DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260564

复杂水动力条件下滨海软基圈围海堤设计与施工关键技术研究

邹　丹
(上海市堤防泵闸建设运行中心,上海市 200080)

摘　要: 针对长江口与杭州湾交汇处水动力复杂、风浪大、软基承载力低、砂源不足、工期紧等圈围难题,依托上海港临港产业区奉贤分区圈围工程,针对软基海堤结构、水动力调控、地基处理与施工组织关键技术,提出“顺应河势演变、分区可控施工、结构适应沉降”思路,比选确定复合斜坡式土石坝断面;建立长江口—杭州湾二维水流数学模型,量化中港出海口流态与冲淤变化,据此增设西侧导流堤束水冲淤;对厚层淤泥地基采用“吹砂挤淤+反压加载+塑料排水板固结+土工格栅加筋”复合处理;提出“一步到位、分期实施”施工方案。实施后堤顶高程降低 0.5 m,每公里节约投资 50 万元、节省占地 3 000 m²,海堤历经多年台风考验整体稳定、无病害,供同类工程参考。

关键词: 滨海圈围工程;软土地基;海堤设计;水动力模拟;施工组织
中图分类号: TU47　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0261-06

Study on Key Design and Construction Technologies of Coastal Soft Soil Enclosure Seawall Under Complex Hydrodynamic Conditions

ZOU Dan
(Shanghai Embankment Pump Sluice Construction and Operation Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: To address the challenges of complex hydrodynamics, strong waves, low bearing capacity of soft tidal-flat foundations, insufficient sand sources and tight construction schedules at the junction of the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay, this study investigates key technologies for soft-foundation seawall structures, hydrodynamic regulation, ground treatment and construction organization, based on the reclamation project in the Fengxian Sub-area of the Shanghai Port Lingang Industrial Zone. A design concept of "following river-regime evolution, zoned controllable construction and structures adapting to settlement" is proposed, and a composite sloping earth-rock dam section is selected through comparison. A large-scale two-dimensional flow model of the Yangtze Estuary – Hangzhou Bay is established to quantify the flow pattern and erosion – deposition changes at the Zhonggang outlet before and after construction, on which basis a west-side diversion dike is added to concentrate flow and scour the channel. For the thick muddy foundation, a composite treatment combining sand-blowing replacement, surcharge loading, plastic drainage board consolidation and geogrid reinforcement is adopted, together with a "one-step completion with staged implementation" construction scheme. After implementation, the crest elevation was lowered by 0. 5 m, saving about RMB 0. 5 million in investment and 3000 m² of land per kilometre; the seawall has remained stable, free of excessive settlement, slope damage, toe scour and outlet siltation after years of flood seasons and typhoons, providing a reference for similar projects.

Keywords: coastal enclosure project; soft soil foundation; seawall design; hydrodynamic simulation; construction organization

0　引　言

滨海滩涂圈围是沿海城市拓展产业用地、完善港口配套、盘活滨海国土资源的核心工程手段,在区域航运建设、产业升级与经济发展中发挥关键作用。长江口-杭州湾交汇处属于典型强潮海湾区域,潮汐运动复杂、风浪频次高、滩涂淤积层厚度大,土体具有高含水量、高压缩性、低承载力的特点,是滨海水利工程建设的难点区域。常规海堤设计方案易出现堤身不均匀沉降、坡面破损、堤脚冲刷及口门淤积等病害,且传统施工工艺难以适配短工期、低投资、高

收稿日期:2025-05-19
作者简介:邹丹(1976—),男,硕士,高级工程师,从事水利工程管理工作。

安全性的建设要求。

目前,国内学者针对滨海软基海堤工程已开展大量研究:部分研究聚焦软土地基加固技术,验证了排水固结、土工加筋技术在沉降控制中的应用效果[1-3];也有研究通过水动力数值模拟,优化海堤堤线布置与导流结构形式[4-6]。但针对长江口与杭州湾交汇的复合型水动力环境,兼顾用地紧迫性、河势稳定性、生态保护性与经济性的成套设计施工技术体系仍有待完善;且现有成果多集中于技术做法的总结,对设计思路与方案比选的量化依据、处理措施的加固机理,以及优化前后的效果对比论述不足,难以为同类工程提供可复制的判断标准。

本文以上海港临港产业区奉贤分区圈围工程为载体,按照"设计思路—方案比选—技术原理—量化效果"的主线,从海堤结构设计、水动力环境调控、软土地基处理和精细化施工组织四个方面开展研究:通过堤线布置与断面型式比选确定总体设计方案;建立二维水流数学模型,量化评价导流堤对出海口流态的改善效果;阐明复合地基各单项措施的加固机理与处理目的;提出适配潮间带受限施工条件的施工组织方案。研究形成适配强潮复杂海域的滨海圈围工程成套技术,为同类滨海滩涂开发与软基海堤建设提供参考。

1 工程概况与建设难点

1.1 工程概况

本工程地处长江口与杭州湾交汇处南汇嘴以西奉贤区境内,工程东起南汇与奉贤区交界的芦潮港西侧圈围堤,西至中港水闸东侧,是临港物流园区与重装备产业区的核心配套工程。工程主要建设内容包含顺堤、西侧堤、隔堤、导流堤及围内吹填工程,其中顺堤总长3 223.22 m,西侧堤415.45 m,隔堤532.09 m,中港水闸出口导流堤270 m,整体圈围造地面积约160.8 hm^2。

本工程为Ⅰ等水利工程,围堤为1级堤防,防洪标准采用200年一遇高潮位叠加12级风下限风速(32.7 m/s)[7-8],大堤抗震设防烈度为7度,临时排水标准为5年一遇日雨量两日排空。工程围区规划吹填高程4.0 m,旨在解决临港工业园区产业用地缺口,完善上海国际航运中心配套体系,助力临港新城产业集聚与区域经济发展。

1.2 工程特点和难点

本工程地处复合型水动力交汇区域,水文、地质与施工条件复杂,多重建设难题叠加,是典型的高难度滨海软基圈围工程,核心建设难点如下。

(1)水动力条件复杂。工程直面杭州湾开阔海域,潮汐为非正规半日浅海潮,每日两涨两落,风浪扰动强烈,潮流与波浪叠加作用易造成堤脚冲刷、口门淤积[9]且工程建设对区域河势、排涝及生态环境敏感度极高。

(2)地质条件恶劣。围堤整体坐落于滩涂新近淤积软土层之上,局部淤泥层厚度达3.0 m,土体含水量高、压缩性大、承载力极低,施工期堤身易出现滑坡、不均匀沉降、结构开裂等病害。

(3)施工条件受限。工程属于潮间带作业,潮涨淹没、潮落出露,无法实现海上大型船舶连续作业与陆上24 h施工,有效作业时长有限,施工强度极高。同时区域本土砂源匮乏,筑堤与吹填砂料需远距离外运,施工成本高、组织难度大。

(4)建设工期紧迫。区域产业用地需求迫切,无法采用传统"先促淤、后圈围"的慢速施工模式,需实现圈围造地一步到位,同时需保障汛期渡汛安全,节点管控难度极大。

2 工程总体设计方案

本工程总体设计遵循"顺应河势、减少扰动、分区可控、结构适应沉降"的思路,设计流程为:以区域河势演变与水文地质条件为基础确定堤线布置;以波浪要素与软基变形特征为控制条件确定断面型式与结构参数;以排涝安全与施工组织为约束优化导流与分区布置。以下分总体布局与断面结构两部分论述,并对关键方案进行比选。

2.1 总体布局设计

结合区域总体规划与河势演变规律,本工程顺堤沿-2.0 m高程线布设,顺应天然岸线形态,最大程度减少对区域水动力格局的扰动。西侧堤沿中港出海口现状走向布置,与顺堤弧形平顺衔接,规避岸线突变引发的局部冲刷问题。为适配分区分批施工、分期交地需求,场内设置1条隔堤,将整体围区分割为两个独立作业库区,可实现分区合拢、分区吹填,降低单次施工风险,保障工期节点。

针对中港水闸出口易淤积、泄流不畅的问题,在河道西侧增设导流堤结构,通过束水冲淤原理优化出海口流场[10],减小圈围工程对水闸排涝功能的负面影响,保障区域防汛排涝安全。同时配套建设4座临时排水口,满足施工期围内雨水、吹填余水快速

排空需求。

堤线布置是圈围工程总体布局的核心,直接决定工程对区域河势的扰动程度、堤身工程量与施工可实施性。本工程堤线布置主要受控于3项条件:(1)区域河势稳定与岸滩演变趋势,堤线宜沿滩面相对稳定的高程线布设,避免压缩主槽行洪断面;(2)堤基软土分布与滩面高程,堤基宜落于淤泥层相对较薄、承载条件相对较好的滩面;(3)圈围分区与分期交地的可实施性,需满足分区合拢与分区吹填要求。比选同时满足《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》[22]关于围堤堤线布置、分区与纳潮口选址及河势影响控制的要求。

2.2　海堤断面结构设计

海堤断面型式需同时满足防浪稳定、护滩防冲、软基沉降适应、生态景观与工程造价等多目标要求。常用断面型式包括斜坡式、直立式和混合式三类,其适用性对比如表1所示。本工程滩面平缓、软基深厚,波浪以风浪为主且允许少量越浪,经比选采用复合型斜坡式土石坝断面,并针对各部位结构参数进行优化,形成适配复杂海域的海堤结构体系。

表1　海堤断面型式比选

比选项目	斜坡式(采用)	直立式	混合式
波浪爬高与越浪控制	好	一般	较好
软基沉降适应性	好(可分级适应沉降)	差(对不均匀沉降敏感)	一般
地基承载力要求	低	高	较高
护滩防冲能力	强	一般	较强
潮间带施工便利性	好(可分段施工)	差	一般
生态景观效果	好	差	一般
工程相对造价	较低	较高	中等
综合评价	采用	不采用	不采用

本工程采用的复合型斜坡式土石坝断面由防浪结构、堤身、护滩护脚、内坡及附属结构组成,各部位依据波浪要素、软基变形特征与施工条件进行参数优化,典型断面主要结构参数见表2。

防浪结构采用深弧形钢筋混凝土防浪墙,墙顶高程9.5 m,返浪效果优于传统平直防浪墙,可有效降低波浪爬高[11-12]。墙后堤顶路面高程8.3 m,预留0.5 m结构沉降量。堤顶设置7.0 m宽双车道,搭配1.75、0.75 m双侧人行便道,兼顾防汛通行与日常运维需求。

堤身外坡坡度统一为1∶3,上坡采用栅栏板护坡,抗风浪稳定性强、施工便捷;下坡采用翼形块体护坡,消浪性能优异[13]。在外坡6.0 m高程处设置6 m宽灌砌块石消浪平台,平台内外设置混凝土埂,阻断波浪紊流冲刷堤身。堤脚采用软体排砂肋抛石+扭王块体复合护滩护脚结构,提升堤脚抗冲刷能力,防止滩地淘刷失稳。

表2　海堤典型断面主要结构参数

部位/项目	设计参数
防浪墙型式与墙顶高程	深弧形钢筋混凝土防浪墙,墙顶高程9.5 m
堤顶路面高程	8.3 m,预留0.5 m结构沉降量
堤顶宽度	7.0 m双车道,配1.75、0.75 m双侧人行便道
堤身外坡	坡度1∶3,上坡栅栏板、下坡翼形块体护坡
消浪平台	6.0 m高程处设6 m宽灌砌块石平台,内外设混凝土埂
护滩护脚	软体排砂肋抛石+扭王块体复合结构
堤身内坡	坡度1∶3,浆砌块石拱格+草皮护坡
内青坎	高程4.5 m、宽20 m,配套排水沟
分缝格埂	设于2.70 m平台促淤坝与堤身土方分界处
堤身构筑形式	内外充泥管袋棱体+吹填土堤芯

堤身内坡采用1∶3坡度,选用浆砌块石拱格搭配草皮护坡,兼顾防渗、防雨淋冲刷与生态景观效果。内青坎高程4.5 m、宽度20 m,配套布设排水沟,完善堤身排水体系。同时在2.70 m平台促淤坝与堤身土方分界处设置分缝格埂,解决传统工程中外侧抛石坝变形引发的内侧土方流失、不同结构差异沉降开裂问题,优化结构受力特性。

堤身采用“内外充泥管袋棱体+吹填土堤芯”的构筑形式[14-15],充分适配软基施工条件,降低结构自重,提升堤身整体性与变形适配性。

3　核心关键技术研究与应用

3.1　分期分步圈围施工优化技术

常规滨海圈围工程多采用先促淤、后圈围的施工模式[16],工期周期长,无法适配本项目紧迫的用地需求。为平衡工程安全、建设工期与投资成本,本工程摒弃传统施工模式,创新采用“一步到位、分期实施”的总体方案,在保障河势稳定、降低施工风险的前提下,满足区域快速供地需求。

结合汛期水文规律,制定五阶段精细化施工流程:第1阶段,汛后实施堤脚2.5 m高程抛石棱体施工,形成滩地保护屏障,作为后期大堤镇压平台,规避汛期滩地冲刷;第2阶段,依托抛石屏障开展顺堤裸吹填土与围堤土方施工,完成大堤龙口合拢与堤身主体填筑;第3阶段,开展围内吹填施工,快速推

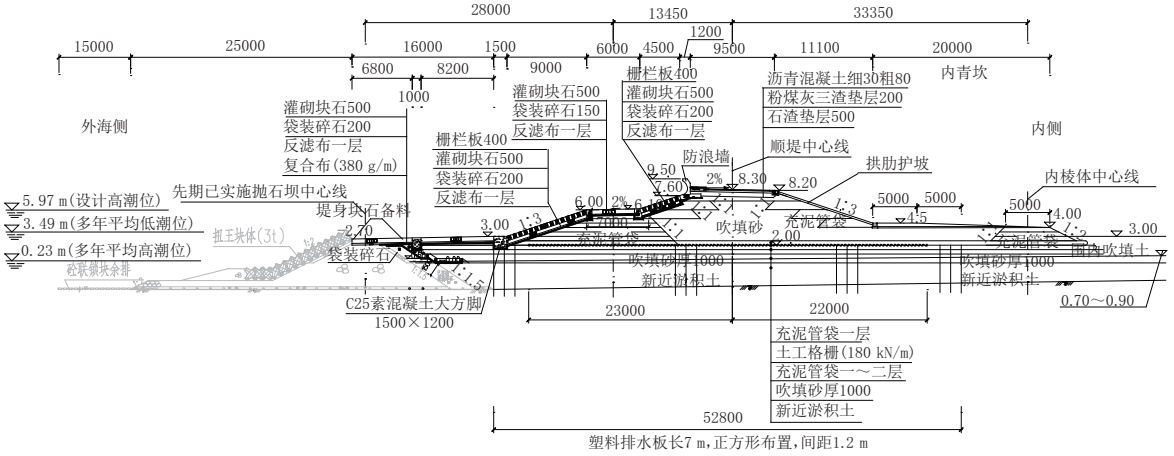


图1　海堤断面设计图(单位:mm)

进滩涂成陆;第4阶段,施工渡汛断面结构,保障汛期工程安全;第5阶段,完善堤顶挡墙、路面、内坡护坡等附属结构,完成整体竣工验收。

该施工方案规避了主汛期土方作业,大幅降低台风、大浪对在建工程的破坏风险,同时通过前置抛石护脚、分区合拢的方式,解决了砂源短缺、作业时长不足的难题,在压缩工期的同时,有效控制工程投资与施工风险。

为定量说明该施工组织方案的优越性,将其与传统"先促淤、后圈围"方案在工期、投资与风险控制等方面进行比选,结果如表3所示。

表3　施工组织方案比选

比选项目	传统方案 (先促淤、后圈围)	本工程方案 (一步到位、分期实施)
主要工序	促淤成滩→二次圈围→堤身填筑→围内吹填	抛石护脚→堤身填筑→龙口合拢→围内吹填→渡汛→附属结构
圈围成陆周期	长,需先促淤成滩,历时数年以上	短,实现圈围造地一步到位
工程投资	高,含促淤、二次圈围及重复抛石费用	较低
汛期施工风险	大,跨汛期作业面多	小,规避主汛期土方作业并设渡汛断面
砂源需求	大	较小,就地吹填与外运结合
风险控制措施	常规管控	前置抛石护脚+分区合拢+全过程监测
综合评价	不采用	采用

3.2　水动力数值模拟与导流堤优化技术

为精准研判工程对区域河势、中港水闸排涝的影响,建立长江口–杭州湾大范围二维水流数学模型与工程局部精细化模型,基于实测潮位、流速、地形数据完成模型率定验证,精准模拟工程建设前后区域流场、流速、淤积变化规律。

大范围模型用于提供开边界条件并反映工程对区域流场的影响,局部模型用于刻画导流堤、龙口及出海口附近的流态细节。模型采用垂向平均二维潮流(浅水)方程离散求解,计算方法与长江口—杭州湾同类模型一致[4-6];滩地采用动边界处理干湿交替。

模型经实测潮位与流速资料率定验证,各测点计算值与实测值吻合良好,误差满足工程模拟精度要求;文献[4]对该海域二维模型的验证亦表明计算流场与实测一致。以区域实测潮流特征[21]作为判别优化前后流速增减幅度的参照基准。

为系统评价工程建设及导流堤优化对流场的影响,设置工程前、工程后(未设导流堤)与工程后(设导流堤)3类状态,并分别考虑大潮、中潮两种潮型,共5个计算工况,如表4所示。考虑到大潮涨落潮流速显著大于小潮[21],以大潮工况作为控制工况、中潮工况作为对照工况。

表4　计算工况设置

工况	工程状态	潮型	分析目的
工况1	工程前(现状)	大潮	建立基准流场
工况2	工程前(现状)	中潮	建立基准流场
工况3	工程后、未设导流堤	大潮	单侧圈围延伸的影响
工况4	工程后、设导流堤	大潮	评价优化方案效果
工况5	工程后、设导流堤	中潮	评价优化方案效果

模拟结果表明:单侧圈围延伸后,中港出海口过流断面未收窄、落潮流速降低,挟沙能力下降,泥沙易于落淤,口门淤积加剧,水闸排涝能力随之削弱;增设西侧导流堤后,出海口过流断面适度收窄,涨落潮分流嘴明显外移,落潮流速集中,挟沙能力增强,原口门淤积区逐步转为冲刷、淤积区向外侧迁移,水流流态平顺,局部涡流与回流区基本消失,有效改善了出海口流态。

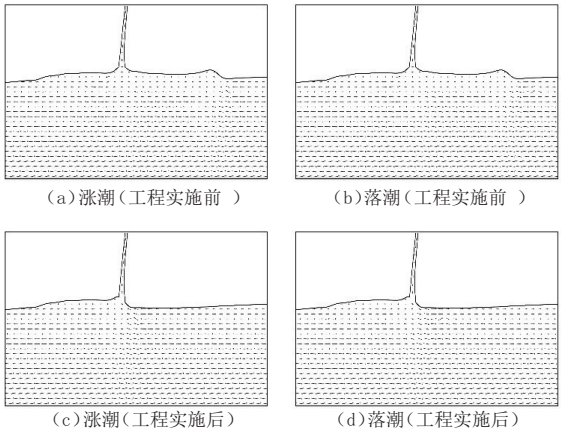


图2　长江口南汇嘴潮滩围垦工程前后潮流流场对比

3.3　滨海软淤土地基复合处理技术

针对本工程堤身淤泥层厚、固结度低、地基承载力不足、易沉降滑坡的核心难题,创新提出“吹砂挤淤+反压加载+塑料排水板固结+土工格栅水平加筋”的复合地基处理方案[17]。

通过表层裸吹置换浅层软弱淤泥,替换优质砂料优化堤基基材;依托前期抛石棱体实现堤脚反压加载,提升堤基整体稳定性;布设塑料排水板加速深层软土孔隙水排出,加快土体固结沉降,提升地基承载力;铺设高强度土工格栅实现水平加筋,均匀分散堤身荷载,抑制地基侧向变形,解决软基浅层滑动问题。

上述四项措施是按照“置换—排水—固结—加筋”的次序分工协同,各单项措施的作用原理、处理目的与适用条件如表5所示。

表5　复合地基各单项措施作用原理与处理目的

单项措施	作用原理	处理目的	适用条件
吹砂挤淤	利用吹填砂自重及挤淤压力将浅层淤泥向两侧挤出,形成砂垫层与置换体	置换表层软弱淤泥,提高浅层承载力,兼作排水与施工垫层	浅层淤泥较薄(≤3 m)、具备砂源
反压加载(抛石棱体)	堤脚抛石棱体对堤基产生侧向反压,约束软土侧向变形	提高堤基整体稳定性,抑制浅层滑动,兼作镇压平台	堤脚具备抛石施工条件
排水固结(塑料排水板)	缩短土体排水路径,加速孔隙水排出与超静孔隙水压力消散	加快深层软土固结沉降,提高地基承载力	深厚软土、工期受限
水平加筋(土工格栅)	格栅与土体界面摩擦与互锁,分散荷载并承受拉应力	均匀分散堤身荷载,抑制侧向变形与差异沉降	需控制不均匀沉降的部位

综合处理后,地基工后残余沉降控制在预留沉降量0.5 m以内;堤基抗滑稳定与整体稳定安全系数满足《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)[7]和《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)[8]要求。

相较于单一地基处理工艺,该复合技术可大幅缩短软土固结周期,适配短工期建设要求。同时搭配深弧形优化防浪墙结构,成功将堤顶高程降低0.5 m,每公里海塘节约投资约50万元,节省占地3 000 m^2,实现了安全、经济、占地控制的多重效益。通过分缝格埂结构优化,彻底解决了软硬结构衔接处的土方流失与沉降开裂病害,大幅提升海堤结构耐久性。

3.4　精细化施工组织与监测管控技术

针对潮间带施工、砂源短缺、汛期风险高的特点,制定精细化施工组织方案,明确两大核心管控节点:大堤龙口合拢与汛期渡汛。通过前置场内外交通道路建设、提前完成抛石备料、预制圈围启动泥库与备砂场地等措施,彻底解决砂石料运输储备难题,保障施工连续性。施工组织简图如图3所示。

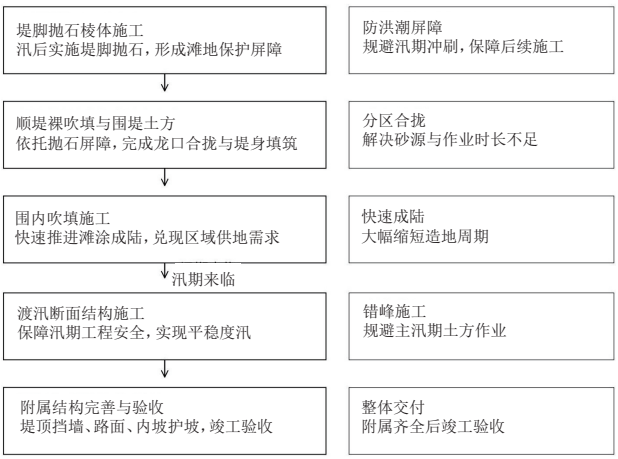


图3　施工组织简图

龙口施工采用“先缩窄、后合拢”的施工方式,在非汛期小潮期将120 m龙口逐步收窄至80 m,采用充泥管袋平立堵结合工艺完成合拢[18-19],有效降低合拢水流流速,提升合拢成功率。同时引入专业监测单位,开展全过程堤基沉降、位移、应力监测,实时采集施工期沉降、固结度、结构变形数据,通过数据反演分析动态调整堤身加载速率与施工工艺,规避软基失稳风险。

该监测体系不仅保障了本工程施工安全,其积累的软基海堤沉降与变形实测数据,也为国内同类滨海圈围工程的施工管控与参数取值提供了实测依据。

4　工程成效与效益分析

4.1　工程运行成效

本工程竣工验收交付使用后,历经多年汛期、台风及高低潮位极端工况考验,海堤整体结构稳定,

无沉降超标、坡面破损、堤脚冲刷、口门淤积等病害，防汛排涝功能稳定达标。围区形成良性生态湿地，有效改善了滨海滩涂生态环境，吸引候鸟栖息，实现了水利工程与生态环境的协调发展。

工程先后荣获上海市优秀工程咨询二等奖、上海市水利工程金奖、上海市优秀工程设计三等奖、中国水利工程优质(大禹)奖，工程设计与施工质量获得行业权威认可。

4.2 社会效益与经济效益

社会效益方面，工程新增产业用地2 400余亩，彻底解决了临港工业园区重装备产业、物流产业的用地缺口，完善了上海国际航运中心配套体系，推动临港新城产业集聚升级，强化了上海服务长三角、辐射长江流域的枢纽能级。同时工程优化了区域岸线形态，稳固了杭州湾北岸滩涂格局，保障了区域防汛、排涝安全，提升了滨海区域生态景观品质，助力区域可持续发展。

经济效益方面，通过结构优化、地基工艺创新、施工组织精细化管控，有效降低工程建设投资，相较于传统设计方案，大幅减少占地与后期地基处理成本。经国民经济分析，本工程经济内部收益率22.72%，效益费用比1.28，抗风险能力强，具备优异的经济价值。同时快速供地的建设模式，缩短了产业落地周期，为区域产业经济发展创造了显著的增量价值。

5 结论与展望

本文以上海港临港产业区奉贤分区圈围工程为依托，针对长江口-杭州湾交汇区域水动力复杂、软基软弱、砂源匮乏、工期紧张等多重工程难题，研发并应用了成套滨海圈围海堤设计与施工技术体系，得出以下结论：

(1)针对滨海强潮复杂水动力环境，建立长江口—杭州湾大范围二维水流数学模型并完成率定验证，经工程前后多工况对比表明，增设西侧导流堤可收窄出海口过流断面、集中落潮流速，消除局部涡流，改善口门淤积并保障水闸排涝安全，实现了工程建设与河势稳定的协调。

(2)“吹砂挤淤+反压加载+塑料排水板固结+土工格栅水平加筋”复合地基处理技术，可有效解决滨海厚层淤泥地基承载力低、沉降量大、易失稳开裂的问题；配合复合型海堤断面与分缝格埂结构，显著提升结构安全性与耐久性，断面优化使堤顶高程降低0.5 m，每公里节约投资约50万元、节省占地3 000 m^2。

(3)结合汛期水文规律的“一步到位、分期实施”施工组织方案、精细化龙口合拢工艺与全过程监测管控体系，适配潮间带受限施工条件，较传统“先促淤、后圈围”方案在工期、投资与风险控制方面具有明显优势，实现了工期、安全与投资3大指标的平衡。

本工程形成的成套技术体系适配我国东南沿海滨海圈围与海堤改造工程，技术成熟、安全性高、经济性好、生态友好，具备较强的推广价值。后续可结合智能化监测、绿色建材与低碳施工工艺，进一步优化滨海水利工程建设模式，推动沿海滩涂资源高效、绿色、可持续开发利用。

参考文献：

[1] 张甲峰，钱建固，张合青，等.塑料排水板联合超载预压处理超大面积深厚软基的数值分析[J].岩土工程学报，2013，35(增刊2)：892-896.

[2] 刘爱民，梁爱华.土工合成材料在固化土海上围堤工程中的综合应用[J].岩土工程学报，2016，38(增刊1)：177-180.

[3] 吕子鑫，张福海，王保田，等.塑料排水板在吹填土地基沉降控制中的应用[J].水利与建筑工程学报，2012，10(5)：116-119.

[4] 付桂，李九发，戴志军，等.长江口南汇咀岸滩围垦工程潮流数值模拟研究[J].海洋湖沼通报，2007(4)：47-54.

[5] 李莉，操进浪，贺治国，等.杭州湾-长江口海域岸线变化对杭州湾潮汐特征的影响[J].浙江大学学报(工学版)，2018，52(8)：1605-1615.

[6] 左书华，李蓓，张征，等.长江口南汇嘴潮滩围垦工程潮流数学模型研究[J].中国港湾建设，2017，37(7)：8-12.

[7] GB 50286—2013 堤防工程设计规范 [S].

[8] GB/T 51015—2014 海堤工程设计规范 [S].

[9] 李路，刘新成，宋永港，等.强潮河口海岸冲蚀对海堤安全的影响研究[J].华东师范大学学报(自然科学版)，2019，55(4)：202-211.

[10] 郭磊城，朱磊，陈语，等.河口航道治理中导堤丁坝工程措施的影响探讨[J].泥沙研究，2021，46(4)：54-59.

[11] 刘晓建，侯墉，陈文龙，等.生态海堤多级平台消浪特性及越浪量计算[J].河海大学学报(自然科学版)，2024，52(4)：70-77.

[12] 程永东，江洧.允许部分越浪海堤的断面设计[J].水利技术监督，2005，13(3)：34-36.

[13] 骆文广，张小飞，吴金骏，等.台阶式海堤结构参数对堤前波浪特性的影响研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2016，49(4)：408-414.

[14] 张国泉，陈小刚.充泥管袋在青草沙水库工程中的应用[J].人民长江，2009，40(12)：47-48.

[15] 应文斌.充泥管袋干法施工技术在海塘堤身构筑中的应用[J].城市道桥与防洪，2023(6)：199-204.

[16] 茅志昌，李九发，吴华林.上海市滩涂促淤圈围研究[J].泥沙研究，2003(2)：77-81.

[17] 蔡袁强.吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技

(下转第284页)