

doi: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.04.002

中国南海岛礁护岸防波堤在波浪冲击作用下稳定性试验研究*

叶剑红¹, 何坤鹏^{1,2}, 单继鹏^{1,3}

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 南海对我国经济发展、资源开发与运输、维护国土完整具有战略性意义, 目前我国已在南海海域以吹填方式建设了一系列的岛礁。为维护这些吹填岛礁的整体稳定性, 在吹填体外围边缘修建了大量护岸防波堤, 以避免海洋波浪的强力冲刷。岛礁护岸防波堤在极端风浪作用下的安全稳定性是保证岛礁吹填体整体稳定的前提。以我国南海岛礁吹填工程为背景, 采用大型物理水槽模型试验方法, 研究南海岛礁护岸防波堤在设防极端风浪作用下的稳定性。研究表明: 在设防极端风浪作用下, 南海护岸防波堤的波浪冲击力可以达到 50 kPa; 防波堤的水平位移和沉降较小, 地基发生较大位移变形的可能性低; 钙质砂吹填土地基内由于土体的塑性体应变与越浪量造成了一定的孔隙压力累积上升, 但并没有出现液化现象, 稳定性基本能够得到保障; 在设防的极端风浪作用下, 现有的护岸防波堤设计可能造成越浪量过大, 在没有扭王块消浪的情况下, 海水越浪量可达到每延米 195 m³/h, 会造成岛礁植被死亡, 地下淡化水体被海水污染, 延缓淡化水体的形成过程; 采取放置扭王块措施可以有效减少海水越浪量, 但也可以达到每延米 56.3 m³/h。南海岛礁护岸防波堤的防浪高度和防越浪能力需要引起关注。

关键词: 南海岛礁工程; 护岸防波堤; 波浪冲击压力; 波浪作用稳定性; 水槽试验; 越浪

中图分类号: O625 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2019)04-0013-11

Experimental Study on Stability of Revetment Breakwater Built on Reclaimed Coral Reef Islands in South China Sea under Extreme Wave Impact

YE Jian-hong¹, HE Kun-peng^{1,2}, SHAN Ji-peng^{1,3}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The South China Sea has strategic significance for China's economic development, resource exploitation and transportation, as well as safeguarding the integrity of territory. Currently, a series of coral reef islands have been successfully constructed in the way of reclamation in the South China Sea by China. In order to maintain the stability of these reclaimed coral reef islands, a large number of revetment breakwaters have been built along the margin of these reclaimed islands, to avoid the strong scouring applied by ocean wave. Therefore, the stability of these revetment breakwaters under the impact by extreme ocean waves is the precondition for the stability of these reclaimed coral reef islands. In this study, taking the reclamation project of coral reef islands in the South China Sea as the engineering background, three large-scale physical modelling wave flumes tests are conducted to investigate the stability of the revetment breakwaters built on these reclaimed coral reef islands under the fortified ocean wave impact. The experimental results of wave flume tests show that the peak impact force on the caisson applied by fortified ocean

wave could reach up to 50 kPa. The wave-induced horizontal displacement and subsidence of the revetment breakwaters is minor; and it is impossible for the calcareous foundation of the revetment breakwater to generate large deformation. It is found that residual pore pressure builds up in the reclaimed calcareous foundation of revetment breakwaters due to the irreversible plastic volumetric strain and overtopping of seawater under wave impact. However, liquefaction does not occur in the reclaimed calcareous foundation. As a result, it could be concluded that the stability of the revetment breakwaters built on these reclaimed coral reef islands in South China Sea is quite well under the fortified ocean wave impact. However, the water volume due to wave overtopping is excessive. The water volume of overtopping could reach up to 195 m³/h per meter in length if there is no accropode used to dissipate wave energy; meanwhile it is only about 56.3 m³/h per meter in length if there are accropodes placed in the front of revetment breakwater. It is indicated that accropodes indeed are effective to dissipate wave energy in the engineering practice. Excessive seawater overtopping from the revetment breakwater certainly will cause the death of vegetation and contaminate the underground desalinated water on these reclaimed coral reef islands. It is highly suggested to pay our attention on the ability of the revetment breakwaters on these reclaimed coral reef islands in South China Sea to resist overtopping of wave.

Key words: reclaimed coral reef island; revetment breakwater; ocean wave impact; marine structures stability; wave flume test; overtopping

南海具有丰富的油气、渔业资源,是我国对外贸易、能源运输的重要运输通道,对我国具有重要的战略性意义。为维护我国海洋领土完整、合理开发南海资源,我国在南海海域以吹填的方式建设了一系列岛礁,并且修建了军用、民用等基础设施。然而南海海洋环境比较恶劣,在南海海域热带风暴、台风多发;据统计每年灾害性台风风暴有 2~3 次,各种强度的热带风暴 5~6 次;每年台风、热带风暴的活动时间在 240 h 左右。这些台风、热带风暴对南海造成了明显的灾害性影响;如 2007 年 25 号台风“海贝思”在南沙群岛通过,侵袭了美济礁,风力最大 16 级,中心风速 125 km/h(中央气象局数据);据美济礁守礁部队人员肉眼观测,浪高达到了 15 m 以上,造成美济礁多人死亡,泻湖养殖网箱全部损毁;又如 2013 年超强台风“海燕”成为有史以来我国最强登录台风,中心风速达 280 km/h(中央气象局数据),在西沙群岛造成近 80 人死亡,港口防波堤损毁。其它在我国南海产生灾难性影响的台风还有 2013 年的强台风“蝴蝶”等。极端风浪严重影响了南海吹填岛礁吹填体的整体稳定性,为减少极端风浪对岛礁吹填体的强力侵蚀,工程中在岛礁吹填体外围边缘修建了大量的护岸防波堤;这些岛礁护岸防波堤在

极端风浪作用下的安全稳定性,是保证岛礁吹填体整体稳定的前提;所以研究南海岛礁护岸防波堤在极端风浪作用下的稳定性,对保障岛礁吹填体的稳定性、以及长期服役性能具有重要的工程意义。

关于防波堤稳定性的研究方法,目前主要包括数值计算以及模型试验两种方法。在数值计算方法方面,近 10 年来取得了明显的进展;众多学者运用自主开发或商业的弹塑性有限元计算模型模拟了多种形式的防波堤的稳定性,以及海床地基土体内的孔隙压力、有效应力的响应^[1-7],如叶剑红等人就成功研发了一个能够考虑波浪-结构物-海床地基相互作用^[6-7],进而评价结构物波浪稳定性的耦合计算模型 FSSI-CAS 2D/3D。对于复杂条件下的重要防波堤工程的稳定性,除数值计算方法以外,开展波浪水槽物理模型试验研究工作具有重要意义。

由于波浪水槽物理模型试验操作复杂,经费成本极高,这方面的工作远不如发展数值计算模型方面的工作多。但是波浪水槽设备却是海洋工程学科领域的一种强大的试验工具,广泛应用于研究各种海工结构物(近海风机、防波堤、海底管线、采油平台等)对波浪荷载的动态响应,以及各种机理的研究。前人在海洋防波堤的动力响应、失稳机制等方面已经开展了一些有意义的波浪水槽模型试验工作,如 Johnstone et al(1978)证明了拥有相似频谱的一系列波,波形更加规则的波比完全随机波对防波堤会造成更大的损伤^[8];该结论表明在开展物理模型水槽试验中,采用规则波浪获得的结构物稳定性的结论更趋于保守,对结构物设计更有利;这样就可以有效规避水槽试验中制造随机波浪的复杂操作;

收稿日期:2019-11-08

作者简介:叶剑红(1981-),博士、教授,主要从事流体-结构物-海床地基相互作用(FSSI)、海洋岩土工程、南海岛礁结构物波浪、地震稳定性方面的研究工作,(E-mail) yejianhongcas@gmail.com 或 jhye@whrsm.ac.cn。

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题-结构物安全与服役性能(XDA13010202);国家自然科学基金面上项目(No. 51879257) Supported by Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, Grant No. XDA13010202; National Natural Science Foundation of China (No. 51879257)

Galland et al(1995)开展了若干组水槽试验,以研究随机入射波对抛石防波堤的冲击作用,并提出了一种新的计算方法来实现随机波与规则波对防波堤冲击力大小的相互转换^[9];Jensen(1997)验证了规则波与不规则波对防波堤的破坏作用,证明了在一定时间内,当规则波的波高等于不规则波最大的 20 个波高的平均值时,二者对防波堤的破坏能力基本相当^[10];另外,Gürer et al(2005)^[11]、Verhagen et al(2007)^[12]、Yagci et al(2004)^[13]、Aniel-Quiroga et al(2018)^[14]、Chávez et al(2017)^[15]、Romano et al(2015)^[16]、Christensen et al(2018)^[17]等一众学者对影响防波堤稳定性的因素也开展了大量试验工作。近年来随着我国科研经费的大量投入,我国在天津建成了长 450 m、宽 5 m、深 8~12 m 世界造波能力最强的波浪试验水槽^[18],并开展了一些大比尺的极端波浪-防波堤-海床地基耦合作用试验^[19],对提升我国在波浪水槽试验方面科研能力起到了重要作用。

研究海洋防波堤在波浪作用下的稳定性的水槽试验通常包括两大类。第一类是不考虑结构物地基的存在,只考虑波浪对防波堤的冲击作用;第二类考虑结构物地基的存在,认为波浪、结构物、地基之间存在复杂的相互作用。第一类方法认为防波堤这类海洋结构物的失稳要么归因于被波浪推翻,要么归因于过大的水平位移,其目的主要是研究防波堤的抗倾覆和抗滑移能力;而实际上海洋结构物的失稳绝大多数要归因于结构物地基在波浪循环荷载作用下发生液化、软化而丧失承载能力;第二类方法因在试验中考虑了结构物地基的存在,对海洋结构物稳定性中额外考虑了地基失稳这一主导因素,因此稳定性评价的结果更加可信。在第二类水槽模型试验方面,经典的工作由日本学者 Mizutani et al(1998)^[20]和 Mostafa et al(1999)^[21]开展,试验过程中主要测量结构物孔隙海床地基内由波浪导致的孔

隙压力变化过程。前人的研究表明,对于欠密实的结构物海床地基,在波浪持续循环作用下,其内部的孔隙水压力会累积上升,导致地基发生液化或者软化丧失承载能力,致使结构物发生失稳破坏^[15]。针对海床地基的液化、软化问题,不少学者也专门开展了水槽试验进行研究,如剑桥大学的 Teh et al(2003)^[22]、墨西哥的 Chávez et al(2017)^[15];我国的杨少丽以渤海湾粉砂为介质,探究了砂土地基液化的机理,提出波浪对地基液化影响的深度不是无限的,存在一个最大液化深度^[23]。

以南海岛礁吹填工程为背景,采用大型物理模型水槽试验的方法,依据工程结构物的实际尺寸和配置,采用 1:10 的几何相似比尺,相似模拟南海吹填岛礁护岸防波堤在设计极端风浪冲击下的动态响应特征,根据防波堤的位移和钙质土地基的变形判断其稳定性。试验结果表明南海岛礁护岸防波堤的稳定性基本能够到保障,但是胸墙的抗越浪能力相对不足,须引起关注。该研究工作对南海岛礁护岸防波堤的设计、后期维护具有借鉴意义。

1 试验方案

物理模型试验所用水槽全长 47 m,高 1.3 m,宽 1 m,左侧造波端装有一台伺服电机驱动的推板造波机,右侧尾端设有约 7 m 长的斜坡式消波段;由于此次试验工作中护岸防波堤和地基在水槽中是全断面铺设,试验过程中入射波浪会被物理模型完全阻挡反射,因此水槽尾部的消波段无需发挥作用。为了有效利用水槽,使物理模型尽量远离造波机,物理模型铺设在离消波斜坡的起点 2 m 的位置段,因此水槽试验的实际有效长度为 38 m,如图 1 所示。试验模型依据南海岛礁现场真实结构物尺寸,以几何相似比尺 1:10 进行配置。根据相似比理论,相关的物理量纲也要进行换算,如表 1 所示。

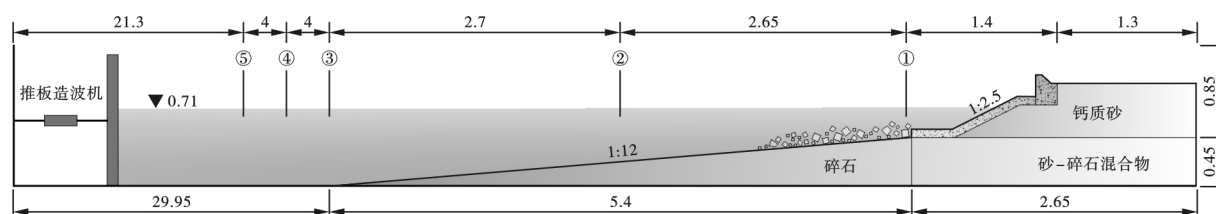


图 1 水槽试验物理模型剖面图(单位:m)

Fig. 1 Sectional schematic diagram of the physical wave flume test(unit: m)

为了测量模型试验中水槽内波浪液面的变化过程,沿水槽中心线方向放置了 5 支电阻式浪高仪,量程均为 ± 50 cm,精度为 1 mm。5 支浪高仪在水槽模型中的具体安放位置在图 1 中用黑色竖直线表

示,浪高仪距离所铺设的物理模型最右端的距离列于表 2 中。试验中所有浪高仪采样频率均为 50 Hz。

岛礁护岸防波堤由胸墙及 S 型护坡组成,和现场材料保持一致,均采用混凝土浇筑而成。胸墙和

S型护坡分别浇筑,试验中胸墙左侧面与S型护坡末端紧密接触,且S型护坡的前端、后端保持为水平状态,如图2所示。护岸防波堤到造波机的距离为35.35 m,大约为10个波浪波长。

表1 模型试验中物理参量的相似比尺关系

Table 1 Similarity scale of the physical parameters in the wave flume tests

物理参量	比尺
几何尺寸/m	1:10
水深/m	1:10
波高/m	1:10
时间/s	$1:\sqrt{10}$
速度/($m \cdot s^{-1}$)	$1:\sqrt{10}$
位移/m	1:10
压力/kPa	1:10
越浪量/(m^3/m)	1:100

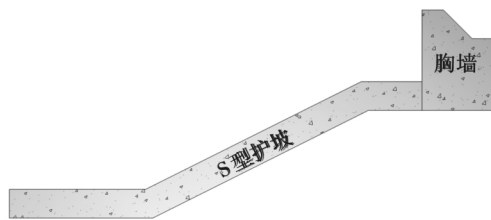


图2 岛礁护岸防波堤模型结构图

Fig. 2 Structural diagram of the revetment breakwater built on the reclaimed coral reef island

表2 浪高仪到物理模型最右端的距离

Table 2 Distance from the wave profile meters to the right end side of the wave flume

浪高仪编号	距离/m
1	2.70
2	5.35
3	8.05
4	12.05
5	16.05

已有的研究表明,珊瑚岛礁是由生物珊瑚死亡后残留躯体堆积而成,在地质历史时期内会发生压实、胶结、冷变质等一些复杂物理、化学作用。现今在海洋中犹如一座突起的大山,高度可达几千米,且坡度较陡,综合坡度一般在 $20^\circ \sim 30^\circ$;在珊瑚岛礁顶部,地势相对平坦,为礁坪区和泻湖区,礁坪区的水深较浅,宽度在80 m到200 m不等。在水槽模型试验中,由于水槽设备的高度一般小于2 m,而岛礁的高度达几千米,所以在深度方向上不可能相似模拟岛礁的整体坡度。唯一可行的方法是只关注深海波浪传播至礁坪上以后,波浪在礁坪上的传播、运动

规律;并且重点研究波浪和护岸防波堤、钙质土地基之间的相互作用,以及防波堤的位移、沉降和地基的变形。因此,本研究工作中水槽模型试验所模拟的部位只包括岛礁礁坪区、护岸防波堤和钙质土地基。

如图1所示,物理模型中护岸防波堤的地基包括三种材料,分别是碎石、砂-碎石混合体和钙质砂。其中碎石和砂-碎石混合体用来模拟岛礁吹填之前的底部岛体;钙质砂用来模拟岛礁吹填体;取自南海某岛礁现场的原状钙质砂作为制作物理模型中模拟吹填体土体的主要材料。根据研究团队在南海岛礁吹填体现场实际测得的大量干密度数据,试验模型中所铺设的钙质砂地基的干密度定 $1.51 g/cm^3$;钙质砂地基铺设的总长度为2.25 m,高为0.5 m。模拟吹填之前的礁坪所用的材料为砂-碎石混合物,铺设在钙质砂地基下方,长2.65 m,高0.45 m。防波堤前方的礁坪模拟材料采用粒径为1~2 cm的碎石,礁坪起始端距离造波机29.95 m,形状为长5.4 m,高0.45 m的三角形。由于岛礁礁坪实际微地形复杂、凹凸不平且粗糙度大,对波浪的消能作用较为明显;然而在水槽物理模型试验中根本无法准确复制礁坪的复杂微地形,试验中采用碎石体近似模拟。该碎石体上表面粗糙不平,在一定程度上能够模拟凹凸不平的礁坪对波浪的消减作用;上述三种孔隙介质的物理属性列于表3中。

表3 试验所使用的三种孔隙介质的物理属性

Table 3 Physical properties of the three kinds of porous medium used in tests

材料	平均粒径 D_{50}/m	孔隙率 n
钙质砂	0.0004	0.5
砂-碎石	0.01	0.493
碎石	0.012	0.5

物理模型在铺设过程中采用分层装样的方式逐层铺盖,并用震动板、水平尺、激光射线仪等辅助工具不断锤击、抹平,保证地基达到预设的干密度并且比较均匀。铺设模型时在图3中淡青色圆点所表示的位置上埋设了16支孔隙压力传感器,传感器外径7 mm,精度0.3%。为测量波浪对护岸防波堤的冲击压力,在防波堤上安装了6个点压力计传感器,外径5 mm,精度0.5%,具体位置如图3中红色圆点所示。物理模型铺设完成后,在胸墙上安装三支LVDT位移传感器,用以测量波浪冲击下胸墙的位移,量程为 $\pm 2.5 cm$,精度为0.01 mm,具体安装位置如图3所示。试验中所有传感器的数据采集频率均为50 Hz。

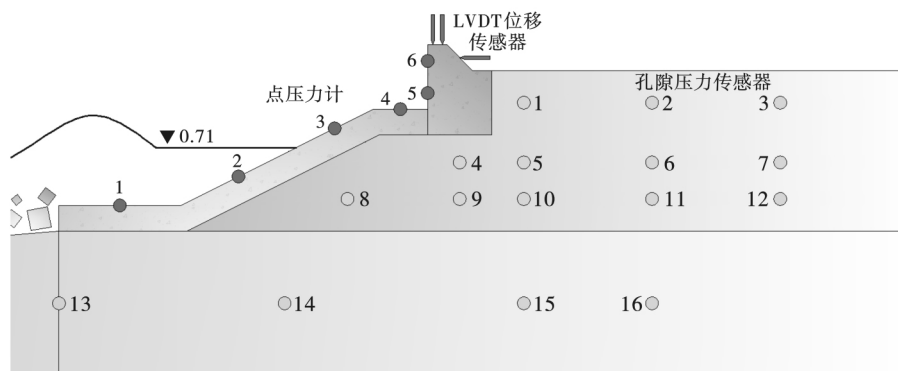
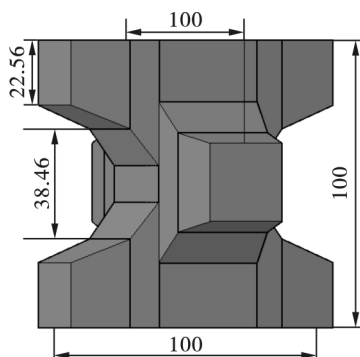


图 3 孔隙压力传感器、点压力计与 LVDT 位移传感器在试验模型中的位置示意图

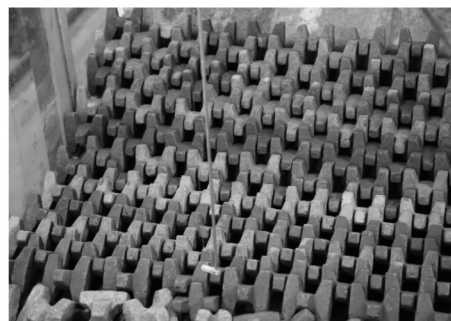
Fig. 3 Schematic diagram of the position of pressure sensors, pressure gauges and LVDT sensors in tests

在南海岛礁现场中,防波堤前方会堆放一定量的抛石,起到一定的消波作用,为此模型试验中,在护岸防波堤前方,模拟礁坪的碎石上堆放了一定量的不规则块石,用来模拟南海岛礁现场的堤前抛石(注:等效直径约为 1 m),物理模型中所铺设的单个块石的平均直径约为 10 cm(满足 1:10 的相似比

尺),铺设长度约 1 m,如图 1 中所示。岛礁工程现场为了进一步加强消波能力,在 S 型护坡上采用交错铺设的方式整齐地放置一系列的扭王块;在物理模型中采用 1:10 缩尺的扭王块模拟了这种消波措施,扭王块的长、宽、高均为 0.1 m(如图 4 所示),由素混凝土浇筑而成。



(a) 扭王块模型结构尺寸详图(单位:mm)
(a) Structural dimensions of the accropode (unit: mm)



(b) 水槽模型试验中扭王块交错式铺设
(b) A real view of the layout of the accropodes in tests

图 4 扭王块尺寸与试验中铺设后实景

Fig. 4 Dimensions of the accropode and a real view of the layout in tests

物理模型建造完成后,将防波堤与水槽玻璃之间的接触边界用橡皮泥及玻璃胶进行封堵,避免试验中水从缝隙直接接触钙质砂地基,对其产生冲刷作用,导致钙质砂地基内出现严重的掏蚀坑。模型铺设完成后,向水槽内注水至水位达到 0.9 m 的高度,并将整个物理模型饱和 12 h。

基于前人在南海的深海波浪监测数据,岛礁工程的设计极端波浪要素标准值是波高 7 m,周期 10 s,极端高水位 +2.34 m。深海波浪进入礁坪后,会因水深突然变浅而发生波浪破碎和能量的衰减,礁坪区起点的波浪高度并不是 7 m;而水槽模型试验中造波机的造波参数(波浪高度、周期和水深)需要根据礁坪起点处的波浪高度确定。研究团队结合

实测获得的岛礁地形,通过 CFD 计算表明,外海 7 m 的波浪传播至礁坪后,由于波浪破碎,有效波高实际上只有 3 m。因此本研究工作中造波机的造波高度按照相似比尺原理定为 0.3 m。波浪周期应该为 $\sqrt{10} = 3.16$ s;但是模型试验所用的造波机无法造出 3 s 这一大周期波浪,根据造波机的实际造波能力,本研究工作将规则波周期定为 2.2 s,随机波的有效周期定为 2.0 s。由极端高水位 +2.34 m 的观测结果,胸墙顶部高程为 +5.8 m 的实际情况,采用极端高水位与胸墙顶部高差为 3.46 m 为原型,水槽试验中极端高水位对应的水深为 0.71 m。一共开展三种工况下的模型试验,每种工况条件下波浪持续冲击 120 min;各工况的波浪要素列于表 4 中。

表 4 水槽模型试验各工况波浪要素

Table 4 The wave conditions set in the wave flume tests

编号	水深/m	周期/s	波高/m	波形	消波
工况 1	0.71	2.2	0.3	规则波	无
工况 2	0.71	2.2	0.3	规则波	扭王块
工况 3	0.71	2.0	0.3	随机波	扭王块

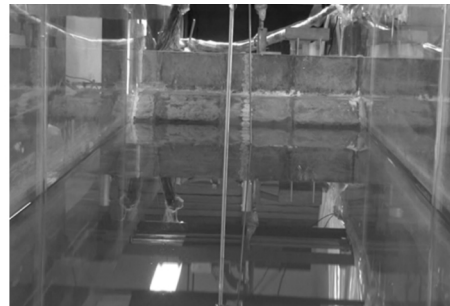
(a) 物理模型侧面图
(a) Lateral view of the physical model(b) 物理模型注水后的正面图
(b) Front view of the physical model after water injection

图 5 物理模型铺设完成后的侧面与正面实景图

Fig. 5 The lateral and front view of the physical model after the model is laid

2 试验结果分析

主要研究分析设防极端风浪条件下极端高水位、大波高波浪对南海岛礁护岸防波堤的冲击,观测护岸防波堤的稳定性。既有的研究已经表明扭王块与随机波都会减弱波浪对防波堤的冲击^[8],因此工况 1 中护岸防波堤所受波浪冲击力最大,其稳定性最差;下面的试验结果分析将以工况 1 为主要对象;工况 2 主要研究扭王块的消波作用;工况 3 中不存在越浪现象,主要目的是与工况 1 进行对比,研究地基内部孔隙压力累积升高的物理机制。

2.1 波浪冲击压力

图 6 给出了工况 1 条件下(规则波和无消浪措施)岛礁护岸防波堤上 6 个压力传感器的部分时段典型的波浪冲击力时程曲线。除 1 号传感器位置外,其余传感器测得的波浪冲击力均呈现出了很好的周期性。1 号传感器位于 S 型护坡左端,该处正好是入射波和反射波叠加的位置,其受波浪叠加影响较大,冲击力时程曲线波动明显,峰值动水压力约为 1.5 kPa(剔除静水压力)。2、3 号传感器位于 S 型护坡上,这两个位置上的波浪冲击力大致相当,都在 1.5 kPa 左右;冲击力时程的峰值和低谷区域均存在高频的抖动,这明显是波浪与 S 型护坡相互作用导致的;这种抖动在 1 号传感器冲击力时程中没有观测到。4 号压力传感器位于 S 型护坡的右端,其监测的波浪冲击力时程与 2、3 号传感器基本一

致,但动态冲击力量级只有 1 kPa 左右。3、4 号传感器都在静水位之上,3 号传感器的冲击力在波浪回撤后变成 0(但也存在较小的波动),而 4 号传感器在波浪回撤后冲击力还有 0.3 kPa,这似乎不太符合常理;分析发现这是由于传感器的测压面需与结构物表面平行,4 号传感器所安装的结构物表面是水平的,波浪回撤后该处还存在积水,所以 4 号传感器在波浪回撤后还存在冲击力读数实际上是正常现象,只不过在确定波浪冲击力时这部分读数应该不包含在内。

5、6 号压力传感器安装在胸墙侧面,能够直接记录波浪对胸墙的冲击力时程特征,如图 6 所示。影像观测发现,试验过程中入射波波峰到达护岸防波堤时,并没有在 S 型护坡上发生明显的破碎,而是沿着倾斜的护坡爬高,最后猛烈地冲击垂直胸墙侧面,发生剧烈破碎和越浪,如图 7 所示。5、6 号压力传感器记录的波浪对胸墙的作用力具有非常典型的冲击力特征,具体表现为在波浪未达到之前,由于在水面以上,所以作用力一直保持为 0;波浪到达之后发生碰撞冲击的瞬间,波浪的冲击作用力在很短的时间内快速达到峰值,之后又迅速降低到峰值的 1/2 到 1/3 的量级范围并维持一段时间,最后在波浪回撤后该冲击作用力有很快降低到 0。图 6 显示工况 1 条件下波浪对胸墙的冲击力峰值可达 5 kPa;按照压力的相似比 1:10(见表 1)还原到现场情况,可以推断岛礁护岸防波堤的胸墙所受到设防极端风浪冲击时,最大

冲击压力可以达到 50 kPa; S 型护坡上的动态波浪冲击力峰值在 10 ~ 15 kPa 的区间内。这一试验结果为岛礁防波堤结构设计和稳定性评价提供了波浪冲击荷载的选择依据。在考虑各种不确定性和大于 2.0 的安全系数的情况下, 研究团队推荐岛礁防波堤结构设计时可以将胸墙、S 型护坡所受冲击力的设计标准值分别定为 100 ~ 120 kPa, 30 ~ 40 kPa。

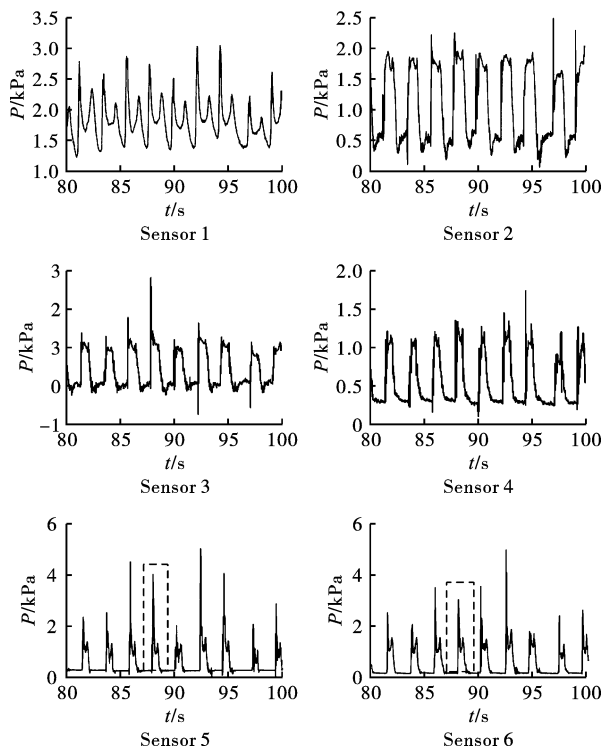


图 6 工况 1 试验中波浪对防波堤结构物的冲击压力的部分典型时程

Fig. 6 Typical time histories of the wave impact pressure on the breakwater in the test 1

2.2 防波堤位移

图 8 给出了工况 1 条件下防波堤胸墙的位移时程曲线。从图 8 中可以看出, 在前 100 s 时间内, 胸

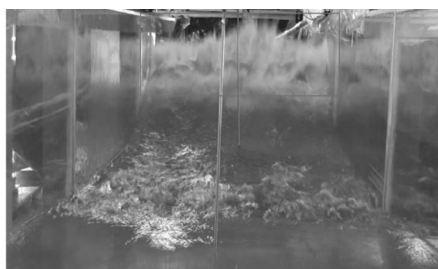


图 7 模型试验中波浪冲击胸墙发生破碎、越浪瞬间实景图

Fig. 7 Real views of the wave breaking and overtopping at the moment when the wave is impacting

2.4 地基内孔隙压力

之前既有的研究工作表明防波堤基本的失稳机

制的水平位移逐渐增大, 存在一定的累积位移, 但量级很小, 仅有 0.25 mm, 之后累计的水平位移量保持稳定。胸墙的竖向沉降一直都很小, 仅有约 0.05 mm, 基本可以忽略不计; 直到试验结束整个护岸防波堤也未发生肉眼可见的位移, 稳定性很好。根据表 1 中的相似比尺进行还原, 在实际南海岛礁现场设防极端风浪环境下, 护岸防波堤胸墙的水平、竖直方向上最大可分别发生 2.5 mm 与 0.5 mm 的累计位移, 相较于岛礁现场护岸防波堤的尺寸而言很小, 表明岛礁现场的护岸防波堤发生失稳的概率较小, 稳定性较好。

2.3 防波堤越浪量

试验过程中全程记录了冲击波浪的越浪量。图 9 是工况 1 (无扭王块) 和工况 2 (有扭王块) 试验中记录的每延米防波堤累计越浪量对比。从图 9 中可以看出, 80 min 内没有放置扭王块的情况下防波堤每延米的累计越浪量达到 2.6 m³, 铺设扭王块后, 累计越浪量减少至 0.75 m³, 越浪量降幅达到 71%。在计算实际岛礁环境下的每延米越浪量时, 须将水平竖直两个方向进行相似还原, 即越浪量的相似比尺为 1:100 (见表 1); 因此, 在工况 1 和工况 2 条件下, 岛礁现场护岸防波堤的越浪量分别为 195 m³/h 与 56.3 m³/h。这些海水一旦越过防波堤胸墙, 由于胸墙本身的阻挡不能再返回到大海, 而是累积在吹填陆域的表面, 只能通过地下渗流和排水系统缓慢返回大海。实际上岛礁现场防波堤后方的吹填陆域的宽度大约为 500 m, 如果将该越浪量换算成降雨量, 相当于每小时的降雨量为 39 cm 和 11.3 cm, 分别属于特大暴雨和大暴雨的级别。大量海水的灌入岛礁吹填陆域会使岛礁上的植被死亡、污染地下水、淡化水体资源等造成生态灾害。该试验结果提示在设防极端风浪环境下, 现有的岛礁护岸防波堤抵抗海水越浪量的能力需要引起关注。

(3) 防波堤地基发生失稳。其中第三种失稳机制在实际工程中最为容易发生,因为在波浪循环荷载冲击下,如果结构物地基不够密实,很容易在地基内部产生体积收缩的趋势,致使地基内超孔隙压力累积上升,有效应力降低,最终导致地基发生软化、液化而丧失承载能力。为了能够全面考虑这三种失稳机制,本试验研究工作中铺设了岛礁护岸防波堤的钙质砂地基,在其内部布设孔隙压力传感器监测钙质土地基内部的超孔隙压力变化情况,从而研究南海岛礁护岸防波堤地基在设防极端波浪冲击下是否存在孔隙水压力累积上升、液化、软化等现象。

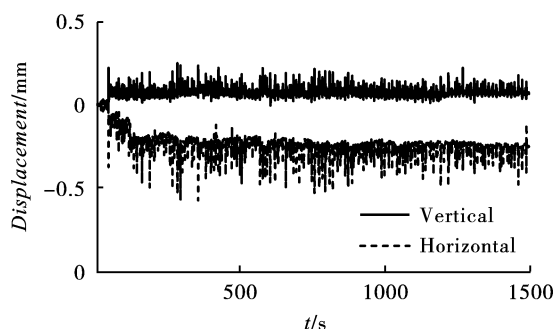


图8 工况1条件下试验中胸墙水平和竖向位移

Fig. 8 Horizontal and vertical displacement of the caisson in the test 1

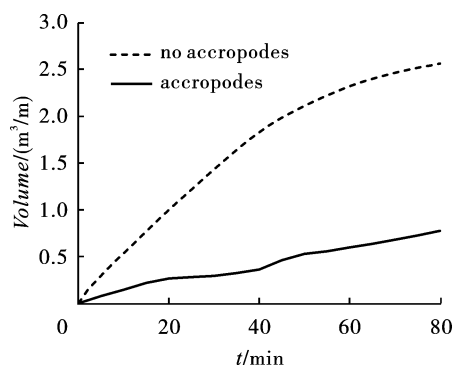


图9 工况1(无扭王块)和工况2(有扭王块)

试验中记录的每延米防波堤累计越浪量对比

Fig. 9 Comparison of the accumulated amount of water overtopping the breakwater recorded in the test 1(without accropode) and test 2(with accropodes)

如图3所示,物理模型地基中一共埋设了4层、16个孔隙水压力传感器,分别位于钙质砂地基以及砂-碎石地基内部。图10展示了每一层的传感器所记录的孔隙压力时程。从图10(d)中可以发现砂-碎石地基内部的孔隙压力基本没有发生累积上升,只有随波浪作用而出现的震荡孔压,表明砂-碎石地基内部没有发生塑性变形;然而埋置在钙质砂地基内部的1~12号孔压传感器都监测到了20~100 s

时间内孔隙压力快速累积上升的现象,100 s之后不再累积上升,大部分位置的累积孔压基本维持不变;同时也存在震荡孔压,而且在越靠近13号传感器的位置,震荡孔压的幅值越大;这一现象的直接原因是波浪的冲击被不透水的护岸防波堤阻挡,波浪压力不能透过防波堤传播至钙质砂地基内部,只能通过钙质砂下方的砂-碎石混合体传播到整个地基内部,理所当然地越靠近13号传感器的位置,波浪导致的震荡孔压幅值越大。然而,地基内部也有发生累积孔压消散降低的情况,如2号传感器所在位置。进一步分析发现第一层传感器(1、2、3号)记录到的累积孔压在1.5~2.2 kPa范围内,第二层传感器(4、5、6、7号)传感器记录到的累积孔压在1.5~2.0 kPa范围内,第三层传感器(8、9、10、11、12号)记录到的累积孔压在0.8~1.0 kPa范围内,总体上看护岸防波堤地基内越靠近砂-碎石混合体的部位,孔压累积幅度越小。

以上分析已经确认了波浪冲击下,岛礁防波堤钙质砂地基内部确实存在孔隙水压力上升的现象,那么是什么因素导致了这种孔压累积上升呢?钙质土地基有没有发生软化或者液化现象呢?从物理机制上讲,导致钙质土地基内部的孔隙水压力累积上升只可能有两点原因,分别是:(1)钙质地基土发生塑性体积收缩变形,和(2)越过胸墙的水进入钙质土地基内产生渗流、液面上升。针对第(1)个原因,由于试验过程中地基内部的变形是无法进行直接测量的,所以为了回答孔压累积上升的物理机制问题,就必须开展无越浪现象的模型试验。工况3的试验结果在一定程度上能够辅助回答这一问题。由于采取了消波措施,工况3在试验过程中没有发生越浪,即工况3中越浪对钙质土地基内孔压变化不存在任何影响。图11展示的是工况3试验(无越浪发生)中1、5、9号传感器孔隙压力响应时程;从图11孔压清晰地看出1、5、9号传感器都记录到了孔压累积上升的现象,只不过孔压累积上升的幅度较小,在第1000 s时分别约为0.4 kPa、1.0 kPa、0.5 kPa。工况1中由于没有消波措施,波浪冲击力比工况3中的肯定要大,那么工况1中的钙质土地基内部的孔隙水压力因塑性体积变形而累积上升的幅度肯定也要更大一些。这就充分说明岛礁防波堤钙质砂地基内部的孔隙水压力累积上升是由于钙质地基土发生塑性体积收缩变形和越浪这两种因素共同作用的结果。

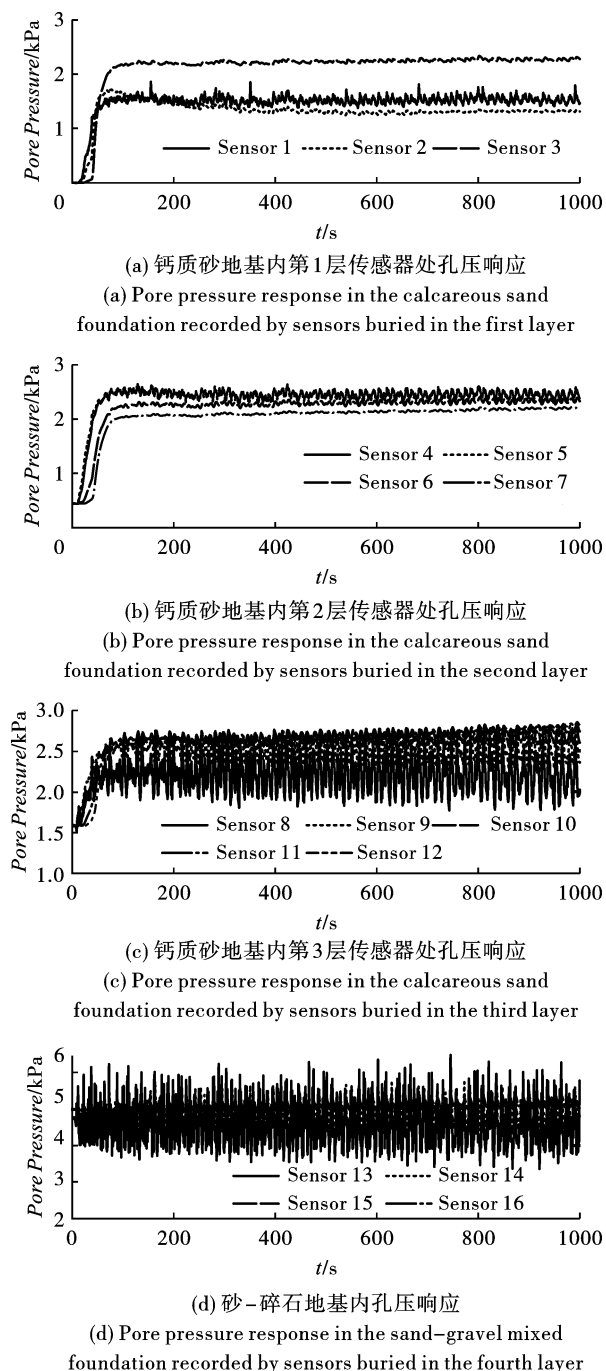


图 10 工况 1 试验中护岸防波堤地基内孔隙压力动态响应时程

Fig. 10 Time histories of the dynamic response of pore pressure in the revetment breakwater foundation in test 1

针对钙质土地基液化、软化问题,由于在有水的情况下地基内部的有效应力无法直接测量,只能通过累积超孔隙水压力或者钙质土地基的变形来间接判断。由上述分析可知,钙质土地基内的孔隙水压力累积既有塑性体变的贡献,也有越浪的贡献;从物理机制上讲,越浪导致的孔隙压力上升不会引起钙质土地基的液化和软化问题,只有地基土塑性体变导致的孔

隙水压力上升才有这种能力。目前的观测手段无法区分开这两种机制的各自贡献量,所以通过孔隙水压力累积上升的幅值无法判断钙质土地基的液化与否。从图 8 展示的胸墙位移时程曲线看,防波堤在波浪持续长时间冲击下位移量极小,这直接反映了钙质土地基肯定没有发生液化、软化,因为钙质土地基一旦液化或者软化,那么就会丧失承载能力,护岸防波堤就会发生大幅度位移而失稳破坏,而且试验过程中也未观测到钙质土地基发生大的变形。

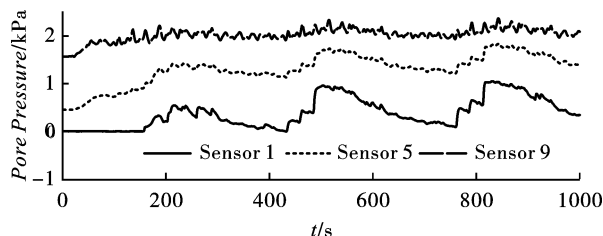


图 11 工况 3 试验(无越浪发生)中 1、5、9 号传感器孔隙压力响应时程

Fig. 11 Time history of the pore pressure response recorded by the sensor No. 1, 5 and 9 in test 3 (no overtopping occurs)

3 结论

以南海岛礁吹填工程为背景,采用大型物理模型水槽试验的方法,依据工程结构物的实际尺寸和配置,采用 1:10 的几何相似比尺,相似模拟了南海吹填岛礁护岸防波堤在设计极端风浪冲击下的动态响应特征。根据防波堤的位移和钙质土地基的变形判断了其稳定性。试验结果表明南海岛礁护岸防波堤的稳定性基本能够到保障,但是胸墙的抗越浪能力相对不足,须引起关注。该研究工作对南海岛礁护岸防波堤的设计、后期维护具有借鉴意义。除此之外,本试验研究工作还有以下几点具体的认识:

(1) 在设防极端风浪冲击下,岛礁护岸防波堤的胸墙所受到的最大冲击压力可达 50 kPa; S 型护坡上的动态波浪冲击力峰值在 10 ~ 15 kPa。在考虑各种不确定性和大于 2.0 的安全系数的情况下,推荐岛礁防波堤结构设计时可以将胸墙、S 型护坡所受冲击力的设计标准值分别定为 100 ~ 120 kPa, 30 ~ 40 kPa。

(2) 在设防极端风浪冲击下,岛礁护岸防波堤的钙质土地基内会产生孔隙水压力的累积上升,这是钙质土地基发生塑性体积变形和越浪共同作用的结果。护岸防波堤的位移极小,钙质土地基也未见明显变形,表明设防极端风浪长时间持续冲击下,岛

礁护岸防波堤的钙质土地基没有发生液化、软化。

(3) 在不放置和放置扭王块的工况下,岛礁现场护岸防波堤的越浪量分别为每延米 $195 \text{ m}^3/\text{h}$ 与 $56.3 \text{ m}^3/\text{h}$,相当于每小时的降雨量为 39 cm 和 11.3 cm ,分别属于特大暴雨和大暴雨的级别;也说明扭王块具有很好的消波功能。大量海水灌入岛礁吹填陆域会使岛礁上的植被死亡、污染地下淡化水体资源等造成生态灾害,需要引起关注。

参考文献(References)

- [1] JENG D S. Wave-induced seabed instability in front of a breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 1997, 24(10) : 887-917.
- [2] JENG D S, CHA D H, LIN Y S, et al. Wave-induced pore pressure around a composite breakwater[J]. *Ocean Engineering* 2001 28(10) : 1413-1435.
- [3] 王元战, 肖 忠, 迟丽华, 等. 筒型基础防波堤稳定性简化计算方法[J]. *岩土力学* 2009 30(5) : 1367-1372.
- [3] WANG Yuan-zhan, XIAO Zhong, CHI Li-hua, et al. Simplified method for stability calculation of breakwater with cylindrical foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009 30(5) : 1367-1372. (in Chinese)
- [4] 肖 忠, 王元战. 箱筒型基础防波堤动力稳定性的有限元分析[J]. *交通科学与工程* 2014 30(4) : 65-72
- [4] XIAO Zhong, WANG Yuan-zhan. Finite element analysis for dynamic stability of bucket foundation breakwater[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2014, 30(4) : 65-72. (in Chinese)
- [5] 王良民, 叶剑红, 朱长歧. 近海欠密实砂质海床内波致渐进液化特征研究[J]. *岩土力学* 2015 36(12) : 3583-3588.
- [5] WANG Liang-min, YE Jian-hong, ZHU Chang-qi. Investigation on the wave-induced progressive liquefaction of offshore loosely deposited sandy seabed [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2015 36(12) : 3583-3588. (in Chinese)
- [6] YE J, JENG D, WANG R, et al. Validation of a 2-D semi-coupled numerical model for fluid structure seabed interaction [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 42: 333-357.
- [7] YE J, JENG D, WANG R, et al. A 3-D semi-coupled numerical model for fluid structures seabed-interaction(FS-SI-CAS 3D) : Model and verification [J]. *Journal of Fluids and Structures* 2013 40: 148-162.
- [8] JOHNSON R R, MANSARD E P D, PLOEG J. Effects of wave grouping on breakwater stability [C]// *Coastal Engineering 1978*, ASCE, 1978, 2228-2243.
- [9] GALLAND J C. Rubble mound breakwater stability under oblique waves: an experimental study [C]// *Coastal Engineering 1994*, ASCE, 1995: 1061-1074.
- [10] JENSEN T, ANDERSEN H, GR NBECH J, et al. Breakwater stability under regular and irregular wave attack [C]// *Coastal Engineering 1996*, ASCE, 1997: 1679-1692.
- [11] G RER S, CEVIK E, Y KSEL Y, et al. Stability of tetrapod breakwaters for different placing methods [J]. *Journal of coastal research* 2005: 21(3) : 464-471.
- [12] VERHAGEN H J, REEDIJK B, MUTTRAY M. The effect of foreshore slope on breakwater stability [C]// *Coastal Engineering 2006*, Proceedings of the 30th International Conference 2007: 4828-4840.
- [13] YAGCI O, KAPDASLI S, CIGIZOGLU H K. The stability of the antifer units used on breakwaters in case of irregular placement [J]. *Ocean engineering*, 2004, 31(8-9) : 1111-1127.
- [14] ANIEL-QUIROGA igo, VIDAL C sar, LARA Javier L, GONZ LEZ Mauricio, SAINZ Ivaro. Stability of rubble-mound breakwaters under tsunami first impact and overflow based on laboratory experiments [J]. *Coastal Engineering* 2018, 135: 39-54
- [15] CH VEZ Valeria, MENDOZA Edgar, SILVA Rodolfo, SILVA Anah and, LOSADA Miguel A. An experimental method to verify the failure of coastal structures by wave induced liquefaction of clayey soils [J]. *Coastal Engineering* 2017, 123: 1-10.
- [16] ROMANO A, BELLOTTI G, BRIGANTI R, FRANCO L. Uncertainties in the physical modelling of the wave overtopping over a rubble mound breakwater: The role of the seeding number and of the test duration [J]. *Coastal Engineering* 2015, 103: 15-21.
- [17] CHRISTENSEN Erik Damgaard, BINGHAM Harry B, FRIIS Andreas Peter Skou, LARSEN Alexander Kruse, JENSEN Karsten Lindegaard. An experimental and numerical study of floating breakwaters [J]. *Coastal Engineering* 2018, 137: 43-58.
- [18] 耿宝磊, 郑宝友, 孟祥玮, 等. 天科院大比尺波浪水槽的建设与应用前景 [J]. *水道港口* 2014, 35(4) : 415-421.
- [18] GENG Bao-lei, ZHENG Bao-you, MENG Xiang-wei, et al. Construction and application prospect of the large scale wave flume in TIWTE [J]. *Journal of Waterway and Harbor* 2014, 35(4) : 415-421. (in Chinese)
- [19] 刘 针, 孟祥玮, 姜云鹏, 等. 大比尺水槽波浪-防波堤-地基相互作用试验方法初探 [J]. *水道港口* 2015, 36(6) : 481-485.
- [19] LIU Zhen, MENG Xiang-wei, JIANG Yun-peng, et al. Preliminary research on test technology of wave and breakwater and foundation interaction in large scale wave

- flume [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2015, 36(6): 481-485. (in Chinese)
- [20] MIZUTANI N ,MOSTARFA A ,IWATA K. Nonlinear regular wave ,submerged breakwater and seabed dynamic interaction [J]. *Coastal Engineering* ,1998 ,33: 177-202.
- [21] MOSTAFA A ,MIZUTANI N ,IWATA K . Nonlinear wave ,composite breakwater ,and seabed dynamic interaction [J]. *ASCE Journal of Waterway ,Port ,Coastal ,and Ocean Engineering* ,1999 25(2) : 88-97.
- [22] 杨少丽 ,沈渭铨 ,杨作升. 波浪作用下海底粉砂液化的机理分析 [J]. *岩土工程学报* ,1995 ,17(4) : 28-37.
- [22] YANG Shao-li ,SHEN Wei-quan ,YANG Zuo-sheng. Liquefaction mechanism analysis of seafloor silt under wave action [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* , 1995 ,17(4) : 28-37. (in Chinese)
- [23] TEH T C ,PALMER A C ,DAMGAARD J S. Experimental study of marine pipeline on unstable and liquefied seabed [J]. *Coastal Engineering* 2003 ,50: (1-2) ,1-17.

英文编辑: 黄刚

(上接第12页)

- [46] 中华人民共和国国土资源部,中华人民共和国水利部. GB/T 14848—2017 中华人民共和国国家标准-地下水质量标准[S]. 2017.
- [46] Ministry of land and resources of the People's Republic of China ,Ministry of water resources of the People's Republic of China. GB/T 14848—2017 national standard of the People's Republic of China-Groundwater quality standard [S]. 2017. (in Chinese)
- [47] ACGIH A C O G. Threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices [M]. Cincinnati ,OHIO: Signature Publications , 2012.
- [48] 张兴凯 ,李怀宇. 露天矿爆破 CO 排放量的计算方法 [J]. *北京科技大学学报* ,1996(3) : 201-205.
- [48] ZHANG Xing-kai ,LI Huai-yu. Calculation method of CO emission from blasting in open pit mine [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* ,1996(3) : 201-205. (in Chinese)
- [49] 徐慧梁. 化学发光法氮氧化物分析仪关键技术研究 [D]. 广州: 华南师范大学 ,2005.
- [49] XU Hui-liang. Study on key technology of the nitrogen oxides analyzer based on chemiluminescence [D]. Guangzhou: South China Normal University ,2005. (in Chinese)
- [50] 赵晓莉 ,王继峰. 炸药爆炸产生有毒气体的原因及其防治 [J]. *煤矿爆破* 2007(2) : 23-26.
- [50] ZHAO Xiao-li ,WANG Ji-feng. The reason for shaping toxic gas during the blasting of explosive and its preventive measures [J]. *Coal Mine Blasting* ,2007(2) : 23-26. (in Chinese)
- [51] 康凤和. 矿山炸药污染防治 [J]. *辽宁城乡环境科技* , 2007(4) : 67-69.
- [51] KANG Feng-he. Control of explosive pollution in mines [J]. *Liaoning Urban and Rural Environmental Science and Technology* 2007(4) : 67-69. (in Chinese)
- [52] 肖辉 ,杨旭升. 硝酸铵炸药的技术进展 [J]. *爆破* , 2011 28(4) : 93-96.
- [52] XIAO Hui ,YANG Xu-sheng. Technical progress of ammonium nitrate explosives [J]. *Blasting* ,2011 ,28(4) : 93-96. (in Chinese)
- [53] ARAOS M J O. Development of a novel mining explosive formulation to eliminate nitrogen oxide fumes [J]. *Mining Technology* 2015 ,124(1) : 16-23.
- [54] ONEDERRA I ,ARAOS M. Preliminary quantification of the in situ performance of a novel hydrogen peroxide based explosive [J]. *Mining Technology* 2017 ,126(2) : 113-122.
- [55] AZARKOVICH A E ,BOIKHOVITINOV L G ,PERNIK L M. Possibility of minimizing generation of nitrogen oxides in blasting of ammonium nitrate explosives [J]. *Mining Ecology* ,1995 31(2) : 147-151.
- [56] 牟振山 ,张连军 ,王宝治. 清洁爆破技术研究及应用 [J]. *黄金科学技术* 2000 8(1) : 36-40.
- [56] MOU Zhen-shan ,ZHANG Lian-jun ,WANG Bao-zhi. Study and application of clean blasting techniques [J]. *Gold Science and Technology* 2000 8(1) : 36-40.
- [57] SANCHIDRIAN J A. SLIM: Technology for blasting to improve mining [C] // 12th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting ,Luleå ,Sweden 2018.
- [58] 谢先启 ,卢文波. 精细爆破 [J]. *工程爆破* 2008(3) : 1-7.
- [58] XIE xian-qi ,LU wen-bo. 3P(Precise ,Punctilious and Perfect) Blasting [J]. *Engineering Blasting* 2008(3) : 1-7. (in Chinese)

英文编辑: 袁必和