

模擬地中式火薬庫の爆発影響評価

中山良男*, 松村知治*, 宮本健一*,
飯田光明*, 吉田正典*

実規模の地中式火薬庫の爆発影響評価を行うことを目的に、本報告では、43分の1スケールの模擬地中式火薬庫を使用して庫外爆風圧データが収集された。ペントライト爆薬92~487グラムの爆発による庫外爆風圧は、庫口からの換算距離 $1.2\sim 2.5\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 、方位角 $0\text{度}\sim 140\text{度}$ の範囲でピエゾ圧力素子により測定された。実験結果より、ピーク静水過圧、到達時間、持続時間、正圧相のインパルスが算出された。ピーク静水過圧と方位角の関係より、爆源に近いほど爆風の指向性は高いが、距離が大きくなるにつれて、指向性が弱くなることが確認された。また、本実験データのピーク静水過圧の測定精度は、平均で $\pm 10\%$ の範囲となった。

1. はじめに

地中式火薬庫の庫外爆風圧に関しては、これまでに数多くの研究者が、模擬地中式火薬庫を使用して検討を行っている^{1)~8)}。その結果、1)地中式火薬庫の爆発による爆風は薬量、薬室断面積に対する前室断面積の比の影響を受ける、2)庫外爆風圧は指向性を持ち、地中式火薬庫の中心軸方向からの方位角 $\theta = 0\text{度}$ の方向において最も強く、方位角が増加するとピーク過圧は減衰する、ことなどが明らかになっている。一方、数値的方法による研究、および数値的結果を実験結果と比較した研究は非常に少ない^{9), 10)}。これは、現象が3次元的であるのに対し、3次元の数値シミュレーションは大規模になり、時間的経済的に困難であること、地中式火薬庫を構成する材料データの精度、および数値シミュレーション手法の精度に問題が存在することなどが主な理由と考えられる。一方、実験的に実規模(例えば、一級火薬庫の場合、貯蔵量40トン)の実験を行う事も、非常に困難である。今後は、小規模爆発実験を実施し、それを再現できる数値シミュレーション技術を開発して、実規模の爆発影響を評価する方法が有効であると考えられる。

我々の最終的な目的は、地中式火薬庫の実規模での爆発影響評価、およびその結果を反映させた保安距離の基準作成である。そのために、本報告では、43分の

1規模の模擬地中式火薬庫を使用して庫外爆風圧データ(ピーク静水過圧、正圧相の時間積分値であるインパルスなど)を収集し、庫口を原点とした場合の爆風の距離減衰特性、方位角に対する減衰特性を検討する。今回は、実験結果を2次元流体力学計算コードにより数値的に解析することを予定しているため、1)爆風伝播が2次元軸対称的な現象と仮定できること、および2)模擬地中式火薬庫が大きく変形または破壊しないこと、を目標にして実験条件を設定した。なお、本実験結果と対応する数値シミュレーション結果との比較、検討は別途報告する予定である。

2. 実験方法

これまでの実験的研究では、換算距離(庫口からの距離を爆薬量の3乗根で除した値)、あるいは保安物件に対するK値が $5\sim 16\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ の範囲において爆風圧が計測されてきた。本研究では、模擬地中式火薬庫は一端開放の金属製肉厚円管とし、その中心軸の高さは、作業、および安全面の見地から、1000mmとした。この高さにおける地面からの反射波の影響を検討し、その結果、庫口から水平距離1000mmにおいて爆風圧を計測することにした。この場合、換算距離は $1.2\sim 2.5\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ 、爆風のピーク静水過圧は最大約1MPaと推定された。

2.1 供試火薬類

本実験に使用した火薬類をTable 1に示す。鑄造ペントライト爆薬(PETN50/TNT50wt%, 中国化薬(株)製)は、上面に雷管孔を有する円柱形であり、その起爆は6号瞬発電気雷管1本により行った。今回は、庫口に近い側の爆薬端面を起爆し、爆轟波を模擬地中式

1999年7月2日受理

*物質工学工業技術研究所極限反応部

〒305-8565 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-54-4793

FAX 0298-54-4783

E-mail ynakayama@nimc.go.jp

Table 1 Explosives

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.2	No.3
Pentolite*	Weight (g)	91.7	91.6	91.0	194.9	486.9
	Density (kg/m ³)	1640	1630	1640	1640	1640
	Diameter (mm)	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5
	Length (mm)	43.6	43.7	43.2	92.2	230.1
	Length to Diameter ratio	1.08	1.08	1.08	2.28	5.68
Number of Detonator #6		1	1	1	1	1

*PETN/TNT = 50/50wt.%

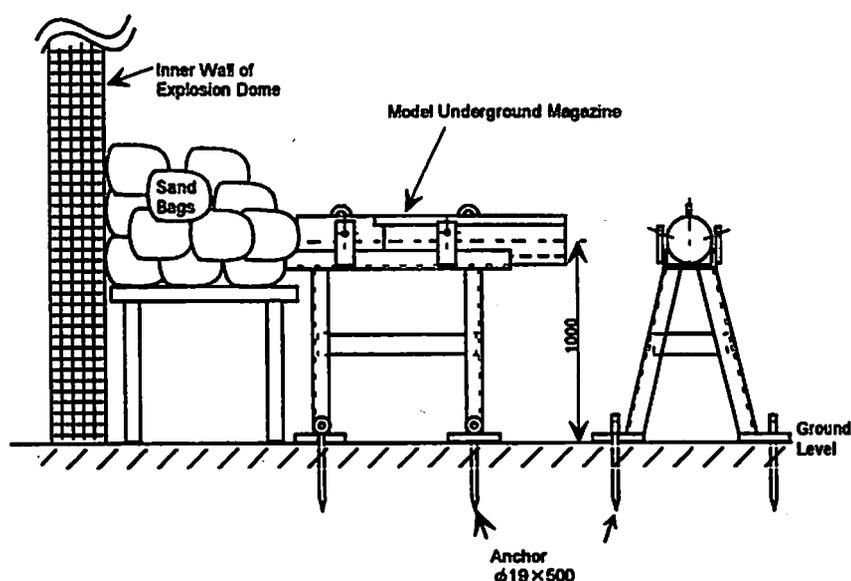


Fig. 1 Front and side view of the model underground magazine (length in mm)

火薬庫の奥に向かって進行させた。爆薬は、その周囲に厚さ0.5mm、面密度0.38kg/m²の板目紙製円板を数枚、直角に配置し、爆薬の中心軸が模擬地中式火薬庫の中心軸に一致するように設置した。位置合わせの精度は、±2mm程度である。実験No.1は同一の薬量で3回実施し、爆風圧の測定精度の検討、記録系のトリガーラインの動作確認などを行った。

2.2 模擬地中式火薬庫

庫外爆風が2次元軸対称的に伝播できるように、1) 火薬庫断面形状は円形、2) 火薬庫と前室(トンネル)部の断面は同じ形・直径、3) 円柱形爆薬の中心は、火薬庫の中心と同一、4) 火薬庫の中心軸は地面から約1000mmの高さ、とした。使用した模擬地中式火薬庫、その架台、およびそれらの設置状況をFig. 1に示す。模擬地中式火薬庫の寸法は、内径193mm×長さ940mmである。模擬地中式火薬庫(材質SS41)が、最

大薬量約500グラムのペントライトの爆発による爆風圧を受けても大きな変形、あるいは破壊することがないようにその構造および寸法を検討し、内径200mmの場合、肉厚30mmに決定した。合計5回の実験を行った後でも、模擬地中式火薬庫に多少の膨らみは認められたが、大きな変形、亀裂等は発生していなかった。なお、本実験の模擬地中式火薬庫の代表長さは、薬量換算で、実規模の約43分の1に相当する。

2.3 測定

庫外爆風は、ピエゾ圧力素子(ピエゾトロニクス社製PCB H102A12)により計測した。ピエゾ圧力素子は、庫口からの距離がほぼ1m、方位角として0度から140度までおよそ30度間隔で計6個の圧力素子を設置した(Fig. 2を参照のこと)。各圧力素子は、直径100mmの円盤状の圧力素子ホルダーを使用して爆風の静水過圧(側圧)を計測する方向に設置した。圧力素子

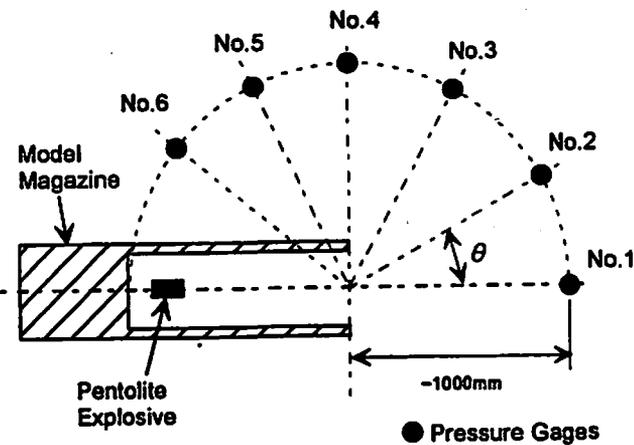


Fig. 2 Locations of pressure gages along six azimuth angles

の高さは、円管状の架台を使用して模擬地中式火薬庫の中心軸と同一の高さ(地面から約1m)に設置した。圧力素子からの出力は、アンプ(PCB480D06)およびバッファアンプ(ヤトロ電子(株)製YH-145型)を通した後約30mの同軸ケーブルで延長して2種類の波形記憶装置TDS684B(SONY Tektronix, 4ch., 5G sample/s, 8bit)および54512B(HP, 4ch., 300M sample/s, 8bit)に記録された。波形記憶装置の測定を開始させるために必要なトリガー信号は、ペンライト爆薬の側面に設置したイオンギャップからの出力とした。したがって、時間軸の原点は、爆轟波が起爆側のペンライト側面に達した時刻に相当する。爆薬の半径は約20mmであり、爆薬端面からイオンギャップまでの軸方向距離は、実験No.1-1, No.1-2, No.1-3, No.2, およびNo.3に対し、それぞれ9.7mm, 19.8mm, 17.6mm,

6.6mmおよび13.4mmであった。したがって、トリガーの精度は、ペンライトの爆速を7km/sと仮定した場合、 $\pm 0.5 \mu s$ となる。

3. 結果

3.1 爆風の時間履歴

Fig. 3(1)~(6)に実験No.1-3(薬量91.0g)の爆風の測定例を示す。同図より、方位角 θ が増加すると、ピーク静水過圧は大きく低下し、到達時刻は遅くなった。これは、庫口における爆風の回折現象を示している。また、庫口正面での圧力履歴には、高周波のノイズが含まれる結果となった。これは、爆薬周囲に設置した板目紙、あるいは雷管の管体による飛散物が圧力素子に衝突したためと考えられる。庫口正面でのピーク静水過圧は他の方位角でのその基準に用いられるため、精度良く計測する必要がある。今後、爆源からの飛散物を少なくすること、方位角 $0 \sim 30$ 度の間において測定点を増やすなどの対策をとる必要がある。一方、 $\theta = 0$ 度(実測値の平均値は1.8度)になった。詳細は次節において述べる。)以外の方位角における圧力履歴は、我々が実施してきた火薬類の保安技術実験において測定された爆風圧波形と比較すると、砂などの飛散物、あるいは地振動によるノイズが非常に小さくなった。これは、模擬地中式火薬庫を地表面ではなく、地上高さ1mに持ち上げたためである。

3.2 爆風特性値の距離減衰特性

今回は、測定距離を固定し、爆薬量を変えることにより、換算距離を変化させた。また、実験により模擬火薬庫は数cm移動したが、移動した状態でその次の実験を実施した。このため、実験毎に圧力素子までの距離、およびその点での方位角は変化した。距離については各実験毎の実測値、方位角については実測値が

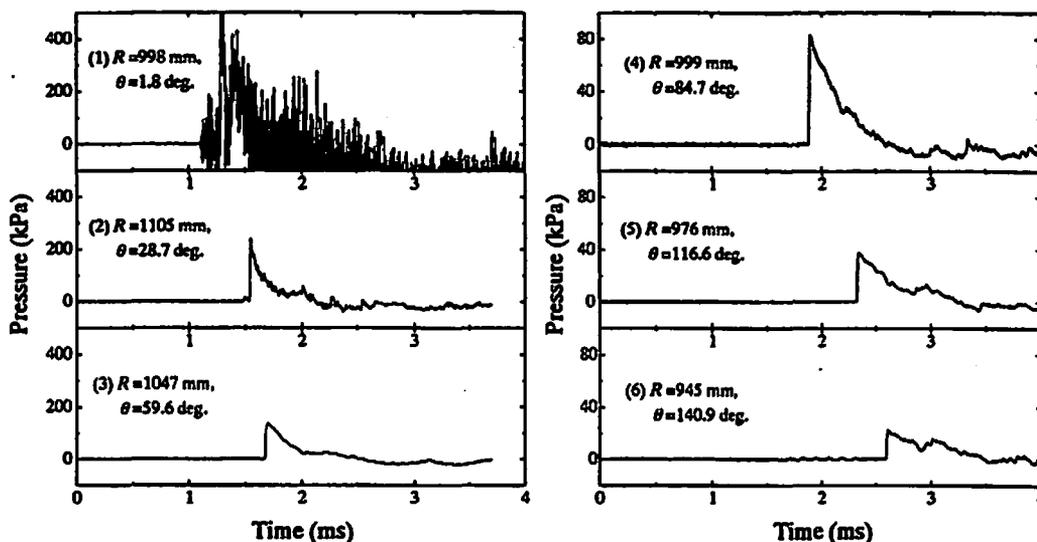


Fig. 3 Pressure-time records of static overpressure for six azimuth angles; No.1-3. Pentolite 91g

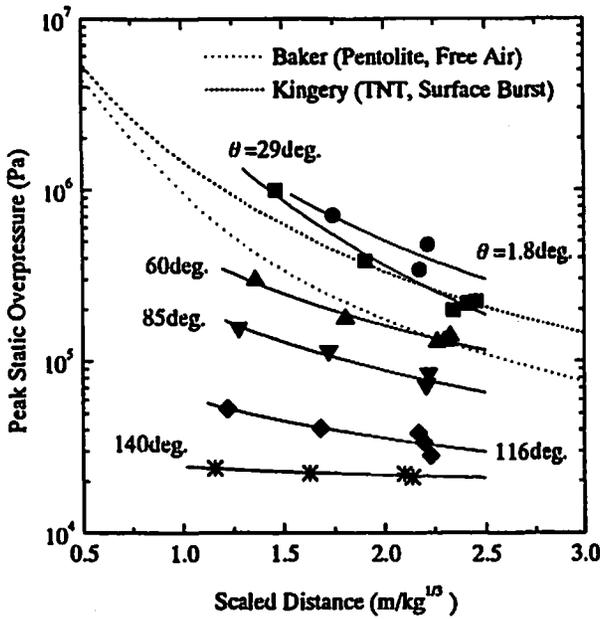


Fig. 4 Peak static overpressure versus scaled distance

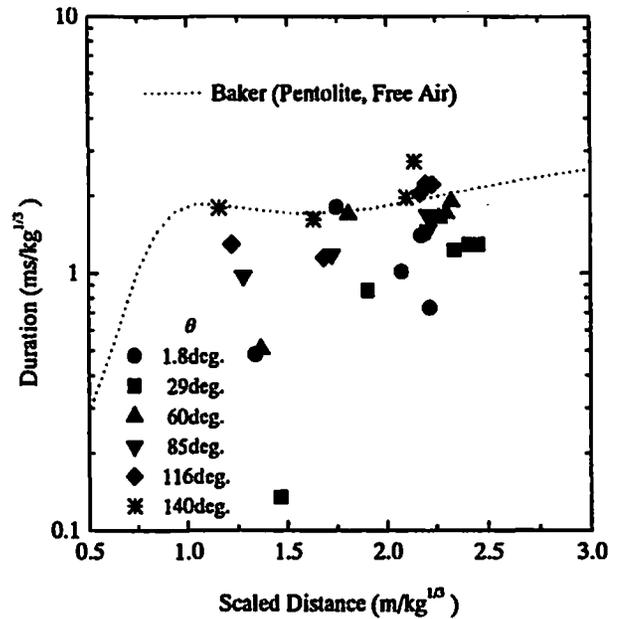


Fig. 6 Scaled duration versus scaled distance

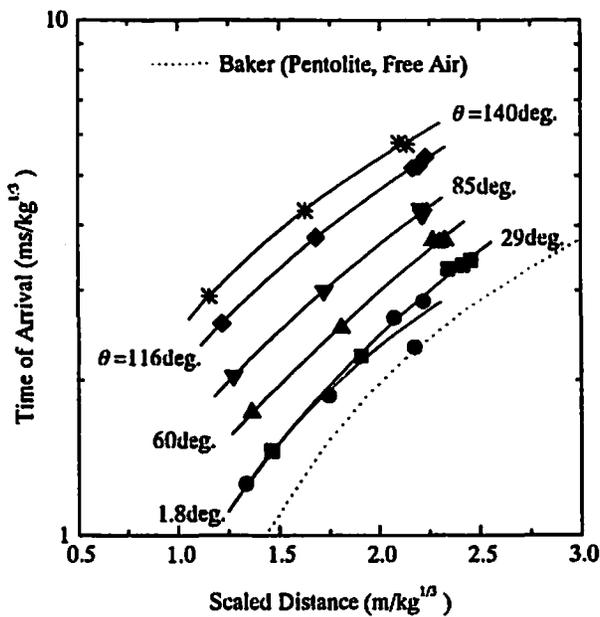


Fig. 5 Scaled time of arrival versus scaled distance

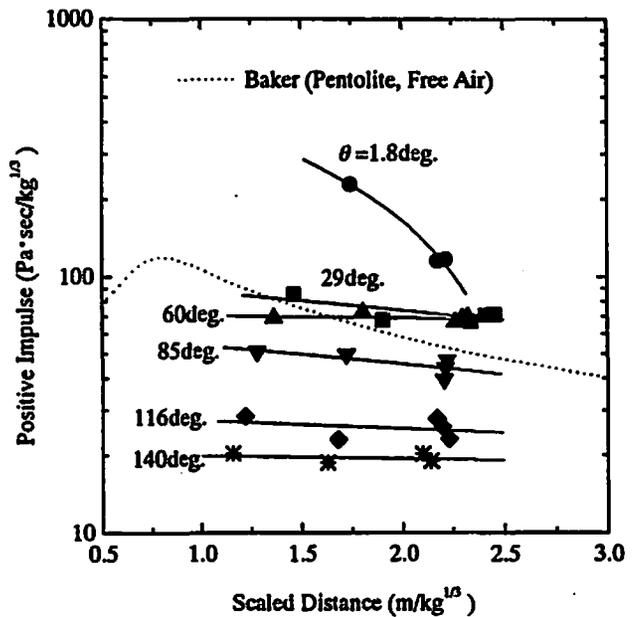


Fig. 7 Scaled positive impulse versus scaled distance

1.84 ± 0.11度, 28.6 ± 0.6度, 59.6 ± 1.2度, 84.7 ± 1.8度, 116 ± 1.6度, および140 ± 1.1度となった(誤差は標準偏差)。変動が±1.8度の範囲に収まることから, 5回の実験の平均値を使用した。

得られた爆風波形を3次の自然スプライン関数により滑らかに補間して, 4つの爆風特性値, すなわちピーク静水過圧, 到達時間, 持続時間, 正圧相の時間積

分値であるインパルスを求めた。Figs. 4~7にピーク静水過圧, 到達時間, 持続時間, および正圧相のインパルスを換算距離に対しプロットした結果を示す。ここに, ●印は方位角1.8度, ■は同29度, ▲は60度, ▼は85度, ◆は116度, *は140度をそれぞれ示す。また, 図中の2種類の点線は, Bakerによるペントライトの空中爆発の文献値(ペントライトの爆発熱

5.1046 × 10⁶ J/kg, 大気圧 101.3kPa, その密度 1225kg/m³により有次元に変換)¹¹⁾, あるいはKingeryによるTNT爆薬の地表面爆発の文献値¹²⁾である。Figs. 4~7より持続時間以外の爆風特性値は方位角をパラメータとして明確に整理できた。持続時間の場合は、理由は不明であるが、方位角の影響がはっきり現れていない。

3.3 ピーク静水過圧の距離減衰特性

次に、ピーク静水過圧について詳細に検討する。Fig. 4より、方位角18~29度では、空中爆発の結果より高く、方位角60度ではほぼ同じになり、方位角85~140度では空中爆発の結果より低くなった。庫口正面方向のピーク静水過圧は、Bakerのデータの2倍薬量に相当するKingeryのデータよりもさらに高くなった。このことより、庫口を距離の原点とした場合、換算距離~2m/kg^{1/3}, 方位角0~30度の範囲において、ピーク静水過圧は空中爆発の場合よりも薬量換算で2倍以上高くなると考えられる。一方、換算距離~2m/kg^{1/3}においては、方位角が増加すると、ピーク静水過圧は著しく減衰する結果となった。今後、方位角180度における計測を実施する予定である。

換算距離の範囲が、1.2~2.3m/kg^{1/3}となることから、本報告ではピーク静水過圧の距離減衰を表す実験式として(1)式を使用する。

$$\Delta p = k (R/W^{1/3})^n \quad (1)$$

ここに、 Δp はピーク静水過圧(Pa), R は庫口からの距離(m), W は薬量(kg), k は圧力の減衰定数, n は距離減衰のべき指数である。フィッティングの結果、方位角 $\theta = 1.8, 29, 60, 85, 116, 140$ 度に対し、それぞれべき指数 $n = -2.360, -3.015, -1.488, -1.325, -0.8157, -0.1618$ となり、方位角が増加するにつれて、ピーク静水過圧は緩やかに減衰する結果となった。なお、方位角1.8度のべき指数 n の絶対値が方位角29度のそれより小さいのは、実験No.3の方位角1.8度のデータを収集できなかったため、実験No.1および実験No.2のデータ、すなわち、より遠方の換算距離におけるデータだけを使用して補間したためと考えられる。今後、庫口正面方向のデータ収集を継続する必要がある。

3.4 ピーク静水過圧の方位角依存性

次に、ピーク静水過圧の方位角依存性、すなわち爆風の指向性を考察する。各方位角に対し(1)式のピーク静水過圧の減衰定数 k , および距離減衰のべき指数 n が求められているので、これらの値を使用し、換算距離1.6, 1.8, 2.0, 2.2, および2.4m/kg^{1/3}における各方位角のピーク静水過圧を算出した。

Fig. 8は、横軸に方位角、縦軸には方位角18度にお

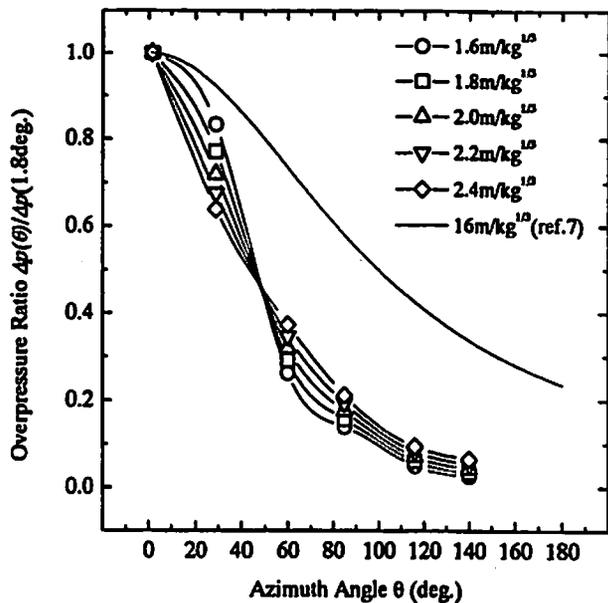


Fig. 8 Overpressure ratio as a function of azimuth angle

けるピーク静水過圧に対するある方位角におけるピーク静水過圧の比(過圧比)をプロットした結果である。図中の実線は、換算距離は16m/kg^{1/3}での文献⁷⁾の結果である。同図より、換算距離が大きくなると、過圧比は緩やかに変化する、すなわち爆風の指向性が弱くなるのがわかる。さらに、換算距離16m/kg^{1/3}における結果とも、本実験結果は、定性的には一致する。以上より、過圧比は、換算距離、あるいは保安距離に関連した表現であれば K 値により変化するため、保安基準の設定に際しては、この爆風の特性を十分に考慮する必要がある。

3.5 ピーク静水過圧の測定精度

本実験データは、今後、2次元流体計算コードによる結果と比較考察される予定である。このため、本実験データの測定精度を算出した。

実験No.1において同一薬量の実験を3回行ったので、ピーク静水過圧の結果より、各方位角毎にデータの分散を推定できる。平均値、標準偏差を算出した結果をTable 2に示す。ここに、誤差は標準偏差により示し、測定精度は標準偏差を平均値で割った値とした。同表より方位角1.8度の測定精度は、非常に悪くなったが、これはFig. 3(1)に示すように、飛散物によるノイズの影響が大きいためと考えられる。 $\theta = 116$ 度の測定精度はやや悪くなったが、 $\theta = 1.8$ 度のデータを含めない場合の測定精度の平均値は $\pm 7.3\%$ 、 $\theta = 1.8$ 度のデータを含めた場合でも $\pm 10\%$ となった。Swisdakによるピーク静水過圧の測定精度も $\pm 10\%$ と報告されている

Table 2 Peak static overpressure scatters in the experiment No.1

Azimuth Angle (deg.)	Peak static overpressure		
	Mean Value (MPa)	Error* (MPa)	Accuracy** (%)
1.8	0.408	0.097	23.8
29	0.212	0.013	6.3
60	0.133	0.005	4.0
85	0.0768	0.0066	8.6
116	0.0334	0.0049	14.5
140	0.0217	0.0007	3.3

* : Error is defined by standard deviation.

** : Accuracy is defined by error divided by mean value.

¹³⁾。数値シミュレーション結果と比較する際には、本測定精度を考慮に入れて考察する必要がある。

次に、本実験で使用した薬量は最大500gと小薬量のため、100kgクラスの薬量の爆発実験により得られた爆風圧データと比較すると、衝撃波の持続時間(パルス幅)は短い。このため、測定精度に影響を与えている可能性があるため、この点につき次に考察する。A.B.Arons & R.H.Coleは、ピエゾ圧力素子が有限な大きさを持つ場合に、理想的なステップ関数の衝撃波圧力が鈍化して計測されること、鋭いスパイク状圧力波の場合は鈍化するだけでなくピーク高さも低く表れること、およびその低くなる割合は $a/c\theta$ であることを示した¹⁴⁾。ここに a はピエゾ圧力素子の受圧面の直径、 c は波の進行速度、 θ は圧力の減衰定数である。本実験で使用したピエゾ圧力素子の a は、圧電材料である石英エレメントの代表長さであると考えて、 $a=3.45\text{mm}$ を採用する。また、 c として、衝撃波速度 U_s を使用することとし、 U_s は次式により算出した¹⁵⁾。

$$U_s = C_0 \left(1 + \frac{\gamma + 1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $C_0=338\text{m/s}$ (実験時の平均気温を10度として求めた音速)、 γ は空気の比熱比(=1.4)、 Δp は爆風のピーク静水過圧、 $p_0=990\text{hPa}$ (実験時の平均大気圧)を使用した。また、減衰定数 θ は、本報告では、圧力がピーク静水過圧の $1/e$ まで減衰するのに要した時間とした。ここに e は自然対数の底である。

薬量が少ない場合に持続時間が短くなり、測定誤差も大きくなることから、薬量91.0gの場合を検討した。その結果、測定誤差の最大値は方位角28.7度において

$a/c\theta=0.043$ 、最小値は方位角140.9度において0.017、平均値は 0.0295 ± 0.008 となった(分散は標準偏差による)。これらより、本実験結果の場合、持続時間が短いため、測定値は実際のピーク過圧より1.7~4.3%、6方向の平均値で約3.0%低く評価していると推定される。数値シミュレーション結果と比較する際には、この測定誤差を考慮に入れて考察する必要がある。

4. まとめ

実規模の地中式火薬庫の爆発影響評価を行うことを目的に、本報告では、43分の1スケールの模擬地中式火薬庫を使用して庫外爆風圧データが収集された。発生する庫外爆風が2次元軸対称的に伝播できるように、模擬地中式火薬庫は、地表面から約1mの高さに設置された。ペントライト爆薬92~487gの爆発による庫外爆風圧は、庫口からの換算距離 $12\sim 25\text{m/kg}^{1/3}$ 、方位角0度~140度の範囲でピエゾ圧力素子により測定された。実験結果より、ピーク静水過圧、到達時間、持続時間、正圧相のインパルスが算出された。ピーク静水過圧と方位角の関係より、1)ピーク静水過圧は、方位角0度~30度では、空中爆発のそれより2倍以上高くなる、2)爆源に近いほど爆風の指向性は高いが、距離が大きくなるにつれて、指向性が弱くなる、ことが確認された。また、本実験データのピーク静水過圧の測定精度は、平均で $\pm 10\%$ の範囲となった。また、ピエゾ圧力素子の大きさに起因する計測誤差を評価し、計測値は実際の圧力値より平均で約3.0%低いと推定された。

文 献

- 1) A.Skjeltorp, T.Hegdahl and R.Jenssen, Proc. of the Fifth International Symposium on Military Application of Blast Simulators, p.6 : 7 : 1, Stockholm, May (1977)
- 2) C.F.Millington, Minutes of the Twentieth Explosives Safety Seminar, p.1285 (1982) の Fig.7.
- 3) 中原正二, 元場昭夫, 加藤慎一, 工業火薬協会誌, 46, 219(1985) の Fig.9
- 4) 蓮江和夫, 宗正邦彦, 足立哲彦, 加藤清志, 中原正二, 工業火薬協会誌, 51, 16(1990) の Fig.5
- 5) 中山良男, 松永猛裕, 横井裕之, 平成4年度火薬類の保安技術実験報告書, p.9(1993)
- 6) 中山良男, 松永猛裕, 飯田光明, 田中克己, 火薬学会誌, 56, 254(1995)
- 7) 中山良男, 松永猛裕, 飯田光明, 田中克己, 火薬学会誌, 59, 275(1998)
- 8) C.N.Kingery, Technical Report BRL-TR-3012, June (1989)
- 9) 藤本一男, 倉持二郎, 高根澤吉夫, 吉岡 巖, 美

- 濃口俊生, 山口 弘, 工業火薬協会誌, 46, 237 (1985)
- 10) L.W.Kennedy, and K. D.Schneider, Hydrodynamic code calculation of airblast for an explosive test in a shallow underground storage magazine, Proc. of the 17th ISSW, p.879 (1990)
- 11) W.E.Baker, Explosions in Air, Univ. Texas Press (1973)
- 12) C.N.Kingery and B.F.Pannill, BRL Report No.1518, Aberdeen Proving Ground (1964)
- 13) M.M.Swisdak, Jr., Explosion effects and properties part I explosion effects in air, Technical Report NSWC/WOL/TR 75-116, NSWC (1975)
- 14) A.B.Arons and R.H.Cole, Rev. Sci. Inst. 21, 31 (1950)

Evaluation of explosion effect from a model underground magazine

Yoshio NAKAYAMA*, Tomoharu MATSUMURA*, Kenichi MIYAMOTO*
Mitsuaki IIDA* and Masatake YOSHIDA*

In order to conduct evaluation of explosion effect for a real scale underground magazine, the airblast data were obtained by using a 1/43rd linear scale model underground magazine. The experimental conditions were chosen so that the two-dimensional axisymmetric blast waves were generated. The blast waves outside the model underground magazine by the explosion of the pentolite explosive of 92.487 grams were measured with the pressure gages within the range of scaled distance $1.2-2.5\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ from the magazine exit and from 0 to 140 degree in azimuth angle. The peak static overpressure, time of arrival, duration, and positive impulse were calculated from the experimental results. It was confirmed from the relations between the peak static overpressure and the azimuth angle that the directionality of the blast waves was high near the exit, in other words, the longer the scaled distance, the lower the directionality of the blast waves. Moreover, the accuracy of measurement of the peak static overpressure and the measurement error due to the size of pressure gage was discussed.

(*Dept. of Advanced Chemical Technology, National Institute of Materials and Chemical Research, AIST, MITI, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, Japan)