

Research on Tunnel Bearing Characteristics Considering the Influence of Initial State

Yongliang Huang Hu Li Kang Zhang

Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

After deformation and damage occur in the tunnel segment structure, the bearing capacity decreases and affects the operating life. Based on the section between Xiangyang Station and Lingang Station of Jinan Metro, this paper investigates the initial state of the tunnel, studies the distribution law of the damage, calculates the bearing capacity of the tunnel under different states based on finite element analysis, classifies its safety, and proposes corresponding reinforcement measures. This provides a theoretical basis for deformation control measures of existing shield tunnels and is of great significance for ensuring the long-term safe operation of tunnels.

Keywords

initial state; Tunnel structure; Bearing characteristics; safety assessment

考虑初始状态影响的隧道承载特性研究

黄永亮 李虎 张康

济南轨道交通集团有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

摘 要

隧道管片结构产生变形病害后, 承载力降低, 影响运营寿命, 本文依托济南地铁向阳站~临港站区间, 对隧道的初始状态进行了调查, 研究了病害分布规律, 基于有限元分析的方法计算了不同状态下隧道的承载力, 并对其安全性进行了分级, 并提出了对应的加固措施, 为既有盾构隧道的变形控制措施提供理论依据, 对保障隧道长期安全运营具有重要意义。

关键词

初始状态; 隧道结构; 承载特性; 安全评估

1 引言

随着城市发展, 城市轨道交通由建设为主转向建运并重, 地铁隧道安全面临严峻挑战。隧道上方城市开发建设活动, 导致盾构管片承受的应力逼近极限、混凝土应变剧增, 进而引发结构变形^[1]。同时, 加载强度和初始状态的差异使运营隧道普遍存在病害^[2]。加之地铁车辆长期不均匀的动力荷载以及隧道上方填土堆载等多重因素影响, 在建盾构隧道在运营过程中极易发生不均匀变形^[3-5]。

当前, 针对隧道变形, 国内学者已开展了系列研究。王一兆等^[6]通过实测数据作为精细化数值模拟分析的基础, 统计既有隧道管片各截面内力, 取内力较大的若干截面作为关键截面进行过程分析, 发现既有隧道管片的横向变形主要由于土层侧向约束较小而导致接头变形, 而非结构本身因内力过大而出现大面积屈服、破坏导致的结构变形; 吴庆^[7]

研究了超载条件下浅埋隧道的结构变形机理以及超载对于隧道结构变形的影响, 研究发现隧道的垂直附加应力随着隧道埋深的减小而逐渐增大, 并提出当隧道的埋深小于隧道直径的 1.5 倍时需要隧道上方的附加荷载进行严格的控制, 同时随着堆载中心与隧道中心的距离越远其对应的附加应力越小, 隧道结构的竖向变形也越小。罗昭明^[8]等人针对发生管片错台、破损与局部开裂以及有较大变形与位移的隧道, 采用钢板内衬加固的方式对破损管片进行修复, 并对修复过程所涉及的净空复核、管内受力复核、裂缝处理及环片加固等技术难题进行了解释和阐明。

现有研究对于不同初始状态隧道承载特性研究较少, 本研究以济南地铁向阳站~临港站区间为工程背景, 对隧道不同初始状态的变形和承载特性开展研究, 明确不同初始状态隧道的承载性能, 并提出相应的加固措施建议。为既有盾构隧道的变形控制措施提供理论依据, 对保障隧道长期安全运营具有重要意义。

【作者简介】黄永亮 (1990-), 男, 中国山东济南人, 高级工程师, 硕士, 从事地下工程研究。

2 工程概况

向阳站~临港站区间为单圆盾构区间,起点接向阳站,向北沿机场路敷设,下穿青银高速桥、小清河及南水北调干渠后,接临港站。左右线盾构推进方向为:由向阳站~临港站区间风井小里程端双始发至向阳站接收,后吊出并转移至区间风井大里程端二次始发至临港站接收。左线全长 1559.347 m,右线全长 1553.582 m。工程位于山前冲洪积平原—黄河冲积平原地貌单元。地貌成因类型为冲洪积平原和冲积平原。地形较为平坦,沿线勘探点高程为 18.26~24.01 m。^[1]

本区间线路沿线地质特征,以小清河南岸为界,场地属于两个水文地质单元,小清河以南属于山前冲洪积平原水文地质单元,小清河以北属于济阳水文地质单元。地下水类型均为第四系松散孔隙水,含水岩组主要为碎石土层、含碎石粉质黏土层、砂土、粉土层,黏性土层内分布有导水裂隙,具有一定的渗透性。^[2]

3 初始状态调查

3.1 隧道初始状态检测

针对向阳站~临港站区间隧道已发生的管片破损、裂缝和断面椭圆度进行检测。管片破损、裂缝检测主要为调查隧道管片破损、裂缝数量和分布情况,统计分析隧道病害数量和分布形式。断面椭圆度通过隧道激光断面仪进行变形测量。检测区域为左线 0-20 环。^[3]

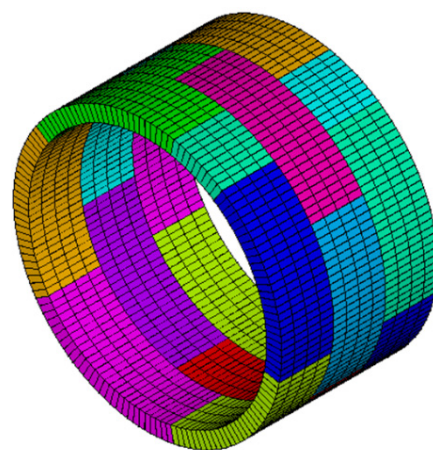
3.2 隧道初始状态检测结果

检测结果如下:破损共计 20 环存在破损,占比 95.24%,共检出破损 149 处。破损病害分布于环缝以及纵缝处。以环缝破损为主,91% 的破损位于环缝处,且多位于纵向螺栓附近;裂缝共计 17 环存在裂缝,累计检出裂缝 151 条。裂缝主要位于两侧腰部以及拱顶部位,多呈纵向分布,存在较多沿管片纵向通长分布裂缝;断面椭圆度其中 0-6 环为竖鸭蛋变形,竖轴变为长轴,变化最大值为 4.4 cm,位于 3 环,椭圆度最大值为 14.31‰,位于 4 环。剩余 7-20 环为横鸭蛋变形,横轴变为长轴,变化最大值为 4.0 cm,位于 11 环,椭圆度最大值为 13.28‰,位于 11 环。^[4]

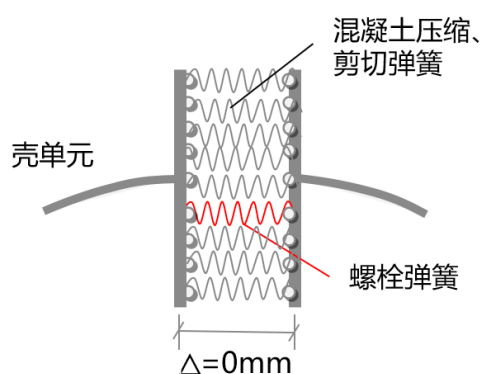
4 承载特性分析

4.1 计算模型

为分析盾构隧道管片承载特性,本研究计算分析采用壳-弹簧模型,使用 ANSYS 软件建立,模型示意图如图 1 所示。衬砌结构参考实际设计尺寸建立,环宽 1.2 m,管片厚度 0.3 m,计算半径 3.05 m,分块和拼装角度均与实际相同,包括 1 块封顶块 K、2 块邻接块 B、3 块标准块 A。模型管片采用非线性壳单元模拟,如图 1(a) 所示。纵缝与环缝接头采用弹簧模拟,考虑接缝位置处混凝土压缩、径向和纵向剪切作用,以及非线性螺栓作用。如图 1(b) 所示。^[5]



(a) 衬砌结构模型



(b) 管片接头模型

图 1 模型示意图

4.2 计算结果

根据现场检测结果,对隧道结构进行安全性鉴定,分别对原设计施工工况、事故抢险工况、抢险后现状工况、后续使用工况进行计算。在各工况下,管片 R/S 取所有管片截面校核结果中的最小值,纵缝 R/S 取所有纵缝截面校核结果中的最小值。计算简图如图 2 所示,衬砌环各工况的计算结果汇总如表 1 所示:

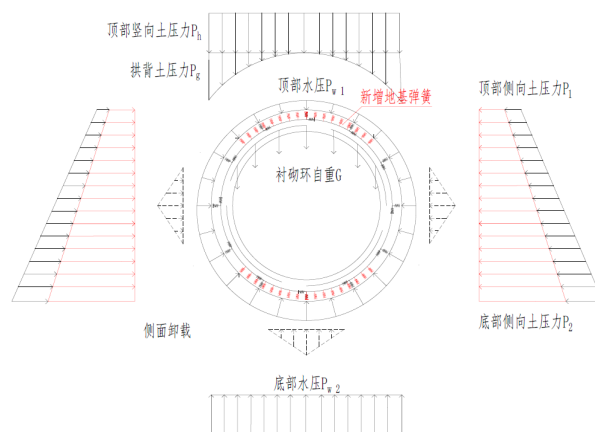


图 2 计算简图

表 1 第 0~20 环衬砌环各工况计算结果汇总表

环号	原设计施工工况		事故抢险工况		抢险后现状工况		后续使用工况	
	管片 R/S	纵缝 R/S	管片 R/S	纵缝 R/S	管片 R/S	纵缝 R/S	管片 R/S	纵缝 R/S
0	2.25	2.73	1.02	1.90	2.21	2.78	2.01	2.80
1	2.15	2.85	0.97	2.06	1.84	2.64	1.87	2.68
2	2.26	2.85	0.92	1.94	1.37	2.53	1.56	2.59
3	2.26	2.86	0.90	1.77	1.14	2.27	1.29	2.35
4	2.28	2.86	0.91	1.84	1.09	2.02	1.23	2.12
5	2.26	2.87	0.96	1.83	1.18	2.15	1.31	2.23
6	2.28	2.86	0.99	1.92	1.79	2.39	1.65	2.45
7	2.27	2.87	0.97	2.95	1.96	3.05	1.43	2.92
8	2.28	2.86	0.96	2.70	1.87	4.09	1.21	3.36
9	2.27	2.87	0.91	2.62	1.90	4.01	1.10	3.40
10	2.28	2.86	0.97	2.59	1.76	3.89	1.10	3.36
11	2.27	2.87	0.90	2.71	1.73	3.88	1.17	3.30
12	2.28	2.86	0.98	2.49	1.60	3.86	1.16	3.36
13	2.27	2.87	/	/	1.47	3.87	1.09	3.31
14	2.28	2.87	/	/	1.31	3.84	1.00	3.25
15	2.28	2.87	/	/	1.25	3.81	0.98	3.26
16	2.29	2.88	/	/	1.16	3.69	0.92	3.17
17	2.34	2.83	/	/	1.16	3.97	0.91	3.35
18	2.09	3.23	/	/	1.33	3.73	0.99	3.21
19	2.32	2.85	/	/	1.49	3.87	1.13	3.28
20	2.39	2.80	/	/	1.60	3.80	1.24	3.28

4.3 安全性评级

根据各工况计算结果，对衬砌环和环缝进行安全性评级。衬砌环 R/S 数值取管片 R/S 和纵缝 R/S 两者中的较小值，环缝 R/S 数值取各计算单元的最小值。安全性评级如下所示：

安全性为 A 级的衬砌环有 5 环，占比 23.8%，分别为 0、13、14、19、20 环；安全性为 B 级的衬砌环有 16 环，占比 76.2%，分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、15、16、17、18；没有安全性为 C、D 级的衬砌环。^[6]

安全性为 A 级的环缝有 7 条，占比 35%，分别为 13-14、14-15、15-16、16-17、17-18、18-19、19-20 环；安全性为 B 级的环缝有 13 条，占比 35%，分别为 0-1、1-2、2-3、3-4、4-5、5-6、6-7、7-8、8-9、9-10、10-11、11-12、12-13；没有安全性为 C、D 级的环缝。^[7]

4.4 加固建议

通过对隧道结构现场调查及计算分析表明，隧道结构在事故抢险过程中受到历史最不利作用，部分衬砌环与环缝

承载力不满足安全性要求；在抢险阶段采用了地面、洞内注浆等工程措施后，隧道结构的受力状态有所改善，但结构安全性储备降低，使用性受到影响，应进行必要的修复处理。建议按照如下顺序，进行修复施工：对于存在渗漏水的衬砌环进行注浆堵漏，洞外注浆，加强地层约束，对安全性评级为 B 级的衬砌环进行裂缝修复、破损修补，在修复施工及后续运营过程中，应对上述安全性评级为 B 级的衬砌环进行长期监测，长期变形监测项目应至少包括竖向沉降和收敛变形两项，结构修复施工过程中，应采取措施避免或尽可能减少损伤原结构；发现原结构或相关工程隐蔽部位的构造有严重缺陷时，应会同原设计单位采取有效措施后方可继续施工。^[8]

5 结论

本文深入研究了不同初始状态的变形和承载特性，通过现场检测和模型计算相结合的方法，得出以下主要结论：当盾构隧道周围的荷载受到较大变动时，隧道结构周围的土体会发生对应的应力重分布，并且进一步导致隧道管片发生变形，管片从类圆状逐渐变形到椭圆状。并且产生病害，裂缝病害主要分布于两侧腰部以及拱顶部位，存在较多沿管片纵向通长分布裂缝。破损病害以环缝破损为主，且多位于纵向螺栓孔附近。基于有限元分析的方法计算了不同状态下隧道的承载力，并对其安全性进行了分级，对安全性评级为 B 级的衬砌环进行裂缝修复、破损修补，在修复施工及后续运营过程中，应对上述安全性评级为 B 级的衬砌环进行长期监测，研究成果可为后续工程提供借鉴。

参考文献

[1] 刘志坚, 曹伍富, 黄俊鸿, 等. 盾构隧道超近间距下穿运营盾构隧道管片环变形规律研[J/OL]. 铁道标准设计: 1-9[2023-08-16].

[2] 姚爱军, 张剑涛, 郭海峰, 等. 地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(07): 2318-2326+2335.

[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(01): 157-160+166.

[4] 刘庭金, 陈思威, 叶振威. 堆载诱发盾构隧道病害及结构安全分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 67-73.

[5] 李泽民. 地下工程开挖对近接建筑物的影响研究[D]. 沈阳建筑大学, 2020.

[6] 王一兆, 陈俊生, 闵星, 等. 基于精细化数值模拟的地铁盾构隧道椭圆度安全研究[J/OL]. 铁道标准设计: 1-10[2023-11-01].

[7] 吴庆. 地面堆载对既有盾构隧道结构的影响研究[D]. 上海交通大学, 2012..

[8] 罗昭明, 董志超. 地铁盾构隧道管片破损修复技术研究[J]. 人民长江, 2015, 46(24): 59-62+93.