

DOI: 10.7672/sgjs2025230083

隧道衬砌混凝土抗剥落性能评价研究*

杨旭东

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 隧道衬砌混凝土在长期使用过程中可能出现剥落缺陷,严重影响隧道安全性和稳定性。为探讨隧道衬砌混凝土剥落缺陷的早期识别方法,通过室内试验探讨混凝土剥落缺陷发生的振动特性与其风险评估方法。结果表明,随着缺陷部位剥落断面扩展,隧道衬砌的最低阶模态频率显著下降,表明衬砌整体刚度减弱。低阶模态对界面附着状态变化更敏感,适合作为剥落评估的判别指标。相比之下,高阶模态因频率间距较小、模态重叠严重,不利于准确识别变化趋势,不宜作为主要评价依据。衬砌混凝土缺陷部位的振动信号表现出较显著的低频特征,尤其是在剥落风险较高的区域,振动信号中低频成分的增强与高频成分的减弱明显,表明低频信号对衬砌剥落的早期预警具有重要指示作用。

[关键词] 隧道;衬砌;混凝土;振动特性;超声波检测;风险评估

[中图分类号] U453.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0083-06

Evaluation Research for Spalling Resistance of Tunnel Lining Concrete

YANG Xudong

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: During the long-term use of tunnel lining concrete, spalling defects may occur which seriously affect the safety and stability of the tunnel. To explore the early identification methods of spalling defects in tunnel lining concrete, the vibration characteristics and risk assessment methods of spalling defects were studied through indoor experiments. The results show that as the spalling area of the defect expands, the lowest-order modal frequency of the tunnel lining significantly decreases, indicating a reduction in the overall stiffness of the lining. The low-order modes are more sensitive to changes in the interface adhesion state and are suitable as discriminant indicators for spalling assessment. In contrast, the high-order modes, due to their small frequency spacing and severe modal overlap, are not conducive to accurately identifying the trend of changes and are not suitable as the main evaluation basis. The vibration signals at the defect areas of the lining concrete exhibit significant low-frequency characteristics, especially in areas with a higher risk of spalling, where the enhancement of low-frequency components and the weakening of high-frequency components in the vibration signals are obvious, indicating that low-frequency signals have an important indicative role in the early warning of lining spalling.

Keywords: tunnels; lining; concrete; vibration characteristics; ultrasonic testing; risk assessment

0 引言

隧道工程施工质量对城市交通系统安全与稳定至关重要^[1]。在现代城市地铁建设中,隧道衬砌缺陷,特别是混凝土剥落问题,成为影响隧道结构

安全的主要因素之一。混凝土剥落通常由施工质量问题、地下水侵蚀、冻融循环或长期运营中的荷载作用等因素引发^[2-4],不仅威胁隧道结构稳定,还可能引发安全事故。因此,准确评估混凝土剥落风险,并采取有效的预警措施,成为隧道施工与维护的重要任务。

随着现代检测技术发展,超声波振动检测逐渐被应用于隧道衬砌缺陷检测与分析中。徐昆杰等^[5]引入超声相控阵技术检测西部某高速铁路隧

* 中铁十八局集团有限公司 2022 年度科研创新项目(C2022-051);
中国铁建股份有限公司 2022 年度科技研究开发计划及资助课题
(2022-C1)

[作者简介] 杨旭东,助理工程师,E-mail:3423390300@qq.com

[收稿日期] 2025-08-15

道衬砌结构,发现缺陷检测结果较好。李国勇等^[6]通过超声波无损检测技术,得到经硫酸钠腐蚀后的隧道衬砌混凝土强度,为预测地铁隧道衬砌混凝土开裂奠定基础。胡锦涛^[7]研究适用于隧道衬砌混凝土检测的超声成像方法,实现局部隧道衬砌缺陷的精细化检测。韦文瑜^[8]设计了管片试验模型,在模型内设置特定病害,运用超声波和探地雷达检测管片模型。超声波振动技术通过分析混凝土在不同缺陷条件下的振动特性,有效发现隐性缺陷,评估结构的安全性^[9]。然而,现有检测方法仍面临一定局限,如何定量识别、评估混凝土剥落风险,仍是亟待解决的难题。

本文结合西安市地铁 8 号线广泰门—堡子村区间隧道项目,通过现场振动检测、试验模拟及数值分析相结合的方法,研究隧道衬砌混凝土剥落的振动特性变化规律。

1 工程概况

西安市地铁 8 号线广泰门—堡子村区间隧道自广泰门站出发后沿广运潭大道向北前行,与广运潭大道及浐灞大道呈十字转入西北角空地,后转入浐灞一路向西敷设进入堡子村站。区间隧道位于西安市郊区,广运潭大道宽 60m,为双向 6 车道。浐灞一路宽 40m,为双向 4 车道,地下管线较多,道路两侧建(构)筑物较少,但隧道相继穿越 DN800 热力套管、f1 地裂缝等。因此地裂缝附近采用矿山法施工,其余段采用盾构施工。左右线的矿山法区间起讫里程分别为 ZDK23+958.250—ZDK24+105.024, YDK23+958.250—YDK24+100.799,设计左线采用矿山法的施工区间长 146.774m,设计右线采用矿山法的施工区间长 142.549m。矿山法隧道区间埋深为 14.91m,左右线间距 17.2~18.2m。该段隧道采用马蹄形断面,为复合衬砌结构,断面二衬净空的宽度、高度分别为 7.9,7.95m,二衬结构采用 C35 模筑钢筋混凝土,抗渗等级为 P10。二衬厚度为 500mm,其全断面铺设防水卷材。杨家庄站—堡子村站区间线路平面位置如图 1 所示。

该段隧道二衬结构断面如图 2 所示。施工时,在右线小里程开始端头 10m 内,于初支内预埋吊环,洞内拼装组合台车。利用提前加工的可移动平台铺设防水、安装钢筋。等仰拱浇筑完成后首次回填并浇筑铺底,待仰拱及铺底混凝土强度达到设计要求后,再施工拱墙二衬混凝土,待盾构空推后进行第 2 次铺底回填浇筑。最后完成二衬施工,在洞内拆卸衬砌台车并运出隧道。将二衬混凝土浇筑分 2 次施工,即先浇筑仰拱、后施工侧墙和拱顶。区

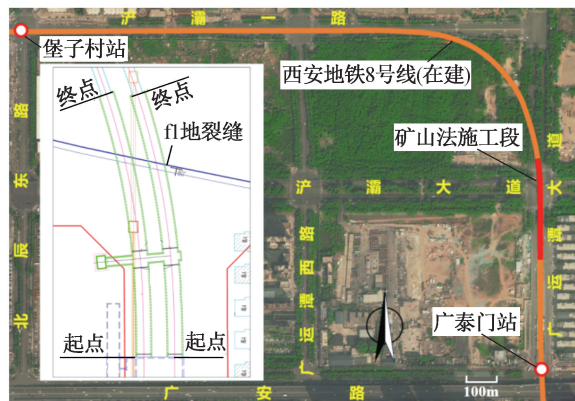


图 1 杨家庄站—堡子村站区间线路平面位置
Fig. 1 Line plan position between Yangjiazhuang Station and Baozicun Station

间隧道施工段按台车长度划分,特殊变形缝及洞门段均为后浇环梁施工。二衬混凝土采用地泵泵送浇筑混凝土,其中仰拱 15m 长划分为 1 段,共 22 个施工段;二衬 7.5m 长划分为 1 段,共 41 个施工段。

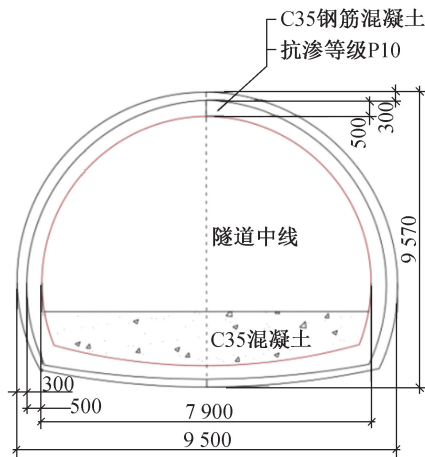


图 2 二衬结构断面

Fig. 2 Cross-section of the secondary lining structure

由于二衬浇筑过程中的施工质量与衬砌强度及稳定性密切相关,施工过程中,各环节均可能由于施工工艺缺陷、支模缺陷及养护不足等问题造成衬砌混凝土开裂脱落。如混凝土浇筑时若振捣不足或振捣点位遗漏,会导致内部气泡残留、骨料分布不均,形成蜂窝或空洞(尤其是拱顶部位)。此类缺陷在拆模后可能直接暴露,或在收缩过程中引发裂缝,最终发展为剥落。模板台车支撑不牢或变形下沉,可能导致衬砌厚度不均或局部脱空,最终导致顶部混凝土开裂脱落。此外,长期运营过程中,可能由于施工期间产生的脱空以及地下水侵蚀、冻融循环等原因造成表皮开裂甚至剥落。

2 隧道二衬缺陷振动检测

超声波振动检测是探测混凝土构件缺陷及质

量验收常用的手段。为分析矿山法施工中现浇隧道衬砌混凝土开裂剥落过程中振动的信号差异,掌握缺陷部位的振动特性,对隧道内监测结果进行分析。现场测量的最低阶模态振动频率分布如图3所示。图3a显示主频集中在10kHz附近,但存在一定程度的离散性。部分研究认为表皮混凝土剥落概率与最低阶模态振动频率为负相关,因此对于极有可能产生混凝土表皮剥落的区域,数据应集中于低频区域,但检测结果并未观察到该趋势。某山岭隧道中,通过激光测量判定为缺陷的衬砌部位如图4所示,该段隧道中3处存在缺陷。2号检测结果表明对于存在缺陷的位置,反馈信号中低频振动信号更强、高频信号强度较小。

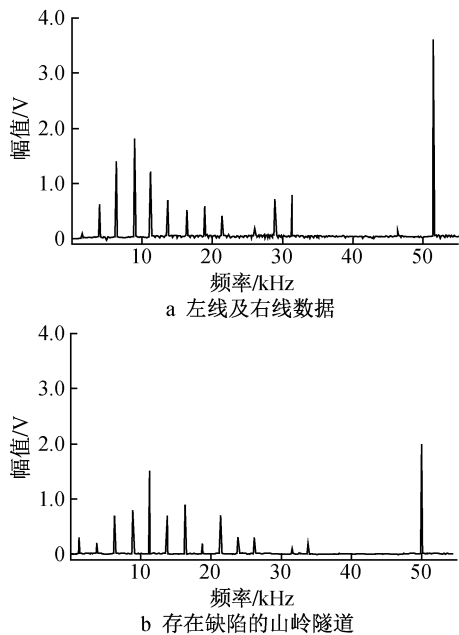


图3 最低阶模态振动频率分布

Fig. 3 Vibration frequency distribution of the lowest mode

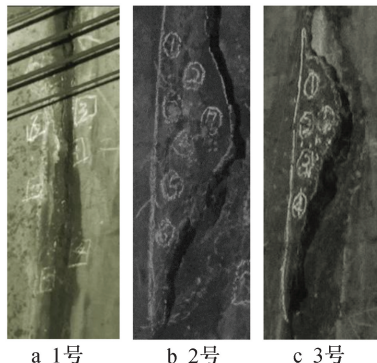


图4 存在缺陷的衬砌

Fig. 4 Lining with defects

土开裂剥落的概率,但其中存在低频信号、剥落风险、持续观察的必要性等定性指标,故混凝土衬砌开裂剥落概率判定标准仅能划分为A级(近期存在威胁安全的剥落风险)、B级(当前无直接风险但未来可能发展为A级)、C级(无安全威胁)。因此常规检测评估结果中可能包含检查人员的经验与主观判断偏差,仅凭现场检测得到的数据难以建立系统可靠的量化评价指标。

3 混凝土剥落缺陷处的振动波特性研究

为客观评估混凝土剥落概率,需明确混凝土剥落缺陷处的反馈振动波特性。因此将完整的混凝土立方体切割1处倾斜的切口模拟即将剥落部分,对剥落部分预设剥落断面扩展过程及邻近剥落状态的反馈振动波特性变化进行研究。

3.1 试件概述

混凝土试样尺寸如表1所示,其中试样5的详细尺寸如图5所示。5组试件质量均 $\leq 80\text{kg}$,试样1的预设剥落部分(沿预设剥落断面分离后的混凝土块)重约30kg。试样1,2尺寸相同,但剥落部分与固定部分连接处尺寸不同,试样2,3,4预设剥落断面角度相同但尺寸不同。试样2,5及其连接部分尺寸相同,但预设剥落断面角度不同。预设剥落部分与固定部分间的预设剥落断面通过混凝土浇筑时预埋聚苯乙烯薄板并于硬化后去除实现。所有试件在预设剥落部分表面中心均预埋用于施加拉伸荷载的预埋件。

表1 混凝土试样尺寸

Table 1 Dimensions of concrete samples

试样编号	试样尺寸/mm	连接部分尺寸/mm	预设剥落断面角度/(°)	备注
1	500×400×175	50×400 (预设断面宽5)	15	—
2	500×400×175	100×400 (预设断面宽5)	15	—
3	400×320×140	80×320 (预设断面宽4)	15	各边长为试样2的80%
4	200×160×70	40×160 (预设断面宽2)	15	各边长为试样2的40%
5	500×400×175	100×400 (预设断面宽5)	10	裂缝角度为10°

试样混凝土配合比如表2所示,粗骨料最大粒径为20mm。采用同批次混凝土制作立方体试样,测试材料物理力学性能。结果显示28d抗压强度为28MPa、抗拉强度为2.4MPa、弹性模量为29GPa、泊松比为0.20、密度为2300kg/m³。

综合人工目视和超声检测共同确定衬砌混凝土

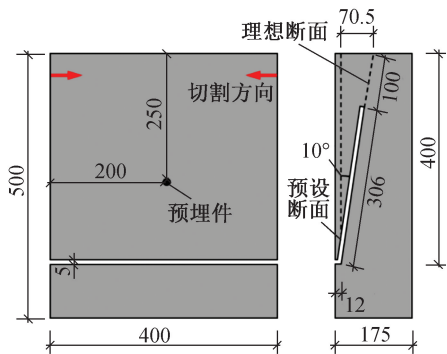


图5 试样5的详细尺寸

Fig. 5 Detailed dimensions of the sample 5

表2 试样混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportions of the sample

 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$

水灰比	细骨料	水	水泥	细骨料	粗骨料	外加剂
0.68	46	190	270	800	990	2.7

3.2 试验方法

1999年日本山阳新干线福冈隧道发生大规模混凝土剥落事故,事故中剥落断面位于施工缝处,且脱落前出现漏水现象。经过调查认为,该事故由于衬砌与围岩间脱空漏水,同时列车通过时产生空气压力波动,导致剥落面逐渐扩展至混凝土块脱落。本研究制作带初始预设剥落面的混凝土试样,使用锯条不断切割预设剥落部分与固定部分间的连接处,从而缩小连接处断面面积,使预设剥落部分在张拉荷载下逐渐濒临剥落的临界状态,直到预设剥落部分从连接处断裂脱落。切割过程中采用超声波振动信号测试混凝土试样的振动反馈,振动反馈通过激光多普勒振动计测量。数据采集频率为100kHz,不使用滤波器。由于仅考虑自重,位于隧道衬砌顶部的缺陷脱落风险较高。因此,主要针对隧道顶部衬砌存在缺陷的工况进行模拟分析。试验过程中在剥落部分(试件中央)预埋件上施加拉伸荷载,模拟剥落过程中所受的自重效应。

为分析连接处的最大主应力分布,同时进行室内试验与数值模拟计算,结合两者计算结果,估算现场产生同规模脱落所需的附加荷载,该附加荷载即与福冈隧道事故中列车通过时产生的空气压力限值近似。为满足一致性要求,数值模拟计算模型需采用与试验试件完全相同的形状及尺寸。为模拟隧道衬砌(混凝土块)剥落工况,将试件剥落处表面及其周围设为自由边界,其余部分设为固定边界条件。该模型仅考虑自重,并以体积力形式作用于整个分析区域的试件正面(即预埋件张拉面的垂直

方向)。在室内试验数值模拟中,荷载包括垂直向下的自重以及作用于试件中央的集中荷载,模拟计算时设置的拉伸荷载估算结果如表3所示。其中试样4的估算精度为1N,其余试件为10N。由于连接处(预设剥落断面未切割部分)面积减少对估算结果波动量极小(可忽略),因此表中数据与附着部面积无关。结果表明,模拟现场所需拉伸荷载与预设剥落块的质量相当。试验中实际施加荷载为兼顾安全性,应采用略高于估算值且便于操作的整数值。

表3 拉伸荷载估算结果

Table 3 Estimation results of tensile loads

试样编号	脱落部分质量/kg	模拟拉伸荷载/N	试验时拉伸荷载/N
1	30.0	280	300
2	30.0	270	300
3	15.0	140	150
4	1.9	16	20
5	14.0	130	150

3.3 试验结果及分析

3.3.1 剥落扩展过程中频率响应函数的变化

以试样2为研究对象,剥落面扩展过程中的结构振动特性变化如图6所示。在其剥落部位正面上方(距左端25mm、底部高度100mm区域)施加激励信号,并在右下方对应区域(距右端25mm范围内、底部高度100mm区域)采集响应信号。试验设置无剥落(断面扩展量为0)、中度剥落(扩展量20cm,对应附着面积减少约50%)和高度剥落(扩展量30cm,对应附着面积减少约75%)工况。为消除锤击激励方式对结果的影响,采用频率响应函数(FRF)形式处理信号,以增强振动模式的识别准确性。

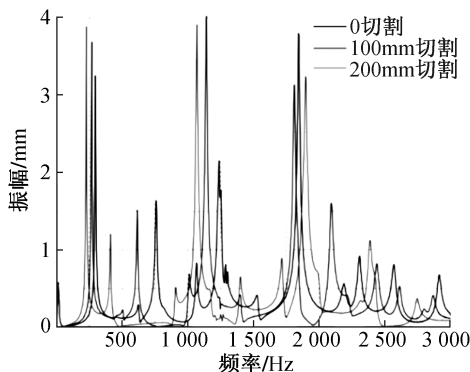


图6 试样2的结构振动特性变化

Fig. 6 Changes in the structural vibration characteristics of sample 2

由图6可知,随着剥落范围扩大,结构最低次及次低次固有频率均呈明显下降趋势,表明剥落导致

整体刚度减弱,且中低阶模态对界面附着状态变化更敏感,适合作为剥落评估的判别指标。相比之下,高阶模态因频率间距较小、模态重叠严重,不利于准确识别变化趋势,因此不宜作为主要评价依据。

试样 2 扩展量为 0 时,通过特征值分析获得低阶固有振动模态变形,其中模态 A 对应最低阶固有模态,模态 B 为次低阶模态,如图 7 所示。尽管缺陷区域内可能存在多种局部固有模态,但本研究主要聚焦于上述 2 类代表性模态。由于其他试样中亦观测到形态相近的模态特征,故在分析过程中一并纳入比较与讨论,以增强结果普适性、代表性。

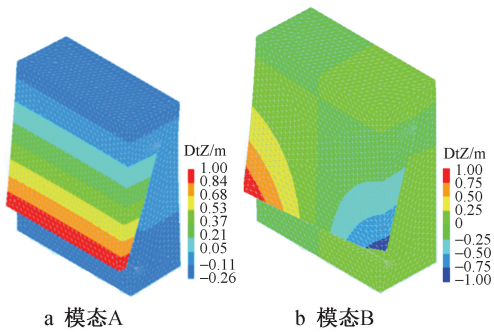


图 7 低阶固有振动模式的变形

Fig. 7 Deformation of low-order natural vibration modes

3.3.2 剥落扩展过程中低阶模态频率的变化

在预设断面扩展过程中,各试样低阶固有模态频率的变化趋势如图 8 所示,固有频率由 LSCF (least squares complex frequency) 法进行识别与估算。结果显示,模态 A、B 的频率均随断面扩展量呈单调递减趋势,且模态 B 相比模态 A 具有更快的下降速率。此外,除试样 1 外,其余试样在接近剥落阶段时,模态 B 的频率降至最低阶,反映其对结构完整性变化的更高敏感性。

剥落试验的最终结果如表 4 所示。除试样 1 外,其余试样在附着部宽度减至 1cm 时仍未剥落。考虑到附着面积积极度缩小时,断面扩展宽度误差趋大,且在进一步扩展过程中可能出现不可预见的瞬时剥落,试验附着部宽度减至 1cm 且未剥落时,将荷载提升至预设值的 2 倍,若仍未发生剥落,则持续加载直至破坏发生。

由表 4 可知,试样 4 剥落时的荷载值显著高于预期,说明在未达到临界附着面积前,剥落破坏较难发生。此外,从动态特性来看,各试样在剥落前,缺陷区域的最低阶模态频率均显著下降,验证了低阶模态对界面附着状态变化的良好指示能力。虽然试样 1、2 设定的预期剥落质量均为 30kg,但在附着部宽度减半后的状态下,即使试样 1 的附着面积

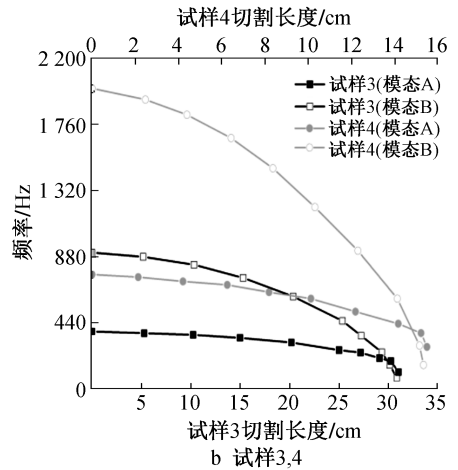
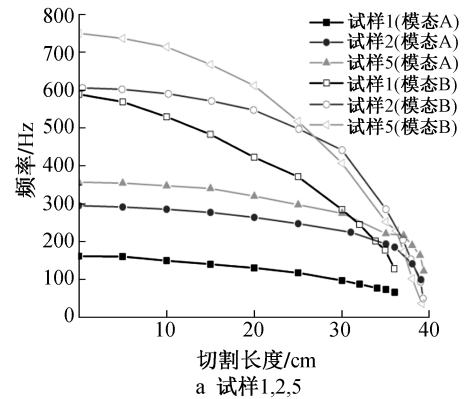


图 8 各试样低阶固有模态频率的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of the low-order natural mode frequencies of each sample

表 4 剥落试验的最终结果

Table 4 Final results of the spalling test

试样编号	脱落前最低阶模式的频率/Hz	脱落时附着部分面积/cm ²	脱落时的荷载/N
1	84	20(5×4)	301
2	38	10(10×1)	501
3	65	8(8×1)	214
4	185	2.8(4×0.7)	147
5	50	5.6(8×0.7)	178

更大,但该试样仍在较小荷载作用下发生剥落,表明实际剥落行为受附着面积以外的因素,如局部黏结状况、应力集中等影响显著。

剥落后预设剥落面附近的断裂状况如图 9 所示。结果表明,试样 1 脱落后,其断裂面避开了粗骨料分布区,最终破坏路径相比预设切割面存在一定偏移。相对而言,试样 2 的断裂面沿预设剥落面发生,且穿透粗骨料,断裂路径与设定切面高度一致。除试样 1 外,其余试件均呈沿预设剥落面割裂粗骨料的破坏形态,说明在附着区域面积较小时,界面破坏更倾向于以贯穿骨料为主,表明割裂骨料成为剥落过程的主要机制之一。

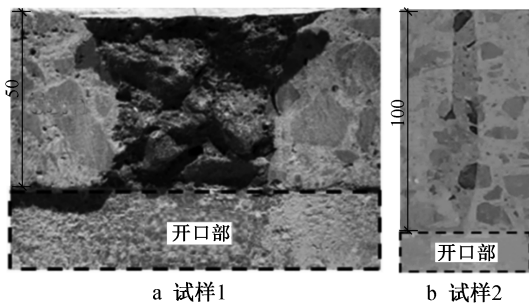


图9 预设剥落面附近的断裂状况

Fig.9 Fracture condition near the predefined spalling surface

剥落面扩展过程中,通过固有振动分析获得的低阶模态频率变化趋势如图10所示。考虑到结构固有频率受几何尺寸影响较大,若试件各边尺寸放大 N 倍,其固有频率理论上缩小为原来的 $1/N$,因此本图省略试件3,4,将模拟结果与图8a中的试验数据进行比较,可见两者在模态频率随切割长度变化趋势上具有一致性,验证数值模拟方法在预测剥落发展过程中振动特性变化方面的有效性。此外,模态A的频率随切割长度增加呈急剧下降趋势,推测其主要原因在于实际切割形状与理想预设形状间存在偏差,从而引发局部刚度分布的非均匀性,导致模态频率变化异常。

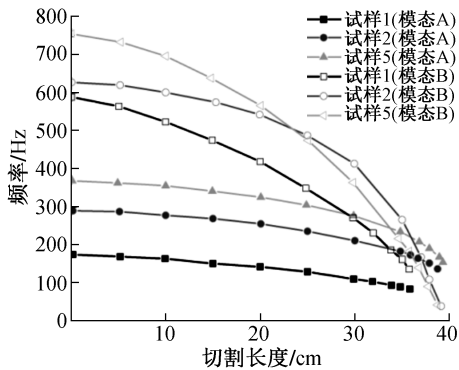


图10 数值模拟所得频率随分离进度的变化

Fig.10 Variation of frequency with separation progress obtained from numerical simulation

4 结语

1)随着缺陷部位剥落断面扩展,隧道衬砌的最低阶模态频率显著下降,表明衬砌整体刚度减弱。

2)低阶模态对界面附着状态变化更敏感,适合作为剥落评估的判别指标。相比之下,高阶模态因频率间距较小、模态重叠严重,不利于变化趋势的准确识别,因此不宜作为主要评价依据。

3)衬砌混凝土缺陷部位的振动信号表现出较显著的低频特征。尤其在剥落风险较高的区域,振

动信号中低频成分增强与高频成分减弱明显,表明低频信号对衬砌剥落的早期预警具有重要指示作用。因此,超声波振动检测能够为隧道衬砌的安全评估和缺陷预警提供有效的技术手段。

参考文献:

- [1] 陈棚,江星宏,叶建虎. 基于现场检测及数值模拟的严重病害隧道安全性分析[J]. 市政技术,2023,41(3):40-44,121.
CHEN P, JIANG X H, YE J H. Safety analysis of serious disease tunnel by field test and numerical simulation[J]. Journal of municipal technology, 2023,41(3):40-44,121.
- [2] 豆海涛,吕延豪,孙雪兵,等. 多病害耦合作用下地铁盾构隧道单环管片健康度评价方法研究[J]. 铁道标准设计,2025,69(1):111-119.
DOU H T, LÜ Y H, SUN X B, et al. Research on health evaluation method of single ring segment for subway shield tunnel under multi-defect coupling[J]. Railway standard design, 2025, 69(1): 111-119.
- [3] 易明扬,黄光楚. 地铁隧道钢筋混凝土衬砌裂损加固方案[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(4):8-11.
YI M Y, HUANG G C. Reinforcement scheme for crack damage of reinforced concrete lining of subway tunnel[J]. Urban mass transit, 2022, 25(4): 8-11.
- [4] 伍浩然. 宜万铁路隧道服役安全评价及监测方法研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
WU H R. Study on service safety evaluation and monitoring method of Yiwan Railway Tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [5] 徐昆杰,马伟斌,彭旸,等. 超声相控阵在隧道衬砌精细化检测中的应用[J]. 铁道建筑,2025,64(5):13-17.
XU K J, MA W B, PENG Y, et al. Application of ultrasonic phased array in fine detecting of tunnel lining [J]. Railway engineering, 2025, 64(5): 13-17.
- [6] 李国勇,陈钦. 硫酸钠腐蚀对地铁隧道衬砌混凝土强度影响的试验曲线研究[J]. 市政技术,2020,38(3):283-285.
LI G Y, CHEN Q. Study on effect of Na_2SO_4 corrode on the strength of subway tunnel lining concrete [J]. Journal of municipal engineering, 2020, 38(3): 283-285.
- [7] 胡锦琳. 隧道衬砌混凝土内部缺陷超声成像及三维可视化研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2024.
HU J L. Study on ultrasonic imaging and 3D visualization of internal defects in tunnel lining concrete [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2024.
- [8] 韦文瑜. 超声波和探地雷达对隧道衬砌病害检测效果研究[J]. 铁道运营技术,2023,29(2):36-39.
WEI W Y. Study on detection effect of ultrasonic and ground penetrating radar on tunnel lining diseases[J]. Railway operation technology, 2023, 29(2): 36-39.
- [9] 张东波,王卓琳,张永群,等. 基于超声相控阵技术的钢板混凝土缺陷识别研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(3):4-9.
ZHANG D B, WANG Z L, ZHANG Y Q, et al. Research on defect identification of steel-concrete composite plate based on ultrasonic phased array technology [J]. Construction technology, 2023, 52(3):4-9.