

考虑渗流场作用下的隧道开挖分析

赵二项¹ 高江涛²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室,甘肃兰州 730000;

2. 中铁一局集团有限公司房屋建筑工程分公司,陕西西安 710054)

【摘要】 由于隧道的开挖,破坏了初始地应力场与渗流场。以圆形隧道为例,采用有限差分程序计算考虑渗流场作用时,隧道开挖后洞室周围应力场、孔隙水压力、位移场的分布情况,并对比计算了是否考虑渗流效应时位移场的差异,以及不同水位导致的位移场的不同分布状态。提出了相应的隧道防排水、设计与施工相关建议。

【关键词】 渗流场;流固耦合;有限差分法;隧道;快速拉格朗日分析方法

【中图分类号】 U 452.2

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.05.004

Analysis of the Tunnel Excavation Under Considering the Seepage Field

Zhao Erxiang¹ Gao Jiangtao²

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. China Railway First Group Co., Ltd. Building's Structural Engineering Company, Xian 710054, Shanxi, China)

【Abstract】 The initial geostress and seepage field are destroyed because of tunnel excavation. Take circular tunnel for example, the distribution of stress field, pore water pressure and displacement field after tunnel excavation will be obtained with Finite-difference procedures considering seepage force. Meanwhile, the difference of displacement field is contrasted between whether or not take into account seepage effect and also the different distribution of displacement field under diverse water line. Eventually, the relative suggestion of waterproof and drainage, design and construction on tunnel is provided.

【Key words】 seepage force; Fluid-Solid coupling; FDM; tunnel; Fast Lagrangian Analysis of Continua

0 引言

所有的隧道都有一个共性——建造在地表以下。由于地表以下存在各种地下水,因此在隧道建设过程中必须要考虑地下水对隧道周围围岩的影响。隧道的开挖破坏了原始的地应力场和渗流场,应力场的改变会使围岩产生变形,改变岩体渗流性质,进而影响渗流场^[1]。同样,渗流场的改变将改变渗透体积分力的分布,后者又必将对应力场产生影响^[2]。

三维快速拉格朗日法,是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法,它可以模拟岩土或其它材料的三维力学特性^[3-4]。本文采用有限差分计算程序,对处于地下水范围内的圆形隧道进行开挖计算,分析渗流场、应力场、位移场的变化,并对比了不同埋深下位移场的差异。由于不考虑流体的作用,只作一般性的弹塑性分析,也会造成一定的误差。

但经过多年的理论与实践证明,计算的结果在有些方面的误差若是在一定的范围之内,还是可以接受的^[5]。因此,本文还计算了不同水位下是否考虑渗流效应时位移场差异,并针对计算结果对含水地区隧道的设计与施工提出相应的建议。

1 渗流场应力场耦合分析数学模型

隧道围岩和混凝土衬砌都是透水介质,在任何透水介质中,水荷载以渗透面力和渗透体积分力表示,水在透水介质中形成渗流势场 $H(x, y, z)$, 即^[6]:

$$H = \frac{p}{\gamma} + z \quad (1)$$

渗透压力(面力):

$$p = \gamma(H - z) \quad (2)$$

式中: p 为水的压力; γ 为水的重度; z 为研究点竖向坐标值,以向上为正。

基金项目:中国科学院冻土工程国家重点实验室基金资助项目(SKLFSE-ZY-03)

作者简介:赵二项,1983年生,河北石家庄人,硕士研究生。研究方向:隧道渗流场对隧道防排水系统影响。E-mail: xautzhao@163.com

水在渗流过程中由于水压力的梯度而产生渗流体积力为^[6]:

$$\begin{aligned} p_x &= -\frac{\partial p}{\partial x} = -\gamma \frac{\partial H}{\partial x} \\ p_y &= -\frac{\partial p}{\partial y} = -\gamma \frac{\partial H}{\partial y} \\ p_z &= -\frac{\partial p}{\partial z} = -\gamma \left(\frac{\partial H}{\partial z} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

1.1 渗流场影响下的应力场数学模型^[7]

平衡方程:

$$\sigma_{ij,i} + F_j = 0 \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (4)$$

几何方程:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (5)$$

物理方程:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1+\nu)\sigma_{ij} - \nu\sigma_k\delta_{ij}] \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (6)$$

应力边界:

$$\sigma_{ij}n_j = f_i(H) \quad (x, y, z) \in S_\sigma \quad (7)$$

位移边界:

$$u_i = \bar{u}_i \quad (x, y, z) \in S_u \quad (8)$$

式中: $f_i(H)$ 为面力分布, 是渗流势场 H 的函数; Ω 为围岩区域。

1.2 应力场影响下的稳定渗流场数学模型^[6-8]

连续性方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\sigma_{ij}) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(\sigma_{ij}) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\sigma_{ij}) \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (x, y, z) \in \Omega' \end{aligned} \quad (9)$$

第一类边界条件, 指水头条件:

$$H = H_0 \quad (10)$$

第二类边界条件, 指流量边界:

$$k(\sigma_{mn})H_i n_i = q(x, y, z) \quad (11)$$

式中: Ω' 为围岩渗流区域; $k(\sigma_{mn})$ 为各项同性的渗透系数, 是应力的函数。

1.3 渗透系数的定义

又称水力传导系数 (hydraulic conductivity)。在各向同性介质中, 它定义为单位水力梯度下的单位流量, 表示流体通过孔隙骨架的难易程度。一般

来说, 土体的孔隙率越大, 其渗透系数越大。假定均质土体的体积应变是由土体中的孔隙体积 (液相、气相部分) 变化所产生的, 即假定土颗粒受压缩后不产生变形。那么, 土体受力后的孔隙率为:

$$n = n_0 + \epsilon_v \quad (12)$$

式中: n_0 为土体初始孔隙率; n 为受力后土体的孔隙率; ϵ_v 为受力后土体的体应变。

所以可以得出这样的结论: 土体受力变形后, 土的孔隙率发生变化, 进而影响到土的渗透系数。由于体应变是由应力产生的, 因此可以推出, 渗透系数是应力的函数, 即 $k(\sigma_{mn})$ 。

2 数值分析计算模型

本文以圆形隧道为例, 研究处于地下水范围内隧道的开挖计算。隧道断面半径为 4 m, 拱顶到上表面的距离为 20 m。计算时, 隧道轴线方向为 Y 方向, 铅直方向为 Z 方向, X 方向由右手法则确定, 假定地表平面为铅直方向 $z=0$ 处。建模时, 考虑开挖半径的影响, 左右方向取 4 倍洞径距离以上, 计算范围 $-40 \text{ m} \leq x \leq 40 \text{ m}$, 深度范围取 $-60 \text{ m} \leq z \leq 0 \text{ m}$, 隧道轴线方向取 3 m, 则整个模型范围为 $80 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。计算模型见图 1, 模型左右边界和下边界为不透水边界, 上边界和隧道开挖边界为透水边界, 固定隧道开挖壁孔隙水压力为 0。计算模型采用位移边界条件, 左右边界约束水平位移, 下边界约束竖向位移, 上边界为自由边界, 前后边界约束轴向位移。数值计算中材料力学模型选用摩尔-库伦弹性理论模型, 地下水运动规律满足达西定律, 渗流分析过程中采用等效连续介质模型。模型参数见表 1。

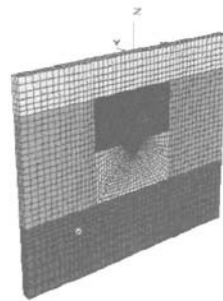


图 1 计算模型

表 1 模型计算参数

体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	抗拉强度 T/N	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	粘聚力 c/MPa	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙率	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.6	1.2×10^5	27	0.22	2.69×10^3	0.3	3.78×10^{-8}

以地下水位于 $z=0$ 时为例, 观察隧道开挖前后渗流场、应力场、位移场的变化。

2.1 孔隙水压力

开挖前围岩孔隙水压力为静水压力, 最大孔隙

水压力为 0.6 MPa,隧道边界为透水边界。开挖后,渗流场发生变化,由于隧道壁周围孔隙水压力下降,孔隙水向隧道内部渗流,形成渗水漏斗。由图 2 可知,隧道底板和边墙处的孔隙水压力较大,因此该位置最容易产生渗水,因此施工过程中防排水重点应该放在此处。

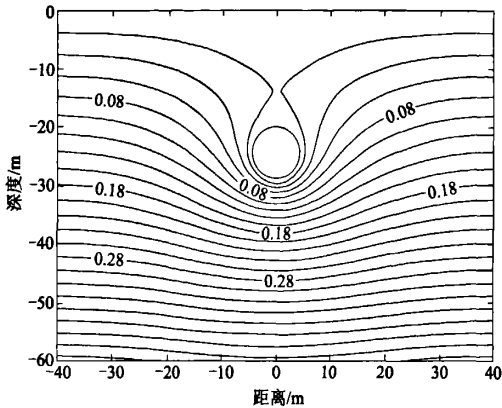


图 2 开挖后孔隙水压力(单位:MPa)

2.2 应力场

隧道开挖后,最大不平衡力见图 3,隧道轴线方向厚度为 3 m,一次开挖。开挖后隧道最大不平衡力由开始时 251 400 N 减小为 433 N,结构达到平衡。

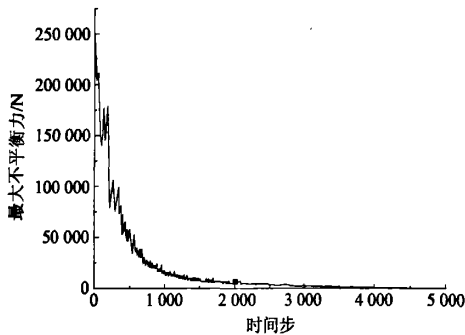
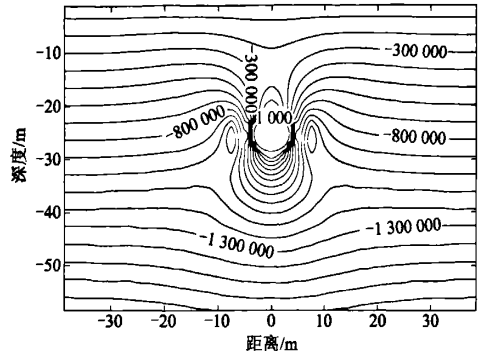
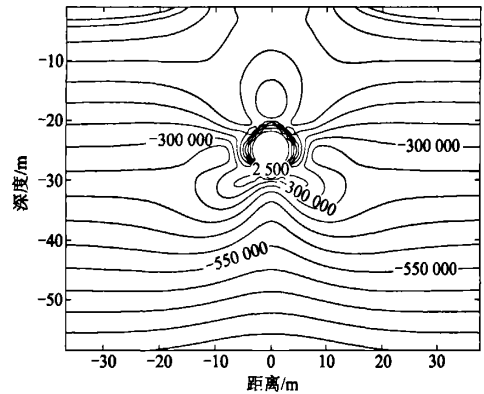


图 3 最大不平衡力

由图 4(a)、4(b)可以看出,隧道开挖围岩产生扰动,使得围岩应力发生二次重分布,隧道拱顶和底板位置出现拉应力,最大压应力集中在边墙和左右拱脚附近。因此施工过程中应及时对隧道进行支护,以消除拉应力,降低压应力^[9-12]。在远离隧道开挖边界范围内,其应力值和围岩深度成正比。其中压应力为负,拉应力为正。



(a) 竖向应力分布图(σ_z)



(b) 横向应力分布图(σ_x)

图 4 隧道开挖后应力分布图(单位:Pa)

2.3 位移场变化

隧道开挖后各测点位移变化曲线见图 5,其中竖向位移以上为正,水平位移向右为正。隧道开挖完成后,由于应力释放,拱顶和底板以竖向位移为主,隧道两侧壁以水平位移为主。从图中可以看到,拱顶和地表的竖向位移最大,稳定时,拱顶最大沉降量为 7.7 mm,地表沉降量为 6.3 mm。隧道底板中点位移变化趋势为由开挖初期的向上隆起逐渐下降,并达到稳定值,其稳定值为 1.5 mm。隧道侧壁的水平位移变化趋势不大,位移量较小,其趋势使隧道向洞内收敛。

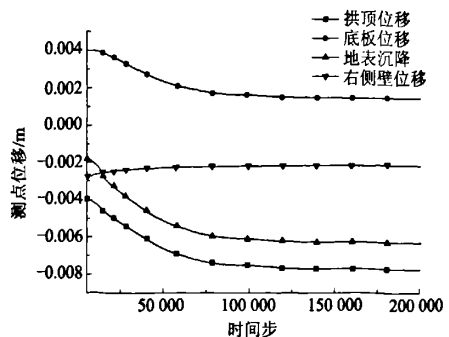


图 5 开挖后各点位移变化曲线

2.4 不同埋深同一水位时位移场变化

当水位处于 $Z=0$ 时,随着隧道埋深的增加,研究考虑渗流与否时,位移场的变化规律。

随着隧道埋深不断增加,隧道拱顶位移、底板中点位移、侧壁横向位移均向内收敛,并随着埋深的增加而不断增加。考虑渗流与未考虑渗流时,位移场变化趋势一致。

随着隧道埋深的不断增加(隧道埋深依次为 -20 m 、 -25 m 、 -30 m 、 -35 m)有以下情况:

1)由图6可知,拱顶位移与未考虑渗流时相比,分别增加了99%、82%、63%、48%,由此可得出,拱顶位移随着隧道埋深的增加,其沉降量变化趋势不断减缓,但沉降值随隧道埋深增加而增加。考虑渗流时,拱顶最大位移分别为 -7.7 mm 、 -9.4 mm 、 -11.5 mm 、 -13.8 mm 。

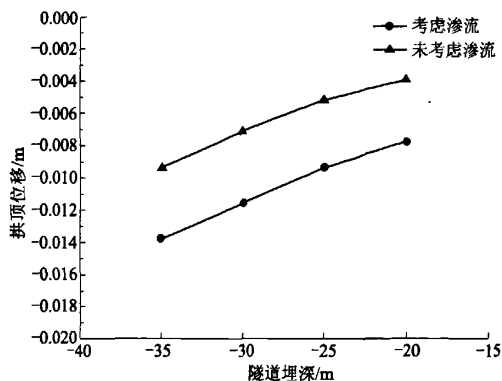


图6 不同埋深下拱顶位移

2)由图7可知,地表沉降量与未考虑渗流时相比,分别增加了266%、228%、192%、165%,其变化趋势同拱顶位移相同。值得注意的是,考虑渗流作用时,地表沉降量的值远大于未考虑渗流时得出的沉降量值,由于围岩在考虑渗流作用时其孔隙受到压缩^[9],导致地表沉降量有很大增加,这点在隧道设计时应予以重视。考虑渗流时,地表最大沉降量依次为 -6.3 mm 、 -7.5 mm 、 -9.1 mm 、 -10.6 mm 。

3)由图8可知,侧横向位移与未考虑渗流时相比,减少了20%、15%、11%、9%,由此可得出,未考虑渗流时的隧道侧壁横向位移值要大于考虑耦合时的值。从隧道右侧壁位移图中可以看出,渗流作用对隧道侧壁位移影响较小。考虑渗流时,隧道右侧壁位移最大值依次为 -2.2 mm 、 -3.5 mm 、 -5.9 mm 、 -8.8 mm 。

4)由图9可知,隧道底板中点位移与未考虑渗流时相比,分别减少了63%、55%、38%、34%,由

此可得出,在考虑渗流作用时,底板中点位移较小。其原因可能是,隧道开挖后底板向上的竖向位移和由于孔隙的压缩产生的向下的位移相互抵消的结果。考虑渗流时,隧道底板中点最大位移依次为 1.4 mm 、 2.1 mm 、 3.2 mm 、 4.3 mm 。

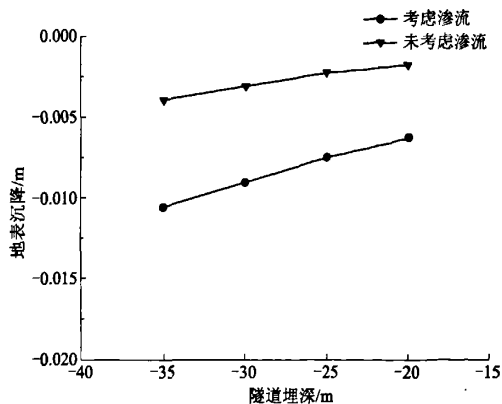


图7 不同埋深下地表沉降

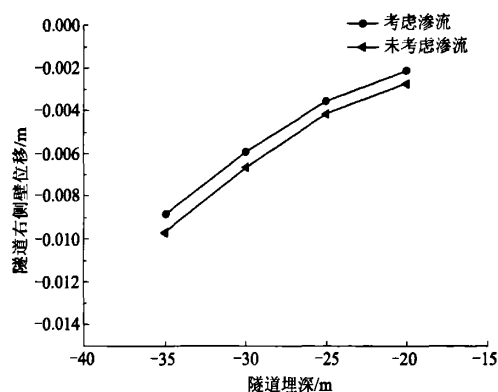


图8 不同埋深下右侧壁位移

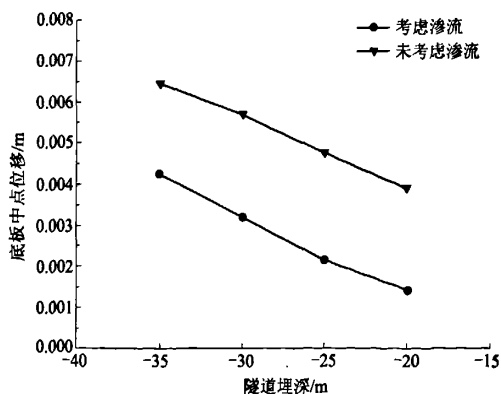


图9 不同埋深下底板中点位移

总体来说,渗流效应对拱顶位移、地表沉降量有很大的影响,对隧道底板竖向位移有一定影响,对横

向位移影响不大。并且,随着隧道的埋深的增加,其影响的程度在减小。

2.5 同一埋深不同水位时位移场变化

当隧道埋深为 20 m 时,取不同水位值来研究位移场的变化规律。

水位依次取为 $Z = -15\text{ m}$ 、 $Z = -10\text{ m}$ 、 $Z = -5\text{ m}$,为了进行比较增加 $Z = 5\text{ m}$ 、 $Z = 10\text{ m}$ 两种情况。

由图 10 可以得出,在埋深一定时,隧道拱顶位移、右侧壁横向位移、地表沉降随隧道周围水位的升高而不断增大,并向洞径内部收敛。水位变化对隧道底板位移影响较小,对地表沉降和拱顶位移影响较大。各测点位移见表 2。

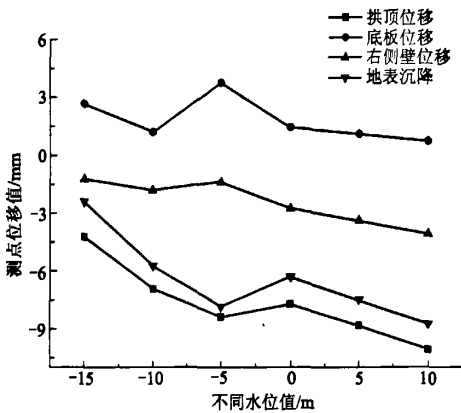


图 10 不同水位下各点位移变化曲线

表 2 不同水位下各测点位移值

水位 /m	拱顶位移 /mm	底板中点位移 /mm	右侧壁位移 /mm	地表沉降 /mm
-15	-4.223	2.662	-1.237	-2.398
-10	-6.937	1.201	-1.812	-5.742
-5	-8.383	3.759	-1.396	-7.844
0	-7.725	1.446	-2.764	-6.300
5	-8.829	1.100	-3.373	-7.499
10	-10.07	0.729	-4.078	-8.744

3 结论

1)随着隧道的开挖,孔隙水向隧道内部渗流,隧道底板和边墙处的孔隙水压力较大,因此该位置最容易产生渗水,因此施工过程中防排水重点应该放在此处。

2)隧道开挖后,隧道岩体应力场发生二次分布,隧道拱顶和底板位置出现拉应力,最大压应力集中在边墙和左右拱脚附近。施工过程中应对隧道及时进行有效支护,以消除拉应力,减小压应力。

3)从是否考虑渗流效应的结果来看,渗流效应对拱顶位移、地表沉降量有很大的影响,对隧道底板竖向位移有一定影响,对横向位移影响不大。因此在隧道设计施工过程中,考虑渗流效应是有必要的。

参考文献

[1] 房倩,张顶立,等. 基于连续介质模型的海底隧道渗流问题分析[J]. 岩土力学与工程学报,2007,26(增2):3776-3784.

[2] 陈平,张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩土力学与工程学报,1994,13(4):299-308.

[3] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[4] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[5] 李延春,李术才,等. 考虑水的耦合与否在隧道稳定计算中造成的结果差异对比[J]. 岩土力学与工程学报,2003,22(增1):2159-2163.

[6] 赖远明,张明义,李双洋,等. 寒区工程理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2009.

[7] 柴军瑞. 大坝及其周围地质体中渗流场与应力场耦合分析[D]. 西安:西安理工大学,2000.

[8] Y. M. Lai, Z. W. Wu, Y. L. Zhu. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature, seepage and stress fields in cold-region tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(4): 435-440.

[9] 杨永香,泉声,等. 龙潭隧道的流固耦合分析[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(3):268-271.

[10] 田坤,黄炳仁,等. 考虑渗流效应下的常吉高速公路隧道数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(4):26-34.

[11] 李建波,陈建云,等. 渗流场对地铁隧道沉降与受力影响的流固耦合分析[J]. 防灾减灾工程学报,2008,28(4):441-446.

[12] 吉小明,王宇会. 隧道开挖问题的水力耦合计算分析[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(6):848-852.

收稿日期:2009-07-30