

水泥搅拌桩在高港枢纽工程中的应用

吴 军

(江苏省水利勘测设计研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要:介绍高港枢纽工程概况. 工程中采用水泥搅拌桩加固地基的地基处理方案, 用现场试验、检验来验证设计取值的可靠性, 通过试验获得了复合地基土与混凝土建筑物底板的抗滑摩擦系数. 竣工后的观测资料表明, 采用水泥搅拌桩来加固地基达到了设计预期的效果.

关键词:水泥搅拌桩; 地基加固; 抗滑摩擦系数; 高港枢纽工程

中图分类号: TU473.1+3

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2004)01-0049-03

高港枢纽工程是泰州引江河的控制口门, 枢纽由节制闸、泵站、调度闸、送水闸及船闸工程等项目组成, 节制闸设计引水流量 $600 \text{ m}^3/\text{s}$; 泵站共 9 台机组, 总装机容量 $18\,000 \text{ kW}$, 设计流量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$, 双向抽水; 船闸工程为 II (3) 级船闸, 设计年运量 $1\,500 \text{ 万 t}$, 是一项以引水为主、灌、排、航综合利用, 效益和影响覆盖苏北地区的战略性基础设施工程.

在高港枢纽工程场区勘探揭示深度范围内地层均为第四系全新统长江冲积层 (Q_4^{al}), 自上而下划分为 7 层. 枢纽主要建筑物的底板均坐落在第四层, 该层灰色中、轻粉质软壤土夹砂壤土、粉砂或为互层, 单层厚度大多为 $0.2 \sim 2.0 \text{ m}$, 具水平层理; 上部以淤泥质壤土为主, 标准贯入击数一般为 $3 \sim 5$ 击; 下部砂性逐渐增大, 标准贯入击数 $6 \sim 14$ 击, 厚度一般为 $5 \sim 12 \text{ m}$; 地基土容许承载力为 $65 \sim 80 \text{ kPa}$; 直接快剪指标: 凝聚力 $c_c = 9 \text{ kPa}$, 摩擦角 $\varphi = 12^\circ$, 该层土质软弱松散, 地基承载力低, 抗滑摩擦系数小, 不能满足设计要求, 必须进行处理. 在设防烈度为 7 度时, 其持力层及下卧层均为可能产生液化的土层. 各建筑物地基以砂性土为主, 渗透系数 $K = 4.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 影响半径 $R = 150 \text{ m}$.

1 地基处理方案

高港枢纽场区地质条件差, 根据地基钻探资料, 地基持力层的容许承载力在 80 kPa 以下, 天然地基不能满足工程要求, 必须进行地基处理. 在可行性研究阶段对换土垫层、沉井、钢筋混凝土灌注桩和钢筋混凝土预制方桩等处理方案进行分析比选, 选用钢筋混凝土预制方桩为基础处理方案. 初步设计阶段,

又对钢筋混凝土预制方桩和水泥搅拌桩两种基础处理方案进行了比选. 枢纽闸站临长江侧的翼墙高度为 14 m , 由于翼墙底板下的天然地基抗剪强度低, 故采用预制桩, 这对提高垂直承载能力是有效的, 但不能完全解决水平承载能力不足的问题, 并使计算模型变得十分复杂. 而采用水泥搅拌桩来加固地基, 可在地基深处就地将软土和水泥强制拌和, 利用水泥和软土之间产生的一系列物理变化和化学反应, 使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的复合地基, 能够同时解决垂直承载能力和水平承载能力的问题, 受力情况十分明确. 根据水泥搅拌桩的技术特性和枢纽地质现状条件, 决定采用水泥搅拌桩基础处理方案.

根据枢纽场区地质情况及施工条件, 并经室内试验, 确定采用 425 号水泥, 掺入比为 $15\% \sim 18\%$. 桩径 0.6 m , 桩长 $5.5 \sim 8 \text{ m}$, 大多数桩长为 6 m . 桩的平面布置一般按等距布置, 部分岸、翼墙根据地基反力大小布置, 桩距及置换率根据各建筑物的地基反力及沉降要求确定. 水泥搅拌桩计算按《软土地基深层搅拌加固技术规程》^[1] 进行, 单桩承载力按式 (1) 和式 (2) 计算:

$$N_d = Kq_u A_p \quad (1)$$

$$N_d = q_s U_p L + \alpha A_p f_k \quad (2)$$

式中: N_d 为单桩承载力设计值; q_u 为室内加固土试块的无侧限抗压强度, 取 $1\,500 \text{ kPa}$; A_p 为桩的截面积; q_s 为桩周土摩阻力, 取 12 kPa ; U_p 为桩周长; L 为桩长, 取 6 m ; α 为桩端土支承力折减系数, 取 0.5 ; f_k 为桩端地基承载力, 取 80 kPa .

按式 (1) 计算, 单桩承载力 $N_d = 148 \text{ kN}$; 按式 (2)

计算, $N_d = 147 \text{ kN}$. 按设计规程两者取小值, 单桩承载力为 147 kN .

复合地基承载力按式(3)计算:

$$f_{sp} = mN_d/A_p + \beta(1 - m) f_i \tag{3}$$

式中: f_{sp} 为复合地基承载力设计值; m 为搅拌桩的面积置换率(取值见表 1); β 为桩间土承载力折减系数, 取 0.5; f_i 为桩间土地基承载力标准值, 取 80 kPa .

表 1 复合地基设计参数及计算结果

位 置	$m/\%$	N_d/kN	β	f_i/kPa	f_{sp}/kPa	设计工况 基底压力 $/\text{kPa}$
闸站西岸墙	25.7	147	0.5	80	163.2	140.8
闸站上游第一节翼墙	25.0	147	0.5	80	159.9	121.7
闸站下游第一节翼墙	25.1	147	0.5	80	160.3	133.0
节制闸闸室	11.9	147	0.5	80	97.2	89.5
泵站站身	19.2	147	0.5	80	132.2	115.6
船闸闸室墙	24.2	147	0.5	80	156.3	125.6
船闸上游导航墙	22.6	147	0.5	80	148.6	118.3
船闸下游导航墙	26.2	147	0.5	80	165.5	142.8

枢纽地基加固面积为 1.68 万 m^2 , 约 15000 根水泥搅拌桩, 2.47 万 m^3 , 总长约 10 万 m . 处理后的地基为复合地基, 其承载能力大幅度提高, 由于水泥搅拌桩桩径较粗, 桩距较密, 使底板下的部分松散土由水泥搅拌桩替代, 且水泥浆可向桩周边渗透, 对松散的土质起到了固结作用, 提高了抗地震液化能力.

2 现场检验、试验及成果

由于在江苏省大型水利工程中首次大规模采用水泥搅拌桩加固地基, 所获得的数据仅仅是依照设计规程计算所得, 缺乏必要的试验数据, 尤其是设计规程中缺乏复合地基的抗剪强度和复合地基土与混凝土建筑物底板的抗滑系数计算方法. 为此, 安排进行了轻便触探检验、载荷试验、开挖检验和抗滑试验.

采用轻便触探进行桩身质量检查, 检测深度在 3 m 左右, 按设计要求随机抽检, 龄期为 $6 \sim 7 \text{ d}$, 现场测试每 30 cm 记录一次 N_{10} 击数. 根据现场记录, 结合有关规定, 进行强度对比判断, 桩身水泥土强度都大于 500 kPa , 桩身质量优良.

载荷试验为复合地基载荷试验, 该工程共进行了 9 组复合地基载荷试验, 试验结果列于表 2. 由表 2 可知, 复合地基承载力计算值和测试结果两者相差较大的仅 2 组, 其相差范围分别为 21% 和 27%, 其它 7 组相差范围为 4% ~ 14%. 在地质条件基本相同的情况下, 复合地基的承载能力与施工期间工艺质量控制的关系较大, 测试结果也反映了这一点. 文献[1]中介绍: “试验资料表明, 水泥土的强度随龄期的增长而增大, 一般情况下水泥土强度 7 d 时可达

标准强度的 30% ~ 50%; 30 d 可达标准强度的 60% ~ 75%; 90 d 为 180 d 的 80%; 而 180 d 以后, 水泥土强度增加仍未终止.” 该工程的复合地基载荷试验是在成桩 30 ~ 45 d 进行的, 按上述方法进行推算, 表 2 中的测试结果均可达到复合地基承载力计算值. 在现场随机开挖检验桩身, 外观质量满足要求.

表 2 复合地基载荷试验结果

位 置	桩号	复合地基 承载力计 算值/ kPa	终止 荷载 $/\text{kPa}$	累计 沉降 $/\text{mm}$	承载力 $/\text{kPa}$
闸站西岸墙	88, 89	163.2	300	37.83	150
闸站上游东侧第一节翼墙	173	159.9	405	30.30	203
闸站下游东侧第一节翼墙	64	160.3	300	23.84	150
闸站上游西侧第一节翼墙	50	159.9	280	44.20	140
闸站下游西侧第一节翼墙	119	160.3	308	46.73	154
船闸上游导航墙	4868	148.6	312	13.14	156
船闸上游导航墙	4886	148.6	340	9.40	170
船闸下游导航墙	722	165.5	360	11.98	180
船闸下游导航墙	738	165.5	400	11.19	200

经轻便触探检验、载荷试验、开挖检验, 验证了设计按《软土地基深层搅拌加固技术规程》^[1] 进行单桩承载力和复合地基承载力计算时对折减系数的取值是较安全的, 由此获得了取值范围.

由于翼墙承受水平推力, 设计时需要测试复合地基对混凝土底板的抗剪强度指标, 因此安排在施工现场在 2 块底板下各做一组水泥搅拌桩复合地基土对混凝土底板的抗滑试验. 抗滑试验原理与直剪试验相似, 取试块 5 块, 分别施加不同的垂直压力, 然后逐级施加水平拉力, 同时量测水平位移, 直至破坏, 将各级垂直压力换算成单位压应力 σ , 把破坏时水平拉力换算成抗剪强度 S_c , 绘制 $\sigma \sim S_c$ 曲线, 由该曲线可求得地基土与混凝土板的抗剪指标 c_c 和摩擦角 φ_c . 在水泥搅拌桩施工 40 d 后, 开挖至设计高程做抗滑试验, 每组现场浇筑 5 块混凝土, 根据各试验建筑物底板下的桩距确定混凝土试块尺寸, 试块厚度 40 cm . 为使试验符合实际使用情况, 混凝土试块浇筑后在周围注水, 使混凝土试块下的地基土在试验全过程中保持饱和状态, 试块布置见图 1. 垂直荷载分别按 37.5 kN , 75 kN , 112.5 kN , 150 kN 施加, 水平拉力用 50 kN 手拉葫芦控制, 水平拉力开始每级按垂直荷载的 $1/10$ 施加, 加水平拉力的方法是用手拉葫芦控制钢筋计, 使与钢筋计相连的接收仪(频率仪)上的读数保持一定值, 如有变化, 立即调整葫芦, 同时每隔 3 min 测试水平位移, 读数精确到 0.01 mm , 当 3 min 位移不超过 0.1 mm 时, 认为滑动稳定, 可施加下一级水平拉力. 以此类推, 直至出现峰值, 即认为剪切破坏, 试验结束. 将试验数据绘制 S (水平拉应力) ~ μ (位移) 曲线, 根据曲线确定每一级垂直荷载 P 作用下水平拉应力的峰值(抗剪强度) S_c , 然后

绘制抗剪强度 S_c 与垂直压力 σ 曲线(图 2), 根据 $\sigma \sim S_c$ 曲线求得抗剪强度指标在凝聚力和摩擦角. 第一组抗剪强度指标为 $c_c = 19 \text{ kPa}$, $\varphi_c = 10.7^\circ$; 第二组抗剪强度指标为 $c_c = 21 \text{ kPa}$, $\varphi_c = 13.5^\circ$.

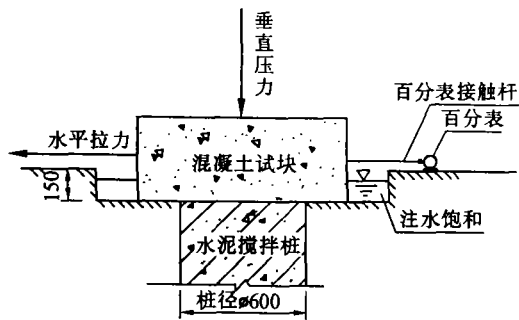


图 1 试块布置示意图

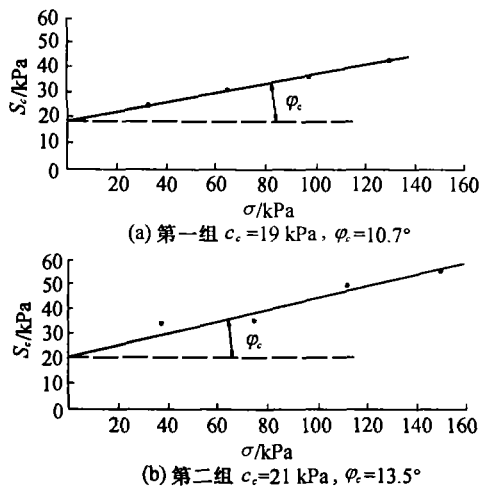


图 2 抗剪强度与垂直压力曲线

抗滑摩擦系数按式(4)计算:

$$f = \tan \varphi + c/n\sigma \quad (4)$$

式中: f 为抗滑摩擦系数; φ 为地基土内摩擦角; c 为地基土凝聚力; n 为系数; σ 为平均基底压应力.

按原状土的抗剪指标进行建筑物抗滑计算时, 由于抗剪指标是由室内试验得出的, 因此 n 取 4. 按现场试验所得到的抗剪指标进行建筑物抗滑计算, n 可取为 1. 该工程建筑物设计工况基底压应力一般为 130 kPa , 经计算, 原状土的抗滑摩擦系数 $f = 0.23$; 用第一组试验所得的抗剪强度指标计算出 $f = 0.34$; 用第二组试验所得的抗剪强度指标计算出 $f = 0.40$. 考虑水泥搅拌桩复合地基土对混凝土底板的抗滑试验是在成桩后 40 d 进行的, 复合地基未达到 90 d 的强度, 经研究确定该工程摩擦系数 f 取 0.35.

3 结 语

高港枢纽工程竣工已 3 年多, 枢纽管理部门的沉降观测资料表明, 各建筑物的沉降均匀, 沉降在施工期基本完成, 竣工投入使用后, 基本上无沉降位

移, 枢纽主体建筑物的沉降情况见表 3. 从现场观测翼墙(挡土墙)外观及从各建筑物伸缩缝观测结果看, 墙身稳定, 无前倾后仰现象. 统计分析表明, 采用水泥搅拌桩加固地基方案比采用钢筋混凝土预制方桩方案节省投资 35%, 节约工程投资 266 万元. 因此, 从结构的安全性及经济性上看, 高港枢纽采用水泥搅拌桩处理软土地基是成功的, 并为江苏省水利工程类似地基的加固处理积累了经验.

表 3 枢纽主体建筑物沉降

部位	点 位	设计工 况基底 压力 /kPa	复合地 基承载 力计算 值/kPa	置换率 /%	施工期 累计沉 降量 /mm	竣工 3 年后累 计沉降 值/mm
节制闸 闸室	1	89.5	97.2	11.9	53.8	55
	2	89.5	97.2	11.9	80.6	82
	3	89.5	97.2	11.9	60.5	61
	4	89.5	97.2	11.9	75.8	78
泵站站身	1	115.6	132.2	19.2	55.7	57
	2	115.6	132.2	19.2	56.1	58
	3	115.6	132.2	19.2	56.5	58
	4	115.2	132.2	19.2	55.4	56
闸站 西岸墙	1	140.8	163.2	25.7	80.8	83
	2	140.8	163.2	25.7	75.8	76
	3	140.8	163.2	25.7	108.8	112
	4	140.8	163.2	25.7	100.8	104
闸站下游 第一节翼墙	1	133.0	160.3	25.1	54.8	57
	2	133.0	160.3	25.1	70.9	72
船闸 闸室墙	1	125.6	156.3	24.2	86.0	87
	2	125.6	156.3	24.2	87.0	88

参考文献:

[1] YBJ225—91, 软土地基深层搅拌加固技术规程[S].

(收稿日期: 2003-04-28 编辑: 张志琴)

大朝山电站水轮机转轮动应力测试取得圆满成功

为了搞清水轮机转轮出现裂纹的根本原因, 解决这一世界性难题, 东方电机股份有限公司 2003 年派出技术人员前往大朝山电站进行了为期 3 个月的转轮动应力真机试验. 对在变转速、变电压、变负荷、甩负荷用筒阀动水关闭等不同运行工况下转轮静动应力进行了测试, 取得了大量、宝贵的第一手试验数据, 据此可进一步了解和掌握转轮动应力的分布规律, 为进一步开展转轮可靠性和防裂纹研究, 提供宝贵的技术资料 and 科学依据.

大型混流式水轮机转轮的可靠性是水轮机设计和制造的关键问题之一, 因此, 研究叶片裂纹机理及预防措施已经成为转轮设计和制造中必须解决的重要技术问题. 大朝山电站转轮动应力测试研究成果的取得为我国大型水轮机转轮设计制造迈向新的台阶铺平了道路, 为三峡水轮机转轮可靠性及防裂纹研究奠定了坚实的技术基础.

(余小波供稿)