

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.008

基于韧性理念的海堤越浪排水规划设计研究

谭庆俭¹, 杨国洪¹, 陆伟雄², 杜佐道¹

(1. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519002; 2. 珠海市供水与排水治污中心, 广东 珠海 519000)

摘要: 现行海堤越浪水量主要依赖与堤身合建的排水沟实现灰色转移和排放, 堤面污染物无法得到有效去除, 更难以有效应对超标降雨和极端风暴潮, 灾后恢复进程缓慢。韧性海堤概念的提出, 带来了越浪排水设计理念的更新, 要求在基础排水设施建设上有预见性地打造韧性城市, 重视排水系统的自然导向和弹性抗冲击能力。以马骝洲水道北堤岸整治修复工程为例, 在挡水、防浪功能分置的框架下, 对韧性海堤越浪排水规划和设计进行研究, 通过优化堤后带竖向设计构建多功能、多层次的韧性防护体系, 可综合实现韧性防灾功能。

关键词: 韧性海堤; 越浪排水; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0055-05

Research on Planning and Design of Seawall Overtopping Drainage Based on the Resilient Concept

TAN Qing-jian¹, YANG Guo-hong¹, LU Wei-xiong², DU Zuo-dao¹

(1. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519002, China; 2. Zhuhai Water Supply and Drainage Pollution Control Center, Zhuhai 519000, China)

Abstract: At present, the water volume of seawall mainly depends on the drainage ditch built together with the levee to realize gray regulation and discharge. The pollutants on the embankment surface can not be effectively removed, and it is more difficult to effectively cope with excessive rainfall and extreme storm surge, resulting in a slow post-disaster recovery process. The concept of resilient seawall brings the renewal of seawall drainage design concept, which requires the construction of infrastructure drainage facilities to build resilient cities in a forward-looking way and pay attention to the natural orientation and elastic impact resistance of the drainage system. Taking the restoration project of the north bank of Maliuzhou waterway as an example, this paper has studied the planning and design of the resilient seawall over the wave under the framework of separating the functions of retaining water and preventing waves. By optimizing the vertical design of the back zone of the embankment, a multi-functional and multi-level resilient protection system is constructed, and the resilient disaster prevention function is fully realized.

Key words: resilient seawall; overtopping drainage; sponge city

传统海堤作为抵御风暴潮的主要屏障, 为满足挡潮防浪的要求, 通常采用加高、加固的措施来避免海水漫溢。挡潮和防浪功能二位一体, 堤身厚

重, 无法形成开阔的海岸视带。随着韧性海堤概念的提出, 通过采用允许越浪标准设计, 挡潮和防浪逐渐形成功能分置的格局。但是, 当前珠海市的允

许越浪海堤大多仍然采用挡、排结合的贴坡排水或堤顶排水。这种较为单一的灰色排水设施亲水性较差,无法有效应对频发的极端灾害天气,其防护效果有限且灾后恢复进程缓慢,堤后带往往破坏最为严重。而韧性海堤旨在构建多功能、多层次的韧性防护体系,以综合实现韧性防灾功能,这就对堤后带的越浪排水提出了新的要求。以马骊洲水道北堤岸整治修复工程为例,在挡水、防浪功能分置的框架下,对韧性海堤越浪排水规划和设计开展研究。

1 工程背景

马骊洲水道北堤岸整治修复工程位于横琴粤澳深度合作区与珠海鹤州新区交界处,马骊洲水道以北,范围东起横琴大桥,西至横琴二桥,长约为5.08 km。作为粤澳深度合作的窗口,试图在海岸带防灾减灾方面进行新的探索。在利用堤前、堤身带来满足消浪、挡潮功能的前提下,通过优化堤后带竖向设计以消纳越浪水量,在实施生态修复、恢复生物群落的同时形成开阔的视野廊道,增强岸线弹性。在此背景下,工程海堤修复加高、消浪防冲、堤后排水和景观绿化等需进行整体综合考虑,与堤后中央绿谷建设项目共同提高海堤防洪(潮)能力,这就需要统筹做好越浪排水规划研究,解决现状越浪排水存在的问题,综合实现绿色防灾和韧性排水功能。

2 韧性海堤建设要点

由于极端洪涝灾害频发,构建水安全韧性城市逐步成为现阶段防灾减灾的新思路。城市韧性其实是一个过程体现,即在受到扰动时功能不被完全破坏,扰动后能快速恢复灾前状态,同时具有适应各种不确定灾害的适灾韧性。而韧性海堤建设主要立足于水安全,优化纵向的弹性设计,在实现挡潮消浪的同时提升整个堤后带抗冲击能力。韧性海堤的竖向规划要点主要基于这一理念进行总体考虑:①根据城市防洪潮标准和周边测站,准确掌握潮位变化规律,确定海堤设计高程;同时,结合海岸原有走势与岸线形态,以及地形地质与规划定位,合理选择堤岸形式,通过设置堤前消浪措施,在削减堤顶高程的同时减少越浪水量。②根据设计潮位和风速对波浪要素进行测算,主要考虑浅水波变形和波浪爬高,测算越浪水量。③结合波浪爬高

和越浪水量情况,综合考虑海堤的生态布局形式,尽量保留并修复原有生态植被和岸滩原始形态,同时在堤后增建蓄洪海绵,通过设置消浪平台和护面措施,预留绿植生长台地以便人工营造接近于自然的植被、景观。④考虑应急强排措施,采用强排和重力自流相结合的方式构建完整的防洪排涝体系,以增强极端风暴潮的应对能力。⑤结合水岸管护,构建万里碧道,推动沿线海岸保护。

工程设计时需结合越浪排水要求,通过优化堤前、堤后带竖向设计,尽量降低堤顶高程,同时结合工程措施营造海岸漫滩,增建堤后蓄洪海绵。

3 韧性海堤越浪排水设计

3.1 现状海堤改造形式

工程现状海堤采用两级斜坡式断面,坡面整治修复基于现状海堤断面形式进行设计(见图1),一级斜坡采用抛石护脚+四角空心块护坡结构,斜坡间设置6.0 m宽消浪平台,二级斜坡布置栅栏板,堤顶面总宽8.2 m。此种断面优点是迎水坡可将大部分波浪破碎,使波能大部分消耗在斜坡上,反射波较小;主要缺点是斜坡堤迎浪面较缓,波浪爬高往往较大,很容易发生越浪,进而引发洪涝灾害^[1]。研究表明,堤顶超高对越浪量的影响最大,随着相对堤顶超高的增大,越浪量呈指数形式递减^[2]。而少量的越浪不会危及堤身安全,现行规范要求的海堤也常分为允许越浪和不允许越浪两种形式。为避免挡墙过度加高,工程可采用“以防为主,以排为辅,防排结合,增建海绵”的防浪规划,允许部分越浪设计。现状堤岸顶部增设低矮型坐凳式防浪墙,墙顶标高为4.25 m,堤顶高程不足部分约0.7 m,由堤后相关建设项目实施,具体可通过设置堤后的连续堆坡条带进一步削减越浪,部分越浪水量由堤后带的LID设施消纳,共同实现100年一遇防洪(潮)功能;当连续堆坡条带的高程 ≥ 4.45 m时,需设置必要的通道和排水设施,考虑堤顶与堆坡之间区域的波浪抗冲刷等问题。

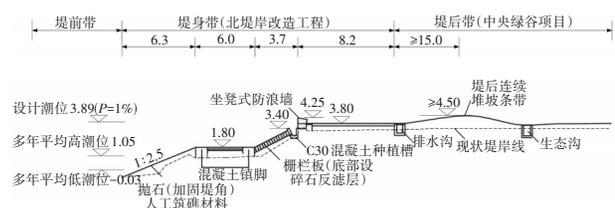


图1 海堤标准断面

Fig.1 Standard section of seawall

3.2 海堤越浪计算校核

波浪在沿垂直堤向传播过程中,受地形条件变化及水工构筑物等因素的影响,将发生浅水变形、折射,复杂地形和结构物的绕射和反射、底摩阻、波浪破碎等一系列复杂现象。潘毅等^[3]对越浪过程进行了系统研究,并提出越浪生命周期内的6个过程,包括外坡堤趾处的波浪传播到破波点、外坡上的波浪爬高与回落、堤顶上的越浪流、内坡上的越浪流以及堤后带越浪挡排水系统。为了避免过分加高挡墙,现状海堤采用允许越浪的布置形式,并针对潮水涨落和波浪的传播规律,设置具有堤前消浪功能的梯形断面斜坡堤,在平均高潮位以上的二级平台既有利于达到削波减浪的效果,还能满足施工管理和亲水平台的打造要求。堤后带的韧性排水需要基于改造后的堤型断面进行越浪水量的校核设计,即根据防洪(潮)设计标准、设计高潮水位和风速、水深和吹程等来计算波浪要素、浅水波变形,进而复核波浪爬高及越浪水量以检验规划设计的合理性。

3.2.1 防洪(潮)设计标准

工程所在中珠联围防洪(潮)标准为100年一遇,根据《城市防洪工程设计规范》(GB/T 50805—2012)、《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)、《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2017)以及《珠海市城市规划技术标准与准则(2021年版)》等相关规范的规定,工程堤防等级为1级,主要建筑物级别为1级,次要建筑物级别为3级。

3.2.2 设计高潮水位和风速

工程海域属弱潮区,潮差相对较小,平均潮差为1.2 m,最大潮差为2.99 m,平均高潮位为0.36 m,平均低潮位为-0.73 m。珠江三角洲主要测站潮位采用设计值表,临近测站三灶水文站100年一遇的设计高潮位为3.89 m,则越浪计算取100年一遇的设计潮水位为3.89 m。

珠海历年平均风速为3.1 m/s,多年平均最大风速为14.8 m/s,瞬时最大风速最高为40 m/s(1983年9月9日的台风)。据实测资料统计分析,常风向为ESE,频率为11%,次常风向为NE,频率为10%,无风或风向不定的频率占12%,8级及以上大风平均

日数为9.2 d,6级及以上大风为9.7 d。珠海年最大风速常见方向为E~ESE,但E向与马骝洲水道流向基本平行,故按SE~SSE方向取值,100年一遇设计风速为32 m/s,见表1。

表1 珠海国家气象站10 m高各方向年最大10 min平均风速

Tab.1 Annual maximum 10-minute mean wind speed in all directions at 10 m height at national meteorological station of Zhuhai $m \cdot s^{-1}$

主风向	风速					
	重现期 10年	重现期 2年	重现期 30年	重现期 50年	重现期 100年	重现期 200年
N~NNE	18.7	22.4	24.5	27.1	30.7	34.2
NE~ENE	21.7	25.6	27.8	30.6	34.3	38.0
E~ESE	26.6	30.9	33.4	36.5	40.7	44.8
SE~SSE	19.6	23.4	25.6	28.3	32.0	35.6
S~SSW	16.7	20.2	22.3	24.8	28.3	31.7
SW~WSW	17.9	21.5	23.6	26.2	29.7	33.3
W~WNW	17.4	21.2	23.4	26.1	29.8	33.5
NW~NNW	18.1	21.9	24.1	26.8	30.4	34.1

3.2.3 计算水深和吹程

马骝洲水道风区的平均计算水深为7.59 m,吹程取河道宽度为500 m,见图2。

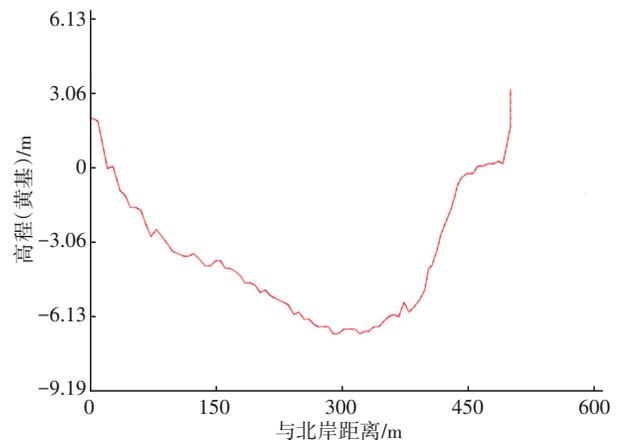


图2 马骝洲水道标准断面

Fig.2 Standard section of Maliuzhou waterway

3.2.4 波浪要素计算

波浪的平均波周期和平均波长宜采用莆田试验站公式计算,具体如下:

$$\frac{gh_m}{W^2} = 0.13 \operatorname{th} \left[0.7 \left(\frac{gH_m}{W^2} \right)^{0.7} \right] \operatorname{th} \left\{ 0.0018 \left(\frac{gD}{W^2} \right)^{0.45} / \left[0.13 \operatorname{th} \left[0.7 \left(\frac{gH_m}{W^2} \right)^{0.7} \right] \right] \right\} \quad (1)$$

$$T_m = 4.438h_m^{0.5} \quad (2)$$

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \operatorname{th} \left(\frac{2\pi H}{L_m} \right) \quad (3)$$

式中： T_m 为平均波周期，s； L_m 为平均波长，m； W 为计算风速，m/s； g 为重力加速度， 9.81 m/s^2 ； h_m 为平均波高，m； H_m 为风区的平均水深，m； H 为坝迎水面前水深，m； D 为风区长度，m。

经计算，平均波周期 T_m 为 2.708 s，平均波长 L_m 为 11.446 m。

3.2.5 浅水波变形

消浪平台高程为 1.80 m、宽为 6.0 m。根据《广东省海堤工程设计导则(试行)》(DB 44/T 182—2004)，经计算，波长 L_0 为 8.64 m、波高为 0.918 m。

3.2.6 波浪爬高计算

根据《广东省海堤工程设计导则(试行)》(DB 44/T 182—2004)，本工程近似按照单一坡度的斜坡式海堤不规则波的爬高计算方法，取糙渗系数 $K_s=0.9$ 、与风速有关的系数 $K_v=1.28$ 、累积频率为 1% 的波高 $H_{1\%}=0.501 \text{ m}$ ，计算得风浪爬高 $R_{1\%}=1.00 \text{ m}$ 、风浪爬高 $R_{13.7\%}=0.85 \text{ m}$ 。

3.2.7 越浪水量计算

近似按照《广东省海堤工程设计导则(试行)》(DB 44/T 182—2004)附录 K.0.1、K.0.2 介绍的计算方法，取 $A=0.011$ 、 $B=22.63$ 、风的系数 $w_f=2$ 、校正因子 $K'=1.411$ ，则越过坐凳式防浪墙(墙顶标高为 4.25 m)的波浪水量为 $0.045 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，越过连续堆坡条带(顶部高程 $\geq 4.45 \text{ m}$)的波浪水量为 $0.022 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。计算结果满足规范所规定的允许越浪量的要求，即在海堤三面(堤顶、临海坡和背海侧)均有保护，堤顶及背海侧均为混凝土保护，允许越浪量 $\leq 0.05 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

3.3 堤后带韧性排水竖向规划

马骊洲水道北堤岸改造工程采用的堤顶标高为 4.25 m，位于堤后带的中央绿谷项目需与海堤工程共建防洪(潮)体系，沿场地内设置 4.45 m 防洪(潮)标高连续条带。防浪堤与中央绿谷项目之间的堤后带需进行合理的竖向设计，在满足海绵存蓄要求的前提下，将堤顶超量雨水和越浪量排至外海。

根据入射抛物线判断(见图 3)，当顶高程为 4.45 m 的堆坡连续条带距离堤岸超过 15 m 范围时，越浪无法越过顶高程 4.45 m。以顶高程 4.45 m 堆

坡为界，至北堤岸坐凳式防浪墙之间的汇水可通过排水沟直排外海，避免越浪量倒灌市政排水系统。

部分规划公园绿地的宽度较大，为有效应对未来风暴增水问题，可通过设置雨水花园和下凹绿地等 LID 设施，使地块具有一定的越浪存蓄能力。即在中央绿谷地形设计时预留两道 4.45 m 地形线，第一道堆坡连续条带与坐凳式防浪墙之间的距离需小于 15 m，越浪水量则会积蓄在两道地形线的中央凹地内，当 LID 设施的水位达到 4.25 m 后，可自行溢流至海堤排水沟方向。越浪排水设施规模不再根据越浪量计算，而是按规定时间将凹地内积蓄的水量排出进行考虑。根据植被耐淹和耐盐碱性要求，园区绿地持续淹没时间不超过 8 h，越浪峰值持续时间按 2 h 计，则保证凹地积蓄的水量在 6 h 内排空即可，由此可推算出雨水花园排出管流量，从而确定排出管管径。为保证公园内积蓄的越浪水量可以及时有效地排出，北堤岸改造项目设计过程中应结合实际情况，统筹考虑极端情况下越浪量的排除，避免出现海堤排水系统下游过流能力不足的情况。

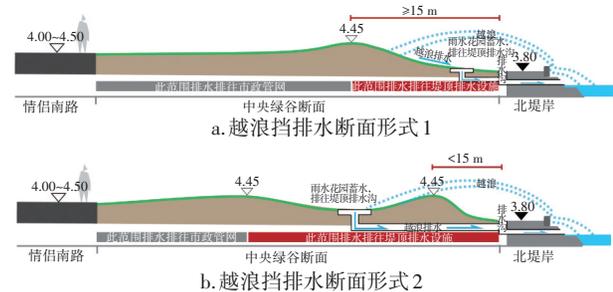


图 3 堤后带越浪排水竖向设计

Fig.3 Vertical design with overwater drainage behind the seawall

3.4 强排系统及防倒灌措施

为了有效应对超标降雨和极端风暴潮增水影响，堤后排水系统需考虑应急强排措施，采用强排和重力自流相结合的方式构建完整的防洪排涝体系：中、小雨通过微海绵、微渗透设施进行渗蓄；大到暴雨依靠溢流通道及时外排；超标降雨和极端风暴潮采用泵站强排。同时，为避免潮水倒灌，排出口末端需设置单向阀。

4 韧性海堤生态化建设

① 利用生物礁自然促淤保滩，营造绿植台地

工程范围内堤基表层以淤泥和淤泥质黏土为主，抗冲刷能力弱，如何在堤前带形成既抗冲刷又

能营造生物礁的自然生长条件,是韧性海堤建设的一大关键所在。为保证海堤前沿滩地的稳定,对海堤堤脚进行一定范围的保护来加强海堤安全,工程结合堤身结构及施工平台布置,堤脚采用抛石护底。据研究,生物礁生长于近岸浅水区的前缘,向海底投入岩石、混凝土块体可吸引藻类、鱼类及贝类聚集生长,有效促进鱼礁—牡蛎礁的形成,与土工措施共同构成新的防冲消浪体系。生物礁形成后,利用涨落潮裹挟的泥沙自然沉积,可在堤前带形成稳定的台地供红树林等植被生长。

② 优化竖向布局,推动堤后带生态海绵建设

针对现状海堤标高不足、生态通道受阻、堤内生境单一、水体自净能力差等问题,工程改造时突破传统水利堤防不断加高的做法,统筹堤后道路、中央绿谷等建设项目对堤后带竖向进行整体规划设计,见图4。即以疏林草地搭建可持续发展的生态基底,结合海绵城市设计理念,于内、外侧堤防之间设置雨水花园,雨水经生态草沟收集至雨水花园可自然渗透或溢流排海。通过设置慢跑道透水铺装、雨水花园、植被缓冲带等LID设施,利用物理、水生植物及微生物等作用,净化堤后带雨水和越浪水,充分增强水陆生态系统的自我调节能力。生态设施需种植适宜珠海本地生长的红树类植物,如榄李、卤蕨、银叶树、水黄皮、杨叶肖槿、玉蕊、黄槿等,此类植物可耐盐碱。

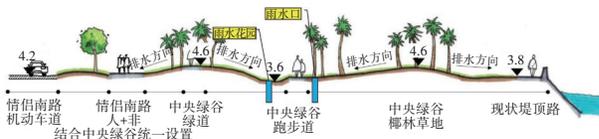


图4 堤前、堤后带低影响开发示意

Fig.4 Schematic diagram of low impact development in front and behind embankments

③ 打造广东万里碧道,实现科学的海岸防护

通过降低堤顶高程打开视野,利用生物措施保护岸滩稳定,结合海绵城市建设等多方面的综合考量,有效实现了海堤的生态化建设,形成近水可憩,远足自然的慢行系统,构建出南粤大地“融入自然、品味文化、畅享健康”的休闲游憩碧道网络。通过引入游人监督,杜绝了违法占滩、围海的不良行为,实现生态的可持续监管。

5 结语

在潮位和风浪共同作用下引起的海堤漫顶和

结构的破坏是沿海堤防建设考虑的重大安全风险因素之一。在挡水和防浪功能分置的框架下,堤身和堤前带的建设主要满足挡潮消浪功能,通过改善堤身结构、采用新型护面材料等措施,可有效提高抗冲刷能力;而堤后带设计则不再单一考虑市政雨水排放能力,同时还需满足对越浪水量的消纳功能。通过优化竖向排水规划,结合工程措施,在堤前、堤后带创造自然生境条件,可有效促进生物生长,并提升抗冲和消浪能力。此外,充分利用堤后带的海绵存蓄功能可进行雨洪调节,形成绿色屏障,既能有效抵御外部冲击,又能适应极端多变的气候,打造水安全韧性城市,此种做法可供类似工程规划设计参考。

参考文献:

- [1] 李东洋,张庆河,焦方骞. 不规则波作用下斜坡堤越浪的数值模拟[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 25-30.
LI Dongyang, ZHANG Qinghe, JIAO Fangqian. Numerical simulation of overtopping of sloping breakwater under irregular wave [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39 (1) : 25-30 (in Chinese).
- [2] 周雅,林登荣,李庆银,等. 不规则波作用下斜坡堤越浪量试验研究[J]. 水道港口, 2016, 37(4):331-335.
ZHOU Ya, LIN Dengrong, LI Qingyin, et al. Experimental research of wave overtopping on sloping dike under irregular waves [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(4):331-335(in Chinese).
- [3] 潘毅,陈永平,袁赛瑜. 海堤波浪溢流大型水槽试验研究[M]. 北京:科学出版社, 2019.
PAN Yi, CHEN Yongping, YUAN Saiyu. Experimental Study on Large-scale Flume with Wave Overflow from Seawall [M]. Beijing: Science Press, 2019 (in Chinese).

作者简介:谭庆俭(1979—),男,广西灵山人,本科,高级工程师,中国城市科学研究会雨洪管理与海绵城市专业委员会委员、珠海市规划设计研究院水务与环境工程分院院长,主要从事市政给排水、厂站、河道治理、海绵城市、综合管廊等规划咨询设计工作。

E-mail:24059951@qq.com

收稿日期:2022-03-15

修回日期:2022-05-15

(编辑:丁彩娟)