

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2085

# 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究

高冉<sup>1,2</sup>, 叶剑红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**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, 并在其上修建了一系列的结构物(房屋、防波堤、机场等)。作为这些重要结构物的地基材料, 珊瑚钙质砂在极端波浪、海底地震等环境荷载作用下的动态响应特性对评价其上结构物的安全稳定性具有重要的意义。以我国南海珊瑚岛礁吹填工程为背景, 对取自岛礁吹填现场的钙质砂样品, 以吹填现场实测的颗粒级配和干密度为依据, 开展动态三轴循环试验, 研究我国南海珊瑚岛礁吹填体钙质砂地基土的动力特性。试验结果表明: 岛礁钙质砂受动态循环荷载作用, 在排水不通畅的条件下可以达到部分液化状态, 在排水通畅的条件下不发生液化; 在不排水条件下, 岛礁钙质砂归一化的累积孔压  $u/\sigma'_0$  与振次比  $N/N_f$  符合 Seed 提出的反正弦孔压发展模式; 在不排水条件下, 所有岛礁钙质砂样品的动态变形模量  $E_d/E_0$  与归一化应变  $\varepsilon_m/\varepsilon_r$  之间全部重合在一条双曲线上, 表明不排水条件下岛礁钙质砂的  $E_d/E_0$  与  $\varepsilon_m/\varepsilon_r$  之间的关系不受干密度和颗粒级配的影响, 具有很好的统一性。

**关键词:** 珊瑚钙质砂; 三轴循环试验; 液化特征; 南海岛礁吹填工程

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)10-3897-13

## Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea

GAO Ran<sup>1,2</sup>, YE Jian-hong<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The South China Sea shows strategic significance for China's economic development, resource exploitation, and maintenance of national land integrity. At present, China has built a series of coral reef islands in the South China Sea by the means of reclamation. A number of structures, such as buildings, breakwaters and airports etc., have been built on these reclaimed coral reef islands. As the foundation materials, calcareous sand's response to extreme ocean wave and strong seismic wave play an important role in evaluating the stability of these structures on these reclaimed islands. In this study, taking the coral reef island reclamation project in the South China Sea as the engineering background, a series of tri-axial cyclic tests is performed for the calcareous sands sampled from reclaimed islands, to investigate their dynamic mechanical properties. The experimental results show that the calcareous could become partially liquefied under cyclic loading in undrained condition. While they can't become liquefied in drained condition. In undrained condition, the relationship between normalized residual pore pressure  $u/\sigma'_0$  and cycle times ratio  $N/N_f$  is found in accordance with the inverse sine development model proposed by Seed. Furthermore, the relationship curves between the dynamic deformation modulus of all calcareous sand samples and their corresponding normalized strain  $\varepsilon_m/\varepsilon_r$  all overlap on one hyperbolic line, indicating that the relationship between the dynamic deformation modulus and normalized strain  $\varepsilon_m/\varepsilon_r$  of calcareous sand is independent on dry density, particles size gradation.

**Keywords:** coral calcareous sand; tri-axial cyclic test; liquefaction characteristics; coral reef island reclamation project in South China Sea

收稿日期: 2018-11-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题(No. XDA13010202); 国家自然科学基金面上项目(No. 51879257)。

This work was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (A) (XDA13010202) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (51879257).

第一作者简介: 高冉, 男, 1995年生, 硕士研究生, 主要从事南海钙质土力学特征方面的研究工作。E-mail: 810630109@qq.com

通讯作者: 叶剑红, 男, 1981年生, 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

## 1 引言

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,其中珊瑚钙质砂是岛礁建设的主要吹填材料。钙质砂是海洋珊瑚生物骨架经长期物理、化学、生物作用而形成的一种碳酸盐沉积物,其主要化学成分为 $\text{CaCO}_3$ ,具有形状不规则、多孔隙、易破碎、摩擦角大等特点,广泛分布于我国南海、东南亚、中东和南太平洋岛国等区域。作为南海吹填岛礁上各种结构物(如护岸防波堤)的地基填筑材料,理解珊瑚钙质砂的力学特性具有重要作用。

南海海洋环境比较恶劣,该海域热带风暴、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。台风、热带风暴中的巨大波浪对岛礁结构物的冲击会造成灾害性影响。除了极端波浪以外,地震荷载也是南海岛礁结构物需要抵御的一种环境荷载。既往的地震监测数据表明,南海地区地震活动不强烈,岛礁基底玄武岩的基本加速度不大,但是岛礁在海洋中是一座孤立的高耸山峰,高度可达几千米,综合坡度在 $20^\circ\sim 30^\circ$ 。研究表明,这种地形对基底的地震波在岛礁吹填工程所在的顶部位置存在5~8倍的放大效应,即如果基底的峰值加速度PGA仅仅为0.05g,那么在岛礁顶部的PGA可能达到0.25g~0.4g,这样对岛礁顶部的结构物稳定性的威胁不容忽视。极端波浪和岛礁地基地震波对岛礁结构物而言是两种典型的动态环境荷载,在动态荷载作用下,研究地基钙质砂的动力响应特征对评价我国南海岛礁结构物,如护岸防波堤的稳定性具有重要的工程实际意义。

针对珊瑚钙质砂的力学性质,国内外对其静态属性<sup>[1-3]</sup>、承载力<sup>[4]</sup>及其颗粒破碎<sup>[5-9]</sup>开展了广泛的研究工作。关于珊瑚钙质砂的动态力学特征,近年来逐渐被学者所重视,陆续开展了一些研究工作,国内中国科学院武汉岩土力学研究所汪稔研究团队开展了卓有成效的工作,他们首先采用循环三轴试验研究了钙质砂的动强度<sup>[10]</sup>、应力主轴旋转条件下钙质砂的特性<sup>[11]</sup>、波浪荷载作用下钙质砂的动力响应特征<sup>[12-13]</sup>、初始主应力方向对钙质砂动力响应的影响<sup>[14]</sup>,以及内孔隙与各向异性对钙质砂液化的影响<sup>[15]</sup>。除中科院岩土所之外,纪文栋等<sup>[16]</sup>还研究了

循环单剪条件下钙质砂与石英砂剪切特性的区别,王刚等<sup>[17]</sup>研究了循环三轴试验中钙质砂的颗粒破碎演化规律,刘汉龙等<sup>[18]</sup>也简单探讨了西沙钙质砂的液化特征。近些年在国际上一些学者采用共振柱<sup>[19-20]</sup>、循环单剪<sup>[21]</sup>、常规动三轴<sup>[22-23]</sup>也对分布于世界各地的钙质土动力特征进行了试验研究工作,进一步丰富了对钙质土这种材料动力特性的认识。除此之外,一些学者还对钙质砂土这种材料在爆破冲击荷载作用下的动力响应开展了十分有意义的物理模型试验<sup>[24-28]</sup>。

总体而言,前人对钙质砂的动力特性已经开展了一些卓有成效的研究工作,但是这些试验研究工作基本都采用取自泻湖的最大粒径小于2 mm的砂样,而且试验样品的颗粒级配与我国南海珊瑚岛礁吹填体的总体级配相差较大。本文以我国南海珊瑚岛礁吹填工程为背景,对取自岛礁吹填体现场的钙质砂样品,以吹填现场实测的颗粒级配和干密度为依据,开展动态三轴循环试验,研究我国南海珊瑚岛礁吹填体钙质砂地基的动力特性,获得了一些新的结果和认识。相关的研究结果可以进一步丰富对我国南海钙质砂动力特性的认识,也对发展钙质砂的动态本构模型提供试验基础,为评价南海岛礁结构物在波浪、地震作用下的安全稳定性和长期服役性能具有坚实的支撑作用。

## 2 试验方案

### 2.1 试样基本特征

试验所用钙质砂试样均取自南海某岛礁,为无胶结松散体,由海洋生物碎屑沉积物组成,主要矿物成分为碳酸钙。该砂颗粒形状多为不规则粒状,表面较为粗糙,有少量呈现长条状,根据土工试验规范中试样尺寸与颗粒粒径的要求,试验中剔除了粒径较大的颗粒,选取颗粒粒径小于5 mm的岛礁钙质砂制作 $\phi 70\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ 的圆柱样品。中国科学院武汉岩土力学研究所的岛礁研究团队曾在南海几个典型岛礁上对吹填钙质土地基的现场开展了百余次的颗粒筛分和干密度现场测试工作,获得了大量的岛礁吹填地基的颗粒级配和干密度的数据。依据研究团队获得的数据,本试验研究工作中原状钙质砂的级配选取这百余组筛分结果的总体平均值,如图1所示,其中不均匀系数 $C_u=6.18$ ,曲率系数 $C_c=1.35$ ,总体上属于级配良好土,但是需要说明的是岛礁现场局部也确实存在级配不良的钙质地基土。图1所示的原状级配的各个特征粒径列于表1。

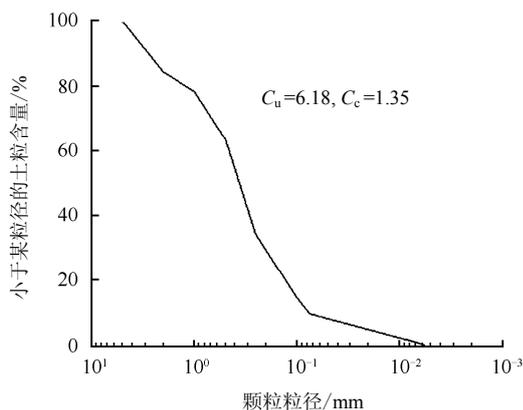


图 1 南海岛礁珊瑚钙质砂的平均颗粒级配曲线  
Fig.1 Average particles grading curve of coral calcareous sand from reef islands in South China Sea

表 1 试验使用的南海岛礁钙质砂试样基本物理参数  
Table 1 Basic physical properties of the calcareous sand from reef islands in South China Sea used in the tests

$d_{60}$ /mm	$d_{30}$ /mm	$d_{10}$ /mm	土粒相 对密度	最大干密度 /( $g/cm^3$ )	最小干密度 /( $g/cm^3$ )
0.47	0.22	0.076	2.73 <sup>[29]</sup>	1.73	1.27

### 2.2 试样制备

采用分层装样的方法制作试验圆柱样品。在底座上套上橡胶膜，并用橡胶圈固定，将透水石平整放入橡胶膜内底座上，套上承膜筒，使橡胶膜舒展与承膜筒贴紧。将烘干的钙质砂试样分为 3 等份，分 3 层装入，装填过程中适当敲击承膜筒外壁，使试样分布均匀，保证每层试样装入高度相等，并在装下一层试样之前，刮毛上一层钙质砂的表层避免分层。试样的饱和方法有多种，包括抽气饱和、二氧化碳饱和、水头饱和以及施加反压饱和等。由于钙质砂颗粒多棱角，且内孔隙丰富，一般的饱和方法难以使其达到理想的饱和状态。本次试验采用多种方法相结合的措施。试验饱和过程中，先利用真空泵对试样进行抽气约 30~40 min，将试样内部孔隙内气体抽出，形成一定的真空状态；然后通过孔压管向试样中通入 CO<sub>2</sub> 大约 15~20 min，再通过水头饱和和排出试样内气体，持续约 30 min；最后施加 600 kPa 的反压，使未排出的少量气体在样品孔隙水中形成的气泡的体积进一步被压缩，大幅度降低水-气混合体的压缩性。当然在此过程中，始终保持围压要大于反压 20 kPa，防止橡皮膜膨胀，以维持砂样品的稳定性。试验表明测得的  $B$  值可达 0.95~0.99，认为达到饱和状态， $B$  值达到 1.0 基本上不可能。

### 2.3 试验方案

本试验主要研究钙质砂的动力特性及其液化特征，分别进行固结排水 (CD) 及固结不排水 (CU)

试验。为了保证试验数据的可靠性，每组试验都开展 2 次平行试验进行对比。原状钙质砂有 2 种干密度，分别为 1.38  $g/cm^3$  和 1.45  $g/cm^3$ 。此外，本次试验还针对 0.1~0.25 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径范围内钙质砂样品开展工作，干密度分别为 1.30  $g/cm^3$  和 1.38  $g/cm^3$ 。如表 2 所示，一共需要开展 24 个钙质砂样品的试验。试验条件为：反压为 600 kPa，围压为 900 kPa，有效围压为 300 kPa，动剪应力比统一为 0.4，轴向动应力幅值为 120 kPa，振动频率为 1 Hz。所有试验均在英国产 GDS 动态三轴试验设备上实施。

表 2 试验变量参数

Table 2 Variable parameters in the experiment

试验编号	粒径范围 /mm	干密度 /( $g/cm^3$ )	是否排水	平行试验次数
1	原状	1.38	是	2
2	原状	1.38	否	2
3	原状	1.45	是	2
4	原状	1.45	否	2
5	0.10~0.25	1.30	是	2
6	0.10~0.25	1.30	否	2
7	0.10~0.25	1.38	是	2
8	0.10~0.25	1.38	否	2
9	0.25~0.50	1.30	是	2
10	0.25~0.50	1.30	否	2
11	0.25~0.50	1.38	是	2
12	0.25~0.50	1.38	否	2

## 3 试验结果分析

### 3.1 钙质砂的液化特征

钙质砂的液化问题是近年来一直争论较多的问题，有些学者认为钙质砂是可以液化的，而有些学者坚持认为钙质砂是不能液化的。这两种观点实际上是从不同的证据出发而得出的看似是完全对立观点。本文针对南海钙质砂的液化问题对原状、粒径 0.1~0.25 mm 和粒径 0.25~0.5 mm 的钙质砂样品开展了系统试验工作。图 2、3 展示的就是南海岛礁钙质砂在排水和不排水条件下的动态三轴循环试验的典型结果。经过分析发现，和图 2 所展示的一样，在排水通畅的情况下，钙质砂在循环动荷载作用下，所有样品在轴向尽管产生了 0.1%~0.4% 的累积压缩变形，但是其内部的累积孔隙水压力并没有上升（如图 4 所示），这说明南海岛礁钙质砂在排水通畅的情况下不能发生液化现象。

如图 3 所示，南海岛礁钙质砂在不排水动态试验中孔隙水压力在循环作用前期会明显累积上升，

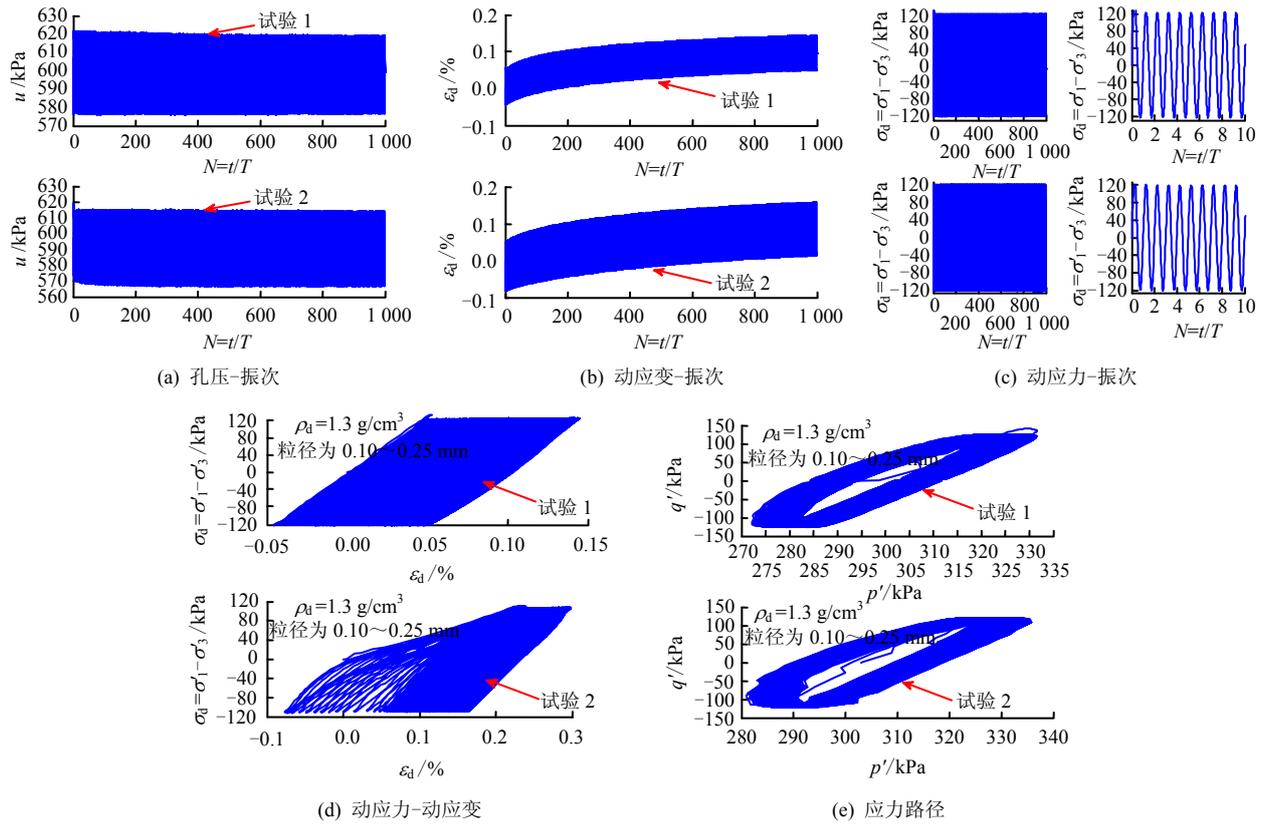


图2 南海岛礁钙质砂排水动态三轴试验典型的数据结果(试验5)

Fig.2 Typical test results of the drained dynamic triaxial test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea (test 5)

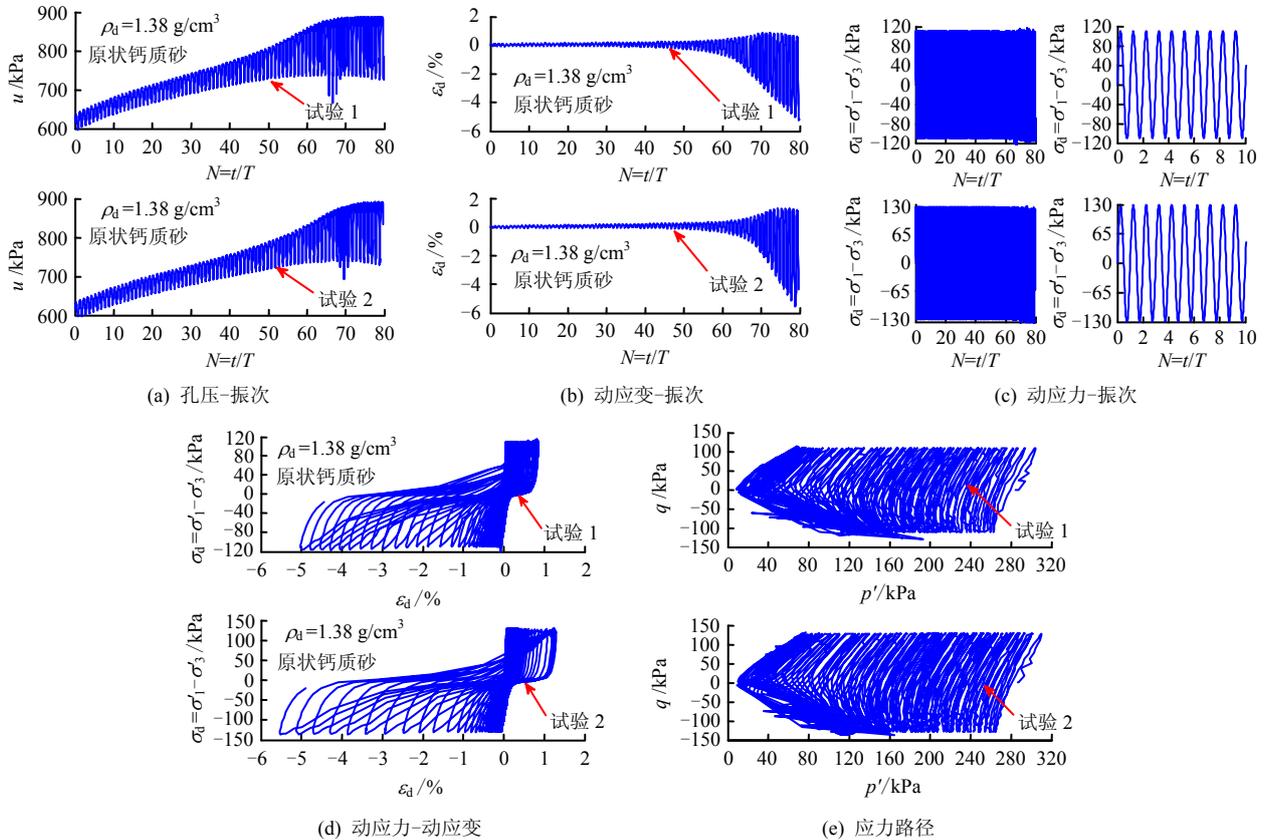


图3 南海岛礁钙质砂不排水动态三轴试验典型数据结果(试验2)

Fig.3 Typical test results of undrained dynamic triaxial test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea (test 2)

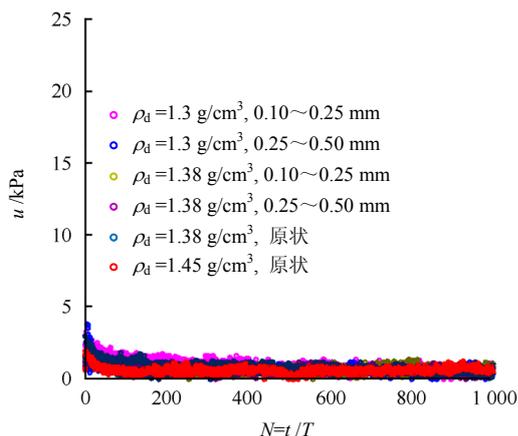


图 4 南海岛礁钙质砂排水动态试验 (CD) 中累积孔隙水压力和振次之间的关系 (荷载循环 1 000 次)

Fig.4 Relationship between the cumulative pore pressure and time in the dynamic test (CD) of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea (1 000 times loading cycles)

之后维持震荡, 但是最大的孔隙水压力 (=累积孔隙压力+震荡水压力最大值) 无论如何都无法超越 300 kPa 的有效围压。从动态应变的时程来看, 在  $N=65$  次之前, 动态应变的幅值相对较小; 但是在  $N=65$  次之后, 动态应变的幅值大幅度增大, 这就是钙质砂样品的刚度急剧减小, 承载能力急剧减弱的表现, 很多学者就把这种行为称之为液化。仔细分析 12 次不排水动态试验的结果发现, 南海岛礁钙质砂所有的不排水试验结果均与图 3 所示的结果类似, 只不过到达液化时的循环振动次数有所不同。该试验结果表明, 南海岛礁钙质砂在排水不通畅的情况下受循环动态荷载作用是可以发生液化的。

综上所述, 有些学者认为钙质砂可以液化, 而有些学者认为钙质砂不能液化的结论均有合理性, 但比较片面。在评估某种颗粒材料是否会发生液化时需要给定更多的赋存条件, 主要包括: ①是否含水以及饱和程度; ②排水是否通畅 (渗透性能和渗透路径); ③颗粒材料的级配和密实程度; ④动态荷载的强度和作用频率。对于饱水的欠密实颗粒材料, 如果排水不畅, 在高频、高强度的动态荷载作用下就极容易发生液化。液化是上述 4 种因素的一种综合影响结果, 如曾有报道称在 2008 年汶川地震中在离震中 200 km 以内的位置发现有被黏土层覆盖的地下卵石层液化的现象<sup>[30]</sup>; 卵石层一般认为其自身的渗透性能非常好, 不会发生液化, 但是其上的黏土层使排水通道被堵, 再加上离震中较近, 地震荷载作用频率高, 强度大, 发生液化也是可解释的。因此, 在讨论南海钙质砂能否发生液化这个问题时,

首先应该明确钙质砂所赋存的环境, 不能只强调钙质砂能否液化这一片面结论而忽视所赋存环境因素的影响。

结合南海吹填岛礁现场的情况, 吹填陆域的厚度普遍在 5~7 m 的范围, 经现场双环法实测岛礁上吹填的钙质砂地基的渗透系数一般在  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4}$  m/s 范围内<sup>[31]</sup>, 其自身的排水性能良好, 再加上吹填钙质砂地基上方没有阻水层覆盖, 总体而言属于排水较通畅的条件。另外岛礁现场的动态环境荷载只有两类, 即海洋波浪和地震。波浪的冲击作用频率一般只有 0.2~0.05 Hz, 地震的作用主频率一般在 1~2 Hz, 结合本文所开展的排水动态三轴试验 (作用频率为 1 Hz, 动剪应力比为 0.2), 基本可以认定我国南海岛礁吹填钙质砂地基在波浪荷载作用下发生液化的可能性极小。对于地震波荷载, 尽管南沙海域属于地震不活跃区块, 由于珊瑚岛礁孤立地形的巨大放大作用, 且其作用频率相较波浪荷载要高得多, 所以地震波作用下吹填岛礁现场的钙质砂地基是有可能发生液化的, 如 1993 年 8 月 8 日的关岛 8.1 级地震就发生了大量的钙质土地基失稳的案例。这里还需要说明的一点是, 不发生液化不代表在波浪作用下岛礁吹填钙质砂地基内部不会产生累积超孔隙压力。研究团队针对南海岛礁护岸防波堤的波浪稳定性开展的大型波浪水槽试验就监测到, 在波浪持续冲击下, 岛礁防波堤的钙质砂地基内部就产生了因塑性收缩体应变而形成的超孔隙压力的累积上升, 只不过这种累积上升的幅度较小, 不足以使钙质砂地基的有效应力大幅度减少, 产生液化特征。

基于试验结果, 对于砂土液化有 3 个问题值得进一步讨论。

第 1 个是关于液化程度方面的问题。按照美国 ASCE 的定义, 所谓液化是任何物质从固态转变成液态的一个过程, 针对颗粒材料, 这种转换完全是由于孔隙水压力上升, 粒间有效应力消失造成的。所以严格来讲, 土的液化应该包括部分液化和完全液化。土处于部分液化状态时颗粒间没有完全脱离接触, 存在一定的剪切刚度, 还能够承载。土处于完成液化状态时呈现出液体特征, 没有剪切刚度, 不能传递剪切波, 也完全丧失承载能力。目前颗粒间有效应力降幅达到什么级别时才能称之为部分液化还没有定论。从南海钙质砂的动三轴试验结果来看, 不排水情况下孔隙水压力的最终累积幅值达到 200~230 kPa 时均表现出了动态应变急剧增大的液化特征 (如图 3、5 所示), 累积孔隙压力都没有到

达有效围压 300 kPa,说明本试验工作中南海钙质砂均只是出现了部分液化,没有达到完全液化状态。

第 2 个是关于液化判断的问题。通常对液化的判断有 3 种规则。规则 1: 基于动态应变幅值判断,即设定一个阈值,当动态应变幅值达到该阈值是就判定土发生了液化。由于土的种类众多,结构多样,达到液化时动态应变幅值千差万别,某一阈值不能作为一个统一的判定标准。规则 2: 基于累积超孔隙压力判断,这是一种被广泛应用的判定标准,当累积超孔隙压力与初始有效围压之间的比值  $u/\sigma'_0$  达到 1.0 时,可认为土体达到完全液化状态,但是在室内动态试验中基本不可能到达完全液化状态,只能达到部分液化状态,如本研究中南海岛礁钙质砂的累积超孔隙压力与初始有效围压的比值  $u/\sigma'_0$  达到 0.6~0.8 时钙质砂就表现出液化特征。由于试验中不同的试样表现出液化特征时  $u/\sigma'_0$  肯定没有统一的标准,为了在工程评估中方便应用的统一性,本文推荐当  $u/\sigma'_0 \geq 0.6$  时,可以认为砂土已经进入部分液化状态,对结构物的稳定性具有潜在的威胁。当然  $u/\sigma'_0=0.6$  并不是一个绝对度量值,仅仅是一个中性推荐值,这个阈值的取值主要还是取决于工程师在设计中的容忍程度,如果结构物比较重要且工程师容忍度小,那么可以取 0.5; 如果结构物不重要且工程师容忍度较大,可以取 0.8。目前也只有为数不多的本构模型能够在特定条件下模拟出  $u/\sigma'_0=1.0$  的结果<sup>[32]</sup>。另外学者们一般认为,  $u/\sigma'_0$  的值不能大于 1.0,实际上这种理解具有一定的片面性。研究团队曾经对渤海湾黄河口粉质黏性土开展过系统的动态三轴试验,发现  $u/\sigma'_0$  值可以达到 1.05~1.08,而且此时粉质黏性土试样并没有表现出动态应变幅值急剧增大的液化特征,探究其原因是因为土体具有较强的黏性,其液化阻抗能力远大于砂性土。所以对于无黏性土必须有  $u/\sigma'_0 \leq 1.0$ ; 对于黏性土  $u/\sigma'_0$  是可以大于 1.0 的。Ye 等<sup>[33]</sup>的研究还表明,基于  $u/\sigma'_0$  的值来判断液化是否发生有个前提条件,那就是土体在液化过程中,不能受到附近结构物的影响。如果结构物在土体液化过程中发生了倾倒、沉降,结构物重心偏移,会导致结构物基础附近土体所受的总应力发生了变化,此时  $u/\sigma'_0$  的值可能会达到 2.0,而土体实际上受到结构物的压重作用并没有液化。规则 3: 基于颗粒间有效应力判断,这是最直接的一种判断规则。当颗粒间有效应力变为 0 时,土体肯定完全液化; 对于部分液化状态,借鉴规则 2 基于  $u/\sigma'_0$  的判断方法,本文也推荐当有效应力相较于初始值降幅到达 60%

时,可以认为土体已经进入部分液化状态,对结构物的稳定性具有潜在的威胁。

第 3 个是关于土体液化后试验设备伺服控制的有效性。动三轴试验过程中,土体一旦发生液化,其剪切刚度急剧降低,给试验设备的伺服控制带来很大的难度,在某些试样的试验过程中可能会导致两个方面的问题: ①施加的轴向动应力幅值要么达不到设定值,要么超过设定值并无规律可循; ②超孔隙压力中的震荡孔压部分幅度变得很大,累积孔压部分与液化之前形成截然不同的变化模式,难以准确确定其值。所以对于南海岛礁钙质砂液化后的动应力、动应变和累积孔隙压力的测试结果的规律性不能有过高要求。

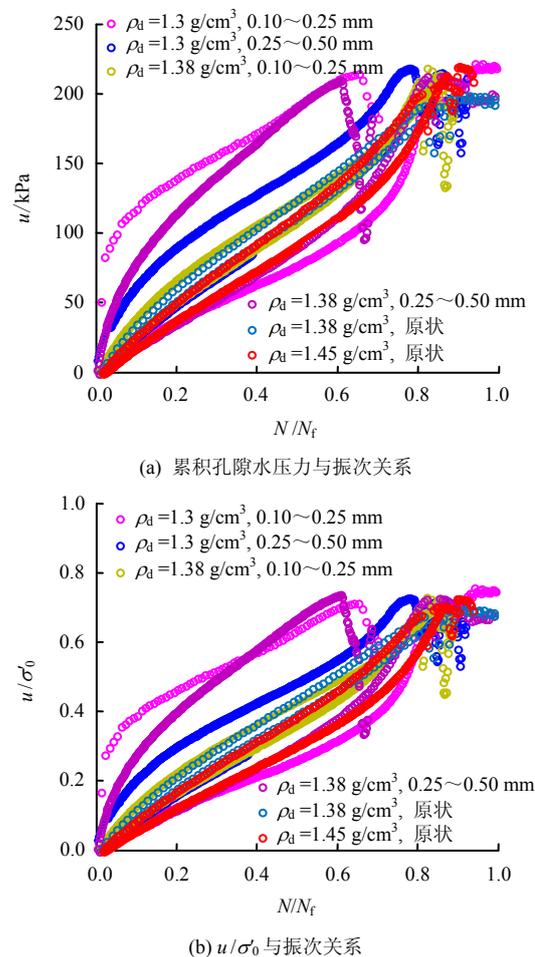


图 5 南海岛礁钙质砂不排水动态试验 (CU) 中累积孔隙水压力、 $u/\sigma'_0$  与振次之间的关系

Fig.5 Relationship between the cumulative pore pressure  $u/\sigma'_0$  and time in the undrained dynamic test (CU) of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

## 3.2 钙质砂的孔隙压力发展模式

### 3.2.1 累积孔隙水压力与振次比的关系

土体的累积孔隙水压力发展模式是某些经验性的动态本构模型的发展基础。基于试验结果,这里

对南海岛礁等向固结钙质砂在动态循环荷载作用下的孔隙压力发展模式进行探究。前人对土体在动态荷载作用下的累积孔隙水压力的发展过程提出几种经典模式，如双曲线模式、Seed 模式<sup>[32]</sup>以及一些基于它们的修正模式，其中 Seed 模式应用比较广泛。从图 5 可以看出，等向固结的岛礁钙质砂的累积孔压发展肯定不符合双曲线模式，那么需要判断是否符合 Seed 模式。Seed 模式修正后的累积孔隙压力与振动次数比之间的关系式为<sup>[34]</sup>

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left[ 2 \left( \frac{N}{N_f} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (1)$$

式中： $N$  为振次； $N_f$  为达到完全液化时的振动次数； $\alpha$  为无量纲参数； $\sigma'_0$  为初始有效应力。

基于前述分析可知，岛礁钙质砂试验中不能到达完全液化状态，所以  $N_f$  不可能通过  $u-N$  试验曲线直接确定，只能通过试验数据的拟合确定，也就是说式 (1) 中存在  $\alpha$  和  $N_f$  两个拟合参数。图 6 中将干密度为  $1.38 \text{ g/cm}^3$ ，粒径为  $0.1\sim 0.25 \text{ mm}$  和干密度为  $1.45 \text{ g/cm}^3$  的原状钙质砂的两个不排水试验数据作为典型代表，对式 (1) 进行目标拟合，发现拟

合度非常好， $R^2$  达到 0.97 以上。表 3 中列出了全部 12 个不排水钙质砂样品的试验数据对式 (1) 的拟合结果， $R^2$  最小值为 0.948，这就充分说明了我国南海岛礁钙质砂在循环荷载作用下累积孔隙压力的发展符合 Seed 模式。

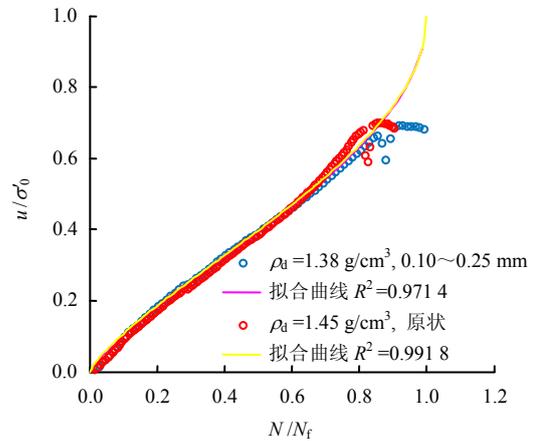


图 6 南海岛礁钙质砂不排水三轴循环试验中累积孔压归一化规律变化

Fig.6 Normalized regulation of the cumulative pore pressure in the undrained dynamic test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

表 3 南海岛礁钙质砂对式 (1) 中  $N_f$  和  $\alpha$  参数拟合结果 (试验 1、试验 2 是两组平行试验)

Table 3 Fitting results of parameter  $N_f$  and  $\alpha$  for the calcareous sand from the reef islands in South China Sea based on equation (1) (test 1 and test 2 are parallel tests)

干密度/(g/cm³)	粒径/mm	$\alpha$		$N_f$		$R^2$	
		试验 1	试验 2	试验 1	试验 2	试验 1	试验 2
1.30	0.10~0.25	0.495 2	2.574	100	265	0.991 6	0.966 2
1.30	0.25~0.50	1.739 0	1.015	500	550	0.992 4	0.975 2
1.38	0.10~0.25	1.685 0	1.391	250	560	0.984 6	0.996 2
1.38	0.25~0.50	0.618 1	2.007	480	150	0.948 0	0.960 2
1.38	原状	1.324 0	1.600	80	80	0.960 8	0.971 4
1.45	原状	1.554 0	2.219	140	290	0.993 3	0.991 8

### 3.2.2 累积孔隙水压力与动应变的关系

基于试验结果，进一步探讨南海岛礁钙质砂在循环荷载作用下孔隙水压力与动态应变之间的关系。这里对累积孔隙水压力进行归一化处理，将某一个动力循环内的累积孔压与该试样最终液化时的最大累积孔压的比值记作  $u/u_m$ ，同时将该次循环内的最大应变记作  $\varepsilon_m$  (动应变幅值)。图 7 展示了 12 个典型岛礁钙质砂样品的  $u/u_m$  与动应变幅值  $\varepsilon_m$  之间的关系。由图可以发现：岛礁钙质砂在发生液化时动应变幅值普遍在 0.5%~2%之间；而且在液化之前岛礁钙质砂样品的  $u/u_m$  与动应变幅值  $\varepsilon_m$  之间存在正相关关系，累积孔隙压力上升，钙质砂的有效应力降低，抗剪切刚度减小，从而导致动应变幅值也增大。该图还显示岛礁钙质砂样品的  $u/u_m$  与动

应变幅值  $\varepsilon_m$  之间近似符合如下双曲线关系：

$$\frac{u}{u_m} = \frac{\varepsilon_m}{G + H\varepsilon_m} \quad (2)$$

式中： $G$ 、 $H$  为拟合参数。

将干密度为  $1.38 \text{ g/cm}^3$ ，粒径为  $0.1\sim 0.25 \text{ mm}$  和干密度为  $1.45 \text{ g/cm}^3$  的原状钙质砂的两个不排水试验数据作为典型代表，对式 (2) 进行目标拟合，发现拟合度  $R^2$  达到 0.99 以上。表 4 中列出了全部 12 个不排水钙质砂样品的试验数据对式 (2) 的拟合结果， $R^2$  最小值为 0.735 7，但多数都大于 0.9。如前所述，由于试验设备固有的问题，液化后伺服控制存在难度，所以图 7 中显示液化后  $u/u_m$  与  $\varepsilon_m$  之间的规律性不是很好。

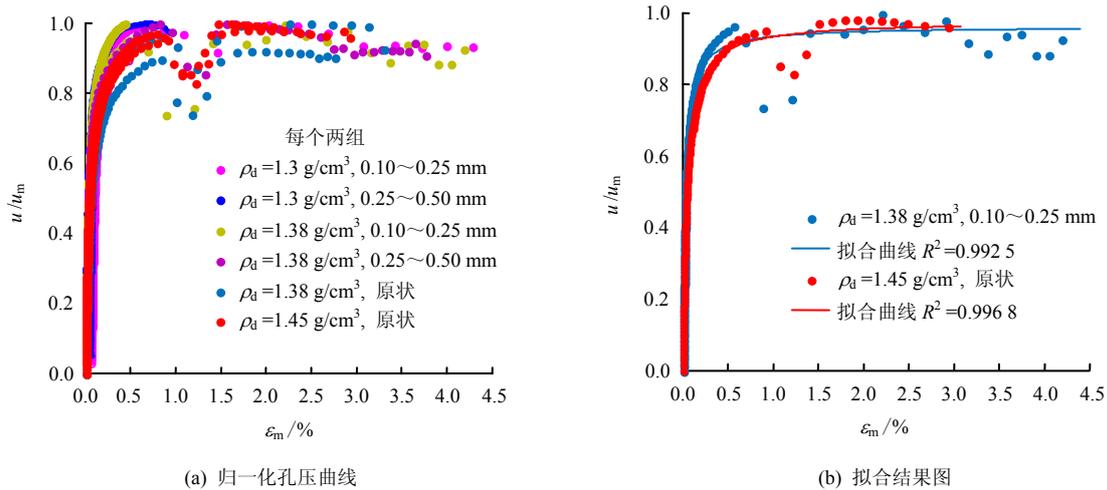


图7 南海岛礁钙质砂不排水三轴循环试验下  $u/u_m - \epsilon_m$  的关系曲线

Fig.7 Relationship between  $u/u_m$  and  $\epsilon_m$  in the undrained dynamic test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

表4 南海岛礁钙质砂  $u/u_m - \epsilon_m$  关系参数  $G$ 、 $H$  拟合结果 (试验1、试验2是两组平行试验)

Table 4 Fitting results of parameter  $G$  and  $H$  for the calcareous sand from the reef islands in South China Sea (test 1 and test 2 are parallel tests)

干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	粒径/mm	$G$		$H$		$R^2$	
		试验 1	试验 2	试验 1	试验 2	试验 1	试验 2
1.30	0.10~0.25	0.065 54	0.147 90	0.854 7	0.949 7	0.930 9	0.862 5
1.30	0.25~0.50	0.024 70	0.111 70	0.970 3	0.706 9	0.999 2	0.735 7
1.38	0.10~0.25	0.030 60	0.027 01	1.040 0	0.952 8	0.992 5	0.999 8
1.38	0.25~0.50	0.042 10	0.028 54	1.005 0	1.026 0	0.999 2	0.994 6
1.38	原状	0.049 47	0.043 82	1.102 0	1.017 0	0.991 1	0.993 5
1.45	原状	0.044 78	0.028 98	1.027 0	1.049 0	0.996 8	0.992 0

### 3.3 钙质砂动态变形模量与阻尼的变化规律

#### 3.3.1 CD 条件下动态变形模量与阻尼变化规律

将动态应力第 1 次循环内应力-应变关系下降段的弹性模量记为  $E_0$ , 同时为了对动应变幅值  $\epsilon_m$  进行归一化处理引入参考应变幅值  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_r$  为每一个应力循环的应力幅值  $(\sigma_d)_{max}$  与  $E_0$  的比值  $\epsilon_r = (\sigma_d)_{max} / E_0$ 。固结排水条件下南海岛礁钙质砂的变形模量  $E_d / E_0$  与归一化后的动应变幅值  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间的关系如图 8 所示。从图中可以看出, 钙质砂的动态变形模量  $E_d / E_0$  与  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间呈现出条带状模式, 随着循环作用次数的增加岛礁钙质砂的动模量表现出下降趋势。同时通过对试验数据处理还可以得到钙质砂的阻尼比  $\lambda$  与  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间的关系, 如图 9 所示。由图可知, 岛礁钙质砂在动态应力循环作用下, 度量能量耗散的阻尼比与  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间呈现出线性关系, 而且随着动应变幅值的增加而变大。

#### 3.3.2 CU 条件下动态变形模量与阻尼变化规律

采用同样的归一化方法, 也可以得到固结不排水条件下岛礁钙质砂的动态变形模量、阻尼比与动应变之间关系, 如图 10、11 所示。Hardin 等<sup>[35]</sup>曾

提出采用  $\frac{E_d}{E_0} = \frac{1}{1 + \epsilon_m / \epsilon_r}$  公式来描述不排水条件下土体的动态变形模量与动态应变之间的关系。在此基础上, 虞海珍<sup>[11]</sup>对其进行了指数修正:

$$\frac{E_d}{E_0} = \frac{1}{A + (\epsilon_m / \epsilon_r)^B} \quad (3)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为两个拟合参数。对试验数据拟合分析发现, 式 (3) 相对 Hardin-Drnevich 公式<sup>[35]</sup>拟合程度要高很多, 更适用于描述岛礁钙质砂动态变形模量与动应变之间的关系。表 5 中列出了全部 12 个不排水钙质砂样品的试验数据对式 (3) 的拟合结果,  $R^2$  最小值为 0.972 7, 拟合程度非常理想。

从图 10 中可以发现, 不排水条件下岛礁钙质砂的动态变形模量  $E_d / E_0$  与动应变  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间的关系具有很好的统一性, 所有样品的  $E_d / E_0$  与动应变  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间的关系基本重合在一条曲线之上。这种统一性表明了不排水条件下岛礁钙质砂的动态变形模量  $E_d / E_0$  与动应变  $\epsilon_m / \epsilon_r$  之间的关系并不受干密度、颗粒级配的影响。这种一致性的发现对后续发展岛礁钙质砂的动态本构模型具有重要意义。

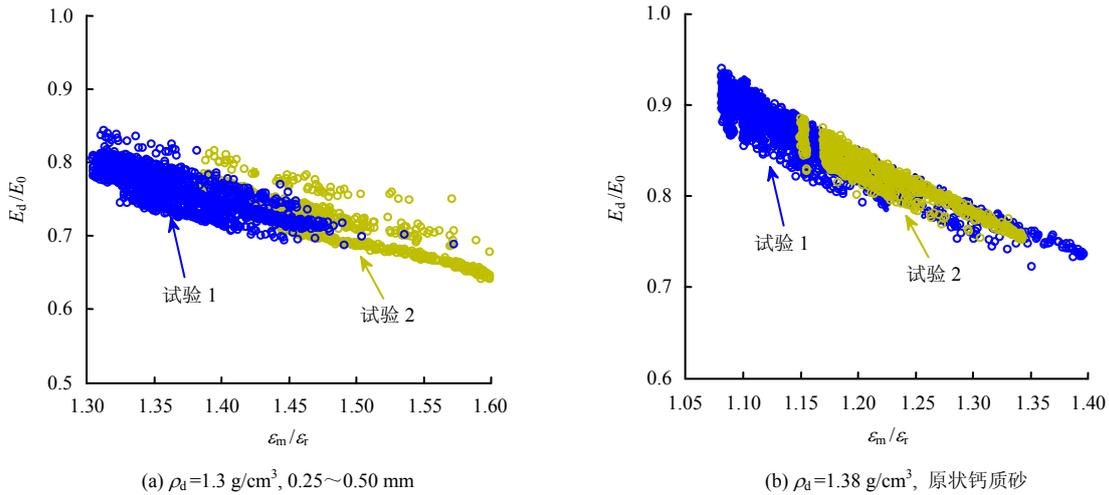


图 8 南海岛礁钙质砂动态排水试验中典型动变形模量  $E_d/E_0$  与  $\epsilon_m/\epsilon_r$  之间的关系  
 Fig.8 Relationship between  $E_d/E_0$  and  $\epsilon_m/\epsilon_r$  in the drained dynamic test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

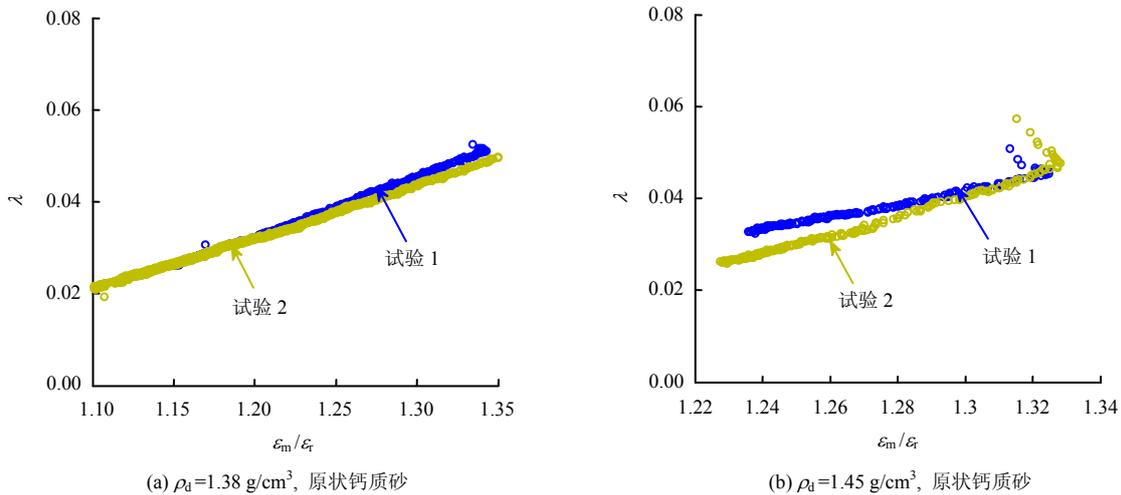


图 9 南海岛礁钙质砂动态排水试验中典型阻尼比  $\lambda$  与  $\epsilon_m/\epsilon_r$  之间的关系  
 Fig.9 Relationship between  $\lambda$  and  $\epsilon_m/\epsilon_r$  in the drained dynamic test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

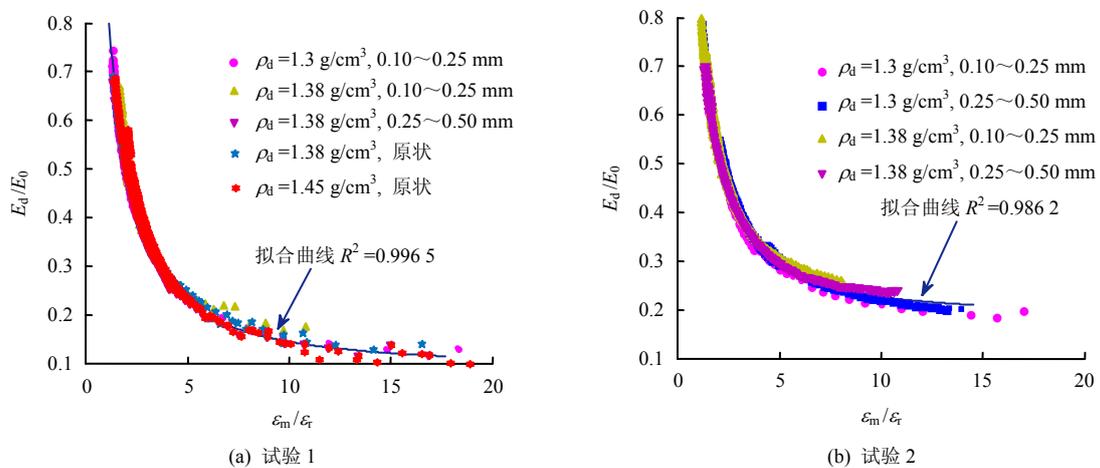


图 10 南海岛礁钙质砂在不排水循环试验中归一化动弹模  $E_d/E_0$  与  $\epsilon_m/\epsilon_r$  之间的关系  
 Fig.10 Relationship between  $E_d/E_0$  and  $\epsilon_m/\epsilon_r$  in the undrained dynamic test of the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

表5 南海岛礁钙质砂对式(3)中A、B参数拟合结果(试验1、试验2是两组平行试验)

Table 5 Fitting results of parameters A and B for the calcareous sand from the reef islands in South China Sea based on equation (3) (test 1 and test 2 are parallel tests)

干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	粒径/mm	A		B		R <sup>2</sup>	
		试验1	试验2	试验1	试验2	试验1	试验2
1.30	0.10~0.25	0.174 7	0.324 0	0.926 0	0.708 0	0.989 4	0.972 7
1.30	0.25~0.50	0.147 3	0.139 2	0.766 8	0.757 1	0.986 2	0.989 2
1.38	0.10~0.25	0.023 9	0.146 8	0.916 4	0.773 8	0.988 1	0.985 6
1.38	0.25~0.50	0.120 1	0.281 9	0.842 3	0.690 5	0.987 0	0.980 9
1.38	原状	0.188 9	0.157 7	0.844 7	0.871 4	0.997 4	0.995 5
1.45	原状	-0.102 2	0.137 9	0.934 3	0.906 4	0.987 3	0.996 5

相对于动态变形模量表现出来的统一性, 岛礁钙质砂的阻尼比却并没有呈现出某种一致性, 如图11所示。岛礁钙质砂的动态阻尼比在各个试验样品之间差距比较明显, 但是阻尼比与归一化的  $\varepsilon_m / \varepsilon_r$  之间的关系总体上是先升高, 之后基本维持不变或者降低。通过拟合模型的筛选, 本文最后确定下式具有很好的拟合度:

$$\lambda = a \arctan \left( b \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_r} + c \right) - d \quad (4)$$

式(4)中一共包括 a、b、c、d 4 个拟合参数。将干密度为 1.38 g/cm<sup>3</sup> 和 1.45 g/cm<sup>3</sup> 的原状钙质砂

的两个不排水试验数据作为典型代表, 对式(4)进行目标拟合, 发现拟合度 R<sup>2</sup> 达到 0.99 以上(图11所示)。表6中列出了全部12个不排水钙质砂样品的试验数据对公式(4)的拟合结果, 最小的 R<sup>2</sup> 为 0.986 2, 表明公式(4)的拟合程度令人满意。

### 4 结论

本文以南海岛礁吹填为背景, 以南海岛礁钙质砂为研究材料, 开展了等向固结排水和等向固结不排水的动态三轴试验, 研究了岛礁钙质砂的液化、累积孔压力发展模式, 动态变形模量、阻尼比等动力特征, 获得了如下几点认识:

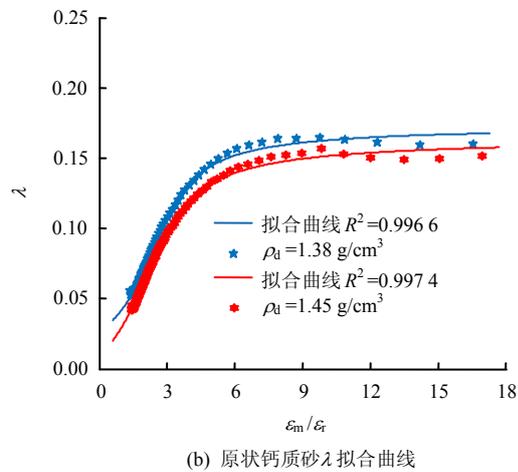
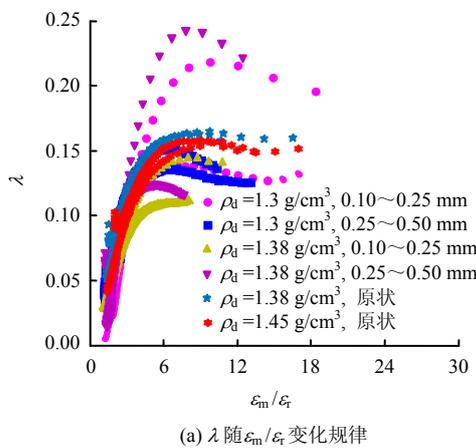


图11 钙质砂不排水循环试验下阻尼λ变化规律

Fig.11 Variation regulation of the damping coefficient λ in the undrained dynamic test of the calcareous sand

表6 南海钙质砂阻尼λ拟合参数 a、b、c、d

Table 6 Fitting results of parameters a, b, c, d for the calcareous sand from the reef islands in South China Sea

干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	粒径/mm	a		b		c		d		R <sup>2</sup>	
		试验1	试验2	试验1	试验2	试验1	试验2	试验1	试验2	试验1	试验2
1.30	0.10~0.25	0.107 10	0.031 55	0.598 1	1.177 0	-1.382	-3.149	-0.063 36	-0.089 63	0.996 4	0.986 2
1.30	0.25~0.50	0.066 85	0.042 68	0.987 5	1.064 0	-1.610	-2.321	-0.055 27	-0.072 51	0.996 6	0.990 7
1.38	0.10~0.25	0.061 84	0.050 08	0.641 6	0.806 8	-1.467	-1.338	-0.061 54	-0.044 60	0.998 8	0.999 4
1.38	0.25~0.50	0.114 80	0.027 96	0.632 0	1.283 0	-1.552	-3.051	-0.082 79	-0.084 06	0.996 1	0.990 8
1.38	原状	0.039 25	0.056 89	0.807 9	0.685 7	-2.162	-1.584	-0.108 40	-0.083 88	0.991 8	0.996 6
1.45	原状	0.027 89	0.062 53	0.954 8	0.607 7	-3.370	-1.254	-0.116 70	-0.065 89	0.986 7	0.997 4

(1) 岛礁钙质砂受动态循环荷载作用, 在排水不通畅的条件下可以达到部分液化状态, 在排水通畅的条件下不发生液化。由于实测岛礁上吹填的钙质砂地基的渗透系数一般在  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4}$  m/s 范围内, 其自身的排水性能良好, 再加上吹填钙质砂地基上方硬化阻水层覆盖面积相对较少 (<30%), 总体而言属于排水通畅的条件, 所以岛礁钙质砂地基在波浪荷载作用下发生液化的可能性较低。对于地震波荷载, 尽管南沙海域属于地震不活跃区块, 但是由于珊瑚岛礁孤立地形的巨大放大作用, 且地震波作用频率相较波浪荷载要高的多, 所以地震波作用下岛礁吹填钙质土地基有可能发生液化, 需要引起关注。

(2) 岛礁钙质砂在三轴不排水条件下, 归一化的累积孔压  $u / \sigma'_0$  与振次比  $N/N_f$  符合 Seed 提出的反正弦孔压发展模式。同时归一化的累积孔压  $u/u_m$  与动应变幅值  $\varepsilon_m$  之间满足双曲线函数。

(3) 岛礁钙质砂在排水条件下, 钙质砂的动态变形模量与归一化应变  $\varepsilon_m / \varepsilon_r$  之间呈现出条带状模式, 随着循环作用次数的增加变形模量表现出下降趋势。同时阻尼比与归一化应变  $\varepsilon_m / \varepsilon_r$  之间呈现出较好的线性上升的趋势。而在不排水条件下, 动态变形模量与归一化应变  $\varepsilon_m / \varepsilon_r$  之间都近乎全部统一重合在一条双曲线上, 表明岛礁钙质砂动态变形模量与归一化应变  $\varepsilon_m / \varepsilon_r$  之间的关系不受干密度、颗粒级配的影响, 具有很好的统一性。然而, 不排水试验条件下, 岛礁钙质砂的阻尼比与归一化应变  $\varepsilon_m / \varepsilon_r$  之间的关系没有明显的统一性, 受到干密度、颗粒级配的影响较为明显, 但是关系曲线比较符合反正切函数关系。

### 参 考 文 献

- [1] 钱炜, 张早辉. 钙质砂摩尔-库仑强度特性三轴试验测试[J]. 土工基础, 2017, 31(2): 231-232.  
QIAN Wei, ZHANG Zao-hui. Triaxial test of Mohr-Coulomb strength characteristics of calcareous sand[J]. *Geotechnical Foundation*, 2017, 31(2): 231-232.
- [2] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043-2048.  
ZHANG Jia-ming, JIANG Guo-sheng, WANG Ren. Study on the influence of particle breakage and dilatancy on the shear strength of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2043-2048.
- [3] GIANG P H H, VAN IMPE P O, VAN IMPE W F, et al. Effects of particle characteristics on the shear strength of calcareous sand[J]. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2017, 14(2): 76-89.
- [4] WANG Xin-zhi, WANG Xing, JIN Zong-chuan. Shear characteristics of calcareous gravelly soil[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(2): 561-573.
- [5] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 147-152.  
WANG Xin-zhi, WANG Ren, MENG Qing-shan, et al. Laboratory load test of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 147-152.
- [6] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS FERITAS T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. *Geotechnique*, 2004, 54(3): 157-163.
- [7] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2789-2793.  
ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, JIANG Guo-sheng, et al. Experimental study of calcareous sand particle breakage under shear action[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2789-2793.
- [8] 孙吉主, 汪稔. 三轴压缩条件下钙质砂的颗粒破裂过程研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 822-825.  
SUN Ji-zhu, WANG Ren. Study on the particle fracture process of calcareous sand under triaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5): 822-825.
- [9] 何建乔, 魏厚振, 孟庆山. 大位移剪切下钙质砂破碎演化特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 165-172.  
HE Jian-qiao, WEI Hou-zhen, MENG Qing-shan. Fragmentation and evolution of calcareous sand under large displacement shear[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 165-172.
- [10] 虞海珍, 汪稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 6-11.  
YU Hai-zhen, WANG Ren. Experimental study on dynamic strength of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(4): 6-11.
- [11] 虞海珍. 复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
YU Hai-zhen. Experimental study on dynamic characteristics of saturated calcareous sand under complex stress conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [12] 虞海珍, 汪稔, 赵文光, 等. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(11): 86-89.

- YU Hai-zhen, WANG Ren, ZHAO Wen-guang, et al. Experimental study on pore pressure growth characteristics of calcareous sand under wave loading[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2006, 28(11): 86—89.
- [13] 李建国. 波浪荷载作用下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.  
LI Jian-guo. Experimental study on dynamic characteristics of saturated calcareous sand under wave loads[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [14] 李建国, 汪稔, 虞海珍, 等. 初始主应力方向对钙质砂动力特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 723—727.  
LI Jian-guo, WANG Ren, YU Hai-zhen, et al. Experimental study on the influence of initial principal stress direction on the dynamic characteristics of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(5): 723—727.
- [15] 孙吉主, 黄明利, 汪稔. 内孔隙与各向异性对钙质砂液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 166—169.  
SUN Ji-zhu, HUANG Ming-li, WANG Ren. Effects of internal porosity and anisotropy on liquefaction characteristics of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 166—169.
- [16] 纪文栋, 张宇亭, 王洋, 等. 循环单剪下珊瑚钙质砂和普通硅质砂剪切特性对比研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 282—288.  
JI Wen-dong, ZHANG Yu-ting, WANG Yang, et al. Comparative study on shear properties of coral calcareous sand and ordinary siliceous sand under cyclic single shear[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl. 1): 282—288.
- [17] 王刚, 查京京, 魏星. 循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 755—760.  
WANG Gang, CHA Jing-jing, WEI Xing. Evolution of particle crushing of carbonate sands under cyclic triaxial stress path[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(4): 755—760.
- [18] 刘汉龙, 胡鼎, 肖杨, 等. 钙质砂动力液化特性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 707—711, 725.  
LIU Han-long, HU Ding, XIAO Yang, et al. Test study on dynamic liquefaction characteristics of calcareous sand[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2015, 35(6): 707—711, 725.
- [19] GIANG P H H, VAN IMPE P O, VAN IMPE W F, et al. Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 100: 371—379.
- [20] VAN IMPE P O, VAN IMPE W F, MANZOTTI A, et al. Compaction control and related stress-strain behaviour of off-shore land reclamations with calcareous sands[J]. **Soils and Foundations**, 2015, 55(6): 1474—1486.
- [21] FAHEY M, MAO X. Behaviour of calcareous soils in undrained cyclic simple shear[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(8): 715—728.
- [22] MANAL SALEM, HUSSEIN ELMAMLOUK, SHEHAB AGAIBY. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, 55: 83—91.
- [23] JAFARIAN Y, JAVDANIAN H, HADDAD A. Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. **Soils and Foundations**, 2018, 58(1): 172—184.
- [24] 徐学勇, 汪稔, 胡明鉴, 等. 饱和钙质砂爆炸密实动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 402—406.  
XU Xue-yong, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Experimental study on dynamic characteristics of explosive compaction of saturated calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 402—406.
- [25] 吕亚茹, 王明洋, 魏久淇, 等. 钙质砂的 SHPB 实验技术及其动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1262—1270.  
LÜ Ya-ru, WANG Ming-yang, WEI Jiu-qi, et al. SHPB experimental technology and dynamic mechanical properties of calcareous sand[J]. **Explosion and Impact**, 2018, 38(6): 1262—1270.
- [26] 魏久淇, 吕亚茹, 刘国权, 等. 钙质砂一维冲击响应及吸能特性试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 191—198, 206.  
WEI Jiu-qi, LÜ Ya-ru, LIU Guo-quan, et al. One-dimensional impact response and energy absorption of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 191—198, 206.
- [27] 袁璞, 马芹永, 马冬冬. 端面不平行对岩石 SHPB 测试结果的影响分析[J]. 爆破, 2018, 35(3): 26—31.  
YUAN Pu, MA Qin-yong, MA Dong-dong. Influence of non-parallel end-face in rock SHPB test[J]. **Blasting**, 2018, 35(2): 26—31.

- 抗滑桩的抗震性能对比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 194—200.
- AI Hui, WU Hong-gang, FENG Wen-qiang, et al. Research on seismic capacity correlative experiment of top beam binding anti-slide pile and common anti-slide pile[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2017, 37(2): 194—200.
- [16] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- ZHANG De-feng. MATLAB wavelet analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [17] 韩晶晶. 基于小波包变换的地震动非平稳特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- HAN Jing-jing. Seismicity non-stationary characteristics study based on wavelet packet transform[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [18] 黄文华, 徐全军, 沈蔚, 等. 小波变换在判断爆破地震危害中的应用[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 24—27.
- HUANG Wen-hua, XU Quan-jun, SHEN Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage[J]. **Engineering Blasting**, 2001, 7(1): 24—27.
- [19] 侯静. 基于小波包分析的激光超声缺陷信号处理方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- HOU Jing. Study on laser ultrasonic defect signal processing method based on wavelet packet analysis [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2017.
- [20] 张耀平, 曹平, 高赛红, 等. 爆破振动信号的小波包分解及各频段的能量分布特征[J]. 金属矿山, 2007, 37(11): 42—47.
- ZHANG Yao-ping, CAO Ping, GAO Sai-hong, et al. Wavelet packet decomposition of blasting vibration signals and energy distribution characteristics of frequency band[J]. **Metal Mine**, 2007, 37(11): 42—47.
- [21] 牛文庆. 微型桩支挡结构地震动力特性试验研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2016.
- NIU Wen-qing. Research on earthquake dynamic experiment of micropiles supporting structure[D]. Beijing: China academy of railway sciences, 2016.
- [22] 吴道勇. 玉树地震作用下松散堆积层缓斜坡变形机制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- WU Dao-yong. Deformation mechanism of loose deposits gentle slope due to the Yushu earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiao-tong University, 2013.
- 
- 上接第 3908 页
- [28] 邹锐, 王玉杰, 任少峰, 等. 含水土质边坡的爆破振动响应及破坏模式研究[J]. 爆破, 2018, 35(1): 27—34.
- ZOU Rui, WANG Yu-jie, REN Shao-feng, et al. Study on vibration response and failure mode of soil slope with groundwater[J]. **Blasting**, 2018, 35(1): 27—34.
- [29] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 91—94.
- LIU Chong-quan, WANG Ren, WU Xin-sheng. Some problems for the tests of physico-mechanical properties of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 91—94.
- [30] 曹振中, 刘荟达, 袁晓铭. 砾性土液化特性与机理[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1165—1174.
- CAO Zhen-zhong, LIU Hui-da, YUAN Xiao-ming. Liquefaction characteristics and mechanism of gravel soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(7): 1165—1174.
- [31] 胡明鉴, 蒋航海, 朱长歧, 等. 钙质砂的渗透特性及其影响因素探讨[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2895—2900.
- HU Ming-jian, JIANG Hang-hai, ZHU Chang-qi, et al. Permeability of calcareous sand and its influencing factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2895—2900.
- [32] YE Jian-hong, HUANG Du-you, WANG Gang. Nonlinear dynamic simulation of offshore breakwater on sloping liquefied seabed[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2016, 75(3): 1215—1225.
- [33] YE Jian-hong, WANG Gang. Seismic dynamics of offshore breakwater on liquefiable seabed foundation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2015, 76: 86—99.
- [34] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Pore-pressure changes during soil liquefaction[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1976, 102(GT4): 323—346.
- [35] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1972, 198(7): 667—692.