

文章编号: 1000-7598(2009)06-1665-06

# 双线平行盾构法隧道施工附加荷载的计算分析

齐静静<sup>1,2</sup>, 徐日庆<sup>2</sup>, 魏 纲<sup>3</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司技术检测中心, 东营 257002; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310027;  
3. 浙江大学 城市学院 土木工程系, 杭州 310015)

**摘 要:** 对隧道周围土体采用椭圆形非等量径向位移模式, 在镜像法基本原理基础上推导出土体损失引起的附加应力计算公式; 结合弹性力学 Mindlin 解得到的正面附加推力和摩擦力引起的附加应力, 得到三者共同作用下总的附加应力公式, 并通过算例分析了各影响因素下水平平行隧道上附加荷载的分布规律, 重点探讨了土体损失引起的附加荷载在相邻隧道上的分布, 分析结果对平行隧道施工具有一定的参考价值。

**关 键 词:** 附加荷载; 镜像法; 土体损失; 正面附加推力; 摩擦力

**中图分类号:** U 45      **文献标识码:** A

## Analysis and calculation of superimposed load induced by double parallel shield tunnelling

QI Jing-jing<sup>1,2</sup>, XU Ri-qing<sup>2</sup>, WEI Gang<sup>3</sup>

(1. Shengli Oilfield Technology Inspection Center, Sinopec, Dongying 257002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Department of Civil Engineering, City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** Based on the theory of image method, the formulas of superimposed stress induced by ground loss are obtained. Combining the formulas of superimposed stress induced both by bulkhead additive thrust and frictional force between shield and soil, which are based on the Mindlin solution, the formulas of total soil stress are obtained. The distributions of superimposed load on parallel tunnel, which are caused by all of the factors, are analyzed by using an analytical calculation case. In the analytical process, the distribution of superimposed load caused by ground loss is discussed emphatically. The result obtained will have some referential value in parallel tunnelling.

**Key words:** superimposed load; image method; ground loss; bulkhead additive thrust; frictional force

## 1 引 言

随着城市建设的发展, 需要建造越来越多的地下工程, 盾构法是最常见的隧道施工方式。由于城市地下空间的限制及各已建管道的存在, 近距离平行隧道的施工成为不可回避的课题。由于隧道之间的相互影响, 特别是当轴线距离较近时后建隧道在施工过程中会在已建隧道上引起附加荷载, 产生危害。因此, 预测平行隧道施工引起的附加荷载对指导工程施工有重大意义。

目前对于平行隧道施工的研究较少。张冬梅等<sup>[1]</sup>、吴修锋<sup>[2]</sup>利用弹性力学 Mindlin 解得到正面附加推力引起的土体附加应力计算公式。胡昕等<sup>[3]</sup>分析了各种条件下正面附加推力在相邻水平平行管道上引起的附加荷载分布规律。魏纲<sup>[4]</sup>推导了正面附

加推力和掘进机与土体之间摩擦力引起的相邻水平平行管道上的附加荷载的计算公式。土体损失也是引起周围土体变形和应力变化的主要因素, 但目前还没有考虑土体损失引起的相邻平行隧道上附加荷载的计算公式, 因此, 有必要作进一步的研究。

本文在镜像法基本原理<sup>[5-6]</sup>的基础上推导了土体损失在水平平行隧道上引起的附加荷载计算公式, 结合由弹性力学 Mindlin 解得到的正面推力和盾壳与周围土体之间摩擦力引起的附加荷载, 得到土体损失、正面附加推力及摩擦力三者共同作用下, 相邻水平平行隧道上附加荷载计算公式。

## 2 力学分析模型及假定

根据位置不同平行隧道可以分为水平平行和垂直平行, 本文主要就水平平行隧道上的附加荷载进

收稿日期: 2006-11-24

第一作者简介: 齐静静, 女, 1981年生, 博士后, 主要从事地下结构工程的研究。E-mail: bae810212@163.com

行计算分析。

水平平行隧道的相互影响受多种因素的制约，后施工隧道会使周围土体产生附加应力，从而引起相邻已建隧道上附加荷载的增加。附加荷载不仅与土体物理参数有关，而且与隧道施工参数关系密切。考虑到隧道施工引起土体附加应力的因素主要有：土体损失、正面附加推力和盾壳与周围土体之间的摩擦力<sup>[7]</sup>。文中分别就这 3 个主要因素影响下的水平平行隧道上的附加荷载进行分析。

分析中假定：

- (1) 一条隧道已存在，第 2 条隧道平行于该隧道施工；
- (2) 施工隧道的推进面为荷载作用面，不计已有管道本身刚度对荷载传递的影响<sup>[3]</sup>；
- (3) 盾壳与周围土体之间的摩擦力均匀分布<sup>[7]</sup>；
- (4) 土体为均匀的线弹性半无限体；
- (5) 管道的推进仅为空间位置上的变化，与时间无关。

图 1 为计算力学模型。图中  $D$  为盾构机外直径 (m)； $h$  为隧道轴线距地面距离 (m)； $L$  为盾构机长度； $S$  为两隧道之间的净距。

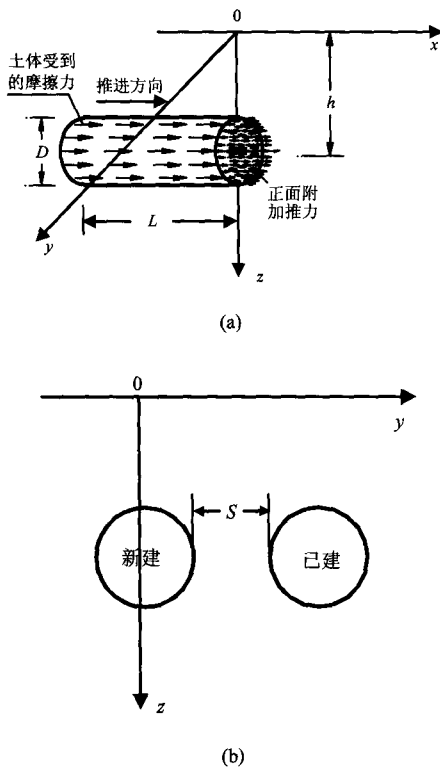


图 1 力学模型简图

Fig.1 Sketch of mechanical model

### 3 土体损失引起的附加应力计算

#### 3.1 镜像法基本原理

Sagaseta 对地面以下某深度处由土体损失引起的土体应变场进行分析，采用虚像技术考虑自由表面，得到初始各向同性、均匀弹性半空间中不可压缩土体的解析解。具体步骤如下<sup>[5]</sup>：

(1) 假定土体为无限体，在真实源的作用下，在地表处产生正应力  $\sigma_0$  与剪应力  $\tau_0$  和无限体内的应力场和位移场；

(2) 在地面以上对应源的位置，再假定有一影响汇的作用，在无限体内及地表产生应力与位移。在源与汇的作用下，可以消除地表面实际上不存在的法向应力  $\sigma_0$ ；

(3) 为符合实际自由边界条件，假定地面上有一与  $\tau_0$  方向相反、大小为其 2 倍的切向应力作用，求出该应力与地面以下各点产生的应力场。

(4) 以上 3 步产生的应力之和即为实际问题的应力解答。

#### 3.2 单位体积开挖引起的附加应力计算

对于水平平行隧道，水平方向应力分量  $\sigma_y$  对相邻隧道产生主要影响，因此，本文仅对应力分量  $\sigma_y$  的计算进行分析。

姜忻良等<sup>[6]</sup>根据体积恒定的假定，得到半无限体内在  $(x_0, y_0, z_0)$  点处半径为  $a$  的空隙在点  $(x, y, z)$  处产生的  $x$ 、 $y$  及  $z$  向位移分量分别为

$$S_{x1} = -\frac{a^3(x-x_0)}{3r_1^3}, \quad S_{y1} = -\frac{a^3(y-y_0)}{3r_1^3},$$

$$S_{z1} = -\frac{a^3(z-z_0)}{3r_1^3} \quad (1)$$

式中： $r_1 = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{1/2}$

其镜像位置  $(x_0, y_0, -z_0)$  处大小相等的体积膨胀在点  $(x, y, z)$  处产生的位移分量为

$$S_{x2} = \frac{a^3(x-x_0)}{3r_2^3}, \quad S_{y2} = \frac{a^3(y-y_0)}{3r_2^3},$$

$$S_{z2} = \frac{a^3(z+z_0)}{3r_2^3} \quad (2)$$

式中： $r_2 = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2]^{1/2}$

由弹性力学基本方程知：

$$\epsilon_x = \frac{\partial S_x}{\partial x}; \quad \epsilon_y = \frac{\partial S_y}{\partial y}; \quad \epsilon_z = \frac{\partial S_z}{\partial z} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_y \quad (4)$$

将式 (1) ~ (3) 代入式 (4), 得到 (1)、(2) 两步产生的附加应力计算公式分别为

$$\sigma'_{y1} = -\frac{a^3}{r_1^3} \cdot \frac{E}{3(1-2\mu)} + a^3 \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{(y-y_0)^2}{r_1^5} + a^3 \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[ \frac{(x-x_0)^2}{r_1^5} + \frac{(z-z_0)^2}{r_1^5} \right] \quad (5)$$

$$\sigma'_{y2} = \frac{a^3}{r_2^3} \cdot \frac{E}{3(1-2\mu)} - a^3 \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{(y-y_0)^2}{r_2^5} - a^3 \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[ \frac{(x-x_0)^2}{r_2^5} + \frac{(z+z_0)^2}{r_2^5} \right] \quad (6)$$

式中:  $E$  为土体压缩模量;  $\mu$  为土体泊松比。

以上两步在地表处产生的剪应力分别为  $\tau_{xz}$  和  $\tau_{yz}$  [6]:

$$\tau_{xy} = -4Ga^3 \frac{z_0(x-x_0)}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{5/2}} \quad (7)$$

$$\tau_{yz} = -4Ga^3 \frac{z_0(y-y_0)}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{5/2}} \quad (8)$$

式中:  $G$  为土体剪切弹性模量。

将  $\tau_{xz}$  和  $\tau_{yz}$  反方向作用于地表, 通过弹性力学 Cerruti 解, 即可求得第 3 步的应力解答为

$$\sigma'_{y3} = \frac{a^3}{\pi} \frac{E}{1+\mu} \lim_{b \rightarrow \infty} \lim_{c \rightarrow \infty} \int_{y_0-b}^{y_0+b} \int_{x_0-c}^{x_0+c} \frac{z_0(x-u)(u-x_0)}{[(u-x_0)^2 + (t-y_0)^2 + z_0^2]^{5/2}} \left\{ \frac{1-2\mu}{(R+z)^2} \left[ \frac{3}{R} \frac{(x-u)^2}{R^3} - \frac{2(x-u)^2}{R^2(R+z)} \right] - \frac{3(y-t)^2}{R^5} \right\} dudt + \frac{a^3}{\pi} \frac{E}{1+\mu} \lim_{b \rightarrow \infty} \lim_{c \rightarrow \infty} \int_{y_0-b}^{y_0+b} \int_{x_0-c}^{x_0+c} \frac{z_0(y-t)(t-y_0)}{[(u-x_0)^2 + (t-y_0)^2 + z_0^2]^{5/2}} \left\{ \frac{1-2\mu}{(R+z)^2} \left[ \frac{3}{R} \frac{(y-t)^2}{R^3} - \frac{2(y-t)^2}{R^2(R+z)} \right] - \frac{3(x-u)^2}{R^5} \right\} dudt \quad (9)$$

式中:  $R = [(x-u)^2 + (y-t)^2 + z^2]^{1/2}$

因此, 半无限体内  $(x_0, y_0, z_0)$  点处半径为  $a$  的空隙在点  $(x, y, z)$  处产生的由于土体损失引起的  $y$  向总附加应力为

$$\sigma'_y = \sigma'_{y1} + \sigma'_{y2} + \sigma'_{y3} \quad (10)$$

对于单位体积的空隙产生的应力在以上基础上除以体积  $4\pi a^3/3$ , 即

$$\sigma_y = \frac{\sigma'_y}{\left(\frac{4}{3}\pi a^3\right)} \quad (11)$$

### 3.3 土体损失引起的附加应力

土体损失是指开挖的土体多于设计开挖量的数量, 主要是由于开挖卸载以及盾尾通过后产生的建筑空隙引起。尽管采取了注浆填充措施, 仍不可避免会产生土体损失。

许多学者<sup>[5, 6, 8-11]</sup>通过研究发现, 隧道周围土体移动符合椭圆形非等量径向移动模式, 如图 2 所示 (图中  $R$  为盾构机外半径,  $g$  为等效土体损失参数)。

姜忻良等<sup>[6-12]</sup>利用 Sagaseta 提出的源汇法 (也称镜像法), 采用椭圆形非等量径向土体移动模式, 通过数值积分求解得到土体损失引起的土体中任一点位移的计算公式。

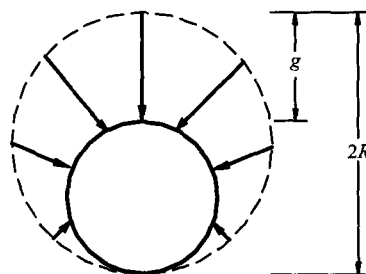


图 2 隧道周围土体的移动模式

Fig.2 Soil displacement patterns around a tunnel

隧道推进产生的附加应力也可以通过对单位土体产生的应力解答积分得到, 如图 3。设隧道开挖断面中心线深度为  $h$ , 自  $(0, -l, h)$  点沿  $x$  轴正方向掘进, 推进到  $(0, 0, h)$ , 空隙厚度为  $g$ 。土体损失为两个长度相同, 半径不同而且侧壁相连的圆柱体之间的空隙, 即  $V = V_1 - V_2$ , 其中外圆柱体  $V_1$  轴线深度  $h$ , 半径为盾构切口半径  $R$ , 长度为  $l$ ; 内圆柱体  $V_2$ , 轴线深度  $h+g/2$ , 半径为  $R$  ( $r = R-g/2$ )。则隧道掘进产生附加应力可以通过以下积分求得:

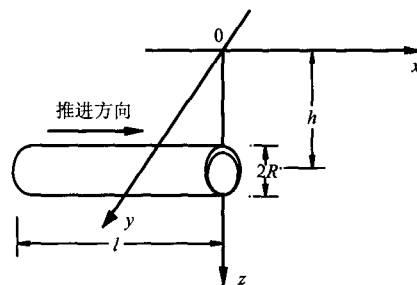


图 3 隧道掘进过程示意图

Fig.3 Sketch of the process of tunnel pushing

$$\sigma_{y1} = \iiint_V \sigma_y(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{v_1-v_2} \sigma_y(x, y, z) dx dy dz \quad (12)$$

利用 Fortune 编制成相应的计算机程序, 便可方便地计算出土体损失引起的土体附加应力。

### 4 正面推力和摩擦力引起的附加应力

假定土体为均质的线弹性半无限体, 盾构推进面为荷载作用面, 将正面附加推力  $P$  近似为圆形均

布荷载, 盾壳与周围土体之间的摩擦力  $p$  均匀分布。计算所取坐标系如图 1 所示, 采用极坐标。在图中荷载作用圆截面内取微分面积  $rdrd\theta$ , 利用弹性力学 Mindlin 解, 通过数值积分得到正面附加推力引起的土体中任一点  $(x, y, z)$  处的附加应力  $\sigma_{y2}$ ; 同理, 取盾壳表面的微分面积  $RdLd\theta$ , 利用弹性力学 Mindlin 解, 积分得到盾壳与土体之间摩擦力作用下土体中任一点  $(x, y, z)$  处的附加应力  $\sigma_{y3}$ , 公式具体推导过程见文献[4]。

$$\sigma_{y2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \frac{Px}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{-1+2\mu}{M_1^3} + \frac{3(y+r\cos\theta)^2}{M_1^5} - (1-2\mu) \frac{(3-4\mu)}{N_1^3} + \frac{3(3-4\mu)(y+r\cos\theta)^2}{N_1^5} + \frac{1}{(N_1+z+h-r\sin\theta)^2} \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1} \left[ 1 - \frac{(y+r\cos\theta)^2(3N_1+z+h-r\sin\theta)}{N_1^2(N_1+z+h-r\sin\theta)} \right] - \frac{6(h-r\sin\theta)[h-r\sin\theta-(1-2\mu)(z+h-r\sin\theta)]}{N_1^5} - \frac{30z(h-r\sin\theta)(y+r\cos\theta)^2}{N_1^7} \right\} r dr d\theta \quad (13)$$

$$\sigma_{y3} = \frac{Rp}{8\pi(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^L (x+L) \left\{ \frac{-1+2\mu}{M_2^3} + \frac{3(y+R\cos\theta)^2}{M_2^5} - (1-2\mu) \frac{(3-4\mu)}{N_2^3} + \frac{3(3-4\mu)(y+R\cos\theta)^2}{N_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_2} \frac{1}{(N_2+z+h-R\sin\theta)^2} \left[ 1 - \frac{(y+R\cos\theta)^2(3N_2+z+h-R\sin\theta)}{N_2^2(N_2+z+h-R\sin\theta)} \right] - \frac{6(h-R\sin\theta)[h-R\sin\theta-(1-2\mu)(z+h-R\sin\theta)]}{N_2^5} - \frac{30z(h-R\sin\theta)(y+R\cos\theta)^2}{N_2^7} \right\} dL d\theta \quad (14)$$

式中

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

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

$$M_2 = \sqrt{(x+L)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z-h+R\sin\theta)^2}$$

$$N_2 = \sqrt{(x+L)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z+h-R\sin\theta)^2}$$

$P$  为盾机正面附加推力;  $p$  为盾壳与周围土体之间的摩擦力。

### 5 总附加应力计算

将土体损失、正面附加推力和盾壳与周围土体之间的摩擦力作用下土中任一点处产生的附加应力叠加, 得到总附加应力为

$$\sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3} \quad (15)$$

### 6 附加荷载的分析

由于对于水平平行隧道,  $\sigma_x$  和  $\sigma_z$  在相邻隧道上引起的附加荷载较小, 本文仅讨论应力分量  $\sigma_y$  在

相邻隧道上引起的附加荷载分布。文中受力以压为正、拉为负。

在分析中, 附加荷载承受点  $(x, y, z)$  为相邻隧道内侧表面点, 取:

$$z = h \pm 0, 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.4D, 0.5D$$

$$y = S + D - \sqrt{D^2/4 - (z-h)^2}$$

分别计算附加应力  $\sigma_y$ , 并求出沿轴向  $x$  分布的线荷载 ( $z = h \pm 0, 0.1D, 0.2D, 0.3D, 0.4D, 0.5D$  处各  $\sigma_y$  和各乘以  $D/11$ ), 即为附加线荷载  $q_k$  (kN/m)。

分析中, 计算参数具体取值如下:  $D=2\text{ m}$ ,  $S=4\text{ m}$ ,  $h=8\text{ m}$ ,  $L=3.4\text{ m}$ ,  $\epsilon_s=1\%$ ,  $g=10\text{ mm}$ ,  $P=20\text{ kPa}$ ,  $P=30\text{ kPa}$ ,  $E=8.0\text{ MPa}$   $\mu=0.35$ 。

#### (1) 各影响因素引起的附加荷载分析

如图 4 所示, 正面附加推力引起的附加荷载分布曲线以开挖面正上方为轴线呈反对称分布, 在相邻平行隧道前方产生压力, 增加到峰值后逐渐下降, 在后方则产生拉应力。摩擦力引起的附加荷载分布规律与正面附加推力相似, 在盾构机中间位置处附加荷载为 0。

土体损失是引起附加荷载的主要因素，在开挖面后方，沿  $x$  轴反向附加荷载逐渐增大， $x$  约达  $0.2D$  时，基本稳定；在开挖面前方，沿  $x$  轴正向，其值逐渐减小。土体损失在相邻平行管道上主要产生拉应力。在3者共同作用下，开挖面前方相邻管道上先产生压应力，随着盾构机的推进，土体损失的影响程度增大，在开挖面到达之前管道开始出现拉应力；在离开挖面一定距离后拉应力达最大值，随后产生一定反弹。

文献[3-4]分别对正面附加推力和盾壳与周围土体之间的摩擦力引起附加荷载的分布规律及影响因素进行了分析，下面主要对土体损失在相邻隧道上引起附加荷载的影响因素进行分析。

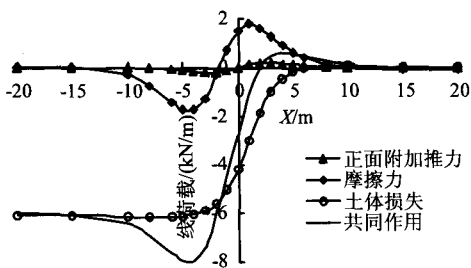


图4 各影响因素引起的附加荷载分布  
Fig.4 Distribution curves of superimposed loads

(2) 净距  $S$  变化时土体损失引起附加荷载分布

如图5所示，随着净距  $S$  的减小，在开挖面后方土体损失引起的附加荷载峰值明显变大，在开挖面前方附加荷载沿  $x$  轴的衰减速度随着  $S$  的减小呈增大趋势；当  $S$  减小到  $2\text{ m}$  时，在开挖面前方一定范围内出现压应力。

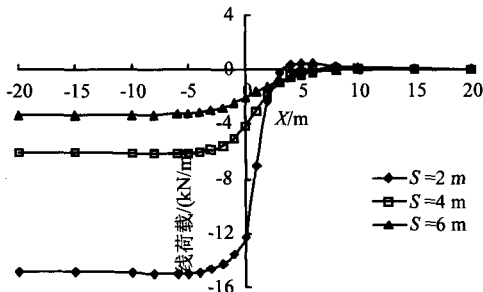


图5 不同  $S$  时附加荷载分布  
Fig.5 Distribution curves of superimposed load with different values of  $S$

(3) 盾构机外  $D$  变化时引起的附加荷载分布  
从图6可以看出，随着盾构机外径的增加，土

体损失引起的附加荷载呈增大趋势，且在开挖面前方衰减速率随着  $D$  的增加而增大。

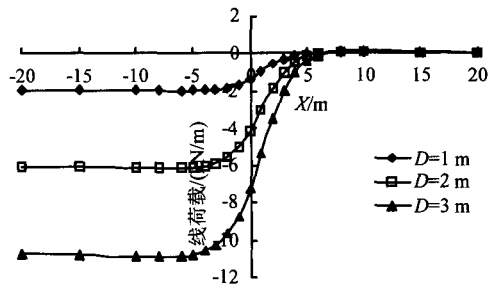


图6 不同  $D$  时附加荷载的分布  
Fig.6 Distribution curves of superimposed loads with different values of  $D$

(4) 埋深  $h$  变化时引起的附加荷载分布

如图7所示，随着隧道埋深的增加，土体损失引起的附加荷载峰值呈减小趋势，但减小幅度不大，受埋深的影响较小。另外，附加荷载的衰减速度随着埋深的变化也较小。

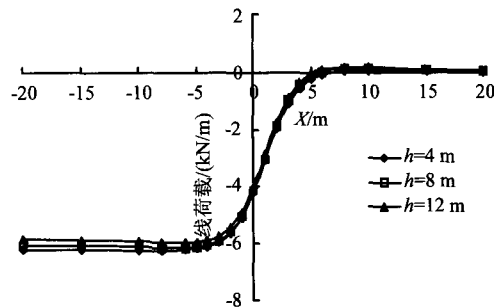


图7 不同  $h$  时附加荷载分布  
Fig.7 Distribution curves of superimposed loads with different values of  $h$

## 7 结论

采用镜像法基本原理推导了土体损失引起的附加应力计算公式；结合正面附加推力和盾壳与周围土体之间摩擦力引起的附加应力计算公式，得到盾构施工引起的总的附加应力公式。

通过算例对水平平行隧道上附加荷载的分布规律进行分析，结果表明：

(1) 土体损失是引起相邻隧道上附加荷载的主要因素，在计算中不可忽略。在3个主要因素的共同作用下，开挖面前方相邻管道上先产生压应力，随着盾构机的推进，土体损失的影响程度增大，在开挖面到达之前管道开始出现拉应力；在离开挖面一定距离后拉应力达最大值，随后产生一定反弹。

(2) 随着  $S$  的减小, 土体损失引起的附加荷载峰值明显变大, 在开挖面前方沿  $x$  轴的衰减速度呈增大趋势。

(3) 随着  $D$  的增加, 土体损失引起的附加荷载呈增大趋势, 且在开挖面前方衰减速率随着  $D$  的增加而增大。

(4) 土体损失引起的附加荷载受埋深的影响较小, 随着  $h$  的增加其峰值呈略有减小。

文中假定土体为均质线性弹性半无限体, 不考虑注浆和盾构机偏斜, 可能与实际情况有所偏差, 可作进一步修正。本文主要为平行隧道上附加荷载的计算提供了一种新的理论计算方法, 由于在研究工作中做了简化和假设, 可作进一步研究。

### 参考文献

- [1] 张冬梅, 黄宏伟. 地铁盾构推进引起周围土体附加应力分析[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 379—382.  
ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Superimposed stress analysis of soil imposed by tunnel impulsion[J]. *Underground Space*, 1999, 19(5): 379—382.
- [2] 吴修锋. 顶管施工引起的地层移动与变形控制研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004.
- [3] 胡昕, 黄宏伟. 相邻平行顶管推进引起附加荷载的力学分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 75—77.  
HU Xin, HUANG Hong-wei. Mechanical analysis of superimposed load introduced by propulsion of adjacent parallel pipe[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 75—77.
- [4] 魏纲. 顶管工程土与结构的性状及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. *Geotechnique*, 1987, 37(3): 301—320.
- [6] 姜忻良, 赵志民. 镜像法在隧道施工土体位移计算中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 27(6): 801—803.  
JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min. Application of image method in calculating tunneling-induced soil displacement[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 27(6): 801—803.
- [7] 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 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.
- [8] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(9): 846—856.
- [9] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling I: Estimating the gap parameter[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(6): 929—940.
- [10] 魏纲, 魏新江, 龚慈, 等. 软土中盾构法隧道引起的土体移动计算研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 995—999.  
WEI Gang, WEI Xin-jiang, GONG Ci, et al. Study on calculation for shield tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 995—999.
- [11] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542—1544.  
JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1542—1544.
- [12] 姜忻良, 赵志民. 盾构法施工引起土体位移的空间计算方法[J]. 华中科技大学学报, 2005, 22(2): 1—4.  
JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min. Calculation method of 3D soil displacement due to construction of tunnel[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2005, 22(2): 1—4.