

土工袋护坡在河岸边坡工程中的稳定性分析与应用研究

丁云龙, 陈欢欢, 吕娜, 张哲, 曾阳益, 张峻岭, 张鼎

四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072

DOI:10.61369/WCEST.2026020016

摘 要 : 为解决河岸边坡失稳破坏问题, 探究土工袋护坡技术的工程适用性与稳定控制机理, 本文系统研究了土工袋护坡的稳定性分析方法, 明确了土工袋护坡体的主要破坏形式及影响因素, 通过平面滑动法建立了土工袋护坡体稳定性计算模型, 结合简化 Bishop 法引入土工袋压坡效应, 分析了压坡体宽度、坡高、坡比对边坡安全系数的影响规律; 同时采用费伦纽斯条分法、复合型滑动面分析法分别计算了无砌护、土工袋砌护工况下河岸边坡的稳定系数。研究结果表明: 土工袋护坡体主要存在滑动、塑性、断裂、水平滑移 4 种破坏形式, 其稳定性关键受土工袋抗拉强度、层间摩擦系数及填料内摩擦角影响; 相同坡高和压坡体宽度下, 边坡安全系数随坡比增大而减小, 相同坡高和坡比下, 安全系数随压坡体宽度增大而提升, 相同坡比和压坡体宽度下, 安全系数随坡高增加而降低; 相较于无砌护工况 (安全系数 1.05), 土工袋砌护后河岸边坡安全系数提升至 1.56, 边坡稳定性显著提高。研究成果可为土工袋护坡技术在河岸边坡工程中的设计与应用提供理论依据和工程参考。

关 键 词 : 土工袋护坡; 河岸边坡; 稳定性分析; 压坡效应; 安全系数; 条分法

Stability Analysis and Application Research of Geosynthetic Bag Slope Protection in Riverbank Slope Engineering

Ding Yunlong, Chen Huanhuan, Lv Na, Zhang Zhe, Zeng Yangyi, Zhang Junling, Zhang Ding

Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610072

Abstract : To address slope instability issues along riverbanks and investigate the engineering applicability and stability control mechanisms of geotextile bag slope protection technology, this study systematically examines stability analysis methods for geotextile bag slopes. It identifies primary failure modes and influencing factors of geotextile bag slope structures, establishes a stability calculation model using the planar sliding method, and incorporates geotextile bag pressure effects through simplified Bishop's method to analyze the impact of slope width, height, and gradient on slope safety factors. The Frenius strip method and composite sliding surface analysis were employed to calculate stability coefficients for unlined and geotextile bag-lined riverbank slopes. Results demonstrate four predominant failure modes (sliding, plastic deformation, fracture, and horizontal displacement), with stability critically influenced by geotextile bag tensile strength, interlayer friction coefficients, and filler internal friction angles. Under identical slope height and pressure width conditions, slope safety factors decrease with increasing gradient; increase with pressure width at constant slope height and gradient; and decrease with height at fixed gradient and pressure width. Compared to unlined conditions (safety factor 1.05), geotextile bag lining elevates riverbank slope safety factors to 1.56, significantly enhancing slope stability. These findings provide theoretical foundations and engineering references for designing and applying geotextile bag slope protection technologies in riverbank engineering projects.

Keywords : geosynthetic bag slope protection; riverbank slope; stability analysis; slope compression effect; safety factor; strip method

引言

河岸边坡易受水流冲刷、土体自重等因素影响而失稳, 威胁河道安全和生态环境, 是世界范围内面临的主要自然灾害之一^[1]。传统防护技术如混凝土砌护刚性大、适应性差, 且施工效率低、成本高、生态破坏明显。土工袋护坡作为新型柔性技术, 采用土工材料填充岩土后分层码放, 具备良好抗剪、抗滑性能及变形协调能力。该技术施工简便、经济环保, 应用广泛, 凭借生态兼容、造价低和就地取

基金项目: 水利部重大科技项目《黄河上游生态脆弱区防洪治理工程关键技术研究》(SKS-2022023)。四川省省级科研院所基本科研项目(2025-SKY-ZXKY-03)。

作者简介: 丁云龙(1992.04-), 男, 甘肃省张掖人, 汉族, 技术员, 大学本科, 主要从事水利水电工程设计、咨询与管理工作。

边坡稳定性是土工袋护坡工程设计与应用的核心问题,其分析方法和计算模型直接决定防护方案的合理性和工程安全性。目前边坡稳定性分析方法主要分为定性分析和定量分析,定量分析中的极限平衡法、数值模拟法是工程中最常用的方法,但针对土工袋柔性护坡的特殊性,现有分析方法未充分考虑土工袋与边坡土体的相互作用及压坡效应,难以准确反映土工袋护坡体的稳定机理。基于此,本文以土工袋砌护的河岸边坡为研究对象,系统分析土工袋护坡体的破坏形式与影响因素,建立考虑压坡效应的土工袋护坡稳定性计算模型,通过室内计算与工况分析,揭示土工袋护坡对河岸边坡稳定性的提升规律,为该技术的工程推广提供理论支撑。

下稳定性更优。

极限平衡法是边坡稳定分析中经典且广泛采用的方法。极限平衡法的优势在于模型简单、计算公式简洁,易于工程设计人员掌握和应用,但该方法也存在明显局限性:(1)预设滑动面形态与位置,可能与实际情况偏差;(2)忽略土体与支护结构相互作用,难以展现协同机制;(3)缺乏位移计算能力,无法呈现变形过程。

数值分析方法是目前边坡稳定性分析中最普遍的方法, 主要包括有限元法、有限元强度折减法、FLAC 法、边界元法、离散元法等, 其中有限元法及强度折减法在土质边坡分析中应用最广泛。有限元强度折减法由 Zienkiewicz 于 1975 年提出^[7], 将极限平衡原理、有限元计算原理和强度折减理论相结合, 通过逐渐增大强度折减系数, 分析坡体的特征值和特征点, 最终将坡体失稳时对应的折减系数定为边坡安全系数。

图1 十丁袋护坡体结构破坏简图

(W 为土工袋的重量; h 为土工袋堆砌高度; θ 为滑坡面倾角; ω 为坡面倾角)

(一) 土工袋压坡体的受力平衡分析

土工袋组合体具有柔性,能适应坡体胀缩变形,其压坡作用增强边坡稳定性。本研究将土工袋加筋体视为压坡体,并假定无相对滑动。二者同步破坏,结合简化 Bishop 法引入压坡效应,建立考虑土工袋压坡的边坡稳定性计算模型。

土工袋护坡体采用柔性叠筑结构,其破坏机理与刚性护坡有明显区别。根据工程实践和理论分析,该类护坡结构主要存在四种破坏模式:(1)滑动破坏;(2)边坡土体塑性破坏;(3)土工袋断裂破坏;(4)水平推移破坏。

图2 土丁袋压坡体及其后边坡土体作用力示意图

(W 为土工袋的自重; P 为边坡土体对土工袋的作用力; N 为土工袋底面的垂直力; T 为土工袋底面的抗滑力; θ 为坡脚; ϕ 为土工袋与边坡间摩擦角)

影响土工袋护坡体破坏形式和稳定性的因素较多, 核心影响为土工袋自身性能和填料物理力学性质, 主要包括: (1) 袋的抗拉强度和延伸率, 直接决定袋体抵抗拉裂、滑移的能力; (2) 土工袋之间的摩擦系数, 影响层间抗滑力大小, 是防平滑移和滑动破坏的关键; (3) 土工袋内填充材料的内摩擦角, 决定填料的抗剪强度, 影响护坡体整体抗滑稳定性。

(二) 压坡效应的影响规律分析

土工袋护坡体极少出现圆弧滑动破坏,通常表现为沿层间的折线式破坏,因此可将滑动面简化为平面,土工袋护坡体在缓坡

为研究土工袋压坡对边坡稳定性的影响,研究选取三种坡比

(1:2.5、1:2、1:1.5)、三种坡高(1.0m、1.5m、2.0m)和四种压坡体水平宽度(0m、0.8m、1.2m、1.6m)进行工况计算。各工况边坡安全系数计算结果见表1。

表1 不同压坡体宽度、坡比和坡高条件下的坡体安全系数

坡比	坡高 (m)	压坡体水平宽度(m)		
		0m	0.8m	1.2m/1.6m
1:2.5	1.0	2.66	2.84	2.95/3.01
1:2.5	1.5	1.94	2.04	2.12/2.18
1:2.5	2.0	1.52	1.57	1.62/1.66
1:2.0	1.0	2.37	2.59	2.72/2.81
1:2.0	1.5	1.70	1.81	1.91/1.98
1:2.0	2.0	1.31	1.36	1.41/1.46
1:1.5	1.0	2.06	2.31	2.49/2.58
1:1.5	1.5	1.45	1.57	1.68/1.77
1:1.5	2.0	1.09	1.15	1.20/1.25

由表1计算结果可知,土工袋压坡体对边坡稳定性的提升存在明显规律:

(1)同等坡高和坡宽条件下,安全系数与坡角呈现负相关,如坡高1.0m、压坡体宽度1.6m时,坡比1:2.5、1:2、1:1.5对应的安全系数分别为3.01、2.81、2.58,表明陡坡条件下边坡稳定性更差,需增大压坡体宽度提升稳定性;

(2)同等坡高和坡比条件下,安全系数与坡宽呈现正相关,如坡高2.0m、坡比1:1.5时,压坡体宽度从0m增至1.6m,安全系数从1.09提升至1.25,增幅达14.7%,但压坡体宽度增大到一定程度后,安全系数增幅逐渐放缓,存在最优经济宽度;

(3)同等坡比和坡宽条件下,安全系数与坡高呈现负相关,如坡比1:2、压坡体宽度1.2m时,坡高1.0m、1.5m、2.0m对应的安全系数分别为2.72、1.91、1.41,表明高边坡需采取更宽的压坡体或分层防护措施。

四、河岸边坡不同砌护模式下的稳定性对比分析

以某河道试验段岸坡为研究对象,选取坡高H=3m、坡比1:1.5的典型断面,分别采用费伦纽斯条分法、复合型滑动面分析法计算无砌护、土工袋砌护工况下的边坡稳定系数,对比分析土工袋护坡的工程效果。试验段边坡土体参数:粘聚力 $c=10\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=20^\circ$,重度 $\gamma=19\text{kN/m}^3$;河道底部1m处存在软弱流沙层,流沙层粘聚力 $c=7.5\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=16^\circ$,重度 $\gamma=19\text{kN/m}^3$ 。

(一) 无砌护工况下边坡稳定性分析

无砌护河岸边坡为粘性土坡,失稳时滑动面近似为圆柱面,采用费伦纽斯条分法(圆弧滑动面法)进行稳定性计算,考虑河

道渗流影响,采用等代法将渗流作用等效为静水压力和土体重度的变化。将滑动土体划分为8个土条,通过CAD作图确定土条几何参数和受力特征,采用Excel计算确定最危险滑动面圆心位置,土条受力计算结果如表2所示。

表2 无砌护边坡最危险滑动面条分法计算表

序号	土条宽度(m)	土条滑动弧段的倾角($^\circ$)	土条的重量(kN/m)	滑动面的长度(m)	静水压力(kN/m)
1	1	-12.07	11.02	1.10	5.59
2	1	-0.59	29.83	1.02	12.54
3	1	10.87	44.65	1.00	15.88
4	1	22.81	55.67	1.02	16.95
5	1	35.99	60.99	1.09	15.48
6	1	52.32	51.87	1.24	11.07
7	1	67.99	33.44	1.64	2.84
8	0.42	79.82	4.56	1.12	0.00
合计	-	-	281.38	9.23	80.36

(二) 土工袋砌护工况下边坡稳定性分析

土工袋砌护时,护坡体支撑基础未深入河道底部软弱流沙层,边坡滑动面为圆弧与直线构成的复合型滑动面。采用简化分析法,取坡肩、坡脚至软弱流沙层的脱离体为研究对象,考虑脱离体自重G、滑动面抗滑力R、法向支持力N及朗肯主动/被动土压力 E_a 、 E_p ,根据水平方向力的平衡和强度条件,推导出复合型滑动面边坡安全系数计算公式:

$$K=\frac{E_p+G\tan\phi+cL}{E_a} \tag{1}$$

式中:L为滑动面长度,m; E_a 、 E_p 分别为朗肯主动、被动土压力,按朗肯土压力理论公式计算。

代入流沙层和边坡土体参数,计算得朗肯主动土压力 $E_a=82.5\text{kN/m}$,被动土压力 $E_p=45.3\text{kN/m}$,结合滑动面几何参数,最终计算得土工袋砌护工况下边坡安全系数 $K=1.56$,相较于无砌护工况提升48.6%,表明土工袋护坡能有效约束边坡土体变形,抵抗软弱夹层的滑移作用,显著提升河岸边坡的稳定性。

五、结论

本文通过理论分析、模型建立和工况计算,系统研究了土工袋护坡在河岸边坡工程中的稳定性机理和应用效果,得出以下主要结论:

(1)土工袋护坡体的主要破坏形式为滑动、边坡土塑性、断裂和水平滑移破坏,其稳定性关键受土工袋抗拉强度、层间摩擦系数、填料内摩擦角影响,折线式滑动是最常见的破坏形式,可采用平面滑动法建立其稳定性计算模型;

(2) 土工袋压坡效应能显著提升边坡稳定性, 边坡安全系数随压坡体宽度增大而提升、随坡高和坡比增大而降低, 压坡体宽度增大至一定程度后安全系数增幅放缓, 工程设计中需选取最优经济宽度;

(3) 无砌护河岸边坡(坡高3m、坡比1:1.5)的安全系数仅为1.05, 处于基本稳定状态; 土工袋砌护后, 边坡滑动面变为复合型, 安全系数提升至1.56, 稳定性提高48.6%, 土工袋护坡技术对河岸边坡的稳定控制效果显著。

参考文献

[1] 吴小军. 水利工程水闸除险加固施工工艺研究 [J]. 科学技术创新, 2020, (31): 129-130.

[2] 徐解刚, 杭天飞, 厉凯, 等. 基于土工袋的河岸防护应用研究 [J]. 陕西水利, 2021, (04): 48-50+56.

[3] 董宗伟, 徐生武, 王相峰. 塔里木河干流土工袋护岸边坡稳定分析 [J]. 东北水利水电, 2022, 40(08): 20-23+72.

[4] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2267-2273.

[5] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用 [J]. 岩土工程技术, 2007(05): 221-225.

[6] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术 [J]. 岩土力学, 2007(08): 1665-1670.

[7] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975. DOI:10.1680/geot.1975.25.4.671.