

# 地震波斜入射下浅埋偏压双隧道地震响应分析\*

朱辉<sup>1</sup>, 严松宏<sup>1,2</sup>, 孙纬宇<sup>1,2</sup>, 欧尔峰<sup>1,2</sup>, 林峻岑<sup>1</sup>, 汪精河<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院 兰州, 730070)

(2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室 兰州, 730070)

**摘要** 浅埋偏压隧道上覆岩土体薄弱, 承受荷载不对称, 在地震作用下的动力稳定性较差且易发生灾害。为研究其在地震作用下的动力响应特征, 首先, 基于波动理论将地震波转换为黏弹性人工边界上的等效节点荷载, 建立了SV波斜入射时的荷载计算公式; 其次, 在ANSYS中编制APDL程序实现了黏弹性人工边界的自动生成和地震荷载的自动输入; 最后, 基于该输入方法, 研究了某浅埋偏压双洞隧道在不同洞距时衬砌主应力的分布规律。结果表明: 地震波斜入射时两隧道衬砌应力均为不对称的X型分布, 随着洞距的增大, 深埋侧隧道应力分布逐渐趋于对称, 浅埋侧隧道应力分布无明显变化; 当洞距达到 $4D$  ( $D$ 为最大洞径)后, 浅埋侧隧道对深埋侧隧道的影响可以忽略。因此, 认为地震波斜入射时浅埋偏压双隧道的合理洞距为 $4D$ 。

**关键词** 偏压隧道; 地震波斜入射; 合理洞距; 地震响应  
**中图分类号** TU435; U25

## 引言

与地上结构相比, 地下结构由于受到周围岩土体的约束, 一般认为其抗震性能相对较好, 因此地下结构的抗震问题常被忽略。如果遭遇强震, 大量的地下结构会产生不同程度的破坏甚至倒塌, 如日本阪神地震中灾区内10%的隧道受到严重破坏<sup>[1]</sup>、我国台湾集集地震中约49座隧道发生破坏<sup>[2]</sup>、汶川地震中约100多座隧道受损<sup>[3]</sup>, 因此隧道等地下结构的抗震问题需被重视。在地下结构抗震问题的研究中, 通常认为地震波的传播方向为垂直方向。对于深源地震或土体等介质, 这种说法是正确的。对于浅源地震或岩体等介质, 由于震源较近或介质的材料刚度较大, 地震波在传播过程中角度改变相对较慢。对于地下结构来说地震波是以一定的角度倾斜入射, 而倾斜入射引起的非一致变形会对地震响应规律产生重要的影响。

目前, 隧道等地下结构的抗震问题研究取得了许多成果。文献[4-5]对SV波、P波入射下浅埋双洞隧道的衬砌应力响应规律。杜修力等<sup>[6]</sup>对SH波入射时断层隧道的动力响应特征。李林等<sup>[7]</sup>基于振动台模型试验对隧道洞口段的地震响应特征。白哲等<sup>[8]</sup>对地震力作用下偏压隧道围岩压力的解析解分别进行了研究。以上研究均假设地震波是垂直或水平入射, 未考虑地震波倾斜入射的情况。在地震波倾斜入射的研

究方面, 孙纬宇等<sup>[9]</sup>对SV斜入射时近接双洞隧道的地震响应特征。文献[10-12]对地震波斜入射时浅埋偏压单洞隧道的地震响应特征。周晓洁等<sup>[13]</sup>对地震波斜入射时沉管隧道的地震响应特征。杜修力等<sup>[14]</sup>对SV波斜入射时岩体隧道洞身段的地震响应特征分别进行了研究。以上研究都是基于均压隧道或偏压单洞隧道的斜入射, 而在我国西部地区由于地形条件的限制, 在实际工程中会有偏压双洞隧道的存在, 其在地震波斜入射时的动力响应也应予以重视。

笔者采用将地震波转化为黏弹性人工边界上等效率节点荷载的地震动输入方法, 在有限元软件ANSYS中编制APDL程序, 实现黏弹性人工边界的自动生成和等效节点荷载的自动输入, 并基于该程序研究了地震波倾斜入射时不同洞距对浅埋偏压双洞隧道地震响应特征的影响。

## 1 地震波斜入射方法

### 1.1 黏弹性人工边界

在研究地震作用下土-结构之间相互作用的问题时, 选择能够真实模拟无限域地基特性且与地震动输入方式相匹配的人工边界, 是正确反映土-结构整体动力特性的关键。

\* 国家自然科学基金资助项目(52068044, 52168058, 52208392); 甘肃省自然科学基金资助项目(21JR7RA309); 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室开放基金资助项目(GSDQ-KF2020-5); 中国博士后科学基金资助项目(2021M693843)  
收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-05-25

目前,常用的人工边界主要有黏性边界<sup>[15]</sup>、透射边界<sup>[16]</sup>及黏弹性边界<sup>[17-18]</sup>等。其中,黏弹性人工边界克服了黏性边界低频漂移和透射边界高频失稳的缺点,具有良好的低频和低频稳定性,同时还可以模拟半无限地基的弹性恢复性能,是被广泛使用的一种人工边界。在大型通用有限元软件ANSYS中,黏弹性人工边界可采用具有弹簧和阻尼原件的COMBIN14单元模拟,其主要参数为

$$\begin{cases} K_n = \alpha_n G/R \\ C_n = \rho C_p \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} K_t = \alpha_t G/R \\ C_t = \rho C_s \end{cases} \quad (2)$$

其中: $K_n, K_t$ 分别为法向和切向弹簧刚度系数; $C_n, C_t$ 分别为法向和切向阻尼系数; $\alpha_n, \alpha_t$ 分别为法向和切向人工边界修正系数,其值按文献[18]分别取1.0和0.5; $\rho$ 为介质密度; $G$ 为剪切模量; $R$ 为波源到人工边界的距离; $C_p, C_s$ 分别为压缩波速和剪切波速。

## 1.2 人工边界等效节点荷载

为更加便捷地在有限元软件中模拟地震动对结构的作用过程,采用文献[19]提出的波场分解技术,将总波场分解为内行场和外行场,从而减少地震动输入的工作量。内行场是指从无限域通过人工边界进入有限域的波场,外行场是指从有限域通过人工边界进入无限域的波场。其中,内行场需要将其转化为人工边界节点上的等效荷载来输入到有限元模型,而外行场可直接由黏弹性人工边界来模拟。

图1为SV波斜入射时自由场输入模型。图中一平面SV波与垂直方向成 $\theta$ 角度倾斜入射。对于左侧边界,内行场由入射角为 $\theta$ 的SV波、反射角为 $\theta$ 的SV波和反射角为 $\beta$ 的P波叠加而成,其中反射角 $\beta$ 可根据半空间表面反射规律确定;对于底边界,内行场仅由入射角为 $\theta$ 的SV波组成;对于右侧边界,在地震波斜入射时只有外行场而无内行场,故无需输入等效荷载。

设作用在人工边界上的等效节点荷载为 $F_b$ ,则其荷载分量分别如下。

对于左侧人工边界

$$\begin{cases} F_{bx}^{-x}(t) = [K_n u_{bx}^{-x}(t) + C_n \dot{u}_{bx}^{-x}(t) - \sigma_x] A_b \\ F_{by}^{-x}(t) = [K_t u_{by}^{-x}(t) + C_t \dot{u}_{by}^{-x}(t) - \tau_{xy}] A_b \end{cases} \quad (3)$$

对于底边人工边界

$$\begin{cases} F_{bx}^{-y}(t) = [K_t u_{bx}^{-y}(t) + C_t \dot{u}_{bx}^{-y}(t) - \tau_{yx}] A_b \\ F_{by}^{-y}(t) = [K_n u_{by}^{-y}(t) + C_n \dot{u}_{by}^{-y}(t) - \sigma_y] A_b \end{cases} \quad (4)$$

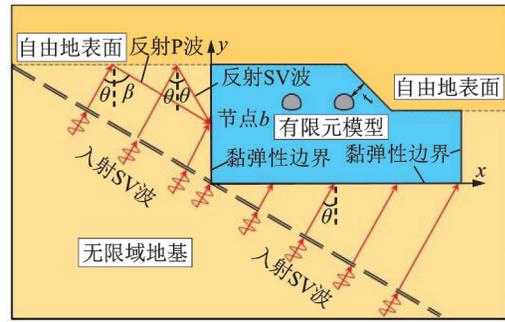


图1 SV波斜入射时自由场输入模型

Fig.1 Free-field input model under obliquely incident SV waves

其中:上标表示节点 $b$ 所在边界的外法线方向;下标表示节点 $b$ 的荷载分量方向;与坐标轴方向相同为+,与坐标轴方向相反为-; $A_b$ 为节点 $b$ 所影响的面积,在ANSYS中可用ARNODE函数提取。

因此,在求解边界上某一节点的等效荷载时,只需求解其自由场位移、自由场速度和自由场应力即可。

## 1.3 边界等效节点荷载求解

SV波斜入射时, $u(t) = u_0(t)$ ,对于左边界,根据波动理论,各分量的求解如下。

位移场为

$$\begin{cases} u_{bx}^{-x}(t) = u_0(t - \Delta t_1) \cos \theta - A_1 u_0(t - \Delta t_2) \cos \theta + \\ \quad A_2 u_0(t - \Delta t_3) \sin \beta \\ u_{by}^{-x}(t) = -u_0(t - \Delta t_1) \sin \theta - A_1 u_0(t - \Delta t_2) \sin \theta - \\ \quad A_2 u_0(t - \Delta t_3) \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

速度场为

$$\begin{cases} \dot{u}_{bx}^{-x}(t) = \dot{u}_0(t - \Delta t_1) \cos \theta - A_1 \dot{u}_0(t - \Delta t_2) \cos \theta + \\ \quad A_2 \dot{u}_0(t - \Delta t_3) \sin \beta \\ \dot{u}_{by}^{-x}(t) = -\dot{u}_0(t - \Delta t_1) \sin \theta - A_1 \dot{u}_0(t - \Delta t_2) \sin \theta - \\ \quad A_2 \dot{u}_0(t - \Delta t_3) \cos \beta \end{cases} \quad (6)$$

应力张量为

$$\begin{cases} \sigma_x = -\rho C_s \sin 2\theta [\dot{u}_0(t - \Delta t_1) - A_1 \dot{u}_0(t - \Delta t_2)] - \\ \quad \frac{\lambda + 2G \sin^2 \beta}{C_p} A_2 \dot{u}_0(t - \Delta t_3) \\ \tau_{xy} = -\rho C_s \cos 2\theta [\dot{u}_0(t - \Delta t_1) + A_1 \dot{u}_0(t - \Delta t_2)] + \\ \quad \frac{G \sin 2\beta}{C_p} A_2 \dot{u}_0(t - \Delta t_3) \end{cases} \quad (7)$$

对于底边界,各分量的求解如下。

位移场为

$$\begin{cases} u_{bx}^{-y}(t) = u_0(t - \Delta t_4) \cos \theta \\ u_{by}^{-y}(t) = -u_0(t - \Delta t_4) \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

速度场为

$$\begin{cases} \dot{u}_{bx}^{-y}(t) = \dot{u}_0(t - \Delta t_4) \cos \theta \\ \dot{u}_{by}^{-y}(t) = -\dot{u}_0(t - \Delta t_4) \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

应力张量为

$$\begin{cases} \tau_{yx} = -\rho C_s \cos(2\theta) u_0(t - \Delta t_4) \\ \sigma_y = \rho C_s \sin(2\theta) u_0(t - \Delta t_4) \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\Delta t_1 \sim \Delta t_4$  分别为左边界入射 SV 波、反射 SV 波、反射 P 波和底边界入射 SV 波的延迟时间;  $A_1, A_2$  分别为反射 SV 波、反射 P 波与入射 SV 波的幅值比;  $\lambda$  为拉梅常数;  $G$  为动剪切模量。

相关参数可由式(11)进行计算

$$\begin{cases} \beta = \arcsin(C_p \sin \theta / C_s) \\ A_1 = \frac{C_s^2 \sin 2\theta \sin 2\beta - C_p^2 \cos^2 2\theta}{C_s^2 \sin 2\theta \sin 2\beta + C_p^2 \cos^2 2\theta} \\ A_2 = \frac{2C_s C_p \sin 2\theta \cos 2\theta}{C_s^2 \sin 2\theta \sin 2\beta + C_p^2 \cos^2 2\theta} \\ \Delta t_1 = y \cos \theta / C_s \\ \Delta t_2 = (2H - y) \cos \theta / C_s \\ \Delta t_3 = \frac{H - y}{C_p \cos \beta} + \frac{[H - (H - y) \tan \theta \tan \beta] \cos \theta}{C_s} \\ \Delta t_4 = x \sin \theta / C_s \end{cases} \quad (11)$$

其中: 反射 P 波的反射角  $\beta$  要小于  $90^\circ$ ; 入射角  $\theta$  要小于其临界值, 即  $\theta < [\theta] = \arcsin(C_s / C_p)$ 。

将式(5)~(10)分别代入式(3)~(4)中, 即可得各边界的等效节点荷载。按照上述步骤, 通过 ANSYS 软件编制 APDL 程序即可实现黏弹性人工边界的自动生成和等效节点荷载的自动加载, 完成有限元模型上地震动的输入。

## 2 地震动输入方法验证

为验证所编制地震动输入程序的正确性和有效性, 从无限域地基中截取  $1800 \text{ m} \times 600 \text{ m}$  的有限区域作为图 2 所示的弹性半空间有限元模型。

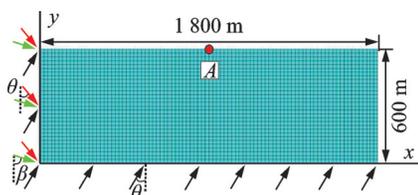


图 2 弹性半空间有限元模型

Fig.2 Finite element model of elastic half space

模型上边界为自由地表面, 左、右边界和底边界分别建立黏弹性人工边界。模型的主要参数如下: 弹性模量  $E = 1.25 \text{ GPa}$ ; 泊松比  $\mu = 0.3$ ; 介质密度  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ 。在上边界中点处设置一监测点 A。

计算得到地震波速分别为:  $C_s = 500 \text{ m/s}$ ;  $C_p = 866 \text{ m/s}$ 。取一与竖直方向成  $20^\circ$  夹角的 SV 波从左下角倾斜入射, 入射波位移时程曲线如图 3 所示。

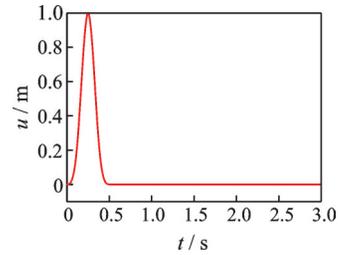


图 3 入射波位移时程曲线

Fig.3 Displacement-time history curve of incident wave

入射波位移表达式为

$$\begin{cases} u(t) = 16[G(\tau) - 4G(\tau - 0.25) + 6G(\tau - 0.5) - 4G(\tau - 0.75) + G(\tau - 1)] \\ G(\tau) = \tau^3 H(\tau) \\ \tau = t/T \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $T = 0.5 \text{ s}$ , 为荷载持时;  $H(\tau)$  为 Heaviside 函数。

图 4 为 SV 波以  $20^\circ$  倾斜入射时半空间位移场云图。图中为当  $t = 1.98 \text{ s}$  和  $t = 2.53 \text{ s}$  时, 入射 SV 波到达地表后发生反射, 产生反射 SV 波和反射 P 波的传播过程及其在半空间的叠加情况。

图 5 为监测点 A 的位移时程曲线。可以看出, 监测点 A 处的理论解和计算解基本吻合, 验证了本研究所采用的方法和程序的正确性。

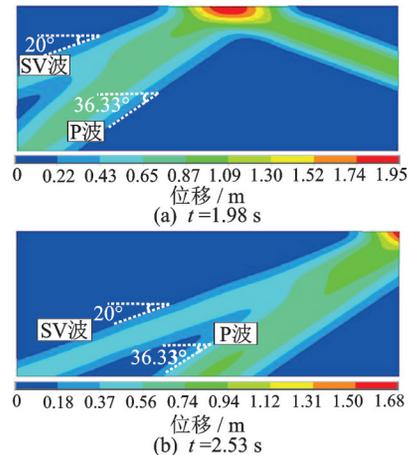


图 4 SV 波以  $20^\circ$  倾斜入射时半空间位移场云图

Fig.4 Displacement contour of the semi-infinite space under SV waves with  $20^\circ$  incident angle

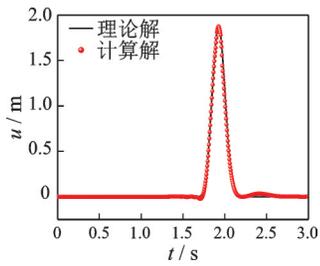


图5 监测点A的位移时程曲线

Fig.5 Displacement time history at observation point A

### 3 偏压隧道计算模型

以成兰铁路某隧道地质情况为依据,建立如图6所示的偏压双洞隧道模型,其围岩等级为V级,隧道断面最大洞径 $D=11.8\text{ m}$ ,最大高度为 $9.86\text{ m}$ ,二衬厚度为 $0.5\text{ m}$ ,隧道周边土体中设 $3\text{ m}$ 长系统锚杆进行加固。参考文献[10]的模型尺寸,模型的左边界高度为 $160\text{ m}$ ,右边界高度为 $80\text{ m}$ ,偏压角度为 $45^\circ$ ,覆土厚度 $t=10\text{ m}$ 。为消除地基辐射阻尼的影响,同时考虑到模型大小变化会引起其自振频率的变化,从而改变模型阻尼系数,使得变量不唯一,因此模型采用固定大小,即宽度 $L=32D$ 保持不变,洞距 $A$ 分别取 $0.5D, 1D, 2D, 3D, 4D, 6D$ 和 $8D$ ,隧道衬砌主要特征点见图7,主要计算参数见表1。

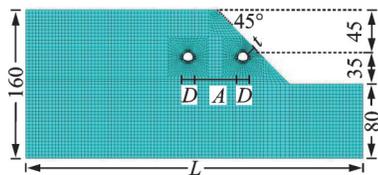


图6 偏压双洞隧道模型(单位:m)

Fig.6 Unsymmetrical-loading double tunnel model (unit:m)

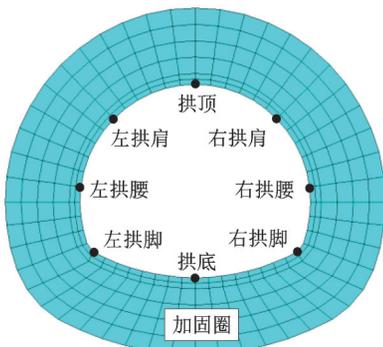


图7 衬砌主要特征点

Fig.7 Main feature points of lining

围岩、衬砌及加固圈均采用Plane182单元模拟,单元关键选项按平面应变问题考虑。由于在ANSYS中,经典DP(Drucker-Prager)材料模型已无法适用于Plane182等高级单元,因此围岩和加固圈

表1 主要计算参数

Tab.1 Main calculation parameters

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )
衬砌	2 500	31.0	0.20	-	-
加固圈	2 000	1.0	0.35	150	30
围岩	2 000	1.0	0.35	100	30

均采用扩展DP材料模型(extended Drucker-Prager, 简称EDP)。该模型克服了经典DP模型无法反映材料硬化、屈服面单一的缺点,在岩土数值分析中可配合高级单元使用。采用EDP模型时需要定义屈服函数和流动准则,相关主要参数为应力敏感度 $C_1$ 和屈服强度 $C_2$ ,其计算公式为

$$\begin{cases} C_1 = 6\sin\varphi / (3 - \sin\varphi) \\ C_2 = 6c \cos\varphi / (3 - \sin\varphi) \end{cases} \quad (13)$$

其中: $c$ 为材料的黏聚力; $\varphi$ 为材料的内摩擦角。

衬砌采用弹性模型,模型中采用瑞利阻尼来模拟地基的黏滞性,其阻尼矩阵为

$$C = \alpha M + \beta K \quad (14)$$

其中: $\alpha, \beta$ 分别为质量阻尼系数和刚度阻尼系数; $M, K$ 分别为结构的质量矩阵和刚度矩阵。

在ANSYS中,可先通过模态分析获得结构的自振频率 $f$ ,再根据式(15)计算 $\alpha, \beta$ 输入

$$\begin{cases} \alpha = 4\pi\xi f_i f_j / (f_i + f_j) \\ \beta = \xi / \pi (f_i + f_j) \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\xi$ 为地基阻尼比,文中取 $0.05$ ;  $f_i$ 和 $f_j$ 为感兴趣的自振频率范围,分别取 $1\sim 3$ 阶自振频率,即 $f_1=1.0218\text{ Hz}, f_3=1.4878\text{ Hz}$ 。

入射地震波选用宁河波,斜入射角临界值 $\theta = \arcsin(C_s/C_p) \approx 28^\circ$ ,故入射角度 $\theta$ 分别取 $15^\circ$ 和 $25^\circ$ 。从所选地震波中截取 $20\text{ s}$ 特征段,时间步长为 $0.01\text{ s}$ ,根据隧址设防烈度和场地类别,将地震波调幅至 $0.2g$ ,得到入射宁河波加速度时程曲线如图8所示。

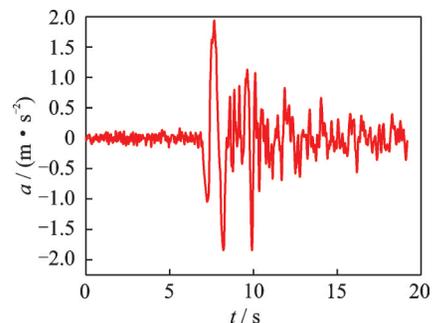


图8 宁河波加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration time history curve of Ninghe wave

## 4 计算结果分析

当  $\theta$  取  $15^\circ$  和  $25^\circ$  时,分别计算了浅埋偏压双隧道的动力响应结果。由于不同角度入射时隧道具有相似的动力响应规律,本研究只对  $15^\circ$  入射时的计算结果进行分析。

### 4.1 不同洞距下隧道衬砌主应力分布

提取了地震动作用 20 s 后左、右隧道衬砌内缘各特征点的主应力峰值,对其取绝对值后绘制极坐标图,得到了不同洞距影响下隧道衬砌主应力的分布情况。

左、右洞隧道衬砌主应力峰值分布如图 9 所示。由图可知,SV 波倾斜入射时,浅埋偏压双隧道左、右洞的主拉应力和主压应力总体上均为 X 型分布,其较大值均分布在共轭  $45^\circ$  方向(拱肩和拱脚部位),而拱顶、拱底和拱腰部位的应力值相对较小。

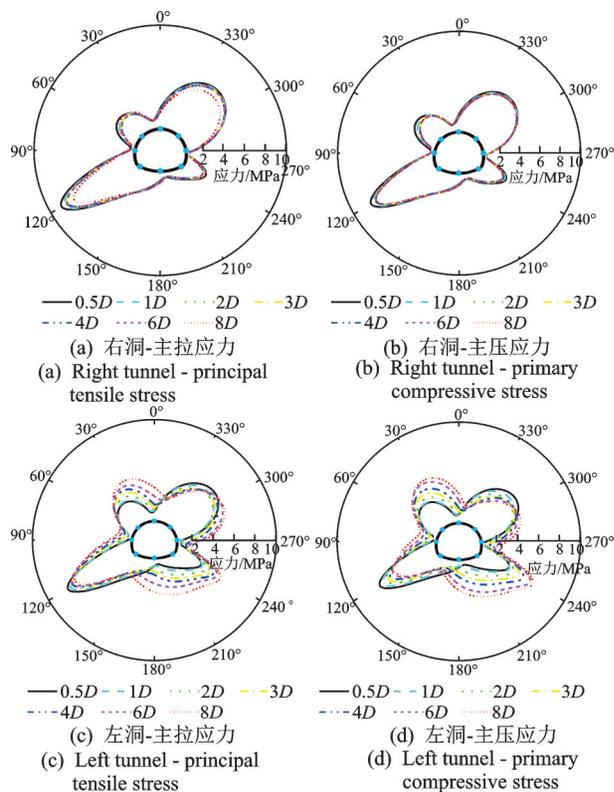


图 9 左、右洞隧道衬砌主应力峰值分布

Fig.9 Distribution of principal stress peak values of left and right tunnel lining

对于浅埋侧隧道(右洞),主拉应力和主压应力呈不对称的 X 型分布,最大值分布在右拱肩( $300^\circ \sim 330^\circ$ )和左拱脚( $120^\circ$ 左右)部位,左拱肩( $30^\circ \sim 60^\circ$ )和右拱脚( $240^\circ$ 左右)部位的应力值较小,拱顶、拱底和拱腰部位的应力值最小。随着洞距的不断增大,应力峰值分布未发生明显变化,说明洞距变化对于

浅埋侧隧道的影响较小。

对于深埋侧隧道(左洞),在洞距较小时,应力仍为不对称的 X 型分布,应力分布情况与浅埋侧隧道相似。随着洞距的不断增大,主拉应力和主压应力分布均逐渐趋于对称,其对称轴远离垂直方向而向右偏移约  $15^\circ$ ,拱顶、拱底、拱腰、左拱肩和右拱脚处的主拉、主压应力逐渐增大,右拱肩和左拱脚处的主拉、主压应力逐渐减小,说明深埋侧隧道受洞距变化的影响更强烈。

### 4.2 衬砌主应力最大值随洞距变化情况

为研究浅埋偏压双隧道在地震波斜入射时的合理洞距,图 10 给出了地震动作用 20 s 后,隧道衬砌主应力最大值随洞距的变化情况。

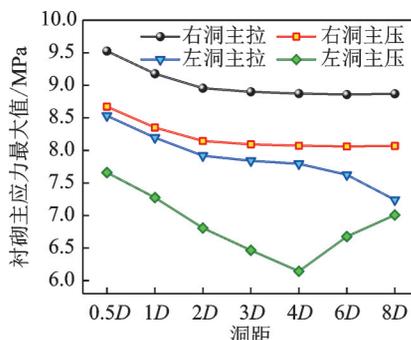


图 10 衬砌主应力最大值随洞距的变化

Fig.10 The change of maximum principal stress of lining with different hole diameter

由图 10 可以看出:当隧道洞距小于  $2D$  时,主应力最大值随洞距的增大呈直线下降趋势,且下降坡度较大;当洞距达到  $2D$  时,主应力最大值下降坡度逐渐缓慢(除左洞主压应力直线下降外),接近于水平直线;当洞距达到  $4D$  时,左洞主压应力达到最小值,随后由于左洞逐渐进入未偏压区域,洞身上方土体厚度骤增,故随着洞距的增大其主压应力最大值不断增大。同时发现,右洞主拉、主压应力最大值均大于左洞,说明地震作用下浅埋侧隧道是最薄弱的部位,应当重点考虑;而深埋侧隧道随着洞距的增大,其上覆岩土体逐渐趋于对称,故应力值相对较小;但在小洞距下,深埋侧隧道应力值较大,也应予以重视。

为更直观地研究洞距变化对隧道衬砌应力的影响,笔者同时也建立了浅埋偏压单洞隧道模型进行对比计算,偏压单洞隧道模型的大小、计算参数等与偏压双洞模型一致,但只建立深埋侧隧道,与双洞情况下深埋侧隧道衬砌应力进行比较,观察地震作用下浅埋侧隧道对深埋侧隧道的影响范围。

图11为1D, 2D和4D下单、双洞隧道衬砌主拉应力峰值对比(主压应力分布与主拉应力分布规律一致), 图中阴影部分为双洞应力值与单洞应力值的差值。可以看出: 随着洞距的增大, 单、双洞隧道

应力差值逐渐减小; 当洞距达到4D时, 单、双洞隧道主应力分布曲线基本重合, 应力差值基本为零, 说明此时浅埋侧隧道对深埋侧隧道的影响可以忽略。

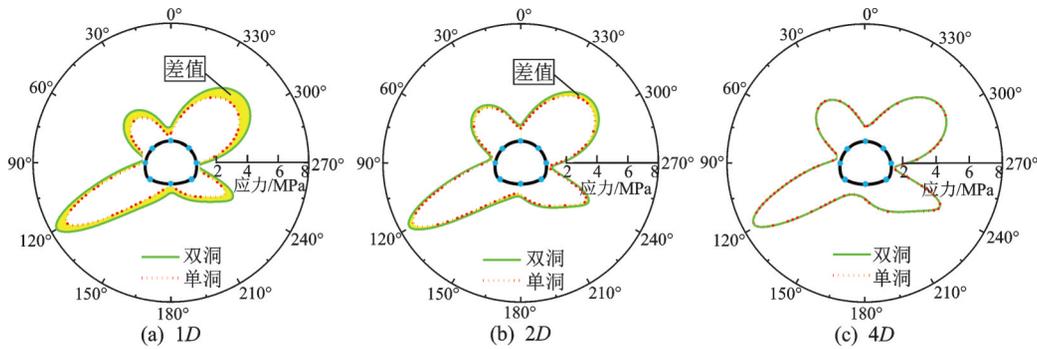


图11 单、双洞隧道衬砌主拉应力峰值对比

Fig.11 Comparison of peak value of principal tensile stress between single and double tunnel

图12为单、双洞隧道衬砌主应力最大值的比较。可以看出, 单、双洞隧道衬砌主应力最大值的差值随洞距的增大而减小。当洞距达到4D时, 双洞隧道相比单洞隧道, 其主拉应力最大值增大了0.42%, 主压应力最大值增大了0.52%, 即此时洞距对于单、双洞隧道的衬砌应力的影响很小。这说明浅埋侧隧道引起的最大影响范围为4D, 故可认为地震波倾斜入射时浅埋偏压双隧道的合理洞距为4D。

时其薄弱部位也为右拱肩和左拱脚, 洞距较大时其左右拱肩、左右拱脚均为薄弱部位。

3) 地震波倾斜入射时, 浅埋侧隧道主应力大于深埋侧隧道主应力, 其地震响应也更加强烈, 是地震作用下的薄弱部位, 应当重点考虑。

4) 当两隧道洞距达到4D时, 浅埋侧隧道对深埋侧隧道地震响应的影响可以忽略, 因此认为浅埋偏压双隧道在地震波斜入射时的合理洞距为4D。

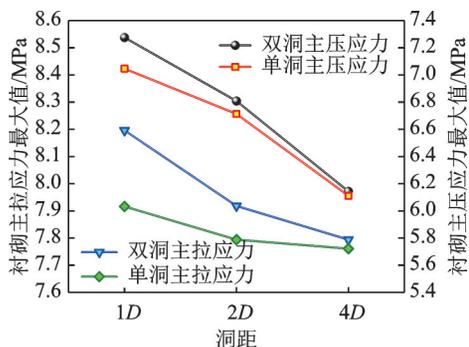


图12 单、双洞隧道衬砌主应力最大值的比较

Fig.12 Comparison of maximum principal stress between single and double hole lining

## 5 结论

1) 地震波斜入射时, 浅埋偏压双隧道衬砌主应力为不对称的X型分布。随着洞距的增大, 浅埋侧隧道主应力分布无明显变化, 深埋侧隧道主应力分布逐渐趋于对称。洞距变化对深埋侧隧道地震响应的影响更大。

2) 地震波斜入射时, 对于浅埋侧隧道, 其薄弱部位为右拱肩和左拱脚; 对于深埋侧隧道, 洞距较小

## 参 考 文 献

[1] 杜修力, 马超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 53-62, 69.  
DU Xiuli, MA Chao, LU Dechun, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic load[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 53-62, 69. (in Chinese)

[2] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 133-150.

[3] 臧万军. 汶川地震公路隧道震害规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 17-25.  
ZANG Wanjun. Damage to highway tunnels caused by the Wenchuan earthquake[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 17-25. (in Chinese)

[4] 高波, 王帅帅, 申玉生, 等. 平面SV波垂直入射下浅埋双圆隧道复合衬砌解析解及减震力学机理分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 321-328.  
GAO Bo, WANG Shuaishuai, SHEN Yusheng, et al. Dynamic stress concentration and damping mechanism

- of twin cylindrical composite-lined tunnels subjected to vertical incident plane SV waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2):321-328. (in Chinese)
- [5] 王帅帅,高波,范凯祥,等.平面P波入射下浅埋平行双洞隧道注浆加固减震机制[J].岩土力学,2018,39(2):683-690.  
WANG Shuaishuai, GAO Bo, FAN Kaixiang, et al. Damping mechanism of shallow cylindrical parallel tunnel with grouting reinforcement zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2):683-690. (in Chinese)
- [6] 杜修力,苏驰翔,黄景琦,等.SH波水平入射穿越垂直断层隧道动力响应分析[J].震灾防御技术,2019,14(2):269-280.  
DU Xiuli, SU Chixiang, HUANG Jingqi, et al. Analysis of dynamic response of rock tunnels with vertical fault fracture zone under SH waves[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(2):269-280. (in Chinese)
- [7] 李林,何川,耿萍,等.浅埋偏压洞口段隧道地震响应振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2540-2548.  
LI Lin, HE Chuan, GENG Ping, et al. Study of shaking table model test for seismic response of portal section of shallow unsymmetrical loading tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2540-2548. (in Chinese)
- [8] 白哲,吴顺川,刘波,等.地震力作用下浅埋偏压隧道围岩压力的解析解[J].北京科技大学学报,2013,35(8):1106-1112.  
BAI Zhe, WU Shunchuan, LIU Bo, et al. Analytical solution of rock pressure for shallow-buried unsymmetrical-loading tunnels under earthquake loading[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(8):1106-1112. (in Chinese)
- [9] 孙纬宇,严松宏,汪精河,等.SV波不同角度入射下近接双隧道的地震响应分析[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(5):956-963.  
SUN Weiyu, YAN Songhong, WANG Jinghe, et al. Seismic response analysis on adjacent double tunnel at different incident angles of SV waves [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(5):956-963. (in Chinese)
- [10] 汪精河,周晓军,刘建国,等.地震波斜入射下浅埋偏压隧道动力响应数值分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2016,52(4):455-459,465.  
WANG Jinghe, ZHOU Xiaojun, LIU Jianguo, et al. Numerical analysis of the dynamic response of a shallow-buried unsymmetrical-loading tunnel subjected to an oblique incidence of earthquake wave[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(4):455-459, 465. (in Chinese)
- [11] 孙纬宇.浅埋偏压大断面黄土隧道地震响应特征与震害机理研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [12] SUN W Y, YAN SH, MA Q G, et al. Dynamic response characteristics and failure mode of a bias loess tunnel using a shaking table model test[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31:100659.
- [13] 周晓洁,张越宇,何颖,等.地震SV波斜入射下沉管隧道的地震响应分析[J].地震工程学报,2017,39(4):600-608.  
ZHOU Xiaojie, ZHANG Yueyu, HE Ying, et al. Seismic response analysis of immersed tunnel under oblique incidence of seismic SV wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4):600-608. (in Chinese)
- [14] 杜修力,黄景琦,赵密,等.SV波斜入射对岩体隧道洞身段地震响应影响研究[J].岩土工程学报,2014,36(8):1400-1406.  
DU Xiuli, HUANG Jingqi, ZHAO Mi, et al. Effect of oblique incidence of SV waves on seismic response of portal sections of rock tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8):1400-1406. (in Chinese)
- [15] LYSMER J, KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1969, 95(4):859-877.
- [16] LIAO Z P, WONG H L. A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation[J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(4):174-183.
- [17] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, 120(1):25-42.
- [18] 刘晶波,杜义欣,闫秋实.粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[C]//第三届全国防震减灾工程学术研讨会论文集.南京:《防震减灾工程学报》编辑部,2007:43-48.
- [19] 杜修力.工程波动理论与方法[M].北京:科学出版社,2009:370-374.



**第一作者简介:**朱辉,男,1997年6月生,博士生。主要研究方向为隧道及地下工程抗震。

E-mail: zhuhui\_lzjtu@163.com

**通信作者简介:**孙纬宇,男,1988年7月生,副教授。主要研究方向为岩土与地下工程抗震。

E-mail: sunwy\_11@163.com