文章编号:2096-5052(2026)03-0122-13　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.12

隧内结构施作时机对大直径盾构隧道横向力学性能影响研究

戴志成[1,2],李春林[3],张亮亮[1,2*],李佳林[4]

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014;
4. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为明确隧内结构施作时机对大直径盾构隧道横向力学性能的影响,以济南黄河隧道为工程背景,建立管片-隧内结构三维实体有限元模型,以管片椭圆度表征隧内结构施作时机,设置管片椭圆度达到 3.5‰、4.0‰、4.5‰和 5.0‰时施作隧内结构的 4 种工况,对管片、隧内结构及螺栓的变形与受力特征进行对比分析。结果表明:隧内结构施作越早,管片衬砌的变形量和 Mises 应力越小,管片结构安全性越高;隧内结构过早施作会使其自身分担更多荷载,使车道板变形增大;隧内结构施作越早,螺栓应力分布越均匀且整体应力水平越低;隧内结构对管片环的约束作用在拱腰位置发挥了更大的作用,不同施作时机时管片环拱腰位置变形量基本不变。

关键词:盾构隧道;有限元模型;管片衬砌;隧内结构;结构力学性能
中图分类号:U45;TU452　　**文献标志码**:A

引用格式:戴志成,李春林,张亮亮,等. 隧内结构施作时机对大直径盾构隧道横向力学性能影响研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):122-134. Dai Zhicheng, Li Chunlin, Zhang Liangliang, et al. Study on the effect of internal structure construction time on the transverse mechanical properties of large diameter shield tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):122-134.

Study on the effect of internal structure construction time on the transverse mechanical properties of large diameter shield tunnel

Dai Zhicheng[1,2], Li Chunlin[3], Zhang Liangliang[1,2*], Li Jialin[4]

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;
3. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
4. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: This study was conducted to clarify the effect of the construction timing of the internal structure on the transverse mechanical performance of large-diameter shield tunnels. A three-dimensional solid finite element model of the segmental lining and internal structure was established based on the Jinan Yellow River Tunnel. The ellipticity of the segmental lining was used to characterize the construction timing of the internal structure, and four cases were considered

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-06-01;**接受日期**:2026-06-09;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003);中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]-01,2024-A01)
第一作者简介:戴志成(1995—),男,江西抚州人,工程师,硕士,主要研究方向为岩土与隧道工程。
E-mail:641948023@qq.com
*通信作者简介**:张亮亮(1980—),男,安徽阜阳人,正高级工程师,博士,主要研究方向为岩土与隧道工程。
E-mail:25010849@qq.com

in which the internal structure was constructed when the segmental ellipticity reached 3.5‰, 4.0‰, 4.5‰, and 5.0‰. The deformation and mechanical responses of the segments, internal structure, and bolts were compared. The results showed that less deformation and lower von Mises stress were observed in the segmental lining when the internal structure was constructed earlier, and the structural safety was thereby improved. When the internal structure was constructed too early, a larger portion of the load was carried by the internal structure, and greater deformation of the carriageway slab was produced. When the internal structure was constructed earlier, a more uniform distribution of bolt stress was obtained, and the level of bolt stress was reduced. The restraining effect of the internal structure on the segment ring was most pronounced at the arch waist; the deformation at the arch waist of the segment ring remained essentially unchanged regardless of the construction timing.

Keywords: shield-driven tunnel; finite element model; segmental lining; in-tunnel structures; structural mechanical properties

Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-06-01; **Accepted**: 2026-06-09; **Published**: 2026-09-20

0　引言

随着我国城镇化进程的加速,公共交通需求持续增长,地面交通运力已难以满足日益复杂的出行需求,地下隧道工程由此成为缓解城市交通压力的关键途径[1-3]。尽管地下空间资源相对丰富,但适于隧道建设的优质区段仍较为稀缺,因此大断面复合式隧道已成为水下隧道工程的重要发展方向,其中又以公轨合建隧道最为常见[4]。该类隧道通过整合公路与轨道交通功能,显著提升了城市跨江交通效率,然而其大断面特征及复杂的隧内结构布局对结构力学性能提出了新的挑战。相较于传统小断面隧道,复合式隧内结构对盾构隧道横向力学行为的影响机制亟待深入探究。

围绕隧内结构的构造形式与连接方式,已有研究表明,不同连接及约束条件会显著改变管片-隧内结构体系的传力路径和局部受力。刘念等[5]、温竹茵等[6]比较多种上层车道板与管片连接方式,指出不同方案在结构受力与节点构造方面各具优劣,需要结合工程条件进行选型;崔佳等[7]研究发现,隧内结构约束形式会改变盾构管片的受力特征;王均勇等[8]进一步表明,不同隧内结构类型均可提高盾构隧道的纵向刚度,但其刚度增强和受力改善程度存在差异;潘文韬等[9]指出,不同隧内结构形式和拼装方式会引起列车振动响应差异,说明隧内结构形式对隧道动力响应同样具有重要影响。

在运营期及极端荷载作用方面,隧内结构对盾构隧道的刚度、局部内力与损伤演化具有明显影响。薛光桥等[10]指出,双层公路隧道隧内结构能够增大横向刚度并减小横向变形,施作上层板时增强效果更显著,同时可降低隧道局部峰值弯矩和峰值轴力;禹海涛等[11]对比发现,设计地震作用下隧内结构可明显改善管片抗震性能,且现浇形式优于预制形式,而在罕遇地震作用下现浇形式可能更为不利;徐秀峰等[12]、王程等[13]和王明年等[14]分别从邻近开挖卸载、地震与火灾作用出发,揭示不同外部荷载会改变管片与隧内结构的变形和内力分布;何应道等[15]发现,弹性阶段提高隧内结构与管片的连接刚度有助于减小隧道变形,但结构进入塑性阶段后过强约束可能加剧变形,隧内结构同时可降低局部内力以及施作区域内管片的峰值应力和损伤;王伟等[16]指出,π 形隧内结构可显著减小隧道底部管片张开量,但会增加顶部管片的受拉损伤;杨文波等[17]和 Guo 等[18]表明,列车振动荷载下隧道及隧内结构不同部位的动力响应存在明显差异;李春林等[19]进一步指出,循环荷载作用下管片与隧内结构会发生塑性应变累积,隧内结构局部区域更易出现应力集中和开裂;朱伟东[20]和陈孝华等[21]则分别从施工车辆荷载与河床冲淤作用出发,揭示施工期及长期运营条件下隧内结构的变形和受力响应。

在承载能力与施工期力学效应方面,黎晨等[22]通过荷载试验验证内部双层预制车道结构的承载能力;赵延喜等[23]通过有限元分析识别隧内结构的危险截面并评价了各部位承载裕度;鲁选一等[24]指出,考虑公轨合建型内部结构后,通缝与错缝拼装隧道纵向刚度有效率分别提高 21.4% ~ 61.9% 和 14.3% ~ 35.3%,加载环最大 Mises 应力分别降低 61.3% 和 69.2%,表明隧内结构能够显著提高纵向刚度并分担管片荷载;张亮亮等[25]通过现场监测与数值分析揭示了施工期内部箱涵的变形特征;Zhu 等[26]、Liu 等[27]、Li 等[28]和 Wang 等[29]分别从内力解析、二次衬砌类型、加固方式及厚度不足等方面研究双层衬砌,结果表明这些因素会显著影响结构承载能力、变形及损伤演化。综上,现有研究主要集中

于隧内结构形式、连接方式以及运营或特殊荷载条件下的力学响应,而针对隧内结构在不同管片变形阶段施作所引起的横向力学差异,仍缺乏系统研究。

目前,众多学者对盾构隧道隧内结构开展了大量的研究,但大多数研究集中于讨论隧内结构形式对隧道管片安全性能的影响,鲜有考虑隧内结构施作时机对盾构隧道安全性的研究。在工程实际施工过程中,盾构隧道隧内结构通常于管片成环后一定时间才进行施作,这段时间内仅由管片单独承受外界荷载。具体的施作时机会直接影响到管片这一阶段的变形和受力情况,直接影响隧道结构的机械性能和承载能力。因此对于不同隧内结构施作时机的研究至关重要。

为能清晰研究隧内结构施作时机对公轨合建盾构隧道横向力学性能的影响,本研究依托于济南市济泺路穿黄隧道工程,采用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立隧内结构在盾构隧道成环后不同时机进行施作的三维精细化数值计算模型,开展隧内结构施作时机对公轨合建盾构隧道横向力学性能影响研究。

1 工程概述

1.1 工程背景

济南市济泺路穿黄隧道工程(又称济南黄河隧道)位于济南市天桥区,起点位于黄河南岸老城济泺路与泺口南路交叉口以南约 300 m,向北依次下穿二环北路、绕城北高速高架、南岸大堤、黄河、北岸大堤,鹊山村,后接现状国道 G309。隧道位于济南城市的中轴线上,沿城市既有泺口黄河浮桥的位置穿越下游的黄河,距上游的济南建邦黄河公路大桥约 5.3 km。

隧道全长 4.76 km,其中盾构段长 2 516 m。按照文献[30]对于隧道直径的划分标准,在公路水下隧道领域,直径大于 10 m 即被明确归类为大直径。穿黄隧道外径 15.2 m,内径 13.9 m,是典型的大直径水下盾构隧道。盾构段埋深 26.30~54.60 m,穿越地层以第四系粉质黏土为主,多夹砂层及钙质结核层,其分布不均匀,局部富集成层。隧址区地貌形态为冲积平原,地势较为平坦。

1.2 隧道结构

隧道管片厚度 0.65 m,幅宽 2 m,采用 C60 混凝土,每环衬砌为“7(标准块 B)+2(邻接块 L)+1(封顶块 F)”的分块方式,其中封顶块圆心角为 12.87°,标准块与邻接块圆心角为 38.57°。隧道采用错缝拼装的方式,采用 8.8 级 M36 斜螺栓进行连接,其中一环管片由 30 颗环向螺栓连接而成环,环与环之间由 28 颗纵向螺栓连接。隧道横断面分块方式如图 1 所示。

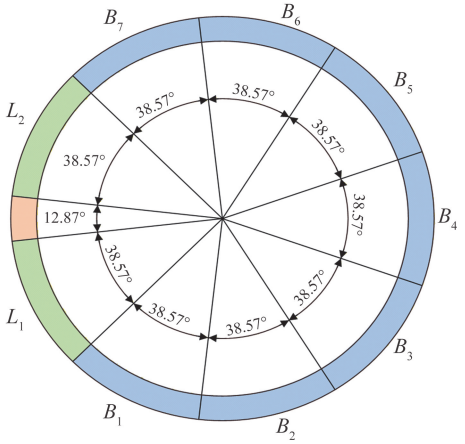


图 1 隧道横断面示意图

Fig.1 Schematic diagram of tunnel cross-section

为提高隧道断面利用率,划分隧道断面不同功能区域,隧道设置双层形式的隧内结构。隧内结构置于盾构隧道管片下部分,将管片分为 4 个不同的功能区域。隧内结构由两侧护柱、中部两根立柱、横隔板和弧形护板组成。中部立柱间距 5 m,所形成的空间为轨道交通区域,两侧则为排烟道及线路管廊、疏散通道等功能通道。横隔板上部空间为公路车道区域。立柱与横隔板厚度分别为 0.30、0.65 m,两侧护柱为弧形结构,紧贴于管片衬砌表面。隧道隧内结构横断面形式如图 2 所示。

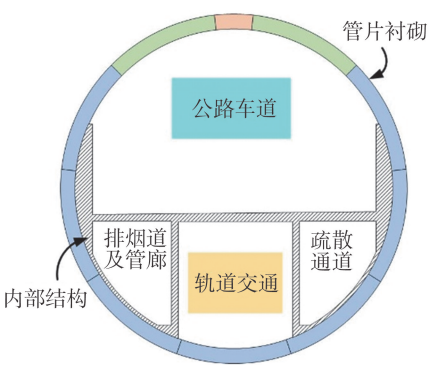


图 2 隧内结构示意图

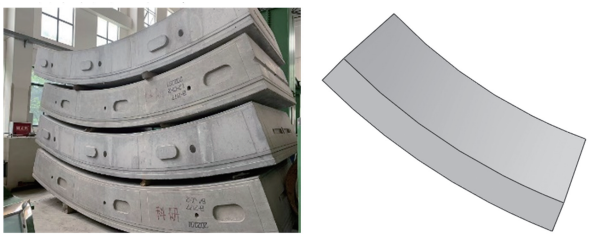
Fig.2 Internal structure diagram

2 数值模型概述

2.1 计算假定

实际工程中,盾构隧道管片存在大量的止水橡胶槽、凹凸榫、螺栓孔、手孔等细部构造,若在有限元

软件中建立上述细部结构,会导致模型计算速度过慢甚至出现无法收敛的现象,管片模型如图 3 所示。为提升计算效率,本模型忽略上述构造,将管片视为规整的圆弧结构,如图 3(b)所示。同时将模型土体进行均一化处理,所有土体为同一参数。



(a) 实际盾构管片　　(b) 简化后的管片模型

图 3　管片模型

Fig.3　Segment model

2.2　模型本构及参数

2.2.1　管片及隧内结构

由于盾构隧道在受力后的横向变形主要为管片块与块之间接缝张开所致,相较于此,盾构管片主体自身变形值很小,故在本模型中管片与隧内结构均采用弹性本构。相关参数参考文献[31]设置,如表 1 所示。

表 1 混凝土参数

Table 1　Concrete parameters

类别	标号	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
管片	C60	36.0	0.2	2 400
隧内结构	C40	32.5	0.2	2 400

2.2.2　螺栓及钢筋

济南黄河隧道管片螺栓为 8.8 级的 M36 高强螺栓,钢筋为 HRB400E。为简化计算与加快收敛,螺栓和钢筋均采用双线性应力-应变本构关系,即当螺栓和钢筋的应力达到屈服应力之后,其弹性模量变为原本的 1/100。螺栓具体参数参考文献[32]设置,如表 2 所示。隧道含 2 种类型钢筋,分别为管片钢筋、隧内结构钢筋,具体参数参考文献[33]设置,如表 3 所示。

表 2　螺栓参数

Table 2　Bolt parameters

长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
750	36	210	0.3	7 900

表 3　钢筋参数

Table 3　Reinforcement parameters

类型	直径/mm	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
1	22	210	0.3	7 900
2	20	210	0.3	7 900

2.2.3　土体

隧址区地层以粉质黏土为主。本数值模型采用均一地层,土体本构采用 Mohr-Coulomb 模型。根据工程地质报告,土体参数如表 4 所示。

表 4　土体参数

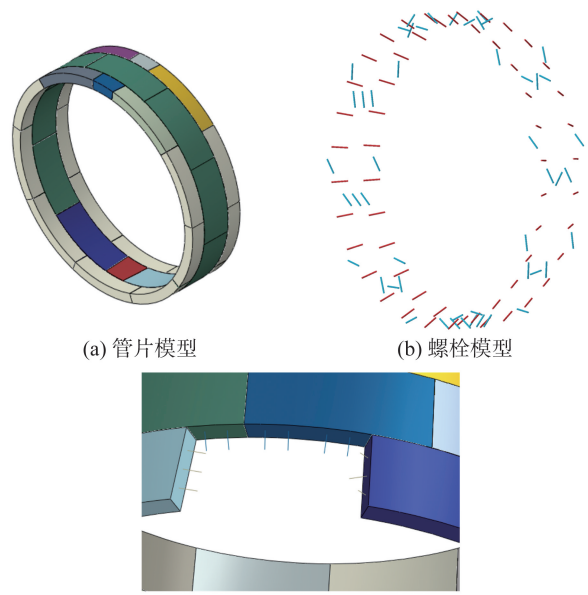
Table 4　Soil parameters

弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
15	0.3	1 800	13	8

2.3　模型建立

2.3.1　管片结构与螺栓建立

管片模型共建立 3 环模型,管片及螺栓模型如图 4 所示。其中边环取幅宽为 1 m 作为边界,中间环幅宽为 2 m。模型采用 180°错缝角度拼装,如图 4(a)所示。管片采用 C3D8R 单元。螺栓采用 B31 梁单元建立,如 4(b)所示。螺栓采用 EMBED 的相互作用将两端与管片连接,如 4(c)所示。



(a) 管片模型　　(b) 螺栓模型

(c) 管片螺栓连接

图 4　管片及螺栓模型

Fig.4　Segment and bolt model

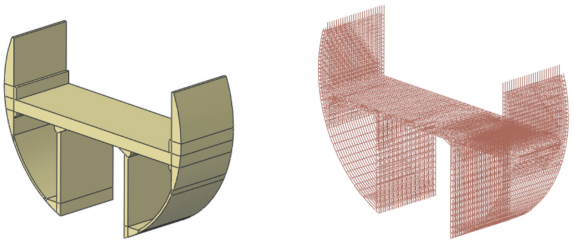
2.3.2　隧内结构建立

为简化计算条件,隧内结构在 ABAQUS 中采用整体形式进行建模,即将上层车道板、下层箱涵视为一个整体,不考虑隧内结构中的螺栓作用,简化计算过程,缩短计算时间。隧内结构及其内部钢筋模型如图 5 所示。

2.3.3　土体建立

由圣维南原理可知,隧道开挖对开挖周围岩土体的影响较大,而对距离开挖点越远的土体影响越小,对约 3~5 倍洞径外土体几乎无影响,因此建立模型时仅建立有限的土体即可。本模型土体四周边

界土体大小为长×宽=60 m×60 m,厚度为 4 m,隧道模型位于土体正中心,土体建模如图 6 所示。



(a) 隧内结构 (b) 钢筋

图 5 隧内结构及钢筋模型

Fig.5 Internal structure and reinforcement model

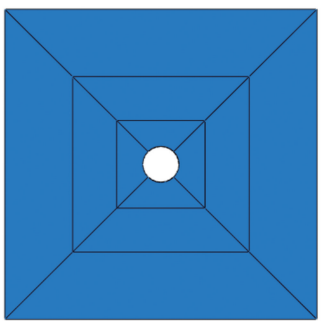


图 6 土体模型

Fig.6 Soil model

2.4 相互作用

结构部分的相互作用主要分为盾构隧道管片与管片之间、盾构管片与隧内结构之间、隧内结构与隧内结构之间的 3 种相互作用的设置。3 种情况均采用了面-面接触,且由于接触面之间无浆液连接,故需将相互作用设置为“允许接触后分离”。在接触面的切向设置“罚”函数,以代表混凝土与混凝土表面的摩擦作用。模型中混凝土间摩擦系数取值为0.5[34]。在接触面的法向设置为“硬”接触,防止面-面接触时两接触面相互穿透。隧道与土体也采用面-面接触,摩擦系数取值为 0.4[35]。

2.5 边界条件与加载

试验参考文献[36]采用平面应变理论的荷载-结构模型,模拟了土体平放至加载台上、对土体上下两侧的位移条件施加约束、对土体四周施加既定荷载的模型试验,该模型不考虑土体及盾构隧道自身重力对横向力学性能的影响。

模型中对土体、管片及隧内结构前后均施加法向约束,即将其视为平面应变模型。由于采用面荷载形式进行加载会使得在隧道平面没有位移约束,导致土体发生整体滑移现象。故模型加载方式采用位移控制法,即对土体 4 个侧面均耦合至一个参考点,在加载时对参考点施加一定值的位移,以代替面荷载形式进行加载。其中土体上下面的位移值为 515 mm,侧面位移值为上下面位移值的一半,用以模拟土侧压力系数的作用。试验加载如图 7 所示。

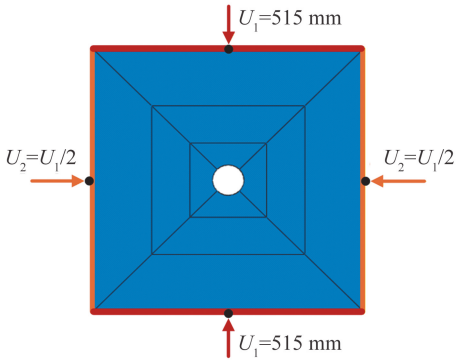


图 7 模型加载示意图

Fig.7 Model loading diagram

2.6 加载工况

由于隧内结构施作时机的时间参数在模型设置中并不容易体现,且时间指标在实际工程中意义不大,故在本模型中选择盾构隧道椭圆度作为隧内结构施作时机的指标,即假定隧内结构在不同时机施作等同于隧内结构在隧道变形至不同椭圆度后施作。椭圆度分析不仅是隧道几何形态的检测,更是综合评价施工质量、结构安全、地层稳定性及运营适应性的核心手段。由于文献[37]中规定,在盾构隧道竣工验收时,衬砌圆环变形收敛偏差在± 6 ‰内,因此本模型通过调整隧内结构在模型所承受荷载的占比,来实现调整隧内结构施作时机的目的。施作时机标准以盾构管片椭圆度达到固定值为准。本研究设置 4 种加载工况,分别在管片椭圆度达到 3.5‰、4.0‰、4.5‰和 5.0‰时施作隧内结构。盾构隧道椭圆度

$$T=\frac{a-b}{D}, \tag{1}$$

式中:T 为管片椭圆度;a 为管片断面长半轴,mm;b 为管片断面短半轴,mm;D 为管片外径,mm。

3 结果分析

3.1 管片变形分析

3.1.1 椭圆度

选择中间环管片对隧道进行变形分析。提取不同施作时机的管片拱顶、拱底位置竖向变形及拱腰位置侧向变形,计算管片结构椭圆度绘制如图 8 所示曲线。

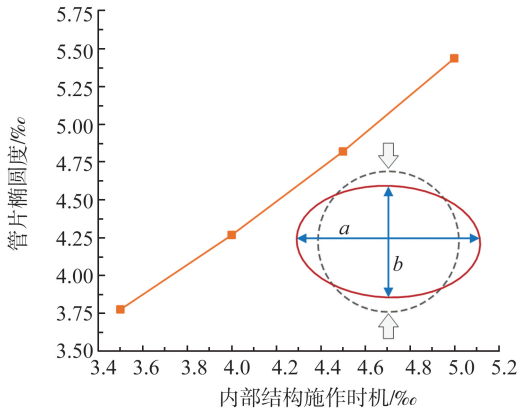


图 8　管片环椭圆度变化图

Fig.8　Ellipticity variation diagram of segmental ring

由图 8 可知:随着隧内结构施作时机的不断推迟,加载结束后盾构管片的最终椭圆度在不断增大,将隧内结构从管片椭圆度为 3.5 ‰时施作延后至 5 ‰时施作,会使得盾构管片最终椭圆度从 3.78 ‰增大至 5.43 ‰,增幅达 43.65%。可以见得不同时机施作隧内结构会显著影响盾构隧道管片结构在荷载作用下的收敛变形,隧内结构施作越早,隧内结构发挥作用的时间便越早,越能有效的降低管片的最终变形。

隧内结构作为隧道横向支撑体系的关键组成部分,如图 9 所示。提前施作可更早形成“管片-隧内结构”协同受力体系,有效约束管片的径向位移,进而提升隧道整体横向刚度。进一步表明隧内结构的施作时机对盾构隧道横向变形情况及横向刚度的影响是非常大的。

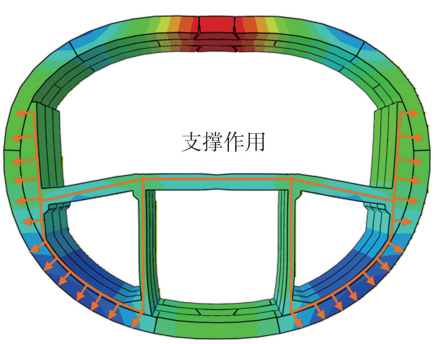


图 9　隧内结构作用机理

Fig.9　Internal structure mechanism of action

可见在隧道施工时越早的进行隧内结构的施作,隧内结构对盾构隧道横向变形的抑制作用也会越明显,对降低结构变形更有利。因此,在盾构隧道施工过程中,合理提前隧内结构施作时机,是控制隧道横向变形、保障结构长期稳定性的关键技术措施之一。

3.1.2　径向变形

不同施作时机下管片环径向变形如图 10 所示。由图 10 可知:不同施作时机的工况下,管片具有相同变形特征:管片顶部和底部向内收敛,管片左右拱腰向外扩张,管片结构整体呈现横鸭蛋状。观察每种工况下管片环径向变形分布,发现其径向位移关于竖向界面呈几乎对称状分布,局部不对称现象源于螺栓布置形式和封顶块影响。左右拱腰位置处径向位移大小相近,但管片顶部径向位移较底部更大,施作时机从 3.5‰到 5.0‰时,管片顶部径向位移分别比底部大 51.14%、37.21%、28.49%。这是由于隧内结构的构造形式导致。隧内结构放置于管片底部,底部管片直接受到隧内结构的约束作用,因此相较于管片顶部,底部管片的变形更低,隧内结构对管片的约束作用在底部发挥了更大的作用。

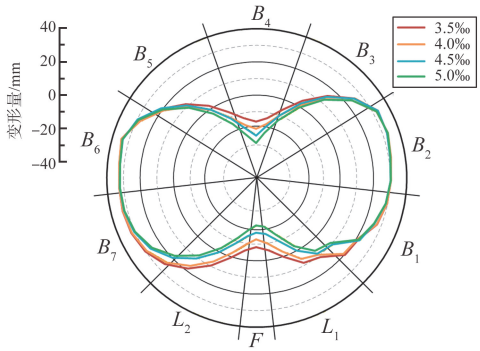


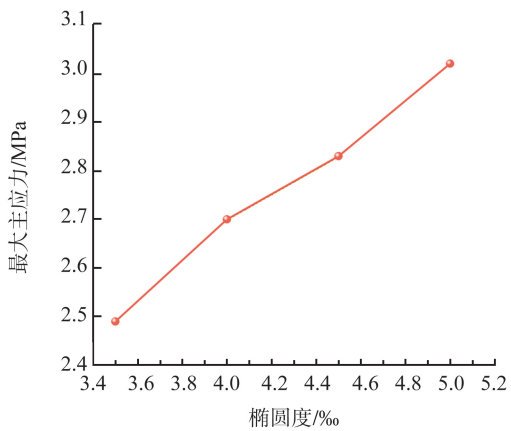
图 10　管片变形雷达图

Fig.10　Radar image of segmental ring deformation

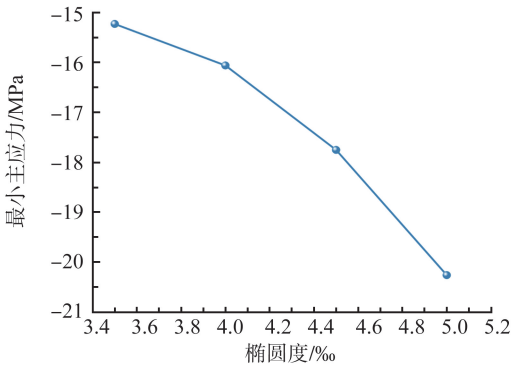
随着隧内结构施作时机推迟,管片变形量明显增大,尤其以拱顶、拱底位置的竖向变形量最为明显。当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时,管片顶部径向位移分别为 16.23、19.67、23.52、27.82 mm。而在隧内结构与管片相连位置,即左右拱腰位置,不同施作时机下管片径向变形量相近。可以从侧面反映出隧内结构在隧道变形承载能力中所起到的重要作用。

3.2　管片受力分析

选择中间环管片对隧道进行应力分析,提取管片环最大主应力与最小主应力,绘制其随隧内结构施作时机变化的曲线图,如图 11 所示。



(a) 最大主应力变化图



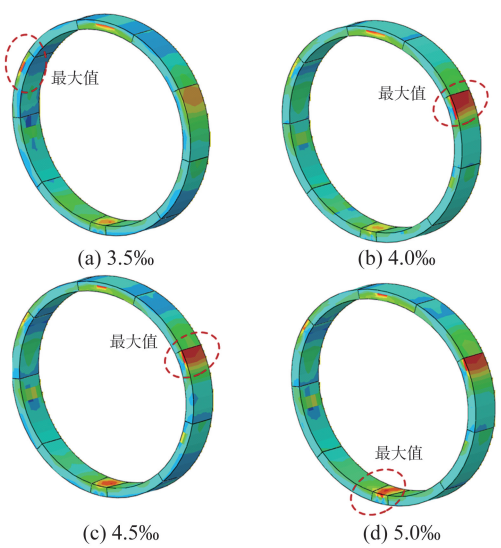
(b) 最小主应力变化图

图 11 管片应力变化图

Fig.11 Stress variation diagram of segmental ring

由图 11 可知:随着隧内结构的不断延迟施作,管片的最大主应力和最小主应力绝对值皆逐渐增大,施作时机为 3.5‰、4.0‰、4.5‰、5.0‰时对应的管片最大主应力分别为 2.49、2.70、2.83 和 3.02 MPa,最小主应力分别为 −15.23、−16.06、−17.75和−20.26 MPa。每推迟 0.5‰椭圆度施作隧内结构,隧内结构最大主应力和最小主应力便比前一施作时机大 8.43%、4.81%、6.71% 和 5.45%、10.52%、14.14%。分析应力变化曲线发现隧内结构可以分担部分盾构管片受到的荷载,隧内结构越早施加,其承担的外界荷载就越多,管片也可以愈加趋近于安全的区间。从具体数据来看,隧内结构不同的施作时机对管片的内力大小影响较大,与 5.0‰工况相比,3.5‰时施作可使最大主应力和最小主应力绝对值分别降低 17.55%和 24.83%。

观察管片受力云图如图 12 和图 13 所示,最大主应力分布不均。

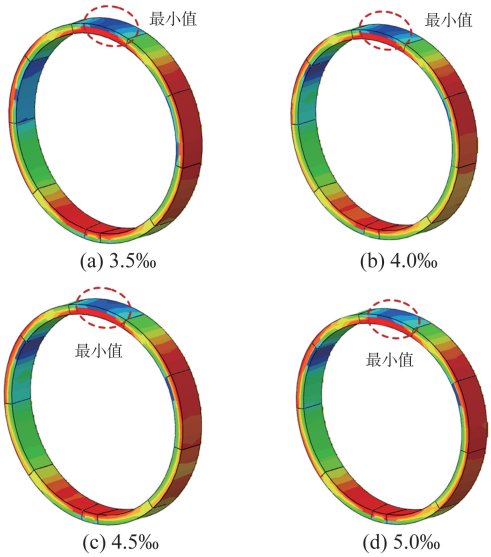


(a) 3.5‰ (b) 4.0‰

(c) 4.5‰ (d) 5.0‰

图 12 不同施作时机管片最大主应力云图

Fig.12 Cloud chart of maximum principal stress of segments at different construction stages



(a) 3.5‰ (b) 4.0‰

(c) 4.5‰ (d) 5.0‰

图 13 不同施作时机管片最小主应力云图

Fig.13 Cloud chart of minimum principal stress of segments at different construction stages

在管片外侧拱腰处以及内侧拱底处出现较大的应力分布,此位置位于隧内结构管片的连接位置以及管片纵向接缝位置。最小主应力同样存在分布不均的情况,最小主应力最大位置位于管片外侧拱顶位置,在外侧拱腰和内衬拱顶位置相对较小。可见管片拱腰和拱顶位置是管片受力较大的区域。拱腰以及管片接缝位置是管片结构的薄弱环节,在设计时可针对此特性进行结构加强,同时在隧道完成施工后的运营期需着重注意管片拱腰位置的变形以及接缝位置的管片状态。

观察管片结构 Mises 应力分布云图,发现管片结构存在部分应力集中现象,如图 14 所示。在管片顶部附近和接缝部位应力会略大于其余位置,除此之外,在管片拱腰上侧同样出现应力集中区域。这是由于管片底部和拱腰下侧与隧内结构连接一体,隧内结构的存在分担了管片部分受力,而管片拱腰上侧未有隧内结构的加强,因此会出现部分应力集中现象。从 Mises 应力大小来看,管片应力集中现象不明显。但随着隧内结构施作时机的不断提前,在隧内结构与盾构管片的连接位置的应力集中现象会逐渐变得更加明显,最大 Mises 应力会变得更高,且应力集中区域的面积也不断扩大,使得管片本身较脆弱的位置变得更加危险。随着施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时,管片结构最大 Mises 应力从10.10 MPa上升至 17.67 MPa,Mises 应力增大了74.95%。这是因为更早的隧内结构施作使得隧内结构同管片一起承受荷载,隧内结构的存在分担了部分管片所承受的内力,这可以有效的降低盾构管片的应力水平,使管片结构更加安全,提高管片的承载能力。

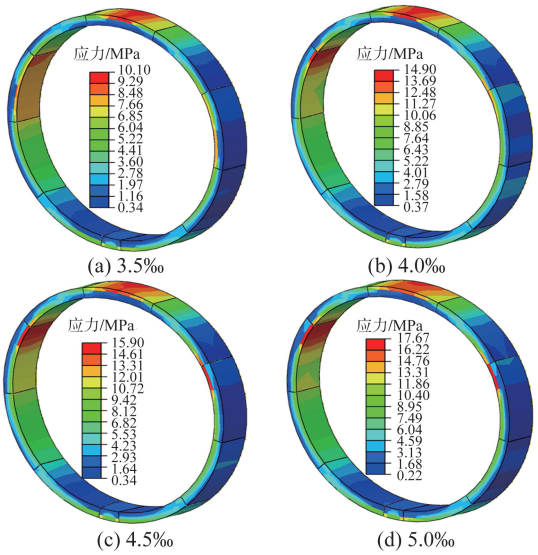


图 14　管片应力集中区域

Fig.14　Stress concentration area of segment ring

3.3　隧内结构位移分析

选择中间环隧内结构作为分析对象。由于管片受荷变形模式为上下收敛,左右扩张的趋势。左右扩张使得隧内结构受到植筋的拉力作用,上下收敛使得隧内结构底部向上移动,引起隧内结构中柱对车道板产生向上的推力。由于管片的限制,隧内结构作用两侧会在和管片接触后引起向下的约束。因此,隧内结构的在综合作用下会呈现出弯曲变形特征,如图 15 所示。

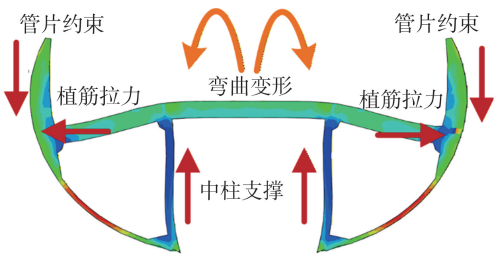


图 15　隧内结构变形特征

Fig.15　Deformation characteristics of internal structure

隧内结构的弯曲变形导致车道板出现两端下沉中间凸起的变形模式,车道板的变形会严重影响车辆行驶安全。因此对于车道板的变形分析至关重要。提取不同施作时机下隧内结构车道板竖向位移,隧内结构车道板竖向位移随施作时机变化曲线如图 16 所示。

由图 16 可知:不同施作时机时车道板竖向位移分布曲线存在相似的变化规律,从车道板两端向中部呈逐渐增大的变化趋势。而在隧内结构中柱间区域的车道板竖向位移差异基本不大。关注车道板中间区域,随着施作时机的提前,中部区域竖向位移差会变得越来越明显。当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时,中部区域竖向位移差分别为 2.88、2.69、2.15、1.14 mm,分别比前一施作时机降低 6.60%、20.07%、46.98%。这是由于隧内结构施作越早,其受到荷载越早,因此承受的力更大,变形更大。越早施作隧内结构,荷载对其结构形状的改变越大,车道板过大的变形差异会影响车辆行驶的平顺性,因此应合理安排隧内结构施作时机。

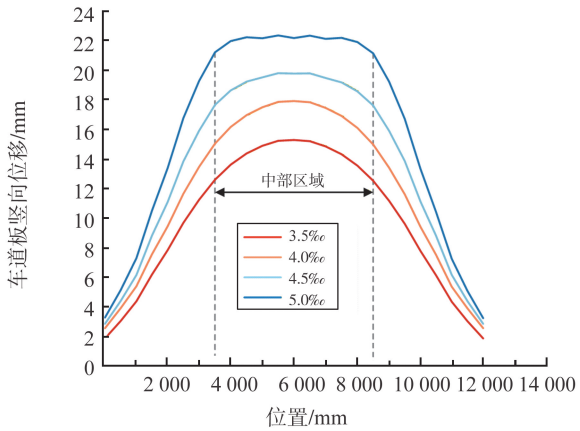


图 16　隧内结构车道板位移变化图

Fig.16　Displacement variation diagram of internal structure lane board

不同施作时机下隧内结构的最大竖向位移曲线及其变形云图如图 17 所示。由图 17 可知:隧内结构位移变化与管片存在相似规律,随着隧内结构施作时机的推迟,隧内结构自身变形量不断增大。当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时,隧内结构最大竖向位移分别为 15.26、17.89、19.78、22.32 mm,每推迟 0.5‰椭圆度施作隧内结构,隧内结构最大竖向位移分别比前一工况增大 17.23%、10.56%、12.84%。此处最大竖向位移为相对于隧内结构初始位置的竖向位移量。随着施作时机推迟,盾构管片变形量不断增大,管片向上抬升使隧内结构整体向上位移量也随之增大。

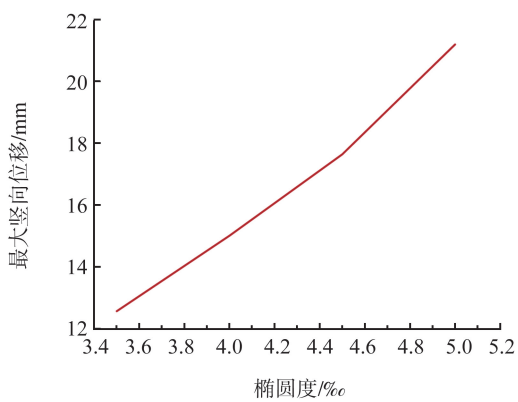
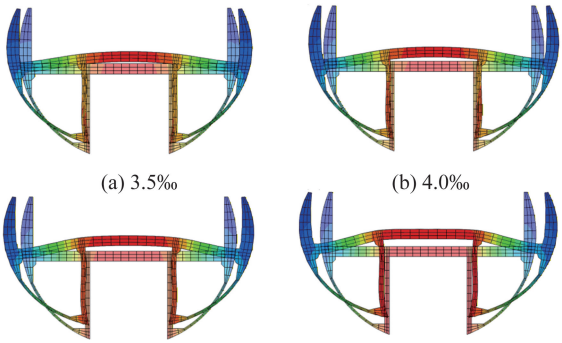


图 17　隧内结构位移变化图

Fig.17　Diagram of internal structural displacement

观察隧内结构变形云图如图 18 所示，发现随着施作时机的不断延后，车道板整体位移差会越来越大。过大的管片变形使得隧内结构中柱向上隆起、隧内结构两端受到挤压，从而继续挤压造成车道板拱起。总体看来，隧内结构施作越早，隧内结构的竖向位移越小，对隧道结构越有利。



(a) 3.5‰ (b) 4.0‰

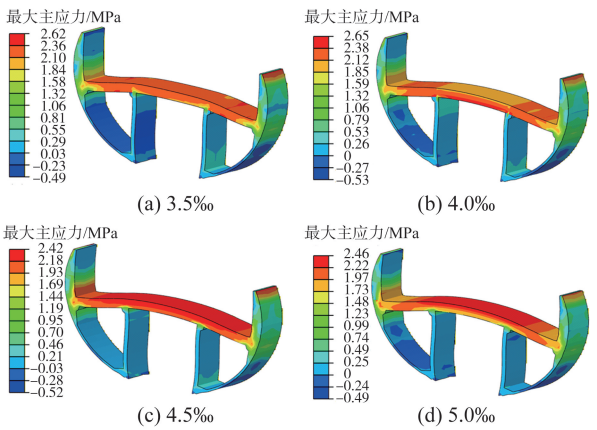
(c) 4.5‰ (d) 5.0‰

图 18 隧内结构位移变化云图

Fig.18 Contour map of structural displacement changes within the tunnel

3.4 隧内结构内力分析

对于隧内结构的受力分析，同样选择中间环隧内结构进行应力分析。提取不同椭圆度施加隧内结构时加载结束后隧内结构的最大主应力及最小主应力，以研究隧内结构在不同施作时机时受力变化情况，如图 19、20 所示。



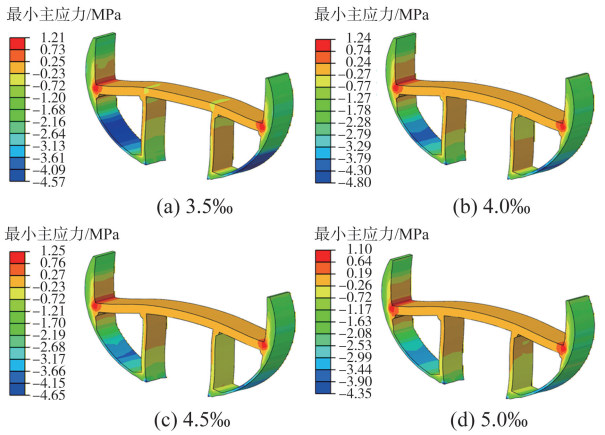
(a) 3.5‰ (b) 4.0‰

(c) 4.5‰ (d) 5.0‰

图 19 隧内结构最大主应力图

Fig.19 Maximum principal stress diagram of internal structure

由图 19、20 可知：隧内结构最大主应力主要集中于车道板位置，越靠近车道板中部，其最大主应力越大，这与隧内结构的变形模式相对应。由于车道板中部的竖向位移最大，因此其对应的最大主应力也同样较其他部位更大。隧内结构最小主应力分布较最大主应力更均匀，其中在车道板和两侧墙相交区域相对更大，但在车道板上并未出现最大主应力类似的中部更大的分布情况，分布更均匀。



(a) 3.5‰ (b) 4.0‰

(c) 4.5‰ (d) 5.0‰

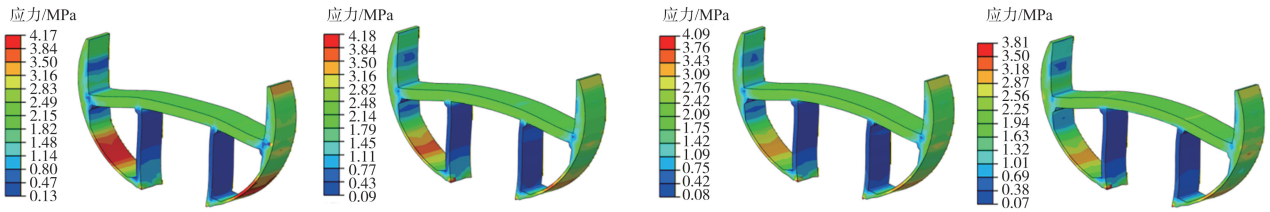
图 20 隧内结构最小主应力图

Fig.20 Minimum principal stress diagram of internal structure

观察不同施作时机的隧内结构应力大小情况，发现随着隧内结构施作时机的推迟，隧内结构的应力变化并不均匀，施作时机从 3.5‰延迟到5.0‰时，最大主应力变化规律为先增大后减小再增大的变化趋势，而最小主应力变化规律为先增大后减小的变化趋势。当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时，隧内结构最大主应力和最小主应力分别为 2.62、2.65、2.42、2.46 MPa 和−4.57、−4.8、−4.65、−4.35 MPa，每推迟 0.5‰椭圆度施作隧内结构，隧内结构最大主应力和最小主应力分别比前一施作时机工况大 1.15%、−8.68%、1.65%和5.03%、−3.13%、−6.45%。最大主应力在隧内结构施作时机为 4.0‰时最大，为 2.65 MPa；最小主应力在隧内结构施作时机为 4.0‰时达到最小值−4.80 MPa。

整体看来，随着施作时机的延后，隧内结构的应力呈降低的趋势。从具体数据来看，隧内结构不同的施作时机对其本身的内力大小影响较小，施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时，隧内结构最大主应力和最小主应力从最低值到最高值分别降低了 8.68%和 9.38%。

隧内结构 Mises 应力分布云图如图 21 所示，由图 21 可知：隧内结构整体应力分布较均匀，但弧板位置的 Mises 应力较高。这是由于中柱底部和隧内结构两侧的约束使弧板产生较大的内力。随着施作时机的延后，弧板 Mises 应力总体减小，这是因为隧内结构越晚施作，其分担的管片荷载越小、受力越小。当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时，隧内结构 Mises 应力分别为 4.17、4.18、4.09、3.81 MPa。相邻工况相比，其变化率分别为 0.24%、−2.15%和−6.85%，总体呈下降趋势。



(a) 3.5‰　(b) 4.0‰　(c) 4.5‰　(d) 5.0‰

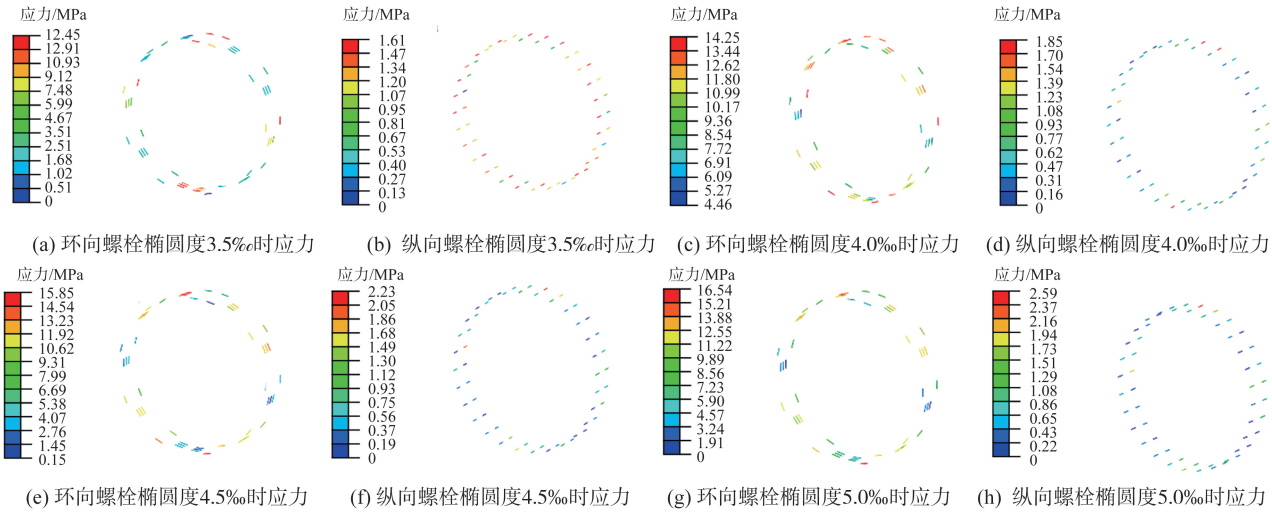
图 21　隧内结构 Mises 应力云图

Fig.21　Stress cloud map of Mises of internal structure

关注隧内结构弧板位置,发现随着施作时机的不断提前,其应力集中现象越明显。因此,这是隧内结构设计和施工时需着重关注的地方。设计时可优化结构或增大弧板厚度,加强此薄弱环节,避免结构受荷时出现较大的破坏。施工时应合理的确定施作隧内结构施作时机,使管片和隧内结构的受力处于一种相对平衡状态,隧内结构既能最大的分担管片荷载,又不使得隧内结构出现较大的变形和内力,致使隧内结构发生失效。

3.5　螺栓应力

提取中间环管片接缝位置的纵向螺栓和环向螺栓在不同施作时机情况下最大荷载施加时刻应力分布云图,如图 22 所示。



(a) 环向螺栓椭圆度3.5‰时应力　(b) 纵向螺栓椭圆度3.5‰时应力　(c) 环向螺栓椭圆度4.0‰时应力　(d) 纵向螺栓椭圆度4.0‰时应力

(e) 环向螺栓椭圆度4.5‰时应力　(f) 纵向螺栓椭圆度4.5‰时应力　(g) 环向螺栓椭圆度5.0‰时应力　(h) 纵向螺栓椭圆度5.0‰时应力

图 22　螺栓应力变化图

Fig.22　Diagram of bolt stress variation

由图 22 可知:管片环向螺栓应力分布不均,在拱顶和拱底位置处螺栓应力较大,拱腰处螺栓应力相对最小。随着施作时机的提前,拱底和拱顶处螺栓应力逐渐变小,相较其他位置螺栓应力差异更低,应力分布更均匀。拱腰位置的螺栓随施作时机的提前,相较其他位置处螺栓应力差变得更小,在椭圆度为 5.0‰时施作隧内结构的拱腰处螺栓应力明显低于其他位置螺栓,但提前至 3.5‰椭圆度施作隧内结构后拱腰位置螺栓应力和其他位置螺栓应力大小相差不大,螺栓整体分布更均匀。

上述现象主要是隧内结构的施加导致的,在较低的椭圆度施加隧内结构时,管片变形和受力较小,应力分布相对更均匀。但随着隧内结构施作时机的推迟,管片受到更大的荷载作用,其变形和受力较更早施加隧内结构时更大,螺栓同样也会受到更大的内力,因此螺栓应力随施作时机的延迟而不断增大,当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时,螺栓最大应力分别为 12.45、14.25、15.85、16.54 MPa。由于隧内结构独特的结构,使得管片拱腰位置的内力相对更低,对应位置的螺栓内力同样会降低。拱腰局部应力对施作时机相对不敏感,展现出和其他位置螺栓应力差越来越大的现象。

观察纵向螺栓云图,可以看到管片纵向螺栓应力分布均匀。但随着隧内结构施作时机的延后,各位置处的螺栓应力差异逐渐增大,当施作时机从 3.5‰延迟到 5.0‰时,螺栓最大应力和最小应力差分别为 1.61、1.85、2.23、2.58 MPa,椭圆度为 5.0‰时

施加隧内结构的螺栓应力差较椭圆度为 3.5‰时施加隧内结构的螺栓应力差大 60.25%,可见随着隧内结构施作时机的延后,纵向螺栓的应力分布出现差异性变化。观察螺栓应力云图,发现拱底和拱腰处螺栓变化更大,这同样是由于隧内结构的结构特点导致,隧内结构对管片拱腰位置和拱底位置的加强作用较其他地方更大,因此对应位置的螺栓所受到力的作用更低,应力变化更小。

总体看来,管片螺栓的应力变化规律和管片的应力变化规律类似,都是随着隧内结构施作时机的不断提前,管片环向螺栓和纵向螺栓的 Mises 应力均在不断减小。由此可看出隧内结构越早施作,就可以越好的减缓盾构管片接缝张开现象,达到抑制管片横向变形的目的。

4 结论

本研究针对隧内结构施作时机对盾构隧道横向变形特征和力学性能的影响进行研究,通过建立 ABAQUS 有限元模型,对比在管片变形椭圆度分别达到 3.5‰、4.0‰、4.5‰、5.0‰后施作隧内结构所得到的管片横向变形情况和应力分布规律。

(1) 隧内结构施作时机的提前不仅会降低管片的横向变形量,还能减少隧内结构的竖向位移量。但会增大隧内结构自身的变形量,使车道板出现较大位移差,影响车辆运行。

(2) 隧内结构的存在可以加强管片结构的承载力。隧内结构施作时机越早,管片和螺栓的应力大小便会越低,隧道结构越安全。但隧内结构自身会分担更大的荷载,增大内力。

(3) 不同的隧内结构施作时机会造成隧道结构不同的受力特性,应合理设置隧内结构施作时机以保证管片和隧内结构受力和变形量达到最理想状态。

综合考虑不同施作时机下管片衬砌和隧内结构的内力与变形规律以及螺栓应力分布情况,建议管片环初始椭圆度为 4.5 ‰附近时进行隧内结构的施作。

参考文献:

[1] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109.
He Chuan, Feng Kun, Fang Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.

[2] 李璋, 白森, 郑建国, 等. 基坑开挖对西安黄土地层中既有盾构隧道围岩压力及变形影响分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(1): 35-47.
Li Zhang, Bai Sen, Zheng Jianguo, et al. The influence of foundation pit excavation on the surrounding soil pressure and deformation of existing shield tunnel in Xi′an loess stratum [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(1): 35-47.

[3] 丁建奇, 王陈成, 朱向闪, 等. 大直径隧道施工对临近建筑的作用机制[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(1): 22-34.
Ding Jianqi, Wang Chencheng, Zhu Xiangshan, et al. Influence mechanism of large diameter tunnel construction on adjacent buildings[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(1): 22-34.

[4] 孙文昊, 封坤, 肖明清, 等. 双层隧道内部结构对隧道纵向力学性能的影响[J]. 铁道建筑, 2021, 61(5): 43-48.
Sun Wenhao, Feng Kun, Xiao Mingqing, et al. Influence of internal structure of double deck tunnel on longitudinal mechanical properties of tunnel[J]. Railway Engineering, 2021, 61(5): 43-48.

[5] 刘念, 李一伦. 盾构隧道双层车道结构与管片不同连接形式的受力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2020(1): 201-203.
Liu Nian, Li Yilun. Mechanical analysis on different connection types of double-deck lane structure and segment in shield tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(1): 201-203.

[6] 温竹茵, 刘念, 燕晓. 盾构隧道双层车道结构与管片不同连接形式研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊 1): 382-386.
Wen Zhuyin, Liu Nian, Yan Xiao. Study on different connection forms of double-deck lane structure and segment in shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 382-386.

[7] 崔佳, 张力, 郭文琦. 盾构隧道装配式内部结构形式及其对管片受力的影响[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(15): 96-98.
Cui Jia, Zhang Li, Guo Wenqi. Assembled internal structure of shield tunnel and its influence on force of segment [J]. Building Technique Development, 2021, 48(15): 96-98.

[8] 王均勇, 封坤, 孙文昊, 等. 不同内部结构类型对盾构隧道纵向力学性能的影响[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(11): 100-107.
Wang Junyong, Feng Kun, Sun Wenhao, et al. Influence of different internal structure types on longitudinal me-

chanical properties of tunnels[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(11): 100-107.

[9] 潘文韬, 肖明清, 封坤, 等. 软弱围岩下海底铁路盾构隧道全装配式内部结构列车振动响应研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(3): 130-137.
Pan Wentao, Xiao Mingqing, Feng Kun, et al. Study on train vibration response of integral assembled internal structure in submarine railway shield tunnel under soft surrounding rock[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(3): 130-137.

[10] 薛光桥, 肖明清, 封坤, 等. 特大直径双层公路盾构隧道管片-内部结构复合体系横向抗震性能研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 67-77.
Xue Guangqiao, Xiao Mingqing, Feng Kun, et al. Research on transverse seismic resistance of compound system of segments and internal structure of a super-large diameter double-layer highway shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(5): 67-77.

[11] 禹海涛, 李龙津, 曹春艳, 等. 考虑内部预制结构的盾构隧道抗震性能分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊2): 834-840.
Yu Haitao, Li Longjin, Cao Chunyan, et al. Seismic analysis of shield tunnel considering internal prefabricated structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 834-840.

[12] 徐秀峰, 黄爱军. 地面卸载作用下软土大直径轨道交通盾构隧道结构变形预测[J]. 中国市政工程, 2016(5): 62-66.
Xu Xiufeng, Huang Aijun. Deformation prediction of rail transit shield tunnel structure with large-diameter under ground loading in soft soil[J]. China Municipal Engineering, 2016(5): 62-66.

[13] 王程, 汤鹏, 庄海洋, 等. 考虑错缝拼装的过江大直径管廊盾构隧道抗震性能研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 116-123.
Wang Cheng, Tang Peng, Zhuang Haiyang, et al. Seismic performance of large shield tunnel under the Yangzi River with considering the staggered joints[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 116-123.

[14] 王明年, 胡萧越, 唐雄俊, 等. 大直径盾构铁路隧道火灾温度荷载及结构内力特性研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 1-9.
Wang Mingnian, Hu Xiaoyue, Tang Xiongjun, et al. Study on temperature loads and structural internal force characteristics of large-diameter shield-driven railway tunnels in a fire scenario[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 1-9.

[15] 何应道, 肖明清, 封坤, 等. 公轨合建盾构隧道管片-内部结构复合体系横向抗震性能研究:以济南黄河隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1404-1413.
He Yingdao, Xiao Mingqing, Feng Kun, et al. Transverse seismic performance of segment-internal structure composite system of high way-metro integrated shield tunnel: a case study of Yellow River tunnel in Jinan, China[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1404-1413.

[16] 王伟, 刘英, 庄海洋, 等. 考虑内部结构的大直径盾构隧道抗震性能[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(3): 78-85.
Wang Wei, Liu Ying, Zhuang Haiyang, et al. Seismic performance of large shield tunnel considering internal structure[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(3): 78-85.

[17] 杨文波, 杨林霖, 梁杨, 等. 列车振动荷载作用下公轨合建隧道及周围土体动力响应特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1659-1670.
Yang Wenbo, Yang Linlin, Liang Yang, et al. Study on the dynamic response characteristics of road-metro tunnels and surrounding soil under train vibration loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1659-1670.

[18] Guo W Q, Yang W B, Qian Z H, et al. The effect of internal structure on dynamic response of road-metro tunnels under train vibration loads: an experimental study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 138: 105182.

[19] 李春林, 张西文, 刘广森, 等. 循环荷载作用下大直径盾构隧道力学变形特性研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 47-53.
Li Chunlin, Zhang Xiwen, Liu Guangsen, et al. Research on mechanical and deformation characteristics of large diameter shield tunnels under cyclic loadings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 47-53.

[20] 朱伟东. 大直径盾构隧道装配式内部结构施工期变形特性研究[D]. 济南:济南大学, 2022: 37-72.
Zhu Weidong. Study on deformation characteristics of assembled internal structure of large diameter shield tunnel in construction period [D]. Jinan: Jinan University, 2022: 37-72.

[21] 陈孝华, 何应道, 封坤, 等. 河床冲淤作用下公轨合建盾构隧道纵向力学性能研究[J]. 公路, 2023, 68(1): 391-400.
Chen Xiaohua, He Yingdao, Feng Kun, et al. Research on the longitudinal mechanical properties of road-rail shield tunnel under the action of riverbed silting and scouring[J]. Highway, 2023, 68(1): 391-400.

[22] 黎晨, 张开银, 黄俊. 盾构隧道内部双层车道板结构受力分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 103-110.
Li Chen, Zhang Kaiyin, Huang Jun. Mechanical analysis of double-decked traffic lane slabs in shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 103-110.

[23] 赵延喜, 宗兰. 基于有限元的盾构隧道内部结构承载能力评价[J]. 江苏建筑, 2018(6): 46-48.
Zhao Yanxi, Zong Lan. Evaluation of internal structure bearing capacity of shield tunnel based on finite element method[J]. Jiangsu Construction, 2018(6): 46-48.

[24] 鲁选一, 封坤, 漆美霖, 等. 考虑公轨合建型内部结构的盾构隧道纵向力学性能研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(1): 107-114.
Lu Xuanyi, Feng Kun, Qi Meilin, et al. Study on longitudinal mechanical properties of shield road-metro tunnel internal structure[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(1): 107-114.

[25] 张亮亮, 张西文, 孙文昊, 等. 大直径盾构隧道施工期内部箱涵的变形特征[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(5): 560-565.
Zhang Liangliang, Zhang Xiwen, Sun Wenhao, et al. Deformation characteristics of inner box culverts in large diameter shield tunnels during construction period[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(5): 560-565.

[26] Zhu Y Y, Liu C, Yin X T, et al. Analysis of the internal force and deformation characteristics of double-layer lining structure of water conveyance tunnel[J]. Geofluids, 2022, 2022: 9159632.

[27] Liu C, Wang S M, Wan A T. Influence of secondary lining reinforcement on the mechanical properties of double-layer lining in shield tunnels[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2025, 19(9): 1531-1544.

[28] Li Z, Liu X Z, Wang J Y. Elaborate numerical investigation on surcharge-induced mechanical responses and strengthening effects of single-line shield tunnels with typical cross-sections[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 156: 106237.

[29] Wang S M, Wang Y, Lin Z Y, et al. Analysis of the influence of the thickness insufficiency in secondary lining on the mechanical properties of Double-layer lining of shield tunnel[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106663.

[30] T/CHTS 10268—2025 公路水下大直径盾构隧道技术规范[S].

[31] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].

[32] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].

[33] GB 1499.2—2024 钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋[S].

[34] 陈富强, 田唯, 刘占国, 等. 匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J]. 中国港湾建设, 2014, 34(12): 34-38.
Chen Fuqiang, Tian Wei, Liu Zhanguo, et al. Experimental study on friction coefficient of concrete with matching pouring surface[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(12): 34-38.

[35] 许宏发, 吴华杰, 郭少平, 等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002, 29(5): 10-12.
Xu Hongfa, Wu Huajie, Guo Shaoping, et al. Study on the parameters of pile soil contact surface element[J]. Exploration Engineering (Drilling & Tunneling), 2002, 29(5): 10-12.

[36] 王士民, 于清洋, 彭博, 等. 基于塑性损伤的盾构隧道双层衬砌三维实体非连续接触模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 303-311.
Wang Shimin, Yu Qingyang, Peng Bo, et al. Three-dimensional discontinuous contact model for shield tunnels with double-layer lining based on plastic-damage model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 303-311.

[37] GB 50446—2017 盾构法隧道施工与验收规范[S].

(编辑:张延欢)