

文章编号: 1001-1455 (2000)04-0333-05

# 建筑结构对爆破震动的响应预测<sup>\*</sup>

刘 军<sup>1</sup>, 吴从师<sup>2</sup>, 高全臣<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学北京校区, 北京 100083;

2. 长沙矿冶研究院, 湖南 长沙 410012)

摘要: 介绍了一种在爆前即能预测建筑结构对爆破震动的响应的方法。通过预测结构地基的震动波形计算结构的抗震设计反应谱, 用动力分析法计算结构在爆破震动作用下的响应。预测结果为结构所受内力的定量数值, 并且还可通过不同延期时间下的预测结果比较, 为爆破设计选取最佳延期时间。实际应用表明, 预测结构可靠。此方法可用于预测结构在爆破震动作用下的安全性。

关键词: 建筑结构; 爆破震动; 结构响应; 延期时间

中图分类号: TU311.3 文献标识码: A

## 1 引 言

爆破地震效应的预测及相应标准的建立已成为爆破工程中不容忽视的重要环节, 直接关系到爆破工程能否安全顺利地进行以及能否获得预期的经济效益, 同时也对爆破地震效应的危害做出真实、客观的评价, 消除人们的疑虑。由于爆破地震波在地层中的传播是一个复杂的力学过程, 土岩介质的动力学性质很难用计算方法精确确定, 所以目前国内外广泛采用单一参数法评估爆破地震效应。这一方法通过大量的现场实验和观测, 将建筑物的破坏与爆破地震的强度联系起来进行统计分析, 确定某个单一的地震强度参数作为评价爆破地震安全的控制参量。大量的测试资料和工程实践表明, 地面最大震动速度与建筑结构破坏的相关性最好, 所以现在广泛采用最大震速作为结构安全的评定标准<sup>[1]</sup>。

单一参数法不能解决结构对不同的震动频率响应不同的问题, 没有考虑结构的动力特性和材料性能。因而这种方法给出的指标往往带有片面性和保守性, 对不同场区和不同类型的建筑结构适应性较差, 实际应用时, 只能凭设计施工人员的经验予以修正。

为了弥补单一参数法的不足, 作者试图建立一个综合模型, 实现在爆前即能预测结构的爆破震动响应。这个模型考虑了爆源与结构之间的地质条件、结构对不同震动频率的响应。这个模型包括: 预测结构地基的震动波形, 即在爆破施工前做单孔或单排孔爆破实验, 测得结构地基的单孔或单段爆破波形, 认为生产爆破的波形可由单孔或单段爆破波形的叠加得到, 然后由此预测波形计算结构的抗震设计反应谱, 再应用动力分析法计算结构的内力。作者用 FORTRAN 语言编写了整个预测程序。

\* 收稿日期: 1999-12-17; 修回日期: 2000-03-16

作者简介: 刘 军 (1969—), 男, 博士研究生。

## 2 结构地基的爆破震动预测

现代地震学提供了各种各样计算理论地震波形的方法,这些方法都需要震源与传播介质的参数。在爆破工程中,排炮地震波的形成是一个非常复杂的过程,至今不甚明了。为了克服这些困难,作者建立了一个用于预测爆破震动的现场实验与理论分析相结合的综合模型。这个模型以叠加单孔临空爆破波形为基础,假定单孔爆破的震动波形在给定位置能够复现。把测震仪安置在可能受爆破震动危害的结构地基上,在生产爆破前,做单孔临空爆破实验,得到结构地基的单孔爆破波形记录。这个波形记录包括了诸多复杂信息,如地震波能量辐射的复杂机理以及传播过程中的过滤效应等。认为排炮的震动是单个炮孔震动效应在时域内的叠加<sup>[2]</sup>,在爆区位置变化不大的情况下,可采用同一单孔爆破波形预测。如爆区位置变化较大,则应在新爆区位置重新做单孔爆破实验(爆区变化范围的定量数值有待进一步研究)。忽略先爆炮孔对后继炮孔的爆破地震波形传播路径的影响。在本文的实例中,多排微差爆破的震动波形通过叠加单段爆破波形进行预测,单段指处于同一延期段的炮孔。综上所述,结构地基的震动波形可表示为

$$U = U_s \sum_{i=1}^n a_i \delta(t - t_i) \quad (1)$$

式中:  $U_s$  为地基某点的实测单孔或单段爆破波形;  $n$  为多排微爆破的段数;  $a_i$  为第  $i$  段爆破震动比例系数,考虑到爆破震动参数与爆破药量、距离的非线性关系,由下式确定

$$a_i = (Q_i / Q_0)^{0.533} \quad (2)$$

$Q_i$  为生产爆破的第  $i$  段药量,  $Q_0$  为用于预测该次爆破震动的单孔或单段爆破药量,系数 0.533 由在预测位置实测的两个不同药量的、爆源位置相邻的两次单段爆破的震动波形经相关分析移轴后,对应峰值的统计分析得到;  $t_i$  为第  $i$  段的发火时间;  $\delta$  为第  $i$  段的脉冲函数。

经实验证明<sup>[3~4]</sup>,模型的假设合理,预测与实测结果接近。

## 3 结构响应计算

得到结构地基的预测波形后,即可依据此波形计算加速度反应谱,用动力法计算结构的爆破震动响应。对单自由度体系可直接应用反应谱进行抗震验算,对多自由度体系则采用振型分解反应谱法计算结构在爆破震动作用下的内力。这一方法的基本原理是:假定建筑结构是多自由度的线弹性体系,利用振型分解与振型正交性原理,将求解  $n$  个自由度弹性体系的地震反应分解为求解  $n$  个独立的等效单自由度弹性体系的最大地震反应,从而求得对应于每一个振型的作用效应(弯矩、剪力),再按一定的法则将每个振型的作用效应组合成总的地震作用效应<sup>[5]</sup>

$$V_i = \left[ \sum_{j=1}^m \left( \sum_{k=i}^n F_{jk} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$W_l = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{k=i}^n F_{jk} (Y_k - Y_l) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$F_{jk} = \alpha_j \gamma_j x_{jk} G_k \quad (5)$$

$$\alpha_j = \frac{S_a(\zeta_j, \varphi)}{|x_g(t)|_{\max}} \cdot \frac{|x_g(t)|_{\max}}{g} = K\beta_j \quad (6)$$

式中： $V_i$  为振型组合后第  $i$  层的层间剪力，当  $i=1$  时，为基底剪力  $V_{\max}$ ； $W_l$  为振型组合后  $l$  截面的弯矩，当  $l$  为结构地基面时，称为基底弯矩  $W_{\max}$ ； $\alpha_j$  为相应于  $j$  振型自振周期的地震影响系数， $K$  为地震系数，是地面运动最大加速度  $\ddot{x}_g(t)|_{\max}$  与重力加速度  $g$  的比值； $\beta_j$  为动力系数，是相应于  $j$  振型阻尼比、自振频率分别为  $\zeta_j$ 、 $\omega_j$  的单自由度体系的最大加速度反应  $S_a(\zeta_j, \omega_j)$  与地面运动最大加速度的比值； $\gamma_j$  为振型参与系数； $x_{jk}$  为  $j$  振型  $k$  质点的水平相对位移； $G_k$  为  $k$  质点的重量； $m$  为参加组合的振型数； $n$  为用质量集中模型简化后，结构的总质点数； $Y_l$  为  $l$  截面的高程； $Y_k$  为  $l$  截面以上各层高程。

## 4 应用实例

### 4.1 工程概况

所用数据均来自涟源钢铁公司第四轧钢厂烟囱基础拆除爆破。施工中，主要针对全厂的供电枢纽——变电房进行监测。变电房为两层框架结构，高 7m，计算时简化为二自由度体系。在变电台地基 A、B 处布置两个测点：A 点的单段爆破波形的药量为 1.05kg，距爆源 18m；B 点的单段爆破波形的药量为 0.9kg，距爆源 15m。在每个测点处分别测得一次单段爆破波形，测量方向为变电房的短轴水平向，两个单段测点 A、B 加速度波形见图 1，分别用于预测第一、二次爆破。

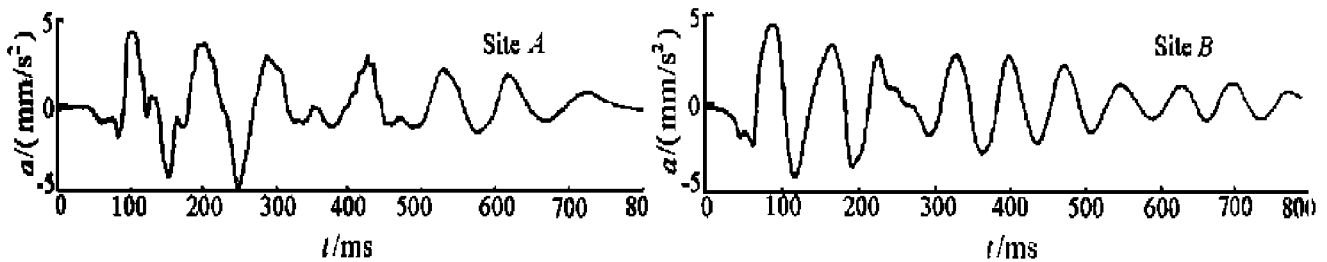


图 1 单段爆破波形

Fig.1 The seismogram from simultaneous-hole shot

### 4.2 变电房爆破震动响应预测

两次爆破参数见表 1、表 2，变电房的结构参数(用文献[6]介绍的方法计算)见表 3，应用计

表 1 第一次爆破的爆破参数

Table 1 The parameters of the first blast

序号	药量/kg	延期时间/ms	震动比例系数
第一段	0.9	0	0.92
第二段	1.1	26	1.03
第三段	0.9	78	0.92
第四段	0.8	104	0.86

表 2 第二次爆破的爆破参数

Table 2 The parameters of the second blast

序号	药量/kg	延期时间/ms	震动比例系数
第一段	1.0	0	1.05
第二段	1.4	26	1.27
第三段	1.2	78	0.86
第四段	1.2	104	0.86

表 4 变电房的周期、频率与振型

Table 4 The periods, frequencies and vibration model of substation

表 3 变电房的结构参数

Table 3 The parameters of substation

层号	质量/kg	刚度/(kN/m)	阻尼比
第一层	82700	54000	0.0361
第二层	41000	47000	0.0312

层号	周期/s	频率/Hz	第一振型	第二振型
第一层	0.32	3.09	0.076	0.080
第二层	0.14	7.10	0.113	-0.108

算程序,对变电房在两次爆破作用下的受力情况进行预测,输出结果如表 4。

变电房在两次爆破作用下的内力分别为:第一次爆破,  $V_{\max} = 29.34\text{kN}$ ,  $V_2 = 15.71\text{kN}$ ,  $W_{\max} = 131.62\text{kN}\cdot\text{m}$ ,  $W_2 = 70.68\text{kN}\cdot\text{m}$ ;第二次爆破,  $V_{\max} = 89.73\text{kN}$ ,  $V_2 = 48.63\text{kN}$ ,  $W_{\max} = 403.04\text{kN}\cdot\text{m}$ ,  $W_2 = 218.82\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

### 4.3 结果验证

采用一个近似的方法对前述两次爆破的预测结果进行验证。在前述的两次爆破中分别在变电房一二层与结构外地面布置一台测震仪,测得两次爆破作用下的加速度波形。变电房的层间剪力用一二层实测加速度波形的最大值与结构外地面加速度波形最大值之差(即相对加速度)与对应质点的乘积估算,用这种方法计算的层间剪力分别为:第一次爆破,  $V_{\max} = 21.56\text{kN}$ ,  $V_2 = 12.47\text{kN}$ ;第二次爆破,  $V_{\max} = 79.56\text{kN}$ ,  $V_2 = 39.65\text{kN}$ 。预测结果与估算结果接近。

### 4.4 最佳延期时间的选取

在程序中,把延期时间改为由程序循环生成,其他输入参数不变,仍对前述两次爆破进行预测,可得不同延期下的结构响应,见图 2、图 3。由图可见,第一次爆破在 310~330ms 与 350~380ms 的延期范围内、第二次爆破在 310~330ms 与 360~380ms 的延期范围内变电房的基底剪力与弯矩较小,即在此延期时间内,爆破震动对结构的影响较小,爆破设计可依此选取延期时间。

## 5 结 论

(1)模型的应用简便,克服了单一参数法的某些不足,体现了爆源至结构间地质条件及不同的震动频率对结构的影响;

(2)可通过对不同延期时间下的预测结果的比较,为爆破延时设计提供依据,这对爆破工程具有重要意义;

(3)通过结构地基的预测波形计算反应谱,避免了通过爆破资料积累获取抗震设计反应谱的繁琐工作,并提高了计算精度;

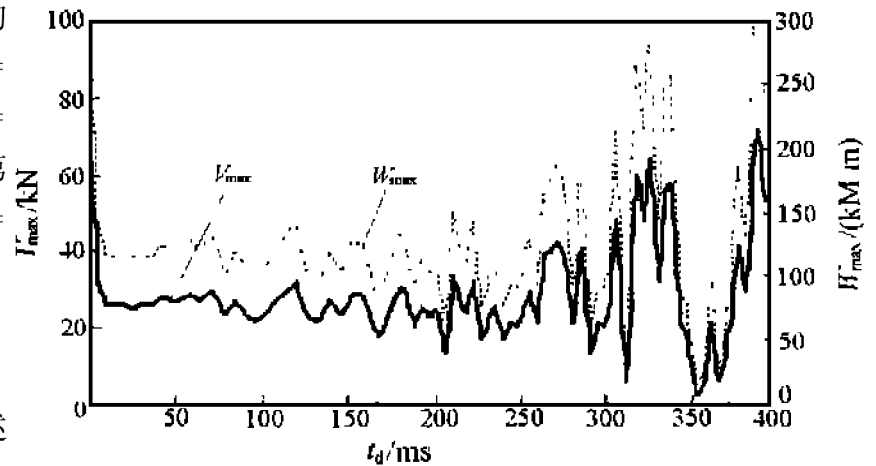


图 2 第一次爆破变电房内力与延期时间的关系

Fig.2 The relation between structural forces and delays for the first blast

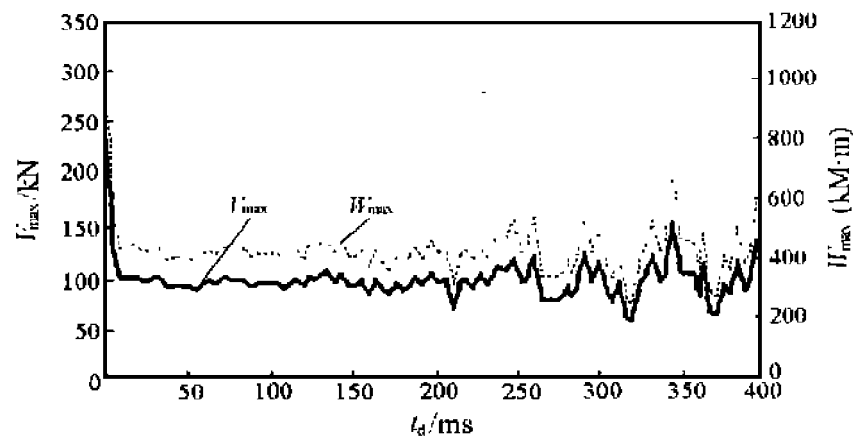


图 3 第二次爆破变电房内力与延期时间的关系

Fig.3 The relation between structural forces and delays for the second blast

(4)预测结果为结构的内力,便于抗震验算。

本文的预测模型充分考虑了准确性与实用性,通过实际应用表明,预测结果可靠,可用于爆破实践。

模型的建立从实用角度出发,对某些因素作了简化。结构地基爆破震动的预测模拟只考虑了延期时间与各段药量两个参数,只考虑结构在水平地震作用下沿结构短轴方向的振动,未考虑结构在爆破震动作用下的扭转。模型有待进一步完善。

## 参考文献:

- [1] 霍永基,王湘均,费骥鸣.爆破地震效应及安全评定方法探讨[A].土岩爆破文集·第二辑[C].北京:冶金工业出版社,1985.184—187.
- [2] Anderson D A, Ritter A P, Winzer S R, et al. A Method for Site-specific Prediction and Control of Ground Vibration from Blasting [A]. White H J. Proceeding 11th Annual Conference Explosives and Blast Technique [C]. U S: University of California, 1985. 158 ~ 179.
- [3] 刘军. 建筑结构爆破震动效应预测方法研究[D].长沙:长沙矿冶研究院,1998.5—9.
- [4] WU Cong-shi, WU Qi-su. A Preliminary Approach to Simulating Blast Vibration[A]. Nadkarni M A. Proceeding 3rd International Symp on Rock Fragmentation by Blasting [C]. Brisbane, Australia; Brisbane Institute of Mining and Metallurgy, 1990. 245—248.
- [5] 高振世,朱继澄,唐九如. 建筑结构抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.38—62.
- [6] GBJ 11—89, 建筑抗震设计规范[S].

## A Research on Predicting Structural Responses to Blasting Vibration

LIU Jun<sup>1</sup>, WU Cong-shi<sup>2</sup>, GAO Quan-chen<sup>1</sup>

(1. *China University of Mining Technology, Beijing 100083, China;*

*2. Changsha Institute of Mining and Metallurgy, Changsha Hunan 410012, China*)

**Abstract:** A method that can be used to predict structural responses to blasting vibration was introduced in this paper. The structural response spectrum was computed using the seismogram of structural foundation that has been predicted in advance. Then, the structural responses can be derived by employing dynamic analysis method, and the optimum delay time can also be determined by comparing the predicting results under different delays. The model has been used in a practical blast, the predicting results are reliable. The model in this paper can be applied to evaluate the security of structures before blast.

**Key words:** structure; blasting vibration; structural responses; delay time