

文章编号: 1001-1455(2009)06-0566-07

# 地下墙施工爆破对既有隧道的振动测试与分析\*

禹海涛<sup>1</sup>, 柳 猷<sup>1,2</sup>, 袁 勇<sup>1,2</sup>, 王庆国<sup>3</sup>, 程国荣<sup>4</sup>, 吴晓峰<sup>2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海轨道交通 9 号线项目部, 上海 200082;

4. 上海市政养护管理有限公司, 上海 200082)

**摘要:** 结合复兴东路越江隧道浦西引导段地下连续墙爆破施工工程, 给出了爆破施工对既有隧道振动影响的监测方案, 包括测点布置、测试方法、测振系统。基于爆破振动监测数据, 分析了 3 次不同位置和药量爆破下各测点的振动波形、速度、加速度响应、主频及主频域, 根据判别标准得出了隧道在爆破振动下接近安全值底线的结论, 同时归纳出不同爆破振动下结构的响应频谱特性, 研究结果可为类似工程提供参考。

**关键词:** 爆炸力学; 隧道工程; 爆破施工; 振动监测; 响应谱; 地下连续墙

**中图分类号:** O389; U455.6; TU94

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引 言

城市地下工程施工时需要采用地下连续墙等作为开挖工程的围护结构, 这类临时结构一般在主体工程完成后即失去作用, 但却会成为其他后续工程施工的障碍, 有时甚至控制地下快速交通系统的线路规划和工程进度。另一方面, 尽管有些围护工程在建设时已经采取了预留通道等技术措施, 在现有技术条件下穿越围护结构施工仍然难以避免人工作业的情形, 这样既延误工期, 又存在安全隐患。

在后建隧道从既有隧道下方通过时, 发展无需手工作业穿越原临时围护的地下连续墙体结构的爆破施工方法, 必须分析和评价爆破产生的冲击波对既有隧道结构的作用, 避免对既有的地下构筑物的安全构成威胁。已有的对隧道爆破振动的研究<sup>[1-6]</sup>着重于岩体隧道钻爆法开挖对周围介质、相邻隧道或既有结构的影响分析。近年来, 国内外在爆炸理论、实验研究以及爆炸数值模拟等方面都有了新的发展与提高, 尤其在药包布置、布孔方式、填充系统、起爆方式等技术方面的研究比较系统<sup>[7-9]</sup>, 由于城市爆破工程的限制, 没有看到软土地下结构中爆破对既有隧道结构影响的研究, 更没有形成爆破安全控制标准。

本文将结合上海市跨越黄浦江的复兴东路隧道浦西引导段地下连续墙爆破施工的现场监测, 分析爆破振动对既有隧道结构的影响, 进而评价爆破施工方法。

## 2 爆破方案

复兴东路隧道是我国第 1 条双管双层六车道盾构法隧道, 其浦西引导段底板标高-8.641 m, 采用地下连续墙作为围护结构, 地墙-13.675 m 标高以下范围采用 C30 玻璃纤维混凝土, 作为 9 号线地铁区间隧道穿越的预留通道, 如图 1 所示。穿越段隧道的轴线情况为: 上行线平曲线  $R=349.856$  m 的左曲、坡度为 16%, 下行线平曲线  $R=354.851$  m 的左曲、坡度为 16%。本次地下连续墙共处理 4 幅, 上、下行线各处理 2 幅。地下连续墙对应区间隧道的具体环号为上行线 936~958 环、下行线 948~969 环。在此位置, 隧道位于粉质粘土层中, 如图 2 所示。为确保盾构能够顺利穿越该处, 同时确保工程的施工进度, 拟对地下连续墙采取地下爆破进行预先处理, 然后盾构再进行穿越。

\* 收稿日期: 2008-08-08; 修回日期: 2008-12-07

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ27B02-02)

作者简介: 禹海涛(1983—), 男, 博士研究生。

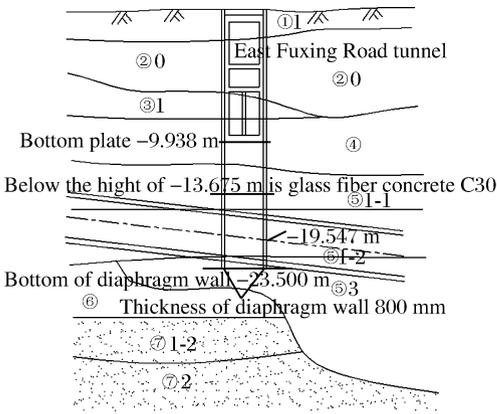


图 1 复兴东路隧道浦西引导段横断面图  
Fig. 1 Cross section of Puxi guiding section of East Fuxing Road tunnel

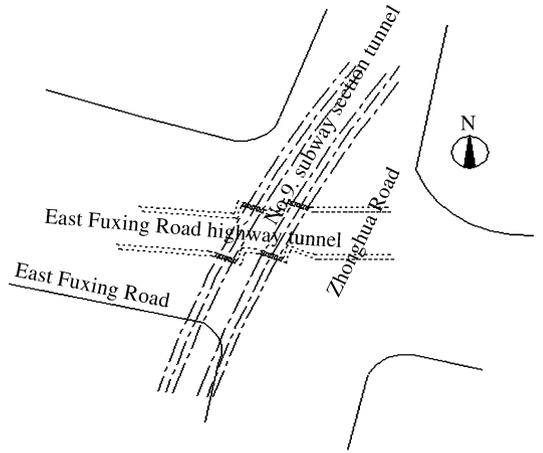


图 2 复兴东路公路隧道与 9 号线地铁区间隧道平面布置图  
Fig. 2 Plan arrangement of East Fuxing Road highway tunnel and No. 9 subway section tunnel

本次爆破采用在地下连续墙中心线垂直钻孔的爆破方案,即在地下连续墙的顶面中心位置钻孔,深度为 27.2 m,钻孔直径 110 mm,采用 1.0 倍地下连续墙厚度的孔距(800 mm),如图 3 所示。爆破所用炸药为乳化炸药配 RDX 起爆体,起爆方法采用毫秒级的微差爆破,即每幅地下连续墙的中间孔(6 号)首先起爆,炮孔起爆顺序依次为 6、5、7、4、8、3、9、2、10、1、11,每个相邻起爆时间间隔为 0.1 s。4 幅地下连续墙共分 3 次起爆:第 1、2 次起爆分别为南线隧道东侧和西侧地墙,第 3 次为北线隧道东西两侧地墙同时起爆。

此次地下爆破施工首次在上海市实施,且施工现场位于交通繁忙的中华路复兴东路路口,周边还有众多建筑物和公共管线,因此对施工中的安全要求较高。爆破施工在地表以下 15~23 m 的范围内进行,每段起爆药量为 3 kg,会对周边的建筑物、管线产生一定的影响,而且此次爆破位置为复兴东路隧道地下连续墙围护结构,可能对隧道结构的安全构成威胁,因此,有必要在爆破实施过程中对既有复兴东路隧道结构进行现场监测。

### 3 爆破振动测试方案

本次现场监测利用低频测振仪对既有隧道结构爆破产生的振动进行测量,除测量沿隧道轴向、水平垂直于隧道轴线方向和铅垂向速度外,还补充测量 3 个方向的振动加速度,以全面了解振动大小、频谱和时间特性等振动评价参数。

#### 3.1 测点布置

测点及传感器布置遵循以下原则:(1)最大振动发生的位置和方向监测;(2)爆破振动效应跟踪监测;(3)爆破振动衰减规律观测。

按照上述原则并结合工程实际,本次振动监测共布置 3 个测点,布置方式如图 4、5 所示。3 个测点

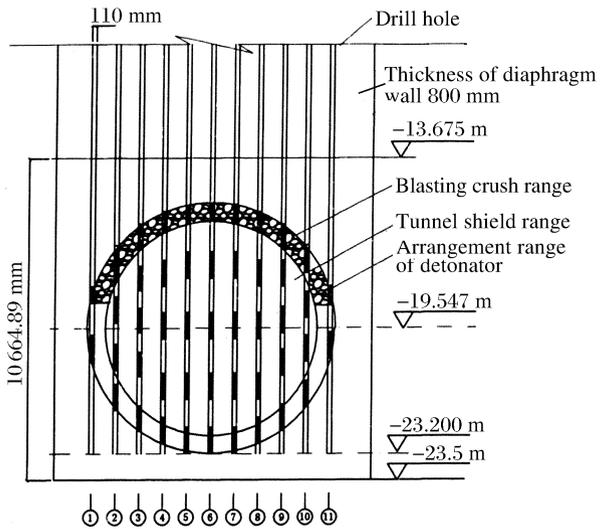


图 3 钻孔剖面布置图  
Fig. 3 Layout of drilling profile

均布置在复兴东路线下层隧道路面上,由西向东测点分别为 A、B、C,间距分别为 36、22 m。测点 A 位于地下连续墙爆破位置的中心,且靠近隧道中墙一侧。在测点 A 布置 1 个竖直向速度传感器和 1 个沿横断面水平向速度传感器。在测点 B 布置分别沿隧道轴向、横断面水平向、竖直向的速度传感器和加速度传感器。在测点 C 布置 1 个竖直向速度传感器。

### 3.2 测试方法

用于爆破振动监测的仪器为信号采集分析仪,并配有 3 个北智传感器技术有限公司生产的三分量力平衡加速度传感器、6 个 941B 型拾振器。频率范围为 0.06~1 000 Hz,电压灵敏度分别为 95.98、99.96 和 100.95 mV·s<sup>2</sup>/m;941B 型拾振器由中国地震局工程力学研究所研制,频率范围为 1~100 Hz,电压灵敏度分别为 22.69、23.59、23.60、24.08、24.50 和 24.59 V·s/m。对于铅垂向和水平向加速度振动频谱的测量,分别将加速度传感器沿竖直和水平方向固定于立方体铁块上;对于速度振动频谱的测量,将速度拾振器沿预定方向放在指定的测点上,并用双面胶加以固定。测量时,将各测点处的传感器导线按照顺序接入信号采集仪的采集通道中。信号采集仪中数据采集频率为 2 000 Hz,采集通道为 9 个,采集时间约 1 h,记录了 3 次爆破施工所产生的振动。

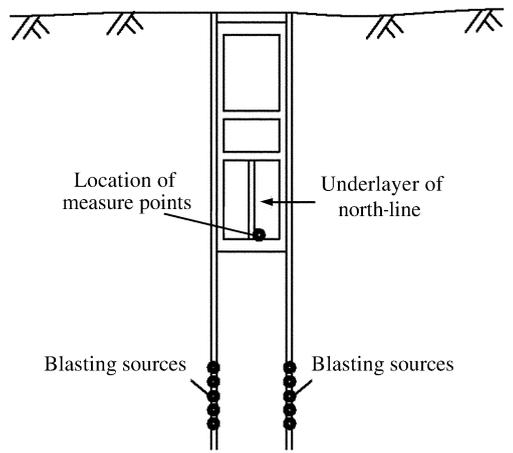


图 4 复兴东路隧道地墙爆破监测测点布置立面图  
Fig. 4 Elevation arrangement of monitoring measure points

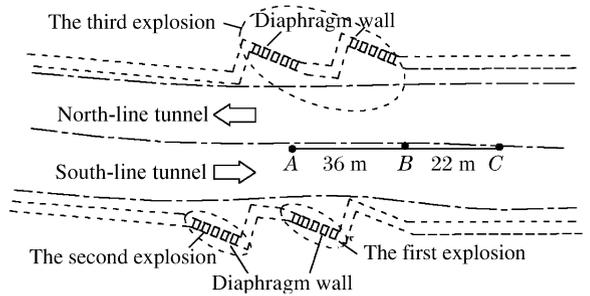


图 5 复兴东路隧道地墙爆破监测测点布置平面图  
Fig. 5 Plan arrangement of monitoring measure points

## 4 测试结果及分析

### 4.1 既有隧道结构安全性评价

限于篇幅,仅列出在 3 次爆破过程中测点 A 处所记录的速度响应时程,如图 6 所示,图中  $v_v$ 、 $v_h$  分别为竖直向和水平横向速度。从图中可以看出,测点处的速度响应曲线包含多个波峰和波谷,这是由于每次爆破过程由多个微差爆破组成,且爆破冲击波在介面处反射所致。根据监测结果,可以分析出 3 次爆破施工作用下隧道结构的最大振动响应值。各测点处最大加速度、速度峰值见表 1,表中  $v_p$ 、 $a_p$  分别表示速度峰值和加速度峰值。

从表 1 可以得出以下结论:(1)地下连续墙爆破施工中,第 3 次爆破产生的振动能量最大,其次为第 1 次,第 2 次最小。主要原因是第 3 次爆破为北线隧道 2 幅地墙同时爆破,产生的能量巨大。而第 1 次爆破位置为南线隧道靠东一侧地墙,较第 2 次爆破位置靠西一侧离测点较近;(2)每次爆破过程中,测点 A 产生的振动响应最大,依次是测点 B、C。这主要和测点离爆破中心的距离有关。从测点布置图可以看出测点 A 离爆破源最近;(3)每次爆破过程中,各测点竖直向振动响应均大于水平向振动响应,一般为 3~5 倍。这说明每次爆破产生的能量主要沿竖直向传播。

此外,由于本次监测对象为公路隧道,根据《爆破安全规程》(GB6722-2003)规定<sup>[10]</sup>其安全允许振速为 10~20 cm/s。

由于复兴东路隧道在此次爆破过程中产生的最大响应速度为 9.73 cm/s,可见此次爆破振动接近

国家规定安全值的底线 10 cm/s,说明隧道结构在爆破产生的冲击力作用下处于安全的临界状态,同时也表明此次爆破施工方案应当谨慎小心地进行。

表 1 各测点振动响应峰值  
Table 1 Peak vibration response of measure points

测点	方向	第 1 次爆破		第 2 次爆破		第 3 次爆破	
		$v_p/(m/s)$	$a_p/(m/s^2)$	$v_p/(m/s)$	$a_p/(m/s^2)$	$v_p/(m/s)$	$a_p/(m/s^2)$
A	隧道轴向						
	隧道水平横向	0.023		0.012		0.026	
	竖直向	0.097		0.052		0.061	
B	隧道轴向	0.002		0.003		0.003	
	隧道水平横向	0.004	1.944	0.002	1.199	0.006	4.907
	竖直向	0.013	6.818	0.010	4.327	0.013	18.018
C	隧道轴向						
	隧道水平横向						
	竖直向	0.006		0.005		0.007	

注:表中空白处表示在测点处对应方向上未布置传感器,或传感器发生了故障。

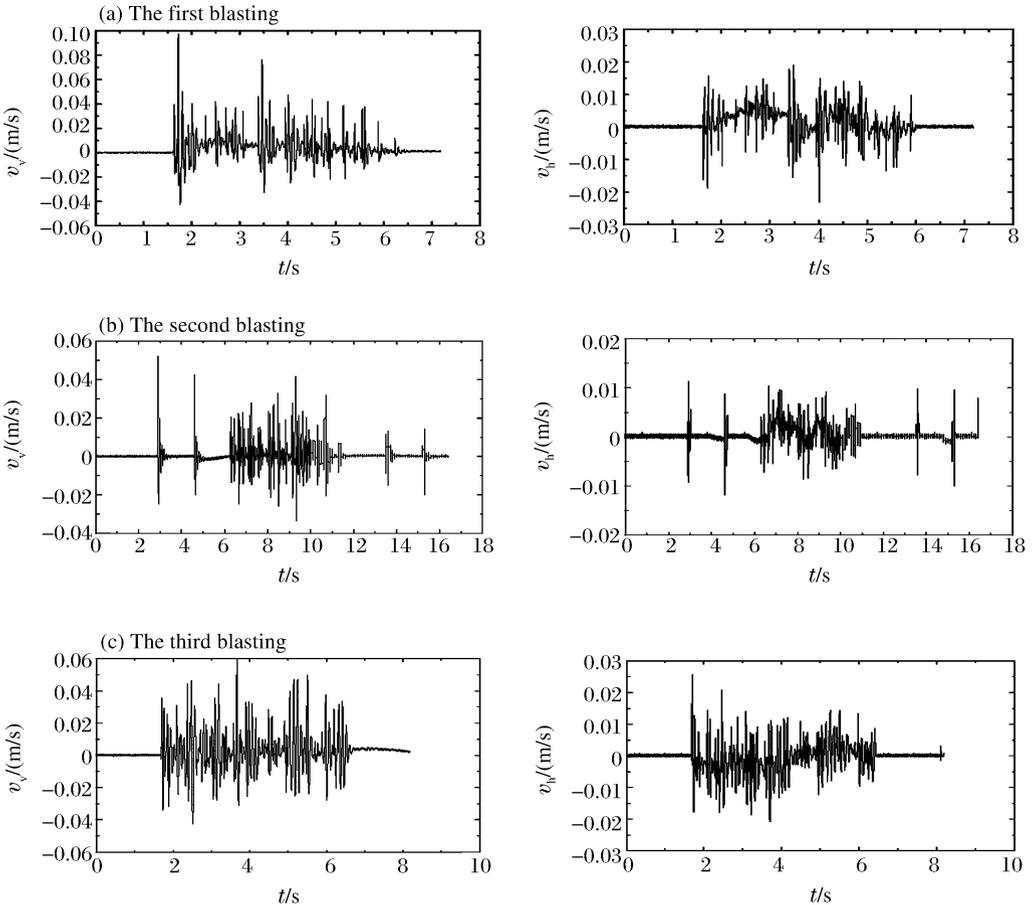


图 6 爆破测点 A 处速度时程

Fig. 6 Velocity history at measure point A

### 4.2 结构响应频谱分析

由于爆破载荷作用时间短,爆破振动波形是非周期性的瞬态波形,其频率复杂,频带较宽,而且爆破

药量、爆破方法、地形地质等条件对既有隧道结构振动波形、频率成份均有不同程度的影响。因此研究 3 次不同爆破条件下隧道结构振动的频谱特性,对于结构爆破振动控制、隔震防震设计有重要意义。

通过对爆破过程中监测数据的频谱分析,可得到结构在不同爆破振动下的加速度反应谱,见图 7。

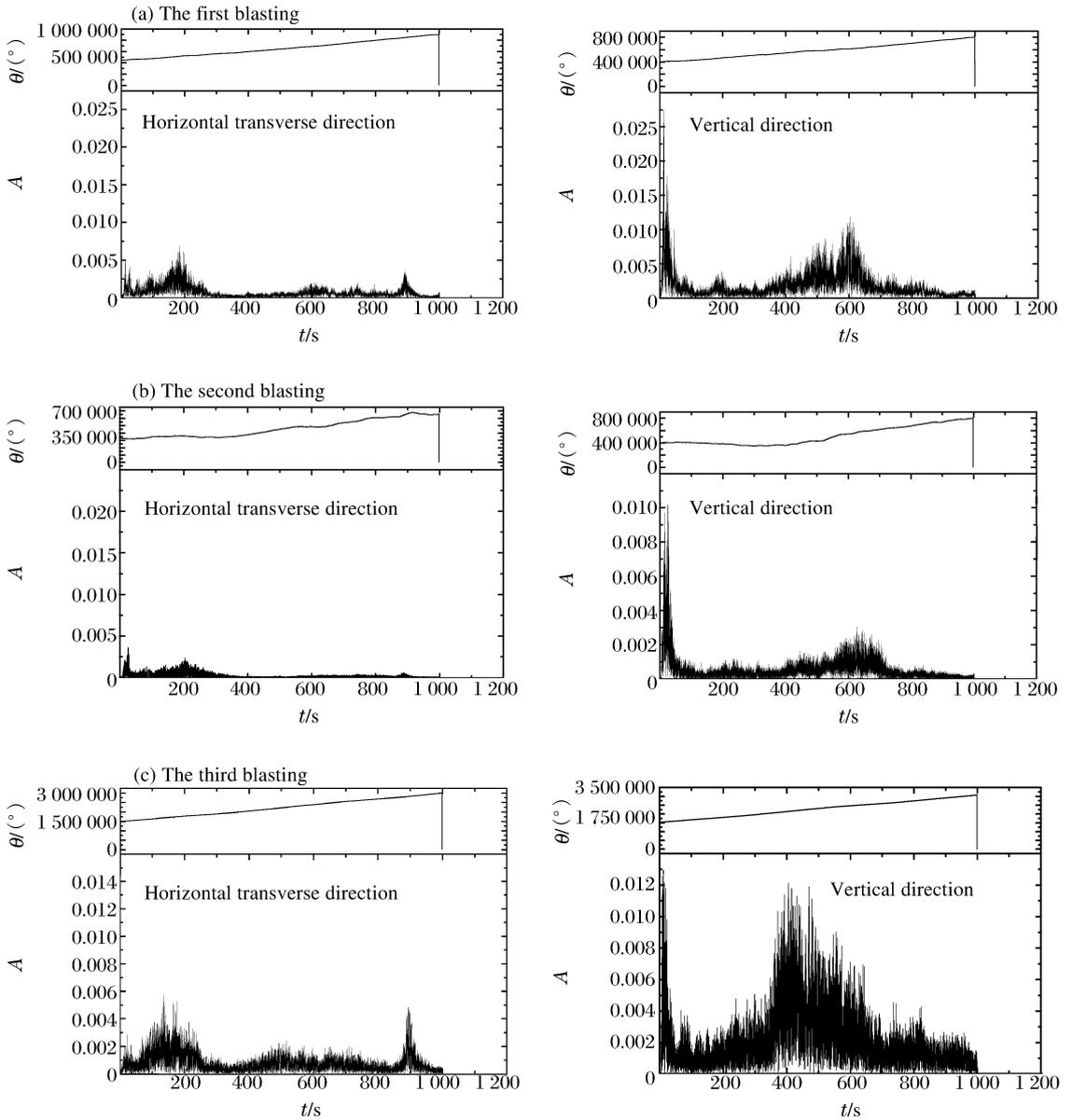


图 7 爆破测点 B 加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration response spectrum of measure point B

通过对以上数据的分析,可以得到测点 B 处 3 次爆破施工振动下结构的响应主频率,其中隧道水平横向第 1、2、3 次爆破加速度响应主频分别为 195.61、24.94、136.74 Hz,竖直向第 1、2、3 次爆破加速度响应主频分别为 12.57、24.94、9.40 Hz。

此响应主频道值表明第 1 次和第 3 次爆破振动过程中结构沿水平横向响应主频率主要为高频振动,而沿竖直向结构振动响应主频为低频振动,约 10 Hz;第 2 次爆破振动过程中结构沿水平向和竖直向响应主频均为低频振动,约 25 Hz。

由以上结果分析可知,复兴东路隧道地墙爆破对既有隧道的振动具有以下频谱特性:

(1) 3 次爆破结构振动具有不同的频谱特性。当药量较大时(第 3 次爆破),炸药爆破反应的历时较

长, 爆炸气体膨胀作功能量较大, 药室内正、负压作用时间均延长, 使爆源激发结构振动的频率较低, 且结构振动主频域处于较低的频率范围。

(2) 结构振动在各方向上频谱差别较大。各次爆破振动过程中结构竖向振动幅值均较大, 表明爆破冲击波能量主要沿竖向传播。除第2次爆破外, 结构竖向振动主频远小于水平向, 且3次爆破结构竖向振动主频域均较窄。

## 5 结 论

复兴东路隧道浦西引导段地下连续墙爆破施工在上海市首次采用, 风险较高。此次爆破振动监测意义重大。通过对爆破施工过程中隧道结构的速度、加速度监测, 得到大量有价值的监测数据。在对监测结果进行整理、分析后, 得出对类似工程有指导意义的几点结论:

(1) 地下连续墙爆破施工中, 第3次爆破产生的振动能量最大, 其次是1次, 第2次爆破产生的振动能量最小, 这主要与爆破药量有关;

(2) 每次爆破过程中, 测点A产生的振动响应最大, 依次是测点B、C, 这主要与测点离爆破中心的距离有关;

(3) 每次爆破过程中, 各测点竖向振动响应均大于水平向振动响应, 一般为3~5倍, 这说明每次爆破产生的能量主要沿竖向传播;

(4) 复兴东路隧道在此次爆破过程中产生的最大响应速度为9.73 cm/s, 接近国家规定安全值的底线10 cm/s, 说明隧道结构在爆破过程中产生的冲击力作用下处于安全的临界状态, 同时也表明此次爆破施工方案应当谨慎小心地进行;

(5) 3次爆破作用下结构振动具有不同的频谱特性, 且振动在各方向上频谱差别较大。

## 参考文献:

- [1] Berta G. Blasting induced vibration in tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994,9(2):175-187.
- [2] 彭道富, 李忠献, 杨年华. 近距离爆破对既有隧道的振动影响[J]. 中国铁道科学, 2005,26(4):73-76.  
PENG Dao-fu, LI Zhong-xian, YANG Nian-hua. Vibration effect on the working tunnel induced by an adjacent blasting[J]. China Railway Science, 2005,26(4):73-76.
- [3] 时亚昕, 王明年, 李强. 爆破振动对双连拱隧道中墙的影响分析[J]. 岩土力学, 2007,28(6):1275-1279.  
SHI Ya-xin, WANG Ming-nian, LI Qiang. Analysis of influence of blasting vibration on middle wall of a double-arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(6):1275-1279.
- [4] 姚勇, 何川, 周俐俐, 等. 爆破振动对相邻隧道的影响性分析及控爆措施[J]. 解放军理工大学学报, 2007,8(6):702-708.  
YAO Yong, HE Chuan, ZHOU Li-li, et al. Effect analysis and controlled measures research about blasting vibration to neighboring tunnel[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007,8(6):702-708.
- [5] 王源, 刘松玉, 谭跃虎, 等. 九华山隧道爆破施工对明城墙振动影响的监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(1):3584-3589.  
WANG Yuan, LIU Song-yu, TAN Yao-hu, et al. Monitoring and analysis of ming dynasty wall vibration influenced by explosion construction of Jiuhuashan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(1):3584-3589.
- [6] 赵东平, 王明年. 小净距交叉隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土工程学报, 2007,29(1):116-119.  
ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian. Study on influence of blasting vibration on cross tunnels with small clearance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(1):116-119.
- [7] 刘艳青, 钟世航, 卢汝绥, 等. 小净距并行隧道力学状态试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000,19(5):590-594.  
LIU Yan-qing, ZHONG Shi-hang, LU Ru-sui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of twin tunnels with small spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(5):590-594.

- [8] Talhik T, Bensaker B. Design of a model blasting system to measure peak P-wave stress[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003,23(4):513-519.
- [9] 李云鹏,艾传志,韩常领,等.小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J].*爆炸与冲击*,2007,27(1),75-81.  
LI Yun-peng, AI Chuan-zhi, HAN Chang-ling, et al. Study on dynamics effect caused by blasting construction by numerical simulation for tunnels with small spacing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007,27(1),75-81.
- [10] GB6722-2003,爆破安全规程[S].

## Monitoring and analysis of an existing tunnel vibration induced by blasting construction of diaphragm wall

YU Hai-*tao*<sup>1\*</sup>, LIU Xian<sup>1,2</sup>, YUAN Yong<sup>1,2</sup>, WANG Qing-guo<sup>3</sup>,  
CHENG Guo-rong<sup>4</sup>, WU Xiao-feng<sup>2</sup>

(1. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

2. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

3. *Shanghai Rail Transit No.9 Project Department, Shanghai 200082, China;*

4. *Shanghai Municipal Maintenance & Management Co Ltd, Shanghai 200082, China)*

**Abstract:** Based on the blasting construction of diaphragm wall in Puxi guiding section of East Fuxing Road crossing-river tunnel, the vibration monitoring project on the existing tunnel influenced by explosion construction was put forward, which included measure points arrangement, test method and vibration test system. Based on the monitoring data of explosion vibration, the vibration wave form, velocity, acceleration response, domain frequency and field of measure points were analyzed under the condition of three different locations and different detonators. Then according to the safety-judging criterion of explosion vibration, the conclusion that the existing tunnel could be in the base line of safety value under explosion vibration was drawn. Furthermore, the response spectrum characteristics of the existing tunnel subjected to three different explosion vibrations were concluded, these would provide references to the similar projects.

**Key words:** mechanics of explosion; tunnel engineering; explosion construction; vibration monitoring; response spectrum; diaphragm wall

\* Corresponding author: YU Hai-*tao*  
Telephone: 86-21-65980234

E-mail address: yuhaitaobest@163.com