

多孔介质中化学 - 热 - 水力 - 力学耦合过程 本构模型和数值模拟

A constitutive model and numerical simulation for coupled chemo-thermo-hydro-mechanical process in porous media

刘泽佳, 李锡夔, 武文华

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 本文发展了一个多孔介质中的化学 - 热 - 水力 - 力学 (CTHM) 耦合本构模型。该模型基于文献[1]中多孔介质热 - 水力 - 力学 (THM) 本构模型、文献[2, 3]中的污染物传输本构模型和文献[4]提出的化学 - 力学本构模型。在本构模型中引入化学软化函数以模拟孔隙水中有机污染物对多孔介质力学性质的影响。考虑了温度对污染物传输机制的影响。本文 CTHM 耦合本构模型已在多孔介质的热 - 水力 - 力学 - 污染物传输数学模型中建立。在 CTHM 本构模拟框架中对计及化学塑性效应、描述在热 - 水力 - 污染物传输耦合作用下多孔介质力学行为、在应力 - 吸力 - 温度四维空间中包含了五重屈服面的耦合本构模型发展了一致性切线模量矩阵。数值结果突出显示了污染物浓度在多孔介质化学 - 热 - 水力 - 力学 (CTHM) 耦合系统中的影响。

关键词: 多孔介质; 化学塑性; 污染物传输; 本构模型; 耦合

中图分类号: TU 43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2004)06 - 0797 - 07

作者简介: 刘泽佳(1975 -), 男, 山东平度人, 博士生, 2002 年 3~7 月和 2003 年 5~10 月赴比利时列日大学土木和环境工程系合作研究, 主要从事饱和、非饱和土的有限元分析及本构数值模拟。

LIU Ze-jia, LI Xi-kui, WU Wen-hua

(The State Key Laboratory for Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A coupled chemo-thermo-hydro-mechanical (CTHM) constitutive model of porous media is developed in this paper. The model is developed on the basis of the following existing component constitutive models for porous media, i.e., the thermo-hydro-mechanical (THM) constitutive model presented in Reference[1], the constitutive model of contaminant transport presented in References[2,3] and the chemo-mechanical constitutive model presented in Reference[4]. The chemo-softening function is introduced into the constitutive model to simulate the effects of organic contaminants in pore water on the mechanical properties of the porous media. The effect of temperature on the mechanism governing contaminant transport in porous media is considered. The present coupled CTHM constitutive model has been integrated into the coupled thermo-hydro-mechanical mathematical model including contaminant in porous media. Within the framework of CTHM constitutive model, a consistent tangent modulus matrix for the fivefold yield surfaces in the four dimensional stress-suction-temperature space, describing the mechanical behavior of porous media coupled with thermo-hydro process and contaminant transport and taking into account the chemo-plastic effect, is derived. The numerical results are illustrated to particularly emphasize the effects of the contaminant concentration on the coupled CTHM system in porous media.

Key words: porous media; chemo-plasticity; contaminant transport; constitutive model; coupling

0 前 言

人们已经认识到工业废弃物和生活垃圾腐烂过程中产生的化学物质会对工程土障的水力、力学性质产生不利的影响。污染物的存在引起了孔隙水的电 - 化学性质变化, 导致了土体微观结构和构造的变化, 产生导致土体体积、孔隙度和水力渗透性变化的化学应变^[4]。

Fernandez和Quigley^[5]作了一系列实验, 研究了Sarnia土在有机物污染物影响下水力、力学性质的变

化, 实验结果表明, 常应力状态下的固结压力是污染物质量浓度的单调下降函数。Hueckel^[4]在此基础上提出了孔隙水中只含有一种水融性有机物的等温化学塑性公式, 建立了固结压力的化学软化函数, 以此来描述实验中所观测到的化学软化现象。

Thomas^[6]、Schrefler^[7]分别建立了多孔介质的热 - 水力 - 力学 (THM) 数学模型。李锡夔和武文华等

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50278012, 10302005); 国家 973 资助项目 (2002CB412709)

收稿日期: 2003 - 12 - 29

[8]、Schrefler^[9]、Thomas^[10]分别建立了污染物传输问题与THM系统耦合的THMC数学模型及相应数值方法。

Alonso和Gens等^[11]在Cam-Clay模型基础上引入了吸力影响并提出了非饱和多孔介质的Alonso-Gens本构模型。武文华和李锡夔等在Alonso和Gens等提出的非饱和多孔介质本构模型基础上,建立了一个包含五个屈服面的多孔介质热-水力-力学本构模型^[1]。

本文基于李锡夔和武文华等的THMC数学模型^[2,3,8],进一步考虑了孔隙水中有机污染物对多孔介质力学行为的影响及温度对溶液中污染物传输机制的影响,发展了非等温污染物传输分模型、计及更完全耦合效应的THMC数学模型及相应数值方法;在武文华和李锡夔等建立的考虑温度影响的多孔介质的水力-力学CAP类型的THM本构模型^[1]基础上,考虑了多孔介质孔隙水中化学物质对多孔介质力学性质的影响,引入污染物浓度对前期固结压力的软化函数,提出了溶液中污染物浓度对多孔介质内聚力的硬化/软化公式,建立了化学-热-水力-力学(CTHM)耦合的本构模型。本文数学模型适用于土和混凝土等一般意义的饱和、非饱和和多孔介质,而本文算例则仅针对土这一种特定的多孔介质。

1 化学塑性的基本概念

在数学模型和本构模型中假定孔隙水中仅存在一种有机溶质和污染物,并定义孔隙水中污染物质量浓度 c 为

$$c = \frac{m_c}{m_f}, \quad (1)$$

式中 m_f, m_c 分别为单位体积孔隙水溶液的质量和其中污染物质量。

Fernandez等^[5]的实验表明,弹性阶段浓度增大将引发可逆的膨胀化学弹性应变;发生屈服以后浓度的增大会引起不可逆的压缩化学塑性应变。Hueckel建立了化学弹性应变与孔隙水溶液中污染物浓度之间的关系,化学弹性应变速率与浓度变化速率的关系为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{c,e} = -\frac{\beta \dot{c} \delta_{ij}}{3} = D_{ij}^{c,e} \dot{c}, \quad (2)$$

式中 β 为化学膨胀系数,是浓度的标量函数,它与浓度的关系:

$$\beta = F_0 \beta_0 \exp[\beta_0(1-c+\ln c)] \left(\frac{1}{c} - 1 \right), \quad (3)$$

式中 β_0 是由实验确定的依赖于污染物性质的材料参数; $-F_0$ 为单位污染物浓度产生的最大化学弹性体积

应变的值。化学塑性应变率与浓度变化速率的关系为:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{c,p} = D_{ij}^{c,p} \dot{c} \quad (4)$$

式中 $D_{ij}^{c,p}$ 的数值由塑性势函数确定。

2 多孔介质的化学-热-水力-力学本构模型

本文建立的多孔介质的化学-热-水力-力学(CTHM)耦合本构模型基于考虑温度影响的多孔介质的水力-力学本构模型-CAP模型^[1],考虑了污染物浓度对多孔介质力学性质的影响,由五个屈服面组成:状态界面(SBS);临界状态线(CSL);吸力增加曲线(SI);最大拉伸球应力约束方程(TM);热屈服曲线(TYC)。

2.1 状态界面(SBS)方程^[1,11]

状态界面方程在 (I_σ, II_σ) 平面上是一个椭圆的上半部分,考虑污染物浓度、温度、吸力影响的状态界面方程的表达式为

$$\begin{aligned} f_1 &= II_\sigma^2 + m^2(I_\sigma - 3p_s(\bar{\epsilon}^p, s, T, c)) \\ (I_\sigma + 3p_{0c}(\epsilon_v^p, s, T, c)) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 I_σ 和 II_σ 分别为第一、第二应力不变量; m 为内摩擦角 φ 的函数:

$$m = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}}, \quad (6)$$

$p_s(\bar{\epsilon}^p, s, T, c)$ 为依赖于等效塑性应变、温度、吸力、浓度的内聚力

$$\begin{aligned} p_s(\bar{\epsilon}^p, s, T, c) &= p_s(0, T_r) + \\ &\frac{(c_f - c_0) \bar{\epsilon}^p}{B_p + \bar{\epsilon}^p} + k_{ps}(\Delta T) s + k_{pc} c, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $c_f, c_0, B_p, k_{ps}(\Delta T), k_{pc}$ 均为依赖于材料性质的实验参数, c_f, c_0, B_p 决定了等效塑性应变 $\bar{\epsilon}^p$ 对内聚力的软化/硬化作用; $k_{ps}(\Delta T), k_{pc}$ 分别反映了吸力、浓度对内聚力的硬化/软化作用; ΔT 是当前温度和参考温度 T_r 的差值; $p_s(0, T_r)$ 为 $s=0, c=0, T=T_r$ 时的内聚力; $p_{0c}(\epsilon_v^p, s, T, c)$ 为多孔介质在吸力、温度、污染物浓度共同作用下的固结压力:

$$p_{0c}(\epsilon_v^p, s, T, c) = p_0(\epsilon_v^p, s, T) S(c), \quad (8)$$

式中 $S(c)$ ^[4]为浓度对固结压力的化学软化函数,基于Fernandez和Quigley的实验结果, Hueckel定义

$$S(c) = \exp(-\alpha_c c), \quad (9)$$

式中 α_c 为软化系数,是由实验确定的材料常数。 $p_0(\epsilon_v^p, s, T)$ 是多孔介质在 $c=0$ 时的前固结压力,它对温度、饱和度和塑性体积应变的依赖关系遵从Loading-Collapse(LC)曲线^[1,11]。

2.2 临界状态线 (CSL) ^[12]

Drucker-Prager 屈服准则定义的屈服面在 π 平面上为一个圆、在主应力空间中为一圆锥面、在 $I_\sigma - II_{\hat{\sigma}}$ 应力平面上为一条直线, 即临界状态线。与吸力、温度、浓度相关的临界状态线方程可表示为

$$f_2 = II_{\hat{\sigma}} + m(I_\sigma - 3p_s(\bar{\epsilon}^p, s, T, c)) = 0 \quad (10)$$

2.3 最大拉伸球应力约束方程 (TM) ^[11]

最大拉伸球应力约束方程可表示为在 $I_\sigma - II_{\hat{\sigma}}$ 应力平面上平行于 $II_{\hat{\sigma}}$ 坐标轴的直线:

$$f_3 = I_\sigma - 3\sigma_1 = 0 \quad (11)$$

式中 σ_1 是作为材料参数的最大拉伸球应力。

2.4 吸力增加 (SI) ^[1,11]

考虑温度影响的非饱和多孔介质吸力增加屈服条件可表示为

$$f_4 = s - [s_0 + (Se)^{k1}(s_1(\epsilon_v^p, \Delta T) - s_0)] = 0 \quad (12)$$

式中 s_0 是参考温度 T_r 下多孔介质所经受过的最大吸力, $k1$ 为经验系数, s_1 为当前的吸力值, S_e 为有效饱和度。

2.5 温度屈服曲线 (TYC) ^[11]

温度屈服曲线用一条直线表示为

$$f_5 = T - T_0 = 0 \quad (13)$$

多孔介质的化学 - 热 - 水力 - 力学本构模型的屈服面较复杂, 其中的热 - 水力 - 力学本构模型的屈服面在文献中已有展示^[11], 本文中如图 1 所示, 只显示污染物浓度对屈服面的影响。

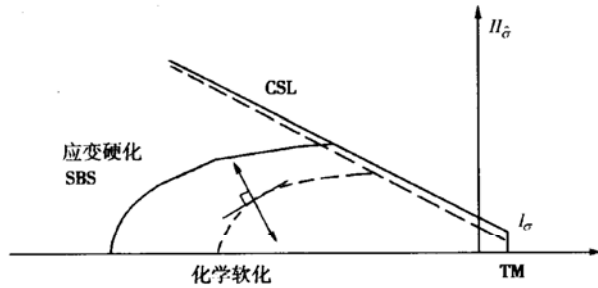


图 1 $I_\sigma - II_{\hat{\sigma}}$ 空间中考虑浓度影响的屈服面

Fig. 1 The yielding surfaces in the $I_\sigma - II_{\hat{\sigma}}$ space considering effect of concentration

3 多孔介质中热 - 化学 - 弹塑性的一致性算法 - 一致性切线模量矩阵

3.1 应变速率

考虑力学、热、化学、吸力因素作用下的多孔介质中应变速率可表示为四部分, 每一部分又可进一步和式分解地表示为弹性应变和塑性应变两部分之和, 即

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^m + \dot{\epsilon}_{ij}^s + \dot{\epsilon}_{ij}^T + \dot{\epsilon}_{ij}^c = \dot{\epsilon}_{ij}^{m,e} + \dot{\epsilon}_{ij}^{m,p} + \dot{\epsilon}_{ij}^{s,e} + \dot{\epsilon}_{ij}^{s,p} + \dot{\epsilon}_{ij}^{T,e} + \dot{\epsilon}_{ij}^{T,p} + \dot{\epsilon}_{ij}^{c,e} + \dot{\epsilon}_{ij}^{c,p} \quad (14)$$

式中 上标 m, s, T, c 分别表示与力学、吸力、热、化学因素相关的物理量; 上标 e, p 分别表示物理量的弹性与塑性部分。应力速率可表示为

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}^e \dot{\epsilon}_{kl}^{m,e} \quad (15)$$

其中 C_{ijkl}^e 是依赖于杨氏模量和泊松比的弹性模量矩阵。

吸力与热因素引起的弹性应变率可分别表示为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{s,e} = -\frac{1}{3} \frac{\kappa}{(1+e)} \frac{\dot{s}}{(s+p_a)} \delta_{ij} = h_{ij}^e \dot{s} \quad (16)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{T,e} = \frac{1}{3} \alpha_2 \dot{T} \delta_{ij} = T_{ij}^e \cdot \dot{T} \quad (17)$$

其中 κ 是随吸力变化的弹性刚度系数; e 为孔隙率; p_a 为孔隙气压力; α_2 为热弹性膨胀系数。

屈服面被激活后, 力学、吸力与热因素引起的塑性应变率可分别表示为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{m,p} = \lambda^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (18)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{s,p} = -\frac{1}{3} \frac{\lambda(s, T) - \kappa}{(1+e)} \frac{\dot{s}}{(s+p_a)} \delta_{ij} = h_{ij}^p \dot{s} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^{T,p} &= T_{ij}^p \dot{T} \\ &= -\frac{1}{3} \frac{(\lambda(0, T) - \kappa)(a_1 + 2a_2 \Delta T)}{(1+e)p_0^*} \dot{T} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $\lambda(0, T), \lambda(s, T)$ 分别为随吸力变化的塑性刚度系数在吸力为 0 和 s 时的值; λ^p 是塑性乘子; g 是非关联塑性势函数, 塑性势角为 ψ ; α_1 为实验常数。

化学塑性应变率可由以下一致性条件得到

$$\frac{\partial f}{\partial c} \dot{c} + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}^{c,p}} \delta \epsilon_{ij}^{c,p} = 0 \quad (21)$$

并进一步表示为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{c,p} = -\frac{1}{3} \frac{\alpha_c (\lambda(s, T) - \kappa)}{1+e} \delta_{ij} \dot{c} = D_{ij}^{c,p} \dot{c} \quad (22)$$

由式 (2) 以及式 (15) ~ (20)、(22) 可得到总应变速率表达式:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} &= C_{ijkl}^e \dot{\sigma}_{kl} + \lambda^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} + h_{ij}^e \dot{s} + h_{ij}^p \dot{s} \\ &+ T_{ij}^e \dot{T} + T_{ij}^p \dot{T} + D_{ij}^{c,e} \dot{c} + D_{ij}^{c,p} \dot{c} \end{aligned} \quad (23)$$

3.2 一致性切线模量矩阵

对于一个给定的分屈服面 $f=0$, 考虑控制塑性应变发展的内状态变量 ζ 的一致性条件可写为

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dot{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial \zeta} \dot{\zeta} + \frac{\partial f}{\partial s} \dot{s} + \frac{\partial f}{\partial T} \dot{T} + \frac{\partial f}{\partial c} \dot{c} = 0 \quad (24)$$

其中应力速率可由式 (23) 表示为

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}^e [\dot{\epsilon}_{kl} - (\lambda^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}} + h_{kl}^e \dot{s} + h_{kl}^p \dot{s} + T_{kl}^e \dot{T} + T_{kl}^p \dot{T} + D_{kl}^{c,e} \dot{c} + D_{kl}^{c,p} \dot{c})], \quad (25)$$

而内状态变量变化率定义为

$$\dot{\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{ij}^p} \dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{ij}^p} \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \lambda^p + h_{ij}^p \dot{s} + T_{ij}^p \dot{T} + D_{ij}^{c,p} \dot{c} \right). \quad (26)$$

由式(24)~(26)可以得到应力速率与应变、吸力、温度、化学浓度速率关系的本构方程:

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}^{ep,m} \dot{\epsilon}_{kl} + D_{ij}^{ep,s} \dot{s} + D_{ij}^{ep,T} \dot{T} + D_{ij}^{ep,c} \dot{c}, \quad (27)$$

式中 $D_{ijkl}^{ep,m}, D_{ij}^{ep,s}, D_{ij}^{ep,T}, D_{ij}^{ep,c}$ 分别为力学、吸力、温度和化学浓度因素相关的一致性弹塑性切线模量矩阵, 并可表示为

$$D_{ijkl}^{ep,m} = C_{ijkl}^e - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ab}} C_{abkl}^e C_{ijcd}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{cd}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnop}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{op}} - \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{mn}^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}}}, \quad (28)$$

$$D_{ij}^{ep,s} = -C_{ijkl}^e (h_{kl}^e + h_{kl}^p) - \frac{C_{ijkl}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnop}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{op}} - \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{mn}^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}}} *$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial s} + \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{ab}^p} h_{ab}^p - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ab}} C_{abcd}^e (h_{cd}^e + h_{cd}^p) \right), \quad (29)$$

$$D_{ij}^{ep,T} = -C_{ijkl}^e (T_{kl}^e + T_{kl}^p) - \frac{C_{ijkl}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnop}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{op}} - \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{mn}^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}}} *$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial T} + \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{ab}^p} T_{ab}^p - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ab}} C_{abcd}^e (T_{cd}^e + T_{cd}^p) \right), \quad (30)$$

$$D_{ij}^{ep,c} = -C_{ijkl}^e (D_{kl}^{c,e} + D_{kl}^{c,p}) - \frac{C_{ijkl}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnop}^e \frac{\partial g}{\partial \sigma_{op}} - \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{mn}^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}}} * \left(\frac{\partial f}{\partial c} + \frac{\partial f}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \epsilon_{ab}^p} D_{ab}^{c,p} - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ab}} C_{abcd}^e (D_{cd}^{c,e} + D_{cd}^{c,p}) \right). \quad (31)$$

4 非等温的污染物传输模型

本文在李锡夔^[2, 3]等提出的多孔介质中污染物传

输模型基础上, 进一步考虑温度对污染物传输控制现象的影响, 建立了非等温污染物传输模型。污染物传输的控制现象包括: 对流、分子弥散、机械逸散控制污染物传输的三个主要的因素; 不动水效应、吸附和解吸附以及降解等机制将影响污染物在多孔多相介质中的分布并产生延迟现象。

4.1 对流

污染物的对流流量是污染物随孔隙水的流动而迁移的流量:

$$J_c = c \dot{U}_w, \quad (32)$$

式中 \dot{U}_w 为孔隙水固有速度。

4.2 分子弥散

分子弥散流量是由于水中分子的随机运动产生的, 费克定律给出了分子弥散流量与污染物浓度空间梯度的关系:

$$J_m = -D_m \nabla c, \quad (33)$$

式中 D_m 为多孔介质中孔隙水的分子弥散系数。根据 Stocks-Einstein 公式, 温度相关的分子弥散系数定义为

$$D_m = D_{mr} \frac{T}{T_r}, \quad (34)$$

式中 D_{mr} 为在参照温度时的分子弥散系数。

4.3 机械逸散

机械逸散流量也由费克定律定义为

$$J_d = -D_d \nabla c, \quad (35)$$

式中 机械逸散系数为

$$D_d = \left(a_T \|\dot{U}_w\| \mathbf{I} + (a_L - a_T) \frac{\dot{U}_w \dot{U}_w^T}{\|\dot{U}_w\|} \right), \quad (36)$$

式中 \mathbf{I} 是单位矩阵; a_L, a_T 分别为沿流线与正交于流线方向的逸散系数。

把机械逸散流量和分子弥散流量相加定义为水动力学扩散流量:

$$J_h = -(D_m \mathbf{I} + D_d) \nabla c = -D_h \nabla c, \quad (37)$$

式中 D_h 称为水动力学扩散系数。

5 数值算例

5.1 例1: 化学弹塑性变形

考虑一饱和土样品, 温度 $T = 293 \text{ K}$, 孔隙水压力 $p_w = 100 \text{ kPa}$, 空气压力 $p_a = 100 \text{ kPa}$ (吸力为零) 均保持恒定。土样的材料参数: $n = 0.4, G = 1000 \text{ kPa}, \nu = 0.3, F_0 = -0.04, \beta_0 = 1.32, \alpha_c = 3.45, p_0^* = 200 \text{ kPa},$ 内聚力 $p_s = 400 \text{ kPa}, \varphi = 30, \psi = 30$ 。初始净应力为 $\sigma_x = -83 \text{ kPa}, \sigma_y = -133 \text{ kPa}$ 。全域内浓度均匀地从 0.1 增加到 1.0。浓度 - 体积应变曲线在 $c = 0.2$ 处有一个拐点, 在 $c < 0.2$ 时为弹性状态, 只产

生体积膨胀化学弹性应变; 随着浓度升高, 固结压力下降, 在 $c = 0.2$ 时进入塑性状态, 开始产生体积收缩化学塑性应变; 浓度 $c = 1.0$ 时的弹性应变 $\varepsilon_v^e \approx -F_0$, 与试验结果相符, 如图 2 (a) 所示。当吸力和温度为恒定值时, 在浓度 $c < 0.2$ 的化学弹性状态下, 材料参数 p_0 为常数, 而固结压力 p_{0c} 如式 (8) 所示由于化学软化因素将随着化学物浓度的增加而减小。进入化学塑性阶段后, 利用式 (8)、(9)、(22) 以及 p_0^* 随 ε_v^p 变化的表达式^[1]可得到

$$\frac{\partial p_{0c}}{\partial c} = \frac{\partial p_{0c}}{\partial S(c)} \frac{\partial S(c)}{\partial c} + S(c) \frac{\partial p_{0c}}{\partial p_0^*} \frac{\partial p_0^*}{\partial \varepsilon_v^{c,p}} \frac{\partial \varepsilon_v^{c,p}}{\partial c}$$

$$= -\alpha_c p_{c0} + S(c) \left(p_0 \frac{\lambda(0,T) - \kappa}{\lambda(s,T) - \kappa} \frac{1}{p_0^*} \right)$$

$$\left(-\frac{1+e}{\lambda(0,T) - \kappa} p_0^* \right) \left(-\frac{\alpha_c (\lambda(s,T) - \kappa)}{1+e} \right) = 0。$$

这表明在化学塑性阶段, 如吸力和温度不变, p_{0c} 将是一常数。这些化学弹塑性行为的特征在本例数值结果中都得到了很好的验证, 如图 2 (b) 所示。

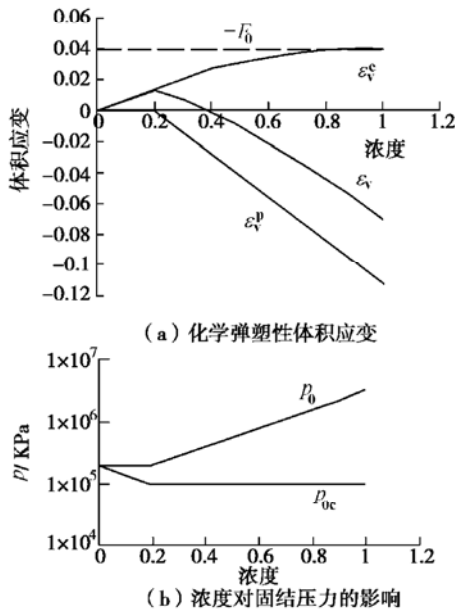


图 2 浓度升高引起的化学弹塑性变形
Fig. 2 The chemo-elasto-plastic deformation due to the increasing concentration

5.2 例 2: 污染物浓度对剪切带发展的影响

图 3 给出了 $0.1 \text{ m} \times 0.17 \text{ m}$ 非饱和土样及其 10×20 个八点等参元的离散。土样顶部两侧有两个缺口以激发剪切带的发生。材料参数: $\varphi = 20$, $\psi = 5$, $E = 1.0 \text{ GPa}$, $B_p = -1.0$, $c_0 = p_s = 14 \text{ MPa}$, $c_f = 0$, $p_0^* = 2.0 \text{ GPa}$, $k_{pc} = -4.0 \text{ MPa}$, $k_{ps} = 1.0 \times 10^{-3}$, $k_{int} = 4.7 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。初始条件: 净应力 $\sigma_x = -133 \text{ kPa}$, $\sigma_y = -133 \text{ kPa}$, $p_w = -78.5 \text{ MPa}$, $p_a = 100 \text{ kPa}$, 饱和度为 0.4 , $T = 293 \text{ K}$ 。 p_a 和 T 固定, 边界不排

水。考虑两个荷载工况: ①在顶部处以 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 的指定垂直向下速度施加相应于指定位移的机械荷载; ②在①所描述的机械荷载基础上在 $t = 4000 \text{ s}$ 开始在全域以 $1.5 \times 10^{-4} / \text{s}$ 的速率均匀地增加污染物浓度。图 4 给出了两种荷载条件下土样顶部的荷载位移曲线, 显示了在弹性阶段, 由于化学荷载的膨胀作用, 土体承载能力增大; 但在进入塑性阶段以后, 污染物作为化学荷载使土样的极限承载能力降低, 在较低的机械荷载峰值下开始了应变软化的进程。对于考虑化学加载影响的荷载工况②, 图 5 (a) ~5 (b) 分别给出了在荷载历史结束时土样内等效塑性应变和达西速度的分布, 显示了以应变局部化为特征的剪切带破坏现象。

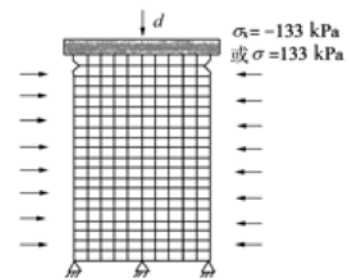


图 3 剪切带问题的有限元网格

Fig. 3 The finite element discretization of the shear band problem

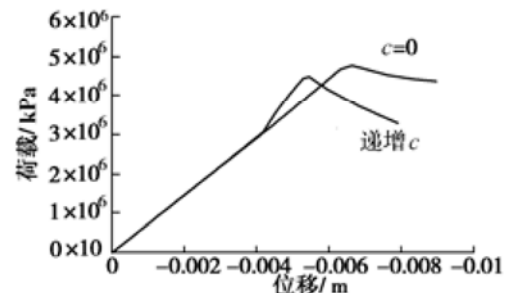


图 4 剪切带问题的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves for the shear band problem

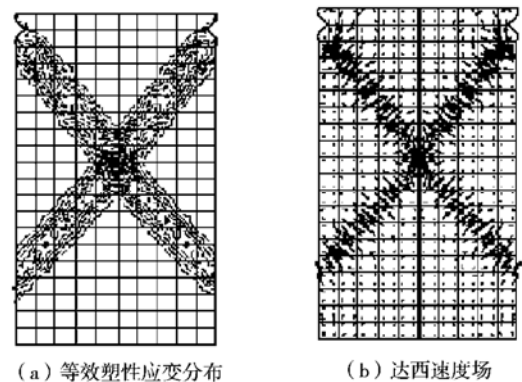


图 5 浓度作用下的剪切带问题在加载结束时 (7900 s) 的数值结果

Fig. 5 The numerical results of the shear band problem with effects of concentration at the end of loading history (7900 s)

5.3 例 3: 污染物扩散的影响

考虑一开挖于地下 50 m 的非饱和土中的半径 2.5 m 的隧道，模拟隧道开挖完成后孔隙水中的污染物扩散对隧道周围变形的影响。对以隧道圆心为中心的 200 m×100 m 的区域进行数值模拟，基于问题的对称性只对一半区域 (100 m×100 m) 离散成 600 个 8 节点等参元进行计算，如图 6 所示。所采用材料参数为： $E=0.4\text{ GPa}$ ， $\varphi=30$ ， $D_m=5.0\times 10^{-6}\text{ m/s}$ ， $p_0^*=10\text{ MPa}$ ， $k_{int}=4.7\times 10^{-14}\text{ m}^2$ ，其余参数同例 2。初始条件： $c=0$ ， $T=293\text{ K}$ ， $\sigma_x=-4.6\text{ MPa}$ ， $\sigma_y=-4.6\text{ MPa}$ ， $p_a=100\text{ KPa}$ ，上边界饱和度 0.4， $p_{w,T}=-78.5\text{ MPa}$ ，考虑重力影响，孔隙水压力在竖直方向随高度线性变化，下边界为 $p_{w,B}=-77.5\text{ MPa}$ 。隧道表面分布压力在 6000 s 内降至零，以模拟隧道开挖过程。同时隧道表面的污染物浓度由零升至 $c=0.6$ ，以模拟污染物注入隧道过程。为作比较，对不考虑污染物浓度影响 ($c=0$) 的情况也作了数值模拟。图 7 给出的在 $t=1.0\times 10^7\text{ s}$ (115 d) 时刻的模拟结果显示，污染物浓度的影响仅局限于隧道周围较小的范围内。图 7 (b) 给出的考虑污染物影响的最大等效应变 (0.0269) 比图 7 (c) 所示的不考虑污染物影响的最大等效应变 (0.0153) 大 75%，说明污染物在隧道开挖过程中对隧道的变形有较大的影响。

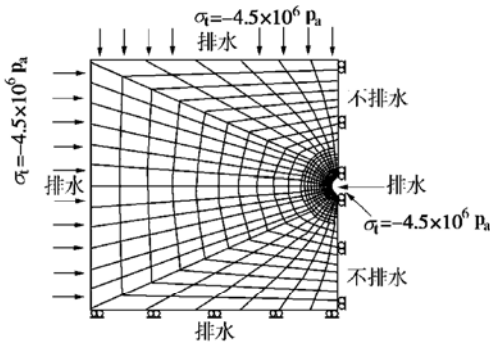


图 6 隧道开挖问题的边界条件和初始条件

Fig. 6 The boundary and initial conditions for the tunnel excavation problem

6 结 论

(1) 本文的 CTHM 耦合本构模型能够正确地模拟有机污染物引起的化学弹塑性变形。数值结果与理论推导表明：在化学塑性阶段，如吸力和温度不变， p_{0c} 是一常数。

(2) 浓度影响下的应变软化显示在弹性阶段，由于化学荷载的膨胀作用，土体承载能力增大；但在进入塑性阶段后，浓度作为化学荷载使土样的极限承载能力降低，在较低的机械荷载峰值下开始了应变软化

的进程。

(3) 应用本文的 CTHM 耦合本构模型的非饱和土热 - 水力 - 力学 - 污染物传输数学模型进行数值模拟显示污染物在隧道开挖过程中对隧道的变形有较大影响。

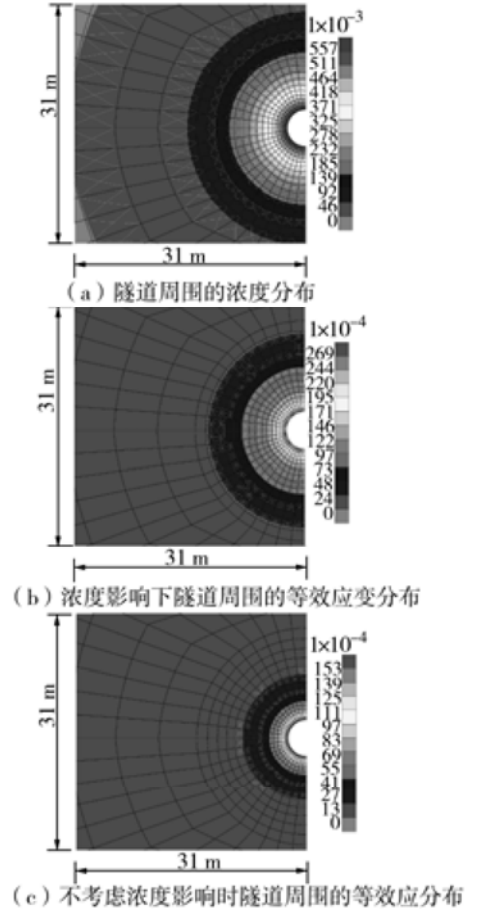


图 7 隧道开挖问题在计算结束时 ($t=1\times 10^7\text{ s}$) 的结果显示
Fig. 7 Numerical results for the tunnel excavation problem at the end of the simulation($t=1\times 10^7\text{ s}$)

参考文献

[1] Wu Wenhua, Li Xikui, Charier R, Collin F. A thermo-hydro-mechanical constitutive model and its numerical modelling for unsaturated soils [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2),155-167.

[2] Li Xikui, Cescotto S, Thomas H R. Finite element method for contaminant transport in unsaturated soils [J]. ASCE Journal of hydrologic engineering, 1999,4(3), 265-274.

[3] Li Xikui, Wu Wenhua, Cescotto S. Contaminant transport with non-equilibrium processes in unsaturated soils and implicit characteristic Galerkin scheme [J]. Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(3): 219-243.

[4] Hueckel T, Chemo-plasticity of clays subjected to stress and

- flow of a single contaminant [J]. *Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 1997, 21, 43-72.
- [5] Fernandez F, Quigley R M. Controlling the destructive effect of clay - organic liquid interactions by application of effective stresses [J]. *Can Geotech J* 1991, 28, 388-398.
- [6] Thomas H R, Sansom M R. Fully coupled analysis of heat moisture and air transfer in unsaturated soil [J]. *J Engng. Mech ASCE*. 1995, **121**(3): 382-405.
- [7] Schrefler B A F.E. in environmental engineering: coupled thermo-hydro-mechanical processes in porous media including pollutant transport [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1995, 2&3, 1-54.
- [8] Li Xikui, Wu Wenhua, Charlier R. Numerical simulation of thermo-hydro-mechanical behaviour with pollutant transport in engineered clay barrier [A]. *Int Workshop on Environmental Geomechanics* [C]. Switzerland, 2002. 377-388.
- [9] Schrefler, B A. Geomechanics and quantitative solutions: application to environmental problems [A]. *Int Workshop on Environmental Geomechanics*[C]. Switzerland, 2002, 137-159.
- [10] Thomas H R, Cleall P J, Seetharam S C. Numerical modelling of the thermal-hydraulic-chemical-mechanical behaviour of unsaturated clay [A]. *Int Workshop on Environmental Geomechanics*[C]. Switzerland, 2002, 125-136.
- [11] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils [J]. *Geotechnique* 1990, 40(3), 405-430.
- [12] Drucker D C, Prager W. Soil mechanics and plasticity analysis or limit design [J]. *Quarterly Applied Mathematics* 1952,**10**(2):157-165.

6th International Conference on Ground Improvement Techniques (Call for papers)

6th International Conference on Ground Improvement Techniques is organized by CI-Premier Conference Organisation with the official support of Dept. of Civil Engineering of the University of Coimbra and International Association of Engineering Geology (IAEG) Commission No. 18: Collapsible Soils. It will be held in Coimbra, Portugal during 18~19 July 2005.

Conference topics: Mechanical and Chemical Stabilisation of Soils; Accelerating Consolidation of Clayey Soils (preloading, electroosmosis, geodrains, vacuum); Deep compaction of Granular Soils (blasting, heavy compaction, vibroflotation); Soil Reinforcement (facing, backfill, reinforcements); Grouting; Thermal Stabilisation of Soils; Deep Soil Mixing, Micropiles, Stone Columns, Granular Piles; Innovative Techniques in Ground Improvement; Evaluation of Ground Improvement and Theoretical Methods; Environmental Aspects.

Other areas of participation include: Co-sponsors, exhibitors, advertisers, commercial presenters; Desk-top exhibition; Pre- and post-conference seminars and workshops; Advertising; Accompanying Persons Programme, conference golf, tours etc.; Speakers of the Conference will be invited to the Pre-conference cocktails.

Important dates: Abstracts (in a A4 page) to be received by 30 December 2004; notification of acceptance by 30 January 2005; full text (in required format) to be received by 30 March 2005.

Please contact: The Conference Director (GI05), CI-Premier Pte Ltd, 150 Orchard Road, Orchard Plaza, #07-14, Singapore 238841; Tel: (65) 67332922; Fax: (65) 62353530; E-mail: cipremie@singnet.com.sg; Web: <http://www.cipremier.com>.

(Provided by CI-Premier PTE. LTD.)