

双线隧道盾构施工对临近 高层建筑物的影响分析

李涛,陈慧娴,刘波,窦海洋,杨伟红

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:以北京市轨道交通 6 号线某区间盾构隧道工程实例为背景,针对双线盾构掘进先后通过临近高层建筑物的特殊情况,首先通过 FLAC^{3D} 软件对该工程进行数值模拟,分析了先后盾构掘进两条平行隧道时地表最大沉降值的位置,以及盾构掘进与临近建筑物相互作用对地表沉降的影响;其次,对盾构掘进先后穿过高层建筑物的实测数据进行了分析,获得了双线盾构顺序穿越临近高层建筑过程中地表沉降的变化规律;最后,分析了盾构施工对临近高层建筑物的影响.结果表明:在盾构面前方 20 m 作用的范围内,地表略微隆起,而盾构通过 40 m 后地表沉降基本稳定;后行隧道引起的地表沉降大于先行隧道引起的地表沉降;临近高层建筑在隧道沉降槽影响范围内时,盾构施工对建筑物影响较大,而与双线隧道的先后施工顺序关系不大,数值计算和实测结果相符,对类似工程有一定的借鉴和指导意义.

关键词: 双线盾构;高层建筑;数值计算;现场监测

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9102(2013)04-0043-06

随着我国城市轨道交通的日益发展,盾构法以其安全高效,以及对周围地层影响小的优点在城市地下隧道施工中得到了广泛的应用.由于城市地下隧道施工多在市區,周围建筑物较多,给施工带来一定的难度的同时,也影响临近建筑物的安全和正常使用^[1-2].临近高层建筑时,盾构隧道开挖自身的安全以及由开挖引起建筑物的变形是一个极其复杂的共同作用的问题,也是目前盾构法施工需要解决的一个重要问题.针对这些问题,文献[2]研究了盾构隧道近距离侧穿建筑物的情况,获得了建筑物变形、地表变形与盾构面和建筑物之间距离的关系.文献[3-5]通过大量的数据分析,分析了 Peck 法预测我国的隧道施工引起地表面变形的适用情况,并获得了用于预测隧道施工引起建筑物变形的刚度分析法,这个考虑隧道-土-结构相互作用,同时也研究了隧道施工对地层沉降槽宽度的影响.文献[6]

分析了后掘进盾构施工超越先掘进盾构的特殊情况.文献[7]对邻近不同位置建筑物工况下的盾构隧道施工进行了模拟和分析,确定建筑物比较危险的区域.以上研究多针对单一盾构隧道对周围环境的影响的研究,基于此,本文对双线盾构隧道先后通过既有临近高层建筑时,周围土体和建筑物二次扰动的问题进行研究.

本文以北京地铁 6 号线双线盾构隧道先后旁穿临近高层建筑为背景,采用数值仿真分析和现场实测的方法,对盾构推进过程中对周围土体的两次扰动问题进行了分析,并对建筑物不均匀沉降和偏移问题进行了深入研究.

1 工程概况

本工程为北京地铁 6 号线双线盾构隧道近距离旁穿临近高层建筑,如图 1 所示.双线隧道采用先

收稿日期:2012-11-28

基金项目:国家自然科学基金(50974126);博士点基金新教师类(20100023120003)

通信作者:李涛(1981-),男,河南新郑人,博士,讲师,主要从事岩土工程、城市地下工程研究. E-mail: litaocumb@163.com

后盾构的方式进行,先施工右线,后施工左线,2条线路都从西向东进行掘进.为了保证工程的盾构能顺利通过高层建筑物,对右线隧道上部土体进行了袖阀管注浆加固.近距离旁穿的高层建筑物为全现浇钢筋混凝土剪力墙结构,地上21层地下2层,基础为箱型基础,2层地下室,埋深约为4.8 m.建筑物平面尺寸为27.6 m×27.6 m.盾构隧道尺寸及其与建筑物的相互位置关系如图1所示.隧道埋深23.5 m,盾构外径为6 150 mm,最大推进速度10 cm/min,最大推力为38 500 kN,最大扭矩为5 620 kN·m.

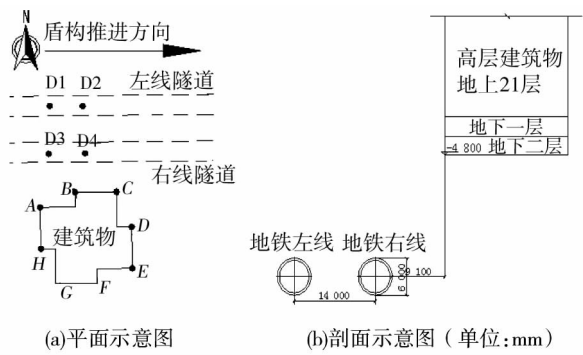


图1 盾构隧道和高层建筑物相互关系图
Fig.1 Arrangement among tunnels and building

边界条件是约束水平移动,模型底部位移边界为固定边界,约束其水平移动和垂直移动,模型上边界为地表,为自由边界.

2.3 模型参数

区间隧道穿过地层自上而下为:粉质粘土层、粉土层、粉细砂层、圆砾层、中粗砂层、粉质粘土层、粘土层、粉土层.在铁路箱涵范围隧道穿越地层上半部为圆砾卵石层,下半部为粉质粘土层.区域水文地质勘测资料表明,本段线路赋存3层地下水,分别为上层滞水、潜水及层间水.近3~5年最高水位标高31.00 m,为上层滞水.计算模型的物理力学参数如表1所示,衬砌、建筑物基础的力学参数如表2所示.

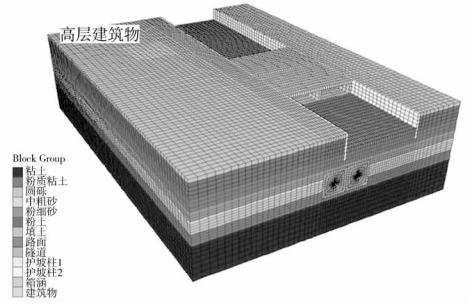


图2 计算网格单元
Fig.2 Unit grid of computing model

2 数值计算

2.1 计算模型

采用有限差分软件FLAC^{3D}进行分析,模型尺寸可基本消除边界效应带来的影响.FLAC^{3D}计算网格单元如图2所示.岩土体模型采用弹塑性理论,符合摩尔-库仑准则;盾构隧道的管片,建筑物的基础采用弹性体三维实体单元,力学行为符合胡克定律^[8];高层建筑物的箱型基础采用弹性体单元进行模拟.在盾构过程中,衬砌管片所受到的注浆压力比较复杂,浆液渗入土体,与土压力相互平衡后,一起对衬砌产生作用,在此过程中,浆液要经过由液态到固态的过程.由于浆液由液态逐渐硬化成固态的过程较难模拟,因此,通过向上一步中盾尾处的1环单元的外围土体单元施加等效均布的径向压力,模拟盾尾同步注浆过程^[9].具体的模拟过程为:(1)重力荷载作用下的内力平衡;(2)施加建筑物的荷载,并再一次进行内力平衡;(3)分步开挖右线隧道,管片拼装并进行壁后注浆;(4)分步开挖左线隧道,管片拼装并进行壁后注浆.

2.2 边界条件

模型侧面和底面为位移边界,模型两侧的位移

表1 岩土材料的物理力学参数

Tab.1 Calculation parameters of geomaterial of shield launching paragraph

序号	土层名称	密度/(kg/m ³)	体积模量 / MPa	剪切模量 / MPa	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	土层厚度 / m
1	填土	1 900	4.63	2.12	10.0	12.0	2
2	粉质粘土	2 020	5.20	1.82	23.9	24.8	7
3	粉细砂	2 000	10.15	5.23	0	16.8	5
4	圆砾	2 010	9.17	4.23	0	30.0	2
5	中粗砂	2 010	9.20	4.30	0	12.3	1
6	粉质粘土	2 005	16.67	8.59	10.2	17.6	5
7	粘土	2 000	19.82	8.37	22.5	14.0	18

表2 管片的计算参数

Tab.2 Calculation parameters of lining

序号	名称	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
1	管片	2 500	31.5	0.25
2	建筑物基础	2 400	25.0	0.25

2.4 计算结果

1) 地面沉降计算结果分析

图3是隧道上方地表纵向沉降的分布曲线.地

表纵向沉降曲线是施工中最为关心的控制指标之一,本文用三维方法对测点数据比较完整的 D4(见图 1(a))进行了计算分析.在盾构推进过程中产生的地面变形主要由盾构到达前的变形、盾构达到和通过时的变形、地表后期固结变形 3 个部分.施工过程中,盾构机推力大于开挖面水土压力时,会表现为地表隆起.数值计算过程中,开挖面是处于平衡状态,故不能表现出隆起的现象,反而出现微小的沉降,图 3 显示盾构施工对开挖面前方土体的影响范围大约在 45 m 左右.盾构到达和通过时的沉降主要是由管片拼装后与盾构外壳之间形成的空隙引起的,这一部分的沉降大约为 -8.6 mm,占总沉降的 79.6%.盾构通过监测断面后,出现一定的后期固结沉降,其值大约为 -0.3 mm,盾构开挖面通过测点 20 m 左右后,沉降值基本趋于稳定,其值为 -10.8 mm.

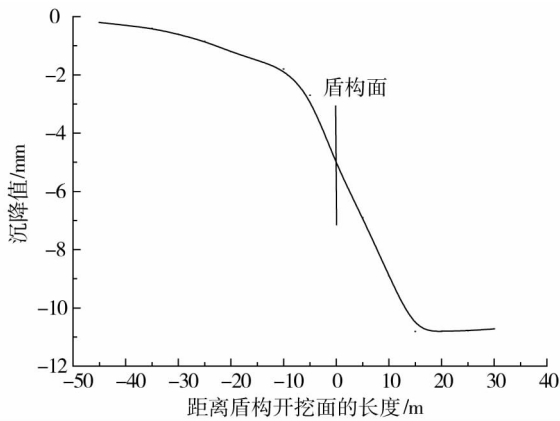


图 3 地表纵向沉降曲线

Fig. 3 Displacement of the ground surface

2) 建筑物沉降计算结果分析

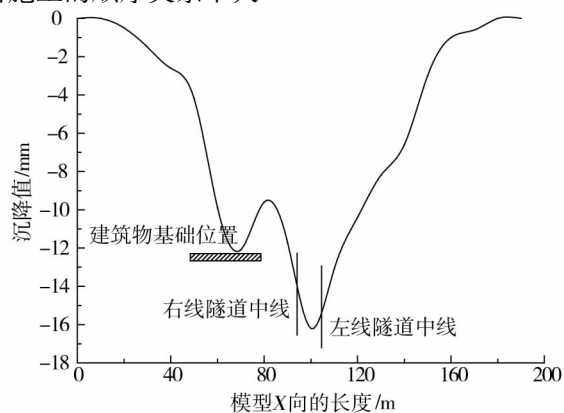
图 4 是高层建筑基础的沉降曲线.在右线隧道开挖后,地层内部的荷载得到释放,并重新分布,使得在建筑物附近的沉降槽向隧道方向发展;双线隧道通过后引起的地表最大竖向位移为 -16.2 mm,高层建筑基础最大沉降量 -12.1 mm,远离隧道一侧的基础最大沉降量 -3.8 mm,如图 4(a) 所示.与隧道上方地表的沉降呈现 V 型相比(图 3),由于建筑物荷载的存在,使得该曲线呈现出 W 型.从建筑物处沉降曲线的突变可知建筑物在隧道施工的影响范围内.

图 4(b) 是双线隧道先后盾构通过建筑物的沉降曲线图.图中数字 1,2,3 分别表示右线隧道通过点 A,B,G 时的沉降,数字 4,5,6 分别表示左线隧道通点 A,B,G 的沉降.右线隧道距离建筑物很近,故

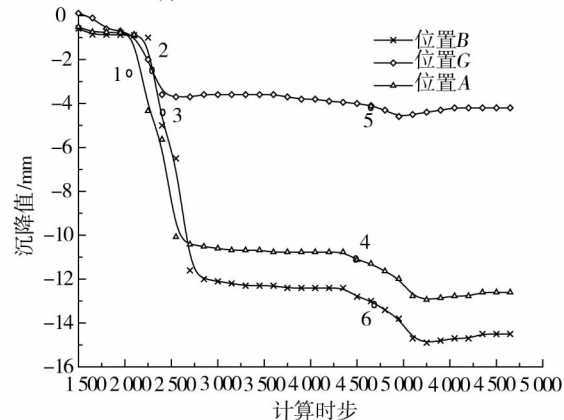
盾构旁穿后,引起了建筑物较大的沉降及倾斜,其中 B 点的沉降为 -3.6 mm,G 点的沉降为 -11.6 mm,A 点的沉降为 -10.0 mm;左线隧道通过建筑物后,B 点的沉降稳定在 -4.0 mm,G 点的稳定沉降值为 -14.5 mm,A 点的稳定沉降值为 -12.6 mm.由此可以看出,右线隧道通过高层建筑物时,对建筑物产生了较大的影响,而左线隧道通过时,对建筑物影响不大,这主要与隧道开挖引起的沉降槽宽度 i 有关.O' Reilly 和 New 伦敦地区的经验认为:沉降槽宽度 i 和隧道深度 z_0 之间存在简单线性关系^[10]:

$$i = Kz_0. \quad (1)$$

式中 K 为沉降槽宽度参数.文献[3]通过大量的数据统计分析,认为北京地区 K 值应该在 0.3 ~ 0.6.基于本次工程的地层条件, K 取 0.55.本工程隧道深度 z_0 为 23.5 m,经计算,右线隧道开挖引起的沉降槽宽度为 12.9 m,大于右线隧道与建筑物之间的距离 12.1 m,而小于左线隧道与建筑物之间的距离 26.1 m.故,建筑物是否在隧道沉降槽宽度范围内是建筑物产生变形大小的主要原因,而与双线隧道先后施工的顺序关系不大.



(a) 建筑物基础处的横向沉降图



(b) 建筑物基础处的纵向沉降图

图 4 高层建筑基础地表位移曲线图

Fig. 4 Displacement of the ground surface about the tall building foundation

3 现场监测结果分析

为保证高层建筑物的安全,使盾构施工顺利进行,对盾构施工过程进行动态监测.主要监测内容有:地表沉降、高层建筑物沉降.

3.1 地表沉降实测结果分析

图5为观测点沉降量随机头位置变化的曲线.地表监测点沿盾构隧道掘进方向每5~10 m布置一监测断面.为研究线路中线盾构机机头前后的纵断面沉降曲线分布,在盾构机前方40 m左右的线路中线上方地面处布设沉降观测点.当盾构机向前掘进时,盾构机逐渐临近并通过该点,然后又逐渐离去.从图5可以看出:在盾构面前面20 m作用的范围内,地表略微隆起,这主要是施工过程中,盾构机推力略大于开挖面水土压力造成的.地表在盾构到达前15 m左右开始沉降,一直持续到盾构通过40 m后,以后地表沉降基本稳定.监测结构表明D1点的沉降值最大,为-12.4 mm,各监测点平均沉降值为-10.5 mm.与数值计算结果基本相符,也验证了计算模型的正确性.

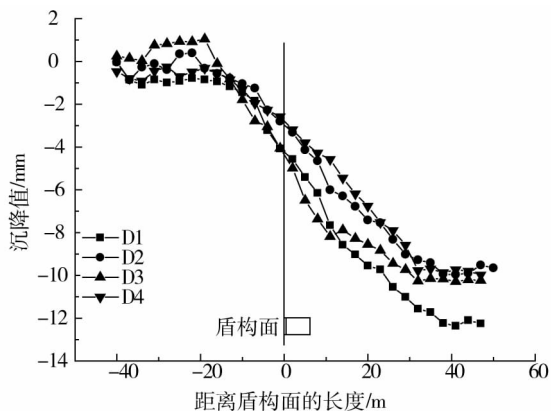


图5 不同时间同一观测点沉降量随机头位置变化曲线

Fig.5 Displacement to shield tunnel face in different time of a same observation point

3.2 临近高层建筑物沉降实测结果分析

图6是高层建筑物各监测点的实测沉降曲线.在右线盾构到达各监测断面前,各测点先出现了不同程度的上浮现象,随着盾构的掘进,开始呈缓慢下沉趋势发展.右线盾构穿过后,临近隧道的测点C、D出现了稍大的沉降,其中C点的沉降值为-8.1 mm,D点的沉降值为-9.2 mm,而远离隧道一侧的建筑物监测点无明显沉降.由第2.4.2节分析可知,单个隧道沉降槽宽度为12.9 m,C点与右线隧道之间的距离为12.1 m,在沉降槽宽度范围内,所以沉

降变化明显;而F、G2点到右线隧道中线的距离为大于20 m,在沉降槽宽度范围之外,受盾构隧道开挖的影响较小,而且,由于建筑物为框架结构,整体刚度较好,甚至出现了F、G2点略微上浮的情况,其值为0.8 mm.当左线盾构到达高层建筑物时,D监测点的沉降值最大,其值为-13.0 mm;左线盾构穿过建筑物,地层沉降趋于稳定时,D点的累计沉降量最大,为-14.3 mm;而测点G继续上浮,其值达到3.0 mm,并逐渐趋于稳定.由以上分析可知,右线隧道引起建筑物的沉降要远大于左线隧道引起的沉降,这说明沉降槽宽度*i*是考虑盾构隧道施工对建筑物影响的重要参数.以D点为例,D点距离右线隧道中线为12.1 m,在沉降槽宽度内,此时右线隧道引起建筑物沉降为-9.2 mm,占总沉降的64.3%;D点距离左线隧道中线为26.1 m,在沉降槽宽度外,左线隧道引起的沉降为-5.1 mm,占总沉降的35.7%.

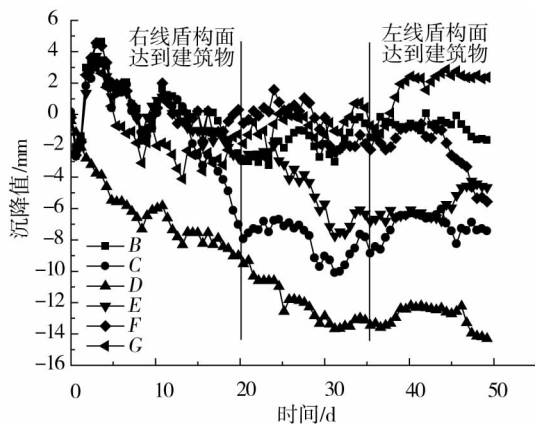


图6 高层建筑沉降

Fig.6 Settlement of the tall building

图7是建筑物倾斜率的历时曲线.建筑物基础倾斜监测采用倾斜位移测量法测量,即根据建筑物结构的差异沉降来推算楼房基础的倾斜率,基础倾斜各测点与楼房结构沉降测点相同.右线隧道盾构过程中,建筑物基础最大倾斜率发生在A-H截面,倾斜率最大值为0.035 9%.左线盾构通过至沉降稳定时,建筑物基础D-E截面和A-H截面倾斜率分别为-0.046 1%和-0.029 3%.由表1可知,高层建筑物地基位于粉质粘土层上,其侧限压缩模量 E_s 远大于4 MPa,属于中低压缩性土.根据《建筑地基基础设计规范》,工业与民用建筑对于框架结构,相邻柱基的沉降差的允许值为0.002 l (l 为相邻柱基中心距离),即倾斜率为0.2%,而以上结果均小于0.2%,故建筑物是安全的.

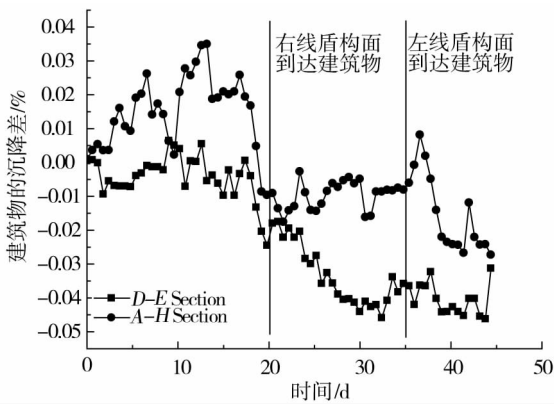


图7 建筑物倾斜率的历时曲线

Fig. 7 Gradient of slope - time curves of building foundation

4 双线盾构对临近结构物的影响分析

双线隧道先后施工过程中,由于前行隧道引起的滞后沉降尚未完成,使得两条隧道扰动范围的重叠区域的土体受到第二次扰动,土体在反复挤压和卸荷的影响下,密实度、变形模量等物理力学参数相应降低,土体稳定性变差.与前行隧道引起的地层沉降相比,土体会产生更大的弹塑性变形,从而引起更大的地表沉降.

现场监测和数值计算表明,盾构隧道时,由于施工对土体造成的扰动,使得周围地层发生一定的沉降或隆起,这会对紧邻结构物造成一定的损伤.双线隧道盾构过程中,沉降槽宽度 i 是确定地表变形范围的主要依据.建筑物是否在隧道沉降槽宽度范围,对建筑物的沉降产生较明显的影响.因此,确定沉降槽宽度 i 是分析这类问题的关键.

5 结论

1) 现场监测和数值计算结果表明,北京地铁盾构施工中,在盾构面前方 20 m 作用的范围内,地表略微隆起;地表在盾构到达前 15 m 左右开始沉降,盾构通过 40 m 后地表沉降基本稳定.同时也说明了模型的合理性,以及结果的可靠性.

2) 2 条盾构隧道先后通过时,扰动范围的重叠区域的土体受到第二次扰动,土体稳定性变差.后行隧道掘进会使土体产生更大的弹塑性变形,从而引起更大的地表沉降.

3) 由于建筑物的存在,使得地表横向沉降出现双峰曲线;临近高层建筑在隧道沉降槽影响范围内时,盾构施工对建筑物影响较大,而与双线隧道的

先后施工顺序关系不大.双线盾构通过建筑物后,建筑物的最大倾斜率为 -0.046% ,符合相邻柱基的倾斜率小于 0.2% 的规定,各监测点沉降值变化速率慢慢减小,各点沉降趋于稳定.

4) 数值计算的沉降规律和现场监测的沉降规律基本相符,采用有限差分的方法预测地铁盾构穿越建筑物引起的地表沉降,在实际中具有指导意义.

参考文献:

- [1] 阳军生,刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京:中国铁道出版社. 2002.
Yang J S, Liu B C. Surface movement and deformation caused by the construction of urban tunnel [M]. Beijing: China Railway Publishing House. 2002.
- [2] 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.
He M D, Liu J, Le G P, et al. Study of impact of shield tunneling side-crossing on adjacent high buildings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 29(3): 603-608.
- [3] 韩焯, 李宁, Standing J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 33-39.
Han X, Li N, Standing J R. An adaptability study of gaussian equation applied to predicting of ground settlements induced by tunneling in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 33-39.
- [4] 韩焯, Standing J R, 李宁. 隧道施工引起建筑物变形预测的刚度修正法[J]. 岩土工程学报, 2009, 4(31): 539-545.
Han X, Standing J R, Li N. The stiffness correction method in building deformation prediction due to tunnel construction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 4(31): 539-545.
- [5] 韩焯, 罗文林, 李宁. 地铁隧道施工引起沉降槽宽度的影响因素[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1188-1193.
Han X, Luo W L, Li N. The width of settlement trough influenced by tunneling in soft ground [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1188-1193.
- [6] 白云, 戴志高, 徐飞, 等. 后掘盾构先掘盾构对地层变形的影响研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 128-135.
Bai Y, Dai Z G, Xu F, et al. Study of the influence of one shield passing another on ground deformation for construction of parallel tunnels [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 128-135.
- [7] 魏新江, 魏娟, 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, 28(10): 1277-1282.
Wei X J, Wei G, Ding Z. The interaction analysis for shield tunnel construction and adjacent buildings in different position [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 1277-1282.
- [8] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.
Liu B, Han Y H. Principle, living examples, and application guide

[9] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307 – 1312.

Ye F, Zhu H H, He C. Back – filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,

[10] O’Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction [C]// Proceedings Tunnelling 82. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982.

Research on the influence of twin shield tunnel construction on the adjacent high rise building

LI Tao, CHEN Hui – xian, LIU Bo, DOU Hai – yang, YANG Wei – hong

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The interactions between twin shield tunneling and the nearby high rise building were researched by numerical calculation and field monitoring, with the project of Beijing subway line 6 as the background. The place of maximum ground settlement when two parallel tunnels shield construction successive was assessed by using the software FLAC^{3D}. And the influences of the interactions between twin shield tunneling and the nearby high rise building on the ground settlement were analyzed numerically. Further, the field instrumentation were presented and conducted during the tunnels – driven passing through the nearby high rise building successively, and the curves of ground settlement were obtained. The Influences of twin shield tunnel – driven successive on the adjacent structures were analyzed. The results show that the ground rises slightly at 20m ahead of the shield face, and the value of ground settlements is basically constant when the shield face passes cross – section 40m. The value of ground settlements caused by back shield tunneling is larger than it caused by the first shield tunneling. The tall building settlements are influenced greatly by shield construction when the tall building is in the range of tunnel settlement trough, and the settlements have little relationship with the construction sequence of the twin – tunnels. The results from field tests are consistent with numerical simulations, and it will potentially provide the knowledge for understanding tunneling undercrossing the existing tall buildings.

Key words: twin shield – driven; high rise building; numerical calculation; field monitoring