

地铁隧道下穿施工对既有地铁车站及高架桩基的影响分析

李志敏

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘要 [目的] 研究地铁隧道近距离下穿施工对既有地铁车站及高架桩基的影响。[方法] 以合肥 S1 线五里墩站安全线隧道施工近距离下穿既有地铁 2 号线五里墩站为背景, 利用有限元软件 ABAQUS 对项目施工全过程进行三维建模, 对比分析了逐线开挖和两线同时开挖两种方案下车站结构和高架桩基的变形。为考察类似工程在不同土体条件下的适用性, 通过改变隧道处土体黏聚力和弹性模量两参数, 分析了两参数在隧道开挖过程中对土体以及车站底板沉降的影响。[结果及结论] 隧道开挖完成后, 2 号线五里墩站底板在两种方案下的最大沉降相近, 分别为 0.73 mm 和 0.77 mm, 均满足控制标准要求; 当土体的黏聚力和弹性模量分别小于 70 kPa 和 100 MPa 时, 隧道开挖过程中车站结构的沉降和桩基的水平位移开始显著增大, 应对此引起重视。

关键词 地铁隧道; 既有车站; 下穿施工; 黏聚力; 弹性模量

中图分类号 TU433; U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.034

Influence Analysis of Metro Tunnel Under-ground Construction on Existing Metro Station and Viaduct Pile Foundation

LI Zhimin

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

Abstract [Objective] Influence of metro tunnel closely under-passing the existing metro station and viaduct pile foundation is studied. [Method] Wulidun Station safety line tunnel on Hefei S1 Line closely under-passes the existing Wulidun Station on Metro Line 2. With this project as the background, the finite element software ABAQUS is used to build a three-dimensional model of the whole construction process, and the deformations of station structure and viaduct pile foundation under line by line excavation and simultaneous excavation of the above two lines are compared and analyzed. In order to investigate the applicability of similar engineering under different soil conditions, by changing the two parameters of soil cohesion and elastic modulus, the influence of the two parameters on the

settlement of soil and station bottom plate during tunnel excavation are analyzed. [Result & Conclusion] After the completion of the tunnel excavation, the maximum settlements of the bottom plate of Metro Line 2 Wulidun Station under the two schemes are very similar being 0.73 mm and 0.77 mm, both meeting the requirements of the control standard. When the soil cohesion and elastic modulus are less than 70 kPa and 100 MPa respectively, the settlement of the station structure and the horizontal displacement of the pile foundation during tunnel excavation begin to increase significantly, which should be treated seriously.

Key words metro tunnel; existing station; underpass construction; cohesion; elastic modulus

近年来,随着国内各大城市地铁建设的蓬勃发展,地铁隧道下穿既有车站的情况也越来越多。下穿隧道近距离开挖对土体的扰动可能会影响既有车站的正常使用,因此有必要在施工之前对隧道开挖造成的影响进行评估。文献[1]依托深圳地铁 10 号线福田口岸站—福民站区间隧道下穿 4 号线福田口岸站工程,采用数值仿真手段,揭示了隧道开挖对既有地铁车站的影响和隧道初支的力学行为特性。文献[2]采用 MIDAS GTS 软件分析了北京新机场线大断面暗挖隧道下穿京沪铁路施工对土层及轨道的影响。文献[3]依托北京某新建地铁隧道下穿既有地铁车站暗挖段实际工程,研究了新建隧道采用不同方法下穿施工对既有车站暗挖段结构竖向变形的影响。

在地铁隧道施工过程中,也会遇到下穿高架桩基的情况。文献[4]以广佛环线东环地铁盾构隧道下穿广河高速高架桩基为背景,以减少地面及桩基沉降为目的,分析了地铁盾构隧道下穿高架桩基过程主要施工参数的变化情况。文献[5]通过数值模拟分析了上海轨道交通某盾构隧道侧穿内环高架桥桩基施工引起的桩基竖向位移、水平位移及倾斜

率。文献[6]通过三维数值模型分析了铁路隧道施工对既有高架站桥墩安全性的影响,并分析了隧道施工过程中的桥梁基础变形特征。

虽然研究隧道下穿地铁车站或高架桩基等结构的文献较多,但对隧道同时下穿地铁车站和高架桩基的研究较少,相应的工程案例也较少。隧道下穿既有结构的研究主要是通过数值模拟进行评估和分析的,但由于不同城市或同一城市不同地点的土体参数差异较大,因此对同一工程案例在不同土体条件下的适用性研究具有重要意义。

本文以合肥新桥机场 S1 线五里墩站安全线隧道工程为例,通过三维建模计算分析,研究隧道开挖施工对既有的合肥地铁 2 号线五里墩站和长江西路高架桩基的影响;并通过土体参数化分析,确定类似工程的土体参数敏感值。

1 工程概况

新建工程为合肥新桥机场 S1 线工程五里墩站安全线隧道。安全线长度应为远期列车长度 + 50 m,因此该安全线需下穿既有地铁 2 号线五里墩站。

安全线区间隧道采用矿山法施工,其左线和右线长度分别为 103.8 m 和 90.8 m,左右线间距为 16 m,左右线的标准段外皮净间距为 9.5 m。2 号线五里墩站底板与矿山法衬砌之间的夹层土厚度约为 2.7 m,区间地面覆土厚度约为 26.4 m。穿越土层主要为中等风化泥岩,地下水主要为上层滞水。右线距高架桩基最近距离为 3.02 m。2 号线和 S1 线的五里墩站主体结构类型分别为两层双跨框架结构和三层三跨框架结构。图 1 为五里墩站安全线隧道与车站和高架桩基位置关系。

2 数值模型

根据安全线隧道与 S1 线和 2 号线五里墩站之间的空间位置关系,采用 ABAQUS 软件建立整体三维有限元模型,如图 2 所示。有限元模型长 250 m、宽 250 m、厚 60 m,包含整个 S1 线五里墩站及其安全线隧道、2 号线五里墩站的一部分和范围内的长江西路高架桩基及其承台。除桩基用梁单元(B31)模拟外,其余部件均采用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)模拟。考虑简化并根据工程实际土层分布,将土层简化为人工填土、黏土和泥质砂岩三层,其厚度分别为 3.26 m、6.05 m 和

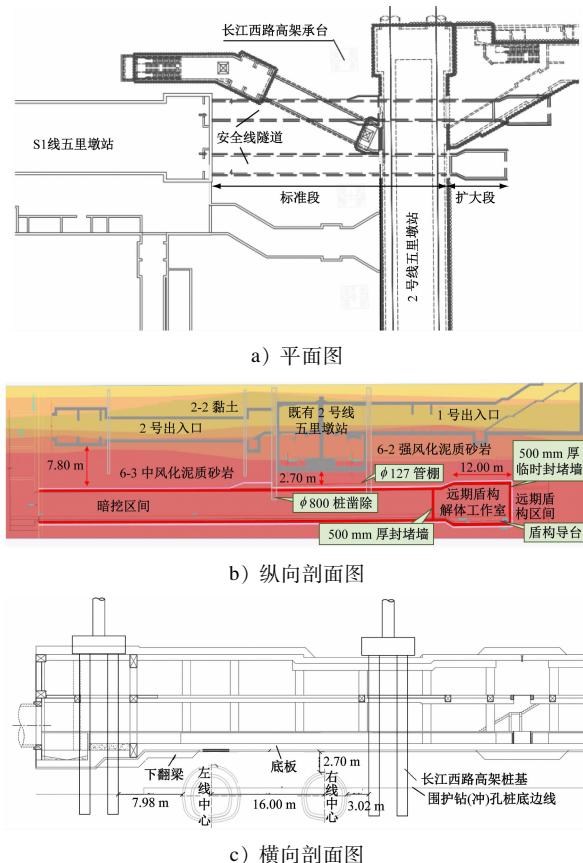


图 1 五里墩站安全线隧道与车站、高架桩基位置关系
Fig. 1 Relative position of safety line tunnel, station and viaduct pile foundation at Wulidun Station

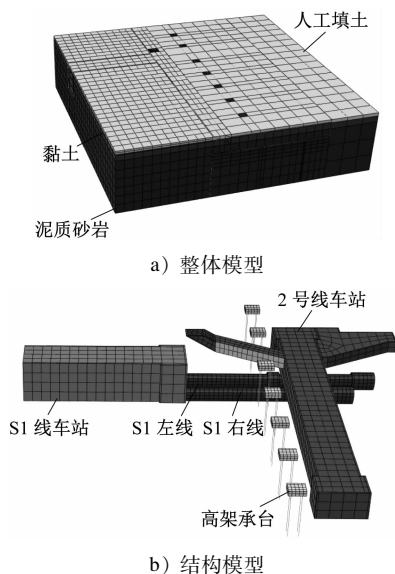


图 2 五里墩站安全线隧道工程有限元模型

Fig. 2 Finite element model for safety line tunnel project of Wulidun Station

50.69 m。各层土体均采用摩尔-库伦本构模型,参数如表 1 所示。钢筋混凝土构件采用弹性本构模

型,弹性模量取 30 600 MPa,泊松比为 0.20,重度为 25.00 kN/m³。

表 1 各土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	弹性模量/MPa	重度/(kN/m ³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
人工填土	12	19.80	0.29	25	20.6
黏土	40	19.11	0.29	35	17.2
泥质砂岩	200	22.15	0.22	130	25.0

模型分析中,对左/右侧约束 X 方向的变形,对前/后侧约束 Y 方向的变形,对模型下表面约束 X 、 Y 和 Z 方向的变形。模型的荷载为岩土和结构自重、桩基承台压强。计算过程中通过“Model change”命令来模拟隧道的开挖和衬砌的施作。共考虑了两种施工方案:①逐线开挖方案(方案 1),即先开挖左线,再开挖右线,左线施工需 40 步,右线施工需 34 步,整个开挖过程共需模拟 74 步;②两线同时开挖方案(方案 2),即左线和右线同时开挖,整个开挖过程共需模拟 40 步。

3 数值模拟结果及分析

3.1 隧道围岩位移

由安全线隧道贯通后模型的竖向位移可知,拱顶和拱底的竖向位移最大。采用方案 1 的方式进行开挖时,隧道拱顶最大沉降为 18.21 mm,拱底最大隆起为 17.05 mm;采用方案 2 的方式进行开挖时,隧道拱顶最大沉降为 18.29 mm,拱底最大隆起为 17.76 mm。总体来看,两条隧道依次开挖与同时开挖导致的拱顶与拱底的竖向位移相差不超过 1 mm。

安全线隧道拱顶处沉降随隧道开挖的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知,当隧道开挖至测点断面处时,该断面的拱顶沉降较大,其余时间该断面处的竖向位移基本不变。由于 E 断面为管棚工作室的位置,其断面直径较其余断面大,故开挖至该断面时,其拱顶沉降最大,达到了 13 mm。两种方案的隧道拱顶沉降相差不大,但各测点发生沉降的时间不同。

3.2 S1 线五里墩站底板沉降

不同施工阶段沿车站底板中间路径的竖向位移如图 4 所示。由图 4 可见:采用方案 1 的方式进行施工时,左线施工完毕时沉降曲线呈“V”形,具有

一个沉降极值点,右线施工完毕时沉降曲线呈“W”形,具有两个沉降极值点;采用方案 2 的方式进行施工时,随着双线隧道的开挖,沉降曲线逐渐变为“W”形。方案 1 和方案 2 中,车站底板中间路径上最大沉降分别为 0.73 mm 和 0.77 mm,两者相差不大。

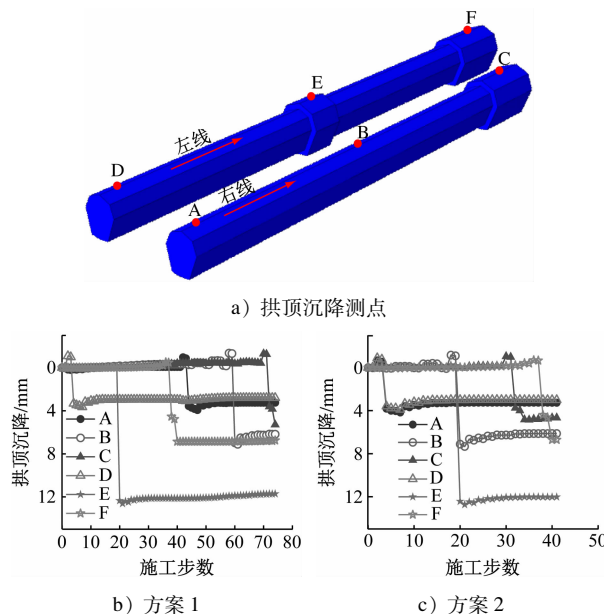


图 3 五里墩站安全线隧道拱顶测点处沉降

Fig. 3 Subsidence at safety line tunnel arch top measurement points of Wulidun Station

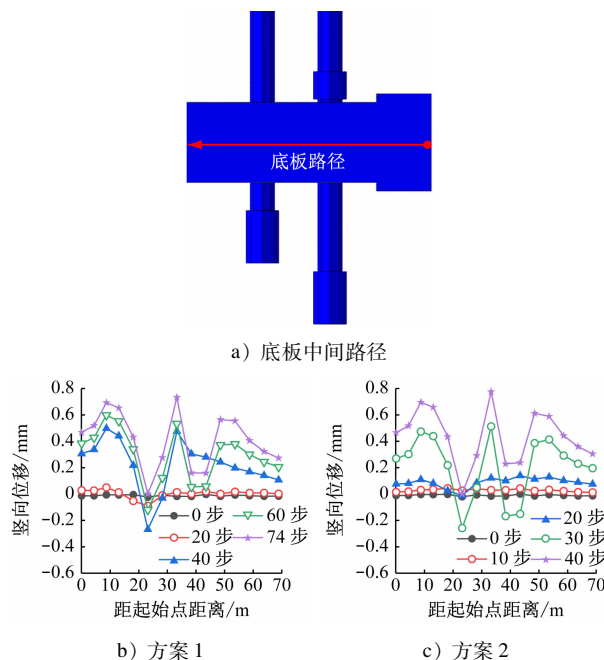


图 4 车站底板中间路径竖向位移曲线

Fig. 4 Curves of station bottom plate vertical displacement along the middle path

3.3 安全线隧道上方土体沉降

图 5 为车站底板下方土体沿不同路径的沉降曲线。沿隧道开挖方向截取了 6 条路径 (path), 其中 path4 为底板正下方的土体路径。由图 5 b) 和图 5 c) 可见, 左线施工完毕时, 土体沉降曲线在左线正上方有一个极值点; 右线施工完毕时, 土体沉降曲线在左线和右线正上方各有一个极值点。由图 5 d) 可知, 底板正下方的土层竖向变形沿路径波动较小。

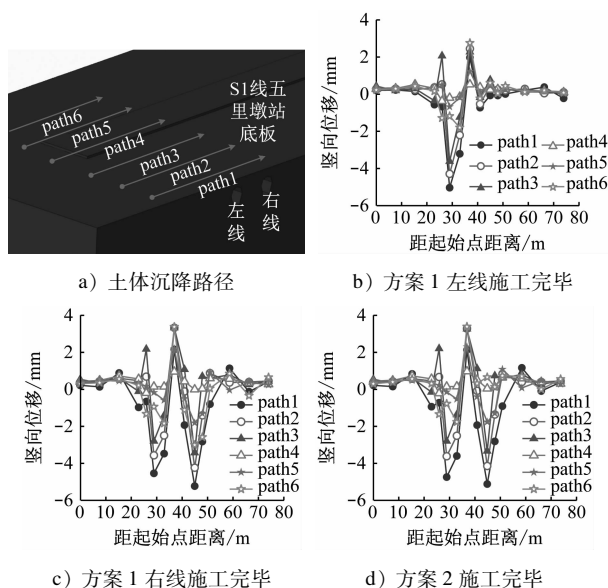


图 5 车站底板下方土体沿不同路径沉降曲线

Fig. 5 Curves of soil subsidence along different paths under the station bottom plate

3.4 高架桩基水平位移

安全线隧道距长江西路高架桩基的水平距离最小仅有 3.02 m, 选取距左线隧道和右线隧道最近的 4 个桩基分析隧道施工过程中桩基的水平位移。图 6 为两种施工方案下桩基的水平位移分布曲线。当隧道开挖至距桩基最近的位置时, 桩基向远离隧道的方向产生了位移, 且两种方案下的最大水平位移均不超过 0.5 mm。

4 参数化分析

4.1 参数设置

土颗粒间存在着相互作用力, 土体的黏聚力是土颗粒间引力与斥力综合作用的结果。土体的压缩模量是判断土体的压缩性和计算地基压缩变形量的重要指标。在 ABAQUS 软件中, 地基弹性变形的特性是通过土体材料的弹性模量体现的, 一般来

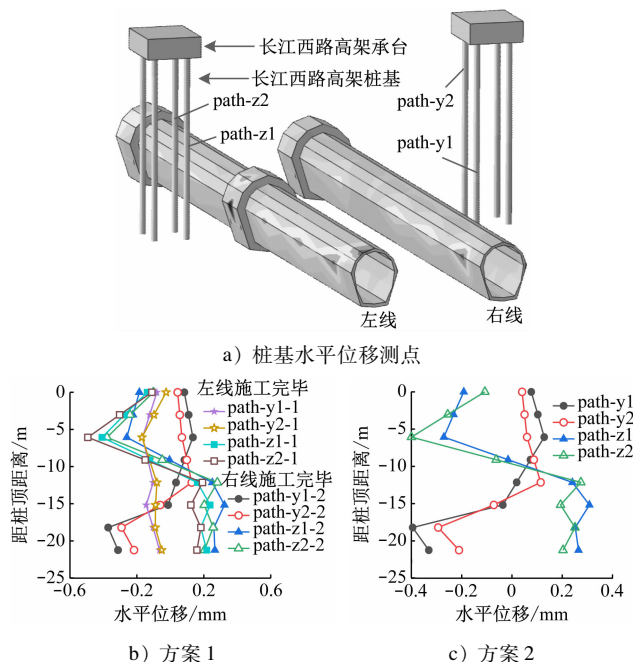


图 6 不同施工方案下桩基水平位移曲线

Fig. 6 Curves of pile foundation horizontal displacement under different construction plans

说, 土体的弹性模量为压缩模量的 3~5 倍。不同土层和地区的土体黏聚力和弹性模量一般相差较大。土体黏聚力和弹性模量的大小对土体扰动后的变形有较大影响。为考察本工程在不同土体条件下的适用性, 本文探究在不同黏聚力和弹性模量土体中开挖隧道对车站结构以及高架桩基的影响。在有限元模型分析基础上, 以两线同时开挖为例, 通过改变隧道处土层的黏聚力和弹性模量大小进行参数化分析。黏聚力分别为 130 kPa、100 kPa、70 kPa 和 40 kPa; 弹性模量分别为 200 MPa、150 MPa、100 MPa 和 50 MPa (所对应的土体压缩模量分别为 40 MPa、30 MPa、20 MPa 和 10 MPa)。

4.2 黏聚力影响

4.2.1 黏聚力对车站底板沉降影响

图 7 为不同黏聚力模型下五里墩站底板沿路径的沉降曲线。由图 7 可知: 随着土体黏聚力 c 的减小, 车站底板的沉降逐渐增加; 当黏聚力从 70 kPa 减小至 40 kPa 时, 底板最大沉降从 1.15 mm 增大到 3.94 mm; 当土体黏聚力较大时 (大于 100 kPa), 底板大部分区域的沉降为正值, 即发生向上的位移; 当土体黏聚力较小时 (小于 100 kPa), 底板沉降均为负值。

4.2.2 黏聚力对车站底板下方土体沉降的影响

图 8 为不同黏聚力模型下车站底板下方土体沿

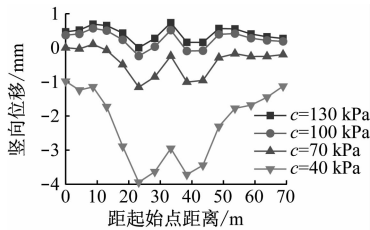
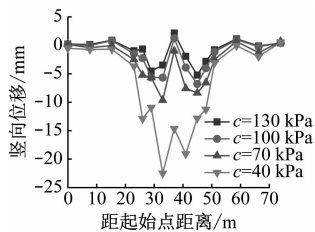
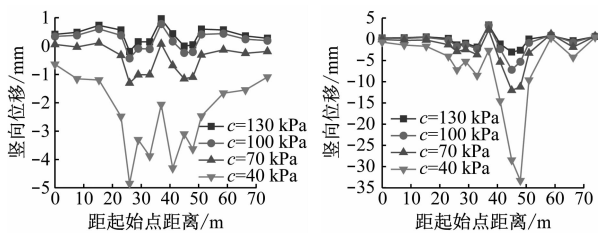


图7 不同黏聚力模型下五里墩站底板沿路径沉降曲线
Fig.7 Curves of Wulidun Station bottom plate subsidence along the path in different cohesion models

不同路径沉降曲线。由图8可知:黏聚力对土体沉降量的影响较大,黏聚力越小,土体沉降越大;对于 path1,当黏聚力从 130 kPa 减小至 40 kPa 时,土体最大沉降从 5.22 mm 增大到 22.48 mm,增幅为 330%;对于 path6,当黏聚力从 130 kPa 减小至 40 kPa 时,土体最大沉降从 3.00 mm 增大到 33.31 mm,增幅为 1 010%;对于 path4,由于此路径位于车站底板正下方,与其他路径相比,土体沉降更小,当黏聚力为 40 kPa 时,最大沉降仅为 4.85 mm。



a) path1



b) path4

c) path6

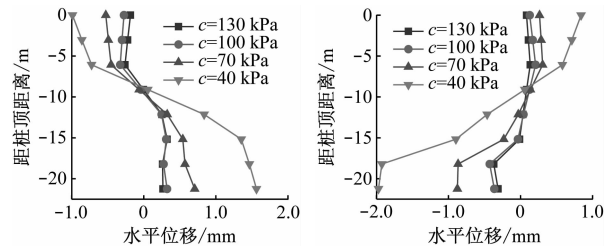
图8 不同黏聚力模型下车站底板下方土体沿不同路径沉降曲线

Fig.8 Curves of soil subsidence under the station bottom plate along different paths in different cohesion models

4.2.3 黏聚力对桩基水平位移影响

图9为不同黏聚力模型下桩基水平位移曲线。由图9可见:土体黏聚力越小,桩基水平位移越大;对于 path-z1,当黏聚力从 130 kPa 减小至 40 kPa 时,桩基最大水平位移从 0.27 mm 增大到 1.56 mm,桩顶与桩底的水平距离从 0.45 mm 增大到 2.55 mm;对于 path-y1,当黏聚力从 130 kPa 减小至

40 kPa 时,桩基最大水平位移从 0.31 mm 增大到 1.97 mm,桩顶与桩底的水平距离从 0.40 mm 增大到 2.81 mm。



a) path-z1

b) path-y1

图9 不同黏聚力模型下桩基水平位移曲线

Fig.9 Curves of pile foundation horizontal displacement in different cohesion models

综合图7—图9可知,当黏聚力小于 70 kPa 时,车站底板沉降、车站底板土体沉降和桩基水平位移均有显著增大的趋势。换言之,当黏聚力小于 70 kPa 时,黏聚力参数对土体和结构的变形影响更大。

4.3 弹性模量的影响

4.3.1 弹性模量对车站底板沉降影响

图10为不同土体弹性模量模型下五里墩站底板路径沉降曲线。由图10可见,随着土体弹性模量 E 的减小,车站底板隆起位移逐渐增加;当弹性模量从 100 MPa 减小至 50 MPa 时,底板最大隆起从 1.52 mm 增大到 3.29 mm。

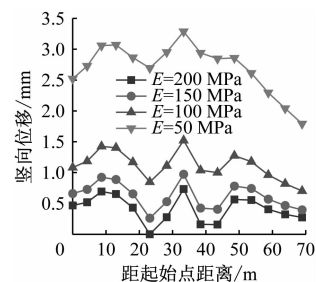


图10 不同土体弹性模量模型下五里墩站底板路径沉降曲线
Fig.10 Curves of Wulidun Station bottom plate subsidence along the path in different soil elastic modulus models

4.3.2 弹性模量对车站底板下方土体沉降影响

图11为不同弹性模量模型下车站底板下方土体沿不同路径的沉降曲线。由图11可见:弹性模量对土层沉降量的影响较大,弹性模量越小,土层沉降越大;对于 path1,当弹性模量从 200 MPa 减小至 50 MPa 时,土体最大沉降从 5.22 mm 增大到 12.09 mm;对于 path6,当弹性模量从 200 MPa 减小至 50 MPa 时,土体最大沉降从 3.00 mm 增大到 16.86

mm。

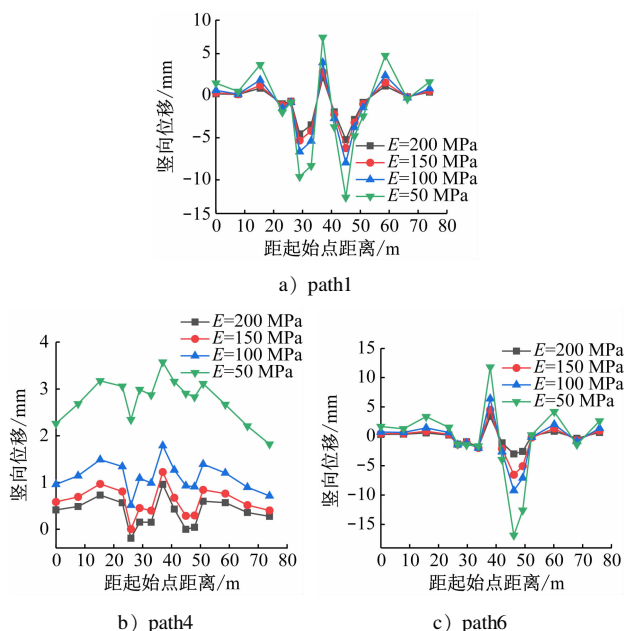


图 11 不同弹性模量模型下车站底板下方土体沿不同路径沉降曲线

Fig. 11 Curves of soil subsidence under the station bottom plate along different paths in different soil elastic modulus models

4.3.3 弹性模量对桩基水平位移影响

图 12 为不同土体弹性模量模型下的桩基水平位移曲线。由图 12 可知:弹性模量越小,桩基水平位移越大;对于 path-z1,当弹性模量从 200 MPa 减小至 50 MPa 时,桩基最大水平位移从 0.32 mm 增大到 0.77 mm,桩顶与桩底的水平距离从 0.45 mm 减小至 0.42 mm;对于 path-y1,当弹性模量从 200 MPa 减小至 50 MPa 时,桩基最大水平位移从 0.37 mm 增大到 0.75 mm,桩顶与桩底的水平距离从 0.40 mm 减小至 0.06 mm。

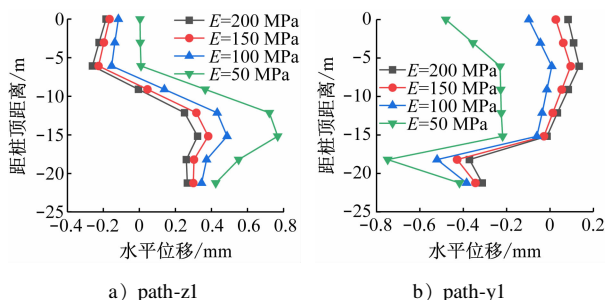


图 12 不同土体弹性模量模型下桩基水平位移曲线

Fig. 12 Horizontal displacement curves of pile foundation under different elastic modulus models

综合图 10—图 12 可知,当弹性模量小于 100

MPa(压缩模量小于 20 MPa)时,车站底板沉降、车站底板土体沉降和桩基水平位移均有显著增大的趋势。换言之,当弹性模量小于 100 MPa 时,弹性模量参数对土体和结构的变形影响更大。

5 结论

1) 隧道开挖完成后,方案 1 中,拱顶沉降和拱底隆起最大值分别为 18.21 mm 和 17.05 mm;方案 2 中,拱顶沉降和拱底隆起最大值分别为 18.29 mm 和 17.76 mm。两种开挖方法对隧道拱顶与拱底竖向位移的影响差异不大。

2) 隧道开挖完成后,两种方案下车站底板中间路径上的最大沉降相近,分别为 0.73 mm 和 0.77 mm,均小于 5 mm,满足控制标准要求,表明两种开挖方式均可采用。当隧道开挖至距高架桩基最近的位置时,桩基向远离隧道的方向产生了水平位移,两种方案下桩基的最大水平位移均不超过 0.5 mm。

3) 土体的黏聚力和弹性模量对隧道开挖过程中车站底板沉降和桩基水平位移影响较大。黏聚力或弹性模量越小,车站底板沉降越大,且两个参数的数值减小与结构变形增大不呈线性关系。

4) 当土体的黏聚力和弹性模量分别小于 70 kPa 和 100 MPa(压缩模量小于 20 MPa)时,隧道开挖过程中车站结构的沉降和桩基的水平位移开始显著增大,因此,在这些土体条件下建设类似本文所述案例工程时,应引起重视。

参考文献

- [1] 严德添. 暗挖隧道近距离下穿既有地铁车站的影响与控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
YAN Detian. Study on impact and control technology of bored tunnel undercrossing the existing subway station at short range[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [2] 刘胜欢, 杜明芳, 易领兵, 等. 北京新机场线大断面暗挖隧道下穿京沪铁路施工影响数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 125.
LIU Shenghuan, DU Mingfang, YI Lingbing, et al. Numerical analysis of the large section tunnel excavation for Beijing New Airport Line crossing under Beijing-Shanghai Railway[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 125.
- [3] 朱春杰. 新建地铁隧道下穿既有车站影响及安全控制措施研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.

(下转第 195 页)

差为 2 mm 的正态分布;其他定位点处高度施工误差服从均值为接触线标称高度、标准差为 3 mm 的正态分布。锚段关节处 99.7% 的定位点处高度施工误差在 ± 6 mm 范围内;其他定位点 99.7% 的定位点处高度施工误差在 ± 9 mm 范围内。

4 结语

1) 通过对现场实测导高值的统计分析,得出刚性悬挂系统导高施工误差服从正态分布模型。

2) 利用刚性悬挂导高施工误差的分布规律,生成正态随机数,建立考虑导高施工误差的刚性接触网仿真模型。通过弓网动态仿真分析,得到导高存在施工误差的接触力标准差是无施工误差的 2~3 倍,说明导高施工误差对受电弓与刚性接触网动态耦合性能的影响显著。

3) 通过弓网动态仿真分析,得到满足车速 160 km/h 的弓网系统技术参数。该弓网系统技术参数可为车速 160 km/h 刚性接触网方案设计与施工提供参考。

参考文献

- [1] VERA C, SUAREZ B, PAULIN J, et al. Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(8): 595.
- [2] 王世轩. 城市轨道交通弓网建模方法适用性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WANG Shixuan. Applicability study of pantograph-catenary modeling method in urban transit system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

- [3] MAK M K. Adoption of overhead rigid conductor rail system in MTR extensions[J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2012, 2(4): 463.
- [4] 代洪宇. 200 km/h 交流刚性接触网方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
DAI Hongyu. Research on 200km/h AC rigid catenary scheme [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [5] 宋博瀚. 地铁刚性接触网弓网关系与优化策略分析[J]. 中国设备工程, 2022(10): 83.
SONG Bohan. Analysis on the relationship between pantograph and catenary and its optimization strategy in metro rigid catenary[J]. China Plant Engineering, 2022(10): 83.
- [6] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
GUAN Jinfa. Study on dynamic interaction between pantograph and rigid catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 轨道交通 受流系统 受电弓与接触网相互作用准则: TB/T 3271—2011[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Railway applications-Current collection systems- Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access): TB/T 3271—2011[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.

· 收稿日期:2021-12-16 修回日期:2022-03-12 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-16 Revised:2022-03-12 Published:2024-06-10
· 第一作者:乔锦新,工程师,61969461@qq.com
通信作者:冯帆,硕士研究生,fflabcde@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 190 页)

- ZHU Chunjie. Research on impact and safety control measures of newly built subway tunnel undercrossing the existing subway station [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015.
- [4] 张桂彬. 复合地层盾构下穿高架桩基施工安全控制研究[J]. 建筑安全, 2021, 36(4): 26.
ZHANG Guibin. Study on safety control of shield tunneling under elevated pile foundation in composite stratum[J]. Construction Safety, 2021, 36(4): 26.
- [5] 王春凯. 小半径近距离盾构隧道侧穿高架桩基影响研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(6): 282.
WANG Chunkai. Analysis on influence of minor radius short-distance shield tunnel side crossing viaduct pile foundation[J].

- Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(6): 282.
- [6] 韦巍, 贺建军. 某铁路隧道下穿既有高架站安全性影响分析[J]. 技术与市场, 2015, 22(8): 74.
WEI Wei, HE Jianjun. Analysis on the safety impact of a railway tunnel undercrossing the existing elevated station[J]. Technology and Market, 2015, 22(8): 74.

· 收稿日期:2023-10-30 修回日期:2023-12-11 出版日期:2024-06-10
Received:2023-10-30 Revised:2023-12-11 Published:2024-06-10
· 作者:李志敏,高级工程师,86295464@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license