

隧道施工引起土体变形的半解析分析

施建勇¹, 张 静², 余才高², 樊有维³

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京市地下铁道工程有限责任公司, 江苏 南京 210024;
3. 南京市勘察测绘设计研究院, 江苏 南京 210008)

摘要: 采用沿轴向和横向解析、竖向离散的半解析方法求解隧道施工引起的土体变形问题。将轴向解析函数取为梁振型函数, 横向解析函数取为形状类似于高斯曲线的负指数函数, 建立了土体和衬砌的半解析函数。通过对一工程实例的计算分析可知, 采用的半解析方法能较好地分析隧道施工引起的地面沉降和隆起以及沉降槽在纵向和横向的分布规律, 计算方便, 是一种可行的计算方法。

关键词: 半解析; 隧道; 土体变形

中图分类号: U455 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2002)06-0048-04

1 隧道施工土体变形的半解析方法

1.1 半解析函数的构造

半解析解函数主要由一些方向上的解析函数族和另一些方向上分片插值函数构成。对于三维问题, 如果解函数采用二维解析、一维离散的方案, 则半解析位移解函数按如下方式构成:

$$u(x, y, z) = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q X_m(x) Y_n(y) \sum_{k=1}^s N_k(z) a_{mn}^{(k)} \quad (1)$$

式中: $X_m(x)$, $Y_n(y)$ ——解析方向 x , y 的一维解析函数; $N_k(z)$ ——沿离散方向 z 的插值函数; $a_{mn}^{(k)}$ ——广义变量, 即自由度, 是离散化方程中的未知数。

根据观测到的地面沉降曲线的形状, 横向解析函数取类似高斯曲线的负指数函数来表示

$$X_m(x) = e^{-m\left(\frac{x}{R}\right)^2} \quad (2)$$

式中: m —— x 方向所取的项数; R ——隧道半径, $x = \infty$ 时, $X_m(x) = 0$, 满足无穷远处位移为 0 的边界条件。

纵向取自由—固支梁的振型函数作为该方向的解析函数

$$Y_n(y) = (\operatorname{ch}\alpha_n y - \cos\alpha_n y) - c_n(\operatorname{sh}\alpha_n y - \sin\alpha_n y) \quad (3)$$

式中: n —— y 方向所取的项数; α_n , c_n ——根据边界条件不同而选择的参数。

1.2 几何模型

根据地基土成层分布的特点, 把土介质用层单元来划分, 即沿水平面方向解析、竖向离散; 根据隧道衬砌圆形的几何形状, 把衬砌沿周向离散, 轴向解析。在划分单元时, 要使土介质单元与衬砌单元有共同的结线。图 1 为单元剖分示意图, 图中 d 点为起始开挖面, 从 d 点向 o 点开挖。

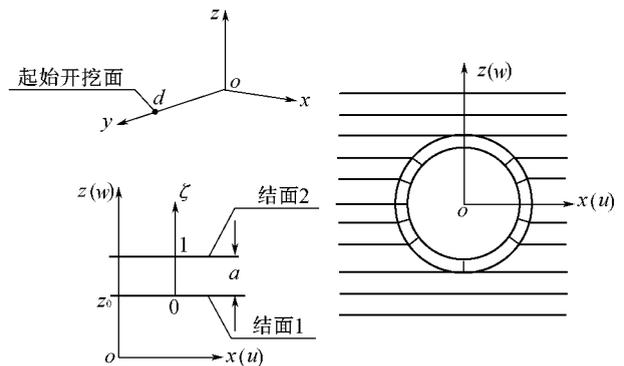


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometrical model

$$u_s = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q \left\{ x e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} \left[(\operatorname{ch}\alpha_n \gamma - \cos\alpha_n \gamma) - c_n (\operatorname{sh}\alpha_n \gamma - \sin\alpha_n \gamma) \right] \right\} [(1-\zeta)u_{1mn} + \zeta u_{2mn}] \quad (4)$$

$$v_s = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q \left\{ e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} \left[(\operatorname{sh}\alpha_n \gamma + \sin\alpha_n \gamma) - c_n (\operatorname{ch}\alpha_n \gamma - \cos\alpha_n \gamma) \right] \right\} [(1-\zeta)v_{1mn} + \zeta v_{2mn}] \quad (5)$$

$$w_s = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q \left\{ e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} \left[(\operatorname{ch}\alpha_n \gamma - \cos\alpha_n \gamma) - c_n (\operatorname{sh}\alpha_n \gamma - \sin\alpha_n \gamma) \right] \right\} [(1-\zeta)w_{1mn} + \zeta w_{2mn}] \quad (6)$$

对于衬砌(以下标 l 表示),当划分的单元足够多时,可看作平壳单元.土体单元在整体坐标系下的位移与衬砌单元在局部坐标系下的位移间的换算关系如下:

$$u'_{kn} = \frac{N_k(\zeta)}{N_k(\zeta')} \left[-\sin\alpha \sum_{m=1}^p x e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} u_{kmn} + \cos\alpha \sum_{m=1}^p e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} w_{kmn} \right] \quad (7)$$

$$v'_{kn} = \frac{N_k(\zeta)}{N_k(\zeta')} \sum_{m=1}^p e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} v_{kmn} \quad (8)$$

$$w'_{kn} = \frac{N_k(\zeta)}{N_k(\zeta')} \left[\cos\alpha \sum_{m=1}^p x e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} u_{kmn} + \sin\alpha \sum_{m=1}^p e^{-m\left(\frac{x}{r}\right)^2} w_{kmn} \right] \quad (9)$$

1.3 荷载

1.3.1 隧道开挖释放荷载

隧道圆周的释放荷载列阵计算是根据静力等效原则,把即将开挖的圆周面处土介质中的相互作用面力移至结面上,可得土层单元内释放荷载.开挖面上的释放荷载由盾构开挖前方待开挖处的释放荷载计算得到.

1.3.2 盾构正面支护力荷载

盾构开挖时,为保持开挖面的稳定,需设置压力作用于开挖面上.由支护力荷载可得到开挖面上土层单元处支护力荷载.

1.3.3 土体力引起的荷载列阵

由土层单元体积力引起的荷载列阵按盾构开挖横截面范围外的单元和盾构开挖横截面范围内的单元分别计算.

由平衡条件可以得到求解位移的控制方程.

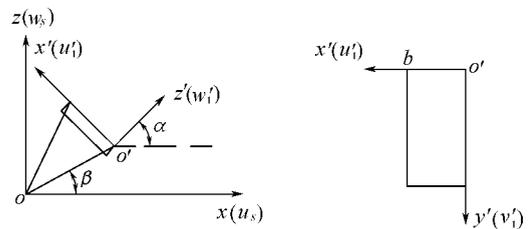


图 2 局部坐标系
Fig.2 Local coordinate system

2 隧道施工土体变形计算

2.1 工程概况

某地铁区间隧道处于灰色淤泥质粘土层中,隧道轴线距地表深度变化较大,本次取有代表性的距地面 11 m 的一段来进行分析.盾体直径 6.34 m,长度 6.24 m.隧道外径为 6.2 m,内径为 5.5 m,由预制混凝土衬砌环构筑而成.每块衬砌长 1 m,由 6 个环形混凝土片组成,环片之间沿环向和纵向由 16 个钢螺栓连接而成,环缝及纵缝防水采用弹性密封衬垫.

2.2 几何及施工参数

$z = 0$ 处为隧道轴线深度处, $z = 11$ m 处为地表自由边界, $z = -34.5$ m 处为地层深部边界,约束全部自由度. $y = 0$ 处为掘进方向远处边界,约束全部自由度,相当于梁函数的固定端,盾构从 $y = 60$ m 处向 $y = 0$ 处掘进, $y = 60$ m 处为自由边界,相当于梁函数的自由端.考察面取在 $y = 30$ m 处. X 方向可取为 $-\infty$ 至 $+\infty$.设置在开挖面处的支护力取为 0.2 MPa,比开挖面前静止水土压力约大 20 kPa.

2.3 土层及隧道衬砌物理力学参数

计算中土介质采用理想弹塑性模型,衬砌采用线弹性模型.各土层的物理力学参数见表 1,衬砌计算参数见表 2.

表1 土层计算参数
Table 1 Soil parameters for calculation

土层名称	层厚/m	变形模量 E_0 /MPa	泊松比 ν	凝聚力 c /kPa	内摩擦角 φ ($^\circ$)
人工填土	1.0	3.52	0.25	18.2	18.0
褐黄色粘土	1.5	3.37	0.27	17.7	17.0
灰色砂质粉土	3.5	6.87	0.25	6.3	20.5
灰色淤泥质粉质粘土	2.5	1.38	0.25	13.2	9.0
灰色淤泥质粘土	7.5	1.28	0.25	12.6	7.3
灰色粘土	4.5	3.29	0.25	14.7	10.0
灰色粉质粘土	2.0	3.33	0.25	15.3	9.6
暗绿色粘土	3.0	6.31	0.22	25.0	19.0
草黄色粉质粘土	1.0	5.78	0.25	17.1	20.0
草黄色砂质粉土	7.0	9.25	0.21	2.5	24.1
草黄色粉砂	12.0	12.38	0.2	2.0	24.5

2.4 地表沉降计算值与实测值对比

由图3和4可以看出,横向沉降槽计算曲线与实测曲线的趋势基本吻合.纵向沉降曲线在距刀盘30m处计算沉降为0,这是假定边界条件为固定边界的结果;在开挖面处实测值比计算值大,盾尾后计算值比实测值大,两条曲线变化趋势基本吻合,能反映土压平衡盾构掘进引起的地表横向沉降槽与纵向沉降曲线的基本规律.但因没有考虑超挖和跟踪注浆,在数值上计算沉降与实测沉降有一定的差异.对盾构和衬砌均进行了模拟,而且将三维问题化为一维问题,更为简便合理.所以本文的方法可用来预测土压平衡盾构施工引起的地表变形,与已有的研究成果相比有较大的改进.

盾构推进的过程就是对土体扰动的过程,施工前原本处于平衡应力状态的土体,盾构开挖时平衡状态就被破坏,土被扰动使应力状态发生了改变,从而引起扰动土的变形,初始应力状态的改变是地层变形的内在原因之一.所以研究盾构推进引起土中初始应力状态的改变就可从中分析出土体扰动的范围和程度.图5中的 S 表示离开开挖面的距离处.

表2 衬砌计算参数

Table 2 Calculation parameters for lining

厚度 T /mm	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν
350	3×10^4	0.17

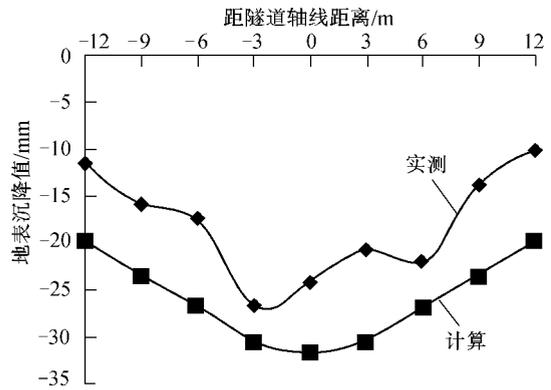


图3 横向沉降槽计算与实测值对比

Fig.3 Comparison of calculated and measured transversal settlements

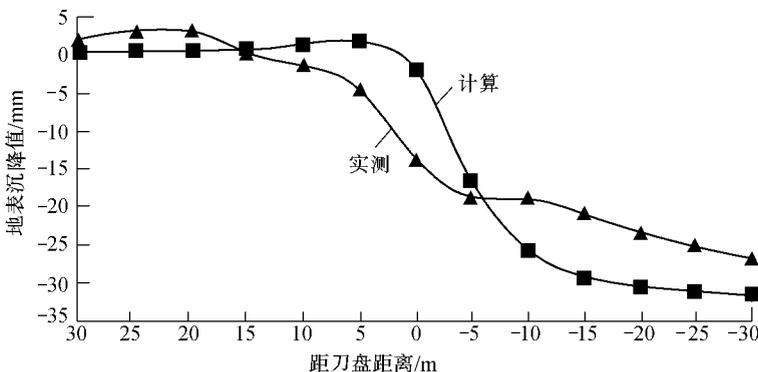


图4 纵向沉降实测与计算曲线对比

Fig.4 Comparison of calculated and measured axial settlements

从图5中可以看出,在开挖面前方不同距离处,盾构推进产生的附加应力的值和扩散程度不同,但最大值均出现在隧道轴线处.实测资料也表明在开挖面处,隧道轴线位置的纵向水平移动值最大^[4].远离开挖面处,应力值较小,但影响范围较大,在 $S > 3m$ (约 $0.5D$) 时,附加应力范围在隧道轴线上左右各 $1.5D$.距

离近处应力值大,衰减快,影响范围小,附加应力基本上处于盾构直径范围内,即上下左右各 $0.5D$ 。附加应力 σ_x 、 σ_z 也有类似的规律。

3 结 论

(a)将一个方向解析推广到横向和纵向的解析,在竖向进行了离散的半解析方法,把隧道施工引起地面下沉的三维问题化成一维离散问题求解;(b)选取了横向和纵向的解析函数,导出了半解析解函数及相关的计算式;(c)对隧道施工过程中荷载的计算进行了处理;(d)结合一工程实例,进行了半解析分析计算,计算结果能合理反映工程实际。

此外,由于隧道施工过程的复杂性,要更好地模拟施工过程还有很多问题需要深入研究。

参考文献:

- [1] 曹志远,张佑启.半解析数值方法[M].北京:国防工业出版社,1992.1~42,115~125,156~229.
- [2] 易宏伟.盾构施工对土体扰动及地层移动影响的研究[D].上海:同济大学,1999.
- [3] 方从启.基于半解析元法研究顶管施工引起的地层运动[D].上海:同济大学,1998.
- [4] 曾晓清.地铁工程双线隧道平行推进的相互作用及施工力学的研究[D].上海:同济大学,1995.

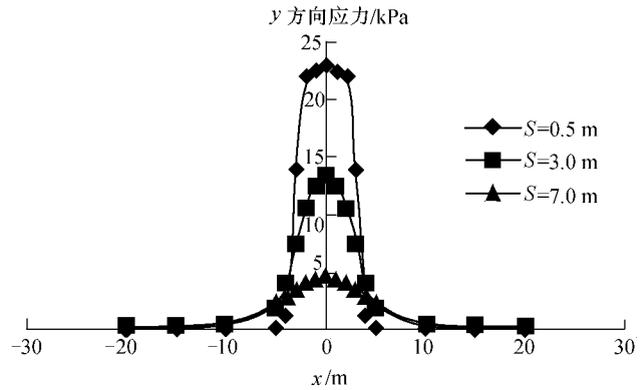


图5 y 方向应力沿 x 方向分布曲线($z=0$)

Fig.5 Distribution of stress in y-direction along x-axis

Semi-analytical method for calculation of soil deformation caused by tunnel construction

SHI Jian-yong¹, ZHANG Jing², SHE Cai-gao², FAN You-wei³

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Metro Corporation, Nanjing 210024, China;

3. Nanjing Research, Exploration and Survey Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: A semi-analytical method for calculation of soil deformation caused by tunnel construction is developed in such a way that discretization is employed in the vertical direction, and analytical functions are employed in the axial and lateral directions. The beam vibration function is adopted as the axial analytical function; the negative exponential function similar to the Gauss curve is adopted as the lateral analytical function. Then, semi-analytical functions for soil and lining are established. An analysis of a project shows that the semi-analytical method can be used to analyze the ground settlement and rise and their distribution in the longitudinal and lateral directions caused by tunnel construction, and that the calculation is simple and convenient, and the method is feasible.

Key words: semi-analytical method; tunnel; soil deformation