文章编号:2096-5052(2026)03-0076-13　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.08

附加荷载下盾构隧道穿越软硬不均地层的变形及损伤演化规律

周朋[1,2]

(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)

摘要:为揭示软硬不均地层条件下盾构隧道的纵向力学响应与损伤演化规律,以济南黄河济泺路隧道为工程背景,建立盾构隧道纵向三维精细化数值计算模型,基于衬砌整体损伤指标,研究河床淤积附加荷载作用下隧道的变形特征、损伤发展规律及破坏机制,并开展纵向残余顶推力和螺栓直径的参数敏感性分析。研究结果表明:软硬地层承载能力差异导致隧道在软硬交界面产生显著纵向不均匀变形,环缝呈现硬土侧张开、软土侧错台的特征,且变形随附加荷载增大而加剧;软硬交界面是结构变形与损伤最为敏感的区域,衬砌压缩损伤主要集中于交界面,拉伸损伤则主要分布于软土侧,管片环横向变形是诱发拉伸破坏的关键因素;纵向残余顶推力和螺栓直径均可提高隧道纵向刚度,但二者对结构响应的影响机制存在差异,其中纵向残余顶推力对变形控制和损伤演化的影响更为显著,有利于减小纵向变形和环缝错台,但会加剧局部压缩损伤及软土侧拉伸损伤,而增大螺栓直径则有助于抑制管片横向变形并降低拉伸损伤。研究表明,软硬交界面是盾构隧道结构安全控制的关键部位,纵向残余顶推力是影响结构受力状态与损伤发展的重要因素。研究成果可为软硬不均地层盾构隧道的设计、施工及运营安全评估提供参考。

关键词:盾构隧道;软硬不均地层;纵向力学性能;数值模拟;损伤评价
中图分类号:U45;TU94　　**文献标志码**:A

引用格式:周朋. 附加荷载下盾构隧道穿越软硬不均地层的变形及损伤演化规律[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2026,8(3):76-88. Zhou Peng. Deformation and damage evolution law of shield tunnels crossing soft-hard heterogeneous strata under additional loads[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):76-88.

Deformation and damage evolution law of shield tunnels crossing soft-hard heterogeneous strata under additional loads

Zhou Peng[1,2]

(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)

Abstract: To reveal the longitudinal mechanical response and damage evolution law of shield tunnels in soft-hard heterogeneous strata, a refined three-dimensional longitudinal numerical model was established based on the engineering background of the Jinan Yellow River Jiluo Road Tunnel. After an overall damage index for the tunnel lining was adopted, the deformation characteristics, damage evolution laws, and failure mechanisms of the tunnel under the additional loads induced by riverbed siltation were systematically investigated. In addition, parametric sensitivity analyses of the longitudinal residual jacking force and bolt diameter were carried out. The results indicated that significant longitudinal non-uniform deformation at the soft-hard stratum interface was induced by the bearing capacity difference between the soft and hard strata. Opening on the hard soil side and dislocation on the soft soil side were exhibited by the circumferential joints, and these structural deformations were aggravated as the additional loads

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]-09)
作者简介:周朋(1987—),男,湖南常德人,高级工程师,硕士,主要研究方向为隧道与地下工程。E-mail:674835405@qq.com

increased. The soft-hard stratum interface was identified as the most sensitive zone for structural deformation and damage accumulation. The compressive damage of the lining was mainly concentrated at the stratum interface, while tensile damage was predominantly distributed on the soft soil side. The transverse deformation of segment rings was verified to be the key factor inducing tensile failure of the tunnel lining. The longitudinal stiffness of the tunnel could be improved by both the longitudinal residual jacking force and the bolt diameter, whereas distinct mechanisms of action on structural responses were observed. A more significant effect on deformation control and damage evolution was exerted by the longitudinal residual jacking force than by the bolt diameter. The longitudinal deformation and circumferential joint dislocation were found to be reduced by the longitudinal residual jacking force, whereas local compressive damage and tensile damage on the soft soil side were aggravated by it. By contrast, the transverse deformation of segments was effectively restrained, and tensile damage was reduced by the increase in bolt diameter. It was demonstrated that the soft-hard stratum interface was regarded as the critical position for the safety control of shield tunnel structures, and the longitudinal residual jacking force was identified as a vital factor affecting the structural stress state and damage development. A reliable reference for the design, construction, and operational safety assessment of shield tunnels in soft-hard heterogeneous strata could be provided by the research results.

Keywords: shield tunnel; soft-hard heterogeneous strata; longitudinal mechanical properties; numerical simulation; damage evaluation

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

0　引言

近年来,随着轨道交通的快速发展,盾构法施工隧道的应用逐渐增多[1]。然而,运营期盾构隧道的纵向不均匀沉降问题日益凸显,成为影响其安全性和稳定性的重要因素。软硬不均地层、地表加卸载等外部因素会导致地层发生扰动,从而使盾构隧道出现不均匀沉降[2-4]。作为由螺栓连接的预制混凝土管片构成的三维线状不连续地下结构,盾构隧道的纵向承载能力相对较弱,容易受到不均匀沉降的影响,进而诱发管片环错台、螺栓剪切、接缝渗漏等结构性病害[5-6]。因此,研究盾构隧道在软硬不均地层下的纵向力学行为,对于优化隧道设计、提升施工安全性以及延长运营期隧道的使用寿命具有重要意义。

目前,已有大量学者通过理论解析、模型试验、数值计算等方法对盾构隧道的纵向力学行为进行深入研究。在理论解析方面,Koizumi 等[7]提出的纵向梁弹簧模型及 Shiba 等[8]提出的纵向等效连续化模型是早期的经典纵向简化模型;朱合华等[9-10]提出一种梁-接头不连续模型,并引入纵向剪切接头元模型模拟管片环在纵向上的错缝拼装对隧道整体结构的受力加强作用;朱伟等[11]提出一种三维壳-弹簧模型,通过壳单元、弹簧单元分别模拟管片环和接头,可真实反映错缝拼装隧道衬砌的纵横双向力学性能;黄正荣[12]基于三维纵向壳-弹簧模型,探究管片拼装方式对盾构隧道纵向弯曲刚度有效率的影响,证实管片横断面拼装方式对隧道纵向抗弯刚度的作用不可忽视;张治国等[13]基于 Timoshenko 梁理论和 Kerr 地基模型,建立新建隧道掘进对上部已建隧道纵向结构响应的理论分析方法;Guo 等[14]提出考虑环间接头弯剪刚度迭代更新的大断面盾构隧道纵向分析方法,揭示复杂荷载下环向接头的非线性弯剪演化规律,并有效表征软硬不均地层隧道的差异化沉降与内力集中特征。模型试验方面,何川等[15]以狮子洋隧道为背景,通过轴向等效刚度模型的单、双层衬砌纵向试验,探明地表局部荷载对软硬交替地层盾构隧道纵向沉降与内力的影响规律;吴庆等[16]开展地面堆载工况下的隧道纵向模型试验,考虑不同埋深与堆载位置的影响,探明地面堆载对既有盾构隧道变形的作用规律;杨帆[17]设计并开展穿越复合地层的盾构隧道模型试验,试验中采用聚乙烯模拟管片衬砌,研究运营期盾构隧道在粉质黏土和砂卵石复合地层中的纵向变形规律及力学特征;梁荣柱等[18]开展地表堆载下管片模型试验,探究堆载对盾构隧道力学及变形特性的影响。试验发现,荷载作用下隧道中部管片产生横向收敛,且拱顶沉降主要由该变形所致。数值计算方面,孙廉威等[19]依托杭州地铁 1 号线隧道工程,建立地面堆载影响既有隧道管片及环间接头的三维数值模型,从整体变形、接头受力变形及管片受力等维度,分析堆载对盾构隧道变形与破坏的作用机制;张毫毫等[20]基于非线性接触理论和多尺度混合建模技术建立围岩-管片三维精细化数值计算模型,探明新建隧道下穿对既有盾构隧道力学行为的影响;桑运龙等[21]建立基于三维实体-非线性弹簧单元的盾构隧道纵

向数值计算模型,研究地面堆载作用下盾构隧道纵向差异沉降与环缝张开、错台的关系;Wang 等[22]建立 40 环管片的三维精细化数值计算模型,研究纵向不均匀沉降导致的盾构隧道的纵向变形特征和环间接头的破坏机理;Shi 等[23]基于三维非线性接触理论建立地层-管片三维纵向等效连续化数值计算模型,研究基坑侧向开挖影响下盾构隧道管片和接头的力学变形特性;钟小春等[24]建立可考虑环缝张开的三维纵向结构数值计算模型,研究螺栓数量、预紧力、管片环宽度等对隧道纵向力学性能的影响;Hu 等[25]建立考虑管片拼装与螺栓作用的地层-盾构隧道三维精细化纵向模型,分析软硬突变地层中隧道纵向变形、接头变位及螺栓力学响应,并通过参数分析探究地层弹性模量差异对隧道纵向受力变形的影响;阮恒丰等[26]结合管片接头受力模型,建立地层-盾构隧道三维精细化纵向数值模型,分析地表突发堆载下隧道整体变形、环片横向形变、接头变位及环间压力的演化规律,揭示其受力变形机理。

上述研究分别从结构变形、破坏特征和损伤机理等方面加深了对盾构隧道纵向力学行为的认识,但由于大断面水下盾构隧道线路较长,沿线土体性质的空间变化不容忽视[25],尤其是在软、硬土层交界区域,隧道纵向力学行为往往更加复杂且不利。同时,盾构施工过程中形成的纵向残余顶推力在运营期普遍存在[27-31],其会影响环间接触状态、结构整体刚度及荷载传递机制,进而对隧道纵向变形和损伤演化产生重要影响。然而,现有研究对纵向残余顶推力影响的关注相对不足,且相关参数分析多集中于围岩条件,对连接螺栓等结构参数影响纵向力学性能和破坏特征的研究仍不够充分。

本研究利用大型有限元分析软件建立考虑管片分块、连接螺栓和钢筋的盾构隧道精细化数值计算模型。基于衬砌整体损伤指标,研究盾构隧道在穿越软硬不均地层并受到附加荷载作用时的纵向力学行为与破坏特征,同时进行系列敏感性分析,探讨纵向力和螺栓直径对盾构隧道在软硬不均地层中的变形与损伤特征的影响。

1 工程背景

济南黄河济泺路隧道位于中国山东省济南市城市中部,根据工程勘察资料,隧道穿越地层主要为第四系上更新统粉质黏土层,局部夹钙质结合层及砂层,下伏地层为全风化辉长岩及少量粉细砂。由于粉质黏土与全风化辉长岩在变形模量、承载能力及力学性质等方面存在显著差异,隧道沿线形成典型的软硬不均地层条件。本研究选取隧道穿越粉质黏土与全风化辉长岩交界区域作为研究对象,其工程地质纵断面如图 1 所示。

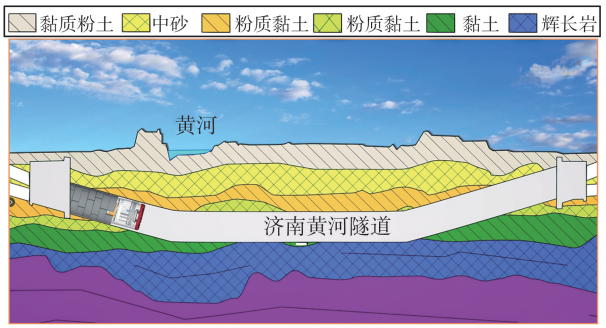


图 1 隧道工程地质纵断面图

Fig.1 Engineering geological longitudinal profile of tunnel

济南黄河济泺路隧道主体采用 C60 钢筋混凝土管片,采用“1+2+7”的分块方式,即 1 块封顶块(F 块)、2 块邻接块(L_1 块、L_2 块)和 7 块标准块(B_1 块-B_7 块)。衬砌环外径为 15.2 m,内径为 13.9 m,衬砌厚度为 650 mm,衬砌环宽为 2 000 mm。管片结构的连接形式为斜螺栓连接,斜螺栓强度等级为 8.8 级,每环管片环向螺栓 30 颗(M36),纵向结合 28 块分布式凹凸榫并考虑管片旋转拼装点位,纵向螺栓为 28 颗(M30)。管片环缝面设置分布式凹凸榫。管片结构分块示意图如图 2 所示。

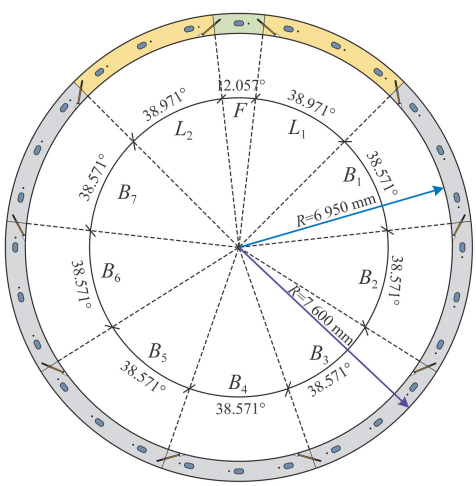


图 2 管片结构分块示意图

Fig.2 Schematic diagram of segmental lining structure

2 数值计算模型

2.1 模型建立

基于隧道的几何尺寸,本研究利用大型有限元通用软件,选取济南黄河隧道软硬不均地层区间为研究对象,建立了穿越软硬不均地层的盾构隧道结构纵向数值计算模型,如图 3 所示。数值计算模型

的长、宽、高分别为 80、80、80 m,包括软硬不均地层、40 环管片、连接螺栓和钢筋。管片与土体均采用实体(C3D8R)单元模拟,螺栓采用梁(B31)单元模拟,钢筋采用桁架(Truss)单元模拟。隧道模型尺寸与实际工程一致,其中隧道埋深为 32.275 m。隧道穿越地层夹角为 60°的软硬不均地层,因此地层模型的夹角设置为 60°,以对比不同附加荷载下隧道穿越软硬不均地层的纵向力学性能。

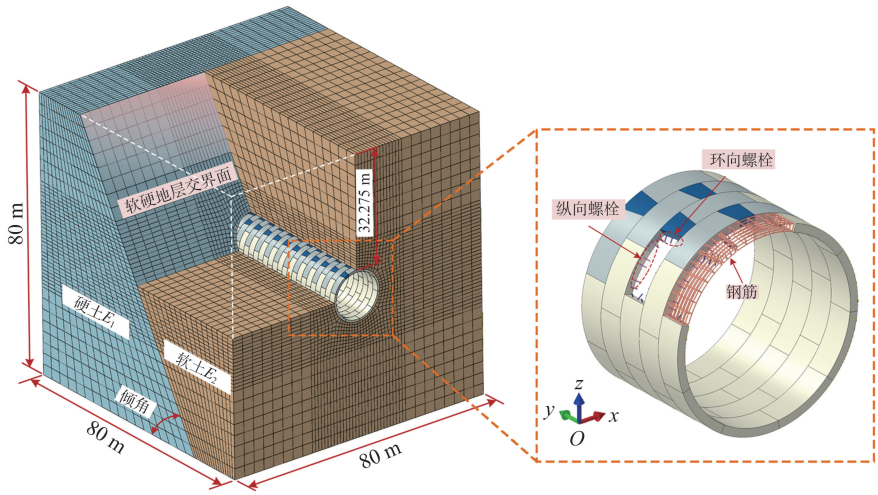


图 3　数值计算模型示意图
Fig.3　Schematic of numerical calculation model

2.2　材料属性

混凝土采用有限元软件内设的混凝土损伤塑性(CDP)本构模型。根据文献[32]确定混凝土轴心抗压强度标准值、轴心抗压强度标准值、弹性模量,管片结构采用 C60 混凝土。混凝土损伤参数根据 Sidoroff 等[33]提出的等效弹塑性能量法进行计算,C60 混凝土损伤塑性本构的基本参数如表 1 所示。

表 1　混凝土损伤塑性本构的基本参数
Table 1　Basic parameters of CDP model

膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K_c	黏滞系数
38	0.1	1.16	2/3	1×10^{-4}

软硬不均地层采用 Mohr-Coulomb 本构进行模拟,具体力学参数如表 2 所示。螺栓与钢筋均采用双线性弹塑性本构进行模拟,当螺栓或钢筋达到屈服应力后,螺栓或钢筋的弹性模量为原本的 1/100。连接螺栓等级为 8.8 级,其屈服强度和抗拉强度分别为 640、800 MPa,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3;管片主筋采用 HRB400,其屈服强度和抗拉强度分别为 400、540 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3;管片箍筋采用 HPB300,其屈服强度和抗拉强度分别为 300、400 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。

表 2　软硬不均地层的基本力学参数
Table 2　Mechanical parameters of soft and hard soils

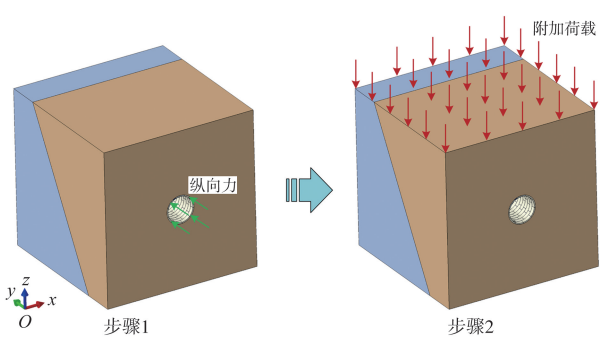
类型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t·m^{-3})	摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
软土	0.04	0.3	1.91	20.8	0.07
硬土	0.16	0.3	2.15	22.0	0.15

2.3　相互作用及边界条件

管片环缝及纵缝接触面均采用面-面接触模型,切向摩擦系数取 0.55[34],法向采用硬接触[35-36],以模拟相邻管片之间的接触行为。土体与管片结构表面也采用面-面接触模型,切向摩擦系数为 0.4,法向为硬接触,模拟土体与管片之间的相互作用[37]。纵向螺栓与环向螺栓的两端均通过 Embedded 方式嵌入管片内部,以确保螺栓与管片的耦合作用。钢筋网通过 Embedded 方式完全嵌入管片内部[38-39],以反映钢筋与混凝土的复合力学行为。此外,本模型对土体的除地表外各面进行了法向约束,确保土体边界条件的合理设置。

2.4　荷载施加方式及工况设置

本数值模型加载方式如图 4 所示,整个加载过程可分为两步。



(a) 隧道开挖贯通、激活管片并施加纵向力　　(b) 施加附加荷载

图 4　模型加载方式示意图
Fig.4　Schematic diagram of model loading method

首先考虑土体及管片结构自重,建立初始地应力场并进行地应力平衡分析。在此基础上,由于本文重点关注运营期附加荷载作用下盾构隧道的纵向力学性能[40],因此采用一步贯通的方法模拟隧道开挖与衬砌成环过程,同时施加纵向残余顶推力。计算过程中利用有限元软件导入 ODB 的方法进行迭代计算,直至模型达到平衡状态,初始位移小于 10^{-4} mm。由于模型经过地应力平衡处理后,结构初始变形极小,因此后续分析主要关注附加荷载作用引起的增量响应。

在地表施加附加荷载。本研究以济南黄河济泺路隧道为工程背景,考虑黄河河床淤积作用产生的附加荷载影响。根据 2002—2020 年隧址区水文监测资料,河床最大淤积高度约为 16 m,换算得到的最大淤积荷载约为 0.304 MPa。为覆盖工程可能出现的不利工况并研究结构损伤发展规律,本文将最大附加荷载设定为 0.4 MPa,并以 0.01 MPa 为荷载增量逐步施加,分析不同附加荷载水平下盾构隧道的纵向变形及损伤演化特征。

本数值模型主要是探讨不同附加荷载下穿越软硬不均地层的盾构隧道纵向力学性能,保持土体材料属性不变,具体设置的计算工况如表 3 所示。

表 3 加载工况设置

Table 3 Loading conditions of the numerica model

单位:MPa

加载工况	E_1	E_2	附加荷载
1	40	160	0.1
2	40	160	0.2
3	40	160	0.3
4	40	160	0.4

3 计算结果分析

3.1 竖向沉降

为探究盾构隧道在穿越软硬不均地层时的纵向不均匀变形情况,分别提取不同附加荷载 P 下的拱底竖向位移分布如图 5 所示。

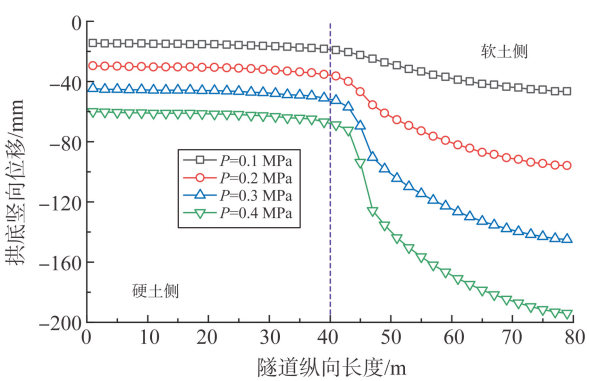


图 5 不同附加荷载下隧道竖向位移

Fig.5 Vertical displacement of tunnel under different additional loads

由图 5 中可知:当隧道在软硬不均地层中受到附加荷载作用时,盾构隧道沿纵向会产生明显的不均匀变形,隧道在两种土层里均发生了不同程度的沉降,其中硬土层一侧竖向位移较小,且相邻两环沉降量差距较小,这是因为硬土层一侧可以提供更强的地层抗力作用,而软土层一侧竖向位移较大,且相邻两环沉降量差距较大,这是因为位于软土层一侧的隧道类似一个“悬臂梁”,受硬土层以及相邻管片环环间作用,越靠近软硬交界面沉降量越小,越远离软硬交界面沉降量越大。隧道纵向不均匀变形主要分布在软硬交界面更偏向软土层一侧,这主要与软硬不均地层的交角有关。同时,随着附加荷载的增大,这种不均匀沉降现象更为显著。

3.2 环缝变形

盾构隧道在运营期中由于纵向不均匀沉降导致的环间接缝变形会极大的影响到隧道的结构安全,需要对于隧道环间接缝变形进行及时监测,尤其对于穿越软硬不均地层的盾构隧道环间接缝变形可能更为显著。因此,提取不同附加荷载下盾构隧道穿越软硬不均地层时的环间接头张开量和错台量分布分别如图 6、7 所示。

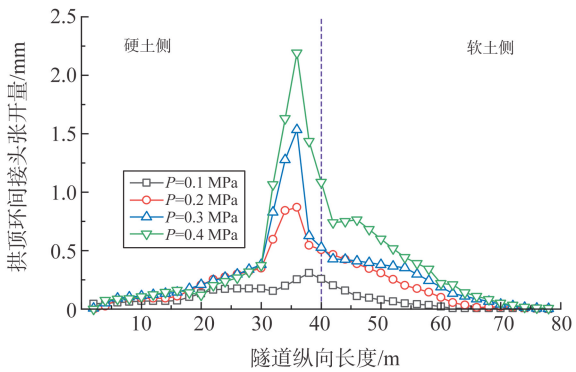


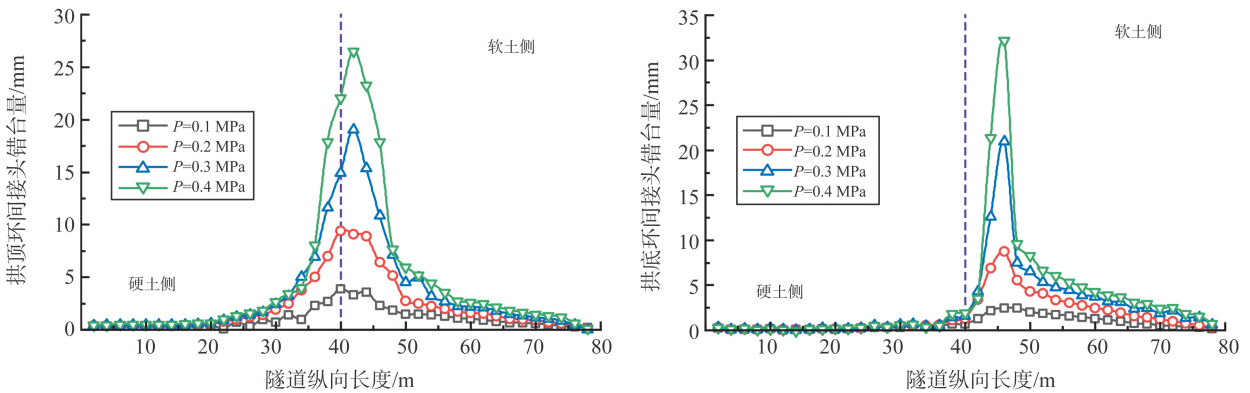
图 6 不同附加荷载下隧道纵向环间接头张开量分布

Fig.6 Longitudinal distribution of tunnel circumferential joints opening under different additional loads

盾构隧道穿越软硬不均地层时环间接头拱顶张开量分布如图 6 所示。由图 6 中可知:当隧道穿越软硬不均地层并受到附加荷载作用时,由于软硬不均交界面具有一定的交角,位于软硬不均交界面偏向硬土层一侧的环间接头拱顶张开量最大。在受到附加荷载作用时,软硬交界面土体发生不均匀变形,与硬土层相比,软土层沉降量更大,盾构隧道环间接头拱顶受到土体的压、拉、剪作用,管片环随着软土层一起滑移,环间接头被拉伸,在软硬交界面产生明显的张开现象。随着附加荷载的增大,盾构隧道环间接头张开量逐渐增大,当附加荷载 P 分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 MPa 时,盾构隧道环间接头最大张开

量分别为 0.31、0.87、1.53、2.19 mm。

盾构隧道穿越软硬不均地层时环间接头错台量分布如图 7 所示,图 7(a)为拱顶位置处,图 7(b)为拱底位置处。与环间接头张开量分布最大位置不同,环间接头错台量最大位置位于软硬不均交界面偏软土层一侧,这主要是由于软硬不均交界面存在一定交角,当隧道拱底受到硬土层约束时,其错台量较小;当隧道拱底受到软土层约束时,其错台量较大。盾构隧道环间接头拱顶和拱底错台量在数值大小和分布范围上有所差别,盾构隧道拱顶直接受到土体的压、拉、剪作用,环间接头拱顶错台量分布范围较大,但在数值上小于环间接头拱底错台量,环间接头拱底错台量分布则较为集中。因此,当盾构隧道穿越软硬不均地层时对于环间接头拱顶和拱底的张开量均需重点监测,防止发生渗漏水情况,以便进行及时加固。同时,随着附加荷载的增大,盾构隧道环间接头错台现象更为显著,当附加荷载 P 分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 MPa 时,盾构隧道环间接头拱顶最大错台量分别为 3.87、9.40、19.05、26.53 mm,拱底最大错台量分别为 2.45、8.73、20.96、32.20 mm。



(a) 拱顶环间接头错台量　　(b) 拱底环间接头错台量

图 7　不同附加荷载下隧道纵向环间接头错台量分布

Fig.7　Longitudinal distribution of tunnel circumferential joints dislocation under different additional loads

3.3　横向收敛

在隧道受到超载作用时,隧道会产生明显的横向变形。当隧道在软硬不均地层中受到超载作用时,由于软、硬地层的地层抗力不同,隧道横向变形会出现明显的差异。为了解隧道在软硬不均地层中受到附加荷载时的横向变形情况,分别提取不同附加荷载下管片环竖向收敛分布如图 8 所示。

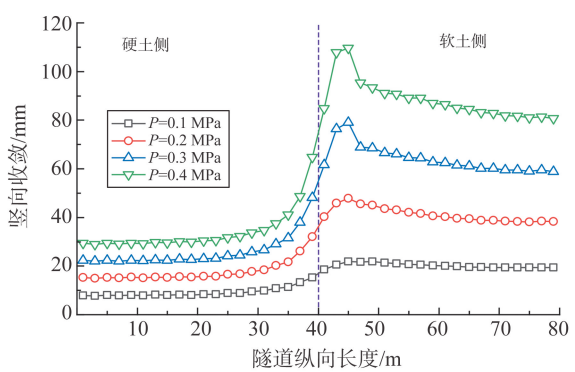


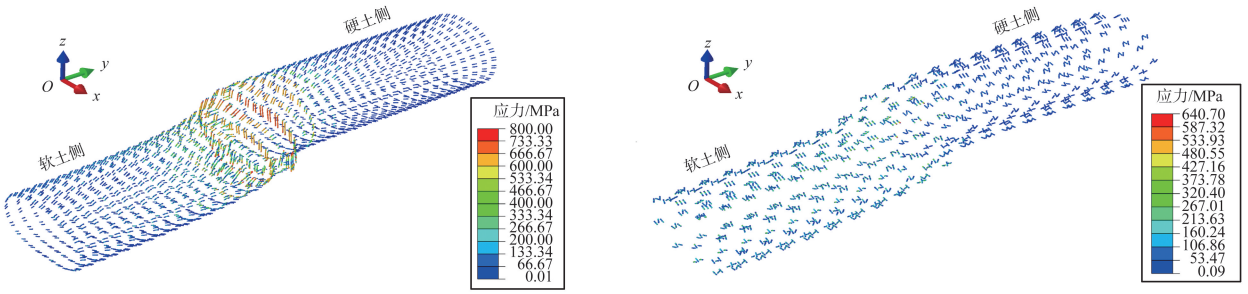
图 8　不同附加荷载下隧道竖向收敛

Fig.8　Vertical convergence of tunnel under different additional loads

由图 8 可知:盾构隧道在穿越软硬不均地层中受到附加荷载作用时位于软土层一侧的管片环竖向收敛量明显大于硬土层一侧。同时,位于软硬不均交界面更偏软土层一侧的竖向收敛量最大。管片环的产生横向变形的原因主要可以归结为两点,一是由于附加荷载本身造成的地表沉降产生的管片环横向变形,导致在硬土层一侧隧道的管片环横向变形较小,软土层一侧隧道的管片环横向变形较大;二是由于软硬不均交界面存在一定交角,隧道在软硬不均地层交界面附近处于上软下硬地层中,导致软硬不均交界面位置处管片环横向变形更大。盾构隧道竖向收敛值在软硬交界面更偏软土层一侧约 6~8 m 位置处最大,具体范围大小与软硬不均交界面的交角有关,这表明应该对软硬交界面软土层一侧的管片环横向变形进行重点监测,具体监测范围应根据软硬不均交界面交角的大小而定。随着附加荷载的增大,盾构隧道管片环横向变形更为显著,尤其是软硬不均交界面位置处。当附加荷载 P 分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 MPa 时,盾构隧道管片环最大竖向收敛量分别为 21.94、47.83、79.10、109.67 mm。

3.4　螺栓应力

螺栓是连接管片接头的主要构件之一,为深入研究隧道在软硬不均地层中受到附加荷载作用时螺栓的受力情况,提取附加荷载为 0.4 MPa 时盾构隧道螺栓应力云图如图 9 所示。



(a) 纵向螺栓　　(b) 环向螺栓

图 9　螺栓应力云图

Fig.9　Bolt stress clouds

由图 9 可知:当隧道在软硬不均地层中受到附加荷载作用时,隧道环向螺栓的应力远远低于纵向螺栓应力,这是因为隧道的纵向不均匀变形更为严重。其中,纵向螺栓应力最大位置为软硬交界面位置环间接缝的上部螺栓,这与前文中该位置接缝明显张开的现象是对应的。

3.5　隧道整体衬砌损伤

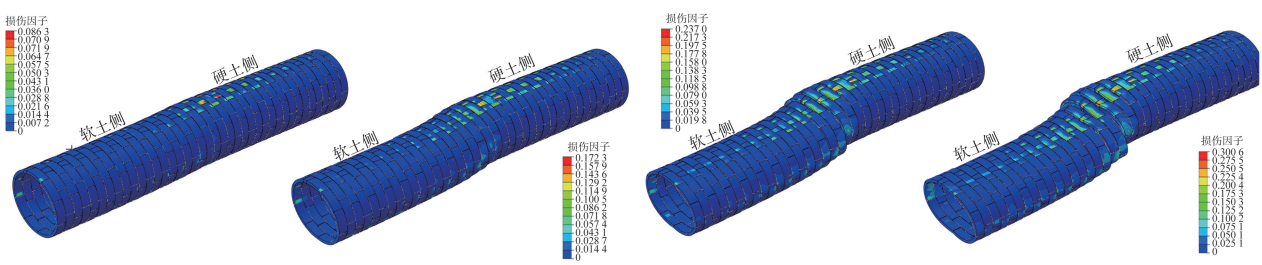
为了定量评价穿越软硬不均地层时盾构隧道断面的损伤特征,本研究采用了隧道衬砌损伤指数。盾构隧道衬砌损伤指数可以分为两部分,即衬砌受压整体损伤指数(D_{OLC})和衬砌受拉整体损伤指数(D_{OLT})。这两个指数可以通过公式计算得到,如式(1)和(2)所示。整体损伤指数由隧道横截面内所有单元的损伤变量加权求和确定,其中权重系数为各单元耗散能与隧道横截面内所有单元的总耗散能之比。

$$D_{\mathrm{OLC}}=\sum_{i=1}^{n}\left[d_{ci}^{\mathrm{e}}E_i^{\mathrm{e}}\left(\sum_{i=1}^{n}E_i^{\mathrm{e}}\right)^{-1}\right], \tag{1}$$

$$D_{\mathrm{OLT}}=\sum_{i=1}^{n}\left[d_{ti}^{\mathrm{e}}E_i^{\mathrm{e}}\left(\sum_{i=1}^{n}E_i^{\mathrm{e}}\right)^{-1}\right], \tag{2}$$

式中:d_{ci}^{e}和d_{ti}^{e}分别为第 i 个单元的受压损伤变量和受拉损伤变量;E_i^{e} 是第 i 个单元的耗散能,包括塑性耗散能和损伤耗散能。

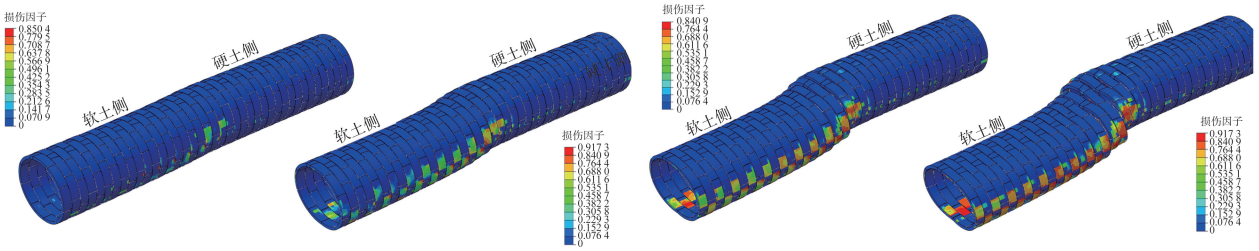
图 10~12 为不同附加荷载下盾构隧道管片衬砌沿纵向的整体损伤分布情况,其中 DamageC、DamageT 分别代表压、拉两类损伤因子,取值为 0 时结构无损伤,取值为 1 时结构发生完全损伤破坏。从图 10~12 可以看出,衬砌整体压缩损伤最大位置位于软硬不均土层交界位置处,衬砌整体拉伸损伤最大位置位于软土层一侧。随着附加荷载的增加,隧道衬砌截面整体压、拉损伤程度在大小和分布范围上均有所增大。衬砌的损伤程度主要与隧道纵向刚度、横向刚度、管片环间相互作用以及衬砌与围岩的相互作用有关。随着附加荷载的增大,土体不均匀变形增大,隧道衬砌与围岩之间的相互作用增强,导致隧道衬砌在软硬不均交界面所受压应力加剧。隧道衬砌拉损伤较大位置处位于软硬不均交界面处和软土层一侧,衬砌整体拉伸损伤曲线按照分布规律可以划分为两类,当附加荷载为 0.1 和0.2 MPa 时,衬砌整体拉伸损伤最大位置位于软硬不均交界面更偏向软土层一侧,最大位置处与管片环产生最大竖向收敛位置基本一致,这说明盾构隧道在穿越软硬不均地层时,管片环横向变形是导致衬砌整体拉伸损伤的原因之一。但当隧道完全位于软土层时,衬砌整体拉伸损伤逐渐减小,这主要是由于附加荷载较小,软土层一侧隧道并未产生较大横向变形,因此衬砌整体拉伸损伤较小。当附加荷载增大至 0.3和 0.4 MPa 时,软土层一侧隧道产生较大的横向变形,隧道拱顶和拱底的内侧、两侧拱腰的外侧产生较大的拉损伤,这导致了盾构隧道在穿越软硬不均交界面完全进入软土层后衬砌整体拉伸损伤不断增长。值得注意的是,衬砌整体拉伸损伤分布曲线在软土侧表现出明显的波动性,这主要是由于盾构隧道采用错缝拼装,相邻两环管片协调性不一致,损伤程度有所区别。



(a) P=0.1 MPa　(b) P=0.2 MPa　(c) P=0.3 MPa　(d) P=0.4 MPa

图 10　盾构隧道纵向拉伸损伤分布云图

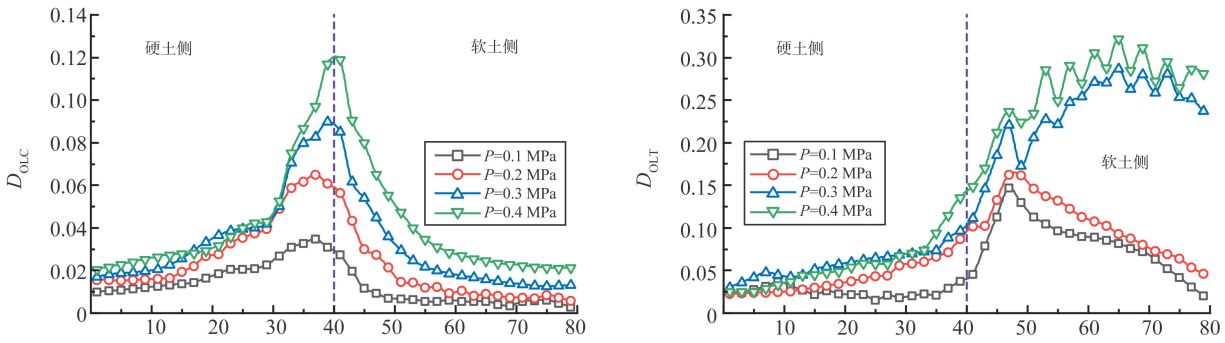
Fig.10　Contour plot of longitudinal tensile damage distribution of shield tunnel



(a) P=0.1 MPa　(b) P=0.2 MPa　(c) P=0.3 MPa　(d) P=0.4 MPa

图 11　盾构隧道纵向压缩损伤分布云图

Fig.11　Contour plot of longitudinal compressive damage distribution of shield tunnel



(a) D_{OLC}　(b) D_{OLT}

图 12　盾构隧道纵向整体衬砌损伤指数

Fig.12　Damage index of longitudinal overall lining of shield tunnel

4　参数分析

为探究关键因素对穿越软硬不均地层盾构隧道在附加荷载作用下力学行为及损伤特征的影响,开展参数敏感性分析。参数分析主要考虑纵向残余顶推力和纵向连接螺栓直径对结构变形及破坏特征的影响,其中纵向连接螺栓主要通过改变螺栓直径反映其连接性能差异。

本研究所考虑的纵向力为盾构施工过程中形成并保留至运营期的纵向残余顶推力。已有相关实测及研究结果表明[27],施工阶段管片结构纵向压力可达到约 3 MPa,而随着运营期结构应力松弛及环间接触状态调整,纵向压力会逐渐衰减至约 1 MPa,平均压力松弛度约为 60%。因此,为覆盖实际工程中可能存在的纵向残余顶推力范围,本研究分别选取 1、2 和 3 MPa 三个典型纵向力水平进行分析,以研究不同残余顶推力状态下盾构隧道的纵向力学响应及损伤演化规律。参数分析计算工况如表 4所示。

表 4　参数分析计算工况设置

Table 4　Calculationcase settings for parametric analysis

工况	纵向力/MPa	螺栓直径/mm	螺栓倾斜角度/(°)	螺栓数量/个
1	1	36	54	28
2	2	36	54	28
3	3	36	54	28
4	1	30	54	28
5	1	42	54	28
6	1	48	54	28

4.1　纵向力的影响

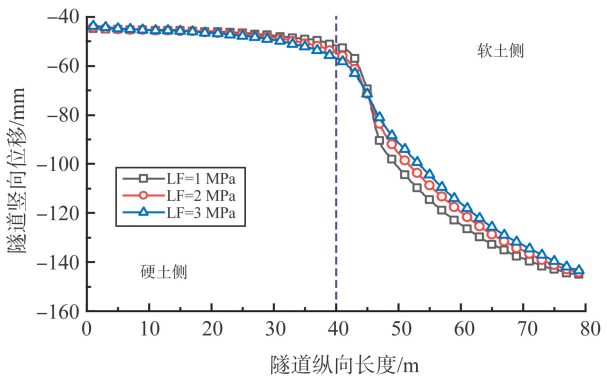
4.1.1　隧道变形

不同纵向力下盾构隧道穿越软硬不均地层时的变形情况如图 13 所示。由图 13(a)中可知:随着纵向力的增大,隧道在软土层一侧竖向位移减小,在硬土层一侧竖向位移增大,这表明增大纵向力能有效提高盾构隧道的纵向整体性,充分减少竖向位移。图 13(b)可知:随着纵向力的增大,软硬不均交界面位置处环间接头错台现象能够得到有效地抑制。当纵向力从 1 MPa 增长至 2 MPa 时,环间接头错台量有

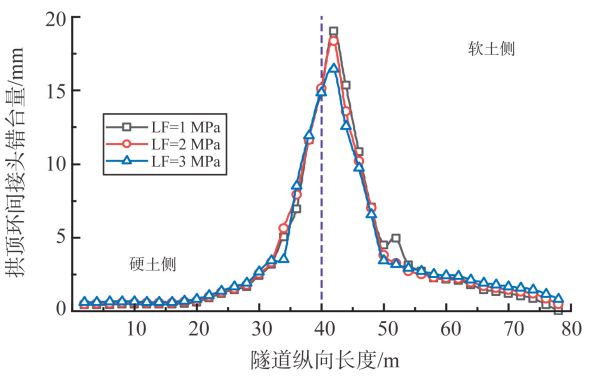
所减小,但两者差距不大。当纵向力从 1 MPa 增长至 3 MPa 时,环间接头最大错台量减少了 2.60 mm。

4.1.2 隧道整体衬砌损伤

不同纵向力下盾构隧道穿越软硬不均地层时的损伤情况如图 14 所示。由图 14(a)中可知:随着纵向力的增大,衬砌整体压缩损伤程度和范围均有所增大。这是由于增大纵向力增大了隧道纵向刚度和管片衬砌环间相互作用,盾构隧道不易变形,隧道衬砌与围岩之间的相互作用增强,软硬不均交界面隧道拱顶位置处压应力显著增大,衬砌整体压缩破坏加剧。由图 14(b)中可知:在第 21 环~24 环管片环中,随着纵向力的增大,衬砌整体拉伸损伤逐渐减小。这是由于纵向力的增加使得管片环间相互作用增强,管片环横向刚度增大,管片环在纵向力较大时不易发生横向变形,衬砌整体拉伸损伤减弱。但在高纵向力条件下,隧道整体性较好,管片环协同变形,位于软土层的管片环横向变形较大,衬砌整体拉伸损伤加剧。在低纵向力条件下,由于环间约束不足,位于软硬不均交界面位置处环间螺栓变形量较大,管片环间协同性较差,位于软土层的管片环横向变形较小,衬砌整体拉伸损伤较小。管片环间协同性的好坏从衬砌整体压缩损伤曲线的波动性也可以看出,纵向力为 3 MPa 时曲线较低纵向力情况下更为稳定。



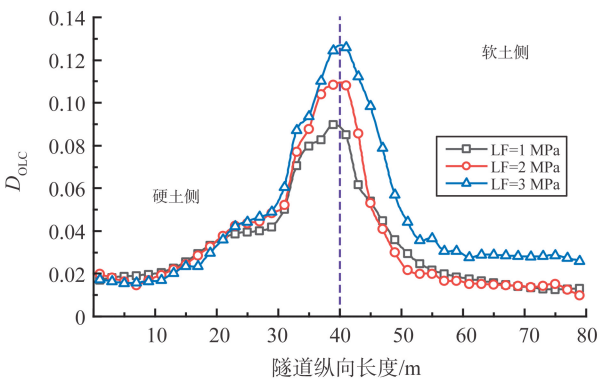
(a) 竖向位移



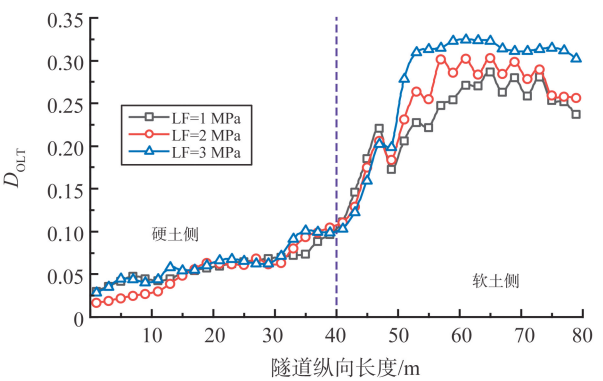
(b) 拱顶环间接头错台量

图 13 不同纵向力下隧道纵向变形分布

Fig.13 Tunnel longitudinal deformation distribution under different longitudinal forces



(a) D_{OLC}



(b) D_{OLT}

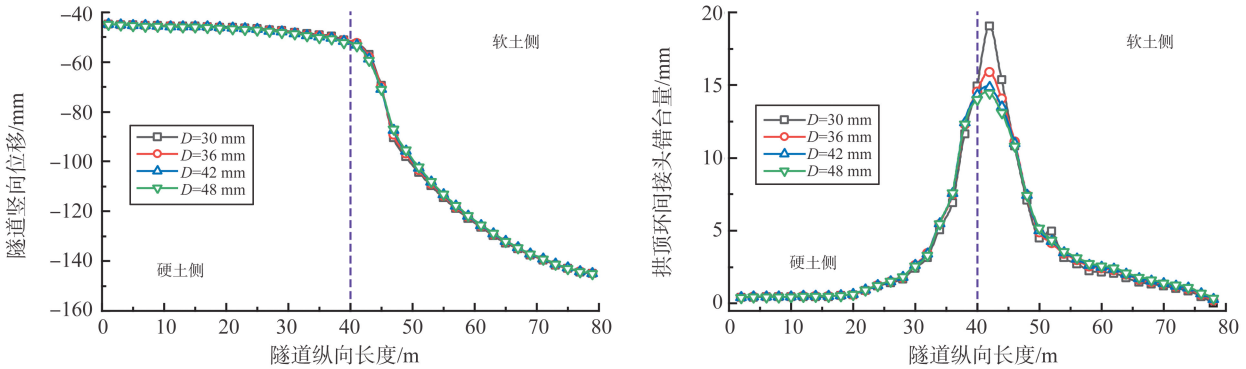
图 14 不同纵向力下隧道纵向损伤分布

Fig.14 Tunnel longitudinal damages distribution under different longitudinal forces

4.2 斜螺栓直径的影响

4.2.1 隧道变形

不同纵向螺栓直径下盾构隧道穿越软硬不均地层时的变形情况如图 15 所示。由图 15(a)可知:随着螺栓直径的增大,隧道在软土层一侧竖向位移略有减小,在硬土层一侧竖向位移略有增大,这表明增大螺栓直径对减少隧道竖向位移影响不大。由图 15(b)可知:随着螺栓直径的增大,软硬不均交界面位置处环间接头错台现象能够得到有效地抑制。当纵向螺栓直径从 30 mm 增大至 36 mm 时,环间接头错台量减小最为明显,减少了 3.18 mm。当纵向螺栓直径继续增大时,环间接头错台量抑制效果有所减弱,这表明在进行盾构隧道纵向螺栓设计时应充分考虑纵向螺栓的功能性和经济性,选择合适的螺栓直径。



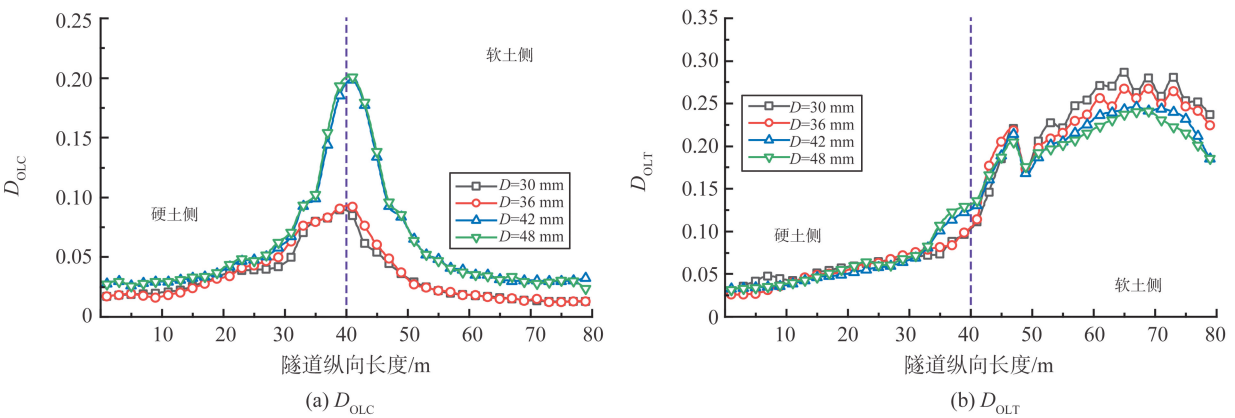
(a) 竖向位移　　(b) 拱顶环间接头错台量

图 15　不同螺栓直径下隧道纵向变形分布

Fig.15　Tunnel longitudinal deformation distribution under different bolt diameters

4.2.2　隧道衬砌损伤

不同纵向螺栓直径下盾构隧道穿越软硬不均地层时的损伤情况如图 16 所示。由图 16(a)可知:随着纵向螺栓直径的增大,衬砌整体压缩损伤程度和范围均有所增大。这是由于增大纵向螺栓直径增大了隧道纵向刚度,隧道衬砌与围岩之间的相互作用增强,软硬不均交界面隧道拱顶位置处压应力显著增大,衬砌整体压缩破坏加剧。由图 16(b)可知:随着纵向螺栓直径的增大,衬砌整体拉伸损伤逐渐减小。这是由于纵向螺栓直径的增加使得隧道纵向刚度增大,管片环横向变形减小,衬砌整体拉伸损伤减小,这体现了盾构隧道的横-纵耦合效应。



(a) D_{OLC}　　(b) D_{OLT}

图 16　不同螺栓直径下隧道纵向损伤分布

Fig.16　Tunnel longitudinal damages distribution under different bolt diameters

5　结论

本研究以穿越软硬不均地层的济南黄河济泺路隧道为工程背景,建立盾构隧道纵向三维精细化数值计算模型,基于衬砌整体损伤指标,研究盾构隧道在穿越软硬不均地层时受到附加荷载作用下的纵向力学行为与破坏特征,并针对纵向力、螺栓直径等关键影响因素开展参数分析。

(1) 软硬不均地层条件下,隧道在软硬交界面处产生明显的纵向不均匀沉降,交界面两侧环缝分别表现为硬土层侧张开和软土层侧错台,且拱顶错台影响范围大于拱底,而最大错台量低于拱底。随着附加荷载增大,隧道纵向变形及环缝变形均逐渐增大,表明软硬交界面是盾构隧道纵向变形最为敏感的区域。

(2) 软硬不均地层作用下,硬土层侧管片环横向变形明显小于软土层侧,横向变形峰值位于软硬交界面软土层一侧,且随附加荷载增大而显著加剧。衬砌压缩损伤主要集中于软硬交界面附近,拉伸损伤则主要分布于软土层侧,其中管片环横向变形是诱发拉伸损伤的重要因素,隧道横向刚度及环间连接作用进一步影响其损伤发展。因此,软硬交界面及其软土侧是结构变形与损伤的重点区域。

(3) 纵向残余顶推力和螺栓直径均能够提高隧道纵向刚度及环间协同作用,但其影响机制存在明显差异。增大纵向力能够有效减小隧道纵向变形和环缝错台,但对软土层侧横向变形的抑制作用有限,

并会加剧软硬交界面附近的压缩损伤及软土层侧拉伸损伤;增大螺栓直径对纵向变形的抑制作用相对有限,但能够增强环间连接作用,有效减小管片横向变形并降低拉伸损伤水平。

(4) 相比螺栓直径,纵向残余顶推力对盾构隧道整体受力状态、纵向变形及损伤演化的影响更为显著。提高纵向力虽可增强隧道整体性和环间协同变形能力,但可能导致软硬交界面局部压缩损伤及软土层侧拉伸损伤进一步发展。因此,针对穿越软硬不均地层的盾构隧道,应综合考虑纵向残余顶推力、环间连接刚度与局部损伤风险之间的关系,并重点加强软硬交界面及软土侧的变形控制与长期监测。

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] Berthoz N, Branque D, Subrin D, et al. Face failure in homogeneous and stratified soft ground: theoretical and experimental approaches on 1g EPBS reduced scale model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30: 25-37.

[3] Zhao K, Bonini M, Debernardi D, et al. Computational modelling of the mechanised excavation of deep tunnels in weak rock[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 66: 158-171.

[4] He C, Feng K, Fang Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2012, 13(11): 858-869.

[5] Shen S L, Wu H N, Cui Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 309-323.

[6] Wu H N, Shen S L, Chen R P, et al. Three-dimensional numerical modelling on localised leakage in segmental lining of shield tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103549.

[7] Koizumi A, Murakami H, Nishino K. Study on the analytical model of shield tunnel in longitudinal direction[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1988(394): 79-88.

[8] Shiba Y, Kawashima K, Obinata N, et al. An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analyses [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1988, 1988(398): 319-327.

[9] 朱合华, 桥本正. 盾构隧道管片接头衬砌系统的两种受力设计模型[J]. 工程力学, 1996, 13(A3): 395-399.
Zhu Hehua, Qiao Benzheng. Two stress design models of segment joint lining system in shield tunnel[J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(A3): 395-399.

[10] 朱合华, 崔茂玉, 杨金松. 盾构衬砌管片的设计模型与荷载分布的研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 190-194.
Zhu Hehua, Cui Maoyu, Yang Jinsong. Design model for shield lining segments and distribution of load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 190-194.

[11] 朱伟, 黄正荣, 梁精华. 盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 940-947.
Zhu Wei, Huang Zhengrong, Liang Jinghua. Studies on shell-spring design model for segment of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 940-947.

[12] 黄正荣. 基于壳—弹簧模型的盾构衬砌管片受力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007:93-114.
Huang Zhengrong. Study on the mechanics character of shield tunnel segment with shell-spring model[D]. Nanjing: Hohai University, 2007:93-114.

[13] 张治国, 陈杰, 朱正国, 等. 基于 Kerr 地基模型的盾构下穿诱发既有非连续隧道纵向变形分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2238-2247.
Zhang Zhiguo, Chen Jie, Zhu Zhengguo, et al. Longitudinal deformations of existing discontinuous tunnels induced by shield tunneling based on Kerr foundation model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2238-2247.

[14] Guo W Q, Feng K, Mu H X, et al. Analysis method for longitudinal structural response of shield tunnels incorporating iterative updates of circumferential joint bending and shear stiffness [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2026, 175: 107747.

[15] 何川, 郭瑞, 肖明清, 等. 铁路盾构隧道单、双层衬砌纵向力学性能的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 40-46.
He Chuan, Guo Rui, Xiao Mingqing, et al. Model test on longitudinal mechanical properties of single and double layered linings for railway shield tunnel [J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 40-46.

[16] 吴庆, 杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 57-66.
Wu Qing, Du Shouji. Model test on influence of ground heaped load on existing shield tunnel structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014,

10(1): 57-66.

[17] 杨帆. 穿黄超大断面盾构隧道纵向结构性状及设计模式研究[D]. 济南: 济南大学, 2019:35-51.
Yang Fan. Study on longitudinal structural behavior and design model of super large section shield tunnel crossing the Yellow River [D]. Jinan :Jinan University, 2019: 35-51.

[18] 梁荣柱, 曹世安, 向黎明, 等. 地表堆载作用下盾构隧道纵向受力机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 736-747.
Liang Rongzhu, Cao Shian, Xiang Liming, et al. Experimental investigation on longitudinal mechanical mechanism of shield tunnels subjected to ground surface surcharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 736-747.

[19] 孙廉威, 秦建设, 洪义, 等. 地面堆载下盾构隧道管片与环缝接头的性状分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(8): 1509-1518.
Sun Lianwei, Qin Jianshe, Hong Yi, et al. Shield tunnel segment and circumferential joint performance under surface surcharge [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(8): 1509-1518.

[20] 张毫毫, 雷明锋, 刘凌晖, 等. 新建隧道下穿施工对既有上卧盾构隧道扰动影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(2): 396-404.
Zhang Haohao, Lei Mingfeng, Liu Linghui, et al. Study on the influence law of underpass construction of new tunnel on the disturbance of existing upper shield tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(2): 396-404.

[21] 桑运龙, 刘学增, 张强. 基于螺栓-凹凸榫连接的地铁盾构隧道管片环缝接头刚度分析及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 19-27.
Sang Yunlong, Liu Xuezeng, Zhang Qiang. Stiffness analysis and application of segment annular joint based on bolt-concave and convex tenon connection in metro shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 19-27.

[22] Wang Z, Wang L Z, Li L L, et al. Failure mechanism of tunnel lining joints and bolts with uneven longitudinal ground settlement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 300-308.

[23] Shi C H, Cao C Y, Lei M F, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 175-188.

[24] 钟小春, 张金荣, 秦建设, 等. 盾构隧道纵向等效弯曲刚度的简化计算模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 132-136.
Zhong Xiaochun, Zhang Jinrong, Qin Jianshe, et al. Simplified calculation model for longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel and its influence factors′ analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 132-136.

[25] Hu J, Chai S B, Wang H C, et al. Longitudinal mechanical properties of shield tunnels crossing soft and hard mutation strata [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(12): 04023225.

[26] 阮恒丰, 梁荣柱, 康成, 等. 地表突发堆载作用下地铁盾构隧道变形机制三维精细化数值模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 35-45.
Ruan Hengfeng, Liang Rongzhu, Kang Cheng, et al. Three-dimensional elaborate numerical modelling analysis on the deformation mechanism of metro shield tunnel induced by sudden surface surcharge [J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(1): 35-45.

[27] 廖少明, 门燕青, 肖明清, 等. 软土盾构法隧道纵向应力松弛规律的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 795-803.
Liao Shaoming, Men Yanqing, Xiao Mingqing, et al. Field tests on longitudinal stress relaxation along shield tunnel in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 795-803.

[28] 沐海星, 封坤, 郭文琦, 等. 超大直径盾构隧道管片结构力学行为与破坏特征研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 125-134.
Mu Haixing, Feng Kun, Guo Wenqi, et al. Study on the mechanical behavior and failure characteristics of ultra-large diameter shield tunnel segment structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(1): 125-134.

[29] 门燕青, 李虎, 周建国, 等. 考虑盾构隧道纵向应力松弛的环缝渗漏水计算分析[J]. 土木工程学报, 2019(增刊 1): 99-105.
Men Yanqing, Li Hu, Zhou Jianguo, et al. Calculation of circular joint leakage considering the longitudinal stress relaxation along the shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(S1): 99-105.

[30] Guo W Q, Feng K, Mu H X, et al. Investigation on the force transmission performance between segmental rings of super-large cross-section shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 164: 106779.

[31] Mu H, Feng K, Yang S, et al. Investigation on internal force transmission and failure characteristics of segmental linings for super-large cross-section shield tunnels[J]. Structures, 2025, 74: 108564.

[32] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].

[33] Sidoroff F. Description of anisotropic damage application to elasticity[C] // PhysicalNon-Linearities in Structural Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981: 237-244.

[34] 郭建光, 王星, 董唱唱, 等. 浆液时效性与管片摩擦作

用下管片上浮研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(2): 73-80.
Guo Jianguang, Wang Xing, Dong Changchang, et al. Study on tunnel segment uplift under the coupled effect of grout time-dependent properties and segmental friction [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(2): 73-80.

[35] 杨绍毅, 封坤, 沐海星, 等. 穿越土-岩复合地层的盾构隧道纵向地震响应研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(增刊2): 133-141.
Yang Shaoyi, Feng Kun, Mu Haixing, et al. Study on longitudinal seismic response of shield tunnel crossing soil-rock composite strata[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(S2): 133-141.

[36] Mu H X, Feng K, Li J L, et al. Influence of inclination angle on the failure mechanisms and shear capacity of concave-convex tenon connections in shield tunnel joints [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2026, 174: 107700.

[37] 郑贺民, 刘雪婷, 秦承帅, 等. 海相软土高铁隧道管-土相互作用试验研究与数值分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2026, 8(2): 1-16.
Zheng Hemin, Liu Xueting, Qin Chengshuai, et al. Experimental investigation and numerical analysis of pipeline-soil interaction in high-speed railway tunnel in marine soft soil[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(2): 1-16.

[38] Huang Z, Zhang C L, Ma S K, et al. Study of the mechanical behaviour and damage characteristics of three new types of joints for fabricated rectangular tunnels using a numerical approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 118: 104184.

[39] Wu H N, Chen S, Chen R P, et al. Deformation behaviors and failure mechanism of segmental RC lining under unloading condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104687.

[40] 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.

(编辑:张延欢)