

岩土力学
Rock and Soil Mechanics
ISSN 1000-7598, CN 42-1199/O3

《岩土力学》网络首发论文

题目: 南海钙质砂蠕变-应力-时间四参数数学模型
作者: 曹梦, 叶剑红
DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1267
收稿日期: 2018-07-13
网络首发日期: 2018-09-19
引用格式: 曹梦, 叶剑红. 南海钙质砂蠕变-应力-时间四参数数学模型. 岩土力学.
<https://doi.org/10.16285/j.rsm.2018.1267>



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。

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1267

南海钙质砂蠕变-应力-时间四参数数学模型

曹 梦^{1, 2}, 叶剑红²

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

摘 要: 钙质砂是一种海洋生物沉积形成的具有特殊结构和力学性质的岩土材料, 是我国南海岛礁吹填工程的物源材料。为进一步了解其蠕变特性, 本文采用三轴流变仪对取自中国南海某岛礁的钙质砂进行不同围压条件下的长期蠕变试验研究。试验结果表明, 在小于其破坏强度的恒定应力作用下, 饱和钙质砂发生衰减蠕变, 随时间增加, 变形不断增加, 但变形速率不断减小, 直至变形稳定, 所受应力越大则达到变形稳定所需时间越长, 且蠕变变形量与所受偏应力正相关、与有效围压反相关。应力-应变与应变-时间均为非线性关系, 试验研究发现, 可采用幂函数对钙质砂蠕变应变-时间进行数学描述, 基于试验结果, 本文提出了一种蠕变应变与时间、偏应力和有效围压相关的四参数新的蠕变模型, 可以对钙质砂的蠕变过程进行较好的数学描述; 与经典的 Mesri 蠕变模型相比, 所提出的数学蠕变模型不需要开展常规三轴压缩试验确定破坏时的峰值偏应力, 减少了试验工作, 具有一定的优势。

关 键 词: 南海钙质砂; 三轴蠕变试验; 蠕变特性; 蠕变数学模型

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 05-0000-07

Creep-stress-time four parameters mathematical model of calcareous sand in South China Sea

CAO Meng^{1, 2}, YE Jian-hong²

(1. School of resource and environmental engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Calcareous sand is a kind of geo-material with special structure and mechanical properties formed due to the marine biological deposition process. To further study on its creep properties, a series of long-term creep tests for calcareous sand sampled from a South China Sea coral reef island were carried out under different confining pressure. The instrument used in this study is triaxial rheological apparatus. The test results show that the damping creep occurs with deformation increasing for saturated calcareous sand when the applied constant pressure load is less than the failure strength, however the deformation rate decreases until the deformation become stable. The greater the applied stress is, the longer the deformation becoming stable could takes. The creep deformation is positively correlated with the deviatoric stress, meanwhile is inversely correlated to the effective confining pressure. The relationship of strain-stress and strain-time are nonlinear. It is found that it can be fitted with power function in mathematic. A four parameters new model is proposed to describe the relationship between creep strain and time, deviatoric stress as well as effective confining pressure. Compared with the traditional empirical Mesri creep model, it is unnecessary to perform the conventional triaxial test to determine the peak failure strength. Due to the fact that the required test works is reduced, the proposed new model in this study owns some priorities to some extent.

Keywords: calcareous sand in South China Sea; triaxial creep tests; creep properties; creep mathematical model

1 引 言

钙质砂是海洋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 CaCO_3 , 具有形状不规则、孔隙多、易破碎、易胶结等特点。随着我国海洋强国战略的实施, 我

收稿日期: 2018-07-13

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)。

This work was supported by Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, Grant No. XDA13010202

第一作者简介: 曹梦, 1993 年生, 硕士研究生, 从事南海钙质土蠕变特征方面的研究工作。

通讯作者: 叶剑红, 1981 年生, 博士, 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、地震稳定性方面的研究工作。Email: yejianhongcas@gmail.com

国在南海开展了珊瑚岛礁吹填建设工程。钙质砂是岛礁建设的主要地基材料,研究其力学属性对评价岛礁吹填陆域的稳定性、结构物在波浪、地震作用下的稳定性具有重要作用,当前已有不少学者开展了各种研究工作^[1-6]。

对于砂土蠕变,国内外学者已开展了一系列室内试验研究,包括一维固结蠕变和三轴蠕变试验。然而,目前对钙质砂的蠕变性质的研究还不是很全面,已有文献中,Lade^[7,8]对钙质砂进行三轴蠕变试验,分析了蠕变变形性质及应力变化对蠕变的影响;Lv^[9]对钙质砂和石英砂开展了蠕变对比试验,分析发现钙质砂蠕变变形明显要大于石英砂。但他们对钙质砂的蠕变性质的研究主要集中在现象分析方面,并未建立钙质砂的蠕变数学模型。土体常用的蠕变模型包括经验模型、元件模型和粘弹塑性模型三种,其中经验模型是根据土体实际受力的变形总结出应力-应变-时间的关系,具有形式简单、参数少易求解的优点,在实际工程中具有较大的应用价值^[10]。Singh 和 Mitchell^[11]基于三轴固结排水与不排水蠕变试验总结出著名的应变率-应力水平-时间形式的方程,对其积分后即可得到蠕变方程;Mesri^[12]在Kondner^[13]提出的应力-应变双曲线关系基础上提出应变-时间幂函数关系,建立了应力-应变-时间蠕变模型;Feda^[14]则认为可用双曲线描述土体蠕变中应变-时间关系;张云^[15,16]对上海砂和常州砂分别进行一维固结蠕变试验,提出了非线性蠕变模型,表明应变-时间与应变-应力关系均可用幂函数模拟;孙晓涵^[17]对西安细砂蠕变试验数据进行单对数坐标拟合,发现可用应变-时间单对数形式描述;刘业科^[18]通过软黏土三轴蠕变试验对 Singh-Mitchell 模型进行修正,以克服其无法描述零应力零应变的缺点,且使用双曲线描述应变与时间的关系使蠕变变形随时间收敛;张先伟^[19]比较了 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型的缺点,提出改进后的蠕变模型,实现了应力-应变关系的归一化。本文开展了不同围压下的我国南海钙质砂的三轴固结排水蠕变试验,基于试验数据并结合前人总结的经验模型,提出了一种新的适用于钙质砂蠕变的四参数数学描述模型。与经典的 Mesri 蠕变模型相比,所提出的数学蠕变模型不需要开展常规三轴压缩试验确定破坏时的峰值偏应力,减少了试验工作,具有一定的优势。

2 钙质砂三轴蠕变特性

2.1 钙质砂样性质及试验方案

所用钙质砂取自我国南海某岛礁,于 105℃ 烘

干 8 小时后进行筛分配样,砂样为圆柱形,直径 61.8 mm,高 120 mm。根据土工试验规范,剔除大粒径,取粒径不大于 5 mm 的钙质砂作为砂样,其基本物理力学性质参数见表 1,表中 G_s 表示土粒比重, ρ_{\max} 、 ρ_{\min} 分别表示最大、最小干密度, d_{60} 表示限定粒径, d_{30} 表示连续粒径, d_{10} 表示有效粒径, C_u 表示不均匀系数, C_c 表示曲率系数, C 表示粘聚力, Φ 表示内摩擦角。试验所用钙质砂样的干密度 ρ_d 均为 1.45 g/cm³。所有砂样均采用同一级配,其颗粒级配曲线见图 2。



图 1 蠕变试验钙质砂

Fig.1 Calcareous sand in creep test

表 1 钙质砂试样基本物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of the samples

G_s	ρ_{\max} / g/cm ³	ρ_{\min} / g/cm ³	C / kPa	Φ / °
2.81	1.73	1.27	49.7	43.6
d_{60} / mm	d_{30} / mm	d_{10} / mm	C_u	C_c
0.47	0.22	0.076	6.18	1.35

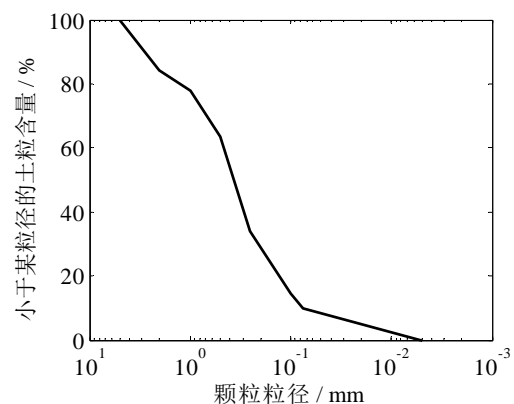


图 2 南海某岛礁珊瑚钙质砂颗粒级配曲线 ($C_u=6.18$, $C_c=1.35$)

Fig.2 Particle gradation curve of the calcareous sand from a coral reef reclamation island in South China Sea ($C_u=6.18$, $C_c=1.35$)

饱和钙质砂三轴排水蠕变试验在全自动三轴流变仪上进行，试验中偏应力在蠕变过程中保持恒定，外置位移传感器记录整个试验中位移的变化。为得到钙质砂在不同应力下的蠕变全过程曲线，试验采用的加载方式为分别加载，因此在制样和试验操作过程要使每个试样在各方面尽量保持一致，尽可能减少试验过程中的差异。每个试样的试验时间较长，一般为 10~20 天，观测到变形大致稳定为止，其稳定标准取变形量不大于 0.005 mm/d。蠕变实验前对干密度为 1.45 g/cm³ 的砂样进行常规三轴剪切试验，每种围压设置三组平行试验，经测定，有效围压为 100 kPa 时其破坏强度为 640±30 kPa，有效围压为 400 kPa 时破坏强度为 2100±30 kPa，蠕变荷载施加方案根据破坏强度的大小而确定，具体试验安排见表 2。试验步骤如下：(1) 制样。将砂样搅拌均匀，在压力室底座上分三层装样。(2) 饱和。初始饱和和反压饱和各 30min 后，测得 *B* 值大于 0.95 即可视作饱和。(3) 固结。施加有效围压后使其固结完成。(4) 蠕变。从零开始施加偏应力到预定值，之后保持恒定，直至试样变形稳定。

表 2 钙质砂蠕变试样荷载施加方案
Table 2 Test plan for the calcareous sands

有效围压 / kPa		偏应力 / kPa			
100	100	200	300	450	600
400	400	800	1200	1600	2000

2.2 试验结果分析

各试样在不同应力条件下的三轴排水蠕变曲线见图 3。饱和钙质砂的蠕变曲线形状基本类似，由于砂土的透水性较好(渗透系数 *k* 在 O(10⁻⁵cm/s) 量级)，在应力加载时颗粒间的孔隙水能够快速排出，超静孔隙水压力迅速消散，基本不存在像黏土蠕变过程中的超孔隙水压^[19]。如图 3 所示，轴向变形可分为应力加载到预定值的瞬时变形和应力恒定后的蠕变变形两阶段。当荷载达不到破坏强度时，钙质砂蠕变均为衰减蠕变，即蠕变速率随时间不断减小，最终变形趋于稳定，且试样所受的应力越大，稳定所需时间越长，最长稳定时间约为 18 天左右。分析蠕变数据可得到，各条件下的蠕变变形量与轴向变形总量的比值为 8%~19%。图 4 为钙质砂蠕变过程的应力-应变等时曲线，5 个时刻的应力-应变曲线十分相似，呈非线性关系。随着偏应力 *q* 的增大，5 条等时线有逐渐散开趋势，说明蠕变阶段的变形随偏应力的增大而增大。

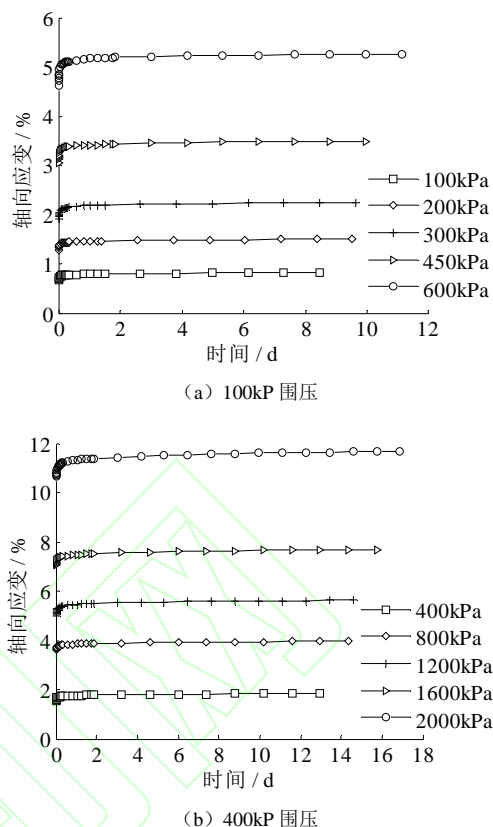


图 3 饱和钙质砂的蠕变-时间曲线
Fig.3 Creep-time curves of saturated calcareous sand

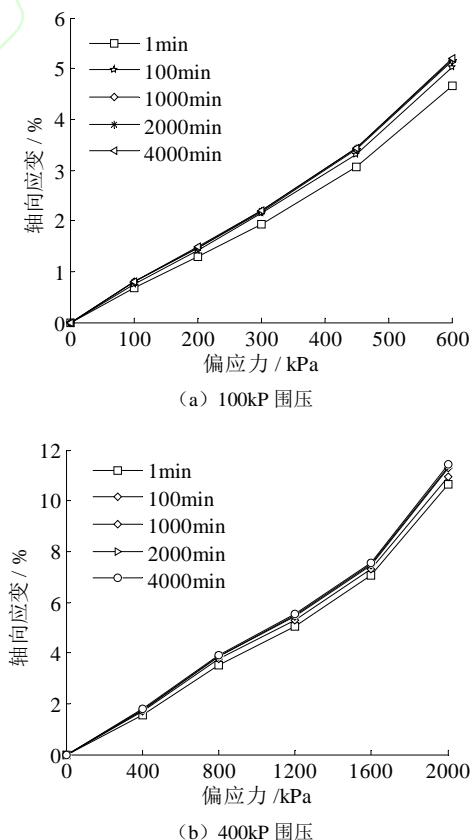


图 4 饱和钙质砂蠕变过程的应力-应变等时曲线
Fig.4 Isochronal curves of saturated calcareous sand in creep process

3 钙质砂蠕变四参数数学模型

针对土体的室内蠕变特征，很多学者开展了一些试验研究，总结出了不少有价值的经验方程。一般认为土体蠕变应变是应力和时间的函数，且应力-应变关系和应变-时间关系分别可以用双曲线、幂函数、指数函数等来描述。可根据不同土样的试验数据来选择最合适的函数形式。目前，虽然有学者对钙质砂蠕变开展了试验研究工作，对其蠕变特征有了进一步了解^[7-9]，但并未明确给出可以描述钙质砂蠕变-应力-时间的数学公式，本研究工作中着重解决这一问题。

砂土的蠕变变形受土的结构、受力和时间的影响，由于砂样的结构性具有很大的随机性，现有条件下难以进行准确定量描述；试验过程中尽量采用同一设备，同一实验人员，同一操作过程保证各个试验样品的统一性，避免样品的结构性的显著影响。基于此，本文只讨论受力和时间因素，受力包括施加的有效围压和偏应力，构建蠕变方程

$$\varepsilon = f(q, \sigma'_3, t) \quad (1)$$

将轴向应变-时间关系用双对数坐标表示，如图5所示，可发现同一围压不同荷载下应变-时间是一组近似平行的直线，线性相关度均在0.95以上，因此应变-时间可表示为

$$\ln \varepsilon - \ln \varepsilon_r = \lambda (\ln t - \ln t_r) \quad (2)$$

即

$$\varepsilon = \varepsilon_r \left(\frac{t}{t_r} \right)^\lambda \quad (3)$$

式(1)-(3)中， ε 为轴向应变； q 为偏应力； σ'_3 为有效围压； t 为时间； t_r 为参考时间，此处取 $t_r = 1\text{min}$ ； ε_r 为参考应变，即试样在 t_r 时刻的应变； λ 是与砂土结构性质相关的无量纲参数，其数值上等于双对数坐标中应变-时间所拟合直线的斜率，同一围压下斜率相近，取平均值即可。

经试验数据分析，发现饱和钙质砂参考变形 ε_r 与所施加的偏应力呈正相关关系，与有效围压呈反相关关系，据此建立以下关系式

$$\varepsilon_r = K \frac{(q/P_a)^m}{(\sigma'_3/P_a)^n} \quad (4)$$

式(4)中， P_a 为大气压，取值101.3kPa，起到无维化作用； K 、 m 、 n 均为与砂土结构性质相关的参数，均为无量纲参数。

将 $t_r = 1\text{min}$ 时的参考轴向应变 ε_r 与偏应力在双对数坐标上表示出来，可以用直线进行拟合，直线斜率则为 m ，如图6所示；拟合度均在0.99以上。

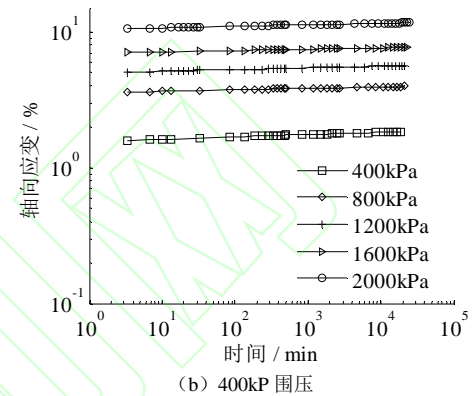
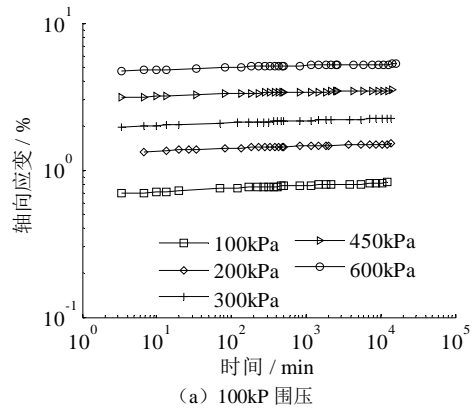


图5 双对数坐标中钙质砂蠕变-时间曲线
Fig.5 Creep-time curves of calcareous sand in log-log coordinates

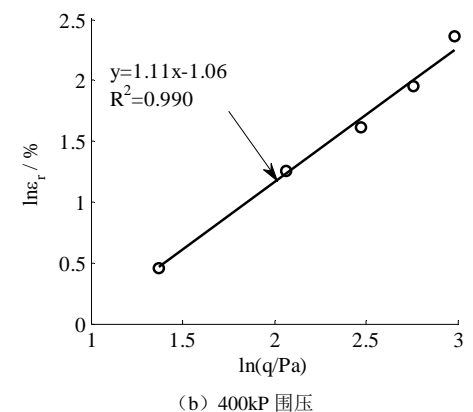
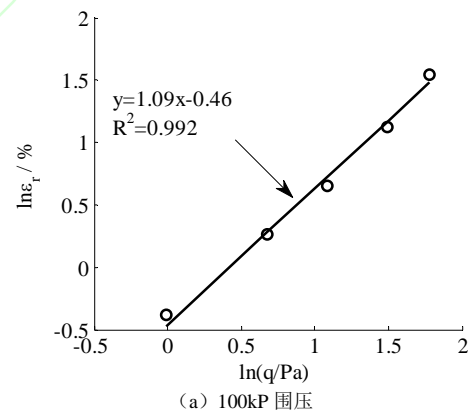


图6 双对数坐标系参考应变-偏应力线性拟合曲线
Fig.6 Reference strain-deviatoric stress linear fitting curves in log-log coordinates

而且两种围压下所拟合直线的斜率十分接近，分别为 1.09 和 1.11，因此可将 m 视作一个常数，取其平均值 1.10。参数 n 和 K 则根据以下公式求解

$$\left. \begin{aligned} \frac{K}{(100/101.3)^n} &= e^{-0.46} \\ \frac{K}{(400/101.3)^n} &= e^{-1.06} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据式 (1-4)，可以得到一个四参数钙质砂蠕变变形数学描述公式

$$\varepsilon = K \frac{(q/P_a)^m}{(\sigma_3/P_a)^n} \left(\frac{t}{t_r}\right)^\lambda \quad (6)$$

此模型中包含 K 、 m 、 n 和 λ 四个参数，根据蠕变试验数据，所求解得的南海钙质砂参数见表 3。将试验所得曲线和公式 (6) 预测的曲线进行比较，如图 7 所示，可发现除了有效围压 400 kPa、偏应力 2 000 kPa 的试样预测值偏小外，其他情况下公式 (6) 的预测均较好。可能原因有：一方面是由于有效围压 400 kPa 的试样其破坏强度接近 2 000 kPa，所以在施加 2 000 kPa 时试样处于即将被剪坏的不稳定状态；另一方面试验本身存在一定的随机性问题，因为蠕变试验的加载方式为分别加载，在装样过程中由于各种因素的影响不可能保证各个试样都完全一致，且蠕变模型参数 λ 和 m 取的都是 5 个样品的平均值，使得公式 (6) 与少量几个样品的试验数据出现一定的偏离的现象是完全在情理之中。

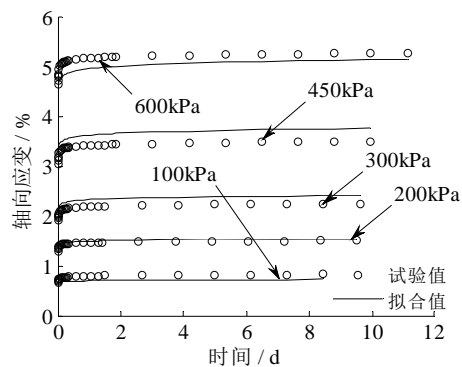
表 3 蠕变模型参数表
Table 3 Parameters of the creep model

有效围压	K	m	n	λ
100 kPa	0.628	1.10	0.433	0.016
400 kPa				0.012

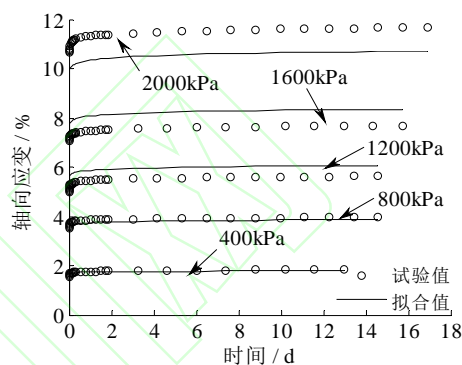
经典的 Mesri 蠕变模型在确定参数时，需要额外开展常规三轴试验，确定样品的峰值强度，以计算蠕变偏应力的应力水平参数 D ；而本文所提出的蠕变模型公式 (6) 在应用时不需要额外开展常规三轴试验，而且确定参数时，试验数据的拟合程度都非常高，如图 5 中达到 $R^2 > 0.99$ ，所以本文所提出的蠕变模型减少了试验工作量，且数学描述精度较高，具有一定的优势。

4 颗粒破碎分析

Lv^[9]和朱长歧^[3]等人为观察钙质砂的微观结构，均对钙质砂颗粒进行了电镜扫描试验，发现砂粒具有内孔隙丰富、形状不规则、多棱角的特点；此外，钙质砂的矿物成分主要为文石和方解石，其硬度远比石英砂低，因此与普通陆源砂相比，钙质砂表现



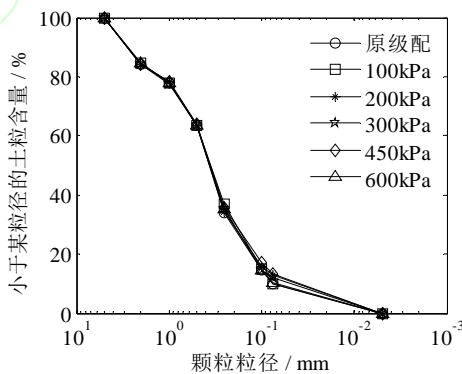
(a) 100kPa 围压



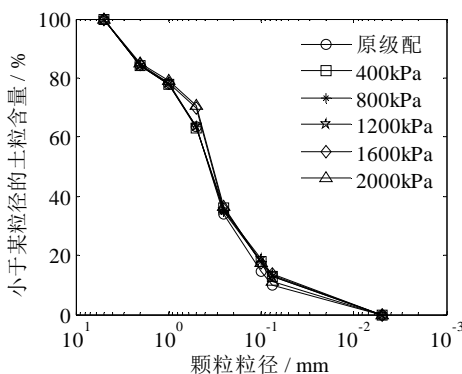
(b) 400kPa 围压

图 7 钙质砂蠕变试验数据与蠕变模型预测比较

Fig.7 Comparisons between creep test data and predicted value of creep model for calcareous sand



(a) 100kPa 围压



(b) 400kPa 围压

图 8 试验前后砂土粒度成分比较

Fig.8 Comparison of gradation curves before and after tests

出易压缩、易破碎、强度低等性质。为观察蠕变试验前后钙质砂颗粒破碎情况,对拆样后的砂土进行了烘干及筛分,试样前后砂土粒度成分比较见图 8。从筛分曲线可看出,若忽略筛分过程中可能产生的砂子少量遗失及称量时产生的误差,在围压 100 kPa 时,颗粒的破碎表现的极不明显,仅粒径小于 0.1 mm 的颗粒表现出微量破碎,因此低围压下引起钙质砂的蠕变因素主要为颗粒间的移动重组;400 kPa 的围压下,钙质砂颗粒破碎量亦不多,偏应力不大于 1200 kPa 的试样中粒径小于 0.25 mm 的砂粒有少许破碎,而偏应力为 1600 kPa 和 2000 kPa 的试样中粒径 0.25~1 mm 的颗粒也表现出一定的颗粒破碎,表明围压较高时钙质砂蠕变不仅仅是由于颗粒间的错位重组,还包括一定量颗粒的破碎。

5 结 论

钙质砂作为海洋建设常用的地基材料,研究其蠕变性质可为评价岛礁结构物的长期沉降提供一定依据。本文开展了室内饱和钙质砂三轴排水蠕变试验,从宏观上研究了钙质砂蠕变特性,获得了如下认识:

(1) 钙质砂在恒定应力作用下发生非线性蠕变,当所施加的应力小于破坏强度时,蠕变均为衰减型,随时间增加,变形量不断增加,但变形速率不断减小直至变形稳定,且受力越大蠕变稳定所需时间越长。蠕变变形量占轴向变形总量的 8%~19%,与所受偏应力正相关、与有效围压反相关。

(2) 钙质砂蠕变过程中的应变-应力-时间关系均为非线性,可用幂函数进行描述。基于此,本文提出了一种蠕变应变与时间、偏应力和有效围压相关的四参数新的蠕变模型,与传统的 Mesri 模型相比,将不同围压下的蠕变变形统一求解,且在实际应用时无需进行额外的常规三轴试验以确定应力水平参数 D ,有效降低了确定蠕变数学模型参数的工作量,且描述精度较高,具有一定的优势。

(3) 本试验钙质砂蠕变过程中颗粒会发生一定破碎,但破碎量并不大。100 kPa 围压下颗粒破碎不明显,蠕变变形主要由颗粒移动重组引起;400 kPa 围压下颗粒存在少量破碎,且偏应力越高破碎程度越大。

参 考 文 献

[1] 王新志,汪稔,孟庆山. 钙质砂室内荷载试验研究[J]. *岩土力学*. 2009, 30(1): 147-151.
WANG Xin-zhi, Wang Ren, MENG Qing-shan. Study of

plate load test of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 147-151.

- [2] 黄宏翔,陈育民,王建平,等. 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 2082-2088.
HUANG Hong-xiang, CHEN Yu-min, WANG Jian-ping, et al. Ring shear tests on shear strength of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2018, 39(6): 2082-2088.
- [3] 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): 1831-1836.
ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 1831-1836.
- [4] 汪轶群,洪义,国振,等. 南海钙质砂宏观破碎力学特性[J]. *岩土力学*, 2018, 39(1): 199-206.
WANG Yi-qun, HONG Yi, GUO Zhen, et al. Micro-and macro-mechanical behavior of crushable calcareous sand in South China Sea[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 199-206.
- [5] 王新志,王星,刘海峰,等. 珊瑚礁地基工程特性现场试验研究[J]. *岩土力学*. 2017, 38(7): 2065-2070.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, LIU Hai-feng, et al. Field test study of engineering behaviors of coral reef foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7): 2065-2070.
- [6] Habib Shahnazari, Reza Rezvani. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sand: An experimental study[J]. *Engineering Geology*, 2013, 159: 98-105.
- [7] P. 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.
- [8] P. V. Lade. Creep, stress relaxation, and rate effects in sand[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria: IOS Press, 2009.
- [9] Yaru Lv, Feng Li, Yawen Liu, et al. Comparative study of coral sand and silica sand in creep under general stress states[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1601-1611.
- [10] 温亚楠,朱鸿鹄,张诚成,等. 砂土蠕变特性研究现状及展望[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(增刊): 284-291.

- WEN Yanan, ZHU Honghu, ZHANG Chengcheng, et al. Current stature and trends on the study of sand creep[J]. **Journal of Engineering Geology**. 2015, 23(suppl.): 284-291.
- [11] Singh A., Mitchell J. K. . General stress-strain-time function for soils [J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE. 1968, 94(1): 21 -46.
- [12] G. Mesri, E. Febres-Cordero, D. R. Shields, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays[J]. **Geotechnique**. 1981, 31(4): 537—552.
- [13] Robert L. Kondner. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. **American Society of Civil Engineers**. 1963, 89(1): 115—144.
- [14] FEDA J. Creep of soils and related phenomena[M]. **Elsevier Science**, 1992.
- [15] 张云, 薛禹群, 施小清, 等. 饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(12): 1869—1873.
- ZHANG Yun, XUE Yu-qun, SHI Xiao-qing, et al. Study on nonlinear creep model for saturated sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1869—1873.
- [16] 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): 1226—1231.
- ZHANG Yun, XUE Yu-qun, WU Ji-chun, et al. Experimental research on creep of Shanghai sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1226—1231.
- [17] 孙晓涵. 西安地面沉降与砂土蠕变关系初探[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- SUN Xiaohan. The relationship between sand creep characteristic and land subsidence of Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [18] 刘业科, 邓志斌, 曹平, 等. 软黏土的三轴蠕变试验与修正的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2012, 43(4): 1440—1446.
- LIU Ye-ke, DENG Zhi-bin, CAO Ping, et al. Triaxial creep test and modified Singh-Mitchell creep model of soft clay[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(4): 1440—1446.
- [19] 张先伟, 王常明. 饱和软土的经验型蠕变模型[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2011, 42(3): 791—796.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. Empirical creep model for saturated soft soil[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(3): 791—796.