

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0528

分级加卸载下南海珊瑚泥一维固结长期 变形试验及模型研究

沈 扬, 邓 珏, 翁 禾, 阳 龙

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要: 南海珊瑚泥是珊瑚群体死后的骨骼、碎屑聚积形成的海洋岩土体钙质软泥, 具有特殊的工程性状, 研究其在荷载作用下与时间相关的长期非线性变形对吹填岛礁建设和长期稳定分析具有重要意义。对珊瑚泥进行了 3 组不同加卸载方案的一维固结压缩试验, 通过改变加载时间与加卸载循环圈数探究应力历史对其长期变形性质的影响, 并针对珊瑚泥在加卸载试验条件下呈现出的瞬时变形、延时衰减与延时稳定变形 3 阶段规律, 采用改进的 Burgers 模型拟合不同竖向应力作用下的 $\varepsilon-t$ (应变-时间) 曲线, 具有较高拟合精度。同时分析模型参数后发现, 随着分级加载时间提高, 瞬时应变增量及其增长率下降, 最终荷载下的延时衰减时间缩短, 延时稳定应变速率及最终荷载下的总应变增量减小。同一加卸载循环圈数中, 同竖向应力下卸载阶段的瞬时应变增量小于加载阶段。随着加卸载循环圈数的增加, 加、卸载各阶段瞬时应变增量均减小且二者相近, 延时衰减时间缩短, 延时稳定应变速率及最终荷载下的总应变增量减小。研究了分级加载时间与加卸载循环圈数对珊瑚泥长期变形性质的影响, 旨在为岛礁建设中的堆载预压方案提供理论依据。

关 键 词: 南海珊瑚泥; 分级加卸载; 长期非线性变形; 改进 Burgers 模型; 模型参数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 03-0685-12

Long-term deformation test and model study of one-dimensional consolidation of South China Sea coral mud under graded loading and unloading

SHEN Yang, DENG Jue, WENG He, YANG Long

(Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: South China Sea coral mud is a calcareous ooze of marine rock and soil formed by the accumulation of bones and debris after the death of coral groups, which has special engineering properties. It is significant to investigate its time dependent long-term nonlinear deformation under load for the construction and long-term stability analysis of dredger fill islands and reefs. Three groups of one-dimensional consolidation compression tests of coral mud with different loading and unloading schemes were carried out, and the influence of stress history on its long-term deformation properties was explored by changing the loading time and loading-unloading loops. According to the three-stage law of coral mud's instantaneous deformation, delayed attenuation deformation and delayed stable deformation under loading and unloading test conditions, the improved Burgers model was used to fit $\varepsilon-t$ curves under different vertical stresses, which has high fitting accuracy. Meanwhile, after analyzing the model parameters, it was found that the instantaneous strain increment and its growth rate decrease with the increase of graded loading time, the duration of delayed attenuation under the final load decreases, and the delayed stable strain rate and the total strain increment under the final load decrease. In the same loading-unloading loops, the instantaneous strain increment in the unloading stage is smaller than that in the loading stage under the same vertical stresses. With the increase of loading-unloading loops, the instantaneous strain increment in each stage of loading and unloading decreases and is close to each other, the duration of delayed attenuation deformation, the delayed stable strain rate and total strain increment under the final load decrease. The effects of graded loading time and loading and unloading cycles on the long-term deformation properties of coral mud were studied to provide theoretical basis for surcharge preloading scheme in island reef construction.

Keywords: South China Sea coral mud; graded loading and unloading; long-term nonlinear deformation; improved Burgers model; model parameters

收稿日期: 2022-04-15

录用日期: 2022-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51979087)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979087).

第一作者简介: 沈阳, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体静动力学特性和本构理论的研究。E-mail: shenyang1998@163.com

1 引言

近年来,国家正推进“一带一路”倡议下 21 世纪海上丝绸之路的建设,在南海珊瑚岛礁展开大规模吹填工程^[1]。作为地基主要吹填材料的南海珊瑚泥是珊瑚群体死亡后的碎屑聚积,经过漫长地质作用形成的海洋岩土体,在地基相关问题的研究中,其在上部荷载作用下的变形类似于一维条件下的双面排水固结变形。南海珊瑚泥具有易破碎、孔隙比高、内摩擦角高、压缩性高等特点,工程性状特殊,与常规陆源土有较大区别^[2-3],研究其在荷载作用下长期非线性变形对吹填岛礁建设与长期稳定分析具有重要意义。

大部分土,特别是软土在恒定竖向应力下表现出与时间相关的非线性变形特征^[4]。在研究这种长期非线性变形的过程中,通常存在两种假设:假设 A 与假设 B。二者均认为长期非线性变形可分为两部分,即孔隙水应力消散引发的变形以及与之无关、仅与时间有关的变形,它们的区别在于假设 A 认为仅与时间相关的变形只发生在孔压消散阶段后(如 Mesri^[5-7]、Ladd^[8]等),而假设 B 认为仅与时间相关的变形存在于整个变形过程(如 Bjerrum^[9]、Graham^[10]、Yin^[4, 11-14]等)。基于假设 B,国内外学者提出了较多理论。Bjerrum^[9]提出可估计延时变形的时间线模型,引入了瞬时压缩线、时间线等概念;Graham 等^[10]在 Bjerrum^[9]的基础上采用等效时间概念导出与时间相关的应力-应变性状的弹黏塑性模型;殷建华等^[4]进一步发展等效时间概念,提出一维变形条件下的弹黏塑性模型;Feng 等^[15]在殷建华等^[4]的基础上对香港海洋沉积土进行加卸载固结试验,提出考虑加载压缩与卸荷回弹特性的非线性弹黏塑性方程;胡惠华等^[16]采用双曲线函数拟合洞庭湖砂纹淤泥土的应变-应力等时曲线;王元战等^[17]基于一维固结应力-应变等时曲线建立滨海软土的黏弹塑性模型。在模型发展过程中,亦有学者采用元件模型进行分析。元件模型由基本元件并联、串联组合而成,通常在室内试验基础上通过组合不同元件来模拟土体变形的实际物理性质。Taylor 等^[18]采用 Kelvin 模型描述黏弹性变形;殷德顺等^[19]根据分数阶微积分理论推出软体元件及其本构方程;刘忠玉等^[20]引入分数导数的弹壶元件修正 Kelvin 模型,描述饱和黏土的一维本构关系;刘清秉等^[21]采用 Burgers 模型模拟瞬时与延时变形过程;陈晓平等^[22]将非线性弹簧代替 Merchant 模型的线性弹簧,并串联 Kelvin 体建立三单元非线性弹黏性模型。

以上模型研究在描述土体加载阶段长期变形特性时已取得较好成效,但在卸载阶段的应用尚不广泛,而这又恰是考虑实际工程中的堆载预压加卸载方案时不容忽视的重要方面。因此,本文通过不同加卸载方案的一维固结试验,研究了珊瑚泥在加、卸载阶段的长期变形性质,根据应变-时间曲线特征,采用改进的 Burgers 模型拟合,确定模型参数,并基于其物理意义分析了分级加载时间与循环加卸载圈数对珊瑚泥一维固结长期变形的影响,以期堆载预压方案提供依据。

2 试验材料及试验仪器

2.1 试验材料

本文一维固结压缩试验所用的南海珊瑚泥取自我国南海地区,在吹填施工过程中,由于颗粒分选作用,会形成钙质粉土夹层。南海珊瑚泥的碳酸钙含量高达 90%以上^[23],颜色呈白色至淡黄色,基本物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 南海珊瑚泥基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties of South China Sea coral mud

相对密度 G_s	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	含水率 $\omega/\%$
2.77	33.8	23.0	45.5

图 1 为电镜扫描(scanning electron microscope, 简称 SEM)试验得到的南海珊瑚泥的电子扫描图片,图 2 所示为粒径分布曲线。南海珊瑚泥与一般的粉土、软黏土间存在较大差异,其棱角发育明显、分布不均匀,颗粒形态以条状、针状为主。由于内部孔隙较多,在荷载加载瞬时,珊瑚泥的孔隙被迅速压缩,产生较大的瞬时变形;随着加载时间的增加,由于颗粒形状不规则,珊瑚泥颗粒间相对位置的调整较普通软黏土缓慢,因此达到稳定变形所需的时间更长^[2]。

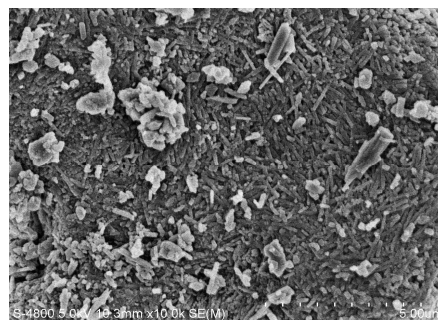


图 1 南海珊瑚泥电镜扫描图

Fig.1 Scanning electron microscope image of South China Sea coral mud

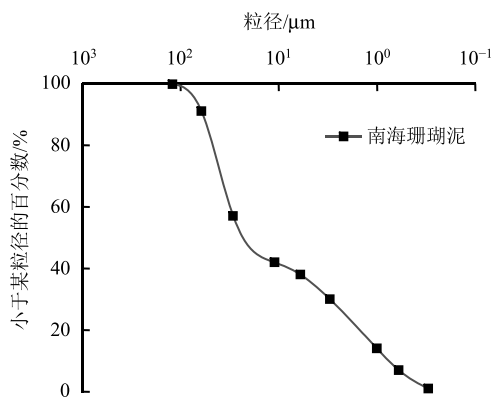


图 2 南海珊瑚泥粒径分布曲线

Fig.2 Particle size distribution curve of South China Sea coral mud

2.2 试验仪器

本文一维固结压缩试验采用的仪器是南京土壤仪器厂有限公司生产的 WG 型单杠杆固结仪。试验

制样高度为 20.0 mm，直径为 61.8 mm，双面排水，在试验过程中保持水槽内水位高度高于试样以确保试样饱和。3 组试验中，试样的初始孔隙比分别为 1.26、1.29、1.23，初始含水率分别为 45.36%、46.61%、44.54%。

3 试验方案设计

本文设计了 T1、T2、T3 共 3 组分级加载的一维固结压缩试验，采用不同加载时间与加卸载方式，分别对应实际工程中堆载预压法的不同堆载时间与加卸载圈数的方案，如表 2 所示。3 组试验均采用对数时间法，在加载后 $\lg t = -1.0, -0.8, -0.6, -0.4, \dots$ (t 为荷载加载时间 (min)) 读数。T1 试验、T2 试验前 8 级荷载与 T3 试验用于研究分级加载时间对珊瑚泥一维固结长期变形的影响，T2 试验用于研究循环加卸载圈数对珊瑚泥一维固结长期变形的影响。

表 2 试验方案

Table 2 Schemes of tests

试验序号	试验步骤	竖向应力/kPa	加载时间/min	试验步骤	竖向应力/kPa	加载时间/min	试验步骤	竖向应力/kPa	加载时间/min
T1	1	25	10 080	4	200	10 080	7	1 600	10 080
	2	50	10 080	5	400	10 080	8	3 200	11 520
	3	100	10 080	6	800	10 080			
T2	1	25	1 440	14	200	1 440	27	1 600	1 440
	2	50	1 440	15	400	1 440	28	3 200	11 520
	3	100	1 440	16	800	1 440	29	1 600	1 440
	4	200	1 440	17	1 600	1 440	30	800	1 440
	5	400	1 440	18	3 200	11 520	31	400	1 440
	6	800	1 440	19	1 600	1 440	32	200	1 440
	7	1 600	1 440	20	800	1 440	33	100	1 440
	8	3 200	11 520	21	400	1 440	34	200	1 440
	9	1 600	1 440	22	200	1 440	35	400	1 440
	10	800	1 440	23	100	1 440	36	800	1 440
	11	400	1 440	24	200	1 440	37	1 600	1 440
	12	200	1 440	25	400	1 440	38	3 200	11 520
	13	100	1 440	26	800	1 440			
T3	1	25	10	4	200	10	7	1 600	10
	2	50	10	5	400	10	8	3 200	11 520
	3	100	10	6	800	10			

注：表中 10、1 440、10 080、11 520 min 均为每级荷载加载时间。

4 试验结果与分析

4.1 各加卸载阶段的一维固结长期变形特征

图 3 所示为 T1、T2、T3 试验中珊瑚泥在各加卸载阶段的应变-时间 ($\varepsilon-t$) 曲线，其变形主要分为 3 个阶段。在各级竖向应力作用瞬时， $\varepsilon-t$ 曲线表现为陡峭的直线，土体产生瞬时变形，此时应变速率较大；随着时间的增长， $\varepsilon-t$ 曲线表现为弧线（加载时上凸、卸载时下凸），土体的应变速率逐渐减小，发生延时衰减变形；在变形的最后阶段， $\varepsilon-t$ 曲线趋

于直线状，土体的应变速率逐渐稳定，趋于定值，此时发生延时稳定变形。

4.2 加卸载阶段的 Burgers 模型

珊瑚泥在各级竖向应力作用下表现出的瞬时变形、延时衰减以及延时稳定变形 3 阶段特性，与典型的 Burgers 模型曲线基本特征相符^[21]，本文拟采用 Burgers 模型拟合各加卸载阶段的一维固结应变-时间曲线。Burgers 模型由 Kelvin 体（胡克弹簧与牛顿黏壶并联）和 Maxwell 体（胡克弹簧与牛顿黏壶串联）串联而成，如图 4 所示。

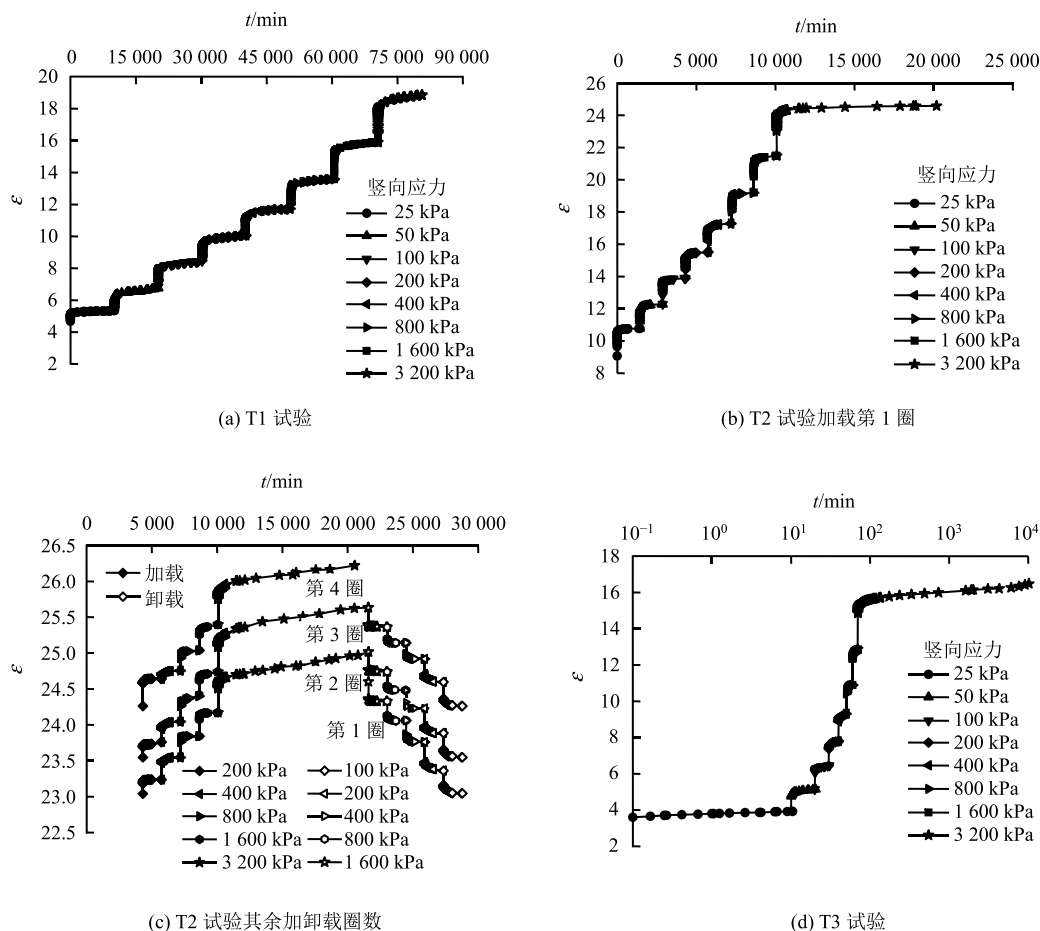


图3 T1、T2、T3 试验的 ε - t 曲线
Fig.3 ε - t curves in T1, T2 and T3 tests

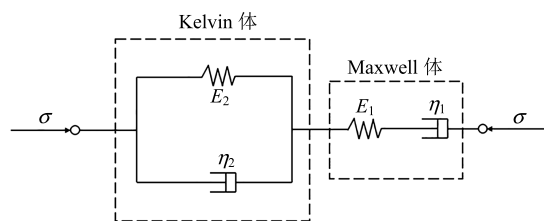


图4 Burgers 模型示意图
Fig.4 Schematic diagram of Burgers model

对加载阶段的 Burgers 模型进行分析, 当竖向应力 σ 作用时, Burgers 模型的本构方程为

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: σ 为一维固结压缩试验的竖向应力; E_1 、 E_2 为胡克弹簧的弹性模量; η_1 、 η_2 为牛顿黏壶的黏性系数。

竖向应力 σ 为常数时, 式(1)改写为

$$\varepsilon_p(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_p(t)$ 为 Burgers 模型加载阶段的应变。

令 $A = \frac{\sigma}{E_1}$, $B = \frac{\sigma}{\eta_1}$, $C = \frac{\sigma}{E_2}$, $D = \frac{E_2}{\eta_2}$, 式(2)中 $\varepsilon_p(t)$ 可写为

$$\varepsilon_p(t) = A + Bt + C(1 - e^{-Dt}) \quad (3)$$

分析卸载阶段 Burgers 模型, 本文根据其特点, 推导了 Burgers 模型卸载阶段本构方程。对 Maxwell 与 Kelvin 体分别进行分析。对于 Maxwell 体, 当竖向应力 σ 恒定时, 根据初始条件 $\varepsilon(t)|_{t=0} = \sigma / E_1$ 可得

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t \quad (4)$$

采用分级卸载法, t_1 时刻卸除竖向应力 $\Delta\sigma$ 至 σ_1 , 由于卸荷比为 1, 故 $\Delta\sigma = \sigma_1 = \sigma / 2$ 。 $\Delta\sigma$ 为卸除的竖向应力, σ_1 为卸载后的竖向应力, t_1 为卸载时刻。当 $t \geq t_1$ 时, Maxwell 体卸载阶段的应变 ε_{Mr} 为

$$\varepsilon_{Mr} = \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t_1 + \frac{\sigma_1}{\eta_1} (t - t_1) \quad (5)$$

对于 Kelvin 体, 在 t_1 时刻卸除竖向应力 $\Delta\sigma$ 至 σ_1 , 当 $t \geq t_1$ 时, Kelvin 体在卸载阶段的应变 ε_{Kr} 为

$$\varepsilon_{Kr} = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) - \frac{\sigma - \sigma_1}{E_2} \left[1 - e^{-\frac{E_2 (t-t_1)}{\eta_2}} \right] \quad (6)$$

于是 Burgers 模型在卸载阶段的应变 ε_r 为

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{Mr} + \varepsilon_{Kr} =$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t_1 + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{E_2} e^{-\frac{E_2 (t-t_1)}{\eta_2}} - \frac{2\sigma}{E_2} e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right] \quad (7)$$

$$\text{令 } A = \frac{\sigma}{E_1}, B = \frac{\sigma}{\eta_1}, C = \frac{\sigma}{E_2}, D = \frac{E_2}{\eta_2}, \text{ 式 (7)}$$

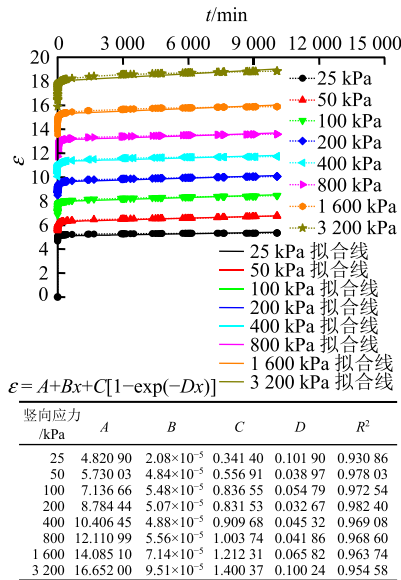
可改写为

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} [A + Bt_1 + Bt + C + Ce^{-D(t-t_1)} - 2Ce^{-Dt}] \quad (8)$$

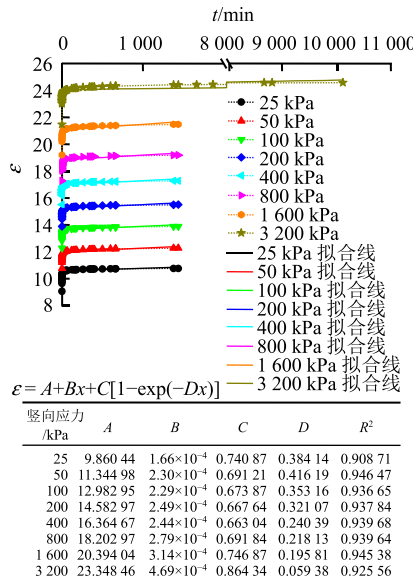
4.3 加卸载阶段的 Burgers 模型参数的确定

采用式 (3) 拟合图 3 中 T1、T2、T3 试验加载阶段的 $\varepsilon-t$ 曲线, 如图 5 所示, 可见 Burgers 模型的拟合精度较高, 能较好地反映珊瑚泥在加载阶段的瞬时变形、延时衰减变形以及延时稳定变形 3 阶段的特性。

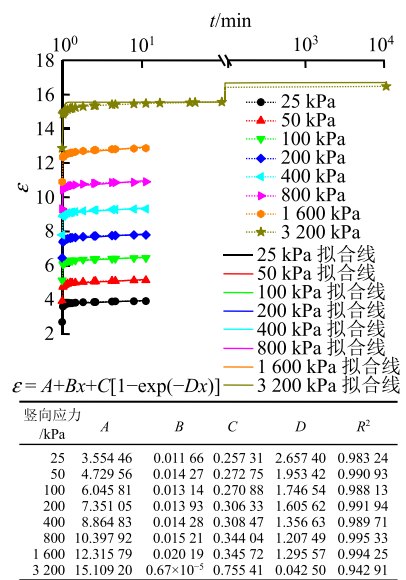
根据图 5 得到 A 、 B 、 C 、 D 的值, 由此可确定 T1、T2、T3 这 3 组试验在加载阶段各级竖向应力作用下的 Burgers 模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 , 如图 6 所示。分别采用式 (3)、(8) 对 T2 试验加、卸载阶段各级竖向应力下的 $\varepsilon-t$ 曲线进行拟合, 并将 T2 试验中从 σ_i 加载至 σ_{i+1} (σ_i 、 σ_{i+1} 为 T2 试验各加卸载阶段荷载等级) 与从 σ_{i+1} 卸载至 σ_i 作为一组分别



(a) T1 试验



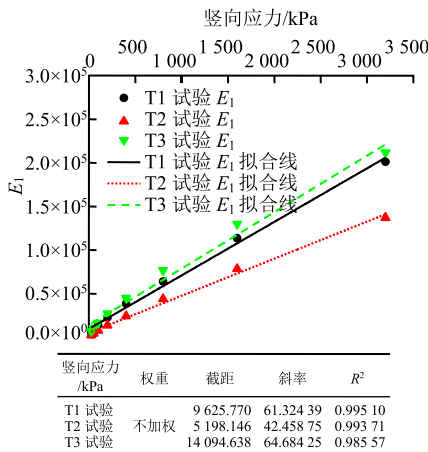
(b) T2 试验



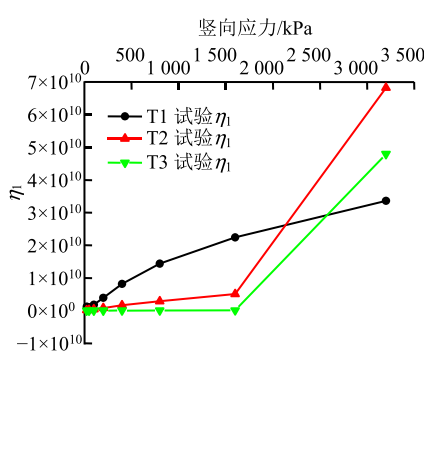
(c) T3 试验

图 5 T1、T2、T3 试验加载阶段的 $\varepsilon-t$ 曲线

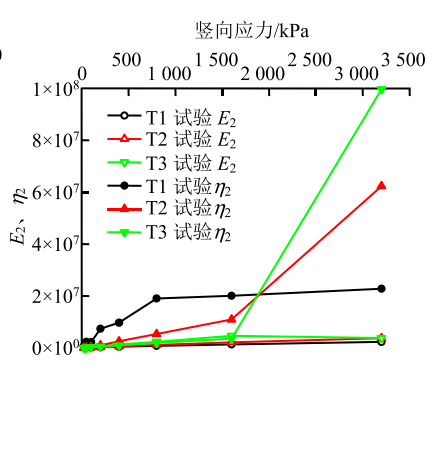
Fig.5 $\varepsilon-t$ curves in loading stages in T1, T2 and T3 tests



(a) E_1



(b) η_1



(c) E_2, η_2

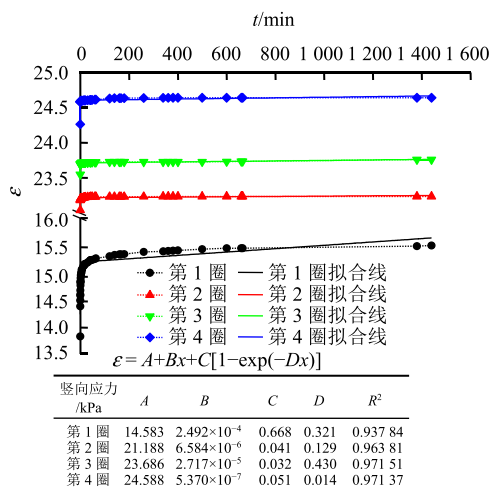
图 6 T1、T2、T3 试验加载阶段的 Burgers 模型参数

Fig.6 Burgers model parameters in loading stages in T1, T2 and T3 tests

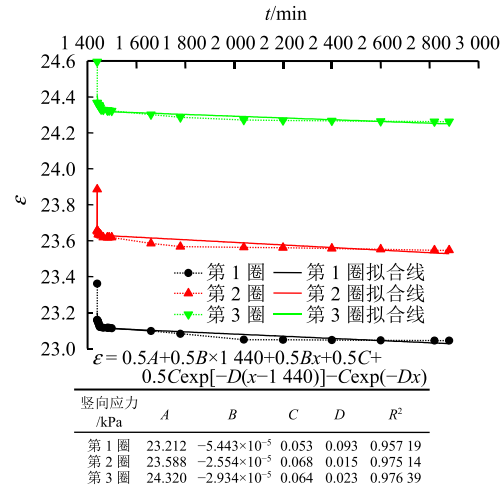
进行对比, 拟合结果如图 7 所示。

需指出的是卸载阶段 ε - t 曲线横坐标 t_1 的取值与加载阶段不同, 加载时间 t 仅考虑本级荷载, σ 为 200~1 600 kPa 时加载 1 440 min, t 取值范围为 0~1 440 min, σ 为 3 200 kPa 时加载 11 520 min, t 取值

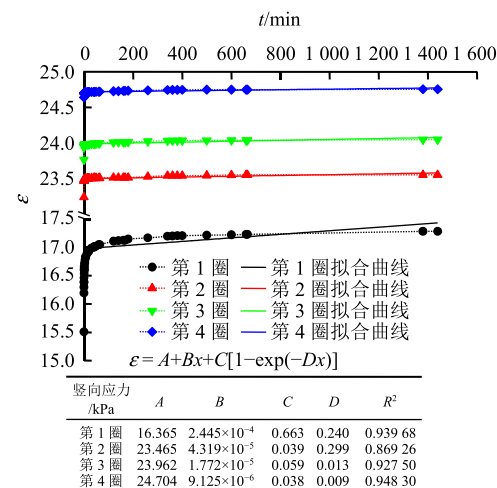
范围为 0~11 520 min; 而卸载阶段横坐标 t_1 是在上级荷载加载基础上卸载的时间, 卸载至 100~800 kPa 时, 上级荷载加载 1 440 min, t_1 的取值范围为 1 440~2 880 min, 卸载至 1 600 kPa 时, 上级荷载加载 11 520 min, t_1 取值范围为 11 520~12 960 min。



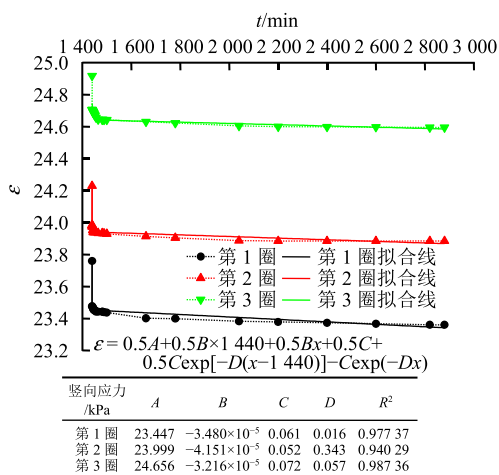
(a) 加载至 200 kPa



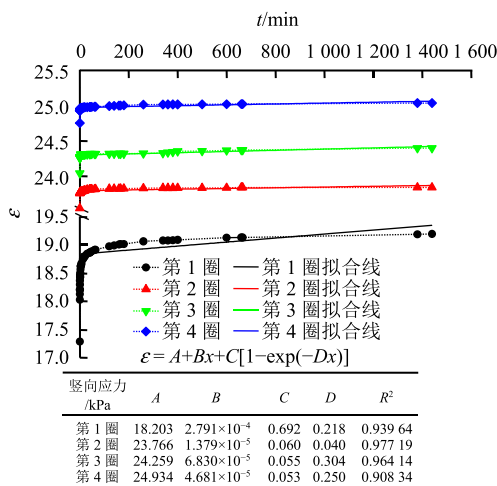
(b) 卸载至 100 kPa



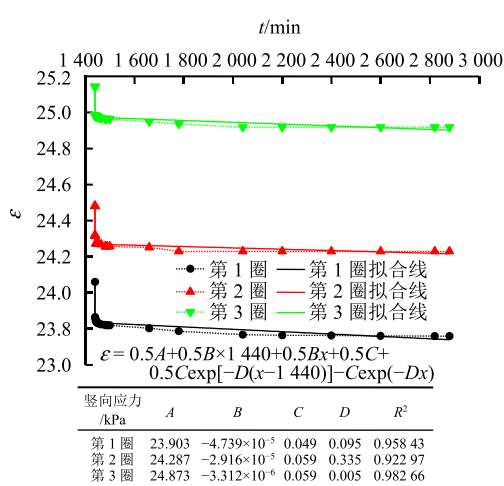
(c) 加载至 400 kPa



(d) 卸载至 200 kPa



(e) 加载至 800 kPa



(f) 卸载至 400 kPa

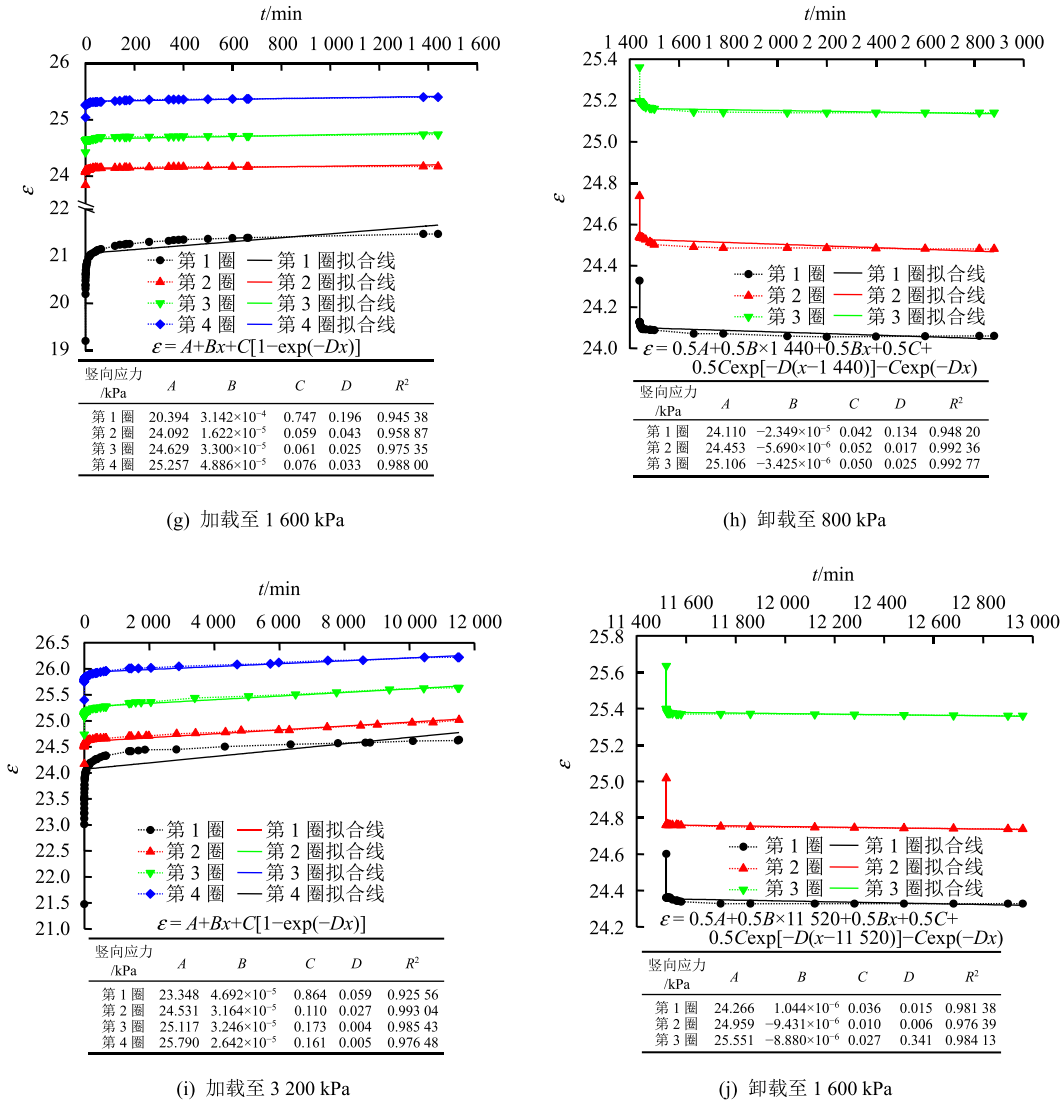


图 7 T2 试验不同加卸载圈数下的 ε - t 曲线
Fig.7 ε - t curves under different loading and unloading cycles in T2 test

根据图 7 中的 A 、 B 、 C 、 D 求得 T2 试验加卸载阶段的 Burgers 模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 ，其中卸载阶段的黏性系数 η_1 均为负值，说明典型的 Burgers 模型在卸载阶段将 Maxwell 体中牛顿黏壶的变形亦视为回弹变形，这有悖于牛顿黏壶在卸荷后的变形完全不能恢复的性质^[24]，因此传统意义上的 Burgers 体在卸载阶段存在一定的自身缺陷，虽然拟合精度较高，但其参数 η_1 已然失去了物理意义，无法精确反映珊瑚泥的长期变形特性，需对此作进一步改进。

4.4 改进的 Burgers 模型及其参数

鉴于 Burgers 模型在卸载阶段存在的自身缺陷会对分析结果产生影响，本文对经典的 Burgers 模型作进一步改进。

改进的 Burgers 模型分为加、卸载两个阶段，对于加载阶段，模型参数仍取用图 6、7 中的结果。

对于卸载阶段，针对 Maxwell 体中牛顿黏壶在卸荷后变形完全不能恢复的特性，考虑到 T2 试验加、卸荷比均为 1，本文将加载阶段 (σ_i 加载至 σ_{i+1}) 的 η_1 值代入相对应的卸载阶段 (σ_{i+1} 卸载至 σ_i) 的 Burgers 模型本构方程式 (7) 进行改进，再重新拟合图 7 中卸载阶段的 ε - t 曲线， R^2 均大于 0.9。采用改进的 Burgers 模型重新拟合后求得 T2 试验的模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 ，如图 8 所示。

4.5 改进的 Burgers 模型参数物理意义

分析加载阶段的模型参数，弹性模量 E_1 与土体在加载瞬时发生的瞬时变形有关，其余 3 个参数则与延时变形有关。在式 (2) 的基础上对 t 求导，可得加载阶段应变率 $\varepsilon'_p(t)$ 与时间 t 的关系：

$$\varepsilon'_p(t) = \frac{\sigma}{\eta_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[\frac{E_2}{\eta_2} e^{\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t \right)} \right] \quad (9)$$

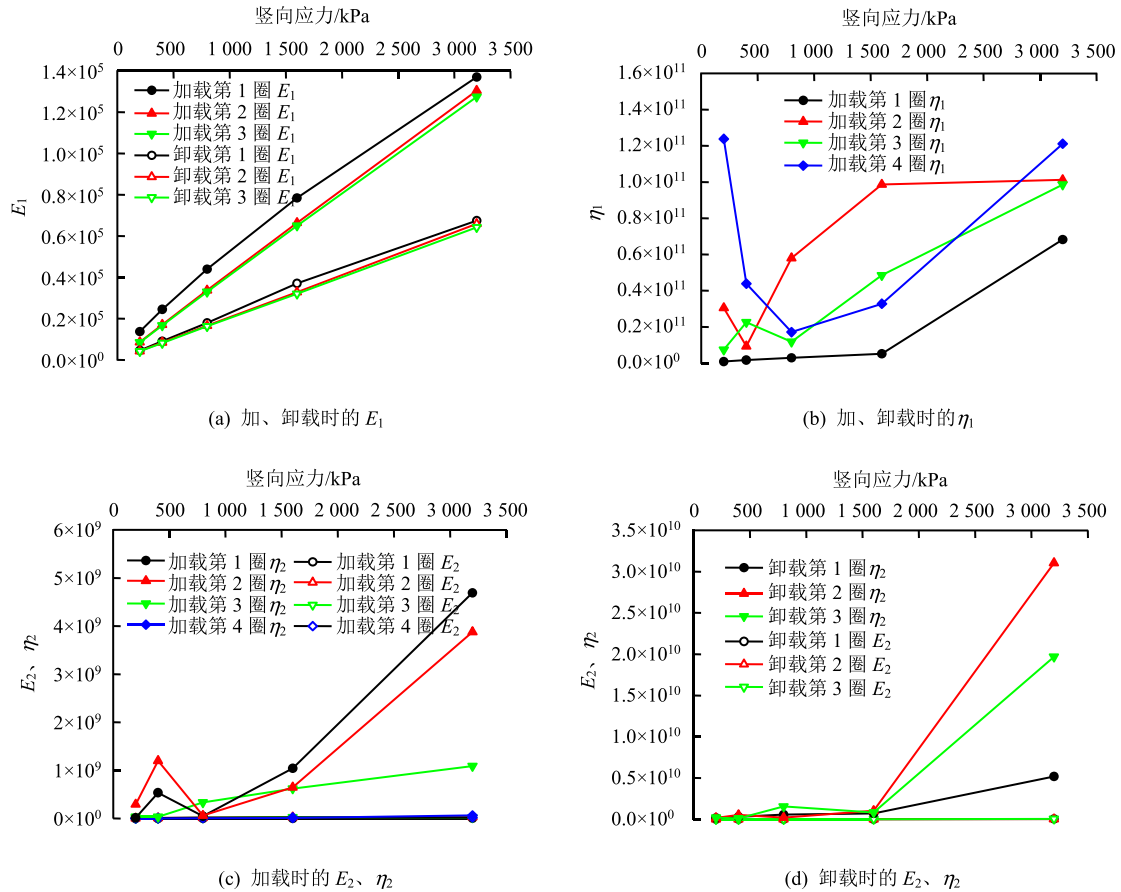


图 8 T2 试验中改进的 Burgers 模型参数
Fig.8 Improved Burgers model parameters in T2 test

当 $t \rightarrow \infty$ 时,

$$\varepsilon'_p(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{\sigma}{\eta_1} \quad (10)$$

根据式 (9) 对 t 进一步求导, 可得

$$\varepsilon''_p(t) = -\frac{\sigma}{E_2} \left(\frac{E_2}{\eta_2} \right)^2 e^{\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t \right)} \quad (11)$$

可见, 土体在加载阶段的长期变形特性可通过模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 表征。在瞬时变形阶段, 土体的瞬时变形量与弹性模量 E_1 有关。在延时衰减变形阶段, 由式 (11) 可知 $\varepsilon''_p(t)$ 恒小于 0, 应变速率随着时间的增加而减小, 土体表现出延时衰减特性, 与弹性模量 E_2 、黏性系数 η_2 有关。在延时稳定变形阶段, 由式 (10) 可知土体发生延时稳定变形, 当 t 趋于无穷时, 应变速率趋于定值 σ / η_1 , 符合维也纳一维固结压缩试验得到的结论^[25], 在相同的竖向应力下, 应变速率随着黏性系数 η_1 的增大而减小。

分析卸载阶段的模型参数, 弹性模量 E_1 与土体在卸载瞬时发生的瞬时变形有关, 其余 3 个参数则

与延时变形有关。在 Burgers 卸载的本构方程式 (7) 的基础上对 t 求导, 可得

$$\varepsilon'_r(t) = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\eta_1} - \frac{1}{2} \frac{\sigma}{E_2} \frac{E_2}{\eta_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_1)} + \frac{\sigma}{E_2} \frac{E_2}{\eta_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \quad (12)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,

$$\varepsilon'_r(t) = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\eta_1} \quad (13)$$

根据式 (12) 对 t 进一步求导, 可得

$$\varepsilon''_r(t) = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{E_2} \left(\frac{E_2}{\eta_2} \right)^2 e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_1)} - \frac{\sigma}{E_2} \left(\frac{E_2}{\eta_2} \right)^2 e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \quad (14)$$

由图 7 中卸载曲线可知, 当 t 的取值范围为 1 440~1 570 min 时, $\varepsilon''_r(t) > 0$, 卸载曲线呈下凸状。

在卸载阶段, 模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 也表征着与加载阶段相似的规律。由式 (13) 可知, 土体延时稳定应变速率随时间趋于定值 $\sigma / 2\eta_1$ 。

4.5.1 分级加载时间对珊瑚泥一维固结长期变形的影响

在对 T1、T2、T3 这 3 组试验中加载阶段的模

型参数物理意义的研究基础上, 分析分级加载时间对珊瑚泥一维固结长期变形性质的影响。

由图 6(a)可知, 3 组试验的弹性模量 E_1 均与竖向应力 σ 成正比。分析土体瞬时应变增量, 如图 9 所示, 当分级加载时间提高约 140 倍时, T2 试验瞬时应变增量的增长率约为 T3 试验的 0.34~0.84 倍; 当分级加载时间提高约 1 000 倍时, T1 试验增长率约为 T3 试验的 0.15~0.67 倍。因此增加分级加载时间可有效减小瞬时应变增量及其增长率。

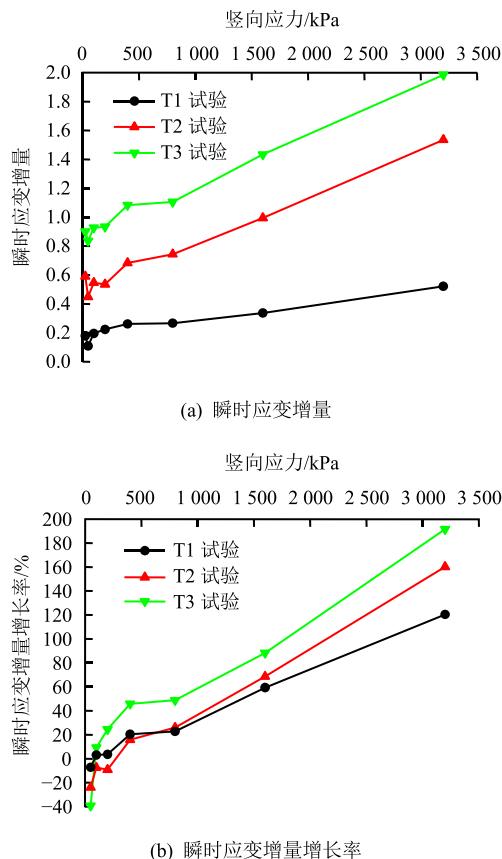


图 9 T1、T2、T3 试验瞬时应变增量及其增长率
Fig.9 Instantaneous strain increment and its growth rate in T1, T2 and T3 tests

分析土体在延时衰减阶段的变形特性, 由式(9)可知, 土体应变速率的变化主要由弹性模量 E_2 与黏性系数 η_2 控制, 应变速率在加载后某一时间趋于定值 σ/η_1 , 此时延时衰减阶段结束, 土体进入延时稳定变形阶段。本文提出用下式分析延时衰减时间与竖向应力、弹性模量 E_2 及黏性系数 η_2 的关系:

$$t_a = \frac{\sigma}{E_2} \left(a \frac{\eta_2}{\sigma} + b t_0 \right) \quad (15)$$

式中: t_a 为延时衰减时间 (min); a 、 b 为参数; t_0 为参考时间, $t_0 = 0.1$ min。

式(15)的拟合结果如表 3 所示, R^2 均大于 0.95。

参数 a 随着分级加载时间的增加而减小, 而参数 b 随着分级加载时间的增加而增大。

表 3 3 组试验中 t_a 与 σ 、 E_2 、 η_2 的拟合结果

试验序号	a	b	相关系数 R^2
T1	19.804 39	229 033.167 6	0.998 20
T2	21.330 75	6 881.254 5	0.996 72
T3	25.923 84	-254 079.901 9	0.999 82

结合图 10 可知, 随着分级加载时间的增加, 延时衰减时间在竖向应力较小时增长, 而在竖向应力最大时缩短, 说明在前期荷载加载阶段, 土颗粒在较长的加载时间下排列逐渐紧密, 延时衰减时间增长, 而在最终荷载下土颗粒较难移动, 延时衰减时间缩短, 土体较快进入延时稳定变形阶段。

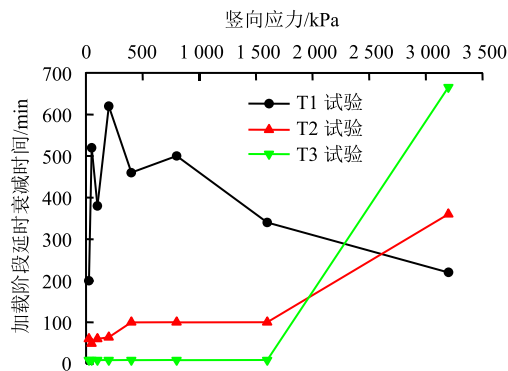


图 10 T1、T2、T3 试验加载阶段的延时衰减时间
Fig.10 Duration of delayed attenuation deformation in loading stages in T1, T2 and T3 tests

由图 6(b)、图 11 可知, 竖向应力较小时, T1 试验的黏性系数 η_1 最大, T2 次之, T3 最小, 此时 T1、T2 试验延时稳定应变速率远小于 T3 试验; 竖向应力较大时, 三者的延时稳定应变速率相近且均趋于 0。因此, 增加分级加载时间可有效减小土体的延时稳定应变速率。

对比图 3 中 3 组试验最终荷载 3 200 kPa 下的总应变增量, T1 试验为 2.964%, T2 为 2.995%, T3 为 3.612%。综合分级加载下土体的上述变形特性, 增加分级加载时间在一定程度上可减弱土体的长期变形。

4.5.2 加卸载循环圈数对珊瑚泥一维固结长期变形的影响

在对 T2 试验加卸载阶段的模型参数物理意义的研究基础上, 分析加卸载循环圈数对珊瑚泥一维固结长期变形性质的影响。

由图 12 可知, 相同加卸载圈数与相同竖向应力

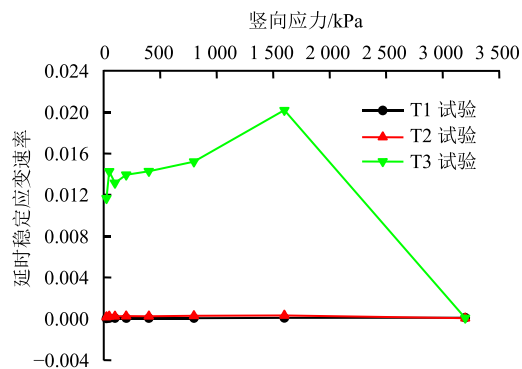


图 11 T1、T2、T3 试验加载阶段的延时稳定应变速率
Fig.11 Delayed stable strain rate in loading stages in T1, T2 and T3 tests

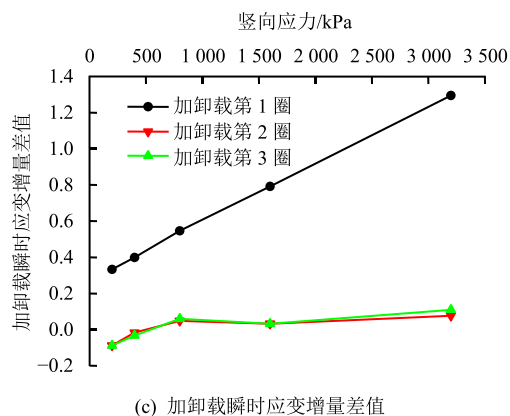
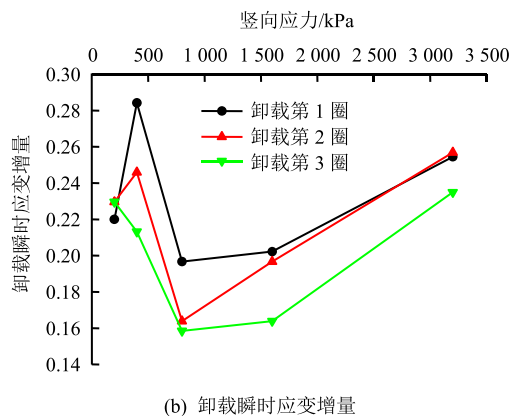
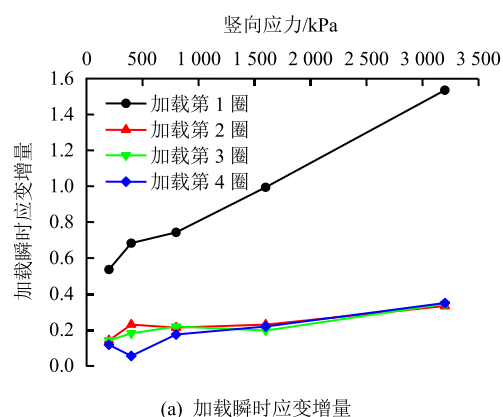


图 12 T2 试验加、卸载瞬时应变增量
Fig.12 Instantaneous strain increment in loading and unloading stages in T2 test

下,土体在卸载阶段的瞬时应变增量小于加载阶段。结合图 3(c)可知,随着加卸载循环圈数的增加,加、卸载阶段的瞬时应变增量均减小且二者相近。

采用式 (15) 拟合不同循环圈数下延时衰减时间与竖向应力、弹性模量 E_2 及黏性系数 η_2 的关系,如表 4 所示,拟合精度较高。随着加卸载循环圈数的增加,参数 a 均先减小后增大,参数 b 先增大后减小。

表 4 T2 试验中 t_a 与 σ 、 E_2 、 η_2 的拟合结果

加卸载圈数	a	b	相关系数 R^2
加载第 1 圈	21.364 86	1 757.553 9	0.996 31
加载第 2 圈	7.438 35	27 410 900.000 0	0.855 55
加载第 3 圈	9.419 67	8 055 815.019 5	0.928 28
加载第 4 圈	17.579 19	-5 760 480.734 8	0.994 98
卸载第 1 圈	14.032 92	-3 451 387.183 3	0.995 32
卸载第 2 圈	12.341 19	119 553 000.000 0	0.886 22
卸载第 3 圈	14.199 28	17 474 600.000 0	0.999 17

结合图 13 可知,随着加卸载圈数的增加,土体在加载以及逐级卸载阶段的延时衰减时间均减小,说明在反复的加卸载循环作用下,土颗粒间的排布更为紧密,不断趋近于稳定状态,土体更快进入延时稳定变形阶段。

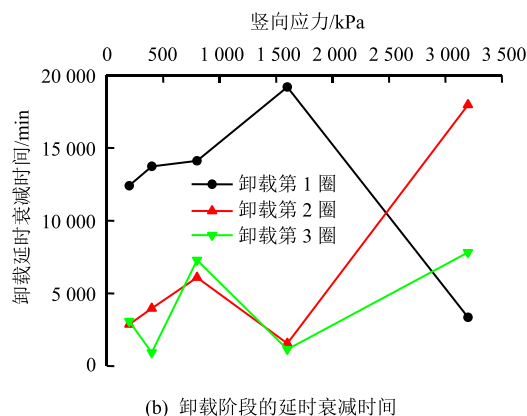
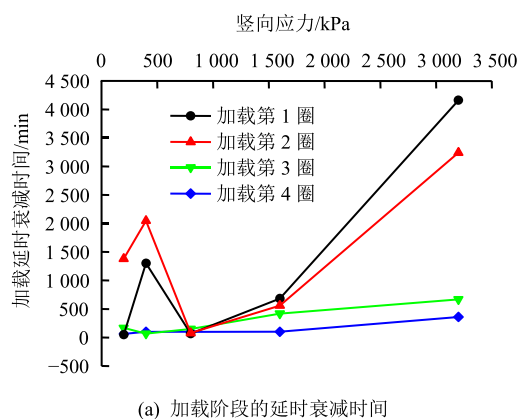


图 13 T2 试验延时衰减时间
Fig.13 Duration of delayed attenuation deformation in T2 test

由图 8(b)、14 可知, 相同竖向应力作用下, 加卸载第 1 圈的黏性系数 η_1 最小, 延时稳定应变速率最大。随着加卸载循环圈数的增加, 延时稳定应变速率迅速减小且趋近于 0。

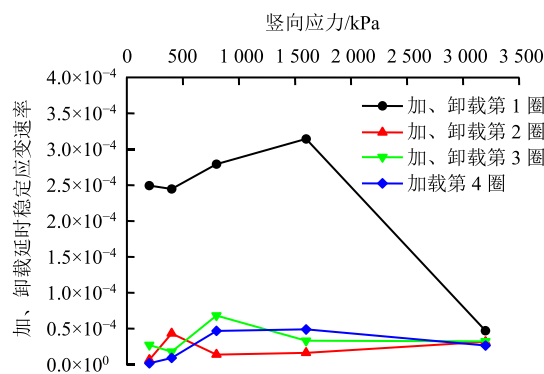


图 14 T2 试验加、卸载延时稳定应变速率

Fig.14 Delayed stable strain rate in loading and unloading stages in T2 test

根据图 3(b)、3(c)对比 T2 试验各加卸载循环圈数下加载至 3 200 kPa 时的总应变增量, 加卸载第 1 圈时为 2.995%, 第 2 圈为 0.896%, 第 3 圈为 0.847%。综合加卸载下土体上述 3 阶段的变形特性, 增加加卸载循环圈数能在一定程度上减弱土体的长期变形。

5 结 论

(1) 南海珊瑚泥的微观颗粒形态不规则、孔隙比高等特点使之与一般的软黏土有较大区别。本文通过不同加卸载方案的一维固结压缩试验, 研究了珊瑚泥在加卸载阶段的长期变形性质, 根据 $\varepsilon-t$ 试验曲线的变化规律, 采用改进的 Burgers 模型拟合, 拟合精度均较高, 能较好反映珊瑚泥的瞬时变形、延时衰减变形与延时稳定变形特性。

(2) 进一步挖掘改进的 Burgers 模型参数表征的珊瑚泥各变形阶段的物理意义。 E_1 反映瞬时变形特性, 可表征瞬时应变增量; E_2 、 η_2 反映延时衰减变形特性, 可表征延时衰减时间; η_1 反映延时稳定变形特性, 可表征延时稳定应变速率, 同级荷载下 η_1 越大, 延时稳定应变速率越小。

(3) 随着分级加载时间的提高, 土体的瞬时应变增量及其增长率下降, 最终荷载下延时衰减时间缩短, 延时稳定应变速率及最终荷载下总应变增量减小, 故增加分级加载时间可在一定程度上减弱珊瑚泥的长期变形。

(4) 循环加卸载时, 同圈数同竖向应力下卸载

阶段的瞬时应变增量小于加载阶段。随着加卸载圈数的增加, 加、卸载瞬时应变增量均减小且二者相近; 加载及逐级卸载阶段延时衰减时间缩短; 延时稳定应变速率及最终荷载下总应变增量减小, 故增加循环加卸载圈数能在一定程度上减弱珊瑚泥的长期变形。

(5) 随着分级加载时间与加卸载循环圈数的增加, 南海珊瑚泥的长期非线性变形能得到有效的减弱, 因此在实际工程的堆载预压方案设计中, 采用延长分级加载时间并增加循环加卸载圈数的方法, 或能在一定程度上增强吹填岛礁地基的长期稳定性。

参 考 文 献

- [1] 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 Wen-juan. 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.
- [2] 袁征, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 87-93.
YUAN Zheng, YU Ke-fu, WANG Ying-hui, et al. Research progress in the engineering geological characteristics of coral reefs[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(1): 87-93.
- [3] 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): 2065-2079.
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): 2065-2079.
- [4] 殷建华, CLARK J I. 土体与时间相关的一维应力-应变形状、弹粘塑性模型和固结分析[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 65-80.
YIN Jian-hua, CLARK J I. One-dimensional time dependent stress-strain behaviour of soils, elastic visco-plastic modelling, and consolidation analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(3): 65-80.
- [5] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time-compressibility and stress-compressibility interrelationship[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1979, 105(1): 106-113.
- [6] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress compressibility interrelationship[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1979, 103(5): 417-430.

- [7] MESRI G, FEBRESCORDERO E, SHIELDS D R, et al. Shear stress-strain-time behaviour of clays[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(4): 537-552.
- [8] LADD C, FOOTT R, ISHIHARA K, et al. Stress-deformation and strength characteristics: state of the art report[C]//Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: [s. n.]: 1977.
- [9] BJERRUM L. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to the settlements of buildings[J]. **Geotechnique**, 1967, 17(2): 83-118.
- [10] GRAHAM J, CROOKS J H, BELL A L. Time effects on the stress-strain behavior of natural soft clays[J]. **Geotechnique**, 1983, 33(3): 327-340.
- [11] YIN J H. Calculation of settlements of foundation soils considering creep[C]//Proceedings of the Nakase Memorial Symposium. Boca Raton: CRC Press, 2003: 205-211.
- [12] YIN J H, GRAHAM J. Equivalent times and one-dimensional elastic viscoplastic modelling of time-dependent stress-strain behaviour of clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(1): 42-52.
- [13] YIN J H. Non-linear creep of soils in oedometer tests[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(5): 699-707.
- [14] YIN J H, TONG F. Constitutive modeling of time-dependent stress-strain behaviour of saturated soils exhibiting both creep and swelling[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(12): 1870-1885.
- [15] FENG W Q, LALIT B, YIN Z Y, et al. Long-term non-linear creep and swelling behavior of Hong Kong marine deposits in oedometer condition[J]. **Computers and Geotechnics**, 2017, 84: 1-15.
- [16] 胡惠华, 贺建清, 聂士诚. 洞庭湖砂纹淤泥质土一维固结蠕变模型研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1269-1276.
- HU Hui-hua, HE Jian-qing, NIE Shi-cheng. One-dimensional consolidation creep model for sandy grain muddy soil of Dongting Lake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(5): 1269-1276.
- [17] 王元战, 王婷婷, 王军. 滨海软土非线性流变模型及其工程应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2679-2685.
- WANG Yuan-zhan, WANG Ting-ting, WANG Jun. A nonlinear rheological model of soft clay and its application to Tianjin littoral area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2679-2685.
- [18] TAYLOR D W, MERCHANT W. A theory of clay consolidation accounting for secondary compression[J]. **Journal of Mathematics and Physics**, 1940, 19(3): 167-185.
- [19] 殷德顺, 任俊娟, 和成亮, 等. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1899-1903.
- YIN De-shun, REN Jun-juan, HE Cheng-liang, et al. A new rheological model element for geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1899-1903.
- [20] 刘忠玉, 杨强. 基于分数阶 Kelvin 模型的饱和黏土一维流变固结分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3680-3697.
- LIU Zhong-yu, YANG Qiang. One-dimensional rheological consolidation analysis of saturated clay using fractional order Kelvin's model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(12): 3680-3697.
- [21] 刘清秉, 王顺, 夏冬生, 等. 残余强度状态下原状滑带土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1305-1313.
- LIU Qing-bing, WANG Shun, XIA Dong-sheng, et al. Experimental study of residual-state creep behavior of intact sliding-zone soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1305-1313.
- [22] 陈晓平, 白世伟. 软土蠕变-固结特性及计算模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 728-734.
- CHEN Xiao-ping, BAI Shi-wei. Research on creep-consolidation characteristics and calculating model of soft soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 728-734.
- [23] 沈扬, 冯照雁, 刘汉龙, 等. 初始浓度对南海珊瑚泥沉积浊液面沉速特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 22-26.
- SHEN Yang, FENG Zhao-yan, LIU Han-long, et al. Experimental study on effects of initial concentration on settling velocity characteristics of turbid surface of South China Sea coral mud[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl.2): 22-26.
- [24] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical theory and calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [25] BRANDL H. Consolidation/creeping of soils and pre-treated sludge[J]. **Poromechanics V-Proceedings of the 5th Biot Conference on Poromechanics**, 2013(1): 1346-1357.