

地中式火薬庫の爆発実験（第1報）

—構造体の応答—

倉持二郎*, 藤本一男*, 高根沢吉夫*, 中原正二**

地中式火薬庫内で爆発事故が発生した場合、火薬庫内外に及ぼす影響について、まだ不明な点が多い。そこで、実際の40t火薬庫と同じ装填密度にした場合、収納爆薬量150kgに相当する寸法と形状の多数の同一の地中式火薬庫をつくって、最高300kgまでの爆発実験を行ない、庫内外に及ぼす影響、その弾薬と爆薬による差異などについて検討した。そのうち、本報では構造体の応答について報告する。

実験の結果、火薬庫内の爆風圧および破損の程度は、爆薬の方が弾薬より大きいことがわかった。これは弾薬が弾殻の破壊にエネルギーを消費するためである。火薬庫上部の地表面上における土や岩石の飛散は、全実験を通じて認められなかった。庫内爆風圧、準静圧、平均火炎伝播速度、地盤の最大変位速度とその周期などについて、実測値とかなりよく合う推定計算が可能になった。

1. 緒言

地中式火薬庫内で不慮の爆発事故が発生した場合、火薬庫内外に及ぼす影響について、筆者の一人、中原は欧米における文献に基づいて解説を行なった¹⁾。しかし、その中にも書いたように、この種の実験は、大規模なものはもちろん、小規模なものでも、公表された文献の数は多くなく、さまざまに異なる多数の要因について、十分な知見が得られる状態になっていないのが、現状である。

本研究は、昭和55年から58年にわたって行なった一連の地中式火薬庫の爆発実験に関するものであって、火薬庫の破壊状況、庫内外の爆風圧、爆発音、地盤振動、飛散物およびこれらについての弾薬と爆薬の差異などについて測定を行なった。

第1報では、本体および前室における爆風圧、構造体のひずみ、地盤表面の加速度と変位、構造体および地盤の変形と破壊状況、隣接火薬庫に及ぼす影響などについての測定結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試火薬庫

昭和60年1月11日受理

*防衛庁技術研究本部第4研究所
〒229 相模原市淵野辺 2-9-54
TEL 0427-52-2941-3

**防衛大学校化学教室
〒239 横浜須賀市走水 1-10-20
TEL 0468-41-3810

供試火薬庫は、次の事項を考慮して設計、製作した。(1)火薬庫本体の容積は、爆薬量150kgで実際の40t火薬庫と同じ装填密度になるようにする。(2)本体と前室の断面積比を、実際の火薬庫と同一にする。(3)地盤の厚さは、法規を参考にし、爆薬量150kgに対応する厚さとする。(4)扉は設けない。

昭和55~57年に実験した王城寺原では、れき混り土砂、崩積土層、有機質粘土層など柔らかい地盤であった。地盤の厚さは法規の数値をそのまま使用せず、40t火薬庫の地盤の厚さを相似則によって縮小したものを使用した。

法規によれば、貯蔵爆薬量40tにおける地盤の厚さは29mである。したがって、相似則により、爆薬量150kgの場合における地盤の厚さは、 $29 \times (150/40000)^{1/3} = 4.5\text{m} \approx 5\text{m}$ となる。そこで本実験では地盤の厚さはすべて5mとした。

火薬庫の構造はTable 1のように素掘り、無筋コンクリート製、鉄筋コンクリート製の3種類としたが、形状と寸法はすべて同一である。Fig. 1に土壌のある場合の火薬庫の形状を図示した。

使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを用い、呼び強度210kgf/cm²、スランプ15cm、粗骨材最大25cmで、鉄筋コンクリートの場合には、鉄筋SD35.D-19で、鉄筋比0.48%であった。

土壌の影響を検討する実験は、昭和58年に1回(Run No. 6)行なった。土壌の形状、寸法はFig. 1の通りであるが、土を推積したもので、芝草類の被覆はない。

Table 1 Test conditions

Run No.	Explosive	Site	Year	Structure of magazine	Whight of explosive (kg)	Equivalent weight of explosive (kg)
1	Ammunition	Ojojibara	1980	Without lining	76.78	76.78
2	"	"	1981	Reinforced concrete	150.2	150.2
3	"	Kamifurano	1983	"	149.4	149.4
4	"	Ojojibara	1982	"	301.2	301.2
5	"	Kamifurano	1983	"	300.5	300.5
6	"	"	1983	(with earth mound)	300.5	300.5
7	Blasting explosive	Ojojibara	1980	Concrete	8.36	9.49
8	"	"	1980	"	76.75	87.7
9	"	"	1981	Reinforced concrete	131.2	149.8
10	"	"	1982	"	300.4	342.9
11	"	Kamifurano	1983	"	300.4	342.9

*TNT equivalency factor of Comp. B is equal to 1.148

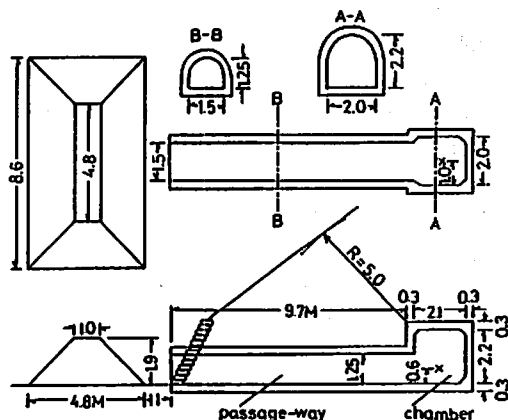


Fig. 1 Configuration of the model underground magazine and the earth mound
x : Center of the explosive

なお、本体の容積は 8.3m^3 で、 150kg の場合の装填密度は $18.1\text{kg}/\text{m}^3$ であった。

2.2 試料火薬類

試料火薬類は、弾薬では 203mm りゅう弾（炸薬は TNT, 信管なし）、爆薬では Comp. B を主として使用したが、薬量調節、伝爆薬などの目的のために、テトリル、Comp. C-3 なども少量使用した。試料火薬類はいずれも市販のものをそのまま用いた。爆薬量は Table 1 に示した。

火薬庫内の火薬類設置方法は Fig. 2 の通りである。

2.3 起爆方法

火薬系列、爆薬の場合には、8号電気雷管、導爆線（複数）、8号工業雷管（複数）、TNT（雷管孔付き金風缶に装填）、Comp. B（金風缶に装填）の順にした。

弾薬の場合には、火薬系列は8号電気雷管、導爆線（複数）、8号工業雷管（複数）、Comp. C-3、（工業雷管を挿入）テトリル（伝爆薬）、TNTの順にした。

起爆は、高速度カメラの同期回路を用いて行なった。

2.4 計測

計測項目および方法は、次の通りである。

(1) 火薬庫本体および前室の爆風圧

爆風圧測定用ピックアップは、PCB社製ピエゾ圧力変換器 PCB 108A（測定範囲 $7000\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）と PCB 101A.03（測定範囲 $700\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）を、それぞれ本体と前室で使用した。変換器は熱と振動の影響を防ぐため鋼製取付具を使用して取り付けた。圧力測定は真空引きしたシリコングリスを介して行なった。シリコングリスを使用しないと、熱の影響を思われる大きな負圧が検出された。変換器の取り付け位置の一例を Fig. 3 に示す。

(2) 構造体のひずみ

ひずみ測定は、昭和55、56年には本体内で行なったが、爆発後 $1\sim 2\text{ms}$ でスケールオーバーするので、57年以降は前室中央で測定した。

ひずみゲージは、共和電業製 KFW-2-C1-11-L

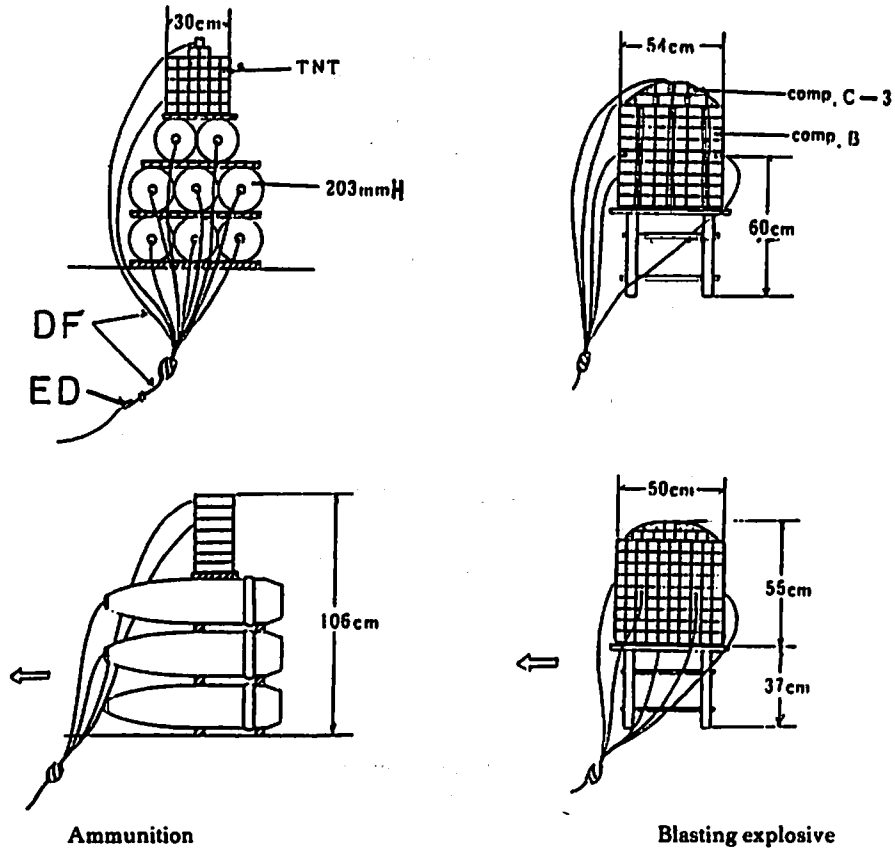


Fig. 2 Loading configuration of the test explosives in the chamber

DF : detonating fuse, ED : electric detonator

⇐ : direction of the entrance

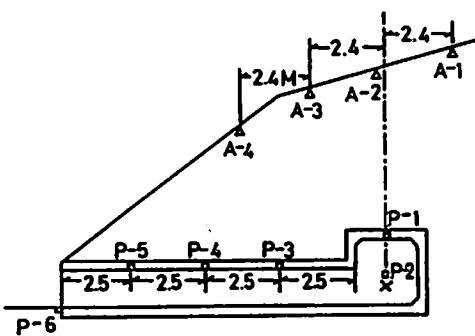


Fig. 3 Position of pressure transducers and accelerometers

P : pressure transducer,

A : accelerometer

100 を使用し、あらかじめ火薬庫の前室中央部の鉄筋に貼り付け、その後、コンクリートを打設した。貼り付け位置は Fig. 4 の通りである。動ひずみ計は、共和

電業 CDV 230A (応答周波数 DC ~ 60kHz) を用いた。

(3) 地盤表面の加速度

加速度計はピエゾ式の PCB 社 308B (応答周波数 3 kHz, 測定範囲 50G) を使用し、あらかじめ作製した木箱の中に固定し、地表から深さ 20cm 位置に埋設した。箱の中では、3つの加速度計で互いに直角をなす 3方向 (鉛直方向、火薬庫の軸方向およびそれに直角方向) の加速度が測定できるようになっており、これらの総重量と木箱の体積との比は、土の比重 (1.6g/cm³) と等しくし、土と同一挙動を示すように考慮された。加速度の配置も、Fig. 3 に示した。

(4) 地盤表面の変位

ヤーマン製光学式変位計オプトフオロ (応答周波数 DC ~ 500kHz, 分解能 0.01%/フルスケール) によって、本体部中央直上の地盤表面における垂直方向および庫軸方向の変位を測定した。測定方法は、ターゲットを地盤上に設置し、これを光学式変位計のカメラ部でとらえ、ターゲットの移動量を変位として測定した。

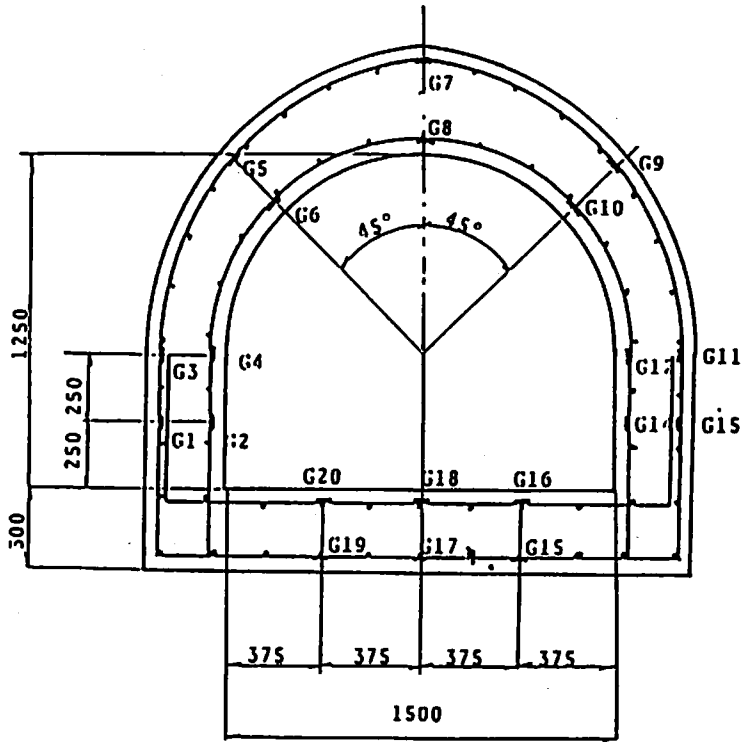


Fig. 4 Position of strain gauges
G : strain gauge unit : mm

ただし、正確に測定できるのは、爆発振動がカメラ部に到達するまでの時間である。また、爆発による閃光がカメラ部に入ると、測定が不可能になるので、その点につき配慮した。

(5) 構造体および地盤の変形と破壊状況

爆発後の測定によって、構造体および地盤の変形と

破壊状況を測定した。

(6) 隣接火薬庫に及ぼす影響

隣接火薬庫の構造体のひずみと壁体表面の加速度を測定し、また、内壁のクラックの発生状況をしらべた。

Fig. 5は計測システムのブロック図である。

圧力変換器および加速度変換器は、アンプ内臓型ビ

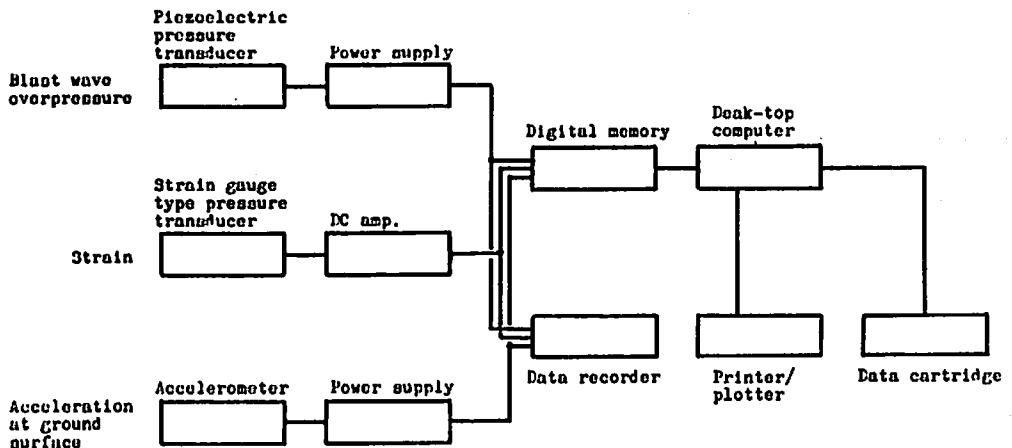


Fig. 5 Block diagram of the measuring system

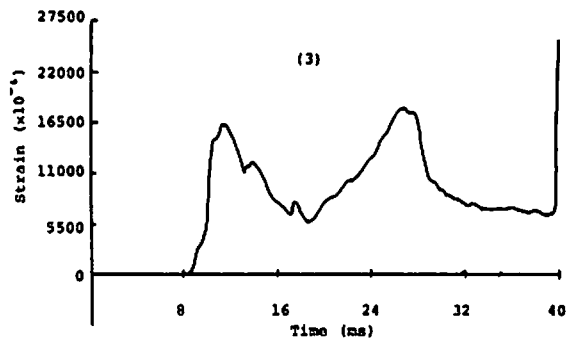
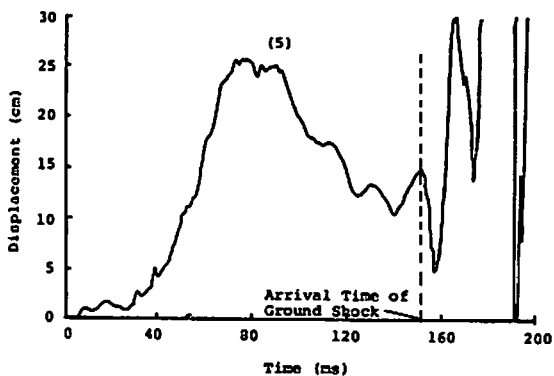
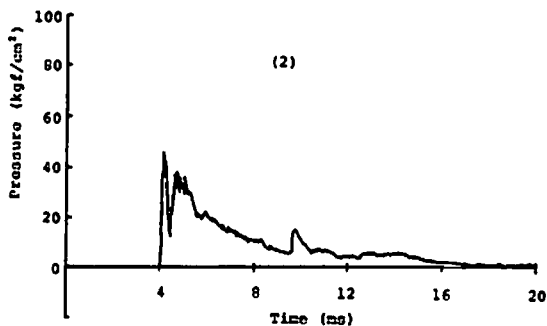
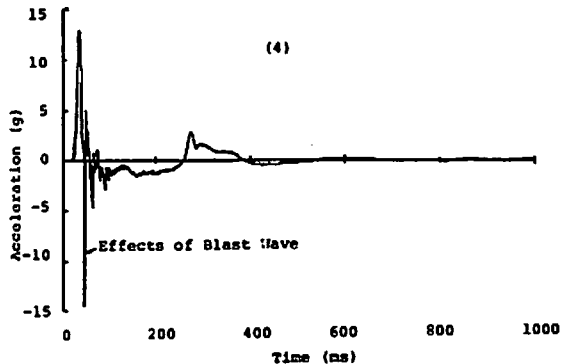
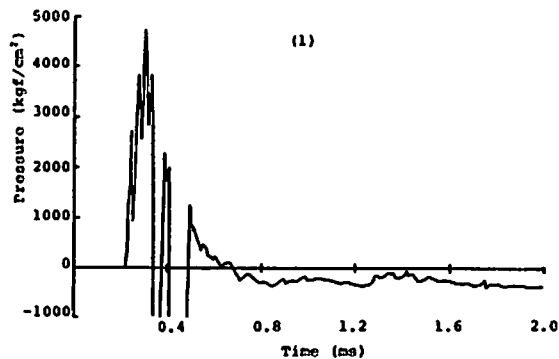


Fig. 6 Typical examples obtained by some instruments

- (1) Reflected overpressure in the chamber, Run No. 11 at P-1
- (2) Incident overpressure in the passage-way, Run No. 5 at P-6
- (3) Strain at the middle part of the passage-way, Run No. 5 at G-1
- (4) Acceleration at the ground surface, Run No. 11 at A-2, Horizontal
- (5) Displacement of the ground surface, Run No. 6

ックアップで、電源供給を行なうことのみで、所望の信号が得られ、デジタルメモリ（岩通電子製 DM7100 ×40CH）へ入力された。

ひずみゲージからの信号は、動ひずみ計によって増幅した後、デジタルメモリへ入力された。

デジタルメモリのトリガには、爆薬中に設置されたイオンギャップを使用した。この信号をデジタルリターダ（菅原研究所製 RE-306、遅延時間 1~999999 μs）に入力し、パルスを発生させ、これをデジタルメモリの外部トリガに入力した。このトリガによって開始された記録は、各ボックス毎に設定されたクロックレ

トによって停止した。

デジタルメモリによって記録されたデジタル信号は、コンピュータ（YHP 9835 B, 125k バイト）の記憶部に転送され、所要の計算処理の後に、プロッタ（YHP 9872 A）によって図化されるとともに、データカートリッジに記録され、保存された。実験後、約3時間で40チャンネルのデータは、すべて処理され、図化された。データレコーダは55年にバックアップ用として用いたが、その後は使用しなかった。

3. 実験結果

3.1 本体内の爆風圧

本体内の圧力変換器によって得られた爆風圧の時間履歴の一例を、Fig. 6-1に示す。圧力波形は、いずれも破片の衝突による圧力変換器の振動や、コンクリート壁体の破損によるリード線の切断、コネクタの破損などによって、複雑な波形となった。特に、弾薬の場合、弾片の影響も加わり、データの信頼性は少なかった。しかし、弾片の発生しない爆薬では、初期の爆風圧はほぼ正しく測定できたと考える。本体内の最大過圧（反射圧）の測定値をTable 2に示す。

3.2 前室における爆風圧

前室における爆風圧の波形記録の一例をFig. 6-2に、最大過圧（入射圧）をTable 3に示した。

測定値には、入口近傍の方が圧力が高い、いわゆる逆転した場合もあり、ばらつきは大きかったが、概して、爆薬の方が弾薬より最大過圧は高かった。同一年で比較すると、その関係は明瞭である。

3.3 前室中央部でのひずみ

前室中央部で測定した引張りひずみの時間履歴の一例をFig. 6-3に示す。波形記録から見て、ほぼ正しく

測定できたと考える。

前室における残留ひずみの分布状況の一例を、Fig. 7に示す。この図にも見られるように、破損までのひずみは、爆薬の方が弾薬より大きかった。

3.4 地盤表面の加速度

火薬庫の上方における地盤表面の加速度—時間履歴の一例をFig. 6-4に示す。

この加速度を積分して、最大変位速度 V (m/s) を求め、換算距離の3乗 D^3/W (m^3/kg) との関係を図示したのが、Fig. 8である。ただし、 D は爆薬からの距離 (m)、 W は爆薬量 (kg) である。昭和55年の爆薬 (Run No. 7および8) は別個の直線となったが、その他は一つの直線状になり、弾薬と爆薬で差がなかった。

また、最大変位速度 V における半周期 T (ms) も、両対数グラフにおいて、 D^3/W と直線関係を示した。

3.5 地盤表面の変位

Fig. 6-5は、光学式変位計によって得られた本体中央直上の地盤の鉛直上方への変位—時間曲線の一例で

Table 2 Peak reflected overpressure in the chamber

Measuring point				P-1	P-2
Distance from center of the explosive (m)				1.60	1.18
	Run No.	Explosive	Equivalent weight of explosive (kg)	Peak overpressure (kgf/cm ²)	
Experimental value	2	Ammunition	150.2	(386)	(4550)
	3	"	149.4	1450	900
	4	"	301.2	370	—
	5	"	300.5	3300	1270
	6	"	300.5	2250	1425
	7	Explosive	9.49	117.5	62.5
	8	"	87.7	—	(44.3)
	9	"	149.8	2080	1860
	10	"	342.9	3210	2240
	11	"	342.9	4800	1350
	Calculated value by Sachs' parameter		Explosive	9.49	127
		"	87.7	580	—
		"	150	890	1900
		"	300	1320	2470
Calculated value by the PISCES code		"	150*	1600	1240
		"	300**	2260	2480
		"	300*	2500	2600

* The wall was assumed to be rigid body.

** Effects of the concrete and the ground were considered.

() : unquestionably improper value

Table 3 Peak incident overpressure in the passage-way

Run No.	Explosive	Year	Equivalent weight of explosive (kg)	Experimental value (Peak overpressure (kgf/cm ²) / distance from entrance of magazine (m))
2	Ammunition	1981	150.2	36.7/7, 8.47/3
3	"	1983	149.4	135/7.5, 118/5, 29/0
4	"	1982	301.2	135/5, 130/2.5
5	"	1983	300.5	357/7.5, 291/5, 296/2.5, 46/0
6	"	1983	300.5	124/7.5, 140/5, 92/2.5, 63/0
8	Blasting explosive	1980	87.7	61.8/5
9	"	1981	149.8	74.2/7, 39.6/0
10	"	1982	342.9	470/7.5, 360/5, 145/2.5
11	"	1983	342.9	370/7.5, 228/5, 290/2.5, 85/0

ある。爆発による振動は、150ms後にカメラ部に到達しているため、それ以降の記録は信頼性がない。

図から鉛直方向の最大変位速度を計算すると、4.83 m/sとなる。一方、同一方向の加速度記録を積分すると、5.40m/sとなり、両者の差は小さく、加速度の積分による速度の値は、ほぼ信頼性があることが確認された。

3.6 構造体および地盤の変形と破壊状況

王城寺原で爆薬量300kgの場合 (Run No. 4および10)には、本体天井は崩落し、本体内はコンクリート塊と土砂で充満した。150kgの場合 (Run No. 2および9)には、鉄筋コンクリートの破碎と剝離、鉄筋の

露出と垂れ下り程度で、崩落には至らなかった。

上富良野では、爆薬量300kgでも弾薬の場合 (Run No. 5および6)には、崩落しなかった。しかし、爆薬の場合 (Run No. 11)には天井が構造倒壊し、直径2.1~2.3m、高さ1.35mの空洞ができた。地盤が岩盤の場合には、土の場合よりも本体の破壊が少ないことが示された。また、上富良野で300kgの場合、爆薬の

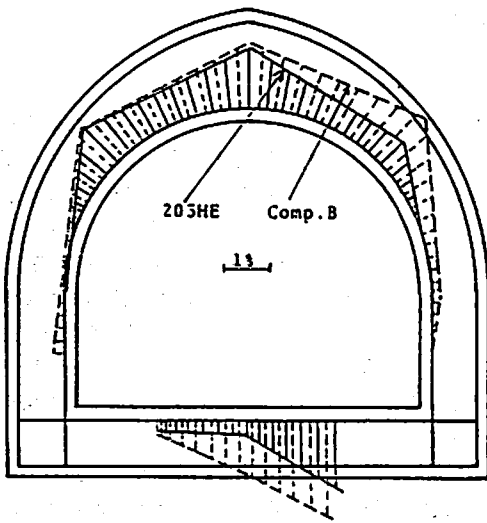


Fig. 7 Distribution of residual strain at the middle part of the passage-way
205HE: Run No. 4, Comp. B: Run No. 10

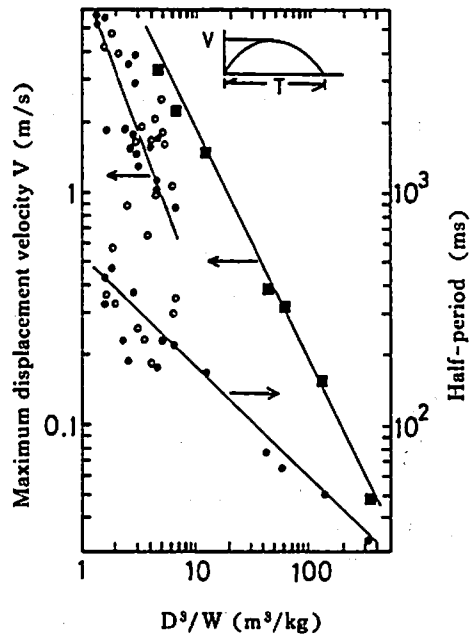


Fig. 8 Maximum displacement velocity V and half-period T versus scaled distance
○: Ammunition
■: Blasting explosive, Run No. 7 and 8
●: Blasting explosive, Run No. 9 ~ 11

Table 4 Residual elongation percentage of the structure

Run No.		3	4	5	6	10	11
Residual elongation (%)	Chamber	2.9	—	5.9	8.0	—	11.4
	Passage-way	2.0	1.8	1.9	3.6	4.3	5.8

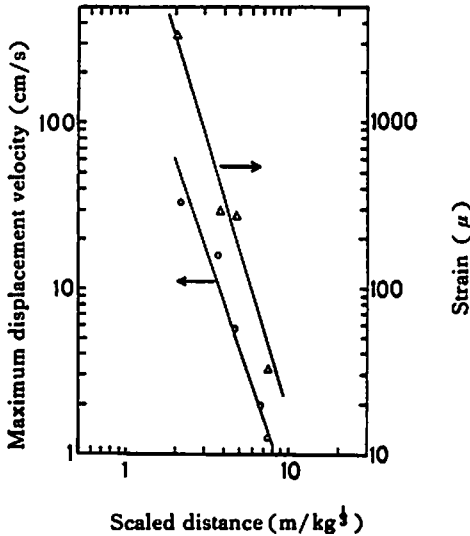


Fig. 9 Maximum displacement velocity and strain versus scaled distance by blasting in an adjacent magazine

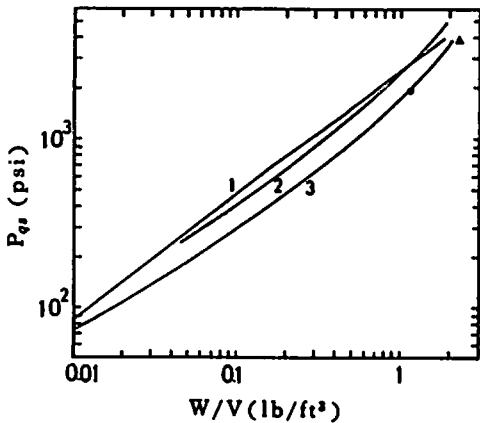


Fig. 10 Peak quasi-static overpressure P_{qs} versus loading density W/V ,
 1: reference 3), 2: reference 4),
 3: reference 5), ● ▲: reference 6)

方が弾薬よりも破壊の程度が大であることが明瞭に示された。

前室は、いずれの場合も、亀裂の発生と若干のコン

クリートの剝離程度で、立入り可能な状態であったが、やはり爆薬の方が弾薬より破壊の程度が大であった。

構造体は、鉄筋コンクリートの場合、最も破損が少なく、次いで無筋コンクリート、素掘りの順となった。王城寺原で300kgの場合、弾薬で1.3m、爆薬で2.45m前室が前方に押出される剛体移動があった。

本体および前室の円周方向と長さ方向の各数ヶ所について、残留伸び率を測定し、その平均をとったのがTable 4である。本体、前室ともに弾薬より爆薬の方が、また、鉄筋コンクリートより無筋コンクリートの方が、残留伸び率は大きかった。

全実験を通じて、本体直上の地表面の土砂または岩石の飛散は認められなかった。王城寺原で300kgの場合も、陥没が発生した程度だった。その陥没は、弾薬の場合、直径約11m、深さ約1.7m、爆薬の場合、直径約13m、深さ約3mであって、爆薬の方が大きかった。

3.7 隣接火薬庫に及ぼす影響

隣接火薬庫間の壁間距離は約13~19mであった。爆発による隣接火薬庫の壁面における加速度を積分して変位速度を求め、また、ひずみを測定した。結果を換算距離に対してプロットすると、Fig. 9のようになり、ともに両対数グラフで直線関係を示した。

内壁に生じた亀裂を調査したが、亀裂の幅は最大で0.1~0.3mmであった。

4. 考察

4.1 本体内の爆風圧

本体内の爆風圧については、センサが強力な爆風圧をうけ、また破片の打撃を受ける場合もあるので、測定はかなり困難であり、得られた実測値をそのまま信用することはできない。そこで、Sachsパラメータ²⁾と、後報で記述するPISCESコードによる反射圧の計算値を、Table 2に併記した。爆薬の形状はSachsパラメータでは点爆源、PISCESコードでは直径と長さが等しい円筒体を仮定している。なお、*は壁面を鋼体と仮定して計算したものであり、**は壁面の相互作用を考慮して計算した。

実測値と計算値を比較すると、爆源からの距離が近く、測定、計算ともに困難であるにもかかわらず、爆薬の場合には、SachsパラメータによるP-1値を除いては、かなり合っていると云えよう。したがって、実際の火薬庫の爆風圧もこれらの計算方法によって推

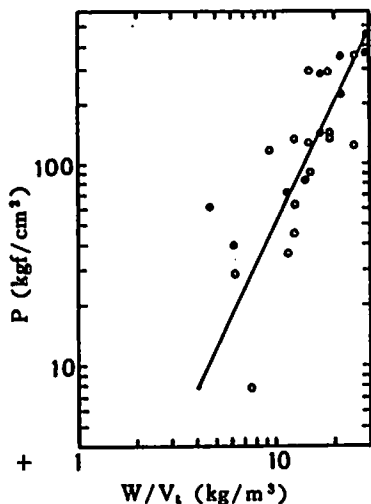


Fig. 11 Peak incident overpressure in the passageway P versus (explosive weight/total effective volume) W/V_t
 ● : blasting explosive, ○ : ammunition

定できると考えられる。Sachs パラメータ値が P-2 で比較的良好に合っているのに対して、P-1 で合わない理由は、P-1 点が円筒体の半円のクラウン部にあり、圧力が両方から集中したためと考えられる。

弾薬の場合には、Sachs パラメータ、PISCES コードともに実験値と合わなかった。破片の影響によるものであろう。

爆発が構造体に及ぼす影響には、反射爆風圧のほか、準静圧とそれらの時間的変化がある。最大準静圧 P_{qs} と装填密度 W/V の関係は、文献³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾によれば、Fig. 10 のようになる。この図から求めると、爆薬量 150kg と 300kg について、 P_{qs} はそれぞれ 140~210 kgf/cm²、290~420kgf/cm² である。また、準静圧の持続時間はそれぞれ 34ms と 49ms である⁶⁾。

4.2 前室における爆風圧

前室における弾薬の爆風圧は、爆薬の爆風圧より小さい傾向がある。この傾向は庫外爆風圧においても認められた。弾薬の場合、弾殻の破壊にかなりのエネルギーが消費されるためであろう。

文献⁷⁾によれば、弾薬内の爆薬の実効力積 I は、それと同重量の爆薬だけの場合の力積 I_0 に対して、

$$I = (0.44 \sim 0.67) I_0 \quad (2)$$

で表わされる。

別の文献⁸⁾によれば、鋼弾殻の場合、弾薬内の爆薬の裸薬当量は、次式が実験データとよく一致するという。

$$W' = W [0.2 + 0.8 / (1 + W_c / W)] \quad (3)$$

ここに、 W' は裸薬当量 (kg)、 W は弾殻内の爆薬重量 (kg)、 W_c は弾殻重量 (kg) である。

(3)式に 203mm りゆう弾の W と W_c の値を代入すると、

$$W' = W [0.2 + 0.8 / (1 + 73.23 / 16.67)] = 0.348 W \quad (4)$$

となり、爆薬重量の 34.8% の効果を示すことになる。

これらの文献によっても、弾薬は弾殻破壊の際に、かなりの割合のエネルギーを消費することがわかる。

Skjeltorp ら⁹⁾によれば、トンネル内爆発の際の前室内最大過圧 P (kgf/cm²) は、(6)式で表わされる。

$$P = a (W/V_t)^m (A_t/A_j)^n \quad (5)$$

ここに、 W は爆薬量 (kg)、 V_t は測定点までの爆風通過容積 (m³)、 A_t と A_j はそれぞれ本体と前室の断面積 (m²)、 a 、 m 、 n は常数である。本実験において、比 A_t/A_j は一定であるから、(5)式は次のようになる。

$$P = a' (W/V_t)^m \quad (6)$$

ただし、 a' は常数である。

Fig. 11 は、 P と W/V_t の関係を両対数グラフにプロットしたものである。測定値にばらつきはあるが、

Table 5 Mean propagation velocity of explosion flame in the underground magazine

Run No.	Explosive	Equivalent weight of explosive (kg)	Mean propagation velocity (km/s)
2	Ammunition	150.2	2.91
3	"	149.4	2.70
4	"	301.2	2.76
5	"	300.5	2.76
6	"	300.5	2.70
9	Blasting explosive	149.8	3.16
10	"	342.9	3.16
11	"	342.9	3.30

ほぼ直線関係にあるといえる。図を見ると、弾薬は直線の両側に分布しているが、爆薬は直線の上側が多くなっており、概して、爆薬の方が弾薬より爆風圧が大きいことがわかる。

起爆から火炎が火薬庫入口に現われるまでの時間により計算した、庫内の火炎平均伝播速度は Table 5 の通りである。表を見ると、実験範囲内では、火炎伝播速度は、爆薬量によらず、弾薬か爆薬かで異なり、その平均値は弾薬で 27.7km/s、爆薬で 3.21km/s であった。庫内爆風圧-時間履歴から計算した伝播速度の値も、ほぼ同様であった。

4.3 構造体の応答

Fig. 6-3 に見られるように、起爆後約 8m/s でひずみが発生しはじめ、圧力が減少しはじめても、ひずみは減少せず、その後、残留ひずみとして一定の大きさのひずみが残った。

Fig. 7 から見ると、残留ひずみはクラウンの部分で最も大きく、側壁部分のひずみは小さかった。クラウン部分は、構造的にも変形に対する抵抗が最も少なく、爆風圧も集中する部分と考えられるので、大きなひずみが発生したのは当然である。床部のひずみが左右対称になっていないのは、床部の切込み砂利の不均質性が考えられる。

図に示されたように、クラウン部分での最大残留ひずみは約 18000 μ (1.8%) であった。これが半円部分に分布していると考え、伸び量は 4.2cm となり、亀裂は約 4cm 幅となる筈である。実測値はこれにほぼ等しい値が得られ、ひずみ測定の高かったことを示している。

構造体の破壊は、爆薬の方が弾薬より甚だしかった。このことは、爆薬の方が爆風圧が大きかったことと対応している。

今回の実験における隣接火薬庫の壁面における最高変位速度は 33cm/s であった。Langefors ら⁸⁾は、変位速度が 23cm/s 以上になると、建物に大きな亀裂が発生すると言っているが、本実験ではヘアクラック以上の亀裂は発生しなかった。建物と地中式火薬庫との相違を示しているのであろう。ひずみも最大 3000 μ (0.3%) であった。

地中式火薬庫における薬室間距離と被害の程度については、Odello⁹⁾が発表しているが、それによると、殆んどあるいは全くスポーリングが起らない壁間換算距離 (m/kg^{1/3}) は、砂岩 1.56、石灰岩 1.72、花崗岩 2.2 である。Fig. 9 における最小の換算距離は 2.1 であり、この場合、岩石は溶結凝灰岩であるから、スポーリングの認められない範囲に入っているが、スポーリングあるいは殉爆の限界薬室間距離については、更

に検討の必要がある。

4.4 地盤の応答

本実験全般を通じて、火薬庫上部における土砂や岩石の飛散が認められなかった。このことは、不慮の爆発事故が発生した場合、周囲に及ぼす影響の一つである地盤の飛散の問題が解消され、通常の 2 倍の爆薬量でも心配ないことを示している。

地盤は土の場合の方が岩石の場合よりも変形が大きかった。しかし、Fig. 8 に示すように、同じ換算距離における変位速度は、Run. No. 7 および 8 (王城寺原) を例外とすれば王城寺原と上富良野では、明確な相違は認められなかった。

Vretblad¹⁰⁾は地中式火薬庫における地盤厚、装填密度と爆薬の爆発による地盤の変位速度の関係を、小規模実験によって求め、次の実験式を提案している。

花崗岩の場合

$$v/(W/V)^{0.25} = 1.56(D/W^{1/3})^{-2.08}$$

砂の場合

$$v/(W/V)^{0.26} = 2.07(D/W^{1/3})^{-2.60}$$

ここに、 v は地盤の最大変位速度 (m/s)、 W は爆薬量 (kg)、 V は薬室容積 (m³)、 D は地盤の厚さ (m) である。両式を爆薬量 150kg と 300kg の場合について計算すると、次の様になる。

Weight of explosive (kg)	Maximum displacement velocity (m/s)	
	granite	sand
150	3.67	4.82
300	6.99	8.91

本実験では、地盤の条件は砂と花崗岩の間であるが、150kg で最高 2m/s、343kg で最高 6m/s を得ていて、表の値よりも若干低かった。

5. 結論

以上の実験結果および考察から、次の結論が得られる。

(1) 本体内爆風圧は、弾薬の場合、破片の影響で正確な測定はできなかったが、爆薬の場合にはほぼ正しい測定ができた。爆薬の場合の最大過圧 (反射圧) を、Sachs パラメータと PISCES コードにより推定したが、爆薬の直上のクラウン部における Sachs パラメータ値を除いて、実測値と計算値は比較的良好に合っていた。

(2) 本体内の準静圧とその持続時間を推定したが、爆薬量 150kg で 140~210kgf/cm² と 34ms、300kg では 290~420kgf/cm² と 49ms であった。

(3) 前室における爆風圧は、概して爆薬の方が弾薬より

大きかった。この最大過圧（入射圧）は、Skjeltorp式でおよそ推定できた。

(4)火薬庫内における火炎の平均伝播速度は、実験範囲内では、爆薬の量によらず、弾薬で2.77km/s、爆薬で3.21km/sであった。

(5)構造体の破壊の激しさを要因別に比較すると、爆薬>弾薬、素掘り>無筋コンクリート>鉄筋コンクリート、また地盤では、土>岩石となった。

(6)通常の2倍の装填密度でも、火薬庫上方地表面における土や岩石の飛散は認められなかった。

(7)地盤の最大変位速度とその周期は、換算距離の3乗の関数として推算可能である。この場合、一部の例外を除けば、爆薬と弾薬、王城寺原と上富良野で、明瞭な差は認められなかった。

本実験は、陸幕、武器補給処、施設学校、防衛施設庁、技術研究本部第1研究所、第4研究所および防衛大学校の協力によって実施された。また、東北方面隊、北部方面隊などの支援を受けた。なお、昭和55～57年の間、防大名誉教授竹田仁一博士の御指導を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- 1) 中原正二, "地中式火薬庫の爆発実験について", 工業火薬, 43, (4), 203 (1983)
- 2) AMCP 706-181, "Engineering Design Handbook, Explosion in Air Past One"(1974)
- 3) TM5-1300, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions" (1969)
- 4) AD-A-049017, "Suppressive Shield Structure Design and Analysis Handbook", (1978)
- 5) A. Skjeltorp, T. Hangdoh and T. Jenssen, "Underground Ammunition Storage, Blasting Propagation in the Tunnel System, Report III A", Norwegian Defense Construction Service (1975)
- 6) AD-A-111849, "A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading on Structures", (1980)
- 7) TM5-855-1 "Protective Design" "Fundamentals of Protective Design (Non-nuclear)" (1965)
- 8) U. Langefors and B. Kihlström, "The Modern Technique of Rock Blasting" P. 278, John Wiley & Sons, Inc. (1963)
- 9) R. J. Odells, "Origins and Implications of Underground Storage Regulations", The 19th Explosive Safety Seminar, 1161 (1980)
- 10) B. F. Vretblad, "Model Tests for Underground Ammunition Storage Facilities", The 20th Explosives Safety Seminar, 1271 (1982)

**Explosion Tests in Model Underground Magazines (I)
Responses of Underground Magazines by Explosion**

by Jiro KURAMOCHI*, Kazuo FUJIMOTO*, Yoshio TAKANEZAWA*
and Shoji NAKAHARA**

There are many unknown factors about effects of accidental explosion in an underground magazine on its structure and its outside.

Model underground magazines having the same configuration and dimensions were constructed. Their loading density was the same as the usual 40ton underground magazine when 150kg explosive were loaded in them. Explosion tests were carried out in order to have information on their structure and outside, and on differences of these effects between blasting explosives and ammunitions. The weight of explosives used in the tests was up to 300kg.

In this paper, responses of the underground magazine structure by explosion were reported.

Blast wave overpressure and degree of damage in underground magazines by explosion of blasting explosives were found to be larger than those by that of ammunitions because ammunitions lost some of their energy through destruction of their cases.

Scattering of earths and rocks from the ground was not observed in any experiment.

Peak blast wave overpressure, peak quasi-static overpressure, mean propagation velocity of explosion flame, maximum displacement velocity of the ground and its frequency were able to be estimated by calculation; these estimated values were correlated well with the experimental values.

(*First Div., Fourth Research Center, T. R. D. I., Defence Agency,
2-9-54, Fuchinobe, Sagami-hara-shi, Kanagawa-ken, 229, Japan.

**The National Defense Academy, 1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka-shi,
Kanagawa-ken, 239, Japan.)