

涉水路堤边坡稳定分析

尹祖超¹, 贾瑞雨¹, 涂开智², 邹小龙¹

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 武汉城建集团建设管理有限公司, 湖北 武汉 430022)

摘要: 以武汉市某主干路涉水路堤边坡为例, 在抗滑稳定分析的基础上开展了渗流稳定分析, 研究了边坡坡率和水位高度对涉水路堤边坡渗流稳定性的影响。均质土路堤渗流稳定性与边坡坡率呈近似线性正相关, 坡率每增加0.5, 安全系数约提升6%; 与水位高度呈负相关, 水位每升高2 m, 安全系数约降低3%; 水位抬升致使迎水侧浸润线同步升高, 而背水侧渗流溢出高度呈非线性变化。涉水路堤应根据可能出现的最高水位合理选择边坡坡率, 确保边坡渗流稳定。该研究成果可为类似涉水路堤边坡设计提供参考。

关键词: 涉水路堤; 渗流稳定性; 边坡坡率; 水位高度; 数值模拟

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Stability Analysis of Submerged Embankment Slope

YIN Zuchao¹, JIA Ruiyu¹, TU Kaizhi², ZOU Xiaolong¹

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, Hubei, China;

2. Construction Management Co., Ltd. of Wuhan Urban Construction Group, Wuhan 430022, Hubei, China)

Abstract: Taking the water-related embankment slope of a trunk road in Wuhan as an example, this paper carries out seepage stability analysis on the basis of anti-sliding stability analysis, and investigates the influences of slope ratio and water level on the seepage stability of submerged embankment slopes. The seepage stability of homogeneous soil embankments is approximately linearly and positively correlated with the slope gradient; specifically, for every 0.5 increase in the slope ratio, the safety factor increases by about 6%. Conversely, it is negatively correlated with the water level height, where a 2-meter rise in the water level decreases the safety factor by approximately 3%. Furthermore, as the water level rises, the phreatic line on the upstream side elevates synchronously, whereas the seepage overflow height on the downstream side exhibits nonlinear variation. For submerged embankments, the slope ratio should be reasonably determined according to the possible maximum water level to guarantee seepage stability. The research results can provide a reference for the design of similar submerged embankment slopes.

Key words: submerged embankment; seepage stability; slope ratio; water level; numerical simulation

1 引言

我国河湖、沿海地区水系发达、地形条件复杂, 涉水路堤已成为沿江、沿湖、沿海地区主干公路、市政道路及防洪工程的重要结构形式, 典型工程包括武汉长江与汉江沿岸路堤、东莞大堤、鄱阳湖永吴公路过水路基、江苏响水海堤、

广西北海涠洲岛海堤等, 这些工程普遍承担着交通通行与防洪防潮双重功能。

目前, 已有众多学者针对涉水路堤边坡稳定性展开大量研究。梁士鹏^[1]等依托黄河下游堤防帮宽工程, 一方面采用渗流反演方法进行堤防渗流稳定性计算, 另一方面运用简化毕肖普法进行堤防抗滑性稳定计算, 系统分析堤防帮宽的稳定性。

收稿日期: 2025-12-22

作者简介: 尹祖超, 正高级工程师, 硕士, 研究方向为道路工程设计与研究

基金项目: 堤防道路勘察设计技术研究 (编号: CX2019Z08)

庞锐^[2]等基于随机场理论建立了非侵入式随机渗流分析框架,研究了复杂堤防在不同随机场参数下堤防内水力坡降、渗流量等渗流控制指标的变化规律。张泽^[3]利用有限元法对山西省大同市御河下游1级堤防进行了渗透稳定性及抗滑稳定性计算,并阐述了计算原理及过程。邹恒^[4]结合长江口某地区2 km海堤现场观测和检测结果,分析了海堤病害情况,探究了病害形成机理和大堤主要安全隐患。李丽华^[5]等以加筋路堤边坡为研究对象,结合不同土工合成材料的加筋效果开展水位涨落模型试验,探究水位涨落工况下各类路堤的水力特性、沉降规律及破坏模式。肖绪恋^[6]针对兼做公路的临河土堤,通过足尺模型试验、数值模拟分析等方法,对不同稳态水位下施加不同荷载的堤身应力应变进行研究,分析其在不同工况下的变形规律及安全稳定特性。刘晶^[7]等以贵州平塘六硐南岸滑坡为研究对象,结合野外调查及现场监测,基于非饱和渗流理论和极限平衡分析,运用有限元软件 Geo-studio,计算水位波动、降雨不同组合工况下滑坡的稳定系数,分析渗流场、应力场与位移场的演化规律,明确了该滑坡的变形特征及破坏机制。

在水流渗透的长期作用下,涉水路堤边坡可能出现渗流破坏、边坡失稳等病害现象。涉水路堤边坡失稳病害多与渗流场动态变化密切相关,水位升降幅度、浸润线位置、渗流出溢高度及水力梯度均直接控制路堤稳定状态。因此,开展不同边坡坡率与水位高度条件下涉水路堤渗流稳定研究,揭示其灾变机制,对工程设计、病害防治

与安全运营具有重要意义。

2 工程概况

武汉市某城市主干路,全长4.9 km,双向六车道,设计速度为60 km/h,是衔接主城区与经济技术开发区的重要干线,工程总体布置如图1所示。K2+253—K2+820段紧邻长江一级支流通顺河,采用路基与堤防结合的共建模式,属于涉水路堤,堤防工程等级为2级,该路段平面布置见图2。

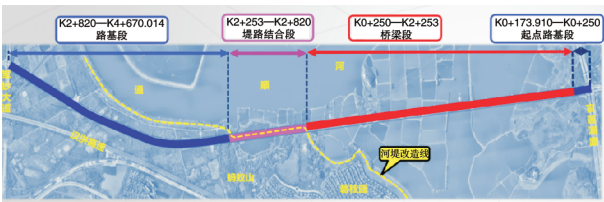


图1 工程总体布置方案

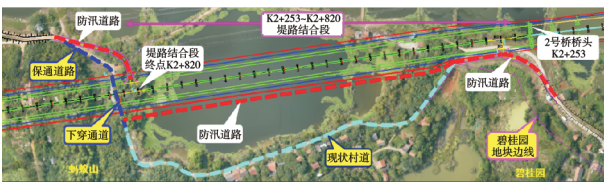


图2 堤路结合段平面布置方案

涉水路堤段全长567 m,路幅总宽34 m,横断面布置:人行道2 m、非机动车道1.5 m、侧分带2 m、机动车道11.25 m、中央分隔带0.5 m、机动车道11.25 m、侧分带2 m、非机动车道1.5 m、人行道2 m。道路标准横断面如图3所示。

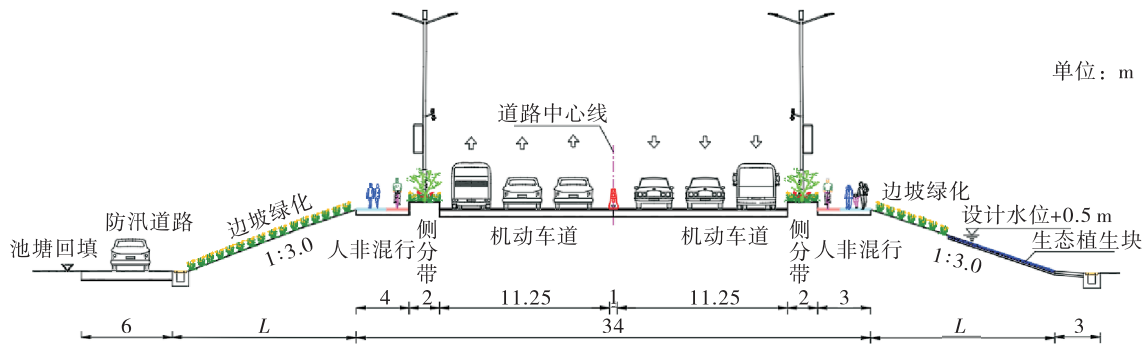


图3 堤路共建段典型横断面图

该工程位于汉江冲积平原,地势平坦,场地内土层主要为第四系覆盖层全新统冲积黏土、粉质黏土。根据地质勘察报告,本工程堤路结合段地基土体从上到下依次是1-2-1层淤泥、2-1-4层淤泥质粉质黏土、2-1-5层粉质黏

土、4-1-2层粉质黏土和27-1-1层中风化灰岩等。受季节性降雨影响,汛期堤防长时间浸水,渗流作用显著,可能诱发堤防变形和失稳。工程区设计洪水位为28.15 m,常水位为20.50 m。

3 边坡抗滑稳定性分析

3.1 计算方法及参数

基于极限平衡条件的条分法是边坡稳定性分析中应用最为广泛的方法之一。极限平衡分析将岩土材料假定为刚塑性介质，要求其同时满足静力平衡条件与刚塑性体剪切破坏的极限平衡准则。条分法将土体划分为若干独立土条，并假定各土条为刚体，通过合理修正条间作用力，将边

坡稳定的超静定求解问题转化为静定问题，以此计算特定滑动面的安全系数，再通过枚举法或最优化搜索算法，确定边坡最小安全系数对应的危险滑动面。现阶段工程中最常用的条分法为简化毕肖普法，本文参照《堤防工程设计规范》（GB 50286—2013），采用简化毕肖普法开展边坡稳定分析。计算断面如图 4 所示：填方高度约 9 m，路基宽度 34 m，边坡坡比为 1：3。依据地质勘察报告，路基及填土各项物理力学参数见表 1。

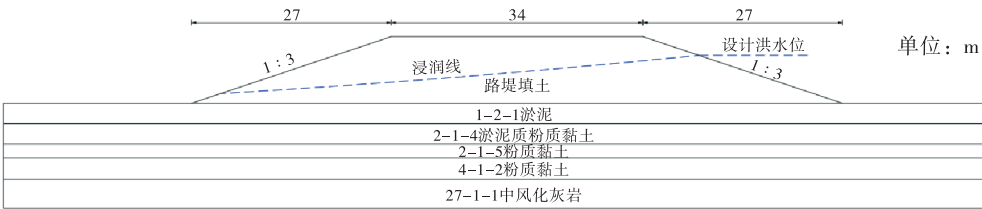


图 4 边坡稳定计算模型示意图

表 1 路基及填土物理力学参数

地层编号及名称	土层厚度 H_i/m	天然重度 $\gamma/(kN/m^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	渗透系数 $k/(cm/s)$
路堤填土	9	18.50	20	10	1.0×10^{-5}
1-2-1 淤泥	2	16.24	6	4	1.0×10^{-5}
2-1-4 淤泥质粉质黏土	2	17.63	13	6	1.0×10^{-5}
2-1-5 粉质黏土	4	19.03	19	10	2.0×10^{-5}
4-1-2 粉质黏土	2	19.99	34	16	4.0×10^{-6}
27-1-1 中风化灰岩	6	—	60	30	—

3.2 边坡抗滑计算工况及结果

依据《堤防工程设计规范》（GB 50286—2013），涉水路堤边坡抗滑稳定性验算对象主要为设计洪水水位下的临水侧、背水侧堤坡和设计洪水水位骤降期的临水侧堤坡。水利、航道、堤防工程设计手册、图集普遍采用骤降 2 m 作为示例与默认工况，本文计算设计洪水水位骤降时亦取 2 m。边坡抗滑稳定安全系数（FOS）见表 2，涉水路堤边坡安全系数均满足规范要求。在设计洪水水位工况下，背水侧边坡抗滑安全系数略高于临水侧，这是由于堤防临水侧土体浸水饱和致使抗剪强度降低；同时渗透力会降低土体有效应力，进一步削弱抗滑力矩。在完成涉水道路路堤边坡抗滑稳定的基础上，继续开展边坡渗流稳定分析研究。

表 2 边坡抗滑稳定安全系数

计算部位	设计洪水水位工况	设计洪水水位骤降 2 m 工况	规范要求
临水侧	2.37	2.14	1.35
背水侧	2.41	—	1.35

4 边坡渗流稳定性分析

本文利用有限元软件构建涉水道路路堤边坡渗流－应力场耦合模型，研究渗流作用下边坡稳定性。在渗流场分析基础上计算土体的渗透力，将其作为体积力施加到应力平衡方程中求解应力应变。同时利用强度折减法^[8]不断降低土体强度，直至边坡破坏，得到安全系数。

4.1 模型与参数

由于涉水道路路堤沿纵向长度方向的几何形状和材料参数变化较小，因此可简化为二维平面应变问题进行分析，这将大大减少计算工作量且不会对分析结果造成明显影响。依据 K2 + 640 处涉水道路路堤典型横断面构建数值模型如图 5 所示：填方高度约为 9 m，路基宽度为 34 m。渗流边界条件设置为：堤底及迎水坡为定水头边界，水头值取堤底高程与上游水位的差值；背水坡及坡脚以下为渗流出口，形成自由渗流面；其余边界为自由面。应力边界条件设置为：模型底部采用固定约束；两侧边界设置水平滚轮约束，仅允许边界沿竖直方向自由变形；迎水面施加水压力荷载，其余边界均为自由面。采用 Delaunay 三角

剖分算法自适应加密网格, 单元总数为 7 447 个, 最小单元质量为 0.53, 平均质量为 0.82, 网格质量较高。由于本文主要探究涉水路堤边坡的渗流稳定性, 地基深部各土层渗透差异性对路堤边坡

渗流稳定性影响很小, 为简化计算将路堤简化为均一土体, 采用莫尔-库仑本构模型, 依据地质勘察报告及填料检测结果, 路堤填土各项计算参数见表 3。

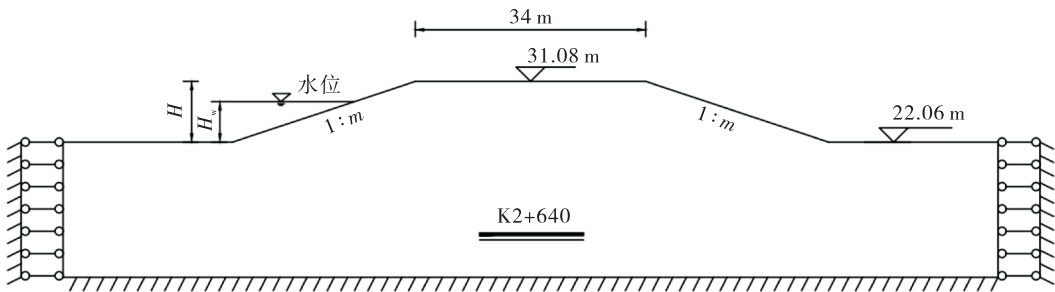


图5 数值模型示意图

表3 路堤填土计算参数

计算参数	单位	数值
密度	kg/m ³	1 850
渗透系数	cm/s	1 × 10 ⁻⁵
孔隙率	—	0.3
泊松比	—	0.3
黏聚力	kPa	20
饱和内摩擦角	°	10
非饱和内摩擦角	°	15
弹性模量	MPa	50

4.2 边坡坡率对渗流稳定性的影响

根据《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013)和《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)的相关规定, 城市主干路路基边坡坡率不宜陡于 1 : 1.5, 涉水路基在设计水位以下边坡坡率不宜陡于 1 : 1.75。为研究边坡坡率对渗流稳定性的影响规律, 固定上游水位高度 H_w 为 6 m, 选取 5 种典型的边坡坡率 (1 : m) 进行对比分析, m 分别取 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5, 对应的不同坡率条件下的几何模型如图 6 所示。

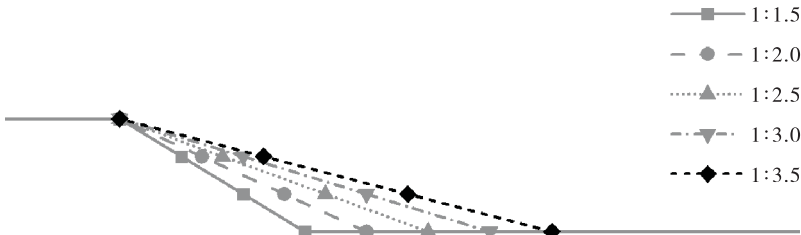


图6 不同坡率条件下几何模型示意图

不同边坡坡率下涉水道路路堤边坡最大位移与安全系数 (FOS) 的关系曲线如图 7 所示。当最大位移开始快速增大时, 意味着边坡趋于失稳, 由此可确定边坡稳定安全系数。数值模拟结果表明, 随着 m 从 1.5 增大到 2.0、2.5、3.0、3.5, 边坡稳定安全系数分别提高了 5.83%、12.5%、19.17% 和 24.17%。

安全系数与边坡坡率 m 的关系如图 8 所示, FOS 与 m 呈现出近似线性关系, 坡率越缓, FOS 越大, 涉水道路路堤边坡稳定性越高。边坡坡率 m 影响渗流稳定性的内在机理在于, m 的变化会引起边坡土体应力分布和破坏模式的改变。当 m 较小时, 边坡较陡, 在自重应力和渗流力的共同作用下, 坡脚处产生较大的剪应力, 易达到强度

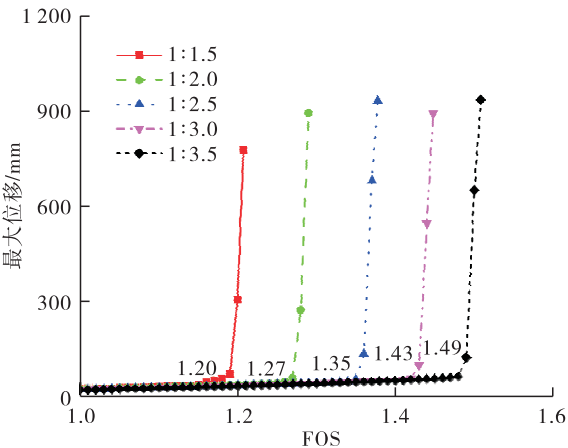


图7 不同坡率条件下最大位移与 FOS 关系曲线

极限而发生局部屈服, 形成塑性区, 变形迅速累

积,边坡处于失稳临界状态。随着 m 增大,边坡变缓,坡面受力更加均匀,剪应力集中现象得到缓解,塑性区出现的时机被推迟,范围和程度也有所减小,边坡整体趋于稳定。此外,边坡土体在渗流作用下会产生附加渗透力,该力整体沿坡面向下,与土体下滑力大致平行,会进一步加剧边坡的变形与破坏。边坡坡率越小,渗透力沿坡面切向的分量越大,对边坡稳定性的不利影响也越显著。

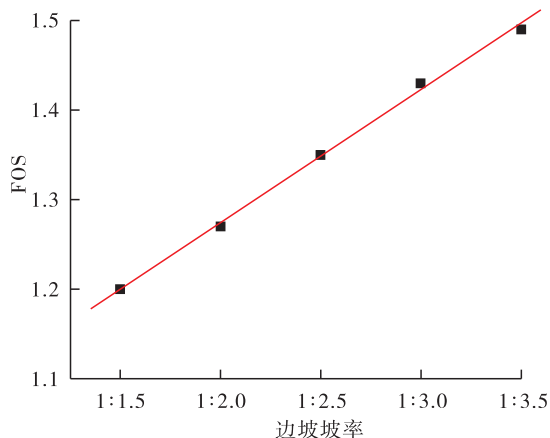


图8 FOS与边坡坡率 m 的关系曲线

边坡坡率 m 对堤内渗流压力水头分布的影响如图9所示。由图可知,不同边坡坡率对应的压力水头云图基本一致,说明边坡坡率的变化对堤内渗流场的影响较小。究其原因,渗流场分布主要受土体渗透性与上下游水位差控制,与边坡坡率关联性较弱。该结论可为堤防道路渗流稳定性分析提供重要参考依据。

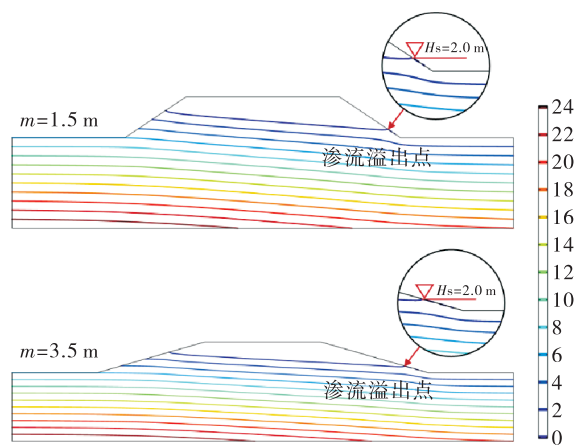


图9 不同边坡坡率下渗流溢出点高度 (H_s)

4.3 水位高度对渗流稳定性的影响

上述分析是在固定水位高度的条件下进行的。但在实际工程中,水位是不断变化的,不同水位高度条件下边坡渗流稳定性可能存在显著差

异。为全面评估边坡安全性,本研究对不同水位高度下渗流稳定性进行了分析。上游水位的升高会导致堤内渗流场发生改变,渗透压力增大,边坡稳定性趋于降低。水位变化还会影响边坡土体饱和区域,进而影响其抗剪强度和变形特性。根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013) 2级土堤的堤坡坡率为1:3,以水位高度 H_w 为2 m、4 m、6 m、8 m 四种工况进行数值模拟,揭示水位高度 (H_w) 与边坡安全系数的定量关系。

不同条件下边坡最大位移-安全系数关系曲线如图10所示,随着 H_w 的升高,最大位移-安全系数曲线整体向左侧移动,表明边坡稳定性逐步降低。 H_w -FOS 关系曲线如图11所示,进一步印证了这一趋势:当 H_w 从2 m升高至4 m、6 m和8 m时,FOS 分别从1.50降低至1.46、1.42和1.37,相对于初始2 m水位工况的降幅依次为2.67%、5.33%和8.67%。水位每升高2 m,边坡安全系数就下降约3%。这表明水位升高对边坡稳定性构成了显著的不利影响,在涉水道路路堤设计中应予以高度重视。

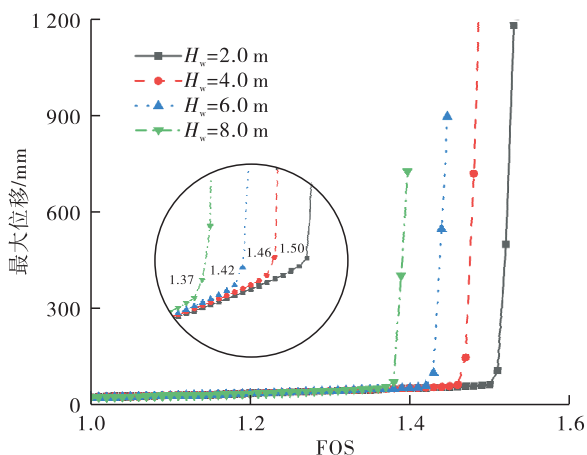


图10 不同水位条件下最大位移与FOS关系曲线

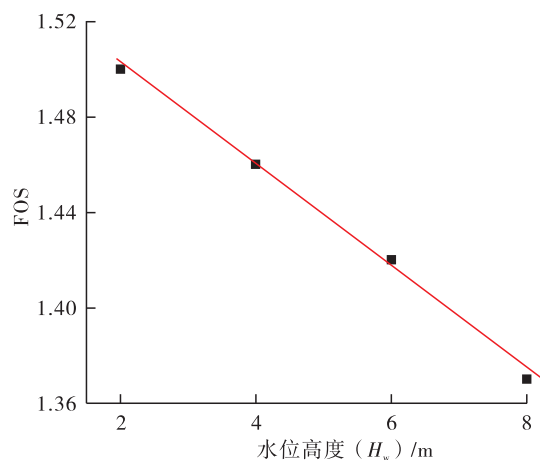


图11 水位高度 (H_w) 与FOS关系曲线

水位升高削弱渗流稳定性的根本原因在于堤防道路边坡内部渗流场的改变。图12给出了不同水位高度下堤防道路的渗流压力水头云图,其中水头为0的等值线即为浸润线。由图12可知,随着 H_w 的升高,浸润线整体抬升,渗流溢出点也随之上移,堤体内部的饱和区不断扩大。浸润线在迎水坡一侧抬升尤为明显,而在背水坡一侧变化相对较小,这主要是由于迎水坡直接承受上游水压力,渗流集中,而背水坡远离水源,渗流相对缓和。当水位从2 m抬升到4 m

时,渗流溢出高度迅速从0.2 m增加到1 m;水位从4 m增加到6 m时,渗流溢出高度保持不变;当水位高度进一步升高到8 m时,渗流溢出高度才又迅速增加到1.8 m,高水位条件下堤防道路渗流问题更为严重。但水位高度与渗流溢出高度之间呈非线性变化关系,其原因在于堤防道路的渗流作用对水位变动存在一定的缓冲效应。当水位超过某一临界值后,渗流溢出现象会快速发育,对堤防道路的整体安全造成严重威胁。

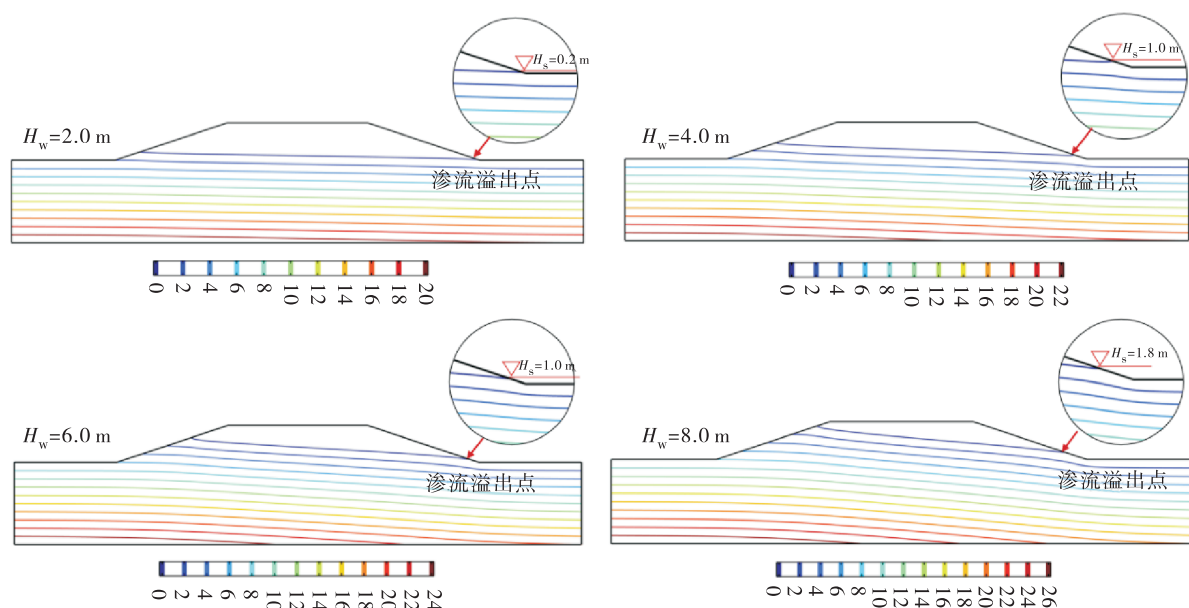


图12 不同水位下压力水头云图

5 总结

(1) 边坡坡率对涉水道路路堤边坡渗流稳定性具有显著影响,缓坡有助于缓解土体应力集中,延迟塑性区的形成,促进土体抗剪强度的充分发挥,提高边坡渗流稳定性。渗透力沿坡面方向分量随坡率放缓而降低,减轻渗流对涉水道路路堤边坡稳定性的不利影响。

(2) 水位升高会显著削弱涉水道路路堤边坡稳定性,引起堤内浸润线整体抬升,饱和区面积增大,饱和区土体抗剪强度参数降低,边坡稳定性降低。水位高度与渗流溢出高度之间存在非线性关系。

(3) 涉水路堤边坡坡率选择应以可能出现的最高水位为依据,并综合考虑稳定性和经济性等因素,合理选择坡率。同时建议加强迎水坡防渗措施,以有效控制渗流失稳风险,确保涉水路堤边坡稳定。

参考文献:

- [1] 梁士鹏,李英帅.基于有限元法的堤防帮宽稳定分析[J].人民黄河,2025,47(S1):9-10,12.
- [2] 庞锐,徐明洋,柴伊豪,等.考虑渗透系数空间变异性的堤防工程渗流分析[J].水电能源科学,2024,42(7):207-210.
- [3] 张泽.基于有限元法的堤防渗透稳定及抗滑稳定计算[J].山西水利科技,2023(4):7-10.
- [4] 邹恒.海堤工程病害分析与除险设计研究[J].城市道桥与防洪,2025(7):196-200.
- [5] 李丽华,李泽升,肖衡林,等.水位涨落作用下加筋路堤稳定性研究[J].岩土工程学报,2024,46(S2):1-5.
- [6] 肖绪恋.兼做公路的临河土堤的变形机制与安全稳定研究[D].郑州:河南工业大学,2025.
- [7] 刘晶,左双英.水位升降和降雨联合作用的岸坡流固耦合及失稳机理分析:以贵州平塘六洞南岸滑坡为例[J].科学技术与工程,2024,24(12):4876-4886.
- [8] 田益琳,李华,巩瑞杰,等.基于双系数强度折减的边坡稳定性评估方法及应用[J/OL].金属矿山,2025(11):1-12(2025-11-24)[2026-06-16].<https://link.cnki.net/urlid/34.1055.TD.20251121.1812.002>.