

DOI: 10.11779/CJGE2016S1037

长江口软土地基水库围堤的防渗体结构探讨

陆健辉, 阮龙飞, 王永庆

(长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司, 上海 200439)

摘要: 充泥管袋充填粉细砂技术, 在长江口软土地基上修筑围堤, 取得了较好的效果。但围堤堤身均由透水性较强的粉砂料填筑而成, 且围堤堤基浅部地层通常分布有粉土、粉砂土, 属中等透水且易产生渗透变形。在库内外水头差的作用下, 堤身、堤基土均可能产生渗漏及渗透变形问题, 因此, 水库围堤必须要采取渗流控制处理措施。结合本工程渗流控制措施的特点和难点, 进行了多方案比选, 并根据现场原型试验确定防渗体结构的最终结构形式和施工参数。还对推荐方案进行了详细的渗流控制分析计算, 为类似工程提供参考。

关键词: 软土地基; 水库围堤; 充泥管袋; 渗流控制; 防渗体结构

中图分类号: TV223.42

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S1-0195-08

作者简介: 陆健辉(1982-), 男, 工程师, 从事水利工程设计工作。E-mail: ljh517932@163.com。

Impervious structure of reservoir embankment in soft soil foundation of Yangtze Estuary

LU Jian-hui, RUAN Long-fei, WANG Yong-qing

(Shanghai Branch of Changjiang Survey Planning Design and Research Limited Co., Shanghai 200439, China)

Abstract: The technology of mud-filled bag filled with sand plays a good role in the construction of the dike in the Yangtze Estuary. However, the dike embankments are mainly built by powder materials with high permeability, and the shallow strata of dike foundation normally consist of silt and silty sand, which are moderately permeable and prone to seepage deformation. Under the action of water head difference, levee and foundation soil may produce leakage and seepage deformation. Therefore, seepage control measures should be taken for the reservoir embankments. According to the characteristics and difficulties of the seepage control measures in this project, many schemes are compared, and the final form and construction parameters of the impervious structure are determined based on the field prototype tests. A detailed calculation of the flow control of the recommended scheme is given, and it may can provide reference for similar projects.

Key words: soft soil foundation; reservoir embankment; mud-filled bag; seepage control; impervious structure

1 概述

太仓市应急水源地工程位于长江口南支浏河口上游侧长江边滩上, 滩面高程 0.5~4.0 m (国家 85 高程, 下同), 占用岸线 2362 m。水源地总面积 220 万 m^2 , 由北堤、东堤、南堤及西堤圈围而成, 其中北堤、东堤、南堤是水源地新建围堤, 总长 4486 m, 西堤利用原太仓长江大堤按水源地工程及区域规划要求进行加宽加固形成, 长 2634 m。水库最高蓄水位为 5.5 m, 总容积为 1742 万 m^3 , 有效容积 1427 万 m^3 。

围堤的结构型式经多方案比较采用充泥管袋斜坡式结构, 充泥管袋斜坡式围堤以充泥管袋为内、外侧棱体, 棱体间吹填粉土或粉砂土筑堤芯至堤顶, 堤顶高程为 6.37 m, 堤顶宽 6 m, 采用沥青砼路面。堤顶水源地侧设高 1.2 m 的钢筋砼防浪墙, 墙顶高程 7.57 m。

堤外坡护面采用钢筋砼栅栏板, 厚度取为 0.35 m, 栅栏板下设灌砌块石。在吹填土与块石间, 依次为土工反滤布和袋装碎石滤层。在围堤外侧 4.0 m 高程处设置外棱体消浪平台, 平台宽 5 m。外棱体外边坡为 1:3, 内边坡为 1:1。

内侧棱体平台高程为 3.00 m, 棱体宽度为 4.00 m。内棱体平台以上吹填土边坡为 1:2.5, 平台以下边坡为 1:3, 内边坡为 1:1。围堤内坡护面采用灌砌块石, 其下铺设碎石垫层和土工反滤布。

由于堤基下的软土层较厚, 为增强大堤的整体抗滑稳定性, 滩面高程在 0.0 m 以下区域, 采用通长充泥管袋平铺, 伸出内、外侧棱体以外, 其上抛石, 形成内、外侧镇压平台, 内、外侧平台顶高程分别为 0.0

m 和 1.0 m, 宽度均为 15 m^[1]。

围堤典型断面结构见图 1。

2 问题提出及难点分析

2.1 工程地质分析

根据地质勘探资料, 水库围堤局部堤基浅部地层为粉土、粉砂土, 属中等透水且易产生渗透变形。并且所有新建围堤堤身也是由透水性较强的粉砂料采用水力冲填筑筑而成, 因此在库内外水头差的作用下, 堤身、堤基土均可能产生渗漏及渗透变形问题。

2.2 工程特点与难点

经过仔细研究, 本工程的渗流控制措施特点及难点如下:

(1) 水源地围堤堤身承受双向水流作用

水源地内水位不断变化, 同时, 外江潮位每日两涨两落, 因此, 水源地大堤在蓄水过程中, 既会发生水源地内向外江的渗流, 也会发生外江向水源地内的渗流, 防渗方案应能防止双向渗透破坏。

(2) 新建围堤工后沉降大

在水源地区域内, 广泛分布有深约 20~30 m 的软弱土层, 围堤施工期及工后沉降量较大。要保证围堤工后运行期内大堤防渗墙的防渗效果, 防渗墙需要适应堤基变形, 即在大堤发生较大沉降量的情况也能保持墙身的整体性, 因此, 宜优先选用柔性防渗墙体。

(3) 防渗墙需要穿越充泥管袋或混凝土连锁块软体排

水源地围堤采用吹填袋装砂筑堤, 堤基滩面上铺设有 2~6 层充泥管袋, 龙口段堤基还铺设有混凝土连锁块软体排, 其对防渗墙的完整性及施工的可行性需要考虑。

(4) 堤身结构及施工工艺特殊, 易产生渗漏通道, 质量控制难

水源地围堤采用的是充泥管袋斜坡堤结构, 堤身两侧为吹填管袋棱体, 堤芯为吹填砂, 堤身底部滩面上铺设有 2~6 层通长充泥管袋。吹填袋之间及管袋接

头处易形成渗漏通道。并且筑堤主要采用水下充填管袋工艺, 袋体之间水下搭接、厚度控制等施工质量不确定因素较多, 施工质量控制难度较大。

(5) 水源地大堤坡面反滤结构特殊

与一般土石坝的干地施工条件不同, 本工程地处河口地区, 施工受到潮水影响, 所有的施工均需临水施工, 因此传统的级配反滤层无法施工, 因此水源地围堤坡面上均设置了由无纺布和袋装碎石组成的反滤层。由于反滤层均为临水施工或水下施工, 反滤结构、水下铺设搭接、袋装碎石施工质量控制较难。而且在实际过程中, 因施工机械和人员的穿行以及整理边坡过程中的削切, 反滤层的施工质量难以得到保障。

3 渗流控制方案比选

3.1 渗流控制常用措施

堤防的防渗处理一般遵循上堵下排的原则, 基本措施是“铺、截、排”。铺指的是上游水平铺盖和下游盖重, 截是指对堤基垂直截渗, 排是指坝基下游的排渗。

目前常用的堤防防渗处理方法很多: 针对堤身防渗加固可采用上游坡面防渗, 堤身垂直防渗幕墙等方法; 针对堤基可采用铺盖(或土工膜)防渗、吹填盖重、排水减压沟(井)、垂直防渗幕墙等方法。

堤防上游坡面防渗可采用土工膜进行防渗, 施工简单, 防渗体能够适应大堤的变形, 防渗效果好, 工程造价低。

堤前铺盖(或土工膜)防渗通过在堤防上游河床上与堤底部铺设衔接的防渗层, 可延长渗径、降低水力比降, 保护堤防的出逸安全。

吹填盖重是指在堤后一定范围内通过吹填砂土等进行堆积压重, 保护堤基土体不被渗透破坏。

排水减压沟(井)采用导渗、排渗原理使渗透水流迅速顺利排出, 减小渗流出口比降, 降低堤身浸润线, 保证堤防渗流和稳定安全。

垂直截渗法可以同时处理堤身、堤基渗漏问题, 可以做到堤身、堤基防渗结构的“无缝”连接, 避免

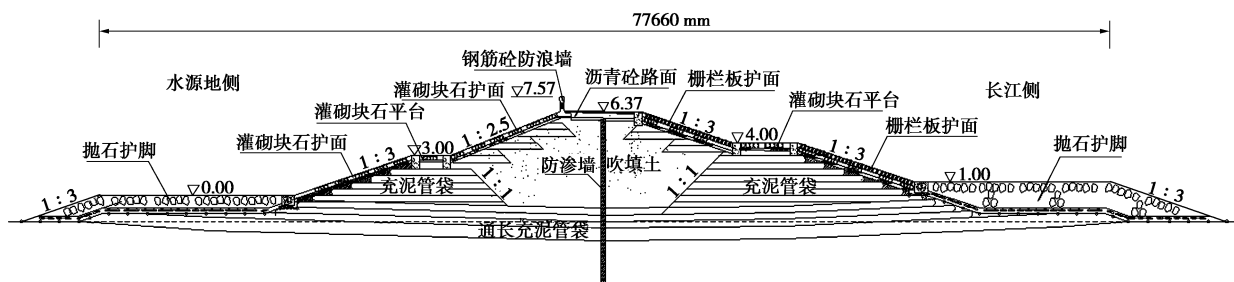


图 1 围堤典型断面结构图

Fig. 1 Typical section of embankment structure

由于堤身、堤基防渗结构连接部位处理不当造成的渗透破坏, 对需进行堤身、堤基防渗的大堤而言常常是一种比较合理的选择。近年来在长江重要堤防防渗工程中垂直防渗以其占地少, 防渗效果显著等优点得到了大量的使用。本工程新建围堤为吹填粉细砂堤芯, 堤基直接出露粉细砂透水层, 堤身承受双向渗流作用, 一侧为库区, 设计最高蓄水位 5.5 m, 死水位-1.2 m; 另一侧为长江, 汛期 100 年一遇设计高潮位 4.57 m, 平均低潮位-0.55 m。堤基滩面高程 0.5 m~4.0 m, 大部位于平均潮位以下, 堤前铺盖(土工膜)的防渗方法不太适用, 反滤结构质量也不易保证, 参考长江堤防工程的经验, 推荐采用以堤身、堤基防渗相统一的垂直防渗为主的防渗方案, 以“堵”为主, 以排为辅。

垂直防渗加固的方法很多, 按其成墙方式可分为 4 大类:

(1) 搅拌成墙施工法^[2], 实际上就是利用深层搅拌机械在堤身、堤基一定深度范围内钻进搅拌, 将土体与输入的水泥(或石灰)等固化剂充分拌和, 使固化剂与土体产生一系列的物理-化学变化而凝结成墙体达到防渗目的。搅拌成墙机械又有单(双)头和多头搅拌桩, 三轴搅拌桩, 横向连续切削式地下连续墙工法(TRD), 双轮铣深搅工艺(CSM)等。

(2) 置换成墙施工法, 是将堤身、堤基一定深度内的需置换土体挖除成槽, 再填筑或铺设塑性混凝土、防渗膜等防渗墙材料并连成整体的防渗墙, 根据成槽工艺又分为垂直铺塑法、锯(拉)槽法、射水法和抓斗法等。置换成墙防渗工程均需进行泥浆护壁。

(3) 高压喷浆成墙施工法^[3], 是以高压喷射流直接冲击破坏土体, 浆液与土混合凝结为固体形成防渗墙。高压喷浆按其喷射方式分为旋喷、摆喷和定喷三种; 按其喷管数目可分为单管、双重管、三重管 and 多重管 4 种。

(4) 挤压注浆成墙施工法, 就是将造墙设备中的板桩挤压到土体中, 起拔时形成空间注入浆体连续施工成防渗墙。包括板桩灌注墙、振动沉模板、振动切槽法等。

3.2 渗流控制方案比选

据本工程围堤堤身及堤基的特点, 垂直防渗施工工艺尚应符合下列要求:

(1) 防渗体施工工艺对堤芯吹填砂及堤基粉细砂层应有较好的适应性;

(2) 防渗体应能完整穿越充泥管袋或混凝土连锁块软体排;

(3) 防渗体应具有较强的变形适应能力和具有较好的可修补性。

目前国内运用较多, 经验成熟, 造价适中的防渗墙施工方法主要有三轴搅拌法、高压喷射法和抓斗成槽法等。根据本工程新建围堤堤身结构和堤基地质条件, 结合工程特点及渗流控制要求, 综合考虑各种垂直防渗方法的特点及在类似工程中的使用经验, 对太仓应急水源地新建围堤垂直防渗拟定三种垂直防渗成墙方法进行比较, 方案一为三轴搅拌桩垂直防渗墙方案, 方案二为高压喷射灌浆垂直防渗墙方案, 方案三为抓斗成槽塑性混凝土垂直防渗墙方案。

根据有关规范和相关资料, 搅拌法防渗墙墙体渗透系数约为 $(5\sim 10) \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 高喷法及塑性混凝土防渗墙墙体渗透系数约为 $(1\sim 5) \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。根据渗流分析成果, 搅拌法防渗墙有效厚度约为 0.4~0.6 m, 高喷及塑性混凝土防渗墙有效厚度约为 0.2~0.4 m。

三轴搅拌桩, 目前常用的 SMW 水泥土搅拌桩结构形式主要有 $\phi 650 \text{ mm}@450 \text{ mm}$ 、 $\phi 850 \text{ mm}@600 \text{ mm}$ 和 $\phi 1000 \text{ mm}@750 \text{ mm}$ 三种, 由于本工程围堤承受的水头差不大, 需要的墙厚较薄, 因此选用 $\phi 650 \text{ mm}@450 \text{ mm}$ 的三轴搅拌桩。

高压喷射灌浆可采用旋喷、摆喷、定喷三种形式, 定喷和小角度摆喷形成的防渗墙整体性、连续性相对较差。旋喷法穿透能力强, 形成的防渗墙墙厚比较均匀, 整体性、连续性好, 抗渗性能强, 但造价较高, 适用于承受水头差较大的围堤防渗。对于承受水头较小, 历时较短的本工程围堤的防渗墙, 拟采用大角度摆喷形式, 考虑到摆喷墙厚度不均, 特别是摆喷孔口附近, 墙厚较小, 且容易产生裂缝, 难以满足防渗要求。因此, 拟在摆喷孔口上补上一道旋喷, 以解决此问题。即本工程围堤的高喷防渗墙采用摆喷+旋喷的结构形式。

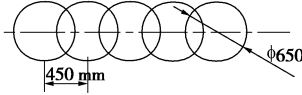
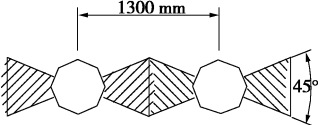
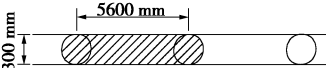
抓斗成槽塑性混凝土垂直防渗墙, 根据本工程围堤渗流分析成果及地质条件, 最小墙厚 0.3 m。

上述三个方案比选分析的详细情况列于表 1。

综合分析可见, 三种方案均有优缺点, 只要精心组织、严格施工, 采取相应措施, 确保每道工序的施工质量, 三种防渗墙均能满足本工程围堤的抗渗要求。相对而言, 方案三造价较高, 不宜采用; 方案一及方案二造价较为接近, 但方案一采用的三轴水泥土搅拌机在穿越充泥管袋或软体排时, 钻具易被土工布缠绕, 施工比较困难, 成墙质量也较难保证, 而高压喷射注浆穿过充泥管袋及软体排有成熟的工程经验, 适应性广且墙体质量控制较好, 因此, 新建围堤的防渗方案推荐采用方案二, 即采用高压摆喷结合旋喷形成防渗墙。

表 1 垂直防渗墙方案比选表

Table 1 Comparison of scheme for vertical cutoff wall

防渗方案	方案一	方案二	方案三
施工方法	SMW 水泥土搅拌法	高压摆喷+旋喷	液压抓斗成槽法
结构布置			
适用范围	各类软硬土层, 包括砂砾层、粒径<10 cm 的卵石层	淤泥质土、砂土, 粒径<10 cm 的卵石层, 不适宜地下水流速大的部位	适应地层范围较广, 各类土层、砂、卵石层
处理深度	≤32 m	30~40 m	≤50 m
成墙厚度	0.65 m	0.30 m	0.30 m
优点	(1) 施工无噪音、无污染, 材料浪费少; (2) 墙体整体性较好, 变形适应能力强	(1) 施工设备占地少, 对施工场地的要求不高; (2) 墙体抗渗性能及变形适应能力强	(1) 墙体厚度均匀、质量可靠, 整体性最好; (2) 墙体抗渗性能及变形适应能力强
缺点	(1) 施工机械重心高、稳定性差, 所需的施工平台也较宽 (一般需 7~9 m), 施工难度较大; (2) 穿过软体排时, 钻具易被土工布缠绕, 需进行处理; (3) 对围堤加筋材料影响大, 影响围堤稳定	(1) 施工时, 溢出浆液较多, 对场地环境有不利影响; (2) 墙体厚度不均匀, 成墙也不直观, 整体检测性难度较大; (3) 对围堤加筋材料影响小	(1) 施工设备体积较大, 需较宽的施工平台 (约为 5~7 m); (2) 施工时需要泥浆护壁, 遇砂层及淤泥层时易塌孔, 护壁技术要求高, 工效较低; (3) 穿过土工布及软体排时, 墙体质量及防渗效果不明; (4) 对围堤加筋材料影响大, 影响围堤稳定
综合单价	402.5 元/m ²	427.2 元/m ²	564.3 元/m ²

3.3 防渗体结构设计

经过对各种防渗方案的详细比较, 本工程新建围堤采用高压摆喷结合旋喷形成防渗墙来进行截渗。

由于新建围堤承受双向水流, 因此将防渗墙轴线布置在大堤堤顶中心线附近, 因水源地侧水位较高, 略偏向水源地侧, 考虑到防渗墙的施工可能对防浪墙有影响, 所以将防渗墙布置在距离防浪墙底板边缘约 1.5 m 处。由于水源地最高蓄水位为 5.5 m, 根据《碾压式土石坝设计规范》(SL274—2001)^[4]第 5.5.3 条防渗体顶部超高的规定, 本工程防渗墙应从堤顶开始设置。其底部应伸入相对不透水层 1.5 m, 形成垂直封闭防渗体系。

根据现场原型试验 (如图 2 所示), 确定高压摆喷及旋喷的最终结构形式和施工参数如图 3 及表 2^[5]所示。防渗墙质量技术指标如表 3 所示。



图 2 现场原型试验照片

Fig. 2 Photos of field prototype tests

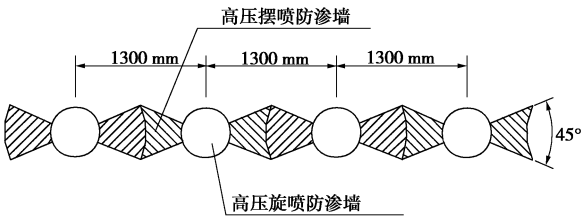


图 3 围堤典型断面结构图

Fig. 3 Typical section of embankment structure

表 2 防渗墙施工参数表

Table 2 Construction parameters of diaphragm wall

高喷形式	浆压 /MPa	气压 /MPa	浆液密度 /(g·cm ⁻³)	提升速度 /(cm·min ⁻¹)	摆速 (转速) /(次·min ⁻¹)	摆角 /(°)
摆喷	32	0.7	1.5	13 (0 m 高程以下) 15 (0 m 高程以上)	8	45
旋喷	20~22	0.7	1.5	20 (3 m 高程以下) 25 (3~5.7 m 高程)	16	

4 渗流控制方案分析计算

渗流计算的主要内容: ①确定在设计高潮位持

续时间内浸润线的位置, 并计算下游出逸点的位置、

表 3 防渗墙质量技术指标

Table 3 Quality and technical indices of cutoff wall		
项目	单位	特征值
防渗墙底高程	m	-8.0
墙体渗透系数	cm/s	$\leq 5 \times 10^{-6}$
抗压强度 R_{28}	MPa	≥ 2
允许渗透梯度		≥ 60
最小墙厚	m	0.20
平均墙厚	m	0.30
槽孔倾斜度		$\leq 0.5\%$

出逸段与堤基表面的出逸坡降, 并绘制堤身及堤基内的等势线图; ②确定围堤及堤身的渗透量。

渗透稳定分析的主要内容为: ①分析判定土的渗透变形类型; ②判明堤身及堤基土体的渗透稳定; ③分析判定渗流出逸段的渗透稳定。

4.1 分析方法

《堤防工程设计规范》^[6]中给出了渗流计算的水力学解法, 同时附录 E1.1 规定: “本附录中只列出最常用的均质土堤的渗流计算, 其他类型堤防的渗流计算可参照有关规定执行。”另外, 根据《碾压式土石坝设计规范》(SL274—2001) 规定, “1 级、2 级坝和高坝应采用数值法计算确定渗流场的各种渗流因素”。太仓水源地围堤为 2 级水工建筑物, 水位组合多, 地质条件较为复杂, 堤身结构形态也不规则, 堤防规范中列出的均质土堤的渗流水力学解法难以满足要求, 所以, 本工程采用北京理正软件设计研究院有限公司按有限元法编制的“理正渗流分析软件”来进行计算。

4.2 计算条件

(1) 水位组合

计算的水位组合工况列于表 4。

表 4 渗流计算水位组合表

Table 4 Combination of water levels				
渗流方向	计算工况	外江潮位	库内水位	
外江侧→	1 长期	平均高潮位 1.71 m	水源地死水位-1.2 m	
库内侧	2 短暂	300 年一遇高潮位 4.88 m	非咸潮期常水位下限 0 m	
库内侧→	3 长期	平均低潮位-0.55 m	水库最高运行水位 5.5 m	
外江侧	4 短暂	最低潮位-1.52 m	水库最高运行水位 5.5 m	

(2) 土层渗透系数

围堤及堤基土层渗透系数列于表 5。

表 5 围堤及堤基土层渗透系数表

Table 5 Permeability coefficients of embankment and foundation soil			
土层	土的名称	$K_H/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_V/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
	堤身	2.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}
① ₋₁	粉质黏土	6.47×10^{-7}	8.44×10^{-7}
② ₋₃	粉土、粉砂	1.02×10^{-4}	2.19×10^{-4}
③ ₋₁	淤泥质粉质黏土	6.10×10^{-7}	1.29×10^{-6}
④	灰色淤泥质黏土	1.22×10^{-8}	2.33×10^{-7}
⑤ ₋₁₋₁	黏土	4.15×10^{-7}	4.95×10^{-7}
⑤ ₋₁₋₂	灰色粉质黏土	1.20×10^{-6}	1.94×10^{-6}
⑤ ₋₂	灰色粉土	1.21×10^{-4}	1.92×10^{-4}
⑦ ₋₁	灰色粉砂	1.02×10^{-4}	2.19×10^{-4}

注: 围堤堤身由吹填砂及聚丙烯编织布充砂管袋吹填砂组成, 其渗透系数通过工程类比或室内模型试验确定。

4.3 渗流控制标准

(1) 堤基渗流控制标准

本工程围堤浅层堤基土主要为①₋₁ 吹填土、①₋₂ 黄灰色淤泥、③₋₁ 灰色淤泥质粉质黏土、②₋₃ 灰色粉土、粉砂等, 其中①₋₁、①₋₂、③₋₁ 等均属于透水性较弱的黏性土, 不易产生渗透破坏, 只有②₋₃ 层为中等透水的粉土、粉砂层, 抗渗性较差, 易产生渗透破坏。按照地质勘探资料, 其细粒含量较高, 渗透变形类型应为流土型。其临界水力坡降采用 $J_{cr} = (G_s - 1)(1 - n)$ 计算, 根据地质勘探报告提供的参数, ②₋₃ 层粉土及粉砂层的临界水力坡降为 0.6~0.7。

又根据《堤防工程设计规范》(GB50286—2013) 及《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008)^[7] 规定, 无黏性土的允许比降等于土的临界水力坡降除以安全系数(一般取 1.5~2.0)。考虑到本工程围堤属于重要水工建筑物, 一旦失事, 危害较大, 本工程的安全系数取 2.0。因此本工程堤基的②₋₃ 层粉土、粉砂的允许比降应为 0.3~0.35。为安全起见, 本工程的允许比降取为 0.3, 与附近已建堤防堤基的渗流控制标准基本相同。

(2) 堤坡渗流控制标准

本工程围堤堤坡主要是由充泥管袋装砂组成, 堤坡还设置有厚型针刺无纺布作为反滤层。相关规范对堤坡渗出点的临界渗流比降计算未有具体规定, 参考毛昶熙编著的《渗流计算分析与控制》^[8], 坡面渗出点的临界渗透比降可按下式计算:

$$J_c = \frac{\gamma'_1}{\gamma}(\tan \varphi - \tan \beta) \cos \beta + \frac{c}{\gamma}, \quad (1)$$

式中 γ 为水的重度; γ'_1 为土的浮重度; c 为出口段土体的黏聚力; φ 为土的内摩擦角; β 为坝坡坡角。

按式(1)计算,可得坡面出逸比降允许值为 0.16。考虑到坡面设置反滤层保护,坡面允许比降可适当提高,取为 0.20,该标准与附近已建堤防堤坡的渗流控制标准也基本相同。

(3) 接触渗流控制标准

土工管袋间及管袋与基砂间的接触冲刷国内现尚无统一、明确的标准。根据《水闸设计规范》(SL265—2001)^[9]规定,粉细砂层的水平允许比降为 0.5~1.0,若渗流出口处设有滤层,允许比降可提高 30%即为 0.65~1.3。

按照类似工程的水工模型试验成果,在基砂与管袋之间易形成冲刷破坏,接触渗流临界比降 0.13 左右,采用 1.5 的安全系数,允许比降为 0.08 左右。又考虑

到模型玻璃钢槽光滑表面会造成试验成果偏低,同时考虑到土工反滤层的部分作用,接触冲刷允许比降可采用 0.13。

综合上述两方面成果,本工程的接触冲刷允许比降值最终确定为 0.10。

4.4 计算成果及分析

(1) 堤身未采取渗控处理措施前

按上述计算参数和方法计算,在各种工况下,堤身和堤基的最大出逸比降、渗漏量等计算结果见表 6,长期工况下的渗流流网如图 4~5 所示。

由于水源地内最高蓄水位比外江侧 300 年一遇高潮位高,且水源地内水位变化缓慢,而外江侧潮位变化较快,所以水源地内向外江侧渗流状况比外江侧向

表 6 围堤渗流计算成果表

Table 6 Calculated results of seepage of dike embankments

渗流方向	计算工况		最大出逸比降				水平比降		单宽渗流量 /(m ³ ·d ⁻¹ ·m ⁻¹)
			堤坡出逸面		堤基出逸面				
			计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值	
外江侧→	1	长期	0.15	0.20	0.11	0.30	0.08	0.10	0.25
库内侧	2	短暂	0.18	0.20	0.08	0.30	0.11	0.10	—
库内侧→	3	长期	0.45	0.20	0.23	0.30	0.13	0.10	0.77
外江侧	4	短暂	0.62	0.20	0.27	0.30	0.15	0.10	—

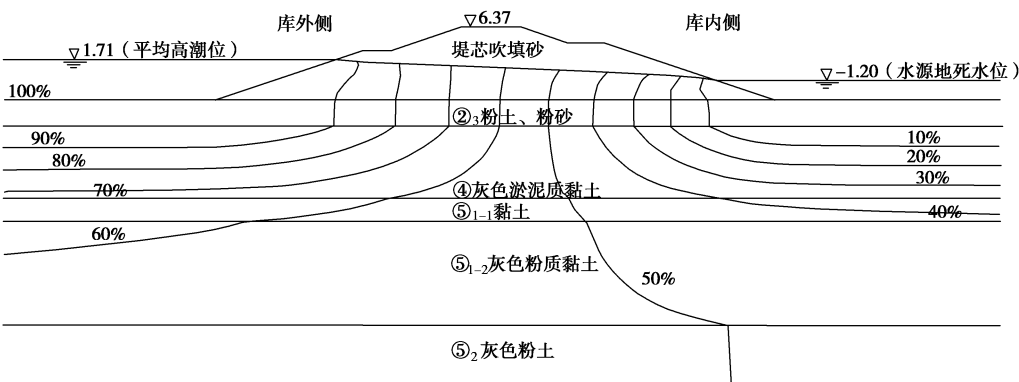


图 4 围堤工况 1 流网图 (长期工况)

Fig. 4 Flow net of dike embankment No. 1 (long-term working conditions)

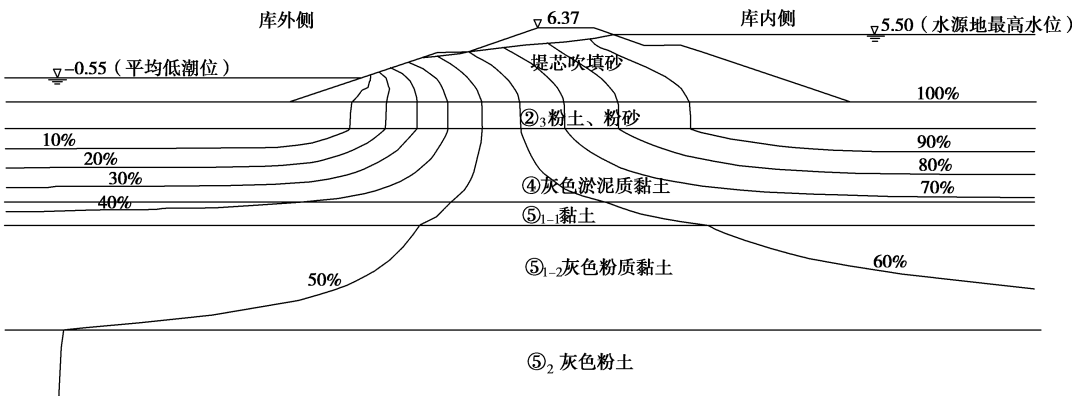


图 5 围堤工况 3 流网图 (长期工况)

Fig. 5 Flow of dike embankment No. 3 (long-term working conditions)

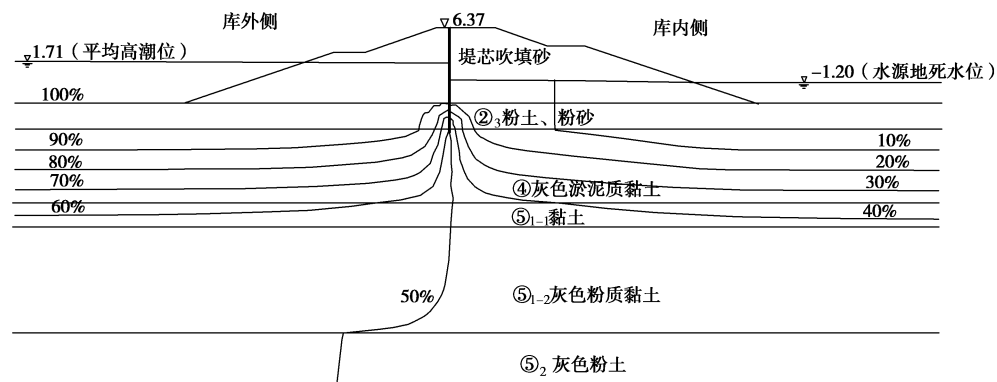


图 6 围堤工况 1 流网图 (长期工况)

Fig. 6 Flow net of dike embankment No. 1(long-term working conditions)

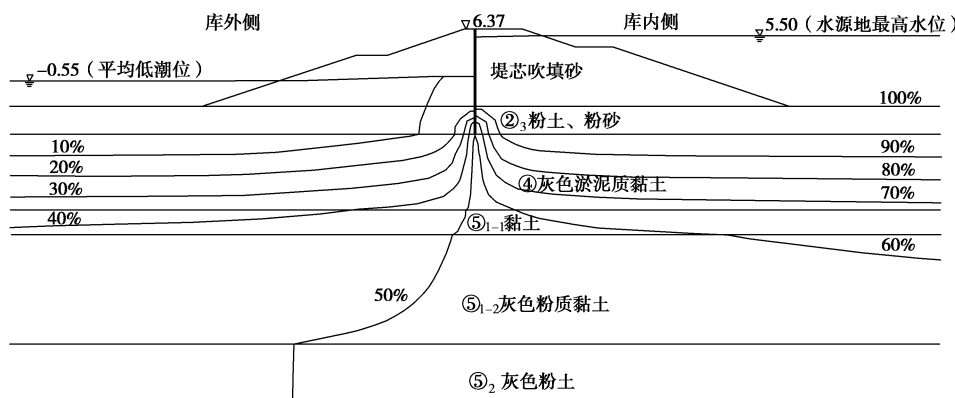


图 7 围堤工况 3 流网图 (长期工况)

Fig. 7 Flow net of dike embankment No. 3(long-term working conditions)

水源地内危险; 长期工况按稳定渗流计算, 短期工况按非稳定渗流计算, 由于短期工况下的水位差比长期工况的要大, 因此短暂工况下渗流状况比长期工况下更危险。

由渗漏量的计算结果看, 控制工况下水源地内向外江渗漏量大于外江向水源地内的渗漏量。经计算, 咸潮期典型库容运行历时曲线下水源地向外江的总渗漏量约为 6.52 万 m³, 为水库有效库容的 0.46%, 外江咸水通过渗透进入水源地的渗漏量约为 0.95 万 m³, 占水库有效库容的 0.07%。

围堤在各种工况下, 堤基的出逸比降均小于允许比降, 因此堤基的渗透稳定是满足要求的。但在水源地侧水位高于长江侧水位两种控制工况下, 堤坡的出逸比降均远远大于允许值, 极可能出现渗透破坏。另外, 堤身与堤基接触面水平比降在大多数工况下也均超出接触冲刷的允许比降值, 所以须对新建围堤堤身采取渗控处理措施。

(2) 堤身采取渗控处理措施后

采取垂直防渗措施后, 重新对围堤进行渗流计算, 各工况下的渗流计算成果见表 7, 长期工况下的流网

见图 6~7 所示。

表 7 设置垂直防渗墙后, 围堤渗流计算成果表

Table 7 Calculated results of seepage of dike embankment after construction of vertical cutoff wall

渗流方向	计算 工况	最大出逸比降				单宽渗流量 /(m ³ ·d ⁻¹ ·m ⁻¹)
		堤坡出逸面		堤基出逸面		
		计算值	允许值	计算值	允许值	
外江侧	1 长期	0.06	0.20	0.10	0.30	0.15
→ 库内侧	2 短暂	0.12	0.20	0.24	0.30	—
库内侧	3 长期	0.16	0.20	0.22	0.30	0.28
→ 外江侧	4 短暂	0.18	0.20	0.26	0.30	—

计算表明, 围堤堤身设置垂直防渗墙后, 太仓应急水源地新建围堤堤身和堤基渗透比降及渗漏量大幅减小, 渗透稳定已能满足设计要求。根据水源地在咸潮期典型运行水位历时曲线及渗流计算结果, 在没有渗流控制措施时, 水源地渗漏量为 6.52 万 m³, 为有效容积的 0.46%, 而采取渗流控制措施后, 水源地的渗漏量为 1.67 万 m³, 占有有效容积的 0.11%。这意味着

采取渗流控制措施既有效保证了大堤渗透稳定的要求,又大大减小了水源地的渗漏量,提高运行效益。

5 结 语

为解决长江口软土地基上水库围堤渗漏及渗透变形问题,本文根据堤身结构和堤基地质条件,结合工程特点及渗流控制要求,对三轴搅拌桩、高压喷射灌浆及抓斗成槽塑性混凝土三种垂直防渗墙方案进行了经济技术比较,最终推荐采用高压摆喷结合旋喷形成防渗墙的方案,并根据现场原型试验确定防渗体结构的最终结构形式和施工参数,为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 陆健辉, 阮龙飞. 土工织物加筋法在堤坝地基处理中的应用[J]. 人民长江, 2012, 43(增刊 I): 34 - 37. (LU Jian-hui, RUAN long-fei. Application of geotextile reinforcement technique in dam ground treatment[J]. Yangtze River, 2012, 43(S1): 34 - 37. (in Chinese))
- [2] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 王明森, 王洪恩, 查振衡, 等. 高压喷射灌浆防渗加固技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (WANG Ming-sen, WANG Hong-en, ZHA Zhen-heng, et al. High pressure jet grouting reinforcement technology[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))
- [4] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (SL274—2001 Design code for rolled earth-rock fill dams[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))
- [5] DL/T 5200—2004 水利水电工程高压喷射灌浆技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005. (DL/T 5200—2004 Technical specification of jet grouting for hydropower and water resources projects[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005. (in Chinese))
- [6] GB50286—2013 堤防工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (GB50286—2013 Code for design of levee project[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [7] GB50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (GB50487—2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))
- [8] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Seepage calculation analysis and control[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese))
- [9] SL265—2001 水闸设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (SL265—2001 Design code for sluice[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2001. (in Chinese))

(本文责编 明经平)