

# 考虑界面黏结滑移的地铁盾构隧道内钢圈加固时机研究

张伯林 郑 军\* 沈晓伟

(南京地铁集团有限公司, 210018, 南京//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 收敛变形超限是软土地区地铁盾构隧道结构的典型病害。目前, 业内主要采用内钢圈的加固处理办法, 但其合理的加固时机尚不明确。鉴于此, 通过建立能够体现黏结界面滑移破坏的地铁三维盾构隧道精细化有限元模型, 研究了盾构隧道在不同收敛变形条件下进行内钢圈加固后衬砌环的收敛变形、接缝张开量、螺栓应力和内钢圈应力。研究结果表明: ①内钢圈加固后, 衬砌环达到屈服时, 钢板应力水平尚未达到材料自身的强度极限, 但部分界面已经剥离。②加固时机对于加固后衬砌环结构的变形破坏特征有明显影响。最合理的加固时机应当是一个安全界限, 早于安全上限加固, 则衬砌环结构破坏具有较强的突发性, 迟于安全下限加固, 则结构会产生过大的变形量。

**关键词** 地铁; 盾构隧道; 内钢圈加固; 加固时机; 界面黏结滑移

**中图分类号** U455.43

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2020.10.007

## Reinforcement Opportunity of Subway Shield Tunnel Bonded Steel Ring with Study on Interfacial Bond Slip

ZHANG Bolin, ZHENG Jun, SHEN Xiaowei

**Abstract** Convergence deformation overrun is a typical disease of subway shield tunneling in soft soil area. Currently, the industry mainly adopts the reinforcement of bonded steel ring, but the reasonable reinforcement opportunity of which is not clear. In view of this, a refined finite element model of 3D shield tunnel is established, which can reflect the interfacial bond slip failure, and the convergence deformation of lining ring after reinforcement, the joint opening, bolt stress and internal steel ring stress under different previous shield tunnel deformation conditions are studied. The results show that: ① when the lining ring reaches yield after the reinforcement of bonded steel ring, the stress level of steel plate has not reached the strength limit of the material itself, but some of the interface has been stripped off; ② the reinforcement opportunity has a significant impact on the deformation and failure charac-

teristics of the reinforced lining ring structure. In conclusion, the most reasonable time for steel ring reinforcement should be a safety boundary. Earlier or later than safety upper limit, the deformation and failure of lining ring structure will have a strong suddenness or produce an excessive deformation.

**Key words** metro; shield tunnel; reinforcement of bonded steel ring; reinforcement opportunity; interfacial bond slip

**Author's address** Nanjing Metro Group Co., Ltd., 210018, Nanjing, China

## 0 引言

地铁周边常伴随大面积开发, 会造成诸如顶部超载、侧面卸载等情况, 此时盾构隧道结构的受力状态会变得非常不利, 易产生过大的整体横向收敛变形<sup>[1-4]</sup>。为了保证地铁盾构隧道服役期间的整体承载能力和耐久性满足要求, 需要及时采取有效措施进行加固修复处理<sup>[5]</sup>。目前, 针对地铁隧道结构整体发生过大横向变形的问题, 主要采用在隧道衬砌内表面粘贴预制钢板的方式, 即业界常用的内钢圈加固法。为了研究此方法的综合加固效果, 文献[6-8]采用了整环管片衬砌足尺试验, 结果表明内钢圈加固能显著提高衬砌结构的整体刚度和极限承载力。此外, 也有部分学者通过数值模拟的手段对其进行了分析。文献[9]采用以纤维梁单元模拟管片, 在钢板与混凝土管片间设置联结弹簧以模拟环氧树脂黏结作用, 建立简化模型探讨了钢板加固后的单环管片衬砌承载性能。该宏观简化模型能较准确和高效地预测单环管片衬砌加固前后在荷载作用下的整体变形和混凝土应力等。文献[10]采用实体单元模拟管片, 采用非线性连接单元模拟连接螺栓, 采用线性二维梁单元模拟加固钢板, 不考虑钢板与隧道内表面之间的滑移。文献[11]建立单环精细有限元模型, 各部件均采用实体结构,

\* 通信作者

其方法能够考虑黏结作用以及接头细部构造,并模拟出加固前后衬砌结构的细部变形特征。

上述研究尚未考虑内钢圈加固时间节点,而在实际工程中,采取加固措施的时机并非固定。目前,关于加固时机方面的研究较少,隧道结构服役期间,应当何时采取内钢圈加固,也没有明确可依的标准,工程人员往往根据经验进行判断。因此,在研究加固问题时,考虑加固前隧道结构变形不同所带来的影响,是十分必要的。

考虑到加固研究中界面黏结破坏的重要性,本文引入了基于线弹性断裂理论的黏聚力模型对加固界面层的黏结破坏进行详细描述,依此构建了三维精细化有限元模型,分析了盾构隧道在不同变形下进行内钢圈加固后的收敛变形、接缝张开量、螺栓应力和内钢圈应力。

## 1 地铁盾构隧道内钢圈加固三维有限元模型

### 1.1 模型尺寸与单元形式

本文选用管片厚 350 mm,外径 6 200 mm,内径 5 500 mm,环宽 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°)。管片采用 C50 混凝土,内部主要钢筋采用 HRB335,纵缝由 2 根 5.8 级 M30 弯螺栓连接。加固钢板厚 20 mm,宽 850 mm,钢板与管片内表面采用环氧结构胶进行粘结。

管片、接头螺栓、加固钢板均采用三维八节点减缩积分实体单元 C3D8R。胶层采用黏聚力单元模拟,属于连续的八节点零厚度单元。内钢圈加固三维有限元模型如图 1 所示。

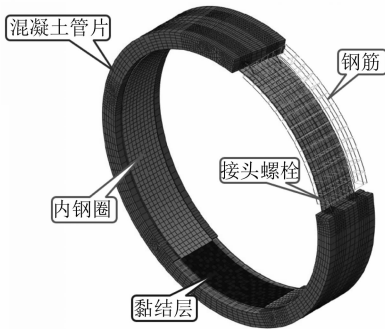


图 1 地铁盾构隧道内钢圈加固三维有限元模型

### 1.2 材料参数与接触关系

模型中主要结构由管片、螺栓、钢筋、钢板、胶层等组成。各材料的主要力学参数见表 1。

表 1 有限元模型材料参数表

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
钢板	200			235	375	0.3
结构胶	2.5	52.6	18.70			

模型中管片-管片和管片-螺栓为面面接触,其法向定义为“硬接触”,切向定义为“库伦摩擦接触”,设置相应的摩擦系数。钢筋采用嵌入单元,加固界面的接触关系由黏聚力单元的应力、变形、损伤情况进行描述。

### 1.3 荷载及边界条件

在计算模型中,拱顶位置限制了沿水平和竖直方向的平移及转动,并在整环管片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拱顶和拱底水土压力、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。

### 1.4 模型验证

依托项目所完成的整环管片衬砌足尺试验(见图 2),对本文所用数值模型进行了验证。两种方法得到的变形破坏曲线基本吻合,证明本文数值方法的正确性。



图 2 整环管片衬砌足尺试验

## 2 加固时机的选择

衬砌环结构受力变形分为两个阶段,分别为未加固时的变形阶段和粘贴内钢圈加固后的变形阶

段。综合考虑工程实际情况与试验结果,本文选取5‰、10‰、15‰椭圆度所对应的收敛变形量,分别为31 mm、62 mm、93 mm 作为内钢圈加固时机,研究衬砌环结构收敛变形量、接缝张开量、螺栓受力、内钢圈受力和内钢圈-管片界面应力的变化规律,分析加固时机对加固效果的影响。

### 3 计算结果

#### 3.1 衬砌环结构收敛变形

如图3所示,给出了3种加固时机下衬砌环结构的收敛变形。由图3可知,加固前衬砌环结构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,此时结构产生较大塑性变形。加固后衬砌环结构收敛变形增长速率迅速减慢并恢复为线性增长,继续施加顶部超载,结构会再次进入较快变形阶段,加固后结构最终产生较大塑性变形并破坏。

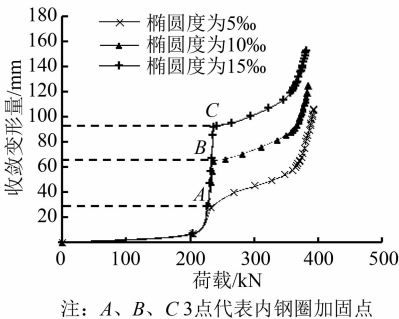


图3 衬砌环结构收敛变形

#### 3.2 衬砌环管片接头张开量

如图4所示,与衬砌环结构收敛变形发展规律

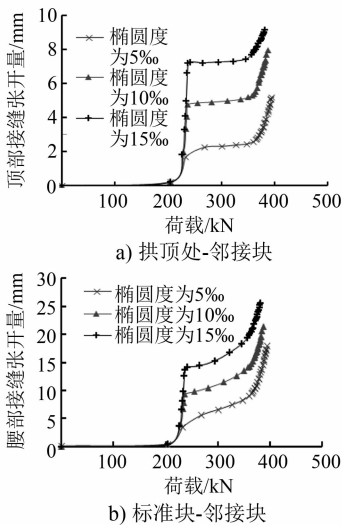


图4 衬砌环相邻块接缝张开量曲线

类似,前期衬砌环相邻块接缝张开量几乎为零,进入塑性变形阶段后迅速增加,加固处理后张开量增加速率降至较低水平,随荷载增加最终会产生较大张开量。

与衬砌环结构整体收敛变形类似,越早加固对接缝张开的控制越明显。内钢圈加固对于拱顶接缝张开的控制效果十分明显,加固后接缝张开量的增加速率几乎为零,对于拱腰和拱底接缝的张开量也起到了较好的控制效果。

#### 3.3 衬砌环管片纵缝接头螺栓应力

如图5所示,荷载施加初期,封顶块-邻接块纵缝接头螺栓应力线性缓慢增加,受力程度较小。当衬砌环结构产生一定变形后螺栓开始承受主要荷载,其应力水平高速线性增加。加固处理后,由于内钢圈开始参与受力,螺栓应力先降低,随着荷载的增加又恢复至较高水平。

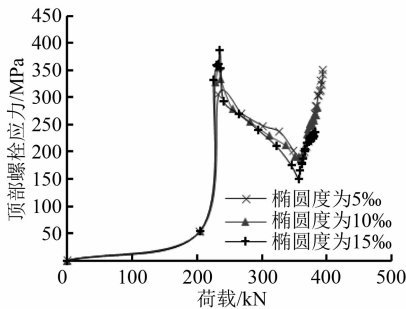


图5 封顶块-邻接块纵缝螺栓应力曲线

衬砌环管片拱顶处接头螺栓的应力水平在5‰、10‰、15‰时均已接近其强度极限,加固初期应力降低,后又恢复至极限状态,3种工况的应力-荷载曲线基本一致,因此,加固时机对其几乎没有影响。

#### 3.4 内钢圈应力

如图6所示,内钢圈被粘贴于衬砌环内表面后,立即参与衬砌环结构的整体受力,加载至结构最终破坏前,内钢圈的应力基本保持线性增长趋势,表明其作用效果明显,有效增加了结构的整体刚度。加固后衬砌环结构发生较大变形时,内钢圈的应力水平仍未达到材料自身的强度极限,即钢板本身并未屈服。此时,部分区域的应力水平出现波动甚至是下降,是黏结失效导致的界面剥离,使得该处的内钢圈不完全承载。

3种加固时机下内钢圈应力曲线的幅值和趋势基本一致,可见无论加固早晚,内钢圈自身均能较

好地起到增加结构刚度的作用。位于拱顶处的钢板基本处于受拉状态;位于拱腰处的钢板初期受拉,后期转换为受压状态。

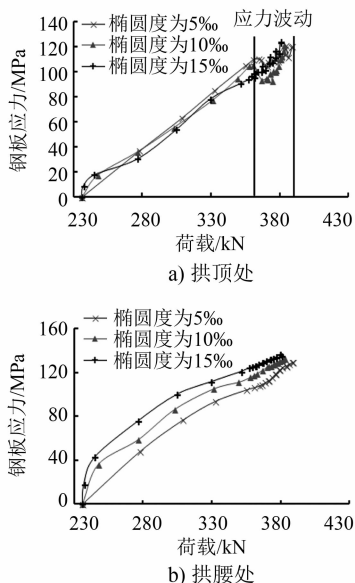


图6 拱顶和拱腰处钢板应力曲线

## 4 结语

本文建立了考虑了界面黏结-滑移效应的精细化三维有限元模型。基于此,分析了衬砌环收敛变形、接缝张开、螺栓应力等,得到如下结论:

1) 内钢圈加固对于拱顶接缝张开的控制效果十分明显,对于拱腰和拱底接缝的张开量也起到较好的控制效果。

2) 内钢圈加固后的衬砌环达到屈服时,钢板应力水平尚未达到材料自身的强度极限,但部分界面已经剥离。

3) 加固时机对于加固后结构的变形破坏特征

有明显影响。最合理的加固时机应当是一个安全界限,早于安全上限加固,则衬砌环结构破坏具有较强的突发性,迟于安全下限加固,则衬砌环结构会产生过大的变形量。

## 参考文献

- [1] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报,2013(6): 1092.
- [2] 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(增刊2): 802.
- [3] 叶耀东,朱合华,王如路. 软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J]. 地下空间与工程学报,2007(1): 157.
- [4] 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(增刊2): 83.
- [5] 何川,封坤,孙齐,等. 盾构隧道结构耐久性问题思考[J]. 隧道建设(中英文),2017(11): 1351.
- [6] 柳献,张浩立,唐敏,等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究——半环加固法[J]. 现代隧道技术,2014(3): 131.
- [7] 柳献,唐敏,鲁亮,等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究——整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报,2013(11): 2300.
- [8] 毕湘利,柳献,王秀志,等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报,2014(11): 128.
- [9] TANG M, LIU X, YUAN Y. Non-linear analysis of mechanical behaviors of shield tunnel segments reinforced by steel plate[J]. Proceeding of the EURO-C 2014: Conference on computational modelling of concrete structures, 2014(2): 899.
- [10] 翟五洲,张东明,黄宏伟,等. 盾构隧道“芳纶布-钢板”综合加固效果研究[C]//中国土木工程学会. 2016 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十九届年会论文集. 成都:中国土木工程学会,2016:8.
- [11] 刘庭金,黄鸿浩,许饶,等. 粘贴钢板加固地铁盾构隧道承载性能研究[J]. 中国公路学报,2017(8): 91.

(收稿日期:2019-04-20)

(上接第 25 页)

- [7] 曾攀. 有限元法[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [8] 赵剑坤,叶家玮. 基于有限元分析的永磁吸附单元设计优化[J]. 机械设计与制造,2009(3): 47.
- [9] 熊君. 基于 Ansoft Maxwell 仿真分析的永磁应用磁路优化设

计例析[J]. 磁性材料及器件,2018(6): 28.

- [10] 豆春蕾,李静. 磁吸附系统的磁力仿真计算与测试[J]. 新技术新工艺,2018(10): 36.

(收稿日期:2019-08-28)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt1998.com