

## 非均匀收敛条件下浅埋隧道围岩的弹性解\*

张威振

(湖南中设计院有限公司, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 隧道稳定性分析主要考虑隧道开挖中围岩的应力及位移, 对于浅埋隧道, 由于上下边界的不对称, 稳定性分析存在较大困难。目前众多隧道稳定性计算方法都基于隧道深埋假设, 针对一般浅埋隧道的分析多停留在经验总结及数值模拟等方法上或未深入分析浅埋隧道失稳破坏机制。文中开展浅埋隧道围岩弹性研究, 基于隧道在无限空间下的弹性解, 运用镜像法, 考虑隧道周边非均匀收敛情况, 得到非均匀收敛条件下浅埋隧道的弹性解。

**关键词:** 隧道; 浅埋隧道; 围岩; 弹性解; 非均匀收敛; 镜像法

**中图分类号:** U451

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2019)01-0143-04

盾构隧道开挖产生的岩土体变形主要取决于所在地区工程地质条件及水文地质条件、开挖参数、施工条件。目前隧道稳定性计算方法大都基于隧道深埋假设, 针对一般浅埋隧道的分析多停留在经验总结及数值模拟上或未深入分析浅埋隧道失稳破坏机制。Peck R. B.等提出了计算隧道开挖引起地表沉降的经验公式, 运用于满足特定条件的隧道时该方法可较准确地评估地表沉降, 但该方法未考虑不同工程地质、地表及施工条件的隧道开挖, 且只考虑了沉降分布而没有考虑应力变化。Lee K. M.等提出了基于理论计算的地表变形预测方法, 首次提出了隧道开挖间隙参数的概念, 该参数同时考虑了隧道变形过程中土体弹塑性阶段内强度和变形的影响、开挖预留间隙的影响及施工条件的影响。Mindlin R. D.提出的用双极坐标获得精确解的方法可获得精确解, 但解答很复杂且无法得到隧道变形解。Wood A. M. M.研究了隧道在无限弹性介质中的椭圆形畸变。Sagaseta 提出了不可压缩土体的地层损失计算方法。该文根据盾构隧道开挖机制, 利用间隙参数对隧道变形进行分析, 研究非均匀收敛条件下浅埋隧道围岩的弹性解。

## 1 基本理论

### 1.1 基本假设

基本假设如下: 1) 隧道围岩为满足胡克定律的均质各向同性材料; 2) 围岩变形为小变形; 3) 地表水平, 不考虑围岩自重; 4) 岩土体不可压缩。

### 1.2 间隙参数的定义及计算

文献[5]基于三维弹塑性有限单元分析, 考虑开挖机械特征、施工条件、衬砌活动及衬砌几何特征的影响, 提出了隧道开挖间隙参数计算公式。现场数据表明, 地层损失的发生可概括为隧道开挖面上地层损失、盾壳上方地层损失、衬砌上方地层损失 3 个阶段。远期的地层损失由围岩蠕变、岩土体固结及水力效应产生。计算分析二维平面应变问题时, 地层损失可采用隧道开挖间隙参数来表述。

如图1所示, 隧道开挖间隙参数可度量不同类

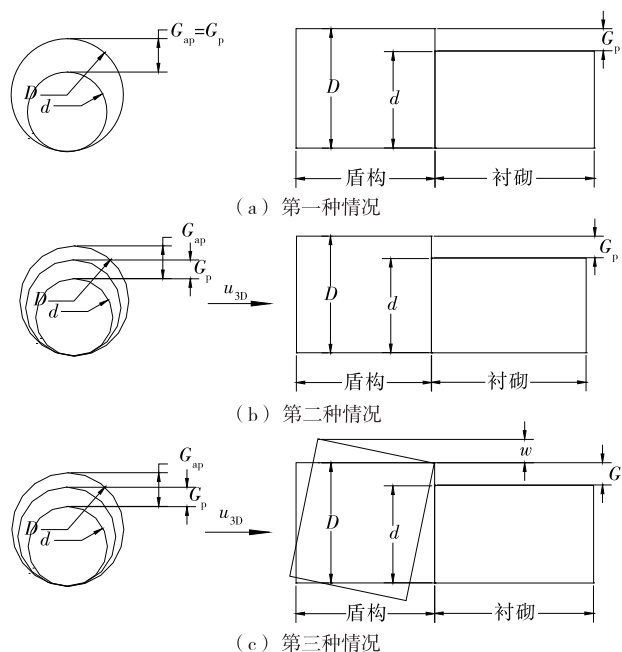


图1 各种情况产生的施工间隙

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1201204)

型的地层损失量。1) 在理想化的施工条件(盾构机紧贴隧道开挖面、使用压缩气体减小变形及应力变化、隧道有序推进)下,隧道开挖间隙参数等于物理间隙  $G_p$ 。 $G_p$  定义为衬砌顶部到开挖面顶部之间的竖向距离[见图 1(a)]。2) 如果采用不保守的施工条件,隧道前方产生的三维效益更显著,由此产生的间隙用  $u_{3D}$  表示[见图 1(b)]。3) 施工条件如施工控制及施工工序不良易造成超挖,由此产生的施工间隙用  $w$  表示[见图 1(c)]。

综合考虑以上 3 种情况产生的施工间隙,在平面应变模型计算中采用下式计算隧道开挖施工间隙参数:

$$g = G_p + u_{3D} + w$$

式中: $g$  为间隙参数; $G_p$  为物理间隙,表示盾构外表面与衬砌之间的距离,由隧道附属物厚度  $\Delta$  及预留变形量  $\kappa$  计算, $G_p = 2\Delta + \kappa$ ;  $u_{3D}$  为考虑隧道三维效应的变形量; $w$  为施工工艺引起的间隙。

根据文献[6],隧道开挖施工间隙参数计算方法为:当隧道施工不进行注浆填充时,物理间隙  $G_p = 2\Delta + \kappa$ ;现代隧道施工一般采用注浆填充技术,根据试验结果,注浆情况下物理间隙为原来的 7%~10%,即  $G_p = (7\% \sim 10\%)(2\Delta + \kappa)$ 。由于浆液收缩发生在较短时间内,由浆体—土体混合收缩产生间隙的过程可视为不排水过程。

盾构向前推进时会对掌子面前方土体产生推力,从而引起应力变化。盾构在开挖面上的压力小于初始应力时,开挖面上岩土体将朝开挖面移动。由于开挖面应力释放,沿开挖面运动的部分岩土体被挖走而产生的间隙为  $u_{3D}$ ,可用下式定义:

$$u_{3D} = \frac{k}{2} \delta_x$$

式中: $k$  为土体切割阻力系数; $\delta_x$  为土体轴向挤出位移。

Lee K. M. 等根据经验及弹塑性分析,建议对于从硬到软的土体, $k = 0.7 \sim 0.9$ ;对于软土, $k = 1$ 。 $\delta_x$  由下式确定:

$$\delta_x = \frac{\Omega R p_0}{E}$$

式中: $\Omega$  为无量纲位移因子; $R$  为隧道半径; $p_0$  为开挖面附加应力, $p_0 = (K_0' P_v' + P_w) - p_{in}$ ;  $K_0'$  为有效静止土压力系数; $P_v'$  为隧道轴线处有效垂直压力; $P_w$  为孔隙水压力; $p_{in}$  为隧道支护力; $E$  为弹性模量。

隧道拱顶弹塑性平面应变下的位移  $U_i$  可通过

下式计算:

$$\frac{U_i}{R} = 1 - \left\{ \frac{1}{1 + \frac{2(1+\mu)c}{E} \left[ \exp\left(\frac{N-1}{2}\right) \right]^2} \right\}^{0.5}$$

式中: $\mu$  为泊松比; $c$  为土体不排水抗剪强度; $N$  为稳定数。

Lee K. M. 指出,不考虑隧道超挖,并严格控制盾构机操作的情况下,由施工工艺造成的间隙  $w$  取  $0.6G_p$  及  $1/3U_i$  中的较小值。

### 1.3 隧道变形的计算

根据文献[7]中隧道间隙参数定义,经 Lee K. M. 公式计算后,可采用  $g$  描述地层损失并进行地层变形计算。但地层损失参数影响变形模式, Lee K. M. 提出的隧道开挖间隙参数为不排水条件下不考虑时间效应的物理间隙,并不满足实际隧道变形情况。因此,文献[6]在 Lee K. M. 隧道间隙参数的基础上提出一种新的表述地层损失的参数,定义为等价不排水地层损失参数  $\epsilon_0$ ,由下式计算:

$$\epsilon_0 = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \times 100\%$$

式中: $R$  为隧道开挖半径; $g$  为隧道开挖间隙参数。

实际工程中,隧道周边变形往往不是均匀径向收敛,不同部位的收敛值也不同,推测原因为:1) 隧道掘进过程中盾壳微微抬升以防盾构下潜产生的影响;2) 隧道衬砌施工时移除盾壳的影响;3) 轴向力作用产生三维效应的影响。文献[6]提出采用以下公式计算隧道非均匀收敛条件下的位移:

$$\epsilon_1 = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(h+R)^2} \right] + \frac{0.69z^2}{h^2} \right\} \times 100\%$$

式中: $x, z$  为计算点坐标; $h$  为隧道埋深。

文献[9]引入椭圆化变形参数  $\delta$  来考虑隧道椭圆化变形问题,计算公式为:

$$\delta = 4(1-\mu)(1-2\mu)\epsilon_0$$

### 1.4 圆形隧道在无限空间下的弹性解

对于无限空间内圆孔开挖径向收缩产生的位移,根据土体不可压缩的假定,无限空间隧道围岩附近的位移场为:

$$u_x = -\epsilon R^2 \frac{x}{r^2}, u_z = -\epsilon R^2 \frac{z}{r^2}$$

式中: $\epsilon$  为隧道半径收敛值与初始半径的比值; $R$  为隧道初始半径; $r$  为计算点到缩孔的距离。

隧道收敛过程中并非均匀,事实证明在隧道长期变形过程中常伴随椭圆形畸变,根据弹性理论可

得到椭圆形畸变对计算点位移的影响。考虑隧道长期变形产生的椭圆形畸变,无限空间内的位移为:

$$u_x = -\epsilon R^2 \frac{x}{r^2} + \delta R^2 \frac{x(x^2 - kz^2)}{r^4}$$

$$u_z = -\epsilon R^2 \frac{z}{r^2} + \delta R^2 \frac{z(kx^2 - z^2)}{r^4}$$

## 2 半无限空间隧道围岩弹性解

### 2.1 半无限空间圆形隧道问题定义

半无限空间岩土体中开挖半径为  $R$  的隧道,圆心为  $o_1$ ,圆心到地面的距离为  $h$ ,以地面为  $x$  轴,穿过  $o_1$  确定  $z$  轴,建立图 2 所示直角坐标系,计算点  $q(x, z)$  到圆心  $o_1$  的距离为  $r_1$ 。

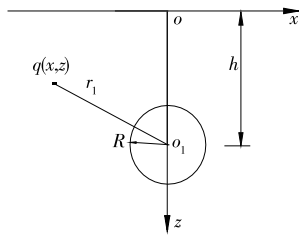


图 2 半无限岩土体下隧道计算模型

### 2.2 求解思路

(1) 采用 Sagaseta 提出的汇—汇法,设置镜像缩孔,假设无地表边界条件,即在无限空间下求解在实际缩孔和镜像汇共同作用下隧道的收缩对周围岩体的影响。

(2) 考虑隧道变形过程中椭圆畸变的影响对基础解进行修正。

(3) 由于此时地表边界上还存在剪应力,采用 Boussinesq 解对其进行修正。

(4) 将上述解答进行叠加得到隧道在半无限空间下的弹性解。

### 2.3 无限岩体中隧道及其镜像汇引起的位移解

如图 3 所示,以地面为对称面,在对应位置设置

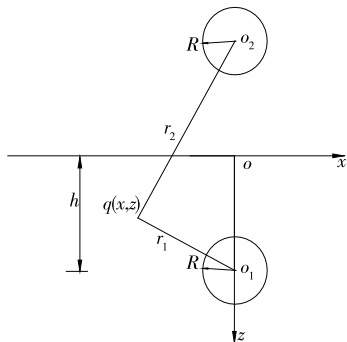


图 3 隧道和其镜像汇对围岩的影响

镜像缩孔,计算点  $q$  的坐标为  $(x, z)$ ,其到镜像汇圆心  $o_2$  的距离为  $r_2$ 。根据几何关系,得:

$$r_1 = \sqrt{x^2 + (z-h)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{x^2 + (z+h)^2}$$

根据上文的基本理论,如果忽略边界的作用,只考虑隧道和其镜像汇的共同作用,则计算点  $q$  的  $x$ 、 $z$  向位移分别为:

$$u_{x1} = -\epsilon R^2 \left( \frac{x}{r_1^2} + \frac{x}{r_2^2} \right), u_{z1} = -\epsilon R^2 \left( \frac{z}{r_1^2} + \frac{z}{r_2^2} \right)$$

### 2.4 椭圆形畸变引起的岩土体位移

椭圆形畸变引起的计算点的位移按下式计算:

$$u_{x2} = \delta R^2 \frac{x[x^2 - k(z-h)^2]}{r_1^4} + \delta R^2 \frac{x[x^2 - k(z+h)^2]}{r_2^4}$$

$$u_{z2} = \delta R^2 \frac{(z-h)[kx^2 - (z-h)^2]}{r_1^4} + \delta R^2 \frac{(z+h)[kx^2 - (z+h)^2]}{r_2^4}$$

式中: $\epsilon$ 、 $\delta$  为隧道开挖轮廓相关位移参数, $\epsilon$  表示径向位移引起的地层损失, $\delta$  表示椭圆形畸变引起的地层损失; $k = \mu/(1-\mu)$ 。

### 2.5 地表边界的应力修正

由于半无限空间地表不存在应力,引入 Boussinesq 解消除无限空间地表应力。隧道与隧道镜像关于地表自由边界对称,无限空间内基础解和椭圆形畸变修正解答在地表边界产生竖向应力,该应力不满足地表自由边界条件,需通过施加反向荷载进行修正。由隧道和隧道镜像得到的法向应力  $\sigma_z$  是相等的, $z=0$  时,相加得:

$$\sigma_z|_{z=0} = q(x) = -4G\epsilon R^2 \frac{x^2 - h^2}{(x^2 + h^2)^2} - \frac{8\mu m \delta R^2 h^2 (3x^2 - h^2)}{m+1 (x^2 + h^2)^3}$$

式中: $G$  为弹性材料的剪切模量, $G = E/[2(1+\mu)]$ ;  $m = 1/(1-2\mu)$ 。

为使地表边界满足自由位移边界条件,对边界上的正应力进行修正(见图 4)。可施加与边界上正应力等大、反向的力进行修正,使用 Boussinesq 解,将问题转化为 Boussinesq 问题在半平面  $z > 0$  上的解。边界条件为:

$$z=0: \sigma_z = -q(x), \tau_{zx} = 0$$

这类问题可通过傅里叶变换来解答,傅里叶变

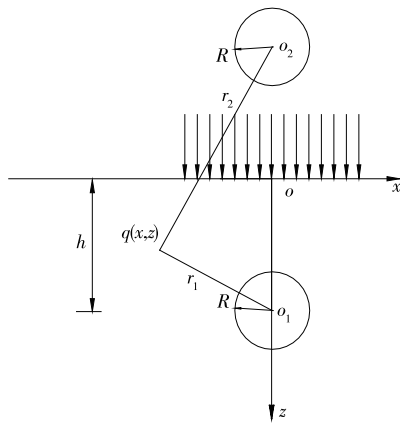


图4 对地表边界的正应力修正示意图

换后的位移为:

$$u_{x3} = \int_0^\infty A(1 - m\alpha z) \exp(-\alpha z) \sin(\alpha x) d\alpha \quad (1)$$

$$u_{z3} = - \int_0^\infty A(1 + m + m\alpha z) \exp(-\alpha z) \cdot \cos(\alpha x) d\alpha \quad (2)$$

式(1)、式(2)中  $A$  由积分定义为:

$$A = - \frac{1}{m\pi G} \frac{1}{\alpha} \int_0^\infty q(x) \cos(\alpha x) dx \quad (3)$$

将  $z=0$  时的边界条件函数  $q(x)$  代入式(3),得到下式:

$$A = - \frac{2\epsilon R^2}{m} \exp(-ah) - \frac{2\delta R^2}{m+1} ah \exp(-ah)$$

在傅里叶变换后,由贝特曼积分及相关理论得:

$$u_{x3} = - \frac{2\epsilon R^2 x}{m} \left[ \frac{1}{r_2^2} - \frac{2mz(z+h)}{r_2^4} \right] - \frac{4\delta R^2 x h}{m+1} \left\{ \frac{z+h}{r_2^4} + \frac{mz[x^2 - 3(z+h)^2]}{r_2^6} \right\}$$

$$u_{z3} = - \frac{2\epsilon R^2}{m} \left\{ \frac{(m+1)(z+h)}{r_2^2} - \frac{mz[x^2 - (z+h)^2]}{r_2^4} \right\} - 2\delta R^2 h \left\{ \frac{x^2 - (z+h)^2}{r_2^4} + \frac{m}{m+1} \frac{2z(z+h)[3x^2 - (z+h)^2]}{r_2^6} \right\}$$

## 2.6 浅埋隧道的弹性解答

合并以上三部分解答,得到最终弹性位移为:

$$u_x = u_{x1} + u_{x2} + u_{x3}, u_z = u_{z1} + u_{z2} + u_{z3}$$

应变与位移之间满足如下关系:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \gamma_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}$$

对于平面应变问题,其物理方程可表示为:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_z), \sigma_z = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_z + \mu\epsilon_x)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xz}$$

## 3 结语

该文对隧道变形机制进行分析,利用间隙参数计算隧道的变形,给出的解是对 Sagaseta 解答的一种扩展。该解答针对的不仅是不可压缩的地层损失情况(泊松比等于 0.5),还针对泊松比为任意值的地层损失情况;不但包含了均匀收敛下的隧道变形模式,还包含了隧道椭圆形畸变的影响。

## 参考文献:

- [1] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C], 1969.
- [2] Lee K M, Rowe R K, Lo K Y. Subsidence owing to tunnelling. I: estimating the gap parameter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6).
- [3] Mindlin R D. Stress distribution around a tunnel [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1940, 195.
- [4] Wood A M M. The circular tunnel in elastic ground [J]. Géotechnique, 1975, 25(1).
- [5] Lee K M, Rowe R K. An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 28(1).
- [6] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9).
- [7] Rowe R K, Kack G J. A theoretical examination of the settlements induced by tunnelling: four case histories [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(2).
- [8] 童磊, 谢康和, 程永锋, 等. 考虑椭圆化地层变形影响的浅埋隧道弹性解 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2).
- [9] Verruijt A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(21).
- [10] Park K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4).
- [11] Park K H. Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays [J]. Tunnelling and Under-

(下转第 151 页)

表 6 光面爆破参数

项目	参数值
周边眼间距 $E/\text{cm}$	40~55
周边眼抵抗线 $W/\text{cm}$	50~60
相对距离 $E/W$	0.8~0.85
装药集中度 $/( \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} )$	0.25~0.35

24 h 可完成 1.5~2.0 个工作循环,平均掘进进尺为 4.0 m 左右;在Ⅲ、Ⅳ级围岩地段每 24 h 可完成 2.0~2.5 个循环,每循环掘进进尺 5 m 左右。与加固前平均进尺 1.2 m/d 相比,隧道进口软弱围岩段掘进速度显著提高,节约工期将近 2/3。按该方法进行隧道开挖,围岩只发生少量弹性变形,无塑性流动变形、破坏和坍塌,偶有小掉块,拱顶下沉量在规范及设计要求范围内,自稳性良好。爆破后Ⅴ、Ⅵ级围岩地层加固段开挖面周边钻孔痕迹保存率达 75%,Ⅲ、Ⅳ级围岩地段周边钻孔痕迹保存率达 85%。

#### 4 结语

富水圆砾石软弱围岩浅埋微断面隧道快速开挖综合技术的关键为:1) 通过改进的长螺旋钻机按照高压旋喷原理,通过旋喷+搅拌方式在原始圆砾石地层中形成咬合排桩幕墙结构体系,解决富水圆砾石地层条件下的止水问题,并满足防护体系受力要求,达到快速进洞条件。2) 应用竖向旋喷搅拌桩+外侧袖阀管注浆技术使原本松散结构的圆砾石地层形成较密实的钙质胶结致密整体或块状结构,改善隧道围岩的稳定性。加固后的Ⅴ、Ⅵ级围岩段按照Ⅲ级围岩进行光面水压爆破设计,实现“软隧硬打”,

解决进度缓慢的难题。3) 采用斜眼掏槽水压爆破技术解决炮眼深度受微断面限制及爆破夹制作用大、效果差、效率低的难题,提升钻爆效率,同时解决隧道内扬尘问题,实现微断面隧道的快速、环保施工。4) 采用 150 型电动液压扒渣机+小型农用自卸车组合出渣,并在微断面隧道中改造并增设避车洞形成会车道,解决洞内交通问题,减少循环作业时间,大幅度提高出渣效率。

#### 参考文献:

- [1] 徐伟.水压爆破在铺子山隧道施工中的应用[J].公路与汽运,2014(3).
- [2] 李沛盈.软弱围岩浅埋隧道施工工法研究[J].东北水利水电,2016(1).
- [3] 陈发本,杨卓,黄德镛.考虑渗流场作用下的富水隧道稳定性影响因素分析[J].交通科学与工程,2013,29(3).
- [4] 张拥法.高寒冬季富水圆砾石地层长螺旋旋喷搅拌桩止水幕墙施工技术[J].市政技术,2018(2).
- [5] 杨兆仁.袖阀管注浆加固地层原理浅析[J].科技信息,2011(8).
- [6] 李得,杨溢,李睿,等.多级复式楔形掏槽在大断面隧洞掘进中的应用研究[J].爆破,2017,34(1).
- [7] 胡海英.小断面隧道施工关键技术[J].山西建筑,2009,35(17).
- [8] 李拉普.水压光面爆破在隧道掘进中的应用[J].铁道建筑技术,2009(5).
- [9] 张春涛.浅埋段偏压软弱围岩双连拱隧道施工动态过程研究[J].公路与汽运,2018(5).

收稿日期:2018-06-05

(上接第 77 页)

研究[D].西安:长安大学,2014.

- [9] 仰建岗,刘燕,林天发.玄武岩纤维沥青混凝土路用性能研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,40(1).

(上接第 146 页)

ground Space Technology,2005,20(3).

- [12] 林存刚,夏唐代,梁荣柱,等.盾构掘进地面沉降虚拟镜像算法[J].岩土工程学报,2014,36(8).
- [13] 施有志.双孔平行地铁隧道开挖的复变函数解析解与数值分析[D].泉州:华侨大学,2013.

- [10] 于斌.纤维沥青胶浆流变特性及纤维沥青混合料路用性能研究[D].西安:长安大学,2010.

收稿日期:2018-05-10

- [14] 韩凯航,张成平,王梦恕.浅埋隧道围岩应力及位移的显式解析解[J].岩土工程学报,2012,36(12).

- [15] 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).

收稿日期:2018-08-15