

矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究^{*}

许有俊¹,王雅建¹,冯超¹,刘志伟²,朱剑³

(1.内蒙古科技大学 土木工程学院,内蒙古 包头 014010;2.中交一公局第六工程有限公司,天津 300451;
3.北京城建设计发展集团股份有限公司,北京 100037)

摘要:以南宁市轨道交通1号线南湖站I号过街通道顶管工程为背景,分别考虑顶管机及后续管节对土体的作用力引起开挖面周围土体的施工时变形、土体损失引起地面永久沉降、注浆对土体损失补偿引起的地面抬升、地层中超孔隙水压力消散发生失水固结效应引起的工后沉降等因素,揭示了在注浆压力作用下矩形顶管隧道周围土体的变形模式,推导了由注浆填充引起的土体竖向变形计算方法,给出了扰动范围土体内超孔隙水消散引起的工后固结沉降的计算公式。运用 Mindlin 弹性理论解、随机介质理论、分层总和法分别对该工程由土体应力状态变化、地层损失、注浆填充和失水固结4个方面引起的地面变形进行计算,根据计算结果与实测数据的对比分析,对矩形顶管施工扰动引起的地表沉降变形特性进行系统研究,叠加后的计算结果与实测数据变化规律基本一致,且数值吻合较好。

关键词:矩形顶管;地面变形;工后固结沉降;随机介质理论;注浆填充

中图分类号:TU91

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)01-0192-08

Research on Ground Deformation Caused by Rectangular Pipe Jacking Construction

Xu Youjun¹, Wang Yajian¹, Feng Chao¹, Liu Zhiwei², Zhu Jian³

(1. School of Architecture & Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, P.R.China; 2. No.6 Engineering Co., Ltd. of First Highway Engineering Company of China Communication Construction Co., Ltd., Tianjin, 300451, P.R.China; 3. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, P.R.China)

Abstract: Taking Nanning rail transit Line 1 Nanhu station crossing pipe jacking construction as the background, respectively considering the influence factors of the acting force of the pipe jacking machine and subsequent pipe to the soil caused the brief deformation of soil around working face, the soil loss caused the ground permanent settlement, grouting filling on the loss of soil caused the surface uplift and the dewatering consolidation caused the post-construction settlement by the excess pore water pressure dissipation. This research reveals the rectangular pipe-jacking tunnel surrounding soils expansion deformation caused by the grouting pressure is similar to ellipse, and deduced to calculate vertical deformation of soil caused by it. The disturbed soil's post-construction settlement caused by the dissipation of excess pore water pressure calculation formula is also given. The Mindlin solution, Random Medium Theory, method of layered summation are respectively used to calculate the ground deformation caused by the stress changes, the ground loss, the grouting fillings and the dissipation of excess pore water pressure. According to the comparison of the calculation results and the measured data, the surface deformation

^{*} 收稿日期:2017-06-30(修改稿)

作者简介:许有俊(1979-),男,内蒙古包头人,博士,教授,主要从事隧道与地下工程等方面的研究。

E-mail:xyoujun@163.com

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2017MS(LH)0523)

characteristics caused by the rectangular pipe jacking construction disturbance are presented. The changing rule of the superposition calculation results and the measured data are basically identical, and their values are very anastomosis.

Keywords: rectangular pipe-jacking; ground deformation; dewatering consolidation; Random Medium Theory; grouting filling

0 引言

近年来,矩形顶管技术开始广泛运用于我国行人过街地下通道、地铁车站出入口过街通道、下穿城市道路的隧道、地下共同沟、地铁车站、城市地下商业空间开发等工程中,采用该种地下非开挖技术修建的隧道具有断面面积利用率高、埋深浅、不中断地面道路交通、避免各类地下管线的拆迁、无噪音、无环境污染等优点,代表着未来城市矩形断面中短隧道修建技术的发展方向。

矩形顶管施工会不可避免地造成土体应力状态改变和地层损失从而引起地面变形。对于矩形顶管引起的地面变形计算预测方面,一般借鉴于圆形顶管或盾构施工引起的土体变形计算方法。如目前应用最为广泛的 Peck 经验公式法^[1];阳军生等^[2]介绍了随机介质理论在隧道开挖引起的地面变形计算中的应用;Sagaseta^[3]给出了弹性各向同性均质体产生地层损失情况下的地表应变更;Verruijt 等^[4]考虑隧道在初始应力场下的椭圆化变形,对 Sagaseta 的方法进行了修正。魏纲等^[5]利用 Mindlin 弹性理论解,推导了圆形顶管正面附加推力、顶管机及后续管节的侧摩阻力引起的地面变形计算公式;韩煊等^[6]基于随机介质理论推导了各类断面形状在不均匀收敛模式下的计算公式;王日东^[7]在二者基础之上进一步对矩形顶管引起的地面变形计算方法进行了研究;张顶立等^[8]提出失水流沙及施工降水引起的地层变形破坏影响模式及预测方法。唐智伟等^[9]推导了注浆抬升引起的土体位移解析解,并利用 FLAC3D 模拟注浆引起的地表位移。

本文依托南宁市轨道交通一号线南湖站顶管施工工程实例,运用 Mindlin 弹性理论解、随机介质理论及分层总和法,分别对该工程由土体应力状态变化、地层损失、注浆填充和失水固结 4 个方面

引起的地面变形进行计算,根据计算结果与实测数据的对比分析,对矩形顶管施工扰动引起的地表沉降变形特性进行系统研究。

1 应力状态改变引起的地面变形

不考虑顶管施工过程中纠偏、注浆和其他因素的影响,将土体视作均匀的线弹性半无限体;认为顶管机工作面对土体的作用力是矩形均布荷载,顶管机与后续管节与土体的各个接触面摩擦力也分别为均布荷载,仅对应力变化引起的土体位移计算。

1.1 正面附加应力引起的地面变形

土体受力模型简图如图 1 所示。以工作面竖向中轴线与地面的交点作为坐标原点,顶管机掘进方向为 x 轴正方向, x 轴在水平面顺时针旋转 90° 得到 y 轴,从原点过顶管机工作面中心指向地心方向为 z 轴正向,地面距隧道周线距离为 h 。为方便计算,以工作面中心为原点,建立小坐标系 $x'y'z'$,在此坐标系下的任意一点只需 z 坐标加上 h 便可得到原坐标下的坐标值。

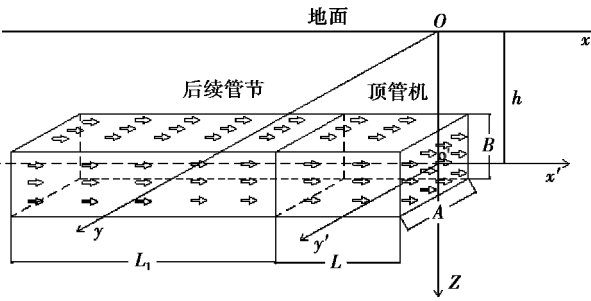


图 1 土体受力模型简图

Fig.1 Diagram of force analysis of soil

如图 2 所示,顶管机的掌子面位于 yOz 平面内,将附加应力在工作面内微分离散,每个微分单元($dy'dz'$)均视作为半无限空间内的集中力,将坐标转化到与 Mindlin 解一致的坐标系下,对 Mindlin 公式积分可得到土体内任意一点的竖向位移:

$$w_1 = \frac{P_x}{16\pi G(1-\mu)} \int_{-0.5B}^{0.5B} \int_{-0.5A}^{0.5A} \left[\frac{z-h-z'}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-h-z')}{R_2^3} - \frac{6z(h+z')(z+h+z')}{R_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+h+z')} \right] dy'dz' \quad (1)$$

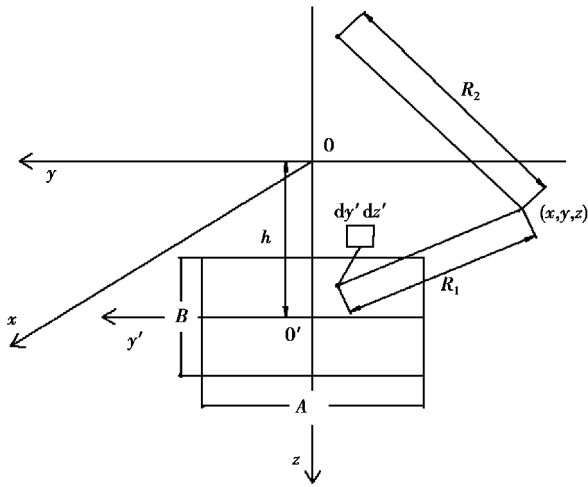


图 2 明德林解计算简图

Fig.2 Calculation diagram of Mindlin solution

式中: x 为所求点与开挖面的水平距离, m ; y 为所求点与开挖面竖向中轴线的横向水平距离, m ; z 为所求点与地表的竖向距离, m ; y' 为力作用点与开挖面中轴线的横向水平距离, m ; z' 为力作用点与开挖面水平中轴线的距离, m ; p 为掌子面对土体的附加应力, kPa ; μ 为土体泊松比; G 为土体剪切

弹性模量, MPa ; R_1 为力的作用点与所求点的空间距离, m ; $R_1 = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + [z - (h + z')]^2}$; R_2 为力的作用点与所求点关于地面的对称点的空间距离, m ; $R_2 = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + [z + (h + z')]^2}$ 。

1.2 侧摩擦应力引起的地面变形

在顶进过程中,矩形顶管机的 4 个侧面与土体接触,其左右立面的摩擦应力对称相等,上下面接触应力不同,需分别进行计算,假设作用在每一个侧面上摩擦力为均布荷载。将各个侧面摩阻力引起的土体位移进行叠加计算即可得顶管机壳体与土体的侧面接触应力引起的土体位移:

$$w_2 = w_l + w_b + w_l + w_r$$

式中: w_l 、 w_b 、 w_l 、 w_r 分别为顶管机上下左右各个面由侧摩阻力引起的土体竖向位移。假设作用在顶管机的每一个侧面上的摩擦力是一个均布荷载(如图 1 所示),顶管机头长度为 L ,后续管节长度为 L_1 ,取上下面积分单元 $dy'dl$,左右面积分单元 $dz'dl$,对 Mindlin 公式进行积分,可得土中任意一点在顶管机上侧面上的摩阻力引起的的位移:

$$w_l = \frac{P_l}{16\pi G(1-\mu)} \int_{-0.5A}^{0.5A} \int_0^L (x+l) \left[\frac{z - (h - 0.5B)}{R_{1l}^3} + \frac{(3 - 4\mu)(z - (h - 0.5B))}{R_{2l}^3} - \frac{6z(h - 0.5B)(z + h - 0.5B)}{R_{2l}^5} + \frac{4(1 - \mu)(1 - 2\mu)}{R_{2l}(R_{2l} + z + h - 0.5B)} \right] dldy' \quad (2)$$

式中: P_l 为顶管机上侧面与土体之间的单位面积摩擦力,可通过正压力 N 乘以摩擦系数 f 得到; R_{1l} 、 R_{2l} 等其余各参数与式(1)中含义相同,同理可求得 w_b 、 w_l 、 w_b 。

只需在式(2)的基础上,将 x 方向的积分区域由 $[0, L]$ 变换为 $[L, L_1]$,侧摩阻力变换为管土间的单位面积摩擦力,便可得到管道与土体的摩擦力引起的土体竖向位移。

$$w_3 = w'_l + w'_b + w'_l + w'_r$$

2 土体损失引起的地面变形

目前,关于在顶管施工过程中土体损失引起的地表沉降计算方法主要有 Peck 公式法和随机介质理论法。对于浅埋隧道的沉降槽宽度计算,容易受到隧道断面形状尺寸的影响,因此,采用 Peck 经验公式法得出的计算结果误差较大。韩焱等^[10]经过推导认为 Peck 公式法是随机介质理论在埋深较大情况下的一个近似,而不适用于超浅埋的情况。本文研究的工程实例埋深较浅,故而

采用随机介质理论对土体损失引起的地面变形进行计算。

采用随机介质理论计算土体损失而引起的土体变形时,考虑土体为一种“随机介质”,认为整个土体的开挖引起的地面变形为若干小开挖单元引起地面变形的总和。在顶管顶进施工过程中,管道周围土体将受到扰动并会形成环形建筑空隙,从而引起四周土体向管节方向发生收敛坍塌。传统的收敛模型认为地层损失引起的土体移动形式为均匀的径向收敛,而后有学者进一步研究提出隧道开挖后土体移动形式实际为一非均匀收敛过程,绘制的如图 3 所示的计算简图。

随机介质理论认为隧道开挖引起土体中的某一点下沉为一随机事件(如图 4 所示),取一长宽高均为无限小的开挖单元 $dldy'dz'$,假定土体不发生排水固结且密度不发生变化,可认为土体损失的总体积为若干开挖单元完全塌落的体积之和。

那么地层损失引起的土体竖向位移为:

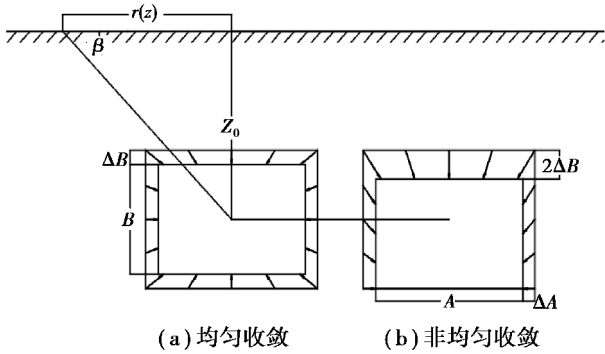


图3 土体开挖收敛模型示意图

Fig.3 Diagram of model for soil excavation convergence

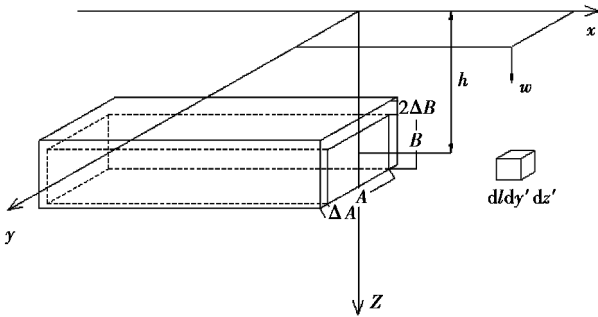


图4 开挖单元引起的土体损失示意图

Fig.4 Diagram of soil loss caused by excavation

$$w_{\text{loss}} = \int_{h-0.5B}^{h+0.5B} \int_{-0.5A}^{0.5A} \int_{-\infty}^0 \frac{1}{r^2(z)} \exp \left[-\frac{\pi}{r^2(z)} (x-l)^2 + (y-y')^2 \right] dldy'dz' - \int_{h-0.5B+2\Delta B}^{h+0.5B} \int_{-0.5A+\Delta A}^{0.5A-\Delta A} \int_{-\infty}^0 \frac{1}{r^2(z)} \exp \left[-\frac{\pi}{r^2(z)} (x-l)^2 + (y-y')^2 \right] dldy'dz' \quad (3)$$

式中: $r(z)$ 为开挖单元在深度为 z 的水平面上的主要影响范围, $r(z)=z/\tan \beta$, β 为上部地层的主要影响角,根据地质资料确定,也可以通过实测数据分析得出。

3 注浆填充引起的地面变形

在顶管顶进施工过程中,往往需要注入减摩泥浆来降低管节四周土体的摩阻力。在注浆压力下,注入的减摩浆液会迅速渗透填充到管节四周建筑空隙及周围土体孔隙,当渗透的浆液足够多时就会在管道四周形成一个密实、不透水的泥浆套,它能够阻止浆液继续向土体渗透,泥浆套一旦形成,继续注入浆液就会引起周围土体的膨胀。

假设施工中补浆及时且泥浆套形成前的浆液

渗透不会引起土体位移,可将土体视作一“随机介质”,同土体损失一样,认为整个土体由注浆引起的地面膨胀为若干小注浆单元引起的地面膨胀总和。如图5所示, A 、 B 分别为注浆区域原始边长,泥浆套受到周围土体的主动土压力和注浆压力作用,则可考虑隧道周围土体变形共由2个部分组成:

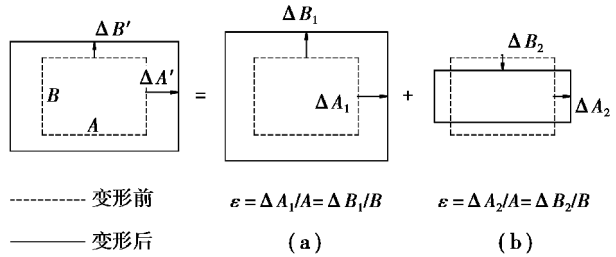


图5 隧道周围土体的变形模式

Fig.5 Deformation modes of soil around tunnel

(1)在注浆压力作用下,发生各向同性的径向膨胀应变,径向变形参数 $\varepsilon=\Delta A_1/A=\Delta B_1/B$ 。

(2)考虑泥浆套严格封闭,浆液不可压缩,则在不均匀初始应力场作用下(即竖向土压力大于侧向土压力),泥浆套会发生竖向回缩、横向外扩的变形,且变形过程中其体积不发生变化, δ 为类椭圆变形参数, $\delta=\Delta A_2/A=\Delta B_2/B$,一般可近似等于机头和后续管节外径差值与机头高度的比值。

取膨胀为正,压缩为负,则将二者叠加可得到注浆补偿引起的管道周围土体变形为:

$$\Delta A' = (\varepsilon + \delta)A$$
$$\Delta B' = (\varepsilon - \delta)B$$

从上式可知, $\Delta A'>\Delta B'$,即管道周围土体在注浆压力和土压力的共同作用下发生的水平变形要大于竖向变形。

设单位长度土体膨胀体积 $\Delta V=(1-\lambda)V_{inj}$, V_{inj} 为每掘进单位长度需注入的泥浆量, λ 为浆液填充率,其值大小受浆液性质、地层条件、土体固结历史等影响,一般取80%~95%。根据 ΔV 可反算出径向应变 $\Delta A'$,进而求得 $\Delta B'$ 。可认为注浆补偿引起的地面变形是土体损失的逆过程,运用随机介质理论的方法可表示为:

$$w_{inj} = \int_{h-0.5B}^{h+0.5B} \int_{-0.5A}^{0.5A} \int_{-\infty}^0 \frac{1}{r^2(z)} \exp \left[-\frac{\pi}{r^2(z)} (x-l)^2 + (y-y')^2 \right] dldy'dz' - \int_{h-0.5B-\Delta B}^{h+0.5B+\Delta B'} \int_{-0.5A-\Delta A'}^{0.5A+\Delta A'} \int_{-\infty}^0 \frac{1}{r^2(z)} \exp \left[-\frac{\pi}{r^2(z)} (x-l)^2 + (y-y')^2 \right] dldy'dz' \quad (4)$$

该方法实际上只是改变了土体损失引起地面变形计算公式中的积分区域,故式中各参数含义与土体损失计算公式相同。

4 超孔隙水消散引起的工后沉降

在顶管机顶进过程中,土体受到挤压应力、注浆填充的扰动作用,会产生超孔隙水压力。当施工结束后,超孔隙水逐渐消散,土体在附加应力的作用下会发生失水固结效应,其中附加应力是由超孔隙水压力降低引起的应力增量,其值等于超孔隙水压力。黏性土层的固结沉降量包括主固结沉降和次固结沉降,主固结沉降即为超孔隙水消散引起的土体压密变形,次固结沉降为土层骨架长时间缓慢蠕变所产生的地面沉降。

顶管施工过程中,土体超孔隙水压力是一个变量,很难计算得到,由其引起的失水固结最终沉降量可运用分层总和法近似计算:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i h_i}{E_{si}} \tag{5}$$

式中: n 为隧道上覆土层数; ΔP_i 为扰动范围内第 i 层土由超孔隙水消散引起的应力增量,其值等于该土层初始超孔隙水压力,可参照魏纲在文献[8]中给出的盾构施工引起的最大超孔隙水压力计算方法计算; γ_w 为地下水的重度; h_i 为浆液渗透范围内第 i 层土的初始厚度; E_{si} 为第 i 层土的体积压缩模量。

考虑双面排水,由太沙基一维固结理论可近似求得各黏土层固结度:

$$U_{vi} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_{vi}\right) \tag{6}$$

式中: T_{vi} 是关于时间的参数,可由下式表示:

$$T_{vi} = \frac{C_{vi} t}{(\Delta H_i)^2} \tag{7}$$

$$C_{vi} = \frac{K_i (1 + e_{0i})}{\gamma_w a_i} \tag{8}$$

式中: ΔH_i 取扰动范围内第 i 层黏性土层厚度的 $1/2$; C_{vi} 为扰动范围内第 i 层黏性土层的固结系数; K_i 为扰动范围内第 i 层土层的渗透系数; e_{0i} 为扰动范围内第 i 层黏性土层的初始孔隙比; a_i 为第 i 层土的压缩系数。

那么对于黏土层,由于超孔隙水消散引起的固结沉降总量为:

$$w_4 = \sum_{i=1}^n U_{vi} S_i = \sum_{i=1}^n U_{vi} \frac{\Delta p_i h_i}{E_{si}} \tag{9}$$

而对于砂性土而言,其含水层一般具有良好的渗透性,固结效应可在较短时间内完成,故而可认为其瞬间沉降量就是最终沉降量。

5 算例分析

5.1 工程实例

南宁市轨道交通 1 号线南湖站 I 号出入口通道采用 8 刀盘土压平衡矩形顶管施工,通道断面尺寸为 4.9 m×6.9 m,如图所示。



图 6 顶管机机头

Fig.6 Pipe jacking

本条隧道断面大、埋深浅,平均埋深约为 5 m,长 65 m。在施工过程中为及时调整施工参数,控制地表隆沉、确保施工和周边环境安全,对地表和周边影响范围内建筑物进行全面系统的监控量测,测点布置如图 7 所示。

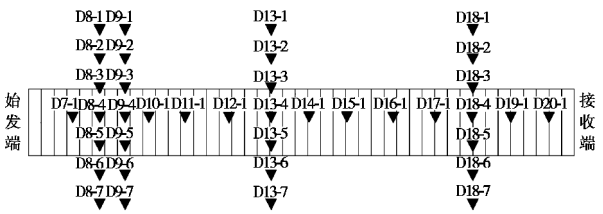


图 7 监测点布置平面图

Fig.7 Layout of the monitoring points

顶管隧道开挖面为一上硬下软的复合地层,上半部分为硬塑状黏性土,下半部分为粉细砂层,隧道穿越区域土层自上而下分别为:①1 层杂填土、②2-2 层硬塑状粉质粘土、②2-1 层硬塑状粘土、④1-2 层粉细砂、③2 层粉土,土层分布情况如图 8 所示。

各土层物理力学参数如表 1。

表 1 地层物理力学性质参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

地层	土层厚度 /m	静止土压 力系数	天然密度 /(g·cm ⁻³)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩模量 E _a /MPa	渗透系数 K _d	压缩系数 α	初始孔隙比 ε ₀
杂填土	1.8	—	1.87	12	8	4.0	0.1	0.35	0.720
粉质黏土	1.8	0.45	1.98	45	15	8.8	0.003	0.20	0.685
硬塑状粘土	3.5	0.48	1.96	50	14	10.5	0.001	0.18	0.751
粉细砂	3.5	0.41	2.06	0	21	—	4	—	0.557
粉土	—	0.51	2.00	10	13	7.1	0.5	0.25	0.607

结合本工程实际情况,各计算参数选取如下表:

表 2 计算参数表

Table 2 Calculation parameters

A	B	h	μ	ΔA=ΔB	G	P	P _t	P _b	P ₁ =P _t	ε	δ
6.92 m	4.92 m	7.5 m	0.2	10 mm	8 MPa	100 kPa	108 kPa	140 kPa	20 kPa	0.0025	0.002

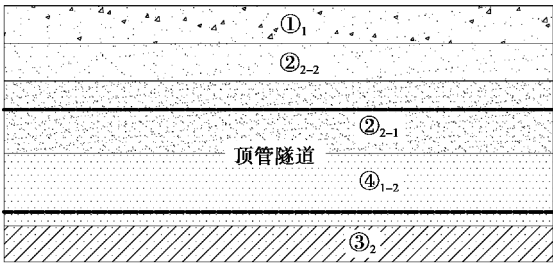


图 8 顶管隧道区域地质纵剖示意图

Fig.8 Geological longitudinal profile of pipe jacking tunnel area

依据以往施工经验选取注浆后混凝土管节与土体的单位面积摩擦力为 5 kPa, tan β 可根据下方关系式^[10]确定:

$$\tan\beta = \frac{20}{50 - \varphi} = 0.56 \tag{10}$$

式中:φ 为各土层的内摩擦角的加权平均值。

分别运用上述各式对该顶管施工引起的地表位移进行计算,叠加求和后即可得到总的地面竖向变形:

$$w = w_1 + w_2 + w_3 + w_{\text{loss}} + w_{\text{inj}} \tag{11}$$

施工结束后,在以上计算结果的基础上再加上 w₄ 即可对地面工后沉降进行预测计算。

5.2 地面变形规律分析

计算结果显示土体的变形以阻尼塑性波的形式扩散传递,但在实际开挖过程中,由于土体并不是理想的连续弹性介质,向上方的应力应变传递只

延续在上覆土层的主要影响范围内。

如图 9 所示,开挖面前方附加应力引起地面前方隆起后方沉降,其变形关于原点中心对称,顶管机外壳体摩擦力对地表移动的影响较大,其规律类似于正面附加应力;由于泥浆套的减摩作用,后续管节的摩擦应力引起地面变形相对较小,但在其影响范围内均表现为隆起。整体由于管土作用应力引起的施工期间变形大约以顶管机头的中心为界限,前方表现为隆起,后方表现为沉降。

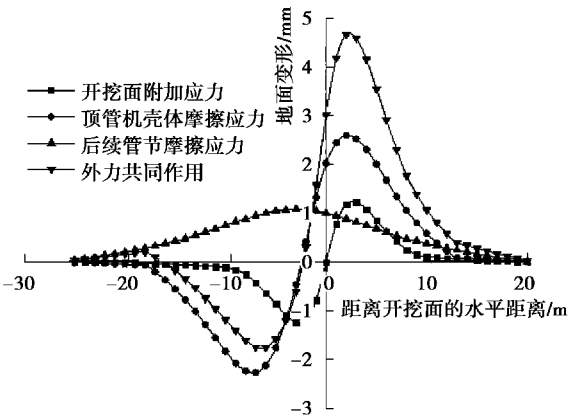


图 9 应力状态改变引起的地面竖向变形

Fig.9 Ground vertical deformation caused by changes of stress state

图 10 为顶管掘进过程中引起的轴线上方地表变形曲线。从图中可看出,由土体损失引起的地表沉降较大,并且会造成开挖面前方小范围内的地

面沉降;注浆填充会对地面有一定的抬升作用,和土体损失的规律相反地引起开挖面前方小范围内的土体隆起;顶管机及后续管节对土体的作用力会引起前方地面隆起,后方地面沉降,但变形较短暂,随着开挖面的远离,地面逐渐恢复,从计算结果可看出掘进扰动的应力状态变化对地面最终沉降几乎没有影响,但由于计算结果是基于对土体的弹性假设得出的,实际上在顶管施工过程中,掘进对土体的扰动作用力也有可能产生负土体损失。图中实测数据开挖面后方的 3 个测点正在沉降的过程中,实测数据稍滞后于计算值,但其变形规律与计算结果基本相同。

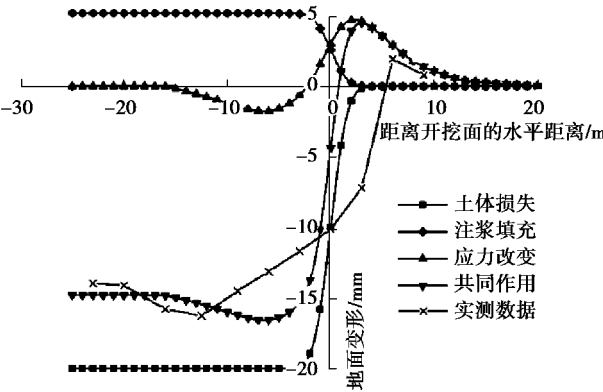


图 10 施工过程中轴线上方地面变形示意图
Fig.10 Ground deformation diagram above central axis during construction process

如图 11 所示,各曲线分别为基于实测数据和计算结果的顶管机掘进过程中地面某一测点的沉降变化过程的实测图。计算结果显示在顶进过程中,测点的最大隆起约在工作面即将抵达前 0.5D 时,最大沉降出现在工作面通过后 D 时。而实测数据与计算结果有所不同,在工作面未到达测点处时即发生明显的沉降,这是由于本工程在掘进 35 m 左右时遭遇连日暴雨阻碍了正常顶进,且中途因顶管机左蛟龙故障停机一天。这期间由于工作面下半部分粉细砂土层饱和后受扰动出现流沙现象而引起地面较大范围的沉降。在工作面通过测点时,地面先微微回弹,工作面离开后,随即发生急速的沉降。由于土体变形传递是一个关于时间和空间的变化过程,实测土体变形要稍滞后于计算结果,但变形规律一致,根据计算结果不难推算出土体变形传递到地表的周期约 2~3 d。

图 12 为顶管机顶进过程中地面某横向断面沉降变形过程示意图,当顶管机即将要抵达横向测线时,前方地面各点隆起;当开挖面抵达时,隆起的地

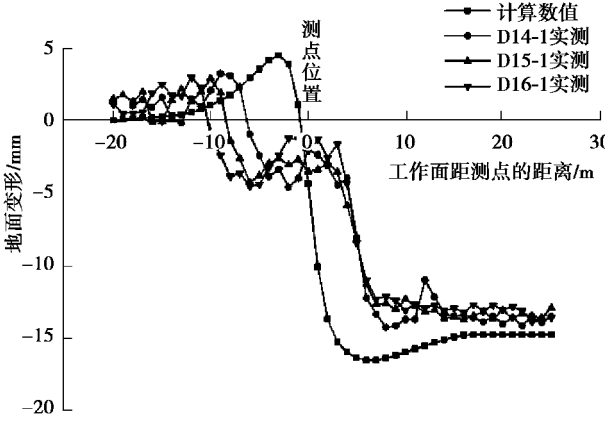


图 11 顶进过程中地面某点变形图
Fig.11 Ground deformation of some points during jacking process

面中心处先发生了沉降,两边仍表现为隆起;整个掘进过程中的最大沉降出现在开挖面通过后约 D 时,随着顶管机的远离,地面微微回弹,逐渐达到最终沉降状态。从图中可看到,横向测线上的 7 个测点的最终沉降监测数据与随机介质理论的计算结果很接近,进一步验证了本文的方法对于大断面浅埋隧道开挖引起的沉降预测的适用性。

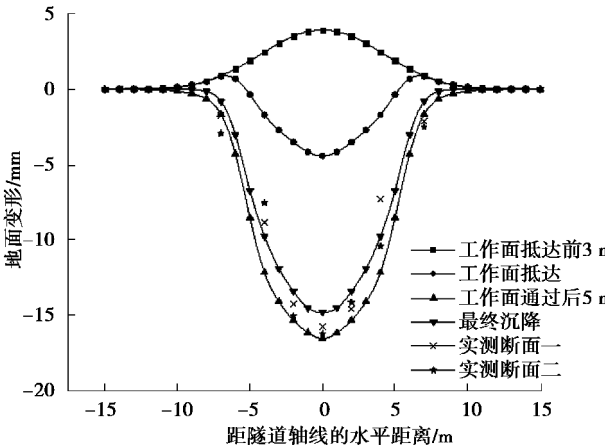


图 12 顶进过程中地面某断面变形图
Fig.12 Ground deformation of some cross section during jacking process

经过计算,得到隧道轴线上方由超孔隙水压力消散引起的沉降约 3 mm,而顶管贯通后的实测数据表明该工程几乎没有发生工后沉降,这是由于该工程受到顶进区域上半部分为压缩模量大的硬塑状粘土层,下半部分为渗透系数大的粉细砂层的复合地层特性的影响。

6 结论

(1) 应力状态改变只会在顶管施工时引起短暂的变形,随着开挖面的远离,地面逐渐恢复,故在

实际工程中对地面最终沉降的预测计算只需考虑土体损失、注浆填充和失水固结,对最大隆起的预测计算需考虑顶管机及后续管节对土体的作用力。

(2)考虑隧道周围土体的初始应力场,揭示了矩形顶管施工中注浆引起周围土体的变形模式,推导了由注浆填充引起土体竖向变形的计算方法。从计算结果得出,注浆可以有效地补偿地层损失,减少最终沉降量,其补偿效果由注浆量控制,而施工时引起的隆起对于最终沉降的抵消作用甚微。

(3)在正常顶进过程中,测点的最大隆起约在工作面即将抵达前约 $0.5D$ 时,最大沉降出现在工作面通过后约 D 时,最终沉降不一定是最大沉降。

(4)当工作面通过地表横向断面时,地表横向测线各点发生沉降的顺序是先中心、后两边。

(5)运用分层总和法近似计算了由超孔隙水消散引起的土层固结沉降,失水固结引起的工后沉降相对于地层损失较小,其沉降量容易受到顶管隧道周围的土质条件的影响。

在顶管施工过程中,影响土体变形的各个因素之间相互影响、相互诱发、相互约束,它们对地面变形的影响是一个动态耦合的作用,因而其单独作用的计算叠加要比实际共同作用下引起的地面变形要大,再加上地层结构复杂、施工状况多变,故而很难做到对施工引起地面变形的精确预测。

参考文献(References)

- [1] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[A]//Proc. 7th Int. Conf. SMFE. Mexico City. State of the Art Volume[C]. 1969: 225-290.
- [2] 阳军生,刘宝琛. 挤压式盾构隧道施工引起的地表移动及变形[J]. 岩石力学, 1998, 19(3): 10-13. (Yang Junsheng, Liu Baochen. Ground surface movement and deformation due to tunnel construction by squeezing shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(3): 10-13.(in Chinese))
- [3] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [4] Verruijt A, Booker J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753-756.
- [5] 魏纲,黄志义,徐日庆. 顶管施工引起地面变形的计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5808-5815. (Wei Gang, Huang Zhiyi, Xu Riqing. Study on calculation methods of ground deformation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2005, 24(Supp.2):5808-5815. (in Chinese))
- [6] 韩焯. 隧道施工引起的地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. (Han Xuan. The analysis and prediction of tunneling-induced building deformations [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [7] 王日东. 矩形顶管施工引起的土体变形计算方法研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2014, 32(5): 711-714. (Wang Ridong. The study on soil deformation calculation method caused by rectangular pipe jacking construction [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2014, 32(5): 711-714.(in Chinese))
- [8] 张顶立,李倩倩,房倩,等. 隧道施工影响下城市复杂地层的变形机制及预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2504-2515. (Zhang Dingli, Li Qianqian, Fang Qian, et al. Deformation mechanism and prediction method for tunneling in complex urban ground conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2504-2515. (in Chinese))
- [9] 唐智伟,赵成刚. 注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1512-1516. (Tang Zhiwei, Zhao Chenggang. Mechanisms of ground heave by grouting and analytical solutions & numerical modeling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1512-1516. (in Chinese))
- [10] 韩焯,李宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 594-600. (Han Xuan, Li Ning. Comparative analysis of strata prediction models for ground movement induced by tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 594-600. (in Chinese))
- [11] 魏纲,周洋,魏新江. 盾构隧道施工引起的工后地面沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2891-2896. (Wei Gang, Zhou Yang, Wei Xinjiang. Research on post-construction surface settlement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.1):2891-2896.(in Chinese))
- [12] 陈庆,刘小丽,曹勉励. 黏性土主动土压力计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1180-1184. (Chen Qing, Liu Xiaoli, Cao, Mianli. On the computation methods of active earth pressure of cohesive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1180-1184. (in Chinese))