岩土各向同性损伤本构模型

周建廷[1, 2]，刘元雪[2]
(1.重庆交通大学科技处，重庆 400074；2.后勤工程学院建筑工程系，重庆 400041)

摘　要：基于连续介质力学基本概念得出岩土损伤复合体理论的应力－应变合成一般模式，简化得出岩土各向同性损伤复合体理论的应力－应变合成模式，建立了岩土各向同性损伤本构模型。提出了岩土各向同性损伤本构模型的数值求解法。通过对一个算例分析，加深了对岩土损伤机理的认识。计算分析认为：串联假设不适用于岩土体；严格意义上，并联假设不适用于岩土体；当应力较小时混合体的应力－应变关系与理想原状岩土类似，与重塑土差异较大，应力较大时，应力－应变关系特点与应力路径有关。
关键词：岩石；土；损伤；各向同性；本构关系
中图分类号：TU45　　文献标识码：A　　文章编号：1000－4548(2007)11－1636－06
作者简介：周建廷(1972－　)，男，浙江兰溪人，研究员，主要从事土木工程评定与加固研究。E-mail: jt-zhou@163.com。

Constitutive model for isotropic damage of geomaterial

ZHOU Jian-ting[1,2], LIU Yuan-xue[2]
(1. Department of Science and Technology, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Department of Architecture and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: The reasonable synthetic mode of stress and strain for complex theory of geomaterial damage was obtained based on the basic concept of continuum mechanics. The simplified formulas of synthetic mode of stress and strain for isotropic damage was provided. A constitutive model for isotropic damage of geomaterials was put forward, and its numerical computation procedure was also given. The calculated results for a simple example could highlight our understanding about the mechanism of geomaterial damage, and several useful conclusions could be drawn: The series assumption could not be used to the synthetic mode of stress and strain for complex theory of geomaterial damage; strictly speaking, the parallel assumption could not be used to the synthetic mode of stress and strain even under small strain; the complex stress-strain behavior was similar to that of ideal natural geomaterials under small stress, and varied with stress path under large stress.

Key words: rock; soil; damage; isotropy; constitutive relation

0　引　　言

损伤力学是一门较新的力学学科，全称是连续损伤力学（Continuum Damage Mechanics）。损伤力学与断裂力学、疲劳分析理论全都属于破坏力学，是研究物质不可逆的破坏过程的科学。从广泛的意义上看，损伤力学可以被认为是理性连续介质力学在处理耗散系统方面的一个分支。根据广义损伤概念，象土体的塑性流动，结构性黏土受力后的结构破坏，硬土、密砂加载过程中出现的软化现象，黄土的湿陷等等都属于损伤力学的研究范畴。然而损伤力学在岩土力学中的应用却开展得很晚。1988 年，沈珠江[1]将现实的土体看作由理想的原状土和完全损伤土的组合，把土体在受力、浸水或变温下的变形过程看作由原状土向损伤土的演化过程。1993 年，他提出了一个可以考虑黏土结构破损过程的损伤力学模型[2]。岩土损伤模型近年来发展很快[1-8]，但还有一些基本问题值得斟酌：对于岩土材料损伤问题目前的主流认为应该采用复合体理论，即与传统材料不同，损伤后的岩土体虽然力学性质有所劣化，但仍然具有一定的承载能力，但复合体的两个组分的应力、应变合成模式上存在争议，目前有并联、串联与混合模式，需要解决的是合理的复合体两组分的应力、应变合成模式应该是怎样的呢？本文基于连续介质力学基本概念得出岩土损伤复合体理论的应力－应变合成一般模式，简化得出岩土各向同性损伤复合体理论的应力－应变合成模式，建立了岩土各向同性损伤本构模型。提出了岩土各向同性损

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50309017）；重庆市科委资助项目
收稿日期：2006－10－23

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

伤本构模型的数值求解法。通过一个简单算例计算结果分析，可以加深人们对岩土损伤机理的认识。

1　岩土损伤复合体的应力、应变合成模式分析

岩土损伤复合体理论认为：对于岩土材料与传统材料不同，损伤后的岩土体虽然力学性质有所劣化，但仍然具有一定的承载能力，但复合体的两个组分的应力、应变合成模式上与假设有关。即原状岩土与损伤部分遵从不同的本构关系：

$$\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}}=[D_{\mathrm{n}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}} \quad 或 \quad \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}}=[C_{\mathrm{n}}]\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}} \quad , \tag{1}$$

$$\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}}=[D_{\mathrm{d}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}} \quad 或 \quad \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}}=[C_{\mathrm{d}}]\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}} \quad , \tag{2}$$

式中　下标 n，d 分别标记原状岩土与损伤部分的有关物理量。

总应力 σ、总应变 ε 与两组分的应力(σ_{n}，σ_{d})，应变(ε_{n}，ε_{d})的关系与假设有关。

1.1　并联类型合成模式

复合体并联类型的应力－应变合成模式[3-4]都隐含一基本假设，即原状岩土体与损伤岩土体的应变是一致的，两体并联。数学描述为

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon&=\varepsilon_{\mathrm{n}}=\varepsilon_{\mathrm{d}},\\ \sigma&=(1-w)\sigma_{\mathrm{n}}+w\sigma_{\mathrm{d}},\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中，w 为损伤变量。

1.2　串联类型合成模式

复合体串联类型的应力－应变合成模式[5-6]隐含的基本假设为：原状岩土体与损伤岩土体的应变是一致的，两体串联。数学描述为

$$\left.\begin{aligned}\sigma&=\sigma_{\mathrm{n}}=\sigma_{\mathrm{d}},\\ \varepsilon&=(1-w)\varepsilon_{\mathrm{n}}+w\varepsilon_{\mathrm{d}}。\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

1.3　混合类型合成模式

复合体混合类型的应力－应变合成模式[3, 7]隐含的基本假设为原状岩土体与损伤岩土体不是简单的串联或并联，具体的应力应变关系与假设有关，如采用均匀化理论的[8]：

$$\left.\begin{aligned}\bar{\sigma}&=(1-w)\bar{\sigma}_{\mathrm{n}}+w\bar{\sigma}_{\mathrm{d}},\\ \bar{\varepsilon}&=(1-w)\bar{\varepsilon}_{\mathrm{n}}+w\bar{\varepsilon}_{\mathrm{d}}。\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

或从应变能等效假设推出的[3]

$$\sigma\varepsilon=(1-w)\sigma_{\mathrm{n}}\varepsilon_{\mathrm{n}}+w\sigma_{\mathrm{d}}\varepsilon_{\mathrm{d}} \quad 。 \tag{6}$$

因为混合类型合成模式与假设有关，没有统一的关系式，故不一一给出他们对应的本构关系。

1.4　岩土损伤复合体理论应力－应变合成的合理模式

损伤力学是以连续介质力学、不可逆过程热力学为基础，研究固体材料及其工程构件在一定荷载与环境条件下，材料损伤随变形发展最后导致破坏的过程的规律。也就是说它还是在连续介质力学范畴内来研究问题。那么我们就可以从连续介质力学的一些基本概念出发来研究岩土损伤复合体理论应力－应变合成的合理模式问题。

连续介质力学的一点应力定义为 $\sigma=\lim\limits_{\Delta S\to 0}\dfrac{\Delta P}{\Delta S}=\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}S}$，不失一般性，以 x 方向的正应变为例，令原状岩土体与损伤部分所占的面积、应力分别为：$\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}$，$\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}$，$\mathrm{d}P_{x\mathrm{n}}$，$\mathrm{d}P_{x\mathrm{d}}$，则 x 方向的正应力

$$\begin{aligned}\sigma_x&=\frac{\mathrm{d}P_x}{\mathrm{d}S}\\ &=\frac{\mathrm{d}P_{x\mathrm{n}}+\mathrm{d}P_{x\mathrm{d}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}\\ &=\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}\frac{\mathrm{d}P_{x\mathrm{n}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}}+\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}\frac{\mathrm{d}P_{x\mathrm{d}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}\\ &=(1-\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}})\mathrm{d}\sigma_{x\mathrm{n}}+\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}\mathrm{d}\sigma_{x\mathrm{d}},\end{aligned}$$

即

$$\sigma_x=(1-w_{\sigma x})\mathrm{d}\sigma_{x\mathrm{n}}+w_{\sigma x}\mathrm{d}\sigma_{x\mathrm{d}} \quad , \tag{7}$$

式中，$w_{\sigma x}$ 可看成损伤变量，定义为

$$w_{\sigma x}=\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}{\mathrm{d}S_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}S_{\mathrm{d}}}。$$

同理可得

$$\varepsilon_x=(1-w_{\varepsilon x})\mathrm{d}\varepsilon_{x\mathrm{n}}+w_{\varepsilon x}\mathrm{d}\varepsilon_{x\mathrm{d}} \quad , \tag{8}$$

式中，$w_{\varepsilon x}$ 可看成损伤变量，定义为

$$w_{\varepsilon x}=\frac{\mathrm{d}x_{\mathrm{d}}}{\mathrm{d}x_{\mathrm{n}}+\mathrm{d}x_{\mathrm{d}}}。$$

广而言之，一般情况下，岩土体的损伤为各向异性的，这时不能保证 $w_{\sigma i}=w_{\sigma j}$，$w_{\varepsilon i}=w_{\varepsilon j}$，则一般意义的应力应变合成模式为

$$\left.\begin{aligned}\sigma&=(I-[w_\sigma])\sigma_{\mathrm{n}}+[w_\sigma]\sigma_{\mathrm{d}},\\ \varepsilon&=(I-[w_\varepsilon])\varepsilon_{\mathrm{n}}+[w_\varepsilon]\varepsilon_{\mathrm{d}},\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

式中，$[w_\sigma]$，$[w_\varepsilon]$ 为四阶损伤张量。

2　基于各向同性损伤的岩土损伤本构模型

当损伤为各向同性时（事实上当前的岩土损伤模型基本上采用损伤各向同性假设[1-8]的），损伤张量就可以用以标量来表示，而且存在 $[w_\sigma]=[w_\varepsilon]=wI$。这样式（9）变为

$$\left.\begin{aligned}\sigma&=(1-w)\sigma_{\mathrm{n}}+w\sigma_{\mathrm{d}},\\ \varepsilon&=(1-w)\varepsilon_{\mathrm{n}}+w\varepsilon_{\mathrm{d}},\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

显然，即使是在各向同性损伤条件下也不能保证

$$\sigma=\sigma_{\mathrm{n}}=\sigma_{\mathrm{d}} \quad , \quad \varepsilon=\varepsilon_{\mathrm{n}}=\varepsilon_{\mathrm{d}}。$$

因此，对于岩土损伤体的应力应变合成一般公式应采用式（9）。当采用各向同性损伤假设时只能采用

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式（10）。不能简化为式（3）或式（4）。

完整的各向同性岩土损伤本构关系应是结合式（1），（2）和（10），即

$$\left.\begin{aligned}\sigma &= (1-w)\sigma_{\mathrm{n}} + w\sigma_{\mathrm{d}},\\ \varepsilon &= (1-w)\varepsilon_{\mathrm{n}} + w\varepsilon_{\mathrm{d}},\\ \mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}} &= [D_{\mathrm{n}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}},\\ \mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}} &= [D_{\mathrm{d}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}},\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

则

$$\mathrm{d}\sigma = (1-w)\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}} + w\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}} + (\sigma_{\mathrm{d}} - \sigma_{\mathrm{n}})\mathrm{d}w \ , \tag{12}$$

$$\mathrm{d}\varepsilon = (1-w)\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}} + w\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}} + (\varepsilon_{\mathrm{d}} - \varepsilon_{\mathrm{n}})\mathrm{d}w \ 。 \tag{13}$$

令 $w = w(\varepsilon)$，$\mathrm{d}w = w'\mathrm{d}\varepsilon$。式（12），（13）变为

$$\mathrm{d}\sigma = (1-w)[D_{\mathrm{n}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}} + w[D_{\mathrm{d}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}} + (\sigma_{\mathrm{d}} - \sigma_{\mathrm{n}})w'\mathrm{d}\varepsilon \ ,$$

$$\mathrm{d}\varepsilon = (1-w)\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}} + w\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}} + (\varepsilon_{\mathrm{d}} - \varepsilon_{\mathrm{n}})w'\mathrm{d}\varepsilon \ ,$$

则

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}} = \frac{\mathrm{d}\sigma - \{(\sigma_{\mathrm{d}} - \sigma_{\mathrm{n}})w' + [D_{\mathrm{d}}] - [D_{\mathrm{d}}](\varepsilon_{\mathrm{d}} - \varepsilon_{\mathrm{n}})w'\}\mathrm{d}\varepsilon}{(1-w)\{[D_{\mathrm{n}}] - [D_{\mathrm{d}}]\}} \ , \tag{14}$$

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}} = \frac{\{[D_{\mathrm{n}}] - [D_{\mathrm{n}}](\varepsilon_{\mathrm{d}} - \varepsilon_{\mathrm{n}})w' + (\sigma_{\mathrm{d}} - \sigma_{\mathrm{n}})w'\}\mathrm{d}\varepsilon - \mathrm{d}\sigma}{w\{[D_{\mathrm{n}}] - [D_{\mathrm{d}}]\}} \ 。 \tag{15}$$

显然无法得到岩土各向同性损伤本构关系的显式增量应力应变关系 $\mathrm{d}\sigma = [D]\mathrm{d}\varepsilon$。但并不意味就不能得到他们之间的严格关系，一种较方便的方法是采用数值解法，建议方法如下：

（1）确定应力增量 $\Delta\sigma_0$。

（2）先借助并联假设得总应变增量 $\mathrm{d}\varepsilon_0 = [C_1]\mathrm{d}\sigma = [D_1]^{-1}\Delta\sigma_0$。

（3）计算损伤增量 $\mathrm{d}w_0 = w'\mathrm{d}\varepsilon_0$。

（4）根据式（14），（15）得到原状岩土体与损伤部分的应变增量 $\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}0}$，$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}0}$。

（5）根据式（1），（2）得到原状岩土体与损伤部分的应力增量 $\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}0}$，$\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}0}$。

（6）再根据式（10）得到 $\Delta\sigma_1 = \sigma - (1-w)\sigma_{\mathrm{n}} - w\sigma_{\mathrm{d}}$。

（7）重复（2）～（6）步，直到收敛。

（8）进入下一步应力增量计算。

最后的总应力增量为 $\sum\Delta\sigma_0$，总应变增量为 $\sum\mathrm{d}\varepsilon_i$，总损伤增量为 $\sum\mathrm{d}w_i$，原状岩土体的总应变增量为 $\sum\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}i}$，损伤岩土体的总应变增量为 $\sum\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}i}$，原状岩土体的总应力增量为 $\sum\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}i}$，损伤岩土体的总应变增量为 $\sum\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}i}$。

需要注意的一个问题是计算收敛标准的确定，从上述计算可以看出，涉及 7 个变量的计算，而且 6 个是张量，从上面计算过程看，主变量为 $\Delta\sigma_i$，其他都是从变量，也就是说一旦 $\Delta\sigma_i$ 很小，就可以忽略它所致的其他增量，$\Delta\sigma_i$ 为张量，表述如下：

$$\Delta\sigma_i = \begin{pmatrix}\Delta\sigma_{11i} & \Delta\sigma_{12i} & \Delta\sigma_{13i}\\ \Delta\sigma_{21i} & \Delta\sigma_{22i} & \Delta\sigma_{23i}\\ \Delta\sigma_{31i} & \Delta\sigma_{32i} & \Delta\sigma_{33i}\end{pmatrix} 。$$

可以采用应力增量不变量[9]方法来表征 $\Delta\sigma_i$，以判断其收敛行为

$$\begin{cases}\Delta p_i = \left(\Delta\sigma_{11i} + \Delta\sigma_{22i} + \Delta\sigma_{33i}\right)/3,\\ \Delta q_i = [\left(\Delta\sigma_{11i} - \Delta\sigma_{22i}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{22i} - \Delta\sigma_{33i}\right)^2 +\\ \left(\Delta\sigma_{33i} - \Delta\sigma_{11i}\right)^2 + 6\left(\Delta\sigma_{12i}{}^2 + \Delta\sigma_{13i}{}^2 + \Delta\sigma_{23i}{}^2\right)]^{\frac{1}{2}}/\sqrt{2}。\end{cases}$$

如果满足下式，可以认为计算已经收敛，

$$\Delta p_i < \alpha\Delta p_0,\ \Delta q_i < \alpha\Delta q_0,\ 0 < \alpha << 1。 \tag{16}$$

3 算例

下面将给出一个基于各向同性损伤的岩土损伤本构关系算例，可以比较岩土体损伤后，不同相与整体的应力应变差异，以便加深对岩土损伤的理解。

3.1 原状土的本构关系

假设原状土的本构行为为线弹性模型，采用广义虎克定律描述：

$$\left.\begin{aligned}\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}} &= [C_{\mathrm{n}}]\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}},\\ \mathrm{d}\sigma_{\mathrm{n}} &= [D_{\mathrm{n}}]\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{n}},\\ [D_{\mathrm{n}}] &= [C_{\mathrm{n}}]^{-1}。\end{aligned}\right\} \tag{17}$$

3.2 损伤土的本构关系

损伤土的本构关系采用修正剑桥模型表述[10]：

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}}{}^{\mathrm{e}} = [C_{\mathrm{d}}{}^{\mathrm{e}}]\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{d}} \ , \tag{18}$$

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}}{}^{\mathrm{p}} = \mathrm{d}\lambda\frac{\partial F}{\partial\sigma_{\mathrm{d}}} \ , \tag{19}$$

基于剑桥模型的损伤土体的总应变增量为

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}} = \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}}{}^{\mathrm{e}} + \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{d}}{}^{\mathrm{p}}。$$

3.3 损伤变量演化规律

假定损伤变量演化规律为

$$w = 1 - \exp(\frac{-k_1\varepsilon_{\mathrm{t}}}{\lambda_{\mathrm{p}}}) \ , \tag{20}$$

式中，$\varepsilon_{\mathrm{t}} = \sqrt{(1-A)\varepsilon_{\mathrm{v}}{}^2 + A\varepsilon_{\mathrm{s}}{}^2}$。

3.4 力学参数

重塑土材料参数 λ，λ_{e}，M，原状土 E，ν，损伤参数 A 根据文献[9，10]确定，损伤参数 k_1 根据当剪切应变达到 15%时，损伤达到 90%计算确定。计算参数如下：$\lambda = 0.0576$，$\lambda_{\mathrm{e}} = 0.0217$，$M$=0.954，$E$＝33 MPa，$\nu = 0.3$，$k_1 = 0.86$，$A = 0.7$。

3.5 等 p 应力路径 1 计算结果分析

等 p 应力路径为：$q = 0$，$p = 0\ \mathrm{kPa} \rightarrow 100\ \mathrm{kPa}$。即三向等压加载 p 从 0 kPa 升至 100 kPa。结果见图 1～图 3。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

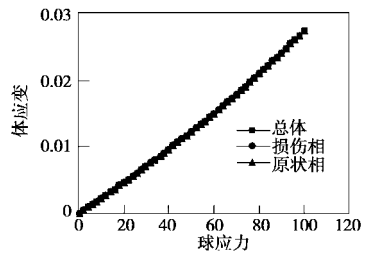


图 1 总体应变与两相体应变

Fig. 1 Total volumetric strain and two-phase volumetric strain

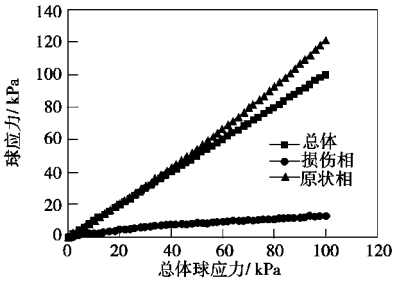


图 2 总应力与两相应力

Fig. 2 Total stress and two-phase stress

基于各向同性损伤土、理想原状土及完全重塑土应力应变关系对比见图 3。

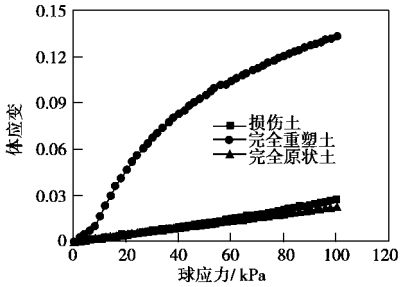


图 3 损伤土、完全原状土与完全重塑土应力应变关系

Fig. 3 The comparison of stress-strain relation among admixture, ideal natural soil, and completely damaged soil

从上述图形对比可以看出，当应力不大时，混合体的总应变与原状相、重塑相的应变是一致的（图 1），即变形是均匀的。损伤程度基本呈线性变化，总损伤不大，约为 20%。但应力相差较大（图 2）：总应力与原状部分基本相同，原状部分应力略大，而损伤部分应力则要小得多，因为这一路径损伤较小，相对而言，应力较小时，重塑土的刚度要小得多，故应力主要由未损伤部分承担。从图 3 可以看出当应力较小时混合体的应力应变关系与理想原状土类似，与重塑土差异较大，这与图 1 和图 2 结果一致，即应力较小时，损伤较小，应力主要由未损伤部分承担，混合体主要表现为理想原状土特性（线弹性体）。

3.6　等 p 应力路径 2 计算结果分析

等 p 应力路径为：$q=0$，$p=0$ kPa $\rightarrow$1000 kPa。三向等压加载 p 从 0 kPa 升至 1000 kPa。结果见图 4～图 6。

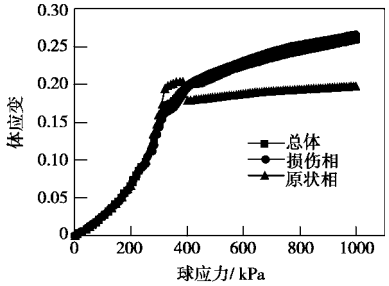


图 4 总应变与两相应变

Fig. 4 Total volumetric strain and two-phase volumetric strain

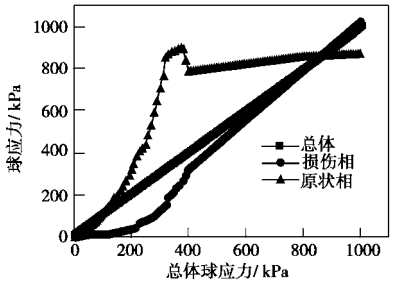


图 5 总应力与两相应力

Fig. 5 Total stress and two-phase stress

基于各向同性损伤土、完全原状土及完全重塑土应力应变关系对比图如图 6。

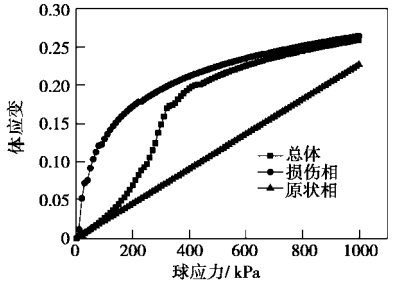


图 6 损伤土、完全原状土与完全重塑土应力应变关系

Fig. 6 The comparison of stress-strain relation among admixture, idea natural soil, and completely damaged soil

从图 4～6 对比可以看出，当应力逐渐增大时，混合体的总应变与原状相、重塑相的应变从一致变到有很大差异（图 4），应力较大时，总应变与重塑土比较接近。损伤程度开始时基本呈线性变化，到后来逐渐减缓，最终总损伤约为 90%。原状相、重塑相的应力相差较大（图 5）：混合体的总应力开始时与原状部分基本相同，应力较大时，与损伤部分应力接近，这与土体损伤演化情况相一致，那一相占优势，那一相的应力就与总应力接近 ;比较有趣的一点是应力很大后，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

原状相有一定的卸载现象，这与假设有关，原状相为线弹性体，刚度不随压力变化，而重塑土具有应力硬化现象，刚度随应力而增长，应力很大后，计算刚度大于原状相，应力就主要有重塑相承担，故原状相的应力有向重塑相转移的现象（需要说明的是，这是一种基于假设的计算现象）。从图 6 可以看出当应力较小时混合体的应力应变关系与理想原状土类似，与重塑土差异较大，而当应力较大时，混合体的应力应变关系与重塑土类似，与理想原状土差异较大，这与图 4，图 5 结果一致，即应力较小时，损伤较小，应力主要由未损伤部分承担，混合体主要表现为理想原状土特性（线弹性体），应力较大时，损伤较大，应力主要由损伤部分承担，混合体主要表现为重塑土特性。

3.7 三轴剪切应力路径 3 计算结果分析

三轴剪切应力路径 3 为：$\sigma_2 = \sigma_3 = 200$ kPa，$\sigma_1 = 200$ kPa ↑。因为篇幅关系本文主要显示剪切方面的对比，不突出体积变化。结果见图 7～9。

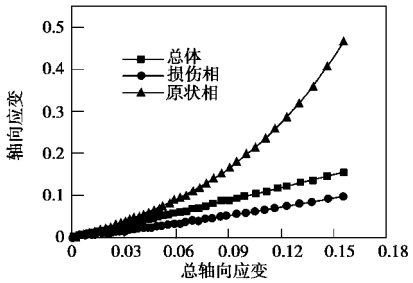


图 7 总轴向应变与两相轴向应变

Fig. 7 Total axial strain and two-phase axial strain

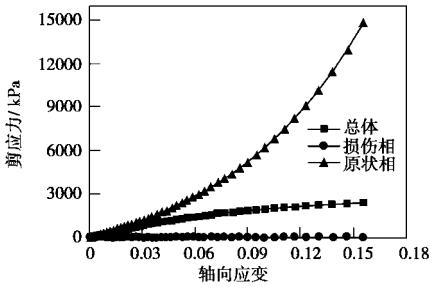


图 8 总剪应力与两相剪应力

Fig. 8 Total shear stress and two-phase shear stress

基于各向同性损伤土、完全原状土及完全重塑土应力应变关系对比图如下：

从图 7～9 对比可以看出，围压为 200 kPa 的三轴剪切试验中，当应力逐渐增大时，混合体的总应变与原状相、重塑相的应变从相近变到有很大差异（图 7），应力较大时，总应变与重塑相、原状相相差都较大。损伤程度开始时基本呈线性变化，到后来逐渐减缓，最终总损伤约为 83.7%。开始时原状相与总体的应力状态相近，与重塑相相差较大；应力较大后，三者的应力状态相去甚远（图 8）。从图 9 可以看出当应力较小时混合体的应力应变关系与理想原状土类似，与重塑土差异较大，而当应力较大时，混合体的应力应变关系与两相差异都大。土体剪切时的应力应变规律与三轴等压压缩大不相同，原因在于三轴剪切时以剪切应变为主，体积应变较小，所以土体损伤相硬化不足，承载能力低，不能象三向等压一样，逐渐以重塑相承担荷载为主。

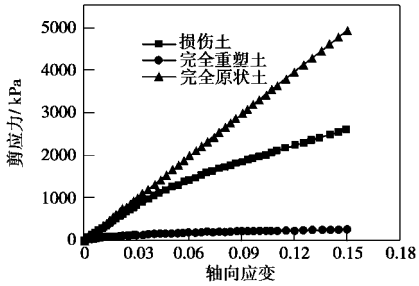


图 9 损伤土、完全原状土与完全重塑土应力应变关系

Fig. 9 The comparison of stress-strain relation among admixture, idea natural soil, and completely damaged soil

3.8 计算结果分析

从上述算例结果可以看出基于各向同性损伤的岩土力学行为：

（1）当应力较小时，土体变形是均匀的，土体力学行为类似于未损伤土（理想原状土）。但并不意味着可以采用并联假设：从计算过程来看，当应力达到 3 kPa 时，就有一定误差需要迭代（一步计算误差达 0.5%），达到 30 kPa 后误差就比较大了（一步计算误差达 1.5%以上）。因此严格意义上，并联假设不适用于岩土体。

（2）当应力较小时，整体应力与原状相接近，与重塑相相差大。当应力较大时，对于三轴压缩路径，整体应力与重塑相较接近，与原状相相差较大；而对于三轴剪切路径，整体应力与重塑相、原状相相差都大。也就是说全过程来看，两相的应力相差都比较大，即串联假设不适用于岩土体。

（3）当应力较小时混合体的应力应变关系与理想原状土类似，与重塑土差异较大。当应力较大时，三轴等压路径时混合体的应力应变关系与重塑土类似，与理想原状土差异较大，三轴剪切时混合体的应力应变关系与重塑土、理想原状土差异都大。

4 结 论

基于连续介质力学基本概念推导出岩土损伤复合体理论的应力－应变一般合成模式，简化得出岩土各

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向同性损伤复合体理论的应力－应变合成模式，建立了岩土各向同性损伤本构模型。

通过一个简单算例计算结果分析，可以加深人们对岩土损伤机理的认识。结论如下：

（1）严格意义上，并联假设不适用于岩土体。

（2）串联假设不适用于岩土体。

（3）当应力较小时混合体的应力应变关系与理想原状岩土类似，应力较大时应力应变关系特点与应力路径有关。

参考文献：

[1] 沈珠江, 章为民. 损伤力学在土力学中的应用[C]//第三届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 595－610. (SHEN Zhu-jiang, ZHANG Wei-min. Application of damage mechanics in soil mechanics[C]// The 3th Chinese Conference of Numerical Simulation and Analysis of Geomaterial. Beijing: China Architecture and Building Press, 1988: 595 － 610. (in Chinese))

[2] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 21－28. (SHEN Zhu-jiang. The elastoplastic damage model of structural clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 21 － 28. (in Chinese))

[3] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破损力学-结构类型与荷载分担[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(13): 2137－2142. (SHEN Zhu-jiang, CHEN Tie-lin. Geomaterial breakage mechanics-structure types and load share[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(13): 2137－2142. (in Chinese))

[4] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003(7): 1－6. (SHEN Zhu-jiang, HU Zai-qiang. The binary medium model of loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 1－6. (in Chinese))

[5] 周　成, 沈珠江, 陈生水, 陈铁林. 结构性土的次塑性扰动状态模型[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 435－439. (ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang, CHEN Sheng-shui, CHEN Tie-lin. Hypoplastic disturbed state model of structural soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 435－439. (in Chinese))

[6] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(4): 565－569. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. The constitutive model of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(4): 565－569. (in Chinese))

[7] 沈珠江. 岩土破损力学: 理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 253－257. (SHEN Zhu-jiang. Geomaterial breakage mechanic: The ideal fragile elastoplastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 253－257. (in Chinese))

[8] WANG J G, LEUNG C F. A simplified homogenization method for composite soils[J]. Computers and Geotechnics, 2002: 384－397.

[9] 刘元雪. 含主应力轴旋转的土体一般应力应变关系[D]. 重庆: 后勤工程学院, 1997. (LIU Yuan-xue. The general stress-strain relation of soil involving rotation of principal stress axis[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 1997. (in Chinese))

[10] 刘元雪, 施建勇, 尹光志, 陆　新. 基于应力空间变换的原状软土本构模型[J]. 水利学报, 2004(6): 14－20. (LIU Yuan-xue, SHI Jian-yong, YIN Guang-zhi, LU Xin. The constitutive model of natural soft soil based on transformation of stress space[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 14－20. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net