

曲线盾构隧道施工地表沉降分析

冯浩¹, 闫格²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 辽宁省住房和城乡建设厅, 辽宁 沈阳 110001)

摘要 目的 研究盾构法隧道曲线段施工过程中产生的不均匀地表沉降, 提高对隧道曲线段地表沉降的预测及计算能力. 方法 以马来西亚吉隆坡某地铁隧道区间盾构施工为案例背景, 通过现场试验、拟合计算及二维数值计算等方法, 研究曲线隧道地表沉降计算, 分析地表沉降、千斤顶推力等因素之间的关系. 结果 在经典的隧道施工地表沉降经验计算公式的基础上提出了修正公式, 该修正公式更适用于预测计算曲线盾构隧道施工的地表沉降, 最大误差值在4%以内. 同时给出了地表不均匀沉降量与盾构不平衡推力之间的关系式. 结论 笔者提出的曲线盾构隧道地表沉降计算公式优于经典的地表沉降经验计算公式, 可更准确的描述曲线盾构隧道施工过程中地表沉降槽的形态.

关键词 盾构法隧道; 曲线段掘进; 不均匀沉降; 不平衡推力

中图分类号 TU25

文献标志码 A

Analysis and Calculation of Surface Settlement in Curved Tunneling Section

FENG Hao¹, YAN Ge²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Department of Housing & Urban-Rural Development Liaoning, Shenyang, China, 110001)

Abstract: In order to study curved tunnel and the uneven surface subsidence in the construction process, and improve the prediction of the ground settlement in a curved tunnel, the calculation method of ground settlement of curved tunnel is studied based on the field measurements from shielding subway tunnels in soft ground located in Malaysia, and the relationship between factors such as ground settlement and jacking thrust is analyzed by means of on-site test, fitting calculation and two-dimensional numerical calculation. Based on the classical empirical formula of ground settlement in tunnel construction, a modified formula is proposed, which is more suitable for predicting the ground settlement of curved tunnel. The proposed formula predicted settlement with a maximum error of 4%. Meanwhile the relationship between the uneven ground settlement and the unbalanced jacking thrust is given. The formula of curved tunnel proposed in this paper is superior to the classical empirical formula, it can describe the shape of ground settlement trough more accu-

收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678438)

作者简介: 冯浩(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道工程、地下建筑工程等方面研究.

rately.

Key words: shielding; curved tunnel; uneven settlement; uneven jacking thrust

盾构在隧道曲线段施工时产生的地表沉降槽,与经典沉降计算公式(Peck^[1]公式)所得出沉降槽对称分布形态存在较大区别.关于隧道施工地表沉降的计算方法,多年来已有很多学者进行了广泛深入的研究. Peck^[1]最早提出了预测地表沉降槽的经验公式,采用了高斯函数的分布规律;在经典的 Peck 沉降计算公式的基础上,随后有很多学者进行了修正.除了经验公式法,地表沉降解析解的方法也被大量采用. A. C. Palmer 等^[2]将隧道施工导致的地层损失问题简化成弹性半平面问题,推导了地层损失计算公式. A. M. Puzrin 等^[3]分析出不排水工况下各向同性弹性体中隧道开挖引起的地表变形,将推导了地表变形的计算公式.有学者应用随机介质理论及公式解析等方法对地表沉降预测及地层损失计算进行了相关研究;文献[2,4]在 Hoek - Brown 基础上,基于文献[5]提出的强度准则,采用塑性理论推导出了预测矩形洞室破坏区的解析公式;还有多位学者在 Hoek - Brown 基础上进行了深入研究^[6-7].

采用参数现场实测法及室内试验法也得到了学者的大量应用. H. M. SHAHIN 等^[8]采用室内试验等方法研究了不同覆跨比时隧道施工引起的地表沉降曲线形状,表明了均质地层中覆跨比越大地表沉降曲线就越平缓,最大沉降量也越小;江英超等^[9]通过室内试验研究了盾构施工对地层的扰动机理,得出土体形状对地层沉降有重要的影响作用,地层损失是地表沉降的主要原因;还有学者通过现场试验结合数值模拟的方法研究地表长期沉降^[10]. 蒙晓莲等^[11]应用 ANSYS 数值计算软件模拟了曲率半径为 450 m 的单曲线盾构隧道在施工时引起的地表沉降,描述了盾构机机头距离不同观测断面的地面沉降槽形态规律;还有许多学者应用数值计算软

件对隧道施工引起的沉降进行了广泛研究^[12-17].

关于曲线隧道地表沉降的研究,多集中在数值计算模型的基础上,但并未进行计算方法的总结及实测研究.基于此,笔者以马来西亚吉隆坡某区间盾构施工项目为背景,观测和研究了盾构机在隧道曲线段施工时产生的地表沉降的特征规律,依据地表沉降观测点的地表沉降值及相应的千斤顶不对称推力等相关现场实测数据,采用现场试验、拟合回归计算、二维数值计算等方法,得出了曲线盾构隧道施工产生的地表沉降的计算方法.

1 工程概况

吉隆坡某地铁区间隧道线路总长 2 716 m,线路如图 1 所示.平均埋深为 13 m.采用土压平衡式(EPB)盾构机,盾构机长度 10 m,5 m 处设铰接装置.刀盘直径 6.67 m,盾构机外径 6.63 m.平均掘进速度为 7 环/天.隧道管片外径为 6.35 m,长度为 1.4 m.



图 1 总平面图

Fig. 1 Site-plan plot

隧道处于风化的肯尼山残积土层之中,地质剖面图如图 2 所示.

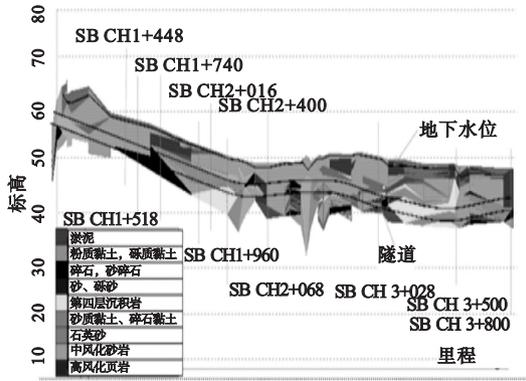


图2 地质剖面图

Fig.2 Geological profile

图2中应用不同颜色给出了隧道施工沿线地质情况,并依据隧道里程标注了各个地表沉降观测断面,SB CH1+448、SB CH1+518、SB CH1+740、SB CH1+960、SB CH2+016、SB CH2+400分别表示多个地表沉降观测断面.风化的肯尼山残积土大概分为A、B、C三类,土力学性质见表1.笔者研究的断面均处于C类残积土.

表1 土的物理力学参数

Table 1 Physic-parameters of soils

类型	标准贯入 度值/N	重力密度/ (N·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
A	<30	18 500	<60	5	28.0
B	30~100	19 000	60~200	10	30.0
C	>100	20 000	>200	10	32.0

2 观测面及施工参数

2.1 观测面

笔者重点选取4个曲线段观测面,其转弯半径R分别为300 m、400 m、500 m、700 m.4个观测断面按里程标注分别为SB CH1+448、SB CH1+518、SB CH1+960和SB CH2+400.地表沉降观测点用GSM表示,例如观测断面SB CH1+448上的地表沉降观测点GSM1451、GSM1451、GSM1451、GSM1451等.地表沉降观测点的横坐标值见表2.

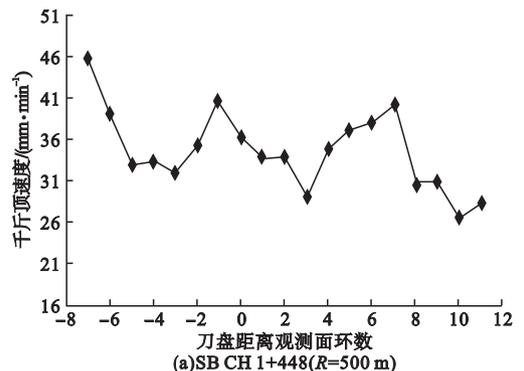
表2 地表沉降观测点坐标

Table 2 Coordinates of observed ground settlement points

观测断面	地表沉降观测点	横坐标 x/m
SB CH 1 + 448 (R = 500 m)	GSM 1451	6.5
	GSM 1452	0
	GSM 1453	-6.5
	GSM 1454	-13
	GSM 1455	-16.5
	GSM 1456	-18
	GSM 1457	-19
SB CH 1 + 518 (R = 400 m)	GSM 1521	50
	GSM 1522	6.5
	GSM 1523	0
	GSM 1524	-6.5
	GSM 1525	-13
	GSM 1526	-16.5
	GSM 1527	-24
SB CH 2 + 400 (R = 300 m)	GSM 1528	-31
	GSM 2450	30
	GSM 2451	3.5
	GSM 2452	0
	GSM 2433	-6.5
	GSM 2434	-13
	GSM 2435	-16
SB CH 1 + 960 (R = 700 m)	GSM 2436	-19.5
	GSM 2437	-27
	GSM 1961	50
	GSM 1962	0
	GSM 1963	-6.5
	GSM 1964	-13
	GSM 1965	-21
GSM 1966	-24	
GSM 1967	-34	

2.2 千斤顶速度

盾构(EPB)穿越各观测面时,推进速度如图3所示.



(a)SB CH 1+448(R=500 m)

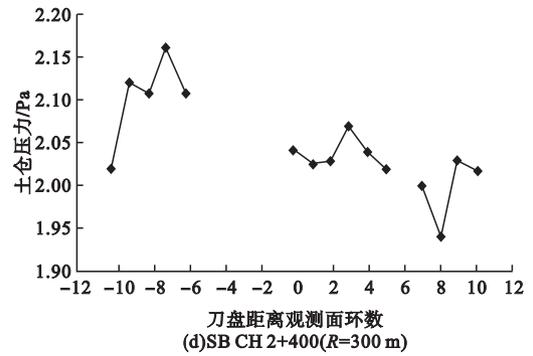
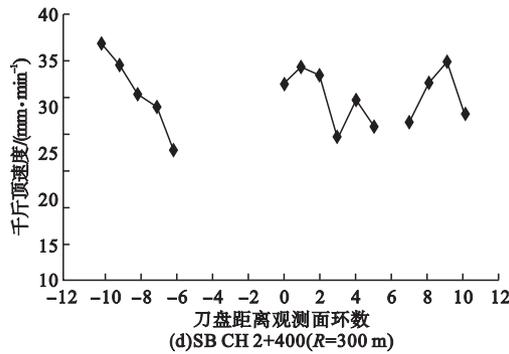
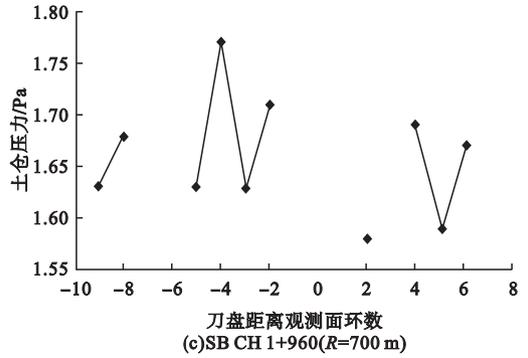
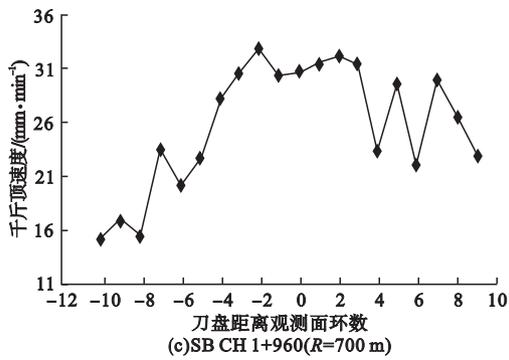
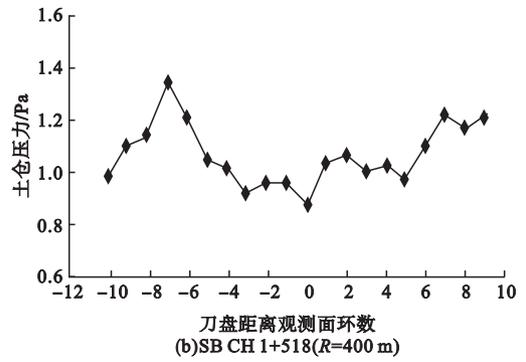
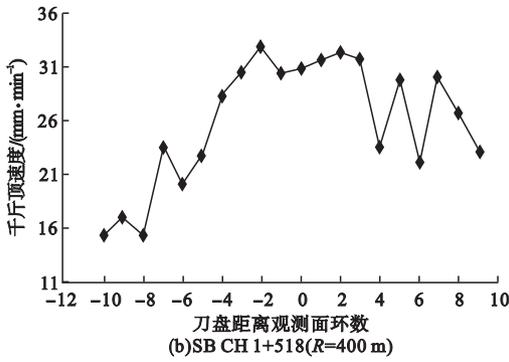


图3 盾构通过各观测面时千斤顶速度

图4 盾构通过各观测面时土仓压力

Fig. 3 Advancing speed of thrust at monitoring sections

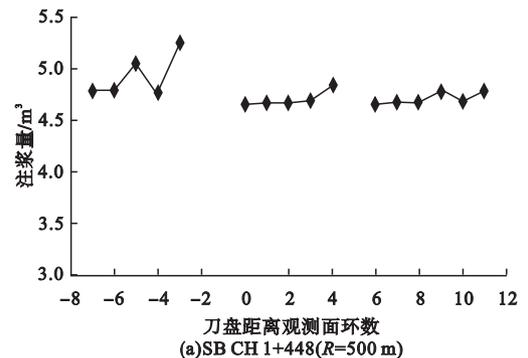
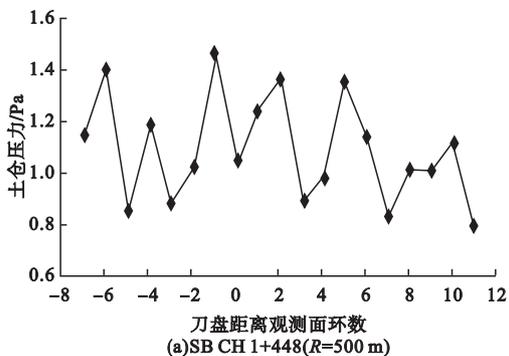
Fig. 4 Earth pressure at monitoring sections

2.3 土仓压力值

2.4 注浆量

盾构(EPB)穿越各观测面时,土仓压力见图4所示。

盾构穿越各观测面时,总体注浆量如图5所示。



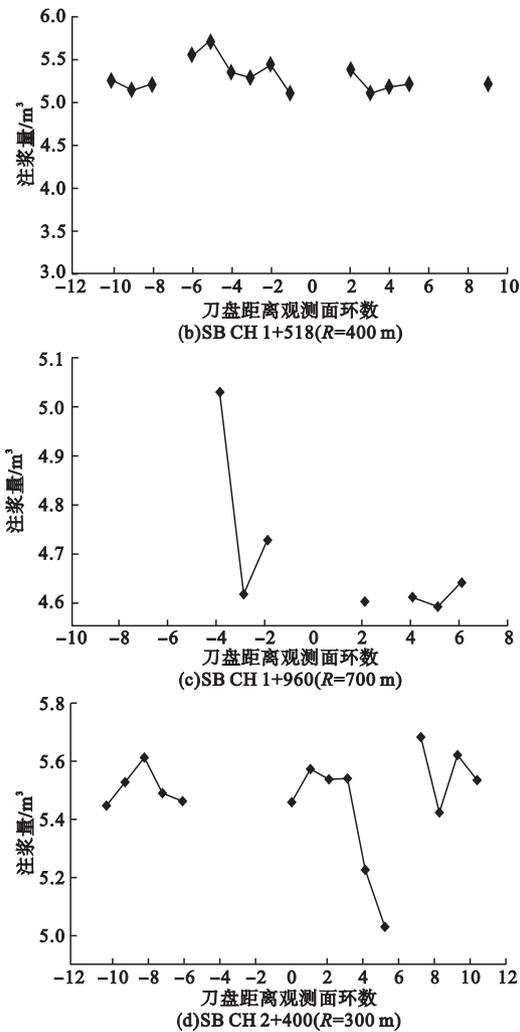


图5 盾构通过各观测面的注浆量

Fig. 5 Grouting at monitoring sections

2.5 千斤顶推力

盾构机设有 22 个千斤顶,分成上、下、左、右四组. 研究中,盾构推进至曲线段时分别记录了盾构穿越观测面前后 7 环左右组的推力值并取其均值 J_0 、 J_i , 然后计算其比值 J_0/J_i (见表 3).

表 3 盾构机到达观测面时千斤顶左右组的推力值

Table 3 Jacking thrust of left and right groups at monitoring sections

观测面	J_0 /MPa	J_i /MPa	J_0/J_i
SB CH 1 + 448	0.64	0.22	2.9
SB CH 1 + 518	0.81	0.21	3.9
SB CH 1 + 960	0.79	0.47	1.7
SB CH 2 + 400	1.47	0.24	6.1

3 隧道曲线段地表沉降

3.1 曲线盾构隧道施工引起的地表沉降规律

将每个观测断面上的实测地表沉降观测值应用高斯函数进行拟合计算,拟合结果中的拟合度分别为 -0.7、-0.85、0.29 及 0.75 (见图 6).

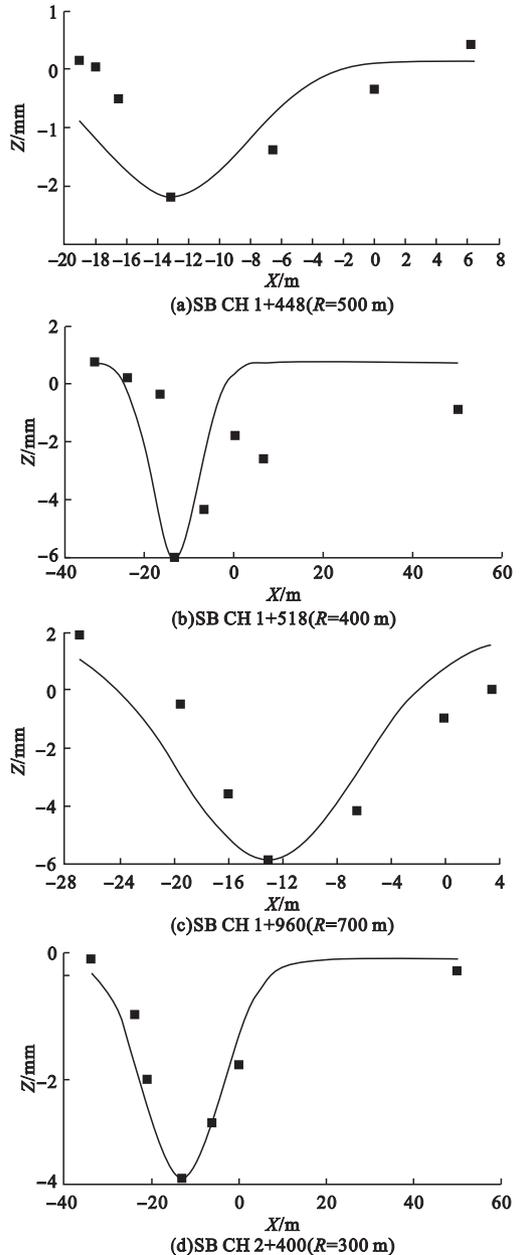


图6 盾构到达各观测面地表沉降

Fig. 6 The ground settlement trough at monitoring sections

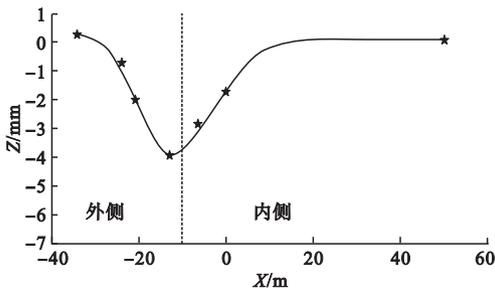
3.2 计算公式推理假设

针对以上地表沉降不对称的分布现象^[16],对隧道中线两边的沉降进行分算,公式可表达如下:

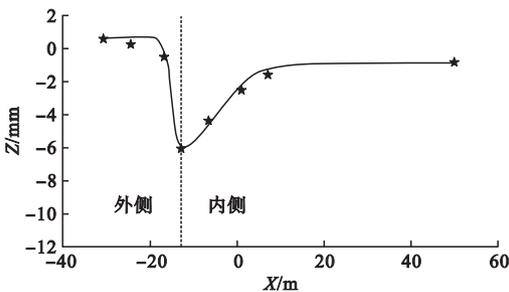
$$S_x = \begin{cases} \frac{v_i}{\sqrt{2\pi}i_i} \exp\left(-\frac{x^2}{2i_i^2}\right), x \geq 0, \\ \frac{v_o}{\sqrt{2\pi}i_o} \exp\left(-\frac{x^2}{2i_o^2}\right), x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_x 为坐标 x 处的地表沉降值,m; V_i 、 V_o 分别为隧道曲线内、外侧地层损失量,m/m; i_i 、 i_o 分别为隧道曲线内、外侧沉降槽宽度系数.

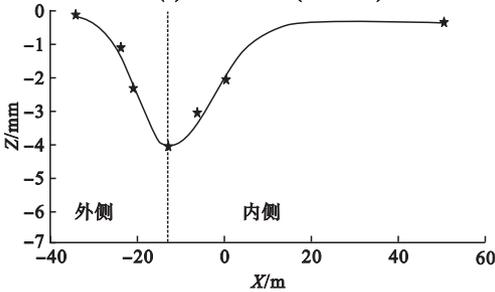
应用式(1)对之前盾构穿越各观测面时现场实测地表沉降数据进行拟合计算,拟合曲线(见图7)与实测值的拟合度为0.99、0.97、0.98和0.99,说明式(1)更适合于计算隧道曲线段的地表沉降值.



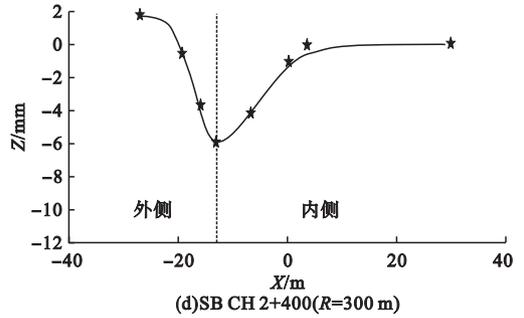
(a)SB CH 1+448(R=500 m)



(b)SB CH 1+518(R=400 m)



(c)SB CH 1+960(R=700 m)



(d)SB CH 2+400(R=300 m)

图7 各观测面拟合曲线

Fig.7 The ground settlement fitting trough at monitoring sections

4 曲线段地表沉降计算式中的系数

式(1)中的因素 V_i 、 V_o 分别代表了沉降槽两侧每延米的沉降量.研究中,观测并记录曲线段地表沉降数值的同时,记录下相应的千斤顶推力,相关数据见表4.

表4 盾构机穿越各观测面时的推力及沉降

Table 4 Jacking force and ground settlement at monitoring sections

观测面	转弯半径 R/m	V_i/V_o	J_o/J_i
SB CH 1+448	500	2.41	2.9
SB CH 1+518	400	3.33	3.9
SB CH 1+960	700	1.35	1.7
SB CH 2+400	300	4.19	6.1

经过拟合分析计算(见图8),盾构机到达各观测面时,不对称沉降,即沉降槽左右侧的沉降量与左右侧千斤顶推力存在如下关系:

$$\frac{v_i}{v_o} = a + b \times \left(\frac{J_o}{J_i}\right), \frac{J_o}{J_i} \geq 1, R \geq 300 \text{ m}. \quad (2)$$

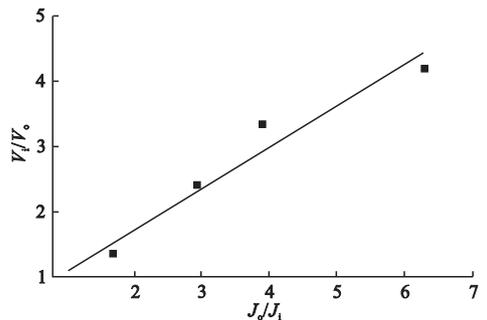


图8 地表沉降与千斤顶推力的关系

Fig.8 The relationship between ground settlement and jacking thrust

正比例函数直线与拟合点的拟合度为0.95,系数值分别为 $a=0.45, b=0.63$.

5 地表沉降二维数值分析

5.1 不均匀沉降原理分析

孟晓莲^[11]应用 ANSYS 数值模拟的方法,对不同转弯半径在不同的左右千斤顶推力作用下进行了多种工况的模拟分析.现分析盾构机壳体曲线外侧上半部与周围岩土产生顶推力的作用力情况.通过力的简化分解,将总顶推力 $F_{合}$ 分解成横向 $F_{横}$ 、纵向 $F_{纵}$ 两个主要分力(见图9).

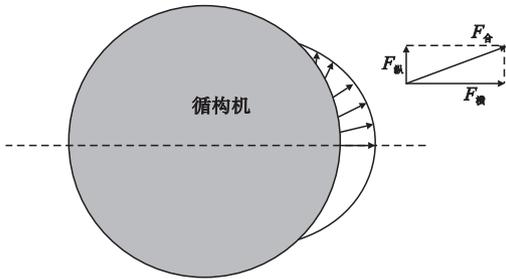
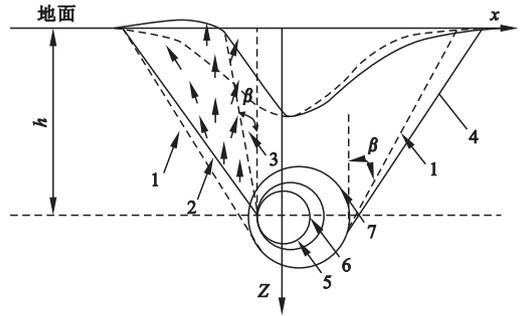


图9 曲线外侧盾构机壳体上部受力示意图
Fig.9 Diagram of forces on the upper part of the shield shell

图9所示曲线外侧对围岩产生主动土压力作用而使土体有向上滑动破坏的趋势,进而在隧洞外侧区域产生被动土压力极限破坏状态下新的剪切滑动破坏面,并且会使原有正常沉降情况下的完全边界向隧道轴线方向靠拢缩短,即影响角 β 会相应减小;相反,曲线内侧由于超挖作用会使剪切屈服区域影响

范围扩大,并且开挖土层损失量主要发生在内侧一面,致使横断面隧道轴线内侧的沉降影响宽度增大.该工程案例下,盾构机向前方左侧转弯,土体右侧受挤压力,于是隧道曲线段内外侧沉降影响范围及变化趋势如图10所示.



1.原边界;2.实际隆起边界(外侧);3.实际沉降边界(外侧);4.实际沉降边界(内侧);5.隧道;6.土体损失;7.剪切扰动区域。
图10 曲线段沉降(隆起)趋势图

应用 ABAQUS 软件建立隧道曲线段观测断面二维分析模型,通过数值模拟计算的方式与式(1)和实测值三者进行比较,对曲线段观测断面的应力状态及土体变形规律进行深入研究.

5.2 数值分析

5.2.1 计算模型及计算参数

笔者采用二维模型,应用 ABAQUS 对实际工程进行模拟实验.盾构机穿越隧道各曲线段观测面的断面地质物理力学参数见表5.

表5 观测面土的物理力学参数

Table 5 Physic-parameters of soils at monitoring sections

观测面	土体类型	厚度/m	重力密度/ ($N \cdot m^{-3}$)	弹性模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比
SB CH 1 + 448	淤泥质土	1	18 000	15	15	25	0.40
	砂质黏土	12	19 000	180	20	32	0.32
SB CH 1 + 518	淤泥质土	0.5	18 000	15	15	25	0.40
	砂质黏土	12.5	19 000	180	20	32	0.32
SB CH 1 + 960	淤泥质土	3	18 000	15	15	25	0.40
	砂质黏土	10	19 000	180	20	32	0.32
SB CH 2 + 400	砂质黏土	13	19 000	180	20	32	0.32

5.2.2 模型建立

在盾构机曲线段掘进过程中产生围岩与盾构机结构的相互作用,考虑到两者网格划分不一致,采用多点约束 Tie 命令. 详细描述如下:

- ①盾构机穿越曲线观测断面过程对地表沉降的影响简化为平面问题;
- ②盾构机壳体简化为一均质刚体圆环;
- ③将注浆浆液视作固体,千斤顶总顶推力侧向分力加载到盾构机壳体侧面(假定盾构机外侧壳体与土体挤压力的有效接触面积为 1 m).

按照图 9 中力的分解方式,将盾构机穿越各观测断面时的侧向分力分解计算,计算结果统计如表 6 所示.

表 6 盾构到达观测断面时的因子

Table 6 The factors of the shield machine at monitoring sections

观测面	半径/ m	转角/ rad	总推力/ kN	侧向分力/ kN
SB CH 1+448	500	0.002 8	33 150	92. 820
SB CH 1+518	400	0.003 5	31 950	111. 825
SB CH 1+960	700	0.002 1	38 550	77. 100
SB CH 2+400	300	0.004 7	35 250	165. 675

表 6 中,半径是指曲线隧道的转弯半径;转角是指隧道转弯处管片端面与该处轴线的法线方向在平面上产生的夹角.

计算模型中,盾构机壳体尺寸采用工程实际尺寸.模型尺寸选取范围为水平 X 方向取 100 m,向下纵深 50 m,埋深 13 m.模型左右侧边界节点施加水平约束,底部边界节点为固定约束.盾构机壳体、土体及注浆均采用 2D 实体单元,均采用各向同性线弹性本构模型.加载在盾构机壳体上的侧向分力按照表格 6 中推力分量取值.计算模型及约束力和荷载见图 11 及图 12 所示.

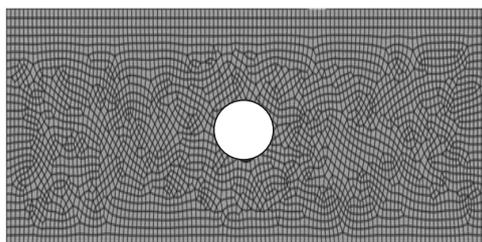


图 11 计算模型

Fig. 11 Calculation model

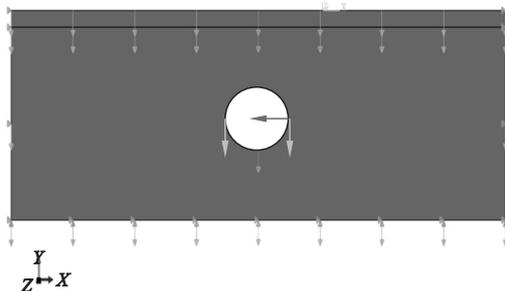


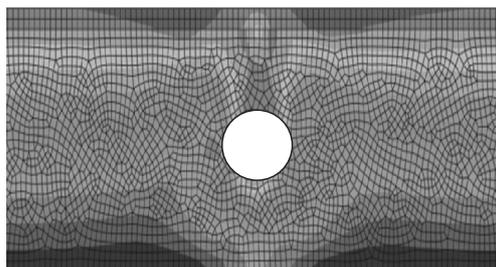
图 12 计算模型约束力及荷载

Fig. 12 The binding force and load of calculation model

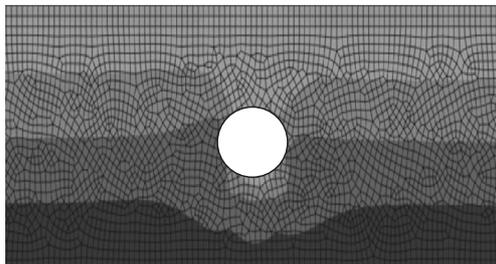
5.2.3 数值计算分析

(1) 最大主应力

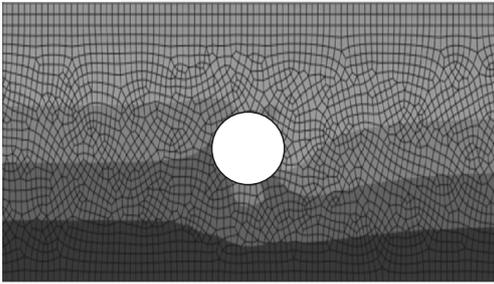
图 13 分别列出了盾构机到达各曲线观测断面时在侧向分力及土体自重作用下,盾构机周围土体的最大主应力情况.经过模型计算可以看出随着曲线半径的减小,最大主应力在曲线内外侧应力不对称分布状态也显著增大.



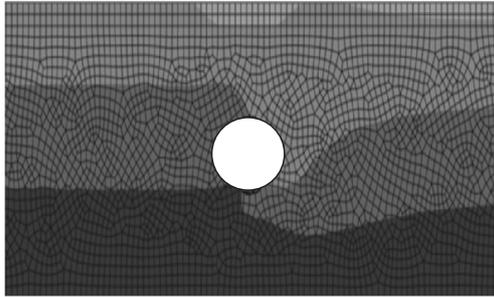
(a)SB CH 1+960(R=700 m)



(b)SB CH 1+448(R=500 m)



(c)SB CH 1+518($R=400$ m)



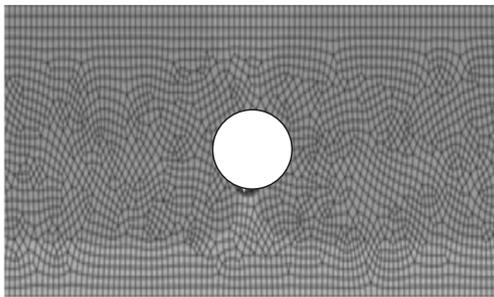
(d)SB CH 2+400($R=300$ m)

图 13 盾构到达观测断面时的主应力

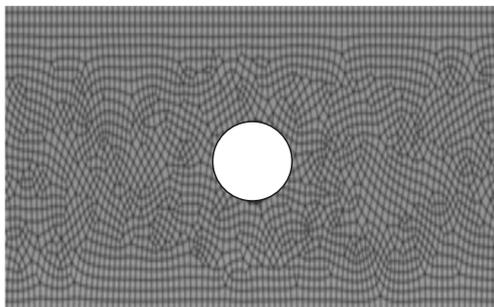
Fig. 13 Main stress when shield arrived at monitoring sections

(2) 土体位移

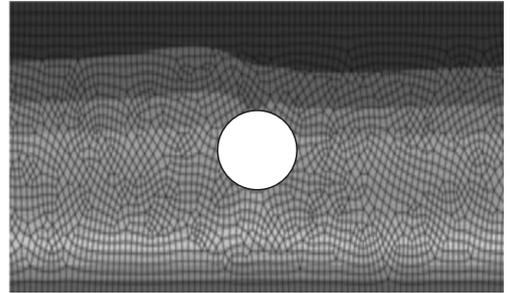
图 14 分别列出了盾构机到达各曲线观测面时在侧向分力及土体自重作用下,盾构机周围的土体位移情况。



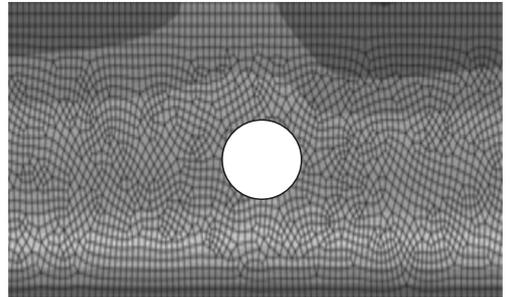
(a)SB CH 1+960($R=700$ m)



(b)SB CH 1+448($R=500$ m)



(c)SB CH 1+518($R=400$ m)



(d)SB CH 2+400($R=300$ m)

图 14 盾构到达各观测断面时的土体位移

Fig. 14 The soil displacement when shield arrived at monitoring sections

6 结 论

(1) 得出了盾构隧道曲线段施工产生的地表沉降分布为非对称分布,其沉降槽计算公式可由两个半区间高斯函数组合而成,且极值点处(S_{max})函数连续;

(2) 得出了盾构隧道曲线段(曲线半径 $R \geq 300$ m)施工内、外侧沉降量比值 V_i/V_o 与内、外侧千斤顶组的推力比值 J_o/J_i 之间存在正比例关系,并得出了函数关系式;

(3) 应用数值计算软件 ABAQUS 建立了单线隧道盾构施工曲线段的计算模型,应用力学简化的方式建立了模型的受力加载方式,并模拟计算了土层应力分布及土体位移,得出了隧道各曲线段观测面的地表沉降数值模拟计算结果。

参考文献

[1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering. Mexico City: [s. n.],

- 1969;225 - 290.
- [2] PALMER A C, ROBERT J M. Ground movements above tunnels: a method for calculating volume loss [J]. Canadian geotechnical journal, 2011, 48: 451 - 457.
- [3] PUZRIN A M, BURLAND J B, STANDING J R. Simple approach to predicting ground displacements caused by tunnelling in undrained anisotropic elastic soil [J]. Geotechnique, 2012, 62(4): 341 - 352.
- [4] LI W X, LI J F, WANG Q, et al. SMT-GP method of prediction for ground subsidence due to tunneling in mountainous areas [J]. Tunneling and underground space technology, 2012(32): 198 - 211
- [5] FRALDI M, GUARRACINO F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek - Brown failure criterion [J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2009(46): 665 - 673
- [6] YANG X L, HUANG F. Collapse mechanism of shallow tunnel based on nonlinear Hoek - Brown failure criterion [J]. Tunneling and underground space technology, 2011(26): 686 - 691
- [7] SUCHOWERSKA A M, MERIFIELD R S, CARTER J P, et al. Prediction of underground cavity roof collapse using the Hoek - Brown failure criterion [J]. Computers and geotechnics, 2012(44): 93 - 103.
- [8] SHAHIN H M, NAKAI T, ZHANG F, et al. Behavior of ground and response of existing foundation due to tunneling [J]. Soils and foundations, 2011, 51(3): 395 - 409.
- [9] 江英超, 何川, 胡雄玉, 等. 砂土地层盾构隧道施工对地层扰动的室内掘进试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2550 - 2559.
(JIANG Yingchao, HE Chuan, HU Xiongyu, et al. Experimental study on indoor tunneling of stratum disturbance by shield tunnel construction on sandy soil [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(12): 2550 - 2559.)
- [10] WANG Z, WONG R C K, LI S, et al. Finite element analysis of long-term surface settlement above a shallow tunnel in soft ground [J]. Tunneling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2012, 30(4): 85 - 92.
- [11] 蒙晓莲. 大坡度小半径线路情况对盾构法施工开挖面稳定性及管片受力影响的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
(MENG Xiaolian. Research on the effect of the small radius of the large slope on the stability of the excavation face and the force of the tube plate on the construction of shield construction [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.)
- [12] DO N A, DIAS D, ORESTE P. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin stacked tunnels in soft ground [J]. Tunneling and underground space technology, 2014, 42(11): 40 - 51.
- [13] NAGEL F, MESCHKE G. Grout and bentonite flow around a TBM; computational modeling and simulation-based assessment of influence on surface settlements [J]. Tunneling & underground space technology, 2011, 26(3): 445 - 452.
- [14] MIRHABIBI A, SOROUSH A. Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements [J]. Tunneling and underground space technology, 2012(29): 40 - 51.
- [15] SOUSA J A E, NEGRO A, FERNANDES M M, et al. Three-dimensional nonlinear analyses of a metro tunnel in Sao Paulo Porous Clay, Brazil [J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 2011, 137(4): 376 - 384.
- [16] KIVI A V, SADAGHIANI M H, AHMADI M M. Numerical modeling of ground settlement control of large span underground metro station in Tehran Metro using central beam column (CBC) structure [J]. Tunneling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2012, 28(1): 1 - 9.
- [17] RAMABU S S, DAVID A S, KELLY A B, et al. Study on the effect of a new construction method for a large span metro underground station in Tabriz-Iran [J]. Tunneling & underground space technology incorporating trenchless technology research, 2010, 25(1): 63 - 69.
- [18] 冯浩. 单曲线隧道地表不均匀沉降计算方法 [J]. 山西建筑, 2018, 44(9): 163 - 164.
(FENG Hao. The calculation method of uneven surface settlement of single-curve tunnel [J]. Shanxi architecture, 2018, 44(9): 163 - 164.)