

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0941

盾构隧道与周围土体在列车振动荷载作用下的动力响应特性

杨文波^{1,2}, 陈子全^{1,2}, 徐朝阳^{1,2}, 晏启祥^{1,2}, 何 川^{1,2}, 韦 凯^{2,3}

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 3. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 为研究列车振动荷载作用下盾构隧道结构及周围土体的动力响应特性, 采用模型试验方法, 通过布置在盾构隧道底部的激振器施加扫频激振荷载和列车振动荷载, 采用频率响应函数 *FRF* 与最大加速度分析了盾构隧道衬砌结构与周围土体不同位置处的动力响应及其衰减规律。研究表明: *FRF* 是隧道衬砌结构和周围土体自身的动力响应特性的体现, 与激振力的大小、扫频方向及扫频时间无关; 在隧道管片衬砌结构的底部和顶部均体现出高频响应大于低频响应的特性, 隧道顶部加速度响应沿隧道纵向衰减幅度明显小于隧道底部; 隧道周围土体的动力响应沿深度有明显变化, 但均表现出沿隧道轴向衰减的规律。隧道结构上部第 1 层测点土体的动力响应在全频域内随频率的增加逐渐增大。但在第 2 层和地表的第 3 层测点, 土体的动力响应在 30~90 Hz 区段线性增长, 在 90~300 Hz 区段出现波动变化, 并无明显增大趋势; 与扫频激振荷载引起的动力响应规律一致, 由列车运行振动荷载引起的隧道管片衬砌结构和周围土体的振动沿隧道轴向逐渐衰减, 隧道底部的加速度响应大于顶部, 随着列车车速的增大, 在隧道内部引起的加速度响应将显著增大。同时, 在列车振动荷载作用下发现地表存在加速度放大效应, 地表第 3 层测点的加速度响应均大于隧道结构上部第 1 层测点。

关 键 词: 盾构隧道; 振动荷载; 动力响应; 频率响应函数 *FRF*; 隧道衬砌结构; 隧道周围土体

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018)02—0537—09

Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibration

YANG Wen-bo^{1,2}, CHEN Zi-quan^{1,2}, XU Zhao-yang^{1,2}, YAN Qi-xiang^{1,2}, HE Chuan^{1,2}, WEI Kai^{2,3}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: To investigate dynamic behaviour of shield tunnels and surrounding soil, a physical model test was conducted. An electromagnetic shaker located at the bottom of the shield tunnel was used to apply sweep excitation and train vibration load. The data of accelerometers are applied to calculate the frequency response function (FRF) and the maximum acceleration of the tunnel and soil. It is found that FRF is insensitive to the excitation amplitude, sweep direction and period, which represents dynamic characteristics of tunnel lining structure and surrounding soil. The results also show that the high-frequency response is greater than the low-frequency response at the tunnel lining. The attenuation of dynamic response along the longitudinal direction of the tunnel is obviously faster at the tunnel invert comparing to at the tunnel apex. For surrounding soil, a variety of dynamic response with depth is observed. A clear degradation of soil response along the longitudinal direction of the tunnel is found at all depths. The soil response increases with the increase of excitation frequency at the first measurement layer above the tunnel lining. However, at the second and third measurement layer, soil response increases linearly at the frequency of 30-90 Hz. At higher frequency range, soil response does not show a clear increasing trend with frequency. The dynamic response under train-vibration load is consistent with sweep excitation

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51408494, No.51278425, No.51408326); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.2682015CX092)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51408494, 51278425, 51408326) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682015CX092)。

第一作者简介: 杨文波, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作。E-mail: yangwenbo1179@hotmail.com

通讯作者: 陈子全, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: chenziquan@163.com

load. Both tunnel and soil responses decrease in the longitudinal direction. Tunnel response at the tunnel invert is larger than that at the tunnel apex. With the increase of the train speed, tunnel and soil responses are significantly amplified. It is also found that the soil responses at the free surface are more significant than the soil responses inside the soil layer from train induced vibration.

Keywords: shield tunnels; vibration load; dynamic response; frequency response function; tunnel lining; soil

1 引言

近年来,随着城市地铁工程的不断发展,列车荷载导致的隧道结构-土体以及地面振动问题也引起更多的重视。隧道结构及其上覆土体在列车振动荷载作用下的动力响应复杂多变,在长期振动荷载作用下,隧道衬砌结构可能出现支护开裂而产生纵、横向裂缝、洞顶混凝土的剥落甚至底部隆起变形等问题。除隧道结构外,周围土体在长期列车荷载作用下也会有砂土液化、不均匀沉降和地面塌陷等问题的发生。因此,研究列车振动荷载作用下隧道结构及周围土体的动力响应特性和变化规律具有重要研究意义。

针对隧道结构-土体的动力响应特性,国内外许多学者都作过相关的研究。王祥秋等^[1]研究了不同断面形状的隧道衬砌结构的动力响应特性。王田友等^[2]基于现场实测分析了不同频率成分的衰减规律。Thusyanthan 等^[3]研究了振动能量在隧道结构的传播规律。刘维宁等^[4]提出基于实测振动传递特性的人工单点列脉冲激励预测方法,预测了地铁列车运行引起的环境振动响应。范思婷等^[5]从时域、频域、时-频域以及振级 4 个角度全面分析了列车振动引起的隧道内部的动力响应。吴宗臻等^[6]针对地铁环境振动预测评价体系的施工设计阶段的预测,提出了一种通过隧道内脉冲激励实测地表系列频响函数的预测方法。Yang 等^[7]通过离心模型试验和数值模拟研究了隧道内部的动力响应及其传播规律。楼梦麟等^[8]通过对上海地铁某区间进行现场实测,分析了地铁引起的地面振动的振动特性和衰减规律。李亮等^[9]研究了不同断面形式、车速和阻尼比系数对振动响应的影响,并将结果与小断面隧道进行比较。莫海鸿等^[10]对埋置于深厚软土地层之中的盾构隧道在地铁营运期间动力响应进行深入分析,发现隧道动力响应自底部向顶部逐渐衰减,地层动力响应由隧道壁往外快速衰减的规律。

本文采用盾构隧道衬砌管片与周围土体共同作用的模型试验方式,研究了隧道衬砌结构和周围岩土体在频域与时域下的动力响应特性,分析了振动能量的传播及衰减规律。研究成果对隧道衬砌结构及上覆土体的动力稳定性分析和完善隧道结构设计理论及其安全性评估提供一定的指导意义。

2 模型试验概况

2.1 试验原理

目前国内外针对振动荷载作用下隧道结构内部和周围地层以及地面建筑物的动力响应特性开展了大量的研究,但大多都是基于现场实测或者数值模拟计算。现场实测虽然简单直接,但无法研究不同参数对隧道结构与周围岩土体的动力响应特性及其衰减规律的影响。数值模拟计算则很难真实地模拟振动荷载作用下隧道结构-土体的相互作用关系及能量传递规律。

本次试验采用盾构隧道管片与周围均质土体共同作用的模型试验方式进行。首先依据相似理论获得模型试验管片衬砌结构和土体的物理力学参数,通过激振器将振动荷载施加在盾构隧道管片底部,凭借预先埋设好的加速度传感器获取隧道结构和周围土体的动力响应特性及其衰减规律。

2.2 物理力学参数的相似关系

考虑本次试验主要测试列车振动荷载作用下盾构隧道结构与周围土体的动力响应,模型的变形主要在弹性范围内^[7],因此,模型试验相似比满足弹性相似定律即可。在充分考虑试验的操作性和可靠性的基础上,确定本次试验以几何相似比 $C_l = 20$ 、密度相似比 $C_\rho = 1$ 以及弹性模量相似比 $C_E = 30$ 为基础相似比。根据相似理论,得到试验其他物理力学参数的相似比为:速度相似比 $C_v = C_l C_\rho^{0.5} C_E^{-0.5} = 3.65$ 、加速度相似比 $C_a = 1$ 、重力加速度相似比 $C_g = 1$ 、时间相似比 $C_t = C_l C_\rho^{0.5} C_E^{-0.5} = 3.65$ 、频率相似比 $C_\omega = C_l^{-1} C_\rho^{-0.5} C_E^{0.5} = 0.27$ 、力相似比 $C_F = C_l^3 C_\rho = 8\ 000$ 。

2.3 相似材料的选取

本试验相似材料的选取主要涉及盾构隧道管片衬砌和土体的力学参数。由于试验中隧道结构与土体的变形主要为弹性变形,相似材料的选择主要考虑了衬砌与土体的重度、弹性模量、剪切模量、泊松比等弹性参数。经过多组配比试验及弹模测试,最终确定采用石膏:硅藻土:水为 1:0.4:1.8(质量比)混合模拟管片衬砌材料。模型土体由粉煤灰、石英砂、河砂和机油按一定比例配置而成^[11]。隧道管片衬砌和土体参数分别如表 1 所示。

试验以目前国内地铁区间盾构隧道为模拟对

象, 原型隧道外径为 6 m, 内径为 5.4 m, 管片厚度为 0.3 m, 幅宽为 1.5 m, 衬砌环分为 6 块, 封顶块圆心角为 15° , 两邻接块圆心角为 64.5° , 3 个标准块圆心角为 72° 。

表 1 衬砌材料及土体物理力学参数
Table 1 Mechanical parameters of lining materials and soil

类型	衬砌材料			土体		
	弹性模量 / GPa	剪切模量 / GPa	泊松比 μ	弹性模量 / MPa	剪切模量 / MPa	泊松比 μ
原型	34.5	13.30	0.3	52.00~ 68.00	20.00~ 26.20	0.3
模型	1.1	0.44	0.3	1.95	0.75	0.3

2.4 管片结构特征模拟

盾构隧道衬砌结构由大量管片通过螺栓连接而成, 具有众多环向、纵向接头, 而这些接头模拟的成功与否对试验结果的准确性、可靠性有重要影响。本次试验对隧道环向接头采用在环中接头位置处开一定深度的槽缝, 弱化其抗弯刚度, 使其与原型接头抗弯能力等效的方法进行模拟^[11]。根据国内外已有研究成果^[12], 对于埋深 10~20 m 的盾构隧道, 原型接头处弯曲刚度 K_θ 的取值可近似为 $5 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 。其计算公式为^[13]

$$K_\theta = \frac{6EI\alpha L}{24EI\delta_c - Pa(3L^2 - 4aH^2)} \quad (1)$$

式中: K_θ 为接头抗弯刚度; EI 为管片抗弯刚度; L 为支座间距离; δ_c 为中央位置的位移; P 为施加荷载; a 为荷载与支座间的距离; H 为管片厚度。利用有限元软件 ANSYS 构建模型 (见图 1) 进行反复计算, 得到满足要求的开槽深度为 17.5 cm, 根据几何相似比, 转化为模型值约为 9 mm。

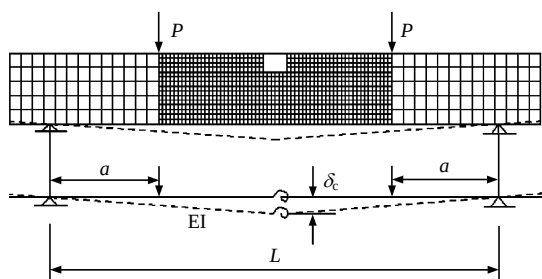


图 1 ANSYS 构建的数值模型
Fig.1 ANSYS numerical model

由于工程中管片纵向接头错动很小, 故试验中考虑将径向抗剪刚度和切向抗剪刚度取为无限大^[11]。具体试验方法为: 在模型上纵向接头位置用

直径 4 mm 钢棒沿纵向进行各管片环间连接。

2.5 试验装置及测试系统

为模拟振动荷载在隧道结构内部和周围土体中的传播规律, 采用专门研制的三维模型试验装置, 模型试验系统由模型箱、加载系统和监测系统 3 部分组成 (见图 2)。

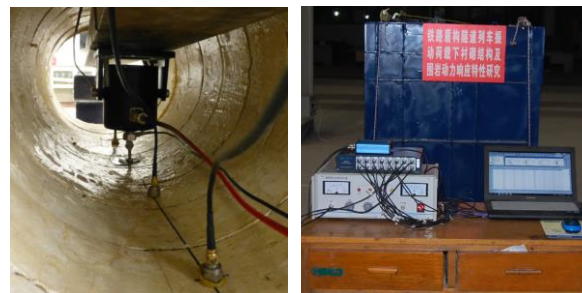


图 2 模型试验装置
Fig.2 Model tests devices

试验所采用模型箱的内部有效尺寸为 1.5 m (长) $\times$ 0.9 m (宽) $\times$ 1.35 m (高)。隧道模型纵向长度为 0.9 m, 上覆土体厚度为 0.5 m (对应原型埋深 10 m), 下部土体厚为 0.48 m (对应原型 9.6 m)。对于振动试验, 降低和减少模型边界上波的反射, 是试验成功的关键点和难点。本试验中在模型箱内部粘结了一层目前国内广泛采用的吸振材料 Duxseal, 其对剪切波与压缩波均能吸收, 具体效果与厚度有关。根据之前的研究经验, 最终厚度选择为 30 mm^[7, 14]。

模型试验采用激振器施加振动荷载, 激振器布置在隧道衬砌管片中间, 并在激振器下部安装了动态力传感器, 采集通过激振器施加在管片底部的振动荷载。

为分析盾构隧道在振动荷载作用下的动力响应, 将加速度传感器布置在隧道管片衬砌结构内部和周围土体中。在隧道衬砌顶部与底部分别布置了 3、2 个加速度传感器。在隧道结构的下部土体内埋设了 2 个加速度传感器, 而隧道结构的上部土体内则埋设了 3 层共 9 个加速度传感器 (见图 3)。

2.6 试验方案

试验中, 激振器将振动荷载施加在盾构隧道管片底部, 通过在隧道结构和周围土体中预先埋设的加速度传感器对模型的动力响应进行测试。考虑模型试验的可操作性与试验目的, 本文采用了目前国内常用的单点激振的方法对列车振动荷载进行了模拟^[7, 15]。试验施加了扫频激振荷载和列车振动荷载两种类型。通过扫频荷载主要分析了不同频率振

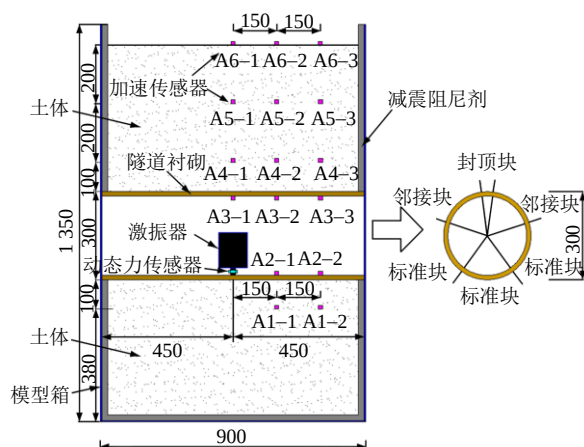


图3 加速度传感器布置图(单位: mm)

Fig.3 Layout of acceleration sensors (unit: mm)

动荷载作用下隧道结构和周围土体的动态响应特征,可深入了解频率变化对动态响应的影响规律。通过列车振动荷载则研究了各测点在时域上的最大加速度以及相应的衰减规律。

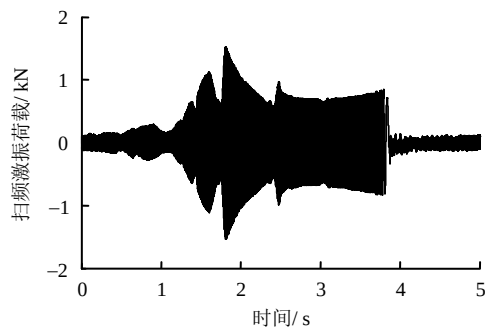
(1) 扫频激振荷载。根据国内外已有工程经验与前人研究基础^[5-6],本次试验选择的扫频范围设定在 0~300 Hz (原型值)。为确保计算结果的可靠性施加了不同扫频时间、扫频方向和激振电压条件下的激振荷载。图 4(a)为 1 000 mV 激振电压下、300~0 Hz 扫频方向、5 s 扫频时间的激振力曲线。

(2) 列车振动荷载。根据已有研究成果^[16-18],通过建立三维车辆-轨道耦合模型,重点考虑轨道不平顺产生的振动荷载,以 5、6 级轨道谱为例,模拟出了 3 种时速下(40、50、60 km/h)的列车振动荷载。不同列车速度条件下的最大振动荷载分别为 19.2、20.8、21.6 kN (原型值)。图 4(b)为 40 km/h 车速条件下的列车振动荷载时程曲线,两个峰值点代表前、后轮通过轨道测点时刻的振动荷载。

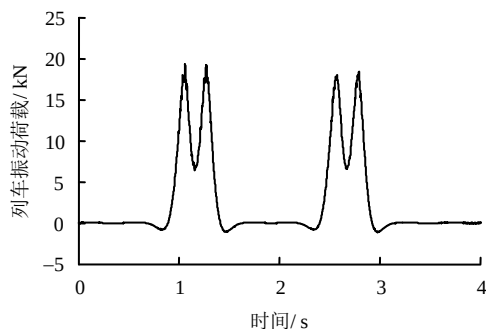
3 频率响应函数及其可靠性分析

3.1 频率响应函数(FRF)定义与相干系数

由地铁列车运行诱发的地铁振动荷载往往被认为是小振幅荷载,隧道衬砌结构及周围岩土体的变形都仍处于弹性范围,因此,笔者通过施加扫频信号,首先采用频域分析的方法对该问题进行研究。针对结构的频谱特征,以往往往是直接分析傅里叶变换后的加速度响应。但结构的加速度响应特性除了与激振荷载的频谱特性相关之外,与施加的激振荷载的大小也有关系。因此,笔者引入频率响应函数,更为深入地分析隧道结构和周围土体在不同频率激振荷载作用下的动力响应特性。



(a) 1 000 mV 激振电压下、300~0 Hz 扫频方向、5 s 扫频时间激振力曲线



(b) 列车时速 40 km/h 下的列车振动荷载曲线

图4 施加动荷载曲线

Fig.4 Vibration load curves

频率响应函数(FRF)具体定义为傅里叶转换后的加速度响应 $R(\omega)$ 与激振力 $F(\omega)$ 的比值,其计算式为

$$FRF(\omega) = \frac{R(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

由于振动荷载的随机性和噪音的存在,为了提高计算结果的可靠性,笔者采用随机振动分析理论,将动态力传感器以及加速计测得信号视为随机振动信号,通过分别计算力与加速度的自功率谱密度函数与其之间的互谱密度函数,得到了随机振动下频率响应函数的第 1 与第 2 估算式为

$$FRF_1(\omega) = \frac{S_{FA}(\omega)}{S_{FF}(\omega)} \quad (3)$$

$$FRF_2(\omega) = \frac{S_{AA}(\omega)}{S_{AF}(\omega)} \quad (4)$$

式中: $S_{AA}(\omega)$ 、 $S_{FF}(\omega)$ 为加速度与激振力的自功率谱密度函数; $S_{FA}(\omega)$ 、 $S_{AF}(\omega)$ 为加速度和激振力的互谱密度函数。

$$S_{FF}(\omega) = \frac{1}{N_s^2} \left(\sum_{n=0}^{N_s-1} F(t)_n e^{-\frac{2\pi i n m n}{N_s}} \right)^2 \quad (5)$$

$$S_{AA}(\omega) = \frac{1}{N_s^2} \left(\sum_{n=0}^{N_s-1} A(t)_n e^{-\frac{2\pi i n m n}{N_s}} \right)^2 \quad (6)$$

$$S_{AF}(\omega) = \frac{1}{N_s^2} \left(\sum_{n=0}^{N_s-1} A(t)_n e^{-\frac{2\pi i m n}{N_s}} \right) \left(\sum_{n=0}^{N_s-1} F(t)_n e^{-\frac{2\pi i m n}{N_s}} \right) \quad (7)$$

$$S_{FA}(\omega) = \frac{1}{N_s^2} \left(\sum_{n=0}^{N_s-1} F(t)_n e^{-\frac{2\pi i m n}{N_s}} \right) \left(\sum_{n=0}^{N_s-1} A(t)_n e^{-\frac{2\pi i m n}{N_s}} \right) \quad (8)$$

式中: $m=1, 2, \dots, N_s-1$; $n=0, 1, 2, \dots, N_s-1$; $F(t)_n$ 为测得的激振力; $A(t)_n$ 为测得的加速度。

根据随机振动理论已知, 实测荷载信号中噪音对第1估算式(式(3))可靠性影响较大, 而实测响应信号中的噪音对第2估算式(式(4))的结果影响较为明显。根据实测结果分析发现在加速度响应信号中的噪音相对较大, 因此, 本次试验采用第1估算式 $FRF_1(\omega)$ 分析各测点的动态响应特性。

另外, 根据随机振动分析理论, 引入相干系数 $\gamma^2(\omega)$ 对计算得到 FRF 的可靠性进行检验, 其计算式为

$$\gamma^2(\omega) = \frac{S_{FA}(\omega)S_{AF}(\omega)}{S_{FF}(\omega)S_{AA}(\omega)} \quad (9)$$

相干系数的大小介于 0~1 之间。相干系数为 0, 表明该加速度测点的动力响应与振动荷载无关; 相干系数为 1 说明动力响应则完全由振动荷载引起, 结果可靠。

3.2 实测 FRF 曲线与相干系数特性

通过计算得到隧道下部土体测点 A1-1 和隧道内管片底部测点 A2-1 在整个频率范围内的 FRF 与相干系数如图 5 所示。

根据图 5 可以看出, 在不同频率范围内的频率响应函数 FRF 及其对应的相干系数呈现出不同的变化规律。当激振频率处于 0~30 Hz 阶段内时, 由于环境噪声在这个频率区段内的干扰作用较大, 频率响应函数 FRF 对应的相干系数值也较低。在 30~100 Hz 频率范围内, 相干系数虽有所波动, 但整体较好, 能达到 0.8。当激振频率位于 100~300 Hz 范围内时, FRF 对应的相干系数基本接近于 1。说明加速度计测得隧道结构与土体的响应与激振器施加荷载相关性较好, 受到测试环境中噪声影响较小, 测试结果较为可靠。

由于模型试验时, 环境噪声扰动不可避免, 根据以上结果, 在后期分析中笔者着重研究了隧道结构和周围土体在 30~300 Hz 范围内的动力响应特性。在 0~30 Hz 的低频频率范围内, 笔者建议可在模型试验的基础上通过数值模拟手段分析其动力响应特性。

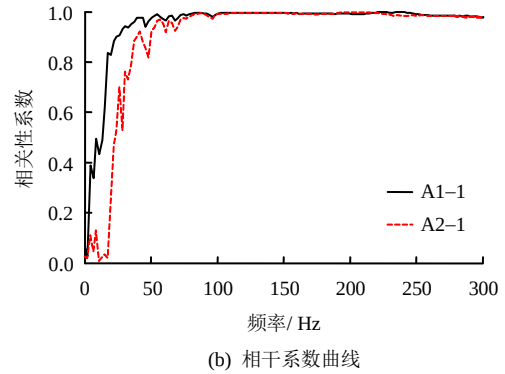
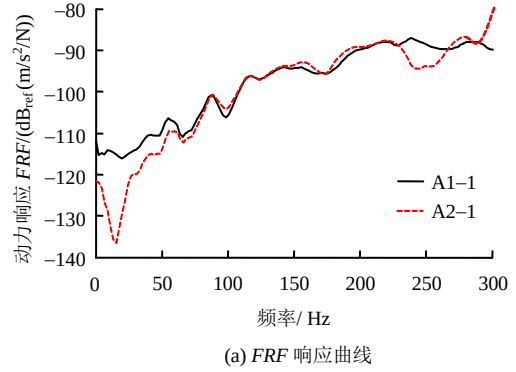


图 5 测点 A1-1 与 A2-1 动力响应曲线

Fig.5 Dynamic response at points A1-1 and A2-1

3.3 激振力大小对频率响应函数 FRF 的影响分析

试验中施加了 3 个振幅的扫频振动荷载(激振电压分别为 800、1 000、1 200 mV), 对隧道结构与周围土体的响应进行了测试。激振电压越大, 激振器施加的激振荷载越大, 在隧道各个测点所激发的加速度响应也就越大。根据测试结果计算了隧道结构与周围土体在不同激振电压下的 FRF 曲线如图 6 所示。

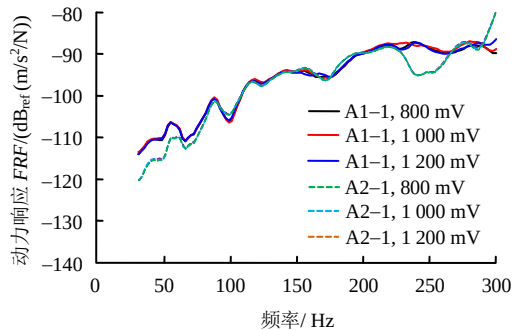


图 6 不同扫频振幅下测点 A1-1 和 A2-1 的动力响应曲线

Fig.6 Dynamic response at points A1-1 and A2-1 under different excitation amplitudes

可以看出, 不同激振电压下的频率响应 FRF 曲线在整个频率范围内几乎重合, 其变化规律与大小都基本一致。表明在本次试验加载范围内, 结构与

土体的响应与激振荷载按照相同比例增加,因此, FRF 与外界所施加的振动荷载大小无关。由此可以看出,隧道结构和周围土体响应仍处于线性状态,没有出现塑性变形,与国际标准认为的小应变状态(可采用线弹性模型)一致^[19-20]。

3.4 扫频方向和扫频时间对 FRF 的影响分析

为了分析不同的扫频方向和扫频时间是否会影响频率响应函数 FRF ,进行了0~300 Hz和300~0 Hz两个扫频方向的激振试验以及一个扫频周期的扫频时间分别为5、10、15 s的激振试验。

从不同扫频方向条件下测点A1-1和测点A2-1的动力响应曲线(见图7)可以看出,测点A1-1和测点A2-1在不同扫频方向下的 FRF 曲线基本吻合,采用不同扫频方向施加激振荷载不会影响频率响应函数 FRF 。

图8为不同扫频时间下的动力响应曲线,激振荷载为1 000 mV,扫频方向为300~0 Hz。从图中的情况看,不同扫频时间下的隧道结构与周围土体的 FRF 曲线也几乎重合。

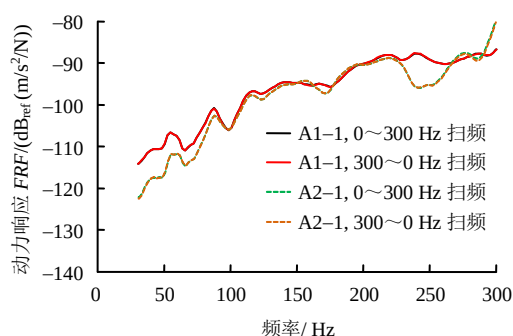


图7 不同扫频方向下测点A1-1和A2-1的动力响应曲线
Fig.7 Dynamic response at points A1-1 and A2-1 under different frequency sweep directions

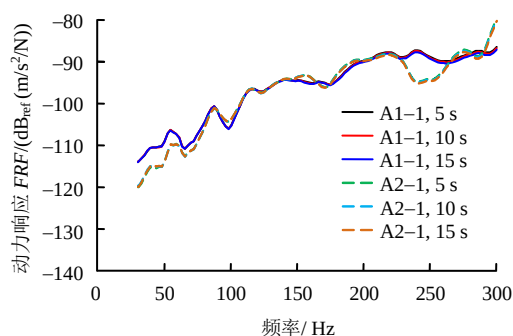


图8 不同扫频时间下测点A1-1和A2-1的动力响应曲线
Fig.8 Dynamic response at points A1-1 and A2-1 under different frequency sweep times

由以上分析可以看出,在30~300 Hz的频率范围内,隧道结构与周围土体的响应与激振荷载相关

性高,受噪音干扰较小。同时,计算得到的 FRF 曲线不受扫频信号本身(大小、方向及周期)的影响,有较高的可靠度,能很好地反映出衬砌结构与周围土体在不同振动频率下的动力响应特性。

4 隧道衬砌结构动力响应特性分析

4.1 扫频激振荷载作用下隧道结构的动力响应

列车振动荷载一般通过轮轨直接传递给隧道结构,隧道结构内部不同位置的动力响应特性和不同振动频率成分的衰减规律是研究的热点和难点^[21]。通常隧道衬砌结构具有与土体和地面建筑不同的动力响应规律。

图9为盾构隧道管片底部测点A2-1和测点A2-2在扫频荷载下动力响应曲线。可以看出,管片底部的两个测点在整个频域的频率响应 FRF 曲线呈现出相似的变化规律。隧道管片底部的动力响应随着频率的增大而增强,并呈现出以中高频振动为主的特性。两个测点的频率响应 FRF 均呈现出波动状的增长,在频域的前半段(150 Hz以下) FRF 值增长较快,在频域的后半段增速有所变缓。在隧道底部管片的振动传播特性上,不同频率段的振动衰减幅度差距不大。整个频率范围中,测点A2-1的 FRF 值比点A2-2平均大约高出9 dB,可以看出,距离振源越近,动力响应越大。

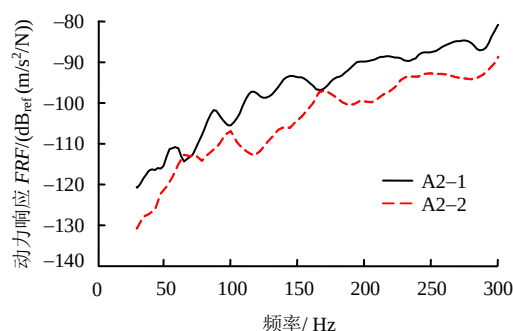


图9 盾构隧道管片底部的动力响应曲线
Fig.9 Dynamic response curves at the bottom of shield tunnel segment

图10为隧道顶部不同位置处的频率响应函数。从图中可以看出盾构隧道顶部表现出与底部不同的动力响应特性。在30~100 Hz的低频阶段,各个测点的动力响应变化相对平缓。频率响应函数 FRF 在100~150 Hz的中频阶段有一个明显增长的趋势。频率达到150 Hz后,虽然各个测点的 FRF 值随频率变化出现波动,但较中频阶段增幅明显放缓。在沿隧道轴向的振动衰减特性上,从测点A3-1到测点A3-2的 FRF 衰减约6 dB,从测点A3-2到A3-3

衰减了约 2dB。在低频阶段的衰减幅值小于高频阶段的衰减幅值, FRF 衰减幅度随距离增大而降低。

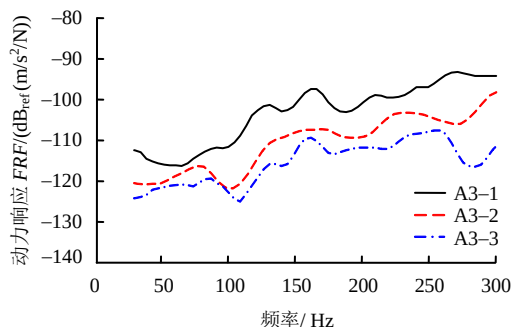


图 10 盾构隧道管片顶部的动力响应曲线
Fig.10 Dynamic response curves at the top of shield tunnel segment

通过比较图 9、10 可以看出, 由于激振力施加在隧道底部, 隧道顶部的加速度响应与隧道底部相比更小。如测点 A2-1 和测点 A3-2、测点 A2-2 和测点 A3-3 都处于一个隧道断面上, 测点 A2-1 的振动高出 A3-2 平均约 14.5 dB, 测点 A2-2 比 A3-3 高约 11 dB。同时还可以看出, 在隧道顶部加速度响应沿隧道纵向衰减幅度明显小于隧道底部。

4.2 列车荷载作用下隧道结构的动力响应

随着列车运行速度越来越快, 由列车荷载导致的隧道结构-土体以及地面振动问题受到越来越多的关注。笔者在试验中通过激振器在隧道底部施加了 3 种不同列车时速 (40、50、60 km/h) 条件下的振动荷载。表 2 为不同车速下隧道内部各测点的最大加速度。可以看出:

(1) 在盾构隧道底部管片产生的加速度响应明显大于顶部管片上产生的加速度响应, 与扫频激振荷载产生的动力响应规律一致。

(2) 随着列车车速的增大, 在隧道内部引起的加速度响应增大。如测点 A2-1, 从 40 km/h 到 50 km/h, 最大加速度增加了 37.0%, 从 50 km/h 提速到 60 km/h, 最大加速度则增大 38.7%。

表 2 不同车速下隧道内部各测点的最大加速度
Table 2 The maximum accelerations of monitoring points in tunnel under different speeds

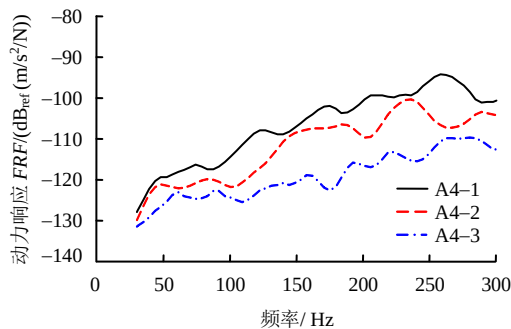
车速 /(km/h)	最大加速度/(cm/s ²)				
	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	A3-3
40	17.31	8.74	13.81	6.79	3.98
50	23.72	11.92	18.62	9.70	5.45
60	32.90	14.02	24.61	12.61	7.47

致, 由列车振动引起的盾构隧道底部管片和顶部管片的振动沿隧道轴向逐渐衰减。同时, 发现在隧道底部最大加速度衰减速率明显高于隧道顶部。

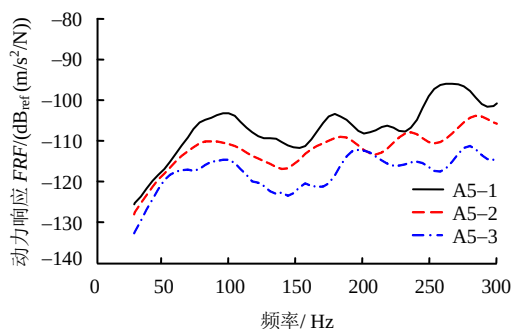
5 隧道周围土体动力响应特性分析

5.1 扫频激振荷载作用下土体动力响应

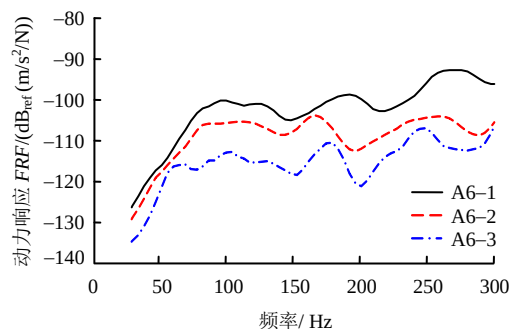
为分析隧道周围土体的动力响应特性及其衰减规律, 在隧道结构上部土体内部的不同埋深处布置了 3 层共 9 个加速度传感器, 距隧道模型顶部 10 cm 处为第 1 层加速度测点 (A4), 30 cm 处为第 2 层测点 (A5), 土体表面为第 3 层测点 (A6), 详情见图 3。图 11 为隧道衬砌结构上部土体各测点层的动力响应曲线, 可以看出, 不同埋深条件下各加速度测点的 FRF 曲线变化较大, 总体上可以看出以下两个特点:



(a) 隧道结构上部第 1 层测点



(b) 隧道结构上部第 2 层测点



(c) 土体表面的第 3 层测点

图 11 隧道衬砌结构上部土体的动力响应曲线
Fig.11 Dynamic response curves of the upper layer

(3) 与扫频激振荷载引起的动力响应规律一

(1) 每层加速度测点均呈现出动力响应沿隧道轴向衰减的规律。同时,在低频区段(<50 Hz),动力响应的衰减明显小于中高频区段。

(2) 距离隧道结构最近的第 1 层测点(A4)的动力响应在全频域内随频率的增加逐渐增大。但在第 2 层和地表的第 3 层测点,土体的动力响应在 30~90 Hz 区段呈现出线性增长的趋势,且增速较快。但在 90~300 Hz 区段,动力响应均出现波动变化,并无明显增大趋势。

5.2 列车荷载作用下土体动力响应

本文对不同列车时速下土体中各测点的加速度响应也进行了测试,并将各点响应的最大加速度提取,结果见表 3。通过比较表 3 中结果可以看出:

(1) 在隧道衬砌结构上部不同埋深处的第 1 层、第 2 层和第 3 层测点中均出现了沿隧道轴向动力响应逐渐衰减的特性。列车振动荷载越大,引起的加速度动力响应也就越大。

(2) 总体来说,隧道衬砌结构上部的第 2 层测点处土体的动力响应相比第 1 层有所衰减,但低于沿隧道轴向方向产生的动力衰减程度。

(3) 在土体表面,土体动力响应具有放大效应。位于上部土体表面的第 3 层测点在不同车速条件下的最大加速度大于隧道结构上部的第 1 层和第 2 层测点。

文献[22]已证明地铁在运营过程中引起的土体竖向振动在传播过程中,在地表存在着加速度的放大效应。与试验测试结果所观察到的结果一致,又进一步验证了试验结果的正确性。

表 3 不同车速下隧道结构上部土层中各测点的最大加速度

Table 3 The maximum acceleration of monitoring points in the upper layer under different speeds

车速 (km/h)	最大加速度/(cm/s ²)								
	A4-1	A4-2	A4-3	A5-1	A5-2	A5-3	A6-1	A6-2	A6-3
40	4.27	3.55	2.72	3.21	2.94	2.63	5.26	4.78	3.11
50	5.85	4.41	3.53	3.98	3.57	3.41	7.54	6.71	5.69
60	7.87	6.88	5.22	5.28	4.77	4.22	9.34	8.10	7.48

6 结 论

(1) 通过模型试验的方法,对盾构隧道及周围土体的动力响应进行了测试。为了更深入地分析隧道结构和周围土体在不同荷载频率下的动力响应特性,提出采用频率响应函数 *FRF* 及相干系数方法分析其动力响应。*FRF* 是隧道衬砌结构和周围土体自身的动力响应特性的体现,与激振力的大小和扫频方向及扫频时间无关。

(2) 通过试验发现,隧道顶部与底部在表现出不同的动力响应特征。隧道管片底部的动力响应随着频率的增大而增强,在频域的前半段(150 Hz 以下) *FRF* 值增长较快,在频域的后半段增速有所变缓。在隧道顶部,在 30~100 Hz 的低频阶段,各个测点的动力响应变化相对平缓。频率响应 *FRF* 在 100~150 Hz 的中频区间明显增大,之后 *FRF* 值随频率增大所增加的趋势明显降低。通过 *FRF* 分析还可以看出在隧道顶部加速度响应沿隧道纵向衰减幅度明显小于隧道底部。

(3) 与扫频激振荷载引起的动力响应规律一致,由列车振动荷载引起的隧道底部管片和顶部管片的振动沿隧道轴向逐渐衰减,底部的加速度响应大于顶部。随着列车车速的增大,在隧道内部引起的加速度响应将显著增大。

(4) 在隧道结构的上部土体中,第 1 层测点的土体动力响应在全频域内随频率的增加逐渐增大。但在第 2 层和地表的第 3 层测点处土体动力响应呈现出先线性增长(30~90 Hz)后不断波动的趋势(90~300 Hz)。同时在列车振动荷载作用下发现在地表有一个明显的加速度放大效应。第 3 层测点的加速度动力响应大于隧道上部第 1 层测点。但由于振动能量在土体中的衰减及土的阻尼作用,上部土体引起的加速度响应低于隧道结构内部。

由于篇幅有限,本文重点对模型试验理论、试验方法以及错缝拼装的盾构隧道结构与周围土体响应的基本规律进行了阐述。关于管片的不同拼装方式与隧道上覆不同级别岩体对盾构隧道动力响应特性的影响将会另外撰写文章叙述。

参 考 文 献

- [1] 王祥秋,杨林德,周治国. 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1337—1342.
WANG Xiang-qiu, YANG Lin-de, ZHOU Zhi-guo. Dynamic response analysis of lining structures for tunnel under vibration loads of train[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1337—1342.
- [2] 王田友,丁洁民,楼梦麟,等. 地铁运行所致建筑物振动的传播规律的影响[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 33—39.
WANG Tian-you, DING Jie-min, LOU Meng-lin, et al. Subway-induced building vibration and its propagation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(5): 33—39.
- [3] THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G. Experimental study of vibrations in underground

- structures[J]. **Geotechnical Engineering**, 2003, 156(2): 75—81.
- [4] 刘维宁, 袁扬, 王文斌, 等. 地铁列车运行引起环境振动响应的人工单点列脉冲激励预测方法[J]. 中国铁道科学, 2015, 35(4): 74—79.
- LIU Wei-ning, YUAN Yang, WANG Wen-bin, et al. Prediction method with artificial single-point pulse excitations for environment vibration response induced by in-service metro train[J]. **China Railway Science**, 2015, 35(4): 74—79.
- [5] 范思婷, 刘干斌, 黄力, 等. 轨道交通运行引起的隧道结构振动测试研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 2): 298—303.
- FAN Si-ting, LIU Gan-bin, HUANG Li, et al. Testing study of tunnel structure vibration induced by rail transit[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(Supp.2): 298—303.
- [6] 吴宗臻, 刘维宁, 马龙祥, 等. 基于实测频响函数列的地铁环境振动响应预测方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 32(6): 155—161.
- WU Zong-zhen, LIU Wei-ning, MA Long-xiang, et al. Prediction method for metro environment vibrations based on measured frequency response functions field[J]. **Engineering mechanics**, 2015, 32(6): 155—161.
- [7] YANG W, HUSSEIN M F M, MARSHALL A M. Centrifuge and numerical modelling of ground-borne vibration from an underground tunnel[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, (51): 23—34.
- [8] 楼梦麟, 贾旭鹏, 俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 282—288.
- LOU Meng-lin, JIA Xu-peng, YU Jie-qin. Field measurement and analysis of ground Vibration Induced by subway trains[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2009, 29(3): 282—288.
- [9] 李亮, 张丙强, 杨小礼. 高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4259—4265.
- LI Liang, ZHANG Bing-qiang, YANG Xiao-li. Analysis of dynamic response of large cross-section tunnel under vibrating load induced by high speed train[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4259—4265.
- [10] 莫海鸿, 邓飞皇, 王军辉. 运营期地铁盾构隧道动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 3508—3512.
- MO Hai-hong, DENG Fei-huang, WANG Jun-hui. Analysis of dynamic responses of shield tunnel during metro operation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 3508—3512.
- [11] 何川, 封坤, 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2260—2269.
- HE Chuan, FENG Kun, YANG Xiong. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze River tunnel with super-large cross-section[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2260—2269.
- [12] 张厚美, 过迟, 付德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 309—314.
- ZHANG Hou-mei, GUO Chi, FU De-ming. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(3): 309—314.
- [13] 地盤工学会. シールドトンネルの新技术[M]. 东京: 鹿島出版社, 1997.
- Japanese Geotechnical Society. The new technology of shield tunnel[M]. Tokyo: Kashima Institute Publishing Co., Ltd., 1997.
- [14] PAK R Y S, GUZINA B B. Dynamic characterization of vertically loaded foundations on granular soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 121(3): 274—286.
- [15] TSUNO K, MORIMOTO W, ITOH K, et al. Centrifugal modelling of subway-induced vibration[J]. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, 2005, 5(4): 15—26.
- [16] ZHAI W M, WANG K Y, CAI C B. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics[J]. **Vehicle System Dynamics**, 2009, 47(11): 1349—1376.
- [17] 韦凯, 翟婉明, 肖军华. 软土地铁盾构隧道垂向随机振动分析模型[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 117—123.
- WEI Kai, ZHAI Wan-ming, XIAO Jun-hua. Vertical random vibration model for subway shield tunnel in soft soil[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(6): 117—123.
- [18] WEI Kai, WANG Ping, YANG Fan, et al. The effect of the frequency-dependent stiffness of rail pad on environment vibration induced by subway in tunnel[J]. **Journal of Rail and Rapid Transit**, 2016, 230(3): 697—708.
- [19] International Organization for Standardization. BS ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration-ground-borne noise and vibration arising from rail systems[S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2005.
- [20] ISHIHARA K. Soil behaviour in earthquake geotechnics[D]. Oxford: Oxford University, 1996.
- [21] 闫维明, 聂晗, 任珉, 等. 地铁交通引起地面振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(2): 1—5.
- YAN Wei-ming, NIE Han, REN Min, et al. In situ experiment and analysis of ground surface vibration induced by urban subway transit[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2006, 3(2): 1—5.
- [22] 马蒙, 刘维宁, 王文斌. 轨道交通地表振动局部放大现象成因分析[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 275—309.
- MA Meng, LIU Wei-ning, WANG Wen-bin. Analysis on the reasons of ground vibration amplification induced by railway traffic[J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(4): 275—309.