

DOI: 10.11779/CJGE202105014

一种基于界面的饱和软黏土弹塑性动本构模型

冯双喜¹, 雷华阳^{*1,2,3}

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300354; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300354;
3. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300354)

摘要: 弹塑性动本构模型对循环荷载作用下路堤和地基基础的设计具有重要意义, 构建兼顾实用性和通用性的动本构模型是目前岩土工程设计面临的主要问题。在临界状态和界面理论框架下建立了综合表征饱和软黏土循环退化、非线性、滞回和变形累积特性的弹塑性动本构模型。在 $p'-q$ 空间中, 将参数 n, ζ 引入剑桥边界方程, 提出了反映水滴形和类椭圆形的广义剑桥边界方程, 统一了边界面形状。结合三角形相似原理建立了加载面和屈服面之间映射关系, 形成了考虑循环退化模量场。通过常规的室内试验, 确定了模型中 9 个参数。开展了等向循环加载和不等向循环加载的动三轴试验和数值模拟, 分析了饱和软黏土应力-应变关系和应力路径, 研究结果证明了试验结果与模型预测结果基本一致, 模型可合理分析饱和软黏土的循环退化、非线性、应变累积和滞回特性。

关键词: 饱和软黏土; 动本构模型; 界面理论; 广义剑桥边界方程; 循环退化

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)05-0901-08

作者简介: 冯双喜(1988—), 男, 博士后, 主要从事软土工程特性和本构关系方面的研究工作。E-mail: 15822062923@163.com。

An elastoplastic dynamic constitutive model for saturated soft clay based on bounding surface theory

FENG Shuang-xi¹, LEI Hua-yang^{1,2,3}

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Simulation of Engineering Earthquake and Urban-Rural Seismic Resilience, CEA, Tianjin 300354, China)

Abstract: The elastoplastic dynamic constitutive model plays an important role in the design of embankment or foundation under cyclic loading. The main challenge in the design of geotechnical engineering is to establish a dynamic constitutive model which is practical and universal. Based on the critical state theory, an elasto-plastic constitutive model is established to characterize the cyclic degradation, hysteresis and deformation accumulation of saturated soft clay under cyclic loading. In the $p'-q$ space, parameters n and ζ are introduced into the Cam-clay model, and the Cambridge bounding surface equations, which can reflect the shape of water drop and similar ellipse, are proposed. Based on the triangle similarity principle, the mapping relationship between the loading surface and the yield surface is established, and the cyclic degradation modulus field is formed. Nine parameters in the model are determined by the routine laboratory tests. To verify the correctness of the model, the dynamic triaxial tests and numerical simulations are carried out under the isotropic cyclic loading and the anisotropic cyclic loading. The stress-strain relationship and stress paths of the saturated soft clay are analyzed. The research results demonstrate that the test results are basically consistent with the predicted ones by the model, and the proposed model can correctly analyze the cyclic degradation, nonlinearity, strain accumulation and hysteresis characteristics of saturated soft clay.

Key words: saturated soft clay; dynamic constitutive model; bounding surface theory; generalized Cambridge clay bounding surface equation; cyclic degradation

0 引 言

中国沿海地区广泛分布“高含水率、高孔隙比、高压缩性、低强度和低渗透特性”的软黏土^[1]。随着“一带一路”倡议、“交通强国”国家战略的提出,

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0805407); 国家自然科学基金项目 (51890911, 52078334)

收稿日期: 2020-03-13

***通信作者 (E-mail: leihuyang74@163.com)**

大量的公路、铁路、城市基础设施以及轨道交通工程在中国沿海地区不断涌现。在工程建设和服役过程中,软黏土原有受力平衡状态被打破,将承受复杂的施工扰动和长期的交通荷载。大量试验表明循环荷载将导致土体产生循环退化,可明显降低软黏土的抗剪强度和刚度,并引起较大的地基变形^[2]。此外,目前中国软黏土路基设计实践中,均将施工扰动和交通荷载等效简化为拟静荷载并选用静力本构开展模型分析,高估或低估软黏土地基变形时有发生,因此亟需提出一种兼顾实用性和通用性的动本构模型为岩土工程设计提供参考。

循环荷载作用下饱和软黏土表现出循环退化、非线性、应变累积和滞回等特性,传统静本构模型很难合理描述其力学行为。为此,众多学者开展了大量的动本构研究,取得了丰富的研究成果。目前动本构类型可以分为4类:①基于弹性单元、黏性单元和塑性单元的串并联模型^[3-4],如 Kelvin 模型、Maxwell 模型、Bingham-Kelvin 模型或 Iwan 模型。②非线性弹性模型,如 Hardin 和 Drnevich; Kalliglou 等^[5]广泛研究了软黏土骨架曲线变化规律,并采用 Masing 二倍法模拟滞回曲线。③等效黏弹性模型,如 Martin-Finn-Seed 模型,旨在建立剪切模量与剪应变的关系和阻尼比与剪应变的关系,该模型广泛应用于地震工程中^[6]。④弹塑性动本构模型,边界面模型为常见和典型的弹塑性动本构关系,其本质为在经典弹塑性理论上构造变化的硬化模量场,通过模量动态变化来反映软黏土力学响应。

边界面模型因具有物理参数意义明确、算法流程逻辑清楚和土动力学行为表征合理等优点,受到广大学者的关注。1975年 Dafalias 等^[7]最早针对于金属材料提出边界面模型,由于可以较好反映土体应力-应变关系的非线性、应变累积和滞回特性,后来广泛应用到土工合成材料、砂土、软黏土中。边界面理论由套叠多屈服面本构理论(多面模型),逐渐演化为加载面和边界面双面本构理论(双面模型)与弹性核(点)和边界面本构理论(单面模型)。通过研究总结,边界面动本构的建立整体包括3个流程:①描述土体破坏的边界面和其表达式;②模量场的演化规律;③增量弹塑性本构关系。在合理边界面方程范围内正确描述土体模量场的变化规律是建立边界面模型的关键。程兴磊等^[8]分别基于总应力和有效应力方法在圆形边界面的基础上,将循环软化系数引入硬化模量场中,并利用差值方法构造初始剪切模量与边界模量的关系,形成了考虑土体循环退化单面模型。Hu 等^[9]基于广义各向同性硬化准则建立了考虑饱和软黏土循环软化的损伤单面模型。通过在有效应力空间中引入损伤变量,

来模拟饱和黏土刚度和强度的软化特性。

目前国内外学者基于圆形、椭圆形和水滴形的边界面构造了多面模型、双面模型和单面模型,边界面方程形式呈现出复杂化、多样化和多元化,没有实现边界面方程的统一化,统一化的本构模型构建是未来的发展趋势。刘方成等^[10]在圆形边界面基础上,提出了基于阻尼效应的多面模型,可综合反映土体的滞回特征。为了模拟循环加载下砂土应变的累积特性和滞回特性,万征等^[11]建立了水滴形屈服面,塑性势面为椭圆的边界面模型。Zhou 等^[12]在临界状态理论下,综合考虑温度效应对土体大应变和小应变的影响,构建了椭圆形双面模型。

通过文献综述不难发现,很少有专家对统一化的边界面方程开展研究,分析统一化边界面方程下饱和软黏土的循环特性。基于此,本文在边界面理论和临界状态理论的框架下,基于剑桥屈服面方程,提出了水滴形和类椭圆形的广义剑桥边界面方程,建立了可综合表征软黏土应力-应变关系的循环退化、非线性、应变累积和滞回特性的动本构模型。结合三角形相似原理建立了加载面和屈服面之间映射关系,形成了考虑循环退化模量场。模型参数物理意义明确,通过室内试验确定了模型参数。开展了等向加载和不等向加载的动三轴试验和数值模拟,对比分析了室内动三轴试验数据与模型预测结果,验证了模型的正确性。

1 动本构模型的建立

按照经典弹塑性理论,动本构模型建立的核心问题是寻找硬化模量场,即获得硬化模量便可以形成应力-应变的关系。本文重点介绍加载面和边界面方程、硬化规律与一致性条件来说明动本构模型建立过程。

1.1 加载面和边界面方程

边界面方程是土体破坏重要标志,也是确定土体刚度或模量的关键。边界面和加载面方程往往根据经典屈服面方程确定,但屈服面方程的形状各异,如圆形(D-P模型)、椭圆形(修正剑桥模型)、和水滴形(水滴形屈服面理论)等,尚未形成统一理论。

根据 Yao 等^[13]提出统一硬化模型理论的思想,建立了广义的边界面方程 \bar{F} :

$$\bar{F} = \xi \ln \left(\frac{\bar{p}'}{p_0} \right) + \left[\frac{\bar{q}}{M \bar{p}'} \right]^n, \quad (1)$$

式中, n , ξ 为材料参数, \bar{p}' 为边界面上的平均有效应力, \bar{q} 为边界面上的偏应力, p_0 为回弹线与正常固结线的交点,表征先期固结压力的大小, M 为 $p' - q$ 空间中临界状态线的斜率。通过调节参数 n , ξ , 模

型可以综合表征水滴形和类椭圆形边界面 (图 1), 拓宽了边界面模型选择范围, 实现边界面形状的统一。

当 $n=1$ 和 $\xi=1$, 模型可以退化为传统剑桥模型。

为了进一步说明 n, ξ 是如何影响边界面形状和大小, 假定先期固结压力为 100 kPa, $M=1.2$, 如图 1 所示。从图 1 (a), (b) 中可以看出, 随着 ξ 的增加, 边界面大小逐渐增大, 但对边界面的形状影响不明显, 呈现出水滴形。从图 1 (c), (d) 可以看出, n 同时影响边界面的形状和大小, 随着 n 增加, 边界面大小呈现减小趋势, 边界面的形状由水滴形向类椭圆形过渡。

边界面越大, 说明土体承受偏应力越大。为了合理说明土体变形破坏, 在模拟过程中利用边界面和临界状态线耦合控制, 因此在工程设计中, 应综合对比试验结果, 合理选取材料参数 n, ξ 。

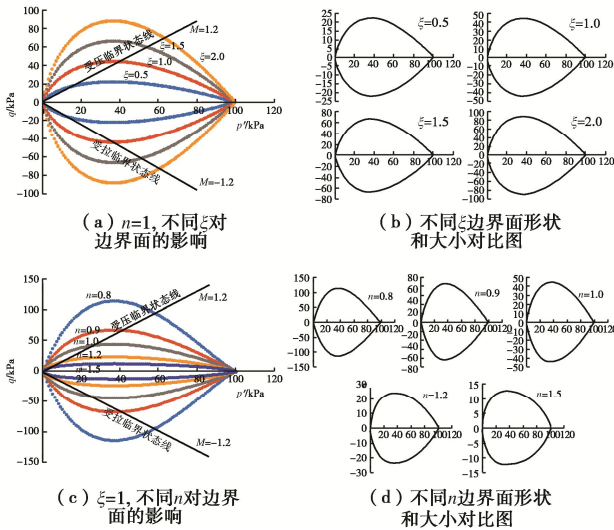


Fig. 1 Shapes and sizes of bounding surface

假定土体达到临界状态, $\bar{q} = M \bar{p}'$, 结合边界面方程式 (1) 有

$$\xi = -\frac{1}{\ln \frac{p'}{p_0}}, \quad (2)$$

式中, p_0 为先期固结压力, 为回弹线与正常固结曲线的交点, 因此满足:

$$v = N - \lambda \ln \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right), \quad (3)$$

$$v = N_k - \kappa \ln \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right), \quad (4)$$

式中, p_{ref} 为参考平均有效应力, v 为比容 ($1+e$), λ 为正常固结线斜率, κ 为回弹线斜率, N, Γ 分别为正常固结线和临界状态线与纵坐标的交点。

结合式 (3), (4) 可求得:

$$p_0 = \exp \left(\frac{N - N_k}{\lambda - \kappa} \right), \quad (5)$$

$$\bar{p}' = \exp \left(\frac{v - \Gamma}{\lambda} \right), \quad (6)$$

式中, N_k 为在 $v - \ln p'$ 空间中回弹曲线与纵坐标的交点。因此,

$$\xi = \frac{1}{\frac{v - \Gamma}{\lambda} - \frac{N - N_k}{\lambda - \kappa}}. \quad (7)$$

考虑边界面的对称性, 选取 $\xi=1$ 和 $n=1.5$ 上半部分边界面定义说明相关概念, 假定在加载过程中存在加载面, 加载面的形状与边界面一致。(p', q) 为当前应力点, 位于加载面上, (\bar{p}', \bar{q}) 为边界面上点。原点 (0, 0) 为映射中心, 当前应力点到映射中心的距离为 δ , 边界面点到映射中心的距离为 δ_0 , 如图 2 所示。根据三角形相似原则, 获得几何关系如下:

$$\frac{\bar{p}'}{p'} = \frac{\bar{q}}{q} = \frac{\delta_0}{\delta}. \quad (8)$$

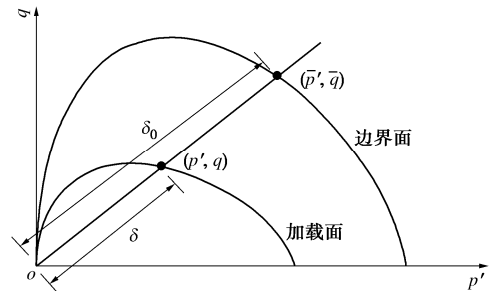


图 2 加载面与边界面的关系 ($\xi=1, n=1.5$)

Fig. 2 Relationship between loading surface and bounding surface ($\xi=1, n=1.5$)

考虑边界面的能量方程得到:

$$d\bar{W}^p = \bar{p}' d\bar{\epsilon}_v^p + \bar{q} d\bar{\epsilon}_s^p = \bar{p}' \sqrt{(d\bar{\epsilon}_v^p)^2 + M^2 (d\bar{\epsilon}_s^p)^2}. \quad (9)$$

根据非相关联法则, 可获得边界面剪胀因子的表达式:

$$\bar{D}_s = \frac{d\bar{\epsilon}_v^p}{d\bar{\epsilon}_s^p} = \frac{M^2 - \bar{\eta}^2}{2\bar{\eta}}, \quad (10)$$

式中, \bar{D}_s 为边界面的剪胀因子, $d\bar{\epsilon}_v^p$ 为边界面塑性体积应变增量, $d\bar{\epsilon}_s^p$ 为边界面塑性剪切应变增量, $\bar{\eta}$ 为边界面应力比, $\bar{\eta} = \bar{q} / p'$ 。

为了说明加载面的剪胀因子, 将能量方程改写为 $dW^p = p' \frac{\delta_0}{\delta} d\epsilon_v^p + q \frac{\delta_0}{\delta} d\epsilon_s^p = p' \frac{\delta_0}{\delta} \sqrt{(d\epsilon_v^p)^2 + M^2 (d\epsilon_s^p)^2}$ 。

获得加载面的剪胀因子:

$$D_s = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_s^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right)^2. \quad (12)$$

当 $\delta = \delta_0$, 加载面与边界面重合。

1.2 硬化规律与一致性条件

边界面的硬化规律与常规剑桥模型相同, 硬化参

数 H 为 p_0 , $\bar{\varepsilon}_v^p$ 硬化规律的硬化函数表达式为

$$H = p_0 = \exp\left(\frac{N}{\lambda - \kappa} \bar{\varepsilon}_v^p\right) \quad (13)$$

对 $d\bar{\varepsilon}_v^p$ 进行微分可得

$$\frac{dH}{d\bar{\varepsilon}_v^p} = \frac{d p_0}{d\bar{\varepsilon}_v^p} = \frac{N}{\lambda - \kappa} p_0 \quad (14)$$

根据边界面一致性条件:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial p'} d\bar{p}' + \frac{\partial \bar{F}}{\partial q} dq + \frac{\partial \bar{F}}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial \bar{\varepsilon}_v^p} d\bar{\varepsilon}_v^p = 0 \quad (15)$$

将 $d\bar{\varepsilon}_v^p$ 表述为 $\bar{D}_s d\bar{\varepsilon}_v^p$, 变换可得

$$d\bar{\varepsilon}_v^p = \bar{D}_s d\bar{\varepsilon}_v^p = \frac{1}{\bar{K}_p} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \sigma_{ij}} \right) d\sigma_{ij} \quad (16)$$

式中, \bar{K}_p 为边界面的塑性模量,

$$\bar{K}_p = -\frac{\partial \bar{F}}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial \bar{\varepsilon}_v^p} D_s = \frac{N}{\lambda - \kappa} \xi \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \quad (17)$$

结合加载面的剪胀方程式(12), 加载面上的模量为

$$K_p = -\frac{\partial F}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial \varepsilon_v^p} D_s = \frac{N}{\lambda - \kappa} \xi \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right)^2 \quad (18)$$

从式(18)可以看出, 当 $\delta = \delta_0$, 加载面与边界面重合, 加载面上的塑性模量与边界面相同。当 $\delta = 0$, 表明土体塑性模量为无穷大, 土体的应变为零, 加载面为弹性核。

通过上述推导可以获得弹塑性矩阵为

$$D_{ep} = [D]_e - \frac{[D]_e \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \left\{ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D]_e}{K_p + \left\{ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [D]_e \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \right\}} \quad (19)$$

式中, $[D]_e$ 为弹性矩阵, ϕ 为塑性势函数, $\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}}$ 与剪

胀性有关, 可表示为

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = [1/3 \quad 1/3 \quad 1/3 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot D_s + \frac{3}{2q} \left[\sigma_{11} - \frac{1}{3} p' \quad \sigma_{22} - \frac{1}{3} p' \quad \sigma_{33} - \frac{1}{3} p' \quad 2\sigma_{12} \quad 2\sigma_{13} \quad 2\sigma_{23} \right]^T \quad (20)$$

2 模型参数确定

本模型一共包含 9 个参数, 分别为正常固结线斜率 λ , 回弹线斜率 κ , 泊松比 μ , 临界状态线斜率 M , $v - \ln p'$ 空间中正常固结线和临界状态线与纵坐标的交点 N, Γ , 边界面材料参数 n, ξ , 先期固结压力 p_0 。

开展等向压缩和回弹试验, 在 $v - \ln p'$ 空间中绘制正常固结土等向固结的曲线, 然后开展三轴不排水剪切试验, 确定破坏时土体临界状态线。如果已知单

位体积压缩指数 C_c 和膨胀指数 C_s , 可得:

$$\kappa = \frac{C_s}{2.303} \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{C_c}{2.303} \quad (22)$$

在 $v - \ln p'$ 空间中绘制正常固结线和临界状态线, 通过直线方程式(3), (4) 确定 N, Γ , 令平均有效应力 $p' = 1 \text{ kPa}$, 可获得 N, Γ 值。通过分析计算 $\lambda = 0.18, \kappa = 0.05, N = 2.68, \Gamma = 2.52$ 。

泊松比应在小应变条件确定, 在加载过程中通过获取水平位移和竖向位移的比值, 计算获得泊松比 μ 。研究表明软黏土泊松比取值范围 $0.3 \sim 0.48$, 本文结合王元战等^[14]研究结果, 选取泊松比为 $\mu = 0.432$ 。

开展三轴压缩试验, 通过计算内摩擦角, 获得 M 值:

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (23)$$

根据 Xiao 等^[15]提出的研究方法, 假定受压临界状态线与受拉临界状态对称。开展了相同密度条件下, 不同围压 (50, 100, 150, 200 kPa) 的等向压缩试验, 分别绘制土体破坏状态 (应变达到 20% 认为土样发生破坏^[16]) 的 $p' - q$ 应力路径, 通过直线拟合方式获取 M 值, 如图 3 所示。从图 3 中可以发现, 临界状态线的拟合程度为 0.93, M 值为 1.2。从图 4 中可以发现当轴向应变为 10%~20%, 超孔隙水压力基本保持不变, 这表明当土体轴向应变达到 20%, 已达真实的临界状态。

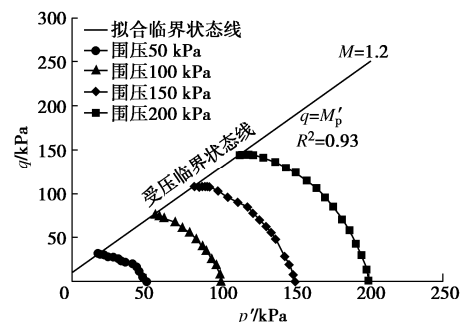


图 3 M 拟合图

Fig. 3 Fitting line for M

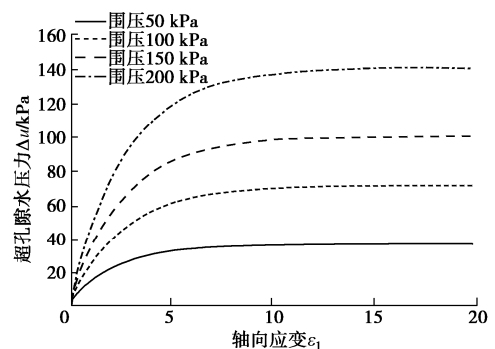


图 4 超孔隙水压力与轴向应变的关系

Fig. 4 Relationship between excess pore water pressure and axial strain

开展室内固结试验, 绘制 $e - \lg p$ 曲线, 利用卡萨兰德作图法确定先期固结压力^[15], 如图 5 所示。从图 5 中可以看出软黏土先期固结压力 p_0 约为 200 kPa。

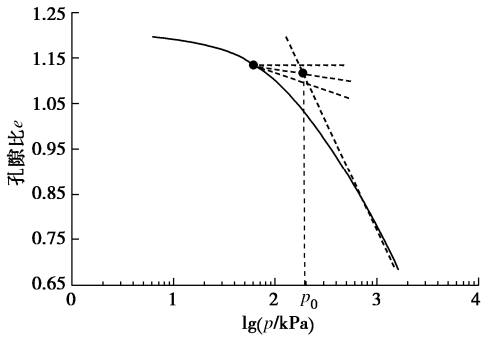


图 5 $e - \lg p$ 曲线

Fig. 5 Curve of $e - \lg p$

参数 n , ζ 可以控制边界面的形状和大小, ζ 可以采用式 (7) 进行计算, 需要说明的是在确定 ζ 时, 需要确定回弹线与纵坐标交点 N_k , 即 N_k 与 ζ 不是独立变量。参数 n 应结合动三轴和静三轴破坏试验结果综合确定, 通过大量的静三轴和动三轴试验, 本文选用 n 为 1.3, ζ 为 1.21。综上, 模型材料参数: $\lambda=0.18$, $\kappa=0.05$, $\mu=0.3$, $M=1.2$, $N=2.68$, $\Gamma=2.52$, $n=1.3$, $\zeta=1.21$, $p_0=200$ kPa。

3 动三轴试验与数值模拟建立

为了说明模型的正确性, 开展了等向加载和不等向加载的动三轴试验。试验开始前, 首先对饱和软黏土试样进行等向固结 24 h, 选取固结压力为 100 kPa, 然后施加循环荷载。考虑模型 M 值对循环动荷载幅值的要求, 以及为了对比分析等向循环加载和不等向循环加载对软黏土动力特性的影响, 在循环加载过程中, 动荷载类型选取正弦荷载。对于等向循环加载, 选取振动幅值 σ_d 分别为 20, 40, 60 kPa; 对于不等向循环加载, 动载幅值 σ_d 分别为 10, 20, 30 kPa。振动频率 f 为 1 Hz, 选取循环次数前 100 次进行试验结果分析。

根据三轴尺寸 39.1 mm×80 mm, 利用 ABAQUS 建立模型, 如图 6 所示, 建立 3 个分析步, 设置底部约束 x, y, z 3 个方向的位移边界条件, 在圆柱周围及顶面设置围压 100 kPa 力的边界条件, 选用 C3D8P 单元, 共划分网格 525 个, 在三轴顶面预定义初始孔隙比大小 1.62, 设置等向固结应力场, 保证每个单元承受的 3 个方向主应力 σ_{11} , σ_{22} 和 σ_{33} 均为 100 kPa。

在统计数值结果应变、应力路径数据时, 选取单元时应与土样传感器测量位置保持一致。在动三轴试验设备中压力和位移传感器均放置于土样的表面, 因此应变和应力分析时, 采用圆柱体最上一层所有单元

计算其应力和应变的平均值。

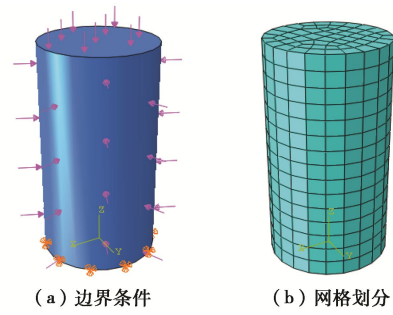


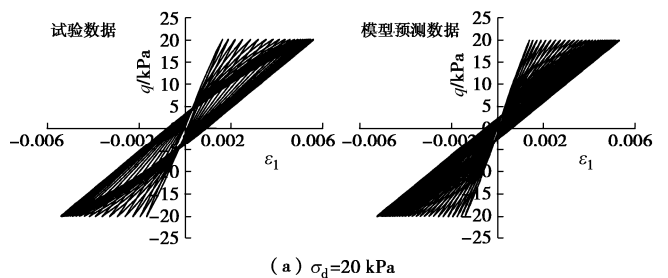
图 6 数值模型建立

Fig. 6 Establishment of numerical model

采用费康等^[17]提出的一种带误差控制的改进 Euler 隐式积分算法, 这种方法将应变增量 $[\Delta \epsilon]$ 分解为多个子步的应变增量, 每个子步的长度可由 Δs 控制, Δs 的取值范围为 $[0, 1]$, 通过人为设定误差 SSTOL 来控制结果的精度。SSTOL $< 10^{-4}$ 能够满足计算精度和收敛性。利用 Fortran 语言 Subroutine 编制 UMAT 程序, 程序编制关键是形成弹塑性刚度矩阵 DDSDDDE。

4 试验与数值模拟结果分析

图 7 为等向循环加载的软黏土应力 - 应变滞回关系曲线, 从图 7 中可以发现, 初始加载时滞回圈“瘦小”, 但是随着循环次数增加, 滞回圈呈现出“胖大”现象, 并且不断朝 x 轴方向倾斜, 即出现循环退化现象。当振次增加一定程度时, 滞回圈在某位置反复, 循环退化消失, 这与土体的应力路径和孔隙水压力变化密切相关, 土体变形基本保持稳定。此外, 随着振幅 σ_d 的不断增大, 能量耗散较大, 滞回圈“胖大”, 这与王军等^[18]试验研究结论基本一致。当循环荷载幅值较小时, 需要通过多次振动土体变形才能达到稳定, 当循环荷载幅值较大时, 在较低振次条件下变形达到稳定。试验数据与模型预测数据基本一致, 并且振幅越大, 弹塑性变形越大。比如当振幅为 20, 40, 60 kPa, 最终塑性应变 (循环次数为 100) 试验结果分别为 $-0.005 \sim 0.005$, $-0.0075 \sim 0.0075$, $-0.018 \sim 0.018$, 模拟结果为 $-0.0048 \sim 0.0048$, $-0.0081 \sim 0.0081$, $-0.017 \sim 0.017$, 相对误差为 4%, 1.07%, 5.56%。



(a) $\sigma_d=20$ kPa

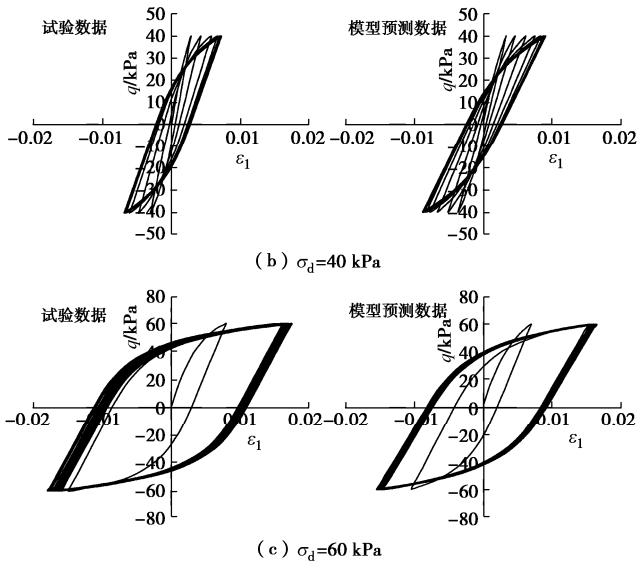
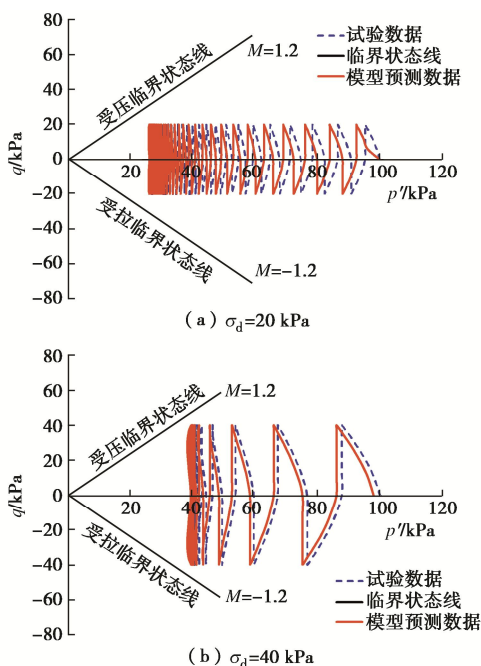


图7 等向循环加载的软黏土应力-应变滞回关系曲线

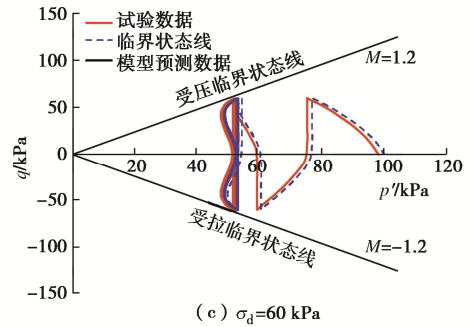
Fig. 7 Stress-strain hysteretic curves of soft clay under isotropic cyclic loading

图8为等向循环加载的软黏土应力路径,从图8中可以看出试验数据和模型预测数据基本一致。随着循环次数的增加,平均有效应力不断减小,朝着x轴负向运动。这主要是因为循环荷载作用下土体孔压不断增加,土体平均有效应力不断减小。当振幅不断增大,土体承受的剪应力 q 不断增大,不断靠近受压临界状态线和受拉临界状态线。需要说明的是,当振幅为20, 40 kPa时,随着循环次数增加,土体的平均有效应力在某位置上下浮动没有继续往x轴负方向运动,其原因是设置的孔隙水压力达到平衡,或者剪应力不能超过模型设置的边界面大小。



(a) $\sigma_d=20$ kPa

(b) $\sigma_d=40$ kPa

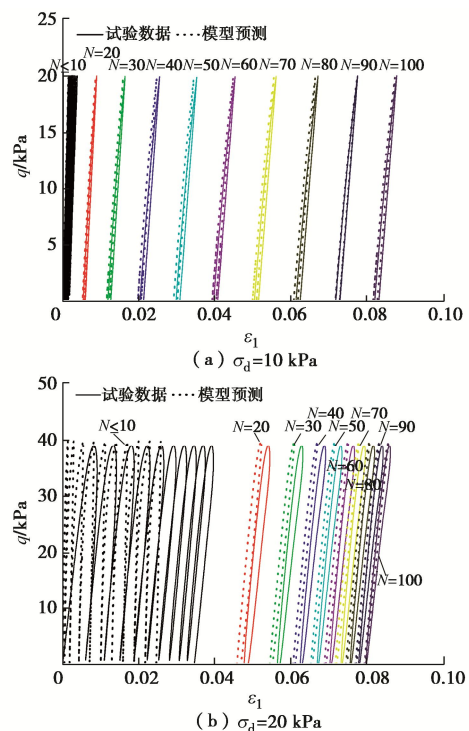


(c) $\sigma_d=60$ kPa

图8 等向循环加载的软黏土应力路径

Fig. 8 Stress paths of soft clay under isotropic cyclic loading

图9为不等向循环加载软黏土应力-应变关系曲线,从图9中可以发现不等向循环加载土体的滞回特性不同于等向循环加载的滞回特性。不等向循环加载条件下土体呈现出塑性应变累积特性,模型预测结果和试验结果基本一致。当振幅为10, 20, 30 kPa时,试验获得的累积应变(循环次数 $N=100$)分别为0.085, 0.425, 1.45, 模型预测结果分别为0.084, 0.421, 1.42, 相对误差分别为1.18%, 0.94%, 2.07%。虽然模型可以模拟应变累积特性,但不能很好地反映土体加载初期较大能量累积损耗,即加载初期模型滞回圈偏小(循环次数 $N \le 10$),这与剪切模量选取有较大的关系。模型预测的累积变形循环安定性不明显,主要是因为模型基于临界状态线和边界面综合判断土样变形破坏,尚没考虑循环安定土体破坏状态。在后续研究中,拟在模型基础上引入循环安定边界线,由边界面、临界状态线和循环安定边界线三者共同控制软黏土的变形破坏,实现土体的循环安定演化规律。但是通过对比发现最终累积塑性应变试验结果与数值模拟结果基本一致。



(a) $\sigma_d=10$ kPa

(b) $\sigma_d=20$ kPa

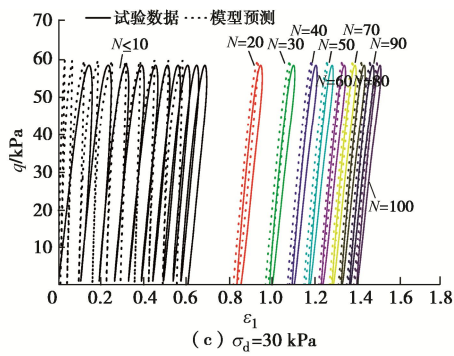


图 9 不等向循环加载软黏土应力 - 应变关系曲线

Fig. 9 Stress-strain hysteretic curves of soft clay under anisotropic cyclic loading

图 10 为不等向循环加载的软黏土应力路径,从图 10 中可以看出不等向循环加载的软黏土应力路径与等向循环加载软黏土应力路径不同,主要表现在不等向循环加载的应力路径不存在受拉临界状态线。试验数据与模型预测数据变化规律基本一致,随着循环次数的增加,模型预测和试验结果均表明平均有效应力

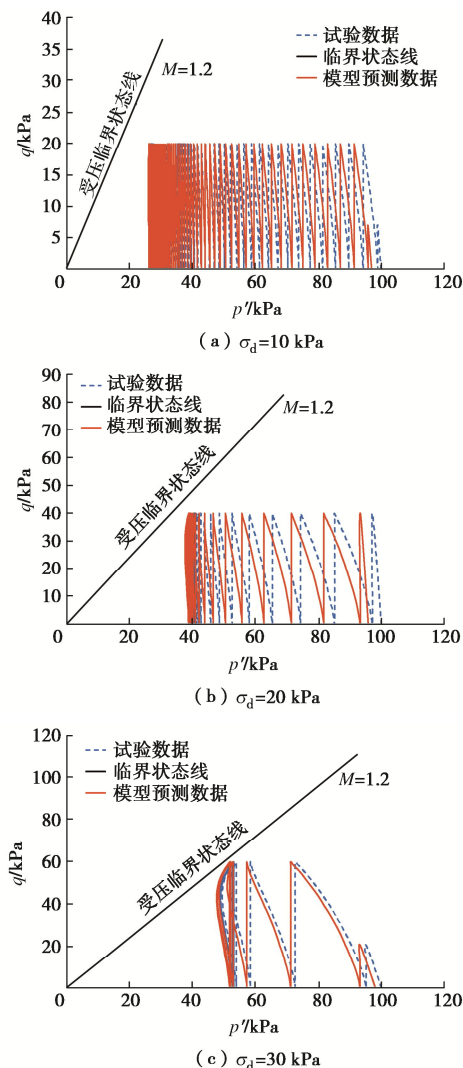


图 10 不等向循环加载的软黏土应力路径

Fig. 10 Stress paths of soft clay under anisotropic cyclic loading

朝着 x 轴负向运动,并在固定位置上下浮动。当振幅为 10, 20, 30 kPa 时,固定平均有效应力试验数据为 25, 38, 51 kPa;模型预测结果为 24.8, 37.6, 50.2 kPa,其相对误差为 0.8%, 1.05%, 1.57%。

5 结 论

针对饱和软黏土的不排水应力 - 应变的特性,在临界状态理论框架下建立了一种基于边界面的弹塑性本构模型,提出了广义边界面方程,建立了加载面和屈服面之间映射关系,形成了综合考虑循环退化模量场。本模型共包含 9 个参数,物理意义明确,对比分析了试验结果和模型预测结果,模型预测结果和试验数据具有较好的一致性,验证了模型正确性。具体获得 3 点结论。

(1)提出一种综合反映水滴形和类椭圆形广义的边界面方程,并通过参数 n, ζ 调整边界面的大小和形状。边界面随着 n 减小和 ζ 增大而增大, ζ 对边界面形状影响不明显, n 增加可导致边界面形状由水滴形过渡到类椭圆形。

(2)利用非相关联的流动法则和相似三角形原则获得加载面的剪胀因子,利用一致性条件获取了加载面的塑性模量,可反映在加载过程中模量循环退化特性。

(3)通过试验数据和模型预测结果对比分析了等向循环加载和不等向循环加载的软黏土的应力 - 应变关系和应力路径,模型结果和试验结果基本一致,可以反映土体的循环退化、非线性、应变累积和滞回特性。

本文仅对三轴结果进行了预测,关于应变累积特性中初始滞回圈偏小,应需要进一步细化初始剪切模量以及边界面模量与加载面模量之间的关系,此外,模型尚没考虑循环安定土体破坏标准,后续研究中拟通过引入循环安定边界线,由边界面、临界状态线和循环安定边界线三者共同控制软黏土的变形破坏,构造更加符合实际的弹塑性动本构方程,综合反映软黏土循环退化、非线性、应变累积、滞回和循环安定等特性。

参考文献:

[1] LEI H, FENG S, JIANG Y. Geotechnical characteristics and consolidation properties of Tianjin marine clay[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 16(2): 125 - 140.
 [2] GU C, GU Z, CAI Y, et al. Dynamic modulus characteristics of saturated clays under variable confining pressure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(5): 729 - 735.

- [3] BISOI S, HALDAR S. 3D Modeling of long-term dynamic behavior of monopile-supported offshore wind turbine in clay[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, **19**(7): 04019062-1-04019062-13.
- [4] 蔡袁强, 柳伟, 徐长节, 等. 基于修正 Iwan 模型的软黏土动应力 - 应变关系研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(9): 1314 - 1319. (CAI Yuan-qiang, LIU Wei, XU Chang-jie, et al. Study on dynamic stress-strain relationship of soft clay based on modified Iwan's model under undrained cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(9): 1314 - 1319. (in Chinese))
- [5] KALLIOGLOU P, TIKI T H, PITILAKIS K. Shear modulus and damping ratio of cohesive soils[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, **12**(6): 879 - 913.
- [6] RAGOZZINO E. Seismic response of deep Quaternary sediments in historical center of L'Aquila City (central Italy)[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **87**: 29 - 43.
- [7] DAFALIAS Y F, POPOV E P. A model of nonlinearly hardening materials for complex loading[J]. *Acta Mechanica*, 1975, **21**(3): 173 - 192.
- [8] 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 Xing-lei, WANG Jian-hua. Research on elastoplastic constitutive relation for soft clay considering cyclic softening[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(3): 786 - 794. (in Chinese))
- [9] HU C, LIU H, HUANG W. Anisotropic bounding-surface plasticity model for the cyclic shakedown and degradation of saturated clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, **44**: 34 - 47.
- [10] 刘方成, 尚守平, 王海东, 等. 基于阻尼的边界面模型[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(6): 851 - 858. (LIU Fang-cheng, LIU Shou-ping, WANG Dong-hai, et al. Damping ratio-based bounding surface model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(6): 851 - 858. (in Chinese))
- [11] 万征, 孟达. 复杂加载条件下的砂土本构模型[J]. *力学学报*, 2018, **50**(4): 929 - 948. (WAN Zheng, MENG Da. A constitutive model for sand under complex loading condition [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, **50**(4): 929 - 948. (in Chinese))
- [12] ZHOU C, FONG K Y, NG C W W. A new bounding surface model for thermal cyclic behaviour[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2017, **41**(16): 1656 - 1666.
- [13] YAO Y P, KONG Y X. Extended UH model: Three-dimensional unified hardening model for anisotropic clays[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, **138**(7): 853 - 866.
- [14] 王元战, 黄东旭, 肖忠. 天津滨海地区两种典型软黏土蠕变特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **34**(2): 379 - 380. (WANG Yuan-zhan, HUANG Dong-xu, XIAO Zhong. Experimental research on creep properties of two typical soft clays in coastal region of Tianjin[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **34**(2): 379 - 380. (in Chinese))
- [15] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. Bounding surface model for rockfill materials dependent on density and pressure under triaxial stress conditions[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, **140**(4): 04014002-1-04014002-14.
- [16] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 2019. (Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [17] 费康, 刘汉龙. 边界面模型在 ABAQUS 的开发应用[J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2009, **10**(5): 447 - 451. (FEI Kang, LIU Han-long. Implementation and application of bounding surface model in ABAQUS[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **10**(5): 447 - 451. (in Chinese))
- [18] 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. (WANG Jun. Study on Dynamic Behavior of Saturated Soft Clay Under Unidirectional and Bidirectional Cyclic Loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))