

· 港 口 ·



某四角锥护面斜坡堤损坏原因分析

许建武¹, 杨小龙¹, 沈雨生², 张 军¹

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 防波堤损毁原因的分析对其修复或重建方案具有重要指导作用。地中海某防波堤在过去 45 a 施工和运营期间多次遭受大浪作用导致较严重的破损, 虽历经多次修复, 但仍然发生局部破坏。通过现场调查, 结合理论公式计算和防波堤断面物模试验, 对可能导致破坏的原因进行了分析。结果表明: 1) 地中海地区波浪强烈, 波高大、周期长, 大浪持续时间长, 破坏力大。2) 防波堤四角锥护面块体破坏的最主要原因是护面坡度过陡。3) 四角锥护面块体的安放质量对其稳定性也有明显影响, 随机抛放时四角锥护面块体的稳定性明显低于规则摆放时的情况。4) 对于地中海区域的大型四角锥护面块体深水防波堤项目, 设计中应充分考虑护面块体适宜坡度、块体安装质量及安装密度等诸多因素对块体稳定性的影响。

关键词: 斜坡式防波堤; 四角锥块体; 损坏; 地中海

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0032-07

Damage analysis of a breakwater with tetrapod armor

XU Jian-wu¹, YANG Xiao-long¹, SHEN Yu-shen², ZHANG Jun¹

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210042, China)

Abstract: The damage analyses of breakwaters have an important guiding role for its rehabilitation or reconstruction. During the past 45 years of construction and operation, a rubble mound breakwater armored with Tetrapod units in the Mediterranean has damaged successively under strong wave conditions. Although it has been repaired many times, it still suffered local damage. In this paper, by field investigation, theoretical formula verification, and 2D physical model test, the damage reasons of Tetrapod blocks are analyzed. Results show that: 1) The Mediterranean area has strong waves, high wave height, long period, long duration, and great destructive power. 2) The main reason for the breakwater damage is that the slope of the protective surface is too steep. 3) The unit placement quality also has a significant effect on the stability of the Tetrapod units. The stability of the Tetrapod units with randomly placed is much worse than that of the Tetrapod units with regular well placed. 4) For the breakwater projects in the Mediterranean, the factors of armour slope, block installation quality and unit placement density should be considered in the design.

Keywords: rubble mound breakwater; tetrapod; damage; the Mediterranean

斜坡式防波堤作为港口码头最常用的防浪掩护建筑物, 是港口码头正常营运的重要保证, 防波堤的损坏将造成巨大的经济损失和严重的社会影响。随着经济的发展, 国内外防波堤工程建设越来越多, 波浪作用下防波堤的损毁实例也时有

发生。1978 年, 葡萄牙 Sines 防波堤 42 t 的扭工字块在大浪作用下发生垮塌, 防波堤严重破坏^[1-2]; 1980 年, 西班牙的 San Ciprian 防波堤扭工字块护面遭受严重的破坏^[3]; 1981 年, 阿尔及利亚的 Arzew el Djedid 防波堤 20 m³ 的四角锥块体在一次

收稿日期: 2020-09-30

作者简介: 许建武(1984—), 男, 高级工程师, 从事港口工程设计工作。

风暴中发生了非常严重的破坏。这些大型防波堤失败的案例, 引发了广泛的关注和大量的研究。M. T. Reis 等^[4]对葡萄牙 Sines 防波堤的损坏原因及修复方案开展试验研究; 日本港湾技术研究所^[5-7]对发生在日本的几个防波堤损坏案例进行了分析; 李炎保等^[8]根据国内外典型防波堤破坏案例, 探讨了防波堤的损坏特点及其成因; 王美茹^[9]对国外几处深水斜坡式防波堤的破坏案例进行了分析, 指出了设计中需要注意的关键问题。以上研究主要从护面块体断肢、护面块体质量不足、挡浪墙失稳、沉箱失稳、地基承载力不足、施工缺陷和深水波浪水动力学特征等方面分析了防波堤损坏的原因, 为防波堤的设计及修复提供了一定的借鉴。虽然近几十年来国内外在波浪理论、防波堤设计方法以及防波堤模型试验等方面均有了较大的发展, 但仍不断有防波堤破坏的案例发生, 防波堤损毁原因的分析对防波堤损毁后的修复及新建防波堤设计、施工方法的完善具有重要的意义。

随着我国“一带一路”倡议的推进, 我国企业承建的海外港口码头项目逐年增多, 其中很多是对损坏防波堤的修复工程。本文依托的防波堤工程位于地中海, 护面采用四角锥块体(tetrapod) 双层摆放, 自建成以来, 40 多年间护面多次发生破坏, 并开展过 2D 和 3D 波浪物理模型试验^[10-12], 1989 年最后一次修复后又发生损坏。我国企业承

接了该防波堤的修复工程, 对防波堤护面损坏原因的分析关系到工程的成败。本文依据当地波浪条件, 通过现场调查, 对比防波堤原设计方案和实际破坏情况, 结合理论公式计算和防波堤断面物模试验, 对可能导致破坏的原因进行了详细分析, 可为类似防波堤修复和建设工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 防波堤设计施工方案

工程防波堤位于地中海南岸的阿尔及利亚 SKIKDA 港(阿尔及利亚东北部), 防波堤总长 1 876 m, 堤头位于 18 m 水深处, 见图 1。

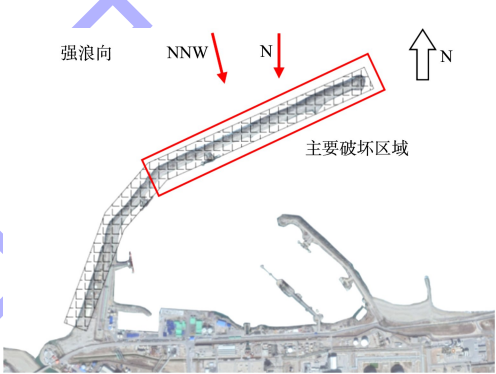


图 1 防波堤平面布置

防波堤为斜坡式结构, 外坡的护面斜坡坡度 1:1.33, 护面采用 2 层 40 t 四角锥块体, 堤顶有混凝土胸墙, 顶高程 7.56 m(图 2)。防波堤施工期为 1970—1973 年, 在胸墙大部分浇筑好后, 采用门式起重机陆上安装四角锥护面块体。

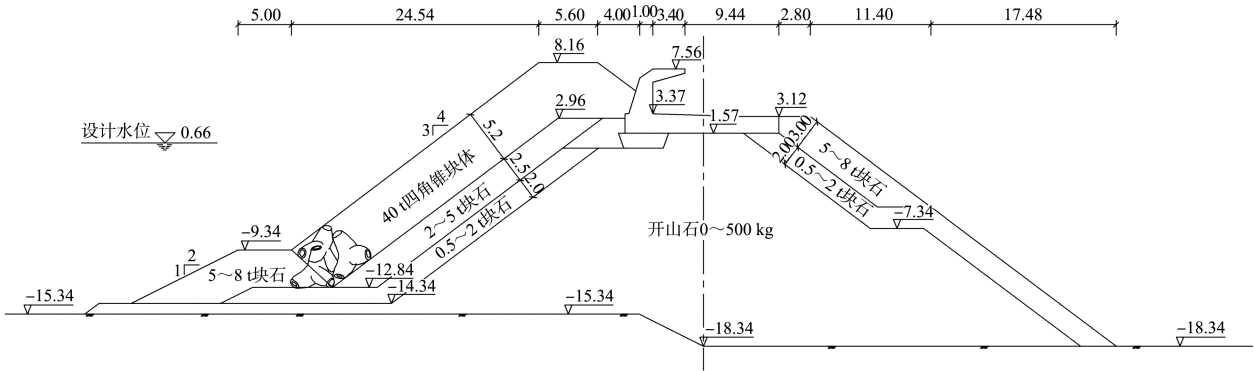


图 2 防波堤设计断面 (单位: m)

1.2 波浪条件

地中海东西长约 3 000 km、南北长约 600 km,

以意大利西西里岛为界分为西地中海和东地中海。工程区常年有效波高基本在 2 m 以下, 波高季节性

分布明显，冬季受风暴影响波浪大，夏季受西南季风控制，波浪小。有效波 4 m 以上的风暴每年至少一次，工程海域在防波堤施工过程中和竣工后历史大浪见表 1。

表 1 工程区历史大浪情况

时间	H_s/m
1973-01-22—1973-01-23	6.2
1978-11-26—1978-11-30	7.8, H_s 超过 5 m 达 50 h
1982-12-01—1982-12-20	7.4
1989-02-15	4.6
1990-12-13	7.4
1996-02-08	6.7
1996-02-08—1996-02-09	6.9
2003-02-01	7.2
2005-02-01—2005-02-15	7.1
2009-03-06	6.3
2013-11-11	5.5
2015-11-26	5.4

注： H_s 为不规则波的有效波高 $H_{1/3}$ 。

结合近些年的波浪实测资料数模推算，设计高水位为 0.66 m，防波堤 100 a 一遇设计有效波

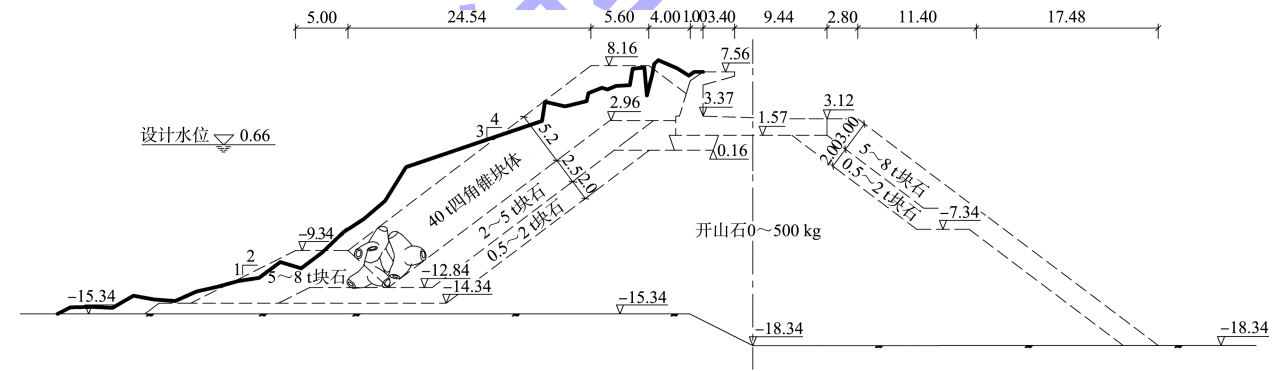
高 $H_s=9.0\text{ m}$ ，谱峰周期 $T_p=12\text{ s}$ ，浪向为 N 和 NNW 向。

1.3 防波堤损坏情况

防波堤自 1970 年开工以来，在施工过程中和竣工后经历多次大浪袭击，有效波高 7 m 以上的大浪袭击有 5 次。1973 (施工期)、1978、1982、1989 年的风暴中遭受比较严重的损坏，随后进行了修复。

自 1989 年损坏至今，对该防波堤进行了数次物理模型试验研究，并进行了多次系统的修复。物模试验的有效波高 H_s 最大达到 10 m，试验中 40 t 四角锥块体的失稳率均小于 5%，满足稳定性的要求。

防波堤典型破坏断面见 3，目前防波堤的损坏情况主要如下：1) 外坡肩台的四角锥护面块体普遍破坏较严重，集中体现在肩台区域的护面块体被打落至水面以下坡面和坡脚；2) 外坡坡脚存在一些散体材料，以四角锥和块石混杂为主；3) 内坡块石护面的肩台局部位冲落至坡面或坡脚。



注：实线为损坏断面。

图 3 防波堤典型损坏断面 (单位: m)

2 现场调查及分析

2.1 波浪因素

工程区波浪强烈，大浪持续时间长，破坏力大，见表 1。

2.2 护面坡度

现有人工护面块体设计中，以钩联作用为主的单层摆放块体 (如 Accropode™ 或 Accropde™ II、

Core-loc™、Xbloc™ 等) 不允许发生失稳，以重力为主要稳定因素的双层摆放块体 (如 Tetrapod、Cube 和 Antifer 等) 在设计波浪下通常允许发生一定数量失稳^[10-12]。

四角锥块体的稳定性主要依靠自重，坡度影响较大。*The rock manual*^[11] 对四角锥块体的特性进行了说明，建议坡度不陡于 1:1.5。本工程护面

斜坡坡度为 1:1.33，坡度过陡。

2.3 护面块体稳定性验算

对于块体质量，采用 Hudson (1959) 公式^[13]进行复核， $K_0=8$ 时，40 t 四角锥块体可承受的最大有效波高 $H_s=7.95$ m，历史上记录到的最大波浪未超过此值。

对于波浪作用时间，采用文献 [14] 中的四角锥护面公式进行复核， $N_{od}=0.5$ 时，当波数取 1 000 时，40 t 四角锥块体可承受目前的设计波高 $H_s=9.0$ m。

2.4 施工质量影响分析

防波堤水域水深较大，1973 年施工期间就遭受到了大风暴的袭击，由于施工期间设计断面尚未成型，因此造成了严重的损坏。在修复的过程中，难以消除所有潜在的隐患，尤其是水下区域，可能造成在后续风暴过程中再次遭到破坏。

原设计断面的四角锥护面支撑在棱体块石上，大型的棱体块石施工难度大，可能存在局部部位施工质量难以保证。

同时，鉴于当时的施工技术没有水下摄像、多波束、声呐扫描系统(如 Echoscope 三维图像声呐)或者软件(如 POSIBLOC™ 水下安装系统)^[15] 等的辅助，随机安装的四角锥块体质量难以保证。现场考察发现，护面四角锥块体比较散乱，可见四角锥块体安放应为随机抛放的。对于随机抛放的四角锥护面块体，局部区域的安装密度和安装姿态等难以达到设计的要求。

3 物理模型试验

3.1 试验设备和方法

防波堤断面物理模型试验在南京水利科学研究院的波浪水槽中进行，水槽长 68 m、宽 1.8 m、深 1.8 m，造波机安装有丹麦水工研究所生产的 AWACS² 造波及二次反射吸收控制系统，可根据需要产生规则波及不同谱型的不规则波。波高测量采用电阻式波高仪，采用 DS30 多功能自动采集系

统采集信号，最终由计算机形成波高数据文件并进行处理分析。

采用正态模型，按重力相似模型设计，模型比尺为 1:38.6。

试验采用的不规则波浪谱为 JONSWAP 谱。不规则波每组波列的持续作用时间为 3 h。

试验断面为防波堤原设计断面(图 2)，挡浪墙、护面块体除与原型保持几何相似外，还保持重力相似。垫层和护底块石等均严格挑选，以保证质量相似。

根据 *The rock manual*，对于单个块体，失稳标准为块体累积位移超过块体的当量直径。对于整个四角锥块体护面，其稳定性标准为失稳百分比 $N_d(N_d=$ 发生失稳的护面块体个数/护面块体总数) 小于 5%。

根据项目以往数次试验记录，即使 H_s 达到 10 m 时，试验中 40 t 四角锥块体均满足稳定性的要求，故本文未对损坏与波浪要素的关联做进一步研究，而重点分析可能的施工质量问题(四角锥护面块体摆放方式)以及结构设计本身的缺陷(护面斜坡坡度较陡)对稳定性的影响。

防波堤断面物理模型试验工况如下：1) 护面块体摆放方式对稳定性的影响：试验护面块体摆放方式包括规则摆放和随机抛放；2) 护面坡度对稳定性的影响：试验护面坡度包括 1:1.2、1:1.33 和 1:1.5。

各工况的试验波浪条件相同，均为 T1(历史大浪)和 T2(设计波浪)，试验水位均为 0.66 m。

3.2 试验结果及分析

3.2.1 护面块体摆放方式对稳定性的影响

在原设计护面坡度(1:1.33)下进行了护面块体摆放方式对稳定性影响的试验。试验护面块体摆放方式包括规则摆放和随机抛放，两种摆放方式的试验照片见图 4。需要说明的是，如施工条件允许，设计的护面四角锥块体摆放方式为规则摆放。这里所讲的“规则摆放”不是指护面上所

有四角锥块体均一种摆放姿态，而是指护面上四角锥块体主要有几种特定的摆放姿态，摆放后的护面四角锥块体表面整体规整。对于随机抛放摆放方式，模型中安放护面四角锥块体时，在铺放完模型垫层块石后，向水槽内注水至设计水位，然后在有水的条件下将模型四角锥块体逐个抛放至垫层块石上，其安放方式与现场施工情况基本相同，安放完成后的模型护面块体状况与现场未破坏区域的护面块体摆放方式基本一致。

不同摆放方式的稳定性试验结果见表 2。

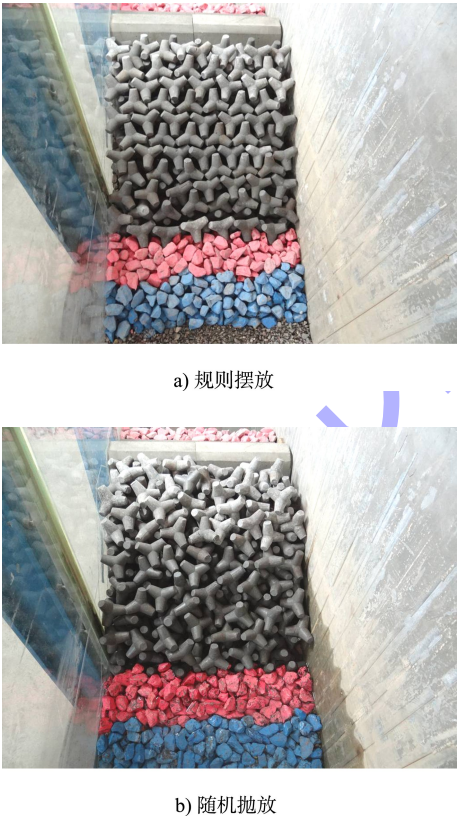


图 4 不同摆放方式波浪作用前的四角锥护面块体模型照片

表 2 不同摆放方式下四角锥护面块体的失稳率
(原设计护面坡度 1:1.33)

编号	水位/m	H_s /m	T_p /s	失稳率/%	
				规则摆放	随机抛放
T1	0.66	7.9	12	0	1.9
T2	0.66	9.0	13	0	5.2

由试验结果可见，对于四角锥护面块体规则摆放的情况，在 H_s 为 7.9 m 和 9.0 m 波高的两组波浪作用下，40 t 四角锥护面块体均无滚落，其失稳率为 0.0%，护面块体稳定。对于四角锥护面块体随机抛放的情况，在 H_s 为 7.9 m 和 9.0 m 波高的两组波浪作用下，40 t 四角锥护面块体有个别滚落，其失稳率分别为 1.9% 和 5.2%；在 H_s 为 9.0 m 波高的波浪作用下，40 t 四角锥护面块体的失稳率接近 5%，处于临界稳定状态。可见，四角锥护面块体的摆放方式对其稳定性存在明显影响，随机抛放时四角锥护面块体的稳定性明显低于规则摆放时的情况。

3.2.2 护面坡度对稳定性的影响

对于在原设计护面坡度 (1:1.33) 下的随机抛放四角锥护面块体，其在历史大浪 ($H_s = 7.9$ m、 $T_p = 12$ s) 的试验波浪要素作用下，其破坏程度 (护面块体仅个别滚落,护面坡线无明显变形,处于稳定状态)明显小于现场实际破坏程度 (现场破坏比较严重,护面块体多处滚落较多,护面坡线明显变形,见图 3)。可见，除了四角锥块体的施工摆放方式对其稳定性存在明显影响外，还存在其它因素对其稳定性存在明显影响。为了进一步论证四角锥块体的损坏原因，对护面坡度对稳定性的影响进行研究 (各护面坡度下护面块体均随机抛放)。不同护面坡度的稳定性试验结果见表 3。

表 3 不同坡度下四角锥护面块体的失稳率 (随机抛放)

编号	水位	H_s /m	T_p /s	失稳率/%		
				坡度 1:1.2	坡度 1:1.33	坡度 1:1.5
T1	0.66	7.9	12	6.2	1.9	0.6
T2	0.66	9.0	13	9.0	5.2	2.4

图 5 为 $H_s = 7.9$ m、 $T_p = 12$ s 波浪作用 3 h 后 1:1.2 坡度断面损坏情况照片，图 6 为其损坏断

面，图 7 为不同外坡坡度下四角锥护面块体的稳定性试验结果对比。

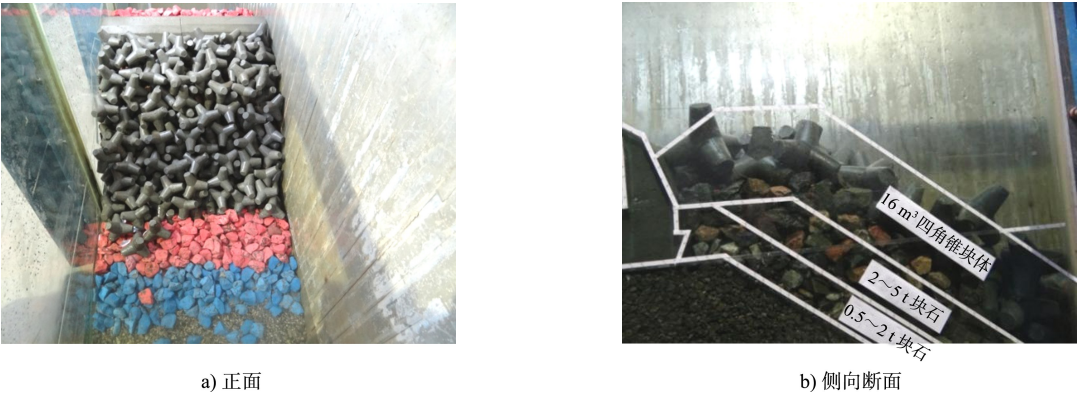


图 5 坡度 1:1.2 断面波浪作用后的损坏情况照片

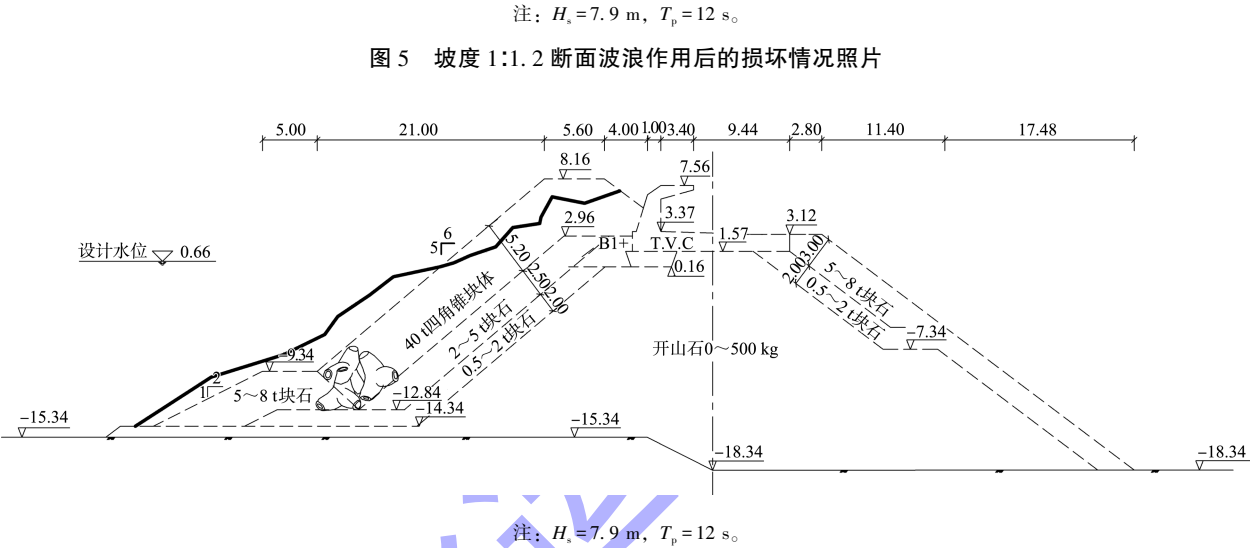


图 6 坡度 1:1.2 断面波浪作用后的损坏断面（单位：m）

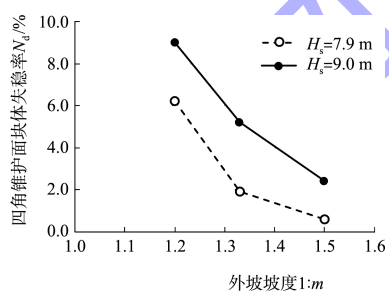


图 7 不同外坡坡度下四角锥护面块体失稳率对比

图 6 中的损坏情况与图 3 的防波堤现场损坏典型断面非常接近。由试验结果可见，当入射波高 $H_s=7.9\text{ m}$ ，坡度由 1:1.33 调整为 1:1.2 后，四角锥护面块体的失稳率由 1.9% 增加到 6.2%，四角锥护面块体由稳定变为失稳。当入射波高 $H_s=9.0\text{ m}$ 时，坡度 1:1.33 上的 40 t 四角锥护面块体的失稳率接近 5%，处于临界稳定状态，护面块体基本无安全余量；当坡度变为 1:1.2 时，四角锥护面块体的失稳增加至 9.0%，显著失稳；当坡度变

为 1:1.5 时，四角锥护面块体的失稳减至 2.4%，满足稳定性的要求。分析可见，在 1:1.2~1:1.5 坡度范围内，四角锥块体的稳定性对护面坡度非常敏感，尤其在外坡坡度较陡(1:1.2 和 1:1.33) 情况下，当坡度由 1:1.33 调整为 1:1.2 后，四角锥护面块体的稳定性显著降低。

由于本防波堤施工期就发生了损坏，在历次修复中很难保证原设计的坡度(1:1.33)，施工过程中局部较小的偏差就可能会使坡度接近 1:1.2 而显著降低护面块体的稳定性。因此，原设计断面采用 1:1.33 的坡度对于四角锥块体护面来说是较陡的，对其稳定性不利，*The rock manual* 中建议四角锥块体的坡度应缓于 1:1.5 是合理的。

4 结语

1) 地中海地区波浪强烈，波高大、周期长，大浪持续时间长，破坏力大。

2) 本防波堤四角锥护面块体破坏的最主要原因是护面坡度过陡。尽管在此坡度下的块体试验验证是稳定的, 但实际施工中局部微小的偏差可能在大浪作用下被放大, 导致稳定性发生质的变化。其次, 四角锥护面块体的安放质量对其稳定性也有明显影响, 随机抛放时四角锥护面块体的稳定性明显低于规则摆放时的情况。

3) 对于该防波堤修复工程, 由于防波堤已建成, 护面修复只能采取水上施工, 施工质量控制较之前的陆上施工更困难, 因此, 修复工程首先应放缓四角锥块体护面坡度, 但考虑到现状的实际情况, 建议可保持水下区域已放缓的坡度, 而仅对水位附近破坏严重的区域进行坡度调整。

4) 对于地中海区域的大型四角锥护面块体深水防波堤项目, 在设计中应该充分考虑块体适宜坡度、块体安装质量及安装密度等诸多因素对块体稳定性的影响。施工期间, 应加强施工期的临时防护措施, 避免施工期因断面还未形成而造成较大的损坏。

参考文献:

[1] BURCHARTH H F. The lessons from recent breakwater failures: developments in breakwater design[M]. Denmark: Aalborg university, 1987.

[2] JENSEN O J. Safety of breakwater armour layers with special focus on monolayer armour units [C]//Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013. London: ICE Publishing, 2014: 33-44.

[3] EDGE B, MAGOON O. A review of recent damages to coastal structures [C]// Conf. on Coastal Structures 79.

USA, Virginia: [s.n.] 1979: 333-348.

[4] REIS M T, NEVES M G, LOPES M R, et al. Rehabilitation of Sines west breakwater: wave overtopping study [J]. Maritime engineering journal, 2011, 164(1) : 15-32.

[5] 北岛昭一, 中野拓治, 掘井修身, 等. 被灾防波堤集览[R]. 东京: 港湾技研所, 1968: 58.

[6] 武山秀夫, 中山种清. 被灾防波堤集览(その2) [R]. 东京: 港湾技研所, 1975: 200.

[7] 服部千佳志, 柴田钢三, 大晃一. 被灾防波堤集览(その3)[R]. 东京: 港湾技研所, 1984, 485.

[8] 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.

[9] 王美茹. 深水防波堤设计方法初探[J]. 港工技术, 2010, 47(3) : 1-7, 41.

[10] US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual [S]. Vicksburg, America: US Army Corps of Engineers, 2006.

[11] CUR, CIRIA, CETMEF. The rock manual: The use of rock in hydraulic engineering [S]. 2nd ed. London: C683, CIRIA, 2007.

[12] The British Standards Institution. Maritime works-part 7: guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7: 1991[S]. London: BSI Standards Publication, 1991.

[13] HUDSON R Y. Laboratory investigations of rubble mound breakwaters[J]. Journal of the waterways and harbors division, ASCE, 85(WW3) : 93-121.

[14] VAN DER MEER J W. Application and stability criteria for rock and artificial units[M]// PILARCZYK K W. Seawalls, dikes and revetments. Rotterdam: Balkema, 1998.

[15] 薛瑞龙, 朱英, 魏建雄, 等. 防护块体 Core-Loc 的三维可视化安装技术[J]. 水运工程, 2012(7) : 46-50.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版) 》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。