

综合交通枢纽施工对既有地铁隧道结构 影响机制研究

郑宏利¹, 牛豪爽²

(1. 中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京 101500; 2. 长安大学, 陕西 西安 710064)

摘 要: 目前关于多种构建筑物同时下穿车站这种耦合作用的相关研究较少, 结合广州南大干线工程, 通过建立三维模型分析了南大干线高架段、会江涌改造以及穗西电力隧道施工荷载对地铁结构的弯矩的影响, 模拟了桥梁施工、会江涌改造和电力隧道施工的过程, 获得了各工况下地铁二号线会江站结构的变形及内力变化情况。模拟分析南大干线主线施工对地铁车站结构的影响可知, 地铁车站结构水平位移极值为 1.037 mm, 竖向位移极值为隆起 3.704 mm, 隧道结构弯矩极值为 $-1\,158.67\text{ kN}\cdot\text{m}$, 弯矩增量为 $28.55\text{ kN}\cdot\text{m}$, 增幅仅为 2.5%, 在工况基坑开挖步骤中, 位移与弯矩同时达到最大值, 为现场施工过程提供可靠分析。

关键词: 数值模拟; 下穿车站; 电力隧道; 位移; 弯矩

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0103—06

Influence Mechanism of Integrated Transportation Hub Construction on Existing Subway Tunnel Structure

ZHENG Hongli¹, NIU Haoshuang²

(1. China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 101500, China;

2. Changan University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: At present, there is little research on the coupling effects of multiple structures passing through the station at the same time. In this paper, combined with the Guangzhou NANDA trunk line project, the influence of the construction load on the bending moment of the subway structure was analyzed by establishing a three-dimensional model, which can simulate the process of bridge construction in Huijiangyong reconstruction and power tunnel construction, as well as the structure deformation and internal force change of Huijiang station of Metro Line 2 under various working conditions. Through the simulation analysis of the impact of the construction of the main line of NANDA trunk line on the subway station structure, it can be seen that the maximum horizontal displacement of the subway station structure is 1.037 mm, the vertical displacement extreme value is 3.704 mm, and the maximum bending moment of the tunnel structure is $-1\,158.67\text{ kN}\cdot\text{m}$. The increment of bending moment is only 2.5% and the increment of moment is $28.55\text{ kN}\cdot\text{m}$. In the excavation process of foundation pit, the displacement and bending moment reach the maximum value at the same time, which provides reliable analysis for the field construction process.

Keywords: numerical simulation; underpass station; power tunnel; displacement; bending moment

随着经济的快速发展,城市规模和人口也在日益扩大,轨道交通将由二维线状向三维立体网状发展,难免出现在既有车站附近新建构筑物基础、地铁

等情况,这不仅使得既有车站稳定性受到严重影响,同样也会增加新建构筑物的施工难度^[1-4]。根据有关研究^[5-7],在 2050 年北京市区轨道交通线路规划

图中,节点车站和地铁区间穿越段的数目高达 118 处。目前穿越工程施工过程相互影响的分析研究主要采用数值模拟技术,研究成果较多,但对于多种构筑物同时下穿车站这种耦合作用的相关研究较少,对车站结构的位移和变形影响分析也相对较少。许斌峰等^[8]采用 MIDAS/GTS 软件建立工程结构顶管施工全过程的数值模拟,结合监测数据,得到矩形顶管施工对下穿电力隧道影响主要以竖向隆起为主,水平位移可以忽略。郭涛等^[9]借助数值分析方法与现场自动监测,对近距离下穿既有隧道的影响展开研究,对实际施工工况进行数值模拟,动态地分析了下穿过程对既有地铁隧道的影响。许友俊等^[10]运用有限元软件对施工过程进行模拟。结合实测数据,分析了在既有车站底板下方布置四排预埋桩基与不布置预埋桩基两种情况下盾构施工对既有车站沉降变形的影响。朱正国^[11]采用 FLAC^{3D} 三维快速拉格朗日差分方法分析软件对不同开挖工法及周围地层不同加固范围等施工方案进行了数值模拟,分析了既有车站轨道沉降、结构应力及新建区间隧道周边变形、结构受力特点及规律。在下穿工程中,许多学者还进行了大量的研究^[12-16],同时为施工风险控制提供了理论依据。

本文通过数值建模,模拟南大干线桥墩桩基、上部混凝土箱梁结构施工、会江涌箱涵改造施工以及穗西电力隧道盾构段施工等工况下对广州地铁二号线的影响,分析地铁车站结构的受力及变形状态在各阶段下的变化过程,进而评估南大干线项目的实施对地铁二号线地铁结构的影响程度,为后续施工提供理论依据,同时也为类似工况工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 工程简介

广州市南大干线西起番禺区石壁街钟三路,路线自西向东经大石街、南村镇、新造镇和化龙镇,终点位于石楼镇莲花大道,路线全长约 30.5 km。道路等级为城市快速路,规划路基宽度为 80 m,是联系广州南站—番禺新城及大学城组团的交通干线,未来西延佛山,往东通过莲花山过江通道连接东莞,将形成佛山—番禺—东莞的快速通道。

南大干线(东新高速至番禺大道)—东新高速至 G105 国道 K2+960—K4+869 工程位于番禺区大石街,路线全长 1.909 km,起终点桩号为 K2+960,是整个南大干线中的一部分。路线西起于东新高速公路(互道立交不包括立交范围),南大干线主

线高架桥设上、下匝道与东新高速连接;路线向东延伸,南大干线主线连续高架,分别上跨规划石西路、大石次三路,地面辅道与之作平面交叉;南大干线继续向东至终点桩号 K4+869,其中与地铁二号线会江站交叉部分平面图如图 1 所示。

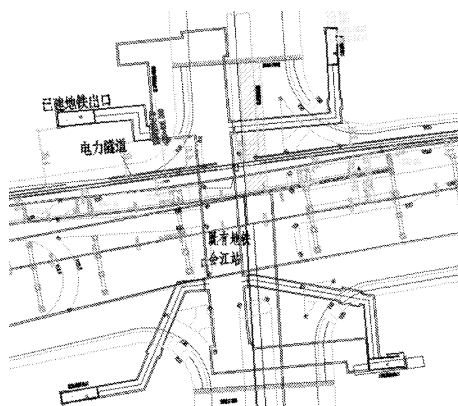


图 1 地铁二号线会江站交叉部分平面图

1.2 工程地质条件

场区属珠江三角洲沉积区,从上往下,覆盖层主要为第四系全新统人工填土(Q_4)、第四系全新统冲积层(Q_4^{al}),第四系残积层(Q^e),基岩为白垩系砂岩、泥质粉砂岩(K)。本路线工程地质的主要特点是全线分布巨厚层软土,本工程全线为软土路基,软土为流塑状淤泥、流塑状—软塑状淤泥质土。

选取地铁车站左线和右线典型地质纵断面钻孔可得,地铁车站结构主要位于<4-1>粉质黏土、<5-2>粉质黏土和<6>全风化粉砂岩中。考虑桩基施工及河涌改造施工对地铁车站的影响主要为土体侧向卸载及顶部竖向加卸载可能产生的车站结构位移,因此地铁车站所在位置的岩土层物理力学特性对分析桩基施工、河涌改造施工等产生的影响更为敏感,选取地铁钻孔作为评估的地质条件。

对比以上钻孔可得,建模分析过程以距离河涌改造段更近且岩面最低对地铁车站结构更为不利的 MBZ3-HJ-05 作为计算依据,可获得更为准确、真实的计算结果,相应的钻孔柱状图见图 2。

2 数值模拟研究

MIDAS/GTS NX 是一款基于尖端的计算机处理和分析技术研发而成的新一代通用岩土分析软件。该软件包含施工阶段的应力分析和渗透分析等岩土和隧道所需的几乎所有分析功能的通用分析软件。GTS/NX 将通用分析程序 MIDAS/Civil 的结构分析功能和前后处理程序 MIDAS/FX+ 的几何建模和网

格划分功能结合后,加入了适合于岩土和隧道的专用分析功能。

时代成因	地层编号	层底深度/m	分层厚度/m	层底标高/m	岩芯采取率/%	柱状图	岩芯照片值		地层描述	岩(土)样		标贯 N
							/%	/%		编号	击数	
Q ₄ ^{nl}	<1>	2.80	2.80	4.12	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	素填土:灰黄色,呈稍湿,松散状态,主要由中砂、黏性土组成,其中0.00m~0.15m为黏混凝土路面。		=10.0	
											1.85-2.15	
Q ₄ ^{mc}	<2-1A>	3.90	1.10	3.02	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	淤泥:灰黑色,呈饱和~饱湿,流塑~软塑状态,不均匀含细砂10%左右。		=2.0	
											3.55-3.85	
Q ₃ ^{sl+pl}	<4-1>	10.30	6.40	-3.38	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	粉质粘土:褐红、灰黄色,呈稍湿~湿,可塑~硬塑状态,不均匀含10%~15%细中砂。		=17.0	
											5.55-5.85	
Q ₂ ^{el}	<5-2>	15.10	4.80	-8.18	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	粉质粘土:灰黄、褐红色,呈稍湿,硬塑状态,由粉砂岩风化残积而成。		=20.0	
											8.65-8.95	
K ₁ ^{b1}	<6>	19.90	4.70	-12.88	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	全风化粉砂岩:褐红色,原岩组织结构基本风化破坏,但仍可辨认,岩石呈坚硬土柱状,遇水易软化、崩解。		=19.0	
											10.65-10.95	
K ₁ ^{b1}	<7>	25.10	5.30	-18.18	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	强风化粉砂岩:褐红色,原岩结构、构造基本可辨,节理裂隙微发育,岩质较软,岩石块手可折断,岩石呈半土状,遇水易软化、崩解。		=22.0	
											12.75-13.05	
K ₁ ^{b1}	<8>	27.90	2.80	-20.98	20.40±0.80 11.11		1:200	20.40±0.80 11.11	中风化粉砂岩:褐红色,中厚层状构造,岩层成分主要为粉细砂,节理发育,岩石组织结构部分破坏,节理、裂隙发育,岩石较完整,多呈块状、短柱状。		=27.0	
											14.75-15.05	
											=38.0	
											18.05-18.35	
											=58.0	
											20.05-20.35	
											>50.0	
											22.85-23.15	

图 2 MBZ3-HJ-05 钻孔柱状图

2.1 分析范围

(1) 南大干线主线主线桥高架段与地铁会江站相交,与车站呈近似垂直关系,本次分析区域内主线桥 K3+320 桥台桩基与车站结构最小净距 6.7 m。A 匝道高架段与地铁会江站相交,与车站呈近似垂直关系,本次分析区域内 A 匝道 AK0+100 桥台桩基与隧道盾构段结构最近距离 10 m。

(2) 500 千伏穗西电力隧道工程(南大干线共建段)第 1 路段与二号线会江站相交。穗西电力隧道拟采用 Φ4 100 mm 盾构,由于地铁车站覆土有限,隧道无法从区间上方穿越,设计采用盾构从二号线车站底下穿,电力隧道距离车站净距 6.7 m。盾构隧道穿越处地层为红层中风化带,地质条件好。

(3) 会江涌箱涵改造工程与车站主体结构近似平行,与车站附属 I 号出入口斜交。新建箱涵桩基距离车站附属 I 号出入口最小净距 3.26 m。新建箱涵距离车站主体结构最小净距 2.84 m,挡土墙距离

车站主体结构最小净距 2.12 m,施工期间基坑开挖深度 3.2 m~3.9 m,采用放坡开挖,基坑开挖顶距离车站主体结构最小净距仅 0.5 m。新建箱涵两侧填土高度 1.5 m。新建箱涵从 I 号出入口上方通过,跨越 I 号出入口采用桩基加混凝土板的形式架空穿越,施工期间开挖基坑底以及施工后箱涵底距离车站附属结构顶板净距仅 10 cm。

根据拟建南大干线主线桥高架段、A 匝道高架段、拟建穗西电力隧道以及拟改造会江涌方案与紧邻地铁隧道结构的空 间 关 系,结 合 桩 基 设 计 方 案、承 台 开 挖 方 案、桥 梁 上 部 结 构 方 案、电 力 隧 道 以 及 会 江 涌 改 造 的 设 计 和 施 工 等 资 料,建 立 三 维 整 体 模 型,详 见 图 3。

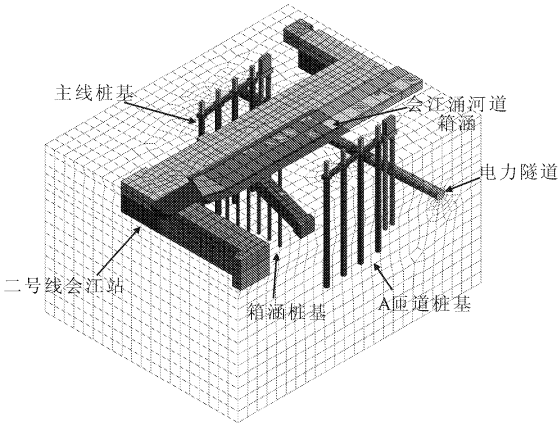


图 3 数值模型三维透视图

本文整体模型中包含了既有的二号线会江站、拟施工南大干线主线高架段、A 匝道高架段、穗西电力隧道和拟改造会江涌,模型计算范围为长约 125 m,宽约 100 m,土层计算深度为 75 m。

2.2 计算参数

本文主要参考《广州市轨道交通二、八号线拆解工程会江站详细勘察阶段岩土工程勘察报告》提供的岩土层参数作为计算依据,并根据相关工程经验,可确定三维整体模型的岩土层参数。

各岩土层土体采用弹塑性本构模型进行模拟,具体计算参数见表 1。

表 1 岩土层主要物理力学参数表

层号	土层名称	重度/(kN·m ⁻³)	变形模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	本构关系
<1>	素填土	19.0	8.0	10.00	5.00	修正摩尔库仑
<2-1A>	淤泥	15.3	3.6	2.70	3.10	修正摩尔库仑
<4-1>	粉质黏土	20.3	24.3	13.10	10.00	修正摩尔库仑
<5-2>	粉质黏土	20.0	42.0	28.20	16.00	修正摩尔库仑
<6>	全风化粉砂岩	20.5	70.0	29.00	16.10	修正摩尔库仑
<7>	强风化粉砂岩	22.6	120.0	80.00	29.00	修正摩尔库仑
<8>	中风化粉砂岩	25.1	500.0	100.00	40.00	修正摩尔库仑

根据二号线会江站设计资料,可确定三维整体模型的车站几何尺寸及物理力学参数,如表 2 所示。

表 2 车站结构主要参数表

名称	顶板厚/mm	底板厚/mm	中板厚/mm	侧墙/mm	材料类型	本构关系
主体结构	700	900	400/650	700	C30 混凝土	弹性
I 号出入口	550	600	—	500	C30 混凝土	弹性
III 号出入口	600	600	—	600	C30 混凝土	弹性
1 号风道	800	800	400	700	C30 混凝土	弹性

依据穗西电力隧道设计方案资料,三维整体模型的结构几何尺寸见表 3。

表 3 电力隧道管片主要参数表

名称	内径/mm	外径/mm	材料类型	本构关系
穗西电力隧道管片	3500	4100	C50 混凝土	弹性

依据桩基设计方案资料,三维整体模型的结构几何尺寸见表 4。

表 4 桩基结构主要参数表

名称	尺寸	模拟单元	材料类型	本构关系
钻孔桩	$\varphi 1.2\text{m}/\varphi 1.8\text{m}/\varphi 2.2\text{m}$	3D 单元	C30 混凝土	弹性
承台	详见图纸	3D 单元	C30 混凝土	弹性

2.3 边界条件及基本假设

边界条件:三维整体模型的边界条件为:模型底部约束 Z 方向位移,模型前后两面约束 Y 方向位移,模型左右两面约束 X 方向位移。三维整体模型的荷载条件为:岩土层自重、桩机自重、桥墩自重及现浇梁满堂支架荷载。一般地面按 20 kPa,桩机超载按 40 kPa,现浇梁满堂支架荷载按设计要求及相关规范取值。

基本假设:将土体视为均质、各向同性、理想的层状弹塑性体,并在盾构过程中不考虑土体的时间效应;电力隧道管片为各向同性的线弹性体,且忽略其管道接头的影响;忽略模型尺寸效应与粒径效应;在土体与管片之间的注浆层,考虑其注浆硬化的过程,仅考虑注浆后的压力大小。

2.4 分析工况

本次分析内容主要是拟建南大干线路高架段桩基施工、穗西电力隧道以及会江涌改造等施工对地铁二号线车站结构的影响。

针对拟建工程的全过程进行三维模拟,共分为 46 个施工工况,计算分析前 2 个工况为模拟地铁施工初始状态,主要为获取地铁结构初始内力;工况 3—工况 7 为模拟 A 匝道高架段施工;工况 8—工况

12 为模拟主线桥高架段施工;工况 13—工况 17 为模拟会江涌箱涵改造施工;工况 18—工况 46 为模拟电力隧道盾构掘进施工,具体如表 5 所示。

表 5 模拟工况施工步骤

工况序号	工况	描述
1	初始地应力状态	考虑未开挖状态的岩土层应力状态
2	地铁结构施工	模拟地铁隧道开挖
3	A 匝道桩基成孔	模拟 A 匝道桩基开挖
4	A 匝道桩基灌注	灌注评估范围内 A 匝道桩基
5	A 匝道承台基坑开挖	模拟 A 匝道承台开挖
6	A 匝道承台施工	灌注评估范围内 A 匝道承台
7	A 匝道桥墩施工	灌注评估范围内 A 匝道桥墩
8—12	主线桥高架段施工	模拟主线桥高架段施工,施工步骤类似 A 匝道
13	箱涵桩基成孔	模拟会江涌改造箱涵桩基开挖
14	箱涵桩基灌注	灌注箱涵桩基
15	基坑开挖与旧箱涵破除	模拟河涌改造段基坑开挖及旧箱涵破除
16	挡土墙与新箱涵施工	模拟新建挡土墙及箱涵施工
17	箱涵基坑回填	模拟基坑回填施工
18—46	电力隧道盾构施工	模拟电力隧道盾构掘进、管片安装施工

3 模拟结果分析

3.1 地铁结构水平位移

通过分析南大干线高架段施工、会江涌改造施工以及穗西电力隧道施工的过程,获得拟建南大干线、会江涌改造及穗西电力隧道施工对地铁结构的水平位移的影响,如图 4 所示。

由计算结果可知,地铁结构水平位移随着桩基施工、河涌改造施工和电力隧道施工的增加而增大,在基坑开挖与旧箱涵破除时,位移产生突变,主要是因为基坑土的移除打破了原有的土体平衡,因此在施工时应注意基坑支护,来维持原有平衡。位移最大值为 1.037 mm,出现在工况 38(电力隧道第 21 环施工),位移最大值位于 I 号出入口顶板靠近河涌

基坑开挖东侧的位置,且位于车站结构的顶部。

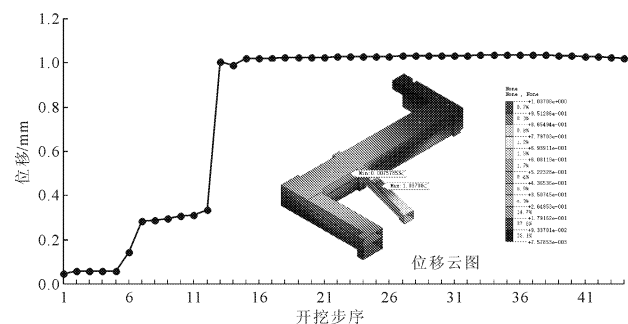


图4 各工况步骤下地铁结构水平位移极值

地铁结构水平位移变化较大的工况出现在工况15—工况17,说明河涌改造施工是引起地铁结构水平位移的主要施工因素。

3.2 地铁结构竖向位移

通过分析南大干线高架段施工、会江涌改造施工以及穗西电力隧道施工的过程,获得拟建南大干线、会江涌改造及穗西电力隧道施工对地铁结构的竖向位移的影响,如图5所示。

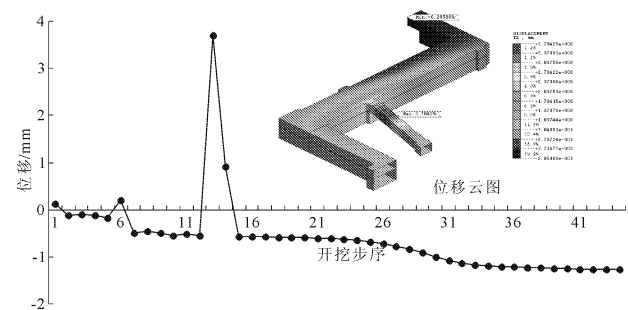


图5 各工况步骤下地铁结构竖向位移极值

由计算结果可知,地铁竖向位移最大值为隆起3.704 mm,出现在工况15(基坑开挖与旧箱涵破除),可在图中看到明显的突变,随着挡土墙与新箱涵施工和基坑回填迅速减小,可见在基坑开挖过程中,有效的支护非常有必要,并且在进行回填前不能拆掉支撑装置。随着电力隧道盾构的开挖,竖向位移基本平稳。位移最大值位于I号出入口与箱涵开挖基坑相交处正下方的顶板,且位于车站结构的顶部。

3.3 地铁结构内力

通过分析南大干线高架段施工、会江涌改造施工以及穗西电力隧道施工的过程,获得拟建南大干线、会江涌改造及穗西电力隧道施工对地铁结构的弯矩的影响,如图6所示。

由计算结果可知,地铁结构初始弯矩值为

-1 130.12 kN·m,弯矩极值为-1 158.67 kN·m,出现在工况15(基坑开挖与旧箱涵破除),在拟建项目施工期间,隧道弯矩呈增大趋势,弯矩增量为28.55 kN·m,增幅仅为2.5%。

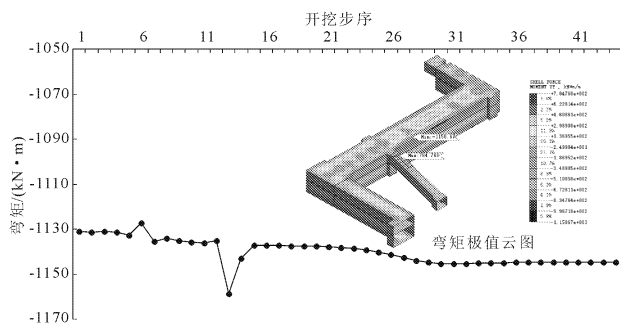


图6 各工况步骤下地铁结构弯矩极值

4 结 论

本文通过建立三维模型分析了南大干线高架段、会江涌改造以及穗西电力隧道施工荷载对地铁结构的弯矩的影响,模拟了桥梁施工、会江涌改造和电力隧道施工的过程,获得了各工况下地铁二号线会江站结构的变形及内力变化情况。

(1) 在工况5—工况6模拟中,随着A匝道承台基坑开挖,水平、竖向位移和弯矩都出现突变,在此阶段施工中,应保障开挖过程中的支撑。

(2) 施工工况模拟中,在工况15即基坑开挖与旧箱涵破除中,水平位移、竖向位移和弯矩同时达到最大值,在施工过程中,应做好开挖前后期的支护。

(3) 整个盾构电力隧道开挖过程中,未出现明显的位移和弯矩突变,在水平位移上较为平稳,竖向位移和弯矩都有小幅度上升,应加以关注。

(4) 地铁车站结构水平位移极值为1.037 mm,竖向位移极值为隆起3.704 mm,隧道结构弯矩极值为-1 158.67 kN·m,弯矩增量为28.55 kN·m,增幅仅为2.5%。

参考文献:

- [1] 马腾飞,刘小亮,岳 虎.软黏土地层中新建隧道下穿既有车站数值模拟分析[J].现代商贸工业,2019,40(32):197-198.
- [2] 何小龙,董浩伟,陈燕青,等.上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形影响的监测与数值分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):39-44.
- [3] 戚长军,刘争宏,余武术,等.基坑开挖对既有盾构隧道与地层的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):142-146.

[4] 汪 洋,何 川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报,2010,32(2):79-85.

[5] 张成满,罗富荣. 地铁工程建设中的环境安全风险技术管理体系[J]. 都市轨道交通,2007(2):63-65,83.

[6] 贺美德,刘 军,乐贵平,等. 盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):603-608.

[7] 陈 俊. 超大直径盾构下穿对运营地铁隧道的变形分析[J]. 浙江水利水电学院学报,2020,32(3):51-56.

[8] 许斌锋,于洪波,柳盛霖,等. 大断面矩形顶管下穿电力隧道的数值模拟及现场监测[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(2):148-151.

[9] 郭 涛,邹伟彪. 浅埋暗挖隧道下穿北京既有地铁站的过程控制[J]. 市政技术,2010,28(2):95-98.

[10] 许有俊,孟 贞,李志成,等. 盾构隧道近距下穿既有地铁站沉降控制措施研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(6):1044-1050.

[11] 朱正国,余剑涛,朱永全. 区间隧道零距离下穿既有地铁车站施工方案研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(6):124-130.

[12] 刘光华,魏 红. 电力隧道近距离底穿输水方涵应力变形分析[J]. 人民黄河,2020,42(4):108-111.

[13] 马文辉,杨成永,彭 华,等. 卵石地层中地铁盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 太原理工大学学报,2020,51(3):372-379.

[14] 王日东,杨 潇. 上软下硬地层下穿建筑物隧道数值模拟[J]. 低温建筑技术,2014,36(4):133-135.

[15] 李颖娜,赵 欣. 浅析电力隧道下穿通顺路的沉降影响[J]. 市政技术,2016,34(2):97-98,102.

[16] 王 涛,余建民. 基坑开挖对邻近既有下穿顶管隧道的变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):200-204.



(上接第 102 页)

[10] 张东鹏,吴应雄,林顺建,等. 隔震工程下支墩混凝土及预埋板施工技术分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,16(3):101-107.

[11] 吴国来,陈启东,张东鹏,等. 隔震支座下支墩(柱)预埋钢板下部填充工法试验研究[J]. 施工技术,2020,49(13):114-117,122.

[12] 江丽玲,陈伟恩,刘 林,等.《福建省隔震建筑结构构造图集》编制技术分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):215-222.

[13] 杨清华,李少宁,薛 彪,等. 对隔震技术及设计的常识性介绍[J]. 施工技术,2018,47(S1):1714-1716.

[14] 吴应雄,黄 净,陆剑峰,等. 考虑不同底层结构形式和刚度的柱顶隔震结构试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(3):521-534.

[15] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[4] 汪 洋,何 川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报,2010,32(2):79-85.

[5] 张成满,罗富荣. 地铁工程建设中的环境安全风险技术管理体系[J]. 都市快轨交通,2007(2):63-65,83.

[6] 贺美德,刘 军,乐贵平,等. 盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):603-608.

[7] 陈 俊. 超大直径盾构下穿对运营地铁隧道的变形分析[J]. 浙江水利水电学院学报,2020,32(3):51-56.

[8] 许斌锋,于洪波,柳盛霖,等. 大断面矩形顶管下穿电力隧道的数值模拟及现场监测[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(2):148-151.

[9] 郭 涛,邹伟彪. 浅埋暗挖隧道下穿北京既有地铁站的过程控制[J]. 市政技术,2010,28(2):95-98.

[10] 许有俊,孟 贞,李志成,等. 盾构隧道近距下穿既有地铁车站沉降控制措施研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(6):1044-1050.

[11] 朱正国,余剑涛,朱永全. 区间隧道零距离下穿既有地铁车站施工方案研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(6):124-130.

[12] 刘光华,魏 红. 电力隧道近距离底穿输水方涵应力变形分析[J]. 人民黄河,2020,42(4):108-111.

[13] 马文辉,杨成永,彭 华,等. 卵石地层中地铁盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J]. 太原理工大学学报,2020,51(3):372-379.

[14] 王日东,杨 潇. 上软下硬地层下穿建筑物隧道数值模拟[J]. 低温建筑技术,2014,36(4):133-135.

[15] 李颖娜,赵 欣. 浅析电力隧道下穿通顺路的沉降影响[J]. 市政技术,2016,34(2):97-98,102.

[16] 王 涛,余建民. 基坑开挖对邻近既有下穿顶管隧道的变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):200-204.



(上接第 102 页)

[10] 张东鹏,吴应雄,林顺建,等. 隔震工程下支墩混凝土及预埋板施工技术分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,16(3):101-107.

[11] 吴国来,陈启东,张东鹏,等. 隔震支座下支墩(柱)预埋钢板下部填充工法试验研究[J]. 施工技术,2020,49(13):114-117,122.

[12] 江丽玲,陈伟恩,刘 林,等.《福建省隔震建筑结构构造图集》编制技术分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):215-222.

[13] 杨清华,李少宁,薛 彪,等. 对隔震技术及设计的常识性介绍[J]. 施工技术,2018,47(S1):1714-1716.

[14] 吴应雄,黄 净,陆剑峰,等. 考虑不同底层结构形式和刚度的柱顶隔震结构试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(3):521-534.

[15] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.