

预测压气法隧道施工中的漏气量的模型研究

孙冬梅^{1, 2}, 冯平¹, 张明进², G. Steger³

(1. 天津大学建工学院, 天津 300072; 2. 交通部天津水运工程科学研究院水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456; 3. 奥地利格拉茨技术大学土力学及基础工程研究所, 格拉茨 A-8010)

摘要: 在阐述压气法隧道施工原理的基础上, 建立了水-气二相流模型来模拟压气法隧道施工过程中超压空气驱替隧道周围土体的孔隙水的水-气二相流过程。该模型同时考虑了土体中气相和水相的流动以及水相和气相相互作用的影响, 比较符合水-气二相渗流过程的物理意义。通过工程算例, 计算出不同施工进度下开挖面和隧道混凝土衬砌上的空气损失速率以及空气入流对隧道周围土体渗流场的影响, 结果表明: 在均质的地质条件下, 开挖面上的漏气速率一般为常数, 而衬砌上的漏气速率将随着隧道长度的增加而线性增大。最后, 提出了利用水-气二相流模型进一步提高压气法隧道施工的漏气量的数值模拟精度, 需要深入研究的两点意见。

关键词: 压气法隧道施工技术; 水-气二相流模型; 漏气量; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1030-07

作者简介: 孙冬梅(1978-), 女, 辽宁北票人, 博士后, 主要从事饱和-非饱和渗流及水资源的合理开发利用方面的研究。E-mail: sundongmei@126.com。

Prediction of air losses in compressed air tunneling using numerical models

SUN Dong-mei^{1, 2}, FENG Ping¹, ZHANG Ming-jin², G. Steger³

(1. School of Civil Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Lab of Harbor & Marine Structure Safety of Ministry of Communications, Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 3. Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, Graz A-8010, Austria)

Abstract: A numerical model based on the theory of water-air two-phase flow model is proposed to simulate the process of the transient air flows from the compressed air tunnel into the surrounding ground induced by excess air pressure inside the tunnel. The transition between water phase and gas phase in seepage process is taken into account. In order to allow an accurate prediction of the amount of air losses in the design process and to provide pore pressure distributions, the air loss rates through the tunnel face and shotcrete lining and the distribution of seepage field in different advance rates for subway tunneling are calculated through a numerical example. The analytical results show that for the homogeneous formation the magnitude of air loss rate through the tunnel face is constant along the advance of the tunnel, however, the air loss rate through the shotcrete lining increases linearly with increasing length. Finally, two suggestions for improving the accuracy of numerical simulation of prediction of air losses in compressed air tunneling using water-air two-phase flow model are presented.

Key words: compressed air tunneling; water-air two-phase flow model; air loss; numerical simulation

0 引言

近二十年来, 压缩空气隧道施工技术(简称压气法)在浅层城市地铁建设中一直被采用, 利用超高压空气护壁, 驱赶开挖区地下水以阻止地下水向隧洞的渗入, 该技术不仅可有效阻水、减少地面沉降, 而且不会改变隧道周围的地下水环境^[1]。由于土体的渗透性, 超高压空气将向四周的饱和土体渗入, 形成气驱替水的水-气二相流过程, 从而造成施工过程的空气损失, 而在整个施工过程中所需要的空气量是决定工程造价的重要因素, 如何确定施工过程中的漏气量是

一个十分重要的问题。

在目前的研究中, 通常利用建立渗流模型来计算所需的空气量。首先 Chen 等^[2]以三维稳定渗流模型为基础, 建立了求解压气法施工的渗流的数学模型。为了考虑压气法隧洞施工的水-气二相流过程, Gülzow^[3]建立了以水相、气相的质量平衡方程为基础

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(50809044); 国家自然科学基金项目(50579049); 博士后科学基金项目(20080440682)

收稿日期: 2008-04-23

的有限元模型。Hochgürtel^[4]进一步考虑了压气法隧道施工中非饱和土的力学行为, 建立了半耦合的土体骨架变形-水-气二相流模型。Öttl^[5]建立了二维的同时考虑水相、气相和骨架变形的全耦合数学模型。Kramer^[6]进行了一系列大型的实验室水-气二相流试验, 研究水相、气相通过衬砌裂缝向与之相邻的土壤的流动情况。Strobl^[7]进行了一系列的模型试验来研究水相和气相在各种不同土壤的流动情况, 并建立的三维有限元模型来模拟气相在土壤中流动情况。Scheid^[8]建立了求解压气法隧道施工过程的三维同时考虑水相和气相的数学模型。

本文基于多相流理论, 同时考虑土体的水相和气相流动及相互作用, 不考虑土体变形, 建立水-气二相流模型, 来模拟压气法隧道施工过程中的水-气二相流过程, 预测隧道周围的渗流场状态及开挖面向前推进过程中空气的损失率和总损失量与施工进度

1 压气法隧道施工原理

当土体饱和和水力传导率的范围在 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ m/s 时, 可以采用压气法来阻止地下水向隧道的涌入。图1为隧道中空气压力、周围的孔隙水压力及空气超压分布, 所施加在隧道壁上的空气压力必须等于或大于隧道底部处的孔隙水压力, 即 $P_a \geq P_{win}$ 时才能对抗隧道周围的孔隙水压力。通常施加在隧道四周的空气压力是一个常数, 而隧道壁上的孔隙水压力是随深度的增加而线性增大的, 满足静水压力定律, 因此空气压力与水压力的差值 ΔP 从隧道底部向顶部逐渐增大。

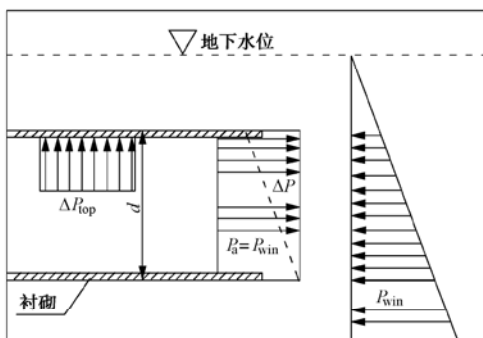


图1 空气压力、孔隙水压力及空气超压分布

Fig. 1 Air pressure, pore water pressure and excess air pressure

由于空气超压的作用, 空气将流入四周的饱和土体中, 形成空气驱替水的水-气二相流, 因此为保证空气压力满足工作要求, 所损失的空气量必须得到补充, 空气的损失量随着隧道的地质条件和几何形状以及所施加的空气压力而改变, 空气的损失不仅发生在未支护的开挖面上, 而且还发生在衬砌的干缩裂缝上。

2 水-气二相流模型的建立与求解

2.1 基本控制方程

本文建立的水-气二相流模型的基本控制方程是各组分的质量平衡方程:

$$\frac{\partial(M^\kappa)}{\partial t} = -\text{div}(F^\kappa) + q^\kappa \quad (1)$$

式中 κ 为化学组分, 组成水相和气相的化学组分均为空气和水, 水相由液态水和溶解的空气组成, 气相由干空气和水蒸气组成, 水相和气相之间通过空气溶解于水, 水与水蒸气之间相互转化来实现质量交换; q^κ 为组分 κ 的源汇项; F^κ 为孔隙中流体的平流运动的组分 κ 的流量, 遵循 Darcy's 定律。 M^κ 为单位体积内组分 κ 的质量, 是水相和气相所包含的组分 κ 的质量之和, 利用质量分数的概念,

$$M^\kappa = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \phi S_{\beta} \rho_{\beta} \quad (2)$$

式中 X_{β}^{κ} 表示组分 κ (空气 a, 水 w) 占 κ 相 (气相 g, 水相 w) 的质量百分比, 则 κ 中的各个组分的质量分数之和等于 1.0; ϕ 为孔隙率; S_{β} 为 κ 相流体饱和度, 水相与气相饱和度之和等于 1.0; ρ_{β} 为 κ 相流体的密度, 为了考虑流体的压缩性, ρ_{β} 不是常数, 而是流体压力 p_{β} 的函数, 对于水相流体来说, 因温度不同而造成的水的密度变化, 比因压力不同而造成的变化要重要得多, 在恒温情况下, 通常取水的密度为 1000 kg/m^3 , 对于气相流体来说, 在岩土工程中通常遇到的压力和温度情况下, 干燥的空气和气相 (即含有水蒸气的空气) 均可视为“理想”气体, 满足理想气体定律满足理想气体定律,

$$\rho_g = \frac{\omega_g}{RT} \bar{p}_g \quad (3)$$

式中 ω_g 为气相的分子质量, 取决于干燥空气和水蒸气混合物的组成, 可根据水蒸气与干空气的所在气相的质量分数计算出来; $\bar{p}_g$ 为绝对气相压力; R 为气体摩尔常数, 可取 $8.31432 \text{ J/(mol K)}$; T 为绝对温度。空气在水相流体中的溶解性满足 Henry's 定律^[9], 可求出空气占水相的质量分数; 气相压力与空气、水蒸气之间的压力关系满足 Dalton 分压力规律^[10]。

$$F^\kappa = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} F_{\beta} \quad (4)$$

$$F_{\beta} = \rho_{\beta} v_{\beta} = -K \frac{\rho_{\beta} k_{r\beta} (S_w)}{\mu_{\beta}} (\nabla p_{\beta} - \rho_{\beta} g) \quad (5)$$

式中 F_{β} 表示 β 相的流量; v_{β} 为达西流速; K 为固有渗透率张量; $k_{r\beta}$ 为 β 相流体的相对渗透系数, 可表达为饱和度 S_w 的单值函数。为了区组分水 w 与水相 w, 规定上标 w 表示组分水, 下标 w 表示水相。

在非饱和区, 各点的毛细压力和渗透系数依赖于各点的含水率或饱和度, 最常采用 Van Genuchten 模型^[11]来表征毛细压力-饱和度关系曲线, 采用 Can Genuchten-Mualem^[12]模型来表征水相和气相的相对渗透率-饱和度关系曲线:

$$p_c = \begin{cases} p_0 [(S_e)^{-1/m} - 1]^{1/n} & (S_e > 0), \\ p_{\max} & (S_e \leq 0), \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_{rw} = S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2, \\ k_{rg} = (1 - S_e)^{0.5} \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m}. \end{cases} \quad (7)$$

式中 p_c 表示毛细压力, 其定义为孔隙水压力与孔隙气压力的差值, 即 $p_c = p_w - p_g$, 而基质吸力与毛细压力大小相等, 符号相反, 即 $S_u = -p_c$; S_e 表示有效水饱和度, $S_e = (S_w - S_{wr}) / (S_{ws} - S_{wr})$, 其中 S_{ws} 为饱和水饱和度; S_{wr} 为剩余水饱和度; p_0 表示进气值; n 为与多孔介质孔隙分布特征有关的参数, m 是与曲线的形状有关的参数, Van Genuchten 限定了参数 m 和 n 之间的函数关系, $m = 1 - 1/n$; $p_{\max}$ 表示最大毛细压力, 被广泛采用的值为 1.0×10^7 Pa; S_{rg} 为剩余气饱和度。

2.2 模型的数值求解方法

本文采用计算效率较高的积分形式的有限差分方法 (IFDM) 进行控制方程的空间离散^[13], 时间上的离散采用一阶向后差分的全隐式方法, 得到任意控制体积 V_n 上的全隐式、非线性方程组,

$$R_n^{\kappa, k+1} = M_n^{\kappa, k+1} - M_n^{\kappa, k} - \frac{\Delta t}{V_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^{\kappa, k+1} + V_n q_n^{\kappa, k+1} \right\} = 0. \quad (8)$$

式中 引入了组分 $\kappa = w, g$ 的余量 $R_n^{\kappa, k+1}$; M_n^{κ} 表示 M^{κ} 在控制体积 V_n 上的平均值; q_n^{κ} 表示 q^{κ} 在控制体积 V_n 上的平均值; m 为与单元 n 相邻的所有单元; A_{nm} 是单元 n 和 m 相邻的交界面的面积; F_{nm}^{κ} 是 F^{κ} 在面 A_{nm} 上的内法线方向的平均值; Δt 为时间步长; 上标 k 和 $k+1$ 表示两相邻的时间步指标。

模型的线性化采用 Newton-Raphson 迭代方法, 引入迭代指标 p , 式 (8) 中对余量 $R_n^{\kappa, k+1}$ 在迭代步 $p+1$ 处进行泰勒级数展开, 只保留一阶项, 得到包含 $2 \times \text{NEL}$ (计算域内单元数) 个方程的线性方程组, 并且以两迭代步的增量为未知量:

$$-\sum_i \frac{\partial R_n^{\kappa, k+1}}{\partial x_i} \Big|_p (x_{i, p+1} - x_{i, p}) = R_n^{\kappa, k+1} (x_{i, p}). \quad (9)$$

对于式 (9) 所示的大型稀疏系数矩阵的线性方程组, 通过编制计算机程序 SEEP2P 来求解, 当两次迭代的余量项中的最大值小于某数值, 如 10^{-6} 时, 作为迭代收敛条件。

3 模型的验证

本文引用在奥地利 Graz 技术大学土工试验室完成的压缩空气向上流动形成的水-气二相流试验^[14-15], 利用本文提出的水-气二相流模型对该试验进行数值模拟, 将计算结果与试验数据进行比较, 从而验证本文建立的水-气二相流模型的正确性和有效性。

3.1 试验方法

试验设备如图 2 所示, 树脂玻璃的圆筒容器内径 0.44 m、高 0.87 m 及壁厚度 0.012 m, 用来盛放 UK4 土样。UK4 砂土的毛细压力-饱和度关系曲线和相对渗透率-饱和度关系曲线采用 VG 和 VG-M 模型来表征, 模型参数及特性参数: $\phi=0.40^\circ$, $K=7.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $k_s=1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $P_0=35 \text{ kN/m}^2$, $S_{rw}=0.20$, $S_{rg}=0.05$, $S_{sw}=1.00$, $n=1.56$ 。

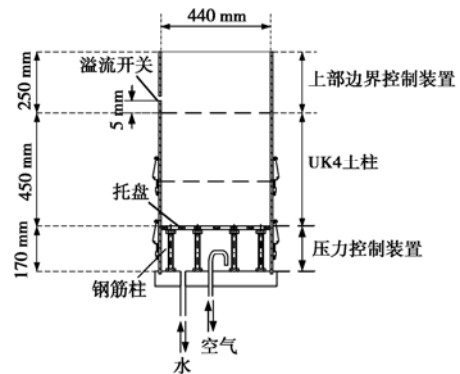


图 2 空气出流试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of cylinder in air outflow experiment

在试验开始之前, 首先土柱顶部放水, 使土柱变为充分饱和状态, 这期间底部的水管一直处于打开状态, 直到土样达到饱和时才关闭。供气装置可以产生所要求大小的压力气流, 同时底部安装一个压力表 P1, 用来监控流入土柱的气压力值。UK4 土样放置在圆筒容器的中部, 土样高度为 0.45 m, 土样中放置 6 个电子仪器, 3 个安放在土样的第一个 1/3 高度处, 另外 3 个放在第二个 1/3 高度处, 4 个 TDR (时间域反射计) 测量土柱在试验过程中体积含水率的变化, 编号为 T1~T4; 2 个压力表测量土柱中孔隙气压力的变化, 编号为 P2~P3。4 个 TDR 探头 (T1~T4) 和 3 个压力表 (P1~P3) 都与数据采集器相连, 试验过程中 TDR 和压力器的数据通过一台计算机输出。圆筒容器的上部为边界控制装置, 其高度为 0.25 m, 有一个溢流开关来保证土样以上的水位保持为 0.05 m, 使试验过程中保持土样以上的水面高度不变, 另一端与量筒相连, 由于空气流从下而上的流动, 饱和土柱中的水向上流出, 通过溢流开关流到量筒中, 从而可量测试验过程中水的出流量。

空气出流试验的开始是关掉顶部的供水管, 打开

底部的供气管, 可调节的供气装置将一定压力的气流输入到土样中, 试验过程中, 气压力逐级增大, 一系列的不同时刻的气压力的值通过气压表 P1 记录下来。在每一级的气压力试验中, 土样中的水被气流驱赶出来, 在试验之前, 土样顶部的水的高度与输出水管同高, 因此试验过程中被驱赶出来的水量就是流入到量筒中的水量。

3.2 数值模拟

利用水 - 气二相流模型 SEEP2P 对上述室内非稳定空气出流试验进行数值模拟, 图 3 为模拟该试验的简化模型。模型侧面的边界条件分别为: 边界 1 为不透水边界; 上部和下部边界, 即边界 2 和边界 3 为 Dirichlet 边界条件, 边界 2 上的气压力已知 (饱和状态, 等于水相压力) 和质量分数 X_w^a 很小, 取 10^{-10} , 边界 3 上的气压力已知, 等于压力控制室内的压力, 由压力表 P1 读出, 质量分数 X_g^w 很小, 取 10^{-10} 。土柱的处于稳定饱和状态, 初始条件由试验给出。

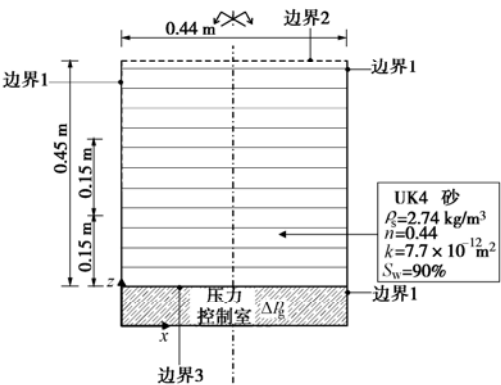


图 3 空气出流试验模拟的数值模型

Fig. 3 Numerical model to simulate the laboratory experiment

由于试验过程中, 底部气压力是逐级增加的, 因此在 SEEP2P 数值模拟过程中要进行分段模拟。对于第一阶段施加的气压力, 根据初始已知的初边值条件进行模拟, 得到第一阶段末的土柱孔压、饱和度分布状态; 开始第二阶段施加的气压力, 将第一阶段末的渗流状态量作为初始条件进行模拟, 同样得到第二阶段末的渗流状态, 将其作为模拟第三阶段渗流的初始条件, 以此类推, 直到模拟完最后一个阶段所施加的气压力过程。

最后, 我们将试验过程中测量得到的水的出流量、土柱的体积含水率和土柱的孔隙气压力的观测数据与利用 SEEP2P 数值模拟该试验所得到的计算数据进行比较, 如图 4 所示, 可见, 观测数据与计算数据吻合的较好, 说明本文建立的水 - 气二相流数学模型 SEEP2P 能够很好的模拟水 - 气二相流问题, 从而验证了模型 SEEP2P 的正确性和有效性。

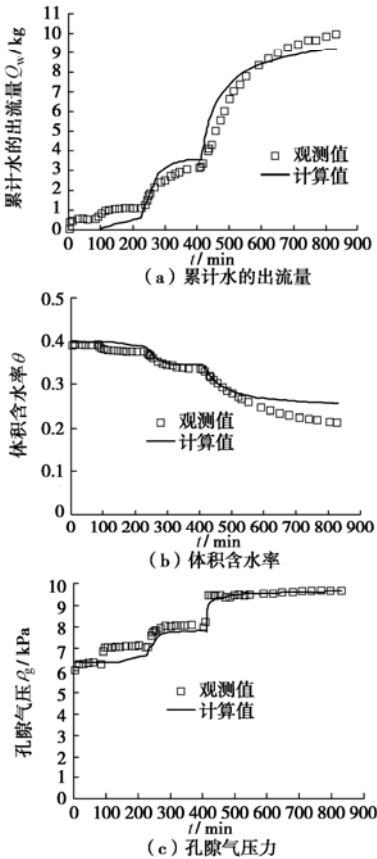


图 4 观测值与计算值的比较

Fig. 4 Comparison between measurements and calculations

4 算例分析

某两个单轨隧道采用压气法隧道施工技术, 隧道长度为 55 m, 其地质条件及横剖面图见图 5, 隧道呈口形, 平均直径为 6.5 m, 隧道底部距离地下水位 12.5 m, 地下水位线位于隧道顶部 6 m 处。施加在隧道中的空气压力为 110 kPa, 地下水位以上 4 m 是砂砾土, 渗透系数较大, 饱和渗透率 $k_{sw}>10^{-2}$ m/s, 隧道所在土层为黏质粉土, 饱和渗透率为 5×10^{-6} m/s, 孔隙率为 0.38。

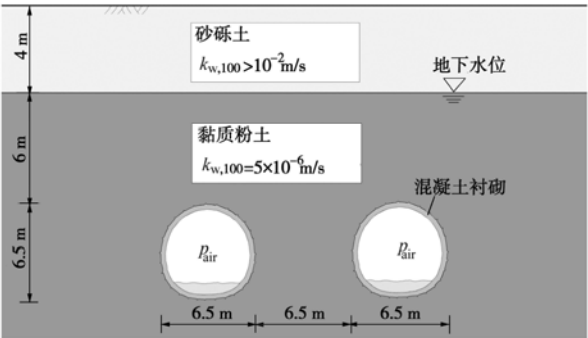


图 5 地质条件及隧道横剖面图

Fig. 5 Geological conditions and cross section of project

混凝土衬砌的固有渗透率为由室内试验测得, 为 7×10^{-12} m², 水相和气相的相对渗透率 - 饱和度关系

曲线满足线性关系。

黏质粉土在压缩空气超压的作用下, 由于土体本身变形的影响, 会形成大孔隙, 从而导致气相导率剧增, 即使在水相饱和度较大的土体内, Kammerer^[16]在 2000 年的试验发现, 当水相饱和度为 0.85 时, 气相相对渗透率高达 70%。另外, 一旦空气进入土体并形成大孔隙通道时, 土体的脱水过程 (即水相饱和度下降的过程) 会很慢。根据试验结果及参数反演计算, 对 Van Genuchten-Mualem 模型所表示的相对渗透率-饱和度关系曲线模型进行改进, 使之符合黏质粉土的实际空气损失量, 即得到黏质粉土的水相和气相相对渗透率-饱和度关系曲线如图 6 所示。

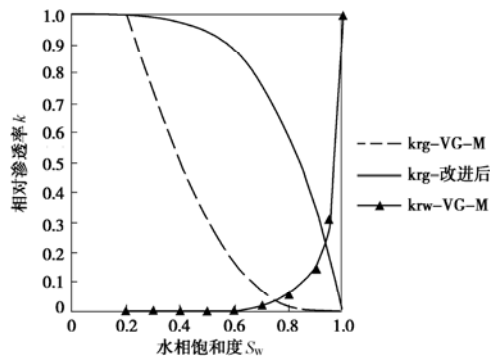


图 6 改进后的相对渗透率-饱和度关系曲线

Fig. 6 Adjusted relationship between relative permeability and water saturation

根据隧道形状及布置的对称性, 取隧道横剖面的 1/4, 即半个隧道来进行研究, x 方向 14 m; 隧道的长度方向为 y 方向, 取 70 m; 深度为 z 方向, 取 15 m。三维网格模型示意图见图 7。

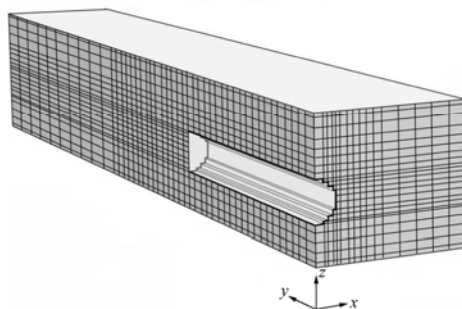


图 7 三维计算模型网格

Fig. 7 Three-dimensional grids of numerical model

隧道为空气单元, 气压力等于压缩空气压力 110 kPa; 随着开挖面的前移, 压缩空气压力边界变为混凝土衬砌单元; 在隧道开端处为支护好的工作台, 为不透水边界; 上部边界为已知气压力边界, 气压力等于大气压力, 因为上部砂砾土的渗透率很大, 可以近似看作与大气相通; 对称面为不透水边界; 侧面边界上的水压力已知, 等于该点的静水压力; 底部边界为水压力不变, 等于底端的已知水压力。

采用本文提出的水-气二相流模型来模拟隧道在

施工过程中的水-气二相流过程, 隧道的开挖是逐步向前推进的, 其施工的掘进速度对渗流场及漏气量的影响很大。在此, 选取 2 种工况进行模拟研究: ①考虑到复杂的地质条件, 向前掘进的速度只有 1 m/d; ②提高效率后向前掘进速度提高为 5 m/d。

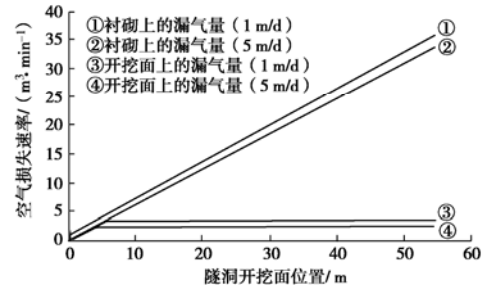


图 8 空气损失速率随开挖面位置和开挖速度的变化

Fig. 8 Variation of air losses with location of tunnel face and different advance rates

图 8 给出压气法隧道施工过程中在两种不同的施工进度下的空气损失速率。可见, 空气的损失量分为两部分: ①一部分为前端开挖面上的漏气量, 对于均质地质条件, 这部分漏气量基本为常数; ②一部分为通过混凝土衬砌的干缩裂缝的漏气量, 这部分的漏气量将随着隧道的向前延伸而逐渐增大。隧道开挖面上的漏气量在不同的施工进度 5 m/d 和 1 m/d 时的差别很微小, 这说明空气在粉质黏土中的流动接近稳定状态, 从通过混凝土衬砌上的漏气量也证实了这一点, 不同施工进度时的漏气量差别不大。当隧道施工到末端 55 m 处的通过衬砌的空气损失速率均达到 35 m³/min, 比经验值略高, 而通过开挖面上的空气损失率比经验值略低, 造成这种现象的可能原因是开挖面上的土体所受到的压缩空气的破坏作用要比衬砌后面的土体所受到的破坏作用要大得多。由于现场的实际空气损失量很难准确测量, 这种精度的计算值对于工程的设计和施工具有很大的指导意义。

图 9 为隧道开挖面向前推进 30 m 处的纵剖面和横剖面上的孔隙气压力和气相饱和度分布情况。图 9 (a) 为纵剖面上的孔隙气压力水头分布情况, 由于隧道中施加空气超压的作用, 隧道四周的孔隙气压力增大, 隧道边壁上的孔隙气压力等于施工中所施加的空气超压 110 kPa, 在开挖面处孔隙气压力的等值线较陡, 距开挖面前方越远, 由于空气入流较少, 孔隙气压力分布保持静水压力分布状态; 图 9 (b) 为纵剖面上的孔隙水压力水头分布情况, 由于空气的入流, 与静水压力相比, 已经开挖的隧道上方及开挖面附近孔隙水压力明显减小; 图 9 (c) 为隧道纵剖面上的气相饱和度分布情况, 同样, 在隧道周围及开挖面附近空气入流较多, 由于施加在隧道顶部的空气超压较大, 因而空气入流主要发生在隧道的上半部, 在隧道前方远离开挖面的土体几乎无空气入流; 图 9 (d) 为隧道开挖

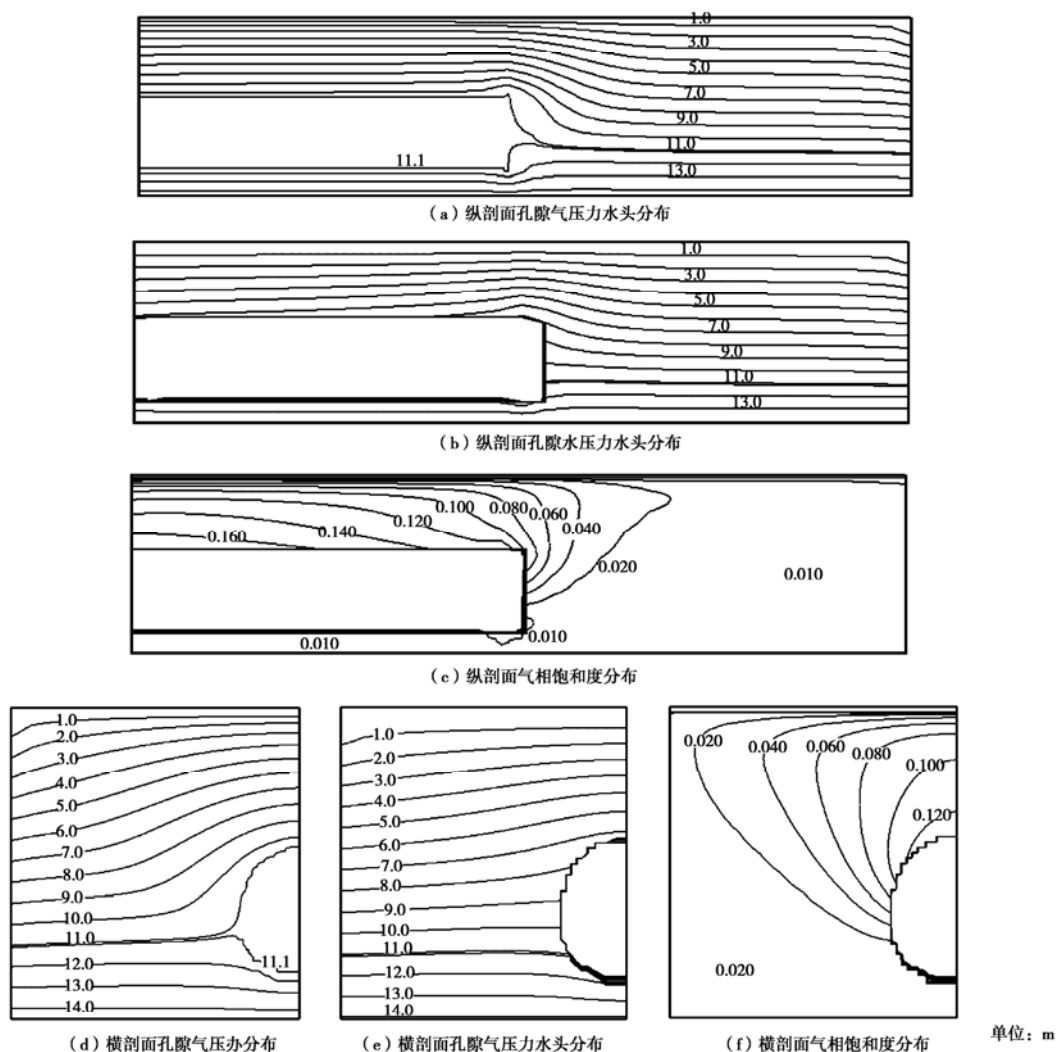


图9 隧道纵剖面 and 横剖面上的孔隙气压力及气饱和度分布

Fig. 9 Distribution of pore air pressure head and gas saturation in cross and longitudinal sections

30 m 处的横剖面上的孔隙气压力水头分布, 在左侧边界处, 孔隙气压力接近稳定状态时的静水压力分布, 距离隧道越近, 孔隙气压力的等值线越陡, 这是由于隧道中的空气流入所引起的; 图 9 (e) 为横剖面上的孔隙水压力水头分布, 由于空气的入流, 与静水压力相比, 开挖面附近孔隙水压力明显减小; 图 9 (f) 为横断面上的气饱和度分布情况, 可看出压缩空气向隧道周围土体扩散的范围, 空气的入流主要发生在隧道断面的上半部, 气饱和度的最大值为 20% 发生在隧道顶部的土体中, 随着离隧道面距离的增大, 气饱和度较快的下降, 这个结果是利用改进后的气相相对渗透率 - 饱和度关系曲线计算得到的, 即使气相饱和度较低, 气相的相对渗透率仍然较大, 是符合实际情况的。

5 结 语

采用压气法进行隧道施工过程中, 空气压力与隧道周围孔隙水压力的差值使得超压空气流入四周的饱和土体中, 形成气驱替孔隙水的水 - 气二相流, 从而

改变隧道周围区域的渗流场, 造成压缩空气的损失。施工过程中空气的损失不仅发生在未支护的开挖面上, 而且还发生在新奥法隧道施工的衬砌上, 在均质的地质下环境中, 开挖面上的漏气量一般为常数, 而衬砌上的漏气量将随着隧道长度的增加而线性增大, 并且这部分将成为决定因素。要通过数值方法来较为精确的模拟压气法隧道施工中的水 - 气二相流过程, 建立水 - 气二相流模型是十分必要的, 因为该模型不但考虑了土体中气相的流动, 而且还考虑了水相流动以及水相和气相相互作用的影响, 比较符合气驱替孔隙水的水 - 气二相渗流过程的物理意义。

通过本文的研究工作可以看出, 要进一步提高压气法隧道施工过程中的漏气量的数值模拟精度, 需要深入研究以下两点: ①进一步在水 - 气二相流模型中考虑压缩空气对土体的破坏作用, 即将水 - 气二相流过程与应力状态分析耦合, 可得出施工过程中地面的沉降程度; ②进一步研究表征土体的相对渗透率 - 饱和度关系以及毛细压力 - 饱和度关系曲线 (或土水特

性曲线)的数学模型,例如本文的黏质粉土在高压空气的入流作用下会形成大孔隙通道,从而导致气相传导率剧增,即使在水相饱和度较大的土体内,气相传导率可能很大,常用的表征气相相对渗透率-饱和度的关系曲线的数学模型(如 Van Genuchten-Mualem 模型)可能不适用,需通过土样的室内试验进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] LAMONT D, FICE C E. The HSE compressed air tunneling exposure database[J]. Actions to Improve Safty and Health in Construction, 2004, 7: 28 - 30.
- [2] CHEN Z S, HOFSTETTER G, MANG H. 3D-boundary element analysis of the lowered groundwater level for tunnels driven under compressed air[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1991, 15: 735 - 752.
- [3] GÜLZOW H G. Dreidimensionale Berechnung des Zweiphasenströmungsfeldes beim Tunnelvortrieb unter Druckluft in wassergesättigten Böden[M]. Aachen Germany, Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau, 1994. (GÜLZOW H G. Three-dimensional calculation of the two-phase flow at the tunnel under pressure in saturated soils[M]. Aachen Germany, publications of the Institute for Foundation Engineering, Soil Mechanics, Rock Mechanics and Transport Waterways, 1994. (in German))
- [4] HOCHGÜRTEL T. Numerische Untersuchungen zur Beurteilung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Einsatz von Druckluft zur Wasserhaltung im schildvorgetriebenen Tunnelbau[M]. Aachen Germany, Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau, 1998. (HOCHGÜRTEL T. Numerical investigations to assess the stability of the Ortsbrust when using compressed air on water in schildvorgetriebenen tunneling[M]. Aachen Germany, publications of the Institute for Foundation Engineering, Soil Mechanics, Rock Mechanics and Transport Waterways, 1998. (in German))
- [5] TTL G. A Three-phase fe-model for dewatering of soil by means of compressed air[D]. Austria: Institute for Structural Analysis and Strength of Materials, University of Innsbruck.
- [6] KRAMER J, SEMPRICH S. Erfahrungen über den druckluftverbrauch bei der Spritzbetonbauweise[M]. Essen: Taschenbuch für den Tunnelbau, Verlag Glückauf, 1989: 91 - 153. (KRAMER J, SEMPRICH S. Experiences on the air consumption in the shotcrete design[M]. Essen: Paperback for tunneling, Glückauf Verlag, 1989: 91 - 153. (in German))
- [7] STROBL B. Die NATM in Böden in Kombination mit Druckluft[D]. Austria: Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, 1991. (STROBL B. NATM in soils in combination with compressed air[D]. Austria: Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, 1991. (in German))
- [8] SCHIEDL Y. Einfluss des Strömungsmechanik teilgestützte Böden beim Tunnelbau unter Druckluft nach NATM[D]. Austria: Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, 2003. (SHIEDL Y. Influence of fluid mechanics in saturated soils during compressed air tunneling after NATM[D]. Austria: Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, 2003. (in German))
- [9] HARRISON L P. Fundamental concepts and definitions relating to humidity[M]. New York: Reinhold. 1965.
- [10] SISLER H H, VANDERWERF C A, DAVIDSON A W. General chemistry: a systematic approach[M]. New York: Macmillan. 1953.
- [11] VAN Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892 - 898.
- [12] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513 - 522.
- [13] NARASIMHAN T N. An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(1): 57 - 64.
- [14] STEGER G, SEMPRICH S. 3-D numerical simulation of air losses in compressed air tunneling[C]// Geo Shanghai International Conference, Shanghai, 2006.
- [15] 孙冬梅. 水-气二相流饱和-非饱和渗流场分析及其应用研究[D]. 南京: 河海大学. 2007. (SUN Dong-mei. Study on saturated-unsaturated seepage based on water-air two-phase flow theory and applications[D]. Nanjing: Hohai University. 2007. (in Chinese))
- [16] KAMMERER G. Experimentelle Untersuchungen von Strömungsvorgängen in teilgestützten Böden und in Spritzbetonrissen im Hinblick auf den Einsatz von Druckluft zur Wasserhaltung im Tunnelbau[D]. Graz: Technische Universität Graz, 2000. (KAMMERER G. Experimental investigation of flow processes in saturated soils and shotcrete cracks when using compressed air tunneling[D]. Graz: University of Technology, 2000. (in German))