

国内外港口斜坡堤受损修复典型案例分析^{*}



陈志乐，杨静思

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：随着全球极端风浪天气日益增多，已建港口防波堤受损的情况逐年增加。为分析总结防波堤受损机理和修复领域的研究成果，收集近年来国内外 34 个防波堤损坏和修复案例，总结出斜坡堤损坏的 4 种主要因素并选取典型案例进行介绍，提出斜坡堤的修复和新建设计的合理化建议。对于外侧护面结构破损严重的斜坡堤，建议将已有结构作为堤心，新建护面结构进行修复；对于浪高和地形复杂的新建工程，建议综合考虑含建设费用和维护费用的全生命周期费用，充分考虑斜坡堤维护和修复的便利性，合理选取断面形式并采用块体强健性高、易修复的人工块体。

关键词：斜坡堤；受损原因；修复方案

中图分类号：U656.2+1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)09-0044-06

Typical cases for sloping breakwater damage and repair in domestic and foreign ports

CHEN Zhile, YANG Jingsi

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: With the growth of global extreme stormy weather, the damaged breakwaters of built ports have increased year by year. To summarize the research results in the field of breakwater damage mechanism and repair, thirty-four cases of domestic and foreign breakwaters damaged in recent years are collected in this paper. The four main factors that cause damage to sloping breakwater are summarized. Typical cases for each factor are introduced to propose reasonable suggestions for sloping breakwater repair and design. For a sloping breakwater with severe damage to the outer protective structure, it is recommended to use the existing structure as the core and construct a new protective armor structure for repair. For new projects with high wave heights and complex terrain, it is advisable to consider the life-cycle cost, including construction and maintenance expenses, and carefully consider the convenience of maintenance and repair. It is recommended to select a suitable cross-sectional form and artificial blocks with high robustness and ease of repair.

Keywords: sloping breakwater; cause of damage; repair plan

我国是世界上遭受海洋灾害最严重的国家之一，中国海洋灾害公报^[1]显示，近 10 年来由近岸台风大浪直接导致的防波堤、护岸等损毁长度达 3 000 km。防波堤作为重要的防御工程，损坏后严重影响了港口基础设施的安全有效运行。随着全球气候变化，近年来港口防波堤的损坏情况日益增多。李炎保等^[2]、吴永强等^[3]对防波堤损

坏特点及成因进行总结分析；胡曦光^[4]对深水斜坡堤破坏致因进行分析，并以某防波堤破坏案例为基础提出修复方案。

本文收集国内外公开资料中的 34 个防波堤损坏和修复案例（表 1），重点对其中抛石斜坡堤的损坏和修复进行分析总结。

收稿日期：2023-01-16

*基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFE0104500）

作者简介：陈志乐（1982—），男，硕士，高级工程师，从事水运工程设计。

表1 部分国内外防波堤受损案例

工程名称	受损年份
深圳盐田港东作业区东大堤	2018
汕头华能海门电厂东北防波堤	2016、2018
汕头中石油原油码头防波堤	2016
茂名港博贺港区西防波堤	2015
坎门渔港防波堤	2013
山东某船厂舾装码头防波堤	2012
日本岩手县釜石港防波堤	2011
大连某化工码头防波堤	2011
西班牙阿尔赫西拉斯港防波堤	2008
钓滨渔港防波堤	2005、2006(2013修复完成)
台山防波堤工程	2005
珠海桂山岛十三湾防波堤	2003
长江口二期工程北导堤	2002
长江口深水航道治理工程南导堤	1999
台湾基隆八尺门港区防波堤	1996
荣成西霞口防波堤	1993
日本六小河原港防波堤	1991
利比亚的黎波里港防波堤	1981
日本小名滨港	1981
山东岚山头港防波堤	1981
阿尔及利亚安纳巴港防波堤	1980
葡萄牙锡尼什港防波堤	1978
西班牙蓬塔卢塞罗防波堤	1976
阿尔及利亚斯基克达港防波堤	1973、1978、1982、1989
日本酒田港防波堤	1973(1980—1985修复)
意大利巴勒莫港防波堤	1973
大连石油七厂防波堤	1972
大连渔港防波堤	1972
黄海船厂防波堤	1972
阿尔及利亚穆斯塔法港防波堤	1957
意大利热那亚港防波堤	1955
印尼爪哇岛南岸电厂码头防波堤	-
日本小樽港防波堤	-
香港渔港防波堤	-

防波堤损坏的过程、部位和破坏方式等各有不同, 对表1中防波堤损坏资料进行系统分析和

总结后发现, 造成斜坡堤损坏的主要有4种因素: 对波浪水动力特性认识不足、地基承载力不足、局部构造不尽合理、施工期抗浪能力不足, 其中大部分损坏并非由单一因素导致的, 而是由多种因素联合作用造成的。本文按主要损坏成因选取部分防波堤损坏和修复典型案例进行介绍, 以供类似斜坡堤损坏修复工程参考。

1 对波浪水动力特性认识不足

波浪力是防波堤的主要荷载, 而波浪的设计标准、波浪的水动力特性(如波能局部集中、波群的持续影响等)都会影响到设计波要素的选取。波要素选取偏小或水动力特性考虑不足, 斜坡堤就易在极端气候条件下受损。

1.1 实际波浪大幅超过原设计标准

防波堤受损最常见的情况是遭受台风袭击, 台风期间作用于防波堤的波浪很可能大于设计采用的波浪标准。防波堤实际遭遇波浪大于设计波高时易造成胸墙失稳、护面块体损坏、堤脚冲刷失稳等常见的损坏特征。

钓滨渔港斜坡堤^[5]受2005年“卡努”和“麦莎”、2006年“桑美”台风袭击, 斜坡堤受损十分严重, 堤顶高程下沉20~90 cm; 胸墙前端扭王字块体前倾; 戍台及护面扭王字块体大部分下滑且有折断, 垫层石出露; 护底块石坍塌下沉。

修复方案如图1所示。将设计潮位和波浪的重现期提高至100 a一遇, 增大扭王字块质量至15 t(将原有块体作为垫层)。抬高胸墙顶高程1.5 m以控制越浪量, 并将胸墙加厚1.0 m。钓滨渔港于2013年完成修复, 并成功抵御“凤凰”等台风的袭击, 经受住了考验。

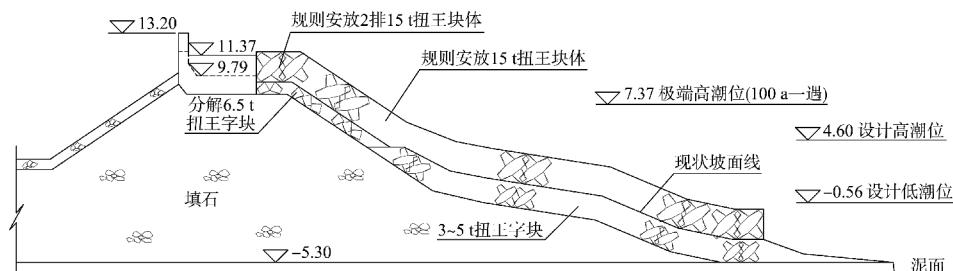


图1 钓滨渔港防波堤修复断面(单位: m)

1.2 局部波能集中

局部波能集中也是斜坡堤损毁的常见原因。由于斜坡堤平面布局中有凹角或相邻结构差异会导致局部波高增大和波能集中，使得斜坡堤护面承受更大的波浪力，进而导致斜坡堤呈现差异化的受损程度。

汕头华能海门电厂防波堤^[6]平面呈折线型布置。折角处斜坡堤外坡护面采用 20 t 扭王字块，采用 600~800 kg 抛石棱体。2018 年受台风“山竹”袭击，最大波高超过 8.0 m，折角处斜坡堤受损严重。外坡扭王字块散乱严重，地基发生沉降，

胸墙损坏严重。

该段斜坡堤位于平面拐折处，同时是直立堤与斜坡堤的连接处，波况复杂，形成局部波能集中。修复方案如图 2 所示，由于台风破坏后坡面处于设计低水位 1 倍波高范围内，此区域波浪作用剧烈，若采用传统抛石棱体易在波浪作用下失稳，因此改用质量 500 t 的大型钢筋混凝土块体作为 40 t 扭王字块体的抛石棱体。海床加固采用水下浇筑早强自护混凝土，将块体和块石混合物胶结以增强抗冲刷能力。

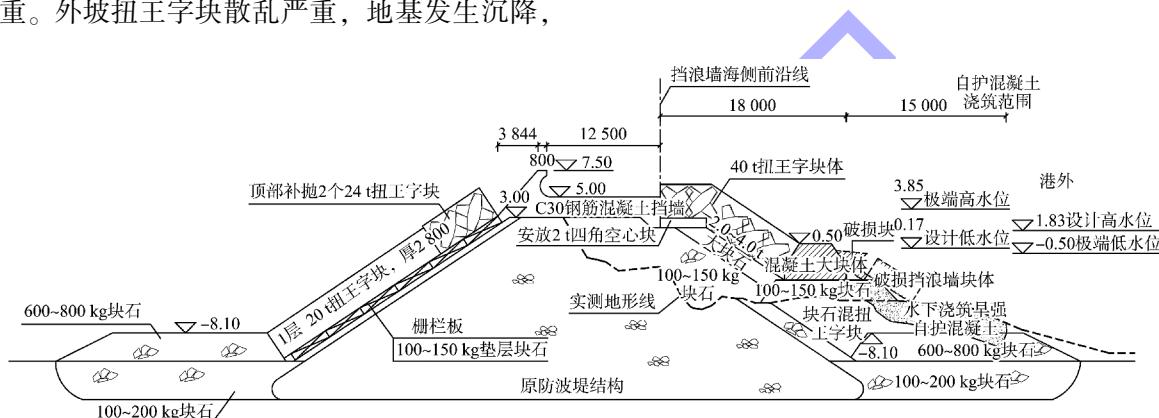


图 2 华能海门电厂斜坡堤修复断面 (尺寸: mm; 高程: m)

1.3 波群影响

葡萄牙的锡尼什港防波堤是一座深水斜坡堤，最大水深 50 m。堤心外侧依次铺设 0.25~1 t、3~6 t、42 t 扭工字块体各 1 层。1978 年港区遇到波高约 9 m 的风暴，有 2/3 的块体被浪冲走，大量块体断裂，上部挡浪墙坍塌破坏。

损坏的主要原因是对波群和波谱特性认识不足。当地波浪记录显示存在波群现象，虽然大浪波高未超过设计波高，但波群也会造成斜坡堤损坏。试验表明，波群现象对斜坡堤护面块体的稳定性不利。通常，波群中第 1 个大波使块体发生

摆动，第 2 个大波倾向于将块体从护面层中抬出来，而第 3 个大波则使块体延坡面滚动。如果大波非成群出现，则在第 1 个大波作用下摆动的块体，将会在随后较小的波浪作用下渐趋于稳定状态^[7]。

修复方案如图 3 所示。将破坏后的防波堤作为堤心，外侧补抛 1~300 kg 块石形成设计堤心断面，抛填 3~6 t 块石垫层，外坡下部采用不规则安放的 2 层 90 t 块体(顶层 Antifer，下层 Robioc)，施工水位以上采用单层规则安放的 90 t Antifer 块体。新块体较扭工字块体有更高的块体强健性。

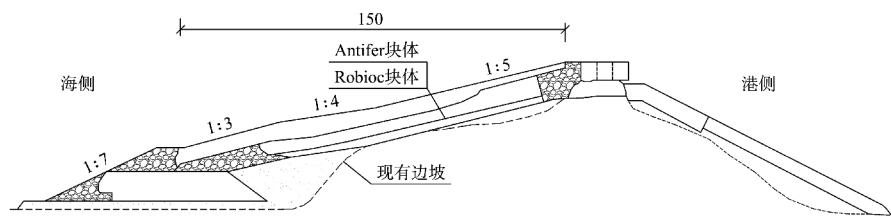


图 3 锡尼什港斜坡堤修复断面 (单位: m)

2 地基承载力不足

对于原地基强度不高或地基土易于冲刷的工程, 当勘察数据离散性较大或者设计对地基承载力认识不充分, 未对原地基进行有效处理, 就可能致使斜坡堤整体结构滑移、倾斜或沉降过大, 产生破坏。

香洲渔港斜坡堤^[8]堤高 6 m, 建于厚 6~10 m 的淤泥软弱土层上。设计采用 2 m 厚砂垫层。完工后仅 4 h 就有长约 90 m 的堤段塌陷, 且向内坡方向滑移, 最大水平位移 4 m; 内坡堤脚外土面隆起达 1.5 m。

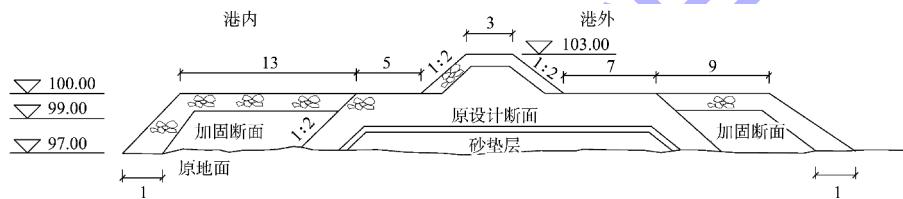


图 4 香洲渔港斜坡堤修复断面 (单位: m)

3 局部构造不尽合理

受限于当时的认知水平, 设计有时未能完善地考虑到局部构造措施, 比如护面压脚结构选取不合理、胸墙前平放块体的宽度不足、水下平台宽度不足、堤顶部位构件稳定性不足等^[9-10]; 或是在实施过程中有未尽合理之处, 比如堤心石透水性低于设计要求、扭工字块摆放方式有问题、垫层块石质量不足等。随着时间的推移, 这些细节上的不完善均可能导致斜坡堤的局部乃至大段损坏。选取 2 个典型案例进行介绍。

3.1 设计方面不足

利比亚的黎波里港斜坡堤^[11], 在 1981 年的 2 次风暴中遭海浪袭击, 波高达 7.35 m, 水深较大处受损严重。受损处水深大于 7.4 m, 护面结构为 2 层 8 m³(18.8 t) 的四角锥体, 挡浪墙顶高程为 9.0 m。部分挡浪墙发生位移及断裂, 四角锥体破坏导致护面层顶高程变低。

损坏原因为胸墙前的四角锥体层的原顶宽(2.3 m)和顶高程(6 m)不足, 且四角锥体护面层下的块石戗台高程(-5 m)太高。此外, 实际波高

损坏原因: 1) 因砂料供应不足, 砂垫层厚度减为 1 m, 且局部尚不足 1 m。2) 为追求施工进度, 未严格按照规定的日沉降量 5 mm 控制加载速率, 完工前连续 10 d 日沉降量超过规定, 最多达十几毫米。最终的日沉降量达 21 mm, 发生大体积塌陷。综上, 均为施工原因导致的地基承载力不足引起斜坡堤滑移。

修复方案如图 4 所示。采用双侧反压平台, 反压平台外侧宽 9 m、内侧宽 13 m, 加固断面采用抛填袋砂方式, 顶部及外侧铺设块石护面。斜坡堤自修复后 20 余年, 经受住多次台风的考验未损坏。

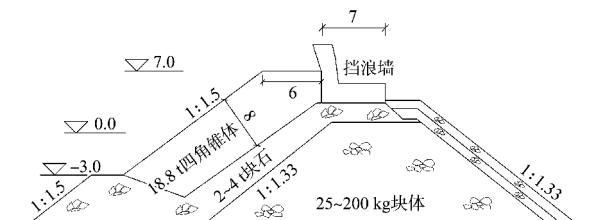


图 5 黎波里港斜坡堤修复断面 (单位: m)

3.2 施工方面不足

珠海市桂山岛十三湾斜坡堤^[12]在 2003 年受台风“伊布都”袭击, 东堤外坡大面积损坏, 堤头及近堤头 120 m 堤段几乎完全坍塌毁坏, 堤身没入水中, 失去防护功能。

损坏原因包括原设计波高偏小、护面块体选择不当、施工质量不足等。通过实地观测, 施工质量存在以下问题: 1) 护面块石厚度不足。原设

计外坡采用厚 2 m 的 3~4 t 大块石，施工时普遍不满足厚度要求，且块石间接缝过大，并用较小的块石堵塞。波浪作用下小块石被淘出，相邻石块失去嵌固而相继松动，最终护面块石失稳。2) 垫层块石质量不足。设计采用厚 1 m 的 300~500 kg 块石，但实际未见明显的垫层块石，只是小块石和石碴。3) 堤心石不满足设计要求。实际施工采用

开山石的石渣作为堤心，不满足堤心石 20~200 kg 设计要求且含泥量超标，致使堤心石易被淘空，加速了防波堤损坏进展。

修复方案如图 6 所示。以受损斜坡堤为基础，补充石料理坡成型，将块石护面调整为 8 t 扭王字块，堤头段取 12 t。抬高堤顶高程至 7.5 m，外坡堤脚增设 500~800 kg 块石护脚。

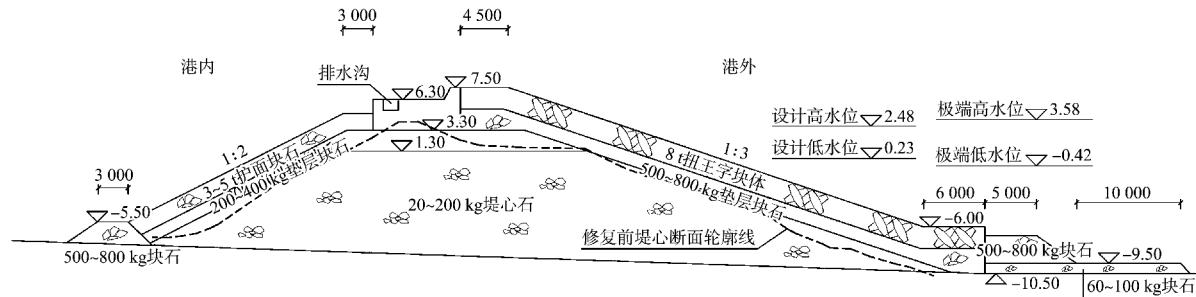


图 6 珠海市桂山岛十三湾防波堤修复断面 (尺寸: mm; 高程: m)

4 施工期抗浪能力不足

印尼爪哇岛南岸电厂码头斜坡堤^[13]在施工将要完成时，受到数次大浪袭击，堤身及堤头扭工字块体损坏严重、断肢率高，堤心石裸露，部分堤段被冲断成两截。

损坏原因主要包括斜坡堤尚未防护成型，设计波周期较实际偏小，施工质量存在问题。其中，施工期未防护成型是关键原因。大浪爬高越浪后直接作用在堤顶，而堤顶尚未安装护面块

体，堤心石直接被大浪冲走，致使斜坡堤断面整体坍塌。

修复方案如图 7 所示。在现有堤身基础上，上部安放 2 层 15 t 扭工字块，下部安放 3 层 4 t 扭工字块体，并将护底块石加宽和加厚。为避免斜坡堤在施工中受损，在堤心石推填出水面后及时安放扭工字块体进行防护，并加强大浪预报信息收集，在大浪来临前将堤顶护面块体进行临时安装，使斜坡堤具备整体防护能力。

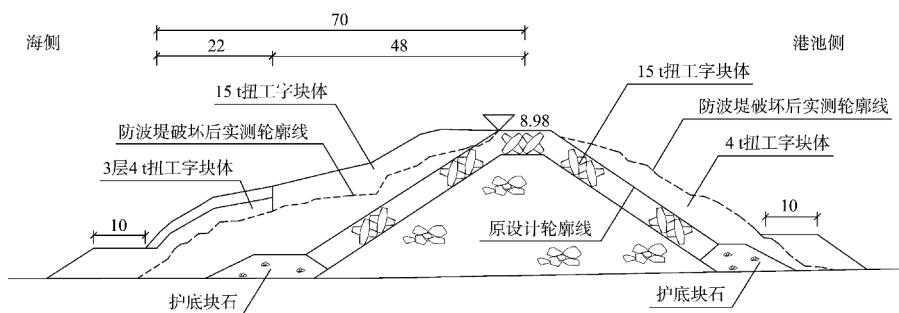


图 7 印尼爪哇岛南岸电厂码头斜坡堤修复断面 (单位: m)

5 结语

1) 斜坡堤受损的主要因素包括：波浪水动力特性认识不足、地基承载力不足、局部构造不尽

合理、施工期抗浪能力不足等。新建工程宜重点研究工程处的水文和地质特性，合理选取设计波浪标准；施工时加强质量管控，并及时监测水文

气象条件, 在堤心石推出水面后及时防护, 并在大浪来临前在堤顶安装临时护面块体, 提高整体防护能力。

2) 对于斜坡堤受损后的修复, 由于斜坡堤破坏后会出现护面块体断肢破坏、局部块体缺失、与内部垫层和堤心块石混合等情况, 受损后防浪能力难以有效评估, 拆除施工难度大, 目前大多在原堤现状基础上外加垫层和新护面块体进行修复, 并通过物理模型试验对修复方案进行验证。

3) 斜坡堤修复内容主要集中在调整挡浪墙顶高程, 优化护面块体结构形式, 调整护面块体质量, 增设或优化肩台, 增加堤脚抛石棱体等。对于浪大和地形复杂的工程, 建议初始设计时综合考虑含建设费用和维护费用的全生命周期费用, 充分考虑维护和修复的便利性, 合理选取斜坡堤的断面形式和护面类型。

4) 对于深水、大浪条件下的防波堤, 块体结构强健性对于结构整体安全性至关重要, 目前块体所受波浪力还有待进一步研究, 在新建工程中宜采用块体强健性高、易修复的人工块体。

5) 防波堤设计方案应采用物理模型试验验证, 但需要评估模型试验的合理性, 重点关注块体摆放与实际施工的相似性、胸墙底部摩擦系数、底部地基冲刷模拟。对于深水、大浪条件下的防波堤, 如选用有细长肢体的人工块体作为护面, 宜考虑护面块体的强度相似性。

(上接第 31 页)

- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018 [S]. 北京: 人民交通出版股份有限公司, 2018.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版股份有限公司, 2015.
- [7] 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院. 共富路(沿海大道至码头)道路工程临海路基防浪结

参考文献:

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2022.
- [2] 李炎保, 蒋学炼, 刘任. 防波堤损坏特点与其成因的关系[J]. 海洋工程, 2006(2): 130-138.
- [3] 吴永强, 李炎保, 刘颖辉. 防波堤损坏研究进展及损坏原因浅析[J]. 港工技术, 2008(2): 8-11.
- [4] 胡曦光. 深水斜坡堤破坏致因分析及修复方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [5] 赵子文, 陈德春, 江根青, 等. 钓浜渔港防波堤修复加固新技术[J]. 水运工程, 2015(9): 99-103.
- [6] 中交水运规划设计院. 华能海门电厂 2018 年“山竹”台风受损港口设施加固修复工程[R]. 北京: 中交水运规划设计院, 2019.
- [7] 谢世楞. 斜坡式防波堤设计中若干问题的探讨[J]. 水运工程, 1983(1): 10-15.
- [8] 魏汝龙. 我国沿海软黏土特性及其工程问题[C]//交通部基建管理司. 水运工程技术四十年. 北京: 人民交通出版社, 1996: 947-952.
- [9] 肖仕宝, 邓涛. 深水防波堤扭王块护面压脚设计方案[J]. 水运工程, 2018(9): 66-68, 123.
- [10] 潘宝雄. 斜坡式建筑物波要素的设计标准探讨[J]. 水运工程, 1982(11): 49-56.
- [11] 谢世楞. 的黎波里港防波堤的破坏及其原因分析[J]. 港工技术通讯, 1982(1): 15-20, 69.
- [12] 蒋美娇, 冯海波. 珠海桂山岛十三湾防波堤修复加固方案[J]. 水运工程, 2019(6): 63-69.
- [13] 邓振洲, 冯建国. 印尼某电厂码头防波堤破坏原因分析及修复方案[J]. 港工技术, 2018, 55(6): 71-74.

(本文编辑 王璁)

构提升防浪标准断面物理模型试验报告[R]. 南京: 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 2021.

- [8] 姜云鹏, 刘昌兴, 彭程. 波浪作用下陡坡和缓坡地形对护岸工程的影响[J]. 水运工程, 2015(4): 61-65.
- [9] 张弛, 牛恩宗, 齐彦博, 等. 斜坡式护岸结构优化设计[J]. 水运工程, 2015(5): 67-71.

(本文编辑 王传瑜)