

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220827002

# Rayleigh波入射下建筑群-隧道群相互作用特性研究\*

刘中宪<sup>1</sup>, 王建旭<sup>1</sup>, 金立国<sup>2</sup>, 陈 苏<sup>3</sup>

(1. 天津城建大学, 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 中国地震局地球物理研究所强震动地震学研究室, 北京 100081; 3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

**摘要:** 采用一种高精度间接边界元方法(IBEM), 研究了Rayleigh波入射下地上建筑群-地铁隧道群的动力响应。研究发现: 地上建筑群与邻近地铁隧道群之间存在显著的相互作用, 系统响应规律与入射波的频率、建筑物的数量与高度、隧道数量和位置等因素密切相关。参数分析表明: 考虑不同因素影响后, 地面运动幅值最大可放大约25%。当入射波频率较低时, 地上建筑群结构顶部位移幅值会较单一建筑顶部位移幅值显著降低, 这尤其体现在位于建筑群中部的建筑响应中, 最大可降低约88%; 当入射波频率较大时, 这一现象变得不再明显。高频入射波作用下, 地上建筑群与地铁隧道群的相互作用会使隧道衬砌产生较大环向应力, 其峰值可较单一地上建筑的情况放大约60%。

**关键词:** 土-结构相互作用; Rayleigh波; 间接边界元法; 建筑群; 衬砌隧道

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1153-12

## Study on the Interaction Characteristics of Building Group and Tunnel Group under Rayleigh Wave Excitation

LIU Zhongxian<sup>1</sup>, WANG Jianxu<sup>1</sup>, JIN Ligu<sup>2</sup>, CHEN Su<sup>3</sup>

(1. Tianjin Chengjian University, Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 3. Beijing University of Technology, Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A high-precision indirect boundary element method (IBEM) is used to study the dynamic response of the aboveground building group and subway tunnel group under Rayleigh wave excitation. It is found that there is a significant interaction between the aboveground building group and the adjacent subway tunnel group, and the system responses are closely related to the frequency of the incident wave, the number and height of buildings, the number and location of tunnels, etc. Parametric analysis shows that the maximum displacement amplitude of the ground building can be amplified by

\* 收稿日期: 2022-08-27; 修回日期: 2022-09-20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51878434)、天津市杰出青年科学基金(19JCJQJC62900)、天津市科技支撑计划项目(19YFZCSN01180)资助

**作者简介:** 刘中宪(1982—), 男, 博士后, 教授, 博士。主要从事地震工程、工程防护等方面的研究。

E-mail: zhongxian1212@163.com

**通讯作者:** 金立国(1986—), 男, 博士后, 副研究员, 博士。主要从事地震工程、工程防护等方面的研究。

E-mail: jlg1206@tju.edu.cn

about 25% after considering the influence of different factors. When the frequency of the incident wave is low, the displacement amplitude at the top of the above-ground building group will be significantly lower than that of the single building. The phenomenon is more significant when the building is located in the middle position of the building group, and the maximum reduction of the displacement amplitude is about 88%. However, when the frequency of the incident wave is higher, this phenomenon becomes less obvious. High-frequency incident waves will cause large circumferential stresses in the tunnel lining, and the peak circumferential stresses can be 60% larger than that of the single aboveground building.

**Keywords:** soil-structure interaction; Rayleigh waves; indirect boundary element method; building complex; lined tunnels

## 引言

近年来,为缓解城市人口增加带来的交通压力,我国城市轨道交通建设得到了迅猛发展。截至2021年,我国城市地铁运营线路长度达到7 206.8公里<sup>[1]</sup>。与此同时,必须注意到,我国有近一半数量的城市位于高烈度抗震设防区。现有研究表明,强震作用下,地铁隧道与临近地上建筑会产生显著的相互作用。例如,在1985年墨西哥地震中,与地铁隧道临近的大量地上建筑出现严重破坏<sup>[2]</sup>;1995年的日本神户地震震害调查也发现:大开地铁地下车站的临近地上建筑也发生了严重破坏<sup>[3]</sup>。

目前,地铁隧道与临近地上建筑地震相互作用的研究,已经积累了不少研究成果<sup>[4-16]</sup>。如K.Pitilakis等<sup>[17]</sup>研究了圆形隧道与地上结构的地震相互作用,指出浅埋情况下刚性衬砌隧道动应力会显著增大。王国波等<sup>[18-19]</sup>采用有限元法研究了下穿隧道—土—地表邻近框架结构地震响应规律,指出当隧道半径较大时,地震波的传播会被隧道所阻隔,从而起到一定的减震作用。陈健云<sup>[20]</sup>同样采用有限单元法,研究了地下车站结构对临近地上建筑地震响应的影响。研究表明,地下车站结构的存在,会放大邻近框架柱的剪力与位移响应。D. Clouteau等<sup>[21]</sup>基于边界元法,研究了建筑群分布特性对地表地震动特性和结构响应的影响。陈超<sup>[22]</sup>的研究表明,当地表存在多个邻近既有建筑时,地下车站结构的地震动动力响应会明显减小,且地表结构数量越多,地下结构地震响应就越小。张悦豪<sup>[23]</sup>研究了地震动特性对地上—地下连体结构地震响应的影响。

此外,针对Rayleigh波入射的情况,学者们也开展了一定研究<sup>[24-26]</sup>。范凯祥等<sup>[27]</sup>推导了饱和土中浅

埋复合式隧道衬砌在入射平面Rayleigh波作用下动力响应的解析解,研究了入射频率、衬砌内外刚度比与厚度比等因素对复合式衬砌隧道动力响应的影响规律。王竞雄等<sup>[28]</sup>分析了Rayleigh波频率和速度幅值对埋设于不同回填土中的连续管道动力响应,并比较了不同场地条件(土层剪切波速、土层厚度和基岩剪切波速等)下的管道最大应变,并讨论了管道埋深与管道表面粗糙度对管道最大应变的影响。最近,L.G.Jin等<sup>[29-30]</sup>给出了地铁隧道与临近地上建筑地震相互作用的一个解析模型,提出了可预测地上与地下结构地震相互作用强弱位置的Rayleigh散射特征频率计算方法,并讨论了隧道纵向剪切刚度对地上建筑地震响应的影响。

然而,必须指出的是:现有地下结构与地上建筑地震的相互作用研究主要针对单一地下结构与单一地上结构,很少涉及地铁隧道群与地上建筑群。在大城市中,双线或多线地铁隧道群近距离穿越地上密集建筑群的案例十分普遍。同时,现有研究主要围绕体波(P波、S波)作用展开,针对能量较大的面波(Rayleigh波)作用下的地下结构和地上建筑动力相互作用的研究,尚未见报道。

鉴于目前研究中存在的上述不足,本文采用IBEM方法,研究Rayleigh波作用下两个地铁隧道与多个地上建筑之间的地震相互作用问题。相比域离散型方法,本文采用的间接边界元(IBEM)法具有:降低问题求解维数、节省内存、自动满足无限远辐射条件、无高频数值频散、位移和应力计算精度高等优势。

## 1 计算模型

如图1所示,假设二维均匀半空间中存在多个

地上建筑,同时在其下方有两个隧道穿过。为简化分析,建筑物的地上结构部分假定为剪力墙模型,这是因为在实际地震过程中建筑物上部结构主要

以承受剪切变形为主,因此本文采用剪力墙模型代替计算更为复杂的框架模型。地上建筑的基础假定为刚性基础。

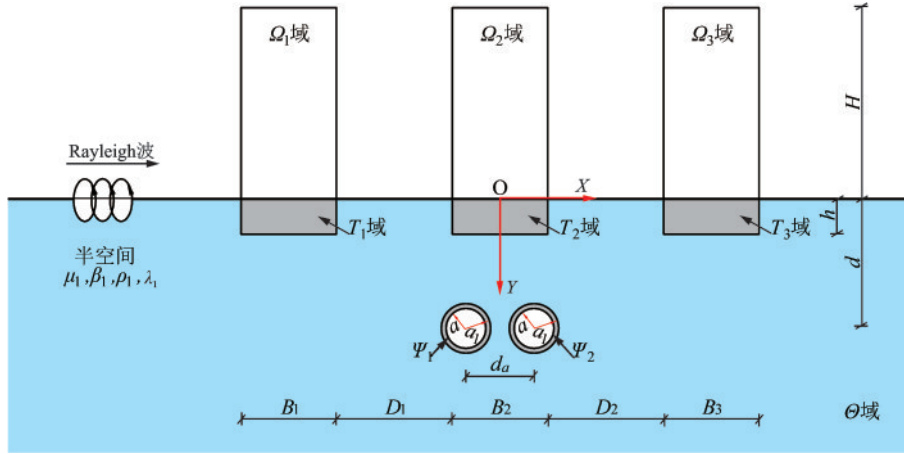


图1 计算模型

Fig.1 Numerical model

本文以三幢地上建筑为例。半空间区域记为域 $\Theta$ ;隧道衬砌区域分别记为域 $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$ ;建筑物的基础区域分别记为域 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ ,对应的上部剪力墙区域分别记为域 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 、 $\Omega_3$ 。模型中半空间介质、剪力墙介质和隧道衬砌介质,均假定为线弹性均匀各向同性介质。域 $\Theta$ 和 $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$ 交界面记为 $L_{11}$ 、 $L_{13}$ ;域 $\Theta$ 和 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 交界面分别记为 $L_2$ 、 $L_3$ 与 $L_4$ ;剪力墙 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 、 $\Omega_3$ 和基础 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 交界面分别记为 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$ ;剪力墙外表面边界分别记为 $L_8$ 、 $L_9$ 、 $L_{10}$ 。建筑物上部结构高度均为 $H$ ,基础埋深均为 $h$ ,隧道圆心距地表距离为 $d$ ,隧道圆心之间的距离为 $d_a$ ,隧道内外半径分别为 $a$ 和 $a_1$ 。半空间介质剪切波速、泊松比和密度分别为 $\beta_1$ 、 $\mu_1$ 、 $\rho_1$ ;隧道衬砌材料特性参数记为 $\beta_2$ 、 $\mu_2$ 、 $\rho_2$ ,基础材料特性参数记为 $\beta_3$ 、 $\mu_3$ 、 $\rho_3$ ,剪力墙的材料特性参数记为 $\beta_4$ 、 $\mu_4$ 、 $\rho_4$ 。由于地上建筑的基础被假定为刚性,此在后续计算中,作者是通过将基础剪切波速 $\beta_3$ 赋予充分大的数值来实现的。

## 2 方法及求解

### 2.1 间接边界元法

根据弹性波动理论,总波场可分为自由场和散射场的叠加。对于自由场的反应求解可参见文献<sup>[31]</sup>的波场分析部分。对于散射场,在简谐波激励下,边界为 $S$ 的均匀各向同性区域 $V$ 上,其域内任一点的位移可由Somigliana积分公式表达为:

$$cu_i(\xi) = \int_V G_{ij}(y, \xi) f_j(y) dV + \int_S [G_{ij}(x, \xi) t_j(x) - T_{ij}(x, \xi) u_j(x)] dS \quad (1)$$

式中, $G_{ij}(x, \xi)$ 、 $T_{ij}(x, \xi)$ 分别为位移格林函数、应力格林函数; $u_j(x)$ 为域内任意一点 $x$ 处的 $j$ 向位移; $t_j(x)$ 为对应的 $j$ 向应力; $f_j(y)$ 表示体力的 $j$ 向分量。

借助于单层位势理论,这里将式(1)表示的Somigliana积分表达式,改写为与之匹配的间接边界元法的积分表达形式:

$$u_i(x) = \int_V G_{ij}(x, \xi) f_j(\xi) dV_\xi + \int_S G_{ij}(x, \xi) \phi_j(\xi) dS_\xi \quad (2)$$

$$t_i(x) = \frac{1}{2} \delta_{ij} \phi_i(x) + \int_V T_{ij}(x, \xi) f_j(\xi) dV_\xi + \int_S T_{ij}(x, \xi) \phi_j(\xi) dS_\xi \quad (3)$$

式(2)和(3)是本文采用的间接边界元法求解的理论基础。在进行数值计算时,一般忽略体力的作用,且对计算模型的边界面进行离散,并以此为基础进行各域的应力与位移的计算。

### 2.2 边界条件及求解

在模型的各边界处,均需满足位移和应力连续性条件;在地表、隧道内壁以及剪力墙外表面处还须满足零应力条件。具体的边界条件如下:

(1) 自由水平地表边界 $L_1$ 上应力为零:

$$t_i^{(f, \Theta)} + t_i^{(s, \Theta)} = 0 \quad (4)$$

(2)基础底部边界 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 上位移和应力连续:

$$u_i^{(f,\theta)} + u_i^{(s,\theta)} = u_i^{(s,T)} \quad (5a)$$

$$t_i^{(f,\theta)} + t_i^{(s,\theta)} = t_i^{(s,T)} \quad (5b)$$

(3)剪力墙外表面边界 $L_8$ 、 $L_9$ 、 $L_{10}$ 上应力为零:

$$t_i^{(s,\Omega_1)} = 0 \quad (6a)$$

$$t_i^{(s,\Omega_2)} = 0 \quad (6b)$$

$$t_i^{(s,\Omega_3)} = 0 \quad (6c)$$

(4)剪力墙 $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 、 $\Omega_3$ 和基础 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 的连接处 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$ 上位移和应力连续:

$$u_i^{(s,\Omega_1)} = u_i^{(s,T_1)}, t_i^{(s,\Omega_1)} = t_i^{(s,T_1)} \quad (7a)$$

$$u_i^{(s,\Omega_2)} = u_i^{(s,T_2)}, t_i^{(s,\Omega_2)} = t_i^{(s,T_2)} \quad (7b)$$

$$u_i^{(s,\Omega_3)} = u_i^{(s,T_3)}, t_i^{(s,\Omega_3)} = t_i^{(s,T_3)} \quad (7c)$$

(5)隧道 $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$ 衬砌外表面与半空间土体边界 $L_{11}$ 、 $L_{13}$ 上位移和应力连续:

$$u_i^{(f,\theta)} + u_i^{(s,\theta)} = u_i^{(s,\Psi_1)} \quad (8a)$$

$$t_i^{(f,\theta)} + t_i^{(s,\theta)} = t_i^{(s,\Psi_1)} \quad (8b)$$

$$u_i^{(f,\theta)} + u_i^{(s,\theta)} = u_i^{(s,\Psi_2)} \quad (8c)$$

$$t_i^{(f,\theta)} + t_i^{(s,\theta)} = t_i^{(s,\Psi_2)} \quad (8d)$$

(6)隧道域内壁 $L_{12}$ 、 $L_{14}$ 上应力为零:

$$t_i^{(s,\Psi_1)} = 0, t_i^{(s,\Psi_2)} = 0 \quad (9)$$

其中,地表零应力条件(4)可进一步表示为:

$$-0.5\phi_j^\Omega(x) + \int_S \phi_j^\Omega(\xi) T_{ij}^\Omega(x, \xi) dS_\xi = 0 \quad (i, j = x, y) \quad (10)$$

在利用上述边界条件进行问题求解时,首先将地表、隧道、剪力墙、基础的外边界进行离散,并在计算中将虚拟波源点布置在这些边界的离散点处,波源强度设为待定值。取水平地表的离散范围为隧道附近散射波长的5~10倍以满足计算精度要求。将边界 $L_1$ 到 $L_{14}$ 的离散点的数量分别记为 $N_1$ 到 $N_{14}$ ,其中 $\Phi_j(\xi)$ 为离散单元上的不变常量,所有积分边界条件最终可转化为线性方程组:其中 $M_1 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_{11} + N_{13}$ ,  $M_2 = N_5 + N_8$ ,  $M_3 = N_6 + N_9$ ,  $M_4 = N_7 + N_{10}$ ,  $M_5 = N_5 + N_2$ ,  $M_6 = N_6 + N_3$ ,  $M_7 = N_7 + N_4$ ,  $M_8 = N_{11} + N_{13}$ ,  $M_9 = N_{12} + N_{14}$ 。

$$-0.5\phi_j^\theta(x_n) + \sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^\theta(x_n, \xi_{l_1}) = -t_i^{(f,\theta)}(x_n), n_1 = 1, N_1, \quad i, j = x, y \quad (11)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^\theta(x_{n_2}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_2} \phi_j^{T_1}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{T_1}(x_{n_2}, \xi_{l_2}) = -u_i^{(f,\theta)}, n_2 = 1, N_2, \quad i, j = x, y \quad (12a)$$

$$-0.5[\phi_j^\theta(x_n) - \phi_j^{T_1}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^\theta(x_{n_2}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_2} \phi_j^{T_1}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{T_1}(x_{n_2}, \xi_{l_2}) = -t_i^{(f,\theta)}, n_2 = 1, N_2, \quad i, j = x, y \quad (12b)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^\theta(x_{n_3}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_2} \phi_j^{T_2}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{T_2}(x_{n_3}, \xi_{l_2}) = -u_i^{(f,\theta)}, n_3 = 1, N_3, \quad i, j = x, y \quad (12c)$$

$$-0.5[\phi_j^\theta(x_n) - \phi_j^{T_2}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^\theta(x_{n_3}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_2} \phi_j^{T_2}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{T_2}(x_{n_3}, \xi_{l_2}) = -t_i^{(f,\theta)}, n_3 = 1, N_3, \quad i, j = x, y \quad (12d)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^\theta(x_{n_4}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_2} \phi_j^{T_3}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{T_3}(x_{n_4}, \xi_{l_2}) = -u_i^{(f,\theta)}, n_4 = 1, N_4, \quad i, j = x, y \quad (12e)$$

$$-0.5[\phi_j^\theta(x_n) - \phi_j^{T_3}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^\theta(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^\theta(x_{n_4}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_2} \phi_j^{T_3}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{T_3}(x_{n_4}, \xi_{l_2}) = -t_i^{(f,\theta)}, n_4 = 1, N_4, \quad i, j = x, y \quad (12f)$$

$$-0.5\phi_j^{\Omega_1}(x_n) + \sum_{l=1}^{M_2} \phi_j^{\Omega_1}(\xi_l) \cdot t_{ij}^{\Omega_1}(x_{n_5}, \xi_l) = 0, \quad n_5 = 1, N_5, \quad i, j = x, y \quad (13a)$$

$$-0.5\phi_j^{\Omega_2}(x_n) + \sum_{l=1}^{M_3} \phi_j^{\Omega_2}(\xi_l) \cdot t_{ij}^{\Omega_2}(x_{n_6}, \xi_l) = 0, \quad n_6 = 1, N_6, \quad i, j = x, y \quad (13b)$$

$$-0.5\phi_j^{\Omega_3}(x_n) + \sum_{l=1}^{M_4} \phi_j^{\Omega_3}(\xi_l) \cdot t_{ij}^{\Omega_3}(x_{n_7}, \xi_l) = 0, \quad n_7 = 1, N_7, \quad i, j = x, y \quad (13c)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_2} \phi_j^{\Omega_1}(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^{\Omega_1}(x_{n_8}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_5} \phi_j^{T_1}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{T_1}(x_{n_8}, \xi_{l_2}) = 0, n_8 = 1, N_8, \quad i, j = x, y \quad (14a)$$

$$-0.5[\phi_j^{\Omega_1}(x_n) - \phi_j^{T_1}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_2} \phi_j^{\Omega_1}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Omega_1}(x_{n_8}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_5} \phi_j^{T_1}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{T_1}(x_{n_8}, \xi_{l_2}) = 0, \quad n_8 = 1, N_8, \quad i, j = x, y \quad (14b)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_2} \phi_j^{\Omega_2}(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^{\Omega_2}(x_{n_9}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_6} \phi_j^{T_2}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{T_2}(x_{n_9}, \xi_{l_2}) = 0, n_9 = 1, N_9, \quad i, j = x, y \quad (14c)$$

$$-0.5[\phi_j^{\Omega_2}(x_n) - \phi_j^{T_2}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_5} \phi_j^{\Omega_1}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Omega_1}(x_{n_9}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_6} \phi_j^{T_1}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{T_1}(x_{n_9}, \xi_{l_2}) = 0, \quad n_9 = 1, N_9, \quad i, j = x, y \quad (14d)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_4} \phi_j^{\Omega_3}(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^{\Omega_3}(x_{n_{10}}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_7} \phi_j^{T_3}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{T_3}(x_{n_{10}}, \xi_{l_2}) = 0, \quad n_{10} = 1, N_{10}, \quad i, j = x, y \quad (14e)$$

$$-0.5[\phi_j^{\Omega_3}(x_n) - \phi_j^{T_3}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_4} \phi_j^{\Omega_3}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Omega_3}(x_{n_{10}}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_7} \phi_j^{T_3}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{T_3}(x_{n_{10}}, \xi_{l_2}) = 0, \quad n_{10} = 1, N_{10}, \quad i, j = x, y \quad (14f)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^{\Theta}(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^{\Theta}(x_{n_{11}}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_8} \phi_j^{\Psi_1}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{\Psi_1}(x_{n_{11}}, \xi_{l_2}) = -u_i^{(f, \Theta)}, \quad n_{11} = 1, N_{11}, \quad i, j = x, y \quad (15a)$$

$$-0.5[\phi_j^{\Theta}(x_n) - \phi_j^{\Psi_1}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^{\Theta}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Theta}(x_{n_{11}}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_8} \phi_j^{\Psi_1}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{\Psi_1}(x_{n_{11}}, \xi_{l_2}) = -t_i^{(f, \Theta)}, \quad n_{11} = 1, N_{11}, \quad i, j = x, y \quad (15b)$$

$$\sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^{\Theta}(\xi_{l_1}) \cdot g_{ij}^{\Theta}(x_{n_{12}}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_8} \phi_j^{\Psi_2}(\xi_{l_2}) \cdot g_{ij}^{\Psi_2}(x_{n_{12}}, \xi_{l_2}) = -u_i^{(f, \Theta)}, \quad n_{12} = 1, N_{12}, \quad i, j = x, y \quad (15c)$$

$$-0.5[\phi_j^{\Theta}(x_n) - \phi_j^{\Psi_2}(x_n)] + \sum_{l_1=1}^{M_1} \phi_j^{\Theta}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Theta}(x_{n_{12}}, \xi_{l_1}) - \sum_{l_2=1}^{M_8} \phi_j^{\Psi_2}(\xi_{l_2}) \cdot t_{ij}^{\Psi_2}(x_{n_{12}}, \xi_{l_2}) = -t_i^{(f, \Theta)}, \quad n_{12} = 1, N_{12}, \quad i, j = x, y \quad (15d)$$

$$-0.5\phi_j^{\Psi_1}(x_n) + \sum_{l_1=1}^{M_8} \phi_j^{\Psi_1}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Psi_1}(x_{n_{13}}, \xi_{l_1}) = 0, \quad n_{13} = 1, N_{13}, \quad i, j = x, y \quad (16a)$$

$$-0.5\phi_j^{\Psi_2}(x_n) + \sum_{l_1=1}^{M_8} \phi_j^{\Psi_2}(\xi_{l_1}) \cdot t_{ij}^{\Psi_2}(x_{n_{14}}, \xi_{l_1}) = 0, \quad n_{14} = 1, N_{14}, \quad i, j = x, y \quad (16b)$$

### 3 精度检验

首先定义无量纲动应力集中因子为  $\sigma_{\theta\theta}/\mu k_{\beta}^2$ , 其表示衬砌环向应力与半空间中入射波应力幅值的比值。

为了验证本文计算结果的正确性, 这里将模型退化为均匀半空间中单一隧道模型并与参考文献[3]的结果进行比对, 如图2所示。验证中的参数取

值为: 黏滞阻尼比  $\zeta=0.001$ , 泊松比  $\mu=0.33$ , 无量纲频率  $\eta=0.5$ , 隧道埋深取1.5倍的隧道半径。对于柔性衬砌, 取半空间和衬砌材料的密度比  $\rho_1/\rho_2=1.25$ , 剪切波速比  $\beta_1/\beta_2=3.0$ ; 对于刚性衬砌, 密度比  $\rho_1/\rho_2=0.8$ , 剪切波速比  $\beta_1/\beta_2=0.2$ 。从图中可知, 本文结果同文献结果吻合很好, 验证了本文结果的精确性。

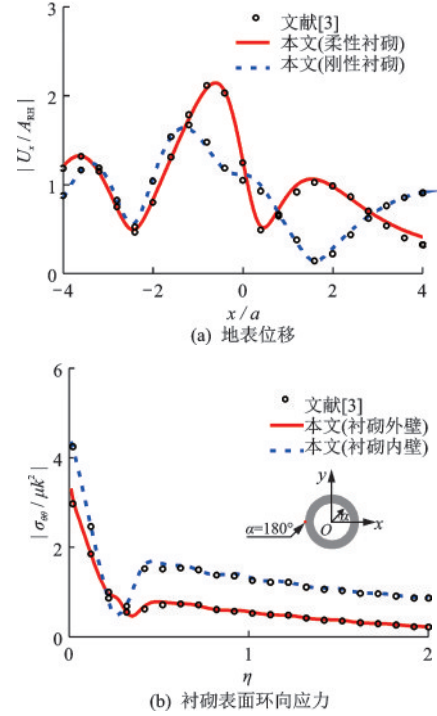


图2 本文计算结果和文献[3]结果比较

Fig.2 Comparison of calculation results in this paper with those in literature [3]

### 4 算例分析

算例参数如下: 两隧道均采用外半径  $a_1=4.4$  m, 内半径  $a=4$  m 的模型; 剪力墙的宽度和高度分别为  $B_1=21$  m 和  $H=44$  m; 三个基础埋深均为  $h=4$  m、宽  $B_1=21$  m。两隧道圆心的距离为  $d_a=13$  m, 半空间剪切波速  $\beta_1=200$  m/s, 密度  $\rho_1=2700$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu_1=0.3$ ; 隧道介质剪切波速  $\beta_2=2600$  m/s, 密度  $\rho_2=2700$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu_2=0.3$ 。近似刚性基础的剪切波速  $\beta_3=10400$  m/s, 密度  $\rho_3=2500$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu_3=0.25$ 。剪力墙的剪切波速  $\beta_4=420$  m/s, 密度  $\rho_4=500$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu_4=0.3$ 。无量纲频率  $\eta=2a/\lambda_1$ , 分别取  $\eta=0.25, 0.5, 1$  和  $2$ 。衬砌内外介质材料滞回阻尼系数均取  $0.002$ 。

#### 4.1 地表位移

图3给出了Rayleigh波入射下不同楼高和隧道埋深对地表位移响应的影响。横坐标对应地表各点位置 $x/a$ ,纵坐标表示使用Rayleigh波位移幅值归一化后的地表位移幅值 $|u_{\max}/A_{RH}|$ 。同时令两隧道位于中间建筑物的正下方且关于 $y$ 轴对称,隧道埋深分别取 $d/a=3,4.5,6$ (分别对应12 m、18 m、24 m),建筑物高度分别取 $H/a=9,11,13$ (分别对应36 m、44 m、52 m)。

如图3所示,当入射波频率较低( $\eta=0.25$ 与 $0.5$ )时,建筑物高度的变化对地表位移幅值影响较小;隧道埋深的变化对建筑物及其周围地表位移幅值也有一定的影响,但影响程度很微弱。如当 $\eta$ 为 $0.25$ ,建筑高度44 m,隧道埋深为 $3a,4.5a,6a$ 时, $x$ 方向的地表位移峰值分别为1.45、1.46、1.47。

随着 $\eta$ 逐渐增加,地表位移幅值变化显著,震荡变得更加剧烈,空间分布特征也更为复杂。如当建筑物高44 m且隧道埋深 $d=3a$ 、 $\eta$ 由 $0.25$ 增加到1时, $x$ 方向地表位移幅值由1.45增加到1.82,放大约25%,同样 $y$ 方向地表位移幅值由1.96增加到2.40,放大约22%。同时,当频率增加时,建筑物高度对地表位移幅值的影响也显著增大,并且与隧道的埋深密切相关。如当 $\eta=2$ 且 $d=3a$ 、建筑物高度分别

为36、44 m和52 m时, $x$ 方向地表位移幅值分别为1.84、3.36、1.83; $y$ 方向地表位移幅值分别为2.50、4.62、2.53。而当隧道埋深增大为 $d=4.5a$ 时,建筑物高度36、44 m和52 m对应的 $x$ 方向地表位移峰值为2.41、3.52、2.45,分别被放大31.0%、4.7%、33.8%; $y$ 方向地表位移峰值为3.17、4.87、3.29,分别被放大26.8%、5.4%、30.0%。当隧道埋深继续增大到 $d=6a$ 时,地表位移幅值趋于稳定。

#### 4.2 建筑顶部位移

为分析建筑顶部位移的变化,本文分别计算了如图4所示的8种不同工况的结果,其中图4(a)为图1所示模型。8种不同工况中,隧道埋深均为 $d=12$  m,隧道均位于中间建筑物正下方且隧道圆心距离 $y$ 轴水平距离 $d_c/2=6.5$  m。图5给出了Rayleigh波入射下不同工况建筑物顶部位移结果。

当入射频率较小时( $\eta=0.5$ ),工况1~5建筑顶部位移见表1、2。对比工况5和1,工况6和2,工况7和3,工况8和4四组数据中建筑顶部位移幅值可发现,地上建筑群顶部位移与地上单一建筑结果存在较大差异,尤其体现在位于建筑群中间的结构中。而横向对比工况1~4,则说明上述情况是由于处于最左侧的建筑对入射波产生了较大的屏蔽作用。

表1 建筑顶部位移(一)

Table 1 Building roof displacement(first)

入射频率( $\eta=0.5$ )	中建筑顶部 $x$ 方向位移幅值	中建筑顶部 $y$ 方向位移幅值	左建筑顶部 $x$ 方向位移幅值	左建筑顶部 $y$ 方向位移幅值	右建筑顶部 $x$ 方向位移幅值	右建筑顶部 $y$ 方向位移幅值
工况5	0.245	0.474	—	—	—	—
工况1	0.343	0.175	0.117	0.537	0.041	0.157
工况6	0.121	0.449	—	—	—	—
工况2	0.050	0.164	0.117	0.535	0.046	0.156

表2 建筑顶部位移(二)

Table 2 Building roof displacement(second)

入射频率( $\eta=0.5$ )	中建筑顶部 $x$ 方向位移幅值	中建筑顶部 $y$ 方向位移幅值	左建筑顶部 $x$ 方向位移幅值	左建筑顶部 $y$ 方向位移幅值	右建筑顶部 $x$ 方向位移幅值	右建筑顶部 $y$ 方向位移幅值
工况7	0.217	0.455	—	—	—	—
工况3	0.027	0.109	0.117	0.537	0.042	0.158
工况8	0.126	0.506	—	—	—	—
工况4	0.039	0.115	0.114	0.540	0.051	0.159

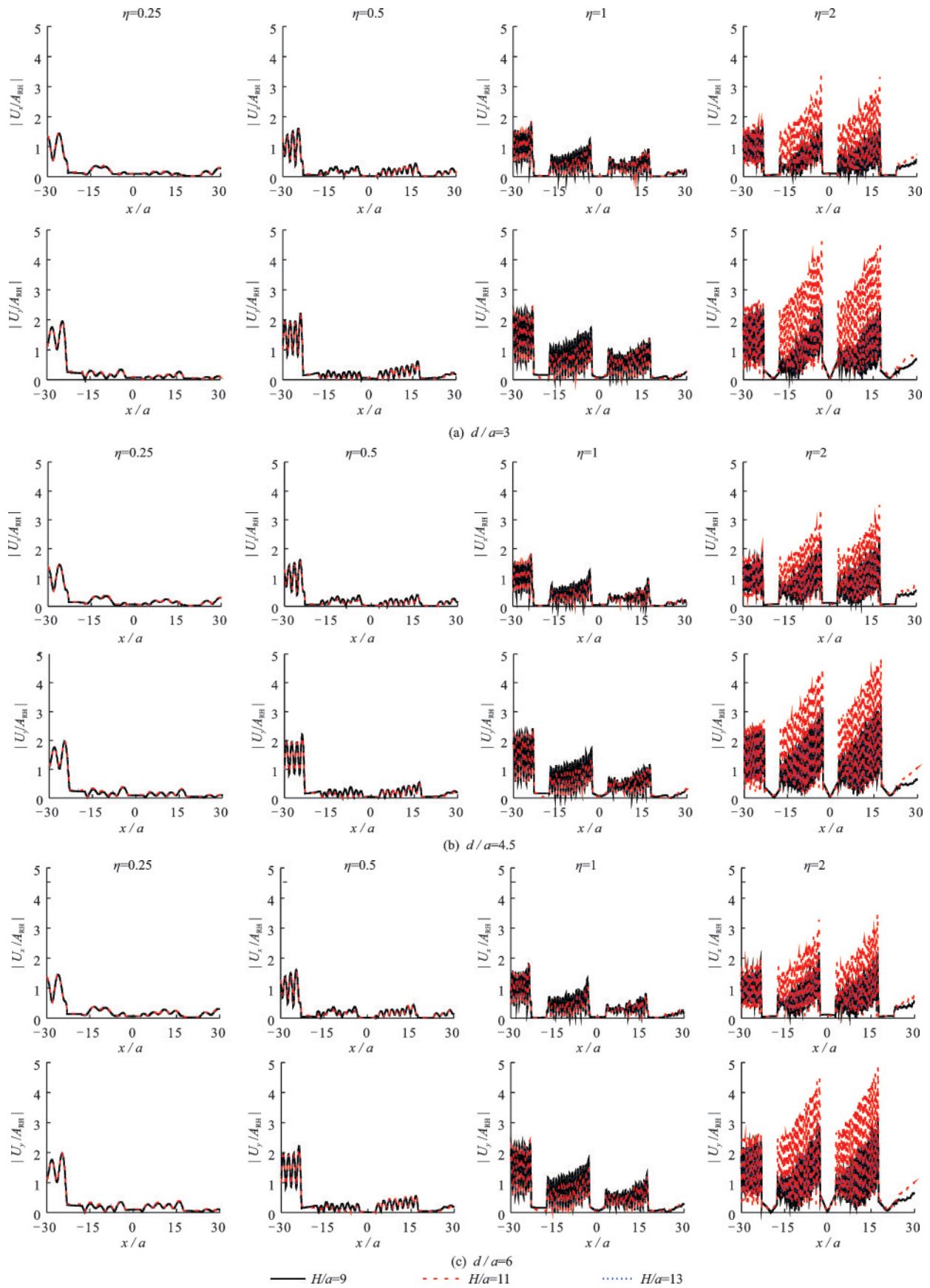


图3 Rayleigh波入射下不同建筑物高度和隧道数埋深的地表位移幅值

Fig.3 Surface displacement amplitudes for different building heights and tunnel burial depths under Rayleigh wave incidence

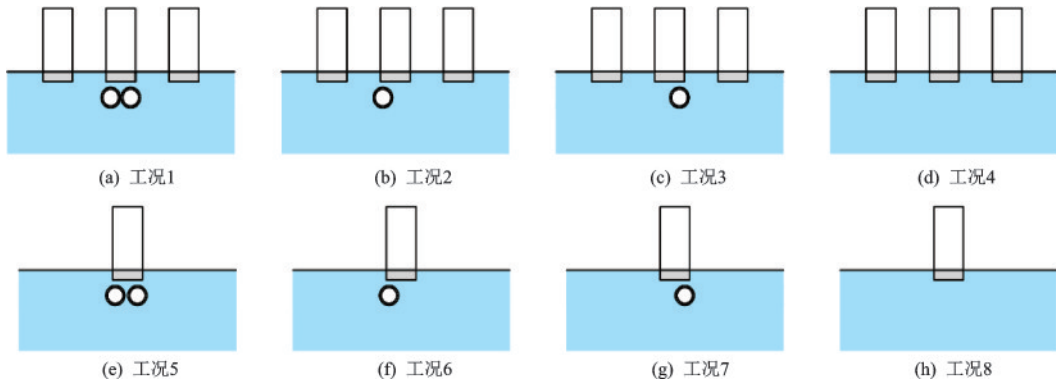
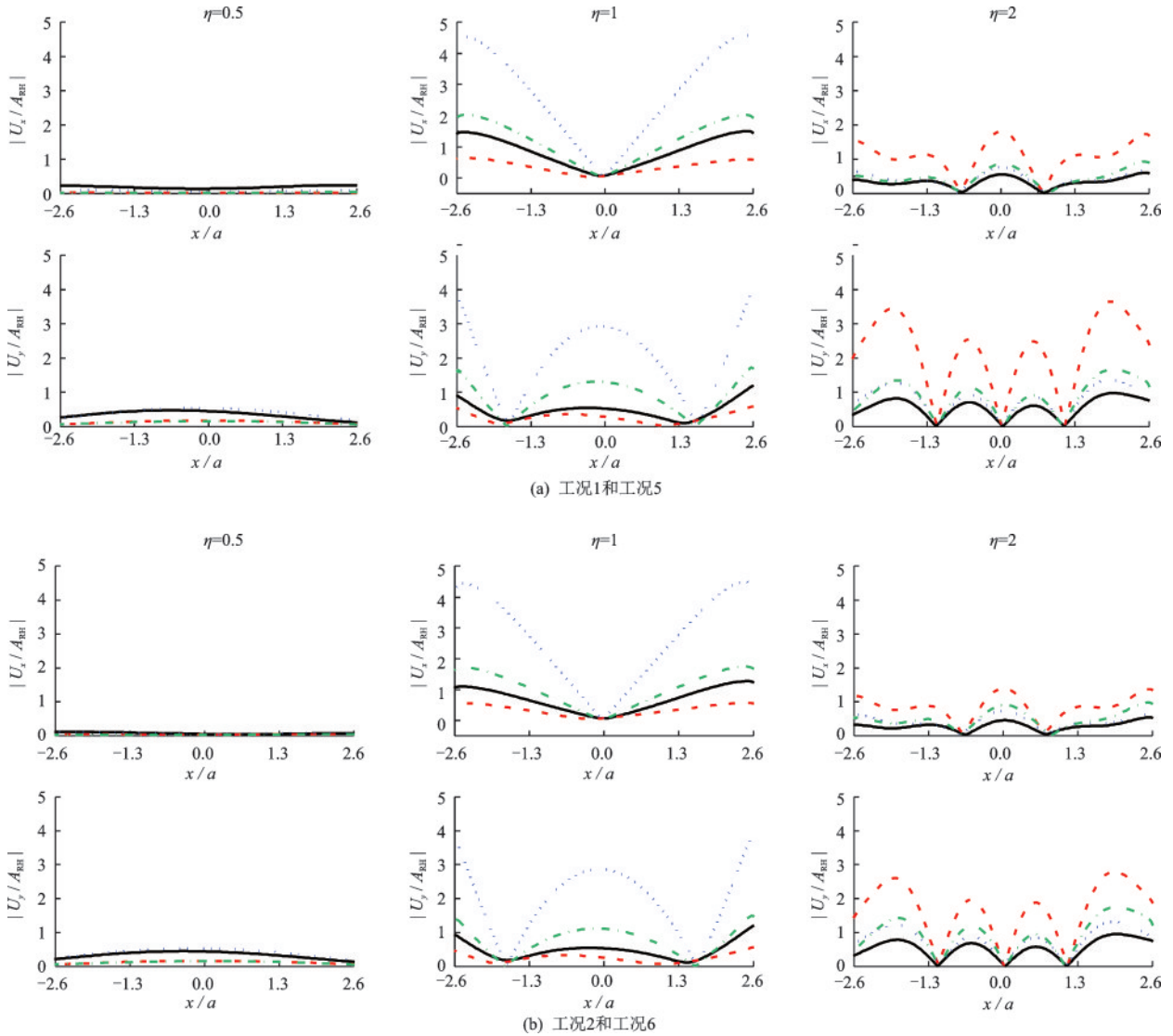


图4 本文计算工况

Fig.4 Calculation conditions in this paper

而当入射频率较大时,  $\eta=1$  和 2 对应的工况 1 左侧建筑顶部  $x$  方向位移幅值分别为 4.59、0.77, 下降 83.2%, 同理  $y$  方向位移幅值分别为 3.89、1.37, 下降 64.8%。可见, 随着入射波频率的提高, 建筑物顶

部位移存在一个先上升后下降的趋势。此外, 图 5 中还能观察到, 由于建筑下隧道的影响, 位于建筑群中间的建筑在高频入射波作用下会产生较大的顶部位移。



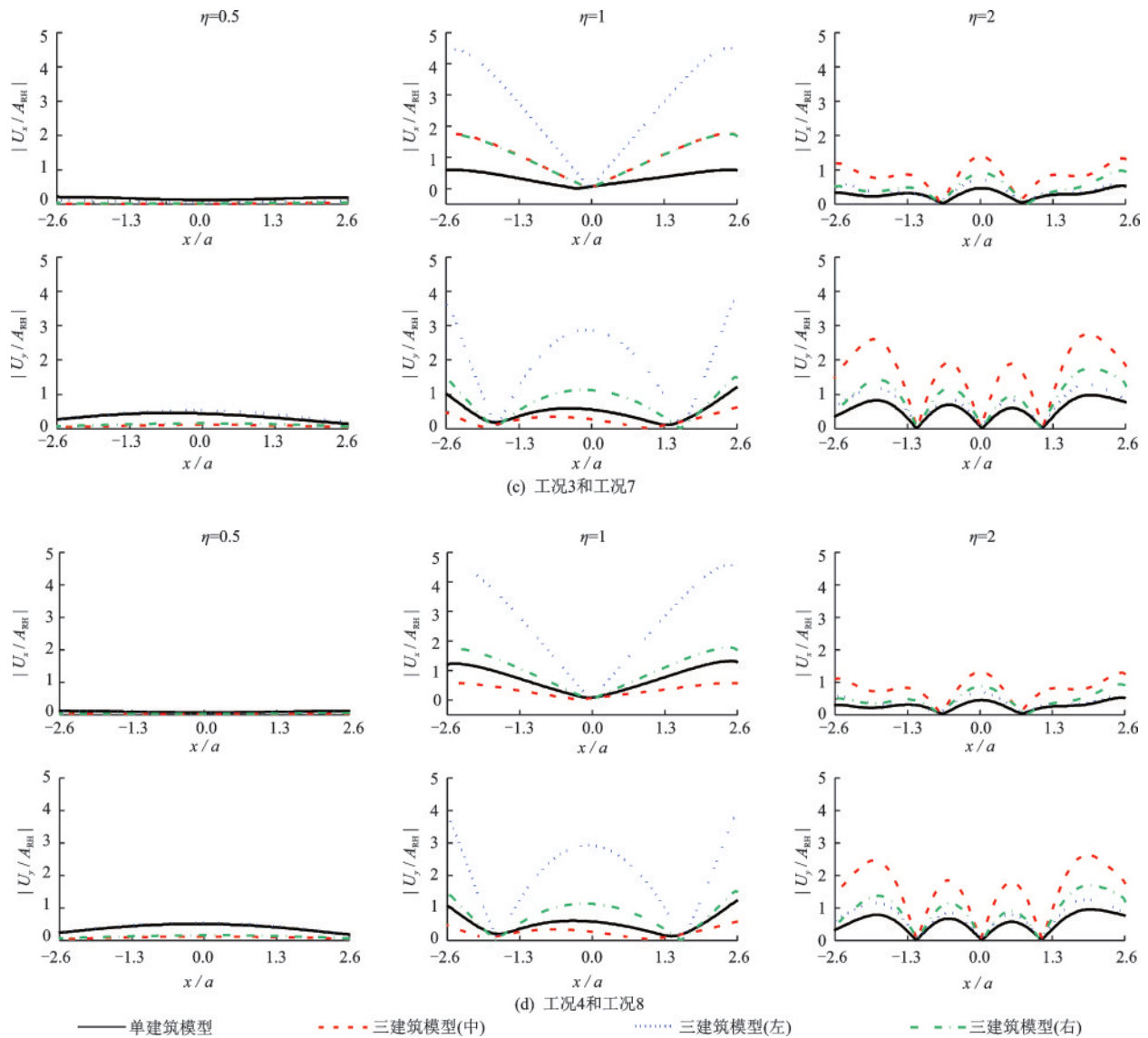


图5 Rayleigh波入射下不同建筑物和隧道数量的建筑顶部位移幅值

Fig.5 Roof displacement amplitudes for different numbers of buildings and tunnels under Rayleigh wave incidence

### 4.3 隧道应力云图

图6分别计算了工况1和工况5下隧道的环向应力云图。

对于工况5的单建筑双隧模型,由左隧道应力云图可知,在入射波频率较低时,衬砌内会产生较大的应力。当入射波频率从0.5增大到2时,衬砌内的环向应力呈减小趋势,左右两隧道应力幅值分别减小了约67%和75%,而且应力的分布也变得更为复杂。而对于工况1的三建筑双隧模型,左隧道的应力云图因为隧道左侧存在建筑物影响,衬砌环向应力幅值随入射频率的增加呈现增大的趋势,增加

的幅度约为60%和56%。

当入射频率不变(如 $\eta=1$ )时,工况5左隧道的环向应力幅值比工况1左隧道的环向应力幅值放大约22%。当入射波继续增大到 $\eta=2$ 时,工况5左隧道的应力相较于工况1左隧道的环向应力幅值减小约57%。因此隧道设计时要重点考虑高频入射波作用的情况。

工况1右隧道环向应力随着入射频率的增加一直呈增大趋势,表现为隧道环向应力更加集中。而工况5的右隧道环向应力变化规律则恰恰相反,随着入射频率的增加,隧道衬砌内环向应力幅值一直呈减小趋势。

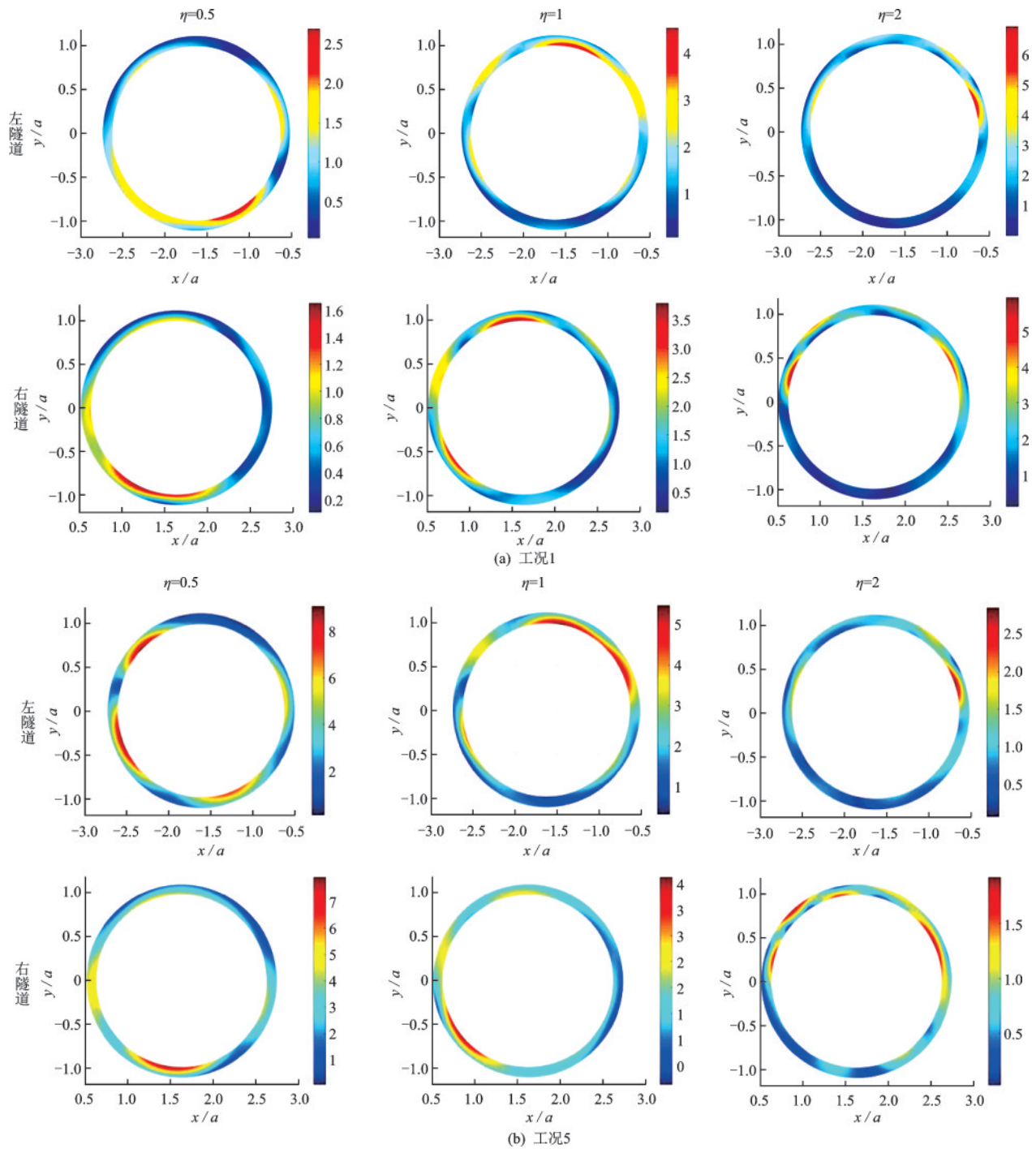


图6 Rayleigh波入射下不同建筑物数量影响下隧道环向应力云图

Fig.6 Tunnel hoop stress cloud under the influence of building numbers at Rayleigh wave incidence

## 5 结论

采用IBEM方法研究了地上建筑群—地铁隧道群在Rayleigh波作用下的动力相互作用。理论分析表明,地上建筑群和地下地铁隧道群会产生显著的相互作用,系统响应较之于单一地上建筑和单一地

铁隧道地震相互作用的系统动力响应有显著差异。主要结论和发现如下:

(1)入射波频率、隧道群和建筑群的空间位置以及物理特性参数、隧道和建筑物的数量等因素是影响地上建筑群与地铁隧道群地震相互作用的关键。

(2)靠近来波一侧的建筑和隧道会对入射波产

生显著的屏蔽作用,进而使得位于建筑群中间的建筑动力响应幅值显著降低,最大可减小约86%。

(3)地上建筑的数量会对隧道群各隧道衬砌内的环向应力产生显著影响。高频入射波会在隧道衬砌内产生较大的环向应力。在地上建筑群与地下地铁隧道群相互作用的研究中,更应该关注高频地震波入射的情况。

## 参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通2021年度统计和分析报告[J].城市轨道交通,2022(7):10-15.  
China Association of Metros. 2021 statistics and analysis report of urban rail transit[J]. China Metros, 2022 (7): 10-15. (in Chinese)
- [2] Fahimifar A. The prediction of seismic damages in tunnels and underground spaces and the method of controlling them, (Persian paper), Jadeh[J]. Journal of Ministry of Road & Transportation of Iran, 2003, 48: 76-89.
- [3] 李平,刘红帅,薄景山,等.汶川 $M_s$ 8.0地震河谷地形对汉源县城高烈度异常的影响[J].地球物理学报,2016,59(1):174-184.  
Li P, Liu H S, Bo J S, et al. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan town during the Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59 (1): 174-184. (in Chinese)
- [4] 刘中宪,梁建文,张贺.弹性半空间中衬砌隧道对瑞利波的散射[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1627-1637.  
Liu Z X, Liang J W, Zhang H. Scattering of Rayleigh waves by a lined tunnel in elastic half space[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (8): 1627-1637. (in Chinese)
- [5] 高艳华,宋俊磊,潘旦光,等.相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究进展[J].科技导报,2015,33(24):106-113.  
Gao Y H, Song J L, Pan D G, et al. Research status and outlook of structure-soil-structure dynamic interaction in adjacent buildings[J]. Science & Technology Review, 2015, 33 (24): 106-113. (in Chinese)
- [6] Richardson J D. Forced vibrations of rigid bodies on a semi-infinite elastic medium[D]. Nottinghamshire: University of Nottingham, 1969.
- [7] 窦立军,杨柏坡.高层建筑与相邻多层建筑间的动力相互作用[J].地震工程与工程振动,2000,20(3):19-20.  
Dou L J, Yang B P. Dynamic interaction of tall building with neighboring multi-storied building[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20 (3): 19-20. (in Chinese)
- [8] Lou M, Wang H, Chen X, et al. Structure-soil-structure interaction: literature review[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31 (12): 1724-1731.
- [9] 梁建文,张浩,WLee Vincent.地下洞室群对地面运动的影响[J].土木工程学报,2005,38(2):106-113.  
Liang J W, Zhang H, Vincent W. Effect of underground group cavities on ground surface motion[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (2): 106-113. (in Chinese)
- [10] 巴振宁,安东辉,梁建文.场地动力特性对衬砌隧道地震反应的影响[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):918-926.  
Ba Z N, An D H, Liang J W. Effects of site resonant characteristics on the seismic response of lined tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38 (6): 918-926. (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 Z X, Liang J W, Zhang H. 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] 田彼得,俞载道.结构-土结构相互作用体系的动力分析[J].同济大学学报,1987,15(2):157-168.  
Tian B D, Yu Z D. Dynamic analysis of structure-soil structure interaction system[J]. Journal of Tongji University, 1987, 15(2): 157-168. (in Chinese)
- [13] 姜忻良,黄艳,丁学成.相邻建筑物-桩基-土相互作用[J].土木工程学报,1995,28(5):36-37.  
Jiang X L, Huang Y, Ding X C. Adjacent building-pile-soil interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(5): 36-37. (in Chinese)
- [14] 潘旦光,高莉莉,靳国豪,等.结构-土-结构体系动力特性的模型实验[J].北京科技大学学报,2014,36(12):1720.  
Pan D G, Gao L L, Jin G H, et al. Model test of the dynamic characteristics of a structure-soil-structure system[J]. Journal of University of Science Technology Beijing, 2014, 36(12): 1720. (in Chinese)
- [15] 谢军,段龙,梁金晓,等.隧道-土-地表建筑相互作用体系的减震分析[J].现代隧道技术,2022,59(3):136-145.  
Xie J, Duan L, Liang J X, et al. Analysis of the shock absorption of tunnel-soil-surface building interaction sys-

- tem[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 136-145. (in Chinese)
- [16] Fu Y B, Wang G B, Hu Y, et al. Seismic response of underground subway and aboveground structures considering the tunnel-soil-aboveground structure interaction[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, DOI: 10.1080/13632469.2022.2120571.
- [17] Pitilakis K, Tsinidis G, Leanza A, et al. Seismic behavior of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 67:1-15.
- [18] 王国波, 王亚西, 陈斌, 等. 隧道-土体-地表结构相互作用体系地震响应影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1276-1287.  
Wang G B, Wang Y X, Chen B, et al. Analysis of factors influencing seismic responses of tunnel soil ground structural system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1276-1287. (in Chinese)
- [19] 王国波, 马险峰, 杨林德. 软土地铁车站结构及隧道的三维地震响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2523-2528.  
Wang G B, Ma X F, Yang L D. Three-dimensional seismic response analysis of metro station structures and tunnels in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2523-2528. (in Chinese)
- [20] 陈健云, 何伟, 徐强, 等. 地下结构对场地和地表建筑地震响应影响分析[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(3): 393-398.  
Chen J Y, He W, Xu Q, et al. Analysis of the impact of underground structures on seismic responses to sites and surface buildings[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(3): 393-398. (in Chinese)
- [21] Clouteau D, Aubry D. Modifications of ground motion in dense urban areas[J]. Journal of Computational Acoustics, 2001, 6: 1659-1675.
- [22] 陈超. 地震作用下邻近既有建筑(群)对地铁地下结构动力响应的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
Chen C. Research on the influence of existing adjacent structures on the seismic response of subway structure[D]. Wnhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 张悦豪. 考虑土-结构相互作用的复建式地下结构地震反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Zhang Y H. The earthquake response analysis of reconstructed underground structure with soil-structure interaction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [24] 刘晶波, 李彬. Rayleigh波作用下地下结构的动力反应分析[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 132-135.  
Liu J B, Li B. Dynamic response analysis of underground structures during propagation of Rayleigh waves[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 132-135. (in Chinese)
- [25] 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 J W, Ji X D. Amplification of Rayleigh waves due to underground lined cavities[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(4): 24-31. (in Chinese)
- [26] 柴华友, 汪江波, 周一勤. 瑞利波分析方法及应用进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 119-125.  
Chai H Y, Wang J B, Zhou Y Q. Progress of Rayleigh wave analysis methods and applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 119-125. (in Chinese)
- [27] 范凯祥, 申玉生, 闻毓民, 等. 平面 Rayleigh波入射下饱和土中浅埋隧道复合式衬砌的动力响应[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 444-455.  
Fan K X, Shen Y S, Wen Y M, et al. Dynamic response of composite linings of shallowly buried tunnels in saturated soils subjected to incidence of plane Rayleigh waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 444-455. (in Chinese)
- [28] 王竞雄, 李鸿晶. Rayleigh波作用下埋地连续管道地震响应分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(6): 787-796.  
Wang J X, Li H J. Seismic response of buried continuous pipelines subjected to Rayleigh waves[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2020, 42(6): 787-796. (in Chinese)
- [29] Jin L G, Du L T, Xie J J, et al. An analytical model for 2D seismic tunnel-aboveground structure interaction with considering the influence of tunnel longitudinal shear deformation [J]. Earthquake Spectra, 2022, DOI: 10.1177/87552930221110255.
- [30] Jin L Q, Zhu J, Zhou W, et al. 2D dynamic tunnel-soil-aboveground building interaction I: Analytical solution for incident plane SH-waves based on rigid tunnel and foundation model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 128(1):104625.
- [31] Hang L, Liu Z X, Wu C Q, et al. The scattering of plane P, SV waves by twin lining tunnels with imperfect interfaces embedded in an elastic half-space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 319-330.

(本文责编: 赵霞)