

秦淮河船闸扩容改造工程围堰设计方案优化

丁 跃¹, 张友利^{2,3}, 唐云清^{2,3}, 王玉波³

(1. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223005; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 3. 江苏科兴工程建设监理有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 秦淮河船闸扩容改造工程围堰地基具有强渗透性特点,故围堰必须具有较强的防渗能力,才能保证船闸主体进行干地施工。原围堰结构设计方案为:上游围堰采用土工织物袋双棱体结构;下游围堰迎水面采用双排钢板桩中间回填黏性土直立结构,背水面采用回填黏性土斜坡式结构,经对“充填砂袋+防渗帷幕”、“黏土填筑+防渗帷幕+反压平台”及“黏土填筑+防渗帷幕+钢板桩”三种围堰结构设计方案进行比选优化,最终确定采用“黏土填筑+防渗帷幕+反压平台”的结构形式,保证了围堰结构安全和防洪进度,并取得了明显的经济效益。

关键词: 秦淮河; 船闸; 强渗透性; 围堰方案; 设计优化

中图分类号: TU753.6+2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)03-0092-06

秦淮河船闸位于江苏省南京市秦淮河航道新河段下游,距入江口约2 km,是沟通长江干线和南京内河航道的唯一通江口门船闸,也是南京市水上交通的重要基础设施。该船闸按Ⅳ级船闸设计,设计最大船舶吨级为500 t(兼顾1 000 t),船闸尺度为165 m×18 m×4 m(闸室长×口门宽×槛上水深),上、下游主导航墙直线投影长度为45 m,辅导航墙直线投影长度为30 m,上、下游引航道护坦30 m。船闸扩容改造工程土建施工项目施工工期为24个月,需要在主体工程施工期间上、下游设置围堰^[1]。船闸勘察区深度60.0 m以浅均为第四系全新统土层,其岩性及分布特征如下:1-2层(Q4):层顶标高-3.19~3.90 m,最大层底埋深13.5 m,层厚0.8~7.8 m,为灰色淤泥质黏土,流塑夹粉砂薄层,高孔隙比、高压缩性,设计厚度取值为2.6 m;1-4层(Q4):粉砂,部分为粉土层,灰色、饱和、稍密,具中偏低~中等压缩性,部分夹极薄层粉质黏土,层厚1.5~4.2 m,设计厚度取值为3.8 m;2-1层(Q4):粉砂,灰色,饱和,中密为主,中偏低~中等压缩性,部分夹极薄层粉质黏土,为勘察区浅部主要含水层,层顶面标高约-8.20~-5.34 m,层厚12.0~16.0 m。

围堰位于1-2层的中软土层,该层土性为软黏土,局部为淤泥质黏土,强度低,土性差。经抽水试验结果表明,2-1粉砂层水平渗透系数^[2] $K=8.0\text{ m/d}(1.0\times10^{-2}\text{ cm/s})$,影响半径 $R=92.0\text{ m}$ 。现场实际抽水试验表明2-1粉砂层实测渗透系数为7.25 m/d。渗流稳定验算表明,基坑渗流量高达38 396 m³/d。比较类似船闸项目(如江苏省泰州口岸船闸、南京划子河船闸地基渗透系数等级亦为 10^{-2} cm/s)及一般船闸项目(如南京杨家湾船闸、南京下坝船闸地基渗透系数等级为 10^{-5} cm/s)结果表明秦淮河船闸的基础具有较强的渗透性^[3]。

1 方案比选

1.1 原设计方案

(1)上游围堰 原设计方案采用土工织物袋双棱体断面,底角采用沙袋反滤护角(见图1)。由于围堰基础为3~5 m深淤泥层,主要技术问题有:①土工织物充填袋装沙棱体的堤身稳定性差,在设计高水位工况下,两侧棱体不满足堤身稳定要求;②若清除基础淤泥,不仅施工难度大、费用高,而且淤泥层下的细沙层透

收稿日期: 2013-11-11

作者简介: 丁 跃(1974-),男,江苏淮安人,工程师,主要从事水利工程建设管理研究。E-mail: 610467022@qq.com

水性极强,内侧渗流量大,极易出现管涌而影响围堰安全性;③土工织物充填袋装沙棱体为两侧坡比设计不一致,内侧为1:1,外侧为1:3,棱体施工为水下抛填施工,施工周期长;④施工两侧棱体时,在两侧设计低水位和中间堤身断面回填的最不利荷载组合下,棱体整体抗滑稳定不能满足规范要求,且可操作性较差,无法形成设计断面。

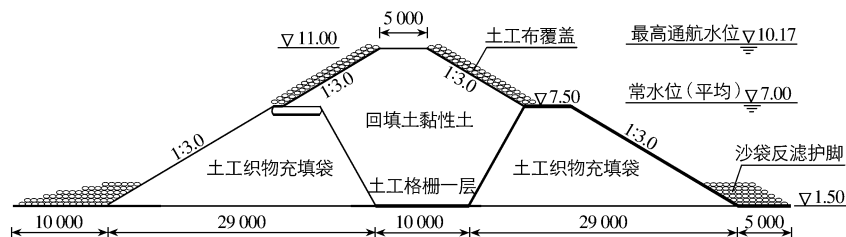


图1 上游围堰原设计图(单位:长度 mm,其他 m)

Fig. 1 Original design chart of upper cofferdam (units: length in mm, others in m)

(2)下游围堰 下游围堰迎水面采用双排钢板桩中间回填黏性土直立式结构,背水面采用回填黏性土斜坡式堤心断面结构(见图2)。存在的主要技术问题有:①迎水面直立式钢板桩施工需水上沉桩施工,钢板桩沿板桩墙轴线方向易产生平面扭曲,锁扣发生脱榫而导致挡水困难,给后期围堰施工造成困难,甚至后期无法施工;②钢板桩入土深度不够,钢板桩桩顶标高为+6.00 m,底标高为-14.0 m,泥面标高为-4.1 m,入土深度仅为9.9 m,而上部悬臂为10.1 m。经计算表明,钢板桩后回填土施工工况条件下的钢板桩抗弯拉强度不满足要求;后期斜坡式堤身回填时的最不利荷载组合工况下,直立式钢板桩结构整体抗滑不能满足规范要求;③断面结构形式对施工工期要求高,需要在枯水位期间施工,且有清淤要求,施工期间清淤难度较大、费用高、周期较长;另外还需对背水面进行二次清淤。经复核计算表明,在设计高水位与墙后清淤挖泥最不利荷载组合条件下,直立式钢板桩临时围堰整体抗倾覆稳定性不能满足规范要求。

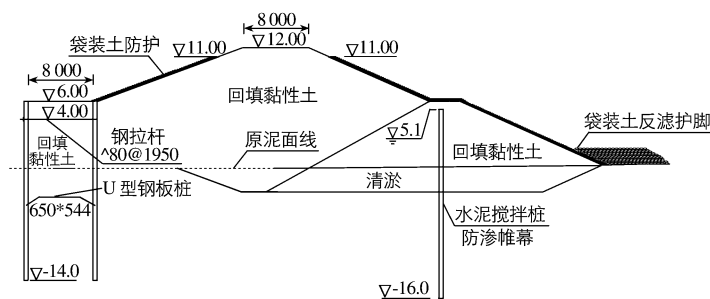


图2 下游围堰原设计图(单位:高程 m,其他 mm)

Fig. 2 Original design chart of lower cofferdam (units: elevation in m, others in mm)

经对上游围堰和下游围堰复核分析表明,原有设计方案存在结构整体稳定性不足,抗渗稳定性和整体稳定性差等缺点,因此需要优化设计方案。

1.2 方案比选

围堰施工是船闸安全施工的前提,原设计方案仅供参考,有必要进一步优化设计^[4],在确保围堰安全稳定基础上,有效控制施工成本,优化比选围堰设计方案^[5]。

(1)充填砂袋+防渗帷幕 充填砂袋式围堰^[6]曾在泰州口岸船闸应用,优点是围堰填筑就地取材(河底吸砂)充填模袋方式,施工成本较低,但由于本工程河床底部为3 m厚淤泥层,实际施工时较难采取吸砂工艺,实施难度较大。

(2)黏土填筑+防渗帷幕+反压平台 素土填筑为传统结构形式^[7],优点是施工工艺简单,施工质量较易控制,但由于本工程围堰体积较大,土源组织难度大。

(3)黏土填筑+防渗帷幕+钢板桩 该方案是在原设计方案基础上调整而成,但存在与原方案类似问题:如施工难度大、施工质量控制难和施工成本较高^[8]等缺点。

经技术和经济分析,初步选定黏土填筑+防渗帷幕+反压平台作为优化方案。

2 设计方案优化

根据防洪规划,上游围堰按Ⅱ级防洪标准设置,下游围堰按Ⅰ级防洪大堤标准设置。

2.1 方案优化

2.1.1 上游围堰 优化后的上游围堰方案,距离上游靠船墩约 50 m,该处河床最深处高程为 1.5 m,堰体总高度为 9.5 m,总长约 160 m,呈一字形,在河床处底宽约 110 m,顶宽 5 m(见图 3)。一级围堰填筑高程为 1.5~9.0 m,顶宽 23 m,迎水面与背水面坡比均为 1:5,二级围堰填筑高程为 9.0~11.0 m,底宽为 17 m。由于堰底淤泥黏土层厚达 5 m,因此仅在南、北两侧老驳岸与围堰连接处采用水泥搅拌桩防渗帷幕墙,设置于一级围堰顶轴线上。反压平台设置于背水面坡脚位置,利用老闸拆除的石渣及混凝土块反压;为方便围堰水下拆除,迎水面采用砂袋护脚,二级平台及其以上坡面采用模袋混凝土防护至坡顶。

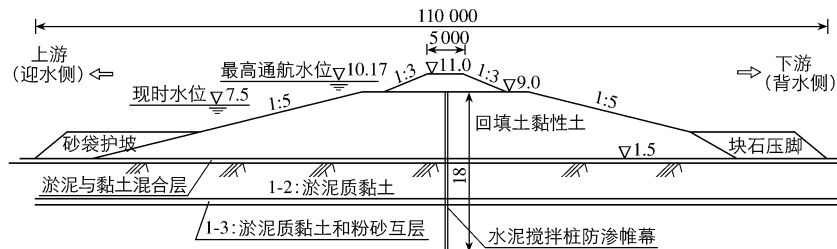


图 3 上游围堰设计优化结构图(单位:长度 mm,其他 m)

Fig. 3 Optimized design chart of upper cofferdam (unit: length in mm, others in m)

2.1.2 下游围堰 下游围堰平均高度为 12.1 m,总长约 165 m,底宽 102.5 m,在 6.0 m 处设置平台,顶宽 8 m(见图 4)。采用黏土填筑+防渗帷幕墙+反压平台结构,其中在迎水面侧 6.0 m 处平台上围堰全范围设置防渗帷幕墙与基坑南北侧的防渗帷幕墙相连接,反压平台则设置于背水面坡脚位置。由于北侧防洪大堤与闸管所的南侧混凝土路面存在 1.8 m 高差,考虑堰顶设有临时道路纵向需与南北侧防洪堤顺接,从北侧 12.0 m 高程放坡至南侧混凝土路面 10.2 m 高程。

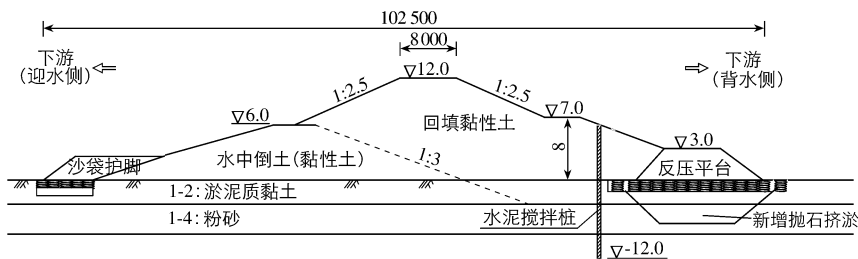


图 4 下游围堰设计优化(单位:长度 mm,高程 m)

Fig. 4 Optimized design chart of lower cofferdam (unit: length in mm, elevation in m)

为确保道路交通及防汛安全,在下游围堰顶道路临水面侧,全范围增设了隔离防洪墙,南侧与闸管所防洪墙相接,墙顶高程为 12.0 m,北侧与防洪堤顶的防洪墙高程(12.7 m)一致,形成全封闭,保证下游围堰的防洪标准。在背水面侧设置了 40 cm 高的防撞安全墙。

2.2 上游围堰整体稳定和沉降分析

2.2.1 计算条件和参数 计算参照围堰实际施工流程,根据施工组织设计总体施工流程^[9]为:①施工第一级堰体,标高为 9.0 m;②围堰内抽水,施工反压平台,围堰施工沙袋护脚;③施工第二级堰体,标高为 11.0 m。

围堰整体稳定计算分 5 种工况,分别为:①工况 1,堰体内外边坡的稳定性工况,即现时水位 7.5 m 时,1 级堰体填筑完毕;②工况 2,堰内抽水完毕时 1 级堰体内外边坡的稳定性工况,即堰外水位为 7.5 m 时,1 级堰体内抽水完毕,堰内施工反压平台,堰外施工沙袋护脚;③工况 3,整个堰体内外边坡的稳定性工况:2 级堰体填筑完毕,堰外常水位为 7.5 m 时,堰内无水;④工况 4,整个堰体内外边坡的稳定工况,2 级堰体填筑完毕,堰外洪水位为 10.17 m 时,堰内无水;⑤工况 5,堰体外边坡(迎水面)的工况,即堰外水位由 10.17 m 降至 7.5 m。

堤坝及地基土层主要力学参数取值见表 1。

表1 土层主要力学参数取值
Tab.1 Main mechanical parameters of soil foundation

范 围	土 层	土层厚度/ m	天然重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和重度 γ_{sat} / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比 e	黏聚力/ kPa		内摩擦角/ $^{\circ}$		备注
						快剪 C_q	固快 C_g	快剪 φ_q	固快 φ_g	
围堰	上层	2.0	18.0	19.6		20.0		15.0		(水上)
	下层	7.5	18.0	19.6		12.0		9.0		(水下)
	抛石+堆石	3.0	15.0	17.0		0.0		45.0		
地基	1-2 层淤泥质土	4.0	17.0	17.1	1.33	9.0	16	2.2	6.9	
	1-3 层粉质黏土夹粉砂	0.7	17.9	18.1	1.02	11.0	5	16.0	29.8	
	1-4 层粉砂	5.5	17.3	17.8	1.06	12.0	5	31.3	29.4	
	2-1 层细砂	14.0	17.9	18.3	0.94	2.0	2	32.5	35.6	
	挤淤层	1.1	17.0	17.1		10.8	16	2.64	6.9	抛石挤淤

2.2.2 计算结果与分析

(1)整体稳定验算 根据《堤防工程设计规范》50286-2013,整体稳定采用总应力法和瑞典条分法^[10],计算结果表明上游围堰迎水面最小安全系数为 1.517,背水面最小安全系数为 1.151,均达到规范要求的五级堤防安全系数 1.10。

(2)沉降计算 沉降计算考虑实际施工过程,即一级堰体填土 60 d,第 2 级堰体填土 15 d,计算基准期为 2 年,地基总沉降计算方法为经验系数法,主固结沉降计算方法为 $e-p$ 曲线法。围堰设计顶高度为 11.0 m,堰顶宽度为 5.0 m,竣工后上游侧工作水位高为 10.17 m,基坑工作水位高为 1.5 m,竣工后经过 60 d 注水到工作水位。结果表明一级堰体填土 60 d 后的围堰沉降达 0.892 m,第 2 级堰体填土 15 d 后的累积沉降为 1.058 m,计算基准期 2 年的累积沉降为 1.166 m。

2.3 下游围堰整体稳定和沉降分析

2.3.1 计算条件和参数 下游围堰施工流程为:首先施工 1 级堰体,然后施工沙袋护脚,施工水泥搅拌桩,堰内抽水施工反压平台;最后施工 2 级堰体至设计标高。

围堰整体稳定计算工况分 4 种:①工况 1,堰体内外边坡的稳定工况,即在现时水位 3.8 m 时,1 级堰体填筑完毕;②工况 2,为在围堰和反压平台间抽水清淤时 1 级堰体内外边坡的稳定性,1 级堰体内抽水完毕,堰内施工反压平台,堰外施工沙袋护脚,施工水泥搅拌桩;③工况 3,整个堰体内外边坡的稳定性;④工况 4,堰体外边坡(迎水面)稳定性工况,即堰外水位由 11.07 m 降至 2.5 m。堤坝及地基土层主要力学参数取值见表 1。

2.3.2 计算结果与分析

(1)整体稳定验算 整体稳定采用总应力法和瑞典条分法,计算结果表明下游围堰迎水面最小安全系数为 1.34,背水面最小安全系数为 1.209,均达到规范要求的长江 1 级堤防安全系数 1.20。

(2)沉降计算 沉降计算考虑实际施工过程,堤身施工期为 90 d,计算基准期为 2 年,地基总沉降计算方法为经验系数法,主固结沉降计算方法为 $e-p$ 曲线法。下游围堰设计高度为 13.5 m,设计顶宽为 8.0 m,竣工后左侧工作水位高为 11.07 m,右侧工作水位高为 -1.0 m,竣工后经过 60 d 注水到工作水位,荷载施加级数为 2 级,第 1 级加荷(60 d)后的沉降为 0.671 m,第 2 级加荷(90 d)后的累积沉降为 1.142 m,基准期结束时的累积沉降为 1.168 m。

3 运行效果与检验

围堰方案经优化后的技术经济比较见表 2,与原方案相比,节约成本约 256.8 万元,减少施工工期约 12 d。为确保及时掌握围堰的安全状况,对围堰沉降、水平位移等实施观测,在上、下游围堰顶部中心以及非临水侧上下相邻两级边坡交接的马道上沿轴线方向分别布设 3 个表面变形观测点。结果表明,上游围堰沉

降量分别为 198, 318 和 389 mm, 下游围堰沉降量分别为 254, 170 和 190 mm, 沉降量小于计算值, 表明围堰优化方案达到设计预期目标值。同时围堰在 2012 年汛期经受长江汛期考验, 通过日常巡查和专业监测, 围堰结构稳定, 未出现大量渗水、滑移及坍塌等现象。

表 2 工程经济效益

Tab. 2 Economic benefits analysis results

项 目	项目名称	节约数量	围堰原结构与优化后结构对比说明	
			原设计方案	优化后方案
费 用	土方工程	-45.0 万元	原方案土方量约 $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3$, 按土方填筑成本 30 元/ m^3 计, 实际成本约 375 万元。	优化方案需土方约 $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$, 按土方填筑成本 30 元/ m^3 计, 实际施工成本约 420 万元。
	防护工程	301.8 万元	下游围堰原方案迎水面采取双排钢板桩防护, 防护长度约 165 m, 总计需钢板桩 (12 m) 约 660 根, 施工单价按 35 元/m 计, 钢板桩租赁成本约为 0.6 元/(m·d), 钢板桩施工工期约 21 个月, 则钢板桩施工成本约为 327.1 万元。	采用模袋混凝土进行坡面防护, 总计防护面积为 2 300 m^2 , 模袋砼施工单价约为 110 元/ m^2 , 则施工成本约为 25.3 万元。
	小 计	256.8 万元		
工 期	土方施工	-10 d	原方案土方量约 $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3$, 按填筑平均速率 1 500 m^3/d 计, 实际成本工期约为 84 d。	围堰结构优化后方案需土方约 $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$, 按填筑平均速率 1 500 m^3/d 计, 实际成本工期约为 94 d。
	防护工程	22 d	钢板桩施工速率按 60 根/d 计, 则打拔钢板桩约需时间为 22 d。鉴于下游围堰需首先施工钢板桩, 其后才填筑围堰, 故钢板桩施工工期直接影响整体工期。	模袋混凝土实际施工工期为 6 d, 但由于其施工可在围堰填筑期间同时实施, 故模袋混凝土施工不影响整体工期。
	小 计	12 d		

4 结 语

围堰是船闸安全施工前提, 本文针对强渗透性地基的特点, 通过对“充填砂袋+防渗帷幕”方案、“黏土填筑+防渗帷幕+反压平台”方案及“黏土填筑+防渗帷幕+钢板桩”方案进行比选, 采用优化的“黏土填筑+防渗帷幕+反压平台”方案, 船闸施工和围堰观测表明:

(1) 上、下游围堰沉降量远小于计算值, 优化方案达到设计预期目标。经受了长江 2012 年汛期考验, 日常巡查和专业监测, 围堰结构稳定, 未出现明显结构破坏等现象。

(2) 优化方案不仅减少了围堰施工量、节约工期, 而且取得了显著的经济效益, 可为类似地质条件下的围堰方案优化提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 张利荣, 胡继峰, 刘剑. 河道中在建工程抗洪抢险的关键技术措施[J]. 水利水电技术, 2013(3): 17-21. (ZHANG Li-rong, HU Ji-feng, LIU Jian. Key technical measures adopted for flood-fighting and emergency rescue of an under-construction project in river channel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013(3): 17-21. (in Chinese))
- [2] 吴伟智. 通过抽水试验计算水文地质参数[J]. 西部资源, 2013(3): 94-95. (WU Wei-zhi. Calculation of hydrogeological parameters through pumping tests[J]. Western Resources, 2013(3): 94-95. (in Chinese))
- [3] 刘利, 余家华, 崔婷婷, 等. 淤质细砂围堰渗透稳定的研究与应用[J]. 广东水利水电, 2013(3): 26-28. (LIU Li, YU Jia-hua, CUI Ting-ting, et al. Research and application on seepage stability of the cofferdam of sedimentary fine sand[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2013(3): 26-28. (in Chinese))
- [4] 钱令希. 工程结构优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (QIAN Ling-xi. Optimization design of engineering structure [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

- [5] 李守德, 仲曼. 浅海吹填区围堰构造优化研究[J]. 公路工程, 2013(2): 180-183. (LI Shou-de, ZHONG Man. Study on cofferdam structure optimization in the fill zone of shallow water[J]. Highway Engineering, 2013(2): 180-183. (in Chinese))
- [6] 张敏, 李士彦. 泗阳三线船闸基坑防渗帷幕的方案比选与实施[J]. 交通科技, 2012(6): 45-47. (ZHANG Min, LI Shi-yan. Scheme comparison and implementation of pit impervious curtain in Siyang third-lane shiplock[J]. Transportation Science & Technology, 2012(6): 45-47. (in Chinese))
- [7] 王付德, 任季恩. 反压平台在围堰及引堤软基处理中的应用[J]. 湖北水力发电, 2007(1): 17-20. (WANG Fu-de, REN Ji-en. Application of counter-weight platform for soft foundation treatment of seaside cofferdam & leading jetty[J]. Hubei Water Power, 2007(1): 17-20. (in Chinese))
- [8] 林培源. 钢板桩在建筑工程深基坑支护中的应用研究[J]. 建材与装饰, 2013(20): 131-132. (LIN Pei-yuan. Application study of steel sheet pile in deep foundation pit supporting of construction work[J]. Construction Materials & Decoration, 2013(20): 131-132. (in Chinese))
- [9] 李静, 孙磊. 基于组合预测模型的城市道路深厚软基最终沉降分析[J]. 青岛理工大学学报, 2013(4): 44-46. (LI Jing, SUN Lei. Final settlement analysis of urban roads on deep soft base by combination prediction model[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2013(4): 44-46. (in Chinese))
- [10] 雷国辉, 郑强. 瑞典条分法剖析引发的有效应力和渗流力概念问题[J]. 岩土工程学报, 2012(4): 667-676. (LEI Guo-hui, ZHENG Qiang. Issues on concepts of effective stress and seepage force arising from anatomizing Swedish slice method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012(4): 667-676. (in Chinese))

Cofferdam design optimization for modification work of Qinhuai River shiplock

DING Yue¹, ZHANG You-li^{2,3}, TANG Yun-qing^{2,3}, WANG Yu-bo³

(1. Jiangsu Province Huai-Shu New Canal Administrative Office, Huaian 223005, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Kexing Engineering Construction Supervision Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: Owing to the strong permeability of the cofferdam foundation in the expansion and modification project of the Qinhuai River shiplock, the cofferdam foundation must have a good anti-seepage capacity to ensure that the main body of the shiplock is under construction on a dry site. There were some problems in the original design proposals for the cofferdam structure, and hence it is necessary to further optimize the design schemes. After making the comparison and optimization of three kinds of the cofferdam structure design schemes: “filling sand bags + impervious curtain, clay filling + impervious curtain + backpressure platforms and clay filling + impervious curtain + steel sheet pile”, a final design scheme “clay filling + impervious curtain + backpressure platforms” has been adopted, thus ensuring the safety of the cofferdam structure and flood control progress, and having significant economic benefits. All of those may provide a useful reference for the design of the cofferdam structure with similar geological conditions.

Key words: Qinhuai River; shiplock; strong permeability; scheme of cofferdam; design optimization