

隧道衬砌空洞对结构安全性影响机理研究

尹水金¹ 赵洪尧²

1 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330013

2 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要]文中以某地铁区间隧道工程为例,采用数值模拟的方法,分别设置两种方案,方案1为当空洞位于I号点时,方案2为当空洞位于II号点处时;在两种方案的基础上,研究不同空洞范围对衬砌管片应力和衬砌管片开裂的影响,结果表明:管片空洞缺陷处应力集中非常明显且处于受拉状态,空洞的中心位置处主应力最大,且随着空洞范围的增大,最大主应力值增大;衬砌背后空洞范围越大,裂缝越早出现且扩展速度越快。通过对文中数值模拟结果分析,可以提出合理有效的施工措施并对实际工程具有一定的指导意义。

[关键词]隧道工程;衬砌开裂;拓展有限元;数值模拟

DOI: 10.33142/aem.v5i11.10280

中图分类号: U457.2

文献标识码: A

Research on the Mechanism of the Impact of Tunnel Lining Voids on Structural Safety

YIN Shuijin¹, ZHAO Hongyao²

1 Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Jiangxi, Nanchang, 330013, China

2 Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: Taking a subway section tunnel project as an example, numerical simulation method is used to set up two schemes. Scheme 1 is when the tunnel is located at point I, and Scheme 2 is when the tunnel is located at point II; On the basis of two schemes, the influence of different cavity ranges on the stress and cracking of lining segments was studied. The results showed that the stress concentration at the defect area of the segment cavity was very obvious and in a tensile state. The main stress at the center of the cavity was the highest, and as the cavity range increased, the maximum main stress value increased; The larger the range of voids behind the lining, the earlier the cracks appear and the faster their propagation speed. By analyzing the numerical simulation results in the article, reasonable and effective construction measures can be proposed, which has certain guiding significance for practical engineering.

Keywords: tunnel engineering; cracking of lining; extended finite element analysis; numerical simulation

引言

随着隧道建设规模的不断扩大和运营时间的不断延长,我国铁路和公路建设的快速发展,铁路和公路隧道的数量和里程都在迅速增加^[1]。伴随着跨海、跨江大桥技术的飞快发展,海底隧道、河(江)底隧道的修建技术也在快速更新,隧道结构和施工的安全问题,特别是衬砌管片开裂问题以及影响隧道开挖稳定性的相关问题。

隧道工程在逐步建设的同时,由于受地质、气候、设计和施工等因素的影响,隧道施工中往往会存在多种缺陷^[2]。本文所提到的衬砌背后空洞会引起空洞附近出现应力集中,使得应力重新分布,往往会引起衬砌管片的开裂,进而影响隧道的稳定性和使用的安全性,导致工程事故的发生。因此,未来很长一段时间内,我国的隧道工程技术的发展将由以往的大规模建设向今后的灾害治理修复转变^[3-4]。因此,对隧道工程结构的开裂、渗透水、背后脱空等健康状况进行分析和量化评价,具有一定的研究意义。

隧道在修建和使用的过程中,因为隧道衬砌的开裂从而引发的工程事故屡见不鲜。2003年5月,湖南有一条公路隧道,拱顶发生了坍塌事故,坍塌掉落下的衬砌混凝土

土块有几百公斤重。根据相关单位的调查结果,发生坍塌事故的原因因为衬砌厚度不足且塌方衬砌背后存在较大空洞,在隧道开挖的时候拱顶已经出现了纵向裂缝但施工单位并未处理^[5]。可以看出,衬砌开裂是由于衬砌后空洞的存在,直接影响衬砌结构的承载能力,危及行人和车辆的安全,造成经济损失。

通过研究隧道衬砌开裂的原因、方式以及可能造成的危害大小,从而制定相应的处理方法和补救措施。知道隧道衬砌管片断裂的机理、影响因素等,我们可以制定专项的处理方法,并且可以在施工过程中根据研究内容改进施工方法,研究出更适合的制作衬砌的材料,从而更好地减少衬砌开裂,减少工程事故和经济损失。此外,通过隧道衬砌开裂的研究,我们可以知道隧道开裂的先期表征、特点、开裂速度等,因此可以制造相关的衬砌开裂报警器,定点放置,更好地实时监测隧道开裂情况。当开裂达到一定要求时,提前预警,可以减少人员伤亡和制定补救措施,减少隧道开裂或者延缓隧道开裂。

1 工程概论

南昌地铁2010年开始1号线筹建,之后2、3号线陆续

展开,到2020年将建成1、2、3号线形成“人”字形主骨架。本次建设的南昌市轨道交通3号线起点为莲塘站,终点为京东大道站。为联系莲塘、青云谱区、绳金塔、老城核心区、青山路、二七北路、青山湖风景区、火炬大街、高新区等重要区域的联系通道。线路全长28.5km,全线设车站22座,均为地下站,平均站间距1.36km。3号线全部22个车站,其中八一路站、青山路口站为1、2号线已开工建设车站,十字街站为地块开发单位代建车站。其余19座车站中4个车站为换乘车站,车站结构基本位于中风化泥质粉砂岩上层,均采用明挖法或局部盖挖法施工。区间全部采用盾构法施工,其中1~7标段采用三台盾构施工,8标采用两台盾构施工。盾构机主要穿越地层为富水沙层、上软下硬地层、全岩地层。

2 数值模型建立

在盾构隧道修建过程中,其主要支护形式为预制式管片衬砌,由于施工因素或地质条件的影响,管片背后会出现空洞,从而改变衬砌结构受力特征,严重时可能导致衬砌管片开裂,给工程安全带来极大隐患。本节根据南昌地铁盾构江铃站-京家山站区间某断面的工程情况,结合XFEM有限元理论,使用ABAQUS软件建立计算模型,对比不同位置、不同大小范围条件下背后空洞对管片受力状态的影响规律、管片开裂状态以及裂缝发展情况。

2.1 模型建立

根据所研究断面的实际状况对隧道建模条件进行简化。简化结果如下:隧道埋深为10m,土层分布规律自上而下分别为素填土,粉质黏土,粗砂,粗砂(水位线以下),沙砾,中风化泥质粉砂岩。

考虑隧道施工过程中的边界效应,计算范围取3~4倍隧道直径,模型尺寸设置为地质体数值模型深度72m,长度72m,宽度12m。衬砌管片数据为外径6m,内径5.4m,厚度0.3m,宽度1.2m。管片采用C50混凝土,抗压强度50MPa,重度25kN/m³。裂缝扩展采用最大主应力开裂准则,混凝土抗拉强度 $f_t=1.89\text{MPa}$ 。简化后的三维模型及地层分布图如图1所示。

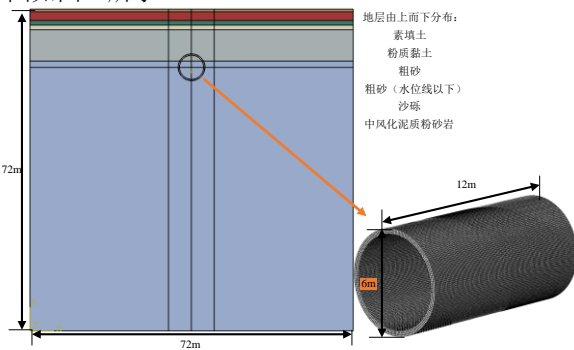


图1 三维模型图

2.2 模型参数

根据实际地质构造示意图进行地层简化,简化后的各层参数结果如表1所示:

表1 简化地层分层表

分层序号	地层名称	地层厚度 m	重度(浮重度) 10^3N/m^3	压缩模量 MPa
1	素填土	0.5	1.76	6.5
2	粉质黏土	2.0	1.84	7.2
3	粗砂	1.0	1.81	12.0
4	粗砂(水位线下)	1.0	0.81	12.0
5	砂砾	7.0	0.85	23.0
6	中风化泥质粉砂岩	—	1.52	29.0

注:由于地层中强风化泥质粉砂岩比例极少,故在简化分析底层时不再考虑强风化泥质粉砂岩。3 计算结果分析

由相关研究可知,管片背后空洞多位于图中I号点和II号点位置,因此,设置两种方案进行研究,方案1为当空洞位于I号点时,方案2为当空洞位于II号点处时。本节计算中分别以I号点和II号点为中心,沿环向取 10° 、 20° 和 30° 范围的空洞大小,共六种方案进行对比计算。

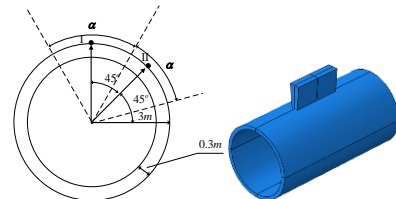


图2 计算位置示意图和衬砌背后空洞示意图

3.1 空洞引起衬砌管片应力变化分析

为研究空洞对衬砌管片应力变化的影响,分析两种方案下不同空洞角度范围的管片应力云图,以此来分析空洞位置及范围对管片应力变化的影响。当空洞范围大小分别为 10° 、 20° 、 30° 时,衬砌管片应力结果分别如图3、图4和图5所示。

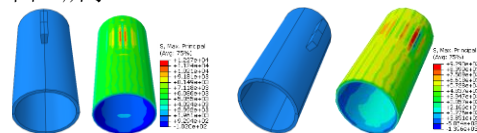


图3 空洞 10° 应力结果图(左I右II)

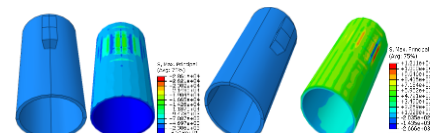


图4 空洞 20° 应力结果图(左I右II)

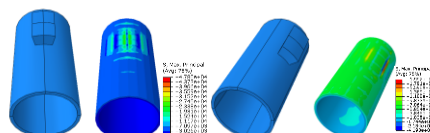


图5 空洞 30° 应力结果图(左I右II)

根据以上六处空洞条件下的计算结果可以看出,管片的应力分布情况由于空洞的存在发生了很大改变。管片空洞存在的地方应力集中非常明显且处于受拉状态,空洞的中心位置处主应力最大,且随着空洞范围的增大,最大主

应力值增大。空洞之外的区域应力分布均匀,管片均处于受压状态。六种空洞条件下,方案1中空洞处最大主应力(拉应力)为 $1.045 \times 10^3 \text{Pa}$,方案2中空洞处最大主应力 $4.193 \times 10^3 \text{Pa}$,均未超过衬砌管片的开裂应力 1.89MPa ,因此衬砌管片并没有产生裂缝。

将I号点位置处与II号点位置处不同范围空洞条件下的最大主应力进行对比,可以得出结论:I号点位的主应力总是大于II号点位;I号点位的拉应力总是小于II号点位;I号点位拉应力与压应力之差总是大于II号点位的应力差。

可以看出I号点位(顶部)出现空洞时衬砌管片受到压应力较大,且其内部应力变化幅度比较大,内部应力变化更复杂。由于混凝土具有抗压不抗拉的特性,比如C50混凝土抗拉强度为 50MPa ,而抗拉强度仅有 1.89MPa ,故混凝土的开裂主要由拉应力强度决定。I号点位(顶部)的拉应力总是小于II号点位(肩部),因此,II号点位(肩部)出现空洞时,衬砌管片的受力状况更接近管片的极限抗拉状态,此时衬砌管片更不稳定,在实际工程中更容易发生开裂现象。

3.2 空洞引起衬砌管片开裂规律分析

在应力研究的基础之上,继续增大土体的重力使衬砌管片达到极限状态,进而使其出现开裂,之后再对裂纹延伸情况进行分析研究。经过不断尝试逐步增加重力(通过改变重力加速大小改变重力大小),当重力增加至2.4倍时,所有工况下衬砌管片均能产生裂缝且数值模型计算收敛。数值模型计算时,重力加速度逐步增加 24m/s^2 。当空洞范围大小分别为 10° 、 20° 、 30° 时,衬砌管片开裂结果分别如图6、图7和图8所示。

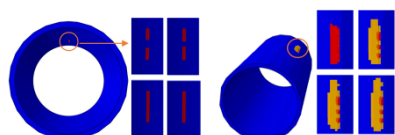


图6 空洞范围 10° 时衬砌管片开裂结果(左I右II)

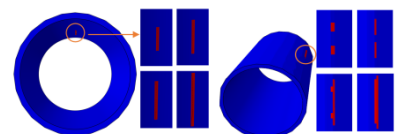


图7 空洞范围 20° 时衬砌管片开裂结果(左I右II)

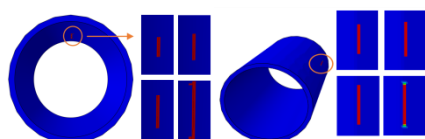


图8 空洞范围 30° 时衬砌管片开裂结果(左I右II)

根据以上模型计算结果可以看出,当空洞位于I号点位置处时,裂缝主要出现在衬砌管片内侧。空洞大小范围为 10° 时,衬砌管片内表面首先出现多个不连续裂缝,随着重力的不断增大,不连续裂缝逐步延展最终连接成大

裂缝并仍在不断扩展;空洞大小范围为 20° 时,衬砌管片内表面突然出现较大的贯通裂缝,随着重力的不断增大,裂缝快速延伸扩大,相比于 10° 时的裂缝大;空洞大小范围为 30° 时,衬砌管片内表面出现又宽又大的贯通裂缝,随着重力的增加不断扩张,当增加到一定程度时,裂缝突然出现向垂直于原来裂缝发展方向发展。

当空洞位于II号点位置处时,裂缝主要出现在衬砌管片的外侧。空洞大小范围为 10° 时,衬砌管片外表面出现大裂缝,随着重力增加,裂缝扩展较缓慢并且变化不均匀;空洞大小范围为 20° 时,衬砌管片外表面出现不连续裂缝,随着重力增加,裂缝逐渐贯通,最终也出现交叉裂缝;空洞大小范围为 30° 时,衬砌管片表面出现很长贯通裂缝,随着重力增加,贯通裂缝快速延伸。当空洞位于II号点位置处裂缝的变化情况相对于位于I号点位置处时更加复杂。

根据模型计算结果,得到六种工况下刚出现裂缝时相对重力加速度的大小。可以得知在一样的工况条件下,II号位置产生裂缝时的相对加速度较小,说明II号位置较I号位置更容易产生裂缝。在相同位置下,空洞的范围越大,出现裂缝时相对加速度小,即衬砌管片出现裂缝更早。因此,衬砌管片设计及隧道施工时,要对顶部衬砌内表面进行加固,对肩部衬砌外表面进行加强处理,进而保证隧道施工的稳定。

4 结论

本文通过ABAQUS建模计算,完成了背后空洞对衬砌管片开裂的影响研究,详细地说明了衬砌管片中应力的变化和裂缝的开展延伸情况,得出以下结论:

(1)管片空洞缺陷处应力集中非常明显且处于受拉状态,空洞的中心位置处主应力最大,且随着空洞范围的增大,最大主应力值增大。空洞之外的区域应力分布均匀,管片均处于受压状态。II号点位(肩部)出现空洞时,衬砌管片的受力状况更接近管片的极限抗拉状态,此时衬砌管片更不稳定,更容易发生开裂现象。

(2)当衬砌管片出现裂缝时,拱顶内侧先出现裂缝,而拱肩时外侧先出现裂缝,且裂缝均是由较小的张开和撕开裂缝逐步扩展成大的贯穿裂缝。衬砌背后空洞范围越大,裂缝越早出现且扩展速度越快。

[参考文献]

[1]杨朝帅,崔臻,牛富生,等.隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(4):180-186.
[2]黄红元.富水环境下水工隧洞渗流计算及结构外水压力研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
[3]薛晓辉.富水黄土隧道服役性能劣化机理及处治技术研究[D].长安:长安大学,2021.
[4]聂子云.隧道衬砌背后空洞对结构安全影响及防治技术研究[D].广州:中南大学硕士学位论文,2013.
作者简介:姓名:尹水金(1984—),男,江西吉安人,土木工程专业,南昌大学毕业,工作单位南昌轨道交通集团有限公司。