

文章编号: 0451-0712(2007)02-0168-05

中图分类号: U451.2

文献标识码: A

基于三维有限元分析的隧道开挖效应研究

汪成兵¹, 刘丰军^{1,2}, 王士民¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系 上海市 200092; 2. 河南科技大学建筑工程学院 洛阳市 471003)

摘要: 隧道的开挖引起围岩应力状态的变化, 改变了隧道围岩的力学性能。在三维非线性有限元计算的基础上, 研究分析了隧道开挖全过程中隧道围岩应力、位移变化规律以及开挖结束后隧道周边的应力、位移状态。研究结果表明: 隧道的开挖是一个先加载后卸载的过程, 隧道开挖卸荷效应在隧道拱底表现最为明显, 拱顶次之; 在隧道轴线方向上开挖对周围岩的影响范围约为掌子面前后各 1 倍的隧道跨度, 在隧道横断面方向上约为 2 倍的隧道跨度, 对隧道截面中心岩体的影响范围在隧道轴线方向上约为掌子面到达该断面前 1 倍的隧道跨度。此外, 文中还将计算结果与工程实际进行了定性的比较和分析。

关键词: 公路隧道; 开挖效应; 有限元分析

隧道的开挖对隧道周边围岩产生一个动态的扰动, 打破了岩体内原岩应力场的平衡状态, 导致隧道围岩发生卸荷回弹和应力重分布。由开挖而引起的围岩应力状态的变化改变了隧道围岩的力学性能, 导致岩体强度的降低, 并最终影响隧道围岩的变形量及其破坏模式。因此, 隧道开挖全过程中围岩的实际受力过程是一个值得研究的课题。

在隧道计算分析中, 按平面应变问题所建立的模型, 仅适用于已建成的隧道或者远离掌子面的洞身, 且其研究主要集中在隧道边墙及拐角的应力集中、位移及稳定性方面。而三维数值分析可以从空间角度较为真实地模拟开挖过程, 更能够体现隧道的开挖对掌子面及掌子面附近岩体稳定性的影响。本文以江西某高速公路隧道为工程背景, 对隧道开挖过程进行了弹塑性三维有限元计算, 分析研究了隧道开挖全过程中隧道围岩应力、位移变化规律以及开挖结束后隧道周边的应力、位移状态, 并参照工程实际进行了相关的讨论, 得出了一些与工程实际吻合较好的结论。

1 施工过程动态仿真基本原理

隧道开挖施工过程主要包括岩体分步开挖及支护结构的分步设置等。对各施工阶段的状态, 有限元分析的表达式为:

$$[K]_i \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_r\}_i + \{\Delta F_g\}_i + \{\Delta F_p\}_i \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, L$$

式中: L 为施工步数; $[K]_0$ 为开挖前岩体等的初始总刚度矩阵; $[K]_i (i > 1)$ 为第 i 施工步岩土体和支护结构总刚度矩阵; $\{\Delta F_r\}_i$ 为第 i 施工步开挖边界上的释放荷载的等效结点力, 初次开挖由岩体自重、地下水荷载、地面超载等确定, 其后各开挖步由当前应力状态决定; $\{\Delta F_g\}_i$ 为第 i 施工步新增自重等的等效结点力; $\{\Delta F_p\}_i$ 为第 i 施工步增量荷载的等效结点力; $\{\Delta\delta\}_i$ 为第 i 施工步的结点位移增量。

对每个施工步, 增量加载过程的有限元分析的表达式为:

$$[K]_{ij} \{\Delta\delta\}_{ij} = \{\Delta F_r\}_{ij} a_{ij} + \{\Delta F_g\}_{ij} + \{\Delta F_p\}_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, L; j = 1, \dots, M$$

式中: M 为各施工步增量加载的次数; $[K]_{ij}$ 为第 i 施工步中施加第 j 增量步时的刚度矩阵; a_{ij} 为第 i 施工步第 j 增量步的开挖边界释放荷载系数, 开挖边界荷载完全释放时有 $\sum_{j=1}^M a_{ij} = 1$; $\{\Delta F_g\}_{ij}$ 为第 i 施工步中施加第 j 增量步新增自重等的等效结点力; $\{\Delta\delta\}_{ij}$ 为第 i 施工步中施加第 j 增量步的结点位移增量; $\{\Delta F_p\}_{ij}$ 为第 i 施工步中施加第 j 增量步增量荷载的等效结点力。

2 三维分析模型的建立

数值模拟采用MARC有限元软件,以江西某高速公路隧道为工程背景。该隧道为分离式四车道高速公路隧道,穿越的围岩主要有第四系残坡积层、全风化板岩、强风化千枚状板岩及弱风化千枚状板岩,围岩岩性IV~VI级。隧道最小埋深22 m,最大埋深63 m。隧道净跨度 $B=10$ m,净高 $H=7.5$ m。隧道横截面如图1所示。

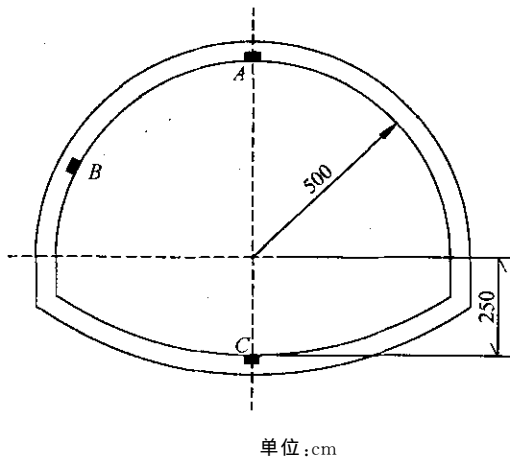


图1 隧道横截面示意

为分析隧道的开挖效应,计算过程中不考虑支护的影响。根据设计施工图纸,计算模型取隧道横截面方向长100 m,高100 m,隧道轴线方向长100 m,围岩按V级考虑,围岩计算参数如表1。隧道位于模型中央,模型左右边界设为 x 方向位移约束,前后边界设为 z 方向位移约束,下边界设为固定约束,上边界自由。因隧道埋深较浅,计算时只考虑围岩的自重应力场。岩体的弹塑性分析采用线性Mohr-Coulomb屈服准则。模型共16 952个单元,18 009个结点。隧道按全断面一次开挖,开挖步距为2 m。有限元模型如图2所示。

表1 隧道围岩计算参数

围岩级别	弹性模量 E GPa	泊松比 μ	重度 γ kN/m ³	粘聚力 c MPa	内摩擦角 φ (°)
V级	1.5	0.4	19	0.1	24

3 计算结果分析

3.1 隧道周边应力变化规律

选取隧道轴线方向中间部位隧道拱顶、侧壁、拱底的3个定点A、B、C为对象(见图1),开挖全过程主应力变化曲线分别如图3、图4、图5所示(图中

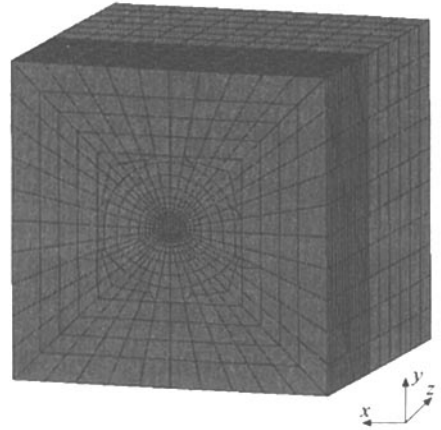


图2 三维有限元模型及网格划分

坐标轴横轴表示该点距掌子面的距离,负值表示掌子面还未到该点所处的断面)。从计算结果可以看出,对拱顶A点、侧壁B点、拱底C点而言,随着掌子面的逐步推进,3个测点的主应力逐渐增高,当掌子面到达3个测点所处的位置时,主应力达到最大值。随掌子面逐渐远离3个测点,3个测点主应力总体呈下降趋势,其中A点和C点的主应力值在掌子面通过一定距离后有所波动,这应是由隧道开挖卸荷回弹而引起的。

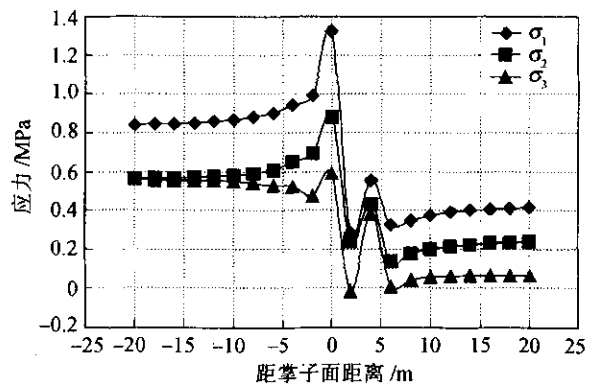


图3 开挖全过程A点主应力变化曲线

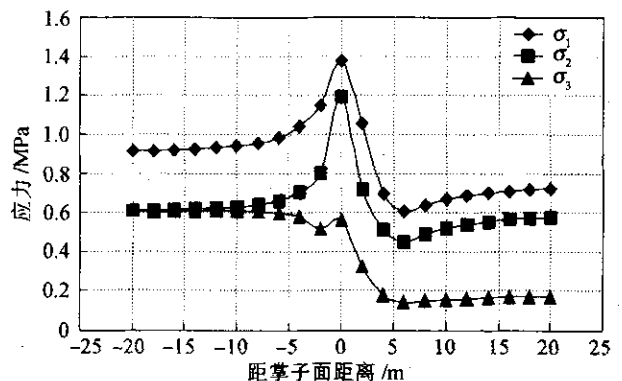


图4 开挖全过程B点主应力变化曲线

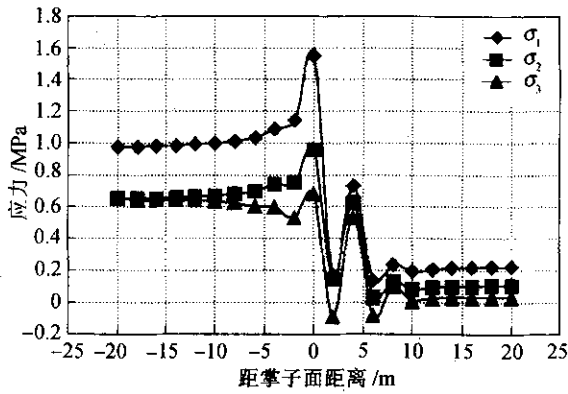


图 5 开挖全过程 C 点主应力变化曲线

从 3 个测点的主应力变化曲线可以看出,由隧道开挖而引起的对 3 个测点的影响范围为掌子面到达测点前 10 m 左右和掌子面通过测点后 10 m 左右,即大约为 2 倍隧道跨度的范围。在这个范围内,3 个测点主应力值变化幅度较大,经历了一个相对复杂的先加载后卸载的过程。对强度较低的围岩,在这种循环荷载的作用下,就可发生屈服破坏,从而丧失其稳定性。

以 $\sigma_{初}$ 表示该点的初始地应力值, σ_0 表示掌子面通过该点所在断面时该点的主应力值, $\sigma_{终}$ 表示掌子面远离该点所在断面时该点的最终主应力值。隧道拱顶 A 点、侧壁 B 点及拱底 C 点在隧道开挖过程中主应力值变化系数如表 2 所示。从表 2 可以看出,隧道的开挖引起的应力重分布在隧道拱顶、侧壁和拱底的表现各不相同,开挖卸荷效应在隧道拱底表现得最为明显,拱顶次之,侧壁最弱。

表 2 隧道开挖过程中主应力值变化系数

测点	σ_1		σ_2		σ_3	
	$\sigma_0/\sigma_{初}$	$\sigma_{终}/\sigma_{初}$	$\sigma_0/\sigma_{初}$	$\sigma_{终}/\sigma_{初}$	$\sigma_0/\sigma_{初}$	$\sigma_{终}/\sigma_{初}$
拱顶 A	1.575	0.491	1.563	0.425	1.049	0.119
侧壁 B	1.505	0.789	1.959	0.944	0.923	0.280
拱底 C	1.589	0.225	1.473	0.159	1.046	0.046

隧道拱顶、侧壁、拱底 3 个不同位置周边处及距周边 1.5 m 处开挖全过程中的主应力变化系数见表 3。从表中可以看出,距隧道周边 1.5 m 的点的主应力变化系数普遍小于相应的隧道周边处的主应力变化系数,由此说明,在隧道开挖过程中,隧道周边经历了一个更为强烈的加卸载过程。因此,对于连续介质岩体,隧道的破坏总是从隧道周边开始,沿隧道半径方向向围岩深部发展。

表 3 隧道周边不同距离开挖过程中主应力值变化系数

测点	拱顶		侧壁		拱底	
	0 m	1.5 m	0 m	1.5 m	0 m	1.5 m
$\sigma_0/\sigma_{初}$	1.575	1.202	1.505	1.282	1.589	1.210
$\sigma_{终}/\sigma_{初}$	0.491	0.792	0.789	0.989	0.225	0.685

取隧道轴线方向中间部位隧道中心某定点为观测点,其开挖全过程主应力变化曲线如图 6 所示。隧道开挖对隧道中心,该点的影响范围为掌子面到达该测点前 10 m 左右,即约 1 倍隧道跨度。在该范围内, σ_1 和 σ_2 先增加后减小, σ_3 持续减小,根据 Mohr-Coulomb 强度准则,这种应力变化规律可导致隧道掌子面在即将到达该测点时,该测点所处断面发生屈服破坏。在工程实际中,当围岩级别较低时,发生过许多这种隧道掌子面塌方破坏的实例。图 7 所示为该隧道左线某断面掌子面的塌方情况。

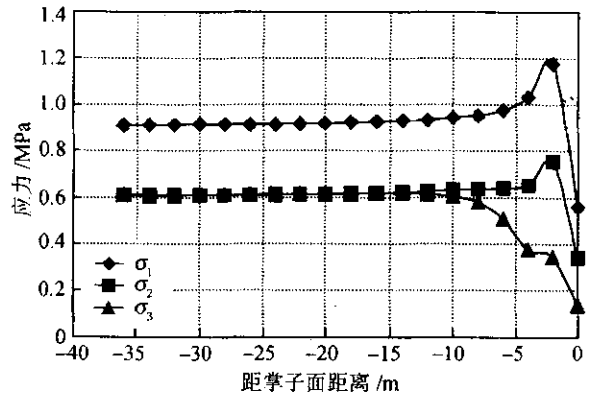


图 6 开挖全过程掌子面中心某点主应力变化曲线



图 7 隧道掌子面塌方破坏实例

隧道开挖结束后,侧壁附近最终主应力增量变化曲线如图 8 所示。从该图中可以看出,开挖在隧道周边的影响范围约为 20 m 左右,即大约为 2 倍的隧道跨度。

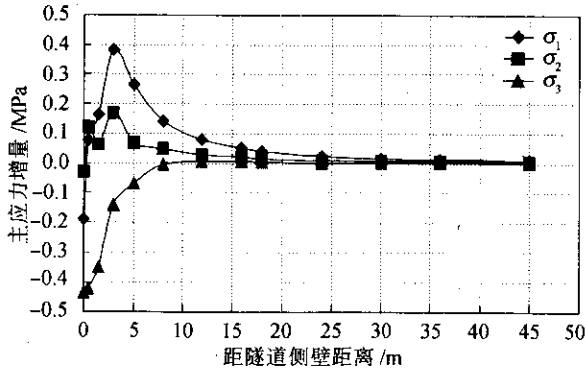


图8 开挖结束后隧道侧壁附近主应力增量变化曲线

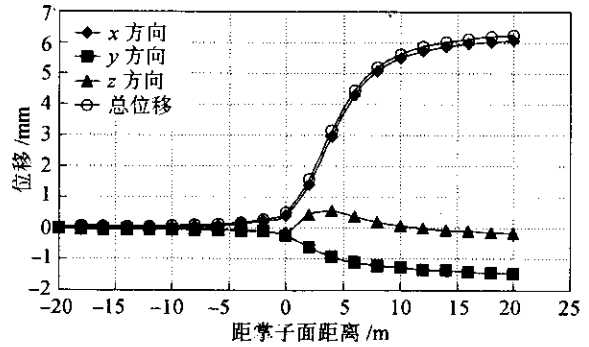


图10 开挖全过程B点位移变化曲线

3.2 隧道周边位移变化规律

隧道拱顶A点、侧壁B点及拱底C点开挖全过程中在x、y、z方向位移及总位移变化曲线如图9、图10及图11所示。从计算结果可以看出,对拱顶A点、侧壁B点、拱底C点而言,随着掌子面的逐渐推进,3个测点总位移逐渐增加。在隧道掌子面尚未到达3个测点所在断面时,总位移增加幅度较小,总位移趋于一定值,经过测点所在断面时,总位移增加速率急剧增大,离开测点所在断面10 m左右即约1倍隧道跨度后,总位移增加速率趋于平缓。3个测点z方向位移均较小,并随掌子面向测点所在断面接近逐渐增大,随掌子面远离测点所在断面逐渐减小,z方向位移均表现为趋向隧道掌子面的方向。

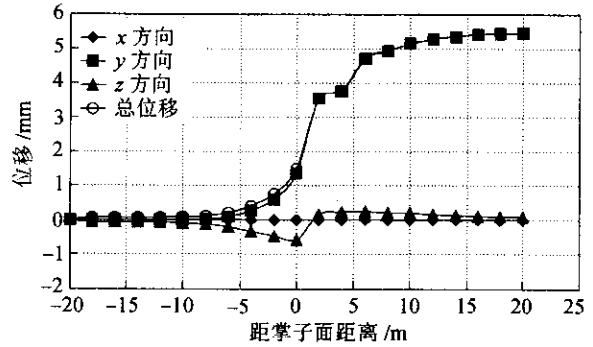


图11 开挖全过程C点位移变化曲线

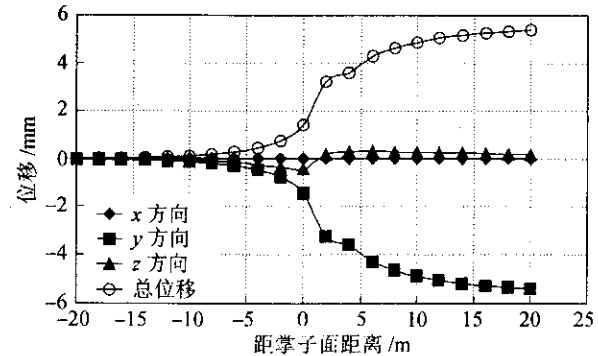


图9 开挖全过程A点位移变化曲线

隧道拱顶和拱底以y方向位移为主,隧道侧壁以x方向位移为主,并且均随着掌子面的推进而逐渐增加。拱顶测点、拱底测点取y方向位移,侧壁测点取x方向位移进行分析。隧道掌子面远离测点2 m时测点产生的位移分别占最终位移的33.1%、16.2%和39.5%;隧道掌子面远离测点10 m时,测点A、B、C产生的位移分别占最终位移的64.2%、83.8%和69.1%。可见,在隧道施工期,位移监测仪

器必须及时埋设,这样才能实时捕捉到隧道周边围岩变形。以上数据还表明,卸荷在隧道拱底表现最为明显,这与应力分析结果相一致。

隧道开挖结束后其侧壁水平方向、顶底垂直方向位移变化曲线如图12、图13所示。从图中可以看出,随着距隧道侧壁、拱顶、拱底位置的不不断接近,水平方向x、垂直方向y上所产生的位移不断增加直至隧道侧壁、拱顶、拱底处达到最大值,且在接近隧道周边时位移迅速增加。

4 结论

(1)对隧道周边及掌子面岩体而言,隧道的开挖不是一个简单的卸载过程,而是一个相对复杂的先加载后卸载的过程。对强度较低的围岩,在这种循环荷载的作用下,就可发生屈服破坏,从而丧失其稳定性。

(2)以隧道横断面为研究对象,在轴线方向上,隧道开挖对周边围岩的影响范围约为2倍的隧道跨度(掌子面到达该断面前和通过该断面后各约1倍隧道跨度),在隧道横断面方向上约为2倍的隧道跨度,对隧道中心岩体的影响范围在隧道轴线方向上约为掌子面到达该断面前1倍的隧道跨度。

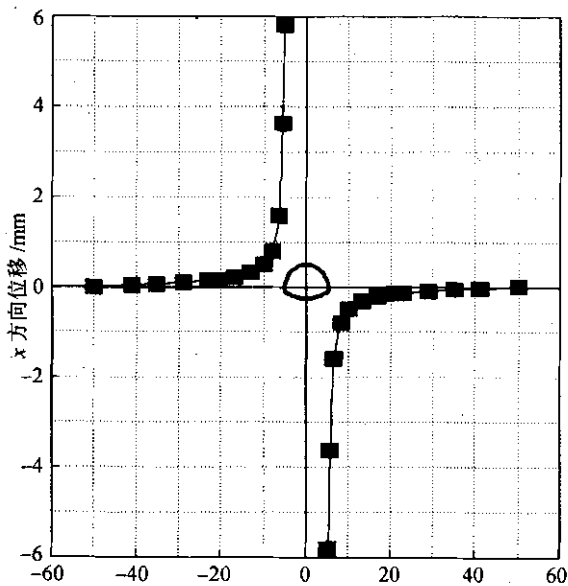


图 12 开挖结束后隧道侧壁水平方向位移变化曲线

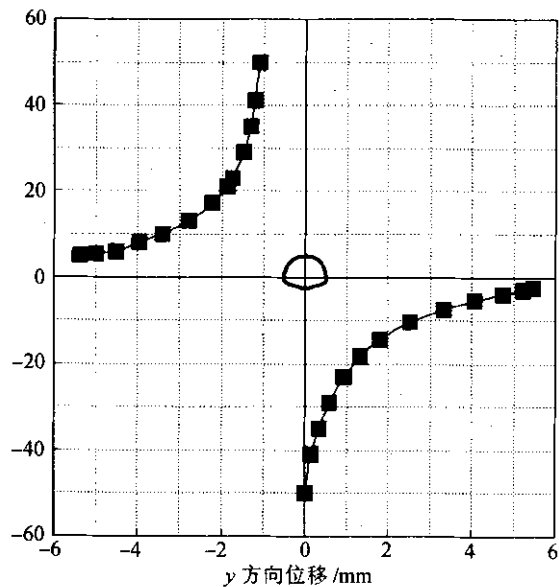


图 13 开挖结束后隧道顶底垂直方向位移变化曲线

(3)隧道周边岩体比隧道围岩内部岩体在隧道开挖过程中经历了一个更为强烈的加卸载过程,因

此,对于连续介质岩体,隧道的破坏总是从隧道周边开始,沿隧道半径方向向围岩深部发展。

(4)隧道开挖卸荷效应在隧道拱底表现最为明显,拱顶次之,隧道侧壁最弱。

参考文献:

[1] Abel JF, Lee FT. Stress changes ahead of an advancing tunnel [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1973,10(6).

[2] Seki J, Noda K, Washizawa E, Suzuki T. Effect of bench length on stability of tunnel face. In Abdel-Salam ME, editor [C]. Proceedings of the International Congress on Tunneling and Ground Conditions, Caris. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994.

[3] Martin CD. Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength [J]. Can Geotech J, 1997,34(5).

[4] Martin CD, Read RS, Dzik EJ. Near-face cracking and strength around underground openings [C]. In: Rossmannith H-P, editor. Proceedings of the Second International Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.

[5] 王春生,周翠英. 梅河高度公路隧道稳定性数值模拟 [J]. 中山大学学报(自然科学版),2005,44(1).

[6] 周太全,华渊,连俊英,等. 软弱围岩隧道施工全过程非线性有限元分析. 岩土力学,2004,25(增刊).

[7] 许月,杨文,张宏博. 软质岩体中浅埋隧道开挖支护的数值模拟 [J]. 土工基础,2004,18(4).

[8] 胡庆安,夏永旭,王文正. 双连拱隧道施工过程的三维数值模拟 [J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(1).

[9] 徐林生,孙钧,蒋树屏. 洋碰隧道开挖面空间效应的数值模拟研究 [J]. 沿途工程界,2002,4(6).

[10] 周小平,徐小敏. 四角田隧道围岩稳定性三维有限元数值分析 [J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(1).

A Study on Excavation Effect of Tunnel Based on Using 3-D FEM

WANG Cheng-bing¹, LIU Feng-jun^{1,2}, WANG Shi-min¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Architecture Engineering, HAUST, Luoyang 471003, China)

Abstract: The excavation of the tunnel induces the changes of the stress state of the surrounding rock, such changes alter the mechanical property of the surrounding rock. On the basis of a detailed 3-D

文章编号: 0451-0712(2007)02-0173-04

中图分类号: U455.4

文献标识码: B

两江隧道施工方法分析

陈 杨¹, 林 志²

(1. 重庆交通大学 重庆市 400074; 2. 重庆交通科研设计院 重庆市 400067)

摘 要: 拟建的两江隧道工程是目前国内外技术最为复杂的隧道工程, 根据隧址的工程地质及水文地质条件, 两江隧道工程的越江方案在本阶段(可研阶段)拟定了盾构、沉管、钻爆等3种隧道方案。本文首先通过3种工法的简单分析和定性比较, 然后从项目实施中的风险程度出发, 采用定量的风险模糊分析方法, 得出了各种工法的风险度, 最后建议采用盾构施工法。

关键词: 两江隧道; 钻爆法; 盾构法; 沉管法; 风险; 模糊综合评判

1 工程概况

重庆两江隧道工程(见图1)以已经建成的江北、南岸和渝中半岛的滨江路为基础, 采用水下隧道方式穿越两江, 沟通“一岛两岸”(渝中半岛、江北及南岸)。工程拟采用城市主干道 I 级标准, 设计车速为 50 km/h, 两江隧道均按双洞双向 4 车道组成。此工程是目前国内外技术最为复杂的隧道工程。实施中需穿越泥岩、砂岩以及泥岩夹砂岩层, 裂隙较发育, 局部透水性强, 隧道坑道施工中的透水、涌水、缓倾岩层的围岩稳定和衬砌承受静水压力是江底隧道施工中不可回避的主要工程地质问题; 隧道直径大, 两江隧道在朝天门嘴设地下互通式立交, 解决地下“丁”字交叉问题, 匝道与匝道(或主显)交叉 5 次, 分合流端部 6 处, 结构复杂, 施工难度大; 地面环境复杂, 需穿越朝天门高层建筑群等多项难点。国内外尚无类似地质条件和水深条件的互通式立交隧道结构

设计及防水设计资料可参考。

2 拟采用的施工方法及关键技术研究

目前国内外穿越江、河、湖、海等水域的隧道通常采用盾构、沉管、钻爆隧道方案, 根据隧址的工程地质及水文地质条件, 两江隧道工程的越江方案拟定了盾构、沉管、钻爆等 3 种隧道方案。

2.1 暗挖钻爆法

朝天门两江隧道采用钻爆暗挖施工, 施工方案按普通山岭隧道施工方法进行。对于匝道段隧道, 可采用上下台阶法、多台阶法进行开挖。平交和立交段, 可采用双侧壁法、单侧壁法或微台阶法等开挖方式。本工法拟解决的关键技术为:

- (1) 爆破振动技术;
- (2) 注浆技术;
- (3) 结构的耐久性设计;

收稿日期: 2006-08-24

finite-element analysis, the near-field stress path and displacement changing law during the progressive advancement of a tunnel face and the state of stress, displacement around the tunnel after the excavation finished are studied and analyzed. According to the study results, some conclusions can be drawn out. The surrounding rock of the tunnel undergoes a stress path from loading to unloading during the excavation. The unloading effect of the excavation has more evident expression on the bottom than on the arch crown of the tunnel, and insignificant expression on the side wall of the tunnel. The region affected by excavation on the surrounding rock is from 1B before the tunnel face to 1B behind the tunnel face at the tunnel axis and 2B around the tunnel perpendicular to the tunnel axis. B represents the tunnel span. The results of the analysis and engineering practice are compared and studied qualitatively in this paper.

Key words: highway tunnel; excavation effect; FEM analysis