

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.008



基于时空关系的盾构开挖地表沉降规律

王智德¹, 江俐敏², 饶宇^{1,3}

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉职业技术学院 建筑工程学院, 武汉 430074;
3. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘要:基于武汉地铁四号线某区间隧道盾构开挖引起的地表沉降数据分析,考虑地表沉降的时空关系,将地表沉降划分为无影响阶段、前期沉降阶段、通过阶段、盾尾空隙沉降阶段、工后沉降阶段,并给出了各个阶段的大致范围及其地表沉降占总沉降的比值。通过对 Mindlin 解引入时间参数,针对不同阶段地表沉降影响因素进行分析,在前影响距离范围内,盾构机与土体的摩擦力和地层损失对地表沉降的影响占优,在后影响距离范围内,地层损失对地表沉降起到了绝对的控制作用,前期沉降阶段的土层隆起与正面附加推力、摩擦力有关,而正面附加推力、摩擦力和注浆压力导致了工后沉降阶段的土体回弹,由此获得了实时地表沉降预测的理论公式。研究表明:理论预测值与实测值能较好的吻合,该公式能够较为准确地实时预测地表沉降。

关键词:地表沉降;盾构隧道;沉降预测;Mindlin 解

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0062-08

Estimation of ground settlement induced by shield tunnel excavation based on the time-space relationship

Wang Zhide¹, Jiang Limin², Rao Yu^{1,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China; 2. School of Architecture Engineering, Wuhan Polytechnic, Wuhan 430070, P. R. China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: Based on the analysis of ground settlement caused by shield tunneling excavation of a certain section of 4th Line of Wuhan Metro considering tempo-spatial effect of ground settlement, the ground settlement has been divided into five stages as follows: no effect stage, earlier stage, passing stage, tail void stage, passed stage. The distance of each stage between the excavation face and the monitoring section have been suggested. In addition, the ratios of ground settlement in different stages to total settlement have been calculated. The main influence factors of ground settlement in different stages are investigated by introducing time parameter into Mindlin solution. Results show that the friction force and ground loss have more influence on ground settlement before the cutter of the shield machine through monitoring section, and the ground loss has great effect on ground settlement after the cutter through monitoring section. The

收稿日期:2018-04-17

基金项目:国家自然科学基金(51374163);武汉市城乡建设委员会科技计划(武城建[2017]12号)

作者简介:王智德(1983-),男,博士,高级实验师,主要从事隧道监测、检测研究, E-mail: wangzhide-wuhan@whut.edu.cn.

Received:2018-04-17

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51374163); Science Program of Wuhan Urban and Rural Construction Commission (No. [2017]12)

Author brief: Wang Zhide (1983-), PhD, senior experimentalist, main research interests: monitoring and detection of tunnels, E-mail: wangzhide-wuhan@whut.edu.cn.

additional thrust and friction force tend to cause ground-uplifting at the Earlier-stage. Besides, the additional thrust, friction force and grouting pressure may lead to ground resilience during the passed-stage. More importantly, a formula of calculating the real-time ground settlement has been proposed to offer a technical support in engineering construction. The calculated results are in good agreement with the corresponding measured values, indicating that the formula is able to accurately predict the ground settlement in real time.

Keywords: ground settlement; shield tunnel; settlement prediction; Mindlin solution

地铁往往穿越密集的城市建筑群,隧道开挖引起的地表沉降如不加以控制,往往会造成严重的经济损失。在中国,地铁隧道开挖过程中由于地表沉降过大引起的重大事故不乏其例。因此,对地表沉降规律进行研究与预测在工程实践中显得尤为重要。目前常用的预测方法有:工程经验法、理论解析法、数值分析方法、随机介质理论方法、模型试验法以及神经网络与灰色预测等方法^[1-3]。魏纲等^[4]较早注意到 Mindlin 解在盾构法施工中计算地表沉降的作用;林存刚等^[5]研究了盾构掘进速度和非正常停机对地表沉降的影响关系;唐晓武等^[6]研究了地表沉降计算公式,并认为适用范围为盾构机头前后 $2L$ 处,且仅限于施工阶段;孙统立等^[7]、陈春来等^[8]研究了双线盾构隧道的地表沉降;饶宇等^[9]提出了基于 Peck 公式的地表沉降预测方法;张冬梅等^[10]研究了列车振动和地下水耦合下沉降时空规律;林存刚等^[11]基于 Mindlin 解得到了推力、盾构摩擦力、同步注浆压力以及地层损失所引起的地表竖向位移;其他学者^[12-16]采用数值模拟、理论分析等方法,并考虑隧道各种影响因素,分析了引起地表沉降的原因。

地表沉降是时间与空间交互影响的结果,准确地讲,地表沉降是动态变化的。然而,多数学者采用单一地表沉降计算公式,忽略了其阶段变化特性。实际上,各个阶段地表沉降计算公式是有显著差异的。其不仅与时间密切相关,且受到盾构推进速度影响。因此,本文基于 Mindlin 解,综合考虑地表沉降的时空关系和阶段特性,分析各阶段地表沉降的控制因素,推导了地铁隧道盾构开挖引起地表沉降在各个阶段的预测公式,并通过实例验证了公式的有效性。

1 盾构引起地表沉降阶段划分

一般来说,地表沉降大致经历 5 个阶段:前期沉降阶段、开挖面前的隆沉、通过期间沉降阶段、盾尾间隙沉降阶段和后期沉降阶段。图 1 和图 2 是武汉地铁四号线某区间隧道右线监测断面不同监测点的

地表沉降速度与推进进度对应图,其中, y 值为横断面测点与隧道轴线的距离, m 。从图 1、图 2 中可以看出,地表沉降速率有两个峰值,通过时间与盾构机位置的对应分析,可以知道第 1 个地表沉降速率峰值发生在盾构机通过监测断面正下方,第 2 个则发生在盾构机尾脱出监测断面瞬间,而第 2 个峰值往往比第 1 个更大。在第 1 个峰值之前,沉降速度由零开始变化,一段时间沉降速度小于零,产生地表隆起;第 2 个峰值之后,沉降速度迅速下降,直至趋近于零,甚至产生回弹。同时,根据地表沉降速度随时间的变化特点,可将地表沉降的时间序列划分成不同阶段,如图 3 所示。

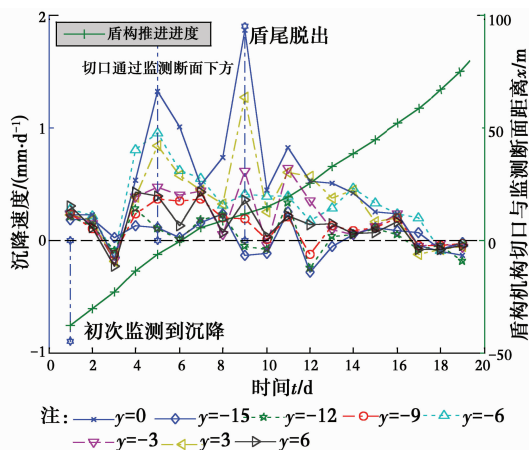


图 1 右线 CJD1 断面沉降速度与推进进度对应图

Fig. 1 Velocity of ground settlement and Advance-time curve of shield machine at the right line monitoring section 1

根据图 1~图 3,沉降规律总结如下:

1) 无影响阶段:开挖工作面距离到达监测断面之前 35 m 以上,地表不产生沉降或者隆起,这一阶段隧道盾构开挖对监测断面土体的扰动几乎没有。

2) 前期沉降阶段:范围为开挖工作面距离监测断面 35~14 m,尤其在 28~14 m 范围内,沉降显著增大,这主要是工作面的支护力不足,导致开挖面前方土体向后下移动。特别应该指出的是,由于盾构机顶进推力过大,往往产生土体的隆起。这一阶段监测断面各测点沉降值基本在 0.7 mm 以内,沉降

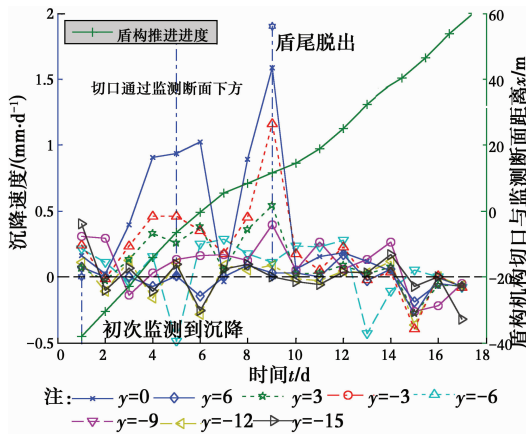


图 2 左线 CJD1 断面沉降速度与推进进度对应图

Fig. 2 Velocity of ground settlement and Advance-time curve of shield machine at the left line monitoring section 1

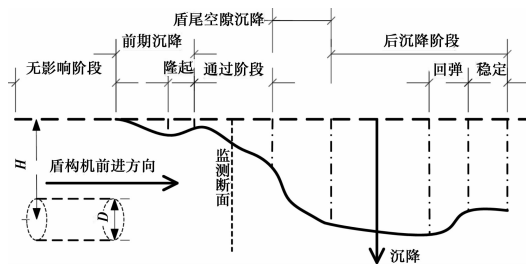


图 3 地表沉降阶段

Fig. 3 Stages of the ground settlement

占比低于 10%，甚至由于隆起出现负比值。

3)通过阶段:这一阶段开挖工作面距离监测断面 $-14\sim 14$ m,其中“+”表示监测断面在开挖工作面推进前方,“-”表示开挖工作面已经通过了监测断面。此阶段地表沉降突然急剧增大,隧道轴线中心沉降量达到 4 mm 左右,各测点沉降占比多处于 50%~35%,监测断面边缘个别测点出现沉降比值畸变。

4)盾尾空隙沉降阶段:这一阶段开挖工作面已经离开监测断面 $14\sim 28$ m。通过阶段过后往往沉降速度稍有下降,但是,随后进入盾尾空隙沉降阶段,沉降速度增大,沉降速度峰值往往比通过阶段沉降速度峰值还要大,达到各阶段瞬时沉降峰值。这是由于盾尾间隙过大、盾尾同步注浆效果欠佳造成的^[17]。这一阶段应该对注浆质量引起重视。虽出现沉降峰值,但由于注浆凝固的影响,持续时间短暂,沉降值基本在 2 mm 以下,沉降占比 25%~15%。

5)工后沉降阶段:开挖工作面离开监测断面 28 m 以上,特征是沉降速度迅速降低,但持续时间长,这一阶段沉降占比在 20% 以下。需要指出的是,这一阶段存在土体回弹阶段,一般发生在工作面

离开监测断面 6~10 d 内产生,此时,工作面已经离开监测断面 42 m 左右,之后地表沉降趋于稳定。

2 地表沉降规律及影响因素

盾构隧道施工引起的地表沉降规律表现出强烈的空间效应和时间效应,时间的推移反映在空间上就是开挖工作面相对位置的变化。在隧道埋深不变,土层物理力学性质相对稳定条件下,地表沉降的影响因素主要分为盾构开挖附加推力、盾构外壳与土体的摩擦力、同步注浆压力、地层损失以及工后固结沉降^[11]。对于施工期各个沉降阶段均受到其中几个或全部因素影响,某些因素占据主导作用。

2.1 模型的建立与 Mindlin 解

通过上述分析可知,隧道施工过程中随开挖工作面的推进,地表沉降大体经历了 5 个阶段,地表沉降受到开挖工作面与监测断面相对位置的影响,建立如图 4 所示的沉降分析模型。盾构机沿 x 正方向推进, z 轴为竖直方向, y 轴为横断面方向。

基于 Mindlin 解假定土体为线弹性半无限空间体。各参数含义: ν 为土体泊松比; G 为土体剪切模量,MPa; v 为盾构机推进速度, m/d; t 为盾构机以进入前影响距为起点的时间, d; D 为盾构机外径(即为隧道直径, m); R 为隧道半径, m; L 为盾构机长度, m; L_1 为盾构机通过监测断面前的影响距离, m; L_2 为盾构机通过监测断面后的影响距离, m; H 为轴线埋深, m,如图 4 所示。

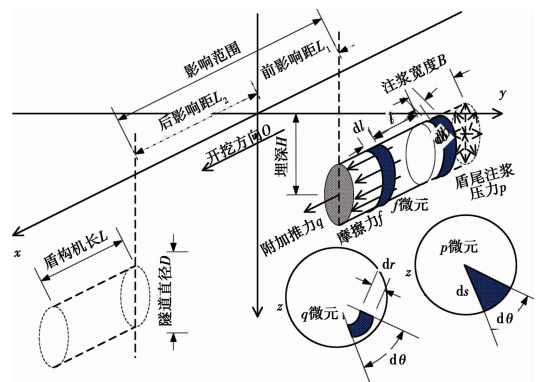


图 4 沉降分析模型

Fig. 4 Settlement analysis model

如图 5, Mindlin^[18] 推导均质各向同性半无限空间内 $z=c$ 深度处作用竖向作用力和水平集中力时,任意一点的竖向位移值 S_1 和 S_2 分别为

$$S_1 = \frac{P_v}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z'-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'-c)^2 - 2cz'}{R_2^3} + \right]$$

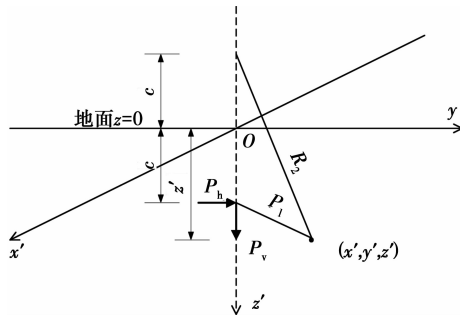


图 5 Mindlin 公式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Mindlin formula

$$\left. \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{P_h x'}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{z'-c}{R_1^3} + \frac{(z'-c)(3-4\nu)}{R_2^3} - \frac{6cz'(z'+c)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z'+c)} \right] \quad (2)$$

$$R_1 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z'-c)^2} \quad (3)$$

$$R_2 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z'+c)^2} \quad (4)$$

2.2 正面附加推力引起的地表沉降

对于盾构机处于固定位置的正面附加推力、盾构与土体摩擦力以及盾尾注浆压力引起的地表沉降,林存刚等^[11]做了较为详尽的推导,如图 4。正面附加推力微元 $dq_h = qrd\theta dr$,作用位置 $c = H - r\sin\theta$;盾壳摩擦力微元 $df_h = fRd\theta dl$,作用位置 $c = H - R\sin\theta$;盾尾注浆压力竖向分力微元 $dp_v = pR\sin\theta d\theta dl$,作用位置 $c = H - R\sin\theta$ 。本文在此基础上,引入时间效应,将地表沉降视为动态变化的,并将转换坐标设定在前方固定位置,以此来研究某一固定监测断面的地表沉降规律。

在各个阶段,转换坐标均保持一致,即(参数具体含义见前文)

$$\begin{cases} x' = x + L_1 - vt \\ y' = y - r\cos\theta \\ z' = z \end{cases} \quad (5)$$

将 $c = H - r\sin\theta$ 代入式(3)、式(4),得(其中,上标 $i=1,2$ 分别对应前影响距阶段和后影响距阶段)

$$R_{1q}^i = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' - H + r\sin\theta)^2} \quad (6)$$

$$R_{2q}^i = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' + H - r\sin\theta)^2} \quad (7)$$

将式(5)~式(7)代入式(2),得地表沉降微元 ds_{2q}^i ,即可得该阶段地表沉降的变化函数。

$$ds_{2q}^i = \frac{qr(x+L_1-vt)drd\theta}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{z-H+r\sin\theta}{R_{1q}^{i,3}} + \frac{(z-H+r\sin\theta)(3-4\nu)}{R_{2q}^{i,3}} - \frac{6z(z+H-r\sin\theta)}{R_{2q}^{i,5}} \right] \times$$

$$\left. \left[(H-r\sin\theta) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_{2q}^i(R_{2q}^i+z+H-r\sin\theta)} \right] \quad (8)$$

$$S_{2Q}^i = \int_0^{2\pi} \int_0^R ds_{2q}^i \quad (9)$$

2.3 盾构与土体摩擦力引起的地表沉降

对变量 k 作如下定义:

$$k_f^i = \frac{z-H+R\sin\theta}{R_{1f}^{i,3}} + \frac{(z-H+R\sin\theta)}{R_{2f}^{i,3}} \times (3-4\nu) - \frac{6z(z+H-R\sin\theta)(H-R\sin\theta)}{R_{2f}^{i,5}} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_{2f}^i(R_{2f}^i+z+H-R\sin\theta)} \quad (10)$$

1)阶段一(通过前阶段一,机体部分在影响范围内): $0 \leq t \leq (L/v)$

$$\begin{cases} x' = x + L_1 + l - vt \\ y' = y - R\cos\theta \\ z' = z \end{cases} \quad (11)$$

将 $c = H - R\sin\theta$ 代入式(3)、式(4),得

$$R_{1f}^1 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' - H + R\sin\theta)^2} \quad (12)$$

$$R_{2f}^1 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' + H - R\sin\theta)^2} \quad (13)$$

将式(11)~式(13)代入式(2),得

$$S_{2F}^1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{vt} \frac{fRk_f^1(x+L_1+l-vt)dld\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (14)$$

2)阶段二(通过前阶段二,机体全部在影响范围内): $L/v < t \leq L_1/v$

$$R_{1f}^2 = R_{1f}^1 \quad R_{2f}^2 = R_{2f}^1 \quad (15)$$

$$S_{2F}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^L \frac{fRk_f^2(x+L_1+l-vt)dld\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (16)$$

3)阶段三(通过阶段三): $(L_1/v) < t \leq [(L+L_1)/v]$

将盾构机分成 $-l_1 \leq x \leq 0$ 和 $0 < x \leq l_2$ 两个部分,其转换坐标分别为

$$\begin{cases} x' = x + l \\ y' = y - R\cos\theta \\ z' = z \end{cases} \quad \begin{cases} x' = x - l \\ y' = y - R\cos\theta \\ z' = z \end{cases} \quad (17)$$

$$S_{2F}^3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{L+L_1-vt} \frac{fRk_f^{31}(x+l)dld\theta}{16\pi G(1-\nu)} + \int_0^{2\pi} \int_0^{vt-L_1} \frac{fRk_f^{32}(x-l)dld\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (18)$$

4)阶段四(通过后阶段四): $[(L+L_1)/v] < t$,转换坐标为

$$\begin{cases} x' = x + L + L_1 - l - vt \\ y' = y - R\cos\theta \\ z' = z \end{cases} \quad (19)$$

$$S_{2F}^4 = \int_0^{2\pi} \int_0^L \frac{fRk_f^4(x+L+L_1-l-vt)dld\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (20)$$

2.4 盾尾注浆压力引起的地表沉降

$$k_p^i = \left[\frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_{2p}^i} + \frac{(z-H+R\sin\theta)^2}{R_{1p}^i} + \frac{(3-4\nu)(z+H-R\sin\theta)^2 - 2z(H-R\sin\theta)}{R_{2p}^i} + \frac{3-4\nu}{R_{1p}^i} + \frac{6(H-R\sin\theta)z(z+H-R\sin\theta)^2}{R_{2p}^i} \right] \quad (21)$$

显然,将不同阶段的转换坐标(其中 $y'=y-R\cos\theta$, $z'=z$, x' 不同阶段存在差异)代入式(3)、式(4)能得到该阶段的 R_1 、 R_2 。

对于盾尾注浆压力范围,一般为盾尾后一环衬砌的宽度。且假定其沿该环管片均匀分布,在盾尾离开一环管片宽度后,开始拼装管片,瞬时均匀加载。

1) 阶段一(通过前阶段): $t \leq [(L+L_1)/v]$, 其中, $x'=x+L_1+L+b-vt$, 则:

$$S_{2P}^1 = \int_0^{2\pi} \int_0^B \frac{\rho R k_p^1 \sin\theta db d\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (22)$$

2) 阶段二(通过阶段): $[(L+L_1)/v] < t \leq [(L+L_1+B)/v]$ 。同样地,将注浆衬砌分成两部分, $-l_1 \leq x \leq 0$ 和 $0 < x \leq l_2$ 两个部分,其转换坐标 x 分别为 $x'=x+b$, $x'=x-b$ 。

$$S_{1P}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{B+L_1+L-\alpha} \frac{\rho R k_p^{21} \sin\theta db d\theta}{16\pi G(1-\nu)} + \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha-L_1-L} \frac{\rho R k_p^{22} \sin\theta db d\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (23)$$

3) 阶段三(通过后阶段): $[(L+L_1+B)/v] < t$, 其中, $x'=x+L_1+L+B-b-vt$, 则

$$S_{2P}^3 = \int_0^{2\pi} \int_0^B \frac{\rho R k_p^3 \sin\theta db d\theta}{16\pi G(1-\nu)} \quad (24)$$

2.5 地层损失引起的地表沉降

盾构机刀片在切割土体向前推进时,由于盾构尾部衬砌管片拼接、注浆不及时,注浆压力不够等不可避免地产生土层的整体下沉,产生所谓的地层损失。对于开挖面之前的土体,一般不考虑其地层损失。Loganathan 等^[19]认为地层损失沿隧道截面成椭圆形分布,在隧道径向不等量。Sagaseta^[20]则认为地层损失沿隧道截面径向成均匀等量的圆形,地面沉降槽体积等于土体损失量。其地表的竖向位移计算公式为

$$S_v = \frac{V}{2\pi} \frac{H}{y^2 + H^2} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}} \right) \quad (25)$$

式中: V 为地层损失量,大多采用地层损失率的经验方法来计算。 $V = \pi R^2 \eta$, η 为地层损失率,一般取工程经验值, R 为隧道半径。

转换坐标为: $x'=x+L_1-vt$, $y'=y$, $z'=z$ 。对于某一监测断面地表沉降,地层损失历程为

$$S_v = \frac{V}{2\pi} \frac{H}{y^2 + H^2} \left(1 - \frac{x+L_1-\alpha}{\sqrt{(x+L_1-\alpha)^2 + y^2 + H^2}} \right) \quad (26)$$

2.6 地表沉降计算公式

在不考虑土体在施工期后固结沉降的情况下,总地表沉降即为以上沉降分量的叠加。

$$S_{<t,x,y,0>} = S_{Q<t,x,y,0>} + S_{F<t,x,y,0>} + S_{P<t,x,y,0>} + S_{V<t,x,y>} \quad (27)$$

需要注意的是,地层损失引起的沉降为地表面的沉降。在计算地表沉降随时间变化的时候,应取 $z=0$,计算监测横断面的地表沉降时,应取 $z=0$, $x=0$ 。

通过该计算公式,可以和前面划分的地表沉降阶段很好地对应起来,以此来分析各个阶段影响地表沉降的主导因素,为地铁施工和地表沉降的控制提供依据和指导。

3 实例分析

武汉市轨道交通四号线 05 标段为两站两区间,包括罗家港—园林路区间、园林路站、园林路—工业路区间及工业路站。拟建场地属长江冲积 I 级阶地,场地为一般粘性土、软土、砂土层。

通过现场实验,参数为:隧道半径 $R=3$ m,盾构机长度 $L=11.4$ m,土体泊松比 $\nu=0.28$,土体剪切模量 $G=10$ MPa,隧道埋深 $H=14$ m,正面附加推力 $q=42$ kPa,摩擦力 $f=88$ kPa,注浆压力 $p=300$ kPa,根据第 2 节,前影响距 $L_1=35$ m,后影响距 $L_2=42$ m,推进速度 $v=42$ 环/周=9 m/d,地层损失率根据武汉地区工程经验值^[21],取 $\eta=0.01$ 。

图 6~图 9 分别为附加推力、摩擦力、注浆压力和地层损失引起的地表沉降变化规律图(y 值为横断面测点与隧道轴线的距离, m)。其中,第 4 天开挖工作面通过监测断面正下方,为地层损失和正面附加推力的通过阶段;第 5 天盾尾通过监测断面下方,为注浆压力的通过阶段;4~5 d 为盾构机身的通过阶段。

由图 6~图 9 可知,正面附加推力、摩擦力、注浆压力以及地层损失都能很好的与前面所述的无影响阶段、前期沉降阶段、通过阶段、盾尾空隙沉降阶段、工后沉降阶段对应起来。在无影响阶段,各因素引起的地表沉降趋近于零;前期沉降阶段,正面附加推力和摩擦力都引起地表隆起;一旦进入通过阶段,各因素引起的地表沉降迅速增大;盾尾空隙阶段,地

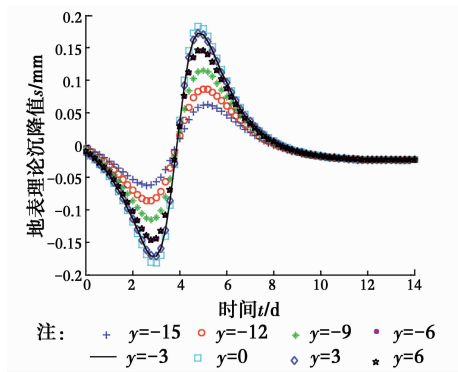


图 6 附加推力引起的地表沉降

Fig. 6 Ground settlement caused by additional thrust

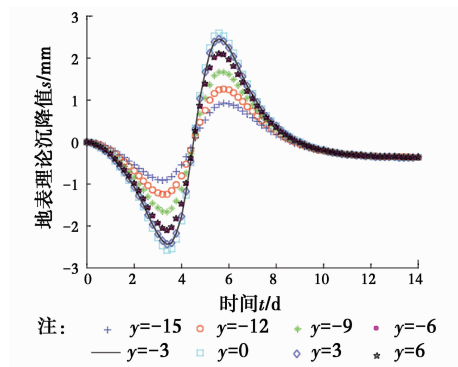


图 7 摩擦力引起的地表沉降

Fig. 7 Ground settlement caused by friction force

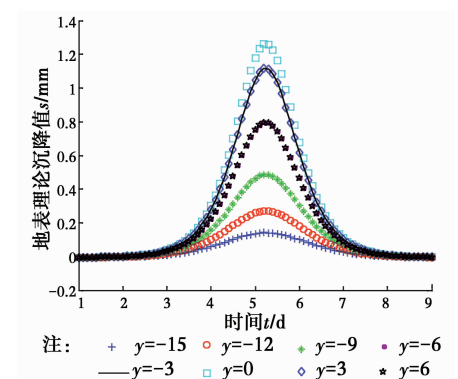


图 8 注浆压力引起的地表沉降

Fig. 8 Ground settlement caused by the grouting pressure

表沉降持续增大;此后进入工后沉降阶段。显然,土体回弹现象主要与前 3 个因素密切相关,之后地表沉降趋于稳定,这与第 2 节所述的沉降规律吻合。

单从对地表沉降的贡献值来说,前影响距阶段摩擦力和地层损失对地表沉降起到了控制作用;后影响距阶段地层损失起到了主要控制作用;而在整个阶段,正面附加推力、摩擦力、注浆压力和地层损失等 4 个因素中,以地层损失对地表沉降影响最甚。地表隆起主要由正面附加推力和摩擦力所引起,而工后沉降阶段的土体回弹则与正面附加推力、摩擦

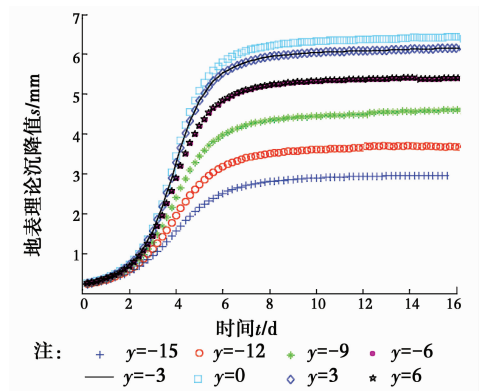


图 9 地层损失引起的地表沉降

Fig. 9 Ground settlement caused by ground loss

力和注浆压力 3 个因素有关。

图 10 为地表沉降理论值与现场实测值的比较。由于受到现场施工技术、地质条件等因素影响,难以采用理论公式进行考虑,并且本文做了一定的简化,考虑到受力情况与实际存在差异,实际摩擦力、正面附加推力和注浆压力分布不均并存在测量误差,因此,实测值比理论值稍微偏大。

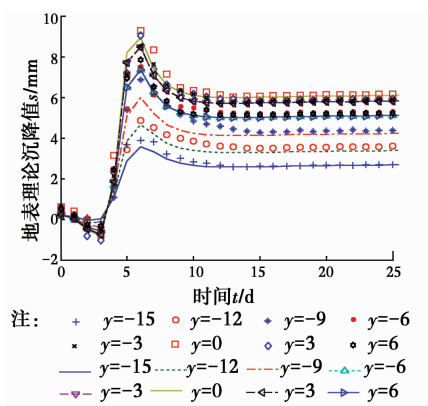


图 10 地表沉降理论值与实测值比较

Fig. 10 Comparison between the theoretical value and the measured values of ground settlement

4 结论

1)通过划分施工阶段反映了地表沉降的时间和空间效应,将地表沉降分为 5 个阶段,并通过现场监测数据分析获得各阶段的大致范围。

2)指出在前、后影响距离范围内,盾构机与土体的摩擦力和地层损失等对地表沉降的影响,确定了导致工后沉降阶段土体回弹的前期沉降阶段各种因素。实际工程中,在施工的各个阶段,需要采取措施对相应的主导因素加以控制。

3)考虑地表沉降的时空关系,推导了实时地表沉降计算的理论公式,实例应用表明:实测值比理论预测值偏大。

笔者主要从理论上推导了盾构开挖引起地表沉降的规律和计算方法,但对于实际施工中存在的摩擦力、正面附加推力和注浆压力分布不均以及如何进行精确测量等问题仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] LIANG R, XIA T, HUANG M, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect [J]. *Computers & Geotechnics*, 2017, 81: 167-187.
- [2] 施成华. 城市隧道施工地层变形时空统一预测理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007:6-15.
SHI C H. Study on time-space united calculating theory of stratum deformation for tunnel excavation in urban and its application [D]. Changsha: Central South University, 2007: 6-15. (in Chinese)
- [3] SHI J, NG C W W, CHEN Y. A simplified method to estimate three-dimensional tunnel responses to basement excavation [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2017, 62:53-63.
- [4] 魏纲, 徐日庆. 软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27 (9): 1077-1081.
WEI G, XU R Q. Prediction of longitudinal ground deformation due to tunnel construction with shield in soft soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(9): 1077-1081. (in Chinese)
- [5] 林存刚, 吴世明, 张忠苗, 等. 盾构掘进速度及非正常停机对地面沉降的影响[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2472-2482.
LIN C G, WU S M, ZHANG Z M, et al. Influences of shield advance rate and abnormal machine halt on tunnelling-induced ground surface settlements [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (8): 2472-2482. (in Chinese)
- [6] 唐晓武, 朱季, 刘维, 等. 盾构施工过程中的土体变形研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29 (2): 417-422.
TANG X W, ZHU J, LIU W, et al. Research on soil deformation during shield construction process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 417-422. (in Chinese)
- [7] 孙统立, 李浩, 吕虎, 等. 双圆盾构施工扰动引起的地表位移特性分析 [J]. *土木工程学报*, 2009, 42 (6): 108-114.
SUN T L, LI H, LYU H, et al. Characteristics of the surface displacement induced by double-O-tube shield tunneling [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(6): 108-114. (in Chinese)
- [8] 陈春来, 赵城丽, 魏纲, 等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(8): 2212-2218.
CHEN C L, ZHAO C L, WEI G, et al. Prediction of soil settlement induced by double-line shield tunnel based on Peck formula [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(8): 2212-2218. (in Chinese)
- [9] 饶宇, 夏元友, 赵根, 等. 盾构引起地表沉降预测模型与影响因素分析 [J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37 (2): 63-68.
RAO Y, XIA Y Y, ZHAO G, et al. Influencing factors and prediction model of ground settlement caused by shield tunnel excavation [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37 (2): 63-68. (in Chinese)
- [10] 张冬梅, 李钰. 地铁荷载引起的盾构隧道及土层长期沉降研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35 (5): 563-567.
ZHANG D M, LI Y. Long-term Settlement of shield tunnel in soft clay due to vehicle vibration [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(5): 563-567. (in Chinese)
- [11] 林存刚, 张忠苗, 吴世明, 等. 软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(12):2583-2592.
LIN C G, ZHANG Z M, WU S M, et al. Study of ground heave and subsidence induced by shield tunnelling in soft ground [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(12): 2583-2592. (in Chinese)
- [12] NG C W W, BOONYARAK T, MAŠIN D. Effects of pillar depth and shielding on the interaction of crossing multitunnels [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141 (6):04015021.
- [13] 魏新江, 张孟雅, 丁智, 等. 初始固结度影响下地铁运营引起的长期沉降预测 [J]. *现代隧道技术*, 2016, 53 (2): 114-120.
WEI X J, ZHANG M Y, DING Z, et al. Prediction of long-Term settlement caused by subway operation under the influence of initial consolidation [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53 (2): 114-120. (in Chinese)
- [14] 徐明, 邹文浩, 章龙管. 房屋刚度对隧道开挖引起的土体变形的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (4): 838-848.
XU M, ZOU W H, ZHANG L G. The influence of building stiffness on soil deformation induced by

- tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 838-848. (in Chinese)
- [15] GONG W, JUANG C H, HUANG H, et al. Improved analytical model for circumferential behavior of jointed shield tunnels considering the longitudinal differential settlement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 45:153-165.
- [16] 黎永索, 阳军生, 邓宗伟, 等. 盾构隧道下穿地下建筑物时的地表沉降分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(6): 705-711.
- LI Y S, YANG J S, DENG Z W, et al. Analysis of surface subsidence of shield tunnel passing through underground structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(6): 705-711. (in Chinese)
- [17] 侯永茂, 郑宜枫, 杨国祥, 等. 超大直径土压平衡盾构施工对环境影响的现场监测研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 235-243.
- HOU Y M, ZHENG Y F, YANG G X, et al. Measurement and analysis of ground settlement due to EPB shield construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 235-243. (in Chinese)
- [18] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi - infinite solid [J]. Journal of Applied Physics, 1936, 7(5): 195-202.
- [19] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.
- [20] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [21] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354-1361.
- WEI G. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1354-1361. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)