

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.013

# 循环荷载作用下黏土改进界面模型

李 剑, 陈善雄, 姜领发

(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)

**摘 要:** 为克服界面模型应用不便、不能反映卸载过程中土体的弹塑性性质的缺陷, 提出了一个循环荷载作用下可考虑弹塑性加、卸载过程的重塑黏土改进界面模型。模型采用了简单的界面形式, 可大大简化该模型理论的推导与计算; 采取了不预先定义界面大小的方式, 有效地降低了改进界面模型在应用过程中的经验性; 加入界面胀缩规则, 使模型可考虑土样卸载过程中的弹塑性性质, 进而可反映土样的滞回特性。通过对重塑黏土进行循环三轴数值模拟试验, 并与真实试验结果进行对比分析, 验证了改进界面模型的合理性和有效性。数值验证结果表明, 改进界面模型具有物理意义明确、参数易于确定、形式相对简单的特点, 且该模型计算精度较高, 计算结果与试验结果吻合得较好。

**关 键 词:** 界面模型理论; 改进界面模型; 循环三轴试验; 滞回特性; 界面胀缩

**中图分类号:** TU 433

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 02 - 0387 - 07

## An improved bounding surface model for clay under cyclic loading

LI Jian, CHEN Shang-xiong, JIANG Ling-fa

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** This paper proposes an improved bounding surface model for remolded clay, which overcomes the defects that it is inconvenient to apply and not related with elastoplastic property in the unloading process of the bounding surface model, by considering elastoplastic loading and unloading processes under cyclic loading. The model uses a simple bounding surface formula, which significantly simplifies the derivation and calculation of the model; which also effectively reduces the empirical dependence in the application process of the improved bounding surface without predefining the bounding surface. It introduces bounding surface expansion and contraction rules, which makes the model consider the elastoplastic property of the soil in the unloading process and then reflects the hysteretic behavior of the soil. This improved bounding surface model is verified by comparison between numerical simulation of remolded clay cyclic triaxial test and the cyclic triaxial lab test. The results show that the improved bounding surface has following advantages: clear physical significance and simple form, parameters easy to determine, high precision of calculation and the calculation results fitting the real test results.

**Key words:** bounding surface model theory; improved bounding surface model; cyclic triaxial test; hysteretic behavior; bounding surface expansion and contraction

## 1 引 言

大量动三轴试验研究表明, 土体在动力荷载作用下的动应力-动应变关系呈现明显非线性和滞后性的特点, 反映出土体在动荷作用下弹塑性加、卸载的特点<sup>[1-3]</sup>。合理的动力本构模型要正确反映动荷作用下土体受力变形的特点, 准确地描述土体动应力-应变关系的滞回特性, 而这一特点也是构建动

力本构模型最核心的内容。

近年来, Dafalias 等<sup>[4-5]</sup>提出的界面动力本构模型得到广泛发展和应用。界面模型取消了多重嵌套的屈服面, 计算过程中不用追踪、记录计算过程中屈服面的变化; 同时取消了弹性域的存在, 这样避免了加、卸载过程中, 需要建立弹塑性域在界面内移动规则的困难, 从而大大简化了界面模型的理论推导。受益于其简明的理论形式、较低的

收稿日期: 2013-10-15

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (No. KZZD-EW-05); 岩土力学与工程国家重点实验室资助项目 (No. SKLQ015, No. SKLZ0803); 国家自然科学基金重点项目 (No. 51027002); 湖北省自然科学基金项目 (No. 2011CDA124); 国家科技支撑计划课题 (No. 2011BAB10B02)

第一作者简介: 李剑, 男, 1983 年生, 助理研究员, 主要从事土动力学与工程稳定性方向的研究工作。E-mail: 710171305@qq.com

数值计算难度,在实际中被广泛应用并加以改进。

Anandarajah 等<sup>[6]</sup>在界面方程加入组构张量,建立了描述黏土各向异性的界面模型;Liang 等<sup>[7]</sup>采用同样的方法也建立了一个可描述各向异性的界面模型,其与前者的差别在于硬化法则的不同。周健等<sup>[8]</sup>在界面模型中引入卸载阶段塑性模量的表达式,将原来界面模型中弹性卸载改为弹塑性卸载,较好地描述了软土的动应力-应变关系。刘明<sup>[9]</sup>通过在界面方程中引入各向异性张量,并通过对加、卸载过程采用不同映射中心的方式,建立了可描述饱和软黏土动力特性的界面模型。秦立科<sup>[10]</sup>通过改进土体强化参数以及引入结构性参数的方式,得到了可描述原状非饱和黄土动力特性的界面模型。徐舜华等<sup>[11]</sup>将塑性偏应变作为硬化参数,建立了一个适用于往返循环荷载作用的砂土界面本构模型。柳艳华等<sup>[12]</sup>在界面模型的基础上,通过引入结构性损伤内变量的方式,提出了一个可以描述循环荷载作用下结构性饱和软黏土动力特性的界面模型。

分析上述研究成果可知:(1) Dafalias 等<sup>[4-5]</sup>提出的界面模型并不完善,其计算结果不能表现出动荷作用下土体材料的滞后特性,与实际有一定差异,应用时需要改进;(2) 由于岩土材料的复杂性和差异性,单一的动力本构模型并不能全面描述所有岩土材料的动力特性,针对岩土材料独特的特点,需要有针对性地建立相应的动力本构模型;(3) 界面模型在应用过程中仍有其不便之处,具体表现为某些参数的取值具有较强的经验性,不能直接从试验中得出。

鉴于上述特点和问题,本文拟在临界状态理论和界面模型的理论框架内,针对各向同性的黏土材料,建立一个物理意义明确、参数易于确定、形式相对简单的循环荷载作用下重塑黏土的弹塑性界面模型。

## 2 界面模型理论基础及其缺陷

### 2.1 界面模型理论概述

Dafalias 等<sup>[4-5]</sup>于 1986 年以剑桥模型为基础,提出了界面模型。该模型的核心内容是将屈服面之间塑性模量的变化用一套映射准则和插值函数来反映,模型模量随应力点距界面距离的变化而变化,因此,也就没有了众多嵌套的屈服面,使得该理论更为简明,数值实现起来更为容易。

归纳起来,界面模型理论主要包括:(1) 界面的形式;(2) 映射法则;(3) 塑性流动法则及

塑性模量的求法。

#### 2.1.1 界面的形式

图 1 给出了 Dafalias 等<sup>[4-5]</sup>采用的界面形式。它由两段椭圆和一个双曲线组成,其中椭圆 1 的形式与剑桥模型相同,椭圆 2 和双曲线可与椭圆 1 光滑搭接。界面方程可表示为

$$F(\bar{\sigma}_{ij}, q_n) = 0 \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}_{ij}$  为虚应力状态,其可转换为  $\bar{p}$  和  $\bar{q}$ ,  $\bar{\sigma}_{ij}$  可根据一定的映射规则由  $\sigma_{ij}$  确定; $q_n$  为内变量,规定界面的硬化参数。

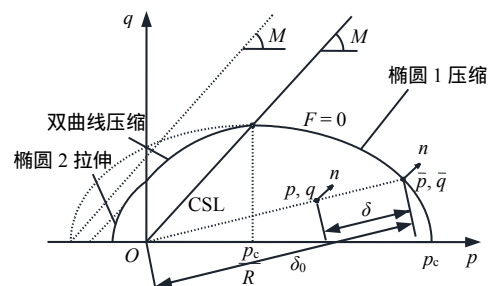


图 1 界面的形式

Fig.1 Shape of bounding surface

图中,CSL 为临界状态线; $M$  为临界状态线的斜率; $O$  为坐标原点,也表示映射中心点; $F$  表示界面方程; $p_c$  为初始固结压力; $n$  为当前应力状态的方向向量; $\delta_0$  为映射中心到虚应力状态的距离; $\delta$  为实际应力状态到虚应力状态的距离。

#### 2.1.2 映射法则

界面模型中通过映射法则将给定的应力点  $\sigma_{ij}$  映射到界面上得到虚应力状态  $\bar{\sigma}_{ij}$ ,此虚应力点代替传统塑性力学中加载面上的应力点,以确定加载方向和大小。映射法则可表示为

$$\bar{\sigma}_{ij} = c(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) + \alpha_{ij}, c = \frac{\delta_0}{\delta_0 - \delta} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{ij}$  表示真实应力点; $\alpha_{ij}$  为映射中心; $\delta_0$  为映射中心到虚应力点的距离; $\delta$  为真实应力点到虚应力点的距离。

#### 2.1.3 塑性流动法则及塑性模量的求法

界面模型采用了相关联的流动法则,其表达为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \langle L \rangle \mathbf{R}_{ij} \quad (3)$$

式中: $L$  为加载因子,控制塑性应变增量  $\epsilon_{ij}^p$  的大小; $\langle \rangle$  为 Macauley 括号,当  $L > 0$  时,  $\langle L \rangle = L$ ; 当  $L < 0$  是,  $\langle L \rangle = 0$ 。 $\mathbf{R}_{ij}$  为塑性势函数的方向向量,它决定

了塑性应变增量  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  的方向，其表达式为

$$R_{ij} = \frac{\partial Q}{\partial \bar{\sigma}_{ij}} = \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{ij}} \quad (4)$$

式中： $Q$  为塑性势函数，当采用相关联流动法则时， $Q = F$ 。

界面模型基于剑桥模型，故其采用与剑桥模型相同的硬化参数作为内变量，即塑性应变  $\dot{\epsilon}_v^p$ ，并采用等向强化法则，界面在加载过程中保持形状不变，但大小在扩张。其硬化法则可表示为

$$\dot{p}_c = p_c \frac{v}{\lambda - \kappa} \dot{\epsilon}_v^p \quad (5)$$

式中： $v$  为土体比体积， $v = 1 + e$ ； $\lambda$ 、 $\kappa$  为土体  $e - \ln p$  曲线上的压缩指数和回弹指数。

在求解加载因子  $L$  时，需要首先确定塑性模量  $\bar{K}_p$  和  $K_p$  的大小。Dafalias 等用插值法，提出的插值函数将真实应力点与虚应力点的距离联系起来，求解真实塑性的模量为

$$K_p = \bar{K}_p + K(\sigma_{ij}, q_n) \frac{\delta_0}{\delta_0 - \delta} \quad (6)$$

式中： $K_p$  和  $\bar{K}_p$  分别表示实际应力状态时的塑性模量和虚应力状态时的塑性模量； $q_n$  为内变量。

### 2.2 界面模型理论的缺陷

界面模型对传统弹塑性理论做了一定改进，但界面模型也存在一定缺陷，主要表现为以下几个方面：

(1) 单面界面模型采用了弹性卸载的概念，卸载模量与初始加载时的弹性模量相同，这种情况下模型计算得到的应力-应变曲线不能表现出滞回性，也无法模拟出土体在卸载条件下的弹塑性。图 2、3 分别给出了 Li 等<sup>[13]</sup>的试验结果及李兴照<sup>[14]</sup>采用单面界面模型弹性卸载的概念模拟得到的应力-应变关系曲线，可以看出，单面界面模型不能模拟土体在循环荷载作用下应力-应变表现出的滞

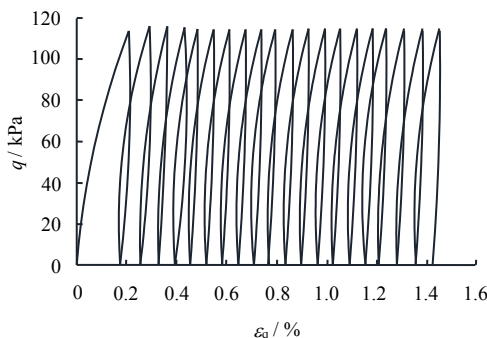


图 2 试验结果(Li 等<sup>[13]</sup>)  
Fig.2 Test results (obtained by Li et al. <sup>[13]</sup>)

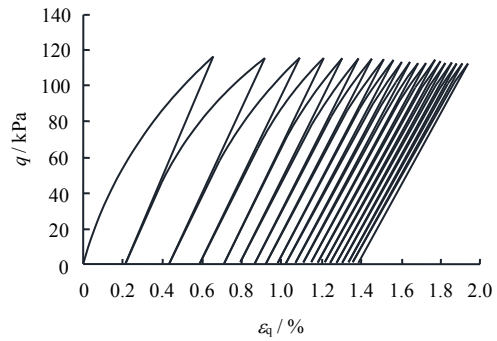


图 3 模拟结果<sup>[14]</sup>  
Fig.3 Simulation results<sup>[14]</sup>

回性，且由于模拟曲线没有滞回性，则得到的累积塑性应变必然较试验值大，当滞回性越大时，模型结果的误差就越大。

(2) 需要预先提出边界面的形式，而边界面的大小对模型模拟土体力学特性是有影响的。根据 Schofield 等<sup>[15]</sup>的建议，界面大小控制参数  $R$  取 2.72。尽管 Schofield 给出了  $R$  的通常取值，但由于岩土体复杂的地质成因和条件， $R$  取一个值往往不能较好地模拟所有岩土体的力学特性，只能根据试验结果具体确定。

综上所述，界面模型尽管具有形式简单、数值要求较低、应用方便的优点，但其自身也存在一定的缺陷，故针对不同土体材料，在具体应用时需要不断改进。

## 3 改进界面模型的建立

### 3.1 界面方程

改进界面模型以临界状态理论和界面理论为基础，计算过程不需预先定义界面，而是采用在土样初始加载的过程中形成的最大屈服面作为界面，这样就避免了模型应用过程中对界面的大小需要预先确定的缺点，简化模型参数的标定，使模型的应用相对更为方便。具体界面的形式为<sup>[16]</sup>

$$F = Q = \bar{q}^2 + [M'(\theta_\sigma)]^2 \bar{p} (\bar{p} - \bar{p}_c) \quad (7)$$

$$M'(\theta_\sigma) = \frac{2mM_c}{(1+m) - (1-m)\sin 3\theta_\sigma} \frac{1}{ap+b} \quad (8)$$

式中： $m = \frac{M_c}{M_c}$ ，其取值范围为 0.7  $m$  1.0； $M_c$  为轴对称拉伸时应力点与原点连线的斜率， $M_c = \frac{q_c}{p_c}$ ； $M_c$  为轴对称压缩时应力点与原点连线的斜率， $M_c = \frac{q_c}{p_c}$ ，其中， $q_c$  为偏应力； $p_c$  为球应力；

$\theta_\sigma$  是罗德角，并且  $-\frac{\pi}{6} < \theta_\sigma = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left[ \frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right] < \frac{\pi}{6}$ ；  
 $a$ 、 $b$  为双曲线临界状态线的参数<sup>[16]</sup>。

### 3.2 映射中心与法则

本文仍采用与 Dafalias 等<sup>[4-5]</sup>提出的映射准则，即边界面内没有弹性核，映射中心固定在坐标原点。如图 4 所示。

可见，由于映射中心固定在坐标原点，根据式 (2) 可得

$$\bar{\sigma}_{ij} = c\sigma_{ij}, c = \frac{\delta_0}{\delta_0 - \delta} \quad (9)$$

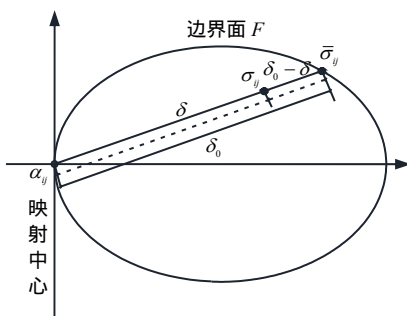


图 4 映射中心与法则

Fig.4 Mapping center and rule

### 3.3 塑性流动法则与边界面的胀缩

#### 3.3.1 塑性流动法则

本文采用与剑桥模型相同的塑性流动法则和硬化法则，具体可见下式 (10) (11)：

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

$$\dot{p}_c = p_c \frac{v}{\lambda - \kappa} \dot{\epsilon}_v^p \quad (11)$$

#### 3.3.2 边界面的胀缩

改进边界面模型不需要预先定义边界面的大小，但计算过程中却要表现出土体受动荷载过程中的弹塑性变形特性，因此，在受力过程中边界面就需要随着受力状态的变化而变化。

边界面的胀缩法则决定了模型是否可以较好地描述土体在循环荷载作用下的弹塑性应力-应变关系。观察土体应力-应变关系（见图 5），可以发现：由 O 加载至 A 点时的割线模量与由 A 卸载至 B 时的割线模量相似；后一个荷载周期内的应力-应变关系曲线与前一个荷载周期内的曲线具有相似性，不同的是，后一个荷载周期内的应力-应变关系较前一个周期更陡。Masing<sup>[17]</sup>发现，卸载时应力-应变曲线的曲率降到初始加载时曲线的一半，说明卸载时应力-应变曲线的塑性模量较初始加载时更

为平缓，且与其有相似性。这个规律被称为 Masing 准则。可以看出，土体卸载和再加载的初期，应力-应变关系的弹塑性并不明显，但超过应变轴后，应力-应变关系表现出明显的弹塑性。因此，由以上 4 点发现可知，单面边界面模型不能反映这种规律，这主要是因为单面边界面模型中卸载和再加载过程中，边界面保持不变，即采用了弹性卸载的概念。而如果要反映出卸载过程和再加载过程中的弹塑性关系，就必须使得边界面在整个加卸载过程中保持不断变化，即采用适当的硬化法则。

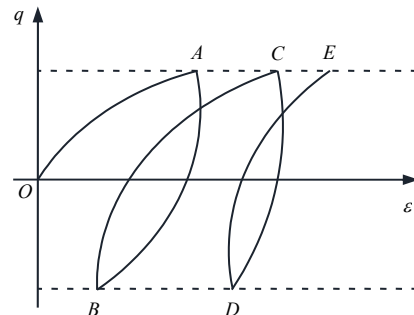


图 5 循环荷载作用下土体应力-应变关系示意图

Fig.5 Sketch of soil stress-strain curves under cyclic load

对于边界面的胀缩，本文采用如下规则：土体在加卸载过程中，根据映射法则求解新一步应力状态对应的“像应力点  $\bar{\sigma}_{ij}$ ”，将  $\bar{\sigma}_{ij}$  带入边界面方程中，如果超过边界面方程，即  $F > 0$ ，则该步状态下边界面发生硬化，此时边界面扩大；如果应力状态没有超过边界面方程，即  $F < 0$ ，则该步状态下没有塑性应变发生，但要让此应力状态保持在边界面上，此时边界面发生收缩。本文硬化规则可由图 6 表示。

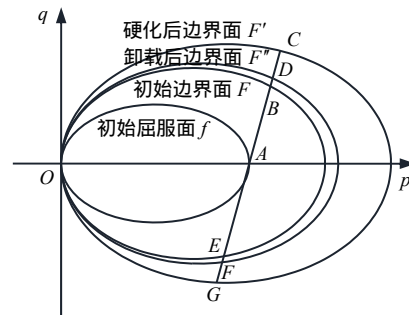


图 6 边界面的胀缩示意图

Fig.6 Sketch of expansion and contraction of bounding surface

从图 6 可以看出，本文边界面的胀缩规则，应力路径为：A→B→C→D→E→F→G。土体由等向固结应力点 A 加载至 B 的过程中，初始屈服面 f 随

塑性应变硬化至初始界面  $F$ ；如果此时继续加载至  $C$ ，则界面发生硬化，此时伴随硬塑应变发生，界面变为  $F'$ ；而后卸载至  $D$ ，此过程中如果不发生塑性应变，则界面发生收缩，使得应力状态保持在界面上，界面变为  $F''$ ；应力卸载至  $A$  点后，继续卸载至  $E$  点，该过程中发生弹塑性行为，界面发生硬化，扩大变为界面  $F$ ；如继续卸载至  $G$  点，则界面继续硬化，变为  $F'$ 。

### 3.4 塑性模量

界面模型的关键之一即为塑性模量的求法。求解塑性模量采用插值函数的方法，即  $K_p$  和  $\bar{K}_p$  之间的关系与应力状态  $\sigma_{ij}$ 、内变量  $q_n$  以及应力点间的距离  $\delta$ 、 $\delta_0$  有关。

由真实土体应力-应变关系可知，动应力比相对较小时，循环应力作用下，重塑黏土的滞回圈在一定的循环振次作用后，逐渐趋于重合，亦即累积塑性应变的发展速率减小并趋于稳定，说明塑性模量  $K_p$  在逐渐减小，并趋于稳定。由此可见， $K_p$  和  $\bar{K}_p$  之间的关系如果仅与应力状态  $\sigma_{ij}$ 、内变量  $q_n$ 、 $\delta$  和  $\delta_0$  有关，那么， $K_p$  则无法表现出逐渐减小的趋势。为此，本文参考 Manzari 等<sup>[18]</sup>提出的插值函数，如下式所示。

$$K_p = \bar{K}_p + H_0 \frac{16M^4\nu}{9(\lambda - \kappa)} \bar{p}^3 \left( \frac{c-1}{c} \right) \quad (12)$$

根据界面一致性条件，即可求出  $\bar{K}_p$ ：

$$\bar{K}_p = -\frac{\partial F}{\partial p_c} \bar{p}_c \frac{\nu}{\lambda - \kappa} \frac{\partial F}{\partial p} = [M'(\theta_\sigma)]^4 \cdot (2\bar{p} - \bar{p}_c) \bar{p} \bar{p}_c \frac{\nu}{\lambda - \kappa} \quad (13)$$

## 4 模型验证

为验证本文改进界面模型的合理性，采用重塑红黏土试样，进行了循环荷载作用下的三轴数值试验，并将计算结果与真实动三轴试验进行对比分析。

### 4.1 模型参数标定

改进界面模型以临界状态理论和界面模型理论为基础，与传统剑桥模型不同的是，改进界面模型采用了双曲线临界状态<sup>[16]</sup>，并采用与传统界面模型不同的塑性模量求法。

但改进界面模型仍可用普通三轴试验的结果对模型中的参数进行标定。其中，初始模量可通过三轴试验获取；压缩和回弹指数可以通过压缩和回弹试验得到；初始孔隙比可根据所制土样确定；插值函数中的  $H_0$ ，通常采用试算的方法得到。惟一不同的是，改进界面模型中，临界状态线可根据以下方式取得：

- (1) 针对每一种土样，分别进行不同围压的三轴试验，根据试验结果获取试验土样的强度参数；
- (2) 根据试验得到的土样强度所对应的 3 个主应力，可计算相应的球应力  $p$  和广义剪应力  $q$ ；
- (3) 在  $p-q$  应力空间中，用最小二乘的方法对应力空间中的临界应力状态进行曲线拟合，进而可得到参数  $a$  和  $b$  的值。

### 4.2 疲劳循环三轴数值模拟试验

为选取压实度为 0.8、固结比 3.0 的重塑红黏土试样，进行疲劳循环三轴数值模拟试验。

计算模型参照真实试验建立，共 32 个单元，其尺寸为： $\phi 38 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 。具体试验步骤是：在模型周边施加固定围压  $\sigma_3$  并保持不变；在模型中用 initial 命令施加初始固结压力  $p_c$ ；固定模型底面；在模型顶部按照真实试验条件施加循环荷载。具体计算模型见图 7。

计算参数均按照模型标定的方法得到。模型中土体参数见表 1。

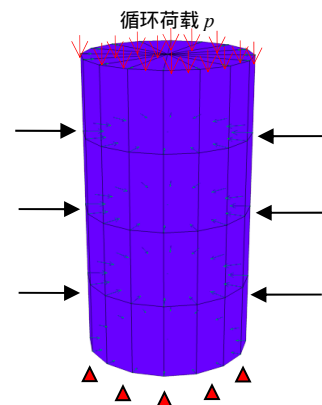


图 7 疲劳循环三轴数值计算模型

Fig.7 Numerical calculation model for fatigue cyclic triaxial test

表 1 数值模拟参数表

Table 1 Parameters for numerical simulation

压实度	固结比 $k_c$	初始比体积 $\nu$	压缩指数 $\lambda$	回弹指数 $\kappa$	体积模量 $K$ / MPa	初始围压 / kPa	$H_0$	初始固结压力 $p_c$ / kPa	$a$	$b$	泊松比 $\mu$
0.80	3.0	2.21	0.19	0.026	16.7	50	20	150	0.000 9	0.687 4	0.3

### 4.3 试验结果与分析

试验得到土样的动应力-应变曲线及累积塑性应变发展曲线如图 8、9 所示。

从图 8、9 可以看出,数值模拟计算得到的曲线与实测试验曲线表现出了较好的一致性。对于动应力幅值较低的情况,数值模拟计算的结果前期累积塑性应变发展稍快,后期趋于稳定。对于动应力幅值较大的工况,数值模拟计算的结果前期与试验曲线更为接近,从总体上看,本文边界面模型还是可以较好地描述循环荷载条件下,土体的动应力-应变关系以及累积塑性应变的发展趋势,计算结果表现出了较好地数值稳定性,计算效率较高。

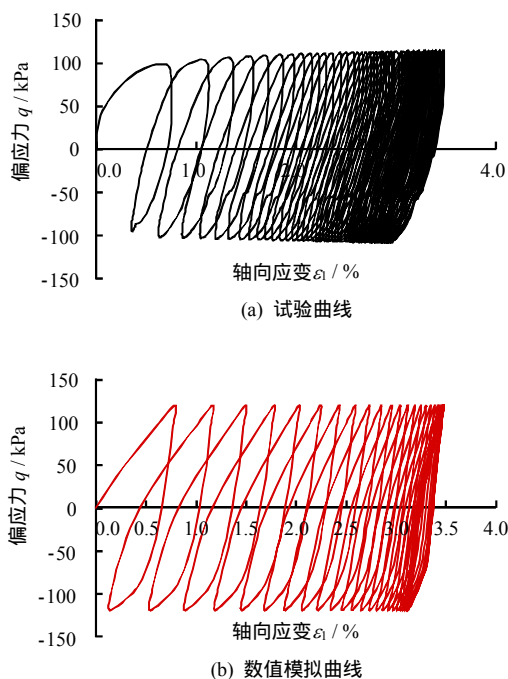


图 8 疲劳循环三轴试验实测曲线与数值模拟曲线  
( $\sigma_1 = 120$  kPa)

Fig.8 Test and simulation curves of fatigue cyclic triaxial test

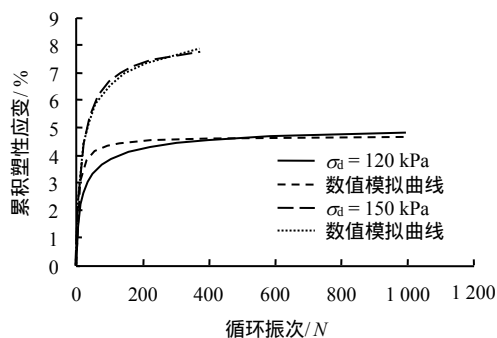


图 9 疲劳循环三轴试验实测累积塑性应变曲线与数值模拟曲线

Fig.9 Accumulated plastic strain test and simulation curves of fatigue cyclic triaxial test

## 5 结 论

(1) 通过改进边界面的形式,简化了边界面模型中相对复杂的边界面形式,并采取了不预先定义边界面的方式,从而降低了边界面模型应用的经验性和数值计算的难度。

(2) 通过在边界面模型中加入边界面胀缩规则,使得改进边界面模型可考虑加、卸载过程中弹塑性特性,进而可使得模型计算曲线能反映土体的滞回特性。

(3) 改进的边界面模型具有物理意义明确、参数易于确定、形式相对简单的特点,且该模型计算精度较高,计算结果与试验结果吻合得较好。

### 参 考 文 献

- [1] KAYNIA A M, MADSHUS C, ZACKRISSON P. Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2000, 126(6): 531 - 537.
- [2] 王军. 单、双向激振循环荷载作用下饱和软黏土动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] 杨庆, 王猛, 栾茂田. 非饱和粉土静、动强度对比试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 71 - 80.  
YANG Qing, WANG Meng, LUAN Mao-tian, et al. Experimental research of correlation on static and dynamic strengths of unsaturated silty clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 71 - 80.
- [4] DAFALIAS Y F. Bounding surface plasticity I: Mathematical foundation and hypoplasticity[J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1986, 112(9): 966 - 987.
- [5] DAFALIAS Y F, HERRMANN L R. Bounding surface plasticity II: Application to isotropic cohesive soils[J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1986, 112(12): 1263 - 1291.
- [6] ANADARAJAH A, DAFALIAS Y F. Bounding surface plasticity III: Application to anisotropic cohesive soils[J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 1986, 112(12): 1292 - 1319.
- [7] LIANG R Y, MA F. Anisotropic plasticity model for undrained cyclic behavior of clays I: Theory[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 1992, 118(2): 229 - 245.

- Technology**, 2000, 22(2): 54 - 57.
- [17] HOSSAIN M M, RAHMAN M K, RAHMAN S S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2000, 27: 129 - 149.
- [18] 赵延林, 彭青阳, 万文, 等. 高水压下岩体裂纹扩展的渗流-断裂耦合机制与数值实现[J]. **岩土力学**, 2014, 35(2): 556 - 564.
- ZHAO Yan-lin, PENG Qing-yang, WAN Wen, et al. Seepage-fracture coupling mechanism of rock masses cracking propagation under high hydraulic pressure and numerical verification[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 556 - 564.
- [19] KHADEMIAN Z, SHAHIAR K, GHAROUNI NIK M. Developing an algorithm to estimate in situ stresses using a hybrid numerical method based on local stress measurement[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2012, 55: 80 - 85.
- [20] 姜永东, 鲜学福, 许江. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(6): 946 - 950.
- JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, XU Jiang. Research on application of Kaiser effect of acoustic emission to measuring initial stress in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 946 - 950.
- [21] 葛兆龙, 卢义玉, 梅绪东, 等. 一种煤矿井下高压水力压裂封孔材料及封孔工艺: 中国, ZL201210578643.5[P]. 2013-3-20.
- [22] 葛兆龙, 梅绪东, 卢义玉, 等. 煤矿井下水力压裂钻孔封孔力学模型及试验研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(7): 1097 - 1103.
- GE Zhao-long, MEI Xu-dong, LU Yi-yu, et al. Mechanical model and test study of sealed drilling for hydraulic fracturing in underground coal mines[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1097 - 1103.

#### 上接第 392 页

- [8] 周健, 孙吉主, 吴世明. 往复荷载下软土的界面广义弹塑性模型[J]. **岩土力学与工程学报**, 2002, 21(2): 210 - 214.
- ZHOU Jian, SUN Ji-zhu, WU Shi-ming. Elasto-plastic model of soft clay under reversal load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 210 - 214.
- [9] 刘明. 饱和软黏土动力本构模型研究与地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [10] 秦立科. 非饱和黄土动力本构模型及其在地铁车站地震反应分析中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [11] 徐舜华, 郑刚, 徐光黎. 循环荷载下砂土的剪切硬化界面本构模型[J]. **岩土力学**, 2010, 31(1): 1 - 8.
- XU Shun-hua, ZHENG Gang, XU Guang-li. A bounding surface constitutive model of sands with shear hardening[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 1 - 8.
- [12] 柳艳华, 黄茂松, 李帅. 循环荷载下结构性软黏土的各向异性界面模型[J]. **岩土工程学报**, 2010, 32(7): 1065 - 1071.
- LIU Yan-hua, HUANG Mao-song, LI Shuai. An anisotropic bounding surface model for structured clay under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(7): 1065 - 1071.
- [13] 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.
- [14] 李兴照. 饱和软黏土的流变和循环流变特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [15] SCHOFIELD A N, WROTH C P. Critical state soil mechanics[M]. New York: McGraw-Hill Book Company Limited, 1968.
- [16] 李剑. 高铁列车荷载作用下红黏土地基动力响应研究[D]. 武汉: 中国科学院大学武汉岩土力学研究所, 2013.
- [17] MASING G. Eigenspannungeu und verfertigung bim Messing[C]//Proceedings of the 2nd International Congress on Applied Mechanics. Zurich: [s. n.], 1926.
- [18] MANZARI M T, NOUR M A. On implicit integration of bounding surface plasticity models[J]. **Computers and Structures**, 1997, 63(3): 385 - 392.