

DOI: 10.11779/CJGE201712020

# 内源爆炸荷载作用下饱和土中圆形衬砌隧道的瞬态响应解答

高 盟<sup>1, 2</sup>, 张继严<sup>1, 2</sup>, 王 澄<sup>1, 2</sup>, 晁明颂<sup>1, 2</sup>, 陈青生<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;  
3. 新加坡国立大学土木与环境工程系, 新加坡 119077)

**摘要:** 内源爆炸荷载作用下隧道的动力响应, 经常被简化为以爆源为中心的二维平面应变问题, 其实际上是一个三维岩土工程问题。为评价隧道爆源及周围区域的爆炸破坏, 采用 Laplace 和 Fourier 变换, 提出一种在内源爆炸荷载作用下, 饱和土体中圆形衬砌隧道的瞬态响应精确解答。基于 Biot 波动理论, 将周围土体和衬砌结构分别看成饱和两相介质和弹性介质, 推求了 Laplace 和 Fourier 变换域内爆炸荷载作用下衬砌和周围饱和土体的动力响应解析解。利用 Laplace 和 Fourier 反变换的数值方法, 进行了爆炸荷载作用下衬砌和周围土体的动力响应数值分析。结果表明: 与简化的二维平面应变模型相比, 基于三维模型得到的切向应力、径向位移和孔隙水压力较小; 隧道的动力响应随时间而迅速减小, 并随着与爆源距离的增加, 而在径向和轴向上呈指数衰减。

**关键词:** 圆形衬砌隧道; 饱和土体; 三维动力响应; 内源爆炸荷载; Laplace 变换; Fourier 变换

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2017)12-2304-08

**作者简介:** 高 盟(1974-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学、桩基工程及环境土工方面的研究工作。E-mail: mega2328@hotmail.com。

## Exact solutions for dynamic responses of a cylindrical lined tunnel in saturated soil to internal blast loads

GAO Meng<sup>1, 2</sup>, ZHANG Ji-yan<sup>1, 2</sup>, WANG Ying<sup>1, 2</sup>, CHAO Ming-song<sup>1, 2</sup>, CHEN Qing-shen<sup>3</sup>

(1. Shandong University of Science and Technology, Shandong Province Key Laboratory of Civil Engineering & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China; 2. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

**Abstract:** The dynamic response of tunnels under internal explosion in reality is a three-dimensional geotechnical problem, however, it is often simplified as a plane strain problem in 2D model which can only deal with the dynamic responses of tunnels at the source of explosion. To evaluate the damage of the explosion to the surrounding areas of the tunnel apart from the section at the source of explosion, a set of exact solutions for the three-dimensional dynamic responses of a cylindrical lined tunnel in saturated soil due to internal blast loads are derived by using the Fourier transform and Laplace transform. The surrounding soil is modelled as the saturated medium based on the Biot theory and the lining structure modeled as the elastic medium. By utilizing a reliable and efficient numerical method for the inverse Laplace transform and Fourier transform, the numerical solutions for the dynamic responses of the lining and surrounding soil are obtained. The 3D dynamic responses of the lined tunnel and the surrounding saturated soil medium due to internal blast loads are then presented and discussed. The results show that (a) compared to the simplified 2D plane strain model, the 3D model yields smaller predictions in the hoop stresses, radial displacements, and pore water pressures; (b) the dynamic responses of tunnels decrease sharply in an oscillating manner as the time elapses, while such responses attenuate exponentially with the increasing distance away from the explosion source center at both radial and axial directions of the tunnel.

**Key words:** cylindrical lined tunnel; saturated soil; three-dimensional dynamic response; internal blast load; Fourier transform; Laplace transform

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR201702160391); 山东科技大学科研创新团队资助项目(2015KYTD104)

收稿日期: 2016-11-14

\*通讯作者 (E-mail: hopeywwgy@hotmail.com)



## 0 引言

21 世纪是地下工程的大发展时代, 尤其是地下交通隧道及各种流体运输管道大力建设, 如海底隧道及各大城市的地铁隧道、石油天然气运输管道及热力管道。这些地下衬砌结构给人们带来便利的同时, 也会面临内爆炸荷载的威胁, 而引起地下衬砌结构及周围土体的损伤。因此, 研究内爆炸荷载作用下地下衬砌结构的动力响应对地下结构的抗爆防爆具有重要意义。

Senjuntichai 等<sup>[1]</sup>给出了内部瞬态荷载下圆柱形无衬砌结构隧洞的动力响应解答。Kattis 等<sup>[2]</sup>用边界元法得出了无限饱和多孔介质中简谐波入射作用下衬砌隧道和非衬砌隧道的动力响应解析解; Osinov<sup>[3]</sup>研究了作用于衬砌上的爆炸荷载引起的饱和粗粒土中隧道的动力响应; 徐长节等<sup>[4-5]</sup>采用饱和土力学模型和黏弹性两相介质模型, 考虑土骨架的黏性以及流体与固体之间的耦合作用, 分别求解了黏弹性饱和和准饱和土中球空腔的动力响应问题。刘干斌等<sup>[6]</sup>通过引入 Carcione 的黏弹性本构方程, 得到了饱和多孔介质中圆柱形孔洞在衬砌表面作用轴对称简谐荷载和流体压力条件下的频域解答。高盟等<sup>[7-10]</sup>将饱和土体和衬砌结构分别视为流固耦合介质和弹性均匀介质, 引入势函数将土体的位移控制方程化为二维轴对称波动方程, 研究了内源荷载作用下圆柱形孔洞的动力响应问题。随后, 又探讨了耦合质量对均布突加荷载作用下衬砌结构瞬态响应的影响。蔡袁强等<sup>[11-12]</sup>应用 Biot 波动理论, 对衬砌应用 Flügge 壳体理论, 利用 Laplace 变换及数值逆变换, 得到爆炸荷载作用下圆形隧道的 Laplace 变换解和时域解。高华喜等<sup>[13]</sup>引入与孔隙流体体积分数有关的应力系数, 采用饱和多孔介质理论和黏弹性理论, 在频率域内给出了内水压力作用下饱和土和衬砌位移、应力和孔压的表达式。王滢等<sup>[14-15]</sup>根据牛顿第二定律、达西定律和 Biot 波动理论, 探讨了饱和度对准饱和土中圆柱形衬砌的瞬态动力响应。随后, 推导出了半空间饱和介质的控制方程, 给出了圆柱形衬砌隧道在突加荷载、阶跃荷载和三角形脉冲荷载作用下的时域解。以上文献均将内爆炸问题简化为球对称问题或平面应变问题, 实际上, 内源爆炸荷载作用下圆形衬砌隧道的动力响应问题是三维问题。

本文在 Biot 波动理论和达西定律的基础上, 推导出 Fourier 变换域内爆炸荷载作用下圆形衬砌及周围饱和土体的无量纲控制方程; 引入势函数并进行 Laplace 变换, 分别求得衬砌结构和饱和土体的通解, 结合边界条件求出特解; 应用 Laplace 变换和 Fourier

逆变换, 得出相应的时域解。

## 1 理论方程推导

一无限长深埋隧道受到内源爆炸荷载作用, 如图 1 所示建立坐标系, 径向为  $r$ , 轴向为  $z$ , 切向为  $\theta$ 。

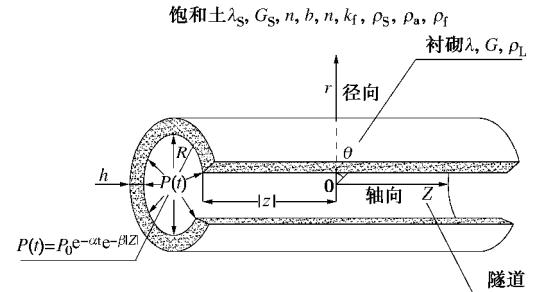


图 1 分析模型

Fig. 1 Analysis model

爆炸荷载以爆源为中心, 沿隧道  $z$  轴向两侧逐渐衰减, 是三维荷载, 其表达式为

$$P(t) = P_0 e^{-\alpha t} e^{-b|z|}, \quad (1)$$

式中,  $P_0$  为爆炸荷载最大值,  $a$  和  $b$  为爆炸荷载衰减系数。

图 1 所述问题是三维空间轴对称问题, 直接推求其理论解答较为困难。考虑到该模型沿隧道轴向轴对称, 取轴向为  $z$  的某一截面, 在该截面上对坐标变量  $z$  和爆炸荷载进行 Fourier 变换, 求出该截面上的 Fourier 变换域内的解答后, 再进行反 Fourier 变换从而得到问题的解答。

在坐标为  $z$  的某一截面上, 根据文献[10], 由圆形衬砌结构的运动方程、几何方程和物理方程可得衬砌结构的无量纲控制方程:

$$\frac{\partial^2 u_L^*(r^*, w, t^*)}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial u_L^*(r^*, w, t^*)}{\partial r^*} - \frac{u_L^*(r^*, w, t^*)}{r^{*2}} = \frac{1}{c^{*2}} \frac{\partial^2 u_L^*(r^*, w, t^*)}{\partial t^{*2}}. \quad (2)$$

由衬砌周围饱和多孔介质的运动方程、几何方程和物理方程可得无量纲化的控制方程:

$$\left. \begin{aligned} (I_s^* + 2G_s^*) \left( \nabla^2 - \frac{1}{r^{*2}} \right) u_r^*(r^*, w, t^*) &= \frac{b^*}{n} \frac{\partial}{\partial t^*} [u_r^*(r^*, w, t^*) - \\ w_r^*(r^*, w, t^*)] + r_{11}^* \frac{\partial^2 u_r^*(r^*, w, t^*)}{\partial t^{*2}} - \frac{1-n}{n} r_{22}^* \frac{\partial^2 w_r^*(r^*, w, t^*)}{\partial t^{*2}}, \\ (1-n)k_f^* \frac{\partial e^*}{\partial r^*} + nk_f^* \frac{\partial x^*}{\partial r^*} &= b^* \frac{\partial}{\partial t^*} [w_r^*(r^*, w, t^*) - u_r^*(r^*, w, t^*)] + \\ r_{22}^* \frac{\partial^2 w_r^*(r^*, w, t^*)}{\partial t^{*2}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $u_L^*(r^*, w, t^*)$ ,  $u_r^*(r^*, w, t^*)$ ,  $w_r^*(r^*, w, t^*)$  分别为  $z$  截面处衬砌、土骨架和孔隙流体的归一化径向位移。

以上各式中, 其它归一化的参数为

$$\left. \begin{aligned} r^* &= r/R, \\ t^* &= t/(R(r/G_a)^{0.5}), \\ c^{*2} &= (I^* + 2G^*)/r_L^*, \\ \nabla^2 &= (\partial^2 + \partial r^*) + (\partial/\partial r^*)/r^*, \\ r_L^* &= r_L/r, \\ I^* &= I/G_a, \\ G^* &= G/G_a, \\ I_s^* &= I_s/G_a, \\ G_s^* &= G_s/G_a, \\ b^* &= b/(R(r/G_a)^{0.5}), \\ r_{11}^* &= r_{11}/r, \\ r_{22}^* &= r_{22}/r, \\ k_f^* &= k_f/G_a, \\ P_0^* &= P_0/G_a, \\ h^* &= h/R, \\ e^* &= (\partial u_r^*/\partial r^*) + u_r^*/r^*, \\ x^* &= (\partial w_r^*/\partial r^*) + w_r^*/r^*. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $R$  为隧道内半径,  $k_f$  表示孔隙流体的体积模量,  $G_a = (G + G_s)/2$ ;  $I$  和  $G$  为弹性常数,  $w$  是 Fourier 变换参数,  $r_{11} = (1-n)r_s + r_a$ ,  $r_{22} = n r_f + r_a$ ,  $r = (1-n)r_s + r_f$ 。其中  $r$ ,  $r_s$  和  $r_f$  分别表示混合密度、土的密度和流体的密度,  $r_a$  为附加质量的密度;  $n$  为土体孔隙率;  $b = hn^2/k_d$ , 表示黏性耦合系数, 其中  $k_d$  和  $h$  分别是渗透系数和流体黏滞系数;  $I_s$  和  $G_s$  是拉梅常数, 下标  $s$  和  $L$  分别代表土体和衬砌; 其它变量可参考文献 [10]。

对爆炸荷载以坐标  $z$  为变量进行 Fourier 变换, 式 (1) 可改写为

$$P(t) = \frac{2b}{b^2 + w^2} P_0^* e^{-at} \quad (5)$$

采用文献[10]的推导过程和方法, 可得任意截面处隧道衬砌和周围饱和土体的动力响应通解。

隧道衬砌的动力响应通解为

$$\begin{aligned} u_L^*(r^*, w, p) &= A_L k I_1(kr^*) - B_L k K_1(kr^*) \quad (6) \\ s_L^*(r^*, w, p) &= \left[ (I^* + 2G^*) k^2 I_0(kr^*) - 2G^* k I_1(kr^*)/r^* \right] A_L + \\ &\quad \left[ (I^* + 2G^*) k^2 K_0(kr^*) + 2G^* k K_1(kr^*)/r^* \right] B_L \quad (7) \\ s_L^q(r^*, w, p) &= \left[ I^* k^2 I_0(kr^*) + 2G^* k I_1(kr^*)/r^* \right] A_L + \\ &\quad \left[ I^* k^2 K_0(kr^*) - 2G^* k K_1(kr^*)/r^* \right] B_L \quad (8) \end{aligned}$$

式中  $s_L^*(r^*, w, p)$  和  $s_L^q(r^*, w, p)$  分别表示变换域

内径向应力和切向应力;  $A_L$ ,  $B_L$  为任意常数;  $I_0$ ,  $K_0$  分别为零阶第一类和第二类修正的 Bessel 虚宗量;  $I_1$  和  $K_1$  分别为一阶第一类和第二类修正 Bessel 虚宗量。

衬砌周围饱和土体的动力响应通解为

$$u_r^*(r^*, w, p) = -B_1 b_1 K_1(b_1 r^*) - B_2 b_2 K_1(b_2 r^*) \quad (9a)$$

$$w_r^*(r^*, w, p) = -a_1 B_1 b_1 K_1(b_1 r^*) - a_2 B_2 b_2 K_1(b_2 r^*) \quad (9b)$$

$$\begin{aligned} s_f^*(r^*, w, p) &= -\frac{k_f^*}{n} [(1-n+na_1) B_1 b_1^2 K_0(b_1 r^*) + \\ &\quad (1-n+na_2) B_2 b_2^2 K_0(b_2 r^*)] \quad (9c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_r^*(r^*, w, p) &= \left[ I_s^* + 2G_s^* + \frac{(1-n)(1-n+na_1)k_f^*}{n} \right] B_1 b_1^2 K_0(b_1 r^*) + \\ &\quad 2G_s^* B_1 b_1 K_1(b_1 r^*)/r^* + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left[ I_s^* + 2G_s^* + \frac{(1-n)(1-n+na_2)k_f^*}{n} \right] B_2 b_2^2 K_0(b_2 r^*) + \\ &\quad 2G_s^* B_2 b_2 K_1(b_2 r^*)/r^* \quad (9d) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_q^*(r^*, w, p) &= \left[ I_s^* + \frac{(1-n)(1-n+na_1)k_f^*}{n} \right] B_1 b_1^2 K_0(b_1 r^*) - \\ &\quad 2G_s^* B_1 b_1 K_1(b_1 r^*)/r^* + \\ &\left[ I_s^* + \frac{(1-n)(1-n+na_2)k_f^*}{n} \right] B_2 b_2^2 K_0(b_2 r^*) - \\ &\quad 2G_s^* B_2 b_2 K_1(b_2 r^*)/r^* \quad (9e) \end{aligned}$$

式中,  $s_f^*(r^*, w, p)$ ,  $s_r^*(r^*, w, p)$  和  $s_q^*(r^*, w, p)$  分别为变换域内衬砌周围饱和介质的孔隙水压力, 径向应力和切向应力,  $b_1$  和  $b_2$  为两种纵波  $P_1$  和  $P_2$  无量纲形式<sup>[10]</sup>,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  是未定系数。

## 2 待定常数确定

根据饱和土体与衬砌结构在接触面处的连续性条件, 有

$$u_L^*[(1+h^*), w, p] = u_r^*[(1+h^*), w, p] \quad (10a)$$

$$s_L^*[(1+h^*), w, p] = s_r^*[(1+h^*), w, p] \quad (10b)$$

$$w_r^*[(1+h^*), w, p] - u_r^*[(1+h^*), w, p] = 0 \quad (10c)$$

在衬砌结构的内边界上:

$$s_L^*(1, w, p) = -P(w, p) \quad (10d)$$

由定解条件可得待定系数:

$$A_L = \frac{2b}{b^2 + w^2} \frac{1}{a + p} P_0^* \cdot \left[ \frac{-T(E + BF) + J(X + BY)}{(TC - DS)(E + BF) - (DH + CJ)(X + BY)} \right], \quad (11a)$$

$$B_L = \frac{2b}{b^2 + w^2} \frac{1}{a + p} P_0^* \cdot \left[ \frac{H(X + BY) + S(E + BF)}{(TC - DS)(E + BF) - (DH + CJ)(X + BY)} \right], \quad (11b)$$

$$B_1 = \frac{2b}{b^2 + w^2} \frac{1}{a + p} P_0^*.$$

$$\left[ \frac{HT + SJ}{(TC - DS)(E + BF) - (DH + CJ)(X + BY)} \right], \quad (11c)$$

$$B_2 = \frac{2b}{b^2 + w^2} \frac{1}{a + p} P_0^*.$$

$$\left[ \frac{B(HT + SJ)}{(TC - DS)(E + BF) - (DH + CJ)(X + BY)} \right], \quad (11d)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } B &= -\frac{(1-a_1)b_1 K_1[b_1(1+h^*)]}{(1-a_2)b_2 K_1[b_2(1+h^*)]}, \quad C = (I^* + 2G^*) \cdot \\ &k^2 I_0(k) - 2G^* k I_1(k), \quad D = (I^* + 2G^*) k^2 K_0(k) + 2G^* \cdot \\ &k K_1(k), \quad E = b_1 K_1[b_1(1+h^*)], \quad F = b_2 K_1[b_2(1+h^*)], \\ &H = k I_1[k(1+h^*)], \quad J = k K_1[k(1+h^*)], \quad S = (I^* + 2G^*) \cdot \\ &k^2 I_0[k(1+h^*)] - 2G^* k I_1[k(1+h^*)]/(1+h^*), \quad T = (I^* + \\ &2G^*) \cdot k^2 K_0[k(1+h^*)] + 2G^* k K_1[k(1+h^*)]/(1+h^*), \quad X = \\ &\left[ I_s^* + 2G_s^* + \frac{(1-n)(1-n+n\alpha_1)k_f^*}{n} \right] \cdot b_1^2 K_0[b_1(1+h^*)] + 2G_s^* \cdot \\ &b_1 K_1[b_1(1+h^*)]/(1+h^*), \quad Y = \left[ I_s^* + 2G_s^* + \right. \\ &\left. \frac{(1-n)(1-n+n\alpha_2)k_f^*}{n} \right] \cdot b_2^2 K_0[b_2(1+h^*)] + 2G_s^* b_2 K_1 \cdot \\ &\left[ b_2(1+h^*) \right]/(1+h^*). \end{aligned}$$

因此, 任意截面  $z$  处的 Fourier 和 Laplace 空间解为

$$u_L^*(r^*, w, p) = A_L k I_1(kr^*) - B_L k K_1(kr^*), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} s_L^*(r^*, w, p) &= [(I^* + 2G^*) k^2 I_0(kr^*) - \\ &2G^* k I_1(kr^*)/r^*] A_L + [(I^* + 2G^*) k^2 I_0(kr^*) + \\ &2G^* k K_1(kr^*)/r^*] B_L, \quad (13) \end{aligned}$$

$$s_L^q(r^*, w, p) = [I^* k^2 I_0(kr^*) + 2G^* k I_1(kr^*)/r^*] A_L + [I^* k^2 K_0(kr^*) - 2G^* k K_1(kr^*)/r^*] B_L, \quad (14)$$

$$u_r^*(r^*, w, p) = -B_1 b_1 K_1(b_1 r^*) - B_2 b_2 K_1(b_2 r^*), \quad (15)$$

$$w_r^*(r^*, w, p) = -\alpha_1 B_1 b_1 K_1(b_1 r^*) - \alpha_2 B_2 b_2 K_1(b_2 r^*), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} s_f^*(r^*, w, p) &= -\frac{k_f^*}{n} [(1-n+n\alpha_1) B_1 b_1^2 K_0(b_1 r^*) + \\ &(1-n+n\alpha_2) B_2 b_2^2 K_0(b_2 r^*)], \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_r^*(r^*, w, p) &= \left[ I_s^* + 2G_s^* + \frac{(1-n)(1-n+n\alpha_1)k_f^*}{n} \right] B_1 b_1^2 K_0(b_1 r^*) + \\ &\left[ I_s^* + 2G_s^* + \frac{(1-n)(1-n+n\alpha_2)k_f^*}{n} \right] B_2 b_2^2 K_0(b_2 r^*) + \\ &2G_s^* B_1 b_1 K_1(b_1 r^*)/r^* + 2G_s^* B_2 b_2 K_1(b_2 r^*)/r^*, \quad (18) \end{aligned}$$

$$s_q^*(r^*, w, p)$$

$$= \left[ I_s^* + \frac{(1-n)(1-n+n\alpha_1)k_f^*}{n} \right] B_1 b_1^2 K_0(b_1 r^*) +$$

$$\begin{aligned} &\left[ I_s^* + \frac{(1-n)(1-n+n\alpha_2)k_f^*}{n} \right] B_2 b_2^2 K_0(b_2 r^*) - \\ &2G_s^* B_1 b_1 K_1(b_1 r^*)/r^* - 2G_s^* B_2 b_2 K_1(b_2 r^*)/r^*. \quad (19) \end{aligned}$$

式中  $A_L$ ,  $B_L$ ,  $B_1$  和  $B_2$  是任意常数, 可根据边界条件和连续条件求出;  $p$  是 Laplace 变换参数;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $b_1$  和  $b_2$  与文献[10]意义相同。

令  $z^*$ ,  $n$ ,  $r_f^*$  和  $k_f^*$  均等于 0, 饱和介质退化为弹性介质,  $b_1^2 = p^2/(I_s^* + 2)$ ,  $b_2^2 = 0$ 。再令土体和衬砌材料参数相同, 即  $r_L^* = r_s^*$ ,  $I^* = I_s^*$  和  $G^* = G_s^*$ 。本文解答可退化为经典弹性解, 即

$$u_r^* = \frac{K_1(b_1 r^*)}{(I_s^* + 2)b_1 K_0(b_1) + 2K_1(b_1)} \frac{1}{a + p} P_0^*, \quad (20a)$$

$$s_r^* = -\frac{(I_s^* + 2)b_1 K_0(b_1 r^*) + 2K_1(b_1 r^*)/r^*}{(I_s^* + 2)b_1 K_0(b_1) + 2K_1(b_1)} \frac{1}{a + p} P_0^*. \quad (20b)$$

式(20a)、(20b)与文献[16]中受均匀压力的圆柱形空腔的经典解答完全一致。

### 3 算例分析

对所得解答式(12)~(19)进行反 Laplace 和反 Fourier 变换, 可得内源爆炸荷载作用下, 衬砌和周围饱和土体三维动力响应在时域内的解答。以上海地铁 7 号线隧道为例, 进行数值分析。衬砌内半径  $R=6000$  mm, 厚度  $h=300$  mm, 材料密度  $r_L=2800$  kg/m<sup>3</sup>, 剪切模量  $G=2 \times 10^9$  Pa, 泊松比  $\mu=0.2$ 。衬砌周围饱和土密度  $r_s=2500$  kg/m<sup>3</sup>, 剪切模量  $G_s=2 \times 10^7$  Pa, 泊松比  $\mu_s=0.3$ , 孔隙率  $n=0.3$ 。孔隙流体密度  $r_f=1000$  kg/m<sup>3</sup>, 附加质量的密度  $r_a=150$  kg/m<sup>3</sup>, 体积模量  $k_f=2.19 \times 10^9$  Pa, 动力黏滞系数  $h=0.001$ , 动力渗透系数  $k_d=1 \times 10^{-10}$  m/s。爆炸荷载  $P_0=5 \times 10^6$  Pa, 衰减系数  $a=3$ ,  $b=0.85$ 。无量纲计算参数:  $n=0.3$ ,  $I_s^*=0.03$ ,  $r_{11}^*=0.93$ ,  $G_s^*=0.02$ ,  $r_{22}^*=0.22$ ,  $k_f^*=2.15$ ,  $I^*=1.3$ ,  $b^*=3.8$ ,  $G^*=2$ ,  $h^*=0.05$ ,  $r_L^*=1.37$ 。

#### 3.1 二维和三维计算结果对比

对于内源爆炸荷载下隧道的动力响应问题, 通常将其简化为二维平面应变问题, 实际上爆炸问题应为三维问题。衬砌在内源爆炸荷载作用下二维和三维动力响应对比如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出, 土体的二维径向应力峰值明显较三维径向应力大, 比三维径向应力峰值增大了约 10%。图 2(b)中, 饱和土二维孔隙水压力峰值与三维孔隙水压力峰值差距更加明显, 前者比后者大约 12%。这是因为二维条件下, 沿隧道轴向每个截面处

都是爆源中心, 相当于若干爆源叠加, 而三维模型中, 爆炸荷载以爆源为中心沿轴向向两侧逐渐衰减。因此二维的计算结果较三维的计算结果大。

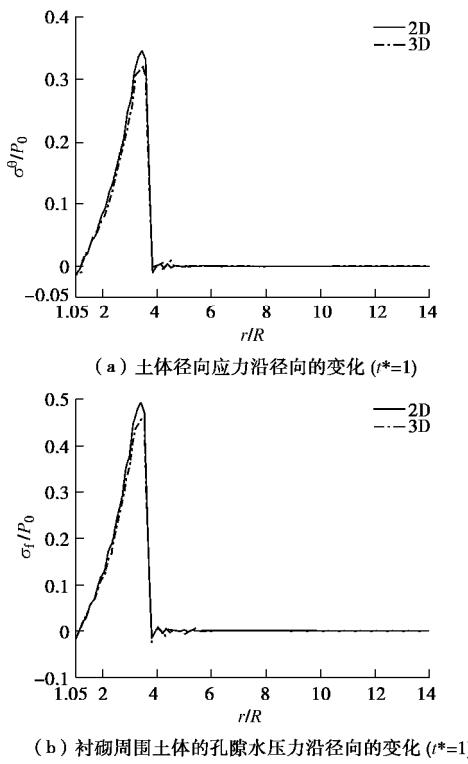


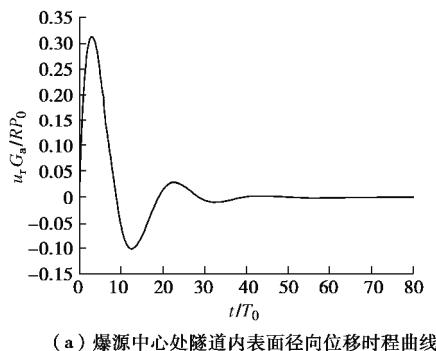
图 2 二维和三维计算结果对比

Fig. 2 Comparison between 2D and 3D dynamic responses

### 3.2 三维计算结果分析

图 3 为内源爆炸荷载作用下, 圆形隧道的三维径向位移计算结果。

图 3 (a) 为隧道内表面的位移时程曲线。从图中可看出, 隧道内表面 ( $r^*=1, z^*=0$ ) 的径向位移随时间而快速衰减, 在  $t^*=40$  时衰减为 0。由图 3 (b) 可知, 隧道的径向位移在 5 倍隧道内径处衰减为 0, 且从爆源中心向左右两侧衰减比较迅速, 这与图 3 (a) 所反映的规律一致。由图 3 (c) 可知  $t^*=2.9$  时, 径向位移在爆源中心到达峰值, 在轴向和径向方向上, 随着与爆源距离的增加而迅速衰减, 并在轴向  $z^*(z/R)=\pm 5$  和径向  $r^*=8.6$  处衰减为 0。时间  $t^*=12.5$  时径向位移分布如图 3 (d) 所示, 有着同样的分布规律。



(a) 爆源中心处隧道内表面径向位移时程曲线

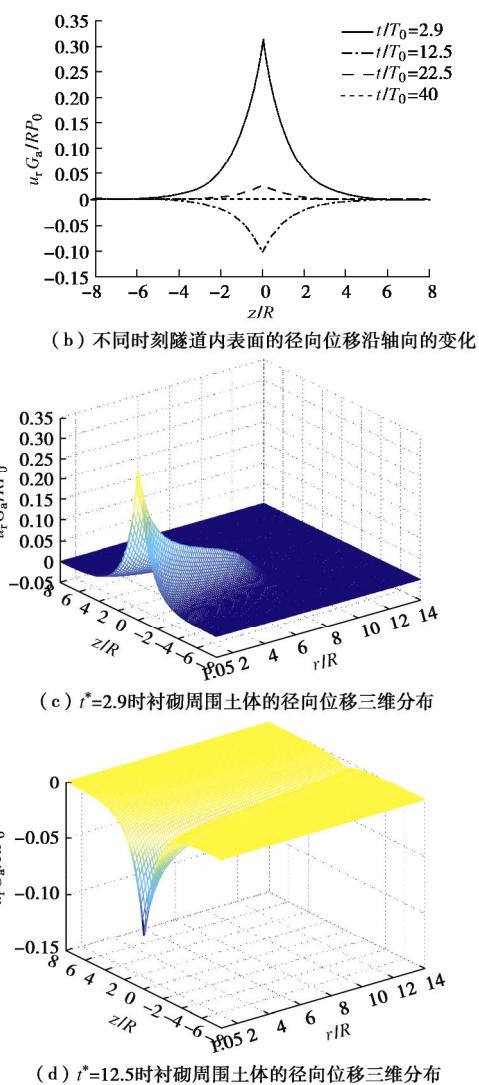
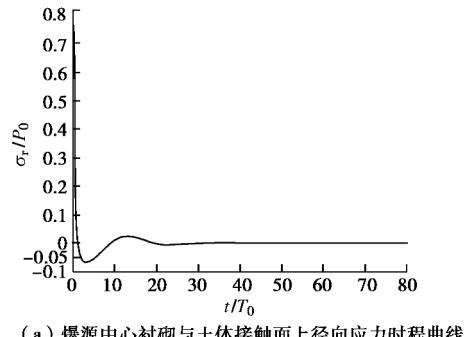


图 3 三维径向位移

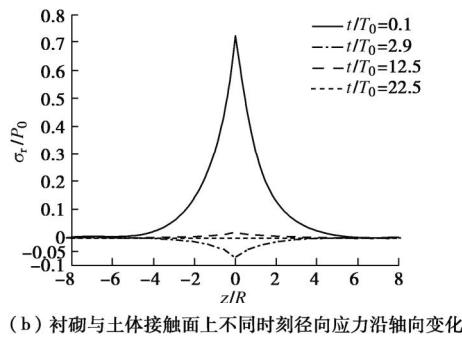
Fig. 3 3D radial displacements

内源爆炸荷载作用下衬砌与周围饱和土接触面上的径向应力如图 4 所示。

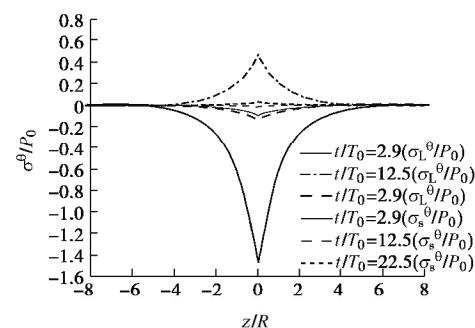
由图 4 (a) 可知, 径向应力在爆炸的瞬间 ( $t^*=0.1$ ) 突增到峰值, 而后随时间的增长而急剧减小, 最后约在  $t^*=30$  时衰减为 0。从图 4 (b) 可以看出, 不同时刻的径向应力均沿隧道  $z$  方向迅速衰减, 约在 5 倍隧道内径处衰减为 0。由图 4 (c) 和 4 (d) 可知, 最大径向应力发生在爆源中心, 并沿轴向和径向, 随着与爆源距离的增加而迅速减小。



(a) 爆源中心衬砌与土体接触面上径向应力时程曲线



(b) 衬砌与土体接触面上不同时刻径向应力沿轴向变化



(b) 衬砌与土体接触面上不同时刻切向应力沿轴向变化

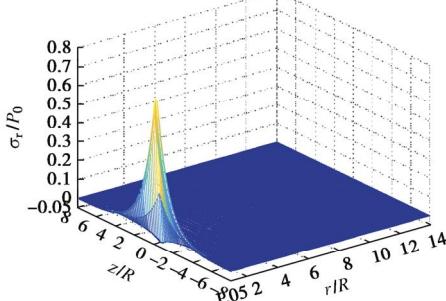
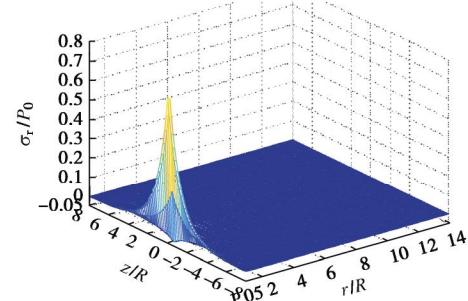
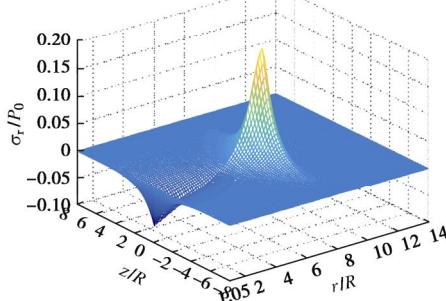
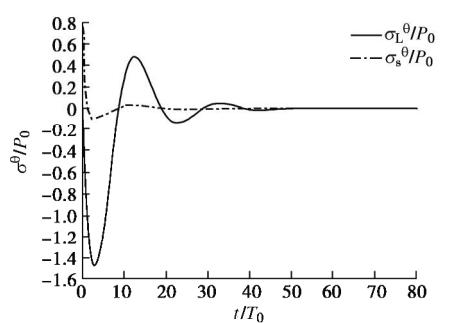
(c)  $t^*=0.1$ 时刻衬砌周围土体径向应力三维分布(c)  $t^*=0.1$ 时刻衬砌周围土体的切向应力三维分布(d)  $t^*=2.9$ 时刻衬砌周围土体径向应力三维分布

Fig. 4 3D radial stresses

图5描述的是内源爆炸荷载作用下, 衬砌结构和饱和土体的三维切向应力响应。 $\sigma_L^q$ 和 $\sigma_S^q$ 分别为衬砌结构和饱和土体的切向应力。

由图5(a)可知,  $t^*=2$ 时, 在衬砌接触面上, 衬砌和周围土体的切向应力均达到峰值, 而后随时间迅速减小, 并在 $t^*=40$ 时减小到0。由图5(b)可知, 同时刻的切向应力均沿隧道轴向迅速衰减。图4(c)和4(d)分别为 $t^*=0.1, 2.9$ 时, 周围土体切向应力的三维分布。其分布规律与图4(c)、图4(d)径向应力分布规律一致。



(a) 爆源中心衬砌与土体接触面上切向应力时程曲线

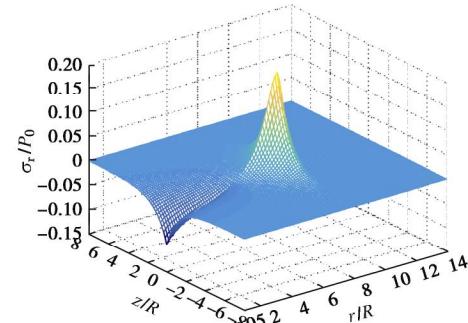
(c)  $t^*=2.9$ 时刻衬砌周围土体切向应力三维分布

图5 3D hoop stresses

图6为内源爆炸荷载作用下, 衬砌周围饱和土体中孔隙水压力的计算结果。

由图6(a)可以看出, 衬砌结构和饱和土体接触面上, 孔隙水压力时程曲线与径向应力和切向应力变化趋势一致, 孔隙水压力在爆炸瞬间激增到峰值, 然后随时间迅速衰减, 并在 $t^*=30$ 时衰减为0。对比图4(b)、图5(b)和图6(b)可知, 在不同时刻, 孔隙水压力的衰减规律也与径向应力和切向应力的衰减规律一致。图6(c)和6(d)分别为 $t^*=0.1, 2.9$ 时, 孔隙水压力的三维分布。其分布规律与径向应力和切向应力的规律一致, 最大孔隙水压力也发生在爆源中心, 并在轴向和径向方向上, 随着与爆源距离的增加而迅速减小。

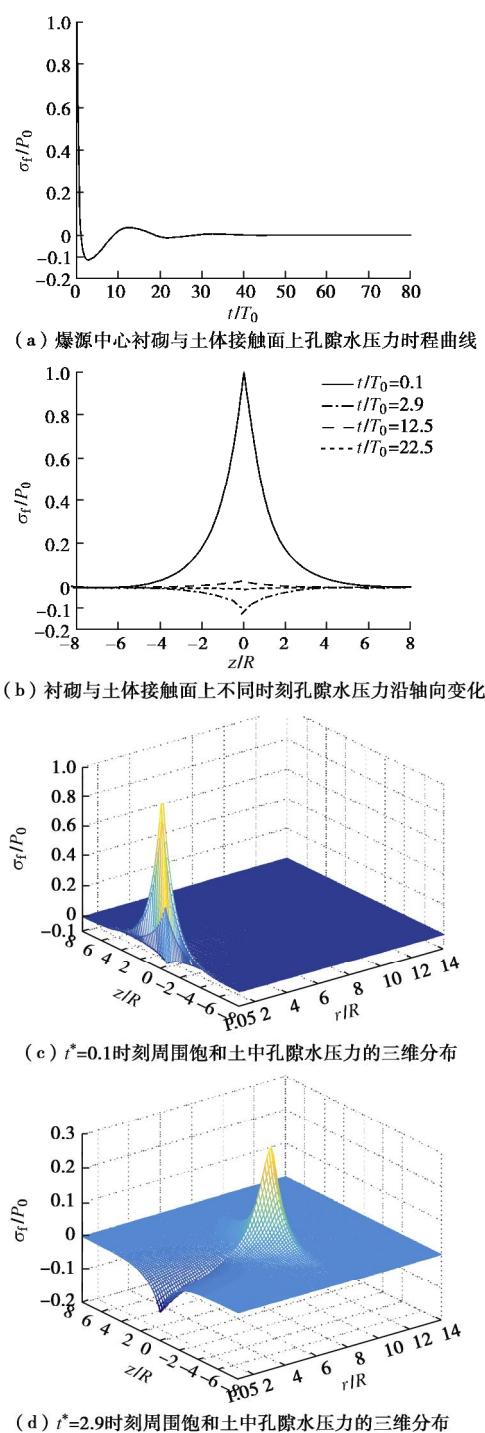


图 6 孔隙水压力的三维动力响应

Fig. 6 3D dynamic responses of pore water pressure

## 4 结 论

以 Biot 波动理论为基础, 将衬砌及周围土体分别看作弹性材料和饱和两相介质, 在隧道某一截面上对轴向坐标  $z$  进行 Fourier 变换, 对时间  $t$  进行 Laplace 变换, 推求了变换域内隧道衬砌及其周围土体的动力响应精确解。采用反 Laplace 变换和反 Fourier 变换数值方法, 给出了时域内的解答; 并对内源爆炸荷载作

用下隧道衬砌及其周围土体的瞬态响应进行计算分析, 主要结论如下:

(1) 推导出了内源爆炸荷载作用下饱和土中衬砌隧道的三维动力响应解析解。

(2) 基于二维平面应变模型所得的径向应力和孔隙水压力明显较大, 与三维模型所得结果相比, 峰值分别增大了 10% 和 12%。

(3) 内源爆炸荷载作用下最大动力响应(径向应力、切向应力、径向位移、孔隙水压力)发生在爆源中心处, 并以爆源为中心, 沿隧道轴向、径向迅速衰减。沿隧道轴向动力响应的影响范围为 5 倍隧道半径, 在此范围外动力响应衰减为 0。

## 参 考 文 献:

- [1] SENJUNTICHAI T, RAJAPAKSE R. Transient response of a circular cavity in a poroelastic medium[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993, **17**(6): 357 – 383.
- [2] KATTIS S E, BESKOS D E, CHENG A H D. 2D dynamic response of unlined and lined tunnels in poroelastic soil to harmonic body waves[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, **32**: 97 – 110.
- [3] OSINOV V A. Blast-induced waves in soil around a tunnel[J]. Archive of Applied Mechanics, 2011, **81**(5): 543 – 559.
- [4] 徐长节, 蔡袁强. 黏弹性饱和土中球空腔的动力响应[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(4): 88 – 92. (XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. Dynamic response of spherical cavity in viscoelastic saturated soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(4): 88 – 92. (in Chinese))
- [5] 徐长节, 马晓华. 黏弹性准饱和土中球空腔的动力响应[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1189 – 1194. (XU Chang-jie, MA Xiao-hua. Dynamic response of spherical cavity in nearly saturated viscoelastic soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(8): 1189 – 1194. (in Chinese))
- [6] 刘干斌, 谢康和, 施祖元. 黏弹性饱和多孔介质中圆柱孔洞的频域响应[J]. 力学学报, 2004, **36**(5): 557 – 563. (LIU Gan-bin, XIE Kang-he, SHI Zu-yuan. Frequency response of a cylindrical cavity in poro-viscoelastic saturated medium[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, **36**(5): 557 – 563. (in Chinese))
- [7] 高 盟, 高广运, 王 漾, 等. 饱和土与衬砌动力相互作用的圆柱形孔洞内源问题解答[J]. 固体力学学报, 2009, **30**(5): 481 – 488. (GAO Meng, GAO Guang-yun, WANG Ying, et al. A solution on the internal source problem of a cylindrical cavity considering the dynamic interaction between lining and saturated soil[J]. Chinese Journal of Solid

- Mechanics, 2009, **30**(5): 481 - 488. (in Chinese))
- [8] 高 盟, 高广运, 王 漙, 等. 均布突加荷载作用下圆柱形衬砌振动响应的解析解[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(2): 237 - 242. (GAO Meng, GAO Guang-yun, WANG Ying, et al. Analytical solution on dynamic response of lining subjected to sudden internal uniform loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(2): 237 - 242. (in Chinese))
- [9] 高 盟, 高广运, 李大勇. 考虑耦合质量影响的均布突加荷载作用下衬砌结构的瞬态响应[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 862 - 868. (GAO Meng, GAO Guang-yun, LI Da-yong. Transient response of lining structure subjected to sudden internal uniform loading considering effects of coupling mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 862 - 868. (in Chinese))
- [10] GAO M, WANG Y, GAO G Y, et al. An analytical solution for the transient response of a cylindrical lined cavity in a poroelastic medium[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, **46**: 30 - 40.
- [11] 蔡袁强, 陈成振, 孙宏磊. 黏弹性饱和土中隧道在爆炸荷载作用下的动力响应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, **45**(9): 1657 - 1663. (CAI Yuan-qiang, CHEN Cheng-zhen, SUN Hong-lei. Dynamic response of tunnel in viscoelastic saturated soil subjected to blast loads[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, **45**(9): 1657 - 1663. (in Chinese))
- [12] 蔡袁强, 陈成振, 孙宏磊. 爆炸荷载作用下饱和土中隧道的瞬态动力响应[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 361 - 367. (CAI Yuan-qiang, CHEN Cheng-zhen, SUN Hong-lei. Transient dynamic response of tunnels subjected to blast loads in saturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 361 - 367. (in Chinese))
- [13] 高华喜, 闻敏杰. 内水压作用下黏弹性饱和土-隧道衬砌相互作用[J]. 工程力学, 2013, **30**(3): 289 - 296. (GAO Hua-xi, WEN Min-jie. Interaction of viscoelastic saturated soil and tunnel lining subject to inner water pressure[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(3): 289 - 296. (in Chinese))
- [14] 王 漙, 高广运. 准饱和土中圆柱形衬砌的瞬态动力响应分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(12): 3400 - 3409. (WANG Ying, GAO Guang-yun. Analysis of transient dynamic response of cylindrical lined cavity in nearly saturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(12): 3400 - 3409. (in Chinese))
- [15] 王 漙, 高广运. 饱和半空间瞬态加载衬砌隧道的动力响应研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(3): 850 - 858. (WANG Ying, GAO Guang-yun. A study of dynamic response of lined tunnel subjected to transient loads in saturated half space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(3): 850 - 858. (in Chinese))
- [16] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 199 - 203. (YANG Gui-tong, ZHANG Shan-yuan. Elastic dynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988: 199 - 203. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达咨询有限公司
- 封 3 北京理正软件股份有限公司
- 封 4 上海分元土木工程有限公司
- 后插 1 重庆地质仪器厂
- 后插 2 济南普业机电技术有限公司