覆土式の RC 製火薬庫内で爆発が生じた際の爆風圧特性に及ぼす覆土厚の影響

The effect of thickness of covered soil on the properties of blast wave pressure on site due to inner explosion in an earth covered RC explosives magazine

別府 万寿博*, 大野 友則**, 塩見 昌紀***, 片山 雅英**** Masuhiro Beppu, Tomonori Ohno, Masanori Shiomi and Masahide Katayama

* 博(工),防衛大学校講師,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)

** 工博,防衛大学校教授,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)

*** 博(工),日本ゼニスパイプ(株)(〒101-0032 東京都千代田区岩本町 1-10-5)

**** 博(工),伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム事業部(〒100-6080 東京都千代田区霞ヶ関 3-2-5)

This paper is to study the effect of thickness of covered soil on the properties of blast wave on site due to inner explosion in a RC arch type earth covered explosives magazine. Firstly, explosive tests for the small scaled arch type earth covered magazines were carried out to examine the characteristics of blast wave caused by inner explosion, and the effect of thickness of covered soil on the explosion pressure. Then, the three dimensional numerical simulation by AUTODYN was executed to reproduce test results and investigate the mitigation mechanism by covered soil.

Key Words: Earth covered RC magazine, blast wave pressure, covered soil thickness, Composition-4 explosives キーワード: RC 製覆土式火薬庫, 爆風圧, 覆土厚, C4 爆薬

1. はじめに

火薬庫とは、製造された火薬類(火薬,爆薬,火工品 等)を貯蔵するための施設であり,貯蔵する火薬類の種 別や量に応じて、1級・2級・3級などの種類がある¹⁾. また,1級火薬庫は,最大量で火薬80トンまたは爆薬40 トンが貯蔵でき,施設の構造形式の相違によって地上 式・地中式および覆土式の3種類がある.地上式火薬庫 は厚さ15cm 程度の RC 壁または20cm 程度のコンクリー トブロック造の比較的簡易な地上建物で、その周囲を土 堤で囲んだ構造である.この方式では、爆発が生じた際 の爆風圧や飛散物を主として火薬庫の上方へ放出するこ とで周囲の安全を確保するものである.ただし、簡易な 建物を建設するので施工性が良いという利点がある反面, 大規模な爆発が発生すると周囲への影響も大きくなる可 能性がある.地中(地下ではない)に設置する地中式火 薬庫は、地山をトンネル状に掘削して RC 構造の火薬庫 をその中に建設するものである.地中式では、爆発によ る衝撃を地山で抑え, 爆風圧をトンネル構造の出入口だ けから放出させる. したがって, 爆発が生じた際に爆風 圧が放出・伝播する方向を特定できるので、爆風圧を抑

制あるいは緩衝する対策を実施しやすいという利点があ る.しかしながら,地山を掘削する必要があるため,施 工や費用の面で問題が多い.一方,覆土式火薬庫は,火 薬庫を地上に建設した後で,その周囲を土で覆う(覆土) 構造としたものである.つまり,地上式と地中式火薬庫 それぞれの長所を取り込んだ構造となっている.したが って,施工性を確保しながら,爆発が発生した際の爆風 圧や飛散物が周囲へ与える影響を覆土により低減するこ とができると考えられる.

火薬庫の建設にあたっては、万が一の爆発事故に際し て周囲への安全を確保するために、火薬類取締法施行規 則(以下、火取法規則と呼ぶ)により保安距離という法 規定が課せられている.すなわち、保安距離は火薬庫の 外壁から保安すべき物件までの水平距離であり、貯蔵量 と保安すべき物件(第1種~4種)に対する係数(K値) で定められている(D=K×W^{1/3}:保安距離 D,爆薬量 W). ここに、保安距離は火薬庫の種類または構造形式の相違 によらず同一に規定されている.

近年,市街化の拡大のために火薬庫周辺にまで住宅家 屋が建設される状況にある.このため,火取法規則で定 められた保安距離を確保することが難しくなってきてい





平面図(単位:mm)







る.現行の火取法規則による保安距離算定の根拠は,爆 薬を自由空間中で爆発させた際の爆風圧データに基づい ている.つまり,火薬庫の構造特性(構造強度,土堤の 有無,覆土の厚さなど)が爆風圧の伝播特性に与える影 響については考慮されていない.しかしながら,地中式 や覆土式火薬庫は堅固な RC 構造物で建設されており, さらに火薬庫は地山や覆土によって覆われているため, これらが周辺に伝播する爆風圧を低減させる効果が期待 できると考えられる^{2),3)}.しかし,火薬庫における覆土 の厚さと爆風圧の関係についての既往の研究は,国内外 でも見当たらない.

既存の覆土式火薬庫は、矩形断面の箱型 RC または円 形断面等のアーチ型 RC 構造のいずれかで建設されてい る.本研究では、アーチ型 RC 製の覆土式コンクリート 火薬庫に着目し、覆土の厚さが周囲の爆風圧に与える影 響について実験および解析的な検討を行ったものである. まず、覆土厚をパラメータとする小型爆発実験を行い、 火薬庫模型周辺の爆風圧特性について調べている.次に、 覆土による爆風圧の低減メカニズムについて数値シミュ レーションによる検討を行っている.

2. 模型火薬庫を用いた内部爆発実験

2.1 実験の概要

図-1に、爆発実験の概要を示す.火薬庫模型の作製に あたっては爆発実験室の空間的な制約を考慮して、実規 模の火薬庫を約 1/20 に縮尺した寸法とし, 直径 4 m の円 筒形爆発実験室内に設置した.一般には、火薬庫の入口 側を前方,その反対側を後方と呼んでいる.そこで,本 研究でもこの呼称を用いることにする.火薬庫模型は, 図-2 に示すように,板厚 30 mm,高さ 360 mm×幅 660 mm ×長さ600 mm のコンクリート製ボックスアーチ構造で ある. コンクリートの強度は約 30N/mm² であり, 補強用 として直径 3.2 mm, 間隔 50 mm のメッシュ筋を断面の 中心に配置した.また、火薬庫模型は、製作上両側が開 放構造となっているので、前方側の中央下部には 200 mm×200 mmの開口部を設けた鋼板(厚さ20 mm)を, 後方側には開口部が無い鋼板を用いて閉塞した.実験で は覆土に山砂を用い, 覆土厚をパラメータとした. 火取 法規則では覆土の厚さは 3m 以上と定められているが, 覆土厚と周囲に生じる爆風圧の関係を検討した例はない ことから, 覆土厚 3 m を 1/20 に縮尺した 15 cm を基準と して, 9 cm, 3 cm および 0 cm (覆土なし) に設定した. 火取法規則では, 覆土は入口のある前面以外の全周に対 して行い、その斜面の角度は45度以下とすることが規定



図-3 覆土の概要



写真-1 覆土した模型火薬庫



写真-2 C4 爆薬の設置状況

されている.そこで、図-3に示すように、覆土式の模型 火薬庫両側の覆土斜面の角度も45度以下になるように 調整して成形した.火薬庫模型に覆土した状況を、写真 -1に示す.火取法規則では、爆発が発生した場合の衝撃 波を防ぐために火薬庫入口の前方5m以内に土堤を設置 すること等の措置を講ずることが義務づけられているた め、火薬庫模型の前方に土堤を設置した.土堤の高さは、 火薬庫の高さ以上と規定されているので、覆土厚9cmの ときに火薬庫模型と同じ高さになる45cmとした.

爆薬は、**写真-2** に示すように円柱状に成形した *Composition-4* 爆薬(以下, C4 爆薬と呼ぶ)を、火薬庫 模型内の中央(高さ15 cm)位置に設置し、電気雷管に よって起爆を行った.実験ケースは、各覆土厚に対して 爆薬量を10,30,50gと増加させ、火薬庫模型が破壊す るまで実験を行った.

火薬庫模型周辺の爆風圧を測定するために、ペンシル 型爆風圧センサーを設置した.爆風圧を評価する位置や

表-1 爆発圧センサーの性能・諸元

項目	性能等
分解能 (kPa)	0.069
計測範囲 (kPa)	3450
共振周波数 (kHz)	500



写真-3 爆発圧センサーの設置状況

高さについては今後も検討する必要があるが,設置の位置は実験室の制約から,図-1に示すように,火薬庫の前方では,爆発の中心から 1,600mm (F1), 1,900 mm (F2),後方では 1,000 mm (B1), 1,550 mm (B2) とした.高さについては,過去に著者らが行った研究^{4),5)}より,地表面での反射によって地面近傍の圧力が大きくなることがわかっているので,地面から 10cm の高さとした.ペンシル型爆風圧センサーの性能および設置状況を表-1および写真-3 に示す.また,火薬庫模型の破壊状況および覆土の崩壊状況を観察した.

2.2 火薬庫模型の破壊および覆土の崩壊状況

1) 爆薬量 10 gの場合: 覆土厚によらず火薬庫模型のア ーチ隅角部に小さなひび割れが生じたが, 覆土が崩壊す るまでには至らなかった.

2) 爆薬量 30gの場合: 写真-4 に示すように, 覆土が無 い場合は, 火薬庫模型が全体的に破壊した. 覆土厚 3 cm のケースでは, 覆土が崩れて周囲に飛散するとともに, 火薬庫模型の隅角部が破壊してメッシュ筋が露出した. 覆土厚 9 cm では, 火薬庫模型の隅角部における破壊およ び覆土の崩壊が低減した. 覆土厚 15 cm の場合は, 模型 直上部の覆土の形状が崩れたが, 火薬庫模型の内部はほ とんど破壊していない.

3) 爆薬量 50g の場合:覆土厚 9 cm, 15 cm の火薬庫模型 に対して実験を行った.この場合,いずれも覆土が完全 に飛散し,火薬庫模型も完全に破壊した.

以上の結果から、爆薬量 30g の場合のように、覆土厚 0cm では火薬庫は完全に破壊するが、覆土を厚く施すこ とによって、火薬庫模型の破壊が大幅に低減されること がわかる.これは、覆土によって火薬庫模型が上方およ



写真-4 爆薬量 30g の場合の破壊状況



図-4 火薬庫模型無しの場合の爆風圧~時間関係(爆薬量10g)

び側方から拘束を受けることにより、破壊が低減したものと考えられる.

2.3 火薬庫模型を設置しない場合の爆風圧の特徴

火取法規則では、自由空間中での爆発データに基づい て火薬庫の保安距離が規定されている.そこで、火薬庫 模型を設置せず、土堤のみを設置した状態で実験を行っ た.爆薬10gを爆発させたときの爆風圧~時間関係を、 図-4に示す.図から、爆風圧の到達時刻は、火薬庫模型 前方(土堤側)の位置F1、F2においてそれぞれ約0.004 s および0.0048s であり、後方のB1、B2位置ではそれぞ れ0.0018 s および0.0031s であることがわかる.後方の B1、B2の最大爆風圧は、それぞれ約50 および25 kPa で あり,爆発位置から1,550mm離れたB2の最大爆風圧は, 爆発位置から1,000 mm離れたB1での値の約1/2に減衰 している.なお,いずれの位置における爆風圧も,最大 爆風圧の後は急激に減圧して負圧を示している.火薬庫 模型前方の位置F1,F2における最大爆風圧はほぼ等し く,約10kPaである.つまり,爆風圧が土堤によって後 方に反射し,また土堤の上方および側方からの回折現象 が生じる.この結果として,後方には大きな爆風圧が到 達し,前方では小さな爆風圧になったと考えられる.

2.4 火薬庫模型および覆土厚の影響

以降の考察においては、紙面の都合より、F1、B1の爆 風圧に着目する.図-5に、火薬庫模型を設置した場合(覆



図-5 爆風圧~時間関係の比較(爆薬量10g)

表-2	最大爆風上の一覧
	(a) 前古 E1

(a) 前方 F1				単位:kPa	
爆薬量	模型なし	覆土厚 0cm	覆土厚 3cm	覆土厚 9cm	覆土厚 15cm
10g	8.0	7.0	6.0	7.5	8.0
30g	17.0	12.0	11.5	17.5	17.6
50g	25.0	—	—	20.0	21.0

(b) 後方 B1

爆薬量	模型なし	覆土厚 0cm	覆土厚 3cm	覆土厚 9cm	覆土厚 15cm
10g	54.0	12.5	7.3	4.8	4.0
30g	120.0	18.5	16.3	10.8	12.0
50g	148.0	_	—	12.5	13.8

土厚 0 cm) および覆土厚 15 cm の場合に対して, 爆薬 10 g を内部爆発させたときの爆風圧~時間関係を示す. 図 は、爆風圧が各センサーに到達した時点をデータの起点 として示している.また図中には、参考のため火薬庫を 設置していない場合の結果も併せて示している. 図-5(a) を見ると、覆土厚 0cm および覆土厚 15cm の場合の最大 爆風圧はそれぞれ約7kPa,約8kPaであり,前方の位置 では火薬庫模型無しの場合とほとんど差異が生じていな いことがわかる.一方,図-5(b)の後方位置 B1 において は, 覆土厚 0cm の場合の爆風圧は約12 kPa であり, 火薬 庫模型無しの場合に対して約 77%低減している. また, 覆土厚 15cm の場合の最大爆風圧は約4kPa であり, 覆土 厚 0cm の場合(約 12 kPa)に比べて 1/3,火薬庫模型無 しの場合より約94%低減した. すなわち, 火薬庫模型の 設置及び覆土厚の増加によって,後方の爆風圧は著しく 低減されることがわかる.表-2に、全実験ケースの最大 爆風圧を示す. なお, 覆土厚 0, 3cm の場合は, 爆薬量 30g で完全に破壊したので、爆薬量 50g の実験は行って

いない.表から、火薬庫模型を設置することにより、後 方の最大爆風圧は約77~85%低減することがわかる.

単位:kPa

図-6 に最大爆風圧と覆土厚との関係を示す。図-6(a)に 示す火薬庫前方の位置 F1 では, 覆土無し(0 cm) に比 べて3 cm の覆土を施すと最大爆風圧はやや小さくなっ た.しかし,覆土厚が3cmから9cmに増加すると,爆 風圧が増加する傾向を示している. 例えば、爆薬量 30g の場合(W30), 覆土厚 3 cm では最大爆風圧は 11 kPa で, 覆土厚9 cm では 17 kPa の値となった. ただし, 覆土厚 を9 cmから15 cmに増やしても最大爆風圧の増加は小さ い.一方,図-6(b)の火薬庫模型の後方位置 B1 での結果 は、前方の位置 F1 における結果と傾向が逆になってい る. すなわち, 覆土厚が大きくなると, 最大爆風圧は減 少する傾向がある.覆土厚が0 cm から9 cm までは,覆 土厚の増加とともに最大爆風圧は減少する.爆薬量30g の場合は, 覆土厚0 cm で 19 kPa, 覆土厚9 cm では 11 kPa (42%減少)である. ただし, 覆土厚が 15 cm の場合は, 覆土厚9cmの場合に比べて大きな差異は認められない.





以上の実験結果から、①火薬庫模型を設置することに より模型前方の最大爆風圧は多少小さくなる、②火薬庫 模型後方の最大爆風圧は、火薬庫模型が無い場合に比べ て約77~85%低減される、③火薬庫模型前方では、覆土 厚が増加すると最大爆風圧は大きくなる傾向がある、④ 模型後方では、覆土厚の増加にしたがって最大爆風圧は 減少する、ことがわかった.ただし、③と④の傾向は覆 土厚9cm以上では小さくなった.なお、F2とB2の結果 についても、F1,B1と同じような傾向を示した.

3. 覆土の影響に関する数値シミュレーション

ここでは,実験で得られた爆風圧伝播特性を3次元解 析モデルでシミュレートし,火薬庫模型の有無および覆 土厚が最大爆風圧に与える影響について検討を行う.

3.1 解析の概要

解析は、衝撃解析コード AUTODYN を用いて3次元オ イラー座標系で実施した.解析モデルは、土堤、火薬庫 の対称性を考慮し、全体の2分の1の領域をモデル化し た.本解析手法は構造格子を用いた有限差分法であるた め、実験に用いたアーチ型の模型火薬庫の形状を正確に 再現することが難しい.そこで、図-7に示すようにアー チ型の覆土式火薬庫模型と高さおよび内部空間容積が等 しくなるように直方体型(高さ:360 mm,幅:480mm, 長さ 600 mm)のモデルとした.火薬庫模型の幅が小さ くなった影響を受け、覆土をした解析モデルでは覆土の 全幅も小さくなっている.図-8 および図-9 に、それぞれ 火薬庫模型のみの場合と覆土を有する場合の2つの解析 モデルを示す.

解析のケースについては、火薬庫模型がほとんど損傷 しなかった爆薬量10gの実験を対象とした.また、実験 結果では土堤、火薬庫および覆土はほとんど変形しなか



図-7 アーチ型火薬庫の簡易モデル

ったので,その部分に対応するオイラー要素は使用せず, 変位ゼロの境界条件を与えた.空気を含む全領域は,高 さ1,000 mm,幅3,270 mm,奥行き1,000 mmとした.空 気,火薬庫模型,土堤は1辺20 mmの立方体の要素に分 割し,合計2,660,000 個の要素で構成した.解析領域の 外側境界面には,爆風が透過できるように流出境界条件 を設定した.

爆薬のモデル化にあたっては、一般に爆薬の爆発現象 を解析的に評価する場合, BKW 式, JWL 式⁶ など爆轟 状態を表現するための状態方程式が用いられる. しかし ながら,これらの爆轟圧力を再現するためにはかなり細 かい要素分割をする必要がある.また、本実験のように 爆発位置から十分に離れた位置における爆風圧について は,これらの状態方程式を適用しなくても爆発によるエ ネルギーの拡散を評価すれば良いと考えられる. ちなみ に,実験結果から火薬庫模型後方の圧力センサー位置に おける爆風の伝播速度を求めると、空気の音速とほぼ等 しい結果であった. すなわち, 火薬庫内での爆発によっ て生じた高圧・高速度の爆轟生成ガスは、火薬庫後方の 位置に達した時点では十分に低減し、音速で伝播してい ることを示している. そこで本解析では、火薬庫模型が ない場合の爆風圧~時間関係を基準とし、爆発の初期条 件を以下の要領で決定した.まず,状態方程式としては, 理想気体の状態方程式を用いる. 圧力は, 密度と内部エ ネルギーによって決定されるため、理想気体の状態方程 式において、適切な密度とエネルギーを設定すれば、こ れに対応した高圧力を再現することができる. このよう



図-10 火薬庫模型無しの解析結果(爆風圧~時間関係)

な密度と内部エネルギーを設定する領域をここでは仮想 爆薬領域と定義し、火薬庫模型の中央にある1要素(総 体積 8cm³)とした.したがって、仮想爆薬領域の密度は、 実験に用いた C4 の質量を仮想爆薬領域の体積で除して $\rho = 0.625 \text{ g/cm}^3 となる.内部エネルギーについては、$ 火薬庫模型無しの実験で得られた爆風圧~時間関係を再現できるように試行錯誤して内部エネルギーを <math>e = 9.375 kJ に決定した.

3.2 火薬庫模型が無い場合のシミュレーション

図-10 に、火薬庫模型無しの場合における、解析と実験による爆風圧~時間関係を比較して示す. 図から、前方では、解析、実験ともに最大爆風圧は9kPa、継続時間は0.0016~0.0017s である. また後方でも、解析、実験と



(a) 前方 F1

図-12 覆土厚 0cm の場合の解析結果(爆風圧~時間関係)

もに最大爆風圧は55kPa,継続時間は0.0007~0.0009sで ほぼ一致している.すなわち,爆薬の爆発エネルギーと 等価なエネルギーを初期条件として与える解析手法によ って,比較的良好に実験結果を再現できることがわかる. 火薬庫模型無しの場合の爆風圧伝播過程を,図-11 に示 す.なお,図は爆風圧に大気圧(103.1kPa)を加えた絶 対圧力で表示している.爆発後,爆風は周囲に半球状に 伝播して,土堤に到達する.その後,t=0.000925sの時 点で,土堤の上方を乗り越え始めている.なお,この時 点では側方への回折は生じていない. t = 0.001726 s になると、爆風は土堤の側方から回折し、前方への伝播が始まっている.ちなみに、この時点ではすでに後方の位置 B1には爆風が到達している.t=0.003628 s になると、爆風は土堤の裏側まで回りこんでいる.

(b) 後方 B1

3.3 数値シミュレーションによる爆風圧伝播過程

(1) 火薬庫模型の内部爆発による爆風圧の伝播過程図-12 に, 覆土が無い(厚さ 0cm)の場合の爆風圧~時間



図-14 覆土厚 15cm の場合の解析結果(爆風圧~時間関係)

関係を示す. 図から, 前方の F1 および後方の B1 のいずれも, 解析結果は実験で得られた最大爆風圧および継続時間と概 ね等しくなっていることがわかる. なお, 前方の爆風圧 F1 は 実験施設の制約から実験室内壁で反射した爆風の影響を 強く受ける. 解析では内壁をモデル化していないため実験結 果と直接比較することは難しいが、反射の影響が無い第一波 までは実験値と解析値は良好に一致している. 覆土厚 0cm の場合の爆風圧伝播過程を、図-13 に示す. 図から、爆風は 火薬庫模型の開口部から放出され、t = 0.000782s で爆風は 土堤に衝突して反射した後、火薬庫上方に堰上げるように伝





播している. t = 0.001142s では土堤の上方にも伝播し, t = 0.003265s では土堤の側方および裏側に回折している. この とき,火薬庫の上方から伝播した爆風の方が側方からよりも 早く裏側に到達していることもわかる. 最終的に t = 0.005527s になると,前方および後方ともに球面波のような状態で前後 に伝播している.

次に,覆土がある場合の一例として,図-14 に覆土厚 15 cm の場合の爆風圧~時間関係を示す.図から,前方 のF1 および後方のB1 のいずれも,実験結果と解析によ る最大爆風圧は差異があるが,第1 波の継続時間は実験 結果とほぼ一致している.また,覆土厚が大きくなると, 実験では爆風が後方のB1よりも前方の位置F1 へ先に到 達する傾向が顕著になるが,解析でもこの傾向を捉えて いることがわかる.覆土厚 15 cm の場合の爆風圧伝播過 程を,図-15 に示す.図から,爆発後 t = 0.000993s で爆 風は土堤で反射し,覆土および土堤の頂部にほぼ同時刻 に到達している.t = 0.001443~0.003554s になると,爆 風は土堤の上方からと側方から前方へ伝播している.な お,火薬庫および覆土があるケースになると,解析値と 実験結果との差異が大きくなるが,この原因は火薬庫模 型モデルを作成する際に,アーチ形状を直方体に変化さ せたため,火薬庫および覆土の幅が短くなったためと考 えられる.

(2) 最大爆風圧の比較

図-16 に、最大爆風圧と覆土厚の関係について解析値 と実験結果を比較して示す.火薬庫模型前方の位置 F1 の解析値は覆土厚とともにやや大きくなるが、実験値よ りも 30%~40%小さい値となっている.一方、模型後方 の位置 B1 では、覆土0 cm のときの最大爆風圧は、実験 値と解析値は近い値を示しているが、覆土厚が 3 cm より も大きくなるにしたがって解析値と実験値の差が大きく なる.すなわち、解析値は実験に比べ約 1.4~2.3 倍大き い.しかしながら、覆土厚による最大爆風圧の相違につ いて、定性的な傾向はシミュレートすることができたと 言える.

(3) 覆土による爆風圧低減メカニズム

図-17に、土堤で反射した直後の爆風圧の挙動を示す. 爆風は、土堤で反射した後火薬庫模型の上部に乗り上げ るように回折する.この際、覆土厚が大きくなるにした がって、火薬庫模型上部に伝播する爆風の割合が少なく



図-18 火薬庫模型裏側での反射の例(覆土厚 3cm)

なる.このため、火薬庫模型後方に伝播する爆風圧が小 さくなるとともに、後方へ到達する時間も長くなってい くものと考えられる.ちなみに、火薬庫模型側方からの 回折に対しては、覆土厚の影響はあまりみられなかった.

なお、火薬庫模型の上方を乗り越えて伝播した爆風は、 火薬庫模型の裏側~後方へ回折する. 裏側に達した爆風 は、さらに、図-18 に示すように地面において反射波を 生じ、増幅した爆風圧が後方に伝播する. 実験では、火 薬庫後方部分の覆土に代えて鋼製壁を用いた. そこで、 参考のために覆土厚 3 cm、爆薬量 10 g のモデルを用いて、 火薬庫模型の後方の覆土を 45 度の傾斜をもつ斜面にし た場合のシミュレーションを行った. 解析で得られた火 薬庫後方での反射の状況を、図-19 に示す. 図から、爆 風圧が火薬庫の後方で地面に到達したとき、後方に覆土 が無い場合よりも覆土したときの爆風圧が小さくなって いることがわかる.図-20 に、後方に覆土が無い場合と 覆土がある場合の、後方位置 B1 における爆風圧~時間 関係を比較して示す.図から、最大爆風圧や負圧が発生 する時間はほぼ同一であるが、最大爆風圧の大きさは後 方に覆土がある場合は覆土が無い場合よりも約 15%減 少していることがわかる.すなわち、傾斜のある後方の 覆土は、爆風圧の増幅を低減させる効果があると言える.



(a) 後方に覆土なし(t=4.596ms)
(b) 後方に覆土あり(t=4.596ms)
図-19 火薬庫模型の後方に傾斜を設けた場合の反射波の状況(覆土厚 3cm)



図-20 覆土斜面が爆風圧に及ぼす影響

4. 結言

本研究は, 覆土式 RC 製火薬庫模型の内部で C4 爆薬 を爆発させ,火薬庫模型の有無および覆土の厚さが周囲 の爆風圧特性に及ぼす影響について, 模型実験および数 値解析的な検討を行ったものである.本研究の成果を以 下に示す.

- (1)既存火薬庫を1/20に縮尺した模型火薬庫を用いて、 内部爆発実験を行った.その結果、火薬庫模型を設置することで、火薬庫模型後方の最大爆風圧は約77~85%低減することがわかった.また、覆土厚を増加すると、火薬庫模型前方では最大爆風圧が増加したが、模型後方では覆土の増加とともに最大爆風圧は減少した.ただし、覆土厚9cm以上ではあまり大差はなかった.
- (2)爆薬量 10g の実験結果に対して 3 次元の爆風圧伝播 シミュレーションを行った.その結果,火薬庫模型 を設置することにより,火薬庫模型の開口部から放 出された爆風は土堤で反射した後,火薬庫模型の上

方に伝播することが明らかとなった.また,覆土厚 が増加すると,火薬庫模型の上方に回折する爆風の 割合が低減するため,火薬庫模型後方での最大爆風 圧が低減することがわかった.

(3)数値シミュレーションにより、火薬庫後方に設ける 覆土およびその傾斜は、地面における爆風圧の増幅 を低減する効果があることが認められた。

謝辞:本研究を実施するにあたり,当時防衛大学校理工 学研究科前期課程学生大山浩代氏および本科学生富澤 由貴子氏の多大なる協力をいただきました.ここに記し て謝意を表します.

参考文献

- 1) 日本火薬工業会:火薬類取締法令集,平成13年5月.
- 2) 大山浩代:爆薬の内部爆発に対する覆土式火薬庫の設計に関する基礎的研究,防衛大学校理工学研究科前期 課程修士論文,平成19年3月.
- 高澤由貴子,大山浩代,大野友則,別府万寿博:アー チ型覆土式火薬庫内で爆発が生じた際の周辺の爆風 圧特性,I-034,第34回土木学会関東支部技術研究発表 会概要集,2007.3.
- 2) 渡辺萌奈,田中信行,大野友則,別府万寿博:近接爆発によって生じる爆風圧の防爆壁による低減効果に関する研究,I-049,第33回土木学会関東支部技術研究発表会概要集,2006.3.
- 5)渡辺萌奈:C4爆薬の空中爆破によって生じる爆風圧 の空間特性および壁による圧力減衰効果に関する実 験・解析的研究,防衛大学校本科卒業論文,平成18年 3月.
- 6)(社)火薬学会:エネルギー物質ハンドブック, pp.165-170, 1999.3.

(2007年9月18日受付)