

文章编号: 1000-7598 (2010) 12-3971-07

# 地铁交叉隧道近场强地震反应特性的 三维精细化非线性有限元分析

陈 磊, 陈国兴, 龙 慧

(南京工业大学 岩土工程研究所, 南京 210009)

**摘 要:** 基于 ABAQUS 软件研发的显式有限元并行计算集群平台, 建立地铁双层交叉隧道结构的三维精细化有限元分析模型, 研究了近场强地震动作用下地铁双层交叉隧道的三维非线性地震反应特性, 并与浅埋/深埋单层隧道的地震反应特性进行了比较, 结果表明: 双层隧道的相互作用效应对上、下层隧道顶、底部之间的相对水平位移差具有放大作用; 对上、下层隧道的地震应力反应有减小作用; 双层隧道上、下层左侧的地震应力反应大于右侧的地震应力反应, 隧道拱肩和拱腰处的应力反应明显大于其他部位, 拱肩为隧道结构的最危险部位; 双层隧道下层顶、底部的峰值加速度反应大于上层顶、底部的峰值加速度反应; 双层隧道相互作用效应对上、下层隧道地震反应的影响与双层隧道的交叉形式和基岩输入的近场强地震动特性有关。

**关 键 词:** 地铁交叉隧道; 近场强地震动; 三维精细化有限元; 非线性地震反应特性

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

## 3D refined nonlinear finite element analysis of intersecting metro tunnels under near-field ground motion

CHEN Lei, CHEN Guo-xing, LONG Hui

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** According to the explicit finite element method of ABAQUS and 32 CPU parallel computing cluster platform of the research group, a three-dimensional refined finite element model for cross tunnels is established and used to research the 3D nonlinear seismic response of cross tunnels under near-field strong ground motion and compare the results with that of one-layer upper/lower tunnels. The results show that: compared with a single deep/shallow-buried tunnels, for any one-layer upper/under tunnel of intersecting metro tunnels, the relative horizontal displacement difference of the tunnel top and bottom is magnified; and the seismic stress of intersecting tunnels is reduced; the seismic stress on the left side of tunnels is larger than that of the right side; and the seismic stress of tunnel spandrel and hance is significantly greater than that of other parts; and the tunnel spandrel is the most dangerous part of the tunnel structure. The acceleration response of top and bottom at the under tunnel of intersecting metro tunnels is larger than that of the upper tunnel; the interaction influence of intersecting metro tunnel on the seismic response of any one-layer upper/under tunnel is related to the cross form of intersecting metro tunnels and the characteristics of the inputted near-field ground motion.

**Key words:** intersecting metro tunnel; near-field ground motion; 3D refined nonlinear finite element model; nonlinear seismic response characteristics

## 1 引 言

近年来, 我国的城市地铁建设进入了一个高速发展时期。随着城市地铁网络的不断完善, 在城市

地铁轨道交通线网中出现“十字形”、“X 型”的上下交叉及上下平行线是不可避免的, 如: 南京地铁 1 号线 1 期工程小行站—安德门站地铁区间布置了 3 条隧道<sup>[1]</sup>, 有些地方上下两条地铁线之间的土层

收稿日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 90715018); 国家公益性行业 (地震) 科研专项 (No. 200808022); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目 (No. 08KJA560001); 南京工业大学博士论文创新基金 (No. BSCX200912)。

第一作者简介: 陈磊, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事城市地下结构抗震方面的研究工作。E-mail: emerald1982@126.com

通信作者: 陈国兴, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事土动力学与岩土工程方面的研究工作。E-mail: gxchen@njut.edu.cn

厚度不足 2 m。由于后建地铁线的建成改变了原地铁线的地层条件,且两条地铁线隧道之间又存在相互作用,从而使后建隧道对先建隧道的地震反应特性产生显著的影响<sup>[2]</sup>。近年来国内外对城市交叉隧道动态施工的复杂力学行为开展了一些研究<sup>[3-4]</sup>,但对城市地铁交叉隧道的地震反应特性还鲜有研究<sup>[5]</sup>。因此,研究城市地铁“十字型”、“X 型”交叉和上下平行区间隧道的地震反应特性是很有现实意义的,其成果有助于揭示后建地铁隧道对已建地铁隧道抗震性能的影响机制及其相互作用效应。

对地铁地下结构地震反应分析的数值模拟,过去由于受数值计算条件的限制,往往将三维问题简化为二维问题,这样不但影响精度,且无法进行复杂结构的数值模拟。随着数值计算技术的快速发展,近年已有学者开始尝试采用三维模型进行地铁地下结构的地震反应特性数值模拟研究<sup>[6-7]</sup>。

近年发生的大地震,如美国 Northridge  $M_w$ 6.7 级地震(1994 年),日本 Kobe  $M_s$ 7.2 级地震(1995 年),我国台湾集集地震  $M_w$ 7.6 级(1999 年),土耳其 Kocaeli 的  $M_s$ 7.4 级地震(1999 年),伊朗 Bam 的  $M_w$ 6.5 级地震(2003 年)等,对离震源较近的(<50 km)城市造成了重大人员伤亡和财产损失。近场地震动高频成分丰富,并具有方向性效应、脉冲效应等。其震害机制不同于低频成分丰富的远场地震动。近场地震动特征及其对工程结构的影响已成为工程地震学和抗震工程学关注的热点课题<sup>[8-9]</sup>。

本文采用自行研发的基于 ABAQUS 软件的 32CPU 显式有限元并行计算集群平台<sup>[10]</sup>,利用汶川大地震的近场地震动记录,对软土地基上地铁双层交叉隧道的三维非线性地震反应特性进行了显式有限元分析,该研究将有助于对近场地震动作用下软土地基上地铁交叉隧道地震灾变机制的认识。

## 2 三维精细化有限元分析模型

### 2.1 计算模型的建立

以在建的某南京地铁隧道为研究对象,隧道衬砌的外径为 6.2 m,内径为 5.5 m,衬砌厚度为 0.35 m,双层交叉地铁隧道的上下圆形隧道尺寸相同,上层隧道结构的上覆土层厚 14 m,下层隧道结构的上覆土层厚 27.1 m;选取邻近长江的一个具有代表性的软土地地作为地铁隧道场地,采用修正的 Davidenkov 黏弹性动力本构模型模拟土的动力特性<sup>[11]</sup>,地铁隧道结构的混凝土动力本构模型采用 Jeecho Lee 等提出的黏塑性动力损伤模型<sup>[12]</sup>。区间隧道结构采用

C30 混凝土,土体和混凝土的动力本构计算参数见文献[11]。土体和隧道法向采用硬接触,切向采用摩擦接触。计算的交叉隧道工况为:交叉角为  $0^\circ$  (上下平行型)、 $45^\circ$  (X 型)和  $90^\circ$  (十字型)双层隧道、浅埋单层隧道和深埋单层隧道。为了保证计算精度,并尽可能减少计算时间,地基土采用 C3D10M 三棱锥型四面体单元模拟,隧道结构采用 C3D8 六面体单元模拟,不同工况的总自由度数为 461 043~499 986。水平向地震动从基岩面输入,地震波输入方向垂直于上层隧道,土层计算区域两侧采用竖向约束、水平向自由的人工边界。为了避免数值计算设置的边界对不同交叉角隧道地震反应的影响,并考虑到隧道地震反应的洞口效应,不同交叉角隧道地震反应分析的三维精细化有限元模型取为圆柱型模型,计算模型直径为 60 m。地基土-地铁隧道体系有限元三维网格划分如图 1 所示。

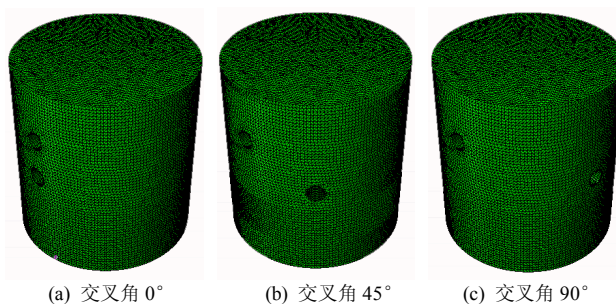


图 1 地基土-地铁隧道三维有限元网格

Fig.1 Meshes of three dimensional finite element models of soil-metro tunnels

### 2.2 输入地震动的选取

选择汶川  $M_s$ 8.0 级地震中 2 条具有代表性的近场强地震动加速度记录作为地铁交叉隧道地震反应分析的近场输入地震动,其相关的参数见表 1。

表 1 近场输入地震动参数  
Table 1 Near-field ground motion parameters

| 地震动 | 震源距<br>/ km | 震中距<br>/ km | 峰值加速度<br>/( $m/s^2$ ) |
|-----|-------------|-------------|-----------------------|
| 清平  | 14.1        | 2           | 8.025                 |
| 卧龙  | 23.6        | 19          | 9.578                 |

地震动加速度-时程曲线见图 2(a)、(b),截取其含有峰值加速度的近场地震动清平波和卧龙波的前 40 s 时程进行计算。傅氏谱见图 2(c)、(d)。由谱可知,汶川卧龙波主频段集中在中高频,绵竹清平波的频率成分相对比较均匀,但都具有中高频段频谱丰富这一近场地震动特征。

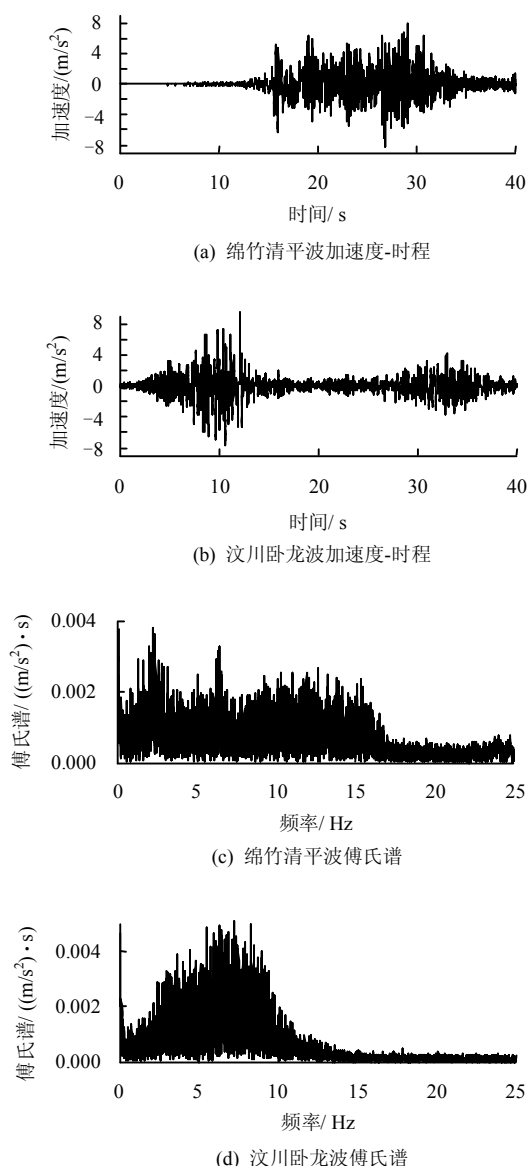


图 2 输入地震动加速度-时程和加速度傅氏谱

Fig.2 The acceleration time-histories and Fourier spectra of bedrock ground motion

### 3 交叉地铁隧道地震反应数值模拟

#### 3.1 交叉地铁隧道的相对水平位移反应

对于沿海(江)城市的软土地层,在强地震动作用下会发生较大的动变形,土介质的动变形通过土-隧道结构的相互作用效应,使隧道结构产生相应的变形,隧道结构可能会因局部变形过大而损伤,甚至会形成塑性区而破坏。现将地震动作用下地铁区间隧道不同高度处的相对水平位移-时程与隧道底部的相对水平位移-时程之差的最大值定义为隧道相对水平位移差。图 3 和图 4 分别为地铁交叉隧道地震反应相对水平位移差的三维和二维图像,表 2 给出了以浅埋/深埋的单层隧道最大相对水平位移差为 1.0 时地铁交叉隧道最大相对水平位移差的放大率。由此可以得出以下结论:

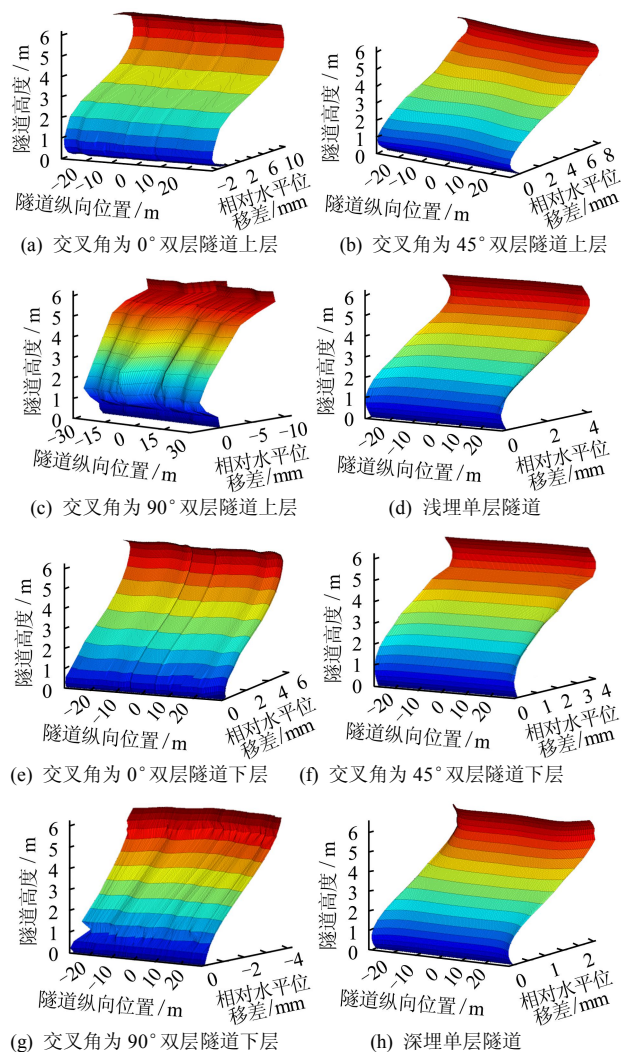


图 3 清平波作用下地铁交叉隧道地震反应相对水平位移差的三维图像

Fig.3 Horizontal relative displacement difference of the intersecting tunnel top and bottom under Qingping ground motion

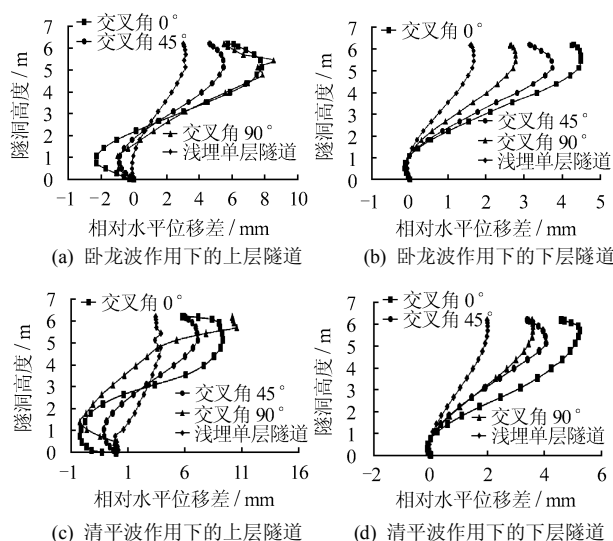


图 4 隧道交叉剖面处的地震反应相对水平位移差曲线

Fig.4 Horizontal relative displacement difference of the intersecting tunnel top and bottom under bedrock ground motion

表 2 卧龙波作用下隧道衬砌地震应力反应的 Mises 应力幅值  
Table 2 Mises stress response ranges of metro tunnels under Wolong ground motion

| 隧道位置  | 单元节点位置 | 交叉角 0°   |       | 交叉角 45°  |       | 交叉角 90°  |       | 浅埋/深埋单层隧道 |     |
|-------|--------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-----------|-----|
|       |        | 应力幅值/MPa | 放大率   | 应力幅值/MPa | 放大率   | 应力幅值/MPa | 放大率   | 应力幅值/MPa  | 放大率 |
| 上层/浅埋 | 顶部     | 3.546    | 0.673 | 3.982    | 0.756 | 4.449    | 0.845 | 5.268     | 1.0 |
|       | 拱肩(左)  | 4.942    | 0.681 | 5.778    | 0.796 | 6.545    | 0.902 | 7.259     | 1.0 |
|       | 拱肩(右)  | 5.499    | 0.663 | 6.543    | 0.788 | 7.274    | 0.876 | 8.299     | 1.0 |
|       | 中部(左)  | 4.200    | 0.819 | 4.931    | 0.961 | 5.355    | 1.044 | 5.131     | 1.0 |
|       | 中部(右)  | 3.448    | 0.648 | 3.551    | 0.668 | 3.587    | 0.675 | 5.317     | 1.0 |
|       | 拱腰(左)  | 5.765    | 0.887 | 6.144    | 0.945 | 6.264    | 0.963 | 6.503     | 1.0 |
|       | 拱腰(右)  | 5.649    | 0.763 | 6.549    | 0.885 | 7.095    | 0.959 | 7.399     | 1.0 |
|       | 底部     | 4.323    | 0.796 | 5.411    | 0.996 | 6.136    | 1.130 | 5.432     | 1.0 |
| 下层/深埋 | 顶部     | 4.061    | 0.650 | 3.789    | 0.607 | 3.301    | 0.528 | 6.246     | 1.0 |
|       | 拱肩(左)  | 5.574    | 0.684 | 5.337    | 0.655 | 5.221    | 0.641 | 8.146     | 1.0 |
|       | 拱肩(右)  | 6.140    | 0.637 | 5.992    | 0.622 | 5.986    | 0.621 | 9.637     | 1.0 |
|       | 中部(左)  | 4.894    | 0.823 | 4.754    | 0.800 | 4.200    | 0.707 | 5.943     | 1.0 |
|       | 中部(右)  | 3.822    | 0.635 | 3.671    | 0.610 | 3.510    | 0.583 | 6.022     | 1.0 |
|       | 拱腰(左)  | 6.541    | 0.852 | 6.334    | 0.825 | 5.540    | 0.722 | 7.673     | 1.0 |
|       | 拱腰(右)  | 6.571    | 0.771 | 6.096    | 0.715 | 5.067    | 0.595 | 8.521     | 1.0 |
|       | 底部     | 5.122    | 0.809 | 4.537    | 0.717 | 4.349    | 0.687 | 6.329     | 1.0 |

(1) 与浅埋/深埋的单层隧道最大相对水平位移差相比, 双层隧道的相互作用对上、下层隧道的相对水平位移差具有放大效应, 且与双层隧道的形式和输入地震动的特性有关。与浅埋的单层隧道相比, 对上层隧道相对水平位移差的放大效应, 交叉角 45° 时的放大效应明显小于交叉角 0° 和 90° 时的放大效应, 交叉角 90° 时的放大效应又略大于交叉角 0° 时的放大效应, 且交叉角 90° 的上层隧道在拱肩和拱腰处衬砌发生严重的塑性变形; 与深埋的单层隧道相比, 对下层隧道相对水平位移差的放大效应, 交叉角 0° 时最大, 45° 时次之, 90° 时最小, 也即其放大效应随双层隧道交叉角的增大而减小。

(2) 对不同的输入地震动和双层交叉隧道的交叉形式, 上层隧道的相对水平位移差均明显大于下层隧道的相对水平位移差, 上、下层隧道顶部相对水平位移差的比值介于 1.45~3.10。

(3) 从交叉隧道地震反应相对水平位移差的三维图像可以发现, 交叉角 0° 和 90° 隧道沿纵向的相对水平位移差不是渐变的, 每隔一段距离会产生一个相对水平位移差呈显著变化的极值线, 而在交叉角 45° 时及浅埋/深埋单层隧道, 这一现象不明显, 这说明三维精细化有限元法比二维有限元法分析双层交叉隧道的地震反应更合理、更精确。

不论是浅埋/深埋单层隧道, 还是双层交叉隧道, 隧道沿衬砌高度的相对水平位移峰值分布呈现出显著的反 S 分布型, 这一现象与文献[2]关于隧道的地震变形模式呈斜椭圆状的结论是一致的。

### 3.2 地铁交叉隧道的地震应力

根据地铁隧道结构动应力-时程的动画演示研究, 对地铁隧道结构关键部位结点的动应力反应规律进行了分析, 其关键部位的节点编号如图 5 所示。

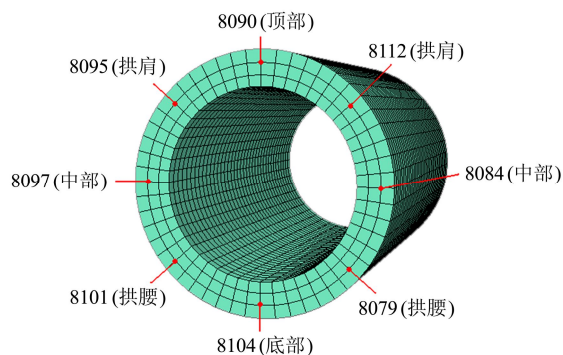


图 5 地铁隧道结构输出动应力反应的单元节点位置  
Fig.5 Locations of nodes with dynamic stress responses analyzed

表 3 和表 4 给出了地铁交叉隧道交叉段隧道横截面地震应力反应的 Mises 应力幅值, 并给出了以浅埋/深埋的 Mises 应力幅值为 1.0 时地铁交叉隧道的地震应力放大率。由此可以发现:

(1) 浅埋单层隧道的地震应力反应小于深埋单层隧道的地震应力反应, 双层隧道的上层/下层隧道地震应力一般小于浅埋/深埋单层隧道地震应力, 也即双层隧道的相互作用效应对隧道的地震应力反应具有减小作用, 且对下层隧道地震应力的减小作用更为显著, 但 90° 交叉的(十字型)双层隧道上层底部和中部的地震应力稍大于浅埋单层隧道地震应力。

表 3 清平波作用下隧道衬砌地震应力反应的 Mises 应力幅值  
Table 3 Mises stress response ranges of metro tunnels under Qingping ground motion

| 隧道位置  | 单元节点位置 | 交叉角 0°   |       | 交叉角 45°  |       | 交叉角 90°  |       | 浅埋/深埋单层隧道 |     |
|-------|--------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-----------|-----|
|       |        | 应力幅值/MPa | 放大率   | 应力幅值/MPa | 放大率   | 应力幅值/MPa | 放大率   | 应力幅值/MPa  | 放大率 |
| 上层/浅埋 | 顶部     | 3.636    | 0.665 | 4.636    | 0.848 | 5.196    | 0.950 | 5.470     | 1.0 |
|       | 拱肩（左）  | 8.825    | 0.880 | 9.381    | 0.935 | 10.433   | 1.040 | 10.028    | 1.0 |
|       | 拱肩（右）  | 8.068    | 0.774 | 8.529    | 0.819 | 9.321    | 0.895 | 10.419    | 1.0 |
|       | 中部（左）  | 4.333    | 0.695 | 5.618    | 0.901 | 5.871    | 0.942 | 6.234     | 1.0 |
|       | 中部（右）  | 4.069    | 0.602 | 4.580    | 0.678 | 5.871    | 0.869 | 6.755     | 1.0 |
|       | 拱腰（左）  | 7.906    | 0.779 | 8.796    | 0.866 | 9.754    | 0.961 | 10.155    | 1.0 |
|       | 拱腰（右）  | 8.107    | 0.822 | 8.624    | 0.875 | 10.493   | 1.064 | 9.860     | 1.0 |
|       | 底部     | 3.179    | 0.659 | 4.235    | 0.878 | 4.660    | 0.966 | 4.826     | 1.0 |
| 下层/深埋 | 顶部     | 4.318    | 0.658 | 3.890    | 0.593 | 3.681    | 0.561 | 6.558     | 1.0 |
|       | 拱肩（左）  | 10.009   | 0.891 | 9.164    | 0.816 | 8.112    | 0.722 | 11.234    | 1.0 |
|       | 拱肩（右）  | 9.467    | 0.811 | 7.764    | 0.665 | 6.764    | 0.579 | 11.676    | 1.0 |
|       | 中部（左）  | 4.774    | 0.653 | 4.559    | 0.624 | 4.410    | 0.604 | 7.307     | 1.0 |
|       | 中部（右）  | 4.733    | 0.595 | 4.678    | 0.589 | 4.614    | 0.580 | 7.949     | 1.0 |
|       | 拱腰（左）  | 8.957    | 0.736 | 7.922    | 0.651 | 7.344    | 0.603 | 12.170    | 1.0 |
|       | 拱腰（右）  | 9.076    | 0.836 | 8.704    | 0.802 | 8.347    | 0.769 | 10.854    | 1.0 |
|       | 底部     | 3.735    | 0.690 | 3.594    | 0.664 | 3.610    | 0.667 | 5.410     | 1.0 |

表 4 地铁交叉隧道的相对水平位移放大率  
Table 4 Magnification rates of horizontal relative displacement of intersecting metro tunnels

| 输入地震动 | 位置 | 相对水平位移放大率 |          |          |                |
|-------|----|-----------|----------|----------|----------------|
|       |    | 交叉角为 0°   | 交叉角为 45° | 交叉角为 90° | 浅埋/深埋的<br>单层隧道 |
| 卧龙波   | 上层 | 2.57      | 1.72     | 2.73     | 1.0            |
|       | 下层 | 2.94      | 1.76     | 1.39     | 1.0            |
| 清平波   | 上层 | 2.40      | 1.83     | 2.48     | 1.0            |
|       | 下层 | 2.97      | 1.67     | 1.26     | 1.0            |

(2) 隧道拱肩和拱腰处的应力反应明显大于其他部位，且拱肩处的应力反应又略大于拱腰处的应力反应，这与隧道的相对位移反应相吻合，拱肩为隧道结构的最危险部位。

(3) 对于 0° 交叉（上下平行型）隧道，上层隧道的地震应力反应小于下层隧道的地震应力反应；对于 90° 交叉（十字型）隧道，上层隧道的地震应力反应大于下层隧道的地震应力反应；对于 45° 交叉（X 型）隧道，除隧道右拱腰至底部区域外，上层隧道的地震应力反应也小于下层隧道的地震应力反应。

(4) 对于双层隧道的上层隧道地震应力反应，0° 交叉（上下平行型）隧道的最小，45° 交叉（X 型）隧道的次之，90° 交叉（十字型）隧道的最大；对于双层隧道的下层隧道地震应力反应，则地震应力反应的规律正好与此相反，0° 交叉隧道的最大，45° 交叉隧道的次之，90° 交叉隧道的最大。双层隧道 45° 交叉和 90° 交叉时，上层隧道的地震应力反应大于下层隧道的地震应力反应；双层隧道 0° 交叉

（上下平行型）时，下层隧道的地震反应大于上层隧道，也即双层隧道的交叉形式对上、下层隧道地震应力的影响规律正好相反。

(5) 对于浅埋/深埋单层隧道，在隧道结构的拱肩、中部、拱腰部位，其右侧的地震应力反应大于左侧的地震应力反应；但对于双层隧道的上、下层隧道，在隧道结构的拱肩、中部、拱腰部位，均呈现出左侧地震应力反应大于右侧地震应力反应的现象，且隧道底部的地震应力反应大于隧道顶部的地震应力反应，也即双层隧道和浅埋/深埋单层隧道结构左、右侧的地震应力大小，两者正好相反。

(6) 虽然清平波的峰值加速度小于卧龙波的峰值加速度，但卧龙波作用引起的双层交叉隧道和浅埋/深埋单层隧道的应力反应大于清平波作用引起的应力反应。

3.3 交叉地铁隧道交叉段水平向加速度反应规律

表 5 为地铁交叉隧道与浅埋/深埋单层隧道顶、底部峰值加速度反应的比较，可以看出：

(1) 双层隧道下层顶、底部的峰值加速度反应大于上层顶、底部的峰值加速度反应；上、下层隧道底部的峰值加速度反应大于其顶部的峰值加速度反应。这可能是由于软土地基对地震波的低频放大和滤波作用，在高频成份较丰富的近场地震动作用下，软土层对地震波主要起滤波减小作用。

(2) 虽然清平波的峰值加速度小于卧龙波的峰值加速度，但卧龙波作用引起的双层交叉隧道和浅埋/深埋单层隧道顶、底部的峰值加速度反应大于清平波作用引起的峰值加速度反应。

表 5 地铁隧道结构顶、底部的峰值加速度 (单位:  $\text{m/s}^2$ )  
Table 5 Peak accelerations on the top and bottom of the metro tunnels (unit:  $\text{m/s}^2$ )

| 输入地震动 | 基岩   | 双层隧道<br>位置 | 交叉角 $0^\circ$ |      | 交叉角 $45^\circ$ |      | 交叉角 $90^\circ$ |      | 浅埋/深埋单层隧道 |      |
|-------|------|------------|---------------|------|----------------|------|----------------|------|-----------|------|
|       |      |            | 顶部            | 底部   | 顶部             | 底部   | 顶部             | 底部   | 顶部        | 底部   |
| 卧龙波   | 9.57 | 上层         | 2.31          | 2.46 | 2.26           | 2.45 | 1.96           | 1.99 | 2.08      | 2.19 |
|       |      | 下层         | 2.42          | 2.90 | 2.89           | 3.55 | 2.41           | 2.34 | 2.84      | 2.85 |
| 清平波   | 8.24 | 上层         | 2.47          | 2.60 | 2.42           | 2.48 | 2.37           | 2.42 | 2.36      | 2.43 |
|       |      | 下层         | 2.69          | 3.66 | 3.39           | 3.71 | 2.61           | 3.14 | 3.43      | 3.45 |

(3) 与浅埋单层隧道顶、底部的峰值加速度反应相比,  $90^\circ$  交叉时上层隧道顶、底部的峰值加速度反应减小,  $0^\circ$  和  $45^\circ$  交叉时上层隧道顶、底部的峰值加速度反应增大, 且  $0^\circ$  交叉时的峰值加速度反应要略大一些。

(4) 双层隧道下层顶、底部的峰值加速度反应,  $45^\circ$  交叉时的峰值加速度反应最大。与深埋单层隧道顶、底部的峰值加速度反应相比,  $90^\circ$  交叉时下层隧道顶、底部的峰值加速度反应减小;  $0^\circ$  和  $45^\circ$  交叉时的下层隧道顶、底部的峰值加速度反应的增大或减小, 与输入的近场地震动特性有关。

## 4 结 论

在近场强地震动作用下, 与软土地地上浅埋/深埋单层隧道的地震反应相比, 双层隧道的相互作用效应对上、下层隧道地震反应的影响规律如下:

(1) 双层交叉隧道的相互作用效应对上、下层隧道顶、底部之间的相对水平位移差具有放大效应, 上层隧道的相对水平位移差明显大于下层隧道的相对水平位移差, 且与双层隧道的交叉形式和输入地震动的特性有关。

(2) 双层隧道的相互作用效应对上、下层隧道的地震应力反应均有减小作用, 且对下层隧道的减小作用更为显著; 隧道拱肩和拱腰处的应力反应明显大于其他部位, 拱肩为隧道结构的最危险部位。

(3) 双层隧道上、下层的地震应力反应的大小与上、下层隧道的交叉形式有关, 且其交叉形式对上、下层隧道地震应力的影响相反。

(4) 浅埋/深埋单层隧道结构右侧的地震应力反应大于左侧的地震应力反应; 而对于双层隧道, 则上、下层隧道结构左侧的地震应力反应大于右侧地震应力反应, 且隧道底部的地震应力反应大于隧道顶部的地震应力反应。

(5) 双层隧道下层顶、底部的峰值加速度反应大于上层顶、底部的峰值加速度反应; 上、下层隧道底部的峰值加速度反应大于其顶部的峰值加速度反应, 且与双层隧道的交叉形式和输入地震动的特

性有关。

## 参 考 文 献

- [1] 严松宏, 谢君泰, 梁波, 等. 南京地铁区间交叉隧道塑性分析[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(增刊): 311—315.
- [2] 陈磊, 陈国兴. 近场和远场地震动作用下双层竖向重叠地铁隧道的地震反应比较[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 79—85.  
CHEN Lei, CHEN Guo-xing. Comparative study on the characteristics of seismic responses of two-layer vertical overlapping metro tunnels under near-field and far-field ground motions[J]. *China Railway Science*, 2010, 31(1): 79—85.
- [3] HORIBE Y, YAGI H, OJAYASU S, et al. Connection between two tunnels under a busy crossing in a big city[C]//Proc. Congress. Cairo: Balkema A A, 1994.
- [4] 靳晓光, 张宪鑫, 李勇, 等. 大型地下立交动态施工过程 3D 有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 215—219.  
JIN Xiao-guang, ZHANG Xian-xin, LI Yong, et al. 3D finite element research on dynamic construction mechanics for a large-sized underground interchange[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(2): 215—219.
- [5] 姜忻良, 谭丁, 姜南. 交叉隧道地震反应三维有限元和无限元分析[J]. 天津大学学报, 2004, 30(4): 32—36.  
JIANG Xin-liang, TAN Ding, JIANG Nan. 3D finite and infinite element analysis for seismic response of intersecting tunnel[J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 30(4): 32—36.
- [6] 杨林德, 王国波, 郑永来, 等. 地铁车站接头结构振动台模型试验及地震响应的三维数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1892—1898.  
YANG Lin-de, WANG Guo-bo, ZHENG Yong-lai, et al. Shaking table tests on subway station joint structure and 3D numerical simulation of seismic response[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1892—1898.

- 
- [7] MAYORAL J M, ROMO M P, MARTINEZ S. Advanced 3-D seismic soil-structure interaction analysis of a cellular-raft foundation in soft clay[C]//Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2008. Sacramento: [s. n.], 2008.
- [8] BRAY J D, RODRIGUEZ-MAREK A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(5): 815—828.
- [9] AKKAR S, YAZGAN U, GULKAN P. Drift estimates in frame building subjected to near-fault motions[J]. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 2005, 131(7): 1014—1024.
- [10] CHEN Guo-xing, CHEN Lei, JING Li-ping, et al. Comparison of explicit and implicit finite element methods with parallel computing for seismic response analysis of subway underground structure[C]//International Symposium on Geomechanics and Geotechnics. Shanghai: CRC Press, 2010.
- [11] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] LEE JEEHO, GREGORY L FENVES. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1998, 124(4): 892—900.