列车荷载下管片背后含空洞盾构隧道结构动力响应研究

徐 波[1] 邹佳旺[2]
1.南昌轨道交通集团有限公司地铁项目管理分公司，江西 南昌 330013
2.大连海事大学交通运输系，辽宁 大连 116026

[摘要]以南昌地铁3号线盾构隧道为背景，利用LS-DYNA软件模拟和分析在地铁列车荷载下，管片背后含空洞盾构隧道结构的动力响应。选取最容易出现空洞的位置，选取适当的列车荷载，建立相应的模型来进行分析计算，对比分析了拱顶含空洞、拱肩含空洞、拱腰含空洞情况下盾构管片不同位置的动应力和加速度。模拟结果表明：在空洞出现的位置处，盾构管片的动应力和加速度明显变大；当空洞出现在拱圈的上半部分时即拱肩处，盾构管片的动应力和加速度明显大于空洞出现在拱腰处，需要采用相应的有效措施减小空洞的影响，来保证隧道安全。
[关键词]盾构隧道；管片背后空洞；列车荷载；数值模拟；动力响应
DOI：10.33142/aem.v6i9.13847 中图分类号：U459.5 文献标识码：A

Study on Dynamic Response of Shield Tunnel Structure with Cavity Behind the Pipe Segment under Train Load

XU Bo[1], ZOU Jiawang[2]
1. Subway Project Management Branch of Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330013, China
2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: Taking the shield tunnel of Nanchang Metro Line 3 as the background, LS-DYNA software was used to simulate and analyze the dynamic response of the shield tunnel structure with cavities behind the pipe segments under the load of subway trains. Selecting the location where voids are most likely to occur, selecting appropriate train loads, establishing corresponding models for analysis and calculation, and comparing and analyzing the dynamic stress and acceleration of shield tunnel segments at different positions under the conditions of arch crown with voids, arch shoulder with voids, and arch waist with voids. The simulation results indicate that the dynamic stress and acceleration of the shield tunnel segment significantly increase at the location where the cavity appears; When the cavity appears in the upper half of the arch ring, that is, at the arch shoulder, the dynamic stress and acceleration of the shield tunnel segment are significantly greater than those of the cavity appearing at the arch waist. Corresponding effective measures need to be taken to reduce the impact of the cavity and ensure tunnel safety.
Keywords: shield tunnel; hollow behind the pipe segment; train load; numerical simulation; dynamic response

引言

随着城市化进程的加快，地下交通系统的建设日益成为现代城市发展的重要组成部分。盾构隧道因其施工效率高、对地面影响小等优点，广泛应用于城市轨道交通、排水系统等工程中，因此盾构隧道的安全和性能愈发受到关注。而在隧道围岩和衬砌管片之间常常出现空洞，空洞的存在可能导致衬砌管片出现应力集中、材料疲劳及变形等一系列问题，进一步影响隧道的稳定性和安全性。近年来，随着研究的深入，越来越多的学者开始关注盾构隧道结构在不同荷载下的动态行为。然而，关于管片背后空洞对隧道动力响应影响的研究仍显不足，特别是在考虑列车荷载作用的情况下。长期的列车振动荷载会导致隧道衬砌混凝土产生动态响应，初始裂隙扩展，最终可能导致隧道破坏，严重时影响城市交通系统。破坏过程隐蔽且后果严重。在一些城市，衬砌结构病害已经影响运营，甚至引发事故。

最常见的病害是衬砌背后的空洞，空洞的产生主要是由于列车运行震动引起周围岩土体的累积作用所致。空洞的存在可使隧道围岩与衬砌管片的加速度反应增大，引起内力增加，从而影响管片结构的承载力。在海底隧道中，空洞的存在还会导致管道泄漏，且泄漏与空洞大小相关。针对这一问题，研究人员对多个隧道进行了测试和数据分析，分析结果后发现，许多隧道在围岩和衬砌管片之间出现了空洞，极大程度影响了衬砌管片的承载能力，存在安全隐患，据大数据分析，存在空洞的隧道长度超过整个测线长度的10%。国内外学者已通过模型试验、数值模拟及现场数据分析，对盾构隧道背后空洞的病害进行了研究。宋磊[1]分析了不同角度和位置的空洞对衬砌受力的影响。得到拱顶空洞的存在，会造成了拱顶板开裂损伤；侧壁空洞的存在对衬砌受力情况产生较大的影响。赖金星等[2]针对空洞存在的位置和尺寸进行了研究。得出：当空洞存在于管片两腰时，隧道后部土体的应力集中程度较大且管片的内力以及稳定性较差。任仁[3]针对铁路隧道进行了无

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

损检查，结果表明：在隧道衬砌中空洞发生最多的位置是拱顶和拱肩，其次是拱腰和边墙。

1 模型建立和基本原理

1.1 隧道模型

本次研究数据来源于南昌地铁 3 号线某盾构区间，该盾构隧道衬砌为单层钢筋混凝土衬砌，衬砌外半径为 3.0m，内半径为 2.7m，管片厚度为 0.3m，宽为 1.2m，每个管片环由 6 部分组成，由 1 个封顶块、2 个邻接块、3 个标准块拼装而成。每环管片之间纵向共 10 只 M24 螺栓，环向共 12 只 M27 螺栓，管片与管片之间的拼接形式为错缝拼装。衬砌环模型如图 1～图 3 所示。

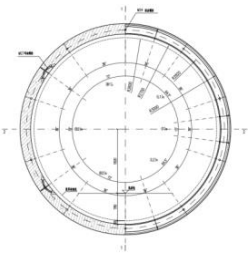


图 1 衬砌环构造

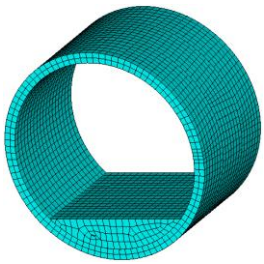


图 2 衬砌三维模型

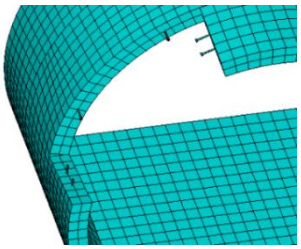


图 3 隧道衬砌局部放大图

1.2 材料基本参数

该盾构隧道衬砌结构材料主要包括 C50 的混凝土衬砌管片及 M24 和 M27 的连接螺栓，其基本力学参数如表 1 所示，隧道所处地层的物理力学指标见表 2。

表 1 隧道衬砌材料基本力学参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
C50 混凝土	34500	0.20	2500
M24 螺栓	207000	0.23	7680
M27 螺栓	209000	0.25	7890

表 2 地层物理力学指标

地层编号	变形模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})	黏聚力/kPa	内摩擦角/(φ)
1	28	1970	24.76	16.1
2	35	2440	0	36
3	40	2000	40	25

1.3 有限元模型

对隧道所处的地层采用四面体网格和自适应网格相结合的形式划分网格。隧道附近的土层形状及性质相对较为复杂，采取四面体网格计算精度较低，于是隧道附近的网格采取自适应网格，提高了计算精度。对相对隧道较远的地层采用四面体网格，密度小于隧道附近，在保证精度的同时，节省计算时间。根据上述数据和建模得到的隧道数值模型如图 4～图 6 所示。

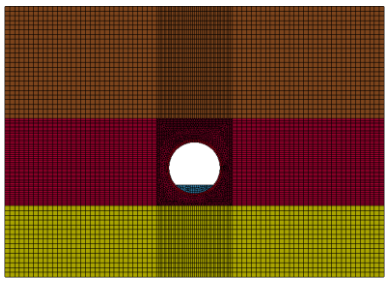


图 4 地层模型平面视图

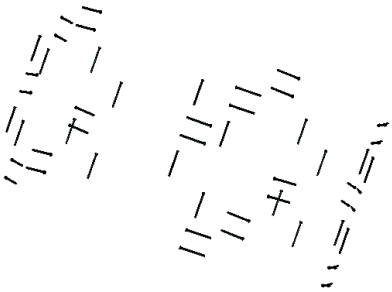


图 5 环向和纵向连接螺栓

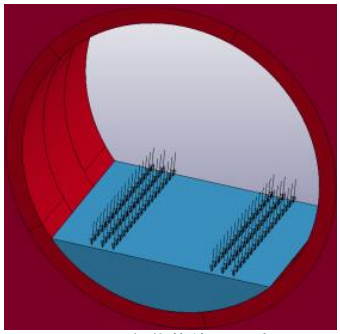


图 6 列车荷载施加示意图

1.4 基本原理

借助 LS-DYNA 软件模拟隧道衬砌后含空洞情况下，地铁列车运行时对隧道的影响，重点分析衬砌管片在地铁列车振动荷载下的竖向加速度和应力。建立好初步模型后，对相关部分进行本构模型的选择以及参数的定义，设置地层相关参数、衬砌管片相关参数以及螺栓相关参数，其中地层的本构模型选择 HJC 本构模型，HJC 本构模型是在 Johnson-Cook 模型的基础上，综合考虑了围压效应、损伤演化效应以及压实压碎效应的影响，能很好地表达描述岩石、混凝土等材料的大变形或者大应变率效应等特性，衬砌管片的本构模型选择了 RHT 本构模型，RHT 模型基于 HJC 模型的改进，考虑了应力张量的第三不变量对损伤表面形状的影响。当压力低于孔隙破碎压力时，材料具有弹

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

性。一旦压力超过破碎压力，导致材料的有效体积模量下降。其他材料选择线弹性本构模型；定义接触，土层和隧道之间的接触选择硬接触，管片与螺栓之间设置共节点以保证螺栓与管片之间不会分离并可以传递力。此外，在数值模型的周围表面采用无反射边界来消除应力波反射的影响。

2 列车振动荷载和空洞选定

2.1 列车振动荷载模拟

在计算地铁列车荷载时，要综合考虑车辆轴重、行车速度和轨道不平整等多种因素。根据梁波等人建立的计算模型，根据表 3 选择了相应的参数，从而得到了计算所需要的特定的列车载荷[4]。

$$P(t)=k_1k_2\left(P_0+P_1\sin\omega_1t+P_2\sin\omega_2t+P_3\sin\omega_3t\right) \quad (1)$$

式中：P_1, P_2, P_3为 3 种情况的振动荷载；k_1为相邻轮轨力叠加系数，一般为 1.2～1.7；k_2为钢轨分散系数，一般为 0.6～0.9；P_0为车辆静载。

南昌地铁 3 号线列车计划采用 6 节编组的 A 型列车，设定轴重为 16t，单边车轮静态载荷为 80kN，运行速度为 80km/h。行车平顺性相关参数为：波长 10m，正矢 5mm；动力附加荷载的波长为 2m，正矢为 0.6mm；波形磨耗的波长为 0.5m，正矢为 0.005mm。此外，相邻轮轨力的叠加系数为 1.5，钢轨的分散系数为 0.8，最终列车荷载的时程如图 7 所示。

表 3 列车振动荷载相关系数

控制条件	波长/m	正矢/mm
按行车平顺性	50.0	16.0
	20.0	9.0
	10.0	5.0
按作用到线路上的动力附加荷载	5.0	2.5
	2.0	0.6
	1.0	0.1
波形磨耗	0.5	0.1
	0.05	0.005

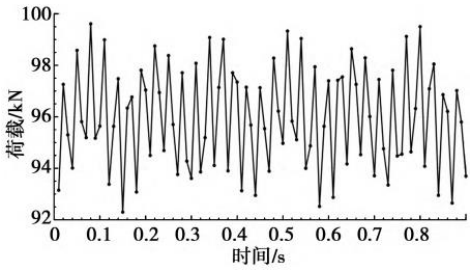


图 7 车速 80km/h 的列车时程曲线

2.2 空洞选定

隧道衬砌后含空洞是既有隧道普遍发生的问题，空洞位置一般多出现在拱顶、拱肩、拱腰等部位。造成这种脱空的原因有两种：一是隧道与围岩没有完全接触，二是由于其他原因在围岩中形成了空腔。空洞的几何特征主要包括径向、纵向和环向。径向特指管片与围岩接触面附近的空洞；环向对应于隧道圆形截面的辐射角度；纵向长度是空洞沿隧道线路方向的延伸长度[5]。通常，空洞的形状可以是长方形、三角形或圆弧形，长方形和圆弧形是最常见的无损检测方法。通常情况下，空洞的深度范围在 20cm 到 30cm 之间，宽度则在 1.0m 到 2.0m 之间，本文设计计算三种工况：工况一，拱顶上方空洞，深度为 20cm，环向角度为 30°，纵向长度 180cm；工况二，左右拱肩空洞，深度为 20cm，环向角度为 30°，纵向长度 180cm；工况三，左右拱腰空洞，深度为 20cm，环向角度为 30°，纵向长度 180cm。

具体情况见图 8～图 10。

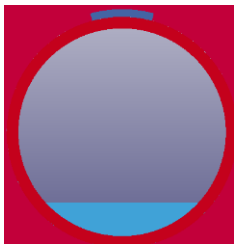


图 8 拱顶空洞示意图

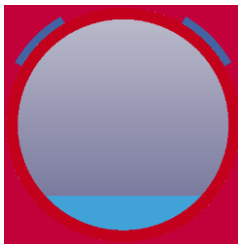


图 9 左右拱肩空洞示意图

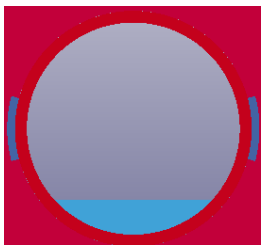


图 10 左右拱腰空洞示意图

3 结果和分析

在管片与围岩之间设置不同位置的空洞，空洞随着列车振动荷载的作用下，分析空洞位置的不同对隧道衬砌管片的影响。得到在列车振动荷载下隧道衬砌管片模型中心处位置的竖向加速度和动应力变化规律。

（1）衬砌管片竖向加速度分析

在列车荷载作用下，拱顶处竖向峰值加速度变化不大，除拱顶外其余位置竖向峰值加速度大小与空洞位置有关，测点具体数据见表 4，不同测点峰值加速度图见图 11。

表 4 不同空洞位置竖向峰值加速度（m/s^2）

测点位置	工况一	工况二	工况三
拱顶 A	0.350	0.346	0.304
右拱肩 B	0.277	0.370	0.277
右拱腰 C	0.196	0.306	0.363
左拱肩 D	0.234	0.365	0.287
左拱腰 E	0.193	0.313	0.369
拱底 F	0.242	0.285	0.259

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

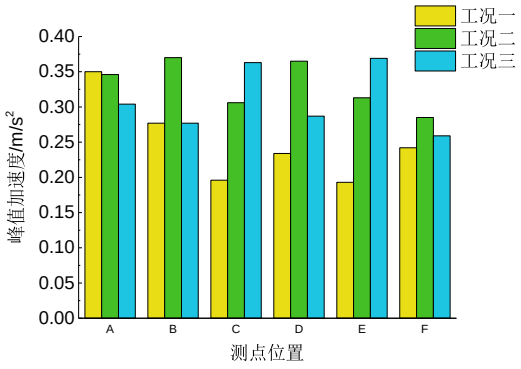


图 11　各测点峰值加速度

由表 4 和图 11 得到拱顶处竖向峰值加速度随着空洞的变化而变化，工况一所测得竖向加速度最大，其次是工况二，工况三所得竖向峰值加速度最小，但总体变化很小。由于盾构隧道衬砌管片的特殊性，加之空洞位置的不同，导致不同测点位置峰值加速度大小不同且变化幅度不一致。除了拱顶之外，其他测点的竖向峰值加速度随空洞位置的变化而变化，当测点处存在空洞时，相应的竖向峰值加速度比该测点不存在空洞时明显增大。由此可以得到空洞的存在主要对其对应管片的位置处影响较大。

（2）衬砌管片环向应力分析

不同空洞位置动应力峰值见图 12。

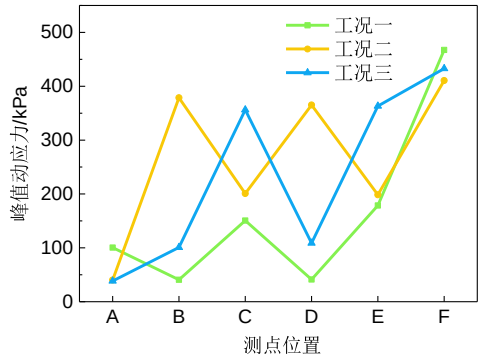


图 12　各测点峰值动应力

由图 12 可知，当拱顶存在空洞时，中心处环向应力受压拱顶处应力峰值明显大于拱顶处未存在空洞的工况二和工况三；当空洞出现在拱肩和拱腰时，在相应部位产生应力集中，峰值动应力显著增加。随着空洞位置的变化，整个衬砌圆环受力状态明显不同，当空洞存在于拱肩时，应力集中较其他情况明显。总体上拱顶处峰值动应力变化幅度较小，当测点处存在空洞时，峰值动应力明显增大，这是由于空洞处存在一定应力集中现象。

4 结论

（1）在列车振动荷载作用下，隧道衬砌管片的竖向峰值加速度和动应力峰值与空洞所在位置有关，由于盾构隧道管片的特殊性，加之空洞位置的不同，导致不同测点位置加速度大小不同且变化幅度不一致。

（2）当围岩与管片之间存在空洞时，该处的竖向峰值加速度和动应力峰值都明显增大，但其他位置变化幅度不明显，说明空洞的存在主要对其对应管片的位置处影响较大。

（3）在列车振动荷载的作用下，对比三种工况所得到的数据，当空洞存在于拱肩时即工况二，得到的竖向峰值加速度和动应力峰值较大，说明当空洞存在于拱肩时，对管片的内力及稳定性产生较大影响。

[参考文献]

[1]宋磊.衬砌背后空洞对既有隧道受力影响研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):134-137.

[2]赖金星,刘炽,胡昭,等.盾构隧道衬砌背后空洞对结构影响规律数值分析[J].现代隧道技术,2017,54(3):126-134.

[3]任仁.高铁隧道空洞几何特征及劣化机制研究[D].北京:北京建筑大学,2018.

[4]刘继红,衣忠强,田龙岗,等.列车振动荷载下盾构隧道结构动态响应研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):901-907.

[5]王劲博.管片背后空洞缺陷影响的大直径盾构隧道列车动力响应研究[D].华北:华北水利水电大学,2023.

作者简介：徐波（1992.8—），男，学位：硕士，学历：硕士研究生，从事专业：城市轨道工程，研究方向：地铁建设、基坑开挖、盾构隧道等地下工程，职称：工程师。

Copyright © 2024 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.