

爆炸载荷作用下混凝土内应力波速度的测量^{*}

王定贤,胡永乐,金飞华,黎小毛,石培杰

(西北核技术研究所,西安 710024)

摘要:根据一维弹性波理论,提出了一种应用行波杆对混凝土内应力波速度进行测量的方法,介绍了该方法的测量原理,设计了该方法中行波杆的长度、外径和材质等关键参数,并构建了在爆炸载荷驱动下的混凝土实验模型,配置了测试系统.实验结果表明,行波杆设计方法正确,各项参数符合测试需求,实验数据真实可靠.

关键词:混凝土;行波杆;应力波;测量

中图分类号:O384

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2009)05-0044-02

混凝土在抗爆防护结构中应用非常广泛,对其防护性能的评估一直是工程设计人员所关心的重要问题.由于混凝土本构关系比较复杂,它既不是匀质材料,也不是线弹性材料,因此很难设计出一种和混凝土材料性质完全匹配的传感器.

若采用普通压电式压力传感器对混凝土防护工程性能进行评估,则其响应频率低,在测量爆炸应力波时容易出现波形失真的现象^[1].而应变式压杆压力传感器(其关键部件是行波杆)则不然,在强爆炸冲击载荷作用下利用它可以对混凝土内应力波的传播行为进行测量,不但符合测试频响的要求,而且也可以避免混凝土材料非均匀性和微裂纹等对周向应变的影响^[2],因此测量结果较为可靠.通过对比不同半径距离处的应力波峰值,还可研判应力波的衰减规律,进而为工程设计和评估提供依据.

该方法的关键是:1)行波杆的长度、直径、材料等参数的设计;2)与行波杆配套的测试系统组成和参数设置.

1 测试原理

爆炸冲击波进入混凝土介质后以应力波的形式传播.当该应力波作用在细长圆柱弹性杆(简称“行波杆”)的前端时,会在杆中激发一个由纵波组成且沿杆传播的弹性应力波.若在杆的某处对该波进行测量,记录其随时间的变化,然后根据弹性波在杆中的传播规律,可计算出作用在杆端部的压力随时间的变化^[3].根据一维应力波理论,细长杆中纵波的波动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

式中, x 为横截面微元坐标; u 为微元位移; c_0 为波的传播速度, $c_0 = \sqrt{E/\rho}$; E 为弹性模量, ρ 为材料密度.

解此方程得

$$u = f(x \pm c_0 t) = f(\cdot)$$

则细长杆内的应变为

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = f'(\cdot)$$

细长杆内的速度为

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = c_0 f'(\cdot) = c_0 \epsilon$$

假设应力波在行波杆前端和混凝土的交界面处无反射,由于混凝土的波阻抗和铝材接近,因此行波杆和混凝土交界面处的混凝土内应力波速度和细长杆内的速度 v 相等,通过测量细长杆内的应变即可计算出混凝土内应力波的传播速度(应变片贴在行波杆上的预定位置).

2 实验模型

针对某次实验任务的需求,现就行波杆的具体设计方法和测试系统配置情况进行分析,最后进行实验验证.

实验基本模型为:半径为1 m、长度为2 m、壁厚为0.02 m的钢筒,其外围浇注厚度为1.5 m的普通混凝土.浇注混凝土时,预置4套行波杆的安放孔,孔底距容器钢壁的距离依次为0.5 m、0.75 m、1.0 m和1.25 m(依次定位1#、2#、3#和4#测点),各孔间夹角为30°.预成孔时各孔中心线需对准爆心.实验前,将加工好的行波杆置于各孔内,行波杆外套要进行刚性固定,防止爆炸瞬间被冲飞,炸药用支架放置于钢筒中心位置.

3 行波杆设计

3.1 长度设计

设计前,应用ANASY/LS-DYNA软件对上述实验模型

* 收稿日期:2009-03-03

作者简介:王定贤(1973—),男,甘肃人,工程师,硕士研究生,主要从事爆炸与冲击方面的研究.

的动力学响应行为进行了数值模拟^[4]。模拟曲线表明,容器钢筒在爆后约 300 μs 停止运动,考虑到应力波在混凝土中的传播波长会增大,全波形测量时间可能需要 400 μs ~ 500 μs 。以硬铝波速 $c_0 = 5\,000\text{ m/s}$ 计算,测量应变片到行波杆末端的距离须满足以下关系

$$L_1 \frac{c_0 \cdot T_c}{2} = (1\,000 \sim 1\,250)\text{ mm}$$

对细长杆,在机械加工时要保证其具有较高的直线度是比较困难的,故在满足测试需求的情况下应力求尽量减少杆长。分析结果表明,应变片到行波杆末端的距离 $L_1 = 800\text{ mm}$ 可完成爆心截面混凝土圆柱体质点速度峰值的可靠测量。同时根据声学理论,要保证贴在行波杆上应变计的响应上升时间,应变片到杆前端的距离须大于 20ϕ (ϕ 为行波杆直径),考虑到应变片的贴片和维护,最终分别取四根行波杆的长度为: 1 530 mm、1 780 mm、2 030 mm 和 2 280 mm。

3.2 直径设计

根据测试要求,行波杆的频率 f 需大于 50 kHz,行波杆直径 ϕ 应满足 $\phi \geq 0.2 \lambda_{\min}$ (λ_{\min} 是应力波脉冲中的最短波长,取 $\lambda_{\min} = \frac{c_0}{f} = 0.1\text{ m}$),因此 $\phi \geq 0.02\text{ m}$ 。考虑频响和加工难度,最终取 $\phi = 0.014\text{ m}$ 。

3.3 材质选用

行波杆的材质由传感器与混凝土介质的匹配以及传感器的量程决定。行波杆式所能测量的最大压力则取决于材质的屈服极限。由于高硬铝的波阻抗与混凝土比较接近,可以减小测量行波杆及外套筒应力波的干扰,提高测量准确性,因此最终选用 LC4 高强铝合金。

此外,为安装和保护行波杆,还必须加工外套、聚乙烯缓冲垫片及端盖等小件。外套和行波杆之间采用间隙配合并在局部位置安装橡胶环,以使其具有良好的声绝缘特性,保证行波杆的自由径向运动不受阻碍,避免波形失真。还要在行波杆贴应变片处对应的外套上开槽,以引出测试线。

4 测量系统及结果分析

4.1 测量系统

测量系统由行波杆部件总成、应变片、应变放大器、示波器及触发电路等组成。示波器选用 DSO6014A 型,设置采样率 1 Msps,时基单位 2 V/div,触发电平 2 V。放大器选用 DH3842 型,设置桥压 5 V,滤波器上限频率 30 kHz,应变片选用 FLA-3-17 型,灵敏系数 2.13,最大量程 $\pm 20\,000\ \mu\text{e}$ [5-6]。

4.2 测量结果及分析

除 3 号测点的波形异常外(可能因为行波杆外套前端与混凝土有空隙,耦合不好导致应力波不能直接传输,因而无法测到信号),其余波形良好,依次如下图 1、2、3 所示。

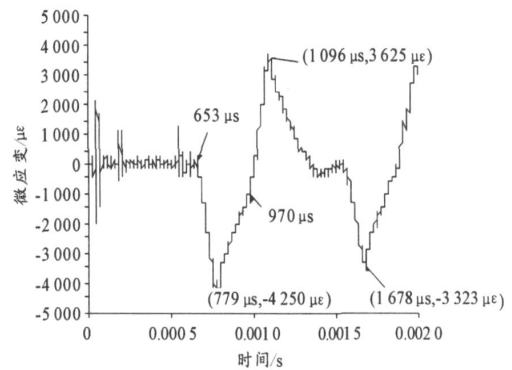


图 1 1# 测点测量波

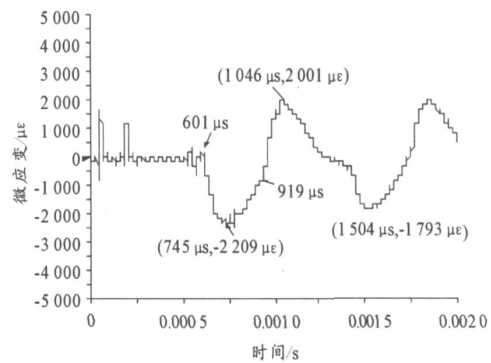


图 2 2# 测点测量波

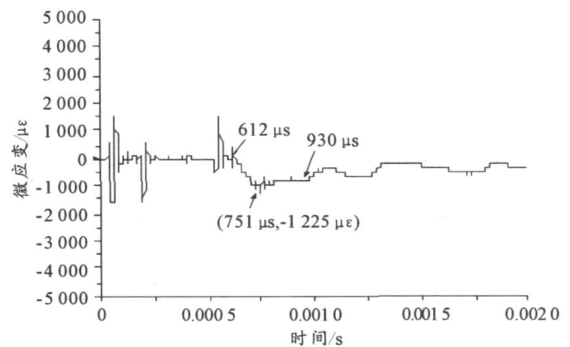


图 3 4# 测点测量波

现以 1 号测点的结果为例进行分析。1 号行波杆距离爆炸容器钢壁 0.5 m,信号达到时间 653 μs ,峰值到达时间 779 μs 。两次峰值应变的时间差 $t = 899\ \mu\text{s}$,正是应力波在行波杆内传递一个来回的时间,而杆长为 2.28 m,由此可推算应力波在行波杆内的传播速度 $v = 5\,072\text{ m/s}$,这和理论硬铝波速 $c_0 = 5\,000\text{ m/s}$ 十分接近。同时,首波应力峰值与反向应力首波峰值到达时间差 $t = 317\ \mu\text{s}$,即为应力波从贴片位置至行波杆末端一个来回的时间,也是行波杆的有效测量时间。因实测数据计算的速度为 $v = 5\,072\text{ m/s}$,可算出贴片位置到行波杆末端的距离为 $L = 0.804\text{ m}$,这与实际贴片距离 $L = 0.8\text{ m}$ 也很相符。

(下转第 48 页)

则不同接收概率下 P_q 的点估计见表 4.

表 4 不同接收概率下 P_q 的点估计

q	0.99	0.98	0.95	0.90
P_q	203.3	204.7	206.9	208.8

从上表可以看出,对于表 3 给定的测量结果,武器性能参数 P 被接收概率应大于 0.99(0.998);而如果按成败型数据评定,则即使在很低的置信度(0.7)情况下,接收概率也才不到 0.90(见表 2).

3.2 考虑置信度情况下正态数据的评定

在考虑置信度的情况下,3.1 节中计算 P_q 的方法需要修正, P_q 将用不同置信度下的置信下限 $P_{q,c}$ 来代替,即:

$$P_{q,c} = \bar{P} - S_p \cdot K(\alpha, n, q) \quad (9)$$

其中可按 GB4885—85^[6]中规定的方法进行计算.

对于表 3 给定的样本数据,接收概率为 0.95,则不同置信度下 $P_{q,c}$ 的计算结果见表 5.从表中数据可以看出:指标被接收的概率为 0.95,置信度大于 0.95,相对于验前评定方法给出的接收概率(0.9)和置信度(0.7)有大幅度提高.

表 5 不同置信度下的 $P_{q,c}$ 估计值

	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
K	1.82	1.96	2.15	2.45	2.74
$P_{q,c}$	206.0	205.2	204.2	202.6	200.9

4 结论

本文中根据新概念武器鉴定试验的特点,探讨了新概

念武器性能指标的评定方法,该方法综合了验前评定和验后评定,其具体步骤如下:

1) 在试验前没有数据统计分布信息的情况下,用成败型数据模型的评定方法,在较低的接收概率和置信度要求下确定试验次数和评定要求.

2) 获得试验数据后,首先用验前规定的评定方法评定试验数据,得到初步的评定结论.

3) 对获得的数据进行常用统计分布的分布拟合检验,如果检验没有通过,则初步评定结论作为最终评定结论.

4) 如果某种统计分布的分布拟合检验通过,则使用该统计分布的数据评定方法重新对数据进行评定,以获得较高的接收概率和置信度.

参考文献:

- [1] 甄涛,王平均,张新民. 地地导弹武器作战效能评估方法[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 王玉恒,杜太焦,刘峰,等. 高能激光武器系统效能评估方法[J]. 四川兵工学报,2008,29(2):1-3.
- [3] GB 4087.3—85. 数据的统计处理和解释 - 二项分布可靠度单侧置信下限[S].
- [4] GB/T 4882—2001. 数据的统计处理和解释 - 正态性检验[S].
- [5] 唐雪梅,张金槐,邵凤昌,等. 武器装备小子样试验分析与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [6] GB4885—85. 正态分布完全样本可靠度单侧置信下限[S].

(上接第 45 页)

因 1#、2#、4# 的峰值应变分别为 4 250 μ 、2 209 μ 和 1 121 μ ,应力波速度分别为 11.3 m/s、8.5 m/s 和 5.7 m/s. 可以看出,当行波杆前端与爆炸容器外壁距离从 0.5 m 增加到 0.75 m 时,速度衰减较快,而从 0.75 m 增加到 1.25 m 时衰减程度明显减缓.初步分析认为,混凝土层内质点运动速度衰减具有非线性特征,近似指数衰减形式.

由于波形良好,符合理论响应规律,因此行波杆的设计参数也满足频响、测量上升时间、持续时间等测试要求,说明设计方法可行,测试系统配置正确.

5 结论

1) 根据一维弹性应力波理论对行波杆进行了设计,通过配置测量系统,在实验中获得了较好的应力波形;

2) 应用应变式压杆压力传感器测量系统,可研究抗爆混凝土层内部的动力学响应行为,为混凝土防护工程性能评估提供了一种有效的测试平台;

3) 应变式压杆压力传感器原理结构简单,性能易于控

制,适合测试境条件较差的爆炸动载环境或介质中,但在设计时应注意该种传感器的频响和量程主要受行波杆材质和直径的限制.

参考文献:

- [1] 张挺. 爆炸冲击波测量技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 胡永乐,林俊德,金飞华. 应变式压杆压力传感器在冲击载荷测试中的应用[J]. 实验力学,2006(5):547-552.
- [3] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [4] 王万鹏. 混凝土加固爆炸容器的计算机数值模拟[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- [5] 王伯雄. 测试技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [6] 朱明武,梁人杰. 动压测量[M]. 北京:国防工业出版社,1983.