

厚层淤泥质地基高土石围堰边坡抗滑稳定敏感性分析

贺新星, 王瑞骏, 闫菲

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对厚层淤泥质地基结构复杂, 对围堰稳定不利的问题, 基于 Geostudio 软件, 采用极限平衡法对厚层淤泥质地基高土石围堰在典型工况下的边坡抗滑稳定进行了计算分析, 并针对施工过程中可能发生的覆盖层、透镜体物理力学参数变化, 分析了围堰边坡抗滑稳定的敏感性。结果表明: 典型工况中存在不满足围堰及基坑边坡稳定要求的情况; 覆盖层②层的内摩擦角变化对围堰边坡稳定影响较为明显; 透镜体参数变化对最危险滑动面穿过透镜体的情况影响较大, 因此应考虑采取地基加固措施。

关键词: 厚层淤泥质地基; 高土石围堰; 边坡抗滑稳定; 敏感性分析

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0196-06

Analysis of slope stability sensitivity of high earth – rock cofferdam on the thick silt foundation

HE Xinxing, WANG Ruijun, YAN Fei

(Institute of Water Resources and Hydro – electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the complex structure of the thick silt foundation and the problem of the cofferdam stability, the sloping stability of high earth – rock cofferdam on thick silt foundation under typical conditions was computed by limit equilibrium method, and the sensitivity analysis of slope stability against sliding was also analyzed according to the possible changes of physical and mechanical parameters of cover layer and lens body in the process of design and construction. The results showed that there were situations which can not meet the sloping stability requirements of cofferdam and foundation in typical conditions; the changing of internal friction angle in the second covering layer had an obvious influence on the sloping stability of cofferdam; the lens parameters had significant impact on the situation of the most dangerous sliding surface passing through the lens, so it should consider the foundation reinforcement measures.

Key words: thick silt foundation; high earth – rock cofferdam; sloping stability; sensitivity analysis

厚层淤泥质覆盖层作为一种特殊的地基, 其结构复杂, 抗剪强度不一^[1], 有的还存在黏土、粉砂等低强度土层, 这些因素会影响围堰深层抗滑稳定, 而围堰抗滑稳定是围堰设计中需要研究的重要问题, 因此, 应在明确覆盖层软土分布情况及力学性质的前提下, 根据稳定分析的计算结果, 对厚层淤泥质地基采取针对性的处理措施, 如挖除表层软弱土层, 放缓围堰边坡, 在坡脚增加压重等^[2]; 对深部软弱土层, 必要时可以采用振冲碎石桩加固等措施^[3-7]。同时, 围堰填筑后基础覆盖层的水文地质条件、物理

力学性能将发生一定变化, 对围堰稳定将产生不利影响^[8]。

因此, 本文以某大型水利工程为例, 对厚层淤泥质地基上高土石围堰的边坡抗滑稳定进行了核算, 并针对覆盖层及透镜体参数变化情况, 进行围堰边坡抗滑稳定的敏感性分析。

1 工程概况

某水电站工程上游横向围堰两岸为裸露基岩, 岩性为绿泥角闪片岩, 地表岩体完整性较好。根据

收稿日期: 2016-05-31; 修回日期: 2016-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介: 贺新星(1992-), 男, 安徽淮南人, 在读硕士研究生, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者: 闫菲(1990-), 女, 陕西宝鸡人, 在读硕士研究生, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

钻孔揭露,围堰处河床覆盖层最大厚度为 63 ~ 65 m,按物质成分可分为 4 小层和 I 号透镜体,由上至下依次为:⑤Q^{al}层,河床冲击砂卵石层夹少量漂石,层厚(围堰轴线处,下同)为 4.06 m;③Q^{al}层,含淤泥质粉砂层、黏土质砂,层厚为 14.96 m;②Q^{al}层,以砂质低液限黏土为主,层厚为 31.92 m;①Q^{al}层,为卵石、块石夹砂,层厚为 14.19 m;I 号透镜体位于围堰下游坡脚处的②层与①层之间,缺失第④层。

该横向围堰挡水设计标准为全年 30 年一遇,对应洪峰流量 6 330 m³/s,围堰最大高度约 60.3 m。其下部堰体及基础采用塑性混凝土防渗墙,上部堰体采用复合土工膜斜墙防渗。围堰填筑料绝大部分为枢纽建筑物开挖料,主要为强风化及全风化石料,力学参数较低。围堰基础覆盖层最大厚度约 65 m,围堰下游坝基开挖最大深度达 70 m 左右,覆盖层大部分属于中度压缩性堰塞湖沉积物,对围堰沉降及边坡稳定较为不利。

2 高土石围堰边坡抗滑稳定计算

2.1 计算方法

目前边坡抗滑稳定分析方法主要有刚体极限平衡法、有限元分析方法、极限分析法、滑移线场法等。极限平衡法主要以 Mohr – Coulomb 准则作为基础,

一般是通过给出假想的简单破坏面,并将滑动面以上的滑体分成若干垂直条块,建立静力平衡方程,辅以一定假设条件计算得出结果,刚体极限平衡法是目前岩土工程界最为广泛采用的方法,原因在于其原理简单、计算方便、且能给出易于接受的稳定性指标^[9-11]。

本文基于 Geostudio 软件,该高土石围堰边坡抗滑稳定分析选用 Mohr – Coulomb 屈服准则,根据《碾压式土石坝设计规范》(DL/T 5395 – 2007),施工期采用有效应力法和总应力法分别进行坝坡稳定计算,并以两种方法计算结果的最小值为准,抗滑稳定安全系数 K ≤ 1.30;稳定渗流期采用有效应力法(考虑孔隙水压力)进行坝坡稳定计算^[12]。稳定计算结果按 Morgenstern – Price 法控制,以 Bishop 法作为参考。

2.2 计算断面

围堰计算断面是综合在天然地基上进行振冲碎石桩加固、上下游坡脚压重等处理方式而确定的最终设计断面形式,如图 1 所示,以下均称作推荐计算断面。

2.3 计算工况及计算参数

为模拟围堰施工及运行过程,计算工况包含施工期、稳定渗流期及基坑开挖期共 8 个工况,如表 1 所示;计算参数如表 2 所示。

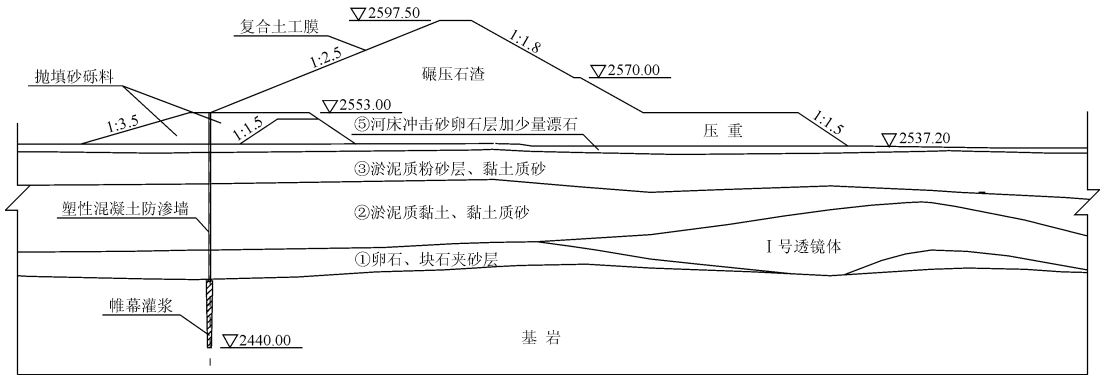


图 1 计算断面图

表 1 高土石围堰稳定计算工况表

	计算工况	围堰填筑高程/m	基坑已开挖情况	上游水位/m	下游水位/m
施工期	工况 S – 1	2553.00		2550.61	2538.00
	工况 S – 2	2597.50		2550.61	2538.00
稳定渗流期	工况 S – 3	2597.50		2595.05	2538.00
	工况 K – 1	2597.50	覆盖层第⑤层	2595.05	基坑底高程
基坑开挖期	工况 K – 2	2597.50	覆盖层第⑤、③层	2595.05	基坑底高程
	工况 K – 3	2597.50	覆盖层第⑤、③、②层	2595.05	基坑底高程
	工况 K – 4	2597.50	覆盖层第⑤、③、②、①层	2595.05	基坑底高程
	工况 K – 5	2597.50	覆盖层第⑤、③、②、①层	2550.61	基坑底高程

表 2 堰体及覆盖层土体稳定计算参数表

材料	湿容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	总应力指标		有效应力指标	
			c	$\varphi /(^{\circ})$	c	$\varphi /(^{\circ})$
坝体碾压石渣	22.4		0	38	0	38
坝体抛填砂砾料(水上)	17.9		0	25	0	25
坝体抛填砂砾料(水下)		18.4	0	23	0	23
坝体抛填石渣(水上)	21.5		0	32	0	32
坝体抛填石渣(水下)		22	0	30	0	30
I号透镜体	20	20.5	0	28	0	30
⑤层河床冲积砂卵石夹少量漂石	20.63	21	0	29	0	30
③层淤泥质粉砂、黏土质砂	17.45	18.5	15	13	22	18.5
②层淤泥质粘土、黏土质砂	16.73	17.75	13	10	19	16
①层卵石、块石夹砂	20.38	20.75	0	30	0	31

2.4 计算结果分析

通过连续增量计算获得了全部工况下围堰稳定系数结果,如表 3 所示。

由表 3 可看出:(1)施工期,围堰边坡均满足稳定要求,其中稳定安全系数最小值为 1.331,位于围堰上游坡,如图 2 所示。(2)稳定渗流期,围堰上下游边坡均满足稳定要求,稳定安全系数最小值为

1.365,位于工况 S-2 下的上游坡,如图 3 所示。

(3)开挖期,工况 K-2 的下游边坡不满足稳定要求,稳定安全系数为 $K=1.293$,最危险滑弧位于基坑边坡,如图 4 所示,其余工况的下游边坡及各工况的上游边坡均满足稳定要求。(4)采用 Morgenstern-Price 法和 Bishop 法各工况计算结果较为接近,验证了计算结果的可靠性。

表 3 推荐计算断面各工况稳定系数计算结果表

计算工况		安全系数							
		有效应力法				总应力法			
		M-P 法		简化 Bishop		M-P 法		简化 Bishop	
		上游坡	下游坡	上游坡	下游坡	上游坡	下游坡	上游坡	下游坡
施工期	工况 S-1	1.331	1.460	1.459	1.520	1.501	1.461	1.587	1.540
稳定渗流期	工况 S-2	1.365	1.556	1.373	1.577				
	工况 S-3	2.721	1.447	2.732	1.462				
	工况 K-1	2.744	1.469	2.755	1.484				
	工况 K-2	3.080	1.293	3.099	1.292				
开挖期	工况 K-3	3.239	1.971	3.268	1.975				
	工况 K-4	3.259	1.993	3.289	1.998				
	工况 K-5	1.614	1.993	1.642	1.998				

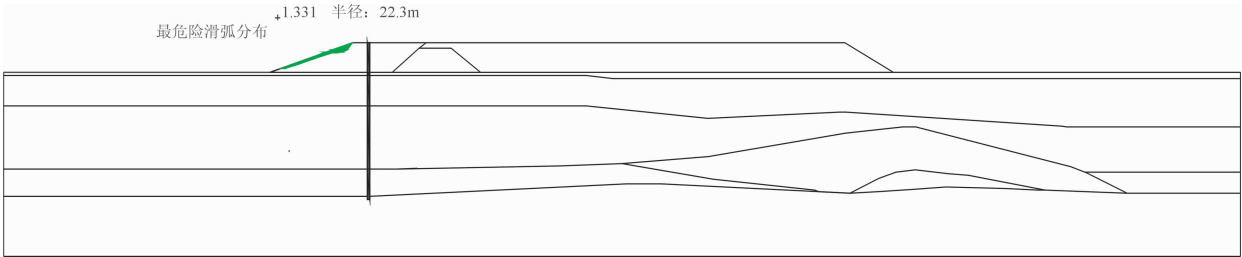


图 2 施工期围堰边坡最危险滑弧分布

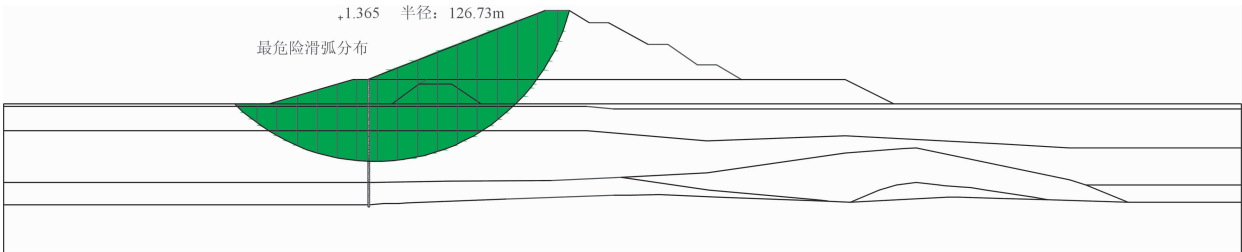


图 3 稳定渗流期围堰边坡最危险滑弧分布

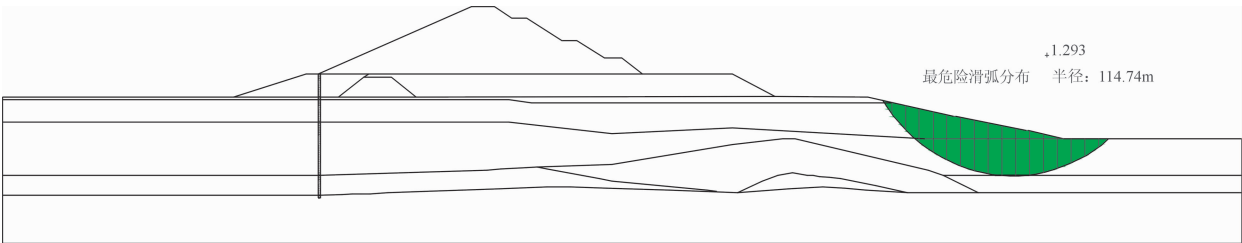


图 4 开挖期围堰边坡最危险滑弧分布

3 高土石围堰边坡抗滑稳定敏感性分析

3.1 敏感性分析条件

考虑到在围堰填筑过程中可能造成的覆盖层物理力学参数的变化及透镜体范围的不确定性对围堰抗滑稳定产生的影响,对围堰边坡的抗滑稳定进行以下敏感性分析^[13-14]。

(1)其他参数按基本参数计算,调整覆盖层②层计算参数,使其内摩擦角分别增大和减小 2°。

(2)其他参数按基本参数计算,透镜体参数采用覆盖层②层参数进行计算。

3.2 敏感性分析结果

(1)上游围堰边坡稳定关于覆盖层②层强度参数的敏感性分析。调整覆盖层②层计算参数,使其内摩擦角分别增大和减小 2°,其他参数不变,计算结果如表 4 所示。

由表 4 及图 5、图 6 可知,覆盖层②层内摩擦角的变化对上游围堰边坡稳定影响较为明显。

当其增大 2°时,除施工期工况 S-1 外的所有工况安全系数均有增大,其中渗流稳定期的稳定安全系数最小值为 1.453,位于工况 S-2 的上游坡,开挖期原本不满足稳定要求的工况 K-2 下游基坑边坡的安全系数由 1.280 增加至 1.396,所有工况均满足稳定要求;

当其减小 2°时,除施工期工况 S-1 外的所有工况安全系数均有减小,其中渗流稳定期工况 S-2 的围堰上游坡不满足稳定要求,安全系数为 1.272,基坑开挖期工况 K-2 下游基坑边坡的安全系数由 1.280 减小至 1.189,不满足稳定要求,其余工况依

然满足稳定要求。
分析施工期工况 S-1 的稳定安全系数不受覆盖层②层内摩擦角变化影响的原因,可能是工况 S-1 下的围堰填筑高程低,断面较小,围堰荷载对深层覆盖层的作用很小,因此地基覆盖层的参数变化也不会对围堰产生影响。

表 4 上游围堰边坡稳定关于覆盖层②层强度安全系数的敏感性分析结果

内摩擦角 计算工况		有效应力法			
		M-P 法		简化 Bishop	
		上游坡	下游坡	上游坡	下游坡
增大 2°	工况 S-1	1.331	1.460	1.459	1.514
	工况 S-2	1.453	1.606	1.460	1.607
	工况 S-3	2.910	1.529	2.928	1.542
	工况 K-1	2.934	1.552	2.952	1.565
	工况 K-2	3.280	1.396	3.301	1.394
	工况 K-3	3.404	2.147	3.436	2.150
	工况 K-4	3.416	2.184	3.449	2.189
	工况 K-5	1.674	2.184	1.706	2.189
	工况 S-1	1.331	1.460	1.459	1.514
	工况 S-2	1.272	1.475	1.276	1.497
减小 2°	工况 S-3	2.533	1.366	2.545	1.382
	工况 K-1	2.544	1.388	2.565	1.404
	工况 K-2	2.869	1.189	2.888	1.189
	工况 K-3	3.049	1.799	3.077	1.803
	工况 K-4	3.067	1.805	3.096	1.810
	工况 K-5	1.534	1.805	1.559	1.810

(2)上游围堰边坡稳定关于透镜体参数的敏感性分析。其他参数按基本参数计算,透镜体参数采用覆盖层②层参数进行计算,计算结果如表 5 所示。

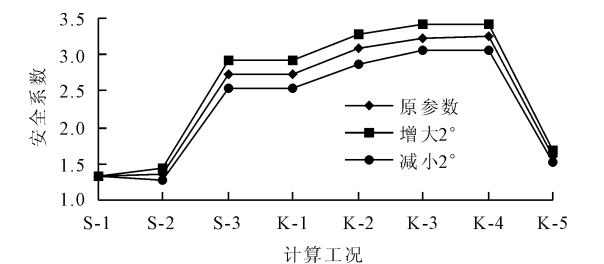


图5 覆盖层②层参数变化时围堰上游边坡安全系数

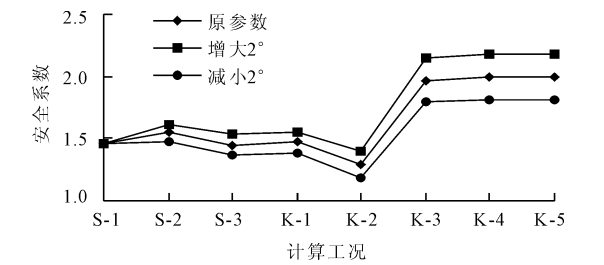


图6 覆盖层②层参数变化时围堰下游边坡安全系数

表5 上游围堰边坡稳定关于透镜体采用②层参数的安全系数敏感性分析结果

计算工况	有效应力法			
	M - P 法		简化 Bishop	
	上游坡	下游坡	上游坡	下游坡
工况 S - 1	1.331	1.462	1.459	1.520
工况 S - 2	1.359	1.402	1.366	1.403
工况 S - 3	2.673	1.280	2.684	1.279
工况 K - 1	2.695	1.289	2.706	1.288
工况 K - 2	3.019	1.283	3.037	1.221
工况 K - 3	3.217	1.964	3.246	1.968
工况 K - 4	3.237	1.993	3.266	1.998
工况 K - 5	1.609	1.993	1.637	1.998

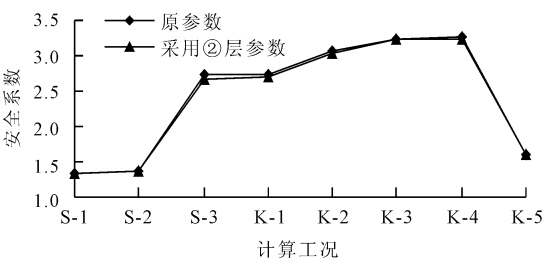


图7 透镜体参数变化时围堰上游边坡安全系数

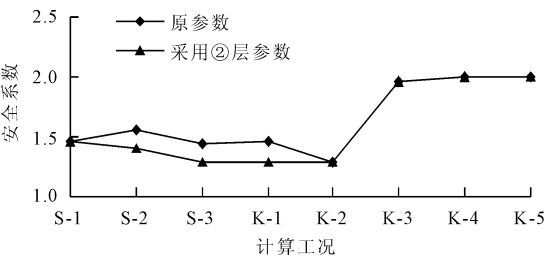


图8 透镜体参数变化时围堰下游边坡安全系数

由表5及图7、图8可知,透镜体参数采用覆盖层②层参数时,较透镜体参数采用原参数的情况,稳定渗流期工况S-3、开挖期工况K-1的围堰下游边坡均不满足稳定要求,安全系数分别减小至1.280,1.289,而透镜体参数的改变对其他工况影响很小。分析造成该现象可能的原因是:工况S-3、K-1在透镜体参数采用原参数时,围堰下游边坡最危险滑动面未穿过透镜体,而透镜体参数采用覆盖层②层参数时的最危险滑动面穿过了透镜体,如图9及图10所示,因此透镜体参数的改变对这3种工况下的围堰下游边坡稳定产生了影响,而其他工况的下游边坡最危险滑动面均未穿过透镜体。

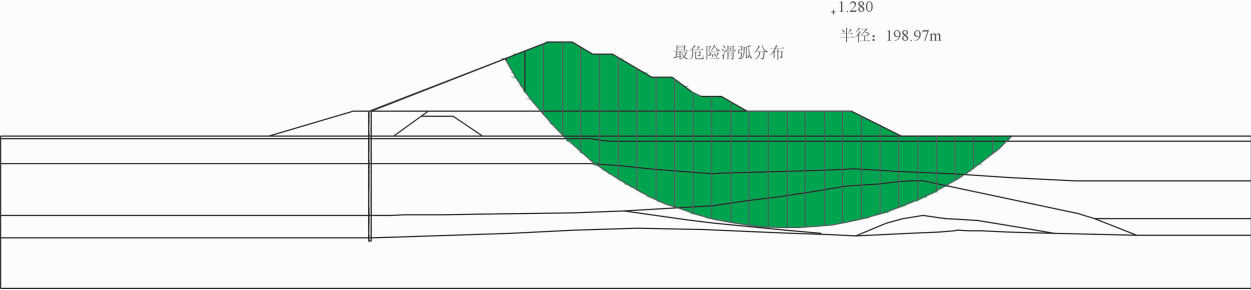


图9 透镜体参数采用覆盖层②层参数时工况S-3围堰下游边坡最危险滑弧分布

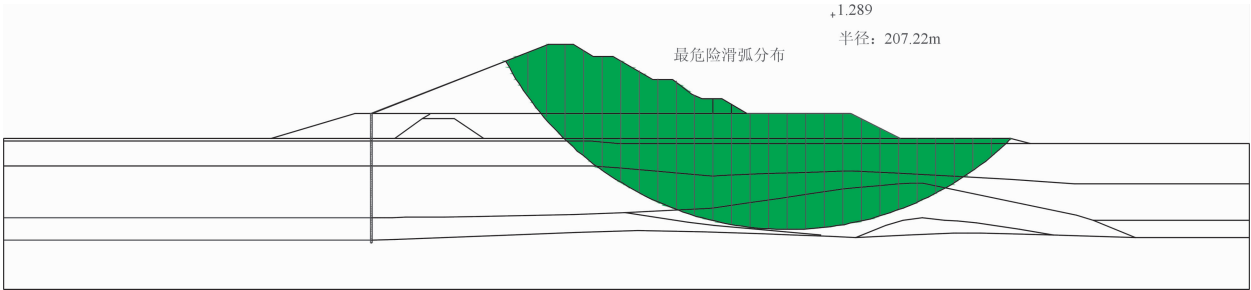


图10 透镜体参数采用覆盖层②层参数时工况K-1围堰下游边坡最危险滑弧分布

4 结 论

本文以某水电站工程上游横向围堰为例,研究了深厚覆盖层地基高土石围堰在施工过程中典型工况下边坡抗滑稳定情况,并针对不同的覆盖层、透镜体物理力学参数变化情况,进行了围堰及基坑边坡稳定抗滑的敏感性分析。通过计算分析得出以下几点结论:

(1)覆盖层②层的内摩擦角的增大对围堰边坡稳定的影响较为明显,围堰设计过程应考虑到围堰填筑过程中地基覆盖层可能的参数变化,以及由此带来的对围堰安全稳定的影响。

(2)透镜体参数对围堰边坡最危险滑动面穿过透镜体的情况影响较大,其他情况下产生的影响基本可以忽略。对于围堰稳定关于透镜体参数的敏感性研究是基于覆盖层中透镜体位置及范围的不确定性而言的,因此通过地质探测,确定透镜体准确位置及范围,有利于围堰边坡稳定性的精确分析,可减少其他不必要的地基处理措施。

(3)为满足围堰边坡稳定要求,可考虑对覆盖层地基采取适当加固处理措施。

参考文献:

- [1] 张 飞,卢晓春,陈博夫,等.深厚覆盖层土石围堰防渗墙结构设计研究[J].长江科学院院报,2016,33(4):120-124.
- [2] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016,49(1):96-115.
- [3] 党林才,方光达.深厚覆盖层上建坝的主要技术问题

- [J].水力发电,2011,37(2):24-28+45.
- [4] 薛山丹,吕江明,庞 彬.瀑布沟水电站大坝深厚覆盖层坝基处理[J].人民长江,2012,43(4):35-38.
- [5] 卢晓春,田 斌,孙开畅.深厚覆盖层上土石围堰渗流及边坡稳定性研究[J].人民长江,2014,45(9):55-58+61.
- [6] 中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会.利用深厚覆盖层建坝的实践与发展[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [7] 田 水,王 钊.夯击方式对强夯加固效果的影响[J].岩土力学,2008,29(11):3119-3123.
- [8] 张亚丽,薛鹏松,张园园,等.松塔水电站上游土石围堰邓肯E-B、E- μ 模型参数试验研究[J].水力发电,2016,42(2):116-119.
- [9] 汪承亮.极限分析法在边坡稳定分析及挡土墙土压力计算中的应用[D].合肥:合肥工业大学,2010.
- [10] 周 俊,刘晓平,林积大,等.湘江长沙综合枢纽左岸二期围堰稳定分析[J].交通科学与工程,2012,28(1):69-73.
- [11] 陈 磊,窦向贤.深厚覆盖层砾石土心墙堆石坝抗滑稳定分析[J].四川水力发电,2010,29(4):8-11.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.DL/T5395-2007碾压式土石坝设计规范[S].北京:电力出版社,2008.
- [13] 樊艳欣,王瑞骏,郭兰春,等.深厚覆盖层地基高土石围堰应力变形敏感性分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(5):207-211.
- [14] 何江达,肖明砾,高希章,等.深厚覆盖层下围堰基坑开挖稳定性非线性有限元分析[C]//中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会第六届委员会2009年工作会议暨首届利用深厚覆盖层建坝技术研讨会,南京,2009:312-318.