

DOI: 10.11779/CJGE2020S2045

饱和珊瑚砂三轴蠕变特性及经验模型

薛 鹏¹, 周先齐², 蔡燕燕^{1*}, 马林建³, 廖仁国¹, 俞 缙¹

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024;
3. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 对饱和珊瑚砂进行不同围压和偏应力水平下的三轴排水蠕变试验, 结果显示: 围压和偏应力对蠕变变形影响显著, 具体表现为偏应力较大或围压较小时, 蠕变变形变量较大, 蠕变现象明显。采用传统的 Singh-Mitchell 及 Mesri 蠕变模型描述珊瑚砂蠕变特性, 发现两者在高偏应力条件下模型计算结果与试验结果相差较大, 无法准确描述珊瑚砂的蠕变行为。通过分析模型与试验结果误差较大的原因, 并将应力 - 应变及应变 - 时间关系均采用双曲线函数表示, 建立了一个新的蠕变模型, 且新模型预测结果与试验结果一致性较好。

关键词: 珊瑚砂; 蠕变特性; 蠕变模型

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0255-06

作者简介: 薛 鹏(1993—), 男, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: 18013086033@stu.hqu.edu.cn。

Triaxial creep characteristics and empirical model for saturated coral sand

XUE Peng¹, ZHOU Xian-qi², CAI Yan-yan¹, MA Lin-jian³, LIAO Ren-guo¹, YU Jin¹

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: The triaxial drainage creep tests are performed on saturated coral sand under different cell pressures and deviator stress levels. The results show that the cell pressure and deviator stress have significant effects on creep deformation. The specific performance is that when the deviator stress is large or the cell pressure is small, the creep deformation is large, and the creep phenomenon is obvious. The traditional Singh-Mitchell and Mesri creep models are used to describe the creep characteristics of coral sand. It is found that the calculated results of the two models are quite different from the test results under high deviator stress conditions, which cannot accurately describe the creep behavior of the coral sand. By analyzing the reasons for the large error between the model and the test results, the stress-strain and strain-time relationships are expressed by hyperbolic functions, and a new creep model is established. The predicted results of the new model are in good agreement with the test results.

Key words: coral sand; creep characteristic; creep model

0 引言

珊瑚砂广泛分布于中国南海, 富含碳酸盐, 具有内孔隙、高压缩性及砂粒易破碎等特点^[1-4], 是特殊的岩土材料。实际岛礁建设中, 珊瑚砂地基的长期变形是关注的重点, 过量的砂基变形会对结构物服役能力产生不利问题。众所周知, 地基变形主要包括弹塑性变形和蠕变变形, 学者们已发展了不少本构模型预测砂基的弹塑性变形^[5-6], 但是对珊瑚砂的蠕变特性和理论模型研究尚不充分, 严重影响了人们对珊瑚砂蠕变行为的理解和地基长期变形的预测能力^[7-10]。

元件模型和经验模型常用来描述土体的蠕变特性。元件模型概念直观, 物理意义明确, 但模型参数

较多, 求取困难^[11]。经验模型参数少, 可准确描述土体的蠕变特性, 具有较高的工程应用价值^[12]。已有一些学者通过三轴蠕变试验分析土的蠕变特性, 并建立经验模型, 如 Singh-Mitchell 模型^[13]与 Mesri 模型^[14]等。Lin 等^[15]比较 Singh-Mitchell 模型与 Mesri 模型的区别, 提出考虑超固结因素的蠕变方程, 拓展了偏应力水平的适用范围。王常明等^[16]发现软土具有非线性

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978292, 51774147); 厦门市科技计划产学研协同创新项目(3502Z20193040); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划项目(18013086033)

收稿日期: 2020-08-07

*通信作者 (yycai@hqu.edu.cn)

蠕变特性，并将 Singh-Mitchell 蠕变模型中的应力-应变关系修正为双曲线，建立了相应的蠕变模型。卢萍珍等^[17]在总结 Singh-Mitchell 模型与 Mesri 模型的基础上，提出采用幂函数表示应力-应变关系，采用双曲线表示应变-时间关系的蠕变方程。

前述研究多针对软土的蠕变特性展开讨论，其蠕变模型是否适用于珊瑚砂，有待深入研究。因此，Lade 等^[18-19]通过三轴蠕变试验，研究钙质砂蠕变变形规律并分析变形和应力对其蠕变的影响；Lü 等^[20]在同一条件下开展石英砂与钙质砂蠕变对比试验，发现钙质砂的变形明显比石英砂的要大。张小燕等^[21]开展了珊瑚砂高压一维蠕变试验。研究结果表明：在高应力下，颗粒细化滑移填充孔隙引起的变形是造成蠕变的主要原因。以上研究多从珊瑚砂蠕变的力学性质入手，并未建立蠕变模型，从而无法预测珊瑚砂长期蠕变变形趋势。鉴此，本文以饱和珊瑚砂为研究对象，开展三轴蠕变试验，得到珊瑚砂蠕变变形规律。利用 Singh-Mitchell 模型与 Mesri 模型对试验数据进行拟合，并分析产生误差的原因。最后利用双曲线描述应力-应变关系及应变-时间关系，提出了一种预测精度较高的珊瑚砂蠕变经验模型。

1 试验材料及试验方案

1.1 钙质砂基本物理性质

试验所用珊瑚砂取自中国南海某地，其粒径范围为 5 mm 以下，级配曲线如图 1 所示，基本物理性质如表 1 所示。

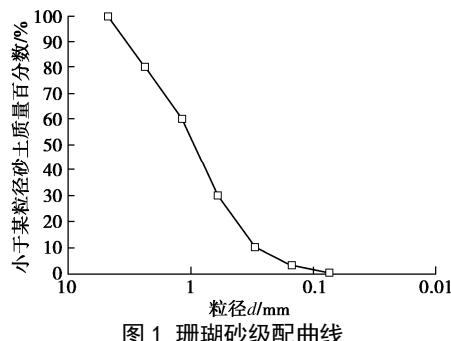


Fig. 1 Grain-size distribution curve of coral sand

表 1 珊瑚砂基本物理指标

Table 1 Basic physical indice of coral sand

G_s	e_{min}	e_{max}	C_u	C_c
2.74	0.860	1.505	3.39	1.02

1.2 试验方案

试样为圆柱形土样，直径为 61.8 mm，高度为 125 mm，干密度为 1.38 g/cm^3 。珊瑚砂颗粒内部有许多微小孔隙造成试样难以饱和，故依次采用二氧化碳饱和、水头饱和及反压饱和的方法对珊瑚砂进行饱和。根据

Skempton 的 B 值法确定饱和度， B 值大于 0.95 时饱和度达到要求。试验采用 FLSY30-1 型全自动三轴测试仪，最大轴向荷载为 30 kN，误差精度在 $\pm 0.2\%$ 范围内，围压设置为 100, 200, 300 kPa，采用分别加载开展蠕变试验。当变形速率不大于 0.005 mm/d 时即认为蠕变稳定，终止试验。具体加载方案如表 2 所示。

表 2 珊瑚砂蠕变试验加载方案

Table 2 Loading schemes of creep tests on coral sand

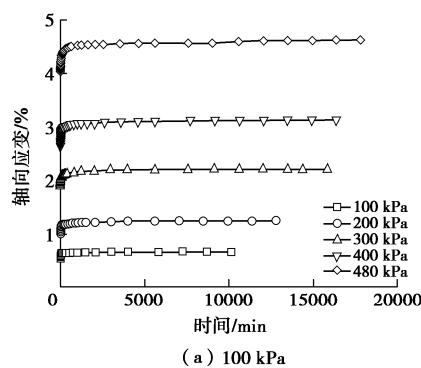
有效围压/kPa	偏应力/kPa
100	100, 200, 300, 400, 480
200	200, 400, 600, 800, 950
300	300, 500, 700, 1000, 1300

2 试验结果与分析

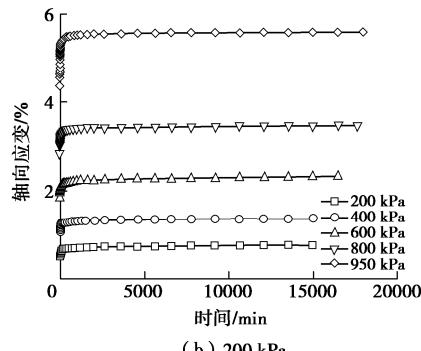
2.1 应变-时间关系曲线

图 2 为珊瑚砂轴向应变与时间关系曲线。珊瑚砂蠕变变形呈现典型的两个阶段，即初始弹性变形阶段和稳定蠕变变形阶段。珊瑚砂试样结构比较疏松，在荷载作用下，颗粒间孔隙迅速减小，产生较大的瞬时变形，随着时间推移，孔隙减小，颗粒之间可调整空间逐渐缩小，移动阻力增加，变形逐渐缓慢，在 1000~2500 min 后，变形趋于稳定。

从图 2 可以看出，随着偏应力增加，珊瑚砂瞬时弹塑性变形量逐渐增加，变化梯度也呈现上升趋势。以围压 100 kPa 为例，偏应力为 100, 200, 300, 400, 480 kPa 产生的初始弹塑性变形量分别为 0.6%, 1.2%, 2.1%, 3.0%, 4.4%，约占总变形的 80%，表明珊瑚砂蠕变变形主要为弹塑性变形。从图中还可以看出，变形达到稳定状态所需时间与偏应力水平呈正比关系。



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa

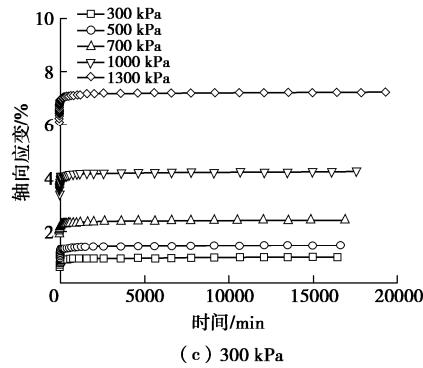


图 2 不同围压作用下珊瑚砂应变 - 时间曲线

Fig. 2 Strain-time curves of coral sand under different cell

pressures

2.2 应力 - 应变等时曲线

图 3 为 300 kPa 条件下珊瑚砂应力 - 应变等时曲线。可以看出, 除 $t=0$ min 外, 其它时刻曲线基本完全一致。应变随应力增加呈现非线性增加趋势, 这也表明后续构建模型时应选取非线性蠕变模型。

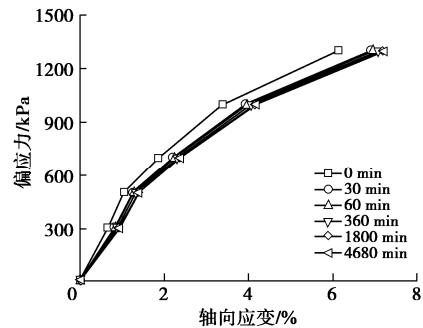


图 3 珊瑚砂应力 - 应变等时曲线

Fig. 3 Stress-strain isochronous curves of coral sand

3 蠕变模型

3.1 Singh-Mitchell 蠕变模型

Singh-Mitchell 模型采用幂函数表示应变 - 时间关系、指数函数表示应力 - 应变关系, 模型表达式为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \frac{A}{1-m} e^{\alpha \bar{D}} (t)^{1-m} \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(t)$ 为试样蠕变应变(%); ε_0 为初始应变(%); $m \neq 1$, $\bar{D} = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为偏应力水平, 其中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为三轴排水剪切试验得到的抗剪强度(kPa); t 为蠕变时间(min); A , α , m 为待定参数。式中 $1-m$ 为 $\ln \varepsilon - \ln t$ 曲线斜率, 具体求解方式如下:

忽略初始应变, 当 $t=1$ min 时, 式(1)可改写为

$$\varepsilon_1 = \frac{A}{1-m} e^{\alpha \bar{D}} \quad (2)$$

对式(2)两边分别取自然对数有

$$\ln \varepsilon = \alpha \bar{D} + \ln \frac{A}{1-m} \quad (3)$$

图 4 为 $\ln \varepsilon - \ln t$ 曲线, 通过拟合得各曲线斜率为 0.0269, 0.0217, 0.0166, 0.0147, 0.0113, 平均值为

0.0187, 则 m 值为 0.9812。

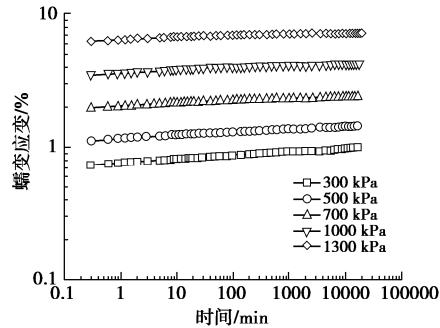


图 4 应变 - 时间双对数关系曲线

Fig. 4 Strain-time double-logarithmic relationship curves

以围压 300 kPa 试验结果为例, 取 $t=1$ min 绘制 $\ln \varepsilon_1 - \bar{D}$ 关系曲线, 如图 5 所示。通过线性拟合可得参数 $A=0.0077$, $\alpha=2.8997$ 。则 Singh-Mitchell 蠕变方程可表示为

$$\varepsilon_1 = 0.411 e^{2.8997 \bar{D}} t^{0.0187} \quad (4)$$

图 6 比较了 Singh-Mitchell 模型理论值与试验实际值。可以看出, 偏应力较小时, 模型可以较好地描述珊瑚砂蠕变变形, 当偏应力大于等于 1000 kPa 时, 理论值远高于试验值, 当偏应力达到 1300 kPa 时, 误差达到了 20%, 表明该模型在高偏应力条件下适用性较差。

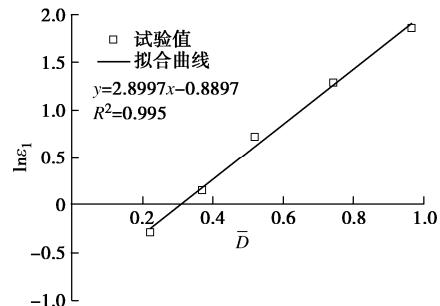
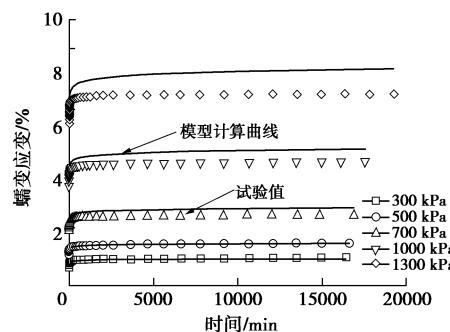
图 5 $\ln \varepsilon - \bar{D}$ 关系曲线Fig. 5 $\ln \varepsilon - \bar{D}$ relationship curve

图 6 试验曲线与 Singh-Mitchell 模型曲线对比图

Fig. 6 Comparison of fitting curves between tests and Singh-Mitchell model

3.2 Mesri 蠕变模型

Mesri 模型采用幂函数表示应变 - 时间关系, 双

曲线函数表示应力 - 应变关系, 模型表达式为

$$\varepsilon = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{E_u} \right] \frac{\bar{D}}{1 - R_f \bar{D}} \left(\frac{t}{t_r} \right)^\lambda , \quad (5)$$

可简化为

$$\varepsilon = \left(\frac{2S_u}{E_u} \right) \frac{\bar{D}}{1 - R_f \bar{D}} \left(\frac{t}{t_r} \right)^\lambda . \quad (6)$$

对 $t_r=1$ min 时不同偏应力水平的应变进行拟合, 结果如图 7 所示, 即可确定模型参数, 如表 3 所示。则此状态下的 Mesri 模型表达式为

$$\varepsilon = 1.9394 \frac{\bar{D}}{1 - 0.8691 \bar{D}} t^{0.0187} . \quad (7)$$

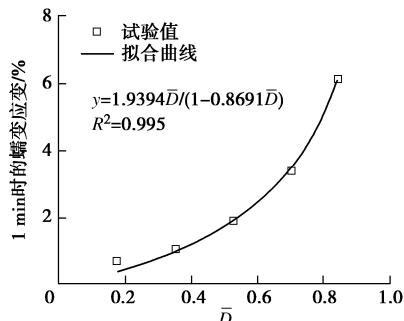


图 7 1 min 时的蠕变应变与应力水平的关系曲线

Fig. 7 Relationship between creep strain and stress level at 1 min

表 3 围压 300 kPa 下 Mesri 蠕变模型参数取值

Table 3 Parameters of Mesri creep model under cell pressure of 300 kPa

围压/kPa	t_r/min	$2S_u/E_u$	R_f	λ
300	1	1.9394	0.8691	0.0187

图 8 为 Mesri 模型理论值与试验值对比图, 可以看出, 当偏应力低于 700 kPa, 理论值远低于试验值, 当偏应力高于 1000 kPa 时, 理论值高于试验值, 误差较大, 表明 Mesri 模型不适合描述珊瑚砂蠕变变形规律。

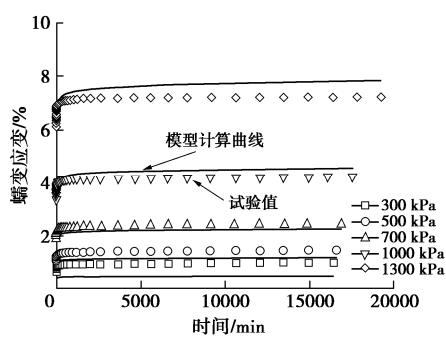


图 8 试验曲线与 Mesri 模型曲线对比图

Fig. 8 Comparison of fitting curves between tests and Mesri model

3.3 珊瑚砂蠕变经验模型

Singh-Mitchell 模型及 Mesri 模型应变 - 时间关系均采用幂函数表示, 而幂函数形式下应变随着时间发展呈递增趋势, 难以描述珊瑚砂稳定蠕变趋势, 而采

用双曲线描述应力 - 应变及应变 - 时间关系较为合适。因此, 构建珊瑚砂蠕变:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{aD}{a - bD} \frac{t}{T + t} . \quad (8)$$

式中 $D = \sigma_1 - \sigma_3$ 为应力偏差; $\sigma = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 为平均应力; ε_0 为初始应变; t 为时间; a , b , T 为待定参数。

当 $t=0$ 时, $\varepsilon = \varepsilon_0$; 令: $\varepsilon_0 = 0$, 则蠕变表达式为

$$\varepsilon = \frac{aD}{a - bD} \frac{t}{T + t} . \quad (9)$$

(1) 参数的确定

当 $t = \infty$ 时, 代入式 (9) 中, 得

$$\varepsilon_\infty = \frac{aD}{\sigma - bD} . \quad (10)$$

绘制 $t = \infty$ 时 $\sigma\varepsilon_\infty/D - \varepsilon_\infty$ 关系曲线, 见图 9。曲线截距为参数 a , 斜率为参数 b , 则: $a=0.7689$, $b=0.4548$ 。

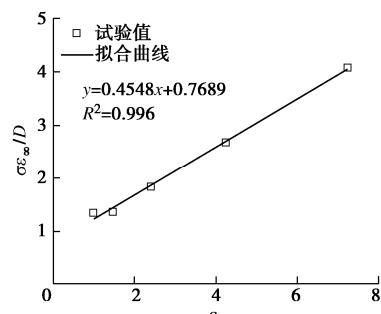


图 9 试样的 $\sigma\varepsilon_\infty/D - \varepsilon_\infty$ 关系曲线

Fig. 9 $\sigma\varepsilon_\infty/D - \varepsilon_\infty$ curve of sample

式 (9) 移项可得

$$\frac{t}{\varepsilon} = \frac{1}{\left(\frac{aD}{\sigma - bD} \right)} t + \frac{T}{\left(\frac{aD}{\sigma - bD} \right)} . \quad (11)$$

绘制不同偏应力水平 $t/\varepsilon - t$ 曲线如图 10, 每级荷载对应的 a , b , D , σ 均已知, 得到平均值 $T=17.2332$ min, 因此, 蠕变模型表达式为

$$\varepsilon = \frac{0.7689D}{\sigma - 0.4548D} \frac{t}{17.2332 + t} . \quad (12)$$

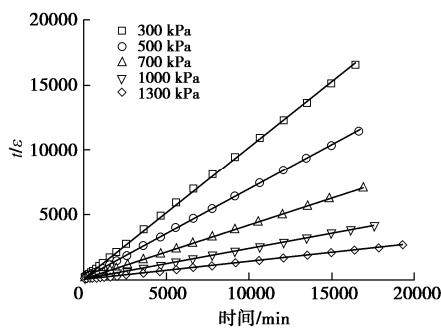


图 10 试样的 $t/\varepsilon - t$ 关系曲线

Fig. 10 $t/\varepsilon - t$ curve of sample

(2) 模型验证

模型计算曲线与试验曲线对比如图 11 所示。

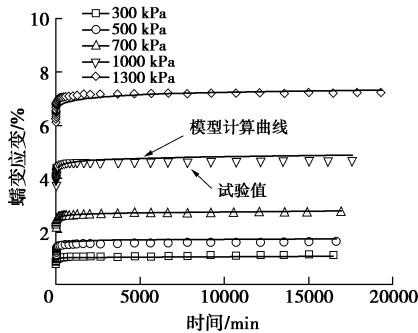


图 11 模型计算曲线与试验曲线对比图

Fig. 11 Comparison between fitting and experimental results

由图 11 可得, 新建立模型计算曲线与试验曲线趋势基本一致, 蠕变模型的蠕变增长速度随时间的增加而不断减小, 并趋于稳定, 符合珊瑚砂衰减蠕变的变形规律。

图 12 对比了 Singh-Mitchell 模型、Mesri 模型、本文构建的珊瑚砂蠕变模型。从图中可以看出, 与 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型相比, 无论在低偏应力水平还是较高的偏应力水平, 本文构建模型都能够描述珊瑚砂两阶段蠕变变形特性。

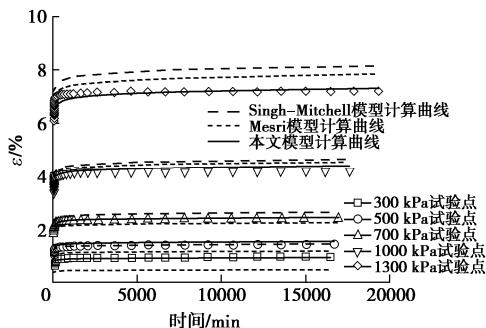


图 12 3 种模型计算曲线及试验曲线对比图

Fig. 12 Comparison between fitting curves and three models

4 结 论

(1) 开展了不同围压和偏应力条件下珊瑚砂固结排水蠕变试验, 得到珊瑚砂蠕变呈典型的两个阶段。分析了 Singh-Mitchell、Mesri 蠕变模型实用性, 得到前者不适合应用于较高的偏应力试验条件, 后者在各个偏应力条件下均存在一定偏差。

(2) 构建了珊瑚砂蠕变模型, 通过与试验结果对比分析可知, 该模型优于 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型。特别地, 当偏应力水平大于或等于 1000kPa 时, 本文构建蠕变模型对于珊瑚砂蠕变特性描述更准确。另外, 该模型只有 3 个待定参数, 计算简便。

参考文献:

- [1] 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]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6):

1242 - 1251. (YE Jian-hong, CAO Meng, LI Gang. A preliminary study on the creep characteristics of the undisturbed calcareous sand of the reclamation islands and reefs in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1242 - 1251. (in Chinese))

- [2] 彭宇, 丁选明, 肖杨, 等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2663 - 2672. (PENG Yu, DING Xuan-ming, XIAO Yang, et al. Research on the breaking characteristics of calcareous sand particles based on dyeing calibration and image particle segmentation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2663 - 2672. (in Chinese))
- [3] 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. Annular shear test on the shear strength characteristics of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2082 - 2088. (in Chinese))
- [4] 朱长岐, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831 - 1836. (ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Analysis of the structural characteristics of pores in calcareous sand particles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831 - 1836. (in Chinese))
- [5] 袁庆盟, 孔亮, 赵亚鹏. 考虑水合物填充和胶结效应的深海能源土弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 1 - 10. (YUAN Qing-meng, KONG Liang, ZHAO Ya-peng. Elastoplastic constitutive model of deep-sea energy soil considering hydrate filling and cementing effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 1 - 10. (in Chinese))
- [6] YAO Yang-ping, LIU Lin, LUO Ting, et al. Unified hardening (UH) model for clays and sands[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 326 - 343.
- [7] 王艳芳, 蔡正银, 蔡燕燕, 等. 饱和土排水蠕变特性对比研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(5): 985 - 997. (WANG Yan-fang, CAI Zheng-yin, CAI Yan-yan, et al. Comparative study on the creep characteristics of saturated soil drainage[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2017, 25(5): 985 - 997. (in Chinese))
- [8] 王艳芳, 蔡燕燕, 蔡正银. 饱和砂土蠕变特性实验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 31 - 37. (WANG Yan-fang, CAI Yan-yan, CAI Zheng-yin. Experiment on the creep characteristics of saturated sand[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science Edition), 2017, 38(1): 31 - 37. (in Chinese))

- University (Natural Science Edition), 2017, **38**(1): 31 - 37. (Chinese))
- [9] YIN J H, GRAHAM J. Elastic visco-plastic modeling of one-dimensional consolidation[J]. *Géotechnique*, 1996, **46**: 515 - 527.
- [10] 殷建华. 等效时间和岩土材料的弹黏塑性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(2): 124 - 128. (YIN Jian-hua. Equivalent time and elasto-viscoplastic model of geotechnical materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, **18**(2): 124 - 128. (in Chinese))
- [11] 袁 静, 龚晓南, 益德清. 岩土流变模型的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(6): 772 - 779. (YUAN Jing, GONG Xiao-nan, YI De-qing. Comparative research on rheological model of rock and soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, **20**(6): 772 - 779. (in Chinese))
- [12] 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 of saturated soft soil[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2011, **42**(3): 791 - 796. (in Chinese))
- [13] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for clay[J]. *Journal of the Clay Mechanics and Foundation Division*, 1968, **94**(SM1): 21 - 46.
- [14] MESRI G, REBRES-CORDERO E, SHIELDS D R, et al. Shear stress-strain-time behaviour of clays[J]. *Géotechnique*, 1981, **31**: 537 - 552.
- [15] LIN H D, WANG C C. Stress-strain-time function of clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(4): 289 - 296.
- [16] 王常明, 王 清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 227 - 230. (WANG Chang-ming, WANG Qing, ZHANG Shu-hua. Creep characteristics and creep model of coastal soft soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(2): 227 - 230. (Chinese))
- [17] 卢萍珍, 曾 静, 盛 谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(4): 1041 - 1044, 1052. (LU Ping-zhen, ZENG Jing, SHENG Qian. Research on creep test of soft clay and its empirical model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(4): 1041 - 1044, 1052. (Chinese))
- [18] LADE P V, CARL D, LIGGIO J, et al. Strain rate, creep, and stress drop-creep experiments on crushed coral sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(7): 941 - 953.
- [19] LADE P V. Creep, stress relaxation, and rate effects in sand[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, Alexandria.
- [20] LÜ Y R, LI F, LIU Y W, 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.
- [21] 张小燕, 蔡燕燕, 王振波, 等. 珊瑚砂高压力下一维蠕变分形破碎及颗粒形状分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1573 - 1580. (ZHANG Xiao-yan, CAI Yan-yan, WANG Zhen-bo, et al. One-dimensional creep fractal fracture and particle shape analysis of coral sand under high pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(5): 1573 - 1580. (Chinese))

(编校: 黄贤沙)