

盾构隧道下穿砌体结构住宅群的施工技术

李梓亮^{1,2} 汤劲松^{1,2} 赵书银³ 姜景双⁴

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 050043, 石家庄;

2. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 050043, 石家庄;

3. 中铁十六局集团有限公司, 100018, 北京;

4. 中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司, 101100, 北京 // 第一作者, 硕士研究生)

摘要 以呼和浩特市轨道交通2号线呼和浩特站—公主府站区间盾构隧道下穿砌体结构住宅群为工程背景, 采用MIDAS-GTS有限元软件对盾构隧道下穿砌体结构住宅群进行数值模拟。以砌体结构墙体最大拉应力增量作为评价指标, 分析盾构隧道施工对砌体结构的影响。提出洞内深孔注浆加固措施的技术参数, 结合现场监测数据, 对加固效果进行分析。结果表明: 未采取任何加固措施时, 盾构隧道施工结束后, 房屋的沉降虽能满足控制要求, 但砌体结构墙体最大拉应力增量不满足房屋安全使用要求; 采用深孔注浆加固后, 墙体的最大拉应力增量可以满足建筑物安全使用控制标准, 证明深孔注浆加固技术可以较好地减少盾构隧道施工对砌体结构房屋的影响, 保证砌体结构建筑物的安全和正常使用。

关键词 城市轨道交通; 盾构隧道; 下穿砌体结构住宅群; 深孔注浆加固技术

中图分类号 U455.43; U456.3⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.025

Construction Technology of Shield Tunnel Undercrossing Masonry Structure Residential Group

LI Ziliang, TANG Jinsong, ZHAO Shuyin, JIANG Jing-shuang

Abstract Taking shield tunnel between Hohhot Station and Gongzhufu Station of Hohhot City Rail Transit Line 2 undercrossing masonry structure residential group as engineering background, numerical simulation for shield tunnel undercrossing masonry structure residential group is carried out by using MIDAS-GTS finite element software. The maximum tensile stress increment of the masonry structured house wall is taken as the evaluation index. The influence of shield tunnel construction on masonry structured house is analyzed, and technical parameters are proposed for deep-hole grouting reinforcement measure. The reinforcement effect is analyzed taking into consideration of field monitoring data. Results show that,

without reinforcement measure, settlement of house can meet control requirements, but the maximum tensile stress increment of masonry structure wall does not meet the requirements of safe use after shield tunnel construction completed; with deep-hole grouting reinforcement technology, the maximum tensile stress increment of the wall can meet safe control standards of building. It is proved that the deep-hole grouting reinforcement technology can well reduce the influence on masonry structure caused by shield tunnel construction and ensure safe and normal use of masonry buildings.

Key words urban rail transit; shield tunnel; undercrossing masonry structure residential group; deep-hole grouting

First-author's address School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, 050043, Shijiazhuang, China

在城市中修建地铁隧道时不可避免地会下穿建筑物或者建筑群。其中, 砌体结构建筑物相比其他结构建筑物而言具有抗拉强度小、抗剪强度低和结构刚度弱等缺点。因此, 盾构隧道下穿砌体结构房屋一直以来都是地铁隧道施工过程中的重点和难点所在。

对于砌体结构建筑物而言, 其对地基的不均匀沉降十分敏感, 不均匀沉降会导致砌体结构房屋墙体发生挠曲, 从而引起砌体结构建筑物开裂, 尤其在墙体窗户口、门洞等建筑物刚度相对较小的部位。文献[1-10]将建筑物的沉降和局部倾斜作为判别盾构隧道下穿砌体结构房屋影响大小的标准, 分析了盾构隧道施工对房屋的影响规律, 但不足之处在于砌体结构建筑物的局部倾斜并不能直接反映盾构隧道下穿建筑物后结构的受力状态, 也不能判断砌体结构房屋的结构安全性和正常使用功能。

本文采用MIDAS-GTS软件对盾构隧道下穿砌体结构住宅群进行数值模拟, 以砌体结构墙体最大

拉应力增量作为评价指标,分析盾构隧道施工对砌体结构房屋的影响;提出适应盾构隧道下穿砌体结构房屋控制要求的地层加固措施;结合现场监测数据,对加固效果进行了分析。研究成果可为后续地铁隧道的建设提供一定的借鉴和参考。

1 工程概况

呼和浩特市轨道交通 2 号线一期工程呼和浩特站—公主府站区间隧道为单线双孔隧道,分左、右两条线。区间隧道采用盾构法进行施工,盾构机采用中国铁建重工集团股份有限公司生产的 2 台编号分别为 269、270 的土压式平衡盾构机。刀盘直径为 6 440 mm,开口率为 60%;盾构机主体长 8 865 mm,盾尾间隙为 30 mm。隧道管片采用 C50 预制钢筋混凝土拼装管片,管片直径为 6 200 mm,厚度为 350 mm,每环管片宽 1.5 m。

盾构隧道自公主府站始发,止于呼和浩特站,沿线下穿建筑物主要为道北三小区和道北二小区砌体结构住宅群。其中受盾构隧道施工扰动影响的建筑物约 10 栋,如图 1 所示。由于数值模拟的局限性,本文选取房屋结构较弱、建成时间较长、离盾构隧道间距较小的道北三小区 1 号、4 号、6 号和 9 号居民楼进行分析。

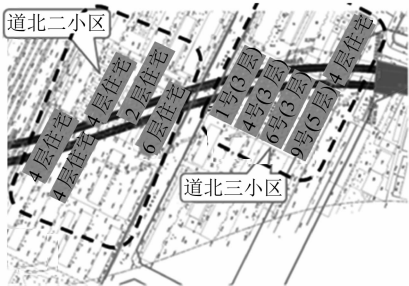
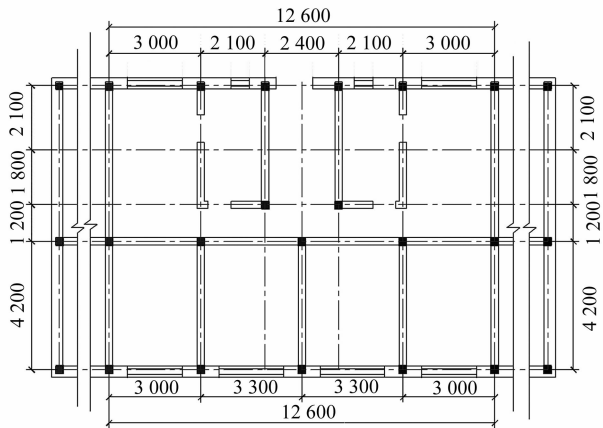


图 1 盾构隧道与道北三小区砌体结构住宅群相对位置图

道北三小区始建于 20 世纪 90 年代,结构设计为砌体结构,道北 1 号楼、4 号楼和 6 号楼为地上 3 层,道北 9 号楼设计层数为 5 层,无地下室。1 号楼、4 号楼、6 号楼和 9 号楼均采用一梯两户单元式结构设计,层高为 2.8 m,单元长度为 12.6 m,宽度为 9.8 m。建筑物采用条形基础,基础底宽 1.6 m,埋深为 1.0 m。墙体为 M10 混合砂浆砌 MU10 烧结普通砖,房屋的现浇楼板、基础均采用 C20 钢筋混凝土材料。砌体结构房屋单元平面设计如图 2 所示。



尺寸单位: mm

图 2 砌体结构房屋单元平面图

根据前期地勘报告可知,区间隧道在下穿砌体结构建筑物时,主要穿越地层为圆砾和中砂地层。

2 砌体结构房屋安全控制标准

本工程中,由于道北二、三小区使用年限已久,且房屋老化严重,因此根据专家论证意见,对建筑物的沉降标准进行适当折减,严格控制砌体结构建筑物的沉降和局部倾斜。地表和建筑物的相关控制指标见表 1。

表 1 地表和建筑物的沉降标准

监测项目	累计值	变化速率
建筑物沉降	15 mm	3 mm/d
建筑物倾斜	1‰	>0.1‰ H/d
地表沉降	30 mm	4 mm/d
地表隆起	10 mm	3 mm/d

注: H 表示建筑物的高度;建筑物的倾斜变化速率是连续 3 d 的情况。

表 1 中的各指标均为现场施工过程中常用的评价建筑物安全性的指标。指标数据主要通过全站仪、卷尺等测量设备测得,具有简单易得的优点;但这些指标不能准确描述出此时建筑物结构的受力状态,以及盾构隧道施工对建筑物应力造成的影响。砌体结构房屋的墙体为薄弱结构,在地基的不均匀沉降作用下,易受到破坏,常在窗户、门洞等部位出现裂缝,故以砌体结构墙体的抗拉强度设计值作为评价指标能够更全面地评价建筑物的安全性。

本工程中道北三小区砌体结构房屋墙体采用 M10 混合砂浆和 MU10 烧结普通砖,根据 GB 50003—2011《砌体结构设计规范》^[11]中的相关规定,其弯曲抗拉强度为 330 kPa。但考虑到道北三小区建成时间较长,建筑物结构老化严重,为此对墙

体的弯曲抗拉强度设计值进行相应折减,以弯曲抗拉强度为 250 kPa 作为判断砌体结构房屋墙体破坏的标准。

3 盾构隧道下穿住宅群数值模拟分析

3.1 模型的建立

考虑到隧道开挖空间效应的影响,在建模时采用以下原则:①模型长度自隧道左右两侧各取 6 倍的隧道直径,且满足建筑物边缘与模型边缘距离不小于 30 m;②模型宽度取至建筑物外边缘 30 m;③在模型高度方面,隧道以上取至地表,隧道以下取 3 倍的隧道直径。三维模型如图 3 所示。整个模型尺寸为 144 m×40 m×159 m(长度×高度×宽度),共 484 709 个单元、287 637 个节点。

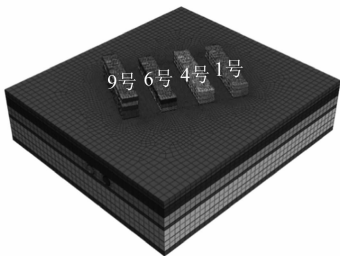


图 3 三维数值计算模型

模型采用位移边界条件,其中底部为固定边界,限制其水平及垂直方向的位移;模型周围限制水平方向的位移;模型上部取至地表,为自由边界。

3.2 计算参数的确定

考虑到隧道的开挖卸载作用,本文对于建筑物基础所在的素填土地层采用摩尔-库伦本构关系,其余地层采用修正摩尔-库伦本构关系。在修正摩尔-库伦本构关系中,卸载模量的取值一般为弹性模量的 3~5 倍^[12],本文卸载模量取 3 倍的弹性模量。地层计算参数取值见表 2。

表 2 地层计算参数取值

地层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	2.8	20	0.30	20.0	20	30.0
③ ₄ 粉砂	2.4	10	0.30	19.2	0	29.5
③ ₉ 圆砾	8.1	37	0.25	21.4	0	37.0
③ ₆ 中砂	5.4	28	0.28	20.4	0	34.3
④ ₁ 黏土	2.0	18	0.35	18.9	26	22.6
④ ₆ 中砂	8.7	33	0.28	20.9	0	34.5
④ ₄ 粉砂	3.4	10	0.30	20.4	0	30.0

建筑物、管片及注浆材料等构件,统一采用弹性模型。同时,考虑到管片接头的拼装影响,将管

片的刚度按 0.85 的系数进行折减^[13]。主要材料计算参数取值见表 3。

表 3 主要材料计算参数取值

材料	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)
管片	210 000.0	0.20	25.0
盾壳	30 000.0	0.30	78.5
软注浆液	0.9	0.30	21.0
硬注浆液	15.0	0.20	21.0
基础、楼板	20 000.0	0.20	25.0
砖墙	2 700.0	0.15	20.0

3.3 盾构隧道施工过程模拟

按照现场实际施工,先开挖右线隧道再开挖左线隧道。

盾构隧道施工过程模拟步骤如下:①计算地层的初始应力,地层位移清零;②施加砌体结构建筑物荷载,位移清零;③钝化隧道开挖土体,激活盾壳和支护压力;④钝化盾壳,激活管片和软注浆液,开挖 5 环后将软注浆液硬化为硬注浆液;⑤重复步骤③—步骤④,至 2 条隧道开挖完成。

3.4 计算结果分析

3.4.1 盾构隧道施工引起地层和建筑物位移分析

右线隧道施工结束后,地表及建筑物沉降放大变形如图 4 所示。双线隧道贯通后,地表及建筑物沉降放大变形如图 5 所示。

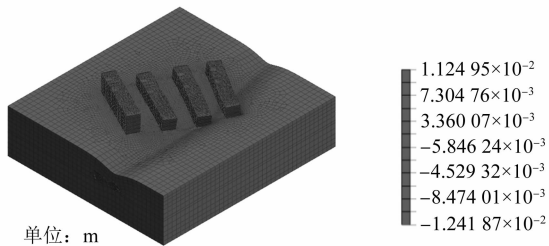


图 4 右线隧道施工结束后地表及建筑物沉降放大变形图

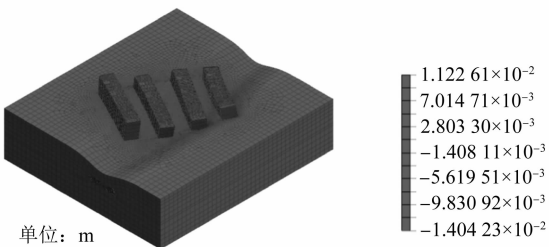


图 5 双线贯通后地表及建筑物沉降放大变形图

由图 4 可知,右线隧道施工结束后,由于右线隧道侧穿 6 号楼和 9 号楼,所以 6 号楼和 9 号楼的沉降变形较小,其中 9 号楼的最大沉降值比 6 号楼还

要小,这是因为 9 号楼离右线隧道的距离比 6 号楼要远。而对于 1 号楼和 4 号楼,由于 4 号楼为右线隧道侧穿工况,且 4 号楼的一个角正好处于右线隧道的正上方,所以导致 4 号楼的最大沉降值比 1 号楼要大,沉降值最大的地方位于右线隧道正上方建筑物角点。

由图 5 可知,双线隧道贯通后,除了 9 号楼的沉降变形较小,其余建筑物的沉降变形均较大。这是因为对于 9 号楼而言,不论是右线隧道还是左线隧道,均不下穿 9 号楼,但盾构施工使其产生了倾斜。对于其余建筑物,由于左线隧道均为下穿情况,所以造成建筑物沉降变形较大。

3.4.2 砌体结构房屋墙体拉应力增量分析

对图 4 和图 5 中建筑物的沉降和墙体的最大拉应力增量进行提取汇总,如表 4 所示。本工程中隧道为曲线隧道,所以盾构隧道在下穿建筑物过程中,隧道中心线与建筑物中心线间距在不断变化。因此,定义建筑物长度方向中心线与隧道中心线的交点到建筑物中点的距离为间距。至于隧道中心线与建筑物中心线的夹角这一因素,对于同一栋建筑物而言,隧道中心线与建筑物中心线的夹角不变,不同建筑物之间隧道中心线与建筑物中心线的夹角变化又不大,所以忽略隧道中心线与建筑物中心线夹角的影响,只分析间距不同时,盾构隧道施工对砌体结构建筑物造成的影响。

表 4 建筑物与隧道位置参数和计算结果

工况		间距	夹角/(°)	房屋最大沉降值/mm	墙体最大拉应力增量/kPa
右线隧道施工结束	1 号楼	D	38	7.34	534.293
	4 号楼	$3D$	33	9.70	414.423
	6 号楼	$5D$	30	5.64	217.423
	9 号楼	$7D$	26	1.20	151.736
双线隧道施工结束	1 号楼	$2D$	38	11.90	684.493
	4 号楼	$0.5D$	33	12.50	632.074
	6 号楼	$3D$	30	13.90	340.501
	9 号楼	$5D$	26	7.57	290.992

注: D 为隧道外直径。

对比分析表 4 中右线隧道施工结束后和双线贯通后建筑物的沉降变化和墙体的最大拉应力增量可知:右线隧道施工结束后,建筑物沉降最大的为 4 号楼,砌体结构房屋墙体拉应力增量最大的为 1 号楼;双线贯通后,建筑物沉降最大的为 6 号楼,砌体结构房屋墙体拉应力增量最大的为 1 号楼。由此可知,在盾构隧道施工过程中,单纯以建筑物的沉降

作为控制指标并不能完全体现盾构隧道施工对砌体结构建筑物的影响程度,也不能对建筑物的安全性作出可靠评价,此时可以体现出本文以砌体结构房屋墙体最大拉应力增量作为评价指标的合理性和可行性。

根据表 4 的模拟计算结果可知,在施工过程中,砌体结构房屋的沉降虽然满足控制标准,但其墙体的最大拉应力增量不能满足规定要求。为了最大程度地满足砌体结构房屋的安全使用要求,需要在盾构隧道掘进过程中采取一系列加固措施,以减小盾构隧道施工给居民生活造成的不利影响。

4 洞内深孔注浆加固措施研究

深孔注浆加固技术是目前工程中应用最多、效果最好、技术最成熟的加固措施之一,其主要技术参数包括隧道径向加固半径、建筑物前后加固范围及隧道加固断面等。

深孔注浆加固材料采用水泥-水玻璃双浆液。该浆液具有可控性好、浆液凝固后结石率高等优点。根据现场试验,测定加固后的土体弹性模量为 500 MPa,泊松比为 0.2,重度为 21 kN/m³,黏聚力为 30 kPa,内摩擦角为 43°。

4.1 深孔注浆加固参数的确定

通过对盾构隧道下穿砌体结构建筑群的研究可知,在不采取任何措施的情况下,盾构隧道施工会引起建筑物破坏,其中道北 1 号楼危险性最大。因此,以道北 1 号楼为例,采用正交试验方法确定深孔注浆加固技术的最佳技术参数。

4.1.1 正交试验因素水平选取

1) 隧道径向加固半径:径向注浆是指采用注浆管通过预制管片的预留注浆孔对隧道周围土体进行加固,而径向注浆半径是指注浆管伸出盾构管片外的长度。深孔注浆在实际隧道工程应用中,其径向加固半径根据工程条件而不同,为此本文隧道径向加固半径分别选取 2 m、3 m、4 m 及 5 m。

2) 建筑物前后加固范围:现场注浆加固都是按管片环数对建筑物前后进行加固。参照实际工程,分别选取建筑物前后 2 环、4 环、6 环、8 环范围内的土体进行加固。

3) 隧道加固断面:在实际工程中,常用的隧道加固断面有 120°断面、180°断面和 360°断面。为了与隧道径向加固半径因素和建筑物前后加固范围因素的水平数一致,对隧道加固断面因素增加一个

水平,为 240°隧道加固断面。

对各因素的水平按照随机化的方式进行排列。正交试验因素水平表如表 5 所示。对隧道进行“全断面加固+隧道径向加固半径 3 m+建筑物前后加固 4 环”的加固,如图 6 所示。

表 5 正交试验因素水平表

水平	隧道径向加固半径/m	建筑物前后加固范围	隧道加固断面
I	2	6 环	120°
II	3	2 环	180°
III	4	8 环	240°
IV	5	4 环	360°

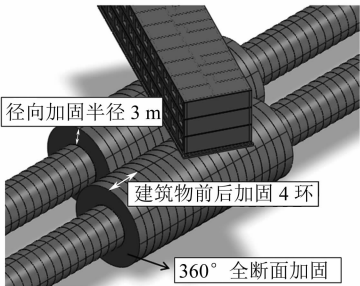


图 6 隧道加固断面示意图

4.1.2 正交试验结果

正交试验采用 5 因素 4 水平正交试验表进行设计。正交试验表及计算结果如表 6 所示。

表 6 正交试验表及墙体最大拉应力增量

试验编号	隧道径向加固半径/m	建筑物前后加固范围	隧道加固断面	墙体最大拉应力增量/kPa
1	2	6 环	120°	277.294
2	2	2 环	180°	271.473
3	2	8 环	240°	261.468
4	2	4 环	360°	248.543
5	3	2 环	360°	238.567
6	3	6 环	240°	254.646
7	3	4 环	180°	265.237
8	3	8 环	120°	273.653
9	4	8 环	180°	251.587
10	4	4 环	120°	273.195
11	4	6 环	360°	220.170
12	4	2 环	240°	233.514
13	5	4 环	180°	225.794
14	5	8 环	360°	208.333
15	5	2 环	120°	272.650
16	5	6 环	180°	253.555

根据表 6 中的计算结果,结合砌体结构房屋安全控制标准可知:试验 4、5、11、12、13 和 14 的数值模拟计算结果均小于折减后的墙体抗拉强度控制标准,其中试验 14 的计算结果最小,加固效

果最优;试验 4 的计算结果与控制标准最为接近。在确定加固参数时,考虑到施工成本和对环境的影响,遵循“安全可靠、经济合理”的原则,不一定需要采用最优方案使墙体的最大拉应力增量达到最小,只需将砌体结构房屋墙体的最大拉应力增量控制在安全使用范围内即可。因此,决定采用试验 4 的加固方案作为推荐方案,并对该方案进行进一步分析。

4.2 现场施工监测点布置

该工程已于 2019 年 6 月施工完毕,通过对隧道施工过程中和施工结束后的现场勘查发现,道北三小区和二小区内的砌体结构住宅楼未产生明显倾斜,墙体未出现明显裂缝,建筑物沉降也在控制标准内。由此可见,采用深孔注浆加固方案后,盾构隧道施工未给砌体结构房屋造成较大的影响,砌体结构住宅楼满足安全使用要求。为了进一步分析数值模拟结果的可靠性,以下通过施工现场监控量测,将现场监测数据与数值模拟结果进行对比分析。

根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》^[14] 和 JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》^[15],结合砌体结构房屋的特点,对道北 1 号楼进行监测点布置。测点布置原则为在砌体结构房屋的四角或沿外墙每隔 6~10 m 设置 1 个沉降监测点,且每侧墙体不少于 3 个测点。道北 1 号楼现场监测点布置如图 7 所示。

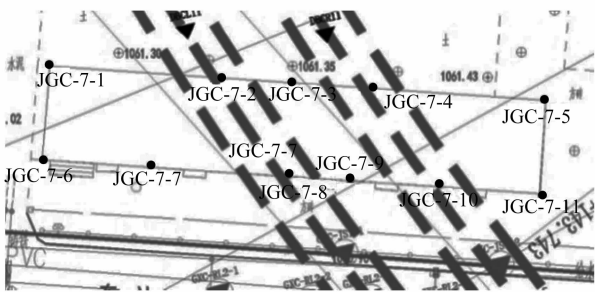


图 7 道北三小区 1 号楼监测点布置图

4.3 现场监测数据与数值模拟结果对比

在施工过程中对建筑物进行监测时,考虑到人力、物力的影响,对监测点采用的监测频率为 1~2 次/d。为了使实测数据和模拟结果具有可比性,按照盾构机刀盘至监测点的实际距离对数值模拟中的监测点进行数据提取,并对道北 1 号楼各监测点实测数据与模拟结果进行对比分析。

4.3.1 监测点 JGC7-1

右线隧道施工过程中和左线隧道施工过程中,

监测点 JGC7-1 的实测沉降值与数值模拟沉降值对比如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知,右线隧道施工时,随着盾构机的掘进,刀盘距离监测点 JGC7-1 的间距不断减小,监测点 JGC7-1 逐渐产生沉降;实测最大沉降值为 1.7 mm,数值模拟最大沉降值为 1.9 mm;实测沉降值与数值模拟沉降值变化趋势相同,且吻合度较好。

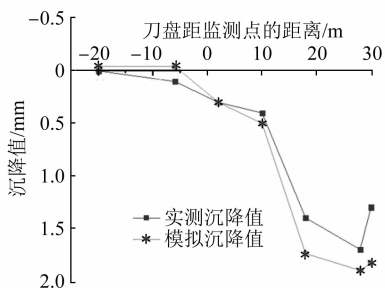


图 8 右线隧道施工监测点 JGC7-1 沉降值对比

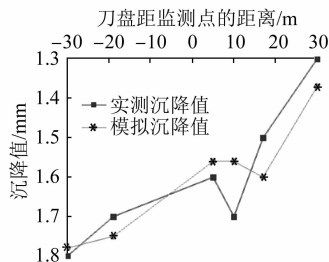


图 9 左线隧道施工监测点 JGC7-1 沉降值对比

由图 9 可知,左线隧道施工时,随着盾构机的掘进,监测点 JGC7-1 的沉降值出现较小的回弹,其主要原因为该监测点是 1 号楼的一个角点,左线隧道施工使得地表产生沉降从而导致建筑物产生向左的倾斜,最终导致监测点 JGC7-1 的沉降值出现回弹;实测数据的回弹值为 0.50 mm,数值模拟数据的回弹值为 0.41 mm,二者基本接近,表明数值模拟方案与实际工程相似度较高。

4.3.2 监测点 JGC7-3

右线隧道和左线隧道施工过程中,监测点 JGC7-3 的实测沉降值与数值模拟沉降值对比如图 10 和图 11 所示。

由图 10 可知,右线隧道施工时,随着盾构机的掘进,刀盘距离监测点 JGC7-3 的间距不断减小,该监测点逐渐产生沉降,且沉降趋势不断增大。究其原因,主要是因为该监测点为整个建筑物外墙的中心点,距离右线隧道轴线较近,从而导致其沉降值较大;实测最大沉降值为 2.5 mm,数值模拟最大沉降值为 2.3 mm,通过监测点的沉降趋势可知实测值

与模拟值趋势相同,且吻合度较好。

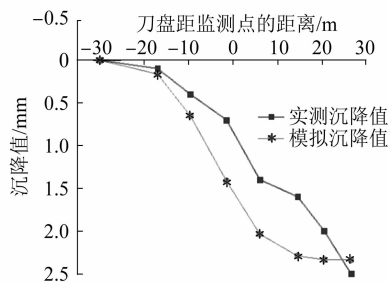


图 10 右线隧道施工监测点 JGC7-3 沉降值对比

由图 11 可知,左线隧道施工时,随着盾构机的掘进,监测点 JGC7-3 的沉降值在原有沉降值的基础上不断增加。这是由于该监测点位于两条隧道的中间,左线隧道的施工扰动同样导致该监测点产生沉降所致。左线施工结束后,实测最大沉降值为 3.6 mm,数值模拟最大沉降值为 3.5 mm,二者数值相差较小,监测点沉降趋势基本接近。

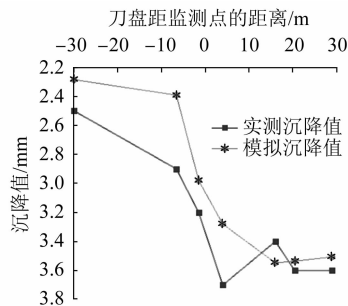


图 11 左线隧道施工监测点 JGC7-3 沉降值对比

通过对道北 1 号楼监测点 JGC7-1、JGC7-3 的实测数据与数值模拟结果进行对比,发现实测数据与数值模拟结果虽然数值上存在一定的差异,但其总体沉降趋势基本相同,且沉降值的差异也在可接受范围内。由此可见,采用推荐的深孔注浆加固方案后,实际盾构隧道施工对道北 1 号楼的影响与数值模拟情况基本一致。因此,采用径向加固 2 m、建筑物前后加固 4 环、隧道全断面加固的深孔注浆加固参数,可以有效减少盾构隧道施工对上部砌体结构房屋的扰动程度,使道北 1 号楼在盾构隧道施工过程中处于安全状态。

5 结论

1) 通过对盾构隧道下穿砌体结构住宅群的数值模拟结果分析可知,虽然砌体结构的最大沉降值能够满足建筑物沉降要求,但墙体最大拉应力增

(下转第 124 页)

子,在质量分析器中完成,质荷比取决于离子的质量数和电荷数。

5 结语

本文对目前国内城市轨道交通部门常规采用的 3 种爆炸物危险品检测方法进行了原理性阐述及优缺点对比。随着新技术的不断涌现,新型的爆炸物危险品检测手段也会层出不穷,包括核磁共振等,但是由于新技术的设备成本较高且相应的爆炸物危险品图谱不完整,因此一直未得到充分的应用;另一方面,爆炸物危险品的种类也在不断地升级,还有待于研究人员进行更加充分的学习和研究,新技术研发工作仍然“任重道远”。

参考文献

[1] 刘明,胡文祥.爆炸性物质的测量测定技术方法[J].有机化

学研究,2015(1):77.

- [2] 石小溪,赵国忠.爆炸性物质的太赫兹 (THz) 光谱分析[J].现代科学仪器,2006(2):48.
- [3] 许欣,吴勋,孟宪君,等.太赫兹技术在爆炸物检测中的应用[J].光学技术,2008(增刊1):265.
- [4] 黄超群,夏磊,李爱悦,等.非放射源离子迁移谱爆炸物检测技术发展和应用[C]//第五届全国“公共安全领域中的化学问题”暨第三届危险物质与安全应急技术研讨会论文集.北京:中国化学会,2015.
- [5] 吕勇杰.离子迁移谱技术及其在毒品和爆炸物检测中的应用[D].上海:华东师范大学,2006.
- [6] 李金香,武波涛,王兴军.离子迁移谱技术发展趋势和应用前景[J].舰船科学技术,2006(2):13.
- [7] 马建福,王俊.爆炸危险品检测技术浅探[J].科技情报开发与经济,2006(1):160.

(收稿日期:2020-04-17)

(上接第 120 页)

量超过安全控制标准,砌体结构墙体仍会出现破坏产生裂缝。因此需综合考虑沉降和应力来判断砌体结构房屋的安全性。

2) 在盾构隧道下穿道北小区住宅群的施工过程中,采用“隧道径向加固半径 2 m+建筑物前后加固 4 环+隧道全断面加固”的深孔注浆加固方案,砌体结构墙体应力增量值大幅减小,且均能控制在规定的范围内,满足建筑物安全使用要求,由此证实该方案是可行的加固方案。

3) 将现场实测数据与数值模拟结果进行对比,结果表明实测数据与数值模拟结果的沉降趋势相同,沉降值也较为接近,说明本文数值模拟方案能较好地盾构隧道下穿砌体结构建筑物进行仿真分析。

参考文献

- [1] 范培.盾构隧道近距离侧穿砌体结构建筑物施工技术[J].施工技术,2019(11):111.
- [2] 杨啸南.地铁隧道盾构法施工下穿建筑物分析[D].南昌:南昌大学,2015.
- [3] 杨宏泰,张怀静.软土地区大直径盾构下穿建筑物注浆方案优化[J].北京建筑大学学报,2015(2):29.
- [4] 魏新江,魏纲,丁智.盾构施工与邻近不同位置建筑物相互影响分析[J].岩土力学,2007(增刊1):505.

- [5] 兰宇,方勇,段绍和,等.地铁盾构隧道侧穿锦江大桥施工的三维数值模拟[J].铁道工程学报,2009(3):79.
- [6] 王春凯,许恺,周冠南,等.盾构隧道穿越条基框架结构影响研究[J].城市轨道交通研究,2009(9):47.
- [7] 温裕春.武汉地铁盾构下穿京广铁路变形影响分析[J].现代城市轨道交通,2016(1):30.
- [8] 祁文睿.大直径盾构侧穿古建筑引起沉降分析及注浆加固研究[J].铁道建筑技术,2018(3):93.
- [9] 任建喜,张引合,冯超.地铁隧道盾构施工引起的古城墙变形规律及其控制技术[J].岩土力学,2011(增刊1):445.
- [10] 曹振,张宁,杨锋.地铁盾构隧道下穿古城墙变形规律预测与施工安全防控技术[J].城市轨道交通研究,2015(8):119.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] 刘钊,李子春,刘国楠,等.花岗岩残积土的修正摩尔库伦模型参数取值研究[J].铁道建筑,2017(3):89.
- [13] 来弘鹏,郑海伟,何秋敏,等.砂土地层盾构隧道小角度斜下穿既有隧道施工参数优化研究[J].中国公路学报,2018(10):130.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑变形测量规范:JGJ 8—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

(收稿日期:2020-03-24)