

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.13

盾构施工与波浪荷载耦合作用后软土力学特性

刘浩旭, 朱剑锋, 饶春义, 潘斌杰

(宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对波浪循环荷载作用和盾构穿越海堤过程中的施工扰动对下卧软黏土地基的弱化效应问题, 研究了盾构施工与波浪荷载耦合作用后海洋软土的强度和刚度变化规律。通过逐步降围压的方式模拟盾构施工过程中的地层损失所引起的应力释放, 循环加载 3 000 次模拟波浪荷载长期作用, 开展了波浪和盾构施工耦合作用后的软土空心圆柱扭剪不排水剪切单元体试验。试验结果表明: (1) 在盾构施工与波浪荷载耦合作用下, 软黏土的强度和刚度均随围压变大而增强, 在同一围压下, 二者均随波浪循环次数和土体损失率(δ)的增大而减小。(2) 在相同的波浪循环剪切次数下, 软黏土初始切线模量随 δ 的增加而呈线性递减趋势, 而软黏土黏聚力和内摩擦角随 δ 的增加而呈现非线性减小。波浪和盾构施工耦合作用后软黏土的强度和刚度均呈现不同程度的衰减, 二者耦合扰动作用对软黏土的弱化效应在实际工程中应充分重视。此研究对探讨复杂扰动条件下海洋结构性软土力学特性规律, 丰富和发展扰动状态下结构性软土的计算理论, 以及对海岛基础设施建设具有重要的参考价值。

关键词: 波浪荷载; 盾构施工; 土体扰动; 空心圆柱扭剪仪; 软黏土; 强度; 刚度

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0097-07

Mechanical properties of soft clay after coupling between shield construction and wave loading

LIU Haoxu, ZHU Jianfeng, RAO Chunyi, PAN Binjie

(Faculty of Architectural Civil Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: The soften effect of the cyclic wave loading and construction disturbance during shield passing through the breakwater on the beneath soft clay ground is examined and the static mechanical behaviour (shear strength, stiffness, etc.) of the marine soft soil after coupling of shield construction disturbance and wave loading are investigated in this paper. A series of hollow cylinder apparatus (HCA) undrained shear elementary tests of the soft clay after coupling between shield construction disturbance and wave loading are conducted, in which the stress loss induced by the ground loss during the shield construction is modeled through gradually reducing the confining pressure and the long-time wave loading is simulated by the 3,000 cyclic loading. The experimental results show that (1) both the shear strength and stiffness of the soft clay increases with the increasing confining pressure. However, they both decrease with the increasing wave cycles and ground loss rate (δ) under the same confining pressure. (2) Under the same wave cycle shear times, the initial tangent modulus of the soft clay decreases linearly with the increasing soil loss (δ) under the same wave cycle. However, both the cohesive force and internal friction angle decrease nonlinearly with the increase of δ . Above all, both the shear strength and stiffness of the soft clay are reduced in different amplitudes after the coupling actions of wave loading and shield construction. It is suggested that full attention should be paid to

收稿日期: 2018-10-13; 修订日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51879133; 51409142); 浙江省自然科学基金项目资助(LY17E080006)

第一作者: 刘浩旭(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事波浪荷载作用下的软土力学性质研究。E-mail: liuhaoxu@nbu.edu.cn

通讯作者: 朱剑锋(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为波浪-结构物-海床相互作用。E-mail: zhujianfeng0811@163.com

the soften effect on static mechanical behaviour of soft clay after the coupled disturbance effect of shield construction and wave loads in practical engineering.

Keywords: wave load; shield construction; soil disturbance; hollow cylinders; soft clay; strength; stiffness

近年来,随着发电厂、人工岛屿、海底隧道开挖以及海堤项目的大规模兴建,波浪荷载循环剪切作用(包括作用时与作用后)对软土力学性状的影响机理也引起了广泛关注。Yasuhara 等^[1]的动三轴试验结果表明黏土动强度随应变发展而降低。Attila 等^[2]通过开展循环直剪试验发现正常固结黏土的动强度比与循环次数的对数之间呈线性关系。Lee 等^[3]认为循环加载 1 000 次以上的动强度大约为静态强度的 20% ~ 50%。Idriss 等^[4]研究了循环荷载作用下饱和软黏土的模量软化特性,并提出了软化指数和软化系数的概念。要明伦等^[5]通过饱和软黏土动三轴试验修正了 Idriss 的软化系数。ZHOU 等^[6]根据杭州软黏土的动三轴实验结果提出了综合考虑超固结比、循环应力比、频率等因素的软化模型。目前,循环荷载作用下软黏土模量和强度将发生衰减基本达成共识,然而关于循环荷载作用后软土的力学特性变化规律尚未明确。Hicher 等^[7]认为改变主应力方向会影响黏土微观结构,进而引起土体强度降低;Yasuhara 等^[8]发现主体模量比强度衰减明显;Esrig 等^[9]对密西西比三角洲沉积海洋黏土的固结不排水试验表明,软黏土未发现明显的强度降低。Austin^[10]发现在给定动应力水平下,经历循环荷载后试样强度略微增长。沈扬等^[11]对杭州原状软黏土空心圆柱扭剪结果表明,试样抗剪强度受主应力轴旋转影响不明显。王淑云等^[12]、黄博等^[13]、郝鑫^[14]等研究认为,循环振动作用后的黏土强度是否衰减取决于应变和孔压是否超过阈值。

在进行海滨发电厂建设时,通常采用盾构法来修建多条循环水输水隧道。盾构施工会产生土层的扰动,改变土体的初始平衡状态,从而引起不同程度的沉降变形^[15-17]。林存刚等^[18]认为盾构施工对周围土体的扰动、堤顶车辆对土体施加的循环荷载及降雨等共同作用使盾构在大堤下施工引起的地表沉降更大。虽然在陆域软土中盾构施工扰动研究已有大量研究^[19-23]。然而,海洋软土中盾构施工的扰动效应仍处于探索阶段。李玲玲等^[24]对进排水盾构隧道穿越新建海堤进行了有限元模拟,结果表明:网格盾构法施工对周围土体产生

较大的扰动,为保证施工过程中海堤稳定,建议在穿越海堤阶段盾构施工速度宜控制在 7 环/d;徐学勇等^[25]开展了盾构穿越海堤过程中海堤沉降变形和整体抗滑稳定性的数值分析,结果表明:受盾构管道穿越施工扰动的影,穿越位置处海堤的整体抗滑稳定系数略有降低。上述研究仅考虑了盾构施工对周围土层的扰动作用,尚未分析波浪对海堤的下卧软土产生的循环剪切作用以及二者的耦合效应。

鉴于盾构施工引起的扰动主要由土体损失引起^[21-23],本文以降围压方式^[26-27]模拟盾构施工过程中地层损失引起的应力释放,以长期循环剪切试验模拟波浪荷载的作用,开展波浪和盾构施工耦合作用空心圆柱扭剪试验,分析耦合作用后软黏土的强度和刚度的变化规律,揭示盾构施工和波浪荷载耦合作用下土体弱化机理。

1 试验仪器与试验土样

本次试验采用浙江大学 5 Hz 空心圆柱扭剪仪(Hollow Cylinder Apparatus 简称 HCA),如图 1 所示,对空心圆柱试样独立施加轴向力 W 、扭矩 M_T 、内压力 P_i 、外压力 P_o ,这 4 个参数进行独立控制来实现主应力轴连续旋转等复杂的试验应力路径^[28]。采用线弹性假定计算轴向应力、径向应力和环向应力,采用线弹性模型和理想塑性模型的平均值来计算扭剪应力。相应的应变分量竖向应变、径向应变、环向应变及扭剪应变如表 1 所示。

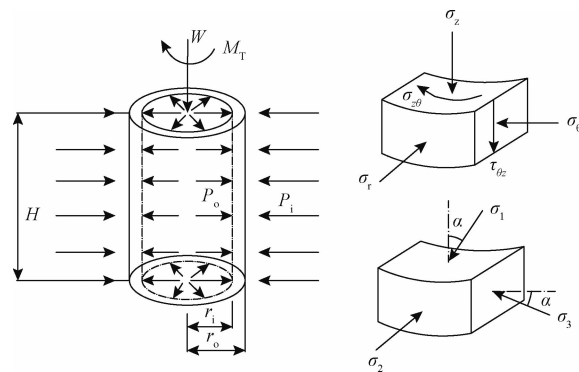


图 1 空心圆柱试样受力示意图

Fig. 1 Stress state of the hollow cylinder specimens

本次试验土样取自杭州某基坑工程项目原状淤泥质黏土,取土深度为地表底下 5~6 m 处,试样尺寸为 200 mm(高度)×100 mm(外直径)×60 mm(内直径)。具体物理参数如表 2 所示。

表 1 HCA 中各应力及应变分量计算式
Table1 Each stress and strain calculation formula in HCA

分量	应力	应变
轴向	$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_o(r_o^2 - r_i^2) - P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$	$\varepsilon_z = \frac{z}{H}$
径向	$\sigma_r = \frac{P_o r_o + P_i r_i}{r_o + r_i}$	$\varepsilon_r = \frac{u_o - u_i}{r_o - r_i}$
环向	$\sigma_\theta = \frac{P_o r_o - P_i r_i}{r_o - r_i}$	$\varepsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_o + r_i}$
剪切	$\tau_{z\theta} = \frac{M_T}{2} \left[\frac{3}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{4(r_o^3 - r_i^3)}{3\pi(r_o^2 - r_i^2)(r_o^4 - r_i^4)} \right]$	$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)}$

式中: r_i —试样内径/mm; r_o —试样外径/mm; H —试样高度; z —竖向变形; u_i —试样内径变形; u_o —试样外径变形。

表 2 原状土的物理指标
Table 2 Basic parameters of the intact clay

土样名称	含水量 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	天然孔隙比 e	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	比重 G_s
软黏土	52	1.64	1.5	27.6	48.6	2.75

制样时参考文献[29]的方法:先切取试块的内心,试块的外部则用胶带纸进行保护。内壁切好之后再用切土刀进行精修,最后修剪试样的外壁。通过这一改进可以进一步减小制样过程对土样的扰动,并可以提高试样尺寸的精度。制备完成和剪切结束的原状试样如图 2 所示。

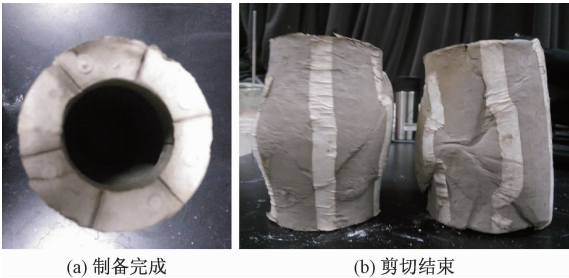


图 2 HCA 试样
Fig.2 Hollow cylinder clay specimens

2 试验方案与假设

2.1 基本假定

(1)波浪荷载可以简化等波长、等幅度的无限延长的简谐波,假设土体为半无限各向同性弹性体,其正

应力偏差与剪应力所形成的循环偏应力幅值保持不变,主应力方向发生连续旋转,应力路径为圆形。

(2)忽略海堤填筑前软土地基受波浪长期作用的影响,假定海堤填筑完成后下卧软土完全等向固结(受试验仪器条件和对象强度较低的限制,不等向固结时土样易产生较大的径向变形)。

(3)盾构工程施工过程中造成的地表沉降主要由地层损失引起,因此可通过降围压的方式模拟盾构施工地层损失,并与波浪荷载耦合。

2.2 试验方案

现分别以地表以下 4 m、8 m 以及 12 m 的单元体作为计算单元,考虑到海堤自重的影响,分别取初始围压为 100 kPa($z=4$ m)、200 kPa($z=8$ m)以及 300 kPa($z=12$ m)的软土单元体来研究。当试样安装完成后,对试样分别施加 100、200、300 kPa 的等向固结压力,当试样固结稳定后,在循环剪切的同时逐步降低围压至设计值(整个过程约 40 s),对试样循环剪切 3 000 次后,再利用空心圆柱扭剪仪进行静力不排水三轴剪切试验,测定波浪荷载和盾构施工耦合作用后的软土强度与刚度(初始弹性模量)。循环剪切试验采用应力控制方式,为方便施加荷载,不同深度处软土单元的动剪应力幅值(τ_{dmax})统一取为 15 kPa^[30],频率为 0.5 Hz^[31-32],不排水三轴剪切采用应变控制方式,轴向变形速率 0.1 mm/min,按 0.05%/min 的应变速率计算,最大到 15%。整个试验过程中试样始终处于完全饱和状态。

3 试验结果

3.1 盾构施工和波浪荷载耦合作用前后土体特性

在原状土($\delta=0$)、不同地层损失率($\delta=10\%$, 20%, 30%)以及 3 000 次波浪循环荷载($\tau_{dmax}=15$ kPa, $f=0.5$ Hz)作用下,不同土体埋深单元体试样的偏应力 $q(=\sigma_1 - \sigma_3)$ 和轴向应变 ε_z 之间的关系曲线见图 3,其中 σ_{3o} 表示原始围压。由图 3 可知:

(1)各工况下单元体试样的应力-应变曲线近似呈双曲线分布,且围压越大,初始切线斜率越大,软土的强度越高。

(2)随着盾构施工扰动程度(地层损失率)的增大,各围压下的软黏土应力应变曲线的初始斜率逐渐降低,峰值强度逐渐减小。

3.2 盾构施工和波浪荷载耦合作用对软黏土强度的影响

由图 3 试验结果可得到不同围压下的波浪循环荷

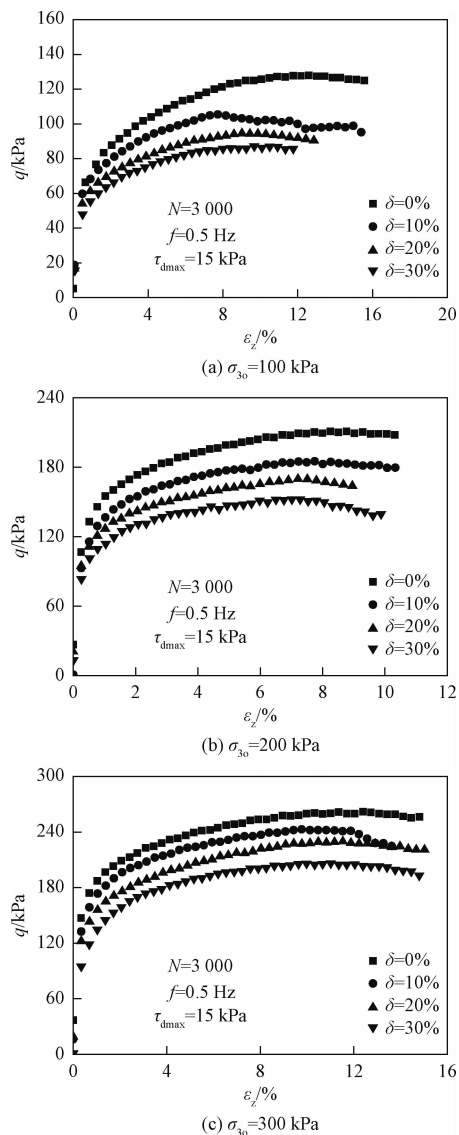


图3 盾构施工和波浪荷载耦合作用前后软黏土应力应变关系

Fig.3 Relationship between stress and strain before and after the coupled effect of shield construction and sea wave loads

载与盾构施工耦合作用前后的软黏土的主应力值(表3),其中 σ_{3u} 为不同地层损失对应的最终围压。

利用 Excel 中的规划求解功能可绘出由不同围压情况下的莫尔应力圆以及强度包络线,进而获得不同程度下的盾构施工扰动度和 3 000 次波浪荷载作用后的软黏土抗剪强度指标,结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出:

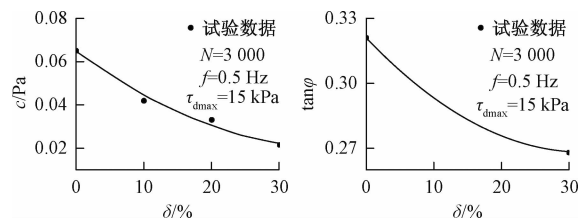
(1) 软黏土的内摩擦角(φ)随施工扰动度增加呈非线性递减。出现上述现象由于盾构施工影响和波浪循环往复的荷载使软黏土颗粒之间很容易因滑动或错动而形成剪切面,降低了土体内部的平均颗粒粗糙程

度,从而进一步导致内摩擦角 φ 的减小。

表3 不同围压下的主应力值

Table 3 Principal stress under different confining pressures

$\delta/\%$	σ_{30}/kPa	σ_{3u}/kPa	$\sigma_1 - \sigma_{3u}/\text{kPa}$	σ_1/kPa
0	100	100	128	228
	200	200	211	411
	300	300	262	562
10	100	90	106	196
	200	180	185	365
	300	270	244	514
20	100	80	95	175
	200	160	165	325
	300	240	230	470
30	100	70	87	157
	200	140	153	293
	300	210	207	417

图4 盾构施工和波浪荷载耦合作用前后软黏土抗剪强度
Fig.4 Shear strength parameters before and after the different coupled effects of shield construction and sea wave loads

(2) 软黏土的黏聚力(c)在初始阶段急剧下降($\delta = 10\%$ 且 $N = 3\ 000$ 次),之后 c 减小幅度逐渐放缓,趋于平稳状态(此时软土结构性基本完全破坏)。 c 在土体刚受到扰动时下降最为明显,而随盾构施工和波浪荷载影响程度的进一步增加呈现缓慢下降趋势。这是因为黏土颗粒间被胶结物所黏结,软黏土在盾构施工与波浪循环往复荷载作用下,软黏土内部的结构逐渐遭到破坏,直至达到重塑状态。

3.3 盾构施工和波浪荷载耦合作用对软黏土刚度的影响

为进一步研究盾构施工和波浪荷载耦合作用对软黏土刚度的影响规律,现采用 Kondner 等^[33]提出的双曲线方程来描述任意状态下软黏土的应力应变关系:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1)$$

式中: σ_1, σ_3 ——最大和最小主应力;

ε_1 ——最大主应变。

在常规三轴试验中,式(1)可写成:

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (2)$$

由于常规试验中 $\sigma_2 = \sigma_3$, 且均为常量, 因此土体初始切线模量 (E_i) 即为:

$$E_i = \frac{1}{a}$$

(3)

参考 Duncan 等^[34] 提出的计算方法, 可得:

$$a = \frac{1}{E_i} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{95\%} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{70\%}}{2} - \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \left[(\varepsilon_1)_{95\%} + (\varepsilon_1)_{70\%} \right]$$

(4)

式中下标 95% 和下标 70% 分别代表当 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 等于软黏土强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的 90% 和 70% 时有关的实验数据。 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为双曲渐进线对应的极限偏差应力, 且:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$$

(5)

将图 3 中的试验结果代入式 (4) 可得盾构施工和波浪荷载耦合作用后的软黏土的刚度 (初始切线模量 E_i), 如表 4 和图 5 所示。

表 4 不同工况下软黏土的 E_i 值

Table 4 Values of E_i under different experimental conditions for soft clay

σ_{30}/MPa	$\delta/\%$	σ_{3u}/MPa	a/kPa^{-1}	E_i/MPa	衰减幅度/%
0.1	0	0.10	58.170	17.191	0
	10	0.09	66.796	14.971	12.91
	20	0.08	71.521	13.982	18.67
	30	0.07	79.315	12.608	26.66
0.2	0	0.20	17.158	58.282	0
	10	0.18	19.818	50.459	13.42
	20	0.16	22.205	45.034	22.73
	30	0.14	25.088	39.86	31.61
0.3	0	0.30	14.506	68.938	0
	10	0.27	17.968	55.654	19.27
	20	0.24	20.780	48.123	30.19
	30	0.21	23.232	43.044	37.56

由图 5 可知, 在相同的波浪荷载循环剪切次数下, 不同围压下的软黏土初始模量 (E_i) 均呈现下述规律: 土体损失率 (δ) 越大, E_i 越小, 且二者近似呈线性关系。这主要是由于波浪与盾构耦合作用后, 软黏土的结构性遭到破坏, 刚度显著降低。通过计算不同工况下软黏土的 E_i 衰减幅度可以看出, 在不同围压下, 随着 δ 的增加, E_i 衰减幅度逐渐增加, 且围压越大, 衰减幅度越大 (最大达到了 37.56%)。与此同时, 各围压下, 当 δ 从 0 增加到 10% 时, E_i 衰减幅度最大, 分别达到了 12.91%、13.43% 以及 19.27%。由此可见, 在实际工程中, 盾构刚开始施工阶段对土体的扰动影响最为显著。

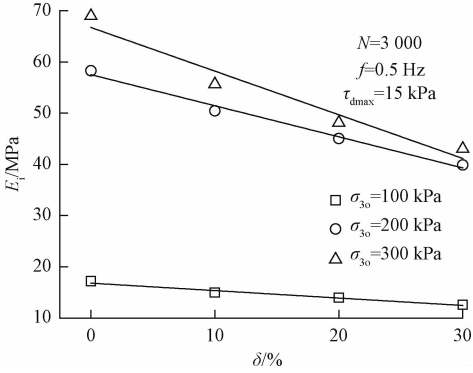


图 5 盾构施工与波浪耦合作用前后的 E_i

Fig. 5 Value of E_i before and after the coupled effect of shield construction and sea wave loading

综上, 原状软土强度明显高于扰动软土, 且盾构施工扰动程度越大 (即 δ 越大), 土体的强度降低越多。主要原因在于: 一方面盾构施工引起的应力释放会降低周围土体的围压, 破坏土体的结构性, 进而降低土体的强度与刚度, 另一方面波浪荷载的长期循环剪切作用也会引起软土强度与刚度的衰减, 由此可以看出盾构施工和波浪荷载的耦合扰动效应不容忽视。

4 结论

- (1) 在不同的耦合扰动作用下, 软黏土的应力-应变关系均近似呈双曲线, 且土的变形能力随围压变大而增强; 在同一围压下, 土体强度随波浪荷载和盾构施工扰动的增大而减小。
- (2) 随着盾构施工影响和波浪循环往复作用, 软黏土颗粒之间很容易因滑动或错动而形成剪切面导致平均颗粒粗糙程度下降, 进而导致内摩擦角 φ 的降低。
- (3) 随着盾构施工的影响的增大, 黏聚力 c 在土体刚受到施工扰动时下降最为明显, 而在施工影响进一步加大时, 呈现缓慢下降趋势。黏土颗粒间可以被胶结物所黏结, 软黏土在循环往复的荷载作用下, 内部的结构受到进一步的破坏。
- (4) 在波浪循环荷载和盾构施工的耦合扰动效应下, 软黏土的初始模量呈现线性降低, 盾构施工和波浪荷载的耦合扰动效应不容忽视。
- (5) 现实海洋工程中, 波浪循环荷载将长期对建筑物造成影响。本文仅考虑同一波浪频率、动剪应力幅值以及某一循环作用次数下不同土体损失对软黏土的影响规律, 关于同一土体损失不同波浪频率、动剪应力幅值以及循环剪切的次数对土体的性状的研究有待进一步展开。

参考文献:

- [1] YASUHARA, HIRAO, HYDE. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and Foundation, 1992, 32(1): 100 - 116.
- [2] ATILLA F M, ANSAL, AYFER E. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(7): 968 - 983.
- [3] LEE K L, FOCHT J A. Strength of clay subjected to cyclic loading[J]. Marine Geotechnology, 1975, 3: 165 - 185.
- [4] IDRISS I M, DOBRT R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading conditions [J]. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 1978, 104: 1427 - 1447.
- [5] 要明伦, 聂栓林. 饱和软黏土主动变形计算的一种模式[J]. 水利学报, 1994, 25(7): 51 - 55. [YAO M L, NIE S L. A model for calculating deformation of saturated soft clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(7): 51 - 55. (in Chinese)]
- [6] ZHOU J, GONG X N. Strain degradation of saturated clay under cyclic loading[J]. Can. Geotech., 2001, 38: 208 - 212.
- [7] HICHER P, LADE P V. Rotation of principal directions in K_0 -consolidated clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(7): 774 - 788.
- [8] YASUHARA K, MURAKAMI S, SONG B-W, *et al.* Postcyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129: 756 - 769.
- [9] ESRIG M I, LADD R S, BEA R G. Material properties of submarine Mississippi Delta sediments under simulated wave loading [C]//7th offshore Technology Conference OTC, 1975, 2188: 399 - 411.
- [10] AUSTIN G. The behavior of Keuper Mari Funder undrained creep and repeated loading[D]. University of Nottingham, 1979.
- [11] 沈扬, 周建, 张金良, 等. 考虑主应力方向变化的原状黏土及超静孔压特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 843 - 847. [SHEN Y, ZHOU J, ZHANG J L, *et al.* Research on strength and pore pressure of intact clay considering variation of principal stress direction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 843 - 847. (in Chinese)]
- [12] 王淑云, 楼志刚. 原状和重塑海洋黏土经历动载后的静强度衰减[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 20 - 23. [WANG S Y, LOU Z G. The degradation of undrained shear strength of undisturbed and remolded marine clay after cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 20 - 23. (in Chinese)]
- [13] 黄博, 丁浩, 陈云敏, 等. 交通荷载作用后粉质黏土不排水强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3986 - 3993. [HUANG B, DING H, CHEN Y M, *et al.* Experimental study of undrained strength property of saturated silty clay after traffic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2): 3986 - 3993. (in Chinese)]
- [14] 郝鑫. 海底交通隧道下饱和软黏土动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. [HAO X. Experimental study on dynamic characteristics of saturated soft clay under subsea transportation tunnel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)]
- [15] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 软土地层土压平衡盾构法施工的模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1849 - 1857. [XU Q W, ZHU H H, LIAO S M, *et al.* Experimental study on EPB shield tunnel construction in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1849 - 1857. (in Chinese)]
- [16] 顾其波, 郑荣跃, 杨芬, 等. 宁波软土盾构隧道施工地表沉降分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 85 - 87. [GU Q B, ZHENG R Y, YANG F, *et al.* An analysis of the surface settlement in the shield construction on the Ningbo urban rail transit [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 85 - 87. (in Chinese)]
- [17] 王鹏, 周传波, 刘亚辉, 等. 武汉地铁三号线土层盾构开挖引起的地表沉降研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 75 - 78. [WANG P, ZHOU C B, LIU Y H, *et al.* A study of land subsidence in the subway shield tunnel excavation in soil strata in Wuhan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 75 - 78. (in Chinese)]
- [18] 林存刚, 夏唐代, 梁荣柱, 等. 盾构掘进地面沉降虚拟镜像算法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1438 - 1446. [LIN C G, XIA T D, LIANG R Z, *et al.* Estimation of shield tunnelling-induced ground surface settlements by virtual image technique [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1438 - 1446. (in Chinese)]
- [19] ZHU J F, XU R Q, LIU G B. Analytical prediction for

- tunnelling-induced ground movements in sands considering disturbance [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 41: 165 – 175.
- [20] NG C W W, HONG Y, SOOMRO M A. Effects of piggyback twin tunnelling on a pile group: 3D centrifuge tests and numerical modelling [J]. *Géotechnique*, 2014, 65(1), 38 – 51.
- [21] STANDING J R, SELEMETAS D. Greenfield ground response to EPBM tunnelling in London Clay [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(12): 989 – 1007.
- [22] 魏纲. 盾构施工中土体损失引起的地面沉降预测[J]. *岩土力学*, 2007, 28(11): 2375 – 2379. [WEI G. Prediction of surface settlement induced by ground loss during shield tunneling construction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(11): 2375 – 2379. (in Chinese)]
- [23] 姜忻良, 赵志民. 镜像法在隧道施工土体位移计算中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 27(6): 801 – 803. [JIANG X L, ZHAO Z M. Application of image method in calculating tunneling-induced soil displacement [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 27(6): 801 – 803. (in Chinese)]
- [24] 李玲玲, 王立忠. 新建海堤下盾构隧道施工措施及监控[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(7): 995 – 1003. [LI L L, WANG L Z. Construction control and monitoring of shield tunnels under newly-built sea embankments [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(7): 995 – 1003. (in Chinese)]
- [25] 徐学勇, 樊延强, 宋庆晓, 等. 盾构掘进穿越海堤稳定性分析与工程控制措施[J]. *水利与建筑工程学报*, 2013, 11(3): 63 – 66. [XU X Y, FAN Y Q, SONG Q X, *et al.* Stability analysis for seawall with shield tunnel digging and engineering control measures [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2013, 11(3): 63 – 66. (in Chinese)]
- [26] GU C, WANG J, CAI Y Q, *et al.* Undrained cyclic triaxial behavior of saturated clays under variable confining pressure[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 40: 118 – 128.
- [27] 谷川, 王军, 蔡袁强, 等. 考虑变围压因素的饱和软黏土循环纯压动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7): 1307 – 1315. [GU C, WANG J, CAI Y Q, *et al.* Undrained dynamic behaviors of saturated clays under compressive stress paths considering cyclic confining pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1307 – 1315. (in Chinese)]
- [28] 沈扬, 周建, 龚晓南. 空心圆柱仪(HCA)模拟恒定围压下主应力轴循环旋转应力路径能力分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(3): 281 – 287. [SHEN Y, ZHOU J, GONG X N. Analysis on ability of HCA to imitate cyclic principal stress rotation under constant confining pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3): 281 – 287. (in Chinese)]
- [29] 严佳佳. 主应力连续旋转下软黏土非共轴变形特性试验和模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. [YAN J J. Experimental research on non-coaxial deformation behavior and modeling of soft clay under principal stress rotation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)]
- [30] 杨彦豪, 周建, 温晓贵, 等. 波浪荷载作用下原状软黏土动力特性和基于能量方法的孔压研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(6): 2309 – 2316. [YANG Y H, ZHOU J, WEN X G, *et al.* Dynamic characteristics of isotropically consolidated intact soft clay and study of pore water pressure based on energy method under wave loading [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(6): 2309 – 2316. (in Chinese)]
- [31] ZHAO H Y, JENG D S, LIAO C C. Effects of cross-anisotropic soil behaviour on the wave-induced residual liquefaction in the vicinity of pipeline buried in elasto-plastic seabed foundations [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 80: 40 – 55.
- [32] ZHAO H Y, JENG D S, LIAO C C. Parametric study of the wave-induced residual liquefaction around an embedded pipeline [J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 55: 163 – 180.
- [33] KONDNER R L. Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils [J]. *J. soil Mech. & Found. div.*, 1963, 89(1): 115 – 143.
- [34] DUNCAN J M. Nonlinear analyses of stress and strain in soils [J]. *Asce*, 1970, 96.

编辑: 张明霞