港口防波堤抗浪韧性评价标准研究

陈志乐[1]，杨静思[1]，李昌军[2]，陈松贵[3]，胡杰龙[3]
（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；2. 中国人民解放军 92730 部队，海南 三亚 572000；
3. 交通运输部天津水运工程科学研究院，港口水工建筑技术国家工程研究中心，天津 300456）

摘要：随着全球气候变化加剧，极端天气事件频发，港口防波堤灾害受损情况显著增加，对港口安全运营构成严重威胁。现行防波堤行业标准主要聚焦设计标准内的结构性能，对超设计标准条件下结构抗灾性能及灾后恢复能力的研究尚显不足。为提升港口防波堤防灾抗灾能力、完善防波堤设计理论体系，亟须开展防波堤抗浪韧性评价标准研究。以国内典型斜坡式防波堤为研究对象，创新性地构建涵盖结构破损程度、灾后修复经济成本、功能恢复时间 3 大核心维度的多指标抗浪韧性评价体系，建立层级清晰、可量化的防波堤抗浪韧性分级判定标准。研究成果可为防波堤工程韧性水平的科学量化评估与韧性提升设计提供理论依据和技术支撑。

关键词：防波堤；抗浪韧性；防灾抗灾；评价体系；分级标准
中图分类号：U656.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)10-0064-06

Research on evaluation standard for anti-wave resilience of port breakwater

Chen Zhile[1], Yang Jingsi[1], Li Changjun[2], Chen Songgui[3], Hu Jielong[3]
(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. Troops 92730 of CPLA, Sanya 572000, China;
3. National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology,
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: The increasing frequency and severity of extreme weather events induced by global climate change have resulted in a growing number of disaster-related failures of port breakwaters, posing significant challenges to the safety of port operations. Existing industry standards for breakwaters primarily emphasize structural performance under prescribed design conditions, whereas the assessment of structural resilience and post-disaster recovery capability under extreme conditions beyond design scenarios remains inadequately addressed. To enhance the disaster prevention and resistance capabilities of port breakwaters and improve the theoretical system of breakwater design, it is urgent to conduct research on the evaluation standards for the wave resilience of breakwaters. Typical slope breakwaters in China are selected as research subjects, and a novel multi-dimensional evaluation framework for wave-induced resilience is proposed. The framework integrates three critical aspects of resilience performance: structural damage severity, economic cost of post-disaster rehabilitation, and duration required for functional recovery. On the basis of these indicators, a hierarchical and quantitative classification standard for breakwater wave resilience levels is built. The research results can provide a theoretical basis and technical support for the scientific quantitative assessment of the resilience level of breakwater projects and the design of resilience improvement.

Keywords: breakwater; anti-wave resilience; disaster prevention and relief; evaluation system; grading standard

收稿日期：2026-04-20　　**录用日期：**2026-05-21

作者简介：陈志乐(1982—)，男，硕士，正高级工程师，从事水运工程设计和研究工作。

水运工程

全球气候变化导致台风、风暴潮等海洋灾害的强度和频率呈上升趋势，港口防波堤作为抵御波浪侵袭的关键屏障，其灾害受损情况显著增加。防波堤一旦破坏，不仅会恶化港内泊稳条件，还可能引发连锁灾害，严重影响港口运营和区域经济发展。因此，提升防波堤的防灾抗灾能力成为水运工程领域亟待解决的重要课题。

现行防波堤设计规范如 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》[1]，核心聚焦于设计标准内的结构性能，但对于超越设计标准的极端波浪作用下，结构损坏水平、在合理时间内恢复至预定性能的韧性水平，该规范尚缺乏系统的评估体系与设计考量。韧性概念源于生态学，后被引入工程领域，特指结构在遭受灾害后抵抗破坏、适应损伤并快速恢复功能的能力[2]，目前建筑抗震韧性已形成 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》[3]等规范，而港口防波堤的抗浪韧性研究仍处于起步阶段。

国内外学者在防波堤破坏机理方面开展了大量研究，van der Meer[4]通过物理模型试验研究波浪作用下抛石防波堤的破坏发展过程，提出护面块体稳定性的计算公式；Amir 等[5]分析斜坡堤在不同波要素作用下的护面层稳定性；Sajan 等[6]、Manu 等[7]、Chaudhary 等[8]、Matsumoto 等[9]聚焦地震与海啸共同作用下的韧性斜坡式防波堤结构研究设计；任冰等[10]开展波浪与防波堤相互作用的理论与试验研究，探讨护面块体的受力特性；李楠[11]、李懿等[12]开展了基于物理模型试验的斜坡式防波堤结构稳定性研究。但国内对结构超越设计状态后的损伤演化、修复成本及恢复时间等韧性核心指标关注不足。

针对上述问题，本文以我国典型斜坡式防波堤为研究对象，创新性构建基于多重指标的抗浪韧性评价体系，制定分级评价标准，旨在为防波堤工程韧性水平的科学量化评估与韧性提升设计提供理论依据和技术支撑。

1　防波堤抗浪韧性评价体系

1.1　韧性三维度评价指标体系

本文构建的防波堤抗浪韧性评价体系包含结构破坏程度、灾后修复经济成本、功能恢复时间 3 个核心维度，各维度指标的定义和选取均遵循系统性、代表性和可度量性原则，具体如下。

1）防波堤破坏指标。反映防波堤在波浪作用下结构破坏的发展程度，指标选取需要综合体现波浪动力与结构响应的内在联系，能全面表征结构从轻微损伤到严重破坏的演化规律。

2）修复费用指标。反映防波堤受损后恢复至预定功能状态所需的经济投入，包含结构修复、拆除、置换产生的各项费用，以及材料采购、运输和专业人工费用等，计算时需要严格区分结构构件与非结构构件。

3）修复时间指标。反映防波堤从受损到功能完全恢复或达到安全运营标准所需的持续时间，涵盖所有受损构件完成功能性修复的名义修复时间，计算时需要综合考虑修复工时配置和人工数量规模。

1.2　韧性评价的主要内容

韧性评价核心包含 6 项关键内容：1）明确评估对象，确定破坏类型及实际破坏情况；2）收集基础资料，涵盖灾害发生时的波浪参数（波高、周期等）、当地工程材料价格及人工成本；3）运用评价指标，对评估对象抗浪韧性能力进行定性或定量评估；4）计算指标值，精准测算防波堤破坏指标、修复费用指标和修复时间指标；5）综合评级并提出建议，基于 3 项核心指标确定防波堤抗浪韧性等级；6）针对性给出工程措施（维持、局部修复或重建）。

防波堤抗浪韧性评价流程见图 1。

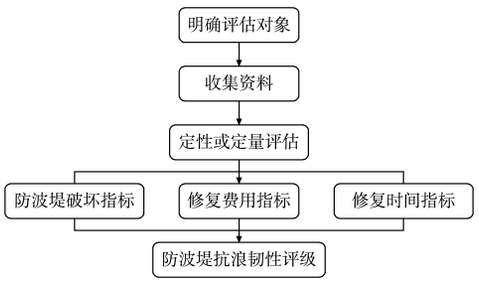

图 1　防波堤抗浪韧性评价流程

Fig. 1　Evaluating process for wave impact resilience of breakwaters

2 防波堤韧性指标评价方法

2.1 防波堤破坏指标评价

2.1.1 破坏指标等级划分

结构破坏程度指数 I_{SD} 按下式计算：

$$I_{SD} = \sum_{i=1}^{n} I_{SD,i} w_i \tag{1}$$

式中：$I_{SD,i}$ 为结构破坏发展程度评价体系中指标因素 i 的分值；w_i 为指标因素 i 的权重。

I_{SD} 取值范围为 0～100，数值越大表示破坏越严重。等级划分见表 1。

表 1 防波堤破坏发展程度等级划分

Tab. 1 Classification of breakwater damage development levels

I_{SD}	防波堤破坏发展程度	防波堤破坏后对应的修复情况
[0,30)	优	监测为主,局部维护
[30,60)	良	局部修复,提升耐久性
[60,80)	中	全面加固或部分重建
[80,100]	差	拆除重建,优化设计

2.1.2 破坏指标计算方法

防波堤破坏指标的计算采用层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）与隶属度赋值法相结合的方式。首先通过层次分析法构建递阶层次结构和判断矩阵，确定各影响因素的权重 w_i；其次采用隶属度赋值法对各指标进行量化确定各指标分值 $I_{SD,i}$；最后计算结构的 I_{SD}。斜坡式防波堤破坏发展程度各影响因素的权重和指标量化处理标准见表 2、3。

表 2 防波堤破坏指标权重

Tab. 2 Weights of breakwater damage indicators

目标层	指标层	权重
斜坡式防波堤破坏发展程度	入射波高 A1	0.322 1
	入射波周期 A2	0.169 5
	波浪累计作用时间 A3	0.086 9
	块体摆放密度 A4	0.168 5
	块体类型 A5	0.253 0

表 3 防波堤破坏指标权重

Tab. 3 Weights of breakwater damage indicators

指标层	度量因子	评价标准				
入射波高	增加比例	[0%, 10%]	(10%, 20%]	(20%, 30%]	(30%, 35%]	(35%, 40%]
入射波周期	增加比例	0%	(0%, 10%]	(10%, 20%]	(20%, 30%]	(30%, +∞)
波浪累积作用时间	作用时间	[0 h, 3 h]	(3 h, 6 h]	(6 h, 12 h]	(12 h, 24 h]	(24 h, +∞)
块体摆放密度	摆放密度大小	100%	[95%, 100%)	[90%, 95%)	[85%, 90%)	[80%, 85%)
块体类型	波高条件 1	[0, 10]	(10, 20]	(20, 30]	(30, 35]	(35, 40]
	块体类型 1	扭王字块	扭王字块	扭王字块	扭王字块	扭王字块
	波高条件 2	–	(30, 40]	(20, 30]	(10, 20]	[0, 10]
	块体类型 2	扭工字块	扭工字块	扭工字块	扭工字块	扭工字块
赋值		100	[80, 100)	[60, 80)	[30, 60)	[0, 30)

根据各指标的评价标准和评价范围，选用隶属度赋值法进行赋值，计算公式为：

$$Y = \frac{F_{max} - F_{min}}{B_{max} - B_{min}} (X - B_{min}) + F_{min} \tag{2}$$

式中：Y 为评价指标的赋值；X 为评价指标的量值；F_{max}、F_{min} 分别为参考标准对应划定分值的最大值、最小值；B_{max}、B_{min} 分别为评价指标参考标准划定的最大值、最小值。

2.2 防波堤修复费用指标评价

2.2.1 修复费用指标等级划分

采用修复费用与现行建造成本之比作为评价指标，即：

$$\kappa = \frac{R_t}{C_t} \tag{3}$$

式中：κ 为结构修复费用评价指标；C_t 为结构按照现行定额计算得到的现行建造成本，元；R_t 为防波堤修复总费用，元。

κ 的等级划分见表 4。

表 4 防波堤修复费用等级划分

Tab. 4 Grade classification of breakwater restoration cost levels

κ/%	[0, 5]	(5, 15]	(15, 30]	(30, 50]
防波堤结构修复费用等级	优	良	中	差

水运工程

2.2.2　修复费用计算方法

修复费用计算参照 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》，分别考虑结构构件和非结构构件的损伤状态(结构构件和非结构构件均分为 4 级)，并考虑修复工程量的折减，公式为：

$$R = \left(\sum_{i=1}^{n} \eta_{1,i} L_i\right) \zeta_c \tag{4}$$

$$L_i = \eta_{2,i} C_i \tag{5}$$

$$R_T = \lambda_c R \tag{6}$$

式中：R 为所有修复费用的总和，元；n 为构件损伤状态类别的数量；$\eta_{1,i}$ 为修复系数，处于损伤状态 i 下的修复费用与 L_i 的比值，对于结构构件破坏，1 级取 1.80，2 级取 2.58，3 级取 5.36，4 级取 6.75，对于非结构构件，1 级取 1.00，2 级取 1.15，3 级取 1.31；L_i 为处于损伤状态 i 下所对应的经济损失，元；ζ_c 为考虑修复工程量的修复费用的折减系数，对于结构构件破坏，根据破坏程度取 0.85~1.00，对于非结构构件破坏，根据破坏程度取 0.96~1.00；C_i 为处于损伤状态 i 下的现行造价之和，元，以现行定额计算，参考 JTS/T 276-1—2019《沿海港口水工建筑工程定额》[13] 和 JTS/T 272-1—2014《沿海港口建设工程投资估算指标》[14] 相关规定；$\eta_{2,i}$ 为构件处于损伤状态 i 时的损失系数，对于结构构件，1 级取 0.10，2 级取 0.20，3 级取 0.50，4 级取 1.00，对于非结构构件，1 级取 0.10，2 级取 0.50，3 级取 1.00；R_T 为结构修复费用，元；λ_c 为结构本身重要性等级对构件修复费用的影响系数，结构安全等级为一级时取 1.20，结构安全等级为二级时取 1.10，结构安全等级为三级时取 1.00。

2.3　防波堤修复时间指标评价

2.3.1　修复时间指标等级划分

采用完成结构所有功能性修复工作所需的名义修复时间作为结构修复时间的评价指标，按式(7)~(9)计算。修复时间等级划分见表 5。

$$T_{s,1} = \max(T_{W,1}, T_{W,4} + T_{W,3}) + T_{W,2} \tag{7}$$

$$T_{s,2} = \max(T_{W,5}, T_{W,6}) \tag{8}$$

$$T_0 = T_{s,1} + T_{s,2} \tag{9}$$

式中：$T_{s,1}$ 为完成第 1 阶段(含块体预制、块体安装、垫层修复、堤心修复)修复工作所需要的名义修复时间，d；$T_{W,i}$ 为单一修复工作的独立耗时，对某一类具体修复工作完成主要修复工作的名义修复时间，d；$T_{s,2}$ 为完成第 2 阶段(胸墙修复及非结构构件修复)修复工作所需要的名义修复时间，d；T_0 为完成全部功能性修复工作所需要的名义修复时间，d。

表 5　防波堤修复时间指标等级划分

Tab. 5　Grade classification of breakwater repair time indicator

T_0/d	≤7	(7, 30]	(30, 60]	>60
防波堤结构修复时间等级	优	良	中	差

2.3.2　修复时间计算方法

修复工时按照 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》要求考虑规模效应和效率提升而产生的影响，按下式计算：

$$Q = \left(\sum_{i=1}^{n} Q_i\right) \zeta_T \lambda_T \tag{10}$$

式中：Q 为构件的修复工时总和，人·d；Q_i 为处于损伤状态 i 下的修复工时，人·d；ζ_T 为考虑修复工程量的修复工时折减系数，根据破坏程度取 0.75~1.00(破坏严重取小值)；λ_T 为考虑结构本身重要性等级对构件修复工时的影响系数，重要性等级为一级取 1.10，二级取 1.05，三级取 1.00。

人工数量需求按下式计算：

$$N_{W,i} = q_r A \tag{11}$$

式中：$N_{W,i}$ 为完成某类主要修复工作 W_i 时的人工数需求，其中 $N_{W,1}$ 为块体预制人工需求、$N_{W,2}$ 为块体安装人工需求、$N_{W,3}$ 为垫层修复人工需求、$N_{W,4}$ 为堤心修复人工需求、$N_{W,5}$ 为胸墙修复人工需求、$N_{W,6}$ 为非结构构件修复人工需求主要修复工作；A 为破坏面积；q_r 为单位面积(单位破坏构件)的工人数量需求。

完成结构所有的主要修复工作所需名义时间按下式计算：

$$T_{W,i} = \frac{\sum_{i=1}^{m} Q_i}{N_{W,i}} \tag{12}$$

式中：$T_{W,i}$ 为主要修复工作 W_i 的名义修复时间，d；Q_i 为处于损伤状态 i 下对应主要修复工作 W_i 的修复工时，人·d；$N_{W,i}$ 为完成主要修复工作 W_i 时的人工数需求；$m_{W,i}$ 为主要修复工作 W_i 中所包含的构件类型数量。

3　防波堤抗浪韧性等级综合评价

斜坡式防波堤抗浪韧性等级需要综合考虑结构破坏指标、修复费用指标、修复时间指标 3 项核心指标确定，采用直接对比法和加权归一化评价法分别计算韧性等级，最终选取两种方法中较低的等级作为防波堤最终的抗浪韧性等级，并根据等级明确对应的修复策略。

3.1　直接对比法

直接对比法为定性与定量结合的综合评价方法，直接将 3 项核心指标的分级标准与韧性等级一一对应，取 3 项指标中的最低等级作为防波堤的抗浪韧性等级，3 项指标与韧性度等级的对应关系见表 6。

表 6　3 项指标对应韧性度等级划分

Tab. 6　Grade classification of resilience degree corresponding to three indicators

指标	优	良	中	差
防波堤破坏指标	[0, 30)	[30, 60)	[60, 80)	[80, 100]
修复费用指标	[0%, 5%]	(5%, 15%]	(15%, 30%]	(30%, 50%]
修复时间指标	≤7 d	(7 d, 30 d]	(30 d, 60 d]	>60 d

3.2　加权归一化评价法

对各指标进行归一化处理，再按权重加权求和，即：

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{13}$$

$$S = w_1 I_{\text{SD,norm}} + w_2 \kappa_{\text{norm}} + w_3 T_{0,\text{norm}} \tag{14}$$

式中：X_{norm} 为归一化后的结果；X 为 I_{SD}、κ、T_0 3 个指标的数据值；$X_{\min}$ 为该指标的最小值；$X_{\max}$ 为该指标的最大值；S 为韧性度评价指标；w_i 为专家专题论证确定 3 个指标（I_{SD}、κ、T_0）的权重，且满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$；$I_{\text{SD,norm}}$ 为防波堤结构 I_{SD} 归一化后的结果；κ_{norm} 为防波堤结构 κ 归一化后的结果；$T_{0,\text{norm}}$ 为防波堤结构 T_0 归一化后的结果。

韧性等级按 S 值划分，见表 7。

表 7　加权归一化评价方法对应韧性度等级划分

Tab. 7　Grade classification of resilience degree by weighted normalization evaluation method

S	[0, 0. 25)	[0. 25, 0. 50)	[0. 50, 0. 75)	[0. 75, 1. 00)
韧性度等级	优	良	中	差

3.3　韧性等级判定与修复策略

结合直接对比法和加权归一化评价法的评定结果，确定防波堤最终的抗浪韧性等级，并根据韧性水平将等级划分为合格（优、良）和不合格（中、差）两类，各等级对应的修复策略和工程措施见表 8。

表 8　防波堤抗浪韧性评价等级划分

Tab. 8　Grade classification of anti-wave resilience evaluation grade of breakwater

防波堤抗浪韧性水平	防波堤抗浪韧性度等级	防波堤破坏后对应的修复情况
合格	优	监测为主，局部维护
	良	局部修复，提升耐久性
不合格	中	全面加固或部分重建
	差	专项修复或拆除重建

4　结论

1）本文构建了涵盖结构破坏程度、灾后修复经济成本、功能恢复时间 3 个核心维度的防波堤抗浪韧性评价体系，明确评价总体要求和各指标定义、选取原则，满足对防波堤抗浪韧性的多角度、系统化量化评估。

2）本文提出基于层次分析法的破坏指标权重确定方法，引入结构破坏程度指数 I_{SD}、修复费用比 κ、修复时间 T_0 作为核心量化指标，制定各指标的四级分级标准，为单指标韧性评价提供了定量依据。

3）本文给出直接对比法和加权归一化法两种韧性等级综合评定方法，将防波堤抗浪韧性划分为优、良、中、差四级，明确各等级对应的韧性

水平和修复策略，实现了防波堤抗浪韧性的综合定级。

4）研究成果实现了港口防波堤抗浪韧性的科学量化评估，后续将进一步研究韧性防波堤设计方法，从而系统给出韧性防波堤涵盖评价和设计的工程解决方案。

参考文献：

[1] JTS 154—2018　防波堤与护岸设计规范[S].
JTS 154-2018　Code of design for breakwaters and revetments[S].

[2] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.

[3] GB/T 38591—2020　建筑抗震韧性评价标准[S].
GB/T 38591-2020　Standard for seismic resilience assessment of buildings[S].

[4] Van Der Meer J W. Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1988, 114(1): 66-80.

[5] Etemad-Shahidi A, Bali M. Stability of rubble-mound breakwater using H_{50} wave height parameter [J]. Coast Engineering, 2012, 59(1): 38-45.

[6] Sajan M K, Chaudhary B, Akarsh P K, et al. Developing tsunami-resilient rubble mound breakwater: novel gabion-based technique[J]. Natural Hazards Review, 2024, 26(1): 04024049.

[7] Sajan M K, Chaudhary B, Kotrabasappa A P, et al. Novel techniques for reinforcing rubble-moungd breakwater against tsunamis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(3): 04024002.

[8] Chaudhary B, Hazarika H, Murakami A, et al. Development of resilient breakwater against earthquake and tsunami[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(1): 04018188.

[9] Matsumoto T, Otsubo M, Takahashi H, et al. A new failure mechanism for breakwater due to combined seismic motion and tsunami[C]//Rahman M M, Jaksa M. Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE 2022). Sydney: Australian Geomechanics Society, 2022: 2661-2664.

[10] 任冰, 金钊, 高睿, 等. 波浪与斜坡堤护面块体相互作用的 SPH-DEM 数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(2): 241-248.
Ren Bing, Jin Zhao, Gao Rui, et al. Numerical simulation of wave interaction with armor block of mound breakwater by SPH-DEM model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(2): 241-248.

[11] 李楠. 基于物理模型试验的斜坡式防波堤护面块体稳定性研究 [J]. 水运工程, 2012(2): 8-10, 29.
Li Nan. Stability study of armor blocks of inclined breakwaters based on physical modeling experiment[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(2): 8-10, 29.

[12] 李懿, 牛红林, 薛丁源. 斜向长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构稳定性优化[J]. 水运工程, 2018(9): 69-75.
Li Yi, Niu Honglin, Xue Dingyuan. Structural stability optimization of the rubble-mound breakwater under action of oblique long period swells[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(9): 69-75.

[13] JTS/T 276-1—2019　沿海港口水工建筑工程定额[S].
JTS/T 276-1-2019　Quota for maritime works in seaport[S].

[14] JTS/T 272-1—2014　沿海港口建设工程投资估算指标[S].
JTS/T 272-1-2014　Indexes for estimation of cost of seaport construction project[S].

（本文编辑　王璁）

水运工程