

小净距平行盾构隧道施工先行隧道管片附加 应力监测研究

张明聚¹, 赵 明¹, 王鹏程², 贾大鹏², 刘 义¹, 杜永骁¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 中铁十二局集团有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 通过现场监测, 研究揭示小净距平行盾构隧道施工中后行隧道掘进引起的先行隧道管片附加应力的变化规律。介绍了管片附加应力测点布置及监测方法, 分析给出了管片附加应力动态变化规律, 研究了附加应力与后行隧道掘进距离的关系, 对管片附加应力的最大值和稳定值进行了统计分析。监测结果表明, 当后行隧道掘进到监测断面附近时, 附加应力有突变量, 水平直径处环向受到压力作用, 环向应力的量值比纵向应力大。以期能为评价小净距盾构隧道施工相互影响程度及该类盾构隧道设计、施工提供参考依据。

关键词: 盾构隧道; 小净距盾构掘进; 附加应力; 现场监测

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)11-2121-06

作者简介: 张明聚(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事城市地下工程方面的教学、科研和技术开发。E-mail: zhangmj@bjut.edu.cn。

Field tests and researches on secondary stresses of advanced tunnel segments during parallel shield tunnels driving in close proximity

ZHANG Ming-ju¹, ZHAO Ming¹, WANG Peng-cheng², JIA Da-peng², LIU Yi¹, DU Yong-xiao¹

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing

100124, China; 2. China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: The change rules of the secondary stresses of advanced tunnel segment induced by parallel shield tunnels driving in close proximity are studied by field tests. The layout of the measured points and the field test methods are introduced, and the change rules of the secondary stresses are analyzed. Furthermore, the relationship between the secondary stresses and the distance of the shield driving face to the measured section are studied. Statistical analyses of the maximum and the stabilized magnitudes of the secondary stresses are carried out. The results of the field tests show that there will be sharp change of the secondary stresses when the hind shield is driven to the measured section, the circumferential secondary stresses in the intersection of horizontal diameter with circumference of the tunnel will be laid, and the magnitudes of the circumferential secondary stresses will be greater than those of the longitudinal secondary stresses. The results may be applied to the quantitative assessment of the construction interaction of shield tunnels in close proximity and is regarded as references to the design and construction of this kind of shield tunnels.

Key words: shield tunnel; parallel shield tunnels driving in close proximity; secondary stress; field test

0 引言

地下铁道区间隧道通常设计为双孔并行隧道, 并且越来越多的采用盾构法施工。由于受周边地下建筑(构)筑物的影响, 或者满足线路规划设计的要求, 有时两条隧道的净距离小于规范限制的最小间距6 m^[1]。盾构在小净距条件下同向掘进时, 控制后行隧道施工对先行隧道的影响, 确保先行隧道的结构安全稳定, 是盾构设计施工必须解决的问题。

国内外学者对小净距盾构隧道施工相互影响问题十分关注, 并进行了理论分析、数值模拟、模型试验及施工监测研究。文献[2]研究了4条平行盾构隧道近距离掘进过程中围岩与隧道的相互作用及控制方法。文献[3]在总结日本盾构法隧道技术及现状中, 也对小

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678002)

收稿日期: 2012-01-06

净距隧道施工问题进行了阐述。在国内,曾小清等较早提出双线平行隧道施工相互影响问题,并进行了理论研究^[4]。姜忻良等采用有限元程序ABAQUS对近距离双线平行盾构掘进过程进行了动态模拟^[5]。方勇等采用三维有限元方法对平行盾构隧道施工进行模拟,分析新隧道动态掘进时既有隧道位移、变形和内力的变化规律^[6]。林志等对双线盾构隧道施工过程建立三维弹塑性有限元模型,对盾构法施工不同参数进行对比研究^[7]。陶连金等通过数值模拟研究盾构近接工程新建盾构隧道施工对已建盾构隧道纵向和横向变位、附加弯矩及轴力的影响规律^[8]。章慧健等针对小净距双孔盾构隧道中间夹岩的复杂三维受力状态,采用数值模拟和离心模型试验相结合的手段,对上下重叠和水平并行两类小净距隧道中间夹岩力学特征进行了研究^[9]。凌昊等采用离心模型试验方法,对双孔盾构隧道在不同相对位置情况下的力学行为进行了研究^[10]。何川等采用相似模型试验和三维有限元数值分析相结合的手段,对新建隧道施工所引起的已建平行隧道纵向变位、纵向附加轴力和弯矩、横向变形、横向附加轴力和弯矩进行了深入研究^[11]。邵华等通过实测数据对盾构近距离穿越扰动影响问题进行了定量分析^[12]。陈越峰等针对上海某地铁近距离三线并行盾构区间隧道的施工影响进行现场监测分析研究,总结归纳了盾构施工对周围深层土体水平位移、深层土体沉降、孔隙水压力的基本影响规律^[13]。综上所述,国内外学者对小净距盾构的研究从理论分析、数值模拟到模型试验、现场监测,逐步深入;所取得的成果无疑对设计、施工有很好的指导作用。但同时也可看出,理论分析、数值模拟及模型试验所得的结论往往是定性的,现场实测的案例及定量分析结论相对较少。

本文采用北京地铁10号线2期草(桥)—纪(家庙)区间小净距盾构隧道施工管片附加应力监测数据,分析后行隧道掘进过程中引起的先行隧道管片附加应力的变化规律及量值大小,以期能为评价小净距盾构隧道施工相互影响程度及该类盾构隧道设计、施工提供参考依据。

1 工程概况

北京地铁10号线2期草桥站—纪家庙站区间在里

表1 监测断面布置情况

Table 1 Layout of monitoring sections

编 号	I	II	III	IV	V	VI
里程	K38+803.24	K38+786.44	K38+755.24	K38+743.24	K38+725.24	K38+701.24
管片环数	85	99	125	135	150	170
净距/m	4.0	3.5	2.7	2.7	2.7	3.5

程K38+806处有一地热井(京热#89),在设计初期,计划移动地热井,但在后续施工中发现移动地热井的费用巨大。同时,并行的隧道两侧也受到建筑物限制。因此,只能通过采取缩小两隧道间距的措施进行平行隧道布设,在K38+678—K38+807.6范围内隧道净距小于4 m,最小间距为2.7 m。

小净距隧道区间埋深在13 m左右,地层自上而下为杂填土、粉土、粉细砂、卵石、圆砾、粉质黏土及新近沉积卵石层等,盾构穿越的土层主要为新近沉积卵石层。地下水位在盾构隧道底部以下,分布在卵石层中,静止水位埋深约24.70~26.60 m,对盾构施工没有影响。

采用海瑞克S399型圆形盾构,外径6.28 m,本体全长9.3 m,刀盘直径为6.28 m,每环排土量43~45 m³,总推力1000 kN×10~1200 kN×10,推进速度30~40 mm/min,上部土仓压力0.03~0.05 MPa,刀盘转速1.7~1.9 r/min,刀盘扭矩3000~3500 kN·m。盾构管片内径为5.4 m,管片厚度0.3 m,管片宽度1.2 m。衬砌环由1个封顶块、2个邻接块、3个标准块共6块管片组成。

在净距小于4 m地段,在左、右线盾构隧道外侧地层中每环打入9根3 m长的Φ42钢花管加固两条隧道之间的地层,注浆压力为2.2~2.5 bar,注浆量为5.5~6.0 m³。该区间平行隧道采用同向掘进,右线隧道先行,左线隧道后行,掘进面间距保持在200 m以上。在小净距段后行隧道掘进过程中,通过调整施工参数,保证盾构机均衡、匀速、稳定地进行掘进及管片拼装。

2 先行隧道管片附加应力动态监测方案

在右线盾构隧道的管片内表面布置6个附加应力监测断面,监测断面编号、里程及对应环数、隧道净距如表1所示。

每个监测断面在靠近左线的一侧的水平直径处、+45°直径处、-45°直径处布置附加应力监测点(图1),在I、II、VI断面布置环向附加应力测点,在III、IV、V断面既布置环向附加应力测点又布置了纵向附加应力测点,测点编号如表2所示。

本工程盾构管片附加应力采用YT-500D型振弦式表面应变计和YT-406A型频率读数仪进行监测,

表2 附加应力测点编号

Table 2 Serial numbers of monitoring points for secondary stresses

监测点位置及类型	监测断面					
	I	II	III	IV	V	VI
水平直径处	环向应力 σ_θ	H1-1	H2-1	H3-1	H4-1	H5-1
	纵向应力 σ_z	—	—	Z3-1	Z4-1	Z5-1
$+45^\circ$ 直径处	环向应力 σ_θ	H1-2	H2-2	H3-2	H4-2	H5-2
	纵向应力 σ_z	—	—	Z3-2	Z4-2	Z5-2
-45° 直径处	环向应力 σ_θ	H1-3	H2-3	H3-3	H4-3	H5-3
	纵向应力 σ_z	—	—	Z3-3	Z4-3	Z5-3

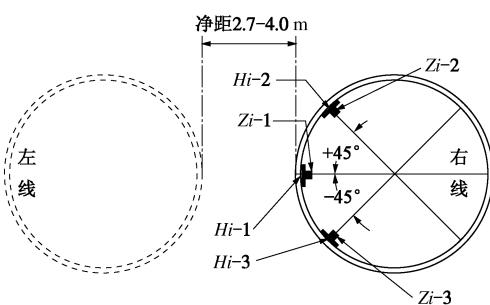


图1 应变计布置示意

Fig. 1 Layout of strain gauges

YT—500D型表面应变计的分辨率是 $\leq 0.02\%F\cdot S$ ，测量范围压缩 1800×10^{-6} 、拉伸 1200×10^{-6} 。在右线隧道内的管片上安装表面应变计，对后行左线隧道掘进施工中引起的附加应力进行动态监测。安装时，首先将需要黏贴的部位去毛打平，用乙炔烘烤干燥，将基座底部中间涂上AB胶，黏贴在预定位置，并均匀施加压力；然后，再在四周点上少许502胶水起快速黏接作用，施压的同时用胶带固定；最后，用免钉胶涂在每个基座的四周，以防止水的渗入。同时，将信号电缆线固定好，从隧道内的人行便桥下引到护栏上，避免导线及传感器被挂断破坏，同时也便于监测。

通过监测数据处理得到管片附加应变值，根据材料力学的虎克定律计算得到管片附加应力。管片混凝土强度为C50，计算中取弹性模量 $E = 3.45 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。

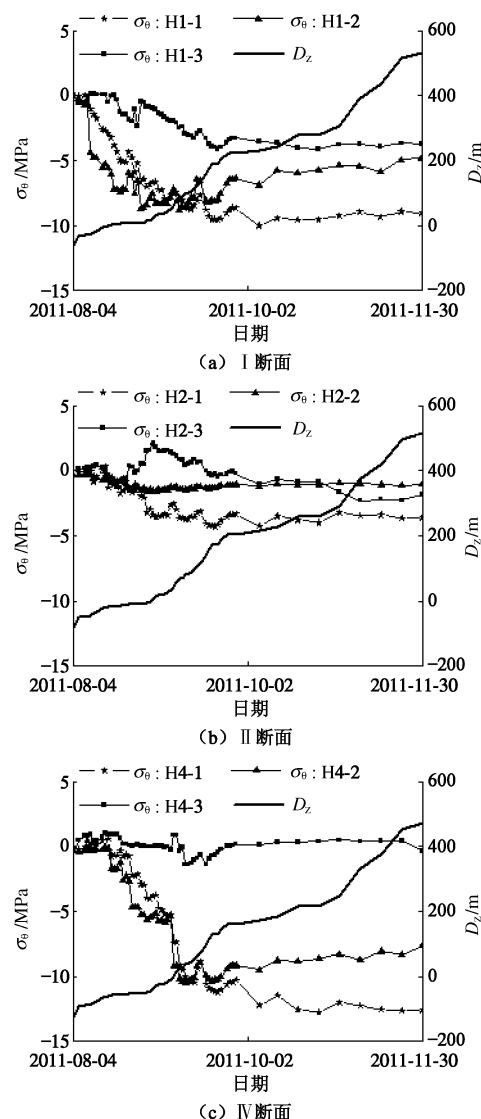
3 先行隧道管片附加应力动态变化规律

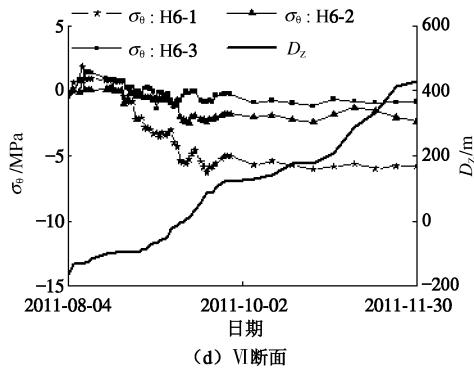
对于任意一个监测断面，设后行的左线盾构隧道距监测断面的距离为 D_z ，当后行左线隧道掘进到距监测断面200 m时开始监测，规定此时 $D_z = -200 \text{ m}$ ，当掘进到监测断面时 $D_z = 0 \text{ m}$ ，当掘进过监测断面200 m时 $D_z = 200 \text{ m}$ 。采用函数曲线图分别给出管片附加应力 σ_θ 、 σ_z 的历时变化和后行的左线盾构隧道距监测断面的距离 D_z 的历时变化，以反映小净距平行隧道施工中先行隧道管片附加应力的动态变化。

3.1 先行隧道管片环向附加应力 σ_θ 的历时变化

根据后行隧道掘进过程中先行隧道典型监测断面

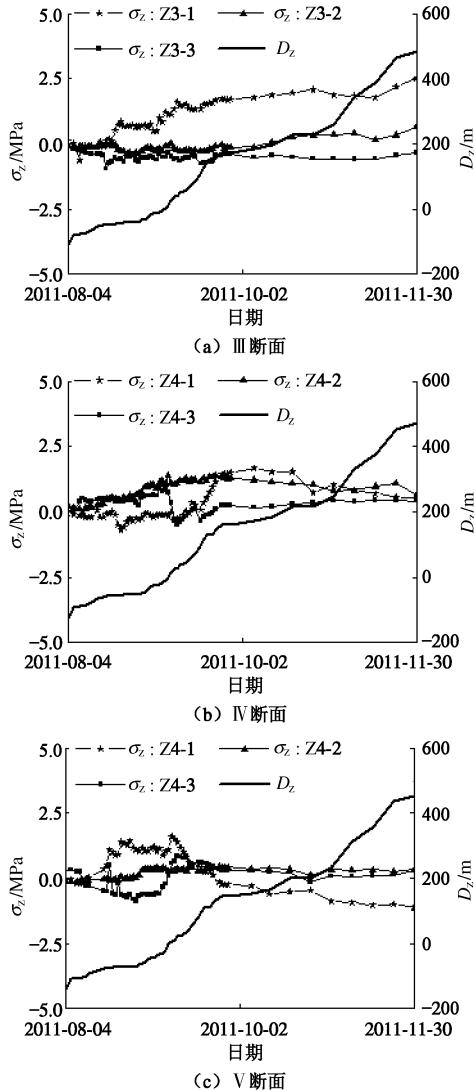
环向附加应力 σ_θ 的历时变化函数曲线（图2），可分析看出其动态变化规律主要有：①先行隧道的管片附加应力的 σ_θ 经历了微小变化、急剧变化、突变、稳定变化及稳定等5个阶段；②在水平直径处、 $+45^\circ$ 直径处，管片环向呈明显的受压变化趋势，同时水平直径处的环向附加压应力 σ_θ 较 $+45^\circ$ 直径处的大；③在 -45° 直径处，管片环向受压或受拉变化趋势不明显，受拉或受压量值都不大，反映出盾构底部管片受到的附加应力水平不高；④管片附加应力在后行的盾构隧道到达监测断面前有较大的变化，在到达监测断面时有明显的突变增加，在通过监测断面后趋于稳定。



图 2 环向附加应力 σ_0 历时变化曲线Fig. 2 Curves of duration of hoop secondary stress σ_0

3.2 先行隧道管片纵向附加应力 σ_z 历时变化

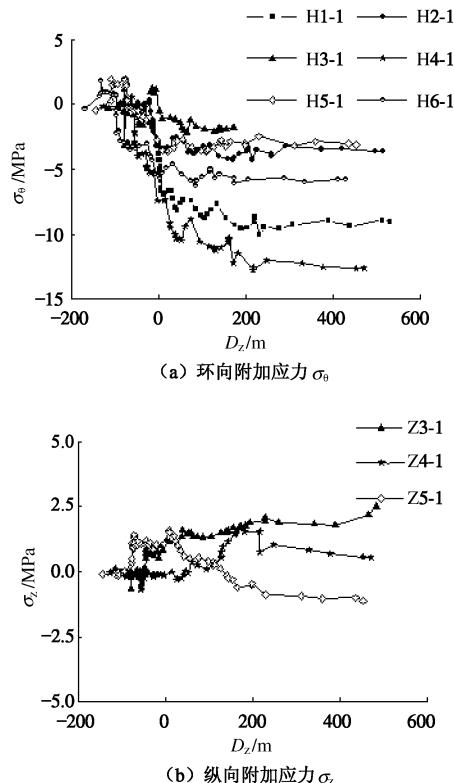
根据后行隧道掘进过程中先行隧道典型的监测断面纵向附加应力 σ_z 的历时变化函数曲线(图 3), 可分析看出其动态变化规律主要有: ①后行左线隧道掘进在右线隧道管片中引起有量值较小的纵向附加应力 σ_z , 有拉应力也有压应力; ②在后行隧道距离监测断面较远时, σ_z 变化微小; 在到达监测断面前后, σ_z 有较大的变化; 在通过监测断面后, σ_z 趋于稳定; ③在水平直径处、 $+45^\circ$ 直径处管片纵向有受拉趋势, 在 -45° 直径处管片纵向有受压趋势, 在水平直径处纵向附加应力 σ_z 的量值大, 变化也较大。

图 3 纵向附加应力 σ_z 历时变化曲线Fig. 3 Curves of duration of longitudinal secondary stress σ_z

面较远时, σ_z 变化微小; 在到达监测断面前后, σ_z 有较大的变化; 在通过监测断面后, σ_z 趋于稳定; ③在水平直径处、 $+45^\circ$ 直径处管片纵向有受拉趋势, 在 -45° 直径处管片纵向有受压趋势, 在水平直径处纵向附加应力 σ_z 的量值大, 变化也较大。

3.3 先行隧道管片附加应力 σ_0 , σ_z 与 D_z 关系分析

水平直径处盾构管片附加应力 σ_0 , σ_z 与 D_z 的关系如图 4 所示。

图 4 水平直径处附加应力与 D_z 关系曲线Fig. 4 Relation between D_z and secondary stresses at place of horizontal diameter

由图 4 分析可知: ①管片环向附加应力 σ_0 随 D_z 有很大的变化, 为压应力, 量值也较大, 管片纵向附加应力 σ_z 随 D_z 的变化较小, 量值也较小, 有受拉的趋势; ②当左线盾构隧道掘进面到达监测断面时, σ_0 有一个明显的突变, 而且各测点的变化趋势有较好的一致性(图 4 (a))。

$+45^\circ$ 直径处盾构管片附加应力 σ_0 , σ_z 与 D_z 的关系如图 5 所示。

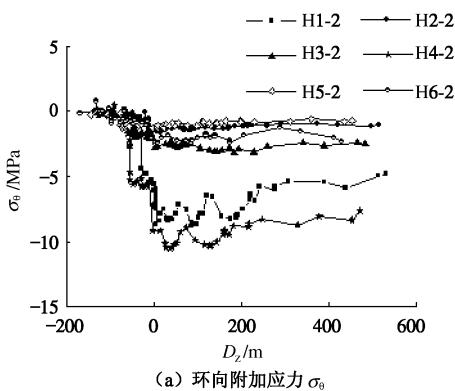
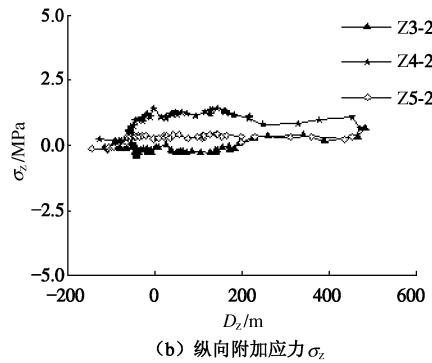
由图 5 可知, $+45^\circ$ 直径处盾构管片附加应力 σ_0 , σ_z 与 D_z 的关系有如下特点: ①第 I 、 IV 监测断面 σ_0 随 D_z 有很大的变化, 为压应力, 量值也较大, 其他监测断面管片环向附加应力 σ_0 随 D_z 的变化不大; 管片纵向附加应力 σ_z 随 D_z 的变化较小, 量值也较小, 有的受拉, 有的受压。②当左线盾构隧道掘进面到达监测断面时, 第 I 、 IV 监测断面管片环向附加

表3 管片附加应力 σ_0 统计分析

Table 3 Statistical analysis of segment secondary stresses

位置	σ_0 /MPa	监测断面					
		I	II	III	IV	V	VI
水平直径处	最大值	-10.01	-5.09	—	-12.77	-3.66	-6.27
	稳定值	-9.21	-3.58	—	-12.49	-2.94	-5.82
$+45^\circ$ 直径处	最大值	-8.81	-1.61	-3.21	-10.53	-1.30	-2.46
	稳定值	-6.11	-1.08	-2.72	-8.36	-0.75	-1.82
-45° 直径处	最大值	-4.12	-2.29	2.19	-1.40	2.63	1.41
	稳定值	-3.66	-1.11	1.24	0.30	2.43	-0.81

应力 σ_0 有明显的突变增量。

(a) 环向附加应力 σ_0 (b) 纵向附加应力 σ_z 图5 $+45^\circ$ 直径处附加应力与 D_z 关系曲线Fig. 5 Relation between D_z and secondary stresses at place of $+45^\circ$ diameter

-45° 直径处盾构管片附加应力 σ_0 , σ_z 与 D_z 的关系如图 6 所示。

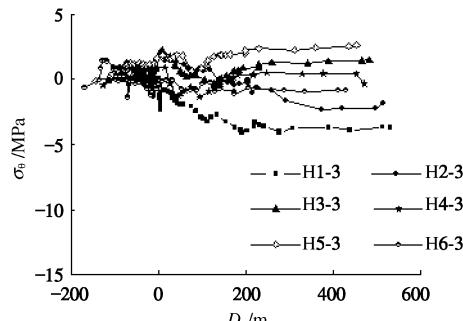
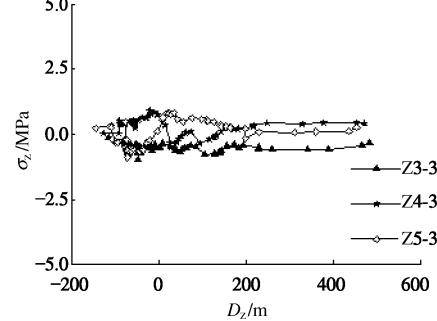
由图 6 可知, -45° 直径处盾构管片附加应力 σ_0 , σ_z 与 D_z 的关系是: 管片环向附加应力 σ_0 随 D_z 有变化, 但没有明显的突变, 有拉应力, 也有压应力, 压应力的量值较大, 拉应力量值较小; 管片纵向附加应力 σ_z 随 D_z 的变化较小, 量值也较小。

由图 4~6 还可看出, σ_0 , σ_z 与 D_z 的关系有如下共同特点: 不同位置处当后行隧道距监测断面较远 ($D_z < -100$ m 时, σ_0 , σ_z 变化微小; 在后行隧道到达监测断面附近时 ($D_z = 0$ m 左右), σ_0 , σ_z 有突变; 在后行的盾构隧道通过监测断面后 ($D_z > 100$ m), σ_0 , σ_z 均趋于稳定)。

3.4 先行隧道环向管片附加应力 σ_0 统计分析

由上分析可知, 先行隧道环向管片应力 σ_0 量值较

大, 以下对不同监测断面和测点位置, 分别提取其在历时变化中量值最大值及稳定值 (稳定值是在左线盾构隧道通过断面 200 m 后量值) 见表 3。

(a) 环向附加应力 σ_0 (b) 纵向附加应力 σ_z 图6 -45° 直径处附加应力与 D_z 关系曲线Fig. 6 Relation between D_z and secondary stresses at place of -45° diameter

由表 3 可知: ①水平直径处环向附加应力 σ_0 为压应力, 且量值较大, 最大值为 -12.77 MPa, 发生在第 IV 监测断面。② $+45^\circ$ 直径处环向附加应力 σ_0 也为压应力, 且量值较水平直径处小, 最大值为 -10.53 MPa, 发生在第 IV 监测断面。③ -45° 直径处环向附加应力 σ_0 有压应力, 也有拉应力, 量值最大值为 -4.12 MPa, 发生在第 I 监测断面。④不同测点环向管片附加应力的稳定值都较历时变化中的最大值有所降低。

4 结 论

在小净距平行隧道施工中, 后行隧道引起的先行隧道管片附加应力有 4 点变化规律。

(1) 不同位置受到的影响是不一样的, 水平直径处受到的附加应力最大, 其次是 $+45^\circ$ 直径处, 反映

出盾构中上部受到较大的附加应力；在-45° 直径处，管片环向受压或受拉变化趋势不明显，受拉或受压量值都不大，反映出盾构底部管片受到的附加应力水平不高。

(2) 不同类型的附加应力大小是不一样的，管片环向附加应力为拉应力，纵向附加应力有压应力也有拉应力；环向附加应力的量值比纵向附加应力的量值大。本工程环向附加应力最大量值为 12.77 MPa (压应力)，纵向附加应力量值最大值为 3.13 MPa (拉应力)，环向附加应力大约是纵向附加应力的 4 倍。

(3) 管片环向附加应力经历了较为明显的微小变化、急剧变化、突变、稳定变化及稳定等 5 个阶段，管片纵向附加应力历时变化较为平稳。

(4) 管片附加应力在后行的盾构隧道接近监测断面前有较大的变化，在到达监测断面时有明显的突变增加，在通过监测断面后趋于稳定。而且稳定值都较历时变化中的最大值有所降低。

参考文献：

- [1] TB100032—2004 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. (TB100032—2004 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [2] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289 - 304.
- [3] KOYAMA Yukinori. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 145 - 159.
- [4] 曾小清, 曹志远. 半解析数值法在地铁工程双线隧道分析中的应用[J]. 工程力学, 1998, 15(1): 46 - 52. (ZENG Xiao-qing, CAO Zhi-yuan. Application of semi-analytical numerical method to double-tube tunnel structures[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(1): 46-52. (in Chinese))
- [5] 姜忻良, 贾勇, 王涛. 近距离平行隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[J]. 天津大学学报, 2007, 40(7): 786 - 790. (JIANG Xin-liang, JIA Yong, WANG Tao. Numerical simulation of influence of shield tunneling on short-distance parallel existing tunnel[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(7): 786 - 790. (in Chinese))
- [6] 方勇, 何川. 平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1402 - 1406. (FANG Yong, HE Chuan. Numerical analysis of effects of parallel shield tunneling on existent tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1402 - 1406. (in Chinese))
- [7] 林志, 朱合华, 夏才初. 双线盾构隧道施工过程相互影响的数值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 85 - 89. (LIN Zhi, ZHU He-hua, XIA Cai-chu. Numerical modeling study on interaction between twin shields tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 85 - 89. (in Chinese))
- [8] 陶连金, 孙斌, 李晓霖. 超近距离双孔并行盾构施工的相互影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1856 - 1862. (TAO Lian-jin, SUN Bin, LI Xiao-lin. Interaction analysis of double holes extremely close approaching parallel shield tunnels construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1856 - 1862. (in Chinese))
- [9] 章慧健, 仇文革, 冯冀蒙. 小净距隧道夹岩力学特征分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 434 - 439. (ZHANG Hui-jian, QIU Wen-ge, FENG Ji-meng. Mechanical performance of shared rock of neighborhood tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 434 - 439. (in Chinese))
- [10] 凌昊, 仇文革, 孙兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2849 - 2853. (LING Hao, QIU Wen-ge, SUN Bing, et al. Study of adjacent construction of two tube shield tunnels by centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2849 - 2853. (in Chinese))
- [11] 何川, 苏宗贤, 曾东洋. 盾构隧道施工对已建平行隧道变形和附加内力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2063 - 2069. (HE Chuan, SU Zong-xian, ZENG Dong-yang. Research on influence of shield tunnel construction on deformation and secondary inner force of constructed parallel tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2063 - 2069. (in Chinese))
- [12] 邵华, 张子新. 盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 545 - 549. (SHAO Hua, ZHANG Zi-xin. Analysis of disturbing effect on running subway caused by adjacent shield-driven[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 545 - 549. (in Chinese))
- [13] 陈越峰, 张庆贺, 张颖, 等. 近距离三线并行盾构隧道施工实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 335 - 340. (CHEN Yue-feng, ZHANG Qing-he, ZHANG Ying, et al. In-situ monitoring and analyzing on construction of three closely spaced parallel pipe shield tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 335 - 340. (in Chinese))