

岩石力学与工程学报  
*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*  
ISSN 1000-6915, CN 42-1397/O3

## 《岩石力学与工程学报》网络首发论文

题目：中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探  
作者：叶剑红，曹梦，李刚  
DOI：10.13722/j.cnki.jrme.2018.0695  
收稿日期：2018-06-11  
网络首发日期：2018-11-08  
引用格式：叶剑红，曹梦，李刚. 中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探[J/OL]. 岩石力学与工程学报. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2018.0695>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探

叶剑红<sup>1</sup>, 曹梦<sup>2</sup>, 李刚<sup>3</sup>

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

3. 西京学院 土木工程学院, 陕西 西安 710123)

**摘要:** 南海岛礁吹填工程是我国的战略工程, 岛礁顶部的吹填陆域主要由珊瑚钙质砂组成。已有的研究表明珊瑚钙质砂在恒定荷载长期作用下会产生蠕变变形。作为各种岛礁结构物的地基材料的钙质砂, 其长期蠕变行为会对岛礁结构物的长期沉降变形产生影响。因此, 研究南海岛礁珊瑚钙质砂的长期蠕变特征具有重要的工程意义。本文对取自我国南海某岛礁的原状级配珊瑚钙质砂开展了室内饱和三轴排水蠕变试验(围压 100 kPa), 研究其长期蠕变特征。试验结果表明, 珊瑚钙质砂的蠕变为衰减型稳态蠕变, 不同应力条件下的蠕变-时间曲线在双对数坐标中均为直线, 可以采用幂函数进行描述; 且同一密实程度的钙质砂在不同偏应力作用下蠕变直线族基本平行, 直线斜率与偏应力量级无明显关系。钙质砂蠕变阶段的体积变化趋势受蠕变之前试样的体积收缩是否充分完成控制。本文研究发现 Mesri 蠕变数学模型可以很好地描述珊瑚钙质砂的应力-应变-时间关系, 最终的蠕变变形和应力水平  $q/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  呈现出高度线性正相关关系。试验前后颗粒筛分发现, 低围压下钙质砂蠕变过程中颗粒破碎极不明显, 表明珊瑚钙质砂在低围压条件下其蠕变变形主要是由颗粒间滑移、错动、重排列引起。

**关键词:** 土力学; 珊瑚钙质砂; 三轴蠕变试验; 蠕变特征; 蠕变模型; 南海岛礁吹填工程

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2019)XX-0000-10

## Preliminary study on the creep characteristics of calcareous sand from reclaimed coral reef islands in south China sea

YE Jianhong<sup>1</sup>, CAO Meng<sup>2</sup>, LI Gang<sup>3</sup>

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

2. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

3. School of Civil Engineering, Xijing College, Xi'an, Shaanxi 710123, China)

**Abstract:** The Construction of a series of reclamation islands on coral reef in South China Sea is a strategic project of China. These reclaimed lands on the top of coral reef is mainly consist of calcareous sand. Previous studies have confirmed that coral calcareous sand could generate creep deformation under long term constant loading. As the foundation material of all kind of structures built on reclaimed coral reef, the creep behavior of calcareous sand will definitely affect the long-term subsidence of these structures built on it. Therefore, it is highly necessary to investigate the long-term creep characteristics of coral calcareous sand from South China Sea. In this study, a series of tri-axial drained creep tests are performed with confining pressure 100kPa for the samples from a coral reef island in South China Sea to investigate the creep characteristics of calcareous sand. The experimental results

**收稿日期:** 2018-06-11; **修回日期:** 2018-09-09

**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)

Supported by Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(Grant No. XDA13010202)

**作者简介:** 叶剑红(1981-), 博士, 2006年毕业于中国地质大学(北京)土木工程专业, 现任教授, 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、地震稳定性等方面的研究工作。E-mail: yejianhongcas@gmail.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0695

indicate that the creep of calcareous sand is attenuated and steady type. The relation between creep strain and time in double logarithmic coordinates are all straight lines under different stress condition. It is indicated that a power function can be adopted to describe the relation between creep strain and time for calcareous sand. Additionally, it is further found that these straight lines corresponding to different creep deviatoric stresses are basically parallel with each other so long as the dry density of calcareous sand is the same. It is shown that the slope of these straight lines describing the relation between creep strain and time for calcareous sand has no obvious relationship with the creep deviatoric stresses. Based on the test results, it is also found that the trend of volume change of calcareous sand samples at creep stage is mainly controlled by the previous process of that the volume contraction of calcareous sand samples is finished or not under shearing before creep stage beginning. In this study, it is confirmed that Mesri creep model can effectively describe the stress-strain-time relation of coral calcareous sand. It is also found that the final creep strain of calcareous sand is highly linearly related to the stress level  $q/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ . Through particles gradation test before and after creep test, it is indicated that the creep of calcareous sand under low confining pressure is mainly attributed to the slipping, shifting, and rearrangement between soil particles.

**Key words:** soil mechanics; coral calcareous sand; triaxial creep test; creep characteristics; creep mathematical model; coral reef reclamation project in South China Sea

## 1 引言

实际工程结构物设计中, 结构物的地基变形是工程师所重点关注的一个问题, 过量的工后沉降可能会给结构物的功能使用带来严重问题, 所以结构物的地基变形计算和预估在结构设计中是不可缺少的。地基变形一般包括与应力相关、与时间无关的弹塑性变形, 以及与应力和时间都相关的蠕变变形。目前, 国际上已经发展出了较多的土的本构模型计算地基土体的弹塑性变形<sup>[1]</sup>, 且比较成熟, 也有一些学者提出了少量的黏-弹-塑性本构模型预测土的长期变形<sup>[2]</sup>, 但工程应用很少。在很大程度上, 对地基的长期蠕变变形特征、机制的认识程度和数学描述模型的准确性直接决定了对结构物的地基最终变形预估的可靠性, 所以对各种地基材料的长期蠕变行为开展深入研究就显得比较重要。南海岛礁吹填工程是我国的战略性工程, 对我国在主权维护、海洋科学研究、能源生命线保护等方面具有战略性价值。实际工程建设中, 在岛礁钙质砂吹填体上建设了各种各样的结构物, 如护岸防波堤、灯塔、机场和框架式建筑物等。在这些结构物的附加应力长期作用下, 了解掌握钙质砂的长期蠕变变形特征是可靠预估岛礁结构物钙质砂地基的最终沉降量的必要条件。本文以南海岛礁吹填工程为背景, 研究南海岛礁吹填钙质砂的蠕变特征。

在恒定应力作用下, 岩土材料的变形随时间不断增加的过程是土的蠕变, 这一现象早就被科学家

所认识。不同类型的土所表现出来的蠕变性能有较大的差别, 软土的蠕变较大, 而且蠕变持续的时间很长, 可达 10 年以上<sup>[3]</sup>; 粗粒土的蠕变量相对小, 而且蠕变持续时间也相对短一些。另外, 在蠕变机制上也有所不同, 软土、石英砂主要是颗粒调整相互间位置而产生蠕变; 而高围压下, 粗粒土、钙质土除了颗粒间相互滑动之外, 还会发生颗粒破碎而加剧蠕变过程。对于黏性土的蠕变变形机制已经有学者进行了大量全面且深入的研究, 相对而言, 砂土蠕变研究起步较晚。但近年来随着学者对砂土蠕变的重视, 研究成果也比较丰硕, 如王者超<sup>[4]</sup>对目前黏土和砂土蠕变性质及模型的研究现状作了较为全面的总结。

当前, 对砂土蠕变研究主要以开展室内蠕变试验为主, 包括单向固结蠕变和三轴蠕变试验。Murayama 等<sup>[5-6]</sup>对石英砂进行了三轴排水蠕变试验, 验证了其提出的流变模型的适用性, 并详细阐述了模型中各参数的意义和求解过程; Karimpour 和 Lade<sup>[7]</sup>通过对弗吉尼亚砂进行高围压和低围压条件下的三轴蠕变试验, 研究砂土蠕变过程中的时间效应和颗粒破碎行为, 结果表明, 低围压下砂土蠕变主要是由于颗粒的重组和滑移, 而高围压下砂土蠕变难以稳定, 且蠕变过程中伴随着砂土颗粒的破碎, 能量输入和相对颗粒破碎指数存在线性正相关关系; 张云等<sup>[8-9]</sup>对饱和上海砂和饱和常州砂分别进行了一维固结蠕变试验, 构建了应力-应变-时间的非线性模型, 表明上海砂、常州砂的应力-应变-应变-时间关系可以用幂函数描述; 孙晓涵<sup>[10]</sup>

用自制高压固结仪对西安含水层中细砂进行一维蠕变试验，研究地下水位变化与砂土蠕变的关系，为探究砂土蠕变微观机制，用激光粒度和电镜扫描观测蠕变过程中存在砂土颗粒滑移和破碎，并用广义开尔文模型对蠕变行为进行了模拟；宋世雄和张建民<sup>[11]</sup>采用非平衡态热力学方法，构建了描述砂土流变行为的热力学本构模型，为研究砂土蠕变力学行为提供了新思路。

南海岛礁工程是以南沙珊瑚钙质砂为原材料进行吹填形成人工岛，珊瑚钙质砂主要由珊瑚、贝壳等海洋生物残骸组成，其碳酸钙含量超过 90%。近年有学者对钙质砂也进行了一些试验，表明钙质砂具有疏松多孔、易破碎、易压缩、渗透性强等的特征<sup>[12-19]</sup>。然而，针对钙质砂蠕变性质的研究较少。Lade<sup>[20]</sup>对加勒比海珊瑚砂进行三轴蠕变试验，分析了蠕变过程中轴向变化和体积变化的规律，发现应力下降会使蠕变延迟；此外，Lade<sup>[21]</sup>还就珊瑚砂的蠕变与应力松弛关系做了对比试验，发现用蠕变模型的基本参数无法对应力松弛作出正确的预测；Lv 等<sup>[22]</sup>通过珊瑚砂和石英砂的三轴蠕变试验，对两者蠕变现象进行对比分析，发现与石英砂相比，钙质砂的蠕变变形更为显著。但文献中 Lade<sup>[20-21]</sup>和 Lv<sup>[22]</sup>并未建立相应的钙质砂蠕变的数学描述模型，导致不能对钙质砂的长期蠕变变形趋势做出预测。作为南海吹填人工岛建设的地基材料，南海岛礁钙质砂的蠕变行为对于岛礁建筑物的长期沉降变形有着不可忽视的贡献。本文通过恒定偏应力三轴蠕变试验，对我国南海吹填岛原状级配的珊瑚钙质砂的蠕变特征进行初步探究，并针对南海珊瑚钙质砂的蠕变变形提出适用的数学模型，这将对后续针对南海岛礁钙质砂发展黏-弹-塑性本构模型奠定基础。

## 2 蠕变试验方案

### 2.1 岛礁钙质砂物性参数

试验所用珊瑚钙质砂取自南海某吹填岛礁。试验中尽量采用原状级配进行装样，使用前于 105 °C 烘干至少 8 h。根据土工试验规范中试样尺寸与颗粒粒径的要求，三轴试验中剔除粒径特别大的颗粒，选取颗粒粒径小于 5 mm 的钙质砂制作砂样品。试验前对钙质砂样品的物理性质进行了测定，颗粒级配曲线如图 1 所示(大颗粒被剔除之后)，相关参数列于表 1(表中  $d_{60}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{10}$  分别为限定粒径、连续粒径、有效粒径)，样品钙质砂的不均匀系数为

表 1 南海珊瑚钙质砂的基本物性参数

Table 1 Physical parameter of calcareous sand from a coral reef island of South China Sea

$d_{60}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{10}/\text{mm}$	比重	最大干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最小干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
0.47	0.22	0.076	2.71	1.73	1.27

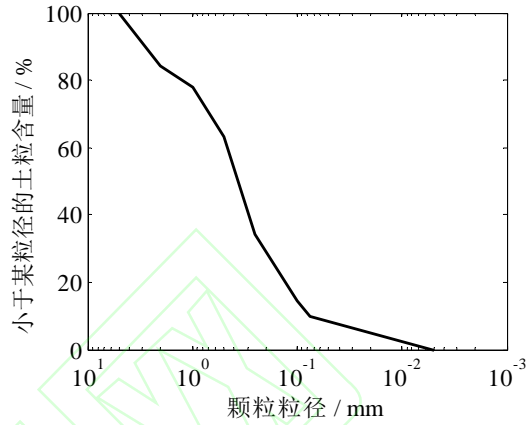


图 1 南海某岛礁珊瑚钙质砂颗粒级配曲线( $C_u = 6.18$ ,  $C_c = 1.35$ )

Fig.1 Particle gradation curve of the calcareous sand from a coral reef reclamation island in South China Sea( $C_u = 6.18$ ,  $C_c = 1.35$ )

$C_u = 6.18$ ，曲率系数为  $C_c = 1.35$ 。为了保证试验数据的可比性，所有试样采用相同的级配。

### 2.2 试验方案

珊瑚钙质砂蠕变试验在中科院岩土所开展，所用的仪器是全自动应力路径三轴流变仪，力传感器(日本 TML)最大加载轴向力为 10 kN，其精度为 0.03%，外置位移传感器精度为 0.001 mm。蠕变加载过程中使用应力控制，全程为排水状态。轴向加载分为两个阶段，第一阶段是从 0 快速加载到预定的偏应力(时间少于 5 分钟)；第二阶段是伺服维持该蠕变偏应力为恒定值。由于珊瑚钙质砂的渗透性能较好，快速加载过程中排水通畅而未出现超孔隙水压力。试验样品为圆柱状，直径为 61.8 mm，高度为 120 mm。由于岛礁现场的框架建筑物通常不超过七层，护岸防波堤的高度不超过 3 m，基地的附加压力一般不超过 100 kPa，因此蠕变试验中有效围压统一设置为 100 kPa。试验中钙质砂的干密度有两种：1.45 和 1.65  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，分别属于中密砂和密实砂，分别对应于岛礁吹填体的未振冲部位和振冲部位的密实程度。偏应力加载前对试样进行反压(200 kPa)饱和，孔隙压力系数  $B > 0.95$  才视为饱和，否则重新饱和，直至  $B > 0.95$  才开展后续试验过程。加载

方式采用分别加载，恒定荷载作用下，观测到试样轴向变形速率不大于 0.005 mm/d 时视为蠕变稳定，方可终止试验。本研究一共开展了 10 个样品的蠕变试验，历时约 180 d，具体加载方案如表 2 所示。

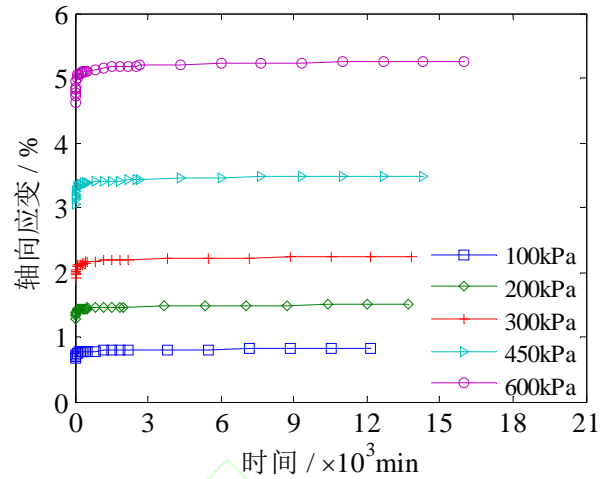
表 2 珊瑚钙质砂的蠕变试验加载方案

Table 2 Experimental scheme of creep tests for calcareous sand

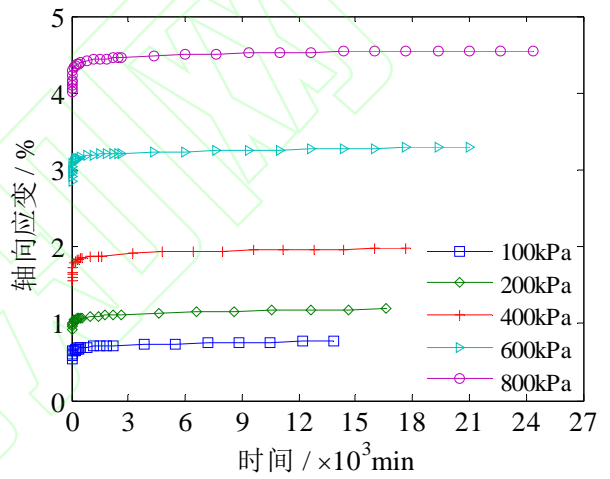
编号	干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	相对密实 度 $D_r$	饱和度	有效围压/ kPa	偏应力/ kPa
1					100
2					200
3	1.45	46.7%	$B > 0.96$	100	300
4			饱和		450
5					600
6				100	100
7					200
8	1.65	86.6%	$B > 0.96$	100	400
9			饱和		600
10					800

### 3 试验结果与分析

图 2 为两种密实度钙质砂的轴向应变 - 时间蠕变试验曲线。由于蠕变开始之前偏应力加载过程快速，可近似视为瞬时加载，试验结果处理时将时间零点从偏应力加载到预定值时开始，轴向应变为总应变，包括初始应变和蠕变应变。从图 2 中可看出，南海岛礁钙质砂在恒定偏应力作用下发生了明显的随时间增长的变形，即蠕变。密实钙质砂的轴向蠕变量小于中密砂，且最终蠕变量随偏应力的增加而增加；不同偏应力下各个试样的蠕变变形随时间变化的曲线形状基本相似，大体可分为两个阶段：(1) 快速加载变形阶段，试样在偏应力从 0 施加预定值过程中快速压缩，应变速率大，产生初始应变  $\epsilon_0$ ；(2) 蠕变变形阶段，偏应力保持恒定后，试样变形速率随时间不断减小并趋于 0，发生衰减蠕变，在一定时间后变形基本保持不变，此阶段钙质砂试样产生的轴向蠕变应变为  $\epsilon_c$ 。综合起来，试样最终总轴向应变量为  $\epsilon_{final} = \epsilon_0 + \epsilon_c$ 。试样蠕变变形稳定的时间一般都在 10 d 以上，当钙质砂越密实或施加的偏应力越大时，蠕变达到稳定所需要的时间越长，如干密度  $1.65 g/cm^3$  且施加偏应力 800 kPa 的样品蠕变 17 d 后才达到稳定，而干密度  $1.45 g/cm^3$  且施加偏应力 100 kPa 的样品蠕变约 10 d 即可达到稳定，其原因是当钙质砂试样越密实，在蠕变变形阶段砂颗粒相对位置的调整的空间越小、颗粒移动的阻力相



(a) 干密度  $1.45 g/cm^3$



(b) 干密度  $1.65 g/cm^3$

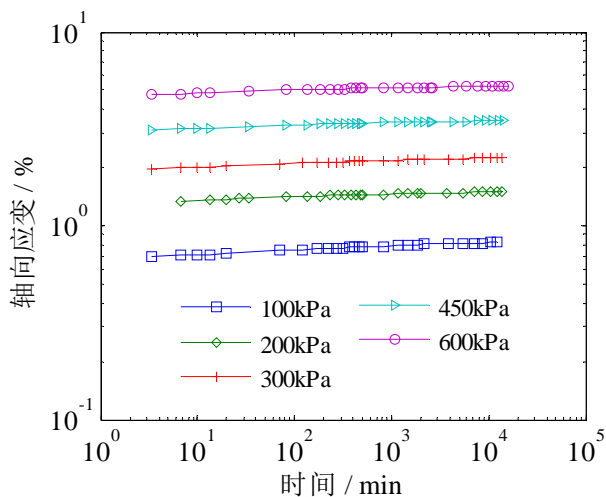
图 2 饱和南海岛礁珊瑚钙质砂蠕变曲线(有效围压 100 kPa)

Fig.2 Creep curve of saturated calcareous sand from a coral reef island of South China Sea(Confining pressure = 100 kPa)

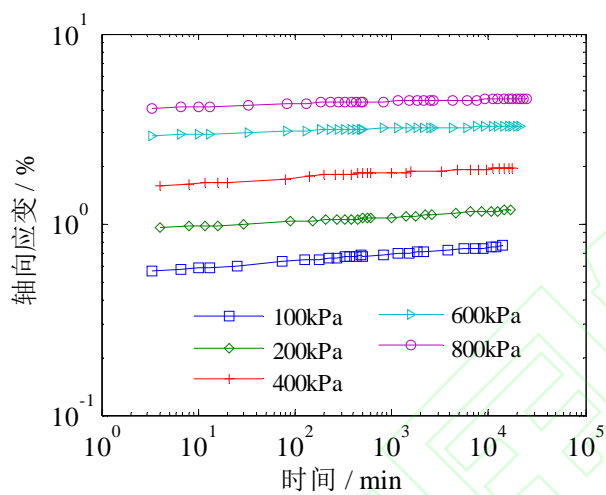
对较大，从而导致颗粒间相对滑移的速率也较小，所以达到新的平衡状态(即蠕变稳定状态)需要更长的时间。

图 3 展示的是岛礁钙质砂蠕变的应变-时间双对数曲线。从图 3 中可以发现同一密实度的岛礁钙质砂在不同偏应力作用下的蠕变变形-时间曲线在双对数坐标系中均近似为直线，且基本平行，说明这些直线的斜率与蠕变时偏应力大小并无相关性。这一结果表明南海岛礁钙质砂的蠕变变形与时间之间的数学关系可以用幂函数来描述。

图 4 是南海岛礁钙质砂的蠕变过程在不同时刻的应力 - 应变关系等时线。由于对每种干密度的钙质砂仅开展了 5 次蠕变试验(有效围压相同，偏应力不同)，所以在每一时刻的等时线上只有 5 个数据



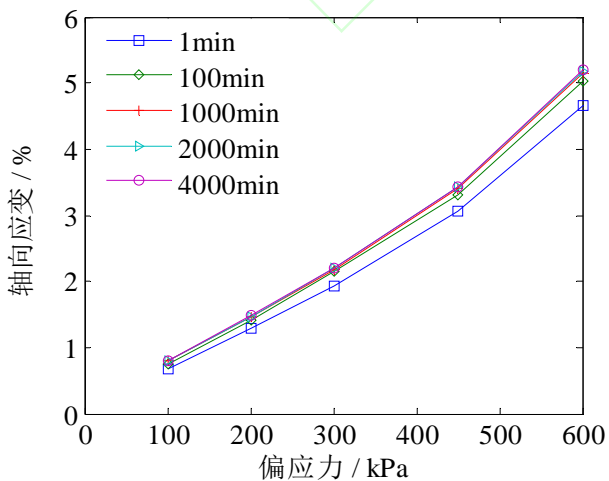
(a) 干密度 1.45 g/cm³



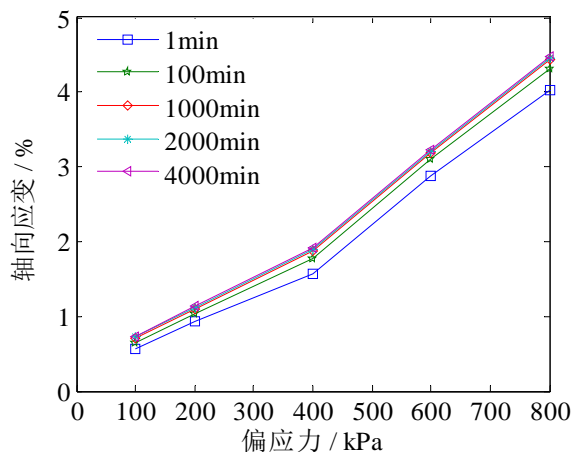
(b) 干密度 1.65 g/cm³

图 3 饱和南海岛礁珊瑚钙质砂蠕变双对数关系曲线 (有效围压 100 kPa)

Fig.3 Creep curve in logarithmic coordinates of saturated calcareous sand from a coral reef island of South China Sea ( $\sigma_3 = 100$  kPa)



(a) 干密度 1.45 g/cm³



(b) 干密度 1.65 g/cm³

图 4 100 kPa 围压下饱和钙质砂应力 - 应变等时线

Fig.4 Stress-strain isochrones of saturated calcareous sand under 100kPa confining pressure

点。 $t = 1$  min 的等时线可以认为是蠕变开始前的弹塑性变形。图 4 中，可以看到同一密实度的钙质砂，在同一偏应力作用下，钙质砂的轴向变形随时间逐渐增长，从  $t = 1$  min 到  $t = 100$  min 时间段内，变形增长较快，之后增长非常慢，这一规律和图 2 所展示的规律相同。另外，在图 4 中可以发现，同一密实度的钙质砂在不同时刻的应力-应变等时线的形态相似，具有自相似特征。由于本研究工作开展蠕变试验是采用分别加载的方法，要求每一级偏应力下的蠕变试验都需要重新制样。实际上，即使是同一试验操作人员，用同一级配的砂样，制作同一干密度的砂样品，每次制作的试样理论上都不可能一样。这种不可避免的因素就可能导致试验结果具有一定的离散性，进而导致试验数据的规律性不强。从另一方面看，如果不同次的试验数据具有很好的规律性，而且具有自相似的特征，那就说明所开展的多次试验的测试结果具有很好的可信度。图 4 中所展示的不同密实度钙质砂的应力-应变等时线的自相似特征也就说明了本文所开展的钙质砂蠕变试验数据具有很好的可信度。

土在常规三轴试验中会出现剪缩或者先剪缩后剪胀的物理现象。南海岛礁钙质砂在蠕变过程中的体积变化规律也是一个值得关注的蠕变特征。图 5 展示了两种密实度钙质砂的在蠕变阶段体积应变 - 轴向应变的试验关系曲线。为了研究快速加载阶段的体变对后续蠕变阶段体变的影响，图 5 中也包含了快速加载阶段的体变过程(图中竖直虚线为两个加载阶段的分界线)。

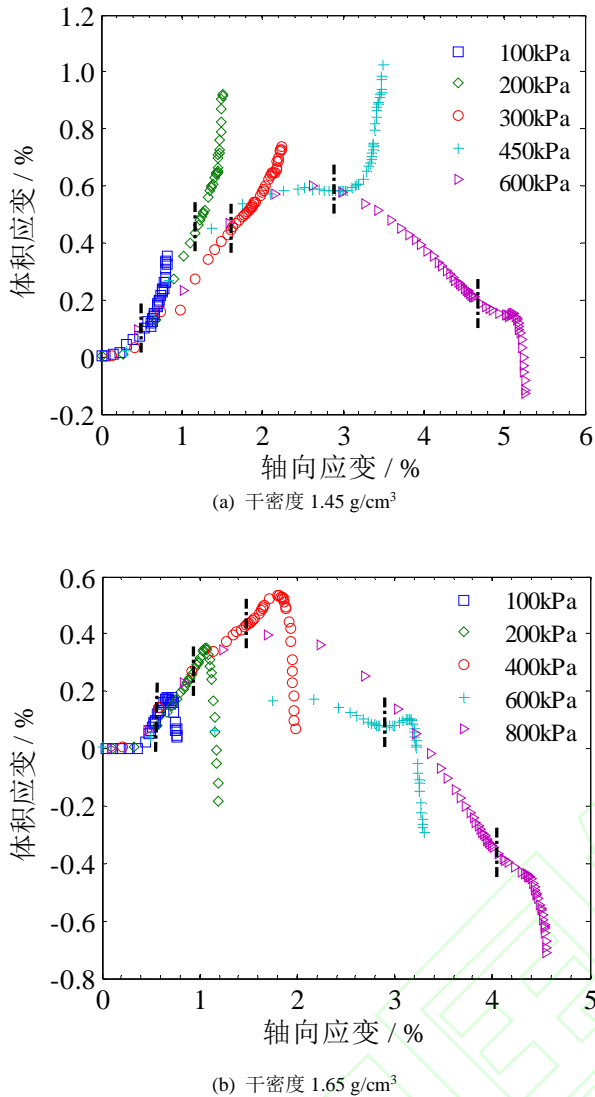


图 5 100 kPa 围压下饱和钙质砂体积应变 - 蠕变应变曲线  
Fig.5 Volume strain-creep strain curves of saturated calcareous sand under 100kPa confining pressure

从图 5 中, 可以发现如下规律: (1) 对于干密度  $1.45 \text{ g/cm}^3$  的欠密实钙质砂, 当偏应力较小时(如  $q \leq 450 \text{ kPa}$ ), 在快速加载阶段都处于剪缩状态, 后续的蠕变阶段仍然继续了这种剪缩状态。说明对于欠密实样品, 偏应力较小时, 试样在快速加载阶段的体积收缩尚没有完成, 导致后续的蠕变阶段需要继续完成体积收缩。当偏应力较大时(如  $q = 600 \text{ kPa}$ ), 由于其快速加载阶段剪缩已经完成, 并且已经出现了剪胀状态, 所以后续的蠕变阶段试样只能继续处于剪胀状态。(2) 对于干密度  $1.65 \text{ g/cm}^3$  的密实钙质砂, 其剪缩的趋势变弱, 剪胀的趋势变强。当偏应力较小时(如  $q \leq 400 \text{ kPa}$ ), 在快速加载阶段都出现了剪缩, 由于该阶段的体缩也尚未完成, 后续的蠕变阶段就先继续完成体缩, 之后又发生体胀。当偏应力较大时(如  $q \geq 600 \text{ kPa}$ ), 由于快速加载阶

段钙质砂试样已经完成了剪缩, 而且还发生了剪胀, 所以后续的蠕变阶段试样只能继续处于剪胀状态。综合来看, 岛礁钙质砂的蠕变阶段的体积变化规律取决于快速加载阶段的体缩是否完成, 以及后续的蠕变变形量。具体有三种情况: (1) 快速加载阶段的体缩未完成, 且后续蠕变变形较小, 则蠕变阶段只出现剪缩状态; (2) 快速加载阶段的体缩未完成, 且后续蠕变变形较大, 则蠕变阶段先出现剪缩, 后发生剪胀状态; (3) 快速加载阶段的体缩已经完成, 无论后续蠕变量大小, 均只会出现剪胀状态。

#### 4 岛礁钙质砂蠕变数学模型

在了解南海岛礁钙质砂蠕变的基本特征后, 需要论证采用何种数学模型可以描述岛礁钙质砂的长期蠕变变形发展过程。通过筛选, 发现 Mesri 蠕变模型具有很好的适用性。Kondner 于 1963 年提出土的应力 - 应变曲线可以近似假设符合双曲线方程<sup>[23]</sup>, 实际上邓肯 - 张非线性弹性模型就是基于此假设发展而来。其关系式为

$$\epsilon_1 = \frac{2}{E_i / S_u} \frac{D}{1 - R_f D} \quad (1)$$

式中:  $E_i$  为初始切线模量;  $S_u$  为不排水剪切强度, 排水试验中, 可用  $S_u = 1/2(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  计算, 其中  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为破坏强度  $q_f$ ,  $\sigma_1$  为轴向应力,  $\sigma_3$  为有效围压;  $R_f$  为破坏比,  $R_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ , 其中  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  是双曲线型应力-应变曲线中, 当应变为无穷大时所能达到的最大主应力差;  $D = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = q / q_f$  为应力水平。为确定南海岛礁钙质砂在 100 kPa 围压下的破坏强度, 本文开展了常规三轴试验, 并且为了确保所确定的破坏强度值具有较高的可靠度, 对两种干密度的钙质砂分别进行了 3 次平行试验。图 6 显示平行试验的测试结果重合度较高, 表明试验数据可靠度较好。最终确定干密度  $1.65 \text{ g/cm}^3$  的岛礁钙质砂的破坏强度约为 867 kPa, 干密度  $1.45 \text{ g/cm}^3$  的约为 641 kPa。

Mesri 在 Kondner 基础上提出了适用于黏土蠕变的应力 - 应变 - 时间蠕变模型。该模型中应力 - 应变曲线假设为双曲线方程(1), 同时蠕变应变 - 时间假设为幂函数关系。根据前述的南海岛礁钙质砂的蠕变试验结果, 钙质砂的蠕变应变 - 时间之间确实呈现幂函数关系(在双对数坐标系内为直线, 如图 3 所示)。基于这种试验得到的蠕变应变 - 时间幂函数关系, 并在 Kondner 提出的应力 - 应变双曲线方程的基础上, Mesri 蠕变方程<sup>[24]</sup>为

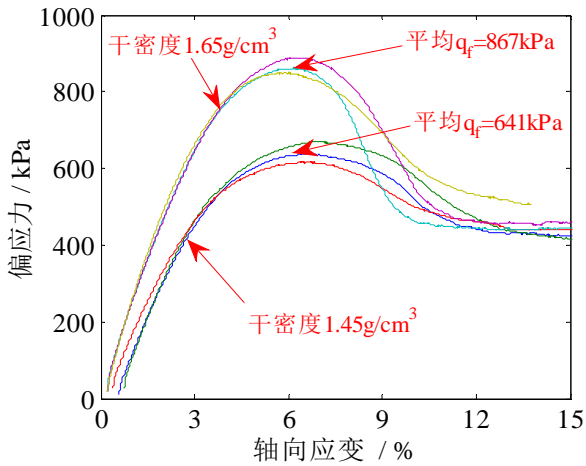


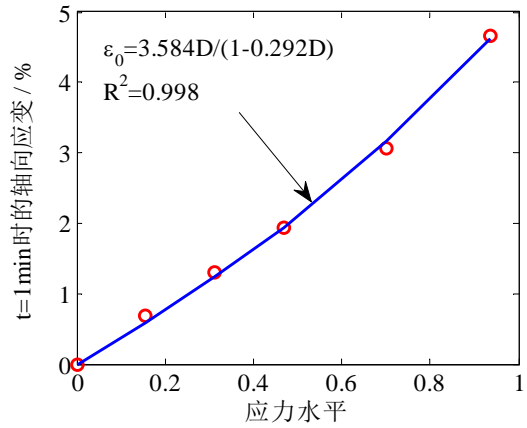
图 6 南海岛礁钙质砂在 100 kPa 围压下常规三轴应力 - 应变试验曲线

Fig.6 Stress-strain curves under  $\sigma_3 = 100$  kPa of calcareous sand from South China Sea

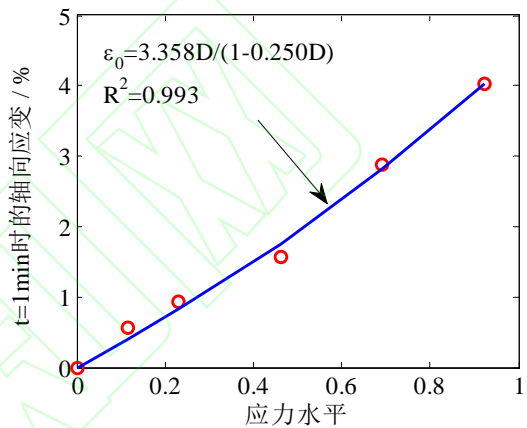
$$\varepsilon_1 = \frac{2}{E_i / S_u} \frac{D}{1 - R_f D} \left( \frac{t}{t_r} \right)^\lambda \quad (2)$$

式中： $\lambda$ 为常数，与材料相关，对不同偏应力水平下的  $\ln \varepsilon_1 - \ln t$  进行线性拟合，其斜率即为 $\lambda$ 值； $t_r$ 为时间参数，一般选取  $t_r = 1$  min。当  $t = t_r = 1$  min 时，即蠕变刚刚开始，公式(2)计算所得的应变值就是蠕变开始前的弹塑性轴向应变。

根据公式(2)，对不同的应力水平和  $t = 1$  min 时的轴向应变进行拟合，即可确定公式(2)中的参数值。图 7 给出了干密度 1.45 和 1.65 g/cm<sup>3</sup> 的钙质砂试样的应力水平  $D$  和轴向应变的拟合曲线，可以发现南海岛礁钙质砂在  $t = 1$  min 时(蠕变开始之前)的弹塑性变形可以和 Kondner 提出的公式(1)具有高度的吻合度，无论是 1.45 g/cm<sup>3</sup> 还是 1.65 g/cm<sup>3</sup> 的钙质砂，曲线的拟合度都高于 0.99。由于邓肯 - 张非线性弹性模型也是基于应力 - 应变为双曲线关系假设发展而来，图 7 中所展示的高度吻合度从某种程度上可能指示了可以采用邓肯 - 张非线性弹性模型来描述南海岛礁钙质砂的力学行为，评估岛礁结构物地基的弹塑性地基沉降。根据图 7 中所示的曲线拟合，可以得到 1.45 和 1.65 g/cm<sup>3</sup> 的岛礁钙质砂的弹塑性变形描述参数  $2S_u/E_i$  和  $R_f$ ；另外根据图 3 中双对数坐标系内的多条近平行直线，求取各条直线的斜率，再以求平均值的方法确定平行直线簇的总体平均斜率，以此确定 1.45 和 1.65 g/cm<sup>3</sup> 的岛礁钙质砂的参数  $\lambda$ 。



(a) 干密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>



(b) 干密度 1.65 g/cm<sup>3</sup>

图 7 岛礁钙质砂试样在  $t = 1$  min 时应力水平  $D$  和轴向应变的双曲线拟合

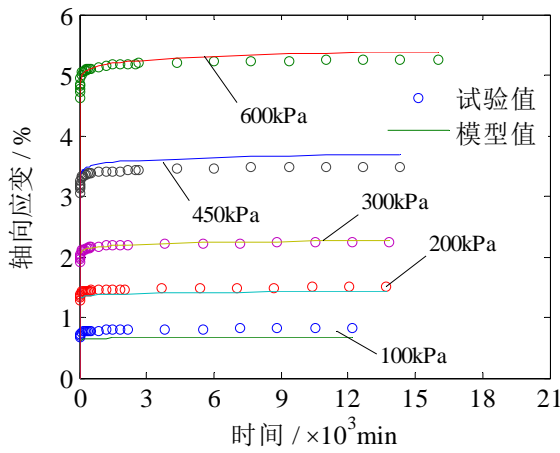
Fig.7 Hyperbolic fitting between the stress level  $D$  and axial strain at  $t = 1$  min for calcareous sand from South China Sea

南海岛礁钙质砂的 Mesri 蠕变模型各参数列于表 3 中。将各参数值代入方程(2)，对比 Mesri 蠕变模型的预测值和试验值(如图 8 所示)，可发现 Mesri 蠕变模型对于干密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup> 的钙质砂的蠕变规律描述较为理想，而对干密度为 1.65 g/cm<sup>3</sup> 的钙质砂的蠕变规律描述具有一定的偏差。这主要是由于试验误差所造成，具体有 3 点：(1) 5 次试验的样品尽管干密度和级配一致，但是每次装样后样品的颗粒形状、排列绝对不一样，还可能差别很大；(2) 试验操作过程人为误差不可避免；(3) 试验后数据处理和模型本身的精度问题造成的误差，如图 7 中对不同应力水平和  $t = 1$  min 时的轴向应变关系的拟合不可能完美，且参数 $\lambda$ 是将不同偏应力下所求得的 $\lambda$ 值取平均值得到，所以拟合结果会存在合理误差。从本文的研究结果看，Mesri 蠕变模型是可以用来描述南海岛礁珊瑚钙质砂的蠕变力学行为的。

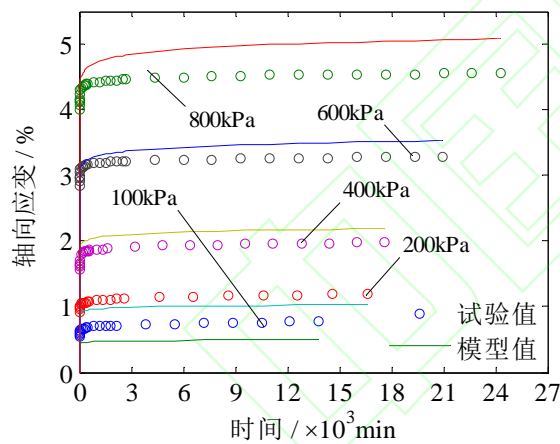


表3 采用试验数据确定的 Mesri 蠕变模型参数值  
 Table 3 Parameters of Mesri creep model determined based on experimental data

干密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	t <sub>r</sub> / min	2S <sub>u</sub> /E <sub>i</sub>	R <sub>f</sub>	λ
1.45	1	3.584	0.292	0.016
1.65	1	3.358	0.250	0.023



(a) 干密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>



(b) 干密度 1.65 g/cm<sup>3</sup>

图8 岛礁钙质砂蠕变试验曲线与 Mesri 蠕变模型的对比图  
 Fig.8 Comparison between the creep experimental data of calcareous sand and Mesri creep model

本文试验中钙质砂均发生衰减蠕变，蠕变变形随时间呈收敛趋势，而 Mesri 蠕变模型并不收敛，当时间趋于无穷则应变也趋于无穷，无法确定最终轴向总应变；这是 Mesri 模型的一个固有缺陷。从试验结果图 2 中可以发现，岛礁钙质砂蠕变过程的蠕变量ε<sub>c</sub>(蠕变过程达到稳定，终止试验)与应力水平 D 呈正相关关系。基于此认识，在同一坐标系中将两种密实度(1.45 和 1.65 g/cm<sup>3</sup>)的钙质砂在各应力

水平下的最终蠕变量进行拟合，如图 9 所示。研究发现两种密实度的钙质砂的最终蠕变量和应力水平 D 之间呈现出高度线性关系，拟合度高达 0.96。基于此线性关系，即可推断不同应力水平下岛礁钙质砂的最终蠕变量。如果将 t = 1 min 时的应变视为初始弹塑性应变ε<sub>0</sub>，钙质砂蠕变变形稳定时的最终蠕变量则是应力水平的函数，则总轴向应变可表示为初始弹塑性应变ε<sub>0</sub>和最终蠕变量ε<sub>c</sub>之和：

$$\varepsilon_{final} = \varepsilon_0 + \varepsilon_c = \frac{2}{E_i / S_u} \frac{D}{1 - R_f D} + aD + b \quad (3)$$

式中：a, b 均为材料参数。

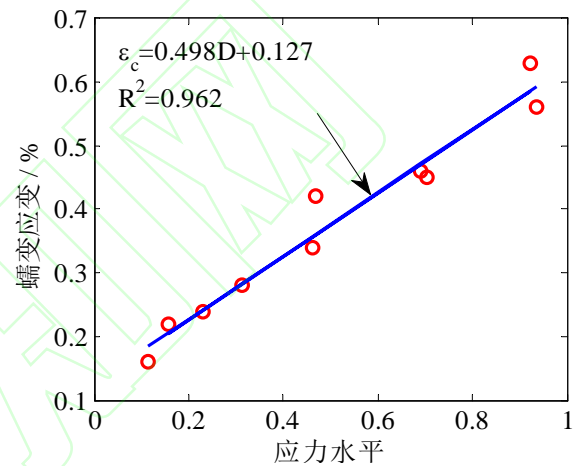


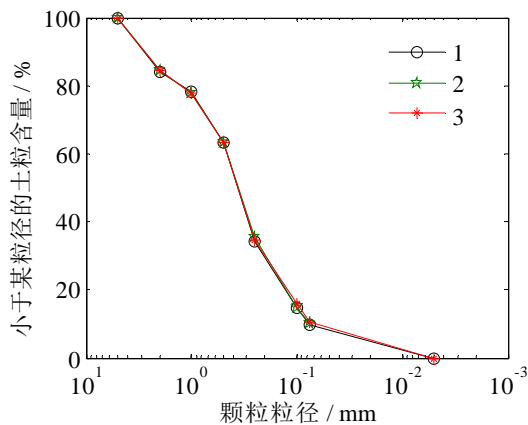
图9 岛礁钙质砂最终蠕变应变与应力水平 D 的关系图  
 Fig.9 Relationship between final creep strain and stress level D of calcareous sand

本文所建立的总变形量(初始弹塑性应变ε<sub>0</sub>，蠕变试验稳定后的蠕变量ε<sub>c</sub>之和)与钙质砂所受的应力水平之间的关系式(3)可以克服 Mesri 模型的固有缺陷，作为 Mesri 模型的有益补充，预测钙质土的长期变形稳定后的总变形量。

## 5 钙质砂蠕变机制

砂土的蠕变变形从微观上可以解释为颗粒间在接触面上相互滑移、颗粒滚动等排列重组和颗粒破碎两个方面。Karimpour<sup>[7]</sup>和 Lv<sup>[22]</sup>对不同砂土的蠕变机制研究中，发现低应力条件下引起砂土蠕变的是颗粒的滑移重组，而高应力下还伴随着颗粒破碎行为。与普通陆源砂相比，钙质砂颗粒由于多孔、质脆、多棱角等特征，其重要特点之一就是颗粒易发生破碎。本研究工作所开展的蠕变试验前后均对钙质砂试样进行了筛分，高应力下蠕变试验前后钙

质砂的颗粒级配曲线列于图 10 中。从图 10 可发现，在围压 100 kPa 的条件下，试验前后的钙质砂的颗粒曲线基本重合，没有表现出颗粒破碎的特征。因此低围压下钙质砂的蠕变变形主要还是颗粒间的滑移、重排列，而非颗粒破碎。



1—试验前；2—干密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>(偏应力 600 kPa 试验后)；  
3—干密度 1.65 g/cm<sup>3</sup>(偏应力 800 kPa 试验后)

图 10 岛礁钙质砂试样蠕变试验前后颗粒级配曲线

Fig.10 Gradation curves of particles size of calcareous sand before and after creep tests

## 6 结 论

本文针对我国南海岛礁钙质砂的长期蠕变特征问题，开展了一系列的蠕变试验，对南海岛礁钙质砂的蠕变行为有了初步深入理解，并论证了 Mesri 模型描述岛礁钙质砂蠕变行为的可行性和可靠性。本文主要有以下几个方面的结论：

(1) 钙质砂在长期恒定应力作用下具有明显的蠕变特性，在应力小于其破坏强度时发生衰减蠕变，变形在一定时间后趋于稳定。所加载的应力越大，或砂土越密实，则达到变形稳定的时间越长。

(2) 钙质砂蠕变过程中体积变化趋势取决于蠕变发生前的加载阶段体积剪缩是否完成，以及蠕变变形的量，可以出现 3 种体变趋势：① 只发生剪缩；② 先剪缩后剪胀；③ 只发生剪胀。

(3) 南海岛礁钙质砂的应力 - 应变关系可以双曲线描述，蠕变过程中应变 - 时间关系可用幂函数描述，符合 Mesri 蠕变模型建立的前提条件。钙质砂蠕变试验数据表明，Mesri 蠕变模型可以描述南海岛礁钙质砂的蠕变变形规律。钙质砂的最终蠕变变形(蠕变稳定后)与应力水平  $D$  之间呈高度线性正相关关系，与密实度无关，可据此对岛礁钙质砂的最终蠕变变形做出预测。

(4) 低围压条件下，钙质砂蠕变主要由颗粒间滑移、重排列引起，颗粒破碎影响极小。

## 参考文献(References):

- [1] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679 - 686.(YANG Guanghua. New computation method for soil foundation settlements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 679 - 686.(in Chinese))
- [2] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2 006 - 2 011.(SHE Chengxue. Research on nonlinear visco-elasto-plastic creep model of rock. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2 006 - 2 011.(in Chinese))
- [3] 马桂华, 陈锦剑, 王建华, 等. 上海软土地区多层建筑物长期沉降特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 991 - 994.(MA Guihua, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, et al. Long-term settlement of multi-story buildings on soft clay foundation in Shanghai[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 991 - 994.(in Chinese))
- [4] 王者超, 乔丽萍. 土蠕变性质及其模型研究综述与讨论[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2 251 - 2 260.(WANG Zhechao, QIAO Liping. A review and discussion on creep behavior of soil and its models[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2 251 - 2 260.(in Chinese))
- [5] SAKURO Marayama. Formulation of stress-stain-time behavior of soils under deviatoric stress condition[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(2): 43 - 57.
- [6] SAKURO Marayama, KAZUTOSHI Michihiro, TOSHIHIKO Sakagami. Creep characteristics of sands[J]. Soils and Foundations, 1984, 24(2): 1 - 15.
- [7] HAMID Karimpour, POUL V. Lade. Creep behavior in Viginia beach sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(11): 1 159 - 1 178.
- [8] 张云, 薛禹群, 施小清, 等. 饱和砂土非线性蠕变模型实验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 869 - 1 873.(ZHANG Yun, XUE Yuqun, SHI Xiaoqing, et al. Study on nonlinear creep model for saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1 869 - 1 873.(in Chinese))
- [9] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 上海砂土蠕变变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1 226 - 1 231.(ZHANG Yun, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. Experimental research on creep of Shanghai sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1 226 - 1 231.(in Chinese))
- [10] 孙晓涵, 崔向美. 高应力下西安含水层砂土蠕变特性的研究试验[J]. 南北水调与水利科技, 2015, 13(6): 1 133 - 1 137.(SUN Xiaohan, CUI Xiangmei. Experimental research on creep characteristics of aquifer sand sediments in Xi'an under high stress[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015, 13(6):

- 1 133 - 1 137.(in Chinese))
- [11] 宋世雄, 张建民. 砂土流变行为的热力学本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊): 129 - 133.(SONG Shixiong, ZHANG Jianmin. Thermodynamic constitutive model for rheological behavior of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Supp.): 129 - 133.(in Chinese))
- [12] 朱长岐, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙结构特征成分分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1 831 - 1 836.(ZHU Changqi, CHEN Haiyang, MENG Qingshan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1 831 - 1 836.(in Chinese))
- [13] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.(ZHANG Jiaming. Study on the fundamental mechanical characteristics of calcareous sand and the influence of particle breakage[D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics), 2004.(in Chinese))
- [14] 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, 2005, 30(1): 147 - 151.(WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Study of plate load test of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 30(1): 147 - 151.(in Chinese))
- [15] 张家铭, 张 凌, 刘 慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊): 3 010 - 3 015.(ZHANG Jiaming, ZHANG Ling, LIU Hui, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.): 3 010 - 3 015.(in Chinese))
- [16] 胡 波. 三轴条件下钙质砂颗粒破碎力学性质与本构模型研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.(BO Hu. Research on the particle breakage mechanical characteristics and constitutive model of calcareous sand under triaxial condition[D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics), 2008.(in Chinese))
- [17] 张家铭, 汪 稔, 石祥峰, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 327 - 3 331.(ZHANG Jiaming, WANG Ren, SHI Xiangfeng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 327 - 3 331.(in Chinese))
- [18] Habib Shahnazari, Reza Rezvani. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sand: An experimental study[J]. Engineering Geology, 2013, 159: 98 - 105.
- [19] 钱 琨, 王新志, 陈剑文, 等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1 557 - 1 564.(QIAN Kun, WANG Xinzhi, CHEN Jianwen, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1 557 - 1 564.(in Chinese))
- [20] Poul V. Lade, Carl D. Liggio Jr., Jungman Nam. Strain Rate, Creep, and Stress Drop-Creep Experiments on Crushed Coral Sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(7): 941 - 953.
- [21] P. V. Lade. Creep, stress relaxation, and rate effects in sand[C]// Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria: IOS Press, 2009.
- [22] Yaru Lv, Feng Li, Yawen Liu, Pengxian Fan, Mingyang Wang. Comparative study of coral sand and silica sand in creep under general stress states[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1 601 - 1 611.
- [23] ROBERT L. Kondner. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. American Society of Civil Engineers, 1963, 89(1): 115 - 144.
- [24] MESRI G, FEBRES-CORDERO E, SHIELDS D R. A. Castro. Shear stress-strain-time behavior of clays[J]. Geotechnique, 1981, 31(4): 537 - 552.