

# 地震加速度作用下饱和土中深埋隧道的动力响应

赵江倩<sup>1</sup>, 刘优平<sup>1</sup>, 余巍伟<sup>2</sup>, 徐斌<sup>1</sup>

(1. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 南昌大学科学技术学院, 江西 南昌 330029)

**摘要:** 通过建立和求解饱和土中圆形隧道在地震加速度作用下的动力控制方程, 得出了该问题的通解; 再根据弹性力学问题的几何方程和物理方程, 推导出了饱和土及隧道结构中的应变及应力分量表达式; 结合饱和土中圆形隧道在地震加速度作用下动力响应的边界条件, 对其进行了数值计算, 较为全面的分析了地震频率、隧道结构参数以及地震加速度大小对饱和土中圆形隧道对地震响应的影响。研究表明: 随着地震频率的增加, 孔隙水压力和土体应力分量最大值减小; 隧道衬砌结构剪切模量的增加, 孔隙水压力和土体应力分量最大值均有所增加; 地震加速度的大小对孔隙水压力和土体应力分量影响最为明显, 地震加速度增加的倍数与各应力分量增加的倍数基本一致, 随着离开隧道距离的增加, 饱和土中孔隙水压力、径向应力分量和切向应力分量迅速衰减, 而剪应力分量值最大且呈正负交替较慢衰减; 这些研究结果对正确理解饱和土中圆形衬砌隧道的抗震性能、破坏机理以及指导隧道抗震设计都有参考意义。

**关键词:** 饱和土; 衬砌隧道; 地震加速度; 动力响应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S1-0418-07

**作者简介:** 赵江倩(1964-), 女, 江西南昌人, 硕士, 教授, 主要从事岩土力学与工程等方面的研究与教学工作。E-mail: csulyp@126.com。

## Dynamic response of deep buried tunnels in saturated soil to effect of seismic acceleration

ZHAO Jiang-qian<sup>1</sup>, LIU You-ping<sup>1</sup>, YU Wei-wei<sup>2</sup>, XU Bin<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Structure Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. College of Science & Technology, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** By establishing and solving the dynamic control equations for circular tunnels in saturated soil to the effect of the seismic acceleration, the general solution is obtained. According to the geometrical equation and physical equation for the elastic mechanics problem, the stress and strain expressions in the saturated soil and tunnel structure are deduced. Based on a circular tunnel in saturated soil under the action of earthquake acceleration boundary conditions, the numerical calculation is carried out, and the influences of seismic frequency, tunnel structure parameters and seismic acceleration on the seismic response of the circular tunnel in saturated soil are comprehensively analyzed. The results show that, with the increase of the earthquake frequency, the pore water pressure and the maximum values of stress components decrease. The pore water pressure and the maximum values of stress components increase when the tunnel lining structure shear modulus increases. The effect of the seismic acceleration on the pore water pressure and stress component is the most obvious, and the increase ratio of earthquake acceleration and the increase multiples of stress components are basically the same. With the increase of the distance away from the tunnel, the pore water pressure, radial stress component and tangential stress component decrease obviously, and the shear stress component is large and has slow attenuation. These results are very helpful for correctly understanding the seismic performance, damage mechanisms and seismic design of tunnels.

**Key words:** saturated soil; circular lined tunnel; seismic acceleration; dynamic response

## 0 引言

隧道工程的发展和建设有力地促进了中国交通运输事业的腾飞, 同时也带动了土木工程、水利工程等相关学科的发展, 在中国国民经济建设中起到了越来越重要的作用。尽管地下隧道受周围岩土体的约束,

一直以来, 人们认为其具有良好的抗震性能, 然而,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50969007, 51269021); 江西省自然科学基金项目(20114BAB206012); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ12629)

收稿日期: 2013-03-01

国内外历史上发生的地震都使地下隧道系统受到一定程度的震害, 特别是 1995 年日本阪神地震中, 神戸市的区间隧道和车站均遭受了严重的破坏。如何保证地下隧道系统在地震中及震后能安全可靠运行, 已成为国际地震工程界的一个热门研究课题<sup>[1]</sup>。

目前, 国内外地下结构抗震研究方法主要有地震观测、试验研究和理论分析, 前两种方法存在成本较高, 时间长且受场地的限制, 随着计算机技术的发展, 理论分析计算成为解决地下结构抗震问题的有效途径。张引科等<sup>[2]</sup>应用 Fourier 展开和 Hankel 变换, 求出了弹性饱和和多孔介质 Biot 方程在非轴对称情况下的级数解; 梁建文等<sup>[3-4]</sup>利用 Fourier-Bessel 级数展开法求解出地下衬砌圆形洞室对入射平面 SV 波和 Rayleigh 波的动应力集中问题的 3-D 级数解; 史文谱等<sup>[5]</sup>研究了半无限空间中稳态 P 波在衬砌周围的动力响应问题; 相对于弹性单向介质, 在含水丰富地区, 研究饱和土两相介质中的动力响应问题更接近工程实际, 文献<sup>[6]</sup>研究了半空间饱和土中的圆形衬砌对稳态压缩波的散射; Wang 等<sup>[7]</sup>利用复变函数法求解在全空间任意孔洞对弹性波的散射和孔边的动应力集中。

本文通过建立饱和土中圆形隧道在地震加速度作用下的动力控制方程, 结合该问题解的边界条件, 编写 fortran 程序进行数值计算, 较为全面地分析了地震频率、隧道结构参数以及地震加速度大小对饱和土中圆形隧道对地震响应的影响。

## 1 动力响应的控制方程

地震加速度作用下饱和土中深埋隧道的动力响应分析模型见图 1, 圆形衬砌隧道处于无限大饱和土中, 隧道轴线沿 Z 轴, X 轴方向水平, Y 轴方向竖直, 隧道中心距基岩面距离为 D。

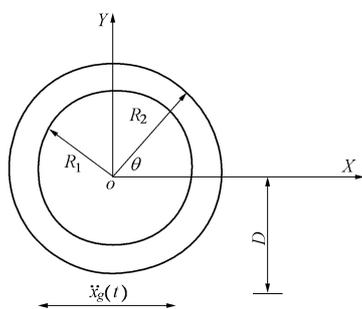


图 1 分析模型

Fig. 1 Analysis model

假定饱和土层深部水平基岩沿 X 轴方向的加速度为  $\ddot{x}_g(t)$ , 隧道结构和饱和土处于平面应变状态, 则饱和土和隧道衬砌结构的动力方程分别为<sup>[8]</sup>

$$G \left[ \nabla^2 u_r - \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right) \right] + (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{\partial p_f}{\partial r} = \rho \left[ \ddot{u}_r + \ddot{x}_g(t) \cos \theta \right], \quad (1)$$

$$G \left[ \nabla^2 u_\theta + \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta \right) \right] + (\lambda + G) \frac{\partial e}{r \partial \theta} - \frac{\partial p_f}{r \partial \theta} = \rho \left[ \ddot{u}_\theta - \ddot{x}_g(t) \sin \theta \right], \quad (2)$$

$$\nabla^2 p_f = \frac{\rho_f \dot{g}}{k_d} \dot{e} - \rho_f \ddot{e}, \quad (3)$$

$$G' \left[ \nabla^2 u'_r - \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u'_\theta}{\partial \theta} + u'_r \right) \right] + (\lambda' + G') \frac{\partial e'}{\partial r} = \rho' \left[ \ddot{u}'_r + \ddot{x}_g(t) \cos \theta \right], \quad (4)$$

$$G' \left[ \nabla^2 u'_\theta + \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u'_r}{\partial \theta} - u'_\theta \right) \right] + (\lambda' + G') \frac{\partial e'}{r \partial \theta} = \rho' \left[ \ddot{u}'_\theta - \ddot{x}_g(t) \sin \theta \right]. \quad (5)$$

式中  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \theta^2}$ ;  $e = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta}$ ;

$G, \lambda, \rho, \rho_f, k_d$  为饱和土性质参数;  $G', \lambda'$  为隧道衬砌介质参数;  $g$  为重力加速度;  $u_r, u_\theta$  和  $u'_r, u'_\theta$  分别为饱和土、衬砌结构相对于基岩的径向和切向位移;  $e$  和  $e'$  分别为饱和土和衬砌结构的体应变。

对于稳态动力问题, 基岩水平运动加速度为

$$\ddot{x}_g(t) = A_g e^{i\omega t}. \quad (6)$$

同时, 将式 (1) ~ (5) 中的函数进行如下分解:

$$f(r, \theta, t) = f(r, \theta) e^{i\omega t}, \quad (7)$$

则式 (1) ~ (5) 可得到地震加速度作用下饱和土中深埋隧道的动力响应控制方程:

$$G \left[ \nabla^2 u_r - \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right) \right] + (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{\partial p_f}{\partial r} + \rho \omega^2 u_r = \rho A_g \cos \theta, \quad (8)$$

$$G \left[ \nabla^2 u_\theta + \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_\theta \right) \right] + (\lambda + G) \frac{\partial e}{r \partial \theta} - \frac{\partial p_f}{r \partial \theta} + \rho \omega^2 u_\theta = -\rho A_g \sin \theta, \quad (9)$$

$$\nabla^2 p_f = \rho_f \omega^2 \left( 1 + \frac{i g}{\omega k_d} \right), \quad (10)$$

$$G' \left[ \nabla^2 u'_r - \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u'_\theta}{\partial \theta} + u'_r \right) \right] + (\lambda' + G') \frac{\partial e'}{\partial r} + \rho' \omega^2 u'_r = \rho' A_g \cos \theta, \quad (11)$$

$$G' \left[ \nabla^2 u'_\theta + \frac{1}{r^2} \left( 2 \frac{\partial u'_r}{\partial \theta} + u'_\theta \right) \right] + (\lambda' + G') \frac{\partial e'}{r \partial \theta} + \rho' \omega^2 u'_\theta = -\rho' A_g \sin \theta. \quad (12)$$

## 2 稳态动力响应的解

### 2.1 控制方程稳态动力响应的解

为了解控制方程稳态动力响应的解, 令

$$\begin{bmatrix} u_r(r, \theta) \\ e(r, \theta) \\ p_f(r, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_r(r) \\ \tilde{e}(r) \\ \tilde{p}_f(r) \end{bmatrix} \cos \theta, \quad (13)$$

$$u_\theta(r, \theta) = \tilde{u}_\theta(r) \sin \theta, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} u'_r(r, \theta) \\ e'(r, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}'_r(r) \\ \tilde{e}'(r) \end{bmatrix} \cos \theta, \quad (15)$$

$$u'_\theta(r, \theta) = \tilde{u}'_\theta(r) \sin \theta, \quad (16)$$

则式(9)~(12)可转化为

$$\frac{d^2 \tilde{u}_r}{dr^2} + \frac{d\tilde{u}_r}{rdr} - \frac{2}{r^2}(\tilde{u}_r + \tilde{u}_\theta) + k_s^2 \tilde{u}_r + \frac{(\lambda + G)d\tilde{e}}{Gdr} - \frac{dp_f}{Gdr} = \frac{\rho A_g}{G}, \quad (17)$$

$$\frac{d^2 \tilde{u}_\theta}{dr^2} + \frac{d\tilde{u}_\theta}{rdr} - \frac{2}{r^2}(\tilde{u}_r + \tilde{u}_\theta) + k_s^2 \tilde{u}_\theta + \frac{(\lambda + G)\tilde{e}}{Gr} - \frac{p_f}{Gr} = -\frac{\rho A_g}{G}, \quad (18)$$

$$\frac{d^2 p_f}{dr^2} + \frac{dp_f}{rdr} - \frac{p_f}{r^2} = \rho_f \omega^2 \left(1 + \frac{ig}{\omega k_d}\right) \tilde{e}, \quad (19)$$

$$\frac{d^2 \tilde{u}'_r}{dr^2} + \frac{d\tilde{u}'_r}{rdr} - \frac{2}{r^2}(\tilde{u}'_r + \tilde{u}'_\theta) + k_s'^2 \tilde{u}'_r + \frac{(\lambda' + G')d\tilde{e}'}{G'dr} = \frac{\rho' A_g}{G'}, \quad (20)$$

$$\frac{d^2 \tilde{u}'_\theta}{dr^2} + \frac{d\tilde{u}'_\theta}{rdr} - \frac{2}{r^2}(\tilde{u}'_r + \tilde{u}'_\theta) + k_s'^2 \tilde{u}'_\theta + \frac{(\lambda' + G')\tilde{e}'}{G'r} = -\frac{\rho' A_g}{G'}. \quad (21)$$

求解微分方程(17)~(21), 得到控制方程稳态动力响应的解<sup>[9]</sup>:

$$\tilde{e} = A_e K_1(kr) + B_e I_1(kr), \quad (22)$$

$$\tilde{p}_f = A_p \frac{1}{r} + B_p r + \frac{a}{k^2} [A_e K_1(kr) + B_e I_1(kr)], \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_r = & \frac{A_u}{2} J_2(k_s r) + \frac{A_u}{2} J_0(k_s r) + \frac{B_u}{2} N_2(k_s r) + \\ & \frac{B_u}{2} N_0(k_s r) + \frac{A_e d}{2(k_s^2 - k_p^2)} [K_2(kr) + K_0(kr)] - \\ & \frac{A_p}{\rho \omega^2 r^2} + \frac{A_g}{\omega^2}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_\theta = & \frac{A_u}{2} J_2(k_s r) - \frac{A_u}{2} J_0(k_s r) + \frac{B_u}{2} N_2 k_s r - \\ & \frac{B_u}{2} N_0(k_s r) + \frac{A_e d}{2(k_s^2 - k_p^2)} [K_2(kr) - K_0(kr)] - \end{aligned}$$

$$\frac{A_p}{\rho \omega^2 r^2} - \frac{A_g}{\omega^2}. \quad (25)$$

$$\tilde{e}' = A'_e J_1(k'_p r) + B'_e N_1(k'_p r) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}'_r = & \frac{A'_u}{2} J_2(k'_s r) + \frac{A'_u}{2} J_0(k'_s r) + \frac{B'_u}{2} N_2(k'_s r) + \\ & \frac{B'_u}{2} N_0(k'_s r) + [J_2(k'_p r) - J_0(k'_p r)] + \\ & \frac{B'_e}{2k'_p} [N_2(k'_p r) - N_0(k'_p r)] + \frac{A'_g}{\omega'^2}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}'_\theta = & \frac{A'_u}{2} J_2(k'_s r) - \frac{A'_u}{2} J_0(k'_s r) + \frac{B'_u}{2} N_2(k'_s r) - \\ & \frac{B'_u}{2} N_0(k'_s r) + \frac{A'_e}{2k'_p} [J_2(k'_p r) + J_0(k'_p r)] + \\ & \frac{B'_e}{2k'_p} [N_2(k'_p r) + N_0(k'_p r)] - \frac{A'_g}{\omega'^2}. \end{aligned} \quad (28)$$

式中  $k_p = \frac{\omega}{V_p}$ ,  $V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho \left[1 - \frac{\rho_f}{\rho} \left(1 + \frac{ig}{\omega k_d}\right)\right]}}$ ,  $d =$

$$\frac{(\lambda + G)k^2 - a}{Gk}, \quad k = ik_p, \quad k'_p = \frac{\omega}{V'_p}, \quad V'_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G'}{\rho'}}$$

$A_e, B_e, A_p, B_p, A_u, B_u, A'_e, B'_e, A'_u$  和  $B'_u$  是待定系数;  $J_n(x)$  第一类 bessel 函数;  $N_n(x)$  第二类 bessel 函数;  $I_n(x)$  第一类修正(虚宗量) bessel 函数;  $K_n(x)$  第二类修正(虚宗量) bessel 函数。

### 2.2 饱和土及隧道衬砌结构中的应变分量

利用弹性力学极坐标中的几何方程<sup>[10]</sup>, 可由饱和土及隧道衬砌结构中的位移分量导出饱和土及隧道衬砌结构中的应变分量, 其饱和土中应变分量表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_r(r) = & -\frac{A_u k_s}{4} [J_1(k_s r) + J_3(k_s r)] + \\ & \frac{A_e kd}{4(k_s^2 - k_p^2)} [3K_1(kr) + K_3(kr)] + \\ & \frac{2A_p}{\rho \omega^2 r^3} - \frac{B_u k_s}{4} [N_1(k_s r) + N_3(k_s r)], \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_\theta(r) = & \frac{A_u k_s}{4} [J_1(k_s r) + J_3(k_s r)] + \\ & \frac{A_e kd}{4(k_s^2 - k_p^2)} [K_1(kr) - K_3(kr)] - \\ & \frac{2A_p}{\rho \omega^2 r^3} + \frac{B_u k_s}{4} [N_1(k_s r) + N_3(k_s r)] \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{r\theta}(r) = & \frac{A_u k_s}{4} [J_1(k_s r) - J_3(k_s r)] - \frac{A_e kd}{4(k_s^2 - k_p^2)} \\ & [K_1(kr) - K_3(k_s r)] + \frac{2A_p}{\rho \omega^2 r^3} + \frac{B_u k_s}{4} [N_1(k_s r) - N_3(k_s r)]. \end{aligned} \quad (31)$$

隧道衬砌结构中应变分量表达式为

$$\tilde{\varepsilon}'_r(r) = -\frac{A'_u k'_s}{4} [J_1(k'_s r) + J_3(k'_s r)] - \frac{B'_u k'_s}{4} [N_1(k'_s r) + N_3(k'_s r)] + \frac{A'_e}{4} [3J_1(k'_p r) - J_3(k'_p r)] - \frac{B'_e}{4} [3N_1(k'_p r) - N_3(k'_p r)], \quad (32)$$

$$\tilde{\varepsilon}'_\theta(r) = \frac{A'_u k'_s}{4} [J_1(k'_s r) + J_3(k'_s r)] + \frac{B'_u k'_s}{4} [N_1(k'_s r) + N_3(k'_s r)] + \frac{B'_u k'_s}{4} [N_1(k'_s r) + N_3(k'_s r)] + \frac{A'_e}{4} [J_1(k'_p r) + J_3(k'_p r)] + \frac{B'_e}{4} [N_1(k'_p r) + N_3(k'_p r)], \quad (33)$$

$$\tilde{\varepsilon}'_{r\theta}(r) = \frac{A'_u k'_s}{4} [J_1(k'_s r) - J_3(k'_s r)] + \frac{B'_u k'_s}{4} [N_1(k'_s r) - N_3(k'_s r)] - \frac{A'_e}{4} [J_1(k'_p r) + J_3(k'_p r)] - \frac{B'_e}{4} [N_1(k'_p r) + N_3(k'_p r)]. \quad (34)$$

### 2.3 饱和土及隧道衬砌结构中的应力分量

利用弹性力学的物理方程, 可由饱和土及隧道衬砌结构中的应变分量导出饱和土及隧道衬砌结构中的应力分量, 其饱和土中应力分量表达式为

$$\tilde{\sigma}'_r(r) = -\frac{A_u G k_s}{2} [J_1(k_s r) + J_3(k_s r)] - \frac{B_u G k_s}{2} [N_1(k_s r) + N_3(k_s r)] + A_e \left\{ \frac{Gkd}{2(k_s^2 - k_p^2)} [3K_1(kr) + K_3(kr)] + \left( \lambda - \frac{a}{k^2} \right) K_1(kr) \right\} + A_p \left( \frac{4}{k_s^2 r^3} - \frac{1}{r} \right), \quad (35)$$

$$\tilde{\sigma}'_\theta(r) = \frac{A_u G k_s}{2} [J_1(k_s r) + J_3(k_s r)] + \frac{B_u G k_s}{2} [N_1(k_s r) + N_3(k_s r)] + A_e \left\{ \frac{Gkd}{2(k_s^2 - k_p^2)} [K_1(kr) - K_3(kr)] + \left( \lambda - \frac{a}{k^2} \right) K_1(kr) \right\} - A_p \left( \frac{4}{k_s^2 r^3} + \frac{1}{r} \right), \quad (36)$$

$$\tilde{\tau}'_{r\theta}(r) = \frac{A_u G}{2} [J_1(k_s r) - J_3(k_s r)] + \frac{B_u G}{2} [N_1(k_s r) - N_3(k_s r)] + A_e \frac{Gkd}{2(k_s^2 - k_p^2)} [K_1(kr) - K_3(kr)] + A_p \frac{4}{k_s^2 r^3}. \quad (37)$$

隧道衬砌结构中应力分量表达式为

$$\tilde{\sigma}'_r(r) = -\frac{A'_u G' k'_s}{2} [J_1(k'_s r) + J_3(k'_s r)] - \frac{B'_u G' k'_s}{2} [N_1(k'_s r) + N_3(k'_s r)] + A'_e \left\{ \left( \lambda' + \frac{3G'}{2} \right) J_1(k'_p r) - \frac{G'}{2} J_3(k'_p r) \right\} + B'_e \left\{ \left( \lambda' + \frac{3G'}{2} \right) N_1(k'_p r) - \frac{G'}{2} N_3(k'_p r) \right\}, \quad (38)$$

$$\tilde{\sigma}'_\theta(r) = \frac{G' k'_s}{2} A'_u [J_1(k'_s r) + J_3(k'_s r)] +$$

$$B'_u [N_1(k'_s r) + N_3(k'_s r)] + A'_e \left\{ \left( \lambda' + \frac{3G'}{2} \right) J_1(k'_p r) + \frac{G'}{2} J_3(k'_p r) \right\} + B'_e \left\{ \left( \lambda' + \frac{3G'}{2} \right) N_1(k'_p r) + \frac{G'}{2} N_3(k'_p r) \right\}, \quad (39)$$

$$\tilde{\tau}'_{r\theta}(r) = \frac{A'_u G' k'_s}{2} [J_1(k'_s r) - J_3(k'_s r)] + \frac{B'_u G' k'_s}{2} [N_1(k'_s r) - N_3(k'_s r)] - A'_e \left\{ \left( \frac{G'}{2} \right) [J_1(k'_p r) + J_3(k'_p r)] \right\} - B'_e \left\{ \left( \frac{G'}{2} \right) [N_1(k'_p r) + N_3(k'_p r)] \right\}. \quad (40)$$

### 2.4 边界条件

要求解饱和土以及衬砌结构中的应力应变和位移, 则必须确定上述函数通解中的 10 个待定系数  $A_e$ ,  $B_e$ ,  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $A_u$ ,  $B_u$ ,  $A'_e$ ,  $B'_e$ ,  $A'_u$  和  $B'_u$ , 首先分析式 (23), 当  $r \rightarrow \infty$  时,  $I_1(kr) \rightarrow \infty$ ; 考虑离隧道无限远处空隙水压为有限值, 可知,  $B_e$  和  $B_p$  值均为 0; 所以需要求解的待定系数有 8 个。

(1) 衬砌结构内表面 ( $r=R_1$ ) 边界条件

由隧道衬砌内表面没有内力:

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}'_r(R_1) = 0, \\ \tilde{\tau}'_{r\theta}(R_1) = 0. \end{cases} \quad (41)$$

(2) 衬砌结构和饱和土接触处 ( $r=R_2$ ) 边界条件位移连续条件为

$$\begin{cases} \tilde{u}_r(R_2) = \tilde{u}'_r(R_2), \\ \tilde{u}_\theta(R_2) = \tilde{u}'_\theta(R_2). \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}'_r(R_2) = \tilde{\sigma}_r(R_2), \\ \tilde{\sigma}'_{r\theta}(R_2) = \tilde{\sigma}_{r\theta}(R_2). \end{cases} \quad (43)$$

衬砌结构不透水时, 有

$$\frac{d\tilde{p}_f}{dr}(R_2) = 0. \quad (44)$$

(3) 饱和土和基岩接触处 ( $r=D$ ) 边界条件为了引入基岩加速度对隧道衬砌结构的影响, 要求:

$$\tilde{u}_\theta(D) = 0. \quad (45)$$

利用上述边界条件, 构成了求解矩阵, 从而可以求出 8 个待定系数, 计算出饱和土及隧道结构中的应力应变分量。

## 3 地震加速度作用下饱和土中深埋隧道的动力响应问题的数值分析

为了系统分析地震加速度作用下饱和土层中圆形隧道的动力响应问题, 借助位移、应力应变分量表达

式, 利用边界条件, 编写 fortran 程序进行数值计算分析, 除特别说明情况外, 数值计算参数见表 1, 2。

表 1 饱和土参数

Table 1 Parameters of rock

密度 $\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量 $G' /\text{MPa}$	$\lambda'$ /MPa	渗透系数 $k_d /(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	加速度 $A_g /(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
1600	44	330	0.001	1.0

表 2 衬砌结构参数

Table 2 Parameters of lined tunnel

密度 $\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量 $G' /\text{MPa}$	$\lambda'$ /MPa	$R_1$ /m	$R_2$ /m	频率 $\omega$	$D$ /m
2560	8600	78000	9.5	10	$4\pi$	30

### 3.1 地震频率对动力响应的影响

取地震频率  $\omega$  分别为  $3\pi$ ,  $4\pi$  和  $5\pi$ , 分别计算饱和土及圆形隧道系统空隙水压力、径向应力、切向应力及剪应力分量的分布情况, 计算结果见图 2~5。

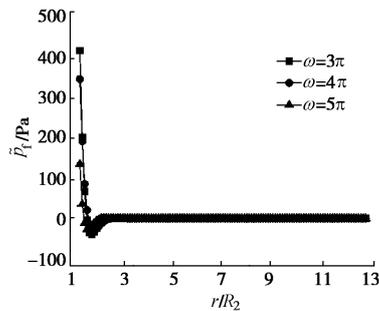


图 2 孔隙水压力与  $r/R_2$  的关系

Fig. 2 Relation between pore water pressure and  $r/R_2$

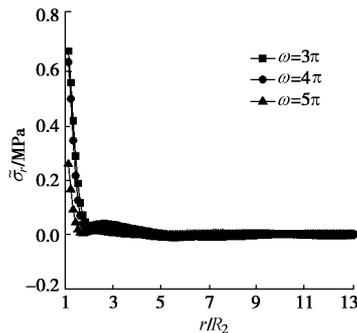


图 3 径向应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 3 Relation between radial stress and  $r/R_2$

从图 2~5 可以看出, 随着离开隧道距离的增加, 饱和土中孔隙水压力、径向应力分量和切向应力分量迅速衰减, 而剪应力分量衰减较慢, 并且其值较大, 正负值交替变化明显, 故隧道衬砌结构容易出现压剪破坏; 随着频率的增加, 孔隙水压力和应力分量最大值减小, 这与文献[11, 12]在弹性土中采用波动理论研究该问题的结论吻合。

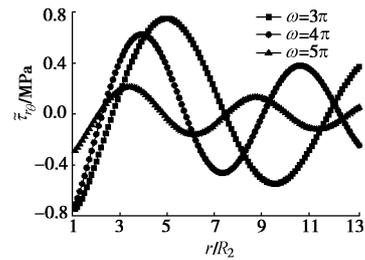


图 4 剪应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 4 Relation between shear stress and  $r/R_2$

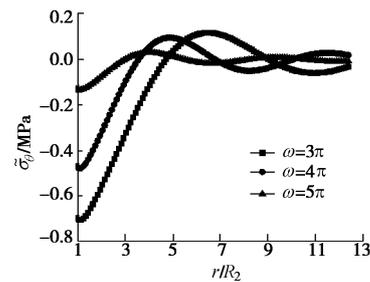


图 5 切向应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 5 Relation between tangential stress and  $r/R_2$

### 3.2 衬砌剪切模量对动力响应的影响

取衬砌结构剪切模量  $G'$  分别为 8600,  $0.3 \times 8600$ ,  $3 \times 8600$  MPa, 分别计算饱和土及圆形隧道系统空隙水压力、径向应力、切向应力及剪应力分量的分布情况, 计算结果见图 6~9。

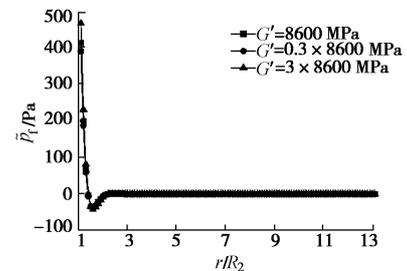


图 6 孔隙水压力与  $r/R_2$  的关系

Fig. 6 Relation between pore water pressure and  $r/R_2$

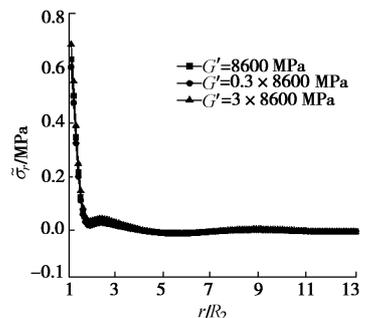


图 7 径向应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 7 Relation between radial stress and  $r/R_2$

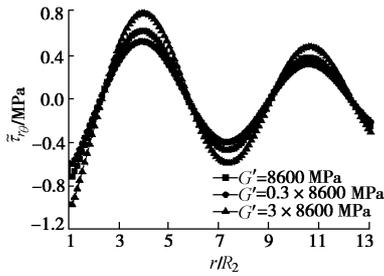


图 8 剪应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 8 Relation between shear stress and  $r/R_2$

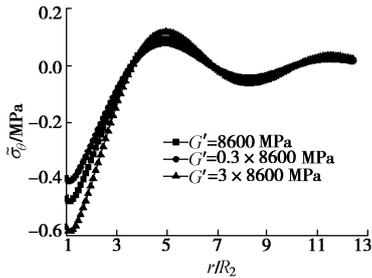


图 9 切向应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 9 Relation between tangential stress and  $r/R_2$

从图 6~9 可以看出, 随着衬砌结构剪切模量的增加, 孔隙水压力和各应力分量最大值均有所增加, 所以在隧道结构中适当增加衬砌的柔性有利于改善衬砌结构和土体中的应力分布。土体各应力分量中, 孔隙水压力较小, 剪应力分量值最大, 并且孔隙水压力只是在隧道附近的土体中较为明显, 远离隧道处的孔隙水压力可忽略不计; 随着衬砌结构刚度增加各分量值衰减速度加快, 衬砌结构的刚度大小各分量值衰减速度近似成正比关系。

### 3.3 地震加速度对动力响应的影响

取地震加速度  $A_g$  分别为 1.0, 2.0, 3.0  $m/s^2$ , 分别计算饱和土及圆形隧道系统空隙水压力、径向应力、切向应力及剪应力分量的分布情况, 计算结果见图 10~13。

从图 10~13 可以看出, 地震加速度的大小对孔隙水压力和应力分量影响最为明显, 地震加速度增量与各应力分量大小近似成正比关系; 随着地震加速度的增加, 各应力分量衰减速度也加快, 同时, 地震加速度的大小只会改变土体中各应力值的大小, 不会影响到土体中各应力作用的正负方向。

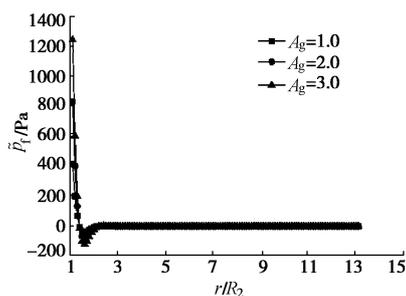


图 10 孔隙水压力与  $r/R_2$  的关系

Fig. 10 Relation between pore water pressure and  $r/R_2$

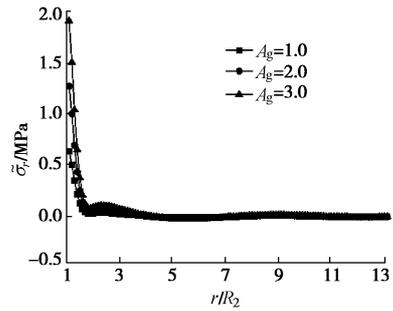


图 11 径向应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 11 Relation between radial stress and  $r/R_2$

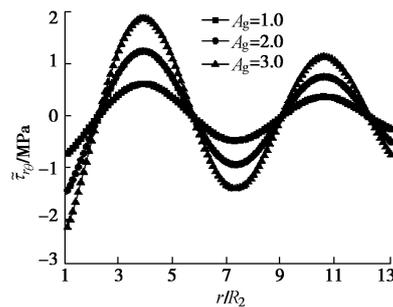


图 12 剪应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 12 Relation between shear stress and  $r/R_2$

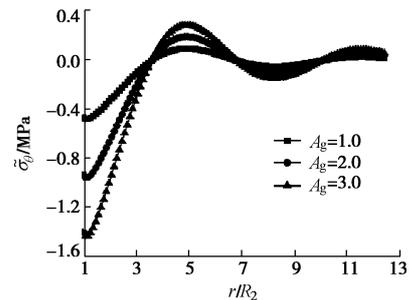


图 13 切向应力分量与  $r/R_2$  的关系

Fig. 13 Relation between tangential stress and  $r/R_2$

## 4 结 语

文章采用解析法较为全面地分析了地震频率、隧道结构参数以及地震加速度大小对饱和土中圆形隧道对地震响应的影响。研究表明: 饱和土中圆形隧道在地震加速度作用下, 土体各应力分量中, 孔隙水压力较小, 剪应力分量值最大, 随着离开隧道距离的增加, 饱和土中孔隙水压力、径向应力分量和切向应力分量迅速衰减, 而剪应力分量正负交替较慢衰减; 随着频率的增加, 孔隙水压力和土体应力分量最大值有所减小; 隧道衬砌结构剪切模量的增加, 各应力分量最大值及衰减速度均有所增加; 地震加速度的大小对各应力分量值影响最为明显, 地震加速度增加的倍数与各应力分量增加的倍数基本一致, 但不会影响到土体中各应力作用的正负方向。这些研究结果对正确

理解饱和土中圆形衬砌隧道的抗震性能、破坏机理以及指导隧道抗震设计都有参考意义。

### 参考文献:

- [1] 岳庆霞, 李杰. 近似 Rayleigh 地震波作用下地下综合管廊响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, **25**(4): 409 - 416. (YUE Qing-xia, LI Jie. Response analysis of utility tunnel in earthquake of approximate Rayleigh waves[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, **25**(4): 409 - 416. (in Chinese))
- [2] 张引科, 黄义. 弹性饱和多孔介质在非轴对称荷载下的稳态动力响应[J]. 土木工程学报, 2002, **35**(3): 41 - 45. (ZHANG Yin-ke, HUANG Yi. Steady dynamic response of elastic saturated porous medium under non-axisymmetrical load[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, **35**(3): 41 - 45. (in Chinese))
- [3] 梁建文, 纪晓东, LEE V W. 地下圆形衬砌隧道对沿线地震动的影响:(II)数值结果[J]. 岩土力学, 2005, **26**(5): 687 - 692. (LIANG Jian-wen, JI Xiao-dong, LEE V W. Effects of an underground lined tunnel on ground motion (II): numerical results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(5): 687 - 692. (in Chinese))
- [4] 梁建文, 纪晓东. 地下衬砌洞室对 Rayleigh 波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(4): 24 - 31. (LIANG Jian-wen, JI Xiao-dong. Amplification of Rayleigh waves due to underground lined cavities[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(4): 24 - 31. (in Chinese))
- [5] 史文谱, 刘殿魁, 林宏, 等. 半无限空间中稳态 P 波在衬砌周围的散射[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(3): 19 - 26. (SHI Wen-pu, LIU Dian-kui, LIN Hong, et al. Scattering of steady P-wave around a circular lining in half space[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, **22**(3): 19 - 26. (in Chinese))
- [6] 姜颌发, 王建华, 周香莲. 半空间饱和土中圆形衬砌对弹性压缩波的散射[J]. 岩土力学, 2008, **29**(2): 315 - 317. (JIANG Ling-fa, WANG Jian-hua, ZHOU Xiang-lian. Scattering around a circular lining in saturated poroelastic half-space under dilatational waves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 315 - 317. (in Chinese))
- [7] WANG J H, ZHOU X L, LU J F. Dynamic stress concentration around elliptic cavities in saturated poroelastic soil under harmonic plane waves[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, **42**: 4295 - 4310.
- [8] 张引科. 饱和土中圆形衬砌隧道地震响应的研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. (ZHANG Yin-ke. Seismic response of circular lined tunnels in saturated soils[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese))
- [9] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. (LIANG Kun-miao. Methods of mathematical physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese))
- [10] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (XU Zhi-guan. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [11] 刘中宪, 梁建文, 张贺. 弹性半空间中衬砌洞室对平面 P 波和 SV 波的散射(II) 数值结果[J]. 自然灾害学报, 2010, **19**(4): 77 - 88. (LIU Zhong-xian, LIANG Jian-wen, ZHANG He. Scattering of plane P and SV waves by a lined tunnel in elastic half space (II): numerical results [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, **19**(4): 77 - 88. (in Chinese))
- [12] 纪晓东. 半空间中圆形洞室对弹性波的散射[D]. 天津: 天津大学, 2005. (JI Xiao-dong. Scattering and diffraction of a cylindrical cavity in half-space subjected to elastic waves[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)