

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0158-07

# 盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析

朱才辉, 李 宁, 柳厚祥, 张志强

(西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

**摘 要:** 在研究盾构施工工艺诱发地层沉降规律时, 对施工工艺变化引起地表沉降的量化分析成果相对较少。将盾构工艺分为注浆填充率 $\beta$ 、支护压力比 $\lambda$ 和偏心率 $\kappa$ 等 3 个主要因素, 将其引入到 Rowe 等人提出的“间隙参数”的公式中, 利用 Loganathan 等人提出的地表沉降预测解析公式, 对上述 3 个工艺参数的变化对地表沉降的影响进行量化分析; 同时以间隙参数为前提, 对前人提出的等代层厚度参数取值进一步探讨, 为复杂的盾构施工工艺的数值模拟提供计算依据。通过对西安地铁 2 号线试验段地表沉降实测资料进行反演, 分析结果认为, 提出来的间隙参数计算方法及修正等代层模型能较为真实地反应施工工艺水平, 能够为盾构施工地面沉降控制提供一定的参考。

**关 键 词:** 地表沉降; 盾构施工工艺; 间隙参数; 等代层; 有限元方法

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

## Analysis of ground settlement induced by workmanship of shield tunnelling

ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Hou-xiang, ZHANG Zhi-qiang

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The researches on the quantitative analysis of ground settlement induced by the shield tunnelling workmanship are relatively less. In this paper, three workmanship parameters, i.e. grouting filling ratio, shield pitch ratio and support pressure ratio, are introduced into the gap parameters to make the quantitative analysis of ground settlement based on Loganathan expressions. The deep discussion about the equivalent circle zone which was proposed by some scholars is made to provide the basis of numerical analysis for the shield tunneling project. The back analysis of the Xi'an metro line-2 is carried out to validate the rationality of the method introduced in this paper. It is shown that the method can factually reflect the workmanship level and offer a certain reference to the control of the ground settlement during the shield tunneling.

**Key words:** ground settlement; workmanship of shield tunneling; gap parameters; equivalent circle zone; finite element method

## 1 前 言

随着城市化进程的加剧, 仅地面交通已难以缓解交通拥堵的现象, 于是城市地铁建设工程开始大量涌现, 但同时也带来了新的工程问题, 如地铁施工中对地层的扰动, 对地表房屋建筑、沥青路面、城市地下管网线等基础设施的扰动, 严重者会造成临近建筑物的倒塌、城市水电及交通系统的瘫痪等, 因此, 施工工艺的控制是保障城市正常运行的决定性因素, 量化分析和研究盾构工艺变化情况下对地表沉降的影响规律是十分重要的。

地铁盾构施工工艺引起土体的扰动主要表现为

盾构对土体的挤压和松动、加载与卸载、孔隙水压上升与下降所引起土性的变异、地表隆起与下沉等, 国内外学者针对盾构施工对地层扰动的规律做了许多研究。朱忠隆等<sup>[1]</sup>对盾构推进引起的周围土体扰动破坏机制进行了理论分析, 并通过现场监测和静力触探试验对理论分析结果进行了比较验证。易宏伟等<sup>[2]</sup>从土体应力路径角度出发, 对土体受到盾构扰动引起的应力状态变化研究, 并进行了土体扰动的现场测试分析, 认为土体扰动后其力学性质参数与原状土相比会发生变化。蒋洪胜等<sup>[3]</sup>从盾构机的力学原理角度分析了在饱和软黏土地层中盾构法施工对周围土体产生的扰动作用, 并对扰动区域进行

收稿日期: 2009-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50879068); 国家自然科学基金创新群体(No. 40821001); 中国科学院冻土国家重点实验室项目(No. SKLFSE-ZY-03)。  
第一作者简介: 朱才辉, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事地下洞室、岩土工程数值模拟等方面的研究工作。E-mail: zhucaihui123@163.com

了划分。魏纲等<sup>[4]</sup>利用弹性力学的 Mindlin 解，推导了适用于施工阶段正面附加推力、盾壳与土体之间的摩擦力引起的地面变形计算公式。徐永福等<sup>[5]</sup>研究了盾构掘进引起土体应力-应变的规律，他们将盾构掘进引起土体应力的变化分为 5 部分：①盾构推进时盾构工作面前的土体应力的变化；②在切削过程中盾构工作面上土体应力的变化；③盾构推进时与土体之间的摩擦力引起的土体应力的变化；④盾构脱盾时产生的空隙引起土层土体应力的变化；⑤地应力恢复时土体长期流变引起的土体应力的变化。Mair 等<sup>[6]</sup>将盾构隧道施工引起的地层位移划分为以下 5 个阶段：①盾构到达前先行沉降；②盾构到达时的地面变形；③盾构通过时推进沉降；④盾构通过后盾尾空隙瞬时沉降；⑤后期固结变形。刘建航、侯学渊<sup>[7]</sup>将地面变形简化为 3 个阶段，即盾构到达前的地面变形、盾构到达和通过时的地面变形和地表后期固结变形。从以往的研究经验可知，盾构施工工艺水平的高低直接影响着地表的沉降量的大小，总的可以归纳为以下 3 个主要方面：①开挖面支护压力不足引起的位移；②盾构刀盘偏心超挖引起的位移；③盾尾注浆不足过程引起的位移。以上所述的诸多工艺因素是引起地表沉降的 3 个最主要的负面因素，但对于以上因素对地表沉降影响程度大小的量化分析结果还不多，本文基于 Rowe 等<sup>[8]</sup>提出的“间隙参数”概念，对“间隙参数”进行相应的修正，再基于 Loganathan<sup>[9]</sup>公式，利用修正的“间隙参数”对地表沉降进行上述 3 大工艺因素的量化分析，同时对张云等<sup>[10]</sup>基于经验提出的等代层参数厚度进行相应的修正，结合实际工程对本文提出的方法合理性进行验证。

## 2 间隙参数的取值探讨

为了分析上述因素对地表沉降的影响，很多学者进行了理论分析和简化模型来计算地表的空间或平面沉降及水平位移，Rowe 和 Kack 将三维的隧道变形，主要包括向开挖面处的弹塑性变形、盾构机周围的超挖、以及盾构机和衬砌之间的物理间隙，在平面上等效为一个二维的空隙，提出间隙参数的概念，根据 Lee 等<sup>[11]</sup>提出的理论分析模型，得到了不排水条件下间隙参数的计算公式：

$$g = G_p + U_{3D}^* + w \quad (1)$$

式中： $G_p$  为物理间隙； $U_{3D}^*$  为隧道开挖面的三维弹塑性变形； $w$  为工艺水平数。

间隙参数概念及其公式中的参数取值见表 1 及

图 1 所示。

上述公式主要是基于弹性半空间，均匀、各向同性、轴对称圆形断面平面应变问题理论建立起来的，考虑了隧道的泊松效应、椭圆化变形、地层损失率  $\nu$ 、间隙参数  $g$  等主要因素；但从式 (1) 可见，盾尾衬砌壁后真正引起地表沉降的间隙参数中，并未考虑盾尾注浆对间隙的填充作用，过大地考虑了间隙量，但同时又未能反应盾构施工中因盾构机主体偏心引起的超挖间隙，无法对盾构姿态的控制，即超挖量的控制进行分析计算。

表 1 间隙参数公式中参数的取值

Table 1 Parameters in the gap parameter expressions

| 参数                                         | 取值                                                                                    |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $G_p$ 、 $\Delta$ 、 $\delta$ 、 $U_{3D}^*$   | 物理间隙，对于圆形隧道， $G_p = 2\Delta + \delta$ ；盾构机尾翼的厚度；安装衬砌的空隙；隧道开挖面的三维弹塑性变形；                |
| $k$ 、 $\delta_s$                           | 考虑开挖面凸出效应的系数；隧道开挖面土的最大轴向挤入量， $\delta_s = \Omega R P_0 / E$ ；对于土压平衡盾构 $\delta_s = 0$ ； |
| $\Omega$ 、 $R$ 、 $E$                       | 与隧道稳定系数 $N$ 有关的无量纲变形系数； $N = (\gamma H - P_t) / c_u$ ；隧道半径；隧道拱脚线处土的杨氏模量；              |
| $P_0$ 、 $K_0'$                             | 隧道开挖面移除的总应力， $P_0 = K_0' P_t' + P_w - P_t$ ；有效静止土压力系数；                                |
| $P_t'$ 、 $P_w$ 、 $P_t$                     | 隧道拱脚线处竖向有效应力；开挖前隧道拱脚线处孔隙水压力；开挖面支护力，完全开挖时为 0，有压缩空气时大于 0；                               |
| $\omega$ 、 $U_t$ 、 $E_u$ 、 $c_u$ 、 $\nu_u$ | 工艺水平系数；隧道顶部处的弹塑性平面应变位移；不排水下变形模量、抗剪强度和泊松比                                              |

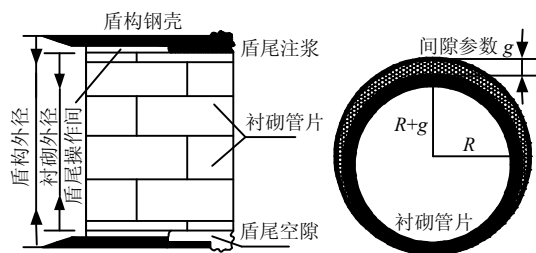


图 1 盾尾间隙参数

Fig.1 The gap parameter of the shield-tail

综上所述，工艺因素对地表沉降的影响极为复杂，本文结合工程实际，对式 (1) 中提出的工艺影响因素对间隙参数的影响概括为以下 3 个主要方面：①注浆填充率  $\beta$ ；②开挖面支护压力比  $\lambda$ ；③偏心率  $\kappa$ ，以下将详细探讨这 3 个参数的涵义。

### 2.1 注浆填充率 $\beta$

由于盾尾物理间隙的存在，设计上必须采用大于该间隙量在沿着一环管片的纵向长度范围内的注浆量来消除这一间隙，一般注浆率为物理间隙的

1.2~2.5 倍, 否则将会引起地面产生较大的沉降, 盾尾注浆对间隙参数的消减作用比较复杂, 很难通过理论分析进行量化计算, 主要原因是: ①土层不均匀性使得浆液充填盾尾间隙时产生不均匀现象; ②浆液在搅拌传输过程中的损失和由于注浆压力不稳定产生的压浆不均匀; ③部分浆液出漏造成浆液流失; ④浆液硬化固结后产生体积收缩等。盾尾注浆实际填充情况如图 2 所示。

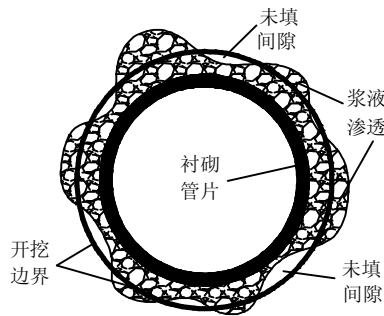


图 2 盾尾注浆的实际填充情况  
Fig.2 The factual filling of grouting in shield tail

假定在一定的设计注浆率下其充填率为  $\beta$ , 在不同的注浆率下, 注浆率越高,  $\beta$  越高, 根据工程实际可知, 其取值范围一般为  $\beta = 60\% \sim 90\%$ , 则拱顶处剩余未充填的等效间隙厚度为

$$g_1 = (1 - \beta)G_p = (1 - \beta)(2\Delta + \delta) \quad (2)$$

## 2.2 偏心率 $\kappa$

由于地层岩面起伏较大, 隧道断面内出现风化或洞体填充物的处理与周边岩层差异较大, 在此情况下, 刀盘受力和掘进速度不均, 姿态不易控制, 易出现盾构机头下垂、机头向上的蛇形、偏离轴线等情况 (见图 3), 为了保证盾构与隧道设计轴线同心前行, 必须进行及时的纠偏, 操作过程中难以避免超挖现象, 过量的超挖会对土体产生很大的扰动而造成地面沉降失控。

盾构机主体偏心距  $\delta$ , 可以通过在隧道开挖面周围布置监测点, 测量各点的水平方向位移  $S_H$  和垂直方向位移  $S_V$  来计算, 其取值应根据洞周监测点处最大值为参考; 也可以通过盾构的纠偏装置来测量盾构机的偏心率来计算偏心距, 假设盾尾相对于盾头的偏心率为  $\kappa$ , 盾构机主体长度为  $L$ , 则偏心距  $\delta$  可以下式表示

$$\delta = \kappa L = L \tan \alpha = \sqrt{S_H^2 + S_V^2} \quad (3)$$

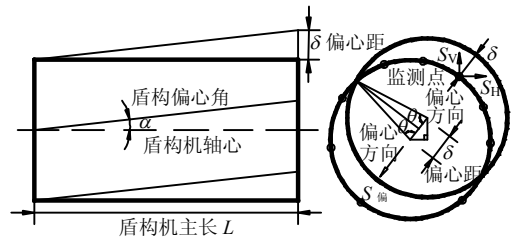


图 3 盾构偏心超挖间隙  
Fig.3 The gap due to the shield pitch

盾构发生偏心的方向很难确定, 为了综合分析盾构偏心超挖所占据扰动区域的厚度, 故根据统计学原理, 通过计算可以得到超挖区域的面积为

$$S_{\text{偏}} = (\pi - 2\theta)R^2 + \delta R \sin \theta \quad (4)$$

式中:  $\theta = \arccos(\delta/2R)$ 。

由于盾构偏心方向可能与水平向以任何夹角的形式存在, 且其随着盾构的推进, 这种超挖的间隙存在是动态的, 为了综合表示这种动态间隙的厚度, 本文假定这部分间隙均匀分布于盾构外壳的周围, 将上述超挖间隙面积等效为一大于衬砌外径的环形区域, 则这部分均匀化的厚度  $\Delta$  可以进行如下的假设和计算。

假定该环形区域外径相对于原轴心的半径为  $R'$ , 令:  $S_{\text{偏}} = \pi(R'^2 - R^2)$ , 则有:

$$\Delta = R' - R = \sqrt{\left(2 - \frac{2\theta}{\pi}\right)R^2 + \delta R \sin \theta} - R \quad (5)$$

则由于盾构偏心超挖引起的间隙  $g_2$  可以用下式表示为

$$g_2 = 2 \left( \sqrt{\left(2 - \frac{2\theta}{\pi}\right)R^2 + \kappa L R \sin \theta} - R \right) \quad (6)$$

实际工程中, 盾构机时刻都要进行纠偏操作, 工程实际表明盾构偏心率约在  $\kappa = 0 \sim 4\%$  之间。

## 2.3 支护压力比 $\lambda$

在盾构法隧道施工中, 为了预防开挖引起地层变位较大或开挖面失稳, 盾构压力仓通过在开挖面施加与原始地应力=隧道上方土体的压力+孔隙水压力相等的支护压力  $P_i$  来进行平衡, 开挖面支护压力大小的控制应该保证不至于压力过低发生开挖面坍塌, 同时又不能压力过大而发生隆起破坏。隧道支护压力  $P_i$  的作用原理及其对地层位移的影响可以用图 4 描述。

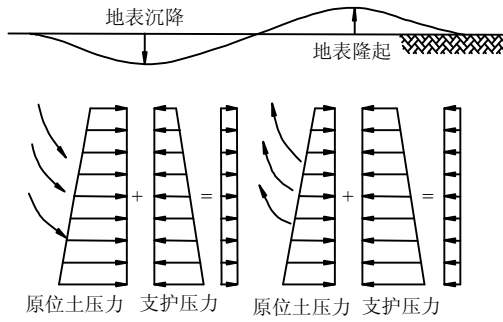


图4 支护压力对地层变位的影响

Fig.4 The ground movement due to the support pressure

对于开挖面支护压力的大小直接影响着开挖面前方土体向洞内临空面发生弹塑性位移的大小,为此 Lo 等<sup>[12]</sup>提出了计算拱顶由于支护压力不足引起的弹塑性位移公式, Lee 等<sup>[11]</sup>又利用三维有限元分析,得到其计算公式如下:

$$U_{c,p}^* = \frac{1}{4} U_i \quad (7)$$

式中:  $U_i$  可以用下式表示为

$$\frac{U_i}{R} = 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2(1+\nu_u)c_u}{E_u} \left[ \exp\left(\frac{N-1}{2}\right) \right]^2}} \quad (8)$$

式中:  $N$  为与隧道稳定性相关的系数无量纲变形系数,  $N = (\gamma H - P_i)/c_u$ ;  $P_i$  为隧道开挖面支护力,对于完全开挖,  $P_i = 0$ , 若有压缩空气, 则  $P_i > 0$ 。支护压力表示为

$$P_i = K'_0 P'_v + P_w \pm 20 = K'_0 \gamma' H + \gamma_w h \pm 20 \square \lambda \gamma H \quad (9)$$

式中:  $K'_0$  为有效静止土压力系数;  $P'_v$  为隧道轴线处有效应力;  $P_w$  为孔隙水压力;  $\gamma'$  为土体干重度;  $\gamma_w$  为水重度,  $\gamma$  为上覆土体天然重度,  $H$  为隧道轴线埋深;  $h$  为距离隧道轴线位置的地下水位水头;  $\lambda$  为支护压力比, 一般取值为 1.0~0.0, 如果支护压力超过原位土压力则大于 1.0。将支护压力比引入该公式, 则式 (8) 可以表示为

$$\frac{U_i}{R} = 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2(1+\nu_u)c_u}{E_u} \left[ \exp\left(\frac{(1-\lambda)\gamma H - c_u}{2c_u}\right) \right]^2}} \quad (10)$$

## 2.4 间隙参数 $g$ 的取值

根据以上 3 个方面因素的探讨, 笔者认为, 最终的间隙参数可以包括以下几个方面:

①由注浆对盾尾物理间隙填充不足引起的间隙为

$$g_1 = (1 - \beta) G_p \quad (11)$$

②由于偏心超挖引起的间隙为

$$g_2 = 2 \left( \sqrt{\left( 2 - \frac{2\theta}{\pi} \right) R^2 + \kappa LR \sin \theta} - R \right) \quad (12)$$

③由于支护压力不足引起的的间隙为

$$g_3 = \left( \frac{R}{4} \right) \left\{ 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2(1+\nu_u)c_u}{E_u} \left[ \exp\left(\frac{(1-\lambda)\gamma H - c_u}{2c_u}\right) \right]^2}} \right\} \quad (13)$$

根据上述引起间隙参数变化的 3 个方面, 本文认为其间隙参数可以表示为下式:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 \quad (14)$$

## 3 地表沉降量化分析

Loganathan 和 Poulos 提出的计算公式, 利用间隙参数概念提出了预测地表沉降的解析解, 其得出地表的沉降计算公式为

$$U_{z=0} = (4gR + g^2)(1 - \nu) \frac{H}{H^2 + x^2} \exp\left(-\frac{1.38x^2}{(H + R)^2}\right) \quad (15)$$

式中:  $\nu$  为泊松比;  $R$  为隧道半径;  $x$  为离隧道中线的水平距离。

现基于此公式, 以  $\beta$ 、 $\kappa$ 、 $\lambda$  3 个参数为计算目标, 对上述参数对地表沉降的影响进行单因素量化分析, 分析结果如下。本文以西安地铁 2 号线试验段为计算依据。所需参数如下: ①隧道轴线埋深为  $H=12.5$  m, 盾构机刀盘外径为  $D=6.25$  m, 盾构机钢壳外径为 6.23 m, 衬砌外径为 6.0 m, 盾构机主体长度  $L=8.0$  m, 理论间隙参数为  $G_p=0.25$  m, 其中盾构钢壳厚度为 40 mm, 建筑空隙为 75 mm; ②地层参数取隧道上方的加权平均值, 变形模量为 5.6 MPa, 泊松比为 0.3, 天然重度 18.3 kN/m<sup>3</sup>, 黏结强度为 24 kPa, 内摩擦角为 13.6°。

(1) 假定盾构不发生偏心且开挖面支护压力与原位土压力完全平衡, 注浆填充率  $\beta$  分别为 60%、70%、80%、90%、100%等进行计算, 得到地表沉降曲线如图 5 所示。

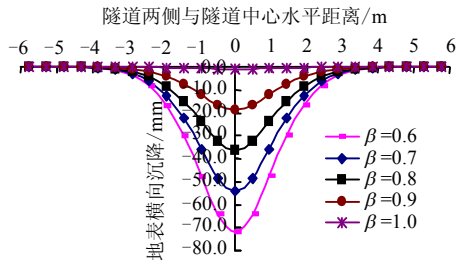


图 5 不同注浆充填率下地表沉降曲线  
Fig.5 The ground settlements in different filling ratios of grouting

从图可见,随着注浆填充效果的减小,盾构间隙增大,地面沉降将呈线性增大,假定初始注浆填充率为 90%,则当注浆填充率每减小 10%,地面最大沉降将增大到原来的 1.5 倍,工程经验表明,一般注浆率为 120%~250%之间,由于其他因素的存在,即使注浆率很高,注浆填充效果最好也仅能达到 90%,因此,注浆质量的好坏决定着地表沉降的控制量大小。

(2) 假定盾构不发生偏心且盾尾注浆完全填充空隙,支护压力比  $\lambda$  分别为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 等进行计算,得到地表沉降曲线如图 6 所示。

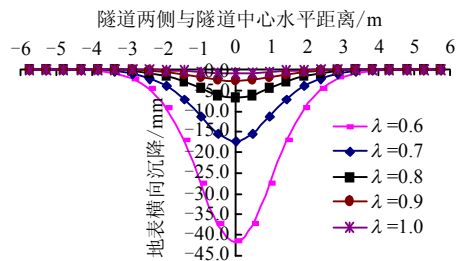


图 6 不同支护压力比下地表沉降曲线  
Fig.6 The ground settlements in different support pressure ratios

从图可见,支护压力比的变化反映了盾构施工过程中开挖面土体的平衡状态,在一定范围内,支护压力比越大对地表的沉降控制程度越好,随着支护压力系数的增大,地面沉降的减小率逐渐趋于平衡,表明支护压力持续增大后,地面不仅不沉降,反而有可能发生隆起现象;如果支护压力系数同样幅度减小,则地面沉降将急剧增大甚至导致开挖面失稳而产生地面塌陷。

(3) 假定开挖面支护压力与原位土压力完全平衡,盾尾注浆完全填充空隙,盾构偏心率分别为 0、0.1%、0.5%、1.0%、2.0%等 5 组进行计算,得到地表沉降曲线如图 7 所示。

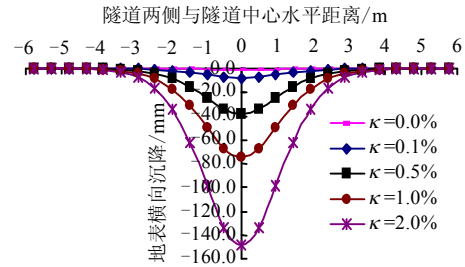


图 7 不同偏心率下地表沉降曲线  
Fig.7 The ground settlements in different ratios of shield pitch

从图可见,随着盾构机偏心率的增大,超挖现象加剧了地面沉降的速率,相比填充率和开挖面支护压力以相同的比例的增加引起的地表沉降增加速率更快,由此说明,盾构超挖对地表沉降的影响非常显著,盾构施工过程中注意纠偏,防止过量超挖是盾构施工中控制地表沉降的决定性因素。

## 4 等代层概念探讨及反演分析

### 4.1 等代层概念的探讨

为了反应盾尾空隙、土体向盾尾空隙的自然充填及注浆后浆体的分布情况和隧道壁面受扰动的程度和范围等这些因素对地面沉降影响,张云等<sup>[10]</sup>提出了一种等代层的概念,在数值分析中,对施工阶段衬砌脱出盾尾后,土体向盾尾空隙的自然充填及注浆后浆体的分布情况和隧道壁面受扰动的程度及范围概化为一环形的均质、等厚、弹性的“土层”,使得用等代层替换衬砌周围实际的土层及注浆情况后地表变形保持不变,对一定的水文及地质条件和施工工艺而言,其厚度及其力学参数应该是一定的。笔者认为,这种抽象化的“土层”应是一种能综合反应扰动土体、水泥浆及未填充的间隙的复杂材料,其组成比例与土体的性质和施工工艺有关。笔者基于张云等<sup>[10]</sup>提出的等代层概念,结合间隙参数的计算方法,将基于经验系数基础上的等代层厚度取值进行相应的修正。

笔者认为,等代层的厚度取值主要由盾构施工过程中对衬砌外围土体的扰动圈大小确定,这与盾尾注浆对“物理间隙 ( $G_p$ )”的充填效果以及由于超挖偏心或开挖面支护压力不足等引起的“未充填间隙量”关系重大,假定将衬砌壁后间隙层厚度与  $\delta_1$  与注浆层厚度  $\delta_2$  分别“均匀化”处理,将其等效到衬砌壁的后面,那么该等效厚度就可以作为“等代层”的总厚度。用下式表示:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0.5G_p + (g_2 + g_3)/2 \quad (16)$$

这与张云等以实际工程的实测值为基础得出的等代层厚度计算公式  $\delta = \kappa G_p$  所给定的经验系数 ( $\kappa = 0.7 \sim 2.0$ ) 不同的是, 本文方法能够通过盾构工艺参数来确定。

#### 4.2 等代层参数反演分析实例

为了验证本文提出的“等代层”计算的合理性, 以西安地铁 2 号线张家堡—尤家庄段某断面的实测地表沉降为计算依据, 利用 ANSYS 来进行三维有限元数值反演, 其基本假定如下: ①土体的应力-应变关系符合 D-P 本构关系, 计算过程中认为土体变形为瞬时的; ②将等代层和隧道衬砌(管片)均为弹性材料, 考虑到衬砌管片的螺栓连接效应, 将其刚度乘以 0.8 的折减系数<sup>[13]</sup>; ③盾构掘进的三维施工模拟过程中采用“刚度迁移”法改变预先设置好的等代层及管片单元材料属性, 实现盾构开挖及支护过程, 假定衬砌一次施作到工作面, 且工作面的推进是分段连续的, 每一段推进距离为一环管片 (1.5 m) 的长度; 同时将相应的注浆压力 (3.5 bar)、盾构机顶进压力 (1 140 kN/个) 也相应迁移, 利用 ANSYS 中特有的“杀死”、“激活”来模拟土体的开挖和支护材料受力特性, 从而实现管片、等代层及荷载向前推进过程。

地铁 2 号线试验段某监测断面的主要地层情况为: 上部地层为第四系上更新统风积黄土及残积古土壤, 下部为中、上更新统冲积粉质黏土及砂类土, 隧道轴线埋深为  $H = 12.5$  m, 处于古土壤层及粉质黏土层交汇处。地层材料及衬砌的力学参数如表 2 所示。

表 2 土体及衬砌材料力学参数  
Table 2 The mechanical parameters of soils and lining materials

| 土体   | $E_0$ / MPa | $\mu$ | $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> ) | $c$ / kPa | $\varphi$ / (°) |
|------|-------------|-------|---------------------------------|-----------|-----------------|
| 素填土  | 3.0         | 0.3   | 15.9                            | 15.0      | 10.0            |
| 黄土   | 4.0         | 0.3   | 16.4                            | 18.0      | 13.0            |
| 新黄土  | 5.0         | 0.3   | 18.5                            | 20.0      | 15.0            |
| 古土壤  | 7.0         | 0.3   | 19.4                            | 27.0      | 14.0            |
| 粉质黏土 | 8.0         | 0.3   | 19.5                            | 30.0      | 14.0            |
| 粉细砂  | 25.0        | 0.3   | 20.0                            | 15.0      | 20.0            |
| 管片层  | 27 600.0    | 0.167 | 25.0                            |           |                 |

为了减少运算量, 模型选取范围为: 隧道轴线左右两侧及轴线开挖深度各取为  $5D$ , 底部取为  $3D$ , 顶部取至地表。约束情况: 模型前后左右及底部均设置法向约束, 顶部为自由边界。根据上述土层参数及管片结构和初始等代层参数, 进行数值反演, 其三维有限元网格如图 8 所示。

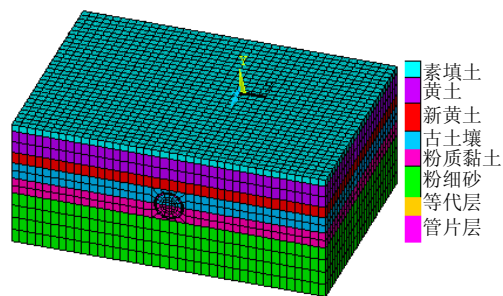


图 8 三维有限元网格图  
Fig.8 The three dimensional FEM meshes

以下为开挖完后, 地层的三维沉降云图及地表变形矢量图如图 9、10 所示。

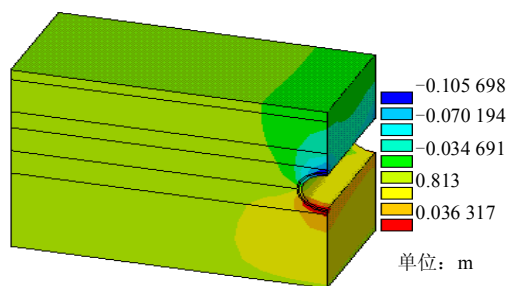


图 9 地层三维沉降云图  
Fig.9 Nephogram of three-dimensional ground settlements

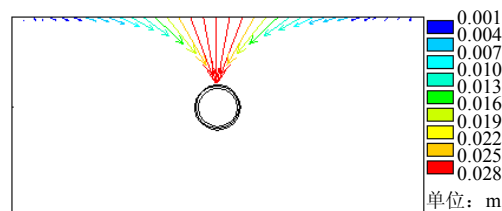


图 10 地面沉降矢量图  
Fig.10 The arrows of ground settlements

通过上述针对实测断面沉降值的三维数值反演得到的等代层参数为: 厚度为 97 mm, 弹性模量为 1.5 MPa, 泊松比为 0.2, 天然重度为 21.0 kN/m<sup>3</sup>, 由试验段实测值可知, 地面约有 0.5 mm 的隆起, 则土压基本保持平衡, 该地段采取的盾尾注浆率为 130%~220%, 若其注浆填充率为 85%或偏心率约为 0.35%, 即超挖土体平均厚度为  $\pm 18$  mm 时, 计算可得间隙参数  $g = 39$  mm, 利用 Loganathan 公式进行地表沉降预测, 结合本文的数值计算及实测地表沉降数据进行对比, 如图 11 所示。

通过本文数值反演后, 将得到的地面沉降曲线与实测曲线相比, 沉降槽宽度和深度基本一致, 利用本文提出的间隙参数法进行 Loganathan 公式地表沉降预测可以对施工质量, 包括注浆效果、盾构开

挖面支护力对土体的平衡效果及盾构偏心超挖量进行定性评价,同时也可以根据已知的上述工艺参数进行地表沉降的预测。对于复杂的地层条件可以利用三维数值反分析,更能真实的反映盾构施工地表沉降特性。

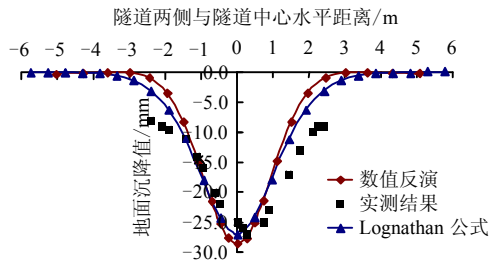


图 11 地面沉降曲线

Fig.11 The ground settlement curves

## 5 结 论

(1) 将间隙参数归纳为注浆填充率 $\beta$ , 支护压力比 $\lambda$ , 偏心超挖率 $\kappa$ 等 3 个参数的影响, 对其进行地表沉降规律的量化分析表明, 不同的工艺参数对地表沉降影响很大, 偏心超挖对地表沉降的影响最大, 注浆填充率是控制地表沉降的关键因素, 开挖面支护压力比次之, 因此, 严格控制盾构姿态和注浆效果对地表沉降控制尤为重要。

(2) 等代层厚度与施工工艺直接相关, 将 3 个工艺参数引入到其厚度的反分析数值计算中能够较为真实的反映施工工艺对地表沉降的影响, 通过对工程实例的分析验证了本文提出方法的合理性。

## 参 考 文 献

- [1] 朱忠隆, 张庆贺. 盾构法施工对土体影响理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增刊): 1087—1090.
- [2] 易宏伟, 孙钧. 盾构施工对软粘土的扰动机理分析[J]. 同济大学学报, 2000, 28(3): 277—281.  
YI Hong-wei, SUN Jun. Mechanism analysis of disturbance caused by shield tunnelling on soft clay[J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(3): 277—281.
- [3] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1514—1520.  
JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1514—1520.
- [4] 魏纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3317—3323.  
WEI Gang, ZHANG Shi-min, QI Jing-jing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 3317—3323.
- [5] 徐永福, 陈建山, 傅德明. 盾构掘进对周围土体力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1174—1179.  
XU Yong-fu, CHEN Jian-shan, FU De-ming. Effect of shield tunnelling on mechanical properties of soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1174—1179.
- [6] MAIR R J, TAYLOR R N. Bored tunneling in the urban environment[C]//Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: Balkema A A, 1997: 2353—2380.
- [7] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [8] ROWE R K, LO K Y, KACK G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(8): 11—22.
- [9] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1998, 124(9): 846—856.
- [10] 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 Yun, YING Zong-ze, XU Yong-fu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 388—392.
- [11] LEE K M, ROWE R K. Subsidence due to tunnelling: Part II—Evaluation of a prediction technique[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(5): 941—954.
- [12] LO K Y, NG M C, ROWE R K. Predicting settlement due to tunnelling in clays[C]//Proceedings of Tunnelling in Soil and Rock. Atlanta: [s. n.], 1984: 46—76.
- [13] 朱合华, 丁文其, 李晓军. 盾构隧道施工力学性态模拟及工程应用[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 098—103.  
ZHU He-hua, DING Wen-qi, LI Xiao-jun. Construction simulation for the mechanical behavior of shield tunnel and its application[J]. *Civil Engineering Journal*, 2000, 33(3): 98—103.