利用损伤塑性模型分析岩体水力耦合过程

陈　伟，阮怀宁

（河海大学岩土工程研究所，江苏 南京 210098）

摘　要：使用损伤塑性模型分析隧洞开挖过程中的岩体耦合过程。在低围压条件下，岩石呈现脆性材料行为特性，主要的破坏机制是受拉开裂和受压破碎。此次研究使用的损伤塑性模型能够体现出低围压条件下脆性岩石的损伤破坏机制。计算模型中，浅埋引水隧洞按顺序开挖，开挖后岩体充分变形，然后加入支护。计算结果表明：开挖顺序对隧洞围岩的力学行为有着重要影响。隧洞开挖后，在洞底部和侧墙附近产生了一定程度的张拉损伤破坏。裂缝在压应力条件下产生闭合现象，因此此次计算没有发现压破损伤。

关键词：耦合；损伤塑性；开挖

作者简介：陈　伟（1979－　），男，博士，主要从事岩石隧洞开挖渗流应力耦合分析和地质参数的随机生成。

0　引　　言

在低地应力低围压条件下，岩石一般呈现脆性材料特性，它的不均匀性和不连续性导致材料具有微观缺陷[1]。隧洞开挖过程中，由于扰动和卸荷作用，脆性岩体材料的缺陷会进一步发展，强度和刚度均有不同程度的降低。岩体的开裂损伤会影响到岩体的水利行为，而水利行为的改变又可以影响岩石的力学响应，因此对浅埋隧洞开挖过程中岩体的水力耦合损伤分析是非常必要的。

本文采用等效连续模型模拟岩石介质的水利行为，针对脆性材料特性，采用了损伤塑性本构关系来反映岩体的力学响应。

1　裂隙多孔介质模型的控制方程

1.1　Biot 有效应力

Biot修正形式的有效应力公式为

$$\sigma = \sigma' - \alpha_{\text{biot}} I P_{\text{w}} \quad , \tag{1}$$

式中，σ 是总应力张量，σ' 为有效应力张量，P_{w} 是孔隙水压力，α_{biot} 为Biot系数[2-3]。

1.2　饱和多孔介质的质量守恒方程

变形多孔介质中流体的质量守恒方程最终形式可以表示为

$$\phi \frac{\partial \rho_{\text{w}}}{\partial t} + \rho_{\text{w}} \left[\frac{\partial \varepsilon_{\text{v}}}{\partial t} + \frac{(1-\phi)}{\rho_{\text{s}}} \frac{\partial \rho_{\text{s}}}{\partial t} \right] = -\nabla(\rho_{\text{w}} \bar{v}_{\text{w}}) \quad , \tag{2}$$

式中，ϕ 表示材料的孔隙率，ρ 表示密度，v 表示速度，下标 w, s 分别代表液相和固相，$\bar{v}_{\text{w}}$ 表示液体平均速度。式（2）中，右边表示液体水质量的散度，主要是Darcy 对流，左边表示液体水质量的改变率是由水的密度，体积应变和固体颗粒的体积改变组成的。

1.3　脆性材料损伤塑性本构方程

1.3.1　应力应变关系

$$\sigma = (1-d) D_0^{\text{el}} : (\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}) = D^{\text{el}} : (\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}) \quad , \tag{3}$$

式中，D_0^{el} 是初始（非损伤）弹性矩阵，$D^{\text{el}} = (1-d) D_0^{\text{el}}$ 是退化矩阵，d 是退化变量。

参照连续损伤力学，引入“有效应力”的概念（这里的“有效应力”和多孔介质力学的有效应力是两个不同的概念）：

$$\bar{\sigma} = D_0^{\text{el}} : (\varepsilon - \varepsilon^{\text{pl}}) \quad , \tag{4}$$

Cauchy 应力可以表示为

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad , \tag{5}$$

退化变量 d 是硬化变量 $\tilde{\varepsilon}^{\text{pl}}$ 和“有效应力”的函数

$$d = a(\bar{\sigma}, \tilde{\varepsilon}^{\text{pl}}) \quad , \tag{6}$$

硬化变量 $\tilde{\varepsilon}^{\text{pl}}$ 表示为

$$\tilde{\varepsilon}^{\text{pl}} = \begin{bmatrix} \tilde{\varepsilon}_{\text{t}}^{\text{pl}} \\ \tilde{\varepsilon}_{\text{c}}^{\text{pl}} \end{bmatrix} \quad , \tag{7}$$

其中硬化变量 $\tilde{\varepsilon}_{\text{t}}^{\text{pl}}$ 和 $\tilde{\varepsilon}_{\text{c}}^{\text{pl}}$ 分别对应于受拉和受压的等效塑性应变。

1.3.2　屈服函数

脆性材料的损伤塑性屈服函数模型基于 Lubliner 等提出的原始模型[4]和Lee and Fenves 提出的改进模型[5]，能够反映在受拉和受压条件下，不同的强度变化过程。

$$F(\bar{\sigma}, \tilde{\varepsilon}^{\text{pl}}) = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}^{\text{pl}})(\hat{\bar{\sigma}}_{\max}) - \gamma(-\hat{\bar{\sigma}}_{\max})) - \bar{\sigma}_{\text{c}}(\tilde{\varepsilon}_{\text{c}}^{\text{pl}}) \le 0, \tag{8}$$

式中，α 和 γ 是材料常数，$\bar{p}$ 是“有效”静水压力，$\bar{q}$ 是 Mises 等效“有效”应力。$\hat{\bar{\sigma}}_{\max}$ 是 $\bar{\sigma}$ 的代数最大特征值。

$$\beta(\tilde{\varepsilon}^{\text{pl}}) = \frac{\bar{\sigma}_{\text{c}}(\tilde{\varepsilon}_{\text{c}}^{\text{pl}})}{\bar{\sigma}_{\text{t}}(\tilde{\varepsilon}_{\text{t}}^{\text{pl}})} (1-\alpha) - (1+\alpha) \quad , \tag{9}$$

式中，$\bar{\sigma}_{\text{t}}$ 和 $\bar{\sigma}_{\text{c}}$ 分别是“有效”抗拉和抗压应力。

1.3.3　流动法则

塑性损伤模型采用非相关联的流动法则，

$$\varepsilon^{\text{pl}} = \lambda \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}} \quad , \tag{10}$$

流动势函数 G 取超线性 Druker-Prager 函数：

$$G = \sqrt{(\kappa \sigma_{\text{t0}} \tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan\psi \quad , \tag{11}$$

式中，ψ 是 p -q 平面的膨胀角，σ_{t0} 是材料破坏时的单轴拉应力，κ 是曲线参数。

2　应　　用

2.1　计算假设

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结合河海大学岩土工程研究所自行研制的耦合程序，并且加入第2节讨论的损伤模型对云南阿海水电站浅埋导流隧洞进行了水力耦合分析。导流洞断面为城门洞型，最大高度12 m，洞宽12 m，导流洞基本地质条件较好，没有大的断层区，以微风化花冈岩为主，隧洞埋深60～80 m，地下水位线位于洞顶大约20 m处。本次采用的耦合方程的求解器使用直接求解法，损伤塑性材料本构模型的具有非线性特点，因此庞大的三维问题对于设备和时间的要求都相当高。考虑到本次计算的隧洞 z 方向较长，而且基本没有大的断层破碎带，因此可以近似成二维的平面应变问题求解（计算模型见图1），模型上部施加均布荷载，模拟上部山体自重。计算采用了等效连续模型模拟含有大量不规则裂隙的岩体，忽略了岩体在 z 方向上的各向异性,脆性材料的损伤塑性模型用来模拟岩体的力学行为，材料参数见表1。

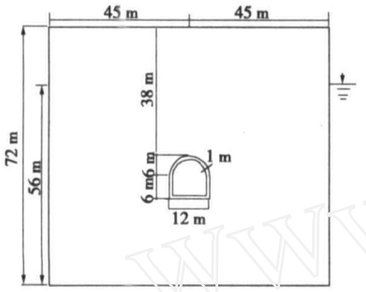

图1 隧洞模型剖面图

表1 材料参数表

参 数	水	岩 石	混凝土衬砌
弹性模量 E /GPa	—	2.0	20.0
泊松比 υ	—	0.25	0.20
密度 ρ /(kg·m^{-3})	1000	2400	2700
膨胀角 φ /(°)	—	25.0	—
初始孔隙比 e_0	—	0.5	—
初始渗透系数 k_0 /(m·d)	—	0.005	—
受压屈服应力 σ_{c0} /MPa		13.0	
受拉屈服应力 σ_{t0} /MPa		1.16	
Biot 系数 α	—	1.0	—

2.2 结果分析

2.2.1 损伤分析

图2、3分别是隧洞开挖完工后洞周受拉损伤变量和退化变量的分布情况。受拉损伤变量并不随着材料受拉破坏而降低。退化变量反映了材料刚度随着裂缝的开闭而变化。由于本次计算的受压损伤为0，因此在某个材料点，当受拉损伤变量 $d_t > 0$ 并且退化变量 $d > 0$ 时，表明有裂隙张开，而 $d_t > 0$，$d > 0$ 时，表明裂隙闭合。从图中可以看出，隧洞底部和左边侧墙都有受拉开裂现象，而底角的裂缝由于受到挤压而闭合。由于开挖顺序的影响，隧洞的破坏情况并不对称，先行开挖的一侧受到破坏更严重。

3.2.2 孔压

隧洞底部孔压随开挖时间的变化曲线如图4所示。在每次开挖扰动时，孔压会迅速上升，然后缓慢下降。这是由于开挖时，岩体卸载变形，裂隙受到挤压，孔隙水短时间内还得不到平衡，因此孔压很快上升，但是随着变形开展，孔隙水慢慢平衡，孔压随之下降。

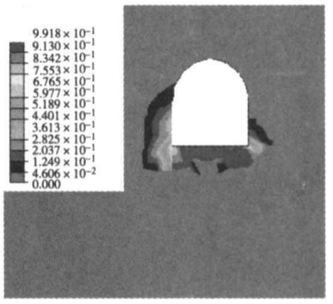

图2 开挖完工后洞周张拉损伤变量云图



图3 开挖完成后洞周退化变量云图

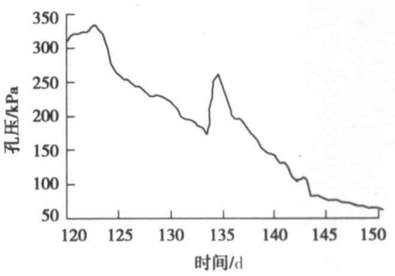

图4 隧洞底部孔压随时间变化曲线

2.2.3 位移

洞周水平和竖向位移如图5、6所示。侧墙最大水平位移有8.5 mm，洞顶部最大竖向位移为12 mm，底部最大回弹位移达到22 mm，因此隧洞底部岩体的损伤破坏情况最为严重。对于脆性材料岩体，城门洞型引水隧洞的侧墙和底部岩石应当注意支护，防止破坏。

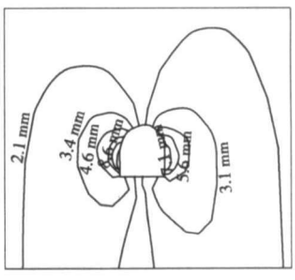

图5 隧洞水平位移等值线

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

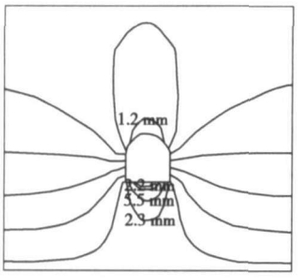

图 6 隧洞竖向位移等值线

3 结论和讨论

本文使用脆性材料的损伤塑性模型对浅埋岩体的水力耦合行为进行了分析探讨。

(1) 隧洞开挖扰动造成围岩开裂损伤，当岩体开裂后应力发生重分布，无损区的岩体承担新的荷载，损伤区会随着开挖进行逐渐扩大。计算结果表明，城门洞型隧洞的底部和侧墙受到的损伤破坏最为严重，而且开挖顺序对于围岩的破坏情况有重要影响，对此应在施工中引起注意。

(2) 每级开挖开始时，围岩的孔压都会短时间内迅速上升，这是由于裂隙受到挤压，孔隙水来不及平衡所致，孔压迅速上升会降低有效应力，从而降低岩体的抗剪强度，这对于岩体稳定是不利的。因此开挖前应当考虑利用辅助洞充分降水，并且在衬砌支护时，适当设置排水孔。

(3) 损伤塑性模型可以通过退化变量，抗拉和受压损伤变量反映出脆性岩体材料的强度和刚度在受外力扰动过程中的受损降低，因此更加合理的模拟了工程中水力耦合行为。

参考文献：

[1] KACHANOV L M. *Introduction to continuum damage mechanics* [M]. The Netherlands: Marinus Nijhoff Dordrecht, 1986.

[2] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L. The finite element method fifth edition volume 1: the basis [M]. Oxford: Fifth edition published by Butterworth- Heinemann, 2000.

[3] DAGGER M S. A fully-coupled two-phase flow and rock deformation model for reservoir rock [D]. Oklahoma: University of Oklahoma, Graduate College, 1999.

[4] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, ONATE E. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, **25**,(3): 229 - 326.

[5] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, **124** (8): 892 - 900.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net