

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220228001

地铁振动作用下上部正交综合管廊动力响应 试验研究*

肖迪¹, 段旭¹, 刘武超², 邹愈³, 董琪³, 叶万军¹

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 信电综合勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 陕西科技控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为揭示地铁振动荷载作用下上部正交管廊的动力响应规律, 采用缩尺物理模型试验的方法, 利用激振电机模拟地铁列车运行时产生的振动荷载, 研究地铁隧道-黄土地基-综合管廊传播路径下地铁运行振动的传播规律及管廊结构的动态响应特征。试验结果表明: 地铁运行产生的振动由隧道顶部向上部土体传播的过程中表现出先骤减后缓慢减小的规律, 加速度响应主要集中于隧道上部40 cm(原型4 m)区间, 动态土压力则在隧道顶与其上部管廊垂直间距80 cm(原型8 m)全段均有较明显的响应。上部正交综合管廊顶、侧、底板与周围土体的动态接触压力响应明显, 并且在相同振动荷载作用下表现出相对稳定的比例关系。随着地铁振动荷载的增强, 上部正交管廊的结构加速度响应逐步增强, 而管廊结构与周围土体的动态接触土压力增长幅度更为显著。

关键词: 综合管廊; 模型试验; 地铁振动; 动力响应; 振动传递

中图分类号: TU411.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1151-09

Experimental Study on Dynamic Response of Upper Orthogonal Comprehensive Utility Tunnel under Subway Vibration

XIAO Di¹, DUAN Xu¹, LIU Wuchao², ZOU Yu³, DONG Qi³, YE Wanjun¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. China DK Comprehensive Investigate and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Shaanxi Science & Technology Holding Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to reveal the dynamic response law of the upper orthogonal pipe gallery under subway vibration load, a scaled physical model test method was used to simulate the vibration load generated by subway train operation. The dynamic response characteristics of vibration propagation through the subway tunnel-loess foundation-integrated pipe gallery path were studied. Experimental results show that: the vibration generated by subway operation propagates from the top of the tunnel to the upper soil, showing a law of sudden decrease first and then slow decrease. The acceleration response is mainly concentrated in the upper 40 cm (prototype 4 m) section of the tunnel, while the dynamic soil pressure exhibits an obvious response throughout the entire section of 80 cm (prototype 8 m) ver-

* 收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902299;42072319)、陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-SF-078;2019KWZ-09)、陕西省重点科技创新团队项目(2021TD-55)资助

作者简介: 肖迪(1997—),男,硕士研究生。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: xiaodi199710@163.com

通讯作者: 段旭(1991—),男,副教授,硕导,博士。主要从事岩土与地下工程方面的研究。E-mail: duanxutim@163.com

tical distance between the tunnel top and the upper pipe gallery. The top, side and bottom plates of the pipe gallery at the central position after the vibration propagates to the upper orthogonal pipe gallery have a strong influence, and show a relatively stable proportional relationship under the same vibration load. As the subway vibration load increases, the acceleration response of the upper orthogonal pipe gallery structure is gradually enhanced, and the increase of the dynamic contact earth pressure between the pipe gallery structure and the surrounding soil becomes more obvious.

Keywords: comprehensive utility tunnel; model test; subway vibration; dynamic response; vibration transmission

0 引言

城市地下综合管廊作为解决城市管线问题以及充分利用城市地下空间的重要基础设施,近年来在大中型城市得到了迅速发展,新建地下综合管廊与既有城市地下构筑物逐渐形成了立体交错的地下空间网络。随着城市现代化进程的迅速发展,地铁在缓解城市交通压力方面发挥了巨大作用,但地下在建或已建成的地铁在施工和运行时产生的环境影响却不容忽视。已有研究表明,地铁隧道在开挖时,会对周围岩土体、构筑物和地表沉降产生影响^[1-2]。另外,地铁在运行时钢轨结构由于磨损会产生一些波浪形磨耗,产生的不顺顺会造成车轮与钢轨碰撞从而产生振动^[3-4],并且该振动激励会通过轨道基础传至隧体,再经隧道传播至土体介质、地面,从而引起地面以及构筑物产生振动^[5]。

地铁运行产生的振动作为立体地下空间长期存在的动力荷载,不少学者利用现场实测和数值模拟的方法,研究了地铁动荷载的影响因素和传播规律。已有研究表明,地铁振动引起的隧道周围地层响应主要以竖向振动为主^[6],振动传播至隧道时振动峰值频率以8~30 Hz为主^[7]。对于地铁运行振动传播过程的衰减情况,C.Mouzakis等^[8]现场实测得到随着距隧道距离的增加低频振动相较于高频衰减的更为迅速。石文博等^[9]则通过建立数值模型研究发现地铁振动传播过程的衰减曲线类似于指数型曲线。徐睿等^[10]通过现场动态监测分析了地铁运行振动的衰减特性以及振动在隧道-地面-建筑物间的传播规律。

地铁运行产生的振动有着周期性和长期性的特点,引起的地面振动成为不可忽视的问题。不少学者研究发现,地铁运行引起的地面振动与地铁车重、车速和钢轨波纹等因素密切相关^[11-13],并且地面

振动频率主要集中于20~80 Hz^[14]。楼梦麟等^[15]通过实测发现地铁振动引起的地面振动在距隧道0~35 m范围内均有明显响应。由于地铁往往修建于城市中心区域,研究学者关注到了地铁运行产生的振动对于邻近建筑物的影响。宋波等^[16]现场监测了地铁运行引起邻近砖混结构的振动规律。钟红等^[17]通过实测得出地铁运行产生的振动对处于距离隧道中心15 m范围内的建筑物影响较为明显。朱大鹏等^[18]建立动态三维数值模型,分析指出地铁振动荷载初期对于周围基坑表面土体沉降的影响较为明显。王田友等^[19]通过现场实测发现地铁运行产生的环境振动在衰减过程中有明显的反弹放大现象,并且对于横向垂直于地铁线路方向布置的地表建筑有较大影响。

综上所述,诸多学者着重考虑了地铁列车运行产生振动的原理、影响因素、传播规律以及对地面和建筑物的影响。而地铁振动在地面以下岩土体内部的传播规律及其临近地下结构动力响应的研究较少。为探究地铁运行振动作用下,其上部正交综合管廊的动力响应规律,本文通过缩尺物理模型试验研究了不同地铁振动强度作用下,振动沿隧道-黄土-管廊路径的传播规律,揭示综合管廊结构的加速度及其与土体接触压力的动态响应特征,以期对立体地下空间规划建设、工程病害防控提供理论基础。

1 模型试验设计

1.1 相似关系与模型材料

模型试验系统由加载系统、缩尺模型以及动态数据采集系统等部分组成。试验中采用的综合管廊模型是以单舱结构预制拼装的支线管廊为原型,原型尺寸为3 m×2 m×3 m(长×宽×高),地铁隧道原型外径6 m、内径5.4 m、厚0.3 m、环宽1.5 m的

盾构隧道。根据相似第三定律,设计原型与模型的几何相似比为10,并在几何相似与弹性模量相似比的基础上确定模型与原型之间的相似比关系见表1。

表1 模型试验各物理量相似关系

Table 1 Similarity relationships of various physical quantities in model experiments

物理量	量纲	相似关系	相似比
长度 l	$[L]$	C_l	10
质量 m	$[M]$	$C_m = C_\rho C_l^3$	1 000
密度 ρ	$[M][L]^{-3}$	$C_\rho = 1$	1
弹性模量 E	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	C_E	1.35
时间 t	$[T]$	$C_t = C_l C_\rho^{1/2} C_E^{-1/2}$	8.61
集中荷载 F	$[M][L][T]^{-2}$	$C_F = C_E C_L^2$	135
加速度 a	$[L][T]^{-2}$	$C_a = C_l^{-1} C_\rho^{-1} C_E$	0.135
频率 f	$[T]^{-1}$	$C_f = C_l^{-1} C_\rho^{-1/2} C_E^{1/2}$	0.14

试验模型箱尺寸为400 cm×240 cm×280 cm(长×宽×高),为保证管廊模型接头强度与原型保持相似关系,综合管廊由单节30 cm×20 cm×30 cm(长×宽×高)的7节预制管节,腋脚处设置预留螺栓孔位,通过制作丝口长度一致的连接螺栓配合紧固螺母,保障紧固后装配力一致。选取弹性模量相似比为1.35的石膏作为模型的浇筑材料,直径6 mm的铝棒作为配筋材料。地铁隧道模型外径60 cm、内径54 cm、厚3 cm,总长400 cm,道床内部不安置钢弹簧和轨枕,在浇筑道床时沿纵向每隔0.5 m预埋两块钢垫板用于固定钢轨,钢轨为规格12 kg/m的轻轨。综合管廊模型与地铁隧道模型的截面设计图与实物图如图1、2所示。

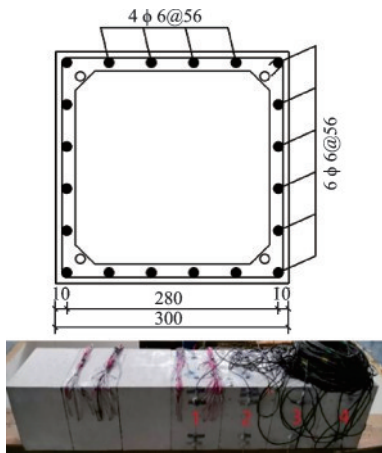


图1 综合管廊模型截面设计图与实物照片

Fig.1 Integrated pipe gallery model cross-section design and physical photograph

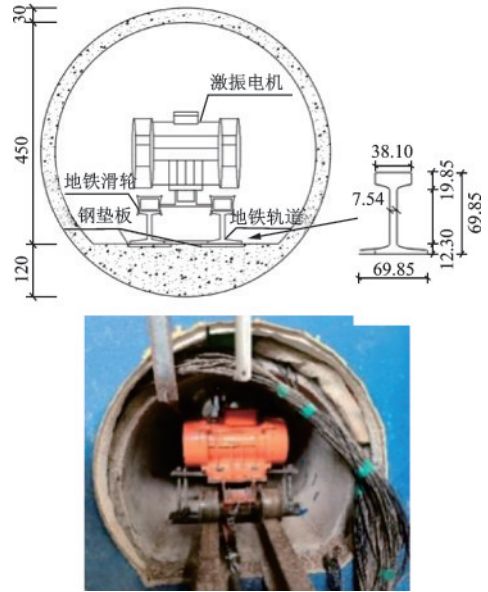


图2 地铁隧道模型截面设计图与实物照片

Fig.2 Subway tunnel model cross-section design and physical photograph

模型箱内填筑土体取自西安地区地下3 m的天然黄土,并经过筛分后在模型箱内逐层填筑,压实后黄土参数为黏聚力37 kPa、内摩擦角26°、密度1.85 g/cm³,综合管廊与地铁隧道正交模型示意图3所示。

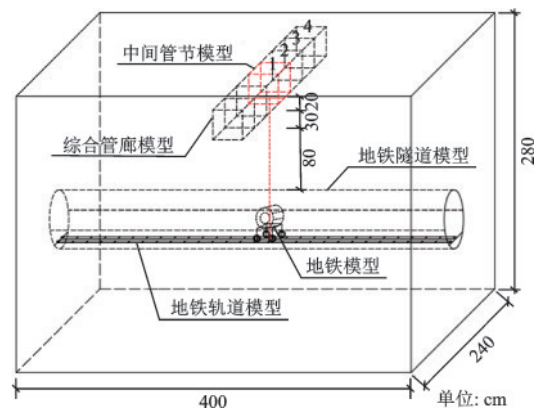


图3 综合管廊与地铁隧道正交模型示意

Fig.3 Schematic diagram of orthogonal model between comprehensive utility tunnel and metro tunnel

1.2 传感器布置

为采集综合管廊结构与隧道结构以及周围黄土地基在地铁运行振动荷载作用下的动态响应情况,试验采用加速度计、微型土压力盒,结合采样频率为1 kHz的TST5915动态信息采集系统以及配套软件,构成试验监测系统。加速度传感器采用TST121A-100型压电式加速度计,灵敏度

为 0.01 g/mv, 微型土压力盒选用 ZFTY380 型压力盒, 灵敏度约为 0.01 Pa/mv。

为监测地铁列车在运行过程中隧道结构的加速度变化, 在隧道结构的 1/2 断面隧道壁顶部和道床位置分别布置了两个加速度计 st_{1-1} 和 st_{1-2} 如图 4(a) 所示。为分析隧道上下方土体以及管廊下方土体在地铁列车运行振动作用下的加速度与土压力变化情况, 在隧道 1/2 断面的横断面竖直方向和水平方向分别布置了加速度计 T_1 至 T_{10} , 土压力盒 S_1 至 S_{10} , 其中土压力盒埋设于加速度计下方 1 cm 处, 如图 4(a) 所示。

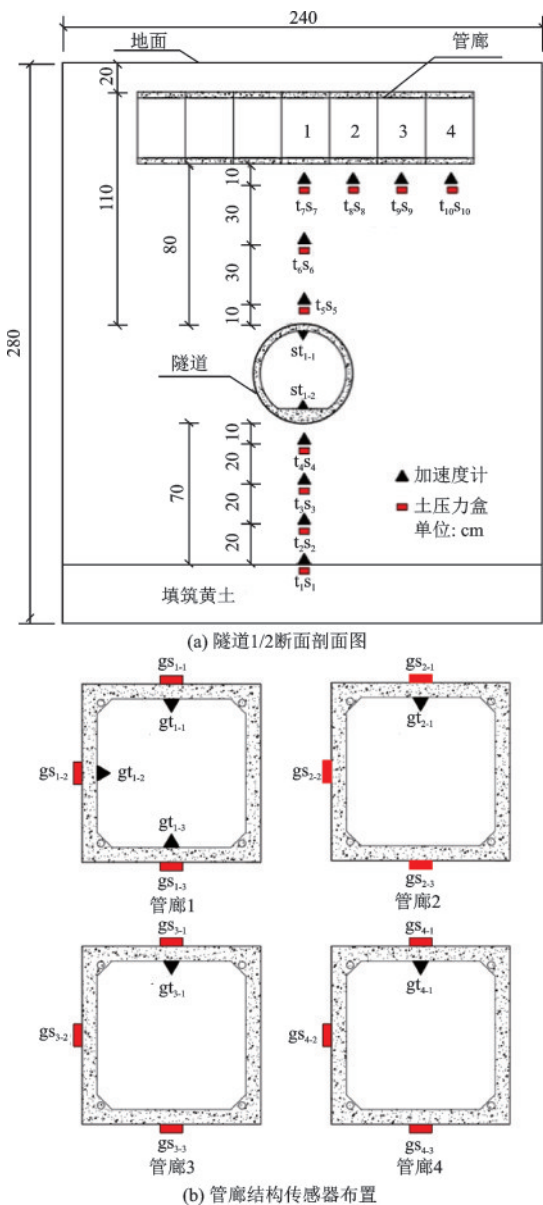


图 4 隧道断面及管廊结构传感器布置

Fig.4 Sensor layout of tunnel cross section and utility tunnel structure

1.3 加载方式及工况设计

列车荷载采用数定法进行模拟, 用激振电机产生的激振力模拟列车竖向动荷载^[20], 采用人工数定激振力模拟地铁振动荷载的函数表达式为^[21]:

$$F(t) = p_0 + p_1 \sin \omega_1 t + p_2 \sin \omega_2 t + p_3 \sin \omega_3 t$$

$$(p_i = m_0 \alpha_i \omega_i^2, \omega_i = 2\pi v/l) \quad (1)$$

式中, p_0 为列车静载; p_1, p_2, p_3 为荷载振幅; m_0 为列车簧下质量 (指悬吊质量, 车轮或车轨和其他直接连接其上的零件), 本文取 75 kg; α_i 为正矢; ω_i 为振动圆频率; v 为行车速度, 取 100 km/h (27.8 m/s); l 为振动波长。

根据英国轨道几何不平顺管理值中的控制标准, 适当选择较高标准, 分别取其不平顺振动波长和相应的矢高值为^[4]:

$$l_1 = 10 \text{ m}, \alpha_1 = 5 \text{ mm}$$

$$l_2 = 2 \text{ m}, \alpha_2 = 0.6 \text{ mm}$$

$$l_3 = 0.5 \text{ m}, \alpha_3 = 0.1 \text{ mm}$$

试验中动荷载工况峰值的设计参照目前已广泛应用的大型地铁列车, 即 B 型大运量地铁列车, 此类列车的轴重约 14 t。由式 (1) 可计算得到最大地铁振动荷载 F_{\max} , 继而根据集中荷载的相似关系得到模型振动力 F 。为研究不同地铁振动荷载作用下上部浅埋综合管廊及隧道的动力响应规律, 试验中动荷载的设置以 B 型车为基准逐次下调, 增加 900、808 和 700 N 荷载工况 (见表 2), 其中 808 N 的振动强度可等效于 C 型车的运行工况。

表 2 列车振动荷载

Table 2 Train vibration loads

列车型号	吨位/t	p_0 /kN	地铁原型最大动载 F_{\max} /kN	C_F	F /kN
B 型	14	137.2	138.48		1.025 8
(原型)	/	120.22	121.5	135	0.900
C 型	11	107.8	109.08		0.808
(等效)	/	93.22	94.5		0.700

试验采用的加载激励系统以激振力与激振频率可调节的激振电机为主体, 安装于地铁车辆模型中, 并将规格为 12 kg/m 的轻轨作为轨道布设于隧道底板, 承载地铁车辆模型。通过调整偏心振动电机的偏心距来模拟不同轴重地铁产生的动荷载, 激

振电机产生的激振力可由以下公式计算得出：

$$F_m = Gg\omega^2 r \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

式中, G 为偏心块质量; g 为重力加速度; r 为偏心块质心与回转轴的距离(即偏心距); ω 为电机旋转角速度, f 为频率,取50 Hz。激振电机出厂参数: ω 为50 Hz, r 为100%,满负荷能产生3 kN的激振力。模型试验中固定激励频率50 Hz,则加载激振力与相应的电机刻度盘百分比见表3。

表3 加载激励强度与电机刻度盘百分比

Table 3 Loading excitation intensity and percentage of motor dial

加载激励强度/N	激励频率/Hz	刻度盘百分比/%
1 025.8 (B型车原型)	50	34.2
900		30
808 (等效C型车)		26.9
700		23.3

2 试验结果分析

2.1 加速度动态响应分析

2.1.1 隧道结构加速度动态响应分析

由隧道顶内壁和道床加速度峰值随地铁振动荷载变化曲线(图5)可以看出,随着地铁振动荷载的增大,隧道壁顶、道床加速度峰值呈现出线性增加的趋势,并且两者的拟合直线近似平行。随着振动荷载的增加(700 N→1 025.8 N),隧道中轴线上顶部的加速度响应峰值与道床位置加速度响应峰值的比例由43.48%逐步增长至54.90%。1 025.8 N地铁振动荷载下,隧道顶部内壁加速度峰值为808 N工况下的1.80倍。表明地铁运行产生的振动主要影响隧道结构道床及以下,但其对隧道结构顶部的影响程度会随着地铁动荷载的增大而有所放大。

2.1.2 竖直方向土体加速度动力响应分析

为探究地铁运行产生的振动在隧道上、下方土体沿隧道横断面竖直方向上($t_1 \rightarrow t_7$)的加速度动态响应规律,以隧道顶内壁、道床附近的加速度峰值作为地铁振动传播初始值,作隧道上方与下方土体加速度响应峰值曲线如图6所示。由图6可以看出,隧道上、下方土体中加速度动态响应均呈现出先骤减后缓慢减小的规律。

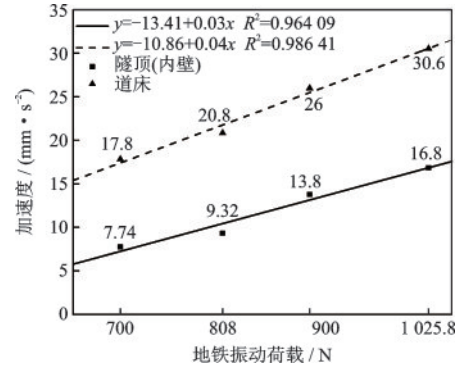


图5 隧道结构加速度响应峰值变化曲线图

Fig.5 Tunnel structure acceleration response peak variation curve

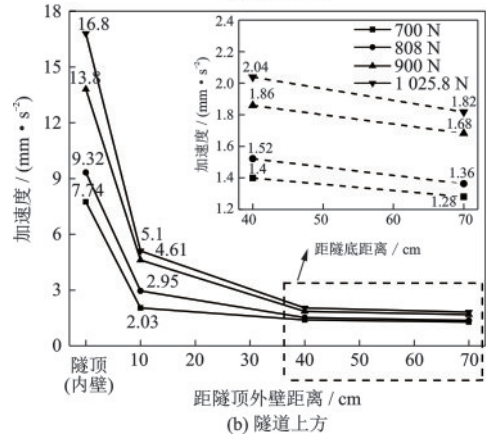
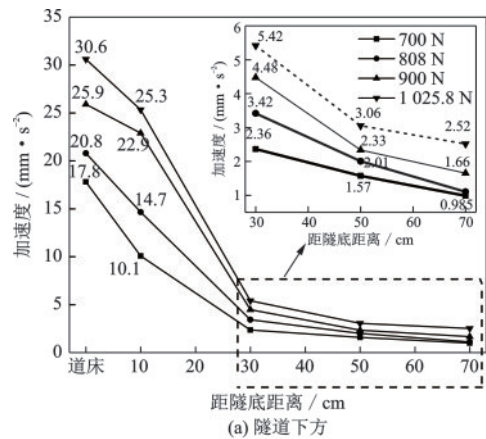


图6 隧道上、下方土体加速度峰值变化曲线图

Fig.6 Peak acceleration variation curves of soil mass above and below the tunnel

近隧道区域(原型1 m范围内),隧道下方土体的加速度峰值明显大于隧道上方土体,同样距离隧道外壁10 cm位置处,隧道下方土体加速度峰值约为隧道上方土体的5倍。振动由隧道顶部向上部土体传播的过程中,加速度高度响应区主要位于隧道上部40 cm(原型4 m)范围内,以1 025.8 N(B型列车)工况为例,当距隧道壁顶部距离由10 cm增至

40 cm 时, 衰减幅度为 3.06 mm/s², 40 cm 处土体的加速度响应峰值仅为隧道顶内壁的 12.14%; 当距隧道壁顶部距离由 40 cm 增至 70 cm 时, 衰减幅度则仅为 0.22 mm/s², 与隧道上部正交的管廊底板下方 10 cm 处(距隧道顶外壁 70 cm)加速度响应峰值约为隧道顶内壁的 10.83%。

2.1.3 管廊沿线下部土体加速度动态响应分析

管廊模型由 7 节长度为 20 cm 的单节管廊预制拼装组成, 为探究在地铁振动作用下上部正交综合管廊沿线下部土体的加速度动态响应规律, 沿管廊纵向沿线(每枚间隔 20 cm) 布设 4 枚加速度计($t_7 \rightarrow t_{10}$)于各节管廊底板下方 10 cm 处。图 7 为地铁振动荷载作用下管廊下方土体的加速度峰值直方图, 表 4 为各工况下加速度沿水平方向衰减拟合数据。

由图 7 和表 4 可知, 随着地铁振动荷载的增加, 地铁振动荷载与各部位土体加速度峰值呈线性增长, 并且相同振动荷载作用下管廊下方沿水平方向各部位加速度随着距管廊中心位置距离的增加也呈现出线性变化的趋势。以 1 025.8 N (B 型列车) 工况为例, 从中间管廊 1 \rightarrow 边缘管廊 4 的底板下方土体的加速度峰值由 1.82 mm/s² 逐渐衰减到 1.33 mm/s², 衰减幅度依次为 0.14、0.22 和 0.13 mm/s²。随着地铁振动强度的增加(700 N \rightarrow 1 025.8 N), 边缘管廊 4 下方土体的加速度峰值依次占中间管廊 1 下方土体加速度峰值的 70.31%、78.67%、71.42%、73.07%, 表明随着距中心管廊 1 距离的增加地铁振动荷载的作用影响虽然逐渐减弱, 但距中间管廊 1 距离 60 cm 的边缘管廊 4 仍会受到地铁振动的影响。

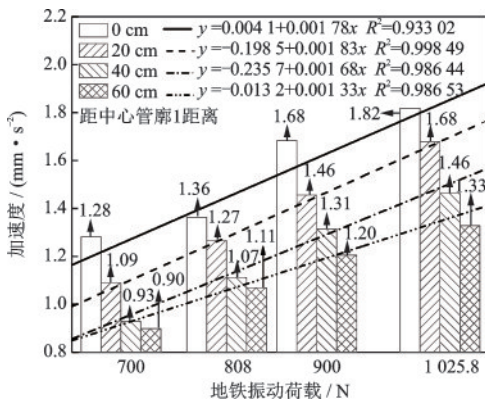


图 7 管廊下方土体加速度峰值随地铁振动荷载变化直方图

Fig.7 Histogram of peak acceleration in subsurface soil beneath the tunnel in response to varied subway vibration loads

表 4 各工况下加速度沿水平方向衰减拟合数据

Table 4 Fitting data of acceleration attenuation along horizontal direction under various working conditions

$y = ax + b$	700 N	808 N	900 N	1 025.8 N
a	-0.006 54	-0.005 18	-0.007 87	-0.008 42
b	1.245 48	1.358 08	1.650 68	1.824 8
R^2	0.925 66	0.960 84	0.972 01	0.991 72

2.1.4 管廊结构加速度动态响应分析

由图 8 可以看出随着地铁振动荷载的增加, 管廊结构的各部位加速度响应峰值呈线性增长的趋势, 并且管廊底板的加速度动态响应明显大于侧壁和顶板。与图 7 相比, 管廊结构加速度峰值比管廊下方 10 cm 处土体加速度峰值大, 可能是由于管廊底板附近反射波和折射波叠加产生了小范围振动放大的情况, 提高了管廊底板的加速度响应峰值。1 025.8 N (B 型列车) 工况下, 管廊与地铁隧道正交中心位置底板加速度峰值为 8.35 mm/s², 是底板的 37.24%, 而 808 N (等效 C 型列车) 工况下, 管廊 1 侧壁与顶板内壁加速度峰值分别为底板的 45.22% 和 30.04%。即地铁振动传播至上部管廊时, 管廊底板加速度响应最为显著, 沿侧壁、顶板依次衰减。1 025.8 N (B 型列车) 工况下, 地铁运行产生的振动对管廊 1 底板内壁的加速度动态响应响应是 808 N (等效 C 型列车) 的 1.26 倍。

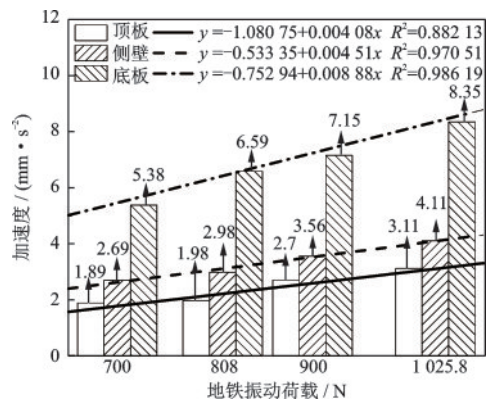


图 8 管廊 1 结构加速度峰值随地铁振动荷载变化直方图

Fig.8 Histogram of peak structural acceleration in tunnel 1 in response to varied subway vibration loads

2.2 土压力动态响应分析

2.2.1 竖直方向土体土压力动力响应分析

为探究地铁振动在隧道上、下方土体竖直方向

上($s_1 \rightarrow s_7$)的土压力动态响应规律,分别作隧道上方与隧道下方土体动土压力峰值变化直方图。由图9可知,隧道上、下方土体土压力峰值变化随着地铁振动荷载的增大近似呈线性增长的趋势。

图9(a)中,以1 025.8 N(B型列车)为例,隧道下方土体土压力峰值则由最初的5 517 Pa先骤减到1 315 Pa,然后衰减速度减缓,依次衰减到891和345 Pa,衰减幅度分别为4 202、424、546 Pa。即隧道下方土体动土压力基本呈现出先骤减后缓慢减小的趋势。而图9(b)中,隧道上方土体的动土压力在沿竖向传播的过程中随着距振源距离的增加逐渐减小。以1 025.8 N(B型列车)为例,距隧道壁顶部距离由10 cm增加到40 cm时,衰减幅度为85 Pa;距隧道壁顶部距离由40 cm增加到70 cm时,衰减幅度为62 Pa。并且距离隧道顶部70 cm(管廊1底板下方10 cm处)动土压力峰值为距隧道顶部外壁10 cm处动土压力峰值的68.78%,即动态土压力在隧道与其上部管廊垂直间距70 cm全段均有较明显的响应,表明地铁振动在70 cm厚土体的阻尼作用下并未衰减完全,对上部正交综合管廊仍会产生一定影响。

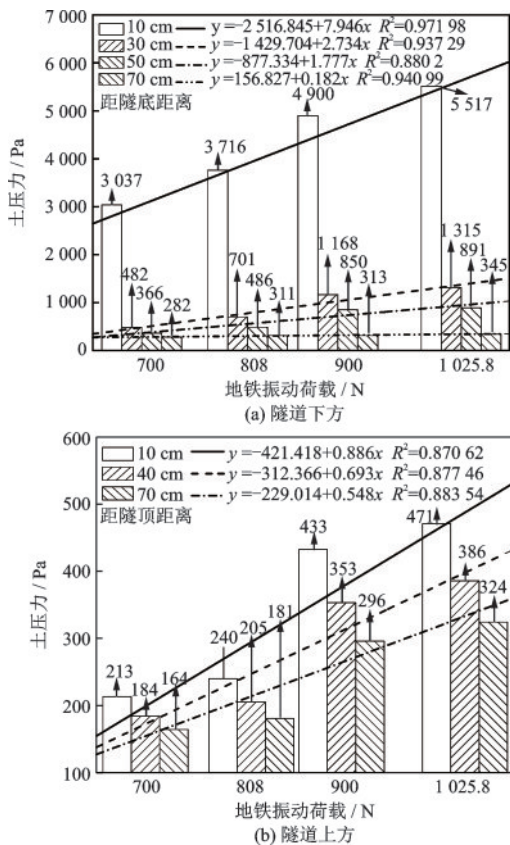


图9 隧道上、下方土体土压力峰值变化直方图

Fig.9 Histogram of peak soil pressure variation above and below the tunnel

2.2.2 管廊沿线下部土体土压力动态响应分析

土压力盒同样以中间管廊1底板与地铁隧道正交位置为起点,沿管廊纵向沿线(每枚间隔20 cm)布设4枚($s_7 \rightarrow s_{10}$)于各节管廊底板下方11 cm处。管廊下部土体土压力峰值变化直方图如图10所示。由图10可以看出,以1 025.8 N(B型列车)为例,随着距中心管廊1距离的增大,管廊下方10 cm处土体的动土压力由324 Pa逐渐衰减到64.1 Pa,衰减幅度依次为174、80.2和5.7 Pa,即管廊下方土体的动土压力呈现出先迅速减小后缓慢衰减的规律。并且边缘管廊4下方10 cm土体的动土压力峰值约为中间管廊1下方土体动土压力峰值的19.78%,表明随着距中心管廊1距离的增加地铁振动荷载的作用影响虽然逐渐减弱,但距离中间管廊60 cm的边缘管廊4仍会受到地铁振动的影响,这与管廊下方土体的加速度动态响应结果具有一致性。

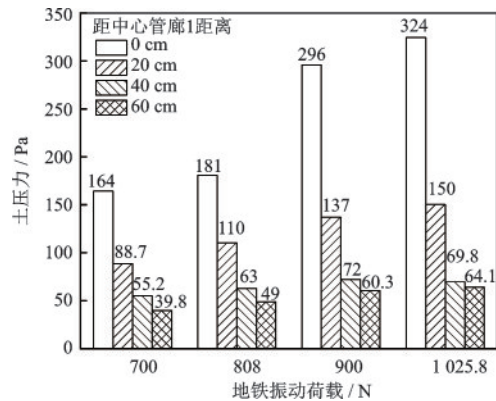


图10 管廊下部土体土压力峰值变化直方图

Fig.10 Histogram of peak variation of soil pressure in the lower part of utility tunnel

2.2.3 管廊与土接触土压力动态响应分析

由图11可知,管廊1(管廊与地铁隧道正交中心位置处管节设定为管廊1)顶、侧、底板外壁与土接触压力峰值随地铁振动荷载的增大表现出较好的线性关系,斜率可以代表接触土压力随地铁振动荷载的增长速率。在1 025.8 N和808 N工况下,振动影响下管廊1的顶板、侧壁、底板与土体接触压力峰值的相对比例关系(顶板:侧壁:底板)分别为0.69:0.85:1和0.58:0.78:1,即管廊在地铁振动荷载作用下底板与土接触压力最大,侧壁次之,顶板最小。表明地铁振动荷载作用下,振动在管廊底板与下部土体的动态相互作用强度最大,其次在管廊侧壁、顶板依次衰减传播。地铁车型为B型(1 025.8 N)时,管廊1底板外壁与土体的动态接触压力是C型(808N)的2.03倍。

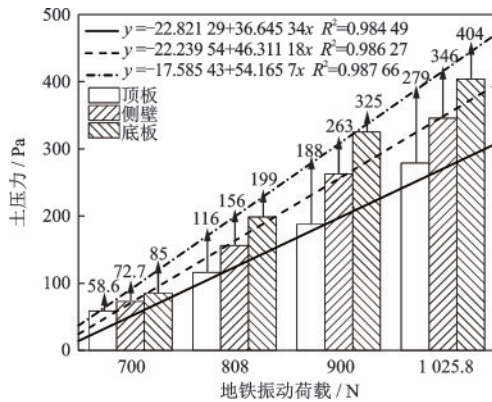


图 11 管廊 1-土接触土压力峰值变化直方图

Fig.11 Histogram of peak contact earth pressure variation between the outer wall of tunnel 1 and soil

3 结 论

通过构建地铁-黄土-管廊缩尺物理模型,采用半正弦波人工激励模拟地铁列车运行时产生的振动荷载,揭示了在地铁振动荷载作用下,黄土地基及地铁隧道上部正交综合管廊的加速度、土压力动态响应规律,结论如下:

(1)地铁运行时产生的振动沿竖向传播的过程中表现出先骤减后缓慢减小的规律,引起的加速度响应主要集中于隧道附近 40 cm(原型 4 m)范围内,而动态土压力则在隧道上部至综合管廊底板全段 80 cm(原型 8 m)范围内均有较为明显的响应。

(2)地铁振动传播至上部正交管廊后,管廊顶板、侧壁、底板均有较明显的响应,其中管廊底板动力响应最为强烈,管廊侧壁和顶板次之。顶板、侧壁和底板的加速度响应及其与周围土体的接触压力呈现出相对稳定的比例关系。

(3)上部正交管廊的加速度响应与地铁振动强度正相关,而管廊结构与周围土体的动态接触压力受地铁振动强度的影响更为显著。振动激励强度提高至 1 025.8 N 后,上部正交管廊中心位置底板部位的加速度响应及其与土体动态接触压力峰值分别达到 808 N 工况的 1.26 倍和 2.03 倍。

参考文献:

[1] 胡斌,王新刚,冯晓腊,等.武汉地铁某深基坑开挖对周边高架桥影响的分析预测与数值模拟研究[J].岩土工程学报,2014,36(增2):368-373.
Hu B, Wang X G, Feng X L, et al. Analysis, predic-

tion and numerical simulation of the influence of a deep foundation pit excavation on surrounding viaduct in Wuhan Metro [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (Sup2) : 368-373. (in Chinese)

[2] 何忠明,蔡军,王利军,等.地铁隧道爆破开挖引起地表位移沉降的数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(9): 3496-3502.
He Z M, Cai J, Wang L J, et al. Numerical simulation of surface displacement and settlement caused by blasting excavation of subway tunnel [J] Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2015, 46 (9): 3496-3502. (in Chinese)

[3] 董霜,朱元清.地铁振动环境及对建筑影响的研究概况[J].噪声与振动控制,2004,24(2):4.
Dong Sh, Zhu Y Q. Research on subway vibration environment and its influence on buildings [J]. Noise and Vibration Control, 2004, 24(2):4. (in Chinese)

[4] 陈国兴,苏晓梅,陈斌.地铁列车运行引起的环境振动评价[J].防灾减灾工程学报,2008,28(1): 70-74.
Chen G X, Su X M, Chen B. Evaluation of environmental vibration caused by subway train operation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(1): 70-74. (in Chinese)

[5] 申跃奎.地铁激励下振动的传播规律及建筑物隔振减振研究[D].上海:同济大学,2007.
Shen Y K. Study on vibration propagation under subway excitation and vibration isolation of buildings [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

[6] 黄强,万灵,刘千斌,等.软土隧道地铁振动效应现场实测与数值分析[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(3): 435-441.
Huang Q, Wan L, Liu Q B, et al. Field measurement and numerical analysis of subway vibration effect in soft soil tunnel [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 435-441. (in Chinese)

[7] Avci O, Bhargava A, Nikitas N, et al. Vibration annoyance assessment of train induced excitations from tunnels embedded in rock[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711(C): 1-11.

[8] Mouzakis C, Vogiatzis K, Zafiropoulou V. Assessing subway network ground borne noise and vibration using transfer function from tunnel wall to soil surface measured by muck train operation [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 650(2): 2888-2896.

[9] 石文博,缪林昌,陈艺南,等.软土层埋深对于地铁振动特性及传播影响规律研究[J].土木工程学报,2015,48(增2):30-35.

- Shi W B, Miao L C, Chen Y N, et al. Research on the influence of the buried depth of soft soil on the vibration characteristics and propagation of subway [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup2): 30-35. (in Chinese)
- [10] Xu R, Li X, Yang W, et al. Field measurement and research on environmental vibration due to subway systems: A case study in eastern China[J]. Sustainability, 2019, 11(23): 1-12.
- [11] 张谦, 陈文化. 地铁列车出、进站加、减速的轴向激励引起出平面振动[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 96-101, 127.
Zhang Q, Chen W H. Exiting plane vibration caused by axial excitation of acceleration and deceleration of subway train exiting and incoming station [J]. Vibration and Shock, 2016, 35(24): 96-101, 127. (in Chinese)
- [12] 马晓磊, 巴振宁, 高愈辉, 等. 滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增2): 177-180.
Ma X L, Ba Zh N, Gao Y H, et al. Analysis of the impact of subway operation on the vibration of buildings along the coastal soft soil area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup2): 177-180. (in Chinese)
- [13] Xin T, Wang S, Gao L, et al. Field measurement of rail corrugation influence on environmental noise and vibration: A case study in China [J]. Measurement, 2020, 164: 108084.
- [14] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 59-69.
Feng Q S, Wang Z Y, Liu Q M, et al. Vibration characteristics of the superstructure of subway depot under excitation of dual vibration sources [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 59-69. (in Chinese)
- [15] 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 M L, Jia X P, Yu J Q. Analysis of ground vibration measurement and transmission law caused by metro operation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 282-288. (in Chinese)
- [16] 宋波, 王希慧, 李杨, 等. 地铁振动对邻近砖混结构住宅影响研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(增2): 48-53.
Song B, Wang X H, Li Y, et al. Study on the influence of subway vibration on neighboring brick-concrete houses [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(Sup2): 48-53. (in Chinese)
- [17] Zhong H, Qu D, Lin G, et al. Application of sensor networks to the measurement of subway-induced ground-borne vibration near the station [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 2014(11): 1-10.
- [18] Dapeng Z, Liangkai Q, Yundian L. Analytical study on dynamic response of deep foundation pit support structure under the action of subway train vibration load: a case study of deep foundation pit of the New Museum Near Metro Line 2 in Chengdu, China [J]. Shock and Vibration, 2015, 2015(PT.4): 1-10.
- [19] 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分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 33-39.
Wang T Y, Ding J M, Lou M L, et al. Analysis of propagation law of building vibration caused by metro operation [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 33-39. (in Chinese)
- [20] 潘昌实, Pande G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984(4): 19-28, 18.
Pan C S, Pande G N. Preliminary finite element analysis of train dynamic load response in loess tunnel [J]. Journal of Civil Engineering, 1984(4): 19-28, 18. (in Chinese)
- [21] 黄庆祥. 地铁列车振动荷载引起的隧道动力响应分析[J]. 路基工程, 2018(4): 161-165.
Huang Q X. Dynamic response analysis of tunnel caused by vibration load of metro train [J]. Subgrade Engineering, 2018(4): 161-165. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)