

一种基于混合物理论的非饱和岩土类材料的弹塑性损伤模型^{*}

A new feasible elasto-plastic damage model in the frame of the theory of mixtures

杨松岩 俞茂宏

(西安交通大学建筑工程与力学学院, 710049)

文 摘 在混合物理论的框架内, 提出了一个处理饱和与非饱和的岩土类材料变形和强度本构建模的新方法。该方法将多相工程材料看成由两个层次的三种混合物模型组成。针对非饱和岩土类材料的特点, 应用该方法, 给出了一个具体的弹塑性损伤本构方程, 可描述材料性质的劣化过程(即损伤和软化)以及非饱和程度对材料变形强度特性的影响, 并编制了专用的有限元程序。作为算例, 对常规三轴试件进行了有限元分析, 得出了一些具体的结果。

关键词 非饱和岩土类材料, 混合物理论, 本构建模, 弹塑性损伤本构模型, 有限元实施和应用。

中图法分类号 TU 411.3

作者简介 杨松岩, 男, 1970年生。1997年在西安交通大学获固体力学专业工学博士学位。现为新加坡南洋理工大学土木与结构工程学院博士后。目前从事非线性连续介质力学和多相孔隙介质的理论建模和工程应用方面的研究。

Yang Songyan Yu Maohong

(School of Civil Engineering and Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract In the frame of the Theory of Mixtures, the paper proposed and developed a new method for the constitutive modelling of saturated and unsaturated porous media. In the new model, realistic porous media is viewed as three kinds of mixtures within two levels. In order to simulate the degradation and softening properties of geomaterials, an elastoplastic damage model is also proposed, which, in addition, can also take into account of the influence of unsaturation on the overall properties of geomaterials. As an example, finite element analysis is performed to simulate the deformation and strength properties of a conventional triaxial specimen.

Key words unsaturated geomaterials, mixture theory, constitutive modelling, elastoplastic damage model, FE implementation and application.

1 前 言

如果从细观的角度研究工程材料(这里主要指岩土类材料, 包含岩石、土和混凝土等)的变形和强度特性, 可以发现工程材料往往具有十分复杂的内部结构。概括起来, 主要有以下两点。

a) 它是一种典型的多相孔隙介质, 具有不均匀分布的固、液、气三相(如果认为固、液、气之间的界面也是独立的材料相时, 则工程材料应当是多相的)。固、液、气三相共同参与变形, 存在复杂的相互作用且在一定的条件下, 各相材料间可以相互转化(即相变)^[1]。

b) 在固相材料中存在大量的无规律分布的微裂纹。在变形过程中, 各微裂纹逐渐成核、扩展, 最终形成宏观裂纹, 导致固相材料的破坏^[2], 即在变形过程中具有明显的材料特性劣化倾向, 尤其是在循环加载过程中, 材料的破坏是一个渐进的过程, 其中伴随着强烈的软化现象^[2, 3]。材料特性劣化的表现为: 随着材料变形过程的发展, 其强度和刚度均有不同程度的下降, 下降的程度与材料变形过程有关。对简单的(单轴

或纯剪切等)循环加载过程, 宏观表现为弹性卸载的刚度(在应力-应变图中为卸载时的斜率)不断减小, 直至最终破坏, 在宏观上则表现为材料强度的不断减小。因此, 要准确地描述工程材料变形的全过程, 就需要研究材料特性的劣化和材料强度的软化问题。

从本质上说, 工程材料的变形和强度特性应当是结构行为, 而不是材料行为, 它是由各组分相材料的相互作用以及无规律分布的微裂纹的成核、扩展和微裂纹的连接形成宏观裂纹等因素决定的。如果不考虑多相材料间的相互作用, 仅从固相材料的变形和强度角度研究, 可以发现正是由于工程材料内部结构的变化导致了材料特性的劣化, 进而导致宏观上的材料软化。

针对该问题, 作者在混合物理论的框架内^[4, 5], 探讨了如何有效地描述工程材料复杂且无规律分布的内部结构, 针对工程材料的变形和强度问题, 提出了一个新的本构描述方法, 并给出了具体的本构方程表达

^{*} 国家自然科学基金资助项目(59779028)。

到稿日期: 1997-08-04。

式^[6,7]。该描述方法主要有以下的特点。

a) 将饱和与非饱和的工程材料看成由两个层次的三个混合物模型组成的混合物体系, 即第一层次的“固相”混合物和“液相”混合物, 第二个层次的由“固相”和“液相”组成的混合物。

b) “固相”混合物是由两种或多种组分固体材料(可以是不同种类的材料, 也可以是由于变形造成的性质有所不同的同一种类的材料)组成, 通过组分材料性质的不同和组分材料在“固相”介质中所占份量的改变, 该混合物模型可以描述固体工程材料的多种变形和强度特性, 并可以描述组分材料间的相变。

c) “液相”混合物是由实际赋存于工程材料中的液体和未溶解的气体组成。“液相”介质的性质由真实液体和未溶解的气体决定, 并且真实液体和气体在“液相”所占份量的改变也将影响“液相”介质的性质。因此“液相”模型可以描述饱和和非饱和特性, 并可描述液体和气体之间的相变。

d) 由“固相”和“液相”组成的工程材料, 其性质完全由组分介质(即“固相”和“液相”)的性质以及组分介质间的相互转化规律决定。

本模型具有比较广泛的适用性, 该思想可以应用到很多其它领域, 如强度和变形问题, 渗透问题, 相变和化学反应问题等。作为该思想一个应用, 针对非饱和岩土类材料的渐进破坏性质, 本文提出了具体的弹塑性损伤模型, 用以模拟岩土类材料的损伤和软化过程, 并考虑到了非饱和程度对材料变形强度特性的影响, 给出了具体的本构描述。作为算例, 还对常规三轴试件进行了有限元分析, 得出了一些具体结果。对其他问题, 采用相似的思想方法也可以得到相应结果。

2 基于混合物理论的本构描述

混合物理论(Mixture Theory)是处理具有不规则内部结构的多相孔隙介质的有效方法。它在物理和数学上都有很好的一般性。它的基本思想是^[4~7]将具有不规则内部结构的多相孔隙介质假想为与之等效的叠加的连续体, 假想连续体之间存在相互作用, 通过适当定义的参数(如体积分数等)反映实际多相孔隙介质的内部结构。

利用上述观点, 我们提出了如下的模型, 用以描述非饱和岩土类材料变形强度特性和相变。

步骤一, 将工程材料看成为固相、液相和气相组成的多相孔隙介质。

为了研究的方便, 有时可以假定在固相和液相(或气相)间不存在相变, 即固相和液相(或气相)物质间不能相互转化, 但液相和气相间可以存在相变。实际的

工程材料大都符合这一假定。

步骤二, 将“固相”介质看成由两种或多种组分材料组成的混合物。

这里定义的组分材料可以指完全不同的材料, 也可以指同一种材料在变形过程中其中一部分某些性质发生了改变, 从而形成了与原来材料性质不完全相同的材料。从实用的角度分析, 后者有更大的优越性, 可以用来描述“固相”介质变形和强度的特点。如要描述“固相”介质的材料性质随变形劣化(损伤和软化)特性, 可以将“固相”介质看成是由完好的固体材料和受损伤的固体材料组成的混合物。受损伤固体材料的某些力学性能比完好的固体材料有所降低。通过对变形过程中两种组分材料在“固相”介质中所占比例的改变来描述“固相”介质的损伤和软化特点。

基于以上考虑, 步骤一中的“固相”材料应当理解为由不同的组分材料组成的多相混合物。随变形的发展, 质量可以在不同的组分材料间重新分配。如果“固相”和液相(或气相)材料间不存在相变, 则在某一控制空间, “固相”材料符合封闭系统的质量守恒定律。“固相”材料的性质由完好材料和受损伤材料的性质决定。

步骤三, 将液相和气相材料组成的混合物用假想的“液相”材料表示。

气相是否存在是定义介质为饱和与非饱和的标志。要有效地描述介质的变形和强度特性, 就需要对液相和气相材料进行准确的描述。液相材料一般可以用 Navier-Stokes 方程描述, 但实际的气相多为水蒸气和空气等组成的可溶性混合物, 很难对其加以描述并获取可靠的状态参数。因此, 这里用假想的“液相”来代替实际液相和气相组成的混合物。同样, “液相”的性质由实际液相和气相的性质决定。

假想的“液相”的可压缩性可以反映介质的饱和程度。实际的液体, 相对于固相材料, 其可压缩程度很小, 在实际应用中可以认为是不可压缩的。而实际的气体具有很大的可压缩性。由于“液相”的性质由实际液相和气相的性质决定, 因此“液相”应当具有一定的可压缩性, 其可压缩的程度随介质中气体含量的增大而增大。因此, 采用可压缩的“液相”模型可以间接反映介质的不饱和程度。与此相对的不可压缩“液相”模型是对饱和介质的描述。通过以上的模型, 我们得到了两个层次的混合物模型。第一个层次为“固相”和“液相”的两个混合物模型, 第二个层次为由“固相”和“液相”组成的混合物的模型。通过对“固相”和“液相”的组分材料的研究, 可以得到“固相”和“液相”的组分材料的变形特性, 利用该特性研究第二个层次的混合物模型, 可以得到混合物总体的变形特性。

因此,利用混合物理理论对“固相”、“液相”和混合物总体分别进行本构建模,可得到通用本构方程^[6]。为了便于研究并突出重点,我们对该通用本构方程进行如下的化简:①所有变形均为小变形;②“固相”、“液相”内部以及它们之间无渗透效应;③“固相”由U和D两相组成,U和D间存在相变;④“液相”由L和G组成,L和G间不存在相变,且L和G为理想流体;⑤“固相”和“液相”间不存在相变。化简后可得本文讨论的非饱和岩土类材料整体的弹塑性损伤本构方程

$$\dot{\sigma} = D^{\text{ep}} : \dot{\varepsilon} - (1 - m^F)(m^D)^{\cdot} (\sigma^U - \sigma^D) \quad (1)$$

其中 $\dot{\sigma}$ 符号:表示张量的一阶缩并, σ 和 ε 为岩土类材料总体应力和应变张量, σ^U 和 σ^D 分别为“固相”介质内部U组分材料和D组分材料的应力张量。 m^F 为岩土类材料中“液相”介质的面积分数,它反映了“液相”介质在岩土类材料中所占的份量,由此还可知“固相”在岩土类材料中所占的份量为 $(1 - m^F)^{[6,7]}$ 。 m^D 为“固相”介质内部D组分材料的面积分数,它反映了D组分材料在“固相”介质中所占的份量,进而可知U组分在其中所占的份量为 $(1 - m^D)$ 。

$$D^{\text{ep}} = (1 - m^F) D_{\text{S}}^{\text{ep}} + m^F \frac{1}{3} K^F (I \otimes I) \quad (2)$$

为岩土类材料总体的有效弹塑性刚度张量(四阶)。其中 I 为二阶单位张量, $\otimes$ 为张量的并矢运算, K^F 为“液相”介质的有效体积压缩模量,它的大小完全由组成“液相”的真实液体和气体的性质以及它们在“液相”中所占的份量决定,即

$$K^F = (1 - m^G) K^L + m^G K^G \quad (3)$$

其中 K^L 和 K^G 分别为液体和气体的真实体积压缩模量, m^G 为气体在“液相”介质中的面积分数, m^G 和 $(1 - m^G)$ 分别为反映了气体和液体在“液相”介质中所占的份量大小。式(2)中 D_{S}^{ep} 为“固相”介质的有效弹塑性刚度张量(四阶),即

$$D_{\text{S}}^{\text{ep}} = (1 - m^D) D_{\text{U}}^{\text{ep}} + m^D D_{\text{D}}^{\text{ep}} \quad (4)$$

其中 D_{U}^{ep} 和 D_{D}^{ep} 为组成“固相”的U组分和D组分材料的真实弹塑性刚度张量(四阶)。

式(1)是不计“液相”内部相变与“液相”和“固相”之间相变时的非饱和工程材料的通用本构方程,但它反映“固相”内部的相变(即在变形过程中,U组分和D组分在“固相”内部所占的份量在不断地改变,表现在参数 $(m^D)^{\cdot} \neq 0$)以及“液相”可压缩性对材料变形和强度的影响。

需要指出的是混合物模型是普遍适用的模型,它可以考虑不同组分间的相对流动,这可以通过本构方程中不同定义的渗透速度表示^[6]。如果考虑“液相”中L和G之间的渗透效应,则模型更具有普遍性。具

体表达式参见文献[6]。

3 一个实用的弹塑性损伤模型

如果定义“固相”中的U组分为完好固体材料,D组分为受损伤的固体材料(完好固体材料由于某些力学性能发生了劣化而形成的),且它在“固相”中所占的份量随变形的发展逐渐增大,则式(1)即为弹塑性损伤本构方程。由于在变形过程中 m^D 不断增大,而 D_{D}^{ep} 在某些强度指标上又较 D_{U}^{ep} 要小,因此式(1)的第一项实际上反映了随变形的发展工程材料总体性质的劣化,如抗剪强度的不断降低等。同样分析可知式(1)的第二项实际上反映了材料的软化。

这里指的损伤是广义的。如果受损伤的材料和完好材料具有相同的弹塑性性质,则 $(m^D)^{\cdot} = 0$,因此式(1)实际上就是该材料的弹塑性本构方程。如果仅从数量的角度讨论,由于 D_{D}^{ep} 为张量,因此它可以使 D_{S}^{ep} 在某一方向有所增强,而在另一个方向上有所减弱,即 D_{D}^{ep} 的引入使“固相”介质弹塑性性质的改变是各向异性的。

针对岩土类材料的具体特点,为了便于应用,本文作出以下的假设。

a) 完好的岩土类材料为具有强化特征的弹塑性体,即^[8,11]

$$\left. \begin{aligned} D_{\text{U}}^{\text{ep}} &= D^e && (\text{卸载或中性变载}) \\ F < 0 \text{ 或 } F = 0 \text{ 且 } f : \dot{\sigma} \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} D_{\text{U}}^{\text{ep}} &= D^e - \frac{1}{A} (D^e : g \otimes f : D^e) && \text{加载} \\ F = 0 \text{ 且 } f : \dot{\sigma} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $F(\sigma, \dots)$ 为应力空间中的塑性屈服(加载)函数; D^e 为完好固相材料的弹性刚度张量,它是对称的四阶张量;

$$f = \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \quad g = \frac{\partial G}{\partial \sigma} \quad (7)$$

分别为塑性屈服(加载)函数和塑性势函数 $G(\sigma, \dots)$ 在应力空间的梯度; A 为硬化参数(为一标量),它是硬化变量(内变量)的函数。由此可见,对非相关联的弹塑性问题,即 $f \neq g$, 式(6)定义的弹塑性刚度 D_{U}^{ep} 为一非对称的四阶张量。

b) 受损伤的岩土类材料不能承受剪切载荷,但能承受一定的静水压力,其承受静水压力的能力比完好材料要差。

由于岩土类材料强度的降低主要是由于在变形过程中大量无规律分布的微裂纹的成核、扩展和微裂纹的连通引起的。微裂纹的存在使材料抗剪切能力急剧降低,沿裂纹走向,材料的抗剪切能力几乎为零。因

此, 假设受损伤(即存在大量连通的微裂纹)的岩土类材料不能承受剪切载荷是合理的。但由于静水压力有使微裂纹闭合的趋势, 因此受损伤材料具有一定的承受静水压力的能力, 但相对于完好材料, 其承受静水压力的能力要有所减小。

需要指出的是这里假设的受损伤岩土类材料是指“固相”中的 D 组分, 其性质不是岩土类材料的总体性质。即使假定受损伤岩土类材料不能承受任何载荷也不意味着岩土类材料总体不能承受任何载荷。此时“固相”中 U 相组分仍然可以承受剪切和静水压力, 因此岩土类材料总体也可以承受该载荷, 只是承受的载荷相对岩土类材料总体产生了一定的折减, 即发生了损伤。因此该描述适合岩土类材料的实际。

引入表征受损伤材料相对于完好材料承受静水压力的能力参数 W , 则当 $W = 0$ 时表示受损伤材料不能承受静水压力, 连同上面的讨论可知, 此时受损伤材料不能承受任何载荷; 当 $W = 1$ 时, 表示受损伤材料承受静水压力的能力和完好材料的相同。

由应力张量的分解可知, 应力张量可以分解为偏量部分和相应的体积应力部分。材料承受剪切载荷的能力由偏应力部分体现, 而材料承受静水压力的能力则由体积应力部分体现。因此, 对具有上述性质的受损伤固体材料, 只有体积应力的一部分体现在本构方程中, 即

$$\sigma^D = \frac{W}{3} (\sigma^U : I) I \quad (8)$$

由此, 可以写出 D 组分材料的弹塑性刚度张量

$$D_D^{\varepsilon p} = \frac{W}{3} I \otimes (I : D_U^{\varepsilon p}) \quad (9)$$

其中完好材料的弹塑性刚度张量 $D_U^{\varepsilon p}$ 由式(5)和式(6)确定。

c) “液相”介质成分稳定, 即在变形过程中其组分间不发生相变。

d) “固相”和“液相”组成的混合物(即实际的岩土类材料)之间也不存在相变。

上述四条假设实际上就是本构方程式(1)应用的条件。将式(8)代入式(2)就可得到岩土类材料总体的有效弹塑性刚度张量

$$D^{\varepsilon p} = (1 - m^F) \left[(1 - m^D) D_U^{\varepsilon p} + m^D \frac{W}{3} I \otimes (I : D_U^{\varepsilon p}) \right] + \frac{1}{3} m^F K^F (I \otimes I) \quad (10)$$

将式(10)和式(8)代入式(1)便可得到本文研究的非饱和和岩土类材料的弹塑性损伤本构方程

$$\dot{\sigma} = D^{\varepsilon p} : \dot{\varepsilon} - (1 - m^F)(m^D)^{\cdot} \sigma^{\text{Res}} \quad (11)$$

其中 σ^{Res} 为残余应力项。

$$\sigma^{\text{Res}} = \sigma^U - \sigma^D = \frac{1-W}{3} (\sigma^U : I) I + S^U \quad (12)$$

它的产生是由于受损伤材料的性质较完好材料的性质发生了劣化。式中

$$S^U = \sigma^U - \frac{1}{3} (\sigma^U : I) I \quad (13)$$

为完好材料真实应力的偏量部分。

4 损伤变量和损伤演化方程

以上讨论的 m^F 和 m^D 等为面积分数, 它们的定义参见文献[6, 7]。面积分数建立了与面积相关量(如应力等)的组分参量与真实参量之间的关系。与此相应, 需要应用体积分数建立与体积(或质量)相关量(如密度, 惯性力等)之间的转换关系^[4~7]。体积分数在理论和工程上都有很广泛的应用, 如岩土工程中采用的孔隙比和含水量饱和度两个参数实际上就是不同定义的体积分数。但面积分数目前还没有得到应有的重视。由于应力是与面积相关的量(为单位面积上所受的力), 用与体积相关的参数确定与面积相关的应力, 这在物理概念上是不能接受的。物理上合理的参数应当是本文提出的面积分数概念。由于在工程实际中测量面积分数比较困难, 因此有必要建立面积分数与传统的体积分数之间的关系。这将涉及到复杂的数学知识, 且不易得到直观的联系, 因此本文对此不作讨论。

多相岩土类材料弹塑性损伤本构方程式(11)中还用到受损伤材料面积分数 m^D 及其导数。从损伤力学的观点来看, m^D 就是损伤变量, 其导数实际上反映了损伤的演化规律。因此, 要使该模型能够真正应用到工程实践中, 还需要定义损伤变量及其演化规律。根据试验观测, 对损伤变量和损伤演化规律作如下假设:

a) 损伤变量只与塑性变形的历史有关, 与弹性变形无关。即在弹性加载、卸载和中性变载过程中, 损伤变量的值没有变化。

b) 在没有变形前, “固相”介质完全由完好材料组成, 随着塑性变形的发展, 完好材料在“固相”介质中所占的比例逐渐减小, 而受损伤材料所占的比例逐渐增大, 这导致了 m^D 随着塑性变形的发展不断地增大, 直至最终破坏。

c) 损伤变量的变化率随塑性变形的发展有逐渐减缓的趋势。

d) 理论上, 当“固相”介质完全由受损伤材料组成时, 材料不能承受任何剪切载荷, 因而达到破坏。实际上, 当损伤变量达到某一临界值时, 即当受损伤材料在“固相”介质中达到某一临界比例, 材料就发生破坏。

根据以上假设, 参照文献[9]的定义, 这里采用如

下形式的损伤变量表达式

$$m^D = m_{lim}^D - m_{lim}^D \exp(-\kappa \xi^R) \quad (14)$$

其中 m_{lim}^D 为临界损伤变量, ξ 为等效塑性应变, 即 $\xi = (\epsilon^P : \epsilon^P)^{1/2}$, κ 和 R 为材料参数。 m_{lim}^D , κ 和 R 均可通过试验加以确定。

5 算 例

不同的屈服(加载)函数对弹塑性损伤分析具有很大的影响。俞茂宏统一强度理论是屈服函数研究的最新进展^[10], 它是分段线性形式的统一强度理论, 具有明确的物理意义和简单的数学表达式, 它完成了应力空间小变形屈服函数的统一, 各种屈服函数均可视为该理论的特例或线性逼近。正是基于此种考虑, 本文采用俞茂宏统一强度理论作为屈服函数进行弹塑性损伤分析, 其具体实施方法见文献^[11], 这里不再赘述。

UEPP 是以俞茂宏统一强度理论为基础的通用有限元程序^[11]。UEPP-POROUS 是专用的处理非饱和和孔隙介质的弹塑性有限元程序^[7]。在此基础上, 结合上述讨论, 我们编制了专用的处理非饱和岩土类材料的弹塑性损伤有限元程序 UEPP-POROUS-DAMAGE。利用该程序, 可以对由非饱和岩土类材料组成的结构进行弹塑性损伤分析。这里给出一个算例。

本算例是由多相岩土类材料(“固相”和“液相”)组成的一常规三轴试件, 沿试件侧向施加大小不等的围压 σ_c , 试件下端固定, 轴向由刚性块施加位移协调的载荷。参见图 1 所示。由对称条件可知, 此时相当于在轴向施加了均匀的载荷。另外假设整个试件四周处于不排水状态, 以便研究不同的“液相”可压缩性对结构弹塑性损伤性质的影响。

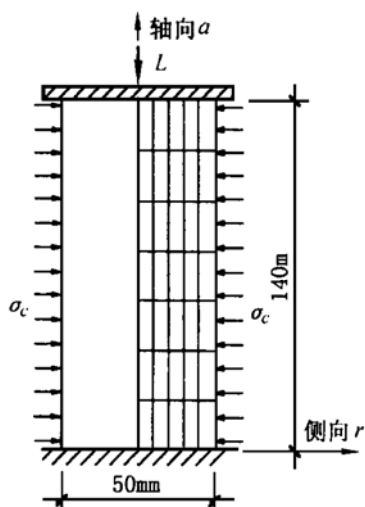


图 1 算例

Fig. 1 An example

通过分析可知^[11], 该算例的应力状态处于 π 平面上双剪应力角 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 60^\circ$ 处, 这两点为基本试验点, 因此选用各个屈服准则均可以得出相同的结果。

但对其它应力状态, 准则的选取将对分析结果产生较大的影响。

本问题为一轴对称问题。沿对称轴任意取一截面, 由于对称性, 这里只取一半进行有限元离散。结构几何信息和有限元离散形式参见图 1 所示。假定完好固体材料为理想弹塑性材料, 其材料参数如下: 弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$; 泊松比 $\nu = 0.2$; 单轴拉伸强度 $\sigma_t = 3.8 \text{ MPa}$; 单轴压缩强度 $\sigma_c = 25.0 \text{ MPa}$ 。

文献^[7]专门讨论了不同的非饱和性对结构弹塑性分析的影响, 这里不再赘述。为突出重点, 假定岩土类材料只是由“固相”材料组成。此时只需在模型中令 $m^S = 1$, $m^F = 0$ 即可达到该假设所要求的条件, 见式(11)。

图 2 给出了在围压 $\sigma_c = 0$ 时的轴向压力与轴向位移曲线, 图中载荷和位移均以压为正。从中可以发现, 在弹性变形阶段和塑性变形的初期, 结构没能出现软化, 只有在塑性变形发展到一定阶段后, 结构才出现了软化现象。这是由于在塑性变形初期, 损伤变量 m^D 的值较小, 还不足以抵消由于塑性区的扩展造成的结构承载能力提高的趋势。而当塑性变形达到某一程度后, m^D 较大, 此时完好材料向受损伤材料转化成为控制变形的的主要原因, 因此结构宏观表现出软化现象。从图 2 中还可以看出, 受损伤材料承受静水压力的能力越高, 即 W 值越大, 结构出现软化的过程越往后拖, 即要宏观变形出现软化, 需要更多的完好材料转化为受损伤材料。

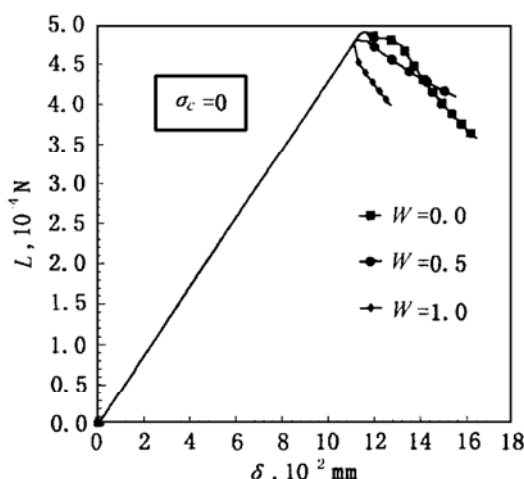


图 2 单轴压缩时轴向位移-载荷曲线

Fig. 2 Axial displacement versus axial load under zero lateral confinement

图 3 为在不同围压下, 当 $W = 0.5$ 时, 结构承受双轴压缩载荷时的轴向应力-轴向应变曲线以及轴向应力-侧向应变曲线。图中应力以压为正, 应变以受压缩时为正。从图中可以看出, 在不同的围压作用下, 曲

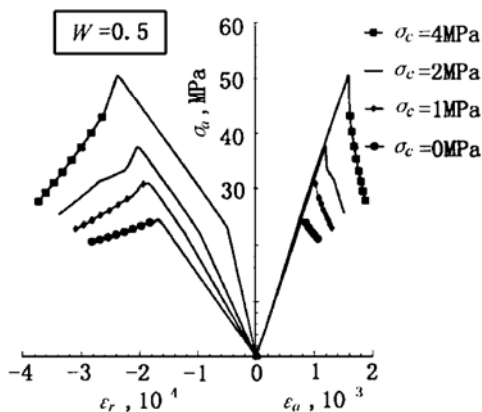


图3 双轴压缩轴向应力-轴向应变-侧向应变曲线

Fig. 3 Axial stress versus axial strain versus lateral strain under biaxial loading

线均出现了下降段,且随围压的增大,出现下降段时的临界压力有所提高。这也符合三轴试验结果^[3]:一般随围压的增大,软化特性趋于不明显。

图4为在 $W = 0.5$, 围压 $\sigma_c = 0$ 时,完好固体材料不同的硬化(指各相同性硬化)条件对结构位移-载荷曲线的影响。图中 $H_p = E_T/E$ 为硬化参量,它的定义为双线性弹塑性模型中硬化段的模量与弹性模量之比,它反映了材料的硬化水平。从中可以看出,在不同硬化条件下,位移-载荷曲线均出现了下降段;曲线的极限荷载随着硬化参量 H_p 的增大而增加。

采用同样方法,应用 UEPP-POROUS-DAMAGE 可以同时分析非饱和程度与材料劣化对结构弹塑性性质的影响,也可以对实际工程问题进行分析。

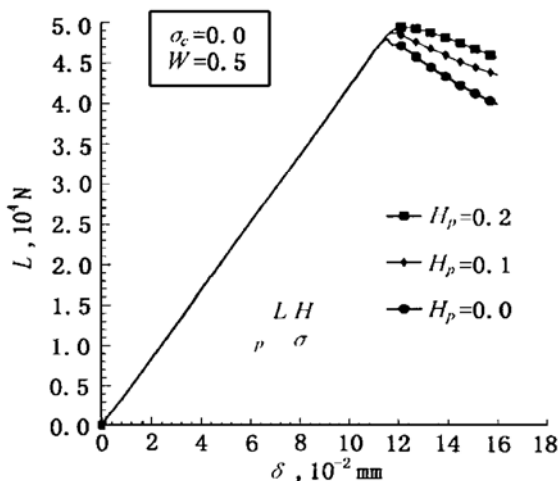


图4 不同硬化条件的影响

Fig. 4 The influence of hardening parameters

6 结 论

本文提出的新方法用宏观手段可以描述多相工程材料的多种复杂的内部结构,能够模拟工程材料变形和强度的很多复杂问题,如多场耦合问题,各个层次的相变问题和材料特性的劣化和软化问题等。该方法不仅可以应用到多相工程材料的变形和强度问题的分析上,也可以应用到其它问题的分析中,因而具有广泛的适用性。

作为工程应用方面的尝试,针对非饱和的岩土类材料,本文具体讨论了弹塑性损伤软化问题。得出了非饱和岩土类材料弹塑性损伤本构方程,进行了工程应用,得出了相应的结果。

参 考 文 献

- 1 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1~9.
- 2 Read H E, Hegemier G A. Strain softening of rock, soil and concrete: A review article. Mechanics of Materials, 1984(3): 271~294.
- 3 Han D J, Chen W F. Strain-space plasticity formulation for hardening-softening materials with elastoplastic coupling. Int J Solids Struct, 1986, 22(8): 935~950.
- 4 Bowen R M. Theory of mixtures. In: Eringen A C, ed. Continuum Physics, Vol III New York: Academic Press, 1976. [中译本]董务民译. 混合物理论. 现代连续统物理丛书; 13. 南京: 江苏科技出版社, 1983.
- 5 de Boer R. Highlights in the historical development of the porous media: toward consistent macroscopic theory. Appl Mech Rev. 1996, 49(4): 201~262.
- 6 杨松岩. 多相孔隙介质的弹塑性本构建模和分析—全过程和全耦合的描述[博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- 7 杨松岩, 俞茂宏, 赵均海. 孔隙液体的可压缩性对非饱和孔隙介质弹塑性分析的影响. 岩土力学, 1998, 19(3).
- 8 Owen D R J, Hinton E. Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice. [s.l.]: Pineridge Press Limited, 1980.
- 9 Frantziskonis G, Desai C S. Constitutive model with strain softening. Int J Solids Struct. 1987, 23(6): 733~750.
- 10 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1~10.
- 11 俞茂宏, 杨松岩, 范寿昌等. 双剪统一弹塑性本构模型及其工程应用. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 2~10.