

DOI: 10.11779/CJGE20230522

饱和珊瑚砂体应变发展模式与预测模型试验研究

王路阳¹, 吴琪^{*1,2}, 周正龙¹, 张鑫磊¹, 王炳辉³, 陈国兴¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 3. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏镇江 212100)

摘要: 珊瑚砂具有较好的排水条件, 地震、波浪荷载作用下饱和珊瑚砂产生的排水变形易引起海床和附近结构物的破坏。利用GDS循环三轴仪, 针对南沙岛礁饱和珊瑚砂试样进行了一系列循环排水加载试验, 以探究细粒含量FC、相对密度 D_r 及循环应力比CSR对饱和珊瑚砂变形特性的影响。试验结果表明, 饱和珊瑚砂的累积体应变 ε_{vp} 的发展速率和变形程度随FC、CSR的增大而增大, 随 D_r 的增大而减小。饱和珊瑚砂 ε_{vp} - N 关系曲线呈现出循环平稳和循环蠕变两种发展模式。引入潜在破坏系数DP表征FC对 ε_{vp} 发展模式的影响, 建立了DP×CSR- D_r 框架的饱和珊瑚砂体应变发展模式评价方法。为表征FC及 D_r 对饱和珊瑚砂 ε_{vp} - N 关系曲线的影响, 引入了骨架孔隙比 e_{sk}^* , 发现两种发展模式下 ε_{vp-s} 与 e_{sk}^* 均存在良好的相关性, 遂建立了排水循环加载条件下饱和珊瑚砂的体应变发展模式, 可以较好地预测饱和珊瑚砂的累积体应变发展规律。

关键词: 珊瑚砂; 细粒含量; 累积体应变; 等效骨架孔隙比; 潜在破坏系数

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)09-1965-09

作者简介: 王路阳(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事珊瑚砂动力特性试验研究。E-mail: wly15194548028@163.com。

Experimental study on development patterns of volumetric strain and predictive modeling for saturated coral sands

WANG Luyang¹, WU Qi^{1,2}, ZHOU Zhenglong¹, ZHANG Xinlei¹, WANG Binghui³, CHEN Guoxing¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: The coral sand has better drainage conditions, and the drainage deformation of the saturated coral sand under earthquake and wave loads can easily cause damage to the seabed and nearby structures. Focusing on the properties of the saturated coral sand and by investigating the effects of fines content FC, relative density D_r and cyclic stress ratio CSR on its deformation characteristics, a series of cyclic drainage loading tests are carried out on the specimens of Nansha islands using the GDS dynamic triaxial instrument. The test results show that the development rate and the degree of deformation of cumulative volumetric strain ε_{vp} of the coral sand increase with the increase of FC and CSR, and decrease with the increase of D_r . The ε_{vp} - N relationship curve of the saturated coral sand shows two development modes, cyclic smoothness and cyclic creep. The potential damage factor DP is introduced to characterize the influences of FC on the development pattern of ε_{vp} , and a DP×CSR- D_r framework is established to evaluate the development patterns of its volumetric strain. To characterize the effects of FC and D_r on its ε_{vp} - N relationship curve, the equivalent skeleton void ratio e_{sk}^* is introduced, and it is found that there is a good correlation between ε_{vp-s} and e_{sk}^* under both development modes, thus, a model for the development of volumetric strain in the saturated coral sand under drainage cyclic loading conditions is established, which can well predict the development patterns of volumetric strain in the saturated coral sand.

Key words: coral sand; fines content; cumulative volumetric strain; equivalent skeleton void ratio; potential damage factor

0 引言

海洋生物沉积形成的碳酸钙(CaCO_3)含量大于90%的碳酸盐砂被称作珊瑚砂, 在自然界中珊瑚砂大

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008206, 51978317, 52208349);
江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX23-0467)

收稿日期: 2023-06-08

*通信作者 (E-mail: qw09061801@163.com)

量存在(波斯湾、中国南海),常作为珊瑚岛礁或港口等基础设施建设的主要岩土介质材料^[1]。珊瑚岛礁或港口所处海洋环境下容易遭受在长期波浪、风暴潮、海啸及地震等动力荷载作用,由海洋动力荷载引起的差异性沉降或者永久性变性会对珊瑚砂基础产生显著影响^[2]。因此,有必要开展循环荷载作用下饱和珊瑚砂的体应变发展特性研究。

室内循环三轴试验已被公认为探究土壤长期累积变形问题的有效手段。长期以来大量学者以普通陆地黏土和海洋黏土作为主要研究对象,进行大量研究得到较多结论^[3-6]。饱和砂土的剪胀由一个完全可逆的循环体应变分量和一个不可逆的累积体应变分量构成^[7]。松散砂土的体积应变随加载频率的增大而减小,循环应变幅值越大这种效果越明显;当循环应变达到1%时砂土的体积应变随加载频率的增大而增大^[8]。

珊瑚砂在常规工程应力下就会发生颗粒破碎并产生细粒^[9-11],形成细粒含量超过原级配的珊瑚砂类土。国内外许多学者研究表明,细粒含量FC对饱和土体动力变形特性的影响显著。Yee等^[12]研究发现:非塑性细粒含量的增加会促进饱和砂土的体应变发展。Indraratna等^[13]发现细粒对砂颗粒之间的接触有润滑作用,会使饱和砂土先期体应变发展速度加快。胡明鉴等^[14]发现FC对珊瑚砂的渗透性有显著影响,当FC<9%时,随FC的增加缓慢减小,当9%<FC<24%时,随FC增加快速减小,当FC>24%时,渗透系数几乎不再变化。已有研究表明体积特性代表应力-剪胀关系,这种关系高度依赖于物质状态^[15-16]。已有较多学者对珊瑚砂的动力特性进行深入研究^[17];高冉等^[18]和王莺等^[19]对南海吹填岛礁珊瑚砂进行现场观察得出珊瑚砂基础具有较好排水条件;排水条件下珊瑚砂在上覆动力荷载作用下易发生塑性变形^[20]。He等^[21]对珊瑚砂进行循环排水试验得到:珊瑚砂的累积轴向应变的不同安定行为与初始孔隙比,循环应力比和固结比有关。秦悠等^[22]在排水条件下对饱和珊瑚砂开展不同循环应力路径试验表明:不同应力路径对饱和珊瑚砂累积体应变有较大影响,引入单元体循环应力比(USR)来统一不同应力路径下累积体应变。

本文针对不同细粒含量FC,相对密实度 D_r 和不同循环应力比CSR的南沙珊瑚砂开展系列排水循环三轴试验,探讨饱和珊瑚砂在不同FC和 D_r 下累积体应变的发展规律,并建立累积体应变的发展预测模型。

1 试验内容与方法

1.1 试验材料

试验采用南沙群岛某岛礁的珊瑚砂,是由一种海

洋生物残骸经物理、化学、生物作用形成的特殊海洋土,珊瑚砂颗粒的成分主要为文石、高镁方解石,且 CaCO_3 占90%以上,属于钙质砂,经测定其相对质量密度为2.84。珊瑚砂广泛分布于热带和亚热带海域,在中国南沙诸岛广泛分布,是南沙岛礁区的主要岩土介质,颗粒颜色以黄白色为主。本文所用珊瑚砂赋存于复杂的南沙海域环境之中,这就造成了珊瑚砂颗粒棱角度高、易胶结、易破碎、且表面粗糙并含内孔隙等性质^[24-25]。

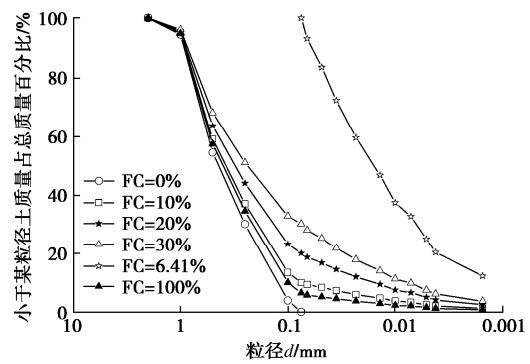


图1 珊瑚砂级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of coral sand

表1 不同FC的珊瑚砂基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of coral sand with different FC

FC/%	G_s	e_{\max}	e_{\min}	d_{50}/mm	C_u	C_c
0		1.31	0.92	0.44	4.44	0.92
6.41		1.17	0.75	0.40	5.25	0.86
10	2.84	1.13	0.69	0.38	6.81	0.96
20		1.07	0.55	0.31	27.97	2.65
30		1.03	0.44	0.24	47.94	2.10

注: e_{\max} 为最大孔隙比; e_{\min} 为最小孔隙比; d_{50} 为平均粒径; C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数; G_s 为相对质量密度。

先将珊瑚砂置于103℃的恒温烘箱内烘干,为将珊瑚砂的细颗粒与砂颗粒分离开,把珊瑚砂放入0.075 mm的标准筛具中振动,从而可获取以0.075 mm为界限的两种珊瑚砂粒径^[23]。将0.075 mm以下的珊瑚砂颗粒视为细粒,而其余的颗粒作为砂粒。将不同质量的细粒与砂粒均匀混合获取具有不同细粒含量FC的珊瑚砂。纯砂粒、纯细粒及具有不同FC的珊瑚砂的级配曲线如图1所示。表1给出了珊瑚砂的基本物理指标,最大、最小孔隙比采用ASTM规范测得,其中为避免测量过程中因珊瑚砂破碎引起级配改变,最小孔隙比采用“振动法”测得。

1.2 试验仪器与试样制备

试验采用英国GDS循环三轴仪进行应力控制循环排水加载试验,该仪器可施加最大轴向应力为±5 kN,最大精度可达0.001 kN,围压舱可承受最大压力为2 MPa,轴向位移量程为100 mm,位移精度0.07% F.S(满量程)。试验采用干装法制样,试样直径 D =

50 mm, 高 $H = 100$ mm。按图 1 所示级配进行称重, 均分 5 层装入承膜筒, 装填过程中严格控制层高, 每层表面需刮毛处理。装样完成后通入 CO₂ 置换空气, 利用无气水进行预饱和, 结束后采用分级反压饱和法对试样进行饱和, 当测得孔压系数 B 值 ≥ 0.97 时, 可认为试样已完全饱和。饱和结束后进行初始有效固结围压 $\sigma'_m = 100$ kPa 的均等固结。

1.3 试验方案

为研究不同 D_r , FC 和 CSR 条件下的珊瑚砂在排水循环加载条件下的体应变发展特性, 选取 FC = 0%, 6.41%, 10%, 20% 和 30% 的珊瑚砂, 对不同 FC 的珊瑚砂分别制备 $D_r = 30\%$, 50%, 70% 的试样, 随后在 $\sigma'_m = 100$ kPa 条件下进行均等固结。固结完成后, 分别进行 CSR = 0.20, 0.25, 0.30 的排水循环加载试验, 试验方案详见表 2, 循环应力比 CSR 为

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_m} \quad (1)$$

式中: σ_d 为循环偏应力, 试验采用正弦波加载, 加载频率为 0.1 Hz。

2 试验结果与分析

图 2 为 $D_r = 30\%$, FC = 20%, CSR = 0.20 的饱和珊瑚砂的体应变时程曲线图。由图可知, 在排水循环荷载作用下体应变 ε_v 随循环振次 N 的增加呈波动上升, ε_v 呈单圈随荷载瞬时震荡的波动性和整体单调增长的累积效应, 张建民^[24]将 ε_v 分为不可逆性体应变(累积体应变, ε_{vp})和可逆性体应变(循环体应变, ε_{vc})。本文以单圈最大与最小峰值的平均值作为 ε_{vp} 值。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

ID	$D_r/\%$	FC/%	CSR	ID	$D_r/\%$	FC/%	CSR	ID	$D_r/\%$	FC/%	CSR
1	30	0		13	30	0		25	30	0	
2	30	10		14	30	10		26	30	10	
3	30	20		15	30	20		27	30	20	
4	30	30		16	30	30		28	30	30	
5	50	0		17	50	0		29	50	0	
6	50	10	0.20	18	50	10	0.25	30	50	10	0.30
7	50	20		19	50	20		31	50	20	
8	50	30		20	50	30		32	50	30	
9	70	0		21	70	0		33	70	0	
10	70	10		22	70	10		34	70	10	
11	70	20		23	70	20		35	70	20	
12	70	30		24	70	30		36	70	30	
T-1	25	20	0.20	T-4	28	0	0.20	T-7	67	20	0.20
T-2	40	20	0.20	T-5	60	0	0.20	T-8	45	0	0.25
T-3	32	10	0.20	T-6	63	10	0.20	T-9	45	10	0.25
T-10	45	20	0.25	T-11	45	30	0.25	T-12	35	0	0.30
T-13	25	10	0.30	T-14	45	20	0.30	T-15	65	30	0.30

注: T 系列试验仅用于验证。

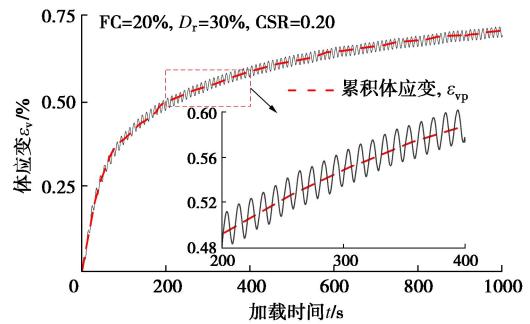


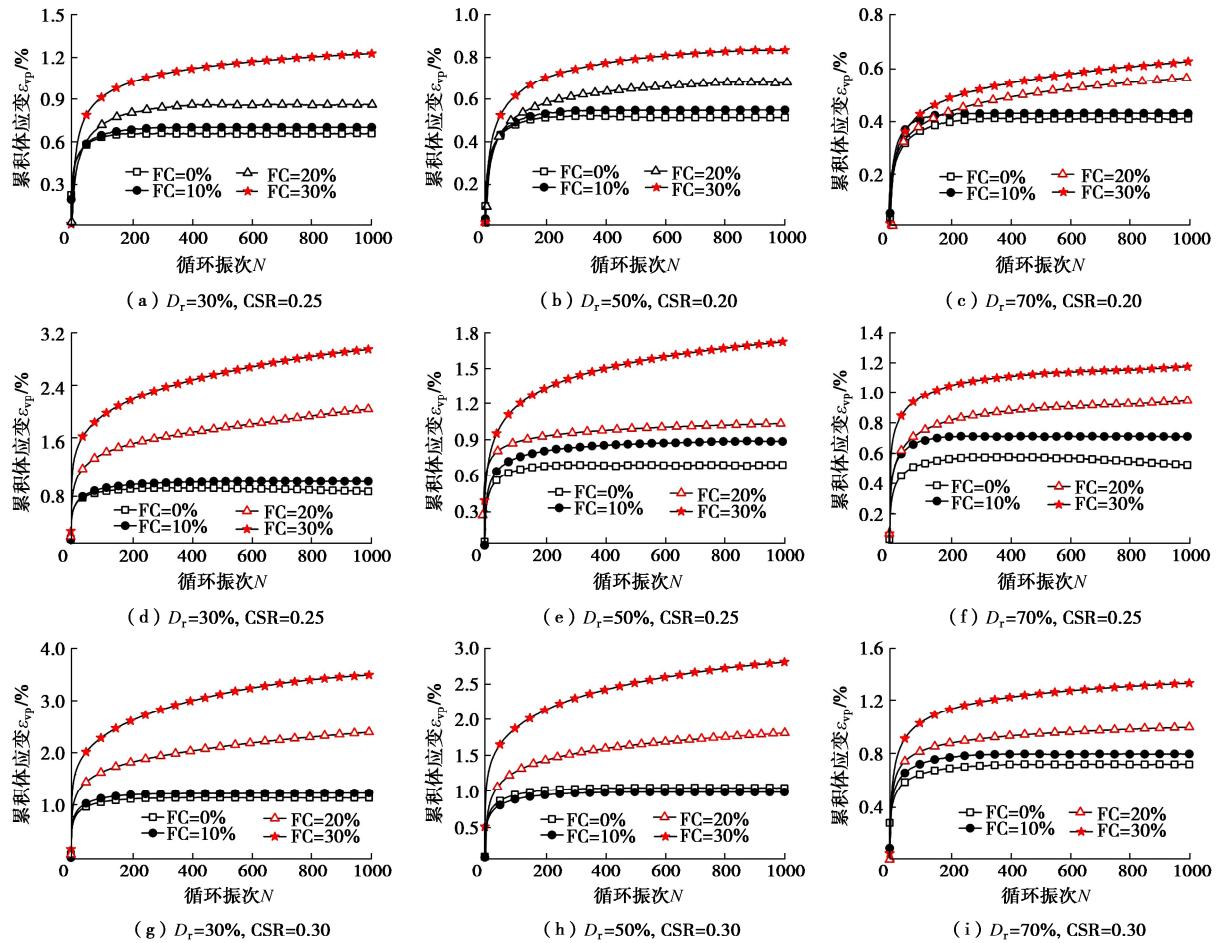
图 2 饱和珊瑚砂的 ε_v 典型时程曲线

Fig. 2 Typical time-history curves of ε_v for saturated coral sand

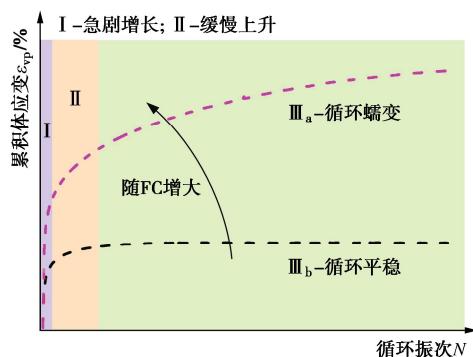
2.1 饱和珊瑚砂累积体应变发展特征

图 3 为饱和珊瑚砂 ε_{vp} 与 N 的关系曲线。 ε_{vp} 随 N 的增加不断增加, 大部分发生在循环加载的初期阶段, ε_{vp} 的增长速率随 N 的增加逐渐减小。 ε_{vp} 随 N 的增长量及增长速率均受到 D_r , FC 及 CSR 的影响。土颗粒在循环荷载作用下存在颗粒重组现象, 宏观上表现为土体孔隙水排出和体应变发展, 使土颗粒间的力链强度增大, 当土体达到一定强度时, 饱和珊瑚砂的 ε_{vp} 发展会趋于稳定, 定义 $\Delta\varepsilon_{vp}/\Delta N$ 小于 0.001% 时, 试样达到稳态。在相同 N 作用下 ε_{vp} 随 CSR 的增大而增大, 随 D_r 的增大而减小, 给定 FC 时, 当 $D_r = 30\%$ 和 CSR = 0.30 时, ε_{vp} 最大, 当 $D_r = 70\%$ 和 CSR = 0.20 时, ε_{vp} 最小。 ε_{vp} - N 曲线随 FC 增大整体上移。

由图 3 可知, ε_{vp} 呈现两种不同的发展模式, 图 4 给出了 ε_{vp} 发展特征模式示意图。由图 4 可知, 2 种 ε_{vp} 发展模式均有 3 个阶段, 其中 I 阶段: 循环加载初期, ε_{vp} 呈“急剧”增长状态; II 阶段: ε_{vp} 呈现“快速”增长状态; III 阶段: ε_{vp} 呈现“循环平稳”和“循环蠕变”

图 3 饱和珊瑚砂 ε_{vp} 与 N 的关系曲线Fig. 3 Relationship between ε_{vp} and N for saturated coral sand

两种不同的发展状态。将III阶段为“循环平稳”的 ε_{vp} 发展模型定义为循环平稳模式；将III阶段为“循环蠕变”的 ε_{vp} 发展模型定义为循环蠕变模式。对于循环平稳模式：试样在III阶段随 N 的增加几乎不产生额外的 ε_{vp} ，呈现完全弹性阶段，此时随 N 的增加只存在 ε_{vc} ；对于循环蠕变模式：试样在III阶段随 N 的增加进入缓慢累积阶段， ε_{v} 随循环应力的加载出现较小波动， ε_{vp} 随 N 的增长速率极其缓慢， $N > 1000$ 后每百圈累积量小于 0.01%，但随 N 的增加并未完全进入完全弹性阶段，每个循环过程， ε_{vp} 和 ε_{vc} 同时存在。

图 4 饱和珊瑚砂 ε_{vp} 典型发展模式Fig. 4 Typical development patterns in ε_{vp} for saturated coral sand

2.2 累积体应变发展模式分析

图 5 为不同 D_r 、FC 及 CSR 的饱和珊瑚砂 ε_{vp} 发展模式。由图 5 可知，FC 的增加会导致 ε_{vp} 从循环平稳模式向循环蠕变模式转变，这是由于细颗粒的增加导致部分“细粒-砂粒”弱力链代替“砂粒-砂粒”强力链，且颗粒接触面积降低，力链强度及接触面积的降低从而导致珊瑚砂不易产生稳定颗粒组构以抵抗外力引起的体积变形，因而导致 ε_{vp} 发展模式的转变。此外， D_r 越大，珊瑚砂排列越紧密，其颗粒间形成的力量链越强，相同循环模式和应力水平 (CSR) 下颗粒不易重新排列形成新的稳定结构。结合图 4、5 可知，FC 是影响 ε_{vp} 发展模式的主要因素，Tatek 等^[25]引入潜在破坏系数 DP 用以表征 FC 在加载过程中对永久变形的潜在影响，DP 定义为细粒体积与土骨架间孔隙体积之比：

$$DP = \frac{V_{FC}}{V_{free}} \quad . \quad (2)$$

式中： V_{FC} 为细粒体积； V_{free} 为土骨架间孔隙体积。

图 6 为基于潜在破坏系数修正的循环应力水平指数 $DP \times CSR$ 与 D_r 关系的 ε_{vp} 发展模式分布图。由图 6 可知，无论珊瑚砂的密实状态如何，当 $DP \times CSR < 0.05$ 时，饱和珊瑚砂的 ε_{vp} 为循环平稳模式，当 $DP \times$

CSR > 0.05 时, 饱和珊瑚砂的 ε_{vp} 为循环蠕变模式。因此, 可建立基于 $DP \times CSR \times D_r$ 框架的体应变发展模式评价方法。

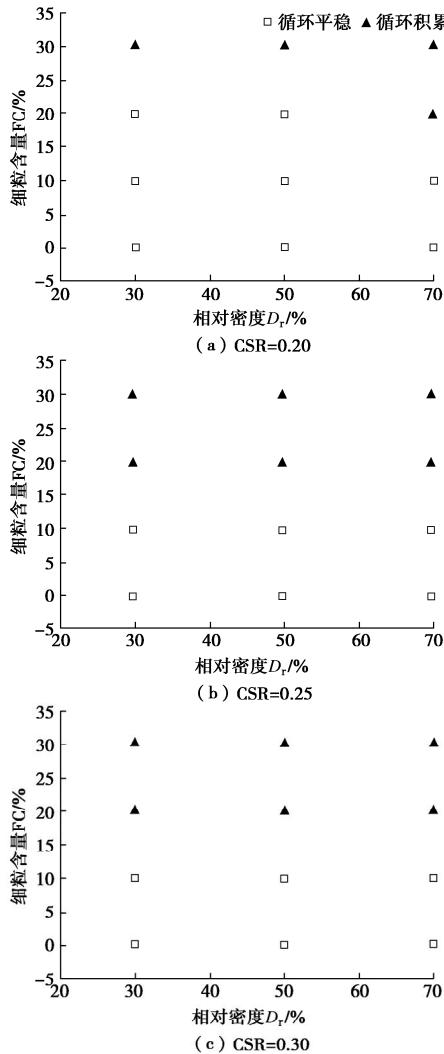


图 5 饱和珊瑚砂累积体应变 ε_{vp} 发展模式与 FC 与 D_r 关系

Fig. 5 Development of volumetric strain ε_{vp} of saturated coral sand and its relation to FC and D_r

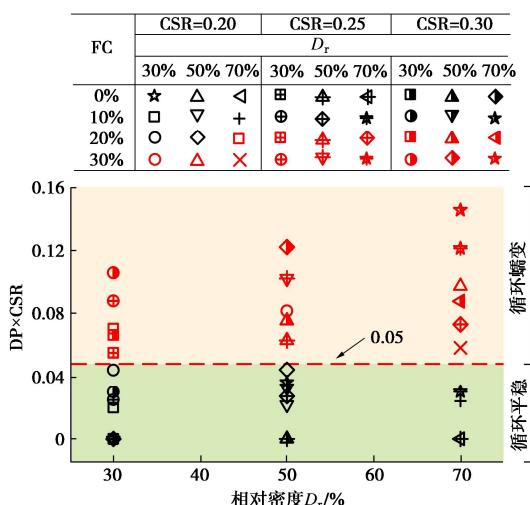


图 6 基于 $DP \times CSR \times D_r$ 关系的饱和珊瑚砂 ε_{vp} 发展模式

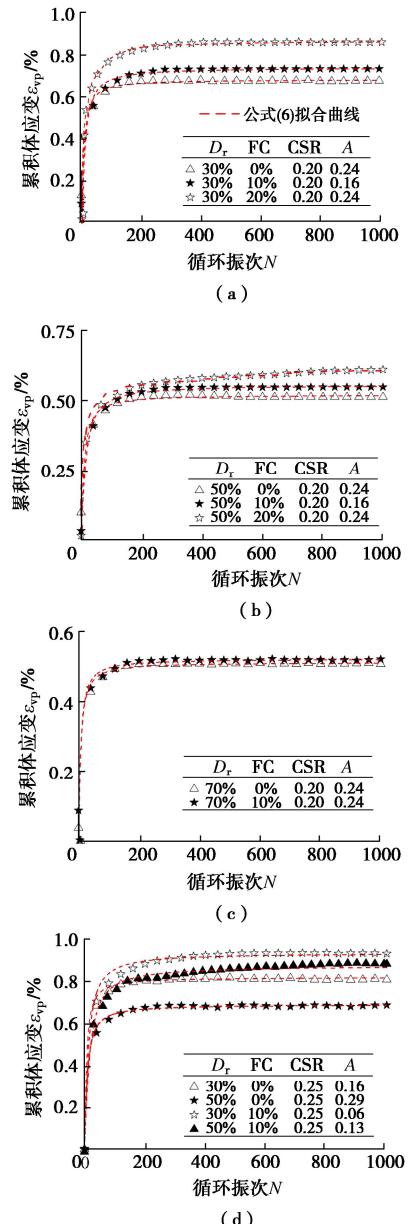
Fig. 6 Development patterns of saturated coral sand ε_{vp} based on $DP \times CSR \times D_r$ relationship

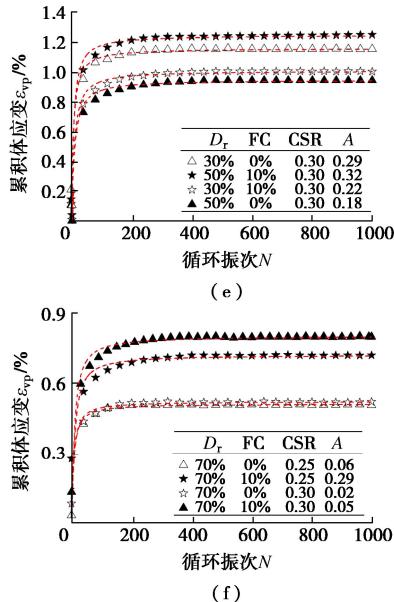
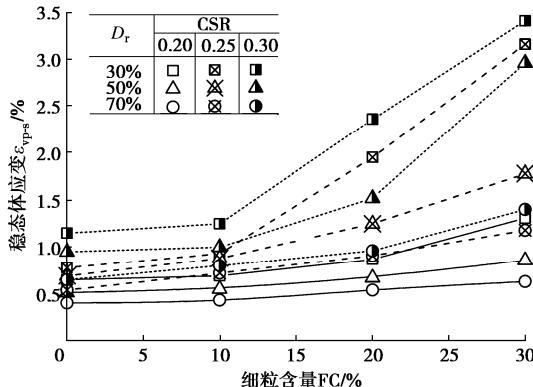
2.3 累积体应变预测模型

不同排水循环加载条件下饱和珊瑚砂的体应变有两种发展模式。对于累积体应变的循环平稳发展模式, 饱和珊瑚砂存在稳态体应变 ε_{vp-s} 。根据这一特点可建立基于 N 的 $\varepsilon_{vp} / \varepsilon_{vp-s}$ 发展模型:

$$\frac{\varepsilon_{vp}}{\varepsilon_{vp-s}} = A \arctan N \quad (3)$$

式中: ε_{vp-s} 为稳态体应变, 定义为试样发展至稳态所需的 ε_{vp} ; A 为拟合参数。图 7 给出了循环平稳模式下累积体应变 ε_{vp} 与循环振次 N 的关系曲线, 由图 7 可知, 式 (3) 可以较好地表征对具有循环平稳发展模式的珊瑚砂 ε_{vp} 发展规律。图 8 为 $D_r = 30\%, 50\%, 70\%$ 下 ε_{vp-s} 与 FC 的关系曲线, 由图 8 可知, 在相同 CSR 下, ε_{vp-s} 随 FC 而增大, 随 D_r 的增大而减小; 当 FC < 20% 时, ε_{vp-s} 增长较小, 当 FC $\geq 20\%$ 时, ε_{vp-s} 有明显增长。



图 7 循环平稳模式 ε_{vp} 随 N 发展曲线Fig. 7 Development curves of ε_{vp} versus N for cyclic-smooth mode图 8 稳态累积体应变 ε_{vp-s} 与 FC 发展关系Fig. 8 Relationship between steady-state cumulative volumetric strain ε_{vp-s} and FC

为统一表征 FC 及 D_r 对饱和珊瑚砂 ε_{vp} - N 关系曲线的影响, 引入等效骨架孔隙比 (e_{sk}^*) 以描述细粒参与组成土骨架的程度对不同 FC 的砂土颗粒接触状态的影响。 e_{sk}^* 定义为砂土骨架颗粒体积与之间的孔隙体积之比^[24]:

$$e_{sk}^* = \frac{e + (1-b) \cdot FC}{1 - (1-b) \cdot FC} \quad (4)$$

式中: b 为细粒影响系数, $0 \leq b \leq 1$ 。Mohammadi 等^[26]给出了预测 b 值的简化公式:

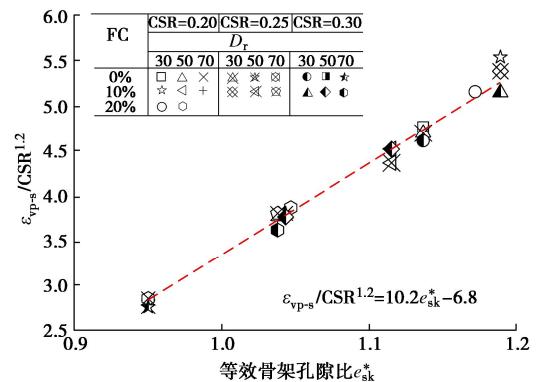
$$b = \left[1 - \exp \left(-\frac{0.3}{k} \right) \right] \left(r \times \frac{FC}{FC_{th}} \right)^r \quad (5)$$

式中: $k = 1 - r^{0.25}$, $r = \chi^{-1}$ 。 $\chi = d_{10-s}/d_{50-f}$ 为颗粒粒径比, d_{10-s} 为纯砂粒有效粒径, d_{50-f} 为纯细粒平均粒径。由图 8 可知, 累积稳态体应变 ε_{vp-s} 与 D_r 及 FC 有关, 通过多元回归分析发现, 应力修正的累积稳态体应变 $\varepsilon_{vp-s}/CSR^{1.2}$ 与 e_{sk}^* 呈现单一的线性关系 (见图 9), 且该线性关系 D_r 与 FC 对其相关性没有影响, 至此, 可

建立参数 ε_{vp-s} 与 e_{sk}^* 的关系:

$$\varepsilon_{vp-s} / CSR^m = \alpha_1 \times e_{sk}^* - \beta_1 \quad (6)$$

式中: m 为应力指标参数; α_1 和 β_1 为拟合参数。对于本试验所用珊瑚砂, $m = 1.2$, α_1 和 β_1 分别为 10.2, 6.8。

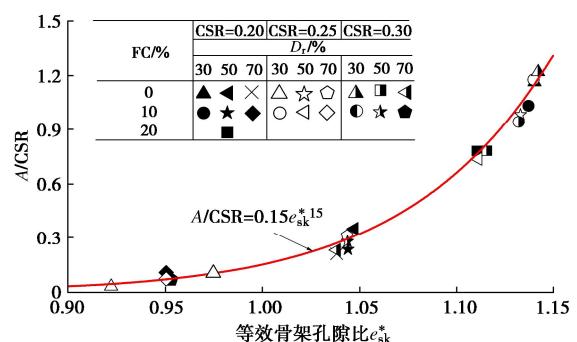
图 9 饱和珊瑚砂 ε_{vp-s} 与 e_{sk}^* 关系Fig. 9 Relationship between ε_{vp-s} and e_{sk}^* of saturated coral sand

由式 (3) 可知, 参数 A 表征了 $\varepsilon_{vp}/\varepsilon_{vp-s}$ 发展速率。由图 7 可知, 参数 A 与 D_r 与 FC 有关, 图 10 为应力修正参数 A/CSR 与 e_{sk}^* 的关系曲线。 A/CSR 随 e_{sk}^* 的增大而增大, A/CSR 与 e_{sk}^* 的试验数据点有较好的负幂函数关系, 且两者的相关性与 D_r 与 FC 的大小基本无关。至此, 可建立参数 A 与 e_{sk}^* 的关系:

$$A/CSR = \alpha_2 \times e_{sk}^{*\beta_2} \quad (7)$$

式中: α_2 和 β_2 为拟合参数, 对于本试验所用珊瑚砂分别取 0.15 和 15。至此, 可得饱和珊瑚砂循环排水的循环平稳模式下的累积体应变发展模型为

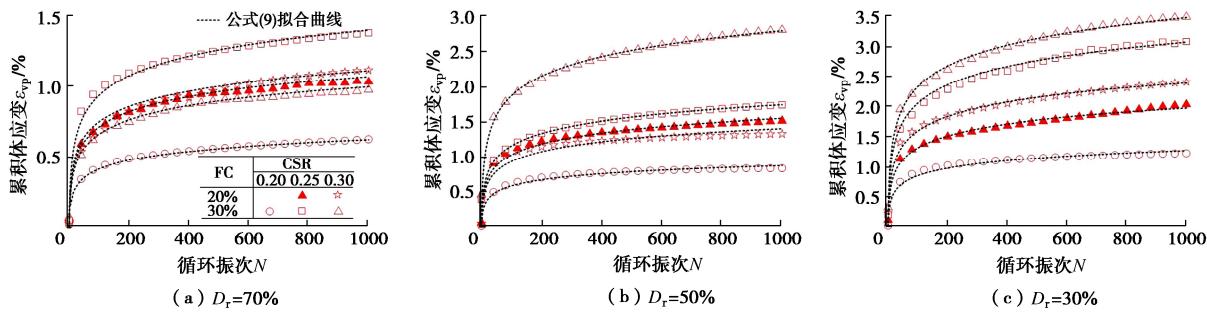
$$\frac{\varepsilon_{vp}}{\varepsilon_{vp-s}} = 0.15e_{sk}^{*15} CSR \arctan N \quad (8)$$

图 10 参数 A 与 e_{sk}^* 关系曲线Fig. 10 Relationship between A and e_{sk}^*

饱和珊瑚砂循环排水发展的循环蠕变模型采用对数函数表达:

$$\varepsilon_{vp} = B \times \ln(N+1) \quad (9)$$

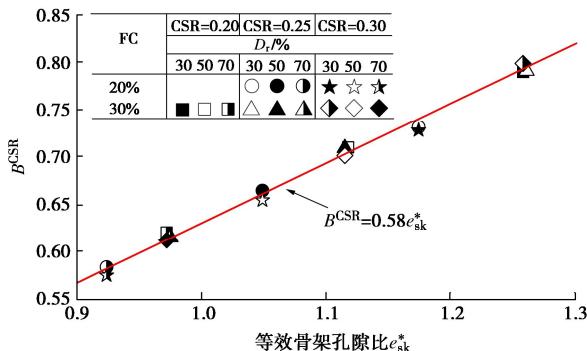
式中: B 为拟合参数。图 11 给出了循环蠕变模式下 ε_{vp} 与 N 的关系曲线。由图 11 可知, 式 (9) 对循环蠕变

图 11 循环蠕变模式的 ε_{vp} 随 N 发展曲线Fig. 11 Development curves of ε_{vp} versus N for cyclic-creep mode

模式下的累积体应变发展有较好的拟合效果, 但不同工况下, ε_{vp} 的增长速率由显著差异, 也即 B 受 FC, D_r 及 CSR 影响显著。通过归回分析发现, 不同 FC, D_r 及 CSR 下, 应力修正参数 B^{CSR} 与 e_{sk}^* 存在单一线相关性 (图 12):

$$B^{CSR} = n \times e_{sk}^* \quad (10)$$

式中, n 为拟合参数, 对于本试验珊瑚砂, 取 0.58。至此, 结合式 (9), (10) 可建立饱和珊瑚砂的循环平稳模式的累积体应变预测模型:

图 12 参数 B 与 e_{sk}^* 关系曲线Fig. 12 Relationship between B and e_{sk}^*

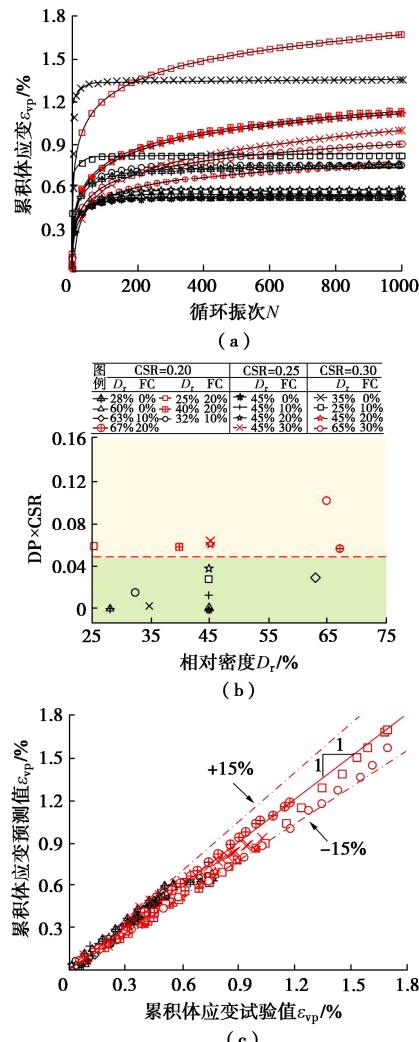
综上, 可建立综合考虑 D_r , FC 及 CSR 的饱和珊瑚砂累积体应变预测模型, 具体流程如下:

$$\varepsilon_{vp} = \left(0.58 e_{sk}^* \right)^{\frac{1}{CSR}} \times \ln(N + 1) \quad (11)$$

首先, 确定砂粒和细粒的基本物理指标, 然后由式 (4), (5) 计算 e_{sk}^* , 由 (2) 确定 DP; 其次, 基于 $DP \times CSR \times D_r$ 分类方法确定累积体应变发展模式; 最后, 基于式 (8) (循环平稳模式) 或式 (11) (循环蠕变模式), 计算循环排水条件下的饱和珊瑚砂累积体应变。

为验证 $e_{sk}^* \times DP$ 分类方法的准确性以及两种模式下预测模型的适用性, 开展随机验证试验, 工况如表 2 所示。试验结果如图 13 (a) 所示; 图 13 (b) 展示了基于 $DP \times CSR \times D_r$ 分类方法确定累积体应变发展模式的结果, 表明 $DP \times CSR \times D_r$ 分类方法对随机试验的

结果验证是准确有效的。图 13 (c) 展示了预测值与试验值对比结果, 发现, 本研究建立的体应变预测模型可以较好的预测两种不同发展模式下饱和珊瑚砂的累积体应变, 且其预测误差小于 15%。

图 13 饱和珊瑚砂累积体应变 ε_{vp} 预测值与试验值对比Fig. 13 Tested and predicted drained accumulated volumetric strains ε_{vp} in saturated coral sand

3 结 论

本文针对饱和珊瑚砂开展了一系列排水循环三轴试验, 研究了相对密度 D_r , 细粒含量 FC 和循环应力

比 CSR 对饱和珊瑚砂累积体应变 ε_{vp} 的影响, 分析了累积体应变的发展模式, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 饱和珊瑚砂累积体应变 ε_{vp} 与的发展速率以及变形程度随着 FC 和 CSR 的增大而增大, 随着 D_r 的增大而减小。

(2) 不同排水循环加载条件下饱和珊瑚砂的体应变 ε_{vp} 有循环平稳和循环蠕变两种发展模式, 引入了潜在破坏系数 DP 来表征 FC 的影响, 当 $CSR \times DP < 0.05$ 时, ε_{vp} 发展模式模式为循环平稳型, 当 $CSR \times DP > 0.05$ 时, ε_{vp} 发展模式为循环蠕变型。

(3) 针对饱和珊瑚砂体应变 ε_{vp} 的两种发展模式建立了两种预测模型, 当发展模式为循环平稳时, 引入了稳态体应变 ε_{vp-s} , 建立了反正切函数的预测模型, 当发展模式为循环蠕变型时, 建立对数函数的预测模型, 并通过试验验证了两种模型的适用性。

参考文献:

- [1] DING Z, HE S H, SUN Y F, et al. Comparative study on cyclic behavior of marine calcareous sand and terrigenous siliceous sand for transportation infrastructure applications[J]. Construction and Building Materials, 2021, **283**: 122740.
- [2] 文 兵, 袁内镇, 孔令伟, 等. 吹填珊瑚砂场地高层建筑复合地基工程实践与沉降估算[J]. 土木工程学报, 2021, **54**(12): 85-93. (WEN Bing, YUAN Neizhen, KONG Lingwei, et al. Application practice and settlement estimation of composite ground for high-rise buildings on coral sand site of hydraulic fill[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, **54**(12): 85-93. (in Chinese))
- [3] 张 勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1542-1548. (ZHANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1542-1548. (in Chinese))
- [4] 陈颖平, 黄 博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(5): 764-768. (CHEN Yingping, HUANG Bo, CHEN Yunmin. Reliability analysis of high level backfill based on chaotic optimization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(5): 764-768. (in Chinese))
- [5] CAO Z G, CHEN J Y, CAI Y Q, et al. Long-term behavior of clay-fouled unbound granular materials subjected to cyclic loadings with different frequencies[J]. Engineering Geology, 2018, **243**: 118-127.
- [6] LI Q L, XIAN Z N, WANG L N, et al. Accumulative strain of clays in cold region under long-term low-level repeated cyclic loading: Experimental evidence and accumulation model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, **94**: 45-52.
- [7] 赵 凯, 吴 琦, 熊 浩, 等. 双向耦合循环剪切条件下饱和砂土体应变发展规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1260-1269. (ZHAO Kai, WU Qi, XIONG Hao, et al. Experimental investigations on volumetric strain behavior of saturated sands under bi-directional cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1260-1269. (in Chinese))
- [8] NONG Z Z, PARK S S. Effect of loading frequency on volumetric strain accumulation and stiffness improvement in sand under drained cyclic direct simple shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(12): 04021159.
- [9] 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, ZHA Jingjing, 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. (in Chinese))
- [10] WEI H Z, ZHAO T, HE J Q, et al. Evolution of particle breakage for calcareous sands during ring shear tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(2): 04017153.
- [11] PENG Y, LIU H L, LI C, et al. The detailed particle breakage around the pile in coral sand[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**(6): 1971-1981.
- [12] YEE E, DUKU P M, STEWART J P. Cyclic volumetric strain behavior of sands with fines of low plasticity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **140**(4): 4013042.
- [13] INDRARATNA B, TENNAKOON N, NIMBALKAR S, et al. Behaviour of clay-fouled ballast under drained triaxial testing[J]. Géotechnique, 2013, **63**(5): 410-419.
- [14] 胡明鉴, 崔翔, 王新志, 等. 细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(8): 2925-2930. (HU Mingjian, CUI Xiang, WANG Xinzhi, et al. Experimental study of the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 2925-2930. (in Chinese))

[15] SUN Y F, GAO Y F, YANG S. Mathematical aspect of the state-dependent stress-dilatancy of granular soil under triaxial loading[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(2): 158-165.

[16] SUN Y F, SUMELKA W, GAO Y F, et al. Phenomenological fractional stress-dilatancy model for granular soil and soil-structure interface under monotonic and cyclic loads[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, **16**(10): 3115-3132.

[17] 马维嘉, 陈国兴, 秦 悠, 等. 初始主应力方向角对饱和珊瑚砂液化特性影响的试验[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(3): 592-600. (MA Weijia, CHEN Guoxing, QIN You, et al. Experimental studies on effects of initial major stress direction angles on liquefaction characteristics of saturated coral sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(3): 592-600. (in Chinese))

[18] 高 冉, 叶剑红. 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3897-3908, 3919. (GAO Ran, YE Jianhong. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(10): 3897-3908, 3919. (in Chinese))

[19] 王 鸾, 汪云龙, 袁晓铭, 等. 人工场地吹填珊瑚土抗液化强度大粒径动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(10): 2819-2829. (WANG Luan, WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, et al. Experimental study on liquefaction resistance of hydraulic fill coralline soils at artificial sites based on large-scale dynamic triaxial apparatus[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(10): 2819-2829. (in Chinese))

[20] 汪 稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究: 从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(1): 202-207. (WANG Ren, WU Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs—engaged in coral reef research for 30 years[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, **27**(1): 202-207. (in Chinese))

[21] HE S H, DING Z, SUN Y F, et al. Cumulative deformations and particle breakage in calcareous sand subjected to drained high-cyclic loading: experimental investigation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, **161**: 107417.

[22] 秦 悠, 马维嘉, 赵 凯, 等. 不同循环应力路径下饱和珊瑚砂体应变的发展特征[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(6): 1294-1302. (QIN You, MA Weijia, ZHAO Kai, et al. Volumetric strain generation of saturated coral sand subjected to various stress paths of cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(6): 1294-1302. (in Chinese))

[23] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

[24] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 1-50. (ZHANG Jianmin. New advances in basic theories of sand dynamics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(1): 1-50. (in Chinese))

[25] TATEK F Y, BJORN B, DENIS J. Packing theory-based framework to evaluate permanent deformation of unbound granular materials[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014, **14**(3): 309-320.

[26] MOHAMMADI A, QADIMI A. A simple critical state approach to predicting the cyclic and monotonic response of sands with different fines contents using the equivalent intergranular void ratio[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, **10**(5): 587-606.