

长江口复杂软土地基上堤坝的设计

——太仓市第二水厂蓄淡避咸水库围堤设计

束一鸣¹, 张乃国², 史海珊², 邹明德³, 杨威¹, 周琼¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学设计院, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学国际工商学院, 江苏 南京 210098)

摘要:位于长江口的太仓市第二水厂蓄淡避咸水库围堤建造在埋有运行取水钢管的软土地基上, 地基承载能力只有 60 kPa, 而围堤高约 10 m, 取水钢管难以承受 1.1 m 的沉降量。经分析, 采用塑料排水带与加筋软体排加固软土地基, 用围压灌浆防止钢管沉降; 并利用桩长逐渐减小的高压旋喷桩复合地基减小由于围压灌浆引起的坝侧高沉降梯度, 防止坝体裂缝破坏。同时, 水库大坝建设综合采用多种土工合成材料的新技术。

关键词:软土地基加固; 围压阻降; 沉降梯度分摊; 土工合成材料

中图分类号: TV871

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2003)06-0033-04

1 工程概况

太仓市第二水厂从长江汲取原水, 水厂地处长江口南岸的浪港口。由于枯水期小流量时, 海潮上溯, 水体含盐量超出饮用水标准, 需建蓄淡避咸水库进行原水调节。水库建于长江大堤以外的江滩上, 总库容 365 万 m³, 占江滩面积 75 万 m², 由新建的上游堤、下游堤、外堤与加固的原长江大堤围成, 堤坝总长度为 3130 m。平行于水流方向的外堤位于江中, 离江岸最远, 所以, 外堤的高度最大。外堤堤基高程 -2.7 m (黄海基准, 下同), 堤顶高程 7.2 m, 最大堤高 9.9 m, 防浪墙顶高程 8.4 m, 计入防浪墙后的总高度为 10.9 m, 水库围堤为二级建筑物。长江大堤堤脚处地面高程为 2.5 m, 而水库底面设计高程为 -1.0 m, 即围堤以内高于 -1.0 m 的库区基面均需开挖至 -1.0 m 高程。水库最高蓄水位 5.8 m, 死水位 -0.3 m。

库区已有取水泵站一座, 直径均为 1.6 m 的 2 根取水钢管自库内泵站直通库外江中的取水头部, 钢管中心线与外堤堤轴线基本正交。两根钢管的中心线间距为 5.6 m, 钢管中心线高程为 -4.5 m, 即钢管顶面在外堤中心线地基面下 1.0 m 处。

长江口属中等赶潮河口, 每日两涨两落。最高潮位为 4.38 m, 最低潮位为 -2.7 m。台风平均每年入侵 2 次, 其中 74% 的风力大于 8 级, 最大可达 11 级。

库区地基为第四纪松散沉积层。近岸处表层有

一些粉土层, 即 2 号土层, 厚度仅 0.3 ~ 1.0 m 不等; 其下及离岸稍远处为淤泥及淤泥质粉质粘土, 即 3 号土层和 4 号土层, 厚度分别达 6 ~ 10 m 和 4 ~ 14 m, 标贯击数 $N = 1 \sim 3$ 级, 承载能力约为 60 kPa。

在该处建坝, 除了需适应潮流、台风环境与缺乏石料建材条件外, 软土地基以及地基中的取水钢管 (处于取水供水运行状态, 不能受损) 等复杂地基问题需妥善处理。

2 复杂地基等问题的处理措施

2.1 以充砂管袋为围堰主体、用库区开挖土料填筑坝体

太仓市第二水厂蓄淡避咸水库所在的浪港口, 软土地基表层无承载能力较强的“铁板砂”层, 淤泥质土裸露, 增加了筑坝的难度。水库大坝以充砂管袋棱体作为围堰与大坝临江侧消浪平台, 因地基软弱, 将棱体坡比适当放缓, 临江侧坡比为 1:3.0, 临库侧坡比为 1:1.5。管袋采用加碳黑的聚丙烯编织布缝制, 经现场试验与分析计算, 要求编织布质量大于等于 150 g/m², 抗拉强度大于等于 20.0 kN/m, 等效孔径 $O_{95} = 0.25$ mm, 充填砂取自附近的江中沙洲白茆砂。围堰合龙前的临库侧水下围堰支承体用吹填方式填筑, 并以多头小直径深层搅拌桩墙防渗; 其上坝体采用库区开挖土经晾晒干填, 由于库区开挖土的粘粒含量高达 23% ~ 33%, 吹填脱水固结时间太

长,因此只能放弃比较经济的吹填施工方式^[1,2],坝体与堰体横剖面见图1.

2.2 塑料排水带固结软土、加筋软体排加筋坝基

由于淤泥质地基的承载能力只有 60 kPa,以竖向土柱估算,只能承受高约 3~4 m 的堆体,而水库围堰最大高度为 6.3 m,坝体最大高度为 9.9 m,所以软土地基必须加固.采用经济快捷的在浅水中机械插打塑料排水带,以填筑堰体为固结加载、适当控制加载速率的方法,使淤泥质地基脱水固结,提高其承载能力.

采用 C 型塑料排水带,插打深度 15 m,间距 1.3 m,呈矩形布置,在坝体高度超过 4 m 的坝基上插打.排水带在 50 cm 厚的充砂管袋上插打,露头部分直接留在充砂管袋中,这样,充砂管袋即为起水平排水作用的地面砂被.

在管袋砂被上面从临江侧坝脚至临库侧坝脚铺设一层完整的加筋软体排,作为软土地基与坝体之间的加筋层.软体排用聚丙烯编织布缝上加筋带制成,编织布的质量大于等于 200 g/m²,等效孔径 $O_{95} \leq 0.15$ mm,编织布上缝上宽 60 cm 的加筋带后的抗拉强度大于等于 60.0 kN/m.软体排的铺设方向即受力方向,垂直于坝轴线.

2.3 围压灌浆护管

枢纽原总体设计采用科学合理的建筑物施工顺序,即水库大坝施工结束,待大部分压缩沉降已经完成再进行取水钢管坝下顶管施工,取水钢管不再会因地基较大的压缩沉降而产生较大的挠度.工程建设过程中因资金筹措缘故,先建设取水泵站及取水钢管,后建设蓄淡水库,以解决居民饮水燃眉之急.

由于建设顺序的颠倒,出现了棘手的技术难题:①经分层压缩计算与有限元分析,在取水钢管中心线处的沉降量达 1.1 m,取水钢管已不能承受;②若采取地基处理措施保护取水钢管不产生较大变形,则钢管两侧未加处理措施的相邻坝体将由于突然产生很大沉降引起贯穿性裂缝而破坏.

为防止取水钢管随地基产生较大沉降,应对地基进行处理.在三种处理方式之间进行比较选择:

①两根钢管下两侧分别用高压旋喷桩(摩擦桩)支

撑,坝体荷载由浅层地基传给钢管,再由钢管传给旋喷桩,称作“支撑保护”;②两根钢管两侧分别插打钢筋混凝土预制桩(摩擦桩),并在地面建钢筋混凝土承台,形成桩基结构,钢管在承台下面,坝体荷载直接由桩基承担,称作“屏蔽保护”;③在两根钢管的外侧,平行于钢管长度方向各设置一道高压定喷板墙,在大坝两侧坝脚处(即垂直于钢管长度方向)也各设置一道高喷板墙,深至地面下 15 m,形成四周封闭的“矩形围封”,通过沉降观测,在沉降部位进行静压注浆,由于灌浆区域已被围封,灌浆压力使该处上抬,回复至原来位置,称作“充填保护”.

三个方案的分析比较如下:“支撑保护”的旋喷桩在淤泥质土的深处很难保证其有效桩径,其施工质量受操作影响较大;“屏蔽保护”的插打桩质量易于保证,但钢筋混凝土承台的浇筑需作围堰,高 6 m 多的围堰荷载也将使钢管产生较大变形,且造价高、工序多、工期长,难以在长江汛期前使围堰合龙;“充填保护”的高喷板墙可与围堰同时施工,经观测需要,随时随地可灌浆,灌浆上抬的效果可直接观测控制,且造价低,施工灵活方便,质量易于控制.

经分析比较,选择“充填保护”方案,以防止取水钢管产生较大挠度变形.

2.4 复合地基护坝

在围封区域沿坝轴线两侧的毗邻区域,与围封灌浆区域相比,存在着较大的沉降差,处理的思路应在一定范围内分摊约 1 m 的沉降差,减少沉降梯度.

采用桩长逐渐变小的高压旋喷桩复合地基,在围封边缘处桩长最大,使该处的沉降量与围封区域相当,随着远离围封,桩长逐渐变小,沉降量逐渐增大,直至复合地基边缘,该处与未处理地基的沉降量相当.经分析计算,采用桩径 1.0 m,桩距 3.0 m,桩长从 18.0 m,每排桩长缩短 1.5 m 直至 3.0 m 桩长,两侧的复合地基的长度均为 28.0 m.

3 围堤结构布置与计算

3.1 新建坝体的结构布置

新建坝体的最大断面参见图1.坝体主要由三

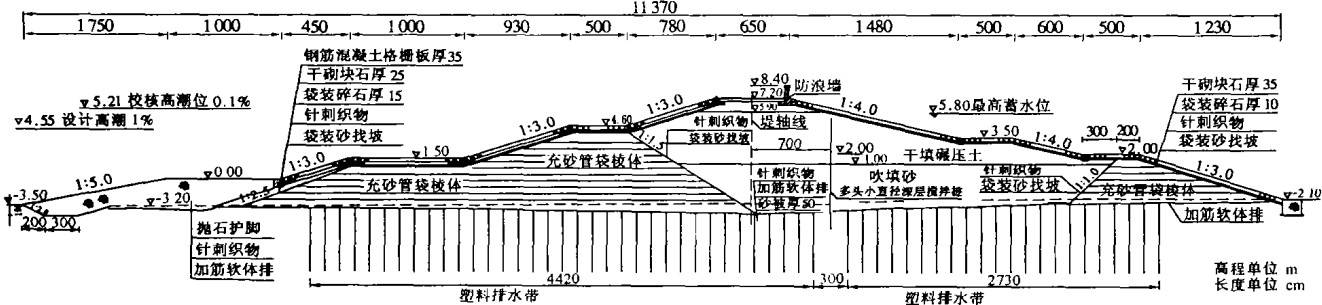


图1 外堤最大断面布置

部分组成,即临江侧的抛石镇压层;临江侧的大棱体与临库侧的小棱体;两棱体间的坝主体.

大棱体作为坝体的一部分,施工期兼作围堰主体与合龙戗体,抵御 20 年一遇高潮位;运行期兼作台风第一级消浪平台,顶高程 4.6 m,顶宽 5.0 m,临江侧坡比 1:3.0,临库侧坡比 1:1.5,最大高度为 7.3 m.棱体主体由充砂管袋构成,外堤临江侧护坡从下至上分别为袋装砂找坡,针刺织物反滤层,厚 15 cm 的袋装碎石,厚 25 cm 的干砌块石,厚 35 cm 的消浪钢筋混凝土格栅板;东西两堤护坡采用厚 30 cm 的 WYC-1 型模袋混凝土.坡脚设置防止水流冲刷的厚 1.5 m,长 15 m 的抛石护脚,兼作镇压层.

小棱体在施工期作为水中充填坝体一级子堰,顶高程 2.0 m,顶宽 2.0 m,临江侧坡比为 1:1.0,临库侧坡比为 1:3.0,最大高度 4.7 m.棱体主体由充砂管袋构成,临库侧护坡从下至上分别为袋装砂找坡,针刺织物反滤层,厚 10 cm 的袋装碎石,厚 35 cm 的干砌块石.

坝主体底部 1.0 m 高程以下为围堰合龙前的水力充填(中细砂)支撑体,以多头小直径深层搅拌桩墙防渗;其上为库内开挖土(粉质粘土)干填区,坝顶宽 6.5 m,高程 7.2 m,兼作第二级消浪平台,临库侧设置混凝土防浪墙,顶高程 8.4 m;临江侧坝坡坡比为 1:3.0,临库侧坝坡坡比为 1:4.0,并在 3.5 m 高程处设置一宽 5.0 m 的稳定平台;坝体两侧护坡分别与大、小棱体的护坡相同.

坝基铺设加筋软体排,作为软土地基加筋层,抛石镇压层(亦为护脚)作为软体排的锚固端,临库侧以小棱体作为锚固端.在大棱体至接近临库侧坝坡平台范围内插打塑料排水带.

3.2 改建坝体的结构布置

水库靠岸一侧围堤以原长江大堤改建而成.堤顶高程由 6.9 m 改建为 7.2 m,防浪墙顶高程为 8.4 m,堤顶宽度由 6.0 m 改建为 6.5 m,并按道路要求设置沥青混凝土路面.坝体临库面坡比由原来的 1:2.2 改建为 1:3.0,并在 3.5 m 高程处设置宽 2.0 m 的稳定平台;背水坡由 1:1.95 改建为 1:2.5,并在 2.4 m 高

程处设置宽 8~10 m 不等的稳定平台,与长江大堤堤后小河河岸设置的砌石挡土墙相连接.

除断面尺寸加大以外,还增加了作为坝体所需功能的防渗排水设施.采用垂直插塑工艺在改建大堤中央偏上游处设置厚 0.5 mm 的土工膜防渗层直至地基-1.0 m 高程;在临库坡面铺设针刺织物反滤层,其上垫层为 10 cm 厚的碎石,护坡为厚 35 cm 的浆砌块石;背水坡脚处设置排水棱体,2.4 m 高程以上坝坡采用生态型绿色草皮护坡^[3,4].改建剖面见图 2.

改建实施的主要步骤为,将原大堤的临水坡与背水坡开挖成台阶状,再用库区开挖出的工程性质较好的粉质粘土层层碾压培厚加高,排水棱体同时修筑,然后设置防渗体、防浪墙、护坡、坝顶路面等.

3.3 新建坝体的渗流稳定计算

3.3.1 计算工况和计算参数

选择控制大坝、水库运行安全的工况作为计算工况,即库内高水位(5.8 m)与库外低水位(0.0 m)组合(工况一),库内低水位(-0.3 m)与库外高水位(4.6 m)组合(工况二).坝体与坝基材料的计算参数见表 1.渗流与稳定计算采用有限元分析软件,其中稳定分析是在有限元结构分析基础上以降低材料的抗剪强度后的强度比求得安全系数.计算中,散粒体材料采用非线性模型,织物加筋软体排采用线弹性模型.

表 1 新建坝体与坝基计算的土体非线性参数

土 样	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/kPa	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
3 号填筑土	18.2	30.8	12.4	5.29×10^{-6}
2 号填筑土	18.9	37.7	7.5	1.16×10^{-6}
填 筑 砂	16.3	41.3	2.6	1.39×10^{-4}
地 基 土	17.6	8.1	9.0	6.37×10^{-7}

土 样	R_f	K/kPa	n	G	F	D
3 号填筑土	0.65	56.0	0.60	0.30	0.00	1.2
2 号填筑土	0.71	123.0	1.07	0.25	0.00	5.3
填 筑 砂	0.84	354.0	0.93	0.23	0.00	6.2
地 基 土	0.61	44.0	0.54	0.32	0.00	0.7

注:织物软体排的变形模量为 500 kN/m.

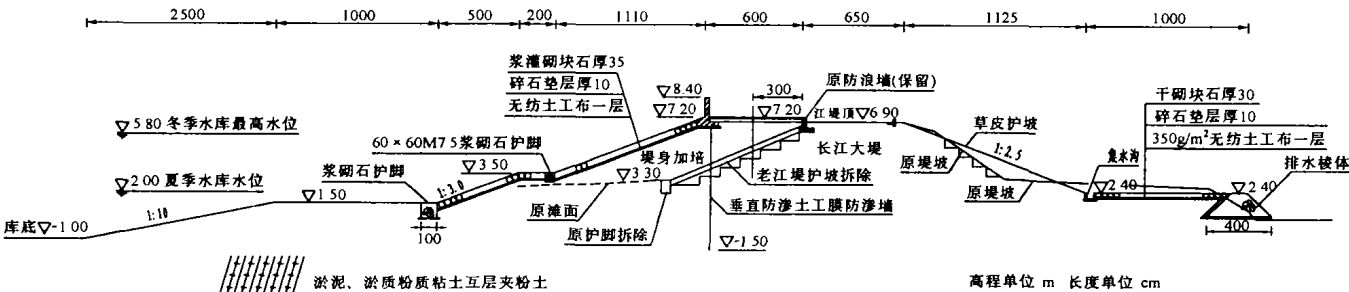


图 2 长江大堤改建断面布置

3.3.2 计算结果

计算结果分别见表 2 和图 3 及图 4.

表 2 新建坝体与坝基渗流和稳定计算结果

工 况	心墙前浸润线 高程/m	心墙后浸润线 高程/m	单宽渗流量 $/((\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}) \cdot \text{m}^{-1})$	抗滑稳定 安全系数
工况一	5.5	0.8	0.054	1.52
工况二	4.3	0.5	0.028	1.38

注:规范要求的安全系数为 1.25.

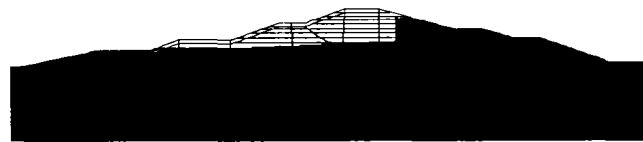


图 3 工况一渗流浸润线

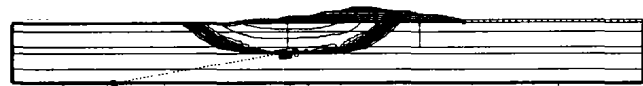


图 4 工况一稳定分析结果

从表 2 与图 3 及图 4 可见,由于设置了中央防渗体,防渗效果明显,渗漏量很小;由于设置了抛石镇压层与加筋软体排,两种控制工况坝体临江坡和临库坡的抗滑稳定安全系数均满足规范要求.

3.4 改建坝体的渗流稳定计算

3.4.1 计算工况和计算参数

计算工况采用库内水位 5.8 m 与库外水位 1.0 m 组合,计算参数见表 3.

表 3 改建坝体与坝基计算的土体非线性参数

土 样	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/kPa	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
2 号填筑土	18.9	37.7	7.5	1.16×10^{-6}
坝基土	18.2	30.8	12.4	5.29×10^{-6}

土 样	R_f	K/kPa	n	G	F	D
2 号填筑土	0.71	123.0	1.07	0.25	0.00	5.3
坝基土	0.65	56.0	0.60	0.30	0.00	1.2

注:坝体防渗墙的渗透系数为 $5.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$.

坝后挡土墙采用线弹性模型,采用混凝土的弹性模量与泊松比.

3.4.2 计算结果

计算结果见表 4 和图 5 及图 6.

表 4 改建坝体与坝基渗流和稳定计算结果

心墙前浸润线 高程/m	心墙后浸润线 高程/m	单宽渗流量 $/((\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}) \cdot \text{m}^{-1})$	抗滑稳定 安全系数
4.01	3.15	0.015	1.65

注:规范要求的安全系数为 1.25.



图 5 改建坝体断面渗流浸润线

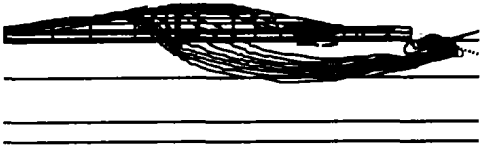


图 6 改建坝体断面稳定分析结果

从表 4 与图 5 及图 6 可见,由于中央防渗体的渗透系数与填土的渗透系数相差的数量级不大,所以防渗体浸润线的削落效果不显著,由于设置了坝后小河河岸挡土墙,抗滑稳定安全系数已从临界状态提高至 1.65,满足规范要求.

4 结 语

水库围堤于 2002 年 11 月全面开工建设,2003 年 5 月上旬围堰合龙,5 月底达到围堰管袋设计高程 4.2 m,至 2003 年底,已完成大棱体干砌石护坡,坝主体正在填筑,顺利度过大潮汐和台风期,工程已处于基本无安全风险阶段的施工期.本工程设计可得到以下结论:①工程建设应尽量维护其固有的科学规律,以免增加建设风险与投资;②河口淤泥质地基上建造堤坝采用充填管袋坝芯施工工艺与加筋软体排及塑料排水带的地基加固措施,施工便捷,大量节省投资;③在埋有管道等忌大变形构件的软土地基上建造堤坝,采用围封灌浆减少绝对沉降量、变参数复合地基减少相对沉降量的工程措施是合理有效的;④充填土工管袋、加筋软体排、塑料排水带、针刺织物反滤层、模袋混凝土护坡、防渗土工膜等土工合成材料综合应用体现了工程建设在建筑材料、设计方法、工艺技术方面出现的新变革.

参考文献:

[1] SDJ338-89,水利水电工程施工组织设计规范[S].
[2] Pilarczyk K W. Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000. 336 ~ 366.
[3] GB50286-98,堤防工程设计规范[S].
[4] GB50290-98,土工合成材料应用技术规范[S].

(收稿日期:2003-08-11 编辑:熊水斌)

