

文章编号: 1001-1455(2006)03-0240-05

土中爆炸地冲击能量分布研究*

施 鹏^{1,2}, 邓国强³, 杨秀敏³, 陈肇元¹

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084;

2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023;

3. 总参工程兵科研四所, 北京 100850)

摘要: 利用数值模拟方法研究了土中装药不同埋设深度爆炸能量分布问题, 通过试验得到了耦合系数数据。给出了自由场条件下, 封闭爆炸最小比例埋深为 $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$, 这与美军设计规范 TM5-855-1 中的数据 $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ 相差较大, 分析了产生差异的可能原因。并指出本文中给出的冲量型耦合系数与 TM5-855-1 中的应力型耦合系数是有所区别的, 应该注意其使用范围和对象。

关键词: 爆炸力学; 能量分布; 数值模拟; 地冲击; 耦合系数

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

当常规弹药在地面或浅埋地下爆炸时, 将产生弹坑、抛掷物和地冲击效应。地冲击是由爆炸传入地下的部分能量产生的, 会导致场地应力场发生剧烈变化。当地冲击波传播到地下结构时, 由于介质与结构之间的相互作用, 地冲击可能对结构产生严重威胁。弹药在介质中不同埋设深度爆炸的能量分布规律、爆炸引起的地冲击规律等决定了结构的响应和爆炸对结构的破坏程度, 其中耦合系数 f 是反映不同埋设深度弹药爆炸和介质的耦合程度的参数。

耦合系数 f 的定义为: 部分埋设或浅埋爆炸(近地爆)与完全埋设爆炸(封闭爆炸)在同一介质中所产生的地冲击大小的比值, 见下式

$$f = \frac{(p, I, v, d, a)_{\text{近地爆}}}{(p, I, v, d, a)_{\text{封闭爆炸}}} \quad (1)$$

式中: 峰值压力(应力) p 、冲量 I 、峰值质点速度 v 、峰值位移 d 、峰值加速度 a 是地冲击参数。若耦合系数 f 选取峰值压力(应力) p 的比值, 则称 f 为应力型耦合系数; 耦合系数 f 选取冲量 I 的比值, 则称 f 为冲量型耦合系数。

爆炸物在介质中爆炸时作用于介质的能量与炸药释放出来的能量和弹体爆炸时距地面的深度有很大关系, 耦合系数是衡量在同一介质中爆炸时能量分布的尺度, 主要由介质参数和爆炸时约束方式的不同引起, 反映弹体爆炸时能量传输给介质的程度。

美军设计规范 TM5-855-1^[1] 是美国防护工程研究、结构设计经常使用的理论和数据手册, 给出了不同介质的耦合系数曲线, 从中可以得出, 土中完全封闭爆炸时 ($f=1.0$), 比例爆炸埋深为 $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ ($=1.4 \text{ ft/l b}^{1/3}$), 当装药量 $W=1 \text{ kg}$ 时, 埋深 $h=0.56 \text{ m}$ 。本文中进行了自由场条件下土中集团装药不同埋设深度爆炸的试验研究和数值模拟, 并将结果与 TM5-855-1 的数据进行了对比分析。

2 耦合系数试验测量

当弹药在土中爆炸时, 影响地冲击荷载规律的物理因素包括弹体装药量 W 、弹体侵彻深度(弹药埋设深度) h 、介质材料参数(介质密度 ρ 、压缩波速 c)、爆心距 R 等。不同侵彻深度对爆炸的影响因素用耦

* 收稿日期: 2005-04-06; 修回日期: 2005-05-30

作者简介: 施 鹏(1970—), 男, 博士, 副研究员。

合系数 f 来表示。

自由场的荷载参数包括峰值压力 p 、冲量 I_0 、上升时间 t_s ，以质量(M)、长度(L)和时间(t)的单位为基本量纲，各参数组成的量纲一组合分别为 $p/\rho c^2$ 、 $I_0/\rho c W^{1/3}$ 、 $t_s c/W^{1/3}$ 。在总结爆炸荷载衰减规律时，把上述量纲一组合与比例距离 $R/W^{1/3}$ (在假定大气压力 p_0 恒为定值条件下，为准量纲一量)在对数坐标内进行线性拟合，拟合后的形式参见下式

$$\begin{cases} p/(\rho c^2) = fa_1 (R/W^{1/3})^{b_1} \\ I_0/(\rho c W^{1/3}) = fa_2 (R/W^{1/3})^{b_2} \\ t_s c/W^{1/3} = fa_3 (R/W^{1/3})^{b_3} \end{cases} \quad (2)$$

式中：拟合系数 $a_i, b_i (i=1,2,3)$ 由实测数据回归得到。

耦合系数通常由试验测得，测试参数根据测试条件的改变而改变，如运动参数(a, v, d)和荷载参数(p, I)等，然后按照公式(1)的定义确定耦合系数 f 。本文的试验方法是在土中的不同深度分别埋设相同质量的 TNT 炸药，传感器的埋设方式和位置不变，同时保持爆心与传感器距离不变，测量峰值压力、上升时间和正压时间。耦合系数 f 与装药埋设深度 h 和药量 W 有关，处理数据时将 h 和 W 组成比例埋深 $h/W^{1/3}$ ，并绘制成 $f-h/W^{1/3}$ 曲线图。

采用掘开逐步回填的方法进行试验，试验井的直径要求大于深度的 1.5 倍，以确保试验土质一致。试验场地选择在黄土层较厚的土质中，土质为洛阳黄土，介质材料参数为：含水量 14~17%，容重 1852 kg/m³，内摩擦角 23°~25°，压缩模量 330 MN/m³，孔隙比 0.90，弹性波速 220~300 m/s。炸药采用 200 g 块状 TNT 捆绑，电雷管电池起爆。采用洛阳铲挖孔，炸药竖直安放在孔底部，不回填。试验的具体过程和数据、误差分析等参见作者的研究报告^[2]。

由于耦合系数是衡量能量分布的尺度，对压力进行时域积分得到压力冲量，取封闭爆炸时的压力冲量为最大值，同其他埋深的压力冲量相比，得到耦合系数曲线(见图 1)。图 2 给出了试验爆炸的宏观现象，可以看出，当装药埋设深度 $h=1.95$ m 时，地面没有出现抛撒和弹坑，仅仅在远区出现不规则裂缝。试验宏观现象和数据均表明，当土中装药比例埋深超过 2.0 m/kg^{1/3} 后，爆炸基本达到完全封闭，耦合系数 f 达到 1.0，这与美军规范 TM5-855-1 中的数据 0.56 m/kg^{1/3} 相差较大，可能的原因将在下面进一步分析。

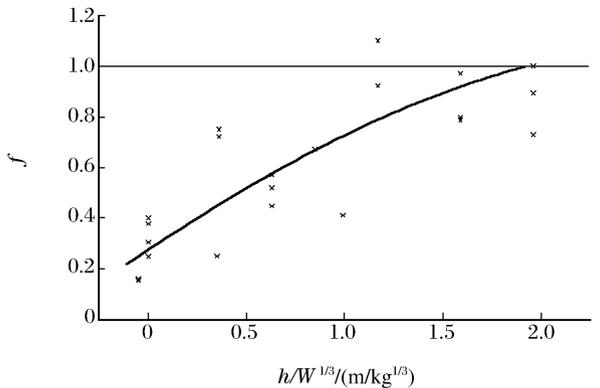


图 1 试验耦合系数曲线

Fig. 1 The coupling coefficient curve from test

(a) $h=0.85$ m



(b) $h=1.95$ m



图 2 试验爆炸现象

Fig. 2 The explosion phenomena in test

3 数值计算

利用 LS-DYNA 程序,采用全欧拉算法进行集团装药不同埋设深度爆炸现象的数值模拟。装药为 834 g TNT 炸药,从爆高 16 cm 开始到埋深 204 cm,按照埋设深度不同分成 13 组进行计算。TNT 炸药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程^[3]模拟,其爆轰过程中压力 p 和相对体积 V 的关系为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 是材料常数, E_0 是初始比内能。TNT 炸药参数为: $\rho=1.64 \text{ t/m}^3$, $D=6.93 \text{ km/s}$, $A=371.2 \text{ GPa}$, $B=3.23 \text{ GPa}$, $R_1=4.15$, $R_2=0.95$, $\omega=0.3$, $E_0=4.27 \text{ GJ/kg}$, $p_{\text{CJ}}=21.0 \text{ GPa}$ 。

土壤采用 SOIL_AND_FOAM_FAILURE 材料模型,材料参数为: $\rho=1.8 \text{ t/m}^3$, $G=63.9 \text{ MPa}$, $K=30 \text{ GPa}$,屈服常数 a_0 、 a_1 、 $a_2=3.4 \times 10^9$ 、 7.03×10^4 、 0.3 ,截断压力 $p_c=-6.9 \text{ kPa}$ 。

4 分析和讨论

TM5-855-1 手册中提供了一组土介质的相对于封闭爆炸的耦合系数,然而完全封闭爆炸的最小比例埋深难以准确确定,但接触爆炸则在试验上和数值计算上都很容易确定,因此我们将耦合系数参照体选为接触爆炸。耦合系数的类型有应力型、速度型、加速度型、冲量型等, TM5-855-1 中提供的数据是应力型的。我们将数值计算的结果与 TM5-855-1 中的数据进行了比较(见图 3),二者在比例埋深小于 $0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 之前吻合较好,在大于 $0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 后有一定的差别,但这种差别小于 10%,实际上,根据数值计算数据,应力在比例埋深大于 $0.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ 后随比例埋深的增长很缓慢。但选取应力作为耦合系数的衡量标准,本身就值得讨论,下面进一步对冲量型耦合系数进行分析。

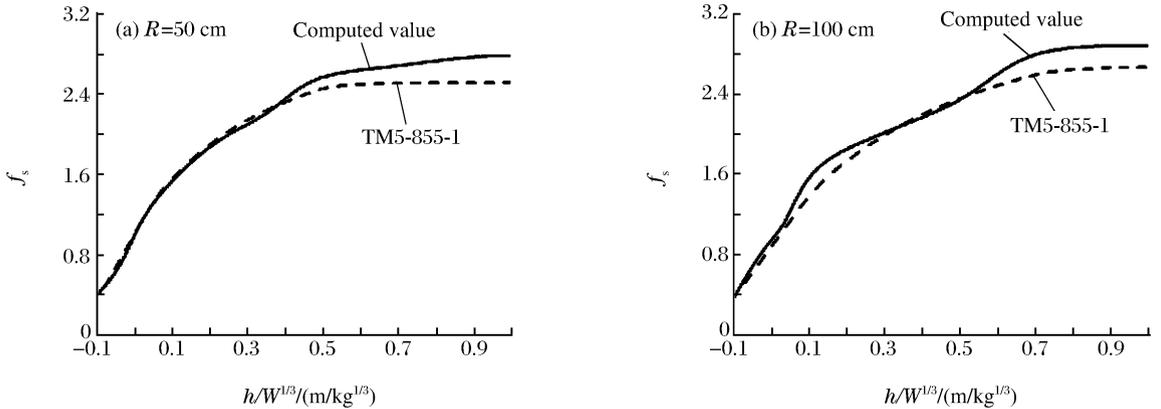


图 3 应力型耦合系数计算值与 TM5-855-1 数据的比较

Fig. 3 Comparison between computed coupling coefficient with stress form and data of TM5-855-1

文献[4]采用美国和瑞典几百次化爆试验结果,采用封闭度 D (实际爆深 h 与完全封闭爆炸最小深度 h_c 的比值) 的概念,提出了两个二次型的耦合系数 f (该文献称为等效当量耦合系数 η) 的计算公式

$$\eta = 20 - 19(1 - D)^2 \quad (4a)$$

$$\eta = 25 - 22(1 - D)^2 \quad (4b)$$

公式(4a)的计算值偏小而公式(4b)的计算值偏大,我们分别作为试验估计的下限和上限(见图 4),而我们的计算值处于两条曲线之间,在开始阶段与估计值下限接近,而在结束阶段与估计值上限接近。究其原因是:开始阶段对应于成坑爆炸,随着地表面土体的飞散,爆炸能量更多传入空气中,地冲击作用时间也短,相应的耦合系数偏小;结束阶段对应于半封闭爆炸,爆炸能量被封闭在空腔的有限空间内,在空腔中来回反射,因此地冲击的作用时间增长,即冲量明显增大,耦合系数偏大。

应力型耦合系数仅考虑了应力峰值,而随着比例埋深的增加,地冲击作用时间也要相应增加,因此

作用时间的影响必须考虑,为此我们选取冲量作为衡量标准。

图5是文献[5]采用美国工程兵水道试验站1977年进行的CENSE2试验得到的分析结果与本文中计算结果的比较,文献[5]采用的是速度型的耦合系数(该文献称为当量系数),二者有一定程度的吻合,但试验缺少埋深较大时的数据。速度型耦合系数与冲量型耦合系数接近,而与应力型耦合系数有很大的差异,这说明速度与应力之间不是简单的线性关系,这两种类型的耦合系数在概念上和工程应用上均不能等同,应该注意区分,根据需要有选择地使用。

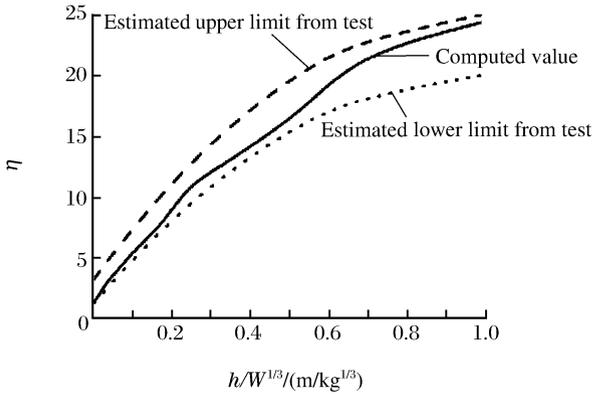


图4 等效当量耦合系数(相对于接触爆炸)与封闭度的关系

Fig. 4 Relation of coupling coefficient and close degree

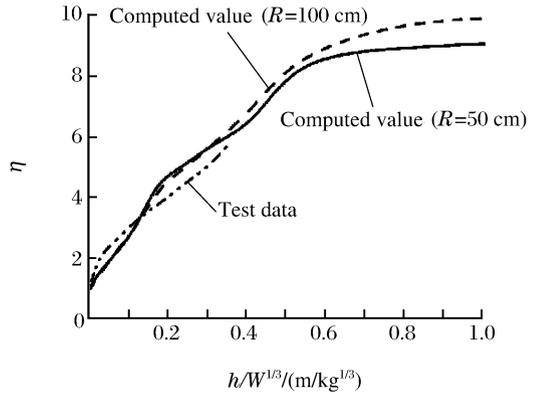


图5 等效当量耦合系数(相对于半埋爆炸)与比例爆深的关系

Fig. 5 Relation of equivalent coupling coefficient and scaled buried depth

综合分析数值计算结果与国内试验数据,本文中拟合出等效当量耦合系数 η 的估算公式,相对于接触爆炸的表达式为

$$\eta = 25 - 7(1 - D) - 16.75(1 - D)^2 \quad (5)$$

相对于完全封闭爆炸的表达式为

$$\eta = 1 - 0.28(1 - D) - 0.67(1 - D)^2 \quad (6)$$

图6是相对于接触爆炸的等效当量耦合系数拟合公式(6)与计算结果的比较,二者基本吻合。

本文的试验表明,当土中装药比例埋深超过 2.0 m/kg^{1/3}后,爆炸基本达到完全封闭,耦合系数 f 达到 1.0,这与美军规范 TM5-855-1 中的数据 0.56 m/kg^{1/3} 相差较大,可能的原因有:

(1)由于 TM5-855-1 中的土介质上面有混凝土遮弹层,遮弹层对能量有明显的反射作用,增加了能量的耦合程度,而本文中的试验和计算是在纯自由场条件下进行的,没有遮弹层的影响,因此二者相差较大。

(2)对完全封闭的定义可能不同。我们认为达到完全封闭时,地表面以上完全没有能量泄漏,没有明显隆起,爆炸能量基本上向下传播;美军设计规范 TM5-855-1 中的完全封闭定义是相对于核爆炸而言,认为地表面以上没有核辐射就达到封闭,而此时仍然有冲击波向空气中传播,这也将导致二者之间的较大差异。还有另外一种解释^[5],临界无影响深度是指超过这一深度后爆炸时,向下传播的地冲击参数可以不考虑地面影响的深度;而封闭爆炸最小深度通常指的是,超过这一深度爆炸时,地面不出现气体泄漏或产生弹坑的深度。因此,临界无影响深度与封闭爆炸最小埋深不是一回事。实际上,临界无影响深度比封闭爆炸最小埋深浅得多。我们认为 TM5-855-1 中的数据 0.56 m/kg^{1/3} 属于临界无影响深

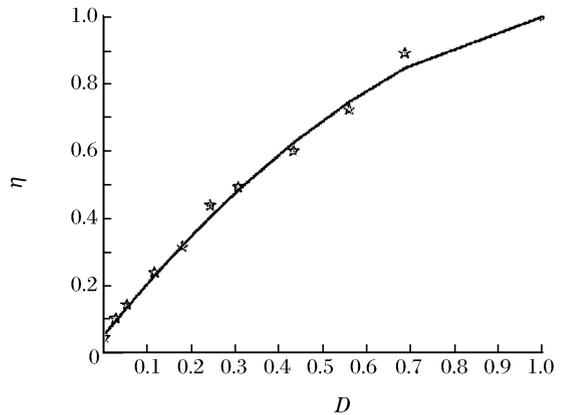


图6 等效当量耦合系数(相对于接触爆炸)与封闭度的关系

Fig. 6 Relation of equivalent coupling coefficient and close degree

度,而本文给出的 $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 属于封闭爆炸最小埋深。

(3) 根据数值计算数据,应力值在比例埋深大于 $0.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ 后随比例埋深的增长很缓慢,根据峰值应力难于准确给出完全封闭爆炸的最小比例埋深。

5 结 论

(1) 自由场条件下,当土中装药比例埋深超过 $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 后,爆炸基本达到完全封闭;这与美军设计规范 TM5-855-1 中的数据 $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ 相差较大,分析了产生差异的可能原因。

(2) 利用数值模拟方法研究了土中装药不同埋设深度爆炸能量分布,数值模拟结果表明, TM5-855-1 中的应力型耦合系数和本文给出的冲量型耦合系数是不同的,说明了它们的差异,今后使用时应注意它们的适用范围,根据需要进行选择。

(3) 给出了等效当量耦合系数的计算公式,供设计和分析时参考。

参考文献:

- [1] Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Department of the Army[S]. TM5-855-1, 1986.
- [2] 施鹏. 炮弹侵彻爆炸效应的数值模拟研究[R]. 洛阳:总参工程兵科研三所,2002.
- [3] 美国 ANSYS 公司. ANSYS-LS/DYNA 用户手册[Z]. 2001.
- [4] 何唐甫. 近地爆、触地爆、钻地成坑爆和地下封闭爆直接地冲击诸参数的统一实用计算公式[J]. 防护工程,1986,8(2):11-16.
HE Tang-pu. The unity computing formula of ground shock parameters for explosion with different buried depth to ground[J]. Protective Engineering, 1986,8(2):11-16.
- [5] 何翔. 指挥防护工程口部防常规武器爆炸设计计算方法[R]. 洛阳:总参工程兵科研三所,2002.

Study on ground shock energy distribution of explosion in soil

SHI Peng^{1,2*}, DENG Guo-qiang³, YANG Xiu-min³, CHEN Zhao-yuan¹

- (1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084 China;
2. Luoyang Hydraulic Engineering Technical Institute, Luoyang 471023, Henan, China;
3. Beijing Canbao Engineering Design Academe, Beijing, 100850 China)

Abstract: The energy distribution for ground shock of explosion with different buried depths in soil is studied with numerical simulation method, and the coupling coefficient data is gained from test. The minimal scaled buried depth for close explosion in free-field is $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ gotten in the paper, there is much difference to the data $0.56 \text{ m/kg}^{1/3}$ in Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons (TM5-855-1), and the reasons for difference are discussed. The coupling coefficient with impulse forms gotten in the paper is quite different to that with stress form in TM5-855-1, the range and object for using should be careful.

Key words: mechanics of explosion; energy distribution; numerical simulation; ground shock; coupling coefficient

* Corresponding author: SHI Peng

E-mail address: shipen87@sina100.com

Telephone: 010-62775083