

地铁列车振动荷载对下叠并行新建城际铁路盾构隧道的动力响应分析*

加武荣

(中铁二十局集团有限公司, 710021, 西安//高级工程师)

摘 要 以新建佛莞城际铁路盾构隧道与广州地铁 3 号线明挖段矩形隧道交叠并行工程为依托, 研究地铁列车通过明挖隧道时产生的振动荷载对下部新建盾构隧道衬砌结构的动力响应, 并对不同列车振动荷载下新建盾构隧道衬砌结构的动应力进行了分析。使用激振力函数法模拟地铁列车振动荷载, 选取下部新建盾构隧道典型监测断面的监测点来研究在地铁列车振动荷载作用下衬砌结构的振动加速度、应力和竖向位移响应特性。结果表明: 轨道结构质量越差, 列车运行速度越快, 车体质量越大, 列车振动荷载的幅值也相应增大; 在地铁列车振动荷载作用下新建盾构隧道衬砌结构存在着明显的动力影响区; 新建盾构隧道衬砌管片竖向位移曲线呈“W”形, 且拱顶处的竖向位移幅值最大; 随着地铁列车运行速度加快, 新建盾构隧道的竖向沉降亦随之增大, 地铁列车运行速度每增加 30 km/h, 隧道衬砌结构的竖向沉降平均增加 2.66%。

关键词 城际铁路; 盾构隧道; 地铁列车振动荷载; 动力响应

中图分类号 U451+.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.019

Dynamic Response Analysis of Train Vibration Load to the Stacked Parallel Railway Shield Tunnel of the New Intercity Railway

JIA Wurong

Abstract Based on the overlapping project of new Foshan-Dongguan Intercity Railway shield tunnel and Guangzhou metro Line 3 open-cut rectangular tunnel, the dynamic response of traffic load generated by metro train in passing through the open-cut tunnel to the lining structure of the new tunnel in the lower part is studied, and the dynamic stress of the new tunnel under different traffic loads is discussed. Then, the excitation force function method is used to simulate the metro traffic load, the response characteristics of vibration acceleration, stress and vertical displacement of the lining structure under

different traffic loads are studied by taking typical monitoring sections of new shield tunnel in the lower part as the monitoring points. The results show that the worse the track quality condition, the faster the train speed and the greater car-body mass will result in the larger amplitude of the train vibration load. There is an obvious dynamic influence area under the vibration load of metro train; the vertical displacement curve of the new tunnel section forms the shape of "W", and the vertical displacement amplitude at the vault is the largest. With the acceleration of the train speed, the vertical settlement of the new tunnel also increases. Every 30 km/h increase in train operation speed will result in the settlement increase of the tunnel lining structure by 2.66% on average.

Key words intercity railway; shield tunnel; metro train vibration load; dynamic response

Author's address China Railway 20th Bureau Group Corporation, 710021, Xi'an, China

随着城市立体振动系统的发展, 大量的城市地铁、城市快速路和城际铁路隧道投入建设。在施工过程中, 难免会遇到隧道之间交叠穿越或上下并行的工况。因此, 既有隧道所产生的振动荷载对下穿新建隧道衬砌结构的影响不容忽视。

目前, 关于列车振动荷载对新建隧道衬砌结构的动力影响研究较浅, 特别是对明挖隧道列车振动荷载作用下下穿的城际铁路隧道的研究成果甚少。文献[1]通过现场试验与频谱分析等方法对地铁列车振动引起的轨道振动响应进行了分析, 并给出了相应的振动加速度计算公式; 文献[2]采用二维数值模型, 对地铁列车振动荷载下平行穿越隧道结构的振动响应进行了分析, 得到了振动荷载对并行隧道结构的动力响应规律; 文献[3]采用三维模型对上海轨道振动 3 号线盾构穿越既有隧道工程进行了

* 国家自然科学基金项目(41172238); 中铁二十局集团有限公司技术开发课题(CR2005-佛莞-KJYF-SJ2016-001)

分析;文献[4]依托武汉地铁 2 号线和 4 号线工程实例,分析了在不同埋深、不同净距与不同列车荷载作用下紧邻平行多孔隧道的振动特性。

本文依托佛莞城际铁路(以下简为“佛莞线”)隧道下叠并行运营中的广州地铁 3 号线(以下简为“3 号线”)明挖段工程,利用数值模拟软件,建立了隧道下叠并行的三维有限元模型;研究了新建隧道下叠并行运营地铁工程中,地铁列车振动荷载对新建盾构隧道衬砌结构的影响,并通过改变列车运行速度来研究不同振动荷载对新建盾构隧道衬砌结构竖向位移的影响。

1 工程概况

佛莞线位于我国粤港澳大湾区的中南部,起点位于广州南站,终点位于东莞西站,横穿整个粤港澳大湾区经济最繁荣的地区。该城际铁路某区间盾构隧道分为左、右两线,均采用土压平衡盾构机掘进。工程场地为丘坡地貌,地势相对开阔、平坦,多为旱地及村庄,局部为开挖鱼塘,地面标高为 12.39~24.09 m,相对高差为 11.7 m。盾构区间沿线地层大致分成素填土层、可塑状粉质黏土、全风化二长花岗岩和中风化二长花岗岩。盾构隧道需穿越不同比例的土层、硬岩的复合地层(见图 1)。

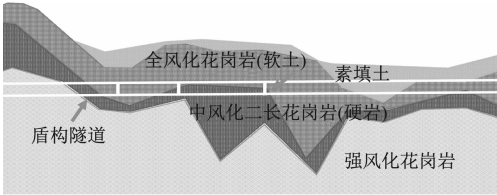


图 1 佛莞线某区间盾构隧道地质断面图
Fig.1 Geological section of a shield interval on section tunnel of Foshan-Dongguan Intercity Railway

2 三维数值模拟分析

2.1 计算区域选取

本文以佛莞线隧道在里程 YDK8+350—YDK8+410 处下叠并行 3 号线明挖隧道工程为计算范围,结合现场勘查资料,采用有限元计算软件构建三维下叠并行隧道计算模型。新建佛莞线隧道与 3 号线明挖隧道的位置关系和地质条件如图 2 所示。

考虑到有限元模型的计算精度和计算效率,三维模型的几何尺寸取 88 m(横向)×45 m(竖向)×44 m(纵向)。取新建佛莞线隧道长 44 m;管片环宽

1.6 m、厚 400 mm,管片外直径为 8.5 m;既有 3 号线明挖段隧道顶部覆土厚 9 m。模型采用实体单元 C3D8R,共计 14 520 个单元。建立的隧道三维有限元分析模型如图 3 所示。

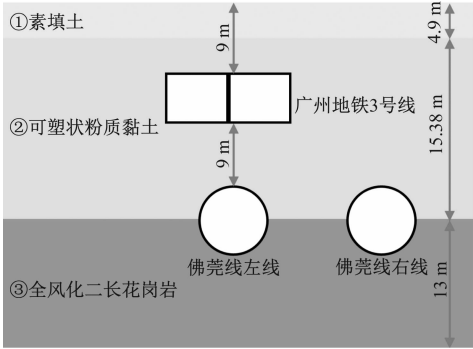
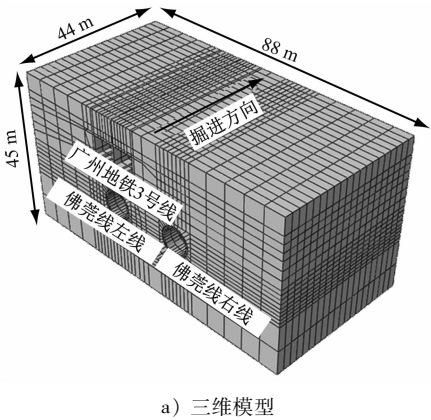
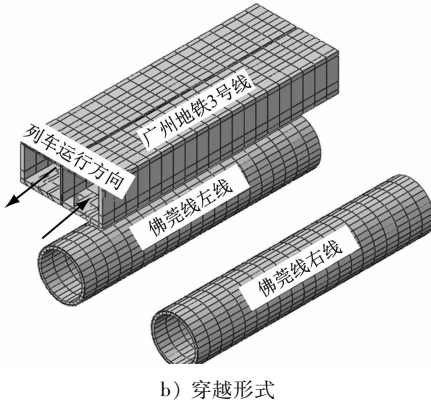


图 2 新建佛莞线隧道与地铁 3 号线明挖隧道的位置关系
Fig.2 Location relationship between the new Foshan-Dongguan Intercity Railway tunnel and the open-cut tunnel of metro Line 3



a) 三维模型



b) 穿越形式

图 3 新建佛莞线隧道下叠并行 3 号线明挖隧道三维有限元模型

Fig.3 3D finite element model of the new Foshan-Dongguan Intercity Railway tunnel stacked parallel the open-cut tunnel of metro Line 3

2.2 材料的物理力学参数及接触关系

在数值计算模型中,地层本构模型采用摩尔-库伦准则。混凝土预制管片、轨道结构,以及模型中其他材料均考虑为线弹性关系。根据文献与地勘报告^[5-6],模型中材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of materials			
材料	体积质量/(kg/m ³)	动弹性模量/GPa	泊松比
素填土	1 820	0.10	0.35
可塑状粉质黏土	1 850	0.15	0.33
全风化花岗岩	1 960	0.21	0.29
衬砌管片	2 200	46.15	0.20

文献[7]提出道床与衬砌管片的变形为共同变形,据此其接触关系可采用 Tie 约束。考虑到衬砌与衬砌之间为螺栓连接,故可将衬砌纵向刚度乘以 0.85 的折减系数,衬砌间接触采用 Hard 接触。

2.3 动力边界条件的确定

在进行有限元模拟分析时,模型的边界会导致振动波在边界面发生反射,从而使得反弹振动波和原有振动波的叠交,进而影响计算结果的准确性。因此,在数值模拟分析时需要考虑到波的衰减这个因素,在模型边界上设置人工黏弹性边界^[8-10]以消除散射波的反射。

2.4 阻尼系数及积分时间步长

阻尼系数 α 、 β 可通过建立的三维有限元模型计算得到。在模型中,将分析步的类型选为频率分析,并使该模型在自重作用下达到平衡,从而进行有限元计算。采用 Lanczos 法,通过正交相似变换提取计算结果中的前 2 阶振型,得到角频率 ω_1 为 11.123 rad/s、 ω_2 为 11.169 rad/s,瑞利阻尼系数 α 为 0.557 3、 β 为 0.004 5。

根据隐式积分计算,得到最大固有周期 T_{\max} 为 0.565 s。模型中的积分时间步长 Δt 为 0.005 s。

3 地铁列车振动荷载的计算

3.1 地铁列车振动荷载的计算方法

地铁列车振动荷载的大小主要由车辆自重、车轮及轨道结构等因素决定,本文采用激振力函数法来计算列车振动荷载。激振力函数法^[11-12]中,列车的振动荷载由车轮静载和车轮等自身因素导致的振动荷载、车轮磨损偏心对轨道结构产生的周期性振动荷载,以及由施工与轨道保养不及时等造成的

列车强迫振动荷载等组成。地铁列车振动荷载 $F(t)$ 的计算公式为:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega_1 t) + P_2 \sin(\omega_2 t) + P_3 \sin(\omega_3 t)$$
(1)

式中:

P_0 ——车轮静载;

P_1 、 P_2 、 P_3 ——分别为行车平顺性、作用到线路上的动力附加荷载及轨道波形磨耗等 3 种控制条件下的列车振动荷载幅值;

ω_i ——列车运行速度 v 对应的不平顺振动波长的圆频率, $\omega_i = 2\pi v/L_i$ ($i = 1, 2, 3$), L_i 为典型波长;

t ——时间。

其相应的列车振动荷载幅值 P_i 为:

$$P_i = M_0 \alpha_i \omega_i^2$$
(2)

式中:

M_0 ——列车簧下质量;

α_i ——典型矢高,其取值源自 BS EN 61373—1999 Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests(见表 2)。

表 2 BS EN 61373—1999 中轨道几何不平顺管理值

Tab.2 Track geometric irregularity management values of BS EN 61373—1999		
控制条件	L_i /m	α_i /mm
行车平顺性($i = 1$)	50.00	16.000
	20.00	9.000
	10.00	3.500
	5.00	2.500
作用到线路上的动力附加荷载($i = 2$)	2.00	0.400
	1.00	0.300
轨道波形磨耗($i = 3$)	0.50	0.080
	0.05	0.005

3 号线列车采用 6 节编组 B 型车,车辆轴重为 14 t, M_0 为 750 kg;列车长约 120 m、宽 2.8 m; v 取 72 km/h。根据表 2 中的轨道几何不平顺管理值, $L_1 = 10.00$ m, $\alpha_1 = 3.50$ mm; $L_2 = 2.00$ m, $\alpha_2 = 0.40$ mm; $L_3 = 0.50$ m, $\alpha_3 = 0.08$ mm。

根据上述波长、矢高,计算得到的相应参数取值如表 3 所示。将表 3 中的结果代入式(1),得到列车单边轮振动荷载 $F(t)$ 为:

$$F(t) = 7 \times 104 + 978.28 \sin(12.57 t) + 2\,795.07 \sin(62.83 t) + 8\,944.23 \sin(251.33 t)$$
(3)

由根据式(3)绘制的地铁列车振动荷载时程曲

表 3 激振力函数法计算参数取值

Tab.3 Calculation parameters of excitation force function method

控制条件	M_0/kg	$v/(\text{km/h})$	L_i/m	α_i/mm	ω/Hz	P_i/N
行车平顺性($i=1$)	1 770	72	10.0	3.50	12.57	978.28
作用到线路上的动力附加荷载($i=2$)	1 770	72	2.0	0.40	62.83	2 795.07
轨道波形磨耗($i=3$)	1 770	72	0.5	0.08	251.33	8 944.23

线(见图 4)可知,地铁列车振动荷载符合动力荷载的状态,且该荷载在 63~87 kN 范围内波动。

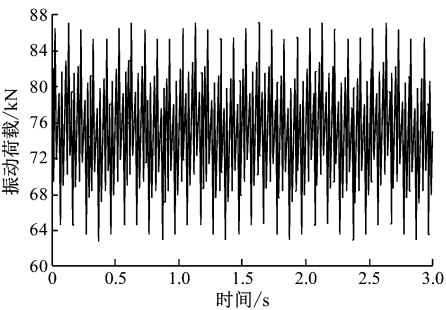


图 4 列车以 72 km/h 行驶时的振动荷载时程曲线
Fig.4 Vibration load curve of a train running at 72 km/h

3.2 地铁列车振动荷载的施加

本文采用赋值幅值函数^[13]的方法实现对轨道结构施加列车振动荷载。模型中,3 号线长 44 m,将其分成 3 段。分别在 0~1 s、1~2 s、2~3 s 时对第 1、第 2、第 3 段轨道结构施加列车振动荷载。

4 计算结果分析

4.1 监测断面选取

对新建广佛城际铁路隧道(以下简为“新建盾构隧道”)盾构区间衬砌结构进行动力响应分析时,考虑到模型的对称性,在该盾构区间隧道中选取 3 个典型监测断面,在每个断面上分别选取拱顶、左拱腰、右拱腰和拱底 4 个监测点(分别为 a、b、c、d)。需注意,由于新建盾构隧道右线距离上方地铁列车振动荷载较远,故本文仅选取左线进行分析。其中,断面 1 位于新建盾构隧道的出发端口,断面 2 位于中间位置,断面 3 位于到达端口。各断面和监测点的分布如图 5 所示。

4.2 竖向振动加速度响应分析

由新建盾构隧道 3 个典型监测断面上各测点的振动加速度时程曲线(见图 6)可知,各典型监测断面上地铁列车振动荷载作用最为强烈的时间段有 3 个,且 3 个时间段均为上方 3 号线列车通过的时间节点;新建盾构隧道左线拱顶直接受到地铁列车振

动荷载的作用,最大振动加速度幅值为 0.16 m/s²;对比同一断面不同测点的振动加速度幅值发现,拱顶振动加速度幅值>拱腰振动加速度幅值>拱底振动加速度幅值。由此可见,新建盾构隧道与地铁列车振动荷载越近,其振动加速度幅值越为明显。同时考虑到隧道衬砌结构的整体性,当列车振动荷载消失后,隧道衬砌结构将继续振动一段时间后会趋于停止,在此过程中同一断面各测点的振动加速度衰减速度和幅值较为接近。

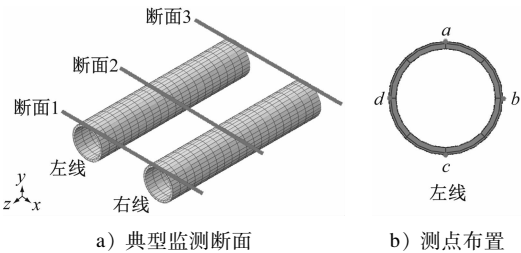


图 5 新建盾构隧道典型监测断面和测点布置图
Fig.5 Layout of typical monitoring sections and points of the new shield tunnel

4.3 竖向位移响应分析

为了更好地分析列车振动荷载对新建盾构隧道不同断面、不同位置衬砌结构的变形响应规律,分别绘制新建盾构隧道左线各断面不同测点的位移时程曲线,如图 7 所示。由图 7 可知,新建盾构隧道的拱腰和拱底竖向位移远小于拱顶的竖向位移。这是由于拱底和拱腰的监测点距地铁列车振动荷载的直线距离相对较远,且地铁列车振动荷载通过振动波影响新建盾构隧道时,拱底因受到的振动波缺乏传播介质,故受其影响十分有限;同时亦发现当列车振动荷载通过各监测断面时,该断面衬砌结构的竖向位移会突然增大,说明拱底和拱腰的竖向变形与地铁列车振动荷载有直接关系;同一隧道断面各测点的振动变形十分相似。

提取新建盾构隧道典型监测断面不同测点衬砌结构的竖向位移,并绘制其最大竖向位移曲线(见图 8)。由图 8 可知,新建盾构隧道下叠并行既有隧道时,既有隧道的列车振动荷载将对新建盾构

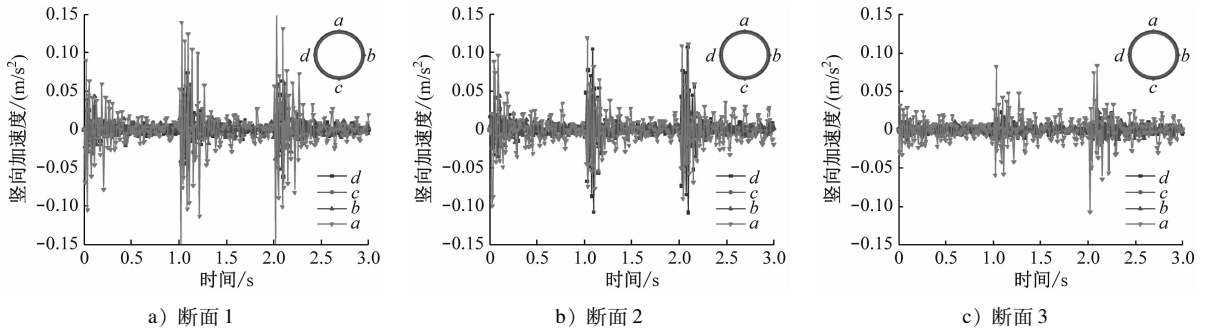


图6 新建盾构隧道典型监测断面振动加速度时程曲线

Fig. 6 Vibration acceleration time history curve of typical monitoring sections of the new shield tunnel

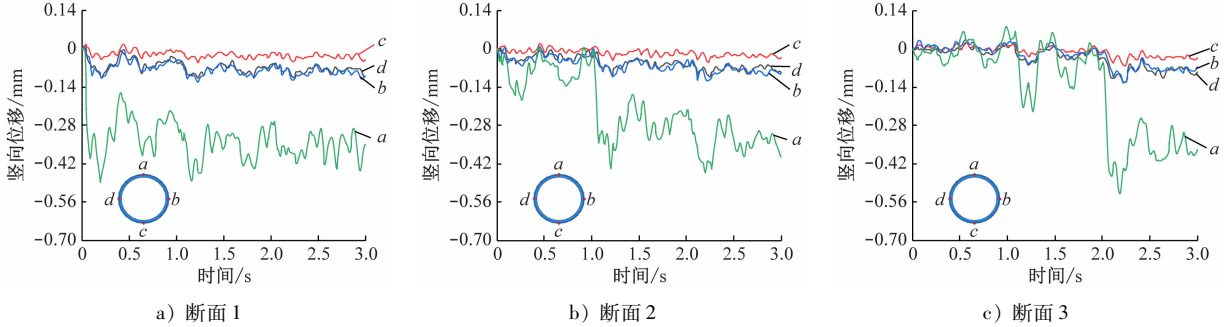


图7 新建盾构隧道典型监测断面各测点位移时程曲线

Fig. 7 Displacement time history curve of each measuring point on typical monitoring sections of the new shield tunnel

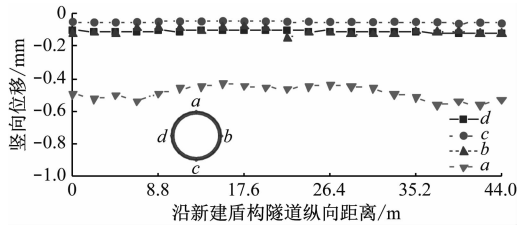


图8 新建盾构隧道各测点沿隧道纵向最大竖向位移曲线

Fig. 8 Maximum vertical displacement curve of each measuring point along the longitudinal direction of the new shield tunnel

隧道的衬砌结构产生影响;新建盾构隧道各典型监测断面拱顶衬砌结构竖向位移幅值远大于拱腰和拱底,拱底衬砌结构的竖向位移约为拱顶的1/10,这与隧道衬砌结构在列车振动荷载作用下的竖向振动加速度、应力的响应规律基本一致。

4.4 不同列车振动荷载下新建盾构隧道竖向变形响应分析

在本文计算的基础上,改变3号线列车运行速度,来研究不同地铁列车运行速度下产生的振动荷载对新建盾构隧道竖向位移的影响。分别取列车运行速度为40 km/h、70 km/h和100 km/h等3种情况进行研究。根据前文的研究结果,考虑结构的对称性,拱腰处仅取监测点b进行分析。提取新建

盾构隧道左线纵向各监测点的最大竖向位移,如图9所示。由图9可知,各个监测点沿隧道左线的最大竖向位移曲线呈“W”形,竖向位移均为负值,新

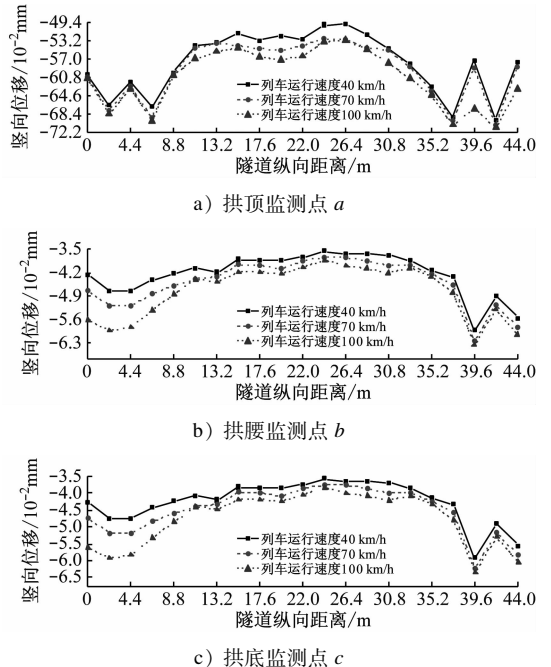


图9 新建盾构隧道各测点沿隧道纵向最大竖向位移曲线

Fig. 9 Maximum vertical displacement curve of each measuring point along the longitudinal direction of the new shield tunnel

建盾构隧道两侧的竖向沉降大于隧道中部的竖向沉降,各监测点的最大竖向沉降均出现在列车运行速度为 100 km/h 时。

综合对比不同列车振动荷载作用下新建盾构隧道衬砌结构的竖向位移曲线可以发现,不论列车振动荷载的大小,各典型监测断面中拱顶的竖向位移幅值 > 拱腰的竖向位移幅值 > 拱底的竖向位移幅值,其中拱腰和拱底的竖向位移相近,且远远小于拱顶的竖向位移。同时亦发现无论在新建盾构隧道的拱顶、拱腰或拱底,列车振动荷载的速度越快,监测点的竖向沉降越大。如在拱顶监测点,列车运行速度为 40 km/h 时所造成的竖向沉降比 100 km/h 所造成的竖向沉降最大将增大 17.36%,平均比列车运行速度较慢时增大 5.38%;列车运行速度每增加 30 km/h 时,新建盾构隧道的竖向沉降将增大 2.66%,这证明不同的列车振动荷载对下部新建盾构隧道衬砌结构的竖向位移有不同的影响。列车运行速度越快,列车振动荷载幅值越大,新建盾构隧道的竖向沉降越大,这与本文中由激振力函数公式所反映的趋势相同。因此,在新建盾构隧道下叠并行既有运营地铁隧道施工过程中,应降低列车运行速度以减轻其对新建盾构隧道的动力影响,保证施工的安全性。

5 结论

1) 由激振力函数法所求得的地铁列车振动荷载函数可知,轨道结构越差(轨道不平顺、基础沉降大)、列车运行速度越快,车辆质量越大时,列车振动荷载幅值也越大,对下方新建盾构隧道衬砌结构所产生的动力影响也越大。

2) 地铁列车行驶过程中,当列车与下方新建盾构隧道典型监测断面间的距离越接近时,新建盾构隧道衬砌结构的动力效应越明显。这证明对于某一特定的监测断面而言,存在列车振动荷载作用下明显的衬砌结构动力响应影响区。

3) 在地铁列车振动荷载的作用下,新建盾构隧道拱顶的竖向振动加速度和竖向应力最大,拱腰次之,拱底最小。

4) 地铁列车振动荷载作用下新建盾构隧道衬砌管片的竖向位移时程曲线呈“W”形,证明在列车振动荷载作用下衬砌管片的横向亦发生了变形。同时拱顶的竖向位移远大于拱腰和拱底的竖向位移,这与衬砌结构的振动加速度及竖向应力所反映

的受力相符。

5) 不同列车运行速度所产生的振动荷载对下方新建盾构隧道的竖向位移产生不同的影响。列车运行速度越快,新建盾构隧道衬砌结构的竖向沉降越大;列车运行速度每增加 30 km/h,新建盾构隧道衬砌结构的竖向沉降最大将增大 17.36%,平均将增大 2.66%。

参考文献

- [1] 蔡向辉. 盾构下穿引起的既有线路轨道变形与列车运营作用研究[J]. 铁道标准设计, 2016(7): 30.
CAI Xianghui. Research on existed track deformation induced by down-traversing shield tunnel and interactive influence on high-speed train[J]. Railway Standard Design, 2016(7): 30.
- [2] 白冰, 李春峰. 地铁列车振动作用下近距离平行隧道的弹塑性动力响应[J]. 岩土力学, 2009(1): 123.
BAI Bing, LI Chunfeng. Elastoplastic dynamic responses of close parallel metro tunnels to vibration loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(1): 123.
- [3] 陈卫军, 张璞. 列车动载作用下交叠隧道动力响应数值模拟[J]. 岩土力学, 2002(6): 770.
CHEN Weijun, ZHANG Pu. Numerical simulation of dynamic response of overlap tunnels in close proximity due to train's vibrating load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002(6): 770.
- [4] 于艳丽, 徐海清, 李振伟, 等. 列车荷载作用下紧邻平行多孔隧道的环境振动分析[J]. 岩土工程学报, 2011(11): 1801.
YU Yanli, XU Haiqing, LI Zhenwei, et al. Ambient vibration analysis of adjacent parallel multi-tunnels under train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(11): 1801.
- [5] 林志鹏. 列车荷载作用下重叠隧道结构动力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016(9): 1789.
LIN Zhipeng. Analysis on dynamic response of overlapped tunnel structure under vibration load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016(9): 1789.
- [6] 李磊. 多线叠交盾构施工及列车荷载作用下既有隧道的变形控制研究[D]. 上海: 上海大学, 2015.
LI Lei. Deformation control of existing tunnels under multi-line overlapped shield tunneling and moving train loads[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.
- [7] 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(5): 33.
WANG Tianyou, DING Jiemin, LOU Menglin, et al. Subway-induced building vibration and its propagation[J]. China Civil Engineering Journal, 2009(5): 33.
- [8] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007(12): 31.

(下转第 107 页)

- BU Xingwei, ZENG Bocun, WAN Feiming, et al. Research on the start-up construction technology of shield tunnels under narrow space conditions[J]. Tunnel Construction, 2018(S2):292.
- [3] 李阳,杨红. 工厂法沉管预制混凝土泵送施工技术[J]. 中国港湾建设,2015(5):56.
- LI Yang, YANG Hong. Pumping construction technology of factory-method sunk pipe precast concrete[J]. China Harbour Engineering, 2015(5):56.
- [4] 魏春春,杨盼龙,张保卫. 超高泵送混凝土施工技术在超高层建筑的应用[J]. 中国港湾建设,2019(7):33.
- WEI Chunchun, YANG Panlong, ZHANG Baowei. The application of ultra-high pumping concrete construction technology in ultra-high-rise building projects[J]. China Harbour Engineering, 2019(7):33.
- [5] 曾华波. 复合地层土压平衡盾构施工应用技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- ZENG Huabo. Research on application technology of earth pressure balance shield construction in composite ground[D]. Nanjing: Hehai University, 2006.
- [6] 杨洪希,黄伟,王树英,等. 粉质黏土地层土压平衡盾构渣土改良技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020(2):76.
- YANG Hongxi, HUANG Wei, WANG Shuying, et al. Soil pressure balance shield muck improvement technology in silty clay [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020(2):76.
- [7] 赵则超. 软土地区面板式盾构在硬粘土中施工技术[J]. 天津建设科技,2015(2):60.
- ZHAO Zechao. Construction technology of panel shield in soft soil area in hard clay[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2015(2):60.
- [8] 徐前卫,唐卓华,朱合华,等. 盾构隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 岩土工程学报,2017(7):1234.
- XU Qianwei, TANG Zhuohua, ZHU Hehua, et al. Research on ultimate support pressure of shield tunnel excavation face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017(7):1234.
- [9] 徐冲. 砂卵石地层泥水平衡盾构隧道掘进参数控制[J]. 铁道建筑,2019(2):94.
- XU Chong. Parameter control of mud-water balance shield tunnel excavation in sandy gravel stratum [J]. Railway Engineering, 2019(2):94.
- [10] 占传忠. 复合地层盾构的适应性及掘进参数的关联性分析[J]. 中国煤炭地质,2018(增刊1):97.
- ZHAN Chuanzhong. Adaptability of shield tunneling in composite strata and correlation analysis of tunneling parameters[J]. Coal Geology of China, 2018(S1):97.
- (收稿日期:2020-05-28)
- (上接第101页)
- GU Yin, LIU Jingbo, DU Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element [J]. Engineering Mechanics, 2007(12):31.
- [9] 于鹤然,周晓军. 高速列车动荷载作用下立体交叉铁路隧道动力响应研究[J]. 铁道学报, 2015(6):103.
- YU Heran, ZHOU Xiaojun. Study on dynamic response of grade-separated railway tunnels under high-speed train induced dynamic load[J]. Journal of the China Railway Society, 2015(6):103.
- [10] 张曦,唐益群,周念清,等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究 [J]. 土木工程学报, 2007(2):85.
- ZHANG Xi, TANG Yiqun, ZHOU Nianqing, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007(2):85.
- [11] 魏纲,庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014(9):2562.
- WEI Gang, PANG Siyaun. Study of three-dimensional soil deformation caused by double-line parallel shield tunnel construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(9):2562.
- [12] 杨春山,莫海鸿,陈俊生,等. 近距离下穿盾构隧道对上覆运营地铁隧道的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2015(5):145.
- YANG Chunshan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. Influence of the approaching construction of underlying shield tunnels on overlying metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015(5):145.
- [13] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011(7):2085.
- ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(7):2085.
- (收稿日期:2020-05-06)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com