

地下式火薬庫の爆発に関する研究(第2報)

爆風と爆発ガスの挙動

進江 和夫*, 宗正 邦彦*, 足立 哲彦*

加藤 清志*, 中原 正二*

地下式火薬庫は地中式火薬庫よりはるかに候補地の選定が容易であるが、その安全性については従来研究されていない。前報では地下式火薬庫の爆発による地盤振動と地下殉爆についてモデル実験を行ない、地中式火薬庫と比較して同等以上の安全性があることがわかった。

本報では、シュリーレン写真及び爆風圧測定により、庫外爆風圧と庫外に噴出する爆風および爆発ガスについて実験し、各種要因の影響を知るとともに、地中式火薬庫よりも安全であることを確認した。

1. 緒 論

火薬庫不足の現状を打解する方法として、新規に火薬庫用地を取得することは困難であるから、地中式火薬庫と比較するとはるかに地形上の制約の少ない地下式火薬庫(仮称)は、自己の用地内に建設し得るという点で非常に有望である。ここで地下式火薬庫とは、地下に埋設してエレベータなどで火薬を出し入れする新しい形式の火薬庫である。

地下式火薬庫について、第1報¹⁾では地盤振動と地下殉爆の実験を行ない、地中式火薬庫と比較して、同等以上の安全性があることを確認した。

本報では、モデル地下式火薬庫内の爆発による庫外爆風圧について実験し、また火薬庫通路から噴出する爆風と爆発ガスのシュリーレン法による観測を行なった。以上の実験結果を地中式火薬庫の場合と比較して、その安全性について考察した。

2. 実験方法

2.1 モデル火薬庫及び試料爆薬

モデル火薬庫は前報¹⁾と全く同じものを使用した(Fig.1)。薬室部は軟鋼SS41またはポリスチレン系プラスチックからなり、6号電気雷管(TNT換算薬量0.513g)1本で現行火薬庫と同じ装填密度18.1kg/m³となる。

試料爆薬には旭化成製6号電気雷管、実質的には添

装薬PETN0.4g(TNT換算0.513g)を用い、装填密度の増加には旭化成製6号工業雷管(添装薬PETN0.4g)を用いた。使用最大薬量は雷管2本、すなわち、PETN0.8gであった。

2.2 地 盤

供試地盤には川砂を5mmふるいでふるったものを用いた。その含水比は4.64~8.34%、平均6.47%であり、粒径は乾燥時平均でつぎのようになった。

0.147mm以下	0.147~0.295mm	0.295~0.589mm
5.5%	15.5%	18%
0.589~1.168mm	1.168~2.362mm	2.362~5.0mm
22.5%	22%	16.5%

締め固め度を一定にするため、ドイツ式貫入棒(約12kg)を約10cmから自由落下させて締め固めた。砂の密度は1.30~1.39g/cm³で、平均1.34g/cm³であった。

2.3 庫外爆風過圧

圧力測定には主としてひずみゲージ式圧力変換器(共和電業PGM2KC)を用い、0°方向(通路軸方向)、45°方向、90°方向(地表面方向)の反射過圧を測定した。圧力変換器の入力はシグナルコンディショナ(共和電業CDA-110)、デジタルメモリ(岩通電子DM7100)を経て、パソコン(日本電気PC9801VX2)で処理した。

また、一部ピエゾ圧力変換器(PCB社101A, 04および101A, 05)も使用した。この場合、0°方向では入射過圧、90°方向では反射過圧を測定した。圧力変換器の入力はアンプ(PCB社Model 483A02)、上記デジタルメモリ、上記パソコンにより処理した。

2.4 シュリーレン写真

平成1年10月11日受理

*防衛大学校

〒239 横須賀市走水 1-10-20

TEL 0468-41-3810 内線 2409

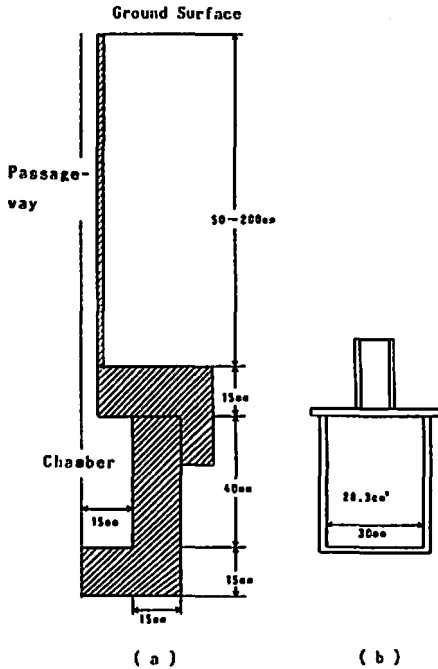


Fig. 1 Model subsurface magazines (a) made of steel and (b) made of polystyrene.

シュリーレン写真の器材配置をFig.2に示す。2枚の凹面鏡($f=1,882\text{mm}$ および $1,864\text{mm}$ 、直径ともに 400mm)の間に火薬庫出口および現象が入るようにした。

火薬庫内の雷管に導線を巻き付け、雷管が爆発した瞬間に導線が切れることによって、パルス発生回路(自作)でパルスを発生させた。パルス遅延装置(自作)で所望時間遅延させ、マグネシウム電極間で放電させる形式の光源(イトウ光研社、約 80kV 、発光時間幅 $2\mu\text{s}$ 、発光時間遅れ $0.2\mu\text{s}$ 以内)を閃光させて、解放カメラで撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 庫外爆風圧

火薬庫出口から最大で 1m の位置にセンサを置いて測定した。

測定波形から計算したプラスチック製および鋼製火薬庫の最大爆風反射過圧 $P(\text{kg}/\text{cm}^2)$ と爆風伝播速度 $V(\text{m}/\text{s})$ との関係、および文献値²⁾による関係式はつぎのようになった。

プラスチック製火薬庫 $V=5.5\text{exp}(0.0088P)$

鋼製火薬庫 $V=5.4\text{exp}(0.014P)$

文献値²⁾ $V=5.4\text{exp}(0.016P)$

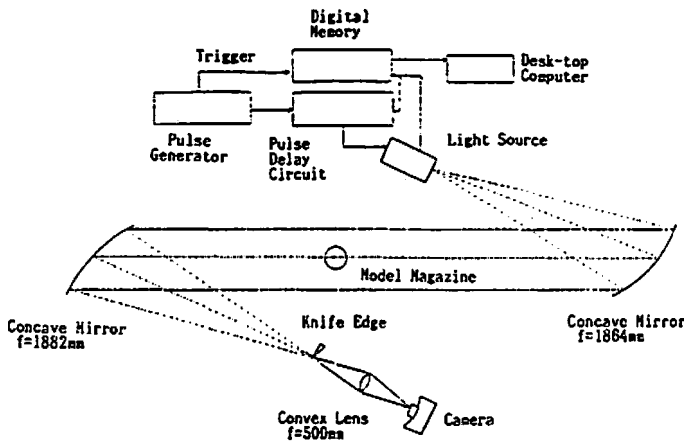


Fig. 2 Schematic diagram of the schlieren photography.

鋼製火薬庫の関係式は文献値とよく合っていた。

庫外爆風圧におよぼす要因としては、換算距離の外に火薬庫材質、放出、角換算深度が挙げられる。これらの要因についてその影響をしらべると、つぎの通りである。

(1) 火薬庫材質

火薬庫材質のプラスチックと鋼による最大反射爆風過圧の差異をFig. 3 (0° 方向)とFig. 4 (90° 方向)に示した。

プラスチック製と比較すると鋼製は 0° 方向で1.74

倍、 90° 方向で1.32倍の大きさであった。(45°方向は図示しなかったが1.58倍。)プラスチック製の場合、モデル火薬庫の爆発で破壊され、爆発エネルギーが砂の塑性変形に多く消費されるのに対して、鋼製では破壊されないため、より多くのエネルギーが通路出口から爆風エネルギーとなって放出されるためである。

なお、Fig. 4には、陸上自衛隊の地中式火薬庫爆発実験結果³⁾も記した。地下式では地中式と比較して1/10以下になっていることがわかる。

90° 方向の換算距離 $D/W^{1/3}(\text{m}/\text{kg}^{1/3})$ と最大爆風反

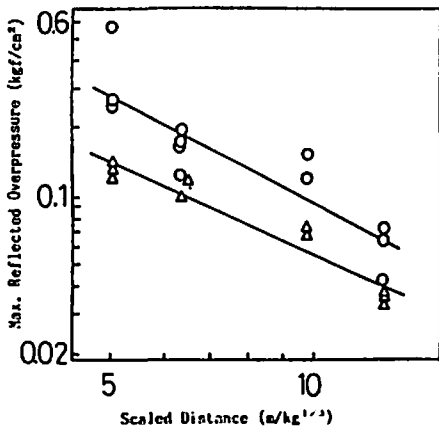


Fig. 3 Maximum reflected overpressure vs. scaled distance at 0° azimuth angle.

○ : steel magazine, △ : plastic magazine

射過圧 P (kgf/cm²) との関係はつぎの通りである。なお、 D は爆源からの距離 (m), W は薬量 (kg) である。

鋼製火薬庫 $P = 0.51(D/W^{1/3})^{-1.04}$

プラスチック製火薬庫 $P = 0.40(D/W^{1/3})^{-1.03}$

陸上自衛隊地中式火薬庫(爆薬) $P = 31(D/W^{1/3})^{-1.92}$

同上(弾薬) $P = 21(D/W^{1/3})^{-1.87}$

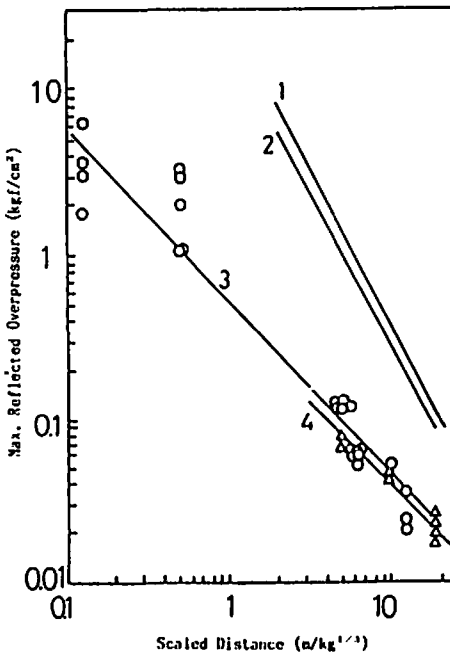


Fig. 4 Maximum reflected overpressure vs. scaled distance at 90° azimuth angle.

1: explosives, and 2: ammunitions in underground magazines³⁾ 3: explosives in subsurface magazines made of steel, and 4: made of plastics

(2) 方向性

同一換算距離で方位角が変わると、Fig.5のように爆風圧が減少した。図中には比較のために地中式火薬庫に関する陸上自衛隊³⁾、化学技術研究所⁴⁾および Millington⁵⁾の実験結果をも記した。鋼製火薬庫の場合、陸上自衛隊の場合に近い結果となった。

各種実験により方位角に対する減衰性に差があるのは、通路の形状と寸法の関係の差によるものであろう。

(3) 深度

火薬庫の深度、すなわち通路の長さ 5~20cm で実験したが、庫外爆風圧との関係は Fig.6 のようになった。換算深度が増すと、庫外爆風圧は減少する。

換算深度ゼロ、すなわち、通路の長さがゼロの場合

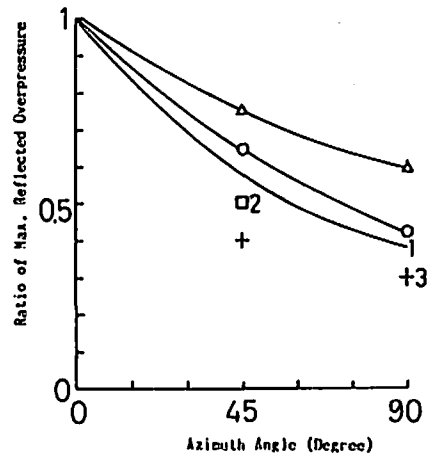


Fig. 5 Maximum reflected overpressure vs. azimuth angle.

△ : plastic magazine, ○ : steel magazine, 1: reference 3, 2: reference 4, and 3: reference 5

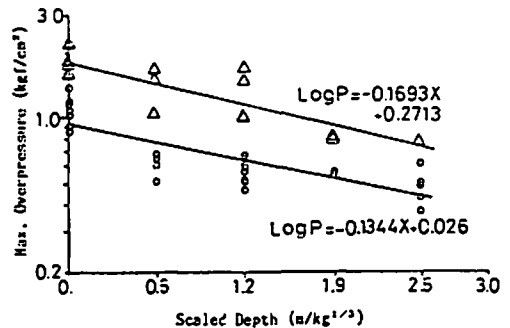


Fig. 6 Maximum overpressure vs. scaled depth.

△ : reflected overpressure at 90° and 4cm from the magazine entrance
○ : incident overpressure at 0° and 11.55cm from the magazine entrance

Table 1 Ratio of maximum overpressure vs. scaled depth.

Scaled depth ($m/kg^{1/3}$)		0	0.6	1.2	1.9	2.5
Ratio of max. overpressure	Incident overpressure at 0°	1	0.83	0.69	0.5	0.46
	Reflected overpressure at 90°	1	0.79	0.63	0.48	0.38

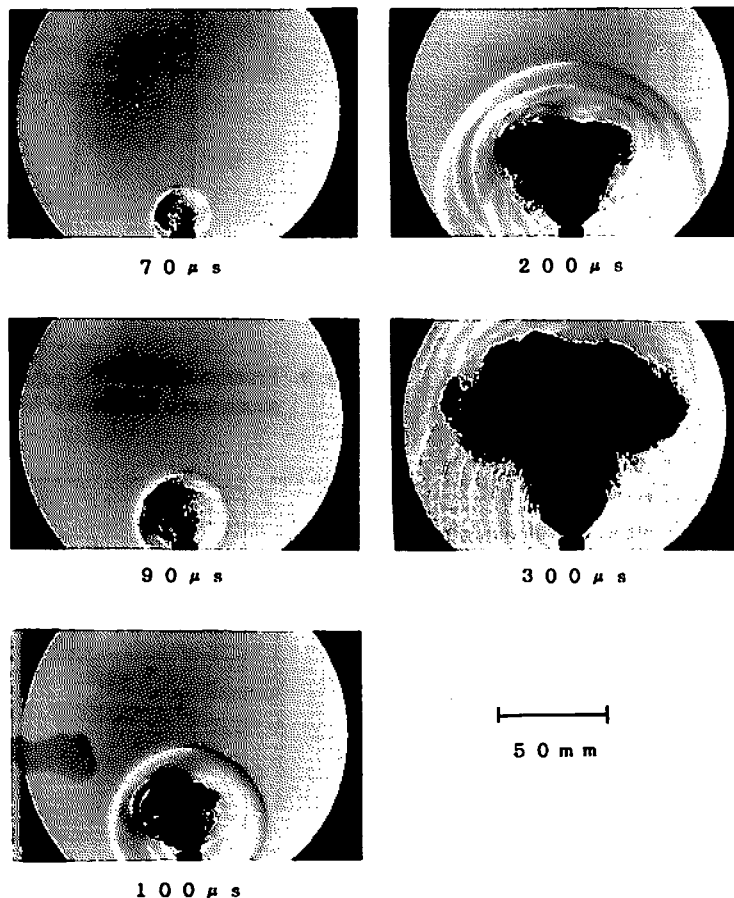


Fig. 7 Schlieren photographs of the explosion gases and shock waves.

の最大爆風過圧を1とすると、各換算深度における最大爆風過圧の比はTable 1のようになる。

3.2 シュリーレン写真

シュリーレン写真の例をFig.7に示す。シュリーレン写真には衝撃波による筋状の空気の粗密が数条認められる。

シュリーレン写真によるガスおよび衝撃波の先端の時間による変化をFig.8に示す。

衝撃波の形状は当然球形であるが、球の中心は火薬庫通路出口ではなく、出口から約1cm(換算距離0.199 $m/kg^{1/3}$)の位置にあった。これは、狭い通路から出た

流速の速い衝撃波およびガスが出口で膨張しようとしても、その流速に押し上げられて、上部約1cmのところまで膨張を開始したものと考えられる。

噴出するガスは火砲の場合と同様に方向性を有し、測定時間内におけるガスの拡がりは $45^\circ \sim 60^\circ$ であった。

Fig. 9に衝撃波およびガスの先端の速度と通路出口からの距離の関係を示す。両者の速度はともに振動しながら次第に減衰している。衝撃波速度は最高1.8 km/s が認められた。ガス速度は1.1~0.17 km/s であった。

シュリーレン写真における筋状の粗密は遅延時間

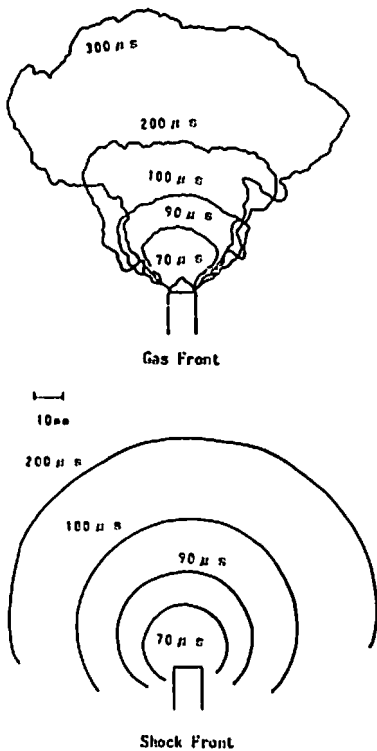


Fig. 8 Gas and shock fronts at various times by the schlieren photography.

200 μ sでは5~6本, 300 μ sでは約10本認められる。その周波数は25,000~33,000Hzである。

Fig. 10は中心軸から1cm, 通路出口から高さ11.5cmの位置における入射過圧の測定例である。その凸部は200 μ sで6個, 300 μ sで9~10個ある。その周波数は26,666~33,333Hzであり, 写真とほぼ同じ周波数である。両者の関連性が推定される。

4. 結論

地下式火薬庫の爆発による通路出口外部の状況について実験した。すなわち, 庫外爆風圧の測定およびシュリーレン写真による観測を行ない, つぎの結論を得た。

(1) 庫外爆風圧は換算距離の他に, 火薬庫材質, 方向性, 深度の影響を受ける。鋼製よりプラスチック製火薬庫の方が, 方位角が大きくなる方が, また換算深度が大きくなる方が, 爆風は減少する。

地下式火薬庫では陸上自衛隊地中式火薬庫実験の1/10以下の爆風圧であった。

(2) 衝撃波は通路から換算距離0.2m/kg^{1/3}上部付近を中心に球状に成長してゆく。

衝撃波は最高1.8km/s, ガスは1.1~0.17km/sでともに振動しながら噴出し, 次第に速度が減衰してゆく。

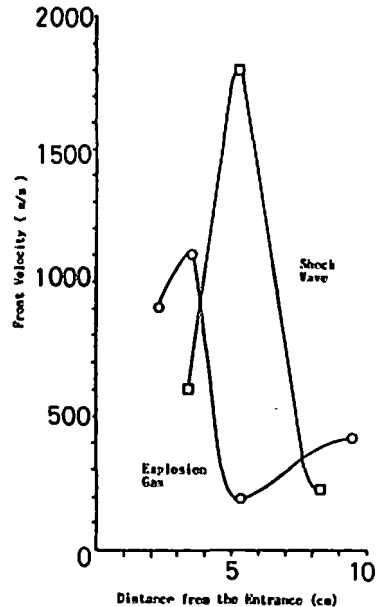


Fig. 9 Front velocity of the explosion gas and the shock wave vs. distance from the entrance.

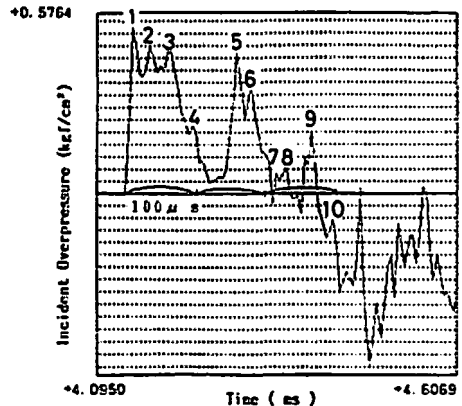


Fig. 10 A incident overpressure record at 0° and 11.5cm from the entrance.

シュリーレン写真における筋状の粗密は爆風過圧波形における凸部とその数および周波数において一致した。なお, 大規模実験による本研究の確認が必要である。

本実験を行なうに当たり, 火薬工業技術奨励会の研究助成金を使用させていただいた。また防衛大学校本科学生上山聡, 広田直文, 古米健治の諸氏の協力を得た。ここに付記して感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 蓮江和夫, 宗正邦彦, 足立哲彦, 加藤清志, 中原正二, 工業火薬, 51, 8(1990)
- 2) ADA 049017; "Suppressive Shield Structural Design and Analysis Handbook", 3-11 (1977)

- 3) 中原正二, 元場昭夫, 加藤慎一; 工業火薬, 46, (No. 4), 219(1985)
4) 中山良男, 飯田光明, 松永猛裕, 石川 昇, 田中克己, 角館洋三, 吉田正典, 藤原修三; 工業火薬

- 協会平成元年度年会講演要旨集, 146(1989, 5)
5) C. F. Millington; Minutes of the Twentieth Explosives Safety Seminar, 1285 (1982)

Explosion of Explosives in Subsurface Magazines(2)

Behavior of Blasts and Explosion Gases outside the Magazines

by Kazuo HASUE*, Kunihiko MUNEMASA*, Tetsuhiko ADACHI*,
Kiyoshi KATOH* and Shohji NAKAHARA*

A new type of magazine, a subsurface magazine is defined as a magazine constructed underground and equipped with elevators and so on.

Subsurface magazines are much easier to find their construction sites than tunnel type underground magazines, but their safety has not been researched.

In our previous paper, experiments on ground vibrations by explosion in model subsurface magazines and gap tests in sand were carried out, and it was found that the subsurface magazines were safer than the underground magazines.

In this report, external responses of the model subsurface magazines by explosion were examined.

Maximum blast overpressures by explosion in the subsurface magazines were measured by strain gauge type and piezoelectric type pressure transducers, and were one tenth of those in the underground magazines.

Explosion gases and shock waves blown out from entrances of the subsurface magazines were observed by schlieren photography. Their fronts attenuated vibrationally. Observed maximum velocities of the gases and the shock waves were 1.1 and 1.8 km/s, respectively.

There were several stripes between each front of the explosion gas and the shock wave in the schlieren photograph. The numbers and the frequencies, i. e. 25,000~33,000Hz, of the stripes were well coincident with numbers and frequencies of pressure peaks on the piezoelectric records.

(*The National Defense Academy, Yokosuka, 239, Japan)