

· 地基与基础 ·



深井降水条件下的高边坡土石围堰稳定性分析

史尧^{1,2}, 卢超^{1,2}, 刘守花³

- (1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040;
2. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430040;
3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 在深厚透土层地区, 可采用无止水帷幕土石围堰结合深井降水技术在临海环境中创造干地施工条件。为研究深井降水对围堰稳定性的影响, 依托埃及苏赫纳第二集装箱码头工程, 运用 GeoStudio 软件, 分析降水井正常运行时的高边坡土石围堰的渗流分布规律及边坡稳定性。建立不同目标降水水位与整体边坡最小安全系数的关系曲线, 并与集水明排工况下的围堰稳定性进行对比。结果表明: 1) 渗流在向陆侧发展的过程中受降水井控制作用明显, 围堰坡脚不产生渗流逸出点, 稳定性可以满足要求。2) 当目标降水水位升高时, 围堰稳定性呈降低趋势。3) 当目标降水水位降至一定深度后, 浸润线达到一定埋深, 围堰稳定性几乎不受渗流影响, 稳定系数不再增加。4) 分析结果可以为类似工程提供合理的围堰设计思路。

关键词: 深厚透土层; 深井降水; 土石围堰; 渗流分析; 边坡稳定

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0207-08

Stability analysis of high earth-rock cofferdam under the condition of deep-well dewatering

SHI Yao^{1,2}, LU Chao^{1,2}, LIU Shou-hua³

- (1.CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Key Laboratory of New Material and Maintenance of Maritime Structures Reinforcement Technology in Hubei Province, Wuhan 430040, China;
3.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In the area with a thick permeable stratum, the dry condition construction under the coastal environment can be achieved by combination of earth-rock cofferdam without water-proof curtain and deep-well dewatering technology. In order to study the influence of deep-well dewatering conditions on the stability of cofferdams, this paper analyzes and discusses the seepage distribution and slope stability of high earth-rock cofferdam during the operation of dewatering wells by GeoStudio based on Egypt port of Sokhna Container Terminal Basin 2 Project. It is established that the relationship curve between different target dewatering levels and the minimum safety factor of the overall slope stability, and compare with the stability of the cofferdam under the condition of open drainage of water collection. The results show that: 1) The seepage is obviously controlled by the dewatering well in the process of developing towards the land side. As there is no seep point in the toe of the cofferdam, the stability can meet the safety requirements. 2) When the target dewatering level rises, the stability of the cofferdam tends to decrease. 3) When the target dewatering level falls to a certain depth, the phreatic line reaches a certain depth, and the stability of the cofferdam is almost not affected by seepage while the stability coefficient no longer increases. 4) The analysis results can provide a reasonable design approach for similar projects.

Keywords: thick permeable stratum; deep-well dewatering; earth-rock cofferdam; seepage analysis; slope stability

收稿日期: 2020-04-26

作者简介: 史尧(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程结构设计和研究。

在水运工程中，土石围堰作为一种临时性围护结构，通常与降水等工程措施相结合，起拦阻水源、创造干地施工环境的作用。土石围堰的稳定性主要与围堰内部土体特性（如强度指标、渗透系数）、外部环境（如水文条件、受力荷载）以及围堰断面的几何形体等有关。由于围堰内外水位差的存在，其失稳主要表现为渗透破坏及边坡失稳，目前土石围堰稳定性研究也主要针对这两方面进行探讨。刘先珊等^[1]对设置防渗墙的土石围堰的渗流及边坡稳定性进行分析，得出材料渗透系数对结果影响显著；刘奉银等^[2]在使用 GeoStudio 耦合模拟土坝的基础上，讨论了地层竖向边界的选取对计算结果的影响，分析认为透水边界较为符合客观实际；基于非均质各向异性的饱和-非饱和土的渗流理论，李术才等^[3]通过三维流-固耦合数值模型，分析心墙对堰体结构的影响，提出使用防渗心墙的堰体结构更稳定；应宏伟等^[4]通过不同静水压力分布模拟潮汐作用，揭示了边坡稳定系数随着潮汐波动的变化规律；严文群等^[5]将试验和数值模拟相结合研究渗流作用下河道边坡的稳定性，验证了降水减压井和反滤保护等防渗措施可有效降低渗流影响，提高边坡稳定性；Gao 等^[6]通过模拟防渗心墙与坝体的相互作用，提出防渗心墙的应力分布受流-固耦合效应影响显著；Nourani 等^[7]采用有限元法预测了不透水混凝土重力坝中的竖向排水井对浮托力的减弱效果，提出竖向排水井的最优布置方式。综上所述，对设置

止水帷幕的围堰研究成果丰富。然而在透水土层较深的地区，综合考虑成本及工期，强透水土石围堰也可不设止水帷幕，地下水渗流由深井降水控制，此时降水条件为影响围堰的渗流特性及稳定性的重要因素，但目前针对这方面的研究较少，急需开展相关研究。

本文依托埃及苏赫纳第二集装箱码头工程项目，以深井降水正常运行状态下的挡水围堰为研究对象，运用 GeoStudio 软件建立围堰的渗流模型、边坡稳定分析模型以及变形预测模型，并结合现场监测数据，探讨深井降水对围堰的渗流及边坡稳定的影响，提供合理的土石围堰断面设计思路，为类似工程提供参考。

1 工程概况

埃及苏赫纳第二集装箱码头距苏伊士运河南入口 40 km，为 20 万吨级深水码头，主体结构采用地连墙单锚板桩结构形式。埃及东部沿海地区普遍为深厚透土层地质条件，因此港池干开挖采用不设置止水措施的临时围堰和深井降水相结合的技术手段，通过布置在工程区域的降水井强排达到截水防渗的目的，动态控制整个区域的地下水位，使其维持在所需的设计降深，降水井布置见图 1。在干开挖施工完成后，使海水回灌进港池，再借助水上疏浚移除临时围堰完成港池的施工。在降水过程中，保证临时围堰在渗流状态下的边坡稳定十分重要。

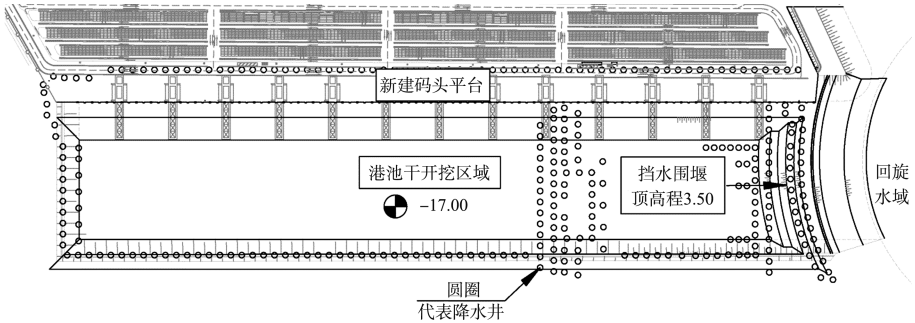


图 1 工程平面布置（单位：m）

项目所在区域潮汐为常规半日潮，以最高天文潮位(HAT)+2.20 m 为设计水位；由于港池掩护良好，波浪的影响可以忽略不计。临时围堰位于图 1

中新建港池口门位置，海侧为现状回旋水域护坡结构；陆侧边坡由原状土开挖形成，从原泥面高程 3.50 m 开挖放坡至-17.00 m，边坡整体高度较高，

层分布均匀，大体可分为图 2 所示的 3 层：①为松散粉细砂或砂质粉土层，②₁为中密至密实粉细砂层夹杂中硬至极硬粉质黏土或砂质粉土，②₂为致密砂卵石层。相应的土层参数取值见表 1。由于

各土层渗透性均比较强且土层均匀间隔分布，因此工程区域土层渗透系数根据现场抽水试验取整体综合渗透系数为 $4.63 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，且竖向渗透系数 k_y 与水平渗透系数 k_x 近似相等，即 $k_y/k_x \approx 1$ 。

表 1 土层物理力学参数

土层	饱和密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	渗透系数/ $(10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	综合渗透系数/ $(10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
①	1.80	24	5	3~5	4.63	35	0.25
② ₁	1.85	35	0	0.1~3	4.63	60	0.30
② ₂	1.85	35	0	5~9	4.63	100	0.30

2.4 边界条件

降水井边界条件定义对深井降水条件下的围堰数值模型建立至关重要。降水效果可以通过目标降水水位来表示，因此本文采用总水头边界条件。总水头由压力水头和高程水位组成，见式(5)：

$$H = \frac{u}{\rho_w g} + y \tag{5}$$

式中： H 为总水头； u 为孔隙水压力； ρ_w 为水的密度； y 为高程。降水设计对相关降水井的目标降水水位进行了分析和确定，降水井稳定工作时，在目标降水水位处可以认为渗流到降水井的水流全部被排出，因此目标降水水位处的压力水头为 0。因此在数值模拟中，对于降水井所在的位置的目标降水水位处给出节点，由于压力水头为 0，根据式(5)该节点的总水头即为该节点高程，同时也为该点的目标降水水位。根据降水设计，围堰上设置 4 排降水井共

61 口，从海侧至陆侧，降水井排间距依次为 20、40、25 m，每排内降水井之间的间距为 20 m，每排降水井的目标降水水位从海侧到陆侧分别为 -20.38、-23.37、-23.30、-23.30 m。每口降水井配置一台潜水泵，工程区域最大同时抽水的水泵数量 188 台，水泵功率为 15 kW，流量为 $1\,920 \text{ m}^3/\text{d}$ ，最大开启降水井时需 $14 \times 400 \text{ kW}$ 发电机(14 台运行，14 台备用)，以提供降水系统所需功率。

2.5 计算模型

首先运用 SEEP/W 建立降水条件下土体内部的稳态渗流模型，然后将该渗流模型应用于 SLOPE/W 进行耦合分析，分别对 3 级开挖边坡的每级边坡及整体边坡的稳定性进行评价，计算模型见图 3。同时，在岩土应力变形分析模块 (SIGMA/W) 中对渗流场与应力场进行流固耦合分析，预测围堰变形情况。

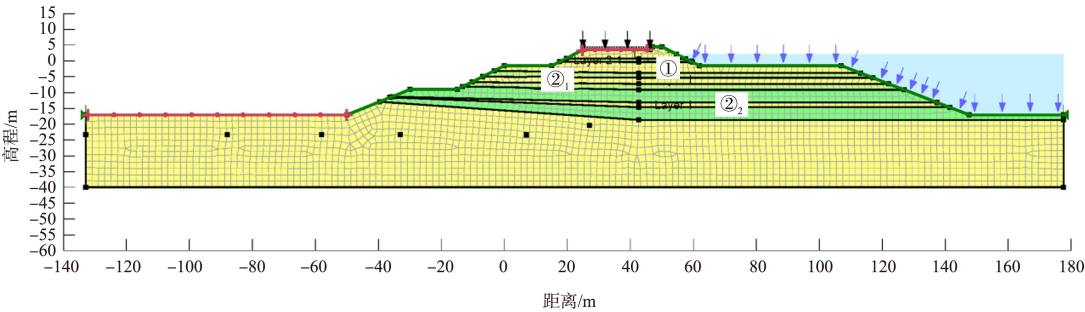


图 3 SEEP/W 与 SLOPE/W 耦合模型

3 结果与分析

3.1 设计断面稳定性分析

通过材料参数取值及边界条件的确定，基于 SEEP/W 与 SLOPE/W 耦合模型，分析设计断面在

降水井正常工作情况下的渗流场分布规律及其对边坡稳定的影响。

1) 由图 4 可以看出，计算浸润线、孔隙水压力、截面流量以及渗流速度在降水井附近发生明

显变化, 渗流场分布规律受降水井控制。计算浸润线由模型的降水井边界条件定义及渗透系数等决定, 其由海侧向陆侧沿程下降至保持不变, 与目标降水位分布保持一致。施工过程中实测水位与模拟浸润线中的水位几乎相同, 验证了模型的合理性。该工况下, 浸润线始终位于堰体深处, 在围堰陆侧无渗流逸出点, 因此不会发生渗透变形破坏。此外, 浸润线的变化体现了总水头的变化, 因此孔隙水压力分布与浸润线变化保持一致。

2) 临时围堰可以视为降水设计中渗流发展的过渡结构, 通过设置在围堰上的降水井使渗流量

逐级降低。图 4 显示: 从海侧到陆侧, 海水初始渗入断面 SEC 1 的渗流量为 $6.1958 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, 通过第 1 排降水井后, 断面 SEC 2 的渗流量为 $2.2998 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, 渗流量相对于初始渗流量降低 62.9%; 通过第 2 排降水井后, 断面 SEC 3 的渗流量为 $3.7441 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, 渗流量降低 94.0%; 通过第 3 排降水井后, 断面 SEC 4 的渗流量为 $9.8297 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 渗流量降低 98.4%。因此, 前沿的两排降水井为主要排渗出口, 重要性不言而喻, 第 1 排降水井处的渗流流速及渗流量等渗流分布情况出现显著变化也能辅助说明。

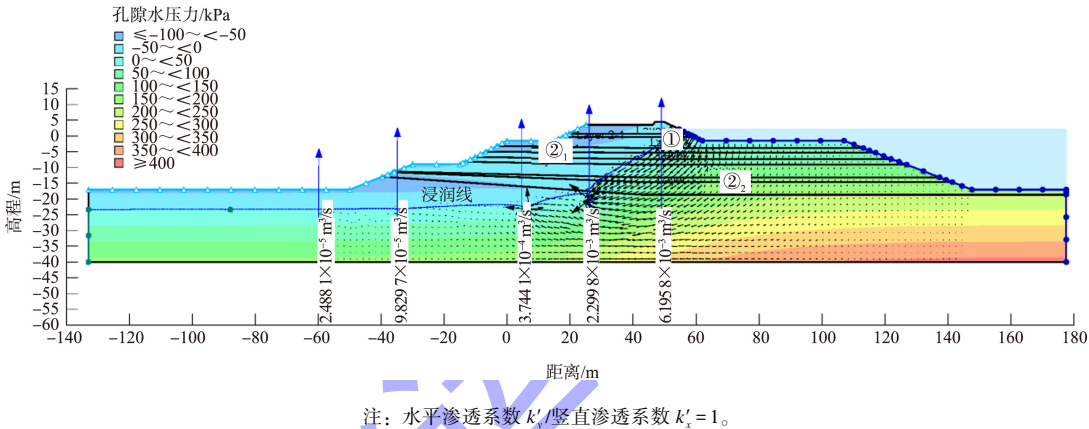


图 4 深井降水条件下堰体浸润线、孔隙水压力分布以及截面流量

3) 表 2 为陆侧各级开挖边坡以及整体大边坡的最小安全系数。可以看出, 各级边坡的最小安全系数为 1.489, 出现在设计断面上部三级边坡, 其滑弧位置见图 5, 可以满足稳定要求。由于降水井的作用, 浸润线处于较深土层, 因此渗流对于边坡影响较小, 边坡稳定性主要与土体本身的强度有关, 因此边坡坡度是主要设计关键点。

表 2 边坡稳定计算结果			
工况	边坡	最小安全系数	安全系数允许值
正常使用工况水位 HAT	一级边坡(-17~-9 m)	1.643	1.30
	二级边坡(-9~-1.5 m)	1.497	
	三级边坡(-1.5~3.5 m)	1.489	
	整体边坡(-17~3.5 m)	2.278	

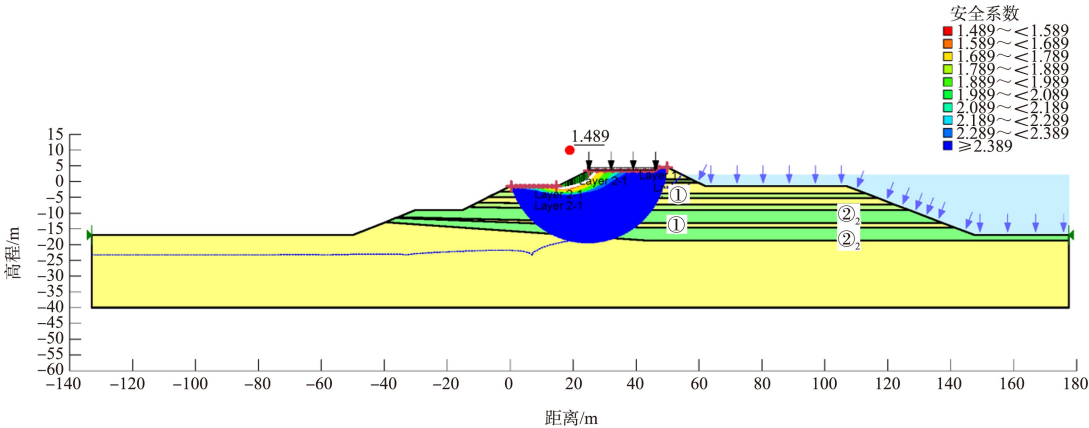


图 5 设计断面危险滑动面和最小安全系数

3.2 设计断面变形预测

渗流主要影响围堰的水平变形,图6为围堰水平变形云图,由图6看出,围堰水平位移关于围堰顶中心对称,测点A在高程-22 m处水平位移 11.38 mm,在围堰顶表层水平位移介于-15~-8 mm,表层位移

与围堰顶所受荷载有关。现场实测数据(图7)显示,实测的水平变形随深度的变化规律与模型预测一致,进一步验证了围堰稳定性分析模型的准确性和可行性。现场实施过程中,实测水平位移基本稳定,未观测到大的波动,围堰始终保持稳定状态。

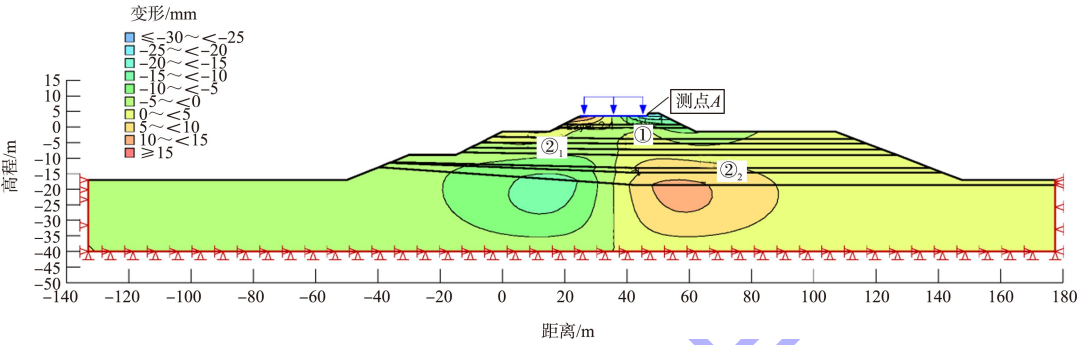


图6 围堰水平变形云图

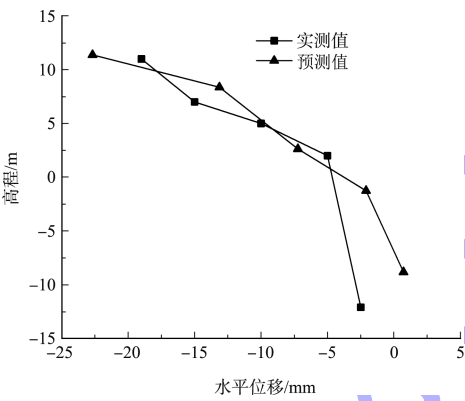


图7 测点A处水平位移模型预测值与现场监测值对比

3.3 深井降水条件对边坡稳定性的影响

深井降水条件的改变,会改变围堰内部的渗流场发展及浸润线位置,从而影响边坡安全系数。而在现场实施过程中,由于施工条件等原因导致降水条件可能会发生改变,因此了解降水条件改变对边坡稳定性的影响可以指导现场对于突发状况的应对措施。

1)浸润线在降水作用下埋藏较深时,分级边坡稳定性几乎不受渗流影响。在保证不出现渗流逸出点的情况下,通过改变第1、2排降水井的目标降水位,分析其变动对边坡稳定性的影响,见图8。随着降水井水位的升高,整体边坡(-17~3.5 m)的最小安全系数随之降低,边坡逐渐趋于不稳定,这是由于浸润线向浅层地表发展,

饱和区升高,导致土体孔隙水压力变大而抗剪强度减弱。当降水井提高排渗能力,浸润线则向土体深处发展,边坡最小安全系数不断增大,但当浸润线降低到一定程度之后,边坡稳定最小安全系数会稍微降低,之后保持不变。推测该现象发生的原因:此时浸润线不再通过危险滑动面,土体滑动力受自身重力影响而增大,抗滑力保持不变,因此安全系数稍稍降低,之后浸润线继续向深处发展,不再影响危险滑动面。本工程目标降水水位取值为最小安全系数为最大时。

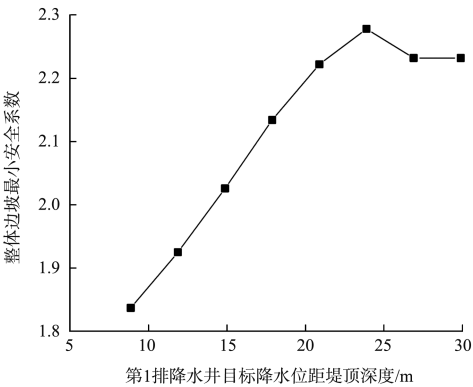
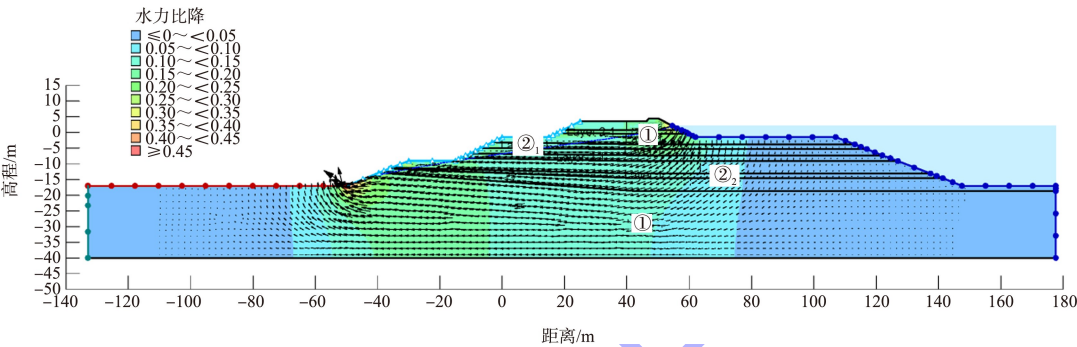


图8 整体边坡最小安全系数随第1排降水井水位变化曲线

2)为进一步分析深井降水条件的重要性,对设计断面在降水井失效而采用集水明排工况下的边坡稳定性进行分析。从图9、10可以看出,此时浸润线位于浅层边坡,且在坡脚处存在渗流逸

出点, 该处水力比降为 0.45, 超出堤防规范中管涌型无黏性土渗流出口的允许水力比降的最大值 0.25, 该工况下发生管涌可能性较大; 此时最危险滑动面发生在底部一级边坡, 最小安全系数为 1.072, 存在失稳的可能性。围堰在明排水工况下渗流稳定性及边坡稳定性均不满足安全要求, 该工况下围堰安全隐患较大, 因此在施工过程中需要密切监测降水井运行状态并关注围堰的变形, 确保降水的安全有效运行, 一旦出现降水异常, 需要及时

启动安全预警机制进行人员设备疏散及隐患排查。此外, 为防止可能出现的降水波动造成边坡坡脚出现渗透变形破坏而导致失稳, 可以适当放缓一级边坡坡度, 达到延长渗径的目的; 在该边坡设置透水盖重及反滤结构, 阻止细小颗粒通过渗流出口, 延缓渗透变形发展, 保护土体完整性。同时在开挖坡脚附近设置截水沟以拦截流向坡脚的地表水, 保护开挖边坡不受冲刷和侵蚀, 还可以将截水沟中的水质及水量作为判断降水效果的一个补充。



注: 水平渗透系数 k'_y /竖直渗透系数 $k'_z = 1$ 。

图 9 明排水工况渗流模型

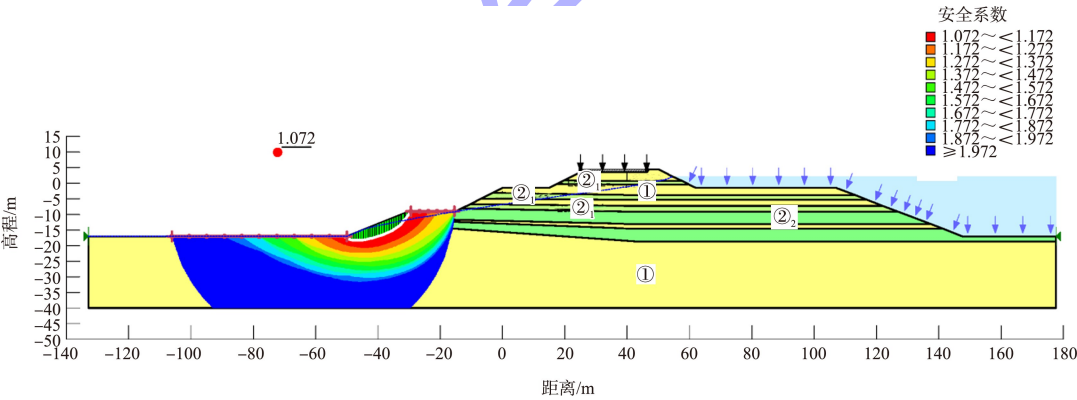


图 10 明排水工况危险滑动面及最小安全系数

4 结论

- 1)在不设置止水措施的情况下, 分级开挖形成的高边坡土石围堰可以通过深井降水有效控制地下水渗流, 维持围堰本身整体稳定。施工过程中需要在相邻两排降水井之间设置监测水位井, 以监控降水井降水效果以及堰体地下水位的异动情况。
- 2)深井降水正常运行时, 临水侧的第 1 排及第 2 排降水井为主要排渗出口, 可将渗流量降低

- 90%以上, 陆侧开挖边坡无渗流逸出点, 发生渗透变形破坏的可能性较小; 由于浸润线埋深较深, 其陆侧分级边坡稳定性受渗流影响较小, 主要与土体本身强度有关, 最危险滑动面位置出现在顶部三级边坡; 水平变形关于围堰顶中心对称, 在最终开挖底高程处出现最大值。
- 3)渗流在向陆侧发展的过程中受降水井控制作用明显, 当目标降水位升高时, 浸润线向土层浅表发展, 边坡整体稳定呈降低趋势。当目标降

水位降低至一定的深度以后，浸润线埋深达到一定深度，围堰边坡稳定性几乎不受渗流影响，稳定系数不再增加，因此在类似项目中，综合考虑工程实际需求，针对不同的设计断面，建立安全系数与目标降水位的的关系曲线，选取合适的降水井数量及目标降水位，在满足安全要求的同时实现经济效益的最大化。此外，为实现经济效益最大化，在下一步工作中，将基于降水能耗与围堰稳定安全系数的关系开展降水井的优化设计研究。

4)降水失效而采用集水明排时，在坡脚处产生渗流逸出点，围堰一级边坡的渗流稳定性及边坡稳定性均不满足安全运行要求。因此对某些危大工程须特别考虑安全性时，建议将该工况作为校核工况，并采取放缓底部一级边坡坡度、设置透水盖重及反滤结构、增加截水沟等措施以增加围堰的安全富余。

参考文献：

[1] 刘先珊,刘少炜,余永康.土石围堰渗流场分析及稳定性评价[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(S1):212-215.

[2] 刘奉银,刘国栋,张瑞,等.Geo-slope 在工程应用中竖向边界选取问题的探讨[J].长江科学院院报,2010,

27(7):76-78.

[3] 李术才,李树忱,朱维申,等.泰安抽水蓄能电站围堰稳定性的流-固耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2004(8):1275-1279.

[4] 应宏伟,聂文峰,王啟铜,等.水位波动对临海重力式挡墙基坑稳定性的影响[J].海洋工程,2013,31(4):48-54.

[5] 严文群,段祥宝,张大伟.地下水渗流对岸坡稳定影响试验研究[J].水运工程,2009(4):22-26,37.

[6] GAO J L, YANG Z G, YANS W. Numerical simulation of interaction of cut-off wall and earth-rock dam in the reinforcement project[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 1800: 2181-2187.

[7] NOURANI B, SALMASI F, ABBASPOUR A, etal. Numerical investigation of the optimum location for vertical drains in gravity dams[J]. Geotechnical and geological engineering, 2017, 35(2): 799-808.

[8] 张飞.深厚覆盖层高土石围堰堰坡稳定研究[D].宜昌:三峡大学,2015.

[9] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司.非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M].中仿科技(Cn Tech)公司,译.北京:冶金工业出版社,2011.

[10] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司.边坡稳定分析软件 SLOPE/W 用户指南[M].中仿科技(Cn Tech)公司,译.北京:冶金工业出版社,2011.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 206 页)

3)结合 Civil 3D 的地形分析模块、汇流分析模块和流域边界分析模块，对整个区域可能的排水方案进行设计，并通过方案比选得出最优化的排水设计方案，为类似大区域的排水规划提供设计方法参考。

参考文献：

[1] 孙同谦,徐峥.BIM 标准对市政给排水专业的指导[J].中国给水排水,2016,32(4):28-31.

[2] 习兴梅.BIM 技术在给水排水工程中的应用[J].建材与

装饰,2017(48):119-120.

[3] 上海市市政工程设计研究总院.室外排水设计规范:GB 50014—2006[S].北京:中国计划出版社,2006.

[4] 水利部水利水电规划设计总院.城市防洪工程设计规范:GB/T 50805—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.

[5] 水利部水利水电规划设计总院.防洪标准:GB 50201—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

[6] 任耀.AutoCAD Civil 3D 2013 应用宝典[M].上海:同济大学出版社,2017.

(本文编辑 郭雪珍)