

DOI: 10.11779/CJGE2023S20041

地铁行车荷载作用下地层和重叠隧道变形数值模拟研究

胡 垚^{1,2}, 李明帅², 郭 飞³, 许英刚⁴, 雷华阳⁴, 吴 筱², 陈学俭^{*5}

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 3. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300220; 4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 5. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 地铁列车运行时产生的行车荷载对地层和重叠隧道有显著影响。然而, 现有研究很少聚焦重叠隧道变形响应, 且缺乏行车荷载施加位置的影响。选取天津某重叠隧道工程, 采用激振力函数确定行车荷载, 开展地铁行车荷载作用下地层及重叠隧道变形数值模拟。结果表明: 地铁行车荷载的施加位置会对地层位移和隧道变形产生明显影响。 S_{\max} 值和 i 值均与数据提取位置相关。距隧道中心 $1.5D$ 为地铁行车荷载引起地层水平位移的临界影响范围。三种工况作用下, 隧道纵向变形均表现为整体下沉。行车荷载仅施加于上或下隧道时, 施加荷载的隧道横向变形较大; 同时施加于两隧道时, 两隧道均在底部产生变形。

关键词: 重叠隧道; 行车荷载; 激振力函数; 数值模拟; 变形特性

中图分类号: TU753; U231 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0258-06

作者简介: 胡 垚(1994—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩土与地下工程方面的教学和科研工作。E-mail: hyjiaoliu@163.com。

Numerical simulation of deformation of strata and stacked tunnels under traffic loads of subway

HU Yao^{1,2}, LI Mingshuai², GUO Fei³, XU Yinggang⁴, LEI Huayang⁴, WU Xiao², CHEN Xuejian⁵

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. CCCC (Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300220, China; 4. School of Civil

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 5. College of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The traffic loads of subway have a significant impact on the strata and stacked tunnels. However, the existing studies have rarely focused on the deformation response of stacked tunnels and consider the influences of the location of the traffic loads. By selecting a stacked tunnel project in Tianjin, the excitation force function is used to determine the traffic loads, and numerical simulations are conducted to analyze the deformation of stacked tunnels under the traffic loads of subway. The results demonstrate that the position where the traffic loads of subway are applied significantly affects the displacement of strata and deformation of tunnels. Both S_{\max} and i values are related to the location of data extraction. The critical influence range of lateral displacement caused by the traffic loads of subway is $1.5D$ from the center of the tunnel. Under the three conditions, the longitudinal deformations of the tunnels are overall downward. When the traffic loads of subway are applied only to the upper or the lower tunnel, the transverse deformation of the tunnel under the loads is large. When the loads are applied to two tunnels synchronously, both the two tunnels deform at the bottom.

Key words: stacked tunnel; traffic load; excitation force function; numerical simulation; deformation characteristic

0 引 言

近年来, 我国地铁建设迅猛发展, 各大城市地铁线网日益密集, 受到地下既有建筑影响, 地铁隧道重叠情况屡见不鲜^[1-2]。地铁运营时, 列车与轨道相互作用产生行车荷载, 使得重叠隧道受到动应力场长期往复作用, 地铁隧道和周围地层产生明显影响。尤其是

软土地区地层中, 地铁运营过程中极易因地层非均匀

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307260, 52378363); 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0882); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开发基金项目(SKJGP2023K024); 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心开放课题(TUC2022-03)

收稿日期: 2023-11-30

***通信作者** (E-mail: chenxj@whu.edu.cn)

沉降导致隧道结构产生损坏, 造成安全事故^[3]。因此, 开展地铁行车荷载作用下重叠隧道变形研究具有重要意义。

目前, 国内外学者对于行车荷载作用下地层与隧道变形开展了广泛研究。地层方面: 安俊杰等^[4]采用仿真软件 COMSOL 进行计算, 分析车辆载重等 5 个与行车荷载有关的因素对隧道及地层变形影响; 郑海忠等^[5]选取某高速铁路及周围场地, 研究高速列车运行引起地层沉降问题; 陈凡等^[6]建立有限元模型, 分析列车荷载作用下液化砂土改良前后地层沉降; 葛世平等^[7]监测上海某地铁线周边土层, 在行车荷载作用下隧道周边土层在隧道拱顶产生沉降。隧道结构方面: 莫海鸿等^[8]利用有限差分法得到隧道结构变形从底端到顶端减小; 杨文波等^[9]研究高速行车荷载作用下隧道结构变形, 得出隧道变形规律; 高峰等^[10]以某地铁近距离重叠隧道为背景, 研究地铁运营期间行车荷载对隧道结构的影响。然而, 现有研究集中在行车荷载作用下单隧道变形, 少有重叠隧道变形的研究, 且缺乏行车荷载不同施加位置的影响。

综上所述, 本文针对地铁行车荷载作用下地层及隧道变形问题, 依托天津某重叠隧道工程, 利用 ABAQUS 有限元软件, 建立地铁行车荷载作用下重叠隧道数值模型, 研究行车荷载不同施加位置对地层和重叠隧道变形的影响, 为重叠隧道的设计提供参考。

1 地铁行车荷载确定

1.1 依托工程简介

本文选取天津地铁某双线重叠隧道为依托工程, 空间布置如图 1 所示。该工程上、下隧道直径均为 6.4 m, 上隧道覆土厚度 6.8 m, 两隧道之间距离 7.2 m。根据勘察资料, 该区域属于河海冲击平原, 在钻孔 50 m 深度范围内均是第四系全新土, 地层由上往下为杂填土、粉质黏土、砂质粉土、粉质黏土、粉土和粉质黏土。

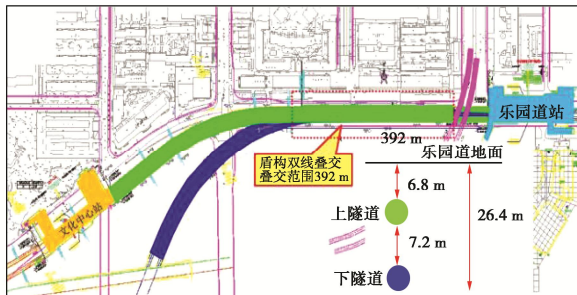


图 1 天津某双线重叠隧道工程概况图

Fig. 1 Project overview of twin stacked tunnels in Tianjin

1.2 地铁行车荷载确定

根据研究^[11-12], 用激振力函数模拟行车荷载, 包

括车轮静载和正弦函数叠加的动荷载。

激振力模拟函数表达式确定如下:

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

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

$$\omega_i = \frac{2\pi}{L_i} \quad (3)$$

式中: P_0 是单个车轮静荷载; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为低频 (0.5~5 Hz)、中频 (30~60 Hz)、高频 (200~400 Hz) 范围荷载振动峰值; M_0 为弹簧下质量; ω 为不平顺振动波长的圆频率; t 为振动波长的作用时间; α 为矢高; L 为列车不平顺振动波长。

根据研究^[13], $P_0 = 70$ kN, $M_0 = 750$ kg, 波长和矢高: $L_1 = 10$ m, $\alpha_1 = 3.5$ mm; $L_2 = 2$ m, $\alpha_2 = 0.4$ mm; $L_3 = 0.5$ m, $\alpha_3 = 0.08$ mm。荷载函数表达式如下所示:

$$F(t) = 70000 + 287.6 \sin 10.47t + 821.6 \sin 52.33t + 2629.2 \sin 209.33t \quad (4)$$

则前 1 s 内地铁行车荷载时程曲线, 如图 2 所示。

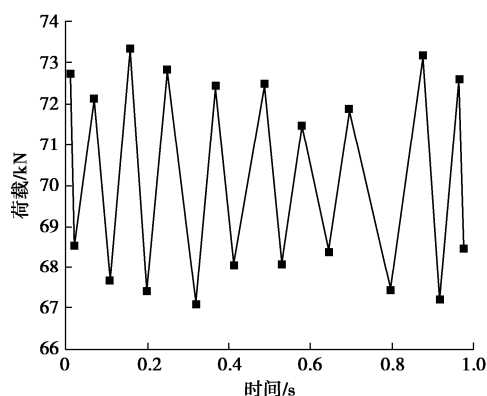


图 2 前 1 s 内地铁行车荷载时程曲线

Fig. 2 Time-history curves of traffic loads of subway within first 1 s

2 数值模型建立

2.1 模型建立

基于依托工程, 采用 ABAQUS 有限元软件, 进行重叠隧道变形数值模拟, 利用现场实测数据验证数值模拟结果的可靠性, 详见文献^[14]。

图 3 为沿 Y 轴切割一半的地铁行车荷载作用下重叠隧道有限元模型 (工况 C1: 行车荷载作用于上隧道)。研究表明^[15], 数值模型计算范围沿隧道直径每个方向都不少于 3~4 倍。模型尺寸为 40 m × 46 m × 63 m, 其隧道直径、覆土厚度、空间布置等与依托工程一致。模型土体为 5 层, 从上往下为粉质黏土 (2.5 m)、砂质粉土 (3.0 m)、粉质黏土 (10 m)、粉土 (12.3 m) 和粉质黏土 (17.9 m), 采用修正剑桥模型, 参数见表 1。隧道和道床采用线弹性本构模型, 参数取值为: 密度 $\rho = 2400$ kg/m³, 弹性模量 $E = 2.93 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.2$ 。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil strata

| 土层 | 重度/(kN·m ⁻³) | 塑性体积模量对数 | 应力比 | 渗透系数/(m·d ⁻¹) | 孔隙比 | 体积模量对数 | 泊松比 |
|-------|--------------------------|----------|------|---------------------------|-------|--------|------|
| ①粉质黏土 | 18.4 | 0.058 | 0.86 | 0.00018 | 0.776 | 0.0072 | 0.32 |
| ②砂质粉土 | 17.9 | 0.031 | 1.03 | 0.00050 | 0.742 | 0.0039 | 0.35 |
| ③粉质黏土 | 10.3 | 0.055 | 0.89 | 0.00031 | 0.764 | 0.0069 | 0.35 |
| ④粉土 | 12.2 | 0.020 | 1.37 | 2.00000 | 0.595 | 0.0025 | 0.30 |
| ⑤粉质黏土 | 18.0 | 0.047 | 0.90 | 0.00485 | 0.683 | 0.0059 | 0.35 |

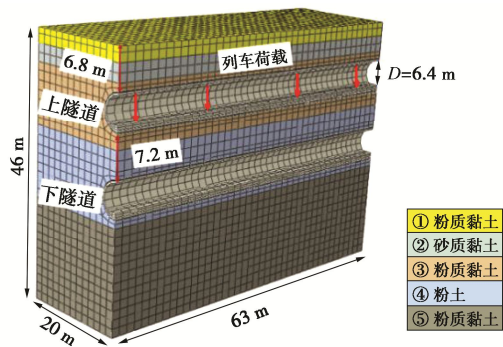


图 3 沿 Y 轴切割一半的模型 (工况 C1)

Fig. 3 Half-cut model along Y axis (case C1)

2.2 模拟方案

基于地铁行车荷载作用于上隧道数值模型 (工况 C1), 改变施加位置, 建立地铁行车荷载作用于下隧道 (工况 C2) 和双隧道 (工况 C3) 的两组数值模型, 开展不同荷载施加位置对地层和重叠隧道变形影响的研究。三种工况模拟方案见表 2。

表 2 模拟方案

Table 2 Simulation schemes

| 工况 | 地铁行车荷载施加位置 | |
|----|------------|-----|
| | 上隧道 | 下隧道 |
| C1 | √ | × |
| C2 | × | √ |
| C3 | √ | √ |

3 结果分析

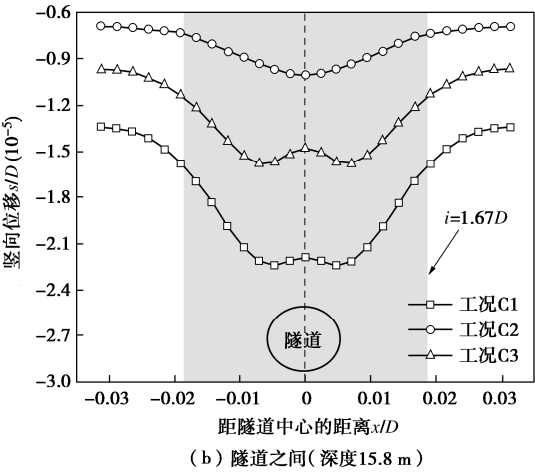
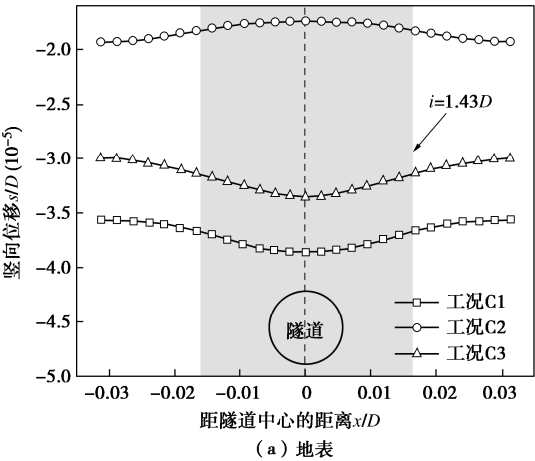
3.1 地层竖向位移

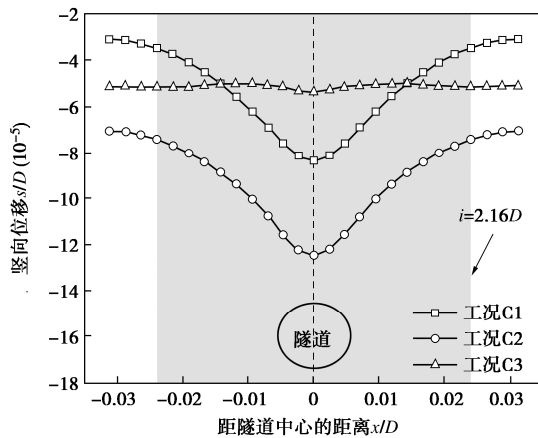
图 4 为三种工况下, 地层不同深度处的竖向位移。地层沉降为负值, 隆起为正值。

由图 4 (a) 可以看出, 在地表位置, 三种工况均发生沉降, 但工况 C2 和工况 C1、C3 曲线差异较大。隧道中心处最大竖向位移 (S_{\max}) 由大到小为: 工况 C1、工况 C3、工况 C2, 沉降槽宽度 (i) 均为 $1.43D$ 。工况 C2 地表沉降最小, 曲线最平缓, 这由于地铁行车荷载施加在下隧道, 下隧道与地表距离较远, 上隧道阻隔荷载传递。工况 C1 和 C3 沉降曲线趋势相同, 但工况 C1 大于工况 C3。说明下隧道施加行车荷载减小地表沉降。这由于上、下隧道施加行车荷载叠加后互相削弱。

由图 4 (b) 可以看出, 在隧道之间位置, 三种工况均发生沉降, 工况 C1 和 C3 沉降曲线呈 “W” 型。 S_{\max} 由大到小为: 工况 C1、工况 C3、工况 C2, i 比地表大, 为 $1.67D$ 。“W” 型沉降的原因是: 工况 C1 和 C3 行车荷载作用于上隧道, 上隧道覆土厚度较小, 存在地铁行车荷载作用时隧道周围地层形成约束反力, 抑制变形。工况 C1 沉降大于工况 C2, 原因是工况 C1 取值位置在施加荷载下方, 工况 C2 取值位置在施加荷载上方。

由图 4 (c) 可以看出, 在下隧道下方位置, 三种工况均发生沉降, 工况 C3 沉降曲线非常平缓, 几乎趋于直线。 S_{\max} 最大为工况 C2, 工况 C1 次之, 工况 C3 最小; 与地表和隧道之间位置相比, i 最大为 $2.16D$ 。工况 C3 之所以平缓, 可能是在上下同时施加荷载情况下, 上下行车荷载之间相互作用, 削弱周边地层竖向位移。





(c) 下隧道下方(深度29.6 m)

图 4 地层竖向位移

Fig. 4 Vertical displacements of strata

以上分析表明,不同位置施加行车荷载对地层竖向位移有明显影响。 S_{\max} 值与取值点到行车荷载作用隧道距离有关,距离较近, S_{\max} 值则大;反之,则小。 i 值与数据提取位置相关,深度增加, i 值增大。

3.2 地层水平位移

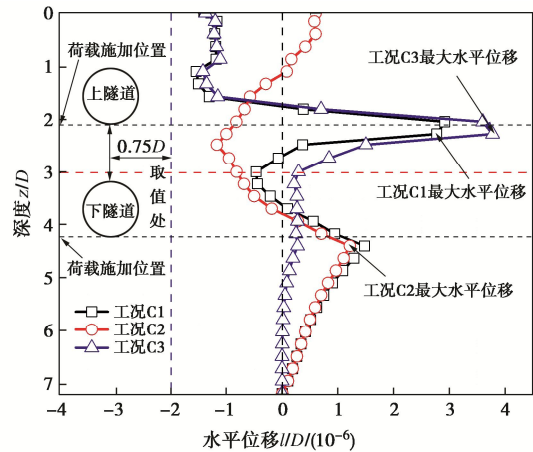
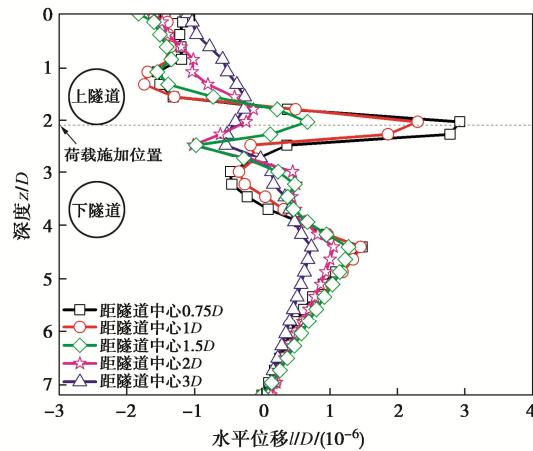
图5是地铁行车荷载作用下地层水平位移。其中,图5(a)是三种工况作用下右侧距隧道中心 $0.75D$ 处的地层水平位移,图5(b)是工况C1在右侧距隧道中心不同距离($0.75D$ 、 $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 和 $3D$)的地层水平位移。地层水平位移向内为负值,向外为正值。

由图5(a)可知,三种工况作用下,最大地层水平位移为工况C3,工况C1次之,最小为工况C2。工况C1和C3的最大水平位移发生在上隧道施加荷载位置,工况C2最大水平位移发生在下隧道施加荷载位置。这可能是由于工况C1和C3的地铁行车荷载施加位置在上隧道,工况C2施加在下隧道。此外,当深度小于 $3D$ 时,工况C1和C3位移曲线相似;当深度大于 $3D$ 时,工况C1和工况C2位移曲线相似。在上隧道施加荷载位置,工况C1和C3产生的水平位移向外,且为最大位移位置,工况C2产生的水平位移向内。在下隧道施加荷载位置,工况C1和C2产生向外位移,工况C3位移很小。这可能由工况C3中上下荷载互相作用抑制变形所导致。

由图5(b)可知,随着距隧道中心的距离从小到大大($0.75D$ 、 $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $3D$),地层水平位移减小。当距离小于 $1D$ 时,地层水平位移较大;当距离大于 $2D$ 时,地层水平位移很小,距离 $1.5D$ 介于两者之间。由此推断,距隧道中心 $1.5D$ 为地铁行车荷载临界影响范围。

3.3 隧道纵向变形

图6(a)为工况C1中隧道纵向变形矢量图。上、下隧道的变形向下,上隧道变形明显大于下隧道。这

(a) 三种工况下,距隧道中心 $0.75D$ 处

(b) 工况C1距隧道中心不同距离

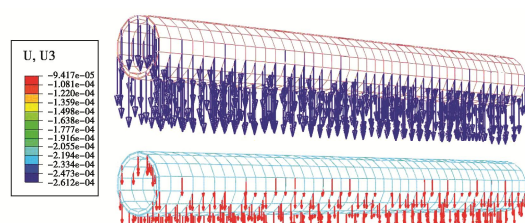
图 5 地层水平位移

Fig. 5 Lateral displacements of strata

是工况C1只在上隧道施加地铁行车荷载导致。地铁行车荷载引发上隧道变形,向下传递进而引发下隧道变形,但传递过程能量损耗,使得下隧道变形较小。

图6(b)为工况C2中隧道纵向变形矢量图。上、下隧道的变形向下;与工况C1不同的是,上隧道变形小于下隧道,但相差没有很大。因为工况C2只在下隧道施加地铁行车荷载,下隧道变形较大,但下隧道埋深较大抑制变形,没有像工况C1中两隧道变形差很大。

图6(c)为工况C3中隧道纵向变形矢量图。两隧道变形向下,但上隧道变形远大于下隧道。这解释3.1节图4(c)中工况C3沉降较小且曲线平缓的现象。可能是两隧道同时施加的地铁行车荷载相互耦合削弱荷载,抑制下隧道变形。



(a) 工况C1

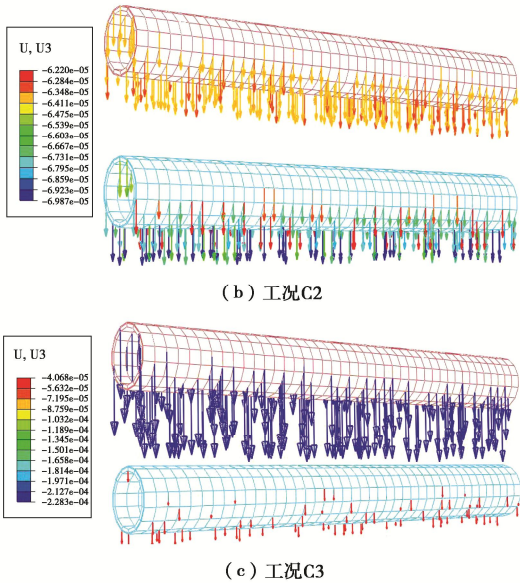


图6 隧道纵向变形

Fig. 6 Longitudinal deformations of tunnel

以上分析表明,地铁行车荷载施加于不同位置会对上、下隧道纵向变形产生不同影响。工况C1、C2和C3中两隧道纵向变形方向阐明地层位移沉降的原因。

3.4 隧道横向变形

图7是三种工况作用下隧道横向变形,主要发生在顶部和底部。

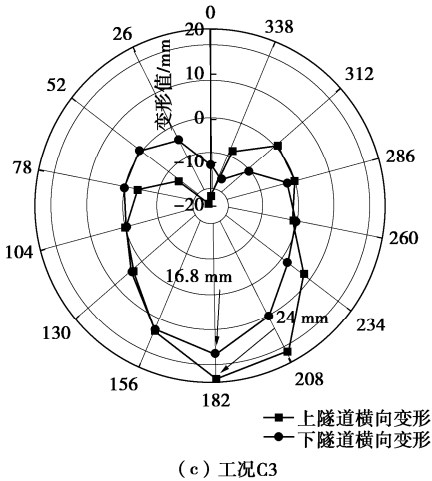
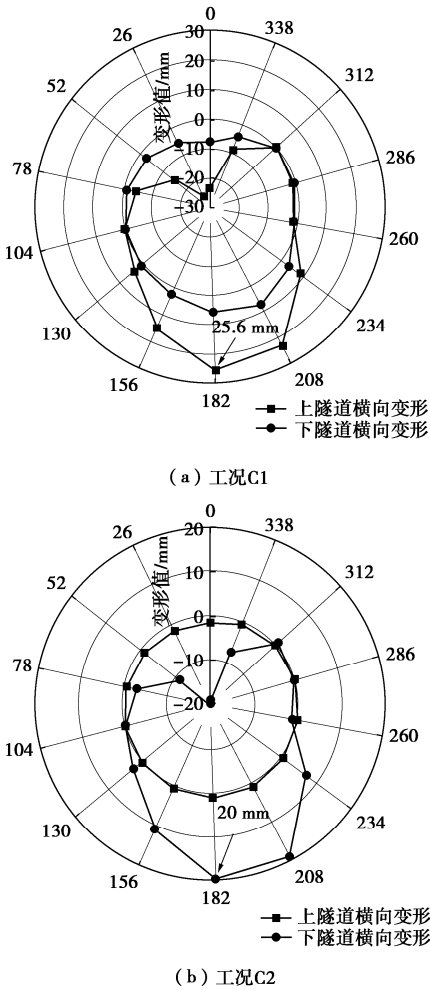


图7 隧道横向变形

Fig. 7 Transverse deformations of tunnel

在工况C1中,上隧道横向变形较大,最大值为25.6 mm,下隧道横向变形较小。在工况C2中,上隧道横向变形较小,几乎处处相等,下隧道横向变形较大,最大值为20 mm。在工况C3中,两隧道横向变形曲线相似,最大变形发生在隧道底部,上隧道最大变形为24 mm,下隧道最大变形为16.8 mm。

4 结 论

本文以天津地铁某双线重叠隧道为研究对象,用激振力函数确定地铁行车荷载,通过ABAQUS有限元软件,建立地铁行车荷载不同施加位置重叠隧道变形模型,分析地层和重叠隧道变形响应。得到如下结论:

(1) 地层位移方面:地铁行车荷载的施加位置对地层竖向和水平位移产生响应。 S_{max} 值与取值位置到行车荷载作用隧道的距离有关; i 值与数据提取位置相关。对于水平位移,距隧道中心 $1.5D$ 为地铁行车荷载的临界影响范围。

(2) 隧道变形方面:地铁行车荷载的施加位置对隧道纵向和横向变形产生影响。三种工况作用下,两隧道纵向变形均表现为整体下沉。两隧道同时施加地铁行车荷载会相互耦合,削弱荷载大小,抑制下隧道较大变形。工况C1中上隧道产生较大横向变形,下隧道变形值较小且几近不变;工况C2中隧道横向变形与C1相反;工况C3中在隧道底部两隧道产生较大变形。

参考文献:

[1] 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, 40(2): 85-88. (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, **40**(2): 85-88. (in Chinese))
- [2] 雷华阳, 张 磊, 许英刚, 等. 快速地铁列车荷载下软土地基沉降数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 1): 45-48. (LEI Huayang, ZHANG Lei, XU Yinggang, et al. Numerical simulation of settlement of soft soil foundation under fast metro train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 45-48. (in Chinese))
- [3] 胡 垚, 雷华阳, 雷 峥, 等. 三向地震作用下叠交隧道地震响应振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(增刊 2): 104-116, 129. (HU Yao, LEI Huayang, LEI Zheng, et al. Shaking table test study on seismic response of overlapping tunnels under three-dimensional earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(S2): 104-116, 129. (in Chinese))
- [4] 安俊杰, 黄 飞, 黄小亮, 等. 施工车辆荷载对隧道内煤系地层的影响规律研究[J]. 能源与环保, 2023, **45**(3): 263-269. (AN Junjie, HUANG Fei, HUANG Xiaoliang, et al. Research on influencing law of construction vehicle load on coal measures strata in tunnels[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, **45**(3): 263-269. (in Chinese))
- [5] 郑海忠, 严武建, 石玉成, 等. 重复列车荷载作用下季节性冻土区桥墩-基础场地振动特性变形分析[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(4): 907-915. (ZHENG Haizhong, YAN Wujian, SHI Yucheng, et al. Vibration characteristics and long-term deformation analysis of bridge piers-foundation sites in seasonal frozen soil region under repeated train load[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(4): 907-915. (in Chinese))
- [6] 陈 凡, 王士民, 谢金池, 等. 液化砂土地层加固措施研究与盾构隧道列车振动响应分析[J]. 铁道标准设计, 2021, **65**(4): 110-117. (CHEN Fan, WANG Shimin, XIE Jinchi, et al. Research on strengthening measures of liquefiable sandy ground and analysis of train vibration response of shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2021, **65**(4): 110-117. (in Chinese))
- [7] 葛世平, 姚湘静, 叶 斌, 等. 列车振动荷载作用下隧道周边软黏土长期沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(11): 2359-2368. (GE Shiping, YAO Xiangjing, YE Bin, et al. Analysis of long-term settlement of soft clay under train vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(11): 2359-2368. (in Chinese))
- [8] 莫海鸿, 邓飞皇, 王军辉. 营运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**(增刊 2): 3507-3512. (MO Haihong, DENG Feihuang, WANG Junhui. Dynamic response analysis of subway shield tunnel during operation period[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3507-3512. (in Chinese))
- [9] 杨文波, 邹 涛, 涂玖林, 等. 高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道动力响应特性分析[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3635-3644. (YANG Wenbo, ZOU Tao, TU Jiulin, et al. Analysis of dynamic response characteristics of horseshoe shaped cross-section tunnel under vibration load of high-speed train[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3635-3644. (in Chinese))
- [10] 高 峰, 关宝树, 仇文革, 等. 列车荷载作用下地铁重叠隧道的响应分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, **38**(1): 38-42. (GAO Feng, GUAN Baoshu, QIU Wenge, et al. Dynamic responses of overlapping tunnels to passing trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, **38**(1): 38-42. (in Chinese))
- [11] 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, **17**(4): 19-28, 18. (PAN Changshi, PANDE G N. Preliminary deterministic finite element study on a tunnel driven in loess subjected to train loading[J]. China Civil Engineering Journal, 1984, **17**(4): 19-28, 18. (in Chinese))
- [12] 胡昭艳, 齐 静, 高 峰. 高速铁路列车振动荷载的分析[J]. 四川建筑, 2008, **28**(1): 65-66. (HU Zhaoyan, QI Jing, GAO Feng. Analysis of vibration load of high-speed railway trains[J]. Sichuan Architecture, 2008, **28**(1): 65-66. (in Chinese))
- [13] 韩俊艳, 万宁潭, 赵 密, 等. 地铁振动荷载作用下场地动力响应及振动衰减规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, **42**(1): 191-199. (HAN Junyan, WAN Ningtan, ZHAO Mi, et al. Research on site dynamic response and vibration attenuation under the vibration loading of subway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, **42**(1): 191-199. (in Chinese))
- [14] HU Y, LEI H Y, ZHENG G, et al. Assessing the deformation response of double-track overlapped tunnels using numerical simulation and field monitoring[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, **14**(2): 436-447.
- [15] 孙凤明. 小间距并行盾构隧道的掘进相互影响分析[D]. 浙江大学, 2015. (SUN Fengming. Analysis of Interaction between Small-Spacing Parallel Shield Tunnel Excavations[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))

(编校: 明经平)