

# 爆発によって構造物に作用する圧力の評価に関する研究

防衛大学校 学生会員 ○チン・ミン・チェン 森 広毅 寺澤 拓真

正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉

伊藤忠テクノソリューションズ 松澤 遼 創成技研コンサルタント 瀬尾 直樹

## 1. 緒言

近年、世界中で爆破テロ事件や爆発事故が多発している。爆風圧に対して構造物を設計するためには、爆風圧の特性を十分に理解する必要がある。米国の防衛施設設計指針 (UFC) <sup>1)</sup>では表-1 に示すように構造物に作用する爆風圧を求める式を提示している。各パラメータは表-2 に示すとおりである。また、既往の研究によると離隔距離を爆薬量の3乗根で除した換算距離を用いて爆風圧特性を評価できることが知られている。しかし、構造物に作用する爆風について、これらの評価式と実験、数値解析と比較した例は少ない。本研究は、構造物モデルへ爆風圧を作用させる実験を行い、数値解析や評価式との比較を行ったものである。

## 2. 実験の概要

実験の概要を図-1 に示す。構造物モデルはアルミニウム製であり、寸法は 250mm×250mm×170mm である。質量 31g の C-4 爆薬を球形に成型し、構造物モデルから 600mm の位置に高さ 100mm で設置した。構造物モデルの表面に設置した圧力センサーの位置を図-2 に示す。実験は、ばらつきを確認するために7回行った。

## 3. 数値解析の概要

実験に対して、ANSYS AUTODYN を用いて解析を行った。状態方程式は、以下の JWL 式を用いた。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) \exp\left(\frac{-R_1}{\eta}\right) + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) \exp\left(\frac{-R_2}{\eta}\right) + \omega\rho e \quad (1)$$

ここに、 $A, B, R_1, R_2$  および  $\omega$  : 実験によって求められた係数,  $\rho$  : 密度,  $\rho_0$  : 初期密度,  $\eta$  :  $\rho$  と  $\rho_0$  の比,  $e$  : 比内部エネルギーである。

解析の概要を図-3 に示す。解析では解析精度の向上と計算時間の短縮のため、爆発後 0.015ms までは1次元モデルで解析し、その後、3次元モデルに物理量を移設して計算を続行した。解析では実験の計測点と同じ位置にデータの出力点を配置した。

## 4. 実験および解析結果

図-4 に実験、解析および UFC の評価式による入射過圧～時間関係の比較を示す。起爆した時刻を時刻ゼロとした。図から、最大入射過圧については実験値、解析値および UFC の計算値は概ね一致していることがわかる。解析による圧力の上昇傾向および減衰は、実験の結果に概ね一致している。UFC の波形は実験による

表-1 UFC による爆風圧の評価式

	パラメーター	記号	求める式
前面	最大入射過圧	$P_r$	$P_r = P_{s0} \times C_r$
	緩和時間	$t_c$	$t_c = 3S/U$
	よどみ圧	$P_s$	$P_s = P_{s0} + C_d \times q_0$
	力積	$I_w$	$I_w = 0.5 \times (P_r - P_s) \times t_c + 0.5P_s \times t_d$
上面と側面	最大過圧までの到達時間	$t_r$	$t_r = L/U$
	有効最大過圧	$P_a$	$P_a = C_e \times P_{s0} + C_d \times q_0$
	力積	$I_w$	$I_w = 0.5 \times P_a \times t_0$
背面	爆発荷重到達時間	$t_a$	$t_a = L/U$
	最大過圧までの到達時間	$t_r$	$t_r = L/U + S/U$
	有効最大過圧	$P_a$	$P_a = C_e \times P_{s0} + C_d \times q_0$
	力積	$I_w$	$I_w = 0.5 \times P_a \times t_0$

表-2 記号の説明

記号	内容	記号	内容
$R$	離隔距離	$U$	波面速度
$W$	爆薬量	$L_w$	波長
$Z$	換算距離	$S$	緩和距離
$P_{s0}$	最大入射過圧	$L$	支間長
$q_0$	最大動圧	$C_e$	等価荷重係数
$t_a$	波面到達時間	$C_r$	反射係数
$t_0$	静圧の継続時間	$C_d$	抵抗係数

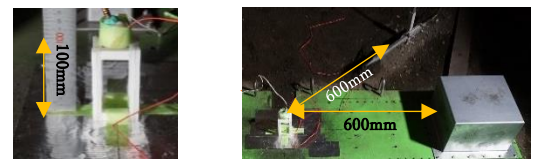


図-1 爆発実験の概要

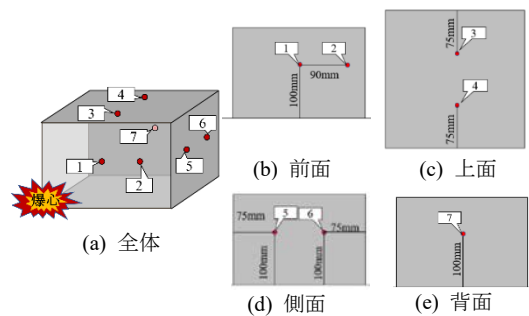


図-2 圧力センサーの位置

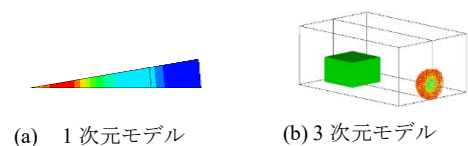


図-3 解析の概要

キーワード 爆風圧, 換算距離, 耐爆設計

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL : 046-841-3810 E-mail : beppu@nda.ac.jp

最大過圧を再現しているが、減衰は実験や解析よりも緩やかな傾向を示した。また、UFC の継続時間は実験や解析より長い。すなわち、UFC の評価は力積を 85% 過大に評価していることがわかる。

図-5~8 に、構造物モデルの前面、上面、側面および背面に設置したセンサーで計測した圧力を、解析および UFC と比較して示す。図から、実験値と解析および UFC による評価は、図-4 に示した入射過圧の傾向に類似している。図-9 に、数値解析で得られた圧力分布の時刻歴を示す。図-9(a)に示すように、爆風圧が構造物モデルの前面に衝突すると爆風が留まることで停滞する圧力を形成する。その後、側面に回折した後、構造物モデルの背後で爆風が重複して増幅する。また、爆風が構造物モデルを通過した後、構造物モデルの背後において周囲より圧力が低い領域が確認できる。図-9(b)からも、構造物モデル前面における停滞の圧力および上面における爆風の回折が確認される。

各センサーの最大過圧、最大過圧までの到達時間および力積について、実験、解析および UFC の評価値の比較を図-10~12 に示す。図には、解析、UFC による評価値と実験値の誤差 (%) も示している。図-10 から、前面と上面の最大過圧について、解析および UFC とも 30% 程度の誤差がある。前面以外に配置したセンサーにおいて、解析の誤差は UFC の評価値より低いことがわかる。図-11 から最大過圧までの到達時間は解析、UFC とも 10% 以内の誤差である。図-12 から、センサー1 以外、解析の力積は UFC の評価値より実験値に近いことがわかる。特に、センサー3~7 において、UFC の誤差は 100% 程度である。この理由は、UFC の継続時間が長いと考えられる。センサー1 の力積において、UFC の評価値が実験と一致した理由は、UFC の最大過圧が低い一方で正圧継続時間が長いためである。

5. 結言

本研究では、爆風を構造物モデルに作用させる実験を行い、数値解析および UFC の評価式との比較を行った。最大入射過圧については実験、解析および UFC による評価は概ね一致したが、構造物モデルの各面における実験の最大爆風圧は解析および UFC の評価値に対して 19~42% の誤差が生じる結果となった。解析は概ね爆風の特性を再現した。今後、さらに解析による実験の再現性を高め、UFC の方法では評価できない斜めからの爆発問題などに対する解析の適用性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) UFC 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions, with change 2, Department of defense, 2014.
- 2) 土木学会: 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価, 2017.

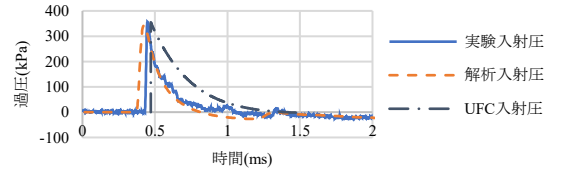


図-4 入射過圧の比較

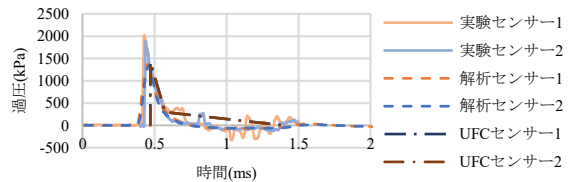


図-5 前面における過圧の比較

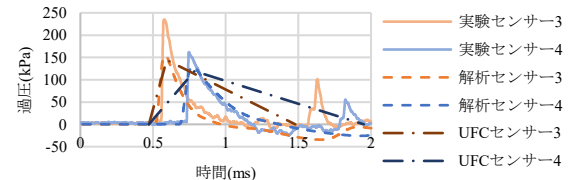


図-6 上面における過圧の比較

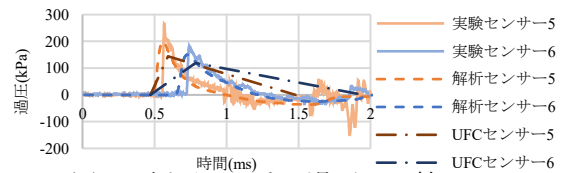


図-7 側面における過圧の比較

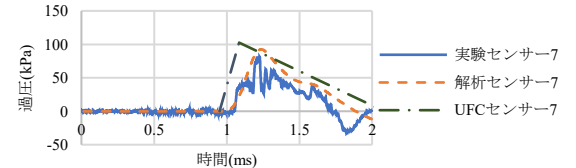


図-8 背面における過圧の比較

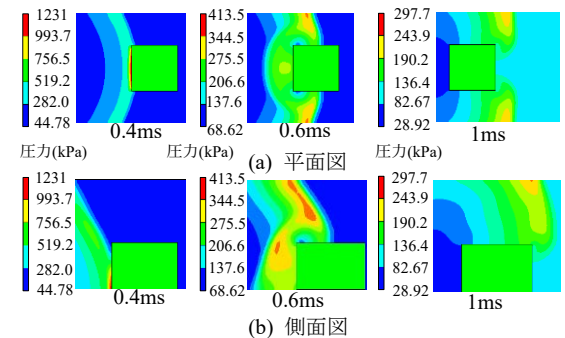


図-9 爆風圧のコンター図

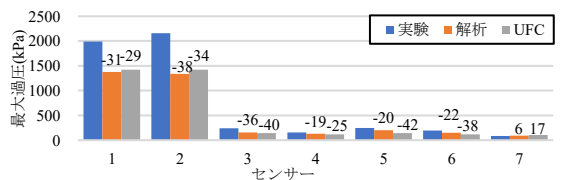


図-10 各センサーの最大過圧

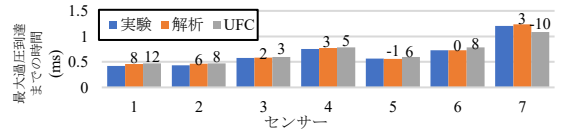


図-11 各センサーの最大過圧までの到達時間

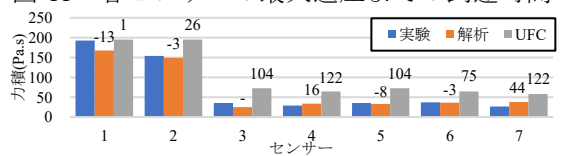


図-12 各センサーの力積