

DOI: 10.11779/CJGE201508002

流变岩体中既有隧道与新建平行隧道 相互影响的理论解

王华宁^{1, 2}, 曾广尚², 蒋明镜^{1, 3}

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092;

3. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 在流变岩体中进行隧道施工时, 既有隧道与新建隧道的相互作用将使围岩应力、位移分布与单隧道问题有明显不同, 且与时间相关。针对黏弹性岩体中深埋双圆形隧道考虑施工顺序问题, 用复变函数方法、Laplace 变换、黏弹性叠加关系导出两隧道周边开挖增量位移和应力场的求解方法和理论解答, 并与有限元解进行了比对。根据解答分析了既有和新建隧道孔边增量位移与全应力分布特点; 隧道周边增量位移随时间的变化; 周边位移随隧道间距的变化规律。可用于黏弹性岩体中双圆形隧道顺序开挖的施工分析。相比数值方法, 理论解可更方便地进行参数分析和初步设计。

关键词: 黏弹性; 双隧道; 解析解

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)08-1365-10

作者简介: 王华宁(1975-), 女, 教授, 主要从事岩土工程中数值与解析方法研究。E-mail: wanghn@tongji.edu.cn。

Analytical solutions for interaction between existing and new tunnels parallel excavated in rheological rock mass

WANG Hua-ning^{1, 2}, ZENG Guang-shang², JIANG Ming-jing^{1, 3}

(1. State Key Lab. of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Aerospace

Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, College of

Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Owing to the interaction between the existing and new excavation tunnels in rheological rock, the distributions of stresses and displacements around twin tunnels are time-dependent and significantly different from those of single tunnel. For deeply buried twin circular tunnels sequentially excavated in viscoelastic rock, the complex variable function method, Laplace transform and superposition principle for viscoelastic cases are used in the derivation of excavation-induced displacements and stresses around tunnels. The solution is validated by FEM method through an example. Good agreement is demonstrated between the analytical and numerical solutions. Based on the analytical solutions, the analysis of induced displacements and total stresses distribution around the existing and new excavation tunnels, the variation of induced displacements versus time and the distance between tunnels are carried out. The solutions presented herein, which can be applied more conveniently in preliminary design and parametric investigation than numerical method, can be used to analyze the sequential excavation of twin tunnels in viscoelastic rock mass.

Key words: viscoelasticity; twin tunnel; analytical solution

0 引言

公路铁路交通、采矿和地铁工程中常遇到流变岩体中双线近距离隧道施工。流变时效和隧道间相互作用使洞周的应力、位移分布与单孔隧道有明显不同, 且与时间相关。当隧道中的一条已经施工完毕, 在其邻近开挖新隧道时, 新建隧道施工对岩体的扰动引起围岩应力重分布, 对既有隧道将造成不利影响。另外,

既有隧道的存在也将影响新挖隧道周边的应力与位移场。

双隧道顺序施工耦合岩体流变特性, 使新建隧道

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB046901); 同济大学土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE14-B-11); 国家杰出青年基金项目(51025932)

收稿日期: 2014-08-28

与既有隧道的相互影响更加复杂。因此,预测并控制施工位移,特别是新建隧道的施工对既有隧道的影响,保证施工安全,是工程中面临重要问题。

从力学上分析,新建隧道与既有平行隧道的相互作用是双孔问题,已有文献中常采用数值方法^[1-5]、试验方法^[6]和解析解^[7-11]来研究其相互作用。其中文献[5]采用三维有限差分法分析了新建盾构隧道施工对近接平行隧道的影响。与数值与试验方法相比,理论解虽然对模型进行了一定简化,但可以更方便地揭示相关参数对结构应力、变形的影响,工程中可据此进行初步设计。

在双孔问题理论分析方面,最先 Ling^[7]将一个双调和函数代入给定的应力系统,得到尺寸相同双圆孔弹性应力的封闭解析解。Zhang 等^[8]利用 Schwarz 交替法,给出平面椭圆形状双孔深埋洞室围岩弹性应力的近似解析解。晏莉等^[9]利用类似的方法得到浅埋双孔平行隧道开挖围岩应力和位移的解析解。苏锋等^[10]利用解析延拓法及 Schwarz 交替法进行无限弹性岩体中任意形状双隧洞应力和位移分布的求解,并给出双圆隧洞问题的显式表达。陈福全等^[11]利用柯西积分法结合 Schwarz 交替法求解出弹性半空间内椭圆形溶洞及圆形隧洞周边任意一点处的应力值和位移解析解的

显式表达式,通过解答可评估受邻近岩洞影响下的隧道开挖产生的岩层位移与应力。Zhang 等^[12]采用半解析方法分析了新开挖隧道对既有隧道的影响,将既有隧道简化为弹性梁,用黏性模型模拟岩土流变特性,用两阶段法得到既有隧道的长期响应。

以上导出的理论解均针对弹性问题,多数仅对应力进行分析,且没有计入施工过程。当考虑岩体流变特性时,因应力、位移与加载历史有关,必须考虑隧洞施工先后顺序,需要建立相应求解方法并寻找解答。

本文将采用黏弹性模型模拟围岩的流变特性,运用复变函数方法、Laplace 变换和黏弹性问题叠加原理进行圆形断面双线隧道开挖引起的增量位移与应力理论解的推导,并进行新建隧道与既有隧道相互影响的分析。

1 分析模型

在理论解推导中,为避免在数学上求解的困难,必须对实际情况进行一定简化,本文假定:①隧道深埋,其所处水平与垂直地应力接近(均为 p_0),并忽略重力梯度效应^[10-11];②围岩为均匀、各向同性黏弹性材料;③未考虑纵向施工过程,即认为掌子面推进

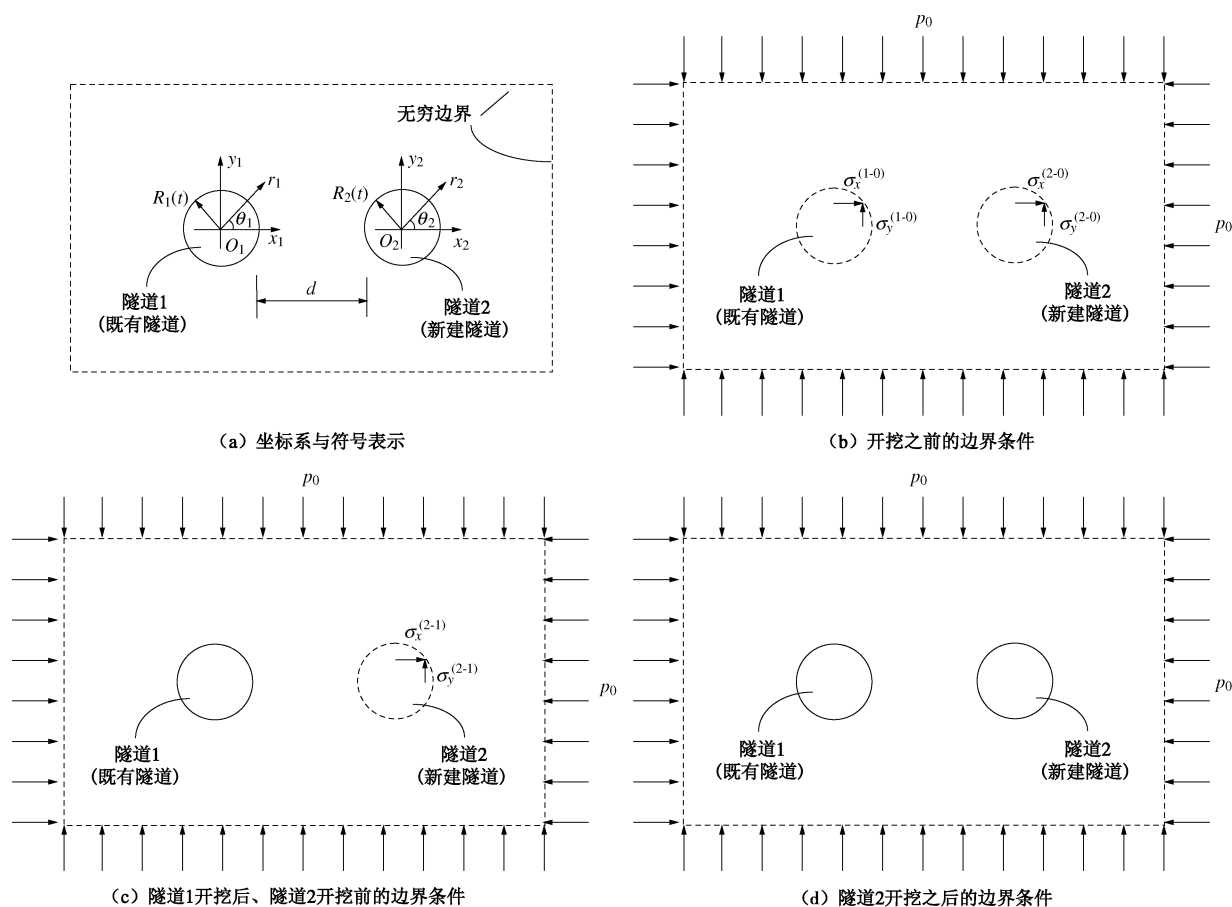


图1 双隧道开挖分析模型

Fig. 1 Mechanical models in twin tunnel analysis

足够快, 其三维影响可以忽略^[9-11]; ④围岩足够好, 施工中没有施加衬砌, 或者衬砌只作为强度储备, 结构上的作用不明显。由于围岩与衬砌的耦合作用非常复杂, 对双圆隧洞弹性问题, 尚无真正考虑衬砌、围压耦合作用及施工过程的理论解答, 因此本文仅进行无衬砌问题的求解; ⑤既有(隧道 1)与新建隧道(隧道 2)均为圆形, 半径分别为 R_1 和 R_2 。假设地应力从 $t' = 0$ 施加, 在 $t' = t'_1$ 时瞬时开挖隧道 1, $t' = t'_2$ 时瞬时开挖隧道 2。

依据以上分析假定, 可按平面应变问题进行力学分析(图 1), 分别在隧道 1 和 2 处建立两套直角坐标系 $x_1O_1y_1$ 和 $x_2O_2y_2$, 及相应的极坐标 r_1, θ_1 和 r_2, θ_2 。

2 黏弹性岩体中平行双孔隧道开挖扰动应力与位移理论解

2.1 黏弹性应力与位移的复位势表达^[13]

复变函数理论常用来进行双隧洞弹性问题的求解^[8, 14]。

由文献[8]中给出的双孔问题应力解答可见, 无论在地应力或孔边力作用下的围岩应力均与弹性参数无关。若 $\varphi^{(k)}$ 和 $\psi^{(k)}$ 为第 k 组外载对应的两个复位势, 文献[13]根据 Laplace 变换给出黏弹性问题和弹性问题通解的关系, 并进一步给出当应力与弹性参数无关情况下应力边值问题的黏弹位移($u_x^{(k)v}$ 和 $u_y^{(k)v}$)、应力($\sigma_x^{(k)v}$, $\sigma_y^{(k)v}$, $\sigma_{xy}^{(k)v}$)与复位势的关系:

$$u_x^{(k)v}(z, t') + iu_y^{(k)v}(z, t') = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{2s\mathcal{L}[G(t')]} \cdot \mathcal{L} \left[\kappa_L(s)\varphi^{(k)}(z, t') - z \frac{\partial \overline{\varphi^{(k)}}(z, t')}{\partial z} - \overline{\psi^{(k)}}(z, t') \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{(k)v}(z, t') &= \operatorname{Re} \left\langle 2 \left[\frac{\partial \varphi^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right] \mp \left[\frac{\partial^2 \varphi^{(k)}(z, t')}{\partial z^2} + \frac{\partial \psi^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right] \right\rangle, \\ \sigma_y^{(k)v}(z, t') &= \operatorname{Im} \left\langle \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}(z, t')}{\partial z^2} + \frac{\partial \psi^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right\rangle, \\ \sigma_{xy}^{(k)v}(z, t') &= \operatorname{Im} \left\langle \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}(z, t')}{\partial z^2} + \frac{\partial \psi^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right\rangle. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\mathcal{L}[\cdot]$ (或 $\widehat{[\cdot]}$) 和 $\mathcal{L}^{-1}[\cdot]$ 分别表示对 $[\cdot]$ 的 Laplace 变换和逆变换; $\overline{(\cdot)}$ 表示共轭; $\kappa_L(s) = \frac{3\widehat{K}(s) + 7\widehat{G}(s)}{3\widehat{K}(s) + \widehat{G}(s)}$ 。

当仅考虑偏量具有黏弹效应, 而球量仍满足弹性关系时, Boltzmann 模型(图 2)的剪切和体积松弛模量为^[13]

$$\left. \begin{aligned} G(t') &= \frac{G_M^2}{G_M + G_K} e^{-\frac{G_M + G_K}{\eta_K} t'} + \frac{G_M G_K}{G_M + G_K}, \\ K(t') &= K_e, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, G_H , G_K 为弹性和黏弹性组分剪切模量, η_K 为黏性系数, K_e 为体积模量。

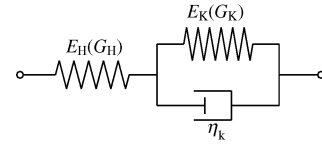


图 2 Boltzmann 黏弹性模型

Fig. 2 Boltzmann viscoelastic physical model

假设 l 组外载分别在 $t' = t'_{b1}, t'_{b2}, \dots, t'_{bl}$ 时刻开始作用于结构, 并在 $t' = t'_{m1}, t'_{m2}, \dots, t'_{ml}$ 时刻移除, 则与第 k 组外载对应的复位势 $\varphi^{(k)}(z, t')$ 和 $\psi^{(k)}(z, t')$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{(k)}(z, t') &= \begin{cases} 0 & (t' \notin [t'_{bk}, t'_{mk}]) \\ \varphi_1^{(k)}(z, t') & (t' \in [t'_{bk}, t'_{mk}]) \end{cases}, \\ \psi^{(k)}(z, t') &= \begin{cases} 0 & (t' \notin [t'_{bk}, t'_{mk}]) \\ \psi_1^{(k)}(z, t') & (t' \in [t'_{bk}, t'_{mk}]) \end{cases}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

代入式(1)得到 t' 时刻位移的积分形式:

$$u_x^{(k)v}(z, t') + iu_y^{(k)v}(z, t') = \frac{1}{2} \int_{t'_{bk}}^{t'_{mk}} I(t' - \tau) \varphi_1^{(k)}(z, \tau) d\tau - \frac{1}{2} \int_{t'_{bk}}^{t'_{mk}} H(t' - \tau) \left[z \frac{\partial \overline{\varphi_1^{(k)}}(z, \tau)}{\partial z} + \overline{\psi_1^{(k)}}(z, \tau) \right] d\tau, \quad (5)$$

其中, $T'_k = \min\{t'_{mk}, t'\}$,

$$\left. \begin{aligned} H(t) &= \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s\widehat{G}(s)} \right], \\ I(t) &= \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{\kappa_L(s)}{s\widehat{G}(s)} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当多组外载(l 组)在不同时刻施加时, 根据黏弹性问题叠加原理^[15], t' ($t' \geq t'_{bl}$) 时刻的总响应为之前所有荷载分别作用于结构而引发的在 t' 时刻响应的叠加, 总位移为

$$\begin{aligned} u_x^v(z, t') + iu_y^v(z, t') &= \sum_{k=1}^l u_x^{(k)v}(z, t') + i \sum_{k=1}^l u_y^{(k)v}(z, t') \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \int_{t'_{bk}}^{T'_k} I(t' - \tau) \varphi_1^{(k)}(z, \tau) d\tau - \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \int_{t'_{bk}}^{T'_k} H(t' - \tau) \left[z \frac{\partial \overline{\varphi_1^{(k)}}(z, \tau)}{\partial z} + \overline{\psi_1^{(k)}}(z, \tau) \right] d\tau. \end{aligned} \quad (7)$$

总应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^v(z, t') &= \operatorname{Re} \left\langle \sum_{k=1}^l \left\{ 2 \left[\frac{\partial \varphi_1^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right] \mp \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left[\frac{-\partial^2 \varphi_1^{(k)}(z, t')}{\partial z^2} + \frac{\partial \psi_1^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right] \right\} \right\rangle, \\ \sigma_{xy}^v(z, t') &= \operatorname{Im} \left\langle \sum_{k=1}^l \left[\frac{-\partial^2 \varphi_1^{(k)}(z, t')}{\partial z^2} + \frac{\partial \psi_1^{(k)}(z, t')}{\partial z} \right] \right\rangle. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2.2 双孔隧道开挖扰动应力与位移求解

因新建隧道(隧道 2)开挖前为单隧洞问题, 本文不再求解。本节将根据 2.1 节给出的位移和应力求解式(式(7)、(8))进行新建隧道开挖后($t' \in [t'_2, \infty]$)引起的围岩位移与应力理论解的推导。

由于黏弹性问题的结构响应不仅与当前受力相关, 还与之前受力和加卸载过程有关, 因此需要从地应力开始施加时分析整个受力时段。

以双孔结构为研究对象(见图 1(a)), 根据作用时段不同将外载分成 3 组, 为以下 3 个问题:

(1) 地应力作用于双孔结构, 作用时段 $t' \in [0, \infty]$, 对应复位势为 $\varphi_1^{(2)}$, $\psi_1^{(2)}$ 。

(2) 隧道 1 开挖前, 由于两孔内岩体均未开挖掉, 其内边界作用由地应力产生的非均匀面力, 见图 1(b), 作用时段 $t' \in [0, t'_1]$, 对应复位势为 $\varphi_1^{(2-0)}$ 和 $\psi_1^{(2-0)}$ 。

(3) 隧道 1 开挖后, 其边界面力变为零, 而此时由于隧道 2 没有开挖, 其边界仍作用有面力(为地应力作用于单孔平板产生), 见图 1(c), 作用时段 $t' \in [t'_1, t'_2]$, 对应复位势为 $\varphi_1^{(2-1)}$ 和 $\psi_1^{(2-1)}$ 。

根据式(7), 可得在 $x_1 O_1 y_1$ 坐标系下总位移表达式($t' \in [t'_2, \infty]$):

$$\begin{aligned} u_x^v(z_1, t') + i u_y^v(z_1, t') &= \frac{1}{2} \varphi_1^{(2)}(z_1) \int_0^{t'} I(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \cdot \\ &\quad \left[z_1 \frac{d\overline{\varphi_1^{(2)}(z_1)}}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(2)}(z_1)} \right] \int_0^{t'} H(t' - \tau) d\tau + \frac{1}{2} \varphi_1^{(2-0)}(z_1) \cdot \\ &\quad \int_0^{t'_1} I(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \left[z_1 \frac{d\overline{\varphi_1^{(2-0)}(z_1)}}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(2-0)}(z_1)} \right] \cdot \\ &\quad \int_0^{t'_1} H(t' - \tau) d\tau + \frac{1}{2} \varphi_1^{(2-1)}(z_1) \int_{t'_1}^{t'_2} I(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \cdot \\ &\quad \left[z_1 \frac{d\overline{\varphi_1^{(2-1)}(z_1)}}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(2-1)}(z_1)} \right] \int_{t'_1}^{t'_2} H(t' - \tau) d\tau, \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $z_1 = x_1 + i y_1$ 。根据弹性叠加原理, 情况①、②弹性问题的叠加即为地应力作用于无孔平面问题(对应复位势为 $\varphi_1^{(0)}$, $\psi_1^{(0)}$)。则对应的复位势也满足该关系:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{(0)} &= \varphi_1^{(2)} + \varphi_1^{(2-0)}, \\ \psi_1^{(0)} &= \psi_1^{(2)} + \psi_1^{(2-0)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

同理, 地应力作用下单孔弹性问题(对应复位势为 $\varphi_1^{(1)}$, $\psi_1^{(1)}$)为情况①与③的叠加, 复位势之间关系为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{(1)} &= \varphi_1^{(2)} + \varphi_1^{(2-1)}, \\ \psi_1^{(1)} &= \psi_1^{(2)} + \psi_1^{(2-1)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(9), 并整理得

$$u_x^v(z_1, t') + i u_y^v(z_1, t') = L_{1-0}(z_1, t') + L_{1-1}(z_1, t') + L_{2-2}(z_1, t'). \quad (12)$$

式中,

$$L_{1-0}(z_1, t') = \frac{1}{2} \varphi_1^{(0)}(z_1) \int_0^{t'} I(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \cdot \left[z_1 \frac{d\overline{\varphi_1^{(0)}(z_1)}}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(0)}(z_1)} \right] \int_0^{t'} H(t' - \tau) d\tau, \quad (13)$$

$$L_{1-1}(z_1, t') = \frac{1}{2} [-\varphi_1^{(1-0)}(z_1)] \int_{t'_1}^{t'} I(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \cdot \left[z_1 \frac{d\overline{[-\varphi_1^{(1-0)}(z_1)]}}{dz_1} - \overline{\psi_1^{(1-0)}(z_1)} \right] \int_{t'_1}^{t'} H(t' - \tau) d\tau, \quad (14)$$

$$L_{2-2}(z_1, t') = \frac{1}{2} [-\varphi_1^{(2-1)}(z_1)] \int_{t'_2}^{t'} I(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \cdot \left[z_1 \frac{d\overline{[-\varphi_1^{(2-1)}(z_1)]}}{dz_1} - \overline{\psi_1^{(2-1)}(z_1)} \right] \int_{t'_2}^{t'} H(t' - \tau) d\tau. \quad (15)$$

式(13)~(15)中, $\varphi_1^{(0)}$ 和 $\psi_1^{(0)}$ 为^[14]

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{(0)}(z_1) &= \frac{p_0 z_1}{2}, \\ \psi_1^{(0)}(z_1) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{(1)}(z_1) &= \frac{p_0 z_1}{2}, \\ \psi_1^{(1)}(z_1) &= -\frac{p_0 R_1^2}{z_1}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$\varphi_1^{(1-0)}$, $\psi_1^{(1-0)}$ 为图 1(b) 中应力 $\sigma_x^{(1-0)}$, $\sigma_y^{(1-0)}$ 作用于单孔问题对应的复位势, 由叠加原理得到:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{(1-0)}(z_1) &= \varphi_1^{(0)}(z_1) - \varphi_1^{(1)}(z_1) = 0, \\ \psi_1^{(1-0)}(z_1) &= \psi_1^{(0)}(z_1) - \psi_1^{(1)}(z_1) = \frac{p_0 R_1^2}{z_1}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$\varphi_1^{(2-1)}$, $\psi_1^{(2-1)}$ 可由式(11)得到, 其中双孔问题对应的复位势表达 $\varphi_1^{(2)}$, $\psi_1^{(2)}$ 见附录。

隧道 2 开挖后, 更关心由于隧道 2 的开挖引起的增量位移, 表达式为

$$\begin{aligned} \Delta_2 u_x^v(z_1, t') + i \Delta_2 u_y^v(z_1, t') \\ = [u_x^v(z_1, t') - u_x^v(z_1, t'_2)] + i [u_y^v(z_1, t') - u_y^v(z_1, t'_2)] \end{aligned}$$

$$= L_{2-\Delta 1}(z_1, t') + L_{2-\Delta 2}(z_1, t') + L_{2-2}(z_1, t') \quad (19)$$

式中, L_{2-2} 见式 (15)。

$$\begin{aligned} L_{2-\Delta 1}(z_1, t') &= L_{1-0}(z_1, t') - L_{1-0}(z_1, t'_2) \\ &= \frac{1}{2} \phi_1^{(0)}(z_1) \left[\int_0^{t'} I(t' - \tau) d\tau - \int_0^{t'_2} I(t'_2 - \tau) d\tau \right] - \frac{1}{2} \cdot \\ &\quad \left[z_1 \frac{d\phi_1^{(0)}(z_1)}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(0)}(z_1)} \right] \left[\int_0^{t'} H(t' - \tau) d\tau - \right. \\ &\quad \left. \int_0^{t'_2} H(t'_2 - \tau) d\tau \right] \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{2-\Delta 2}(z_1, t') &= L_{1-1}(z_1, t') - L_{1-1}(z_1, t'_2) \\ &= -\frac{1}{2} \phi_1^{(1-0)}(z_1) \int_{t'_1}^{t'} I(t' - \tau) d\tau + \frac{1}{2} \phi_1^{(1-0)}(z_1) \cdot \\ &\quad \int_{t'_1}^{t'_2} I(t'_2 - \tau) d\tau + \frac{1}{2} \left[z_1 \frac{d\phi_1^{(1-0)}(z_1)}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(1-0)}(z_1)} \right] \cdot \\ &\quad \int_{t'_1}^{t'} H(t' - \tau) d\tau - \frac{1}{2} \left[z_1 \frac{d\phi_1^{(1-0)}(z_1)}{dz_1} + \overline{\psi_1^{(1-0)}(z_1)} \right] \cdot \\ &\quad \int_{t'_1}^{t'_2} H(t'_2 - \tau) d\tau \quad (21) \end{aligned}$$

令 $t = t' - t'_1$, $t_2 = t'_2 - t'_1$, 式 (19) 及相关的量也可表示为新时间坐标的函数。

由于应力表达式中没有材料参数, 因此 t 时刻应力仅与当前受力状态相关, 由式 (8) 可得总应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^v(z_1) &= \operatorname{Re} \left\langle 2 \left[\frac{d\phi_1^{(2)}(z_1)}{dz_1} \right] \mp \left[\frac{-d^2\phi_1^{(2)}(z_1)}{dz_1^2} + \frac{d\psi_1^{(2)}(z_1)}{dz_1} \right] \right\rangle, \\ \sigma_y^v(z_1) &= \operatorname{Im} \left\langle \frac{-d^2\phi_1^{(2)}(z_1)}{dz_1^2} + \frac{d\psi_1^{(2)}(z_1)}{dz_1} \right\rangle. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

结合式 (11) 可得隧道 2 开挖引起的增量应力为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_2 \sigma_x^v(z_1) &= -\operatorname{Re} \left\langle 2 \left[\frac{d\phi_1^{(2-1)}(z_1)}{dz_1} \right] \mp \left[\frac{-d^2\phi_1^{(2-1)}(z_1)}{dz_1^2} + \frac{d\psi_1^{(2-1)}(z_1)}{dz_1} \right] \right\rangle, \\ \Delta_2 \sigma_y^v(z_1) &= -\operatorname{Im} \left\langle \frac{-d^2\phi_1^{(2-1)}(z_1)}{dz_1^2} + \frac{d\psi_1^{(2-1)}(z_1)}{dz_1} \right\rangle. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

3 解析解与数值解的比较

为验证理论解的正确性, 本节将利用通用软件 ANSYS 进行相同情况下的计算, 并与位移与应力的理论解答进行对比。设隧洞埋深 800 m 左右, 初始地应力 $p_0 = 20$ MPa, 围岩模拟为 Boltzmann 黏弹性模型, 根据反分析可以确定某类岩石材料参数为^[16]: $G_H = 1950$ MPa, $G_K = 1020$ MPa, $\eta_K = 10050$ MPa·d, 并假设岩体不可压缩。两隧道断面尺寸: $R_1 = 3$ m, $R_2 = 6$ m。隧道 2 开挖在隧道 1 开挖稳定之后进行。由于结构上下对称, 数值计算时取结构的一半, 计算范围和有限元网格见图 3。其中点 A、B、C 为对比点。

图 4 给出位移和应力随时间变化的数值解与解析解对比, 可见两者吻合得非常好。相比数值解, 理论解能方便地更改几何与物理参数, 在应用于初步设计中更为方便。

4 新建隧道与平行既有隧道相互影响

本节分析中, 地应力、材料参数与第 3 节中相同。既有隧道已建成很长时间, 应力、位移已经稳定, 下面通过算例说明新开挖隧道与既有隧道相互作用的影响, 并进行参数分析。以下分析中, 以新建隧道开始开挖的时刻为零时刻, 考察该隧道开挖后 ($t \geq 0$) 的位移、应力随时间变化。

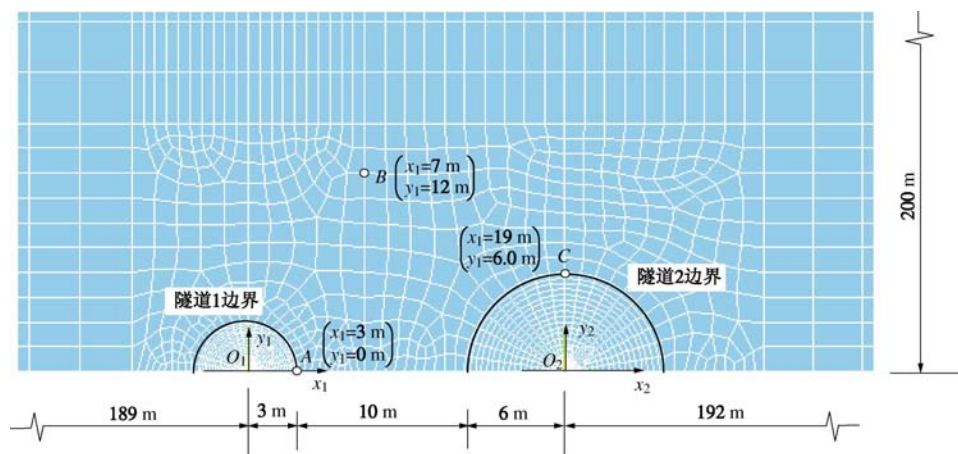


图 3 有限元计算模型及网格

Fig. 3 Model and mesh map in FEM simulation

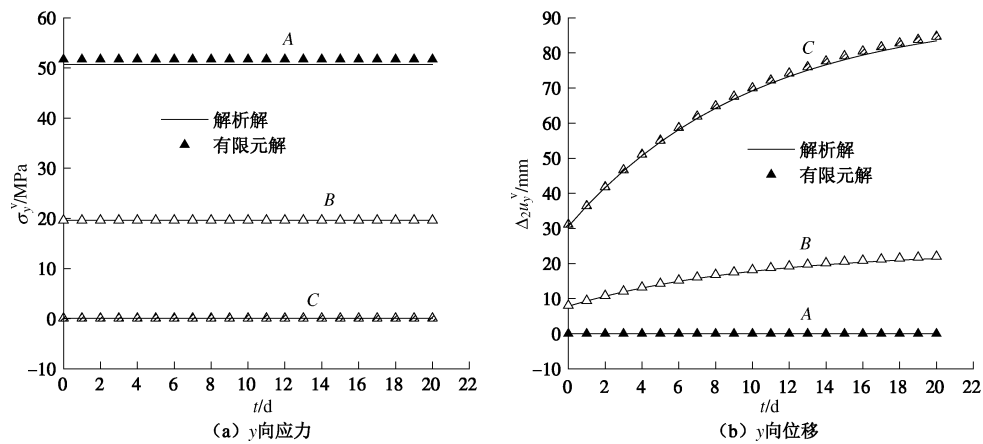


图 4 A, B, C 点的竖向应力和位移的解析解与有限元解比较

Fig. 4 Comparison between analytical solutions and FEM results on stresses and displacements at Point A, B and C along y direction

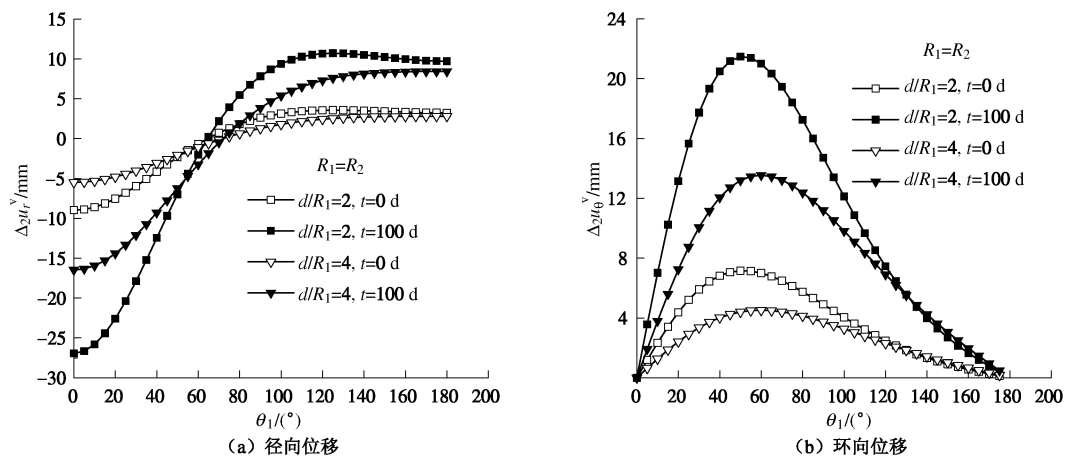


图 5 既有隧道孔边的开挖增量位移分布

Fig. 5 Distribution of displacements versus angle around opening of existing tunnel

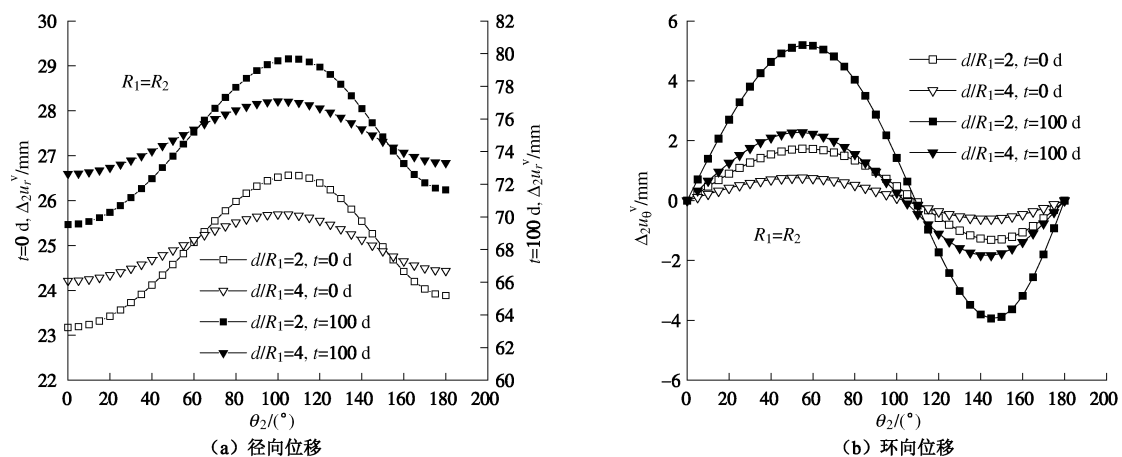


图 6 新建隧道孔边的开挖增量位移分布

Fig. 6 Distribution of displacements versus angle around opening of new tunnel

下面根据解答分析孔边位移与应力分布特点; 孔边位移随两孔距离的变化; 孔边位移随时间的变化。为与工程习惯一致, 应力图中压为正, 位移图中指向洞心的位移为正。

4.1 孔边位移与应力分布

两隧道半径 $R_1 = R_2 = 5$ m, 针对两组不同间距 ($d/R_1 = 2, d/R_1 = 4$) 和不同时刻 (新建隧道开挖时刻 $t = 0$ 、稳定时刻 $t = 100$ d) 给出孔边位移、应力随角

度变化, 见图 5~7。图中位移为隧道 2 开挖后产生的增量位移, 应力为全应力。

图 5 为既有隧道周边位移分布, 可见, 每一情况的径向位移均在 0° 位置最大, 方向背离隧道圆心, 位移绝对值在 $0^\circ \sim 100^\circ$ 范围随角度持续减小, 在 70° 左右的位置径向位移最小, 几乎为零, 后逐步增大至正值。 $\theta_1 > 100^\circ$ 后, 径向位移随角度变化平缓。可见, 位移较大的位置在靠近新建隧道一边, 约 -60° 到 60° 范围。环向位移随角度从零先增大后减小, 在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 左右位置达到最大。隧道间距变大, 环向位移最大值位置角度也变大, 但最大值位置变化对时间因素不敏感。瞬时和长期条件下, 位移变化规律相似, 但量值不同。

图 6 为新建隧道周边的位移分布图。同一间距情况, 径、环向位移随角度变化规律相似: 径向位移为指向洞口的较大正位移, 随角度先增大后减小, 约在 110° 左右达到最大; 环向位移随角度呈近似正弦函数规律变化, 在 110° 左右为零。与径向位移相比, 环向位移量值很小; 径向位移随角度变化值相比总径向位移也不大。这种位移形式, 与双向等地应力作用下单孔的位移分布情况类似。两隧道间距较大时, 位移随角度变化更平缓, 更接近单洞的位移分布。即, 新建隧道的增量位移受既有隧道的影响不大。图 7 给出了既有隧道孔边环向全应力分布图 (新建隧道应力分布与既有隧道应力分布对称)。可见, 环向应力均为压应力, 随角度先减小后增大, 隧道间距越小时应力波动越大。与径向位移相似, 应力最大值也出现在两隧道靠近处 0° 位置, 随着两孔之间的距离增大而减小。当 $d/R_1 = 2$ 时, 应力集中系数 $\sigma_{\theta_{\max}}/p_0 = 2.4$, 而单孔问题环向应力为常值, 该比值为 2.0; $70^\circ \sim 80^\circ$ 位置

环向应力最小, 且随着两孔之间的距离增大而增大, 最小值的位置角度随间距增大而减小。图 7 中应力分布曲线在 $\theta_1 = 40^\circ$ 和 $\theta_1 = 120^\circ$ 左右相交, 其值约 $2p_0$ (单孔问题的环向应力)。为当隧道距离较近, 应该首先注重双洞靠近位置: $\theta_1 \in [-40^\circ, 40^\circ]$, 其次远离位置 $\theta_1 \in [120^\circ, 240^\circ]$ 的应力情况。

4.2 隧道周边位移随时间的变化

经计算, 隧道周边各点随时间变化规律相似, 为更具一般性, 以隧道周边 45° 处的位移为例进行计算。隧道半径 $R_1 = R_2 = 5 \text{ m}$, 净距取 $d/R_1 = 2$, $d/R_1 = 4$, $d/R_1 = 6$ 时两隧道周边 45° 处位移随时间变化见图 8, 9。可见, 岩体流变导致位移随着时间的增加而增大, 若干天后达到稳定。对既有隧道 (图 8), 间距越小, 位移随时间的变化越明显, 特别在开挖初期, 位移增长非常迅速。对新建隧道 (图 9), 位移随时间的变化规律相似, 隧道净距变化对径向和环向位移的影响都很微弱, 这与 4.1 节的结论相似。

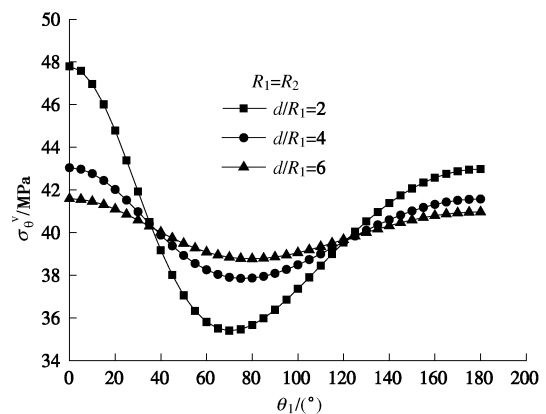


图 7 既有隧道孔边环向应力分布

Fig. 7 Distribution of hoop stress versus angle around opening of the existing tunnel

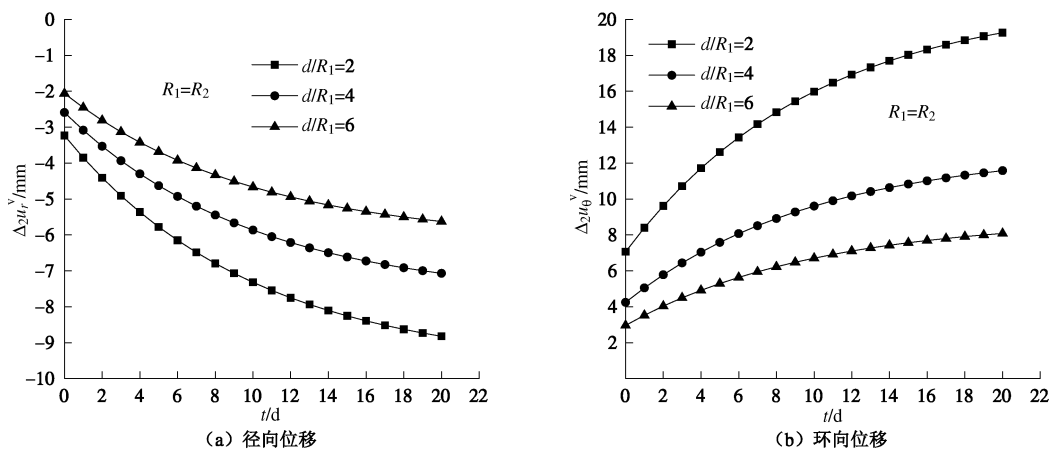


图 8 既有隧道孔边位移随时间的变化

Fig. 8 Variation of induced displacements with time at opening of existing tunnel

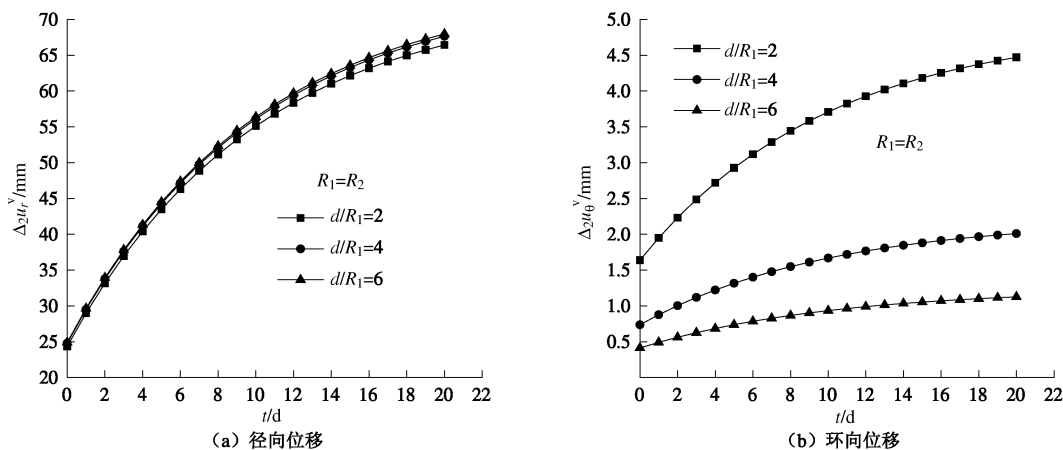


图9 新建隧道周边位移随时间的变化

Fig. 9 Variation of induced displacements with time at opening of new tunnel

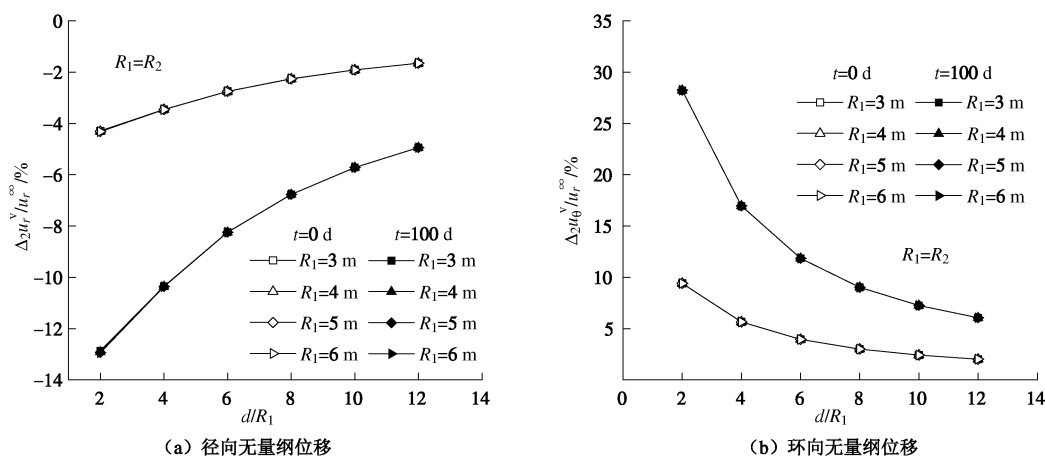


图10 既有隧道孔边位移随距离的变化

Fig. 10 Variation of induced displacements at opening of existing tunnel with distance between tunnels

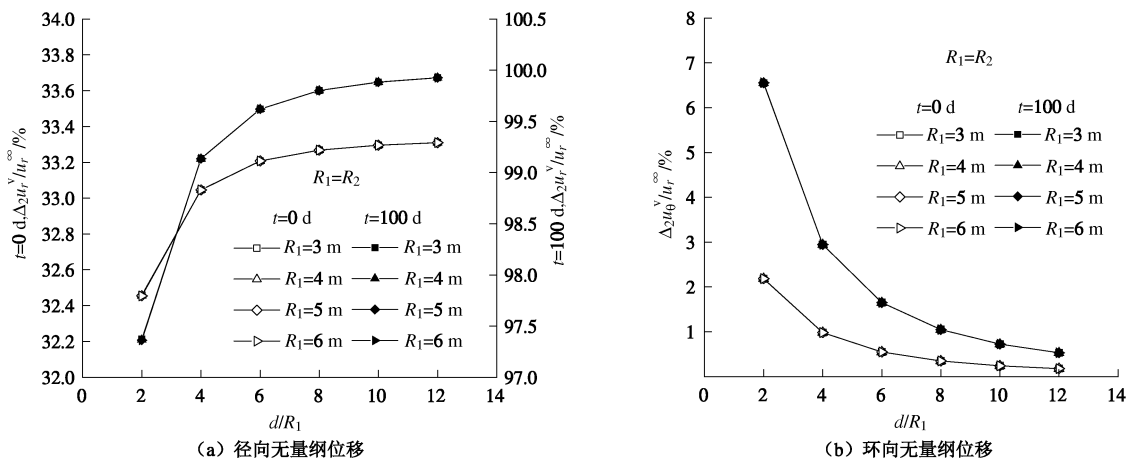


图11 新建隧道孔边位移随距离的变化

Fig. 11 Induced displacements at the opening of new tunnel versus the distance between tunnels

4.3 隧道周边位移随间距的变化

本节将研究两隧道半径相同时($R_1 = R_2$)，隧道净距 d 对瞬时和长期位移的影响，仍以隧道周边 45° 处的位移为例进行计算。所有位移除以 u_r^∞ 进行无量纲化， $u_r^\infty = p_0 R_1 / 2G_\infty$ 为相应半径单孔隧道在地应力作用下的稳定时位移， $G_\infty = G_H G_K / (G_H + G_K)$ ；净距除以

R_1 进行无量纲化。当隧道半径为 3, 4, 5, 6 m 时，图 10, 11 分别是既有和新建隧道周边 45° 处的无量纲位移随无量纲净距变化图。由图可见，无量纲后，位移随净距的变化与隧道尺寸无关。对既有隧道（图 10），径向与环向增量位移绝对值均随净距的增大而减小。净距较小时，净距变化对位移影响较大；随净距

变大, 位移逐渐趋于稳定。根据该图, 可以根据实际需要确定净距尺寸。对新建隧道(图 11), 位移变化规律类似, 但随净距的增大, 增量位移稳定的更快。从量值上讲, 新建隧道位移随净距变化并不大。

5 结 语

本文针对黏弹性流变岩体中既有隧道与新建平行隧道相互作用问题, 给出了顺序施工时深埋圆形断面双线隧洞应力、位移的求解方法和解答。根据解答分析了不同情况下既有和新建隧道孔边增量位移与应力分布; 孔边位移随时间和间距的变化规律。分析显示, 新建隧道对既有隧道周边增量位移和应力的影响较大, 而新建隧道的位移受既有隧道影响不大; 隧道瞬时和长期位移随净距和洞周角度的变化形式相似, 但量值不同; 增量位移随着时间逐渐增大, 最后趋于稳定; 无量纲后, 增量位移随净距的变化与隧道尺寸无关。根据本文解答可以方便、快捷地进行相似条件下隧道的初步设计。

参考文献:

- [1] GHABOUSI J, RANKEN R E. Interaction between two parallel tunnels[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1977, **1**: 75 - 103.
- [2] NG CWW, LEE KM, TANG DKW. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interaction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, **41**(3): 523 - 539.
- [3] SIAHMANSOURI A, GHOLAMNEJAD J, MARJI M F. A hybridized numerical and regression method for estimating the minimum rock pillar width of twin circular tunnels[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, **7**(5): 1059 - 1066.
- [4] 陈先国, 高 波. 地铁近距离平行隧道有限元数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21**(9): 1330 - 1334. (CHEN Xian-guo, GAO Bo. 2D FEM numerical simulation for closely-spaced parallel tunnels in metro[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(9): 1330 - 1334. (in Chinese))
- [5] 李学峰, 杜守继, 张顶锋. 新建盾构隧道施工对近接平行隧道的影响分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, **8**(5): 1065 - 1069. (LI Xue-feng, DU Shou-ji, ZHANG Ding-feng. Analysis on influence of new shield tunneling on closely spaced parallel tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, **8**(5): 1065 - 1069. (in Chinese))
- [6] 何 川, 苏宗贤, 曾东洋. 盾构隧道施工对已建平行隧道变形和附加内力的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(10): 2063 - 2069. (HE Chuna, SU Zong-xian, ZENG Dong-yang. Research on influence of shield tunnel construction on deformation and secondary inner force of constructed parallel tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(10): 2063 - 2069. (in Chinese))
- [7] LING C B. On the stresses in a plate containing two circular holes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, **19**(77): 77 - 82.
- [8] ZHANG L Q, LU A Z, YUE Z Q, et al. An efficient and accurate iterative stress solution for an infinite elastic plate around two elliptic holes, subjected to uniform loads on the hole boundaries and at infinity[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2009, **28**(1): 189 - 193.
- [9] 晏 莉, 阳军生, 刘宝琛. 浅埋双孔平行隧道开挖围岩应力和位移分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(3): 413 - 419. (YAN Li, YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. Stress and displacement of surrounding rock with twin-parallel tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(3): 413 - 419. (in Chinese))
- [10] 苏 锋, 陈福全, 施有志. 深埋双隧洞开挖的解析延拓法求解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(2): 365 - 374. (SU Feng, CHEN Fu-quan, SHI You-zhi. Analytic continuation solution of deep twin-tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(2): 365 - 374. (in Chinese))
- [11] 陈福全, 苏 锋, 施有志. 椭圆形溶洞对邻近深埋圆形隧道洞的影响分析[J]. *计算力学学报*, 2014, **31**(1): 54 - 60. (CHEN Fu-quan, SU Feng, SHI You-zhi. Analysis solution for tunnels due to the influence of adjacent ellipse karst cave[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2014, **31**(1): 54 - 60. (in Chinese))
- [12] ZHANG J F, CHEN J J, WANG J H, et al. Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, **36**: 24 - 33.
- [13] 王华宁, 蒋明镜, 何 平. 流变岩体中椭圆洞室断面开挖过程的力学分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(11): 1979 - 1987. (WANG Hua-ning, JIANG Ming-jing, HE Ping. Analytical solutions for elliptical tunnels in rheological rock considering excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(11): 1979 - 1987. (in Chinese))
- [14] MUSKHELISHVILI N I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity[M]. Groningen: Noordhoff,

1963.

- [15] 曾广尚, 王华宁, 蒋明镜. 流变岩体隧道施工中锚喷支护的模拟与解析分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊1): 1536 - 1542. (ZENG Guang-shang, WANG Hua-ning, JIANG Ming-jing. Simulation and analytical research of tunnel sequential construction with rockbolt support in rheological rock mass[J]. Chinese Journal of Underground

Space and Engineering, 2013, 9(S1): 1536 - 1542. (in Chinese))

- [16] FENG X T, CHEN B R, YANG C, et al. Identification of visco-elastic models for rocks using genetic programming coupled with the modified particle swarm optimization algorithm[J]. Int J Rock Mechanics and Mining Science, 2009, 43: 789 - 801.

附录：双孔问题复位势表达

地应力作用下双孔问题复位势 $\varphi_1^{(2)}(z_1)$ 和 $\psi_1^{(2)}(z_1)$ 可运用文献[8]的 Schwarz 交替法推导得到：

$$\varphi_1^{(2)}(z_1) = \frac{p_0 z_1}{2} - \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{c(c z_1 - c^2 + R_2^2)} - \sum_{n=1}^k (D_{-n} z_1^{-n}) \quad , \quad (A.1)$$

$$\psi_1^{(2)}(z_1) = -\frac{p_0 R_1^2}{z_1} - \frac{p_0 R_2^2}{z_1 - c} - \left(\frac{R_2^2}{z_1 - c} + \frac{c}{z_1} \right) \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{(c z_1 - c^2 + R_2^2)^2} - \frac{R_1^2}{z_1} \sum_{n=1}^k (n D_{-n} z_1^{-(n+1)}) - \sum_{n=1}^k (\overline{D_n} / z_1^n) \quad , \quad (A.2)$$

式中, $c = d + R_1 + R_2$ 为两圆孔之间的圆心距, D_{-n} 和 D_n 为用级数逼近面力分布函数时级数的系数。

当两圆孔半径为 5 m, 圆心距为 30 m, 级数的系数取 9 项时 $D_{-5}=5.523$, $D_{-4}=6.870$, $D_{-3}=8.539$, $D_{-2}=10.595$, $D_{-1}=13.120$, $D_0=16.695$, $D_1=3.265 \times 10^{-2}$, $D_2=5.599 \times 10^{-4}$, $D_3=1.923 \times 10^{-5}$ 。其他情况的系数鉴于篇幅, 不再列出。

第六届中日岩土工程学术会议（二号通知）

(2015 年 8 月 31~9 月 1 日 日本北海道)

主办单位：中国土木工程学会土力学及岩土工程分会；日本地盘工学会。

会议主题：中日岩土工程新进展。

会议语言：英语。

会议专题：地下空间技术；环境岩土工程；地基处理；防灾减灾；桩基工程；隧道工程；土的特性及其模拟；地震工程；数值模拟。

重要日期：①2015 年 4 月 15 日前, 提交全文；②2015 年 6 月 15 日前, 论文录用通知；③2015 年 8 月 31~9 月 1 日, 会议。

注意事项：①直接提交全文 (.doc 和 .pdf 文件), 全文长度在 4~6 页；② 论文格式按照本次会议版式排版 (见附件)；

③所有论文将正式出版 (第三届中日岩土工程会议论文集已被 ISTP 检索, 第五届岩土工程会议论文集已被 EI 检索, 本次会议论文争取 EI 检索)。本次会议在日本北海道举行, 预计参加会议的人会比较。由于会议接待条件有限, 中方参加会议人数暂定 40 人左右。参会资格以大家论文被录用的投稿时间和本人所在单位参会人数来考虑。欢迎大家积极投稿, 投稿邮箱 chinajapanconf6@163.com。

联系人：姚仰平, 胡伟 (电话: 18628195933), 韩剑 (电话: 18696458497)。

联系地址：清华大学水利系岩土所土力学及岩土工程分会, 邮编: 100084; 北京航空航天大学交通学院机场系, 邮编: 100191。