

# 深埋交叉隧道动态施工力学行为研究

靳晓光<sup>1,2</sup>, 李晓红<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**分离式独立双洞之间的横通道开挖,再一次引起主隧道围岩和支护结构的应力释放与重分配,引起交叉段附近岩体与支护结构力学行为发生变化。结合高地应力区深埋隧道工程,通过3D弹塑性有限元数值仿真模拟,分析横通道不同施工方案和动态施工过程对主隧道围岩与初期支护结构力学行为的影响。分析结果显示,横通道的开挖对围岩应力和位移影响较大,对交叉侧主隧道侧壁初期支护应力及交叉对侧主隧道侧初期支护 $\sigma_3$ 和XY平面的剪应力影响较大。为深埋隧道交叉段监控量测系统的设计、施工方案优化及安全控制提供了依据。

**关键词:**交叉隧道;围岩-支护结构;力学行为;数值模拟

中图分类号:U455.4 文献标识码:A 文章编号:1006-7329(2008)02-0032-05

## Dynamic Construction Mechanical Behavior of a Deeply-Buried Intersection Tunnel

JIN Xiao-guang<sup>1,2</sup>, LI Xiao-hong<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Key Lab. for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Excavation of an intersection tunnel between independent double tunnels leads again to stress release and redistribution in the surrounding rock and the support structure of the chief tunnel, resulting in change of mechanical behavior of the rock mass and the supporting structure near the intersection. Considering deeply-buried tunnel engineering in high geo-stress areas, we analyzed the mechanical behaviors of the surrounding rock, the initial support system of the chief tunnel with different construction schemes, and dynamic construction processes of the intersection tunneling using 3D elastic-plasticity finite element numerical simulation. The results of numerical analysis show that intersection tunneling greatly affects the following: the stress and displacement of the surrounding rock, the initial supporting stress for the side wall of the chief tunnel on the intersection side, and the maximum and shear stresses in XY plane on the side opposite the intersection. This study offers references for design of the monitoring system, construction scheme optimization, and safe control of deeply-buried tunnels.

**Key words:** intersection tunnel; surrounding rock-support structure; mechanical behaviors; numerical simulation

目前,我国已建成和正在建设的特长公路隧道有几十座。由于施工、通风和运营安全的要求,并行双洞分离式隧道之间一般设有连络的人行、车行横通道。《公路隧道设计规范》(JTJ D70—2004)<sup>[1]</sup>规定,上、下行分离式独立双洞的公路隧道之间应设置横向通道,人行横通道的设置间距可取250 m,并不大于500 m;车行横通道的设置间距可取750 m,并不得大于1 000 m。如长4.16 km的川藏公路二郎山隧道,主隧

道和平行导洞之间设有18个横通道;长18.4 km的陕西秦岭终南山公路隧道,上下行双洞间每250 m设一处人行横通道。目前设计的横通道一般与主隧道正交,隧道在此区段形成一力学行为复杂的隧道交叉段。

早期鉴于计算机运行速度慢与内存空间不足等限制,隧道交叉区段动态施工复杂三维力学行为研究较少,大部分采用粗略的有限单元弹性分析,主要探讨衬砌结构应力的变化和影响范围及净空变形和影响范

\* 收稿日期:2007-10-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 50334060);重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2006BB6167)

作者简介:靳晓光(1967-),男,副教授,博士后,主要从事隧道工程、道路工程方面的研究,(E-mail)Jxgcqu@163.com。

围<sup>[2-4]</sup>。近年来,由于电子计算机和计算科学的快速发展,对交叉隧道动态施工之复杂力学行为开展了一些研究<sup>[5-8]</sup>。台湾一些学者就不同岩体评分 RMR 对交叉隧道应力—应变行为、不同应力场对隧道应力—应变行为、不同交叉方式(正交与斜交)对衬砌应力的影响及隧道交叉段破坏区位等进行了研究<sup>[8]</sup>;Takino 等人(1985)<sup>[3]</sup>在探讨隧道交叉段三维行为时指出,因破孔时切除主隧道钢肋及喷射混凝土支撑常导致塌方发生。随横通道的开挖,在主隧道拱顶处受到挠曲及剪切破坏;在衬砌趾部则由于应力集中而发生剪切破坏。

本文通过高地应力区深埋交叉隧道施工动态三维弹塑性数值仿真模拟,就主隧道与横通道不同施工方案隧道交叉段动态施工复杂力学行为进行研究,为隧道交叉段监控量测系统的设计、施工方案优化和支护设计及安全控制提供科学依据。

### 1 数值分析模型的建立

选择的隧道断面埋深 760 m,竖向地应力 19.0 MPa,平行和垂直隧道轴线的地应力分别为 29.2 MPa 和 26.2 MPa,侧压力系数  $K_x = 1.38, K_z = 1.54$ 。隧道断面形状为曲墙拱形,主隧道开挖断面宽度  $B = 12.0$  m,洞高  $H = 10.0$  m;横通道开挖断面宽度  $B = 10.0$  m,洞高  $H = 8.0$  m。

#### 1.1 模型及边界条件

数值分析计算范围  $xyz = 80$  m  $\times$   $74$  m  $\times$   $71.5$  m ( $X$  方向为横通道中心线方向, $Y$  方向为重力方向, $Z$  方向为主隧道中心线方向),满足有限元分析要求。主隧道与横通道呈丁字形正交。模型初始划分单元 14 350,节点 62 313;最后模型单元 12 868,节点 57 766 个。模型边界  $X$  方向位移面约束, $Z$  方向位移面约束, $Y$  负方向底部边界位移面约束,正方向上覆地层厚度 700 m 的荷载压力(17.5 MPa)。隧道围岩的地应力状态通过侧压力系数  $K_x, K_z$  来体现。

#### 1.2 岩体材料模型

岩体材料假设为均质各向同性,不考虑地下水的影响。岩体材料应力—应变关系为完全弹塑性,选用 D-P 模型。

D-P 破坏准则的达式为:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

式中: $I_1$ ——为应力张量第一不变量;

$J_2$ ——为应力偏量的第二不变量;

$$\alpha = \frac{\sin\phi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2\phi}}, k = \frac{\sqrt{3}C\cos\phi}{\sqrt{3 + \sin^2\phi}}$$

在模拟分析中,引入了屈服接近度的概念,表示材料进入塑性屈服的程度,其数学表达式为:

$$\eta = f(\sigma)/K(\kappa) \quad (2)$$

$\eta < 1$ ,未破坏(屈服曲面内部); $\eta \geq 1$ ,已破坏(屈服曲面上部或屈服曲面上外部)。

根据 D-P 屈服条件,对材料进入塑性的程度(屈服接近度)可近似表示为:

$$\eta = \frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{k} \quad (3)$$

#### 1.3 隧道开挖与支护

主隧道和联络横通道皆采用全断面开挖,每一轮开挖进尺 5.0 m。主隧道开挖完成后进行横通道开挖,分为 18 个施工步。横通道开挖分两个方案。方案 I,自远离选择的主隧道(相对的)一侧向主隧道开挖,最后贯通于交叉处;方案 II,自与选择的主隧道交叉处开始,向另一主隧道开挖(图 1)。为了简化计算,只计算横通道与一条主隧道交叉的情况。

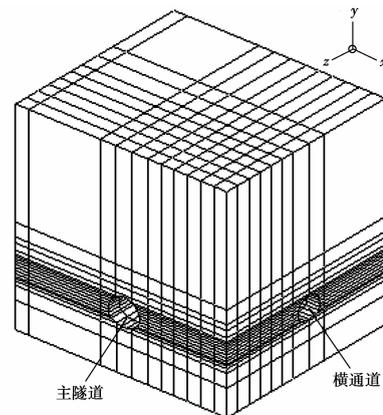


图 1 有限元模型

隧道的支护只考虑喷射混凝土初期支护,以壳单元进行仿真。喷射混凝土厚度 20 cm,假设为弹性材料。隧道开挖后,应力即开始释放,初期支护延迟 1 轮施作,即后一轮开挖的同时进行前一轮的喷射混凝土初期支护。

#### 1.4 材料参数

数值模拟采用的岩体材料参数如表 1 所列。

表 1 输入的材料参数

$E/(10^6 \text{ kPa})$	$\mu$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$	$\tau/\text{kPa}$
20.0	0.25	25.0	1800	40	600

初期支护结构喷射混凝土参数为:弹性模量  $E = 2.85 \times 10^7$  kPa,泊松比  $\mu = 0.2$ 。

### 2 模拟结果分析与讨论

#### 2.1 屈服区特征

横通道按不同方案施工时,因围岩较好,屈服区分布范围相差不大。按方案 I 施工时,屈服区主要分布在横通道拱肩、边墙和隧道底;按方案 II 施工时,屈服区主要分布在横通道的拱顶、拱肩和边墙。

2.2 应力特征

2.2.1 围岩应力 按方案 I 和方案 II 施工完成后,主隧道围岩的  $\sigma_3$  最大值分别为  $-9.93 \times 10^4$  kPa 和  $-9.76 \times 10^4$  kPa,  $\sigma_y$  最大值分别为  $-5.98 \times 10^4$  kPa 和  $-5.84 \times 10^4$  kPa, 皆分布在交叉处边墙底脚。剪应力分别为:

方案 I,  $\tau_{xy} = -3.36 \sim 2.50 \times 10^4$  kPa,  $\tau_{yz} = -4.1 \sim 3.26 \times 10^4$  kPa,  $\tau_{xz} = -1.46 \sim 1.66 \times 10^4$  kPa;

方案 II,  $\tau_{xy} = -2.24 \sim 2.6 \times 10^4$  kPa,  $\tau_{yz} = -3.6 \sim 1.87 \times 10^4$  kPa,  $\tau_{xz} = -1.55 \sim 1.3 \times 10^4$  kPa。

在方案 I 中,关键施工步(交叉处开挖,17 步)交叉处主隧道围岩  $\sigma_3$  分布范围为  $-2.94 \times 10^4$  kPa  $\sim -8.2 \times 10^4$  kPa;  $\sigma_y$  分布范围为  $-3.6 \times 10^3$  kPa  $\sim -5.47 \times 10^4$  kPa; 剪应力分布范围分别为:

$\tau_{xy} = -3.13 \sim 2.46 \times 10^4$  kPa,  $\tau_{yz} = -4.03 \sim 3.23 \times 10^4$  kPa,

$\tau_{xz} = -1.57 \sim 1.25 \times 10^4$  kPa。

在方案 II 中,关键施工步(交叉处开挖,12 步)交叉处主隧道围岩的  $\sigma_3$  分布范围为  $-2.97 \times 10^4$  kPa  $\sim -9.13 \times 10^4$  kPa;  $\sigma_y$  分布范围为  $-5.97 \times 10^4$  kPa  $\sim 1.0 \times 10^3$  kPa; 剪应力分布范围分别为:

$\tau_{xy} = -3.21 \sim 2.46 \times 10^4$  kPa,  $\tau_{yz} = -3.4 \sim 2.74 \times 10^4$  kPa,

$\tau_{xz} = -1.78 \sim 1.45 \times 10^4$  kPa。

2.2.2 初期支护应力 随着横通道的不断开挖,主隧道初期支护结构一喷射混凝土应力状态不断发生改变。在两个施工方案中,对主隧道典型位置一拱顶、交叉侧侧壁和交叉对侧侧壁主应力、应力和剪应力随横通道施工进尺的变化进行了对比分析。

1)主隧道拱顶喷射混凝土应力受开挖方案影响小;随横通道的不断推进应力变化很小,剪应力略有增大。在方案 I 中,  $\tau_{xz}$  由横通道未开挖时的  $-1416.4$  kPa 增加到开挖完成后的  $-1558.5$  kPa, 应力值增量(横通道开挖后的应力值-横通道开挖前的应力值)  $142.1$  kPa, 增量百分比(应力值增量/横通道开挖前的应力值)为  $10\%$ ; 在方案 II 中,  $\tau_{xz}$  由横通道未开挖时的  $-1416.4$  kPa 增加到开挖完成后的  $-1560.7$  kPa, 应力值增量  $144.3$  kPa, 增量百分比为  $10.2\%$ 。

2)交叉侧主隧道侧壁喷射混凝土应力受开挖方案和横通道开挖影响大,交叉处的开挖影响最大,除  $\sigma_y$  减小外,其它都有所增大(图 2)。

在方案 I 中,  $\sigma_x$  增量为  $7769$  kPa, 增量百分比为  $591\%$ ,  $\sigma_z$  增量为  $12552$  kPa, 增量百分比为  $58.8\%$ ;  $\sigma_1$  增量为  $21593$  kPa, 增量百分比为  $98.4\%$ ,  $\sigma_3$  增量为  $14514$  kPa, 增量百分比为  $121.7\%$ ;  $\tau_{xy}$  增量为  $8083$  kPa, 增量百分比为  $220\%$ ,  $\tau_{yz}$  增量为  $16999$  kPa, 增量百分比为  $399\%$ ,  $\tau_{xz}$  增量为  $8020$  kPa, 增量百分比

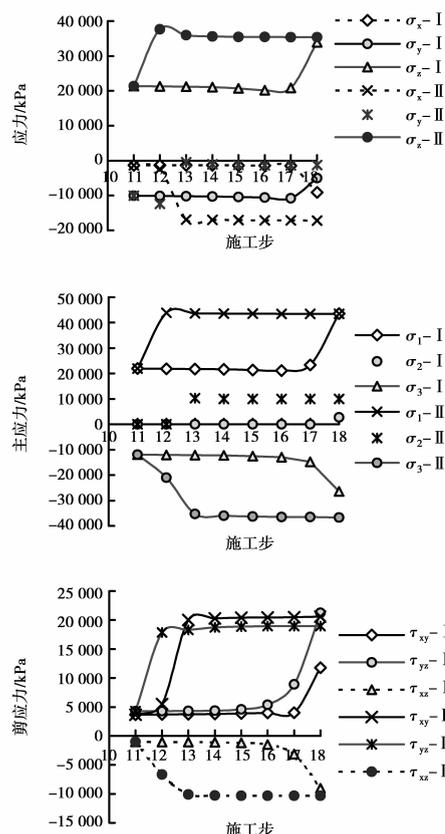


图 2 交叉侧主隧道侧初期支护应力

为  $770\%$ 。

在方案 II 中,  $\sigma_x$  增量为  $15939$  kPa, 增量百分比为  $1213\%$ ,  $\sigma_z$  增量为  $140602$  kPa, 增量百分比为  $65.8\%$ ;  $\sigma_1$  增量为  $21558$  kPa, 增量百分比为  $98.2\%$ ,  $\sigma_3$  增量为  $24718$  kPa, 增量百分比为  $207\%$ ;  $\tau_{xy}$  增量为  $16923$  kPa, 增量百分比为  $460\%$ ,  $\tau_{yz}$  增量为  $14704$  kPa, 增量百分比为  $345\%$ ,  $\tau_{xz}$  增量为  $9295$  kPa, 增量百分比为  $892\%$ 。可见,方案 I 明显优于方案 II。

3)交叉对侧主隧道侧壁初期支护应力,只有  $\sigma_3$  和  $\tau_{xy}$  受开挖方案和横通道开挖影响大(图 3),其它应力受影响很小。

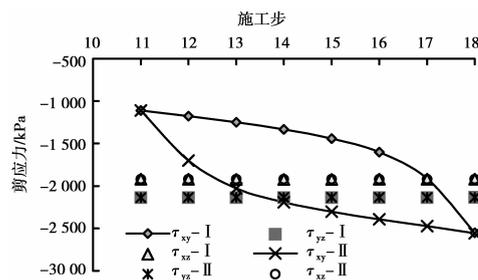


图 3 交叉对侧主隧道侧壁初期支护应力

在方案 I 中,  $\sigma_3$  随横通道的开挖逐渐增加,增量值为  $3197$  kPa, 增量百分比为  $109\%$ ;  $\tau_{xy}$  随横通道的开挖逐渐增加,交叉处开挖时快速增加,增量值为  $1442$  kPa, 增量百分比为  $130\%$ 。在方案 II 中,  $\sigma_3$  增量为  $3206$  kPa, 增量百分比为  $109\%$ ;  $\tau_{xy}$  增量为

1 446 kPa,增量百分比为 130%。

隧道主洞和横通道交叉段初期支护应力现场量测结果如图 4 所示。

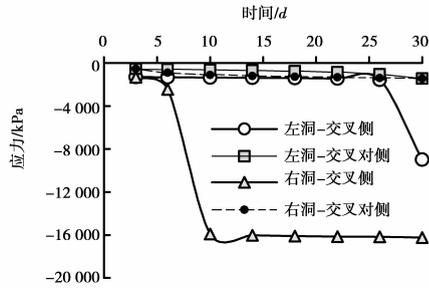


图 4 隧道初期支护应力量测结果

可以看出,隧道左、右洞(对应于方案 I、方案 II)交叉侧监测应力大于交叉对侧应力,右洞监测应力大于左洞的监测应力,左、右洞交叉侧应力分别为 -9 000 kPa 和 16 250 kPa,与数值计算结果中的  $\sigma_x$  变化趋势及大小(分别为 -9 083 kPa 和 17 253 kPa)比较一致,证明了数值分析的正确性。

### 2.3 位移特征

2.3.1 主隧道位移 为了了解围岩位移的变化,对不同施工方案主隧道围岩位移随横通道的开挖变化情况进行了分析。

主隧道拱顶和横通道交叉处顶部(图 5)围岩竖向位移随施工步的变化情况如图 6 所示。可以看出,主隧道围岩竖向位移受施工方案和横通道施工步影响较大。

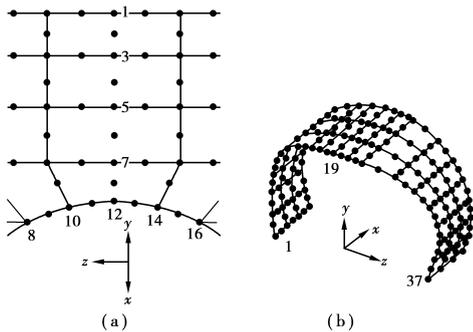
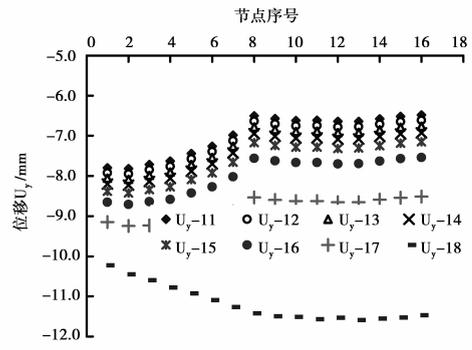
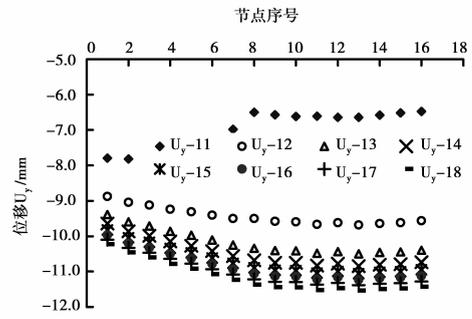


图 5 位移采样节点示意图

横通道未开挖前,主隧道拱顶(节点 1)竖向位移最大,为 -7.8 mm;接触线中部(节点 12)竖向位移为 -6.64 mm。按方案 I 施工完成后,主隧道拱顶竖向位移为 -11.47 mm,增量百分比(位移增量/横通道开挖前的位移量)为 47%;接触线中部竖向位移为 -11.5 mm,增量百分比为 73%。按方案 II 施工完成后,主隧道拱顶竖向位移为 -10.43 mm,接触线中部竖向位移为 -11.47 mm。两种施工方案的最终竖向位移接近,只是中间变化过程不同,这是由于隧道拱顶塑性区小的原因。塑性状态时应力、变形状态是应力路径的函数。



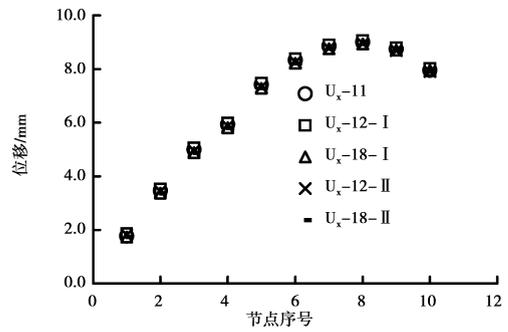
(a)方案 I



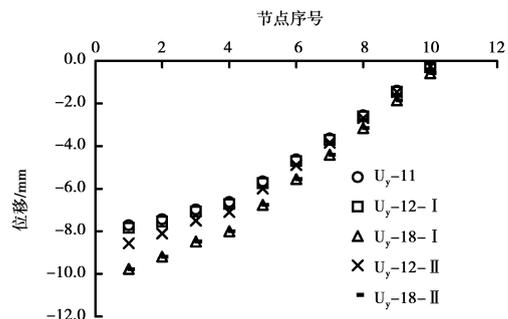
(b)方案 II

图 6 11~18 施工步主隧道顶竖向位移

交叉对侧主隧道围岩  $x$  方向位移受施工方案和横通道开挖影响很小; $y$  方向位移变化过程受施工方案影响较大,受横通道开挖影响很小,各节点第 11、12、18 施工步位移曲线如图 7 所示。



(a)x方向位移



(b)y方向位移

图 7 交叉对侧主隧道位移特征

由上述数值模拟结果分析可以看出,施工方案 I 明显优于施工方案 II。在高地应力深埋条件下,交叉

隧道围岩—支护结构的力学行为与前人、学者对一般隧道的研究认识“隧道开挖后,隧道侧壁、顶拱等位置的衬砌应力以切线方向最大,而变形则以径向最明显”<sup>[8]</sup>不完全一致,与地应力的方向和大小、横通道施工方案有关。

交叉段隧道主洞拱顶下沉位移现场量测结果如图8所示。

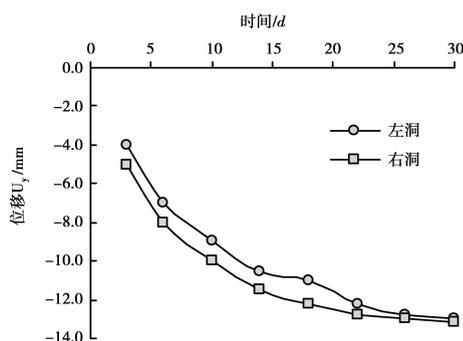


图8 隧道拱顶下沉位移量测结果

可以看出,交叉段左、右主隧道(对应于方案I、方案II)拱顶下沉监测位移分别为12.60 mm和13.20 mm,与数值计算结果(11.47 mm和11.43 mm)比较接近,证明了数值分析的正确性。

2.3.2 横通道位移 由于屈服区主要分布在隧道交叉处横通道一侧,因此对交叉接触部位横通道位移进行了分析计算(图9)。可以看出,两种方案中的屈服区位移只有 $x$ 方向位移在边墙和拱肩差别较大,方案I、II的 $x$ 方向最大位移分别为-8.89 mm和-13.68 mm,方案I优于方案II。

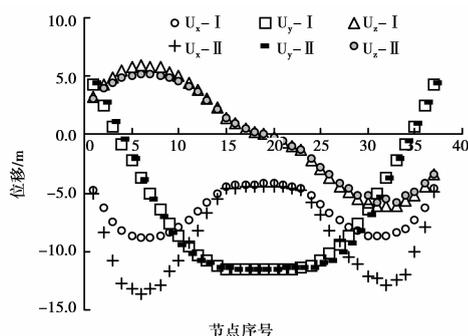


图9 交叉接触部位横通道位移

### 3 结论

深埋隧道交叉段动态施工力学三维弹塑性有限元数值分析表明:

1)隧道施工完成后,交叉段围岩 $\sigma_3$ 一般为-30~-60 MPa,XY、YZ平面的剪应力较大。

2)主隧道初期支护应力拱顶处受横通道施工方案和施工步影响小,侧壁受其影响最大。交叉对侧主隧道侧壁初期支护应力只有 $\sigma_3$ 和 $\tau_{xy}$ 受其影响大,两种施

工方案的增量百分比相同,分别增加109%~130%。

3)主隧道围岩竖向位移变化过程受施工方案和横通道开挖影响较大,由于屈服区很小,最终位移基本相同。交叉对侧主隧道围岩位移受施工方案和横通道开挖影响小。横通道屈服区只有 $x$ 方向位移在边墙和拱肩差别较大。

4)数值分析得到的初期支护应力与拱顶下沉位移与现场量测结果比较一致,证明了数值分析结果的正确性。

5)深埋交叉隧道围岩和初期支护结构的动态施工力学行为有其一定的特点,与地应力的方向和大小、横通道施工方案有关。

### 参考文献:

- [1] JTJ D70-2004,公路隧道设计规范[S].
- [2] TAKINO K, KIMURA H, KAMEMURA K. AND KAWAMOTO T. 3-dimensional Ground Behavior at Tunnel Intersection[C]. In: Proceedings of International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich: 1983.
- [3] TAKINO K, KIMURA H, TAKEDA N and ITO F. Three-dimensional Behavior of Tunnel Intersection[C]. In: Proceedings of Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Nagoya, 1985.
- [4] TSUCHIYAMA S, HAYAKAWA M, SHINOKAWA T and KONNO H. Deformation Behavior of the Tunnel under the Excavation of Crossing Tunnel [C]. In: Numerical Methods in Geomechanics, Rotterdam: 1988.
- [5] Y HORIBE, H YAGI, S OJAYASU et al. Connection between two tunnels under a busy crossing in a big city [C]. In: Tunnelling and ground conditions. Proc. Congress, Cairo, 1994, ed M. E. A. Salam, (Balkema), 1994.
- [6] A SAITOH, K GOM & T SHIRAISHI. Influence forecast and field measurement of tunnel excavation crossing right above existing tunnels[C]. In: Tunnelling and ground conditions. Proc. Congress, Cairo, 1994, ed M. E. A. Salam, (Balkema), 1994.
- [7] 李强,曾德顺.垂直交叉隧道的计算分析[J].现代隧道技术,2001,38(3):29-33.  
LI Qiang, ZENG De-shun. Analysis on perpendicularly crossing tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001,38(3):29-33.
- [8] 游步上,陈尧中,沉劲利.隧道交叉段破坏区位之探讨[C].首届全球华人岩土工程论坛论文集.上海:同济大学出版社,2003,248-254.

(编辑 陈蓉)