

# 横观各向同性土——半封闭隧道衬砌相互作用分析

高华喜<sup>1</sup>, 闻敏杰<sup>2</sup>

(1. 浙江海洋学院 船舶与建筑工程学院, 浙江 舟山 316004; 2. 上海大学 土木系, 上海 200072)

**摘要:**土体在沉积过程中存在各向异性, 将土体视为各向异性体更为合理。考虑土体和衬砌的相互作用, 基于饱和多孔介质理论和弹性理论, 在频率域内研究了简谐荷载作用下横观各向同性土——半封闭圆形隧道衬砌简谐耦合振动。通过衬砌内边界应力连续以及土体和衬砌界面处应力和位移协调, 得到了饱和横观各向同性土和衬砌的位移、应力和孔压解析表达式。利用衬砌中流体速度和土体中流体速度相等, 建立了隧道部分透水边界条件, 得到了待定系数的具体表达式。数值算例分析了土体和衬砌物性和几何参数的影响, 表明: 横观各向同性面内的弹性模量对系统动力响应影响较大, 而垂直于各向同性面内的弹性模量对系统动力响应影响较小。另外, 相对渗透系数和衬砌厚度对响应幅值有很大影响, 而衬砌泊松比对响应幅值影响较小。

**关键词:**横观各向同性; 多孔介质理论; 半封闭隧道; 渗透系数; 参数研究

中图分类号: TU 435

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0135-05

## Analysis on Interaction of Transversely Isotropic Soil and Lining with a Partially Sealed Tunnel

GAO Huaxi<sup>1</sup>, WEN Minjie<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316004, China;  
2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;)

**Abstract:** The soils have anisotropic properties in the deposition process, so regarding the soil as anisotropy medium is more reasonable. Considering the interaction of the soil and lining, and based on the theory of saturated porous medium and elastic, the harmonic coupled vibrations of the transversely isotropic soil and lining with a partially sealed circular tunnel are investigated subjected to the harmonic load in the frequency domain. The analytical expressions of the displacement, stress and pore water pressure of the transversely isotropic soil and lining are obtained by the stress continuous in the inner boundary of the lining and stress and displacement coordination at the interface of the soil and lining. The boundary conditions for partial permeable of the tunnel are established by the fluid velocity equality at the lining and soil. Then, the specific expressions of undetermined coefficient are given. The influence of material and geometric parameter of the soil and lining are studied by the numerical example, it is shown that the elastic modulus in the transversely isotropic plane has a great influence on the system dynamic responses, while the influence of elastic modulus vertical the transversely isotropic is smaller. In addition, the relative permeable coefficient and the lining thickness have big impacts on the responses amplitude, while the influence of poisson's ratio of lining is smaller.

**Key words:** transversely isotropic; porous medium theory; partially sealed tunnel; permeable coefficient; parameter study

随着科学技术的发展, 地下隧道在交通运输、地下铁道、管线等工程领域得到广泛运用。目前, 描述饱和土宏观力学行为的理论主要包括 Biot 理论、线性多孔介质理论和混合物理论。线性多孔介质理论是在体积分数概念和连续介质混合物公理基础上建立的。从连续介质模型角度讲, 比其他模型更精确<sup>[1-3]</sup>。然而, 利用线性多孔介质理论描述横观各向同性土的力学行为笔者还未见相关报道。

近年来, 对于饱和土中深埋圆形隧道的动力响应研究主要基于 Biot 理论<sup>[4]</sup>。Forrest 和 Hunt<sup>[5]</sup>、Lu Jianfei 和 Jing Dongsheng<sup>[6]</sup>、黄晓吉等<sup>[7]</sup>在三维柱坐标下研究了圆柱性隧道的简谐振动动力学特性; Xie Kanghe 等<sup>[8]</sup>、Liu Ganbin 等<sup>[9]</sup>、

高盟等<sup>[10]</sup>、蔡袁强和陈成振<sup>[11]</sup>研究了饱和黏弹性土——深埋隧洞壳体衬砌耦合振动特性。Liu Ganbin 和 Xie Kanghe<sup>[12]</sup>、Hasheminejad 和 Hosseini<sup>[13]</sup>研究了饱和弹性或黏弹性土中球空腔的瞬态动力响应。但是, 上述都忽略了土体的各向异性对位移、应力和孔压的影响。天然土体在沉积过程中存在土骨架各向异性, 考虑土的各向异性更符合实际工程。刘干斌等<sup>[14]</sup>将土体视为线弹性、横观各向同性饱和多孔介质, 根据 Biot 固结理论, 在 Laplace 变换域内得到了饱和土中圆形隧道的应力、位移和孔压解析解。然而, 没考虑土体的惯性效应, 且忽略了衬砌的影响, 也没有考虑隧道半封闭特性。而 Li<sup>[15]</sup>认为实际工程中绝大部分隧道边界不单单是

透水或不透水,而是处于半封闭状态。本文在现有研究基础上,基于饱和线性多孔介质理论和弹性理论,将土体视为横观各向同性体,在频率域内研究了简谐荷载作用下横观各向同性土——深埋圆形半封闭隧道衬砌动力相互作用。并考察了横观各向同性土和衬砌相关参数对系统响应的影响。

### 1 数学模型

如图 1,无限饱和横观各向同性土中有一深埋圆形隧洞。横观各向同性面内的弹性模量和泊松比分别表示为  $E_1$  和  $\mu_1$ ;垂直于横观各向同性面内的弹性模量和泊松比分别为  $E_2$  和  $\mu_2$ ;记土颗粒和孔隙流体的真实密度为  $\rho^{SR}$  和  $\rho^{FR}$ ,而表观密度为  $\rho^S = n^S \rho^{SR}$  和  $\rho^F = n^F \rho^{FR}$ ,其中,  $n^S, n^F$  为土颗粒和孔隙流体的体积分数。衬砌内外半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ ,其厚度为  $d = R_2 - R_1$ ;衬砌密度和泊松比分别为  $\rho^l$  和  $\nu^l$ ,而其弹性模量为  $E^l$ 。衬砌内边界作用径向均匀简谐荷载  $q_0 e^{i\omega t}$  ( $i = -1$ ),其中  $\omega$  为圆频率。衬砌中水头为  $P_1 = 0$ ;土体中水头为  $P_2 = p$ 。假设衬砌不产生变形,衬砌和土体完全接触,且忽略衬砌中孔隙水的影响,界面处无积水。

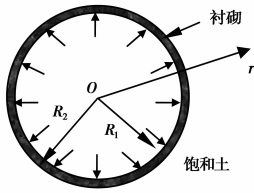


图 1 横观各向同性土——隧洞衬砌动力相互作用

### 2 土体控制方程求解

忽略土骨架和孔隙流体的压缩性,根据饱和和多孔介质理论,得到土体的流固混合物动量方程,孔隙流体动量方程及体积分数方程分别为<sup>[1]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \text{div} \sigma^S - \rho^S \ddot{u}^S + p^S &= 0 \\ \text{div} \sigma^F - \rho^F \ddot{u}^F + p^F &= 0 \\ \text{div}(n^S \dot{u}^S + n^F \dot{u}^F) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $\dot{u}^S$  和  $\ddot{u}^S$  ( $\zeta = S, F$ ) 分别表示土骨架和流体的速度及加速度;应力张量  $\sigma^S$  和  $\sigma^F$  与额外数量  $p^S, p^F$  的关系表示为<sup>[16]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \sigma^S &= -n^S p \mathbf{I} + \sigma^{SE} \\ \sigma^F &= -n^F p \mathbf{I} \\ p^F &= -p^S = p \text{grad} n^F + p^{FE} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $p, \sigma^{SE}$  分别为孔隙水压力和有效应力张量;  $p^{FE}$  表示有效孔压。根据体积分数概念和不可压缩条件,体积分数和满足平衡方程

$$n^S + n^F = 1 \quad (3)$$

因此,总应力张量可表示为

$$\sigma^T = \sigma^F + \sigma^S = -p \mathbf{I} + \sigma^{SE} \quad (4)$$

而有效孔隙水压力  $p^{FE}$  满足

$$p^{FE} = -S_v \left( \frac{\partial u_r^F}{\partial t} - \frac{\partial u_r^S}{\partial t} \right) \quad (5)$$

式中,  $S_v = (n^F)^2 \gamma_w / k^F$  为液固耦合系数,其中  $\gamma_w$  和  $k^F$  分别

为流体重度和动力渗透系数。在极坐标下式(1)~(5)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r^{SE}}{\partial r} + \frac{\sigma_r^{SE} - \sigma_\theta^{SE}}{r} - n^S \frac{\partial p}{\partial r} - \\ \rho^S \frac{\partial^2 u_r^S}{\partial t^2} + S_v \left( \frac{\partial u_r^F}{\partial t} - \frac{\partial u_r^S}{\partial t} \right) &= 0 \\ n^F \frac{\partial p}{\partial r} + \rho^F \frac{\partial^2 u_r^F}{\partial t^2} + S_v \left( \frac{\partial u_r^F}{\partial t} - \frac{\partial u_r^S}{\partial t} \right) &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( n^S \frac{\partial u_r^S}{\partial t} + n^F \frac{\partial u_r^F}{\partial t} \right) \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

显然,有效应力  $\sigma^{SE}$  的应力—位移本构关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^{SE} &= A \frac{\partial u_r^S}{\partial r} + B \frac{u_r^S}{r} \\ \sigma_\theta^{SE} &= B \frac{\partial u_r^S}{\partial r} + A \frac{u_r^S}{r} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $A = a/(a^2 - b^2)$ ;  $B = -b/(a^2 - b^2)$ ;  $a = 1/E_1 - \mu_1^2/E_2$ ;  $b = -\mu_1/E_1 - \mu_2^2/E_2$ 。

利用式(7)代入式(6),得

$$\left. \begin{aligned} A \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial u_r^S}{\partial r} + \frac{u_r^S}{r} \right) - n^S \frac{\partial p}{\partial r} - \\ \rho^S \frac{\partial^2 u_r^S}{\partial t^2} + S_v \left( \frac{\partial u_r^F}{\partial t} - \frac{\partial u_r^S}{\partial t} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$n^F \frac{\partial p}{\partial r} + \rho^F \frac{\partial^2 u_r^F}{\partial t^2} + S_v \left( \frac{\partial u_r^F}{\partial t} - \frac{\partial u_r^S}{\partial t} \right) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( n^S \frac{\partial u_r^S}{\partial t} + n^F \frac{\partial u_r^F}{\partial t} \right) \right] = 0 \quad (10)$$

对于土体——衬砌系统作稳态振动,记

$$u_r^S = U_r^S e^{i\omega t}, u_r^F = U_r^F e^{i\omega t}, p = P e^{i\omega t} \quad (11)$$

利用式(11)代入式(8)~(10),得

$$\left. \begin{aligned} A \frac{d}{dr} \left( \frac{dU_r^S}{dr} + \frac{U_r^S}{r} \right) - n^S \frac{dP}{dr} + \\ \rho^S \omega^2 U_r^S + S_v i\omega (U_r^F - U_r^S) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$n^F \frac{dP}{dr} - \rho^F \omega^2 U_r^F + S_v i\omega (U_r^F - U_r^S) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r (n^S U_r^S + n^F U_r^F) \right] = 0 \quad (14)$$

利用式(13)代入式(12),并结合式(14),可得

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{dU_r^S}{dr} + \frac{U_r^S}{r} \right) - h^2 U_r^S + \frac{C_1 D_2}{n^F r} = 0 \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} h^2 &= D_1 + \frac{n^S D_2}{n^F} \\ D_1 &= \frac{S_v i\omega - n^F \rho^S \omega^2}{n^F A} \\ D_2 &= \frac{S_v i\omega - n^S \rho^F \omega^2}{n^F A} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

利用边界条件  $U_r^S \rightarrow 0 (r \rightarrow \infty)$  以及 Bessel 函数的渐近性质,式(15)解得

$$U_r^S = C_2 K_1(hr) + \frac{D_2 C_1}{n^F h^2 r} \quad (17)$$

式中:  $C_1, C_2$  为待定系数;  $K_1(\cdot)$  为 1 阶第 2 变形 Bessel 函数。

将式(17)结合式(13)和式(14),可得

$$P = D_3 C_1 \ln r - \frac{D_4 C_2}{h} K_0(hr) + C_4 \quad (18)$$

由式(18)可见,  $\ln r$  是发散函数。为满足  $r \rightarrow \infty, p \rightarrow 0$ ,引入大数  $K$ ,使  $p = 0 (K = 0)$

$$C_4 = -D_3 C_1 \ln K + \frac{D_4 C_2}{h} K_0(hK) \approx -D_3 C_1 \ln K \quad (19)$$

$$\text{于是, } P = D_3 C_1 \ln \frac{r}{K} - \frac{D_4 C_2}{h} K_0(hr) \quad (20)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} D_3 &= \frac{1}{(n^F)^2} \left[ \frac{D_2 S_v i \omega}{h^2} + (\omega^2 \rho^F - S_v i \omega) \left( 1 - \frac{n^S D_2}{n^F h^2} \right) \right] \\ D_4 &= \frac{S_v i \omega}{n^F} - \frac{n^S (\omega^2 \rho^F - S_v i \omega)}{(n^F)^2} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

利用式(17)代入本构关系式(7),得土骨架的有效应力为

$$\sigma_r^{SE} = e^{i\omega t} \{ \delta_1 (B-A) - Ah C_2 K_0(hr) \} \quad (22)$$

$$\text{式中, } \delta_1 = \frac{D_2 C_1}{n^F h^2 r^2} + \frac{C_2}{r} K_1(hr)$$

根据式(4),得土体总应力为

$$\sigma_r^T = e^{i\omega t} \left\{ \left[ \frac{D_2 (B-A)}{n^F h^2 r^2} - D_3 \ln \frac{r}{K} \right] C_1 + \delta_2 C_2 \right\} \quad (23)$$

$$\text{式中, } \delta_2 = \frac{(B-A)}{r} K_1(hr) + \left( \frac{D_4}{h} - Ah \right) K_0(hr)$$

### 3 衬砌控制方程

假设衬砌为弹性均匀介质,对于稳态振动,记  $u_r^L = U_r^L e^{i\omega t}$ ,则衬砌的动力方程为

$$\frac{d^2 U_r^L}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_r^L}{dr} - \frac{U_r^L}{r^2} - q^2 U_r^L = 0 \quad (24)$$

$$\text{式中: } \left. \begin{aligned} q^2 &= -\frac{\rho^L \omega^2}{\lambda^L + 2\mu^L} \\ \lambda^L &= \frac{v^L E^L}{(1+v^L)(1-2v^L)} \\ \mu^L &= \frac{E^L}{2(1+v^L)} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

由式(24)易解得

$$U_r^L(r) = C_5 I_1(qr) + C_6 K_1(qr) \quad (26)$$

式中  $C_5, C_6$  为待定系数。

于是,径向应力为

$$\sigma_r^L = e^{i\omega t} \frac{E^L}{(1-2v^L)(1+v^L)} (\zeta_1 C_5 - \zeta_2 C_6) \quad (27)$$

$$\text{式中: } \zeta_1 = (1-v^L) q I_0(qr) - \frac{1-2v^L}{r} I_1(qr)$$

$$\zeta_2 = (1-v^L) q K_0(qr) + \frac{1-2v^L}{r} K_1(qr)$$

### 4 边界条件

衬砌内边界( $r=R_1$ )作用均布轴对称简谐荷载,则满足

$$\sigma_r^L = q_0 e^{i\omega t}, \quad r = R_1 \quad (28)$$

假设衬砌和土体完全紧密接触,则在界面处( $r=R_2$ )满足

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^L &= \sigma_r^T \\ u_r^L &= u_r^S \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

衬砌中的流体速度为<sup>[15]</sup>

$$v^L = \frac{k^L (P_2 - P_1)}{\gamma_w R_2 (\ln R_2 - \ln R_1)} \quad (30)$$

式中  $k^L$  为衬砌的 Darcy 渗透系数。

而土体中流体速度为

$$v^S = \frac{k^F}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (31)$$

显然,上述两者流体速度在衬砌和土体界面处( $r=R_2$ )相

等,则

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \kappa p \quad (32)$$

式中  $\kappa = \frac{k^L}{k^F R_2 (\ln R_2 - \ln R_1)}$  为衬砌和土体相对渗透系数,由衬砌的几何尺寸决定。当  $k^L \ll k^F$  时,  $\kappa \rightarrow 0$ , 边界不渗透,衬砌处于封闭状态;当  $k^L \gg k^F$  时,  $\kappa \rightarrow \infty$ , 边界为自由渗透,衬砌为不封闭状态。

至此,可利用边界条件式(28)、式(29)和式(32)代入式(17)、(18)、(23)和式(26)、(27),即可得到待定系数  $C_1, C_2, C_5, C_6$  的具体表达式,从而得到横观各向同性土中深埋圆形半封闭隧道的稳态动力响应解析解。

### 5 数值算例及分析

为了分析圆形半封闭隧道的振动响应规律,圆形隧道深埋于横观各向同性饱和土中。计算参数参考文献[10,17]:衬砌内半径  $R_1=3$  m,衬砌厚度  $d=0.25$  m,衬砌材料密度为  $\rho^L=2800$  kg/m<sup>3</sup>,衬砌弹性模量  $E^L=7 \times 10^8$  Pa,衬砌泊松比  $v^L=0.2$ ,土颗粒体积分数  $n^S=0.6$ ,孔隙流体体积分数  $n^F=0.4$ ,孔隙流体真实密度  $\rho^F=1000$  kg/m<sup>3</sup>,土颗粒真实密度  $\rho^S=2500$  kg/m<sup>3</sup>,横观各向同性面内的弹性模量和泊松比分别为  $E_1=12 \times 10^6$  Pa 和  $\mu_1=0.4$ ,垂直于横观各向同性面内的弹性模量和泊松比分别为  $E_2=8 \times 10^6$  Pa 和  $\mu_2=0.3$ 。土体动力渗透系数  $k^F=1 \times 10^{-7}$  m/s,参数  $K=60$ ,衬砌和土体的相对渗透系数  $\kappa=0.1$ 。计算过程中位移和孔压幅值表示为  $f = \sqrt{[\text{Re}(f)]^2 + [\text{Im}(f)]^2}$ 。

首先,考察饱和土和衬砌相关参数对径向位移幅值  $|U|$  的影响。图 2 和图 3 分别表示在界面处( $r=3.25$  m)横观各向同性面内和垂直于横观各向同性面内的弹性模量对径向位移幅值  $|U|$  的影响。图 2 可见,横观各向同性面内的弹性模量  $E_1$  对位移幅值  $|U|$  影响很大。随着  $E_1$  的增加,土体的横观刚度增大,故位移幅值  $|U|$  明显减小。衬砌—土系统发生明显的共振现象,当  $E_1$  的增加时共振效应减弱,而基频逐渐增大。图 3 看出,垂直于横观各向同性面内的弹性模量  $E_2$  对位移幅值  $|U|$  影响很弱。随着  $E_2$  的变化,位移幅值几乎无变化,说明垂直于横向面的弹性模量对位移幅值无影响。图 4、图 5、图 6 和图 7 分别表示在  $r=4$  m 处衬砌厚度对径向位移幅值  $|U|$  的影响以及在  $r=3.25$  m 处渗透系数  $\kappa$ 、衬

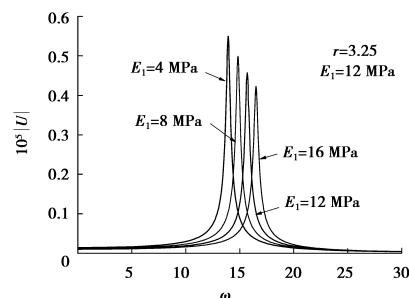


图 2 横观各向同性面内弹性模量对位移幅值影响

砌泊松比  $v^L$ 、横向面的泊松比  $\mu_1$  对径向位移幅值  $|U|$  的影响。图 4 中,随着衬砌厚度的增加,衬砌的刚度越大,导致位移幅值的峰值明显降低,而共振效应的基频逐渐增大。图 5

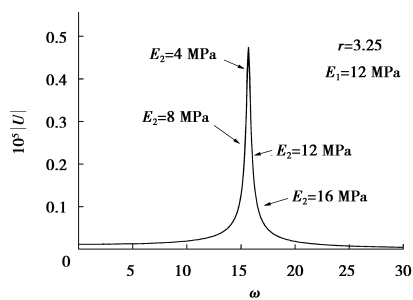


图 3 垂直于横观各向同性面弹性模量对位移幅值影响

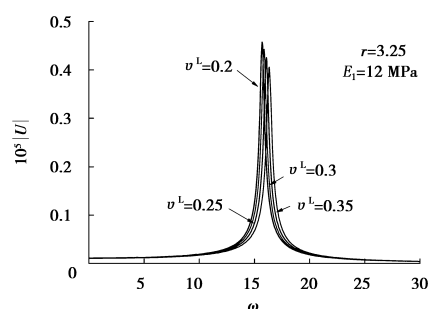


图 6 衬砌泊松比对位移幅值影响

可见,衬砌和土体相对渗透系数  $\kappa$  对位移幅值  $|U|$  影响很大。当  $\kappa=0.1$  时,位移幅值  $|U|$  的峰值最大,而当  $\kappa=100$  时峰值明显减小。这说明孔隙水的渗透性对系统动力响应影响很大。衬砌和土体界面处不渗透产生的共振效应明显比自由渗透时产生的共振效应要强,且基频也要大。另外,发现当  $\kappa=10$  和  $\kappa=100$  两种情况时对系统动力响应影响不大,这说明边界已经很接近自由渗透状态 ( $\kappa \rightarrow \infty$ )。图 6 和图 7 综合可见,衬砌泊松比  $\nu^l$  和横向面的泊松比  $\mu_1$  对径向位移幅值  $|U|$  的影响较小。

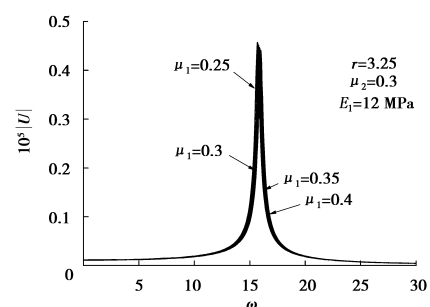


图 7 横观各向同性面内泊松比对位移幅值影响

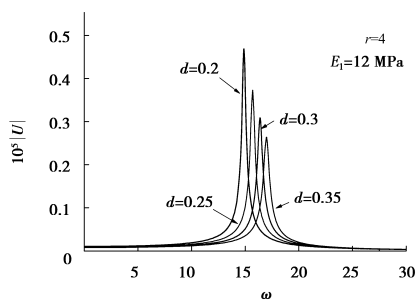


图 4 衬砌厚度对位移幅值影响

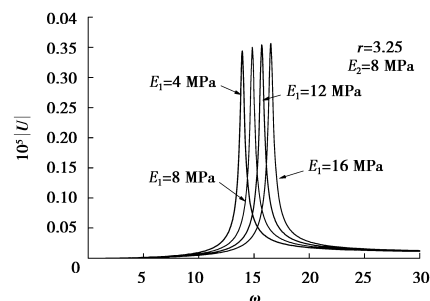


图 8 横观各向同性面内弹性模量对孔压幅值影响

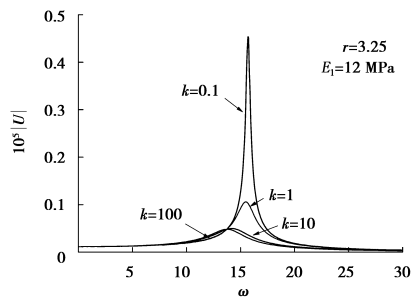


图 5 相对渗透系数对位移幅值影响

其次,考察饱和土和衬砌相关参数对孔隙水压力幅值  $|P|$  的影响。图 8 和图 9 分别表示在界面处 ( $r=3.25$  m) 横观各向同性面内的弹性模量  $E_1$  和垂直于横观各向同性面内的弹性模量  $E_2$  对孔压幅值  $|P|$  的影响。图 8 可见,随着  $E_1$  的增加,孔压幅值的峰值有增大趋势,且共振的基频逐渐增大。图 9 可知,  $E_2$  对孔压幅值的影响类似于对位移幅值的影响。随着  $E_2$  的增加,孔压幅值几乎无变化。图 10、11、12、13 分别表示在  $r=4$  m 处衬砌厚度对孔压幅值  $|P|$  的影响及在  $r=3.25$  m 处相对渗透系数  $\kappa$ 、衬砌泊松比  $\nu^l$ 、横观泊松比

$\mu_1$  对孔压幅值  $|P|$  的影响。图 10 可见,随着衬砌厚度的增加,孔压幅值峰值减小,共振效应减弱而基频增加。图 11 可知,  $\kappa=0.1$  时产生的孔压幅值峰值明显大于其它渗透系数时产生的峰值。当  $\kappa=10$  和  $\kappa=100$  时孔压幅值几乎不产生峰值。可见,渗透系数更合理地描述了界面处的渗透特性。图 12、13 可见,衬砌泊松比  $\nu^l$  和横观泊松比  $\mu_1$  对孔压幅值影响较小。

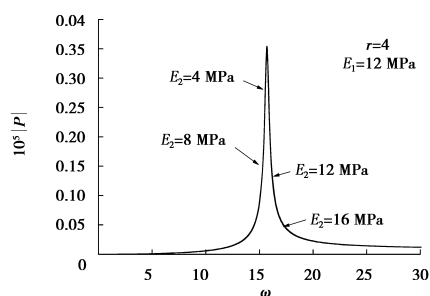


图 9 垂直于横观各向同性面弹性模量对孔压幅值影响

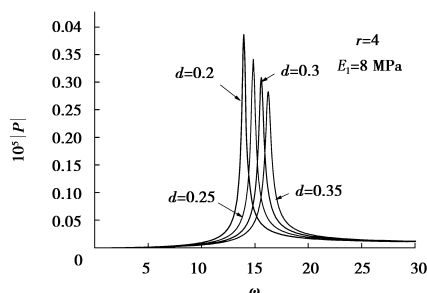


图 10 衬砌厚度对孔压幅值影响

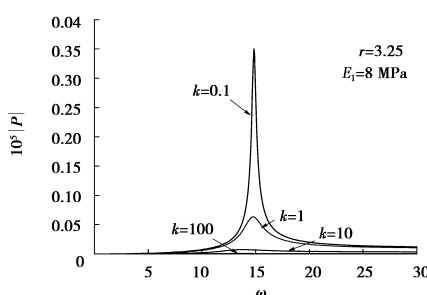


图 11 相对渗透系数对孔压幅值影响

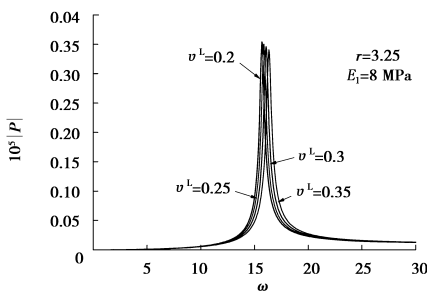


图 12 衬砌泊松比对孔压幅值影响

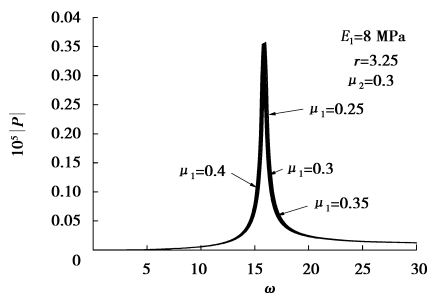


图 13 横观各向同性面内泊松比对孔压幅值影响

量对系统响应影响很弱;渗透系数和衬砌厚度对响应幅值影响很大,而衬砌泊松比和土体横向面泊松比对系统动力响应影响很弱;渗透系数更好地反映了隧道的渗透特性,透水和不透水边界条件只是隧道边界渗透条件的两种极限状态。

参考文献:

[1] 刘林超, 杨晓. 基于多孔介质理论的饱和土: 桩纵向耦合振动研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 89-95.  
 LIU Linchao, YANG Xiao. Vertical coupled vibration of pile in saturated soil based on theory of porous medium[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 89-95.

[2] Edelman I, Wilmanski K. Asymptotic analysis of surface waves at vacuum porous medium and liquid porous medium interfaces [J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2002, 14 (1): 25-44.

[3] Yang X. Gurtin-type variational principles for dynamics of a non-local thermal equilibrium saturated porous medium[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 18(1): 37-45.

[4] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(2): 182-185.

[5] Forrest J A, Hunt H E M. A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4-5): 678-705.

[6] Lu J F, Jeng D S. Dynamic analysis of an infinite cylindrical hole in a saturated poroelastic medium[J] Archive of Applied Mechanics, 2006, 76(5/6): 263-276.

[7] 黄晓吉, 扶有福, 徐斌, 等. 简谐环形荷载作用下饱和土体中圆形衬砌隧道的动力响应研究[J]. 铁道建筑, 2011, 1(4): 29-32.  
 HUANG Xiaoji, FU Mingfu, XU Bin, et al. Study of dynamic response of lined circular tunnel in saturated soil under harmonic ring load[J]. Railway Engineering, 2011, 1(4): 29-32.

[8] Xie K H, Liu G B, Shi Z Y. Dynamic response of a circular tunnel in viscoelastic saturated soil[J]. Soil Dynamic & Earthquake Engineering, 2004, 24(12): 1003-1011.

[9] Liu G B, Xie K H, Liu X H. Dynamic response of a partially sealed tunnel in porous rock under inner water pressure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4): 407-414.

[10] 高盟, 高广运, 王滢, 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 Guangyun, 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.

[11] 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 Yuanqiang, CHEN Chenfei, SUN Honglei. Transient dynamic response of tunnels subjected to blast loads in saturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (3): 361-367.

6 结论

笔者考虑衬砌和土体的相互作用, 基于饱和和线性多孔介质理论和弹性理论, 得到了简谐荷载作用下横观各向同性饱和土体中深埋半封闭圆形隧道的位移、应力和孔压解析表达式, 并算例讨论了饱和土体和衬砌相关物性和几何参数对振动响应的影响规律。结果表明: 横观各向同性面内弹性模量对系统响应有较大影响, 而垂直于横观各向同性面内弹性模

- 1499-1506.
- [7] 陈绪和,王正. 竹胶合梁制造及在建筑中的应用[J]. 世界竹藤通讯, 2005, 3(3): 18-20.  
CHEN Xuhe, WANG Zheng. Bamboo based panels for structural application[J]. World Bamboo and Rattan, 2005, 3(3): 18-20. (in Chinese)
- [8] 肖岩,余立永,单波,等. 现代竹结构在汶川地震灾后重建中的应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 14-18.  
XIAO Yan, SHE Liyong, SHAN Bo. Application of modern bamboo structure to reconstruction after Wenchuan earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(3): 14-18.
- [9] Xiao Yan, Zhou Quan, Shan Bo. Design and Construction of Modern Bamboo Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2010, 15(5): 533-541.
- [10] Wei Y, Jiang S X, Lv Q F, et al. Flexural Performance of Glued Laminated Bamboo Beams[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168-170: 1700-1703.
- [11] 魏洋,吕清芳,张齐升,等. 现代竹结构抗震安居房的设计与施工[J]. 施工技术, 2009, 38(11): 52-55.  
WEI Yang, LYU Qingfang, ZHANG Qisheng, et al. Design and construction of the modern bamboo anti-seismic living room[J]. Construction Technology, 2009, 38(11): 52-55.
- [12] 蒋身学,张齐生,傅万四,等. 竹材重组材高频加热胶合成型压机研制及应用[J]. 林业科技开发, 2011, 25(3): 109-111.  
JIANG Shenxue, ZHANG Qisheng, FU Wansi, et al. Development and application of high-frequency heating molding press for parallel bamboo sliver lumber[J]. China Forestry Science and Technology, 2011, 25(3): 109-111.
- [13] 魏洋,蒋身学,李国芬,等. FRP筋增强竹梁的力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(S1): 327-331.  
WEI Yang, JIANG Shenxue, LI Guofen, et al. Experimental study on mechanical properties of bamboo beams reinforced with FRP bars[J]. Industrial Construction, 2009, 39(S1): 327-331.
- [14] 中华人民共和国国家标准. 木结构设计规范(GB 50005—2003)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
Chinese National Standards. Code for design of timber structures (GB 50005—2003)[S]. Beijing, China Architecture and Building Press, 2003.
- [15] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构可靠度设计统一标准(GB 50068—2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
Chinese National Standards. Unified standard for reliability design of building structures (GB 50068—2001)[S]. Beijing, China Architecture & Building Press, 2001.
- [16] 潘景龙,祝恩淳. 木结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
PAN Jinglong, ZHU Enchun. Wood structural design principle [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

(编辑 张 苹)

(上接第 139 页)

- [12] Liu G B, Xie K H. Transient response of a spherical cavity with a partially sealed shell embedded in viscoelastic saturated soil [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6A(3): 194-201.
- [13] Hasheminejad S M, Hosseini H. Dynamic stress concentration near a fluid-filled permeable borehole induced by general modal vibrations of an internal cylindrical radiator[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(6): 441-458.
- [14] 刘干斌,谢康和,施祖元,等. 横观各向同性土中深埋圆形隧道的应力和位移分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 727-731.  
LIU Ganbin, XIE Kanghe, SHI Zuyuan. Analysis of stress and displacement around a deep circular tunnel in transversely isotropic soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 727-731.
- [15] LI X. Stress and displacement fields around a deep circular tunnel with partial sealing[J]. Computers and Geotechnics, 1999, 24(2): 125-140.
- [16] YANG X, PAN Y. Axisymmetrical analytical solution for vertical vibration of end-bearing pile in saturated viscoelastic soil layer[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(2): 193-204.

(编辑 张 苹)