

DOI: 10.11779/CJGE201408004

SV波斜入射对岩体隧道洞身段地震响应影响研究

杜修力, 黄景琦, 赵密, 金浏

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 基于显式有限元方法并结合黏弹性人工边界条件, 推导了 SV 波斜入射时人工边界面上等效节点力的计算公式, 并基于通用有限元软件实现了 SV 波的倾斜输入。采用简单算例验证了 SV 波斜入射输入方法的准确性。分别考虑了 SV 波在隧道横断面和纵断面内斜入射工况, 研究了 SV 波斜入射条件下岩体隧道洞身段地震响应规律。计算结果表明: SV 波斜入射时的隧道地震响应规律与垂直入射时具有较大的差异; SV 波在不同断面内斜入射时隧道的地震响应结果也具有较大差别。

关键词: 地震波斜入射; 岩体隧道地震响应; 黏弹性人工边界; 等效节点力

中图分类号: TU45 **文献标示码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)08-1400-07

作者简介: 杜修力(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震工程学等领域的教学和科研。E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn。

Effect of oblique incidence of SV waves on seismic response of portal sections of rock tunnels

DU Xiu-li, HUANG Jing-qi, ZHAO Mi, JIN Liu

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: By coupling the explicit finite element method with the viscous-spring artificial boundary condition, the formulae for calculating the equivalent nodal force under the oblique incidence of plane seismic SV waves are deduced. Then, the input of SV waves is realized in the FEM program. A half-space example with simple motion proves that the proposed approach has satisfactory precision. Subsequently, the proposed method is employed to investigate the rock tunnels with two oblique incidence conditions of cross section and vertical section. The numerical results indicate that under the action of obliquely incident seismic waves, the dynamic responses of rock tunnel are clearly different from those under the action of vertically incident seismic waves. In addition, the dynamic responses of the rock tunnels vary greatly with the incidence of SV waves in cross section and vertical section.

Key words: oblique incidence of seismic wave; seismic response of rock tunnel; viscous-spring artificial boundary condition; equivalent nodal force

0 引言

隧道结构由于受到周围围岩介质的约束, 所受的地震作用小于地面上的结构, 因此, 常认为地震作用下不会产生破坏性的后果。但在近几次强震中, 大量的隧道出现了开裂、渗水乃至坍塌等破坏^[1-3], 因此对这些结构的抗震研究逐渐活跃起来^[4-5]。数值分析技术是研究这一问题的一种可行和有效的手段。地下结构地震反应分析严格讲是一个近场波动问题, 它涉及到无限域模型有限化处理带来的人工边界及人工边界上的地震动输入问题。因此, 合理确定地震动输入形式并且建立相应的输入方法是进行地下结构抗震反应分析的一个关键问题^[6-7]。通常, 可将入射地震波假定为

垂直入射, 但由此带来的误差有时是不能忽略的, 特别是对长线型结构, 斜入射会产生非一致的作用。因此, 对隧道这种长线型地下结构而言, 研究地震波斜入射影响的工作值得重视。

目前对于地震波斜入射的研究已有一些工作, 李小军^[8]研究了小角度斜入射时, 局部介质非均匀非线性场地反应; 赵建锋等^[9]采用一种新的黏弹性人工边界和波场分解技术, 在通用有限元软件中实现了瞬态

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划项目)(2011CB013600); 国家自然科学基金项目(51008170); 北京市科技新星计划项目(2011017)

收稿日期: 2013-10-25

平面波条件下局部场地引起波散射问题的数值模拟; 杜修力等^[10]以实际建设的南京地铁某车站结构为研究对象, 研究了地震波斜入射对地铁结构地震反应的影响, 得到斜入射条件下的地下结构的动力反应与地震波垂直入射时有较为明显的差异的结论; 赵宝友等^[11]以某水电站为背景, 研究了二维 P 波斜入射对地下岩体洞室群地震响应的影响; 马行东等^[12]分析了斜入射条件下地下岩体洞室地震反应; 张如林等^[13]对不同入射角度条件下 SV 波作用时的时域数值模拟方法进行了研究。上述斜入射研究工作均为二维问题, 难以反映真实三维情况下的斜入射对结构抗震性能的影响。徐海滨等^[14]在显式有限元法结合黏弹性人工边界的时域波动分析方法的基础上, 建立了三维平面 P 波斜入射的输入方法, 并研究了地震波斜入射对拱坝地震反应的影响。目前关于地震波三维斜入射对岩体隧道地震响应影响的研究还尚未见有成果报道。

基于显式有限元方法, 并结合黏弹性人工边界条件, 推导了三维坐标中地震波 SV 波输入下的等效节点力的计算公式, 并在通用有限元软件 ABAQUS 中进行了实现。基于建立的 SV 波输入方法研究了地震波入射角度对岩体隧道洞身段地震响应的影响规律。

1 平面 SV 波三维斜入射的实现方法

对于岩体隧道等地下结构而言, 隧道衬砌结构埋置于无限的岩体介质中。对于无限介质的辐射阻尼效应, 通常采用局部人工边界进行模拟。目前应用较多的人工边界有黏性边界^[15]、透射边界^[16]和黏弹性边界^[17-18]等。其中黏弹性人工边界既能吸收近场的散射波又能模拟无限地基的弹性恢复性能, 物理意义明确, 不存在高频失稳问题, 便于在通用软件中实现, 从而得到了广泛的应用。当应用人工边界进行地下结构的地震反应分析时, 地震波的输入与所采用的人工边界条件相关联。将人工边界面上的总波场分解为内行场和外行场, 含外源作用的人工边界面上 l 节点 l 方向的集中质量有限元总波场运动方程为^[19]

$$m_l \ddot{u}_{li} + \sum_{k=1}^{n_e} \sum_{j=1}^n (c_{likj} + \delta_{lk} \delta_{ij} A_l C_{li}) \dot{u}_{kj} + \sum_{k=1}^{n_e} \sum_{j=1}^n (k_{likj} + \delta_{lk} \delta_{ij} A_l K_{li}) u_{kj} = f_{li} \quad (1)$$

$$f_{li} = A_l (K_{li} u_{li}^R + C_{li} \dot{u}_{li}^R + \sigma_{li}^R) \quad (2)$$

式中, m_l 为节点 l 的集中质量; k_{likj} , c_{likj} 为节点 k 方向 j 对于节点 l 方向 i 的刚度和阻尼系数; u_{kj} , \dot{u}_{kj} 为节点 k 方向 j 的位移和速度; \ddot{u}_{li} 为节点 l 方向 i 的加速度; f_{li} 为在节点 l 方向 i 处截去的无限远场对有限近场的作用应力; A_l 为人工边界面上节点 l 的影响面积; K_{li} , C_{li} 为节点 l 方向 i 的人工边界参数, 参照文献[17],

18]选取; $\delta_{ij} = 1(i=j)$, $\delta_{ij} = 0(i \neq j)$ 。对于三维问题, $n=3$, 下标 i , $j=1, 2, 3$ 分别相当于直角坐标 x , y , z 。

上述基于黏弹性边界的地震动输入方法将地震动的输入问题转化为求解作用于人工边界面上的等效节点力的问题。地震动输入的关键是由已知入射平面波时程确定人工边界处的内行场位移时程 u_{li}^R 和速度时程 \dot{u}_{li}^R 及其引起的边界表面应力时程 σ_{li}^R 。

2 SV 波三维斜入射等效节点力求解

在三维坐标中, 平面 SV 波 (位移时程为 $u_0(t)$) 斜入射情况下, 取盒子形状的人工边界并使 SV 波波阵面平行于人工边界底面的一条棱。图 1 为 SV 波以入射角 α 斜入射时各人工边界面上一点处的内行场情况, 包括反射角为 α 的平面 SV 波和反射角为 β 的平面 P 波。SV 波振动方向与 z 方向垂直。其中左边界和前后边界的内行场为自由场, 由直接入射 SV 波以及地表反射 SV 波和 P 波构成; 底边界的内行场仅由直接入射 SV 波构成; 右边界无内行场。

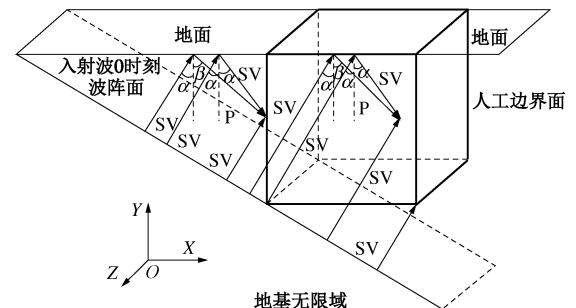


图 1 三维平面 SV 波斜入射示意图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of oblique incidence of plane SV waves

假定被截去的无限地基域为线弹性介质, 根据弹性波在介质中的传播特性计算人工边界各点的内行波场。此法物理意义清楚, 适于计算均匀介质内行波场。

左侧人工边界处的内行场位移:

$$\left. \begin{aligned} u_{l1}^R(t) &= u_0(t - \Delta t_1) \cos \alpha - A_3 u_0(t - \Delta t_2) \cos \alpha + \\ &\quad A_4 u_0(t - \Delta t_3) \sin \beta, \\ u_{l2}^R(t) &= -u_0(t - \Delta t_1) \sin \alpha - A_3 u_0(t - \Delta t_2) \sin \alpha - \\ &\quad A_4 u_0(t - \Delta t_3) \cos \beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

左侧人工边界处内行场应力:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{l1}^R &= \frac{G}{c_s} \sin 2\alpha [\dot{u}_0(t - \Delta t_1) - A_3 \dot{u}_0(t - \Delta t_2)] + \\ &\quad A_4 \frac{\lambda + 2G \sin^2 \beta}{c_p} \dot{u}_0(t - \Delta t_3), \\ \sigma_{l2}^R &= \frac{G}{c_s} \cos 2\alpha [\dot{u}_0(t - \Delta t_1) + A_3 \dot{u}_0(t - \Delta t_2)] - \\ &\quad A_4 \frac{G \sin 2\beta}{c_p} \dot{u}_0(t - \Delta t_3). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

前后人工边界处的内行场位移:

$$\left. \begin{array}{l} u_{l1}^R(t) = u_0(t - \Delta t_4) \cos \alpha - A_3 u_0(t - \Delta t_5) \cos \alpha + \\ A_4 u_0(t - \Delta t_6) \sin \beta, \\ u_{l2}^R(t) = -u_0(t - \Delta t_4) \sin \alpha - A_3 u_0(t - \Delta t_5) \cos \alpha - \\ A_4 u_0(t - \Delta t_6) \cos \beta. \end{array} \right\} \quad (5)$$

前侧人工边界处内行场应力:

$$\sigma_{l3}^R = A_4 \frac{\lambda}{c_p} \dot{u}_0(t - \Delta t_6) \quad . \quad (6)$$

后侧人工边界的作用应力与前侧人工边界面相反。

底部人工边界处的内行场位移:

$$\left. \begin{array}{l} u_{l1}^R(t) = u_0(t - \Delta t_7) \cos \alpha, \\ u_{l2}^R(t) = -u_0(t - \Delta t_7) \sin \alpha. \end{array} \right\} \quad (7)$$

底部人工边界处内行场应力

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{l1}^R = \frac{G}{c_s} \cos 2\alpha \dot{u}_0(t - \Delta t_7), \\ \sigma_{l2}^R = -\frac{G}{c_s} \sin 2\alpha \dot{u}_0(t - \Delta t_7). \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中 $\Delta t_1 \sim \Delta t_7$ 为入射波从零时刻波阵面传播到人工边界节点 l 所需的时间, 可以通过波的传播距离除以波速获得; A_3 为反射 SV 波幅值与入射 SV 波幅值的比值; A_4 为反射 P 波幅值与入射 SV 波幅值的比值; c_p 和 c_s 分别为 P 波和 S 波波速; λ , G 为介质拉梅常数。各人工边界面上 z 方向位移 $u_{l3}^R(t)$ 为零。内行场速度可以通过内行场位移对时间求导获得。

3 地震动输入方法的精度验证

为验证建立的地震波 SV 波斜入射输入方法的模拟精度, 分析平面 SV 波斜入射条件下三维均匀弹性半空间的动力反应问题。入射 SV 波见图 2。半空间介质的质量密度为 2630 kg/m^3 , 弹性模量为 32.5 GPa , 泊松比为 0.22。有限元分析时, 截取 $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$ 的正方体有限区域, 采用满足有限元精度要求的边长 50 m 的立方体实体进行单元离散, 有限元模型见图 3。在有限元模型的侧面和底面施加黏弹性人工边界, 有限元方程的时间积分步长取为 0.0001 s 。

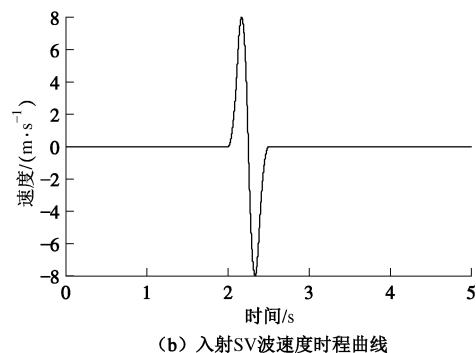
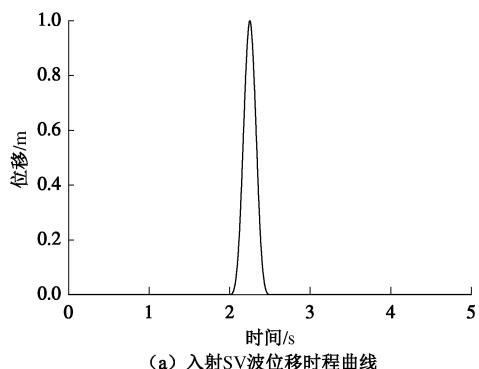


图 2 斜入射的平面 SV 波脉冲

Fig. 2 Pulses of plane SV waves of oblique incidence

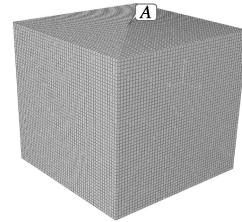


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

图 4 为平面 SV 波入射角为 15° 和 30° 时 A 点(地表中心点)的水平位移时程。可以看到, 计算结果与理论解吻合较好, 说明本文方法具有良好的模拟精度。

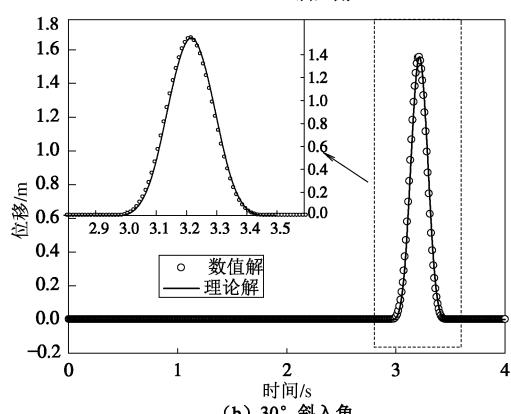
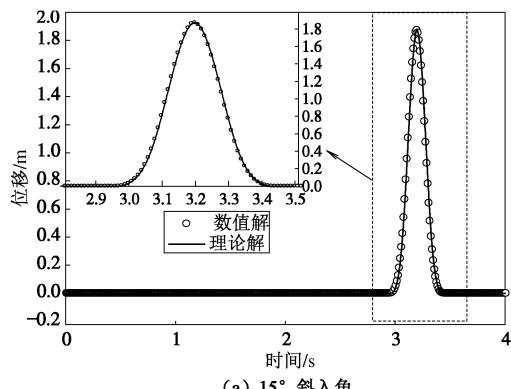


图 4 SV 波斜入射时地表中心点处水平向位移时程

Fig. 4 Displacement of half space under oblique incidence of SV waves

4 SV波斜入射下的岩体隧道地震响应模拟

选取某岩体隧道, 按四心圆法建模, 四心圆半径分别为 5.5, 11.5, 2.5, 2.5 m, 四心圆圆心与地表的距离为 45 m, 衬砌采用 C25 混凝土, 厚度为 35 cm。取隧道拱顶、左右拱腰、左右拱脚和拱底作为隧道分析时的关键监测点, 见图 5。对于围岩体模型, 横向 (x 方向) 取 400 m, 竖向 (y 向) 取 100 m, 纵向 (z 向) 取 160 m。假定围岩坚硬完整, 进而在数值模拟中可将围岩简化为均质、连续的线弹性介质。围岩等级为三级围岩, 围岩及衬砌结构的材料参数见表 1。初始应力为岩体自重应力, 不考虑构造应力场的影响。选取的地震波为 1995 年日本阪神地震中的 Kobe 波, 持续时间为 20 s, 见图 6。静力部分采用动力松弛方法施加, 静力计算 1 s 后输入地震波。

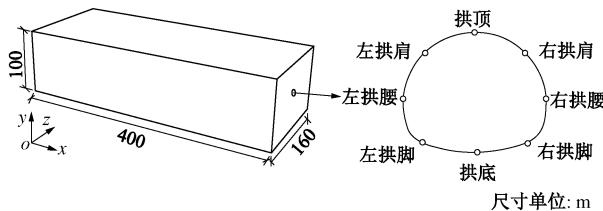


图 5 计算模型

Fig. 5 Computational model

表 1 岩体与结构材料参数

Table 1 Parameters of rock and materials

材料	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力 /MPa
衬砌	2500	30	0.20	58.7	2.38
围岩	2300	10	0.25	—	—

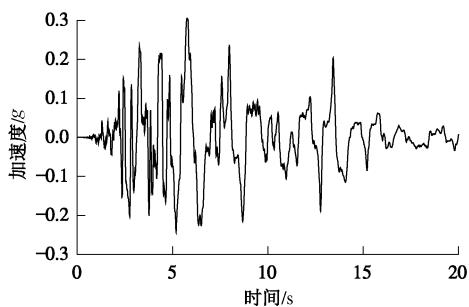
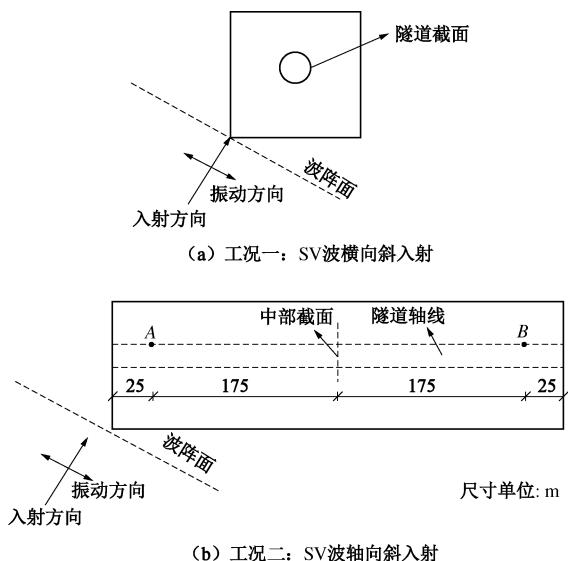


图 6 输入的 Kobe 波加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history of input Kobe waves

本文研究了两种斜入射工况(图 7): ①工况一, SV 波横向斜入射, 指 SV 波在垂直于隧道轴线的横断面内做倾斜入射, 入射情况为垂直入射、 15° 斜入射和 30° 斜入射, 见图 7 (a); ②工况二, SV 波轴向斜入射, SV 波在入射方向和隧道轴线构成的纵断面内做倾斜入射, 入射情况为垂直入射、 15° 斜入射和 30°

斜入射, 见图 7 (b)。



(b) 工况二: SV波轴向斜入射

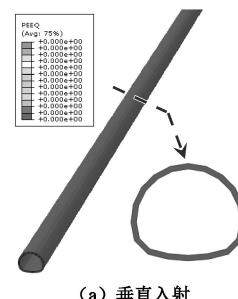
图 7 斜入射工况

Fig. 7 Input conditions of oblique incidence

4.1 工况一结果分析——SV 波横向斜入射

图 8 给出了 SV 波横向斜入射时, 隧道中部衬砌截面上的等效塑性应变云图。从图中可以看出垂直入射时, 等效塑性应变为零, 衬砌结构并没进入塑性损伤状态, 当以 15° 和 30° 斜入射时, 衬砌结构上出现了明显的塑性区, 且随着入射角由 15° 向 30° 增加时, 塑性区范围及塑性应变的大小都随着入射角的增加而增加。

图 9 显示了不同入射角入射时, 衬砌中部截面在加速度最大时刻的变形图。在不同入射角情况下, 衬砌截面在加速度最大时刻具有不同的变形形状。垂直入射时, 衬砌结构变形方向基本与衬砌截面对称轴成 45° 情况。当以 15° 和 30° 斜入射时, 衬砌的变形方向与垂直入射时具有明显不同, 且随着入射角度增加衬砌变形方向逐渐向对称轴靠近, 这是由于斜入射时的地震波场与垂直入射时的地震波场具有明显的不同。地震波斜入射时, SV 波在地表自由表面发生反射作用, 使得反射 P 波和反射 SV 波具有不同的反射方向和振动幅值, 使得场地各点具有不同的振动方向及振动波形, 所以衬砌结构截面出现随入射角变化而具有不同的变形情况。



(a) 垂直入射

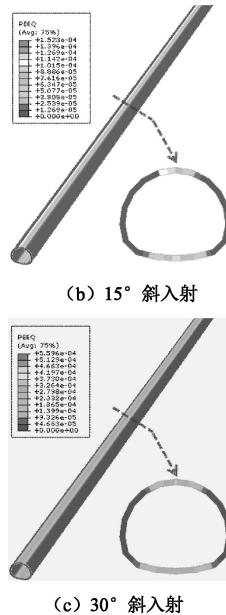


图 8 SV 横向斜入射时衬砌中部截面上的等效塑性应变云图

Fig. 8 Contours of plastic strain of tunnels under oblique incidence of SV waves

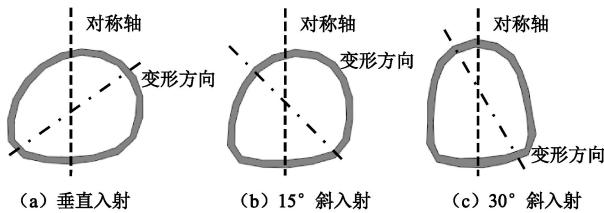


图 9 SV 波横向斜入射时最大加速度时刻的衬砌截面变形图

Fig. 9 Deformation of tunnel section under maximum acceleration

另外随着入射情况的不同,衬砌中部截面上各关键节点处也具有不同的应力状态。图 10 给出了不同入射角情况下,衬砌中部截面关键点处的 Mises 应力峰值。从图 10 中可以看出,随着入射角度的增加,衬砌截面上各关键节点处的 Mises 应力也在增加。垂直入射时,拱腰处的应力水平明显大于其它部位的应力水平,而 15° 和 30° 斜入射时,拱顶与拱底的应力水平明显大于其它部位的应力水平,成为衬砌截面上最不利的受力点,这点与图 8 中塑性区集中在拱顶与拱底处的现象相一致,说明 SV 波横向斜入射时,入射角度改变了衬砌结构的受力分布。

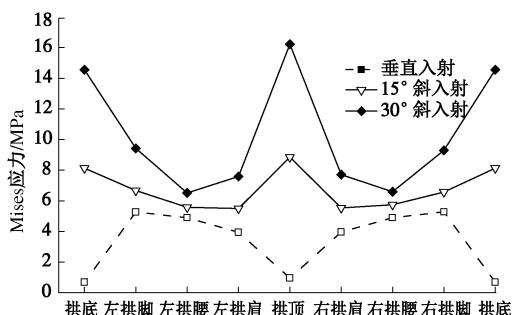
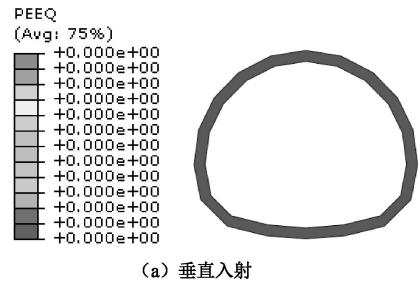


图 10 隧道截面关键节点处的 Mises 应力峰值

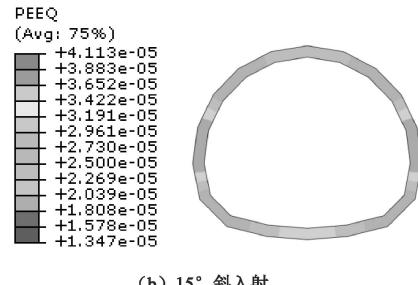
Fig. 10 Peak Mises stresses at key points

4.2 工况二结果分析——SV 波轴向斜入射

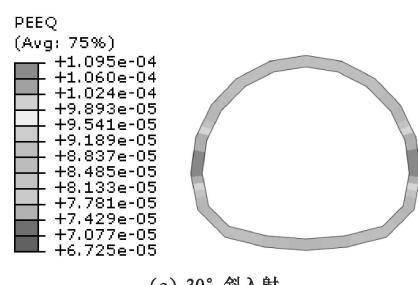
图 11 给出了 SV 波轴向斜入射时,隧道衬砌中部截面处的等效塑性应变云图。随着入射角的改变,衬砌中部截面上的塑性区分分布也明显的不同。垂直入射时,衬砌截面上并没有发生塑性变形。而对于 15° 斜入射和 30° 斜入射,衬砌截面上出现了明显的塑性损伤,且两种入射角度情况下的塑性区都集中在拱腰附近,说明 SV 波轴向斜入射时,拱腰部位为隧道结构的受力不利位置。另外,30° 斜入射时的塑性损伤程度比 15° 斜入射时具有明显的增大。图 12 为 SV 波轴向斜入射时衬砌中部截面关键点处的 Mises 应力峰值。随着入射角的增加,衬砌截面各关键点的 Mises 应力随着入射角的增加而增加,且对于各入射角,都出现了衬砌拱腰处的 Mises 应力高于其它关键点处的 Mises 应力的情况,也再次说明 SV 波轴向斜入射时,衬砌结构受力的不利部位为衬砌的拱腰部位。



(a) 垂直入射



(b) 15° 斜入射



(c) 30° 斜入射

图 11 SV 轴向斜入射时不同入射角下的等效塑性应变云图

Fig. 11 Contours of plastic strain of tunnels under oblique incidence of SV waves

SV 波轴向斜入射时,沿隧道轴线方向具有明显的行波效应,衬砌截面在沿隧道轴线方向上会出现非同步振动的情况。图 13 显示了 SV 波以不同角度轴向斜入射时衬砌沿轴线方向的变形图。垂直入射时,由

于入射波的振动方向与隧道轴线方向平行, 衬砌结构的振动方向平行于隧道轴线方向, 横向位移为零。当 SV 波以 15° 和 30° 斜入射时, 衬砌的振动方向与隧道的轴线方向具有一定的角度, 隧道出现了沿着轴向方向的弯曲变形, 而且随着入射角度的增加沿轴线方向的弯曲变形也在增加。这是由于入射波的振动方向与衬砌轴线方向具有一定角度, 且沿轴向方向出现了明显的行波效应, 衬砌结构沿轴线方向出现了非一致运动的情况。图 14 为 SV 波以不同角度轴向斜入射时衬砌结构上 A, B 点的水平相对位移时程曲线及竖向相对位移曲线。 A, B 点相距 350 m , 见图 7 (b)。从图 14 中可看出, 垂直入射时 A, B 点水平相对位移与垂直相对位移为 0 , A, B 两点所在的两个衬砌截面之间没有相对运动出现, 处于同步振动的状态。而斜入射时两点之间出现了明显的相对位移, 且随着入射角度的增加, 水平向相对位移和竖向相对位移都明显增加, 说明随着入射角度增加, 沿隧道轴线方向上的行波效应越明显, 这与对图 13 的分析结论较为一致。

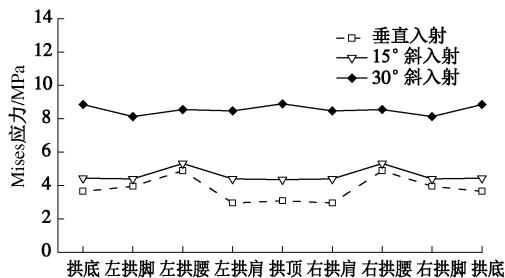


图 12 隧道截面关键节点处的 Mises 应力峰值
Fig. 12 Amplitude of Mises stresses at key points

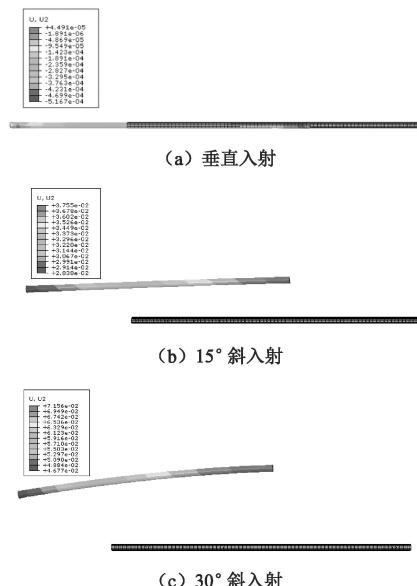
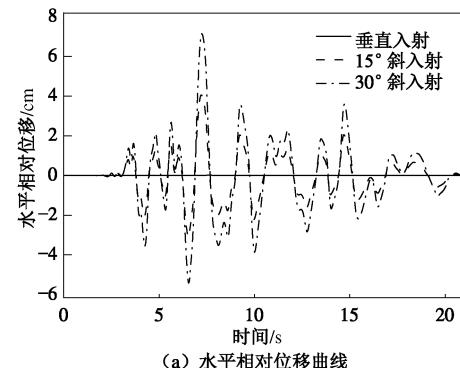
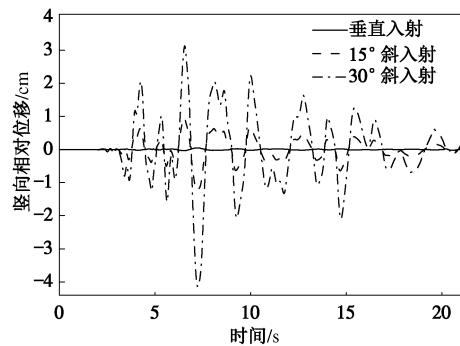


图 13 SV 波轴向斜入射最大加速度时刻衬砌轴线变形图

Fig. 13 Deformation of tunnel center line under maximum acceleration



(a) 水平相对位移曲线



(b) 竖向相对位移曲线

图 14 A, B 两点相对位移时程曲线
Fig. 14 Relative displacements at points A and B

5 结 论

(1) 当 SV 波横向斜入射时, 不同角度入射的 SV 波使得隧道处于不同的波场, 衬砌截面具有不同的振动方向及变形情况, 垂直入射时隧道拱腰及拱脚处的应力较高, 而 15° 及 30° 斜入射时隧道的应力集中在拱顶和拱底处。另外, 从应力水平及塑性损伤的程度上来看, 垂直入射下的隧道地震反应小于斜入射下的地震反应, 且隧道地震反应随着斜入射角度的增大而增大。

(2) 当 SV 轴向斜入射时, 衬砌结构受力的不利部位为衬砌的拱腰部位。与垂直入射相比, 斜入射使隧道在沿轴线方向上出现了非一致振动的情况, 隧道在轴线方向上出现弯曲变形, 且斜入射角度越大这种弯曲变形越明显。另外, 从应力水平及塑性损伤程度上看, 垂直入射下的隧道地震反应小于斜入射下的地震反应, 且隧道地震反应随着斜入射角度的增大而增大。

本文仅基于文中的隧道模型算例, 总结了 SV 入射角度对岩体隧道地震反应的影响, 对于结果中的规律尚需更多的研究进行补充和验证。

参考文献:

[1] KAZUHIDE Y, YOSHIYUKI K, et al. Historical earthquake damage to tunnels in Japan and case studies of railway

tunnels in the 2004 Niigataken-Chuetsu Earthquake[J]. QR of RTRI, 2007, **48**(3): 136 - 141.

[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]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, **16**: 133 - 150.

[3] LI T B. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for a seismic tunnel construction[J]. Bull Eng Geol Environ, 2012, **71**: 297 - 308.

[4] WANG Z Z, GAO B, JIANG Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake[J]. Technological Sciences, 2009, **52**(2): 546 - 558.

[5] 郑颖人, 肖 强, 叶海林, 等. 地震隧洞稳定性分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1081 - 1088. (ZHENG Ying-ren, XIAO Qiang, YE Hai-lin, et al. Study of tunnel stability analysis with seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1081 - 1088. (in Chinese))

[6] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报, 2006, **37**(12): 1417 - 1423. (CHEN Hou-qun. Discussion on seismic input mechanism at dam site[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(12): 1417 - 1423. (in Chinese))

[7] 潘旦光, 楼梦麟, 范立础. 多点输入下大跨度结构地震反应分析研究现状[J]. 同济大学学报, 2001, **29**(10): 1213 - 1219. (PAN Dan-guang, LOU Meng-lin, FAN Li-chu. Status of seismic response analysis of long-span structures under multiple support excitations[J]. Journal of Tongji University, 2001, **29**(10): 1213 - 1219. (in Chinese))

[8] 李小军. 非线性场地地震反应分析方法的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1993. (LI Xiao-jun. Study on the method of analyzing the earthquake response of nonlinear site[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1993. (in Chinese))

[9] 赵建峰, 杜修力, 韩 强, 等. 外源波动问题数值模拟的一种实现方式[J]. 工程力学, 2007, **24**(4): 52 - 58. (ZHAO Jian-feng, DU Xiu-li, HAN Qiang, et al. An approach to numerical simulation for external source wave motion[J]. Engineering Mechanics, 2007, **24**(4): 52 - 58. (in Chinese))

[10] 杜修力, 陈 维, 李 亮, 等. 斜入射条件下地下结构时域地震反应分析初探[J]. 震灾防御技术, 2007, **2**(3): 290 - 296. (DU Xiu-li, CHEN Wei, LI Liang, et al. Preliminary study of time-domain seismic response for underground structures to obliquely incident seismic waves[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007, **2**(3): 290 - 296. (in Chinese))

[11] 赵宝友, 马震岳, 丁秀丽. 不同地震动输入方向下的大型地下岩体洞室群地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3396 - 3402. (ZHAO Bao-you, MA Zhen-yue, DING Xiu-li. Seismic response of a large underground rock cavern groups considering different incident angles of earthquake waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3396 - 3402. (in Chinese))

[12] 马行东, 李海波. 地震波入射方向对地下岩体洞室动态响应的初步分析[J]. 水力发电, 2007, **33**(1): 23 - 25. (MA Xing-dong, LI Hai-bo. Primary analysis of different incidence propagation on dynamic response of underground rock cavern under earthquake[J]. Water Power, 2007, **33**(1): 23 - 25. (in Chinese))

[13] 张如林, 楼梦麟. 基于 FLAC^{3D}的斜入射地震波作用的数值模拟方法研究[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(增刊 1): 22 - 27. (ZHANG Ru-lin, LOU Meng-lin. Study on numerical simulation of obliquely incident seismic waves based on FLAC^{3D}[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(S1): 22 - 27. (in Chinese))

[14] 徐海滨, 杜修力, 赵 密, 等. 地震波斜入射对高拱坝地震反应的影响[J]. 水力发电学报, 2011, **30**(6): 150 - 165. (XU Hai-bin, DU Xiu-li, ZHAO Mi, et al. Effect of oblique incidence of seismic waves on seismic responses of high arch dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, **30**(6): 159 - 165. (in Chinese))

[15] LYSMER J, KUHLEMAYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1969, **95**(4): 759 - 877.

[16] 廖振鹏, 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (LIAO Zhen-peng. Introduction to wave motion theories in engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))

[17] 刘晶波, 谷 音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1070 - 1075. (LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1070 - 1075. (in Chinese))

[18] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, **120**(1): 25 - 42.

[19] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (DU Xiu-li. Theories and methods of wave motion for engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))