

钢筋混凝土框架结构折叠式定向爆破的研究

吴文伟 李刚常 何世本

(阜新矿业学院)

摘要 本文通过对钢筋混凝土框架结构折叠式定向爆破倾倒过程的力学分析和数学方法,结合控制爆破的特点,给出了上下柱起爆间隔角度和间隔时间的计算公式,所用的思路和方法,原则上也适用于其他类似爆破问题的解决。

关键词 控制爆破 建筑物拆除 爆破技术 工程爆破 里兹法

1.问题的提出

钢筋混凝土框架结构由于具有完好的整体性和很高的刚度,以及优越的抗震性能,故在城市的高层楼房和工业厂房的建筑中,是一种最常采用的建筑结构。所以,它的拆除工程大多是在城区或建筑群与设备密集的工厂区内进行,周围往往没有足够的定向倾倒场地,这时,一般可采用折叠式定向爆破,使框架结构在爆破过程中形成折叠,从而使倾倒距离控制在要求的范围内。

折叠式定向倾倒是根据倾倒要求,沿框架结构立柱高度分成若干层足够的爆破高度,自上而下对每层框架结构顺序间隔一定时间起爆,所以,各层框架结构的起爆时间间隔决定着整个框架倒塌方向的场地水平距离。因此,确定较合理的起爆时间间隔是搞好折叠式定向倾倒爆破的前提。

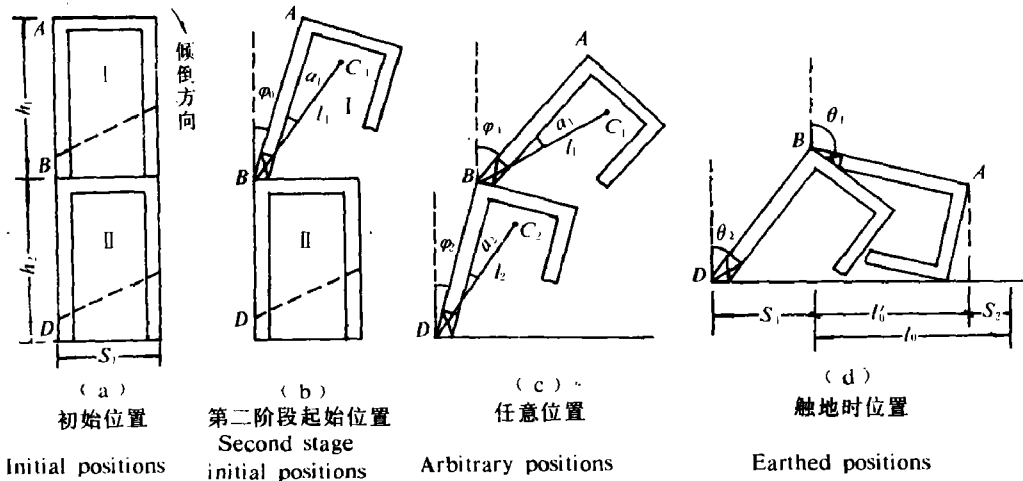


图1 一次折叠倾倒过程图

Fig.1 One fold toppling process

1989年6月30日收到原稿,12月10日收到修改稿。

对于一次折叠，可把其倾倒过程视为图 1 所示。位于倾倒方向立柱应有相应的破坏区高度，使其充分破碎，失去承载能力，非倾倒方向立柱底部应形成铰链。上部框架 I 先起爆，当框架 I 倾倒 φ_0 位置时（经历时间为 t_0 ），再起爆下部框架 II（图 1（c））。由于场地限制，要求框架 I、框架 II 完全倾倒后，框架的水平距离不超过限制距离 l_0 （图 1（d））。图中 S_2 为安全距离，实践证明框架完全倾倒后的倾倒水平距离，要比框架倾倒刚触地时的水平距离大，所以按图中形状计算 θ_1 、 θ_2 角度时，水平距离应取 l_0 ， S_2 值的大小应根据框架的质量，形状而定。

所以，问题的实质是如何确定间隔角度 φ_0 及时间 t_0 ，使得框架触地时，框架 I 和框架 II 的倾角正好为 θ_1 和 θ_2 。而起爆时间间隔 t_0 的大小，实际上是由角度 φ_0 决定的。因此，问题的关键在于当上部立柱爆破后，倾倒多大角度 φ_0 时，再起爆下部立柱。凭经验确定 φ_0 或 t_0 值，引起的误差往往较大，爆破的效果也会大不一样，甚至会出现意想不到的事故。

2. 框架折叠倾倒的数学描述

为明确起见，我们设框架各杆件是均质等截面的，即 $M_2 = \lambda M_1$ ，这里 M_1 、 M_2 分别表示框架 I、框架 II 的质量，折叠倾倒过程可分为两个阶段：

1. 当框架 I 在 B 点处起爆后，框架 I 失稳，从初始位置〔图 1（a）〕向一侧倾倒。此时，框架 I 绕 B 点作定轴转动，将 B 处视为铰链，框架 I 的运动微分方程及初始条件为

$$\begin{cases} J_B \ddot{\varphi} = M_1 g l_1 \sin(\varphi + \alpha_1) & (1) \\ \varphi(0) = 0 & (2) \\ \dot{\varphi}(0) = 0 & (3) \end{cases}$$

式中， J_B ——框架 I 对 B 点转动惯量； l_1 ——框架 I 质心 C_1 到 B 点距离； α_1 ——定角， $\alpha_1 = \angle ABC_1$ 。

由式（1），并用式（3）可得

$$\dot{\varphi} = \left\{ \frac{2M_1 g l_1}{J_B} [\cos \alpha_1 - \cos(\varphi + \alpha_1)] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$t = \left(\frac{J_B}{2M_1 g l_1} \right)^{1/2} \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{[\cos \alpha_1 - \cos(\varphi + \alpha_1)]^{1/2}} \quad (5)$$

2. 当框架 I 与竖直方向夹角达到 φ_0 值时，再于 D 处起爆框架 II，框架 II 开始运动，此时框架 I、框架 II 所组成的系统具有 2 个自由度。取 $\varphi_1(t)$ 、 $\varphi_2(t)$ 为系统的广义坐标（图 2），

B、D 处视为铰链，则框架 II 作定轴转动，框架 I 作平面运动，以 B 为基点，其质心 C_1 的速度为

$$\vec{v}_{C_1} = \vec{v}_B + \vec{v}_{C_1 B}$$

$$\therefore v_{C_1}^2 = \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 h_2^2 + 2l_1 h_2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 + \alpha_1 - \varphi_2)$$

式中， \vec{v}_{C_1} ——绝对速度； \vec{v}_B ——牵连速度； $v_B = \dot{\varphi}_2 h_2$ ； $\vec{v}_{C_1 B}$ ——相对速度； $v_{C_1 B} = \dot{\varphi}_1 l_1$ ； h_2 ——框架 II 高度。

所以，系统的动能为

$$T = \frac{1}{2} J_{C_1} \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} M_1 v_{C_1}^2 + \frac{1}{2} J_D \dot{\varphi}_2^2 = \frac{1}{2} J_B \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} (J_D +$$

$$M_1 h_2^2) \dot{\varphi}_2^2 + M_1 l_1 h_2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 + \alpha_1 - \varphi_2)$$

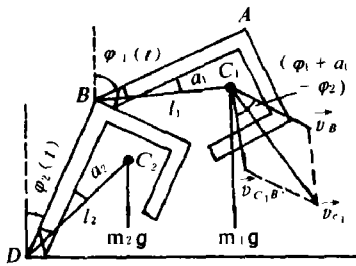


图 2 框架系统运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the motion of the frame system

式中, J_{C_1} ——框架 I 对质心 C_1 的转动惯量; J_D ——框架 II 对 D 的转动惯量。

另外, 作用于系统的主动力是有势力, 选过 D 点的水平位置为零势能位, 则系统的势能为

$$u = u_1 + u_{II} \\ = M_1 g l_1 \cos(\varphi_1 + a_1) + M_1 g h_2 \cos(\varphi_2) + M_2 g l_2 \cos(\varphi_2 + a_2)$$

于是系统的拉格朗日函数为

$$L = T - u = \frac{1}{2} J_B \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} (J_D + M_1 h_2^2) \dot{\varphi}_2^2 + M_1 l_1 h_2 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 + a_1 - \varphi_2) \\ - M_1 g l_1 \cos(\varphi_1 + a_1) - M_1 g h_2 \cos \varphi_2 - M_2 g l_2 \cos(\varphi_2 + a_2) \quad (6)$$

将 L 代入拉格朗日方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_1} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_2} = 0 \end{cases}$$

就得出第二次起爆后, 框架的运动微分方程

$$\left. \begin{aligned} J_B \ddot{\varphi}_1 + M_1 l_1 h_2 \ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_1 + a_1 - \varphi_2) + M_1 l_1 h_2 \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_1 + a_1 - \varphi_2) \\ - M_1 g l_1 \sin(\varphi_1 + a_1) = 0 \\ (J_D + M_1 h_2^2) \ddot{\varphi}_2 + M_1 l_1 h_2 \ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_1 + a_1 - \varphi_2) - M_1 l_1 h_2 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 + a_1 - \varphi_2) \\ - M_1 g h_2 \sin \varphi_2 - M_2 g l_2 \sin(\varphi_2 + a_2) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, l_2 ——框架 II 质心 C_2 到 D 点距离; a_2 ——定角, $a_2 = \angle BDC_2$ 。

若将第二次起爆瞬间作为新的时间起点, 其初始条件为

$$\varphi_1(0) = \varphi(t_0) = \varphi_0; \quad \varphi_2(0) = 0 \quad (8)$$

$$\dot{\varphi}_1(0) = \dot{\varphi}(t_0) = \left\{ \frac{2M_1 g l_1}{J_B} [\cos a_1 - \cos(\varphi_0 + a_1)] \right\}^{1/2}; \quad \dot{\varphi}_2(0) = 0 \quad (9)$$

终止条件为

$$\varphi_1(\tau) = \theta_1; \quad \varphi_2(\tau) = \theta_2 \quad (10)$$

式中, τ ——第二次起爆到框架 I 触地所需时间, (秒)。

值得注意的是式(8)、(9)、(10)并不是通常意义下的初始条件或边值条件, 因为 φ_0 、 τ 都是待定的, 而我们的目的是要找出 φ_0 、 τ 与已知量 θ_1 、 θ_2 间的关系。

3. 关于 φ_0 、 τ 及 t_0 的具体计算公式

对于上述模型, 我们可以通过解“待定”初值问题和解“待定”边值问题这两条途径求解。但由于式(7)的通解不能用有限形式表达, 所以途径一很难实现我们的目的, 而途径二则可用变分问题的直接方法找到 φ_0 的近似解析解, 这样, 依据哈密尔顿 (Hamilton) 原理和变分法, “待定”边值问题就等价于求解下述变分问题

$$S = \int_0^\tau L dt \quad (11)$$

$$\varphi_1(0) = \varphi_0, \quad \varphi_2(0) = 0 \quad (12)$$

$$\varphi_1(\tau) = \theta_1, \quad \varphi_2(\tau) = \theta_2 \quad (13)$$

这里 L 的表达式见式(6)。

1. φ_0, τ 的具体计算公式

现在，用里兹 (Ritz) 法求变分问题式 (11)、(12)、(13) 的近似解。设近似解为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(t) &= \frac{\theta_1 - \varphi_0}{\tau} t + at(t^2 - \tau^2) + \varphi_0 \\ \varphi_2(t) &= \frac{\theta_2}{\tau} t + \beta t(t^2 - \tau^2) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_1(t) &= \frac{\theta_1 - \varphi_0}{\tau} + a(3t^2 - \tau^2) \\ \dot{\varphi}_2(t) &= \frac{\theta_2}{\tau} + \beta(3t^2 - \tau^2) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

它们满足“边界条件”式 (12)、(13)， a, β 为待定系数。

将式 (14)、(15) 代入 L 的表达式 (6)，然后计算积分 $S = \int_0^{\tau} L dt$ 。计算中对含有三角函数的项，采用近似公式 $\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right]$ ，再利用极值条件 $\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0$ ，并由式 (15) 考虑初始条件 (9)，化简后得如下两个方程式，并分别用 $F_1(\varphi_0, \tau), F_2(\varphi_0, \tau)$ 表示。

$$\left. \begin{aligned} F_1(\varphi_0, \tau) &= \frac{gl_1}{4\rho_B^2} \tau^2 \sin\left(\gamma + \frac{\theta_2}{8} + a_1\right) + \left\{ \frac{4}{5} - \frac{3l_1h_2}{64\rho_B^2} \theta_2 \sin(\gamma + a_1) \right\} \tau \\ &\quad \left\{ \frac{2gl_1}{\rho_B^2} [\cos a_1 - \cos(\varphi_0 + a_1)] \right\}^{1/2} - \left\{ \frac{4}{5} + \frac{9l_1h_2}{64\rho_B^2} \theta_2 \sin(\gamma + a_1) \right\} (\theta_1 - \varphi_0) \\ &\quad - \frac{l_1h_2}{\rho_B^2} \left[\cos(\theta_1 - \theta_2 + a_1) - \frac{1}{8} \cos(\gamma + a_1) \right] \theta_2 = 0 \\ F_2(\varphi_0, \tau) &= \frac{gh_2}{4\rho_D^2} \tau^2 \sin \frac{\theta_2}{8} + \frac{1}{4} \lambda \frac{gl_2}{\rho_D^2} \tau^2 \sin\left(\frac{\theta_2}{8} + a_2\right) + \frac{l_1h_2}{\rho_D^2} \left\{ \frac{1}{6} \cos(\varphi_0 + a_1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{3} \cos(\theta_1 - \theta_2 + a_1) + \frac{1}{24} \cos(\gamma + a_1) + \frac{3}{64} \theta_2 \sin(\gamma + a_1) \right\} \tau \\ &\quad \times \left\{ \frac{2gl_1}{\rho_B^2} [\cos a_1 - \cos(\varphi_0 + a_1)] \right\}^{1/2} - \left\{ \frac{4}{5} \left(\lambda + \frac{h_2^2}{\rho_D^2} \right) - \frac{9l_1h_2}{64\rho_D^2} (\theta_1 - \varphi_0) \right. \\ &\quad \left. \times \sin(\gamma + a_1) \right\} \theta_2 - \frac{l_1h_2}{\rho_D^2} \left[\cos(\theta_1 - \theta_2 + a_1) - \frac{1}{8} \cos(\gamma + a_1) \right] (\theta - \varphi_0) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中， $\gamma = \frac{\theta_1 - \theta_2 + 7\varphi_0}{8} + \frac{3}{8} \tau \left\{ \frac{2gl_1}{\rho_B^2} [\cos a_1 - \cos(\varphi_0 + a_1)] \right\}^{1/2}$ ， ρ_B, ρ_D ——分别为框架 I、

II 对 B 点或 D 点的惯性半径， $\rho_B^2 = J_B / M_1, \rho_D^2 = J_D / M_2$ 。

2. 式 (16) 的解法

式 (16) 是一个非线性方程组，可用最优化方法求其近似解。

令 $F(\varphi_0, \tau) = F_1^2(\varphi_0, \tau) + F_2^2(\varphi_0, \tau)$

则 $F(\varphi_0^*, \tau^*) = \text{Min}_{\varphi_0, \tau} F(\varphi_0, \tau)$ 的 φ_0^*, τ^* 即为 $F_1(\varphi_0, \tau) = 0$ 和 $F_2(\varphi_0, \tau) = 0$ 的近似解。求最小值时, 可采用最优化方法中的单纯形加速法或步长加速法; 或用图 3 中的程序框图, 编写电算程序上机计算。

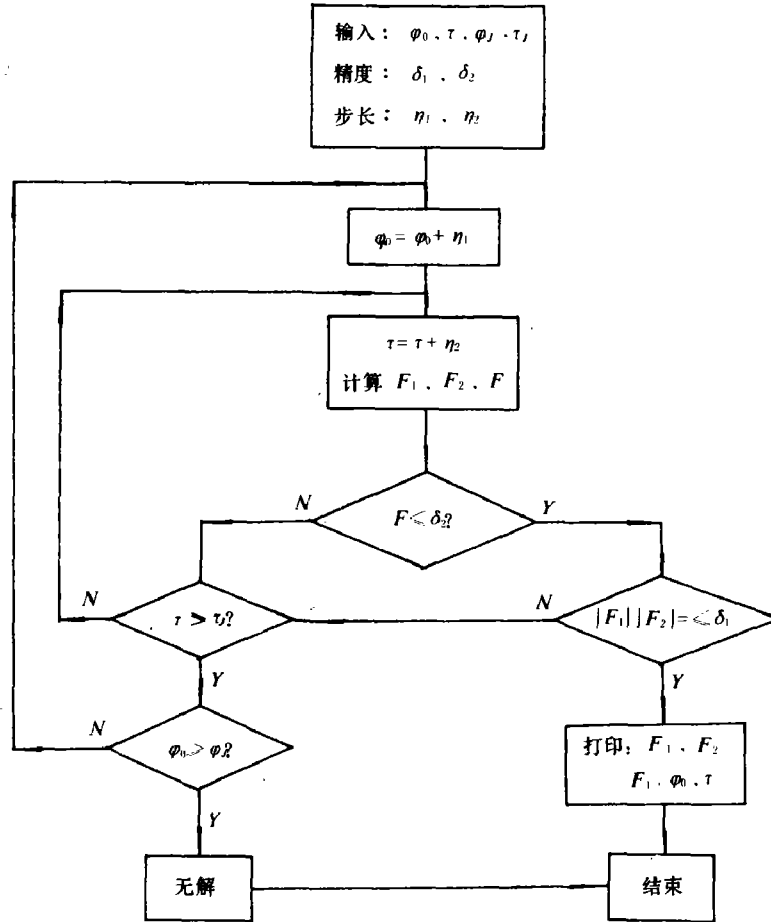


图 3 程序框图

Fig. 3 Flow chart scheme

3. 关于间隔时间 t_0 的计算

由式 (5) 可得

$$t_0 = \left(\frac{\rho_B^2}{2gl_1} \right)^{1/2} \int_0^{\varphi_0} \frac{d\varphi}{[\cos a_1 - \cos(\varphi + a_1)]^{1/2}}$$

给定 φ_0 后, 用数值积分求出 t_0 的近似值

$$t_0 \approx \frac{\varphi_0}{2} \left(\frac{\rho_B^2}{2gl_1} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 c_i [f(x_i) + f(-x_i)] \quad (17)$$

式中,

$$f(x) = \left[\cos a_1 - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} x + a_1 + \frac{\varphi_0}{2} \right) \right]^{-1/2}$$

c_i, x_i 可查有关高斯 (Gauss) 积分公式的计算数据。

4. 实例的计算及分析

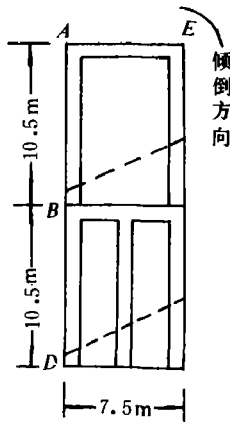


图 4 断面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the cross section

某化工厂蒸汽喷射楼为一整体灌注钢筋混凝土框架大楼，高 21 米，分为两层，每层高 10.5 米，上层柱子截面为 400 mm × 400 mm，下层柱子截面为 500 mm × 500 mm。该楼环境复杂，可倾倒的空场地最大水平距离为 15 米，在楼的北侧^[2] (见图 4)。为此，确定采用折叠式爆破，以使倾倒距离小于 15 米。

根据该楼的特点，分为两层折叠爆破，每层高 10.5 米。

1. 为了达到定向倾倒，对影响框架倾倒的次要梁，柱，板及砖墙，事先起爆加以破坏。上层框架倾倒方向立柱的底部爆高设计为 4 米，下层框架倾倒方向立柱的底部爆高设计为 4 米，中间立柱爆高设计为 2 米，在 B、D 点分别形成铰链。

2. 为了达到折叠爆破效果，首先对上层框架立柱进行爆破，使其倾倒一定角度 φ_0 后，再爆破下层框架立柱。按框架 E 点触地时的情况考虑，取 S_2 为 5 米，可算出 $\theta_1 = 97.8645^\circ$ ， $\theta_2 = 32.3924^\circ$ ，将框架看作等密度的柱、梁组成，由结构图利用周知的计算方法，

得到 $\alpha_1 = 21.65^\circ$ ， $\alpha_2 = 25.9291^\circ$ ， $\rho_B^2 = 82.1030\text{m}^2$ ， $\rho_D^2 = 71.8819\text{m}^2$ 。

3. 本实例在计算式(16)时，是用图 3 中的框图，通过编写电算程序上机计算的(在 IBM 机上实现)。考虑到 φ_0 的单位是度， τ 的单位是秒，它们的单位量级较小，计算时取精度 $\delta_1 \leq 0.1$ ， $\delta_2 \leq 0.02$ ，输出结果为 $\varphi_0 = 10.12^\circ$ ， $\tau = 2.01\text{s}$ ，上下框架起爆时间间隔可按式(17)计算，结果为 $t_0 \approx 0.94\text{s}$ ，实际施工时可取 $t_0 = 1.0\text{s}$ 。

4. 不同的 l_0 ，对应有不同的 φ_0, τ 值。当 $l_0 = 13\text{m}$ ， 10m ，分别可计算出 $\varphi_0 = 15.85^\circ, 38.91^\circ$ ， $\tau = 1.71\text{s}, 1.02\text{s}$ ，其图形如图 5 所示。

5. 文献(1)中指出，根据实际经验 $\varphi_0 = 5^\circ \sim 20^\circ$ ，这与上述实例计算两者相吻合。文献(2)中指出，当 $l_0 < 15\text{m}$ 时，取 $\varphi > 30^\circ$ ，按其文中所述及图示可以认为文献(2)中的 φ 角包括 α_1 角，即我们的 $\varphi_0 + \alpha_1$ 相当于文献(2)中的 φ 。这样上述计算结果为 $\varphi = \varphi_0 + \alpha_1 = 31.77^\circ > 30^\circ$ ，两者也是相吻合的。

5. 几点结论

1. 在建立关于 φ_0 的计算公式(16)过程中，关键的一步是近似求解了变分问题(11)、(12)、(13)，它与精确解的误差是多少，是否在工程应用的允许范围内，这是很重要的问题。由于数学上的困难，我们所设的近似解与精确解的偏差很难估计。但是，由于在设近似解时，除了使它们满足“边界条件”外，我们还考虑了框架的运动特点，加上 τ 的取值范围很小，因此，这样的近似解对精确解的偏离不大。方程组 $F_1 = 0, F_2 = 0$ 的电算结果是有力的作证。从图 5 的 $\varphi_0 - \theta_2$ 曲线上，可看到 φ_0 取值情况与直观的定性分析相当一致 (θ_2 角越小， φ_0 值越大)。

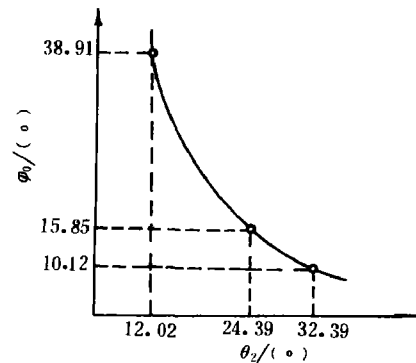


图 5 θ_2 与 φ_0 的关系曲线
Fig. 5 θ_2 versus φ_0

2. 对于折叠式定向爆破, 我们给出的计算方法是具有实际意义的, 一个显然的事实是对于给定的 l_0 、 φ_0 角的选择并不唯一, 我们上述计算是对应 l_0 的最小允许的 φ_0 角, 施工时应取 $\varphi_0 > \min \varphi_0$ 。当 l_0 给定时, φ_0 角要取得适当。现在都偏向于取较大的 φ_0 角, 虽然加大了安全性, 使折叠式定向爆破成功, 但是, 由于此时 τ 值过小, 下部框架难于充分破碎, 经济效果不理想。

3. 关于 t_0 的计算公式, 涉及到施工中的一些因素, 如爆高的影响, 倾倒时构件相互撞击, 物体上部产生复杂的断裂、变形和错动等等都将影响 t_0 值, 所以, 它的偏差常常不易控制, 因此, 按公式制订施工方案时, 还须注意与经验结合。

4. 爆高的确定除要满足爆后能使框架失稳 (这只是决定爆高的必要条件), 而且要保证框架下落冲击地面时, 形成二次解体, 自己破裂 (这是决定爆高的充分条件), 这样可以收到十分良好的经济效果。

参 考 文 献

- [1] 蒋 锐, 工程爆破文集 (第三辑), (全国工程爆破学术会议论文选), 冶金工业出版社, (1988), 171.
[2] 关志中等, 爆破与安全, 湖北科学技术出版社, (1984), 251.

STUDY OF FOLDING DIRECTIONAL BLASTING OF REINFORCED CONCRETE FRAMING

Wu Wenwei Li Gangchang He Shibei

(Fuxin Institute of Mining)

ABSTRACT The calculating formulae of the initiating clearance angle and time for the upper and lower part of the column are given in this paper which are in consideration of the special features of controlled blasting as well as mechanical and mathematical analyse of tilting motion of folding directional blasting for reinforced concrete frame. The principle and method could be adapted to solve analogous blasting problems.

KEY WORDS controlled blasting, demolishing structures, blasting technique, engineering blasting, Ritz method.