

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.032

地铁区间极小间距下穿高铁盾构 隧道施工方法分析

曹瑞琅¹, 赵宇飞¹, 寇卫国², 陆海锋², 张雪东¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

2. 中铁上海工程局集团 第一工程有限公司, 上海 200436)

摘要: 以北京 12 号线地铁区间极小间距下穿京张高铁盾构隧道为工程背景, 数值模拟了台阶法、临时仰拱台阶法、CD 法以及 CRD 法施工过程, 揭示了下穿工程地层变形、地表沉降、盾构管片变形以及支护结构受力特征等规律。研究表明: 地铁区间施工拱顶和仰拱围岩变形最大。地表最大沉降位于地铁双区间隧道中心截面, 越靠近中心地层变形叠加效应越明显, 距离超过 20 m 的地层主要受单线隧道施工影响, 且变形大幅降低; 地铁施工引起盾构管片最大变形在双区间中心截面 ± 15 m 范围内, 为减小盾构隧道变形, 可局部加固距地铁区间较近 30 m 段管片; 在台阶法基础上设置临时仰拱后, 不仅减小了初支因弯矩产生的应力, 还能充分利用锚管的锁脚作用, 临时仰拱台阶法有效控制了地层变形。

关键词: 地铁区间; 下穿施工; 盾构隧道; 地层变形控制

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0171-05

Construction Method Analysis for Metro Tunnel with Minimal Spacing under High-speed Rail Shield Tunnel

CAO Ruilang¹, ZHAO Yufei¹, KOU Weiguo², LU Haifeng², ZHANG Xuedong¹

(1. China State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100048, China;

2. Shanghai Civil Engineering Co. Ltd. of CREC, Shanghai 200436, China)

Abstract: Based on the project of Beijing subway Line 12 passing through Beijing - Zhangjiakou High Speed Rail shield tunnel with minimal interval, this paper uses numerical solution to simulate the construction process of bench cut method, temporary inverted arch bench cut method, CD method and CRD method. It discusses some key issues such as the law of formation deformation in underground engineering, surface subsidence law and deformation law of shield tube sheet and stress characteristics of support structures. The results show that the deformation of arch top and invert surrounding rock is the largest in subway interval. The maximum settlement of the surface is located at the central section of the subway two-interval tunnel. The closer to the central stratum, the more obvious the superposition effect is. The stratum with a distance of more than 20 m is mainly affected by single-line tunnel construction, and the deformation is greatly reduced. The maximum deformation of shield tube sheet caused by subway construction is within the range of ± 15 m of the central section of the double interval. In order to reduce the deformation of shield tunnel, the local reinforcement can be done to 30m pieces of tube from the subway interval. After the temporary invert is set up on the basis of bench cut method, it not only reduces the stress caused by the bending moment of the initial branch, but also makes full use of the anchor pipe's locking foot. So the temporary inverted arch bench cut method effectively controls stratum deformation.

Keywords: subway interval; undercrossing construction; shield tunnel; control of strata deformations

收稿日期: 2018-07-24

修稿日期: 2018-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401801, 2016YFC0401804); 国家自然科学基金项目(51709282, 51674058)

作者简介: 曹瑞琅(1985—), 男, 河南周口人, 博士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的工作。E-mail: finite@yeah.net

城市地铁修筑时,不可避免的存在新建地铁工程与其他结构(既有线、桥桩、建筑基础以及地下管线等)相互影响^[1],近距离甚至“极小间距”穿越工程问题凸显,一般作为工程重点风险源特殊对待,其设计和施工难度极大。

国内外学者对城市地铁修建引起地层变形规律和施工控制技术的研究已取得较为丰富的成果^[2-5]。近些年,随着下穿工程和侧穿工程不断出现,对城市地铁修建对已有结构影响方面研究有了新趋势。张成平等^[6]以北京地铁 5 号线崇文门暗挖车站下穿既有地铁隧道施工为背景,探讨施工前对既有地铁轨道和隧道结构合理加固措施。张士强等^[7]开展昆明地铁盾构下穿火车站沉降控制施工参数研究。A Leitner 等^[8]针对维也纳新建高速公路隧道下穿 U2/U5 地铁区间工程开展研究,分析淤泥河黏土地层的地层变形时间空间分布规律。北京地铁 12 号线大-蓟暗挖区间极小间距下穿京张高铁隧道,两者最小距离仅 1.62 m,在卵石透水地质条件下,如此小间距地铁下穿高铁盾构隧道情况在国内外工程中极为少见,且与一般工程相比,为控制地铁施工对上方盾构管片不均匀沉降影响^[9],地层变形控制标准更为严格。

研究隧道施工方法对下穿工程稳定性影响至关重要,以地铁 12 号线极小间距下穿京张高铁盾构为工程背景,针对各种施工方法实施中地层变形规律、地表沉降规律、盾构管片变形规律以及支护结构受力特征等关键问题开展研究,为下穿工程施工方法选取提供依据。

1 工程背景

1.1 工程概况

北京地铁 12 号线正线全长为 29.35 km,全部为地下线,共设 21 座车站,其中换乘站 14 座。大钟寺站—蓟门桥站区间起点位于大钟寺站,区间线路沿北三环西路路中敷设,终点位于蓟门桥区的蓟门桥站,区间长度 847.298 m,线间距 15.0 m~17.2 m。大钟寺站及蓟门桥站均为暗挖法施工车站,区间线路纵断采用“人”字坡,拟采用矿山法施工,区间埋深约 34 m。

在里程左 SSK108+005—左 SSK108+038 之间,地铁暗挖区间极小间距下穿京张高铁隧道,即区间结构垂直下穿盾构隧道,见图 1。高铁盾构直径 12.2 m,地铁区间直径 6.2 m,两者距离仅 1.62 m,在卵石透水地质条件下,控制地层变形非常关键,必须

选择合理的施工方法,降低地铁区间施工对上方高铁盾构管片及轨道的影响。

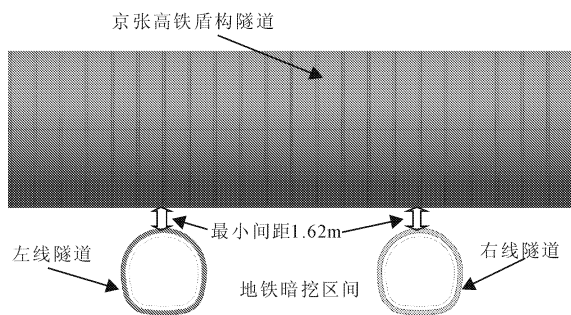


图 1 地铁区间极小间距下穿高铁盾构示意图

1.2 施工方案比选

为控制隧道围岩变形,对隧道拱顶及边墙进行深孔注浆,并在隧道边墙与水平线 30°角度处施加锁脚锚杆。施工遵循“短台阶、短循环、快封闭、勤量测和强支护”的原则^[10],如图 2 所示,考虑的施工方法有:

(1) 台阶法:采用上下台阶法施工,上部台阶预留核心土,各台阶步距为 3.0 m。

(2) 临时仰拱台阶法:在台阶法的基础上,上台阶施工完毕后,施加临时仰拱。

(3) 交叉中隔壁法(CRD):把隧道分为 4 个独立的小洞室分部施工,交叉中隔壁法,随挖随撑。

(4) 中隔壁法(CD法):将隧道分为左右两大部分进行开挖,隧道两侧采用台阶法自上而下分层开挖,中间设置中隔壁以增加支护刚度。

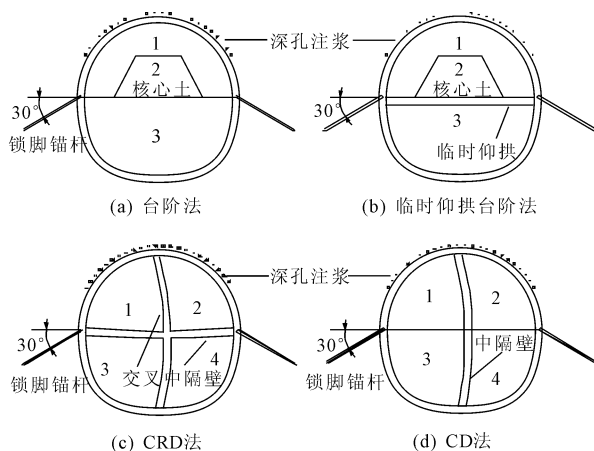


图 2 地铁区间施工方法

2 数值建模与计算方案

2.1 数值建模

考虑到边界效应影响,数值计算模型边界取 3 倍以上洞直径,上部边界取至地表^[11],如图 3 所示,

模型几何尺寸长、宽、高分别为 80 m、80 m 和 50 m。围岩和支护采用实体单元模拟,锁脚锚管采用锚杆单元(Cable)模拟,在地铁区间和高铁盾构隧道交叉部位增加了网格密度以提高计算精度。

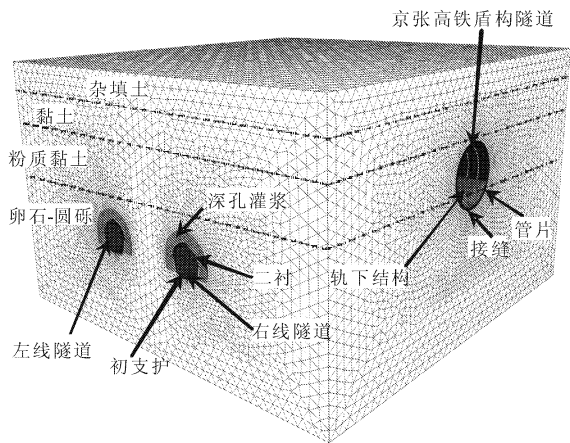


图 3 地铁区间极小间距下穿高铁盾构三维建模图

图 4 给出了数值计算模型网格图,网格节点数为 23.5 万个,网格单元数为 55.1 万个。高铁盾构管片接缝采用等效刚度法模拟。

2.2 模型参数

地铁区间围岩主要是卵石-圆砾层,厚约 23 m,高铁盾构隧道上方主要是黏土和杂填土,上方是卵石-圆砾层,围岩采用服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性模型,物理力学指标见表 1,在 FLAC^{3D} 中采用 Fish 语言按照分层赋予网格参数。深孔注浆效果通过提高围岩变形模型和黏聚力等值实现。

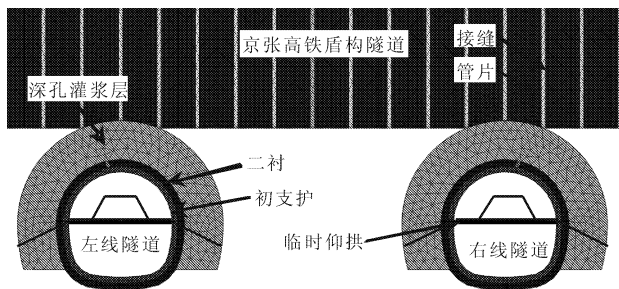


图 4 数值计算模型(临时仰拱台阶法)网格图

表 1 围岩物理力学指标

围岩	埋深 /m	变形模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力 /kPa	重度 /(kN·m ⁻³)
杂填土	0~6	2.1	0.33	10	2	18.0
黏土	6~13	5.7	0.31	10	35	18.8
粉质黏土	13~25	9.5	0.25	32	25	19.9
卵石-圆砾	25~48	63.0	0.20	45	0	21.5
注浆体	—	94.5	0.20	50	50	24.0

初支、二衬及管片采用服从弹性模型的实体单元模拟,参数取值见表 2,管片接缝利用等效刚度折减法^[12]实现。隧道临时支撑(I22a 型钢)采用 Shell 结构单元模拟^[13],锁脚锚管(DN25 中空钢管)用 Cable 杆件单元模拟^[14]。

表 2 支护结构力学计算参数

支护	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)
初支	20	0.20	2600
二衬	32	0.20	2700
管片	35	0.18	2600
管片接缝	7	0.20	2000

3 计算结果分析

3.1 地层变形规律

隧道施工开挖后,由于卸荷作用,围岩沿着隧道洞壁向内产生挤压位移,在应力场重分布过程中逐渐引起附近地层发生变形。

高铁盾构隧道中心截面地层变形规律如图 5 所示,在地铁双区间隧道开挖后,拱顶和仰拱附近围岩变形最大,台阶法施工拱顶变形量为 25.3 mm,与之相比,临时仰拱台阶法降低 22.3%、CRD 法降低 45.0%、CD 法降低 25.4%。由此可见,CRD 法设置水平和竖向中隔壁后,围岩变形得到控制;临时仰拱台阶法和 CD 法分别通过设置水平仰拱和竖向中隔壁后,围岩变形控制效果比较接近,二者最大变形仅相差 0.6 mm。四种施工方案下拱顶附近围岩变形均会比仰拱小,例如,临时仰拱台阶法施工方案拱顶变形为 19.5 mm,而仰拱变形达 42.2 mm,这主要归因于拱顶 270°范围内进行深孔注浆,约束了隧道中上部围岩变形。

图 6 给出了地铁双隧道区间中心截面地层变形云图,高铁盾构隧道附近围岩变形明显会降低,台阶法施工时盾构管片附近最大变形为 10.6 mm,而地铁双隧道区间中心截面其他部位整体变形处于 20.0 mm~25.2 mm,变形减少的主因是盾构隧道管片支护后整体刚度大于原始土层,阻隔了部分施工变形由下方地铁区间向上传递,使得高铁盾构隧道附近地层变形会比地表变形还要小。地铁双区间隧道拱顶截面地层变形见图 7,由于受到左、右区间隧道施工围岩变形叠加效应影响,两个区间中心截面处的整体变形要大于隧道拱顶截面,因此施工中更应注重此断面变形,而不仅要关注隧道拱顶变形。

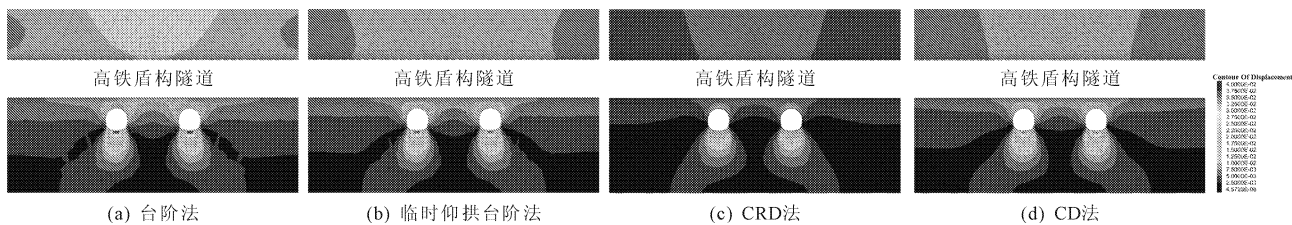


图 5 高铁盾构隧道中心截面地层变形云图

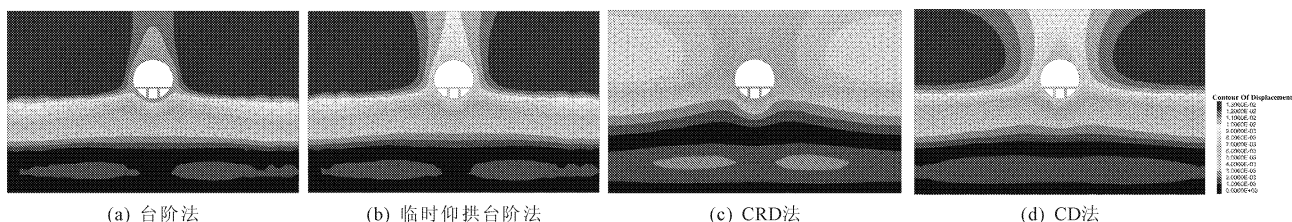


图 6 地铁双隧道区间中心截面地层变形云图

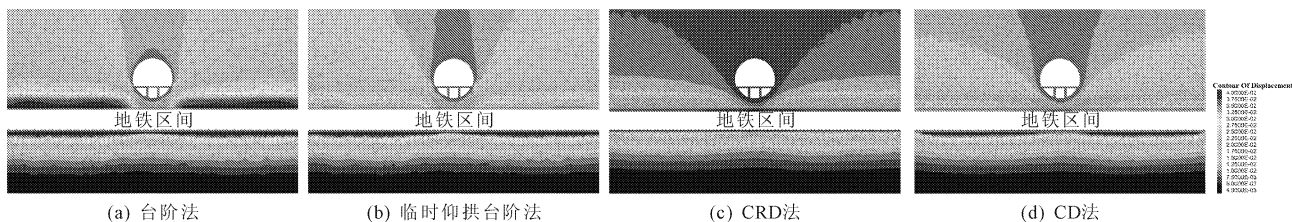


图 7 地铁双隧道区间拱顶截面地层变形云图

3.2 地表沉降规律

不同施工方法沿地铁区间隧道方向地表沉降曲线见图 8,台阶法施工引起地表变形量为最大,达到 18.5 mm,施工引起的地表沉降越靠近高铁盾构隧道会越小,超过高铁盾构隧道中心截面距离 30 m 以外时变形基本趋于一致。

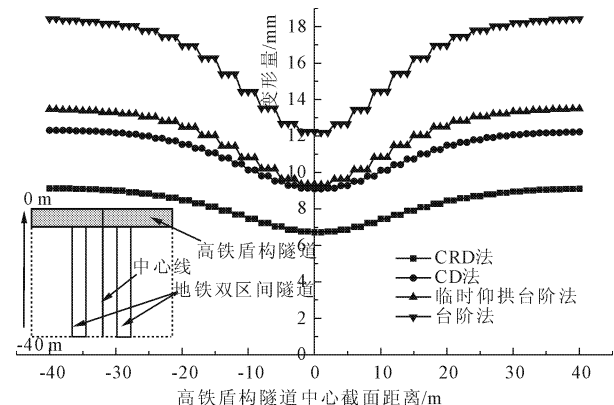


图 8 沿地铁区间方向地表沉降曲线

由临时仰拱台阶法沿高铁盾构隧道方向地表沉降曲线图 9 可以看出,地表最大沉降位于地铁双区间隧道中心截面,越靠近中心施工引起变形叠加效应越明显,远离中心后叠加效应逐渐降低,在距地铁双区间中心截面 20 m 附近存在反弯点,随后地层变形主要受单线隧道施工影响。

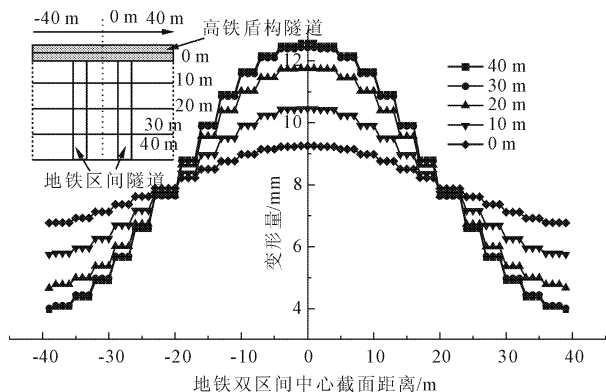


图 9 临时仰拱台阶法沿高铁盾构方向地表沉降曲线

3.3 高铁盾构管片变形规律

受到应力重分布影响,地铁施工开挖会导致高铁盾构管片产生明显变形,图 10 是地铁双区间隧道中心截面不同施工方法盾构管片沿环向变形曲线。

四种施工方法管片均整体向下位移,离区间隧道较近的底部管片变形略大于其他部位,台阶法施工管片最大变形为 11.2 mm,CRD 法施工为 6.8 mm,临时仰拱台阶法和 CD 法施工结果较接近,分别为 8.8 mm 和 9.1 mm。对临时仰拱台阶法施工盾构管片沿环向变形(见图 11 和图 12)分析,结果表明,管片最大变形在地铁区间拱顶上方,而不是两隧道中心截面,且管片在地铁双区间截面中心 ± 15 m 范

围内变形均较大,量值在 8 mm~9.5 mm 之间,因此为减小变形,可着重对这 30 m 段管片局部加固。

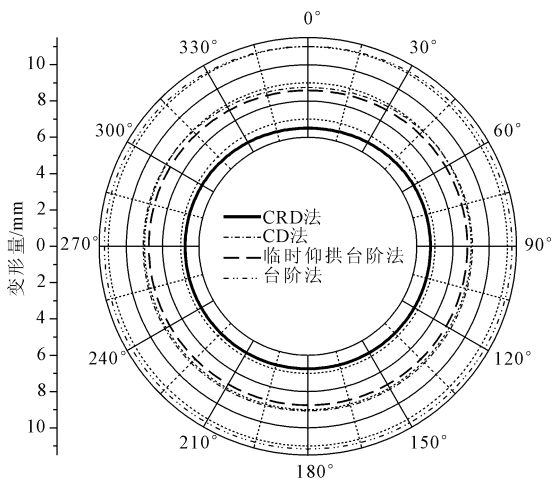


图 10 不同施工方法盾构管片沿环向变形曲线

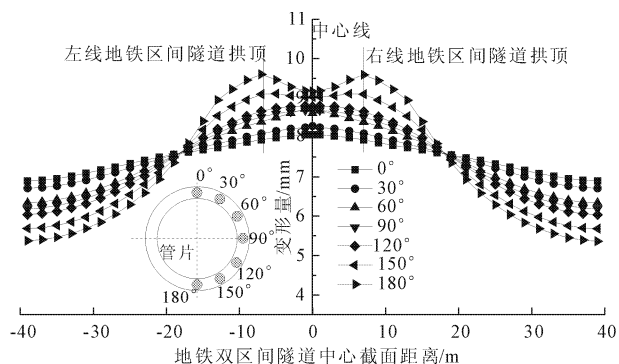


图 11 临时仰拱台阶法施工盾构管片纵向变形曲线

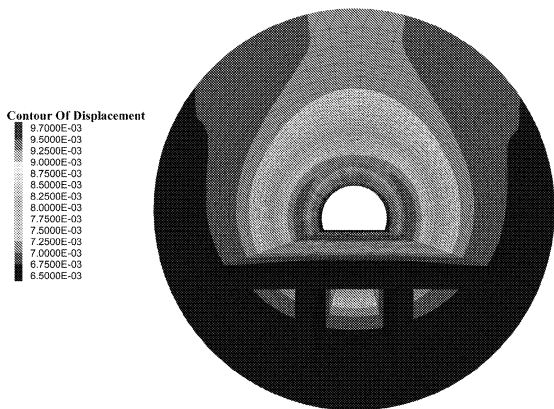


图 12 临时仰拱台阶法施工盾构管片变形云图

3.4 地铁区间隧道支护结构受力

四种施工方式支护结构受力统计见表 3,台阶法初支应力明显较大,其他方法在施加临时仰拱和中隔壁后等型钢后,减小了初支因弯矩产生的应力,型钢受力(见图 13)在 47.0 MPa~60.1 MPa。台阶法和临时仰拱台阶法,将锁脚锚管焊接于钢支撑上协调受力,能充分利用锚管锁脚作用,而 CD 法和 CRD 法

的中隔壁分担了上部初支承受荷载,锁脚作用变弱。

表 3 支护结构最大受力统计表

方案	初支应力 /MPa	型钢应力 /MPa	锁脚锚管轴力/kN
台阶法	11.6	—	56.5
临时仰拱台阶法	7.3	60.1	51.8
CRD 法	5.3	72.0	23.9
CD 法	8.8	47.0	27.3

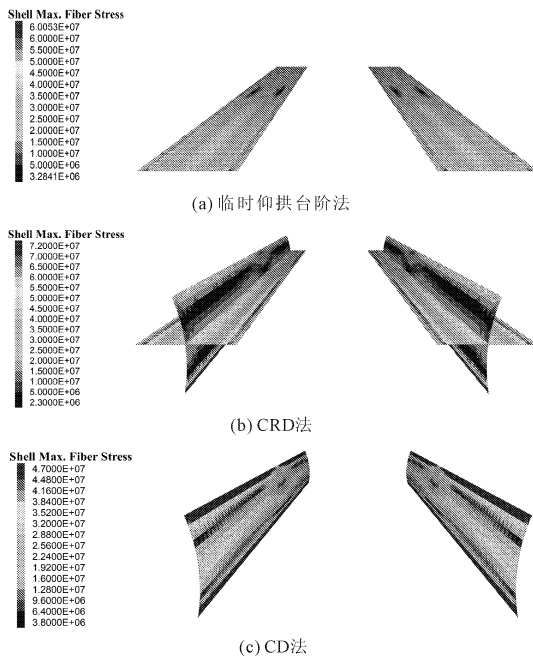


图 13 地铁双区间隧道钢支撑结构应力

3.5 施工方法比选分析

钟明文等^[15]研究表明隧道施工产生的围岩塑性区主要集中在拱脚处,在拱脚附近需要加长锚杆的长度,可以保证隧道围岩的稳定性,本文数值计算结果反映了类似规律,在台阶法基础上设置临时仰拱和锁脚锚管后,不仅减小了初支因弯矩产生的应力,还能充分利用锚管的锁脚作用,能够较好的控制地层变形。台阶法拱顶变形量为 25.3 mm,与之相比,临时仰拱台阶法变形量会降低 22.3%,能控制围岩变形,保证隧道安全。而且,与 CD 法和 CRD 法相比^[16],临时仰拱台阶法施工更加灵活,能加快施工进度,降低造价。综合考虑,依托工程最终选用临时仰拱台阶法施工。

4 结论

以地铁 12 号线极小间距下穿京张高铁盾构隧道为工程背景,针对台阶法、临时仰拱台阶法、CRD 法以及 CD 法实施中地层变形、地表沉降规律以及盾构管片变形受力特征开展研究,结果表明:

(下转第 218 页)

- [2] 舒畅,王英珺,王月中.砂性土地层中盾构穿越高铁桥梁影响分析[J].常州工学院学报,2017,30(6):11-14.
- [3] 李吉林.地铁盾构下穿高速铁路桥梁结构安全性评估研究[J].高速铁路技术,2018,9(1):61-65,75.
- [4] 李波.地铁盾构施工与隔离桩施工对既有桥梁桩基影响的对比分析[J].中国水运,2014,14(3):275-277.
- [5] 吴义明.盾构下穿沪杭高铁高架桥设置围护桩的效果分析[J].城市轨道交通研究,2016,19(6):122-127.
- [6] 陈海丰,袁大军,王飞,等.软弱地层地铁盾构下穿高铁的安全控制技术研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):256-260.
- [7] 赵丽雅,许宏发,晋学辉,等.盾构隧道下穿铁路群的路基加固及沉降分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):85-90.
- [8] 杨俊,邵生俊.地铁盾构隧道穿越高架桥梁基的力学行为分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):190-194.
- [9] 高速铁路设计规范:TB 10621—2009[S].北京:中国铁道出版社,2009.
- [10] 铁路桥涵设计基本规范:TB 10002.1—2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.
- [11] 冷伍明,杨奇,聂如松,等.高速铁路桥梁桩基工后沉降组合预测研究[J].岩土力学,2011,32(11):3341-3348.

(上接第 175 页)

(1) 地铁区间施工拱顶和仰拱围岩变形最大,台阶法拱顶变形量为 25.3 mm,与之相比,临时仰拱台阶法降低 22.3%、CRD 法降低 45.0%、CD 法降低 25.4%。

(2) 地表最大沉降位于地铁双区间隧道中心截面,越靠近中心地层变形叠加效应越明显,距离超过 20 m 的地层主要受单线隧道施工影响,且变形大幅降低。

(3) 地铁施工引起盾构管片最大变形在双区间中心截面 ± 15 m 范围内,为减小盾构隧道变形,可局部加固距地铁区间较近 30 m 段管片。

(4) 在台阶法基础上设置临时仰拱后,不仅减小了初支因弯矩产生的应力,还能充分利用锚管的锁脚作用,能够较好的控制地层变形,综合考虑,依托工程最终选用临时仰拱台阶法施工。

参考文献:

- [1] 李志军,张建国.地铁盾构区间下穿机场跑道的影响控制[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):153-156.
- [2] 王霆,刘维宁,张成满,等.地铁车站浅埋暗挖法施工引起地表沉降规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(9):1855-1861.
- [3] 孙长军.北京地铁近接施工安全风险控制技术及應用研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [4] 陈菊.暗挖地铁区间施工对周边环境的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(1):230-235.
- [5] Porsani J L, Yang B R, Ramos F P, et al. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012,80(5):25-31.
- [6] 张成平,张顶立,吴介普,等.暗挖地铁车站下穿既有地铁隧道施工控制[J].中国铁道科学,2009,30(1):69-73.
- [7] 张士强.昆明地铁盾构下穿昆明火车站沉降控制施工参数研究[J].工程地质学报,2016,24(S1):514-518.
- [8] Leitner A, Herzfeld T, Nebois C, et al. The new line crossing U2/U5 of the vienna subway: das neue linienkreuz U2/U5 der Wiener U-Bahn[J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2017,10(4):395-405.
- [9] 姜洲,高广运,赵宏.地铁行车速度对盾构隧道运营沉降的影响分析[J].岩土力学,2015,36(11):3283-3292.
- [10] 王梦恕,张成平.城市地下工程建设的事故分析及控制对策[J].建筑科学与工程学报,2008,25(2):1-6.
- [11] 徐干成,李成学,王后裕,等.地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J].岩土力学,2009,30(S2):269-272.
- [12] 郭乐,杨新安,邱隽.盾构管片衬砌纵向非均质等效连续模型[J].城市轨道交通研究,2017,20(4):17-22.
- [13] Feng G, Hu S, Li Z, et al. Distribution of methane enrichment zone in abandoned coal mine and methane drainage by surface vertical boreholes: a case study from China[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016,34:767-778.
- [14] 刘娜,黄中峰,郑西贵.基于 FLAC(3D)的中空注浆锚索数值分析[J].煤矿安全,2016,47(6):194-197.
- [15] 钟明文,武松,邓琴,等.大断面小净距浅埋隧道围岩的屈服接近度分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):104-108.
- [16] 但路昭,陈伟,郭琼华.施工工法对下穿公路隧道的影响探究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):60-65.