

DOI: 10.11779/CJGE20240306

# 膨胀土路堑边坡格栅加筋层水力-力学响应的现场监测与数值模拟

韩仲<sup>1</sup>, 谢云涛<sup>1</sup>, 邹维列<sup>\*1</sup>, 王协群<sup>2</sup>, 肖杰<sup>3</sup>, 张红日<sup>4</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

3. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 4. 广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 土工格栅加筋层稳固膨胀土坡技术是一种“覆盖”类加固方法, 主要目的在于解决膨胀土边坡浅层滑动问题。该技术近年来在中国膨胀土地区得到了广泛应用。但加筋层在长期大气干湿循环作用下的水力-力学响应及其加固效果的演化规律有待进一步厘清。依托广西崇左-爱店公路一段采用该技术的膨胀土路堑边坡开展了 3 a 的现场监测, 分析了加筋层中膨胀土的含水率和水平土压力以及格栅的拉应变的分布和发展规律。通过数值模拟方法进一步研究了降雨入渗条件下该堑坡的水力-力学响应及其稳定性。监测及模拟结果表明: ①加筋层能够有效隔离大气干湿循环的影响, 使下伏膨胀土中含水率保持稳定, 起到了保湿作用; ②干湿循环作用下, 格栅的最大拉应变出现在加筋层的中部, 加筋层膨胀土中水平土压力随距坡面距离的增加而增大; ③格栅通过对膨胀土的加筋及包裹作用, 提高了加筋层的整体性和抗剪强度, 限制了膨胀土的膨胀变形。因此, 即使膨胀土在干湿循环作用下强度显著降低并在不加筋时产生失稳, 但由于格栅的加筋作用, 加筋层仍能够维持边坡稳定。

**关键词:** 格栅加筋膨胀土; 路堑边坡; 干湿循环; 现场监测; 数值模拟

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)08-1757-10

**作者简介:** 韩仲(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土及特殊土工程特性、土工合成材料、道路岩土工程等方面的研究工作。E-mail: zhong.han@whu.edu.cn。

## Hydromechanical responses of geogrid-reinforced expansive soil cutting slopes: field monitoring and numerical simulation

HAN Zhong<sup>1</sup>, XIE Yuntao<sup>1</sup>, ZOU Weilie<sup>1</sup>, WANG Xiequn<sup>2</sup>, XIAO Jie<sup>3</sup>, ZHANG Hongri<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan

University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Transportation Engineering, Changsha University of Technology, Changsha

410114, China; 4. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** The technique of using geogrid-reinforced expansive soil as cover layer to protect expansive soil slopes belongs to the “covering” category in the expansive soil reinforcing techniques and is mainly used for preventing shallow failure of expansive soil slopes. This technique has been widely used in expansive soil regions in China in recent years. However, the hydromechanical responses of the geogrid-reinforced layer deserves further investigation. A case study on an expansive soil slope reinforced using this technique at the Chongzuo-Aidian Expressway is introduced. The distribution and evolution of the moisture content and horizontal earth pressure of the expansive soil and the tensile strain of the geogrids within the reinforced layer are monitored for three years. The numerical simulation studies are conducted to simulate the slope in the case study and further investigate the hydromechanical responses and stability of the slope upon infiltration. The results demonstrate that: (1) The reinforced layer is effective in isolating the influences of the external wetting-drying impacts and keeps the moisture content stable in the underlying natural expansive soils. It has the function of humidity maintenance. (2) Upon wetting-drying cycles, the maximum strain of the geogrids is at the middle of the reinforced layer, and the horizontal earth pressure in the

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378365, 52179109, 52078400); 湖北省重点研发计划项目(2023BCB112); 广西重点研发计划项目(AB23075184)  
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.52378365, 52179109, 52078400), Hubei Provincial Key Research & Development Program (Grant No.2023BCB112), and Guangxi Provincial Key Research & Development Program (Grant No.AB23075184).

收稿日期(Received): 2024-04-06 修回日期(Revised): 2024-10-10 接受日期(Accepted): 2024-10-15 网络出版日期(Online): 2024-10-16

\*通信作者 (E-mail: zwiliam@whu.edu.cn)

reinforced expansive soil increases with the distance to the slope surface. (3) through the reinforcement and wrapping of the expansive soil, the geogrids improve the integrity and shear resistance of the reinforced layer and restrain the swelling strain. Therefore, although expansive soils loss strength over wetting-drying cycles and may cause shallow failure for unreinforced slopes, the reinforced cover layer remains stable.

**Key words:** geogrid-reinforced expansive soil; cutting slope; wetting-drying cycle; field monitoring; numerical simulation

## 0 引 言

膨胀土在中国广泛分布，具有吸水膨胀、失水收缩、反复胀缩和裂隙发育等不良工程特性。膨胀土边坡即使坡度较缓，其浅层失稳破坏仍屡见不鲜。现场试验<sup>[1-2]</sup>、模型试验<sup>[3]</sup>及数值模拟<sup>[4-5]</sup>研究表明，大气营力作用，特别是干湿循环作用是诱发膨胀土边坡浅层失稳的重要原因。在干湿循环作用下，浅层膨胀土中裂隙逐渐发育、贯通，成为优势流道，加速了入渗过程<sup>[6]</sup>。湿润和开裂的膨胀土强度显著降低<sup>[7]</sup>，最终导致膨胀土边坡浅层失稳，造成巨大经济损失<sup>[8]</sup>。

土工格栅（简称“格栅”）是一种高强度聚合物土工合成材料，具有经济、耐用、施工工艺简单等特点，因此广泛应用于各种岩土体边坡的加固工程中，如土质陡坡<sup>[9]</sup>、岩石边坡<sup>[10]</sup>、岸坡<sup>[11]</sup>等。对这些边坡，格栅加筋区域通常较大（宽度>10 m），以保证边坡的整体稳定性。

格栅也可用于加固膨胀土边坡<sup>[12]</sup>，其优势在于可对现场膨胀土直接加筋，避免了挖除和换填施工<sup>[13]</sup>。用于防治浅层滑动时，格栅的布置及其与膨胀土的相互作用还有两个特点：首先，格栅加筋区域相对较小（宽度3~5 m），一般仅对边坡表层大气影响急剧层范围内的膨胀土加筋，形成加筋层覆盖于下层天然膨胀土上，以隔离大气营力的影响<sup>[14]</sup>。其次，加筋层中的膨胀土吸湿膨胀时，格栅限制了其膨胀变形，因此格栅还受到膨胀土膨胀力的作用<sup>[15]</sup>。多个工程实例表明<sup>[2, 15-16]</sup>，加筋膨胀土加筋层能够有效防治浅层滑坡破坏，维持膨胀土边坡的稳定。

当前针对加筋膨胀土加筋层的研究多集于其稳固膨胀土边坡的宏观效果，也有研究探讨了格栅-膨胀土的界面特性<sup>[17-18]</sup>。然而，对于加筋层在长期干湿循环作用下的水力-力学响应行为及其加固效果的演化规律需要通过现场监测及试验和模拟等手段进一步厘清。

本文依托广西崇左-爱店高速公路宁明段一处采用格栅加筋的膨胀土路堑边坡，开展了为期3 a的现场监测，研究了加筋层中不同位置的含水率、侧向土压力以及格栅拉应变的分布与演化规律。在此基础上开展了数值模拟研究，分析了有、无加筋层条件下堑坡在降雨入渗过程中含水率的分布以及由此引起的堑坡内应力、变形、稳定性和格栅应变的变化规律。基于现场监测和数值模拟结果，进一步明确了格栅加筋

膨胀土加筋层稳固膨胀土边坡的机理。

## 1 现场监测概况

### 1.1 膨胀土堑坡

本文监测的膨胀土路堑边坡位于广西崇左-爱店高速公路宁明段，为一两级边坡，最大高度约为12 m，长度为200 m。两级堑坡间设4 m宽马道，每级堑坡高度大致相同（6 m），上边坡坡比1.0：1.75，下边坡坡比1.0：1.5（图1(a)）。宁明属亚热带季风气候区，降雨/蒸发频繁交替。该堑坡开挖不久，坡表膨胀土裂缝既显著发育（图1(b)）。

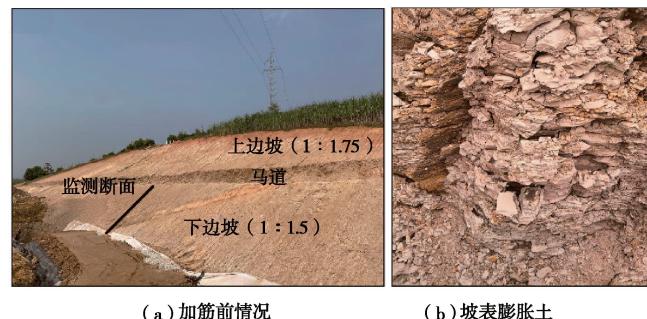


图1 膨胀土堑坡

Fig. 1 Expansive soil cutting slope

依据《土工试验方法标准：GB/T50123—2019》<sup>[19]</sup>，测定了坡表膨胀土的土性指标，结果如表1所示。根据《膨胀土地区建筑技术规范：GB50112—2013》<sup>[20]</sup>，该膨胀土为中膨胀土。

表1 宁明膨胀土的土性指标

Table 1 Basic properties of Ningming expansive soil

$G_s$	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%	砂粒/%	粉粒/%	黏粒占比/%
2.73	51	23	28	64	1	50	49

### 1.2 格栅加筋膨胀土加筋层的结构和施工简况

宁明地区大气影响急剧层深度一般为2~3 m。据此，格栅加筋层横向宽度取为4 m，在垂直于坡面向的深度为2.22 m。加筋层结构及建设前后情况如图2所示。

施工时，首先在堑坡表面铺设一层0.3 m厚的碎石排水层。然后从下至上每隔0.5 m铺设一层单向土工格栅，并回填膨胀土进行压实，平均压实含水率和干密度分别为20%和1.62 g/cm<sup>3</sup>（接近重型击实条件下该膨胀土的最优含水率和最大干密度）。

压实后的膨胀土初始饱和度约为71%。每层格栅

反包段长约 1.5 m, 用连接杆固定于压实膨胀土表面。最后在加膨胀土加筋层表面铺设一层耕植土, 起到绿化和防护作用。

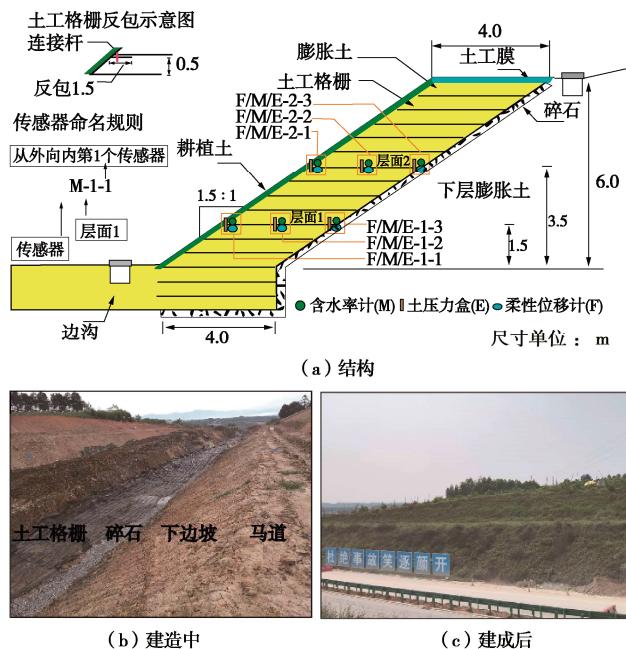


图 2 加筋膨胀土坡

Fig. 2 Reinforced expansive soil slope

### 1.3 监测传感器布设

在膨胀土加筋层内布设了柔性位移计 (F)、含水率计 (M) 和土压力盒 (E) 以监测土工格栅的拉应变  $\varepsilon_t$ 、膨胀土的体积含水量  $\theta$  和水平土压力  $\sigma_L$  (图 2(a))。其中, 土压力盒被焊接在两根钢筋上, 再将钢筋竖直插入膨胀土中, 使土压力盒的盒面垂直于水平面, 以测量  $\sigma_L$ 。

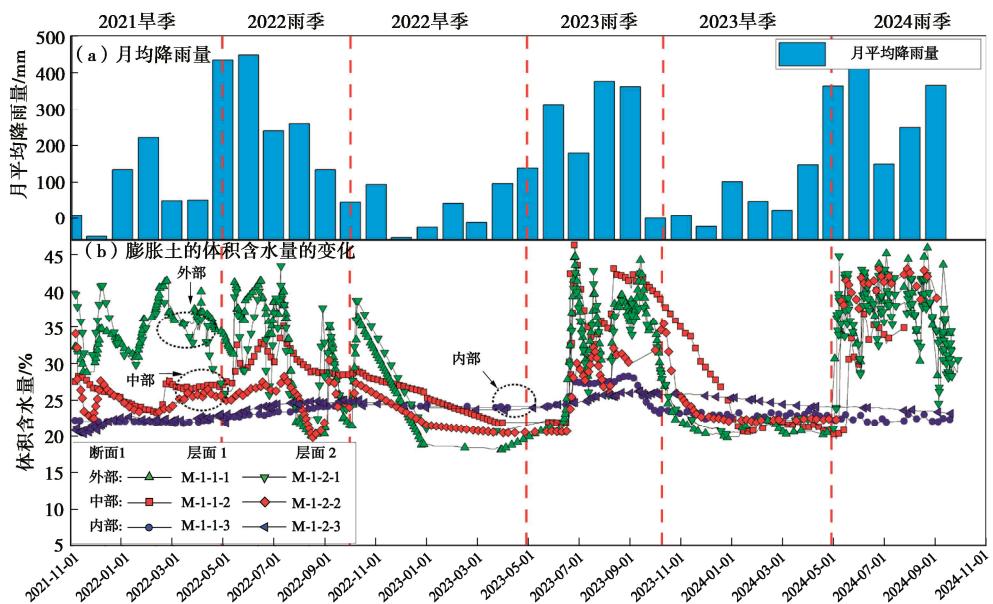


图 3 监测期间(a)月均降雨量及(b)膨胀土的体积含水量的变化

Fig. 3 Evolution of (a) local monthly rainfall intensity and (b) volumetric water content in expansive soil during monitoring period

各传感器分布在距地面 1.5 m 的层面 1 和距地面 3.5 m 的层面 2。传感器成组安装在每个层面上, 每组传感器间距 1.9 m, 见图 2 (a)。为叙述方便, 以下将加筋层表面、中部及底部的传感器分别称为外、中、内传感器, 其具体命名规则见图 2 (a)。所有监测数据均通过自动采集仪获取, 并实时传输至云平台以供存储和分析。该监测段工程于 2021 年 10 月完工, 监测过程从 2021 年 11 月开始, 至 2024 年 10 月结束, 为期 3 a。

## 2 监测结果分析

### 2.1 加筋层中膨胀土的含水量

图 3 为监测期内宁明气象站收集的当地降雨数据以及监测所得到的加筋膨胀土加筋层中体积含水量的变化。两个监测层面外、中、内传感器读数及其变化规律相似, 间接证明含水率监测结果的合理性。

根据宁明的气候特点, 结合降雨数据, 可将一年分为雨季 (5 月—10 月) 和旱季 (10 月—来年 5 月)。3 a 的监测期由此可分为 6 个时段, 见图 3。

(1) 2021 年旱季监测结果反映了竣工后加筋层中膨胀土的初始含水率分布情况及其在旱季的变化。加筋层中膨胀土的初始含水率由外至内逐渐减小, 在零星降雨的作用下, 外部土体含水率随降雨实时波动, 幅度较大; 中部含水率波动幅度较小, 仅在降雨持续时有显著的响应 (如 2022 年 3 月); 内部膨胀土的含水率则基本保持稳定, 对外界干湿过程没有明显的响应。2021 年旱季结束时, 中部和内部土体的含水率明显

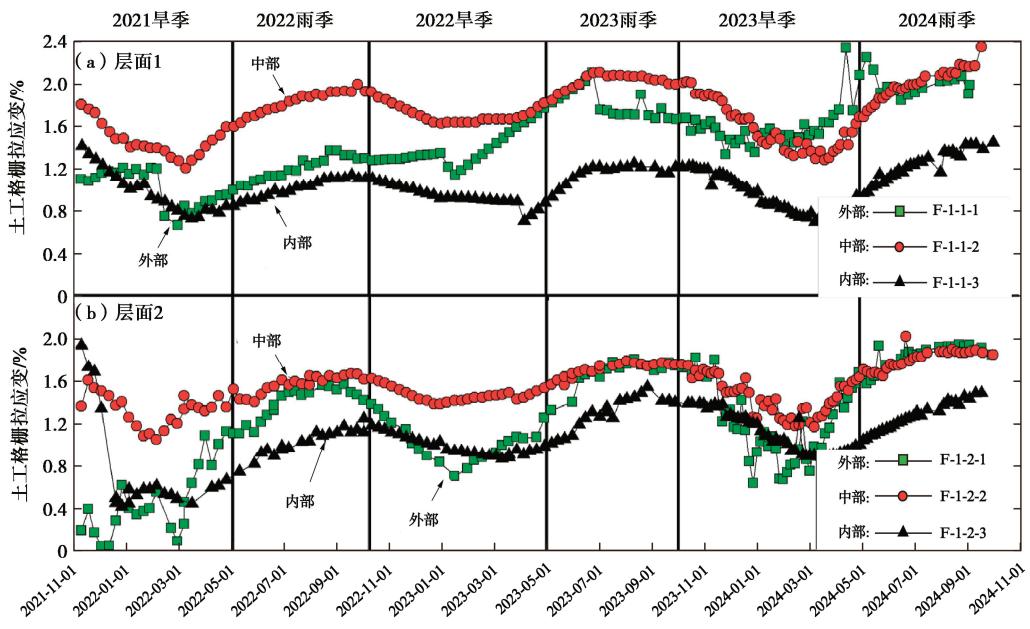


图 4 土工格栅的拉应变

Fig. 4 Tensile strains of geogrids

显低于外部土体。

(2) 2022 年雨季期间, 降雨量较大且集中。加筋层外部和中部膨胀土的含水率随着降雨强度的变化而波动。其中, 外部膨胀土含水率的波动幅度更大。但无论降雨强度和持续时间如何变化, 内部膨胀土的含水率仅呈现轻微上升的趋势。

(3) 2022 年和 2023 年旱季期间仅有零星降雨且雨量较小, 塹坡中的含水率变化规律相似。加筋层外部和中部的膨胀土经历了显著的蒸发过程, 其含水率在旱季初期显著下降, 随后逐渐趋稳。然而, 加筋层内部膨胀土并未显著脱湿, 其含水率始终保持稳定。旱季结束时, 内部含水率甚至高于中部和外部。

(4) 2023 年和 2024 年的雨季, 加筋层外部和中部膨胀土含水率又在密集的降雨过程中重新增大(如 2023 年 7 月和 2024 年 5 月), 并随降雨强度而波动。同样地, 内部膨胀土的含水率仍对降雨无明显的反应, 维持稳定。

## 2.2 加筋层中格栅的拉应变

含水率的波动引起膨胀土的胀缩, 带动格栅产生拉应变。图 4 总结了层面 1 和 2 上加筋层中格栅拉应变的变化。两个层面上的平行监测值在监测初期(2021 年旱季)有一定差异(这可能是施工过程造成的), 但随着气候的变化, 拉应变的值和趋势变得一致。

(1) 在加筋层的外、中和内部, 格栅的拉应变均在雨季随膨胀土的增湿而增加、在旱季则随膨胀土的脱湿而减少。这种响应行为符合预期, 与含水率波动引起膨胀土的胀缩过程相对应。

(2) 与格栅中部和内部的应变相比, 靠近坡面的格栅外部的拉应变变化幅度更为显著。格栅中部和内

部的拉应变的变化趋势相似, 变化曲线接近平行。

(3) 加筋层外部和内部格栅的拉应变接近但均低于中部格栅的拉应变。只有在降雨集中且较强的情况下(如 2022 年 8 月和 2023 年 7 月), 外部格栅的拉应变才会增加到与中部格栅相当的水平。

## 2.3 加筋层中膨胀土的水平土压力

由于技术原因, 2022 年 5 月至 2023 年 8 月时段膨胀土的水平土压力读数缺失。图 5 给出了其余监测时段的结果。

(1) 2021 年旱季竣工后, 受碾压施工可能存在残余应力的影响, 层面 1 和 2 相同位置处的初始水平土压力不一致。但经过一段时间的服役后, 两个层面上的水平土压力在大小和变化趋势上逐渐趋于一致。

(2) 服役初期, 水平土压力即使在 2021 年旱季也随降雨过程表现出一定的波动。但经历 1 年多的服役, 加筋层外、中、内部的水平土压力对降雨均变得不再敏感, 即使在 2024 年雨季, 其波动也不显著。

(3) 水平土压力逐渐稳定后, 加筋层内部膨胀土的水平土压力最高, 中部次之, 外部最低。

## 2.4 讨论

(1) 图 3 结果表明, 当加筋层的厚度大于大气影响急剧层深度时, 外部大气干湿作用对加筋层中膨胀土含水率的影响由外至内迅速减小, 加筋层底部膨胀土含水率几乎不随干湿循环而波动。加之加筋层下的碎石滤水层的排水作用, 可推断加筋层下天然膨胀土坡的含水率将不受干湿循环影响, 即加筋层能够有效地隔离外部大气营力对其下膨胀土坡的作用。

(2) 加筋膨胀土的含水率、水平土压力及格栅的拉应变是相互关联的。膨胀土的水平土压力取决于上

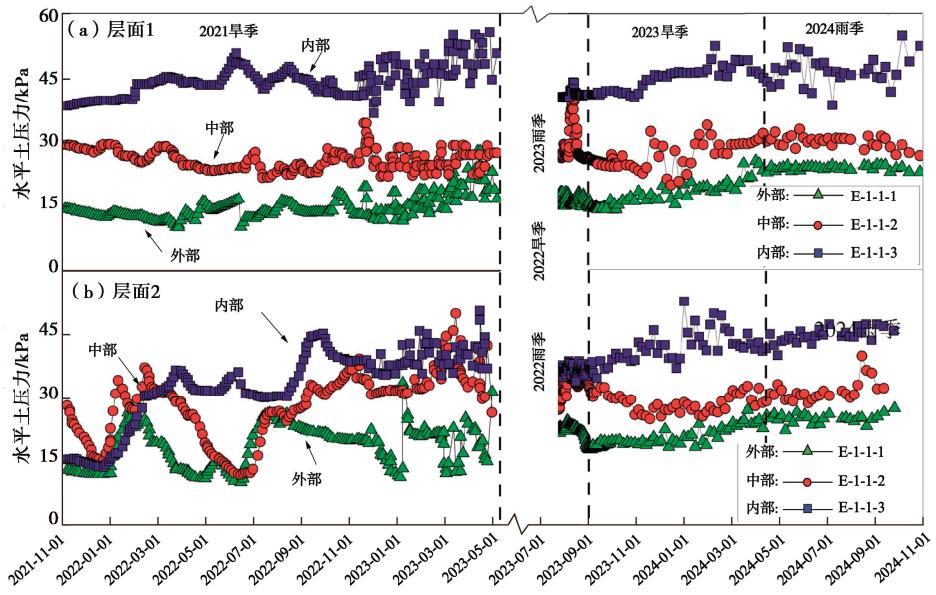


图 5 膨胀土的水平土压力

Fig. 5 Horizontal earth pressures

覆膨胀土的自重和膨胀土吸湿后产生的水平膨胀力。对于上覆自重, 加筋层中由表及里, 上覆自重逐渐增加, 相应地水平土压力逐渐增大。而水平膨胀力则取决于: ①膨胀土的增湿程度(增湿越显著, 水平膨胀力越大); ②周围岩土体及格栅对膨胀土侧向膨胀的约束程度(约束越大, 水平膨胀力越大)。在加筋层中, 由外向内膨胀土的增湿程度逐渐减小, 但对侧向膨胀的约束程度则逐渐增大, 两者综合作用, 叠加上覆自重, 最终表现为水平土压力随深度而增加(见图 5)。

(3)格栅的拉应变与膨胀土的增湿膨胀及水平土压力相关。监测结果表明(见图 4), 加筋层外部膨胀土的水平土压力较低, 格栅拉应变相应较低; 内部膨胀土增湿膨胀不明显, 不能带动格栅产生明显的拉应变; 中部膨胀土的增湿膨胀被格栅有效约束, 使格栅产生的拉应变最大。因此, 加筋层格栅设计的控制断面应在加筋层的中部。

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 数值模型的建立

采用 FLAC<sup>2D</sup> 软件建立与现场膨胀土堑坡相同尺寸和格栅加筋结构的二维模型(见图 6)。

模型包含 14700 个单元, 左侧、右侧和底部边界距离加筋土加筋层分别为 9, 11, 9 m 以减小边界效应, 并对加筋层及地表大气影响深度范围内的网格加密。加筋层表面和底面分别设置 0.1 m 厚的耕植土层和 0.3 m 厚的碎石排水层。加筋层顶面铺设土工膜。另建立了相同尺寸但不包含土工格栅、土工膜及碎石排水层的模型作为对比。

数值模拟分析分为 3 部分: ①渗流, 模拟了降雨

条件下有/无加筋层的膨胀土堑坡内部湿度的分布及变化规律。②应力-应变, 模拟了降雨入渗后膨胀土的应力、变形以及土工格栅的应变的发展规律。③膨胀土堑坡的整体稳定性。

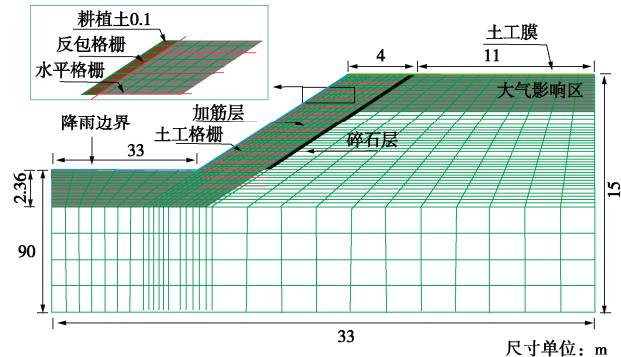


图 6 加筋层膨胀土堑坡数值模型

Fig. 6 Numerical model for reinforced expansive soil slope

#### 3.2 模型参数选取

##### (1) 膨胀土的抗剪强度参数

研究表明, 膨胀土经历 5~6 次干湿循环后, 抗剪强度参数(黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ )显著降低并趋于稳定<sup>[21]</sup>。据此, 对未经干湿循环及经历 6 次干湿循环的压实膨胀土试样开展了固结不排水直剪试验, 以测定干湿循环前后宁明膨胀土的强度参数。

采用与现场加筋层膨胀土平均压实含水率(20%)和干密度(1.62 g/cm<sup>3</sup>)相同的压实试样, 以模拟加筋层中膨胀土的湿密状态。根据文献[22]的建议, 用不同湿度的滤纸包裹试样, 通过滤纸与试样间水分交换改变试样的含水率, 使试样在饱和含水率( $w_{sat}=28.7\%$ )和缩限( $w_s=5\%$ )间变化, 实现干湿循环过程。将压实后以及 6 次干湿循环后的试样抽气饱和, 测得

饱和密度分别为 1.97, 2.08 g/cm<sup>3</sup>。对饱和试样开展固结不排水直剪试验, 测定其  $c$  和  $\varphi$ 。试验结果表明, 未经干湿循环作用试样的  $c=26$  kPa,  $\varphi=17^\circ$ ; 经 6 次干湿循环作用试样的  $c=10.7$  kPa,  $\varphi=11^\circ$ 。根据剪切过程中的应力-应变曲线还可确定膨胀土的剪切模量  $G$ 。对未经干湿循环作用的试样,  $G=10$  MPa; 对经 6 次干湿循环作用的试样,  $G=4$  MPa。

现场含水率监测结果表明(见图 3(b)), 干湿循环主要影响加筋层深度范围内的膨胀土。为简化计算, 加筋层及地表大气影响急剧层深度内的膨胀土采用 6 次干湿循环后饱和试样的抗剪强度参数; 它们以下的深层膨胀土采用未经干湿循环作用的饱和试样的抗剪强度参数。

## (2) 膨胀土的水力特性参数

依据《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》<sup>[19]</sup>, 对未经和经历 6 次干湿循环作用的饱和试样开展变水头渗透试验, 测得渗透系数  $k$  分别为  $1.1 \times 10^{-8}$  m/s 和  $2.4 \times 10^{-6}$  m/s。这与既有研究结果一致<sup>[23]</sup>, 即风化开裂膨胀土的渗透性可能比未开裂膨胀土层大 2~4 个数量级。因此, 数值模型中加筋层和地表大气影响急剧层深度内的膨胀土的  $k=2.4 \times 10^{-6}$  m/s, 其下膨胀土的  $k=1.1 \times 10^{-8}$  m/s。加筋层下碎石层的渗透系数取为  $k=5 \times 10^{-2}$  m/s。

通过在地表和加筋层表面设置恒定流量边界条件以模拟降雨过程(见图 6), 入渗过程则采用两相流方法模拟。宁明雨季日最大降水量约为 500 mm/d。在这种降雨强度下, 湿润锋穿透加筋层大约需要 2 d。据此, 模型中恒定流量边界条件设为 500 mm/d, 降雨持续时间设为 2 d, 膨胀土初始饱和度设为 71%。

在两相流分析中, 基质吸力  $s$  与有效饱和度  $S_e$  之间的关系(即土-水特征曲线, SWCC)可由 V-G 模型<sup>[24]</sup>描述:

$$s = P_0(S_e^{1/a} - 1)^{1-a} \quad (1)$$

式中:  $P_0$  和  $a$  为拟合参数。

依据《非饱和土试验方法标准: T/CECS 1337—2023》<sup>[25]</sup>, 采用接触式滤纸法分别测量了未经和经历 6 次干湿循环作用的宁明膨胀土试样在吸湿过程中的 SWCC(见图 7)。吸湿过程从试样的压实含水率  $w=19\%$  开始直至试样饱和。

可见, 干湿循环降低了膨胀土的持水能力, 即相同吸力下经历干湿循环膨胀土的饱和度显著降低。相关研究也发现类似变化, 并将其归结为干湿循环引起的裂缝以及土的结构变化<sup>[26]</sup>。式(1)能够合理拟合所测得的 SWCC。加筋层和地表大气影响急剧层深度内的膨胀土采用经历干湿循环试样的

SWCC ( $P_0=439$ ,  $a=0.291$ ), 其下膨胀土采用未经干湿循环试样的 SWCC ( $P_0=4983$ ,  $a=0.262$ )。

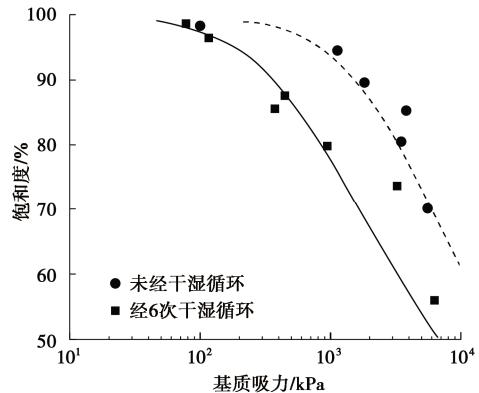


图 7 宁明膨胀土的 SWCC

Fig. 7 SWCCs of Ningming expansive soil

模型中还考虑了格栅对膨胀土中渗流过程的影响。格栅-膨胀土界面水的流动由达西定律描述:

$$q_i^w = - \begin{bmatrix} w_{11} & 0 \\ 0 & w_{22} \end{bmatrix} k_t^w \frac{\partial}{\partial x_j} (P_w - \rho_w g_k x_k) \quad (2)$$

式中:  $q_i^w$  为流量;  $k_t^w$  为水的相对渗透率;  $P_w$  为孔隙水压力;  $\rho_w$  为水的密度;  $g_k$  为重力加速度;  $x_k$  为水头;  $w_{11}$  和  $w_{22}$  分别为水平和垂直方向的流动系数。

研究表明, 格栅能够加速其纵肋方向的渗流速度, 提高约 150%<sup>[27-28]</sup>。因此, 模型中水平方向(即格栅纵肋方向)的流动系数取为  $w_{11}=1.5$ 。考虑到格栅对垂直于格栅平面方向渗流的阻碍作用(水只能通过格栅肋间的间隙渗透), 现场所用格栅的开孔面积比(开孔面积占整个土工格栅面积的百分比)为 41.6%, 即垂直格栅平面方向渗流面积减少到 41.6%。因此, 模型中竖直方向(即垂直格栅平面方向)的流动系数取为  $w_{22}=0.416$ 。

## (3) 膨胀土的膨胀特性参数

采用 FLAC<sup>2D</sup> 的热膨胀模型模拟膨胀土的增湿膨胀过程。根据湿度应力场理论<sup>[29]</sup>, 可将湿度应力场近似等效为温度应力场, 结合热膨胀函数和土的热膨胀系数以及温度的变化, 计算膨胀土的膨胀量。由于加筋层之下的膨胀土的含水率变化很小, 可认为该区域膨胀土不发生膨胀, 故仅模拟加筋层中经历干湿循环作用的膨胀土的增湿膨胀过程。

采用文献[30]所提方法确定宁明膨胀土的热膨胀系数。首先, 采用  $K_0$  固结仪测量了不同竖向压力下经 6 次干湿循环的试样从压实含水率增湿至饱和时产生的水平土压力, 具体试验方法见文献[31]。然后, 建立数值模型模拟了上述  $K_0$  膨胀试验, 通过调整热膨胀系数, 使模拟结果与试验结果相近(见图 8)。通过上述方法确定的加筋层内膨胀土的热膨胀系数为  $1.15 \times 10^{-5}$  m/K。

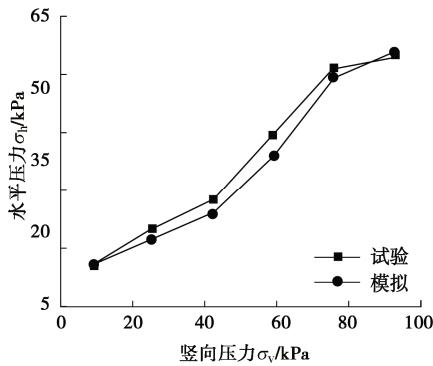


图 8 水平土压力试验结果与模拟结果

Fig. 8 Measured and modeled lateral earth pressures

#### (4) 土工格栅的力学及界面特性参数

采用 FLAC<sup>2D</sup> 中的“Cable”单元模拟格栅<sup>[4]</sup>。

参照《公路工程土工合成材料试验规程: JTGE50—2006》<sup>[32]</sup>, 开展了格栅-膨胀土(未经干湿循环)界面直剪试验和格栅拉伸试验, 得到界面摩擦角  $\phi_i=15.4^\circ$ , 黏聚力  $c_i=16.9\text{ kPa}$ 、剪切刚度  $k_s=3.3\times 10^3\text{ kN/m}$ , 格栅抗拉强度为  $41\text{ kN/m}$ , 拉伸刚度为  $490\text{ kN/m}$ 。

加筋层膨胀土在服役过程中经历多次干湿循环, 模拟中应采用风化膨胀土与格栅间的界面特性参数。研究表明, 界面剪切强度参数与土的剪切强度参数成正比, 可据此估算加筋层中格栅-膨胀土的界面剪切强度参数。未经干湿循环膨胀土的黏聚力 ( $c=26\text{ kPa}$ ) 和内摩擦角 ( $\varphi=17^\circ$ ) 分别是格栅-膨胀土(未经历干湿循环)界面黏聚力 ( $c_i=16.9\text{ kPa}$ ) 和内摩擦角 ( $\phi_i=15.4^\circ$ ) 的 1.5 倍和 1.1 倍。基于此比例, 干湿循环后格栅-膨胀土界面的黏聚力  $c'_i$  和内摩擦角  $\varphi'_i$  可以根据干湿循环后膨胀土的黏聚力 ( $c=10.7\text{ kPa}$ ) 和内摩擦角 ( $\varphi=11^\circ$ ) 进行估算, 分别为  $c'_i=10.7\text{ kPa}/1.5=7.1\text{ kPa}$  和  $\varphi'_i=11^\circ/1.1=10^\circ$ 。此外, 未经干湿循环膨胀土的剪切模量 (10 MPa) 是经干湿循环后膨胀土剪切模量 (4 MPa) 的 2.5 倍。据此比值, 可基于未经干湿循环的界面剪切刚度 ( $k_s=3.3\times 10^3\text{ kN/m}$ ) 估算干湿循环后界面的剪切刚度, 为  $k'_s=3.3\times 10^3\text{ kN/m}/2.5=1.3\times 10^3\text{ kN/m}$ 。

### 3.3 膨胀土堑坡的水力响应

分别对有、无加筋土加筋层的膨胀土堑坡进行降雨条件下的两相流模拟, 得到饱和度分布云图, 如图 9 所示。加筋层中, 格栅改变了靠近坡表的渗流矢量, 使得水流沿着格栅(包括反包段和水平段)流动。对于无加筋层的堑坡, 水流则垂直于斜坡表面。此外, 有加筋层的堑坡, 其坡顶部的土工膜阻止了雨水渗入坡内, 相较于无加筋层堑坡, 坡顶饱和度显著降低。选取坡中和坡底两个截面(见图 9), 对比分析加筋层范围内湿度的分布(图 10)。

可见, 有、无加筋层情况下, 加筋层范围内坡底

和坡中饱和度的分布相似, 表明格栅对入渗过程影响不显著。此外, 随着距坡面水平距离的增加, 饱和度逐渐减小。由于加筋层的隔离作用以及碎石层的排水作用, 加筋层下的膨胀土饱和度保持不变。这与监测结果一致, 说明加筋层能够有效地减小大气降雨对于加筋层下天然膨胀土的影响。然而, 当没有加筋层及碎石排水层时, 距坡面 4~5 m 范围内的深部膨胀土则产生了一定程度的增湿。

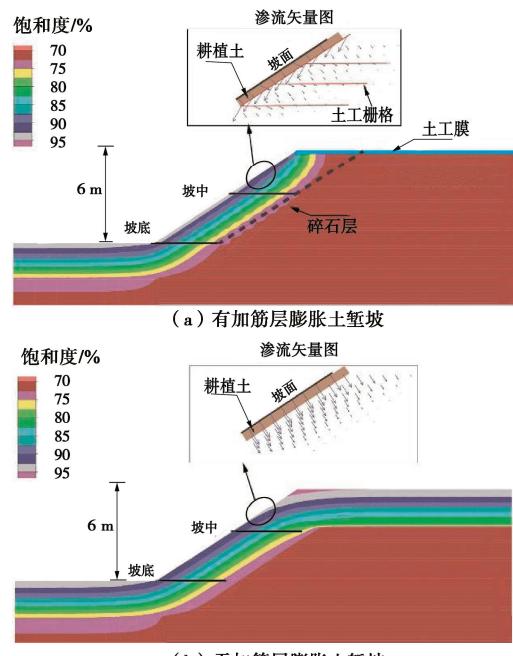


图 9 坡体饱和度分布

Fig. 9 Contours of degree of saturation of slope

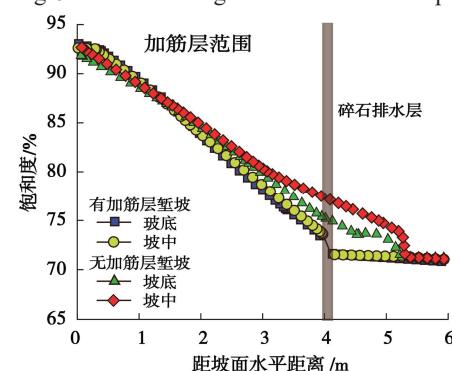


图 10 有、无加筋层边坡中饱和度的分布

Fig. 10 Degrees of saturation in slopes with and without cover layer

### 3.4 膨胀土堑坡的力学响应

#### (1) 墓坡的水平位移

在降雨入渗条件下, 随着表层膨胀土的吸水膨胀, 有、无加筋层的堑坡在加筋层范围内, 内部、中部、外部的水平位移均会增加, 其中外部即坡面的水平位移最大(见图 11)。格栅能够有效抑制加筋层范围内膨胀土的膨胀变形, 特别是对于坡面膨胀土, 最大水平位移从 32 mm 减少到约 20 mm, 降低了 37.5%。

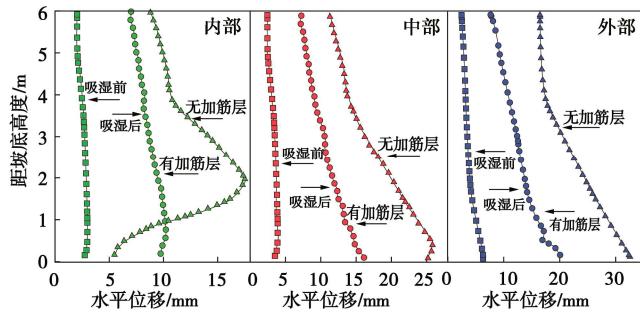


图 11 坡体表层水平位移

Fig. 11 Horizontal surface displacements of slopes

### (2) 格栅的拉应变

吸湿前后格栅的拉应变分布如图 12 所示, 可见, 吸湿前, 格栅拉应变  $\varepsilon_t$  未被调动, 说明膨胀土自身强度足以维持坡体的稳定性; 吸湿后,  $\varepsilon_t$  被调动: 在坡顶和坡中,  $\varepsilon_t$  的最大值出现在加筋层外部靠近坡面的位置; 在坡脚,  $\varepsilon_t$  的最大值出现在加筋层中部, 这与图 4 监测结果是一致的。

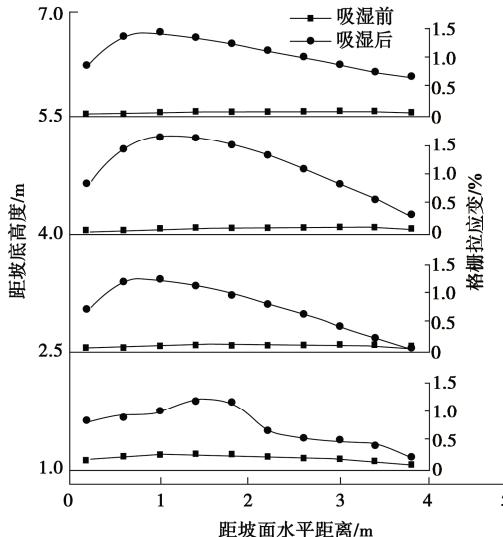


图 12 坡表不同高度处格栅拉应变的分布

Fig. 12 Distribution of tensile strain of geogrids at various heights

### (3) 塹坡内的水平土压力

降雨前, 加筋层中的水平土压力从坡顶到坡脚逐渐增大; 从坡中到坡顶, 加筋层外、中、内部水平土压力相近; 从坡中到坡底, 加筋层中水平土压力由外到内显著增加(见图 13)。

降雨后, 加筋层外、中、内部水平土压力均有所增大但不显著, 最大增量仅为 9 kPa 左右, 这与监测结果(见图 5)是一致的。增湿前后水平土压力增量由坡顶到坡中逐渐增大, 由坡中到坡底增量基本保持稳定, 表现为增湿前后水平土压力分布曲线近乎平行。

### (4) 塹坡的稳定性

图 14 为有、无加筋层的膨胀土堑坡在降雨入渗后塑性屈服点的分布情况。塑性屈服点构成了潜在破坏面。可见, 有加筋层堑坡仅在坡脚处有少量屈服点, 而无加筋层堑坡的屈服点相互连接, 几乎形成了一个

连续且贯通的滑动面。采用 FLAC2D 中的强度折减法进行计算, 得到有加筋层堑坡的安全系数为 2.4、无加筋层堑坡的安全系数为 1.1。

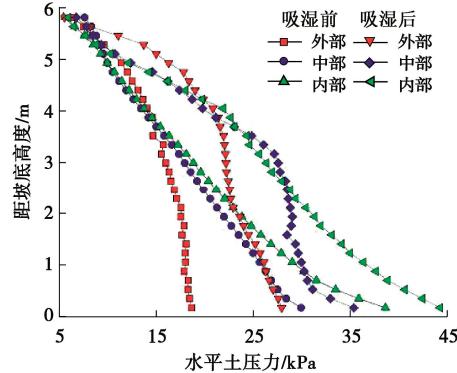


图 13 吸湿前后的水平土压力

Fig. 13 Lateral earth pressures before and after wetting

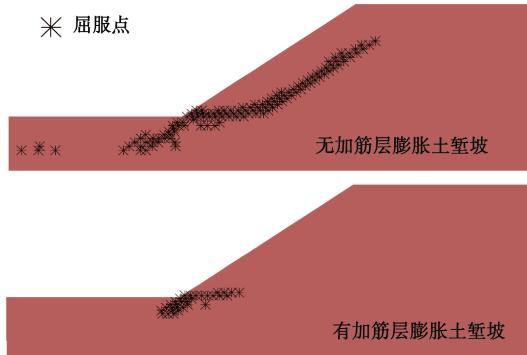


图 14 塌陷点分布

Fig. 14 Distribution of yield points

## 4 格栅加筋土加筋层稳固膨胀土坡机理

基于上述现场监测和数值模拟结果, 可将格栅加筋土加筋层稳固膨胀土坡的机理概括为以下两个方面: ①格栅对加筋层中膨胀土的加筋作用。格栅通过对膨胀土直接加筋以及包裹作用, 增加了表层膨胀土的抗剪强度及整体性, 并约束膨胀土的膨胀。因此, 尽管表层膨胀土在大气干-湿循环作用下裂隙发育、强度降低并产生膨胀变形, 但由于格栅的加筋作用, 加筋层仍具有足够的强度以维持边坡稳定, 同时不发生过大膨胀变形而引起失稳。②加筋层对其下伏天然膨胀土的保湿作用。只要加筋土加筋层保持稳定且具有足够的厚度(大于当地大气影响急剧层深度), 就能有效阻隔外部干湿循环对其下膨胀土坡含水率的影响, 从而起到保湿作用。下伏膨胀土维持相对恒定的湿度状态有助于减少膨胀变形、裂隙发育以及强度劣化导致失稳的可能性, 进而保证了膨胀土堑坡的长期稳定。

此外, 格栅加筋层自身的重量也会对下伏膨胀土可能的膨胀产生抑制效果, 即加筋层具有压重作用。这也是对加筋层保湿作用的一种补充, 即当加筋层保

湿作用部分丧失, 下伏膨胀土产生增湿膨胀时, 加筋层发挥压重作用以维持边坡稳定。

## 5 结 论

本文对广西崇左-爱店公路一段采用格栅加筋稳固技术的膨胀土路堑边坡进行了现场监测和数值模拟, 研究了干湿循环作用下加筋层的水力-力学响应特性, 包括膨胀土的含水率、侧向土压力、膨胀变形以及格栅拉应变的分布、变化规律, 得到如下4点结论。

(1)当格栅加筋层的厚度大于大气影响急剧层深度时, 加筋层能够有效地隔离大气干湿循环作用对其下伏天然膨胀土的影响, 使其含水率几乎保持不变, 起到保湿作用。

(2)在长期服役过程中, 特别是降雨入渗条件下, 格栅的最大拉应变出现在加筋层的中部, 加筋层中膨胀土的水平土压力由表及里逐渐增大。

(3)格栅通过对膨胀土的加筋及包裹作用, 提高了膨胀土的抗剪强度和整体性并有效限制其膨胀变形, 起到了加筋作用和限制变形作用。因此, 即使加筋层中的膨胀土因大气干湿循环作用而产生强度和刚度降低, 但仍能够维持其自身稳定。

(4)在降雨条件下, 最大水平位移和土压力以及屈服和剪切破坏发生在坡脚。因此, 加筋边坡的坡脚在设计和分析中需要重点关注。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 韩仲、邹维列、张红日参与酝酿和设计试验、获取经费、对文章的知识性内容作批评性审阅以及文章修改工作; 韩仲、谢云涛、肖杰、王协群参与实施研究、分析/解释数据和起草文章工作; 邹维列、肖杰、张红日参与技术支持和指导工作。HAN Zhong, ZOU Weilie and ZHANG Hongri contribute to the design of experimental study, funding acquisition, manuscript critical review and revision; HAN Zhong, XIE Yuntao, XIAO Jie and WANG Xiequn contribute to the experimental studies, data interpretation, and writing of the original manuscript; ZOU Weilie, XIAO Jie and ZHANG Hongri contribute to the technical support and supervision of this study.

## 参考文献:

- [1] 黄润秋, 吴礼舟, 胡瑞林. 膨胀土路堑边坡的滑坡机理分析[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1578-1583. (HUANG Runqiu, WU Lizhou, HU Ruilin. Mechanical analysis of cut slope failures in expansive soil areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1578-1583. (in Chinese))
- [2] ZHANG R, LAN T, ZHENG J L, et al. Field performance of a geogrid-reinforced expansive soil slope: a case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 83(1): 7.
- [3] CHEN T L, ZHOU C, WANG G L, et al. Centrifuge model test on unsaturated expansive soil slopes with cyclic wetting-drying and inundation at the slope toe[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1341-1360.
- [4] QI S C, VANAPALLI S K. Influence of swelling behavior on the stability of an infinite unsaturated expansive soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76: 154-169.
- [5] SRBULOV M. Analyses of stability of geogrid reinforced steep slopes and retaining walls[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(4): 255-268.
- [6] HOU D G, ZHOU Y Y, ZHENG X Y. Seepage and stability analysis of fissured expansive soil slope under rainfall[J]. Indian Geotechnical Journal, 2023, 53(1): 180-195.
- [7] 李雄威, 王爱军, 王 勇. 降雨蒸发作用下膨胀土湿热和裂隙特性室内模拟试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2473-2478, 2485. (LI Xiongwei, WANG Aijun, WANG Yong. Laboratory model test on moisture-heat and fissure behavior of expansive soil under action of rainfall and evaporation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2473-2478, 2485. (in Chinese))
- [8] YANG K H, THUO J N, HUYNH V D A, et al. Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 96: 25-39.
- [9] LIU C N, YANG K H, HO Y H, et al. Lessons learned from three failures on a high steep geogrid-reinforced slope[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 34: 131-143.
- [10] MORADI G, ABDOLMALEKI A, SOLTANI P. Small-and large-scale analysis of bearing capacity and load-settlement behavior of rock-soil slopes reinforced with geogrid-box method[J]. Geomechanics and Engineering, 2019, 18(3): 315-328.
- [11] VALI R, SABERIAN M, LI J, et al. Properties of geogrid-reinforced marine slope due to the groundwater level changes[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(6): 735-748.
- [12] AL-OMARI R R, HAMODI F J. Swelling resistant geogrid: a new approach for the treatment of expansive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1991, 10(4): 295-317.
- [13] ZHANG Rui, LONG Mingxu, LAN Tian, et al. Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1965-1980.
- [14] 肖 杰, 杨和平, 符 浩, 等. 膨胀土边坡加筋作用的对比模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(7): 24-31. (XIAO Jie, YANG Heping, FU Hao, et al. Comparison model test on effect of

- geogrid reinforcement for expansive soil slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, **27**(7): 24-31. (in Chinese))
- [15] 徐永福, 程 岩, 肖 杰, 等. 膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(7): 1281-1294. (XU Yongfu, CHENG Yan, XIAO Jie, et al. New prevention and control technology for expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(7): 1281-1294. (in Chinese))
- [16] 邹维列, 蔺建国, 韩 仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(1): 126-139. (ZOU Weilie, LIN Jianguo, HAN Zhong, et al. Progress on strengthening techniques for expansive soil slopes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(1): 126-139. (in Chinese))
- [17] 王协群, 张俊峰, 邹维列, 等. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(4): 133-141. (WANG Xiequn, ZHANG Junfeng, ZOU Weilie, et al. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(4): 133-141. (in Chinese))
- [18] 曹文昭, 郑俊杰, 周燕君. 双向和三向土工格栅筋土界面特性对比试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, **46**(1): 109-116. (CAO Wenzhao, ZHENG Junjie, ZHOU Yanjun. Comparative experimental investigation of geogrid-soil interface behavior of biaxial and triaxial geogrid[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, **46**(1): 109-116. (in Chinese))
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [20] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (Technical Code for Building in Expansive Soil Regions: GB 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [21] 徐 彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 44-50. (XU Bin, YIN Zongze, LIU Shuli. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 44-50. (in Chinese))
- [22] HAN Z, VANAPALLI S K. Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils[J]. Engineering Geology, 2016, **211**: 85-97.
- [23] 郑少河, 姚海林, 葛修润. 裂隙性膨胀土饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(S1): 281-285. (ZHENG Shaohu, YAO Hailin, GE Xiurun. Saturated-unsaturated seepage analysis of fractured expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 281-285. (in Chinese))
- [24] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892.
- [25] 非饱和土试验方法标准: T/CECS 1337—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023. (Standard for Unsaturated Soil Testing Method: T/CECS 1337—2023[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023. (in Chinese))
- [26] ZOU W L, HAN Z, ZHAO G T, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on the shear behaviors of an expansive soil under a wide range of stress levels[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, **81**(3): 77.
- [27] 王协群, 郭 敏, 胡 波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1649-1653. (WANG Xiequn, GUO Min, HU Bo. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1649-1653. (in Chinese))
- [28] 赵 亮, 龚壁卫, 李青云, 等. 加筋膨胀土边坡土工格栅的导水作用研究[J]. 长江科学院院报, 2012, **29**(6): 44-47. (ZHAO Liang, GONG Biwei, LI Qingyun, et al. Water diversion in geogrid in reinforced expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, **29**(6): 44-47. (in Chinese))
- [29] 缪协兴, 杨成永, 陈至达. 膨胀岩体中的湿度应力场理论 [J]. 岩土力学, 1993, **14**(4): 49-55. (MIAO Xiexing, YANG Chengyong, CHEN Zhida. Humidity stress field theory in swelling rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, **14**(4): 49-55. (in Chinese))
- [30] 丁鲁强, 韩 仲, 邹维列, 等. 膨胀土-EPS 缓冲层-挡墙体侧压力的模拟和计算[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(8): 1558-1564. (DING Luqiang, HAN Zhong, ZOU Weilie, et al. Modelling and calculating lateral pressure of expansive soil-EPS inclusion-retaining wall system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(8): 1558-1564. (in Chinese))
- [31] HAN Z, ZHANG P, ZOU W L, et al. At-rest lateral earth pressure of compacted expansive soils: Experimental investigations and prediction approach[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, **16**(4): 1425-1435.
- [32] 公路工程土工合成材料试验规程: JTGE 50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (Test Methods of Geosynthetics for Highway Engineering: JTGE 50—2006[S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))