

爆破地震动频率特性诱导结构破坏分析

柴修伟,舒胜东*,王少峰,高中亮

(武汉工程大学环境与城市建设学院,武汉 430074)

摘要:爆破地震效应是爆破的主要负面效应,目前多采用爆破质点振动速度来表述地震效应的影响程度大小;同时爆破振动频率特性对结构体的破坏程度也有很大的影响作用,并随工程结构特性而异.从爆破震动频率特性的角度,通过理论计算和分析对爆破振动波频率特性诱导结构体破坏作用进行了研究,结果认为结构体对于介质中传来的爆破振动波的选择放大效应.

关键词:爆破振动;频率特性;结构破坏;放大效应

中图分类号:TD235.1

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.2.010

0 引言

爆破地震效应是炸药爆炸产生的冲击波在介质中传播引起的,包括体波和面波,体波是造成岩石破裂的主要原因,而面波造成爆破地震破坏的主要原因.针对爆破工程实施时产生的主要负面效应—爆破振动特性,国内外的专家和学者做了大量的研究和分析,有的是从爆破质点振动速度方面来探讨引起岩石破坏的质点速度临界范围,如 Savely^[1],Langefors 和 Kihlstrom^[2],Holmberg & Persson^[3],Bauer & Calder^[4] 和 Mojtabai & Beattie^[5]等均从爆破产生的质点振动速度角度来探讨爆破对岩体造成损伤的振动速度安全判据.唐春海^[6-7]吴德伦等^[7]在考虑频率因素的情况下,提出了矿山巷道和隧洞、水工隧道、下水管道、地下洞室和地下构筑物的爆破振动安全判据中允许的爆破振动速度标准.有的学者认为单一的振动速度和频率并不能完全体现爆破振动,采用响应速度做为爆破震动安全判据比振速—频率相关的双因素判据更加有效^[8-9].

波的特征一般用振幅 A ,频率 f_0 (或周期 T_0),持续时间 T_E 表示,目前多采用爆破质点振动速度来表述地震效应的影响程度大小,而爆破振动频率特性对结构体的破坏程度也有很大的影响作用,并随工程结构特性而异^[10-11].本文从爆破震动频率特性出发,通过理论分析,研究爆破振动波频率特性诱导结构体破坏作用.

1 爆破地震动速度特性

目前工程中多采用爆破振动速度来表征爆破振动的大小,实际中影响振动强度的因素较多,主要有装药量、爆心距及测点和爆源之间场地的几何形态、地质条件、岩性特征等因素,一般用场地系数总体概括.

当爆破地震波传至结构体时,结构体受到波的影响产生振动,由弹性力学理论和波动理论有

$$\sigma = \frac{EV}{c}$$
$$\varepsilon = \frac{V}{c}$$

式中: σ 为爆破振动在结构体中产生的应力; E 为结构体的弹性模量; ε 为结构体产生的应变, c 为爆破振动波在结构体中的传播速度; V 为质点的振动速度.

可得: $\sigma = E\varepsilon$

造成结构体破坏的主要原因爆破振动对结构体作用后产生一种动态应力,而破坏的程度取决于动态应力 σ 的大小,所以结构体破坏程度与质点振动速度 V 有直接的关系.

2 爆破震动频率特性

爆破震动频率一般高于结构体的固有频率,爆破震动频率特性表示爆破振动波对结构体危害的作用,主要在于结构体在固有频率的基础上,对介质中传来的爆破振动波的选择放大.当爆破振

收稿日期:2012-01-08

基金项目:武汉工程大学科学研究基金项目资助(13105042)

作者简介:柴修伟(1980-),男,安徽亳州人,讲师,博士.研究方向:爆破工程及安全技术.*通信联系人

动波群进入结构体时,爆破振动波的大小和周期多不相同,结构体会使与结构体固有周期相一致的某些频率波群放大并通过,而将另一些与结构体固有周期不一致的某些频率波群缩小或滤掉^[9].

爆破地震波可以看成由一系列正弦波分量叠加合成的. 即有:

$$A(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$$

式中, A_i 为第 i 个正弦分量的振幅值, ω_i 为第 i 个正弦波分量的圆频率, φ_i 为第 i 个正弦分量的初相位.

为了研究爆破地震波中任一频率的正弦波分量对结构体系强迫振动的影响,可以假设爆破地震波中存在这样一个分量,其加速度为:

$$a_i = a \sin \omega_i t$$

式中, a 为加速度振幅值, ω_i 为正弦波分量的角速度.

为了简化计算,通常将结构体系假设为单自由度系统,具有阻尼的单自由度体系的受迫振动的模型如图 1 所示.

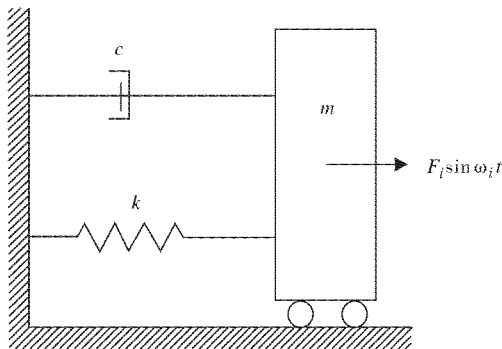


图 1 有阻尼的单自由度体系的受迫振动的模型

Fig. 1 Model of forced vibration of damped single-degree-of-freedom system

在单自由度体系中,相当于结构体系上作用的强迫力:

$$F = F_i \sin \omega_i(t)$$

式中, $F_i = -ma$. 根据力学平衡原理可得:

$$m\ddot{x}_a + c\dot{x}_v + kx = F_i \sin \omega_i(t)$$

式中, m 、 c 和 k 分别为结构体系的质量、粘滞阻尼系数和刚度, x 为结构位移, \dot{x}_v 是结构振动速度, \ddot{x}_a 是结构振动加速度.

$$\text{因此可得: } \ddot{x}_a + 2\zeta_0 \omega_0 \dot{x}_v + \omega_0^2 x = \frac{F_i}{m} \sin \omega_i(t)$$

式中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为结构体系的固有频率, $\zeta_0 =$

$\frac{c}{2m\omega_0}$ 为结构体系阻尼比.

由于外载荷 $\frac{F_i}{m} \sin \omega_i t$ 是按简谐变化. 因此可以

假设方程式的特解形式为:

$$x = N_1 \sin \omega_i t + N_2 \cos \omega_i t$$

式中, N_1 、 N_2 为待定系数.

选择适当的两个常数 N_1 、 N_2 使方程式可以得出:

$$\begin{aligned} & [(\omega_0^2 - \omega_i^2) N_1 - 2\zeta_0 \omega_i \omega_0 N_2 - \frac{F_i}{m}] \sin \omega_i t + \\ & [(\omega_0^2 - \omega_i^2) N_2 + 2\zeta_0 \omega_i \omega_0 N_1] \cos \omega_i t = 0 \end{aligned}$$

由于 $\sin \omega_i t$ 和 $\cos \omega_i t$ 是在 -1 和 1 之间交替变化的时间函数,有:

$$\begin{cases} (\omega_0^2 - \omega_i^2) N_1 - 2\zeta_0 \omega_i \omega_0 N_2 - \frac{F_i}{m} = 0 \\ (\omega_0^2 - \omega_i^2) N_2 + 2\zeta_0 \omega_i \omega_0 N_1 = 0 \end{cases}$$

解方程组可得:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{F_i}{m} g \frac{\omega_0^2 - \omega_i^2}{(\omega_0^2 - \omega_i^2)^2 + 4\zeta_0^2 \omega_i^2 \omega_0^2} \\ N_2 = \frac{F_i}{m} g \frac{-2\zeta_0 \omega_i \omega_0}{(\omega_0^2 - \omega_i^2)^2 + 4\zeta_0^2 \omega_i^2 \omega_0^2} \end{cases}$$

假设:

$$\begin{cases} N_1 = A \cos \varphi \\ N_2 = -A \sin \varphi \end{cases} \text{ 用常数 } A \text{ 和 } \varphi \text{ 代替 } N_1 \text{ 和 } N_2,$$

则可解得:

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{N_1^2 + N_2^2} = x_{st} g \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_0^2})^2 + 4\zeta_0^2 \frac{\omega_i^2}{\omega_0^2}}} \\ \tan \varphi &= -\frac{N_2}{N_1} = \frac{2\zeta_0 \omega_i \omega_0}{\omega_0^2 - \omega_i^2} = \frac{2\zeta_0 \frac{\omega_i}{\omega_0}}{1 - (\frac{\omega_i}{\omega_0})^2} \end{aligned}$$

式中, x_{st} 为动载幅值 F 作用下的静力位移.

设 f_0 为结构体的固有频率, f_i 为爆破振动分量的激励频率, 因此可知, 在振动载荷分量 $F_i \sin \omega_i t$ 的作用下, 结构体系的位移放大系数为:

$$\beta = \frac{A}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{f_i^2}{f_0^2})^2 + 4\zeta_0^2 \frac{f_i^2}{f_0^2}}}$$

由于爆破振动的最大动能与振动的最大势能有以下关系:

$$\frac{1}{2} m V_{\max}^2 = \frac{1}{2} k A^2$$

由上式可知, 结构体系的最大速度放大系数与结构体系的最大位移放大系数相等.

动力放大系数 β 不仅与频率比有关, 而且与结构阻尼比 ζ_0 有关, 对于不同的 ζ_0 值可以画出动

力放大系数与频率比的关系曲线,如图2所示.实际工程结构的阻尼比都比较小,一般 $\zeta_0 = 0.02 \times 0.1$ 左右.

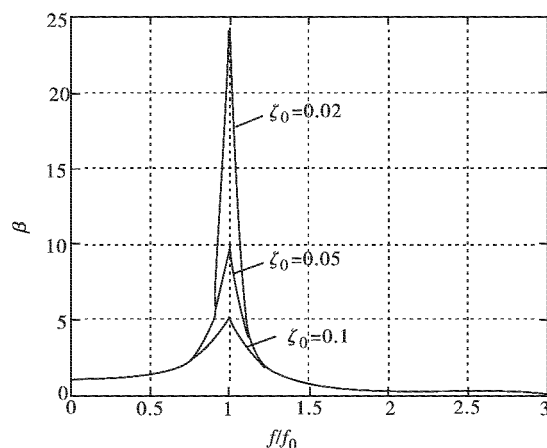


图2 不同阻尼比下动力放大系数与频率比关系图

Fig.2 Relation graph of power amplification coefficient and frequency under different damping ratio

3 结构振动响应分析

通过上面的理论计算,可知结构体对爆破振动的放大系数 β 不仅与结构体的固有频率 f_0 和爆破振动分量的激励频率 f_i 的比值有关,而且与结构阻尼比 ζ_0 有关,当激励频率 f_i 越接近结构体的固有频率 f_0 ,且结构体的阻尼比越小时,振动响应的放大系数 β 就越大,反之,放大系数 β 就越小.

a. 当频率比 $f_i/f_0 \rightarrow \infty$ 时, $\beta \rightarrow 0$,即激励频率 f_i 远远大于结构体的固有频率 f_0 ,表明高频爆破地震动的作用下,结构振幅很小,即在其他条件相同下,爆炸地震具有较小的破坏力.

b. 当频率比 $f_i/f_0 \rightarrow 0$ 时, $\beta \rightarrow 1$,即激励频率 f_i 远远小于结构体的固有频率 f_0 ,此时对于结构体来说,爆破地震动的加载相当于静载作用,可以近似地把爆破地震动的幅值看作静荷载来计算结构振幅.

c. 当频率比 $f_i/f_0 \rightarrow 1$ 时,即激励频率 f_i 接近结构体的固有频率 f_0 ,结构体将出现共振现象,此时 β 增加很快,结构体振幅达到最大值.这表明当爆破地震频率与结构体固有频率接近时,爆破地震动将造成较大的破坏力.

4 结 语

当爆破振动波群进入结构体时,爆破振动波的大小和周期多不相同,结构体会使与结构体固有周期相一致的某些频率波群放大并通过,而将另一些与结构体固有周期不一致的某些频率波群缩小或滤掉.通过理论计算发现,结构体对爆破振

动的放大效应不仅与结构体的固有频率 f_0 和爆破振动分量的激励频率 f_i 的比值有关,而且与结构阻尼比 ζ_0 有关.

当激励频率 f_i 越接近结构体的固有频率 f_0 ,结构体将出现共振现象,且结构体的阻尼比越小时,振动响应的放大系数 β 就越大,结构体振幅达到最大值;反之,放大系数 β 就越小.这表明当爆破地震频率与结构体固有频率接近时,系统结构的动态响应成倍增大,从而可能冲破结构极限抗震能力而产生损伤破坏.

参考文献:

- [1] SAVELY J P. Designing a Final Blast to Improve Stability[C]. New Orleans, Louisiana: the SME Annual Meeting, 1986.
- [2] LANGEFORS U, KIHLESTROM B. The Modern Technique of Rock Blasting[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1973.
- [3] HOLMBERG R, PERSSON P A. The Swedish Approach to Contour Blasting[C]// Proceedings of the 4th Conference on Explosive and Blasting Technique. [S. l.]: [s. n.], 1978: 113 - 127.
- [4] BAUER A, CALDER P N. Open Pit and Blast Seminar [R]. Course No. 63221. Ontario: Mining Engineering Department, Queens University, 1978.
- [5] MOJTABAI N, BEATTIE S G. Empirical Approach to Prediction of Damage in Bench Blasting[J]. Trans Inst Min and Metall, Sect A, 1996, 105: 75 - 80.
- [6] 唐春海,于亚伦,王建国. 爆破地震动安全判据的初步探讨[J]. 有色金属, 2001, 53(1): 1 - 4.
- [7] 夏晨曦,杨军,李顺波,等. 最优小波包基算法在爆破振动信号去噪中的应用[J]. 爆破, 2011, 28(3): 4 - 7.
- [8] 吴德伦,叶晓明. 工程爆破安全振动速度综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 266 - 273.
- [9] SINGH P K, ROY P M, SINHA A. Standardization of Blast Vibration Damage Threshold for the Safety of Residential Structures in Mining Area. [C]//The Asina - Pacific Symposium on Blasting Techniques. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 581 - 589.
- [10] 赵明生,梁开水,曹跃,等. 爆破地震作用下建(构)筑物安全标准探讨[J]. 爆破, 2008, 25(4): 24 - 27.
- [11] 赵明生,张亚文,徐海波,等. 不同微差间隔下爆破振动信号的反应谱分析[J]. 爆破, 2011, 28(1): 28 - 32.

(下转第49页)