

## 研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v2i01.41-47

### 亮点:

- 系统量化对比了混凝土与抗径流网垫护坡的抗滑稳定性, 填补了两者安全性差异的空白。
- 采用 Autobank 构建简化模型, 参数易获取, 为工程前期快速安全评价提供了高效工具。
- 证实抗径流网垫护坡安全余量更高, 体现生态友好特性。

### \*通讯作者邮箱:

18436624302@163.com

**英文引用:** He Dajiang et al., 2026. Anti-sliding stability principle of channel anti-runoff net mat slope protection. Evidence in Engineering Science and Practice, 2(01), 41-47.

**中文引用:** 何大江等., 2026. 渠道抗径流网垫护坡抗滑稳定对比分析及优化研究. 工程科学与实践, 2(01), 41-47.

### 稿件处理节点:

接收	2026年3月23日
修订	2026年3月26日
接受	2026年3月27日
发表	2026年3月31日

### 基金资助:

浙江省水利科技重点项目(RB2513); 2024年浙江省水利科技重大项(RA2403); 2024年浙江省水利科技重点项目(RB2415)。

### 版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名4.0国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

## 渠道抗径流网垫护坡抗滑稳定对比分析及优化研究

何大江<sup>1</sup>, 帅伟<sup>1,\*</sup>, 陈威洁<sup>2</sup>, 胡永成<sup>2</sup>, 黄健<sup>1</sup>, 张超杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 杭州市富阳区林业水利局, 杭州 311400

<sup>2</sup> 建德市水利事业服务中心, 建德 311600

<sup>3</sup> 浙江省水利河口研究院, 杭州 310017

**摘要** 抗径流网垫护坡因良好的变形适应能力, 正逐步成为渠道工程中兼顾生态与安全的重要技术路径, 但其与传统混凝土衬砌在安全性方面的差异尚缺乏系统的量化对比。本研究聚焦于混凝土衬砌与网垫衬砌型柔性护坡两类结构, 基于现行水利工程规范, 构建计算模型对比二者的安全性。研究方法上, 采用 Autobank 软件建立渠道抗滑稳定分析模型, 模型简单, 参数易获取, 相比需复杂边界条件设定的有限元法, 该模型在工程前期设计与快速安全评价中具备更高的实用性与可操作性。研究结果表明, 混凝土衬砌护坡和抗径流网垫护坡均可满足规范抗滑稳定要求; 其中, 抗径流网垫护坡因锚钉系统的固定作用, 在整体稳定性上体现出更高的安全余量。该结构在保障工程安全的同时, 兼顾了生态友好与工程实用性。研究构建的简化对比模型, 为柔性护坡安全评价提供了一种高效、可复用的量化方法, 其成果可直接用于同类工程的前期方案比选, 对推动水利工程向生态友好型方向发展具有实际参考价值。

**关键词:** 抗径流网垫护坡; 混凝土衬砌; 抗滑稳定; 渠道工程; 生态护坡

## Anti-sliding stability principle of channel anti-runoff net mat slope protection

He Dajiang<sup>1</sup>, Shuai Wei<sup>3,\*</sup>, Chen Weijie<sup>2</sup>, Hu Yongcheng<sup>2</sup>, Huang Jian<sup>1</sup>, Zhang Chaojie<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fuyang District Forestry and Water Conservancy Bureau of Hangzhou City, Hangzhou 311400, China;

<sup>2</sup> Jiande Water Conservancy Service Center, Jiande 311600, China;

<sup>3</sup> Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310017, China

**Abstract** Due to its good deformation adaptability, anti-runoff mat slope protection is gradually becoming an important technical path to balance ecology and safety in channel engineering. However, there is still a lack of systematic quantitative comparison between it and traditional concrete lining in terms of safety. This study focuses on two types of structures: concrete lining and mesh lining flexible slope protection. Based on the current water conservancy project specifications, a calculation model is constructed to compare the safety of the two. In terms of research methods, Autobank software is used to establish a channel anti-sliding stability analysis model. The model is simple and the parameters are easy to obtain. Compared with the finite element method that requires complex boundary conditions, the model has higher practicability and operability in the preliminary design and rapid safety evaluation of the project. The results show that both the concrete lining slope protection and the anti-runoff net mat slope protection can meet the requirements of the specification for anti-sliding stability. Among them, the anti-runoff net mat slope protection shows a higher safety margin in the overall stability due to the fixed effect

of the anchor system. The structure not only ensures the safety of the project, but also provides support for the ecological landscape function of channel slope protection. The simplified comparison model constructed in this study provides an efficient and reusable quantitative method for the safety evaluation of flexible slope protection. The results can be directly used for the comparison and selection of similar projects in the early stage, which has practical reference value for promoting the development of water conservancy projects in the direction of eco-friendly.

**Keywords:** Anti-runoff net mat slope protection; concrete lining; anti-sliding stability; channel project; ecological slope protection

## 1. 引言

护坡作为渠道的关键构成部分，提高了输配水能力或安全性，却忽视了生态功能，因此越来越多的生态护岸结构形式在生态渠道工程建设中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>，抗径流网垫护坡采用锚杆、土工合成材料与生态基材构成边坡防护体系，具有柔性、透水性好、施工简便、环保、经济等特点，近年来迅速兴起，已成功应用于灌区渠道。唐庆瑜等<sup>[2]</sup>通过直剪试验发现，三维网垫与植物根系相结合时，对土体强度的提升效果远大于单一因素，且根系主要通过提高土体黏聚力的方式增强抗剪强度，为生态护坡的加筋机理提供了试验依据。在此基础上，Huang等<sup>[3]</sup>通过模型试验进一步揭示了复合生态格点锚固系统（CELAS）在降雨与径流作用下的多层协同抗冲刷机制，其冲刷体积较裸露坡地减少 90.6%，沉积物浓度降低超过 50%，为柔性护坡的结构优化提供了量化依据。与此同时，Sun等<sup>[4]</sup>针对锚杆加固顺层岩质边坡的稳定性分析表明，锚杆角度与直径对边坡安全系数的提升存在最优匹配关系，其提出的极限平衡分析方法可为锚钉系统设计提供理论支撑。

随着柔性生态护坡技术推广应用，大量学者进行研究。肖成志等<sup>[5]</sup>通过试验研究三维网植草护坡性能的主要影响因素，并分析了其稳定性；嵇晓雷<sup>[6]</sup>通过将数值模拟与试验研究相结合的方法，研究了植物根系与边坡土体位移场的关系；王艳坤<sup>[7]</sup>建立锚杆-土工格室复合结构防护边坡三维有限元模型并进行边坡稳定性影响分析。刘英朴<sup>[8]</sup>等通过直剪试验获取了含根量和含水率与根土复合体抗剪强度的关系，发现抗剪强度随含水率增大而降低，降雨强度越大边坡安全系数降低幅度越大。李洋等<sup>[9]</sup>研究表明，不同降雨类型对库岸边坡孔压响应和稳定性影响存在差异，后峰型降雨对安全系数影响最大，且下部滑坡因库水位与降雨联合作用，安全系数明显小于上部滑坡。上述研究均针对稳定性和适用性进行分析，但采用的计算方法需要大量的现场实测数据，不利于工程设计和安全评价，本文在前人研究基础上，采用简单分析方法基于较少的地基数据可将复杂工程问题简化为结构优化问题，为长距离输水渠道提供设计理论依据。

## 2. 计算方法

何大江等，2026

根据《水利水电工程边坡设计规范》（SL386-2007）<sup>[10]</sup>，对渠道断面渠坡抗滑稳定计算采用计及条块间作用力的简化毕肖普（Simplified Bishop）法。该方法在水利工程边坡稳定性分析中应用广泛，高瑞<sup>[11]</sup>采用 Autobank 软件对五曲湾水库进行渗流与结构安全复核，结果表明简化毕肖普法在稳定渗流期与水位降落期的坝坡稳定计算中，最小安全系数均满足规范要求。汤飞雄等<sup>[12]</sup>对理正岩土边坡稳定分析系统中简化毕肖普法的计算原理进行了分析，并与剩余下滑力法进行了对比验证。秦永才<sup>[13]</sup>运用简化毕肖普法对边坡天然工况及暴雨工况下的稳定性进行分析，证明了该方法在工程安全评价中的适用性。计算公式如下：

$$K = \frac{\sum \{[(W \pm V) \sec \alpha - ub \sec \alpha] \tan \phi' + c' b \sec \alpha\} \frac{1}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{K}}}{\sum [(W \pm V) \sin \alpha + \frac{M_C}{R}]}$$
 (1)

式中：

$W$ ——土条重量，kN；

$V$ ——垂直地震惯性力（向上为负，向下为正），kN；

$u$ ——作用于土条底面的孔隙压力，kN/m；

$\alpha$ ——条块重力线与通过此条块底面中点的半径之间的夹角，（°）；

$b$ ——土条宽度，m；

$c'$ ——有效应力抗剪强度指标，土条底面的凝聚力，kPa；

$\phi'$ ——有效应力抗剪强度指标，土条底面的内摩擦角，（°）；

$M_C$ ——水平地震惯性力对圆心的力矩，kN·m；

$R$ ——圆弧半径，m。

## 3. 分析计算

为进行渠道边坡稳定分析，采用 autobank 建立河道断面模型，对岸坡抗滑进行验算。

### 3.1. 工程概况

本文以典型某灌区 5 级渠道为例进行分析，现状渠道采用梯形断面衬砌，渠底宽度 2.0m，坡比 1:1.5，衬砌改造全段采用 C25 混凝土板梯形断面，渠坡坡脚设素混凝土脚槽。排水孔下铺设 10cm 粗砂垫层，粗砂垫层底部设一层 400g/m<sup>2</sup> 无纺布反滤层。粗砂垫层与无砂透水混凝土排水孔底部连接，构成排水体系。渠道断面图见图 1。

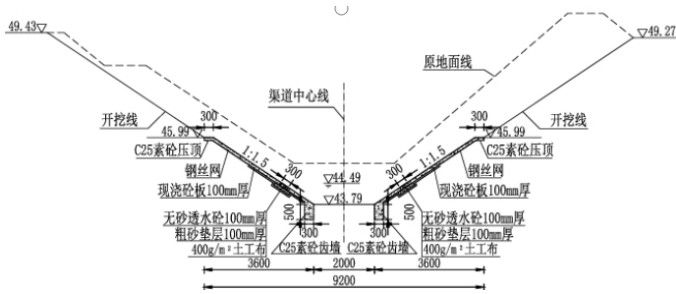


图 1 渠道断面图

为了改善生态环境，改造工程采用抗径流网垫衬砌结构，坡脚采用矩形格宾石笼基础，宽 1.2m、高 1.0m。渠底按设计比降进行清淤整平，每隔 10m 设置 1 道无锈熔接网石笼格梁，格梁宽 0.5m，高 1.0m。两侧渠坡每隔 10m 设置 1 道无锈熔接网石笼格条。抗径流网垫为成品采购，坡脚、坡中、坡顶打入 0.8m 的 T 型锚固钉，地锚拉钉纵、横向间距 1m，梅花形布置。

### 3.2 计算模型及工况

本文要对比两种护坡结构的安全稳定性，对其进行抗滑稳定验算。在建立河道断面模型时，取坡脚到右

边界的距离约为坡高的 1.0 倍，坡顶到左边界距离约为坡高的 1.0 倍，且上下边界总高约为坡高的 2 倍，可以确保较为可靠的计算精度。需要定义的属性有：衬砌、回填土、地下水等影响因素。抗径流网垫护坡看作浅加筋材料，计算范围为锚钉深度 0.8m，提高土体的抗剪强度。根据设计断面及地层情况，输入相应参数建立河道断面模型。

根据《水利水电工程边坡设计规范》（SL 386-2007），并结合渠道具体运行情况，分析渠坡在稳定渗流期的边坡抗滑稳定性。按正常运用和非常运用条件，确定计算工况如表 1。另考虑到持续降雨可能造成地下水位抬升，故设置水位抬升情况，确定计算工况如表 1。

表 1 典型算断面抗滑稳定计算工况

计算工况	潜水位/m	渠道水位/m
正常运用条件	正常水位 骤降期	水位由 44.46 骤降到 无水 43.76
非常运用条件 I	施工期	43.76
非常运用条件 II	地震情况	44.46

### 3.3 计算参数

本次稳定复核，各种土料的物理力学性计算参数，采用勘察实验成果表 2 所示。

表 2 各土层物理力学性参数建议值表

层号	岩性	含水率 $w(\%)$	干密度 $\rho(g/cm^3)$	孔隙比 $e$	饱和快剪		渗透系数 $k$ (cm/s)	承载力 (kPa)
					粘聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\phi$ (°)		
①	轻粉质壤土	26.7	1.46	0.851	11.8	10.0	$4.0 \times 10^{-5}$	120
②	中粉质壤土	22.5	1.46	0.855	13.8	9.3	$3.9 \times 10^{-6}$	80
③	重粉质壤土	30.5	1.46	0.872	11.0	15.5	$3.0 \times 10^{-6}$	100
/	锚钉固化土体	26.7	1.46	0.87	10	20	$3.9 \times 10^{-6}$	120

赵绍恒<sup>[14]</sup>针对植物根系加固软土地基开展的室内剪切试验研究表明，不同植物根系加固下的复合土体表现出不同的剪切性能参数，为锚钉固化土体参数的确

定提供了方法参考。陈攀等<sup>[15]</sup>通过根-土复合体直剪试验发现，干土质量对抗剪强度的影响程度大于水质量和干根质量，根-土复合体的黏聚力较素土增加

16.71%~34.74%，而内摩擦角变化较小，这与本研究中锚钉固化土体参数（粘聚力 10kPa、内摩擦角 20°）的设定逻辑一致，即加筋材料主要通过提高黏聚力来增强土体抗剪强度。在生态基材改良方面，Liu 等<sup>[16]</sup>研究表明，稻壳生物炭等改良剂可显著改善黄河沉积物的持水能力与孔隙结构，从而提升植被生长性能与坡面抗蚀能力，为生态护坡基材的配比优化提供了可行路径。

### 3.4 计算结果

本次稳定复核，各种土料的物理力学性计算参数，采用勘察成果，渠坡抗滑稳定计算结果如表 3 和图 2~7 所示。

表 3 边坡抗滑稳定性计算成果

计算工况	原衬砌安全系数	生态护坡安全系数	规范值
正常运用条件 地下水水位 45.13m，渠道水位由 44.46m 骤降到 43.76m	1.15	1.69	1.05
非常运用条件 I 渠道水位 43.76m（无水），地下水水位 45.13m	1.08	1.23	1.05
非常运用条件 II 渠道水位 44.46m，地下水水位 45.13m，考虑地震作用	1.01	1.01	1.00

根据《水利水电工程边坡设计规范》（SL 386-2007），采用简化毕肖普法计算时，正常运用条件下边坡抗滑稳定安全系数应不小于 1.05；非常运用 I 条件下应不小于 1.05，非常运用 II 条件下应不小于 1.00。由表 3 可以看出，原混凝土衬砌护坡和抗径流网垫护坡在正常运用条件和非常运用条件 I、II 下抗滑稳定计算，计算结果均满足规范要求。

水位降落期，有效应力法，设计水位-无水，u[根据孔压系数计算]，毕肖普法，Fs=1.14954

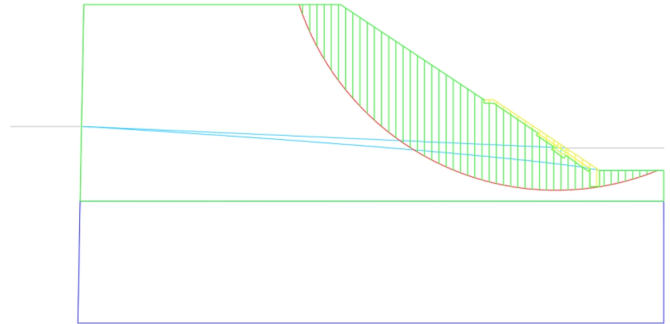


图 2 正常运用条件混凝土渠坡抗滑稳定性

完建期，有效应力法，渠内无水，毕肖普法，Fs=1.08141

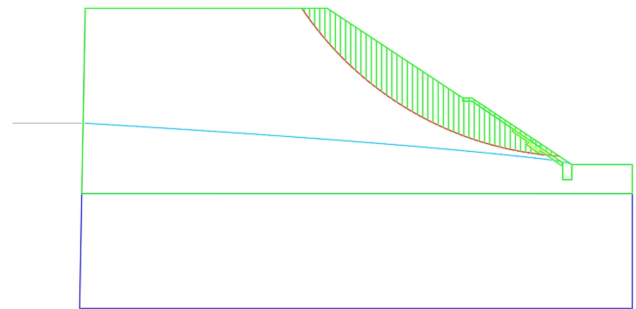


图 3 非常运用条件 I 混凝土渠坡抗滑稳定性

地震工况，有效应力法，设计水位，毕肖普法，地震加速度 0.2g，Fs=1.01295

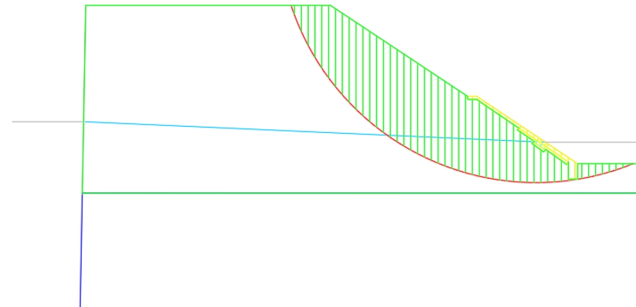


图 4 非常运用条件 II 混凝土渠坡抗滑稳定性

水位降落期,有效应力法,设计水位=无水,  $u$ [根据孔压系数计算],毕肖普法,  $F_s=1.16913$

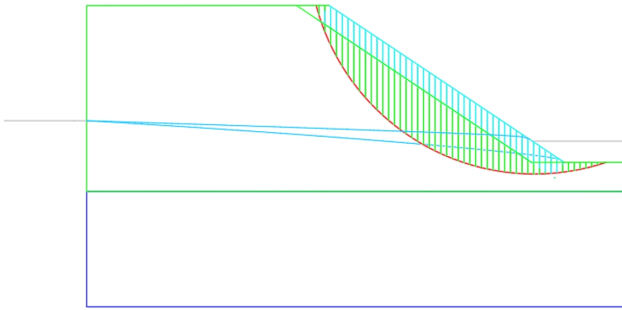


图5 正常运用条件抗径流网垫渠坡抗滑稳定性

完建期,有效应力法,渠内无水,毕肖普法,  $F_s=1.23456$

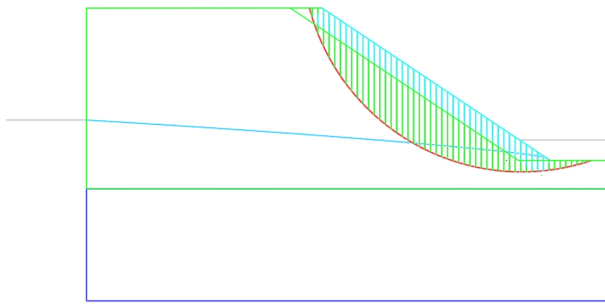


图6 非常运用条件I抗径流网垫渠坡抗滑稳定性

地震工况,有效应力法,设计水位,毕肖普法,地震加速度0.2g,  $F_s=1.00886$

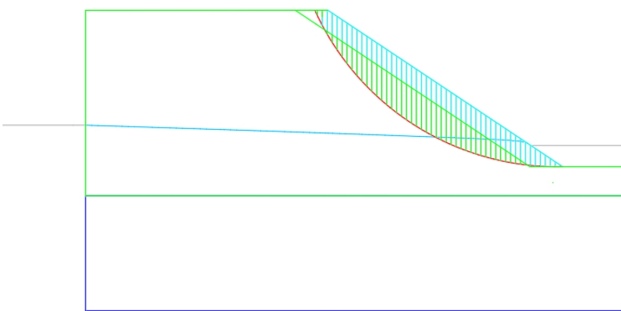


图7 非常运用条件II抗径流网垫渠坡抗滑稳定性

对比原混凝土衬砌护坡和抗径流网垫护坡滑动面知,圆弧滑动面均处于两侧渠坡之上,由于锚钉的固定作用,完建期和水位骤降情况下抗径流网垫护坡滑动面较大,安全系数增大。由于抗径流网垫护坡不改变渠坡土的离散型,故地震情况下二者安全系数一致,均临近规范值。

## 4. 讨论

本研究采用 **Autobank** 软件构建简化抗滑稳定模型,相较于三维有限元等方法,参数需求少、建模简便,更适用于工程前期快速安全评价,与高瑞<sup>[11]</sup>、刘婧<sup>[17]</sup>等研究结论一致。结果表明,抗径流网垫护坡在正常运用及非常运用I条件下安全系数较混凝土衬砌护坡显著提高,与唐庆瑜等<sup>[2]</sup>关于三维网垫加筋可有效提升土体强度的结论相吻合。然而,在地震工况下两种护坡安全系数相同,与嵇晓雷等<sup>[6]</sup>关于植物根系可改善边坡抗震性能的研究存在差异,原因可能在于本研究仅考虑锚钉浅层加筋作用,未计入根系-土体动态相互作用。此外,本研究未涉及锚钉锈蚀、土工材料老化等长期耐久性问题,熊豪创<sup>[18]</sup>关于干湿循环下土体参数弱化对边坡稳定性影响的研究,为本研究后续开展长期耐久性分析提供了参考方向。

针对长期服役性能, Bao 等<sup>[19]</sup>对聚丙烯纤维与瓜尔胶改良黄土边坡的时效劣化过程进行了系统监测,发现其抗冲刷能力随干湿循环次数增加呈阶梯式衰减,且不同改良材料的劣化机制存在差异。Mao 等<sup>[20]</sup>进一步建立了根-土复合体在干湿循环条件下的剪切强度预测模型,揭示了有效凝聚力随干湿循环次数增加而持续衰减的规律。上述研究成果为本研究后续开展锚钉-土体系统长期稳定性评价提供了理论工具。

## 5. 结论

为进行渠道渠坡稳定分析,采用 **autobank** 建立河道断面模型,对混凝土渠坡和抗径流网垫护坡抗滑进行对比分析,结论如下:

1) 采用 **autobank** 软件建立渠道抗滑稳定模型并进行计算,模型简单,参数易获取,相比其他有限元法更适用于工程前期的设计或安全评价。

2) 原混凝土衬砌护坡和抗径流网垫护坡均可满足规范抗滑稳定要求,其中抗径流网垫护坡由于锚钉的固定作用,在满足工程安全要求的同时,进一步提高了安全余量。

后续研究可进一步考虑锚钉锈蚀、土工材料老化等长期耐久性问题,以及根系-土体动态相互作用对抗震性能的影响,同时结合干湿循环下土体参数弱化的研究成果,开展长期水文变化对边坡稳定性的时效性研究。

## 参考文献

- [1] 李甲林,王正中.渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [2] 唐庆瑜,杨文龙.三维生态护坡网垫对边坡土体强度影响研究[J].水利科学与寒区工程,2025,8(09):61-64.
- [3] Huang Z, Li Z, Xu Y, et al. Anti-erosion performance of a composite ecological lattice anchoring system for bank slopes: A model test[J]. Ecological Engineering, 2026, 222: 107810.
- [4] Sun C, Chen C, Zhang W, et al. Stability of bolt-supported concealed bedding rock slopes with respect to bi-planar failure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 104.
- [5] 肖成志,孙建诚,李雨润,等.三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析[J].岩土力学,2011,32(02):453-458.
- [6] 嵇晓雷,杨平.不同根系布置模式对降雨条件下边坡稳定性的影响[J].东北林业大学学报,2020,48(07):86-89+97.
- [7] 王艳坤,宋玲,刘杰,等.锚杆-土工格室复合结构边坡防护有限元数值分析[J].公路,2021,66(11):7.
- [8] 刘英朴,任权.降雨条件下植被型公路边坡的稳定性研究[J].地下水,2024,46(03):270-274.
- [9] 李洋.不同降雨类型情况下库岸边坡稳定性分析[J].水利科学与寒区工程,2025,8(09):32-35.
- [10] 水利部水利水电规划设计总院.水利水电工程边坡设计规范[M].中国水利水电出版社,2007.
- [11] 高瑞.基于 Autobank 水库大坝渗流及稳定分析[J].吉林水利,2023,(05):7-11.
- [12] 汤飞雄,张毅.理正岩土边坡稳定分析系统在浸水边坡稳定性计算中的研究[J].四川水利,2023,44(03):22-25.
- [13] 秦永才.极限平衡法对边坡整体和局部稳定性评价[J].价值工程,2023,42(02):146-148.
- [14] 赵绍恒.植物根系复合土体力学试验分析[J].安徽建筑,2024,31(08):79-81.
- [15] 陈攀,葛永刚,孙庆敏,等.根-土复合体抗剪强度影响因素研究[J].应用力学学报,2024,41(04):804-811.
- [16] Liu B, Liao M, Wan Y, et al. Hydraulic characteristics and vegetation performance of the Yellow River sediment modified by biochar[J]. Biogeotechnics, 2024, 2(2): 100070.
- [17] 刘婧.郑集河输水扩大工程综合治理方案分析[J].陕西水利,2024,(04):142-145.
- [18] 熊豪创.考虑库水位升降作用和土体参数弱化作用边坡稳定性分析[J].水利科学与寒区工程,2025,8(09):1-5.
- [19] Bao H, Liu C, Lan H, et al. Time-dependency deterioration of polypropylene fiber reinforced soil and guar gum mixed soil in loess cut-slope protecting[J]. Engineering Geology, 2022, 311: 106895.
- [20] Mao Z, Ma X, Liu Y, et al. Study on time effect and prediction model of shear strength of root-soil complex under dry-wet cycle[J]. Biogeotechnics, 2024, 2(2): 100079.