

DOI: 10.11779/CJGE2024S20032

# 水位涨落作用下加筋路堤稳定性研究

李丽华, 李泽升, 肖衡林\*, 漆字巍, 叶治, 李玉涛

(湖北工业大学土木建筑与环境学院河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 公路洪水水毁现象愈发频繁, 洪水引起的水位涨落对路堤有不可逆的损坏。以加筋路堤边坡为研究对象, 考虑不同土工合成材料加筋效果, 展开水位涨落模型试验, 研究不同类型路堤在水位涨落条件下的水力特征及沉降与破坏模式。试验结果表明: 水位涨落过程中, 加筋改变了加筋层附近土体的孔隙水压力与土压力变化幅度、体积含水量对水分入渗的响应速度, 不同筋材的加筋效果影响规律不同; 对比未加筋路堤, 孔隙水压力变化幅度在土工格栅加筋路堤中随水位涨、落过程逐步增大, 体积含水量在土工布加筋路堤中响应最迅速, 两者在土工复合材料加筋路堤中的变化利于路堤稳定, 综合考虑, 土工复合材料加筋效果最优; 水位下落后, 未加筋路堤斜坡发生牵引式滑移, 加筋路堤均未发生, 且加筋有效减小了路堤沉降。研究水位涨落条件下加筋路堤稳定特征对洪水水毁灾害防治具有重要意义。

**关键词:** 模型试验; 加筋路堤; 水位涨落; 孔隙水压力; 破坏模式

中图分类号: TU43; U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0001-05

作者简介: 李丽华(1978—), 女, 教授, 主要从事路基工程、加筋土、环境岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: researchmailbox@163.com。

## Stability study on reinforced embankment under action of rise and fall of water levels

LI Lihua, LI Zesheng, XIAO Henglin, QI Ziwei, YE Zhi, LI Yutao

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Key Laboratory of Health Intelligent

Perception and Ecological Restoration of River and Lake, Ministry of Education, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The highway damage due to floods is becoming more frequent, and the rise and fall of water levels caused by the floods has irreversible damage to road embankments. Taking the reinforced embankment slope as the research object, considering the reinforcing effects of different geosynthetics, the model tests on the rise and fall of water levels are carried out to investigate the hydraulic characteristics, settlement and damage modes of different types of embankments. The test results show that during the rise and fall of water levels, the reinforcement changes the pore water pressure and magnitude of change in soil pressure and the rate of response of volumetric water content to water infiltration in the soil near the reinforcement layer, and the reinforcing effects of different reinforcing materials have different impacts. Compared with that of the unreinforced embankment, the change amplitude of the pore water pressure in the geogrid-reinforced embankment increases with the process of rise and fall of water levels, and the response of the volumetric water content in the geotextile-reinforced embankment is the fastest. The change of them is beneficial to the stability of the embankment. The change in the geocomposite-reinforced embankment is favourable to the stability of the embankment, and the effect of geocomposite reinforcement are optimal. After the water level falls, traction slip occurs on the slope of the unreinforced embankment, which does not occur in the reinforced embankment, and the reinforcement effectively reduces the settlement of the embankment. It is of great significance to study the stability characteristics of the reinforced embankment under the rise and fall of water levels for the prevention and control of water damage.

**Key words:** model test; reinforced embankment; water level fluctuation; pore water pressure; failure mode

## 0 引言

多年来, 洪水暴雨已成为公路水毁的主要灾害之一。汛期洪水泛滥, 水位几经涨落极易对路堤造成损伤, 沿河路堤、蓄滞洪区路堤边坡更是饱受洪水侵袭,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278347; U22A20232); 湖北省基金创新群体项目(2024AFA009); 湖北工业大学杰出人才基金项目(XJ2021000501)

收稿日期: 2024-06-21

\*通信作者(E-mail: xiaohenglin\_0909@163.com)

路堤受水位涨落发生破坏的事件数不胜数。土工合成材料加筋土（GRS）结构在实践中有广泛的应用，此外，GRS 结构在洪水、海啸、滑坡等灾害中表现优良<sup>[1]</sup>。土工合成材料加筋可提高路堤稳定性，然而，Koerner 等<sup>[2]</sup>的调查结果表示有 60% 的 GRS 结构失效是由内部或外部水分引起的。

目前，国内外对于水位涨落条件下加筋路堤稳定性的相关研究，Ye 等<sup>[3]</sup>采用离心机模型试验，通过水位快速上升模拟突发洪水，进行公路堤坝在有无干燥裂缝情况下对突发洪水的特性研究；肖捷夫等<sup>[4]</sup>概化制作物理试验模型，模拟降雨、水位涨落，研究滑坡的变形特征与失稳机制；包小华等<sup>[5]</sup>开发研制室内模型试验系统，进行上部、侧向、底部边界渗流的边坡失稳模型试验，分析边坡破坏过程；Hatami 等<sup>[6]</sup>以土工织物加筋路堤为对象进行模型试验，发现含水量的变化对筋土界面强度有显著影响，界面越湿润，抗剪强度损失越大。关于 GRS 结构，李丽华等<sup>[7-8]</sup>研究表明土工格室加筋可有效提高路堤承载力，增强稳定性，减小沉降；双向土工格栅加筋土动力性能优于未加筋土。

综上所述，水位涨落对路堤稳定产生不利因素时，加筋抵御这些不利因素效果如何，不同类型加筋路堤水位涨落条件下影响规律如何，这些问题均亟需进一步探究。本文通过筋-土-水模型试验，研究水位涨落条件下未加筋、土工布加筋、双向土工格栅加筋、土工复合材料加筋 4 种类型路堤的水力特征和失稳过程，分析水位涨落过程中的土体孔隙水压力、土压力、体积含水量变化规律及沉降变形与破坏模式。

## 1 试验设计

采用自行研制的室内模型装置，模型箱长 1200 mm，宽 600 mm，高 950 mm，与之配套的有供水系统，采集系统（包括孔隙水压力、土压力、体积含水量传感器，位移计、数据采集仪、电脑）。

试验土体填料为砂土混合料，砂、土质量比为 6:4，不均匀系数为 5.67，曲率系数为 1.06，相对质量密度为 2.65，最大干密度为 1.97 g/cm<sup>3</sup>，最优含水率为 12.1%。

采用 3 种土工合成材料，分别为土工布、双向土工格栅和土工复合材料，土工布主要成分为聚丙烯，极限抗拉强度为 23.9 kN/m，双向土工格栅极限抗拉强度为 30 kN/m，土工复合材料由土工布与格栅状材料复合而成。

本试验模拟未加筋（W1）、土工布加筋（W2）、土工格栅加筋（W3）、复合材料加筋（W4）路堤 4

种工况在水位涨落条件下的失稳过程。水位涨落分为 3 个阶段：上涨阶段、浸泡阶段、下落阶段，当水位升至距基础底部 650 mm 时静置 1 h，随后将水位高度降至 0 mm。路堤模型地基厚 50 mm、长 1000 mm、宽 600 mm，路堤坡高 650 mm，坡度为 45°。图 1 为传感器布置示意图。

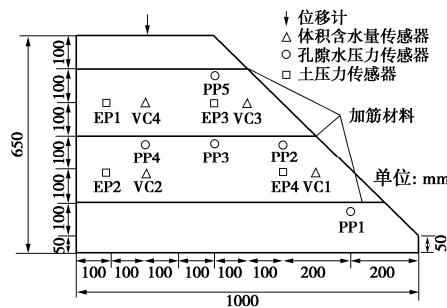


图 1 传感器布置示意图

Fig. 1 Arrangement of sensors

## 2 试验结果与分析

### 2.1 孔隙水压力

水位涨、落过程中路堤试样孔隙水压力变化曲线如图 2 所示，4 种工况下孔隙水压力变化趋势基本一致。涨水前期，随水位上涨，坡外水分向坡内渗流，孔压开始变化，并逐步增长；随后水位暂停上涨，保持定水位状态，坡内水位线向上发展速度减慢，坡内外水头差减小，渗流力减小，孔压增长速度减慢；涨水后期，水位恢复上涨，渗流力产生，孔压增长速度加快。

水位上涨阶段，孔隙水压力逐渐增大，W2 孔压变化最大，W3 次之，W4 最小，W1 与 W3 试样较为接近，孔压增长导致土体抗剪强度减小。由此可知，水位上涨条件下，复合材料加筋对加筋层附近土体的孔压增幅有所减缓，利于路堤稳定性。

土工格栅加筋对土体孔压变化的影响不是固定不变，如图 2 (a)，以测点 PP1 为例，W3 与 W1 曲线出现一个交叉点，为便于表述，将图 2 (a) 曲线交叉点前称为增长前期，交叉点后称为增长后期。增长前期，W3 试样孔压小于 W1，原因是坡外指向坡内的渗流力引起格栅材料横肋产生的被动阻力，侧向束紧加筋层附近土体，水分渗流通道受挤，渗流作用变缓，从而孔压减小。增长后期，试样内水位线穿过底部加筋层，渗流力沿斜坡向上发展，底部加筋材料上的被动阻力逐渐消失，W3 试样孔压反超 W1。此外，复合材料也具有格栅材料的横肋，增长前期，W4 试样相比 W1，孔压降幅大于增长后期。由此也可说明，格栅材料产生的被动阻力作用影响了孔压变化，而渗流力是触发被动阻力的因素。

从图 2 (a) ~ (c) 可看出, W2 试样中各测点孔压对水位变化的响应均最快。这是因为土工布具有横向导水、储水功能, 各测点处传感器均紧贴土工布下方, 水位上涨至坡中时土工布将水分从坡外横向导入坡内, 水分沿土工布渗流速度大于在土体中, 同时, 湿润的土工布导致附近土体孔压增高。W4 中各测点孔压对水位变化的响应最慢, 说明水位涨落条件下, 复合材料加筋试样抵抗水分入渗的能力优于其它三类路堤试样。另外, 图 2 (c) 中 PP5 测点, 孔压达至峰值后小幅下降, 该趋势是朝内的渗流力所导致<sup>[9]</sup>, 具体来说, 水位上涨过程引起的渗流力使孔压增大, 水位停止上涨后, 渗流力引起的孔压增幅逐渐消散, 故孔压达峰值后略降。

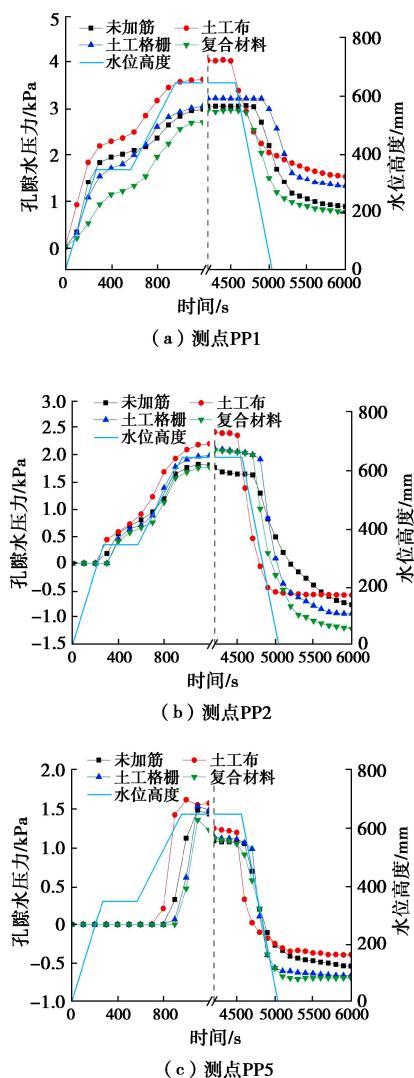


图 2 水位涨落过程中孔隙水压力变化曲线

Fig. 2 Change curves of pore water pressure during rise and fall of water levels

水位下落阶段, 与水位上涨相同, 各测点孔压对水位变化的响应均是 W2 试样率先出现。W2 中, 孔隙水压力变化相比另 3 种工况, 明显下降速度快, 下降后较先趋向稳定, 且下降后最终数值最高。原因在

于土工布的排水功能与外部环境有关, 此外部环境包括渗流力作用和土工布内的饱水程度。详细来讲, 水位下落初期, 由于土工布的透水性, 孔压响应快、下降速度快; 随坡内水分向外排出, 坡内水位线穿过各土工布加筋层, 渗流力作用逐步减轻, 同时, 土工布上方水分减少, 土工布内部后缘难以供水给前缘, 土工布内部饱水变弱、水分减少, 从而土工布的排水效果减弱。曲线图中表现为孔压下降速度减慢并趋于稳定; 孔压最终数值高, 原因在于土工布内残余的水分, 无外部环境作用, 仅靠土工布自身, 排水能力不强。

## 2.2 土压力

水位涨、落过程中路堤试样土压力变化曲线如图 3, 土压力变化规律总体与水位涨落呈正相关, 土压力随水位上涨而增大, 随水位下落而降低, 4 种工况下土压力变化趋势基本一致。土压力的大小与传感器测点位置相关, 取决于传感器上覆土水总重, 图 3 (a), (c) 表明同一水平远离斜坡的位置土压力更大。

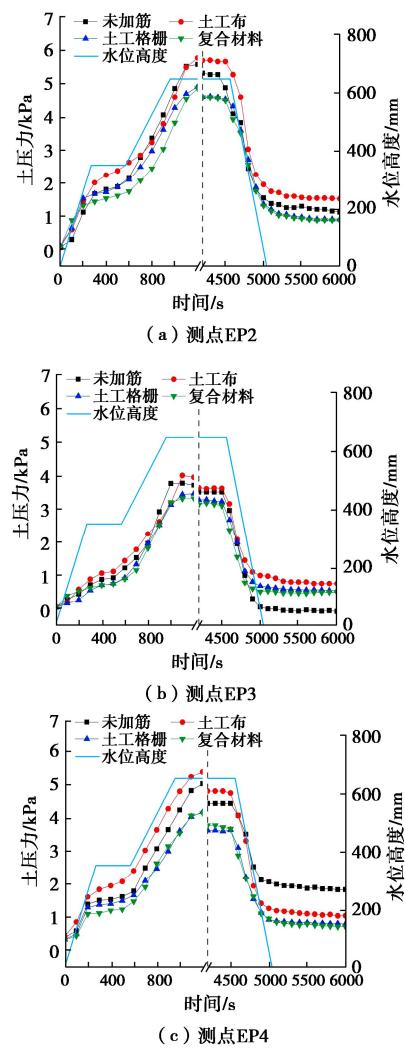


图 3 水位涨落过程中土压力变化曲线

Fig. 3 Change curves of earth pressure during rise and fall of water levels

水位上涨阶段, 坡内水位线未达到土压力传感器之前, 土压力增长来源于不均匀沉降引起应力集中; 坡内水位线浸没土压力传感器之后, 传感器上方土体容重增大的同时受到浮力作用, 此时土压力数值实际为土水总重, 其增长趋势稍减缓; 随着水位上涨到 650 mm, 土水总压力增大至峰值。

水位下落阶段, 体积含水量降低, 土体容重减小, 土体变形与沉降使上覆土层厚度减小, 土压力减小。如图 3 (b), (c), 测点 EP3 处 W1 土压力减小幅度较大, 这是因为 W1 中, 斜坡发生了滑移, 坡面发生较大变形; 测点 EP4 处 W1 土压力减小后的最终值较大, 测点 EP3、EP4 分别位于斜坡坡表前缘、后缘, 坡表后缘产生张拉裂缝, 滑块土体与坡体分离, EP3 上覆土压力减小, 产生滑移的土体堆积在坡表前缘与坡脚处, EP4 土压力降幅减小。W2 中, 除测点 EP4 因变形土压力增大明显, 其余测点土压力在水位下落后的最终值均略高, 这是因为土工布吸水后重量增加, 且水分难以排完, 故土压力略高。

### 2.3 体积含水量

水位涨、落过程中路堤试样体积含水量变化曲线如图 4, 未加筋与加筋试样体积含水量变化规律基本一致, 体积含水量整体随水位上涨而增大, 增大过程呈线性变化, 随水位下落而减小。

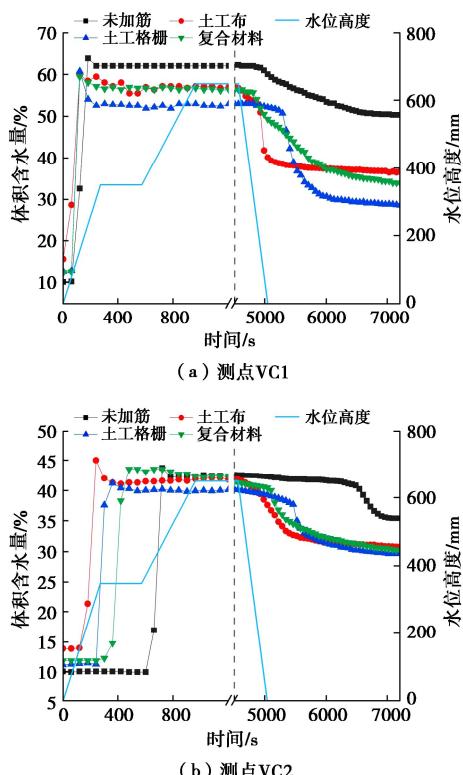


图 4 水位涨落过程中体积含水量变化曲线

Fig. 4 Change curves of in volumetric water content during rise and fall of water levels

水位上涨阶段, 4 种工况中, 体积含水量对水位上涨响应顺序均相同, 依次为 VC1、VC2、VC3、VC4。由图 4 可知, 体积含水量对水位变化的响应十分明确, 三类加筋试样体积含水量对水位上涨响应速度均快于未加筋试样, 说明加筋可以加快水分在路堤边坡内的渗流速度, 提高路堤的整体渗透性。同一测点, 不同工况中试样体积含水量对水位上涨的响应顺序为 W2、W3、W4、W1, 表明水位上涨条件下, 土工布对路堤的整体渗透性增强最大, 土工格栅次之, 复合材料最弱。

水位下落阶段, 体积含水量整体随水位下落而减小, 并逐渐趋于稳定, 减小过程呈非线性变化。4560s 时, 水位下落, 各测点体积含水量变化均滞后于水位变动, 同一测点不同工况试样对水位下落的响应顺序均为 W2、W4、W3、W1, 说明加筋能够加快路堤的排水速度。未加筋试样发生牵引式滑移, 土体堆积在斜坡前缘, 导致路堤内水难以排出, 故未加筋试样测点 VC1、VC2 数值变化明显偏慢。

### 2.4 沉降

图 5 为水位涨落下不同类型路堤沉降, 水位上涨时, 渗流力指向坡内并逐渐向上发展, 对坡体有沿斜坡向上的作用, 路堤几乎无沉降。水位抬升至坡顶后保持不变, 坡内体积含水量达到上限, 土体被软化且容重增加, 由于自重增大坡顶产生沉降, 但在定水位对土体向上的浮托减重作用下, 沉降呈缓慢增加趋势。水位下落时, 一方面, 渗流力指向坡外, 对坡内土体有向外的拉应力, 另一方面, 上阶段定水位的浮托减重作用抵消了土体软化对路堤带来的部分不利影响, 这部分不利影响在水位下落阶段被重新体现, 表现为沉降增大, 在这两方面的作用下, 沉降呈迅速增加趋势。

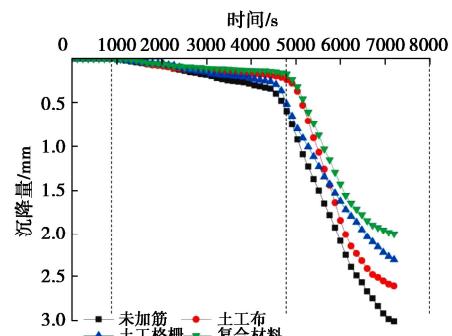


图 5 水位涨落下不同类型路堤沉降变化图

Fig. 5 Change in settlement of different types of embankments during rise and fall of water levels

由图 5 可得, 加筋可有效减小沉降, W4 沉降最小, 最终累计沉降为 2 mm 左右, 相比 W1 减小了 34.1%, W3 效果次之, 减小 23.2%, W2 效果最弱,

减小 13.3%。

水位下落阶段, 初期 W3 沉降量大于 W2, 随坡内水分外排, 末期 W3 沉降量小于 W2。当坡外水位下落至 0 mm, 由于滞后效应, 此时边坡内外水位差达到最大, 即此时向外的渗流力作用最明显, 筋土之间发生相对位移, 土工格栅横肋产生与渗流力方向相反的被动阻力, 从而减小位移, 这是水位下落末期土工格栅加筋作用比土工布显著的原因。

### 3 结 论

本文通过模型试验模拟水位涨落对不同类型加筋路堤边坡稳定的影响, 分析了孔隙水压力、土压力、体积含水量、沉降对水位涨落的响应规律, 以及斜坡的破坏模式, 得出以下 4 点结论。

(1) 土工布加筋路堤整体渗透性最大, 土工布的透水性加快了水分运移, 在水位下落时可加快水分的排出、孔隙水压力的消散。

(2) 土工格栅加筋路堤稳定性较强, 土工格栅抗拉强度大, 抵抗变形能力强, 由孔隙水压力与沉降变形的分析可知, 其加筋作用在水位下落过程中逐步增强。

(3) 复合材料加筋路堤渗透性、稳定性均较好, 复合材料兼顾适中的导水能力和加筋作用。相比未加筋路堤, 复合材料加筋减小沉降量 34.1%, 加筋效果最好, 土工格栅加筋减小 23.2%, 土工布加筋减小 13.3%。

(4) 水位涨落后, 未加筋路堤斜坡出现牵引式滑移, 加筋路堤整体稳定保持较好, 土工格栅、复合材料加筋能有效阻止牵引式滑移的发生, 相比这两者, 土工布加筋路堤存在发生牵引式滑移的风险。

### 参考文献:

- [1] YANG K H, WU H M, TSENG T L, et al. Model tests of geosynthetic-reinforced soil walls with marginal backfill subjected to rainfall[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, **51**(2): 342-359.
- [2] KOERNER R M, KOERNER G R. A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **40**: 20-27.
- [3] YE W, HU J, MA F H. Centrifuge model study on the influence of desiccation cracks on the seepage behavior of upstream clay anti-seepage system subjected to abrupt flood[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, **80**(6): 5075-5090.
- [4] 肖捷夫, 李云安, 胡 勇, 等. 库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(2): 471-480. (XIAO Jiefu, LI Yunan, HU Yong, et al. Model tests on deformation characteristics of ancient bank landslide under water level fluctuation and rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(2): 471-480. (in Chinese))
- [5] 包小华, 廖志广, 徐长节, 等. 不同渗流边界条件下粉砂边坡失稳模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3789-3796. (BAO Xiaohua, LIAO Zhiguang, XU Changjie, et al. Model test study of the failure of silty sand slope under different seepage boundary conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3789-3796. (in Chinese))
- [6] HATAMI K, ESMALI D, CHAN E C, et al. Moisture reduction factors for shear strength of unsaturated reinforced embankments[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(6): D4016001.
- [7] 李丽华, 秦浪灵, 肖衡林, 等. 加筋建筑垃圾土大型动三轴试验及加筋机制探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(8): 1682-1695. (LI Lihua, QIN Langling, XIAO Henglin, et al. Large dynamic triaxial test study on reinforcement mechanisms of reinforced construction waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(8): 1682-1695. (in Chinese))
- [8] 李丽华, 石安宁, 肖衡林, 等. 加筋土挡墙静载模型试验及其力学性能研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(12): 4360-4368. (LI Lihua, SHI Anning, XIAO Henglin, et al. Model test and mechanical properties study of reinforced earth retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(12): 4360-4368. (in Chinese))
- [9] KIM M S, ONDA Y, UCHIDA T, et al. Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: Case study including an experimental sandy slope with artificial rainfall[J]. CATENA, 2018, **161**: 50-62.

(编校: 孙振远)