



侵蚀岸段海堤破坏机理及修复方案^{*}

赵一晗¹, 黄哲^{2,3}, 王登婷^{2,3}

(1. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029;

2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024;

3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 侵蚀岸段通常是海堤破损最为频繁、严重的区段, 随着极端气候条件增多及人类活动的影响, 海岸侵蚀问题加剧, 对海堤及后方陆域安全造成较大威胁, 现有修复手段大多无法从根本上解决侵蚀型海堤的破坏问题。结合因岸滩侵蚀引起的滨海县振东闸以北段海堤破坏案例, 通过现场调研、波浪物理模型试验、理论计算等手段, 分析岸滩侵蚀对海堤安全影响的机理, 探讨侵蚀岸段海堤修复措施, 提出管桩顺坝透射系数、海堤稳定性计算方法。研究认为侵蚀岸段海堤破坏的主要原因是水深增大引起的波浪动力增强, 导致在日常条件下护底、护面侵蚀及极端条件下结构失稳。据此提出保滩、加固相结合的侵蚀型岸段海堤修复方案。经波浪物理试验验证, 该方案合理、可行。

关键词: 侵蚀; 海堤; 破坏机理; 修复

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0023-06

Damage mechanism and remediation plan of seawall on eroded coast

ZHAO Yi-han¹, HUANG Zhe^{2,3}, WANG Deng-ting^{2,3}

(1. Jiangsu Provincial Department of Water Resources, Nanjing 210029, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: Eroded shores are usually the most frequently damaged and severe sections of seawalls. With the increase of extreme weather conditions and the impact of human activities, the problem of coastal erosion has intensified, posing a greater threat to the safety of seawalls and the rear land area. Most of the repairing methods are unable to fundamentally solve the problem of the destruction of eroded seawalls. Based on the case of seawall damage to the north of Zhendong sluice in Binhai County caused by coastal erosion, we analyze the mechanism of coast erosion on the safety of the seawall, discuss the repair measures on the eroded coast, and propose the calculation method of the pile-dam transmission coefficient and the stability of the seawall through field investigation, wave physical model tests, and theoretical calculations. The research reveals that the main reason for the destruction of seawalls on eroded banks is the increase of wave dynamics caused by the increase of water depth, which leads to bottom and surface protection erosion under daily conditions and structural instability under extreme conditions. Based on this, a seawall repair plan for eroded shores with beach protection and reinforcement is proposed, which is verified by the wave physical test to be reasonable and feasible.

Keywords: erosion; seawall; destruction mechanism; repair

海堤是抵御沿海地区台风风暴潮灾害、保障经济发展和人民群众生命财产安全的重要基础设施,

在防御台风风暴潮中发挥了重要作用。

对于此前滩面较高且较宽的岸段, 海堤在相

收稿日期: 2021-11-11

^{*}基金项目: 江苏省沿海重点岸段冲淤演变监测评估工作项目(GHB-ZBWJ-2021004); 江苏省水利科技项目(2019009)

作者简介: 赵一晗(1982—), 男, 高级工程师, 从事重大水利项目规划设计研究。

应水动力条件下的建设标准相对较低。临近工程的开发建设改变了工程区的水动力及输沙条件，造成原先相对稳定的滩面形态发生改变，其中侵蚀性岸段由于水动力条件的增强或上游来沙被拦截，滩面宽度锐减、高程降低，对海堤的掩护作用减弱。同时，在全球气候变化背景下，近年来风暴潮等群发性海洋动力灾害频发，且其强度增强的趋势明显，对近岸带来的灾害影响愈加强烈。在变化环境及人类活动影响下，水沙边界条件的变化对海堤工程安全产生不可忽视的影响。

吉学宽等^[1]对国内外海岸侵蚀、防护与修复研究进行总结，指出人与海岸线的矛盾日益突出，加剧了海岸侵蚀的破坏程度，并介绍不同类型海岸的侵蚀机制及相应的防护与修复方法；黄哲等^[2]通过现场调研、波浪数值计算、波浪物理模型试验等手段对江苏省某海堤局部失稳机理进行分析，认为引起该段海堤破坏的主要原因是滩面侵蚀；《江苏省海堤建设及生态海堤研究》一书中列举了江苏省部分侵蚀性岸段海堤破坏案例^[3]，其中赣榆区小口段、滨海县振东闸南北段、滨海县六合桩段等区段的海堤破坏均是由于滩面冲刷引起的；李路等^[4]研究表明：杭州湾北岸河口海岸地区的滩地受泥沙来源、潮流、风浪和海流等多重因素的作用，具有不稳定性，给海堤安全带来较大风险，初步提出冲蚀性滩地风险。可见，岸滩侵蚀是造成海堤破坏的重要因素。

笔者结合因岸滩侵蚀而引起的江苏省滨海县振东闸以北段海堤破坏案例，针对岸滩侵蚀对海

堤安全影响的机理展开分析，对侵蚀性岸段海堤修复方法进行探讨，通过模型试验验证修复方案的可行性。

1 海堤破坏情况

滨海县是黄河南泛夺滩后冲击而成的海滨平原。在黄河北归后，由于大量泥沙来源断绝，在风浪潮流的袭击下，滨海县海岸线严重蚀退，近百年来已后退 17 km 以上，虽然近年来人工干扰后岸线位置相对固定，但滩面仍以每年 10~15 cm 的速度蚀降^[5-6]。

研究区段位于滨海县振东闸以北。该区段海堤历年来是滨海县海堤防护与抢险的重点堤段，也是滨海县第一轮海堤达标工程实施堤段，1998—2001 年实施了该段主海堤防护工程，工程建成后发挥了较好的治海效益，保证了主海堤近 20 a 的安全。近年来，因北侧滨海港导堤建设，沿岸输沙进一步被拦截，同时受寒潮、台风等极端天气影响，已建海堤工程不断产生水毁，常处于应急抢修的被动状态，直接影响该地区社会稳定和经济发展。

该段海堤设计水位 3.45 m，现状海堤断面结构见图 1。堤顶采用反弧挡浪墙，高程 4.50~5.50 m 之间采用 20 cm 厚混凝土护坡，高程 3.00~4.50 m 之间及高程 3.0 m 防浪平台采用 30 cm 厚混凝土护坡，高程 0.00~3.00 m 之间采用 50 cm 厚素混凝土槽型块/30 cm 厚栅栏板护坡，外海侧采用 60~80 kg 抛石护滩。

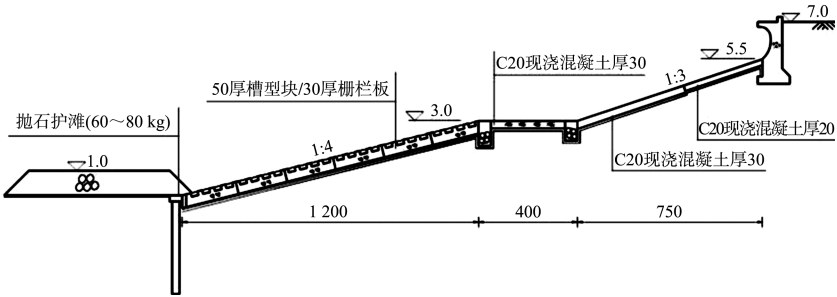


图 1 现状海堤断面 (高程: m; 尺寸: cm)

从图 2 可见，海堤栅栏板护坡和纵、横格埂均出现不同程度的腐蚀、破损，部分损毁严重段栅栏板已脱落移位，下部垫层已掏空破损，部分

区段海堤素混凝土护坡出现面层破损，海堤坡脚前滩面冲刷较为严重。



a) 平台下槽型块护坡损毁严重



b) 平台下栅栏板脱落移位



c) 平台表面局部破损



d) 平台上混凝土护坡表面局部破损

图 2 海堤破坏情况

2 海堤破坏机理

废黄河三角洲海床冲蚀, 岸线后退, 等深线逼岸。其中振东闸以北段海堤自 1998 年建设以来, 滩面由建设初期的 2.00 m 刷降至-2.00 m 左右(图 3)。

设计初期滩面未发生侵蚀, 波浪作用于堤前发生破碎, 破碎后的波浪要素受到水深控制, 波

高迅速减小, 因此作用于海堤上的波浪动力相对较弱。而当滩面由 2.0 m 侵蚀至-2.0 m 时, 堤前水深、波高增大, 作用于海堤上的波浪动力增强。

结合现场海堤破坏情况可见, 滩面的刷降对海堤安全造成较大的影响, 主要体现在日常条件波浪作用下的海堤护底、护面结构侵蚀及极端气候条件波浪作用下的海堤结构失稳。

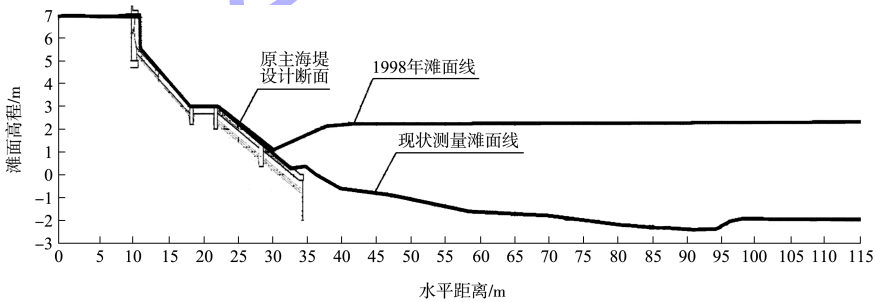


图 3 现状滩面与原设计滩面对比

2.1 日常条件波浪作用下的海堤护底、护面结构侵蚀

由于滩面发生侵蚀, 堤脚处 60~80 kg 块石向外海侧发生塌陷。同时, 在高潮位及相应波浪作用下, 60~80 kg 块石因重力不足而被波浪破碎产生的动能携带至海堤护坡上部, 随着水体往复运动长期磨损海堤护坡, 加快了护面的腐蚀、破碎(图 4)。



图 4 护底结构失稳情况

下部护底结构发生位移后，上部的护面结构失去支撑，容易向海侧发生塌陷，增加了海堤在极端气候条件下的失稳概率。

2.2 极端气候条件波浪作用下的海堤结构失稳

由于滨海县海岸位于相对开敞海域，外海侧无岛屿掩护，海堤直接受到外海来浪影响，极端天气下作用于海堤的波浪强度受到堤前水深控制，当滩面由 2.0 m 刷降至 -2.0 m 后，水深增大 4 m，导致设计水位下作用于海堤上部的波高也相应由 1.0 m 增大至 3.8 m，增幅达到 280%。

根据弥散关系，波浪由外海向近岸传播，当波浪周期一定时，波长随着水深的增加而增大^[7]，破波参数 ξ_p 增大。对比该区段海堤滩面侵蚀前后的波长可见，设计水位下波长由 29.7 m 增大至 55.1 m，增幅 85%。

波浪在板式护坡(槽型块、栅栏板、混凝土板)上的运动过程可分为破碎、冲击、上爬和回落4个阶段。当波长增加、破波参数增大时，波浪在堤前传播过程中变得不易破碎，波能损耗较小，波浪对坡面冲击产生的正压力增大，对护坡结构自身的强度影响较大，容易引起结构损坏，而在波浪回落过程中，由于波长增加，表面水体下落加快，一旦护坡层透水性弱，即影响护面底部孔隙水的排出，护面层内外将产生一个水头差，形成对护面向外的顶托力，当超出护面的水下质量时，会导致护面上托失稳^[8]。

同时，波长、波高的增大也会引起海堤堤脚波浪底流速的增大，进一步加剧护底块石及滩面的淘刷。

3 侵蚀性岸段海堤修复

3.1 修复方案

3.1.1 保滩

由于该区段海堤北侧滨海港导堤建设拦截了

废黄河口由北向南的沿岸输沙，工程区沙源不足，滩面仍存在进一步刷降的可能性，因此需针对现状滩面进行防护。

在距离海堤堤脚 50 m 处修建管桩顺坝，桩径为 50 cm，桩间距 35 cm，管桩顶高程 2.0 m，上部为直径 70 cm 的钢筋混凝土桩帽梁，顶高程 2.12 m。管桩顺坝的修建可以达到保滩、消浪的双重目的，当波浪作用至管桩顺坝后受阻碍，波高减小，部分大波发生破碎，水体携沙能力减弱，使得泥沙在顺坝内侧形成落淤，对落潮时向外海运动的泥沙也起到拦截效果。

针对堤脚前局部冲刷及滩面侵蚀也采取相应的防护措施，拟采用扭王字块体压护结合抛石护滩。在堤脚前紧密摆放 10 排扭王字块体，防护宽度约 6 m，扭王字块体外海侧铺设面层抛石，防护宽度 14 m，堤脚综合防护宽度 20 m。该方案下即使堤脚处局部发生淘刷，面层块石塌陷后也会迅速填补冲刷坑，并阻止下部泥沙遭到进一步侵蚀，因此一定宽度的抛石护脚可以对堤脚处的滩面有效防护；规则摆放的扭王字块体对上部护坡结构可以起到支撑作用。

3.1.2 加固

高程 3.00 m 以下护坡护坡采用 45 cm 厚栅栏板；由于高程 3.00 m 及以上消浪平台、斜坡位于常水位以上，极端高水位仅高于平台 0.45 m，护面稳定受波谷作用时的负压影响较小，因此混凝土板护坡厚度可适当减小至 30 cm；堤脚采用 600 kg 扭王字块体；外海侧采用 ≥ 120 kg 面层抛石。对海堤堤脚进行防护并加固护面后的海堤修复断面结构见图 5。

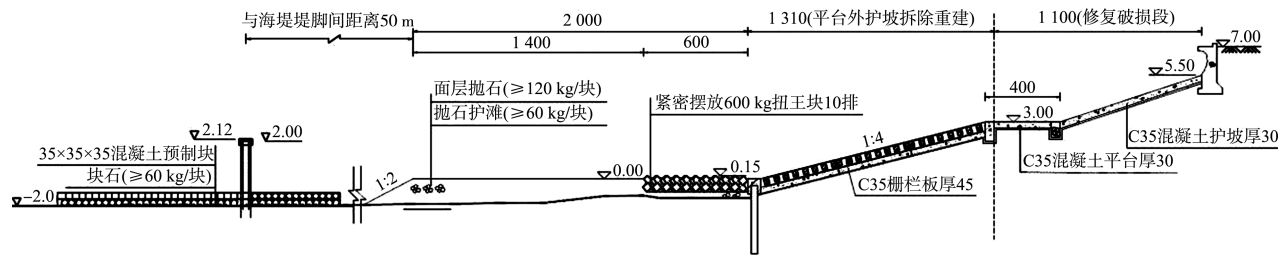


图 5 滨海县振东闸以北段海堤修复断面 (高程: m; 尺寸: cm)

3.2 方案验证

3.2.1 试验设计

采用波浪断面物理模型试验对海堤修复断面进行模拟及验证，试验设计遵照 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》相关规定，采用正态模型，按照 Froude 数相似律设计。

波浪断面物理模型试验在风、浪、流长波浪水槽中进行，波浪水槽长 175.0 m、宽 1.2 m、高 1.8 m。水槽两端均配有消浪缓坡，在一端配有推板式不规则波造波机。该造波系统可根据需求产生规则波和不同谱型的不规则波。

模型几何比尺为 1:20。波浪按重力相似准则模拟，不规则波波谱取 JONSWAP 谱。试验断面各部位均与原型保持几何相似，各结构部分均按比尺缩小，模型误差不超过 1 mm，挡浪墙、扭王字块体等部位采用配重砂浆制作，以保证质量相似。护底块石经严格挑选，与原型保持质量相似。管桩顺坝采用 PVC 管制作，满足管径及管间距与原型桩保持几何相似，模型试验不考虑管桩自身稳定性。

3.2.2 研究方法

试验模型布置于水槽中段，距离造波机 85 m，距离水槽尾端 90 m，前后间距均大于 6 倍波长，可减小波浪反射影响，确保试验结果的准确性。

首先，在试验波浪水槽内未放置模型的情况下根据试验要求率定所需的波浪要素。然后，根据海堤断面结构在试验水槽内对其进行模拟，再进行各项试验内容，模型的模拟及布置均符合标准 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》的有关规定。

正式试验前，先使用小波连续作用一段时间，使得堤心、护面块体及抛石处于相对密实状态。

3.2.3 试验结果

图 6 为修复加固方案稳定性试验情况。50 a 一遇高水位及相应波浪作用下，当波浪运动至管桩顺坝后受到阻挡，水体发生扰动，波高减小，波列中个别大波发生破碎，波能传递至顺坝内侧并继续向主海堤传播。由图 6 可见，水体可作用

到海堤上部结构并存在少许越浪。通过波浪断面物理模型试验验证，修复加固方案挡浪墙、30 cm 厚混凝土护坡、45 cm 厚栅栏板护坡、600 kg 扭王字块体均未出现明显的位移，满足不同设计水位及相应波浪作用下的稳定性要求，120 kg 左右块石较多发生滚动，但是参考现状海堤的破坏情况，发生位移的块石有部分会被波浪卷携至护面上部，长期碰撞、摩擦会引起护面结构的磨损，影响海堤护面的耐久性。因此优化方案将这部分面层块石进行加大，加大后的块石单块质量约 200 kg。



图 6 修复加固方案稳定性试验

优化后的海堤各部位稳定性验证结果表明：在各级水位及相应的极端条件波浪作用后，增重后的块石运动数量明显减少，且发生位移的块石仍大多在抛石平台段来回滚动，基本无块石运动至海堤上部。图 7 为试验后海堤断面俯视图。由图 7 可见，发生位移的块石个别运动至扭王字块体上部，无块石运动至海堤护面，对上部结构的强度、耐久性不会产生影响。因此，该优化方案作为滨海县振东闸以北侵蚀性岸段的海堤修复方案可行。

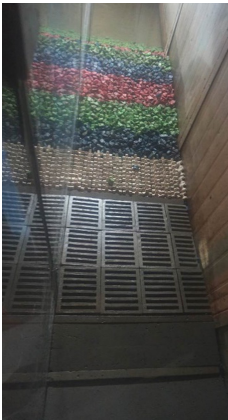


图 7 优化试验后海堤各部位稳定性

3.3 计算方法

3.3.1 保滩工程透射系数确定

除保滩促淤外,试验结果表明:管桩顺坝的消浪性能对维持主海堤结构稳定起到一定作用,但由于管桩顺坝结构在低水位时露出水面,高水位时处于淹没状态,现有研究无统一方法确定变化水位下的透射系数。本文分别参考了 Hayashi 等^[9]、龚崇准等^[10]的相关成果作为出水及淹没状态下保滩工程透射系数选取的依据。

Hayashi 在长波假定和水体通过桩间缝隙的射流理论的基础上得到单排圆桩列的透射系数计算公式为:

$$K_T = \frac{H_T}{H_1} = 4 \left(\frac{h}{H_1} \right) E \left(-E + \sqrt{E^2 + \frac{H_1}{2h}} \right) \quad (1)$$

$$E = c \frac{b}{D+b} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2} \quad (2)$$

式中: H_T 为透射波高; H_1 为入射波高; h 为水深; b 为桩间距; D 为桩径; c 为经验系数,一般取 0.9。

但式(1)中桩基均为出水状态,未考虑淹没时的情况,因此本文仅通过该式来确定 2 m 及以下水位的透射系数。在 2 m 及以下水位,本次加固方案选取的管桩顺坝关于透空率的系数 E 为定值 0.407,且近岸极限波高 $\frac{H_1}{h} = 0.7$,通过式(1)计算得到的透射系数为 0.72。

在高水位时桩基处于淹没状态,管桩顺坝整体消浪效率有所减弱,结合龚崇准对淹没的桩式离岸堤透射系数模型试验结果,按照本次加固方案选取的管桩顺坝桩基相对高度、相对波高、相对间距等参数,在淹没情况下透射系数取 0.87。

3.3.2 海堤稳定性计算

基于相关设计规范,给出海堤护面、护底块石稳定性等的海堤稳定性计算方法。在主海堤外侧修建管桩顺坝,需通过顺坝结构尺寸确定透射系数,计算到顺坝与主海堤之间的波浪要素,进而用于计算主海堤的稳定性。

护面稳定性采用 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[11]第 4.3 节的计算方法,其中块石或

人工块体护坡稳定质量按 4.3.7 节计算;干砌块石、浆砌块石稳定厚度按 4.3.12 节计算;栅栏板稳定尺寸按 4.3.19 节计算。混凝土板或钢筋混凝土板护坡的稳定厚度按 SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》^[12]A.2.3 节计算。

护底块石稳定质量按照 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》确定,首先根据第 4.3.22 条计算斜坡堤前最大波浪底流速,然后通过第 4.3.24 条确定所需的稳定质量。

3.3.3 综合分析

采用海堤稳定性计算方法对海堤现状断面在设计初期滩面(2.0 m)、近期滩面(-2.0 m)各部位稳定性进行复核,并与近期滩面下加固方案模型试验结果相互验证。

在不考虑管桩顺坝的情况下,设计初期 2.0 m 滩面下计算得出海堤现状断面抛石护滩、护面结构等均能满足稳定性要求;而近期-2.0 m 滩面下计算得到的抛石护滩稳定质量在 200~300 kg,栅栏板护坡稳定厚度 35 cm,均大于海堤现状断面的实际值,与现状海堤失稳情况相符。

在考虑管桩顺坝消浪后,顺坝与主海堤间的波高衰减,其中淹没状态 3.45 m 水位时的波高由 3.8 m 减小至 3.3 m;出水状态 2.0 m 水位时的波高由 2.8 m 减小至 2.0 m。此时计算得到适用的块石质量区间在 100~200 kg,栅栏板护坡稳定厚度 32 cm。根据加固方案模型试验结果,45 cm 厚栅栏板护坡未发生失稳,120 kg 块石较多发生滚动且会影响到海堤上部结构耐久性,而优化方案块石质量加大至区间质量上限 200 kg 后,发生位移的块石个数明显减少。试验现象与计算情况吻合较好。

可见,以上管桩顺坝透射系数选取方法及海堤稳定性计算方法是准确的。

4 结论

1) 侵蚀型岸段滩面刷降后水深增大,海堤所受波浪动力增强,在日常水位下护底、护面结构受长期淘刷、侵蚀,极端气候条件下的海堤结构易发生失稳。