

地下水影响下隧道不同开挖方式的数值模拟*

吴开荣, 王桂莹*, 赵 杰

(大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要:以大连某山体公路大跨度隧道为工程背景, 基于流固耦合原理, 考虑地下水影响下不同开挖方式对隧道开挖的影响, 对涌水量、围岩位移、应力以及围岩稳定系数进行了对比分析。结果表明: 导洞法开挖引起的拱顶沉降是最小的, 而拱底隆起和横向拱腰位移却是最大的, 以自编的强度折减法程序计算出来的围岩稳定系数也是最大的, 因此, 相比于其他3种开挖形式导洞法更适合于富水条件下的大跨度隧道的开挖, 为类似工程的设计和施工提供了一定依据。

关键词:流固耦合; 开挖方式; 涌水量; 稳定系数

中图分类号:TV457 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0666(2016)01-0091-05

0 引言

近年来, 人类对交通的需求与日俱增, 而随着地上空间开发的逐渐受限, 人类把目光投向了地下空间, 因此地下空间的应用与开发越来越受到世界各国的关注(钱七虎, 1998; 刘宝深, 1999), 在城市里, 隧道以对周围环境影响少、污染小和结构比较稳定的优点获得人类的青睐, 被广泛应用于城市的地下空间开发。

随着国内经济的快速发展, 隧道在城市交通建设方面得到广泛的应用。隧道工程建设位置的工程地质和水文地质环境相当复杂, 所穿越的地层既有较硬的裂隙岩体, 又有软弱的砂质地层等。无论何种地层, 地下水都是需要解决的问题。在富水条件下开挖隧道, 围岩物理力学参数会受地下水影响而降低, 另一方面, 隧道的开挖会导致围岩应力场和渗流场重新分布, 从而引起孔隙压力的变化, 反过来孔隙压力的变化也会导致应力场的变化, 两场之间耦合作用会加剧地层变形(薛新华, 2008; 李地元等, 2007; 原华等, 2008)。在土质较差的地层, 两场的耦合作用将会更强, 地下水对隧道上覆土层变形的影响较大, 此时若不考虑渗流场与应力场的耦合作

用, 会给计算结果带来一定的误差。

环境因素决定了隧道开挖的手段, 因此, 需要基于流固耦合原理考虑地下水的影响; 不同开挖方式直接决定了施工的难易, 也决定了施工过程的安全, 因此, 对不同开挖方式的研究也十分重要。笔者以大连某山体公路大跨度隧道为背景, 模拟对比了4种隧道开挖方法, 寻找在富水条件下最适合的开挖方式。

1 流固耦合原理及隧道开挖方法

1.1 流固耦合原理

本次模拟采用FLAC3D软件实现, 该软件采用等效连续介质模型将流固耦合机理运用到岩石中, 即将岩体视为多孔介质(Itasca Consulting Group Inc, 2003), 流体在介质中的流动服从Darcy定律, 同时满足Biot方程。该软件使用有限差分法进行流固耦合计算, 包括以下几个微分方程(陈育明, 徐鼎明, 2013; 关宝树, 2003)。

1.1.1 平衡方程

对于小变形情况, 流体质点平衡方程为

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 辽宁省教育厅项目(L2015035)和大连市科技计划项目(2014E13SF145)联合资助.

✉ 通讯作者: 王桂莹(1960~), 教授, 博士, 主要从事重大设施减震以及防震减灾监测技术等.
E-mail: tumuxinxi@163.com.

式中, $q_{i,j}$ 为渗流速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), q_v 为被测体积的流体源强度 (s^{-1}), ζ 为单位体积孔隙介质的流体体积变化量, t 是时间 (s)。

而对于饱水孔隙介质, 则有

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

式中, M 为比奥模量 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), p 为孔隙水压力 (Pa), α 为比奥系数, ε 为体积应变, T 为温度 ($^{\circ}\text{C}$), β 为考虑流体和固体颗粒的热膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.1.2 渗流运动方程

流体通常用 Darcy 定律来表示其运动形式。对于均质介质情况, 其渗流运动方程为

$$q_i = -k[p - \rho_f x_i g_i]_i. \quad (3)$$

式中, q_i 为渗流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), k 是介质的渗透系数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ_f 为流体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), g_i 为重力加速度分量 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

1.1.3 本构方程

流固耦合作用的实质为有效应力原理, 即岩土介质有效应力的变化将导致体积应变的发生, 从而引起流体孔隙压力的变化, 反之, 孔隙压力的变化也会导致有效应力的变化。其本构方程的增量基本形式为

$$\Delta \sigma_{ij} + \alpha \Delta p \delta_{ij} = H_{ij}(\sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}). \quad (4)$$

式中, $\Delta \sigma_{ij}$ 为有效应力增量, H_{ij} 为介质力学行为相关的函数, $\Delta \varepsilon_{ij}$ 为应变增量。

1.1.4 边界条件

渗流计算边界条件有 4 种: ①给定孔隙水压力; ②给定边界外法线方向流速分量; ③不透水边界; ④透水边界。其中透水边界采用如下形式给出:

$$q_n = h(p - p_e). \quad (5)$$

式中, q_n 为边界外法线方向流速分量 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), h 为渗透系数 ($\text{m}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{s}^{-1})$), p_e 为渗流出口处的孔隙水压力 (Pa)。

1.2 隧道开挖方法

沉管法、矿山法和盾构法为开挖隧道的主要施工方法, 其中矿山法是一种传统的施工方法,

在地下工程发展史上一直占有重要的地位。矿山法指在修建隧道和开挖地下坑道时使用同一种作业方式的施工方法 (董宁, 辜文凯, 2012), 其基本原理是: 隧道周围的岩体会在隧道开挖后因受爆破的影响而破裂处于松弛状态, 因此随时都有可能坍落。基于这种松弛荷载理论依据, 其施工方法是按分部顺序采取分割式一块一块地开挖, 要求边挖边撑以求安全。随着喷锚支护的出现, 进而发展成新奥法。以下只对矿山法的 3 种开挖方法做简要阐述。

(1) 台阶法

台阶开挖法将结构断面分成两个以上部分分步开挖。根据地层条件和机械配套情况, 台阶法又可分为正台阶法和中隔壁台阶法。台阶开挖法适合于土质较好的隧道施工, 软弱围岩、第四纪沉积地层隧道。

(2) 单侧壁导坑法

单侧壁导坑法是将断面横向分成 3 块或 4 块, 侧壁导坑尺寸应充分利用台阶的支撑作用, 并考虑机械设备和施工条件。单侧壁导坑法适用于断面跨度大、地表沉陷难以控制的软弱松散围岩处隧道施工。

(3) 双侧壁导坑法

双侧壁导坑法一般是将断面分成 4 块: 左侧壁导坑、右侧壁导坑、上部核心土、下台阶。左侧壁导坑、右侧壁导坑错开的距离, 应以开挖一侧导坑所引起的围岩应力重分布的影响不致波及另一侧已成导坑为原则。适用于隧道跨度较大、地表沉陷要求严格、围岩条件特别差、单侧壁导坑法难以控制围岩变形时的地层条件。

2 工程实例

2.1 工程概况

大连市的气候属温带季风气候, 并具有海洋影响的特点。冬季气温较低、降水少; 夏季气温较高、降雨较多且集中。本文以大连某山体隧道工程为研究对象, 该工程入口处为分离式双洞, 单向三车道, 隧道主要包括两车道部分、变宽段部分和三车道部分。拟建隧道埋深 2.23 ~ 164.00 m, 山体水位线较高, 属于富水条件下开挖。隧道洞身拟采用复合式衬砌混凝土结构。

2.2 模型建立

根据实际工程的地质勘查资料, 得出三车道

公路隧道在总体上属于Ⅳ级围岩。其物理力学参数为：重度 $\gamma = 23 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ，粘聚力 $C = 0.3 \text{ MPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$ ，弹性模量 $E = 4 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.333$ 。拱顶埋深 $D = 105 \text{ m}$ ，隧道高 $H = 11.3 \text{ m}$ ，跨度 $B = 16.2 \text{ m}$ 。为减少数值模型中边界约束条件对计算结果的影响，确保计算结果精度，同时尽量提高计算效率，流固耦合计算时，隧道轴线方向取单步开挖步长为 2 m ，计算域在水平方向由隧道轴线向两侧各取 60 m ，在竖直方向由隧道轴线向上、下两侧各取 60 m 。整体模型尺寸为 $120 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ，采用摩尔—库仑屈服准则，由于地下水非常丰富，因此水位线取到模型顶端。隧道轴心处孔隙水压力为固定值，两侧及底部边界为不透水边界，不考虑隧道初支的止水作用，在隧道开挖面设置零压力水头边界。模型顶端自由，底部施加三方向位移约束，两侧及沿隧道轴线方向边界水平位移约束，初始应力主要考虑岩层的自重应力。同时为了比较不同开挖方法下同一断面围岩的力学特征变化，分别采用三台阶预

留核心土法、导洞法、单侧壁导坑法和双侧壁导坑法建立数值模拟研究，如图 1 所示，模型中，围岩采用实体单元，锚杆采用了 Cable 单元进行模拟，其中钢拱架的作用用等效的方法予以考虑。

3 4 种开挖方式的对比

开挖方式的不同必定会对隧道围岩的位移、应力以及稳定性产生影响，以下对 4 种开挖方式的具体影响进行分析。

3.1 涌水量分析

涌水及地下水超量排放引起的环境问题是隧道及地下工程施工常见的灾害之一，隧道涌水是隧道设计和施工所面临的挑战之一（高虎军，2012）。笔者给出单侧壁导坑法、导洞法、双侧壁导坑法及台阶法 4 种开挖方式的涌水量（表示隧道每天每延米涌水量，单位 $\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$ ），分别为 13.25、14.56、14.07 及 12.74。由此可以看出：导洞法的涌水量最大，台阶法最小，由涌水量数据可以反映出，在支护结构都一样的前提下，导洞法这种开挖方法本身的防水效果较差，台阶法最好。

3.2 位移场分析

将 4 种开挖方式开挖完成后引起的隧道围岩位移的大小进行总结，如表 1 所示，图 2 只给出导洞法的竖向和横向位移云图。由图 2a 可以看出：竖向位移在拱顶和拱底处达到最大，由图 2b 可以看出：水平位移在拱肩上部 and 拱脚下端以及拱腰处达到最大。

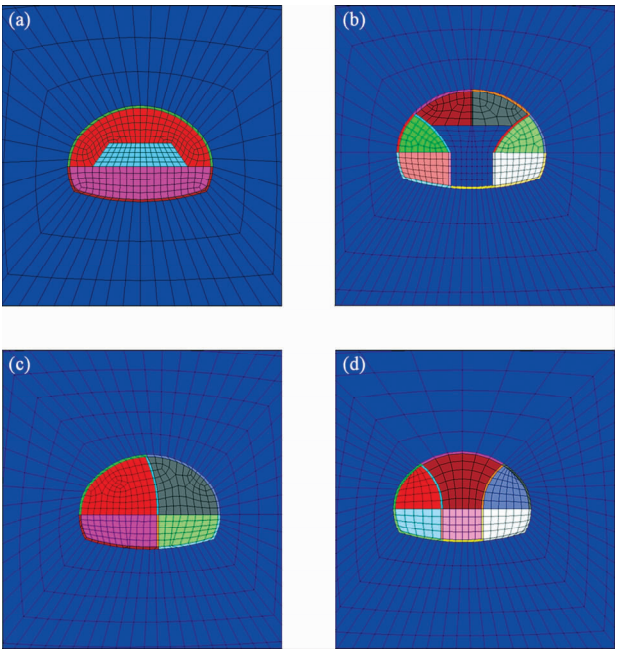


图 1 4 种开挖方法施工模型网格

(a) 台阶法；(b) 导洞法；(c) 单侧壁导坑法；(d) 双侧壁导坑法

Fig. 1 Scheme of the construction grid model of four excavation methods

(a) the bench method; (b) the pilot drift method; (c) the single side heading method; (d) the double side heading method

表 1 位移值

Tab. 1 Displacement values

	横向位移/cm		竖向位移/cm	
	左拱腰	右拱腰	拱顶	拱底
单侧壁导坑法	0.38	0.38	1.78	1.44
台阶法	0.37	0.37	1.90	1.25
导洞法	0.45	0.45	1.66	1.55
双侧壁导坑法	0.40	0.40	1.72	1.42

由表 1 可得出：4 种开挖方式中台阶法的竖向拱顶位移最大，为 1.90 cm，导洞法的竖向拱顶位移最小，为 1.66 cm，而拱底位移则相反，导洞法拱底位移最大，为 1.55 cm，台阶法拱底位移最小，为 1.25 cm，由竖向位移可以得知，断面开挖

分块较多的开挖方法比较稳定,引起的拱顶沉降比较小。由涌水量数据可以得出:导洞法涌水量最大,台阶法最小,这是由于地下水的渗流引起了周围岩土体的变动,加剧了拱底的隆起,因此导洞法拱底位移最大,台阶法最小,所以说拱底是富水条件下开挖隧道的一个薄弱环节(路平,2012)。对于拱腰横向位移,4种开挖方式中导洞法的拱腰横向位移最大,为0.45 cm,台阶法的最小,为0.37 cm,这同样是因为地下水的渗流效果引起了岩土体的变动。

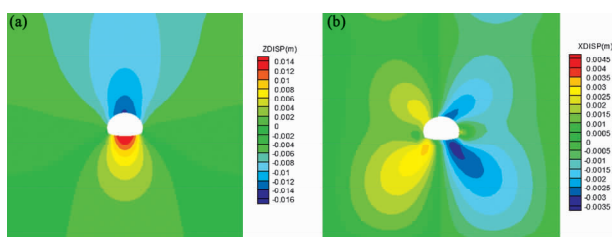


图2 导洞法开挖后围岩位移等值线云图
(a) 竖向位移; (b) 横向位移

Fig. 2 Nephogram of displacement contour of surrounding rock after tunnel excavation by pilot drift method

(a) vertical displacement; (b) horizontal displacement

3.3 应力场分析

笔者只给出导洞法的竖向和横向应力云图,如图3所示,其余开挖方式的应力云图图形都相差不大,只是应力大小上的改变。从图3中可以看出:隧道开挖后,洞口出现应力集中现象。4种开挖方式的应力值列于表2。

表2 应力值
Tab. 2 Stress values

	竖向应力/MPa	水平应力/MPa	大主应力/MPa
台阶法	47.7	38.6	52.1
单侧壁导坑法	38.2	36.5	43.2
导洞法	34.6	33.8	37.7
双侧壁导坑法	35.0	34.1	41.8

由表2可以得出:4种开挖方式产生的应力都集中于隧洞洞口附近(徐孟林,2014),台阶法的应力相比于其他3种开挖方式是最大的,而导洞法开挖周围围岩应力是最小的,这是因为台阶法工艺的自身防水性能在4种开挖方式中是最好的,而

导洞法最差,涌水量过多,导致围岩内部的孔隙水压力减少,从而导致了隧洞洞口周围应力的减少。

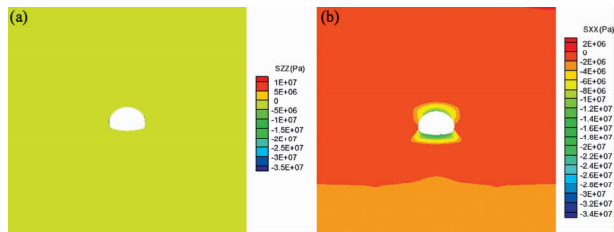


图3 导洞法开挖后围岩总应力等值线云图
(a) 竖向总应力; (b) 水平总应力

Fig. 3 Nephogram of total stress contour of the surrounding rock after tunnel excavation by pilot drift method

(a) total vertical stress; (b) total horizontal stress

3.4 稳定性分析

FLAC3D软件自带自动搜索安全系数的命令solve fos,而此命令仅适用于Mohr-Coulomb模型。通过对围岩的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 进行不断折减,直到围岩处于临界破坏状态,从而确定安全系数(Ugai,1989),这种方法的实质就是强度折减法,此程序是利用内插逼近的方法确定安全系数。

由该方法计算出来的单侧壁导坑法、双侧壁导坑法、导洞法及台阶法4种开挖方式的强度折减系数分别是1.615、1.653、1.699及1.496。从安全系数可以看出:导洞法和双侧壁导坑法相对于另外两种开挖方式围岩的稳定性更加稳定,而导洞法要比双侧壁导坑法略好一点。因此通过围岩安全系数的对比可知:导洞法更加适合大跨度富水条件隧道的开挖。

通过对比4种开挖方法,可知导洞法相比于其他3种开挖方法,更适合于这种大跨度的隧道开挖,虽然其本身的防水性能不是很好,但可以通过后续施工去弥补,因此在富水条件下的大跨度隧道开挖,导洞法更适合。

4 结论

基于流固耦合理论,考虑地下水影响下4种开挖方式对隧道开挖的影响,从而得出:4种开挖方式中台阶法自身防水性能最好,其次依次是单侧

壁, 双侧壁导坑法和导洞法; 对于位移, 导洞法开挖引起的拱顶沉降是最小的, 而拱底隆起和横向拱腰位移却是最大的, 而台阶法则相反; 对于应力, 导洞法开挖围岩周围的竖向、水平应力和大主应力都是最小的, 台阶法则最大。

对于围岩的安全系数, 采用自编强度折减法程序, 对4种开挖方式进行计算, 可以得出: 导洞法的安全系数最大, 依次是双侧壁、单侧壁导坑法和台阶法, 由此得出对于大跨度隧道在富水条件下开挖, 导洞法相比于其他3种开挖形式更适合的结论。

参考文献:

- 陈育明, 徐鼎平. 2013. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 董宁, 辜文凯. 2012. 隧道开挖方法及其施工技术要点分析[J]. 四川建筑, 32(6): 167-170.
- 高虎军. 2012. 青坪隧道流固耦合分析及涌水量预测研究[D]. 湖南: 中南大学.
- 关宝树. 2003. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 147-152.
- 李地元, 李夕兵, 张伟等. 2007. 基于流固耦合理论的连拱隧道围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 26(5): 1056-1064.
- 刘宝深. 1999. 综合利用城市地面及地下空间的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 18(1): 109-111.
- 路平. 2012. 考虑流固耦合的富水软岩隧道力学特性及合理注浆参数研究[D]. 湖南: 中南大学.
- 钱七虎. 1998. 迎接我国城市地下空间开始高潮[J]. 岩土工程学报, 20(1): 112-113.
- 徐孟林. 2014. 渗流水对隧道围岩应力及位移影响的研究[D]. 辽宁: 大连大学.
- 薛新华. 2008. 岩土介质流-固耦合非线性损伤力学理论与数值分析[D]. 杭州: 浙江大学.
- 原华, 张庆贺, 胡向东等. 2008. 大直径越江盾构隧道各向异性渗流应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 27(10): 2130-2137.
- Itasca Consulting Group Inc. 2003. FLAC3D Fluid - mechanical interaction (Version 2.1) [R]. [S. 1.]: Itasca Consulting Group, Inc.
- Ugai K. 1989. A method of calculation of total safety factor of slopes by elastoplastic FEM[J]. Soils and Foundations, 29(2): 190-195.

Numerical Simulation of Different Tunnel Excavation Methods under the Influence of Underground Water

WU Kairong, WANG Guixuan, ZHAO Jie

(The R&D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract

Take a mountain tunnel project in Dalian as the engineering background, considering the influence of different excavation methods on tunnel excavation under the influence of the groundwater based on the principle of fluid-solid coupling, we compared and analyzed the water inflow, displacement, stress and stability coefficient of surrounding rock. The result show that the vault settlement induced by the drift method is minimum, however, the displacement of arched bottom uplift and lateral arch waist is maximum, and the calculated surrounding rock stability coefficient by using the self strength reduction procedure is maximum. Thus, compared to other three excavation form, excavating the large span tunnel under water rich conditions is more suitable by the drift method. The obtained result could provide a certain basis for the design and construction of the similar projects.

Key words: fluid-solid coupling; excavation method; water inflow; stability coefficient