

基于层次分析法的海堤防御能力评估模型

李水清^{1,2,3}, 侯一筠^{1,2,3,4}, 王俊琰^{1,2,4}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海堤是保护我国近海生命和生产安全的重要屏障, 海堤的防御能力的评估具有重要的实际应用意义。本研究考虑海堤对海水入侵的防御内在属性, 从堤身材质、护面块体、底基地质、防浪配置和堤顶高程这五个指标因子建立海堤防御评估指标体系, 采用层次分析方法, 得到各指标因子的指标权重值, 构建了海堤防御能力评估模型。对江苏、山东沿海海堤进行了灾害实例分析评估。结果表明, 对海堤的防御能力评估结果与其在海洋动力灾害过程期间的实际防御表现基本一致。

关键词: 海堤; 防御能力; 评估模型

中图分类号: P753 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2020)08-0008-06

DOI: 10.11759/hyxx20191108001

极端天气强迫下的海洋动力灾害过程(风暴潮、海浪、海啸)对我国近海有显著影响, 而海堤是我国近海生产和生活安全的重要屏障, 它们的安全可靠性和实际防御能力直接关系沿海城市的人员和财产安全。因此, 需要准确、可靠的评估各种防御设施的防御能力, 以便在防灾减灾进行决策。

对海堤防御能力的研究是国内外工程界和管理部门长期关注的课题。海堤对海水入侵的防御体现在两方面: (1)防御海水漫堤。漫堤包括风暴潮引起的水位升高或波浪爬高越过海堤堤顶和波浪以越浪的形式引起的海水入侵; 尹宝树等^[1]根据海水水位相对于堤顶高程的距离, 提出了漫堤灾害的风险等级标准及风险评估方法, 对黄河三角洲近岸海域主要堤段进行了多年一遇和典型台风过程漫堤灾害的风险评估。张莉等^[2]考虑了海水升高和波浪爬高共同导致的漫堤风险, 建立了漫堤预警方案并在福建沿岸应用。越浪量与海堤自身结构有密切联系, 其计算公式有很多种^[3-5], Wang等^[6]对比评价了计算越浪量的几种代表性方法, 并结合试验结果提出了一种改进的计算方法。(2)防御溃堤引起的海水入侵。溃堤指在外力(潮位、风浪及其作用过程等)和抗力(堤坝整体稳定、护面稳定、渗流稳定、堤脚和堤后抗冲刷)相互作用下, 堤身失稳引起的溃决, 海水通过溃口入侵。王晓红^[7]选取浙江沿岸的海堤, 从剩余沉降和堤身稳定两发面对海堤进行了安全评价; 吴晓娟^[8]以宝安区海堤为例, 分析了水位骤降条件下海堤渗

流及稳定性。张尧等^[9]研究了海堤溃堤机理, 发现越浪水体导致的后坡侵蚀和护面块体滑动是海堤失稳的主要触发因素。陈伟秋等^[10]讨论了海堤后坡混凝土护面板在越浪影响下的稳定性情况。

我国约有 75%的海岸沿线修建了海堤^[11], 其中很多海堤存在不达标、地基沉降、年久失修等问题, 这对沿海人员和生产安全带来了潜在的隐患。因此, 有必要发展一种便于应用的海堤防御能力评估方法, 为决策部门提供科学的、可操作的灾害风险评估手段。针对此问题, 本文将建立用于评价海堤防御能力的指标体系方法。

1 防御指标体系

防御指标体系的建立步骤如图 1 中所示, 下面将逐项详细介绍具体的步骤方法。

1.1 防御能力评价指标选取

首先, 确定评价海堤防御能力的要素, 针对海堤防御海水漫堤和溃堤的内在属性, 选取对应的防

收稿日期: 2019-11-08; 修回日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1706216, 41976010, 41606024); 国家重点研发计划(2016YFC1402000)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. U1706216, No. 41976010, No. 41606024; National Key Research and Development Program of China No. 2016YFC1402000]

作者简介: 李水清, 男, 副研究员, 主要从事海洋动力过程的研究, E-mail: lishuiqing@qdio.ac.cn; 侯一筠, 通信作者, 男, 研究员, 主要从事海洋动力过程及其环境效应研究, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

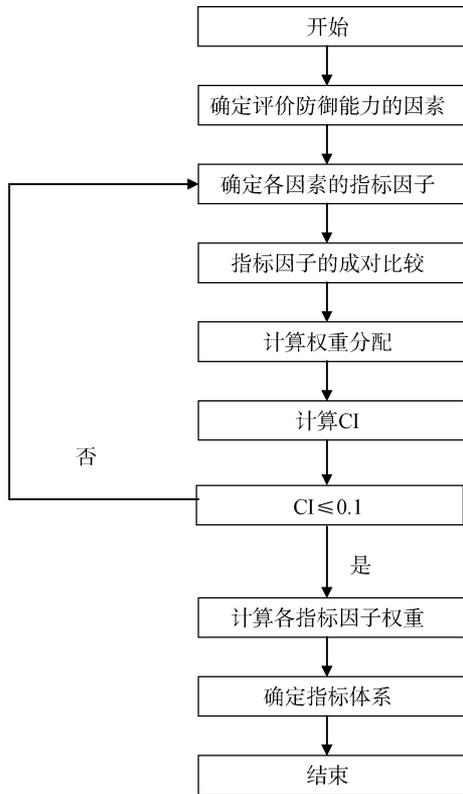


图 1 指标体系构建流程

Fig. 1 Flowchart of the construction of the indicator system

御指标因子(图 2), 包括堤身材质, 护面块体, 底基地质, 防浪配置, 堤顶高程。各项的防御贡献解析如下:

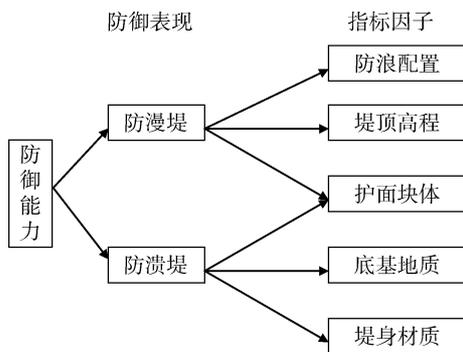


图 2 海堤防御能力评价指标因子

Fig. 2 Seawall defense assessment index

(1) 堤身材质。海堤的堤身材质决定了海堤的稳定性, 是防护外力作用(海浪、风、潮流)的主要因素^[12]。根据当地自然灾害情况和需要保护对象的安全级别, 海堤堤身的设计标准是不同的, 包括混凝土结构、石料砌筑、沙土质或自然海岸。

(2) 护面块体。护面块体对海堤的保护体现在两

方面: 一方面对海堤的堤身起到加固作用, 保护海堤不被外力损坏; 另一方面增加了海堤坡面糙度, 减弱波浪爬高和越浪量^[3-5]。常用的护坡材料有混凝土结构的扭王块、干砌块石、抛石、草皮等。

(3) 底基地质。海堤底基一方面对海堤的稳定性起到重要的支撑作用^[13], 例如, 在海水冲刷作用下, 海堤底基可能会被掏空, 造成堤身失稳溃决^[7]; 另一方面, 底基的坡度结构也会形成一种自然的防御屏障。底基坡度可分为陡峭型和平缓型, 地质类型包括岩石海岸、土质海岸、沙土质海岸等。

(4) 防浪配置。波浪的越浪过程一方面会引起海水入侵, 另一方面也会通过剪切力导致后坡侵蚀和护面块体滑动, 从而触发海堤失稳溃决^[9]。防止越浪的措施包括防浪墙, 海堤的坡度, 以及护面的糙度等要素^[3-5]。

(5) 堤顶高程。海堤高程是防止海水漫堤的最重要的防御要素。根据当地历史极端潮位情形, 推算当地多年一遇重现期高水位, 并以此设计海堤高程。重现期包括 100 年一遇、50 年一遇、30 年一遇等。

1.2 体系指标权重的确定

本文利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)确定上述各指标因子的权重。AHP 由美国运筹学家 Saaty^[14]提出, 是一种定性与定量相结合的计算权重的研究方法, 首先通过定性分析对涉及的因素进行分类, 由专家对不同指标的重要性进行评估, 再通过指标间两两重要性比较结果, 构造判定矩阵, 计算特征向量给出不同指标对目标的重要程度(所占权重), 从而为评估指标的选择和评估体系的建立提供依据。

体系指标权重的确定步骤为:

(1) 构造判断矩阵。邀请海洋工程和海洋灾害研究领域的 20 位专家, 对堤身材质、护面块体、底基地质、防浪配置和堤顶高程这五个指标对海堤防御能力贡献的重要性程度进行打分评定, 专家打分表在附录中给出。本文采用何沙等^[15]提出的改进的 AHP 重要等级标度方法(表 1)。取指标因子 a_i 、 a_j ($i, j=1, 2, \dots, m$), 根据附表 1 中的专家打分结果, 判定 a_i 相对于指标因子 a_j 的相对重要性, 然后根据表 1 确定 a_{ij} 的数值。由 a_{ij} 组成判断矩阵 A , 指标个数为 m 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}$$

表 1 等级指标矩阵的取值

Tab. 1 Values of the index weight

a_{ij}	$9^0(1)$	$\frac{1}{9^1}(1.276)$	$\frac{3}{9^2}(2.082)$	$\frac{6}{9^3}(4.327)$	$\frac{9}{9^4}(9)$
重要性评定	a_i 和 a_j 相同重要	a_i 相对 a_j 稍微重要	a_i 相对 a_j 明显重要	a_i 相对 a_j 强烈重要	a_i 相对 a_j 极端重要

(2) 权重分配。对每个判断矩阵求出其最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量，并做归一化处理，得到每个判断矩阵中所含元素对于上一层次某元素相对重要性(权重)的排序。

(3) 一致性检验。对每个判断矩阵进行一致性检验，按下面公式计算一致性指数(CI)和一致性比率(CR=CI/RI)，其中， $CI = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1)$ ，RI 代表平均随机一致性指数，采用 Saaty^[16]给出的 RI 的值(表 2)。若比率 $CI \geq 0.1$ ，则判断矩阵具有令人满意的一致性；若 $CR \geq 0.1$ ，则判断矩阵需要调整

或舍弃。

表 2 平均随机一致性指标 RI

Tab. 2 Random index (RI)

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

对指标因子进行分级处理，并运用 AHP 方法求出的权重进行加权平均，得到最终的指标权重值，得到的结果如表 3 所示。自重权数的给定参考国家标准《风暴潮防灾减灾技术导则》。

表 3 海堤防御能力评价指标体系

Tab. 3 Seawall defense rating index system

评价指标	指标特征	防御贡献	自重权数	指标权重
堤身材质	混凝土结构	高	50	0.206
	一般性石料结构	较高	30	
	沙土质防潮堤	一般	15	
	自然海岸	低	5	
护面块体	扭工体等混凝土结构	高	50	0.211
	干砌块石	较高	30	
	抛石	一般	15	
	草皮	低	5	
海床底基	陡峭型岩石海岸	高	50	0.191
	陡峭型土质海岸	较高	30	
	沙土质海岸	一般	15	
	平缓海岸	低	5	
防浪配置	具备高标准防浪墙，坡陡较小	高	50	0.165
	具备一般标准防浪墙，坡陡较大	较高	30	
	不具备防浪墙，坡陡较小	一般	15	
	不具备防浪墙，坡陡较大	低	5	
堤顶高程	高潮位重现期达 100 年一遇或以上	高	50	0.227
	高潮位重现期在 50~100 年	较高	30	
	高潮位重现期在 30~50 年	一般	15	
	高潮位重现期小于 30 年	低	5	

2 实例应用

通过上述防御能力评价体系可计算得到海堤的防御综合权数:

$$R = \sum_{i=1}^m F_i \cdot W_i, \quad (1)$$

式中, R 代表多因子系统的危险性评估指数, F_i 代表第 i 个因子防御贡献的自重权数, W_i 代表第 i 个因子所占权重, $i=1,2,\dots,m$ 。该权数反映了海堤的防御能力的水平。参考风暴潮防灾标准中常用的等级划分方法, 基于综合权数对海堤的防御能力划分为五个等级(如表 4 所示)。进而可以根据实际情形下海堤防御指标得到的防御综合权数, 进行防御能力等级评价。

表 4 海堤的防御能力等级划分标准

Tab. 4 Classification criteria for defense capacity of the seawall

防御能力等级	综合权数
高	>34.0
较高	26.1~34.0
一般	17.1~26.0
较低	9.1~17.0
低	<9.0

(1) 案例 1:

江苏海岸线长 954 km, 沿海自然岸线逐年减少, 与之替代的是人工岸线, 江苏省沿海已经建设不同标准的海堤等人工工程防御设施, 海堤长约 775 km。以连云港海港工程为例, 海堤建设标准较高(在 50~100 年一遇或以上标准), 护面块体多为扭工体或块石, 堤身材质为混凝土或石料结构。海堤底基为沙土质海岸, 配有防浪装置。各项指标的权数列表如表所示, 根据本文提出的防御能力评价方法, 海堤的综合权数计算结果为 30.426~43.322, 防御能力为较高至高。

2012 年第 10 号台风“达维”从江苏正面登陆, 登陆时中心最大风力 12 级(35 m/s), 中心最低气压为 975 百帕。此次台风中海港工程无一失事, 重要基础设施完好, 表明海堤等防护工程起到了很好的防护作用, 防御能力高, 与本文评价结果一致。

(2) 案例 2:

山东省有 3 024.4 km 海岸线, 占全国海岸线的 1/6, 次于福建省、广东省和浙江省, 居全国第 4 位。

海堤总长超过 1 500 km, 保护区面积超过 7 400 km²。莱州在莱州湾的一些围海海堤后方为盐池、养殖、新能源等项目, 设计标准为 30~50 年一遇, 海堤堤心为袋装沙、外坡采用抛石防护, 海底床地质为土质海岸或沙土质海岸。各项指标的权数列表如表 5 所示, 根据本文提出的防御能力评价方法, 得到的防潮设施的综合权数约为 15~17.854, 防御能力为较低到一般。

表 5 各指标权数选取

Tab. 5 Assigned values of the defense index in the case study

地区	堤身 材质	护面 块体	底基 地质	防浪 配置	堤顶 高程
连云港	30~50	30~50	15	50	30~50
莱州湾	15	15	15~30	15	15

表 6 给出了近 4 年莱州湾海区经历的海洋动力灾害过程及其灾损情形, 可以看出, 不同年份均存在不同程度的灾害损失, 并且个别年份海堤出现损坏(如 2014, 2015 年), 经济损失严重, 而个别年份海堤的防护效果较好, 并没有明显损坏(如 2016 年), 这表明海堤的防护能力较差, 与本文评价结果一致。

表 6 莱州湾近年受灾经济损失情形

Tab. 6 Loss due to the marine disaster in the Laizhou Bay

年份	风暴潮 警报/次	海浪/次	经济损 失/万元	损毁海 堤/km
2013	10	9	500	—
2014	8	9	2 465	2.76
2015	8	10	4 252.95	8.2
2016	6	5	20	0.08

3 结论

本文通过机制分析海堤在风暴潮和灾害性海浪中的防御体现, 以漫堤和溃堤作为主要考量因素, 提取了海堤的防御指标因子: 堤身材质、护面块体、底地质、防浪配置和堤顶高程; 通过采访国内 20 位海洋工程和海洋灾害领域的专家学者, 对比了各指标因子的相对重要性, 采用层次分析方法, 得到了各指标的权重系数, 通过各指标因子分级划分, 进而构建了海堤的防御能力评估模型。通过山东和江

苏沿海的多次海洋灾害过程实例分析,验证了该模型方法的可靠性。该方法简单易用,可快速简洁评估

沿海海堤的防御能力,对海洋动力灾害风险防控具有实践价值和应用意义。

附录

附表 1 海堤防御能力专家调查表

Appendix Table 1 Expert questionnaire on the defense capacity of the seawall

评价指标因子	对防御能力的贡献评价				
	非常重要	重要	一般	较小	很小
堤身材质(自身结构: 混凝、石料、沙土) 用于保护海堤在外力作用下的牢固)					
护面块体(护面块体和护底块石) 用于保证堤身牢固, 减弱波浪爬高和越浪引起的海水入侵。					
防潮设施(海堤)防御能力评价指标					
底基地质(海堤的底基地质: 岩石海岸沙土海岸)。 用于规避底基冲刷造成堤身沉降和溃堤的影响。					
防浪配置(包括防浪墙, 海堤坡陡) 用于减弱波浪爬高, 越浪引起的海水入侵。					
堤顶高程(防御漫堤过程, 抵御 100 年一遇, 50 年一遇的极端高水位) 用于防止风暴潮漫堤引起的海水入侵。					

参考文献:

- [1] 尹宝树, 徐艳青, 任鲁川, 等. 黄河三角洲沿岸海浪风暴潮耦合作用漫堤风险评估研究[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(5): 457-463.
Yin Baoshu, Xu Yanqing, Ren Luchuan, et al. Risk assessment of overtopping dam under waves and surges in coastal areas of the Yellow river delta[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(5): 457-463.
- [2] 张莉, 商少平, 张峰, 等. 福建沿岸天文潮-风暴潮-台风浪耦合漫堤预警系统[J]. 海洋预报, 2016, 33(5), 61-69.
Zhang Li, Shang Shaoping, Zhang Feng, et al. A tide-storm surge-wave coupled inundation warning system for Fujian coast[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(5): 61-69.
- [3] Hebsgaard M, Sloth P, Juhl J. Wave overtopping of rubble mound breakwaters[C]. Proceedings of the 26th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 1998: 2235-2248.
- [4] Van der Meer J W, Janssen J P F M. Wave run-up and wave overtopping at dikes[J]. American Society of Civil Engineers, 1995, 12(2): 175-189.
- [5] 李晓亮, 俞聿修, 赵凤亚, 等. 斜向和多向不规则波在斜坡堤上的平均越浪量的试验研究[J]. 海洋学报(中文版), 2007, 29(1): 139-149.
Li Xiaoliang, Yu Yuxiu, Zhao Fengya, et al. Experimental study on mean overtopping discharge of sloping seawall under oblique and multidirectional irregular waves[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(1): 139-149.
- [6] Wang D, Ju J, Zhu J, et al. Experimental study on mean overtopping of sloping seawall under oblique irregular waves[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(3): 350-356.
- [7] 王晓红. 强台风条件下浙东海塘安全评价及可靠性[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Wang Xiaohong. Safety assessment and reliability of seawall in the east Zhejiang under powerful typhoon[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [8] 吴晓娟. 水位骤降条件下海堤渗流及稳定性分析——以宝安区西海堤为例[J]. 水利规划与设计, 2017, (8): 106-108.
Wu Xiaojuan. Seepage and stability analysis of seawall under the condition of sudden drop of water level[J]. Water Resources Planning and Design, 2017, (8): 106-108.
- [9] 张尧, 陈刚, 胡金春, 等. 海堤溃堤机理和溃堤越浪量阈值的试验分析[J]. 海岸工程, 2017, 36(3): 10-21.
Zhang Yao, Chen Gang, Hu Jinchun, et al. Experiment study on mechanism of sea-dike failure due to wave overtopping[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(3): 10-21.

- [10] 陈伟秋, 王登婷, 孙天霆, 等. 海堤后坡混凝土板护面稳定厚度的模型试验研究[J]. 水运工程, 2017, (3): 65-70.
Chen Weiqiu, Wang Dengting, Sun Tianting, et al. Experimental study on thickness of concrete slab on the inner slope of a dike[J]. Port and Waterway Engineering, 2017, (3): 65-70.
- [11] 成迪龙, 俞元洪, 谢士猛. 我国海堤建设发展前景展望[C]//中国水利学会滩涂湿地保护与利用专业委员会. 中国水利学会滩涂湿地保护与利用专业委员会2011学术年会论文集, 2011: 21-31.
Cheng Dilong, Yu Yuanhong, Xie Shimeng. Prospect of seawall construction in China[C]// Special Committee for protection and utilization of tidal flat wetland of China Water Conservancy Society: Annual meeting of the Professional Committee for the protection and utilization of tidal flat wetland of China Water Conservancy Society, 2011: 21-31.
- [12] 么学易. 悬挑钢筋混凝土框架结构在连江县城关防洪堤改建工程中的应用[J]. 水利科技, 2016, (2): 26-30.
Yao Xueyi. Application of cantilever reinforced concrete frame structure in reconstruction project of Chengguan flood control dike in Lianjiang county[J]. Hydraulic Science and Technology, 2016, (2): 26-30.
- [13] Singh A, Mishra G. Foundation stability of a levee[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(5): 1555-1567.
- [14] Saaty T L. The Analytical Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill International, 1980.
- [15] 何沙, 陈东升, 朱林, 等. 海上钻井平台安全风险预警模型应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(4): 148-154.
He Sha, Chen Dongsheng, Zhu Lin, et al. Study on application of safety risk early warning model for offshore drilling platform[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(4): 148-154.
- [16] Saaty T L. How to make a decision: The analytical hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990: 48(1): 9-26.

Active defense assessment model of a seawall

LI Shui-qing^{1, 2, 3}, HOU Yi-jun^{1, 2, 3, 4}, WANG Jun-yan^{1, 2, 4}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Nov. 8, 2019

Key words: seawall; defense capacity; assessing model

Abstract: A seawall is an important barrier to protect the life and safety of production along the coast lines and, therefore, it is of practical use to adequately assess the seawall's active defense capacity. In this study, we considered intrinsic attributes of the seawall's defense capacity, including body material, dike dam block, base load, wave configuration and elevation of the top of the seawall to establish the seawall defense assessment index system. A model for assessing the defense capability of the seawall is proposed, using the hierarchical analysis method to obtain the index weight of each index value. The results show that the assessment result is basically consistent with the actual performance of the defense during the dynamic marine disaster process.

(本文编辑: 丛培秀)