

DOI: 10.11779/CJGE2024S10004

# 土工织物加固土质坝堤加高工程的离心模型试验研究

李笑琳, 张嘎

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 土工织物是一种广泛用于边坡加固的合成材料, 但土工织物在土质坝堤加高工程中尚未得到合理应用。针对水位变动条件下土工织物加固的加高土质坝堤进行了离心模型试验, 观测了加高坝堤的变形破坏响应过程。试验结果表明, 土工织物加固的加高土质坝堤的破坏呈现出新旧坝堤各异的特点, 新旧坝堤呈现出不同的破坏特性, 离土工织物较远的旧坝堤先发生破坏, 土工织物加固的新坝堤的破坏发生较晚, 且呈现从上到下渐进发展的特性; 加高坝堤的最终破坏是由变形局部化和局部破坏相互耦合渐进发展导致的; 土工织物分为加固段和约束段, 在约束段坝堤给土工织物提供约束力, 在加固段土工织物限制了坝堤的变形, 土工织物的加固机理是将坝堤深部的约束力传递到坝堤表面, 从而增强了坝堤浅层的抗滑能力; 水位变动引起坝堤的变形增加, 土工织物的加固作用也随之增强。

**关键词:** 坝堤; 加高; 土工织物; 离心模型试验; 水位变动

中图分类号: TV22 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0112-05

**作者简介:** 李笑琳, 女, 清华大学行健书院本科生, 攻读理论与应用力学+土木水利与海洋工程双学位, 研究方向为水位变动条件下土石坝稳定性问题。E-mail: xl-li21@mails.tsinghua.edu.cn.

## Centrifugal model tests on geotextile-reinforced heightening projects of soil embankments

LI Xiaolin, ZHANG Ga

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

**Abstract:** Geotextiles are widely used to reinforce slopes, but they have not yet been effectively applied in heightening projects of soil embankments. The centrifugal model tests are conducted on the elevated soil embankments with geotextile reinforcement under variation of water level. The deformation and failure process of the reinforced embankment are observed and measured. The results indicate that the failure of the elevated soil embankments with geotextile reinforcement exhibits different characteristics between the new and old embankments. The ultimate failure of the elevated embankment is caused by the coupling and progressive development of deformation localization and local failure. The geotextiles are divided into reinforcement section and restraint section. In the restraint section, the embankment provides restraint for the geotextiles, while in the reinforcement section, the geotextiles limit the deformation of the embankment. The reinforcement mechanism of the geotextiles is to transfer the restraint from the deep part of the embankment to its surface, thereby to increase the sliding resistance of the shallow layer of the embankment.

**Key words:** embankment; heightening; geotextile; centrifugal model test; variation of water level

## 0 引言

近十年来, 全球极端气象条件出现愈发频繁, 洪涝灾害形势愈发严峻。我国大量土质坝堤工程的原设计水位已经不能够满足防洪要求, 需要进行加高。

坝堤加高后存在失稳的隐患<sup>[1]</sup>, 而且存在占地过多、费用较高等问题<sup>[2]</sup>。关于坝堤工程加高的稳定性和经济性已开展了一些研究。王世琦<sup>[3]</sup>探讨了堤防加高培厚技术及其应用场景, 张帆等<sup>[4]</sup>利用有限元法计算了下游贴坡式加高的土坝的浸润线和坝坡稳定安全系数。总的来看, 加高坝堤工程的现有研究大多采用

工程地质分析或数值模拟等方法, 物理模型试验相关研究还较为少见。

土工织物对边坡、挡土墙等工程有较好的加固效果和性价比, 已经开展了较多试验研究和数值模拟研究<sup>[5-6]</sup>。但土工织物在加高坝堤工程中的研究还不多, 而且偏重于土工织物在不均匀沉降控制等方面, 很少涉及水位变动条件下的土工织物-新坝堤-旧坝堤相互作用。

本文针对水位变动条件下土工织物加固的加高土

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (QY23148)

收稿日期: 2024-04-29

质坝堤进行了离心模型试验, 观测坝堤变形破坏响应过程, 阐释了加高坝堤的变形破坏特性, 分析了土工织物和旧坝堤的耦合作用规律, 探讨了针对加高坝堤结构的土工织物加固机理。

## 1 试验设备与条件

### 1.1 设备

试验采用清华大学土工离心机进行, 该离心机的有效半径为 2 m, 最大承载能力为 50g·t, 最大离心加速度为 250g。坝堤模型置于铝合金模型箱内, 模型箱尺寸为 60 cm×20 cm×50 cm。为了观察试验过程中坝堤的变形破坏情况, 在模型箱的一侧装有有机玻璃板, 通过摄像机监测坝堤变化。模型箱侧壁底部开孔, 连接进出水管道, 通过电磁阀控制模型箱内的水位升降。

### 1.2 试验模型

坝堤模型分为旧坝堤和新坝堤两部分, 模型照片和结构示意图如图 1 和图 2 所示。旧坝堤高 85.5 mm, 坝顶宽 108 mm, 在旧坝堤上修筑新坝堤, 即加高 85.5 mm 并且在下游培厚 204 mm。本试验在 70g 离心加速度下进行, 对应原型旧坝堤高 6 m, 坝顶宽为 7.56 m, 加高 6 m 并培厚 14.28 m。新旧坝堤坡度均为 0.84:1。在新坝堤内铺设两层土工织物, 间距 42.75 mm, 对应原型土工织物间距为 3 m。坝堤下方有 50 mm 厚的地基, 用以降低模型箱刚性边界对坝堤变形破坏的影响。

模型用土为黄土, 颗粒相对质量密度为 2.70, 液限和塑限分别为 31%和 17%, 制样时控制旧坝堤干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup>, 新坝堤干密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 含水率均为 17%。采用一种单层平均厚度为 0.14 mm 的医用纱布来模拟土工织物。该纱布的弹性模量为 39.7 kN/m, 抗拉强度为 3.15 kN/m。

制样时先修筑 5 cm 厚的地基, 在其上填土夯实并削坡形成旧坝堤, 再培厚旧坝堤, 并在其顶部铺设第一层土工织物。之后在土工织物上分两层施工, 在两层之间铺设第二层土工织物, 完成新坝堤的修筑。在坝堤模型紧贴有机玻璃侧嵌入均匀分布的白色泡沫片 (图 1), 以增大图片的像素灰度差, 提高基于相关分析的位移测量精度。在模型箱内壁均匀涂抹凡士林减小摩擦, 降低边界效应对试验的影响。



图 1 坝堤模型照片

Fig. 1 Photo of embankment model

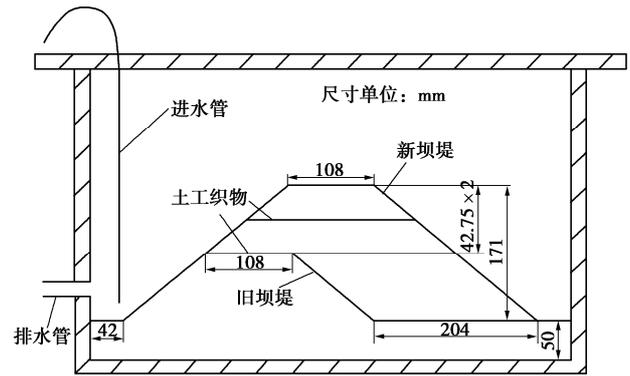


图 2 坝堤模型示意图

Fig. 2 Schematic view of embankment model

### 1.3 测量方法

试验采用图像采集和位移测量系统记录坝堤变形破坏过程。固定在模型箱前的摄像机以每秒 10 帧的频率采集图像, 基于得到的图像序列, 使用 GIPS 软件通过灰度相关分析捕捉标定点, 从而测定模型上任意一点在任意时刻的位移, 测量精度可以达到 0.03 mm<sup>[7]</sup>。采用基于图像的非接触式测量方法避免了传感器对模型的干扰。

以坝底水平线为  $x$  轴, 水平向右为  $x$  轴正方向, 以坝堤中轴线为  $y$  轴, 竖直向上为  $y$  轴正方向, 坝堤中轴线与坝底水平线的交点为坐标原点。水平位移指向坝堤上游 (向左) 为正, 竖直位移向下为正。本文给出的位移测量结果均为模型尺度, 可通过乘以模型比尺 (70) 换算为原型尺度。应变测量结果在模型尺度下和在原型尺度下是一致的。

### 1.4 试验过程

制样完成后, 将模型箱放入离心机, 以 5g 为梯度对模型逐级增加离心加速度, 待坝堤沉降稳定后再增加下一级离心加速度, 直至达到 70g。之后保持 70g 加速度不变, 待坝堤沉降稳定后, 连续蓄水直至水位达到 110 mm。保持该水位不变, 待坝堤变形稳定后, 以 6 mm/s 的速度降低水位至 0。

## 2 变形特性

图 3 给出了水位骤降过程中坝堤坡肩沉降的时程曲线。可以看出坡肩沉降随着水位下降而逐渐增大, 而且表现出明显的延迟性。在水位下降近 30 mm 后, 坡肩沉降才开始出现明显增长。随着水位下降, 坡肩沉降增加速度先是迅速增大, 而后基本保持不变, 在最终阶段有所减缓。坡肩沉降开始发展时, 水位正好降至新旧坝堤结合面附近。可以推断, 旧坝堤的变形在整个坝堤的变形响应中起主导作用, 这是由于只有新坝堤采用土工织物加固措施的缘故。

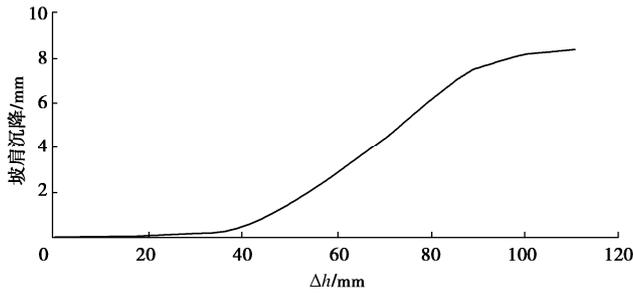


图3 水位骤降坝堤坡肩沉降时程曲线 ( $\Delta h$ :水位下降值)

Fig. 3 Histories of settlement of embankment shoulder ( $\Delta h$ , reduction of water level)

图4给出了坝堤在不同水位下的水平位移的水平分布。水平位移随着水位下降而逐渐增大,这一趋势从坝堤下游到坝堤上游表现得愈发显著。在坝堤较深处,水平位移几乎不随水位下降而改变,在某一位置后水平位移随水位下降开始迅速增加。这表明水位骤降的影响是局部的,存在一个最深影响位置。对比不同高程处的最深影响位置,可以发现随着高程增加,最深影响位置不断向坝堤更深处发展。这一结果在土工织物加固的均质边坡中已被验证<sup>[8]</sup>。

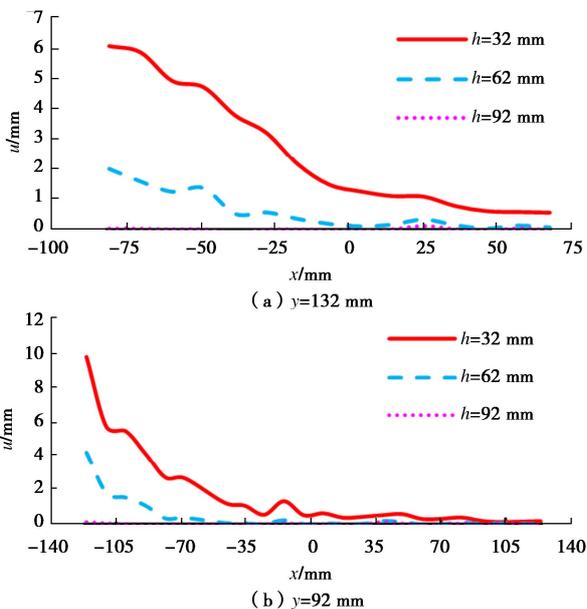


图4 坝堤水平位移的水平分布 ( $u$ :水平位移)

Fig. 4 Horizontal distribution of horizontal displacement of embankment ( $u$ , horizontal displacement)

### 3 破坏特性

基于试验得到的系列图像可以得到坝堤的滑裂面,如图5所示。可以看出,滑裂面位于坝体上游侧,总体呈曲线形状,从坝顶贯通延伸至高程40 mm处。为了进一步分析坝堤的破坏特性,在滑裂面两侧

选取了5个点对测定其相对位移时程,如图6所示。点对包含位于滑裂面两侧且距离很近的一对点,它们的相对位移发展过程可以用来分析坝堤的破坏过程。图7给出了部分点对的切向相对位移和法向相对位移随水位的变化。从图7中可以看出,各点对的切向相对位移均随水位降低而逐渐增大,且显著大于法向相对位移。这反映了滑坡的剪切破坏特征。而且,切向相对位移都从某个水位开始迅速增长,意味着该水位就是坝堤上该点处发生局部破坏的水位。

图6示出了由各点对分析确定的局部破坏水位。可以看出,局部破坏水位从上到下呈现先减小后增大的规律。旧坝堤内部点对的局部破坏水位最高,说明旧坝堤最早发生局部破坏;新坝堤内部点对的破坏水位从上到下逐渐减小,说明新坝堤的破坏是由上到下渐进发展的。

不同于一般均质边坡在水位骤降条件下由上到下的渐进破坏规律<sup>[9]</sup>,土工织物加固的加高土质坝堤的破坏呈现出新旧坝堤各异的特点。新坝堤受到土工织物约束作用,出现局部破坏的时刻较晚;旧坝堤内部离土工织物较远处出现局部破坏的时刻较晚,而较远处出现局部破坏的时刻较早。这表明,土工织物的加固效果主要体现在其附近一定范围的区域内。

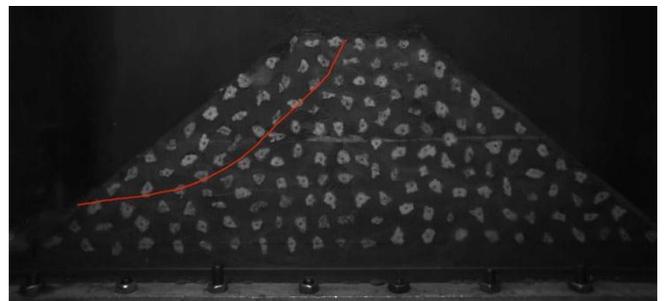


图5 坝堤滑裂面形态

Fig. 5 Slip surface of embankment

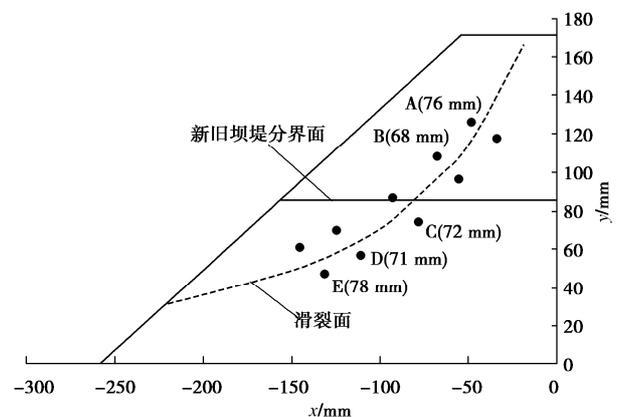


图6 坝堤滑裂面发展过程

Fig. 6 Failure process of embankment

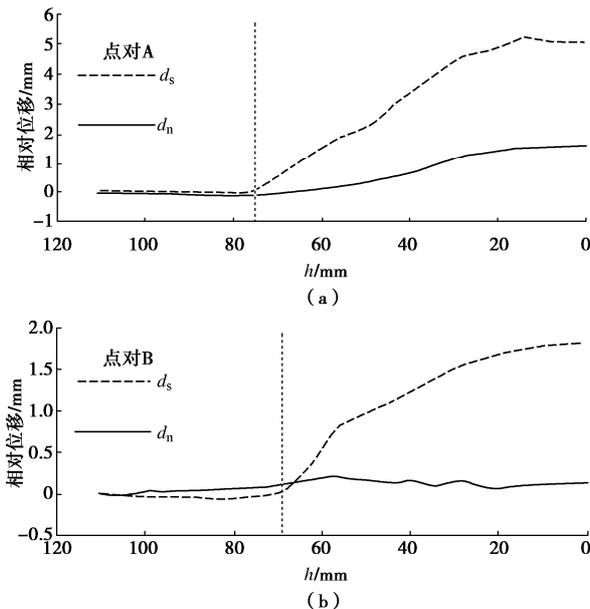


图 7 坝堤点对的相对位移发展过程 ( $d_s$ :切向相对位移;  $d_n$ :法向相对位移;  $h$ :水位)

Fig. 7 Histories of relative displacement of point couples ( $d_s$ , tangential relative displacement;  $d_n$ , normal relative displacement;  $h$ , water level)

图 8 给出了加固土质坝堤在  $y=112$  mm 高程处水平应变的水平分布。水平应变随着水位下降而逐渐增加, 而且在某个区段内显著增大, 这表明坝堤内部出现了变形局部化, 其程度在水位下降过程中迅速增强。滑裂面所在位置处于变形局部化显著区域内, 说明变形局部化的不断发展导致了该处出现局部破坏。在局部破坏发生后, 变形局部化继续增加, 表明局部破坏进一步增强了其附近的变形局部化程度。因此, 坝堤的破坏过程表现出变形局部化和局部破坏相互耦合的特点。

### 4 加固机理

为了进一步探讨土工织物加固坝堤的机理, 需要了解土工织物的受力变形特性。考虑到土工织物具有良好的连续性, 其位移分布可用某一连续函数描述。已有研究表明, 可以用如下公式拟合土工织物的水平位移分布<sup>[10]</sup>:

$$\frac{U}{L} = \frac{A}{1+a(1+\frac{x}{L})^b} + B \quad (1)$$

式中:  $U$  为土工织物的水平位移 (单位: mm);  $L$  是坝堤底部的长度 (516 mm); 参数  $A, B, a, b$  由试验测得的土工织物水平位移分布拟合确定。

在模型箱玻璃侧壁处, 土工织物边缘稍露出坡体, 呈明显白色。因此, 在试验得到的系列图像中可辨别出土工织物并测量其变形。图 9 给出了采用上述公式对高程  $y=86$  mm 处的土工织物在水位为 32 mm 时的

水平位移分布的拟合结果, 相应参数取值在图中给出。

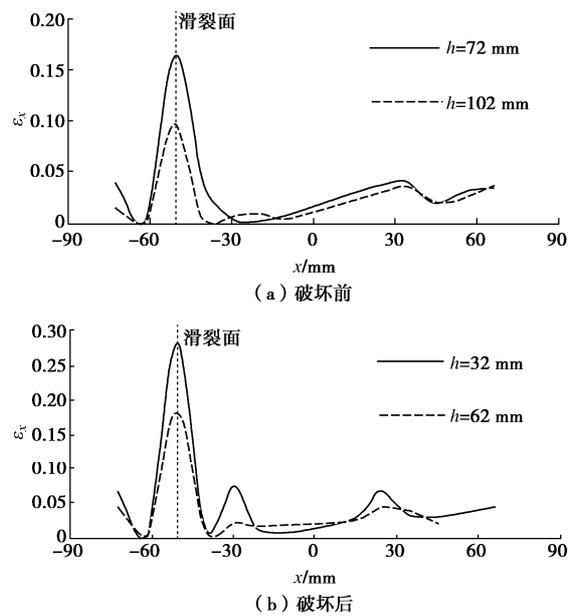


图 8  $y=112$  mm 处坝堤水平应变的水平分布, 破坏水位: 71 mm ( $\epsilon_x$ :水平应变)

Fig. 8 Horizontal distribution of horizontal strain of embankment at  $y=112$  mm and water level at slippage: 71 mm ( $\epsilon_x$ , horizontal strain)

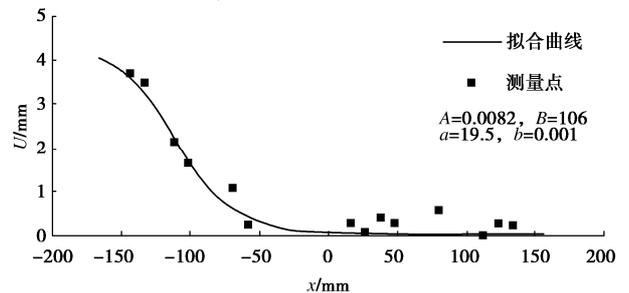


图 9  $y=86$  mm 处土工织物水平位移的测量与公式拟合结果 ( $U$ : 土工织物水平位移)

Fig. 9 Measured and predicted horizontal displacements of geotextiles ( $U$ , horizontal displacement of geotextile)

进一步地, 对式 (1) 进行求导, 得到土工织物的应变分布函数:

$$\epsilon = \frac{-Aab(1+\frac{x}{L})^{b-1}}{(1+a(1+\frac{x}{L})^b)^2} \quad (2)$$

根据式 (2) 可以计算得出两层土工织物在不同水位下的拉应变分布曲线, 如图 10 所示。随着水位下降, 土工织物的拉应变逐渐增加。这意味着随着水位变动引起的坝堤变形增加, 土工织物的加固作用也随之增强。土工织物的拉应变存在一个极值点, 这一极值点的位置只与土工织物的位置有关, 而与水位无关。土工织物所受摩擦力  $F$  和土工织物拉应变  $\epsilon$  呈线性关系, 即

$$F = -ES\varepsilon \quad (3)$$

式中,  $E$  为土工织物的弹性模量,  $S$  为土工织物的横截面积。对式(3)在  $x$  方向上求导得

$$f = -ES\varepsilon' \quad (4)$$

式(4)表明  $\varepsilon'$  的正负变化实际上反映了摩擦力的方向变化。将  $\varepsilon'$  零点(即水平应变的极值点)定义为分界点, 在分界点的下游一侧, 土工织物上各点所受摩擦力指向坝堤下游, 此时坝堤对土工织物提供约束力, 为约束段; 在分界点的上游一侧, 土工织物上各点所受摩擦力指向坝堤上游, 此时土工织物约束了坝堤向临水面的滑动, 为加固段。因此, 土工织物的加固机理是将坝堤深部的约束力传递到坝堤表面, 从而增强了坝堤浅层的抗滑能力。

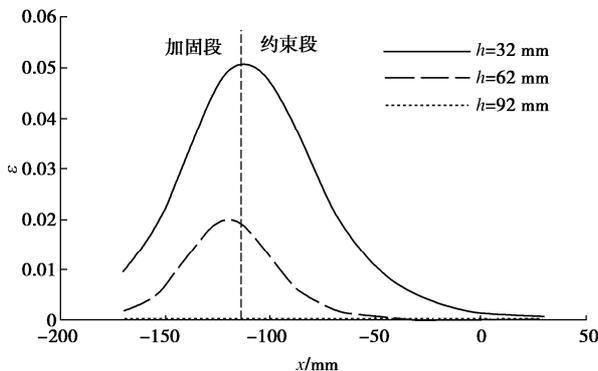


图 10  $y=86$  mm 处土工织物的拉应变分布 ( $\varepsilon$ : 土工织物拉应变)

Fig. 10 Distribution of tensile strain of geotextiles ( $\varepsilon$ , tensile strain)

## 5 结 论

本文针对水位变动条件下土工织物加固的加高土质坝堤进行了离心模型试验, 分析了加高坝堤的破坏特性和土工织物的加固机理, 得到主要结论如下:

(1) 土工织物加固的加高土质坝堤的破坏呈现出新旧坝堤各异的特点。离土工织物较远的旧坝堤先发生破坏; 土工织物加固的新坝堤的破坏发生较晚, 且呈现从上到下渐进发展的特性。

(2) 变形局部化的不断发展导致局部破坏, 局部破坏又增强了变形局部化的程度, 两者相互耦合渐进发展, 最终导致了坝堤的破坏。

(3) 土工织物分为加固段和约束段, 在约束段坝堤给土工织物提供约束, 在加固段土工织物限制了坝堤的变形。加固段与约束段的分界点随着高程的降低向坝堤表面移动。土工织物将坝堤深部的约束传递到坝堤表面, 从而增强了坝堤浅层的稳定性。

(4) 水位变动引起坝堤的变形增加, 土工织物的加固作用也随之增强。

## 参考文献:

- [1] 牛运光. 滑坡处理工程实例连载之十一: 贵州省锅底河水库土石坝滑坡及加固[J]. 大坝与安全, 2003(6): 65. (NIU Yunguang. Case study of landslide treatment engineering in Guizhou province, part 11: landslide and reinforcement of Guodihe Reservoir earth rock dam[J]. Dams and Safety, 2003(6): 65. (in Chinese))
- [2] FOWLER J. Geotextile tubes and flood control[J]. Geotechnical Fabrics Report, 1997(6): 46-51.
- [3] 王世琦. 河道堤防的加高培厚技术探讨[J]. 科技视界, 2014(25): 330. (WANG Shiqi. Discussion on the technology of elevating and thickening river embankments[J]. Technology Perspective, 2014(25): 330. (in Chinese))
- [4] 张帆, 辛全才, 刘倬昀. 土坝下游贴坡式加高渗流与稳定问题研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 123-125. (ZHANG Fan, XIN Quancai, LIU Zhuojun. Research on seepage and stability problems of downstream slope mounted elevated earth dams[J]. People's Yellow River, 2015, 37(3): 123-125. (in Chinese))
- [5] BERGADO D, LONG P, LEE C, et al. Performance of reinforced embankment on soft Bangkok clay with high-strength geotextile reinforcement[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1994, 13(6/7):403-420.
- [6] YIN Z, MARAKA N, LEIREN L, et al. Numerical study of geotextile-reinforced flexible pavement overlying low-strength subgrade[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10325-10325.
- [7] ZHANG G, HU Y, ZHANG J. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2008, 42(1): 87-96.
- [8] LUO F, ZHANG G, LIU Y, et al. Centrifuge modeling of the geotextile reinforced slope subject to drawdown[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46: 11-21.
- [9] LUO F, ZHANG G. Progressive failure behavior of cohesive soil slopes under water drawdown conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11): 973.
- [10] WANG L, ZHANG G, ZHANG J. Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29: 222-232.