

地下式火薬庫の土かぶり厚さと薬量-容積比が 庫内爆発時の吹き出し爆風圧に及ぼす影響

市野宏嘉*, 大野友則*†, 蓮江和夫**, 伊達新吾**

*防衛大学校システム工学群建設環境工学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20
TEL: 046-841-3810 FAX: 046-844-5913

†Corresponding address: ohno@nda.ac.jp

**防衛大学校応用科学群応用化学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

2009年9月10日受付 2010年1月14日受理

要旨

火薬庫に貯蔵されている大量の火薬類が爆発した場合、爆風や火薬庫の破壊に伴う飛散物および地盤振動によって火薬庫周辺に重大な被害を与えることが考えられる。そこで、周辺地域への爆発の影響が少ない火薬庫形式として、地下に建設する地下式火薬庫が考えられる。わが国では、これまで地下式火薬庫が建設された例がなく、設置に係る技術基準や保安距離が現行法令に規定されていない。加えて、地下式火薬庫の建設技術や爆発事故による地表への影響に関する研究は極めて少ない。本報では、地下式火薬庫の建設に資する技術的資料を得ることを目的として、土かぶり厚さと薬量-容積比(薬室の単位容積あたりの薬量)を変化させたコンクリート構造の模型地下式火薬庫内において爆発を爆発させ、地表に吹き出す爆風圧について検討を行った。その結果、薬量-容積比が大きいほど地下式火薬庫から地表に吹き出す爆風圧が大きくなる傾向が認められた。さらに、薬量-容積比の影響を考慮した庫外爆風圧の評価式を提案した。

1. 緒言

火薬庫には爆薬を含む火薬類が貯蔵されている。火薬庫内の火薬類が爆発した場合、火薬庫周辺に重大な被害を与える危険性があることが知られている¹⁾。わが国においては、爆発被害からの保護を要する建築物(保安物件)と火薬庫との間に、貯蔵する火薬類の量に応じた保安距離を確保することが法令によって義務付けられている。ところが近年、既存の火薬庫周辺が市街化することによって、火薬庫により接近した保安物件に対する保安の確保が望まれている。また、規定の保安距離を確保するためには貯蔵量を減少せざるを得ず、必要とされる量の火薬類を貯蔵することが困難な火薬庫が出現している²⁾。

この問題を解決するための一つの方策として、火薬庫を地下に建設することが考えられる。すなわち、火薬類を地下に貯蔵することにより、万が一爆発事故が発生しても爆風や構造物の破壊片を地盤によって抑止させる効果を狙うものである。抑止効果が十分であれば、地下に建設された火薬庫(以後、地下式火薬庫と略記)の場合は、従来の地上式一級火薬庫と比較して保安距離を短縮できる可能性がある。ただし、地下式火薬庫は新しい形式の火薬庫であり、設置に係る技術基準や保安距離が現行法令に規定されていない。地下式火薬庫の建設および内部爆発に関する既往の

研究としては、蓮江ら³⁾がプラスチック製および鋼製の模型地下式火薬庫の内部で雷管を爆発させる実験を行い、地表面での爆風圧を計測するとともに衝撃波および爆発ガスの観測を行っている。また、著者ら⁴⁾はコンクリートで作製した模型地下式火薬庫を用いた庫内爆発実験を行い、地表面での爆風圧の計測を行った。その結果、地下式火薬庫から吹き出した爆風圧は、地上爆発による爆風圧と比較して小さくなることがわかった。しかし、土かぶり厚さや薬量-容積比(薬室の単位容積あたりの薬量)など地下式火薬庫の建設に係る技術基準に関する検討はなされていない。本研究では、地下式火薬庫の建設に資する技術的資料を得るため、コンクリートで作製した模型地下式火薬庫を用いた庫内爆発実験を行った。まず、土かぶり厚さ及び薬量-容積比を変化させた模型地下式火薬庫に対して庫内爆発時における地表面での爆風圧の計測を行い、実験結果に基づいて地下式火薬庫の庫内爆発時における地表爆風圧の評価式を提案した。

2. 模型地下式火薬庫の庫内爆発実験

2.1 模型火薬庫試験体

本実験は、実規模寸法の約 1/20 に縮小したコンクリート構造の模型火薬庫試験体を実験室地盤に埋設し、埋設し



Fig. 1 Concrete specimen (Model subsurface magazine).

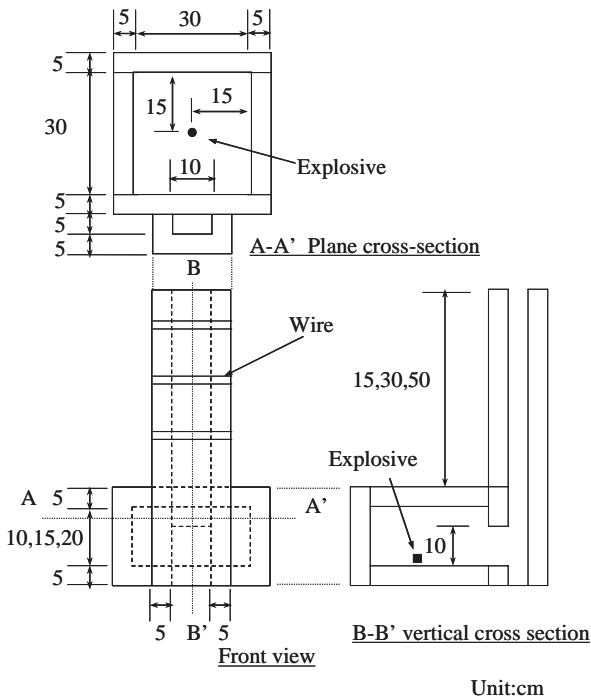


Fig. 2 Size of model subsurface magazine.

た試験体内部で爆薬を爆発させ、爆発時に地表に吹き出す爆風の圧力を計測したものである。直径 4 m の半球ドーム形の爆発ピット内で実験を行った。本実験で使用した火薬庫模型の外観を Figure 1 に、各部の寸法を Figure 2 に示す。試験体中空部の内幅は 30 cm、奥行きは 30 cm、高さは 10 cm、15 cm、20 cm の 3 種類とし、壁厚は 5 cm とした。また、火薬庫の出入口を兼ねた放爆口の高さは、土かぶり厚さに応じて 15 cm、30 cm、50 cm の 3 種類とした。なお、コンクリートの一軸圧縮強度は $27 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ である。模型地下式火薬庫は薬室部、放爆口部など 5 個の部材に分けてコンクリートを打設し、脱型後組み立てて実験に供した。補強のため、火薬庫薬室部には D6 鉄筋(公称直径 6.35 mm, 公称断面積 0.3167 cm^2) を 10 cm 間隔で網目状に配置した。

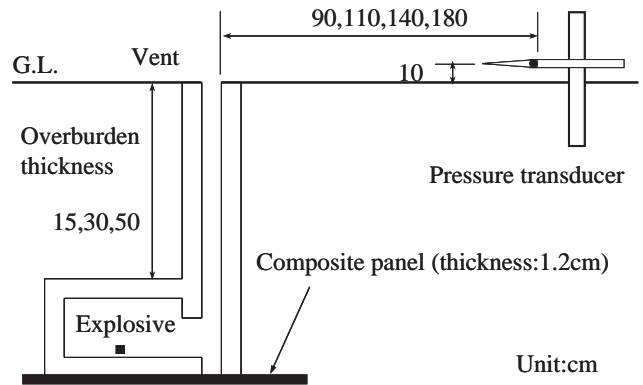


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup.

2.2 模型地下式火薬庫の設置

実験の概要を Figure 3 に示す。模型地下式火薬庫の設置に先立ち、実験室の地盤面を掘り下げ、火薬庫底面を水平に保つために厚さ 1.2 cm のベニヤ合板を敷設した。まず模型火薬庫の薬室部を設置して一方を壁部材で閉塞し、後述する爆薬を設置した。次にもう一方を 10 cm × 10 cm の開口部を有する壁部材で閉塞した。さらに、開口部に接続して放爆口を取り付け、爆風が地表に吹き出るようにした。放爆口はコの字形の部材と板状の部材を □ 形に組み合わせ、接触面に接着剤を塗布して貼り合わせ鉄線で緊縛して組み立てた。最後に土かぶりが所定の厚さとなるように模型火薬庫を埋設した。なお、埋設の際は土かぶりを 15 cm、15 cm、20 cm の 3 層に分けて各層に十分な締め固めを行った。埋め戻しに使用した地盤材料は、平均粒径 0.18 mm の天然無石土である。

2.3 爆発および計測

爆薬は、コンポジション C-4 (以後、C-4 と略記) を使用した。C-4 爆薬 81 g をアルミニウムスリーブ内に充填して直径 42 mm、高さ 42 mm の円柱形に成形した。このときの充填密度は $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。成形した供試爆薬には 6 号電気雷管を装着し、木片と紙による台座を用いて火薬庫の床面から 5 mm 離して Figure 3 に示す位置に設置した。なお、爆薬量は全ケース 81 g とした。実験は 1/20 の模型で行われているため、薬量 81 g を実規模の薬量に換算すると 648 kg となる。

模型地下式火薬庫を埋設した後、爆薬を爆発させ、地下式火薬庫の放爆口から 90 cm、110 cm、140 cm および 180 cm の位置において地上に吹き出した爆風の圧力を計測した。実験結果の評価にあたっては、スケール則を考慮して薬量と爆発からの距離の影響を同時に評価できるように、次式に示す Hopkinson-Cranz の換算距離を導入する。

$$Z = DM^{-1/3} \quad (1)$$

ここに、 Z : 換算距離 ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$), D : 距離 (m), M : 爆薬量 (kg), である。

式(1)より、放爆口から 90 cm、110 cm、140 cm および 180 cm の位置に相当する換算距離は、それぞれ $2.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $2.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, $3.2 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ および $4.1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ である。

Table 1 Test cases.

No.	Overburden thickness T (cm)	Charge mass-to-structure volume ratio MV^{-1} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Density of soil ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Moisture content of soil (%)
1	15	6.0	1.51	12.1
2	30	6.0	1.51	11.7
3	50	6.0	1.55	13.0
4	50	4.5	1.47	12.1
5	50	9.0	1.51	11.3

計測に使用したセンサーは、米国PCB社製爆風圧センサー 137A22 (荷重容量 3450kPa, 共振周波数 500kHz) である。データを記録する際には、高周波雑音の除去は行わず、サンプリング間隔は約 0.01ms (約 100kHz) とした。

2.4 実験ケースの設定

本研究において採用した実験パラメータは、地下式火薬庫の保安距離に影響し、地下式火薬庫を建設する際の技術基準として考慮されるべき事項を選定している。実験ケースの一覧表を、Table 1 に示す。土かぶり厚さが大きくなると、爆発位置から地上までの距離が大きくなることおよび地下式火薬庫からの爆風噴出を妨げる効果が大きくなることから、地表における爆風圧は小さくなると予測される。本研究においては、土かぶり厚さは 15cm, 30cm および 50cm とした。これらは、実規模の火薬庫においてそれぞれ 3m, 6m および 10m に相当する。また、薬量-容積比は単位容積あたりの爆薬量として定義し、 M : 爆薬量 (kg), V : 薬室容積 (m^3) として、 MV^{-1} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) で表される。実際の火薬庫では、薬量-容積比の大小によって地表に放出される爆風圧の大きさが変化すると考えられる。薬量-容積比は、爆薬量を一定の 81g に保ち、火薬庫の容積を 0.0090 m^3 , 0.0135 m^3 および 0.0180 m^3 の 3 種類とすることにより変化させた。すなわち、薬量-容積比は 4.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 6.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ および 9.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ とした。実験回数はそれぞれ 1 回である。

3. 実験結果および考察

3.1 爆風圧~時間関係

本研究では、地下式火薬庫から地表に吹き出す爆風圧を計測し、爆風圧~時間関係のグラフから爆風圧の特徴を調べた。Figure 4 に、爆風圧~時間関係の代表例を示す。横軸は爆風圧の立ち上がり時刻を 0 ms とし、縦軸は大気圧を 0 kPa としてそれぞれ示している。90cm 位置における爆風圧~時間関係の概形は垂直に近い瞬間的な立ち上りを示し、かつピークの後に急勾配の爆風圧低下を示しており、障害物がない地上爆発時の爆風圧~時間関係に類似している。なお、本実験で計測された爆風の正圧部の継続時間は計測位置によっても異なるが約 1 ms である。本研究では、Figure 4 における爆風圧の最大値に着目して土かぶり厚さおよび薬量-容積比が地表爆風圧に及ぼす影響を検討する。なお、以後の検討で用いる最大爆風圧は Figure 4 における爆風圧の最大値から雑音の振幅を差し引いて求めた値としている。また、力積に関する検討にあたっては Figure 4 において爆風圧を時間積分した単位面積あた

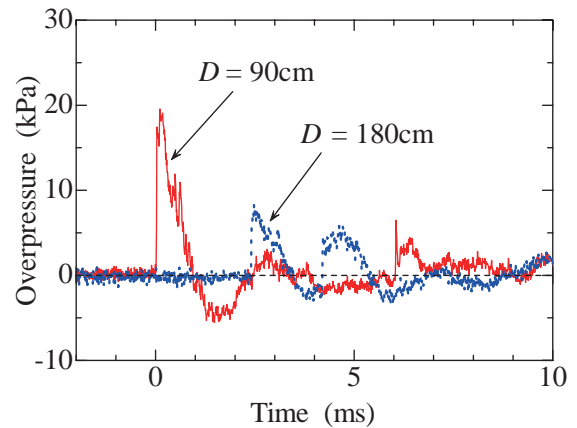


Fig. 4 Typical examples of pressure-time profile. (Overburden thickness : 30 cm, Charge mass-to-structure volume ratio : 6.0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

りの力積を薬量の三乗根で除した値である換算力積 $IM^{-1/3}$ を用いる。最大爆風圧、爆風の正圧継続時間および換算力積の値を Table 2 に示す。

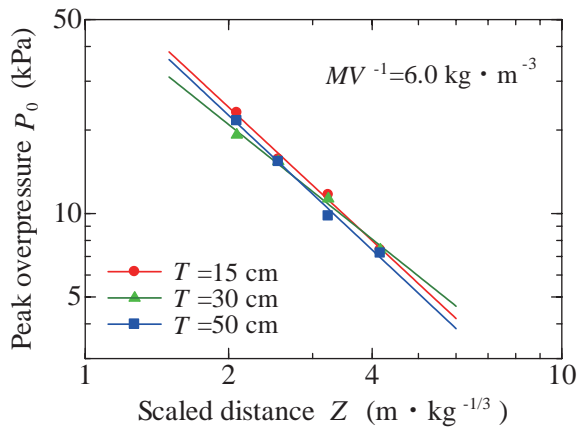
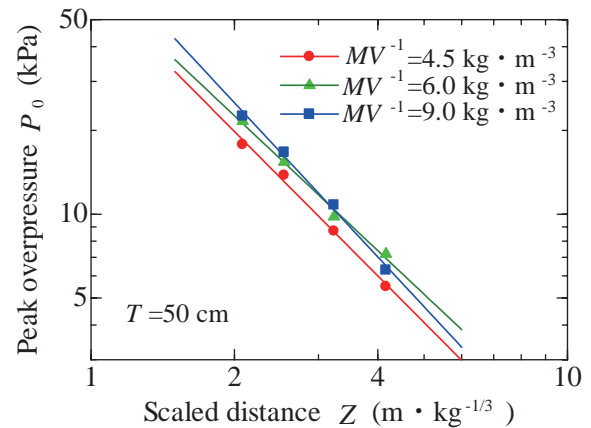
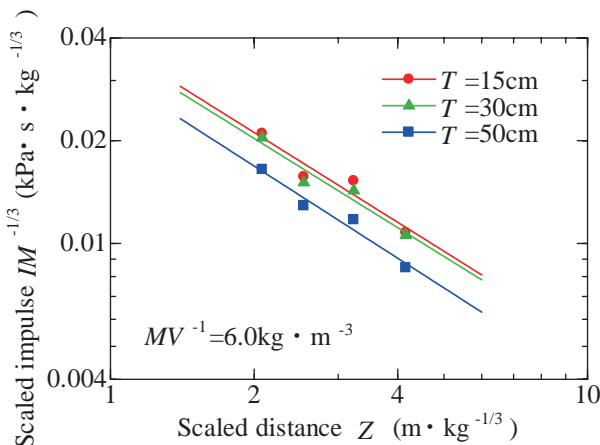
3.2 土かぶり厚さが爆風圧に及ぼす影響

地下式火薬庫の放爆口から吹き出す爆風圧の最大値 P_0 と換算距離 Z との関係 Figure 5 に示す。土かぶり厚さ T が最も大きい 50cm の場合でも、最大爆風圧の値は土かぶり厚さ 15cm, 30cm の場合とほとんど差がなく、とくに換算距離 2.5 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, 4.2 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ の最大爆風圧はほぼ一致している。このように、本実験の範囲では地下式火薬庫の土かぶり厚さは最大爆風圧に影響していない。これは相似則に厳密に従って実規模の現象を再現しようとする重力加速度の 20 倍の加速度の場で実験を実施するか、実地盤の 20 倍の密度の材料で埋め戻す必要があるにもかかわらず、重力場で実物と同じ材料を用いた実験を実施せざるを得なかったことによると考えられる。すなわち、実規模の現象ではより大きな土圧が火薬庫に作用しており、爆発時には火薬庫の破壊を抑制し、爆風や破壊片の地上への放出を妨げると考えられる。

換算力積と換算距離の関係を Figure 6 に示す。一般的に爆風の力積の誤差は $\pm 20\%$ とされている⁵⁾が、土かぶり厚さ 50cm の換算力積は土かぶり厚さ 15cm の場合における換算力積と比較して小さくなり、Table 2 に示すように減少率は 19%~26% となる結果が得られた。また、土かぶり厚さ 15cm および 30cm の換算力積はほぼ同等である。これは、土かぶり厚さ 50cm の場合、土かぶり厚さ 15cm および 30cm の場合と比較して爆風圧の継続時間が小さいことが影響している。本実験は各ケース 1 回のみであり、

Table 2 Values of the peak overpressure, positive phase duration and scaled impulse.

No.		1	2	3	4	5
Overburden thickness T		15cm	30cm	50cm	50cm	50cm
Charge mass-to-structure volume ratio MV^{-1}		$6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$4.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$9.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Peak overpressure P_0 (kPa)	$2.0\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	23.1	19.2	17.8	21.6	22.5
	$2.5\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	15.7	15.4	13.8	15.4	16.7
	$3.2\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	11.7	11.3	8.7	9.8	10.8
	$4.1\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	7.4	7.4	5.5	7.2	6.3
Positive phase duration t_d (ms)	$2.0\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	0.90	0.95	0.90	0.75	0.80
	$2.5\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	0.90	0.90	0.70	0.65	0.85
	$3.2\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	1.15	1.00	1.10	0.90	0.90
	$4.1\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	1.00	1.00	1.10	0.75	1.00
Scaled impulse $IM^{-1/3}$ ($\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)	$2.0\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	0.021	0.020	0.014	0.016	0.016
	$2.5\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	0.016	0.015	0.013	0.013	0.015
	$3.2\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	0.015	0.014	0.012	0.012	0.012
	$4.1\text{m}/\text{kg}^{1/3}$	0.011	0.011	0.009	0.008	0.009

**Fig. 5** Relationship between the peak overpressure and the scaled distance.**Fig. 7** Relationship between the peak overpressure and the scaled distance.**Fig. 6** Relationship between the scaled impulse and the scaled distance.

土かぶり厚さが力積に及ぼす影響に関する実験結果の再現性を検証するため、より多くの実験データの蓄積が望まれる。

3.3 薬量-容積比が爆風圧に及ぼす影響

次に、火薬庫の薬量-容積比 MV^{-1} が最大爆風圧 P_0 に及

ぼす影響について検討する。地下式火薬庫の薬量-容積比 MV^{-1} は、 $4.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $9.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の 3 種類である。このとき、土かぶり厚さ T は 50 cm とした。Figure 7 に、最大爆風圧 P_0 と換算距離 Z との関係を薬量-容積比別に示す。Figure 7 より、薬量-容積比が大きいほど地下式火薬庫の放爆口から吹き出す爆風圧が大きくなる。例えば、換算距離が $2.5\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ で計測された最大爆風圧は、薬量-容積比が $4.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合は 13.8 kPa であるが、薬量-容積比が増加し $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ となると 15.4 kPa に、 $9.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ では 16.7 kPa にそれぞれ増加している。放爆口からの距離が 180 cm の場合には、薬量-容積比が $6.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の爆風圧が最も大きくなっているが、その他のデータについては、いずれも薬量-容積比が大きいほど地表爆風圧が大きくなる。Table 2 から、薬量-容積比 $9.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の爆風圧の実測値は薬量-容積比 $4.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の場合と比較して 115%~126% となっている。爆風圧のピーク値の誤差は $\pm 10\%$ であることが知られている⁵⁾が、薬量-容積比が $4.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ から $9.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ に変化した場合の最大爆風圧の増加率は 15%~26% で、爆風圧の誤差の範囲を超えており、薬量-容積

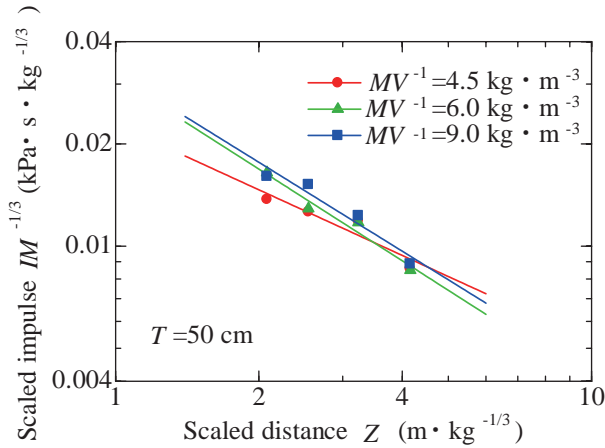


Fig. 8 Relationship between the scaled impulse and the scaled distance.

比が大きいほど地表爆風圧が大きくなる傾向が認められる。容積が異なる構造物の内部で同種類、同量の爆薬がそれぞれ爆発した場合、構造体の容積が大きい（薬量-容積比が小さい）場合は、容積が小さい場合と比べて内部圧力は低くなる。この結果、薬量-容積比が小さい場合は地表に吹き出す爆風の圧力も小さくなったと考えられる。以上より、地下式火薬庫の薬量-容積比を小さくすることで爆発時に地表に放出される爆風圧を低減させることが期待できる。

換算力積と換算距離の関係をFigure 8 に示す。薬量-容積比が換算力積に及ぼす影響は明瞭に認められず、換算距離 3.2 m·kg^{-1/3}, 4.1 m·kg^{-1/3} の場合は全データほぼ同等の値を示している。薬量-容積比の増加に伴い最大爆風圧は増加するが、この傾向は換算力積にはあまり反映されていない。

3.4 最大爆風圧の定式化

一般的に、爆風圧の大きさは換算距離の累乗に反比例することが知られており、これが現行の保安距離を決定する根拠となっている²⁾。地下式火薬庫の保安距離を定めるためには、爆風圧の大きさを評価する必要がある。ここでは、実験の結果から最大爆風圧を定式化する。

Figure 5 およびFigure 7 に示すように、最大爆風圧 P_0 (kPa) と換算距離 Z (m·kg^{-1/3}) との関係は両対数軸上で線形を示し、近似式として次式が得られる。

- 1) 土かぶり厚さ 15 cm, 薬量-容積比 6.0 kg·m⁻³

$$\ln P_0 = 4.29 - 1.60 \ln Z \quad (2)$$
- 2) 土かぶり厚さ 30 cm, 薬量-容積比 6.0 kg·m⁻³

$$\ln P_0 = 3.99 - 1.37 \ln Z \quad (3)$$
- 3) 土かぶり厚さ 50 cm, 薬量-容積比 6.0 kg·m⁻³

$$\ln P_0 = 4.23 - 1.61 \ln Z \quad (4)$$
- 4) 土かぶり厚さ 50 cm, 薬量-容積比 4.5 kg·m⁻³

$$\ln P_0 = 4.18 - 1.72 \ln Z \quad (5)$$

Table 3 Values of factor A.

Z (m/kg ^{1/3})	T: 50cm MV ⁻¹ : 4.5kg/m ³		T: 50cm MV ⁻¹ : 6.0kg/m ³		T: 50cm MV ⁻¹ : 9.0kg/m ³	
	P ₀ (kPa)	A	P ₀ (kPa)	A	P ₀ (kPa)	A
2.0	17.8	4.11	21.6	4.31	22.5	4.35
2.5	13.8	4.20	15.4	4.31	16.7	4.40
3.2	8.7	4.16	9.8	4.28	10.8	4.38
4.1	5.5	4.14	7.2	4.41	6.3	4.27
	Mean value	4.15	Mean value	4.33	Mean value	4.35

5) 土かぶり厚さ 50 cm, 薬量-容積比 9.0 kg·m⁻³

$$\ln P_0 = 4.50 - 1.84 \ln Z \quad (6)$$

すなわち、最大爆風圧と換算距離との間には、

$$\ln P_0 = A + B \ln Z \quad (7)$$

なる関係が認められる。式(7)において、係数Bは換算距離の増大にともなう最大爆風圧の距離減衰の程度を示している。また、係数Aは、距離減衰を考えない場合における爆風圧の大きさを示す係数と考えることができる。Figure 5 から、土かぶり厚さは最大爆風圧と換算距離との関係に影響しないことがわかる。一方、Figure 7 から、薬量-容積比は最大爆風圧と換算距離との関係に影響を与え、薬量-容積比が大きいほど最大爆風圧は大きくなることがわかる。ここで、薬量-容積比の影響を考慮して地下式火薬庫の吹き出し爆風圧を評価する簡易な実験式を定式化する。Bの値は媒質がエネルギーを吸収することによる減衰の程度を表していると考えられるが、薬量-容積比の大小が地下式火薬庫から地上に吹き出した爆風圧の減衰に及ぼす影響は無視できると考えられる。したがって、係数Bは薬量-容積比にかかわらず一定とする。すなわち、(4)~(6)式におけるBの平均値 $B = -1.72$ を用いる。次に、Aの値を薬量-容積比の関数として定式化する。土かぶり厚さ 50cmの全データに対して、実測された最大爆風圧 P_0 , $B = -1.72$, 換算距離 Z を式(7)に代入すると、それぞれのデータに対してTable 3 に示すAの値が得られる。Aの平均値を薬量-容積比に対してプロットするとFigure 9 が得られる。Figure 9 より、Aの値は薬量-容積比の増加にともなって大きくなることがわかる。データ数は3点のみであるが、Aと薬量-容積比 MV^{-1} の間に線形関係を仮定すると次式に示す近似式が得られる。

$$A = (3.90 \times 10^{-2})(MV^{-1}) + 4.02 \quad (8)$$

以上より、次式に示す地表での最大爆風圧評価式が得られる。

$$\ln P_0 = \{(3.90 \times 10^{-2})(MV^{-1}) + 4.02\} - 1.72 \ln Z \quad (9)$$

ここに、 P_0 : 最大爆風圧 (kPa), MV^{-1} : 薬量-容積比 (kg·m⁻³), Z : 換算距離 (m·kg^{-1/3}), である。なお、(9)式の適用範囲は $4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \leq MV^{-1} \leq 9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $2.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3} \leq Z \leq 4.1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ である。

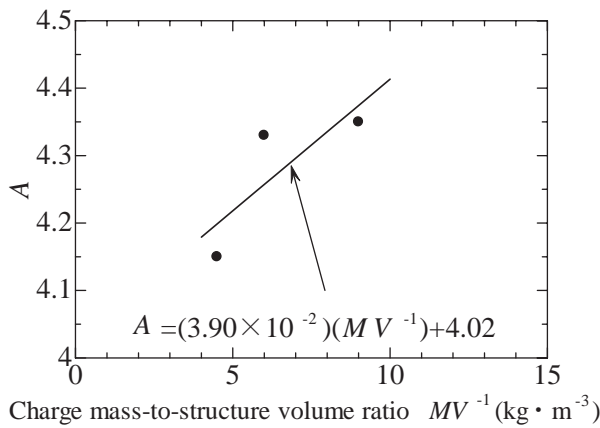


Fig. 9 Relationship between the factor A and the charge mass-to-structure volume ratio.

4. 結論

本報は、地下式火薬庫の建設に資する技術的資料を得ることを目的として、土かぶり厚さと薬量-容積比を変化させたコンクリート構造の模型地下式火薬庫内において爆薬を爆発させ、地表に吹き出す爆風圧について検討を行ったものである。さらに、薬量-容積比の影響を考慮した地表爆風圧の評価式を提案した。主要な結論を以下に要約する。

- (1) 本実験の範囲では、地下式火薬庫の土かぶり厚さが最大爆風圧に及ぼす影響は認められなかった。
- (2) 薬量-容積比が大きいほど、地下式火薬庫から地表に吹き出す爆風圧が大きくなる傾向が認められた。薬量-容積比が $4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ から $9.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ に増加すると、地表爆風圧の大きさは 15%~26% 増加した。
- (3) 薬量-容積比が地表爆風圧に及ぼす影響を考慮して、次式に示す最大爆風圧の評価式を得た。

$$\ln P_0 = \{ (3.90 \times 10^{-2})(MV^{-1}) + 4.02 \} - 1.72 \ln Z \quad (9)$$

ここに、 P_0 : 地上での最大爆風圧 (kPa), MV^{-1} : 薬量-容積比 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), Z : 換算距離 ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$), である。

今後は、薬量-容積比が爆風圧に及ぼす影響をより明確に把握するためにより多くの実験データの蓄積が望まれる。また、規模の大きな爆発実験を行い、提案した評価式の妥当性や適用性について検討する必要がある。

引用文献

- 1) Y. Uehara and T. Ogawa, "Technical Handbook for Fire and Explosion Protection", TECHNO SYSTEM Inc., pp.93-96, 2004
- 2) Ministry of Economy, Trade and Industry Agency for Natural Resources and Energy, "Kayakurui torishimari hourei no kaisetsu", pp.273-280, 2004
- 3) K. Hasue, K. Munemasa, T. Adachi, K. Katoh, S. Nakahara, "Explosion of Explosives in Subsurface Magazines (2) Behavior of Blasts and Explosion Gases outside the Magazines", Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials), Vol.51 No.1, pp.16-21, 1990
- 4) H. Ichino, T. Ohno, K. Hasue and S. Date, "Experimental

study on the effects of blast pressure resulting from the explosion in a subsurface magazine", Japan Explosive Society Sci. Tech. Energetic Materials, Vol.70, No.2, 2009

- 5) Japan Explosives Society, "Gemba Gijyutusya no Tame no Happakougaku Handobukku, Kyouritu Shuppan, p.438, 2001

The effects of overburden thickness and charge mass-to-structure volume ratio on the blast pressure resulting from the explosion in a subsurface magazine

Hiroyoshi Ichino^{*}, Tomonori Ohno^{*†}, Kazuo Hasue^{**}, and Shingo Date^{**}

When an accidental explosion in a surface magazine is happened, the three primary events: air-blast, ground shock and debris, may be produced. To protect surface structures and/or human life from these events, the magazine can be constructed in a subsurface. However, the safety distances and design criteria for a subsurface magazine have not been defined yet. In a series of explosion tests, this study is to examine the effects of overburden and charge mass-to-structure volume ratio on the blast pressure resulting from an accidental explosion in a subsurface magazine. In tests, the air-blast pressure propagated along the ground surface was measured by the blast pressure sensors. From the small-scale test, it has been found that the blast pressure from a subsurface magazine increases with the increase of charge mass-to-structure volume ratio. Furthermore, the value of peak pressure has been formulated as a function of the charge mass-to-structure volume ratio.

Keywords : Subsurface magazine, blast pressure, scaled distance, overburden, charge mass-to-structure volume ratio

^{*}Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy, Hashirimizu 1-10-20,
Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, JAPAN
TEL+81-46-841-3810 FAX+81-46-844-5913

[†]Corresponding address : ohno@nda.ac.jp

^{**}Department of Applied Chemistry, National Defense Academy Hashirimizu 1-10-20,
Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, JAPAN