



## 横沙大道外延工程结构设计及安全控制\*

李锐, 杨冠川

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 针对横沙大道外延工程堤线长、堤顶高程低、风浪条件恶劣、地基基础差、施工风险高等问题, 进行长江口开敞海域软基筑堤设计研究。采用规范公式计算、数学模型和物理模型验证分析等多重研究手段, 进行堤顶结构、护面结构、护底防护和地基处理设计, 创新性提出两侧L形挡墙和中间抛石填筑及埋石混凝土路面的堤顶结构、双层扭王字块护面结构、多手段确定护底尺度、分段分类选择地基处理方式等结构和设计方法, 并结合现场恶劣作业条件提出安全平台、配套平台、临时抛石坝等一系列施工期安全措施, 总结形成了长江口开敞海域软基筑堤设计技术要点。该工程结构经受2024年连续两场台风考验, 达到了预期的工程效果。

**关键词:** 横沙浅滩; 整治建筑物; 软土地基; 结构设计; 安全控制

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0077-09

### Structural design and safety control of Hengsha Avenue extension project

LI Rui, YANG Guanchuan

(CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** In view of the challenges of the Hengsha Avenue extension project, including its extensive dike length, low crest elevation, severe wind and wave conditions, poor foundation soils, and high construction risks, the dike design in the open sea area of the Yangtze Estuary on soft foundations is investigated. Utilizing a multi-faceted research approach involving standard formula calculations, numerical modeling, and physical model verification, the design encompasses dike crest structure, armor layer, toe protection, and foundation treatment. Innovative structures and design methods are proposed, including a crest structure combining L-shaped retaining walls on both sides with rockfill core and rock-filled concrete pavement, a double-layer acropode armor system, a multi-method approach to determine toe protection dimensions, and segment-specific foundation treatment strategies on the basis of soil classification. Furthermore, considering the harsh on-site construction conditions, a series of construction-phase safety measures are implemented, such as safety platforms, auxiliary platforms, and temporary rockfill dams, summarizing key technical points for soft foundation dike design in the exposed waters of the Yangtze Estuary. The engineering structures successfully withstands two consecutive typhoons in 2024, achieving the desired project outcomes.

**Keywords:** Hengsha Shoal; regulating structure; soft soil foundation; structural design; safety control

横沙大道外延工程与长江口北导堤相邻, 具有堤线长、堤顶高程低、风浪条件恶劣、地基基础差、施工风险高等特点。该工程充分借鉴北导

堤建设过程针对地基软化、堤身局部下沉、施工期局部冲刷等问题的解决经验<sup>[1-2]</sup>。本文结合自然条件和工程特点, 从整治建筑物堤顶结构、护面

收稿日期: 2025-06-19 录用日期: 2025-07-29

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208500)

作者简介: 李锐(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程设计与研究工作。

结构、护底防护和地基处理设计、施工期安全措施等方面进行筑堤设计技术要点总结，为沿海开敞海域软基筑堤设计提供经验借鉴。

### 1 工程概况

横沙浅滩固沙保滩稳定河势(横沙大道外延)工程位于长江口北港和北槽间的横沙浅滩水域。该区域目前为自然滩面区域，直接面向外侧开敞水域，同时又是北港与北槽间涨落潮水沙主要交换区，风浪、潮流动力强劲，水沙运动复杂，河势滩势易动。据统计分析，横沙浅滩 2010 年后由淤转冲，且近期冲刷幅度有加大趋势<sup>[3]</sup>。为减弱北槽与浅滩间的水沙交换，减弱滩面漫滩流，遏制浅滩北缘冲刷南退的趋势，适当削弱滩面大环流，2023 年先期实施横沙浅滩固沙保滩稳定河势(横沙大道外延)先行段工程，见图 1。其中新建横沙大道外延工程长度 26.02 km，N9 丁坝以西(DD18+363 以西)高程为 5.4 m(吴淞高程，下同)，满足施工车辆双向通行，N9 丁坝以东(DD18+363 以东)高程为 4.0 m<sup>[4]</sup>。

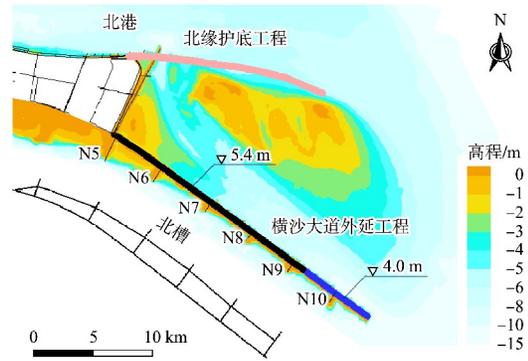


图 1 横沙浅滩先行段工程平面布置

Fig. 1 Plan layout of Hengsha Shoal preliminary project

### 2 设计条件

工程基本平行于北导堤沿南侧坝田区布置，总长度约为 26.02 km，堤线长，沿程设计潮位、波浪、地形及地质变化明显。

#### 2.1 特征潮位

工程区潮位总体表现为西侧高东侧低的特征，平均潮位为 1.97~2.08 m，平均高、低潮位分别为 3.21~3.30 m 和 0.84~1.00 m，平均潮差 2.31~2.37 m，50 a 一遇高潮位为 5.36~5.56 m。设计潮位见表 1。

表 1 设计潮位及设计波要素

Tab. 1 Design tide levels and design wave elements

横沙大道外延 南侧测点	滩面 高程/m	50 a 一遇 高潮位/m	SE 向设计波要素(50 a 一遇风速+50 a 一遇高潮位)						
			$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	平均波高/m	平均周期/s	波长/m
$P'_1$ (近 N5 丁坝)	-1.3	5.56	3.13	2.74	2.67	2.31	1.56	7.9	57.1
$P'_5$ (近 N6 丁坝)	-2.0	5.52	3.99	3.5	3.41	2.96	2.01	7.9	61.9
$P'_{10}$ (近 N7 丁坝)	-2.5	5.48	4.66	4.08	3.97	3.44	2.33	7.9	66.9
$P'_{14}$ (近 N8 丁坝)	-2.1	5.45	3.49	3.05	2.97	2.57	1.73	7.9	59.8
$P'_{18}$ (近 N9 丁坝)	-4.0	5.42	3.11	2.73	2.66	2.31	1.57	7.9	55.9
$P'_{23}$ (近 N10 丁坝)	-6.0	5.38	5.62	4.92	4.79	4.16	2.82	7.9	71.4
$P'_{26}$ (堤头)	-12.2	5.36	7.41	6.43	6.25	5.37	3.57	7.9	82.8

注： $H_p$  为累积频率  $P$  的波高。

#### 2.2 设计波浪

长江口地区的波浪呈现外海大、近岸小，波浪主要沿北港、北槽及南槽等水道向口内传播的分布特征。长江口地形对外海来浪的衰减作用明显，横沙浅滩及北导堤坝田区波高小于外海波高。本文工程北侧区域的控制浪向为 ENE 向，南侧的控制浪向为 SE 向。在 50 a 一遇高潮位及同频率风速条件下，北侧  $H_{1\%}$  为 2.85~6.92 m， $H_{13\%}$  为

2.09~4.97 m；南侧  $H_{1\%}$  为 3.11~7.41 m， $H_{13\%}$  为 2.31~5.37 m。设计波要素见表 1。

#### 2.3 工程地形

工程堤轴线处天然滩面高程为 -12.2~0.1 m，自西向东逐渐降低。工程范围内滩面总体较为平缓，仅在 N5~N10 丁坝两侧滩面局部有冲刷，见图 2。

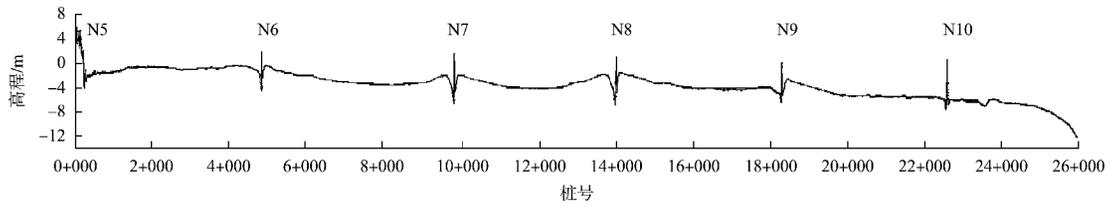


图 2 横沙大道外延堤轴线处地形纵剖面

Fig. 2 Topographic profile at axis of outer embankment of Hengsha Avenue extension

2.4 工程地质

工程区属河口冲积岛, 地貌形态单一, 属河口、砂嘴、砂岛地貌类型。根据粉土粉砂层、淤泥和淤泥质土层的分布及厚度特征, 将工程区地质分为 4 个分区, 见图 3。浅部地层分布有 3 m 厚度以上的粉砂粉土层为 I 区; 浅部地层分布小于 3 m 厚度的粉砂粉土层为 II 区; 浅部地层分布

大于 5 m 厚度的淤泥或淤泥质土层(基本缺失粉土粉砂层)为 III 区; 浅部地层分布的其他情况为 IV 区。自西向东地质分区依次为 I、IV、II、III 区, 基本表现出地基土中砂土、粉土的含量逐渐减少, 由粉细砂、粉砂夹淤泥质粉质黏土或淤泥质粉质黏土夹粉砂相变呈淤泥质粉质黏土或淤泥。

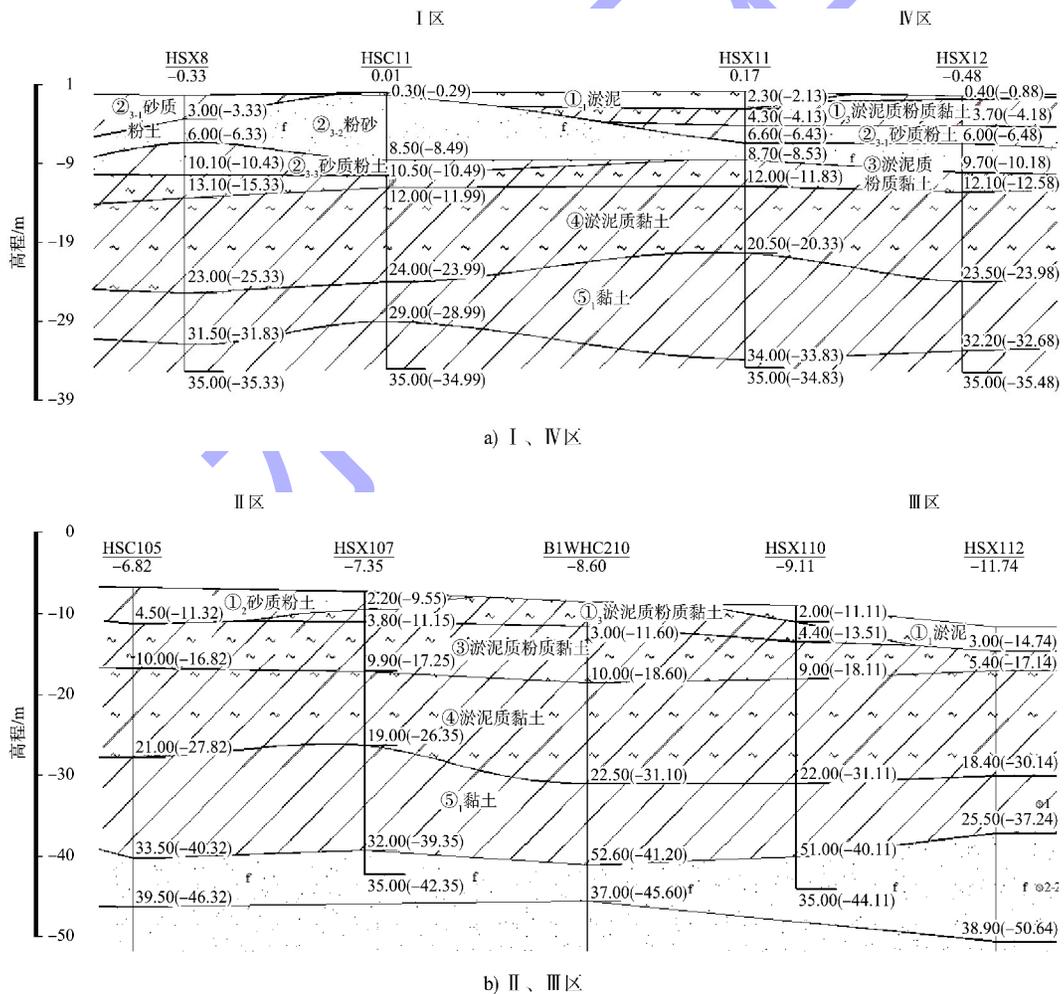


图 3 I~IV 区典型地质剖面

Fig. 3 Typical geological profiles of Zone I-IV

岩土试验结果见表2。表层软土(①<sub>1</sub>淤泥、①<sub>3</sub>淤泥质粉质黏土)及深层软土(③淤泥质粉质黏土、④淤泥质黏土)力学参数较差,建筑物下方软土厚度较大时,在堆载或震动作用下,易产生侧向位移,对堤身整体稳定造成影响,需要采取

相应地基处理措施。特别是N9丁坝以东基本为III区,该段滩面低、堤身高,整体稳定性差,施工区域开阔,易遭受E、ES向波浪作用,施工难度大,大规模施工加载速率和节奏控制要求高,施工风险大,需要重点关注。

表2 III区地基土层物理力学指标

Tab.2 Physical and mechanical indicators of foundation soil layer in Zone III

层序	土层名称	固结快剪		三轴(固结不排水)		直剪快剪		三轴(不固结不排水)	
		黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
① <sub>1</sub>	淤泥	10	10.5	-	-	-	-	-	-
① <sub>3</sub>	淤泥质粉质黏土	11	14.0	11	18.2	14	8.5	20	0.6
② <sub>3</sub> 夹	淤泥质粉质黏土夹粉土	12	19.5	11	18.8	14	8.0	19	0.9
② <sub>3-3</sub>	砂质粉土	5	31.0	-	-	-	-	-	-
③	淤泥质粉质黏土	11	14.0	11	16.3	14	8.5	20	0.5
④	淤泥质黏土	12	11.0	12	13.4	13	4.0	18	0.6

3 堤坝断面结构设计研究

工程采用长江口地区应用成熟的袋装砂斜坡堤,其结构简单、消浪效果好、施工方便,可就地取砂作为堤身材料,经济效益明显。针对横沙大道外延堤顶高程较低、堤顶易受风浪影响、护

面施工易受潮位影响且东端近堤头段设计波浪大、软土层深厚、对护面防护及地基处理要求高等设计难点,采用规范公式计算、数学模型和物理模型验证分析等多手段开展研究,综合确定堤坝断面结构。物理模型试验见图4。

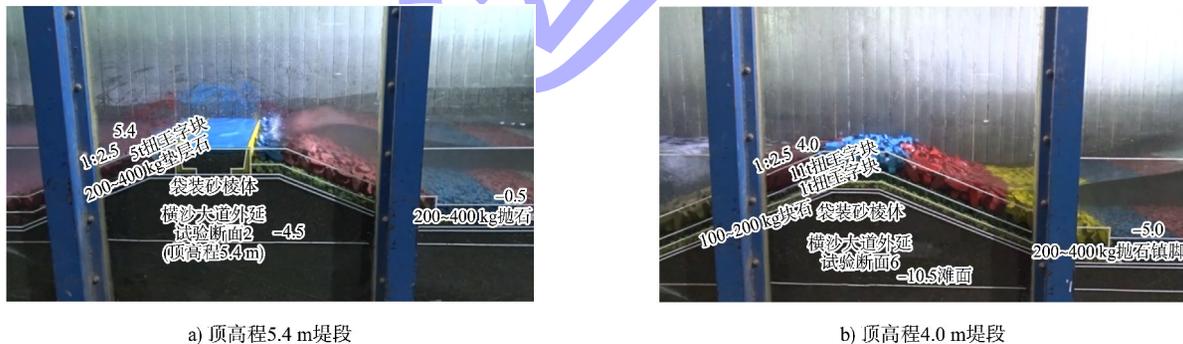


图4 横沙大道外延工程波浪断面物理模型试验

Fig.4 Wave cross-section physical model test for section of Hengsha Avenue extension project

3.1 堤顶结构设计

工程区域面临开敞海域,掩护条件较差。横沙大道外延从西向东50 a一遇潮位5.36~5.66 m,堤顶高程4.0~5.4 m位于50 a一遇高潮位上、下50%设计波高范围以内,根据JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[5]</sup>、GB 50286—2013《堤防工程设计规范》<sup>[6]</sup>和DG/TJ 08-2111—2012《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》<sup>[7]</sup>,堤顶处波浪作用强烈,堤顶失稳风险大。工可阶段顶高程5.4 m堤

段在堤顶两侧设置素混凝土隔埂(平面为正方形,边长为1 m),中间灌砌块石路面结构,顶高程4.0 m堤段堤顶安放3块扭王字块体进行设计。初步设计阶段深化设计时,采用波浪断面物模试验对断面结构进行验证,试验工况包括50 a一遇波浪叠加50 a一遇高潮位、4.0 m潮位、平均高潮位、平均潮位及50 a一遇低潮位作用组合。

试验发现设计波浪作用下顶高程5.4 m堤段出现素混凝土隔埂移动失稳现象。综合规范要求

和工程经验,进一步提出堤顶两侧采用钢筋混凝土L形挡墙,中间采用抛石+碎石垫层+埋石混凝土路面结构,L形挡墙上部有抛石及路面压载,有效提升堤顶结构整体稳定性,且路面结构采用埋石混凝土相比灌砌块石经济性更好、施工效率更高。为进一步削减波浪作用,在挡墙外侧设计安放2块扭王块。经断面物理模型进一步验证,优化后堤顶结构未出现失稳破坏现象。

### 3.2 护面结构设计

工程区域滩面较低,自西向东堤坝镇脚顶高程从2.0 m渐变至-6.5 m,大部分堤段镇脚顶高程低于平均低潮位,护面结构受潮位影响明显,不能采用现浇混凝土板、灌砌块石护面结构。同时工程区设计波浪较大,若采用预制栅栏板结构,其计算最大厚度超过0.7 m,吊装施工难度很大,且栅栏板对下部垫层平整度要求高,水下埋坡质量难以控制。综合比选分析设计采用扭王字块体护面,抗浪效果较好,采用定点随机安放,水下及水位变动区护面垫层及扭王字块安装施工质量易保证。根据JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》第4.3.7条规定的公式计算并采用波浪断面物理模型验证,自西向东扭王字块规格分别取3、5、7、9、11 t。

根据JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》第4.3.15条规定,对外坡护面为随机安放人工块体时的垫层块石质量可取块体质量的1/20~1/10,其中11 t扭王字块下垫层石质量应为600~800 kg。护面为11 t堤段为最东段820 m,该区域滩面高程为-12.0~-8.0 m,若11 t下部直接采用大块石垫层,则11 t扭王字块和大块石垫层间空隙较大,设计波浪作用下袋装碎石反滤层有淘刷流失风险;另外深水区垫层石施工抛填及埋坡难度很大,质量难以控制,且符合质量要求的大块石较难获得。结合其他地区双层扭王字块护面结构<sup>[8-9]</sup>的成功应用经验,提出采用1 t扭王字块和100~200 kg垫层石代替600~800 kg垫层石,经断面物理模型验证,断面结构满足稳定要求。该结构可有效提升堤坝结构安全,降低深水区护面垫层施工难度。

### 3.3 护底防护设计

工程位于横沙浅滩,受长江径流、外侧潮汐及波浪综合作用。JTS 181—2016《航道工程设计规范》<sup>[10]</sup>的冲刷深度公式难以充分考虑地质基础抗冲性能、整体河势的冲淤变化等影响因素,实际冲刷与规范公式计算差距较大。结合长江口12.5 m深水航道工程等护底设计经验,创新性提出结合规范公式计算、计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)软件计算、工程地质抗冲分析和局部冲刷物理模型试验等手段确定横沙大道外延堤身一般段和堤头段护底尺度。

1) 堤身一般段:针对横沙大道外延堤身主要受涨落潮流沿堤流作用特点,采用大范围数值模型计算50a一遇潮位+上游洪季流量组合作用下,堤身南侧沿堤流速为0.61~2.0 m/s,JTS 181—2016《航道工程设计规范》公式计算冲刷深度为1.1~1.8 m。沿堤表层分布有薄层淤泥质土、粉砂、砂质粉土层为抗冲性差土层,深度为0.9~6.8 m。综合考虑堤身位于北导堤南侧坝田区,沿堤流速偏小,设计冲刷深度取3.65~4.40 m,自西向东堤身南侧余排设计宽度为20~60 m。堤身北侧受北导堤掩护沿堤流速更小,且后续将在横沙大道外延与北导堤之间实施9条潜堤以减弱沿堤流作用,因此北侧余排取5 m。护底结构采用在相邻北导堤成功应用的砂肋软体排进行防护。

2) 堤头段:横沙大道外延堤头易受绕堤流、越堤流、沿堤流作用,与相邻北导堤堤头相似。根据北导堤建设经验,自2005年竣工验收以来,北导堤堤头软体排边缘已从-8.5 m冲刷至约-15 m,堤头冲刷作用强烈,设计采用多种手段进行计算和验证。采用JTS 181—2016《航道工程设计规范》丁坝坝头局部冲刷公式(式A.5.1)计算冲刷深度为9.1 m。通过大范围数值模拟计算提取堤头附近最大流速和对应水位,作为CFD软件计算边界进行堤头局部冲刷数值模拟,计算最大冲刷深度为5.5 m。按堤头冲刷至③淤泥质粉质黏土层底部位置,冲刷深度为9.0 m。综合考虑堤头流态复杂,设计冲刷深度取9.1 m,堤头超前护底取100 m。

东端约 510 m 堤头段南侧余排宽度 60 m，北侧余排按与相邻北导堤软体排搭接设计，宽度为 23~34 m，并间隔 150 m 共设置 2 条厚 2 m、宽 10 m 的抛石潜堤加强护底。余排及超前护底结构均采用抗冲性能更好的混凝土连锁块软体排进行防护。进一步采用局部正态物理模型对有无软体排防护的堤头冲刷进行模拟验证，见图 5。设计软体排宽度条件下可以满足堤头防护安全。



图 5 设计方案局部正态物理模型验证

Fig. 5 Verification of local normal physical model for design scheme

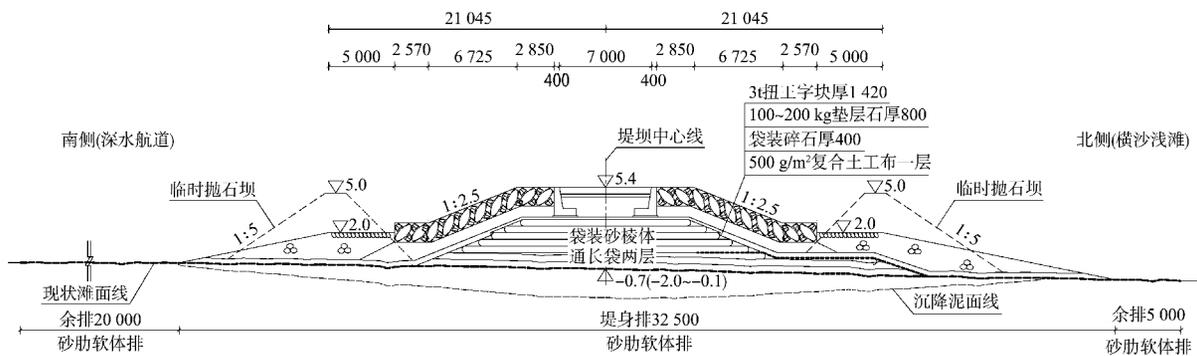
### 3.4 地基处理设计

工程位于开敞海域，越往东风浪条件越恶劣，呈现深厚软基段滩面低、堤身高、整体稳定性差等特点，严重影响袋装砂筑堤施工效率，设计时尽量减小排水板处理堤段。为减少施工工序，以堤身整体稳定为前提，首选施工较简单、工期较短、造价较低的加筋法，当仅采用加筋法无法满足稳定要求的软土层深厚堤段，再设置排水板加快地基土固结，排水板间距 1.0 m。结合设计条件经计算分析，DD6+500 以西滩面高程 -2.5~0.1 m，地质类型为 I、IV 区，浅部土层中砂质粉土、粉砂层厚度较大，堤坝断面采用通长带加筋法。DD6+500 以东滩面高程 -12.2~-2.5 m，浅部土层淤泥、淤泥质黏土等软土厚度逐步增大，需要采用排水固结法或与加筋法组合进行地基处理。根据地基处理方式不同将横沙大道外延工程可分为 A、B、C 三类堤段，见表 3 及图 6。

表 3 横沙大道外延段地基处理分类

Tab. 3 Classification of foundation treatment for Hengsha Avenue extension

分类	桩号范围	地基情况	堤高/m	地基处理方式
A 类堤段	DD0+240~DD6+500	浅部土层多为粉砂或粉质黏土，砂层较厚，中部软土层相对较薄	5.8~7.9	加筋法
B 类堤段	DD6+500~DD24+300	浅部土层多为淤泥、淤泥质粉质黏土或砂质粉土，砂层相对较薄，中部软土层相对较厚	7.5~10.6	排水固结法
C 类堤段	DD24+300~DD26+020	浅部土层多为淤泥或淤泥质粉质黏土，砂层缺失，中部软土层深厚	11.6~13.1	加筋法+排水固结法



a) A类堤段(DD0+240~DD6+500)

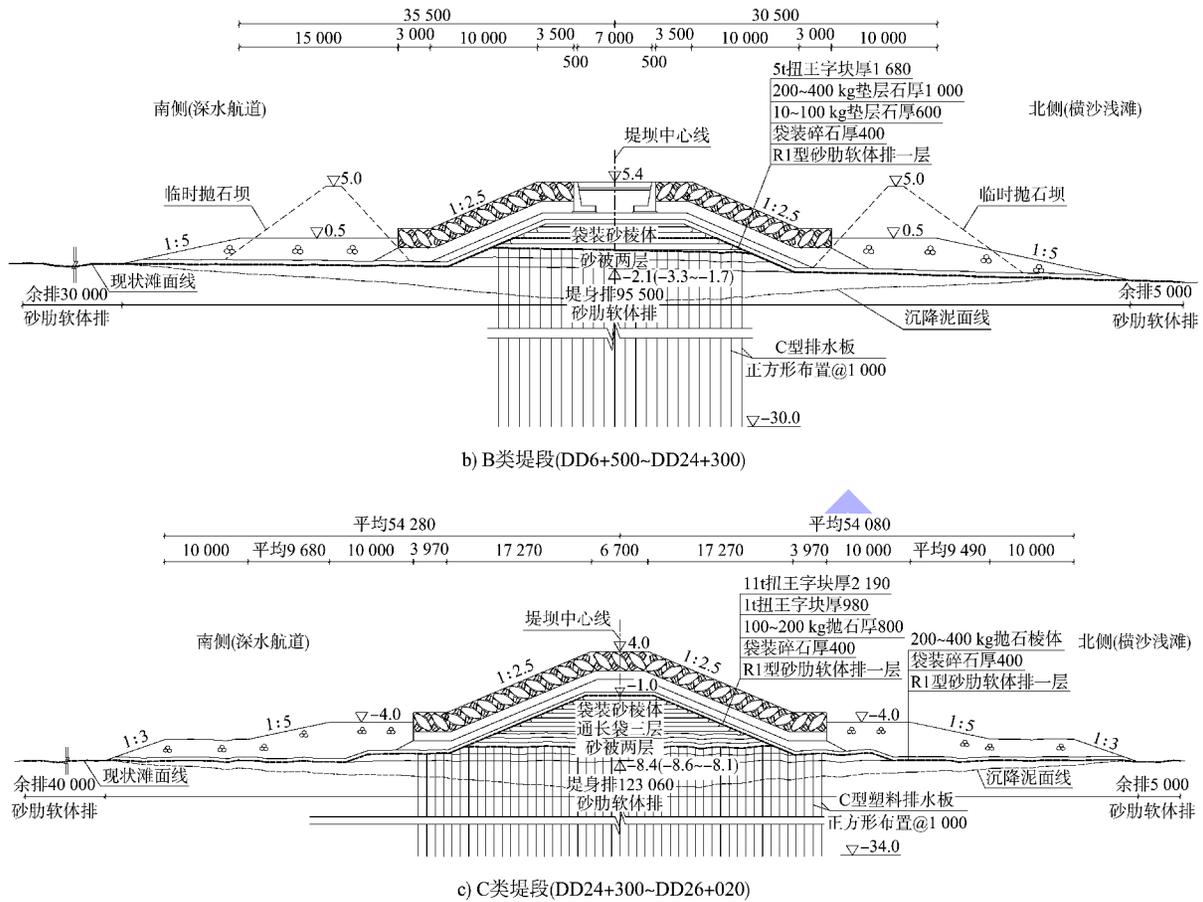


图 6 横沙大道外延工程典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 6 Typical cross-section of Hengsha Avenue extension project (dimension: mm; elevation: m)

#### 4 施工期安全措施

由于工程区远离横沙本岛, 水域开敞, 现场通信条件差, 自然条件复杂恶劣, 工程规模宏大, 建设周期长, 工程施工过程中跨越多个寒潮期、汛期, 人料机水上运输和船舶水上作业无掩护、无依托, 工程安全风险极为突出。为确保施工安全, 提高施工作业效率, 结合现场恶劣作业条件和堤坝结构特点提出一系列针对性施工期安全措施。

1) 间隔 5~6 km 布置安全平台及配套平台, 满足施工组织和紧急避险需求。本文工程堤线长、远离陆基、紧急情况下人员撤离不便, 结合施工组织需要在 DD5+750 处布置 1 座高桩梁板式安全平台(顶高程 10.0 m, 长 100 m、宽 25 m), 可作为现场安全应急救援物资存放点、人员应急登陆

点、船机设备就近靠泊点, 兼作施工调度平台, 在风暴潮、洪水等极端天气作为人员快速撤离的“安全岛”。同时沿堤间隔约 5 km 布置 4 座施工配套平台, 1#配套平台(高程 5.4 m, 长 15 m、宽 10 m)满足施工期小型施工机械、土工织物等物料转运、作为施工及管理人员上下堤安全通道, 2#~4#配套平台(高程 5.4 m, 长 100 m、宽 30 m)满足施工期物料堆放, 临时办公场所、临时通信基站场地设置等, 方便施工组织, 确保现场通信畅通, 见图 7。

2) 超前护底先行, 流水作业, 堤坝建设持续推进。根据长江口深水航道工程建设经验, 堤坝推进过程沿堤流及绕堤流易引起冲刷<sup>[11]</sup>。为避免拟建堤坝段地基的冲刷危及建筑物安全和增大工程量, 建筑物下的护底软体排必须先于堤身施工,

经数学模型计算分析并结合相邻工程经验,确定超前距离为1 km,施工中加强地形监测,动态指导超前护底施工。同时要求堤坝建设持续推进,流水作业,避免形成临时堤头,尤其做好施工期台风、寒潮等突发性恶劣天气下的防护。汛期施工采用短流水作业,分段防护,要求袋装砂棱体暴露长度不超过50 m,同时做好防汛物资储备,遇恶劣天气采取应急防护措施,做好临时防护。本文工程2024年汛期前推进至6.5 km,汛期期间经“贝碧嘉”“普拉桑”连续两场台风考验,台风后度汛断面基本完好。

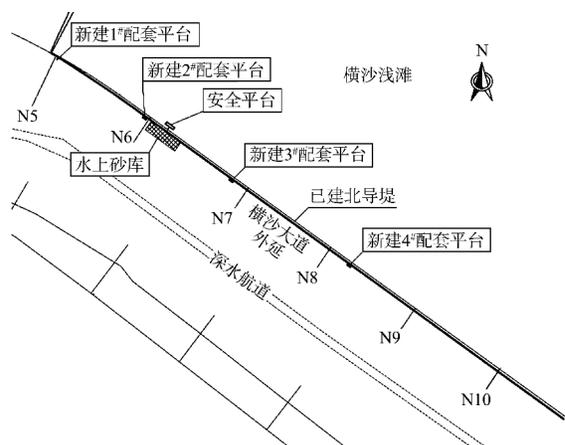


图7 安全平台及配套平台平面布置

Fig. 7 Layout plan of security platform and supporting platform

3) 监测指导施工,分层分级加载,防止堤坝滑移失稳。横沙大道外延堤段下部软弱地基深厚,施工期易于出现袋体滑移。当施工期外侧抛石压载没有及时形成,又恰逢该局部岸段表层回淤土厚、土质差,易出现滑移风险。根据堤身高度和软土厚度提出分层分级加载要求,结合不同阶段堤身整体稳定计算结果,确定断面位置各阶段所允许的最短施工时间。通过间隔1 km布置沉降、位移等观测设施,施工时全过程动态监测,并按监测数据指导施工加载,防止滑移失稳的现象发生。

4) 临时抛石坝先行,保障袋装砂棱体安全。根据横沙东滩整治工程建设经验,冬季寒潮期或台风期间出水袋装砂外棱体易被打坏,横沙浅滩越向东风浪越大,袋装砂袋布易被风浪撕裂,发生袋体内砂流失后破坏,设计提出对于顶高程5.4 m堤段,在袋装砂棱体施工出水之前(即0.0 m之上)需要先行修筑临时抛石坝,形成不小于100 m超前掩护,再分段进行出水部分袋装砂施工;对顶高程4.0 m堤段,由于水深太大,临时抛石坝施工困难、且费用较高,为此在断面设计上对出水部分袋体采用高强土工布或抛石,提高袋体的抗风浪能力,东段施工要求袋装砂棱体暴露长度不超过200 m,后续抛石、扭王字块护面等及时跟进,做好防护。

## 5 结语

1) 本文梳理横沙大道外延工程特征潮位、设计波浪、工程地形与地质等自然条件特点,总结分析长江口开敞海域软土地基斜坡堤结构设计难点,采用规范公式计算、数学模型和物理模型验证分析等多重研究手段,进行堤顶结构、护面结构、护底防护和地基处理设计,创新性提出两侧L形挡墙和中间抛石填筑及埋石混凝土路面的堤顶结构、双层扭王字块护面结构、多手段确定护底尺度、分段分类选择地基处理方式等结构和设计方法。

2) 针对远离陆基、堤线长、滩面低、堤身高、整体稳定性差、施工条件恶劣、恶劣天气情况下掩护效果较差等施工特点,本文提出安全平台、配套平台、临时抛石坝等一系列施工期安全措施,总结形成了长江口开敞海域软基筑堤施工期安全控制技术要点。

3) 工程结构经受2024年连续两场台风考验,达到了预期的工程效果。设计成果可为沿海开敞海域软基筑堤设计提供经验借鉴。

## 参考文献:

- [1] 蔡云鹤,范期锦.长江口深水航道治理二期工程整治建筑物结构设计方案的确定[C]//中国土木工程学会.深港建设技术研讨会论文集.北京:中国土木工程学会,2003:51-69.  
CAI Y H, FAN Q J. Determination of the structural design scheme for the regulation buildings of the second phase of the Yangtze Estuary deepwater channel regulation project[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the Seminar on Deepwater Port Construction Technology. Beijing: China Civil Engineering Society, 2003: 51-69.
- [2] 尹应军,黎界平,杨国录.长江口深水航道防波导堤软基处理方法研究[J].人民长江,2006,37(8):84-86.  
YIN Y J, LI J P, YANG G L. On soft foundation treatment method of breakwater guide levee for deep water channel in estuary area of the Yangtze River [J]. Yangtze River, 2006, 37(8): 84-86.
- [3] 金镠,楼飞,张赛赛.新时期长江口航道建设深化研究方向的探讨[J].水运工程,2022(2):95-99.  
JIN L, LOU F, ZHANG S S. Discussion on deepening research direction of waterway construction at the Yangtze River Estuary in the new era [J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 95-99.
- [4] 长江勘测规划设计研究有限责任公司,中交上海航道勘察设计院有限公司.横沙浅滩固沙保滩稳定河势(横沙大道外延)工程先行段初步设计报告[R].上海:中交上海航道勘察设计院有限公司,2023.  
Changjiang Survey Planning Design and Research Ltd., Co., CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Preliminary design report for the pilot project of the Hengsha shoal sand consolidation and river regime stability(Hengsha Avenue extension) project[R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2023.
- [5] 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.  
Code of design for breakwaters and revetments. JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [6] 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S].北京:中国计划出版社,2012.  
Code for design of levee project: GB 50286-2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [7] 滩涂促淤圈围造地工程设计规范: DG/TJ 08-2111—2012[S].上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2012.  
Design code for promoting sedimentation and land reclamation project: DG/TJ 08-2111-2012[S]. Shanghai: Shanghai Construction and Building Materials Industry Market Management Station, 2012.
- [8] 李江文,祝健康.恶劣海况下防波堤超大型双层扭王字块护面研究[J].水运工程,2022(11):74-79.  
LI J W, ZHU J K. Super large double-layer accropode armour of breakwater under severe sea conditions [J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 74-79.
- [9] 刘辉,倪靖宇,于蕴泽.基于物理模型试验法的双层扭王字块体护面结构稳定性研究[J].水运工程,2021(11):74-80.  
LIU H, NI J Y, YU Y Z. Study on structural stability of double-layer twisted Wang block surface protection based on physical model test method [J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 74-80.
- [10] 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.  
Design code for waterway engineering: JTS 181-2016[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [11] 陈志昌,罗小峰.长江口深水航道治理工程物理模型试验研究成果综述[J].水运工程,2006(S1):134-140.  
CHEN Z C, LUO X F. Physical model research result of Yangtze Estuary deepwater channel regulation project[J]. Port & waterway engineering, 2006(S1): 134-140.

(本文编辑 王璁)