

## 极端降雨条件下土工合成材料加筋土桥台稳定性分析

黄强强, 任非凡

### Stability analysis of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments under extreme rainfall conditions

HUANG Qiangqiang and REN Feifan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412025>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析

Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics

李晋鹏, 汪磊, 王俊, 陈洋, 徐永福 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 29-36

#### 建房切坡条件下边坡稳定性分析

Analysis of slope stability under the condition of cutting for house-building

杜显祥, 房浩, 曹佳文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 40-47

#### 降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40-46

#### 基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

#### 岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测

Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province

王琦, 胡亚净, 宋伟利, 穆启超 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 75-84

#### 模糊数学评判和数值模拟相结合的土质边坡稳定性综合评价

Integrated assessment of soil cutting slope stability using fuzzy mathematics and numerical simulation

王崇敬, 张龙, 刘国伟 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 69-76



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412025

黄强强, 任非凡. 极端降雨条件下土工合成材料加筋土桥台稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 78-86.

HUANG Qiangqiang, REN Feifan. Stability analysis of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments under extreme rainfall conditions[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 78-86.

# 极端降雨条件下土工合成材料加筋土桥台稳定性分析

黄强强<sup>1</sup>, 任非凡<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 土木工程防灾减灾全国重点实验室(同济大学), 上海 200092)

**摘要:** 土工合成材料加筋土桥台因其造价低廉、施工便捷和绿色低碳的特点, 在道路交通工程中具有广泛的应用潜力。然而, 近年来极端降雨事件频发, 对桥台的变形与稳定性造成了显著影响。采用模型试验与数值模拟相结合的方法, 系统分析了极端降雨条件下桥台在交通荷载作用下的力学行为。研究表明, 基于 DBLEAVES-X 建立的数值计算模型能够准确模拟降雨入渗条件下桥台的力学响应, 验证了其在非饱和土力学分析中的可靠性。参数分析结果显示, 降雨强度和填料渗透系数对桥台的稳定性具有显著影响。采用渗透系数为  $1.0 \times 10^{-2}$  cm/s 的高渗透性填料可以显著增强桥台的抗降雨稳定性, 即使在 200 mm/h 的极端降雨条件下, 桥台的稳定性仍接近未降雨工况。当填料渗透系数为  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s 或  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s 时, 降雨可能导致孔隙水压力迅速积累, 引发土体膨胀变形, 显著加剧桥台的变形和失稳风险。因此, 在实际工程设计中, 应优先选用渗透性能良好的填料, 优化排水系统设计, 并采取针对性防护措施, 以提高桥台在复杂环境条件下的长期稳定性和安全性。

**关键词:** 土工合成材料加筋土桥台; 极端降雨; 交通荷载; 渗透系数; 稳定性分析

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2025)02-0078-09

## Stability analysis of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments under extreme rainfall conditions

HUANG Qiangqiang<sup>1</sup>, REN Feifan<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Geosynthetic-reinforced soil (GRS) abutments have demonstrated significant potential in road and transportation engineering due to their cost-effectiveness, ease of construction, and eco-friendly characteristics. However, the increasing frequency of extreme rainfall events in recent years has significantly impacted on the deformation and stability of these structures. This study systematically evaluated the performance of GRS abutments under traffic loads and extreme rainfall conditions through model tests and numerical analysis. The findings indicate that the numerical model developed with the DBLEAVES-X program can accurately simulate the mechanical response of GRS abutments under conditions of rainfall infiltration, confirming its reliability in the analysis of unsaturated soil mechanics. Parameter analysis reveals that

收稿日期: 2024-12-16; 修订日期: 2025-01-12

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 上海浦江人才计划项目(23PJD101); 国家自然科学基金项目(41877224); 中央高校基本科研业务费项目

第一作者: 黄强强(1993—), 男, 安徽芜湖人, 地质资源与地质工程专业, 博士研究生, 主要研究方向为加筋土结构。

E-mail: [huangqq@tongji.edu.cn](mailto:huangqq@tongji.edu.cn)

通讯作者: 任非凡(1980—), 男, 山西运城人, 地质工程专业, 博士, 副教授, 主要研究方向为地质灾害防治、加筋土结构等。

E-mail: [feifan\\_ren@tongji.edu.cn](mailto:feifan_ren@tongji.edu.cn)

rainfall intensity and the permeability coefficient of the backfill significantly influence the abutment's resistance to rainfall. Using high-permeability backfill with a permeability coefficient of  $1.0 \times 10^{-2}$  cm/s can significantly enhance the abutment's resistance to rainfall, maintaining stability even under extreme rainfall conditions of 200 mm/h. In contrast, a permeability coefficient of  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s or  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s may lead to rapid accumulation of pore water pressure, causing soil swelling deformation and substantially increasing the risk of deformation and instability of the abutment. Therefore, it is advisable in practical engineering design to prioritize high-permeability backfill materials, optimize drainage system designs, and implement specific protective measures to enhance the long-term stability and safety of the GRS abutments under complex environmental conditions.

**Keywords:** GRS abutments; extreme rainfall; traffic load; permeability coefficient; stability analysis

## 0 引言

土工合成材料加筋土 (geosynthetic-reinforced soil, GRS) 桥台技术因施工便捷、成本低廉、绿色环保和有效缓解桥头跳车问题等优点, 自问世以来在中小型桥梁建设中得到了快速推广<sup>[1]</sup>。尤其是 GRS 一体化桥台 (GRS-IBS) 技术的引入, 进一步推动了该技术的发展与应用<sup>[2]</sup>。因其采用了较小的加筋间距 (通常  $\leq 0.3$  m) 和高压实度填料, GRS 桥台表现出卓越的抗变形能力和承载性能, 能够很好地满足中小型桥梁的建设需求<sup>[3]</sup>。然而, 近年来频发的极端降雨事件 (如郑州“7·20”特大暴雨) 表明, 降雨可能对 GRS 桥台的稳定性构成严重威胁, 值得进一步研究<sup>[4]</sup>。

现有关于 GRS 桥台的研究主要集中于静态和动态加载条件下的性能分析, 研究方法包括现场监测、数值模拟和模型试验等。在静力研究方面, 研究者们探讨了加筋间距、筋材刚度以及填料特性等因素对 GRS 桥台承载能力和变形性能的影响<sup>[5-7]</sup>; 在动力研究方面, 则聚焦于地震和交通荷载下桥台的抗震性能及累计变形<sup>[8-10]</sup>。对于环境因素的影响, 现有研究多聚焦于温度波动和水位变化<sup>[11]</sup>, 而在降雨影响方面, 研究对象也大多集中于加筋土挡墙<sup>[12-13]</sup>。相比之下, 针对降雨入渗对 GRS 桥台稳定性的研究仍较为有限。尽管相关设计规范明确要求 GRS 桥台在建造过程中应选用排水性能优良的填料, 以减少降雨对结构稳定性的影响<sup>[14]</sup>, 但工程实践表明, 即使采用粗粒填料并设置滤排系统, 在长期服役过程中, 受降雨或坡面径流等作用影响, 细粒土仍可能侵入并填充粗粒土孔隙, 从而削弱排水性能并形成恶性循环, 进一步威胁结构的稳定性<sup>[15]</sup>。

本研究旨在系统分析极端降雨入渗条件下 GRS 桥台的力学行为和稳定性, 重点探讨填料排水性能和降雨强度对桥台稳定性的影响, 为优化设计和施工提供一定的参考和借鉴。

## 1 模型试验及数值模拟

### 1.1 模型试验

本次模型试验在同济大学地下建筑与工程系地质灾害模型试验平台上进行。该平台配备一个大型模型箱和一套全自动液压伺服控制加载系统。模型箱的尺寸为 4 m (长)  $\times$  1.5 m (宽)  $\times$  2 m (高), 加载系统可施加最大 200 kN 的静/动荷载, 动荷载的最高加载频率为 20 Hz。本次模型试验选取高度为 3 m 的 GRS 桥台作为研究原型, 该高度符合实际工程中的常见应用<sup>[16]</sup>。基于模型箱尺寸和原型桥台高度, 确定本次模型试验相似比  $N=2$ , 对应模型桥台的高度为 1.5 m。桥台模型加筋层数设置为 10 层, 每层间距为 0.15 m, 对应至实际为 0.3 m, 满足 GRS 复合体的设计要求。为模拟桥台上部结构与桥台的接触, 在桥台顶部距面板 0.2 m 处放置了一块宽 0.5 m 的加载板。试验过程中, 通过线性可变差动位移传感器 (LVDT)、拉线位移计、土压力传感器和应变片对桥台的变形、土压力分布以及筋材应变进行监测。桥台模型的具体结构及传感器布置如图 1 所示。

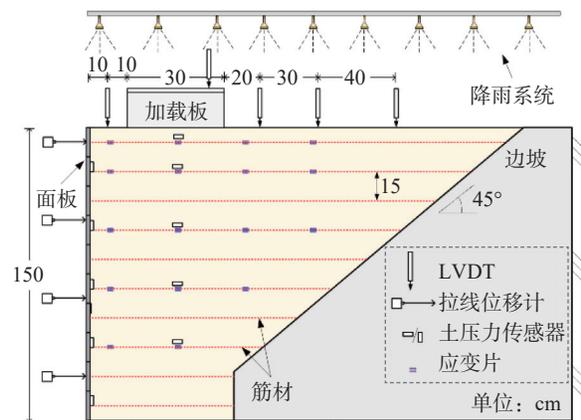


图 1 GRS 桥台模型及传感器分布图

Fig. 1 GRS abutment model and sensors distribution diagram

根据美国联邦公路管理局的相关设计规范<sup>[14]</sup>,

GRS 桥台填料应选用级配良好或开级配的材料,以保证良好的排水性能。尽管级配良好的填料具有更优越的力学性能,开级配填料因其在高水分条件下表现出的优异排水能力而在实践中更为常用<sup>[17]</sup>。鉴于本次试验需要考虑极端降雨的情况,故选择开级配的纯净石英砂作为桥台模型填料,其级配曲线如图 2 所示,中值粒径  $D_{50}=2\text{ mm}$ 。通过渗透试验测得其渗透系数为  $k=1.0\times 10^{-2}\text{ cm/s}$ 。该填料的其他力学参数通过室内试验获取,具体列于表 1。加筋材料采用聚丙烯(PP)单向土工格栅。根据单条拉伸试验结果,该材料在 2% 应变条件下的抗拉强度为 500 kN/m。GRS 桥台的面板系统选用柔性结构,由 2 种尺寸的预制混凝土板拼接而成,板厚均为 20 mm,高度为 150 mm,长度分别为 100 mm 和 200 mm。通过错峰拼接的方式,有效提升了面板系统的整体稳定性。

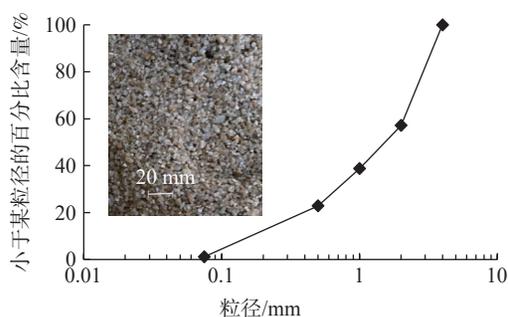


图 2 填料级配曲线

Fig. 2 Baill Particle size gradation curve

表 1 填料物理力学试验参数

Table 1 Physical mechanical test parameters of backfill

最大干密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最小干密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比重	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	渗透系数 /( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1.768	1.373	2.64	0	45	$1.0\times 10^{-2}$

安装在 GRS 桥台模型顶部的降雨系统由直径 20 mm 的水管和多个可调节雾化喷头组成,水管连接至压力水源,可实现不同强度的人工降雨。鉴于本次填料具有良好的透水性能,为深入探究极端降雨条件对 GRS 桥台稳定性的影响,本试验选取郑州“7·20”特大暴雨的峰值降雨强度(约 200 mm/h)<sup>[18]</sup>,并在正式施加荷载前进行 1 h 的持续降雨模拟。试验的荷载分为静荷载和动荷载两部分。静荷载用于模拟 GRS 桥台的上部结构自重,依据工程经验确定其值为 300 kPa<sup>[19]</sup>,对应模型试验为 150 kPa。动荷载主要源于车辆荷载,依据《城市桥梁设计规范》<sup>[20]</sup>,考虑最不利情况下双车道同时承载 145 kN 的车辆荷载,换算至模型试验,加载板需承载荷载约为 17.5 kPa。动荷载采用正弦波形式加载,

加载频率为 2 Hz,循环次数为 5 000 次。2 种荷载的组合方式为先施加静荷载,再在其基础上叠加动荷载。

## 1.2 数值模拟

本研究采用了土-水-气三相耦合有限元分析程序 DBLEAVES-X 来模拟非饱和土的动力学行为。DBLEAVES-X 是基于原有 DBLEAVES 程序开发的扩展版本,专为解决非饱和土问题设计。该程序通过引入 Xiong 等<sup>[21]</sup>提出的非饱和土弹塑性本构模型,结合土水特征曲线(SWCC)对土体有效应力和饱和度的变化进行描述,从而实现了非饱和土在复杂动力条件下的力学行为模拟,有关数值程序的具体说明,可参考文献<sup>[22]</sup>。

数值模拟中,GRS 桥台模型的尺寸与实际工况保持一致,建立了高度为 3 m 的有限元计算模型。由于桥台可视为平面应变问题,因此采用二维有限元模型进行分析。模型包括填料单元、边坡单元、面板单元、加载板单元和筋材单元,各单元网格以不同颜色区分(图 3)。在计算模型中,筋材单元采用梁单元模拟,其余单元均采用实体单元。其中,土体单元共 1 680 个,采用 Cyclic Mobility 本构模型;面板单元 52 个、边坡单元 210 个及加载板单元 10 个,均采用弹性本构模型;筋材单元共 450 个,采用线弹性本构模型。各单元所对应的参数详见表 2。由于 GRS 复合体中筋材间距较小,筋材与土体协同作用形成整体,因此模型中未设置筋材与土体的界面。

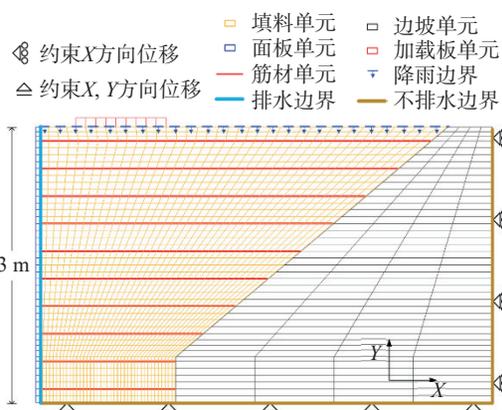


图 3 GRS 桥台有限元网格

Fig. 3 FEM model mesh of GRS abutment

位移边界和渗流边界的设置与模型试验保持一致。在位移边界条件中,模型底部完全约束水平和竖直方向的位移,后侧仅约束水平位移。渗流边界条件方面,桥台模型顶部设为雨水入渗边界,用以模拟不同降雨工况。由于桥台采用柔性面板系统,实际工程中面板缝隙具备透水性,因此数值模型左边界(面板)设置为渗

表 2 数值计算中各材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of materials used in numerical analysis

材料	参数	取值
填料	压缩指数	0.01
	回弹指数	0.001
	泊松比	0.3
	临界应力比	5.2
	正常固结线上的参考孔隙比	0.628
	超固结性参数	0.1
	结构性参数	1.5
	各向异性参数	1
面板	弹性模量/(kN·m <sup>-1</sup> )	2.0×10 <sup>2</sup>
	泊松比	0.3
边坡	弹性模量/(kN·m <sup>-1</sup> )	1.6×10 <sup>5</sup>
	泊松比	0.3
加载板	弹性模量/(kN·m <sup>-1</sup> )	9.9×10 <sup>9</sup>
	泊松比	0.3
筋材	弹性模量/(kN·m <sup>-1</sup> )	500

流边界(如图 3 中蓝色线条所示), 表示雨水可从该边界自由渗流。底部及右侧边界则设置为不透水边界(如图 3 中棕色线条所示), 表示雨水无法流出。此外, 在加载板单元顶部施加与模型试验一致的交通荷载, 竖向荷载为 35 kPa, 采用正弦加载形式(1.4 Hz, 5 000 次循环)。

## 2 结果对比验证

图 4 详细展示了降雨入渗条件下, GRS 桥台在交通荷载作用下沿高度方向的水平位移分布情况, 其中黑色实线和红色虚线分别表示模型试验与数值模拟的结果。尽管 2 组结果均显示变形主要集中在桥台的上半

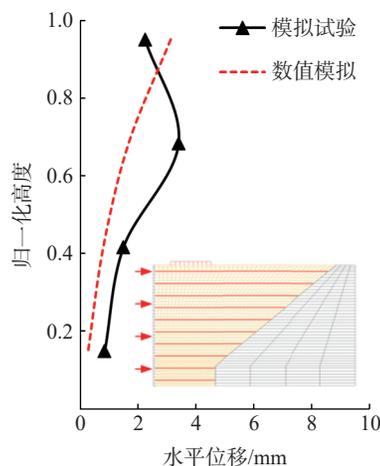


图 4 模型试验与数值模拟水平位移结果对比

Fig. 4 Comparison of horizontal displacement results between model test and numerical simulation

注: 归一化高度等于距桥台底部高度( $Z$ )与桥台高度( $h$ )之比。

部分, 但其变形模式仍存在一定差异。模型试验中 GRS 桥台呈现出鼓胀变形的特征, 最大变形出现在距其顶部约三分之一处; 而数值模拟结果则表现为倾覆变形, 水平位移沿高度方向逐渐增大。这种差异的主要原因是模型试验中顶部面板发生了局部倾覆和分离(图 5), 而数值模拟中面板与土体单元保持紧密接触, 因此难以还原模型试验结果。尽管如此, 两组结果的最大水平位移值接近, 均为约 3 mm, 远低于规范允许的桥台高度 2% 的限值(本试验中为 60 mm)<sup>[14]</sup>。

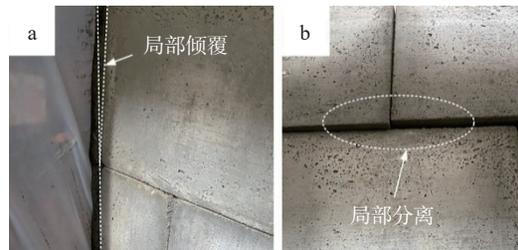


图 5 桥台顶部面板

Fig. 5 Local overturning

注: a 为局部倾覆; b 为局部分离。

沿桥台顶部分布的竖向沉降结果如图 6 所示, 数值模拟与模型试验的结果吻合良好, 几乎一致。仅在靠近面板的位置处, 数值模拟结果略大于模型试验结果, 这与水平变形的差异有关(图 4)。竖向沉降主要集中在加载板正下方, 而加载板后方的变形则不显著。两组试验的最大竖向沉降均约为 10 mm, 远低于规范允许的桥台高度 1% 的限值(本试验中约为 30 mm)<sup>[14]</sup>。由此可见, 即使在降雨入渗条件下, GRS 桥台仍表现出良好的稳定性。

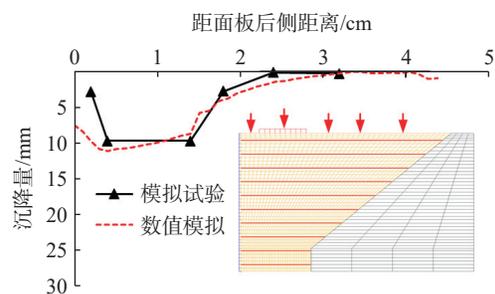


图 6 模型试验与数值模拟顶部沉降结果对比

Fig. 6 Comparison of top settlement results between model tests and numerical simulations

竖向土压力沿深度方向的分布情况如图 7 所示, 数值模拟与模型试验在分布规律上几乎一致。随着深度增加, 由交通荷载引起的竖向土压力增量逐渐减小。尽管数值模拟结果略小于模型试验结果, 但误差在可接受

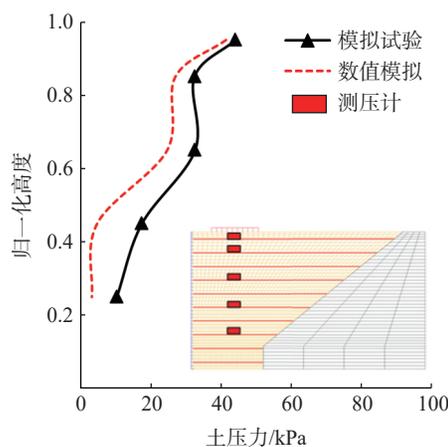


图 7 模型试验与数值模拟土压力分布结果对比

Fig. 7 Comparison of soil pressure distribution results between model test and numerical simulation

的限度之内。

综上所述,数值模拟计算程序 DBLEAVES-X 能够较为准确地模拟 GRS 桥台在降雨入渗条件下受交通荷载作用时的变形、沉降及土压力分布。这不仅验证了模拟方法的有效性,也为进一步深入研究提供了可靠依据。

### 3 参数分析

#### 3.1 变形分析

为了进一步研究不同降雨强度和填料渗透系数对 GRS 桥台稳定性的影响,本研究设计并实施了 10 组数值模拟试验,其具体工况如表 3 所示。在工况 1—工况 4 中,填料渗透系数设为  $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ,与模型试验一致。其中,工况 1 作为基本对照组未考虑降雨情况,其余三组则分别设置了不同的降雨强度,包括 2, 20,

表 3 不同渗透系数与降雨强度组合的数值模拟工况设置

Table 3 Numerical simulation settings for different combinations of permeability coefficients and rainfall intensities

工况	渗透系数 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	降雨强度 ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	降雨时间 /h	降雨总量 /mm
工况1		0	—	—
工况2	$1.0 \times 10^{-2}$	2	100	200
工况3		20	10	200
工况4		200	1	200
工况5	$1.0 \times 10^{-3}$	2	100	200
工况6		20	10	200
工况7		200	1	200
工况8	$1.0 \times 10^{-4}$	2	100	200
工况9		20	10	200
工况10		200	1	200

200 mm/h, 对应的降雨时长为 100, 10, 1 h, 以确保总降雨量均为 200 mm。三种降雨强度对应于实际情况中的长时间小雨、中等强度降雨和短时间内的极端暴雨。考虑到 GRS 桥台在长期服役期间,填料可能因颗粒破碎或地表细颗粒随雨水渗入土体内部等因素导致渗透系数逐渐降低,本研究进一步探讨了填料渗透系数分别降低至  $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  和  $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  的影响。这些情况对应工况 5—工况 10,降雨条件与工况 2—工况 4 保持一致,仅调整填料的渗透系数。所有工况均在降雨结束后立即施加交通荷载。

各工况条件下 GRS 桥台的水平位移和顶部沉降如图 8 所示。研究发现,渗透系数和降雨强度的变化对桥台在交通荷载作用下的稳定性影响显著。当填料渗透系数较大(与模型试验中的渗透系数  $k=1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  保持一致)时,尽管降雨强度从 2 mm/h 增加至 200 mm/h,对桥台的变形影响几乎可以忽略不计。在此条件下,桥台的水平位移和顶部沉降与未降雨对照组(工况 1)的结果基本一致,如图 7(a)(b)所示。这表明,在高渗透性土体中,降雨对桥台稳定性的影响较小。原因在于高渗透性土体具有良好的排水性能,能够迅速将雨水排出土体,防止孔隙水压力的显著累积。即使在极端降雨强度(200 mm/h)的情况下,内部未形成显著的孔隙水压力,因此桥台变形保持在较低水平。

当填料渗透系数降低至  $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  时,降雨对 GRS 桥台变形的影响开始显现。如图 7(c)(d)所示,在 2 mm/h 和 20 mm/h 的降雨强度下,桥台的变形差异不大。然而,在 200 mm/h 的极端降雨条件下,桥台的水平位移和顶部沉降显著增加。这表明,在渗透系数较低的情况下,尽管桥台在长时间小雨和中等强度降雨下仍表现出一定稳定性,但在短时间的极端暴雨条件下,其稳定性显著下降。

当填料渗透系数进一步降低至  $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  时,降雨的影响变得更加显著。在 200 mm/h 极端降雨强度下,仅 13 min 后桥台即发生网格破坏,导致计算程序无法收敛,未能输出变形结果。在长时间小雨和中等强度降雨条件下,桥台变形结果也有显著差异,其中 GRS 桥台在 20 mm/h 的降雨强度下产生的变形显著大于 2 mm/h。这表明在低渗透系数条件下,即使是中等强度的降雨也会对 GRS 桥台稳定性产生较大影响。

综上所述,渗透系数和降雨强度是影响 GRS 桥台稳定性的关键因素。在使用高渗透性填料的情况下,GRS 桥台排水性能良好,降雨对其稳定性影响较小;随着填料渗透系数的降低,雨水对 GRS 桥台稳定性的削弱越

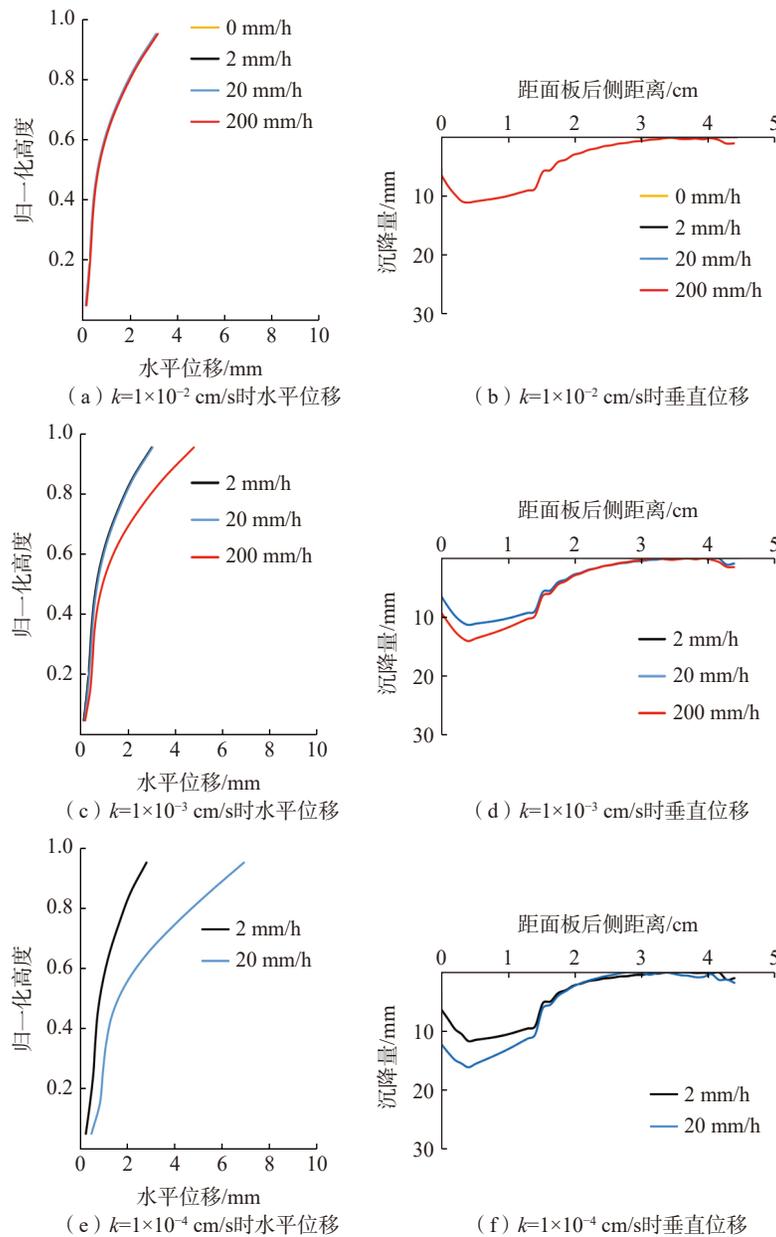


图 8 不同降雨条件下 GRS 桥台的水平位移和竖向沉降

Fig. 8 Horizontal displacement and vertical settlement of the GRS abutment under different rainfall conditions

来越明显,尤其是在较低渗透系数和极端降雨的组合条件下甚至可能导致桥台失稳。因此实际工程中应根据桥台填料的渗透特性和当地降雨条件优化排水设计,以提高 GRS 桥台的抗雨水冲击能力并确保其长期稳定性。

### 3.2 孔隙水压力分析

造成上述 GRS 桥台变形差异的主要原因是降雨引起桥台内部孔隙水压力的变化<sup>[23]</sup>。图 9 展示了在降雨强度为 20 mm/h 且持续 10 h 的中等强度降雨条件下,不同渗透系数下的孔隙水压力分布情况。结果表明,随着渗透系数的减小,由降雨引起的孔隙水压力增量显著增加。当渗透系数为  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s 时,最大孔隙水压力

达到 0.88 kPa。而当渗透系数为  $1.0 \times 10^{-2}$  cm/s 和  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s 时,孔隙水压力的变化较小,均不超过 0.1 kPa,几乎可以忽略。这一结果合理解释了工况 9(降雨强度为 20 mm/h,渗透系数为  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s)中 GRS 桥台变形显著增大的原因。相比之下,在渗透系数为  $1.0 \times 10^{-2}$  cm/s 和  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s 的情况下,由于孔隙水压力增量较小,桥台变形几乎无显著差异。这进一步表明,在填料渗透性较低的情况下,雨水更容易滞留于桥台内部,导致孔隙水压力迅速升高,从而对桥台稳定性产生更加不利的影响。

为进一步探讨降雨对 GRS 桥台稳定性的影响,尤

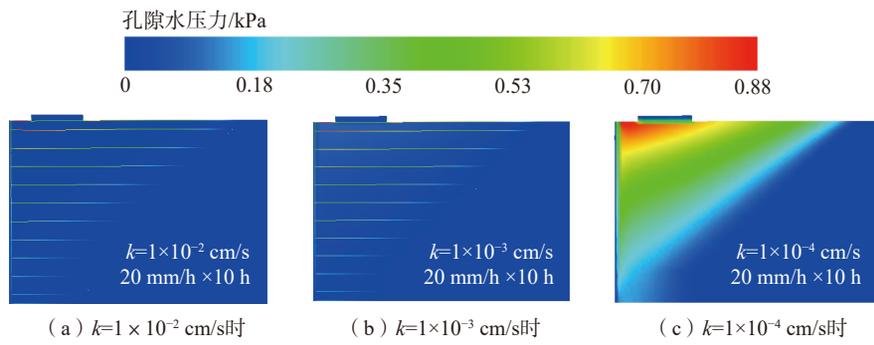


图 9 不同渗透系数桥台在 20 mm/h 降雨条件下的孔隙水压力变化

Fig. 9 Changes in pore water pressure in abutments with different permeability coefficients under 20 mm/h rainfall intensity

其是极端降雨对低渗透性桥台的潜在危害,图 10 展示了在 200 mm/h 极端降雨条件下渗透系数为  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s 的低渗透性桥台内部孔隙水压力随时间的变化规律。结果表明,在降雨强度较大的情况下,孔隙水压力增长速度极快,仅 13 min 即达到 4.78 kPa,随后即发生破坏。从图 10(b)可以看出,由于降雨强度过大,雨水无法及时下渗,主要集中于坡顶区域,这是导致孔隙水压

力快速升高的主要原因。GRS 桥台在极限状态下的变形结果如图 11 所示,孔隙水压力的迅速升高引发土体的膨胀变形,尤其是靠近面板顶部区域,水平向外的变形可达 44 mm。这种较大的膨胀变形表明土体内部出现拉应力,在拉应力作用下土体极易发生破坏,导致数值计算模型在交通荷载尚未施加前便因网格破坏而破坏。上述结果直接反映了实际工况中桥台因极端降雨

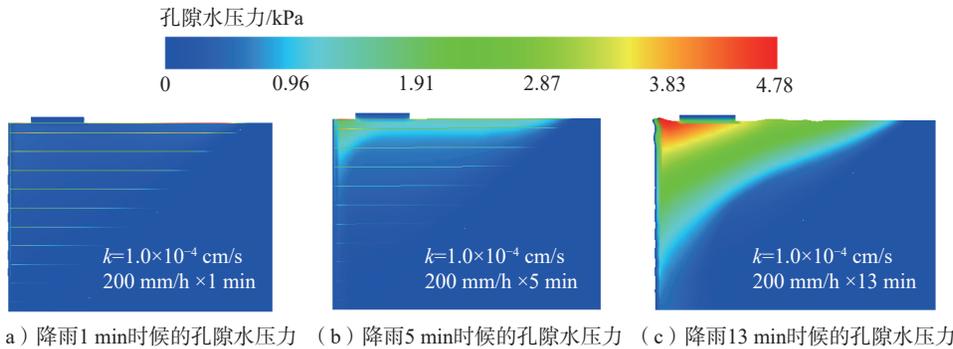


图 10 低渗透性 GRS 桥台在极端降雨条件下孔隙水压力随时间的变化

Fig. 10 Changes in pore water pressure over time in low-permeability GRS abutments under extreme rainfall conditions

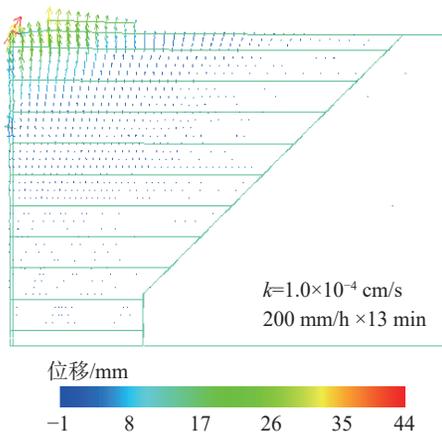


图 11 GRS 桥台在极端降雨条件下的变形

Fig. 11 Deformation of the GRS abutment under extreme rainfall conditions

导致局部破坏的现象<sup>[24-26]</sup>。

综合分析表明,降雨强度和填料渗透性能是影响 GRS 桥台稳定性的关键因素。在工程实践中,应严格按照规范要求选用排水性能良好的填料,同时还要优化桥台排水设计,必要时需采取防护措施以应对极端降雨情况。

#### 4 结论

(1) DBLEAVES-X 所建立的数值计算模型能够较为准确的模拟降雨入渗条件下 GRS 桥台在交通荷载作用下的力学行为。数值模拟结果与模型试验数据吻合较好,不仅验证了程序在非饱和土力学行为分析中的有效性,也为后续进一步研究提供了可靠的工具与依据。

(2)采用高渗透性填料可显著提升 GRS 桥台的抗降雨失稳能力。研究表明,当采用渗透系数为  $1.0 \times 10^{-2}$  cm/s 的填料时,即使在 200 mm/h 极端降雨条件下,GRS 桥台仍表现出与未降雨工况相当的稳定性。良好的排水性能使得雨水能够迅速排出,避免孔隙水压力积累,从而有效抑制桥台变形。

(3)孔隙水压力的快速升高是导致低渗透性 GRS 桥台失稳破坏的关键因素。在渗透性能较低的填料条件下,例如渗透系数为  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/s 或  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/s, 200 mm/h 的极端降雨会显著增加孔隙水压力,导致桥台水平位移和沉降显著增大,甚至诱发土体膨胀变形,最终导致结构失稳破坏。因此,工程设计中应充分考虑填料的渗透性,优化桥台排水系统,并强化极端降雨条件下的防护措施,以确保 GRS 桥台的长期稳定性和安全性。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] ABU-HEJLEH N, ZORNBERG J G, WANG T, et al. Monitored displacements of unique geosynthetic-reinforced soil bridge abutments [ J ] . *Geosynthetics International*, 2002, 9(1): 71 – 95.
- [ 2 ] ADAMS M T, SCHLATTER W, STABILE T. Geosynthetic reinforced soil integrated abutments at the bowman road bridge in defiance county, Ohio [ C ] // *Geosynthetics in Reinforcement and Hydraulic Applications*. Denver, Colorado, USA. American Society of Civil Engineers, 2007: 1-10.
- [ 3 ] ADAMS M, NICKS J, STABILE T, et al. Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system [ C ] // *EuroGeo4 Paper 2011*(271).
- [ 4 ] 任非凡,何江洋.加筋土结构动力特性研究现状综述 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(4): 120 – 129. [ REN Feifan, HE Jiangyang. Research status review on dynamic properties of reinforced earth structure [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(4): 120 – 129. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 徐超,金宇,杨阳,等.路面荷载下包裹式加筋土桥台变形的试验研究 [ J ] . *岩土力学*, 2023, 44(增刊1): 410 – 418. [ XU Chao, JIN Yu, YANG Yang, et al. Experimental study of deformation of mixed reinforced soil abutment under pavement load [ J ] . *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(Sup 1): 410– 418. (in Chinese) ]
- [ 6 ] GEBREMARIAM F, TANYU B F, CHRISTOPHER B, et al. Evaluation of vertical stress distribution in field monitored GRS-IBS structure [ J ] . *Geosynthetics International*, 2020, 27(4): 414 – 431.
- [ 7 ] ZHAO Chongxi, XU Chao, WANG Qingming. Centrifuge model studies on the load-bearing characteristics of geosynthetic-reinforced soil abutment [ C ] // *Engineering Geology for a Habitable Earth: IAEG XIV Congress 2023 Proceedings*, Chengdu, China. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 875 – 883.
- [ 8 ] 王裘申,徐超,张振,等.交通荷载下加筋土桥台工作性能试验研究 [ J ] . *岩土力学*, 2022, 43(12): 3416 – 3425. [ WANG Qiushen, XU Chao, ZHANG Zhen, et al. Experimental study on service performance of reinforced soil abutment subjected to traffic loads [ J ] . *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12): 3416 – 3425. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] XU Chao, LUO Minmin, SHEN Panpan, et al. Seismic performance of a whole Geosynthetic Reinforced Soil-Integrated Bridge System (GRS-IBS) in shaking table test [ J ] . *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3): 315 – 330.
- [ 10 ] JIA Yafei, ZHANG Jun, TONG Lihong, et al. Cumulative deformation behavior of GRS bridge abutments under cyclic traffic loading [ J ] . *Geosynthetics International*, 2025, 32(1): 94 – 108.
- [ 11 ] 孟亚,徐超,赵崇熙,等.分离式加筋土桥台性能及气候因素的影响研究 [ J ] . *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(9): 118 – 126. [ MENG Ya, XU Chao, ZHAO Chongxi, et al. Research on the performance of disconnect-type reinforced soil abutment and the influence of climatic factors on the abutment [ J ] . *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(9): 118 – 126. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] REN Feifan, HUANG Qiangqiang, WANG Guan. Shaking table tests on reinforced soil retaining walls subjected to the combined effects of rainfall and earthquakes [ J ] . *Engineering Geology*, 2020, 267: 105475.
- [ 13 ] REN Feifan, HUANG Qiangqiang, GENG Xueyu, et al. Influence of groundwater level changes on the seismic-response of geosynthetic-reinforced soil retaining walls [ J ] . *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2022, 23(11): 850 – 862.
- [ 14 ] ADAMS M, NICKS J. Design and construction guidelines for geosynthetic reinforced soil abutments and integrated bridge systems[R]. United States: Federal Highway Administration, 2018.
- [ 15 ] 廖碧海,王国鼎.巫山(新县城)超高加筋土挡土墙质量事故及原因分析 [ J ] . *中南公路工程*, 2001, 26(2): 58 – 59. [ LIAO Bihai, WANG Guoding. Quality accident and causes analysis of retaining wall with bar-soil at the superelevation section in Wushan [ J ] . *Central South Highway Engineering*, 2001, 26(2): 58 – 59. (in Chinese) ]
- [ 16 ] ABDULLAH N H H, NG K S, JAIS I B M, et al. Use of

- geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system to alleviate settlement problems at bridge approach: A review [ J ] . *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2023, 129: 103304.
- [ 17 ] HATAMI K, BOUTIN J. Influence of backfill type on the load-bearing performance of GRS bridge abutments [ J ] . *Geosynthetics International*, 2022, 29(5): 506 – 519.
- [ 18 ] 刘海洋, 王录仓, 常跟应. 郑州“7·20”特大暴雨灾害对中国铁路运网的冲击过程和机制 [ J ] . *地理学报*, 2024, 79(3): 617 – 634. [ LIU Haiyang, WANG Lucang, CHANG Genying. The impact process and mechanism of the superheavy rainfall event in Zhengzhou on July 20, 2021 on the China's railway transport network [ J ] . *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(3): 617 – 634. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] NICKS J E, ESMAILI D, ADAMS M T. Deformations of geosynthetic reinforced soil under bridge service loads [ J ] . *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(4): 641 – 653.
- [ 20 ] 上海市市政工程设计研究总院, 北京市市政工程设计研究总院, 天津市市政工程设计研究院, 兰州市城市建设设计院. 城市桥梁设计规范: CJJ11-2011 [ S ] . 行业标准-城建, 2019. [ Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Beijing Municipal Engineering Design Research Institute, Tianjin Municipal Engineering Design Institute, Lanzhou Urban Construction Design Institute. Design code for urban bridges: CJJ11-2011 [ S ] . Industry Standard - Urban Construction, 2019. (in Chinese) ]
- [ 21 ] XIONG Yonglin, BAO Xiaohua, YE Bin, et al. Soil-water-air fully coupling finite element analysis of slope failure in unsaturated ground [ J ] . *Soils and Foundations*, 2014, 54(3): 377 – 395.
- [ 22 ] 谢轶, 朱文轩, 熊勇林, 等. 非饱和路堑和路堤边坡地震响应的数值分析 [ J/OL ] . *上海交通大学学报*, 2024: 1 – 24. (2024-07-12) [2024-12-16]. [ XIE Yi, ZHU Wenxuan, XIONG Yonglin, et al. Numerical analysis of seismic response of unsaturated cutting and embankment slope [ J/OL ] . *China Industrial Economics*, 2024: 1 – 24. (2024-07-12) [2024-12-16]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SHJT20240708001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] REN Feifan, HUANG Qiangqiang, CHEN Jianfeng. Centrifuge modeling of geosynthetic-reinforced soil retaining walls subjected to the combined effect of earthquakes and rainfall [ J ] . *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(3): 470 – 479.
- [ 24 ] 周洪福, 冯治国, 石胜伟, 等. 川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价 [ J ] . *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 112 – 119. [ ZHOU Hongfu, FENG Zhiguo, SHI Shengwei, et al. Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway [ J ] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 112 – 119. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] 杨豪, 魏玉峰, 张御阳, 等. 基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析 [ J ] . *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 152 – 161. [ YANG Hao, WEI Yufeng, ZHANG Yuyang, et al. An analysis of non-penetration cracks in anti-dip rock slope based on centrifugal test [ J ] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 152 – 161. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] 郭延辉, 杨溢, 杨志全, 等. 国产 GB-InSAR 在特大型水库滑坡变形监测中的应用 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 66 – 72. [ GUO Yanhui, YANG Yi, YANG Zhiquan, et al. Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 66 – 72. (in Chinese with English abstract) ]