2020年6月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)

Jun. 2020

浅表层隧道爆破对 临近古建振动影响的现场模拟试验研究

赵 凯, 张 东, 赵丁凤, 蒋鹏程, 宋 著, 陈国兴

(南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要:隧道掘进爆破施工威胁临近建筑物的安全,尤其是结构性能日益衰退的古建筑。为降低此类爆破施工的环境影响,结合南京地铁 4 号线鼓楼站爆破施工现场模拟试验,对比分析了单孔爆破和多孔孔间毫秒延迟爆破对省级木结构保护文物鼓楼的振动安全影响。根据现场地质资料,模拟爆破点选在离古建筑距离较远而地质条件相近的拟建风道口处。根据 6 种爆破强度的模拟结果,研究了地表振动衰减和古建筑振动响应规律,并以此预估实际爆破施工时古建筑的峰值振动速度。试验结果表明:2 种爆破方式均未造成古建筑鼓楼的进一步损伤,但相比于单孔装药量为 500 g 的爆破结果,总装药量为 1 100 g 的 6 孔毫秒延时爆破能显著地减小峰值振速。文物鼓楼处地表的水平和竖直向振动衰减规律均符合萨道夫斯基公式,水平振动占主导地位;单孔爆破 400 g 装药量下共振效应最为显著,速度放大效应约为 2.4 倍。

关键词:爆破试验;木结构古建;峰值振速;地震动衰减;结构安全性 中图分类号:TU411.99 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373(2020)02 - 0110 - 08

城市地铁隧道穿越建(构)筑物需考虑施工方法对周围环境的影响。当岩体较为坚硬时,通常采用爆破掘进,但其诱发的地震效应不容忽视,需严格控制隧道爆破引起周围环境的地表及结构的振动。已有研究结果表明^[1-2],爆破振动强度过大、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等,均有可能导致爆破影响区内的建筑物产生不同程度的损伤,且对木结构古建筑的爆破振动影响尤甚。这归因于木结构古建筑在自然环境及历史因素作用下通常存在不同程度的结构病害,结构耐久性和抗震性日益衰退,对爆破振动也更为敏感。因此,深入研究隧道爆破掘进时古建筑的地震动效应,优化爆破施工方案,有助于降低爆破施工环境影响。

现场模拟爆破试验是研究爆破地震效应对建(构)物影响的重要手段,并为后续的深入研究提供实测参考资料。Dowding^[3]在观测研究的基础上得出,爆破地震对 200~300 英尺外的建筑结构并无影响。娄建武等^[4]基于长期爆破振动时 2 层普通民房振动响应及结构体裂缝的实测数据,指出普通民房结构体的容许振动速度标准为 2 cm/s。谢志招等^[5]测试了国家级文物古石塔的爆破振动响应,并建议将古塔层顶的加速度和速度作为控制塔结构安全性评价标准。林键等^[6]实测了爆破地震波及其引起的多层结构的振动响应,并发现各楼层振动能量集中在 6~25 Hz 频带上。Ma et al^[7]测试了某一古桥的爆破振动响应,通过对比国内外不同规范得出了古桥的振动速度标准为 2 mm/s。上述研究表明,爆破施工下的结构动力响应既与建(构)物自身的动力特性相关,也与爆破地震动特性有关^[8]。杨佑发等^[9]通过对地面六层框架结构在爆破振动下响应的研究,指出在爆破地震波作用下,结构更多的是发生冲击破坏,累计损伤相对较小。徐学勇等^[10]通过对饱和钙质砂爆炸响应动力特性的研究,得出了不同土质对爆破波的吸收和衰

收稿日期:2019-04-29 责任编辑:车轩玉 DOI:10. 13319/j. cnki. sjztddxxbzrb. 20190080

基金项目:国家自然科学基金(51608267)

作者简介:赵凯(1982—),男,博士,副教授,研究方向为隧道抗震。E-mail;zhaokai@njtech.edu.cn

赵凯,张东,赵丁凤,等. 浅表层隧道爆破对临近古建振动影响的现场模拟试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):110-117.

减有着很大的影响。李书进等[11]结合实验和模拟手段,研究了木结构的振动特性,指出木结构破坏主要发生在榫卯节点以及墙面板上。张继春等[12]通过试验研究了渝怀铁路浅埋隧道掘进爆破地表震动效应,分析了不同类型炮孔的自由面条件对地表震动效应的影响,并指出掏槽孔爆破产生的地震效应最强烈,其地表振动速度幅值是其他各类炮孔爆破的 2 倍以上。然而,目前针对结构形式多样的古建筑的动力特性研究仍存在诸多不足,基于一般结构所建立的振动响应规律较难适用于此类古建筑,而现有规范对文物建筑安全性的控制要求尤其严格,严重制约着爆破施工方案的设计合理性与操作可行性。

针对该问题,基于南京地铁 4 号线鼓楼站隧道爆破掘进工程,通过现场试验分别研究了单孔爆破和 多孔孔间毫秒延迟爆破对邻近文物鼓楼的振动安全性影响。通过模拟爆破地点及鼓楼地点测到的峰值 振速,探讨两处地表振动衰减规律的相关性,分析不同爆破强度下文物鼓楼的振动规律,据此预估了实际 爆破时鼓楼的峰值振动速度,并提供了相应的施工建议。

1 工程概况

南京地铁 4 号线鼓楼站东侧为既有地铁 1 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。鼓楼附近的隧道拟采用矿山法施工,包括区间隧道、风道、鼓楼小里程暗挖段和三联拱部分。拟建方案中,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 m,暗挖结构与文物鼓楼的相对位置示意如图 1 所示。

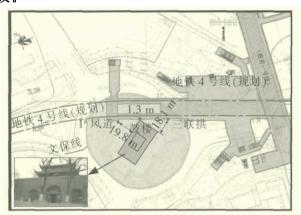


图 1 暗挖结构与文物鼓楼的相对位置示意

省级保护文物鼓楼始建于明代洪武十五年(1382年),为典型的高台基木结构:下部为明初留存的砖石砌筑城阙,上部为重建于清初的木结构碑楼。经检查,鼓楼已存在不同程度的损伤,且有多处危险点:城阙四周墙体均有裂缝,部分裂缝凿开,凿开处裂缝已进入砌体,砖块开裂;城阙顶部四周的女儿墙粉刷层大面积龟裂,石板压顶下有通上水平裂缝;碑楼檐柱、柱、木枋油漆脱落,木材开裂,表面腐朽;屋面有多处渗漏,屋架有干缩裂缝,如图2所示。



图 2 文物鼓楼病害

鉴于此,直接在拟建隧道位置进行爆破试验极有可能加重古建筑的损伤。因此,需预先选取合适的 区域进行模拟爆破,既降低爆破试验对文物古楼伤害,又能有效获取结构振动特性。

2 模拟爆破试验方案

2.1 试验场地及测点布置

模拟爆破试验的场地靠近测试结构,且场地平坦;在爆区范围内由近及远处均有测点布置;试验区与结构附近均布置测点,并估计两处环境差异对测试结果的影响^[7]。结合现场实际情况和勘查资料,选取隧道 1 "风道处为模拟爆破点,如图 3(a)所示。该路段地质情况与鼓楼处较为接近,场地空旷,地势较为平坦。其中,1 "风道的地层分布为①-1 层、①-2 层的杂填土;④-2b2 层、④-3b1-2 层粉质黏土;K-2-2 层强风化砂砾岩、K-3-2 层中风化砂砾岩、K-3-0 及 K-3-1 层中风化泥岩,模拟爆破作业在 K-3-2 层中风化砂砾岩中,围岩等级为 II ~ IV 的坚硬岩石。 鼓楼的地层分布为①-1 层杂填土;④-2b2 层、④-3b1-2 层粉质黏土;K-2-2 层强风化砂砾岩,K-3-2 及 K-3-3 层中风化泥岩。 区域场地构成上软下硬软硬不均的工作面,更有利于爆破地震动的低频成分的传递,具体场地地质条件及围岩分类见表 1。

时代成因	层号	层厚	地层名称	状态	围岩分级
$\mathbf{Q}_{4}^{\mathrm{ml}}$	①-1	1.7	杂填土	松散~稍密	VI
Q.;	①-2	3	素填土	软~可塑	VI
Q_3	(4)-2b2	5.55	粉质黏土	可塑	VI
પ્ ય	4-3b1-2	6.85	粉质黏土	可~塑性	V
	K-2-2	6, 65	砂砾岩	强风化	V
К	K-3-0	0.85	泥岩、泥质粉砂岩、砂砾岩(极破碎)	中风化	V
N	K-3-1	15.5	泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩(较完整)	中风化	$III \sim IV$
	K-3-2	20.4	砂砾岩(较破碎,局部完整)	中风化	$II \sim IV$

表 1 场地地质条件及围岩分类

为评估隧道侧穿鼓楼时爆破施工振动影响,现场模拟爆破点与风道地表各测点之间的相对位置与实际爆破点至文物鼓楼各测点之间的相对位置一致,如图 3(a)所示,模拟爆破点与假想平移鼓楼城阙的最近距离为 1.3 m,最大为 94.3 m。1 [#] 风道地表和鼓楼地表各布置 6 个测点,分别采用 F 和 A 区分;文物 鼓楼城阙以及碑楼四角,每个观测面各布置 4 个测点,分别采用 B 和 C 区分,共 8 个测点。测点数量共计 20 个,每个测点测试 2 个水平方向、1 个竖直方向的振动速度,各测点布置如图 3 所示。

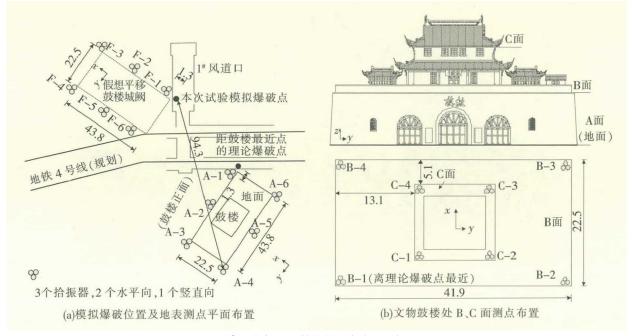


图 3 1 # 风道与文物鼓楼的测点布置(单位:m)

2.2 试爆方案及工况

根据委托方提供的资料,预先在掌子面掏槽,形成临空面。掘进进尺 0.6 m,钻孔孔深 0.7 m,孔距和最小抵抗线取 0.5 m。图 4 为试验爆破孔号及起爆顺序,共进行 6 次爆破测试。试爆分为两类:一类为单孔爆破,一孔爆破完成后再装药起爆另一孔,按照孔号顺序,1~5号孔单孔药量依次为 100 g、200 g、300 g、400 g、500 g,共 5 个工况;二类为孔间毫秒起爆的多孔试验,多孔爆破采用 6 孔毫秒延时爆破,其中孔 6~孔 10 每孔装药 200 g,孔 11 装药 100 g,共 1 100 g,各孔间延时 50 ms。

3 测试结果分析

3.1 实测结果分析

根据爆破强度及布置测点数量,本次爆破振动测试共采集数据 120组。其中,有效数据 84组,分别为风道地表的 6个测点数据(F-1~F-6), 鼓楼地表的 4个测点数据(A-1、A-3、A-4、A-6), 鼓楼碑楼的 4个测点数据(C-1、C-2、C-3、C-4)。图 5 给出了典型工况下鼓楼碑楼的速度时程曲线,例如,图中 F-2-x-200 g 表示为装药量为 200 g 工况下 F-2 测点 x 方向的速度。

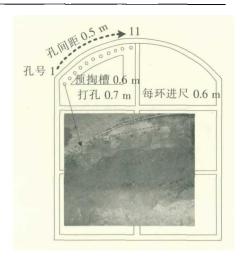


图 4 试验爆破孔及起爆顺序

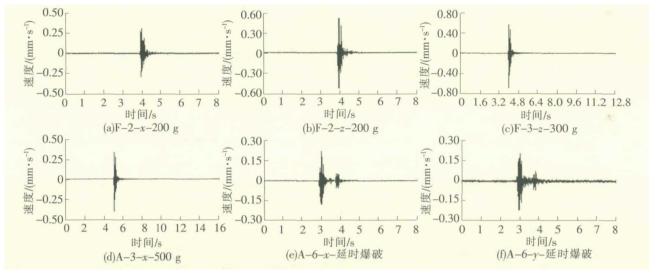


图 5 典型工况下的速度时程曲线

图 6 和图 7 分别为隧道风道和鼓楼处各测点的峰值振速。图 7(d)~图 7(f)给出鼓楼碑楼的峰值振速均小于 1.0 mm/s,满足《爆破安全规程》GB 6722—2014^[13]给出的一般古建筑的安全允许振动速度(2.0 mm/s)。

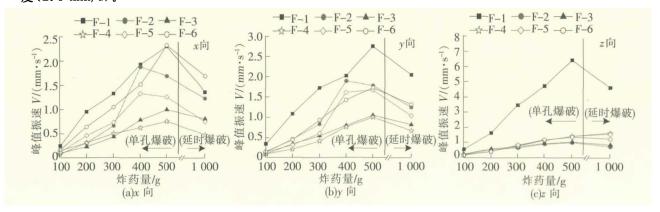


图 6 1 * 风道地表各测点的峰值振速

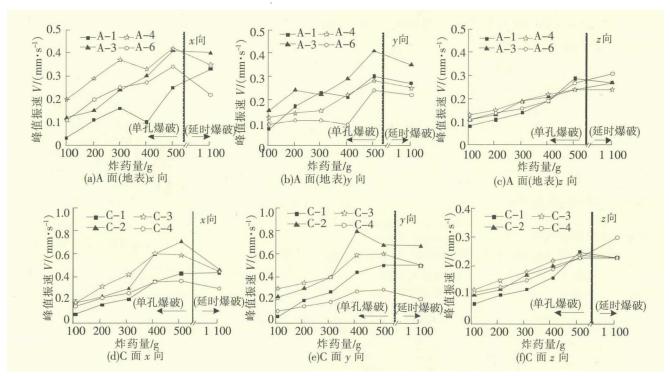


图 7 文物鼓楼地表和鼓楼碑楼各测点的峰值振速

由于岩土体材料的阻尼特性,岩土介质不断耗散爆破地震波的能量,且模拟爆破点上部的土层以 $V \sim VI$ 的软土为主,耗散作用更显著,无论是单孔爆破还是延时爆破,地表的峰值振速随爆心距的增大而迅速衰减。单孔爆破时,装药量从 100 g 递增至 500 g 时,地表和文物鼓楼各测点 x,y 和 z 向的峰值振速随装药量的增加而递增。极个别测点出现随装药量增加峰值振速降低的现象,这可能是由于周围环境振动影响导致的。而对于装药量为 1 100 g 的 6 孔毫秒延时爆破,各测点的振动速度值均比单孔 500 g 装药量测得的振动速度低,由于各孔爆破的时间差异很小,存在叠加效应,测点的峰值振速大于单孔装药量 100 g 和 200 g 的结果,更接近 300~ 400 g 装药量的峰值振速。由此可知,虽然延时爆破的装药量较大,但通过合理的爆破顺序能显著降低各测点的振动速度。

3.2 鼓楼及1#风道地表振动衰减的相关性

岩体的不均匀特性、上覆土层条件、装药方式等因素影响爆破振动衰减规律,进而影响爆区周围结构的振动特性^[1]。为了解场地条件差异性对地表振动衰减的影响规律,现对模拟爆破区域 1 [#] 风道处与鼓楼地表之间的相关性进行研究。

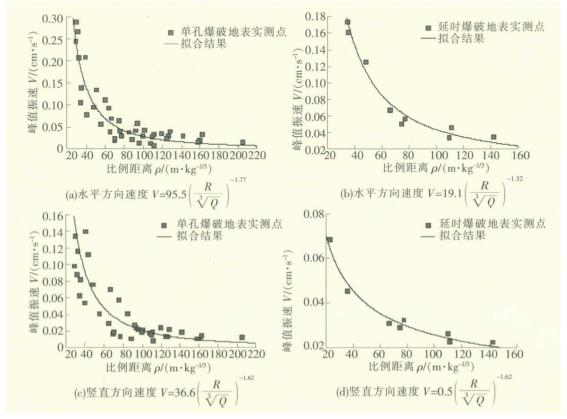
爆破地震波在岩体中的传播规律通常遵循萨道夫斯基公式,可采用现场实测数据进行回归分析,以确定该公式中的常数 K、 α 值,得到岩体中振动波的衰减规律 [1.7.13],其表达式为

$$V = K(\rho)^{-\alpha} \tag{1}$$

$$\rho = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \tag{2}$$

式中,V 为爆破振动质点最大速度;Q 为炸药量;R 为爆源距,定义为比例距离;K、 α 分别为与爆破点至测点间的地形、地质条件有关的系数、衰减指数。

基于 6 个工况下风道及文物鼓楼地表的实测数据,按照式(1)和(2)建立比例距离和峰值振速之间的关系,x、y 和z 3 个方向的振动衰减规律如图 8 所示。由图 8 可知,当比例距离相近时,风道地表和文物 鼓楼地表的峰值振速能基本吻合,2 处地表的衰减趋势连续,模拟爆破区域的地表振动特性大致能反映实际爆破区域的地表振动特性。经拟合,x 和y 向的衰减规律基本一致。

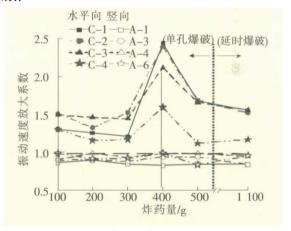


FF 8 地表的振动衰减规律

3.3 不同爆破强度下的文物鼓楼振动响应

图 9 为鼓楼碑楼与地表相应 4 个角点的水平向和竖向 的峰值振速之比。相对于地表,碑楼的水平振动有明显的放 大现象,竖向为单纯的衰减,爆破振动对碑楼水平向的破坏作 用占主导地位,这与一般建筑结构呈现的规律一致[4]。对比不 同爆破强度下的速度放大系数可知,装药量为 400 g 时,虽然 地表处水平向的峰值振速小于其他工况下地表的水平向峰值 振速(图 7(a)~图 7(b)),但能显著放大鼓楼碑楼处的峰值振 速,最大达到 2.4 倍。

根据相关单位给出的结构检测结果,碑楼的自振频率 列于表 2。由上述分析可知,不同爆破强度引起的鼓楼碑 楼的速度放大效应存在显著差异,图 10 对比了装药量为



鼓楼碑楼与鼓楼地表的峰值振速之比

300 g、400 g 和 500 g 下 C-1-y(测点 C-1,振动分量为 y 向)速度时程的 Fourier 谱。装药量为 400 g 时,结 构的振动响应接近文物鼓楼碑楼的 1 阶自振频率,且振幅较大,Fourier 谱谱值最大处的频率为 1.34 Hz; 装药量为 500 g 时,结构的振动响应更接近文物鼓楼碑楼的 2 阶自振频率, Fourier 谱谱值最大处的频率 为 2.32 Hz;装药量为 300 g 时,结构的振动响应均偏离文物鼓楼碑楼的 1 阶和 2 阶自振频率, Fourier 谱 谱值最大处的频率为 1.83 Hz。综上可知,碑楼动力响应的共振频率范围仍集中在 1 阶、2 阶频率范围 内,本次模拟爆破试验对文物鼓楼的影响很小。

	夜 4	义彻取役阵役的自颁频学		ΠZ
•		模态阶数		
方向		1 阶	2 阶	
	水平向	1.37	2. 79	
	·	±		

3.4 实际爆破位置的鼓楼碑楼振动特性的预估

对于一个线性系统,其动力响应与输入的振动强度成比例关系^[14]。因此,通过模拟爆破位置地表相应的峰值振速值能更好预测实际爆破时文物鼓楼地表的峰值振速。假设鼓楼碑楼在各工况下仍为线性系统,其放大效应不变,各质点的峰值振速预测值可按比例换算,并列于表 3。

当炸药量 300 g 及以下时, 鼓楼碑楼各测点的峰值振速均小于 3 mm/s; 炸药量 400 g 时振动速度峰值小于 5 mm/s; 毫秒延时爆破时振动速度峰值也基本低于 3 mm/s。单孔 300 g 炸药量或毫秒延时爆破对文物鼓楼安全性的影响较小。

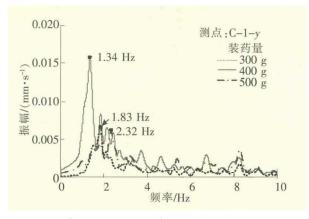


图 10 不同爆破强度下 C-1-y 测点速度时程的傅里叶谱

次3 双俊辉俊的峰追派还顶测诅						11	
测点	方向 -	炸药量					7.T. rs-1
		100 g	200 g	300 g	400 g	500 g	- 延时
C-1	\overline{x}	0.33	1. 20	1, 61	4.69	3. 87	2. 11
	у	0.45	1.37	2, 10	4.94	4, 64	3. 19
	z	0.19	0.59	1.18	1.58	2.21	1.57
C-2	x	0, 15	0.31	0,66	1.87	1. 68	1. 22
	у	0.14	0.45	0.83	1.89	1.78	1. 24
	z	0.20	0.54	0.63	0.88	0.98	0.71
C-3	x	0.12	0, 46	0.73	1.32	1. 25	0. 74
	у	0.14	0.31	0.60	1.61	1.67	1.03
	z	0.17	0.41	0.76	1.12	1.40	1.53
C-4	x	0. 22	0.75	1.23	2, 42	2, 61	1. 98
	у	0.20	0.51	1.10	2.28	1.95	1.54
	2	0, 16	0.37	0. 77	1, 16	1. 14	1, 17

m/s

4 结论

以南京地铁 4 号线鼓楼站隧道爆破施工为背景,通过不同强度的现场模拟爆破试验,研究了爆破地震动特性对文物鼓楼振动响应规律的影响。由实测数据和《爆破安全规程》的规定,以及鼓楼碑楼振动响应的频谱特性可知,此次模拟爆破试验并未加重古建筑的损伤,可作为实际爆破方案选取装药量的依据,并为研究类似古代建筑物的振动特性提供较为全面的实测资料。总结爆破影响区范围内地表及文物鼓楼的振动规律如下:

- (1)对比不同装药量与爆破方法,采用 6 孔毫秒延时爆破(1 100 g 装药量)的地表峰值振速与单孔爆破 300~ 400 g 的结果接近,能显著减小地表峰值振速。
- (2)当爆心距离相近时,模拟爆破区域与鼓楼地表的峰值振速接近,爆破振动的地表衰减规律具有连续性。
- (3)文物鼓楼的水平振动呈放大效应,竖向振动呈衰减效应。对比 300 g、400 g 和 500 g 装药量下结构速度响应的频谱特性,装药量 400 g 时将引起鼓楼碑楼在 1 阶固有频率附近产生较大的振幅,速度放大效应最为显著,达 2.4 倍。
- (4)根据鼓楼碑楼的峰值振速的预测结果,在爆破强度允许的范围内,建议采用单孔 300 g 炸药量或 总装药量为 1 100 g 的毫秒延时爆破。

参 考 文 献

- [1]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.
- [2]孔大庆,管晓明,傅洪贤. 隧道竖向爆破振动下二层砌体房屋动力反应[J]. 土木工程学报,2015,48(S1): 326-330.
- [3] Dowding C H. Suggested method for blast vibration monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(2): 145-156.
- [4]娄建武,龙源,徐全军. 普通民房在爆破地震波作用下的振动破坏分析[J]. 解放军理工大学:自然科学版,2001,2(2): 21-25
- [5]谢志招,姚道平,张艺峰. 爆破振动对古建筑物影响测试和分析方法的研究[J]. 爆破,2007,24(4):77-81.
- [6]林键,林从谋,林丽群. 爆破振动荷载作用下 3~4 层房屋结构响应测试研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 48-51.
- [7] Ma J, Luan L F, Li X H, et al. Monitoring and analysis of historic building vibration influenced by blasting in complex urban environment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2746;1558-1562.
- [8]魏海霞. 爆破地震波作用下建筑结构的动力响应及安全判据研究[D]. 青岛:山东科技大学,2010.
- [9]杨佑发,崔波. 框架结构爆破地震的损伤评估[J]. 振动与冲击,2009,28(10):191-194.
- [10]徐学勇,汪稔,王新志,等. 饱和钙质砂爆炸响应动力特性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(10),2953-2959.
- [11]李书进,铃木祥之. 足尺木结构房屋振动台试验及数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2010,43(12):69-77.
- [12]张继春,曹孝君,郑爽英,等. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(22): 4158-4163.
- [13]中华人民共和国行业标准编写组. GB 6722-2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [14] Jordan J W, Sutcliffe D J, Mullard J A. Blast vibration effects on historical buildings[J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2009, 10(1): 75-84.

Field Test Study on Influence of Superficial Tunnel Blasting on Vibration Response of Adjacent Ancient Building

Zhao Kai, Zhang Dong, Zhao Dingfeng, Jiang Pengcheng, Song Zhu, Chen Guoxing

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

Abstract: Tunneling and blasting construction threatens the safety of adjacent buildings, especially ancient buildings with declining structural performance. In order to reduce the environmental impact of such blasting construction, this paper reports the field test of blasting construction of Gulou Station of Nanjing Metro Line 4 and studies the impacts on the vibration safety of the provincial protection cultural relic drum building due to single-hole blasting and millisecond delay blasting between porous holes, respectively. According to the on-site geological data, the simulated blasting point was selected at the proposed airway opening which was far away enough from the cultural relic drum building but still of the similar geological conditions. According to the test results of six kinds of blasting strength, the vibration response law of the surface of the simulated blasting point and the surface of the Drum Tower and the monument building were studied, and the peak vibration velocity of the actual blasting position of the Drum Tower was estimated. The test results show that the Drum Tower is still within the influence range of the blasting vibration, but the construction will not cause further damages. Compared with the blasting result with a single hole charge of 500 g, the 6-hole millisecond time-delay blast with a total charge of 1 100 g can significantly reduce the peak vibration velocity. The horizontal and vertical vibrations of the surface of Drum Tower follow the Sadowski formula, with the horizontal vibration being the dominant one. The velocity in the case of the single-hole blasting with 400 g charge is amplified by 2. 4 times which causes the most significant resonance effect in all cases.

Key words: in-situ blasting test; historical timber building; peak particle velocity; ground vibration attenuation; structural safety