

文章编号: 1006-9941(2011)05-0544-04

混凝土靶爆破后靶体端面振动加速度的简便算法

宋浦^{1,2}, 王晓鸣¹, 顾晓辉¹, 梁安定², 赵向军²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 通过爆轰波在介质分界面处作用的爆炸力学方程组推导, 提出了固体介质中装药爆炸后的靶体端面振动加速度的简便计算方法。针对混凝土介质进行了爆破实验, 利用实验结果对所得到的简便算法进行了验证分析。实验测得的加速度值约为 $1.47 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 与简便算法得到的结果 ($1.73 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) 接近。研究表明简便算法计算精度满足工程设计需要; 如能给出装药爆轰过程的精确 $p-t$ 曲线, 则可计算出装药爆炸后的固体介质内部任意处的 $a-t$ 曲线。

关键词: 爆炸力学; 混凝土; 端面; 振动加速度; 算法

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.014

1 引言

近期几场局部战争表明, 侵彻爆破类型的钻地弹在地下结构附近的地面或地下爆炸时产生的爆破效应和地冲击效应可对深层工事主体结构产生严重威胁^[1-7]。爆炸威力主要体现在爆坑和对目标造成的结构破坏, 如崩落、抛掷、目标介质的冲击振动等效应。同时在很大的比例距离范围内, 地下爆炸产生的应力大于其在空气中爆炸, 且作用时间更长, 相应的地运动明显。一般而言, 爆炸后效为爆坑作用和爆破地震效应^[7]。

目前, 在爆炸作用下动力响应的理论研究目标大多集中于地面的建(构)筑物, 作用激励主要来自于冲击波, 地下深埋目标结构和其它动力激励因素考虑较少^[2,8]。但地下目标在冲击波的直接作用及其诱发的地冲击作用下将产生突然运动, 因此目标结构、目标中的人员和设备都可能由于突然运动而受到严重冲击, 这种振动冲击直接危及地下结构或结构内部的人员、设备及装备的安全, 甚至能造成严重破坏及失效。因此爆炸振动加速度的研究对于目标的毁伤和防护来说都极为重要。

本文从爆炸力学中爆轰波在介质分界面处作用的基本方程式开始推演, 提出一种固体介质中爆炸振动加速度的简便算法。同时, 开展了混凝土靶端面爆

炸振动加速度的实验, 利用实验结果对简便算法进行了验证分析。

2 简便算法

目前, 衡量爆破振动质点加速度的经验计算公式主要来自于量纲分析法的结论, 如式(1)所示^[9-10]:

$$a = K \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{r} \right)^n \quad (1)$$

式中, a 为质点振动加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; W 为装药量, kg ; r 为测点至装药中心的距离, m ; K 为与爆破场地有关的系数; n 为与介质条件有关的系数。

式(1)虽然表达简洁, 但由于 K 、 n 等参数需由现场实验测得, 将耗费较大的人力和财力, 无法简便地给出, 需要预估的结果, 而且在工程设计中应用的这类评价准则不适用于真实的爆炸振动引起的结构破坏^[2]。

由牛顿第二定律 $F = ma$ 可知, 介质受到的爆炸振动加速度 a 可由其受到的作用力 F 及其质量 m 求得。

$$\text{由于 } F = pS; m = Sl\rho;$$

$$\text{则 } p = la\rho \quad (2)$$

式中, p 为介质受到的爆炸压力(介质中爆炸初始冲击波通过一定距离衰减后的压力), Pa ; S 为介质受力的作用面积, m^2 ; ρ 为介质的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; l 为介质的高度, m 。

炸药在固体介质中爆炸后, 由于材料的粘性引起爆炸波的能量损失, 属于一种物理衰减。虽然粘性会使波产生弥散, 但不会影响波速。同时材料的弹性模量和密度不会有很大变化。其衰减规律一般为^[9-10]:

收稿日期: 2010-11-05; 修回日期: 2011-01-31

基金项目: 国家安全重大基础研究(513090204)

作者简介: 宋浦(1973-), 男, 博士生, 主要从事爆炸力学、战斗部毁伤效能评估等方向研究。e-mail: 24455077@qq.com

$$p = p_m / (r/r_0) \eta \quad (3)$$

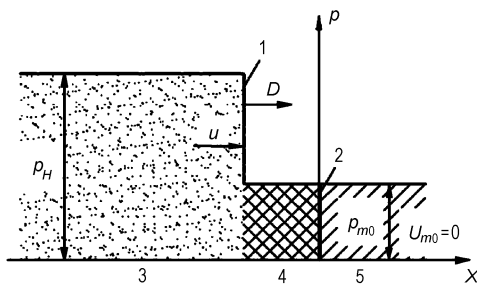
式中, p_m 为爆炸波初始压力, Pa; r 为介质质点距装药中心的距离, m; r_0 为初始装药半径, m; η 为衰减系数。

$$\text{衰减系数}^{[9-10]} \eta = 2 - \frac{v}{1-v} \quad (4)$$

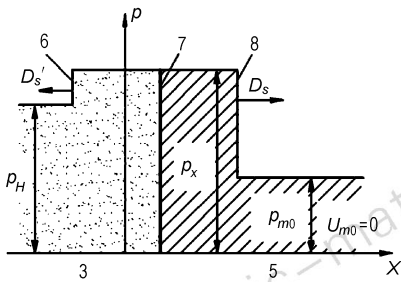
式中, v 为介质的泊松比。

炸药起爆后, 爆轰波向各个方向传播。当其传播到装药边缘时, 爆轰波冲击压缩周围介质; 同时反射波通过气态爆轰产物向装药中心传播。若炸药的冲击阻抗小于固体介质 (例如普通炸药与混凝土介质相比), 分界面处冲击波的初始压力 p_x 将大于爆轰波的 C-J 压力 p_H ^[11-12]。

以下角标 m 代表介质的参数, 下脚标 x 代表初始参数, p_{m0} 和 U_{m0} 表示未受到扰动固体介质的初始压力和质点运动速度。则爆轰波到达界面之前、后与介质发生作用瞬间的分布如图 1 所示。



a. 入射爆轰波到达炸药-介质界面之前
a. incident detonation wave will be at explosive-medium interface



b. 入射爆轰波到达炸药-介质界面之后
b. incident detonation wave have been at explosive-medium interface

图 1 界面压力分布示意图

1—爆轰波阵面, 2—原始分界面, 3—爆轰产物, 4—炸药, 5—固体介质, 6—反射冲击波阵面, 7—分界面, 8—冲击波阵面

Fig. 1 Distribution scheme of pressure at the interface

1—detonation wave front, 2—initial interface, 3—detonation products, 4—explosive, 5—solid medium, 6—reflected shock wave front, 7—interface, 8—shock wave front

由于反射回产物中的波为冲击波, 其波速为 D_s' , 而反射波传过后使得产物的质点速度由 $u_H = \frac{1}{\gamma+1} D$ 降低为分界面的运动速度 u_x , 即反射波 D_s' 传过后产物也获得一个附加速度 u_r , 这一速度等于 u_x 与 u_H 之差 ^[12], 即:

$$u_r = u_x - u_H = -\sqrt{(p_x - p_H)(v_H - v_x)} \quad (5)$$

式中, v_H, v_x 分别为爆轰波阵面上爆轰产物的比容和反射冲击波阵面上爆轰产物的比容。

$$\text{爆轰产物的状态方程可表示为: } p = A\rho^\gamma \quad (6)$$

式中, A 为爆轰产物的特性参数, γ 为爆轰产物的多方指数。

利用式 (6), 可得反射冲击波的 Hugoniot 方程 ^[12]:

$$\frac{v_x}{v_H} = \frac{(\gamma+1)p_H + (\gamma-1)p_x}{(\gamma+1)p_x + (\gamma-1)p_H} = \frac{(\gamma-1)\pi + (\gamma+1)}{(\gamma+1)\pi + (\gamma-1)} \quad (7)$$

其中, 令 $\pi = \frac{p_x}{p_H}$, 将其代入式 (7) 可得 ^[12]:

$$u_x = u_H \sqrt{p_H v_H (\pi - 1) \left[1 - \frac{(\gamma-1)\pi + (\gamma+1)}{(\gamma+1)\pi + (\gamma-1)} \right]} \quad (8)$$

根据 C-J 理论基本方程得到:

$$u_x = \frac{D}{\gamma+1} \left[1 - \frac{(\pi-1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma+1)\pi + (\gamma-1)}} \right] \quad (9)$$

由于 $p_x \gg p_{m0}$, 则在分界面处有:

$$\begin{aligned} p_{mx} &= p_x; \\ u_{mx} &= u_x = \sqrt{(p_x - p_{m0})(v_{m0} - v_{mx})} \\ &\approx \sqrt{p_x(v_{m0} - v_{mx})} \end{aligned} \quad (10)$$

若已知固体介质的冲击绝热方程 $D = C_0 + \lambda u$, 其中 C_0 为介质声速, λ 为特性参数。根据动量守恒, 则

$$\begin{aligned} p_{mx} &= p_x = \rho_{m0} u_{mx} (C_0 + \lambda u_{mx}) \\ &= \rho_{m0} \sqrt{p_x(v_{m0} - v_{mx})} (C_0 + \lambda \sqrt{p_x(v_{m0} - v_{mx})}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, C_0 和 λ 为高压动态试验材料常数, 对于混凝土 ^[13], $C_0 = 2336$, $\lambda = 1.318$ 。

由上述各式联立即可求出分界面处的 p_{mx}, u_{mx}, v_{mx} 。

将分界面处计算出的 p_{mx} 代入式 (3), 可计算出距离装药中心特定距离的压力值, 将其代入式 (2), 可计算出固体介质内部或端面的爆破振动加速度值 a 。

3 爆破实验

炸药在固体介质中爆炸时, 一部分能量引起炸药周围介质的扰动, 并以波动形式向外传播。应力波与冲击波的主要区别在于前者是连续波而后者是强间断

波,且二者的传播速度不同。应力波由冲击波衰减而成,且在爆炸远区其形态接近一般的声学振动。应力波的拉伸相与压缩相均对爆炸的破坏过程起作用,其中压缩相的破坏作用较明显^[9-11]。对于爆破振动来说,应力波作用区域的研究是军事研究者关注的重点。

根据前述理论模型,设计了混凝土介质圆柱靶的爆破实验,以进行靶体端面爆破振动加速度的实测。实验示意简图如图 2 所示。

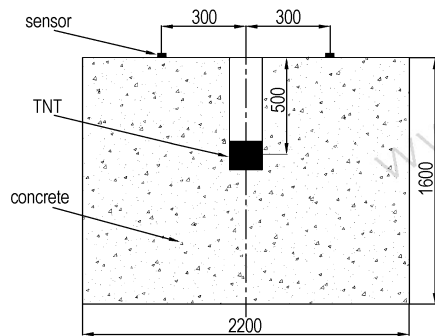


图 2 混凝土介质中的爆破实验示意简图

Fig. 2 Scheme of blast experiment in concrete

实验中使用的装药是 500 g 的压装 TNT 药柱,尺寸 $\Phi 70 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$; C-35 混凝土靶体尺寸为 $\Phi 2200 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$,养护 28 d。炸点位置距混凝土上端面 500 mm。加速度传感器为西安近代化学研究所研制的 988 型传感器,位于靶体的上端面,距中心管中心间距 300 mm。实验测试使用的是江苏联能公司的 YE5853A 型多通道电荷放大器和尼高丽公司的 IDH0700365 型数据记录仪。

实验共进行了 3 次,实测了 6 组数据,加速度传感器测得的一组 $a-t$ 曲线如图 3 所示。

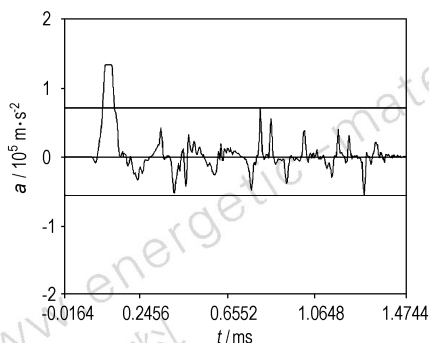


图 3 爆破实验后实测的 $a-t$ 曲线

Fig. 3 The $a-t$ curve measured in blast experiment

由图 3 可知,6 组数据的正向最大加速度值均削波溢出超过了 $1.27 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,根据我们的实验经

验估计在 $1.47 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右。而在实验约束条件下根据上述简便算法计算所得的振动加速度值为 $1.73 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,与实测结果接近。误差原因主要在于模型计算的前提条件是装药在密闭介质中爆炸,能量全部作用于介质;但实验的真实状况是装药置于靶材的中心管内,有向上的泄爆空间,因而装药的能量有耗损,故计算值比实测值偏大。

4 结 论

(1) 提出了一种固体介质中爆炸振动加速度的简便算法,该算法计算精度能满足工程设计需要。

(2) 开展了混凝土靶端面爆炸振动加速度的实验,利用实验结果对简便算法进行了验证分析。实测值约为 $1.47 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,计算值为 $1.73 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,计算值与实验值接近。

(3) 若进一步深入研究,给出装药爆轰过程的精确 $p-t$ 曲线,则可计算出固体介质爆破后内部任意处的 $a-t$ 曲线。

参考文献:

- [1] 洪元军. 外军侵彻弹药及引信技术的最新进展[J]. 探测与控制学报,2000,22(2): 8-13.
HONG Yuan-jun. The recent progress on the penetration ammunition and fuze technique of foreign army[J]. *Journal of Detection & Control*,2000,22(2): 8-13.
- [2] 杜修力,廖维张,田志敏,等. 爆炸作用下建筑物动力响应与防护措施研究进展[J]. 北京工业大学学报,2008,34(3): 277-287.
DU Xiu-li, LIAO Wei-zhang, TIAN Zhi-min, et al. State-of-the-art in the dynamic responses and blast resistant measures of the buildings under explosive loads[J]. *Journal of Beijing University of Technology*,2008,34(3): 277-287.
- [3] 王礼立. 爆炸与冲击荷载下结构和材料动态响应研究的新进展[J]. 爆炸与冲击,2001,21(2): 81-88.
WANG Li-li. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/impact loading[J]. *Explosion and Shockwaves*,2001,21(2): 81-88.
- [4] 李永池,王志海,邓世春. 爆炸和冲击工程力学近期研究进展[J]. 中国科学技术大学学报,2007,37(10): 1172-1179.
LI Yong-chi, WANG Zhi-hai, DENG Shi-chun. Progress in explosion/impact engineering mechanics[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*,2007,37(10): 1172-1179.
- [5] 陈大年. 混凝土的冲击特性描述[J]. 爆炸与冲击,2001,21(2): 89-97.
CHEN Da-nian. Description of properties of concrete under impact[J]. *Explosion and Shockwaves*,2001,21(2): 89-97.
- [6] 顾晓辉,宋浦,王晓鸣. TNT 在钢筋混凝土靶中爆炸的试验研究[J]. 火炸药学报,2009,32(5): 33-36.
GU Xiao-hui, SONG Pu, WANG Xiao-ming. Experimental study on explosion of TNT in reinforced concrete targets[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2009,32(5): 33-36.

- [7] 宋浦,顾晓辉,王晓鸣,等. 混凝土中的爆坑试验研究[J]. 火炸药学报,2005,28(2): 60-62.
SONG Pu, GU Xiao-Hui, WANG Xiao-Ming, et al. Experimental investigation on cratering of concrete[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(2): 60-62.
- [8] 李忠献. 工程结构抗爆防爆的研究与发展[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LI Zhong-xian. Investigation and Progress on Anti-blast and Explosion-proof of Engineering Structure [M]. Beijing: Science Publisher of China, 2005.
- [9] А Н 哈努卡耶夫, 刘殿中译. 矿岩爆破物理过程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 156-160.
А Н Ханукаев. translated by LIU Dian-zhong. Physical Process of Blast of Mining Rock[M]. Beijing: Publisher of Mining Industries, 1980: 156-160.
- [10] 宋浦, 梁安定. 混凝土中的爆炸应力波[C]//中国力学学会爆炸力学实验技术专业组: 第三届全国爆炸力学实验技术学会论文集. 合肥. 2004: 382-386.
SONG Pu, LIANG An-ding. Blasting Stress Wave in Concrete[C] // Experiment Technology Professional of Explosion Dynamics of the Chinese Mechanics Society: The Proceedings of 3rd National Seminar on Experiment Technology of Explosion Mechanics. Hefei. 2004: 382-386.
- [11] 宗国庆. 混凝土介质爆破效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1994.
ZONG Guo-qing. Investigation on blast effect in concrete medium[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1994.
- [12] 爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 222-229.
- [13] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 283-284.
WANG Ru-ce, ZHAO Guo-zhi. Projectile Terminal Effects[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 283-284.

Simplified Calculation Method of Blast Vibration Acceleration in Concrete Target Head Face

SONG Pu^{1,2}, WANG Xiao-ming¹, GU Xiao-hui¹, LIANG An-ding², ZHAO Xiang-jun²

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: By deduction from explosion mechanical equations of detonation wave interaction at interface, the simplified calculation method of blast vibration acceleration of target head face was put forward in solid medium after charge explosion. Blast experiments in concrete were performed, and the simplified calculation method was verified by the experimental results. The vibration acceleration value measured by the experiment was $1.47 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, and it was close with the result calculated by the simplified calculation method ($1.73 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Results show that the accuracy of the simplified calculation method could meet the needs of engineering design, and the $a-t$ curve of the solid medium after blast could be calculated anywhere if the exact detonation wave $p-t$ curve is known.

Key words: explosion mechanics; concrete; head face; vibration acceleration; calculation method

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.014