

地下式火薬庫内の爆発で生じる地表地盤振動の評価

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

2008年7月19日 受付 2009年4月30日 受理

要旨

万が一の火薬庫の爆発によって発生する爆風やコンクリート片・土砂等の飛散物による被害を低減するために、火薬庫を地下に建設することが考えられる。爆発が地下深い地盤中で発生すると、出入口から地上へ爆風が放出するとともに地表地盤が振動する。このため、地下式火薬庫を建設する場合は、地表構造物に対する地盤振動の影響について検討する必要がある。本研究では、地下式火薬庫の設計に資するための基礎的な段階として、実際の火薬庫を約1/20に縮小したコンクリート製の模型地下式火薬庫を用いた庫内爆発実験を行い、地表における地盤振動の計測を行った。実験結果に基づいて、実規模の地下式火薬庫内で爆発が発生した場合の最大振動速度を推定する評価式を定式化した。

1. 緒言

火薬庫に貯蔵されている大量の火薬類が爆発すると、爆風および飛散物によって周辺地域に重大な被害を与える可能性がある¹⁾。このため、万が一火薬類の貯蔵施設が爆発した場合の安全性を確保するため、火薬類取締法・同施行規則によって各種保安物件ごとに定められた保安距離をとることが義務付けられている。ところが近年、既存火薬庫周辺の市街化が進むにつれて従来の保安距離が確保できない事例が発生している²⁾。この結果、規定される保安距離を確保するためには貯蔵量を減少せざるを得ない状況になっている。

保安物件が火薬庫に近接するために生じる貯蔵火薬類の減少を止めるための代案として、火薬庫を地下に建設することが考えられる³⁾。地下の構造物内に貯蔵した火薬類が爆発した場合、爆発によって生じる爆風や構造物の破壊片の飛散は、地盤によって抑止あるいは低減できることが期待される。ただし、地下爆発の場合は、火薬庫周辺の地盤振動が問題となる。その大きさによっては、地表の建物等に被害を与えるおそれがある。そこで、地下式火薬庫を建設する場合は、地盤中での爆発が地表の地盤振動に及ぼす影響を考慮する必要がある。ただし、地下式火薬庫は、火薬庫の形式として現行法令に規定されておらず、地下式火薬庫の内部爆発に関する研究は極めて少ない。数少ない既往の研究として、蓮江ら³⁾が鋼製およびプラスチック製模型火薬庫の内部で爆薬または雷管を爆発させる実験を行

い、地盤振動速度と隣接する火薬庫の殉爆について検討するとともに、実規模の地下式火薬庫における爆発実験と地盤振動速度について比較を行っている。また、地下式火薬庫の内部爆発とは多少異なるが、発破時における地盤振動速度を評価するための研究成果の一例としては、伊藤、吉川、雑喉などの研究者をはじめ、国内の各火薬製造会社が発破による最大地盤振動速度の推定式を提案している⁴⁾。

本研究では、地下式火薬庫の建設に資するための基礎的な段階として、地中に埋設したコンクリート製の模型火薬庫内で爆薬を爆発させる実験を行い、その際に生じる地盤振動について検討を行う。

2. 地下式模型火薬庫の内部爆発実験

2.1 地下式模型火薬庫の概要

本実験では実規模寸法の約1/20に縮小したコンクリート製火薬庫試験体を用い、実験室地盤に埋設した試験体内部で爆薬を爆発させる実験を行った。実験では、爆発時に生じる地表地盤の加速度を計測した。実験状況の概要を、Fig. 1に示す。

模型地下式火薬庫は箱型のコンクリート製試験体であり、寸法は、中空部の内幅30 cm、中空部の高さ30 cm、奥行30 cmの中空構造で壁厚さは3 cmである。コンクリート中には補強のため、直径3 mmの鋼線を5 cm間隔で壁の中央に縦横配置している。設置に際し、中空試験体の両側を2枚のコンクリート板（厚さ10 cm、1枚は10×10 cmの

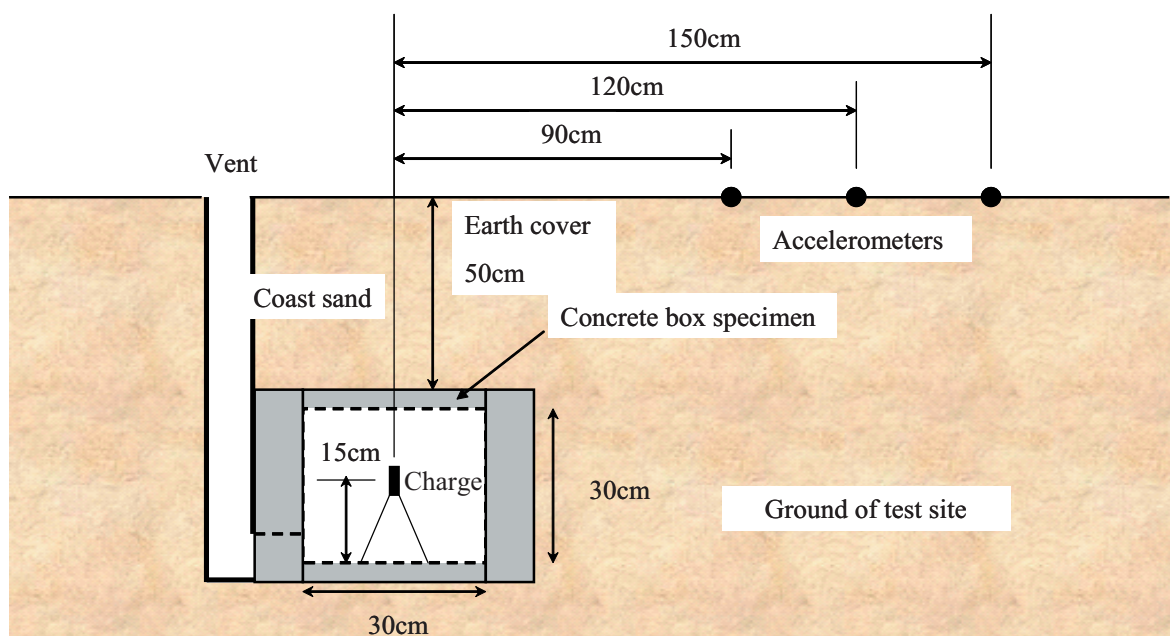


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

Table 1 Test cases.

No.	Thickness of earth cover (cm)	Mass of charge (g)	Moisture content (%)	Wet density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	50	30	9.2	1.50
2	50	30	15.0	1.61

開口部を有する)で閉塞し、火薬類の搬出口を模した合板製の角筒 ($\square 10 \times 10 \text{ cm}$)を取り付けた。爆薬は、地盤の埋め戻し前に試験体内部中央に固定した。埋設用の地盤の投入にあたっては、15 cm, 15 cm, 20 cmの3層に分け各層毎に十分な締め固めを行った。埋設に使用した砂は、平均粒径0.4 mmの天然海岸砂である。

本実験で用いた爆薬はコンポジションC-4 (以後、単にC4と略記)であり、薬量30 gを円柱形に成型した。爆薬は雷管の底面が高さ約15 cmとなるように、針金と粘着テープを用いて台座に固定した。実験に使用する爆薬量について考えると、実際の火薬庫における装薬密度 (単位容積あたりの貯蔵爆薬の総質量) が $5 \sim 20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であれば1/20の模型では135~540 g (実規模の薬量に換算すると1.08~4.32 t)に相当する。ただし、爆発実験に使用する爆発ピットおよび模型火薬庫の構造や寸法の制約により、実験に用いたC4は30 g (実規模で240 kgに相当)とした。したがって、本実験での装薬密度は、 $1.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ である。

2.2 計測方法および実験ケース

地表地盤振動の計測に使用した加速度センサーは、米国PCB社製ICP加速度センサー353B02 (容量 $\pm 250 \text{ G}$, 共振周波数38 kHz以上)である。加速度センサーは、厚さ1 mmで縦10 cm $\times$ 横10 cmのアルミニウム板にねじ止め固定し、さらにアルミテープを用いて固着した。また、地盤の振動をできるだけ精確に計測できるように、センサーを取り付けたアルミニウム板は、4本の鉄杭で地盤に固定した。加速度センサーは、Fig. 1に示すように爆薬設置位置から鉛

直上方の地表位置を基点として水平距離で90 cm, 120 cm, 150 cmの3個所に配置した。

実験ケースを、Table 1に示す。地盤の埋め戻しに用いる海岸砂は、含水比9.2% (海岸砂の表面が十分に湿っておらず地盤が流動性を有する程度、以後Dry地盤と略記)と15.0% (海岸砂の表面が十分に湿っており掘削した際に地盤が自立する程度、以後Wet地盤と略記)の2種類を使用した。

2.3 相似則に関する検討

本実験に用いた模型試験体の寸法は実規模の約1/20としているが、実験室空間やコンクリート・砂などの使用材料の制約から実規模と模型の間の相似関係を厳密に満足させることができない。とくに、火薬庫上方の地盤によって火薬庫天井に上載する地盤応力の大きさを、模型と実規模で等価な応力状態にするためには①地盤材料の単位体積質量が相似比のものを用いる、②地盤の上に荷重を付加する、などの処置が必要である。Table 2に、模型実験における代表的な相似則の例と、それぞれの相似則における相似比を示す。表中の相似則Aは遠心荷重装置を用いて所要の重力加速度の場合での実験を要求する。一方、相似則Bは一般にFroudeの相似則とよばれ、重力場における模型実験で実物の力学挙動を再現できる。ただし、相似則Bでは模型と実物とで密度の相似比を考慮した材料を使用しなければならない。また、相似則Cでは材料の応力が再現できないため、力学特性 (応力~ひずみ関係) が異なる材料を使用しなければならない。

このように、幾何的および力学的に相似則をすべて満足

Table 2 Examples of scaling law.

Dimension		Scaling law A	Scaling law B	Scaling law C
Geometric scale	L	20^{-1}	20^{-1}	20^{-1}
Velocity	LT^{-1}	1	$20^{-0.5}$	$20^{-0.5}$
Acceleration	LT^{-2}	20	1	1
Stress and Pressure	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1	20^{-1}
Density	ML^{-3}	1	20	1
Mass	M	20^{-3}	20^{-2}	20^{-3}
Time	T	20^{-1}	$20^{-0.5}$	$20^{-0.5}$

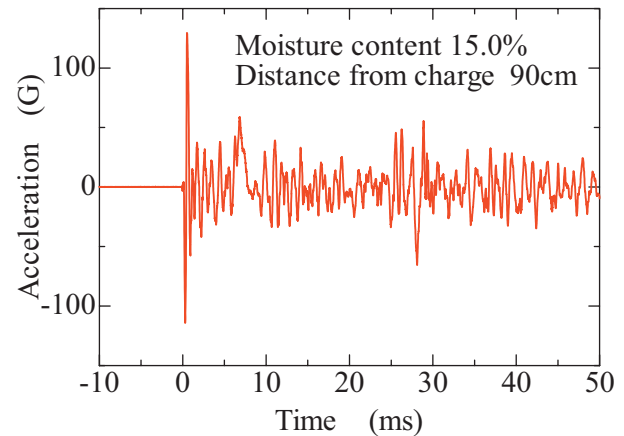
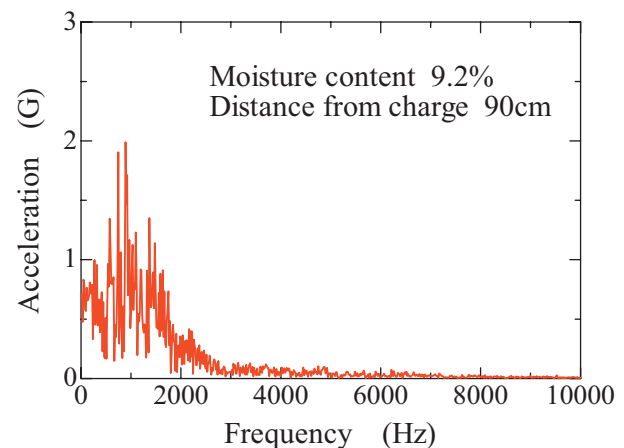
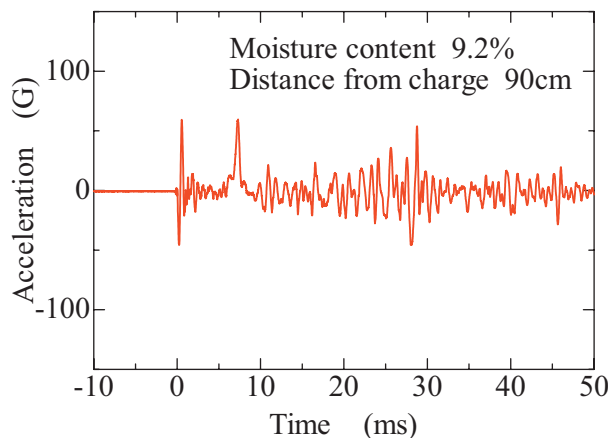
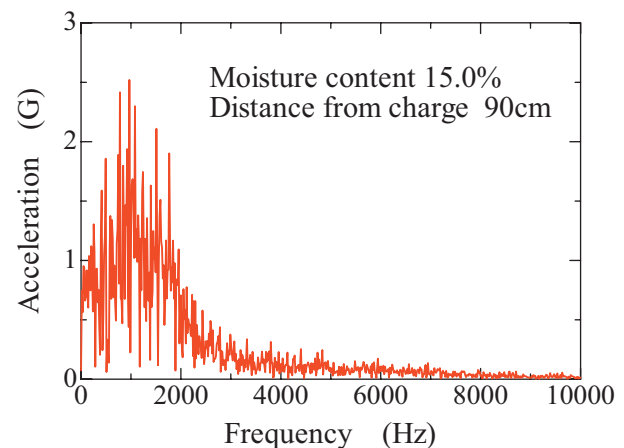
させた状態で地下式火薬庫の内部爆発実験を行うことは一般に困難である。本研究では、実規模の地下式火薬庫と同じ地盤材料およびコンクリートを使用し、かつ重力場において実験を行っているため、Table. 2に示した相似則はいずれも満足されていない。したがって、実験結果の妥当性については既往の発破による地盤振動の評価式との比較によって検討を行う。

3. 実験結果および考察

3.1 地表地盤振動加速度～時間関係および地表地盤振動速度～時間関係

Fig. 2, 3に、実験で計測された地表地盤振動加速度(以下、振動加速度と略記)～時間関係の一例を示す。なお、水平距離90cmの位置で計測された波形について、Dry地盤の場合をFig. 2に、Wet地盤の場合をFig. 3に示す。Fig. 2, 3を見ると、振動加速度は最大で約60Gおよび130Gであることがわかる ($1\text{ G}=9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)。また、振動の継続時間は、計測位置および埋設に用いた海岸砂の含水比によらず200ms程度である。Fig. 2に示した振動加速度～時間特性は、振動の発生直後に大きな加速度が生じ、時刻約1msで最大加速度の60Gとなりその後約8msで第2のピークとして同様に60Gを示している。その後、約200msの間振動が継続している。振動加速度の最大値は含水比が大きいほど増加する傾向が認められるが、振動の継続時間や最大加速度を記録する時刻については地盤の含水状態の相違による顕著な差異は認められなかった。

Fig. 4, 5に、Fig. 2, 3に示した振動加速度～時間特性の加速度スペクトルを示す。Fig. 4, 5から、いずれのケースも300～1700Hz(周期: 0.6～3ms)程度の振動成分が

**Fig. 3** Acceleration-time profile (Moisture content 15.0%).**Fig. 4** Acceleration spectrum (Moisture content 9.2%).**Fig. 2** Acceleration-time profile (Moisture content 9.2%).**Fig. 5** Acceleration spectrum (Moisture content 15.0%).

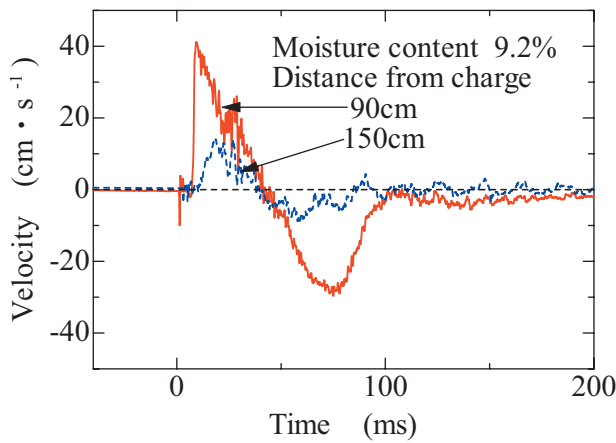


Fig. 6 Velocity-time profile (Moisture content 9.2%).

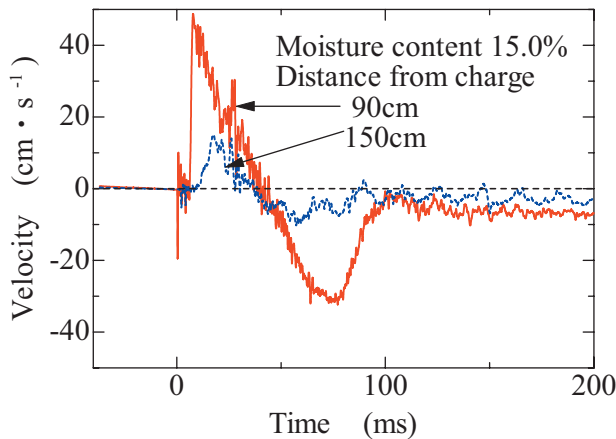


Fig. 7 Velocity-time profile (Moisture content 15.0%).

卓越していることがわかる。実規模の爆発では、寸法効果の影響を考慮すれば振動の周期はこれより大きくなると考えられるが、たとえば、Table 2の相似則Aから実規模の爆発による地盤振動の周期は12~60 ms ($=0.6 \sim 3 \text{ ms} \times 20$)である。これに対して、建築物の固有周期は、比較的固有周期が短い低層のコンクリート建築物でも200~300 msであることが知られている⁵⁾。すなわち、地下構造物の内部爆発で発生する地盤振動の周期は建築物の固有周期と比較して十分小さいので、加速度による地上構造物の応答倍率は小さくなる。振動が構造物に及ぼす影響を評価するもう一つの指標として、地表地盤振動速度（以下、振動速度と略記）がある。

Fig. 6, 7に、振動加速度～時間関係を時間で積分して得られた振動速度～時間関係の例を示す。Fig. 6, 7から、振動速度の最大値は $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \sim 50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であることがわかる。Fig. 6に示した爆薬直上の地表水平距離90 cm位置における振動速度～時間関係では、振動発生後約9 msで鉛直上方向に最大速度が生じている。その後、減少して40 msでは上向きから下向きの速度に変化して、約100 msで速度は $0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ になっている。なお、本実験の条件範囲では、地盤の含水状態の相違による振動速度～時間特性の顕著な差異は認められなかった。

3.2 最大振動速度の距離減衰特性

既往の研究によれば、爆発による地盤振動と建築物および構造物の被害との関係は、最大振動速度によって説明で

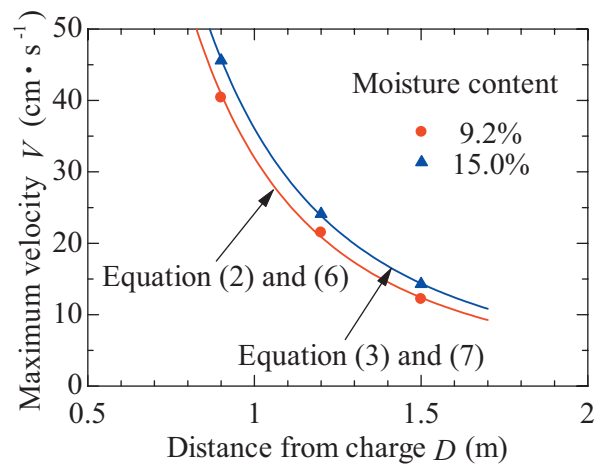


Fig. 8 Relationship between the maximum vibration velocity and the distance from charge.

きることを示されている⁶⁾。そこで、本研究でも、爆発による地盤振動特性を評価する物理量として最大振動速度を採用する。

Fig. 8に、爆薬直上の位置からセンサーまでの水平距離と最大振動速度の関係を示す。すべての実験ケースにおいて、最大振動速度は距離の増加とともに減衰している。例えば、Dry地盤において、水平距離90 cmで計測された最大振動速度は $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、水平距離150 cmでは $12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ である。すなわち、2点間距離60 cmの間に速度が約30%に減衰している。

最大振動速度～水平距離の関係に地盤の含水比が及ぼす影響を調べると、水平距離90 cmでは、Dry地盤で $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、Wet地盤で $46 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ である。したがって、Wet地盤の速度がDry地盤における速度の1.15倍の値を示している。同様に、水平距離150 cmにおいても、Dry地盤で $12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、Wet地盤では $14 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ である。この場合も、Wet地盤における最大速度がDry地盤の1.12倍となっている。つまり、地下火薬庫周辺の地盤が水分を多く含むと、地表地盤の最大速度は多少増大する傾向がある。

次に、最大振動速度の距離減衰は、既述のようにDry地盤では水平距離90 cmと150 cmの60 cmの離隔距離で速度値は30% ($40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ から $12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)に減衰、また、Wet地盤でも同様に30%に減衰 ($46 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ から $14 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)となっている。したがって、本実験の条件においては、地盤の含水状態が最大振動速度の距離減衰におよぼす影響は小さいとみなすことができる。

4. 地下式火薬庫における地盤振動の推定式

4.1 最大地表地盤振動速度の推定

実規模の地下式火薬庫で内部爆発が生じた際の最大振動速度を推定するため、まず本実験結果から最大振動速度 V を爆薬の質量 M および距離 D の関数として回帰式を求める。次に、得られた回帰式を既往の実規模発破による地盤振動推定式と比較して回帰式の妥当性を確認する。

発破時における振動速度を推定する実験式は、これまで多くの研究者や火薬製造会社などによって種々の式が提案されている⁴⁾。これらの式は、いずれも指数関数で表されており、次式に示す形で整理されている。

Table 3 Predicted values by scaling law and estimated equation.

Dimension and unit		measured value	Predicted value A		Predicted value B		Predicted value C	
			Scaling law	Equation	Scaling law	Equation	Scaling law	Equation
			A	(7)	B	(7)	C	(7)
Distance (m)	L	1.2	24	24	24	24	24	24
Charge mass (kg)	M	0.03	240	240	12	12	240	240
Maximum ground vibration velocity (cm·s ⁻¹)	LT ⁻¹	24	24	23	107	2	107	23

$$V = CM^m D^n \quad (1)$$

ここに、 V ：最大振動速度 (cm·s⁻¹)、 C ：発破の条件によって決まる係数、 M ：爆薬の質量 (kg)、 D ：爆発位置からの距離 (m)、 m 、 n ：係数、である。なお、係数 C 、 m 、 n は、 m ：3/4または2/3、 n ：-2.0、 C ：発破方法（トンネル発破、ベンチ発破など）によって異なる値で、 $n = -2.0$ の場合、爆薬の爆発であれば $C = 70 \sim 2,000$ である。

Fig. 8には、実験で計測された最大振動速度 V と爆薬直上からセンサーまでの水平距離 D の関係に加え、式(2)および(3)で与えられる回帰式による関係も示している。

$$\text{Dry地盤：} V = 3.47D^{-2.33} \quad (2)$$

$$\text{Wet地盤：} V = 3.59D^{-2.27} \quad (3)$$

ここで、式(2)および式(3)の右辺の係数値に対して、

$$\text{Dry地盤：} 3.47 = CM^m \quad (4)$$

$$\text{Wet地盤：} 3.59 = CM^m \quad (5)$$

の関係を仮定して C を求める。このとき、式(2)および(3)は式(1)と同じ形で表され、爆薬の質量および距離が実験と異なる場合の最大振動速度を推定することができる。ただし、 $M = 0.03$ (kg)、 $m = 3/4$ とする。得られた式を次に示す。

$$\text{Dry地盤：} V = 446M^{0.75}D^{-2.33} \quad (6)$$

$$\text{Wet地盤：} V = 502M^{0.75}D^{-2.27} \quad (7)$$

既往の発破振動推定式と比較すると、本実験における C の値は既往の発破振動推定式における C の値 ($70 \leq C \leq 2,000$) の範囲内である。また、 n の値は式(4)と(5)での平均値で $n = -2.30$ となり、既往の実験式で多く採用されている $n = -2.0$ に近い値となっている。したがって、本実験で得られた最大振動速度 V と距離 D および爆薬の質量 M との関係は、既往の実規模発破における最大振動速度推定式とはほぼ同様の式で表すことができる。したがって、式(6)および(7)を用いることにより、地下式火薬庫の内部爆発に対する最大振動速度が推定可能であると考えられる。

4.2 本模型実験の妥当性の検討

4.1で、実規模の地中式火薬庫で内部爆発が生じた際の最大振動速度 V を推定するために、模型実験で得られた結果に基づいて実験式を求めた。しかしながら、本研究で行った模型実験は重力場での実験であり、実験条件は厳密にはTable 2に示した相似則が成り立っていない。そこで、実験結果から推定した最大振動速度を相似則から求めた最大振動速度の値と比較することにより、本実験の妥当性について検討を行う。

Table 3に、最大振動速度について、模型実験による実

測値とTable 2に示した相似則に基づく値、さらに式(7)で求めた値をそれぞれ示す。なお、実測値はWet地盤におけるデータである。Table 3から、最大振動速度は相似則Aによる値と式(7)による値がほぼ一致していることがわかる。一方、相似則Bおよび相似則Cで得られた値は、式(7)から得られる値と大きな差異がある。相似則Aは、模型と実物で材料の密度と応力が同一となるが、相似比に応じた加速度の場合における模型実験を要求する相似則である。本研究では、遠心加速装置を用いた実験を要求する相似則Aの条件に従いながらも、重力場で模型実験を実施した。結果的には、最大振動速度は本実験結果に基づく実験式を用いて妥当な評価を得ることができると言える。

5. 結論

本報は、地下式火薬庫の建設に資するための基礎的な段階として、地中に埋設したコンクリート製の模型地下式火薬庫内において爆薬を爆発させ、その際の地盤振動について検討を行ったものである。実験結果に基づいて、地表地盤の最大振動速度の実験式を示した。本研究で得られた主要な結論を、以下に要約する。

(1) 30 gのC 4を50 cmの覆土厚を有する模型地下式火薬庫内で爆発させたところ、いずれの実験ケースにおいても地盤振動の継続時間は約200 msであった。また、爆発による地盤振動の卓越周期は0.6～3 ms程度である。

(2) 地下式火薬庫の埋設に使用した地盤材料の含水比が大きくなると最大振動加速度は増大し、最大振動速度も多少増大する。

(3) 地下式火薬庫の内部爆発に対する最大振動速度を推定する式として次式を得た。

$$\text{Dry地盤：} V = 446M^{0.75}D^{-2.33} \quad (6)$$

$$\text{Wet地盤：} V = 502M^{0.75}D^{-2.27} \quad (7)$$

(4) 地表地盤の最大振動速度は、周辺地盤の条件(土質、乾湿、厚さなど)の相違による誤差を含むことが考えられる。したがって、さらに地盤厚さの影響や地盤振動を低減するための方法に関する検討が必要である。また、相似比や装薬密度をより実際の火薬庫に近づけた実験を行い、より有用なデータを蓄積していく必要がある。

謝辞

実験に使用した試験体の製作にあたっては、日本ゼニスパイプ株式会社のご支援をいただいた。ここに謝意を表する。

引用文献

- 1) Y.Uehara and T. Ogawa, "Technical Handbook for Fire and Explosion Protection", TECHNO SYSTEM Inc., pp93–96, 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(1) Ground Vibration by Explosion by Explosion of Explosives and Gap Tests under the Ground", Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials), Vol. 51No. 1, pp. 8–15, 1990
- 4) Japan Explosives Society, "Gemba Gijyutusa no Tame no Happakougaku Handobukku, Kyouritu Shuppan, pp. 444–450, 2001
- 5) T.Nagai, "Taishingijyutu no Hanashi", Nihon Jitugyou Shippannsya, p. 42, 1995
- 6) K Zakoh, Happashindou no Shyuuhen e no eikyou to taisaku, Kashima Syuppankai, pp. 14–23, 1984

Experimental study on the properties of ground shock vibration resulting from an accidental explosion in a subsurface magazine

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

When an accidental explosion in an aboveground magazine is happened, the three primary events : air-blast, ground shock and debris, may be produced. To secure the surface structure and/or human life from these events, the magazine should be constructed in a subsurface. However, the hazard zones or safety distances for a subsurface magazine may be mainly defined by the effects of ground shock vibration. In this study, to know the effects of ground shock resulting from an accidental explosion in a subsurface magazine, explosion tests for small scaled specimens (1/20scale) were done. In tests, the ground shock vibration propagated to the surface ground was measured by the acceleration sensors. From test results, the maximum vibration velocity of surface ground was formulated by the function of explosive mass and distance from the charge.

Keywords : Subsurface magazine, Concrete, Ground shock velocity

^{*}Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy, Hashirimizu1–10–20, 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
Hashirimizu1–10–20, Yokosuka, Kanagawa, 239–8686, JAPAN