

文章编号: 1000-7598(2012)03-0841-07

节理岩体中双向八车道小净距隧道 施工方案优化分析

蒋 坤^{1,2}, 夏才初¹, 卞跃威¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 大连市政设计研究院有限责任公司, 辽宁 大连 116001)

摘 要: 结合福州国际机场高速公路2期工程魁岐2号双洞八车道特大断面小净距隧道工程, 建立了离散元数值模拟分析模型, 针对节理岩体中特大断面小净距隧道施工方案进行了优化分析。分别研究了双侧壁导坑法、CRD法和CD法3种施工方案下隧道拱顶下沉、中间岩柱水平位移、围岩水平位移和围岩塑性区的变化规律。基于研究成果, 并结合魁岐2号特大断面小净距隧道现场实际情况, 在该隧道进口V级围岩段, 将双侧壁导坑法变更为CRD法, 顺利完成了施工, 此施工方案的变更对降低施工成本、加快施工进度、缩短施工工期均起到了较好的作用。研究结果可为类似条件下特大断面小净距隧道的设计、施工提供借鉴与参考。

关 键 词: 节理岩体; 小净距隧道; 特大断面; 施工方案; 优化分析

中图分类号: U 455

文献标识码: A

Optimal analysis of construction schemes of small space tunnel with bidirectional eight traffic lanes in jointed rock mass

JIANG Kun^{1,2}, XIA Cai-chu¹, BIAN Yue-wei¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Dalian Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116001, China)

Abstract: According to the construction conditions of Kuiqi No.2 small-space tunnel with super-large cross-section and eight traffic lanes in the second phase project of Fuzhou International Airport Highway, a discrete element analysis program is established to simulate the construction process. In the program, the double-heading construction method, CRD method and CD method have been simulated. The settlements of vault, horizontal deformations of middle rock pillar, horizontal deformations of surrounding rock and plastic zone of surrounding rock are analyzed and the advantages of the three methods are compared. Considering the characteristics of Kuiqi No.2 Tunnel, the practical construction scheme is optimized. The double-heading method is changed to CRD method at the tunnel entrance. The modification of construction method has great contribution to cut down the cost and to reduce erection time. The results provide some reasonable references to design and construction for similar engineering.

Key words: jointed rock mass; small space tunnel; super-large cross-section; construction scheme; optimization analysis

1 引 言

随着科学技术的飞速进步, 人们对生活的要求也越来越高, 安全、舒适、快速、方便、经济、环保的运输方式已提到议事日程上。过去, 公路交通运输多用盘山绕行、挖深路堑等方法修建公路, 不仅增加了里程, 降低了行车速度, 而且破坏了生态环境, 同时也给行车安全带来了很大的隐患。现在,

由于新原理、新技术、新设备、新方法、新工艺、新材料的出现, 隧道工程的修建愈来愈多, 同时对公路隧道日交通量的要求也越来越高。原来的双向四车道乃至六车道公路隧道已不能适应交通量日益增长的需求, 双向八车道大断面公路隧道已开始修建, 掀起了国内大跨扁平公路隧道建设的步伐^[1]。

在隧道的实际修建过程中, 由于受地形、地质条件限制以及隧道分建带来的展线困难与占地多等

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40972178)。

第一作者简介: 蒋坤, 男, 1980年生, 博士, 工程师, 主要从事岩土隧道以及地下结构方面的研究和设计工作。E-mail: jkun1980@163.com

因素的影响,人们也越来越多地选择小净距隧道的结构形式,投资和技术两个方面均具有很好的应用前景,同时,小净距隧道能很好地满足特定地质、地形条件以及线桥隧衔接方式,有利于公路整体线型规划和线型优化。

双向八车道隧道与其他双向四车道、六车道隧道相比,存在隧道断面大、支护结构和施工组织较复杂等特点^[2]。同时双向八车道特大断面小净距隧道作为一种新型结构型式,目前尚缺乏足够的设计和施工经验,而一定程度上开挖方式的选择正确与否是决定隧道建设成败的关键^[3],因此,有必要对不同施工方案下围岩和支护结构的变形及力学特征进行研究,得到最优的施工方案,对于推动大断面小净距隧道的发展和应用,具有重要的实践意义。

过去对于大断面隧道施工方案的研究并不多见,龚建伍等^[4]结合双向六车道鹤上隧道利用有限元分析程序对双侧壁导坑法、中隔壁法和上下台阶法不同施工方法的拱顶下沉、地表沉降、围岩稳定性等进行了模拟分析;丁文其等^[5]从施工工序与施工力学角度采用有限元分析程序对双向六车道双连拱龙山隧道三导洞和上下台阶两种工法进行了研究;黄明琦^[6]、梁巍^[7]、张建国^[8]分别对 CRD 法在大断面厦门翔安海底隧道应用进行了研究,并分析了其在控制围岩变形和保持围岩稳定性中的作用。通过查阅文献发现,目前尚没有相关学者和专家对节理岩体中类似于双向八车道特大断面小净距隧道工程的施工方法进行相关的研究工作,因此,本文结合魁岐 2 号特大断面小净距隧道就节理岩体中双向八车道小净距隧道施工方法进行相关的研究,以寻求最优施工方案,为本隧道以及类似条件下隧道工程的设计和施工提供合理的参考依据。

2 工程概况

魁岐 2 号隧道位于福州国际机场高速公路 2 期工程 A3 标段,左洞桩号为 ZK10+841~ZK11+586,隧道长度为 745 m,右洞桩号为 YK10+818~YK11+565,隧道长度为 747 m,左右两洞基本为平行设置。该隧道设计内空断面净宽为 19.9 m、拱高为 10.94 m、含仰拱总高度为 12.84 m,单洞标准断面内轮廓面积(路面以上)为 128.97 m²,含仰拱面积为 159.49 m²(见图 1)。开挖毛洞中间岩柱净距 11.7~15.3 m,即 (0.59~0.77) B (B 为隧道最大开挖跨度)。按照《公路隧道设计规范》^[9]中分离式独立双洞的最小净距规定以及国际隧道协会断面划分标准^[10],该隧道属于特大断面小净距隧道,类似于

本隧道断面之大、结构之复杂,在国内外隧道工程中极为罕见。

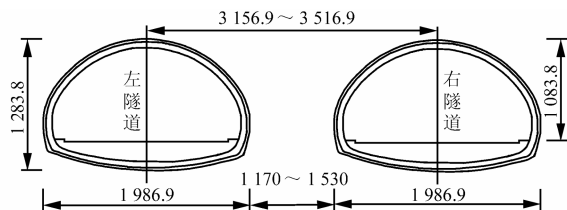


图 1 隧道设计断面尺寸 (单位: cm)

Fig.1 Size of tunnel cross-section (unit: cm)

勘探资料^[11]表明,隧道修建区域节理裂隙发育,通过对隧道进口段 V 级围岩掌子面节理进行调查、统计和拟合分析发现,围岩中共存在 3 组优势节理^[12]: ①节理组 1: 节理倾角约为 61°, 平均间距为 0.74 m; ②节理组 2: 节理倾角约为 53°, 平均间距为 0.85 m; ③节理组 3: 节理倾角约为 73°, 平均间距为 1.26 m。

隧道采用新奥法施工,开挖前设置超前注浆小导管预加固,采用复合衬砌,以锚杆、湿喷混凝土等为初期支护,并辅以钢拱架、大管棚、注浆小导管等支护措施,本隧道 V 级围岩浅埋段取消了锚杆支护^[13]。

3 隧道施工方案动态数值模拟

3.1 模型建立

由于魁岐 2 号隧道围岩属于节理岩体,故采用离散单元法及其应用程序 UDEC^[14]对其进行相关的数值模拟研究。计算模型选取进口段 YK11+425 断面,隧道埋深约为 20 m,围岩级别为 V 级。模型的左右边界约为隧道开挖跨度的 5 倍,上边界至地表自由面,并假设地表为水平状态,下边界至开挖洞底距离约为 5 倍洞高。两侧边界条件采用水平方向单向位移约束,底部边界条件采用水平方向和垂直方向双向位移约束,图 2 为数值计算模型。

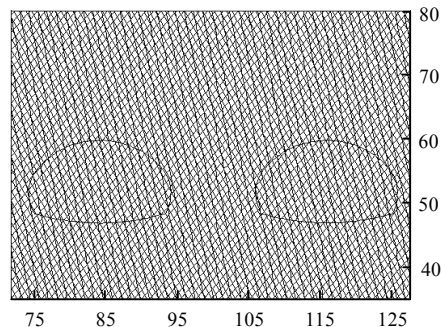


图 2 数值计算模型 (单位: m)

Fig.2 Numerical simulation model (unit: m)

模型中假定岩块为理想弹塑性介质，符合 Mohr-Coulomb 强度屈服准则（见图 3），节理采用 Coulomb 平面接触滑动模型，岩石和节理的变形强度参数根据魁岐 2 号隧道地质资料选取^[11]，分别见表 1、2。

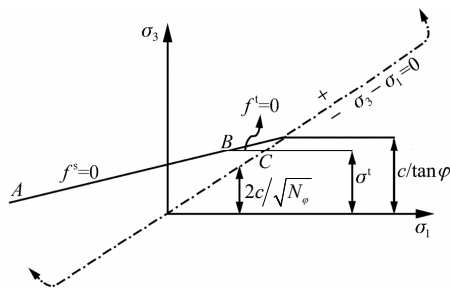


图 3 离散元 UDEC 中的 Mohr-Coulomb 弹塑性模型
Fig.3 Mohr-Coulomb elastoplastic model of UDEC

表 1 岩石力学特性参数
Table 1 Mechanical parameters of rock

重度 γ /(kN/m ³)	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	凝聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /(°)
24	3	0.3	1.5	35

表 2 节理力学强度特性参数
Table 2 Mechanical strength parameters of joint

法向刚度 K_n /(GPa/m)	切向刚度 K_s /(GPa/m)	内摩擦角 φ /(°)	凝聚力 c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa
1.50	0.49	29	0.052	0

图 3 中 A 到 B 点为 Morh-Coulomb 强度准则

$$\left. \begin{aligned} f^s &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \\ g^s &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

B 到 C 点为拉破坏准则

$$\left. \begin{aligned} f^t &= \sigma^t - \sigma_3 \\ g^s &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力； φ 为内摩擦角； c 为凝聚力； σ^t 为抗拉强度； ψ 为剪胀角； N_φ 和 N_ψ 可分别按下式求得：

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ N_\psi &= \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

魁岐 2 号特大断面小净距隧道进口 V 级围岩段支护方案为：初期支护采用喷射厚为 30 cm 混凝土和型号为工 22b 钢支撑联合支护；二次衬砌采用模筑厚度为 60 cm 的钢筋混凝土。在利用离散元 UDEC 计算分析时混凝土和工字钢用 Struct 单元模

拟。

3.2 施工方法动态模拟方案

由于双向八车道小净距隧道单洞跨度达 19.9 m，如若采用台阶法进行施工时施工跨度较大，对隧道围岩控制不利。因此，本文在模拟计算中只选取双侧壁导坑法、CRD 法（center cross diagram method）和 CD 法（center diaphragm method）进行优化比较，3 种施工方案的施工工序分别如下：

方案 1：双侧壁导坑法。此种施工工法的施工工序共分 26 步（见图 4）：（1）开挖左洞左导坑上台阶；（2）施工左洞左导坑上台阶初期支护和临时支护；（3）开挖左洞左导坑下台阶；（4）施工左洞左导坑下台阶初期支护和临时支护；（5）开挖左洞右导坑上台阶；（6）施工左洞右导坑上台阶初期支护和临时支护；（7）开挖左洞右导坑下台阶；（8）施工左洞右导坑下台阶初期支护和临时支护；（9）开挖右洞右导坑上台阶；（10）施工右洞右导坑上台阶初期支护和临时支护；（11）开挖右洞右导坑下台阶；（12）施工右洞右导坑下台阶初期支护和临时支护；（13）开挖右洞左导坑上台阶；（14）施工右洞左导坑上台阶初期支护和临时支护；（15）开挖右洞左导坑下台阶；（16）施工右洞左导坑下台阶初期支护和临时支护；（17）开挖左洞中部上台阶；（18）施工左洞拱部初期支护和中部临时支护；（19）开挖左洞中部下台阶；（20）施工左洞中部仰拱初期支护；（21）开挖右洞中部上台阶；（22）施工右洞拱部初期支护和中部临时支护；（23）开挖右洞中部下台阶；（24）施工右洞中部仰拱初期支护；（25）拆除左洞临时支护并整体浇筑二次衬砌；（26）拆除右洞临时支护并整体浇筑二次衬砌。

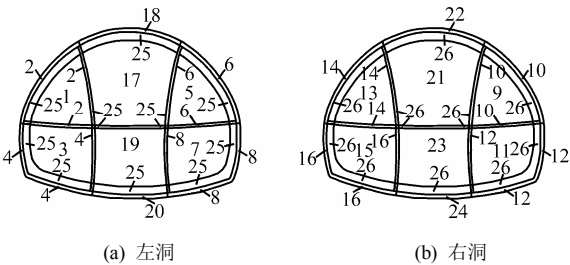


图 4 双侧壁导坑法施工工序
Fig.4 Construction sequences of the double-side-drift method

方案 2：CRD 法。此种施工工法的施工工序共分 18 步（见图 5）：（1）开挖左洞左导坑上台阶；（2）施工左洞左导坑上台阶初期支护和临时支护；（3）开挖左洞左导坑下台阶；（4）施工左洞左导坑下台阶初期支护和临时支护；（5）开挖右洞右导坑

上台阶；(6) 施工右洞右导坑上台阶初期支护和临时支护；(7) 开挖右洞右导坑下台阶；(8) 施工右洞右导坑下台阶初期支护和临时支护；(9) 开挖左洞右导坑上台阶；(10) 施工左洞右导坑上台阶初期支护和临时支护；(11) 开挖左洞右导坑下台阶；(12) 施工左洞右导坑下台阶初支支护；(13) 开挖右洞左导坑上台阶；(14) 施工右洞左导坑上台阶初期支护和临时支护；(15) 开挖右洞左导坑下台阶；(16) 施工右洞左导坑下台阶初支支护；(17) 拆除左洞临时支护并整体浇筑二次衬砌；(18) 拆除右洞临时支护并整体浇筑二次衬砌。

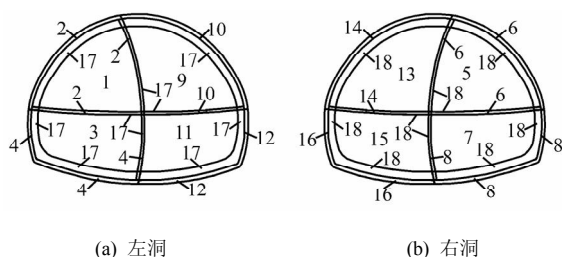


图 5 CRD 法施工工序

Fig.5 Construction sequences of CRD method

方案 3: CD 法。该法与 CRD 法主要区别是 CD 法施工是取消了中部临时仰拱, 此种施工工法的施工工序共分 18 步 (见图 6)。

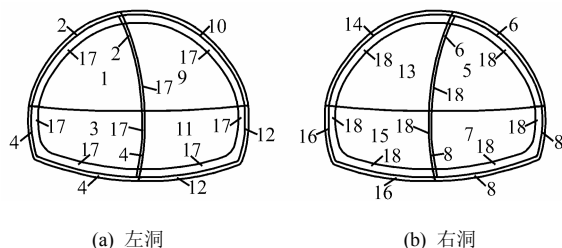


图 6 CD 法施工工序

Fig.6 Construction sequences of CD method

4 计算结果分析

通过对双向八车道特大断面小净距隧道进口段围岩采用双侧壁导坑法、CRD 法和 CD 法施工过程的模拟计算, 得到隧道围岩位移、塑性区等在不同施工方法下的变化和分布特点。

4.1 拱顶下沉

拱顶下沉是不同施工方法下围岩变形中最直观的表现, 同时也是评价围岩稳定性的一个重要指标。图 7 为双侧壁导坑法、CRD 法和 CD 法施工时拱顶下沉曲线。表 3 为 3 种施工方案下左、右洞最终拱顶下沉值。

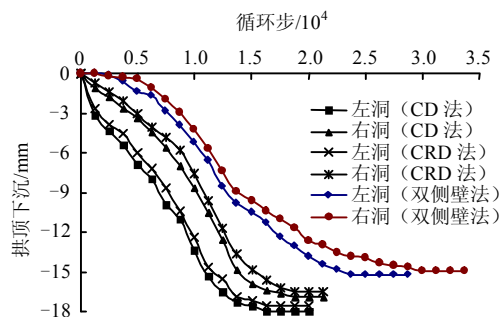


图 7 3 种施工方案时拱顶下沉曲线

Fig.7 Curves of crown settlement under three schemes

表 3 3 种施工方案时拱顶下沉最终值 (单位: mm)

Table 3 Values of crown settlement under three schemes (unit: mm)

围岩部位	双侧壁法	CRD 法	CD 法
左洞	15.3	17.6	18.0
右洞	15.0	16.5	16.9

从图表中可以看出, 双侧壁导坑法施工时拱顶下沉值最小, CRD 法次之, CD 法最大。以双侧壁法施工时拱顶下沉值为基准, CRD 法施工时引起左、右洞拱顶下沉分别比双侧壁法增大了 15.1% 和 10.0%, 而 CD 法施工时引起拱顶下沉分别比双侧壁法增大了 17.6% 和 12.7%, 由此可以说明, 在控制拱顶下沉方面双侧壁导坑法施工时明显优于 CRD 法和 CD 法, 而 CD 法较 CRD 法却没有显著的差别。

4.2 中间岩柱水平位移

中间岩柱的稳定性对小净距隧道整体稳定起决定作用, 中间岩柱的位移是其稳定性的重要体现。图 8 为 3 种施工方案下中间岩柱的水平位移 (向左位移为负值, 向右位移为正值)。

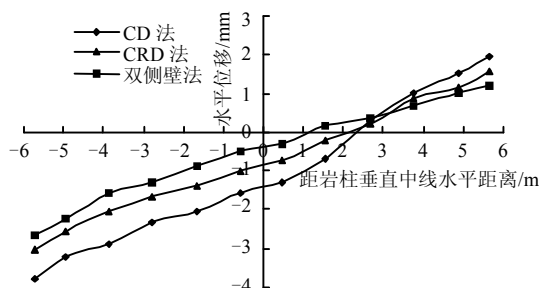


图 8 3 种施工方案时中间岩柱水平位移

Fig.8 Curves of horizontal deformation of middle rock pillar under three schemes

从图中可以看出, 无论是中间岩柱的左侧还是右侧, 双侧壁导坑法施工时水平位移都是最小的, CRD 法次之, 而 CD 法最大。CRD 法施工时引起

的中间岩柱的水平位移较双侧壁导坑法分别增大了 0.72 mm (左侧)和 0.41 mm (右侧), CD 法施工时引起的中间岩柱的水平位移较 CRD 法也分别增大了 0.41 mm (左侧)和 0.37 mm (右侧)。表明双侧壁导坑法施工时最中间岩柱的扰动较小, CRD 法次之, 而 CD 法施工时对中间岩柱的扰动则最大。

分析中间岩柱整体位移曲线可以发现, 当左洞开挖时, 中间岩柱近开挖侧围岩向水平左侧位移, 且位移量较大; 右洞开挖时, 中间岩柱近开挖侧围岩变为向水平右侧移动, 但位移量相对于先行左洞施工明显要小。整体上, 围岩有先向左洞侧移动的趋势。

4.3 围岩水平位移

图 9 为 3 种施工方案时隧道拱腰处水平位移随距隧道边界距离的变化规律。从曲线总体变化规律可以看出, 无论是何种施工方案, 在隧道开挖后, 隧道外侧边墙均向开挖面方向移动, 且在距隧道边界约 1.5B 范围内, 围岩水平位移随着距隧道距离的增大而迅速减小, 而当距隧道边界距离大于 1.5B 时, 围岩水平位移随距隧道距离的增大变化不是太大, 这也说明施工方案对隧道水平位移的影响主要在约 1.5B 范围内。

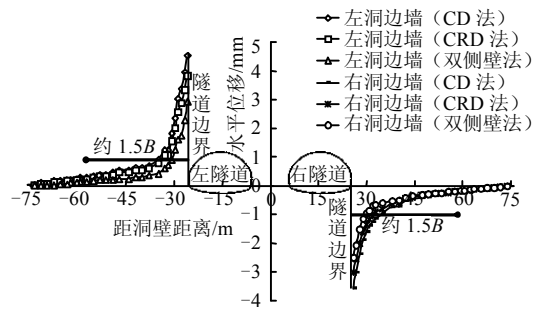


图 9 3 种施工方案隧道边墙水平位移
Fig.9 Horizontal deformation curves of side wall of tunnel under three schemes

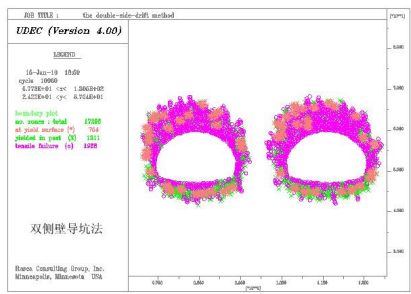
从图中可以看出, 在控制围岩水平位移方面, 双侧壁导坑法明显优于 CRD 法和 CD 法。CRD 法施工时引起的围岩的水平位移较双侧壁导坑法分别增大了 0.91 mm (左洞)和 0.51 mm (右洞), 而 CD 法施工时引起的围岩水平位移较 CRD 法分别增大了 0.69 mm (左洞)和 0.56 mm (右洞), 由此可知, 在控制围岩水平位移方面 CRD 法明显优于 CD 法。

4.4 围岩塑性区

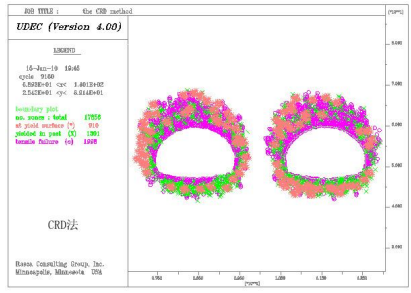
在地下工程中, 隧道的开挖势必引起应力的重分布, 在应力重分布过程中, 局部区域由于发生应力集中现象, 超过了其屈服强度而发生塑性屈服破

坏。图 10 为 3 种施工方案下围岩屈服区范围。从不同施工方案下围岩塑性区可以看出, 双侧导坑法和 CRD 法开挖屈服区范围并没有明显的差别, 而 CD 法围岩塑性屈服区则稍大于双侧壁导坑法和 CRD 法。

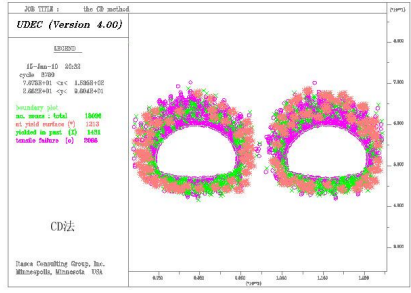
这是由于双侧壁导坑法和 CRD 法施工先行开挖左右侧导洞, 减小了隧道开挖跨度, 同时采用了中隔墙支护和修筑临时仰拱, 且在初期支护成形之后才拆除, 可有效防止围岩失稳, 围岩相对不易屈服。而 CD 法开挖时, 虽然也采用了中隔墙支护, 但取消了中部临时仰拱的修筑, 围岩约束解除的较快, 不利于控制围岩的变形。



(a) 双侧壁导坑法



(b) CRD 法



(c) CD 法

图 10 3 种施工方案下围岩塑性区分析
Fig.10 Plastic zones of surrounding rock under three construction schemes

5 施工方案的变更及监测分析

5.1 施工方案的变更

通过上述对双侧壁导坑法、CRD 法和 CD 法模

拟分析可以发现,从施工力学角度看,3种施工方案均可行,其中双侧壁法和CRD法开挖引起的围岩位移较小,同时围岩塑性区也相对较小,整体上二者差别不大,前者稍优于后者,而CD法则相对较为不利;从施工工序角度看,双侧壁法工作面较小,施工相互影响较大,施工缓慢,CRD法和CD法开挖工作面稍大,有利于加快施工进度。通常,在软弱围岩情况下,侧壁法开挖隧道可充分发挥喷层和锚杆的支护作用,较易于控制围岩的变形和稳定,特别是在断层破碎带,多导洞开挖更显其优势^[4],因而在施工预设计中初步拟定的施工方案为双侧壁导坑法。

实际施工过程中,由于多方面的原因,隧道工程施工进度有所滞后,鉴于魁岐2号隧道作为机场高速公路控制性工程之一,其能否按期完成对工程整体施工进度有重大影响,为加快施工进度,结合本隧道现场地质条件,综合考虑施工力学因素、施工工序要求以及当前施工技术水平,通过比较分析,拟将双侧壁导坑法变更为CRD法施工。

5.2 监测结果分析

由于前述数值模拟结果是在理想施工状态下得出的,实际施工中达到理想状态比较困难,因而围岩实际状态可能比理论计算结果要差。鉴于此,在施工过程中开展了地表下沉、拱顶下沉、洞周收敛、围岩内部位移以及支护间压力、二衬内力等多项监测工作,旨在通过监测结果,及时调整施工参数,为优化施工方案提供保证和支持。

图11、12分别为YK11+425断面拱顶下沉、洞周收敛和测点离掌子面的距离与时间的关系曲线。从图中可以看出,在隧道断面施工初期(测点距掌子面距离较小时),隧道拱顶下沉和洞周收敛迅速增大,随着掌子面的推进,其值缓慢增加并逐渐达到稳定值;而在施工工序变更前后,隧道拱顶下沉和洞周收敛值并没有发生“突变”,监测数据表明,当测点距掌子面40m左右时拱顶下沉和洞周收敛值基本趋于稳定。从图中还可以看出,拱顶下沉最终稳定值为7.31mm,小于数值模拟所得结果,而洞周最终收敛值为4.58mm,与上述数值模拟结果比较接近。

上述监测结果说明,采用CRD法施工是安全的。同时,在隧道施工过程中,基于监测结果及时调整跟进施工措施,围岩稳定得到了较好地控制,顺利安全地完成了隧道施工,因此,结合工程实际,本工程隧道由双侧壁法变更为CRD法施工是合理可行的。



图11 拱顶下沉、测线距掌子面距离与时间的关系曲线

Fig.11 Curves of crown settlement and excavation vs. time

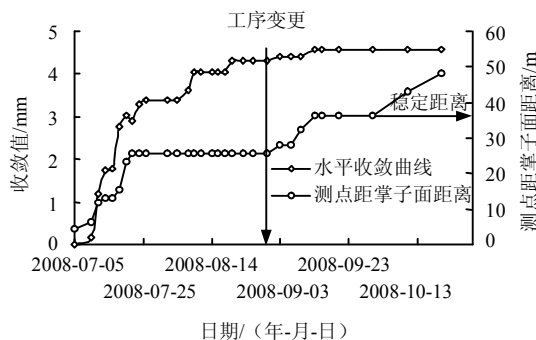


图12 洞周水平收敛、测线距掌子面距离与时间的关系曲线

Fig.12 Curves of horizontal convergence deformation and excavation vs. time

6 结 论

(1) 在控制隧道拱顶下沉、中间岩柱水平位移以及隧道水平位移方面,双侧壁导坑法优于CRD法和CD法;而在控制拱顶下沉方面,CRD法与CD法施工时没有显著的区别;但在控制中间岩柱水平位移和隧道水平位移方面,CRD法明显优于CD法。

(2) 基于在双侧壁导坑法、CRD法和CD法3种施工方案下双向八车道小净距隧道的施工力学特征,同时考虑到魁岐2号特大断面小净距隧道工程的现场实际情况,将本隧道进口段施工方案由双侧壁导坑法变更为CRD法,通过对隧道现场监控量测分析发现,在施工方案变更前后隧道的围岩变形并没有发生“突变”现象,并顺利完成了施工,这对降低施工成本、加快施工进度、缩短工期均起到了较好的实际效果。作为国内首例双向八车道小净距隧道施工的顺利完成,可为今后类似条件下小净距隧道设计和施工提供有益的参考和指导。

参 考 文 献

[1] 张顶立,王梦恕,高军,等.复杂围岩条件下大跨隧道

- 修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 290—296.
- ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, GAO Jun, et al. Construction technique of large-spanned tunnel under condition of complicated surrounding rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 290—296.
- [2] 许崇帮, 夏才初, 朱合华. 双向八车道连拱隧道施工方案优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 30(1): 66—73.
- XU Chong-bang, XIA Cai-chu, ZHU He-hua. Optimum analysis of construction scheme of multi-arch tunnel with eight traffic lanes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 30(1): 66—73.
- [3] 李云鹏, 王芝银, 韩常领, 等. 不同围岩类别小间距隧道施工过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 11—16, 28.
- LI Yun-peng, WANG Zhi-yin, HAN Chang-ling, et al. Simulating study of construction process of tunnels with small spacing for different classes of surrounding rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 11—16, 28.
- [4] 龚建伍, 夏才初, 朱合华, 等. 鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 236—240.
- GONG Jian-wu, XIA Cai-chu, ZHU He-hua, et al. Optimal analysis of construction schemes for Heshang small-space tunnels with large section[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 236—240.
- [5] 丁文其, 王晓彤, 李志刚, 等. 龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4042—4047.
- DING Wen-qi, WANG Xiao-xing, LI Zhi-gang, et al. Optimal analysis of construction schemes for shallow large span Longshan twin tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4042—4047.
- [6] 黄明琦, 付贤伦, 李云超. 大断面海底隧道软弱地层CRD法施工稳定性控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3804—3809.
- HUANG Ming-qi, FU Xian-lun, LI Yun-chao. Study of stability control of large-section subsea tunnels in weak strata by CRD construction method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3802—3809.
- [7] 梁巍, 黄明利. 大跨度隧道 CRD 法穿越含水软弱层沉降变形控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3738—3742.
- LIANG Wei, HUANG Ming-li. Subsidence and deformation control of large-span tunnel in water-bearing unfavorable geological conditions with CRD method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3738—3742.
- [8] 张建国, 王明年, 刘大刚. 海底隧道浅埋暗挖段 CRD 法不同施工工序比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3639—3645.
- ZHANG Jian-guo, WANG Ming-nian, LIU Da-gang. Comparison of different working procedures by CRD method for shallow-buried subsea tunnel excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3639—3645.
- [9] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [10] 龚建伍. 扁平大断面小净距公路隧道施工力学研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [11] 缪圆冰. 魁岐 2 号隧道工程地质评价[R]. 福建: 福建省交通规划设计院, 2007.
- [12] 陈孝湘. 特大跨度隧道岩体节理精细化采集描述及其块体稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [13] 缪圆冰. 福州长乐国际机场高速公路二期工程(A3 标段)两阶段施工设计[R]. 福建: 福建省交通规划设计院, 2007.
- [14] Itasca Consulting Group, Inc. UDEC universal distinct element code (Version 4.00) user's guide[M]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2004.