

研究論文

地下式火薬庫の内部爆発による地表での吹き出し爆風圧

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 TEL046-841-3810 FAX046-844-5913
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 e-mail 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 2008年10月31日 受理

要旨

火薬、爆薬および火工品などを貯蔵する既存の火薬庫周辺が市街化することにより、貯蔵量で規定される所定の保安距離が確保できない事態になっている。そこで、必要とされる貯蔵量を維持しつつより爆発の影響が少ない火薬庫形式として、地下に建設する地下式火薬庫が考えられる。わが国では、これまで地下式火薬庫が建設された例がなく、火薬庫の建設技術や爆発事故による地表への影響に関する研究は見当たらない。そこで本研究では、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、コンクリートで作製した縮小模型地下式火薬庫内で爆薬を爆発させる実験を行い、その際に発生する吹き出し爆風圧の計測を行った。さらに、実規模の地下式火薬庫内部で爆発が発生した場合の吹き出し爆風圧を推定し、既往の研究による地上爆発における爆風圧との比較を行った。地下式火薬庫から吹き出した爆風圧は、地上爆発による爆風圧と比較して小さくなっていることがわかった。したがって、地下式火薬庫は爆風圧を大きく低減できると考えられる。

1. 緒言

何らかの原因で火薬庫に保管されている火薬類が爆発した場合、発生する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¹⁾。このため、火薬庫は貯蔵する火薬類の量に応じて、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確保することが義務付けられている。ところが近年、既存の火薬庫近辺が市街化することによって²⁾、必要とされる量の火薬類を貯蔵することが困難な状況になってきている。そのため、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。

この問題を解決するための代案として、火薬庫を地下に建設して爆発の影響を低減させることが考えられる³⁾。すなわち、火薬類を地下に貯蔵することにより、万が一爆発事故が発生しても爆風や構造物の破壊片が飛散することを地盤によって抑止させる効果を期待するものである。抑止効果が十分であれば、地下に建設された火薬庫（以後、地下式火薬庫と略記）の場合は、従来の地上式一級火薬庫と比較して保安距離を低減できる可能性がある。ただし、地下式火薬庫は新しい形式の火薬庫であり、建設に係る技術基準や保安距離が現行法令に規定されていない。また、新しい形式の火薬庫のため、地下式火薬庫の建設および内部爆発に関する研究はこれまで極めて少ない。既往の研究と

しては、蓮江ら³⁾がプラスチック製および鋼製の模型地下式火薬庫の内部で雷管を爆発させる実験を行い、地表面での爆風圧を計測するとともに衝撃波および爆発ガスの観測を行っている。

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、コンクリートで作製した地下式火薬庫模型を用いた庫内爆発実験を行った。本実験では、主として地表面での吹き出し爆風圧の計測を行った。実験結果に基づいて、実規模の地下式火薬庫内部で爆発が発生した場合の吹き出し爆風圧を推定し、地下式火薬庫と地上式一級火薬庫について爆風圧の比較を行った。

2. 模型地下式火薬庫の内部爆発実験

2.1 模型地下式火薬庫および実験の概要

実験は、直径4mの円筒状の爆発ピット内で行った。本実験で用いた試験体は実規模の地下式火薬庫寸法を約1/20に縮小した箱型のコンクリート製試験体であり、これを爆発ピットの基礎地盤に埋設して試験体内部で爆薬を爆発させた。実験における計測は、爆発時に生じる地表への吹き出し爆風圧である。Fig. 1に実験方法の概要を示す。

模型地下式火薬庫の概要を、Fig. 2に示す。Fig. 2 (a)は火薬庫模型の本体で、各部の寸法はFig. 3に示すように、中空部の内幅が30cm、奥行きが30cm、高さが30cmで壁厚

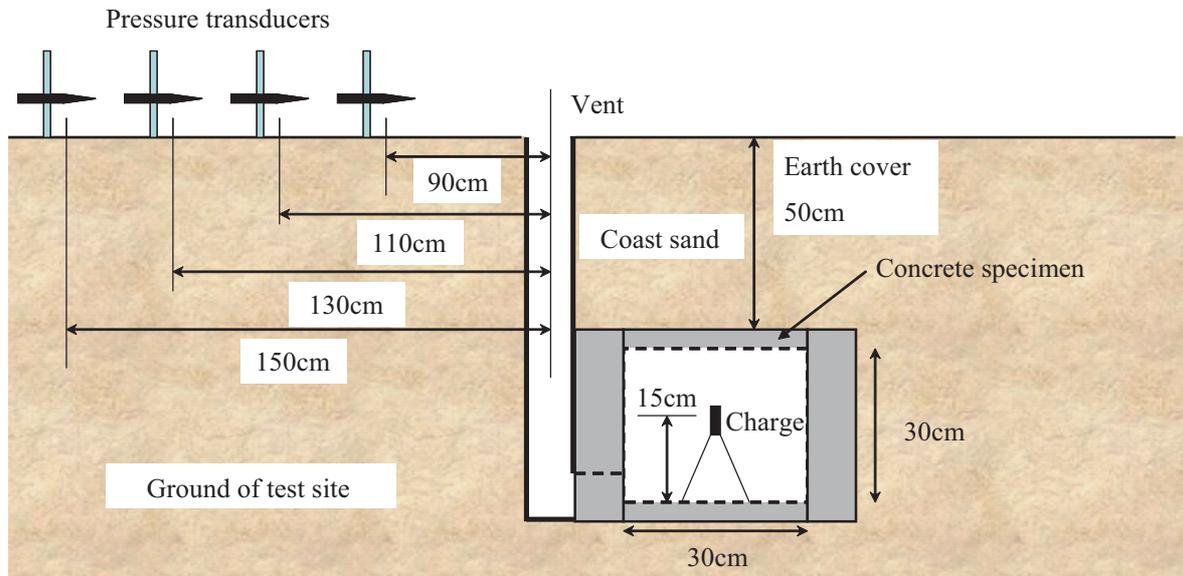
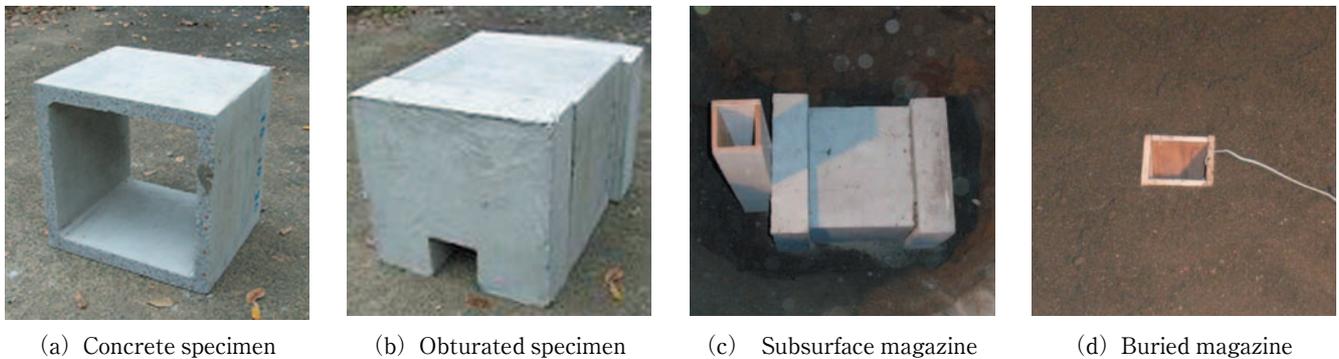


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.



(a) Concrete specimen

(b) Obturated specimen

(c) Subsurface magazine

(d) Buried magazine

Fig. 2 Concrete specimen (model subsurface magazine).

が3cmである。なお、鉄筋の代用として直径3mmの鋼線を5cm間隔で網目状に配置して補強を行った。試験体の両側は、厚さ10cmのコンクリート板（1枚は、縦10cm×横10cmの開口部を設けている。）で閉塞した。さらに、開口部に接続して合板製の放爆口を取り付け、爆風が地表に吹き出るようにした。設置にあたっては、爆発ピット内の地盤を掘り下げて底面を整地し、Fig. 2 (c), (d) に示すように模型火薬庫の覆土の厚さが50cmとなるように埋設した。なお、爆薬を試験体内部に固定した後で砂を埋め戻す際、15cm、15cm、20cmの3層に分け、各層毎に十分締め固めを行った。埋め戻しに使用した砂は、平均粒径0.4mmの天然海岸砂である。

爆薬は、コンポジションC-4（以後、C-4と略記）を使用した。実際に火薬庫に貯蔵される爆薬量は、装薬密度（単位容積あたりの存置爆薬の質量）が $10\sim 20\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であれば1/20の模型では270~540g（実規模に換算すると2.16~4.32t）に相当する。ただし、爆発ピットおよび模型火薬庫の構造によって、規模の大きな爆発実験は制約を受けるため、実験に用いたC-4は30g（実規模で240kgに相当）とした。C-4爆薬はアルミニウムスリーブ内に充填（充填密度 $1.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ）して円柱形に成形した。爆薬は、雷管の底面が試験体の底面からの高さが約15cmとな

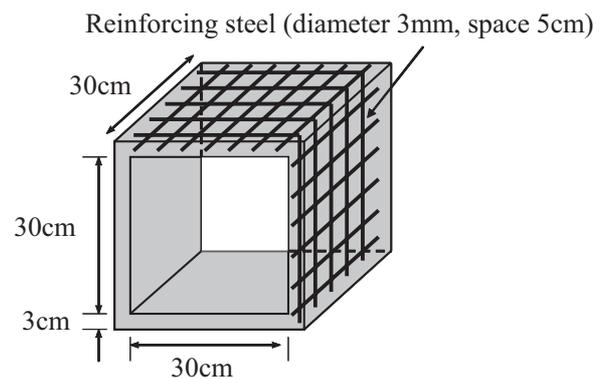


Fig. 3 Size of concrete specimen.

るように針金と粘着テープを用いた台座上に固定して設置した。

2.2 計測方法および実験ケース

使用した爆風圧センサーは、米国PCB社製ICP空中爆風圧センサー137A22（荷重容量3450kPa、共振周波数500kHz）である。爆風圧センサーは、Fig. 1に示すように放爆口の中央からの水平距離が90cm、110cm、130cm、150cmの4か所に、受圧部の中心が位置するように設置した。また、

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

受圧部は地表面からの高さが10cmとなるように調整した。実験ケースをTable 1に示す。火薬庫の埋設に用いる海岸砂は、含水比が9.2%と15.0%（一定体積の土に含まれる土粒子の質量に対する水の質量の比率、たとえば1 m³で1,500kgの土がある場合、土粒子が1,000kg、水が500kgのとき、含水比は50%となる）の2種類を使用した。含水比9.2%の海岸砂は、砂粒子の表面に多少水分が残存しているが流動性を有している。一方、含水比15.0%の海岸砂は、砂粒子の表面が濡れた状態にあるため砂粒子間に付着力が生じている。このため流動性が小さく、実験室の地盤を掘削する際でも垂直に切りとった面を自立させることが可能である。

3. 実験結果および考察

3.1 爆風圧～時間関係

本実験においては、地上部に火薬庫のコンクリート片は飛散しておらず、地盤材料による飛散物の抑止効果が確認できた。

Fig. 4, 5に、爆風圧～時間関係の代表例を示す。なお、Fig. 4に地盤の含水比9.2%の例、Fig. 5に含水比15.0%の例を、放爆口からの水平距離が90cmおよび150cmの場合についてそれぞれ示す。横軸は放爆口から水平距離90cmのセンサーで計測した爆風圧の立ち上がり時刻を0msとし、縦軸は大気圧を0kPaとした。

Fig. 4, 5より、爆風圧は立ち上がりの瞬間に数kPa～十数kPa程度の最大値を示して約1msの間正圧が継続し、その後急勾配で圧力が低下して負圧を生じている。使用した圧力センサーの共振周波数は約500kHzであり、1ms程度の現象である爆風圧の第一波は適切に計測されている。爆風圧～時間関係の傾向は埋設に使用した海岸砂の含水比および通風口からセンサーまでの水平距離に関わらず共通している。ただし、負圧は水平距離150cmの場合には顕著に現れない。模型地下式火薬庫内で発生した爆風は、火薬庫の入り口から放爆口を経て地上に吹き出す。したがって、火薬庫内や放爆口における反射などの影響を受けて爆風が乱れることが考えられるが、本実験の場合、爆風圧～時間関係の波形はいずれのケースにおいても垂直に近い立ち上がりを示し、かつピークの後に急勾配の爆圧低下を示している。このように、爆風圧～時間関係は自由空間で計測された爆風圧～時間関係⁴⁾と類似した形状を示している。

3.2 最大爆風圧の距離減衰特性

最大爆風圧は、Fig. 4, 5に示した爆風圧～時間関係における爆風圧の最大値として定義する。

Fig. 6に、最大爆風圧と放爆口からセンサーまでの水平距離との関係を、地盤含水比別に示す。爆風圧は距離が離れると大きく減衰する。例えば、地盤の含水比15.0%で水

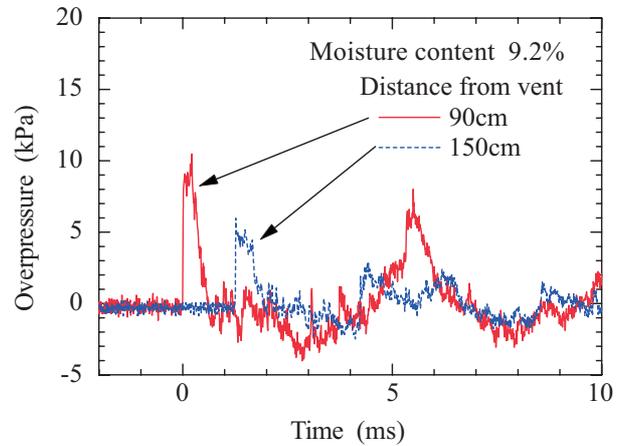


Fig. 4 Pressure-time profile (Moisture content 9.2%).

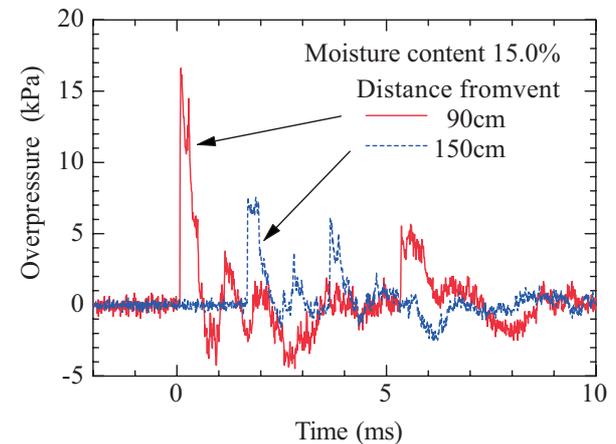


Fig. 5 Pressure-time profile (Moisture content 15.0%).

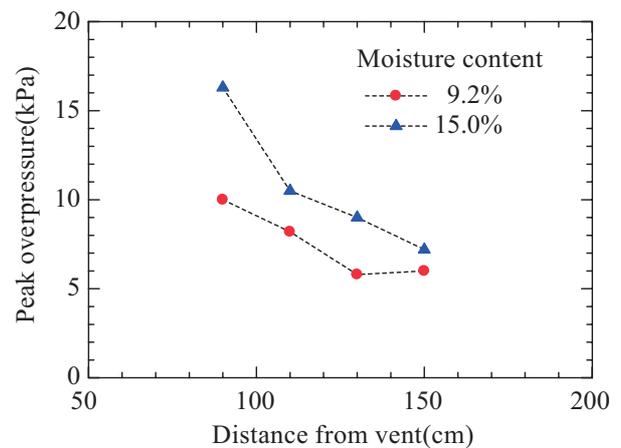


Fig. 6 Relationship between the peak overpressure and the distance from vent.

Table 2 Test conditions of this study and Watanabe's experiment.

	Mass of charge (g)	Distance from vent or charge (cm)	Scaled distance ($m \cdot kg^{1/3}$)
This study	30	90~150	2.9~4.8
Watanabe ⁶⁾	10~20	70~130	2.4~5.6

水平距離90cmの位置では、16kPaである。水平距離が150cmでは、7kPaとなる。最大爆風圧と水平距離との関係に及ぼす含水比の影響に着目すると、水平距離に関わらず含水比が9.2%の場合の最大爆風圧は、含水比が15.0%の場合の60~80%程度になる。模型地下式火薬庫内で爆発が発生すると、放爆口（合板製の角筒）の出口部の壁面が大きく破壊する。このとき、土砂の流入によって放爆口が埋没する。土砂の流入は、土粒子の表面の水分が少なく、流動性を有する地盤である含水比9.2%の場合にとくに著しい。このため、含水比が9.2%の場合には、含水比15.0%の場合と比較して土砂の流入のため放爆口からの爆風の吹き出しが抑制されて最大爆風圧が小さくなったと考えられる。本実験の場合、放爆口が破壊されかつ埋没した場合に吹き出し爆風圧が小さくなった。地下式火薬庫を建設する場合には、周辺地盤の含水比に加え放爆口の構造についても検討する必要がある。

4. 爆風に対する地下式火薬庫の安全性の検討

ここでは、本実験によって得られた最大爆風圧の値を、地上爆発によって得られた最大爆風圧の値と比較して、地下式火薬庫の爆風圧に対する安全性について検討する。検討に際しては、模型実験で得た最大爆風圧を実規模の最大爆風圧に換算する必要がある。規模の異なる爆発を比較するためのパラメータとしてHopkinson-Cranzの換算距離が広く利用されている⁵⁾。HopkinsonとCranzは、同一条件の媒質内において、大きさが異なる相似形状で同じ種類の爆薬が爆発したとき、等しい換算距離において相似な爆轟波が生成するものとして次式を提案している。

$$Z = \frac{D}{M^{1/3}} \tag{1}$$

ここに、 Z ：換算距離 ($m \cdot kg^{-1/3}$)、 M ：爆薬の質量 (kg)、 D ：爆発位置からの距離 (m) を示す。

たとえば、同じ種類、同じ形状をした質量 $M_A = 1$ (kg) と $M_B = 1000$ (kg) の爆薬A、Bが同一条件の媒質内で爆発したとき、爆薬Aについては爆発位置からの距離が $D_A = 1$ (m)、爆薬Bについては爆発位置からの距離が $D_B = 10$ (m) において両者の換算距離は等しく ($Z_A = Z_B = 1$ ($m \cdot kg^{-1/3}$)) となり、これらの位置で等しい最大爆風圧が計測されることになる。なお、最大爆風圧は換算距離の関数で表される。その一例を次式に示す。

$$\ln P = a - b \ln Z \tag{2}$$

ここに、 P ：最大爆風圧、 a 、 b ：係数、である。

式(1)および式(2)を用いると、爆源からの距離および爆薬の質量が異なる爆発実験のデータを比較することができる。

Fig. 7に、最大爆風圧と換算距離との関係を両対数軸上に示す。図中には本研究のデータと、渡辺が行った地上爆

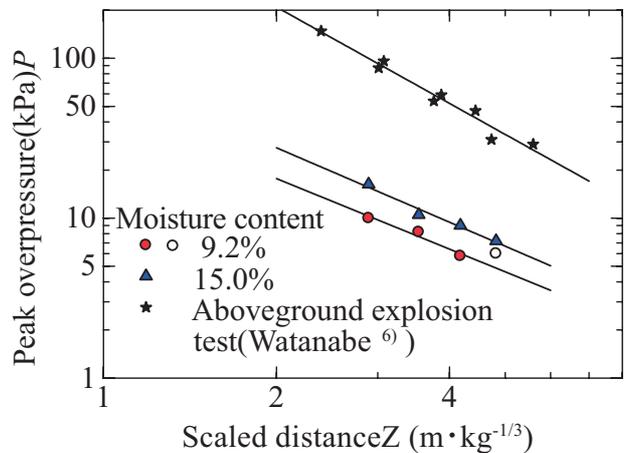


Fig. 7 Relationship between the peak overpressure and the scaled distance.

発実験⁶⁾による最大爆風圧のデータを示す。これらの実験条件についてはTable 2に示す。本研究における実験と渡辺の実験では、爆風圧センサーは同一のものを使用している。また、式(1)の D については、本研究では起算点を放爆口の中心とする水平距離とし、渡辺の実験⁶⁾については距離の起算点を爆薬の中心とした水平距離としている。

Fig. 7から、地下式火薬庫から吹き出した爆風圧は、地上爆発による爆風圧と比較して小さくなっていることがわかる。したがって、地下式火薬庫は爆風圧を大きく低減できると言える。また、各ケースとも最大爆風圧と換算距離は両対数軸上で線形関係を示し、以下の式で近似される。なお、地盤含水比9.2%の実験結果については、換算距離の増加に伴う最大爆風圧の減少傾向を示していない換算距離4.8 ($m \cdot kg^{-1/3}$) のデータ (Fig. 7中の○印) を除外して近似式を求めている。

地盤含水比9.2%： $\ln P = 3.89 - 1.46 \ln Z$ (3)

地盤含水比15.0%： $\ln P = 4.39 - 1.55 \ln Z$ (4)

渡辺の地上爆発実験： $\ln P = 6.72 - 2.00 \ln Z$ (5)

これらの式を用いることにより、実規模の爆発における最大爆風圧を推定することができる。たとえば、爆薬2tを貯蔵する地上式一級火薬庫から100m離れた位置では、式(5)によると最大爆風圧の推定値は13.1kPaとなる。一方、地下式火薬庫の放爆口位置から100m離れた位置で13.1kPaとなるのは、式(4)から、地盤含水比15.0%の場合、爆薬量30tが爆発した事実に対応する。実際の地上式一級火薬庫の爆発時における爆風圧は、火薬庫の周囲に築造された土堤のために障害の無い地上爆発の1/2程度となるとする報告もある⁷⁾。しかしながら、爆風圧の大きさだけでなく、地下式火薬庫は飛散物の発生による被害防止の観点からも非常に有効であると考えられる。

5. 結論

本報は、地下式火薬庫の設計法を確立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構造模型火薬庫内において爆薬を爆発させ、放爆口から吹き出す爆風圧について検討を行ったものである。さらに、実規模の地下式火薬庫内部で爆発が発生した場合の吹き出し爆風圧を推定し、地下式火薬庫と地上式一級火薬庫で爆風圧の比較を行った。主要な結論を以下に要約する。

(1) 含水比が9.2%の場合の最大爆風圧は、含水比が15.0%の場合の60~80%程度になる。これは、含水比が9.2%の場合、含水比15.0%の場合と比較して放爆口への土砂の流入のため爆風の吹き出しが抑制されて最大爆風圧が小さくなったと考えられる。

(2) 地下式火薬庫内での爆発により、放爆口から地表に吹き出す最大爆風圧と換算距離との関係を求め、以下の近似式を得た。

$$\text{地盤含水比}9.2\% : \ln P = 3.89 - 1.46 \ln Z \quad (3)$$

$$\text{地盤含水比}15.0\% : \ln P = 4.39 - 1.55 \ln Z \quad (4)$$

(3) 地下式火薬庫から吹き出した爆風圧は、地上爆発による爆風圧と比較して小さくなった。したがって、爆風圧を軽減する目的から、地下式火薬庫は地上式一級火薬庫よりも有効であると考えられる。ただし、爆風圧だけでなく、地下式火薬庫の内部爆発時に発生する地盤振動に対する安全性についても検討する必要がある。

謝辞

実験に使用した試験体の製作にあたっては、日本ゼネ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。

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 (2) Behavior of Blasts and Explosion Gases outside the Magazines", Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials), Vol. 51No. 1, pp. 16-21, 1990
- 4) P.D.Smith and J.G.Hetherington, "Blast and Ballistic Loading of Structures", Elsevier Science Ltd, p. 35, 1994
- 5) P.D.Smith and J.G.Hetherington, "Blast and Ballistic Loading of Structures", Elsevier Science Ltd, pp. 37-41, 1994
- 6) M. Watanabe, "C 4 bakuyaku no kuutyuu bakuhatu niyotte syoujiru bakuhuuatu no kuukantokusei oyobi kabe ni yoru aturyoku gensui kouka ni kansuru jikken kaiseki teki kenkyuu", Graduation thesis of National Defense Academy Civil and Environmental Engineering, 2006
- 7) Y. Yamamoto "Ippan Kayakugaku", Hitotsubashi Shobou, pp. 212-215, 1969

Experimental study on the effects of blast pressure resulting from the explosion in a subsurface magazine

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

When an accidental explosion in a surface 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 defined by the effects of air-blast and/or ground shock. In this study, to know the effects of air-blast pressure resulting from an accidental explosion in a subsurface magazine, explosion tests for small scaled specimens were done. In tests, the air-blast pressure propagated to the surface was measured by the blast pressure sensors. This study is to examine the effects of blast pressure on a surface ground. From test results, it is found that the blast pressure from a subsurface magazine less than that from a surface magazine.

Keywords : Subsurface magazine, Blast pressure, Scaled distance, Moisture content, Safety distance

^{*}Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy, Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, JAPAN TEL +81-46-841-3810 FAX +81-46-844-5913
e-mail ohno@nda.ac.jp

^{**}Department of Applied Chemistry, National Defense Academy
Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, JAPAN