

国内道路トンネル初となる 現場製造バルクエマルション爆薬による発破を実現

異 義知・村田 健司・三上 英明

山岳トンネル施工における発破作業の安全性や効率性の向上が図れるものとして現場製造バルクエマルション爆薬がある。当該爆薬は専用の製造・装填機械にて爆発の危険性がない基材と発泡剤を現場で混合して製造するマヨネーズ状の爆薬である。海外では20年以上前から導入、改良が進められているが、日本では、爆薬を現場製造する場合、火薬類取締法上、爆薬の製造工場と同様に製造許可が必要となることが現場適用へのハードルとなっていた。筆者らは、製造許可を日本の道路トンネル現場では初めて取得し、当該爆薬による発破を実施した。本稿では、製造許可を受けるにあたり検討した内容や、起爆方法について検討した内容を報告する。

キーワード：山岳トンネル、発破、装填、バルクエマルション爆薬、爆轟圧力、火薬類取締法

1. はじめに

山岳トンネル施工の発破作業における爆薬の装填作業は、工場で製造された紙巻包装円筒状の含水爆薬を切羽まで運搬し、あらかじめ切羽に穿孔した穴に作業員が手作業で行うのが一般的である。この作業は、切羽の近傍での作業となり、掘削面の岩塊がはがれ落ちてきて被災する危険性が伴う。また、手作業による装填では効率化するには限度がある。そのため、機械による爆薬の装填が試みられてきた。例えば、紙巻包装や粒状の含水爆薬を、ホースを用いてエアーで送り出して装填するシステムが開発されている¹⁾。また、工場で製造されたエマルション爆薬を専用の機械で装填

するシステムの適用が検討されている²⁾。しかし、これらは起爆の可能性がある爆薬を送り出すシステムであり、安全性や余剰爆薬の現場での処理方法等の課題が多く、普及までには至っていない。そこで筆者らは、海外で適用事例が増えている現場製造バルクエマルション爆薬に着目した。当該爆薬は、専用の製造・装薬機械にて非爆薬の原材料を現場で混合して製造するマヨネーズ状の爆薬である(図-1)。混合するまでは非爆薬として取り扱い、ホースと長いノズルを用いて切羽から従来よりも離れた位置で爆薬量を10g単位で調整して、装薬孔内に密に装填できる。そのため装薬作業の安全性、効率性の向上が図れる。海外では20年以上前から導入、改良が進められているが^{3), 4)}、

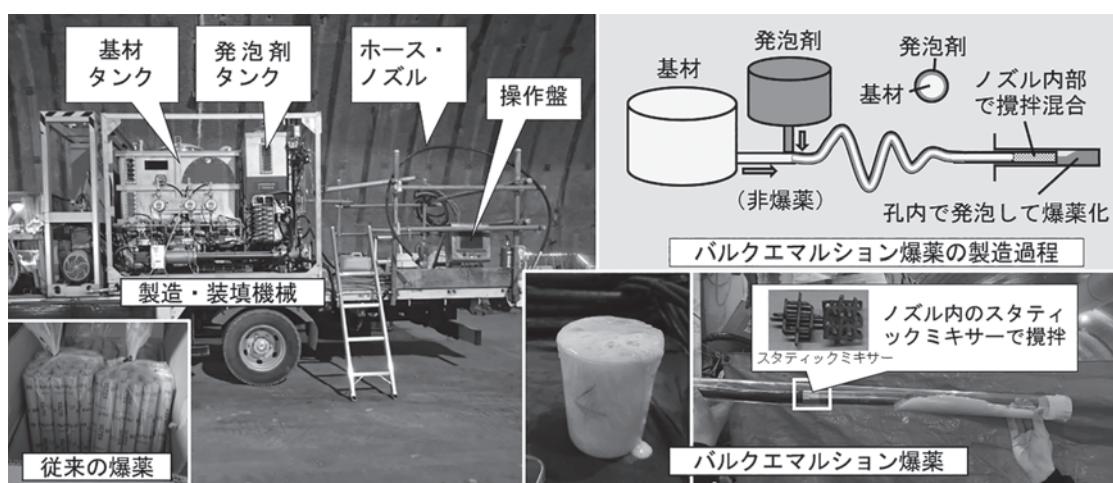


図-1 バルクエマルション爆薬の概要

日本では、爆薬を現場製造する場合、火薬類取締法上、爆薬の製造工場と同様に火薬類製造許可が必要となることが現場適用へのハードルとなっていた。

今般、筆者らは、新名神高速道路宇治田原トンネル東工事（発注者：西日本高速道路株）において、火薬類取締法に定められる技術上の基準を満たし、日本の道路トンネル現場では初めて火薬類製造許可を取得して現場製造バルクエマルション爆薬による発破を実施



写真-1 爆薬装填状況

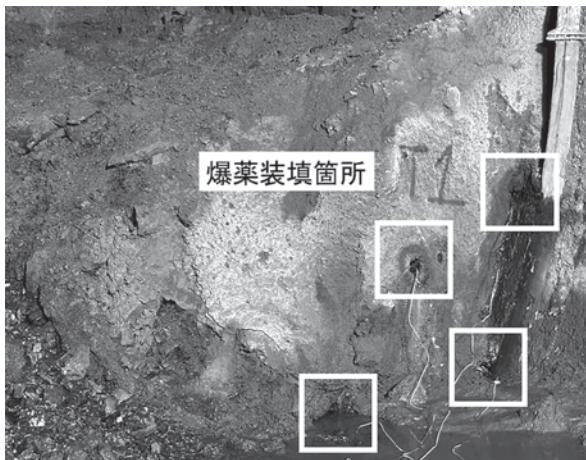


写真-2 爆薬装填完了



写真-3 発破完了

した（写真-1～3）。本稿では、製造許可を受けるにあたり検討した内容や、起爆方法について検討した内容を報告する。

2. 現場製造バルクエマルション爆薬の概要

(1) 製造・装填方法

現場製造バルクエマルション爆薬の装填作業では、専用の移動式の製造・装填機械で非爆薬の基材（ベースエマルション）と発泡剤をホースで送り、ホース先端に取り付けたノズル内部にて、スタティックミキサーで攪拌して爆薬を製造し、ホース先端から吐出して装填する（図-1）。

(2) 特長

当該爆薬の特長は以下の通りである。

- ①ホースと長いノズルを使用することにより、切羽から離れた場所から安全に装填することができる。
- ②攪拌するまでは非爆薬であり、爆発の危険性がないため、自動化機械での取り扱いに向いている。
- ③爆薬量の調整はタッチパネル操作にて10 g単位で行えるため、爆発の威力を微調整できる。
- ④従来の紙巻包装の含水爆薬よりも孔内に密に装填することができ、爆発の威力を効率的に岩盤に伝えられるため、爆薬量を減らすことが可能になる。
- ⑤耐水性に優れ、水がある装薬孔にも使用できる。
- ⑥後ガスが良い。

3. バルクエマルション爆薬の配合

当該爆薬の配合は、爆薬の製造元において海外で実績のある以下のものとした。

- ①ベースエマルション：W/O型（油中水滴型）のエマルションで、水相は酸化剤となる硝酸アンモニウム水溶液、油相は燃料となる発火点の高い燃料油（軽油相当）で構成される。爆薬成分の90～95%を占める。なお、硝酸アンモニウムは窒素系肥料としても用いられる物質である。燃料油は直鎖構造の飽和炭化水素で自然分解性が高い。
- ②発泡剤1：40%酢酸水溶液であり、触媒として発泡を促進する。爆薬成分の1～3%を占める。
- ③発泡剤2：亜硝酸ナトリウム水溶液を主材として、ベースエマルションとの相溶性がよくなるよう、少量の燃料油をカチオン系と非イオン系の界面活性剤で乳化させた粘性の低いW/O型のエマルションである。発泡剤1との化学反応により、微細な窒素ガ

ス気泡を生成する。爆薬成分の1～3%を占める。なお、亜硝酸ナトリウムは食品添加物にも使用される物質である。

④水：潤滑剤として、ホース内面にリング状に流し、装薬中のホース内の圧力の上昇を防ぐ。

4. 法律上の手続き

当該爆薬を現場で製造するにあたり、法律上の手続きとしては以下のものがあった。

今回用いた原材料のベースエマルションは、消防法で定められる危険物第1類第3種酸化性固体に該当した。そのため、取扱いには危険物取扱者甲種、または乙種1類の有資格者が必要であり、指定数量(1,000 kg)以上を現場保管するためには、危険物取扱者甲種、または乙種1類の有資格者で6カ月以上の危険物取扱いの実務経験を有する者の中から危険物保安監督者を定めて保安の監督をさせ、消防署に届け出る必要があった。また、専用の危険物屋内貯蔵所の設置が必要とされ、消防署本部に設置申請をした上で、設置後に完成検査を受ける必要があった。危険物屋内貯蔵所の1例として、今回採用した例を写真—4に挙げる。その構造は、万一の火災と火災時のガス発生に備え、不燃材料造として骨組みと扉は鉄造、壁と天井は耐火布張りとし、天井には継ぎ目を設けてガスを逃がせて飛散物などが出ない構造とした。

また、移動式の製造・装填機械で原材料を混ぜ合わせて爆薬を製造する行為は火薬類取締法上の製造行為にあたり、火薬類製造許可申請書を、所在地を所管する産業保安監督部長に提出して許可を受ける必要があった。その際、製造設備や製造方法等が火薬類取締法に定められる技術上の基準に適合していることが求められた。製造許可を受けた後、製造設備については



写真-4 危険物屋内貯蔵所の例

完成検査を受ける必要があった。また、火薬類危害予防規程を定めて提出し、認可を受ける必要があった。さらに、火薬類の製造所として、火薬類製造保安責任者の免状を有する者が必要であり、その中から火薬類製造保安責任者を選任し、届け出る必要があった。

5. 起爆方法

バルクエマルション爆薬は雷管起爆性のない鈍感な爆薬であり、日本で市販されている6号電気雷管ではANFO爆薬と同様に起爆できない。

海外では8号電気雷管等を、非常に爆轟圧力が高く起爆能力の高いペントライト（ペンスリットとTNT爆薬の混合爆薬）と組み合わせて用い、起爆するのが主流である。しかし、日本では、8号電気雷管は地震探鉱用等の特殊用途でのみ製造されており、ペントライトは実験用程度にしか製造されていない。そのため、これらを起爆用爆薬として使用するには輸入品に頼ることとなる。また、ペントライトは含水爆薬に比べて衝撃感度、摩擦感度が高く、脆くて薄い黄色の固体であり、取り扱い中に欠片を生じる場合がある。加えて、化学的に安定な爆薬であり、万一不爆が生じて残された場合には分解されず、その後何十年も地中に残ることが想定される。

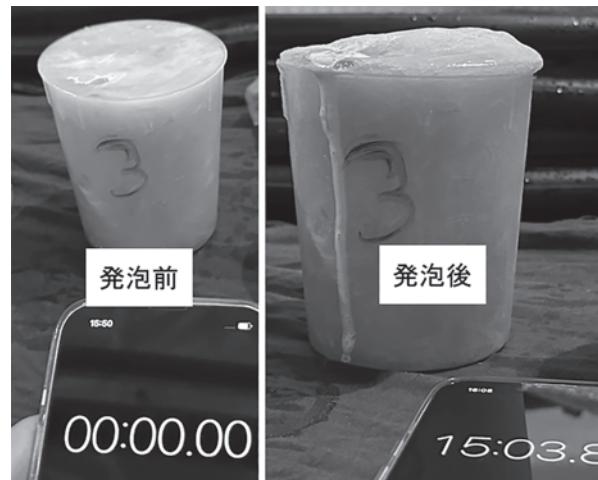
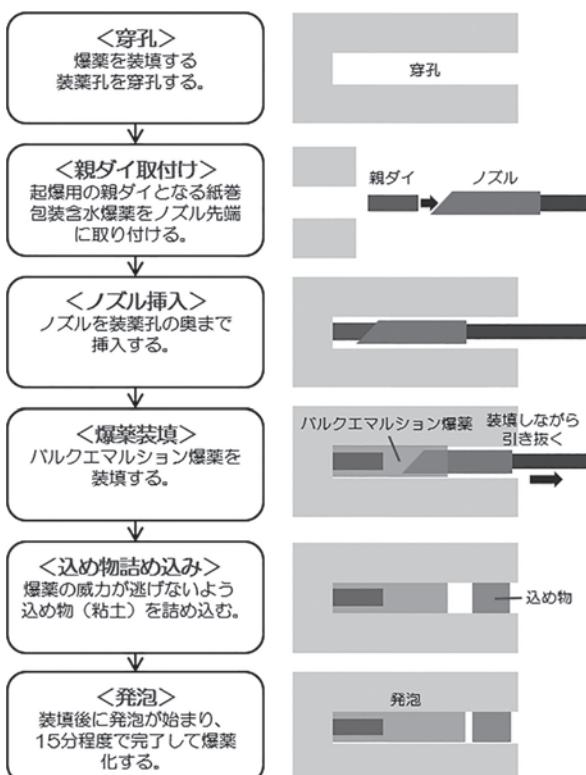
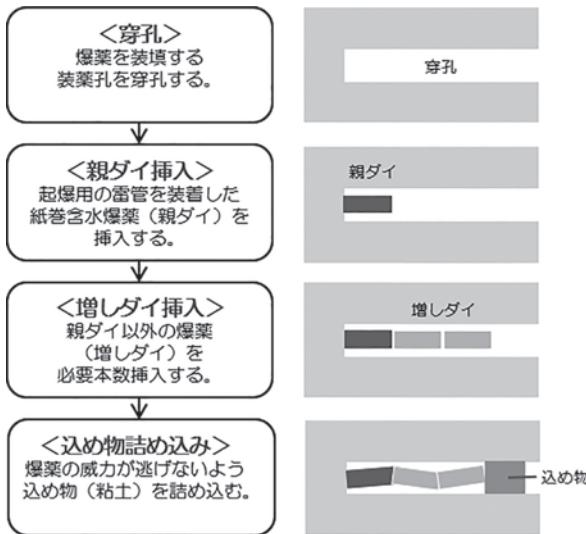
以上より、筆者らは、日本で従来使用されている市販の紙巻包装含水爆薬をバルクエマルション爆薬の起爆用の親ダイに用いることを検討し、8章で後述するシミュレーションの結果、起爆可能であると考えられたため、これを用いることとした。

6. 装填手順

従来の紙巻包装含水爆薬とバルクエマルション爆薬の装填手順をそれぞれ図-2, 3に示す。バルクエマルション爆薬の装填手順は、親ダイをバルクエマルション爆薬の装填ノズルの先端に取り付けて（写真-5）装薬孔の奥側に挿入し、バルクエマルション爆薬を装填した後、従来と同様に、爆薬の威力が逃げないよう込め物を詰め込む手順とした。装填後に発泡が始まり、15分程度で完了して爆薬化し（写真-6）、発破が可能となる。

7. 廃薬処理方法

発破作業時に生じた廃薬は適正に処理する必要がある。廃薬には、ノズル内の爆薬の残薬の他、ホース内



に残る原材料、装置使用開始時の配合が不均質で使用に適さない爆薬等がある。これらは発生後、直ちに分解して安全化することとした。

分解方法は、廃薬に1～5倍量の水と、分解を加速するため、市販のアニオン系界面活性剤（主成分はドデシルスルホン酸ナトリウム、ステアリン酸ナトリウム）などを数%加えて攪拌することとした。これにより、浸透圧の差によって、エマルション内の水相に水が取り込まれるとともに、水に硝酸アンモニウムが溶け出し、同時に気泡が抜けて爆発性がなくなる（写真-7）。これを親油性シートでろ過して水分と油分を分離し、水分は濁水処理プラントで処理、油分は親油性シートとともに産廃処分することとした。

8. 爆轟特性シミュレーション

筆者らは、KHT 計算コード⁵⁾を用いてバルクエマルション爆薬の爆轟特性をシミュレーションした。KHT 計算コードは、爆薬の爆轟状態、爆轟反応速度、爆轟圧力、爆発生成ガス（後ガス）、衝撃波、爆風などをシミュレーション計算できる計算コードである。シミュレーションの結果より、爆薬密度と、爆轟反応速度および爆轟圧力との関係から、日本で従来使用されている市販の紙巻含水爆薬がバルクエマルショ

ン爆薬の起爆用の親ダイに使用可能かを検討するとともに、バルクエマルション爆薬の利用方法の観点から考察した。

(1) 紙巻包装含水爆薬による起爆の可能性の検討

KHT 計算コードを用い、バルクエマルション爆薬の実使用時の密度 (0.9 ~ 1.3 g/cm³ 程度) から爆轟反応速度 D_v と爆轟圧力 D_p をシミュレーション計算した (表-1, 図-4)。さらに密度を実使用時の下限から下げてシミュレーション計算していくと、このシミュレーション計算はできなくなり、その直前の密度は 0.4 g/cm³、爆轟圧力は 3 GPa であった。通常、このシミュレーション計算での爆轟圧力の下限値以上の圧力をかけると爆轟は伝播する。このことから、起爆時には 3 GPa 以上の爆轟圧力があると爆轟の伝播は可能と推定された。

一方、市販の含水爆薬の爆轟圧力 D_p は、初期密度 ρ (1.00 ~ 1.30 g/cm³) と爆轟反応速度 D_v (4,000 ~ 6,000 m/s)⁶⁾ から式 (1) で計算でき、最小値で 4 GPa、通常は 7 ~ 10 GPa と推定される。そのため、市販の紙巻包装含水爆薬でバルクエマルション爆薬を起爆できると判断した。

$$D_p = 1/4 \cdot \rho \cdot D_v^2 \quad (1)$$

(2) 利用方法の観点からの考察

表-1, 図-4 で示されるように、バルクエマルショ

表-1 KHT 計算コードによるシミュレーション計算

密度 ρ (g/cm ³)	爆轟反応速度 D _v (m/s)	爆轟圧力 D _p (GPa)
0.9	4,960	5.8
1.0	5,340	7.3
1.1	5,690	8.9
1.2	6,050	10.8
1.3	6,410	12.8

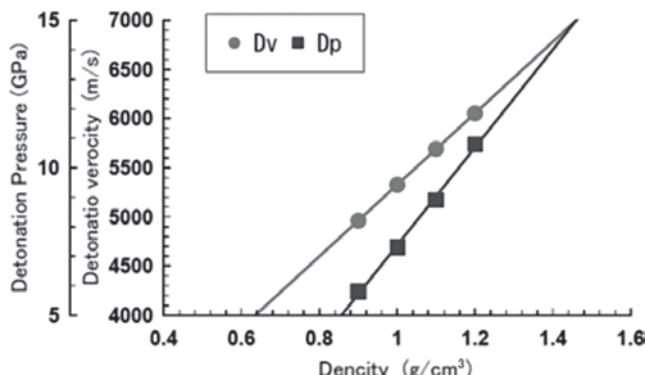


図-4 爆薬密度と爆轟反応速度 D_v、爆轟圧力 D_p の関係

ン爆薬の実使用時の密度 (0.9 ~ 1.3 g/cm³) の範囲において、爆轟反応速度は 4,960 ~ 6,410 m/s、爆轟圧力は 5.8 ~ 12.8 GPa と算出され、密度により爆速と爆轟圧力は大きく変わる。現場製造バルクエマルション爆薬は、密度が固定される市販の含水爆薬と異なり、気泡の導入量を調整することで密度を調整して製造することが可能である。これらより、高威力が望まれる芯抜、払い部、踏前、隅踏前には、爆薬の密度が高くなるよう調整し、高爆速、高爆轟圧力になるようにして効果的に岩盤を破壊したり、最外周孔には密度が低くなるよう調整し、低爆速、低爆轟圧力になるようにして余掘りを抑制したりすることが可能であると考えられる。

9. おわりに

筆者らは、現場製造バルクエマルション爆薬を日本の道路トンネル工事で初適用した。適用時に検討した内容については以下のものがあった。

- ・配合は、爆薬の製造元において海外で実績のあるものとして、ベースエマルションに硝酸アンモニウム水溶液と燃料油を用いた W/O 型（油中水滴型）のエマルション、発泡剤に 40% 酢酸水溶液と、亜硝酸ナトリウム水溶液を主材としたエマルションを用いることとした。
- ・法律上の手続きとして、ベースエマルションが消防法で定められる危険物第 1 類第 3 種酸化性固体に該当したため、消防法上の申請手続きが必要であった。また、バルクエマルション爆薬を移動式の製造・装填機械で原材料を混ぜ合わせて製造する行為は火薬類取締法上の製造行為にあたり、火薬類取締法上の申請手続きが必要であった。
- ・起爆方法については、海外では 8 号電気雷管とペンライトの組合せが主に用いられているが、日本ではほぼ製造されていないこと等から、日本で従来使用されている市販の紙巻包装含水爆薬を起爆用の親ダイに用いることとした。
- ・装填手順は、親ダイをバルクエマルション爆薬の装填ノズルの先端に取り付けて装薬孔の奥側に挿入し、バルクエマルション爆薬を装填した後、従来と同様に、爆薬の威力が逃げないよう込め物を詰め込む手順とした。
- ・廃薬処理方法については、水と界面活性剤を用いて分解処理することとした。
- ・バルクエマルション爆薬の爆轟特性について、KHT 計算コードを用いてシミュレーションし、起

爆に必要な爆轟圧力を推定して、それ以上の爆轟圧力が期待できる市販の紙巻包装含水爆薬は、起爆用の親ダイに用いることができると判断した。また、爆薬密度により爆速と爆轟圧力は大きく変わるシミュレーション結果を受け、現場製造バルクエマルション爆薬は爆薬密度の調整ができる特徴を利用して、場所ごとに威力を調整した発破を行うことが可能であると考えられた。

現場製造バルクエマルション爆薬は、ホース先端のノズルで混合するまでは非爆薬として取り扱え、装薬量や爆薬密度の調整で威力を容易に調整でき、効率よく発破が行える。今後、装薬の遠隔化・自動化機械への展開や装薬量設計システムとの連携も期待でき、切羽での装薬作業における安全性、効率性の向上に大きく寄与するものと考える。本検討内容が、他の現場での適用時に参考になると幸いである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 中村聰磯, 田口琢也, 松岡秀之: 爆薬の機械装填システム, 建設の施工企画 2010 年 9 月号 No.727, pp.26-30, 2010.9.
- 2) 河野興, 委沢俊雄, 中川浩二: 日本のバルクエマルション爆薬の特性とそれを用いたトンネル発破システム, 土木学会論文集 No.700, VI-54, pp.95-109, 2002.3.
- 3) Bartłomiej Kramarczyk, Krystyna Suda, Patrycja Kowalik, Kuba Świątek, Katarzyna Jaszcza, Tomasz Jarosz : Emulsion Explosives: A Tutorial Review and Highlight of Recent Progress, Materials Volume 15, Issue 14, 2022.7.

- 4) Piotr Mertuszka, Bartłomiej Kramarczyk, Mateusz Pytlik, Marcin Szumny, Katarzyna Jaszcza, Tomasz Jarosz : Implementation and Verification of Effectiveness of Bulk Emulsion Explosive with Improved Energetic Parameters in an Underground Mine Environment, Energies Volume 15, Issue 17, 2022.9.
- 5) 田中克己: 爆発現象の解析, 安全工学, Vol.36 No.6, pp.383-389, 2023.1.
- 6) 日本火薬工業会: 火薬学 (第 2 版), p.50, 2019.6.

【筆者紹介】

異 義知 (たつみ よしとも)

戸田建設㈱

技術研究所 社会基盤構築部 山岳トンネル課
課長



村田 健司 (むらた けんじ)

戸田建設㈱

土木技術統轄部 土木技術部
発破技術顧問



三上 英明 (みかみ ひであき)

戸田建設㈱

大阪支店
新名神高速道路宇治田原トンネル東工事作業所
作業所長

