

环向螺栓锈蚀对盾构隧道承载性能的影响*

殷剑光,金浩,宫全美,周顺华

(1.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室,上海 201804)

摘要:针对管片环向螺栓受水、杂散电流等锈蚀作用,引起盾构隧道结构承载性能下降的问题,通过建立能够体现环向螺栓锈蚀的三维盾构隧道精细化有限元模型,探讨了0%、3%、5%、10% 4种锈蚀率下,盾构隧道结构的收敛变形、纵缝张开、螺栓应力等变化规律。研究表明:(1)随螺栓锈蚀加深,盾构隧道结构收敛变形与纵缝张开均明显增加,其中,拱腰处纵缝张开受高锈蚀率(10%)影响最为显著,相比于未锈蚀,张开量增加接近一倍;(2)拱顶和拱底螺栓随锈蚀率增加,其屈服前应力水平提高并更早进入屈服阶段;(3)拱腰螺栓随锈蚀率增加,其全过程中应力水平均有所提高。

关键词:地铁;盾构隧道;螺栓锈蚀;有限元;承载性能

中图分类号:U231

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2020)02-0508-08

Effect of Circumferential Bolt Corrosion on Ultimate Bearing Capacity of Shield Tunnel

Yin Jianguang, Jin Hao, Gong Quanmei, Zhou Shunhua

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China;
2. Shanghai key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, P. R. China)

Abstract: Circumferential bolts are subjected to corrosion factors such as water and electricity, lowering the bearing capacity of the shield tunnel structure. In view of this, through the establishment of a finite-element model which can reflect the corrosion of the circumferential bolt, the changes of the deformation, the longitudinal joint opening and the stress of the bolt under the 0%, 3%, 5% and 10% corrosion conditions were discussed. The results show that: (1) With the deepening of bolt corrosion, the convergence deformation and longitudinal joint opening of shield tunnel are significantly increased. The effect of high corrosion rate (10%) on the longitudinal joint opening at the arch is most significant. Compared with the unrust group, the opening amount increases nearly one time. (2) The stress level of the top and the bottom bolt increases with the corrosion rate, and the stress level before yield increases and enters the yield stage earlier. (3) The stress of the waist bolt increases with the corrosion rate through the whole process.

Keywords: underground railway; shield tunnel; bolt corrosion; FEM; bearing capacity

0 引言

盾构隧道管片结构的接头部分是其力学性能

的薄弱部分,在长期受荷载、振动、渗漏水以及复杂环境作用下,接头自身的健康状况容易受损,影响盾构隧道的正常服役^[1-3]。对目前国内既有盾构

* 收稿日期:2019-08-05(修改稿)

作者简介:殷剑光(1994—),男,安徽淮南人,硕士生,主要从事盾构隧道结构加固的科研工作。

E-mail:yjg1994@tongji.edu.cn

通讯作者:金浩(1986—),男,浙江诸暨人,博士,助理教授,主要从事轨道交通结构智能维护研究。

E-mail:jinhao@tongji.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(51908428);上海市自然科学基金(19ZR1460400)

隧道结构的检测结果表明,盾构隧道常见结构病害中就包括接头部位管片的损坏与锈蚀^[4-6]。

目前对于盾构隧道结构中锈蚀问题的主要研究对象为混凝土管片及内部钢筋,杨林德等^[7]用数值模拟方法研究了越江盾构隧道管片发生开裂及接缝渗漏水情况下氯离子迁移与钢筋锈蚀和混凝土腐蚀之间的关系。Chen等^[8]则是针对海域环境下盾构隧道衬砌管片的薄弱环节接头处进行了分析,研究了服役时间及离子侵蚀对接头的影响。上述研究中忽略了接头的重要构件之一螺栓,卢岱岳等^[9]在研究材料损伤对加卸载作用盾构隧道结构的力学特性影响时考虑了接头螺栓的材料损伤情况,但其模型中对锈蚀的模拟方式为削减螺栓直径,过于简化。对于盾构隧道接头螺栓方面的研究表明,高强度螺栓在接缝处起到十分重要的作用,不同接头形式、预紧力大小、管片受力情况均会影响其力学性能^[10-12]。

以往对于接头的研究中常着眼于结构形式、外部受力以及管片腐蚀,对螺栓的考虑明显不足,很少考虑螺栓自身的锈蚀情况。锈蚀程度是高强度螺栓连接性能的重要影响因素之一,螺栓的锈蚀对于盾构衬砌结构的影响是多方面的,它不仅会使螺栓本身截面积减小,而且使混凝土产生锈胀开裂破坏,除此之外,还会导致螺栓与混凝土之间的粘结性能下降。现有方法中数值模型对于螺栓锈蚀情况的模拟与真实情况存在较大差异,难以反映隧道结构真实的受力状况。已有的研究表明,电化学加速试验^[13-16]能够得到钢构件真实的锈蚀分布规律,锈胀力以及锈蚀界面的粘结退化特性也可以通过数值模拟、试验结果以及解析模型^[17]获取。因此,为了研究接头螺栓锈蚀对盾构隧道力学特性的影响,采用更加合理的模型,引入相应的试验参数,是十分必要的。

为弥补现有研究的不足,通过电化学加速试验方法得到接头螺栓的真实锈蚀分布规律,并根据试验结果建立合适的三维盾构隧道精细化有限元模型。模型考虑了接头螺栓有效直径损失、螺栓与混凝土之间的锈胀作用以及氧化层的材料损伤与粘结弱化。通过设置多个加载工况,分析盾构隧道在不同锈蚀情况下的收敛变形、接缝张开、螺栓应力等变化规律。

1 螺栓锈蚀性能研究

1.1 螺栓锈蚀模拟方法

现服役隧道内的锈蚀螺栓构件难以直接获取,因此本文采用电化学加速试验对接头螺栓进行锈蚀处理。根据文献^[13-16]的研究成果可知,通电锈蚀不仅可以较快速度制备试验试件,还可以人为控制通电量达到所要求的锈蚀程度,以模拟不同工况下的锈蚀螺栓。此外,其锈蚀原理与实际盾构隧道中的螺栓锈蚀机理(电化学腐蚀)相似,能够较好地还原自然腐蚀后的接头螺栓。对试验后的接头螺栓进行取样分析,能够得到不同锈蚀率下的锈蚀分布规律。

1.2 电化学加速锈蚀试验

本研究中采用地铁盾构隧道常用规格的接头螺栓,螺栓直径 30 mm,长度为 533 mm,质量约 3 kg,螺栓主材为 Q235 低碳钢,表面采用镀锌处理。

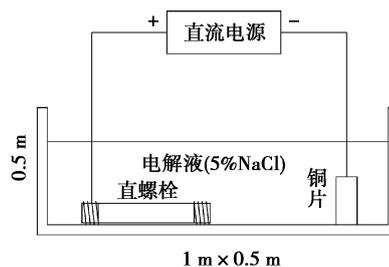


图1 试验电路连接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the circuit connection of test

电化学试验需准备铜电极、电源、电解槽、氯化钠电解液等。铜片规格尺寸严格按照国标 GB/T 5096—85:纯度大于 99.9%的电解铜。宽为 12.5 mm,厚为 1.5~3.0 mm,长为 75 mm。为缩短试验时间,需要较高的电流强度,电源采用稳压稳流双内环高频调制技术,输入端为常规 220 V 交流电压,输出端由导线与电极直接连接,电流可调范围 0~30 A、电压可调范围 0~100 V。测试过程中采用稳流模式,即调节电流至所需大小,保持数值稳定不变,电压满负载运行。电解池所用容器选择定制加工 PP 板方形槽,长 1 m,宽 0.5 m,高 0.5 m。考虑到半结晶性材料本身绝缘性能好,不易被腐蚀,具有一定的隔热性。试验时,槽内铺设两块钢化玻璃板作为置物台。参考土木工程中常用于研究钢筋锈蚀的试验方法,选用 5%浓度的 NaCl 溶液作为电解液。

1.3 螺栓锈蚀规律

已有的检测资料表明,既有运营盾构隧道锈蚀

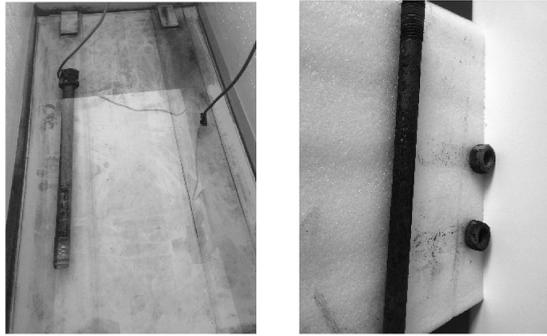


图 2 试验装置及锈蚀件

Fig. 2 Test equipment and corrosion parts

较为严重的区域中,接头螺栓的最大锈蚀率不超过 10%,因此本研究在制定试验方案时将最大锈蚀率设定为 10%,此外还有 3%、5%试验组和 0% (即无锈蚀)的对照组,依照方案进行理论计算确定需要的电路参数。根据法拉第定理,腐蚀量是电压、电流与通电时间的函数,在电压一定的情况下,通过控制电流和通电时间可以得到理论上通电造成的锈蚀率(理论上,会与实际有偏差)。锈蚀质量的计算公式如下:

$$m = Kit \tag{1}$$

式中: i 为平均电流强度; t 为通电时间;系数 K 与电化学反应的两种金属成分有关(正极螺栓不锈钢的主要成分是铁):

$$K = M/Fn \tag{2}$$

式中: n 为化合物中正或负化合价总数的绝对值,这里是 2; F 为法拉第恒量,数值为 $F = 96\ 487\ C/mol$;铁的摩尔质量 M 为 $55.847\ g$ 。

根据上述原理,计算得到:

$$m = 2.894 \times 10^{-4}it \tag{3}$$

为了方便计算,时间 t 单位改为 h,则:

$$m = 1.042it \tag{4}$$

设原始质量为 m_0 ,则锈蚀率:

$$\rho = \frac{m}{m_0} = 1.042\ it/m_0 \tag{5}$$

试验结果记录见表 1 和表 2。

实验数据得到的锈蚀率和直径变化率结果表明:锈蚀虽然不完全均匀分布,但沿轴向总体差距不大,因此模拟过程中假设它锈蚀均匀。

混凝土管片中嵌入的螺栓发生锈蚀以后,其产生的铁锈体积一般是相应钢材体积的 2~4 倍,因此会向四周膨胀并产生锈胀力。锈胀过程中,外部混凝土受力产生一定变形,螺栓表面自由膨胀的铁锈因受力也产生一定变形,二者之间变形协调,如

图 3 所示。

图中:

$$R_1 = d_1/2 \tag{6}$$

$$d_1 = \sqrt{(n - 1)\rho + 1} \cdot d \tag{7}$$

式中: R_1 、 d_1 分别为螺栓自由膨胀后的半径、直径; n 为体积膨胀率; ρ 为螺栓锈蚀率; d 为螺栓的原始直径。

表 1 试验锈蚀率记录表

Table 1 Corrosion rate record of the test

试件编号	平均电流强度/A	通电时间/h	理论锈蚀率/%	实测锈蚀率/%
1	0	0	0	0
2	2	42.6	3	3.25
3	2	42.6	3	3.19
4	5	17.0	3	2.81
5	2	71	5	6.11
6	2	71	5	5.32
7	5	28.4	5	5.02
8	2	142	10	9.84
9	2	142	10	9.67
10	5	56.8	10	10.12

表 2 试验锈蚀质量记录表

Table 2 Corrosion mass record of the test

试件编号	平均电流强度/A	通电时间/h	原始质量	试验后质量	除锈后质量
1	0	0	2 937.60	2 937.60	2 937.60
2	2	42.6	2 877.87	2 858.74	2 784.34
3	2	42.6	2 860.25	2 823.12	2 769.01
4	5	17.0	2 916.04	2 929.63	2 834.10
5	2	71	3 024.70	3 196.26	2 839.89
6	2	71	2 995.33	3 124.11	2 835.98
7	5	28.4	2 980.65	3 089.65	2 831.02
8	2	142	2 904.30	2 992.90	2 618.51
9	2	142	2 921.92	3 027.20	2 639.37
10	5	56.8	2 927.79	3 045.03	2 631.50

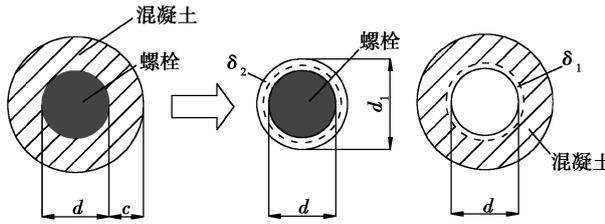


图3 锈胀力变形示意图

Fig. 3 Deformation process of corrosion expansion force

设锈胀力大小为 q , 根据弹性力学则有:

$$\delta_1 = \frac{(1 + u_1)Rc^2 + (1 - u_1)R^3}{E_1(c^2 - R^2)} \cdot q \quad (8)$$

式中: δ_1 为混凝土受锈胀力引起的变形; u_1 为混凝土泊松比; E_1 为混凝土的弹性模量; c 为混凝土有

效受力半径; R 为螺栓半径。

同理有:

$$\delta_2 = \frac{n\rho(1 - u_2)R^1}{E_2[(1 + u_2)n\rho + (2 - 2\rho)]} \cdot q \quad (9)$$

式中: δ_2 为铁锈受锈胀力引起的变形; u_2 为铁锈的名义泊松比; E_2 为铁锈的名义弹性模量; 文献[17]中根据已有试验结果给出了 u_2 、 E_2 的拟合值:

$$u_2 = 0.924 \quad (10)$$

$$E_2 = 10.6e^{-0.33n} \quad (11)$$

将上式带入变形协调方程:

$$R + \delta_1 = R_1 - \delta_2 \quad (12)$$

得到锈胀力的表达式:

$$q = \frac{[\sqrt{(n-1)\rho} + 1 - 1]R}{\frac{n\rho R}{140e^{-0.33n}(1.924n\rho + 2 - 2\rho)} + \frac{(1 + u_1)Rc^2 + (1 - u_1)R^3}{E_1(c^2 - R^2)}} \quad (13)$$

2 三维精细有限元模型

2.1 模型尺寸与单元形式

本文选用研究模型为:管片厚 350 mm, 外径 6 200 mm, 内径 5 500 mm, 幅宽 1 200 mm。单环管片包括 1 个封顶块 K(21.5°)、2 个邻接块 B1 和 B2(68°) 以及 3 个标准块 A1、A2、A3(67.5°) 组成。管片采用 C50 等级高强度混凝土, 内部主要钢筋采用 HRB335 规格, 管片各分块之间纵缝由 2 根 5.8 级 M30 螺栓连接。

基于求解精度与计算效率的综合考虑, 使用 Abaqus 有限元软件建立了如图 4 所示的单整环衬砌管片三维精细化有限元模型。模型考虑了管片接缝、连接螺栓、凹凸榫、手孔等细部构造。其中, 混凝土管片、接头螺栓均采用三维八节点减缩积分实体单元 C3D8R。该单元为线性、减缩积分、六面体实体单元, 适宜于模拟接触问题, 部分过渡区域由于几何特征复杂采用 C3D4 四面体实体单元; 钢

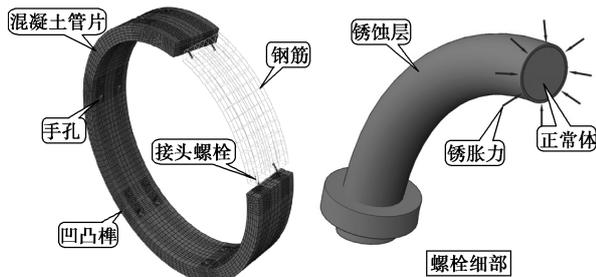


图4 精细化三维有限元模型

Fig. 4 Fine 3-D FEA model

筋选用三维两节点杆单元 T3D2 模拟, 利用埋入单元(Embedded Element)把钢筋埋入到混凝土结构中, 以此来模拟钢筋与混凝土之间的粘结关系。试验得到的螺栓试件从表面向内形成了厚度均匀的锈蚀层, 因此, 有限元模型中螺栓实体包括内部正常体和外部等厚锈蚀层。锈蚀层与混凝土管片直接接触, 根据上述计算得到的锈胀力模型在接触面施加均布面荷载, 以模拟螺栓锈蚀情况。

考虑到实际盾构隧道所处复杂环境, 会出现各个螺栓锈蚀不均匀的情况, 其锈蚀率难以统一定量。因此, 本文为研究锈蚀率与盾构隧道结构承载性能之间的规律性作用, 对此情况进行了一定的简化, 即不考虑各个螺栓锈蚀程度的差异, 在数值模拟过程中采用统一的锈蚀率。

为了验证数值模拟方法的准确性, 笔者借助了实验室近期完成的足尺管片加载破坏试验结果, 试验现场如图 5 所示。之后使用了相同的建模方法对此试验过程进行了还原, 将 2 种方法下得到的变形破坏曲线进行对比分析。

足尺试验的加载对象为未经过螺栓锈蚀处理的管片结构, 分阶段缓慢加载至最终破坏阶段。如图 6 所示, 虚实曲线分别表示试验方法与数值模拟所得到的衬砌环收敛量, 2 种变形破坏曲线基本吻合。通过对 2 种方法得到的前期线性变形速率、进入屈服段的时机以及最终脆性破坏时的极限荷载等指标进行比较分析, 这些指标相差均不超过 8%, 足以证明计算模型的准确性。



图 5 足尺试验现场

Fig. 5 Full-scale load test

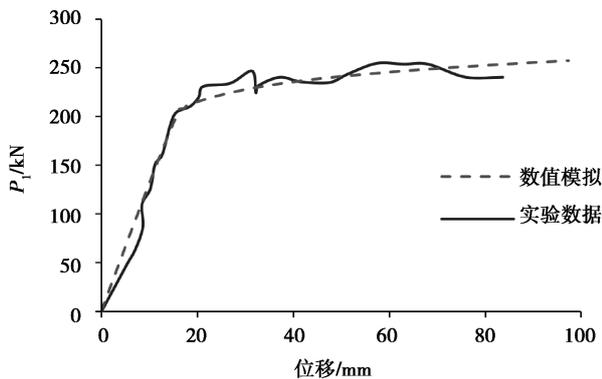


图 6 足尺试验与数值模拟所得收敛变形

Fig. 6 Convergent deformation of full-scale test and numerical simulation

2.2 材料参数与接触关系

模型中主要结构由管片、螺栓、钢筋等组成,在进行模拟时需定义混凝土、螺栓等材料的参数。其中混凝土采用弹塑性损伤本构,不仅能够较好地模拟盾构管片开裂和损伤,还可以大幅提高计算效率,需定义材料的弹性模量、应力-应变关系及损伤因子;普通钢材采用符合 Von Mises 屈服准则的弹塑性本构,锈蚀钢的主要成分为氧化铁,因此仅具有弹性模量而没有屈服特征;钢材与混凝土各项参数的选取均依据《混凝土结构设计规范 (GB 50010—2010)》,各材料的主要力学参数见表 3。

表 3 材料主要参数表

Table 3 Main parameters of material

材料	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	泊松比
混凝土	34.5	32.4	2.64	—	—	0.2
钢筋	200	—	—	335	455	0.3
接头螺栓	210	—	—	400	500	0.3

模型的接触关系主要包括管片-管片、管片-螺

栓、管片-钢筋这几种,其中管片-管片和管片-螺栓为面面接触,表现为挤压摩擦行为,因此其法向定义为“硬接触”,即不同构件之间不存在入侵,切向上定义为“库伦摩擦接触”,设置相应的摩擦系数,当切应力达到摩擦阻力之前不发生相对滑移。锈蚀螺栓试件的摩阻测试表明,锈蚀层和混凝土管片的摩擦相对较弱,因此,将库伦摩擦系数乘以相应的折减系数 0.5;钢筋采用嵌入单元,不占用空间,不具有自由度,仅强化所在区域的刚度,不考虑相对滑动。

2.3 荷载及边界条件

由于三维精细化有限元模型具有复杂性,不能保证其整体网格组成的完全对称,为了避免在数值计算过程中出现的刚体位移情况,需要在某些位置设置相应的位移约束。因此,在模型拱顶位置限制了沿水平和垂直方向的平移及转动,并在整环范围内限制其沿厚度方向的位移。

在实际工程中,地铁盾构隧道处于复杂地层中。本文选取南京典型软土地区浅埋隧道作为研究对象,其穿越土层为软弱土层,多为欠固结土。土层参数以河西地区土建议取值为依据,侧压力系数取 0.7,浅埋隧道顶部埋深为 12 m。采用了基于荷载-结构模型的加载模式,作用于盾构隧道的荷载主要有顶底水土压力、侧向水土压力、自重和地层抗力,并考虑了服役期间由外部施工引起的超载情况,如图 7 所示。计算过程中,初始阶段荷载线性增加,直至衬砌环达到极限状态。

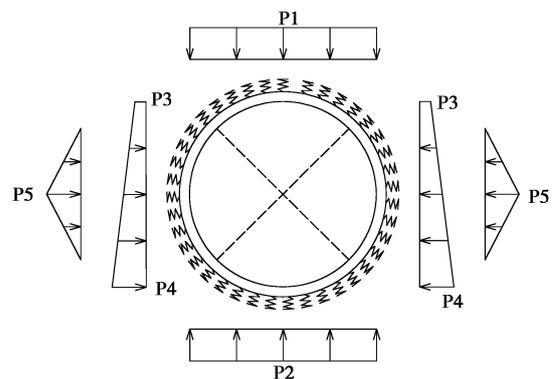


图 7 荷载-结构模型

Fig. 7 Load-structure model

3 计算结果及讨论

3.1 衬砌环收敛变形量

如图 8 所示,给出了不同锈蚀程度下,盾构隧道衬砌结构受荷作用时的收敛变形发展情况,其中横坐标荷载以加载过程中盾构隧道顶部荷载值为标准。前期变形阶段衬砌环的收敛变形先线性缓

慢增加,当荷载达到一定水平后,变形增加速率明显变快,结构产生较大塑性变形。

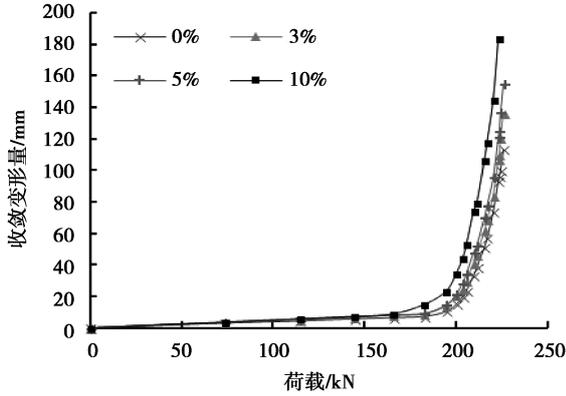


图8 衬砌环总体收敛变形(全过程)

Fig. 8 Convergent deformation of lining ring (whole process)

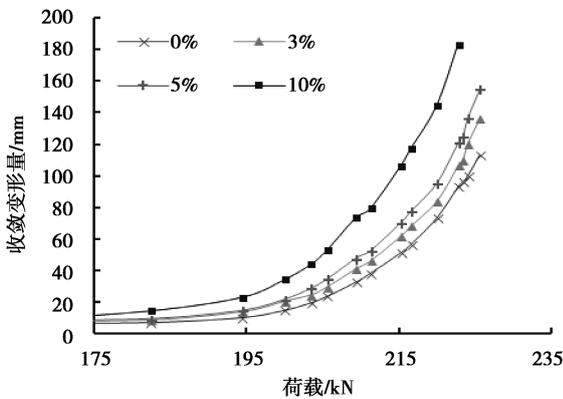


图9 衬砌环总体收敛变形(塑性段)

Fig. 9 Convergent deformation of lining ring (plastic process)

由图8、9可知,螺栓锈蚀率分别为0%、3%、5%和10%时,衬砌环的整体变形发展规律基本一致。当荷载水平较小时,4种锈蚀情况下的变形量几乎相同,均处于较低水平。当荷载达到165 kN时,10%锈蚀率的管片开始进入塑性变形阶段,其余3组在182 kN时进入塑性段。衬砌环的最终收敛变形量随锈蚀程度的加深不断增大,10%锈蚀率下的管片变形提升较为明显,在相同荷载条件下提升最终破坏变形量提升约80%,3%和5%组相比于无锈蚀情况提升较小,约8%和15%。

3.2 管片接头张开量

与衬砌环总体的收敛变形发展规律类似,各个接缝的前期张开量几乎为零,且受到锈蚀率的影响极小,进入塑性变形阶段后各个接缝的张开量迅速增加,如图10—12所示为进入塑性段后的各接缝张开量。

可以看出,4组管片的接缝张开均在195 kN荷载水平下开始出现明显增加情况,拱腰邻接块与标准块之间外弧面接缝张开增长速率相对较慢,其

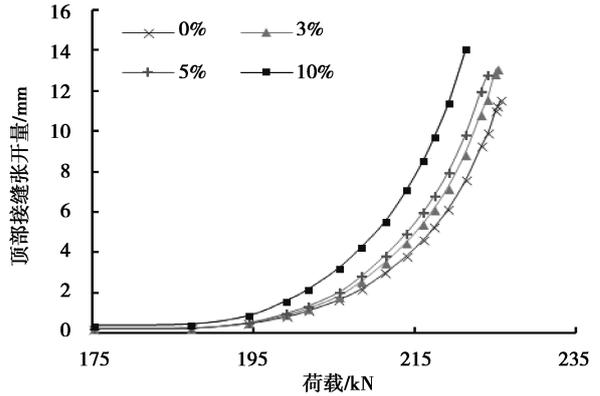


图10 封顶块-邻接块内弧面接缝张开

Fig. 10 Inner joint opening of top block and adjacent block

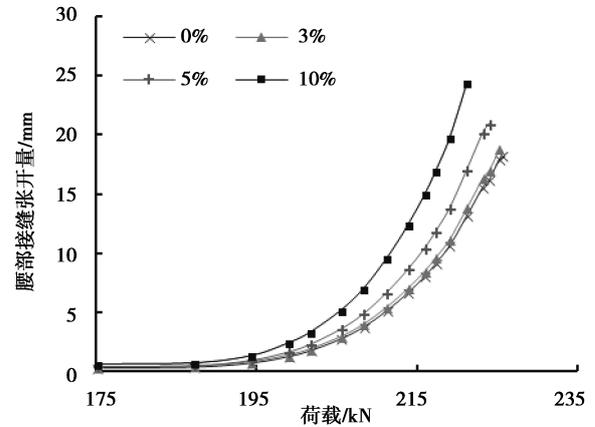


图11 邻接块-标准块外弧面接缝张开

Fig. 11 Outer joint opening of adjacent block and standard block

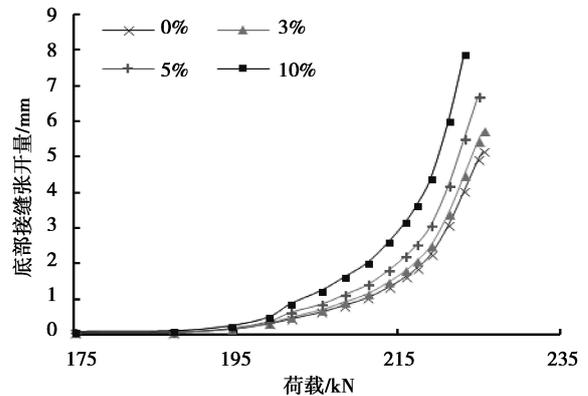


图12 标准块-标准块内弧面接缝张开

Fig. 12 Inner joint opening of the standard block and standard block

最终张开量最大,接近25 mm;拱底标准块之间的内弧面接缝张开量增长曲线最为陡峭,但最终张开量较小,不超过10 mm;拱顶接缝张开速率与量值介于二者之间。锈蚀率增大对不同位置接缝张开量均起到了放大作用,但影响程度不一。对于拱腰接缝,低锈蚀率(3%)时的变形曲线几乎与未锈蚀曲线重合,影响很小;高锈蚀率(10%)则影响显

著,最终张开量提升了接近 100%。对于拱顶和拱底的接缝,随着锈蚀程度的分级增加,接缝张开量也有明显的分级增加。

3.3 纵缝接头螺栓应力

荷载施加初期,接头螺栓应力线性缓慢增加,受力程度总体处于较低水平,当衬砌环进入塑性变形阶段时,螺栓开始承受主要荷载,应力水平按照一定的速率高速线性增加。

如图 13—15 所示,最终变形破坏时,拱顶与拱底的螺栓均进入屈服阶段,应力水平基本保持不变;拱腰螺栓的应力水平在整个塑性变形过程中均保持增长。对于拱顶和拱底的螺栓,锈蚀情况并不会影响其最终达到的屈服应力,但高锈蚀率会使得螺栓应力更早地进入平台期。螺栓锈蚀率为 10% 的管片在荷载水平 211 kN 时就已经屈服,未锈蚀组的螺栓应力则是在 216 kN 时达到峰值,此前同荷载水平下 10% 锈蚀组的螺栓应力比未锈蚀组螺栓应力高出约 30%。对于拱腰螺栓,随着锈蚀程度的加深,同荷载水平下的螺栓应力也不断增大,增幅范围从 0 到 20% 不等。

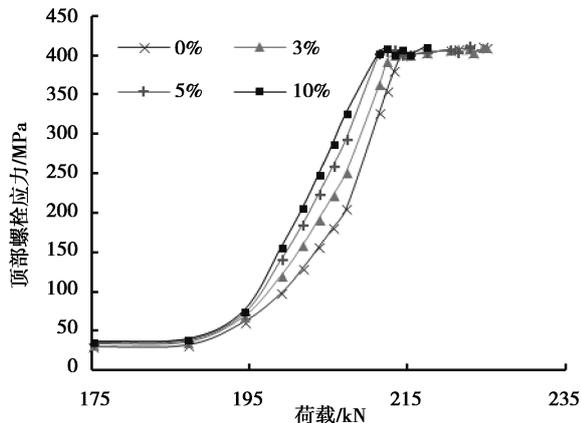


图 13 封顶块—邻接块纵缝螺栓应力

Fig. 13 Stress of bolt between top block and adjacent block

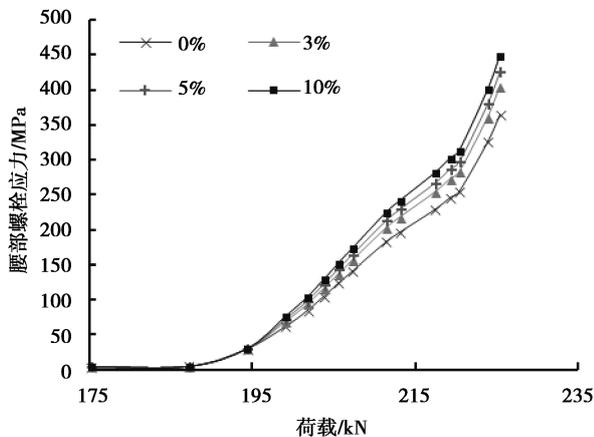


图 14 邻接块—标准块纵缝螺栓应力

Fig. 14 Stress of bolt between adjacent block and standard block

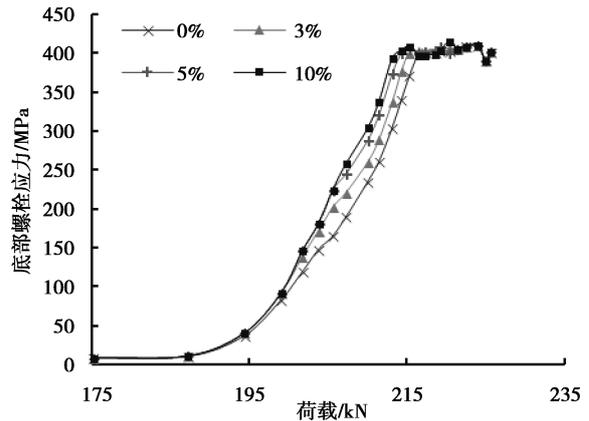


图 15 标准块—标准块纵缝螺栓应力

Fig. 15 Stress of bolt between the standard block and standard block

4 结论

本文采用的三维有限元模型引入了基于试验的螺栓锈蚀分布,考虑了接头螺栓有效直径损失、螺栓与混凝土之间的锈胀作用以及氧化层的材料损伤与粘结弱化,计算得到了衬砌环收敛变形、接缝张开、螺栓应力等指标。根据对计算结果的分析,可以得到如下结论:

(1) 在 0%、3%、5%、10% 4 种锈蚀程度下的衬砌管片,其极限承载性能存在较为明显的差异,且主要体现在盾构隧道出现较大变形时。随着螺栓锈蚀加深,管片的总体收敛变形量与各接缝的最终张开量均明显增加,其中拱腰接缝的张开量的增加受到高锈蚀率(10%)影响最为显著,增幅接近 1 倍,在此锈蚀条件下盾构隧道的整体刚度已严重损失。

(2) 拱顶和拱底的接头螺栓受锈蚀率增加的影响主要体现在屈服前应力水平的提高以及更早进入屈服阶段。

(3) 由于管片各个位置的接头螺栓受力特征不同,拱腰的接头螺栓锈蚀后的变化与拱顶存在差异,螺栓应力受锈蚀率增加的影响主要体现在全过程应力水平的提高。

参考文献 (References)

- [1] 黄宏伟, 沈贤达, 王飞, 等. 盾构隧道管片接头的易损性分析和评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 198-206. (Huang Hongwei, Shen Xianda, Wang Fei, et al. Analysis and evaluation of the vulnerability of the segment joint of the shield tunnel [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 198-206. (in Chinese))
- [2] Dolaro A, Foidelli F, Leva S. Stray current effects

- mitigation in subway tunnels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2304-2311.
- [3] 李剑. 盾构公路隧道结构性能检测评估指标及应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 549-556,665. (Li Jian. Research on the evaluation index and application of structural performance of shield highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 549-556, 665. (in Chinese))
- [4] 林楠, 李攀, 谢雄耀. 盾构隧道结构病害及其机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增2): 802-809. (Lin Nan, Li Pan, Xie Xiongyao. Structural damage and mechanism of shield tunnel[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Supp. 2): 802-809. (in Chinese))
- [5] 刘庭金, 夏文字. 桩锚深基坑诱发地铁盾构隧道病害的成因分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 109-115. (Liu Tingjin, Xia Wenyu. Cause analysis of subway shield tunnel diseases induced by pile anchor deep foundation pit[J]. Journal of Railway Engineering, 2016, 33(1): 109-115. (in Chinese))
- [6] Yan Q, Deng Z, Zhang Y, Yang W. Failure characteristics of joint bolts in shield tunnels subjected to impact loads from a derailed train[J]. Shock and Vibration, 2017: 1-17.
- [7] 杨林德, 伍振志, 时蓓玲, 等. 开裂及接缝渗漏条件下越江盾构隧道管片混凝土氯离子运移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1826-1831. (Yang Linde, Wu Zhenzhi, Shi Beiling. Cracking and seaking conditions under the conditions of crack and joint leakage study on the law of chloride transport in the tunnel segment concrete of the river shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1826-1831. (in Chinese))
- [8] Chen K, Zhang Z, Liao S, et al. Durability of joint components of shield tunnel under high water pressure in erosion environment[J]. Procedia Engineering, 2016, 165: 282-289.
- [9] 卢岱岳, 徐国文, 王士民. 考虑材料损伤的加卸载作用对盾构隧道结构力学特性的影响研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(5): 1104-1112. (Lu Daiyue, Xu Guowen, Wang Shimin. Study on the effect of loading and unloading of material damage on the structural mechanical properties of shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5): 1104-1112. (in Chinese))
- [10] Ahn J H, You J M, Huh J, et al. Residual clamping force of bolt connections caused by sectional damage of nuts [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 136: 204-214.
- [11] 张稳军, 张云旆, 宋晓龙. 盾构隧道弯螺栓接头力学特性受预紧力影响的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 203-206. (Zhang Wenjun, Zhang Yunpei, Song Xiaolong. Numerical study on the influence of pre tightening force on the mechanical properties of curved bolt joints in shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Supp.2): 203-206. (in Chinese))
- [12] Shi C, Cao C, Lei M, 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.
- [13] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 41-47. (Gan Weizhong, Jin Weiliang, Gao Mingzan. Applicability study on accelerated corrosion test of reinforcing bars in concrete [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 41-47. (in Chinese))
- [14] 王雪松, 金贤玉, 田野, 等. 开裂混凝土中钢筋加速锈蚀方法适用性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(4): 565-574. (Wang Xuesong, Jin Xianyu, Tian Ye, et al. Applicability of accelerated corrosion method of steel bars in cracked concrete structure [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2013, 47(4): 565-574. (in Chinese))
- [15] 滕海文. 地铁工程结构耐久性加速模拟试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增1): 1404-1407. (Teng Haiwen. Accelerated simulation experiment of subway structure durability [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(Supp. 1): 1404-1407. (in Chinese))
- [16] 李忠, 陈海明, 孙富学, 等. 氯离子侵蚀盾构隧道衬砌结构性能退化试验[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1092-1097, 1109. (Li Zhong, Chen Haiming, Sun Fuxue, et al. Tests on structure behavior's degradation of shield tunnel lining in chloride erosion [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1092-1097, 1109. (in Chinese))
- [17] 金伟良, 赵羽习, 鄢飞. 钢筋混凝土构件的均匀钢筋锈胀力的机理研究[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 57-62. (Jin Weiliang, Zhao Yuxi, Yan Fei. Study on the mechanism of uniform reinforcement corrosion and expansion of reinforced concrete members [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(7): 57-62. (in Chinese))