

格宾石笼堤坝结构选择和稳定性分析

孙淑伟, 赵晨曦

(山东商河水建工程有限公司, 山东 商河 251600)

【摘要】为进一步提高防洪工程堤坝的结构稳定性, 保证防洪安全, 文章提出了一种基于格宾石笼的堤坝结构, 利用 Geo-Studio 数值模拟分析技术建立了格宾石笼堤坝的仿真分析模型, 并对该类堤坝的结构稳定性进行了研究。结果表明, 基于格宾石笼的堤坝结构安全系数约为 1.16, 明显优于传统的浆砌石结构堤坝, 该研究为优化堤坝设计、提高堤坝结构稳定性和可靠性提供参考。

【关键词】防洪工程; 堤坝结构; 数模分析; 格宾石笼

【中图分类号】TV871

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-08-0052-04

Structural Selection and Stability Analysis of gabion-based Dykes

SUN Shuwei, ZHAO Chenxi

(Hydraulic Construction Engineering Co., Ltd. of Shanghe County, Shanghe, Shandong 251600, China)

Abstract: To further enhance the structural stability and flood safety of dykes in flood control works, a gabion-based dyke structure is proposed in this paper. A numerical simulation model of gabion dyke is built via Geo-Studio finite element numerical simulation software to investigate its structural stability. The results indicate that the safety factor of the gabion dyke reaches approximately 1.16, distinctly superior to traditional mortar rubble dyke structures. The research provides references for dyke design optimization and improvement of structural stability and reliability of levee projects.

Key words: Flood control project; Dyke structure; Numerical simulation analysis; Gabion

在我国广泛开展的河道治理与防洪体系建设中, 堤坝的设计与选型是决定工程成败的关键^[1]。传统的浆砌石堤坝因其材料易得、施工工艺成熟而曾被普遍采用, 然而, 长期的工程实践也暴露出其固有缺陷, 如因砌体间存在大量接缝而导致整体性差、渗透风险高、在复杂地基条件下抗沉降与不均匀变形能力不足等^[2]。这些隐患在极端水文条件或长期运行下可能引发渗漏、管涌甚至失稳破坏, 亟需一种性能更优的新型结构来应对现代水利工程对安全性与耐久性日益提升的要求。在此背景下, 格宾石笼堤坝结构展现出显著的应用潜力。该结构由机械编织的钢丝网箱内填石料构成, 具有柔性好、透水性强、适应地基变形能力佳以及生态友好等优点^[3]。然而, 尽管其优势明显, 但在实际工程推广中, 关于格宾石笼结构与传统浆砌石结构在稳定性方面的系统性对比研究仍相对匮乏, 特别是其在复杂水力工况下的

抗滑、抗倾覆性能以及内部渗流场的变化规律尚不明确^[4]。这种理论研究的滞后, 制约了工程设计人员对堤坝结构的科学选择与优化, 也影响了该新型结构技术优势的充分发挥。

文章以山东省某 IV 级河道治理工程为实际背景, 利用 CREO 软件构建了 1:1 的堤坝三维精细化模型, 并引入了 Geo-Studio 仿真分析软件对不同格宾石笼坡和浆砌石坡的稳定性进行了仿真分析, 确定了格宾石笼坡的稳定性最佳, 并在此基础上对宝塔式格宾石笼坡结构和墙背直立式格宾石笼坡结构稳定进行了分析。

1 堤坝结构稳定性仿真

山东省内某河道治理工程等级为 IV 级, 堤坝顶宽 3 m, 高度 5 m。由于传统的浆砌石坝体渗

收稿日期: 2026-03-27

作者简介: 孙淑伟(1996—), 男, 助理工程师

透风险高、抗沉降能力差等不足,计划采用格宾石笼堤坝结构,本文对两种堤坝结构的稳定性进行对比验证。

1.1 仿真分析模型构建

利用 CREO 三维建模软件^[5]按 1:1 的比例建立该格宾石笼堤坝的三维模型,利用石笼挡墙和雷诺护垫作为模型基础,雷诺护垫的核心用途是保护堤坝的边坡,格宾石笼的结构主要是墙背直立式。为了对格宾石笼堤坝结构稳定性进行研究,项目组引入了一款新的 Geo-Studio 数值模拟分析软件^[6],该软件基于经典的极限平衡理论、渗流理论及应力-应变有限元分析,广泛应用于边坡稳定、渗流、应力变形、地下水流动及污染物运移等岩土工程问题的研究与设计。在进行网格划分时,采用 Geo-Studio 数值模拟分析软件在边坡段、石笼墙段采用了加密四边结构化网格划分方法,网格的尺寸均设置为 200 mm,在其他非关键位置则采用了三边结构化网格划分方法^[7],网格的尺寸均设置为 500 mm,实现仿真分析精度和仿真分析效率的统一。划分网格单元后的格宾石笼堤坝结构如图 1 所示。由图 1 可知,在格宾石笼堤坝中共设置了 4 组石笼墙,在石笼墙的后侧还设置了以防水土工布为主的回填透水层,提高堤坝的防渗性,提升堤坝安全。

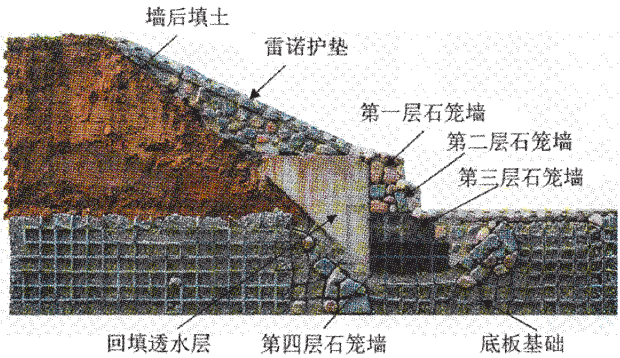


图 1 格宾石笼堤坝仿真分析模型

1.2 仿真分析参数设置

为了提高仿真分析的准确性,格宾石笼堤坝雷诺护垫、回填透水层、石笼、堤坝等均需要根据实际所使用的材料特性设置仿真分析参数,格宾石笼堤坝结构各关键参数见表 1。

2 堤坝结构受力分析

目前进行堤坝受力平衡分析的模型主要包

表 1 格宾石笼堤坝结构关键参数汇总表

关键指标	雷诺护垫参数	回填透水层参数	石笼参数	堤坝基础参数	材料模型
容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	18.6	17.8	19.2	24.3	
内摩擦角/($^{\circ}$)	34.9	/	17.9	/	
弹性模量/kPa	14851	49951	14751	79501	MC 模型
黏聚力/kPa	/	5	/	11	
渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1	0.00002	1	0.0000073	
泊松比	0.336	0.31	0.336	0.31	/

括了简布模型、斯宾塞模型及摩根斯坦-普莱斯模型等。在对不同受力平衡模型进行分析后,选择摩根斯坦-普莱斯模型作为堤坝受力平衡的分析模型,根据《水工挡土墙设计规范》,堤坝的受力主要包括自身重力及水体作用在堤坝挡墙上的力,受力分布情况,可以按下式对墙体的抗滑系数 L_s 进行计算^[8]:

$$L_s = \frac{f \times \sum G + C_0 \times B}{\sum H} \tag{1}$$

式中: f 表示不同层间的摩擦系数; C_0 表示堤坝的内部粘聚力,kPa;根据设计规范,通常情况下,堤坝的抗滑系数 L_s 要大于 1.05,而且在对堤坝的受力分析中,还需要特别注意石笼墙的抗倾特性及墙前被动土压力。石笼墙的抗倾特性取决于石笼墙的抗倾安全系数 L_f ^[9],通常情况下,石笼墙的抗倾安全系数 L_f 需要大于 1.5。

3 堤坝结构稳定性分析

3.1 不同护坡结构在不同降雨情况下的孔隙水压力

以当地最大降水能力为基础,模拟连续降雨 5 h、15 h、25 h 情况下不同护坡结构的孔隙水压力情况,结果如图 2 所示。

由图 2 仿真分析结果可知,不同降雨情况下,两种护坡结构的孔隙水压力都集聚在堤坝的底部,但格宾石笼护坡处的孔隙水压力分布均匀性更高,堤坝的稳定性更好。随着降雨时间的持续增加,在两种边坡位置都出现了稳定的渗流场,且孔隙水压力也不断增加。通过对不同深度位置孔隙水压力分布情况的研究,发现在坡顶下侧格宾石笼护坡的吸力要高于浆砌石坡。当降雨

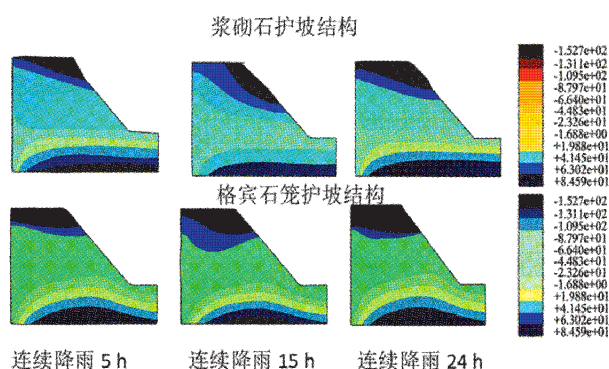


图2 不同降雨情况下不同护坡结构的孔隙水压力示意图

停止后,负孔隙水压力发生在堤坝的坡顶位置,格宾石笼护坡处的压力约为 104 kPa,而浆砌石护坡处的压力约为 136 kPa,造成这种现象的主要原因是浆砌石护坡的阻水能力较强导致。不同降雨时间下,不同护坡结构的孔隙水压力及饱和度变化情况如图 3 所示。

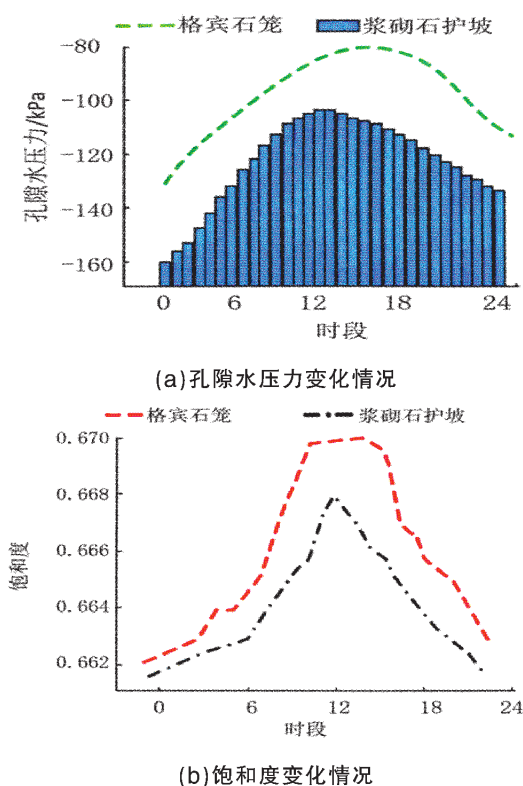


图3 不同降雨时间、不同护坡结构的孔隙水压力及饱和度变化示意图

由分析结果可知,不同护坡结构情况下孔隙水压力变化趋势和饱和度变化趋势基本一致,都呈现先增加后降低的趋势。格宾石笼护坡的最大饱和度是 0.670,浆砌石护坡的最大饱和度是 0.666,说明浆砌石护坡的吸收能力更强;随着堤坝饱和度的不断加大,格宾石笼护坡的最大孔隙

水压力为-112 kPa、浆砌石护坡的最大孔隙水压力为-133 kPa。总体来说,格宾石笼护坡的吸水性低于浆砌石护坡,能够较好地降低孔隙水压力,提高坝体的稳定性。

3.2 不同护坡结构的抗滑/抗倾覆特性

不同护坡结构的稳定性分析结果如图 4 所示。

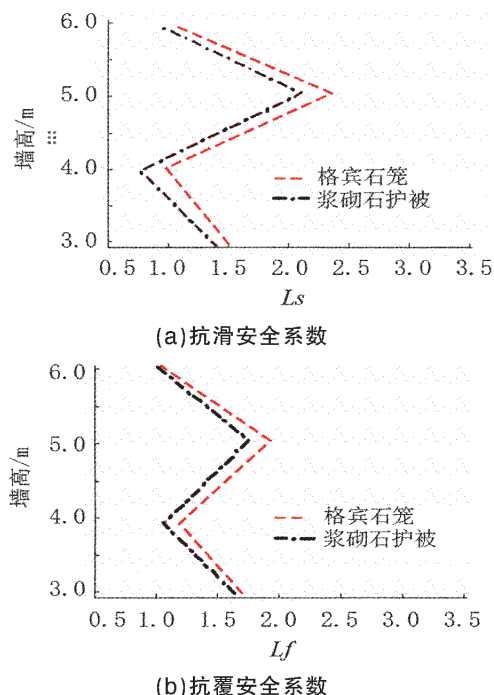


图4 不同护坡结构的稳定性

由图 4(a)分析可知,不同护坡结构的抗滑安全系数-墙高关系曲线的变化趋势基本一致,当墙高一定的情况下格宾石笼护坡的安全系数要高于浆砌石护坡;当墙的高度为 4 m 时,两种护坡结构的抗滑安全系数均最小,此时格宾石笼护坡的安全系数为 1.16、浆砌石护坡的安全系数为 0.79;当墙的高度 5 m 时,两种护坡结构的抗滑安全系数均最大,此时格宾石笼护坡的安全系数为 2.4、浆砌石护坡的安全系数为 2.1,此时安全系数均远大于 1.05,满足使用安全性需求。

由图 4(b)分析可知,不同护坡结构的抗覆安全系数-墙高关系曲线的变化趋势基本一致,当墙高一定的情况下格宾石笼护坡的安全系数要高于浆砌石护坡;当墙的高度为 4 m 时,两种护坡结构的抗覆安全系数均最小,此时格宾石笼护坡的安全系数为 1.58、浆砌石护坡的安全系数为 1.12;当墙的高度 5 m 时,两种护坡结构的抗覆安全系数均最大,此时格宾石笼护坡的安全系数为 3.1、浆砌石护坡的安全系数为 2.52,此时安全系

数均远大于 1.5,满足使用安全性需求。

3.3 不同水力工况下的稳定性分析

根据上述分析,选择格宾石笼护坡为护坡结构,然后将挡墙的高度设置为 5 m,分别制定了宝塔式、墙背直立式两种结构形式。

以上两种结构为基础,分别对低水位工况(场景 1)、中水位工况(场景 2)、高水位工况(场景 3)及堤坝渗水工况(场景 4)情况下不同格宾石笼堤坝结构稳定性进行分析,结果如图 5 所示。

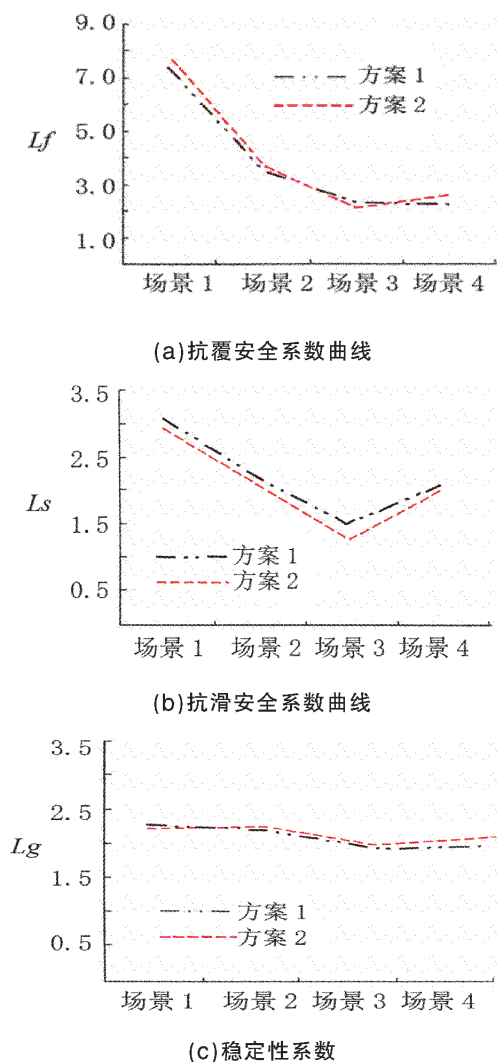


图 5 不同格宾石笼堤坝稳定性示意图

由图 5(a)分析可知,在四种工况下堤坝的抗覆安全系数均大于 1.5,满足设计要求;进一步对不同工况下的抗覆安全系数进行研究,在低水位工况(场景 1)、中水位工况(场景 2)及堤坝渗水工况(场景 4)下方案 2(墙背直立式结构)的安全系数大于方案 1(宝塔式)的安全系数;在高水位

工况(场景 3)下方案 1(宝塔式)的安全系数大于方案 2(墙背直立式结构)的安全系数。

由图 5(b)分析可知,在四种场景下,方案 1 的抗滑安全系数均要优于方案 2;由图 5(c)分析可知,在低水位工况(场景 1)下,方案 1(宝塔式)的稳定性系数大于方案 2(墙背直立式结构);其他场景下,方案 2(墙背直立式结构)的稳定性系数都大于方案 1(宝塔式)的稳定性系数。

综合分析可知,方案 2(墙背直立式结构)更能够适应复杂的水力工况,对提升堤坝的稳定性和可靠性具有十分重要的意义。

4 结 语

研究结果表明:1)格宾石笼护坡的吸水性低于浆砌石护坡,能够有效降低孔隙水压力,提高坝体的稳定性;且当墙的高度 5 m 格宾石笼护坡具有最大的抗滑安全系数和抗覆安全系数。2)墙背直立式格宾石笼结构更能够适应复杂的水力工况,提升堤坝的结构稳定性,能够为水利工程中堤坝类型的选择提供有益参考。

参考文献

- [1] 章慧健,刘功宁,王脉,等.基于格宾石笼的隧道支护构件静力加载模型试验设计 [J]. 实验技术与管理,2024,41(10):18-27.
- [2] 徐立君,王敦格,刘延飞,等.雷诺护垫护岸对粉细砂岸坡的防护效果数值模拟分析 [J]. 中国农村水利水电,2023(12):195-200,206.
- [3] 焦有权,林强,李光涛,等.基于 P-Ⅲ模型的密云水库汛期降水量频率分析[J].黑龙江水利科技,2023,51(4):108-110,121.
- [4] 李海燕,杨涛,廖依琳,等.渭河流域(陕西段)河流生境质量分布格局及驱动力分析[J].生态环境学报,2024,33(7):1153-1162.
- [5] 贺虎林.格宾石笼在河道治理工程中的应用及施工技术[J].内蒙古水利,2022(3):63-64.
- [6] 刘芳.格宾石笼生态护岸在河道治理中的应用[J].黑龙江水利科技,2023,51(6):141-143,159.
- [7] 林军军.格宾笼导流墙在文殊沙河水毁修复中的应用[J].河南水利与南水北调,2022,51(10):53-54,68.
- [8] 侯斯译.格宾石笼基础生态护坡施工技术 [J]. 陕西水利,2022(6):147-148.
- [9] 刘志军.格宾网石笼在河湖连通工程中的应用及施工技术要点[J].农业科技与信息,2020(2):103-105.

(责任编辑 赵其芬)