

王建华,杨召焕.饱和黏土振动弱化性态的边界面模型分析[J].地震工程学报,2020,42(1):168-174.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.168

WANG Jianhua, YANG Zhaohuan. Cyclic Degradation of Saturated Clay Based on a Bounding Surface Model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 168-174. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.168

饱和黏土振动弱化性态的边界面模型分析

王建华, 杨召焕

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 基于增量弹塑性边界面理论, 构建一种可以描述振动应力作用下饱和黏土弱化的边界面应力应变关系。该关系利用具有严谨理论基础的旋转硬化法则描述振动应力作用过程中边界面大小与位置的变化, 并将塑性累积偏应变长度作为反映振动应力历史对饱和黏土应力应变响应影响的状态参数, 通过建立包含状态参数的塑性模量插值关系描述饱和黏土振动弱化应力应变响应, 进一步按照正交流动法则形成增量应力应变关系。该关系包含 9 个参数, 其中 5 个是剑桥模型参数, 其余 4 个参数有相对明确的物理意义。利用所构建的边界面应力应变关系, 对两种黏土的等压固结不排水静三轴试验和动三轴试验进行预测, 并与试验结果进行比较, 结果表明这一关系能够较好描述振动应力作用下饱和黏土刚度与强度弱化特性。

关键词: 软黏土; 土的本构; 振动弱化; 边界面; 土动力特性

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0168-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.168

Cyclic Degradation of Saturated Clay Based on a Bounding Surface Model

WANG Jianhua, YANG Zhaohuan

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An incremental stress-strain relationship was developed based on the incremental elastoplastic bounding surface theory. This relationship could describe the degradation of saturated clay subjected to cyclic loads. In the relationship, a rotational hardening rule based on a rigorous theory was used to describe the change in size and location of the bounding surface during the action of vibrational stress. The plastic accumulative deviatoric strain length was used as a state parameter to reflect the effect of vibration stress history on the stress-strain response of saturated clay. An interpolated relationship of plastic modulus associated with the state parameter was formulated to describe the cyclic degradation of soft clay subjected to cyclic loads. Finally, the incremental stress-strain relationship was established using the associative flow rule. The relationship included nine parameters, five of which were modified Cambridge model parameters, while four had relatively clear physical meanings. Monotonic and cyclic undrained triaxial test results of two

收稿日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579174)

第一作者简介: 王建华(1955—), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事土动力学与海洋岩土工程研究。E-mail: tdwjh@eyou.com。

kinds of saturated clay were predicted using the relationship to verify its validity. Comparison of predicted and test results showed that the relationship can skillfully describe the cyclic degradation behavior of saturated soft clay subjected to cyclic loading.

Keywords: soft clay; constitutive relationship of soil; cyclic degradation; bounding surface; soil dynamic property

0 引言

很多海洋建筑物需建造在软黏土层上。在波浪、地震等振动荷载作用下,软黏土层的承载能力和稳定性将取决于软土的动力特性。分析软黏土层承载力和稳定性的核心问题在于建立能够客观反映土动力特性的本构关系。振动荷载作用下,饱和软土的应力应变响应除了表现出明显的非线性、滞后性以及应变累积特性之外,还具有明显的振动弱化现象。因此,对于一个恰当的本构关系,应当能够描述振动荷载作用下土体强度和刚度的弱化^[1-2]。

已有研究表明,振动荷载会导致饱和软土结构变化,进而引起土体强度和刚度弱化。对于振动三轴试验土样,如果土样无初始轴向静偏应力,振动应力的作用将导致土样轴向振动应变随应力振动次数增加逐渐增大;当有初始轴向静偏应力作用时,土样振动应变相对较小,振动累积应变随应力振动次数增加而增大。以往研究大多采用不同的方式描述不同的振动弱化现象。如在一维条件下,通过建立振动弱化程度随应力(应变)振动次数的变化关系描述振动弱化特性^[3-6]。在增量弹塑性分析中,通常利用边界面大小和位置随反映振动应力历史的状态参数变化描述振动弱化现象。Liang 等^[7]在研究中将状态参数取为累积塑性偏应变长度。Taiebat 等^[8]在研究中将状态参数取为塑性体积应变和剪应变。程星磊等^[9]则采用与应力振动次数有关的参数描述振动弱化。显然,同时考虑塑性体积应变和剪应变对振动弱化影响的处理方法更为恰当,但是这种做法增加了模型的复杂程度。利用振动次数作为弱化程度的宏观度量,对于描述不规则振动荷载下软土弱化有一定难度。采用塑性偏应变长度作为描述饱和软土的振动弱化的状态参数,也存在着硬化规则过于复杂的问题^[10-11]。为此,有必要对描述土体强度和刚度振动弱化的方法做进一步研究。

综上,本文基于增量弹塑性边界面理论,借助一种理论更为严谨、模型参数确定更为恰当的旋转硬化法则,结合更新映射中心的径向映射法则,利用塑性偏应变长度作为状态参数,通过构建能考虑振动弱化影响的塑性插值模量关系,形成边界面应力应变关

系,以此描述振动荷载作用下饱和软黏土的弱化。进而利用这一关系,对两种等压固结黏土的不排水静力三轴试验和循环三轴试验进行预测,阐明这一关系描述振动荷载作用下饱和软黏土弱化特性的可行性。

1 描述振动弱化的边界面关系

基于增量弹塑性边界面理论的应力应变关系包括边界面方程及硬化法则、映射法则、流动法则与增量应力应变关系以及塑性模量插值关系。

式(1)为 p - q 平面上的边界面方程。当 $\alpha = 0$ 时,式(1)即为修正剑桥模型的屈服面方程。

$$F = (\bar{q} - \bar{p}\alpha)^2 - (M^2 - \alpha^2)\bar{p}(p_0 - \bar{p}) = 0 \tag{1}$$

式中: $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ 分别为边界面上的应力点; α 为边界面旋转硬化参数; p_0 为表征边界面大小的参数,即斜率为 α 的直线与边界面交点的 p 坐标(图 1); M 为临界状态参数,通过三轴压缩(拉伸)试验确定,且当 $\bar{\eta} = \bar{q}/\bar{p} > \alpha$ 时, $M = M_c$,反之 $M = M_e$ 。

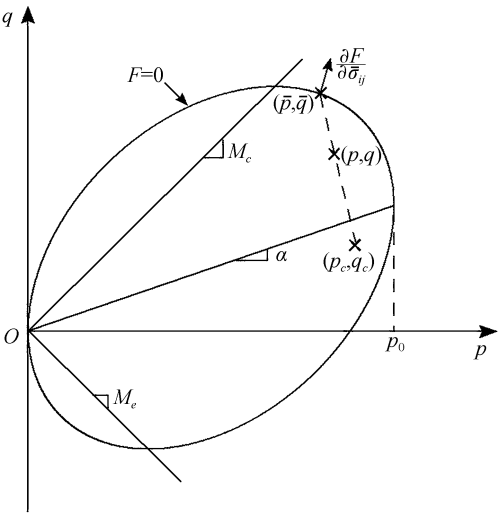


图 1 p - q 平面中的边界面
Fig.1 Bounding surface in p - q plane

根据临界状态理论和 k_0 固结应力状态特点,可以导出对于 k_0 固结土样旋转硬化参数 α 的计算关系:

$$\alpha_{k_0} = \frac{\eta_{k_0}^2 + 3(1 - \kappa/\lambda)\eta_{k_0} - M^2}{3(1 - \kappa/\lambda)} \tag{2}$$

式中: $k_0 = \sigma_3/\sigma_1$; $\eta_{k_0} = 3(1 - k_0)/(1 + 2k_0)$; λ 为一维固结线在 e - $\ln p$ 坐标系中的斜率; κ 为一维回弹线

在 e 为 $\ln p$ 坐标系中的直线斜率。

边界面方程中包括两个硬化参数 p_0 和 α , 分别描述边界面在振动荷载作用过程中的等向硬化和旋转硬化。对于等向硬化, 按式(3) 确定 p_0 。

$$dp_0 = \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} p_0 d\epsilon_v^p \quad (3)$$

式中: p_0 为初始固结压力; e_0 为初始孔隙比; $d\epsilon_v^p$ 为塑性体积应变增量; λ, κ 见式(2) 中解释。

旋转硬化参数 α 表示振动荷载作用下边界面的旋转程度, 以此描述振动加载历史导致的各向异性。这里采用 Dafalias 等^[11] 提出的旋转硬化规则, 见式(4)。

$$d\alpha = \langle L \rangle c p_{at} \frac{p}{p_0} (\alpha_b - \alpha) \quad (4)$$

式中: L 为加载因子, 由式(5) 确定; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macauley 符号, 当 $L \geq 0$ 时, $\langle L \rangle = L$, 反之, $\langle L \rangle = 0$; c 为反映旋转绝对速率的参数; p_{at} 为大气压; α_b 为沿任意一 η 加载时 α 的最终目标值, 且由式(6) 确定。

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_v \\ d\epsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} + \frac{4\bar{p}^2}{K_p} (M^2 - \bar{\eta}^2)^2 \\ \frac{4\bar{p}^2}{K_p} (M^2 - \bar{\eta}^2) (\bar{\eta} - \alpha) \end{bmatrix}$$

为了确定式(8) 中的塑性模量, 首先确定边界面上的塑性模量。为此, 对边界面方程运用相容性条件, 见式(9)。

$$dF = \frac{\partial F}{\partial p} dp + \frac{\partial F}{\partial q} dq + \frac{\partial F}{\partial p_0} dp_0 + \frac{\partial F}{\partial \alpha} d\alpha = 0 \quad (9)$$

将式(4)、(5) 代入式(9), 整理后得到边界面上像应力点处的塑性模量 $\bar{K}_p$, 见式(10)。

$$\bar{K}_p = -\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} p_0 \frac{\partial F}{\partial p_0} \frac{\partial F}{\partial p} - c p_{at} \frac{\bar{p}}{p_0} (\alpha_b - \alpha) \frac{\partial F}{\partial \alpha} \quad (10)$$

为了反映振动加载过程中土体弱化现象, 假设饱和黏土的振动弱化取决于塑性偏应变长度 ζ , 建立以式(11) 表示的塑性模量插值函数。

$$K_p = \bar{K}_p + A e^{-B\zeta} p_0^3 \frac{\delta}{\delta_0 - \delta} \quad (11)$$

式中: $\zeta = \int \left(\frac{2}{3} d\epsilon_q^p \cdot d\epsilon_q^p \right)^{1/2}$; A, B 均为模型参数, A 用于控制塑性模量绝对值, B 用于描述塑性偏应变长度对塑性模量的影响程度, 且当 B 越大, 随塑性偏应变长度增加, 土体刚度弱化越迅速, 反之亦然。 δ_0 为映射中心到像应力点之间的距离; δ 为当前应力点到像应力点之间的距离。

不排水条件下, 体积应变为零, 据此可以导出有

$$L = \frac{1}{K_p} \left(\frac{\partial F}{\partial p} dp + \frac{\partial F}{\partial q} dq \right) \quad (5)$$

式中: K_p 为塑性模量。

$$\alpha_b = \pm \frac{M}{z} \left(1 - \exp \left(-z \frac{|\eta|}{M} \right) \right) \quad (6)$$

采用移动映射中心径向映射法则建立当前应力点与边界面上像应力点之间关系。且初始加载时, 初始加载点为映射中心; 应力反向后, 应力反向点为映射中心。

按正交流动法则确定增量弹塑性应力应变关系, 见式(7a) 与式(7b)。

$$d\epsilon_v^p = \langle L \rangle \frac{\partial F}{\partial p} = \left\langle \frac{1}{K_p} \left(\frac{\partial F}{\partial p} dp + \frac{\partial F}{\partial q} dq \right) \right\rangle \frac{\partial F}{\partial p} \quad (7a)$$

$$d\epsilon_q^p = \langle L \rangle \frac{\partial F}{\partial q} = \left\langle \frac{1}{K_p} \left(\frac{\partial F}{\partial p} dp + \frac{\partial F}{\partial q} dq \right) \right\rangle \frac{\partial F}{\partial q} \quad (7b)$$

对边界面方程式(1) 求导并带入式(7), 得增量应力应变关系, 见式(8)。

$$\begin{bmatrix} \frac{4\bar{p}^2}{K_p} (M^2 - \bar{\eta}^2) (\bar{\eta} - \alpha) \\ \frac{1}{3G} + \frac{4\bar{p}^2}{K_p} (\bar{\eta} - \alpha)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} \quad (8)$$

效应力路径表达式(12)。

$$dp = -\frac{\partial F / \partial \bar{p} \cdot \partial F / \partial \bar{q}}{(\partial F / \partial \bar{p})^2 + K_p / K} dq \quad (12)$$

上述边界面应力应变关系包括修正剑桥模型参数 $e_0, \lambda, \kappa, M_c (M_e)$ 与 v , 以及 4 个附加参数 c, z, A, B 。按已有方法确定修正剑桥模型参数。

由于参数 c 反映旋转硬化绝对速率, 通过拟合静三轴试验应力应变曲线和有效应力路径确定 c 。

参数 z 用于确定以某一固定的应力比加载时边界面旋转的极限值。首先用式(2) 确定 α_{k0} , 然后与式(6) 联立确定 z 。

通过对动三轴载试验加卸载响应曲线的最佳模拟确定参数 A 和 B 。

2 黏土循环应力应变响应分析

为了说明上述关系在描述黏土循环弱化应力应变响应方面的能力, 对两种饱和黏土的静力三轴和循环三轴试验结果进行预测。

2.1 Georgia 高岭黏土三轴试验结果预测

Sheu^[12] 对 Georgia 高岭重塑黏土进行了静三轴和振动三轴试验。该黏土的物性指标和模型剑桥模型参数列于表 1。

表 1 Georgia 高岭黏土物性指标和模型参数

Table 1 The physical indices and model parameters of the clay

黏粒含量/%	PI/%	e_0	λ	κ	M_c	M_e	$\phi'/(^{\circ})$
62	20	1.5	0.121	0.037	0.87	0.86	22.3

该黏土 k_0 系数为 0.62,与之相应的参数 $z=2.5$ 。图 2 给出参数 c 取不同值时,预测的该黏土等压固结不排水静三轴试验有效应力路径与应力应变

曲线。图中结果表明, c 越大,预测的不排水强度越大。当参数 $c=0$ 时,即模型不考虑旋转硬化时,预测的结果就是依据修正剑桥模型预测的结果。进一步取 $c=100$,预测不同固结压力下(276 kPa, 414 kPa和 552 kPa)该黏土的固结不排水三轴试验结果(图 3)。图中结果表明,预测与试验结果较为吻合。

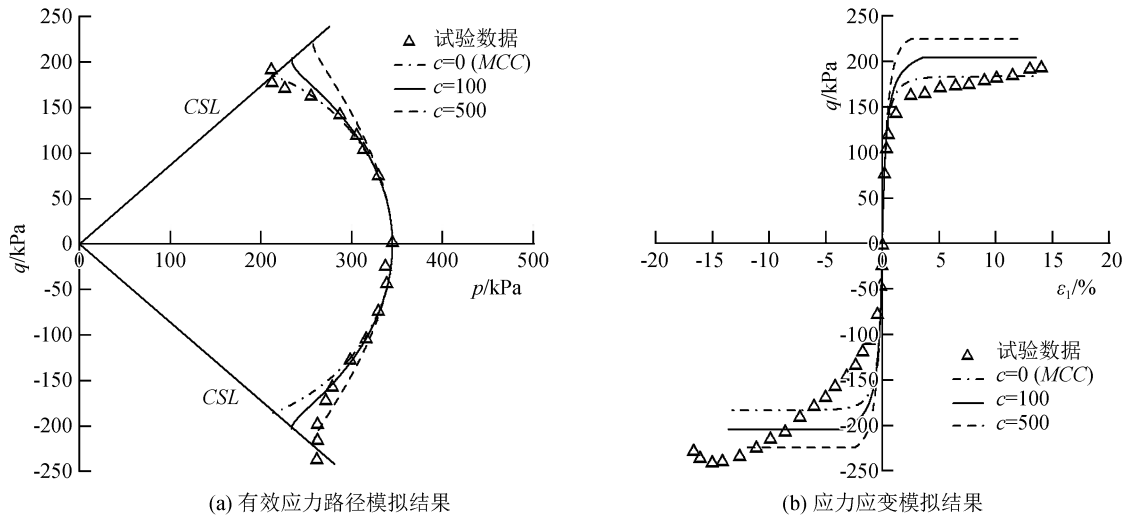


图 2 c 参数对预测结果的影响

Fig.2 Effect of parameter c on predicted results

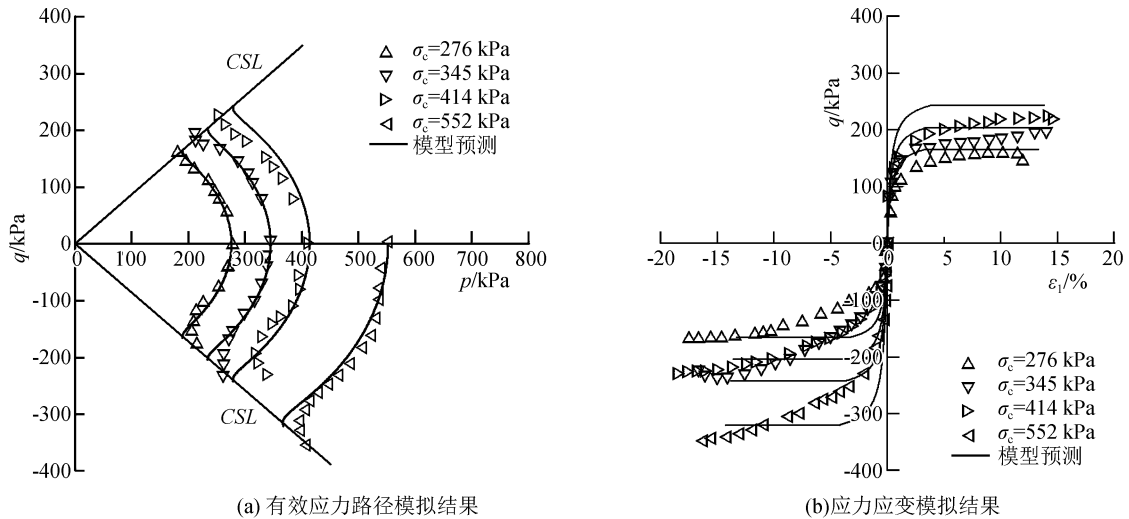


图 3 Georgia 高岭黏土等压固结不排水静三轴试验预测与试验结果($c=100$)

Fig.3 Predicted and test results for isotropically consolidated undrained static triaxial tests of Georgia Kaolin clay ($c=100$)

进一步,对 Sheu^[12] 进行的无轴向静偏应力的振动三轴试验进行预测。按照试验条件,预测时振动应力幅值 q_{cy} 分别取为 121.4 kPa、136 kPa、140.7 kPa 和 165.5 kPa。预测时采用的参数与预测静三轴试验的参数相同,且按下述方法确定塑性模量插值关系中的两个参数 A 和 B 。即通过对 $q_{cy}=121.4$ kPa 的有效应力路径和应力应变曲线的最优拟合确

定 A 和 B ,结果为 $A=50,B=3.6$ 。进而再据此预测 $q_{cy}=136,140.7$ 和 165.5 kPa 的试验结果。图 4 给出了预测以及试验结果的比较。

图 4 中的结果表明,对于 $q_{cy}=136$ kPa 和 $q_{cy}=140.7$ kPa 两种循环应力幅值,预测的结果与试验结果吻合较好,即随循环应力次数增加,振动应变逐渐增大,土样出现了明显弱化,并最终趋于破坏。对于

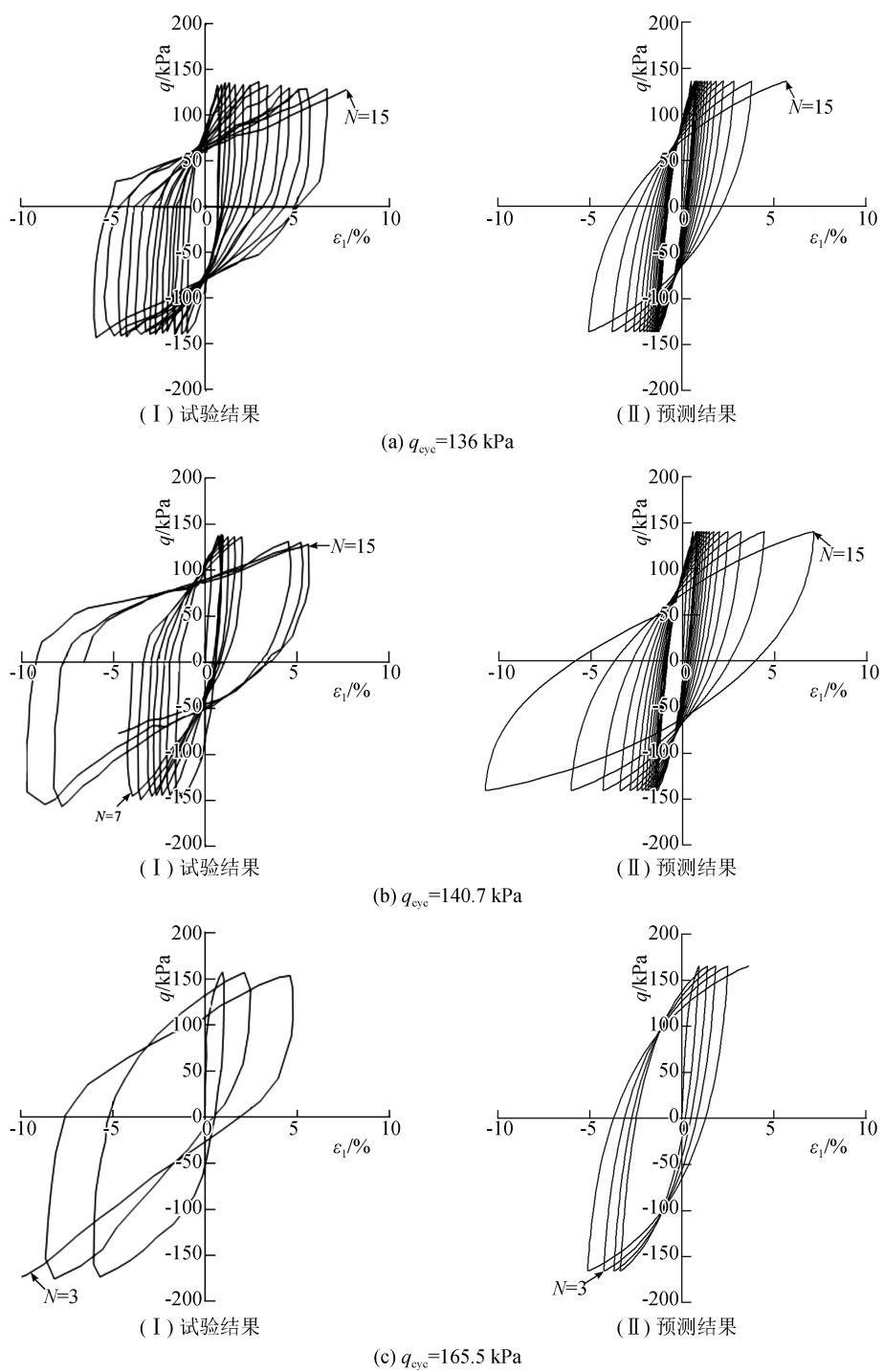


图 4 Georgia 高岭黏土等压固结不排水动三轴试验预测与试验结果($c=100$)

Fig.4 Predicted and test results for isotropically consolidated undrained dynamic triaxial tests of Georgia Kaolin clay ($c=100$)

$q_{cy}=165.5$ kPa 循环应力幅值,预测的振动应变与试验结果相比偏小,但变化趋势基本一致。因此,上述边界面应力应变关系能够较好描述等压固结后的三轴试样受轴向振动应力作用时的弱化特性。

2.2 Itsukaichi 黏土三轴试验结果预测

Hyodo 等^[13]对 Itsukaichi 港区黏土进行了一系列的等压固结不排水静三轴试验和动三轴试验。表 2 给出了该黏土的物性参数和模型参数。图 5 给

表 2 Itsukaichi 黏土物性指标和模型参数

Table 2 The physical indices and model parameters of Itsukaichi clay

G_s	$LL/\%$	$PL/\%$	$PI/\%$	$w/\%$	e_0	λ	κ	M_c	M_e	ν	z
2.532	124.2	51.4	72.8	115.8	2.828	0.349	0.057	1.560	1.456	0.3	2.36

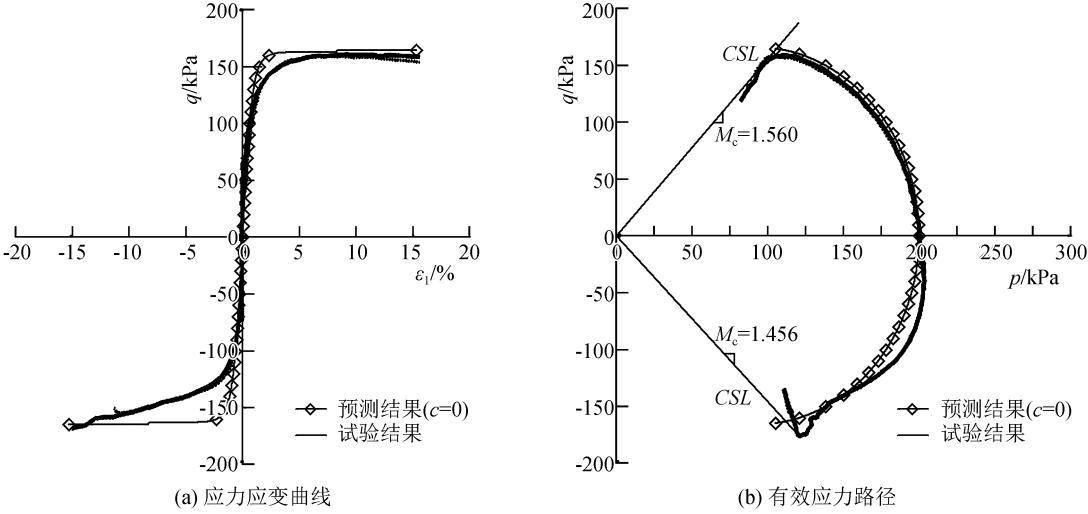


图 5 Itsukaichi 黏土等压固结不排水静三轴试验预测与试验结果($c=100$)

Fig.5 Predicted and test results for isotropically consolidated undrained static triaxial tests of Itsukaichi clay ($c=100$)

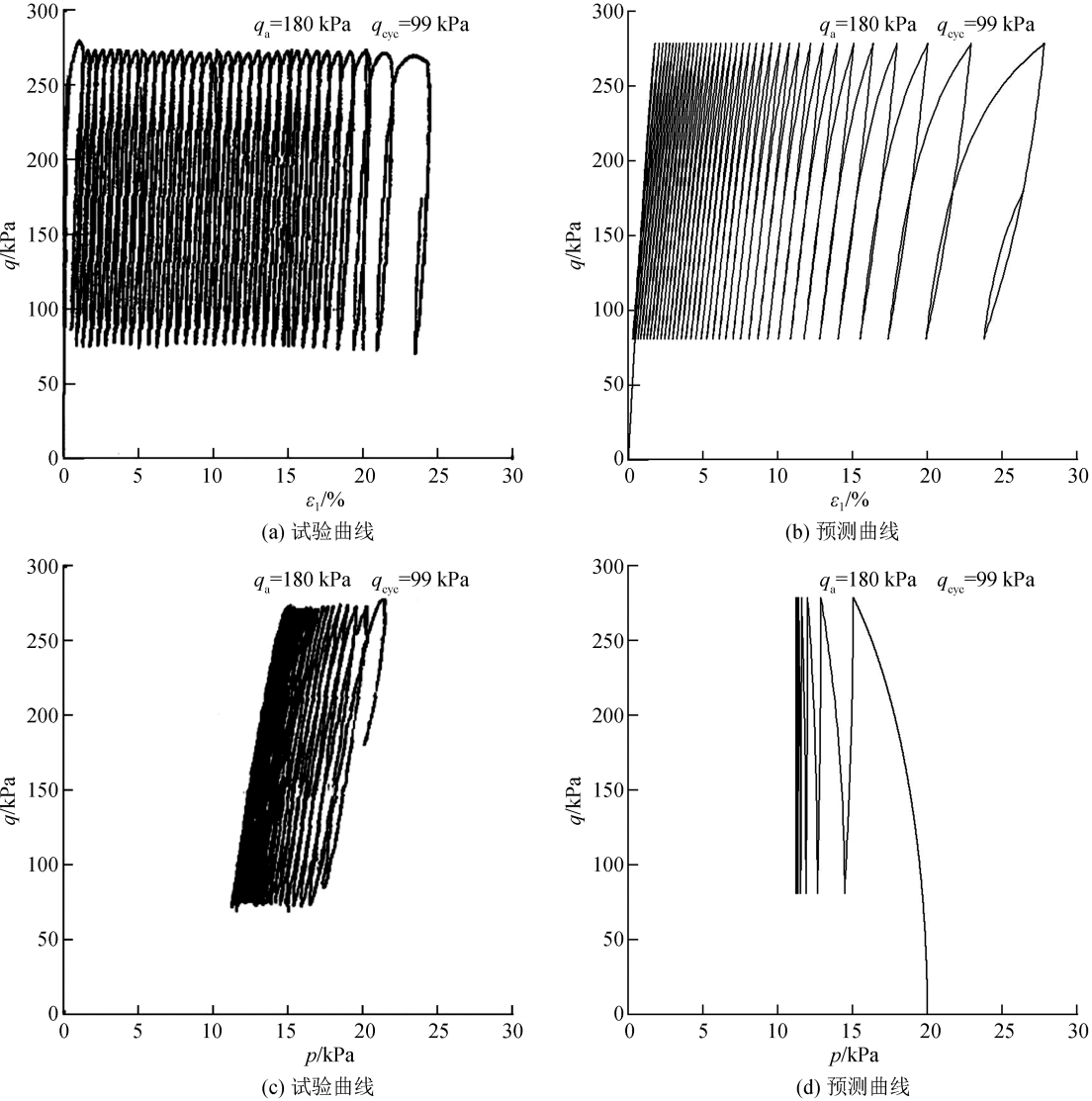


图 6 Itsukaichi 黏土等压固结不排水动三轴试验预测与试验结果($c=100$)

Fig.6 Predicted and test results for isotropically consolidated undrained dynamic triaxial tests of Itsukaichi clay ($c=100$)

出了预测的 Itsukaichi 静三轴试验试验结果。结果表明,旋转硬化参数 $c=0$ 的预测与试验结果较吻合。

图 6 给出了轴向静偏应力 $q_n=180$ kPa、振动应力幅 $q_{cy}=99$ kPa 时,预测与实测的动三轴应力应变曲线和有效应力路径。计算时,参数 $A=2\ 900$, $B=10.5$ 。图 6 中的结果表明,随振动应力次数增加,土样孔压不断累积,刚度逐渐降低,累积应变逐渐增大,最终达到破坏。因此,利用以上边界面应力应变关系,也可以分析静偏应力和振动偏应力共同作用下土样的弱化应力应变响应。

3 结 论

基于增量弹塑性边界面理论,在 p - q 平面中构造了一种增量应力应变关系,据此描述动应力作用下三轴土样的弱化应力应变响应。构造的关系有以下特点:

(1) 采用一种理论更为严谨、模型参数确定更为恰当的旋转硬化规则反映振动应力历史对土体应力应变响应的的影响。

(2) 通过与塑性偏应变长度有关的塑性模量插值关系,描述振动应力作用下饱和黏土的振动弱化特性。模量插值关系包含两个参数,他们具有相对明确的物理意义。

利用该关系分析了两种饱和黏土的不排水静三轴试验和有、无静偏应力作用时的振动三轴试验,预测与试验结果相比较为接近。

研究该关系分析其他应力状态土样振动弱化应力应变响应是进一步的工作。

参考文献(References)

- [1] PRÉVOST J H. Mathematical Modelling of Monotonic and Cyclic Undrained Clay Behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1977, 1(2): 195-216.
- [2] MROZ Z, NORRIS V A, ZIENKIEWICZ 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] 王军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下软黏土刚度软化特

征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2138-2144.

WANG Jun, CAI Yuanqiang, XU Changjie, et al. Experimental Study on Degradation of Stiffness of Saturated Soft Clay under Undrained Cyclic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2138-2144.

- [4] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1491-1498.
HUANG Maosong, LI Shuai. Degradation of Stiffness and Strength of Offshore Saturated Soft Clay under Long-Term Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1491-1498.
- [5] IDRIS D M, DOBRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of Soft Clays during Cyclic Loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(12): 1427-1447.
- [6] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软粘土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75-78, 82.
ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Study on Strain Soften in Saturated Soft Clay under Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75-78, 82.
- [7] LIANG R Y, MA F G. Anisotropic Plasticity Model for Undrained Cyclic Behavior of Clays. I: Theory [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(2): 229-245.
- [8] TAIEBAT M, DAFALIAS Y F, PEEK R. A Destructuration Theory and Its Application to SANICLAY Model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(10): 1009-1040.
- [9] 程星磊, 王建华. 考虑循环软化特性的饱和软土弹塑性本构关系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 786-794.
CHENG Xinglei, WANG Jianhua. Research on Elastoplastic Constitutive Relation for Soft Clay Considering Cyclic Softening[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 786-794.
- [10] SEIDALINOV G, TAIEBAT M. Bounding Surface SANICLAY Plasticity Model for Cyclic Clay Behavior[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38(7): 702-724.
- [11] DAFALIAS Y F, TAIEBAT M. Anatomy of Rotational Hardening in Clay Plasticity[J]. Géotechnique, 2013, 63(16): 1406-1418.
- [12] SHEU W Y. Modeling of Stress-strain-strength Behavior of a Clay under Cyclic Loading[D]. University of Colorado, Boulder, Colorado, USA. 1984.
- [13] HYODO M, YAMAMOTO Y, SUGIYAMA M. Undrained Cyclic Shear Behaviour of Normally Consolidated Clay Subjected to Initial Static Shear Stress. [J]. Soils and Foundations, 1994, 34(4): 1-11.