



水下深层水泥搅拌桩在直立式防波堤 深厚软土地基加固中的应用*

陈丽琴, 唐云, 姚祎雯

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510290)

摘要: 针对直立式防波堤下深厚软土地基可能产生的沉降较大和失稳问题, 依托某场地软土深厚的直立式防波堤工程, 结合自然条件、结构安全使用要求及造价和工期限制, 对地基处理方式选取、水泥搅拌桩的布置形式、桩径、置换率、处理深度及施工技术要点进行论述。采用理论分析与工程经验结合的方法, 得出在合理控制各关键参数和采取合适的措施提高施工质量的前提下, 直立式防波堤下深厚软土地基采用支撑型格栅状小直径水泥搅拌桩结合柔性垫层的处理方式是可行且相对经济、合理的。

关键词: 水下水泥搅拌桩; 直立式防波堤; 深厚软土; 地基加固

中图分类号: U653.4; U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0307-05

Application of underwater deep cement mixing pile in deep soft foundation improvement of vertical breakwater

CHEN Liqin, TANG Yun, YAO Yiwen

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

Abstract: In response to the potential large settlement and instability issues of deep soft soil foundation under the vertical breakwater, based on a certain vertical breakwater project with deep soft soil ground, combined with natural conditions, structural safety requirements, cost and construction period limitations, we discuss the selection of foundation treatment methods, the layout, pile diameter, replacement rate, depth of the cement mixing pile, and construction technology key points. By the method of combining theoretical analysis with engineering experience, it is concluded that under the premise of reasonable control of key parameters and taking appropriate measures to improve construction quality, the improvement method of supporting grid-shaped small-diameter cement mixing piles combined with flexible cushion layers is feasible and relatively economically reasonable for the deep soft soil foundation under the vertical breakwater.

Keywords: underwater cement mixing pile; vertical breakwater; deep soft soil; foundation improvement

水下深层水泥搅拌桩复合地基因其施工效率高、技术经济性显著等优点, 在水运工程的码头、护岸、沉管隧道、防波堤和船台滑道等基础的建设中得到了广泛应用。直立式防波堤因承受较大

的水平波浪力, 其对地基的承载力、沉降和整体稳定均有较高要求。当直立式防波堤位于深厚软土地基上时, 地基加固费用将近防波堤工程总造价的一半, 此时采用水下深层水泥搅拌桩进行深

收稿日期: 2024-05-08

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 陈丽琴(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

厚软土地基加固具有明显优势。本文结合某直立式防波堤工程,对水下深层水泥搅拌桩在该场地的适用性、设计参数的选择、设计和施工技术要点进行分析,验证采用水下深层水泥搅拌桩加固直立式防波堤深厚软土地基的可行性和合理性,并总结水下深层水泥搅拌桩设计和施工中的技术要点,为类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 地质条件

某直立式防波堤工程场地地层主要为淤泥、淤泥质土、黏土、粉质黏土、粉细砂、中砂-粗砂-砾砂、卵石、残积土、风化岩等。场地范围内上

部普遍分布的软弱土层为②₁淤泥-淤泥质土、②₂淤泥质土,具有天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、承载力低、灵敏度高等特点。防波堤区域钻孔大多揭示有厚度1~6 m的浅层夹砂层②_{4,1}粉细砂,松散-稍密,标贯击数多为4~17击,属软弱土,具有一定的承载能力,但为可液化砂层,本场地地基液化等级综合评定为中等液化,局部严重液化。浅表部分布的淤泥土层、淤泥质土层、液化砂层均为拟建工程的主要不良地基土层,土层底高程为-31~-20 m,总厚度为10~23 m。因此,应注意其在上覆荷载作用下可能产生的沉降和失稳等问题。各土层主要物理力学指标见表1。

表1 土层主要物理力学指标

土体名称	含水率 w/%	湿密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比 e	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	压缩 模量/ MPa	快剪		固结快剪		有机质 含量/ %
							黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	
② ₁ 淤泥-淤泥质土	59.6	1.65	1.626	19.4	1.77	1.909	8.0	2.0	6.7	16.7	2.57
② ₂ 淤泥质土	43.3	1.76	1.192	14.8	1.49	2.723	12.6	4.6	9.3	18.7	2.13
② ₃ 黏土-粉质黏土	36.4	1.85	1.022	14.8	0.99	5.066	12.5	6.4	10.9	16.9	1.74
② _{4,1} 粉细砂	-	1.90	-	-	-	-	-	25.2	-	-	-
③ ₃ 中砂-粗砂-砾砂	-	1.85	-	-	-	-	-	33.3	-	-	-

因此,须采取适当方式对本场地淤泥、淤泥质土、液化砂层进行加固或开挖换填后,方可作为上部结构的基础,确保拟建防波堤在施工期和使用期的安全和稳定,满足承载力及变形要求;或采用桩基、插入式大圆筒等结构穿透软弱土层至良好持力层。

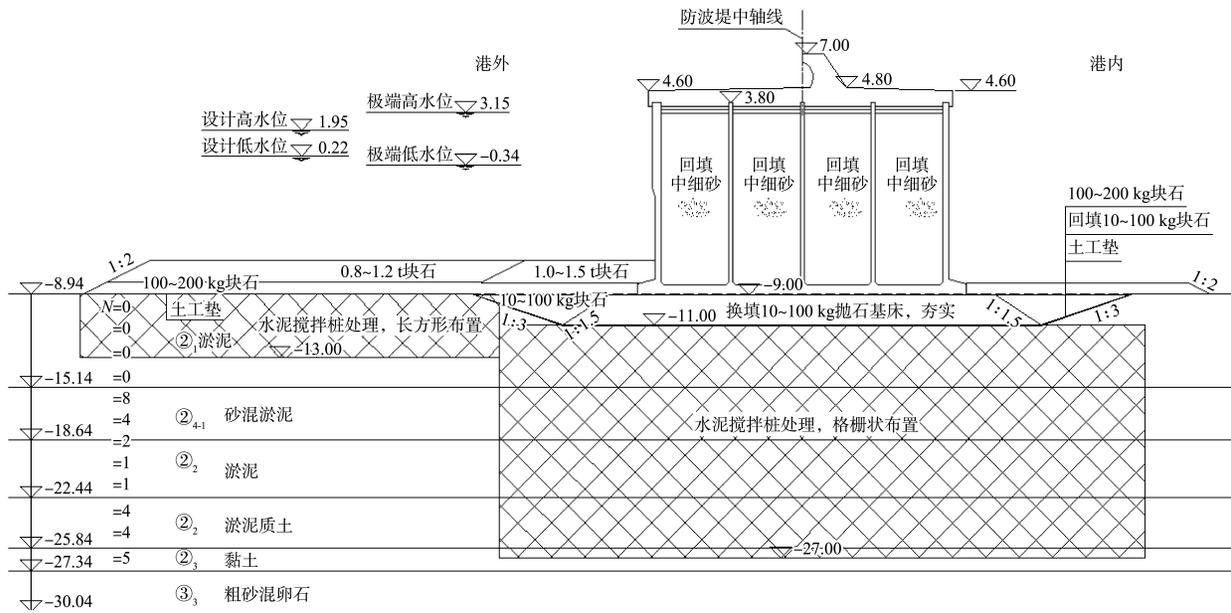
1.2 设计方案

对防波堤的堤身结构方案和地基处理方案进行综合分析。沉箱直立堤结构具有石料用量较少、造价受石料市场影响小、施工速度较快、工程造价较低等优点,水泥搅拌桩地基加固方案具有开挖量小、施工效率高、对周边生态环境影响相对较小、地基处理费用相对较低(比开挖换填块石方案低约32%,比挤密砂桩加固方案低约25%)等优点,故

防波堤采用沉箱直立堤结构,软土地基采用水下深层水泥搅拌桩加固。防波堤断面见图1。

直立堤身为预制沉箱。沉箱内回填中细砂,沉箱上现浇胸墙及挡浪墙,沉箱下设置10~100 kg块石基床。港外侧设0.8~1.2 t块石护底,靠近箱体处护底块石适当加大,其下抛填垫层块石并铺设1层土工垫;港内侧设100~200 kg块石护底,其下铺设1层土工垫。

防波堤区淤泥及淤泥质土层较厚,为保证结构稳定,采用水泥搅拌桩加固地基,沉箱下水泥搅拌桩采用格栅状布置,置换率约为56%。港外侧护底块石下水泥搅拌桩采用方形布置,置换率约为16%。地基处理之后,开挖基槽至-11 m,再在其上铺设土工格栅并抛填块石基床。



注: N 为标贯击数。

图 1 防波堤断面 (尺寸: mm; 高程 m)

2 水下深层水泥搅拌桩设计

2.1 适用性

水下深层水泥搅拌桩法是采用深层搅拌机将水泥浆等材料与水下地基土就地强制搅拌, 经过物理和化学反应, 形成具有一定强度的竖向增强体, 与原地基土一起构成复合地基。因其属于物理化学加固方法, 故该法有特殊的适用性^[1]。

图 1 的②₁ 淤泥、②₂ 淤泥质土均属于正常固结土; ②₃ 黏性土地基承载力标准值为 95 kPa, 塑

性指数最大为 19.4; 地基土的含水率在 30%~60%, 有机质含量最大值为 2.57%, 不属于泥炭土, pH 值大于 7, 地下水无侵蚀性。因此, 水泥搅拌桩法适用于该工程深厚软土地基加固处理。

2.2 布置形式

水泥搅拌桩的布置一般根据工程地质条件、上部结构形式及对地基承载力、沉降和整体稳定的要求, 可采用柱状、壁状、格栅状、块状等加固形式^[2], 见图 2。

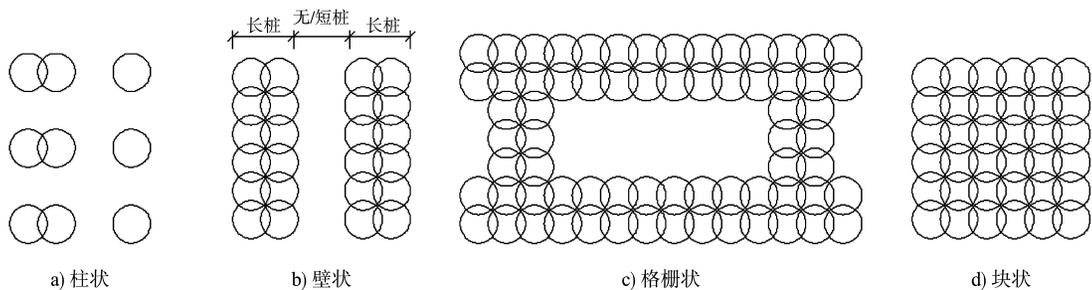


图 2 水泥搅拌桩布置形式

一般承受较大水平荷载、对地基承载力要求较高的建筑物, 适宜采用壁状、格栅状、块状加固形式。对地基承载力要求较低、承受较小水平荷载的建筑物可采用柱状加固形式。目前国内重力式码头和护岸、接岸挡墙下主要是采用支承型

块状^[3]和壁状^[4]加固形式。部分护岸和接岸挡墙的软土地基加固采用支撑型格栅状加固形式^[5]。沉管隧道、斜坡式结构多采用柱状加固形式^[6-7]。

本工程防波堤身地基处理费用大, 占工程总投资比例高。为降低造价, 堤身下水泥搅拌桩采

用格栅状布置。同时,为确保结构安全,尽量减小格栅间距,搅拌桩采用1 m以下直径(同样置换率的情况下,桩径越大,格栅间距越大)。而港外侧护底块石对地基承载力要求较低,其下水泥搅拌桩采用方形柱状布置。

2.3 复合地基置换率和处理深度

直立式防波堤下深层水泥搅拌桩复合地基的置换率和处理深度主要根据结构对地基承载力、沉降和整体稳定性的要求确定。其中沉箱结构断面的平均沉降量不宜超过350 mm^[8]。为分析其合理性,对本工程直立式防波堤断面不同地基处理深度和置换率的整体稳定和沉降进行计算,结果见表2。

表2 直立式防波堤结构不同地基处理深度和置换率整体稳定和沉降计算结果

搅拌桩 置换率/ %	搅拌桩处 理底高程/ m	整体稳定 抗力分项 系数	沉降/ m	最危险滑 弧情况
56	-26.0	1.202	0.19	从复合地基加固区穿过
56	-25.0	1.202	0.28	从复合地基加固区穿过
56	-24.0	1.180	0.33	从加固区和下卧层穿过
56	-23.0	1.064	0.39	从下卧层穿过
50	-25.0	1.105	0.30	从复合地基加固区穿过
61	-25.0	1.282	0.27	从复合地基加固区穿过

由表2可知,从整体稳定性角度看,如加固后最危险滑弧从复合地基加固区穿过,提高复合地基置换率或桩体强度是提高地基整体稳定性的主要途径;如加固后最危险滑弧从复合地基加固区下卧层穿过,最有效的办法是增大水泥搅拌桩的处理深度。为提高防波堤的整体稳定性,水泥搅拌桩的处理深度应深于加固后最危险滑弧以下至少2 m。

从沉降角度看,减小深厚软土地基中复合地基总沉降量的主要途径是增大水泥搅拌桩的处理深度。当水泥搅拌桩桩端穿越软弱土层到达承载力相对较高的土层时,有利于控制复合地基沉降。

水泥搅拌桩复合地基承载力特征值可按式估算^[9]:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{sk} \quad (1)$$

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值, kPa; m 为搅拌桩置换率, %; R_a 为单桩竖向承载力特征值, kN, 其与桩身强度和桩长有关; A_p 为搅拌桩截面积, m²; β 为桩间土承载力折减系数; f_{sk} 为桩间土承载力特征值, kPa。根据有关公式可知,从承载力角度看,提高复合地基置换率或桩体强度比增加桩长的效果更好。同时为了充分发挥桩间土的承载力和复合地基的潜力,应使分别由土的抗力和由桩体强度所确定的单桩竖向抗压承载力接近,并使后者略大于前者较为安全和经济。

2.4 堤身下柔性垫层设置

直立式防波堤下深层水泥搅拌桩复合地基采用格栅状布置时,为减小桩土应力比,可以在直立式防波堤身和搅拌桩之间设置一定厚度的抛石基床,把一部分荷载通过抛石基床传到桩间土上,充分发挥桩间土的作用,有效改善桩顶部分桩体的受力状态。同时,为避免基床块石沉降陷入桩之间软弱土层,使得桩体向上刺入,增大搅拌桩的剪应力,可在基床块石和桩体之间铺设刚度较好的土工垫层或土工格栅垫层。

3 水下深层水泥搅拌桩施工注意事项

3.1 水下深层水泥搅拌桩施工设备

一般可预先搭设水泥搅拌桩作业平台或采用水上船机进行水下深层水泥搅拌桩施工。搭平台法具有施工作业受风浪影响小、效率高、更有利于水泥搅拌桩质量控制等优点,但适用于风浪较小、水深较浅且地质条件许可的情况。而本工程防波堤所在区域地质条件差,风浪大,允许作业波高小于1.0 m时,海上施工全年可作业时间仅约173 d;允许作业波高小于1.2 m时,年可作业时间约236 d。为确保施工安全、施工质量并满足紧张的工期要求,应优先选择抗风浪能力大的水泥搅拌桩施工船舶。

根据以往工程经验结合工程实际情况,4 000 t以上的水泥搅拌桩施工船舶在合理系锚定位条件下,能确保年可作业时间不低于50%。同时,每艘施工船配备3套搅拌桩处理机,每套处理机可

同时施工10根桩;或配备8套搅拌桩处理机,每套搅拌桩处理机可同时施工2根桩,提高水泥搅拌桩施工效率,确保施工进度。

3.2 自动化监控系统

鉴于水下深层水泥搅拌桩为隐蔽性工程,其施工质量无法用肉眼观察,质量验证困难,而水泥搅拌桩质量对于直立式防波堤结构的安全至关重要。设计提出该直立式防波堤所涉及的水下深层水泥搅拌桩施工须采用自动化监控系统。自动化监控必须贯穿从制浆至成桩的全过程,所有数据必须均由电脑自动生成,并同步传输至项目监控中心,供业主、设计和监理等各方在不同地点的不同终端实时查看(手机应用或网页实时查看),杜绝人为修改。

3.3 隆起物的利用和挖除

水泥搅拌桩施工时将大量水泥浆注入地基土中,必然导致海床面隆起及部分浆液溢出,这在目前多个采用水泥搅拌桩加固海床的项目中得到了证明^[10]。水泥搅拌桩加固后隆起物的范围和厚度难以准确估算。隆起物有一定的强度,但一般强度离散性较大,难以准确判断其强度是否能满足设计要求,是否挖除应根据工程实际情况确定。

本工程直立式防波堤基槽范围内地基承载力要求较高,隆起物应采用抓斗挖泥船予以挖除,而基槽以外隆起物可允许保留利用。该部分开挖工程量虽未列入各规范、定额中,但切实发生。因此,建议加固地基完成后,进行海床面地形测量,便于后续工程质量控制和结算。

4 结论

1) 采用水下深层水泥搅拌桩加固直立式防波堤下深厚软土地基是经济、可行的,其布置形式可采用块状、壁状和小直径格栅状加固形式。

2) 对于直立式防波堤下深厚软土地基,为满足地基承载力要求,应充分利用天然地基承载力,并通过协调提高水泥搅拌桩复合地基置换率和桩体强度以满足地基承载力,使地基处理方案安全、经

济;为了减小地基沉降,水泥搅拌桩宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层,避免形成悬浮型复合地基;为提高整体稳定性,水泥搅拌桩的处理深度应深于加固后最危险滑弧以下至少2 m。

3) 直立式防波堤下深层水泥搅拌桩复合地基采用格栅状布置时,宜在堤身和水泥搅拌桩之间设置一定厚度的抛石基床,根据具体情况可在基床块石和桩体之间铺设土工织物垫层或碎石褥垫层。

4) 水下深层水泥搅拌桩施工应选择合适施工设备、施工方法,控制水下深层水泥搅拌桩施工质量,保证施工进度。地基加固完成后,根据工程需要进行海床面地形测量。

参考文献:

- [1] 中港第一航务工程局,中交第一航务工程勘察设计院.水下深层水泥搅拌法加固软土地基技术规程:JTJ/T 259—2004[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [2] 中国交通建设集团.中国交通建设继续教育系列教材:第六册 软土地基处理技术[M].北京:中国交通建设集团,2006.
- [3] 战和增.CDM法在烟台港二期工程中的应用[J].港口工程,1997(4):20-26.
- [4] 刘慧芳,巴蕾,刘强.重力式码头地基加固中DCM桩的设计方法[J].水运工程,2021(10):179-183.
- [5] 唐云,王桃源.深层水泥搅拌桩在港工软基边坡加固中的应用[J].中国港湾建设,2009(6):20-24.
- [6] 赵振东,郝志炜.深中通道水下深层水泥搅拌桩施工技术的研究及探讨[J].华北交通工程,2022(5):18-21.
- [7] 郑鹏一,邓龙照.深层水泥搅拌桩法在护岸地基加固中的应用[J].水运工程,2012(5):134-138.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤与护岸设计规范:JTS 154—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [9] 中交天津港湾工程研究院有限公司.水运工程地基设计规范:JTS 147—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [10] 刘亚平.海上CDM施工中的几个技术问题[J].中国港湾建设,2009(4):42-45.

(本文编辑 王璁)