

文章编号:1006-9941(XXXX)XX-0001-08

不同炸高爆炸条件地下工程内冲击波传播规律的工程算法

刘飞¹,任新见^{1,2},何翔¹

(1. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023; 2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 为了获取不同工况下工程内部冲击波的传播规律,采用可拼装式钢结构单元组成地下工程模型进行了48次不同炸高的模拟爆炸试验,在模型结构内部侧壁安装压阻式压力传感器测量冲击波波形,由实测数据拟合了深钻地爆炸条件下地下工程内冲击波正压冲量和正压作用时间的工程算法模型。结果表明,冲击波特征参量的取值主要与覆盖层配筋率、装药的比例炸高与比例爆距、结构横截面比例直径有关;模型相关系数大于0.8,平均误差小于20%,能为地下工程抗爆炸毁伤分析与设计提供荷载依据。

关键词: 深钻地爆炸;地下工程;冲击波;工程算法模型

中图分类号: TJ5; O383

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019243

1 引言

精确制导钻地武器的出现和应用使得地下工程口部遭受袭击成为可能,地下工程口部内爆炸的破坏效应是目前工程防护研究的热点^[1-2]。爆炸引起的空气冲击波是常规爆破类弹药的主要毁伤元。深钻地条件下地下工程中冲击波的传播规律对工程的结构设计、防护设备的研制具有重要价值。

根据对覆盖层的穿透情况,钻地武器爆炸可分为覆盖层中爆炸和穿透覆盖层后在地下工程口部爆炸两种情形^[3]。前者对应覆盖层中不同炸高爆炸(即钻地弹受侵彻能力限制,未能进入工程内部);后者对应工程口部内爆炸,即钻地弹穿透覆盖层,进入结构内部爆炸。

冲击波的分布规律是深钻地条件下地下工程冲击波毁伤效应的核心要素。从国内外已有成果来看,既有研究多集中于工程口部空爆工况(对应钻地弹穿透覆盖层进入工程内部),如美军TM5-855-1手册给出了口部内爆炸条件下坑道中冲击波超压的分布公

式^[4],庞伟宾等^[5]得到了空气冲击波在坑道中的走时规律,王启睿等^[6]分析了多级穿廊结构的消波效果;但覆盖层中不同侵彻深度爆炸(对应钻地弹未穿透覆盖层)时地下工程内部的冲击波传播规律研究较少^[7-8]。此时如果装药的爆炸威力不足以使结构发生贯穿破坏,则工程内部不会形成强冲击波,设备设施亦不会发生冲击荷载作用下的毁伤。因此,需要重点关注的是装药在覆盖层中内爆形成震塌贯穿、有爆炸剩余能量进入工程内部时空气冲击波的传播规律,即装药不同炸高爆炸时地下工程中的冲击波特征参量分布,以准确获取作用于目标的荷载,继而进行相应的毁伤分析计算。

为此,本研究采用钢结构单元组装成地下工程模型进行了48次不同炸高的模拟爆炸试验,以试验实测数据为基础结合量纲分析的方法,对覆盖层中不同炸高爆炸时地下工程内冲击波正压冲量和正压作用时间的分布规律进行了工程算法研究。

2 试验方案

2.1 试验内容

钻地武器对地下工程口部的主要破坏工况如图1所示。由于口部内爆条件下工程内部的冲击波传播规律已有较成熟结论^[9-10],因此,试验主要聚焦于通过模型化爆试验模拟覆盖层中不同炸高爆炸(对应图1a中破坏工况)。

收稿日期:2019-09-18;修回日期:2020-03-11

网络出版日期:2020-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助(U1404107)

作者简介:刘飞(1977-)男,高级工程师,主要从事人防工程和综合防护技术研究。e-mail:feiliu423@163.com

通信联系人:任新见(1979-)男,副研究员,主要从事常规武器毁伤效应研究。e-mail:pla414100@163.com

引用本文:刘飞,任新见,何翔.不同炸高爆炸条件地下工程内冲击波传播规律的工程算法[J].含能材料,DOI:10.11943/CJEM2019243.

LIU Fei,REN Xin-jian,HE Xiang. Engineering Algorithm of Shock Wave Propagation Law in Underground Bunker at Various Depths of Explosion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2019243.

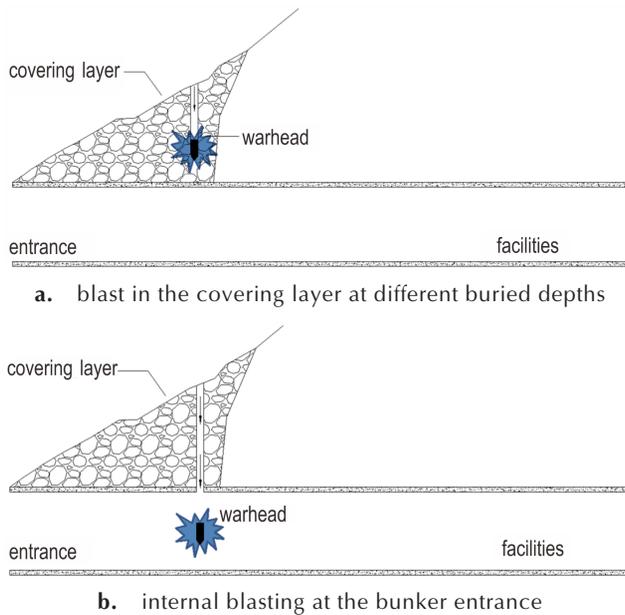


图1 钻地武器对地下工程口部的主要破坏工况
Fig. 1 Schematic of damage modes of bunker entrance caused by earth-penetrating weapons

2.2 试验系统

考虑到试验的成本与实际可操作性, TNT爆炸试验采用模型结构(如图2所示), 总长22 m, 通过钢制单元拼接而成, 两端开口; 每节拼装单元长1 m, 净截面尺寸60 cm×60 cm(因净截面尺寸较大, 模型结构内壁光洁度对试验结果的影响可忽略)。

在口部根据试验需要加装图3所示钢结构单元, 得到所需的工程结构形式。

通过TNT装药进行化爆试验获取有效的冲击波



图2 模型结构实物
Fig.2 Photo of model structure for tests

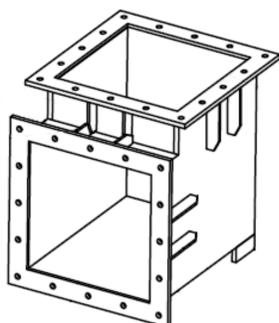


图3 口部钢结构单元
Fig.3 Steel structure unit of mock equivalent entrance

波形是开展针对性研究的前提与基础。试验时, 通过结构侧壁预置的压阻式硅压力传感器测量冲击波波形; 传感器主要布置在距爆心3倍坑道等效直径以外区域, 坑道内已形成稳定平面波。传感器实物如图4所示, 前端带安装螺纹, 量程30 MPa, 频响300 kHz, 线性度 $\leq 0.5\%$, 回差 $\leq 0.5\%$, 重复性 $\leq 0.5\%$, 瞬态响应上升时间 $< 5 \mu\text{s}$ 。



图4 硅压力传感器
Fig.4 Silicon pressure sensors

冲击波信号经低噪音电缆传至放大器放大1000倍, 保存至瞬态数据采集仪。覆盖层中不同炸高内爆试验时, 装药在试件内部爆炸, 如图5所示。

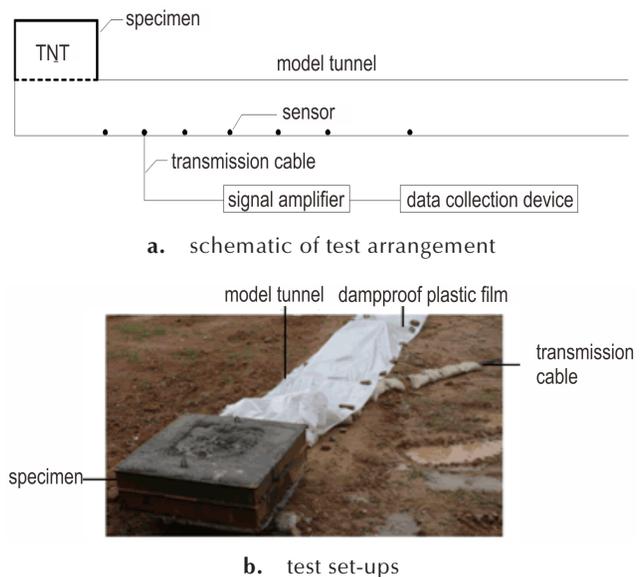


图5 覆盖层内爆试验
Fig.5 Configuration of internal blasting tests in the covering layer

2.3 试验试件

为了考察覆盖层基体强度、钢筋配筋率、装药量、装药炸高对冲击波传播规律的影响, 共设计3类试件I、II、III。试验时炸高取爆心至模型结构顶部距离, 具体试验条件如表1所示。

试件I: 1000 mm×1000 mm×500 mm, $\Phi 8$ HPB335钢筋, 体积配筋率1%, 水平配筋间距150 mm, 竖向配

筋间距 100mm;

试件Ⅱ:1000 mm×1000 mm×500 mm, Φ 12HPB335 钢筋, 体积配筋率 2%, 水平配筋间距 150 mm, 竖向配筋间距 100 mm。

试件Ⅲ: 直径 162 cm, 高 75 cm, 内部采用 Φ 14 螺纹钢, 钢筋水平间距 15 cm; 体积配筋率 1.935%。

试件 I、Ⅱ浇筑完毕, 边缘外扩 40 cm, 外缘采用 2 mm 厚薄钢板进行约束, 钢板与原试件之间填充

C30 素混凝土, 如图 6a 所示。增加试件几何尺寸并用钢板进行约束的目的在于增加试件的抗爆炸毁伤药量, 同时减小试验时的边界效应。由于几何尺寸的限制, 试件 I、Ⅱ的最大抗爆炸毁伤药量仅 1.2 kg; 试件Ⅲ在此基础上增大几何尺寸, 形状上选择没有明显应力集中的圆柱体, 如图 6b、c 所示; 试件外围采用 1 cm 厚高强钢板约束, 用来增强试件的抗爆炸毁伤能力并削弱边界效应。



a. appearance form of specimen I and II b. internal reinforcement of specimen III c. appearance form of specimen III

图6 试件 I、Ⅱ、Ⅲ实物

Fig.6 Photos of specimen I, II and III

试验时, 从试件上表面向下钻孔至试验所需深度后填充 TNT 药块, 并采用与试件等强度的素混凝土将炮孔完全填塞; 试件上表面覆土 80 cm 消减边界效应。试验在混凝土完全凝固后进行, TNT 装药量 Q 为 100~4600 g, 炸高 H 为 2~40 cm。

3 结果与讨论

3.1 破坏形态与波形特点

试验后试件背面的典型破坏形态如图 7 所示, 爆炸漏斗坑形状明显。由图 7 的毁伤结果可见, 结构抗力与配筋密切相关, 配筋率增加时, 试件的抗爆能力大幅提升, 相同工况(药量、炸高相同)下, 试件的破坏程度显著减轻。

从测试结果看, 受高温和电磁的影响, 近区冲击波

波形较紊乱, 中远区波形较理想, 图 8a 为试件 I 内爆试验实测中远区冲击波超压典型波形, 装药量 $Q=400$ g, 炸高 5 cm, 测点至爆心水平间距 $X=303$ cm。为了分析密闭空间的影响和覆盖层的防护作用, 同时进行了空爆对比试验。对比试验未安放试件, 装药量、装药位置与覆盖层中内爆试验相同, 试验结果如图 8b 所示。由图 8 可以看出, 内爆条件下冲击波正压作用时间增长, 而超压峰值显著降低。

覆盖层中不同炸高爆炸时地下工程中不同位置冲击波特征参量(超压 Δp 、正压冲量 I 、正压作用时间 t_+)与装药量 Q 、爆心至地下结构顶部距离 H 、测点至爆心水平间距 X 、结构断面等效直径 d 、试件配筋率 ρ 及配筋屈服强度 f_y 、试件基体强度 σ_c 有关, 由试验实测数据绘出覆盖层内爆时特征参量的变化规律, 如图 9 所示。



a. specimen I

b. specimen II

c. specimen III

图7 三种试件破坏形态

Fig.7 Damage statuses of after-test three specimens

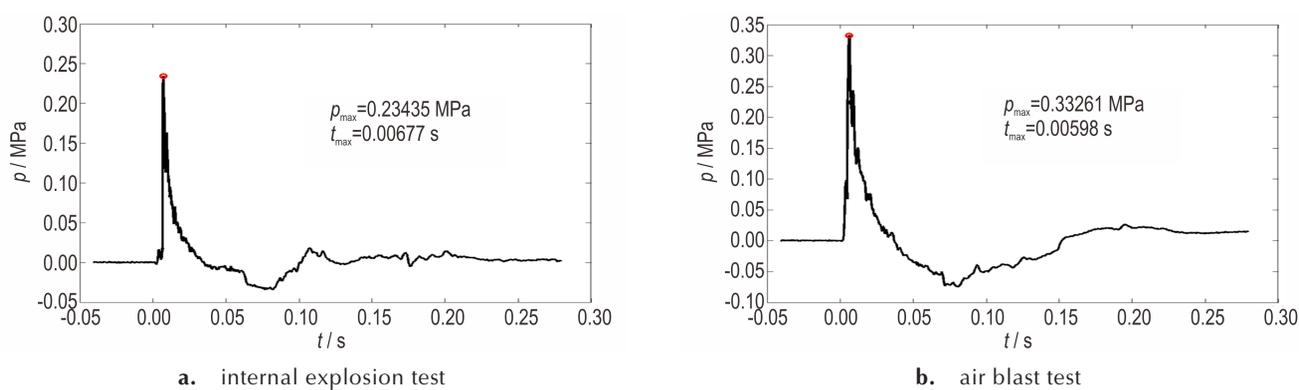


图8 内爆试验与空爆试验波形对比

Fig.8 Waveform comparison between internal explosion test and air blast test

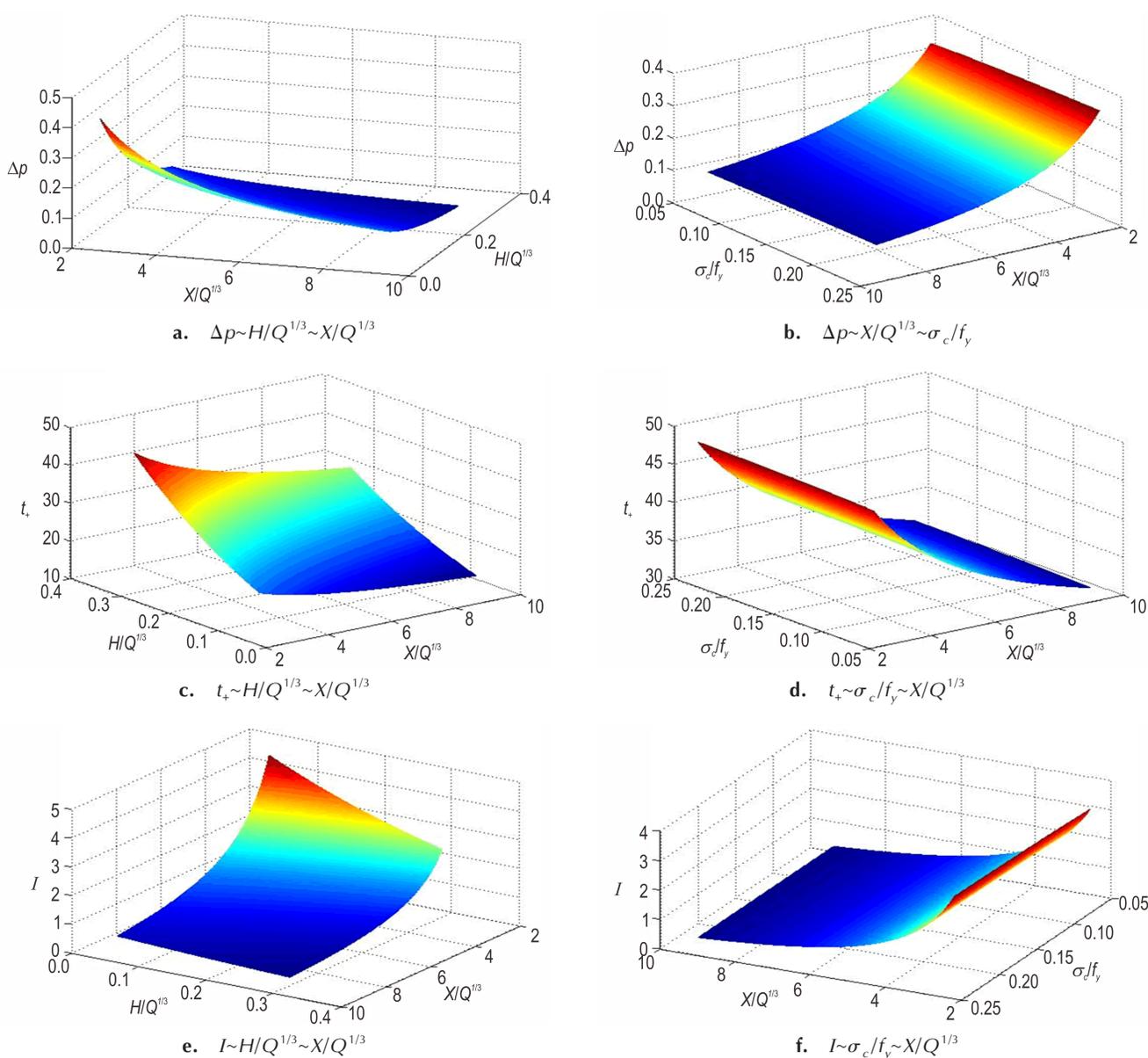


图9 覆盖层内爆时冲击波特征参数的变化

Fig.9 The influences of characteristic parameters on shock wave of internal explosion in the covering layer

特征参量取值随装药参数、试件几何参数及材料参数呈幂指数变化,这为特征参量工程算法公式形式的选取提供了依据。

3.2 特征参量公式

爆炸试验在特定条件下进行,试验数据仅适用于特定工况,对装药质量范围、炸药性质等都有严格要求。为了将试验结果外延至其他工况,这里通过量纲分析构建具有普遍意义的冲击波特征参量函数,进而根据试验结果确定函数的具体表达式,得到便于实际使用的工程算法模型。

空爆条件下,需要重点关注的空气冲击波特征参量主要是超压峰值 Δp ;但覆盖层中爆炸时,地下工程内部冲击波衰减较慢,作用时间较长,计入作用时间影响的冲量是影响毁伤效果的关键因素。因此,除了超压峰值,正压冲量、正压作用时间的取值与分布规律尤其值得研究。

炸药在地下工程覆盖层中内爆时,影响空气冲击波正压冲量 I 的主要因素包括装药属性、介质材料属性、结构几何属性等,不计入空气粘性与热传导属性对结果的影响^[11]。工程内空气冲击波正压冲量分布问题的主定参量为 $Q, \rho_0, D, H, \rho_0, \rho_{a,0}, \sigma_c, \rho, f_y, X, d$; 待定参量为正压冲量 I 。 I 可记为

$$I = f(Q, \rho_0, D, H, \rho_0, \rho_{a,0}, \sigma_c, \rho, f_y, X, d) \quad (1)$$

式中, Q 为装药质量, ρ_0 为装药密度, D 为爆速, H 为炸高; ρ_0 为空气初始大气压, $\rho_{a,0}$ 为空气初始密度; σ_c 为覆盖层混凝土抗压强度, ρ 为钢筋体积配筋率, f_y 为钢筋屈服强度; X 为测点与爆心的水平间距, S 为地下结构横断面面积。考虑到 $S = \pi d^2/4$, 采用等效直径 d 替代 S 进行分析。

由布金汉 π 定理^[12], 依据 L-T-M 单位制, 由主定参量组合得到无量纲量 $\pi = \frac{I}{d\sqrt{\rho_{a,0}\rho_0}}, \pi_1 = \frac{Q}{\rho_0 d^3}, \pi_2 =$

$$\frac{D}{\sqrt{\rho_0/\rho_0}}, \quad \pi_3 = \frac{\rho_{a,0}}{\rho_0}, \quad \pi_4 = \frac{Q}{\rho_0 X^3}, \quad \pi_5 = \frac{Q}{\rho_0 H^3},$$

$$\pi_6 = \rho, \pi_7 = \frac{\sigma_c}{f_y}。$$

$\pi \sim \pi_7$ 代入式(1), 可得

$$\frac{I}{d\sqrt{\rho_{a,0}\rho_0}} = f\left(\frac{Q}{\rho_0 d^3}, \frac{D}{\sqrt{\rho_0/\rho_0}}, \frac{\rho_{a,0}}{\rho_0}, \frac{Q}{\rho_0 X^3}, \frac{Q}{\rho_0 H^3}, \rho, \frac{\sigma_c}{f_y}\right)$$

(2)

将空气密度 $\rho_{a,0}$ 、炸药密度 ρ_0 视作不变量, 这样式

(2) 中 $\frac{\rho_{a,0}}{\rho_0}$ 可略去; 变换 π_1, π_4, π_5 形式, 得

$$\pi'_1 = (\rho_0 \pi_1)^{-1/3} = \frac{d}{Q^{1/3}}, \quad \pi'_4 = (\rho_0 \pi_4)^{-1/3} = \frac{X}{Q^{1/3}}, \quad \pi'_5 = (\rho_0 \pi_5)^{-1/3} = \frac{H}{Q^{1/3}}。$$

试验时统一采用 TNT 炸药, 装药类型固定, 装药爆速 D 不变; 冲击波在空气中传播, 空气初始大气压 p_0 、初始密度 $\rho_{a,0}$ 恒定。从构建工程模型的角度出发, 令 $\rho_0=1, \rho_{a,0}=1, D=1$, 得到覆盖层内爆时工程内空气冲击波正压冲量的计算式为

$$\frac{I}{d} = f\left(\rho, \frac{H}{Q^{1/3}}, \frac{d}{Q^{1/3}}, \frac{\sigma_c}{f_y}, \frac{X}{Q^{1/3}}\right) \quad (3)$$

同理, 由

$$\frac{t_+}{\sqrt{\rho_0/\rho_0} d} = g\left(\frac{Q}{\rho_0 d^3}, \frac{D}{\sqrt{\rho_0/\rho_0}}, \frac{\rho_{a,0}}{\rho_0}, \frac{Q}{\rho_0 X^3}, \frac{Q}{\rho_0 H^3}, \rho, \frac{\sigma_c}{f_y}\right),$$

可得正压作用时间 t_+ 计算式可简记为

$$\frac{t_+}{d} = g\left(\rho, \frac{H}{Q^{1/3}}, \frac{d}{Q^{1/3}}, \frac{\sigma_c}{f_y}, \frac{X}{Q^{1/3}}\right) \quad (4)$$

3.3 数据拟合

工程算法模型能在自变量的某一取值范围内使用指数形式^[13]。因此式(3), (4)可显式表达为

$$\pi = A \pi_1^{\beta_1} \pi_2^{\beta_2} \pi_3^{\beta_3} \pi_4^{\beta_4} \pi_5^{\beta_5} \quad (5)$$

计及配筋率 $\rho=0$ 、炸高 $H=0$ 等极端情况, $\rho, \frac{H}{Q^{1/3}}$ 使用 e 指数形式。表达式可记为

$$\frac{I}{d} = A \cdot e^{\alpha_1 \rho + \alpha_2 \frac{H}{Q^{1/3}}} \cdot \left(\frac{d}{Q^{1/3}}\right)^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{f_y}\right)^{\alpha_4} \cdot \left(\frac{X}{Q^{1/3}}\right)^{\alpha_5} \quad (6)$$

$$\frac{t_+}{d} = B \cdot e^{\beta_1 \rho + \beta_2 \frac{H}{Q^{1/3}}} \cdot \left(\frac{d}{Q^{1/3}}\right)^{\beta_3} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{f_y}\right)^{\beta_4} \cdot \left(\frac{X}{Q^{1/3}}\right)^{\beta_5} \quad (7)$$

对试验实测波形的正压冲量、正压作用时间(典型结果如表 1 所示)进行回归, 确定出各待定系数取值, 整理得覆盖层不同炸高内爆炸条件下地下工程中空气冲击波特征参量分布规律的具体表达式为

$$\frac{I}{d} = 43.131 \cdot e^{-0.170\rho - 2.509\frac{H}{Q^{1/3}}} \cdot \left(\frac{d}{Q^{1/3}}\right)^{0.409} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{f_y}\right)^{0.037} \cdot \left(\frac{X}{Q^{1/3}}\right)^{-1.601} \quad (8)$$

$$\frac{t_+}{d} = 54.032 \cdot e^{0.113\rho + 3.004\frac{H}{Q^{1/3}}} \cdot \left(\frac{d}{Q^{1/3}}\right)^{0.178} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{f_y}\right)^{0.012} \cdot \left(\frac{X}{Q^{1/3}}\right)^{-0.308} \quad (9)$$

式中, I 为测点空气冲击波正压冲量, MPa·ms; t_+ 为测点空气冲击波正压作用时间, ms; ρ 为覆盖层配筋百分率 ($0 < \rho \leq 2$); Q 为装药量, kg; d 为地下结构横截面等效直径, m; H 为炸高(爆心至地下结构顶部的距离),

m ; σ_c/f_y 为覆盖层基体相对强度 (σ_c 对应钢筋混凝土中基体材料抗压强度, MPa; f_y 对应钢筋屈服强度, MPa); X 为测点至爆心的水平间距, m。

表 1 不同炸高爆炸试验实测冲量、作用时间值及其对应试验条件

Table 1 Measured impulse, action time and corresponding conditions at different depths of explosion

I /MPa·ms	t_+ /ms	ρ /%	Q /kg	X /m	H /m	σ_c /MPa
0.632	51.04	1	0.4	5.03	0.2	60
1.350	26.33	1	0.6	5.28	0.05	40
3.450	38.71	1	0.8	3.03	0.05	80
4.250	32.52	1	1.2	3.03	0.05	30
3.120	35.20	1	0.6	3.03	0.05	20
1.020	37.83	2	0.4	4.03	0.05	20
1.540	36.95	2	0.6	4.03	0.05	80
1.050	30.77	2	0.6	5.28	0.05	40
2.590	34.23	2	0.6	3.03	0.05	60
0.878	29.00	2	0.6	5.28	0.05	30
1.380	36.03	1.935	1.6	6.03	0.12	30
1.960	40.46	1.935	2.2	4.03	0.14	30
1.450	38.71	1.935	1.8	6.03	0.15	30
2.020	19.36	1.935	2	3.03	0.07	30
0.944	29.89	1.935	2.6	6.03	0.15	30

Note: 1) I is the positive impulse; 2) t_+ is the positive pressure action time; 3) ρ is the reinforcement ratio; 4) Q is the charge quantity; 5) X is the horizontal distance from measuring point to blasting center; 6) H is the blasting height; 7) σ_c is the compressive strength of concrete.

公式(8), (9)适用范围为: $0 < \rho \leq 2$, $\frac{H}{Q^{1/3}} = 0.041 \sim$

$0.297 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $\frac{d}{Q^{1/3}} = 0.492 \sim 0.919 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $\frac{\sigma_c}{f_y} = 0.059$

~ 0.239 , $\frac{X}{Q^{1/3}} = 2.405 \sim 9.203 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

评价拟合结果好坏时,一方面须具备良好的外延性,即拟合结果有较好的适用范围,而不仅仅局限于试验对应的工况;另一方面相关系数 R 要尽量接近 1 (与试验结果吻合良好,误差在容许范围内),小于 0.8 则失去实用价值^[12]。式(8)拟合相关系数 $R_I = 0.884$, 拟合值与试验值相对误差平均值为 15.75% (拟合结果相对误差如图 10 所示); 式(9)拟合相关系数 $R_{t_+} = 0.901$, 误差平均值 10.33% (如图 11 所示)。因为冲击波的超压峰值测量较准确,而采用现有的常规压阻式硅压力传感器,难于准确测量冲击波的负压,这样增加了正压作用时间界定的难度,导致正压冲量取值误差

增大;但对爆炸冲击试验而言,允许误差一般是 20%,因此工程算法公式的精度在容许范围内。

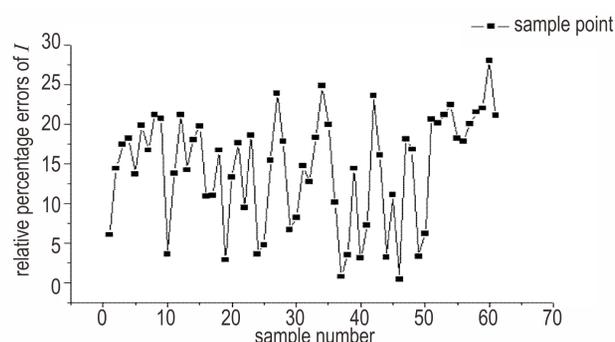


图 10 覆盖层中内爆时冲量拟合误差

Fig.10 Impulse fitting errors of internal explosion in the covering layer

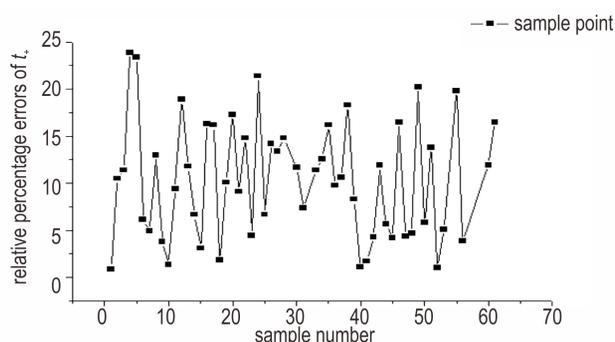


图 11 覆盖层中内爆时正压作用时间拟合误差

Fig.11 Positive pressure action time fitting errors of internal explosion in the covering layer

4 结论

通过不同炸高条件地下工程模型结构的覆盖层内爆试验,可以得到以下结论:

(1) 覆盖层破坏时震塌漏斗坑明显,配筋率对其抗爆炸毁伤能力影响显著;

(2) 工程内部冲击波正压作用时间增加,超压峰值降低明显;

(3) 超压峰值、正压冲量、正压作用时间大小与覆盖层配筋、装药的比例炸高与比例爆距、结构横截面比例直径相关;

(4) 实测波形数据无量纲化后得到的冲击波正压冲量、正压作用时间工程算法公式相关系数大于 0.8, 平均误差小于 20%, 能为地下结构及其内部设备、设施的毁伤分析提供荷载依据。

参考文献:

[1] 杨科之,杨秀敏.坑道内化爆冲击波的传播规律[J].爆炸与冲击,

- 2003, 23(1): 37-40.
 YANG Ke-zhi, YANG Xiu-min. Shock waves propagation inside tunnels[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 37-40.
- [2] UFC-3-340-02. Structures to resist the effects of accidental explosions[R]. US Department of Defense Washington, DC.: 2008.
- [3] 任新见. 深钻地爆炸条件下坑道工程防护门效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
 REN Xin-jian. Study on damage effects of blast doors in the tunnel engineering after deep ground-penetration [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [4] TM5-855-1. Fundamental of protective design for conventional weapons[M]: US Department of the Army, Technical Manual, 1986.
- [5] 庞伟宾, 何翔, 李茂生. 空气冲击波在坑道内走时规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 573-576.
 PANG Wei-bin, HE Xiang, LI Mao-sheng. The formula for air-blast time of arrival in tunnel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 573-576.
- [6] 王启睿, 张晓忠. 多级穿廊结构坑道口部内爆炸冲击波传播规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 449-454.
 WANG Qi-rui, ZHANG Xiao-zhong. Experimental study on the propagation law of blast wave in the entrance of multistage tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5): 449-454.
- [7] Smith P D, Vismeg P, Teo L C, Tingey L. Blast wave transmission along rough-walled tunnels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(6): 419-432.
- [8] Smith P D, Rose T A. Blast wave propagation in city streets-an overview[J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2006, 8(1): 16-28.
- [9] TM5-1300. Structures to resist the effects of accidental explosions[R]. US Department of the Army, Washington, DC, 2010.
- [10] 赵新颖, 王伯良, 李席. 温压炸药在野外近地空爆中的冲击波规律[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(1): 38-42.
 ZHAO Xin-ying, WANG Bo-liang, LI Xi. The shock wave law of thermobaric explosive in the field near ground air explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 38-42.
- [11] Rose T A, Smith P D. Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(4): 359-376.
- [12] 姜启源. 数学模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
 JIANG Qi-yuan. *Mathematical modelling* [M]. Beijing: High Education Press, 1996.
- [13] 汪维, 刘瑞朝. 建筑物内爆泄压口冲击波参数工程算法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 56-62.
 WANG Wei, LIU Rui-chao. Study on the engineering algorithm of shock wave parameters for the internal explosion relief port of buildings[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(9): 56-62.

Engineering Algorithm of Shock Wave Propagation Law in Underground Bunker at Various Depths of Explosion

LIU Fei¹, REN Xin-jian^{1,2}, HE Xiang¹

(1. Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Luoyang 471023, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impacts, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to obtain propagation laws of shock wave inside the bunker under different working conditions, 48 explosion tests at various buried depths were carried out using an underground engineering model that could be assembled by steel structural units. Waveforms of shock waves were measured by piezoresistive pressure sensors mounted on the sidewall of the structures. From the measured data, distribution formulas on positive pressure impulse and action time of shock wave in the underground bunker under deep drilling explosion conditions were studied. The results show that values of representing characteristic parameters of shock waves are mainly related to the reinforcement ratio of the covering layer, the proportional blast height of the charge, the proportional blast distance and the proportional diameter of the cross section of the structure. Correlation coefficients of fitted algorithms are greater than 0.8, and average errors are less than 20%; therefore the engineering models can provide load basis for analysis and design of underground structures against blast damage.

Key words: deep drilling explosion; underground bunker; shock wave; engineering algorithm model

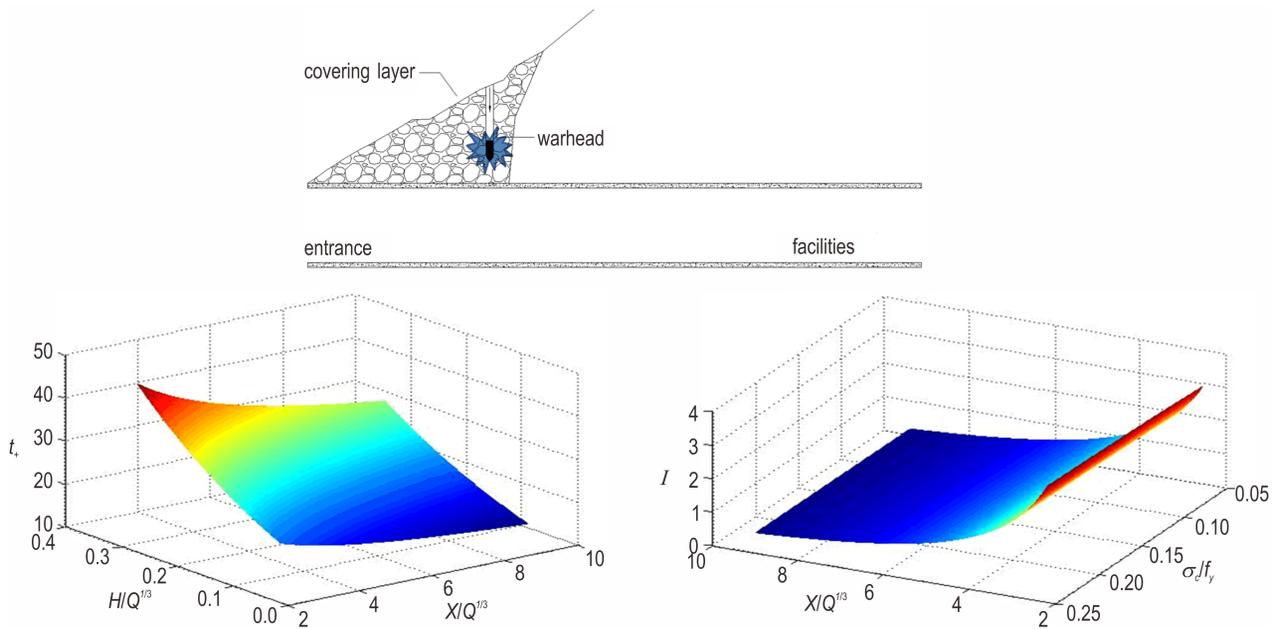
CLC number: TJ5; O383

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019243

(责编: 姜梅)

图文摘要:



Blast tests at different buried depths were carried out using an underground engineering model that can be assembled by steel structural units. The distribution formulas on shock wave in the underground bunker under deep drilling blast conditions were studied.