

逢沙电排站重建工程中的软土垂直支护分析及监测

李 川, 方大勇, 谢应恩, 张 挺, 杜秀忠, 孙昌利

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510635)

摘要: 通过对一宗在深厚软土上重建电排站的软土支护咨询、分析及监测, 提出合理的分析方法, 特别是通过工程方法分析及数模分析, 提出了一种在深厚软土上垂直支护的方法, 这对今后类似工程具有借鉴意义。

关键词: 垂直支护; 深厚软土; 数模分析; 监测

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0692-07

作者简介: 李 川(1973-), 男, 广东潮州人, 大学本科, 高级工程师, 从事水利水电岩土工程研究工作。E-mail: alee@21cn.com.

Analysis and monitoring of reconstruction project of vertical support for Fengsha Pumping Station engineering in soft soils

LI Chuan, FANG Da-yong, XIE Ying-en, ZHANG Ting, DU Xiu-zhong, SUN Chang-li

(1. Guangdong Reserch Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Geotechnical Engineering Technology Research Centres, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Based on the consulting, analysis and monitoring of a supporting case in reconstruction of a pumping station in soft soils, a reasonable analysis method is put forward. In particular, after engineering analysis and numerical simulation analysis, a method for vertical shoring in deep soft soils is proposed. It may provide reference for similar projects in the future.

Key words: vertical support; deep soft soil; numerical analysis; monitoring

1 工程概况

逢沙电排站重建工程所处的顺德第一联围位于顺德区中部、西北江下游网河区, 北临顺德水道。重建的逢沙电排站位于顺德第一联围东部桩号 45+316, 石排涌与李家沙水道的汇口处。

逢沙电排站重建工程在原逢沙电排站北侧开挖修建, 原逢沙电排站和逢沙水闸除基础外全部拆除, 原址重建电排站和水闸, 工程的平面布置如图 1。整个重建工程的土方开挖主要集中在泵站北岸及水闸闸室段的南岸。其中, 须进行深开挖垂直支护的主要有以下两个位置: 外江连接段北侧由+1.0 m 开挖至-2.7~-3.5 m, 支护高度为 3.7~4.5 m; 前池进水池北侧由+2.0 m 开挖至-2.7~-6.4 m, 支护高度为 4.7~8.4 m。由于本工程场地软基深厚, 厚度达 57 m, 工程基坑最大开挖深度达 8.4 m, 因而支护结构是个难点, 同时, 场地软土呈流塑状, 场地开挖引起的软土侧压力容易对工程桩造成影响, 如何对软土地基进行处理, 也是本工程需要解决的问题之一。另外, 重建工程东面有太澳高速公路的桥墩, 西面有广珠城际快速轨道交通工程的桥墩, 桥墩离基坑边较近, 如何采用有效措施

避免基坑施工过程对其产生不良影响, 这些问题, 都需进行分析评价。

2 地质情况

2.1 场地地层分布及特征

依据地质报告, 场地普遍覆盖有第四系(Q^m)堆积物: 第四纪表土层(Q^{ml}), 第四纪冲积层(Q^{al})和下伏基岩(J^{2-3})侏罗纪中—上统泥质砂岩风化层组成。有关各土层特征、性质分述如下:

①素填土(耕植土)(Q^{ml}) 灰黄色, 稍压实, 主要由粉质黏土、风化土组成, 含碎石及粉砂等, 耕植土主要由粉质黏土和少量碎石组成, 厚度为 1.80~2.60 m, 平均为 2.23 m, 层顶标高为 1.28~4.10 m, 平均为 2.55 m。

②冲积层(Q^{al}) 可分为以下 2 个亚层: ②-1 淤泥, 灰色, 手捏黏滑, 含腐殖质, 有腐臭味, 流塑, 夹薄层粉砂, 含贝壳碎片。场区各孔均有分布, 厚度为 3.20~17.20 m, 平均为 10.58 m; 层顶标高为-0.60~

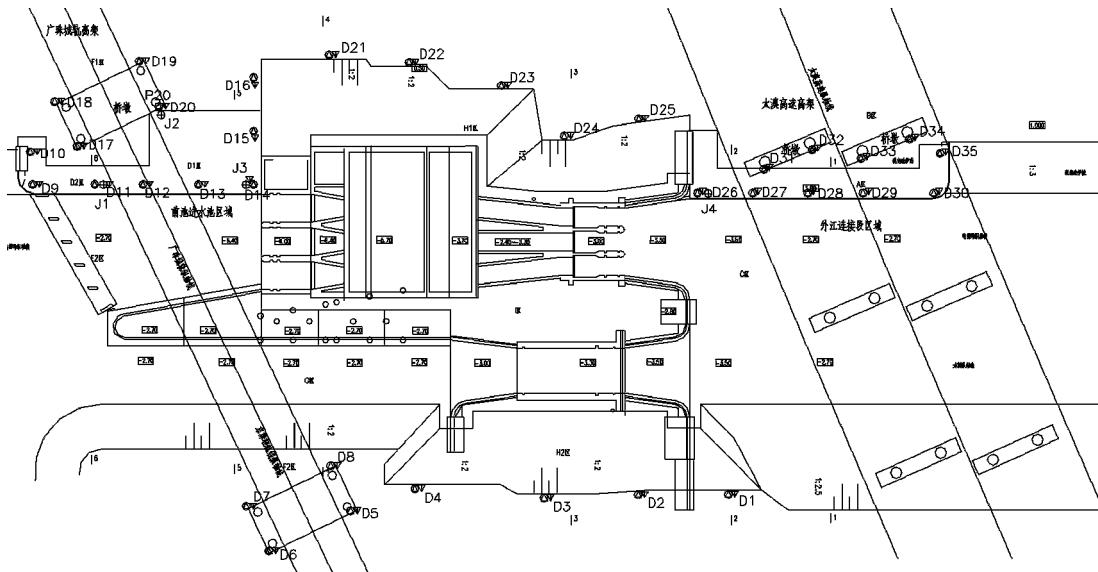


图 1 逢沙电排站重建工程平面简图

Fig. 1 Floor plan of reconstruction project of Fengsha Pumping Station

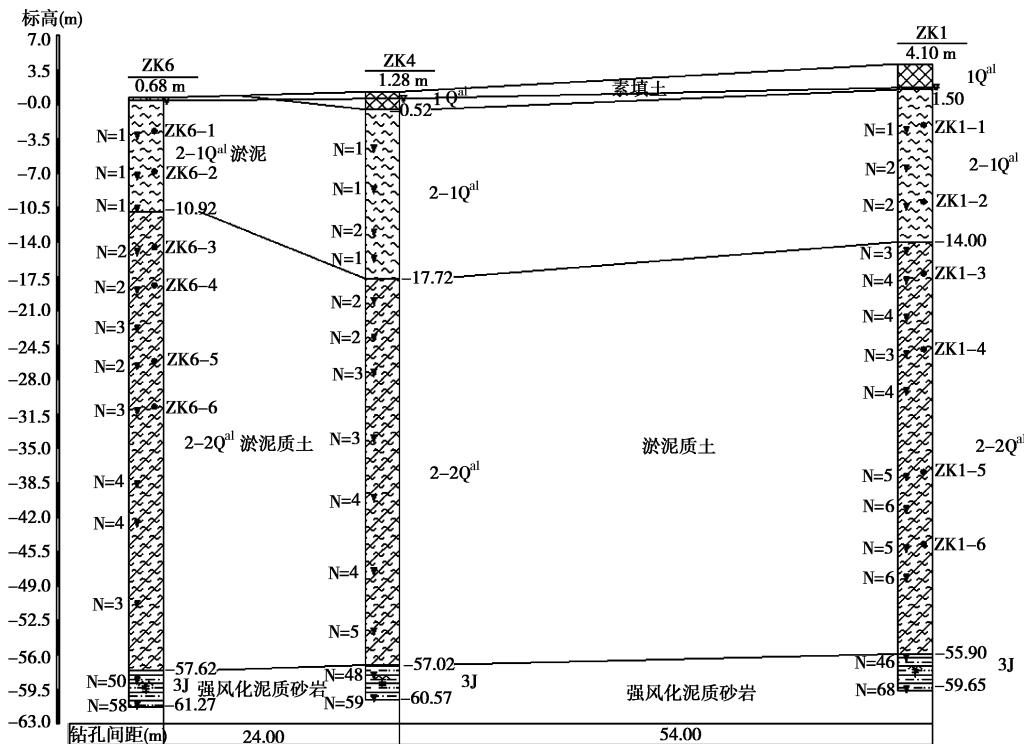


图 2 参考的地质剖面图

Fig. 2 Geological section

1.50 m, 平均为 0.36 m; 层顶埋深为 0.00~2.60 m, 平均为 2.01 m。②-2 淤泥质土, 深灰色, 流塑, 主要由黏粒和有机质组成, 含腐殖质, 夹薄层粉砂与淤泥质土呈互层状, 在该层中下部含大量贝壳碎片及粉细砂, 底部含较多砾砂等。场区各孔均有分布, 厚度为 39.30~54.40 m, 平均为 46.40 m; 层顶标高为 -17.72~-1.97 m, 平均为 -10.22 m; 层顶埋深为 5.40~19.00 m, 平均为 12.59 m。

③强风化泥质砂岩(J²⁻³) 红褐色, 灰白色, 原岩结构大部分已风化成土状, 岩芯呈短柱状, 碎块状,

岩质软, 手捏易碎, 遇水极易软化松散。该层未穿透, 揭露厚度为 3.45~4.25 m, 平均为 3.82 m; 层顶标高为 -57.62~-55.70 m, 平均为 -56.62 m; 层顶埋深为 58.30~60.00 m, 平均为 58.99 m。参考的地质剖面图见图 2。

2.2 地质参数的确定

根据以往的工程经验, 场地各地层地质参数对基础的安全评价影响最大, 因而, 确定地层的地质参数需特别慎重。从地质报告看, 其推荐的各土层力学参数特别是淤泥的强度参数偏低, 这是因为地质钻探中土样

的取样有一定的随意性，土样试验结果有一定的离散性，并且取样土为扰动土，与原状土有一定的差距。因此，我们在选取土层的地质参数，不仅要参考地质报告中土层参数取值，同时也要参考其土样性状的描述，特别是对原状土进行的标贯试验及含水率等特性，还结合我单位二十几年对珠江三角洲地区岩土工程经验，综上所述，各岩土层物理力学参数见表1。

3 电排站重建工程中重点部位的软基处理方案

本工程外江连接段北侧侧壁及前池进水池北侧侧壁的支护，前者最大垂直支护高度为4.5 m，太澳高速公路高架桥4个桥桩距离该段支护结构开挖线最近距离仅为5.5 m，后者最大垂直支护高度达8.4 m，广珠城轨高架桥的桥墩离开挖面最近距离仅为11.3 m，同时，工程场地为深厚淤泥软土层，无法采用锚杆和支撑进行协同支护，单独采用灌注桩进行支护的话，灌注桩将穿越40多米淤泥层才到达稍为坚硬的持力岩层，由于桩过长，桩顶位移过大，支护结构有可能倒塌，一但出现倒塌，临近的太澳高速及广珠城轨桥桩将受影响而产生位移，从而影响这两座高架桥的正常运行，造成事故。

针对以上工程难点，我院项目组提出采用格栅式搅拌桩挡墙支护方案，在该方案中，支护面挡墙采用

$\Phi 500@350$ 搅拌桩，墙深、墙总厚度、肋墙厚及肋墙净距等参数根据不同的支护段而定。基坑底则采用格栅式搅拌桩进行坑底土加固，同时，在临近的高架桥桥墩周围施打围闭的搅拌桩墙对其进行保护。部分位置由于处于高架桥底搅拌桩机作业空间高度不足则采用旋喷桩代替。具体支护方案如下：

外江连接段北侧的支护方案：最大开挖深度为4.5 m，采用格栅式搅拌桩挡墙支护，挡墙采用 $\Phi 500@350$ 搅拌桩，墙深12 m，墙总厚度5.40 m，肋墙厚0.85 m，肋墙净距0.90 m。在迎土侧旋喷桩间插入 $\Phi 48$ 钢管，长度为12 m，间距500 mm。同时，在挡墙墙顶施工砼盖板，盖板厚300 mm，配筋双层 $\Phi 8@150$ ，与钢管焊接。基坑底距开挖面25 m范围内用格栅式搅拌桩对河床淤泥进行置换，搅拌桩采用 $\Phi 500@350$ ，桩长7 m，置换率约为60%。支护剖面图见图3~4。

前池进水池北侧的支护方案：最大开挖深度为8.4 m，采用格栅式搅拌桩挡墙支护，挡墙采用 $\Phi 500@350$ 搅拌桩，墙深17 m，墙总厚度15.00 m，肋墙厚0.85 m，肋墙净距0.90 m。城轨桥底下部分采用格栅式旋喷桩挡墙，旋喷桩采用 $\Phi 1000@850$ ，墙深17 m，墙总厚度15.00 m，肋墙厚1.85 m，肋墙净距1.70 m。在迎土侧旋喷桩间插入 $\Phi 48$ 钢管，长度为12 m，间距500

表1 各岩土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil

地层名称	含水率/%	重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	地质报告提供		实际计算取值	
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$
素填土		18.0	6.1 ^①	3.5 ^①	15	15
淤泥	63.2	15.9	10.1 ^② 10.2 ^③ 5.7 ^①	14.5 ^② 16.5 ^③ 3.3 ^①	7	6
淤泥质土	52.8	17.4	9.4 ^② 9.6 ^③	13.3 ^② 16.4 ^③	10	7

注：①为直接快剪参数平均值；②为饱和固结快剪参数平均值；③为饱和固结慢剪参数平均值。

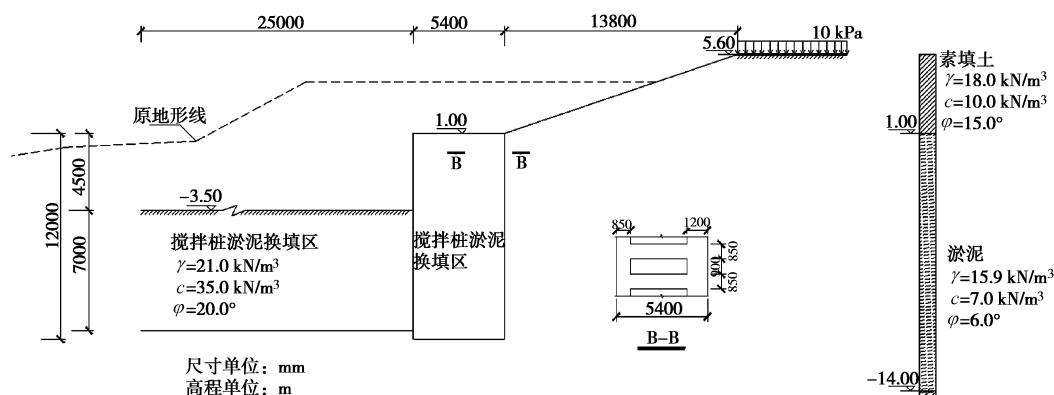


图3 外江连接段北侧的支护剖面图

Fig. 3 Outer connection section at north side of supporting section

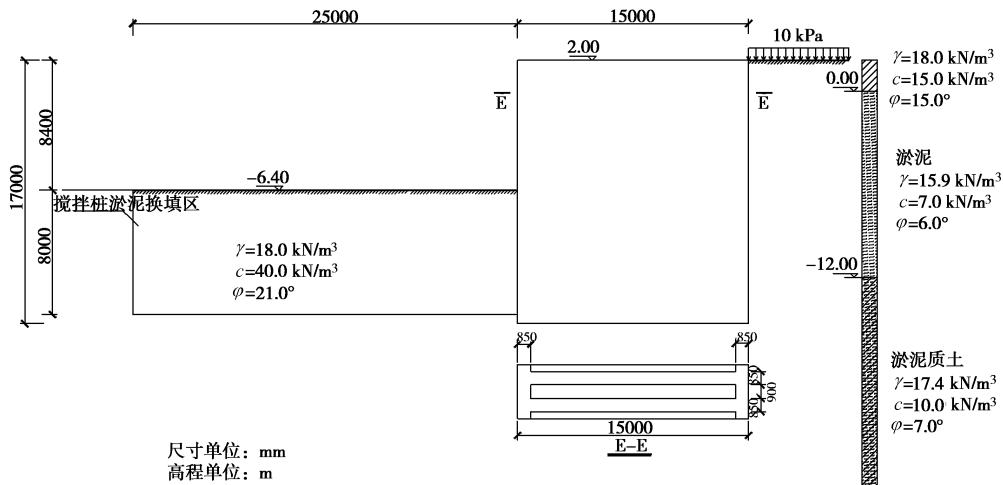


图 4 前池进水池北侧的支护剖面图

Fig. 4 Supporting section at north side of front pool

mm。同时，在挡墙墙顶施工砼盖板，盖板厚 400 mm，配筋双层Φ8@150，与钢管焊接。基坑底面用格栅式搅拌桩对河床淤泥进行置换，搅拌桩采用Φ500@350，桩长 8 m，置换率约为 63%，城轨桥底下部分采用格栅式旋喷桩对河床淤泥进行置换。

4 软基处理方案的分析

在确定采用水泥土挡墙和河床淤泥置换等措施对太澳高速公路及广珠城轨基础附近的开挖面进行支护加固后，又对上述处理方案进行计算分析。

4.1 支护结构内力的计算分析

支护结构的内力计算采用增量法^[3-4]，利用理正基坑软件进行计算，同时，对挡墙进行拉应力验算、压应力验算、抗倾覆稳定性验算、抗滑移稳定性验算及整体稳定验算。

外江连接段北侧侧壁支护结构的计算结果如图 5。

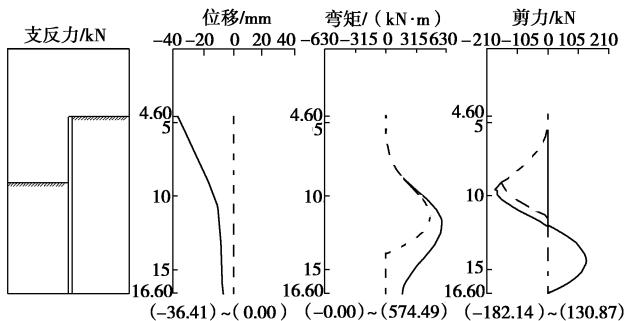


图 5 外江连接段北侧侧壁支护结构的计算结果

Fig. 5 Calculated results of supporting structures of outer connection

由图 5 可以看到，最大位移 $U_{\max}=36.4 \text{ mm}$ ，最大弯矩 $M_{\max}=574 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。搅拌桩挡墙各项验算均符合规范要求。整体稳定安全系数 $F_s=1.599>1.30$ ，满足规

范要求。

前池进水池北侧侧壁支护结构的计算结果图 6。

从图 6 可以看到，最大位移 $U_{\max}=40.6 \text{ mm}$ ，最大弯矩 $M_{\max}=3413 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。搅拌桩挡墙各项验算均符合规范要求。整体稳定安全系数 $F_s=1.706>1.30$ ，满足规范要求。

通过以上分析计算，工程两个重点部位的侧壁支护结构可以满足在深厚淤泥层的垂直开挖要求。

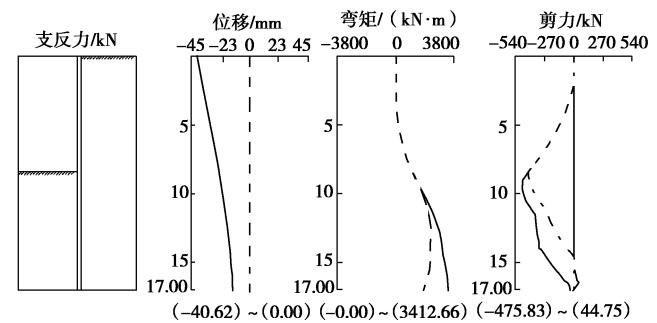


图 6 前池进水池北侧侧壁支护结构的计算结果

Fig. 6 Calculated results of supporting structures of front pool

4.2 高架桥桥墩的变形分析

太澳高速公路及广珠城轨高架桥桥墩基础的变形情况则利用有限元分析软件 ADINA 进行计算分析。先根据周边现状地形计算地层的初始应力场，在此基础上根据电排站开挖高程及基坑开挖支护形式以及太澳高速及广珠城轨的桩基布置，采用弹性模型，计算在支护条件下软土深开挖对太澳高速和广珠城轨桩基础的影响，计算中采用接触单元处理桩土接触问题，同时考虑了有限元网格划分的精度。计算参数见表 2，数字模型见图 7。

太澳高速公路计算结果中，“#17 工程桩水平位移最大，其最大水平位移为 9.0 mm，发生在桩顶处，最

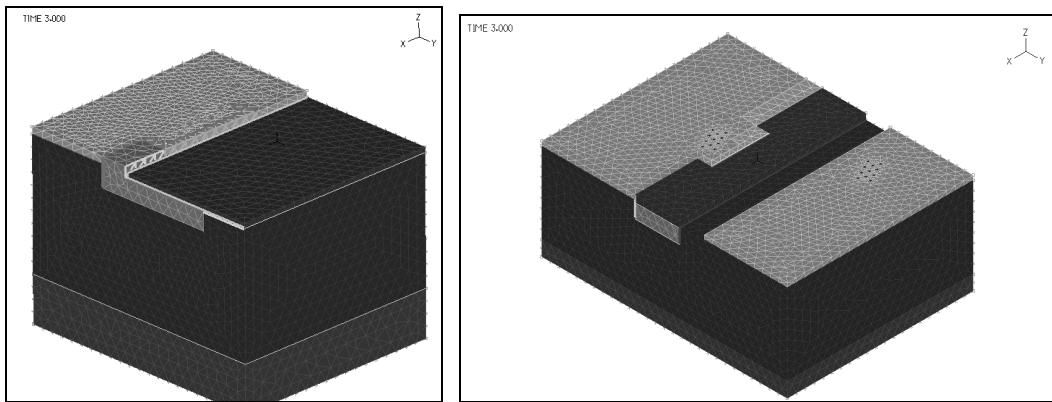


图 7 太澳高速高架桥及广珠城轨高架桥桥墩临近区域的有限元计算网格图

Fig. 7 Finite element meshes

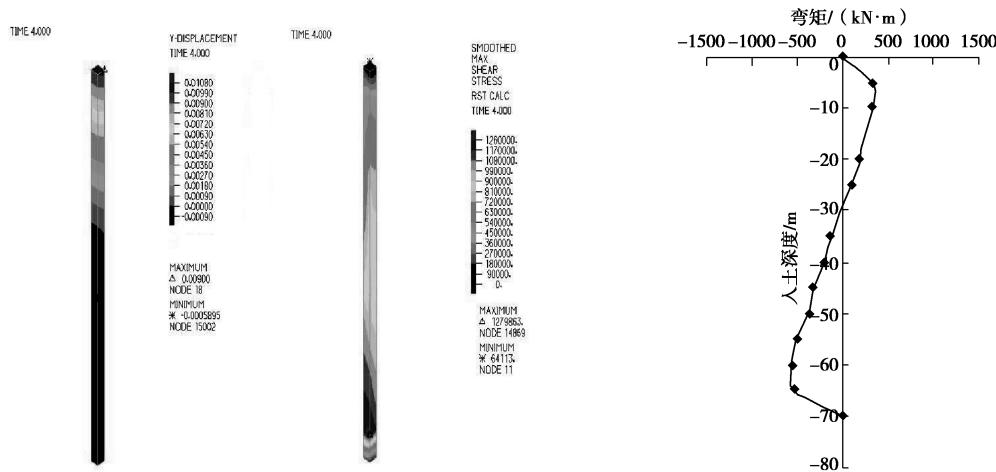


图 8 加固后太澳高速公路#17 桩水平位移、剪力及弯矩(注: #17 桩水平位移最大)

Fig. 8 Horizontal displacement, shearing force and bending moment of pile No. 17

表 2 有限元模型计算参数

Table 2 Finite element model of calculation parameters

项目	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	变形模量 /MPa
素填土	1800	0.30	15
淤泥及淤泥质土	1700	0.42	1
强风化粉砂岩	2000	0.30	100
旋喷桩加固区	2000	0.30	600
搅拌桩加固区	2000	0.30	60
桥墩桩基础	2500	0.30	30000

大弯矩为 572 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)。计算结果见图 8。计算中未考虑桩周旋喷桩或搅拌桩围护加固的作用, 实际位移会小于计算结果。太澳高速公路工程桩为钻孔灌注桩, 桩径 1800 mm, 桩长约 71~72 m, 入岩深度约为 15 m, 桩身砼为 C25, 每桩上部 18 m 部分主筋为 34 \varnothing 28, 下部主筋为 17 \varnothing 28, 则该桩下部设计抗弯强度为 2360 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)。结果表明, 经支护加固后, 太澳高速公路工程桩所受弯矩小于其允许抗弯强度, 可以满足要求。

广珠城轨计算结果中, 工程桩最大水平位移为

16.5 mm, 最大位移发生在高程约-18~-28 m 处, 桩顶位移为 8.0 mm。经计算, 群桩中最大弯矩为 445 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)。计算结果见图 9~11。计算中未考虑桩周旋喷桩或搅拌桩围护加固的作用, 实际位移会小于计算结果。广珠城轨工程桩为钻孔灌注桩, 桩径 1500 mm, 桩长 64~66 m, 入岩 10~12 m, 桩身砼为 C30, 每桩上部约 11 m 部分主筋配筋为 54 \varnothing 22, 下部主筋配筋为 27 \varnothing 22, 则该桩下部设计抗弯强度为 1950 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)。结果表明, 经支护加固后, 广珠城轨工程桩所受弯矩小于其允许抗弯强度, 可以满足要求。

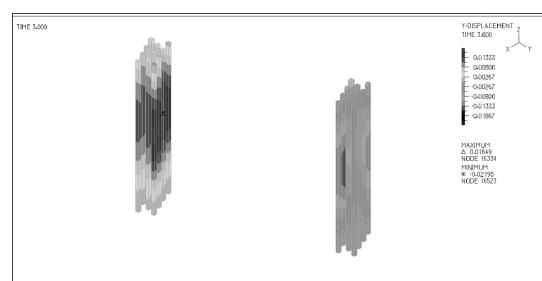


图 9 加固后的城轨桥墩工程桩水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of piles after reinforcement

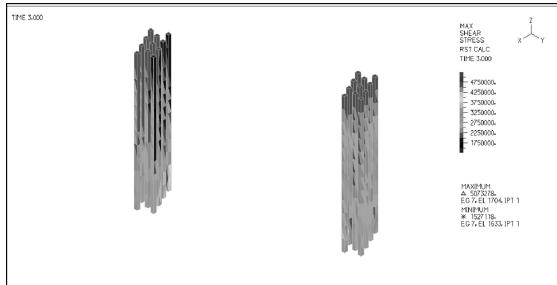


图 10 加固后的城轨桥墩工程桩剪力

Fig. 10 Shear of piles after reinforcement

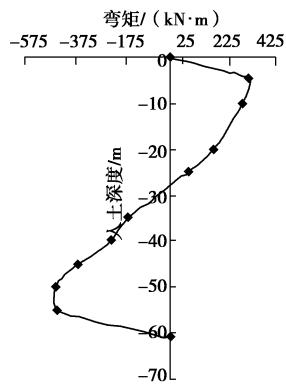


图 11 加固后的城轨桥墩工程桩弯矩

Fig. 11 Bending moment of piles after strengthening

5 施工过程中的监测

为确保支护结构和太澳高速、广珠城轨工程桥墩的安全, 在工程施工的同时展开监测工作。监测项目主要有测斜监测(监测支护结构在不同深度的位移), 位移监测及沉降监测。采用仪器为高精度测斜仪、全站仪及水准仪。从 2010 年 8 月进场展开监测工作, 至 2011 年 5 月, 工程的基坑底板监测工作基本完成。各重点部位观测点的观测结果如表 3~4 所示。

从上述观测结果可以看出, 支护结构位移值最大为 6.9 mm, 沉降值最大为 5.88 mm, 均小于设计、规范要求的控制值, 太澳高速桥墩的沉降量在 0.56~0.85 mm 之间, 位移量在 2.2~3.3 mm 之间, 广珠城轨桥墩的沉降量在 1.54~2.04 mm 之间, 位移量在 2.0~4.7 mm 之间, 均小于计算值。从支护结构不同深度位移监测结果看, 测斜仪测得深层位移最大值均不超过 10 mm。从基坑及邻近建筑物沉降测点的变形速率看, 当工程开挖至设计高程后, 各测点位移时间曲线趋于平缓, 支护结构处于相对稳定状态。这充分说明在搅拌桩支护挡墙的作用下, 工程中软土的开挖对周边环境的影响并不大。

本次监测到的变形量远小于分析计算时的计算值, 主要有以下原因: 设计时工期控制是以搅拌桩施工完工后达 28 d 龄期即开挖, 计算分析时搅拌桩强度

以搅拌桩 28 d 强度 1.0 MPa 计, 但在实际操作中, 由于渡汛要求, 业主计划有变, 搅拌桩施工完后过了一年才开挖, 搅拌桩强度比原先计算分析的 1.0 MPa 大了好几倍。因而支护结构开挖时总体强度比原先计算时高, 如以开挖时搅拌桩的实际强度再进行验算分析, 则各变形量、内力值应可大幅减小, 但因开挖前未再做检测, 未取得搅拌桩强度数据, 因而未再进行验算分析, 可留待以后再深入研究。

表 3 重要测点的观测结果

Table 3 Observed results at important measuring points mm

工程部位	测点位置	测点号	位移观测结果/mm	沉降观测结果/mm
外江连接段北侧	支护结构	D26	3.8	3.31
		D27	2.7	4.38
		D28	2.1	3.78
		D29	4.7	3.27
太澳高速公路桥墩	D31	D32	2.6	0.76
		D33	2.3	0.56
		D34	2.2	0.58
		D12	4.9	3.29
前池进水池北侧	支护结构	D13	3.4	3.98
		D14	6.9	4.52
		D15	4.5	5.88
		D17	4.7	1.73
广珠城轨桥墩	D18	D18	4.7	1.54
		D19	2.0	1.97
		D20	3.1	2.04

表 4 各测孔最终累计最大位移和最小位移深度

Table 4 Ultimate cumulative displacements and displacement depths of various measuring points

工程部位	测点号	方向	最大位移量/mm	最大位移深度/mm
前池进水池北侧	J1	A	7.4	-28.65
		B	5.2	-30.65
	J2	A	7.0	-16.3
		B	6.1	-21.8
外江连接段北侧	J3	A	8.4	-16.7
		B	5.0	-16.2
	J4	A	6.0	-9.1
		B	3.6	-9.1

6 结论

(1) 从监测结果看, 该工程两个处在深厚软土层上深开挖的部位变形均不大, 在施工过程中对其临近的重要建筑物影响也较小。这充分证明了该种在深厚软土层上利用搅拌桩挡墙进行深开挖垂直支护的方法

是有效可行的。

(2) 在工程施工过程中,在业主、设计、监理、施工单位各方的密切配合下,通过监测项目的实施,测量结果及时反馈并指导施工,调整施工方案,实现了信息化施工的目标,保证了工程施工的顺利、安全进行。

参考文献:

- [1] 广东省水利水电科学研究院. 大良逢沙电排站重建工程软基咨询报告[R]. 广州, 2009. (Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower. Daliang Fengsha pumping station reconstruction project soft base consulting report[R]. Guangzhou, 2009. (in Chinese))
- [2] 广东省水利水电科学研究所. 顺德大良逢沙电排站改建工程软土堤基处理咨询报告[R]. 广州, 2002. (Guangdong Reserch Institute of Water Resources and Hydropower. Daliang Fengsha pumping station rebuilding project of soft soil foundation treatment advisory report[R]. Guangzhou,
- 2002. (in Chinese))
- [3] 陆培炎. 横向荷载下土、桩共同作用的简化法[J]. 广东水电科技, 1991(1): 1 - 10. (LU Pei-yan. Lateral loading, pile soil interaction of the simplified calculation method[J]. Guangdong Science and Technology of Water and Electricity, 1991. (in Chinese))
- [4] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中多撑或多锚式地下连续墙的增量计算法[J]. 建筑结构, 1994(8): 28 - 31. (YANG Guang-hua, LU Pei-yan. In the excavation of deep foundation pit support much or anchored underground continuous wall incremental calculation method[J]. Building Structure, 1994(8): 28 - 31. (in Chinese))
- [5] 广东省水利水电科学研究院. 大良逢沙电排站重建工程基坑监测汇总报告[R]. 广州, 2011. (Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower. Daliang Fengsha pumping station reconstruction projec Foundation Pit Monitoring Report[R]. Guangzhou, 2011. (in Chinese)))

(本文责编 明经平)