

DOI: 10.11779/CJGE201904011

# 复合地层盾构隧道管片施工病害特征及成因分析

苏 昂, 王士民\*, 何 川, 卢岱岳, 方若全

(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:** 上软下硬复合地层盾构隧道施工, 极易发生管片裂损病害, 对盾构隧道长期安全影响显著。以某地铁盾构隧道为依托, 针对施工阶段管片裂损情况进行了大量现场调查, 总结归纳了管片裂损分布规律及裂损特征。在此基础上, 采用理论分析和扩展有限单元法, 系统分析了管片裂损的成因机制。研究结果表明: 盾构隧道管片衬砌裂损按照所占比例由大到小依次为环向区域性剥落、纵向裂纹、边角部裂损, 环向区域性剥落和纵向裂纹属于结构性裂损, 边角部裂损属于材料性裂损。纵向裂纹与千斤顶推力和接触面不平整有关, 其产生及扩展多沿千斤顶推力分界面分布, 裂纹扩展是能量积累—释放的往复过程, 表现出台阶式渐进递增的特点, 开裂机制为受拉破坏。环向区域性剥落与环间错台有关, 与榫槽径向允许位移量 8 mm 相等的错台高差是管片发生环向区域性剥落的临界值。在上软下硬复合地层采用错缝拼装进行盾构隧道施工时, 应避免使用带榫管片或减小管片榫槽深度。

**关键词:** 盾构隧道; 上软下硬地层; 不良施工荷载; 错台; 管片病害

中图分类号: TU435; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)04-0683-10

**作者简介:** 苏 昂(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事盾构隧道结构理论研究工作。E-mail: suang@163.com。

## Disease characteristics and causes analysis of segments of shield tunnels in composite stratum during construction

SU Ang, WANG Shi-min, HE Chuan, LU Dai-yue, FANG Ruo-quan

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The construction of shield tunnels in upper-soft and lower-hard composite strata is easy to cause cracking diseases of segments, and has a serious impact on their long-term safety. Based on a metro shield tunnel, a large number of field investigations are carried out for the segment cracks during the construction stage. The distribution laws and characteristics of cracking damage of linings are summarized. On this basis, causes for cracking of segments are analyzed by means of the extended finite element method. The results show that the scale of proportion of cracking forms in the shield tunnels from large to small is the spallings in the circumferential region, longitudinal cracks, and cracks at corners and edges. The first two can be described as the structural failure while the last one can be indicated as the material failure. The generation and expansion of longitudinal cracks, which are related to the jack thrust and the unevenness of contact surface, mostly distribute along the thrust interface of jacks. The propagation of cracks is a reciprocating process of energy accumulation and release with a step shape growth. The mechanism of fracture is tensile failure. The spallings in the circumferential region are related to slab staggering between the rings. The critical value of slab staggering for the spallings in the circumferential region is 8 mm, which is the same as the allowable radial displacement of mortise and tenon. During the construction period of shield tunnels with staggered joint assembly in upper-soft and lower-hard composite strata, the segments with tenon should be avoided and the depth of the grooves should be reduced.

**Key words:** shield tunnel; upper-soft and lower-hard stratum; undesirable construction load; slab staggering; segment disease

## 0 引 言

盾构法以其安全高效、绿色环保的特点, 成为城市地铁和地下隧道最主要的施工方法<sup>[1]</sup>。随着城市地铁规模的不断扩大, 地铁穿越地层愈加复杂, 施工过程中质量问题逐渐增多。上软下硬复合地层是广州、深圳、福州等地区典型地质条件, 盾构机在穿越该类

地层时, 盾构姿态控制不佳, 施工质量问题突出, 管片裂损是其中最普遍的质量问题之一<sup>[2-3]</sup>。管片裂损不仅会引起隧道渗漏水, 影响隧道的耐久性, 在地层围

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578461)

收稿日期: 2017-11-10

\*通讯作者(E-mail: wangshimin@swjtu.edu.cn)

岩及车辆循环荷载作用下，甚至会影响结构承载力危及结构安全。

国内外学者及工程研究人员针对盾构隧道裂损病害进行了大量研究。Li 等<sup>[4]</sup>搜集大量的盾构隧道病害样本，利用最小二乘法回归公式，建立 TSI 综合隧道服务指标，用于评价盾构隧道病害情况。王如路<sup>[5]</sup>针对上海地区软土地铁隧道变形现象，对其特征及原因进行了分类论述。袁勇等<sup>[6]</sup>针对上海打浦路越江盾构隧道严重老化问题，通过系统调查得出现阶段该隧道病害的主要影响因素。董飞等<sup>[7]</sup>基于北京地铁隧道病害检测结果，分析了结构形式、配筋和运营时间对盾构隧道病害状态的影响。赖金星等<sup>[8]</sup>通过采用现场调查、GPR 探测、超声波裂缝检测等方法，系统分析了管片病害状态及原因。Chen 等<sup>[9]</sup>、Mo 等<sup>[10]</sup>利用 ADINA 和 ANSYS 软件对施工阶段和运营阶段的裂缝进行了数值计算，研究了螺栓孔附近裂缝的开展规律，提出了提升螺栓孔附近混凝土抗裂性能的方法。杨雨冰等<sup>[11]</sup>基于断裂力学的有限元方法，从单块管片、2 块管片、整环衬砌结构 3 个层次探讨了盾构隧道管片结构的破损机制；陈俊生等<sup>[12]</sup>采用足尺试验和三维有限元模拟施工阶段管片局部开裂，得出施工过程中出现的开裂和破损是由管片间相对扭转引起的结论；周帅等<sup>[13]</sup>通过 ANSYS 建立三维数值模型，分析了管片衬砌剥落，材料劣化、附加荷载等因素影响下隧道结构的承载能力变化规律。张建刚等<sup>[14]</sup>通过管片组合体加载模型对管片应力分布和传递特征进行了分析，得出了裂缝产生的主要原因并给出了相应的工程措施。

以上针对盾构隧道裂损病害的研究，多采用现场调查和数值模拟方法，分析隧道开裂的部分因素。既有现场调查主要针对均质地层运营期盾构隧道病害开展，少有关于上软下硬复合地层施工期的研究成果见诸报端。

鉴于此，本文以某上软下硬复合地层地铁盾构隧道为依托工程，对施工阶段隧道出现的管片衬砌裂损现象进行大量的现场调查，并对病害调查结果进行统计分析，在此基础上，采用理论分析和扩展有限单元法，探明了管片裂损的成因机制，研究结果对上软下硬地层中盾构隧道施工具有一定参考价值。

1 管片病害调查区间概况

1.1 调查区间概况

该地铁总长度为 24.89 km，所在地区地貌形态大部分场地为山前冲积平原及河流冲淤积平原地貌类型，部分地段为剥蚀残山地貌类型。隧道先后穿越粉质粘土、残积砾质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗

岩、弱风化花岗岩等，与北京、上海等地层相对单一的城市比较起来，该地区的地质条件表现出地形地貌起伏多变、地层上软下硬、岩性复杂多样等独特特征，区间地质情况如图 1 所示。

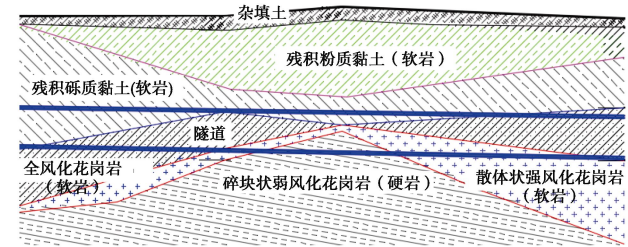


图 1 区间地质剖面图

Fig. 1 Geological profile

1.2 管片衬砌结构特征

该地铁工程管片环外径 6.2 m，内径 5.5 m，管片厚度 350 mm，幅宽 1.2 m，管片衬砌采用“3+2+1”分块方式，管片构造如图 2 所示。管片环间设置凹凸榫，凸榫端部宽 127 mm，凹槽内部宽 135 mm，环间凹凸榫连接时凸榫在凹槽中有 8 mm 的自由调整余量，管片环间凹凸榫构造如图 3 所示。

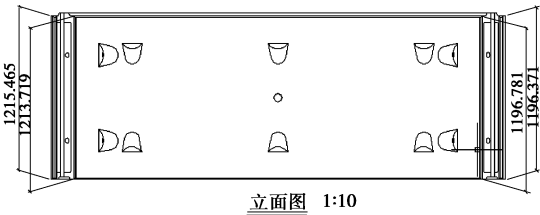


图 2 管片构造图

Fig. 2 Sketch of segment structures

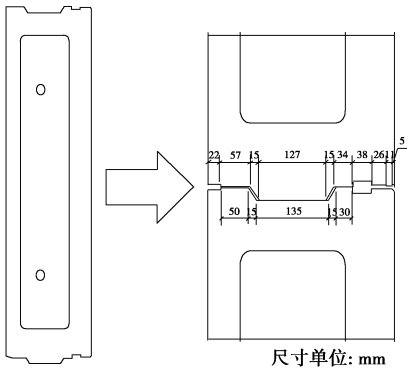


图 3 管片环间凹凸榫构造图

Fig. 3 Sketch of tenon between segment rings

2 管片病害调查及特征分析

2.1 管片病害调查统计分析

本次调查区间隧道总长 3.61 km，调查区间管片共 3008 环，调查区间出现裂损 443 处，统计结果如表 1 所示。

表 1 裂损统计结果

Table 1 Results of crack statistics

项目	F	B	L	总计
边角部裂损	5	25	27	57
纵向裂纹	0	90	93	183
环向区域性剥落	10	116	77	203
总计	15	231	197	443

考虑开裂位置、分布及走向等因素,调查区间盾构隧道管片裂损按其几何形态特征可分为边角部裂损、纵向裂纹、环向区域性剥落三类,所占比例依次为 13%, 41%, 46%。环向区域性剥落数量最多,纵向裂纹略少于环向区域裂损,边角部裂损数量最少。在所有裂损形态中,环向区域性剥落与纵向裂纹占比最高,是施工期影响管片质量问题最主要的两个因素。

2.2 管片病害特征分析

(1) 边角部裂损

边角部裂损是盾构隧道施工过程中常见的一种病害,出现在管片 4 个边角处,以管片掘进方向后缘角部居多,表现为轻微裂纹,如图 4 所示。

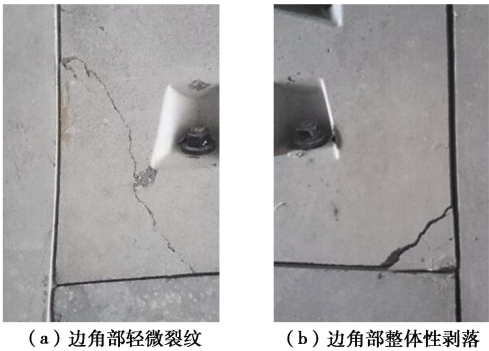


图 4 边角部裂损

Fig. 4 Cracks at corners and edges

a) 分布规律

将整环管片等分成 8 个区域,统计每个区域的边角部裂损数量,记录在该区域中心位置(下同),得到边角部裂损沿着管片环分布图,如图 5 所示。可以看出,边角部裂损在整环管片各区域均有发生,在拱底左 45° 区域分布最广,在其余区域分布均匀。

边角部裂损在各型管片分布比例如图 6 所示,图中 F、L1、L2、B1、B2、B3 分别表示封顶块、邻接块和标准块管片(下同)。边角部裂损在 F 块与 B3 块中所占比例最小,在 L1 块所占比例最大。边角部裂损在 L1 块、L2 块占比之和达到 47.3%,相比其他管片,边角部裂损在邻接块出现的可能性更大。其原因为,一方面管片拼装误差、地层不均匀沉降等原因的存在,导致 L1 块与 L2 块间插入角减小。另一方面,在上软下硬地层,盾构机姿态不易控制。管片拼装过

程中, F 块容易与 L1 块、L2 块边角部发生碰撞,导致 L1 块、L2 块边角部混凝土脱落,发生边角部裂损病害。

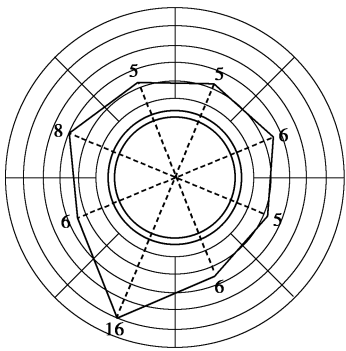


图 5 边角部裂损沿着管片环分布图

Fig. 5 Distribution of cracks at corners and edges along segment ring

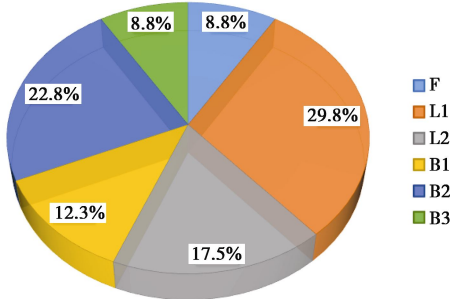


图 6 边角部裂损管片分布比例图

Fig. 6 Ratios of segments with cracks at corners and edges

b) 裂损特征

边角部裂损长度统计结果见表 2, 边角部裂损长度最大值为 628 mm, 最小值为 103 mm, 平均值为 312 mm。图 7 是边角部裂损长度分布图, 可以看出, 边角部裂损长度较小, 多集中在 200~400 mm 范围, 裂损长度离散程度较高。通过裂纹深度检测仪测量发现, 边角部裂纹深度均较浅, 由该裂纹产生的混凝土掉块, 仅为混凝土保护层的部分脱落, 属于材料性裂损。管片在吊装或运输过程中受到不可预见的外力作用, 造成管片内部出现一定程度的微裂损, 施工期不良荷载使管片微裂损程度进一步提高, 造成边角部裂损出现。

表 2 边角部裂损长度统计结果

Table 2 Statistical results of crack length at corners and edges

数量	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm
57	628	103	312

(2) 纵向裂纹

纵向裂纹是盾构隧道施工中最常见病害形式, 本次调查共发现两类纵向裂纹——纵向前裂纹和纵向后裂纹, 所占比例分别为 53%, 47%。纵向前裂纹始于管片掘进方向前部环向边缘, 紧邻管片凸榫, 沿幅宽

方向向后扩展,集中出现在相邻管片纵向接缝的附近,如图 8 (a) 所示。后裂纹始于管片掘进方向后部环向边缘,紧邻管片凹槽,沿幅宽方向向前扩展,集中出现在相邻管片纵向接缝的附近,如图 8 (b) 所示。两类裂纹均表现出明显的区域集中性,沿环向多位于手孔两侧,较少出现裂纹穿越手孔的现象。

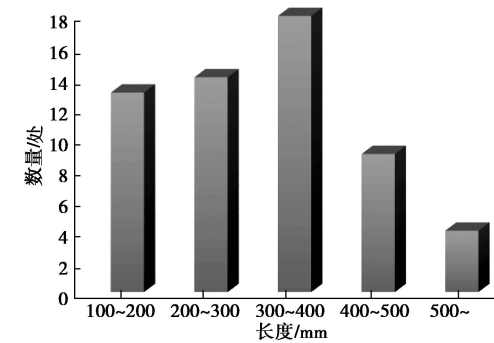


图 7 边角部裂损长度分布图

Fig. 7 Distribution of length of cracks at corners and edges

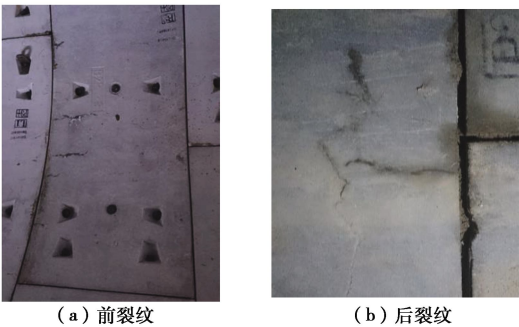


图 8 纵向裂纹

Fig. 8 longitudinal cracks

a) 分布规律

纵向裂纹沿着管片环分布如图 9 所示,纵向裂纹在整环管片各区域均有发生,其形状关于圆心大致呈中心对称分布。该裂纹主要集中在左、右拱腰,拱顶分布最少。

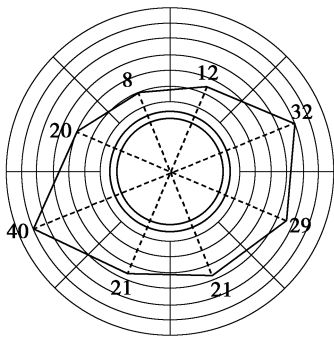


图 9 纵向裂纹沿着管片环分布图

Fig. 9 Distribution of longitudinal cracks along segment rings

纵向裂纹在各型管片分布比例如图 10 所示,纵向裂纹未出现在 F 块中,该裂纹在 L1 块、L2 块中所占

比例较大,分别为 25.1%, 25.7%远大于在其他管片中比例。纵向裂纹在 L1 块、L2 块所占比例之和达到 50.8%,相比其他管片,纵向裂纹在邻接块出现的可能性更大。

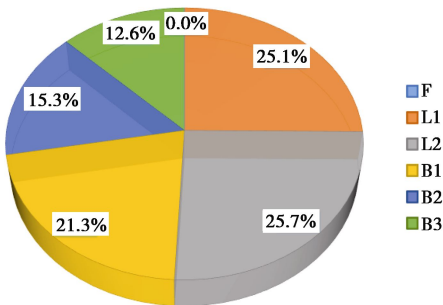


图 10 纵向裂纹管片分布比例图

Fig. 10 Ratios of segments with longitudinal cracks

b) 裂纹特征

纵向裂纹长度统计结果见表 3,纵向裂纹长度最大值为 1100 mm,最小值为 120 mm,平均长度为 511 mm。

纵向裂纹的长度分布如图 11 所示,裂纹多集中在 300~700 mm 区间,表现出非常明显的正态分布特征。纵向最长裂纹为 1100 mm,近乎贯穿管片幅宽方向,若在列车振动和地震荷载作用下,裂纹进一步扩展,将会对管片产生严重的结构性破坏。

表 3 纵向裂纹长度统计结果

Table 3 Statistical results of longitudinal crack length

数量	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm
183	1100	120	511

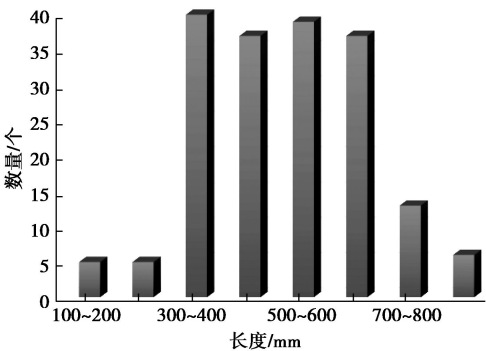


图 11 纵向裂纹长度分布图

Fig. 11 Distribution of length of longitudinal cracks

(3) 环向区域性剥落

一般情况下,环向区域性剥落在盾构隧道中较少出现,但是在调查区间却发现了大量的环向区域性剥落病害,具有出明显的空间连续性特征,如图 12 所示。环向区域性剥落位于管片掘进方向后缘,沿环缝分布于拱顶,表现为较为严重的块状剥落。该剥落区域深度一般止于凹槽内缘,宽度最大延伸至手孔边缘长度。





图 12 环向区域性剥落

Fig. 12 Regional cracks in circumferential direction

a) 分布规律

环向区域性剥落沿着管片环分布如图 13 所示,环向区域性剥落集中分布在拱顶左、右 45° 范围,在拱底分布最少,在左、右拱腰分布相当。

环向区域性剥落在各型管片分布比例如图 14 所示,环向区域性剥落在 F 块分布比例最低,仅为 4.9%,在其他块中的比例大致相等。其原因为, F 块长度较短,在环向螺栓约束下,相邻管片错台对管片凹槽的剪切作用不明显,因而其出现数量最少,剥落程度最弱。

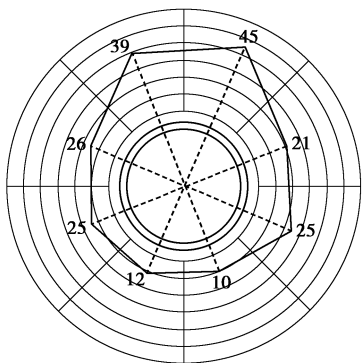


图 13 环向区域性剥落沿着管片环分布图

Fig. 13 Distribution of spallings in circumferential region along segment rings

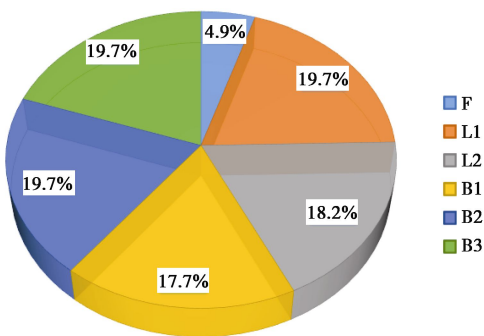


图 14 环向区域性剥落管片分布比例图

Fig. 14 Ratios of segments with spallings in circumferential region

b) 裂损特征

环向区域性剥落长度、宽度统计结果见表 4, 环

向裂纹长度最大值为 3190 mm, 最小值为 60 mm, 平均长度为 1443 mm。环向裂纹宽度最大值为 230 mm, 最小值为 50 mm, 平均长度为 183 mm。

表 4 环向区域性剥落长度、宽度统计结果

Table 4 Statistical results of length and width of spallings in circumferential region

数量	特征	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm
203	长度	3190	60	1443
	宽度	230	50	183

环向区域性剥落长度、宽度分布如图 15, 16 所示,环向裂缝长度集中在 70~1000 mm 区间,长度整体偏小,宽度集中在 100~230 mm 区间,宽度整体偏大,环向区域性剥落形状接近短条形。

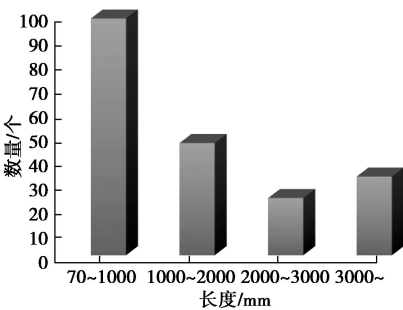


图 15 环向区域性剥落长度分布图

Fig. 15 Distribution of length of spallings in circumferential region

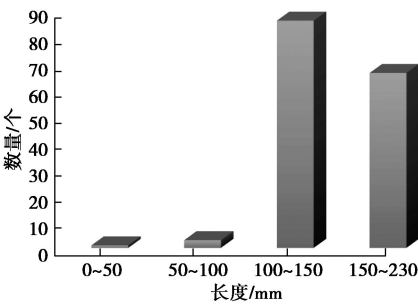


图 16 环向区域性剥落宽度分布图

Fig. 16 Distribution of width of spallings in circumferential region

环向区域性剥落平均弧长为 1443 mm, 接近管片内弧长度的一半, 其最大值达到 3190 mm, 已遍布管片环向后缘, 并延伸至相邻管片。管片手孔距离边缘 196 mm, 区域性剥落宽度平均值为 183 mm, 已基本接近手孔外缘, 一旦管片后缘凹槽处产生区域性剥落, 其破损影响均会扩展至手孔位置, 部分脱落区域宽度最大值达到了 230 mm, 已延伸至手孔内边缘, 对管片产生更为严重的结构性破坏。

3 管片病害成因分析

管片在吊装或运输过程中发生碰撞,管片拼装和注浆施工不到位,围岩压力过大或分布不均匀,管片纠偏时贴片不平整、千斤顶推力不均、管片间环缝压缩量不一致等,均会引起管片开裂。而对于本次研究所调查的盾构隧道区间而言,导致其管片衬砌发生裂损病害的主要原因是盾构施工过程中所产生的不良施工荷载和不良接触状态。

3.1 不良施工荷载

现有文献表明<sup>[15]</sup>,盾构机在千斤顶推力的作用下向前掘进,千斤顶推力反作用于管片上,是盾构隧道管片衬砌结构施工过程中受到的最大外力。

该地铁所在地区地层上软下硬、地形起伏较大,盾构机姿态不易控制。为满足施工要求,需要通过油缸调整千斤顶各分区的出力以实时控制盾构机姿态,往往会导致部分盾构管片将承受来自千斤顶差异较大的不均匀顶推荷载,管片局部将会出现应力集中现象,进而产生裂纹,随着千斤顶推力的增大进而出现破损。

接下来,基于扩展有限元理论<sup>[16-18]</sup>,利用 ABAQUS 有限元软件,建立管片精细化模型,模拟千斤顶推力不均对管片裂损的影响,并对裂纹形态、扩展规律、扩展路径、裂损机制进行深入分析。

(1) 模型建立

本工程采用的盾构机设置 22 对推进千斤顶,按照红色虚线被分为 A、B、C、D 4 个区域,各分区内的千斤顶共用同一油缸加压。本次模拟中目标管片位于管片环右上部,受到 4 组千斤顶作用,其中#1, #2 千斤顶位于 A 区, #3, #4 千斤顶位于 B 区,如图 17 所示。由于管片在拼装、施工过程中会与相邻管片多次挤压及分离,因此环向接触面不能看作铰链或固定约束,为了准确分析相邻管片间的相互作用,在忽略接头螺栓的同时,在标准管片两侧分别建立了两个刚性基座<sup>[9]</sup>,模拟这种复杂的边界条件,如图 18 所示。

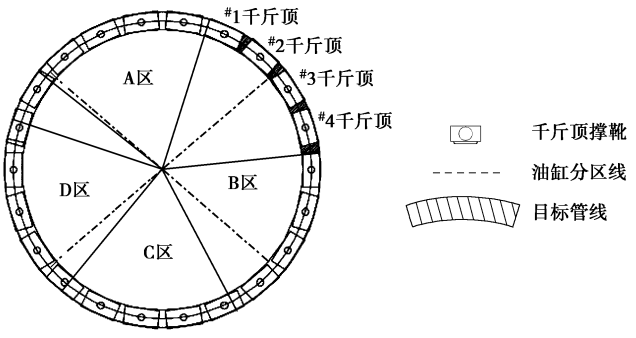


图 17 目标管片  
Fig. 17 Target segments

为简化计算模型,将千斤顶推力转换成均布荷载施加在管片上。根据现场施工参数,换算后软岩中千斤顶荷载大小范围为 6~9 MPa, #1, #2 千斤顶荷载取值为 7.5 MPa。考虑到可能出现盾构机转弯段、盾构机姿态调整、盾构机穿越复杂地层等情况,千斤顶的最大荷载设为该荷载的 2 倍,即 15.0 MPa,目标管片千斤顶荷载大小见表 5。

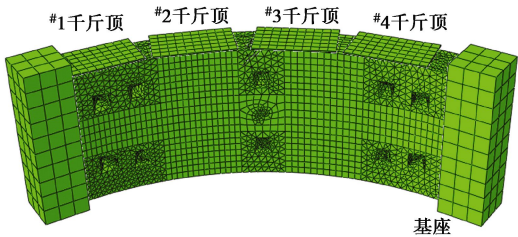


图 18 管片模型

Fig. 18 Segment mode

表 5 目标管片千斤顶荷载  
Table 5 Loads on target segments (MPa)

#1 千斤顶	#2 千斤顶	#3 千斤顶	#4 千斤顶
7.5	7.5	15.0	15.0

(2) 模型参数

管片塑性损伤模型参数<sup>[19]</sup>如下:管片混凝土弹性模量为  $2.648 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.167,剪胀角为  $15^\circ$ ,偏心率为 0.1,双轴与单轴压缩强度比值为 1.16,屈服常数为 0.6667。管片混凝土压缩和拉伸特性见表 6。

表 6 混凝土压缩拉伸特性

Table 6 Compressive and tensile properties of concrete					
压缩			拉伸		
应力 /MPa	非弹性应变	损伤变量	应力 /MPa	非弹性应变	损伤变量
24.019	0	0	1.780	0	0
29.208	0.0004	0.1299	1.457	0.0001	0.30
31.709	0.0008	0.2429	1.113	0.0003	0.55
32.358	0.0012	0.3412	0.960	0.0004	0.70
31.768	0.0016	0.4267	0.800	0.0005	0.80
30.379	0.0020	0.5012	0.536	0.0008	0.90
28.507	0.0024	0.5660	0.359	0.0010	0.93
21.907	0.0036	0.7140	0.161	0.0020	0.95
14.897	0.0050	0.8243	0.073	0.0030	0.97
2.953	0.0100	0.9691	0.040	0.0050	0.99

管片刚度很大,在千斤顶作用下,纵向变形很小,因推力不均匀荷载导致的差异变形更小,管片之间的相对位移可以忽略。管片在脱环之前,未受土水荷载作用,在千斤顶作用下,管片衬砌环有整体沿径向外张趋势,导致管片之间压力较小甚至出现无压力状态。因此,忽略管片环向接触间的摩擦力,管片与基座摩擦系数计算中取 0。管片与千斤顶之间的摩擦系数因其表面粗糙度不同变化较大,本文中摩擦系数取为 0.35<sup>[9]</sup>。

### (3) 边界条件

基座采用全约束, 管片与基座之间在法向上设置硬接触, 管片之间可以传递压力, 并允许接触后分离, 切向上采用基于罚函数法的库仑摩擦模型。管片顶面(凸榫端面)不加约束, 底面(凹槽端面)纵向设置约束, 切向和径向无约束。

### (4) 模拟结果

利用 ABAQUS 有限元软件模拟千斤顶推力不均对管片裂损的影响, 并对裂纹形态、扩展规律、扩展路径、裂损机制进行分析。

#### a) 裂纹形态

千斤顶推力不均情况下, 目标管片裂纹分布如图 19 所示, 受千斤顶推力不均影响, 裂纹集中出现在管片中部位置, 位于千斤顶推力分区边界附近, 其中内弧面出现一条与管片边缘呈  $45^\circ$  的纵向裂纹, 外弧面出现多条纵向裂纹, 顶面裂纹由内弧面沿径向方向向外弧面扩展, 但未贯穿管片。管片裂纹内弧面裂纹与现场调查中普遍出现的纵向前裂纹分布位置及形态吻合, 由此可以断定, 施工过程中的千斤顶推力不均是造成管片前裂纹的主要原因之一。

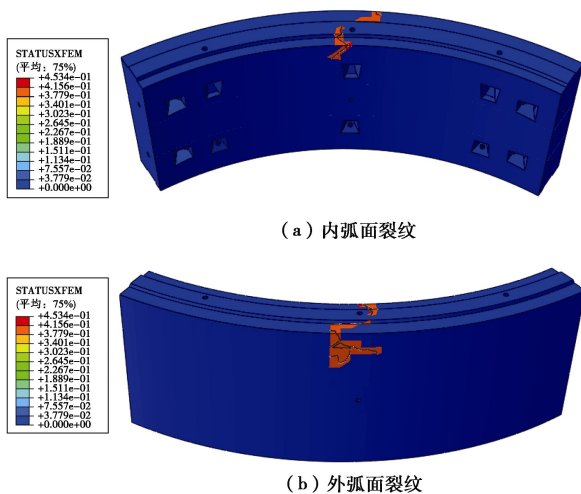


图 19 管片裂纹形态图

Fig. 19 Shapes of segment cracks

#### b) 裂纹扩展规律

管片裂纹长度与压缩量关系曲线见图 20, 裂纹长度变化呈现较为明显的阶梯性递增特征, 裂纹扩展可分为 3 个阶段: 初始裂纹阶段 (BC 段)、内弧面扩展阶段 (DE 段)、外弧面扩展阶段 (FG 段)。相同阶段, 管片压缩量最大差值分别为 0.02, 0.03, 0.01 mm, 裂纹长度最大差值分别为 198, 262, 1062 mm。管片压缩量差异较小, 但裂纹长度差异较大, 表明主裂纹出现之后, 即使微小的外力扰动产生微小的管片压缩量, 也会加速裂纹扩展。

混凝土材料作为典型的脆性材料, 当系统中存储

的弹性应变能满足 (大于或等于) 材料开裂形成新表面所需的表面能时, 裂纹开始扩展, 系统释放的弹性应变能就是裂纹扩展的原动力, 因此裂纹扩展是一个能量积累一释放的往复过程, 在图中表现为明显的阶梯性。如图 20 所示, 管片加载过程中共出现了 3 次管片压缩量突变现象, 即初始阶段突变 (AB 段)、内弧面扩展阶段突变 (CD 段)、外弧面扩展阶段突变 (EF 段), 3 个阶段的突变值分别为 0.03, 0.06, 0.09 mm。在千斤顶作用下, 管片的压缩量与管片能量呈正相关, 相邻扩展阶段的管片压缩量差异大, 管片能量差异较大。

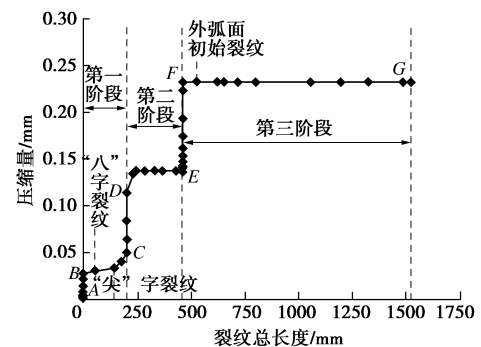


图 20 管片裂纹长度与压缩量关系

Fig. 20 Relationship between crack length and amount of compression

#### c) 裂纹扩展路径

从计算结果可以看出, 管片裂纹发生扩展过程可以分为初始裂纹、内弧面裂纹扩展和外弧面裂纹扩展 3 个阶段。

第一阶段: 初始裂纹阶段。当管片压缩量达到 0.03 mm 时, 管片中部出现初始开裂, 裂纹长 51 mm, 呈“八”字形, 开裂位置为千斤顶不同分区边界, 如图 21 (a) 所示。随着千斤顶推力的继续增大, “八”字裂纹延伸扩展形成“尖”字主裂纹, 裂纹长 140 mm, 裂纹与管片边缘呈  $45^\circ$  夹角, 随后裂纹长度保持不变, 如图 21 (b) 所示。

第二阶段: 内弧面裂纹扩展阶段。当管片压缩量达到 0.13 mm, “尖”字主裂纹同时向两端扩展: 顶面沿径向向管片外弧面扩展, 内弧面沿着幅宽向后方扩展, 如图 21 (c) 所示, 该阶段管片压缩量为 0.14 mm, 裂纹总长度达到 461 mm, 此后裂纹保持较长时间稳定, 系统变形能逐步积累。

第三阶段: 外弧面裂纹扩展阶段。当管片压缩变形量达到 0.23 mm 时, 管片外弧面出现首条裂纹, 该条裂纹长 63 mm, 与管片环向边界近似平行, 如图 21 (d) 所示。随后, 外弧面大面积开裂, 如图 21 (e) 所示, 外弧面与顶面裂纹合并, 扩展成最终多条纵向



裂纹,如图 21 (f))所示,此时管片压缩总量为 0.24 mm,裂纹总长度为 1522 mm。在此之后,裂纹压缩量保持不变,而管片长度持续增大,表明管片结构裂纹扩展加剧,逐渐演化为管片区域性破坏,承载能力显著降低。

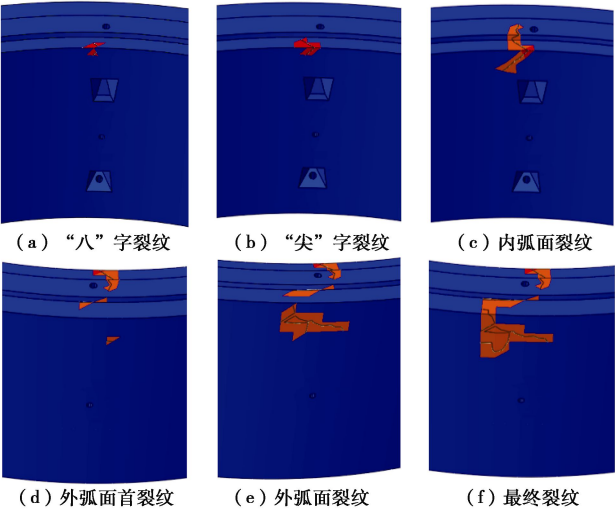


图 21 管片裂纹扩展路径

Fig. 21 Paths of crack propagation in segments

d) 管片裂损机制

管片起裂时刻最大主应力和最大剪应力云图,如图 22 (a)、(b) 所示。管片最大主应力最大值为 1.045 MPa,发生在管片中部位置,管片剪应力最大值为 0.983 MPa,发生在凸榫与管片顶部相交处。管片开裂位置最大主应力为 1.045 MPa,剪应力为 0.512 MPa。最大主应力与剪应力的最大值量值相当,管片的最大主应力最大值所在位置与初始裂纹位置相一致,表明管片裂纹产生是其最大拉应力超过材料极限抗拉强度所致。

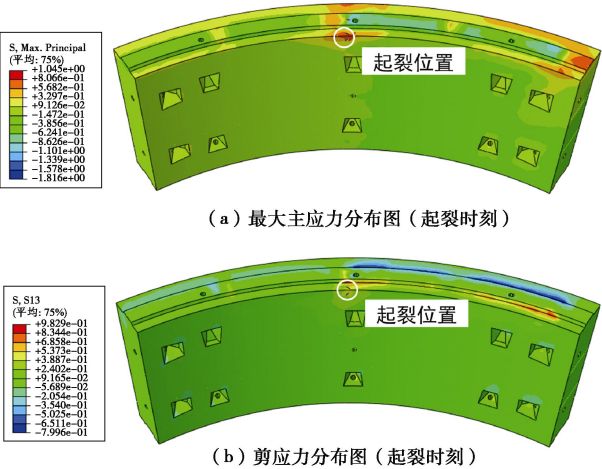


图 22 千斤顶推力不均下管片裂纹分布

Fig. 22 Distribution of cracks on segments under uneven jacking force

3.2 不良接触状态

(1) 管片接触面不平整

纵向裂纹分为纵向裂纹前裂纹、后裂纹两种类型,其产生原因与管片环间接触面不平整有关。纵向前裂纹多出现在相邻管片环的纵向接缝的前方,沿着幅宽方向向后扩展,纵向后裂纹多出现在相临管片环的纵向接缝附近,沿着幅宽方向向前扩展。由于拼装精度不佳,相邻环管片出现纵向不平整接触面,在极端情况下甚至会出现纵向错台或者喇叭口不良接触,造成目标管片局部悬空,如图 23 (a)、(b) 所示。

当相邻环管片出现图 23 (a) 所示的纵向错台不良接触,目标管片则受到非均匀反力约束,在千斤顶推力的作用下前部受弯,进而在管片前部区域产生局部拉应力集中现象,当其最大主应力超过其抗拉强度时引起管片开裂破坏,形成纵向前裂纹,由于错台处应力集中最明显,此处则出现最长前裂纹。当相邻环管片出现图 23 (b) 所示的“喇叭口”接触,目标管片则受到梯形约束反力作用,在千斤顶推力作用下,在千斤顶推力的作用下后部受弯,进而在管片后缘产生局部应力集中现象,当其最大主应力超过其抗拉强度时引起管片开裂破坏。此外,如千斤顶存在推力过大、推力不均、推力偏心、推力偏角等不良荷载条件时,这两种弯曲作用将被显著放大,将极大的加剧管片开裂过程。

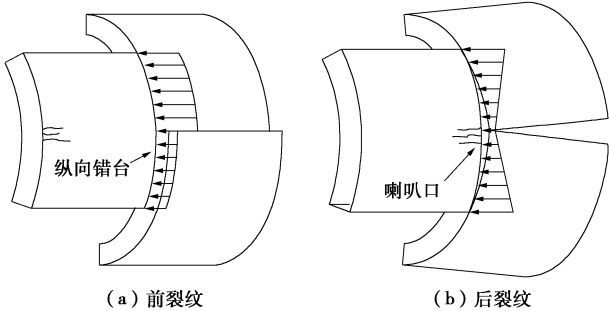


图 23 纵向裂纹开裂原理示意图

Fig. 23 Cracking principles of longitudinal cracks

(2) 管片错台

该地铁隧道所在地层为上软下硬地层,地形地貌起伏多变,盾构机姿态不易控制,盾构机姿态与衬砌环走向配合不佳,管片易受到盾壳挤压出现径向位移,导致错台的形成。该地铁隧道出现纵向错台和环间错台两种错台形式,两种错台形式在某些特定情况下也有叠加出现的现象。两种错台对管片的影响分别为:纵向错台导致管片环间接触面不平整产生,环间错台导致管片环向区域性剥落产生。

本次调查记录环向区域性剥落累计数量与错台高差关系,如图 24 所示。从图 24 中可以看出,本次调查共统计 203 处环向区域性剥落,管片环向区域性剥



落通常出现在管片环间错台较大的位置, 以错台高差 8 mm 为界, 当环间错台量超过 8 mm 以后, 出现环向区域性剥落的数量急剧增大, 占比高达 82.3%。说明 8 mm 错台高差是管片发生环向区域性剥落的临界值。

通过对比管片的设计资料发现, 管片榫槽的径向允许位移值恰好同为 8 mm。当错台高差在 8 mm 范围内时, 在错台量逐渐增大至 8 mm 的过程中, 相邻环管片间可以在径向进行一定程度的自由位移, 由此产生应力集中程度并未显著超出管片的抗拉强度, 管片剥落数量较少。当错台量超过 8 mm 时, 相邻环管片间在径向的自由位移受到榫槽的约束, 引起管片凹槽内侧应力集中程度升高, 且该部位为素混凝土, 内部并未配置钢筋抵抗开裂, 在相邻管片凸榫端的剪切作用下管片凹槽破损脱落, 剪切断面位于凸榫与凹槽的边界处。并随着错台高差的增大, 破损区域进一步扩展形成了横贯拱顶的环向破损、脱落。

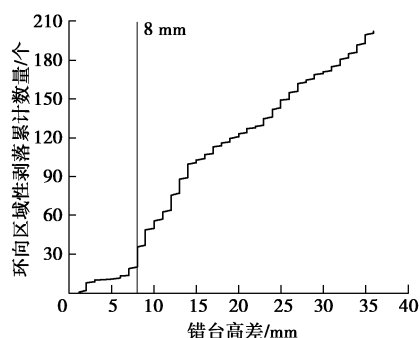


图 24 环向区域性剥落数量随错台高差变化

Fig. 24 Variation of number of spallings in circumferential region with height difference of staggered platform

管片结构设置榫槽、采用错缝拼装形式虽然能够在一定程度上增强隧道结构的纵向刚度, 但也同时会大幅度提高结构对拼装精度的敏感性, 一旦出现超过限值的拼装误差, 会使管片凹槽区域应力集中程度骤增, 形成裂纹, 甚至出现整体性脱落。在上软下硬地层采用错缝拼装进行盾构隧道施工时, 应避免使用带榫管片或合理调整管片榫槽参数。

### 3.3 地层不均匀性对管片裂损的影响

上软下硬地层是典型的不均匀地层, 对管片裂损病害的发生发展影响显著。上述千斤顶推力不均、接触面不平整、管片错台等不良施工荷载与管片不良接触状态, 归根结底则源于上软下硬地层的不均匀性。

上软下硬地层的不均匀性易造成盾构掘进姿态不佳, 严重的上软下硬地层无法通过优化刀具配置予以解决, 施工中为调整盾构姿态, 通常会调整千斤顶各分区的出力, 往往会导致部分盾构管片将承受来自千斤顶差异较大的不均匀顶推荷载, 致使管片局部受强拉或受强剪作用而发生开裂, 严重时直接影响到管片

衬砌结构的整体稳定和长期安全。同时上软下硬地层盾构施工, 不良的盾构姿态还会造成不同程度的管片错台, 严重错台将引起管片环向区域破损, 当管片衬砌结构设置有纵向榫槽结构时, 破损范围及破损程度将会出现激增现象。

## 4 结 论

本文以某上软下硬复合地层地铁盾构隧道为依托工程, 对施工阶段管片衬砌裂损现象进行了大量的现场调查, 并对病害调查结果进行了统计分析。在此基础上, 采用理论分析和扩展有限元法探明了管片裂损的成因机制, 得出以下 4 点结论。

(1) 盾构隧道管片衬砌施工期裂损按形式可分为环向区域性剥落、纵向裂纹和边角部裂损 3 种形式, 3 种裂损形式所占比例由大到小依次为环向区域性剥落、纵向裂纹和边角部裂损。

(2) 纵向裂纹与千斤顶推力和接触面不平整有关。纵向裂纹沿千斤顶推力分界面分布, 其形态为单条或多条线状裂纹, 扩展路径沿径向由内弧面至外弧面。裂纹扩展是一个能量积累一释放的往复过程, 表现出“台阶式”渐进递增的特点。其开裂机制为最大拉应力超过材料极限抗拉强度的受拉破坏。

(3) 环向区域性剥落多位于拱顶左右  $45^\circ$  范围内, 呈现出明显的空间连续性, 是施工期最严重的病害。环向区域性剥落与管片环间错台有关, 与榫槽径向允许位移量 8 mm 相等的错台高差是管片发生环向区域性剥落的临界值, 控制环间错台高差在榫槽径向允许位移量以内, 可大幅减小环向区域性剥落发生的概率。

(4) 在上软下硬地层采用错缝拼装进行盾构隧道施工时, 为减少管片裂损病害的发生, 应避免使用带榫管片或合理调整管片榫槽参数。

## 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. (in Chinese))
- [2] 谭忠盛, 洪开荣, 万姜林, 等. 软硬不均地层盾构姿态控制及管片防裂损技术[J]. 中国工程科学, 2006(12): 92 - 96. (TAN Zhong-sheng, HONG Kai-rong, WAN Jiang-lin, et al. Shield driven tunneling in the complex layer: direction control of shield and preventing segment crack[J].

- Engineering Sciences, 2006(12): 92 - 96. (in Chinese))
- [3] 宋书显. 盾构大体积管片裂纹分析[J]. 隧道建设, 2006(5): 56 - 59, 73. (SONG Shu-xian. Analysis on cracks of large scale segments for shield-driven tunnels[J]. Tunnel Construction, 2006(5): 56 - 59, 73. (in Chinese))
- [4] LI X J, LIN X D, ZHU H H, et al. Condition assessment of shield tunnel using a new indicator: the tunnel serviceability index[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67(8): 98 - 106.
- [5] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. 地下工程与隧道, 2009(1): 1 - 6. (WANG Ru-lu. Factors influencing deforming of Shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 袁 勇, 刘 涛, 柳 献. 运营越江隧道服役现状调查与检测评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 83 - 89. (YUAN Yong, LIU Tao, LIU Xian. Investigation and evaluation of present state and serviceability of existing river-crossing tunnel[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(2): 83 - 89. (in Chinese))
- [7] 董 飞, 房 倩, 张顶立, 等. 北京地铁运营隧道病害状态分析[J]. 土木工程学报, 2017(6): 104 - 113. (DONG Fei, FANG Qian, ZHANG Ding-li, et al. Analysis on defects of operational metro tunnels in Beijing[J]. China Civil Engineering Journal, 2017(6): 104 - 113. (in Chinese))
- [8] 赖金星, 邱军领, 潘云鹏, 等. 盾构隧道管片裂缝病害的综合监测与分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 186 - 191. (LAI Jin-xing, QIU Jun-ling, PAN Yun-peng, et al. Comprehensive monitoring and analysis of segment cracking in shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 186 - 191. (in Chinese))
- [9] CHEN J S, MO H H. Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1): 91 - 102.
- [10] MO H H, CHEN J S. Study on inner force and dislocation of segments caused by shield machine attitude[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 281 - 291.
- [11] 杨雨冰, 谢雄耀. 基于断裂力学的盾构隧道管片结构开裂破坏机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2115 - 2124. (YANG Yu-bing, XIE Xiong-yao. Breaking mechanism of segmented lining in shield tunnel based on fracture mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2115 - 2124. (in Chinese))
- [12] 陈俊生, 莫海鸿, 梁仲元. 盾构隧道施工阶段管片局部开裂原因初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 906 - 910. (CHEN Jun-sheng, MO Hai-hong, LIANG Zhong-yuan. Study on local cracking of segments in shield tunnel during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 906 - 910. (in Chinese))
- [13] 周 帅, 朱合华, 闫治国, 等. 城市轨道交通隧道结构病害数值分析[C]// 运营安全与节能环保的隧道及地下空间暨交通基础设施建设第四届全国学术研讨会. 恩施, 2013: 40 - 44. (ZHOU Shuai, ZHU He-hua, YAN Zhi-guo, et al. The numerical analysis of disease in urban rail transit tunnel[C]// The Fourth National Symposium on Operation Safety, Energy Saving and Environmental Protection of Tunnel and Underground Space and Transportation Infrastructure Construction. Enshi, 2013: 40 - 44. (in Chinese))
- [14] 张建刚, 何 川, 肖明清. 大型管片衬砌结构受千斤顶推力作用的裂缝分析[J]. 铁道建筑, 2008(4): 28 - 31. (ZHANG Jian-gang, HE Chuan, XIAO Ming-qing. Analysis of the cracking induced by jack thrust on the large segment lining[J]. Railway Engineering, 2008(4): 28 - 31. (in Chinese))
- [15] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (JSCE. Standard specification for tunnels (shield article) and interpretation[M]. ZHU Wei, trans. Beijing: China Architecture Building Press, 2001. (in Chinese))
- [16] DUARTE C A, ODEN J T. An H-P adaptive method using clouds[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139(1): 237 - 262.
- [17] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1999, 45(5): 601 - 620.
- [18] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1999, 46(1): 131 - 150.
- [19] 卢岱岳, 何 川, 王士民, 等. 千斤顶作用下带榫管片的裂纹扩展规律[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 75 - 82. (LU Dai-yue, HE Chuan, WANG Shi-ming, et al. Crack propagation law of segment tendon under jacking forces[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 75 - 82. (in Chinese))