

文章编号:1006-2106(2011)11-0093-05

黄土地层地铁盾构施工地表变形规律预测研究^{*}

任建喜^{**} 王金华 张引合 冯晓光 李庆园

(西安科技大学, 西安 710054)

摘要:研究目的:西安地铁是我国首次在黄土地层修建地铁,黄土地层具有湿陷性等特殊的物理力学特性,盾构是西安地铁隧道的主要施工方法之一,但有关西安地铁盾构施工诱发的地表沉降特性预测的研究成果目前还很少,急需开展黄土地层地铁盾构施工诱发的地表变形规律预测方法研究,目的是为盾构施工地表沉降监测方案的制定和盾构施工参数的确定提供理论依据,以保证隧道盾构安全施工。

研究结论:通过理论预测计算得到的沉降值与西安地铁某区间隧道的地表沉降实测数据进行了对比分析,研究结果表明:(1)给出的地表沉降预测公式预计的地表沉降趋势和数据与实测值基本一致;(2)盾构施工时,正面附加推力可以维持开挖面前方土体的稳定,但正面附加推力的大小对地表竖向位移量的大小会产生影响;(3)盾构施工时,影响地表竖向位移因素很多,而盾尾间隙的大小对地表竖向位移影响最大;(4)盾构施工时,地表沉降量随着距隧道轴线距离的增加变形量逐渐减小,在隧道轴线上方变形最大。

关键词:黄土地层;盾构施工;地表变形;预测;监测

中图分类号:U45 文献标识码:A

Study on Prediction of Surface Deformation during Shield Construction of Subway in Loess Stratum

REN Jian-xi, WANG Jin-hua, ZHANG Yin-he, FENG Xiao-guang, LI Qing-yuan

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: Research purposes: The Xi'an subway is the first subway built in loess stratum in China, and the loess has some special physical and mechanical properties such as collapsibility. The shield construction is one of the main methods for construction of subway tunnel, but there is a little research on prediction of the feature of surface deformation induced by shield construction. So it is urgent to do the study on prediction of the features of the surface deformation induced by shield construction in loess stratum for the purpose of offering some theoretical basis for working out the monitoring program for the surface deformation and determining the shield construction parameters to ensure the construction safety of the shield tunnel.

Research conclusions: The comparative analysis of the theoretical forecast computation and the measured data on the surface deformation of one interval tunnel of Xi'an subway was made and the results showed: (1) The predicted surface deformation tendency and data calculated by the prognostic formula was basically consistent with the actual value. (2) During shield construction, the front additional pushing force could remain the the stability of the soil in front of the excavating surface and the big or small of the the front additional pushing force could influence the big or small of the ground vertical displacement. (3) During shield construction, there were lots of factors to influence the ground vertical displacement, but the big or small of the gap of the shield tail had the biggest influence on the ground vertical

^{*} 收稿日期:2011-06-10

基金项目:陕西省教育厅科研计划资助项目(2010JK667)

^{**} 作者简介:任建喜,1968年出生,男,教授,博士生导师。

displacement. (4) During shield construction, the ground settlement decreased with the increase of the axial distance of the tunnel, and deformation above the the tunnel axial was the biggest.

Key words: loess stratum; shield construction; surface deformation; prediction; monitoring

地铁盾构施工在黏质粉土、沿海饱和软土和风化岩石地层中均有系统的盾构施工参数和地层沉降变形规律已经取得许多成果^[1-4],西安地铁 1、2 号线已经开始施工,未来规划有 15 条线路。有关西安黄土地层盾构施工诱发的地表沉降的研究已经引起重视^[5-6]。黄土地层的复杂性使黄土地层地铁隧道盾构施工存在“问题多,难点多,数据少,参数缺”的问题。地铁盾构施工引起的地表沉降预测预报研究对安全施工具有重要价值,急需研究。本文将从盾构施工参数和地层损失对地表沉降的影响规律进行预测研究,目的是为盾构安全施工提供帮助。

1 盾构施工影响地表变形因素及力学计算模型

1.1 影响因素

盾构施工时引起地表变形的影响因素主要如下。

1.1.1 正面附加推力

盾构施工时,为了维持开挖面土体的稳定,必须保证有足够的附加推力。正面附加推力一般控制在 $\pm 20 \text{ kPa}$ ^[6]之间,当附加推力太大时,会引起开挖面前方土体的隆起,推力太小时会导致地表下沉。

1.1.2 盾构与土体之间的摩擦力

盾构推进时,盾壳与周围土体是紧密接触的,盾构机的向前推进会带动周围土体的移动,土体受到扰动后的重新固结会导致地表发生沉降。

1.1.3 盾构开挖引起的盾尾间隙

为了使盾构能够顺利推进,通常盾构的刀盘外径要大于盾构壳的外径,从而在盾构壳外围产生一定厚度的间隙;改变推进方向引起的超挖;土体挤入盾尾空隙等因素都会引起土体的地层损失,从而产生地表沉降。

1.2 计算模型

盾构施工时的基本力学计算模型如图 1 所示。

在本文的研究过程中,做了以下几个方面的假定:

(1) 土体为不固结不排水的均质线弹性半无限体;

(2) 将盾构机的推进视为直线推进,不考虑蛇形推进、纠偏、超挖等的因素。

(3) 将盾构机的受载视为均布受载,即土体与盾构机的摩擦力沿盾构机均匀分布,正面附加推力按圆形均布荷载考虑。

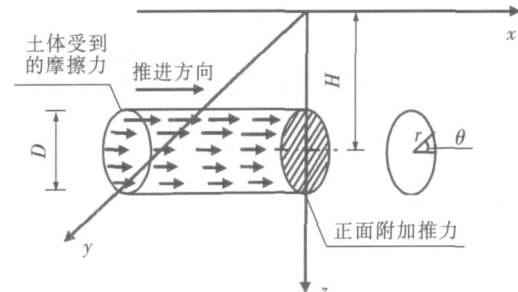


图 1 力学模型简图

(4) 仅考虑盾构推进时的空间位置变化,不考虑时间效应。

2 盾构施工引起的地表变形理论解

2.1 正面附加推力引起的地表变形计算

根据图 1 在盾构机工作面的圆形区域内选取微分元 $rdrd\theta$ 利用 Mindlin^[7] 解公式可以推导出在水平圆形荷载作用下半无限土体中任一点 (x, y, z) 在附加推力作用下引起的土体位移竖直方向上的位移计算公式为:

$$w_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{P_x}{4\pi G} \left[\frac{-h + r\sin\theta}{M_1^3} + \frac{(1-2\mu)}{M_1(M_1 + h - r\sin\theta)} \right] rdrd\theta \quad (1)$$

$$M_1 = N_1 = \sqrt{x^2 + (y + r\cos\theta)^2 + (-h + r\sin\theta)^2} \quad (2)$$

式中 x ——盾构推进方向离开挖面水平距离(m);

μ ——土体泊松比;

P ——盾构机正面附加推力(kPa);

D ——盾构机直径(m);

h ——隧道轴线到地面的距离(m);

y ——垂直于隧道轴线的水平距离(m);

z ——离地面的竖向距离(m);

G ——土体剪切弹性模量(MPa),其值为 $G =$

$$\frac{E}{2(1+\mu)}$$

其中 E ——土体模量(MPa)。

式(1)很难直接积分出来,在本文中采用数值计算方法进行计算。

盾构施工时为了维持开挖面的稳定,其正面附加推力一般控制在 $P = \pm 20 \text{ kPa}$ 之间,对于黄土地层取 $E = 2.8 \text{ MPa}$, $\mu = 0.30$ 则 $G = 1.0769$ 西安地铁衬砌管片半径

为 $D'=3.0$ m 在实际开挖时存在超挖,故取 $D=3.05$ m。对于相同隧道埋深时, $x=10$ m, $h=15$ m;而对于相同正面附加推力时,取 $x=10$ m, $P=10$ kPa。经计算可得地表垂直方向沉降量随正面附加推力及隧道埋深的变化情况。

分析图 2 可知,在相同隧道埋深条件下,地表垂直方向位移量随正面附加推力增大而增大。地表竖向位移量与正面附加推力,两者呈线性增长的关系,但地表变形影响范围基本上不变。盾构推力的大小影响着地表变形量的大小,正面附加推力大于维持开挖面稳定所需压力时,会导致地表的隆起;小于维持开挖面所需推力时会导致地表的沉降。

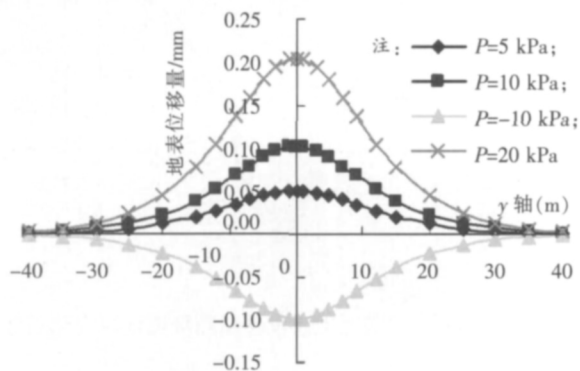


图 2 相同隧道埋深时地表位移量随正面附加推力变化曲线

分析图 3 可知,在相同正面附加推力作用下,地表垂直方向位移量在距隧道轴线 ± 15 m 范围内随隧道埋深增加而减小,而在距隧道轴线 ± 15 m 范围以外,地表位移量却随着隧道埋深的增加而增大,但增加量很小。

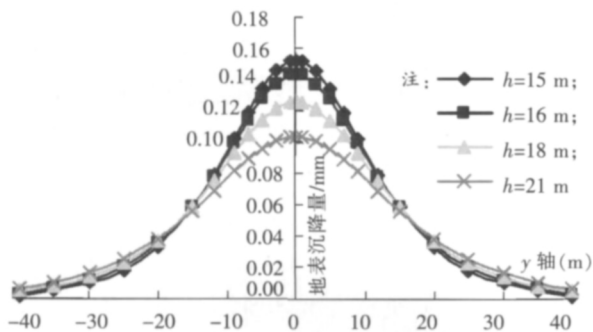


图 3 相同附加推力时地表位移量随隧道埋深变化曲线

2.2 盾壳与周围土体之间的摩擦力对地表变形计算

在盾构施工过程中盾壳与周围土体会产生摩擦力,当盾构机向前推进时,摩擦力会带动土体移动,从而引起地面变形。

根据图 1,取盾构机表面的微分面积 $Rd\theta$,利用 Mindlin 解,通过直接积分可得,盾壳与土体之间的摩

擦力引起的地表垂直方向位移计算公式为:

$$w_2 = \frac{p_1 R}{4\pi G} \int_0^{2\pi} \int_0^R (x+l) \left[\frac{-h+R\sin\theta}{M_2^3} + \frac{(1-2\mu)}{M_2(M_2+h-R\sin\theta)} \right] d\theta \quad (3)$$

$$M_1 = N_1 = \sqrt{(x+l)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (-h+R\sin\theta)^2} \quad (4)$$

式中 L ——盾构机的长度(m);

p_1 ——盾构机与土体之间单位面积的摩擦力(kPa);盾构机与土体之间的摩擦力 p_1 等于正压力 σ_N 乘以摩擦系数 f ,即: $p_1 = \sigma_N \times f$ 。

摩擦力引起的地表位移计算参数取值和正面附加推力引起的位移计算参数一样。对于相同隧道埋深时,取 $x=10$ m, $h=15$ m,对于相同摩擦力时,取 $x=10$ m, $p_1=4$ kPa。经计算可得地表垂直方向位移量随盾壳与土体间摩擦力及隧道埋深的变化情况。

对图 4 分析可得,摩擦力的作用地表会产生隆起,在相同摩擦力作用下,地表垂直方向位移量随盾壳与土体之间的摩擦力的增大而增大,竖向位移量的增大量与摩擦力的增大量两者呈正比关系。因此,在盾构施工时,为了减小地表的沉降时,可采取一些措施减小盾壳与土体之间的摩擦力。

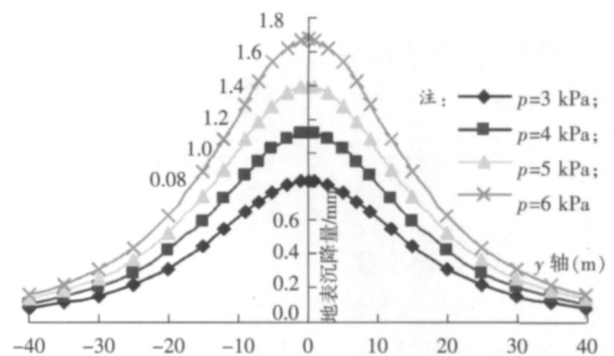


图 4 相同隧道埋深时地表位移量随摩擦力变化曲线

对图 5 分析可得,在相同隧道埋深条件下,在距隧道轴线 ± 20 m 范围内,地表垂直方向位移量随隧道埋深的增大而减小;而在距隧道轴线 ± 20 m 范围外,地表垂直方向的位移基本反而随隧道埋深的增加而增大。

2.3 地层间隙引起的地表变形研究

盾构施工时,由于刀盘的超挖、纠偏、盾尾间隙等会使盾构管片与土体之间没有完全紧密接触,虽然在施工时,采用了注浆等方式对管片与土体之间的间隙

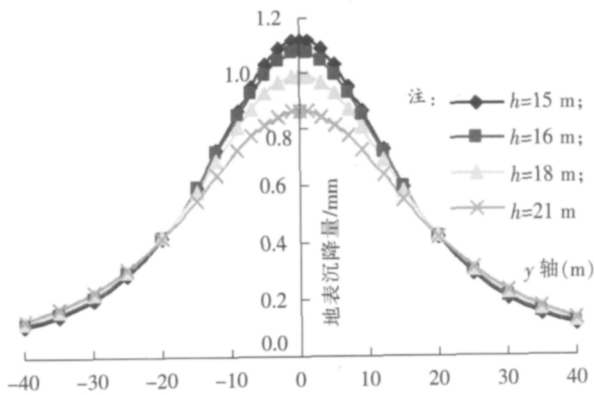


图5 相同摩擦力时地表位移量随隧道埋深变化曲线

进行了回填,仍不可避免盾构周围土体产生地层损失,从而产生地表沉降。

Loganathan 和 Poulos^[8]在 Verruijt 和 Booker 的基础上,考虑地层损失的系数,采用了 Lee^[9]等人间隙参数的概念,并考虑了土向隧道内的位移为椭圆形的非均匀分布特征,如图6所示。

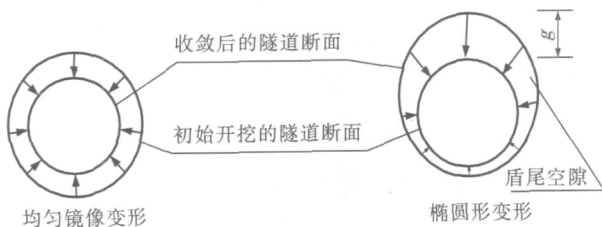


图6 隧道周边土体的均匀径向变形和椭圆形变形

得到了短期不排水地层中,地表任一点的竖直方向位移计算公式如下:

$$w_3 = \frac{(1-\mu) \times h \times (4Rg + g^2)}{x^2 + h^2} \exp\left[-\frac{1.38x^2}{(h+R)^2}\right] \quad (5)$$

式中 g ——间隙参数。

在地层损失引起地表竖向沉降计算过程中,对于相同隧道埋深时,取 $h=15$ m;对于相同地层损失率时,取 $g=25$ mm,则经计算可得。

对图7分析可得,在相同隧道埋深条件下,地表竖向位移量随着盾尾间隙的增大而增大,地表沉降槽宽度不随盾尾间隙的变化而变化。地层损失率只要有微小变化时,地表的竖向最大沉降量将有较大的变化,因此在控制地表竖向位移量时应严格地控制盾尾间隙。

对图8分析可得,在相同盾尾间隙时,在距隧道轴线 ± 10 m 范围内,地表竖向方向最大位移量随隧道埋深增大而减小;在距隧道轴线 ± 10 m 范围外,随隧道埋深的增大而增加。地表沉降槽宽度随着隧道的埋深增加而增大。

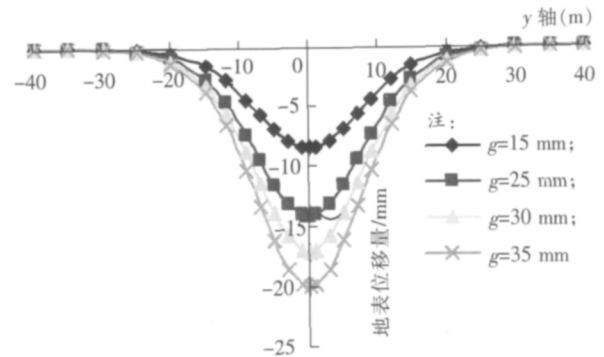


图7 相同隧道埋深时地表位移量随盾尾间隙变化曲线

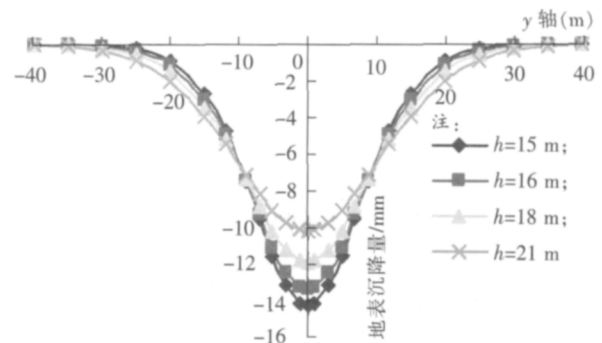


图8 相同盾尾间隙时地表位移量随隧道埋深变化曲线

2.4 地表总沉降

综上所述,地铁盾构施工时地表竖向沉降的总位移是由正面附加推力、盾壳与周围土体之间的摩擦力以及盾尾间隙引起的地表沉降这三部分组成的:

$$w(x, y) = w_1 + w_2 + w_3 \quad (6)$$

3 工程实例

本文以西安地铁2号线某区间隧道盾构施工为例,对盾构在西安黄土地区施工引起的地表沉降位移进行分析。该区间隧道盾构右线起讫里程为 YDK 4 + 439.204 ~ YDK 5 + 485.316,长 1 046.112 m。左线起讫里程为 ZDK 4 + 439.204 ~ ZDK 5 + 485.316,短链 0.097 m,长 1 046.015 m。全线由 4 条曲线段和 2 条直线段组成,曲线半径 3 000 m。本文取 ZDK 4 + 750 处盾构施工参数及地表沉降监测进行分析,此处的地层情况如下:1 ~ 2.2 m 为素填土、2.2 ~ 11.4 m 为新黄土、11.4 ~ 14.8 m 为古土壤、14.8 ~ 20.0 m 为老黄土、20.0 m 以下为粉质黏土。施工参数如下: $L=8.68$ m, $g=25$ mm, $P=13.5$ kPa, $\mu=0.3$, $p_1=4$ kPa, $D=6.18$ m, $R=3.09$ m, $h=16.3$ m, $E=2.8$ MPa, $G=1.0769$ MPa。则经计算可得,附加推力、盾壳与土体之间的摩擦力、盾尾间隙引起的地表竖向位移以及三者共同组成的地表竖向位移曲线如图9所示。

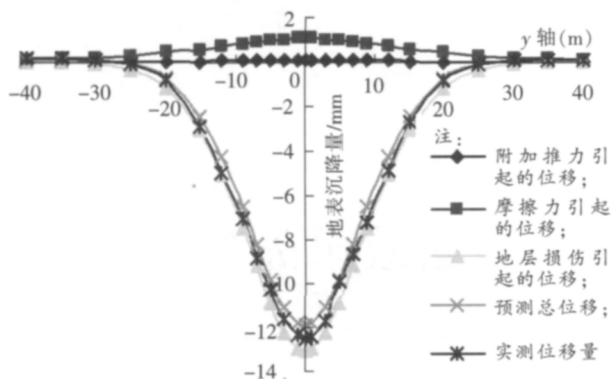


图 9 理论计算与实测对比图

对图 9 分析可知,盾构施工时正面附加推力和盾壳与土体之间的摩擦力会引起地表向上隆起,盾壳与土体间的摩擦力引起的地表隆起量大于正面附加推力引起的隆起量。盾尾间隙则会引起地表沉降,沉降值远大于正面附加推力和摩擦力引起的隆起值,故在此盾构区间盾构施工时,地表表现为沉降。从图中可以看出,实测位移量略大于预测值,这主要是在理论计算时没有考虑地面动荷载引起的。

4 结论

(1) 采用半解析法对黄土地层地铁区间隧道盾构施工引起的地表沉降规律进行了预测研究,主要研究正面附加推力、盾壳与土体之间的摩擦力、盾尾间隙、隧道埋深对地表沉降的影响规律,给出了各个影响因素对盾构施工诱发的地表沉降值的预测计算公式。工程实例分析可知,本文提出的黄土地层盾构施工引起地表沉降的预测计算值与实际监测值趋势一致,数据接近。表明预测公式是可靠的,可用于盾构施工前的地表沉降值预计和确定合理的施工参数,为地表沉降监测方案的合理布置提供帮助。

(2) 盾构施工时,正面附加推力可以维持开挖面前方土体的稳定,但正面附加推力的大小对地表竖向位移量的大小是有影响的,当正面附加推力小于土体主动土压力时地表会产生沉降,沉降量随着正面附加推力的增加而减小;当正面附加推力大于土体主动土压力时,地表会产生隆起,隆起量随正面附加推力的增大而增大。

(3) 盾构施工时影响地表竖向位移因素很多,而盾尾间隙的大小对地表竖向位移影响最大。对于西安老黄土来说,土体结构致密,强度高,开挖后自稳能力比较高,因此盾构施工时应尽量减少超挖,严格控制盾尾间隙以减少地表沉降量。

(4) 盾构施工时,地表沉降量随着距隧道轴线距

离的增加,变形量逐渐减小,在隧道轴线上方变形最大。变形影响范围主要在距轴线 ± 25 m 范围内,因此在该变形影响范围内有建筑物或构筑物时,地铁隧道开挖前应该进行预加固,加固后方能进行盾构施工。

参考文献:

- [1] 魏纲,张世民,齐静静,等. 盾构施工引起的地表变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(1): 3317 - 3323.
Wei Gang, Zhang Shimin, Qi Jingjing, etc. Study on Calculation Method of Ground Deformation Induced by Shield Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(1): 3317 - 3323.
- [2] 郑保才,程文斌,胡国伟. 浅埋暗挖法施工近接交叉地铁隧道地表沉降监测分析[J]. 铁道工程学报, 2009(11): 72 - 76.
Zheng Baocai, Cheng Wenbin, Hu Guowei. Analysis and Monitoring of Ground Subsidence Caused by Excavation of Adjacent and Crossing Metro Tunnel with Shallow - depth and Subsurface Excavation Method [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(11): 72 - 76.
- [3] 骆汉宾,李伟明,周光辉. 武汉地铁盾构施工地表沉降的非等间隔模型分析[J]. 铁道工程学报, 2011(1): 86 - 91.
Luo Hanbin, Li Weiming, Zhou Guanghui. Analysis of Ground Settlement Caused by Shield Construction of Wuhan Metro with Non - equal Interval model [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(1): 86 - 91.
- [4] 唐晓武,朱季,刘维,等. 盾构施工过程中土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(2): 417 - 422.
Tang Xiaowu, Zhu Ji, Liu Wei, etc. Research on Soil Deformation During Shield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(2): 417 - 422.
- [5] 朱才辉,李宁,柳厚祥,等. 盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析[J]. 岩土力学, 2011(1): 158 - 164.
Zhu Caihui, Li Ning, Liu Houxiang, etc. Analysis of Ground Settlement Induced by Workmanship of Shield Tunnelling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(1): 158 - 164.
- [6] 朱才辉,李宁,张志强. 西安黄土地层盾构施工诱发地面沉降规律分析与预测[J]. 岩土工程学报, 2010(7): 1087 - 1094.
Zhu Caihui, Li Ning, Zhang Zhiqiang. Analysis and Prediction of Ground Settlement Induced by Shield Construction in Xi'an Loess Strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(7): 1087 - 1094.