

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201905035

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

于德海¹, 舒娇娇¹, 秦凯凯²

(1. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026;

2. 云南省建设投资控股集团有限公司, 云南 昆明 650217)

摘要: 以大连地铁 2 号线香沙区间盾构隧道下穿铁路桥特殊地段为依托, 通过三维有限元程序仿真模拟以及工程现场动态监测, 研究盾构施工法对周围地层变形的影响和盾构下穿铁路桥造成的沉降特征。结果表明: 盾构开挖引起的地表沉降经历了 5 个阶段, 即初期扰动沉降、开挖面前部沉降、盾构机正上方沉降、盾构通过沉降、后期固结沉降; 地表沉降整体为一个凹槽形, 即隧道中心线地表沉降大, 隧道两边沉降较小, 按隧道横截面轴线左右对称, 符合地表沉降机理, 并与现场监测数据一致; 距离开挖隧道越近, 总体沉降位移越大, 盾构开挖小于 20 m 时, 其沉降位移沿着横向与纵向都有扩展, 隧道开挖至 40 m 时, 沉降位移主要沿着纵向扩展, 横向扩展不明显; 不同深度的上部土体沉降呈漏斗形, 即隧道正上方沉降最大, 两边沉降递减, 沉降曲线基本对称, 地表右侧受右线隧道开挖影响, 沉降量略大于左侧; 桥桩底端处于隧道拱顶上, 且整个桩身处于破裂面之上, 属于短桩范畴, 桥桩变形主要以受土体作用而产生的竖向沉降变形为主。

关键词: 大型盾构; 地铁; 铁路桥; 地表沉降; 隧道; 三维有限元程序

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)02-0148-05

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

YU Dehai¹, SHU Jiaojiao¹, QIN Kaikai²

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. Yunnan Construction and Investment Holding Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650217, China)

Abstract: Research on the shield tunnel of the Xiang-Sha bid section of Dalian metro is done to analyze the effect of the surface settlement by 3D finite element simulation, combined with in situ monitoring data. The results show that the surface settlement undergoes five stages: initial disturbance settlement, settlement in front of excavation, settlement above shield machine, settlement of shield passing and consolidation settlement. The overall shape of the surface settlement is a groove, the surface settlement of the central line of the tunnel is large, and the settlement of both sides of the tunnel is small. The settlement is symmetrical with the axis of the cross section of the tunnel, which conforms to the mechanism of the surface settlement and is consistent with the field monitoring data. The closer the tunnel is to be excavated, the larger the overall settlement displacement is. When the shield excavation is less than 20 m, the settlement displacement expands both horizontally and longitudinally. When the tunnel is excavated to 40 m, the settlement displacement mainly expands along the longitudinal direction, but the lateral expansion is not obvious. The funnel-shaped subsidence is the largest on top of the tunnel, and it decreases on two sides. The settlement curve is basically symmetrical, but the settlement on the right side is slightly larger than the left side because of the excavation of the right line tunnel. The whole pile is on the fracture surface of the tunnel, it belongs to the category of short

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572248;40902075)

第一作者: 于德海(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事土木工程方面的研究与教学工作。E-mail: ydhhdy1977@163.com

piles and the deformation of the bridge pile is mainly caused by the vertical settlement of soil.

Keywords: large shield; metro construction; railway bridge; surface settlement; tunnel; 3D finite element

随着我国城市化进程越来越快,地下工程开发规模与建设速度也日益加强,特别是能有效缓解城市交通压力的城市轨道交通建设。由于轨道交通大多分布于市内繁华区域,大型构筑物比较多,地下管道错综复杂,往往给建设施工带来不小的难度。盾构施工法因其具有适应性强、对周围影响小、高效等特点,在地铁工程中得到了广泛的应用。但在盾构施工过程中,不仅要注重盾构隧道本身的安全,还要考虑施工对周围环境的影响,当引起的周围地层变形超过一定程度时,将会对附近构筑物、建筑物的安全和使用造成严重影响。

周宁等^[1]和张云等^[2]对盾构隧道施工的理论公式进行了进一步推导;易宏伟等^[3]探讨了盾构施工对软黏土的扰动机制;吕培林等^[4]研究了软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律;郑宜枫等^[5]研究了软土施工时超大直径水泥盾构对周围土体的影响;邓小鹏等^[6]和王庆武等^[7]研究了隧道施工过程中隧道岩爆的倾向性,进行了岩爆预测。张鹏^[8]和朱合华等^[9]在铁路隧道模拟中注重考虑了管片的影响。当前的研究主要集中在盾构施工对围岩的影响^[3-9]和盾构掘进对邻近构(建)筑物的扰动^[10-12],而对盾构隧道穿越既有铁路桥的沉降研究较少。

本文以大连地铁2号线香沙路段为依托,采用三维有限元程序 Midas 及现场监测数据研究了盾构下穿铁路桥所造成的沉降影响。

1 工程概况

大连地铁2号线是大连市第一条建成运营的地铁线路,也是大连市第三条建成运营的城市轨道交通线路。香沙路段为盾构法施工,盾构段长度 612.865 m(右线),651.387 m(左线),线间距 29.1~36.0 m。铁路桥段地形起伏较大,地面高程 13.28~19.97 m,地面分布有住宅区和道路,场地开阔,不平坦(图1)。铁路桥位于地铁隧道上方,右线隧道位于铁路桥外右侧 10 m、竖向 20 m 处,左线隧道位于铁路桥内 10 m、竖向 20 m 处。工程掘进隧道为圆形隧道,埋藏深度大约 25 m,隧道外径为 6.6 m,内径为 5.8 m,衬砌管片厚度为 0.5 m,管片宽度为 1.3 m,衬砌管环由 6 个预制装配式管片组装而成。



图1 工程概况

Fig.1 Engineering situation

2 数值模型的建立

2.1 数值模型

数值模型沿 x 、 y 、 z 三轴的计算尺寸分别为 80 m × 45 m × 53 m。其中 y 轴代表掘进方向, x 轴代表横断面, z 轴代表竖向方向。所建模型中,上部为铁路桥面,两侧为桥台,实际隧道采用 Mohr-Coulomb 本构模型,平均埋深取 13.6 m,距离桥面约 19.6 m,隧道外径根据盾构机尺寸取为 6 m。管片模型以实体单元模拟,宽 1.3 m,厚 0.5 m,采用弹性本构关系,见图 2。

数值模型采用位移边界条件,上面为地表,可作为自由面;侧面限制 x 、 y 方向的位移;前后面限制 y 、 x 方向的位移;底面为固定边界,限制 x 、 y 、 z 方向的位移。

2.2 地质体参数

根据现场地质勘察报告,隧道上覆地质体分别为素填土、全风化板岩、强风化板岩、中风化板岩,到铁路桥下部,强风化岩部分变为粉质黏土,导致地层发生突然性的沉降,具体参数见表 1。

2.3 施工过程模拟

隧道总长度为 45 m,盾构从 0 m 掘进至 45 m,每推进一环,即 1.3 m 后施放管片,掌子面与管片的间隔距离约 5 m。土舱压力为 0.45 MPa,沿 y 轴方向向前推进。在施工过程中,首先开挖地铁隧道右线,将隧道右线开挖完成后,再开挖左线隧道,如图 3 所示。

3 计算结果

3.1 地表沉降分布规律

由地表沉降监测可知,掘进初期地表沉降较小,即

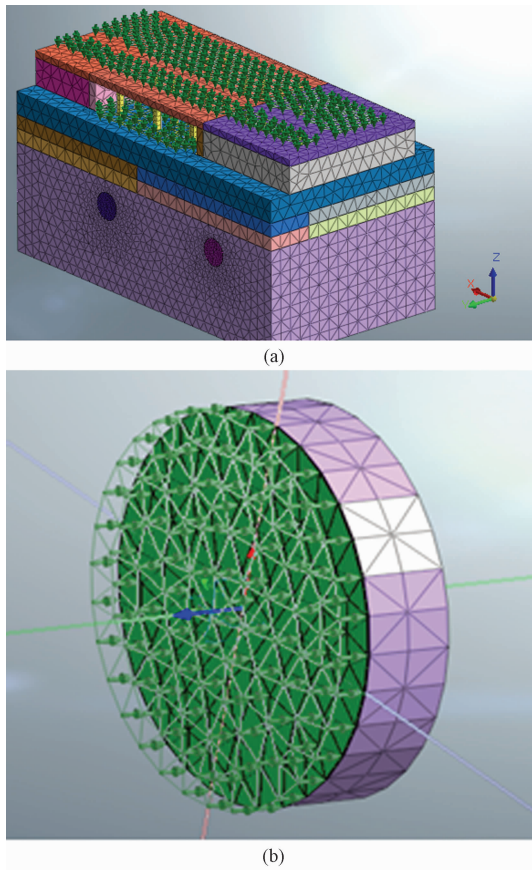


图2 计算模型

Fig.2 Numerical model

地表受到初期扰动,随着隧道盾构开挖的推进,隧道上部土体的平衡被打破,沉降逐渐增大,直到盾构开挖通过监测点一定距离,隧道上部土体不受到扰动,土体达到平衡,形成最终沉降。由此可以得出经历5个阶段的地表沉降规律,即初期扰动沉降、开挖面前部沉降、盾构机正上方沉降、盾构通过沉降、后期固结沉降,如图4所示。

不同阶段地表沉降如图5所示。从图可以看出,地表沉降整体为一个凹槽形,即隧道中心线地表沉降大,隧道两边沉降较小,按隧道横截面轴线左右对称,符合地表沉降机理,并与现场监测数据一致;从地表沉降经历的5个历程分析,可以看出,地表沉降槽随着盾构机的不断推进而加深加宽,且其变化幅度是不均匀的。第一阶段沉降较小,为土层中应力重分布所产生的沉降,至第二阶段沉降明显加大,影响范围加宽,此处土体受到盾构机直接挤压,产生扰动,导致较大沉降,其余阶段随着盾构机的推进及支护的进行,沉降槽变化率逐步减小。

图6给出了隧道开挖20 m、40 m时的位移变化图。由图可知,距离开挖隧道越近,总体位移越大。盾构开挖小于20 m时,其沉降位移沿着横向与纵向都有扩展;当隧道开挖至40 m时,沉降位移主要沿着纵向扩展,横向扩展不太明显。

表1 各土层主要物理力学参数

Table 1 Soil material parameters

名称	厚度/m	弹性模量/kPa	泊松比	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	黏聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)	K_0
杂填土	5.0	5.0×10^4	0.37	20	0.5	10	8	0.90
全风化板岩	3.0	11.0×10^4	0.35	23	0.2	15	16	0.75
强风化板岩	3.0	15.0×10^4	0.32	24	0.2	20	18	0.47
粉质黏土	6.0	12.0×10^4	0.35	20	0.3	12	10	0.80
中风化板岩	23.6	25.0×10^4	0.30	25	0.2	25	25	0.48

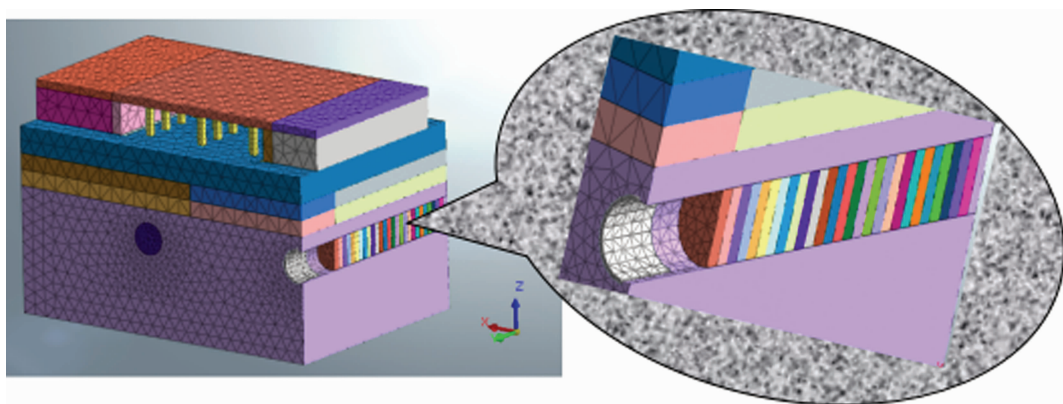


图3 开挖模拟

Fig.3 Excavation simulation

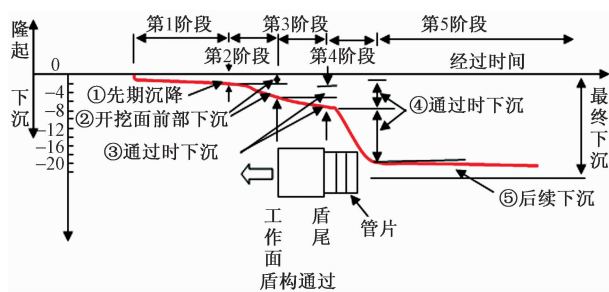


图 4 地表沉降规律变化曲线

Fig. 4 Curve of the surface subsidence

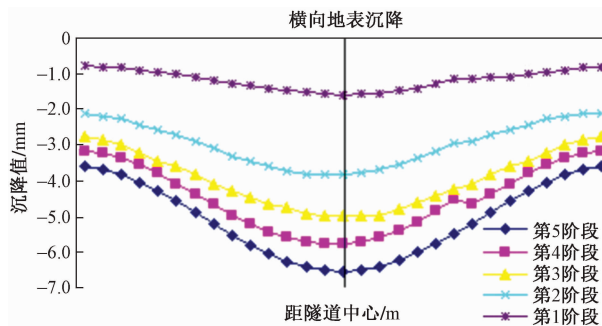


图 5 不同阶段地表沉降图

Fig. 5 Different stages of surface subsidence

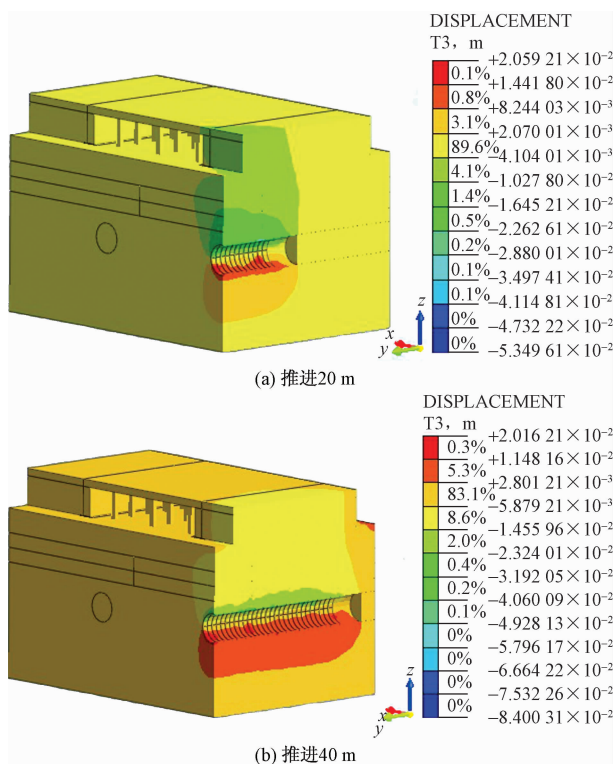


图 6 掘进 20 m、40 m 时位移云图

Fig. 6 Displacement of drilling of 20 m and 40 m

3.2 不同深度地表沉降分析

图 7 描述的是不同深度处地层的沉降量。如图所

示,地表最大沉降量为 6 mm;距离地表 6 m 处,底部为素填土,此处沉降量约为 8.5 mm;距离地表 11 m 处,底部地层为全风化土,沉降量约为 10.2 mm;距离地表 17 m 处,底部地层为中风化钙质板岩,最大沉降量约为 14 mm。另外由图可以看出,由隧道开挖引起的上部土体沉降呈漏斗形,即隧道正上方沉降最大,两边沉降递减,沉降曲线基本对称,但地表右侧受右线隧道开挖影响,沉降量略大于左侧。从不同深度监测值可知,随着地层深度的增加,沉降量也逐渐增大,且越靠近隧道顶部,沉降量越大,这主要是由于围岩地层在隧道开挖后应力释放,且受到盾构机土舱压力、刀盘剪切力、摩擦力等复杂力的作用,使土体受到扰动产生沉降。

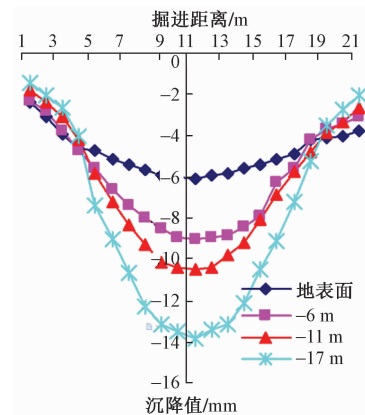


图 7 不同深度地层沉降量

Fig. 7 Subsidence at different depths

3.3 铁路桥桥桩的沉降分析

由于模拟桥桩在土层中埋深为 5 ~ 6 m,隧道距离地面约 15 m,因此,桥桩底部处于隧道拱顶上,且桩身在破裂面之上,属于短桩范畴,故桥桩变形主要以土体的竖向沉降变形为主。

对距离右线隧道最近的第一列桥桩(QD01-01 ~ QD01-07)进行模拟与监测,可以看出,实测沉降值都比模拟沉降值大,这是因为在实际工程中,铁路动荷载对地表有持续性的冲击作用,桥桩处在动荷载作用下,沉降较大,而在模拟计算中,将动荷载简化为静荷载,且部分岩土体参数可能偏高,故其沉降较小。

4 结论

(1) 地表沉降经历了 5 个阶段,即初期扰动沉降、开挖面前部沉降、盾构机正上方沉降、盾构通过沉降、后期固结沉降。

(2) 不同深度的上部土体沉降呈漏斗形,即隧道正上方沉降最大,两边沉降递减,沉降曲线基本对称,

但地表右侧受右线隧道开挖影响,沉降量略大于左侧。

(3)桥桩底端处于隧道拱顶上,且整个桩身处于破裂面之上,桥桩变形主要以受土体作用而产生的竖向沉降变形为主。

参考文献 (References):

- [1] 周宁,袁勇. 越江盾构隧道纵向结构分析模型的改进及应用[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(2): 208 - 213. [ZHOU N, YUAN Y. An improved longitudinal structure model of cross-river shield tunnel and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39 (2): 208 - 213. (in Chinese)]
- [2] 张云,殷宗泽,徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3): 388 - 392. [ZHANG Y, YIN Z Z, XU Y F. Analysis of three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (3): 388 - 392. (in Chinese)]
- [3] 易宏伟,孙钧. 盾构施工对软黏土的扰动机制分析[J]. 同济大学学报,2000,28(3): 277 - 281. [YI H W, SUN J. Mechanism analysis of disturbance caused by shield tunneling on soft clays [J]. Journal of Tongji University, 2000, 28 (3): 277 - 281. (in Chinese)]
- [4] 吕培林,周顺华. 软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J]. 中国铁道科学,2007(2): 12 - 15. [LV P L, ZHOU S H. Analysis of settlement laws caused by shield tunnel under-passing trunk railway in soft soil area [J]. China Railway Science, 2007 (2): 12 - 15. (in Chinese)]
- [5] 郑宜枫,丁志诚,戴仕敏. 超大直径盾构推进引起周围土体变形和土水压力变化分析[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(8): 1349 - 1353. [ZHENG Y F, DING Z C, DAI S M. An analysis of surrounding ground deformation and ground /water pressure fluctuations caused by a super-large diameter TBM [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2 (8): 1349 - 1353. (in Chinese)]
- [6] 邓小鹏,相建华. 宝塔山特长隧道地应力场研究及岩爆预测[J]. 水文地质工程地质,2013,40(1): 83 - 88. [DENG X P, XIANG J H. A study of the geostress field of the surrounding rocks of the Baota mountain tunnel and rock burst forecast [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40 (1): 83 - 88. (in Chinese)]
- [7] 王庆武,巨能攀,杜玲丽,等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(6): 88 - 94. [WANG Q W, JU N P, DU L L, et al. Research on rock burst prediction and engineering measures of long and deep-lying tunnels [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43 (6): 88 - 94. (in Chinese)]
- [8] 张鹏. 盾构隧道管片施工力学性能三维数值模拟研究[J]. 铁道工程学报,2012,10(7): 63 - 69. [ZHANG P. Research on mechanical property of segment of shield tunnel during construction with three-dimensional numerical simulation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 10 (7): 63 - 69. (in Chinese)]
- [9] 朱合华,丁文其,李晓军. 盾构隧道施工力学性能模拟及工程应用[J]. 土木工程学报,2000,33(3): 98 - 103. [ZHU H H, DING W Q, LI X J. Construction simulation for the mechanical behavior of shield tunnel and its application [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33 (3): 98 - 103. (in Chinese)]
- [10] 张志强,何川,余才高. 南京地铁盾构掘进施工的三维有限元仿真分析[J]. 铁道学报,2005,27(1): 84 - 89. [ZHANG Z Q, HE C, SHE C G. Three-dimensional finite element modeling of excavation and advancement processes of shield tunnel construction in Nanjing metro [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27 (1): 84 - 89. (in Chinese)]
- [11] 马伟斌,付兵先,杜晓燕,等. 地铁隧道下穿铁路桥施工变形分析及处理措施[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(4): 896 - 901. [MA W B, FU B X, DU X Y, et al. Analysis on deformation of subway tunnel traversing under operating railway bridge and its treatment measures [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (4): 896 - 901. (in Chinese)]
- [12] 王占生,张顶立. 浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2): 4208 - 4214. [WANG Z S, ZHANG D L. Key techniques on shallow embedded tunnel constructed beneath existing subway tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 26 (Sup2): 4208 - 4214. (in Chinese)]

编辑:汪美华