

高边坡海堤断面方案设计研究

周 雅

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 以青岛某海岸带综合整治工程为例,对高边坡海堤断面方案进行研究。从外坡防护和整体稳定两方面进行现状分析和方案比选,通过物理模型试验和有限元计算提出:堤前海底坡度陡于1/50时,波高随水深减小迅速增大,波浪爬高实际值大于规范计算值,应结合物理模型试验进一步确定防护高度,波浪爬高区域设护面块体防护,水花溅落区域设三维水土保持毯抗冲;堤身宽度受限条件下,放坡+加筋土换填为边坡处理可行方案,土工格栅加筋后,海堤整体稳定安全系数提高5.1%。从结构安全、经济性和生态性角度论证了方案的合理性。

关键词: 海堤;物理模型试验;有限元计算;波浪爬高;整体稳定

中图分类号: TV871

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0145-05

Research on Design of High Slope Seawall Section Scheme

ZHOU Ya

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., LTD., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the comprehensive improvement project of a coastal zone in Qingdao as an example, the section scheme of a high slope seawall is studied. From the perspectives of external slope protection and overall stability, the current situation analysis and scheme comparison are conducted. Through the physical model experiments and finite element calculations, it is proposed that when the slope of the seabed in front of the embankment is steeper than 1/50, the wave height increases rapidly with the decrease of water depth, and the actual value of wave runup is greater than the calculated value in the specifications. The protection height should be further determined in combination with the physical model experiments. The wave runup area is protected by a protective block, and the splash area is equipped with three-dimensional soil and water conservation blanket for splashing. Under the condition of limited width of the embankment, the sloping and reinforced soil replacement is a feasible solution for slope treatment. After the geogrid reinforcement, the overall stability safety factor of the seawall is increased by 5.1%. The rationality of the scheme is demonstrated from the perspectives of structural safety, economy, and ecology.

Keywords: seawall; physical model test; finite element calculation; wave runup; overall stability

0 引 言

海堤是防止风暴潮及波浪影响堤后人民生命财产安全而修筑的水工建筑物。平原地区海堤堤后地坪低于海堤堤顶,设计中重点关注波浪爬高及越浪量;丘陵地区海堤堤后多为高边坡,堤顶高于防浪所需标高,为保证堤顶生产生活安全,设计中重点关注外坡防护和边坡处理。

在青岛某海岸带综合整治工程中,现状海堤堤身高差达15.5 m,为确保堤岸结构安全,通过现状海堤复核和整治方案比选,结合有限元计算和物理模

型试验方法,对高边坡海堤外坡防护和整体稳定进行分析,结论可供类似工程参考^[1-5]。

1 工程概况

1.1 工程现状

工程位于青岛市小港湾北岸,现状堤顶有在建房屋,场地标高17.5 m,堤脚标高2.0 m,堤身高差达15.5 m,现状边坡坡比约1:1.5,堤前海堤底坡1/10,外坡坡面无防护,风暴潮期间坡面水土流失严重,见图1。

1.2 工程地质

整治段海堤地层自上而下分为三层,①素填土,灰褐色,上部干,下部湿~饱和,松散~稍密状态,成分不均匀,厚度约5 m;②强风化砂岩,灰白~黄褐

收稿日期: 2024-02-07

作者简介: 周雅(1992—),男,硕士,工程师,从事水利水运工程设计工作。



图1 工程现状

色,风化裂隙很发育,岩体破碎,坚硬程度为软岩,厚度约 2.5 m;⑨₂ 中风化砂岩,青灰色,风化裂隙较发育,坚硬程度为较硬岩~坚硬岩,岩体较破碎。

丰水期堤顶地下水位为场地地坪以下 3.0 m。各土层主要物理力学性质见表 1。

表 1 土层物理力学参数表

地层	岩土类型	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
①	素填土	16.0	2	18
⑧ ₂	强风化砂岩	22.5	—	35.0
⑨ ₂	中风化砂岩	24.5	—	45.0

1.3 水文条件

整治段海堤防潮标准为 100 a 一遇,工程等级为 1 级,堤前海域潮位资料如下:

- 100 a 一遇高潮位:3.27 m;
- 极端高水位:3.14 m;
- 极端低水位:-3.21 m;
- 年平均高潮位:1.28 m;
- 年平均低潮位:-1.24 m。

对外海海洋站风速和波浪观测数据进行不同重现期推算,结果代入数值模型,计算得工程区域设计潮位下的波浪要素见表 2。

表 2 100 a 一遇高潮位下设计波要素

波向	波高					平均周期	波长
	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{2\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	H_{mean}/m	T/s	L/m
S	2.20	2.06	1.84	1.55	1.01	11.83	84.27

2 研究方法

2.1 物理模型试验

海堤外坡防护断面试验在波浪水槽中进行,波浪按重力相似准则,断面与原型保持几何相似,比尺取 1:20,护面块体与原型保持几何相似和重力相似,堤前模拟水下地形,试验照片见图 2。

2.2 有限元模型建立

海堤整体稳定采用有限元软件 slide 进行计算,模型宽 120 m,高 40 m,堤顶地下水位 14.5 m。堤顶

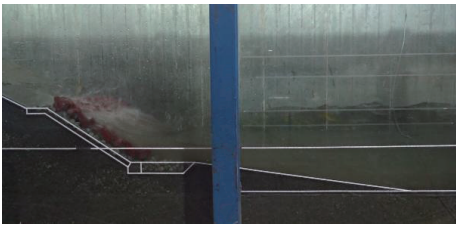


图2 断面试验照片

地面荷载:正常工况 10 kPa,施工工况 20 kPa。土工格栅强度为 50 kN/m,加筋作用发挥率为 50%。模型中先进行渗流计算,将渗流浸润线代入整体稳定模块计算稳定性。模型网格见图 3。

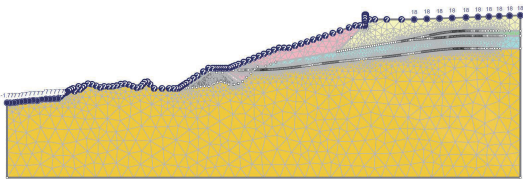


图3 有限元模型

3 现状海堤复核

根据《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154—2018)^[2]对海堤护面块体稳定重量和堤前波浪底流速进行计算,护面块体采用扭王字块体规则摆放,计算成果见表 3、表 4。

表 3 单个块体稳定重量计算成果表

断面位置	d/m	$\bar{H}/\text{m}$	m	$(\bar{H}/d)/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	K_D	W/t
整治段	4.76	1.01	1.5	0.212	1.84	16	0.272

注:设计标准:100 a 一遇高潮位+100 a 一遇波浪

表 4 波浪底流速

断面位置	堤前水深 d/m	堤前波波长 L/m	设计波高 $H_{13\%}/\text{m}$	波浪底流速 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
整治段	4.76	84.27	1.55	1.07

从表中可以看出,斜坡堤护面单个块体的稳定重量计算值为 0.272 t,堤前最大波浪底流速为 1.07 m/s,现状坡面为素填土,无护面块体,堤脚分布有天然礁石,因此,现状坡面易受波浪及水流掏刷,威胁堤身安全,堤脚礁石满足抗冲要求。

整体稳定分析方法采用简化毕肖普法,验算成果见表 5。

表 5 现状断面整体稳定验算成果表

断面	运用情况	计算安全系数	允许安全系数	是否满足
现状	基本组合	1.076	1.50	否
	特殊组合 (地震)	1.013	1.20	否

经复核,现状海堤整体稳定安全系数远低于《海堤工程设计规范》^[1]允许值。

综上,现状海堤外坡防护和整体稳定均不满足要求。

4 断面设计

4.1 外坡防护

堤前波高 $H_{2\%}=2.06\text{ m}$, 根据《海堤工程设计规范》^[1], 深水波长 $L_0 = 1.17 T^2 = 163.74\text{ m}$, 破碎水深 $d_b=4.76\text{ m}$, $d_b/L_0 = 0.029$, 查图 6.4.6, $H_b/d_b = 0.88 \times 1.12 = 0.9856$, 破碎波高 $H_b = 4.69\text{ m} > 2.06\text{ m}$, 堤前波浪未破碎。

海堤堤顶高程为设计潮位、波浪爬高和安全加高之和。按不允许越浪, 本工程堤顶高程计算见表 6。

表 6 100 a 一遇高潮位堤顶高程计算结果

断面型式	波高 $H_{2\%}/\text{m}$	平均周期 T/s	波长 L/m	堤前水深 d/m	波浪爬高 R_f/m	堤顶高程 Z_p/m
斜坡式	2.06	11.83	84.27	4.76	1.546	5.816

从表 6 可以看出, 海堤堤顶高程计算值为 5.816 m, 但以上计算过程中, 对于波浪爬高, 规范公式适用条件为堤前底坡 $i \leq 1/50$, 本段海堤堤前底坡 $i=1/10$, 陡于 $1/50$ 。堤前底坡较陡, 波浪传播过程中发生浅水变形, 波高随水深减小迅速增大。同时, 护面块体稳定重量计算过程中, 平均周期 $T > 10\text{ s}$ 且波陡 $H/L = 1.84/84.27 < 1/30$, 整治段海堤边界条件超出计算公式适用范围。因此, 进一步通过物模试验确定防护顶高程并验证块体重量。扭王字块体的最小重量不宜小于 2 t, 试验中护面块体按 2 t 扭王块, 护底天然礁石间按 100~200 kg 块石设置。

物模试验中 100 a 一遇高潮位+100 a 一遇波浪作用下, 波浪由堤前海底斜坡地形运动至堤脚, 发生破碎, 并冲击到斜坡 2 t 扭王块护面上, 最大成片水体爬高至 8 m。波浪在扭王字块体表面破碎, 破碎后的水花溅落到后方边坡, 最高溅落高程为 10 m。波浪实际爬高 $R_f=8-3.27 = 4.73\text{ m}$, 超出规范计算值 3.184 m。

当波浪累计作用时间相当于原型 3 小时后, 2 t 扭王字块体无明显位移, 满足稳定性要求。100~

200 kg 护底块石个别滚动, 整体无明显变形, 满足稳定性要求。

综上, 整治段海堤一级平台标高确定为 7.0 m

(坡面 2 t 扭王块顶高程 8.2 m), 堤顶宽 5 m, 平台标高 7.0 m 以上为水工边坡, 标高 7.0 m 至 10.0 m 设三维水土保持毯, 防止溅落水花冲刷坡面。

4.2 边坡处理

传统边坡处理方式有放坡、锚杆支护和施打抗滑桩, 空间足够时, 放坡最为经济。整治段海堤堤脚前有规划海岸线, 堤顶有在建房屋项目红线, 海堤占地宽度需不小于 50 m。在用地宽度 50 m 条件下按放坡进行设计: 现状土坡清表至岩层, 按设计泥面回填粘土并分层碾压, 一级平台 7.0 m 以上按 1:2.5 接坡至 12.0 m, 高程 12.0 m 处设置 2.5 m 宽二级平台, 以上按 1:3 接坡至 17.5 m, 对该断面整体稳定进行有限元计算, 结果见图 4。

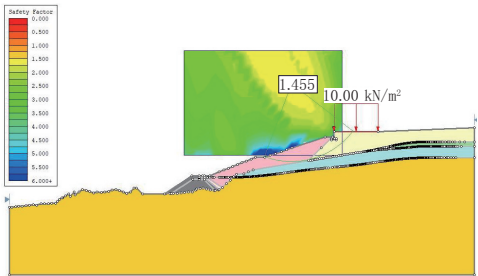


图 4 换填放坡方案整体稳定计算图

由图 4 可知, 断面整体稳定安全系数为 $1.455 < 1.50$, 不满足规范要求。

2011 年陈振华等^[3]结合数值模拟结果提出: 海堤内土工格栅可通过增加抗滑力矩和限制土体变形来提升海堤整体稳定性, 采用土工格栅加筋后, 海堤整体稳定安全系数可提高 6%~10%。2019 年顾婕等^[4]运用 ABAQUS 软件对加筋土边坡稳定性进行敏感性分析, 得出土工格栅铺设在边坡塑性破坏区域能发挥较好的抗滑作用, 土工格栅越长、加筋间距越小, 边坡稳定安全系数越大。2022 年蔡晓光等^[5]在某 92 m 高边坡处理中提出土工格栅加筋方案, 根据 Geo-slope 软件计算结果, 铺设 50~103 m 长, 间距 0.5~1.0 m 的土工格栅时, 边坡稳定性可满足要求。因此, 在放坡基础上标高 7.0~14.5 m 范围内每隔 0.5 m 铺设土工格栅 ($L=8\text{ m}$) 加筋。对放坡+加筋土换填方案进行计算, 结果见图 5, 各工况整体稳定安全系数见表 7。

由图 5 及表 7 可知, 采用土工格栅加筋后, 海堤断面整体稳定安全系数满足规范要求, 基本组合安全系数提高 $(1.529-1.455)/1.455=5.1\%$ 。

在上述边界条件下, 对整治段海堤提出两种边坡处理方案进行比选。

(1)经复核,现状海堤坡面易受波浪及水流掏刷,产生水土流失,威胁整体堤身安全,海堤整体稳定安全系数不满足规范要求,对现状海堤进行整治十分必要。

(2)海堤堤前海底坡度陡于 1/50 时,波高随水深减小迅速增大,波浪爬高实际值大于规范计算值,整治段海堤 1/10 堤前底坡条件下实际波浪爬高超出现规范计算值 3.184 m,类似工程设计中应结合物理模型试验进一步确定底坡陡于 1/50 时的海堤防护高度。

(3)边坡处理设计中,锚杆支护方案占地最小,放坡方案占地最大,锚杆支护和放坡方案造价接近,抗滑桩方案造价最高。综合考虑施工便捷性、经济

性和生态性,放坡方案最优。

(4)堤身宽度受限情况下,高边坡可采用放坡+加筋土换填方案进行加固,经计算,土工格栅加筋后,海堤整体稳定安全系数可提高 5.1%。

参考文献:

[1] GB/T 51015—2014,海堤工程设计规范[S].
[2] JTS154—2018,防波堤与护岸设计规范[S].
[3] 陈振华,李玲玲,王立忠,等.海堤加筋的分析测试与材料选用[J].岩土力学,2011,32(6):1824-1830.
[4] 顾婕,张孟喜.基于强度折减理论的加筋土边坡稳定性分析[J].上海大学学报(自然科学版),2019,25(6):990-1002.
[5] 蔡晓光,王学鹏,吴琪,等.凤庆机场场区土工格栅加筋高边坡设计[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2662-2666.

(上接第 120 页)

墩柱 1.3%,桩基 1.2%。

上述结论可供桥梁工程师在同类工程实践中参考取用,为更科学合理地确定桥梁墩桩配筋提供支撑。

参考文献:

[1] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.
[2] 肖潇,陈振富.桥梁抗震与减隔震[M].北京:机械工业出版社,2014.
[3] 邵旭东.桥梁工程(第四版)[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
[4] 杜修力,韩强.桥梁结构抗震分析与地震保护[M].天津:科学出版社,2020.

[5] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
[6] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
[7] 石岩,李军,秦洪果,等.桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J].中国公路学报,2021,34(2):134-154.
[8] 王东升,郭恩栋,柳春光,等.钢筋混凝土圆形截面柱式桥墩抗震性能评价[J].世界地震工程,2001(1):98-102.
[9] 贾俊峰,边嘉琛,白玉磊,等.自复位摇摆双柱式桥墩抗震能力数值仿真分析[J].振动与冲击,2023,42(1):89-97,122.
[10] AASHTO GSID-4, Guide Specification for Seismic Isolation Design[S].
[11] CA-SPC-2010, Caltrans Seismic design Criteria Version[S].
[12] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings[S].
[13] FEMA 274, Nchp Commem-tary on The Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings[S].