

DOI: 10.11779/CJGE201404004

# 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析

叶飞<sup>1</sup>, 苟长飞<sup>2</sup>, 陈治<sup>1</sup>, 毛家骅<sup>1</sup>, 杨鹏博<sup>1</sup>, 贾涛<sup>1</sup>

(1. 长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 壁后注浆是盾构隧道施工的关键环节, 对控制地表变形影响显著。为建立同步注浆引起的地表变形计算理论, 在分析同步注浆对隧道周围土体的作用机理的基础上, 将同步注浆对地层的压力效应概化为半无限弹性体中的柱形孔扩张问题, 采用镜像法导出了同步注浆引起地表变形的计算式。通过一具体实例, 分析了影响同步注浆引起地表变形的因素, 结果表明: 同步注浆引起的地表变形值受注浆压力、隧道埋深、隧道开挖半径、初始水土压力、土体弹性模量、泊松比等因素影响。

**关键词:** 盾构隧道; 同步注浆; 地表变形; 镜像法

中图分类号: TU433; U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)04-0618-07

**作者简介:** 叶飞(1977-), 男, 副教授、硕士生导师, 主要从事岩土与地下工程等方面的教学和科研。E-mail: xianyefei@sohu.com。

## Ground surface deformation caused by synchronous grouting of shield tunnels

YE Fei<sup>1</sup>, GOU Chang-fei<sup>2</sup>, CHEN Zhi<sup>1</sup>, MAO Jia-hua<sup>1</sup>, YANG Peng-bo<sup>1</sup>, JIA Tao<sup>1</sup>

(1. Chang'an University, Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Xi'an 710064, China; 2. Wenzhou Railway and Mass Transit Investment Group Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** The back-filled grouting is a key step in shield tunnel construction, which has a significant influence on controlling the ground surface deformation. For the purpose of establishing a calculation theory of the ground surface deformation caused by synchronous grouting, the pressure effect of synchronous grouting on the surrounding soils is simplified as an expansion problem of cylindrical cavity in semi-infinite elastic solid. Based on the mechanism analysis of synchronous grouting acting on the surrounding soils, a formula for calculating the ground surface deformation resulting from synchronous grouting is deduced by using the image method. Through a specific example, the influencing factors of the ground surface deformation caused by synchronous grouting are analyzed as well. The results show that the ground surface deformation caused by synchronous grouting is affected by many factors such as grouting pressure, tunnel depth, excavation radius, initial soil and water pressure, elastic modulus and Poisson's ratio of soils.

**Key words:** shield tunnel; synchronous grouting; ground surface deformation; image method

## 0 引言

盾构工法由于对周围环境影响小, 施工快速、安全等原因, 广泛应用于城市公路、地铁、排水、电力、通信等隧道施工中。随着城市地下空间的不断开发, 盾构工法日渐成熟。但无论盾构施工技术如何改进, 由于施工技术工艺质量及周围的环境和岩土介质的特点, 其施工引起的地层移动是不可能完全消除的<sup>[1]</sup>。盾构施工引起的地层位移过大时, 会引起地表沉降超限, 严重时甚至导致周围建筑物倾斜、倒塌。因此, 盾构施工过程中必须严格控制地表变形。

针对盾构施工引起的地表变形, 国内外已经开展了大量的分析和研究, 主要方法有:

(1) 经验公式(Peck公式和修正Peck公式)法。Peck等<sup>[2]</sup>通过大量的工程监测资料进行反分析, 提出隧道引起的地表横向沉降槽可以用高斯分布拟合, 采用地层损失率估算地表变形。Attewell等和Rankin总结了当时广泛应用的经验方法, 提出了新的地表沉降槽经验公式<sup>[3-5]</sup>。

(2) 弹性力学法。王立忠等<sup>[6]</sup>利用Muskhelishvili的复变函数解法, 求得隧道洞周给定位移条件下的应力场和位移场, 从而求出了土层损失所引起的地表变形解。魏纲等<sup>[7-8]</sup>假定土体不排水, 利用弹性力学的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178052)

收稿日期: 2013-09-22

Mindlin 解,推导了正面附加推力和盾壳与土体之间的摩擦力引起的纵向地面变形计算公式,结合土体损失引起的地面变形计算公式,得到盾构施工引起的总的纵向地面变形计算公式。唐晓武等<sup>[9]</sup>利用弹性力学 Mindlin 解,通过坐标变换经积分推导盾构施工过程中刀盘与土体之间摩擦力所引起的地面变形计算公式,并得到盾构施工引起的总地面变形计算公式。

(3) 随机介质法。朱忠隆等<sup>[10]</sup>将运用随机介质理论,导出了能运用于实际的隧道施工引起的纵向地表沉降理论计算公式,并进行了理论计算沉降与实测沉降的对比。施成华等<sup>[11]</sup>将隧道周围土体视为一种随机介质,将盾构法施工引起的地表沉降看作一随机过程,应用随机介质理论,对浅埋隧道盾构施工引起的纵向地表变形进行了计算分析。

(4) 数值算法。张海波等<sup>[12]</sup>在全面分析土压平衡式盾构施工过程中影响周围土体变形各主要因素的基础上,提出一种综合考虑盾构推进、开挖面前方及隧道壁面土体的剪切扰动、盾构刀盘超挖空隙和盾尾间隙的闭合、盾尾注浆等因素的盾构施工三维有限元模拟方法。张云等<sup>[13]</sup>在分析盾构法隧道引起地表变形的原因的基础上,将注浆层概化为一匀质、等厚的等代层,分析了地表变形对等代层参数的敏感性。谢自韬等<sup>[14]</sup>采用 FLAC 软件对某地铁区间隧道同步注浆引起的地表沉降及围岩变形与注浆压力的关系进行了数值模拟研究。殷加顺<sup>[15]</sup>采用有限元数值分析软件 ABAQUS 模拟盾构隧道施工过程,分析了盾构施工过程中注浆压力、支护压力和刚度折减系数等因素对周围土体变形的影响规律。

(5) 现场监测法。刘招伟等<sup>[16]</sup>通过对广州地铁二号线某区间隧道施工过程进行现场监测,并将监测结果与有限元计算结果进行对比分析,得出了盾构法施工引起的地表沉降规律。

从以上文献综述可以看出,目前对于盾构施工引起的地表变形的研究,多集中在经验公式法和数值分析法上,应用弹性理论等力学原理的研究相对薄弱,尤其是针对同步注浆引起的地层变形的力学原理分析。因此,将壁后注浆对地层的压力效应视为半无限土体的柱形孔扩张过程,采用镜像法进行求解,以期得到同步注浆引起的地表变形计算公式。

## 1 同步注浆浆液与地层的作用机理

盾构壁后注浆按照注入时期不同可分为同步注浆、即时注浆和后方注浆。同步注浆是在盾构推进的同时通过盾构机尾部的注浆孔向盾尾间隙注入浆液。同步注浆过程中,由于盾尾间隙在形成的同时被注入

浆液充填,所以充填效果较好,有利于控制地层变形。因此,对于易坍塌的砂质土、含黏土少的砂、砂砾及软黏土地层而言,必须采用同步注浆。即时注入和后方注入通常仅适用于土质坚固、盾尾间隙维持时间较长的地层。

浆液注入到盾尾间隙后,由于周围土质、施工工艺、浆液性质、注浆压力和地下水等因素的共同作用,其扩散过程十分复杂。叶飞<sup>[17]</sup>将浆液在管片壁后的扩散方式理想化归纳为充填、渗透、压密、劈裂 4 个过程。理论上,采用同步注浆方式注浆时,盾尾间隙始终被浆液完全充填,浆液始终与周围土体紧密接触。因此,可认为同步注浆过程中,浆液对盾尾间隙的充填、向周围土体的渗透、对周围土体的压密同时发生;注浆压力较大时,还伴随着浆液对周围土体的劈裂。一般而言,在注浆压力选择合理的情况下,同步注浆浆液对周围土体的作用,在软黏土地层中以压密为主,在砂土地层中以渗透为主。无论压密或渗透效应,均会对周围土体产生沿隧道径向的附加压力,致使周围土体变形。该附加压力对土体的作用可视为在土体中进行一柱形孔扩张。着重分析盾构通过后注浆附加压力对土体变形的影响。

## 2 同步注浆引起的地表变形计算理论

### 2.1 基本假定

为简化计算,进而建立同步注浆对地层变形影响的计算模型,根据同步注浆浆液与地层的作用机理,提出如下基本假定:

(1) 假定盾尾脱离管片后,在盾构机尾部形成均匀环形盾尾间隙,见图 1。

(2) 假定同步注浆过程中,浆液完全充填盾尾间隙,并对周围地层施加与注浆压力相等的径向均布压力。

(3) 忽略浆液和土体之间的渗透作用,认为浆液充填盾尾间隙后对土体产生挤压效应;不考虑浆液性能和土体变形的时效性,土体变形在浆液充满整个间隙之后瞬间发生。

(4) 假定土体是均质的线弹性,各向同性体;土体变形为小变形。

### 2.2 理论推导

根据基本假定,同步注浆对地层的作用,相当于在半无限弹性体中进行柱形孔扩张,见图 2。

半无限问题的求解可以采用镜像法思路,参考文献[18]:将地表视为对称面,在基本柱形孔对应位置同时作用相同的镜像柱形孔的进行扩张,此时将在地表产生竖向应力集中。将与该集中应力大小相同、方



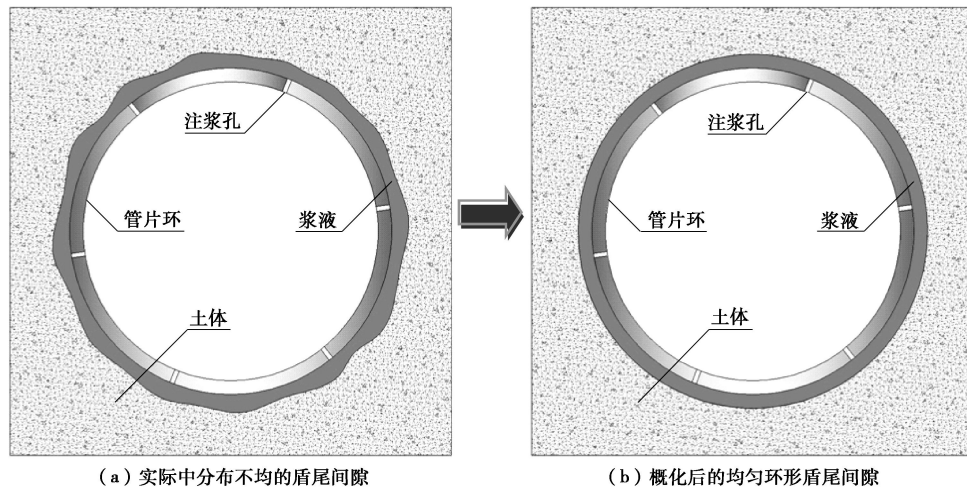


图1 盾尾间隙概化图

Fig. 1 Generalized map of shield tail

向相反的竖向应力作用于地表, 则可消除地表的集中应力, 最终得到满足半无限边界条件的解答。

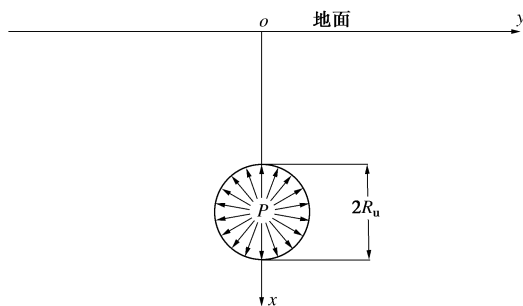


图2 半无限土体中柱形孔扩张示意图

Fig. 2 Sketch of cylindrical cavity expansion in semi-infinite elastic solid

在极坐标下, 无限土体中基本柱形孔扩张的解答(应力压为正、位移向下为正)为

$$\begin{cases} \sigma_{r1} = P \left( \frac{R_u}{r_1} \right)^2 \\ \sigma_{\theta1} = -P \left( \frac{R_u}{r_1} \right)^2 \\ u_{r1} = \frac{(\nu+1)Pr_1}{E} \left( \frac{R_u}{r_1} \right)^2 = \frac{Pr_1}{2G} \left( \frac{R_u}{r_1} \right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\sigma_{r1}$  为极坐标下土体内基本柱形孔扩张产生的径向应力;  $\sigma_{\theta1}$  为极坐标下土体内基本柱形孔扩张产生的环向应力;  $u_{r1}$  为极坐标下的基本柱形孔扩张产生的径向位移;  $r_1$  为土体中任一点到基本柱形孔中心的距离;  $R_u$  为基本柱形孔半径, 近似与隧道开挖半径相等;  $P$  为土体内柱形孔扩张压力, 即注浆压力与初始土体中水土压力的差值;  $E$  为土体弹性模量,  $G$  为土体的剪切模量,  $G=E/2(1+\nu)$ ;  $\nu$  为土体泊松比。

在与地表相对应位置放置同样的镜像柱形孔(见

图3), 其在无限土体中的解答与式(1)相似:

$$\begin{cases} \sigma_{r2} = P \left( \frac{R_u}{r_2} \right)^2 \\ \sigma_{\theta2} = -P \left( \frac{R_u}{r_2} \right)^2 \\ u_{r2} = \frac{(\nu+1)Pr_2}{E} \left( \frac{R_u}{r_2} \right)^2 = \frac{Pr_2}{2G} \left( \frac{R_u}{r_2} \right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\sigma_{r2}$  为极坐标下土体内镜像柱形孔扩张产生的径向应力;  $\sigma_{\theta2}$  为极坐标下土体内镜像柱形孔扩张产生的环向应力;  $u_{r2}$  为极坐标下的镜像柱形孔扩张产生的径向位移;  $r_2$  为土体中任一点到镜像柱形孔中心的距离。

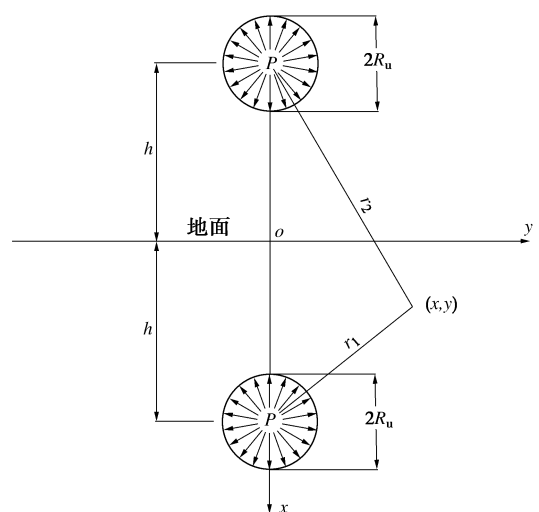


图3 柱形孔与镜像柱形孔叠加示意图

Fig. 3 Sketch of superposition of cylindrical cavity and image cavity

$r_1, r_2$  满足下式:

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x-h)^2 + y^2} \\ r_2 = \sqrt{(x+h)^2 + y^2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $h$  扩张柱形孔中心到地表的距离, 即隧道埋深。

将基本柱形孔和镜像柱形孔解答进行叠加, 并转化到直角坐标系 (图 3) 下, 得到相应的应力和位移的解答:

$$\sigma_x^0 = PR_u^2 \left[ \frac{(x-h)^2}{r_1^4} - \frac{y^2}{r_1^4} + \frac{(x+h)^2}{r_2^4} - \frac{y^2}{r_2^4} \right], \quad (4)$$

$$\sigma_y^0 = PR_u^2 \left[ \frac{y^2}{r_1^4} - \frac{(x-h)^2}{r_1^4} + \frac{y^2}{r_2^4} - \frac{(x+h)^2}{r_2^4} \right], \quad (5)$$

$$\tau_{xy}^0 = 2PR_u^2 \left[ \frac{y(x-h)}{r_1^4} + \frac{y(x+h)}{r_2^4} \right], \quad (6)$$

$$u_x^0 = \frac{PR_u^2}{2G} \left( \frac{x-h}{r_1^2} + \frac{x+h}{r_2^2} \right), \quad (7)$$

$$u_y^0 = \frac{PR_u^2}{2G} \left( \frac{y}{r_1^2} + \frac{y}{r_2^2} \right). \quad (8)$$

式中  $\sigma_x^0$ ,  $\sigma_y^0$ ,  $\tau_{xy}^0$  分别为对称柱形孔叠加后在直角坐标下, 土体内的竖向应力、水平向应力、剪应力;  $u_x^0$ ,  $u_y^0$  分别为对称柱形孔叠加后在直角坐标下, 土体内的竖向位移和水平位移。

式 (4) 中, 当  $x=0$  时, 得到半无限边界处的竖向应力:

$$\sigma_x^0|_{x=0} = 2PR_u^2 \frac{h^2 - y^2}{r_0^4} = 2PR_u^2 \frac{h^2 - y^2}{(h^2 + y^2)^2}, \quad (9)$$

式中,  $r_0$  为地表任意一点到基本柱形孔中心的距离。

将与  $\sigma_x^0|_{x=0}$  大小相同、方向相反的竖向应力  $q(y)$  作用于地表 (图 4), 求解应力和位移。

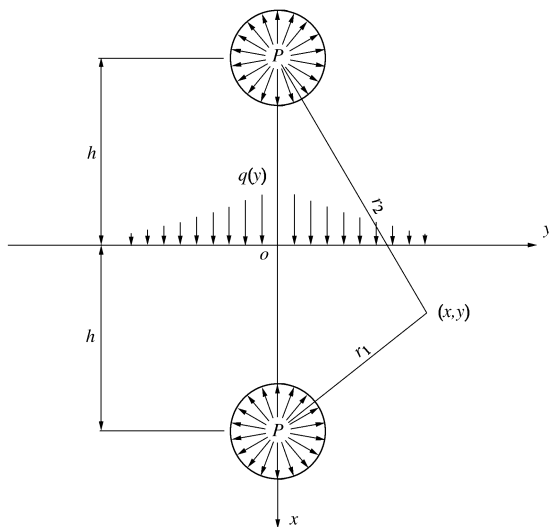


图 4 柱形孔扩张修正应力边界条件示意图

Fig. 4 Sketch of modified stress boundary condition of cylindrical cavity expansion

根据弹性力学理论, 半无限平面边界上受连续分布荷载  $q(y)$  作用时, 有应力分布<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma'_x = \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{x^3 q(\xi)}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2} d\xi \\ \sigma'_y = \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{x(y-\xi)^2 q(\xi)}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2} d\xi \\ \tau'_{xy} = \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{x^2(y-\xi) q(\xi)}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2} d\xi \end{cases}. \quad (10)$$

式 (10) 中,  $\sigma'_x$ ,  $\sigma'_y$ ,  $\tau'_{xy}$  分别为在附加分布荷载  $q(y)$  作用下土体的竖向应力、水平应力和剪应力;  $a$ ,  $b$  为荷载分布范围。

令  $q(y) = -\sigma_x^0|_{x=0} = -2PR_u^2 \frac{h^2 - y^2}{(h^2 + y^2)^2}$ ,  $a=b=h$  代入式 (10) 中, 得

$$\begin{cases} \sigma'_x = -\frac{4PR_u^2 x^3}{\pi} I_x \\ \sigma'_y = -\frac{4PR_u^2 x}{\pi} I_y \\ \tau'_{xy} = -\frac{4PR_u^2 x^2}{\pi} I_{xy} \end{cases}. \quad (11)$$

式 (11) 中,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_{xy}$  分别为

$$I_x = \int_{-h}^h \frac{h^2 - \xi^2}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2 (h^2 + \xi^2)^2} d\xi, \quad (12)$$

$$I_y = \int_{-h}^h \frac{(y-\xi)^2 (h^2 - \xi^2)}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2 (h^2 + \xi^2)^2} d\xi, \quad (13)$$

$$I_{xy} = \int_{-h}^h \frac{(y-\xi)(h^2 - \xi^2)}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2 (h^2 + \xi^2)^2} d\xi. \quad (14)$$

将式 (12)、(13)、(14) 的被积部分分别在  $\xi = h$  处展开成幂级数, 积分得

$$I_x = \frac{25h^2 - 34hy + 9(x^2 + y^2)}{3h[x^2 + (h-y)^2]^3}, \quad (15)$$

$$I_y = \frac{h-y}{3h[x^2 + (h-y)^2]^3} [17h^3 - 43h^2y - 9y(x^2 + y^2) + h(x^2 + 35y^2)], \quad (16)$$

$$I_{xy} = \frac{16x^2}{3[x^2 + (h-y)^2]^3} + \frac{-7h+3y}{h[x^2 + (h-y)^2]^2}. \quad (17)$$

根据弹性力学理论, 有

$$\begin{cases} \varepsilon'_x = \frac{\sigma'_x - \nu\sigma'_y}{E} = \frac{\partial u'_x}{\partial x} \\ \varepsilon'_y = \frac{\sigma'_y - \nu\sigma'_x}{E} = \frac{\partial u'_y}{\partial y} \end{cases}. \quad (18)$$

式 (18) 中,  $\varepsilon'_x$ ,  $\varepsilon'_y$  分别为在集中应力作用下土

体的竖向应变和水平应变;  $u'_x$ ,  $u'_y$  分别为在集中应力作用下的竖向土体的竖向位移和水平位移。

由式(18)可得分布荷载下的地层位移:

$$\begin{cases} u'_x = \frac{1}{E} \int_x^h [\sigma'_x(u, v) - \nu \sigma'_y(u, v)] du \\ u'_y = \frac{1}{E} \int_0^y [\sigma'_y(u, v) - \nu \sigma'_x(u, v)] dv \end{cases} \quad (19)$$

将式(4)、(5)、(6)与式(11)进行对应叠加, 便可得到半无限土体中柱形孔扩张产生的应力解答和位移解答:

$$\begin{cases} \sigma_x = PR_u^2 \left[ \frac{(x-h)^2}{r_1^4} - \frac{y^2}{r_1^4} + \frac{(x+h)^2}{r_2^4} - \frac{y^2}{r_2^4} \right] - \frac{4PR_u^2 x^3}{\pi} I_x \\ \sigma_y = PR_u^2 \left[ \frac{y^2}{r_1^4} - \frac{(x-h)^2}{r_1^4} + \frac{y^2}{r_2^4} - \frac{(x+h)^2}{r_2^4} \right] - \frac{4PR_u^2 x}{\pi} I_y \\ \tau_{xy} = 2PR_u^2 \left[ \frac{y(x-h)}{r_1^4} + \frac{y(x+h)}{r_2^4} \right] - \frac{4PR_u^2 x^2}{\pi} I_{xy} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u_x = \frac{PR_u^2}{2G} \left( \frac{x-h}{r_1^2} + \frac{x+h}{r_2^2} \right) + u'_x \\ u_y = \frac{PR_u^2}{2G} \left( \frac{y}{r_1^2} + \frac{y}{r_2^2} \right) + u'_y \end{cases} \quad (21)$$

式中  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  分别为半无限土体中柱形孔扩张的竖向应力、水平应力和切应力;  $u_x$ ,  $u_y$  分别为半无限土体中柱形孔扩张的竖向位移和水平位移。

一般而言, 盾构隧道施工中只关心地表沉降, 即地表竖向位移的大小。将式(19)代入式(21), 令  $x=0$  可得地表竖向位移:

$$\begin{aligned} u_x|_{x=0} &= u'_x|_{x=0} \\ &= \frac{4PR_u^2}{3\pi h E} \int_0^h \frac{x}{[x^2 + (h-y)^2]^3} \left\{ \nu(h-y)[17h^3 - \right. \\ &\quad \left. 43h^2 y - 9y(x^2 + y^2) + h(x^2 + 35y^2)] - \right. \\ &\quad \left. x^2 [25h^2 - 34hy + 9(x^2 + y^2)] \right\} dx \quad (22) \end{aligned}$$

地表最大竖向位移应在  $y=0$  处, 此时, 由式(22)可得最大地表隆起值:

$$\begin{aligned} u_{\max} &= -u(0, 0) = -\frac{PR_u^2}{3\pi E h} (5 + 13\nu - 18\lg 2) \\ &\approx \frac{PR_u^2}{3\pi E h} (7.4766 - 13\nu) \quad (23) \end{aligned}$$

### 2.3 关于公式应用的讨论

理论上, 由式(21)可计算出同步注浆引起的土体任意点的竖向位移和水平位移。但是, 由于附加分布荷载作用下土体的位移解答十分复杂, 涉及式(19)中的复杂积分问题。因此, 很难显化竖向位移和水平位移的解析解式(21)。这一问题, 可通过数值积分解

决: 在给定隧道半径、埋深, 土体弹性模量、泊松比, 注浆压力等参数的前提下, 可通过式(21), 采用数值积分方法, 计算任意一坐标已知点  $M(x_0, y_0)$  的竖向位移和水平位移。

工程实际中, 往往以地表最大沉降值作为控制参数。因此, 式(23)给出了同步注浆引起的地表最大隆起值计算公式。该式可为盾构施工过程中地表沉降控制及同步注浆压力设置提供理论依据。

对式(23)进行恒等变换, 并考虑地层初始水土压力, 便可得到控制地表隆起的最大注浆压力:

$$P_{\max} = P_0 + \frac{3\pi E h u_{\max}}{R_u^2 (7.4766 - 13\nu)} \quad (24)$$

式中,  $P_0$  为地层初始水土压力。

需要指出的是, 将半无限问题的求解用在注浆引起的地层变形分析中, 得到了概化模型, 推导了解析解。假设在浆液充满整个间隙之前, 土体是不发生变形的, 实际上, 更多的地层移动是跟注浆过程同时发生的。计算理论因忽略这一点而造成的误差尚不清楚, 还有待室内试验、现场实测等研究手段进行验证或修正。此外, 理论推导过程中, 忽略了浆液和土体之间的渗透作用, 认为浆液充填盾尾间隙后对土体产生挤压效应。这种假定在软黏土地层中是可行的, 但不适用于砂性土等其他地层。因此, 公式的适用范围为浅埋软土地层中盾构同步注浆引起的地层变形分析。下文暂通过实例分析, 来验证理论的可行性。

## 3 实例分析

某地铁盾构隧道刀盘开挖半径  $R_u=3.2$  m, 埋深  $h=10$  m; 周围土体初始水土压力  $P_0=0.24$  MPa, 弹性模量  $E=2.85$  MPa, 黏聚力  $c=0.006$  MPa, 内摩擦角  $\varphi=18^\circ$ , 泊松比  $\nu=0.2$ ; 注浆压力  $P_g=0.3$  MPa。

### 3.1 注浆引起的地表隆起计算

将相关参数代入式(23), 可计算出同步注浆引起的地表最大竖向位移值:

$$\begin{aligned} u_{\max} &= \frac{PR_u^2}{3\pi E h} (7.4766 - 13\nu) \\ &= \frac{(0.3 - 0.24) \times 3.2^2}{3\pi \times 2.85 \times 10} (7.4766 - 13 \times 0.2) \\ &\approx 0.01116 \text{ m} \\ &= 11.16 \text{ mm} \end{aligned}$$

可见, 在此种工况下, 同步注浆引起的地表隆起最大值达 11.16 mm, 在地表沉降分析中忽视壁后注浆引起的地表隆起效应, 显然是不尽合理的。

### 3.2 影响因素分析

由式(23)可知, 同步注浆引起的地表隆起值受注浆压力、隧道埋深、隧道开挖半径、土体初始水土压力、弹性模量、泊松比等因素影响。下文在工程实

例中基本参数的基础上, 用数学软件 Wolfram Mathematica 绘制各因素与地表最大隆起值的关系曲线, 如图 5~9 所示。

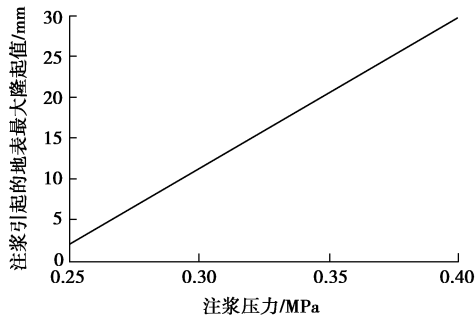


图 5 地表最大隆起值与注浆压力关系曲线

Fig. 5 Relationship between maximum surface uplift value and grouting pressure

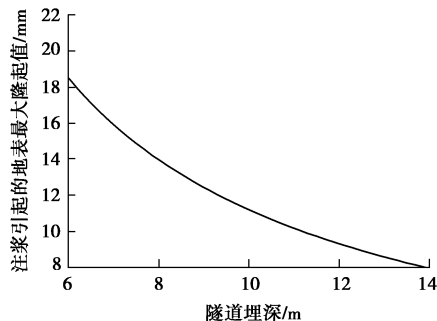


图 6 地表最大隆起值与隧道埋深关系曲线

Fig. 6 Relationship between maximum surface uplift value and tunnel depth

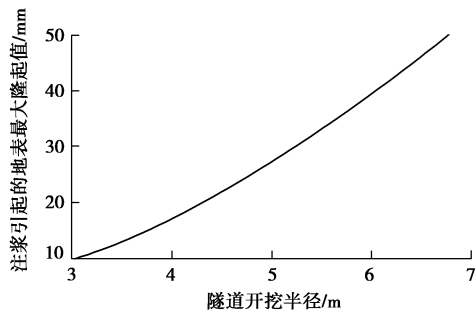


图 7 地表最大隆起值与隧道开挖半径关系曲线

Fig. 7 Relationship between maximum surface uplift value and excavation radius

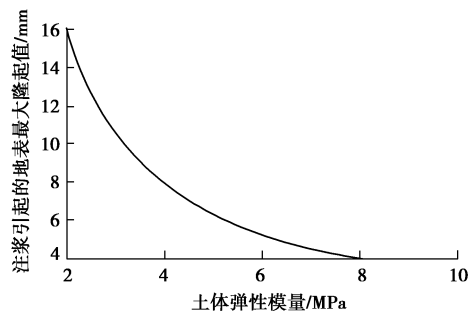


图 8 地表最大隆起值与土体弹性模量关系曲线

Fig. 8 Relationship between maximum surface uplift value and elastic modulus of soils

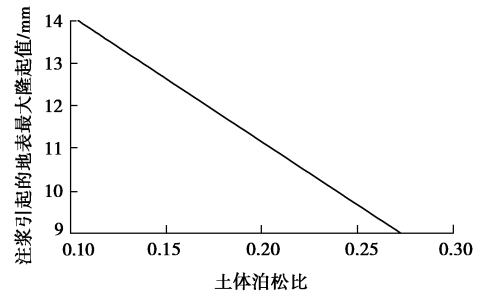


图 9 地表最大隆起值与土体泊松比关系曲线

Fig. 9 Relationship between maximum surface uplift value and Poisson's ratio of soils

由图 5~9 及式 (23) 可以看出, 同步注浆引起的地表最大隆起值随着注浆压力和隧道开挖半径的增大而增大; 随着隧道埋深、土体弹性模量和泊松比的增大而减小。同步注浆引起的地表最大隆起值与注浆压力和土体泊松比分别成线性关系。可见, 为严格控制地表隆起, 应选择与隧道开挖半径、隧道埋深、土体特性参数相匹配的注浆压力, 尤其应注意软土地层、大断面、浅埋条件下的注浆压力选择。

## 4 结 论

(1) 在分析同步注浆浆液与地层的作用机理的基础上, 将同步注浆对地层的压力效应概化为半无限弹性体的柱形孔扩张问题, 采用镜像法导出了同步注浆引起地表变形计算式。

(2) 同步注浆引起的地表隆起值受注浆压力、隧道埋深、隧道开挖半径、土体初始水土压力、弹性模量、泊松比等因素影响。

(3) 同步注浆引起的地表最大隆起值随着注浆压力和隧道开挖半径的增大而增大; 随着隧道埋深、土体弹性模量和泊松比的增大而减小; 与注浆压力和土体泊松比分别成线性关系。

(4) 为严格控制地表隆起, 应选择与隧道开挖半径、隧道埋深、土体特性参数相匹配的注浆压力, 尤其应注意软土地层、大断面、浅埋条件下的注浆压力选择。

## 参考文献:

- [1] 黄宏伟, 张冬梅. 盾构隧道施工引起的地表沉降及现场监控[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1814 - 1820. (HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-mei. Shield tunnelling induced surface settlement and in-situ monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S1): 1814 - 1820. (in Chinese))
- [2] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]// Proc 7th Int Conf SMFE Mexico City State of the Art Volume, 1969: 225 - 290.
- [3] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements

- induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow: Blackie, 1986: 10 - 50.
- [4] RANKIN W J. Ground movement resulting from urban tunnelling: predictions and effects[C]// Bell eds.Engineering Geology of Underground Movements. Proc of the 23rd Annual Conf of the Eng. [s. l.]:[s. n.], 1988: 79 - 92.
- [5] 韩 焯, 李 宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(1): 23 - 35. (HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 23 - 35. (in Chinese))
- [6] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地表变形[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 319 - 327. (WANG Li-zhong, LÜ Xue-jin. A function of complex variable solution for different kinds of oval deformation around circular tunnel in an elastic half plane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 319 - 327. (in Chinese))
- [7] 魏 纲, 徐日庆. 软土隧道盾构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 Gang, XU Ri-qing. 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))
- [8] 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**(增刊 1): 3317 - 3323. (WEI Gang, ZHANG Shi-min, QI Jing-jing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S1): 3317 - 3323. (in Chinese))
- [9] 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 Xiao-wu, ZHU Ji, LIU Wei, 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))
- [10] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏传. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 56 - 59. (ZHU Zhong-long, ZHANG Qing-he, YI Hong-chuan. Stochastic theory for predicting longitudinal settlement in soft-soil tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1): 56 - 59. (in Chinese))
- [11] 施成华, 彭立敏. 随机介质理论在盾构法隧道纵向地表沉降预测中的应用[J]. 岩土力学, 2004, **25**(2): 320 - 323. (SHI Cheng-hua, PENG Li-min. Application of stochastic medium theory to predicting settlement in longitudinal surface due to tunnel construction by shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(2): 320 - 323. (in Chinese))
- [12] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(5): 755 - 760. (ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. 3D finite element simulation on deformation of soil mass during shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(5): 755 - 760. (in Chinese))
- [13] 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, YIN Zong-ze, XU Yong-fu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(3): 388 - 392. (in Chinese))
- [14] 谢自韬, 江玉生, 刘 品. 盾构隧道壁后注浆压力对地表沉降及围岩变形的数值模拟研究[J]. 隧道建设, 2007, **27**(4): 12 - 15. (XIE Zi-tao, JIANG Yu-sheng, LIU Ping. Numerical simulation study on surface settlement and surrounding rock deformation caused by backfill grouting pressure in shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2007, **27**(4): 12 - 15. (in Chinese))
- [15] 殷加顺. 盾构施工注浆对地层变形影响的有限元模拟及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (YIN Jia-shun. The finite element simulation and experimental investigations for ground layer deformation by grouting with shield method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [16] 刘招伟, 王梦恕, 董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1297 - 1301. (LIU Zhao-wei, WANG Meng-shu, DONG Xin-ping. Analysis on ground surface subsidence of metro tunnel induced by shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1297 - 1301. (in Chinese))
- [17] 叶 飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (YE Fei. Analysis and control for upward movement of shield tunnel during construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [18] 朱 宁, 施建勇, 陈海丰. 一种半无限土体中圆孔扩张的分析方法[J]. 岩土力学, 2006, **27**(2): 257 - 260. (ZHU Ning, SHI Jian-yong, CHEN Hai-feng. A method for cavity expansion in semi-infinite soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(2): 257 - 260. (in Chinese))
- [19] 程昌钧, 朱媛媛. 弹性力学[M]. 上海: 上海大学出版社, 2005: 218 - 219. (CHENG Chang-jun, ZHU Yuan-yuan. Elasticity[M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2005: 218 - 219. (in Chinese))