

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0445

地铁隧道毫秒延时爆破环境振动特性研究*

赵凯¹, 赵丁凤², 张东³, 庄海洋¹, 陈国兴¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009;

2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 基于地铁隧道毫秒延时爆破环境振动特性现场试验, 考虑爆破荷载的不规则特性, 采用基于非对称加卸载准则的修正 Davidenkov 本构模型描述场地土体的动力非线性特性; 通过改进 Friedlander 方程来模拟内源爆炸在圆柱形炮孔表面产生的瞬态空气冲击波; 实现了包含毫秒延时爆破荷载输入和有限元-无限元耦合边界的地层-爆源体系三维精细化有限元模型, 并与现场实测数据对比验证了该模型方法的有效性。对 50 ms 延时爆破和齐爆引起的环境振动特性进行了数值模拟, 对比发现毫秒延时爆破不仅可以有效降低地表峰值振速, 而且可以显著改变地表振动的频谱特性。毫秒延时爆破产生的地表振动频带较集中, 对分散爆破振动能量的作用显著, 且地表速度响应的主频较高, 远离建筑结构自振频率, 可显著降低爆破施工引起的邻近建筑物的结构振动水平。

关键词: 毫秒延时爆破; 多孔齐爆; 环境振动; 自振频率

中图分类号: O389; TU411

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Characteristics of environmental vibration induced by millisecond-delay blasting in metro tunnel excavation

ZHAO Kai¹, ZHAO Dingfeng², ZHANG Dong³, ZHUANG Haiyang¹, CHEN Guoxing¹

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China;*

2. *Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;*

3. *Central Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, Jiangsu, China)*

Abstract: Based on the field test of environmental vibration characteristics of subway tunnel millisecond delay blasting, considering the irregular characteristics of blasting load, a modified Davidenkov constitutive model based on asymmetric loading and unloading criterion is used to describe the dynamic nonlinear characteristics of the site soil. The transient air shock wave generated by the internal explosion on the surface of cylindrical blast hole is simulated by improving the Friedlander equation. And a three-dimensional refined finite element model of ground-blast-source system, involving the blast wave input and finite/infinite element coupling boundary, is realized. The effectiveness of the model method is verified by comparing with in-situ testing data. The environmental vibration features induced by 50 ms delay blasting and instantaneous blasting are numerically simulated. It is found that millisecond delay blasting can not only effectively reduce the surface peak vibration velocity, but also significantly change the frequency spectrum characteristics of surface vibration. The frequency band of surface vibration produced by millisecond delay blasting is relatively concentrated, which has a significant effect on dispersing blasting vibration energy. Moreover, the main frequency of surface velocity response is higher, which is far away from the natural frequency of building structure, it can significantly reduce the structural vibration level of adjacent buildings caused by blasting construction. The research results reveal the vibration characteristics and vibration reduction mechanism of millisecond delay blasting environment, which can provide scientific basis and reference for blasting construction of subway

* 收稿日期: 2019-11-21; 修回日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51608267, 51978335); 国家重点研发计划(2018YFC1504301-03)

第一作者: 赵凯(1982—), 男, 博士, 副教授, zhaokai@njtech.edu.cn

通信作者: 庄海洋(1978—), 男, 博士, 教授, zhuang7802@163.com

tunnel in complex urban environment.

Keywords: millisecond-delay blasting; instantaneous blasting; environmental vibration; natural frequency

随着城市地铁的发展,隧道爆破掘进穿越坚硬岩土层的案例屡见不鲜^[1-2],但由于地铁沿线建筑林立、地下管线密布,隧道施工过程中爆破诱发的环境振动效应成为了该工程领域研究的重点和难点。爆破振动强度过大导致围岩破坏^[3-4]、爆破引起建筑物共振以及高频爆破振动迫使刚性结构产生局部应力集中^[5],均可能导致爆破影响区内的构筑物产生不同程度的损伤。为减振降害,通过电子雷管或非电雷管精确控制多孔毫秒延时爆破,既能显著改善岩石破碎效果,又能有效减小爆破振动^[6]。不少学者从大量的爆破资料中总结出毫秒延时爆破的工程参数^[7-8],如毫秒延时爆破最佳间隔时间^[9]、最优单孔药量以及爆破顺序^[10]等。然而,由于实际工程地质条件千差万别^[11],此类现场爆破试验往往具有较强的地域性,且现场试验前单孔药量及爆破顺序等设计参数尚不明确,容易导致相邻建筑物损伤。因此,合理有效的数值模拟成了较理想的预测爆破效果和确定爆破参数的方法^[12]。然而,由于延时爆破中各起爆点的单孔装药量不同,爆破荷载不规则,而常规的数值模拟较难反映此类不规则爆破荷载作用下岩土材料的动力响应特征。

针对上述问题,本文中基于南京地铁隧道毫秒延时爆破环境振动特性现场试验,首先建立有限元-无限元耦合边界的地层-爆源体系的三维精细化有限元模型。其中,考虑爆破荷载的不规则特性,采用基于非对称加卸载准则修正的 Davidenkov 本构模型描述场地土体的动力非线性特性;通过改进的 Friedlander 方程来模拟内源爆炸在圆柱形炮孔表面产生的瞬态空气冲击波。通过与已开展现场爆破试验的实测数据进行对比,验证该模型方法的有效性。最后,对齐爆和毫秒延时爆破的峰值振速及频谱特性进行对比,探讨毫秒延时爆破环境振动特性及减振机理。

1 现场爆破试验回顾

1.1 工程背景

南京地铁四号线云南路~鼓楼站区间全长约 660 m,拟采用矿山法施工,包括区间隧道、风道、鼓楼小里程暗挖段和三联拱部分。鼓楼站东侧为既有地铁一号线鼓楼站,东侧有已通车的鼓楼隧道,西侧为鼓楼公园,公园环岛中间为文物古建筑。区间隧道距鼓楼城阙仅约 1.3 m,竖向距离 14.5 m;1#风道距城阙约为 19.8 m,竖向距离 13.5 m;三联拱距城阙约为 18.1 m,竖向距离 11.0 m,暗挖结构与文物鼓楼的相对位置如图 1 所示。

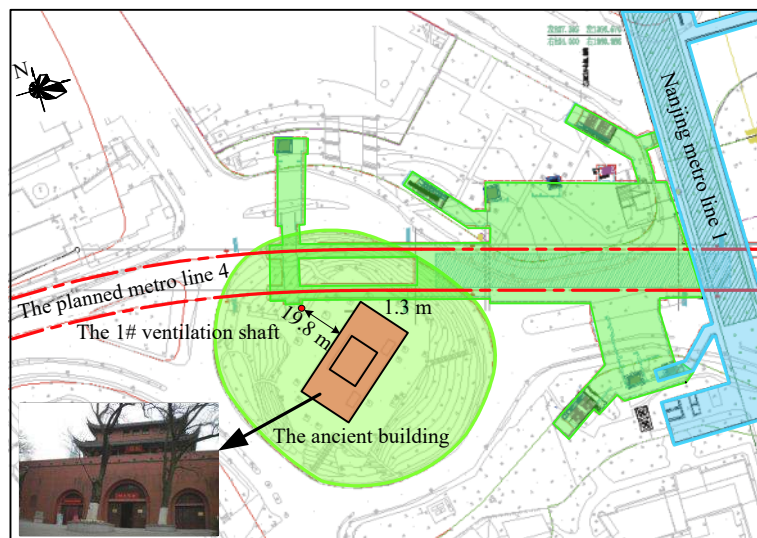


图 1 地铁隧道与文物鼓楼的相对位置

Fig. 1 Relative position between the metro tunnel and the cultural relic drum tower

1.2 现场爆破试验方案

由调查可知, 文物鼓楼的病害较严重, 且区间隧道距鼓楼城阙水平距离最近仅约 1.3 m, 为避免直接近区爆破对文物鼓楼的安全性产生影响, 在文物鼓楼周边选取了爆破试验区域。爆破试验前, 采用环境随机激振法(也称脉动法)对鼓楼的固有频率进行测试, 结果列于表 1。

表 1 鼓楼固有频率测试结果

Table 1 Test results of natural frequencies of the drum tower

| 模态阶数 | 固有频率/Hz | |
|------|---------|------|
| | 水平向 | 竖直向 |
| 1 | 1.37 | 2.00 |
| 2 | 2.79 | 2.98 |

结合现场实际情况和勘查资料(见图 2)可知, 1#风道位于 K-3-2 及 K-3-3 中风化砂砾岩层, 该区域地质情况与文物鼓楼处较接近, 因此将隧道 1#风道作为模拟爆破点。此外, 区域场地构成上软下硬软硬不均的工作面, 相对于单纯的岩体, 岩石-土软硬交界面的存在将放大爆破引起的地表峰值振速, 也将间接影响文物鼓楼的峰值振速。预先在掌子面掏槽, 形成临空面, 掘进进尺为 0.6 m, 钻孔孔深取 0.7 m, 炮孔孔径为 42 mm, 炮孔距取 0.5 m。试爆分为二类, 共进行了 6 次爆破测试。一类为单孔按顺序爆破, 相互之间没有干扰, 1~5 号孔单孔药量依次为 100、200、300、400、500 g, 共 5 种工况; 二类为六孔毫秒延时爆破, 其中 6~10 号孔每孔装药 200 g, 11 号孔装药 100 g, 共 1 100 g, 各孔间延时 50 ms。模拟爆破作业在 K-3-2 层的中风化砂砾岩中, 围岩等级为 II~IV 的坚硬岩石, 如图 2 所示。

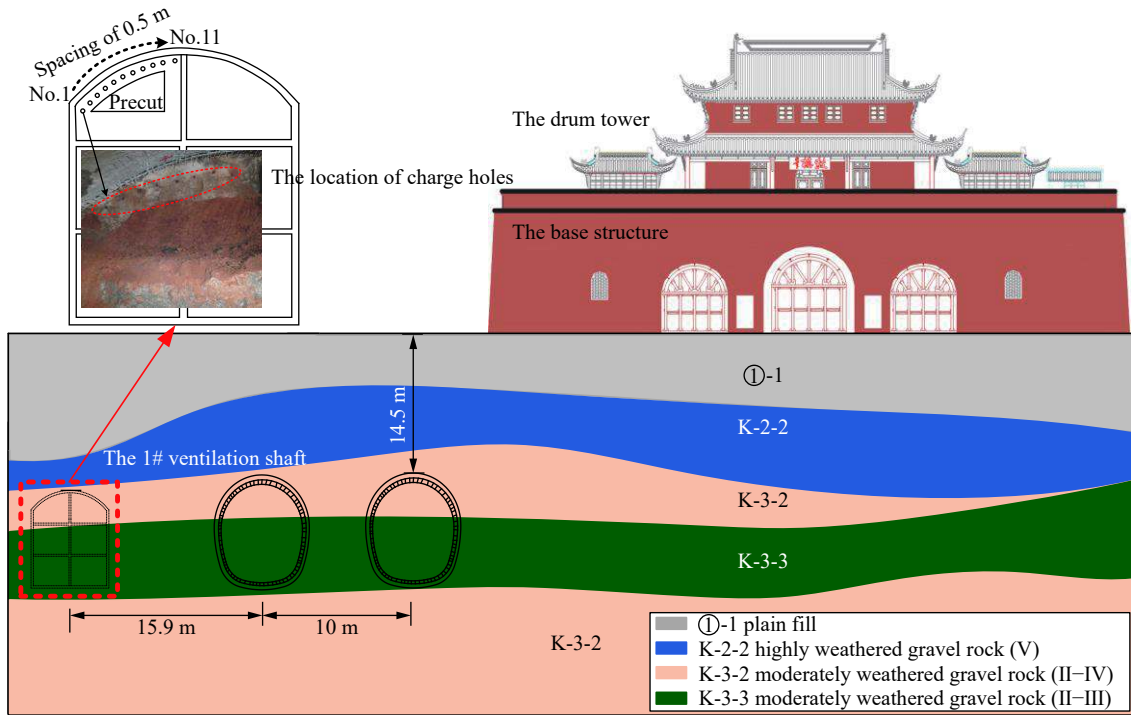


图 2 鼓楼与模拟爆破点的相对位置及地层分布

Fig. 2 Relative position between the drum tower and the blasting site as well as stratum distribution

2 土体动力本构模型

采用非线性滞回本构模型描述岩土体对爆破振动波的能量耗散作用^[13]。为更好地描述并简化不规则荷载作用下 Davidenkov 模型的剪应力-剪应变关系曲线, 赵丁凤等^[14]引入 Pyke 的 n 倍法对加卸载准则进行修正(见图 3), 当施加的应力转向后, 后续的剪应力-剪应变曲线沿当前拐点指向历史上最大(小)点的方向前行, 此时循环剪应力 τ -剪应变 γ 关系由以下公式来描述:

$$\tau - \tau_c = G_{\max}(\gamma - \gamma_c) \left[1 - H \left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n} \right) \right] \quad (1)$$

式中: $G_{\max} = \rho v_s^2$ 为最大剪切模量, ρ 为土体密度, v_s 为土体剪切波速; τ_c 和 γ_c 分别为加卸载转折点处的剪应力和剪应变。

通过对式(1)中的变量 $(\gamma - \gamma_c)$ 求导, 得到应力-应变滞回曲线段 t 时刻的时变切线剪切模量 $G^{(t)}$ 的表达式:

$$G^{(t)} = \frac{\partial(\tau - \tau_c)}{\partial(\gamma - \gamma_c)} = G_{\max} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{2AB(2n\gamma_r)^{2B}}{(2n\gamma_r)^{2B} + |\gamma - \gamma_c|^{2B}} \right] H\left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n}\right) \right\} \quad (2)$$

$$H\left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n}\right) = \left[\frac{|\gamma - \gamma_c|^{2B}}{(2n\gamma_0)^{2B} + |\gamma - \gamma_c|^{2B}} \right]^A \quad (3)$$

$$(2n\gamma_0)^{2B} = (\gamma_{\text{ex}} \pm \gamma_c)^{2B} \left(\frac{1-R}{R} \right) \quad (4)$$

$$R = \left[1 - \frac{\tau_{\text{ex}} \pm \tau_c}{G_{\max}(\gamma_{\text{ex}} \pm \gamma_c)} \right]^{\frac{1}{A}} \quad (5)$$

式中: A 、 B 和 γ_0 为土的试验参数; τ_{ex} 和 γ_{ex} 分别为历史上的最大剪应力和剪应变; 符号“ \pm ”在加载时取“ $-$ ”, 卸载时取“ $+$ ”。

根据上述修正, 除记录历史上最值点外, 当施加的应力转向后, 只需要记忆当前转折点处的应力和应变, 就可以确定应力-应变曲线的走向, 通过这样的方法可以有效解决转折点信息记忆量大的问题^[14]。此时, 不规则加卸载条件下的应力-应变路径为曲线段 0→1→2→3→4→5→6→7, 修正 2 倍 Masing 法则中的曲线段 2→1→3 或曲线段 6→5→7, 模型参数见表 2。

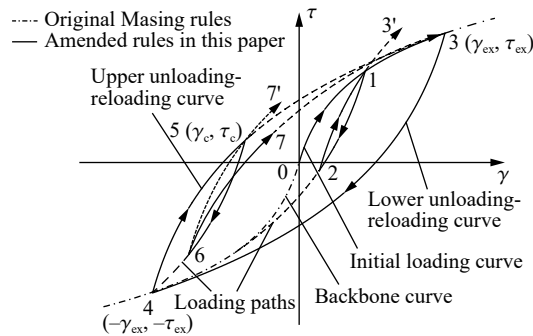


图 3 不规则加卸载准则修正的 Davidenkov 模型^[14]

Fig. 3 The Davidenkov model modified by the irregular loading-unloading rules^[14]

表 2 土体剖面及 Davidenkov 模型参数

Table 2 Parameters for the soil profiles and the Davidenkov model

| 土层描述 | 厚度/m | 重度/(kN·m ⁻³) | 剪切波速/(m·s ⁻¹) | Davidenkov模型参数 | | |
|------|------|--------------------------|---------------------------|----------------|------|--------------------|
| | | | | A | $2B$ | $\gamma_0/10^{-4}$ |
| 杂填土 | 1.3 | 18.5 | 139.5 | 1.05 | 0.84 | 5.5 |
| 粉质黏土 | 6.3 | 20.2 | 250.4 | 1.09 | 0.82 | 6.2 |
| 砂砾岩 | 12.2 | 22.6 | 558.3 | 1.30 | 0.40 | 21.0 |

应力-应变滞回曲线段 $t+\Delta t$ 时刻的时变体积模量 $K^{(t)}$ 可由下式确定:

$$K^{(t)} = \frac{2G^{(t)}(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \quad (6)$$

式中: μ 为泊松比。

由此, 对 t 时刻的应力张量 $\sigma_{ij}^{(t)}$ 进行更新:

$$d\sigma_{ij}^{(t)} = C_{ijkl}^{(t)} d\varepsilon_{kl}^{(t)} \quad (7)$$

$$C_{ijkl}^{(t)} = \begin{bmatrix} \left(K^{(t)} + \frac{4}{3}G^{(t)}\right) & \left(K^{(t)} - \frac{2}{3}G^{(t)}\right) & \left(K^{(t)} - \frac{2}{3}G^{(t)}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \left(K^{(t)} - \frac{2}{3}G^{(t)}\right) & \left(K^{(t)} + \frac{4}{3}G^{(t)}\right) & \left(K^{(t)} - \frac{2}{3}G^{(t)}\right) & 0 & 0 & 0 \\ \left(K^{(t)} - \frac{2}{3}G^{(t)}\right) & \left(K^{(t)} - \frac{2}{3}G^{(t)}\right) & \left(K^{(t)} + \frac{4}{3}G^{(t)}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G^{(t)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G^{(t)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G^{(t)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 三维数值模型的建立

3.1 毫秒延时爆破荷载输入

采用 ABAQUS 计算平台中的 ConWep 模型, 可实现基于改进 Friedlander 方程的爆破冲击波模拟。如图 4 所示, 随着空气冲击波的传播, 超压降低, 使波振面后的压力衰减至环境压力以下。由改进的 Friedlander 方程表示爆炸冲击波产生的入射压强 $p_i(t)$ 和反射压强 $p_r(t)$ 的传播规律^[15]:

$$p_i(t) = (p_{i,max} - p_{atm}) \left(1 - \frac{t - t_a}{t_d}\right) \exp\left[-\frac{a(t - t_a)}{t_d}\right] \quad (9)$$

$$I = \int_{t_a}^{t_a+t_d} p(t) dt \quad (10)$$

$$p_r(t) = \frac{3\gamma - 1}{\gamma - 1} p_i(t) \quad (11)$$

式中: p_{atm} 为环境压力, $p_{i,max} - p_{atm}$ 为入射超压, t_a 为激波前沿到达炮孔表面的时间, t_d 为正相超压的持时, a 为衰减因子, I 为给定位置处的爆破冲量。根据 $p_{i,max} - p_{atm}$ 、 t_d 和 I , 衰减因子 a 可根据式 (10) 进行迭代计算。将炮孔内空气近似描述为理想气体, 取 $\gamma = 1.4$ 。

入射冲击波作用在炮孔表面时将发生反射, 从而导致爆炸冲击波压力和冲量增强。此时, 炮孔表面压强 $p(t)$ 为入射压强 $p_i(t)$ 和反射压强 $p_r(t)$ 的耦合效应, 为介质颗粒动量变化速率产生的单位面积上的反作用力, 并与冲击波至炮孔表面的入射角度 θ 有关。 θ 为炮孔内单元面中心点与爆源连接射线与单元面外法线之间的夹角 (见 图 5), 则 $p(t)$ 与入射压强 $p_i(t)$ 和反射压强 $p_r(t)$ 满足如下经验关系。

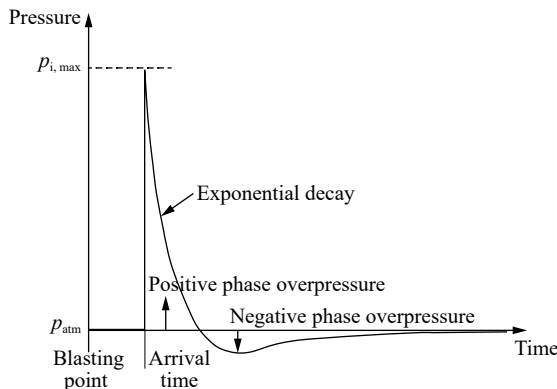


图 4 爆炸引起的超压时程曲线

Fig. 4 Time history of overpressure induced by blasting

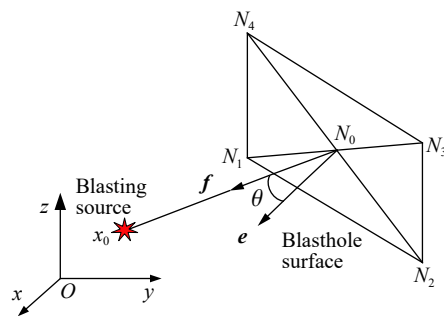


图 5 爆炸冲击波至炮孔表面的入射角度

Fig. 5 Illustration of the incident angle of the blast wave to the surface of the blast hole

当 $\cos\theta \geq 0$ 时:

$$p(t) = p_i(t)(1 + \cos\theta - 2 \cos^2\theta) + p_r(t) \cos^2\theta \tag{12}$$

当 $\cos\theta < 0$ 时:

$$p(t) = p_i(t) \tag{13}$$

ConWep 模型参数涉及爆源至迎爆面的距离、装药量和起爆时刻等。相比于直接施加半理论半经验的爆破荷载压力时程曲线, ConWep 模型中考虑了爆破冲击波入射压强和反射压强在炮孔表面的空间耦合效应,增加了空间维度。

3.2 地层-爆源体系三维有限元模型

爆破是一个非常复杂的力学过程,现有的有限元、离散元等数值方法难以准确模拟炮孔起爆条件下从炸药爆轰、岩石破碎到弹性地震波激发这一复杂过程,需寻求一种实用的等效模拟方法。本文中采用等效弹性边界的概念^[16-19],把炮孔周围岩体根据其破坏程度划分为粉碎区、破碎区和弹性振动区,将整个非弹性区(粉碎区和破碎区)等效为爆炸源,由 ConWep 模块激发的爆炸冲击波直接作用在等效弹性边界上,产生随时间和空间变化的压强。

考虑到圆柱形炮孔能量传播的三维特性,基于 ABAQUS 平行计算平台,建立了三维有限元精细化模型。炮孔等效弹性边界按照文献^[16-19]近似取值 $r=10r_0$ (r_0 为实际孔径)。爆源设置在炮孔中心处,由 ConWep 模块施加在炮孔等效弹性边界上。计算区域为 $75\text{ m} \times 83\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。为弥补有限元模型中场地尺寸过大对计算效率的影响,模型边界采用有限元-无限元耦合的方法来模拟,以考虑爆破地震波在边界的透射问题。模型除自由表面及炮孔所在面外,均设置为无限单元,炮孔所在面约束法向位移。计算采用单元总数 8 009 728 个,具体三维有限元模型如图 6 所示。

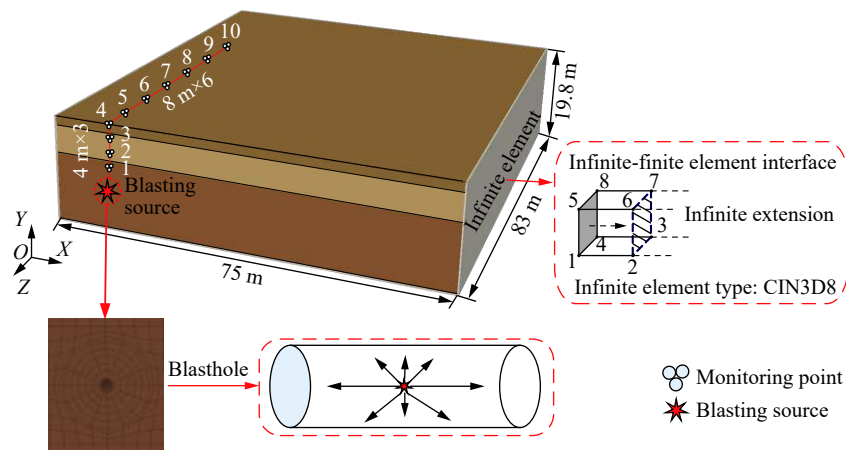


图 6 地层-爆源体系三维有限元模型

Fig. 6 A three-dimensional finite element model of the ground-blasting-source system

4 数值模拟与实测结果的对比

为初步验证此次建立的模型对大型场地爆破地震波传播规律的预测能力,现对比现场爆破试验与数值模拟得到的地表振动响应。图 7 对比了地表试验测点(横坐标)与数值模拟(纵坐标)所得的竖直向/水平向峰值振动速度。由图 7 可知,无论是竖直向峰值振动速度,还是水平向峰值振动速度,两者的实测值与模拟值较均匀地分布在 45° 线附近。这表明,基于修正的 Davidenkov 本构模型以及改进的 Friedlander 方程的三维精细化有限元模型能较真实地反映爆破试验场地的地表振动特性。

图 8 对比了测点 5 (距爆源水平距离 8 m 处) 和测点 9 (距爆源水平距离 40 m 处) 地表水平振动速度时程和傅里叶谱的模拟与实测结果。整体而言,模拟与实测的振动速度衰减规律较一致,远处测

点的实测速度时程稍有滞后, 这是由于实际场地中土的阻尼特性更显著。此外, 对比这两个测点速度响应的傅里叶谱可知, 模拟与实测速度响应的频谱成分、谱形及谱值基本相同。综上可知, 本文模型方法能较理想地模拟爆破荷载作用下场地的环境振动特性, 反映爆破地震波在场地传播过程中的耗能特性。

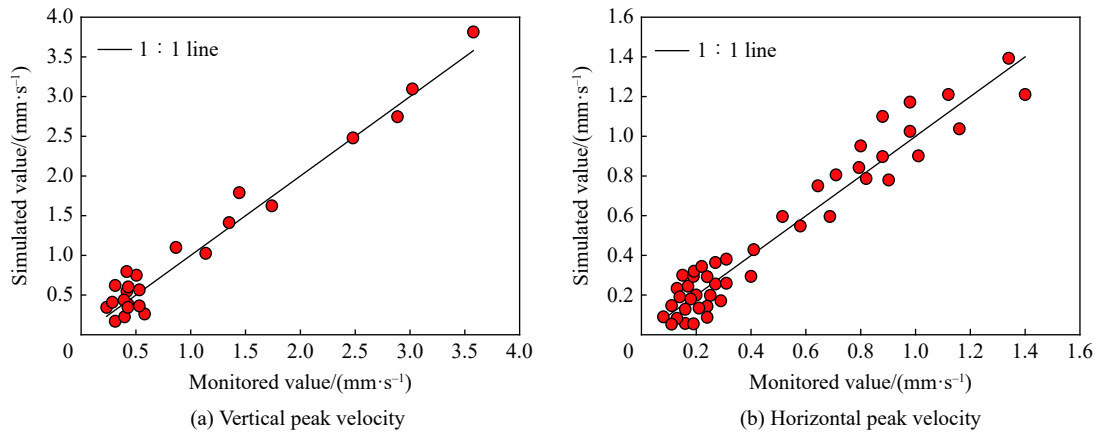


图 7 实测地表测点峰值振速与模拟结果的对比

Fig. 7 Comparison of peak vibration velocities between monitored and simulated surface measurement points

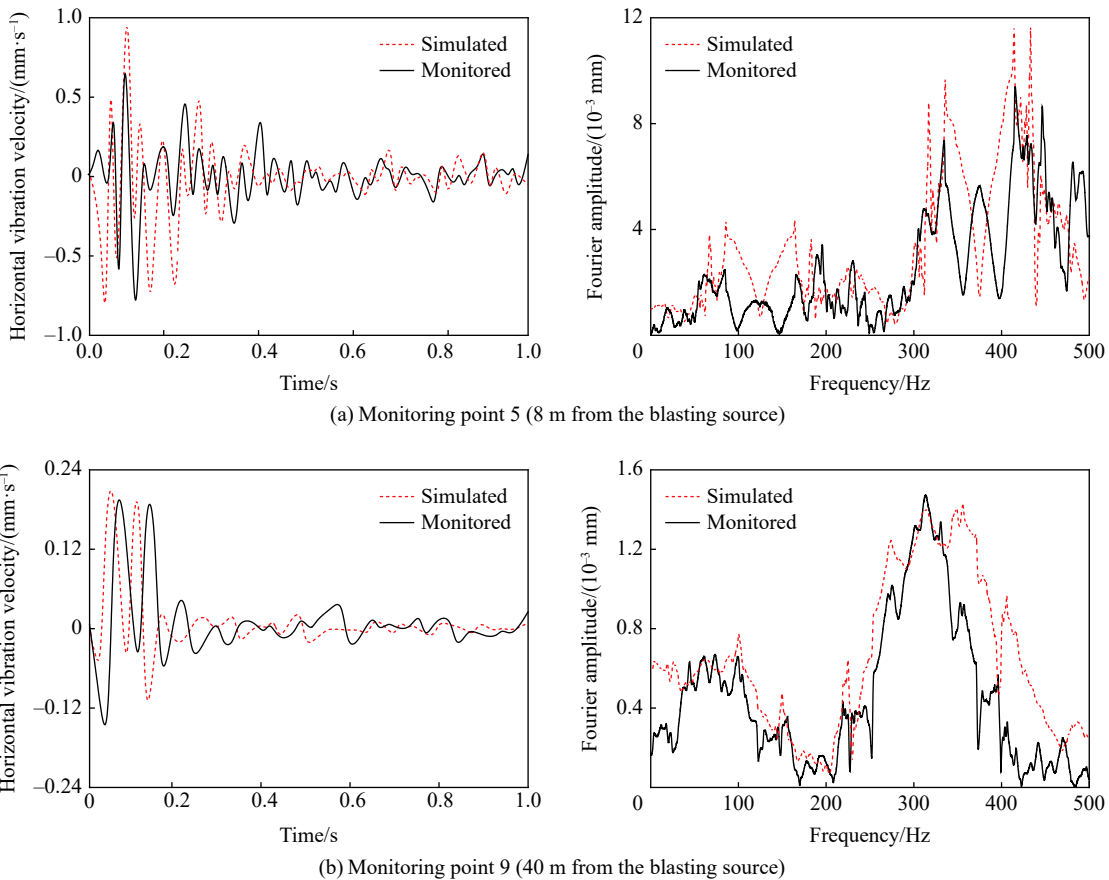


图 8 地表振动速度时程和傅里叶谱对比

Fig. 8 Comparison of vibration waveforms and Fourier spectra between different monitoring points

5 爆破模式对地表速度响应的影响

由于岩土体的阻尼特性,随着传播距离的增大,爆破地震动的能量在岩土介质不断耗散。此外,场地反应也与爆破地震动的特性密切相关。因此,了解不同爆破模式对场地地表响应的影响机理,有利于爆破方案的合理设计。对此,开展了两种爆破方案的数值计算:(1)六孔齐爆,单孔装药量为 500 g;(2)六孔毫秒延时爆破,单孔装药量为 500 g,延时间隔为 5 ms。值得一提的是,本文数值模拟为精确多孔齐爆,而目前瞬发工业雷管或同段毫秒雷管难以实现精确的多孔齐爆,即使精度较高的数码电子雷管也存在±1 ms 的误差。

地表峰值振速通常随爆心距呈指数衰减:

$$v = Kd^{-\alpha} \tag{14}$$

$$d = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \tag{15}$$

式中: v 为爆破振动质点最大速度 (cm/s); Q 为炸药量 (kg), 齐爆时取总药量, 延时起爆时取单段最大药量; R 为爆源距 (m); d 为比例距离; K 和 α 分别为爆破点至测点间地形、地质条件的相关系数和衰减指数。

图 9 中给出了两种爆破模式下地表峰值振速随比例距离的变化趋势。由图 9 可知,在总药量相同的情况下,在相同测点处,延时爆破引起的地表峰值振动速度较齐爆更低,表明延时爆破的降振效果明显。此外,对比图 9(a) 和图 9(b) 可以看出,相较于两种爆破模式下的竖向地表峰值振动速度衰减曲线,

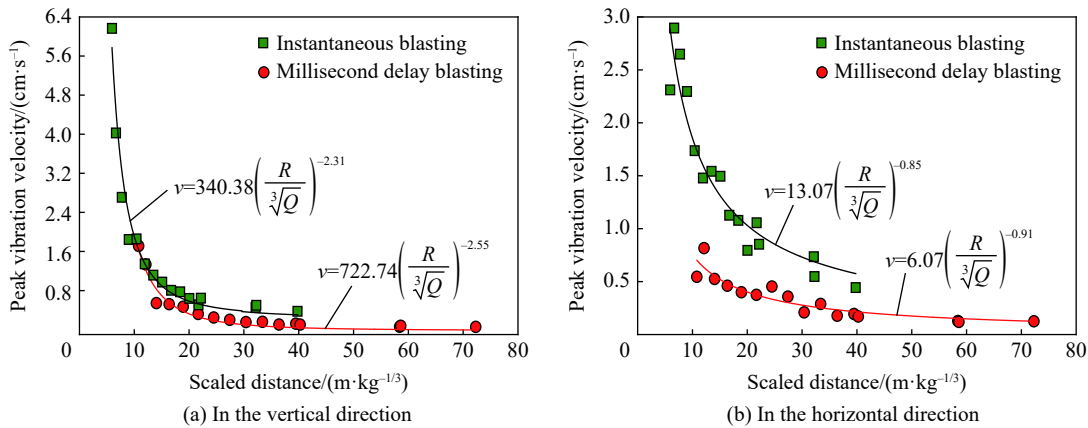


图 9 不同爆破方式下地表振动速度衰减规律对比

Fig. 9 Comparison of ground vibration attenuation under different blasting modes

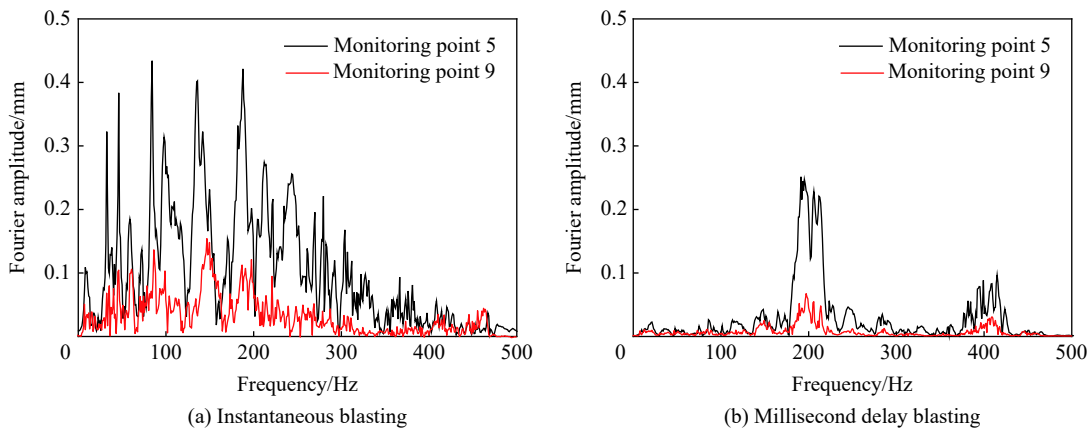


图 10 不同爆破方式下地表测点的频谱对比

Fig. 10 Comparison of frequency spectra at surface monitoring points under different blasting modes

水平向地表峰值振动速度衰减曲线的差异较大。这表明,延时爆破显著降低了爆破施工引起邻近建筑物水平向的振动响应。

先起爆炸孔的速度波形和后起爆炸孔的波形相互干扰,导致波形峰值相互错开进而影响频谱特性^[20]。因此,进一步对比两种工况下地表速度响应(距爆源水平距离 8 m)的频谱特性。图 10 所示:齐爆产生的频带分布较广,并在 0~200 Hz 内出现多个峰值;延时爆破产生的频率成分较单一,主频也较高,约为 200 Hz。从图 10 可以看出,地表土层具有显著吸收爆破振动中高频成分的特性,且对总能量有衰减作用。综上可知,延时爆破对分散爆破振动能量的作用显著,地表速度响应的主频较高,更远离建筑结构自振频率(见表 1),可显著降低爆破施工引起的邻近建筑物的结构振动水平。

6 结 论

依托南京地铁隧道的爆破振动现场试验,考虑毫秒延时爆破的不规则荷载作用,采用非线性土体本构模型和改进的 Friedlander 方程,建立了地层-爆源体系三维精细化有限元模型,对比分析了 50 ms 延时爆破和齐爆引起的环境振动特性,得到的主要结论如下:

(1)采用不规则加卸载准则构造的基于 Davidenkov 骨架曲线的应力-应变滞回圈描述场地土动力非线性特性,能够较好地模拟毫秒延时爆破不规则荷载作用下的土体动力响应。

(2)通过改进的 Friedlander 方程来模拟内源爆炸在圆柱形炮孔表面产生的瞬态空气冲击波,实现了包含爆破荷载输入和有限元-无限元耦合边界的地层-爆破荷载体系的三维精细化有限元模型,与现场实测数据对比验证了该模型方法的有效性。

(3)两种爆破方式中,地表峰值振速均随比例距离的增大而呈指数衰减。50 ms 延时爆破引起的地表振动速度显著低于齐爆引起的地表振动速度,在地表土层传播中衰减较快,且地震波主频集中在高频段,远离建筑结构自振频率,能够显著降低邻近建筑物的结构振动水平。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 1945-1968. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.10.001.
QIAN Q H. Some advances in rock blasting dynamics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 1945-1968. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.10.001.
- [2] 陈庆, 王宏图, 胡国忠, 等. 隧道开挖施工的爆破振动监测与控制技术 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(6): 964-967. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.06.029.
CHEN Q, WANG H T, HU G Z, et al. Monitoring and controlling technology for blasting vibration induced by tunnel excavation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(6): 964-967. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.06.029.
- [3] VERMA H K, SAMADHIYA N K, SINGH M, et al. Blast induced rock mass damage around tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 149-158. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.019.
- [4] LI C J, LI X B. Influence of wavelength-to-tunnel-diameter ratio on dynamic response of underground tunnels subjected to blasting loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 323-338. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.029.
- [5] 管晓明, 傅洪贤, 王梦恕. 隧道近距下穿山坡楼房爆破振动测试研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(7): 1995-2003. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.07.027.
GUAN X M, FU H X, WANG M S. Blasting vibration characteristics monitoring of tunnel under-passing hillside buildings in short-distance [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 1995-2003. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.07.027.
- [6] 李顺波, 杨军, 陈浦, 等. 精确延时控制爆破振动的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 513-518. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0513-06.
LI S B, YANG J, CHEN P, et al. Experimental study of blasting vibration with precisely-controlled delay time [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 513-518. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0513-06.
- [7] 李夕兵, 凌同华. 单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2409-2413. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.14.002.

- LI X B, LING T H. Response spectrum analysis of ground vibration induced by single deck and multi-deck blasting [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2409–2413. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.14.002.
- [8] KUMAR R, CHOUDHURY D, BHARGAVA K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(3): 341–349. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.10.009.
- [9] 陈士海, 燕永峰, 戚桂峰, 等. 微差爆破降震效果影响因素分析 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(10): 3003–3008. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.10.018.
CHEN S H, YAN Y F, QI G F, et al. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3003–3008. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.10.018.
- [10] 龚敏, 吴昊骏, 孟祥栋, 等. 密集建筑物下隧道开挖微振控制爆破方法与振动分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 350–358. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0350-09.
GONG M, WU H J, MENG X D, et al. A precisely-controlled blasting method and vibration analysis for tunnel excavation under dense buildings [J]. *Explosion and Shock Wave*, 2015, 35(3): 350–358. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0350-09.
- [11] GUI Y L, ZHAO Z Y, JAYASINGHE L B, et al. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 101: 63–68. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.
- [12] AINALIS D, KAUFMANN O, TSHIBANGU J P, et al. Modelling the source of blasting for the numerical simulation of blast-induced ground vibrations: a review [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1): 171–193. DOI: 10.1007/s00603-016-1101-2.
- [13] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 888–895. DOI: 10.11779/CJGE201705013.
ZHAO D F, RUAN B, CHEN G X, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 888–895. DOI: 10.11779/CJGE201705013.
- [14] 胡勤, 戚承志. Ramberg-Osgood 土动力非线性模型在 ABAQUS 软件上的开发及应用 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1268–1274. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2012.04.046.
HU Q, QI C Z. Development and application of Ramberg-Osgood soil dynamic nonlinear constitutive model on ABAQUS code [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1268–1274. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2012.04.046.
- [15] OSTRACH B, SADOT O, LEVINTANT O, et al. A method for transforming a full computation of the effects of a complex-explosion scenario to a simple computation by ConWep [J]. *Shock Waves*, 2011, 21(2): 101–109. DOI: 10.1007/s00193-011-0300-8.
- [16] 王明洋, 邓宏见, 钱七虎. 岩石中侵彻与爆炸作用的近区问题研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2859–2863. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.008.
WANG M Y, DENG H J, QIAN Q H. Study on problems of near cavity of penetration and explosion in rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2859–2863. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.16.008.
- [17] 卢文波, 周创兵, 陈明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2184–2192. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.11.003.
LU W B, ZHOU C B, CHEN M, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2184–2192. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.11.003.
- [18] 卢文波, 杨建华, 陈明, 等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1089–1096.
LU W B, YANG J H, CHEN M, et al. Mechanism and equivalent numerical simulation of transient release of excavation load for deep tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1089–1096.
- [19] 杨建华, 卢文波, 陈明, 等. 岩石爆破开挖诱发振动的等效模拟方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0157-07.
YANG J H, LU W B, CHEN M, et al. An equivalent simulation method for blasting vibration of surrounding rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0157-07.
- [20] YI C P, JOHANSSON D, NYBERG U, et al. Stress wave interaction between two adjacent blast holes [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 1803–1812. DOI: 10.1007/s00603-015-0876-x.

(责任编辑 张凌云)