

# 地震波三维斜入射作用下隧道对场地地表地震动的影响

朱 俊<sup>1</sup> 李小军<sup>1</sup> 梁建文<sup>2</sup> 张 斌<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100124; 2. 天津大学, 天津 300354)

**摘要:** 利用 2.5 维有限元-边界元耦合方法, 以饱和土地中圆形隧道为例研究了地下隧道对场地地表地震动加速度的放大效应, 主要讨论了地震波入射角的影响。假定地震波在基岩面三维斜入射, 用水平入射角  $\theta_h$  和竖向入射角  $\theta_v$  两个角度来表示地震波的入射方向。研究表明, 地震波斜入射时的场地地表地震动加速度放大系数显著大于地震波垂直入射情况, 且地震波入射角对场地地表加速度反应谱的幅值、形状以及卓越频率也均有一定程度的影响, 尤其对竖向加速度反应谱卓越周期的影响显著。此外, 针对本文算例,  $\theta_h < 30^\circ$  且  $\theta_v > 30^\circ$  时, 场地地表地震动竖向加速度与水平加速度的比值大于规范推荐的 0.65, 且此时竖向加速度反应谱的幅值可能会大于水平加速度反应谱的幅值。

**关键词:** 地震地面运动; 放大效应; 地下隧道; 地震波斜入射; 2.5 维有限元-边界元耦合方法

**中图分类号:** U45 P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)S1-0318-07

## Effects of a tunnel on site ground motion for 3D obliquely incident seismic waves

Zhu Jun<sup>1</sup> Li Xiaojun<sup>1</sup> Liang Jianwen<sup>2</sup> Zhang Bin<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300354, China)

**Abstract:** Considering a circular tunnel embedded in saturated soil, the amplification of site ground motion due to the tunnel is studied by a 2.5D finite element-boundary element coupling method. It is assumed that seismic waves are incident at an arbitrary angle from bedrock, and the incident direction is described by a horizontal angle  $\theta_h$  and a vertical angle  $\theta_v$ . A parametric investigation on the effects of the incident angle of seismic waves on ground acceleration responses is conducted. It is shown that the amplification factors of the ground accelerations for the oblique incidence case are much larger than those for the vertical incidence case. Moreover, the incident angle also has a big influence on the acceleration response spectra, in terms of the amplitude, distribution pattern and predominant period, and the influence is more pronounced for the vertical acceleration responses. It is also shown that, for the numerical example in this study, when  $\theta_h < 30^\circ$  and  $\theta_v > 30^\circ$ , the ratios of the amplitudes of the vertical accelerations to those of the horizontal accelerations can be larger than 0.65 which is recommended by the code for seismic design, and the amplitudes of the response spectra for the vertical accelerations may be larger than those for the horizontal accelerations.

**Keywords:** ground motion; amplification effects; underground tunnel; obliquely incident seismic waves; 2.5D finite element-boundary element coupling method

**E-mail:** beerli@vip.sina.com

## 引 言

近年来我国地下交通快速发展, 地下隧道的建

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1511004)、国家自然科学基金(51978462, 52008013)和北京市重大科技专项(Z18100003918005)

作者简介: 朱俊, 博士

通讯作者: 李小军, 博士, 教授

收稿日期: 2020-06-15

设形成了城市中一类特殊的局部场地。由于隧道结构对地震波的散射作用, 导致隧道沿线地震动与场地自由场情况完全不同, 这势必会影响隧道附近地面建筑的抗震设计和抗震安全。因此, 研究隧道沿线地震地面运动基本规律有利于合理确定建筑结构所受地震作用, 具有重要理论意义和工程价值。针对该问题的研究, 在理论分析方面主要包括解析分析<sup>[1-2]</sup>和数值模拟分析(多采用有限元方法<sup>[3-4]</sup>、有限差分法<sup>[5]</sup>和边界元方法<sup>[6-8]</sup>)。

然而, 目前针对隧道沿线地震动的研究多基于地震波垂直入射假定, 或认为地震波的传播方向与隧道纵轴垂直, 考虑入射方向在垂直面内(地震波二维斜入射)。实际上, 地震波传播方向是任意的, 往往与隧道纵轴存在一个夹角, 此时隧道结构对地震波的散射是一个三维问题, 导致的地震地面运动也是三维的。因此只有采用地震波三维斜入射分析模型, 才能够准确模拟隧道结构对地震波的散射作用, 从而更真实地反映隧道沿线地震地面运动的特征。

本文利用 2.5 维有限元-边界元耦合方法求解隧道沿线地震地面运动, 通过建立 2.5 维有限单元和有限元子域的移动线荷载响应函数, 以及边界元子域的场地三维动力刚度矩阵和移动线荷载格林函数来实现地震波的三维斜入射输入<sup>[9]</sup>。以饱和土场地中圆形隧道为例, 研究了地震波三维斜入射作用下隧道场地地表地震动加速度幅值大小和反应谱特性随地震波入射角的变化规律。研究结果可为同类场地条件下隧道附近地面建筑的抗震设计和抗震安全性评估提供参考, 也可为相关抗震规范的修订和完善提供科学依据。

### 1 2.5 维有限元-边界元耦合方法

地震波三维斜入射作用下, 饱和土场地隧道沿线地震动 2.5 维有限元-边界元耦合分析模型如图 1 所示。有限元子域( $D_{FE}$ )包括地下隧道结构及其附近土体, 边界元子域( $D_{BE}$ )包括远场土体和弹性基岩。地震波从基岩面入射, 地震波的入射方向可用两个角度表示。水平入射角  $\theta_h$  为地震波传播方向在  $x$ - $o$ - $y$

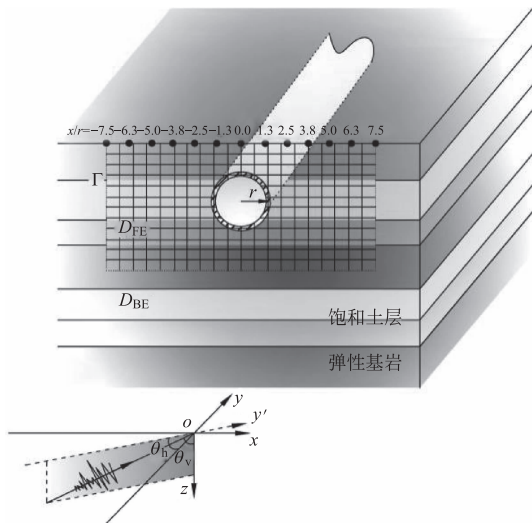


图 1 地震波三维斜入射隧道沿线地震动分析模型  
Fig. 1 The model for ground motion above a tunnel subjected to 3D obliquely incident seismic waves

平面内的投影( $y'$ 轴)与  $y$  轴的夹角, 竖向入射角  $\theta_v$  为地震波传播方向与  $z$  轴的夹角。假定隧道纵向轴线与  $y$  轴平行, 隧道结构形式和材料参数沿纵向保持一致, 且无限延伸。饱和土的模拟基于 Biot 两相介质波动理论<sup>[10]</sup>, 基岩模拟为单相介质。

耦合方法建立在频域内, 首先通过傅里叶变换得到地震波加速度时程对应的加速度频谱, 在频域内计算完成后, 再利用傅里叶逆变换得到对应的时域解。将等效线性化算法嵌入耦合方法中以考虑饱和土骨架的非线性特性, 具体计算流程见参考文献<sup>[9]</sup>。

有限元子域内, 饱和土和隧道结构的模拟分别基于 2.5 维实体单元和壳单元。2.5 维实体单元有四个节点, 每个节点有 6 个自由度, 分别是土骨架沿坐标轴方向的位移  $u_x, u_y$  和  $u_z$ , 以及孔隙水相对于土骨架的位移  $w_x, w_y$  和  $w_z$ 。2.5 维壳单元有两个节点, 每个节点 4 个自由度, 分别为沿坐标轴方向的 3 个平动自由度  $u_x, u_y$  和  $u_z$ , 和绕  $y$  轴的转角自由度  $\varphi_y$ 。组集所有实体单元和壳单元得到有限元子域求解方程,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii} & \mathbf{K}_{ic} \\ \mathbf{K}_{ci} & \mathbf{K}_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{o} \\ \mathbf{Aq}^1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: 下标  $c$  表示沿边界  $\Gamma$  的耦合节点; 下标  $i$  表示有限元子域的内部节点;  $\mathbf{q}^1$  表示沿耦合边界  $\Gamma$  的未知荷载向量;  $\mathbf{A}$  为转换矩阵, 将作用在耦合单元上的分布荷载转化为等效节点荷载。

边界元方法基于饱和土场地三维动力刚度矩阵和移动线荷载格林函数。边界元子域内任一点的位移、牵引力和孔隙水压力响应可表示为:

$$\mathbf{u}(x, y, z) = \mathbf{G}_u \mathbf{q}^2 + \mathbf{u}^f \quad (2a)$$

$$\mathbf{w}(x, y, z) = \mathbf{G}_w \mathbf{q}^2 + \mathbf{w}^f \quad (2b)$$

$$\mathbf{t}(x, y, z) = \mathbf{G}_t \mathbf{q}^2 + \mathbf{t}^f \quad (2c)$$

$$p(x, y, z) = \mathbf{G}_p \mathbf{q}^2 + p^f \quad (2d)$$

式中省略了时间因子  $\exp(i\omega t)$ ;  $\mathbf{u} = \{u_x, u_y, u_z\}^T$  和  $\mathbf{w} = \{w_x, w_y, w_z\}^T$  分别为饱和土骨架位移向量和孔隙水相对于土骨架的位移向量;  $\mathbf{t} = \{t_x, t_y, t_z\}^T$  为饱和土牵引力向量;  $p$  为孔隙水压力; 上标“ $f$ ”表示自由场响应; 矩阵  $\mathbf{G}_u, \mathbf{G}_w, \mathbf{G}_t$  和  $\mathbf{G}_p$  中各元素分别为土骨架位移格林函数、孔隙水相对位移格林函数、牵引力格林函数和孔隙水压力格林函数;  $\mathbf{q}^2$  为作用在边界  $\Gamma$  上边界元子域的未知荷载向量。

沿耦合边界  $\Gamma$ , 有限元子域和边界元子域分别划分  $N$  个有限单元和  $N$  个边界单元, 并使有限单元的单元节点和边界单元的单元节点重合。沿耦合边界,

两子域需满足位移相容和应力平衡条件:

$$\mathbf{u}_j^1 = \mathbf{u}_j^2, w_{nj}^1 = w_{nj}^2 \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

$$\mathbf{t}_j^1 + \mathbf{t}_j^2 = 0, p_j^1 + p_j^2 = 0 \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中各物理量均为单元平均响应,  $w_{nj}^1(w_{nj}^2)$  表示孔隙水与土骨架沿边界  $\Gamma$  法向的相对位移。边界元子域各单元的平均响应可根据式(2)求出。有限元子域各耦合单元(即沿边界  $\Gamma$  的有限单元)的平均响应通过节点平均得到, 表示为:

$$\mathbf{u}_j^1 = \mathbf{R}_{uj} \mathbf{q}^1, w_{nj}^1 = \mathbf{R}_{wnj} \mathbf{q}^1 \quad (5)$$

$$\mathbf{t}_j^1 = \mathbf{R}_{tj} \mathbf{q}^1, p_j^1 = \mathbf{R}_{pj} \mathbf{q}^1 \quad (6)$$

其中: 矩阵  $\mathbf{R}_{uj}, \mathbf{R}_{wnj}, \mathbf{R}_{tj}$  和  $\mathbf{R}_{pj}$  中的各元素为在耦合单元上分别施加沿坐标轴方向的单位均布荷载、法向单位孔隙水压力时, 各耦合单元的土骨架位移响应函数、孔隙水相对位移响应函数、牵引力响应函数和孔隙水压力响应函数。为考虑地震波沿隧道纵向的传播效应, 令上述荷载沿  $y$  轴方向匀速移动, 速度  $c_a = c_R / \cos\theta_h \sin\theta_v$  ( $c_R$  表示基岩剪切波速)。将式(2)、式(5)和(6)代入式(3)和(4)可得耦合方程,

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{R}_{uj} & \mathbf{G}_{uj} \\ -\mathbf{R}_{wnj} & \mathbf{G}_{wnj} \\ \mathbf{R}_{tj} & \mathbf{G}_{tj} \\ \mathbf{R}_{pj} & \mathbf{G}_{pj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}^1 \\ \mathbf{q}^2 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_j^f \\ w_{nj}^f \\ \mathbf{t}_j^f \\ p_j^f \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式(7)为一  $8 \times 8N$  方程组,  $N$  对耦合单元可确定一  $8N \times 8N$  方程组, 并由此求得有限元子域荷载向量  $\mathbf{q}^1$  和

边界元子域荷载向量  $\mathbf{q}^2$ 。将  $\mathbf{q}^1$  和  $\mathbf{q}^2$  分别代入式(1)和式(2), 即可求得两子域内的地震响应。

## 2 数值模拟与结果分析

以饱和土地中圆形隧道为例, 研究地震波三维斜入射作用下隧道场地地震地面运动的基本规律。隧道中心埋深 15m, 隧道外半径 4m, 衬砌厚 0.4m。混凝土衬砌弹性模量为 30GPa, 密度为  $2500\text{kg/m}^3$ , 泊松比为 0.25, 阻尼比为 0.05。假定隧道衬砌线弹性变形, 并与周围土体为绑定接触。饱和土地参数如表 1 所示, 其中  $\mu_{\max}$  为非线性计算时的土体初始剪切模量,  $\nu$  为泊松比,  $\rho_s$  和  $\rho_f$  分别为土颗粒密度和孔隙水密度,  $n$  为孔隙率,  $m, b, \alpha$  和  $M$  均为与 Biot 两相介质模型相关的系数<sup>[10]</sup>。饱和土骨架非线性特性如图 2 所示, 不考虑基岩非线性, 基岩阻尼比为 0.02。在基岩面输入加速度峰值为 0.15g 的 ElCentro 波(图 3), 入射波波型为 SV 波。地震波水平入射角为  $\theta_h = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ , 竖向入射角为  $\theta_v = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 85^\circ$ 。 $\theta_h = 0^\circ$  表示地震波传播方向与隧道纵轴平行,  $\theta_h = 90^\circ$  表示地震波传播方向与隧道纵轴垂直, 此时系统响应与二维平面应变情况相同,  $\theta_v = 0^\circ$  表示地震波垂直入射。在地表设置 13 个观测点, 各观测点间距 5m, 如图 1 所示。

表 1 饱和土地计算参数

Table 1 Parameters of the saturated soil site

| 土层 | 土类  | 厚度(m)    | $\mu_{\max}$ (MPa) | $\nu$ | $\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ ) | $\rho_f$ ( $\text{kg/m}^3$ ) | $n$ | $m$ ( $\text{kg/m}^3$ ) | $b$ ( $\text{N} \cdot \text{s/m}^4$ ) | $\alpha$ | $M$ (MPa) |
|----|-----|----------|--------------------|-------|------------------------------|------------------------------|-----|-------------------------|---------------------------------------|----------|-----------|
| 1  | I   | 1        | 58.95              | 0.25  | 2321                         | 0                            | 0.3 | 0                       | 0                                     | 0        | 0         |
| 2  | I   | 9        | 58.95              | 0.25  | 2321                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.997    | 5904.2    |
| 3  | I   | 10       | 78.00              | 0.25  | 2357                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.996    | 5905.1    |
| 4  | II  | 10       | 99.98              | 0.25  | 2393                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.995    | 5906.1    |
| 5  | II  | 10       | 125.00             | 0.25  | 2429                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.994    | 5907.2    |
| 6  | III | 10       | 182.25             | 0.25  | 2464                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.992    | 5909.8    |
| 7  | III | 10       | 251.13             | 0.25  | 2500                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.988    | 5912.9    |
| 8  | IV  | 10       | 332.00             | 0.25  | 2536                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.985    | 5916.5    |
| 9  | IV  | 10       | 425.25             | 0.25  | 2571                         | 1000                         | 0.3 | 7222.2                  | $10^6$                                | 0.980    | 5920.7    |
| 基岩 | —   | $\infty$ | 660.75             | 0.25  | 2643                         | —                            | —   | —                       | —                                     | —        | —         |

以  $\theta_h = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $\theta_v = 0^\circ, 45^\circ, 85^\circ$  为例, 图 4 给出了不同地震波入射角情况下隧道场地地表加速度的包络图,  $\ddot{u}_x$  表示  $x$  方向水平加速度,  $\ddot{u}_y$  表示  $y$  方向水平加速度,  $\ddot{u}_z$  表示竖向加速度。图 5(a) 给出了隧道场地地表加速度最大值随地震波入射角的变化情况, 图中加速度最大值为场地地表加速度响应最大观测点的加速度时程峰值。图 5(b) 给出了场地地表加速度放大系数随地震波入射角的变化情况。加速度放大系数定义为隧道场地地表加速度最大值与场地自由场地表加速度峰值的比值。可以看出:

化情况, 图中加速度最大值为场地地表加速度响应最大观测点的加速度时程峰值。图 5(b) 给出了场地地表加速度放大系数随地震波入射角的变化情况。加速度放大系数定义为隧道场地地表加速度最大值与场地自由场地表加速度峰值的比值。可以看出:

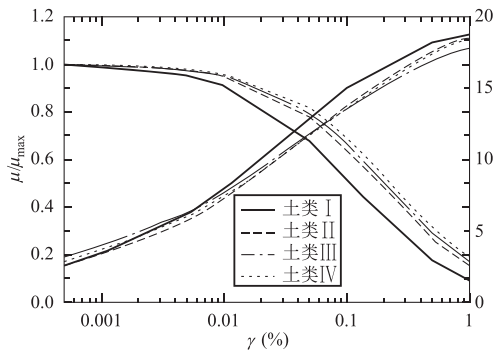


图 2 土体动模量比和阻尼比与剪应变之间的关系

Fig. 2 Dynamic shear modulus ratio and damping ratio versus shear strain

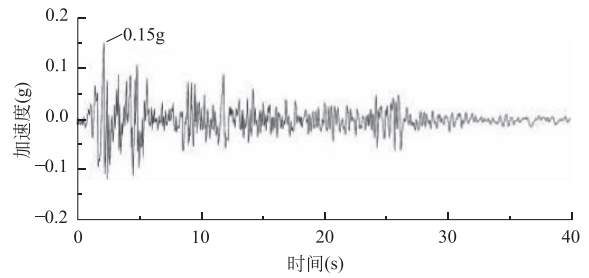


图 3 输入地震波加速度时程

Fig. 3 The input motion from the bedrock

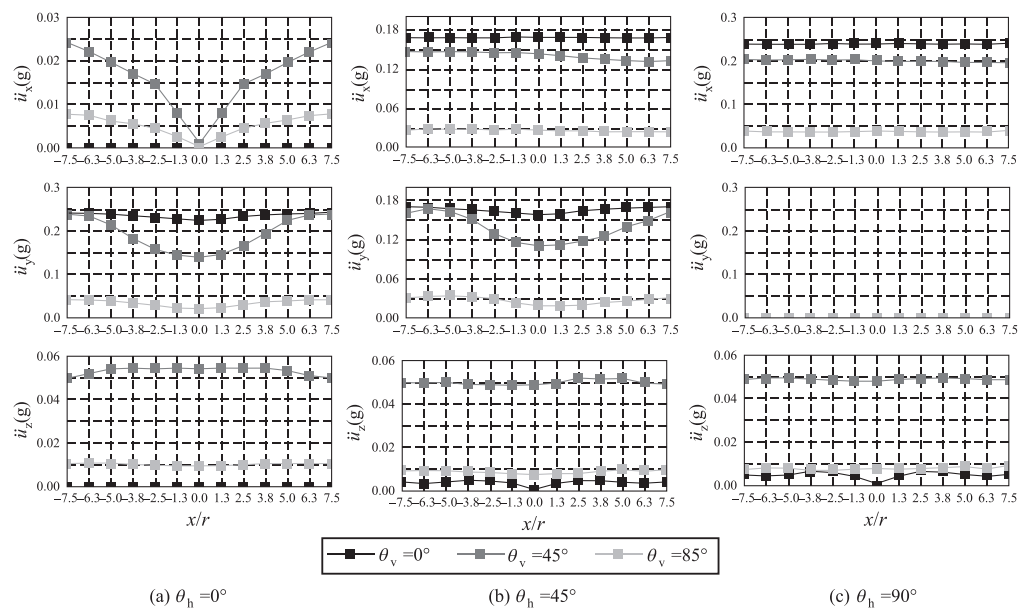


图 4 隧道上方地表加速度包络图

Fig. 4 Envelopes of the ground accelerations above the tunnel

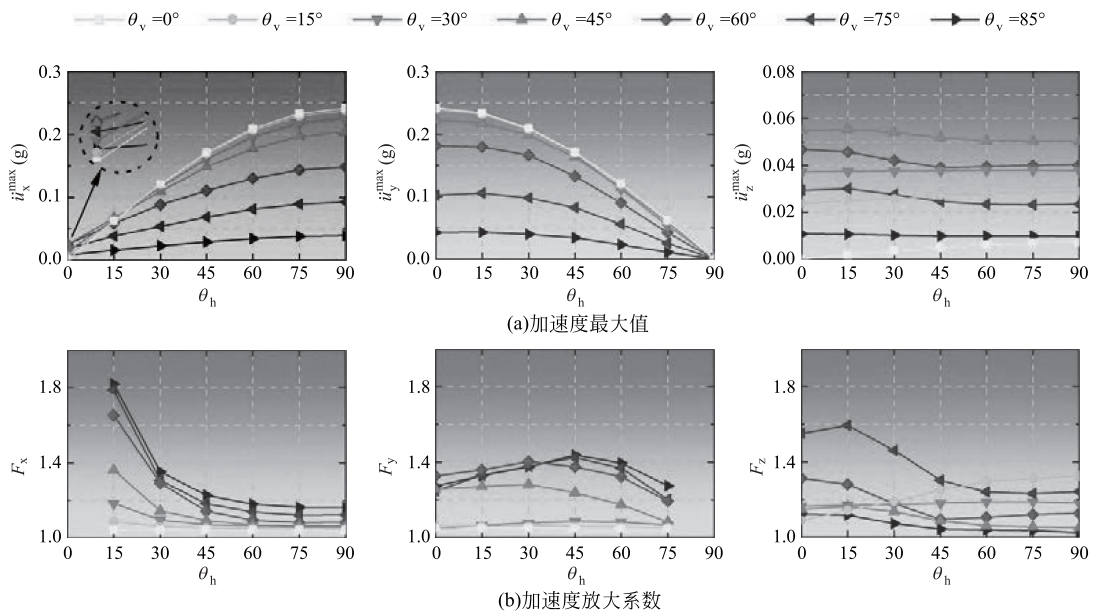


图 5 地震波入射角对场地地表地震动加速度最大值的影响

Fig. 5 Effects of the incident angle of seismic waves on the maximum ground accelerations

(1) 地震波水平入射角  $\theta_h$  对场地地表加速度的分布有较大影响。 $\theta_h = 0^\circ$  时隧道两侧的加速度对称分布, 此时离隧道越近  $x$  方向加速度越小, 随  $\theta_h$  增加, 隧道中心正上方  $x$  方向加速度显著增大。

(2) 地下隧道对地震波的散射作用导致地表  $x$  方向加速度较场地自由场响应最大放大约 1.8 倍 ( $\theta_h = 15^\circ, \theta_v = 85^\circ$ )。放大系数  $F_x$  随地震波水平入射角  $\theta_h$  增大迅速减小, 且  $\theta_h$  越小减小幅度越大。放大系数  $F_x$  随地震波竖向入射角  $\theta_v$  增大而增大, 地震波掠入射时 ( $\theta_v = 85^\circ$ ) 的放大效应最显著。

(3) 地下隧道导致地表  $y$  方向加速度较场地自由场响应最大放大约 1.4 倍 ( $\theta_h = 45^\circ, \theta_v = 85^\circ$ )。放大系数  $F_y$  随地震波水平入射角  $\theta_h$  的增大大致上呈先增大后减小的趋势, 随地震波竖向入射角  $\theta_v$  的增大整体上呈增大趋势,  $\theta_v > 30^\circ$  时放大效应明显。

(4) 场地地表地震动竖向加速度大小受地震波水平入射角  $\theta_h$  的影响较小, 主要由地震波竖向入射角  $\theta_v$  控制。整体而言,  $\theta_v = 75^\circ$  时隧道场地地表竖向加速度的放大效应最明显, 可达自由场结果的 1.6 倍 ( $\theta_h = 15^\circ$ ),  $\theta_v = 85^\circ$  时放大效应最小。

图 6 为不同地震波入射角情况下, 隧道场地地表加速度响应最大观测点的加速度反应谱。可以看出, 地震波水平入射角  $\theta_h$  和竖向入射角  $\theta_v$  对地表加速度

反应谱幅值大小有显著影响。还可以看出, 地震波竖向入射角  $\theta_v$  对场地地表地震动加速度反应谱的谱形有一定影响。针对本文算例, 在周期 0.8s ~ 1.4s 内,  $\theta_v = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  时,  $x$  方向和  $y$  方向的加速度反应谱出现一个明显的峰值, 谱形变宽。在周期 0.8 ~ 1.4s 内,  $\theta_v = 45^\circ$  时的竖向反应谱谱值显著大于其他入射角情况。

为体现地下隧道对场地地表地震动加速度反应谱卓越周期的影响, 图 7 将不同地震波入射角情况下隧道场地地表加速度反应谱的卓越周期与对应自由场结果比较。图中纵坐标为隧道场地地表加速度反应谱的卓越周期, 横坐标为对应自由场地表加速度反应谱的卓越周期。由于地震波水平入射角  $\theta_h$  对反应谱卓越周期的影响较小, 图 7 中的特征周期均按地震波竖向入射角  $\theta_v$  分类给出。针对本文算例,  $\theta_v = 85^\circ$  时, 隧道对地震波的散射作用可能会导致地表两个水平方向加速度反应谱的卓越周期较场地自由场情况明显减小, 而竖向加速度反应谱的卓越周期则可能会明显增大。另外,  $\theta_v = 0^\circ$  时隧道场地  $y$  方向加速度反应谱的卓越周期显著小于场地自由场情况,  $\theta_v = 15^\circ$  时隧道场地地表竖向加速度反应谱的卓越周期也可能较自由场结果明显减小。

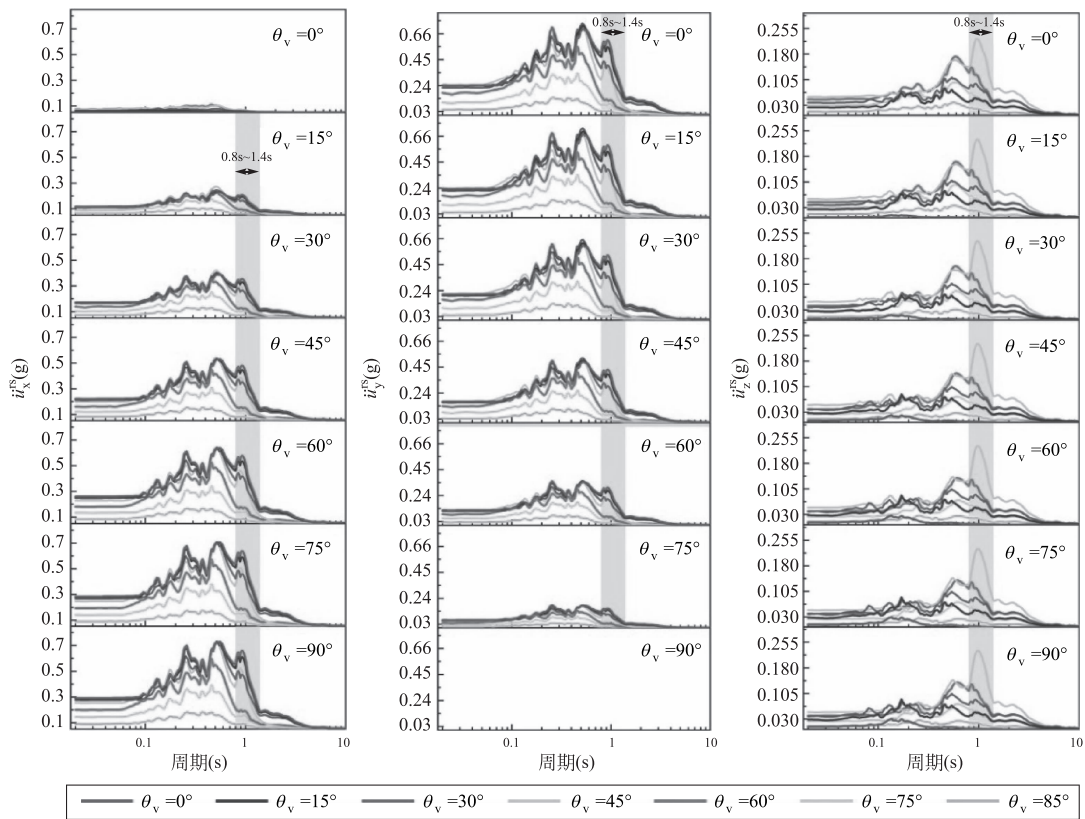


图 6 地震波入射角对场地地表地震动加速度反应谱的影响

Fig. 6 Effects of the incident angle of seismic waves on the acceleration response spectra



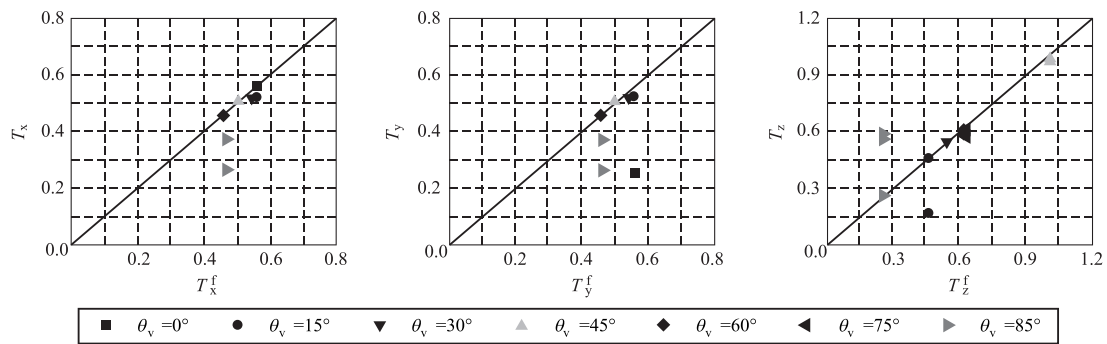


图 7 隧道场地地表地震动加速反应谱卓越周期与场地自由场结果比较

Fig. 7 Comparison of the predominant periods of acceleration response spectra between the tunnel site and free field

在进行结构抗震设计时，通常按 1(水平): 0.65(竖向)的比例考虑竖向地震作用。图 8(a)给出了不同地震波入射角情况下，隧道场地地表地震动竖向加速度最大值与水平(x 方向)加速度最大值的比值，图 8(b)为对应加速度反应谱均方根值的比值。可以看出，竖向加速度与水平加速度的比值随地震波水平入射角  $\theta_h$  的增大而减小，随地震波竖向入射角  $\theta_v$  的增大而增大。针对本文算例， $u_z^{max}/u_x^{max}$  最大可达 0.8，当  $\theta_h < 30^\circ$  且  $\theta_v > 30^\circ$  时， $u_z^{max}/u_x^{max}$  大于规范推荐的比值 0.65，且此时竖向加速度反应谱的幅值可能会大于水平加速度反应谱的幅值 ( $RMS(\ddot{u}_z^s)/RMS(\ddot{u}_x^s) > 1$ )。

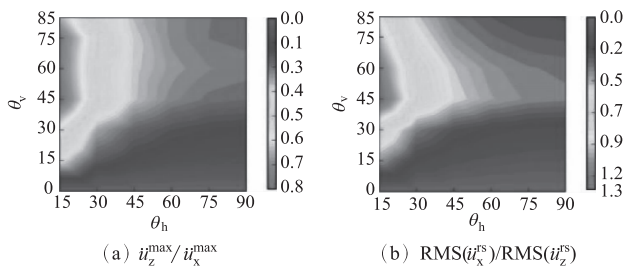


图 8 场地地表地竖向加速度与水平(x 方向)加速度的比值  
Fig. 8 Ratios of the vertical acceleration responses to the horizontal (x-direction) acceleration responses

### 3 结 论

(1) 地下隧道对场地地表地震动加速度大小有明显的放大效应，且地震波斜入射的加速度放大系数显著大于地震波垂直入射情况。

(2) 地下隧道对场地地表地震动加速度反应谱的卓越周期也有一定影响。整体而言，地震波竖向入射角  $\theta_v$  对加速度反应谱形状和卓越周期的影响较大，而地震波水平入射角  $\theta_h$  的影响较小。

(3) 针对本文算例， $\theta_h < 30^\circ$  且  $\theta_v > 30^\circ$  时，场地地表地震动竖向加速度与 x 方向加速度比值大于规范推荐的比值 0.65，且此时竖向加速度反应谱的均方根值大于 x 方向加速度反应谱的均方根值，说明地震波斜入射可能导致较大的竖向地震作用。

### 参 考 文 献

- [1] Lee V W, Karl J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, 11(8): 445-456
- [2] 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(I): 级数解[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 520-524 (Liang Jianwen, Ji Xiaodong, Lee V W. Effects of an underground lined tunnel on ground motion (I): series solution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 520-524 (in Chinese))
- [3] 陈国兴, 庄海洋, 徐焯. 软弱地基浅埋隧洞对场地设计地震动的影响[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 739-744 (Chen Guoxing, Zhuang Haiyang, Xu Ye. A study on influence of excavated shallow tunnel on design parameters of ground motion in the soft site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 739-744 (in Chinese))
- [4] 王国波, 徐海清, 于艳丽. “群洞效应”对紧邻交叠盾构隧道及场地地震响应影响的初步分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 968-973 (Wang Guobo, Xu Haiqing, Yu Yanli. Effect of group cavities on seismic response of adjacent overlapping shield tunnels and site soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 968-973 (in Chinese))
- [5] 孙强强, 薄景山, 刘红帅, 等. 隧道对地表地震动放大作用的研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 65-71 (Sun Qiangqiang, Bo Jingshan, Liu Hongshuai, et al. Effects of a tunnel on ground motion amplification [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3): 65-71 (in Chinese))
- [6] De Barros F C P, Luco J E. Diffraction of obliquely incident waves by a cylindrical cavity embedded in a layered viscoelastic half-space [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1993; 12(3): 159-171
- [7] Stamos A A, Beskos D E. 3-D seismic response analysis of

- long lined tunnels in half-space [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(2): 111-118
- [8] 梁建文, 韩冰, 巴振宁. 层状饱和半空间中无限长洞室群对斜入射 P1 波的三维散射 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(增 1): 153-159 (Liang Jianwen, Han Bing, Ba Zhenning. 3-D diffraction of obliquely incident P1 waves by cylindrical group cavities in layered poroelastic half-space [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 153-159 (in Chinese))
- [9] Zhu J, Li X J, Liang J W. 3D seismic responses of a long lined tunnel in layered poro-viscoelastic half-space by a hybrid FE-BE method [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2020, 114: 94-113
- [10] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178

朱 俊(1989— ),女,博士。主要从事地震工程研究。

李小军(1965— ),男,博士,教授。主要从事地震工程研究。

梁建文(1965— ),男,博士,教授。主要从事地震工程研究。

张 斌(1989— ),男,博士。主要从事地震工程研究。

(上接第 317 页)

董贺祥(1962— ),男,博士。主要从事水泥,混凝土相关材料方面的研究和技术服务。

**John Greenhalgh**(1958— ),高级工程师。主要从事钢纤维补强混凝土方面的研究和技术服务。

作田恭一(1967— ),男,学士,高级主管。主要从事钢纤维,钢丝材料方面的技术服务与市场销售管理。

张日红(1963— ),男,博士,教授。主要从事水泥,混凝土材料方面的研究。

张学军(1973— ),男,硕士,工程师。主要从事钢纤维混凝土材料开发研究和技术服务。

胡云发(1985— ),男,学士,高级工程师。主要从事大盾构隧道混凝土管片及预制构件的智能化,信息化生产技术研究。

陈 健(1973— ),男,教授级高级工程师。主要从事隧道与地下工程技术研究及管理。