

# 锥形土体模型振动传递特性研究

张家滨, 李潇俊, 唐雪松

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 地铁施工过程中的振动对地表结构的影响已成为不可忽视的问题。文中利用振动波能量扩散关系替代有限土体结构的振型分布, 通过叠加有限土体的频率响应特性得到地下到地表的振动传递关系, 分析土体垂直方向振动衰减率, 评估地铁施工振动效应。

**关键词:** 隧道; 地铁; 振动传递; 锥形土体模型

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

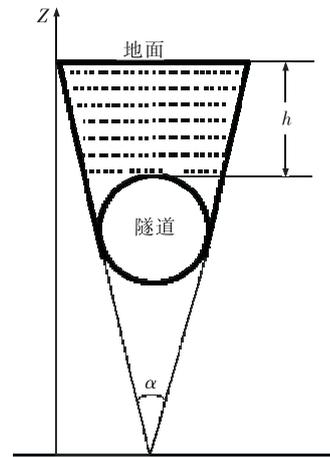
文章编号: 1671-2668(2021)02-0126-03

地铁施工中, 盾构机挖掘中会产生振动效应, 振动通过土壤、基础、隧道等介质传到地面和地上建筑物, 如果产生的振动效应超过许可的振动量级, 将影响地上正常的生活和工作, 尤其当地铁线路穿过存放精密仪器和高危化工品的高校和化工厂、保管大量贵重文物的博物馆时, 如果没有采取合适的防范措施, 甚至可能危害到人们的生命和财产安全。经典传递矩阵方法可有效分析土体中振动波的传递过程, 给出地下振源与地表振动的关系, 但其计算过程较复杂。该文根据地基土的特点, 利用锥形土体模型模拟土体振动传递衰减特性, 同时引入剪切梁模型计算有限结构土体的固有频率, 结合土体波动传递关系和有限结构的固有频率得到土体振动传递特征, 分析地下作用荷载下土体的振动衰减规律, 评估地下振源对地表结构的影响程度。

## 1 锥形土体模型

振动在土体中传播的过程中, 能量衰减主要包含两个因素: 一是能量扩散, 土体内振动传递过程中, 能量由振源向外辐射, 波动面逐渐扩大, 单位面积振动能量不断减少; 二是振动过程中土体摩擦不断消耗能量。半空间土体柱模型无法描述振动能量扩散问题, 有限体采用振型的概念无法描述振动波传递过程中的摩擦阻尼。因此, 针对地下隧道施工建立锥形土体模型, 通过锥形描述能量的扩散效应, 替代有限结构中的振型, 评估振动能量衰减效应(见图 1)。

隧道施工中, 振动能量通过隧道上部传递到土体中, 由于隧道深度一般远大于隧道直径, 隧道上方土体近似为锥形。锥形杆振动幅值沿深度分布函数表示为:



$\alpha$  为辐射角;  $h$  为隧道埋深

图 1 锥形土体模型示意图

$$u_z = e_k \mu^* \exp(ikz) \quad (1)$$

式中:  $e_k$  为振动扩散效应系数;  $\mu^*$  为黏性阻尼模型;  $k$  为波数。

设隧道半径为  $r$ ,  $e_k$  和  $\mu^*$  分别为:

$$e_k = \frac{r}{h \tan \alpha + r} \quad (2)$$

$$\mu^* = 1 + \zeta i \quad (3)$$

利用模态空间求解频域土体动力特性对振源的传递作用, 建立隧道上方锥形土体有限元模型, 获取有限结构固有频率, 边界条件为底部为固支、顶部为自由, 分析得到锥形杆纵向固有频率  $\omega_r$ 。

从模态域分析, 单阶模态振动传递率可表示为固有频率的函数[见式(4)], 传递关系见图 2。

$$\frac{u_m^*}{u_d^*} = T = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (4)$$

式中:  $u_m$  为模态域中地面振动幅值;  $u_d$  为隧道顶部振动幅值;  $\lambda$  为激励频率与固有频率的比值, 即  $\lambda = \omega / \omega_r$ 。

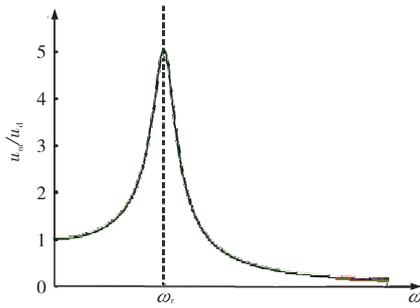


图2 模态传递率

将传递率从模态域转化到物理空间,实际结构振动传递率为:

$$\frac{u_m}{u_d} = T = e_k \mu \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (5)$$

式(5)给出了隧道上方土体对不同激励频率的传递特征,同时包含了振动传递过程中的能量扩散效应。

## 2 土体振动衰减测试对比分析

为对比校验上述理论模型的分析精度,采用长

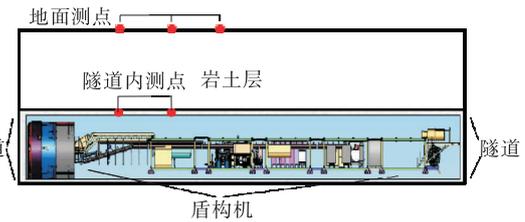
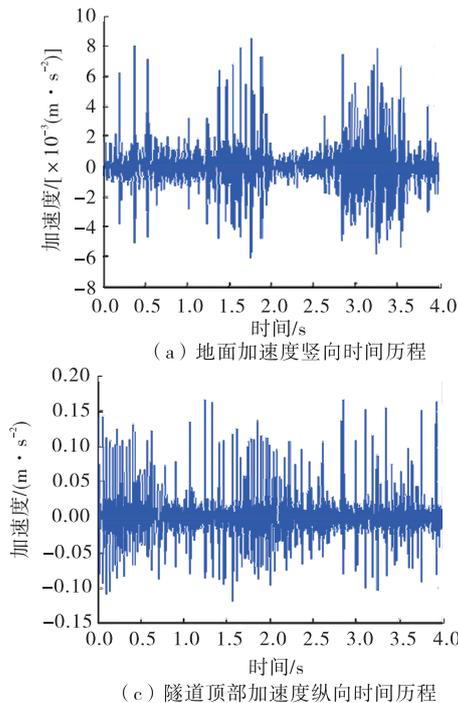


图3 地下和地表振动测试示意图

分别测试隧道顶部和对应地面振动响应,分析振动衰减特征,测试结果见图4。

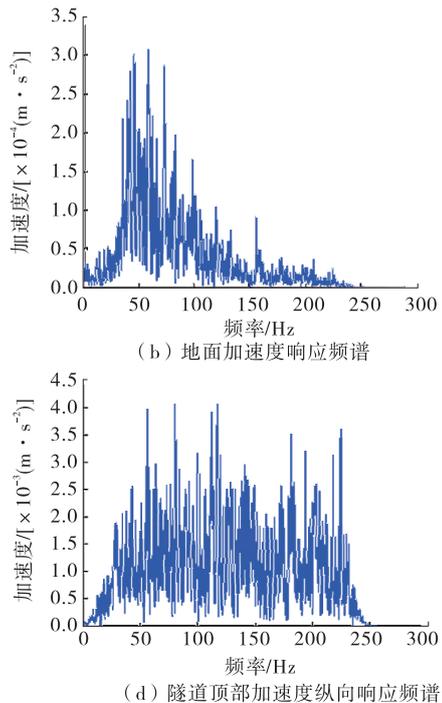


图4 地铁盾构施工振动测试响应数据

施工过程中振动效应竖向占主要成分。从图4(b)来看,地表加速度响应频率变化趋势与图2相同。振动衰减数据取自隧道顶部管片振动响应和地表振动响应,隧道内壁顶部及对应地表最大振动响应见表2。

沙地铁6号线地下和地表振动实测数据进行对比分析。长沙地铁6号线烈士公园区间段的地质条件为中风化板岩,隧道埋深22 m,采用圆形隧道结构,土体参数见表1。地下和地表振动测点布置见图3。

表1 岩土材料的物理、力学参数

项目	参数值
天然密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 120
切线模量/MPa	60
泊松比	0.2
屈服强度/MPa	3

表2 盾构施工过程中振速对比

测点	竖向振速/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	横向振速/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	隧道埋深/m
隧道内壁顶部	0.352	0.071	22
隧道顶部对应地面	0.071	0.031	22

利用锥形土体模型计算振动衰减率,辐射角度为 $15^\circ$ ,阻尼比为0.05,并与实测数据进行对比。结果显示:实测衰减率为79.83%,理论衰减率为76.2%。理论计算所得衰减率与实测数据相近,误差为3.6%,具有较好的参考意义。导致误差的主要原因是岩土结构物理参数复杂、土壤含水率等不确定性较大、模拟过程中理论模型边界条件有所不同、计算过程未考虑隧道结构。

### 3 结语

利用振动波能量扩散关系替代有限土体结构的振型分布,叠加有限土体的动态响应特性得到地下到地表的振动传递关系,可较为准确地分析土体垂直方向的振动衰减率,评估地铁施工振动效应。

地铁施工振动效应通常针对重点区域,可在进入重点防范区域前测试地下施工过程中的振源、振幅及地表振动幅值、校验辐射角,然后根据传递关系表达式较准确地预估地表振动,为重点保护区振动预警提供可靠依据。

### 参考文献:

[1] 钟阳,王哲人,郭大智,等.求解多层弹性半空间非轴对称问题的传递矩阵法[J].土木工程学报,1995,28(1):66-72.

[2] 钟阳,陈静云,王龙.求解动荷载作用下多层黏弹性半空间轴对称问题的精确刚度矩阵法[J].计算力学学报,2003,20(6):749-755.

[3] 曹艳梅,夏禾.波数-频率域内地基土表面位移 Green 函数的理论分析[J].计算力学学报,2008,25(6):833

-838.

[4] 和振兴,翟婉明,杨吉忠,等.铁路交通地面振动的列车-轨道-地基耦合数值方法研究[J].振动工程学报,2008,21(5):488-492.

[5] 聂志红,刘宝琛,李亮,等.移动荷载作用下轨道路基动力响应分析[J].中国铁道科学,2006,27(2):15-19.

[6] 刘唐利,凌同华,陈增辉,等.爆破振动对既有隧道影响的数值模拟分析[J].交通科学与工程,2019,35(3):79-84.

[7] 王春国.新建隧道下穿对既有隧道稳定性影响研究[J].交通科学与工程,2020,36(3):62-66.

[8] 柳厚祥,蒋婷婷,李易承.基于 MySQL 数据库的公路隧道围岩云分级系统[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(1):58-65.

[9] 王路,张庆彬.邻近双洞隧道衬砌结构的爆破动力响应规律分析[J].公路与汽运,2018(1):169-173+182.

[10] 任瑞波,钟岱辉,孔军,等.沥青路面层状粘弹性半空间轴对称问题的求解[J].山东建筑工程学院学报,2002,17(4):1-7.

[11] 任瑞波,钟阳,张肖宁,等.多层粘弹性半空间轴对称问题的理论解[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(6):124-128.

[12] 陈松强,王东升,张瑞,等.非轴对称垂直荷载下弹性半空间体理论解及力学分析[J].中国科技论文,2017,12(7):806-811.

[13] 郭大智,冯德成.层状弹性体系力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001:297.

[14] 艾智勇,刘鹏,成怡冲.轴对称荷载作用下层状黏弹性体系的解析层元解[J].中国科技论文在线,2011,6(11):792-796.

收稿日期:2020-05-09

\*\*\*\*\*

## 《公路与汽运》杂志 2021 年征订启事

《公路与汽运》杂志由长沙理工大学主办,是一份介绍汽车、道路、桥梁等公路交通领域科技信息的面向国内外公开发行的技术类科技期刊。国际标准连续出版物号:ISSN 1671-2668,国内统一连续出版物号:CN 43-1362/U。为首届(2006年)中国高校特色科技期刊、湖南省一级期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊,被中国期刊全文数据库及中文科技期刊数据库全文收录、万方数据-数字化期刊群全文上网,并荣获首届《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊奖。

本刊立足公路交通系统,报道国内外汽车与公路交通领域的最新研究成果,荟萃汽车运用与维修技术,传播公路交通安全知识,介绍公路运输行业的新技术与管理经验,刊登公路交通工程的新工艺、新技术、新材料。2021年拟设主要栏目:汽车工程;交通规划与管理;运输与物流;道路工程;桥隧工程;工程经济与管理。

本刊为双月刊,逢单月25日出版。发行代号:国内42-95,国外DK43002。每期定价15元,全年90元。读者可在当地邮局订阅,也可直接向本刊编辑部索取订单订阅,订阅款请汇至本刊编辑部或银行账号。

通信地址:长沙理工大学金盆岭校区8号信箱 邮编:410076 联系电话:0731-83528400

开户行:长沙市农行高云支行 户名:长沙理工大学 账号:18-051401040000158