

地中式火薬庫の爆発実験（第2報）

— 構造体外の応答 —

中原正二*, 元場昭夫**, 加藤慎一***

地中式火薬庫内で爆発事故が発生した場合の、庫内外に及ぼす影響についての知見を得るため、爆薬量150kgで40t火薬庫と同じ装填密度を有する地中式火薬庫をつくり、300kgまでの爆発実験を実施した。構造体に及ぼす影響については、前報で報告したので、本報では構造体外の応答についてまとめた。

火炎伝播速度、庫外爆風圧、庫外爆風速度はともに爆薬の方が弾薬より大きかった。弾薬は弾殻の破壊にエネルギーを消費するためである。地盤振動と爆発音では、弾薬は爆薬と同等またはそれ以下であった。破片の飛散距離は弾薬の方が大きかったが、爆薬との差はあまり大きくなかった。今回の実験では、土堤は完全に吹きとばされた。土堤は破片の飛散距離にはあまり影響しなかったが、爆風圧を下げる効果はあった。

1. 緒言

地中式火薬庫の内部で爆発事故が発生した場合の庫内外に及ぼす影響の種類、大きさ、範囲および爆薬と弾薬におけるその差異について検討するため、昭和55年から58年にわたって一連の実験を行なった。すなわち、実際の40t火薬庫と同じ装填密度にした場合、150kg装填できる地中式火薬庫をつかって、最高300kgまでの爆発実験を実施した。

そのうち、構造体に及ぼす影響については、第1報¹⁾で報告した。本報では、庫外での爆発火炎、爆風圧、地盤振動、爆発音、飛散物、土堤の影響など、構造体外の応答について報告する。

2. 実験方法

供試火薬庫、試料火薬類および起爆方法については、第1報ですでに報告したので、詳細は省略するが、実験条件をまとめたTable 1を再録する。また、Fig. 1に火薬庫と土堤の形状を示した。

計測項目、使用した機器およびその計測方法は、次の通りである。

昭和60年3月6日受理

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

**陸上自衛隊武器補給処吉井弾薬支処
〒370-12 群馬県多野郡吉井町馬庭 2529
TEL 02738-8-2818

***防衛庁陸上幕僚監部装備部武器化学課弾薬班
〒107 東京都港区赤坂 9-7-45
TEL 03-408-5211 内線 2579

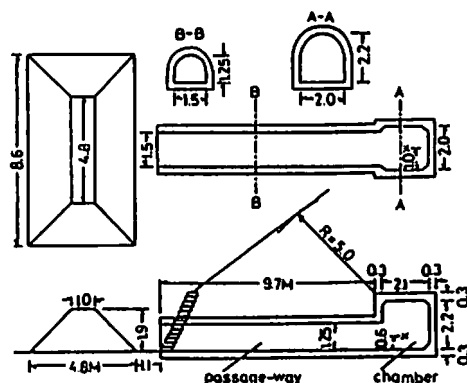


Fig. 1 Configuration of the model underground magazine and the earth mound
x : Center of the explosives

(1)爆発状況

庫外にソニー製FMトリニロンビデオカメラDXC-1740（毎秒30駒）と、日立製高速度カメラ16mmHS型（毎秒3000駒）を設置して、爆発状況を観測した。ヘリコプタによるVTR空中撮影（Run No. 5,11）も行なった。

(2)庫外爆風圧

火薬庫入口（以下庫口という）から見て、その軸線と0°~180°をなす線上で、それぞれ5~107mの距離の数点に、鉛板式（受圧面直径50mm、板厚0.5mm、1.0mm）、ひずみゲージ式（共和電業PGM、2KC、10KE、20KE、50KE、500KE）およびピエゾ式（PCB 101A）圧力計を設置して、庫外爆風圧を測定した。鉛

Table 1 Test conditions

Run No.	Explosive	Site	Year	Structure of magazine	Weight 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 1.148²⁾

板式およびひずみゲージ式圧力計は、受圧面が強固な金属支柱に火薬庫床面レベルから60cmの高さで、爆風が垂直に当るように取付け、反射圧を測定した。ピエゾ式圧力センサは、治具を用いて地表面上で入射圧が測定できるように、取付けた。

(3)地盤振動

火薬庫前方で入口から引いた一直線上に数箇所、45～80mの位置に地表面から0.4～1m掘り下げて、速度型振動計、新日本測器PM-5210B(周波数範囲5～1000Hz, 測定範囲0～200mm/s)を設置し、同一場所で水平庫軸方向と垂直方向の地盤振動を測定できるようにした。

(4)爆発音

実験場所は複雑な地形をしているが、爆源から0.1～1.1kmの道路沿いで、等距離間隔に、インパルス精密騒音計(リオンNA-61)数台を、その他、山頂、境界線上、住宅附近などの爆源からの距離0.2～11kmの数地点では普通騒音計(リオンNA-09およびNA-20)を使用して、爆発音を測定した。

(5)飛散物

弾薬の場合には、入口から7.6mの位置に輪線の片側部分を用いて、高さ5.4m、幅3.6mの直立鋼板壁(厚さ9mmまたは6mmの普通鋼を使用)を設置し、弾片の飛散分布と貫通状況を測定した。また、トランシットおよび巻尺を用いて、弾片とコンクリート破片の飛散方向と距離を測定した。

爆薬の場合には、コンクリート破片の飛散方向と距離を測定した。

計測システムのブロックダイアグラムは、Fig. 2の通りである。

3. 実験結果

3.1 爆発状況

黒煙を伴った爆発火炎は、1回だけでなく、2回以上にわたって庫口から噴出した。最高で5次火炎までのゆるやかな噴出が認められた。

1次火炎の平均伝播速度と持続時間を、Table 2に記した。爆薬の方が弾薬より速度は大きかった。しかし、1次火炎の持続時間は、弾薬の方が長かった。

3.2 庫外爆風圧

庫外爆風圧の時間履歴の一例を、Fig. 3-1に示す。0°方向における最大爆風過圧を、換算距離に対してプロットすると、Fig. 4-1～Fig. 4-3のようになる。ただし、鉛板プラストメータによる最大過圧の推定には、化技研の新しい校正曲線³⁾を利用した。換算距離は庫口を原点とし、薬量にはTable 1のTNT等価薬量をとった。

反射圧、入射圧とも弾薬の方が爆薬より最大爆風過圧が小さかった。弾薬で土堤のある場合は、最も小さかった。図から

$$P = a (D/W)^n \quad (1)$$

の常数 a 、 n の値を計算したのが、Table 3である。ただし、 P は最大爆風過圧(kgf/cm^2)、 D は庫口から

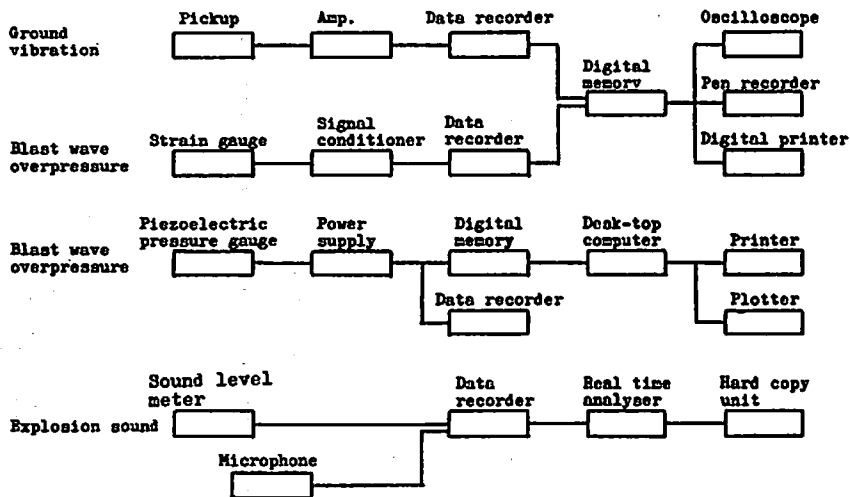


Fig. 2 Block diagram of the measuring system

Table 2 Mean propagation velocity and duration of the first flame by explosion

Run No.	Position	Mean propagation velocity (km/s)			Duration (ms)
		0-5m	5-10m	10-20m	
2		—	—	—	106
3		1.25	0.50	0.12	280
4		—	—	—	270
5		1.67	1.00	—	110
9		—	0.89	0.43	133
10		2.94	1.85	—	48
11		1.67	1.43	—	70

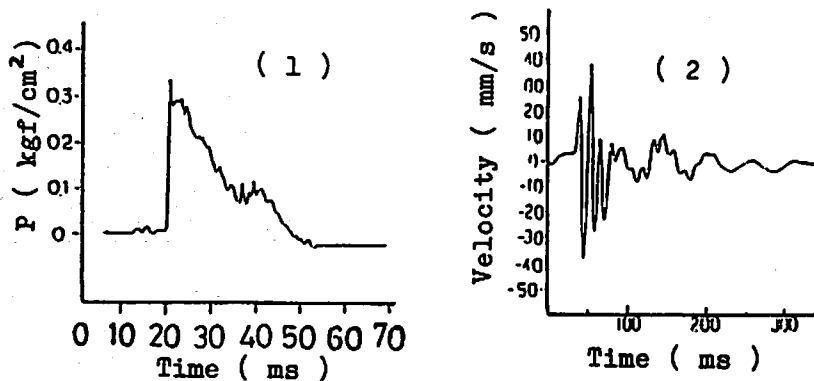
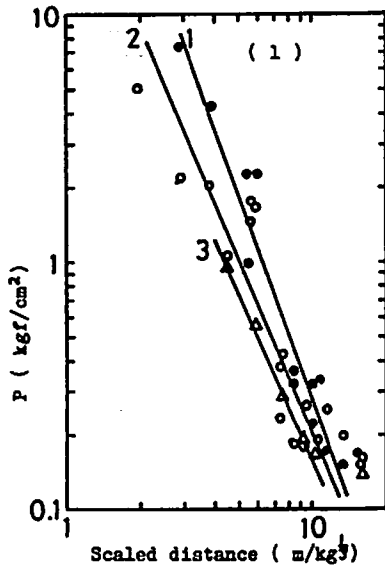


Fig. 3 Typical examples obtained by some instruments

- (1) Incident overpressure outside the magazine P , Run No.2, 30° azimuth angle, 40 meters from the entrance of the magazine
- (2) Ground vibration by explosion, Run No. 2, 40 meters from the entrance of the magazine, horizontal direction



- 1, ● : blasting explosive
- 2, ○ : ammunition
- 3, △ : ammunition (with earth mound)

Fig. 4-1

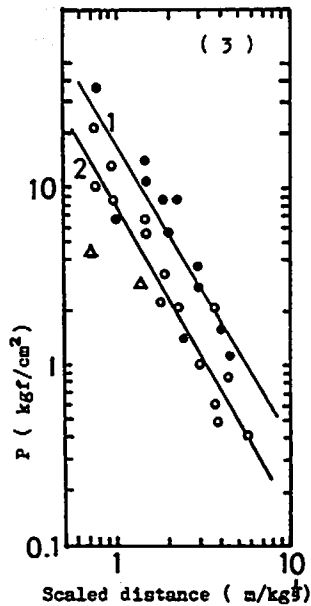


Fig. 4-3

の距離 (m), WはTNT等価爆薬量 (kg)である。
 角度による最大爆風過圧の変化の一例を, Fig. 5に示す。角度が大きくなると, 等爆風圧距離は急速に小さくなった。

また, 圧力波形記録から求めた爆風の到着距離一時

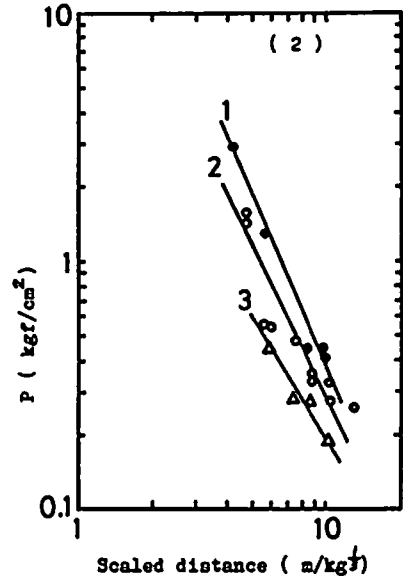


Fig. 4-2

Fig. 4 Peak overpressure P versus scaled distance, 0° of azimuth angle

- (1) Measured by lead plate blast meter (reflected overpressure)
- (2) Measured by strain gauge type pressure transducer (reflected overpressure)
- (3) Measured by piezoelectric pressure transducer (incident overpressure)

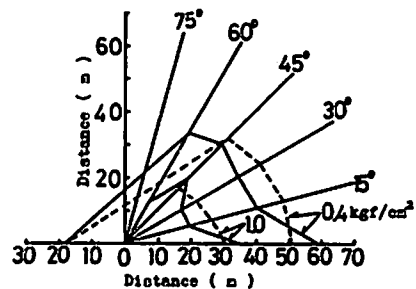


Fig. 5 Isobars for reflected overpressure

- : Run No. 5
- : Run No. 6

間関係はFig. 6のようになった。最初, 爆薬の方が爆風速度は大きい, 次第に爆薬と弾薬の差は小さくなり, 音速となって両者の差はなくなる。音速になるのは, 入口から60mあるいはそれ以上の距離からであった。

Table 3 Values of a and n in formula (1)

Method of measurement	Lead plate blast meter			Strain gauge type			Piezoelectric type	
	B	A	A (E)	B	A	A (E)	B	A
Explosive								
a	180	46	27	72	32	8.5	17	7.6
n	2.8	2.3	2.2	2.3	2.1	1.6	1.7	1.7

A : Ammunition, B : Blasting explosive, (E) : with earth mound

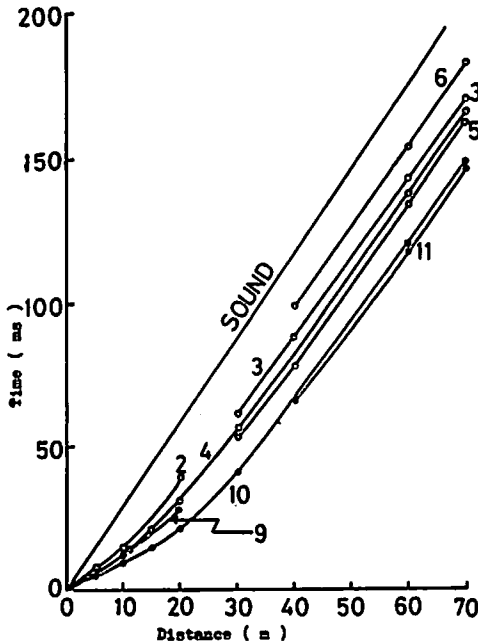


Fig. 6 Distance-time curves for blast waves outside magazine
 ○ : ammunition,
 ● : blasting explosive
 Numerals in the figure denote Run No..

3.3 地盤振動

地盤振動の一例を、Fig. 3-2に示した。

地盤振動の構造物に対する影響は、変位速度によってよく説明できる。そこで、今回の実験はてん壱がなく、デカップリング効果が非常に大きい場合の発破に相当するが、一応日本化薬の式

$$v = KW^{\frac{1}{3}}D^{-2} \quad (2)$$

を利用して、両対数グラフの横軸に $W^{\frac{1}{3}}D^{-2}$ 、縦軸に v をとって、王城寺原と上富良野についてFig. 7-1と7-2に図示した。ここに、 v は水平垂直合成ベクトルとしての最大変位速度 (mm/s)、 W は等価爆薬量(kg)、

D は庫口からの距離 (m)、 K は常数である。

火薬庫前方の土質は、実験のたびに異なるので、測定値のばらつきは大きい。ともにほぼ直線関係が得られた。実験式は次の通りである。

$$\text{王城寺原 } v = 680W^{0.52}D^{-1.4} \quad (3)$$

$$\text{上富良野 } v = 330W^{0.48}D^{-1.3} \quad (4)$$

図からわかるように、弾薬の最大変位速度は爆薬と比べて同等以下であった。王城寺原と上富良野では、同一の $W^{\frac{1}{3}}D^{-2}$ に対して、王城寺原の方が最大変位速度が大きかった。

3.4 爆発音

Fig. 8は爆発音の音圧レベルと換算距離の関係を示したものである。王城寺原と上富良野では、それぞれ測定地点は大体一定していたが、Fig. 8-1とFig. 8-2に分けて図示した上に、さらにRun No.ごとにプロットした。

爆発音の測定に対して、現在の騒音計は測定精度の点で問題があり、爆源から測定点までの地形はさまざま、さらに爆源の風上と風下とでは条件が違うので同一Run No.でも測定値にある程度のばらつきがあるのは止むを得ない。しかし、F特性のばらつきが比較的小さかったのに対して、A特性ではかなり大きかった。

図から判断すると、爆発音について弾薬は爆薬と同等かあるいはそれ以下であるといえる。

3.5 飛散物

鋼板壁の弾痕から見て、庫外に飛散した弾片の約90%が爆源と入口を結び錐体内に入っており、飛散分布は狭い範囲に限定されていた。

鋼板壁の貫通孔数および破片の最大飛散距離をTable 4に示した。150kgよりも300kgの場合の方が、貫通孔数は多かった。Run No.9で最大飛散距離が短くてしたのは、積習のためコンクリート片が発見しにくかったためである。概して、弾薬の方が爆薬より飛散距離は大きかった。

3.6 土壌の破壊状況

Run No.6で、火炎が庫口に達したのは、起爆後約

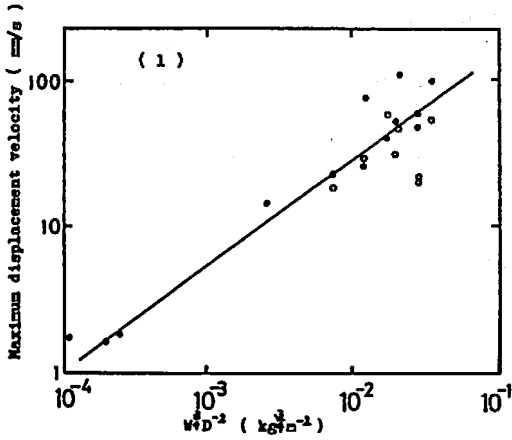


Fig. 7-1

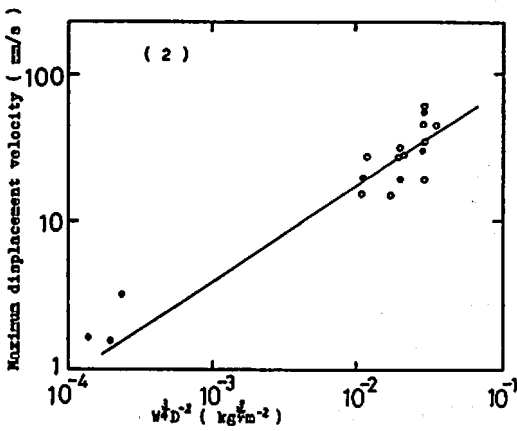


Fig. 7-2

Fig. 7 Ground vibration by explosion
 (1) at Ojozi, (2) at Kamifurano
 ○ : Ammunition
 ● : Blasting explosive

4.1msであった。火炎が土堤の頂部(高さ1.9m, 庫口からの水平距離3m)に達したのは、同8.1msであった。同12.6msで白熱球状火炎が土堤全体を包み込んだ。同約18.6msで土堤の土が吹きとばされ始め、土堤の土砂が最も激しく吹き飛ばされたのは、同100ms頃で、同約120msで土堤はなくなった。破片の飛散状況は、庫口附近の破片数が多かった外は、土堤のない場合とあまり相違なく、破片への土の付着状況にも殆んど差がなかった。

4. 考察

4.1 庫外爆風圧

水島ら⁹⁾によれば、厚さ0.5mmの鉛板プラストメータにおいて、爆風持続時間が1ms以下ならば、凹量は

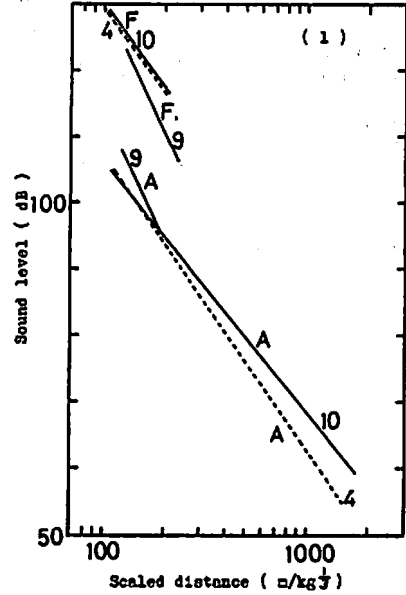


Fig. 8-1

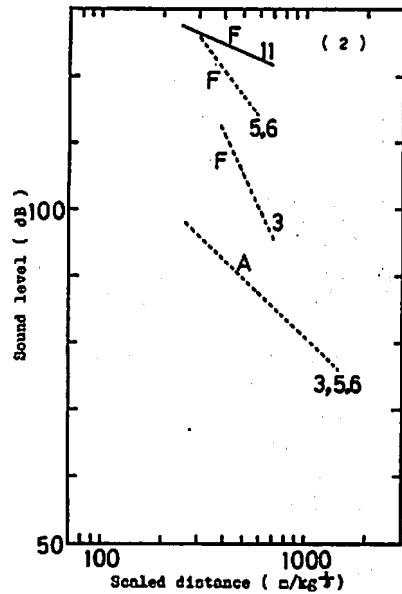


Fig. 8-2

Fig. 8 Explosion sound versus scaled distance
 (1) at Ojozi, (2) at Kamifurano
 F : Flat impulse level,
 A : A weighted impulse level
 Numerals in the figures denote Run No..

力積の関数であり、1ms以上ならば、最大過圧の関数であるという。本実験では、銘板の厚さは0.5mmと1.0mmであるが、爆風持続時間はFig. 3-1からわかる

ように、10ms以上であるから、凹量は最大過圧を衰わしているともてよい。

銘板プラスチックは取扱いが簡単で、便利であるが、銘板に弾片、コンクリート片、土石などが当たり、凹量がその影響を受けている場合があった。特に、庫口近傍ではその割合が多く、データがとれない場合や測定値に疑問のある場合もあった。そのため、測定精度はひずみゲージやピエゾより若干劣るであろう。

最大爆風過圧は、Fig. 4に示したように、鉛板プラスチック値（反射圧）、ひずみゲージ値（反射圧）、ピエゾ値（入射圧）のいずれの場合も、弾薬の方が爆薬より小さかった。また、弾薬で土堤のある場合はない場合より小さかった。

同じ換算距離において、弾薬と爆薬の最大過圧を比較すると、弾薬は爆薬の、鉛板式で40~70%、ひずみゲージ式で50~60%、ピエゾ式で40~50%であって、平均すると約50%であった。

Millington⁵⁾は、爆風圧と換算距離の関係を0°, 45°, 90°方向について求めている。これから同一換算距離におけるある角度と0°との最大爆風圧の比を計算すると、45°で40%、90°で30%となった。この値をFig. 9に+印で示した。図中には弾薬と爆薬の実測値も示した。実測値は文献値より若干大きく、90°で37%、180°で30%となった。弾薬と爆薬では差は僅かだった。

なお、庫外に噴出した火焰に2次火炎以上最高5次火炎まで認められたのは、TNT、Comp. Bともに酸素不足系のためである。

4.2 地盤振動

地盤振動は(3)式および(4)式によって衰わることがわかったが、同一の W^3/D^2 値に対して、上富良野の方が王城寺原より最大変位速度が大きかった。これは実験場の地形や成層条件その他の要因が、複雑に作用

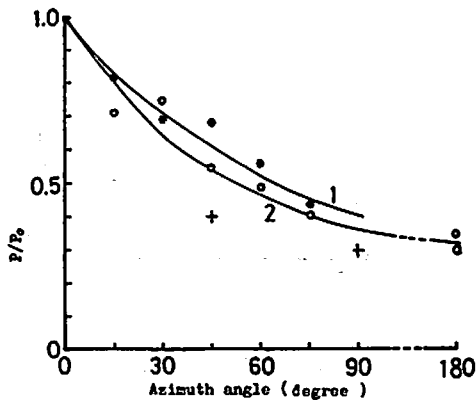


Fig. 9 Peak reflected overpressure versus azimuth angle

- 1, ● : blasting explosive,
- 2, ○ : ammunition
- + : reference 4)

P_0 : peak reflected overpressure at 0°,

P : at a certain angle

したものと思われる。

なお、測定結果から変位速度を0.5msごとにたどると、一例としてFig. 10のような複雑な振動をうけていることがわかった。

4.3 爆発音

Fig. 8の爆発音-換算距離実測値において、A特性の方がF特性よりばらつきが大きかった。その理由はA特性の方が高周波成分を含み、風や地形の影響を受けやすいためである。

地中式火薬庫内爆発による爆発音は、外国データおよび国内通産省実験データによる地表面爆発の爆発音⁶⁾と比較して、同一換算距離における音圧レベルが、同

Table 4 Number of perforation holes in the steel wall and maximum flying distance of fragments

Run No.	Explosive	Weight of explosive	Thickness of steel wall	Number of perforation holes	Max. flying distance of fragments
2	Ammunition	150.2 kg	9 mm	0	69 m
3	"	149.4	6	1	93
4	"	301.2	6	16	150
5	"	300.5	6	14	100
6	"	300.5	—	—	99
8	Blasting explosive	76.75	—	—	85
9	"	131.2	—	—	24
10	"	300.4	—	—	110
11	"	300.4	—	—	82

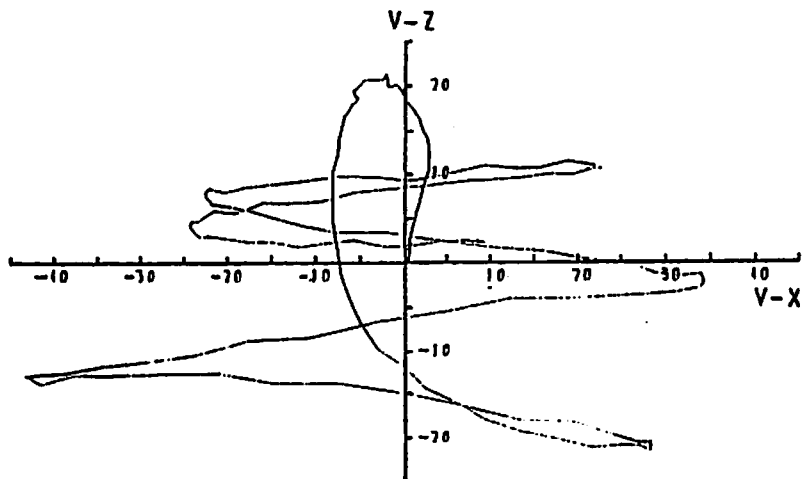


Fig. 10 A typical example of ground displacement velocity
 V-X : velocity in X-direction (mm/s)
 V-Z : velocity in Z-direction (mm/s)

等かあるいはそれ以下である。

4.4 飛散物

弾殻破片の飛散は、方向によって異なり、弾軸に直角の方向に最も多く、次いで弾底方向で、弾頭方向には比較的少ない。今回の実験では、弾薬は弾頭を入口方向に向けて設置したので、庫外への破片の飛散は少なく、大部分が庫内に留っていた。

飛散距離は、弾薬の方が爆薬より若干距離が大きいが、その差はあまり大きいものではなかった。

文献⁷⁾から計算すると、9mm厚の軟鋼板に対して、203mmHリゅう弾の破片が50%貫通する貫通限界距離 V_{50} は、しいのみ形あるいはそれに近い形状の破片の場合、 $V_{50}=370\sim 520\text{m/s}$ となる。

一方、爆源から18.6mの位置にある鋼板に当たる瞬間の破片の飛しょう速度は、もし1個の弾薬が地表面爆発したならば、 970m/s と推定され⁸⁾、破片は当然鋼板を貫通する筈である。貫通しなかった理由としては、(1)鋼板に直接当たる破片数が少なく、幸いにして、大きなエネルギーを持った破片が当らなかったため、(2)スタック状に積み重ねられた多数の弾薬が全弾同時に起爆した場合、各々の弾薬の爆轟波が相互に干渉し、破片形成のエネルギーがその分だけ相殺され、低速度の破片や大破片が多数形成され、したがって、破片の飛散速度、飛散距離とも1個の弾薬の場合よりも小さくなったため等が挙げられる。事実、回収した破片には、1個の弾薬の水井戸試験による破片よりも遥かに大きい破片が多数含まれていた。

Run No. 3~5では、鋼板の厚さを6mmにしたので

Table 4に見られるように、貫通孔があった。爆薬量が多くなると、貫通孔数も多くなった。

土堤は起爆後18.6msまでは原形を保っていた。このときに土堤に当たった破片の平均速度は $14\text{m} / 18.6\text{ms} = 760\text{m/s}$ と計算される。したがって、破片のうちには、高速破片で土堤にめり込んで飛散を妨げられたもの、土堤に当たって跳飛したもの、低速破片または壁面で反射した破片で、土堤の飛散中あるいは飛散後に飛散したものなどがあつたと推察される。

今回は庫口前の近傍に相当数の破片の飛散が見られたが、飛散距離については、土堤の抑制効果は認められなかった。土堤のつくり方などについては、更に検討を要する。

5. 結論

以上により、次の結論が得られた。

- (1) 庫外に噴出した爆発火炎は、2次火炎以上最高5次火炎まで認められた。TNT, Comp. Bともに酸素不足系のためである。火炎の伝播速度は、庫内外とも爆薬の方が弾薬より速かった。
- (2) 庫外の最大爆風過圧を比較すると、弾薬は爆薬の約50%であった。庫口基準での等爆風圧距離は、軸線に対する角度が大きくなると、小さくなった。180°では0°の30%であった。
- (3) 庫外爆風速度は、爆薬の方が弾薬より速かったが、庫口からの距離が大きくなると、次第に両者の差は小さくなり、60mあるいはそれ以上では音速になるので、当然両者の差はなくなった。
- (4) 地盤振動の最大変位速度は、爆薬量と距離の関数に

- よってよく表現できた。弾薬の変位速度は、爆薬とくらべて、同等またはそれ以下であった。また、王城寺原の方が上富良野より若干変位速度が速かった。
- (5)爆発音の音圧レベルは、ばらつきは大きいですが、換算距離の関数として表わすことができた。弾薬の爆発音は、爆薬とくらべて同等以下であった。また、地中式火薬庫内爆発では、地表面爆発と同等あるいはそれ以下の爆発音であった。
- (6)庫口からの飛散物は、爆薬と庫口とを結ぶ鍾体内を約90%が飛散した。飛散距離は、弾片の方がコンクリート片より大きかったが、その差はあまり大きくなかった。
- (7)今回の実験では、土堤は完全に吹き飛ばされた。土堤の存在は飛散距離にあまり影響しなかったが、爆風圧を下げる効果はあった。
- 本実験は、陸幕、武器補給処、施設学校、武器学校、防衛施設庁、技術研究本部第1研究所、第4研究所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。記してここに感謝の意を表する。

文 献

- 1)倉持二郎, 藤本一男, 高根沢吉夫, 中原正二, "地中式火薬庫の爆発実験(第1報)構造体の応答" 工業火薬, 投稿中
- 2)AD-A-003817, "Engineering Design Handbook, Explosions in Air (I)", P.6-4(1974)
- 3)日下部正夫, 吉田正典, 角館洋三, 宵木勝敏, 田中克己, 藤原修三, 飯田光明, 石川昇, "野外爆発実験における爆風圧の計測", 工業火薬協会昭和59年度年会講演要旨集, 103(1984)
- 4)水島容二郎, 中野綾信, "プラスチック鉛板の変形", 工業火薬, 44, (3), 173(1983)
- 5)C.F.Millington, "A Re-assessment of an Existing Underground Explosives Storage Facility in the UK", Minutes of the Twentieth Explosives Safety Seminar, 1285 (1982)
- 6)黒田英司, 日下部正夫, "野外爆発実験で生じた爆発音について", 工業火薬, 41, (1), 51 (1980)
- 7)AD-A-111849, "A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading on Structures", P.6-7 (1980)
- 8)ibid, P. 6-5 (1980)

Explosion Tests in Model Underground Magazines (II)
External Responses of Underground Magazines by Explosion

by Shoji NAKAHARA*, Akio MOTOBA**, and Shin-ichi KATO***

Model underground magazines, having the same loading density with the usual 40ton underground magazine when 150kg explosives were loaded in them, were constructed. Explosion tests were carried out in them, in order to have information on the effects to the magazine structure and the outside.

Responses of the magazine structure were reported previously; therefore, external responses by explosion in underground magazines were reported in this paper.

Propagation velocity of flame and blast wave and blast wave overpressure outside the magazines by explosion of blasting explosives were larger than those obtained by ammunitions. Ground vibration and explosion sound by explosion of ammunitions were the same or less than those by that of blasting explosives. Flying distance of fragments by explosion of ammunitions was longer than that by explosion of blasting explosives, but the difference was not large. The earth mound was blown out completely. The earth mound reduced blast wave overpressure, but had no effect on the flying distance of fragments.

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

**Yoshii Ammunition Branch Depot, Ordnance Depot, Ground Self-Defense Force, 2529 Maniwa, Yoshii-machi, Gunma-ken, 370-12, Japan.

***Ammunition Section, Ordnance and Chemical Div., Logistic Dept., Ground Staff Office, Ground Self-Defense Force, 9-7-45, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107, Japan.)

ニュース

第17回 ICT 国際会議
1986年6月25-27日西ドイツカールスルーエの推
薬爆薬フラウンホーフェル研究所で開催されます。
主題は推薬、爆薬の化学分析法、物理分析法で、例
えば同定、QC、安定度、寿命、共存性、安定性、
標準化で、300語以内の抄録を1986年11月末までに提

出することになっています。関心の向は Dr. H. H.
Krause, Fraunhofer-Institut für Treib- und Explosivstoffe, P. O. Box 1240, Pfinztal-Berghausen,
西ドイツに連絡の程を。

(水島容二郎)