

(42) 覆土式火薬庫における覆土とゴムシート敷設による爆発影響の低減効果

Effect of covered soil and rubber sheet on blast wave pressure and concrete fragment due to inner explosion of earth covered explosive magazine

市野宏嘉*, 大野友則**, 別府万寿博***, 西本安志****, 蓮江和夫*****

Hiroyoshi Ichino, Tomonori Ohno, Masuhiro Beppu, Yasushi Nishimoto and Kazuo Hasue

- * 修(工) 防衛大学校研究科, 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) 防衛大学校准教授, 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) シバタ工業株式会社, 商品企画第2グループ (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)
- *****工博 防衛大学校教授, 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)

キーワード: 覆土式火薬庫, 爆風圧, 飛散片, ゴムシート

(earth covered explosive magazine, blast wave pressure, concrete fragment, rubber sheet)

1. はじめに

国内外で火薬庫等の火薬類取扱施設における爆発事故が報告されている^{1,2)}。火薬庫等の爆発事故では, 事故の原因となった施設が被害を受けるのみならず, 施設周辺の広範囲において死傷者や家屋の損壊が発生するため社会に与える影響が大きい。このような災害を防ぐ目的で, 我が国においては火薬庫に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。保安距離とは, 火薬庫における不慮の爆発に際しての危害を考慮し, あらかじめその付近の物件に対して保有しておかなければならない距離であり, 次式で表される。

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

ここに, D : 保安距離(m), M : 貯蔵火薬類の爆薬換算質量(kg), K : 係数($m/kg^{1/3}$), である。

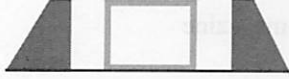


ここで, K は対象となる保安物件の種類に応じて定められている係数である。保安物件はその保護法益の大きさや危険度に応じて分類され, 表-1に示すように第一種から第四種まで段階的に定められている³⁾。近年, 火薬庫の周辺において市街化が進展し, 保安物件が火薬庫に近接して建設されたことによって, 既存の火薬庫の中には保安距離を確保するために貯蔵火薬量を減らさざるを得ず, 産業活動に支障を来している問題がある⁴⁾。

火薬庫の構造・形式については火薬類取締法・同施行規則に規定があり, 地上式1級火薬庫には火薬庫の構造によって地上式火薬庫, 地上覆土式火薬庫(以後, 覆土式火薬庫とよぶ), 地中式火薬庫の3種類がある⁴⁾。それぞれの構造上の主な規定について表-2に示す。これらの火薬庫のうち, 地上式火薬庫は最も軽易な構造であり, 爆発事故の際に周辺地域に広範囲にわたり影響を及ぼす可能性がある。一方で覆土式火薬庫は壁体を二重構造とした上で外部構造の壁厚は20 cm以上とする必要があり, 地上式火薬庫の基準と比較すると壁体は強固である。加えて, 地上覆土式火薬庫は厚さ3 m以上の土で覆わなければならない。ところが, 先に述べた現行の保安距離の規定および式(1)については, 自由空間中の爆発実験における爆風圧を根拠としており, 火薬庫の強度の違いや覆土の効果, さらには飛散物に対する危険性は考慮され

表-1 保安物件とK値

名称	保護対象物件	K値
第一種保安物件	国宝建造物, 市街地の家屋, 学校, 保育所, 病院, 劇場, 社寺及び教会	16
第二種保安物件	村落の家屋および公園	14
第三種保安物件	家屋, 鉄道, 軌道, 汽船の常航路又はけいりゅう所, 発電所, 石油タンク, ガスタンク, 変電所および工場	8
第四種保安物件	国道, 都道府県道, 高压電線, 火薬類取扱所および火気の取扱所	5

表-2 一級火薬庫における構造上の規定

火薬庫の種類とその模式図	構造上の主な規定（火薬類取締法施行規則第二十四条）																
<p>地上式一級火薬庫</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・平屋建の鉄筋コンクリート造、煉瓦造、コンクリート造又は石造とする。 ・火薬庫の壁は、鉄筋コンクリート造の部分にあっては15cm以上、その他の部分にあっては20cm以上とする。 ・火薬庫の周囲を土堤で囲む。 																
<p>地上覆土式一級火薬庫</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・二重の堅固な構造とし、外部構造は厚さ20cm以上の鉄筋コンクリート造とする。 ・火薬庫の覆土は、45度より急でない勾配とし、外部構造の覆土の厚さは、3m以上とする。 																
<p>地中式一級火薬庫</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋コンクリート造等堅固な構造とする。 ・火薬庫の地盤の厚さは、次の表の基準によること。 <table border="1" data-bbox="619 862 1309 929"> <thead> <tr> <th>貯蔵する爆薬(10³kg)</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>5</th> <th>10</th> <th>15</th> <th>20</th> <th>40</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>地盤の厚さ(m)</th> <td>3.5</td> <td>6.0</td> <td>11.0</td> <td>15.5</td> <td>19.0</td> <td>21.5</td> <td>29.0</td> </tr> </tbody> </table>	貯蔵する爆薬(10 ³ kg)	1	2	5	10	15	20	40	地盤の厚さ(m)	3.5	6.0	11.0	15.5	19.0	21.5	29.0
貯蔵する爆薬(10 ³ kg)	1	2	5	10	15	20	40										
地盤の厚さ(m)	3.5	6.0	11.0	15.5	19.0	21.5	29.0										

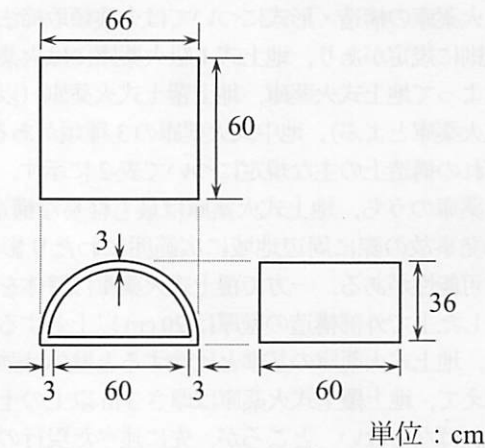


図-1 コンクリート試験体の寸法

ていない。したがって、爆風圧や飛散物に対する火薬庫の構造や覆土の効果を把握すれば、火薬庫を適切に補強することによって爆発事故における被害を軽減できるとともに、火薬庫の形式および構造に応じた保安距離を設定できる可能性がある。

覆土式火薬庫の内部爆発に対する覆土の効果については、大山⁹⁾がボックス型構造体の覆土式火薬庫模型(縮尺1/20、覆土厚さ0 cm～15 cm)の内部で爆薬を爆発させる実験を行って検討している。その結果、覆土の増加とともに構造体の破壊が抑制されること、覆土厚の増加は火薬庫の後方庫外における最大爆風圧の大きさにはあまり影響しないことを明らかにした。また、別府ら⁶⁾は、アーチ型覆土式火薬庫の内部爆発時における爆風圧の伝播について実験及び数値解析により検討している。以上より、覆土式火薬庫の内部爆発によって生じる爆風

圧については研究が進められてきているが、飛散物の発生を防止する方法についてはなお検討の余地がある。

本研究は、アーチ型覆土式火薬庫の模型(縮尺1/20)を用いた爆発実験を行い、覆土式火薬庫の内部爆発時における飛散物と爆風圧に及ぼす覆土の影響およびゴムシート敷設の効果を調べることを目的としている。

2. 模型覆土式火薬庫の内部爆発実験

2.1 実験の概要

実験は、防衛大学の火薬類実験施設内の爆発ピット(以後、爆発ピットと呼ぶ)内で実施した。この爆発ピットは厚さ60 cmの鉄筋コンクリート壁で囲まれており、TNT爆薬約1 kgまでの爆発実験が可能である。

実験に使用した模型覆土式火薬庫の庫体(以下、試験体とよぶ)を図-1および写真-1に示す。火薬庫はコンクリート製(コンクリートの一軸圧縮強度約30 N/mm²)で、鉄筋の代用として直径3.2 mmの鋼線メッシュが5 cm間隔で配置されている。形状は内径60 cmのアーチ型で、奥行きが60 cm、内部空間の高さが30 cm、壁厚は3 cmである。実験の概要を、写真-2および図-2に示す。写真-2に示すように試験体を爆発ピットに設置し、覆土を施して模型覆土式火薬庫を完成した。一部の試験ケースでは、覆土内にゴムシートを敷設した。火薬庫の完成後、コンポジションC-4爆薬80 gを図-2に示す位置で爆発させ、模型火薬庫の損傷と破片の飛散状況を調べるとともに、庫外爆風圧の計測を行った。本実験で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

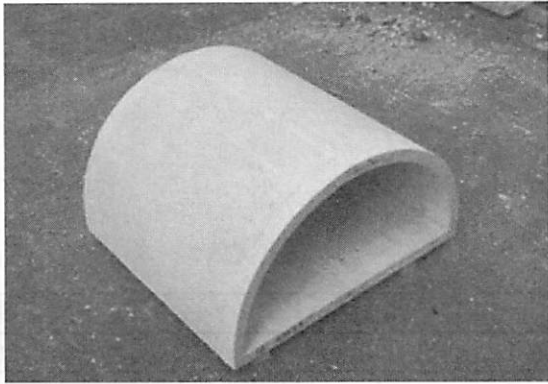


写真1 コンクリート試験体



写真2 模型覆土式火薬庫(覆土厚さ30cmの例)

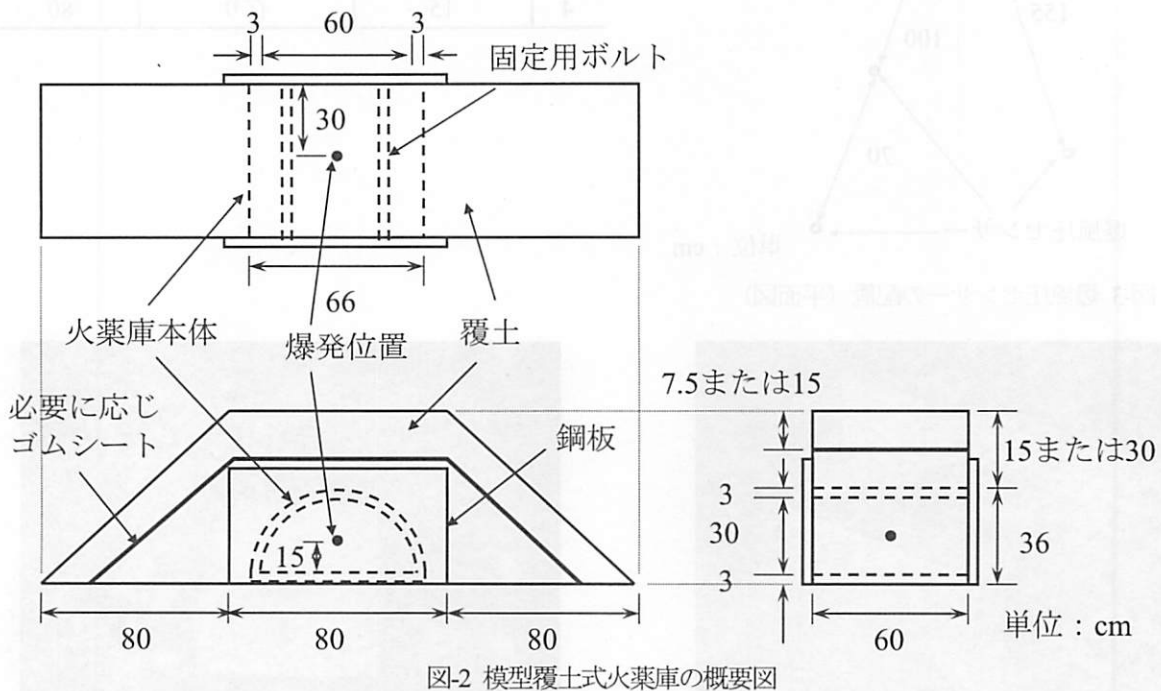


図2 模型覆土式火薬庫の概要図

137A22 (荷重容量約 3450kPa, 共振周波数約 500kHz) である。センサーは図-3 に示すように、火薬庫の後方 (出入り口の反対側) で、爆発位置から水平距離 100 cm, 155 cm および 170 cm の 3 箇所を設置した。センサーの受圧面の高さは、地上から 10cm となるように調整した。

2.2 実験ケース

覆土式火薬庫の内部で爆発が発生した場合、爆風に加えて破片の飛散による被害が生じることが考えられる。飛散物による被害を小さくするには、覆土厚さを増加させて覆土の上載荷重による拘束を増し、構造物の破壊を抑制することが有効であると考えられる。一方、覆土厚さを増加させてゆくと、①火薬庫を建設するために必要な地積が増加する、②庫体に作用する覆土の荷重が大きくなる、といった問題点がある。そこで、飛散物による被害を軽減するために、覆土厚さを増す以外の方法として、覆土にゴムシート (厚さ 1mm) を敷設して破片の飛散を防止することを考える。以上より、表-3 に示す 4 ケ

ースで実験を行い、覆土厚さとゴムシート敷設による破片の飛散防止と爆風圧の低減効果について検討を行う。すなわち、覆土厚さが 0 cm, 15 cm および 30 cm の場合について実験を行うとともに、覆土厚さ 15 cm の場合については覆土にゴムシートを敷設した場合についても実験を行い、破片の飛散と爆風圧について比較を行う。

3. 実験結果

3.1 破片の飛散に及ぼす覆土とゴムシートの効果

爆発後の模型覆土式火薬庫を、写真-3~6 に示す。写真-3 は覆土 0 cm の爆発後の状況を、写真-4 は覆土厚さ 15 cm, 写真-5 は覆土厚さ 30 cm についてそれぞれ示している。写真-3 より、覆土がない場合については試験体が破壊され、多数の細片となっている。コンクリートの破片は実験室内全域に飛散した。写真-4,5 によると、覆土厚さが 15 cm, 30 cm の場合いずれにおいても火薬庫上部の覆土は飛散され、試験体が露出している。アーチ

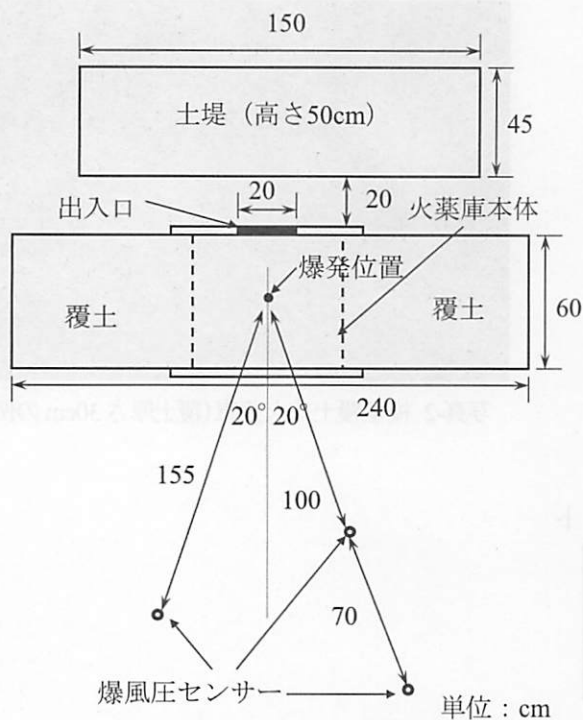
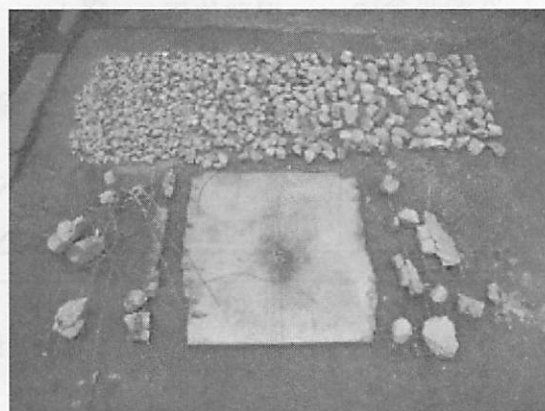


図-3 爆風圧センサーの配置 (平面図)



(a) 爆発直後の模型覆土式火薬庫



(b) 試験体の損傷状況

写真-3 爆発後の模型覆土式火薬庫 (覆土厚さ0cm, ゴムシート無し)

型試験体は上部が破壊され破片が生じている。ただし、覆土の効果により写真-3(a)と比較すると破片の飛散は低減されている。覆土厚さが15 cmから30 cmに変化すると試験体頂部の損傷が低減し、ひび割れが少なくなり、鋼線メッシュの切断箇所も少なくなっているが覆土厚さ15 cm, 30 cmともに破片は生じている。以上より、覆土だけでは破片の飛散を完全に防ぐことができない可能性があることがわかる。本実験は、1/20スケールの模型覆土式火薬庫を用いているが、相似則に厳密にしたがえばコンクリート、覆土等は密度が実物の20倍の材料を使用するべきところを、実物と同じ密度の材料で代用している。このことから、覆土の上乗荷重による試験体の破壊抑制効果が十分に発揮されなかった可能性がある。この点については、より大規模な模型実験を行って結果を比較するなど、別途検討が必要である。

写真-6に覆土厚さが15 cmでゴムシートがある場合について爆発後の状況を示す。写真-6によると、ゴムシートより上面に位置した覆土は飛散し、試験体は破壊され破片が生じているものの、破片はゴムシートに妨げられ庫外に飛散していない。また、ゴムシートには裂傷や穴などの損傷は認められなかった。したがって、ゴムシートを敷設することは、覆土式火薬庫の内部爆発時に発生する破片の飛散防止に有効であることがわかる。

3.2 庫外爆風圧に及ぼす覆土とゴムシートの効果

ここでは、庫外で計測された爆風圧の最大値が、覆土厚さやゴムシートの敷設によってどのように変化するかについて検討する。

図4に、最大爆風圧と爆薬からの水平距離との関係を覆土厚さ別に示す。爆薬からの距離が100 cmにおいて

表-3 実験ケース

番号	覆土厚さ(cm)	ゴムシート敷設	爆薬質量(g)
1	0	無し	80
2	15	無し	80
3	30	無し	80
4	15	有り	80

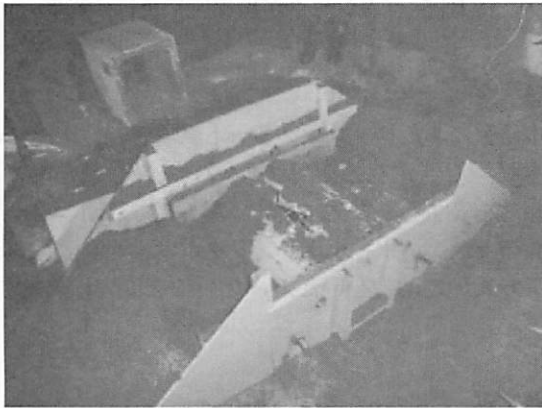


(a) 爆発直後の模型覆土式火薬庫



(b) 試験体の損傷状況

写真4 爆発後の模型覆土式火薬庫 (覆土厚さ 15cm, ゴムシート無し)



(a) 爆発直後の模型覆土式火薬庫



(b) 試験体の損傷状況

写真5 爆発後の模型覆土式火薬庫 (覆土厚さ 30cm, ゴムシート無し)



(a) 爆発直後の模型覆土式火薬庫



(b) 試験体の損傷状況

写真6 爆発後の模型覆土式火薬庫 (覆土厚さ 15cm, ゴムシート有り)

計測された最大爆風圧は、覆土厚さ 15 cm の場合は、24kPa、30 cm の場合は 23 kPa であり、覆土 0 cm の場合と比較して 15 kPa 程度小さくなっている。このように、覆土がある場合は覆土がない場合と比べて最大爆風圧は小さくなる傾向がある。覆土がない場合、爆発によって庫体が破壊され、爆風は直接外部に放出されるが、覆土があると爆風は覆土に妨げられ、爆風の放出は拘束される。そのため、覆土の存在下で爆風圧が小さくなった

と考えられる。したがって、覆土式火薬庫は、覆土のない地上式火薬庫と比較して爆風圧に対して安全であると考えられる。

図-5 に、ゴムシートを敷設した場合の最大爆風圧と爆薬からの水平距離との関係を示す。図-5 より、ゴムシートの有無による最大爆風圧の差はほとんどない。本実験の結果からはゴムシートの有無は庫外の最大爆風圧に影響しないことがわかった。

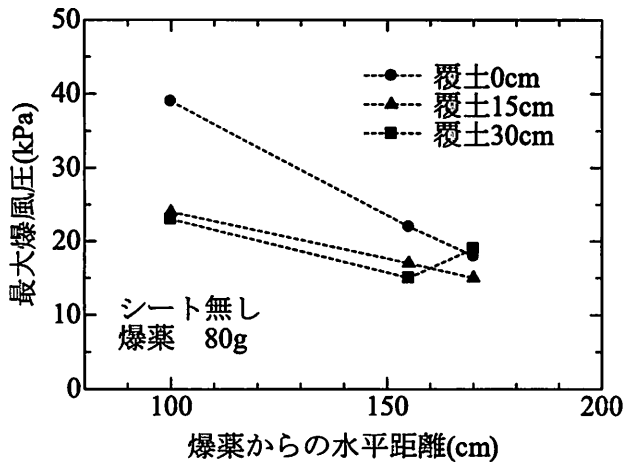


図4 覆土厚さが爆風圧に及ぼす影響

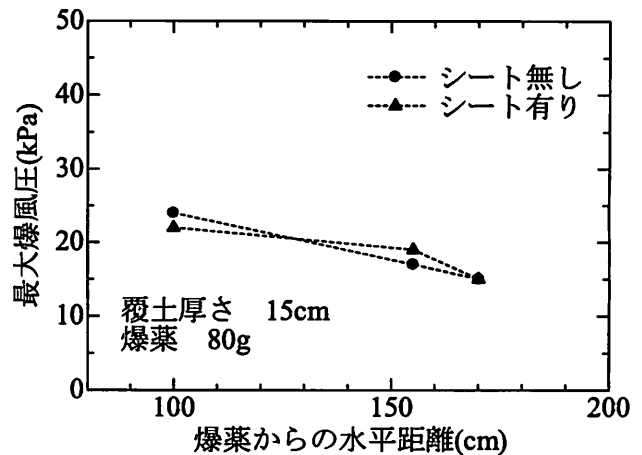


図5 ゴムシートが爆風圧に及ぼす影響

4. おわりに

本報では、覆土式火薬庫の模型を用いた爆発実験を行い、覆土式火薬庫の内部爆発時における飛散物と爆風圧に及ぼす覆土の影響およびゴムシート敷設の効果を調べた。その主要な知見は以下に要約される。

覆土の存在によって、試験体の破壊は抑制され、破片の飛散を低減することができた。ただし、覆土厚さが15 cm から 30 cm に増加しても、覆土の効果はほとんど変化しなかった。そこで、覆土にゴムシートを敷設したところ、破片の飛散を防止することができた。したがって、爆発事故時における破片の飛散を防止するには、覆土にゴムシートを敷設することが有効であると考えられる。

最大爆風圧は、覆土厚さ15 cm、30 cm のときには、覆土がない場合よりも小さくなった。また、ゴムシートの有無による最大爆風圧の差はほとんど認められなかった。

以上より、覆土は爆風圧と飛散物の低減に有効であり、さらにゴムシートを敷設することによって飛散物の発生を抑制できることがわかった。したがって、従来のゴムシートのない覆土式火薬庫であっても、覆土のない地上式火薬庫と比較して爆風圧、飛散物の観点からは安全であるといえ、ゴムシートを敷設することにより、飛散物に対する安全性をさらに向上できると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、コンクリート試験体の製作について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。また、実験に際しては防衛大学校学生齋藤奈々氏、清水和規氏、ゾリグトサイハン・タシジャムツウ氏のご助力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 上原陽一, 小川輝繁 編:新版 防火・防爆対策技術ハンドブック, 株式会社テクノシステム, pp.37-43, 2004.
- 2) 同上 1), pp.81-96.
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁監修 日本火薬工業会資料編集部編:火薬類取締法令の解説, 日本火薬工業会, pp.182-184, 2004.
- 4) 同上 3), pp.262-299.
- 5) 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卒業論文, 2007.3.
- 6) 別府万寿博, 大野友則, 塩見昌紀, 片山雅英: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, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.1022-1033, 2008.3.