

文章编号: 1000-7598-(2008)10-2708-05

随机连续模型分析裂隙岩体耦合行为

陈 伟, 阮怀宁

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 利用能够反映岩体水力性质空间变异特性的随机连续模型对隧洞开挖过程中的裂隙岩体渗流-应力耦合过程进行了数值分析。随机渗透系数场通过顺序指示模拟方法生成。顺序指示法是一种非参数地质统计学技术, 他允许输入任何形式的渗透系数概率分布而不需要对分布做任何假设。由随机模拟生成的渗透系数场被投影到有限元计算网格中进行耦合分析。力学响应使用基于连续介质的节理本构模型来反映岩体中软弱面的影响。结果表明, 随机连续模型能够较好地预测裂隙岩体的稳定入渗率, 水力性质的空间变异性对裂隙介质的耦合过程起着重要作用。在不排水条件下, 隧洞每次开挖开始时, 由于岩石应力重分布, 孔隙水受到扰动, 短时间内不能流动平衡, 因此孔压会迅速上升, 这对于围岩稳定是不利的。

关 键 词: 裂隙岩体; 随机连续模型; 耦合; 开挖; 有限元

中图分类号: O 242.1

文献标识码: A

Using stochastic continuum model to simulate hydro-mechanical processes in deformed fractured rock during tunnel excavation

CHEN Wei, RUAN Huai-ning

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The coupled hydro-mechanical processes in fractured rock during tunnel excavation are analyzed, using the stochastic continuum model that represents the spacial variability in hydraulic properties of fractured rock mass. The stochastic permeability fields are generated with the sequential indicator simulation, which is a non-parametric geostatistical technique and allows the input of the permeability probability distribution of arbitrary shape. The resulted permeability fields are then mapped onto the 3D finite element grids for the coupled hydro-mechanical analysis. A joint material model that can represents the weaken planes with specific orientations is used for the mechanical calculation in the study. The results show that the stochastic continuum model can predict the inflow rate into the tunnel; and the natural, spacial variability in hydraulic properties plays an important role in the coupled hydro-mechanical processes of the fractured rock mass. It is also found that the pore pressure will rise quickly before the water has a chance to move and equilibrate at the beginning of every excavation stage. This transient coupled hydro-mechanical effect may cause local failures in rock.

Keywords: fractured rock; stochastic continuum model; hydro-mechanical coupling; excavation; finite elements

1 引 言

随着理论研究的深入和计算机技术的飞跃, 岩土工程中流体和固体的耦合过程已受到广泛关注。由于裂隙岩体具有强烈的空间非均质性特点^[1], 因此, 岩体的耦合过程分析是个极大的挑战。目前, 对于裂隙介质耦合过程的数值研究, 主流的有 3 种方法: (1) 等效连续法。认为宏观上具有大量裂隙的代表单元 (REV) 仍然是个连续体, 建立等效渗透张量^[2]。此种方法虽然应用简单, 但不能很好地

描述空间非均质性和高渗透裂隙对渗流的影响;

(2) 裂隙网络法。把裂隙岩体分为岩块和裂隙, 认为流体流动只发生在裂隙中, 岩块是不透水材料, 这种方法在模拟实际问题时很难得到运用, 因为裂隙的三维几何模型十分复杂, 完全建立出实际的裂隙模型是很困难的^[3], 虽然随机裂隙生成方法已经运用其中, 但作为一种离散方法, 对于实际问题的求解依然困难重重; (3) 双孔隙率法。认为岩体由多孔岩块和裂隙 2 种连续介质叠加而成, 流体主要在裂隙中流动, 而岩块可以储存流体, 两种连续介

收稿日期: 2006-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50539090)。

作者简介: 陈伟, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事岩石隧洞开挖渗流-应力耦合研究和地质参数随机生成分析方面的研究。

论文联系人: 阮怀宁, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事岩体工程稳定与变形分析和岩土介质本构模拟及计算。E-mail: hnruan@hhu.edu.cn

质中可以发生流体交换^[4-6]。这种方法目前主要用于纯渗流分析, 而且岩体和裂隙的交换参数不易确定, 这在一定程度上限制了这种方法的实用性。

本文根据现场渗透系数实测数据和岩体裂隙分布情况, 利用非参数地质统计学理论生成能够反映水力性质空间变异性的随机连续模型, 结合有限单元程序对实际工程中的隧洞开挖问题进行渗流-应力耦合分析。

2 基本理论

2.1 多孔介质控制方程和本构模型

随机连续模型方法求解裂隙介质的耦合行为的基础依然是多孔连续介质理论, 下面只对多孔介质方程做个简要的描述, 详细过程可以参考文献[7]。

(1) 饱和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

$$\phi \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \rho_w \left[\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{(1-\phi)}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} \right] = -\nabla(\phi \rho_w v_{rw}) \quad (1)$$

式中: ϕ 为材料的孔隙率; ρ 为密度; v 为速度; 下标 w, s 分别为液相和固相; v_{rw} 为液体相对速度。方程式(1)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(密度变化)改变组成的。

(2) 静力平衡方程

宏观问题的静力平衡方程可以表示为

$$\nabla \sigma + \rho_m g = 0 \quad (2)$$

式中: σ 为总应力张量; g 为重力加速度; ρ_m 为平均密度, 且

$$\rho_m = (1-\phi)\rho_s + \phi S_w \rho_w \quad (3)$$

(3) 力学本构方程

基于连续介质理论的节理材料的弹塑性本构方程可以表示为^[8]

$$f_a = \tau_a - P_a \tan \beta_a - d_a = 0 \quad (4)$$

式中: f_a 为屈服面; τ_a 为在节理面上剪应力分量大小; P_a 为节理面上的法向压应力; β_a 为节理系统 a 的摩擦角; d_a 为黏聚力。

2.2 随机模拟原理

随机模拟方法是在传统的地质回归方法 kriging 法上发展起来的, 随机模拟不但可以得到最佳的估计值, 而且可以生成许多等概率的可能结果,

利用 Monte-Carlo 法可进行进一步的风险分析。顺序模拟法(Sequential simulation)是目前较为成熟的地质统计学方法, 它的基本过程可以简单描述为^[9]:

(1) 随机选择一个还没有模拟值的空间点; (2) 建立该处的局部条件概率分布; (3) 从局部概率分布中随机的抽取一个数值; (4) 使此数值和已有的测点值作为进一步模拟的条件值; (5) 重复上述过程直到所有空间点都有一个模拟值。其核心问题是如何确定局部条件概率和找出能够反映空间各点的参数值随距离变化的关系的变异函数模型。

由于将使用顺序指示模拟法来生成随机渗透系数场, 这种模拟方法允许输入任何形式的渗透系数概率分布而不需要对分布做任何假设(比如高斯模拟法常常需要输入的数据为正态分布)^[9, 10], 因此, 局部条件概率 $p_z^*(u)$ 就可以由指示 kriging 法得到:

$$p_z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(u) I(u_{\alpha}; z) + \left[1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(u) \right] m_z \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\alpha}(u)$, $\alpha=1, \dots, n$ 为 kriging 法中的权重, 它体现了各点之间的空间关系; u 为空间坐标向量; z 为随机变量; n 为样本点数量; $I(u_{\alpha}; z)$ 为分类指示随机函数, 可表示为

$$I(u_{\alpha}; z) = \begin{cases} 1, & \text{假如 } z \text{ 在这一类中} \\ 0, & \text{假如 } z \text{ 不在此类中} \end{cases} \quad (6)$$

m_z 为指示随机函数的均值, 且有

$$m_z = E\{I(u_{\alpha}; z)\} \quad (7)$$

根据测得的渗透系数值, 选择指数型空间变异函数结构:

$$r(h) = C(1 - e^{-\frac{3h}{a}}) \quad (8)$$

式中: h 为空间距离变量; a 为变程; C 为基台值。

以上是随机模拟的一个简单概述, 具体的理论和参数讨论可以参考文献[9, 10]

3 数值分析

文中对云南糯扎渡水电站导流隧洞进行了随机渗透系数场生成模拟, 并且把生成的随机渗透系数场投影到有限元计算网格中, 作为下一步耦合分析的基础。

3.1 随机连续模型的生成

文中并不打算使用 Monte-Carlo 方法进行完整的随机分析, 而是选择随机模拟的一个单一结果作为后续预测的基础, 以此来反映岩体水力性质的非

均质特点。

指示模拟法把输入的数据分成若干类，每一类都可以有不同的空间变异函数结构。由于裂隙的长短、宽度、空间分布各异，所测的裂隙岩体的渗透系数值相差很大，而利用指示模拟法的分类功能，根据裂隙的宽度和长度不同，把相应的渗透系数分成不同的几类，每一类分别给与不同的变差函数，可以很好地模拟出空间变异渗透系数场。本文利用自行研制的随机模拟计算程序直接给出应用实例，程序用 Fortran90 编制，能够完成大型三维随机模型的生成。

文中的三维随机模型范围是 180 m×325 m×300 m，现场抽水试验得到的渗透系数值作为条件值输入模型。为了简化模型，低于平均值 $10^{-13.5}$ 的渗透系数值，根据裂隙调查报告，采用各向同性的空间变异结构，变程为 5 m；由于一些大裂隙造成的大于 $10^{-13.5}$ 的渗透系数值，采用各向异性的变异结构，在裂隙长度方向，使用 50 m 的变程，宽度方向使用 10 m 的变程，基台值取 $C = \sigma_{lnk} = 2.65$ 。图 1 是生成的一个三维随机渗透系数场分布，图例上的数值表示渗透系数的 lg 值，单位是 m^2 。

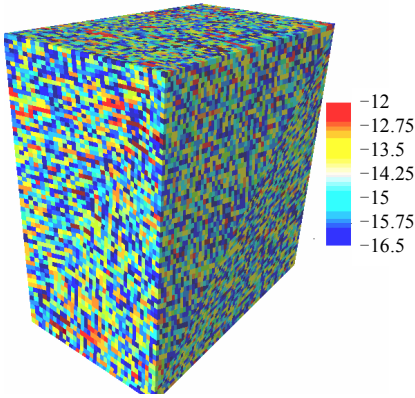


图 1 生成的一个随机连续模型（渗透系数场）
Fig.1 A generated stochastic continuum model (permeability fields)

3.2 有限元计算模型

耦合分析采用引进的大型商业有限元软件 ABAQUS6.6，有限元网格和静水压力分布如图 2 所

示，有限单元采用 8 节点六面体单元，模型共有 28 600 个单元，31 185 个节点。地下水位位于距离模型底部 160 m 处，四周边界为静水压力边界，底部和上部边界为不透水边界。开挖在 60 d 内完成，分 3 步开挖，每 20 d 前进 100 m。隧洞挖完后，及时用衬砌支护，衬砌由壳单元模拟。隧洞开挖过程中，隧洞内表面为不排水边界，开挖完成后，内表面开始排水，为自由排水面。引水洞尺寸见图 3，材料参数见表 1。

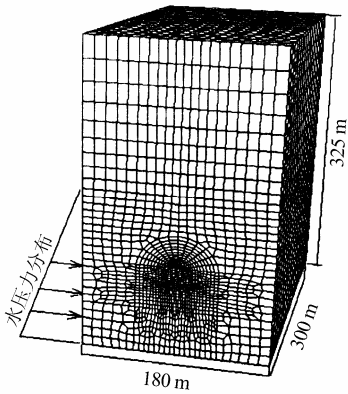


图 2 有限元网格
Fig.2 Finite element meshes

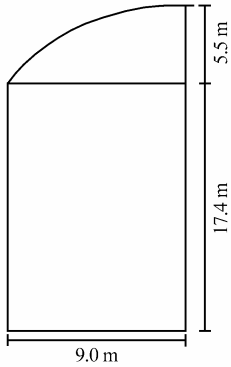


图 3 导流洞截面尺寸图
Fig.3 Geometry of the tunnel cross-section

3.3 计算结果

(1) 渗流率

图 4 对使用随机连续模型和等效连续模型的计算结果进行了比较。

表 1 材料参数

Table 1 Properties of materials

材料	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力 c / kPa	节理		孔隙率 n	黏滞系数 $\mu / \text{Pa} \cdot \text{S}$	比奥系数 α
					摩擦角 $\theta / (^\circ)$	膨胀角 $\varphi / (^\circ)$			
水			10					2.8×10^{-4}	
岩石	2.0	0.35	24	40	35	15	0.05		1.0
混凝土	20.0	0.20	27						

使用随机连续模型得出的隧洞开挖后的稳定入渗率为 1 385 L/d, 和实测结果能够很好的吻合。

由于随机模型能够反映高渗透裂隙对渗流的影响, 因此入渗率结果和实测值吻合较好, 而传统的等效连续模型则不能很好的预测渗流率。

(2) 孔压

图 5 为在不排水条件下, 隧洞开挖过程中控制断面上洞顶孔压变化曲线。

从图中可以发现, 在不排水条件下, 每次开挖开始时, 孔压会迅速上升, 随后缓慢下降。这是因为开挖扰动改变了洞周应力分布, 岩体裂隙受到挤压, 此时孔隙水来不及流动平衡, 导致孔压短时间内升高, 随着开挖进行, 孔隙水渐渐消散平衡。孔压短时间内迅速升高会降低岩石的有效应力, 从而降低岩石抗剪强度, 对于岩体稳定性是不利的。

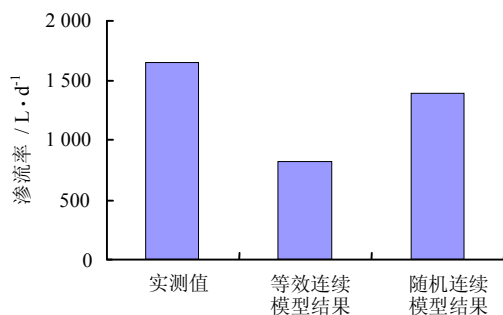


图 4 稳定入渗率

Fig.4 Stable infiltration rate

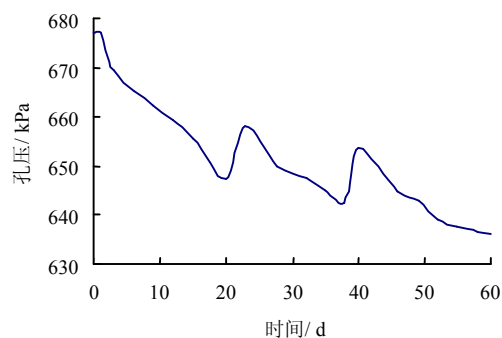


图 5 开挖过程中孔压变化曲线

Fig.5 Changes in pore pressure during tunnel excavation

(3) 塑性区和洞周位移

图 6 为隧洞开挖后, 距洞口 150 m 处控制断面的塑性区分布图。从图中可以看出, 开挖后, 引水洞的侧墙附近有较大的塑性区, 这是由于孔压的存在导致有效应力降低, 而且此隧洞的几何跨度较大也是造成塑性区集中在侧墙附近的一个因素。在设计衬砌和锚杆时应对此有所考虑。图 7 和图 8 为隧

洞的位移等值线图, 洞顶的最大竖向位移有 4.8 cm, 洞底回弹位移为 5.2 cm, 侧墙水平位移是 2.6 cm, 可以看出, 衬砌的支护对控制隧洞变形起到了重要作用。

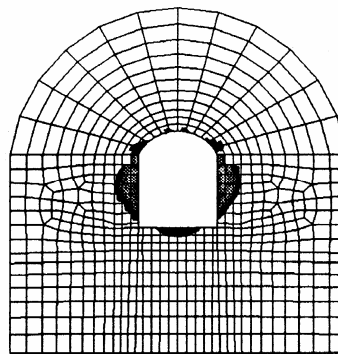


图 6 隧洞塑性区分布

Fig.6 Plastic zone after tunnel excavation

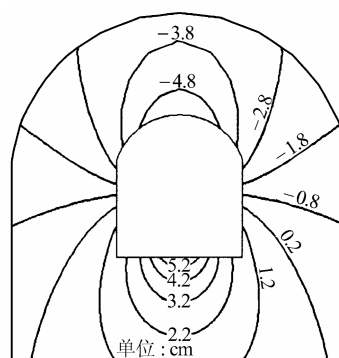


图 7 洞周竖向位移等值线图

Fig.7 Contours of vertical displacements

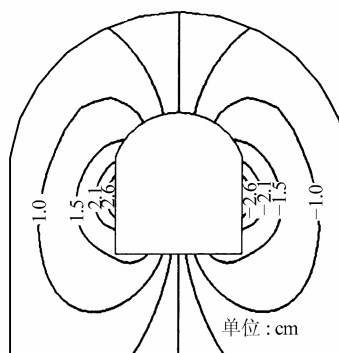


图 8 洞周水平位移等值线图

Fig.8 Contours of horizontal displacements

4 结 语

本文借助随机连续模型对隧洞开挖过程中的渗流应力耦合过程做了分析探讨。计算结果表明:

(1) 随机连续模型对隧洞开挖后的涌水量的预测和实测结果能够较好的吻合, 能够反映出岩体中

高渗透裂隙对渗流的影响以及裂隙岩体水力性质的非均质特点。

(2) 在不排水条件下, 隧洞每一级开挖开始阶段, 岩体的孔压都会迅速地上升, 这种瞬态效应会降低岩石的有效应力, 对于岩体的稳定性是不利的, 施工时应当引起注意。

(3) 由于本次计算模型中, 城门洞形隧洞的几何跨度较大, 而且假设开挖时隧洞内表面为不排水边界, 较高的孔隙水压力导致岩体的有效应力降低, 从而降低了岩石的抗剪强度, 因此开挖后引水洞的侧墙附近有较大的塑性区, 故在开挖工序和衬砌以及锚杆的设计过程中, 对此应给与重视。

本文的三维连续随机渗透系数场的生成, 使用了非参数地质统计学方法(顺序指示模拟法), 同时把现场实测数据作为条件值输入, 能够较好地反映岩体水力性质的空间变异性。其结果可以方便地导入到有限元程序中作为有限元计算的初始参数, 尤其适用于大型三维问题。

参考文献

- [1] 吉小明, 杨春和, 白世伟. 岩体结构与岩体水力耦合计算模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 763—768.
JI Xiao-ming, YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Structure and hydro-mechanical coupled calculation model for rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(5): 763—768.
- [2] BEAR J, TSANG C, MARSILY G. Flow and contaminant transport in fractured rock[M]. San Diego California: Academic Press Inc; 1993.
- [3] TODORKA S, VIKTOR P. Numerical comparison of the equivalent continuum, non-homogeneous and dual porosity models for flow and transport in fractured porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2005, (28): 235—255.
- [4] ELSWORTH D, BAI M. Flow-deformation response of dual-porosity media[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1992, (118): 107—124.
- [5] PRUESS K, FAYBISHENKO B, BODVARSSON G S. Alternative concepts and approaches for modeling flow and transport in thick unsaturated zones of fractured rocks[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1999; 38: 281—322.
- [6] HUDSON J A, STEPHANSSON O, ANDERSSON J, et al. Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001; 38: 143—161.
- [7] LCWIS R W, SCHREFLER B A. The finite element method in the deformation and consolidation of porous media[M]. New York: Wiley, 1987.
- [8] ZIENKIEWICZ O C, PANDE G N. Time dependent multilaminate model of rocks—a numerical study of deformation and failure of rock masses[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1977, (1): 219—247.
- [9] YARUS J M, CHAMBERS R L. Stochastic modeling and geostatistics: principles, methods, and case studies[M]. [s. l.]: American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- [10] JOURNAL A H, HUIJBREGTS C H. Mining geostatistics[M]. London: Academic Press, 1978.

成都地铁 2 号线首个盾构区间工程即将开工

日前成都地铁公司召开了地铁 2 号线首个盾构标段工程的第一次工地例会, 首个盾构区间工程土建工程开工在即。“作为地铁 2 号线首个全面开工的盾构标段工程, 天府广场站-东门大桥站盾构区间在施工中要穿越红星路下穿隧道, 从东门大桥处过锦江, 通过成都商业繁华的春熙路, 因此施工难度相对较大, 要在保证工期的前提下做好管理和施工, 必须在开工前进行充分的交流和沟通”。2008 年 8 月 18 日, 成都地铁公司有关负责人表示。据了解, 地铁 2 号线天府广场站-东门大桥站隧道区间单线总长 3 989.6 m, 包括天府广场站-春熙路站、春熙路站-东门大桥盾构井, 东门大桥盾构井-东门大桥站三个区间, 其盾构井位于东门大桥附近。开工例会后, 东门大桥盾构井将立即组织施工, 预计 2009 年初达到下井条件并开始区间隧道施工。