

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0723

CM 弹塑性本构模型在 FLAC^{3D} 中的二次开发

邢嘉豪, 熊勇林*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 显式有限差分程序 FLAC^{3D} 由于自带的本构库多样性不足, 无法统一描述超固结和结构性这两种自然界土体典型力学特性的本构模型。为了扩大 FLAC^{3D} 应用范围, 更精确地模拟土体力学特性, 本文基于其自带的二次开发平台, 使用 C++ 语言对交变移动(Cyclic Mobility, CM)弹塑性本构模型进行二次开发。首先推导该模型的基本公式; 然后介绍 FLAC^{3D} 的工作原理和关键开发步骤; 再通过不同应力路径下的测试, 对比 FLAC^{3D} 模拟值和该本构的理论值, 验证开发的正确性; 最后通过对一维固结试验数据、三轴排水压缩试验数据和不排水三轴循环加载试验数据的模拟, 验证了二次开发模型能较好地模拟土体的力学行为。

关键词: 超固结; 结构性; FLAC^{3D}; 弹塑性本构模型

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 02-0036-12

FLAC^{3D} 是由 Itasca 公司推出的显式有限差分程序, 有别于其他有限差分软件采用的离散集成法, 该程序采用了混合离散法, 因此提高了数值计算的准确性和稳定性, 能更好地模拟材料的塑性破坏和流动。同时, FLAC^{3D} 采用动力运动方程, 能够完整模拟从力学不平衡到平衡的整个过程, 尤其适用动力问题的求解。但是 FLAC^{3D} 自带的本构库多样性不足, 不适用一些特定工况, 因此已有很多学者对 FLAC^{3D} 进行了二次开发^[1-8]。然而, 有关统一描述土超固结和结构性的本构模型在 FLAC^{3D} 中的二次开发研究鲜见报道。

根据以往的工程实例和试验, 天然土体具有超固结和结构性, 这使其力学性质与重塑土大相径庭^[9-11]。陈贺欣等^[12]对不同超固结土进行了三轴剪胀试验, 发现在一定范围内土体超固结越大其剪胀性降低程度越大。宋晶等^[13]研究揭示了土体初始结构性越强, 加载阶段孔隙累积值越大, 施工沉降越大, 施工后土体结构性变化越大, 土层压缩越明显。因而, 不考虑这两种力学特性的本构模型不能反映实际工况土体的真实强度和变形特点,

甚至可能会导致工程事故的发生。

近年来, 在描述超固结和结构性土体的本构模型方面取得了显著进展。Zhang 等^[14]提出了交变移动(Cyclic Mobility, CM)本构模型, 采用上负荷面和下负荷面的概念, 以及一种新的表示各向异性方法来描述土体结构、密度和应力诱导对各向异性的影响。Ye 等^[15]验证了 CM 模型能够模拟砂质海床液化时的力学行为。与之前的本构模型相比, 该模型可以在一组固定参数下统一描述砂土在不同荷载和排水条件下的静态和动态行为, 且仅涉及 8 个材料参数, 其中 5 个参数与剑桥模型相同, 其他 3 个参数易确定, 表明该模型可简化使用和校准过程, 无需针对不同工况调整模型参数。

本研究基于 FLAC^{3D} 开发一种能够综合考虑土体超固结和结构性的本构模型, 以提高其土体力学行为模拟的准确性和可靠性。首先在 FLAC^{3D} 中对 CM 弹塑性本构模型进行了二次开发; 然后对新模型进行多种应力路径下的测试, 将结果与用 FORTRAN 语言编写的理论解进行对比; 最后模拟了一维固结试验、三轴排水压缩试验和不排水三轴

收稿日期: 2023-07-31.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室开放基金(CJ-20180110)。

第一作者: 邢嘉豪, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土材料本构模型及数值分析. E-mail: 1018911822@qq.com

*通信作者: 熊勇林, 博士/副教授, 主要研究方向: 岩土材料本构模型及数值分析等. E-mail: xiongyonglin@nbu.edu.cn

循环加载试验, 并对模拟结果与试验结果进行了对比, 以验证开发模型的准确性。

1 CM 弹塑性本构模型推导

CM 模型中具有 3 个几何形状相似的屈服面, 分别为上负荷、下负荷和正常屈服面(图 1)。

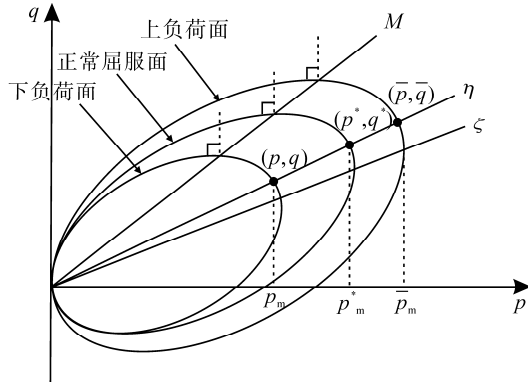


图1 p — q 面上的上负荷、正常、下负荷屈服面示意图

定义结构性状态变量 R^* 和超固结状态变量 R 为:

$$R^* = \frac{p^*}{\bar{p}} = \frac{q^*}{\bar{q}}, \quad 0 < R^* \leq 1, \quad \frac{q^*}{p^*} = \frac{\bar{q}}{\bar{p}}, \quad (1)$$

$$R = \frac{p}{\bar{p}} = \frac{q}{\bar{q}}, \quad 0 < R \leq 1, \quad \frac{q^*}{p^*} = \frac{\bar{q}}{\bar{p}} = \frac{q}{p}, \quad (2)$$

式中: (p, q) 、 (p^*, q^*) 和 $(\bar{p}, \bar{q})$ 分别表示下负荷屈服面上应力状态(当前应力状态)、正常屈服面上应力状态和上负荷屈服面上应力状态。当前应力状态位于下负荷面上, 其形式为:

$$f = \ln \frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} + \ln \frac{M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2}}{M^2 - \zeta^2} + \ln R^* - \ln R - \frac{\varepsilon_v^p}{C_p} = 0, \quad (3)$$

式中: $\sigma_m = 1/3\sigma_{ii}$ 是有效应力; σ_{m0} 是参考应力; M 是临界状态应力比; ε_v^p 是塑性体积应变; $\zeta = \sqrt{3/2}\beta_{ij}\beta_{ij}$ 是各向异性状态变量; β_{ij} 是各向异性应力张量; $\eta^* = \sqrt{3/2}\hat{\eta}_{ij}\hat{\eta}_{ij}$ 表示应力比张量 $\hat{\eta}_{ij}$ 和各向异性张量 β_{ij} 的差异, 其中:

$$\hat{\eta}_{ij} = \eta_{ij} - \beta_{ij}, \quad \eta_{ij} = S_{ij} / \sigma_m, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}, \quad (4)$$

式中: S_{ij} 为偏应力张量; δ_{ij} 为克罗内克张量。

式(3)中 C_p 表达式为:

$$C_p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0}, \quad (5)$$

式中: λ 和 κ 分别是压缩指数和膨胀指数; e_0 是压力为 98 kPa 下的参考孔隙比。

该模型采用联合流动法则(塑性势与屈服函数为同一函数):

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (6)$$

式中: ε_{ij}^p 为塑性体积应变; Λ 为非负参量。

下负荷面的方程可以表示为:

$$df = 0 \Rightarrow \frac{df}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{df}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij} + \frac{1}{R^*} dR^* - \frac{1}{R} dR - \frac{1}{C_p} d\varepsilon_v^p = 0, \quad (7)$$

结构性发展式 R^* 可表示为:

$$dR^* = U^* d\varepsilon_d^p, \quad U^* = \frac{aM}{C_p} R^* (1 - R^*), \quad 0 < R^* \leq 1, \quad (8)$$

式中: a 是控制结构性衰退的速度参数; $d\varepsilon_d^p$ 是塑性剪切应变。

该模型的超固结变化由两部分控制, 分别为应变的塑性分量和各向异性增量。

$$dR = U \|d\varepsilon_{ij}^p\| + R \frac{\eta}{M} \frac{\partial f}{\partial \beta_{ij}} d\beta_{ij}, \quad (9)$$

式中:

$$\|d\varepsilon_{ij}^p\| = \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} = \Lambda \frac{\sqrt{6\eta^{*2} + 1/3(M^2 - \eta^2)^2}}{(M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2})\sigma_m}, \quad (10)$$

$$U = -\frac{mM}{C_p} \cdot \frac{(\sigma_m / \sigma_{m0})^2}{(\sigma_m / \sigma_{m0})^2 + 1} \ln R, \quad (11)$$

式中: σ_{m0} 取 98.0 kPa; m 为控制超固结消失速率参数。

各向异性张量 $d\beta_{ij}$ 的发展式为:

$$d\beta_{ij} = \frac{M}{C_p} b_r (M - \zeta) d\varepsilon_d^p \frac{\hat{\eta}_{ij}}{\|\hat{\eta}_{ij}\|} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M}{C_p} b_r (M - \zeta) d\varepsilon_d^p \frac{\hat{\eta}_{ij}}{\eta^*}, \quad (12)$$

式中: b_r 为各向异性张量发展快慢的控制参数。

根据 Hooke 定理应变张量分为弹性分量和塑性分量, 弹性分量为:

$$d\sigma_{ij} = E_{ijkl} d\varepsilon_{kl}^e = E_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p) =$$

$$\mathbf{E}_{ijkl} d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - \Lambda \mathbf{E}_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{kl}}, \quad (13)$$

式中: $\mathbf{E}_{ijkl}$ 为弹性张量; $d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e$ 为弹性应变; $d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}$ 为总应变; $d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^p$ 为塑性应变。

把式(8)~(10)、式(12)和式(13)代入式(7), 可得 Λ 为:

$$\Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}} \cdot \mathbf{E}_{ijkl} d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}}{h_p + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}} \cdot \mathbf{E}_{ijkl} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{kl}}}, \quad (14)$$

式中:

$$h_p = \frac{1}{C_p (M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2}) \sigma_m} (M_s^2 - \eta^2), \quad (15)$$

$$M_s^2 = M^2 - \frac{mM \ln R}{R} \cdot \frac{(\sigma_m / \sigma_{m0})^2}{(\sigma_m / \sigma_{m0})^2 + 1} \\ \sqrt{6\eta^{*2} + \frac{1}{3}(M^2 - \eta^2)^2 - 2aM(1 - R^*)\eta^* +} \\ (1 - \eta / M) \left[\sqrt{6Mb_r(M - \zeta)\eta^{*2}(2M^2 -} \right. \\ \left. 3\eta_{ij}\beta_{ij}) / (M^2 - \zeta^2 + \eta^{*2})(M^2 - \zeta^2) \right], \quad (16)$$

加载准则为:

$$\begin{cases} \Lambda > 0, \text{加载,} \\ \Lambda = 0, \text{中性加载,} \\ \Lambda < 0, \text{卸载.} \end{cases} \quad (17)$$

所提出模型涉及 8 个参数, 其中 5 个参数 M 、 e_0 、 λ 、 κ 和 ν 与修正剑桥模型中的参数相同. 其他 3 个参数分别为 m 、 a 和 b_r .

2 FLAC^{3D} 计算原理及二次开发过程

2.1 FLAC^{3D} 计算原理

与其他有限元程序相比, FLAC^{3D} 最大的不同在于采用显式积分法, 这意味着在求解过程中不需要求解复杂的刚度矩阵. FLAC^{3D} 计算每一个时步的计算原理和步骤如图 2 所示.

(1)根据牛顿第二定律, 通过已知的外力、质量和应力状态, 计算所有节点的加速度.

(2)通过时间积分, 基于当前时步的加速度和以前时步的速度和位移, 计算出当前时步的节点速度和位移.

(3)根据节点位移和速度更新结果, 利用空间导数计算各单元的应变率.

(4)通过高斯点积分, 根据单元的应力状态和几何特性, 计算各节点的内力.

(5)根据平衡方程, 即节点的合力等于零, 对所有节点进行力平衡求解.

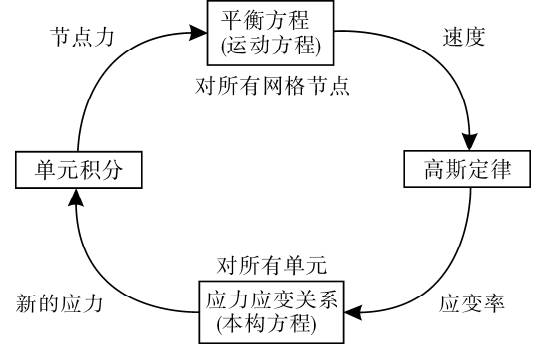


图 2 FLAC^{3D} 计算原理及步骤示意图

与其他有限元程序相比, FLAC^{3D} 采用混合离散法^[16], 把六面体单元划分为稳定的四面体单元, 避免了沙漏变形; 通过区别处理应力、应变的球张量和偏张量, 避免了临界破坏被高估的问题.

综上所述, FLAC^{3D} 采用显式积分法和混合离散法, 在解决非线性、大应变和不稳定问题方面具有较好的适应性和准确性.

2.2 二次开发

使用 Visual Studio 2017 软件, 参照 FLAC^{3D} 自带的修正剑桥模型对头文件(.h)、源文件(.cpp)进行修改. 编程完成后, 生成一个动态链接库文件(.dll). 将该文件复制到 FLAC^{3D} 的 Itasca\exe64\plugins\cmodel 目录下, 即可以通过命令 model configure plugin 调用该模型.

实现二次开发的关键在于正确修改 run() 函数. run() 函数主要内容是计算并更新应力和状态变量, 需要注意的是, run() 函数的计算是在子单元级别, 每次循环都对所有子单元进行调用. 其运行主要流程为:

(1)参数初始化(第 1 步之后参数由上一步更新得到).

(2)弹性试算, 根据主程序所给的应变增量计算应力增量.

$$\Delta p = K d\boldsymbol{\varepsilon}_v^e = K d\boldsymbol{\varepsilon}_v, \quad (18)$$

$$\Delta q = 3G d\boldsymbol{\varepsilon}_s^e = 3G d\boldsymbol{\varepsilon}_s. \quad (19)$$

(3)判断是否发生塑性应变. 根据式(14)计算 Λ , 若 $\Lambda > 0$, 则加载, 进入第 4 步; 若 $\Lambda < 0$ 则卸载, 进

入第5步.

(4)计算塑性体积应变, 对试算应力进行塑性修正.

$$d\varepsilon_v^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial p}, \quad (20)$$

$$d\varepsilon_s^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial p}, \quad (21)$$

$$\Delta p = K d\varepsilon_v^c = K (d\varepsilon_v - d\varepsilon_v^p), \quad (22)$$

$$\Delta q = 3G d\varepsilon_s^c = 3G (d\varepsilon_s - d\varepsilon_s^p). \quad (23)$$

(5)更新子单元应力、应变并返回给主程序.

$$p^n = p^o + \Delta p, \quad (24)$$

$$q^n = q^o + \Delta q, \quad (25)$$

式中: n 和 o 分别表示更新前和更新后.

(6)将所有子单元应力、应变、塑性体变按体积加权平均赋值给单元.

(7)更新并存储单元应力、应变、塑性体变.

(8)参照式(8)、(9)和(12), 更新并存储超固结、结构性和各向异性 3 个参数.

3 本构测试与验证

3.1 与修正剑桥模型的比较

CM 模型与 FLAC^{3D} 自带的修正剑桥模型性能的定量比较结果如图 3~5 所示.

本文考虑了两种类型的测试. 首先是一维固结试验, 从 98 kPa 的垂直载荷开始. 其次是排水三轴压缩试验, 围压为 98 kPa.

模拟使用的参数和初始条件: 压缩指数 0.05、膨胀指数 0.012、临界状态应力比 1.0、初始(98 kPa 时)孔隙比 1.02、泊松比 0.30、超固结发展参数 1.0、结构性发展参数 1.0、各向异性发展参数 0、超固结(OCR)为 5、初始结构性(str)为 0.2、初始各向异性(ζ_0)为 0.

图 3~4 展示了只考虑超固结的情况. 可以看出, CM 模型可表示一维固结试验土压缩曲线(e - $\log p$)和三轴试验中土样的应力—应变—剪胀曲线; 与修正剑桥模型相比, CM 模型可以从超固结状态平稳过渡到正常固结状态, 更加符合实际情况^[17].

图 5 中虚线为只考虑结构的模拟结果. 从图 5 可知, CM 模型能够较好地描述正常固结黏土的典型特征, 即大体积压缩伴随着剪切过程中的应变硬化. 修正剑桥模型无法描述这种行为, 即在应变

为 2%~5% 时, 土体由于结构破坏而发生应变硬化和体积压缩.

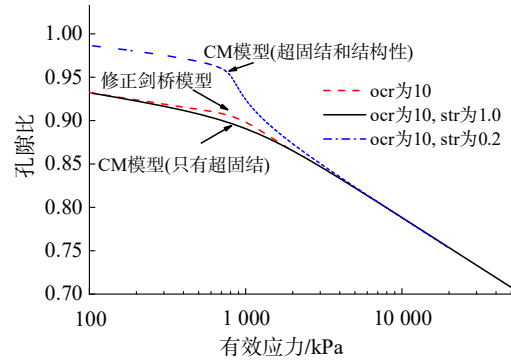


图 3 一维固结模拟试验中修正剑桥模型与 CM 模型的结果比较(超固结和结构性土)

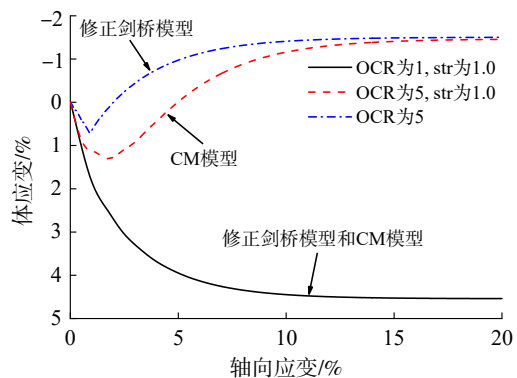
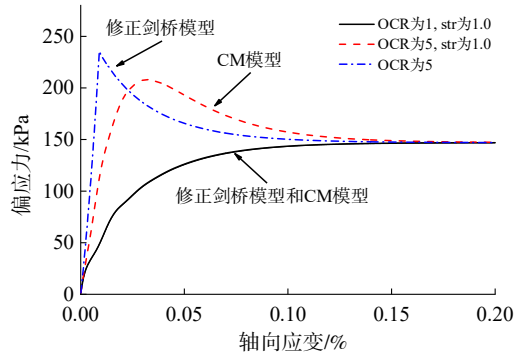
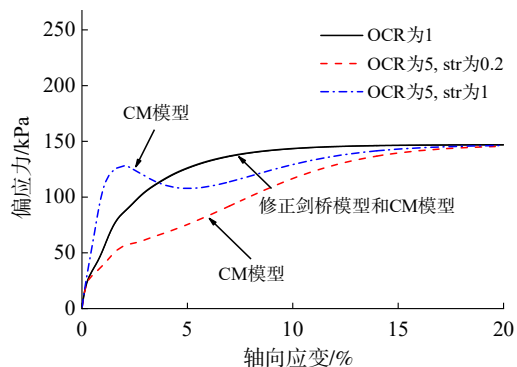


图 4 排水三轴模拟试验中修正剑桥模型与 CM 模型的结果比较(超固结土)



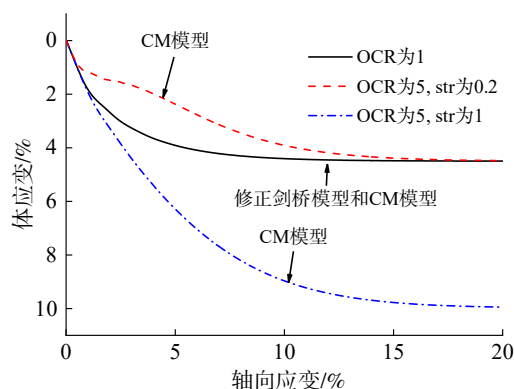


图5 排水三轴模拟试验中修正剑桥模型与CM模型的结果比较(超固结和结构性土)

综上, CM模型不仅可以描述土体从超固结状态到正常固结状态的平滑过渡,而且可以描述修正剑桥模型无法呈现的土壤结构被破坏过程。

3.2 不同应力路径试验分析

为了验证二次开发的准确性,本文测试了不同应力路径条件下FLAC^{3D}的表现,并与CM本构理论值进行对比。测试路径类型包括各向同性固结、一维固结、三轴排水压缩、三轴不排水压缩和三轴不排水交变加载试验,理论值和FLAC^{3D}结果分别用散点和折线表示。用于模拟土体材料的参数和初始状态为:压缩指数0.05、膨胀指数0.012、临界状态应力比1.0、初始(98 kPa时)孔隙比1.02、泊松比0.30、超固结发展参数0.5~3.0、结构性发展参数0.1~2.0、各向异性发展参数0、超固结2~20、初始结构性0.05~0.5、初始各向异性0。

图6为不同初始超固结土体各向同性固结试验的模拟结果。

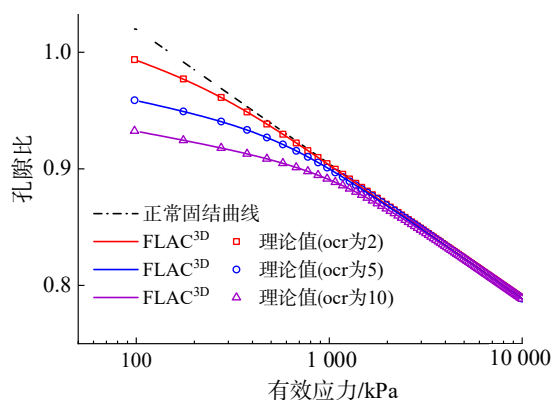


图6 不同初始超固结土各向同性固结试验

从图6可见,初始超固结越大的土样,其孔隙比越小,说明超固结大的土体颗粒间接触更加紧

密。随着固结压力逐渐增大,不同初始超固结土样的固结曲线逐渐靠近正常固结曲线,最终趋于重合,表明土样最终变为正常固结土。

图7为不同初始结构性土的一维固结试验模拟结果。从图7可见,本模型很好地模拟了结构性土的固结特性。由于结构性的存在,土体可以在较大的孔隙比下存在,当结构性较大时,土体出现了应变软化趋势。这与文献[18]对不同结构性土所进行的固结不排水试验结果相似,当试样结构性较大时,试样在核定应变率下固结会发生应变软化现象。

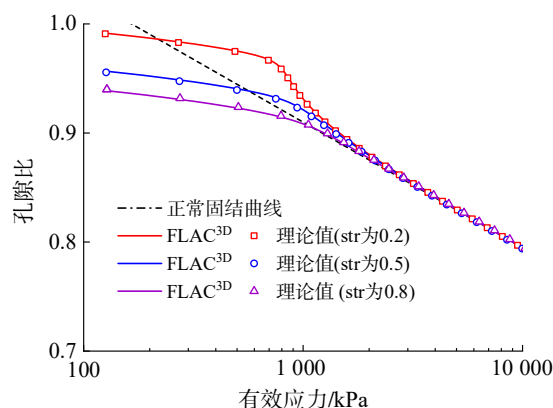


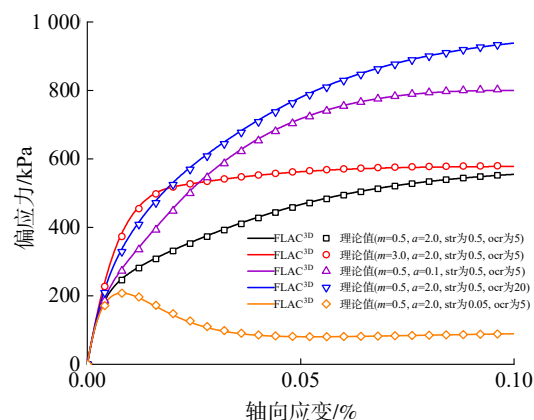
图7 不同初始结构性土各向同性固结试验

图8为不排水三轴压缩试验。在不排水实验中,由于体积变化为零,剪缩会产生正的超孔隙压力,而剪胀会产生负的超孔隙压力。由于结构性较强的土样(第5组)含有较大的孔隙比,加载时会出现明显的孔隙收缩,因此会产生较大的正超孔隙压力,导致强度急剧减小,即应变软化程度很大。当其他参数不变时,初始超固结和 a 值越大,土体的峰值强度就越大,在相同轴向应变下, m 值越大,土体的剪切强度越大。

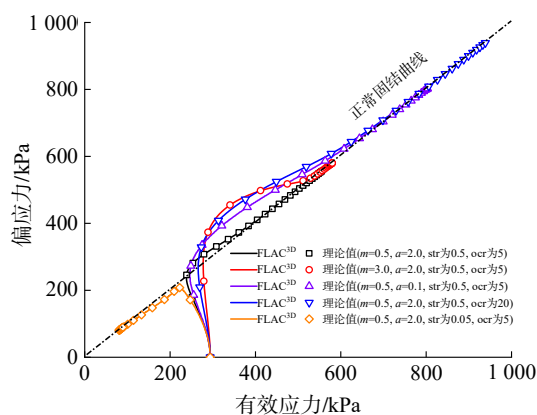
图9为土样在三轴排水试验中的模拟结果。从图9可发现,所有土样达到临界状态时,应力差趋于一致;超固结的消散会引起剪切膨胀,结构性的消散会引起剪切压缩。第1、3、4组土样随着剪应变增大,土样先发生剪切压缩,随后又趋向剪切膨胀,这是由于超固结消散的速度逐渐大于结构性消散速度;第2、5组土样随着剪应变增大,土样先发生一定的剪切膨胀,随后趋向剪切压缩,这是由于在剪切前期结构性消散速度小于超固结消散速度。结合图8和图9可知,超固结和结构性对土体

应力应变关系都会产生影响, 土的结构性越强, 在排水和非排水条件下受压时强度下降越大, 这与宋晶等^[13]在实际工况中得到的结论一致。

图 10 为不同 m 和 a 值试样在不排水三轴循环加载条件下的力学特性模拟结果。从图 10 可知, 通过改变 m 和 a 值, 可以明显看出砂性土和黏性土

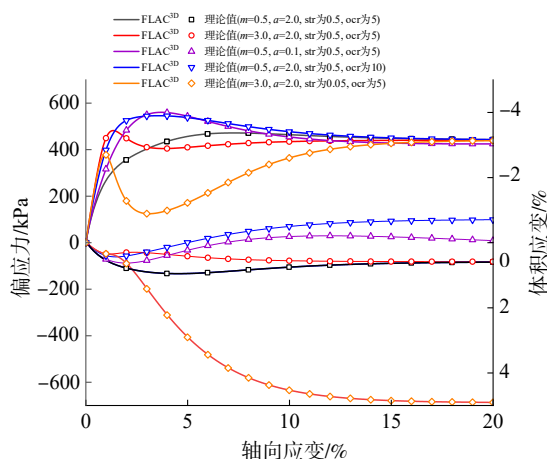


(a) 应力应变



(b) 有效应力路径

图 8 三轴不排水压缩试验



(a) 应力应变及剪胀特性

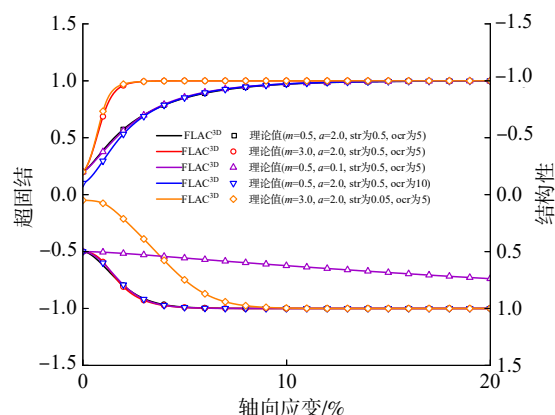
(b) 状态变量 R 和 R^* 的变化

图 9 三轴排水压缩试验

之间的差异。例如, 当 m 为 0.1、 a 为 3.0 时, 超固结消散很慢而结构性消散很快, 表现出砂性土典型的交变移动性的力学特性; 而当 m 为 1.0、 a 为 0.1 时, 超固结消散很快而结构性消散很慢, 表现出典型的黏土在交变加载时的力学特性。这个结果与 Asaoka 等^[19]提出的观点一致, 即黏性土和砂性土的区别取决于剪切时超固结消散速度和结构性消失速度。

用于模拟的土体材料参数和初始状态为: 压缩指数 0.20、膨胀指数 0.065、临界状态应力比 1.0、初始(98 kPa 时)孔隙比 0.98、泊松比 0.30、超固结发展参数 0.1~3.0、结构性发展参数 3.0~1.0、各向异性发展参数 1.5、超固结 2、初始结构性 0.5、初始各向异性 0。此外可以看到, 对于所有试验的模拟, FLAC^{3D} 模拟结果和理论值完全重合。

3.3 试验验证

3.3.1 固结与排水三轴试验

对上海 2~6 层黏土的力学行为进行数值模拟, 试验数据取自文献[20]。图 11 为一维固结试验与模拟结果对比, 图 12 为排水三轴压缩试验与模拟结果对比, 图 11 和图 12 中实验数据和模拟数据分别用散点和折线表示。

用于模拟的黏土参数和初始条件见表 1 和表 2。试验结果得到的主要结论如下:

(1) 从图 11 可见, 第 3 层和第 4 层软黏土的压缩性最高, 第 2 层和第 6 层的相对硬黏土压缩性最低, 第 5 层压缩性中等。再次证明超固结和结构性对土体力学应力应变关系影响很大。

(2) 根据图 12 的数据, 各层的偏应力在达到峰

值时对应的近似轴向应变为:第2层和第6层为5%至10%,第5层为15%,第3层和第4层为大于20%。每层的近似最终压缩体积应变为:第2层和第6层为3%,第5层为6%,第3层和第4层为大于12%。需要说明的是,对于结构性较大的黏土(第3层和第4层),该模型能够准确地模拟其整体行为,包括由结构性破坏引起的较大体积变化。另外,第5层是超固结且结构性较小的黏土,其行为

也能用该模型表示。

(3)根据图中 e - $\log p$ 曲线与应力—应变剪胀关系可知,新模型可以捕捉到超固结黏土(第2层和第6层)的总体趋势。 e - $\log p$ 曲线很好地模拟了从超固结到正常固结状态的平稳变化。应力应变剪胀关系准确地描述了土体偏应力和体积应变的变化。综上表明,二次开发的CM模型能够很好地模拟上海黏土的力学行为。

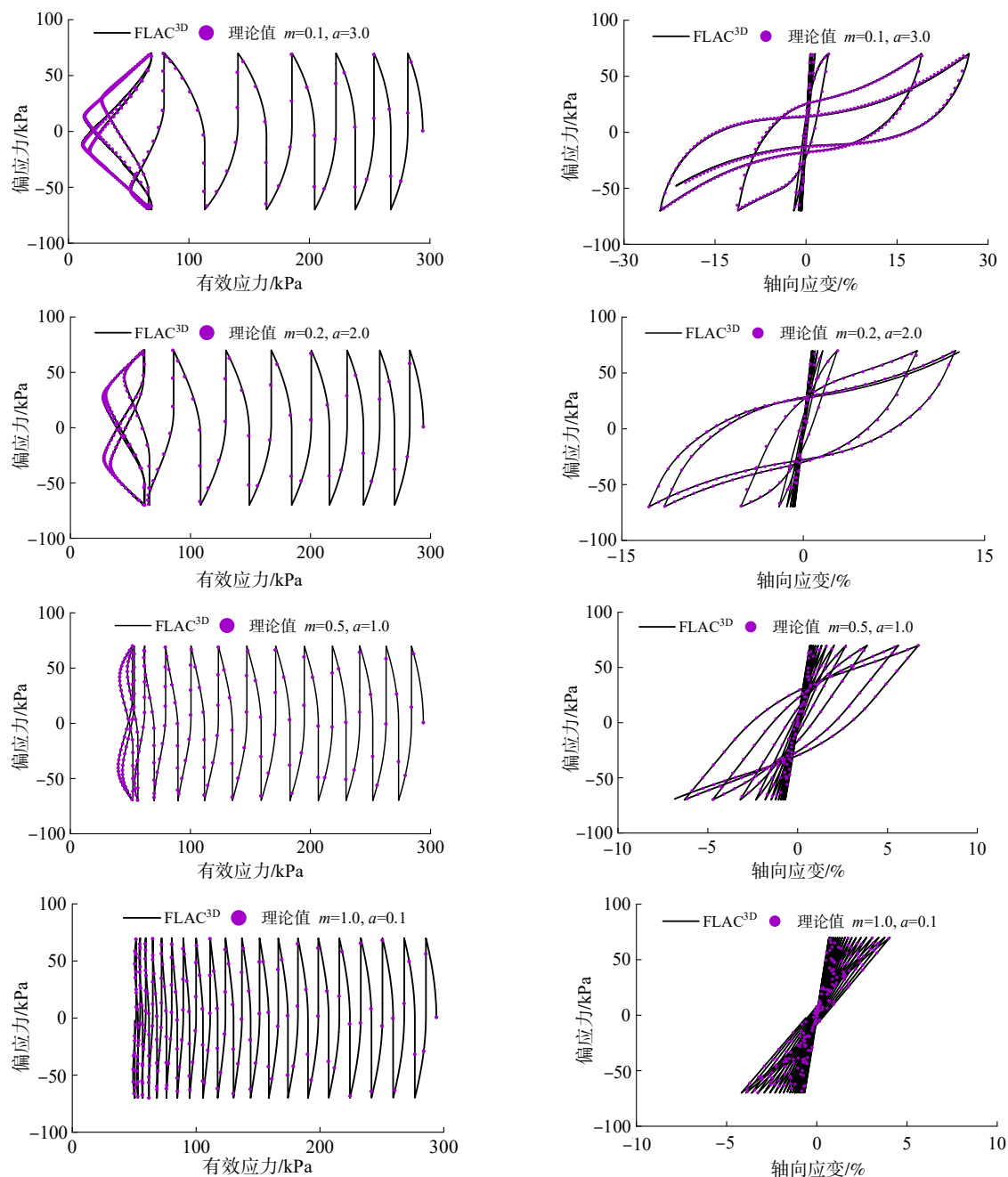


图10 三轴不排水交变加载条件下砂性土和黏性土的力学特性差别

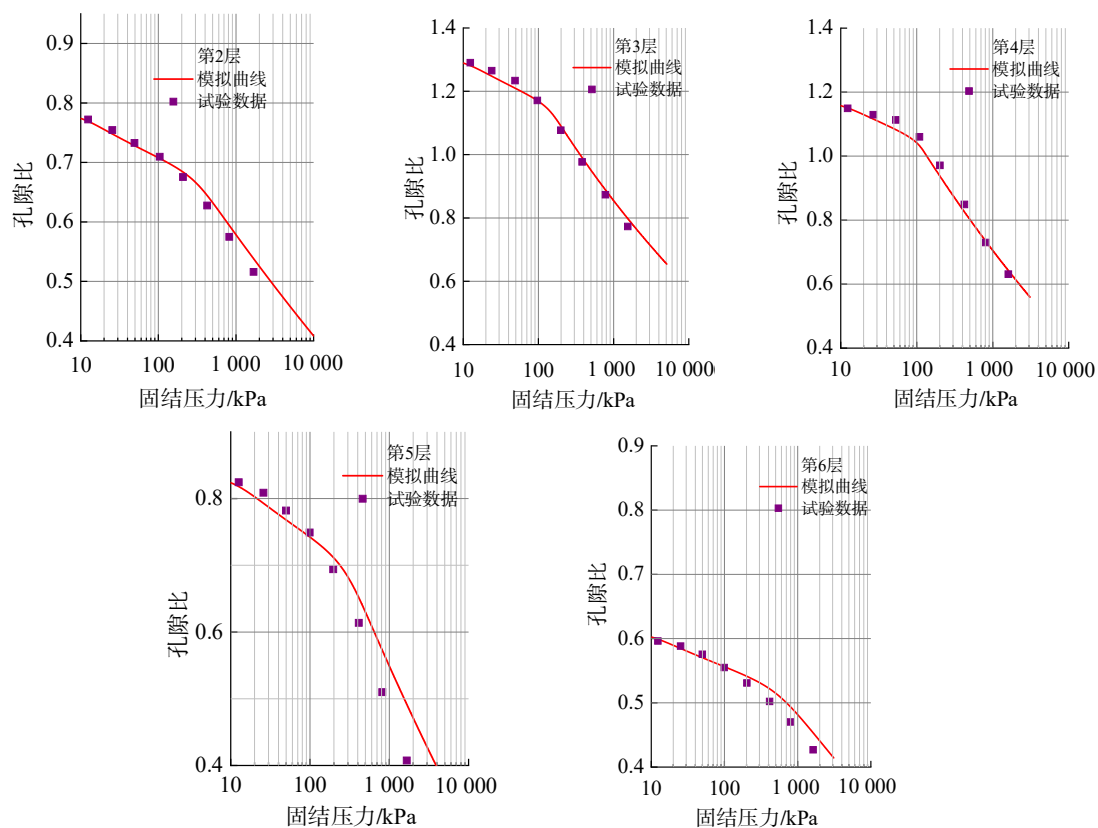
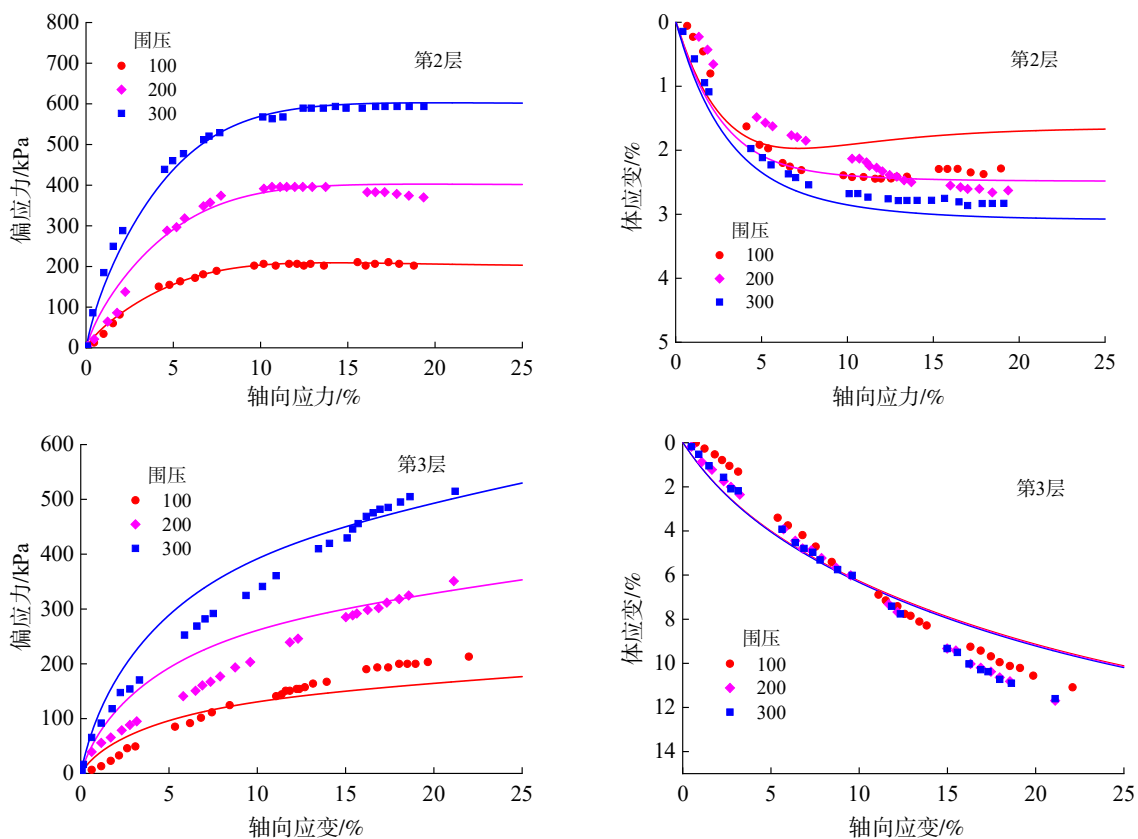


图 11 上海黏土 2~6 层土样一维固结试验与模拟结果



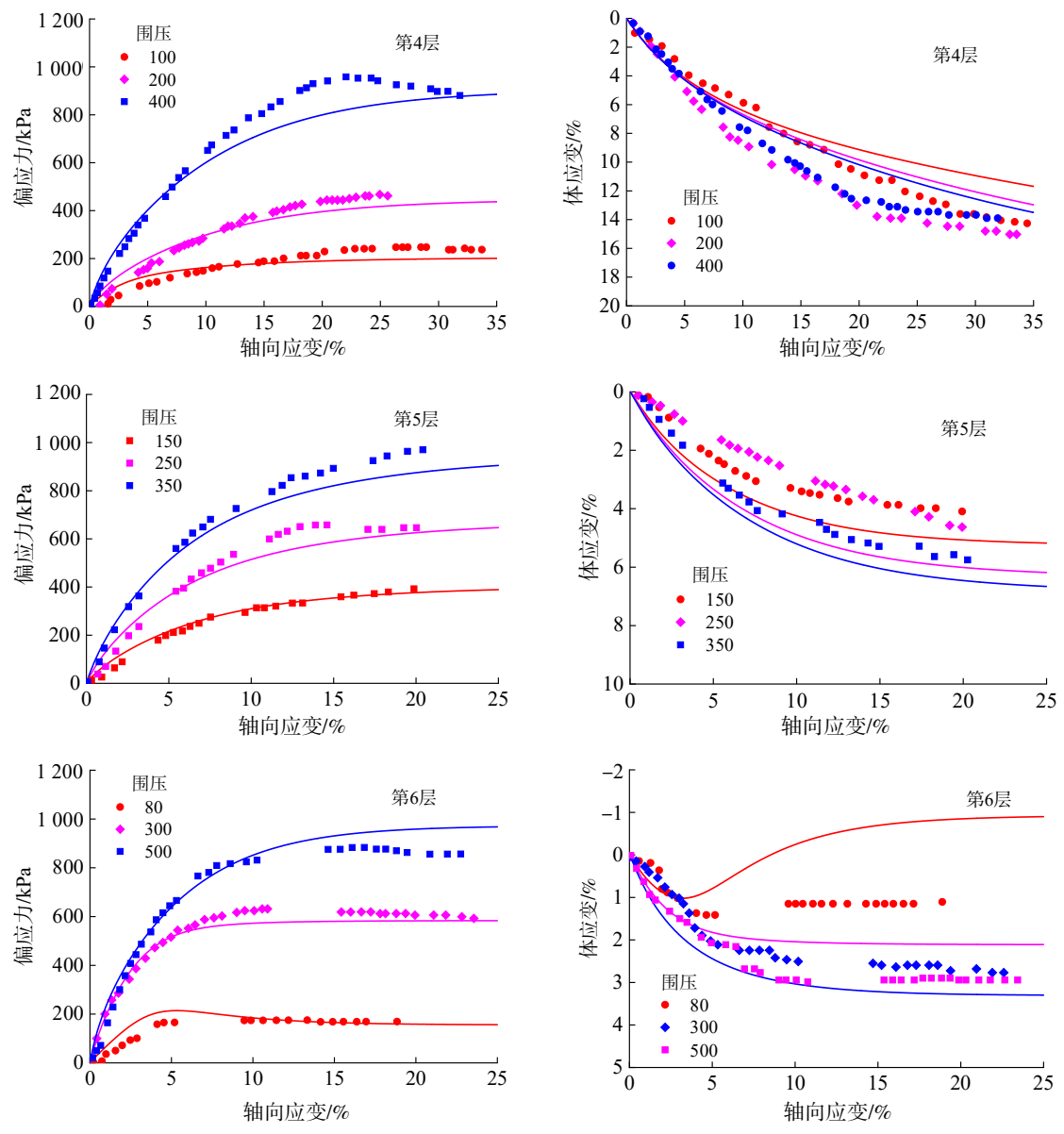


图 12 上海黏土 2~6 层土样排水三轴压缩试验与模拟结果

表 1 上海黏土材料参数

参数	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
压缩指数	0.087	0.132	0.140	0.135	0.070
膨胀指数	0.020	0.020	0.020	0.019	0.017
临界状态应力比	1.20	1.30	1.30	1.42	1.18
孔隙比	0.757	1.080	0.860	0.815	0.630
泊松比	0.32	0.38	0.38	0.35	0.32
超固结发展参数	0.7	4.0	5.0	1.5	1.5
结构性发展参数	1.0	0.4	0.1	2.0	1.0
各向异性发展参数	0	0	0	0	0

表 2 上海黏土初始状态

参数	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层
超固结	150	65	80	220	410
初始结构性	1.0	0.3	0.2	0.6	1.0
初始各向异性	0	0	0	0	0

3.3.2 不排水三轴循环加载试验

对 Toyoura 砂的不排水三轴循环加载试验进行了数值模拟, 试验数据取自文献[21]. Toyoura 砂的初始状态见表 3. 材料参数为: 压缩指数 0.05、膨胀指数 0.006 4、临界状态应力比 1.3、初始(98 kPa 时)孔隙比 0.87、泊松比 0.30、超固结发展参数 0.01、

结构性发展参数 0.5、各向异性发展参数 1.5.

表3 Toyoura 砂初始状态

参数	剪切应力比		
	0.15	0.20	0.25
超固结	70	70	70
初始结构性	0.75	0.75	0.75
初始各向异性	0	0	0
初始有效应力	98	98	98
初始孔隙比	0.81	0.81	0.81

图 13 显示了 3 个不同振幅($q/2p_0$ 分别为 0.15、0.20 和 0.25, p 为有效应力, q 为偏应力)不排水三轴循环加载试验结果. 从图 13 可见, 由于样品是中密砂, 因此在所有 3 次试验中 Toyoura 砂都发生了交变移动特性, 并且循环加载的振幅越大, 样品进入交变移动的速度越快, 表现出砂土的典型特性.

图 14 展示了不排水三轴循环加载试验的理论模拟结果. 模型预测的有效应力路径与应力应变

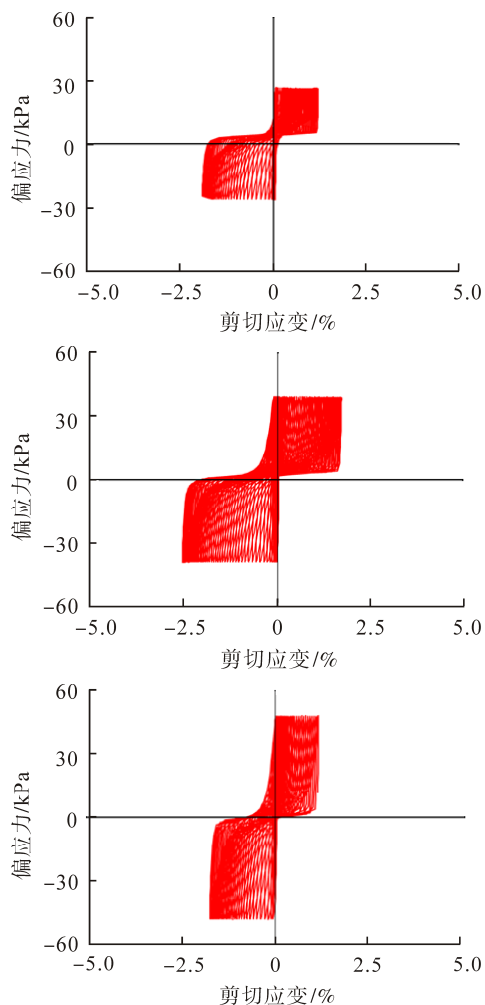
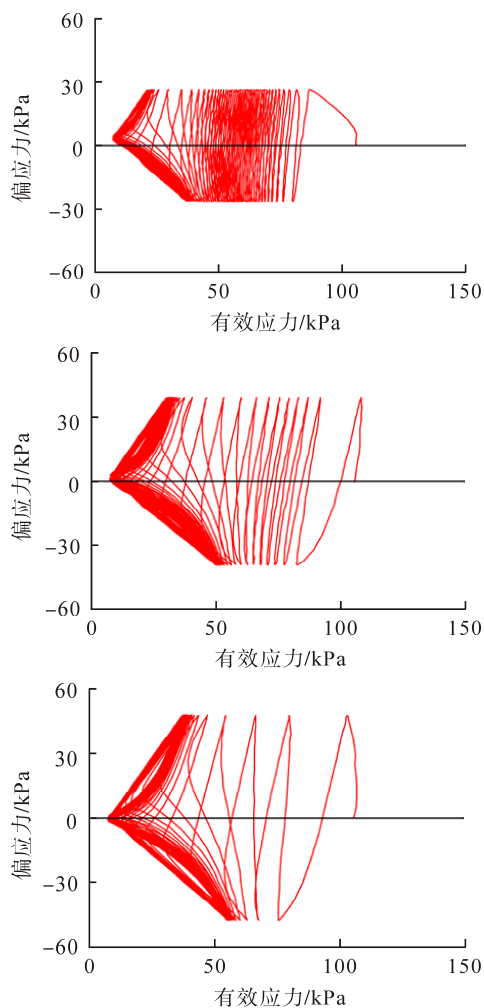
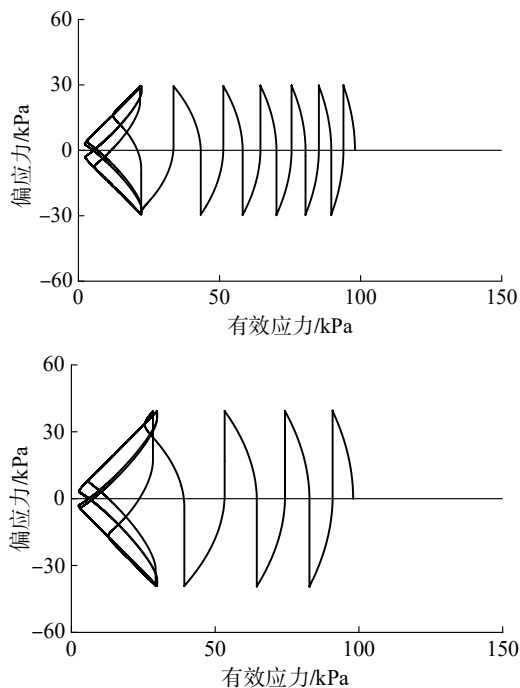


图 13 不同剪切比不排水三轴循环加载试验结果



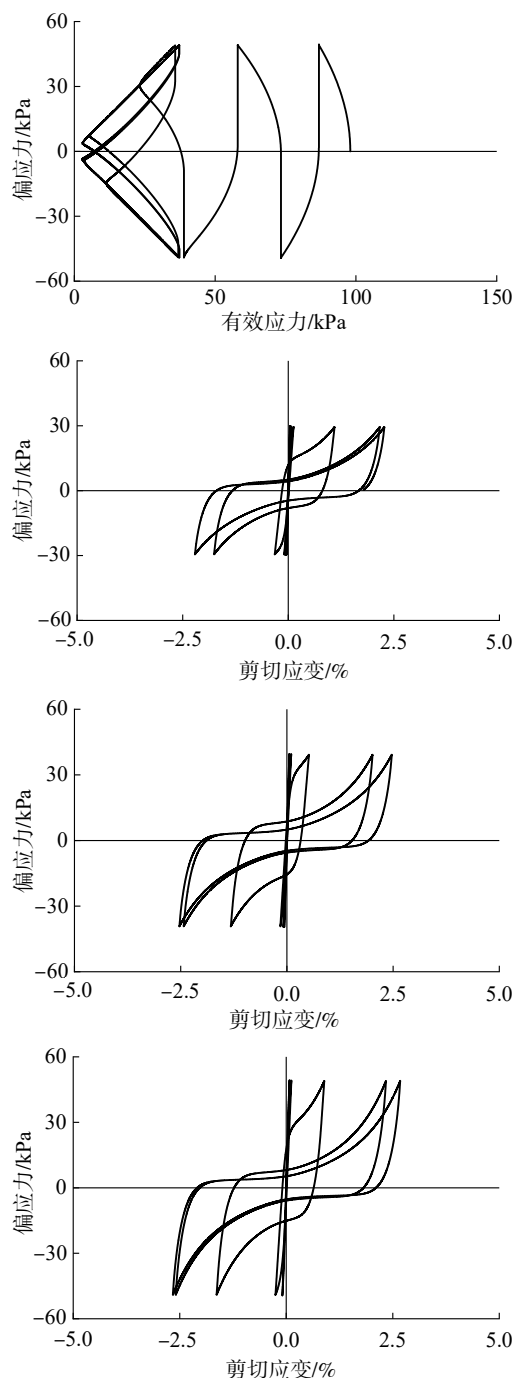


图 14 不同剪切比不排水三轴循环加载试验理论模拟关系在定性分析与实验结果一致,但引起交变移动的加载循环次数小于实验结果,证明二次开发的模型能够较好地模拟 Toyoura 砂动力行为。

4 结论

(1)超固结和结构性都会对土的应力应变关系产生显著影响,而 CM 本构模型能够统一描述不同

超固结和结构性土体的力学特性。

(2)FLAC^{3D}二次开发的 CM 本构模型在不同应力路径下的计算结果能够完全对应 FORTRAN 程序计算值,验证了本次开发的正确性。

(3)FLAC^{3D}二次开发的 CM 模型可以较好地模拟上海黏土一维固结试验、三轴排水压缩试验和 Toyoura 砂不排水三轴循环加载试验,表明该模型能够较好地预测土体的力学行为。

本文仅进行了单元试验模拟,后续将基于 FLAC^{3D}把 CM 模型应用到基坑、隧道等实际工况中,以检验其正确性。

参考文献:

- [1] 罗爱忠,方娟. 基于 FLAC^{3D} 黄土的湿载结构性本构模型二次开发[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3):120-125.
- [2] 蒋邦友,谭云亮,王连国,等. 基于 Mogi-Coulomb 准则的弹塑性损伤本构模型及其数值实现[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(4):784-792.
- [3] 赵立财. 含水砂岩蠕变损伤模型的二次开发及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9):105-112, 120.
- [4] 左双英,肖明,陈俊涛. 基于 Zienkiewicz-Pande 屈服准则的弹塑性本构模型在 FLAC^{3D} 中的二次开发及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(11):3515-3520.
- [5] 杨杰,尹振宇,金银富,等. 结构性黏土模型在 FLAC 中的二次开发及应用[J]. 计算力学学报, 2017, 34(6): 739-747.
- [6] 林志远,熊传祥,谢永宁,等. 黏土广义塑性模型在 FLAC^{3D} 中的数值实现与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(3):159-165.
- [7] 柳军修,尹振宇,杨杰,等. 结构性黏土界面模型在 FLAC^{3D} 中的开发及隧道施工数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6):1277-1286.
- [8] 邹佑学,王睿,张建民. 砂土液化大变形模型在 FLAC^{3D} 中的开发与应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1525-1534.
- [9] JIN Y F, YIN Z Y, SHEN S L, et al. Selection of sand models and identification of parameters using an enhanced genetic algorithm[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(8):1219-1240.
- [10] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. Discussion: the general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. Géotechnique, 1991, 41(2):281-284.
- [11] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新

- 途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6):651-656.
- [12] 陈贺欣, 陆国, 沈银斌, 等. 超固结比对合肥硬黏土剪胀特性的影响研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(4):529-534.
- [13] 宋晶, 叶冠林, 徐永福, 等. 考虑固结历史的结构性软土路基沉降数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(3):1037-1046.
- [14] ZHANG F, YE B, NODA T, et al. Explanation of cyclic mobility of soils: approach by stress-induced anisotropy[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(4):635-648.
- [15] YE G L, LENG J, JENG D S. Numerical testing on wave-induced seabed liquefaction with a poro-elastoplastic model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 105:150-159.
- [16] MARTI J, CUNDALL P. Mixed discretization procedure for accurate modelling of plastic collapse[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1982, 6(1):129-139.
- [17] WOOD D M, BELKHEIR K. Strain softening and state parameter for sand modelling[J]. Géotechnique, 1994, 44(2):335-339.
- [18] 凌道盛, 李奖, 王文军, 等. 人工制备土的结构性及其对应变局部化的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(9):1689-1696.
- [19] ASAOKA A, NAKANO M, NODA T, et al. Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(3):75-85.
- [20] YE G L, YE B. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling[J]. Underground Space, 2016, 1(1):62-77.
- [21] ZHANG F, JIN Y, YE B. A try to give a unified description of toyoura sand[J]. Soils and Foundations, 2010, 50(5):679-693.

Secondary development of CM elastoplastic constitutive model based on FLAC^{3D}

XING Jiahao, XIONG Yonglin

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Overconsolidation and structural properties are two typical mechanical properties of natural soil, while the explicit finite difference program FLAC^{3D} lacks a unified constitutive model to describe these two characteristics due to its lack of diverse constitutive libraries. In order to expand the application scope of FLAC^{3D} and more accurately simulate the mechanical properties of soil, the cyclic mobility elastic-plastic constitutive model was developed in C++ based on the built-in secondary development platform. Firstly, the basic formula of the model was derived, and secondly, the working principle and key development steps of FLAC^{3D} were introduced. Subsequently, such development was verified by comparing the theoretical values of FLAC^{3D} and the constitutive equation through tests under different stress paths. Finally, by simulating one-dimensional consolidation test data, triaxial drained compression test data, and undrained triaxial cyclic loading test data, it was verified that the secondary development model can effectively simulate the mechanical behavior of soil.

Key words: overconsolidation; structural; FLAC^{3D}; elastoplastic constitutive model

(责任编辑 史小丽)