

爆炸地震波振速的特征系数 与衰减指数的研究

李 铮 朱瑞赓 胡再龙

陈宜明 杨静岫 蔡金祥

(1985年6月10日收到)

本文推导出爆炸地震波作用下岩土介质最大的质点振速与比例距离、介质动力特性、爆炸药量、爆破方式、爆破作用指数等有关的统一计算公式, 计算结果与实测基本相符。

一、前 言

爆破振动效应的预估和计算, 关键在于计算由于爆破在岩土介质中产生的最大质点振动速度。通常都是在某种特定的爆破条件与地质条件下进行爆破振动的测量, 以达到定量地评价爆破振动强度的目的。

目前, 国内对爆炸地震波振动速度的经验公式, 普遍采用一项式的形式, 即根据量纲分析, 振速是比例距离 (或比例药量) 的函数。采用一项式时

$$v = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha} = K \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

式中: v —爆破在岩土介质中引起的最大的质点振动速度 (厘米/秒); K —振速系数; α —衰减指数; Q —爆破炸药量 (公斤); R —爆心至测点的距离 (米)。振速系数 K 与岩土的性质和构造、地形及爆破作用指数有关。衰减指数 α 与波的形式 (球面波、柱面波、平面波)、岩土性质及比例距离有关。

目前, 工程上对 K 、 α 都是在一定的场地条件与爆破条件下通过实测振速来确定的。虽然实测结果可用于解决某一具体问题, 但不具有普遍性, 而且国内至今尚未寻找出振速系数和衰减指数与岩土动力特性、爆破方式等的关系。本文就是在这方面的一些探讨。

二、能量法求解

爆炸地震波在无限介质中传播时, 通过介质任意表面的能流密度 P 可以用乌莫夫 (v_{MOB}) 向量来计算, 它在数值上等于单位时间内通过单位面积的能量, 即 $\vec{P} = \rho v^2 \vec{c}$ 。而单位时间

内通过封闭面积 S 的能量 $E = \int \vec{P}_n \cdot d\vec{s} = \rho V^2 \vec{C} S_r$ 。 \vec{P}_n 为乌莫夫向量在波阵面法线上的投影， ρ 为岩土质量密度； C 为波速； S_r 为波阵面的表面积，对球面波而言即为半径为 R 的球表面积。

炸药包在岩土中爆炸后，爆炸地震波的强度随距离的衰减可看成是能流的几何扩散与被吸收的结果。如果不考虑吸收造成的能量耗损，那么，在药室的岩土介质界面上与测点处可建立下述能量守恒方程

$$\rho_0 C_{p0} v_0^2 S_0 = \rho_1 C_{p1} v_1^2 S_1 \quad (2)$$

$$v_1 = \left(\frac{\rho_0 C_{p0}}{\rho_1 C_{p1}} \right)^{1/2} \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{1/2} v_0 \quad (3)$$

式中： ρ 、 C_p 分别为岩土介质的质量密度（克重秒²/厘米⁴）、纵波波速（厘米/秒）；下标“0、1”分别表示装药半径（爆源）处和测点处的量； S 为波阵面的表面积（米²）， $(S_0/S_1)^{1/2}$ 称为波的扩散函数，对球形波它等于 R_0/R_1 ，柱形波它为 $(R_0/R_1)^{1/2}$ ，平面波它为 1。

下面对吸收引起的能量耗损近似地加以考虑。根据对爆炸地震波振速试验资料的分析，波的扩散函数可以用幂函数来表示。我们讨论球形装药的情况，这时(3)式就变为

$$v_1 = \left(\frac{\rho_0 C_{p0}}{\rho_1 C_{p1}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_0}{R} \right)^a v_0 \quad (4)$$

对于装药密度为 1.50 克/厘米³ 的梯恩梯炸药来说， $R_0 = 0.053 Q^{1/3}$ ，这里 Q 为爆炸药量（公斤），并代入(4)式得

$$v_1 = (\rho_0 C_{p0} / \rho_1 C_{p1})^{1/2} \cdot 0.053^a (Q^{1/3} / R)^a v_0 \quad (5)$$

(5) 式只适用于爆破作用指数 $n = 1.0$ 的情况。当 $n \neq 1$ 时，参考 М. А. Садовский 的处理方法⁽¹⁾，(5) 式变为

$$v_1 = (0.4 + 0.6 n^2)^{-1/3} (\rho_0 C_{p0} / \rho_1 C_{p1})^{1/2} \cdot 0.053^a \cdot v_0 (Q^{1/3} / R)^a \quad (6)$$

对比(1)和(6)式，求得(1)式中的 K 的表达式。

$$K = (0.4 + 0.6 n^2)^{-1/3} (\rho_0 C_{p0} / \rho_1 C_{p1})^{1/2} \cdot 0.053^a v_0 \quad (7)$$

由(7)式可以看到：振速系数 K 与爆源和被测处的声阻抗 $\rho_0 C_{p0}$ 、 $\rho_1 C_{p1}$ ，爆破作用指数 n ，初始速度 v_0 有关。一般情况下介质特性、爆破作用指数都已知，而 v_0 可以通过实测或理论计算求得，关键在于如何求出衰减指数。

三、体积模量法求解

实际上爆炸波在岩体中传播时，在传播过程中总是伴随着能量耗损。在爆破的近区以及岩体中的断层破碎带、节理、裂隙处能量耗损更为显著。我们在考虑能量耗损时，为了使计算简化，假定岩土介质是各向均匀的，由此带来的误差通过试验数据进行修正加以解决。

爆炸地震波在岩土介质中传播时，岩土介质中应力与应变的关系可用下式表示

$$\sigma_{kk} = (1/3) k' \varepsilon_{kk} \quad (8)$$

$$k = \rho_0 C_{p0}^2 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{C_{s0}^2}{C_{p0}^2} \right)$$

式中: 应力 $\sigma_{kk} = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$; 应变 $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$; k 为体积压缩模量, C_{s0} 是介质中横波波速; l 为体积模量的幂指数, m 为介质应变的幂指数, 均由试验确定。

我们知道, 一维爆炸波在介质中传播时, 介质中产生的应力与质点振速的关系式可用 $\sigma = \rho C v$ 来表示。根据文献^[2], 球面爆炸波仍可近似采用这一关系, 当爆源与被测处为同一介质时

$$v_{kk} = \frac{1}{\rho_0 C_{p0}} \sigma_{kk} = \frac{1}{\rho_0 C_{p0}} \cdot \frac{1}{3} k^l \varepsilon_{kk}^m$$

$$v_{kk} = \frac{1}{3 \rho_0 C_{p0}} \left[\rho_0 C_{p0}^2 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{C_{s0}^2}{C_{p0}^2} \right) \right]^l \cdot \left[\bar{K} \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\bar{\alpha}} \right]^m \quad (9)$$

需要说明的是: 根据量纲分析采用一项式的形式 $\varepsilon_{kk} = \bar{K} (R/Q^{1/3})^{-\bar{\alpha}}$ 。这里 \bar{K} 、 $\bar{\alpha}$ 都是由试验确定的系数。根据试验结果^[3], 幂指数 $l = 0.73$, 近似取 $l = 2/3$ 。

为便于工程应用, 将岩土的质量密度 ρ 用容重 γ 来代替, $\rho = \gamma/g$, 这里 g 是重力加速度、引入爆破方式系数 $K_s = g^{l-1} \cdot \bar{K}^m / 3$; 与(1)式相比, $\alpha = m \bar{\alpha}$; 则(9)式化简为

$$v_{kk} = \gamma_0^{-1/3} C_{p0}^{1/3} (1 - 4C_{s0}^2/3C_{p0}^2)^{2/3} \cdot K_s (R/Q^{1/3})^{-\alpha} \quad (10)$$

当爆源与被测处岩土性质不同时, 尚须根据(3)式乘以修正系数 $(\gamma_0 C_{p0} / \gamma_1 C_{p1})^{1/2}$, 整理得

$$v_{kk} = \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{5/6} (1 - 4C_{s0}^2/3C_{p0}^2)^{2/3} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} K_s (R/Q^{1/3})^{-\alpha}$$

$$v_{kk} = K_v \cdot K_s \cdot (R/Q^{1/3})^{-\alpha} \quad (11)$$

其中

$$K_v = \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{5/6} (1 - 4C_{s0}^2/3C_{p0}^2)^{2/3} \cdot (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \quad (12)$$

从(12)式可以看到: K_v 只与爆源和被测处介质的容重 γ 、纵波弹性波速 C_p 、横波弹性波速 C_s 有关, 所以我们称 K_v 为介质的特征系数。(12)式与 Медведев^[4] 给出的结果相同。

对于实际工程来说, 一般坚硬岩石的泊松比 $\mu = 0.25$, 因此, (12)式尚可简化为

$$K_v = 1.36 \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{5/6} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \mu^{1/2} \quad (13)$$

(12)、(13) 两式都是爆破作用指数 $n = 1.0$ 的情况, 当 $n \neq 1$ 时, 变为

$$K_v = (0.4 + 0.6n^3)^{-1/3} \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{5/6} (1 - 4C_{s0}^2/3C_{p0}^2)^{2/3} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \quad (14)$$

$$K_v = 1.36 (0.4 + 0.6n^3)^{-1/3} \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{5/6} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \mu^{1/2} \quad (15)$$

公式(11)中的 v_{kk} 是径向振速 v_{xx} 、切向振速 v_{yy} 、垂向振速 v_{zz} 的矢量和。而国内通常都是以垂向振速 v_z 作为指标, 这时只须将 v_{kk} 改为 v_z 就行了。但 K_s 、 α 也须与垂向振速相对应。

四、爆破方式系数

既考虑能量耗损又考虑能量扩散时, 根据体积模量法求得爆破方式系数

$$K_1 = \frac{1}{3} g^{1-l} \bar{K}^m \quad (16)$$

根据我们所进行的试验, 爆破方式不同, 应变的幂指数 m 和应变系数 \bar{K} 值都有较大的差异。例如, 黄土介质中的球形装药爆破与隧道爆破就是这样。它们药室的初始压力及波的形式(球面波或柱面波)不一样, 这就使它们有不同的 K_1 值。大家知道, 深孔微差爆破的振动强度比深孔齐发爆破的振动强度要小。这是因为深孔微差爆破在同一瞬间爆破的能量比深孔齐发爆破小得多的缘故。因此在介质动力特性、爆破作用指数、爆破总能量都相同的情况下, 不同的爆破方式, 由于其总能量中分配到爆炸地震效应上的能量不一样, 所以爆炸地震效应的强弱也不一样。不同爆破方式的质点最大振速的比值在不同的比例药量 ($Q^{1/3}/R$) 上是变化的, 这从图 1 可以看到, 但图 1 所示的垂直振速分布图中已包含了爆破作用指数 ($n \neq 1$) 的

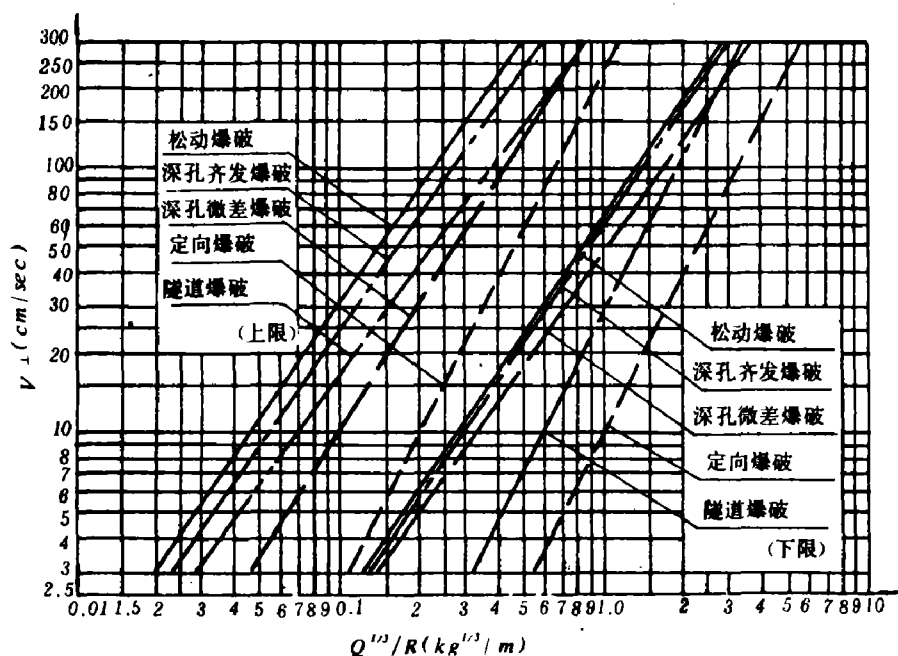


图 1 各种爆破形式垂直振速分布

影响。所以, 在计算爆破方式系数 K_1 时还必须将 $n \neq 1$ 的影响扣除。根据对现有国内各种爆破振动资料的分析, 从上面所求出的 $K_1 = K/K_0$ 关系式中可求得列于表 1 的 K_1 值。随着我国各种爆破资料的进一步积累, K_1 值还可以进一步完善并更加提高其精确度。

五、衰减指数的试验确定

如果弹性波波长接近于岩体中岩石的非均一尺寸, 就会出现明显的能量耗散。能量的耗散造成波的衰减。表示衰减的特征量是能量吸收系数 ψ 和对数衰减率 δ 。 ψ 和 δ 依赖于能量损耗的机制。固体的对数衰减率 δ 与频率无关。在能量损耗过程中应力应变关系呈滞回曲线的形式, 以热能形式损耗的机械能与滞回曲线所包含的面积成正比。波在介质中传播时大量

表1 爆破方式系数 K.

| 爆破方式 | 爆破作用指数 n | 测点所处位置 | | 爆破方式 | 爆破作用指数 n | 测点所处位置 | |
|---------|------------------|------------|-----------|-------------------|----------|-----------|-----------|
| | | 基 岩 | 表 土 | | | 基 岩 | 表 土 |
| 深孔齐发爆破 | 1.0 | 3.5~4.5 | 1.20~1.40 | 松动爆破 | <1.0 | 4.0~5.2 | 1.40~1.60 |
| 深孔微差爆破* | 1.0 [†] | 3.5~4.5 | 1.20~1.40 | | | | |
| 隧道爆破** | 1.0 | 2.80~4.60 | 1.00~1.40 | 定向 (抛掷) 爆 破 | 1.0 | 3.8~6.4 | 1.40~1.90 |
| | 1.5 | 3.80~6.20 | 1.30~1.90 | | 1.5 | 5.3~8.6 | 1.80~2.60 |
| | 2.0 | 5.00~8.00 | 1.70~2.50 | | 2.0 | 7.0~11.0 | 2.40~3.50 |
| | 3.0 | 7.50~12.00 | 2.50~3.70 | | 3.0 | 10.0~16.0 | 3.50~5.10 |

* 这里按每一瞬间的爆炸药量计算的。

** 隧道爆破是指隧道一端开口(不堵塞)一端封闭,柱状装药, $l/d = 30 \sim 40$ (l 为装药长度, d 为装药直径), $V_{\text{室}}/V_{\text{药}} = 1.98 \sim 2.34$ ($V_{\text{室}}$ 为药室体积, $V_{\text{药}}$ 为装药体积)。

的封闭的滞回循环是能量耗散的主要因素,所以衰减指数 α 主要与吸收系数 ψ 有关。由于目前对 ψ 的解析解或数值解的研究还不充分,而根据深孔爆破试验资料^[5],能量吸收系数 ψ 与介质的声阻抗有关,所以衰减指数 α 也与岩土声阻抗有关。

试验得到的衰减指数与声阻抗的关系曲线见图2。其关系式为

$$\alpha = a + b\psi_i C_p \tag{17}$$

系数 a, b 由试验确定。对于各种大爆破,如深孔爆破、松动爆破、定向爆破

$$a = 2.150, b = -4.4 \times 10^{-7} \text{ (厘米}^2 \cdot \text{秒/克)}$$

对于隧道爆破

$$a = 2.156, b = -5.69 \times 10^{-7} \text{ (厘米}^2 \cdot \text{秒/克)}。$$

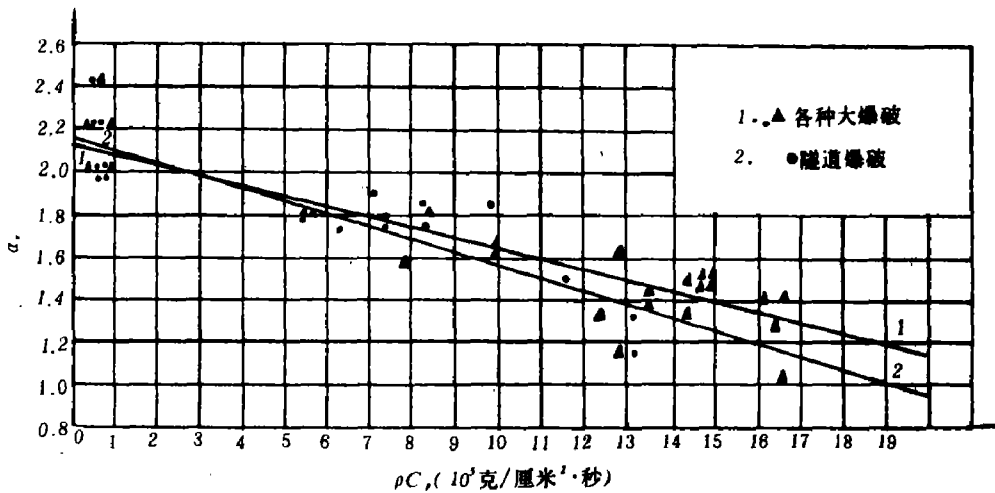


图2 $\alpha - \psi C_p$ 关系曲线

六、垂直振速的计算公式

综上所述,对于各种大爆破,包括深孔齐发爆破、深孔微差爆破、松动爆破、定向爆破、

隧道爆破等,在爆炸地震波作用下岩土介质质点的最大垂直振动速度计算公式可以归纳成如下形式

$$V_{\perp} = K (R/Q^{1/3})^{\alpha} = K_1 K_2 (R/Q^{1/3})^{\alpha} \quad (18)$$

七、理论计算与实测结果的比较

实例 1. 深孔齐发爆破⁽⁶⁾. 鞍钢的大连石灰石矿深孔齐发爆破, 石灰岩的普氏系数 $f = 6 \sim 8$ 、容重 $\gamma_0 = 2.70$ 吨/米³、纵波弹性波速 $C_{p0} = 3770$ 米/秒、横波弹性波速 $C_{s0} = 2065$ 米/秒、泊松比 $\mu = 0.28$ 、爆破作用指数 $n = 1.0$ 。根据实测结果得到 $V_{\perp} = 140 (R/Q^{1/3})^{-1.80}$, 测点自露天矿界线内台阶上向界线外不同厚度的第四纪冲积土上延伸, 求介质特征系数 K_1 、衰减指数 α 及 V_{\perp} 的计算公式。

解: 当测点位于冲积土上时, $\gamma_1 = 1.70$ 克/厘米³、 $C_{p1} = 4 \times 10^4$ 厘米/秒, 由表 1 取平均值 $K_1 = 1.30$ 。

1. 介质特征系数 K_1 (由(13)式计算)、振速系数 K

冲积土上

$$K_1 = 1.36 \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{2/3} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \mu^{1/2} = 144.44$$

$$K = K_1 K_2 = 187.77$$

测点位于露天矿台阶基岩上时, 由表 1 取 $K_1 = 4.0$ (平均值)。

$$K_1 = 1.36 \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{2/3} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \mu^{1/2} = 34.56$$

$$K = K_1 K_2 = 138.24 \quad \text{误差} - 1.30\%$$

2. 衰减指数 α (由(17)式计算)

冲积土上

$$\alpha = a + b \gamma_1 C_{p1} = 2.15 - 4.4 \times 10^{-7} \times \gamma_1 C_{p1} = 2.12$$

基岩上

$$\alpha = a + b \gamma_1 C_{p1} = 2.15 - 4.4 \times 10^{-7} \times \gamma_1 C_{p1} = 1.7021, \quad \text{误差} - 5.44\%$$

3. 垂直振速的计算公式

当测点位于冲积土层上时, 将以上系数代入(18)式得

$$v_{\perp} = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha} = 137.77 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-2.12}$$

当测点位于基岩上时, 由公式(18)得出如下式。

$$v_{\perp} = 138.24 (R/Q^{1/3})^{-1.7021}, \quad \text{实测 } v_{\perp} = 140 (R/Q^{1/3})^{-1.80}$$

计算与实测的误差 $< 5\%$ 。

实例 2. 隧道爆破⁽⁷⁾. 岩石为花岗岩, 容重 $\gamma_0 = 2.65$ 吨/米³、纵波弹性波速 $C_{p0} = 2765$ 米/秒、爆破作用指数 $n = 2.0$, 测点在与爆源同一标高的花岗岩基岩上, 实测 $v_{\perp} = 111.4 (R/Q^{1/3})^{-1.79}$, 求介质的特征系数 K_1 、衰减指数 α 及 v_{\perp} 的计算公式。

解: 根据题给条件: 测点参量同爆源参量, 查得 $\mu = 0.25$, 由表1取 $K_1 = 6.5$ (平均值)。

1. 介质特征系数 K_1 (由(15)式计算), 振速系数 K

$$K_1 = 1.36(0.4 + 0.6n^2)^{-1/3} \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{3/6} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \mu^{1/2} = 18.32$$

$$K = K_1, K_1 = 119.08, \quad \text{误差} + 7\%$$

2. 衰减指数 α , 由(17)式计算, 对于隧道爆破得

$$\alpha = a + b\gamma_1 C_{p1} = 2.156 - 5.69 \times 10^{-7} \times \gamma_1 C_{p1} = 1.739, \quad \text{误差} - 3\%,$$

3. 垂直振速的计算公式, 由(18)式得

$$v_{\perp} = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha} = 119.08 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-1.739}, \quad \text{实测 } v_{\perp} = 114.40 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-1.79}$$

计算结果比实测结果稍大, 但两者仍相当接近。

实例3. 松动爆破⁽⁸⁾. 攀枝花铁矿大爆破, 总药量近1万吨, 药包分布面积0.4平方公里, 分两层两次起爆, 上层第一响药量3470吨, 下层第二响药量5850吨, 延迟时间2秒。岩石为辉长岩, 普氏系数 $f = 16 \sim 21$, 容重 $\gamma_0 = 2.90$ 吨/米³, 纵波弹性波速 $C_{p0} = 5670$ 米/秒, 泊松比 $\mu = 0.27$, 测点布置在基岩上。地形自爆心向远处逐渐降低, 高程相差数十米, 实测 $v_{\perp} = 76 \times (R/Q^{1/3})^{-1.39}$, 求介质特征系数 K_1 、衰减指数 α 及垂直振速计算公式。

解: 攀钢爆破时, 爆破作用指数 $n = 0.80 \sim 0.90$, 取 $n = 0.90$, 由表1取 $K_1 = 5.20$ 。

1. 介质特征系数 (由(15)式求得), 振速系数 K

$$K_1 = 1.36(0.4 + 0.6n^2)^{-1/3} \gamma_0^{1/6} C_{p0}^{3/6} (\gamma_1 C_{p1})^{-1/2} \mu^{1/2} = 42.30$$

$$K_1 = K, K_1 = 219.96, \quad \text{采用 } K = K_1/3.26 = 67.47$$

由于地形高差数十米, 根据现场实测资料, 低洼处垂直振速降低3.26倍⁽⁸⁾, 因此尚须考虑地形对振速系数的影响。所以, 计算的振速系统 $K = 67.47$, 实测的 $K = 76$, 误差 -11% 。

2. 衰减指数 α 由公式(17)计算, 对于松动爆破

$$\alpha = a + b\gamma_1 C_{p1} = 2.15 - 4.40 \times 10^{-7} \gamma_1 C_{p1} = 1.4265, \quad \text{误差} + 3\%$$

3. 垂直振速的计算公式, 将以上系数代入(18)式得

$$v_{\perp} = K \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha} = 67.47 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-1.4265}, \quad \text{实测 } v_{\perp} = 76 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-1.39}$$

计算结果比实测结果略小。

从上述三个实例来看, 衰减指数 α 的计算误差为 $(+3 \sim -6)\%$, 振速系数 K 的计算误差为 $(+7 \sim -11)\%$, 与实测基本相符。考虑到表1中的 K_1 值有一定的变化范围, 因此, 振速系数的最大误差可达20%左右。

八、小 结

1. 采用量纲分析方法可建立爆炸地震波振速计算公式 $v = K(R/Q^{1/3})^{-\alpha}$ 。该式中比例距离 $R/Q^{1/3}$ 已知, 而振速系数 K 和衰减指数 α 都未知。由于该方程中包含了两个未知数, 理论上无法求解, 所以只能通过试验去确定 K 和 α 。为了从理论上解出 K, α , 就必须建立新的方程。

2. 根据乌莫夫向量建立的能量守恒方程, 可以求出振速系数

$$K = (0.4 + 0.6n^2)^{-1/3} \left(\frac{\rho_0 C_{p0}}{\rho_1 C_{p1}} \right)^{1/2} \cdot 0.053^{\alpha} v_0 \quad (6)$$

从(6)式可以看到振速系数与介质的声阻抗有关,这就揭示了一个重要的物理现象。但是,当爆源与测点处为同一个介质时, $(\rho_0 C_{P0}/\rho_1 C_{P1})^{1/2} = 1$,又使介质的动力特性不能反映,所以必须再寻求新的方程。

3. 由于体积模量 k 与介质的密度 ρ 、纵波波速 C_P 、横波波速 C_S 、泊松比 μ 可建立函数关系,这就必须引进应力与应变的关系式 $\sigma = k' \epsilon^m$ 。介质的不均匀性和材料非线性通过幂指数 l 和 m 加以考虑。与此同时,将一维波应力与振速的关系 $\sigma = \rho C v$ 的关系式推广到球面波中,这样就可求出介质特征系数的解析解,即

$$K_1 = \gamma^{1/6} C_{P0}^{5/6} (1 - 4C_{S0}^2/3C_{P0}^2)^{2/3} (\gamma_1 C_{P1}) \quad (12)$$

4. 由于对波的耗损机制的理论研究还很不够,所以通过试验建立爆炸地震波振动速度与介质动力特性的关系。定性来看,爆破时土体强度低,吸收的能量多,爆炸地震波衰减快。对于坚硬岩石情况则相反。反映在衰减指数上就是声阻抗 ρC 较小时 α 较大。但整个说来 $\alpha - \rho C$ 关系曲线还是比较平缓的。这个情况在定性上是正确的,在定量上与实测结果基本相符。

由于我们在软岩中做的试验较少,所以在 $\rho C = (1 \sim 5) 10^5 \gamma C_P$ 克/厘米²·秒的范围内没有试验点,有待于今后的试验研究中予以充实。

5. 本文所讨论的均系地形平坦的情况。

本文承国家地震局工程力学研究所熊建国研究员审阅,并提出许多宝贵意见,在此深表谢意!

参 考 文 献

- (1) 冯叔瑜等,大量爆破设计及施工,人民铁道出版社,(1965),384.
- (2) Crawford, Robert E. (陈肇元、熊建国等译),美国空军防护结构设计与分析手册,空后工程设计局出版,(1985),235.
- (3) Богацкий, В. Ф., Фридман, А. Г., Охрана Инженерных Сооружений и Окружающей Среды от Вредного Действия Промышленных Взрывов, НЕ ДРА, Москва, (1982), 17.
- (4) Медведев, С. В., Багацкий, В. Ф. и др., Взрывное Дело Сборник 78/35. НЕ ДРА, Москва, (1978), 209.
- (5) Миронов, П. С., Взрывы и Сейсмобезопасность Сооружений, НЕ ДРА, Москва, (1973), 42.
- (6) 吴其苏,土岩爆破文集,冶金工业出版社,(1980),199.
- (7) 朱瑞康、李 铮,地下工程,(4)(1981).
- (8) 郭玉学、于双久,同文献(6),187.

**STUDIES ON THE CHARACTERISTIC COEFFICIENT
AND ATTENUATION INDEX IN THE MEASUREMENT
OF BLASTING SEISMIC WAVE**

Li Zhen Zhu Ruigeng Hu Zailong Cheng Yiming

Yang Jingxiu Cai Jinxiang

Abstract

A unified formula for estimation the partical peak velocity produced by seismic waves due to blasting is proposed in the paper, in which besides the explosive weight and the distance from the explosive charge to the point considered, the dynamic characteristics of rock or soil medium, the fashion of explosion, the index of blasting action, etc, have been taken into account. Comparison shows that the proposed formula gives results being in good agreement with the field measured data.