

# 主应力轴循环旋转下饱和软黏土的累积变形

姚兆明<sup>1</sup>, 黄茂松<sup>2</sup>, 曹杰<sup>3</sup>

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 中国民航机场建设集团公司机场工程科研基地, 北京 100062)

**摘要:** 交通荷载下地基中土单元的主应力大小和方向将同时发生变化, 现有的计算交通荷载引起的路基长期沉降实用模型未能反映交通荷载引起的土体单元主应力轴循环旋转现象。在推导常广义剪应力主应力轴循环旋转方程及验证空心圆柱剪切仪动力加载能力基础上, 对上海第④层饱和软黏土进行一系列常广义剪应力主应力轴循环旋转加载试验及非等向固结下循环扭剪试验, 分析了主应力轴旋转角、围压及静偏应力对循环塑性累积广义剪应变的影响。将常广义剪应力主应力轴循环旋转加载试验等效成不同不排水静偏应力和动应力循环旋转加载试验, 从而进一步验证了文献[12]所提出的显式模型在模拟主应力循环旋转效应方面的可靠性。

**关键词:** 原状饱和软黏土; 主应力轴; 循环旋转; 交通荷载; 显式模型

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)06-1005-08

**作者简介:** 姚兆明(1975-), 男, 安徽黄山人, 博士, 副教授, 从事岩土工程教学与研究工作。E-mail: cxmcmx4163@126.com。

## Cumulative deformation of saturated soft clay subjected to cyclic rotation of principal stress axis

YAO Zhao-ming<sup>1</sup>, HUANG Mao-song<sup>2</sup>, CAO Jie<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. R & D Center, China Airport Construction Group Corporation, Beijing 100062, China)

**Abstract:** The magnitude and direction of the principal stress of roadbed soil element will change simultaneously under traffic loading. The traditional model based on tri-axial cyclic loading test data can not reflect the phenomenon of the principal stress rotation. After the axial stress-controlled equation and the circumferential shear stress-controlled equation are derived, a series of consolidated undrained cyclic shear tests are performed under the condition that the value of the general shear stress is constant and the principal stress angle is rotating. At the same time the cyclic torsional shear tests are performed under the condition of  $K_0$  consolidation. The element affecting the plastic accumulative strain is analyzed. The test that the value of the general shear stress is constant and the angle of the principal stress is rotating is equivalent to those that the static deviatoric stress and dynamic stress are different. The explicit strain model in the 12<sup>th</sup> reference is verified to calculate the accumulative strain caused by the cyclic loading of the principal stress axis.

**Key words:** undisturbed saturated soft clay; principal stress axis; cyclic rotation; traffic loading; explicit model

## 0 引言

交通荷载引起的软土地基长期沉降已成为亟待解决的关键问题之一。处于由交通荷载诱发的主应力轴循环旋转作用下的地基土体单元应力状态极其复杂, 在长期交通荷载作用下处于复杂应力状态的软土地基长期沉降值得关注。

迄今为止, 研究土体循环荷载作用下变形特性的本构模型可以分为隐式模型和实用模型, 其中隐式模型有: 修正静力模型<sup>[1]</sup>、边界面模型<sup>[2]</sup>、套叠屈服面

模型<sup>[3]</sup>。隐式模型可较为真实地反映循环荷载下土体变形特征, 模拟效果较好。但这些模型由于采用传统的小步长积分方法, 需要准确模拟每一个循环加载过程, 这对于高达百万次以上往复加载的计算显然是难以实现的。为了方便预测长期交通荷载作用下土体的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50778132); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2007AA11Z117); 国家杰出青年科学基金项目(50825803); 安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2012A072)  
**收稿日期:** 2011-04-06

沉降,许多研究者在大量的室内循环试验的基础上,提出了基于塑性累积应变和循环次数之间直接关系的实用模型,如安定性模型<sup>[4]</sup>、“均匀化”模型<sup>[5]</sup>和显式模型等。

显式模型主要有 Monismith 等<sup>[6]</sup>、Li 等<sup>[7]</sup>以及 Chai 等<sup>[8]</sup>提出的指数模型、Parr 等<sup>[9]</sup>提出的基于第一次循环加载塑性应变指数模型。黄茂松等<sup>[10]</sup>、刘明等<sup>[11]</sup>以及黄茂松等<sup>[12]</sup>提出的显式模型有别于传统显式模型参数完全由拟合得到而造成模型参数物理意义不明确及难于确定的特点,其显式模型主要参数不仅有明确的物理意义且易于确定,适用于长期循环荷载作用下地基沉降计算。以上显式模型未能反映主应力轴循环旋转的事实,因此如要更合理地预测路基的长期沉降,有必要建立能反映主应力大小和方向同时变化的饱和和软黏土的累积变形模型。

沈扬<sup>[13]</sup>对动态空心圆柱仪在模拟主应力轴变化下应力路径能力做了深入分析。动态空心圆柱剪切仪能模拟各种复杂应力路径加载模式,是目前研究主应力轴变化对土体性状影响的理想选择。

本文在推导常广义剪应力主应力轴循环旋转方程及验证空心圆柱剪切仪动力加载能力基础上,对上海第④层饱和软黏土进行一系列等向固结下常广义剪应力主应力轴循环旋转加载试验及非等向固结下循环扭转试验,并对文献[12]所提出的循环塑性累积广义剪应变显式模型是否适用于主应力轴循环旋转的情况进行验证。

## 1 主应力轴循环旋转空心圆柱试验

### 1.1 常广义剪应力主应力轴循环旋转加载路径分析

同济大学动态空心圆柱仪主要由压力室及伺服主机系统,水压伺服控制加载系统,模拟信号与数字信号控制及转换系统,计算机控制系统4部分组成。空心圆柱受力示意图如图1所示。

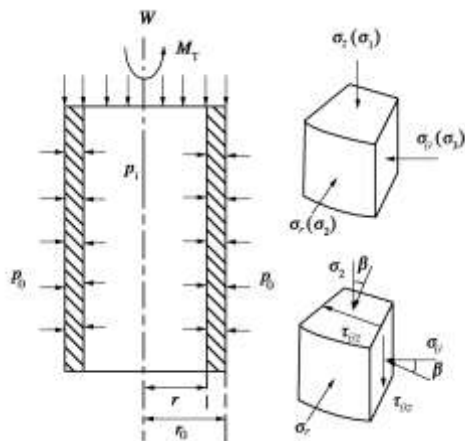


图1 空心圆柱受力示意图

Fig. 1 Forces acting on a hollow cylinder

图1中,  $M_T$  为扭矩,  $W$  为轴力,  $p_0$  为空心试样外壁压力,  $p_i$  为空心试样内壁压力,  $r_0$  为空心试样的外半径,  $r_i$  为空心试样的内半径,  $\sigma_r$  为空心试样单元体所受平均径向正应力,  $\sigma_z$  为空心试样单元体所受平均轴向正应力,  $\sigma_\theta$  为空心试样单元体所受平均环向正应力,  $\tau_{z\theta}$  为空心试样单元体所受平均扭剪应力,  $\sigma_1$  为第一主应力,  $\sigma_2$  为第二主应力,  $\sigma_3$  为第三主应力,  $\beta$  为空心试样单元体  $\sigma_z$  与  $\sigma_\theta$  的旋转角。

要实现常广义剪应力主应力轴循环旋转加载路径,轴力与扭矩必须满足一定的关系,下面推导轴力与扭矩的加载方程。空心圆柱受力为

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)} + \frac{p_0 \cdot r_0^2 - p_i \cdot r_i^2}{(r_0^2 - r_i^2)}, \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{(p_0 r_0 + p_i r_i)}{(r_0 + r_i)}, \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(p_0 r_0 - p_i r_i)}{(r_0 - r_i)}, \quad (3)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)}. \quad (4)$$

广义剪应力  $q$  为

$$q = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

中主应力系数  $b$  为

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (6)$$

由式(1)~(6)得

$$(2K_1)^2 + (\sqrt{3}K_2)^2 = (2q)^2 - 12K_3^2, \quad (7)$$

式中

$$K_1 = \frac{W}{\pi(r_0^2 - r_i^2)}, \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{3M_T}{\pi(r_0^3 - r_i^3)}, \quad (9)$$

$$K_3 = \frac{(p_i - p_0)r_i r_0}{(r_0^2 - r_i^2)}. \quad (10)$$

当  $p_i = p_0$ , 则式(7)为

$$K_1^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}K_2\right)^2 = q^2. \quad (11)$$

根据三角函数性质,可采用如下的轴力和扭矩加载波形组合达到常广义剪应力主应力轴循环旋转加载路径:

$$W = W_d \sin(2\pi t), \quad (12)$$

$$M_T = M_{Td} \cos(2\pi t), \quad (13)$$

或

$$W = W_d \cos(2\pi t) \quad , \quad (14)$$
$$M_T = M_{Td} \sin(2\pi t) \quad , \quad (15)$$
$$W_d = \pi(r_0^2 - r_i^2)q \quad , \quad (16)$$
$$M_{Td} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}(r_0^3 - r_i^3)q \quad , \quad (17)$$

式中,  $W_d$  为循环加载过程中轴力的峰值,  $M_{Td}$  为循环加载过程中扭矩的峰值。

主应力轴旋转角  $\beta$  可表示为

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{2 \cos(2\pi t)}{\sqrt{3} \sin(2\pi t)} \right] \quad . \quad (18)$$

当  $\sigma_z - \sigma_\theta < 0$  时, 有

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{2 \cos(2\pi t)}{\sqrt{3} \sin(2\pi t)} \right] + \frac{\pi}{2} \quad . \quad (19)$$

常广义剪应力主应力轴循环旋转加载下循环加载轴力、环向剪应力加载波形见图 2。图 2 中,  $q_s^*$  为试样固结以后在不排水条件下施加的静偏应力,  $p_0'$  为有效平均固结压力。

1.2 循环加载试验方案

原状土样取自上海第④层淤泥质软黏土, 取土深度为地表以下 10~12 m。为尽可能减小对土样的扰动, 采用如下方法进行现场取土: 将  $D160 \times H280$  mm 的 PVC 管保持水平插入已找平的土层, 在边上开挖将筒取出。试样物理指标为:  $\gamma = 17.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $G_s = 2.67$ ,  $e_0 = 1.40$ ,  $I_p = 23.5$ ,  $w = 47.7\%$ 。

为研究等向固结下常广义剪应力主应力轴循环旋转对累积变形的影响, 进行了表 1 所示的试验。为研

究主应力角和广义剪应力同时循环变化对累积变形的影响, 进行了非等向固结下循环扭剪加载试验, 具体试验方案见表 1, 2 所示, 加载频率为 1 Hz, 循环加载次数为 10000 次。

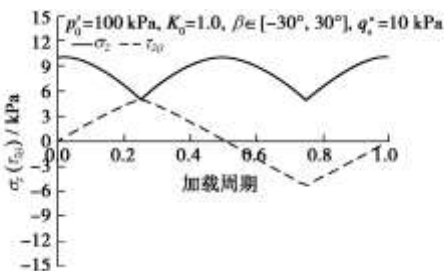


图 2 常广义剪应力主应力轴循环旋转轴向应力、环向剪应力理论加载波形

Fig. 2 Theoretical curves of axial stress and circumferential shear stress in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stress

表 1 中,  $\sigma'_{lc}$  为竖向有效固结压力,  $\sigma'_{3c}$  为空心圆柱内外有效固结压力,  $q_s^*$  为试样固结以后在不排水条件下施加的静偏应力,  $\sigma_{zs}^*$  为竖向静应力,  $\tau_{z\theta s}^*$  为环向静扭剪应力,  $\sigma_{zd}$  为竖向动应力,  $\tau_{z\theta d}$  为环向动扭剪应力。

1.3 常广义剪应力主应力轴循环旋转加载波形

图 3, 4 分别为空心圆柱循环加载轴应力、环向剪应力、加载应力路径及主应力轴偏转角实际与计算加载曲线, 点加虚线为实际加载曲线, 实线为理论加载曲线。

由图 3, 4 可见, 动态空心圆柱仪能满足设定的循环加载试验方案。

表 1 常广义剪应力主应力轴循环旋转(等向固结)

Table 1 Summary of dynamic hollow cylinder tests with cyclic rotation of principal stresses (isotropic consolidation)

$\sigma'_{lc}$ /kPa	$\sigma'_{3c}$ /kPa	$\sigma_{zs}^*$ /kPa	$\tau_{z\theta s}^*$ /kPa	$q_s^*$ /kPa	$\sigma_{zd}$ /kPa	$\tau_{z\theta d}$ /kPa	$q_d$ /kPa	$q$ /kPa	$\beta /(^{\circ})$
100	100	10	0	10	-1.4	2.9	5.2	10	-15~15
100	100	10	0	10	-5.0	5.0	10.0	10	-30~30
100	100	10	0	10	-10.0	5.8	14.1	10	-45~45
100	100	10	0	10	-15.0	5.0	17.3	10	-60~60
100	100	15	0	15	-7.5	7.5	15.0	15	-30~30
100	100	20	0	20	-10.0	10.0	20.0	20	-30~30
150	150	15	0	15	-7.5	7.5	15.0	15	-30~30
200	200	20	0	20	-10.0	10.0	20.0	20	-30~30
200	200	20	0	20	-20.0	11.5	28.2	20	-45~45
200	200	20	0	20	-30.0	10.0	34.6	20	-60~60

表 2 循环扭剪(非等向固结  $K_0 = 0.7$ , 广义剪应力变化)

Table 2 Cyclic torsional shear tests (anisotropic consolidation  $K_0 = 0.7$ , variation of generalized shear stress)

$\sigma'_{3c}$ /kPa	$\sigma'_{lc}$ /kPa	$\sigma_{zs}^*$ /kPa	$\tau_{z\theta s}^*$ /kPa	$q_s^*$ /kPa	$\sigma_{zd}$ /kPa	$\tau_{z\theta d}$ /kPa	$q_d$ /kPa	$q$ /kPa	$\beta /(^{\circ})$
100	142.86	0	0	0	0	10.0	17.3	42.8~46.2	-12.5~12.5
150	214.29	0	0	0	0	15.0	25.9	64.3~69.3	-12.5~12.5

200	285.71	0	0	0	0	20.0	34.6	85.7~92.4	-12.5~12.5
-----	--------	---	---	---	---	------	------	-----------	------------

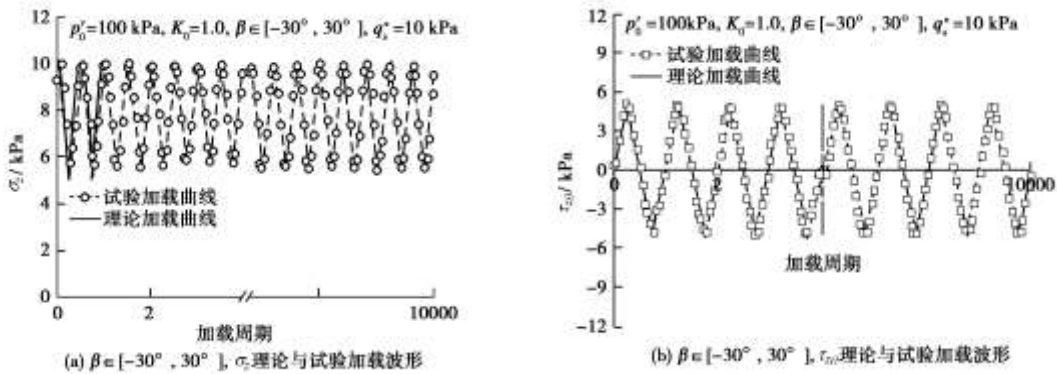


图 3 常广义剪应力主应力轴循环旋转轴力、环向剪应力理论与试验加载波形

Fig. 3 Theoretical and experimental curves of axial stresses and circumferential shear stresses in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

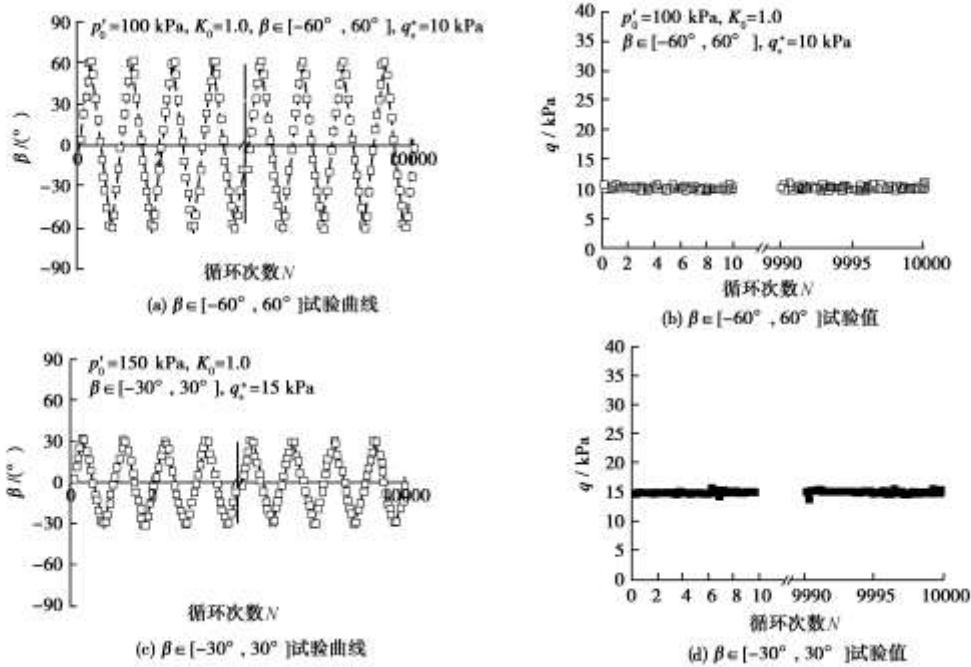


图 4 常广义剪应力主应力轴循环旋转主应力角与剪应力变化试验波形

Fig. 4 Experimental curves of principal stress angles and shear stresses in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

2 主应力轴循环旋转下饱和软黏土的累积变形

2.1 累积变形的影响因素分析——常广义剪应力主应力轴循环旋转试验

在固结不排水动态空心圆柱试验中，循环累积广义剪应变可用下述的广义剪应变可表示

$$\varepsilon_s = \sqrt{2e_{ij}e_{ij}}/3 \quad (20)$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_{kk}/3 \quad (21)$$

式中， $\varepsilon_{ij}$  为应变张量， $e_{ij}$  为应变偏张量， $\varepsilon_{kk}$  为第一应变不变量， $\delta_{ij}$  为狄利内克符号。

(1) 不同主应力轴旋转角的影响

相同固结压力与相同不排水静偏应力循环加载下，循环塑性累积广义剪应变曲线见图 5。

由图 5 可见，相同固结压力与相同不排水静偏应力循环加载试验，在相同循环加载次数下，循环塑性累积广义剪应变随循环主应力轴旋转角的增大而增大。

(2) 不同围压的影响

相同循环主应力轴旋转角与静偏应力循环加载下，循环塑性累积广义剪应变曲线见图 6。

由图 6 可见，相同循环主应力轴旋转角与静偏应力循环加载试验，在相同循环加载次数下，循环塑性累积广义剪应变随固结压力的增大而增大。

(3) 不同静偏应力的影响

相同固结压力与相同循环主应力轴旋转角循环加载下, 循环塑性累积广义剪应变曲线见图 7。

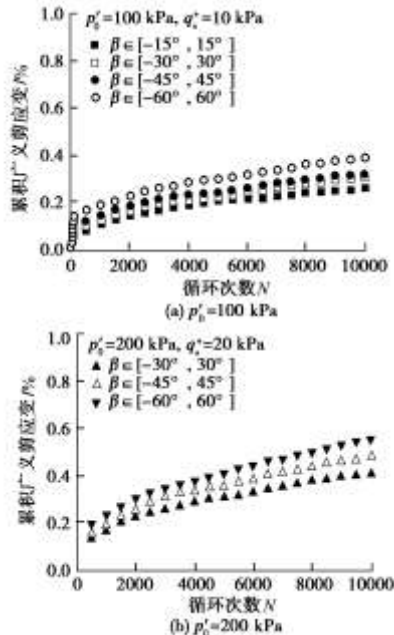


图 5 常广义剪应力循环旋转塑性累积广义剪应变与循环次数关系

Fig. 5 Relationship between plastic cumulative generalized shear strain and number of cycles in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

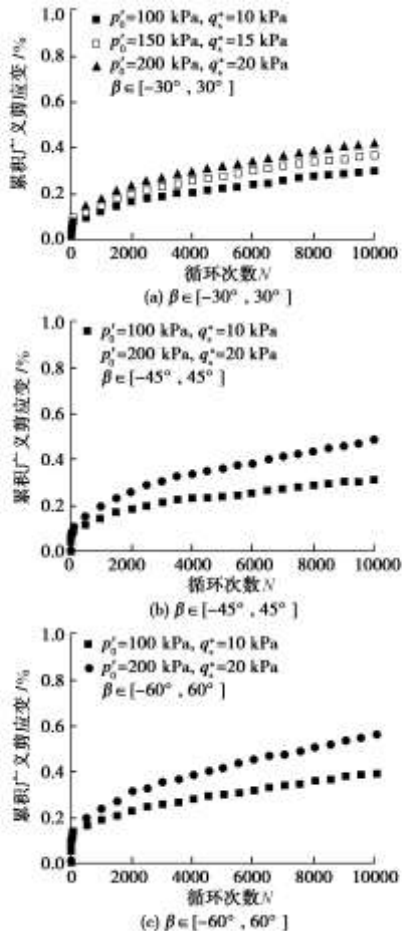


图 6 常广义剪应力循环旋转塑性累积广义剪应变与循环次数关系

Fig. 6 Relationship between plastic cumulative generalized shear strain and number of cycles in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

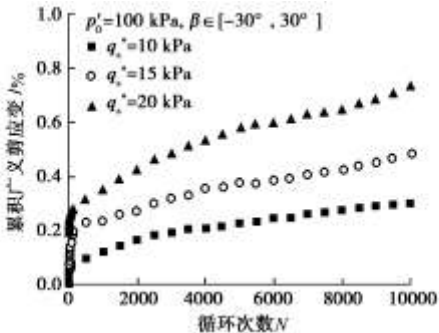


图 7 常广义剪应力循环旋转塑性累积广义剪应变与循环次数关系

Fig. 7 Relationship between plastic cumulative generalized shear strain and number of cycles in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

由图 7 可见, 相同固结压力与相同循环主应力轴旋转角循环加载试验, 在相同循环加载次数下, 循环塑性累积广义剪应变随静偏应力的增大而增大。

## 2.2 累积变形的影响因素分析——循环扭剪试验

非等向固结, 相同循环主应力轴旋转角和相同动应力比循环加载下, 循环塑性累积广义剪应变曲线见图 8。

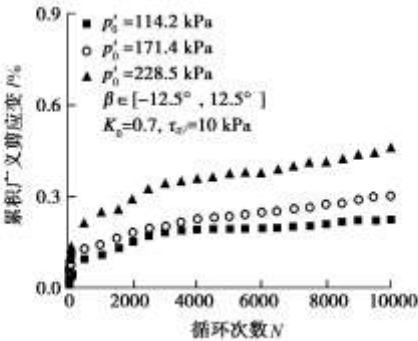


图 8 循环扭剪下塑性累积广义剪应变与循环次数关系

Fig. 8 Relationship between plastic cumulative generalized shear strain and number of cycles in dynamic hollow cylinder torsional tests

由图 8 可见, 非等向固结下相同循环主应力轴旋转角和相同动应力比时循环扭剪试验, 在相同循环加载次数下, 循环塑性累积广义剪应变随围压的增大而增大。

由以上分析可知, 饱和软黏土等向固结不排水循环加载下塑性累积广义剪应变受主应力轴旋转角、围压、静偏应力及固结方式的影响, 故应在模型中应体现这些影响因素。

## 2.3 主应力轴循环旋转下累积变形显式模型的验证

笔者在文献[12]中基于修正动偏应力水平  $D_d^*$  与

第一次循环塑性累积广义剪应变间的关系提出的循环塑性累积广义剪应变模型为

$$\varepsilon_s^p = a D_d^{*n} \left( \frac{p'_0}{p_a} \right)^c N^b, \quad (22)$$

$$D_d^* = \frac{q_d}{q_{ult} - q_s^*}. \quad (23)$$

式中  $p_a=101 \text{ kPa}$ ;  $q_d=\eta_d \cdot \sigma'_{3c}$ ,  $\eta_d$  为动应力比;  $a$ ,  $n$  值反映了修正动应力水平对第一次循环塑性累积广义剪应变与围压归一化值的影响, 由第一次循环塑性累积广义剪应变与围压归一化值和修正动应力水平拟合得到;  $c$  反映了围压对第一次循环塑性累积广义剪应变的影响, 由等向、偏压固结下不同围压相同动应力比循环加载时第一次循环塑性累积广义剪应变与围压通过指数拟合值取平均得到;  $b$  反映了循环次数对循环塑性累积广义剪应变的影响, 由常广义剪应力主应力轴循环旋转试验  $\varepsilon_s^p / \left( a D_d^{*n} (p'_0/p_a)^c \right)$  与循环次数  $N$  通过最小二乘法拟合得到。

式 (23) 中的饱和软黏土固结不排水抗剪强度  $q_{ult}$  可由下式计算:

$$q_{ult} = M p_c \left( \frac{M + \alpha}{2M} \right)^{\frac{\lambda - \kappa}{\lambda}}. \quad (24)$$

式中  $M$  为临界状态应力比;  $\lambda$ ,  $\kappa$  分别为  $e-\ln p$  空间中正常固结线和回弹线斜率, 偏压固结下  $p_c$  由初始固结压力和初始偏应力利用边界面方程计算得到<sup>[11]</sup>。对于等向固结, 式 (24) 中  $\alpha=0$ ,  $p_c$  等于初始平均固结应力。

文献[12]讨论了等向固结和非等向固结条件下不排水三轴循环加载试验。本文的出发点并不是直接采用主应力轴旋转角表示, 而是将常广义剪应力主应力轴循环旋转加载试验等效成不同不排水静偏应力和动应力的试验来讨论, 见表 3 所示。

表 3 常广义剪应力主应力轴循环旋转试验中的  $D_d^*$  值

Table 3 Value of $D_d^*$ in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses					
$\sigma'_{3c}$ /kPa	$\sigma'_{1c}$ /kPa	$\beta /(^{\circ})$	$q_s^*$ /kPa	$q_d$ /kPa	$D_d^*$
100	100	-15~15	10	5.2	0.086
100	100	-30~30	10	10.0	0.165
100	100	-45~45	10	14.1	0.234
100	100	-60~60	10	17.3	0.287
100	100	-30~30	15	15.0	0.271
100	100	-30~30	20	20.0	0.397
150	150	-30~30	15	15.0	0.166
200	200	-30~30	20	20.0	0.165
200	200	-45~45	20	28.2	0.234
200	200	-60~60	20	34.6	0.287

如图 9 在不同围压下相同修正动偏应力水平  $D_d^*$  时第一次循环塑性累积广义剪应变与修正动偏应力水

平间的一一对应关系未能体现, 因此对不同围压的影响需进行归一化。

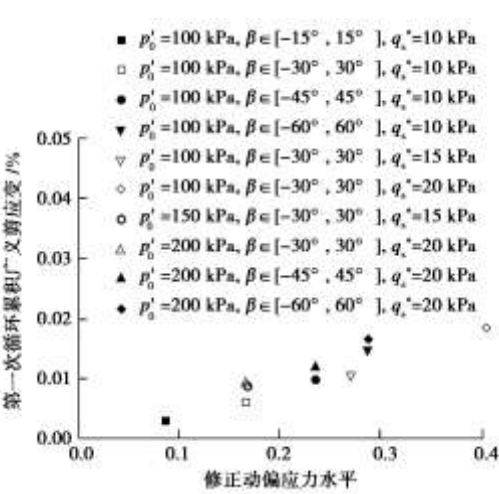


图 9  $\varepsilon_{s1}^p$  与  $D_d^*$  关系

Fig. 9 Relationship between  $\varepsilon_{s1}^p$  and  $D_d^*$   
第一次循环塑性累积广义剪应变  $\varepsilon_{s1}^p$  与  $(p'_0/p_a)^{1/2}$  归一化值  $A$  和修正应力水平  $D_d^*$  的关系见图 10。

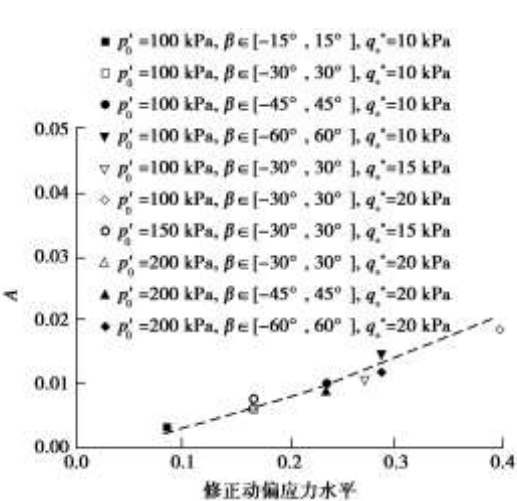


图 10  $A$  与  $D_d^*$  关系

Fig. 10 Relationship between  $A$  and  $D_d^*$   
所采用的显式模型参数见表 3, 上海地区第④层饱和软黏土等向固结条件下常广义剪应力主应力轴循环旋转塑性累积广义剪应变试验值和模型预测曲线见图 11, 12。图 11, 12 中离散点为塑性累积广义剪应变试验值, 虚线为模型计算得到的塑性累积广义剪应变值。

表 4 模型参数

Table 4 Model parameters							
$M$	$\lambda$	$\kappa$	$R$	$a$	$n$	$c$	$b$
1.22	0.173	0.034	2.0	0.076	1.408	0.5	0.408

由图 12 可见, 循环塑性累积广义剪应变模拟结果

与试验结果接近, 表明模型可以很好地计算饱和软黏土在主应力轴循环旋转下的塑性累积广义剪应变。

171.42	150	214.2	-12.5~12.5	0	25.9	0.15
228.57	200	285.7	-12.5~12.5	0	34.6	0.15

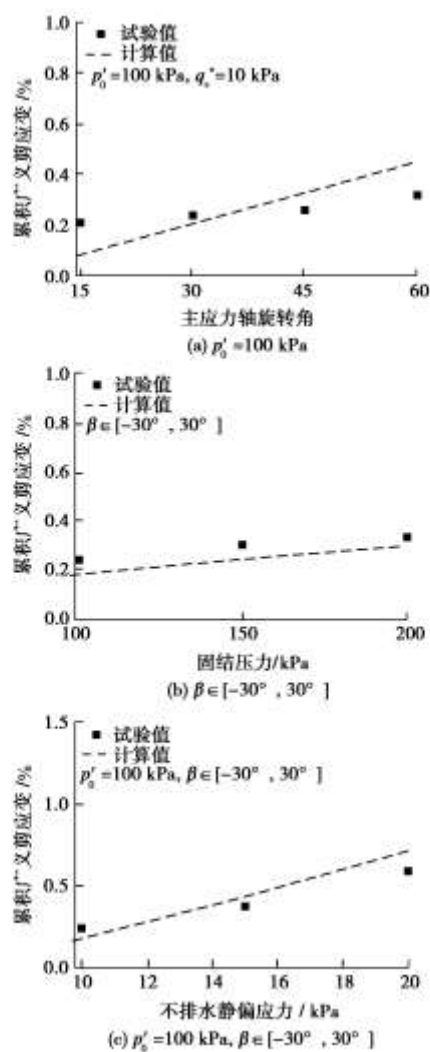


图 11 循环第 6000 次的累积广义剪应变

Fig. 11 Accumulative generalized shear strain of 6000<sup>th</sup> cyclic loading in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

在非等向固结循环扭剪过程中主应力轴角和广义剪应力是同时变化的, 塑性累积广义剪应变计算模型中的不排水极限强度考虑非等向固结的影响。非等向固结循环扭剪动偏应力水平见表 5。上海地区第④层饱和软黏土非等向固结条件下循环扭剪塑性累积广义剪应变试验值和模型预测曲线见图 13, 图中离散点为塑性累积广义剪应变试验值, 虚线为模型计算得到的循环塑性累积广义剪应变值。

表 5  $K_0$ -固结循环扭剪试验中  $D_d^*$  值

Table 5 Value of  $D_d^*$  in cycle torsional test under  $K_0$ -consolidation

$p'_0$ /kPa	$\sigma'_{3c}$ / kPa	$\sigma'_{1c}$ /kPa	$\beta /(^{\circ})$	$q_s^*$ /kPa	$q_d$ /kPa	$D_d^*$
114.28	100	142.8	-12.5~12.5	0	17.3	0.15

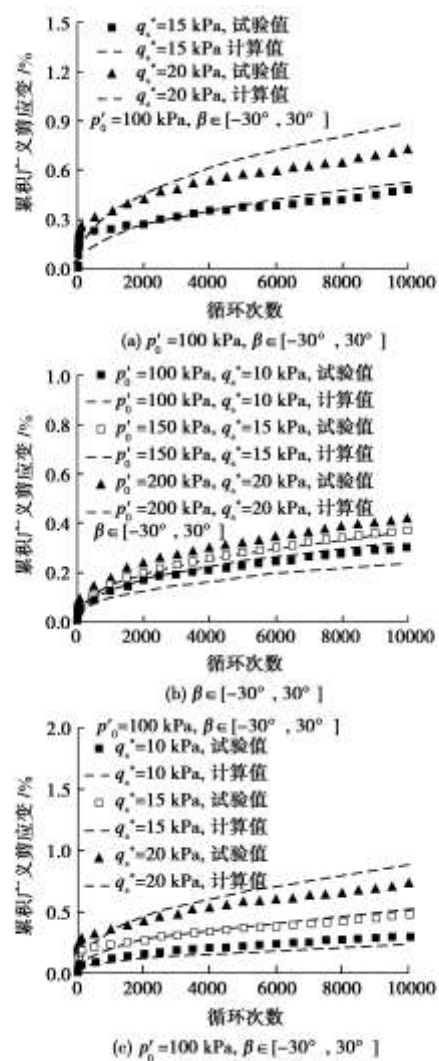


图 12 常广义剪应力主应力轴循环旋转循环塑性累积广义剪应变与循环次数关系

Fig. 12 Relationship between plastic cumulative generalized shear strain and number of cycles in dynamic hollow cylinder tests under constant deviatoric stresses

由图 13 可知, 循环塑性累积广义剪应变模拟结果与试验结果接近, 表明模型可以很好地计算饱和软黏土在非等向固结循环扭剪下的循环塑性累积广义剪应变。

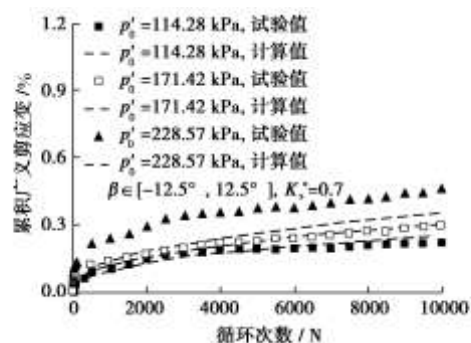


图 13 循环扭剪下循环塑性累积广义剪应变与循环次数关系

Fig. 13 Relationship between plastic cumulative generalized shear strain and number of cycles in dynamic hollow cylinder torsional tests

### 3 结 论

本文对上海第④层饱和软黏土进行一系列常广义剪应力主应力轴循环旋转试验及循环扭剪试验基础上验证显式模型, 得到以下 3 点结论。

(1) 推导了常广义剪应力主应力轴循环旋转方程, 通过对比理论与试验加载曲线验证了空心圆柱仪常广义剪应力主应力轴循环加载能力。

(2) 对上海第④层饱和软黏土进行一系列常广义剪应力主应力轴循环旋转试验以及循环扭剪试验, 分析了主应力轴旋转角、围压及静偏应力对循环塑性累积广义剪应变的影响。

(3) 将常广义剪应力主应力轴循环旋转加载试验等效成不同不排水静偏应力和动应力的循环旋转加载试验, 从而进一步验证了文献[12]所提出的显式模型在模拟主应力循环旋转效应方面的可靠性。

运用移动有限元技术计算车载下路基的应力, 建立能反映主应力轴循环旋转的累积孔压模型, 再结合本文建立的反映主应力轴循环旋转的饱和软黏土循环累积塑性变形模型来计算路基在交通荷载下的长期沉降将是下一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] GBABOUSSI J, MOMEN H. Plasticity model for cyclic behavior of sands[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Aachen, 1979: 423 - 434.
- [2] MROZ Z, NORRIS V A, ZIEENKIEWICZ O C. An anisotropic hardening model for soils and its application to cyclic loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1978, 2(3): 203 - 221.
- [3] LI T, MEISSNER H. Two-surface plasticity model for cyclic undrained behavior of clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(7): 613 - 626.
- [4] SUIKER A S J, de Borst R. A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks[J]. International Journal for Numerical Methods In Engineering, 2003, 57(4): 441 - 470.
- [5] PONDER A R S. The analysis of cyclically loaded creeping structures for short cyclic times[J]. International Journal of Solids and Structures, 1976, 12(2): 809 - 825.
- [6] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[R]. Transportation Research Record. No. 537. Transportation Research Board. Washington, D C, 1975: 1 - 17.
- [7] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006 - 1013.
- [8] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907 - 916.
- [9] PARR G B. Some aspects of the behavior of London clay under repeated loading[D]. Nottingham: University of Nottingham, 1972.
- [10] 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))
- [11] 刘 明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1703 - 1709. (LIU Ming, HUANG Mao-song, LIU Yan-hua. Analysis for long-term settlement of tunnel across river induced by vehicle operation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1703 - 1709. (in Chinese))
- [12] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 325 - 331. (HUANG Mao-song, YAO Zhao-ming. Explicit model for saturated clay behavior subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 325 - 331. (in Chinese))
- [13] 沈 扬. 考虑主应力方向变化的原状软黏土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (SHEN Yang. Experimental study on effect of variation of principal stress orientation on undisturbed soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))