文章编号:1673-9469(2020)04-0001-06 DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.04.001

水泥土搅拌桩防渗墙对土坝防渗效果的模拟研究

郝 洁[1],李 军[1*],郑国宝[2],贾海磊[1],潘文明[1]

(1. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院,江苏 南京 210029;
2. 丹阳市长江堤防工程管理处,江苏 镇江 212300)

摘要:通过对水泥土搅拌桩防渗墙防渗效果进行研究,为水泥土防渗墙设计提供进一步的优化指标。通过测压管观测数据反演得出大坝土体实际渗透系数,建立渗流有限元模型并利用实测资料验证,对水泥土搅拌桩防渗墙在土坝中的施工位置和深度进行不同情景模拟分析,结果表明:加入防渗墙后,渗流稳定性增加,防渗效果明显。防渗墙越靠近坝体上游,坝体的渗流稳定性越好;防渗墙贯入深度越深,坝体的渗流稳定性越好。防渗墙的位置布置在坝体中部靠近上游处较为合理,但考虑实际工程中施工要求,适当将防渗墙位置后移布置在大坝轴线处,对于渗流量影响较小。

关键词:水泥土搅拌桩防渗墙;土坝;有限元;情景模拟

中图分类号:TV139.14 **文献标识码**:A

Simulation Study on Effect of Impervious Wall of Cement-soil Mixing Pile in Seepage Prevention of Earth Dam

HAO Jie[1], LI Jun[1*], ZHENG Guobao[2], JIA Hailei[1], PAN Wenming[1]

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;
2. Danyang Yangtze River Embankment Project Management Office, Zhenjiang, Jiangsu 212300, China)

Abstract: The anti-seepage effect of the cement-soil mixing pile impervious wall was studied, providing further optimization indicators for the design of impervious wall. The finite element model of the seepage flow was established and verified by the measured data. Different scenarios were simulated for the construction position and penetration depth of the cement-soil mixing pile impervious wall in the earth dam. The results shows that after the impervious wall is added, the seepage stability increases and the seepage control effect is obvious. The closer the cutoff wall is to the upstream of the dam body, the better the seepage stability of the dam body; the deeper the penetration depth of the cutoff wall, the better the seepage stability of the dam body. It is reasonable to place the cutoff wall in the middle of the dam body near the upstream, but considering the construction requirements in the actual project, the position of the cutoff wall should be properly moved back at the axis of the dam, which has little influence on the seepage flow.

Key words: the cement-soil mixing pile impervious wall; earth dam; finite element; simulation

水泥土搅拌桩是通过施工机械在地基深处将软土和水泥强制搅拌,经一系列反应硬结成具有整体性、阻水性和一定强度的承重桩,在坝体中连续的搅拌桩构成了水泥土防渗墙。土质防渗体需在筑坝期间施工且施工难度较高,而水泥土搅拌桩防渗墙具有经济、可靠、施工方便等优点,可用于后期浇筑。在工程实际中水泥土搅拌桩防渗墙多应用在水库大坝除险加固工程[1-3],目前针对防渗墙的施工工艺也有较多研究[4-5]。在水泥土搅拌桩防渗墙的效果方面,王静芳[6]对比了无防渗、单排和双排搅拌桩防渗墙,得出双排水泥土搅拌桩防渗墙有更好的防渗效果。侯永峰等[7-9]分别

收稿日期:2020-06-17
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508001);南京水利科学研究院基金项目(Y416004)
作者简介:郝洁(1988-),女,江苏南京人,硕士,工程师,主要从事水工结构健康诊断、安全评估等科研工作。
*通讯作者:李军(1974-),男,安徽东至人,博士研究生,高级工程师,主要从事水工结构健康诊断、安全评估等科研工作。

以粘性土和砂土为原状土,掺入不同比例的水泥进行试验得出一系列的水泥土对应的渗透系数。董凯赫[10]对不同水泥掺量水泥土的渗透性进行了试验研究。王丹[11]针对防渗墙渗透系数、成墙厚度、深度方面都做了一系列假设,进行了渗流分析,但对渗流网和浸润线没有作出分析对比。在渗流观测资料分析方面,满红飞[12]对土石坝的渗流观测数据及计算结果作了对比,但实际分析过程中没有进行反演。

本文采用有限元分析方法和实测资料对水泥土搅拌桩防渗墙防渗效果进行研究,在实测基础上对水泥土搅拌桩防渗的效果进行分析,并通过有限元分析防渗墙墙体位置及墙体深度对抗渗稳定性指标的影响,为水泥土防渗墙设计提供进一步的优化指标。研究成果对于水泥土搅拌桩防渗墙的施工设计具有重要意义。

1 水泥土搅拌桩防渗墙观测实验

1.1 水泥土搅拌桩防渗墙工况

江苏省某水库大坝为均质土坝,坝高14.90 m。除险加固对大坝进行了防渗处理,坝体采取多头小直径深层搅拌桩防渗墙防渗,范围为K0+000—K0+962,墙厚0.3 m,防渗墙进入坝基粉质粘土层不小于1 m。

搅拌桩防渗墙参数:施工单桩直径500 mm,桩间中心距400 mm。固化剂采用42.5级普通硅酸盐水泥,水泥掺入量(占天然土重的百分比)15%。根据质量检测结果,防渗墙成桩完整、连续、质量稳定,外观质量好,桩搭接满足设计要求。根据室内渗透试验结果,防渗墙渗透系数在8.9×10^{-8}~7.5×10^{-7} cm/s之间。

本次渗流实验选取距大坝左起612 m作为典型断面(该断面有较全的地质勘查参数,且有测压管监测断面),典型断面渗流计算简化土质材料分区见图1。各土层原地勘测渗透系数见表1。

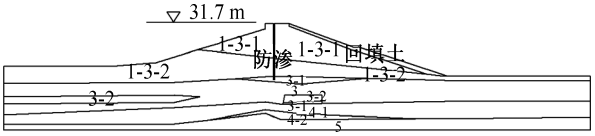


图1 典型断面渗流计算简化材料分区图

Fig. 1 Simplified material partition graph for typical section seepage calculation

1.2 大坝测压管布置及观测结果

在大坝防渗墙前后(P5,防渗墙前1 m;P6,防渗墙后1 m),下游(P7,防渗墙后13 m)、坡脚(P8,防渗墙后34 m),各布置一个测压管,同时观测测压管水位。水库典型断面2010年6月份测压管水位观测值如表2所示。

由表2可知,防渗墙前后水位落差明显,均达到2 m以上,说明防渗墙有降低坝体内水头的效果。根据朱朝阳[13]对混凝土防渗墙浸润线位势的分析,经过混凝土防渗墙后的剩余位势在40%时判断防渗墙效果较好。由表3可知,当库水位在24.98~25.11 m时,典型断面经过水泥土搅拌桩防渗墙后的剩余位势在69.80%~70.04%之间,由于水泥土搅拌桩防渗墙与土体结合,本身作用效果不及混凝土防渗墙,经过防渗墙后位势变动较大(在15%以上)也能说明该工程中防渗墙防渗效果较好。实测各点水位在上游水位变动情况下都有所变化,说明测压管对水位变动反应灵敏。鉴于以上特点,2016年现场对大坝进行检查时,未发现大坝有明显渗漏异常,结合施工期渗流数据,可判断测压管数据准确,符合实际渗流情况。

表1 土层渗透系数表

Tab. 1 Soil permeability coefficient

土层号	岩土名称	渗透系数平均值/($\times10^{-6}$cm·s^{-1})		渗透系数大值平均值/($\times10^{-6}$cm·s^{-1})		渗透系数小值平均值/($\times10^{-6}$cm·s^{-1})	
		水平	竖直	水平	竖直	水平	竖直
1-3-1	坝体填土	20.67	30.74	56.84	79.37	4.84	1.38
1-3-2	坝体填土	31.83	9.63	74.90	63.28	3.10	0.16
3	粉质粘土	38.17	80.55	38.17	80.55	38.17	80.55
3-1	粉土	16.26	5.09	16.26	5.09	16.26	5.09
3-2	粘土	7.07	0.14	7.07	0.14	7.07	0.14
4-1	细砂	467.00	8.77	467.00	8.77	467.00	8.77
4-2	中砂	167.50	167.50	167.50	167.50	167.50	167.50
5	粉质粘土	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65
	防渗墙	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60

表 2 典型断面大坝测压管水位

Tab. 2 Piezometer level of typical dam section

观测日期	库水位/m	坝体测压管编号及管内水面高程/m				
		P5	P6	P7	P8	防渗墙前后水位差(P6-P5)
2010-6-5	26.38	25.21	22.75	21.40	18.97	2.46
2010-6-7	26.44	25.24	22.77	21.42	18.98	2.47
2010-6-9	26.50	25.26	22.78	21.44	18.97	2.48
2010-6-11	26.47	25.25	22.76	21.42	18.95	2.49
2010-6-13	26.43	25.23	22.75	21.40	18.93	2.48
2010-6-15	26.39	25.20	22.74	21.38	18.90	2.46
2010-6-17	26.30	25.18	22.71	21.37	18.87	2.47

表 3 典型断面测点位势统计表

Tab. 3 Piezometric potential level of typical dam section

观测日期	库水位/m	位势/%			
		P5	P6	P7	P8
2010-6-5	25.10	87.53	70.04	76.52	44.77
2010-6-7	25.07	87.29	70.02	76.60	44.80
2010-6-9	25.00	86.95	69.98	76.82	44.37
2010-6-11	24.98	87.12	69.82	76.74	44.12
2010-6-13	25.02	87.27	69.87	76.52	43.86
2010-6-15	25.06	87.33	70.00	76.31	43.38
2010-6-17	25.11	87.96	69.80	76.53	42.79

2　渗流有限元模型构建和验证

目前常用的渗流模型主要有:基于拉普拉斯方程的流网法,根据流线和等势线的关系及水头损失绘制流网;求基本方程数值解的有限单元法;用电磁场模拟渗流场的电拟试验法;在平面渗流条件下求解稳定渗流的水力学方法。渗流模型不考虑渗流在土壤孔隙中流动路径的迂回曲折,只考虑渗流的主要流向,并认为全部渗流空间均被水所充满。本文采用能够描述复杂渗流情况的有限单元数值解法。

2.1　模型构建和网格剖分

根据大坝坝体、坝基填筑和地质情况,选取典型断面进行渗流计算。建模时下边界取坝体向下延伸 1 倍坝高的位置,上游边界延伸 0.5 倍坝宽的位置。网格划分参考简化的各土质材料分区边界,网格单元基本采用四边形,个别部位采用三角形过渡,该模型总单元数为 13 166 个,节点数 13 438 个。渗流平面有限元网格见图 2。

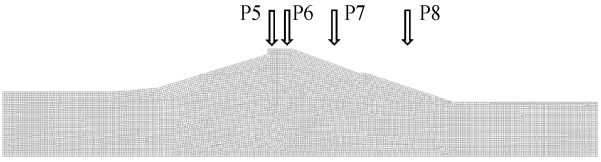


图 2 典型断面渗流有限元平面网格图

Fig. 2 Seepage finite element plane grid of typical section

2.2　模型验证

表 1 中各土层原地勘测渗透系数是针对某一点进行测试,不能完全代表各土层平均渗透系数的真值,因此在模型计算中需针对渗透系数合理取值范围进行调试反演,获得更符合实际情况的模型参数。选取典型断面附近的监测断面,选取实测资料中 2010 年 6 月 5 日的数值作为本次计算的依据。

根据表 1 中渗透系数小值平均值计算浸润线,与实测水位进行比较。计算结果见表 4。

表 4 计算断面实测水位与计算水位比较

Tab. 4 Comparison of measured water level and calculated water level

	上游水位	防渗墙前(P5)	防渗墙后(P6)	下游(P7)	坡脚(P8)	防渗墙前后水位差(P6-P5)
实测值/m	26.38	25.21	22.75	21.40	18.97	2.46
计算值/m		23.99	23.08	21.95	19.81	0.91

表5 计算断面实测水位和反演后计算水位比较

Tab. 5 Comparison of measured water level and calculated water level after inversion

	上游水位	防渗墙前(P5)	防渗墙后(P6)	下游(P7)	坡脚(P8)	防渗墙前后水位差(P6-P5)
实测值/m	26.38	25.21	22.75	21.40	18.97	2.46
计算值/m		24.95	22.52	21.90	19.96	2.43

由表4可知,直接使用地勘资料所得浸润线与实测水位有一定差别,尤其是防渗墙前后水位差与实际情况不符,故结合地勘的渗透系数范围和2010年6月5日监测断面的水位取值,对计算断面的渗透系数进行反演计算,反演计算结果如表5和图3,反演得到各土层渗透系数见表6。

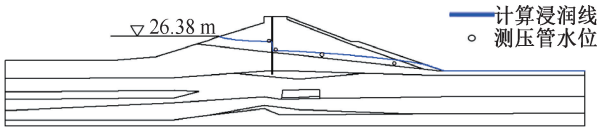


图3 反演后计算水位与实测水位对比

Fig. 3 Comparison of measured water level and calculated water level after inversion

经过反演计算,浸润线与实测值变化趋势相近,防渗墙前后的水头变化及防渗墙后的三个测压管水位更接近实测值,整体浸润线和实测值相近,可认为渗透系数反演取值比较合理。故选取表6渗透系数进行渗流验算。

表6 反演后各土层渗透系数

Tab. 6 Soil permeability coefficient after inversion

层号	岩土名称	渗透系数/($\times10^{-6}$cm·s^{-1})	
		水平	竖直
1-3-1	坝体填土	30.00	90.00
1-3-2	坝体填土	60.00	48.00
3	粉质粘土	70.00	84.00
3-1	粉土	50.00	15.00
3-2	粘土	3.00	0.30
4-1	细砂	300.00	30.00
4-2	中砂	300.00	300.00
5	粉质粘土	3.65	3.65
	防渗墙	0.08	0.08
	回填土	90.00	90.00

2.3 防渗墙效果分析

为了说明水库水泥土搅拌桩防渗墙的作用效果,上游采用水位26.38 m,对比加入防渗墙前后的工况进行分析。分析结果见图4、图5和表7。

由图4和图5可知,加入防渗墙后,墙前有一定的壅水,墙后浸润线降低,防渗墙前后水位差明显;由表7可知,加入防渗墙后,渗流量减少,下游出逸点高程降低,下游最大渗透坡降减小。可见

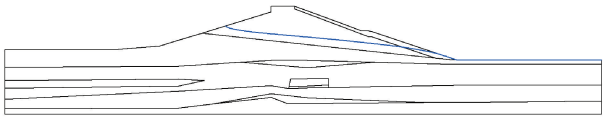


图4 无防渗墙时的渗流计算结果

Fig. 4 Seepage calculation results without impervious wall

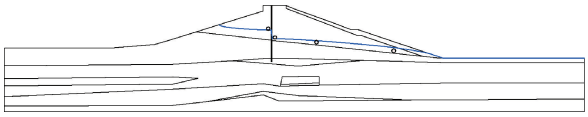


图5 防渗墙加固处理后的渗流计算结果

Fig. 5 Seepage calculation results of impervious wall reinforcement

表7 加入防渗墙前后的渗流计算结果

Tab. 7 Seepage calculation results with and without the impermeable wall

	加防渗墙前	加防渗墙后
渗流量/(m^3·s^{-1})	-1.6×10^{-6}	1.4×10^{-6}
下游出逸点高程/m	18.49	18.12
下游最大渗透坡降	0.46	0.44

加入防渗墙后,渗流稳定性增加,防渗效果明显。

3 防渗墙墙体位置及墙体深度对防渗效果的影响

针对实际坝体,设立防渗墙位置在坝体上游坝坡(53 m)、坝顶上游(63.62 m)、坝顶中部靠前(66 m,原防渗墙位置)、坝顶下游(70.22 m)和下游坝坡(80 m)五种情景(图6),利用有限单元法进行模拟计算,分析防渗墙的位置对防渗效果的影响。同时对比防渗墙底位于不同深度时的防渗效果。表8为不同防渗墙位置和深度对防渗效果的计算结果。

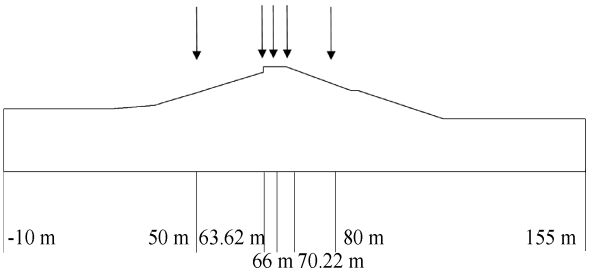


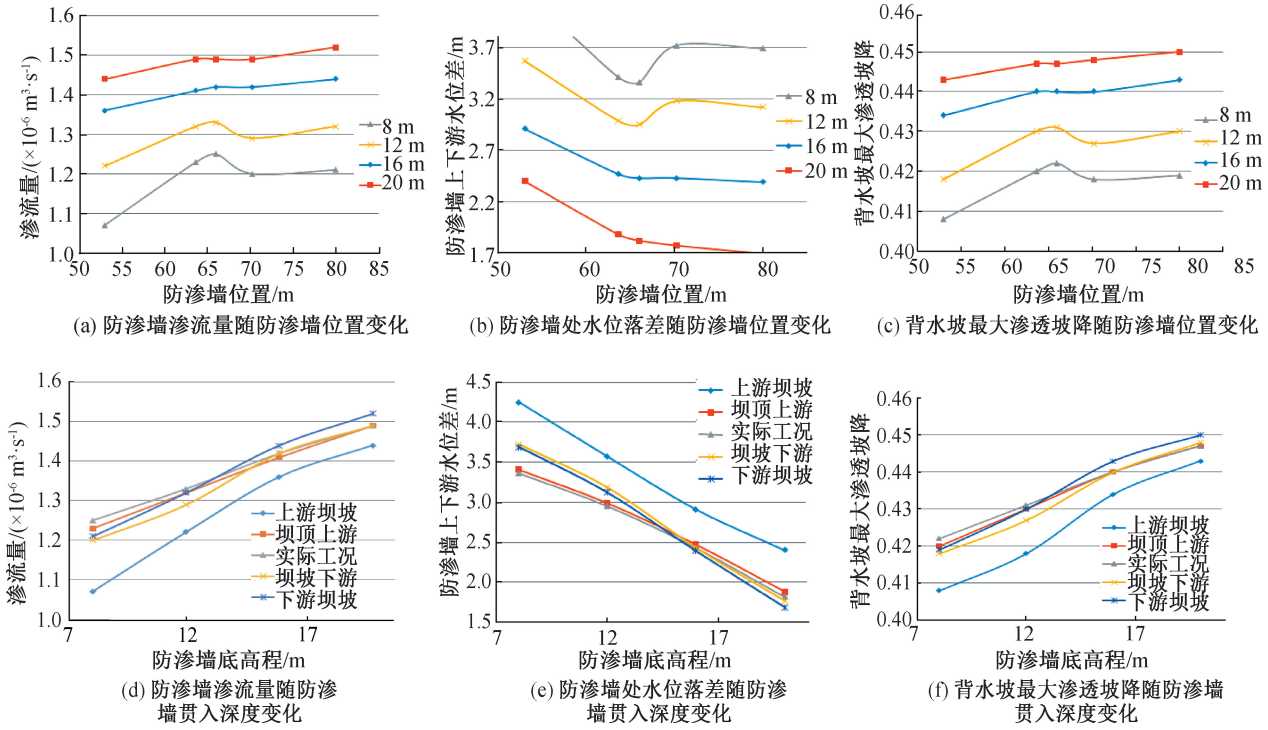
图6 防渗墙位置布置图

Fig. 6 Position layout of impervious wall

表 8 防渗墙位置和深度对于防渗效果的影响计算

Tab. 8 The influence of the position and depth of impervious wall on the anti-seepage effect

墙底高程/m	墙体位置/m	单宽渗流量/($\times10^{-6}$cm·s^{-1})	墙前水位/m	墙后水位/m	墙前后水位差/m	墙底土层编码	出逸点高程/m	最大渗透坡降	
								背水坡	坝基(竖直)
8	53	1.07	26.25	22.00	4.25	4-1	17.62	0.408	0.307
	63.62	1.23	25.33	21.92	3.41	4-1	17.87	0.420	0.331
	66	1.25	25.14	21.78	3.36	4-1	17.87	0.422	0.333
	70.22	1.20	24.91	21.19	3.72	4-1	17.87	0.418	0.327
	80	1.21	24.42	20.73	3.69	4-1	17.87	0.419	0.329
12	53	1.22	26.24	22.67	3.57	3	17.87	0.418	0.329
	63.62	1.32	25.25	22.26	2.99	3	18.00	0.430	0.342
	66	1.33	25.06	22.11	2.95	3	18.00	0.431	0.343
	70.22	1.29	24.80	21.62	3.18	3	18.00	0.427	0.339
	80	1.32	24.15	21.03	3.12	3	18.00	0.430	0.342
16(防渗墙实际深度)	53	1.36	26.23	23.32	2.91	3	18.00	0.434	0.346
	63.62	1.41	25.15	22.68	2.47	3-1	18.12	0.440	0.353
	66	1.42	24.94	22.51	2.43	3-1	18.12	0.440	0.353
	70.22	1.42	24.61	22.18	2.43	3-1	18.12	0.440	0.353
	80	1.44	23.80	21.41	2.39	3-1	18.12	0.443	0.356
20	53	1.44	26.20	23.80	2.40	1-3-2	18.12	0.443	0.356
	63.62	1.49	24.97	23.09	1.88	1-3-2	18.24	0.447	0.361
	66	1.49	24.75	22.93	1.82	1-3-2	18.24	0.447	0.361
	70.22	1.49	24.38	22.61	1.77	1-3-2	18.24	0.448	0.362
	80	1.52	23.49	21.80	1.69	1-3-2	18.24	0.450	0.365



(a) 防渗墙渗流量随防渗墙位置变化　(b) 防渗墙处水位落差随防渗墙位置变化　(c) 背水坡最大渗透坡降随防渗墙位置变化

(d) 防渗墙渗流量随防渗墙贯入深度变化　(e) 防渗墙处水位落差随防渗墙贯入深度变化　(f) 背水坡最大渗透坡降随防渗墙贯入深度变化

图 7 渗流量变化、防渗墙处水位落差及渗透坡降变化图

Fig. 7 Graph of seepage flow changes, water level drop at the cutoff and permeability gradient change

图 7(a)(b)(c)中横坐标为防渗墙位置,不同颜色折线代表防渗墙贯入不同的深度。在相同的成墙深度下,总渗流量随防渗墙的后移有增大的趋势,墙前后水位落差随防渗墙的后移有减小的

趋势,坝基及背水坡最大渗透坡降随防渗墙后移有增大的趋势。由此可见,防渗墙越靠前,坝体的渗流稳定性越好。

图7(d)(e)(f)中横坐标为防渗墙高程,不同颜色折线代表防渗墙处于不同的位置。防渗墙位置相同时,总渗流量随防渗墙贯入深度的增加而减少,墙前后水位落差随防渗墙贯入深度的增加而增加,坝基及背水坡最大渗透坡降随防渗墙成墙深度的增加而降低。由此可见,防渗墙贯入深度越深,坝体的渗流稳定性越好。

以防渗墙实际成墙深度16 m处为例,坝体渗流量随防渗墙位置前移有减小的趋势,渗流量随防渗墙位置的变化斜率为2.9×10^{-9},即防渗墙每向前移动1 m,单宽流量减小2.9×10^{-9} m^3/s。

考虑到坝体稳定性和渗流量等因素,防渗墙应布置在坝顶上游(63.62 m)处,单宽流量为1.41×10^{-6} m^3/s。实际工程中为施工方便,将防渗墙布置在坝顶中部偏上游的位置(66 m),该位置距坝顶上游位置2.38 m,单宽流量差为10.0×10^{-8} m^3/s,占防渗墙位于坝顶上游时单宽流量的0.7%,该差值对于防渗效果的影响较小,故综合考虑,将防渗墙的位置布置在坝体中部靠近上游处较为合理。

4 结论

1)加入防渗墙后,渗流稳定性增加,防渗效果明显。

2)在防渗墙高程取实际深度情况下,由坝下游至坝上游单宽渗流量变化为$1.44\times10^{-6}\sim1.36\times10^{-6}m^3/s$,坝前后水位差变化为2.39~2.91 m,防渗墙越靠上游,单宽渗流量减少,墙前后水位落差增加,坝基及背水坡最大渗透坡降降低,坝体的渗流稳定性越好。

3)在防渗墙高程取实际位置(66 m)情况下,防渗墙越深,单宽渗流量减少,墙前后水位落差增加,坝基及背水坡最大渗透坡降降低,坝体的渗流稳定性越好。

4)防渗墙的位置布置在坝体中部靠近上游处较为合理,但考虑实际工程中施工要求,适当将防渗墙位置后移布置在大坝轴线处,对于渗流量变化影响较小。

参考文献:

[1]赵 慧,范 岳,靖长山. 水泥土搅拌桩防渗墙技术在达拉特旗乌兰淖水库加固中的应用[J]. 内蒙古水利,2015(6):126-127.

[2]张俊峰. 水泥土搅拌桩防渗墙施工技术在北营水库除险加固工程中的应用[J]. 山西水利科技,2013(4):4-5.

[3]张朝温,王炳和,刘书兰. 水泥土防渗墙技术在堤防加固工程中的应用[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版,2002,23(2):60-62.

[4]杨开勇,汪 涛,缪宏伟. 采用多头小直径水泥土搅拌桩防渗墙的堤坝施工设计[J]. 江南大学学报:自然科学版,2014,13(5):572-575.

[5]SCHAUER D A, MEVERS D A, PUCCINI C J. Installation of a Seepage Cutoff Wall at the Herbert Hoover Dike Using the Cutter Soil Mixing Method[C]// International Conference on Grouting and Deep Mixing. 2012: 1214-1225.

[6]王静芳. 多头小直径搅拌桩防渗墙体的性能研究及其渗流分析[D]. 扬州:扬州大学,2009.

[7]侯永峰,龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. 浙江大学学报,2000,34(2):77-81.

[8]张家柱. 黏土与细砂互层渗流控制的围井抽水试验研究[J]. 中国农村水利水电,2014(4):123-128.

[9]胡汉兵,胡胜刚,刘 芳. 粉细砂水泥土力学与渗透特性试验研究[J]. 长江科学院院报,2013,30(10):48-53.

[10]董凯赫. 抗渗性水泥土性能的试验研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2014:58-59.

[11]王 丹. 土坝中水泥土防渗墙防渗效果分析及设计指标研究[D]. 山东:山东大学,2009.

[12]满红飞. 土石坝渗流安全性态分析研究及工程应用[D]. 南京:南京水利科学研究院,2009.

[13]朱朝阳,顾浩钦,崔书生,等. 力洋水库大坝渗流监测资料分析及渗流性状评价[J]. 浙江水利科技,2018(04):51-55.

(责任编辑 王利君)