

# 隧道爆破施工影响下地面既有 高耸结构抗震性能分析\*

刘春生<sup>1,2</sup>, 魏晓刚<sup>3,4</sup>, 王爱文<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 河南能源义马煤业集团股份有限公司, 河南 义马 472300;  
3. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 河南 郑州 450046; 4. 中国地震局工程力学研究所  
中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为研究地下隧道爆破施工影响下的气象塔高耸结构抗震性能的安全问题, 建立隧道爆破施工地震动荷载的确定方法以及隧道施工爆破振动能量的计算方程, 重点探讨了地下隧道爆破施工影响下的气象塔高耸结构的位移场分布与地震动力响应, 对比分析了地下隧道爆破施工影响下气象塔不同位置的动力响应的差异。结果表明: 爆破地震波属近源脉冲型破坏地震波, 横波的破坏能力与其破坏能量及强度有关, 高细型的气象塔结构质量和刚度突变的结构薄弱层处应力突变现象明显, 顶部雷达受鞭梢效应的影响较大, 爆破地震动对其动力响应的放大效应明显, 严重降低了地面高耸结构的抗震性能。

**关键词:** 隧道施工; 爆破地震动; 高耸结构; 数值模拟; 抗震性能

**中图分类号:** V352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)03-0502-07

## 0 引言

随着国家对通讯产业的大力投入, 高耸结构在电信、广播以及气象部门等领域得到广泛使用。与此同时, 由于国内城市地下空间的迅猛发展, 越来越多的工程结构不可避免要面临地铁施工建设所带来的各种风险。爆破施工是地下隧道工程比较常用的施工作业方法(何满潮, 钱七虎, 2010), 但是爆破施工作业所产生的地震动对地面建筑的危害性尚不知晓, 尤其是对于高耸结构抗震性能的影响更是没有可靠的理论计算依据。

国内学者对爆破地震动对地面建筑动力响应的影响及高耸结构抗震性能的研究已经开展了一定的研究。李璐(2011)对隧道爆破施工影响下气象塔的动力响应(变形、振速、应力)进行了数值模拟, 对比分析了不同施工方案影响下的气象塔的安全性; 梅钢(2011)对多种荷载工况下济源气象塔的抗震性能进行了数值计算, 指出了气象塔塔身结构为其抗震性能薄弱部位; 魏晓刚等(2015)基于现场实测与数值计算对比分析了

爆破开采对煤矿采空区地面建筑抗震安全性的影响, 指出了爆破开采地震波的冲击破坏效应严重劣化了煤矿采动建筑的抗震性能; 代数红等(2013)通过现场监测爆破地震波, 指出框架结构及填充墙体的自重周期是决定建筑物安全性的根本因素。曾晟等(2008)通过现场监测矿区地下爆破开采所引起的爆破振动速度, 确定了可以采用微差爆破技术来降低爆破地震动对地面建筑物稳定性的影响。

目前, 关于爆破地震动对地面建筑物影响的研究, 多集中于爆破地震动作用下多层建筑物的动力响应的研究(李璐, 2011; 梅钢, 2011; 魏晓刚等, 2015; 代树红等, 2013; 曾晟等, 2008; 邹育麟等, 2011; 邵良杉, 赵琳琳, 2013, 2014; 姜德义等, 2008; 叶洲元, 周志华, 2015), 而对于在爆破地震动作用下高耸结构的动力响应及抗震性能劣化的研究则相对较少。鉴于此, 笔者针对高耸结构抗震性能的影响因素, 采用爆破振动理论、结构动力学建立爆破地震动作用下高耸结构的能量方程及地震动灾害荷载的确定方法, 重点探讨爆破地震动影响下高耸结构的动力响应的成灾机制。

\* 收稿日期: 2016-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474045)和河南省高等学校重点科研项目(16A560013, 16A560012)联合资助。

# 1 隧道爆破施工的能量分析及地震动荷载的确定

## 1.1 隧道爆破地震动的能量分析

爆破施工引起的地震波可以视为复杂的脉冲波，由此而产生的爆破地震动是蕴含着巨大破坏能量的灾害荷载，所以爆破地震动的产生、在岩层介质中的传播以及对地面建筑物的动力破坏都伴随着能量的迁移、转化和耗散（何满潮，钱七虎，2010）。

爆破地震动对地面建筑物的破坏主要体现在其动能上，对于传播介质中质量为  $\Delta m$  的单位质点，爆破发生的某一时刻所产生的爆破振动所蕴含的能量为：

$$E = \frac{1}{2} \Delta m v^2(t) \tag{1}$$

式中： $E$  为爆破开采地震动在介质传播某一时刻的能量； $\Delta m$  为单位质点的质量； $v(t)$  为  $t$  时刻爆破开采地震动的振动速度。

通过（1）式可以看出，爆破地震动所具有的振动能量与振动速度的平方成正比，此时可以略去常数及单位质点的质量，由此可以得到：

$$E = v^2(t) \tag{2}$$

则峰值振动速度所对应的峰值能量为：

$$E_m = v_m^2 \tag{3}$$

由于现场监测的爆破振动测试值多为离散信号，所以需要在一定的时间段内来判断振动能量的大小，此时可以得到：

$$E_T = \int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt \tag{4}$$

式中： $E_T$  为某一时段内的爆破振动所蕴含的总能量； $t_1$ 、 $t_2$  分别为某一时段内的起始和结束时刻。

可以得到爆破地震动初始传播所具有的总能量为：

$$E_0 = \int v^2(t) dt \tag{5}$$

最终可以得到：

$$E_0 = \left( \sum v^2(t_i) - \frac{v^2(t_0) + v^2(t_m)}{2} \right) \times \Delta t \tag{6}$$

式中： $E_0$  为爆破施工开始到地震动结束的这段时间区段内的爆破振动能量。

爆破振动能量的计算方程可以直接反映爆破施工某一时刻的最大瞬时输入能量，为分析下文爆破地震动作用下高耸结构气象塔的动力演化过程提供理论基础。

## 1.2 隧道爆破施工地震动荷载的确定

考虑到爆破荷载传播的特殊性与衰减性，基于爆破振动理论可知，爆破振动荷载可以视为三角形荷载，其峰值应力  $\sigma_{\max}$  的计算公式为（何满潮，钱七虎，2010）：

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{Z^3} + \frac{844.81}{Z^3} + \frac{2}{Z} - 0.8034 \tag{7}$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \tag{8}$$

式中： $Z$  为比例距离； $R$  为起爆位置到爆破荷载作用在结构的距离； $Q$  为爆破施工所使用的炸药用量。如果为分段起爆， $Q$  为最大段的装药量；如果为齐发爆破， $Q$  为总装药量。

在隧道爆破施工过程中，总装药量  $Q$  可以确定为：

$$Q = kLS \tag{9}$$

式中： $k$  为单位体积岩石爆破时的炸药平均消耗量； $L$  为爆破施工掘进距离； $S$  为隧道开挖断面面积；

隧道多采用分段爆破施工的方法，在有限元数值模拟计算的过程中，模拟隧道爆破施工的开挖过程主要采用分断面多次爆破施工的方法。笔者在前期对爆破地震动对建筑物动力破坏影响的研究基础上发现（魏晓刚等，2015）：爆破地震动的动力破坏能力与工程结构的动力速度响应密切相关（爆破安全规程，GB 6722—2014），所以采用爆破地震动作用下工程结构的振动速度及位移响应来衡量爆破振动强度对高耸结构气象塔的动力破坏。

此时爆破施工影响下高耸结构气象塔的峰值速度动力响应  $v$ 、爆破地震波在传播的过程中引起岩层振动的振幅  $A$  及振动周期  $T$  的关系为：

$$v=2\delta\frac{A}{T}$$

(10)

式中： $\delta$  为与岩土层的力学性能相关的调整系数；岩层的力学性能发生改变时，岩层振动的振幅  $A$  及振动周期  $T$  呈正比例变化；一般情况下  $\frac{A}{T}$  变化较小，建筑物的峰值速度  $v$  变化较稳定。

2 有限元数值计算模型

2.1 工程概况

某气象观测站处于地铁规划区域内（距离隧道为 28.3 m），气象塔高 110 m（含雷达顶高），拟开挖的地铁隧道的地质条件理想，以花岗岩（微风化）为主，需要采取爆破施工方法。由于地铁隧道附近存在着大量的既有建筑以及气象塔，所以爆破施工的强度对地面建筑及气象塔的安全性保障至关重要，基于《爆破安全规程》（GB 6722—2014）来确定的本次爆破施工计算的总持续时间为 2.0 s（分 2 次进行爆破施工，其中第一次爆破施工时间为 0.12 s，第二次爆破施工持续时间为 0.08 s）。

为了保证数值计算模型的合理性，在尽可能节约计算时间成本的基础上，设置数值计算模型的尺寸为地铁隧道结构尺寸的 5 倍，其边界条件为黏弹性的人工边界（其中地表及地铁隧道的内部边界为自由边界）（何满潮，钱七虎，2010；邹育麟等，2011）。采用有限元数值计算模拟软件 ANSYS/LS-DYNA，建立有限元数值计算模型（图 1），相关材料的物理力学性能参数见表 1。

在有限元模型中，隧道的围岩介质采用摩尔-库伦本构关系来描述其弹塑性力学特性，在 ANSYS/LS-DYNA 中隧道的衬砌结构采用 PLANE42 单元，钢结构的气象塔构件采用 BEAM3 来实现，所建立的有限元分析模型详见图 1。

表 1 岩层的力学性能参数  
Tab. 1 Mechanical parameters of rock

岩层	厚度/ m	密度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E/\text{Pa}$	泊松比
强风化岩	2.0	22 000	$2 \times 10^9$	0.35
弱风化岩	2.0	25 400	$4 \times 10^9$	0.30
微风化岩	—	25 700	$3 \times 10^{10}$	0.20
锚杆加固区	4.0	26 000	$3.6 \times 10^{10}$	0.167

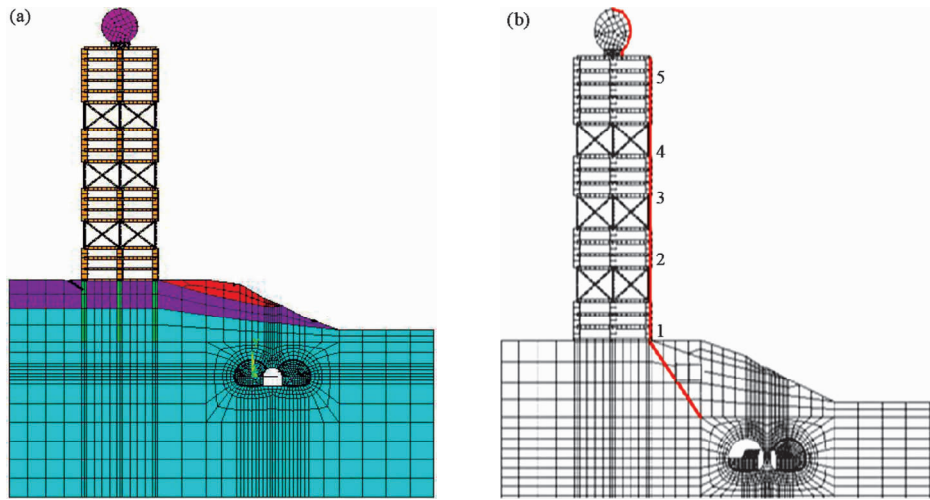


图 1 隧道及地面高耸结构气象塔的数据监测点

Fig. 1 Monitoring site of ground meteorological tower and tunnel

2.2 气象塔高耸结构的自振频率分析

为了探讨气象台高耸结构在爆破施工作业下的动力响应，需要对气象塔的结构动力特性进行分析，所以分别提取了不同荷载工况下的 30 阶气象塔高耸结构的自振频率变化趋势如图 2 所示。

通过分析图 2 不同荷载工况下（2 次爆破作业所引发的爆破地震动）气象塔高耸结构自振频率的变化趋势发现：第一次爆破地震动作用下气象塔的自振频率呈现出“下降-平稳变化-下降-平稳变化”的 4 个阶段的变化趋势，第二次爆破地震动作用下气象塔的自振频率呈现出“迅速下

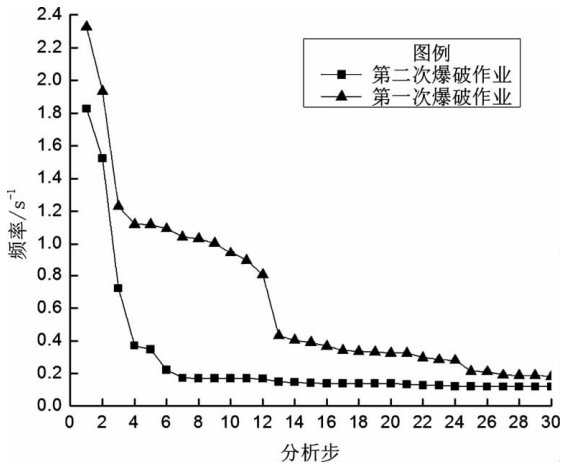
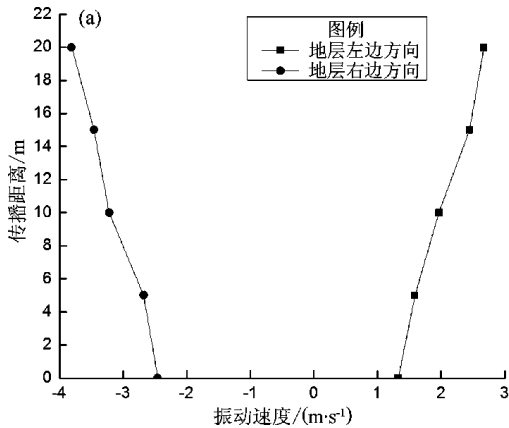


图2 气象塔高耸结构自振频率的变化

Fig. 2 Variation of structural vibration frequency of ground meteorological tower

降－平稳变化”2个阶段的变化趋势，并且2次爆破地震动作用下气象台高耸结构的自振频率最终



有趋向于一致的变化趋势。根据结构动力学可知，建筑结构自振频率的计算公式为：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{k/m}}{\Delta 2\pi}$$
 (11)

由此可以判断：在爆破地震动作用下气象塔高耸结构自振频率不断降低，说明其刚度出现劣化现象，此时气象塔高耸结构发生损失破坏现象，需要在其动力学性能分析过程中重点关注其抗震性能的变化。

2.3 气象塔高耸结构的爆破地震动力响应分析

地下隧道在爆破施工的过程中，爆破地震波的传播衰减规律以及高耸结构气象塔的动力学响应是分析隧道爆破施工对地面高耸结构抗震安全性能影响的关键因素。图3为爆破地震波的传播衰减过程以及高耸结构气象塔的动力学响应。

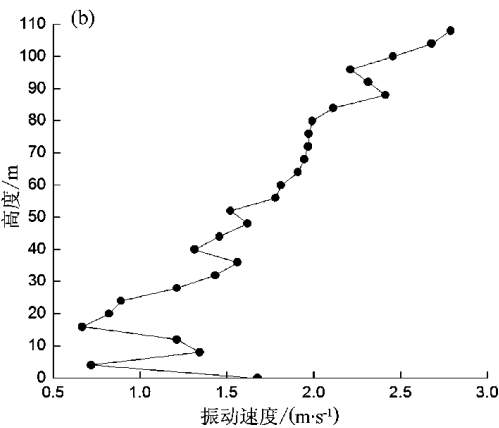


图3 爆破地震波的传播及高耸结构气象塔的动力响应

Fig. 3 Spread of the blasting seismic wave and dynamic response of the meteorological tower

通过分析图3a爆破地震波的传播衰减过程发现：在短距离范围（20 m）临近地表的区域内，地下隧道爆破施工过程中所产生的爆破地震波传播速度呈现出逐渐增加的趋势，说明浅层地表对爆破地震波的放大效应较为显著，此时对地面的高耸结构气象塔的危害较大，容易引起地面高耸结构发生冲击破坏现象。

通过分析图3b高耸结构气象塔的爆破地震动力响应发现：气象塔高耸结构的爆破地震动力响应振型较为复杂。随着气象塔高度的增加，其爆破地震速度响应呈现出“迅速减小－迅速增加－缓慢减小－平缓变化－迅速增加”5个阶段的变化趋势，气

象塔的峰值速度的最大值出现在顶部，峰值速度的最小值在气象塔的中部。出现以上现象的主要原因是高耸结构气象塔的结构刚度沿着高度方向是不均匀变化的，爆破地震动对结构的动力响应影响跟结构的刚度密切相关；高耸结构气象塔的顶部雷达天线质量和刚度突变，由于“鞭梢效应”的存在，其顶部的速度响应出现陡增突变的现象。以上现象说明在隧道爆破施工影响下，高耸结构气象塔的爆破地震峰值速度响应随着其高度的增加而增大，同时气象塔高度对其峰值速度响应的放大效应较为显著，尤其是气象塔的顶部雷达，爆破地震动对其动力响应的放大效应明显。

位移响应是衡量高耸结构动力安全性能的重要参考指标。在高耸结构气象塔的爆破地震动力速度分析的基础上,为了更深入了解影响隧道爆破施工的不同阶段对高耸结构动力响应的影响,

分别探讨了不同时期的高耸结构气象塔的爆破地震动位移(水平和竖直方向)响应。图4为爆破地震动影响下高耸结构气象塔的位移动力响应云图。

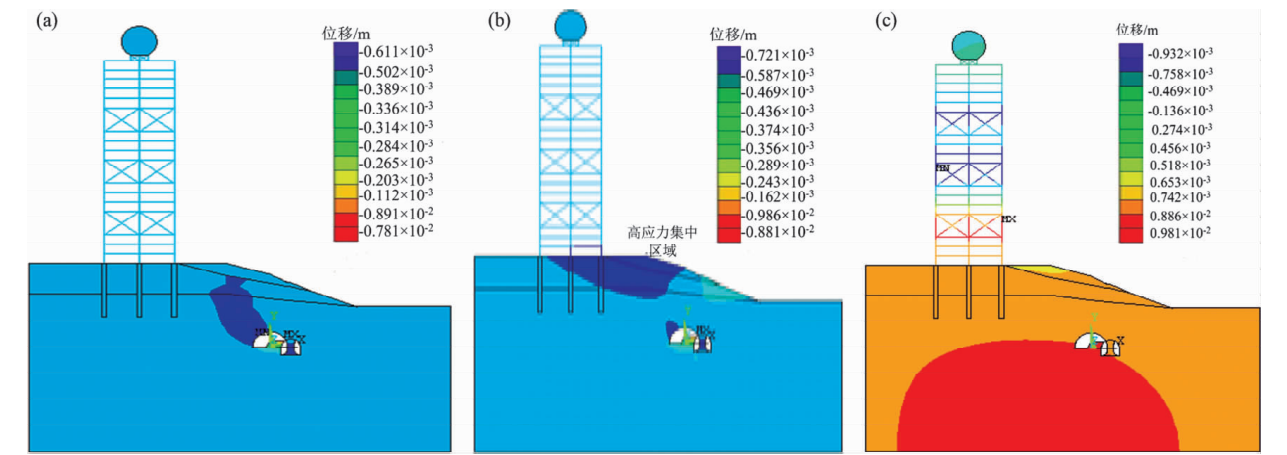


图4 隧道爆破施工后地层-气象塔的位移变化

Fig. 4 Displacement of stratum and meteorological tower after the tunnel blasting construction

通过分析图4爆破施工阶段爆破地震动影响下高耸结构气象塔的水平位移响应云图发现:在隧道爆破施工的过程中,爆破地震动从起爆位置以爆破地震波的形式不断向外传播,高耸结构气象塔的爆破地震水平位移响应从塔底逐渐蔓延至塔顶雷达天线部位,其中塔顶雷达天线部位的峰值位移响应最大,其值为1.62 cm。之后高耸结构气象塔的水平位移响应逐渐减小,说明隧道爆破施工的动力影响逐渐降低衰减。由于高耸结构气象塔的体型属于高细型的钢结构,加之其塔身与上部雷达存在着质量和刚度

突变,导致其结构薄弱层处应力突变现象明显,加之其顶部雷达受鞭梢效应的影响较大,所以需要在其结构薄弱层位置采取合理有效的补强措施(加强节点的锚固及合理的层间隔减震措施),尤其是在进行设计时,需要进行气象台高耸结构的结构动力特性分析及时程分析,确定气象台塔劣化区域,同时应该在塔架的连接转换部位以及劣化区域采取构造加强措施(焊接强化连接或者高强螺栓连接等),避免连接处出现连接件的脱落现象,进而保证高耸结构气象塔结构的良好抗震性能。

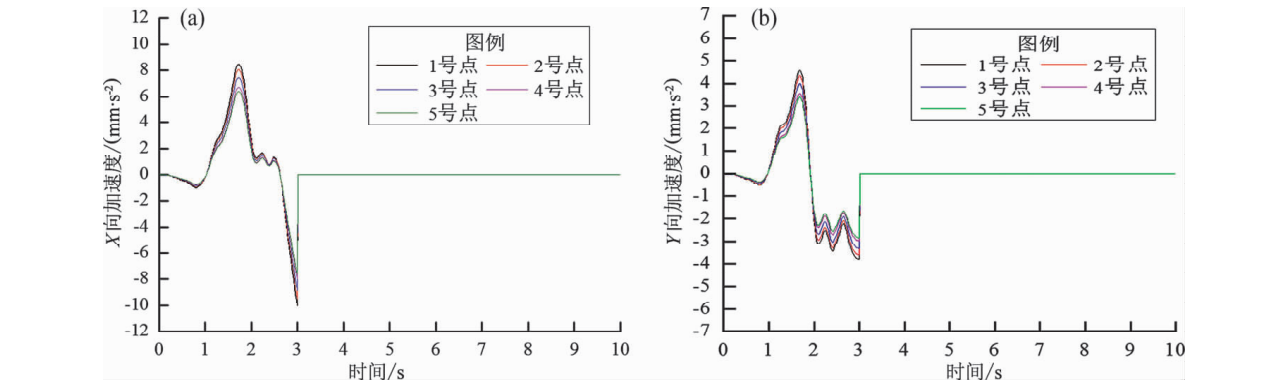


图5 爆破地震动影响下气象塔结构的加速度时程曲线

Fig. 5 Time history curve of acceleration of the meteorological tower structure under the influence of blasting seismic wave

通过分析图 5 爆破施工影响下气象塔的加速度动力响应发现：隧道爆破施工影响下高耸结构不同位置的位移动力响应基本一致，跟爆破地震波的波形比较接近，但峰值加速度响应的最大值存在着时间滞后效应，这主要由于爆破地震波属于近源脉冲型破坏地震波（何满潮，钱七虎，2010），破坏能量集中于爆破施工的过程中，当爆破地震波传播至高耸结构气象塔时，其受迫振动逐渐增加（结构自身的动力响应从底部到顶部呈现出增加的趋势）；随着爆破地震波传播向远处，高耸结构气象塔的加速度动力响应逐渐降低，并最终趋于 0（爆破施工 3 s 后）。

通过分析表 2 隧道爆破施工过程中高耸结构气象塔不同位置（雷达顶、气象塔顶、气象塔中部以及气象塔下部）的动力响应（位移、速度）发现：在隧道爆破施工过程中，随着高耸结构气象塔高度的增加，其 X 向和 Y 向的峰值速度响应在

逐渐增加（Y 向最大值峰值速度响应在气象塔中部出现奇异点），峰值位移响应则在气象塔中出现了跳跃现象（奇异点）。出现以上动力响应差异的主要原因是由于爆破施工产生的近地表爆破地震波属于短时期的近源脉冲型破坏地震波，其在地表的动力破坏放大效应主要集中于其横波，加之高耸结构由于质量和刚度差异而在气象塔顶部产生的鞭梢效应，导致其 X 向的爆破动力响应（峰值速度响应及峰值位移响应）逐渐增加；在气象塔中部出现的动力响应跳跃现象（奇异点）主要是由于气象塔中部的局部刚度与其它位置差异较大，其刚度没有按照高度均匀变化导致的。爆破地震波的纵波虽然传播速度较快，但其破坏能量衰减较快，加之建筑结构对纵向地震波的敏感度较低，所以其纵向爆破地震波作用下高耸结构的动力响应较弱，需要对其横向爆破地震波的破坏效应予以重点关注及控制。

表 2 隧道爆破施影响下气象塔监测点的动力响应  
Tab. 2 Dynamic responses of monitoring points of the meteorological tower under the influence of tunnel blasting construction

不同监测点	峰值速度响应/cm·s <sup>-1</sup>				峰值位移响应/cm			
	X 向最小值	X 向最大值	Y 向最小值	Y 向最大值	X 向最小值	X 向最大值	Y 向最小值	Y 向最大值
气象塔下部	-0.72	-0.45	-0.22	0.82	-2.51	1.57	-1.76	1.92
气象塔中部	-1.11	0.77	-0.41	0.66	-0.72	0.46	-2.22	1.84
气象塔顶	-1.35	0.85	-0.45	0.76	-0.92	1.56	-2.13	1.86
雷达顶	-1.84	0.96	-0.48	0.77	-1.61	1.98	-2.42	1.69

3 结论

基于隧道施工爆破振动能量的计算方程，通过探讨地下隧道爆破施工影响下的气象塔高耸结构的位移场分布与地震动力响应，以及对比分析地下隧道爆破施工影响下气象塔不同位置的动力响应的差异发现：

- （1）爆破地震动的动力破坏能力不仅与其灾害破坏能量及强度有关，同时也与地面建筑结构的结构动力特性密切相关。
- （2）爆破施工产生的近地表爆破地震波属于短时期的近源脉冲型破坏地震波，其在地表的动力破坏放大效应主要取决于其横波效应以及土层

的软硬程度。

（3）高细型的钢气象塔结构由于自身质量和刚度在高度方向的差异，其结构薄弱层处应力突发现象明显，顶部雷达受鞭梢效应的影响较大，爆破地震动对其动力响应的放大效应明显。

参考文献：

代树红,王召,王振伟,等. 2013. 露天矿爆破地震波作用下框架建筑的安全性研究[J]. 中国安全科学学报,23(5):44-49.

何满潮,钱七虎. 2010. 深部岩体力学基础[M]. 北京:科学出版社,1-10.

姜德义,侯亚彬,任松,等. 2008. 城市大跨度隧道爆破对地面建筑物影响的研究[J]. 中国安全科学学报,18(7):99-104.

李璐. 2011. 隧道施工对既有气象雷达塔的影响研究[D]. 兰州:兰州交通大学.

梅钢. 2011. 济源市气象塔抗震性能的研究[D]. 郑州:河南工业大学.

- 邵良杉,赵琳琳. 2013. 露天采矿爆破振动对民房破坏的旋转森林预测模型[J]. 中国安全科学学报,23(2):58-63.
- 邵良杉,赵琳琳. 2014. 爆破振动对民房破坏的鱼骨图-SVM 预测模型[J]. 中国安全科学学报,24(8):56-61.
- 魏晓刚,麻凤海,刘书贤. 2015. 爆破开采对采空区地面建筑抗震性能的影响分析[J]. 中国安全科学学报,25(9):102-108.
- 叶洲元,周志华. 2005. 爆破震动安全距离的优化计算[J]. 中国安全

- 科学学报,15(3):57-60.
- 曾晟,杨仕教,谭凯旋,等. 2008. 爆破振动对地表建筑稳定性影响试验[J]. 采矿与安全工程学报,25(2):176-179.
- 邹育麟,何川,汪波,等. 2011. 新建隧道基于爆破震动对气象塔影响的动力响应分析[C]//全国土木工程研究生学术论坛. 大连:大连型 I 大学.
- GB6722—2014. 爆破安全规程[S].

## Seismic Performance Analysis of Ground In-situ Tall Structures Caused by Tunnel Blasting Construction

LIU Chunsheng<sup>1,2</sup>, WEI Xiaogang<sup>3,4</sup>, WANG Aiwen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(2. Henan Energy Yima Coal Industry Group Limited by Share Ltd, Yima 472300, Henan, China)

(3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, Henan, China)

(4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

### Abstract

Aimed at the problem of seismic safety research of seismic performance analysis of ground in-situ tall structures caused by tunnel blasting construction, we establish the analysis method of determining vibration load method of tunnel blasting work site and calculation equation of blasting vibration energy of tunnel construction, and then we discuss displacement field distribution and seismic dynamic response of tall structures of meteorological tower under the influence of underground tunnel blasting construction. At last, we make comparative analysis of different dynamic responses at different positions of meteorological tower under the influence of underground tunnel blasting construction. The results show that the blasting seismic wave belongs to proximal pulse type, and the destructive potential ability of shear wave due to its failure energy and strength. Stress mutation phenomenon at the weak layer of high thin type structure of meteorological tower is obvious whose quality and stiffness mutated. And the top radar is strongly influenced by the lash effect and the amplification effect of blasting seismic dynamic response is obvious which reduces the seismic performance of ground high-rise structure seriously.

**Keywords:** tunnel construction; blasting vibration; tall structures; numerical simulation; seismic performance