

DOI: 10.11779/CJGE2020S1009

交通荷载作用下 K_0 固结硬黏土动力特性研究

刘旭明¹, 潘 坤², 杨仲轩^{*1}, 蔡袁强^{1, 2}

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 利用 GDS 动三轴仪及空心圆柱扭剪仪对 $K_0 > 1$ 的英国 Gault 硬黏土和 Kimmeridge 硬黏土进行了不排水条件下大周数(1 万次)循环加载试验, 研究了交通荷载作用下循环应力比及主应力轴旋转对 K_0 固结原状硬黏土动力特性的影响。试验结果表明: 与软黏土相比, 硬黏土具有较为明显的脆性特征; 随着循环应力比的增大, 其动力变形响应可分为“稳态”、“亚稳态”和“非稳态”等三种类型。在主应力轴旋转条件下, 硬黏土轴向应变在拉伸侧不断发展, 回弹模量逐渐减小, 土体循环弱化程度较三轴加载条件下更为明显。

关键词: 硬黏土; 交通荷载; 累积应变; 变形模式; 回弹模量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0045-05

作者简介: 刘旭明(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土动力学方面的研究。Email: 21712019@zju.edu.cn。

Cyclic response of K_0 -consolidated stiff clay under traffic loading

LIU Xu-ming¹, PAN Kun², YANG Zhong-xuan¹, CAI Yuan-qiang^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To study the effects of cyclic stress ratio and principle stress axis rotation on the undrained cyclic response characteristics of K_0 -consolidated stiff clay whose K_0 is larger than 1, a series of traffic loading tests with a large number of cycles are conducted on the intact Gault and Kimmeridge clays by using the dynamic triaxial test system (DYNTTS) and the hollow cylinder apparatus (HCA). The test results indicate that the stiff clay has strong brittleness compared with the soft clay. With the increasing cyclic stress ratio, the cyclic deformation responses can be categorized into stable, metastable, and unstable patterns. Under the continuous rotation of the principle stress axis, the axial strain of the stiff clay is gradually accumulated at the extension side, and its resilient modulus is rapidly degraded.

Key words: stiff clay; traffic loading; accumulative strain; deformation pattern; resilient modulus

0 引 言

交通设施的服役性能和运行寿命与路基土的工程力学特性直接相关。针对不同场地条件和土体类别, 刘雪珠等^[1]研究了南京片状细砂受交通荷载作用的有效应力路径及破坏模式; 王瑞等^[2]研究了压实性黄土受交通荷载作用的动力特性; 陈成等^[3]研究了泥炭质土受交通荷载作用的动力变形累积特性; 黄博等^[4]研究了粉质黏土受高速列车荷载作用的变形特性; 蔡袁强等^[5]、王常晶等^[6]和黄茂松等^[7]研究了不同地区饱和和软黏土受交通荷载作用的动力特性; Puppala 等^[8]研究了砂土、粉土和软黏土累积变形的差异。

与传统三轴试验相比, 空心圆柱扭剪仪(HCA)可实现主应力轴连续旋转, 从而更好地模拟交通荷载下的“心形”应力路径^[9]。肖军华等^[10]和钱建固等^[11]利用 HCA 研究了主应力轴旋转对等向固结原状软黏土累积变形的影响; 邓鹏等^[12]研究了主应力轴旋转对

原状温州软黏土不排水动力响应的影响; 熊焕等^[13]研究了主应力轴旋转对非等向固结砂土变形特性的影响。以上不同试验条件下的研究结果表明交通荷载引起的主应力轴连续旋转会加速土体竖向永久变形的累积, 并导致其竖向回弹模量发生软化。

综上所述, 目前学者们主要以砂土、粉土、软黏土为研究对象, 而针对原状土的研究多采用等向固结方式, 未考虑场地条件下土体实际受荷状态。近年来, 邓鹏等^[12]和熊焕等^[13]在试验过程中采用了非等向固结方式以模拟场地侧限条件, 但主要针对水平向应力小于竖向应力的土体应力状态, 即固结应力比 K_0 小于 1。本文研究对象为 Gault 黏土和 Kimmeridge 黏土,

基金项目: 国家自然科学基金委员会与英国皇家学会(NSFC-RS)牛顿高级学者基金项目(51761130078); 国家杰出青年基金项目(51825803)
收稿日期: 2020-05-06

***通信作者** (E-mail: zxyang@zju.edu.cn)

表 1 原状硬黏土物理性质
Table 1 Physical properties of intact stiff clay

硬黏土	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	相对密度 G_s	含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	初始孔隙比 e_0
Gault	19.5	2.59	28.0~30.0	71.0~77.0	28.0~31.0	40~46	0.700~0.750
Kimmeridge	21.0	2.50	16.0~21.0	46.0~55.0	18.0~22.0	28~33	0.430~0.520

分别是采自英国的早白垩世（0.99~1.12 亿年）和晚侏罗世（1.51~1.56 亿年）硬黏土。地质研究表明^[14]，这两种硬黏土历史最大埋深达几百甚至上千米，曾受过很高的压力，而后期的侵蚀、开挖等复杂地质活动导致竖向压力卸载程度较大，土体处于各向异性状态且 $K_0 > 1$ 。Brosse^[14]、Wilkinson^[15]、Hosseini Kamal^[16] 等通过开展单调加载试验和细观结构探测分析，指出硬黏土具有相较于软黏土更为复杂的细微观结构，更为明显的各向异性特性，且强度更大。

基于此，本文利用 GDS 双向振动三轴仪和空心圆柱扭剪仪（HCA）对原状 Gault 和 Kimmeridge 硬黏土进行了 K_0 固结条件下的大周数（10000 次）不排水循环加载试验，探究了循环应力比和主应力轴旋转对硬黏土动力变形和回弹模量的影响。

1 试验方法

1.1 试验土样

试验所用土样为两种英国硬黏土，分别为 Gault 黏土和 Kimmeridge 黏土。两种硬黏土的物理性质指标见表 1，原位应力状态见表 2。

表 2 原状硬黏土原位应力状态预估值

Table 2 Estimated values of in-situ stresses for intact stiff clay					
硬黏土	K_0	σ'_{v0}/kPa	σ'_{h0}/kPa	p'_0/kPa	q_0/kPa
Gault	1.8	39	70	60	-31
Kimmeridge	1.8	133	239	204	-106

1.2 试验方案

试验仪器采用 GDS 双向振动三轴仪及空心圆柱扭剪仪。将切好的试样装样放入压力室内进行反压饱和， B 值均大于 0.95，土体完全饱和。将饱和土样固结至原位应力状态后，对 K_0 固结试样进行不排水条件下的大周数（10000 次）循环加载试验，加载频率为 1 Hz。若加载过程中试样轴向应变达到 10%，则判定试样破坏，中断加载。

加载波形如图 1 所示，图中 σ_z^{ampl} 为竖向动应力幅值， $\tau_{z\theta}^{\text{ampl}}$ 为扭转动应力幅值，为方便对比分析，定义竖向循环应力比（CSR）和扭转动应力比（ η ）如下：

$$\text{CSR} = \sigma_z^{\text{ampl}} / 2p'_0, \tag{1}$$

$$\eta = \tau_{z\theta}^{\text{ampl}} / \sigma_z^{\text{ampl}}, \tag{2}$$

式中， $p'_0 = (\sigma'_{10} + \sigma'_{20} + \sigma'_{30})/3$ ，为有效平均主应力。

本研究试验共分三组，具体加载方案如表 3 所示。

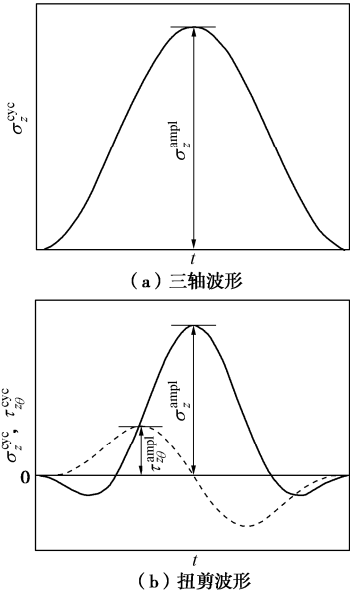


图 1 试验加载波形

Fig. 1 Loading waveforms in tests

表 3 不排水循环加载试验方案

Table 3 Summary of undrained cyclic test conditions							
试验 分组	试验 编号	试验 类型	$\sigma_z^{\text{ampl}} /$ kPa	$\tau_{z\theta}^{\text{ampl}} /$ kPa	CSR	η	N
1	GT-1	三轴	10.5	0	0.088	0	10000
1	GT-2	三轴	19.8	0	0.165	0	10000
1	GT-3	三轴	24.6	0	0.205	0	10000
1	GT-4	三轴	29.4	0	0.245	0	10000
1	GT-5	三轴	34.3	0	0.286	0	10000
1	GT-6	三轴	36.0	0	0.300	0	10000
1	GT-7	三轴	48.0	0	0.400	0	10000
1	GT-8	三轴	54.0	0	0.450	0	10000
1	GT-9	三轴	66.0	0	0.550	0	10000
1	GT-10	三轴	78.0	0	0.650	0	10000
1	GT-11	三轴	96.0	0	0.800	0	2000
2	KT-1	三轴	30.0	0	0.074	0	10000
2	KT-2	三轴	105.0	0	0.257	0	10000
2	KT-3	三轴	150.0	0	0.368	0	10000
3	KH-1	扭剪	30.0	10	0.074	1/3	10000
3	KH-2	扭剪	96.0	32	0.235	1/3	10000
3	KH-3	扭剪	183.0	61	0.449	1/3	308

2 试验结果与分析

2.1 Gault 硬黏土动力响应及循环后特性

图 2 展示了 Gault 硬黏土在不同 CSR 下轴向永久应变 ϵ_a^p （实线）和轴向总应变 ϵ_a^t （虚线）随循环圈数 N 的发展趋势。由图 2 可见：随着 CSR 的增大，土体应变发展速率逐渐加快，累积永久应变也逐渐增大。

当 CSR 较小时, 循环加载过程中土体应变增长较慢, 永久应变基本无累积; 随着 CSR 逐渐增大, 试样轴向应变加快发展, 经过 10000 圈循环后土体虽未破坏, 但永久应变仍持续累积; 当 CSR 进一步增大时, 土体应变随 N 的增加迅速发展, 其速率在加载后期不断增大, 最终导致试样破坏。具体地, CSR = 0.650 时, 试样在 $N=10000$ 处累积永久应变仅为 0.64 %, 而在 CSR = 0.800 条件下, 经过 2 000 圈循环后土体即已破坏。与常见软黏土相比, 硬黏土在交通荷载作用下累积变形总体较小, 但有较明显的脆性特征。

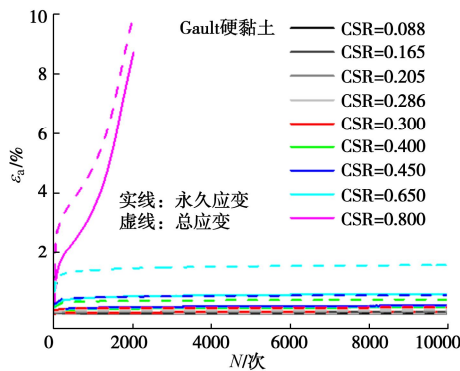


图 2 不同循环应力比下 Gault 黏土竖向应变的发展

Fig. 2 Axial strain responses of Gault clay under different CSRs

图 3 所示为 Gault 硬黏土在三轴试验条件下分别经过 100, 1000, 10000 圈循环后累积轴向应变与 CSR 的关系。由图 3 可见: 当 CSR < 0.25 时, 试样永久应变极小, 其值相当于蠕变累积量, 此时土体处于“稳态” (stable, Cai 等^[17]); 当 0.25 < CSR < 0.45 时, 永久应变随 CSR 近似呈线性增长, 且经过一定循环圈数后趋于稳定, 因此该区间可称为“亚稳态” (metastable, Cai 等^[17]); 当 CSR > 0.45 时, 永久应变随 CSR 增长逐渐加快, 至试验结束时土体变形仍在发展以至破坏, 因此可称之为“非稳态” (unstable, Cai 等^[17])。

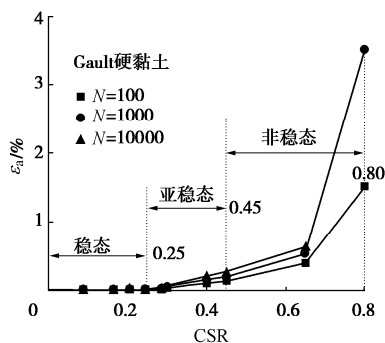


图 3 100, 1000, 10000 圈后 Gault 黏土永久应变与循环应力比的关系

Fig. 3 Permanent axial strain versus CSR for Gault clay after 100, 1000 and 10000 cycles

图 4 为 Gault 硬黏土在不同 CSR 下回弹模量随 N 的变化曲线, 回弹模量定义为 $M_z^r = \sigma_z^{\text{ampl}} / \varepsilon_a^r$, 其中 ε_a^r 为回弹应变。从图 4 中可看出, 回弹模量随 CSR 的增大

逐渐减小。对于未破坏土样, 在加载初期回弹模量有一定程度的衰减, 而后随 N 增大逐渐稳定; 当试样发生破坏时 (CSR=0.800), 回弹模量先急剧减小, 而后由于剪切带的出现而有所增大, 土体发生硬化。回弹模量衰减程度总体上随 CSR 的增大而增大。

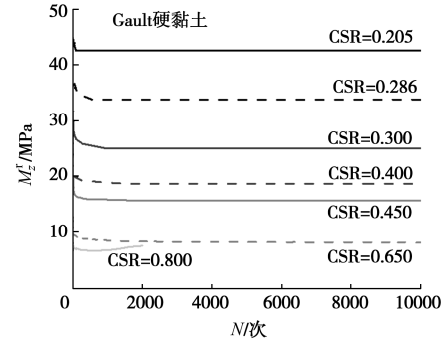
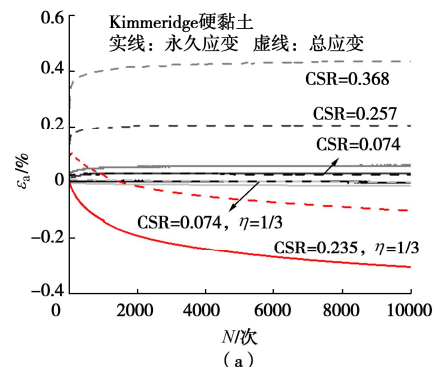


图 4 不同循环应力比下 Gault 黏土回弹模量的发展

Fig. 4 Resilient modulus responses of Gault clay under different CSRs

2.2 Kimmeridge 硬黏土动力响应

图 5 展示了 Kimmeridge 硬黏土在不同 CSR 下试样轴向永久应变 ε_a^p (实线) 和轴向总应变 ε_a^t (虚线) 随循环圈数 N 的发展趋势。图 5 (a) 中, 在三轴加载路径下, 由于对土样施加的 CSR 均较小, 土体轴向应变的累积较小。与 Gault 硬黏土在小 CSR 下的发展趋势相似, Kimmeridge 硬黏土累积应变随 CSR 增大而有所增大, 且在循环加载过程中快速趋于稳定。图 5 (a) 一并示出了两组循环扭剪试验中未破坏 Kimmeridge 硬黏土应变发展曲线。与之相对地, 将扭剪应力路径 (CSR=0.449, $\eta=1/3$) 下破坏土样的应变发展曲线示于图 5 (b)。显然, 随着 CSR 增大, 扭剪条件下土体轴向应变相应增大。从图 5 中还可以看到, 在主应力轴旋转的交通荷载心形应力路径下, 土体轴向应变不断向拉伸侧发展, 且随着 CSR 的增大, 土体拉应变增长速率逐渐加快, 累积值也逐渐增大。这一现象可能与土体初始应力状态有关。本文试验中, 土体初始大主应力方向为水平方向, 在循环扭剪过程中主应力方向从水平方向开始发生旋转, 致密的土颗粒重新排布变得更加疏松, 因而土体表现为拉应变。



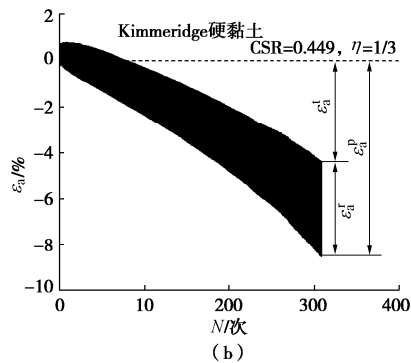


图5 不同循环应力比下 Kimmeridge 黏土竖向应变的发展

Fig. 5 Axial strain responses of Kimmeridge clay under different CSRs

图6所示为Kimmeridge硬黏土在不同CSR下回弹模量随 N 的变化规律。从图6中可看出,三轴条件下Kimmeridge硬黏土的回弹模量变化趋势与Gault硬黏土相类似,在循环前期回弹模量有较小程度的衰减,经过一定的循环圈数后很快达到稳定。同时,当CSR相当时,Kimmeridge硬黏土的回弹模量比Gault硬黏土更大,这表明Kimmeridge黏土作为一扭矩使得硬黏土轴向应变有向拉伸侧发展的趋势,而轴力对土样轴向应变的作用效果则与之相反。因此,当CSR较小时,循环扭剪过程中轴力和扭矩引起的回弹变形相对较小,此时土体回弹模量保持稳定且其值大于三轴条件下的模量值。随着CSR逐渐增大,扭剪试验土样在循环加载后期回弹变形快速增大,回弹模量大幅衰减,从而低于三轴条件下的回弹模量;对于发生破坏的试样,未观察到回弹模量随剪切带出现而回升的现象,这与三轴试验结果有显著差异。

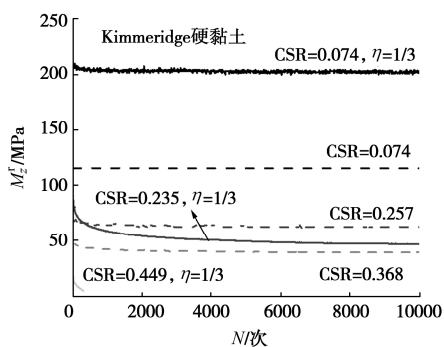


图6 不同循环应力比下 Kimmeridge 黏土回弹模量的发展

Fig. 6 Resilient modulus responses of Kimmeridge clay under different CSRs

3 结 论

通过开展针对原状Gault和Kimmeridge硬黏土的大周数(10000次)不排水循环加载三轴试验和扭剪试验,研究了 K_0 固结条件下循环应力比及主应力轴旋

转对饱和硬黏土轴向应变和回弹模量的影响,得到如下结论:

(1) 三轴加载条件下,Gault硬黏土应变发展速率随CSR增大逐渐加快,累积应变也相应增大,土体动力响应由“稳态”、“亚稳态”逐渐发展至“非稳态”。与软黏土相比,硬黏土在交通荷载作用下累积变形总体较小,但脆性特征更明显。动力加载过程中,土体回弹模量随CSR增大而减小,且衰减程度不断增大。

(2) Kimmeridge硬黏土在三轴试验条件下的动力响应特征总体上与Gault硬黏土相类似:累积应变随CSR增大而增大,回弹模量在循环前期有较小程度的衰减,随后趋于稳定。当循环荷载幅值相当时,Kimmeridge黏土的回弹模量比Gault黏土更大,这表明前者作为一种更古老的硬黏土,其刚度更大。

(3) 循环扭剪试验条件下,Kimmeridge硬黏土的大主应力方向从水平方向发生旋转,轴向应变在拉伸侧不断发展。随着CSR的增大,土体拉应变增长速率逐渐加快,累积值也逐渐增大。主应力轴旋转条件下,土样的回弹模量加速衰减,土体循环弱化程度远大于相同条件下的三轴试验。

参考文献:

- [1] 刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通振动下南京片状细砂的有效应力路径及破坏模式[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 719 - 726. (LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing. Effective stress path and failure pattern of Nanjing fines and with flake-shape structure under vibrating load of rail transit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 719 - 726. (in Chinese))
- [2] 王 瑞, 王 雷, 胡志平, 等. 交通荷载引起的静偏应力对压实黄土动力特性的影响[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 110 - 117. (WANG Rui, WANG Lei, HU Zhi-ping, et al. Study on dynamic characteristic of compacted loess subjected to static deviatoric stress induced by traffic loading[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 110 - 117. (in Chinese))
- [3] 陈 成, 周正明, 张先伟, 等. 循环荷载作用下泥炭质土动力累积特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1247 - 1255. (CHEN Cheng, ZHOU Zheng-ming, ZHANG Xian-wei, et al. Experimental study on accumulative behavior of peaty soil under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1247 - 1255. (in Chinese))
- [4] 黄 博, 丁 浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 195 - 202. (HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yun-min. Simulation of

- high-speed train load by dynamic triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 195 - 202. (in Chinese))
- [5] 蔡袁强, 陈 静, 王 军. 循环荷载下各向异性软黏土应变-软化模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008(6): 160 - 166. (CAI Yuan-qiang, CHEN Jing, WANG Jun. Strain-degradation model for anisotropic soft clay under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008(6): 160 - 166. (in Chinese))
- [6] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1742 - 1747. (WANG Chang-jin, CHEN Yun-min. Study on effect of traffic loading induced static deviator stress on undrained cyclic properties of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1742 - 1747. (in Chinese))
- [7] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 891 - 895. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behavior of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 891 - 895. (in Chinese))
- [8] PUPPALA A J, SARIDE S, CHOMTID S. Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(10): 1379 - 1389.
- [9] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art I: Resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, **126**(1): 66 - 75.
- [10] 肖军华, 许世芹, 韦 凯, 等. 主应力轴旋转对地铁荷载作用下软黏土累积变形的影响[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2938 - 2945. (XIAO Jun-hua, XU Shi-qin, WEI Kai, et al. Influences of rotation of principal stress axis on accumulative deformation of soft clay under subway cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2938 - 2945. (in Chinese))
- [11] 钱建固, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通动载下饱和软黏土累计变形的不排水循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1790 - 1798. (QIAN Jian-gu, WANG Yong-gang, ZHANG Jia-feng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1790 - 1798. (in Chinese))
- [12] 邓 鹏, 郭 林, 蔡袁强, 等. 循环荷载下考虑主应力旋转的软土力学响应研究[J]. 岩土力学, 2015(增刊 2): 156 - 164. (DENG Peng, GUO Lin, CAI Yuan-qiang, et al. Research on mechanical response of soft clay under cyclic loading involving principle stress rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(S2): 156 - 164. (in Chinese))
- [13] 熊 焕, 郭 林, 蔡袁强. 交通荷载应力路径下砂土地基变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 662 - 669. (XIONG Huan, GUO Lin, CAI Yuan-qiang. Deformation behaviors of sandy subgrade soil under traffic load-induced stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 662 - 669. (in Chinese))
- [14] BROSSE A M. Study of the Anisotropy of Three British Mudrocks Using a Hollow Cylinder Apparatus[D]. London: Imperial College, 2012.
- [15] WILKINSON S. The microstructure of UK mudrocks[D]. London: Imperial College, 2011.
- [16] HOSSEINI KAMAL R. Experimental Study of the Geotechnical Properties of UK Mudrocks[D]. London: Imperial College, 2012.
- [17] CAI Y Q, GUO L, JARDINE R J, et al. Stress-strain response of soft clay to traffic loading[J]. Géotechnique, 2017, **67**(5): 446 - 451.

(编校: 明经平)