

盾构隧道近接下穿施工对居民建筑楼群的影响研究

娄霜¹, 赵瑞桐², 徐世达³

(1. 安徽交通职业技术学院, 合肥 230001; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;
3. 中铁建设投资集团有限公司, 深圳 518000)

摘要:以深圳地铁10号线福田口岸站—福民站区间盾构隧道近距离下穿福民新村民居建筑楼群工程为依托,应用有限差分软件FLAC^{3D}建立了包括既有建筑群、建筑基础、新建隧道和地层的数值模型,并根据实际施工方案对地铁盾构隧道的施工过程进行了数值模拟,研究在注浆预加固方案下隧道下穿施工对建筑楼群变形的影响。通过对各建筑沉降数据的分析,得出以下结论:(1)盾构隧道的近接下穿施工,将会导致既有建筑群产生一定程度的不均匀沉降;(2)在注浆预加固方案下进行施工,福民新村民居建筑楼群的最大沉降及最大倾斜度分别为18.537 mm及0.000 623,均小于相应规范规定的控制值,说明在注浆预加固方案下进行隧道掘进,可保证各相关民居建筑的沉降及变形控制在安全范围以内。

关键词:盾构隧道;近接施工;下穿;建筑楼群;注浆加固;数值模拟;沉降变形

中图分类号:U455

文献标志码:A

引言

为了更好地疏解城市交通拥堵,地铁线路往往布设在人流量密集的城市核心区。这些区域由于早期的城市建设,分布着密集的地上或地下既有工程结构物,新建隧道施工过程中对这些既有结构物的影响及其控制措施成为了工程建设的难点。

近年来,不少学者对新建地铁隧道或其他交通隧道下穿既有结构物的相关问题进行了研究。余德强等^[1]研究表明,地表注浆加固可明显控制高压铁塔的基础沉降和不均匀沉降。张旭等^[2]研究表明初支背后回填注浆能够在一定程度上减小既有地铁车站的结构沉降,根据现场监测数据及时调整千斤顶顶升力,可确

保下穿施工期间既有地铁车站的结构安全。王闯等^[3]为盾构近接施工对群桩基础的影响提供了合理定量的评价指标。皮亮等^[4]的研究为紧邻城市高层建筑交通隧道的结构形式、施工工法、支护参数等提供了参考。胡德华等^[5]的研究表明全断面注浆对上软下硬地层隧道下穿既有道路的沉降有较好的控制作用。王强等^[6]的研究表明合理提高开挖面泥水压力并减小压力波动,减缓盾构掘进速度并适当提高注浆压力是控制沉降的关键。张自光等^[7]的研究结果表明工程影响分区分界值随建筑荷载和隧道跨度的增大而不断增大,随建筑物与隧道水平距离的增加而不断减弱。杨兵明^[8]对盾构隧道下穿铁路控制标准的制定及施工对策进行了全面研究。张琼方等^[9]研究表明合理盾构参数的设

收稿日期:2018-04-08

基金项目:国家自然科学基金(51578456,51378434)

作者简介:娄霜(1979-),女,河南原阳人,讲师,硕士,主要从事交通土建工程方面的研究,(E-mail)1015340936@qq.com

置可以有效控制既有隧道变形在允许范围内。周智等^[10]研究表明框架结构建筑物柱间沉降差与隧道掌子面位置密切相关。王剑晨等^[11]为北京地区受新建隧道下穿施工影响的既有隧道变形提供一个简便、快捷的预测方法。李栋等^[12]研究了多种施工技术对特大跨超浅埋隧道下穿天桥稳定性的影响。韩焯等^[13]提出了适用于预测既有线在新建隧道下穿影响下产生沉降的简便分析方法。

在近年来的工程建设中,地铁盾构隧道下穿通过一些修建年代较为久远的砖混建筑群的工程案例逐渐增多。相比于上述学者研究所涉及的内容,砖混建筑由砖砌体和混凝土结构两种性能差异较大的材料构成,因此隧道下穿施工引起的力学行为较为复杂,且群体建筑还需考虑各建筑之间的相互影响。深圳地铁10号线福田口岸站—福民站区间在建设过程中,将下穿修建于上世纪90年代的福民新村建筑楼群,其中线路将穿越两栋建筑正下方的地基,并有可能影响到邻近的其他两栋建筑,工程难度较大。本文以此工程为依托,在考虑建筑楼群彼此相互影响的基础上,利用数值模拟的方法对预加固方案下隧道施工所引发建筑楼群的沉降变形进行了研究,研究成果对类似工程具有一定的借鉴意义。

1 工程概况

深圳地铁10号线福田口岸站—福民站区间盾构隧道在ZDK2+140~ZDK2+250段下穿福民新村33#、34#房屋,其中33#房屋桩基与区间结构净距1.3 m,34#房屋桩基与区间结构净距2.36 m。此外,福民新村32#及35#房屋与盾构隧道距离也较近,同样可能受到较大的施工影响。福民新村楼群均为8层砖混结构,基础为D480锤击沉管钢筋混凝土灌注桩加承台,桩身砼标号C18,桩长16 m。此范围内隧道埋深为20 m~21.66 m。该地区的隧道采用复合式土压平衡盾构进行施工,管片混凝土强度为C50,衬砌厚度为30 cm,幅宽为1.5 m。盾构隧道与建筑物的位置关系如图1所示,图1(a)为平面图,图1(b)为剖面图。

由于盾构外边线与福民新村桩基础之间的最小距

离仅为1.3 m,因此在盾构施工过程中存在房屋因地层扰动而产生不均匀沉降,进而产生倾斜、开裂和倒塌的风险。为了保证施工的顺利进行,初步设计方案要求盾构施工前在一定范围内沿房屋周边3 m布设2排袖阀管(图1)对房屋进行注浆加固,喷浆孔间距 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,交错布置,加固深度为14 m。

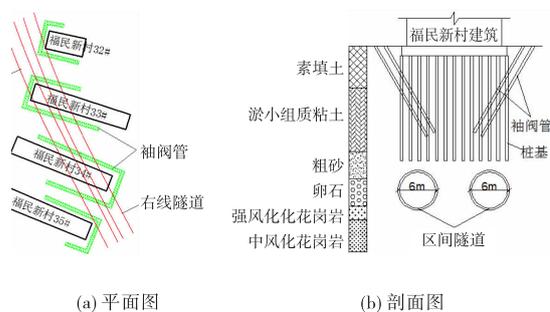


图1 盾构隧道与建筑物位置关系

2 数值模型的建立

采用有限差分数值分析软件FLAC^{3D}进行分析并建立三维数值模型。建立的数值模型包括福民新村32#~35#房屋以及相应区域的隧道开挖区间,如图2所示,其中X轴方向为隧道横截面的水平方向,Y轴正方向为盾构隧道掘进方向,Z轴正方向竖直向上。模型尺寸为:120 m×156 m×50 m,共划分为53.17万个单元。模型的四周和底部边界条件为法向约束,地表为自由边界。三维计算模型中袖阀管注浆加固的土体范围如图3所示。

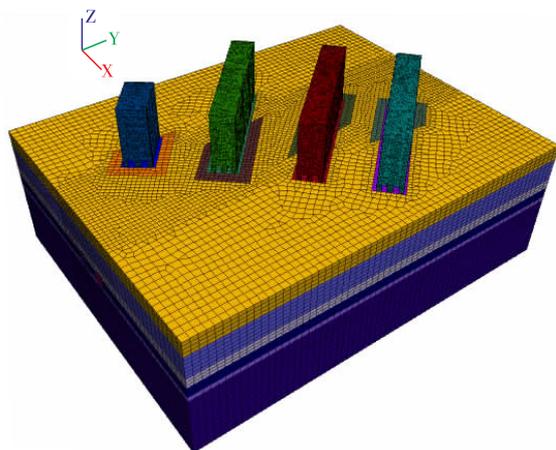


图2 三维计算模型

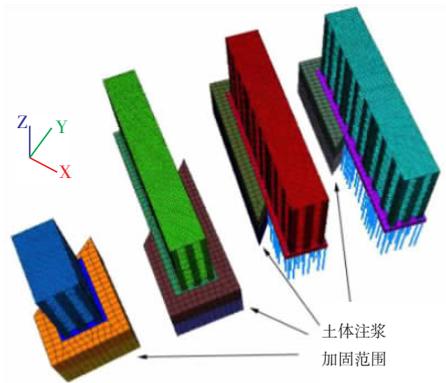


图 3 模型中土体注浆加固范围

表 1 计算模型材料物理力学参数取值

材 料	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	黏聚力 $c / (\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	层厚 h / m
素填土	1890	8	0.35	10	10	6
素填土(加固后)	1890	14.4	0.35	15	10.8	6
淤泥质黏土	1740	5	0.43	10	3	9.1
淤泥质粘土(加固后)	1740	10	0.43	15	3.3	9.1
粗砂	1980	25	0.25	-	28	3.9
卵石	1970	33	0.22	-	38	4
强风化花岗岩	1850	28	0.28	24	25	2
中风化花岗岩	2570	45	0.27	28	29	25
10 号线管片衬砌	2500	34500	0.2	-	-	-
建筑物(砌体)	2500	10000	0.2	-	-	-
建筑物(混凝土结构)	2500	34500	0.2	-	-	-

数值模拟的具体过程为:(1)进行地层的自重平衡运算,地上建筑结构以空模型方式处理,地面以下基础结构则设定为与所在土层相同的本构模型和物理参数。(2)激活地上建筑实体单元和桩单元,赋予计算参数,同时将地下基础结构调整为弹性模型并赋予相应计算参数,运行求解至平衡。(3)提高注浆加固范围内的土体参数模拟注浆加固,再次运行求解至平衡。(4)为了重点研究隧道开挖过程所引起的位移情况,将前述各步骤所产生的位移清零后,再依照施工方案,先开挖左线隧道至贯通,再开挖右线隧道至贯通。

数值模型中,盾构机单元、衬砌单元和注浆层单元都是预设单元,并且将盾构机每次开挖进尺取为管片衬砌的幅宽 1.5 m。当盾构机推进时,将以前的土层(掌子面后方 6 m 范围)材参改变为盾构机材参(其中密度根据盾壳实际的重量进行换算),用以模拟盾构机盾壳。盾壳后方 1.5 m 范围内为一厚度为 20 cm 的壁厚注浆等代层,通过杀死注浆层单元来模拟盾尾空隙,在杀死注浆层单元的同时,沿径向施加 0.1 MPa 的注浆压力,如图 4(a)所示,并且在下一个计算步骤中将注浆层和衬

三维数值计算中相关结构的具体几何参数为实际设计值,地层物理力学参数参考地勘和设计文件。假定房屋建筑及桩基与临接土体变形协调一致,各土层采用摩尔-库伦弹塑性本构实体单元进行模拟,福民新村建筑结构及承台基础、隧道管片衬砌采用弹性实体单元进行模拟,桩基采用结构单元中的桩单元进行模拟,袖阀管注浆效果以相应范围内的素填土、淤泥质黏土的弹性模量、黏聚力、内摩擦角予以模拟^[14-16]。土层以及其他结构计算参数见表 1。

砌单元激活,之后,模型进入下一个掘进环,如图 4(b)所示,以此循环,直至盾构掘进完成^[17-18]。为了保证掌子面前方土体稳定,减小沉降量,盾构下穿过程采用全土压掘进,数值模型中对掌子面施的法向顶进压力取为 200 kPa,同时施加在管片上的顶进反力与顶进压力平衡,根据等式 $A_{\text{掌子面}} \cdot P_{\text{顶进压力}} = A_{\text{管片}} \cdot P_{\text{顶进反力}}$,将作用在管片上的顶进反力取为 1050 kPa。

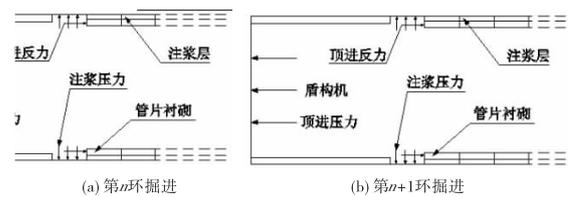


图 4 数值模拟掘进过程示意图

3 计算结果分析

隧道施工完成后福民新村 32# ~ 35# 建筑物首层结构板的竖向 (Z 方向) 位移云图如图 5 所示,图中标注了各建筑物的沉降监测点位置。从图 5 可知,在隧道施工完成后,受施工影响的 4 栋建筑均出现了一定的沉降,

且由于隧道与穿越建筑物空间的位置关系及各建筑物彼此之间的相互影响,这种沉降是不均匀的,其中32#建筑的最大沉降值为6.271 mm,33#的为18.565 mm,34#

的为13.315 mm,35#的为3.390 mm。值得注意的是,位于盾构隧道正上方的33#、34#建筑的最大沉降明显大于位于盾构隧道侧上方的32#、35#建筑。

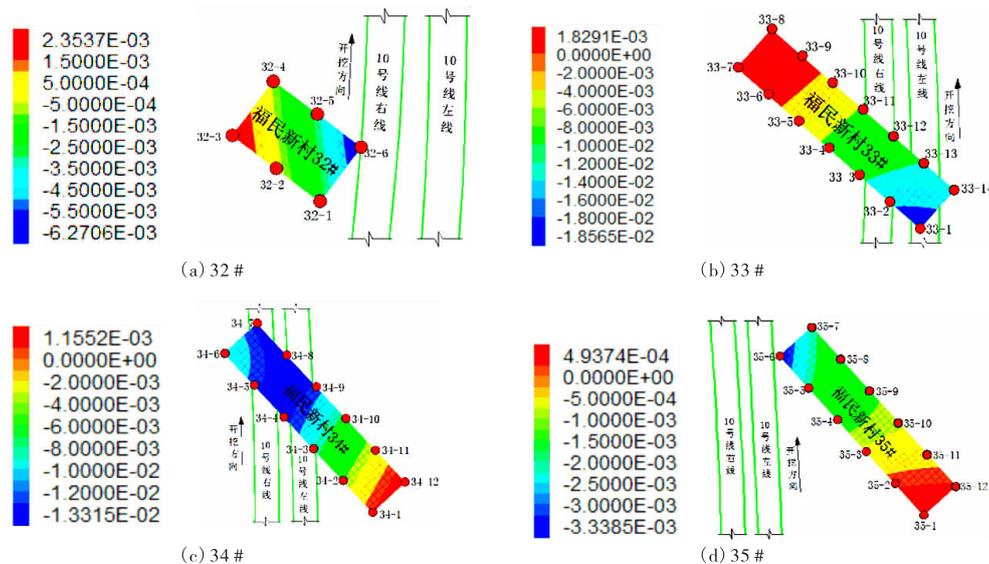


图5 隧道开挖完成后各建筑物首层竖向位移云图

各建筑物首层结构板竖向位移云图中沉降最大及最小位置附近监测点以及与沉降最大监测点对应的短边监测点随开挖进程的沉降变化曲线如图6所示,32#建筑沉降最大及最小的监测点分别为32-6和32-3,33#建筑分别为33-1和33-8,34#建筑分别为34-8和34-12,35#分别为35-6和35-1。

从图6可知,对于33#、34#建筑,在左线隧道开挖至各建筑物下方时,建筑物表现出明显的沉降增大,随着隧道的继续掘进,排土卸载后的回弹效应会使沉降略微

减小;当右线隧道开挖至各建筑物下方时,同样会在一定程度上引起沉降量的增大,但这种影响比左线开挖时小;对于32#、35#建筑,盾构隧道是在其侧下方通过,距离较远一侧隧道开挖对其影响较小,而当距离较近一侧隧道开挖至其附近时,则会引起其沉降的明显增大。

隧道施工过程中及施工完成后,上述各位移监测点的最大沉降值、最大沉降差、最大沉降监测点与对应的短边监测点的沉降差及由沉降差所计算出的建筑物最大倾斜度见表2。

表2 施工过程中及完成后最大沉降值、最大沉降差及最大倾斜

建筑物	施工过程中最大沉降值 S/mm	施工过程中最大沉降差 ΔS /短边最大沉降差 ΔS /mm	施工过程中最大倾斜度 $\tan\theta$	施工完成后最大沉降值 S/mm	施工完成后最大沉降差 ΔS /短边最大沉降差 ΔS /mm	施工完成后最大倾斜度 $\tan\theta$
32#	6.030	7.964/2.996	0.000396	5.796	7.749/2.777	0.000385
33#	18.573	20.455/5.133	0.000623	17.833	19.579/3.501	0.000425
34#	13.069	14.014/3.253	0.000375	13.013	13.996/1.070	0.000123
35#	3.231	3.620/0.891	0.000103	3.154	3.585/0.837	0.000097

从表2可知,在整个施工过程中,各建筑物的最大沉降值为18.537 mm,最大倾斜度为仅为0.000623,均出现在33#建筑;施工完成后,各建筑物的最大沉降值为17.833 mm,最大倾斜度仅为0.000425,这种情况同样出现在33#建筑。根据《铁路隧道监控量测技术规程》^[19]中的要求,隧道施工对无特殊要求的一般建(构)筑物沉降控制累计值可为10 mm~30 mm,并考虑到盾

构下穿房屋皆为上个世纪90年代所建,年代较为久远,因此,在本工程中将房屋的最大沉降控制值设定为20 mm;同时,《建筑地基基础设计规范》^[20]中还规定,建筑高度在24 m以下的多层建筑基础倾斜度应小于0.004,具体到本文指建筑物首层结构板的倾斜度。由此可见,在加固方案下进行盾构隧道施工,相关建筑物的沉降及倾斜均满足控制要求。

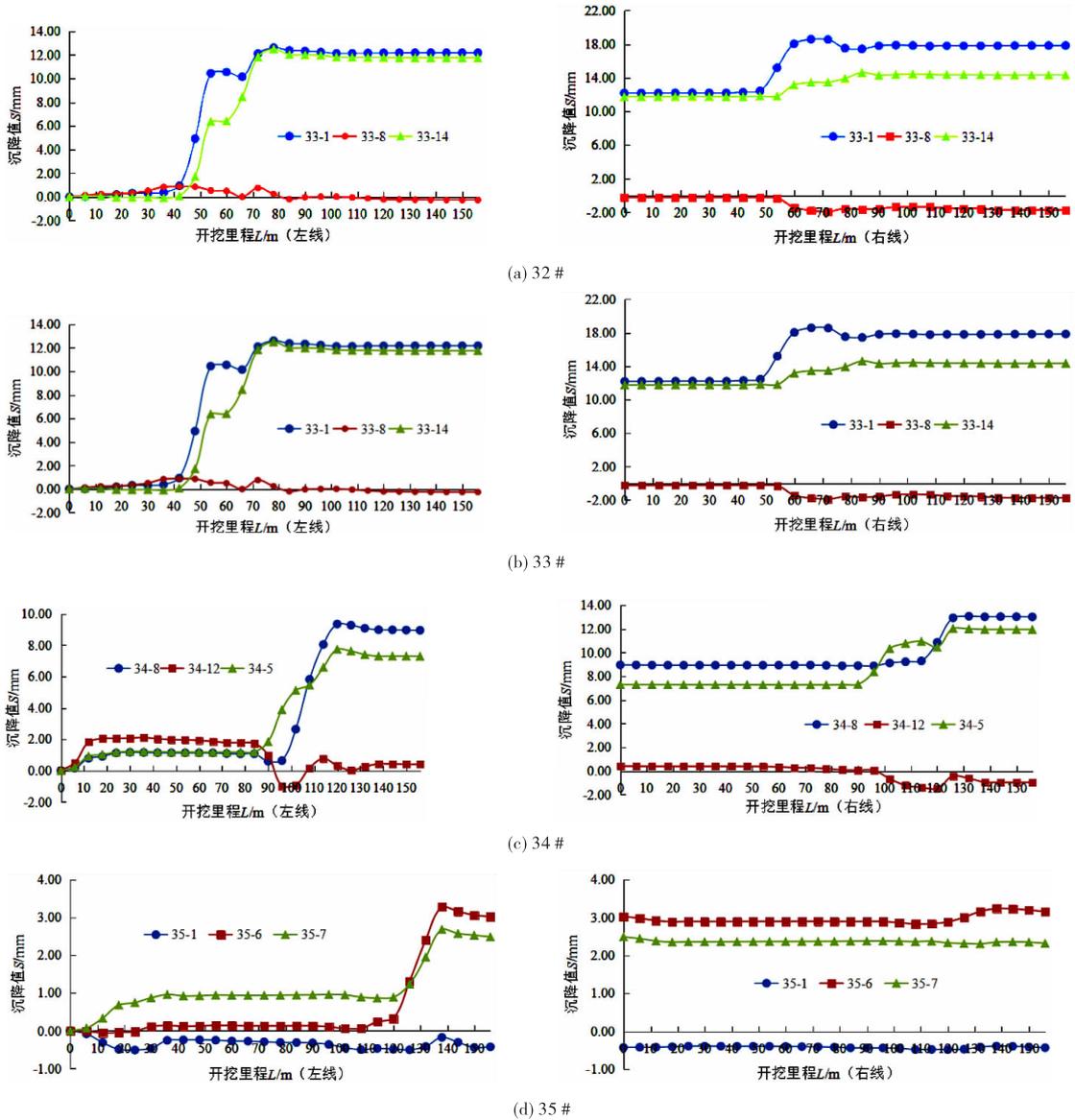


图 6 各建筑物最大沉降值及最小沉降值监测点沉降变化曲线

4 结论

本文依托深圳地铁 10 号线福田口岸站—福民站区间下穿福民新村的工程实例,对盾构隧道下穿施工引发居民建筑楼群的沉降变形规律进行了研究,得出了以下结论:

(1) 盾构隧道近接下穿施工将引发既有居民建筑楼群产生一定程度的不均匀沉降。

(2) 近接施工条件下,先行开挖的盾构隧道掘进至既有建筑物下方时,建筑物沉降发展较为迅速,此阶段应谨慎施工;较晚开挖的另一隧道掘进下穿引起的建筑物沉降在一定程度上小于前者。

(3) 在设计注浆预加固方案下进行施工,福民新村居民建筑楼群的最大沉降及最大倾斜度分别为 18.537 mm 及 0.000 623,均小于相应规范规定的控制值。因此,此预加固方案可保证各相关民居建筑在隧道掘进过程中的结构安全。

参考文献:

[1] 余德强,贺思悦,侯航,等.浅埋隧道下穿高压铁塔注浆加固效果的数值分析[J].公路,2018,63(3):247-252.

[2] 张旭,张成平,韩凯航,等.隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J].岩土工程学报,2017,39(4):759-766.

- [3] 王闯,彭祖昭,苟超,等.盾构近接下穿群桩基础施工影响分区研究[J].土木工程学报,2017,50(s2):174-181.
- [4] 皮亮,蒋树屏.穿越高层建筑大跨隧道施工力学与支护结构研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1303-1310.
- [5] 胡德华,段景川.上软下硬地层双线地铁隧道下穿既有城市道路地层变形规律研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):910-915.
- [6] 王强,谢雄耀,黄钟晖,等.四线并行盾构隧道下穿火车站股道沉降特征研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s2):4235-4243.
- [7] 张自光,仇文革.地铁区间隧道近接建筑施工工程影响分区研究[J].现代隧道技术,2016,53(1):75-82.
- [8] 杨兵明.宁波软土地层盾构隧道下穿铁路施工引起地层变形规律及控制技术[D].北京:北京交通大学,2016.
- [9] 张琼方,夏唐代,丁智,等.盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J].岩土力学,2016,37(12):3561-3568.
- [10] 周智,衡朝阳,孙曦源.隧道下穿施工诱发框架结构建筑物变形规律研究[J].岩土工程学报,2015,37(s1):110-114.
- [11] 王剑晨,张顶立,张成平,等.北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):947-956.
- [12] 李栋,何兴玲,覃乐,等.特大跨超浅埋地铁隧道下穿天桥过程稳定性控制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(s2):3636-3642.
- [13] 韩焯,刘赧炜,JAMIE R S D.隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J].土木工程学报,2012(1):134-141.
- [14] 孙星亮,景诗庭.水平钻孔旋喷注浆加固地层效果研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(5):589-593.
- [15] 吴顺川,金爱兵,高永涛.袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价[J].岩土力学,2007,28(7):1353-1358.
- [16] 高俊涛,黄雪阳.盾构隧道近距离侧穿桩基的施工力学响应研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2015,26(5):69-73.
- [17] 方勇,何川.地铁盾构隧道施工对近接桩基的影响研究[J].现代隧道技术,2008,45(1):42-47.
- [18] 方勇,何川.平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J].岩土力学,2007,28(7):1402-1406.
- [19] 中铁二院工程集团有限责任公司.铁路隧道监控量测技术规程:TB/T 10121-2007[S].北京:中国铁道出版社,2007.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

Investigation on the Influence of Shield Tunnel Construction to Residential Buildings

LOU Shuang¹, ZHAO Ruitong², XU Shida³

(1. Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei 230001, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Taking the interval of Futian to Fumin in Shenzhen Metro Line 10 as the investigation background, the numerical simulation method is used to study the influence of pre-reinforcing scheme to the residential building deformation caused by the undercrossing shield tunnel construction. The results show that shield tunnel construction will cause uneven settlement of existing buildings. By constructing with reinforcement grouting, the largest settlement (18.537 mm) and inclination (0.000 623) of the Fumin residential buildings are controlled within the specified value. Shield tunnel construction with pre-reinforcing scheme can ensure the settlement and deformation of the related residential buildings within the safety range.

Key words: shield tunnel; approaching construction; undercrossing; buildings; grouting reinforcement; numerical simulation; settlement deformation