

# 双洞隧道下穿既有线的施工优化分析

## Optimization in Construction Procedures of Under-crossing Existing Tunnel for Double Tunnels

供稿|任晨<sup>1</sup>, 王雅琦<sup>2</sup>, 潘旦光<sup>2,3</sup>, 白利红<sup>1</sup> / REN Chen<sup>1</sup>, WANG Ya-qi<sup>2</sup>, PAN Dan-guang<sup>2,3</sup>, BAI Li-hong<sup>1</sup>

内  
容  
导  
读

北京地铁17号线东大桥站下穿既有6号线的单层双洞隧道,拟采用6导洞交叉中隔墙法施工。为控制既有线和地表的沉降,采用Flac3D数值计算方法,研究4种导洞施工顺序对既有隧道和地表沉降的影响规律,提出群洞影响系数以定量研究相邻隧道施工对变形的影响。计算结果表明,导洞竖向开挖施工方案,可有效减小既有隧道最大沉降及群洞效应,为最优的施工顺序。

近年来我国城市地铁建设发展迅速,受城市地下空间的限制及换乘需要,新建地铁工程常需要近距离下穿既有地铁线路<sup>[1-2]</sup>。新建工程下穿既有线路,会引起既有隧道结构的变形,进而影响既有地铁线路的正常运营。交叉中隔墙法(CRD法)主要用于城市地铁隧道的施工,刘惠敏等<sup>[3]</sup>以北京地铁10号线光华路站单线侧洞为研究对象,运用有限元软件优化了4导洞CRD工法的施工顺序。戚玉亮等<sup>[4]</sup>采用有限元无限元组合方法研究了大断面浅埋暗挖海底隧道CRD工法对围岩及支护结构的影响。

城市地铁群洞隧道一般分期分部开挖、逐步形成洞室,即使施工方法相同,施工完成后最终状态也可能不唯一,即与施工过程相关<sup>[5-6]</sup>。对于净距较

小的CRD工法双洞隧道,后施工隧道会对先施工隧道产生影响,同时不同导洞开挖支护顺序产生的地层变形及群洞效应不同,因此必须合理组织群洞隧道的施工方案以减小群洞效应的影响<sup>[7-9]</sup>。本文以北京地铁17号线东大桥站下穿既有6号线的区间隧道施工为工程背景,研究CRD法不同导洞施工顺序下地表和既有线的沉降变化规律及群洞影响系数,优化导洞施工方案,可供类似工程施工参考。

### 工程概况

北京地铁17号线东大桥位于北京市朝阳区,下穿既有6号线区间隧道。由于地铁17号线东大桥站顶面高于既有6号线区间隧道的顶面,而东大桥站的底

作者单位: 1. 中铁十六局集团有限公司, 北京 100018; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083

面低于6号线区间隧道的底面，因此，将17号线东大桥设计分为三段，南侧标准段、北侧标准段和中间下穿段<sup>[10]</sup>。本文分析的中间下穿段为单层双洞隧道，拟采用CRD法施工。下穿段隧道长36.5 m，宽9.9 m，高9.52 m，净距5.2 m，与6号线隧道净距约2 m。下穿段与既有线关系如图1所示。

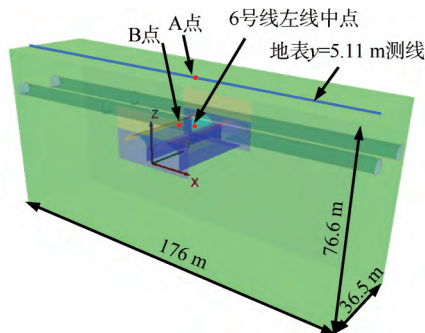
下穿段进行无水暗挖作业。在开挖前，对17号线隧道开挖部位采用全断面深孔注浆，注浆范围为隧道拱部及侧墙外4.0 m，底板以下2.0 m。隧道拱部180°范围内采用单排小导管注浆对拱部土体进行预加固，每榀打设一环。暗挖导洞初衬采用钢筋网、格栅钢架及喷射混凝土联合支护形式，厚度350 mm，中隔壁及临时仰拱由钢筋网、工字钢及喷射混凝土组成，厚度250 mm，二衬为筑模钢筋混凝土结构，底板厚1000 mm，侧墙及拱部厚800 mm。施工时首先开挖左线，导洞采用预留核心土开挖，每循环进尺0.5 m，各导洞相互错开距离不小于15 m。

待各导洞均贯通后，临时中隔壁进行隔二换一的换撑处理，并自下而上逐段拆除剩余中隔壁及临时仰拱、施做拱部防水层和二次衬砌、结构封闭成环。左线单洞隧道施工完成后再施工右线单洞隧道，施工方法与左线一致。

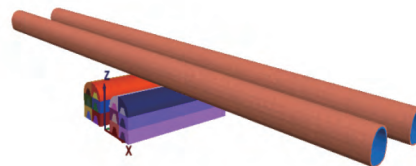
## 数值计算分析

### 计算模型及计算参数

数值计算模型如图1所示，模型尺寸为176 m×36.5 m×76.6 m。模型坐标原点位于17号左右线间底板的起点处。土体及6号线衬砌用实体单元模拟，土体采用摩尔库伦模型，6号线衬砌为弹性模型，17号线位置的土体在施工前用实体单元，施工完成后用壳单元模拟，模型共包括1267471个单元，610949个节点。边界条件为上表面自由，下表面完全约束，四周限制水平位移。



(a) 模型及测线示意图



(b) 新建17号线与既有6号线关系

图1 计算模型

下穿段土层从上到下各层土的力学参数如表1所示。初衬和二衬的等效弹性模量分别为 $2.6 \times 10^4$  MPa和 $3.45 \times 10^4$  MPa，中隔壁和临时仰拱的等效弹性模量为 $3.12 \times 10^4$  MPa。

### 计算工况及计算步骤

17号线位置土体在CRD法施工过程中，导洞不同的开挖顺序引起的沉降不同。为减少17号线下穿段的单层双洞隧道施工对既有线和地表的影响，下面分析图2所示CRD法施工导洞4种不同施工方案下，既有线和地表沉降的变化规律。单侧导洞的施工方案1为①②③④⑤⑥，施工方案2为①④②③⑤⑥，施工方案3为①④②⑤③⑥，施工方

表1 土层力学参数

土层名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/(°)	泊松比	弹性模量/ MPa
杂填土	19.5	0	10	0.29	6
素填土	18.4	5	10	0.29	6
粉质黏土	19.8	25	13	0.28	6
细中砂	21.0	0	28	0.27	27
圆砾	22.0	0	35	0.26	58
粉质黏土	20.2	27	15	0.28	14
中砂	21.5	0	30	0.27	35
圆砾	23	0	40	0.24	70
粉质黏土	20	35	10	0.26	14
中砂	22	0	30	0.27	41
卵石	24	0	45	0.23	81

案4为①②④⑤③⑥，左右线工序相同，其中施工方案1为竖向开挖导洞，施工方案3为横向开挖导洞，施工方案2及施工方案4为横向开挖与竖向开挖相结合。

根据施工工序，计算过程分为以下几个步骤：  
(1)在重力作用下，计算得到包含6号线模型的初始应力场；  
(2)17号线隧道开挖区域进行深孔注浆，注浆区弹性模量为原始土层弹性模量的1.2倍；  
(3)每循环开挖前，隧道拱部进行超前小导管注浆，小导管注浆区等效宽度为0.8 m，每个循环的注浆影响区长度为3 m；  
(4)采用null单元模拟隧道开挖，模拟各导洞循环开挖时，每开挖0.5 m，然后，施做衬砌、中隔壁及临时仰拱；  
(5)左线各导洞依次开挖至贯通后施做二衬；  
(6)17号右线模拟方法同左线。

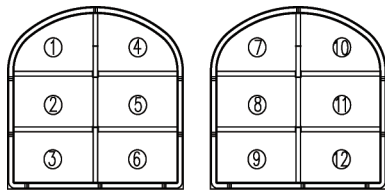


图2 17号线导洞示意图

### 计算结果分析

#### 地表沉降

图3为地表 $y=5.11$  m测线处4种施工方案下17号线左线及右线施工完成后的沉降槽曲线。对于4种施工方案，17号线左线隧道施工完成后，地表沉降槽曲线峰值都位于左线隧道中线处，呈均宽而浅的“V”

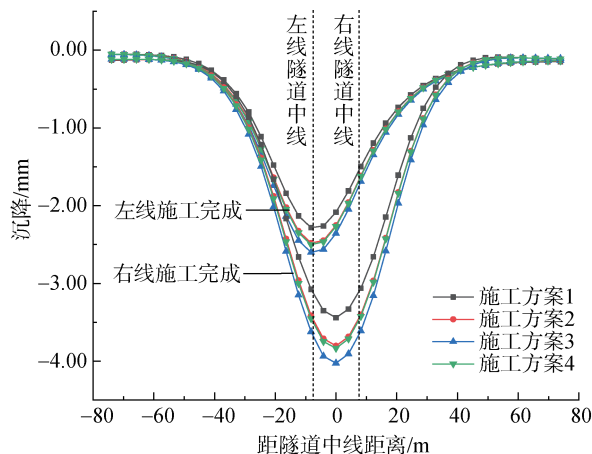


图3 不同施工方案下地表 $y=5.11$  m沉降图

型。但不同施工方案的最大沉降值不同，方案1的沉降最小仅为2.29 mm，而最大的为施工方案3，达2.61 mm。

当17号线右线隧道施工时，沉降槽曲线向右下偏移。由于两隧道的净距仅为5.2 m，为近距离相邻隧道，从而导致左线隧道位于右线隧道沉降槽的影响范围内而存在群洞效应。群洞效应一方面使左线隧道的沉降继续增加，另一方面，使沉降槽曲线峰值不再位于隧道的中心线，而是位于左右两隧道中间。

#### 既有线沉降

6号线左线隧道轴线沉降及不同施工阶段下左线中点沉降对比图如图4所示，由图4(a)可知左线隧道施工完成后沉降槽曲线均呈“V”字形，较地表更加窄而深，待右线隧道施工完成后，由于左右线间土体对上穿6号线隧道起到了一定的支撑作用，限制了右线施工对6号线隧道的影响，因此沉降槽曲线形似“W”。

图4(b)为不同施工阶段下6号线隧道左线中点沉降图，由图可知6号线左线底板中点沉降曲线均呈台阶式下降，当各施工方案开始施工上层④、⑦、⑩号导洞时沉降急剧增加，造成这种现象的直接原因是不同形状的洞室对控制土体变形的效果不同。城市地铁隧道工程一般埋深较浅，初始应力场可认为是重力场。对于非圆形隧道，当隧道断面长边顺着初始地应力的最大主应力方向即重力场方向时，可降低隧道周边切向应力集中现象，进而减小隧道开挖对土层的扰动<sup>[3]</sup>。因此当开挖上层④、⑦、⑩号导洞时扩大了洞室上方土体的横向影响范围，显著削弱了土体抵抗变形的能力，而导洞竖向开挖的横向影响范围较小，并且在开挖中层及下层导洞之前，上层导洞的初支已经形成，上导洞初支对洞室周围的土体起到一定保护作用，减小了下层导洞开挖时对土体的扰动作用，因此竖向开挖的方式较横向开挖可以更好地控制地层变形。

#### 群洞效应

为定量研究群洞效应影响，可定义群洞影响系数

$$\xi = \frac{r - r_0}{r_0} \quad (1)$$

式中： $r_0$ 和 $r$ 分别为先开挖隧道和后开挖隧道完成施

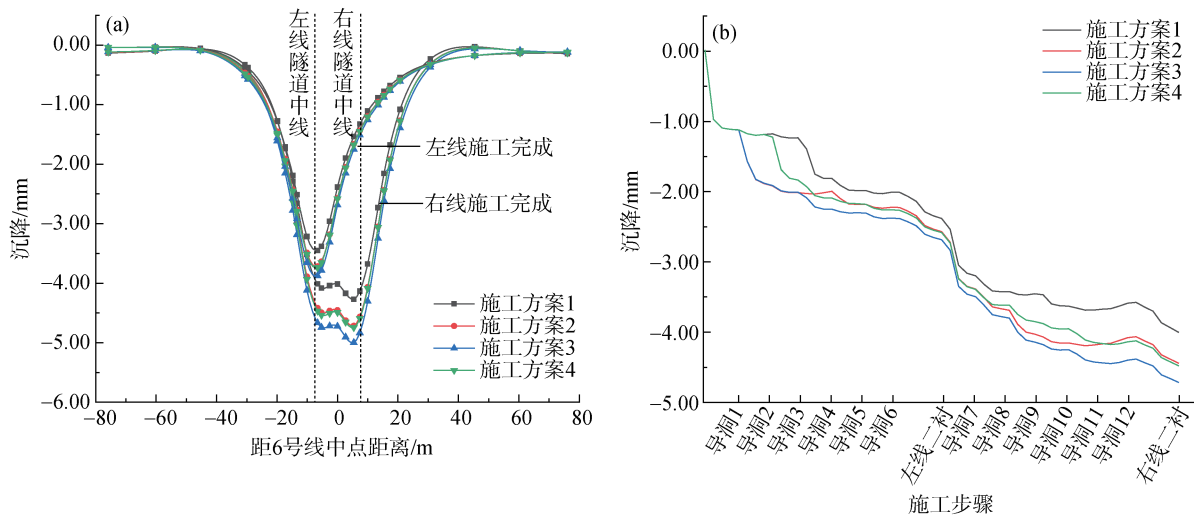


图4 不同工况下6号线左线沉降图: (a) 轴线沉降; (b) 中点的沉降过程

工后同一位置的反应。群洞影响系数 $\zeta$ 反映了后开挖隧道施工引起先开挖隧道的变形或内力增量的百分比,  $\zeta$ 越接近0表示后开挖隧道的施工对先开挖隧道的影响越小。

A点为 $y=5.11$  m处17号线左线隧道中线所对应的地表点, B点为17号左线和6号左线轴线平面投影的交叉点所对应的6号线左线隧道底板点, A点和B点的位置见图1。则A点和B点在17号线左线和右线隧道施工完成后的沉降值如表2所示, 表3为A点和B点的群洞影响系数。显然, 随着17号右线隧道的施工, A点和B点的沉降都进一步增加。施工方案1不仅沉降最小, 而且群洞影响系数也最小, 而施工方案3先横向后竖向的导洞开挖方式, 在右线施工完成后, A点和B点的沉降比施工方案1分别大17.5%和16.2%。这表明, 对于浅埋暗挖大断面CRD法施工时, 采用一侧导洞先开挖, 然后进行另一侧导洞施工, 减少了每侧导洞开挖时的横向断面, 使地表沉降小, 同时有效降低施工对地层的扰动范围而有效降低群洞影响系数, 可推荐实际施工时优先使用。

表2 A点和B点的沉降(mm)

位置	方案1	方案2	方案3	方案4	
A点	左线施工	-2.29	-2.49	-2.61	-2.51
	右线施工	-3.08	-3.42	-3.62	-3.46
B点	左线施工	-3.46	-3.73	-3.89	-3.75
	右线施工	-4.02	-4.43	-4.67	-4.47

表3 A点和B点的群洞影响系数

位置	方案1	方案2	方案3	方案4
A点	0.345	0.374	0.390	0.378
B点	0.162	0.187	0.203	0.194

## 结束语

以北京地铁17号线东大桥站下穿既有6号线的两个相邻隧道施工为研究对象, 分析CRD法施工时不同施工方案对地表和既有线沉降的影响。由数值计算结果可知:

(1) 对于单层双洞CRD法, 导洞先竖向后横向的开挖顺序, 使地表和既有线的沉降相对最小, 为最优方案。而导洞先横向后竖向的开挖顺序引起的沉降最大, 因此在多导洞CRD法中应优先采取导洞先竖向后横向的开挖方式。

(2) 对于近距离相邻隧道施工时, 后开挖隧道的施工会使先开挖隧道的沉降进一步增大, 对于多导洞CRD法, 采用先竖向后横向的开挖顺序, 有效降低施工对地层的扰动范围而有效降低群洞影响系数。

## 参考文献

- [1] 刘波, 曹波, 刘芳, 等. 北京地铁暗挖隧道变形监测与稳定性数值分析. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 518
- [2] 王明均, 崔文辉, 赵向忠, 等. 小净距隧道下穿既有地铁车站施工方法研究. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 200

(下转第32页)

服平台则主要是由于C、N原子对柯氏气团的钉扎作用产生的。钢中C与Fe发生反应，以渗碳体形式被固定，游离C含量极其有限。而SPHD钢在合金设计时，并未添加Nb、V、Ti等具有固N作用的微合金，钢中游离N只能通过脱氧后残余的Al加以固定。通过AlN析出相形式限制游离的N原子，消除其对柯氏气团的钉扎作用。

当AlN的析出临界温度一定时，析出相析出过程与两个因素有关：一方面，温度较高时，过热度偏低，析出驱动力较小；另一方面，温度较低时，化学驱动力增加，但温度降低对扩散动力学不利。因此，只有将AlN析出临界温度提高，才有利于AlN在轧制过程中析出，减少钢中游离N含量，避免橘皮现象的发生，而这与钢中Al含量有直接关系。图4和图5结果均表明，随着Al含量的增加，钢中N可以在更高温度与Al反应形成AlN，以析出相形式析出。正因如此，SPHC钢中采用Al的质量分数为0.02%~0.06%的设计方案。而其他钢种设计时，Al的质量分数一般仅为0.02%~0.04%。

结合上述分析结果可以推断，较低Al(质量分数为0.02%)情况下，在热轧过程中会有相对较多的游离态N存在，这是导致屈服平台出现的主要因素，也是橘皮现象产生的直接原因。

理论上，提高SPHD钢中Al含量可以消除屈服平

台，也可以解决冲压过程橘皮现象。

## 结束语

(1) 从内部成因看，Al含量的不同对热轧酸洗板SPHD的组织产生一定的影响。过低的Al含量会导致较多游离N的析出，进而产生屈服平台，是后续冲压过程中橘皮缺陷产生的主要原因。

(2) 在原有生产工艺的基础上，合理地进行Al的成分设计，可以避免热轧酸洗板SPHD橘皮缺陷的产生，并通过后续对SPHD产品进行实地跟踪，进一步验证了其合理性。

### 参考文献

- [1] 王畅, 于洋, 王林, 等. 高碳SPHC带钢冷轧边裂缺陷机理分析. 轧钢, 2014, 31(2): 17
- [2] 李洪翠. 冷轧板冲压橘皮缺陷分析. 山东冶金, 2013, 35(1): 40
- [3] 弓俊杰, 梅淑文, 齐长发, 等. 低碳冷轧板橘皮缺陷原因分析// 2009年河北省轧钢技术与学术年会论文集. 承德, 2009: 189
- [4] 刘阳春, 傅杰, 吴华杰, 等. 薄板坯连铸连轧低碳铝镇静钢中酸溶铝的作用研究. 钢铁, 2007, 42(1): 23
- [5] 胡文豪, 袁永, 刘骁, 等. 酸溶铝在钢中行为的探讨. 钢铁, 2003, 38(7): 42

**作者简介:** 张城铭(1987—), 男, 工程师, 2010年毕业于东北大学, 在本钢技术研究院从事产品研发工作。  
E-mail: carlstw@qq.com.

### (上接第28页)

- [3] 刘惠敏, 赵月, 吴波. CRD法不同施工工序的比较与分析. 隧道建设, 2005, 25(5): 6
- [4] 戚玉亮, 唐孟雄, 曹洪. 大断面浅埋暗挖海底隧道CRD法施工模拟分析. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 136
- [5] 吴波. 城市地下工程技术研究与实践. 北京: 中国铁道出版社, 2008
- [6] 曹德更, 冯志耀, 潘旦光. 东大桥站群洞施工开挖面距的优化分析. 金属世界, 2019(5): 52
- [7] 姚红伟, 王薇. 浅埋暗挖隧道CRD工法优化与现场试验研究. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1509
- [8] 王子甲, 陈锋, 梁青槐. 双线暗涵近距离下穿既有地铁车站的沉降研究. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 385
- [9] 张涛, 何海健, 张怀静, 等. 双洞隧道下穿施工引起既有隧道沉降的计算方法. 铁道建筑, 2018, 58(10): 40
- [10] 曹德更, 冯志耀, 潘旦光. 临近既有大跨度地铁车站浅埋暗挖施工控制技术. 金属世界, 2019(6): 41

**作者简介:** 任晨(1987—), 男, 黑龙江大庆人, 工程师, 工作于中铁十六局集团有限公司, 主要研究方向: 城市地铁施工研究. E-mail: 380935805@qq.com.

王雅琦(1995—), 女, 陕西西安人, 北京科技大学土木与资源工程学院硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程数值计算. E-mail: 1392313932@qq.com.

白利红(1975—), 女, 河北邯郸人, 高级工程师, 工作于中铁十六局集团有限公司, 主要研究方向: 工程施工和管理. E-mail: 1055182143@qq.com.

**通讯作者:** 潘旦光(1974—), 男, 浙江仙居人. 北京科技大学, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 防灾减灾研究. 通信地址: 100083北京科技大学土木与资源工程学院, 城市地下空间工程北京市重点实验室, E-mail: pdg@ustb.edu.cn.