

## 地下式火薬庫の爆発に関する研究 (第1報) 地盤振動と地下殉爆

蓮江 和夫\*, 宗正 邦彦\*, 足立 哲彦\*  
加藤 清志\*, 中原 正二\*

今日の火薬庫不足の解決法の一つとして、新しい形式の火薬庫である地下式火薬庫(仮称)について研究した。本報は、地下式火薬庫で爆発が発生した場合の地盤振動と隣接火薬庫の殉爆について実験した結果を報告する。

地盤振動速度は、土質では砂より土、火薬庫壁材料では鋼製よりプラスチック製の方が大きかった。また、装填密度と砂の含水率が増し、深度が減少すると、振動速度は増した。しかし、地中式火薬庫の場合より振動速度は小さかった。

砂中10cmの深さでの殉爆実験では換算距離0.071 m/kg<sup>1/3</sup>でも殉爆しなかった。これは現行ガイドラインの約10倍の安全率である。

### 1. 緒 論

最近、火薬庫周辺の開発が進み、保安距離の確保が困難になった所が少なくない。また、新規に火薬庫用地を取得することが難しいため、その貯蔵量及び棟数に制限を受けている。

この隘路を打開し、しかも抗たん性のある火薬庫にする方法として、火薬庫を地下に埋設し、エレベータなどで火薬類を出し入れする地下式火薬庫が考えられる。本研究の目的は、地下式火薬庫内で爆発が発生した場合の庫外への影響、すなわち地盤振動、庫外爆風圧および隣接火薬庫の殉爆について、各種要因の影響をしらべ、地中式火薬庫と安全性の比較をすることにある。

地下式火薬庫は、火薬庫として新しい形式なので、直接、このような爆発の実験をしたという文献はない。強いて言うならば、拡底発破<sup>1)</sup>であるが、拡底発破において地盤振動、庫外爆風圧などを取上げた文献はない。

筆者らは、地盤が関係する現象である地盤振動と地下での隣接火薬庫の殉爆について実験した。

実験は実験室規模で行われ、火薬庫には雷管4本でも破損しない厚肉軟鋼容器と、雷管1本で完全に破壊するプラスチック容器を使用した。土質には、川砂と

赤土を用いた。爆薬には雷管1本(TNT換算薬量0.513g)ないし4本、及びコンポジションC-4 20gを用いた。

したがって、大規模実験による本研究の確認が必要

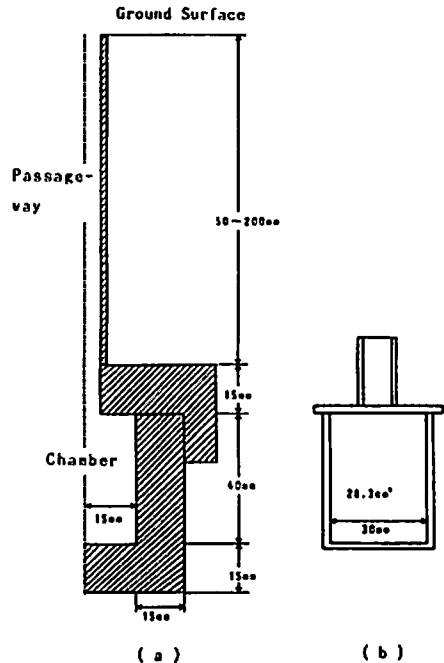


Fig. 1 Model subsurface magazines (a) made of steel and (b) made of polystyrene.

平成1年7月24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

である。

## 2. 実験方法

### 2.1 モデル火薬庫

モデル火薬庫は円筒形薬室部と通路部からなる (Fig. 1)。薬室部は6号電気雷管 (TNT換算薬量0.513g) 1本で現行火薬庫の装填密度 ( $18.1\text{kg/m}^3$ ) になるよう、内径30mmφ、高さ40mm、容積28.3 $\text{cm}^3$ とした。その材質には、雷管4本でも破損しない肉厚15mmの軟鋼SS41と、雷管1本で完全に破壊する肉厚1.1mmのポリスチレン系プラスチックの2種類を使用した。

通路部には内径9mmφ、長さ10~50mm (深度により変化させた) の鋼管 (肉厚2.15mm) 又は硬質塩ビ管 (肉厚2.25mm) を用いた。なおこの内径は40t庫では3.84mの直径に相当する。

### 2.2 試料爆薬

試料爆薬には旭化成製6号電気雷管内添装薬 (PETN, 0.4g, TNT換算0.513g) を、装填密度の増加には同工業雷管を用いた。

殉爆実験では雷管の他にコンポジションC-4も使用した。

### 2.3 地盤

土質には川砂と赤土 (ローム質土、防衛大学校構内で採取) を、砂で1~2日、土で約2週間干日で乾燥させて表乾状態にし、5mmふるいでふるったものを用いた。

供試地盤の作製にあたっては、実験項目ごとに縦130~140cm、横80~90cm、深さ約80cmの範囲を掘り起こし、所望の土質を作製した後に埋め戻した。埋め戻しの際には、締め固め度を一定にするため、ドイツ式貫入棒 (約12kg) をそれぞれ3回、高さ約10cmの位置から自由落下させて締め固めた。

含水比の調整 (砂のみ実験) には、コンクリートミキサ (容積0.03 $\text{m}^3$ ) を使用した。表乾状態の砂をミキサに入れ、攪拌しながら徐々に水を加えて、含水比が均一になるようにした。含水比の測定はガス圧法で行った。

供試地盤作製のち、爆発実験はできるだけ速やかに行った。なお地盤作製後、2時間以内では砂の含水比の変化は無視できることを実験で確認した。

### 2.4 地盤振動

地表面の地盤振動の加速度をピエゾ法によるPCB社 Model 308B (応答周波数27kHz~28kHz、測定範囲50G) で測定した。測定は火薬庫の軸に対して垂直で地表面に対し水平の方向 (X方向という) と地表面に対して垂直方向 (Z方向という) とを同時に行った。

また、地表面の水平方向の変位をヤーマンkk製光学式変位計オプトフォロー50OSD (応答周波数DC~50kHz、ターゲット:アルミ製2cm×2cm、白黒塗り分け) により、垂直方向の変位をKaman社製非接触変位計KD-2300-8C (応答周波数DC~50kHz、ターゲ

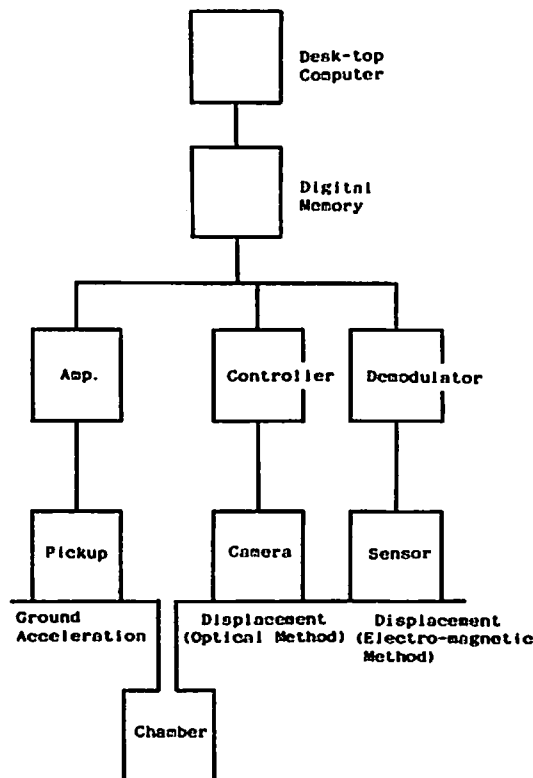


Fig. 2 Block diagram of the measuring system.

Table 1 Gap tests in the sand.

Run No.	Distance between Chambers (cm)	Diameter of Passage-way (mm)	Material of Passage-way	Donner	Scaled Distance (m/kg <sup>1/3</sup> )	Residual Explosive (%)	Test Result
1	5	0	—	C-4, 20 g	0.178	100	No-go
2	4	0	—	"	0.143	100	"
3	2	0	—	"	0.071	97	"
4	1	0	—	"	0.036	85	"
5	2	9	PVC*	"	0.071	86	"
6	2	9	Steel	"	0.071	75	"
7	2	15	"	"	0.071	61	"
8	2	24	"	"	0.071	50	"
9	5	15	"	One Det**	0.625	99	"
10	5	15	"	Two Dets	0.496	86	"
11	5	15	"	Four Dets	0.394	63	"
12	5	15	"	C-4, 20 g	0.178	79	"

\*PVC : Polyvinyl chloride, \*\*Det : detonator

ット:アルミ製約5cm×5cm)により測定した。なお変位計の変位と電圧の校正曲線における相関係数はいずれも99.6%以上であった。測定距離は爆源から2m以内である。

計測のシステムブロック図をFig. 2に示す。センサなどからの信号は個々の変換器によって所望の信号に変換し、デジタルメモリ(岩通電子DM7100)に入力した。デジタルメモリのトリガには発破電流を使用した。デジタルメモリに記録されたデジタル信号は、パソコン(日本電気PC9801, VX2)によりフロッピーディスクに記録・保存し、実験終了後にパソコンで所定の処理をして、プリンタに出力した。

## 2.5 殉爆

殉爆実験は砂中深さ10cmで行った。要因には通路の有無、通路の材質と直径及び励爆薬量をとった(Table 1)。受爆薬はすべてコンポジションC-4 20g (TNT換算22.1g)で、繰返し数は1である。殉爆の判定には残薬量とその外観及び受爆薬に添付した鋼製証拠棒(直径4mm, 長さ100mm)の変形によった。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 地盤振動

本実験で測定された地盤の振動加速度波形の一例をFig. 3. aに、その一次積分で得られた振動速度波形をFig. 3. bに示す。なお、これらの図の実験条件は鋼製火薬庫で、地盤は砂、装填密度18.1kg/m<sup>3</sup>、深度10cm、含水比4.64%で、測定点が50cmの場合である。

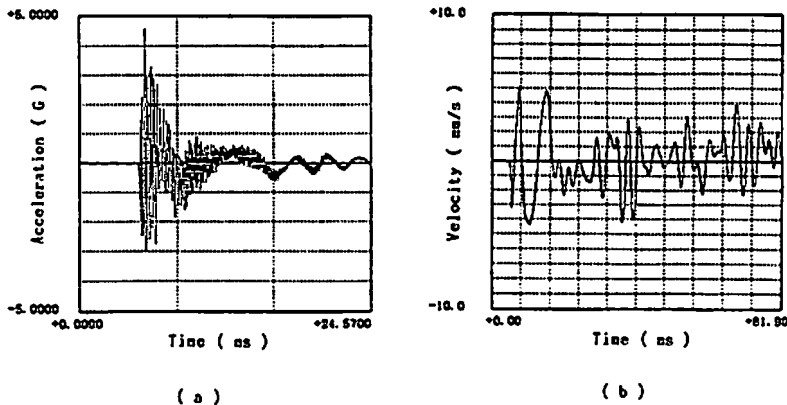


Fig. 3 Typical examples of (a) ground vibration measured by an accelerometer and (b) its integration.

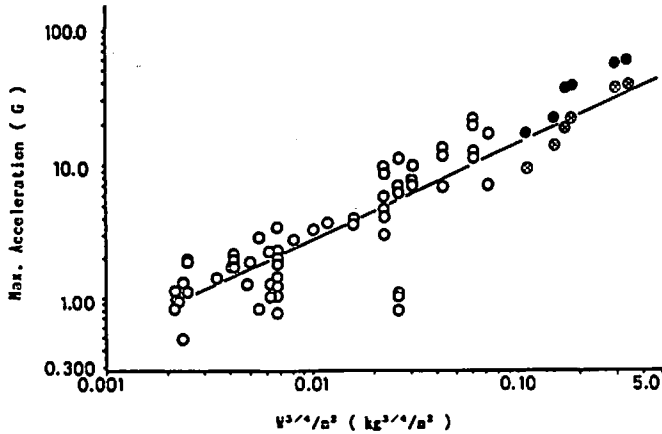


Fig. 4 Maximum acceleration of ground vibration vs. scaled distance.

$W$ : Weight of Explosives (kg),  $m$ : Distance from the Explosives (m),

○: Measured, ●: Calculated by the pisces code (Thickness of concrete wall: 1 m) and ⊗: Calculated by the pisces code (Thickness of concrete wall: 2 m)

最大振動加速度及び速度と換算距離の関係を、日本化薬の式によって図示したのが、Fig. 4とFig. 5である。ともに直線で表示された。Fig. 5には、陸上自衛隊の王城寺原及び北上富良野の実験結果<sup>2)</sup>(爆薬量300kgまで)も図示した。砂より土、鋼製よりプラスチック製の方が振動速度が大きいことがわかる。これを

式で表わすと、次のようになる。

土-プラスチック製  $V=10600 W^{0.77} D^{-2.07}$

砂-プラスチック製  $V=5820 W^{0.78} D^{-2.12}$

土-鋼製  $V=173 W^{0.52} D^{-1.40}$

砂-鋼製  $V=50.5 W^{0.48} D^{-1.23}$

ここに  $V$ は振動速度(mm/s),  $W$ は薬量(kg),  $D$ は距離(m)である。

陸上自衛隊の実験<sup>2)</sup>では、地盤は土、壁はコンクリート又は鉄筋コンクリートであるが、プラスチック

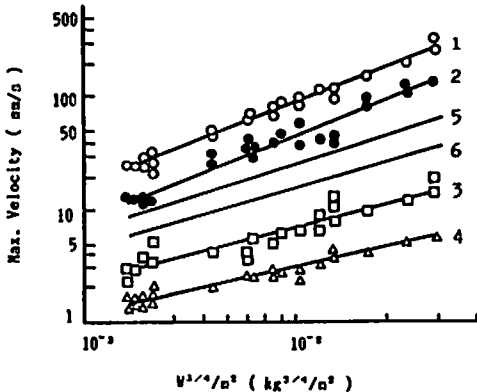


Fig. 5 Maximum velocity of ground vibration vs. scaled distance.

	Earth	Wall of magazine
1	Soil	Polystyrene
2	Sand	Polystyrene
3	Soil	Steel
4	Sand	Steel
5	Measured in ohjohji	
6	Measured in kamifurano	

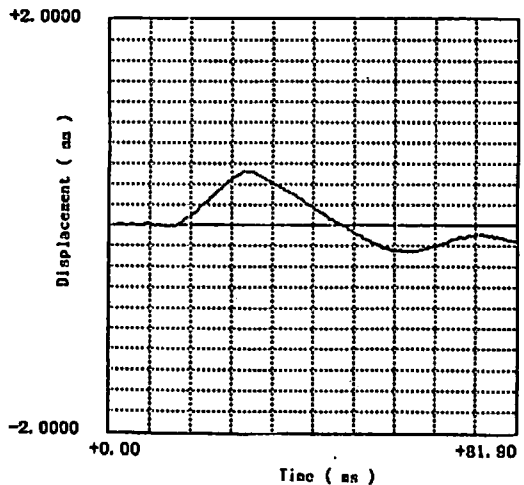


Fig. 6 A Typical example of ground vibration measured by the optical displacement meter.

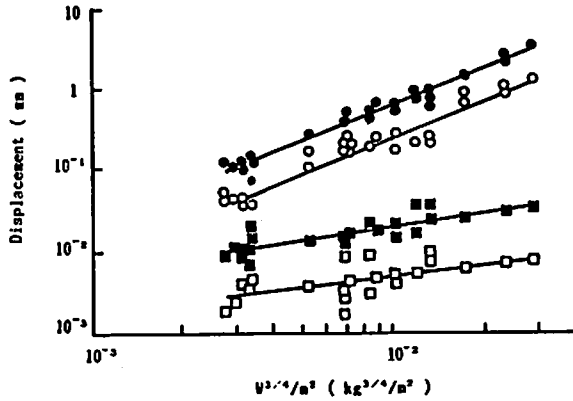


Fig. 7 Maximum displacement of ground vibration vs. scaled distance

●	Earth Soil	Wall of magazine Polystyrene
○	Sand	Polystyrene
■	Soil	Steel
□	Sand	Steel

製と鋼製の中間の値であった。突火薬庫に最も近い構造の土-鋼製系地下式火薬庫では地中式の約1/2以下に、砂-鋼製系では約1/9以下に振動速度が減少している。

変位計による変位波形の一例をFig.6に示す。土質は砂(水分0%)、火薬庫はプラスチック製、距離1.63m、火薬庫深さ30cmの場合のデータである。また、最

大変位と換算距離の関係をFig.7に示す。最大変位においても、土質と火薬庫材質の影響は最大振動速度の場合と同じ傾向である。なお、変位計による測定結果は、加速度波形を二次積分したものと、ほぼ一致していた。

最大振動速度に及ぼす各種要因の影響について示すと、次のとおりである。

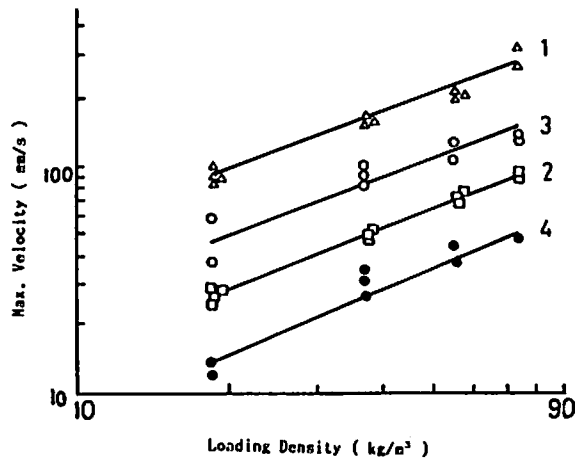


Fig. 8 Maximum velocity of ground vibration vs. loading density

	Earth	Wall of magazine	Distance(m)
1	Soil	Polystyrene	0.5
2	Sand	Polystyrene	1.0
3	Soil	Steel	0.5
4	Sand	Steel	1.0

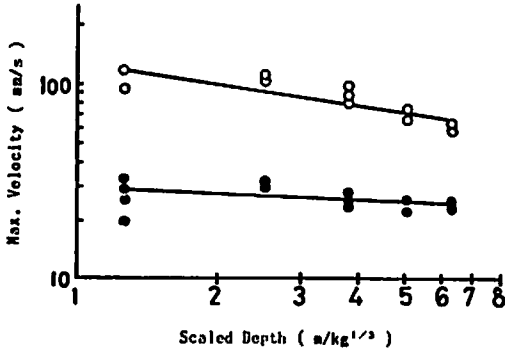


Fig. 9 Maximum velocity of ground vibration vs. scaled depth.

Earth : Soil, Wall of magazine : Steel,  
Distance (m)

○ 0.5  
● 1.0

(1) 装填密度

砂及び土における最大振動速度と装填密度との関係を Fig.8 に図示した。ともに、装填密度が増すと、その約0.9乗に比例して最大振動速度も増加した。

(2) 土質

前記のようにプラスチック製火薬庫、鋼製火薬庫ともに、土の方が砂より最大振動速度が大きいことがわかる。砂における最大振動速度を1とすると、土における最大振動速度はプラスチック製で約2倍、鋼製で約2.2倍であった。

砂は空隙率が大きく、そのクッション効果により、振動速度が小さかったものと考えられる。

(3) 火薬庫の材質

土、砂ともにプラスチック製の方が鋼製よりも最大振動速度が大きかった。鋼製を1とすると、プラスチック製は砂で約9~28倍、土で約9~34倍の最大振動速度であった。

鋼製の場合、弾性変形領域内であったから、爆発エネルギーは爆風圧として通路から抜ける割合が多かった。一方、プラスチック(引張り強度 3 kgf/cm<sup>2</sup>)製では容器が簡単に破壊され、砂又は土の塑性変形に多くのエネルギーが消費された。これが地盤振動を大きくした。

(4) 深度

Fig.9のように、深度の増加とともに最大振動速度は減少した。

深度による拘束圧  $P_r$  (kgf/cm<sup>2</sup>) の影響について、砂の場合で計算する。

$$P_r = C\rho h \quad (1)$$

Cは係数で、0.5、 $\rho$ は1.6 g/cm<sup>3</sup>、hは深度で10、50cmとする。

$$P_r(h=10\text{cm}) = 0.5 \times 1.6 \times 10 = 8 \text{ g/cm}^2$$

$$P_r(h=50\text{cm}) = 0.5 \times 1.6 \times 50 = 40 \text{ g/cm}^2$$

50cmの場合は10cmの場合の5倍になる。したがって、深くなるほど地盤振動しにくかったものと思われる。

(5) 砂の含水率

プラスチック製と鋼製における最大振動速度と含水率の関係を Fig.10 に示す。含水率が増加すると、最大振動速度が若干増加することがわかる。含水率0%のときの最大振動速度を1とすると、含水率11%のときは1.08倍であった。

加速度波形から実測されたP波の伝搬速度は、プラスチック製で275~462m/s、鋼製で300~576m/sであった。土質による差異は顕著ではないが、土の方が若干速かった。また、砂の含水率が増すと、わずかながら、伝搬速度が増加した。

P波の伝搬速度に及ぼす装填密度、深度及び火薬庫材質の影響は、実測値のばらつきが大きいためもあり、特定できなかった。

加速度波形をフーリエ変換して得た卓越周波数は、プラスチック製で12~110Hz、鋼製で49~22600Hzであった。

鋼製における固有振動は、その構造から0次の振動が考えられるが、その周波数は次式で表わされる。

$$f = (\rho r^2 / g E_r)^{-1/2} \quad (2)$$

ここに、fは周波数(Hz)、 $\rho$ は密度で  $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、rは外半径で0.03m、gは重力の加速度で  $9.8 \text{ m/s}^2$ 、

$E_r$ はヤング率で  $2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$  である。したがって、

$$f = \{(7.85 \times 10^3) (0.03)^2 / (9.8) (2.1 \times 10^{10})\}^{-1/2} = 17.100 \text{ Hz}$$

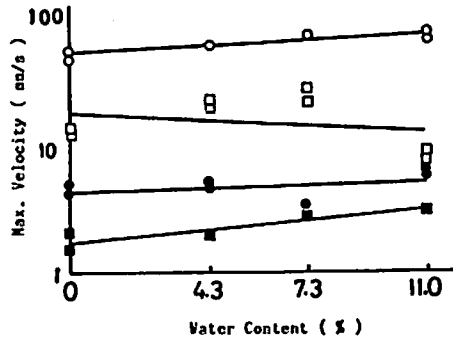


Fig. 10 Maximum velocity of ground vibration vs. water content of sand.

Wall of magazine Distance (m)  
○ Polystyrene 0.5  
□ Steel 0.5  
● Polystyrene 1.0  
■ Steel 1.0

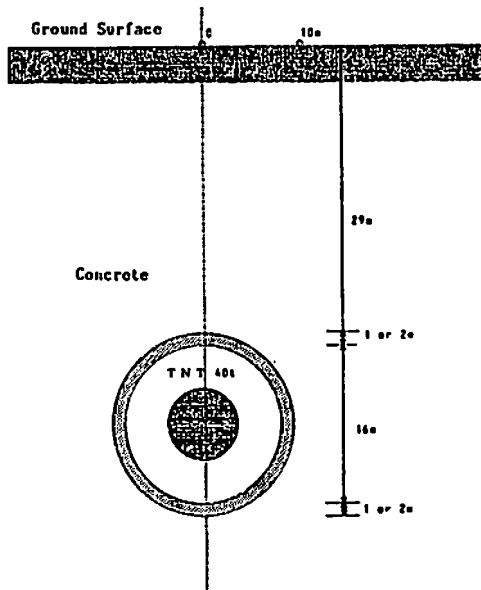


Fig. 11 Ground vibration simulation by explosion in a subsurface magazine model using pisces code calculation

となる。鋼製でしばしば高周波が卓越したのは、鋼製火薬庫の固有振動によるものと考えられる。

一方、プラスチック製では高周波の卓越は認められなかった。爆発の際の高周波領域はプラスチック破壊の際にかなりカットされたためと考えられる。山口<sup>3)</sup>は貯蔵量40tの地下式密閉型火薬庫モデル(Fig. 11)の爆発による地盤振動の解析をPISCESコードを使用して行っている。その結果はFig. 4のなかにプロットした。山口は砂質土を使用しているが、通路の有無、火薬庫の形状、材質などのパラメータが異なる。したがって一概には比較できないが、ほぼ同一線上にあるといえる。

### 3.2 殉爆

実験結果はTable 1に示した。回収残薬の外観と残薬量及び証拠棒の曲がり具合から、殉爆はなかったと推定される。

火薬庫間の殉爆を避け得る距離は、法規には明記されていないが、参考値として次式によって行政指導が行われている。

$$D = 0.75 \times W^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 $D$ は殉爆を避け得る距離(m)、 $W$ は貯蔵火薬類の数量(爆薬換算kg)である。つまり、現行ガイドラインでの換算距離は $0.75 \text{ m/kg}^{1/3}$ である。

本実験では、爆薬にコンポジションC-4を使用して、換算距離 $0.036 \text{ m/kg}^{1/3}$ でも殉爆は起こらなかった。繰返し数を考慮すれば、 $0.071 \text{ m/kg}^{1/3}$ では確実に殉爆は

起っていない。これは、現行ガイドラインの約1/10の換算距離である。

また、本研究室の地中式火薬庫の殉爆実験<sup>4)</sup>(爆薬：コンポジションC-4、火薬庫：鉄筋コンクリート)では、約1/12の $0.064 \text{ m/kg}^{1/3}$ でも殉爆は起らなかった。

爆薬の種類を変えた実験として、黒田らの報告<sup>5)</sup>によると、工業爆薬の砂中殉爆実験結果(爆薬：2号複ダイナマイト、埋設深さ：30cm)から、爆薬包で約 $0.24 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、VP-30塩ビ管中に入れた状態で、 $0.23 \text{ m/kg}^{1/3}$ 以下の結果が得られている。この場合にはガイドラインに対して約3倍の安全性があることになる。なお、2号複の換算距離は弾動きゅう砲比からのTNT換算によって計算した。

このように、爆薬の種類によって異なるが、3~10倍以上の安全性があることがわかる。

### 4. 結論

地下式火薬庫の爆発が周囲に及ぼす影響のうち、地盤振動と地下における隣接火薬庫の殉爆について検討し、次の結論を得た。

(1) 砂より土、鋼製よりプラスチック製の方が振動速度は大きい。陸上自衛隊地中式火薬庫の場合は鋼製とプラスチック製の中間の振動速度となった。実火薬庫に最も近い構造の土-鋼製系地下式火薬庫では地中式の約1/2以下に、砂-鋼製系では約1/9以下に減少している。

また、装填密度が増し、深度が減少し、砂の含水率が増すと、最大振動速度が増す。

(2) 砂中10cmの深さで殉爆実験を行ったが、現行ガイドラインの約1/10の換算距離 $0.071 \text{ m/kg}^{1/3}$ でも殉爆は起らなかった。

本実験を行なうにあたり、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。ここに記して感謝の意を表わす。

### 文献

- 1) 山本祐徳, 「一般火薬学」, P.288(1966), 一橋書房
- 2) 中原正二, 元嶋昭夫, 加藤慎一, 工業火薬, 46, 219(1985)
- 3) 山口 弘, PISCES-2DELKによる地下式火薬庫爆発解析, 防衛庁技術研究本部第4研究所薬械研究室, 未発表
- 4) 蓮江和夫, 岡 義夫, 細川 広, 宗正邦彦, 中原正二, 加藤清志, 工業火薬, 49, 53(1988)
- 5) 黒田英司, 松永猛裕, 田村昌三, 吉田忠雄, 小林直太, 梶山緑朗, 武井敏雄, 斉藤照光, 工業火薬, 48, 41(1987)

