

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.008

天津滨海软黏土动力累积塑性变形特性与增长模型

杨爱武¹, 孔令伟², 郭 飞³

(1. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 天津城大岩土工程技术有限公司, 天津 300384)

摘 要: 为了研究了循环动应力、初始静偏应力、固结比、振动频率共同作用对软黏土累积塑性应变的影响, 以天津滨海新区临港工业区的浅海-滨海相软黏土为研究对象, 利用 GCTS 循环扭剪三轴仪对其进行一系列循环三轴试验。试验结果表明, 循环动应力增加、振动频率降低, 能加快软化指数的衰减速率; 初始静偏应力和固结比的增加, 可提高软黏土抵抗循环动荷载的能力, 减缓软化指数的衰减速率。综合考虑以上 4 种因素对软化指数随累积塑性应变发展变化的影响, 总结得到了不同影响因素下软化指数与累积塑性应变之间的经验公式。结合以往学者对软化指数和循环荷载振动次数的相关性研究, 以软化指数为桥梁, 最终建立了针对天津滨海软黏土累积塑性应变的增长模型, 并对模型的适用性进行了验证。

关键词: 循环荷载; 累积塑性应变; 软化指数; 初始静偏应力; 固结比; 振动频率

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)04-0979-06

Accumulative plastic strain characteristics and growth model of Tianjin Binhai soft clay under cyclic loading

YANG Ai-wu¹, KONG Ling-wei², GUO Fei³

(1. Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Tianjin Chengda Geotechnical Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: This paper investigates the combined effects of dynamic stress, initial static shear stress, consolidation ratio and vibration frequency on growth of accumulative plastic strain of soft clay located in Lingang industrial district, Tianjin Binhai New Area. A series of cyclic triaxial tests is conducted with continental facies soft clay samples by GCTS triaxial torsional shear apparatus. It is observed that when shear stress increases, the ability of resisting cyclic loading enhances. The decaying rates of softening index become slow at the same time. Consolidation ratio affects similarly on growth of accumulative plastic strain. Empirical formulation between softening index and accumulative plastic strain is established considering various influencing factors above-mentioned. Based on previous results, referring to the relationship between softening index and vibration times of cyclic loading N , a new accumulative plastic strain growth model is proposed for soft clay in Tianjin Binhai New Area, including four types of influence factors. And applicability of this model is verified.

Keywords: cyclic loading; accumulative plastic strain; softening index; initial static shear stress; consolidation ratio; vibration frequency

1 引 言

天津滨海新区地处渤海湾西侧古黄河和海河入海口, 有长达 150 多公里的淤泥质海岸。全新世冰后期以来, 海平面上升, 滨海新区沦为滨海-浅海相

环境。古黄河夹带大量泥沙数次从此处入海, 促成了河口三角洲的形成。近万年的沧桑巨变, 形成了天津滨海新区深厚的滨海-浅海相软黏土层。

近年来, 天津滨海新区建设步伐加快, 滨海新区软黏土在动力荷载作用下的力学性质, 尤其是滨

收稿日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51179186, No. 41372291); 天津市科技计划项目(No. 15JCZDJC40600, No. 15ZCZDSF00220)。

This work was supported by the Program of National Science Foundation of China (51179186, 41372291), Tianjin Science and Technology Program (15JCZDJC40600, 15ZCZDSF 00220).

第一作者简介: 杨爱武, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 从事软土地基处理及土体微观结构方面的研究工作。E-mail: tulilab@163.com

海软黏土的沉降特性引起了学者的关注。闫澍旺^[1]较早对循环荷载作用下天津滨海软黏土的变形特性进行了研究。雷华阳等^[2]对交通荷载作用下软黏土的应力-应变关系进行研究,确定了临界动应力和临界振动频率。吕玺林等^[3]建立了一个软土路基长期沉降拟静力计算模型。张茹^[4]、潘有林^[5]、雷华阳^[6]等研究了循环荷载作用下软黏土动模量和阻尼比的变化规律。Lefebvre^[7]、黄茂松^[8]、王军^[9]、刘飞禹^[10]等针对初始静偏应力对软黏土变形特性的影响进行了研究。王军^[11]、郭飞^[12]等建立了软化指数与循环振次的经验函数关系。Vucetic^[13]和王军^[14-15]等考虑超固结比对软黏土累积塑性应变发展的影响,并进行了相关试验研究。姜岩等^[16]把循环荷载作用下软黏土的应变发展分为稳定型和破坏型两种,建立了表征结构逐渐破坏的塑性变形经验公式。蔡袁强^[17]、王军^[18]等考虑浅源地震时的竖向地震力作用,对双向激振条件下软黏土累积塑性变形特性以及动模量、阻尼比特性进行了研究。

然而,诸多学者仅针对某一特定影响因素对循环荷载下土体动力特性产生的影响进行研究。现实工况中,多种因素共同对循环荷载产生影响的情况较为普遍,而同时考虑多种因素综合作用的研究还有很多工作要做。本文拟同时考虑循环动应力、初始静偏应力、固结比和振动频率对天津滨海软黏土累积塑性应变的综合影响,从而得到针对天津滨海新区滨海-浅海相软黏土的累积塑性应变增长模型,以为天津滨海新区工程建设提供理论依据。

2 试验方案

以往学者^[19]对软黏土动力特性研究结果表明,直接考虑不同影响因素,建立累积塑性应变随振次的变化关系,得到的经验公式与试验结果差距较大。自从 Idriss 等^[20]提出软化指数的概念以后,试验土体在循环荷载作用下的动力特性由软化指数来表达变得极为方便。本文试图在考虑不同影响因素综合作用下,建立软化指数随累积塑性应变的变化关系,在已有软化指数与循环振次关系研究的基础上,以软化指数为桥梁,进一步得到累积塑性应变随振次变化的土体塑性应变经验模型。

由于本次试验采用应力控制系统进行,与传统软化指数计算方法不尽相同。软化指数重新定义为

$$\delta = \frac{G_N}{G_1} = \frac{q_{N,\max} - q_{N,\min}}{\varepsilon_{N,\max} - \varepsilon_{N,\min}} \cdot \frac{\varepsilon_{1,\max} - \varepsilon_{1,\min}}{q_{1,\max} - q_{1,\min}} \quad (1)$$

式中: $q_{N,\max}$ 和 $q_{N,\min}$ 分别为第 N 次滞回圈中应力最大值和最小值; $\varepsilon_{N,\max}$ 和 $\varepsilon_{N,\min}$ 分别为第 N 次滞回圈中应变最大值和最小值。循环荷载作用下试验应力-应变关系如图 1 所示。

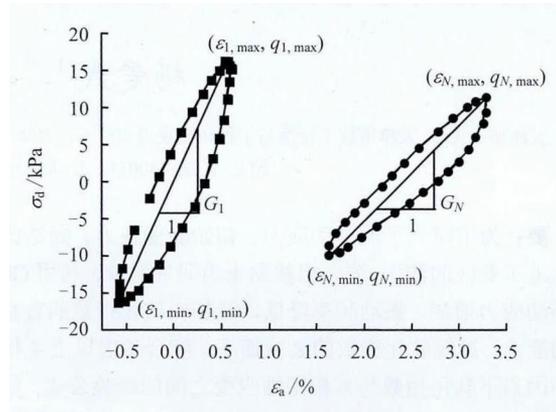


图 1 软化指数示意图

Fig.1 Schematic diagram of softening index

试验用土取自天津滨海新区临港工业区,取样深度为 10.0~11.0 m,属于全新统中组浅海-滨海相沉积。试验仪器采用 GCTS 循环扭剪三轴仪。试验考虑了循环动应力、初始静偏应力、固结比和振动频率 4 种因素对软黏土累积塑性应变发展的影响。所取试样物理力学指标参数和试验方案分别见表 1 和表 2。

表 1 试样物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of testing samples

$\omega/\%$	e	$w_l/\%$	$w_p/\%$	I_p	E_s/MPa
40.7	1.178	40.3	22.1	18.2	2.63

注: ω 为含水率; e 为孔隙比; w_l 为液限; w_p 为塑限; I_p 为塑性指数, E_s 为压缩模量。

表 2 试验方案

Table 2 Testing program

动应力/kPa	静偏应力/kPa	固结比	振动频率/Hz
15, 20, 30	15, 20, 30	1.0	1.0
20	0	1.0, 1.2, 1.4	0.5, 1.0, 2.0

3 循环荷载作用下软化指数特性

3.1 循环动应力的影响

考虑循环动应力对软黏土累积塑性应变发展的影响时,采用循环动应力的幅值分别为 15、20、30 kPa,试验结果如图 2 所示。图中, q_d 和 q_s 分别为所施加的循环动应力和初始静偏应力; ε_p 为试样累积塑性应变。

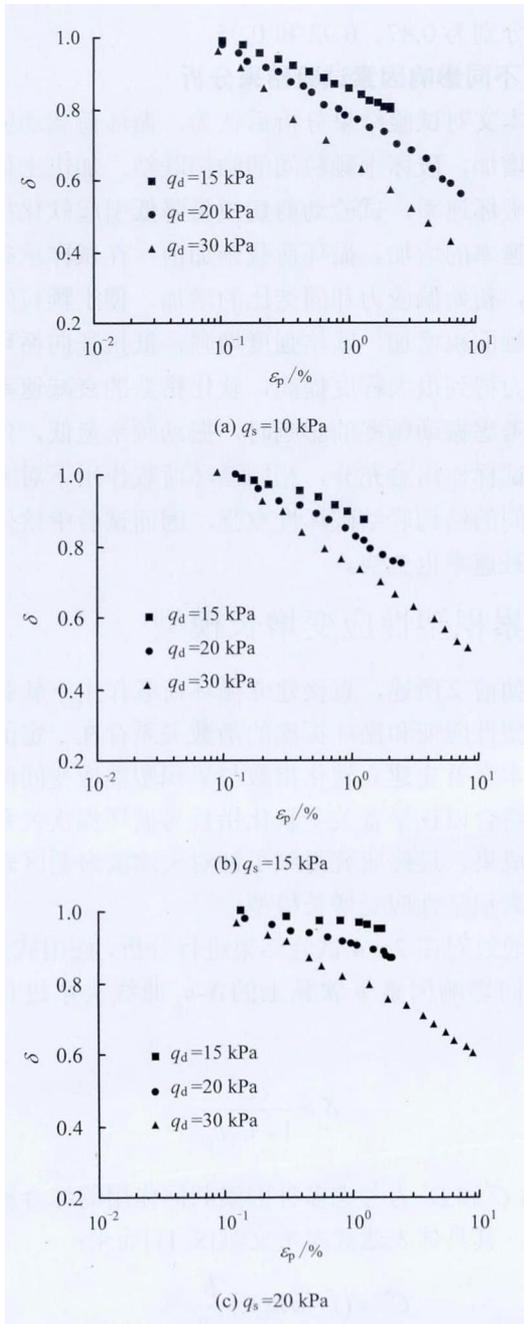


图 2 循环动应力对 δ - ϵ_p 曲线的影响

Fig.2 Effects of cyclic loading on δ - ϵ_p curves

由图 2 所示试验结果可知,不同动应力作用下,初始阶段各试样 δ 缓慢衰减,且衰减速率相差不大;随 ϵ_p 的增加, δ 衰减速率加快。当循环动应力增加, δ 曲线由非线性向趋近于线性形式转变。

3.2 初始静偏应力的影响

考虑初始静偏应力对软黏土累积塑性应变的影响时,设置不同的初始静偏应力值分别为 10、15、20 kPa。试验结果如图 3 所示。

图 3 所示试验结果表明:在试验土体承受范围内, δ 曲线起始点近乎相同,初始静偏应力增加,试验结束时对应的软化指数 δ 较大,如图 3(c)中,

循环动应力均为 30 kPa 时, q_s 为 10、15、20 kPa 时,对应得到的 δ 分别为 0.42、0.50、0.59。在试验土体承受范围内,当 $q_s > q_d$ 时,试验过程中 δ 衰减速率随 ϵ_p 的增加变化缓慢,呈非线性形式衰减,最终软化指数趋于常数;当 $q_s < q_d$ 时, δ 衰减速率明显加快,且与 ϵ_p 在半对数坐标中近似呈线性关系,如图 3(c)所示。

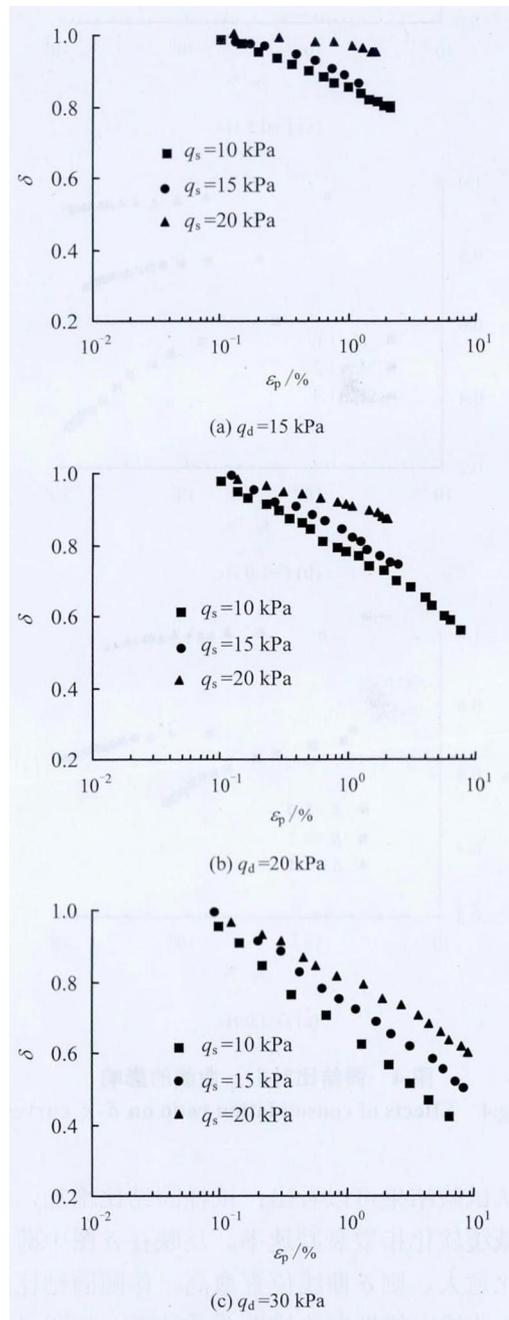


图 3 初始静偏应力对 δ - ϵ_p 曲线的影响

Fig.3 Effects of initial static shear stress on δ - ϵ_p curves

3.3 固结比的影响

考虑固结比对软黏土累积塑性应变发展影响得到的试验结果如图 4 所示。

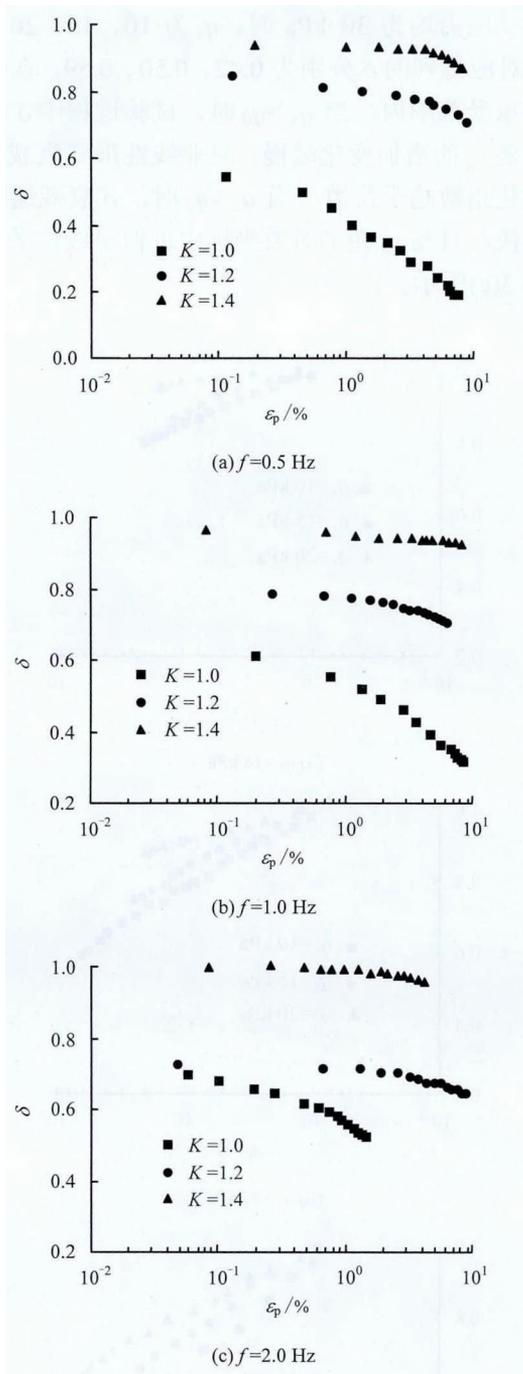


图4 固结比对 δ - ϵ_p 曲线的影响
Fig.4 Effects of consolidation ratio on δ - ϵ_p curves

从试验结果可以看出：试样固结比增加，能够有效减缓软化指数衰减速率。反映在 δ 图中即为，固结比愈大，则 δ 曲线位置愈高。伴随固结比的增加， δ 曲线由线性向非线性关系转变，如图4(a)所示。

3.4 振动频率的影响

从图4的试验结果还可以看出振动频率对累积塑性应变的影响，即振动频率增加，软化指数衰减速率逐渐减慢。以固结比为1.4试验结果为例；试验结束时振动频率为0.5、1.0、2.0 Hz对应的软化

指数分别为0.87、0.92和0.95。

3.5 不同影响因素试验结果分析

本文对试验结果分析后认为，循环荷载动应力幅值增加，破坏土颗粒间的结构联结，加快土体结构的破坏速率，试验动剪切模量降低引起软化指数衰减速率的增加。循环荷载施加前，在试样承载范围内，初始偏应力和固结比的增加，使土颗粒间有效接触面积增加，联结强度增强，抵抗竖向循环荷载能力得到很大程度提高，软化指数的衰减速率减缓。考虑振动频率的影响时，振动频率愈低，外荷载对试样作用愈充分，相同循环荷载作用下对土颗粒之间的结构联结破坏性愈强，因而试验中软化指数衰减速率也愈快。

4 累积塑性应变增长模型

如前文所述，直接建立循环荷载作用下软黏土累积塑性应变和循环振次的函数关系存在一定的困难。本文首先建立软化指数与累积塑性应变间的关系，结合以往学者关于软化指数与循环振次关系的研究成果，最终研究得到了针对天津滨海新区软黏土的累积塑性应变增长模型。

通过对图2~4试验结果进行分析，应用式(2)对不同影响因素下软黏土的 δ - ϵ_p 曲线关系进行拟合：

$$\delta = \frac{cD^*}{1 + C^* \epsilon_p} \quad (2)$$

式中： C^* 和 D^* 为考虑多种因素共同作用的综合影响因子，其具体表达式参考文献[8, 11]而来：

$$C^* = (1 - a \lg f) \frac{b}{k^m} \quad (3)$$

$$D^* = \frac{D_d - D_s}{D_{\max} - D_s} \quad (4)$$

$$q_{ult} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1 - \frac{\kappa}{\lambda}} M p_c \quad (5)$$

$$D_d = \frac{q_d}{q_{ult}}, D_s = \frac{q_s}{q_{ult}} \quad (6)$$

式中： p_c 为土体前期固结压力； λ 和 κ 分别为土体正常固结线和回弹曲线的斜率； M 为修正剑桥模型中临界状态线斜率； a 、 m 均为试验参数。 C^* 考虑循环动应力 q_d 、振动频率 f 、固结比 k 对累积塑性应变的影响； D^* 则考虑循环动应力 q_d 和初始静偏应

力 q_s 对累积塑性应变发展的影响。

进一步分析表明，参数 a 随振动频率变化最为明显， a 与振动频率的变化曲线和拟合结果如图 5 所示。参数 b 、 c 、 m 随试验条件变化并不发生显著变化。

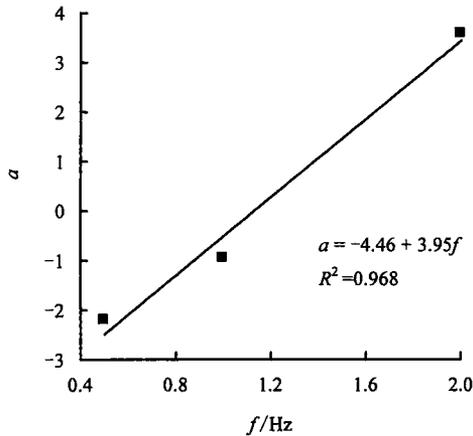


图 5 参数 a 随振动频率 f 的变化曲线
Fig.5 Relationship between model index a and vibration frequency f

借鉴以往学者^[10-12]的研究结果，本文认为，应用式 (7) 描述循环荷载作用下软化指数随循环振次 N 的关系较为合理：

$$\delta = 1 + a_1 \lg N + a_2 (\lg N)^2 \quad (7)$$

联立式 (2) ~ (7)，即得到循环荷载作用下，考虑循环荷载动应力幅值、初始静偏应力、固结比、振动频率等影响因素综合作用下，软黏土累积塑性应变的发展规律。模型综合表达式为

$$\varepsilon_p = \left[\frac{c \frac{q_d - q_s}{q_{ult} - q_s}}{1 + a_1 \lg N + a_2 (\lg N)^2} - 1 \right] \cdot \frac{q_{ult}^2 K^m}{(1 - a \lg f) b q_d^2} \quad (8)$$

应用式 (8) 对软黏土累积塑性应变 N - δ 曲线进行拟合，对应的模型参数 $a=2.72$ ， $b=-0.309$ ， $c=1.211$ ， $m=8.896$ ， $a_0=-0.004$ ， $b_0=0.003$ 。

为进一步验证该模型的适用性，本文拟通过式 (8) 对文献[21]中天津滨海软土在动静荷载作用下的 ε_p - N 试验数据进行拟合，拟合结果如图 6 所示。从拟合结果来看，应用本文建立的应变增长模型能够对多因素综合影响下的软黏土累积塑性应变的发展进行拟合和预测，拟合优度高，能够达到预期目的。

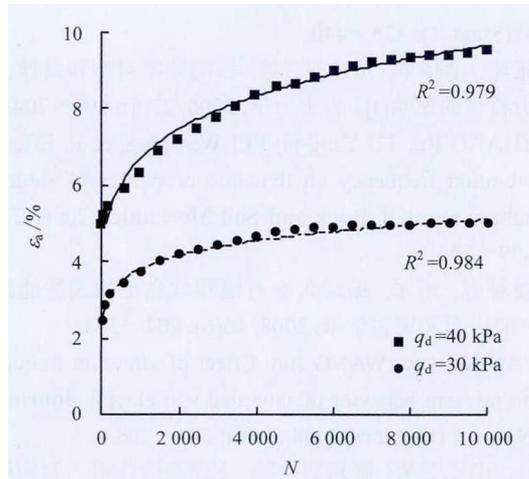


图 6 本文经验模型对文献试验数据拟合结果
Fig.6 Application of empirical model fitting on published data

5 结 论

(1) 循环动应力幅值增加、振动频率降低，能够加快软化指数的衰减速率。

(2) 在不破坏试样的条件下，初始静偏应力和固结比增加，能够提高土体抵抗竖向循环荷载的能力，减小软化指数的衰减速率。

(3) 建立了综合考虑循环动应力、初始静偏应力、固结比和振动频率影响的累积塑性应变增长模型，并且对模型的适用性进行了验证。结果表明，采用本文建立的应变增长模型能够对多因素综合影响下的软黏土累积塑性应变的发展进行拟合和预测，模型的通用性得到了验证。

参 考 文 献

- [1] 闫澍旺. 往复荷载作用下重塑软黏土的变形特性[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 48-53.
YAN Shu-wang. Deformation characteristics of remolding soft clay subjected to reciprocating loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(1): 48-53.
- [2] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动应力-动应变关系试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3052-3057.
LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Experimental study of dynamic stress-strain relation of structural soft soil under traffic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp. 1): 3052-3057.
- [3] 吕玺琳, 方航, 张甲峰. 循环交通荷载下软土路基长期沉降理论解[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 435-440.
LÜ Xi-lin, FANG Hang, ZHANG Jia-feng. A theoretical solution for long-term settlement of soft subgrade induced by traffic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,

- 37(Supp. 1): 435—440.
- [4] 张茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 699—704.
ZHANG Ru, TU Yang-ju, FEI Wen-ping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 699—704.
- [5] 潘林有, 王军. 振动频率对饱和软黏土相关性能的影响[J]. 自然灾害学报, 2008, 16(6): 204—208.
PAN Lin-you, WANG Jun. Effect of vibration frequency on relevant behavior of saturated soft clay[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2008, 16(6): 204—208.
- [6] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动本构关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3788—3792.
LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Experimental study of dynamic constitutive relation of structural soft soils under traffic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3788—3792.
- [7] LEFEBVRE G, PFENDLER P. Strain rate and preshear effects in cyclic resistance of soft clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(1): 21—26.
- [8] 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.
HANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 891—895.
- [9] 王军, 蔡袁强, 高玉峰. 初始剪应力与频率对超固结软土变形试验研究[J]. 振动工程学报, 2010, 23(3): 260—268.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, GAO Yu-feng. Deformation of overconsolidated soft clay considering initial shear stress and frequency[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2010, 23(3): 260—268.
- [10] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载下软土动弹性模量衰减规律研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(9): 1479—1483.
LIU Fei-yu, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Degradation of dynamic elastic modulus of soft clay under cyclic loading[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2008, 42(9): 1479—1483.
- [11] 王军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1713—1719.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Study on strain softening model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1713—1719.
- [12] 郭飞. 静动荷载作用下结构性软土刚度软化特性研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2014.
GUO Fei. Research on stiffness softening characteristics of structural soft soil under static and cyclic loading[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2014.
- [13] VUCETIC M, DOBRY R. Degradation of marine clays under cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 114(2): 133—149.
- [14] 王军, 陈春雷, 丁光亚. 循环荷载下温州超固结软土动强度与变形分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 125—131.
WANG Jun, CHEN Chun-lei, DING Guang-ya. Analysis of dynamic strength and deformation of Wenzhou overconsolidated soft clay under cyclic loading[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2009, 18(4): 125—131.
- [15] 王军, 蔡袁强, 李校兵. 循环荷载作用下超固结软黏土软化-孔压模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3217—3222.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, LI Xiao-bing. Cyclic softening-pore pressure generation model for overconsolidated clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3217—3222.
- [16] 姜岩, 雷华阳, 郑刚, 等. 循环荷载下结构性软土变形预测[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 13—18.
JIANG Yan, LEI Hua-yang, ZHENG Gang, et al. Deformation prediction of structured soft clay under cyclic load[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2011, 11(1): 13—18.
- [17] 蔡袁强, 王军, 海钧. 双向激振循环荷载作用下饱和软黏土强度和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 495—504.
CAI Yuan-qiang, WANG Jun, HAI Jun. Study on strength and deformation behaviors of soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 495—504.
- [18] 王军, 蔡袁强, 丁光亚, 等. 双向激振下饱和软黏土动模量与阻尼变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 423—432.
WANG Jun, CAI Yuan-qiang, DING Guang-ya, et al. Experimental research on changing rules of dynamic modulus and damping ratio of saturated soft clay under bidirectional exciting cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 423—432.
- [19] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75—78.
ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(5): 75—78.
- [20] IDRIS I M, DOBRY R, SING R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division**, 1978, 104(12): 1427—1447.
- [21] 张兆杰. 动静荷载作用下吹填软土变形和强度特性研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2015.
ZHANG Zhao-jie. Research on deformation and strength properties of soft dredger soil under cyclic and static loading[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2015.