

混凝土破裂过程细观损伤与渗流耦合模拟

赵吉坤¹ 张子明¹ 祁顺彬²

(1. 河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 南京交通职业技术学院 江苏 南京 211188)

摘要 :假定混凝土是由骨料、砂浆、界面和随机微缺陷组成的四相复合材料 ,并据此假定建立了混凝土四相复合材料的细观力学模型 ,导出了混凝土弹塑性损伤-渗流耦合本构方程 ,同时数值模拟了试样破裂过程 ,基于细观尺度研究了混凝土弹塑性损伤-渗流耦合问题 ,结果表明 :混凝土渗透系数的变化与混凝土试样弹塑性损伤破裂全过程密切相关 ,破坏的细观单元成为渗流的主要通道。
关键词 :混凝土 ; 渗流 ; 弹塑性损伤 ; 随机微缺陷
中图分类号 :TV431 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2008)01-0071-05

在蓄水过程中 ,流固耦合作用对混凝土坝坝体稳定影响较大 ,研究表明 ,流固耦合过程具有如下 2 个特点 (a)混凝土在流体载荷作用下产生变形 ,变形影响流场 ,从而改变流体载荷的分布形式和大小 ,这种流固两相介质之间的相互作用将产生复杂的流固耦合现象 , (b)流体和固体所占空间各不相同 ,它们之间的相互作用通过流固两相交界面上的边界效应反映出来 ,

张玉军等^[1-4]探讨了饱和岩土体中的渗流-应力耦合现象 ,为了更全面地研究岩石渗流-应力耦合特性 ,一些学者对岩石渗流、应力和损伤耦合作用进行了物理试验 ,这种研究方法为模拟水压致裂过程提供了一种新的途径 ,随着计算机技术的发展 ,岩石损伤-渗流细观数值模拟试验技术也有了新的发展^[5] ,而混凝土弹塑性损伤-渗流细观数值模拟研究还处于起步阶段 ,为此 ,本文基于细观尺度研究了混凝土弹塑性损伤-渗流耦合问题 ,根据 Biot 理论和应变空间理论 ,建立了弹塑性损伤-渗流耦合方程 ,提出了混凝土四相复合材料的细观力学模型 ,并对该模型进行了破坏过程的损伤-渗流耦合数值模拟研究 ,

1 混凝土损伤-渗流耦合方程的建立

1.1 应力-渗流耦合方程^[6-7]

Biot 将孔隙流体压力 p 和水容量的增量 Δn 列为状态变量 ,认为在饱和区内 ,介质服从有效应力定律和 Darcy 定律 :

$$\begin{cases} \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}p \\ V_i = -K_s \frac{\partial h}{\partial x_i} \end{cases} \tag{1}$$

式中 : σ'_{ij} ——有效应力 ; σ_{ij} ——总应力 ; δ_{ij} ——Kroneker delta 函数 ; p ——孔隙压力 ; V_i —— x_i 方向的水流速度 ; K_s ——饱和介质的渗透系数 ; h ——总水头 ,

孔隙介质骨架的本构方程可写成

$$\sigma'_{ij} = D^e_{ijkl} \epsilon^e_{kl} \tag{2}$$

式中 : D^e_{ijkl} ——弹性有效刚度矩阵 ; ϵ^e_{kl} ——弹性应变张量 ,由应变和位移关系得出几何方程

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \epsilon_v &= \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} \end{aligned} \tag{3}$$

式中 ϵ_{ij} 为总应变 ,综合应用式 (1)~ (3) ,可以得到用孔隙介质位移 u_i 和应力表示的平衡方程

收稿日期 2007-03-13
基金项目 国家自然科学基金(50379004)
作者简介 赵吉坤(1977—) ,男 ,山东茌平人 ,博士研究生 ,主要从事混凝土细观损伤与断裂数值模拟研究 ,

$$[\sigma'_{ij} + \alpha \delta_{ij} p]_{,j} + \rho X_i = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (4)$$

式中: α ——孔隙水压系数; ρ ——混凝土细观单元密度; ρX_i ——体力。

混凝土细观单元的非稳定渗流方程为

$$\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} = -K_{ij} \nabla^2 p \quad (5)$$

式中: α ——孔隙水压系数; ε_v ——体应变; Q ——Biot 常数; K_{ij} ——渗透系数, 对于各向同性介质, 各个方向的渗透系数相同, 假定为 K 。

渗流-应力关系方程为

$$K(\sigma, p) = \xi K_0 e^{-\beta \sigma_u / 3 - \alpha p} \quad (6)$$

式中: ξ ——渗透率突跳系数; K_0 ——初始渗透系数; β ——耦合系数。当应力应变达到阈值时, 渗透系数会发生突变。式(6)为用于渗流-损伤耦合数值分析的控制方程, 称为渗流-弹塑性损伤耦合本构方程。

将本构方程、几何方程代入平衡方程, 可得到用位移表示的 Navier 型方程

$$(\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x_j} + G \nabla^2 u + p X_j + \alpha \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0 \quad (j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中 G 和 λ 为剪切模量和拉梅系数。

1.2 混凝土损伤-渗透耦合方程

根据损伤力学理论和塑性理论, 可以得出在应变空间内考虑弹塑性损伤的本构关系。三维应力状态下混凝土细观单元的弹塑性损伤本构方程为

$$\sigma = (1 - W) D_0^e (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (8)$$

式中: D_0^e ——未损伤状态下的弹性 4 阶张量; W ——损伤变量; ε ——总的应变张量, 可分解为弹性应变张量 ε^e 和塑性应变张量 ε^p 部分, 即 $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$ 。

当细观单元的剪应力达到 Mohr-Coulomb 损伤阈值时,

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \geq f_c \quad (9)$$

式中: φ ——摩擦角; f_c ——单轴抗压强度。这里, 损伤变量

$$W = \begin{cases} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_{cu}(\varepsilon_{tu})) \\ 1 - \left(\frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon^p} \right)^3 & (\varepsilon \geq \varepsilon_{cu}(\varepsilon_{tu})) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{cu}(\varepsilon_{tu})$ ——压缩(拉伸)时的屈服应变; ε ——单轴总应变; ε^p ——等效塑性应变。

单元渗透系数

$$K = \begin{cases} K_0 e^{-\beta \sigma_u / 3 - \alpha p} & (W = 0) \\ \frac{1}{1 - W} K_0 e^{-\beta \sigma_u / 3 - \alpha p} & (0 < W < 0.999) \\ 1000 K_0 e^{-\beta \sigma_u / 3 - \alpha p} & (0.999 \leq W \leq 1) \end{cases} \quad (11)$$

1.3 混凝土耦合方程的 Galerkin 形式

根据 Galerkin 有限元理论, 耦合模型方程(4)(5)可分别写成相应的“弱积分”形式。混凝土骨架变形方程(4)可写为

$$\int_Q [\sigma'_{ij} + \alpha \delta_{ij} p]_{,j} \delta u_i dv = - \int_Q \rho X_i \delta u_i dv \quad (12)$$

利用高斯定律, 式(12)可以简化成一阶形式

$$\begin{aligned} \int_Q \sigma'_{ij} \delta u_{i,j} dv + \int_Q \alpha p \delta u_{i,j} dv = \\ \int_Q \rho X_i \delta u_i dv + \int_{\Gamma_s} (\sigma'_{ij} + \alpha p) \delta u_i n_j dS \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\int_Q \alpha p \delta u_{i,j} dv$ ——流体压力载荷; $\int_Q \rho X_i \delta u_i dv$ ——体力项; $\int_{\Gamma_s} (\sigma'_{ij} + \alpha p) \delta u_i n_j dS$ ——边界处所受的总载荷。

那么,混凝土骨架变形方程的 Galerkin 有限元公式为

$$Ku = F_p + F_s \tag{14}$$

式中: u ——混凝土位移,是主要未知量; K ——混凝土骨架变形刚度矩阵; F_p ——流-固耦合对应的有效荷载列向量; F_s ——边界处总载荷列向量。

与混凝土骨架变形有限元公式类似,在方程(5)中引入“虚位移” δp ,得到孔隙流体渗流方程的弱积分形式

$$\int_Q K_{ij} \nabla^2 p \delta p dv = \int_Q \left[\alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} - \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} \right] \delta p dv \tag{15}$$

因此,流体渗流方程的一阶积分方程为

$$-\int_Q K_{ij} \nabla p (\delta \nabla p) dv + \int_{\Gamma_s} K_{ij} \nabla p (\delta p) dS = \int_Q \left[\alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} - \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial t} \right] \delta p dv \tag{16}$$

那么,渗流方程的 Galerkin 有限元公式,其矩阵形式为

$$M_p p + K^p p = F_\epsilon + F_p \tag{17}$$

2 混凝土四相复合材料模型的建立

混凝土是典型的非均匀材料,其中含有微裂缝,甚至有宏观的缺陷(如裂纹、夹杂、气泡、孔穴等),其长度大多小于 0.5 mm。随机缺陷具有一定的方向性。混凝土的强度、变形和破坏性能都与其内部结构及裂缝的扩展有关。这些裂纹大致可以分为 2 种类型:随机分布的微裂缝,它在一定程度上控制着混凝土的抗拉和抗压等宏观强度;方向一定的宏观裂缝,它有时使得混凝土的力学性质呈现各向异性。混凝土破坏是由于对象体系中潜在的各种缺陷引起的,其过程实际上就是微裂纹萌生、扩展、贯通,直到宏观裂纹产生导致混凝土失稳破裂的过程。

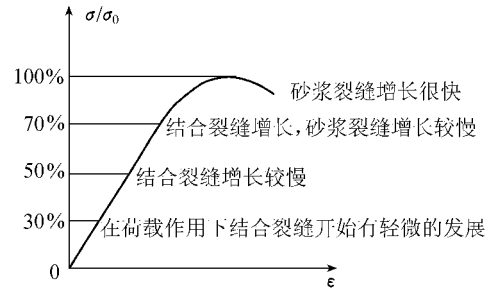


图 1 混凝土的应力应变与微裂缝的关系
Fig.1 Relationship between stress-strain and random micro-cracks of concrete

混凝土内部细微裂隙(结合裂隙和砂浆裂隙)的存在对混凝土的强度和变形有重要影响。Glücklich 研究了混凝土单轴受力构件的应力应变与微裂缝发展的关系,如图 1 所示。

假设混凝土内部随机微缺陷为任意形状的,第 l 个随机缺陷中心 O 的位置 (x_1^l, x_2^l, x_3^l) 在区域内随机分布,混凝土内部随机微裂纹或随机微缺陷满足如下关系式:

$$f_l = (x_i - x_i^l) / a_i = 1 \quad (i = 1, 2, 3) \tag{18}$$

式中 a_i 为随机变化的半轴长度。式(18)为第 l 个随机微裂纹或随机微缺陷函数,满足 $f_l = 0$ 的单元为混凝土随机缺陷单元。需要说明的是,模型中的随机微裂纹或随机缺陷在结构上是非连通的细微裂纹,它不同于宏观预制裂纹。模型采用该部分细观单元的材料参数弱于界面单元材料参数的方法表征这种原始缺陷。

在受载过程中,混凝土微裂纹、原始缺陷的存在和发展使损伤-渗流耦合问题变得十分复杂。细观力学的发展给这一问题的解决提供了新的途径。本文建立了三维混凝土四相复合材料(骨料、砂浆、界面和随机微缺陷)模型,如图 2 所示。该模型力学参数服从 Weibull^[8-10]分布,具体数值见表 1。

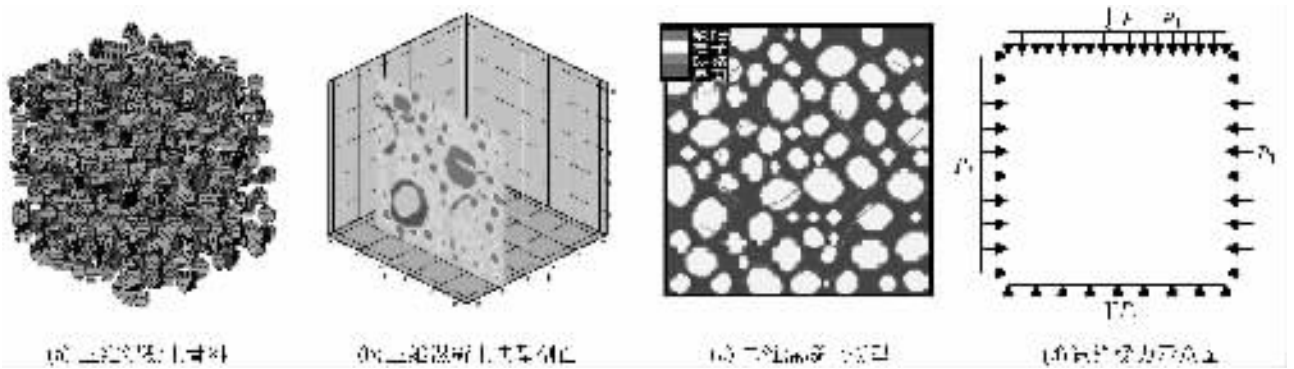


图 2 混凝土四相复合材料模型

Fig.2 Model of four-phase composite concrete material

3 混凝土损伤-渗流耦合数值试验

二维混凝土四相复合材料细观模型的单元类型采用四节点等参单元,三维采用八节点六面体等参单元.二维混凝土四相复合材料细观力学模型的加载情况(图2(d))是下端固定;围压 P_3 为3 MPa;上端施加位移 P_4 为0.000 2 mm/步,稳定水压 P_1 为2.4 MPa;下端施加水压 P_2 为2 MPa.

在数值模拟过程中提出破坏单元网格消去法,清晰地显示破坏单元的破裂情况.

从图3可以看出,混凝土损伤从随机缺陷开始不断增多,随着载荷的不断施加,细观破坏单元不断增加,在渗流耦合作用下,破裂的随机缺陷周围细观单元产生较大孔隙水压力,随着载荷的不断加大,较薄弱的界面单元和砂浆单元产生损伤破坏并贯通,形成的主裂纹成为渗水的主要通道,宏观表现为裂隙流.对比图4和图5可以看出,渗透系数的变化与混凝土试样的损伤破坏过程密切相关,混凝土细观单元损伤破坏使其渗透系数发生变化.

表1 混凝土各组成部分的材料参数均值

Table 1 Mean values of material parameters of different ingredients of concrete

组分	弹性模量/ MPa	泊松比	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
砂浆	14 000	0.2	20.0	2.000	1×10^{-6}
界面	12 000	0.2	10.0	1.000	3×10^{-6}
骨料	23 000	0.2	70.0	7.000	2×10^{-9}
随机缺陷	1 000	0.2	0.2	0.002	2×10^{-5}

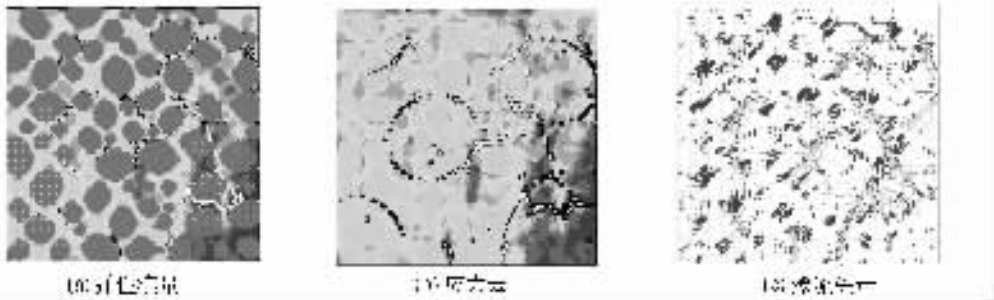


图3 混凝土损伤破坏示意图

Fig.3 Sketch of concrete damage

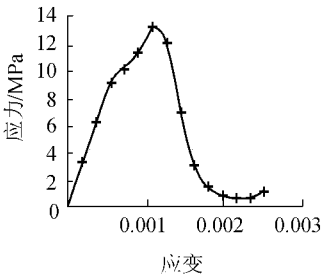


图4 混凝土试样应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of concrete sample

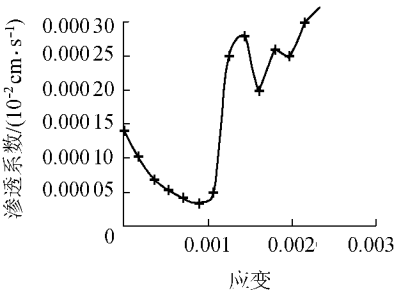


图5 混凝土试样渗透系数-应变曲线

Fig.5 Permeability coefficient-strain curve for concrete sample

数值模拟结果表明,在弹性阶段,若原生微裂隙闭合,则混凝土渗透系数随着应力的增大而略有降低,若原生微裂隙不发育,则混凝土渗透系数变化不大,进入弹塑性阶段后,随着新生裂隙的扩展、贯穿,混凝土渗透系数先缓慢增大,而后急剧增大,在应力峰前或峰后达到极大值,进入损伤破坏阶段后,随着应变的增大,损伤不断产生,混凝土渗透系数急剧降低,而后由于更多破坏单元的产生混凝土渗透系数不断增大.由于水与混凝土细观骨架存在耦合作用,混凝土中的有效应力和塑性区不断发生变化,当每一增量步满足平衡条件后,整个渗流场和应力场趋于稳定.这些现象定性上与物理试验结果较为吻合.

混凝土中渗流会产生水压力,这种水压力会改变混凝土的应力状态,混凝土应力状态的改变会影响混凝土渗透系数的变化,渗透系数的变化又直接影响水的渗流状态.混凝土渗流,不仅作为流体介质冲刷孔隙或裂隙中的填充物,造成混凝土孔隙率的增加,而且作为一种直接力作用在混凝土细观单元上,影响混凝土的稳定性.

4 结 语

本文建立了混凝土四相复合材料细观力学模型,导出了混凝土弹塑性损伤-渗流耦合本构方程,通过对混凝土四相复合材料细观模型破裂过程细观损伤-渗流耦合的模拟研究,取得了与定性分析结果较为一致的数值模拟结果,从而验证了本文所建模型的合理性.通过渗透系数变化来反映混凝土损伤破裂情况进而解释损伤-渗流耦合机理的方法,将加强损伤-渗流耦合特性的宏观规律与微观机理之间的联系,为深入探讨应力-渗流耦合作用发生发展的内在原因提供了有效途径.

采用 Weibull 分布函数来描述混凝土细观单元的强度、弹性模量和渗透系数等力学性质,将细观力学方法与数值计算方法有机地结合起来,在考虑到非均匀性特点的情况下研究混凝土各相复合材料的非线性力学行为,是一种运用连续介质力学方法解决非连续介质力学问题的新型数值分析方法.

参考文献:

[1] 张玉军. 饱和-非饱和介质水-应力耦合弹塑性二维有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3045-3051.

[2] 叶源新, 刘光廷. 岩石渗流应力耦合特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2518-2525.

[3] 王媛, 徐志英, 速宝玉. 复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 177-180.

[4] 盛金昌, 速宝玉, 赵坚, 等. 溪洛渡拱坝坝基渗流-应力耦合分析研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 104-108.

[5] 杨天鸿, 屠晓利, 於斌, 等. 岩石破裂与渗流耦合过程细观力学模型 [J]. 固体力学学报, 2005, 26(3): 333-337.

[6] 武文华, 李锡夔. 非饱和土的热-水力-力学本构模型及数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 411-416.

[7] 严飞, 詹美礼, 速宝玉. 堤坝非饱和渗流模型实验 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 296-298.

[8] 张子明, 赵吉坤, 倪志强. 混凝土拉伸断裂的数值模拟 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 287-290.

[9] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂: 数值试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 29-35.

[10] 张子明, 赵吉坤, 吴昊. 混凝土细观损伤的数值模拟 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 422-425.

Coupled simulation of meso-damage and seepage during the process of concrete failure

ZHAO Ji-kun¹, ZHANG Zi-ming¹, QI Shun-bin²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univeristy, Nanjing 210098, China ;
2. Nanjing Communications Institute of Technology, Nanjing 211188, China)

Abstract: Under the assumption that concrete was a four-phase composite material consisting of mortar, aggregate, interface and random micro-flaw at the meso-level, a meso-mechanical model for four-phase composite materials was developed. A coupled elastoplastic damage-seepage constitutive equation for concrete was deduced, and the failure process of concrete samples was simulated. The study of elastoplastic damage-seepage coupling of concrete in mesoscopic view shows that the variation of permeability coefficient of concrete is closely related to the process of elastoplastic damage, and the damaged meso-element is the main passage of seepage.

Key words: concrete; seepage; elastoplastic damage; random micro-flaw