高孔隙水压作用下混凝土渗流-损伤耦合模型

林凯生, 李宗利

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 混凝土高坝、深埋隧道等工程建筑承受较高的水头,使得混凝土内存在高渗透力,产生较显著的渗流-损 伤耦合作用.应用 Picandet 等学者提出的混凝土渗透损伤演变方程,结合混凝土损伤塑性模型,建立了孔隙水压 作用下混凝土渗流-损伤耦合模型.以混凝土坝内小孔非恒定渗流为例,分别按耦合和非耦合模型进行渗流损 伤分析,对比分析不同方法得到的孔隙水压力及损伤值分布规律.结果表明,随着孔隙水压力的增大,损伤值逐 渐增大,两者变化规律基本一致.在高孔隙水压作用下渗流-损伤耦合效应明显,应用渗流-损伤耦合模型能够 更好地反映混凝土在高孔隙水压作用下的受力变形特性.

关 键 词:混凝土;高孔隙压力;耦合;损伤塑性模型 **中图分类号:**TV431:TV32.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2010)02-0051-05

混凝土是由骨料、水泥浆、掺合料等组成的多相复合材料,其内部结构十分复杂,并存在微裂纹、微孔隙 等缺陷. 高压水会从结构表面的微观裂纹、孔隙逐渐渗入到混凝土内部,并导致混凝土的材料性能发生劣化, 劣化又会引起渗透性的增大,如奥地利 Kolnbrein 拱坝的开裂破坏^[1]就是由上述原因导致的. 目前,国内外学 者提出了许多分析研究因材料劣化引发渗透系数变化的耦合方法,包括孔隙率、应变水平、塑性应变、温度、 裂缝尺寸及损伤变量等与渗透系数之间的耦合方法^[2-3]. 描述混凝土材料内部微观结构缺陷分布和力学性 能劣化程度的场变量[4]就是损伤变量,混凝土材料的劣化损伤对渗透系数的变化起着控制作用[2].损伤值 的增大带来渗透系数的变化,渗透系数的变化又会影响渗透力的大小,影响应力场和位移场,位移场的变化 又引起渗透系数的变化,这种耦合作用最终体现在损伤场的变化上.文献[5]通过对多组混凝土进行试验, 提出了计算低损伤程度下渗透系数与损伤值的耦合方程.许多学者[6-7]也针对实验结果提出了渗透系数关 于损伤值的函数. 文献[8-9]分别利用均一化分析方法和离散模型论证了渗透系数与损伤值的耦合关系. 文 献[10]基于 Biot 固结孔隙水压理论,研究了重力坝的混凝土材料损伤断裂对孔隙水压力影响,为多孔介质 材料的渗流与损伤断裂的耦合研究提供了方法. 文献 [11] 采用弹塑性损伤模型,考虑渗透系数和损伤值的 耦合作用,对混凝土高压容器进行了数值分析,并取得了较好的效果.本文基于 ABAQUS 有限元软件,应用 Picandet 等^[5]学者提出的混凝土在气体作用下渗透系数的损伤演变方程,采用混凝土损伤塑性模型,并以简 单试件为模拟对象,在考虑与不考虑渗流-损伤耦合效应两种情况下,分析渗流稳定过程中孔隙水压力、损 伤值的变化情况. 通过对比分析, 阐述了高压水作用下混凝土结构中的渗流-损伤耦合效应, 为进一步研究 高坝等混凝土建筑物的渗透破坏奠定基础.

1 数值分析模型

1.1 渗流与应力耦合数学模型

基于 Biot 固结理论的多孔介质材料渗流理论,在混凝土材料的非线性力学特性与渗透系数的耦合研究

收稿日期: 2009-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50779057);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB714104) 作者简介:林凯生(1985-),男,广西南宁人,硕士研究生,主要从事结构设计理论与材料研究.

E-mail: linkaisheng1985@163.com

中已得到了很好的应用^[10]. ABAQUS 有限元软件提供的渗流应力耦合分析理论基于经典渗流理论,能求解 多孔介质的饱和渗流、非饱和渗流及二者的混合问题^[12]. 本文直接采用该模型,下面对该模型做简要介绍. 1.1.1 渗流连续方程 流经微单元体的流体满足连续性,其表达式为

$$\int_{V} \frac{1}{J} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (J\rho_{w} sn) \,\mathrm{d}V = -\int_{A} \rho_{w} sn\boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{v}_{w} \,\mathrm{d}A \tag{1}$$

式中: $J = |dV/dV_0|$ 为混凝土材料的当前体积与初始体积的比值; ρ_w 为流体密度;s为饱和度;n为孔隙率;m为流体所流经的微元面的外法向矢量; v_w 为从 dA 面流入流体的平均流速矢量.

孔隙介质渗流遵循 Darcy 定律或者 Forchheimer 定律. 前者适用于低渗透流速,是线性关系;而后者适用于较高渗流流速,是非线性关系,具有更广泛的适用性,其表达式为

$$sn\boldsymbol{v}_{w}(1 + \beta \sqrt{\boldsymbol{v}_{w} \cdot \boldsymbol{v}_{w}}) = -\frac{k_{s}}{\rho_{w}g}\boldsymbol{k} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x}$$
(2)

式中: β 为与材料孔隙比相关的速率系数,当其值趋近于0时,Forchheimer 定律将转化为Darcy 定律; $k_s(s)$ 为 饱和度 s 的函数, 且 $k_s(1)=1$; k 为饱和渗透系数矩阵; ϕ 为总水头.

1.1.2 有效应力原理 基于有效应力原理,多相材料的总应力 σ 由有效应力 σ' ,孔隙水应力 u_w 和孔隙气 应力 u_a 共同组成,其表达式为

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + [\chi u_w + (1 - \chi) u_a] \boldsymbol{I}$$
(3)

式中: $\chi = \chi(s)$ 为饱和度的函数,由试验确定,但该试验数据很难获取,文中简单取 $\chi = s$;I为单位矩阵;当多相材料的渗透性能显著时,式中的孔隙气应力 u_a 可以忽略不计,反之则应考虑.

1.1.3 应力平衡方程 在t时刻,某体积域的固相材料的应力平衡基于虚功原理可以表示为

$$\int_{V} \boldsymbol{\sigma} \delta \boldsymbol{\varepsilon} \mathrm{d} V = \int_{A} t \delta v \mathrm{d} A + \int_{V} f \delta \boldsymbol{v} \mathrm{d} V + \int_{V} s n \rho_{\mathrm{w}} g \delta \boldsymbol{v} \mathrm{d} V \tag{4}$$

式中: δv 为虚速度场; $\delta \varepsilon = sym(\delta v / \delta x)$ 为虚变形速率;t为单位面积的表面力;f为除流体重量以外的其余体积力.式(4)右侧第3项是考虑渗流过程中孔隙内水变化产生的效应.

上述耦合分析模型中考虑了孔隙率变化引起的流量及渗透系数的变化,较经典的 Biot 流固耦合理论有 所改进. 孔隙率的变化主要有两部分组成:一是由于结构形变引起孔隙体积变化;二是微裂纹等缺陷的萌生、 扩展及贯通,使得材料内部的孔隙结构和大小发生改变,即材料发生损伤而引起的孔隙结构变化^[4].本文模 型中还不能很好地考虑损伤引起的孔隙结构变化,但可将这种变化近似均匀到孔隙率的变化内.

1.2 渗流-损伤耦合方程

混凝土在孔隙水压的作用下,因孔隙体积变化引起孔隙率的变化,可由式(2)建立孔隙率与渗透系数的 变化关系,而损伤与混凝土孔隙率的变化有关,由此建立渗透系数与损伤变量的关系,构成渗流与损伤的耦 合分析模型.混凝土渗透系数的损伤演变采用 Picandet 等学者^[5]提出的方程. Picandet 等学者通过普通混凝 土、高性能混凝土以及高性能钢筋混凝土的轴向压缩试验,得到了低损伤程度下的气体渗透系数演化方程,

$$k = k_0 [(\alpha d)^{\beta}]$$
 (0 ≤ d ≤ 0.18) (5)
式中: k_0 为初始渗透系数; α 为试验常数,取值范围为 9.4 ~ 12.3,本文取 11.3; β 为试验常数,取值范围为

1.6~1.8,本文取 1.64;d 为标量刚度损伤变量, $d=1-E_d/E_0, E_0, E_d$ 分别为材料的初始及受损弹性模量.

应用式(5),通过 ABAQUS 的用户接口子程序嵌入渗流分析模型中,实现渗流-损伤耦合分析功能.

1.3 混凝土损伤塑性力学模型

本文采用 ABAQUS 中的混凝土损伤塑性模型^[12]. 该模型是以 Lubliner^[13], Lee 等^[14]提出的损伤模型为 基础的宏观唯象学模型,采用各相同性弹性损伤结合各相同性拉伸和压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性 行为,可以模拟低围压时混凝土受到单调、循环或动载作用下的力学行为. 该模型主要包括以下几部分.

1.3.1 损伤型本构方程 根据塑性力学原理,材料某点的应变可分解为弹性应变和塑性应变. 假设混凝土 在孔隙水压作用下损伤是各向同性的,但受拉损伤与受压损伤机理不同,分别采用不同的损伤值. 在单轴循 环荷载或者三轴应力状态下,有

$$d = 1 - (1 - s_{t}d_{c})(1 - s_{c}d_{t})$$
(6)

式中:*d*为标量刚度损伤变量,*d*₁,*d*_e分别为单轴拉伸、压缩损伤变量,由试验获得;*s*₁,*s*_e为与应力方向有关的应力状态函数,两者在单轴循环荷载状态和三轴应力状态下的表达式有所不同,详见文献[13-14].

由此,标量弹性损伤模型的损伤型本构方程表示为

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d)\boldsymbol{D}_0^{\text{el}}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}) = \boldsymbol{D}^{\text{el}}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}})$$
(7)

式中: D_0^{el} 表示初始(无损伤)材料的弹性刚度; D^{el} 为损伤弹性刚度, $D^{\text{el}} = (1-d)D_0^{\text{el}}$; $\varepsilon, \varepsilon^{\text{el}}, \varepsilon^{\text{pl}}$ 分别为总应变、 弹性应变和塑性应变, $\varepsilon = \varepsilon^{\text{el}} + \varepsilon^{\text{pl}}$.

有效应力定义为
$$\overline{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{D}_0^{\text{el}}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}) = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{1-d}$$
 (8)

1.3.2 屈服函数 损伤塑性模型给出的有效应力空间的屈服函数^[13]F为:

$$F(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}) = \frac{1}{1-\alpha} \{ \bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}) \langle \hat{\bar{\boldsymbol{\sigma}}}_{\mathrm{max}} \rangle - \gamma \langle \hat{\bar{\boldsymbol{\sigma}}}_{\mathrm{max}} \rangle \} - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{c}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}_{c}) \leq 0$$
(9)

式中: α, γ 为无量纲材料常数; $\beta(\tilde{\epsilon}^{pl}) = \frac{\overline{\sigma}_{c}(\tilde{\epsilon}^{pl}_{c})}{\overline{\sigma}_{t}(\tilde{\epsilon}^{pl}_{t})}(1-\alpha) - (1+\alpha); p, q$ 分别为屈服面上的等效静水压力、

Mises 等效有效应力; $\hat{\sigma}_{max}$ 为有效应力 σ 的最大特征值.

1.3.3 流动法则 采用非关联的流动法则[13],即

$$\dot{\varepsilon}^{\rm pl} = \dot{\lambda} \, \frac{\partial G(\overline{\boldsymbol{\sigma}})}{\partial(\overline{\boldsymbol{\sigma}})} \tag{10}$$

式中: λ 为非负塑性乘子; $G = \sqrt{(\epsilon \sigma_v \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi$ 为定义在有效应力空间的流动势, 采用 Drucker-Parger 抛物线函数; σ_v 为破坏时的单轴应力; ϵ 为偏移量参数; ψ 为 p-q 平面上高围压下的剪胀角.

2 实例分析

为研究渗流-损伤的耦合效应,假设在混凝土坝中截取图1所示计算单元,尺寸为150mm×150mm,中 心存在一小孔,孔径2mm.采用孔隙流体/应力耦合单元,共划分单元4685个.不考虑重力及其他外力的作 用,在孔内施加2.5MPa的水压力.混凝土弹性模量为2.65×10¹⁰Pa,泊松比为0.167,密度为2400kg/m³, 单轴拉伸强度为1.8MPa,初始渗透系数为1.1×10⁻¹⁰m/s.并假设初始时刻混凝土内孔隙率为0.01,饱和度 为1,水力梯度为0,且无气体存在.为更好地模拟高坝等建筑物混凝土的渗流场,分析模型的四周设定为排 水边界,其渗流速度为0.8×10⁻¹³m/s,并保持不变.在考虑渗流-损伤耦合的情况下,发生损伤的区域,其渗 透系数发生相应变化,而未损伤区域,包括分析模型的四边,渗透系数保持不变.为简化模型,分析过程中不 考虑由结构形变引起的孔隙率变化,并假设混凝土材料为均质材料,水在混凝土材料的孔隙、微裂隙中的运 动服从达西定律,且渗透各向同性.

采用瞬态分析法分别在不同渗流时刻,按考虑和不考虑渗流-损伤的耦合作用两种情况进行分析.随着 入渗时间的延长,材料内各点的孔隙水压逐步增高,直至达到稳定渗流状态.若以某点孔隙水压的变化率小 于 500 Pa/s 为判断渗流是否达到稳定的标准,则考虑渗流-损伤耦合的情况下,达到稳定渗流的时间为 87.2 s,而不考虑时为 84.7 s.考虑耦合分析渗流达到稳定的时间稍大于非耦合情况,其原因在于材料内部 微裂隙扩展贯通之后,孔隙裂隙内的水所受到的阻力减小,材料渗透系数增大,从而使得孔隙水继续向前渗 透,延长了渗流达到稳定的时间.

图 1 为渗流达到稳定时孔隙水压力的等值线图.从图中可见,孔隙水压分布基本是轴对称的.以圆孔中 心的极坐标为中心,不同时刻的孔隙水压、损伤变量沿径向分布见图 2.从图 2(a)可见,考虑渗流-损伤耦合 的情况下各点的孔隙水压较不考虑的要大.在 30 s 时,距孔中心 30 mm 处,考虑渗流-耦合分析得到的孔隙 水压为1030 kPa,而不考虑时为995 kPa;在渗流达到稳定时,距孔中心30 mm 处,考虑渗流-损伤耦合分析 得到的孔隙水压为1279 kPa,不考虑时为1214 kPa.可见,渗流造成的损伤使混凝土的渗流系数明显增大, 导致同一时刻、同一点处的孔隙压力较不考虑耦合作用时大,耦合作用明显.从图2(b)可见,随着孔隙水压 力的增大,损伤值逐渐增大,两者变化规律基本一致.由于只有达到屈服应力之后材料才开始发生损伤,故损 伤范围仅在孔周17 mm 内.达到稳定状态,考虑渗流-损伤耦合作用下的损伤值较不考虑时要大.







3 结 语

(1)应用 Picandet 等学者提出的混凝土损伤与渗透系数关系,建立渗透系数损伤演变方程,并编写了用 户子程序,嵌入在混凝土渗流模型中,实现了渗流-损伤耦合分析;

(2)基于 ABAQUS 软件的渗流-损伤塑性模型,建立了高孔隙水压作用下混凝土的塑性损伤分析模型;

(3)实例分析表明,高孔隙水压对混凝土的损伤破坏明显,并且存在较强的渗流-损伤耦合效应.由此说明,对于高坝、深埋隧道等与高孔隙水压接触的混凝土建筑物采用渗流-损伤耦合分析能够较真实地反映实际破坏.

参考文献:

- [1] 夏颂佑,鲁慎吾. Kolnbrein 拱坝坝踵开裂机理探讨[J]. 水电站设计, 1999, 15(1): 26-33. (XIA Song-you, LU Shenwu. Approach to cracking mechanism of Kolnbrein Arch Dam heel[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1999, 15(1): 26-33. (in Chinese))
- [2] HOSEINI M, BINDIGANAVILE V, BANTHIA N. The effect of mechanical stress on permeability of concrete: a review [J]. Cem Concr Compos, 2009, 31 (4): 213-220.

- [3] CHOINSKA M, KHELIDJ A, CHATZIGEORGIOU G, et al. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(1): 79-88.
- [4] SOROUSHIAN P, ELZAFRANEY M. Damage effects on concrete performance and microstructure [J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(7): 853-859.
- [5] PICANDET V, KHELIDJ A, BASTIAN G. Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1525-1532.
- [6] SOULEY M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada[J]. Int J Rock Mech Mining Sci, 2001, 38(2): 297-310.
- [7] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Modelling of hydro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermochemical and mechanical material degradation [J]. Comput Methods Appl Mech Eng, 2003, 192(13-14): 1731-1771.
- [8] DORMIEUX L, KONDO D. Approche micromécanique du couplage perméabilité-endommagement [J]. C R Mecanique, 2004, 332(2): 135-140.
- [9] CHATZIGEORGIOU G, PICANDET V, KHELIDJ A, et al. Coupling between progressive damage and permeability of concrete: analysis with a discrete model[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 2005, 29(10): 1005-1018.
- [10] BARY B, BOURNAZEL J P, BOURDAROT E. Poro-damage approach applied to hydro-mechanical fracture analysis of concrete [J]. J Eng Mech, 2000, 126(9): 937-943.
- [11] JASON L, PIJAUDIER-CABOT G, GHAVAMIAN S, et al. Hydraulic behaviour of a representative structural volume for containment buildings[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(12/13): 1259-1274.
- [12] HIBBITT, KARLSSON, SORENSEN INC. ABAQUS analysis user's manual[M]. America: HKS Inc, 2005.
- [13] LUBLINER J, OLIVER J. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25 (3): 229-326.
- [14] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.

Coupling analysis model of concrete seepage and damage by action of high pore water pressure

LIN Kai-sheng, LI Zong-li

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: High concrete dams and deep-lying tunnels, etc. withstand the action of high water pressure, so there exists the effect of high penetration in the concrete interior, which inevitably develops into a more significant seepage-damage coupling effect. The coupling analysis model on the seepage and damage of concrete by the action of pore water pressure is built on the basis of the damage-developing equation of concrete's permeability, which was proposed by Picandet et al., and on the concrete damaged plasticity model. Taking the unsteady seepage flow of pores in concrete dam as an example, the seepage-damage analysis is made according to the coupling and uncoupled model respectively, and the comparison of the pore water pressure and the damage value between different ways is carried out. The results show that with the pore water pressure's increase, the damage value increases gradually, whose changing patterns are basically correspondent to the changes of pore water pressure. Seepage-damage coupling effects of concrete by the action of the high pore water pressure are obvious, so the characteristics of force and deformation of concrete by the action of high pore water pressure can be better reflected by use of the seepage-damage coupling analysis model.

Key words: concrete; high pore water pressure; coupling; damaged plasticity model