



气动潜孔锤在港口超厚抛石层中 引孔沉桩的应用

张丽珍, 郭大维, 宓宝勇

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 气动潜孔锤钻孔具有施工速度快、功效高、质量可靠、性价比高, 以及设备占地面积小、绿色环保无泥浆等特点, 尤其适用于在超厚岩层的区域钻孔, 但在港口工程领域应用较少。某石化码头工程引堤管架基础工程采用传统的冲孔灌注桩方案, 施工效率非常低, 无法如期保质完成。创新性地引入长螺旋气动潜孔锤辅助 PHC 桩沉桩的施工工艺, 将原来的 29 个月施工时间缩短为 2.5 个月, 极大提高了沉桩效率, 满足工程总体进度要求; 同时降低材料费、施工费, 有效解决了工程难题, 保证工程顺利按期完工。

关键词: 潜孔锤; PHC 桩; 引孔沉桩; 超厚抛石层

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0227-09

Application of pneumatic DTH hammer in pile-sinking by guiding hole of ultra-thick riprap layer in port engineering

ZHANG Lizhen, GUO Dawei, MI Baoyong

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Pneumatic DTH (down the hole) hammer drilling has the characteristics of fast construction speed, high efficiency, reliable quality, high cost-effectiveness, small equipment footprint and green environmental protection without mud, especially suitable for drilling in areas with ultra-thick riprap layer, but it is less applied in the field of port engineering. The pipe rack foundation project on an embankment of a petrochemical terminal in a port project used the traditional punching and cast-in-situ pile scheme, which has very low construction efficiency and could not be completed as scheduled with quality. The construction process with long spiral pneumatic DTH hammer assisted PHC pile sinking is introduced innovatively, which greatly improves the efficiency of pile sinking, shortens the original 29 months construction time to 2.5 months, and ensures timely completion to meet the overall project schedule requirement. Simultaneously the technology reduces material and construction costs, and effectively solves engineering problems, ensuring smooth and timely completion of projects.

Keywords: pneumatic DTH hammer; PHC pile; pile-sinking by guiding hole; super thick riprap layer

某石化码头通过引堤结构与陆域相连, 引堤上部的管架基础为了减少不均匀沉降, 采用桩基结构。引堤采用抛石斜坡堤结构, 堤心石厚度超

过 16 m, 桩基施工难度极大, 采用传统的冲孔灌注桩效率非常低, 无法如期保质完成。气动潜孔锤施工速度快, 尤其适用于在超厚岩层的区域钻

收稿日期: 2024-01-17

作者简介: 张丽珍 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口海岸工程设计及管理。

孔。曹爱丽等^[1]采用高压风动潜孔锤完成在陆域电装置基础复杂地质条件下预应力高强度混凝土管桩(PHC 桩)的施工;程巨涛^[2]采用气动潜孔锤引孔技术解决建筑基础孤石地质 PHC 管桩沉桩问题;张亚雄等^[3]在某船厂船台桩基工程开山石厚填土场地中成功采用潜孔锤预钻孔后锤击沉桩。气动潜孔锤在港口工程中的应用较少,宋明智等^[4]在某码头工程的深厚填石地层中采用潜孔锤成功完成预应力管桩沉桩。本文引入长螺旋气动潜孔锤,并将原灌注桩改为小直径 PHC 桩方案,通过引孔完成了在超厚岩层中顺利沉桩,极大提高了沉桩效率,保证按期完工的同时降低了施工成本。

1 工程概况

1.1 引堤管廊架

某石化码头通过引堤与陆域连接,引堤总长 700 m,引堤结构已经完工。现需要在引堤路面上设置管架结构,用于放置工艺、给排水、电控、消防等管道。管架采用钢筋混凝土结构,包括普通管架和补偿平台管架两种类型。普通管架横向设 2 个支柱。每隔 100 m 左右设置 20 m×10 m (长×宽)补偿平台,每个补偿平台设 3 个排架,每个管架横向设 3 个支柱。引堤范围内管架共计 97 排,其中普通管架 76 排,补偿平台管架 21 排。引堤管架局部平面布置见图 1。

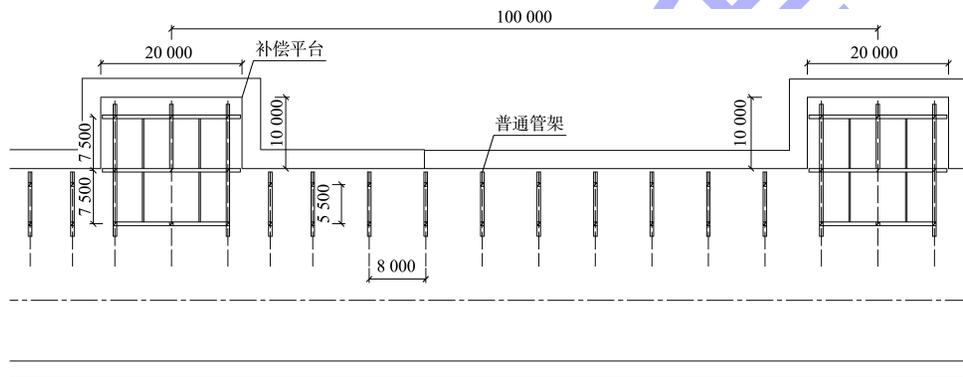


图 1 引堤管架局部平面布置 (单位: mm)

1.2 引堤结构及工程地质

已建引堤结构为抛石堤结构,堤心采用 300 kg 以下开山混合料,堤心厚度达 16 m。引堤

结构断面见图 2,本工程引堤范围内的主要原状土层性状见表 1。

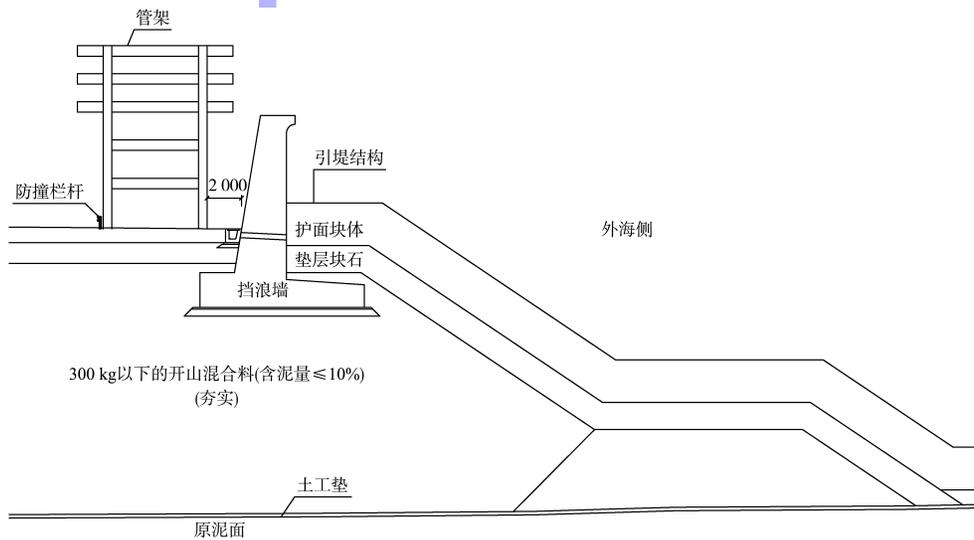


图 2 引堤结构断面 (单位: mm)

表 1 主要原状土层性状

地层编号及名称	土层性状描述	性质评价
①素填土	仅陆域区域分布, 为新近回填土	工程性质差
③ ₂ 砾砂夹珊瑚礁	实测标准贯入击数平均值为 12.4 击, 含较多珊瑚礁硬夹层	沉桩有一定困难
③ ₃ 淤泥混砂	标准贯入试验实测击数平均值为 3.2 击, 压缩性高, 承载力低	工程性质差
⑤ ₁ 强风化玄武岩	标准贯入试验实测击数平均值为 76.5 击, 承载力高	
⑤ ₂ 中风化玄武岩	承载力高	沉桩有一定困难
⑥ ₂ 凝灰岩	引堤区零星分布, 分布不稳定, 承载力高, 埋藏较深	
④ _夹 黏土、⑤ _夹 黏土、⑥ _夹 黏土	残积黏性土, 标准贯入试验实测击数平均值为 20.5~20.9 击, 承载力中等	
⑦粉质黏土	实测标准贯入击数平均值为 21.9 击, 压缩性中等, 承载力中等	
⑦ _中 中砂	零星分布, 标准贯入试验实测击数平均值为 25.8 击, 压缩性低, 承载力高	较好的桩基侧摩层
⑧粉质黏土	实测标准贯入击数平均值为 23.8 击, 压缩性中等, 承载力高	
⑧ _中 中砂	个别钻孔揭露该层, 压缩性低, 承载力高	
⑨粉质黏土	实测标准贯入击数平均值为 31.7 击, 压缩性中等, 承载力高	
⑨ _中 粉砂	部分区域分布, 实测标准贯入击数平均值为 35.2 击, 压缩性低, 承载力高	可作为桩端持力层
⑩粉质黏土	实测标准贯入击数平均值为 41.6 击, 压缩性中等-低, 承载力高	

引堤范围内的钻孔剖面见图 3。为了清楚表达地层分布, 将性质相似、分布连续的土体归为一类, 例如⑤、⑥层为一类, 均为岩层, 可能导致

沉桩困难; ⑦、⑧层以及夹(即④_夹、⑤_夹、⑥_夹)层为一类, 有一定的承载力, 为较好的桩基侧摩层; ⑨、⑩层为一类, 可作为桩端持力层。

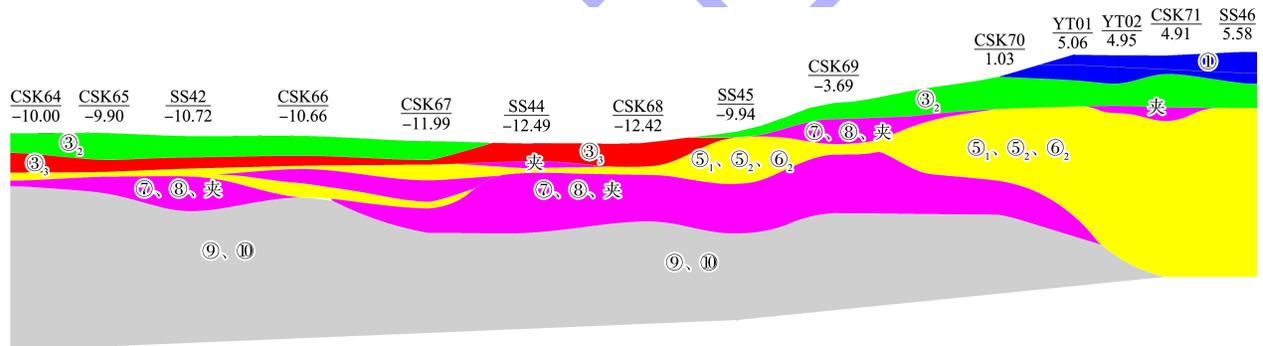


图 3 地质钻孔剖面 (单位: m)

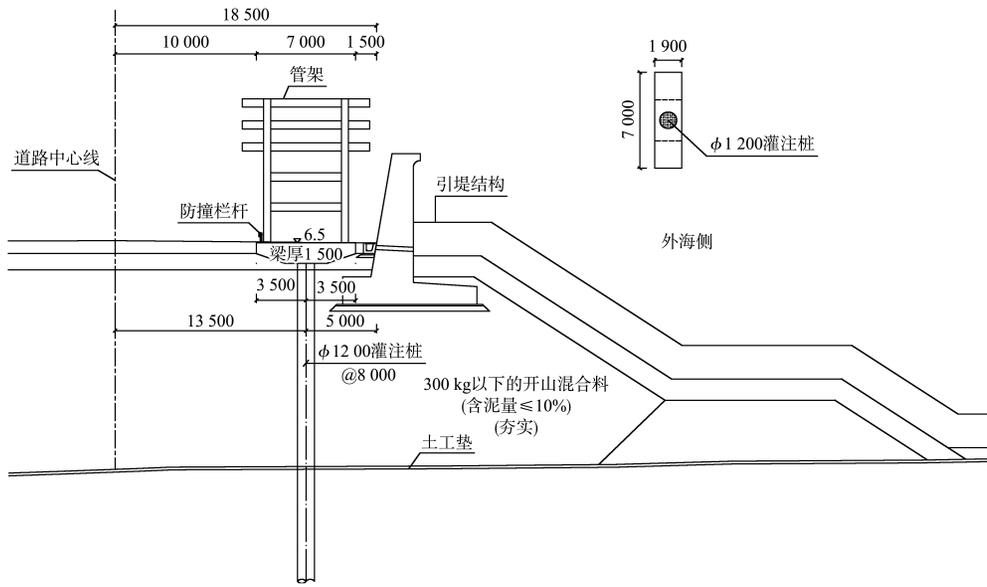
2 管架基础方案 1——冲孔灌注桩方案

2.1 设计方案

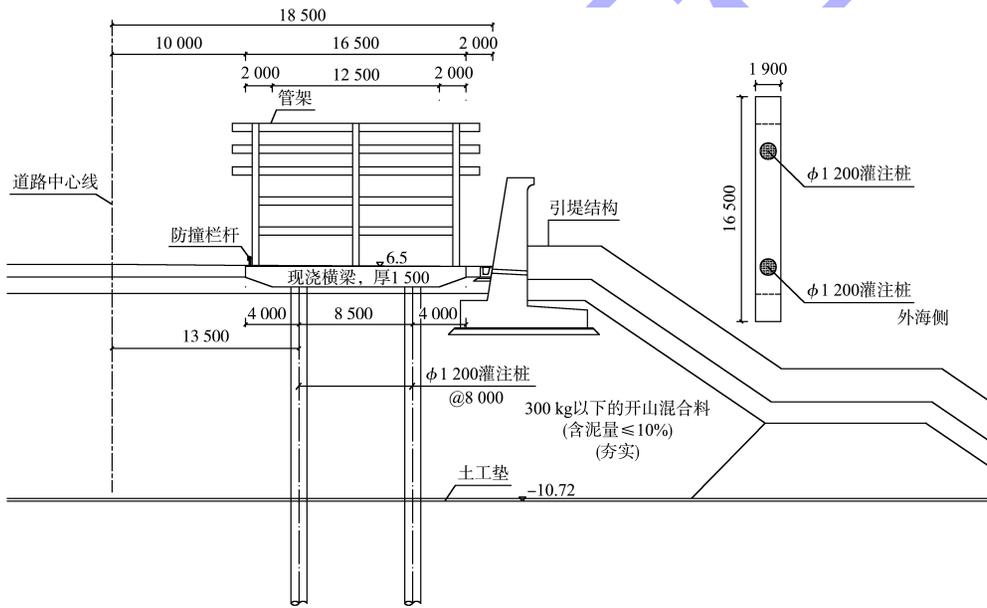
根据表 1 和图 3, 引堤局部存在③₃ 淤泥混砂软弱层, 该层压缩性高、承载力低。其中, 钻孔 SS44、CSK68 范围的淤泥混砂层为表层土, 在前期引堤工程施工前已挖除。而在钻孔 CSK64~CSK67 范围内, 由于表层存在较硬的砾砂夹珊瑚礁层, 施工时未进行处理, 而该段软弱层厚度为 2.5~5.0 m, 根据沉降理论计算, 该段引堤结构设计年限 50 a 的沉降量达到 0.5~0.7 m, 最终沉降量约 1.1 m。此外, 现有引堤结构实测沉降数据显示, 该段的沉降量明显大于其他区域, 无法满足

管架结构不均匀沉降的限制要求。

因此, 钻孔 CSK64~CSK67 范围内的管架基础考虑采用桩基结构。桩基础须穿透引堤抛石堤心, 且原状土层中存在砾砂夹珊瑚礁、玄武岩、凝灰岩等, 打入桩沉桩困难, 因此方案 1 采用对地基适应能力较强、应用广泛的灌注桩方案。钻孔 CSK64~CSK67 范围内的管架共计 42 排, 其中普通管架 33 排, 补偿平台管架 9 排。单个管架条形基础梁采用钢筋混凝土结构。基桩采用 $\phi 1200$ mm 灌注桩, 每个普通管架基础梁中部设 1 根直桩, 补偿平台每个管架设 2 根, 共设置 51 根灌注桩。灌注桩均以⑨粉质黏土层为持力层, 桩基底高程-40 m, 断面见图 4。



a) 普通管架



b) 补偿管架

图4 灌注桩方案管架基础断面 (尺寸: mm; 高程: m)

2.2 施工方案

冲孔灌注桩能穿透旧基础、大孤石等障碍物，适用于人工填石层^[5]，是港口工程中岩石地基常

用的桩基类型。本工程地层复杂，因此采用冲孔桩机施工，主要施工工艺流程见图5。

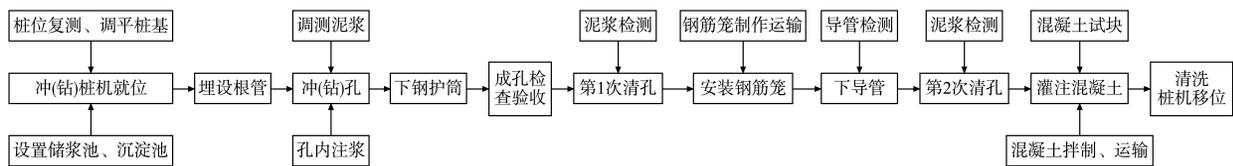


图5 灌注桩方案施工工艺流程

由于引堤抛石层较厚、石块粒径不均匀, 导致灌注桩施工难度很大。在试验段首根灌注桩施工时, 冲孔锤在抛石层中的施工效率约 1.5 m/d。由此预估完成单根灌注桩所需时间为: 现有引堤堤心石厚 16.5 m 左右, 冲孔穿透抛石层时间约 11 d; 进入原泥面后还需要冲孔约 30 m, 时间约 4 d, 从而单根桩的冲孔时间约 15 d。再考虑清孔验收、吊装钢筋笼、灌注混凝土等后续工序需要 2 d, 故完成 1 根灌注桩至少需要 17 d, 施工效率非常低, 远远无法满足工程总体进度要求。

3 管架基础方案 2——潜孔锤引孔+PHC 桩方案

3.1 气动潜孔锤

为了解决工程中复杂、硬岩地层钻进的难题, 国外于 20 世纪 30 年代发明了气动潜孔锤^[6], 并应用于采矿业。由于气动锤成功解决了工程中的岩石钻进难题, 可以提高效率、降低成本, 在各领域有广泛应用。国内于 1958 年开始研制气动锤, 目前在建筑领域已有较多应用经验, 800 mm 以内的潜孔钻机应用技术比较成熟, 例如陈家旺等^[7]曾将潜孔锤应用于海底嵌岩锚链灌注桩, 桩径 800 mm; 谭现锋等^[8]将潜孔锤与旋挖钻机组合应用于嵌岩桩的施工。虽然气动潜孔锤辅助 PHC 桩沉桩已在建筑等领域得到应用, 但穿透厚度达 16.5 m 抛石层的情况在港口领域比较罕见。

气动潜孔锤工作基本原理是通过不断改变高压空气的进气和排气方向, 使得冲击器内的活塞进行高频往复运动, 将活塞运动产生的动能转变成钻头的冲击功, 钻头持续不断的冲击将孔底的岩石破碎成岩屑。空压机制造出来的压缩空气同时可以充当洗井介质, 将岩屑吹离孔底, 排出孔口。

与普通的冲击锤相比, 气动潜孔锤的优点有: 1) 施工速度快、功效高, 尤其是在超厚岩层的区域钻孔, 钻进速度快, 并易于判断入岩深度; 2) 施工质量可靠, 成孔无扩径、无缩径; 3) 成孔时不需要用水, 也无泥浆, 极大减少了材料的种类、设备的数量, 解决了场地面积紧张的问题; 4) 施工节能、绿色环保, 无泥浆产生, 改善了施工环境, 较好地解决了环境污染问题。

3.2 设计方案

为了提高管架桩基施工效率, 经过多方研究与讨论, 决定将原灌注桩改为小直径 PHC 桩方案, 并引入气动潜孔锤引孔施工技术。

根据施工设备配置能力以及气动锤的市场情况, 选用应用最广泛、实际经验丰富的 $\phi 550$ mm 凿岩潜孔锤, 桩基选用 $\phi 500$ mm-125B 型 PHC 桩。与灌注桩相比, PHC 桩强度高, 无需设置泥浆池、调配泥浆, 直接采购成品节约了成桩时间。

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[9]进行桩基承载力计算确定 PHC 桩方案桩基布置。对于普通管架, 拟采用 4 根 $\phi 500$ mm PHC 桩替换原来的 1 根 $\phi 1200$ mm 灌注桩; 对于补偿管架, 由于管架柱脚位置施工空间有限, 无法钻孔沉桩, 因此改用墩台结构, 将 PHC 桩布置在墩台中部, 保证桩基到外侧挡墙的距离满足施工空间要求, 每个补偿平台共设置 20 根 $\phi 500$ mm PHC 桩, 因此共设置 192 根 PHC 桩。

经过初步评估, 4 根 $\phi 500$ mm PHC 桩与 1 根 $\phi 1200$ mm 灌注桩相比, 桩周长(侧面积)增大为 1.67 倍, 而截面积(桩底面积)减小为原来的 69%, 即增大桩侧摩阻力、减小桩端阻力, 总体上承载力与原灌注桩方案相当, 且由于桩截面积减小, 极大节约了混凝土用量。PHC 桩仍以⑨粉质黏土层为持力层, 桩基底高程-40 m, 方案断面见图 6。

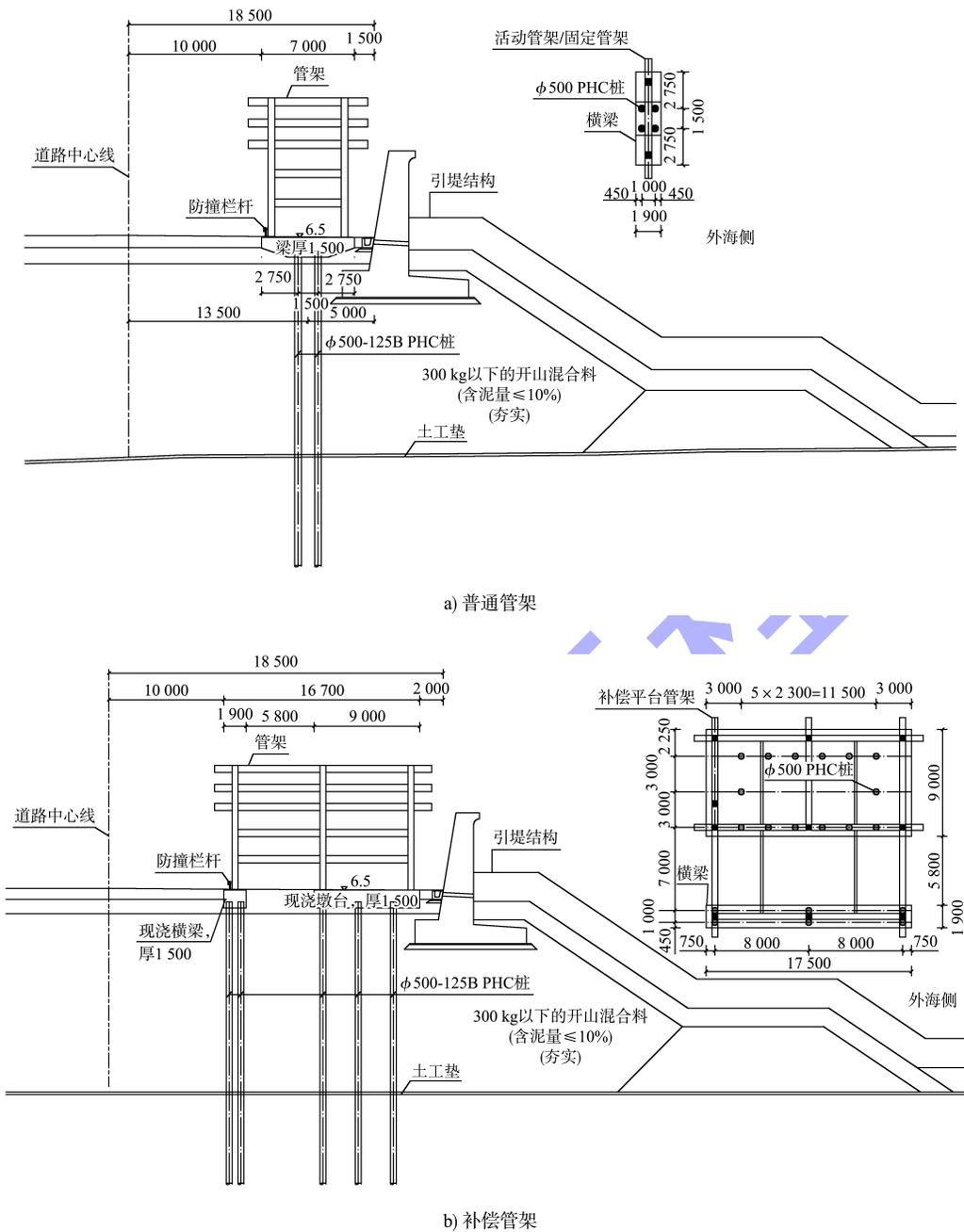


图6 PHC 桩方案管架基础断面 (尺寸: mm; 高程: m)

3.3 施工方案

采用气动潜孔锤进行 PHC 桩施工的主要施工工艺流程见图 7, 主要施工设备见表 2。

3.3.1 施工工艺流程及施工设备

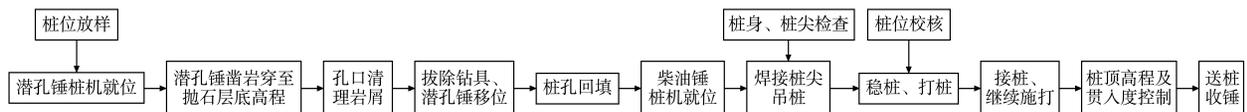


图7 PHC 桩方案施工工艺流程

表 2 主要施工设备

设备名称	规格型号	数量
凿岩潜孔锤	φ550 mm	1 台
挖掘机	PC200	1 台
风管	φ180 mm	100 m
步履(履带)式长螺旋凿岩机	JZB90	1 台
空气压缩机	25 或 30 m ³	2 台
柴油锤	D-80	1 台
其他焊接、测量、定位、运输设备	-	1 项

3.3.2 施工工艺和关键技术

1) 长螺旋潜孔锤桩机就位。将潜孔锤钻头对准桩位, 保持桩尖与桩位中心重合, 采用液压系统调平, 确保始终保持桩机水平。

2) 潜孔锤凿岩。施工段的地质分布, ⑤、⑥层岩层为夹层, 比较薄, 埋深较深, 而③₂ 砾砂夹珊瑚礁土层标贯击数较低, 因此均考虑 PHC 直接锤击沉桩, 潜孔锤仅凿岩至抛石层底高程。经过试验段施工, 根据抛石层底高程确定凿岩深度是合理的。施工时, 下放潜孔锤, 启动空压机, 进行潜孔锤跟管钻进。

3) 孔口清理岩屑。潜孔锤凿岩过程中, 空压机产生的压缩空气兼作洗孔介质, 将潜孔锤破碎的岩屑挟出孔内并堆积在孔口, 现场不间断进行孔口岩渣清理。当确定终孔时, 将潜孔锤钻头上

提 5 cm, 启动空压机 3 min, 将孔底岩屑清理干净。

4) 拔除钻具、潜孔锤机移位、孔内回填。拔出钻具时, 空压机正常工作, 边锤击、边旋转、边上拔, 使孔内岩屑顺利排出。引孔完成后, 为防止抛石层塌孔而造成管桩无法施打, 应及时回填砂。

5) 打桩设备就位。采用 D-80 柴油锤, 利用桩机自身的行走, 调整桩架使之处于垂直平稳状态。

6) 焊接桩尖、吊桩。吊桩前先将十字形桩尖满焊在管桩底部的端口上。采用两点起吊。喂桩时桩机卷筒起吊, 桩顶与桩帽对接, 将桩轻轻喂入桩帽内, 以防桩断裂。

7) 稳桩、打桩、接桩。本工程 PHC 桩为 3 段, 须进行接桩。为了提高施工效率, 接头优先采用机械啮合连接, 当机械啮合有困难时采用焊接。接桩时先将下节桩锤击进入至桩顶距离地面 1.0~1.5 m 处, 起吊上节桩, 使上、下桩对中, 调好垂直度。安装时先拆除桩端板螺栓孔中的保护块, 将连接销旋入螺栓孔内, 各连接销同时插入连接槽内。连接销、连接槽、桩端板周边涂抹或注入沥青涂料。具体锤击沉桩工艺流程见图 8。

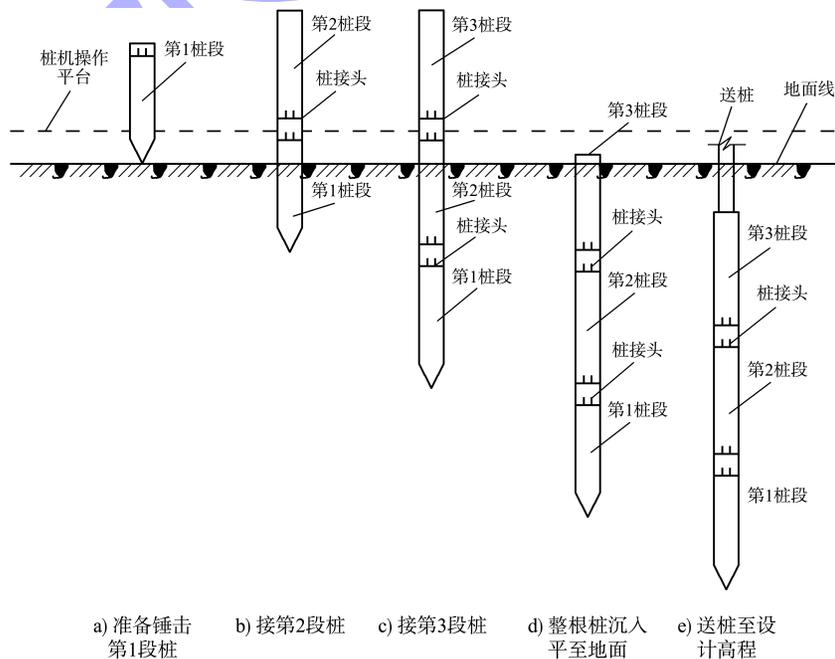


图 8 锤击沉桩工艺流程

8) 送桩、停打标准。以最后 3 阵的贯入度为主,有效桩长控制为辅,最后 3 阵(10 击/阵)的贯入度均不大于 50 mm, D-80 柴油锤二档能量终锤。

在施工前预估工期,气动潜孔锤引孔效率约 4 m/h,抛石层厚 16.5 m,引孔 4 根 PHC 桩深度共 66 m,用时 16.5 h 即大约 2 个台班即可完成 3 个普通排架,另外 PHC 桩锤击沉桩预估 8 根桩/d。综合考虑,预计 2 d 左右即可完成 1 个排架的施工,用时仅为原灌注桩的 1/8.5,可以极大节约工期,满足总体施工进度要求。

3.4 方案 2 应用效果

实际施工中,日均沉桩约 2.56 根。由于每根桩都由 3 个管节组成,管节起吊、对齐、焊接约占总施工时间的 50%。工程管架基础 PHC 桩共计 192 根,全部 PHC 桩实际施工完成时间约为 2.5 个月,满足了时间节点要求,保证工程顺利完工。

此外,由于潜孔锤只引孔至引堤堤心石底部,

地层中存在厚薄不均的玄武岩夹层。PHC 桩进入岩层夹层时易发生断桩现象。本工程实际施工时共出现 2 次断桩情况,须在旁边进行补桩。补桩位置见图 9。

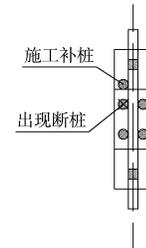


图 9 补桩位置

4 方案综合比较

本工程先后采用了灌注桩方案和 PHC 方案,二者综合比较见表 3(表中费用以 JTS/T 276-1—2019《沿海港口水工建筑工程定额》^[10]为依据进行测算)。可以看出,气动潜孔锤引孔 PHC 桩沉桩方案的材料费、施工费、桩基检测费等均比较低,且施工效率高。

表 3 灌注桩方案和 PHC 方案综合比较

方案	材料费用	施工费用	桩基检测费用		
灌注桩+冲孔设备方案	材料量:φ1 200 mm 灌注桩单根长 45 m,共设置 51 根; 材料费:合计约 597 万元	施工包括冲孔、钢护筒、桩头处理等; 施工费:合计约 785 万元	灌注桩须进行钻芯取样检测、超声波检测等; 检测费:合计约 54 万元		
PHC 桩+气动潜孔锤方案	材料量:单根长 45.5 m,共设置 192 根 φ500 mm PHC 桩; 材料费:合计约 300 万元	施工包括冲孔、孔内填砂、桩尖、打桩接桩、桩头处理等; 施工费:合计约 321 万元	PHC 桩须进行高应变、低应变动力检测等; 检测费:合计约 15 万元		
方案	设备入岩效率	桩基施工效率	施工工期	其他优点	其他缺点
灌注桩+冲孔设备方案	冲孔锤冲孔效率约 1.5 m/d	须进行清孔验收、吊装钢筋笼、灌注混凝土等工序,预计单根桩需要 2 d	预计完成 1 根灌注桩至少需 17 d,完成全部灌注桩施工预计需大约 29 个月,无法满足整体进度要求	桩基一次成型,整体性较好;对不同土层适应性较好,垂直度易控制	桩身强度较低,抗弯性能较差;施工工序复杂;质量可控性较差,已发生塌孔、缩孔、漏浆等
PHC 桩+气动潜孔锤方案	气动潜孔锤引孔效率约 4 m/h,效率非常高	采购 PHC 桩成品直接沉桩,锤击沉桩约 8 根桩/d	日均沉桩约 2.56 根,全部 PHC 桩施工完成时间用时约为 2.5 个月,保证了施工按期完成	无需设置泥浆池、配制泥浆,节约施工场地;与灌注桩比,预应力管桩桩身强度较高	每根桩都由 3 个管节组成,管节之间的机械连接,起吊、对齐等都需要占用一定的施工时间;接头质量是桩基的薄弱点,影响整个桩基的施工质量;进入土层硬度差异较大,桩基垂直度较难控制;进入岩层夹层时易发生断桩现象

5 结论

1) 引入长螺旋气动潜孔锤辅助 PHC 桩沉桩的施工工艺,极大提高了沉桩效率,将施工工期

从原来的 29 个月缩减为 2.5 个月,保证了按期完工;有效减少了材料费、施工费、桩基检测费,降低了施工成本,有极大的经济效益;与灌注桩

相比, PHC 桩无需设置泥浆池、配制泥浆, 节约施工场地, 且桩身强度较高, 桩基质量有保障。

2) 虽然气动潜孔锤引孔方法实际应用效果很好, 但也存在一些需要改进的地方。例如, 在沉桩时需要严格控制垂直度, 减少遇到特殊地质情况时桩发生倾斜而打碎或打断的风险。在实际应用中, 需要严格遵守操作规范和安全措施, 不断进行技术改进和完善, 以提高操作效率和工程质量。

参考文献:

- [1] 曹爱丽, 宋辉. 预应力 PHC 桩在复杂地质条件下的施工[C] //中国电机工程学会. “以电力土建科技创新推进可持续发展”学术交流会技术创新论文集. 北京: 中国电机工程学会, 2005: 274-276.
- [2] 程巨涛. 浅析孤石地质静压 PHC 管桩施工技术[J]. 福建建材, 2020(9): 58-59.
- [3] 张亚雄, 徐彬, 王燕, 等. 潜孔锤预钻孔后锤击沉桩法在开山石厚填土场地中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 89-94.
- [4] 宋明智, 尚增弟, 于芳, 等. 填石层超深预应力管桩综合施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(13): 23-25.
- [5] 徐维钧. 桩基施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 唐俊, 刘权萍, 严辉容, 等. 空气锤发展和应用研究[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(11): 16-19.
- [7] 陈家旺, 殷琨, 彭视明, 等. 大直径潜孔锤在海底嵌岩锚链灌注桩工程中的应用[J]. 施工技术, 2007, 36(1): 86-88.
- [8] 谭现锋, 朱学顺, 胡克祯, 等. 潜孔锤旋挖钻机组合在基岩桩施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(7): 22-23, 26.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [10] 交通运输部水运局, 交通运输部水运工程造价定额中心. 沿海港口水工建筑工程定额: JTS/T 276-1—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [11] 张芝永, 员鹏, 吴修广, 等. 移动射流冲刷数值模拟研究[C]//吴有生, 颜开, 孙宝江. 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2014: 580-585.
- [12] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 长江航道规划设计研究院. 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [13] WESTRICH B, KOBUS H. Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets [C]// State Hydraulic Works of Turkey. The proceedings of research and practice in the water environment. Istanbul: State Hydraulic Works of Turkey, 1973: 91-98.

(本文编辑 王璁)

(上接第 214 页)

- [6] 顾磊, 倪雁, 黄佳丽, 等. 平面淹没射流垂直冲刷泥沙试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 38-43.
- [7] YEH P H, CHANG K A, HENRIKSEN J, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets[J]. Ocean engineering, 2009, 36(3/4): 248-255.
- [8] 白志刚, 孟然, 唐立志, 等. 喷射式水下挖沟机冲刷试验[J]. 中国海洋平台, 2011, 26(6): 35-38.
- [9] 孟然. 海底管道后挖沟技术实验研究及数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] 高亚平, 王玉川, 杨建国, 等. 水下移动射流冲刷沙床的试验研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(5): 28-35.

(本文编辑 王璁)