



近爆作用下方形板表面爆炸载荷分布函数研究

汪维^{1,2}, 刘光昆³, 赵强², 刘瑞朝^{2*}, 吴飏², 周松柏²

1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 宁波 315211;

2. 军事科学院国防工程研究院, 洛阳 471023;

3. 河海大学安全与防灾工程研究所, 南京 210098

*联系人, E-mail: liuruichao1965@163.com

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-08-12; 网络出版日期: 2019-12-11

国家自然科学基金(编号: 11302261, 11972201)和国家自然科学基金河南省联合基金项目(编号: U1404107)资助

摘要 爆炸载荷作用的方式和大小是结构物遭受破坏的主要原因. 目前的大多数研究都将爆炸载荷简化为双直线的形式, 与实际的时程曲线差异较大, 并且直接施加到结构上, 回避了气体和结构间的流固耦合相互作用, 对于近爆或内部爆炸将会对计算结果带来较大的误差. 为了快速确定方形板近爆作用下结构表面的荷载, 本文利用数值模拟方法研究了爆炸冲击波与结构的相互作用, 提出了方形板结构表面上不同点处爆炸载荷的分布函数, 并建立了板结构表面中心点处爆炸载荷参数的简化预测公式, 利用这些公式提出了构建结构表面任意点处爆炸载荷的一般方法. 结果表明, 利用这些公式, 可以预测任意尺寸结构构件在近爆爆炸环境中承受的爆炸载荷的各参数(峰值压力和冲量).

关键词 爆炸力学, 爆炸荷载, 方形板构件, 数值模拟, AUTODYN

PACS: 43.28.Mw, 43.25.Cb, 43.50.Pn

1 引言

目前, 工程上用于计算爆炸超压载荷的经验公式或半经验的方法, 一般都是基于空旷场地的试验或假设^[1], 这与实际作用在建筑物上的爆炸载荷有很大区别. 因此很多学者对不同建筑物结构表面的爆炸载荷以及爆炸冲击波的传播规律进行了研究. 如Smith等人^[2-4]对发生在城市街道中的爆炸所造成的周边建筑物上的爆炸冲击载荷进行了模型实验和数值模拟分析, 指出爆炸冲击波的增强与周围的环境密切相关.

Rose等人^[5]使用Air3D软件建立了爆炸波载荷传播的模型, 指出街道宽度和建筑物的高度对爆炸冲击波的正相超压都有明显的影响, 但街道宽度与街道两旁建筑物高度超过一定值时, 这种影响也就不再明显. Remennikov等人^[6]使用Air3D建模分析了城市复杂环境对建筑结构上的爆炸波的影响, 指出了确定结构上爆炸波载荷时考虑邻近建筑影响的重要性, 并给出了确定载荷增大系数的方法.

在美国陆军、海军和空军部门联合推出的技术手册TM5-1300^[7,8]即《抗偶然爆炸结构设计手册》中,

引用格式: 汪维, 刘光昆, 赵强, 等. 近爆作用下方形板表面爆炸载荷分布函数研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 024615
Wang W, Liu G-K, Zhao Q, et al. Study on load distributing function of square slab surface under close-in blast loading (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 024615, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0188

通过一系列的试验和数值研究手段,建立了适用于工程计算的公式和图表来预测不同质量的炸药在不同爆炸位置起爆后作用在结构上的反射超压时程曲线的各个参数. Beshara^[9,10]对结构表面的爆炸载荷做了较全面的回顾,可以看出外爆的研究成果主要集中在20世纪七八十年代.近期的研究则主要是基于数值模拟方法,针对特定问题进行研究,对于外爆载荷模型的研究很少.在国内,杨鑫等人^[11]、顾垒等人^[12]、林大超等人^[13]提出了爆炸冲击波超压峰值的预测方法,计算得到了爆炸波正相超压函数的一般形式.叶序双^[14]和张守中^[15]介绍了理论推导的基础上理想一维运动情况下冲击波超压计算公式,计算时假设结构面为无限大,计算的结果为理想一维情况固壁反射的压力,这对于实际使用带来很大局限性. Shi等人^[16]虽然对地面爆炸,爆距为10 m时单混凝土柱表面的爆炸载荷进行了数值计算并利用数值计算结果给出了柱表面爆炸压力时程曲线经验公式,但得到的公式仅适用于爆距为10 m条件下地面爆炸时墙柱表面的压力估计,对于近爆小装药量爆炸条件下的爆炸载荷尚未研究. Wang等人^[17]研究了一种有效的模型来计算近爆作用下钢筋混凝土板表面的等效均布载荷,并带入到等效单自由度方法中进行计算,但文中没有给出如何确定特征点爆炸压力的具体方法.汪维等人^[18]对近爆作用下结构表面的爆炸载荷确定方法进行了研究,得到了构件表面爆炸载荷确定的一般方法,但是将结构表面爆炸载荷简化为理想线性函数,忽略了近区爆炸作用下载荷分布的高度非线性.因此,对爆炸冲击波与方形板结构的相互作用进行研究,进而得出爆炸冲击波作用下确定结构表面分布函数,进而得出准确预测方形板结构爆炸载荷的方法,成为此领域需要迫切解决的一个问题.

本文利用数值模拟方法研究爆炸波传播及其与板结构相互作用,建立外爆作用下板构件表面爆炸载荷分布函数.首先,运用AUTODYN有限元显式动力分析软件建立包括TNT炸药、空气和方形板结构在内的三维有限元模型,并对TNT炸药的爆轰在空气中的传播以及与方形板结构的相互作用进行模拟.在此基础上,采用曲线拟合方法,建立预测方形板结构前表面中心点处爆炸载荷参数的公式,并提出基于所建立的爆炸载荷分布函数确定构件表面爆炸载荷模型的一般方法.

2 计算模型和材料参数

目前,爆炸问题的计算通常采用拉格朗日法或欧拉法.拉格朗日法中的运动方程形式比较简单,容易建立精度较高而又稳定的格式.而且,拉格朗日法跟踪固定的介质,可以用来计算包含多种物质的系统,不同物质间的界面能清晰地表示出来,自由面的处理也很方便.因此本文采用拉格朗日网格模拟结构构件.欧拉方法采用固定的网格,物质在网格中流动,更适用于计算流体以及严重扭曲的问题.本文采用欧拉网格模拟炸药及空气.

在本文中,运用AUTODYN软件模拟爆炸波传播及其与结构的相互作用.由于爆炸冲击波与板结构的相互作用很复杂,为了简化分析问题,在研究之前,提出以下假设.

(1) 仅考虑自由空气中的爆炸载荷.即炸药放置在自由空气场中,爆炸产生的冲击波直接与板结构产生相互作用.炸药假定为球形装药,炸药中心距离结构迎爆面的垂直距离即爆距,考察0.5–2 m这个范围内的爆距,通过改变炸药的重量和爆距来获取不同比例距离的爆炸冲击波.

(2) 炸药放在板结构前表面中线的正前方,保证爆炸冲击波传播到并撞击结构中点的前表面时,入射角为 0° .

2.1 有限元模型

数值模拟从炸药的爆轰以及爆炸冲击波在空气中的传播开始,直至爆炸冲击波传播到结构构件所在位置并与之发生相互作用,继而向更远处传播为止.为了节省轴对称过程数值模拟的计算量,采用了两步模拟方法.(1) 利用一维模型对球形爆炸波到达目标壁面之前进行数值模拟,直至传播到结构构件前但尚未和结构构件发生相互作用.(2) 利用AUTODYN^[19]特有的映射功能,将先前一维模拟的结果映射并重现到三维模型中,形成三维的爆炸冲击波.随后,在三维模型中,模拟爆炸冲击波与结构构件的相互作用.这种两步模拟法较之完全的三维模拟,可以采用较少数量的网格、较小的网格尺寸,但同样获得准确的模拟结果,因此,对于整个模拟过程而言不仅能够有效提高计算效率,而且能够提高计算结果的精度.

在数值模拟中,由于结构的对称性,三维结构采用

1/4计算模型进行计算, 炸药和空气采用欧拉网格模拟, 边界采用物质流出边界条件. 板采用拉格朗日网格模拟. 利用AUTODYN提供的欧拉/拉格朗日全接触算法模拟爆炸波与板的相互作用.

2.2 材料模型及参数

数值模拟中, TNT炸药的材料模型用JWL状态方程来描述, 其方程如下:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (1)$$

式中, P 为爆轰产物压力, V 是相对体积, E 是单位质量的内能, A , B , R_1 , R_2 和 ω 是材料常数. TNT炸药JWL状态方程参数^[19]见表1所示.

空气采用理想气体状态方程描述. 其压力 P 和能量 e 的关系可由下式确定:

$$P = (\gamma - 1)\rho e, \quad (2)$$

式中, ρ 为空气的密度, e 为气体单位质量的内能, γ 为材料常数. 表2给出了具体材料参数.

国内其他学者的研究表明结构构件的刚度和变形并不能显著影响作用于构件上的爆炸载荷^[16]. 因此, 当采用有限元模拟方法模拟爆炸波与结构的相互作用时, 可以假定结构为刚体, 约束构件所有自由度, 从而提高计算效率.

2.3 数值模拟方法验证

对爆炸波的传播过程以及其与结构的相互作用进行数值模拟时, 模拟结果的准确度在很大程度上取决于采用的网格尺寸和算法. 因此, 在大多数情况下, 在数值模拟之前, 都应该进行数值试验验证, 从而找到可以接受的网格尺寸和算法.

为了验证爆炸冲击波传播及其与方形板结构相互作用的数值模拟方法, 利用该方法对Chapman等人^[20]做的爆炸试验进行数值模拟. 图1给出了爆炸试验的布置图及有限元计算模型, 试验中使用压力传感器测试一定TNT装药量在某一爆高空空中爆炸抗爆墙后目标表面上目标点的反射压力参数. 其中 H_t 为30 cm, 抗爆墙高度 H_1 为30 cm, d_e 和 d_w 分别为60 cm, 爆高为15 cm, 装药量为60 g. 数值模拟中网格大小取1 cm, 并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析.

图2比较了数值模拟和试验得到的目标点反射超

表1 TNT炸药模型材料的参数

Table 1 Model parameters of TNT

P (g cm ⁻³)	A (10 ² GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω	E_0 (MJ Kg ⁻¹)	V
1.610	3.712	0.0323	4.15	0.95	0.3	7.0	1.00

表2 空气材料参数

Table 2 Model parameters of air

P (g cm ⁻³)	e_0 (kJ kg ⁻¹)	γ
1.293	2.068×10^5	1.4

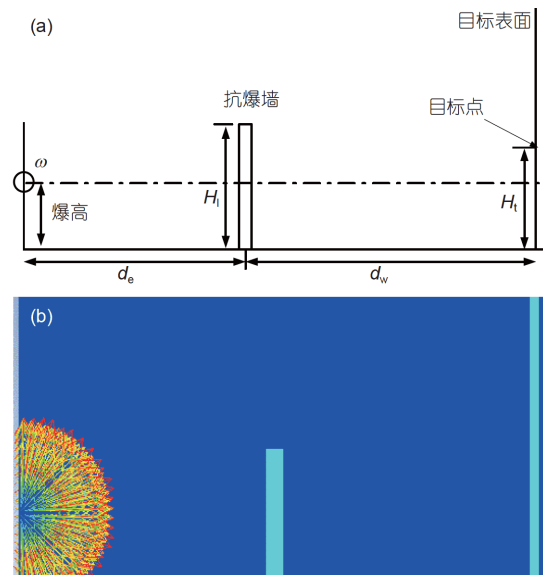


图1 (网络版彩图)爆炸试验布置图及有限元模型. (a) 试验布置图; (b) 有限元模型

Figure 1 (Color online) Blast test disposal and finite element model. (a) Test layout; (b) finite element model.

压的时程曲线, 从图中可以看出, 数值模拟得到的反射超压时程曲线和试验结果吻合较好, 两次反射超压峰值大小以及到达的时间与试验结果吻合较为一致. 与试验结果相比, 数值模拟得到的反射超压由0上升到最大值的时间略长, 正峰值超压的数值略小. 这是由于本试验的炸药起爆位置和目标点的实际距离很小, 尽管如此, 数值模拟的结果仍与试验结果比较吻合, 这进一步说明本文提出的数值模拟方法以及网格大小的适用性, 可以用于爆炸冲击波传播及与结构相互作用的数值模拟计算.

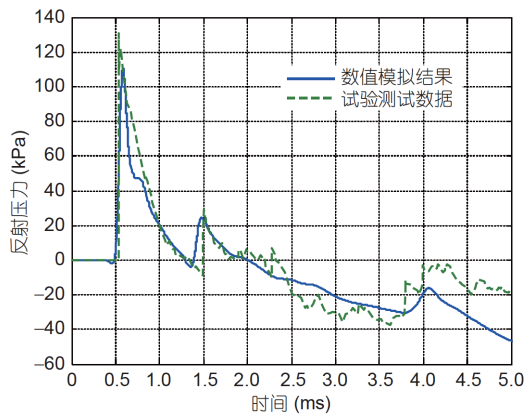


图2 (网络版彩图)目标测试点反射压力时程曲线试验和数值模拟结果对比

Figure 2 (Color online) Comparison of tested reflect overpressure history between experiment and numerical simulation.

2.4 典型数值模拟结果

图3给出了爆炸波的传播及其与方形板结构的相互作用过程,板距离炸药起爆位置的比例距离为 $0.5 \text{ m kg}^{-1/3}$,装药量为 8 kg ,爆距为 1 m .方形板结构的边长为 2 m ,厚度为 0.08 m .

从图3中可以清楚看到爆炸波传播以及与板相互作用的全过程.在 $t=300 \mu\text{s}$,爆炸冲击波仍沿半球状向外传播;在 $t=320 \mu\text{s}$,爆炸冲击波传播至板迎爆面,在板前表面形成反射波,冲击波压力急剧增强;在 $t=960 \mu\text{s}$,爆炸冲击波绕过板两侧,形成衍射波;在 $t=296 \mu\text{s}$,爆炸冲击波淹没板,并在板后表面形成重组波(即爆炸冲击波经过衍射和绕射在板后方重新形成一个新的波阵面继续向前传播).

为了对板迎爆表面爆炸载荷的分布状况进行研究,对如图4所示的表面4个目标特征点的爆炸超压和冲量进行了数据输出.图5给出了在爆炸波与板相互作用过程中,作用在板中心、板1/4中心、板边缘及板角目标点上的典型爆炸超压与冲量时程曲线.从这些图中可以看出:在板的前表面爆炸载荷的分布是非均匀的,随着目标特征点距离爆心位置的增加,作用在目标点上爆炸载荷的正超压峰值和正冲量逐渐减小,峰值超压到达时间逐渐增加;板迎爆面不同位置的爆炸载荷分布主要体现为中部正超压峰值和冲量较边缘高,到达时间早,板角的超压峰值和冲量最小,如图5所示.

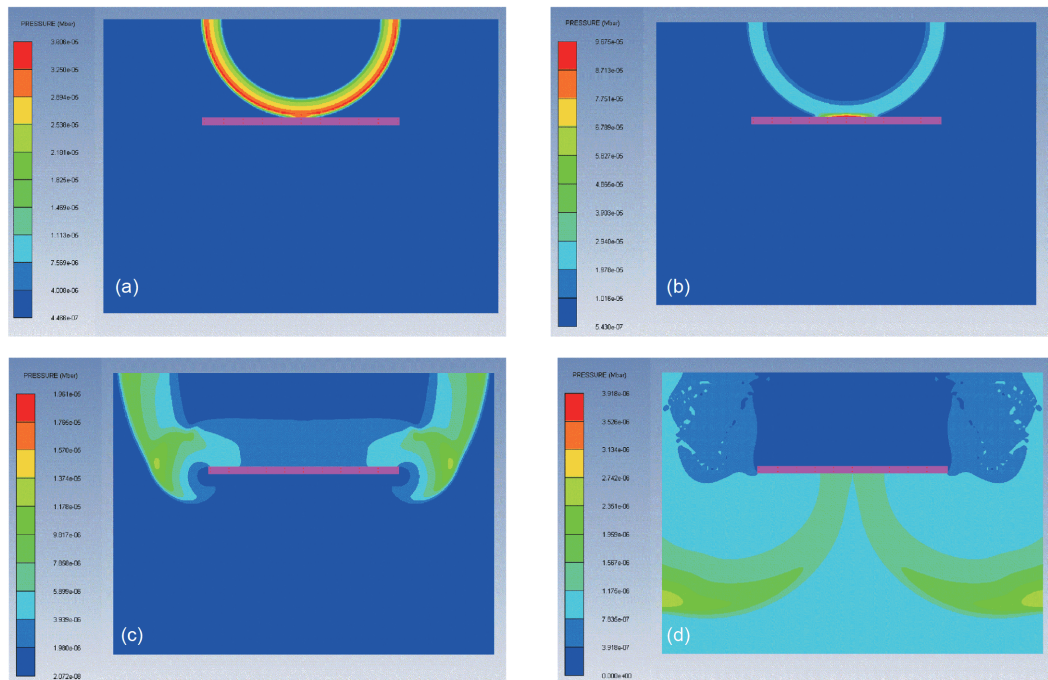


图3 (网络版彩图)爆炸波传播与板相互作用过程图. (a) $t=300 \mu\text{s}$; (b) $t=320 \mu\text{s}$; (c) $t=960 \mu\text{s}$; (d) $t=2960 \mu\text{s}$

Figure 3 (Color online) Blast wave propagation and its interaction with a slab. (a) $t=300 \mu\text{s}$; (b) $t=320 \mu\text{s}$; (c) $t=960 \mu\text{s}$; (d) $t=2960 \mu\text{s}$.

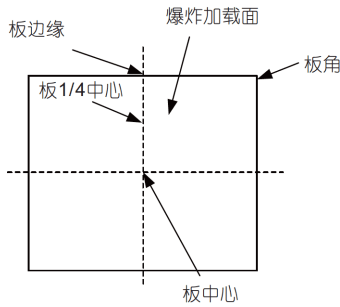


图4 板迎爆表面特征点示意图
Figure 4 The characteristic points on the slab surface.

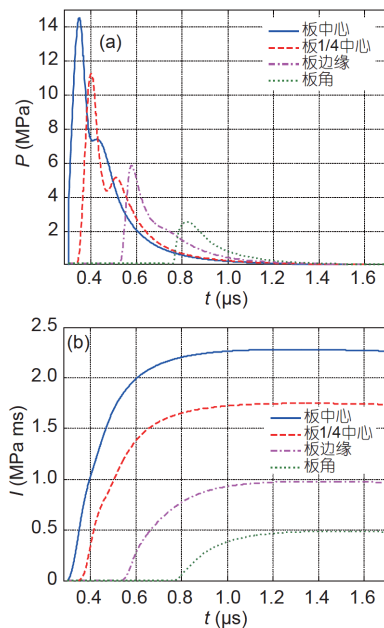


图5 (网络版彩图)板迎爆面各特征点的反射超压及冲量时程曲线比较. (a) 超压时程曲线; (b) 冲量时程曲线

Figure 5 (Color online) Reflected pressure and impulse time histories at different locations. (a) Overpressure time history curves; (b) impulse time history curves.

3 结构构件表面爆炸载荷的确定

本节在数值模拟的基础上, 利用曲线拟合的方法, 建立不同尺寸结构构件前表面中心点爆炸载荷各参数的经验公式, 并建立爆炸荷载归一化分布函数, 从而确定构件表面爆炸载荷.

3.1 迎爆面中心超压和冲量

通过大量有限元数值模拟, 计算得到不同尺寸、不同比例距离下(如图6所示)结构中心的反射峰值超

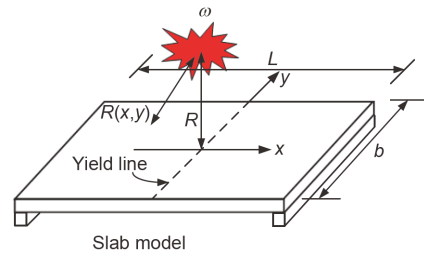


图6 (网络版彩图)载荷分布与爆点距离的关系
Figure 6 (Color online) The relationship between load distribution and blast distance.

压和冲量. 利用最小二乘曲线拟合方法建立正反射峰值压力和正向冲量的拟合公式.

(1) 正反射超压峰值压力

通过数值计算发现, 构件表面中心点的峰值压力与构件的长度和宽度影响不大, 仅与装药量和爆距有关. 利用最小二乘法建立正反射超压峰值 P 的拟合公式如下:

$$P = \left(\frac{0.1258}{Z} + \frac{0.0461}{Z^2} - \frac{0.0033}{Z^3} - 0.0678 \right) \times (e^{-r} + 32.011), \quad (3)$$

式中, P 为正反射超压峰值, 单位为MPa, r 为爆距, 单位为m, Z 为比例距离, 单位为 $\text{m kg}^{-1/3}$. 图7给出了正反射峰值压力与装药量和爆距之间的关系以及拟合曲面与数值点之间的关系, 图8给出了相对误差分布图. 从图7和8可以看出, 由公式(3)得到的正反射超压峰值 P 随比例距离 Z 变化曲线与数值计算结果离散点吻合较好, 拟合公式较好地反映了正反射超压峰值 P 的变化规律. 个别点误差接近20%, 主要原因是计算的值本身较小, 相对误差值较小, 总体来说误差不大于0.1 MPa. 应当注意的是, 上述计算公式适用范围为爆炸近区, 比例距离 $0.25 \text{ m kg}^{-1/3} < Z < 2 \text{ m kg}^{-1/3}$ 时适用.

对不同爆距下构件表面中心点的峰值压力随比例距离变化进行比较, 如图9所示. 可以看出, 在相同比例距离下, 构件表面中心点的峰值压力随着爆距的增大而增大, 这说明, 随着爆距的增大, 板前反射冲击波的峰值压力增加. 但随着比例距离的增加, 这种差异越来越小. 图中TM5-1300为美军防护设计手册中的经验预估曲线, 可以发现, 当比例距离 $Z < 1 \text{ m kg}^{-1/3}$ 时, 本文公式(3)得出的结果比TM5-1300的结果要小, 且装药量越大与TM5-1300的差距越小, 随着爆距的增加公式(3)拟

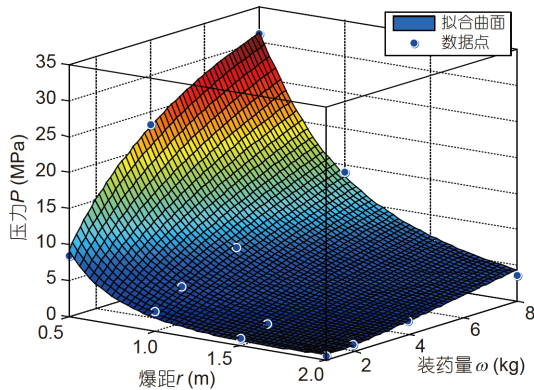


图7 (网络版彩图)峰值压力与爆距和装药量之间的关系
Figure 7 (Color online) Relationship of overpressure with blast distance and charge mass.

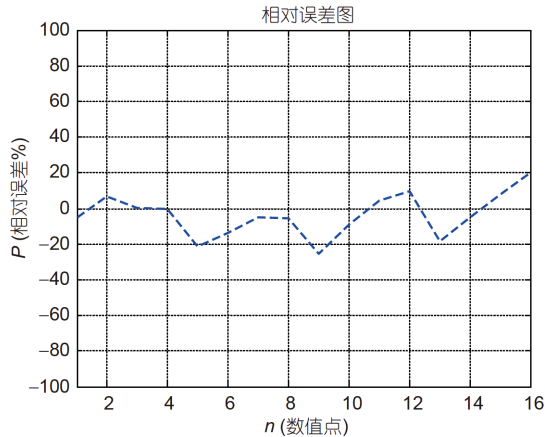


图8 (网络版彩图)峰值压力拟合结果相对误差分布图
Figure 8 (Color online) The error distribution of fitted overpressure results.

合曲线逐渐趋近于TM5-130数据点, 这可能是因为, 当比例距离比较小时, 无论是采用试验的手段或是采用数值模拟的手段, 都很难得到特别准确的爆炸载荷参数. 总体来讲, 本文提出的公式能够较为准确预测不同比例距离下板前迎爆面中心点处的正反射超压峰值.

(2) 正反射冲量

正反射超压冲量的拟合公式如下:

$$\frac{I}{W^{1/3}} = K_b \left(\frac{8.611}{Z} + \frac{0.725}{Z^2} + \frac{0.248}{Z^3} + 0.376 \right) \times (e^{-r} + 49.001) / 1000, \quad (4)$$

式中, I 为正反射冲量, 单位为 MPa ms; r 为爆距, 单位为

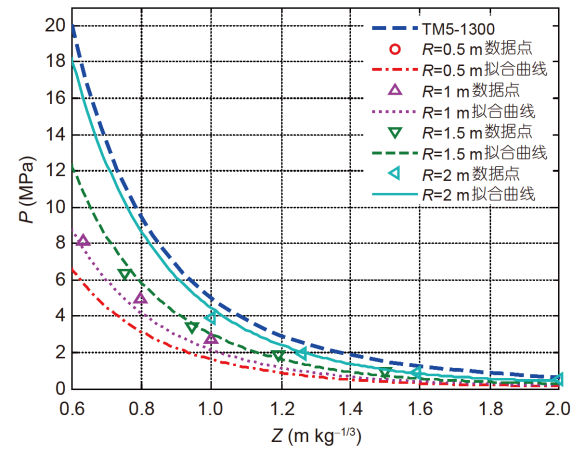
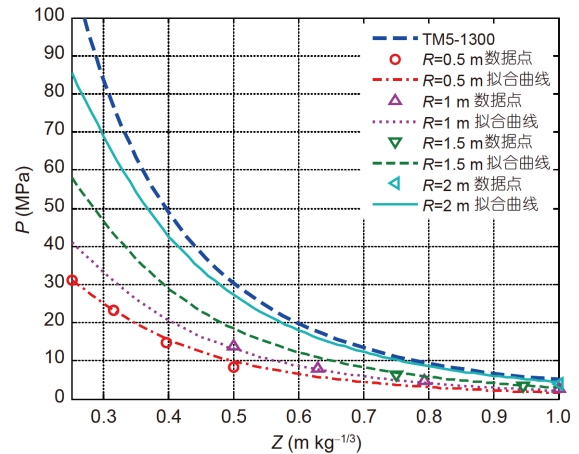


图9 (网络版彩图)不同比例距离情况下超压峰值与TM5-1300手册计算结果比较

Figure 9 (Color online) Comparison of computed overpressure and TM5-1300 results under different scaled distances.

m ; W 为装药量, 单位为 kg; Z 为比例距离, 单位为 $m \text{ kg}^{-1/3}$; b 为构件宽度, 单位为 m; K_b 为构件宽度 b 修正系数, 当 $b \geq 1$ 或 $r/b \leq 1$ 时, K_b 取值为 1, 对于 $b < 1$ 且 $r/b > 1$ 时其表达式为

$$K_b = \exp(0.048z + 0.176) \exp(-0.123r/b - 0.468) \times \exp(0.056r - 0.467) + 0.565. \quad (5)$$

图10给出了正反射冲量与装药量和爆距之间的关系以及拟合曲面与数值点之间的关系, 图11给出了相对误差分布图. 从图10和11可以看出, 由公式(4)得到的正反射超压峰值 P 随比例距离 Z 变化曲线与数值计算结果离散点吻合较好, 拟合公式较好地反映了正反射超压峰值 P 的变化规律.

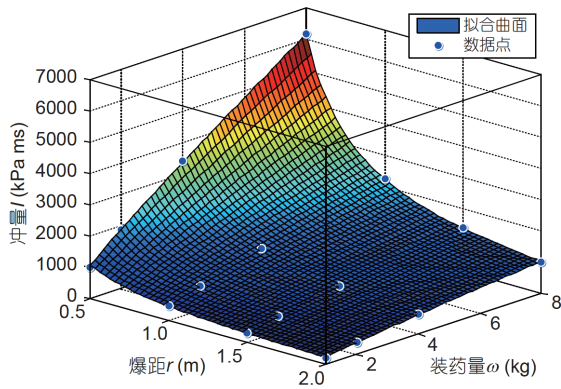


图 10 (网络版彩图)正反射冲量与爆距和装药量之间的关系

Figure 10 (Color online) Relationship of impulse with blast distance and charge mass.

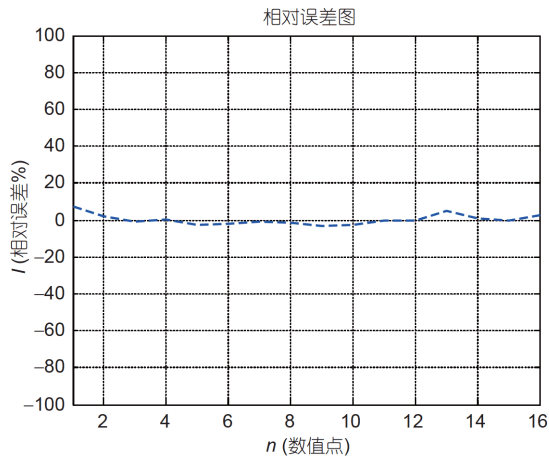


图 11 (网络版彩图)正反射冲量拟合结果相对误差分布图

Figure 11 (Color online) The error distribution of fitted impulse results.

3.2 方形板构件表面爆炸载荷分布函数

上节已经得到了预测构件迎爆面中点爆炸载荷的各参数(峰值超压和冲量)的拟合公式,因此,只需得到构件表面荷载归一化分布函数,即可利用该分布函数得到构件表面荷载分布规律。

设爆高跨度比为 $a=R/L$,压力分布函数是爆高跨度比的函数。当爆高跨度比 a 大于4时,则认为构件表面的荷载是均匀分布的。对于爆高跨度比 a 小于4的情况则需要对爆炸荷载分布函数进行确定,具体确定方法如下。

首先由上一节经验公式求解得到构件中心峰值压

力 P 、中心正向冲量 I 。在此基础上确定归一化压力和冲量分布函数,假设归一化压力分布函数为 $f(x,y)$,以板中心为原点,沿长度方向和宽度方向上的坐标分别为 X 和 Y ,假设 x 和 y 分别为构件长度和宽度方向上归一化取值点,即 $x=X/L$, $y=Y/L$,中心的取值 x 和 y 均为零,对于方板四角 x 和 y 均为1,如图12所示。

由上述假设可知, $f(0,0)=1$,即原点的归一化分布函数的取值为单位1,其他位置的归一化函数取值均 $0 < f(0,0) < 1$,且该归一化函数值随着 x 和 y 增加分别降低,在构件表面的四角取值最低,该最低值大小由爆高跨度比 a 确定。

爆高跨度比 a 越大,构件表面的荷载分布越均匀,爆高跨度比 a 越小,构件表面荷载分布越不均匀,通过数值计算和数据拟合得到压力分布函数 $f_P(x,y)$ 表达式为

$$f_P(x,y) = \frac{1}{-146.28 + 147.28e^{\left[b(x^{2.155} + y^{2.155})^{1.105}\right]}}, \quad (6)$$

其中, b 是爆高跨度比 a 的函数,表达式为

$$b = 0.1462e^{-6.427a} + 0.00545e^{-0.749a}. \quad (7)$$

同样的方法,可以确定冲量分布函数 $f_I(x,y)$ 表达式为

$$f_I(x,y) = \frac{1}{-147.63 + 148.63e^{\left[b_1(x^{2.44} + y^{2.44})^{0.79}\right]}}, \quad (8)$$

其中, b_1 是爆高跨度比 a 和装药量 ω 的函数,表达式为

$$b_1 = 1.93(201.5e^{-12.27a} + 6.548e^{-2.13a})e^{0.0573\omega/1000}. \quad (9)$$

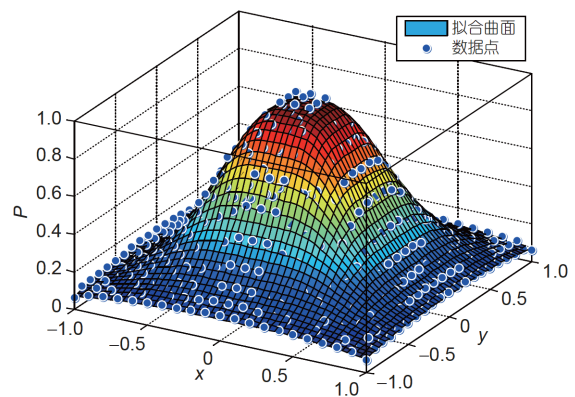


图 12 (网络版彩图)典型方板表面最大压力分布函数

Figure 12 (Color online) Maximum pressure load distributing function of typical square slab.

3.3 构件表面载荷确定一般方法

在前述各节中, 建立了确定结构构件表面中心点处超压载荷各参数的拟合公式和爆炸载荷分布函数, 利用这些公式, 可以预测任意尺寸结构构件在近爆爆炸环境中承受的爆炸载荷的各参数(峰值压力和冲量). 因此, 确定方形板构件表面任意点在近爆环境中的爆炸载荷参数的步骤如下:

(1) 首先利用公式(3)和(4)确定构件表面中心的爆炸载荷反射压力 P 和冲量 I ;

(2) 利用公式(6)和(8)确定构件表面特征点爆炸载荷参数(峰值压力和冲量)归一化分布函数 $f_P(x,y)$ 和 $f_I(x,y)$;

(3) 确定构件表面任意点爆炸载荷参数. 结合构件中心点爆炸载荷参数(爆炸载荷反射压力 P 和冲量 I), 利用归一化分布函数 $f_P(x,y)$ 和 $f_I(x,y)$ 即可确定任意点爆炸载荷参数为

$$P(x,y) = Pf_P(x,y), I(x,y) = If_I(x,y). \quad (10)$$

利用上述方法确定构件表面的爆炸载荷参数后, 即可利用得到的爆炸载荷参数对构件的毁伤破坏进行评估分析.

4 结论

本文通过数值模拟, 主要研究了在建筑物外部爆炸环境下, 爆炸波的传播以及爆炸波在传播过程中与方形板结构相互作用的过程, 并在此基础上, 提出了预测作用在方形板构件表面上爆炸载荷各参数的公式. 主要结论如下.

(1) 通过显式有限元动力分析软件AUTODYN数值模拟了爆炸波传播及其与方形板的相互作用过程. 研究表明, 在板结构的前表面, 近区爆炸载荷的分布是非均匀的, 结构表面不同位置的爆炸载荷分布主要体现为中部正超压峰值和冲量较边缘高, 到达时间早, 四角的超压峰值和冲量较小.

(2) 在有限元模拟数据的基础上, 提出了预测方形板结构表面中心点处爆炸载荷各参数(正反射峰值压力和冲量)的公式.

(3) 建立了方形板结构表面爆炸载荷分布函数, 并利用这些公式提出了构建结构表面任意点处爆炸载荷的一般方法. 公式可以快速确定任意尺寸方形板结构构件在近爆爆炸环境中承受的爆炸载荷的峰值压力和冲量. 这些参数可以作为结构抗爆分析中的输入参数, 为后续的结构损伤破坏分析奠定基础.

参考文献

- Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use. Amsterdam: Elsevier, 1979
- Smith P D, Rose T A. Blast wave propagation in city streets—An overview. *Prog Struct Engng Mater*, 2006, 8: 16–28
- Smith P D, Mays G C, Rose T A, et al. Small scale models of complex geometry for blast overpressure assessment. *Int J Impact Eng*, 1992, 12: 345–360
- Smith P D, Vismeg P, Teo L C, et al. Blast wave transmission along rough-walled tunnels. *Int J Impact Eng*, 1998, 21: 419–432
- Rose T A, Smith P D. Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses. *Int J Impact Eng*, 2002, 27: 359–376
- Remennikov A M, Timothy A R. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Comput Struct*, 2005, 83: 2179–2205
- TM5-1300. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. US Department of the Army. Washington DC, 1990
- UFC-3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. US Department of Defense Washington DC, 2008
- Beshara F B A. Modelling of blast loading on aboveground structures—II. Internal blast and ground shock. *Comput Struct*, 1994, 51: 597–606
- Beshara F B A. Modelling of blast loading on aboveground structures—I. General phenomenology and external blast. *Comput Struct*, 1994, 51: 585–596
- Yang X, Shi S Q, Cheng P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air (in Chinese). *Blasting*, 2008, 25: 15–19 [杨鑫, 石少卿, 程鹏飞. 空气中TNT爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟. *爆破*, 2008, 25: 15–19]
- Gu L, Xiang W F. Analyses on influential factors about airblast overpressure and its control (in Chinese). *Blasting*, 2002, 19: 15–17 [顾垒, 向文飞. 爆炸空气冲击波超压影响因素分析及控制. *爆破*, 2002, 19: 15–17]
- Lin D C, Bai C H, Zhang Q. Overpressure functions of blast waves for explosions in air (in Chinese). *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21: 41–

- 46 [林大超, 白春华, 张奇. 空气中爆炸时爆炸波的超压函数. 爆炸与冲击, 2001, 21: 41–46]
- 14 Ye X S. Foundation of Explosion (in Chinese). Nanjing: Institute of Engineering, PLA University of Science and Technology, 2003 [叶序双. 爆炸作用基础. 南京: 解放军理工大学工程兵学院, 2003]
- 15 Zhang S Z. Explosion and Impact Dynamics (in Chinese). Beijing: Ordnance Industry Press, 1993 [张守中. 爆炸与冲击动力学. 北京: 兵器工业出版社, 1993]
- 16 Shi Y, Hao H, Li Z X. Numerical simulation of blast wave interaction with structure columns. *Shock Waves*, 2007, 17: 113–133
- 17 Wang W, Zhang D, Lu F, et al. A new SDOF method of one-way reinforced concrete slab under non-uniform blast loading. *Struct Eng Mech*, 2013, 46: 595–613
- 18 Wang W, Zhang D, Lu F Y, et al. A method of determining blast loads on structures under close-in explosion (in Chinese). *Acta Armamentarii*, 2013, 34: 234–242 [汪维, 张舵, 卢芳云, 等. 近爆作用下结构表面上爆炸载荷确定方法研究. 兵工学报, 2013, 34: 234–242]
- 19 AUTODYN. Theory Manual. Century Dynamics. San Ramon: Century Dynamics, 2006
- 20 Chapman T C, Rose T A, Smith P D. Reflected blast wave resultants behind cantilever walls: A new prediction technique. *Int J Impact Eng*, 1995, 16: 397–403

Study on load distributing function of square slab surface under close-in blast loading

WANG Wei^{1,2}, LIU Guang-Kun³, ZHAO Qiang², LIU Rui-Chao^{2*}, WU Biao²
& ZHOU Song-Bai²

¹ Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

² Research Institute for National Defense Engineering of Academy of Military Sciences PLA, Luoyang 471023, China;

³ Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China

The mode and magnitude of the blast load are the main cause of damage to the structure. Most current studies have simplified the blast load into a bilinear form that differs greatly from the actual time history curve and is applied directly to the structure, avoiding the fluid-solid coupling interaction between the gas and the structure. The simplified blast load for near-explosion or internal explosion will bring a big error to the calculation results. In order to quickly determine the load on the surface of the square plate under near-explosion, the interaction between the explosion shock wave and the structure is studied by numerical simulation method. The distribution function of the explosion load at different points on the surface of the square plate structure is proposed, and the plate structure is established to simplify prediction formulas for blast load parameters at the center of the surface. Using these formulas, a general method for constructing blast loads at any point on the surface of a structure is proposed. The results show that using these formulas, it is possible to predict the parameters (peak pressure and impulse) of the blast load that an structural member of any size can withstand in a near-explosive environment.

blast mechanics, blast load, square slab, numerical simulation, AUTODYN

PACS: 43.28.Mw, 43.25.Cb, 43.50.Pn

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0188](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0188)