DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260821

海堤的防潮封闭体系构建与加固技术研究
——以珠海石化区东大堤为例

彭文华
(珠海联港城市建设管理有限公司,广东 珠海 519090)

摘 要: 珠海东大堤是片区防潮体系的核心屏障,工程服役年限已达16年。在多场次台风侵袭与长期海洋水动力耦合作用下,堤体呈现结构老化、堤基淘蚀、护面块体损毁等病害特征;加之场内536 m缺口长期未实施封堵,区域防潮工程体系无法形成闭合防护环路,存在重大防洪潮安全隐患。依托现场现状勘查与工程安全评估,系统厘清既有堤身损伤特征,揭示缺口段对防潮闭合防护效能的制约机制;结合场地水文地质边界条件构建综合治理技术方案,改造后可有效提升堤防防潮设防标准、优化近岸水动力环境。相关研究结论可为国内同类存在敞口缺口海堤的封堵改造工程提供理论依据与工程技术借鉴。

关键词: 海堤加固;软基;挡潮闸;防潮闭合体系。
中图分类号: TV871 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0267-05

Research on the Construction and Reinforcement Technology of Seawall Tide-Resistant Sealing Systems:
Taking the East Levee of Zhuhai Petrochemical Zone as an Example

PENG Wenhua
(Zhuhai Liangang Urban Construction Management Co., Ltd., Zhuhai 519090, China)

Abstract: As the core barrier of regional tide-prevention system, the East Embankment of Zhuhai has been in service for 16 years. Under the coupled effects of repeated typhoon strikes and long-term marine hydrodynamic forces, the embankment suffers from typical defects including structural aging, foundation scour and damage of armor blocks. In addition, the 536 m-wide gap within the project has not been closed for a long time, which prevents the regional tide-prevention system from forming a closed protective loop and brings prominent flood and tide safety hazards. Relying on field investigation and engineering safety assessment, this paper systematically analyzes the damage characteristics of the existing embankment and reveals the restriction mechanism of the gap on the closed tide-defense performance. A comprehensive treatment scheme is proposed combined with the hydrogeological boundary conditions of the site. After reconstruction, the tide-defense standard of the embankment can be effectively improved and the nearshore hydrodynamic environment optimized. The research results can provide theoretical basis and technical references for the closure and reconstruction of similar sea dikes with open gaps in China.

Keywords: seawall reinforcement; soft foundation; storm surge barrier; flood defense closure system

0 引 言

石化区东大堤为乾务赤坎大联围的重要组成部分,堤线总长6.31 km,其中中央536 m缺口及配套穿堤水闸因受限于当时建设条件未能同步实施,导致堤内、外海域直接连通,规划要求的封闭防潮洪体系未能形成。工程直面南海,处于迎风顶吹的不利方位,且堤基为深厚软土地基。运行16年来,在多次台风风暴潮正面袭击与软基固结沉降的耦合作用下,既有堤段结构损毁严重,局部防浪墙倾倒、外坡护砌破损、抛石基础流失等问题突出,现状堤顶高程已远低于原设计的100年一遇防潮标准要求。南北两段虽具备一定防御能力,却因中部缺口敞开而无法形成完整的防潮闭合圈,石化区直接暴露于外海风暴潮的威胁之下,同时穿堤建筑物明显挡潮能力不足,同时外排泵站缺失,该区域已无法应对洪潮涝的复合作用[1]。

因此对海堤按100年一遇标准进行达标加固,并

收稿日期:2026-07-24
作者简介:彭文华(1995—),男,学士,工程师,副经理,从事水务工程全过程建设管理工作。

在中央缺口处新建水闸以实现全线封闭，是消除区域防潮安全隐患、提升石化园区防灾能力的必要举措。本文在系统梳理东大堤工程地质条件与病害特征的基础上，重点围绕老堤加固方案比选、缺口建闸的水文适应性及封闭体系的高程控制等关键技术问题展开研究，通过方案比选与稳定性验算论证治理方案的可行性，以期为沿海同类带缺口海堤的升级改造与封闭体系构建提供借鉴。

1 工程现状与安全评估

1.1 原海堤的设计标准与多年的沉降分析

石化区东大堤原规划设计为100年一遇防潮标准，承担着保护高栏港石化园区防潮安全的重任。然而，由于2009年北堤及南堤建成后，中部536 m缺口及配套穿堤水闸一直未建，导致该段海堤长期无法形成闭合的防潮体系，整体防御功能存在先天不足。工程运行16年来，因缺乏系统维护与加固，加之多次台风风暴潮侵袭，海堤水工结构损毁严重，局部防洪墙倾倒、外坡护砌破损、抛石基础流失等问题突出。与此同时，受堤基深厚软土层固结影响，海堤产生了显著的不均匀沉降，根据历次观测资料，堤顶累计沉降量已达0.8~2.5 m。这一沉降直接导致现状堤顶高程严重偏低，经复核计算，现有高程已远不能满足原设的100年一遇防潮标准要求，防御能力大幅下降。上述工程缺陷与结构隐患叠加，使得石化区面临潮水倒灌和漫堤的重大安全风险。综上，原设计标准已不具备现实指导意义，现状海堤的实际防潮能力已不足30年一遇，亟须以现状地基条件为基础，重新确定合理的设计高程并进行系统性加固。

1.2 多场台风登录后的破坏分析

2017年8月23日，强台风“天鸽”正面登陆珠海，中心风力14~15级，恰逢天文大潮期，风暴潮与天文潮叠加导致部分水文站点出现超历史最高潮位，珠海市直接经济损失达200亿元。此后13 d内，“帕卡”“玛娃”接连登陆，珠海市三发台风红色预警，沿海堤防遭受连续反复冲击[2]。

其间，石化区东大堤受损严重：部分堤段漫顶过水，防浪墙局部倾倒，堤外干砌石护坡被波浪掀翻脱落，堤顶及后边坡受越浪冲刷形成冲沟，堤脚抛石大量流失。“帕卡”过境时，掠过金湾、高栏港，进一步加剧了已受损堤段的破坏程度。

2018年9月，“山竹”强台风登陆广东，与珠海距离较近，多个水文站点潮位突破历史极值[3]。由于“天鸽”损毁的海堤尚在修复中，“山竹”再次对东大堤造成冲击：已倾倒防浪墙区域坍塌扩大，受损护坡继续剥落，堤身填土局部塌陷，抛石缺失段基础外露。

2017—2018年，东大堤连续遭受4次台风袭击，结构性损伤持续累积且未获及时修复。上述台风灾害表明，东大堤的破坏并非孤立事件，而是“先天设计缺陷（高程不足）+后天累积损伤（多次冲击）”共同作用的结果；单纯修补已无法恢复其功能，必须在全面评估损伤基础上实施系统性加固。

1.3 防潮体系存在缺口的危害

石化区东大堤中央现存536 m未建缺口，导致堤内外海域直接连通，规划中全线封闭的防潮洪体系始终未能形成。该缺口的存在，使东大堤南北两段建成堤防虽具备一定防御能力，却因中部敞开而丧失整体挡潮功能，高潮位时，海水经缺口长驱直入，直灌石化区围内；风暴潮期间，波浪经缺口无阻碍地传入，在围内形成涌浪，进一步加剧堤后区域淹没风险。此外，缺口段通道效应显著，涨落潮时潮汐水流集中通过缺口，流速加大，对缺口两侧堤头及附近堤脚形成持续性的局部冲刷，已造成两侧堤头基础掏空、护坡塌陷等次生破坏。这一“南北两段闭合、中间敞开”的格局，使得东大堤即便完成南北段加固，只要缺口未封闭，整个防潮体系即存在根本性的功能缺陷。因此，缺口处置是本次治理的首要前提——不解决缺口问题，南北段加固投入将因缺乏封闭条件而无法发挥应有效用；而缺口处置方案的选择（永久封堵抑或建设水闸），则需综合权衡防潮安全、排涝需求与工程经济性，成为本次方案研究的核心议题。

2 整体加固与防潮体系构建方案

针对前文所述现状海堤存在的三项核心问题——中央536 m缺口致使防潮体系无法闭合、堤顶高程不足导致防潮标准严重下降、多次台风袭击造成结构性损伤累积——本章从“既有堤段加固”与“防潮体系闭合”两个层面提出综合治理方案。以100年一遇防潮标准为目标，沿用现状堤线布置，首先通过中部缺口新建水闸及引堤实现南北两段贯通，解决防潮体系“通不通”的问题；在此基础上对南北两段老堤实施加高培厚与护坡加固，恢复并提升其结构强度与挡水能力，解决“够不够”的问题。方案设计充分考虑了深厚软基对堤身稳定与工后沉降

的约束,在断面选型与高程控制中采用了“允许越浪”原则以控制填筑荷载与工程风险。

2.1 海堤加固技术措施

依据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252—2017)、《防洪标准》(GB 50201—2014)及《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014),确定工程防潮标准为100年一遇,治涝标准为30年一遇24 h暴雨不致内涝[4]。

海堤加固沿用现状堤线布置,总长6.31 km,其中旧堤加固5 774 m,中部536 m缺口新建水闸及引堤以实现防潮封闭[5]。经综合比选,采用斜坡式海堤方案,在原堤身基础上加高培厚。施工前对原堤身进行清基处理,拆除旧防浪墙上部结构至建基高程,随后进行堤身加高与堤顶拓宽[6]。如图1所示,堤顶宽度8.0 m,设防汛公路、电缆沟及排水沟,路面以1.5%坡比向堤内倾斜。堤外护坡坡比1∶3,设反压消浪平台(高程2.5 m),采用预制混凝土四脚空心块护面,以利波浪能量在堤前消减,满足抗冲稳定及护坡下部填料淘刷防护要求;堤后护坡坡比1∶3,采用三维植草网垫护坡,堤后反压平台填土至2.5 m并绿化。

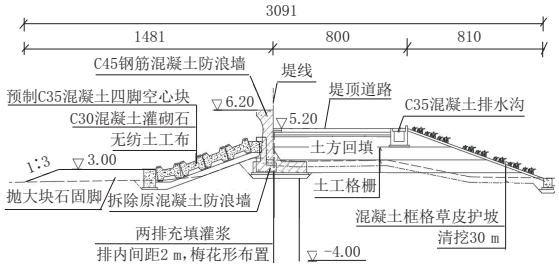


图1 堤防加固典型断面图(单位:cm)

堤身填筑料选用黏性土及石渣料,主堤身采用黏性土回填,堤外反压平台回填石渣料,堤后反压平台采用黏性土及利用料回填,内外护坡采用块石回填。堤顶设悬臂式钢筋混凝土防浪墙,设计高程6.2 m(含预留沉降),C40混凝土,墙顶设消浪反弧,底板厚0.6 m,建基面高程2.8 m,下设垫层。起点与山体间约12 m范围设防浪墙封闭,并保留现有交通闸口,设6 m宽金属横拉门以满足防潮封闭要求。堤外护坡综合考虑珠海地区台风登陆频繁、东大堤迎风顶吹的实际情况及消浪效果、耐久性与投资造价等因素,推荐采用预制混凝土四脚空心块护面结构[7]。

上述加固措施以加高培厚、护坡强化和结构补强为主线,使老堤结构强度与挡水高程满足100年一遇防潮标准要求,同时兼顾堤身稳定与越浪防护,为全线防潮封闭体系的形成奠定基础。

2.2 封闭圈的行成及高程控制

封闭防潮圈的形成依赖于空间闭环与高程达标两大环节的协同。海堤加固沿现有堤线布置,中部536 m缺口处新建东大堤水闸及引堤,使6.31 km海堤全线贯通,形成闭合防潮圈;水闸同时兼顾围内排涝功能。

堤顶高程的确定以堤身整体抗滑稳定计算及波浪爬高计算结果为依据。鉴于堤后为大面积水域可消纳越浪水体,本工程采用“允许越浪、固堤强坡”的设计原则,在确保堤坡抗冲安全的前提下适当降低堤顶高程,以减少堤身填筑工程量并控制深厚软基上的附加荷载风险。经对堤外消浪平台不同宽度(8、11、14 m)及高程(1.5、2.5、3.5 m)进行组合比选,并据此计算各组合下的波浪爬高与越浪量,结合经济性比较,推荐方案为:消浪平台宽11 m、高程2.5 m[8]。防浪墙顶高程不低于5.8 m,不计沉降的堤顶路面设计高程为5.2 m,防浪墙顶与路面高差控制在1.0 m。该方案较“不允许越浪”方案堤顶高程降低1.07~1.70 m,有效地减少了软基填筑风险与工程造价。

通过空间贯通与高程达标双重控制,6.31 km海堤全线形成顶高程统一、挡水标准一致的闭合防潮体系,在保障100年一遇防潮安全的前提下,实现了工程安全性与经济性的合理平衡。

3 关键的施工技术与质量控制

3.1 地基处理技术

新建堤段及水闸地基软土层厚度约10~30 m,堤身稳定、工后沉降控制及施工可行性是地基处理方案选择的关键[9]。综合考虑工程造价、沉降控制及施工期度汛风险,地基处理按部位分别采用不同方案。

3.1.1 主堤身与水闸地基

采用水泥搅拌桩复合地基。主堤身搅拌桩从堤外坡脚至内坡脚共26排,桩径0.5 m,间排距1.0 m(见图2),桩长15 m,处理范围总长244 m。水闸地基搅拌桩布置范围与水闸底板宽度相适应,参数同主堤身。

搅拌桩复合地基承载力按《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)计算,桩侧摩阻力特征值按淤泥质土层取6 kPa,桩端阻力取80 kPa,单桩承载力

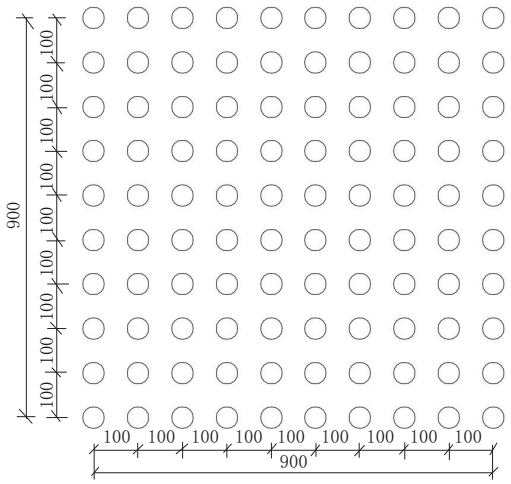


图2 水泥搅拌桩正方形均匀分散布置(单位:cm)

特征值计算为168 kN,面积置换率按等边三角形布桩计算为0.090 7,复合地基承载力特征值为165 kPa,满足上部荷载要求(≥150 kPa)。沉降采用分层总和法计算,压缩层深度按附加应力等于0.2倍自重应力确定,复合地基压缩模量按桩土面积置换率加权计算,基准期结束时主堤身总沉降约0.97 m。

3.1.2 内外反压平台

为节约投资,采用B型塑料排水板结合上部填筑压载预压固结方案[10]。堤外平台设21排排水板,堤内平台设17排,合计38排,间排距1.0 m,排水板长度18 m。采用砂井固结理论计算,平台区域总沉降约3.55 m[11]。

3.1.3 新旧堤衔接段

现状口门与旧堤衔接处设有防护裹头,护面下部及坡底存在大量抛石,水泥搅拌桩或CFG桩施工难度大、造价高,故采用高压旋喷桩方案,先以小孔径(0.11 m)引孔穿透抛石层再高压注浆成桩。衔接段设于口门左右岸各30 m,桩长15 m,桩径0.6 m,共22排,间排距为1.2 m[12]。

3.1.4 差异沉降控制

主堤身与内外平台计算沉降差异约2.58 m。为协调差异沉降,将衔接部位5排水泥搅拌桩排距由1.0 m渐变为1.1~1.2 m进行过渡,同时对内外反压平台采取分层堆载预压并适当超载填筑,使平台区域大部分沉降在施工期内完成[13]。参照相关规范,相邻断面差异沉降率按≤0.5%控制,过渡措施后计算差异沉降率约0.32%,满足要求。

3.2 新建堤防与老堤的衔接施工

新建堤防与老堤衔接的核心问题包括断面型式的顺接、差异沉降控制及防渗体系的搭接。

新建堤防轴线顺连两侧加固堤线,堤顶结构与旧堤加固段保持一致:堤顶宽度8 m,堤顶高程5.2 m,防浪墙顶高程6.2 m(含预留沉降)。堤身采用黏土回填(渗透系数不大于10^{-4} cm/s),中部设3层土工格栅以增强整体稳定。衔接段地基处理采用高压旋喷桩(参数同4.1节),先引孔穿透抛石层后注浆成桩。

衔接施工的关键在于控制地基处理型式差异引起的不均匀沉降:新建段主堤身为水泥搅拌桩、内外平台为排水板预压,而旧堤段采用充填灌浆防渗,基础刚度不同。在衔接部位通过搅拌桩排距渐变(1.0 m→1.1~1.2 m)及分层堆载预压控制差异沉降。同时,将旧堤充填灌浆范围向新建段延长,使两种防渗体在衔接处形成搭接,确保防渗体系连续完整。

3.3 水闸基坑开挖与老堤连接的防渗处理

水闸建于中部536 m缺口处,基坑开挖将揭露两侧老堤堤身及堤基,防渗处理是确保封闭圈完整性的关键环节。

3.3.1 基坑开挖与支护

基坑位于原缺口处,两侧为既有旧堤堤身,开挖深度约4~5 m。支护结合永临结合原则,利用水闸两侧翼墙及引堤结构进行边坡支护,局部软弱段辅以钢板桩临时支护。开挖应分层进行,每层深度不超过1.5 m,及时跟进支护。开挖至设计高程后尽快施工垫层及底板,减少基坑暴露时间,防止坑底软土回弹及雨水浸泡。

3.3.2 与老堤连接的防渗处理

如图3所示,水闸两侧空箱与老堤衔接段(左右岸各20 m引堤范围)是防渗薄弱环节[14]。衔接段地基处理采用高压旋喷桩,与两侧老堤充填灌浆防渗体形成搭接。水闸主体与老堤之间设铜片止水及橡胶止水带双道止水体系,确保衔接缝在温度变化及不均匀沉降条件下的防渗可靠性[15]。翼墙背后设土工膜与老堤防渗体搭接,搭接长度不小于2 m,确保防渗体系连续无断点。

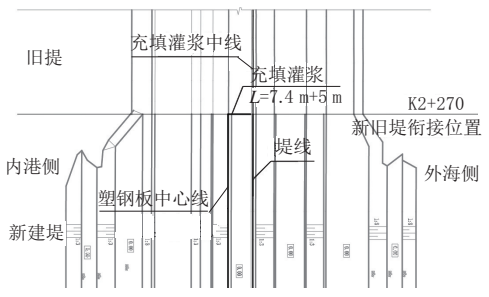


图3 新旧堤防防渗衔接平面图

3.3.3 施工顺序

考虑施工期度汛安全,建议按以下顺序施工:水

闸地基搅拌桩及衔接段高压旋喷桩施工→基坑开挖及支护→水闸底板及闸墩施工→翼墙及引堤施工→闸门安装→防渗体衔接施工(充填灌浆、土工膜铺设)→堤身回填。其中防渗体衔接施工应在水闸主体结构沉降基本稳定后进行,以避免差异沉降导致防渗层拉裂。

4 结 论

(1)既有堤段受软基沉降与台风累积损伤双重影响,现状防潮能力已不足原设计标准;中央 536 m 缺口是制约防潮体系闭合的根本性缺陷,其处置是加固工程的首要前提。

(2)采用斜坡式海堤加高培厚、中部新建水闸及引堤的治理方案,可使 6.31 km 海堤全线形成顶高程统一、挡水标准一致的闭合防潮体系,在保障 100 年一遇防潮安全的前提下,实现了安全性与经济性的合理平衡。

(3)针对深厚软基、新旧堤防衔接及缺口建闸等关键技术环节,采用水泥搅拌桩与塑料排水板分区处理、高压旋喷桩过渡衔接、双道止水与土工膜搭接等综合措施,施工技术可行,可有效控制差异沉降并确保防渗体系连续完整。经计算复核,复合地基承载力、差异沉降率等关键指标均满足规范要求。

本工程方案可为同类带缺口海堤的达标加固与封闭体系构建提供参考。

参考文献:

[1] 李子文.气候韧性下横琴粤澳深度合作区海堤承洪御潮生态体系构建[J].水利规划与设计,2026(12):38-44;152.
[2] 彭铭,张敬良,朱艳,等.风暴潮下海堤破坏模式及钢板桩加固机制[J].地球科学,2025,50(10):3809-3822.
[3] 刘健,张小刚,刘强,等.风暴潮作用下的生态海堤消能效应数值模拟研究[J].水道港口,2026,47(3):355-363.
[4] 张龙.棉北海堤除险加固工程设计研究[J].水利科学与寒区工程,2022,5(11):70-74.
[5] 肖鹏.三屿围海堤防洪工程技术的应用与研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(1):103-105.
[6] 钟振宇,肖杨.海堤提级加固工程设计实践[J].陕西水利,2024(12):79-81.
[7] 潘峰.滨海堤防钢筋混凝土与复合土工合成材料协同加固机制及多灾害韧性提升研究[J].红水河,2025(4):43-45;54.
[8] 黄朝煊,丁羲楠.海堤龙口水力计算方法探讨[J].长江科学院院报,2019,36(9):81-85;98.
[9] 韩涛.海堤工程险工段的加固设计[J].水利技术监督,2024(8):245-248;258.
[10] 钱立义,章文智,张泽文,等.海相软土地区海堤加固工程优化施工研究[J].水利规划与设计,2023(4):126-129.
[11] 瞿晨瑶,陈汉邦,陈文亮,等.基于砂井地基等效法的软基海堤工后沉降数值模拟[J].水利技术监督,2022(10):222-226.
[12] 江辉,刘瑶,黎剑华.钻孔灌注桩加固海堤软基机理及应用[J].铁道建筑,2007(12):85-87.
[13] 朱广安,张婧.新淤土地基上闸堤连接段差异沉降分析与控制研究[J].水利规划与设计,2021(3):82-86.
[14] 刘建飞,任红侠.某海堤与水闸连接段粉砂质地基处理方式研究[J].人民黄河,2020,42(1):138-144.
[15] 王宏晖.浅谈引张线系统在外走马埭海堤水闸监测中的应用[J].水利建设与管理,2018,38(11):67-70.