

爆破地震效应若干问题的探讨

李宏男

王炳乾 林 泉

(沈阳建筑工程学院 沈阳 110015) (大连理工大学 大连 116023)

摘要 对爆破地震效应的若干问题进行了研究,提出了一些新的观点。内容包括:微差爆破问题;爆破地震转动分量的推算;地震荷载的计算;基于多维反应谱方法的内力组合。

关键词 爆破地震 转动分量 地震荷载 反应谱 内力组合

中图分类号 TD235.11

1 引言

爆破地震效应是爆破工程中的重要研究课题之一,它主要研究爆破引起的地震动变化规律及其振动强度对建筑物的影响等。由于爆破地震效应是一个比较复杂的课题,目前积累的测试资料还不多,还有许多问题没有很好地解决,甚至在工程中未被考虑,因此随着爆破技术的广泛应用,对这一问题的研究具有十分重要的理论和实际意义。

2 微差爆破问题

微差爆破不但可以改善爆破质量,而且可以降低地震效应。这种爆破技术起源于本世纪20年代,50年代到60年代初,我国开始试验这种方法。目前,在水库、矿山、筑路等工程中普遍采用微差爆破技术。但微差间隔时间的计算,国内外尚处于探索阶段,实用上多采用经验公式。

然而,同样采用微差爆破,如果微差时间选择不合理,不仅不会减震,有时还会增大地震效应。我们在汤河水库的爆破振动测试中观测到,在相同药量的情况下,在同一地点同一方向上测到的两次爆破振动速度时程曲线的最大峰值相差35%,如图1和图2所示。这是因为地震波峰值产生叠加的原因。也就是说,在一段爆破之后和下段爆破形成接力,产生地震波的叠加,在下半周期产生高峰波。为明显起见,现假设地震波为正弦波予以解释。图3(a)为三段微差且时间间隔 $\Delta t = T/3$ (T 为振动周期)的情况,此时合成的波在理论上应等于零,这是减震效果最好的情况。但当 $\Delta t = T/6$ 时,不但达不到减震的目的,反而增加了振动强度,比齐发爆破振动还要强,如图3(b)所示。

由此可见,认为用微差爆破就能减震的说法并不全面。要想减少爆破地震效应,必需采用适当的时间间隔。否则不但不能减震,反而会增大地震效应。

在筑路、水下岩塞等爆破中,附近常有重要建筑物(如高层建筑、水坝等)。如果将这些

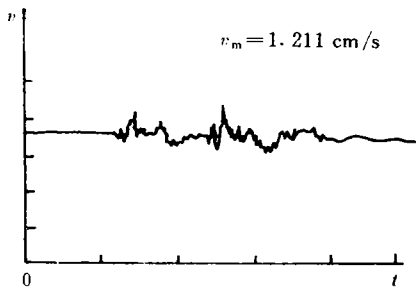


图1 第一次爆破
Fig. 1 First explosion

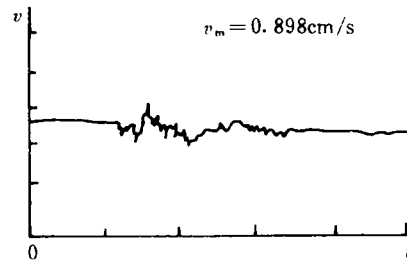
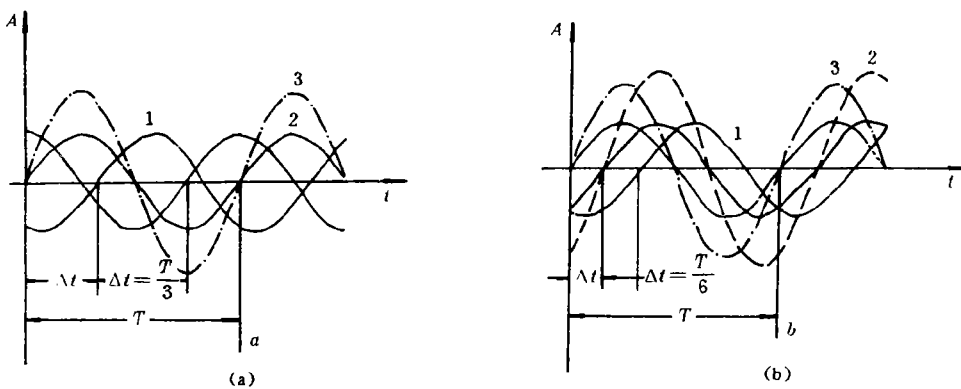


图2 第二次爆破
Fig. 2 Second explosion



1. 三段微差时,每段振动函数;2. 三段微差时,合成振动函数;3. 齐放爆破振动函数

1. A Vibration function; 2. Combined vibration function; 3. Vibration function with simultaneous explosion

图3 $\Delta t = T/3, \Delta t = T/6$ 时的地面反应

Fig. 3 Ground response with $\Delta t = T/3$ and $\Delta t = T/6$

建筑物振坏或振倒,将导致很大的经济损失,甚至危及人民的生命财产安全。因此,在选择合理的微差爆破时间间隔时,我们建议应将附近重要建筑物地基的卓越周期 T 作为重要因素来考虑。但目前国内外给出的计算微差时间间隔的经验公式中^[1],大多主要考虑了岩石性质、炸药与岩石的特征阻抗、岩石的波传播速度、岩块的运动速度、抵抗线等因素,而没有考虑重要建筑物场地地基的卓越周期 T 这一因素。下面给出最佳减震的微差爆破时间间隔。

对于总药量 Q 分为相等重量的 m 段的分段微差爆破的振幅 A ,应与 $\sqrt{Q/m}$ 成比例,即

$$A \propto \sqrt{Q/m} \quad (1)$$

如果将地震波近似看成谐波,则微差爆破地震作用与齐发爆破相比较可用下式表示^[1]

$$D = \frac{A_{\text{齐}}}{A_{\text{微}}} = \frac{\sqrt{m} \sin \frac{1}{2} \omega \Delta t}{\sin \frac{m}{2} \omega \Delta t} \quad (2)$$

式中： D 为地震效应降低系数； $A_{\text{齐}}$ 和 $A_{\text{微}}$ 分别为齐发和微差爆破振动； ω 应取为重要建筑物地基的卓越频率（由实测得到）； Δt 为微差时间间隔。从式(2)可以看出，地震效应降低系数 D 越大，减震效果越好。当 $(m/2)\omega\Delta t = n\pi$ ($n = 1, 2, \dots$) 时， $\sin(m/2)\omega\Delta t = 0$ ；且当 $\sin(1/2)\omega\Delta t = \sin(n/m)\pi \neq 0$ (即 n/m 不等于整数)，这时 $D \rightarrow \infty$ ，则减震效果最好，可以求出间隔时间为

$$\Delta t = \frac{2n\pi}{m\omega} = \frac{n}{m}T \quad (3)$$

上述只是讨论了理想的情况。实际上，地震波是相当复杂的，工程中如果我们选择式(3)中的微差时间接近建筑物地基卓越周期 T 的一半，且 m 为偶数，可以得到较好的减震效果。

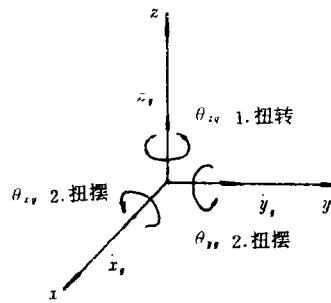
3 爆破地震动转动分量的推算

无论从理论分析，还是从爆破振动的观测现象看，地震动不仅存在着平动分量，而且也有着转动分量（三个平动分量和三个转动分量如图 4），即地震动是多维的。但是到目前为止，由于观测水平所限，在实际工程中只考虑了平动分量，这对工程结构的抗爆设计可能是偏于不安全的。为此，本节给出利用现有平动分量的记录推算爆破地震动转动分量的方法。

假定地震波的传播介质是各向同性的均匀弹性半空间或分层弹性半空间，入射到自由表面的地震波是由体波（P 波和 S 波）或面波（Rayleigh 波和 Love 波）组成。下面以 SV 波为例说明其原理，其它情况类似，结果见文献[2]。当 SV 波入射到自由表面时，其非零分量如图 5 所示，入射波和反射波的位移函数分别为

$$\left. \begin{aligned} S_{Sv} &= A_{sv} \exp[i(k_x x + k_z z - \omega t)] \\ S_p &= A_p \exp[i(k_x x + k_z z - \omega t)] \\ S_{sv'} &= A_{sv'} \exp[i(k_x x + k_z z - \omega t)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中：



1. Torsion; 2. Rocking

图 4 地震动六分量

Fig. 4 Six components of seismic motion

$$\left. \begin{aligned} k_x &= k_x^* = \frac{\omega}{\beta} \sin\theta_0, & k_x^* &= \frac{\omega}{\alpha} \sin\theta_1, \\ k_z &= -k_z^* = \frac{\omega}{\beta} \cos\theta_0, & k_z^* &= \frac{\omega}{\alpha} \cos\theta_1, \\ \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta_1} &= \frac{\beta}{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里： α 为 P 波速； β 为 S 波速。

由图 5 可得水平与竖向的位移分量为

$$\left. \begin{aligned} u &= S_{SV} \cos\theta_0 + S_P \sin\theta_1 + S_{SV'} \cos\theta_2 \\ w &= S_{SV} \sin\theta_0 + S_P \cos\theta_1 - S_{SV'} \sin\theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因为在自由表面的剪应力为零 $\tau_{xz}|_{z=0}=0$ ，即

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)|_{z=0} = 0 \quad (7)$$

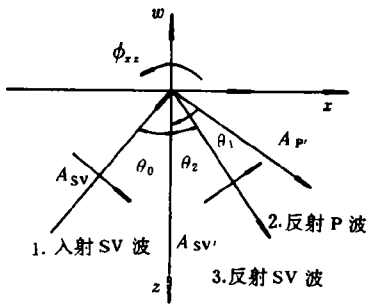
自由表面的摇摆分量为

$$\begin{aligned} \phi_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}\right)|_{z=0} = \frac{\partial w}{\partial x}|_{z=0} \\ &= [(ik_x)S_{SV} \sin\theta_0 + (ik_x^*)S_P \cos\theta_1 - (ik_x^*)S_{SV'} \sin\theta_2]|_{z=0} \end{aligned} \quad (8)$$

利用式(5)，上式为

$$\phi_{xz} = ik_x w = \frac{i\omega}{\beta} \sin\theta_0 w = \frac{i\omega}{c_r} w \quad (9)$$

式中 $c_r = \beta/\sin\theta_0$ 为视波速。



1. Incident SV wave 2. Reflected P wave;
3. Reflected SV wave

图 5 入射波与反射波

Fig. 5 Incident and reflected waves

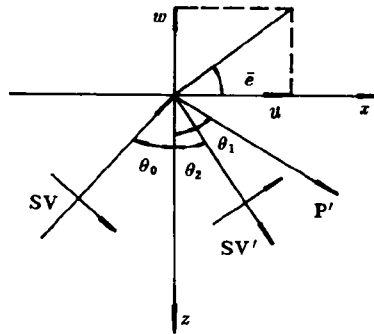


图 6 θ_0 与 \bar{e} 的关系

Fig. 6 Relation between θ_0 and \bar{e}

当入射角 θ_0 大于临界角 $\theta_{cr} = \sin^{-1}(\beta/\alpha)$ 时，反射波为非均匀波，此时可以得到与式(9)完全相同的关系式。

到此我们可以给出地震动转动分量与平动分量的关系的统一表达式

$$\phi_{rj} = \frac{i\omega}{\mu c_r} U_j \quad (j = y, z) \quad (10)$$

式中： $U_j = \begin{cases} v(\text{水平分量}) & \text{当 } j=y; \\ w(\text{竖向分量}) & \text{当 } j=z; \end{cases} \quad \mu = \begin{cases} 1 & \text{当 } j=y \\ 2 & \text{当 } j=z \end{cases}$

ϕ_{rj}, U_j 分别为转动和平动的 Fourier 谱。

由式(10)可看到,求转动分量时要确定视波速 c_r 。我们从工程的角度出发,建议取场地实测到的剪切波速作为 β ,入射角 θ_0 可通过与视出角 \bar{e} 的关系得到(如图 6)。

$$\text{tg } \bar{e} = -\frac{w(\omega)}{u(\omega)} = \begin{cases} \frac{[(\beta/\alpha)^2 - \sin^2\theta_0]^{\frac{1}{2}} \sin\theta_0}{\sin^2\theta_0 - 1/2}, & \theta_0 < \theta_{cr} \\ \frac{2\sin\theta_0(4\sin^2\theta_0 - 1)}{2\sin\theta_0 - 1} [\sin\theta_0 - (\beta/\alpha)^2]^{\frac{1}{2}}, & \theta_0 > \theta_{cr} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $w(\omega)$ 和 $u(\omega)$ 分别为竖向分量与水平分量的 Fourier 谱。求入射角 θ_0 时,首先将记录的时程进行 FFT 变换求出 \bar{e} (是频率的函数),然后再根据式(11)求出 θ_0 。(也是频率的函数)。最后用下式定出视波速

$$c_r = \frac{\beta}{\sin\theta_0(\omega)} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),再进行 FFT 逆变换,即得转动分量的时程(包括扭转分量和摇摆分量,如图 4)。由以上推导过程可看到,此种方法既适用于爆破地震波,也适用于天然地震

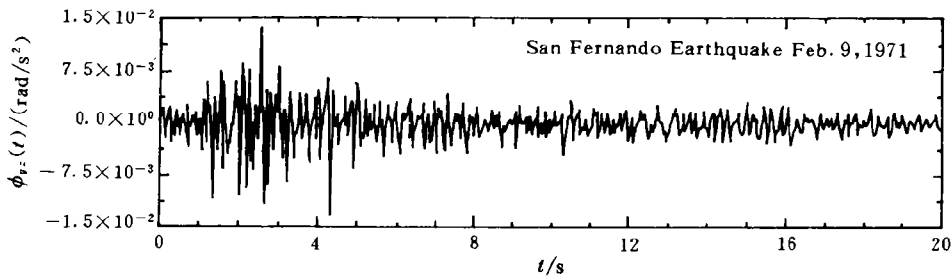


图 7(a) 扭转分量(台站号 110)
Fig. 7(a) Torsional component (Station No. 110)

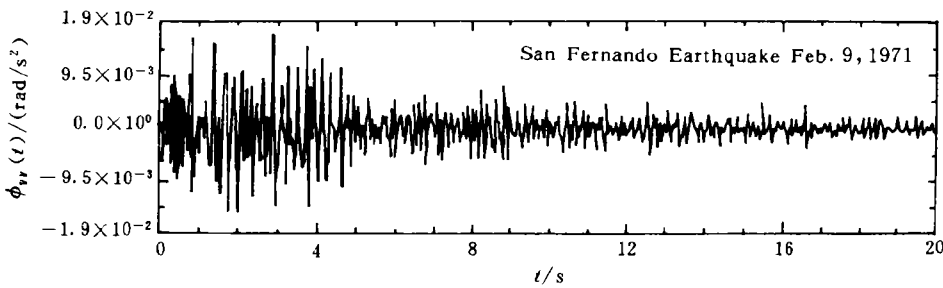


图 7(b) 摇摆分量(台站号 110)
Fig. 7(b) Rocking component (Station No. 110)

波。图 7 示出了用上述方法得到的 1971 年 2 月 9 日美国 San Fernando 地震时一个台站的扭转分量[图 7(a)]和摇摆分量[图 7(b)](以上均为角加速度)。从图中可看到,扭转和摇摆分量比平动分量更富于高频成份。

4 地震荷载的计算

在单一分量爆破地震动作用下采用反应谱理论计算动力荷载,已进行了较多的研究。然而,由上节所述可见,地震动是多维的。在较复杂结构的抗震分析时,只考虑单向地震动作用是不够的,还必须考虑多维地震动的影响。

在一般的结构抗震分析时(这里指房屋建筑结构),通常是将建筑结构简化成平面模型,分别在其两个主轴方向进行计算。严格说来,这样的分析方法只适用于质量中心与刚度中心相重合且在一条直线上的结构^[3]。随着现代建筑的发展,摆脱传统的建筑布局的建筑日益增多。这类建筑一般都是体型多样化,结构的质量中心与刚度中心不重合,作用在质量中心的惯性力将对刚度中心产生扭转力矩,迫使结构产生扭转耦联的空间振动。因此,将这种结构再简化成平面模型进行计算显然是不合理的。下面我们给出在多维爆破地震动作用下采用反应谱理论时的地震荷载计算方法。

设 $\alpha_r(\xi, T_i)$ 表示第 i 振型第 r 分量的地震影响系数($r=x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$), 则建筑结构每个楼层各振型的地震荷载的具体表达式为

$$P_{br}(j) = W_j \phi_i(j) \gamma_i(k) \alpha_r(\xi, T_i) \quad (13)$$

式中: W_j 为第 j 楼层的广义重量(包括转动惯量); $\phi_i(j)$ 为第 j 楼层第 i 振型(包括平移振型和转动振型); $\gamma_i(k)$ 为第 i 振型 k 方向的振型参与系数; $P_{br}(j)$ 为第 j 楼层地震荷载, 第一个脚标表示结构地震反应方向, 第二个脚标表示爆破地震作用方向; 第三个脚标表示振型数。

5 基于多维反应谱方法的内力组合

上节我们给出了在任一方向爆破地震动作用下结构楼层地震荷载的计算方法。对于各分量分别作用产生的结构反应如何组合, 是以反应谱理论为基础的结构多维反应计算所面临的必须解决的课题。

在求出结构的爆破地震荷载之后, 即可求出结构内力。当不考虑各爆破地震动分量相关性时, 我们应用随机振动理论^[4]可推得结构在多维爆破地震动作用下的总内力为

$$S = \sqrt{\sum_r \sum_i \sum_j S_i(\tau) \rho_{ij} S_j(\tau)} \quad (14)$$

式中: ρ_{ij} 为结构振型相关系数; $S_i(\tau)$ 为结构第 i 振型在第 τ 分量作用下的内力。我们选择了 45 种不同的非对称建筑, 利用式(14)采用天然地震波进行计算检验^[5], 得出式(14)具有较好精度。

当仅考虑一个方向的地震动时, 式(14)可简化成

$$S = \sqrt{\sum_i \sum_j S_i \rho_{ij} S_j} \quad (15)$$

即为完全二次型组成公式(CQC 法)。

当仅考虑一个方向的地震动且不考虑振型间相关性时,式(14)可进一步简化成

$$S = \sqrt{\sum_i S_i^2} \quad (16)$$

即为通常应用的平方和开平方的组合方法(SRSS法)。

6 结束语

爆破引起的地面运动对建筑物危害性的研究,越来越引起人们的重视。但由于爆破地震波传播规律的复杂性及在各种不同爆破地震波作用下结构反应的分析方法的研究还不深入,在理论和实际工作中都有不少尚待解决的课题。我们从理论上进行了一些尝试,给出了一整套计算公式。这些公式可用来研究爆破地震动转动分量及特性、结构在多维爆破地震动作用下的反应分析。

参加测试的人员有朱 桐、马恒春两位工程师。

参 考 文 献

- 1 朱忠节,何广沂. 岩石爆破新技术. 北京:中国铁道出版社,1986
- 2 Li Hongnan, et al. Rotational Components of Earthquake Motions and Their Stochastic Models. In: Proc. of SJCSR. Beijing, China; May 28~30, 1989; 230~232
- 3 李宏男. 建筑结构在多维地震动作用下的抗震计算方法. 世界地震工程, 1992, (3); 47~53
- 4 星谷胜(日)著;常宝琦译. 随机振动分析. 北京:地震出版社,1977
- 5 李宏男. 多维地震动作用下结构抗震计算的反应谱方法. 大连理工大学学报, 1992, 32(5); 555~559

STUDIES ON SOME PROBLEMS ON EXPLOSION EARTHQUAKE RESPONSES

Li Hongnan

(Shenyang Architectural and Civil Eng. Institute, Shenyang, 110015)

Wang Bingqian, Lin Gao

(Dalian University of Technology, Dalian 116023)

ABSTRACT The studies on some problems of explosion earthquake responses are carried out in this paper, and some new ideas are presented. They include the differential blasting, calculation of rotational component of explosion ground motion, seismic loadings and internal force combination based on the multi-dimensional seismic response spectra.

KEY WORDS explosion earthquake, rotational component, seismic loading, response spectrum, internal force combination