

管袋堤坝龙口顶袋过水滑移稳定预测*

李 庆^{1,3}, 杨 刚², 刘世通¹

(1. 北部湾大学 建筑工程学院, 广西 钦州 535011; 2. 中交天航南方交通建设有限公司, 广东 深圳 518101;

3. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 管袋堤坝龙口封堵过程受水力作用明显, 易出现袋体滑移失稳的现象, 导致龙口封堵失败, 造成施工成本增加和工期延误。为减小失败的风险, 本文在理论分析的基础上, 采用 FLOW 3D 和 FLAC 3D 数值模拟软件对过水堰顶管袋进行稳定分析, 并与实际工程进行对比。结果表明: 1) 堰顶过流产生的静水压力和水流水平推力是顶袋发生滑移失稳破坏的主要因素。2) 滑移临界水头与顶袋袋体宽度、袋体间等效摩擦系数、袋体充填密度呈正相关。3) 预测公式计算结果与工程实际较为相符, 具有一定的工程参考价值。

关键词: 土工管袋; 龙口封堵; 稳定分析; 临界水头; 预测公式

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0170-05

Prediction and analysis of slippage of geotextile tube in closure gaps

LI Qing^{1,3}, YANG Gang², LIU Shi-tong¹

(1. College of Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China;

2. CCCC TDC Southern Communication Co., Ltd., Shenzhen 518101, China;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: The blocking process of the geotextile tube in the closure gaps is obviously affected by hydraulic force, and the geotextile tube is prone to slip and instability, which leads to the failure of the blocking of the junctions, resulting in increased construction costs and delays in the construction period. To reduce the risk of the failure, based on the theoretical analysis, this paper uses the FLOW 3D and FLAC 3D numerical simulation software to analyze the stability of the weir top geotextile tube, and compares it with the actual project. The results show that: 1) The hydrostatic pressure and the horizontal thrust of the water flow generated by the overflow at the top of the weir are the main factors for the slip failure of the top geotextile tube. 2) The sliding critical head is positively related to the width of top bag, the equivalent friction coefficient between bags and the weight of bag filling. 3) The calculation results of the prediction formula are more consistent with the actual engineering, and have certain engineering reference value.

Keywords: geotextile tube; closure gaps blocking; stability analysis; critical head; prediction formula

管袋堤坝因其具有低碳节能、工艺简单、技术可靠、节省造价和工期可控等特点, 在河口海岸及内河基础设施中广泛应用^[1]。大库区管袋堤坝龙口封堵是围海工程的重点和难点, 决定着围海工程的成败。如果龙口封堵失败, 会加大冲刷作用时间、影响基础稳定, 同时也对施工成本和

工期控制带来十分不利的影响。当龙口封堵时, 水力条件劣化, 会对袋体稳定产生极大的影响。刘海笑等^[2]、朱朝荣等^[3]利用波流水槽, 开展管袋堤坝过水稳定试验, 研究坝体边坡系数、高度和顶袋宽度与临界水流要素的关系, 得出顶袋稳定性随着边坡系数和宽度的增大而增大, 随着高

收稿日期: 2022-04-14

*基金项目: 广西教育厅高校科研项目(2022KY0414); 钦州学院高层次人才科研启动项目(2019KYQD43)

作者简介: 李庆(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程施工技术研究。

度的增加而减小。林刚等^[4]采用静力平衡理论对充填管袋的稳定性进行理论分析, 得到满足袋体稳定的特征值。

以上研究成果丰富, 但理论性很强, 不便于工程现场直接采用。为减小龙口封堵失败导致工期延误和施工成本增加的风险, 本文在理论分析的基础上, 利用 FLOW 3D(高精度计算流体动力学)和 FLAC 3D(仿真计算)数值分析软件相结合, 探寻龙口袋体失稳破坏的机理, 提出顶袋失稳的预测公式, 并与实际工程分析比较, 验证其适用性。

1 龙口顶袋过水滑移破坏机理

龙口封堵过程中过流断面不断缩小, 涨落潮时, 库内外易出现水位差。通过试验表明堤坝袋体在水流作用下, 首先是顶袋失稳破坏, 随后顷刻间顶层以下袋体被冲垮。本文以顶袋为主要分析对象, 研究其受力条件, 判断其失稳破坏条件。

1.1 龙口顶袋滑移破坏条件

1.1.1 摩阻力

管袋堤坝由不同规格尺寸袋体交错充填而成, 交界面上的摩擦阻力是阻止袋体间滑移的关键因素。摩擦阻力大小与袋体充填介质的有效密度、袋体间摩擦系数及接触面宽度等有关。轴线方向单位长度摩擦阻力 F_f 的大小为:

$$F_f = \mu \rho' g h_l L_l \tag{1}$$

式中: μ 为交界面等效摩擦系数; ρ' 为充填介质有效密度; g 为重力加速度; h_l 为袋体层厚; L_l 为袋体间接触面宽度。

1.1.2 水力作用

根据龙口段结构尺寸和堰顶水头特征, 分析其出流形式一般为宽顶堰流。库内外水位差使得堰体内外侧形成静水压差, 同时由于水舌下部的一些空气被带走而出现负压区, 见图 1。

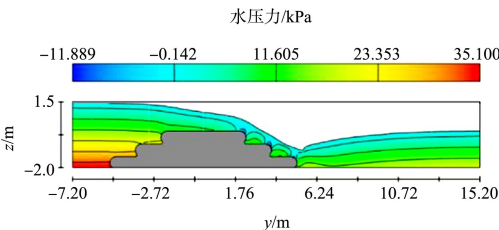


图 1 过水断面水压力分布

水流在行进过程中受到堰体的阻挡, 过流断面变小, 流速发生改变, 见图 2。根据恒定总流动量方程, 可得作用在堰体上的水平推力 R 为:

$$R = P_1 - P_2 - \rho Q (v_2 - v_1) \tag{2}$$

式中: R 为水对堰体的水平推力; P_1 为上游断面水压力合力; P_2 为堰顶中部断面水压力合力; ρ 为海水的密度; Q 为单宽断面流量; v_1 为上游断面平均流速; v_2 为堰顶中部断面平均流速。

1.2 龙口顶袋滑移失稳机理

在未形成龙口前, 管袋堤坝内外侧水位一致, 水压相等, 方向相反, 水平向合力为零, 袋体水平向保持稳定。当形成龙口后, 库内外水位不一致, 产生静水压差, 同时水流向龙口堰顶行进的过程中遇到袋体的阻挡, 使得流线及流速发生改变, 并对袋体产生水平推力。堰上水头较小时, 袋体交界面上的摩擦阻力随着水平力的增大而增大, 此时摩擦阻力与水平力大小相等、方向相反, 袋体保持稳定。随着堰上水头的不断增大, 当水平力大于袋体交界面摩擦阻力时, 顶袋将被冲下堤坝, 龙口段堤坝即发生失稳破坏。龙口段过水断面顶袋受力见图 2。

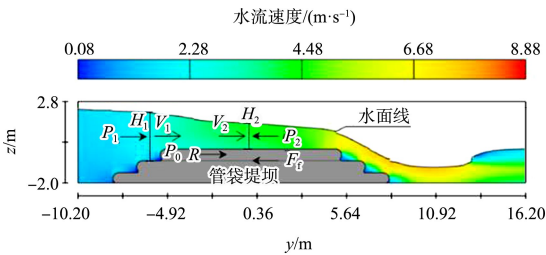


图 2 过水断面流速及顶袋受力

为便于分析计算, 暂不考虑风浪作用影响, 将袋体视为弹性体、迎水断面为圆弧状。基于 Mohr-Coulomb(莫尔-库仑理论)准则, 假定顶袋发生滑移时, 滑移面上的剪应力达到接触面最大抗剪强度, 且大小保持不变、均匀分布。取堤坝轴向单位长度进行分析, 根据极限平衡条件得:

$$P_0 + R = \mu \rho' g h_l L_l \tag{3}$$

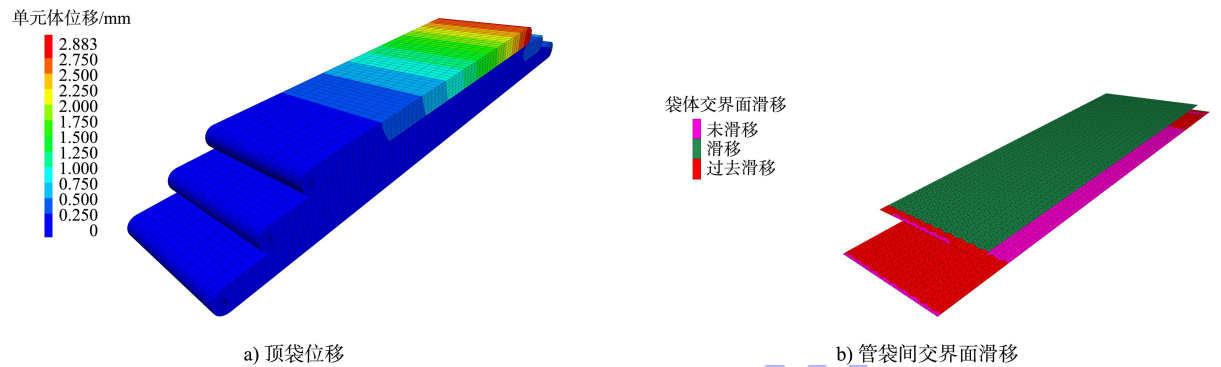
式中: P_0 为顶袋来流侧静水压力。

2 袋体滑移模拟分析

在较短时间内, 可认为龙口过水为恒定流,

按平面问题考虑。龙口段过水断面的流速、流量及水面线随堰上水头及袋体宽度变化而变化。利用 FLOW 3D 数值软件模拟水流流态，得出堰顶相关水流要素，求出作用在顶袋来流侧的静水压力

和水平推力。同时将其导入 FLAC 3D 数值软件接触面单元中，分析顶袋的位移及袋体间的滑移状态。以交界面整体滑移作为滑移失稳判据，分析各参数对顶袋过流稳定的影响，见图 3、4。



注：顶袋宽 12 m，密度 1.3 t/m³，摩擦系数 0.32。

图 3 堰上水头 2.8 m 时顶袋位移及交界面滑移状态

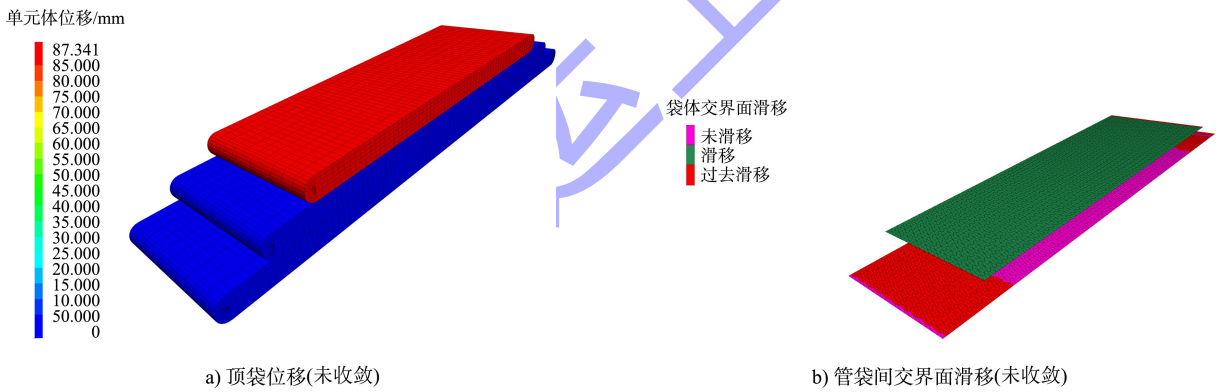


图 4 堰上水头 3.0 m 时顶袋位移及交界面滑移状态

2.1 模拟工况

根据水力学理论可知，堰上水头及堰顶宽度对过流水面线、流速等影响较大，决定着作用在来流侧袋体的静水压力和水平推力，而摩擦阻力则与管袋宽度及交界面摩擦系数有关。假定下游水位与顶袋顶高程相同，袋体层高 70 cm，边坡系数为 2，不考虑下游侧负压及波浪作用的影响。根据实际工程断面和潮位情况，考虑 4 种因素，29 种工况，确定模拟参数取值范围，见表 1。

表 1 模拟参数取值范围

影响因素	堰上水头 H_0/m	袋体宽度 L/m	充填介质密度 $\rho'/(t\cdot\text{m}^{-3})$	交角面摩擦系数 μ
模拟范围	1.8~3.6	4~12	1.0~1.4	0.25~0.40

2.2 影响因素分析

将 FLAC 3D 模型无法收敛或平衡时的上一级堰上水头定义为顶袋临界安全水头(简称临界水头)，模拟分析结果见表 2。

表 2 临界水头变化规律

顶袋宽度 X_1 /m	摩擦系数 X_2	有效密度 $X_3/(t \cdot m^{-3})$	临界水头 Y /m	顶袋宽度 X_1	摩擦系数 X_2	有效密度 $X_3/(t \cdot m^{-3})$	临界水头 Y /m
4	0.36	1.1	0.6	10	0.36	1.0	2.0
4	0.36	1.2	0.8	10	0.36	1.1	2.2
4	0.36	1.3	1.0	10	0.36	1.2	2.6
4	0.36	1.4	1.2	10	0.36	1.3	2.6
4	0.36	1.5	1.2	10	0.36	1.4	2.8
6	0.36	1.1	1.2	12	0.25	1.3	2.2
6	0.36	1.2	1.4	12	0.29	1.3	2.4
6	0.36	1.3	1.4	12	0.32	1.3	2.8
6	0.36	1.4	1.6	12	0.36	1.3	3.0
6	0.36	1.5	1.6	12	0.40	1.3	3.4
8	0.36	1.0	1.6	12	0.36	1.0	2.4
8	0.36	1.1	1.8	12	0.36	1.1	2.6
8	0.36	1.2	1.8	12	0.36	1.2	2.8
8	0.36	1.3	2.0	12	0.36	1.4	3.4
8	0.36	1.4	2.2				

临界水头与随各参数变化的关系曲线见图 5。临界水头随着袋体宽度、界面摩擦系数和袋体

充填重度的增大而增大，呈正相关。

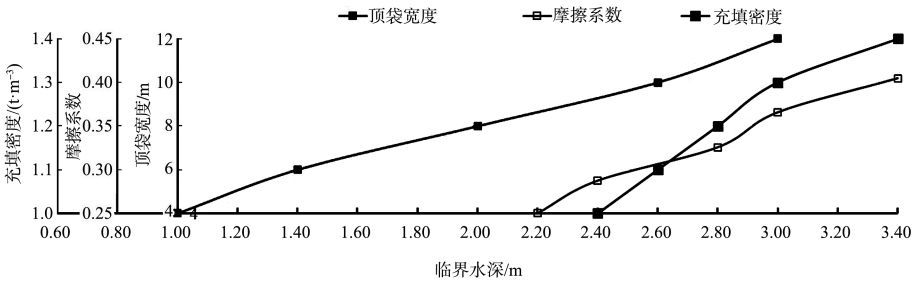


图 5 临界水头与各参数变化关系

2.3 临界水头预测公式

假定堤坝边坡系数为 2，下游水位与过流堰顶高程一致，依据 29 种工况模拟分析结果，采用多元线性回归可得临界水头与各参数之间的关系如下：

$$Y=0.264X_1+7.790X_2+0.165X_3-5.080 \quad (4)$$

式中： Y 为临界水头， X_1 为顶袋宽度值， X_2 为袋体间摩擦系数值， X_3 为袋体充填介质有效重度值。

预测公式相关系数 $R^2=0.983\ 2$ ，将经验公式计算结果和数值分析结果对比分析，两者差值在 $\pm 5\%$ 之内的占比为 69.0%；差值在 $\pm 10\%$ 之内的占比为 96.6%，经验公式与数值分析结果拟合

较好。

3 工程实例

以钦州港东航道扩建工程(一期)为例，其吹填区平整工程中的一标段围堰工程^[5]，龙口封堵的起始高程设定为-2.0 m，对应袋体宽度为 28.4 m。由于用地要求，龙口段由东 1 堤变更至 B 堤，B 堤典型断面见图 6。位置调整后，起始袋体宽度变为 21.2 m，缩短了 25.4%，存在袋体滑移失稳的风险。将袋体宽度 21.2 m、袋体充填有效密度 0.8 t/m³、袋体界面摩擦系数 0.32^[6] 带入公式(4)，计算 B 堤-2 m 处袋体的临界水头为 4.32 m，对应临界潮位为 2.32 m，较实际潮位 2.39 m(2020 年

9 月份该地区最高潮位)略小。2020 年 10 月 1 日(当日最高潮位 2.12 m)对龙口处第一阶段已完成至-2.0 m 的袋体进行扫测检查,结果表明:历经 2.39 m 潮位后,实际潮位略大于临界潮位,但大部分顶袋基本保持稳定,其主要原因可能是下游水位高于-2.0 m,使得顶袋下游侧袋体存在静水

压力作用。工程后期在此基础上分 3 阶段施工,顺利地完成了龙口的封堵工作。

综上可知,预测临界潮位与实际潮位基本一致,采用临界水头(潮位)预测公式对龙口顶袋过流稳定预测分析的方法可行。

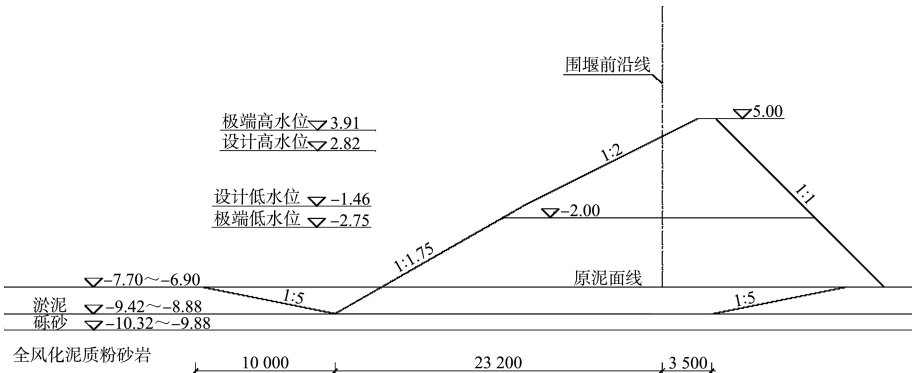


图 6 B 堤典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

龙口封堵工作具有水流条件复杂、作业区域狭窄、袋体定位充灌困难和受潮位影响严重等特点。龙口断面尺寸较大时,虽利于提高龙口管袋的阻滑能力,但尺寸过大会增加断面的充填量,不利于实现快速封堵,可能导致顶袋过水,增加施工难度,甚至出现封堵失败的不利后果。该工程龙口位置调整后,在断面尺寸减小的情况下,仍能实现顺利封堵,说明龙口断面尺寸的合理选择也是十分重要的。

4 结论

1)堰顶过流产生的静水压力和水平推力是管袋堤坝龙口顶袋发生失稳破坏的主要因素,袋体间交界面上的摩擦阻力是保持袋体稳定的关键因素,当顶袋水平力大于交界面摩擦阻力时,顶袋发生滑移失稳破坏。

2)临界水头与顶袋袋体宽度、袋体交界面摩擦系数、袋体充填密度呈正相关。临界水头预测公式与工程实际较为相符,可为类似工程施工提供参考。

3)在保证过水稳定的前提下,合理设计龙口

段管袋断面尺寸对实际工程有十分重要的意义。工程实践证明,除袋体宽度、摩擦系数及水位差等因素影响外,风浪作用对龙口袋体稳定影响不可忽视,后期将结合物理模型试验做进一步的研究。

参考文献:

[1] 束一鸣.我国管袋坝工程技术进展[J].水利水电科技进展,2018,38(1):1-11,18.

[2] 刘海笑,束一鸣,王晓娟.管袋堤坝在深水水流作用下的稳定性试验[J].水利水电科技进展,2009,29(6):67-69.

[3] 朱朝荣,束一鸣,姜俊红,等.管袋堤坝在水流作用下的稳定性模型试验[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36(3):333-336.

[4] 林刚,束一鸣,林勇.充填管袋填筑的原理与实践[J].人民长江,2005,36(2):25-27,47.

[5] 秦学,谢亭亭.袋装砂围堰龙口合龙施工技术[J].珠江水运,2021(7):52-53.

[6] 李家星,赵振兴.水力学(下册)[M].2版.南京:河海大学出版社,2001.

(本文编辑 赵娟)