



# 大型龙口软土地基快速处理关键技术

俞峥巍<sup>1</sup>, 丁付革<sup>2</sup>

(1. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200002;

2. 中交上海航道局有限公司江苏交通建设工程分公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 针对大型龙口的流泥及淤泥土层等软弱地基抗剪强度指标低、抗滑稳定和沉降控制难度大、不能满足合龙要求的问题, 进行了横沙东滩围围(八期)工程的流泥及新淤积软土地基合龙方案的分析研究。采用理论分析结合数值模拟计算方法, 提出同一龙口位置深厚流泥打设排水板、薄层流泥碎石置换以及通长袋加筋的组合式地基处理方法, 使大型龙口的软弱地基土在短时间内强度大幅度提高, 满足了合龙要求。研究成果可为类似工程的施工设计提供新思路。

**关键词:** 大型龙口软土地基; 流泥; 淤积软土; 数值模拟; 组合式地基处理

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0209-05

## Key technology of rapid treatment of soft foundation in large gap

YU Zhengwei<sup>1</sup>, DING Fuge<sup>2</sup>

(1. Shanghai Communications Construction Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

2. CCCC SDC Jiangsu Communications Construction Engineering Company, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** In view of the problems of low shear strength index of soft foundation in large gap such as fluid mud and silt soil layer, difficulty of anti-sliding stability and settlement control, which can not meet the requirements of closure, this paper studies the closure scheme of fluid mud and fresh silted soft soil foundation of Hengsha Dongtan Circle (Phase 8) project. Based on theoretical analysis and numerical simulation calculation method, it proposes the combined foundation treatment method of drainboard installation in deep mud, thin layer mud gravel replacement and long bag reinforcement at the same gap. The strength of gap foundation soil is greatly improved in the short term and meets the closure requirements. The research results can provide new ideas for construction design of similar projects.

**Keywords:** soft foundation in large gap; flow mud; silted soft soil; numerical simulation; combined foundation treatment

经年淤积的流泥或淤泥土层抗剪强度指标较低, 对抗滑稳定和沉降控制非常不利。在软土地基上筑堤必须考虑采用地基处理措施以控制沉降和整体抗滑稳定, 在流泥存在或新近淤积土上筑堤的情况下, 该问题更为关键。地基处理方法的选择应基于施工工期的限制, 综合分析建筑物地基土质条件及加载方式、建筑物结构形式、施工条件、材料来源、处理费用等因素, 最常用的方

法有换填法、排水固结法、加筋法、砂石桩法、水下深层水泥搅拌法等<sup>[1-3]</sup>。在复杂的地质条件和施工要求下, 单种处理方案通常难以达到理想效果, 结合工程特性探讨软基复合处理方案可为研究提供新思路<sup>[4]</sup>。我国目前对于软基处理实例的分析较多, 但系统研究甚少且多集中于道路工程<sup>[5]</sup>, 缺乏对水利工程中软基处理技术发展的关注。因此, 应多从工程角度出发, 加强软土地基

收稿日期: 2023-04-26

作者简介: 俞峥巍 (1974—), 男, 高级工程师, 从事海洋疏浚工程及港航工程研究。

处理方案的决策分析研究,促进系统科学的理论发展和方案创新。

基于长江口区域圈围工程特点及时间紧、任务重的施工背景,横沙东滩圈围(八期)工程对加载速度及地基处理时间有严格要求。针对流泥及深厚的淤泥、淤泥质土难以在短时间内完成固结的地基处理问题,本文依托横沙东滩圈围(八期)工程,首先对龙口地质进行分析,明确软基处理方式,提出龙口吹填流泥基础组合式地基处理思路,并设计对应的地基处理方案,最后通过龙口地基土强度得到提高的事实效果,验证了大型龙口软弱地基快速处理关键技术的合理性。

1 龙口地质分析

横沙东滩圈围(八期)工程 2<sup>#</sup>龙口位于 2<sup>#</sup>围区北侧堤 N5+790,口宽 450 m,基本正对 2<sup>#</sup>围区原促淤坝中间口门位置<sup>[6]</sup>,是围区主要纳潮口之一(图 1)。2<sup>#</sup>围区在护底排铺设前已开始吹填,吹填前龙口位置的地形起伏较大;而 2<sup>#</sup>龙口对应的中间纳潮口作为吹填的主要出水口,围区内吹填后细颗粒泥沙流经龙口位置向外排出,导致龙口处浅表层存在深 1.5~6.0 m 吹填流泥,土质极差,2<sup>#</sup>龙口即设置在流泥和软淤泥质黏土上。

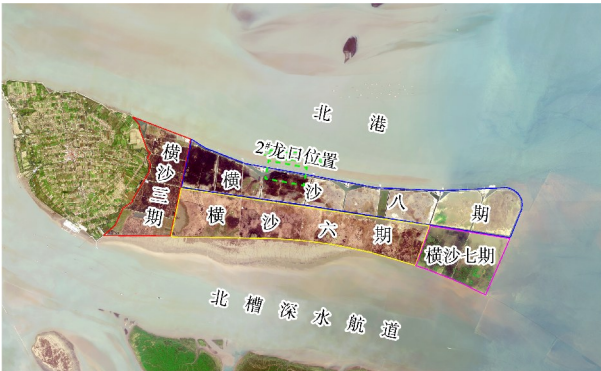


图 1 横沙八期工程施工总平面

根据地质勘察及龙口流变特性试验分析结果<sup>[7]</sup>(表 1),2<sup>#</sup>龙口以中心线 N5+790 为界,其西侧浅表层为①<sub>2</sub>层粉砂,承载能力较高,可作为堤基持力层;东侧浅表层为①<sub>I</sub>层淤泥质黏土与①<sub>II</sub>层淤泥质黏土夹砂,①<sub>I</sub>层土为新近沉积淤泥质土,含水量高,孔隙比大,力学强度低,具有触变、蠕变、高灵敏度及高压缩性等特征,BB<sub>10</sub>钻孔显示淤泥厚度在 3 m 左右。设计采用理正岩土软件,瑞典圆弧法验算,原状土指标计算出的整体抗滑稳定安全系数为 1.02,不满足设计规范要求的 1.20<sup>[8]</sup>。因此,2<sup>#</sup>龙口原土地基不能达到拟建围堤的地基持力层要求,需要对该处地基进行软基处理。

表 1 2<sup>#</sup>龙口土体主要力学指标

层序	土层名称	c/kPa				φ/(°)		
		固快试验	快剪试验	三轴试验	十字板试验	固快试验	快剪试验	三轴试验
① <sub>0</sub>	淤泥	8	4	—	—	10.0	0	—
① <sub>I</sub>	灰色淤泥质黏土	9	8	8	6+1.5H	10.0	2.0	0.4
① <sub>II</sub>	灰色淤泥质黏土夹砂	9	9	22	6+1.5H	15.0	13.0	0.7
① <sub>2</sub>	灰黄色粉砂	3	0	—	—	31.0	30.0	—
② <sub>3-1</sub>	灰色粉砂	3	3	—	—	32.0	30.0	—
② <sub>3-2</sub>	灰色砂质粉土	4	3	—	—	30.0	30.0	—
② <sub>3T</sub>	灰色淤泥质粉质黏土夹砂	11	12	22	6+1.5H	16.0	11.0	0.7
④	灰色淤泥质粉质黏土	12	13	23	32+0.3H	11.0	2.0	0.7
⑤ <sub>I</sub>	灰色黏土	16	16	38	—	14.5	2.5	1.4

注:c为黏聚力,φ为摩擦角,H为十字板高度。

2 龙口吹填流泥基础组合式地基处理方法

2.1 设计依据及思路

围堤合龙阶段需在短时间内将围堤迅速加高,因加载速度快,若堤基软土不进行处理会发生堤

脚剪切、隆起等破坏,导致地基失稳、合龙失败<sup>[9]</sup>。基于 2<sup>#</sup>龙口地质情况,必须在龙口护底铺设前对浅表层淤泥质土进行地基处理,以满足合龙时堤身的整体稳定要求。根据工程总体推进情

况和历年气象状况, 结合龙口流速数模计算结果, 2#龙口计划选取 2017 年 1 月上旬小潮汛期间进行合龙施工。2016 年 9 月底开工至合龙仅有 3 个月, 充分考虑地基稳定、龙口形成和保护所需要的时间, 地基处理应尽可能在 1 个月内完成。

2.2 地基处理方案对比

地基处理方法应综合建筑物地基土质条件及加载方式、建筑物结构形式、施工条件、材料来源、处理费用等因素比较分析确定, 必要时可联合采用多种地基处理方法。常用方法对比见表 2。

表 2 常用地基处理方法对比

处理方法	适用地基	适用深度	施工难度	地基稳定时间	施工成本	备注
换填垫层	软弱土层分布在浅层且厚度较薄	<4 m	工艺简单, 施工时间短	短	一般	-
爆破挤淤填石	淤泥土	4~25 m	工艺复杂, 施工时间短	短	一般	大块石对船只通行有影响
抛石挤淤	淤泥土或流泥	<5 m	工艺简单, 施工时间短	短	一般	
排水固结	淤泥、淤泥质土等软土层	最深可达 40~50 m	工艺简单, 排水板施工时间短	一般	低	堆载预压可结合堤身加载进行
加筋法	所有	表层	工艺简单, 施工时间短	长	低	效果有限
砂石桩	砂土、粉土、粉质黏土、素填土、杂填土等	3~15 m	工艺复杂, 施工时间长	短	高	-
水下深层水泥搅拌	淤泥质土、素填土、黏性土、粉土、中粗砂等	<20 m	工艺复杂, 施工时间长	短	高	冬季负温对施工效果有影响

2.3 地基处理方案选择

2#龙口分为外侧临时抛石坝和内侧主体袋装砂两部分, 其处理要求和方案选择有所区别。外侧临时抛石坝需要在极短时间内形成, 若采用砂石桩法、水下深层水泥搅拌法或排水固结法, 工序复杂且所需时间长, 无法满足要求, 且龙口需要船舶进出, 换填材料需要选用对船舶安全影响小的碎石。故临时抛石坝考虑采用换填碎石法, 即碎石换填顶高程 0 m, 上部采用混凝土联锁块软体排和砂肋软体排的保护方案。内侧主体袋装砂区域的可作业时间相对较长, 经计算, 采用塑料排水板对地基进行排水固结处理<sup>[10]</sup>可满足工期要求。相较换填法, 排水固结法成本低廉, 且在加

速地基抗剪强度增加的同时, 地基沉降在加载期间基本完成, 从而大大减少围堤建成后的沉降量。另外, 加筋法虽然效果一般, 但价格低廉、适用性广, 与排水固结法组合使用, 可进一步降低围堤的沉降和不均匀沉降, 有效提高地基承载力, 同时减少塑性区的范围, 提高堤坝的稳定性。因此主体堤身砂袋采用加筋通长砂袋法<sup>[11]</sup>。

2#龙口地基处理方案如图 2 所示, 临时抛石坝至外海侧堤脚范围为 1 m 左右的①<sub>II</sub>层淤泥质黏土夹砂, 进行开挖后换填碎石处理; 堤身范围内浅表层厚度为 3~4 m 的①<sub>I</sub>层淤泥质黏土, 考虑在表层铺设排水砂垫层, 打设排水板加速其排水固结<sup>[12]</sup>, 同时堤身设置加筋通长砂袋。

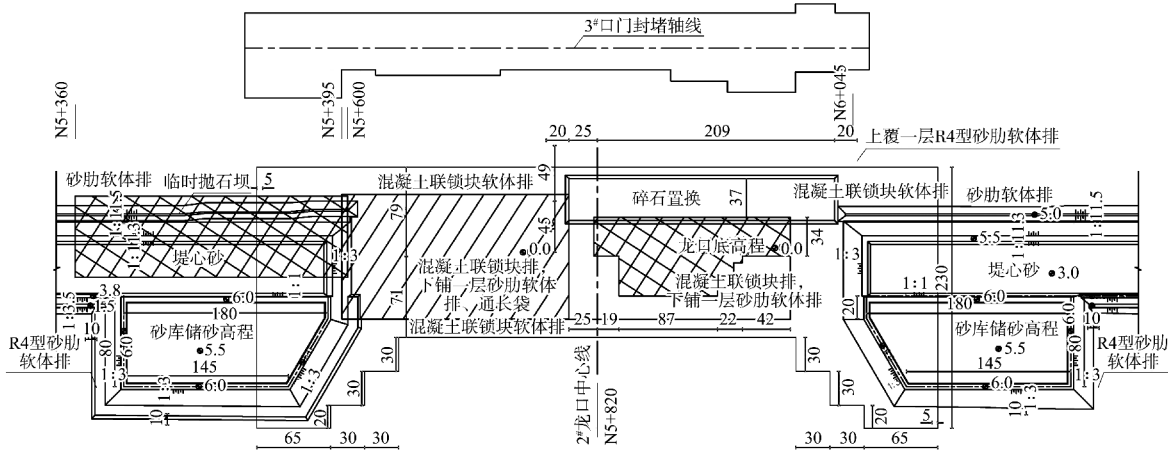


图 2 2#龙口软基处理平面 (单位: m)

### 3 方案稳定性验证

#### 3.1 计算软件

计算采用 Slide 土坡分析软件。Slide 是一款评价岩质或土质边坡安全系数或者失效概率的二维极限平衡程序,滑面指定为圆弧或者非圆弧形式,程序计算方法基于竖直条分法极限平衡分析如 Bishop、Janbu、Spencer 等,对于给定边坡,可指定已知滑面或自动搜索滑面。

#### 3.2 计算公式

根据 DG/T J08-2111—2012《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》,边坡抗滑稳定计算方法可采用瑞典圆弧滑动法:

$$K_s = \frac{\sum [(W_{li} + W'_{2i} + W'_{3i}) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + C_i b_i \sec \alpha_i]}{\sum (W_{li} + W_{2i} + W'_{3i}) \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中:  $K_s$  为抗滑稳定安全系数;  $W_{li}$ 、 $W_{2i}$ 、 $W'_{2i}$ 、 $W'_{3i}$  分别为第  $i$  个土条浸润线以上的土体的天然重力,浸润线与外坡水位线之间的土体的饱和重力,浸润线与外坡水位线之间的土体的浮重力和外坡水位线以下的土体的浮重力, kN;  $\alpha_i$  为第  $i$  个土条底面中点的径向与竖直方向的夹角, ( $^\circ$ );  $c_i$ 、 $\varphi_i$  分别为第  $i$  个土条底部土体的内聚力、摩擦角,均为总抗剪强度指标,单位分别为 kPa 和 ( $^\circ$ );  $b_i$  为第  $i$  个土条的宽度, m。

#### 3.3 Slide 土坡分析计算结果

采用瑞典圆弧滑动法对边坡抗滑稳定性进行计算,结果表明,2#龙口合龙过程中临时抛石坝整体稳定安全系数为 1.221,外侧一级棱体整体稳定安全系数为 1.441,根据 DG/TJ 08-2111—2012《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》,1 级围堤施工期整体稳定安全系数允许值为 1.20,设计方案满足规范要求。

### 4 方案实施效果

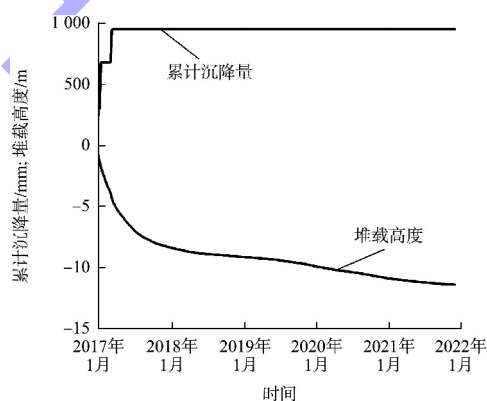
#### 4.1 沉降监测

北堤 2#围区堤基沉降观测数据见表 3。截至 2021 年 12 月 2 日,累计沉降量最大点为 DBC<sub>24</sub> (N3+600 外),最大累计沉降量为 1 272 mm;累

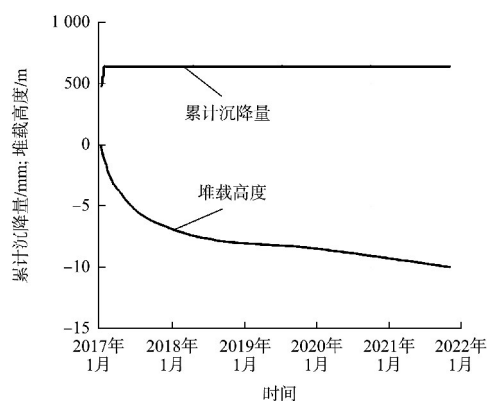
计沉降量最小点为 DBC<sub>31</sub> (N6+200 内),最小累计沉降量为 982 mm。将软基段(北堤 DBC<sub>29</sub>)与普通段(北堤 DBC<sub>40</sub>)堤基沉降结果对比得出(图 3),地基处理方案取得了很好的效果。

表 3 北堤 2#围区堤基沉降观测数据

测点编号	观测次数	初始沉降板高程/m	最终沉降板高程/m	累计沉降量/mm	平均沉降速率/(mm·d <sup>-1</sup> )
BDC <sub>23</sub> (N3+600 内)	352	3.752	2.520	1 232	0.7
BDC <sub>24</sub> (N3+600 外)	358	0.762	-0.510	1 272	0.7
BDC <sub>29</sub> (N5+520 内)	343	1.133	0	1 133	0.6
BDC <sub>30</sub> (N5+520 外)	343	3.198	2.110	1 088	0.6
BDC <sub>31</sub> (N6+200 内)	317	5.022	4.040	982	0.6
BDC <sub>32</sub> (N6+200 外)	326	2.408	1.370	1 038	0.6
BDC <sub>33</sub> (N6+600 内)	317	5.248	4.230	1 018	0.6
BDC <sub>34</sub> (N6+600 外)	333	3.467	2.410	1 057	0.6
BDC <sub>39</sub> (N7+350 内)	330	3.284	2.290	994	0.6
BDC <sub>40</sub> (N7+350 外)	337	4.062	2.980	1 082	0.6



a) DBC<sub>29</sub>(N5+520内)



b) DBC<sub>40</sub>(N7+350外)

图 3 堤基沉降结果对比



4.2 测斜观测

距离 2#龙口最近两处的测斜观测点 CX<sub>19</sub>(N5+520)和 CX<sub>20</sub>(N6+200)的堤脚(0 m 高程)监测数据见表 4。2#龙口于 2017 年 1 月 3 日完成合龙,由表可知,龙口西侧堤脚(CX<sub>19</sub>)在合龙后的 3 个月内位移变化较小,随后灌砌块石及护面结构开始加载造成部分位移,但日位移量小于设计提出的 5 mm/d 控制要求;龙口东侧堤脚(CX<sub>20</sub>)紧邻地基处理区域,整体位移变化不大。因此可以得出,采取本方案后的口地基得到有效加固,未发现明显剪切破坏,保证了龙口的成功合龙。

表 4 北堤 2#龙口两侧测斜观测数据				
观测点	日期	时间/ d	累计位移/ mm	位移速率/ (mm·d <sup>-1</sup> )
CX <sub>19</sub>	2017-01-04	0	0.00	0.00
	2017-01-05	1	1.48	1.48
	2017-02-04	31	-2.82	-0.07
	2017-03-24	79	-9.44	-0.07
	2017-04-14	100	-30.74	-0.18
	2017-05-24	140	-31.97	-0.13
	2017-06-24	171	-34.45	-0.12
	2017-08-16	224	-38.98	-0.11
	2017-10-04	273	-39.54	-0.10
	2017-12-13	343	-39.13	-0.08
	2018-09-21	625	-39.52	-0.05
	2019-09-19	988	-38.46	-0.03
	2020-12-20	1446	-38.78	-0.02
CX <sub>20</sub>	2021-12-01	1792	-38.35	-0.02
	2017-01-13	0	0.00	0.00
	2017-01-14	1	0.21	0.21
	2017-02-23	41	0.13	0.00
	2017-03-24	70	-3.07	-0.03
	2017-04-24	101	-0.90	-0.01
	2017-05-24	131	-1.00	0.00
	2017-06-24	162	-1.18	0.00
	2017-08-16	215	5.13	0.01
	2017-10-20	280	2.61	0.01
	2017-12-13	334	2.62	0.01
	2018-09-21	616	4.91	0.01
	2019-09-19	979	2.11	0.00
	2020-09-19	1 345	4.86	0.00
	2021-12-01	1 783	3.03	0.00

5 结论

1) 依托横沙东滩圈围(八期)工程的流泥及新淤积软土地基合龙关键技术研究,针对软土处理

方案,提出排水板方案、地基土固化、地基土换填的组合地基处理方式。综合考虑 2#龙口依据流泥厚度及地质、地形、水深等条件,采用深厚流泥打设排水板、薄层流泥碎石置换以及通长袋加筋 3 种方法组合式地基处理方法,使龙口地基土强度有了大幅度提高,保护了合龙稳定。

2) 通过数模计算,验证了本研究提出的地基处理方式具有可靠性及稳定性,在实际应用后取得良好效果,可为类似工程施工设计方案提供新思路。

参考文献:

[1] 李焯. 水利工程施工中软土地基处理技术[J]. 石河子科技, 2023(3): 35-36.

[2] 王磊. 水利工程施工软土地基处理技术研究[J]. 内蒙古水利, 2023(4): 18-19.

[3] 李学奎. 水利工程中软土地基处理技术要点分析[J]. 珠江水运, 2023(5): 44-46.

[4] 钟招茂. 如何处理港口工程中的软土地基问题研究[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(6): 136-138.

[5] 潘瑞春, 黄瑞章, 周新年, 等. 道路工程软土地基处理方案选择研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(10): 23-26.

[6] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 横沙东滩圈围八期工程施工图说明及施工技术要求[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2016.

[7] 张莉萍, 李进, 陈勇, 等. 堤防软土边坡稳定性分析[J]. 资源环境与工程, 2017, 31(4): 460-462, 485.

[8] 上海市水利工程设计研究院有限公司. 滩涂促淤圈围造地工程设计规范: DGTJ 08-2111—2012[S]. 上海: [出版者不详], 2012.

[9] 张本静. 某工程软土地基堤基失稳原因分析[J]. 治淮, 2014(7): 16-18.

[10] 戴林伟. 基于塑料排水板在海岸工程水下软土地基中的应用分析[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(5): 247-248.

[11] 陆健辉, 阮龙飞. 土工织物加筋法在堤坝地基处理中的应用[J]. 人民长江, 2012, 43(S1): 34-37.

[12] 吴海彦, 陈小明. 堤防工程软土地基的处理[J]. 科技信息, 2010(11): 350, 329.

(本文编辑 王传瑜)