

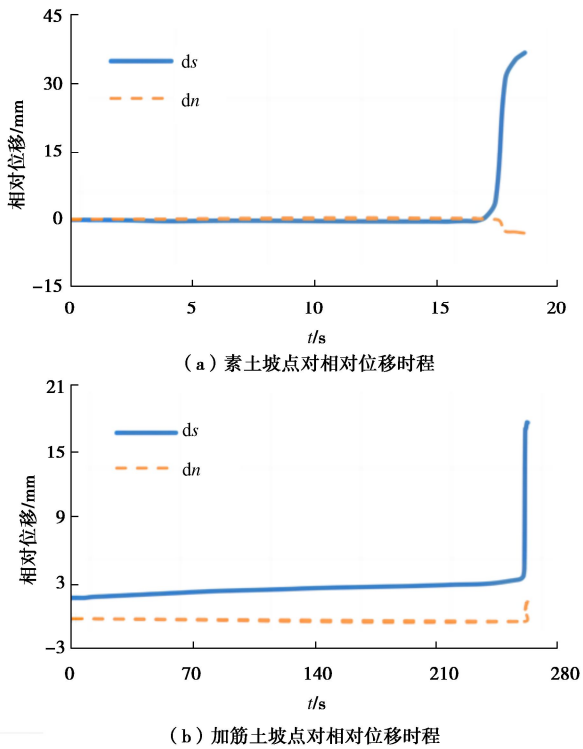


图 7 素土坡与加筋土坡点对相对位移时程 (图 6 A—A')

Fig. 7 Relative displacement process of point pairs between plain soil slope and reinforced soil slope

### 3 机理分析

#### 3.1 破坏机理

采用应变计算方法对边坡变形进行量化。应变分析采用边长为 10 mm 的四节点正方形单元,采用有限元法中的形函数进行计算。其中,单元节点位移直接通过图像测量。本文定义拉应变为正。

图 8 给出了两土坡 150 mm 高程处在不同开挖高度  $h$  的不同时刻的水平应变分布。两土坡破坏前时刻的水平应变均在滑裂面处发生最大突变。从图 8 中可以看出,两土坡在破坏前就已在滑裂面出现显著的变形集中,且随着开挖高度增高而积累。这说明前两次开挖使土坡已出现变形局部化。在最后一次开挖中,变形局部化程度明显继续增大而造成局部破坏,最终导致土坡产生滑裂。

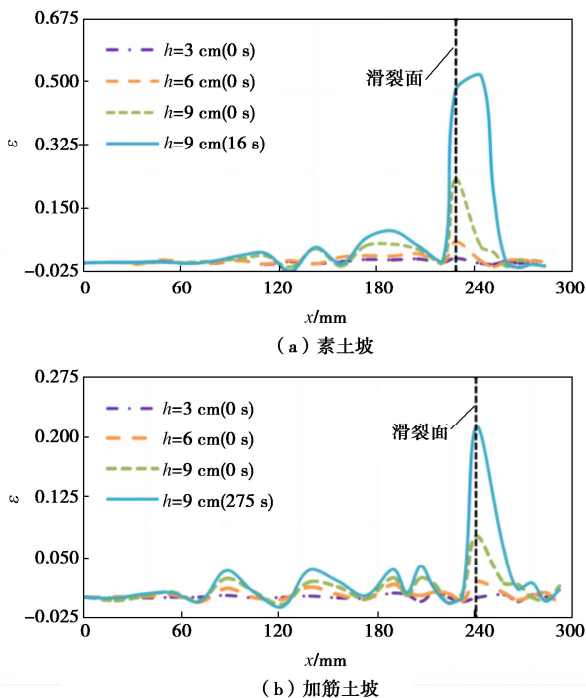


图 8  $y=150$  mm 水平应变的水平分布

Fig. 8 Horizontal distribution of horizontal strain at  $y=150$  mm

#### 3.2 加固机理

图 8 表明,相同开挖高度下加筋土坡滑裂面附近的应变极值明显小于素土坡。此外,素土坡的变形集中区域较宽,加筋土坡的变形集中区域较窄,说明土工织物加筋可减小并均匀化土坡变形,从而减小了变形局部化累积程度,增强了边坡稳定性。

图 9 给出了素土坡与加筋土坡开挖 9 cm 后 8.6 s 时刻两个高程处水平应变的水平分布。可以发现,在土工织物铺设位置 ( $y=150$  mm),两土坡均有着较明显的变形集中区域,但加筋土坡的最大应变明显低于素土坡。这说明土工织物减弱了变形集中区域的变形。

在其他高程(如  $y=75$  mm)也有类似的规律。因此可以推断,土工织物可以削弱坡脚开挖所产生的变形集中程度,增加边坡安全性。

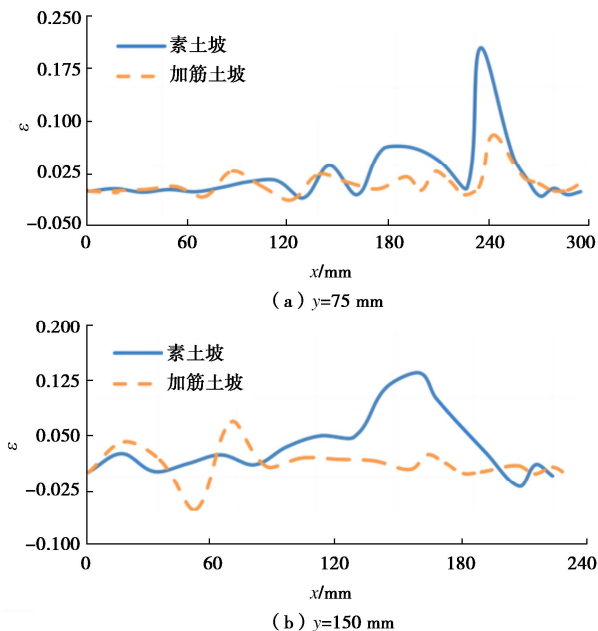


图 9 各高程素土坡与加筋土坡水平应变的水平分布

Fig. 9 Horizontal distribution of horizontal strain of plain soil slope and reinforced soil slope at different elevations

图 10 为加筋土坡中土工织物从第一次开挖前至破坏前时刻(第 3 次开挖后 275 s)水平位移的水平分布。利用三次多项式函数进行拟合结果为

$$u = 1.87 \times 10^{-6} x^3 - 5.12 \times 10^{-4} x^2 + 0.0628x - 0.808 \quad (1)$$

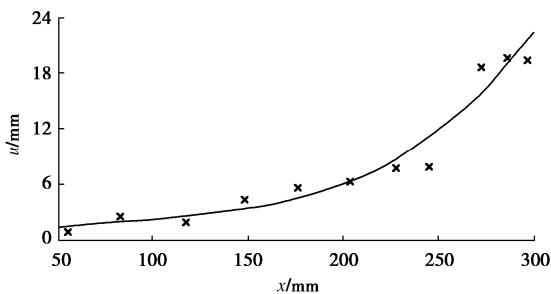


图 10 加筋土坡破坏前土工织物水平位移分布

Fig. 10 Distribution of horizontal displacement of geotextile before failure of reinforced slope

对上式求导可以得到土工织物在边坡破坏前的拉应变分布,如图 11 所示。因为土工织物在拉断前的应力应变关系呈线性,因此土工织物的应力分布与应变分布是相同的。可看出土工织物对外侧坡体作用了向内的拉力,起到了减小土体变形、延缓并减轻局部破坏的作用。同时由于中部土体被牵拉,边坡顶部也更加稳固,整体安全性增强。

由此可得土工织物加固边坡机理:土工织物牵拉土体减小了边坡的变形局部化,推迟了破坏过程,避

免了坡顶的局部破坏,从而增强了开挖过程中边坡的稳定性。

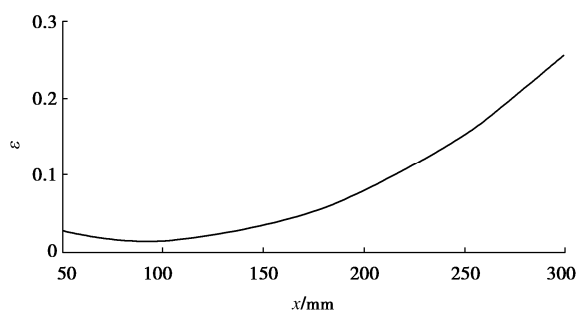


图 11 加筋土坡破坏前土工织物水平应变分布

Fig. 11 Distribution of horizontal strain of geotextile before failure of reinforced slope

## 4 结 论

本文开展了坡脚开挖条件素土坡和土工织物加筋土坡的离心模型试验,测量了开挖过程中边坡位移的时程与空间分布,分析了边坡的变形破坏规律和土工织物的加固机理,得到 4 点结论。

(1) 土工织物加筋减小了土坡位移,提高了开挖条件下土坡的稳定性。

(2) 土工织物改变了滑裂面的形态,减小了土坡的破坏范围。

(3) 坡脚开挖导致土坡出现变形局部化并逐渐发展,导致了土坡发生滑动破坏。

(4) 土工织物使土坡变形均匀化,从而减小了变形局部化程度,并减弱了坡脚开挖对坡顶区域的影响,从而提高了土坡的稳定性并减小了破坏范围。

## 参考文献:

- [1] 袁 欢. 水利工程施工中的边坡开挖及防护技术[J]. 水上安全, 2024(3): 160-162. (YUAN Huan. Slope excavation and protection technology in water conservancy project construction[J]. Maritime Safety, 2024(3): 160-162. (in Chinese))
- [2] 俞章林, 叶洪兴. 土工织物在边坡支护中的应用[J]. 建材技术与应用, 2004(2): 55-56. (YU Zhanglin, YE Hongxing. Application of geotextile in slope support[J]. Research & Application of Building Materials, 2004(2): 55-56. (in

Chinese))

- [3] 李 贺. 土工织物加筋特性与改进方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023. (LI He. Research on Reinforcement Characteristics and Improvement Methods of Geogrid[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Technology, 2023. (in Chinese))
- [4] 孙天祯. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的边坡稳定性分析及支护数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. (SUN Tianyi. Stability Analysis of Slope and Support Numerical Simulation Study Based on FLAC<sup>3D</sup> [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese))
- [5] 刘飞禹, 姚嘉敏, 孔剑捷. 土石混合料-土工织物界面剪切特性研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(1): 35-43. (LIU Feiyu, YAO Jiamin, KONG Jianjie. Study on shear characteristics of soil-rock mixture-geotextile interface[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(1): 35-43. (in Chinese))
- [6] 王由国, 李守德, 仲 曼. 土工织物加筋法加固软基边坡的效果分析[J]. 河南科学, 2014, 32(1): 61-67. (WANG Youguo, LI Shoude, ZHONG Man. Analysis of the consequence of soft ground slope reinforced by geotextile-reinforced method[J]. Henan Science, 2014, 32(1): 61-67. (in Chinese))
- [7] 燕太祥. 土工织物加固后防波堤软基破坏机理实验研究[J]. 水运工程, 2006(10): 199-205. (YAN Taixiang. Test and study on failure mechanism of soft ground under breakwater already improved by geotextiles[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(10): 199-205. (in Chinese))
- [8] LI M, ZHANG J M, LEE C F, et al. Centrifuge model tests on a cohesive soil slope under excavation conditions[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(5): 801-812.
- [9] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, 42(1): 87-96.
- [10] HU Y, ZHANG G, ZHANG J M, et al. Centrifuge modeling of geotextile-reinforced cohesive slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 12-22.

(编校: 胡海霞)