

水泥土细观破裂过程的损伤本构模型

陈四利^{1,2}, 宁宝宽^{1,2}, 鲍文博², 金生吉²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 沈阳 110023)

摘 要: 根据对饱水环境中水泥土力学特性的宏观试验和细观破裂过程试验研究, 建立了水泥土细观孔隙损伤变量和损伤本构模型, 该水泥土的损伤变量不仅与水泥土的初始损伤有关, 而且与水泥土微小孔隙中的孔隙水的密度有关, 所建立的损伤本构模型与饱水情况下水泥土的单轴压缩试验曲线进行了对比, 分析结果表明, 所提出的水泥土细观孔隙损伤本构模型与试验值基本吻合, 很好地描述了水泥土的损伤演化特性。

关 键 词: 水泥土; 细观孔隙; 损伤变量; 本构模型

中图分类号: TU 449

文献标识码: A

A damage constitutive model of cemented soil on meso-fracture process testing

CHEN Si-li^{1,2}, NING Bao-kuan^{1,2}, BAO Wen-bo², JIN Sheng-ji²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Department of Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: On the base of macroscopic and meso-scopic testing on cemented soil in the situation of saturated with water, a damage evolving variable is proposed corresponding with a meso-damage constitutive model established. Not only initial density of water but also initial damage of cemented soil has influence on damage evolving variable. Compared with experimental curves of cemented-soil, it is shown that the damage constitutive model has in good coincidence with the testing results. And the constitutive model can describe the damage characteristic of cemented soil saturated with water.

Key words: cemented soil; meso-cracking; damage evolving variable; constitutive model

1 前 言

水泥土是水泥、土、水以及外加剂按一定比例掺合, 经均匀拌合而成的多相混合体系。水泥土内部特别是水泥水化物与土颗粒之间不可避免地存在着大量的初始孔隙和缺陷, 许多学者应用经典连续介质力学对其力学特性进行了分析, 取得了一定的研究成果^[1~8]。

近年来, 将损伤力学应用于水泥土等岩土材料成为解决此类问题的一种有效途径。张土乔^[9]基于连续性损伤力学概念, 建立了水泥土的损伤本构关系和损伤演变方程, 并对所建立的损伤本构关系和损伤演变方程进行了室内试验验证。童小东^[10]依据不可逆热力学与连续介质损伤力学的基本原理, 根据水泥土的应变硬化规律和损伤硬化规律, 假定了

塑性损伤本构方程和损伤演化方程的形式, 并结合损伤试验确定了水泥土的有关材料参数, 得到了水泥土的塑性损伤本构关系和损伤演化规律, 从而得出了水泥土的弹塑性损伤本构关系, 建立了水泥土在无侧限轴向压缩情况下的弹塑性正交各向异性损伤模型。王立峰^[11]等假定应力主轴与材料主轴重合, 并在加载过程中保持不变, 在此基础上, 推导出水泥土的损伤模型, 提出了针对水泥土的损伤演化方程。

然而, 以上水泥土损伤模型的建立均是在宏观试验的基础上, 对水泥土材料微细观结构的变化及其损伤演化机理的分析还有待研究, 特别是考虑孔隙水存在情况下水泥土损伤演化的规律更需要深入分析。为此, 作者将基于水泥土在细观加载仪上进行的细观力学破裂过程试验结果^[12], 考虑水泥土在

收稿日期: 2005-11-12

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室资助课题 No. Z110403) 和国家自然科学基金资助 (No. 50204009)。

作者简介: 陈四利, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要从事建筑工程和岩石力学与工程方面的研究与教学工作。

饱水情况下的初始密度和初始损伤的影响,建立了水泥石在单轴压缩细观孔隙损伤的本构模型。该模型很好地描述了饱水情况下水泥石细观孔隙损伤演化特性,建立的水泥石细观损伤本构关系模型基本上反映了水泥石的应力-应变响应关系,分析结果表明了应用损伤力学分析水泥石破裂机理的有效性,本文所建立的模型很好地描述了水泥石的损伤演化特性。

2 水泥石细观力学试验的破裂特征

在单轴压缩条件下,水泥石破裂的实质是水泥石在受力过程中微裂纹的萌生、扩展直至裂纹连通的结果,是水泥石微细观结构变形破坏积累的宏观反映。笔者利用本所设计的数字视频观测试验系统观测和记录到了水泥石试件破裂的全过程,水泥石在单轴压缩条件下裂纹起裂并开始扩展时,基本属于张开型的,开始时并没有明显的剪切现象,而且裂纹起裂及扩展方向都与荷载方向平行或成很小的夹角。只是主裂纹形成后才产生整体的错动,而且主裂纹的扩展几乎没有产生明显地分叉现象,试件最后出现宏观的拉压剪断裂破坏。

3 细观裂纹损伤本构模型的建立

由试验结果和分析表明,水泥石中的微细观裂纹、空洞等孔隙随着荷载的增加开始扩展并形成主裂纹,最终导致宏观断裂,文中利用水泥石材料的密度变化来分析水泥石细观孔隙损伤,同时,考虑孔隙水溶液对其的影响,以便探究水泥石在受力过程中细观结构的改变和孔隙水溶液侵蚀下水泥石的细观损伤破坏机理。

3.1 单轴压缩细观裂纹损伤本构方程

在水泥石材料中取一微小单元体 V ,假设其尺寸大到足以包含许多微小孔隙,但同时也充分小,小到可以视为连续损伤力学的一个质点来考虑,以使材料内的微细观孔隙的分布状态是均匀的。

水泥石在饱水条件下,设某一单元体 V 内的密度为:

$$\rho = (1-k)\rho_m + k\rho_w \quad (1)$$

式中: ρ 为水泥石材料的密度; ρ_m 为无孔隙水泥石基体材料的密度; ρ_w 为孔隙水的密度; k 为水泥石的孔隙率。

假设单元体内单个微小孔隙体积大致相等,且记单个孔隙体积为 V_0 ,根据微小孔隙的几何特征及孔隙率的定义,单元体的孔隙率与随机分布的微小

孔隙个数成正比,故 k 可写成:

$$k = ANV_0 \quad (2)$$

式中: N 为单位体积内的孔隙个数; A 为水泥石材料系数。

根据 Grady 和 Kipp^[13]的研究, N 服从 Weibull 分布,即:

$$N = B\varepsilon^n \quad (3)$$

式中 B 和 n 均为材料常数。将式 (3) 代入式 (2) 可得:

$$k = ABV_0\varepsilon^n = C\varepsilon^n \quad (4)$$

式中 C 为材料常数。将式 (4) 代入式 (1) 得:

$$\rho = \rho_m - (\rho_m - \rho_w)C\varepsilon^n \quad (5)$$

利用 Bellion^[14]损伤变量形式,水泥石损伤变量为

$$D = -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (6)$$

式中: D 为水泥石材料的损伤变量; ρ_0 为水泥石材料的初始密度; $\Delta\rho$ 为水泥石材料损伤的密度改变量,将式 (5) 代入式 (6) 可得:

$$D = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_0}\right) + \left(\frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_0}\right)C\varepsilon^n \quad (7)$$

由式 (1) 可得水泥石的初始密度为:

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 &= (1-k_0)\rho_m + k_0\rho_w \\ \text{所以 } \rho_m &= \frac{1}{1-k_0}(\rho_0 - k_0\rho_w) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: k_0 为水泥石材料的初始孔隙率。将式 (8) 代入式 (7) 可得:

$$D = D_0 + m\varepsilon^n \quad (9)$$

其中: $D_0 = \frac{1}{1-k_0}\left(1-k_0\frac{\rho_w}{\rho_0}\right) - 1$ (10)

$$m = \left[\frac{1}{1-k_0}\left(1-k_0\frac{\rho_w}{\rho_0}\right) - \frac{\rho_w}{\rho_0}\right]C \quad (11)$$

式中: D_0 为水泥石材料的初始损伤变量; m 为水泥石材料的损伤系数。

从式 (9) 可以看出,水泥石的损伤变量不仅与水泥石的初始密度有关,而且与水泥石微小孔隙中的孔隙水的密度有关。

根据应变等效假设，有：

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon = E(1-D)\varepsilon \quad (12)$$

将式 (9) 代入式 (12)，可得到本文所建立的饱水情况下水泥石观孔隙损伤本构模型：

$$\sigma = E[(1-D_0)\varepsilon - m\varepsilon^{n+1}] \quad (13)$$

由于试件在单轴压缩初始时，属于水泥石观微裂隙压密阶段，如图 1 所示的 OA 段，超过 A 点（曲线的拐点）以后为弹性压密阶段，所以式 (11) 只适应 A 点以后的应力-应变关系，而 OA 段的应力-应变关系可取为 $\sigma = \sigma_A(\varepsilon/\varepsilon_A)^2$ ，即可得到本文所建立的饱水情况下水泥石观的损伤本构模型：

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_A(\varepsilon/\varepsilon_A)^2, & \varepsilon \leq \varepsilon_A \\ \sigma_A + E[(1-D_0)(\varepsilon - \varepsilon_A) - m(\varepsilon - \varepsilon_A)^{n+1}], & \varepsilon > \varepsilon_A \end{cases} \quad (14)$$

式中 σ_A 和 ε_A 为 A 点对应的应力和应变。

从上述得到的公式可以看出，本文所建立的模型不仅可以分析水泥石观材料细观孔隙损伤，而且还适用于探讨各种水溶液侵蚀的损伤演化规律。

3.2 水泥石观破坏形式的损伤本构模型

水泥石观应力-应变曲线见图 1 和图 2 所示，式 (14) 中的系数 m 和 n 可由 $\sigma - \varepsilon$ 全过程曲线的峰值点 $P(\sigma_p, \varepsilon_p)$ 来求得，因为在极值点有 $(d\sigma/d\varepsilon)|_p = 0$ ，故

$$\left. \begin{aligned} 1 - D_0 - m(n+1)\varepsilon_p^n &= 0 \\ \sigma_p &= \sigma_A + E[(1-D_0)(\varepsilon_p - \varepsilon_A) - m(\varepsilon_p - \varepsilon_A)^{n+1}] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式 (13) 可得：

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{\sigma_p - \sigma_A}{(1-D_0)E(\varepsilon_p - \varepsilon_A) - (\sigma_p - \sigma_A)} \\ m &= \frac{1-D_0}{1+n}(\varepsilon_p - \varepsilon_A)^{-n} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

这样，可得到水泥石观单轴压缩破坏时的损伤本构方程：

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_A(\varepsilon/\varepsilon_A)^2, & \varepsilon \leq \varepsilon_A \\ \sigma_A + E[(1-D_0)(\varepsilon - \varepsilon_A) - m(\varepsilon - \varepsilon_A)^{n+1}], & \varepsilon > \varepsilon_A \end{cases} \quad (17)$$

4 损伤本构模型的应用

为了验证本文所建立的水泥石观单轴压缩损伤本构模型的正确性，将笔者试验所得的单轴压缩曲

线与本文所建立的损伤本构模型预测曲线进行对比，结果如图 1 和图 2 所示，由于篇幅有限，仅取 2 个试验压缩曲线，图 1 和图 2 分别为含水泥 7 % 和 15 % 的水泥石观试验压缩曲线和损伤本构模型预测曲线。这里，水泥石观的弹性模量 $E = 120 \text{ MPa}$ ，考虑水泥石观的初始损伤，经检测图 1 的水泥石观的初始孔隙率 $k_0 = 0.12$ ， $\rho_0 = 1.9 \text{ g/cm}^3$ ， $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ，则由式 (10) 可得水泥石观的初始损伤 $D_0 = 0.06459$ ，而经检测图 2 的水泥石观的初始孔隙率 $k_0 = 0.10$ ， $\rho_0 = 1.95 \text{ g/cm}^3$ ， $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ，则由式 (10) 可得水泥石观的初始损伤为 $D_0 = 0.05413$ ，通过试验结果分析得知，水泥石观微裂隙压密阶段（A 处）的荷载为极限荷载的 15~20 % 范围，本文计算时取 A 处的荷载为极限荷载的 20 %。

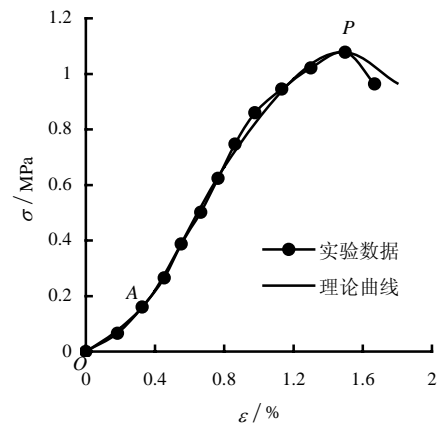


图 1 7 % 水泥掺量土 $\sigma - \varepsilon$ 的试验曲线与理论曲线的对比
Fig.1 Comparison between the theoretic and experimental $\sigma - \varepsilon$ curves of cemented-soil with 7 percent of cement

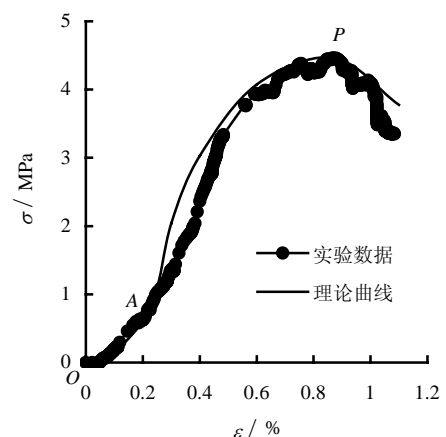


图 2 15 % 水泥掺量的水泥石观 $\sigma - \varepsilon$ 的试验曲线与理论曲线的对比
Fig.2 Comparison between the theoretic and experimental $\sigma - \varepsilon$ curves of cemented-soil with 15 percent of cement

5 结论与讨论

本文根据饱水环境对水泥土力学特性影响的试验研究和观测水泥土的细观破裂特征,建立了水泥土的细观孔隙损伤本构模型,其结果讨论如下:

(1) 针对水泥土力学的特性和细观力学试验结果,本文提出并建立一个新的饱水环境下的水泥土损伤演化变量,该变量不仅与水泥土的初始密度有关,而且与水泥土微小孔隙中的孔隙水的密度有关。

(2) 利用新的水泥土损伤演化变量,建立了含水环境下水泥土细观孔隙损伤本构模型,并与在饱水环境下水泥土的单轴压缩试验曲线进行了对比,结果表明,该模型与试验值基本吻合,很好地描述了饱水情况下水泥土细观孔隙损伤特性。

(3) 在实际工程中,水泥土中的孔隙水溶液成分复杂,本文所建立的水泥土损伤演化变量和细观损伤本构模型可以分析孔隙水溶液成分对水泥土损伤的影响,有关这方面的研究作者将另文介绍。

参 考 文 献

- [1] Fisher K P. Properties of an artificially cemented-clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(1): 25—37.
- [2] Rolling R S. Sulfate attack on cement-stabilized sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1999, 121(5): 364—372.
- [3] 郝巨涛. 水泥土材料力学特性的探讨[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(3): 53—59.
HAO Ju-tao. Study on mechanical properties of cemented-soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 13(3): 53—59.
- [4] 周建民, 等. 深层搅拌桩复合地基的有限元分析[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 44—50.
ZHOU Jian-min, FENG Ding-xiang, ZHENG Hong. Finite element analysis for compound foundation of deep mixing piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2): 44—50.
- [5] 王星华. 黏土固化浆液固结过程的 SEM 研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 34—40.
WANG Jing-hua. SEM study on hardening processes of clay-hardening grouts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 34—40.
- [6] 陈善民, 王立忠, 等. 水泥土动力特性室内试验及复合地基抗震特性分析[J]. 浙江大学学报, 2000, 34(4): 398—403.
CHEN Shan-min, WANG Li-zhong. Experimental determination of dynamic properties of cement-treated soil and earthquake behavior of composite foundation[J]. **Journal of Zhejiang University**, 2000, (34)4: 398—408.
- [7] Masake Kitazume. Centrifuge model on failure envelope of column type deep mixing method improved ground[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(1): 43—55.
- [8] Vatsala A, Nova R, Srinivasa Murthy BR. Elasto-plastic model for cemented soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(8): 679—687.
- [9] 宫必宁, 李淞泉. 软土地基水泥深层搅拌加固土物理力学特性研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(2): 101—105.
GONG Bi-ning, LI Song-quan. Study on physical and mechanical characteristics of deep jet mixing strengthening soil for soft foundation[J]. **Journal of Hohai University**, 2000, 28(2): 101—105.
- [10] 童小东, 龚晓南, 蒋永生. 水泥土的弹塑性损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 82—85.
TONG Xiao-dong, GONG Xiao-nan, JIANG Yong-sheng. Experimental study on elastoplastic damage of cemented soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(4): 82—85.
- [11] 王立峰, 朱向荣. 水泥土损伤模型的试验研究[J]. 科技通报, 2003, 19(2): 136—139.
WANG Li-feng, ZHU Xiang-rong. Study of damage mode of CSS and experimental research[J]. **Bulletin of Science and Technology**, 2003, 19(2): 136—139.
- [12] 宁宝宽, 陈四利, 丁梧秀, 等. 水泥土细观破裂过程的实时观测试验[J]. 岩土力学, 待发表.
NING Bao-kuan, CHEN Si-li, DING Wu-xiu. Real-time observation on the meso-fracture process testing of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, (to be published).
- [13] Grady D E, Kipp M E. Continuum modeling of explosive fracture in shale[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1980, 17: 147—157.
- [14] Bellion G, Bernascoin G. In creep of engineering[J]. **Material & Structure**, 1978, 8(3): 54—65.