

DOI:10.11918/202409064

考虑结构性影响的天然软黏土弹塑性本构模型

王钰轲^{1,2,3}, 李在阳^{1,2,3}, 蒋睿^{1,2,3}, 孙逸飞⁴

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 郑州 450001; 2. 隧道掘进机及智能运维国家重点实验室(中国中铁隧道股份有限公司), 郑州 450001; 3. 郑州大学 地下工程灾变防控省部共建协同创新中心, 郑州 450001; 4. 太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024)

摘要: 已有本构模型多是基于假设无实际物理意义的参数来考虑土体的结构性,且忽略了结构屈服应力的影响。为此,根据原状土与重塑土的抗剪强度关系,提出考虑结构屈服应力的结构性参数 ξ ,在临界状态理论框架下,基于修正剑桥模型,选择Caputo型分数阶微分描述土体塑性流动方向与屈服面非正交的特性,建立一种能够考虑黏土结构性影响的分数阶本构模型。通过温州黏土和大阪黏土对模型进行验证,当土体所受应力小于结构屈服应力时,结构性参数 $\xi > 1$,土体的力学特性受结构性影响显著;当土体所受应力大于其结构屈服应力时,结构性参数 $\xi = 1$,结构性影响消失,模型可退化为常态分数阶本构模型。温州黏土的预测结果表明,在围压为50、100、200 kPa时考虑结构性影响的分数阶本构模型最大预测误差比忽略结构性影响的模型预测误差分别降低27.6%、13.05%和1.8%,平均最大预测误差为4.92%。大阪黏土的预测结果进一步验证该模型可以较好地预测结构性黏土的力学与变形特性,具有良好的适用性和可靠性。

关键词: 天然软黏土; 结构性; 临界状态; 抗剪强度; 本构模型

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)10-0103-09

Elastoplastic constitutive model of natural soft clay considering structural properties

WANG Yuke^{1,2,3}, LI Zaiyang^{1,2,3}, JIANG Rui^{1,2,3}, SUN Yifei⁴

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Tunnel Boring Machine and Intelligent Operations (China Railway Tunnel Stock Co., Ltd.), Zhengzhou 450001, China; 3. Provincial and Ministerial Collaborative Innovation Center for Underground Engineering Disaster Prevention and Control, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Most of the existing constitutive models often relay on parameters that lack actual physical significance to account for the structure of soil, while neglecting the influence of structural yield stress. To address this gap, a structure parameter ξ incorporating the relationship between the shear strength of undistributed and remolded soils is proposed. Within the framework of critical state theory, a modified Cam-clay model is developed. This model employs Caputo-type fractional differential to describe the characteristics of soil plastic flow direction in the soil and the non-orthogonality of the yield surface. Consequently, a fractional constitutive model considering the structural effects in clay is established. The model is validated by Wenzhou clay and Osaka clay. When the stress of the soil is less than the structural yield stress, the structural parameter $\xi > 1$, indicating that the mechanical properties of the soil are significantly affected by the structural properties. Conversely, when the stress of the clay is larger than the structure yield stress, the structural parameter $\xi = 1$, and the structural influence disappears, allowing the model to reduce to a conventional fractional constitutive model. The prediction results of Wenzhou clay show that, when the confining pressure is 50, 100, and 200 kPa, the fractional constitutive model considering the structural influence reduces the maximum prediction error by 27.6%, 13.05% and 1.8%, respectively, compared to the model ignoring the structural influence, with an average maximum prediction error of 4.92%. Further validation using prediction results of Osaka clay demonstrates that the model better predicts the mechanical and deformation characteristics of structural clay, exhibiting good applicability and reliability.

Keywords: natural soft clay; structural properties; critical state; shear strength; constitutive model

收稿日期: 2024-09-27; 录用日期: 2024-11-14; 网络首发日期: 2024-12-03

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241129.1641.004>

基金项目: 国家自然科学基金(52109140); 河南省优秀青年基金(232300421069); 中原科技创新领军人才基金(234200510014); 河南省高校科技创新人才支持计划(24HASTIT014); 河南省交通运输厅科技项目(2022-5-5)

作者简介: 王钰轲(1989—),男,博士,教授,博士生导师

通信作者: 王钰轲, ykewang@163.com

天然软黏土的结构性是指在长期外部荷载作用下,天然软黏土颗粒间产生胶结作用,形成具有大孔隙土颗粒排列的架空结构^[1],导致其在颗粒间的排列、连接方式以及孔隙分布等微观层面明显区别于重塑土,对土体变形特性具有显著影响。结构性变化对于黏土地基建设工程的安全性、耐久性和稳定性起着重要作用^[2],在工程设计中若忽略结构性的影响,将导致建筑物在使用中出现过早的变形或沉降破坏,影响工程结构的安全性和稳定性。因此,针对天然软黏土的结构性影响,开展本构模拟具有重要工程意义和应用价值。

由于结构性的存在,天然软黏土相比重塑土具有更高的强度、刚度以及更高的压缩比和敏感性等特性。目前,相关学者针对黏土的结构性及其对力学特性的影响开展了大量研究。杨爱武等^[3]通过对天津结构性软黏土进行试验,发现结构性的存在使得原状土抵抗变形的能力强于重塑土。刘炳恒等^[4]通过对湛江强结构性黏土进行三轴试验,证明了湛江黏土的结构性不仅影响其蠕变特性,对强度准则也有一定程度的影响。以上有关天然黏土结构性的宏观研究证明了结构性的存在对其强度等方面具有显著影响,也有学者在微观层面对结构性影响的机制进行了研究。如 Luo 等^[5]结合扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)和 X 射线荧光光谱(XRF)研究黏土的微观结构,提出一种将指数性质与工程性质相关联的改进方法。以上试验结果表明,黏土颗粒单元体之间的接触方式、排列规则均会影响天然黏土结构的变化,若黏土颗粒之间胶质联结发生破坏,土体强度则会显著降低,进而其微观结构的改变影响土体的宏观力学响应。天然黏土结构性的特质在塑造其力学特性方面发挥重要作用。

天然黏土结构性的存在使得基于重塑土建立的本构模型难以准确描述天然黏土的力学特性,具有一定的局限性。因此,研究人员在重塑土本构模型的基础上进行了大量工作。Liu 和 Carter 等^[6-7]在修正剑桥(MCC)模型的基础上引入反映黏土结构退化的参数,将适用于重塑黏土的 MCC 模型扩展为适用于天然黏土的结构性剑桥(SCC)模型。但引入参数较多且参数确定复杂,增加了模型应用的难度。李吴刚等^[8]和万征等^[9-10]则通过在原有模型上引入反映结构性的参数考虑黏土结构性的影响,但模型的数学表达和实现更加复杂。Liu 等^[11]通过在模型中建立结构内部变量模拟结构性软黏土在长期循环荷载下的力学行为和结构退化过程。Jiang 等^[12]和 Xiao 等^[13]在界面模型的基础上,建立了考虑黏土结构性的本构模型。此外,Liang 等^[14]的

研究表明,相关联的流动法则不适用于描述岩土材料的力学行为,基于传统模型采用非关联流动法则又很难构造新的塑性势函数,为了考虑结构性的影响,通常需要引入大量参数,导致模型更加复杂且参数缺少具体的物理意义,难以适应工程应用。

基于以上研究,采用 Caputo 型分数阶微积分理论描述土体塑性流动方向与屈服面非正交的特性,运用非关联的塑性流动法则确定塑性应变大小和方向。根据天然黏土的不排水抗剪强度变化,确定天然黏土的结构屈服应力,提出考虑结构屈服应力影响的结构性参数 ξ ,并在临界状态理论的框架内,基于修正剑桥模型,建立一个可以考虑黏土结构性影响的分数阶本构模型。

1 基本概念与分数阶本构模型

1.1 临界状态理论

土体在荷载作用下达到应力不再变化、体积应变不再变化,而剪应变持续发展的流动状态称为临界状态^[15],可用式(1)表示:

$$\frac{\partial p'}{\partial \varepsilon_q} = \frac{\partial q'}{\partial \varepsilon_q} = \frac{\partial V}{\partial \varepsilon_q} = 0 \quad (1)$$

式中: $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ 为三轴试验中有效平均应力, σ'_1 和 σ'_3 分别表示有效轴压与围压, $q' = (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ 为三轴试验中的偏应力, V 为试样体积, ε_q 为剪切应变。

采用参数 ψ 描述土体材料力学和密度特性,有

$$\psi = e - e_c \quad (2)$$

式中 e_c 为临界状态孔隙比。

黏土的临界状态线(CSL)满足半对数线性关系,围压与临界状态孔隙比 e_c 的关系可由下式表示:

$$e_c = e_\Gamma - \lambda \ln p' \quad (3)$$

如图 1 所示, e_Γ 为临界状态线 CSL 与 e_c 轴的截距, λ 为临界状态线斜率。

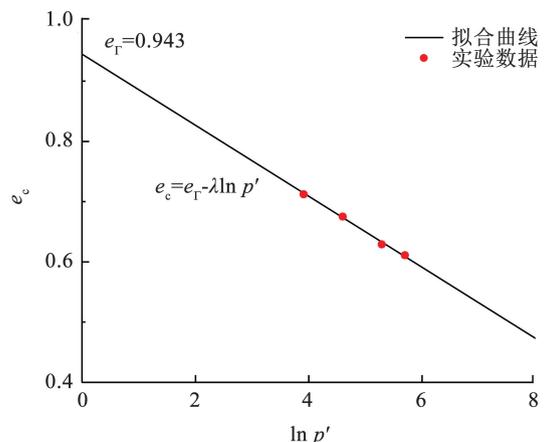


图 1 温州黏土^[16] e_c - $\ln p'$ 空间中的临界状态线

Fig. 1 Critical state line in Wenzhou clay^[16] e_c - $\ln p'$ space

1.2 硬化准则

在黏土的本构模型中, 硬化准则涉及土体在加载过程中屈服面的变化和土体内部结构的演变, 是黏土弹塑性本构模型中的关键组成部分, 用于确定塑性应变增量的大小。

天然沉积黏土的总应变增量可由下式表示:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \quad (4)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e$ 为弹性应变增量, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ 为塑性应变增量。

总的弹性应变增量与应力增量的关系可表示为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = \mathbf{C}^e : \dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (5)$$

式中: \mathbf{C}^e 为弹性柔度矩阵^[17], 可表示为

$$\mathbf{C}^e = \begin{bmatrix} 1/K & & \\ & 1/(3G) & \\ & & \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: K 为体积模量, G 为剪切模量。

总的塑性应变增量 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ 表示为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \Lambda \frac{\partial^\alpha g(\boldsymbol{\sigma})}{\partial \sigma_{ij}^\alpha} \quad (7)$$

式中: Λ 为塑性乘子, $\boldsymbol{\sigma} = [p', q]^T$ 为应力张量, $g(\boldsymbol{\sigma})$ 为塑性势面函数。

通过对屈服函数进行进一步求解得到一致性方程, 并代入式(7)得到塑性乘子表达式, 得到塑性应变增量的最终表达式:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \frac{1}{\Pi} m_{ij} n_{kl} \dot{\boldsymbol{\sigma}}_{kl} \quad (8)$$

式中: Π 为硬化模量, m_{ij} 和 n_{kl} 为加载方向和塑性流动方向, 具体计算方法见 1.4 节。

结合式(5)和(8), 可以得到黏土的总应力-应变关系为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \left(\mathbf{C}^e + \frac{1}{\Pi} m_{ij} n_{kl} \right) \dot{\boldsymbol{\sigma}}_{kl} \quad (9)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为应变张量, $\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{kl}$ 为应力张量。

黏土的结构性和塑性指数对其硬化模量具有显著的影响。在初始阶段, 由于结构性的作用, 原状黏土展现出较高的硬化模量, 但在结构破坏后, 这一模量会显著降低。此外, 塑性指数较高的结构性黏土显示出更强的变形能力, 相应地, 其硬化模量也相对较低。因此, 基于 Li 等^[18] 在常规三轴应力条件下提出的硬化模量概念, 对原有的硬化模量进行了必要的改进和调整, 以构建一个能够综合考虑黏土结构性影响的硬化模量:

$$\Pi = \left[h_0 G \left(\frac{M_p}{\eta} - 1 \right) + \frac{\xi}{100 I_p} \right] e^{k\psi} \quad (10)$$

式中: ξ 为黏土的结构性参数; I_p 为黏土的塑性指数, 可由式(11)计算得出。

$$I_p = \omega_L - \omega_p \quad (11)$$

式中 ω_L 和 ω_p 分别为液限和塑限, 均用百分数表示。

式(10)中 $M_p = M e^{-k\psi}$ 为特征峰值应力比, η 为应力比, k 为材料常数, h_0 为硬化参数, 可表示为

$$h_0 = h_1 e_0 - h_2 \quad (12)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; h_1 和 h_2 为材料常数, 可由拟合土样在不同初始状态下加载产生的轴向应变 ε_1 与偏应力 q 的关系曲线获得^[18], 或者由试错法获得, 详细过程见文献[19-20]。

1.3 结构性参数 ξ

黏土结构的破坏取决于很多因素, 如黏土类型、含水量、颗粒间黏结力的强弱、应力状态等, 因素的不同导致黏土发生塑性破坏或者脆性破坏。当黏土颗粒之间结合较强时, 土体可能会发生塑性破坏, 发生该破坏前, 土体会发生明显的塑性变形, 结构在达到临界值之后会继续发生变形直至结构失效。而当黏土的含水量较低、颗粒间的黏结性能较弱时, 土体可能会发生脆性破坏, 发生破坏前土体只产生微量变形, 但应力水平达到临界应力时, 结构会发生突然断裂。洪振舜等^[21] 基于结构土的不排水抗剪强度特性提出结构土屈服破坏的概念, 认为当应力水平大于结构屈服压力时, 土的结构性完全消失, 当应力水平小于土体的屈服压力时, 结构未发生损伤, 土体的强度仍受结构性影响。假设土的结构性影响是逐渐消失的, 结构土在达到其屈服压力后, 不排水抗剪强度不会与重塑土的不排水抗剪强度线重合, 若重合则代表此时土体的强度不再受结构性的影响, 即所谓的二段论(如图 2 所示)。

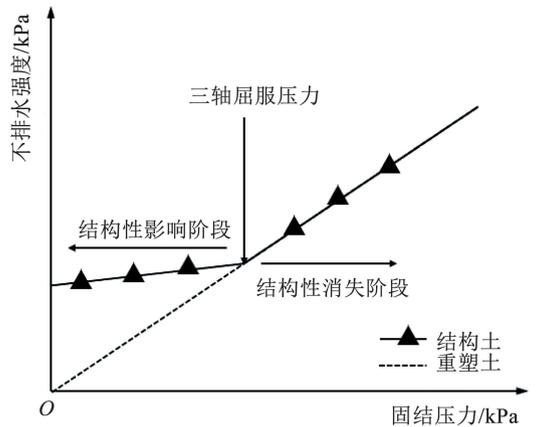


图 2 结构土的屈服破坏

Fig. 2 Yield failure of structural soil

本文采用二段论, 考虑了结构土与无结构土在抗剪强度方面的差异, 通过有效固结应力法^[22] (详细计算过程见文献[23]), 根据天然沉积黏土的不排水抗剪强度确定了其结构屈服应力, 提出结构性参数 ξ 考虑天然黏土结构性的影响, 并将其引入分数阶本构模型, 结构性参数 ξ 计算表达式以及示意

图(图 3)如下:

$$\xi = \frac{S_u}{S_u^*} \quad (13)$$

式中: S_u 为结构土的不排水抗剪强度, S_u^* 为重塑土或者无结构土的不排水抗剪强度, 结构性参数为二者之比。当应力状态未达到结构屈服应力之前, $\xi > 1$; 而当应力状态达到结构屈服应力之后, $\xi = 1$ 。该参数结构简单, 计算方便。

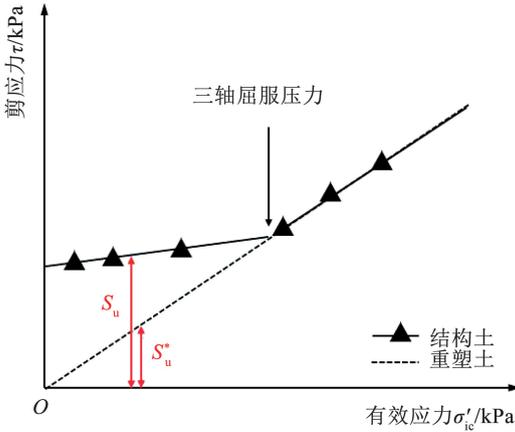


图 3 结构土与重塑土的不排水抗剪强度

Fig. 3 Undrained shear strength of structural soil and remolded soil

已有研究^[24-36]明确指出, 偏应力的变化与土体结构的破坏和抗剪强度的衰减密切相关。结构性黏土的力学特性对偏应力变化极为敏感, 平均有效应力则更多地与土体的整体应力状态相关, 并不直接涉及土体结构的破坏, 因此, 受结构性影响相对较小。为了进一步提升模型对偏应力预测的精确度, 特别对偏应力进行了结构性修正。具体修正过程如下:

$$\dot{q}_\xi = \dot{q} \times \xi = \dot{q} \times \frac{S_u}{S_u^*} \quad (14)$$

调整后结构性黏土的总应力张量可表示为

$$\dot{\sigma}_{kl} = [p' \dot{q}_\xi]^T \quad (15)$$

代入式(9)即可得到平均主应力和偏应力与应变之间的关系。

1.4 加载方向及塑性流动方向

本文模型假设土体是均匀的、各向同性的, 且不考虑温度、土体颗粒大小对结构性的影响。屈服函数选择适用正常固结黏土的修正剑桥屈服函数, 即

$$f = (2p' - p_0)^2 + \left(\frac{2q}{M_c}\right)^2 - p_0^2 = 0 \quad (16)$$

Caputo 型分数阶微分的定义因其弱奇异性且对常数微分为 0 而被广泛应用于自然科学与工程科学^[27], 具体表达形式如下:

$${}_0 D_x^\alpha f(x) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \int_0^x \frac{f^{(n)}(\tau) d\tau}{(x - \tau)^{\alpha+1-n}}, x > 0 \quad (17)$$

式中: ${}_0 D_x^\alpha f(x)$ 表示 $f(x)$ 对在 0 到 x 上进行 α 阶微分, $\Gamma(n - \alpha)$ 为伽马函数, 计算方法如下

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt = (z - 1)! \quad (18)$$

将修正剑桥模型与 Caputo 型分数阶微分相结合, 并结合伽马函数性质, 得到 $f(\sigma) = (\sigma - t)^v$ 型分数阶微分表达式:

$${}_t D_\sigma^\alpha (\sigma - t)^v = \frac{\Gamma(v + 1)}{\Gamma(v + 1 - \alpha)} (\sigma - t)^{v-\alpha} \quad (19)$$

在塑性应变关系增量的表达式(8)中, m_{ij} 代表加载方向, n_{kl} 为塑性流动方向, 如图 4 所示, 其具体表达式为

$$m_{ij} = \left[\frac{D^1 f(p')}{\|D^1 f(\sigma)\|}, \frac{D^1 f(q)}{\|D^1 f(\sigma)\|} \right]^T \quad (20)$$

$$n_{kl} = \left[\frac{D^\alpha f(p')}{\|D^\alpha f(\sigma)\|}, \frac{D^\alpha f(q)}{\|D^\alpha f(\sigma)\|} \right] \quad (21)$$

其中

$$D^1 f(p') = 4(2p' - p_0) = 8p' - 4p_0 \quad (22)$$

$$D^1 f(q) = \frac{8q}{M_c^2} \quad (23)$$

$$D^\alpha f(p') = \frac{8}{\Gamma(3 - \alpha)} (p' - \frac{1}{2}p_0)^{2-\alpha} \quad (24)$$

$$D^\alpha f(q) = \frac{8q^{2-\alpha}}{\Gamma(3 - \alpha)M_c^2} \quad (25)$$

$\|D^1 f(\sigma)\|$ 与 $\|D^\alpha f(\sigma)\|$ 是梯度幅值, 具体见文献^[23]。

分数阶数 α 计算方法如下:

$$\alpha = e^{\beta\psi} \quad (26)$$

式中 β 为材料参数。

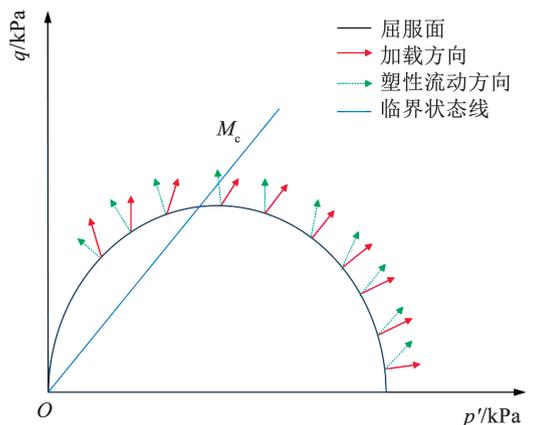


图 4 加载方向和塑性流动方向

Fig. 4 Loading direction and plastic flow direction

2 参数确定与模型预测结果分析

2.1 参数确定

在本文提出的黏土分数阶本构模型中, 一共有 10 个参数, 临界状态参数有 3 个 (M_c, λ, e_Γ), 弹性相关的参数有两个 (G_0 和 ν), 硬化参数有 3 个 (h_1, h_2

和 k), 1 个材料参数 β 以及 1 个结构性参数 ξ 。其中, 临界状态参数、弹性相关参数以及硬化参数均可以通过常规三轴试验测试获得, 临界应力比 M_c 为土体临界状态线在应力路径图 (即 $p' - q$) 中的斜率, λ 和 e_r 可以通过拟合土体的 $e_c - \ln p'$ 曲线获得, 初始剪切模量 G_0 和泊松比 ν 则由天然黏土的本身物理性质和试验数据给出。材料参数 β 只由材料本身的性质决定, 并且参与到分数阶数 α 的计算中, 决定分数阶数的大小。结构性参数 ξ 通过土体的抗剪强度与有效应力的关系获得, 其值等于结构黏土的抗剪强度 S_u 与重塑黏土的抗剪强度 S_u^* 之比, 当土体所受应力小于结构屈服应力时, 其值大于等于 1。上述未列出具体计算公式的参数表达式如下。

硬化参数 k 表达式如下:

$$k = \frac{1}{\psi_p} \ln \frac{M}{\eta_p} \quad (27)$$

式中: η_p 为峰值应力比, ψ_p 为峰值应力点的状态参数, 其表达式为

$$\psi_p = e_p - e_r + \lambda \ln p_p' \quad (28)$$

材料参数 β 表示为

$$\beta = \frac{1}{\psi_d} \ln \frac{2}{1 + (M/\eta_d)^2} \quad (29)$$

式中: η_d 为转换点的应力比, ψ_d 为转换点的状态参数, 定义为

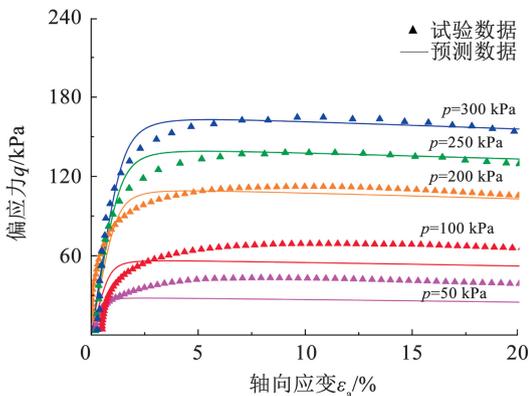
$$\psi_d = e_d - e_r + \lambda \ln p_p' \quad (30)$$

2.2 模型预测结果分析

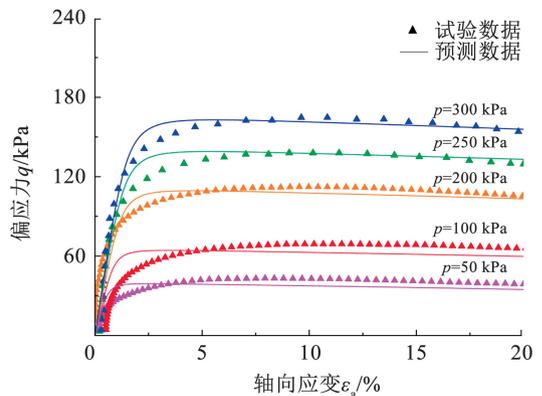
本文模型选择采用国内外具有代表性的温州天然沉积黏土^[16] 和大阪天然沉积黏土^[28] 的不排水三轴试验数据, 多方位对比两种黏土的应力-应变图、应力路径图、孔隙水压力图、归一化应力路径图等 6 种数据图的模型预测结果, 验证考虑结构性的分数阶本构模型的预测能力。

图 5 为考虑结构性和不考虑结构性影响的分数阶本构模型对温州黏土的预测结果对比, 图 6 为温州黏土其他力学关系的模型预测结果, 其模型的所有参数如表 1 所示。

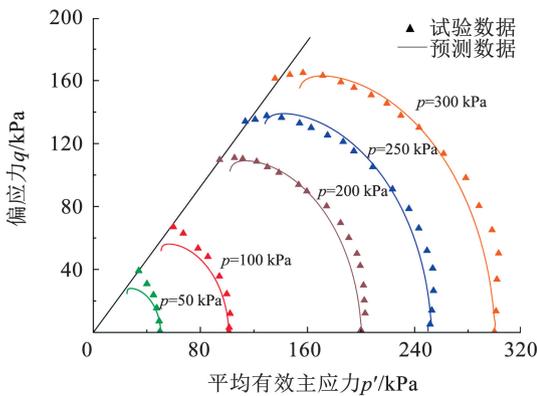
对于温州天然沉积黏土, 采用上述的有效固结应力法对黏土的抗剪强度进行分析得到其结构屈服应力约为 205.25 kPa, 通过上述方法计算得到低于结构屈服应力的不同围压状态下的结构性参数 ξ 分别为 1.402、1.145、1.003, 高于结构屈服应力的围压条件下所得的结构性参数值均为 1。



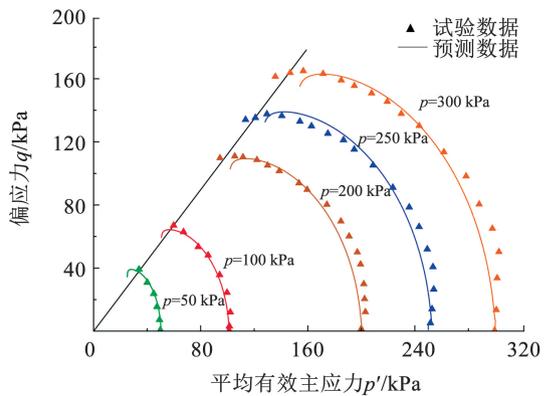
(a) 未考虑结构性影响的应力-应变图



(b) 考虑结构性影响的应力-应变图



(c) 未考虑结构性影响的应力路径图



(d) 考虑结构性影响的应力路径图

图 5 考虑结构性和未考虑结构性影响的温州黏土模型预测结果对比

Fig. 5 Comparison of model prediction results of Wenzhou clay considering structural and non-structural effects

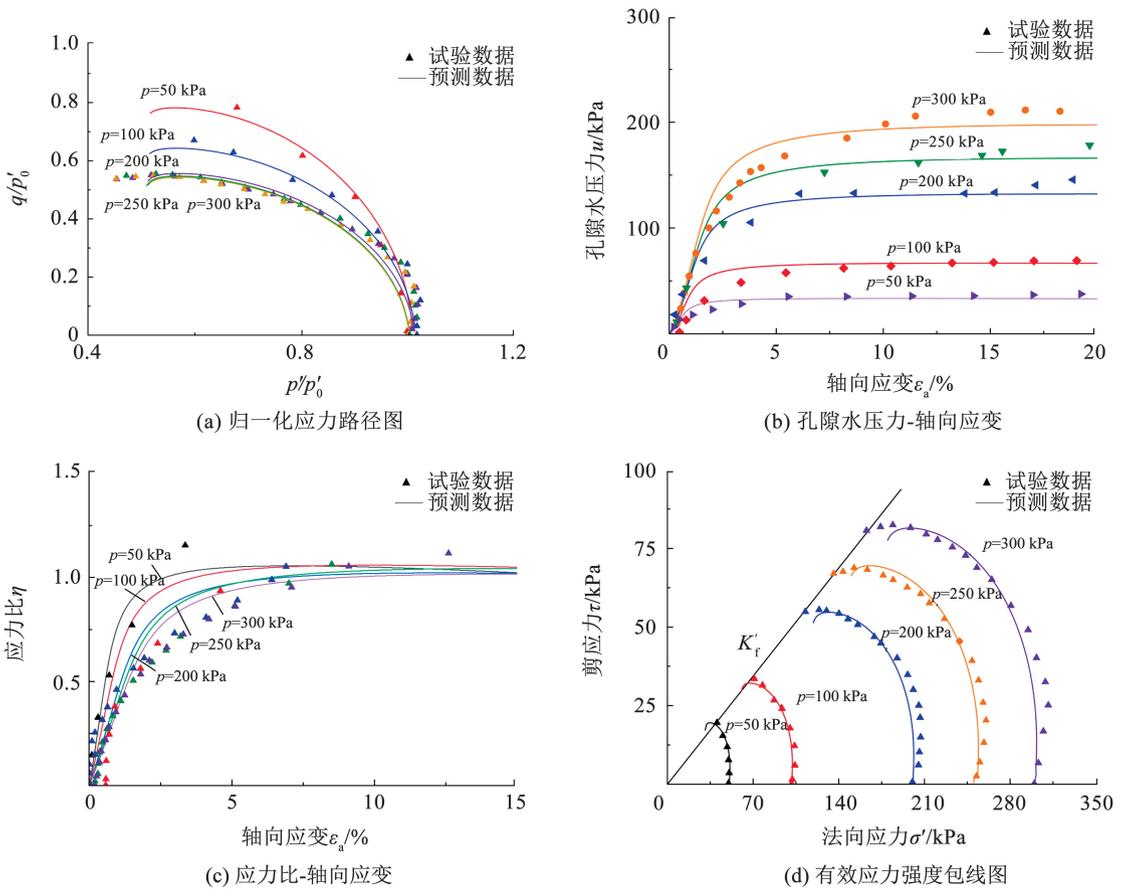


图 6 温州黏土模型预测结果

Fig. 6 Prediction results of Wenzhou clay model

表 1 温州黏土模型参数

Tab. 1 Wenzhou clay model parameters

e	v	G_0	M	e_r	λ	β	k	h_1	h_2
1.71	0.4	35	1.16	0.943	0.042 6	-1.5	-0.16	0.02	0.1

由图 5(a) 的应力-应变关系可知,在低于结构屈服应力的工况 ($p = 50、100、200$ kPa) 下,未考虑天然黏土结构性的模型预测结果明显与试验数据相差较大,其峰值应力误差分别约为 37.21%、20% 和 4.3%,在高于结构屈服应力的工况 ($p = 250、300$ kPa) 下,模型预测结果与试验数据最大误差为 1.92% 和 3.65%。以上结果表明,未考虑结构性影响的本构模型难以准确模拟结构性黏土的力学特性。将结构性参数 ξ 引入模型后,考虑结构性影响的分数阶本构模型对天然沉积黏土的应力-应变关系预测结果见图 5(b)。对比图 5(a) 和 5(b) 可以看出,考虑结构性的分数阶本构模型对结构黏土预测结果明显好于未考虑结构性的模型,低于结构屈服压力工况下(即结构性影响的阶段)的预测误差如表 2 所示,高于结构屈服应力时,由于结构性参数 $\xi = 1$,此时误

差与图 5(a) 一致,不详细讨论。由表 2 可以直观看出,在围压为 50、100、200 kPa 时,考虑结构性影响的分数阶本构模型对结构性黏土应力-应变关系的预测效果明显提升,最大误差分别下降 27.6%、13.05% 以及 1.8%,模型平均最大预测误差为 4.926%,实现了 5 种工况下的预测误差均控制在 5% 以内,预测结果较好。对比图 5(c) 和 5(d) 可以看出,当分数阶本构模型考虑结构性之后,该模型对温州黏土应力路径的预测效果相比未考虑结构性的分数阶本构模型得到优化,更加符合试验结果。

表 2 温州黏土应力-应变关系最大预测误差对比

Tab. 2 Comparison of maximum prediction errors for stress-strain relationships of Wenzhou clay

围压/ kPa	最大预测误差/%		最大预测误差 下降值/%
	未考虑结构性分 数阶本构模型	考虑结构性分 数阶本构模型	
50	37.21	9.61	27.60
100	20.00	6.95	13.05
200	4.30	2.50	1.80

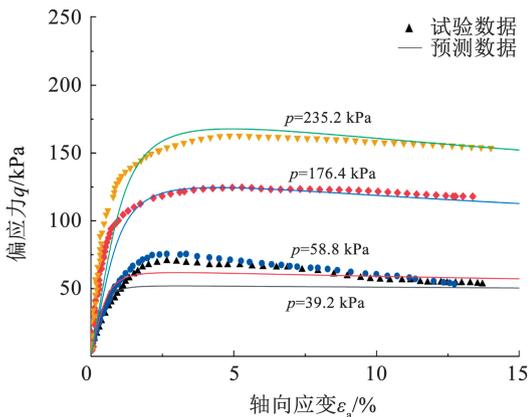
本文基于试验数据和预测数据,对温州黏土又分别进行了归一化应力路径、孔隙水压力、应力比以及有效应力强度包线预测结果的对比,由图 6(a)~(d)不难看出,本文考虑结构性的分数阶本构模型可以较好地预测结构性温州黏土的多种物理力学方面的试验结果,证明该模型具有较好的数据预测精度以及可靠性。

图 7 和图 8 为使用本文模型对日本大阪黏土的预测结果,模型参数取值见表 3。

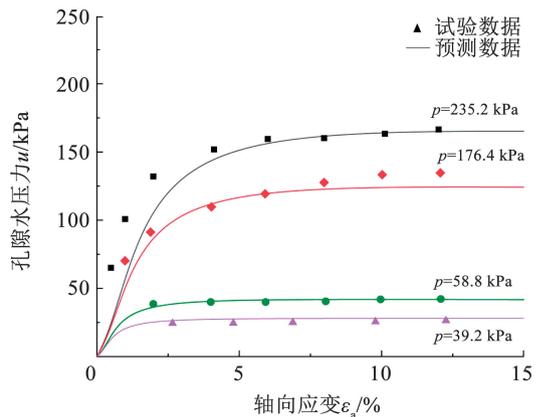
本文模型对大阪黏土预测效果如图 7 和图 8 所示,采用上述方法计算得到大阪黏土的结构屈服应力约为 114.375 kPa,与原文计算结果 120 kPa 接近,误差较小,证明有效固结应力法可以作为一种确定土体结构屈服应力的可靠方法,并通过上述方法计算得到结构性影响的围压条件下结构性参数 ξ 分别为 2.01 和 1.55,其余围压下均为 1。

图 7(a)为不同围压条件下,大阪结构性黏土的

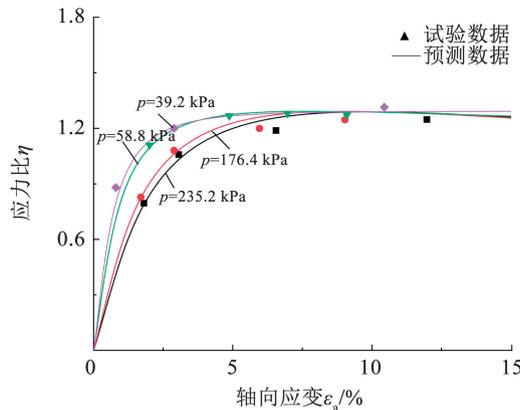
应力-应变关系曲线预测结果。随着围压的逐渐增大,天然黏土的结构逐渐破坏,导致结构性黏土逐渐向重塑黏土退化,其在剪切过程中的应力-应变关系也从应变软化逐渐向应变硬化过渡。分析图 7(a)可以看出,所建立的结构性分数阶本构模型可以合理地预测不同工况下大阪黏土的三轴压缩特性,且能反应结构性黏土的应变软化特性。对比图 7(b)和 7(c)可知,该模型也可以较好地对其孔隙水压力和应力比进行预测。图 8 为大阪黏土的应力路径预测结果,对比试验数据与预测结果可知,考虑结构性影响的分数阶本构模型可以较好地预测天然黏土的应力路径变化趋势,且逐渐趋近于临界状态线,与试验数据大体保持一致。大阪黏土不排水三轴试验的预测结果表明,本文模型对强结构性黏土复杂的力学特性具有良好的预测能力,能够较好地反映天然黏土的力学特性。



(a) 未考虑结构性影响的应力-应变图



(b) 考虑结构性影响的应力-应变图



(c) 应力比-轴向应变

图 7 大阪黏土预测结果

Fig. 7 Osaka clay prediction results

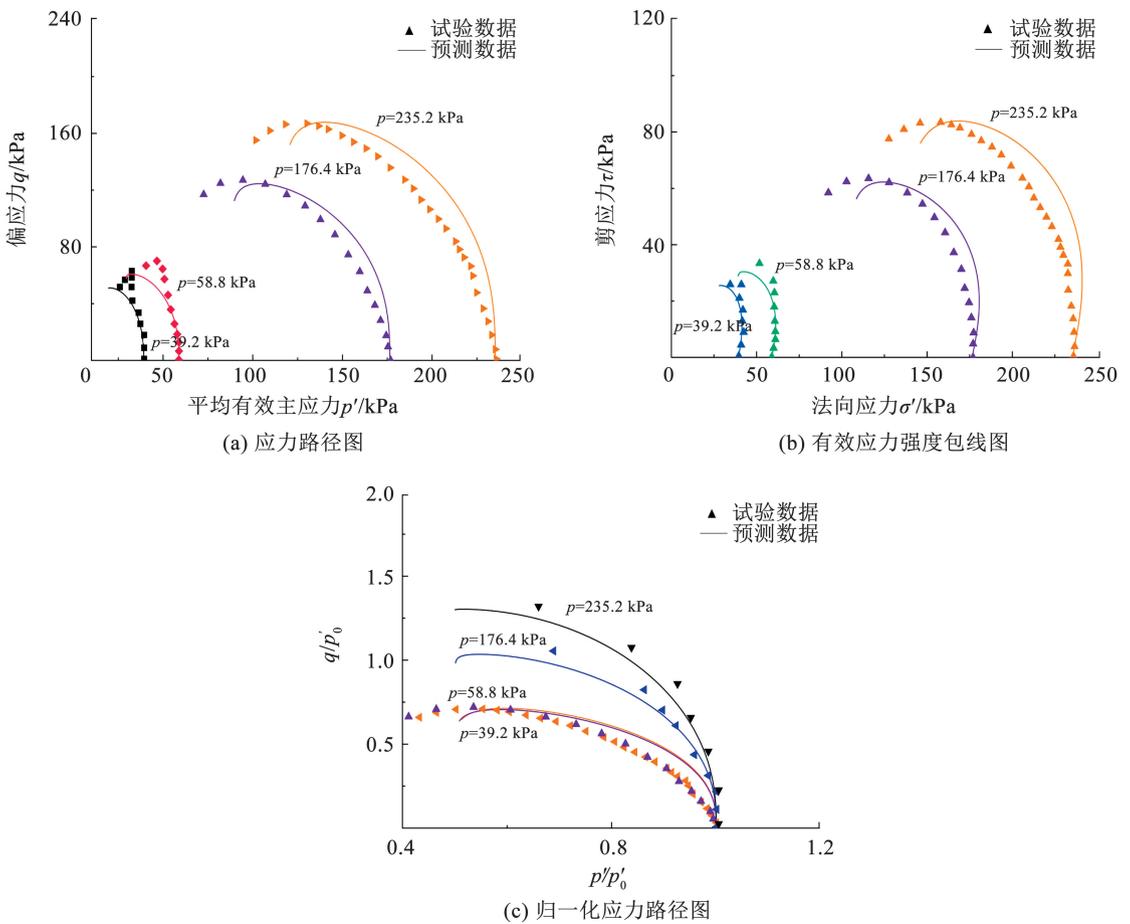


图 8 大阪黏土应力路径预测结果

Fig. 8 Osaka clay stress path prediction results

表 3 大阪黏土模型参数

Tab. 3 Osaka clay model parameters

e	ν	G_0	M	e_r	λ	β	k	h_1	h_2
1.91	0.3	70	1.2	1.56	0.17	-0.4	0.08	-0.99	-1.16

3 结 论

1) 本文建立的考虑结构性影响的分数阶本构模型无需引入额外的塑性势面, 可以反映土体的非正交特性, 参数均可通过土工试验得到, 且所提出的结构性参数 ξ 具有明确的物理意义, 可以较好地反映结构性黏土的结构状态, 计算简单方便。

2) 分别对温州黏土和大阪黏土的应力-应变关系、应力路径和孔隙压力等方面进行了预测。对比分析温州黏土的预测结果可知, 考虑结构性影响的分数阶本构模型相比未考虑结构性影响的本构模型在围压为 50、100、200 kPa 时, 对温州黏土的应力-应变预测最大误差分别降低 27.6%、13.05% 以及 1.8%, 平均最大预测误差为 4.92%, 最大预测误差大幅减小, 预测精度明显提高。大阪黏土的预测结果进一步证明了本文所建模型可以较好地预测结构

性黏土的应力-应变关系等多方面的变化趋势, 具有较好的适用性和可靠性。

参考文献

[1] BURLAND J B. On the compressibility and shear-strength of natural clays[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 329. DOI:10.1680/geot.1990.40.3.329

[2] 刘恩龙, 沈珠江, 范文. 结构性粘土研究进展[J]. 岩土力学, 2005(增刊1): 1
LIU Enlong, SHEN Zhujiang, FAN Wen. Research progress of structural clay[J]. Geotechnical Mechanics, 2005 (Sup. 1): 1. DOI:10.16285/j.rsm.2005.s1.001

[3] 杨爱武, 刘琦, 闫湖旺, 等. 结构性吹填软土流变等时曲线研究[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 58
YANG Aiwu, LIU Qi, YAN Shuwang, et al. Study on rheological isochronous curve of structural dredger fill soft soil[J]. Coal Geology and Exploration, 2012, 40(6): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.06.013

[4] 刘炳恒, 孔令伟, 舒荣军, 等. 湛江结构性黏土在三维应力下的力学特性与强度准则[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3090
LIU Bingheng, KONG Lingwei, SHU Rongjun, et al. Mechanical

- properties and strength criteria of Zhanjiang structured clay under three-dimensional stress [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2021, 42 (11): 3090. DOI:10.16285/j. rsm. 2021. 0396
- [5] LUO Zhibin, LI Zhangming, FU Yong, et al. Insight into the formation of marine clay structure and its effect on the correlation of index properties with engineering properties [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83 (8): 301. DOI:10.1007/s10064-024-03796-6
- [6] LIU M D, CARTER J P. A structured cam clay model [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39 (6): 1313. DOI:10.1139/t02-069
- [7] CARTER J P, LIU M D. Review of the structured cam clay model [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2005, 128: 99. DOI:10.1061/40771(169)5
- [8] 李吴刚, 杨庆, 刘文化, 等. 黏土的结构定量表征及其弹塑性本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(4): 678
LI Wugang, YANG Qing, LIU Wenhua, et al. Quantitative structural characterization and elastoplastic constitutive model of clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(4): 678. DOI:10.11779/CJGE202204010
- [9] 万征, 秋仁东, 宋琛琛. 基于统一硬化参数的原状饱和黏土的结构本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(9): 1905
WAN Zheng, QIU Rendong, SONG Chenchen. Structural constitutive model of undisturbed saturated clay based on unified hardening parameters [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(9): 1905. DOI:10.13722/j. cnki. jrme. 2018. 1356
- [10] 万征, 孟达, 宋琛琛, 等. 状态变量相关三维饱和黏土结构性本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 817
WAN Zheng, MENG Da, SONG Chenchen, et al. Three-dimensional structural constitutive model of saturated clay related to state variables [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 817. DOI:10.13722/j. cnki. jrme. 2019. 0729
- [11] LIU Jiaming, ZHAO Chuang, LIU Hongming, et al. Constitutive modelling of the shakedown response of sensitive clay to undrained long-term cyclic loads incorporating structural destruction [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 176: 106721. DOI: 10.1016/j. compgeo. 2024. 106721
- [12] JIANG Jianhong, LING H I, YANG Lu. Approximate simulation of natural structured soft clays using a simplified bounding surface model [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(7): 06016044. DOI:10.1016/j. compgeo. 2024. 106721
- [13] XIAO Huawen, LEE F H, LIU Yong. bounding surface cam-clay model with cohesion for cement-admixed clay [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(1): 04016026. DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000671
- [14] LIANG Jingyu, LU Dechun, ZHOU Xin, et al. Non-orthogonal elastoplastic constitutive model with the critical state for clay [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 116: 103200. DOI:10.1016/j. compgeo. 2019. 103200
- [15] 周葆春, 王靖涛. 论土体应力应变关系曲线类型和临界状态 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(1): 63
ZHOU Baochun, WANG Jingtao. On the type and critical state of soil stress-strain relation curve [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2008, 30(1): 63. DOI:10.3969/j. issn. 16 74 - 4764. 2008. 01. 015
- [16] 郭林, 蔡袁强, 王军, 等. 长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2249
GUO Lin, CAI Yuanqiang, WANG Jun, et al. Strain characteristics of Wenzhou structural soft clay under long-term cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2249. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4548. 2012. 12. 034
- [17] WANG Yuke, LI Junhao, YU Xiang, et al. Study on fractional-order elastic-plastic constitutive model of river silt based on critical state theory [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2024, 42(1): 59. DOI:10.1080/1064119X.2022.2149371
- [18] LI Xiangsong, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils-discussion [J]. *Geotechnique*, 2001, 51(8): 729. DOI: 10.1680/geot. 2001. 51. 8. 729
- [19] LI Xiangsong, WANG Y. Linear representation of steady-state line for sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(12): 1215. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:12(1215)
- [20] SUN Yifei, SHEN Yang. Constitutive model of granular soils using fractional-order plastic-flow rule [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(8): 04017025. DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000904
- [21] 洪振舜, 刘松玉, 于小军. 关于结构土屈服破坏的探讨 [J]. *岩土力学*, 2004, 25(5): 684
HONG Zhenshun, LIU Songyu, YU Xiaojun. Discussion on yield failure of structural soil [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2004, 25(5): 684. DOI:10.16285/j. rsm. 2004. 05. 003
- [22] 沈珠江. 基于有效固结应力理论的黏土土压力公式 [J]. *岩土工程学报*, 2000(3): 353
SHEN Zhujiang. Clay earth pressure formula based on effective consolidation stress theory [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2000(3): 353. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 2000. 03. 019
- [23] 曹宇春, 杨建辉. 基于有效固结应力法确定结构性黏土不排水抗剪强度 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3085
CAO Yuchun, YANG Jianhui. Determination of undrained shear strength of structured clay based on effective consolidation stress method [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2013, 34(11): 3085. DOI: 10.16285/j. rsm. 2013. 11. 006
- [24] 杨爱武, 马锐敏, 邵朝阳. 基于不同初始静偏应力的结构性软黏土动力特性试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34(10): 19
YANG Aiwu, MA Ruimin, SHAO Chaoyang. Experimental study on dynamic characteristics of structural soft clay based on different initial static deviatoric stresses [J]. *Highway Transportation Technology*, 2017, 34(10): 19. DOI:10.3969/j. issn. 1002 - 0268. 2017. 10. 004
- [25] 杨爱武, 仲涛, 张国军, 等. 循环荷载作用下结构性软黏土动力特性试验研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(1): 44
YANG Aiwu, ZHONG Tao, ZHANG Guojun, et al. Experimental study on dynamic characteristics of structural soft clay under cyclic loading [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2018, 38(1): 44. DOI:10.13197/j. eeev. 2018. 01. 44. yangaw. 006
- [26] 臧濛, 孔令伟, 郭爱国. 静偏应力下湛江结构性黏土的动力特性 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(1): 33
ZANG Meng, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Dynamic characteristics of Zhanjiang structured clay under static deviatoric stress [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2017, 38(1): 33. DOI:10.16285/j. rsm. 2017. 01. 005
- [27] 梁靖宇, 杜修力, 路德春, 等. 特征应力空间中土的分阶临界状态模型 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(3): 581
LIANG Jingyu, DU Xiuli, LU Dechun, et al. Fractional critical state model of soil in characteristic stress space [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(3): 581. DOI:10.11779/CJGE201903022
- [28] ADACHI T, OKA F, HIRATA T, et al. Stress-strain behavior and yielding characteristics of Eastern Osaka clay [J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(3): 1. DOI:10.3208/sandf. 35. 1