参考資料２

トンネル発破における込物なし発破の
安全性評価報告書

平成 31 年 2 月

日本火薬工業会

目次

1. 目的 …… 1
2. 委員会 …… 1
3. 発破に関する文献による考察 …… 2
3.1 込物の役割 …… 2
3.2 発破効果の検討 …… 2
3.3 鉄砲現象による飛石の検討 …… 3
4. 諸外国の実績調査 …… 4
5. 試験発破による込物無し発破の検討 …… 5
5.1 硝安油剤爆薬による込物無し発破試験 …… 5
5.2 含水爆薬による込物無し発破試験 …… 7
6. 結論 …… 10

添付資料

1) 「サンベックス SS 機械装塡システムによる込物使用・不使用発破の飛石確認試験報告書」、旭化成ジオテック株式会社、2007 年 3 月
2) 「北関東自動車道 蓬田トンネル東工事 込物使用・不使用発破の飛石確認試験結果報告書」、中日本高速道路株式会社 中央研究所トンネル研究室、2007 年 3 月
3) 「国道 106 号 茂市トンネル工事 込物使用・不使用発破の飛石確認試験結果報告書」、カヤク・ジャパン株式会社、2019 年 1 月

1. 目的

トンネル工事での発破災害の原因を検討すると、火薬類の装填中における切羽からの落石による事故が多い。落石災害を防止する有効な手段の一つは、発破作業員が切羽に密着する作業をできるだけ少なくすることであり、それを達成する手段として爆薬の機械による装填が期待される。これは、機械装填では発破作業員が切羽近傍から離れて装填作業を実施できることによるものである。

さらに、機械装填の場合には、手作業による装填方法と比較して爆薬を発破孔に密に装填できることから発破効率が向上し、込物をせずに発破が可能であることが、諸外国や国内の実績から明らかになっている。そのため、込物の装填作業を省くことで、発破作業員が切羽に密着する時間がさらに短縮され、より安全が確保できることが期待される。

しかし、機械装填による込物無しの発破をさらに普及させるためには、発破効率の確認はもとより、その安全性を検証することが重要である。そのため、文献による考察、諸外国の状況調査、手装填や機械装填による込物がある場合やない場合の発破実験を行い、有識者による委員会を設置して審議した。

2. 委員会

発破に関する有識者から構成される委員会を設置して、機械装填による込物無し発破の安全性を審議した。委員の構成を以下に示す（アイウエオ順、敬称略）。なお、委員会は、平成31年2月13日に開催し、文献や諸外国の調査確認、機械装填による込物無し発破等の実験の検証、本報告書の作成を行った。

委員長	小川 輝繁	横浜国立大学 名誉教授
		(公財)総合安全工学研究所 専務理事
委員	飯田 光明	(国研)産業技術総合研究所 安全科学研究部門 客員研究員
	緒方 雄二	(国研)産業技術総合研究所 安全科学研究部門 研究部門長
	川﨑 勝樹	日本火薬工業会 専務理事
	川村 実	(株)ジャペックス 営業企画室長 兼 技術部長
	品部 修	カヤク・ジャパン(株) 営業本部 技術部 担当部長
	中村 聡磯	カヤク・ジャパン(株) 営業本部 技術部長
	山口 潤仁	日本火薬工業会 技術部長

3. 発破に関する文献による考察

機械装填の場合、爆薬を発破孔に密に装填できるため、発破効果上、込物を必ずしも必要としないことが、諸外国や国内の実績から明らかになっている。そこで、本委員会では、まず、発破における込物の役割を明確にした上で、込物無しの発破の安全性を審議した。

3.1 込物の役割

一般的に、発破孔に火薬類を装填するときは込物が必要である。込物の基本的な役割は、以下のとおりである。（参考文献：『火薬学』日本火薬工業会、『トンネル爆破技術指針』日本トンネル技術協会、『保安教育講習テキスト』全国火薬類保安協会）

(1) 爆発生成ガスに対する密閉効果

発破孔内に発生する爆発生成ガスを、できるだけ長い時間封じ込めることで、破砕効果を向上させる。

(2) 鉄砲現象による飛石の防止

発破孔で込物長が不足している場合や、適切な込物が使用されていない場合、込物の込め方が適切でない場合は、いわゆる鉄砲状態となり、遠方まで飛翔する飛石の発生が懸念される。適正な込物は、この鉄砲現象による飛石を防止する効果がある。

(3) 石炭鉱山等におけるガス、炭塵への着火抑制

発破孔内に発生する爆発生成ガスの切羽前面への膨張を抑制し、石炭鉱山等における可燃性ガスや炭塵への着火及び爆発を防止する効果がある。

したがって、込物無し発破の問題点として検討すべきなのは、まず発破効果（発破効果が著しく低下しないか？）であり、安全性の面からは、鉄砲現象による飛石発生（飛石の最大飛翔距離が著しく大きくならないか？）である。

3.2 発破効果の検討

通常の手込め装填で込物有りの「普通発破」と、機械装填による「込物無し発破」の発破効果を、1m^3 の岩盤を適切に破砕するのに必要な爆薬量である発破係数[kg/m^3]で比較検討する。（参考文献：『火薬学』日本火薬工業会、『トンネル爆破技術指針』日本トンネル技術協会、『保安教育講習テキスト』全国火薬類保安協会）

発破係数は、爆薬威力係数、岩石抗力係数、填塞係数、装薬係数及び破砕度係数の積で表される。「普通発破」と「込物無し発破」の比較においては、爆薬威力係数、岩石抗力係数及び破砕度係数は一定として扱う（使用する爆薬、岩盤性状は同じとする）。よって、填塞係数と装薬係数の積の値を比較することとなる。

填塞係数は、発破孔の口元までの完全込物のとき 1.00、込物無しのとき 1.25 で、途中までの込物がその間の値である。国内のトンネル発破では、口元までの完全込物はほとんどなく、発破効果に問題がない程度の必要な長さの込物を入れており、したがって「普通発破」の填塞係数は 1.00 と 1.25 の間の値となる。ここでは、中間値 1.13 とする。「込物無し発破」の填塞係数は、定義どおり 1.25 である。

装薬係数は、密装填のとき 0.90、普通装填のとき 1.00、スムースブラスティングのような軽装填のとき 1.05 である。いずれも定義どおりに、「普通発破」の装薬係数は 1.00、「込物無し発破」の装薬係数は 0.90 である。

以上により、「普通発破」の填塞係数と装薬係数の積は 1.13x1.00=1.13、「込物無し発破」の填塞係数と装薬係数の積は 1.25x0.90=1.13 と、同じ値になる。すなわち、同一の爆薬、岩盤であれば、手込め装填による「普通発破」と機械装填による「込物無し発破」の発破係数は同じとなり、発破効果も同程度であることが期待できることとなる。

3.3 鉄砲現象による飛石の検討

トンネル発破における込物の有無による飛石の発生及び飛翔距離に関する定量的なデータは存在しないが、ここでは海外（『Rock Blasting and Explosives Engineering』瑞 CRC）及び国内（『平成 6 年度火薬類消費における保安対策調査（飛石防護実験）』日本火薬工業会）で、密装填の盤打ち発破で込物有無の飛石の違いを比較した実験結果から、込物無し発破の鉄砲現象による飛石の有無について検討する。

海外及び国内の実験結果から、(1) 飛石の飛翔距離が最大となるのは、込物の有無にかかわらず未装薬長（穿孔長－装薬長）が 20～30%のときで、(2) 完全込物の場合でも、未装薬長率によっては込物無しの場合よりも飛石飛翔距離が長くなること、(3) 同じ未装薬長率で比較した場合、込物無しの方が完全込物よりも飛石飛翔距離が約 20%長くなることが分かった。

以上の文献調査から、込物無し発破でも、懸念された異常に飛翔距離の長い鉄砲現象による飛石は観測されず、込物無し発破では完全込物の場合より 2 割程度飛石の飛翔距離が長くなることが明らかとなった。ただし、前述のとおり、国内のトンネル発破における込物は、発破孔口元までの完全込物ではなく、部分的な込物であり、これと込物無し発破を比較すると、飛石飛翔距離は同程度か 1 割程度の増加になることが推定される。

4. 諸外国の実績調査

近年では、日本の建設会社も積極的に海外進出を図っており、それに伴い海外におけるトンネル発破の実績も増加している。そこで、その装填方法や込物実施状況を調査してみると、インドやベトナムでは手込め装薬で砂や粘土の込物を使用した発破が主流であるが、フィリピン、台湾、インドネシア、シンガポール、香港、オーストラリアでは機械装填で込物無しの発破がほとんどであることが分かった。

また、米国の ISEE 発行の Blaster's Handbook によると、「込物は必要なら行う。」、「通常、トンネルでは込物を使用しないのが一般的である。」との記載があり、オーストラリアの法律でも「込物は必要なら行う。」となっており、前述のスウェーデンの Rock Blasting and Explosives Engineering でも込物なしの装薬図があるのみである。これらのことから、また、親会社が海外にある企業の聞き取り調査から、欧米においても機械装填による込物無し発破が一般的に行われていると考えられる。

以上のことから、多くの国で、トンネルにおける機械装填による発破では、通常、込物を使用していないことが分かった。

5. 試験発破による込物無し発破の検討

機械装填による密装填の込物無し発破を行った場合の、発破効果や飛石飛翔距離について、実際のトンネル工事の事例から検討を行った。

5.1 硝安油剤爆薬による込物無し発破試験

硝安油剤爆薬を用いた機械装填による込物無し発破については、導火管発破の技術基準を検討する際に、平成 2 年から平成 5 年にかけて試験発破が行われ、平成 6 年 3 月の報告書にまとめられている（『火薬類技術基準作成審議報告書（カプセル貯蔵庫の構造基準及び導火管発破の技術基準』全国火薬類保安協会）。

トンネル 6 ヶ所において、親ダイに導火管付き雷管を用いた孔底起爆（逆起爆）により、増しダイに硝安油剤爆薬を機械装填で密装填し、込物の有無による発破効果や飛石の状況を比較検討している。その結果の概要を**表 1** に示す。

表 1　増しダイとして硝安油剤爆薬を機械装填した込物無し発破試験結果

No.	試験期日	発破回数	飛石の状況	爆薬の飛散	込物の必要性
1	H2.11.26 ~ H2.12.12	42	飛散は少なく、従来の発破と比較して非常に良好。	無し	問題は発生していないことから、必要ないと考える。
2	H3.6.5 ~ H3.7.26	44	バーンカット心抜きのため切羽より 150m 程度。心抜き方式が同じなら従来の発破と同程度。	無し	必要ない。
3	H4.7.11 ~ H5.6.10	473	従来の発破と大差なし。	無し	硝安油剤爆薬の場合は必要ない。
4	H5.2.12 ~ H5.9.30	327	バーンカット心抜きのため切羽より 150m 程度。	無し	問題は発生していないので、必要ないと考える。
5	H5.7.22 ~ H5.11.22	160	バーンカット心抜きのため切羽より 100m 程度。心抜き方式が同じなら従来の発破と同程度。	無し	問題は発生していないため、必要ないと考える。
6	H5.8.24 ~ H5.10.26	112	バーンカット心抜きのため切羽より 100m 程度。心抜き方式が同じなら従来の発破と同程度。	無し	2 ヶ月の使用で問題発生はないため、必要ないと考える。

これらの結果をまとめると、増しダイとして硝安油剤爆薬を機械装塡した込物無し発破の結果は以下のとおりである。

(1) 機械装填の安全性

硝安油剤爆薬は粒状で流動性があるため、機械装填には何ら問題はなく、雷管やバンチコネクタの不良による以外に、装薬状況が原因と考えられる不発残留は発生していない。

(2) 発破効果

硝安油剤爆薬の飛散（発破孔からの飛び出し）や不発残留もなく、発破効果は従来の込物有りの発破と同等かそれよりも良いという評価である。

(3) 飛石の最大飛翔距離

飛石の飛翔距離については、「心抜きがバーンカット方式のため発破孔の口元近くまでの装薬になっており、従来のＶカット心抜きより薬量が多い。そのため従来発破より飛石距離が同等か長くなっている」場合もあるが、心抜き方法が従来と同じであれば同程度の飛石であると評価されている。

5.2 含水爆薬による込物無し発破試験

含水爆薬を用いた機械装填による込物無し発破については、平成 19 年から平成 31 年にかけて北方トンネル（宮崎県延岡市）、蓬（よもぎ）田トンネル（茨城県筑西市、桜川市）、茂市トンネル（岩手県宮古市）の 3 ヶ所で試験発破が行われた。添付資料 1～3 にその報告書を示す。

北方トンネル及び茂市トンネルでは、紙巻及び粒状含水爆薬の機械装填における込物有り・無しの比較試験が行われ、蓬田トンネルでは、粒状含水爆薬の機械装填・込物無しと従来の紙巻含水爆薬の手込め装填・込物有りとの比較試験が行われた。試験条件等を**表 2** に示す。

表 2　増しダイとして含水爆薬を使用した込物無し・有り発破の試験条件等

試験場所	試験期日	試験回数	込物無し発破に使用した含水爆薬	込物有り発破に使用した含水爆薬
北方トンネル	H19.3.5 ～ H19.3.9	10	機械装填 サンベックス SS （紙巻スラリー爆薬）	機械装填 サンベックス SS （紙巻スラリー爆薬）
蓬田トンネル	H16.10.28 ～ H19.10.12	8	機械装填 ランデックス （粒状エマルション爆薬）	手込め装填 アルテックス （紙巻エマルション爆薬）
茂市トンネル	H31.1.15 ～ H31.1.18	7	機械装填 ランデックス （粒状エマルション爆薬）	機械装填 ランデックス （粒状エマルション爆薬）

トンネル 3 ヶ所において実施した添付資料の試験結果をまとめると、増しダイとして含水爆薬を機械装填した込物無し発破の結果は以下のとおりである。

(1) 機械装填の安全性

ランデックス（粒状エマルション爆薬）は粒状で流動性があるため、機械装填には何ら問題はない。また、サンベックス SS（紙巻スラリー爆薬）の場合は、機械装填の圧力でつぶれて、安全に密装填ができることが確認された。紙巻エマルション爆薬の場合も同様と考えられる。なお、フィルム包装の含水爆薬であっても、紙巻の場合と同じようにつぶれ易い弱い包装にするとか、装填前にホースに仕込んだカッターによって包装に切れ込みを入れる等の工夫で、機械装填で安全に密装填できる。

(2) 発破効果

含水爆薬の飛散（発破孔からの飛び出し）や不発残留はなく、密装填の込物無し発破の発破効果は、従来の込物有りの発破と同等である。

(3) 飛石の最大飛翔距離

トンネル３ヶ所の試験発破で測定された飛石の飛翔距離を**表３**及び**図 1** にまとめた。

表３　増しダイとして含水爆薬を使用した試験発破の飛石飛翔距離

試験場所	込物	爆薬量 [kg]	飛石距離[m]		
			測定値	平均値	標準偏差
北方トンネル	有り	56.8 53.8 103.4 27.6 41.4	25.2 51.6 52.8 56.4 76.8	52.6	18.4
	無し	52.3 62.0 95.2 24.3	50.4 58.8 70.8 84.2	66.1	14.7
蓬田トンネル	有り	39.0 69.8 34.2 45.0	38 40 42 42	40.5	1.9
	無し	68.6 71.0 12.6 11.6	35 39 40 45	39.8	4.1
茂市トンネル	有り	62.2 77.8	44.4 85.8	65.1	29.3
	無し	92.4 88.6 67.8 71.0 65.7	36.0 43.2 52.8 63.6 64.8	52.1	12.6

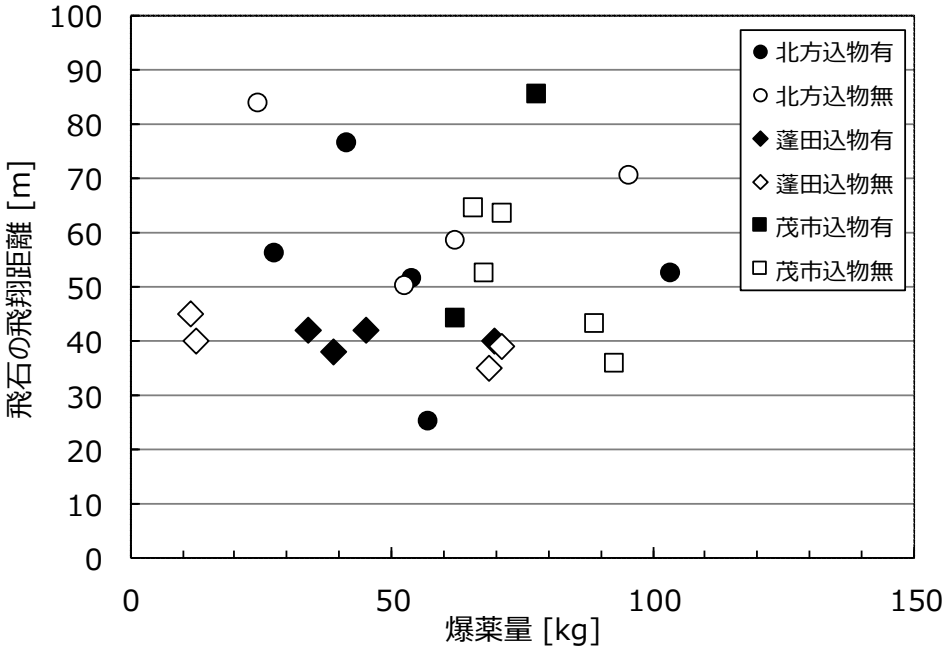


図 1　増しダイとして含水爆薬を使用した試験発破の飛石飛翔距離

北方トンネルの試験発破結果では、込物無し発破（機械装塡）は込物有り発破（機械装塡）と比較して、飛石の飛翔距離の平均値は約 13m、比率では約 26%長くなる結果が得られた（込物無し 66m、込物有り 53m）。しかし、データのばらつきは大きく、それぞれの標準偏差（標本標準偏差、不偏分散の平方根）は、込物無し 15m、込物有り 18m であり、平均値の差は標準偏差 1 単位以下である。したがって、統計的に検証してみても、込物有無による飛石飛翔距離に有意な差はない（込物有りのときの飛石距離の平均値と、込物無しのときの飛石距離の平均値は、信頼度 95%で有意な差があるとはいえない）と判断できる。

蓬田トンネル及び茂市トンネルの試験発破結果では、文献からの予測に反して、込物無し発破は込物有り発破と比較して、飛石の飛翔距離の平均値は短くなった。しかし、北方トンネルの例と同じように、統計的にみるとこれらの場合も、込物有無による飛石飛翔距離に有意な差はない。

以上から、込物無し発破でも、懸念された異常に飛翔距離の長い鉄砲現象による飛石は観測されず、込物有り発破と同程度の飛石の飛翔距離であることが確認された。

6. 結論

トンネル工事での発破作業に伴う事故統計では、切羽での爆薬・込物の装塡中や結線作業中の落石災害が、全件数の数割を占めるほど多発している。さらに、一旦落石災害が起こると、そのほとんどは死亡災害となるため、何らかの対策をとる必要がある。

その有効な対策の一つは、切羽から離れて爆薬を装塡することが可能な機械装塡を採用することである。さらに、込物の装填を省略できれば、切羽に密着する時間がさらに短縮され、より安全を確保できることが期待される。そのためには、機械装塡による込物無し発破の安全性を検証することが重要である。

このため、委員会では、込物無し発破について、文献調査、海外の状況調査、試験発破を行って、安全性を検証した。

込物無し発破の問題点として検討すべきなのは、込物の効果についての考察から、まず発破効果（発破効果が著しく低下しないか？）であり、安全性の面からは、鉄砲現象による飛石発生（飛石の最大飛翔距離が著しく大きくならないか？）であると考えられた。

まず、発破効果については、機械装塡により爆薬が密装填されることにより、手込め装塡での込物効果を補完するため、発破係数の計算から、同じ薬量で同程度の発破効果が期待できることが証明された。

次に、飛石の飛翔距離については、飛石発生状況を実験で調査した国内及び海外の文献から、込物無し発破でも、国内のトンネル発破における込物（発破孔口元までの完全込物ではなく、部分的な込物）有りの発破と比較して、飛石飛翔距離は同程度か 1 割程度の増加になることが推定された。

さらに、海外における込物実施状況の調査では、機械装塡で密装填を行っている場合には込物を使用していない実績が多く存在し、込物無しによって安全性が損なわれることはないと考えられた。

これらの調査結果を踏まえ、機械装填による密装填の込物無し発破を行った場合の、発破効果や飛石飛翔距離について、実際のトンネル工事の事例から検討を行った。

硝安油剤爆薬を用いた機械装填による込物無し発破については、導火管発破の技術基準を検討する際に行われたトンネル 6 ヶ所における試験結果を引用した。含水爆薬を用いた機械装填による込物無し発破については、北方トンネル、蓬田トンネル、茂市トンネルの 3 ヶ所で試験発破を行った。

これらの試験発破の結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 機械装填の安全性

硝安油剤爆薬及び粒状エマルション爆薬は流動性があるため、機械装填には何ら問題はない。また、スラリー爆薬やエマルション爆薬の包装品の場合も、機械装填の圧力によりつぶれて押し込まれることにより安全に密装填できる。

(2) 発破効果

硝安油剤爆薬及び含水爆薬について、込物無しの場合であっても爆薬の飛散（発破孔からの飛び出し）や不発残留もなく、密装填の込物無し発破の発破効果は従来の込物有りの発破と同等である。

(3) 飛石の最大飛翔距離

硝安油剤爆薬及び含水爆薬について、込物無し発破でも、懸念された異常に飛翔距離の長い鉄砲現象による飛石は観測されず、密装填の込物無し発破の飛石の飛翔距離は従来の込物有り発破と同程度である。

以上のことから、トンネル発破において機械装塡で硝安油剤爆薬または含水爆薬を密装填する場合は、込物を使用しなくても、従来の込物を行う手込め装塡と比較して、発破効果においても飛石の飛翔距離においてもほぼ同等であり、安全性に問題ないと結論される。

なお、硝安油剤爆薬または含水爆薬を密装填した場合の込物無し発破が安全であるとしたが、今回の検討内容から、以下のことがその条件となる。

a) 地下発破に限る。

（明かり発破は、実験で飛石等の安全性を確認できないと認められない。）

b) 硝安油剤爆薬または含水爆薬が機械装塡によって密装填されること。

（密装填された爆薬自身が、一部、込物として機能していることも考えられるため。）

c) 孔底起爆（逆起爆）とすること。

（上記と同じ。また、込物無しの正起爆では鉄砲現象を起こしやすいと考えられるため。）

添付資料 1)

サンベックス SS 機械装填システムによる
込物使用・不使用発破の飛石確認試験
報告書

2007 年 3 月

旭化成ジオテック株式会社
（確認：独立行政法人 産業技術総合研究所）

1. はじめに

以下に示す北方インター線トンネル工事において、『爆薬機械装填時の込物有無による飛石確認試験』を行いましたので、ここにその結果を報告いたします。

2. トンネル概要

(1)工事名　　北方インター線トンネル工事
(2)住　所　　宮崎県延岡市北方町
(3)工　期　　平成18年3月10日　~　平成19年12月15日
(4)発注者　　宮崎県延岡土木事務所
(5)工事延長　　トンネル延長　L＝439.0m
(6)地質　　トンネル区間の地質は、概ね日向層群（四万十累帯）で構成されている。日向層群については、泥質岩と砂岩が分布しているが、今回試験発破を行った区間中央よりやや終点側などには、砂岩層に付随して頁岩優勢互層が分布している。岩質はやや砂質分を伴うため硬質なものが含まれるが、亀裂が平行に発達し割れやすい性質を有する。
(7)施工業者名　一心・山本・伊達特性建設工事共同企業体

3. 試験期間・立会者

(1)試験期間：2007年3月5日（月）~ 9日（金）の昼方の発破
(2回/昼番･日×5日＝全10発破)
(2)立 会 者：旭化成ジオテック㈱：野田　英宏，有満　守昭，品部　修，緒方　雅幸
旭化成ケミカルズ㈱：荒牧　昌作，吉竹　隆弘，松岡　秀之
独立行政法人 産業技術総合研究所：緒方　雄二（8日,9日）

4. 試験方法

(1)試験概要

①取得データ：以下の項目についてデータを取得した。

・ズリの飛石距離測定
※発破毎に目視にて,こぶし半分~ こぶし大の石が飛んだ最大距離を支保工Noで記載した。
・不発残留の有無（作業員・火薬番に確認及びズリ捨て場の確認）
・起砕効果の確認（発破後のあたりの有無を目視確認）
・ズリ山の状態確認（ズリ堆積状況、ズリ足長さの記録）
・装薬長及び込物長の測定（1~ 3孔程度／発破の測定）
・穿孔数及び火薬使用量

②試験回数：

・機械装填で込物使用　：6回（内1回は参考データ：添付資料-1参照）
・機械装填で込物不使用：4回

③試験の役割分担：

・穿孔,装薬作業：北方トンネル現場作業員様

・飛石等データ取得：旭化成ジオテック，旭化成ケミカルズ，産業総合研究所

(2)使用装填機・火薬類

・装填機：サンベックス SS システム

・親ダイ，増ダイ：サンベックス SS 爆薬（25mmΦ×100g）

・雷　管：DS 電気雷管

・込　物：機械装填用粘土アンコ(4 個/孔に固定)

(3)試験の進め方

・込物の有無については、装薬に慣れるまでは込物ありで行い、以降は、試験時の岩盤条件をほぼ同一とするため、事前に作業員と相談してできるだけ込物あり・なしの試験を交互に行った。

・穿孔数や薬量については、作業員と相談して穿孔前に決定した。

(4)試験発破時の危害予防規定について

本試験発破時には、以下の項目を危害予防規定として遵守した。

a)火薬類取締法施行規則の消費に関わる条項(第53条の9除く)を厳守実行する。

b)発破場所から適切な退避距離を取る。(今回は 100m 以上とした)。

c)鋼製点火ボックス内にて点火する。

d)点火者以外も 100m 以上退避し、必ず重機等の影に隠れること。

e)点火後すぐにトンネル通路に飛び出さないように指示・徹底する。

5. 試験結果

(1)試験結果

試験全体の内容及び結果一覧を添付資料-1，2 に示し、また、試験発破の発破パターン（代表例）を添付資料-3 に示す。

次に、添付資料-1,2 を元に行った考察を以下に記す。

(2)結果と考察

①ズリの飛石距離

a)測定方法と測定結果

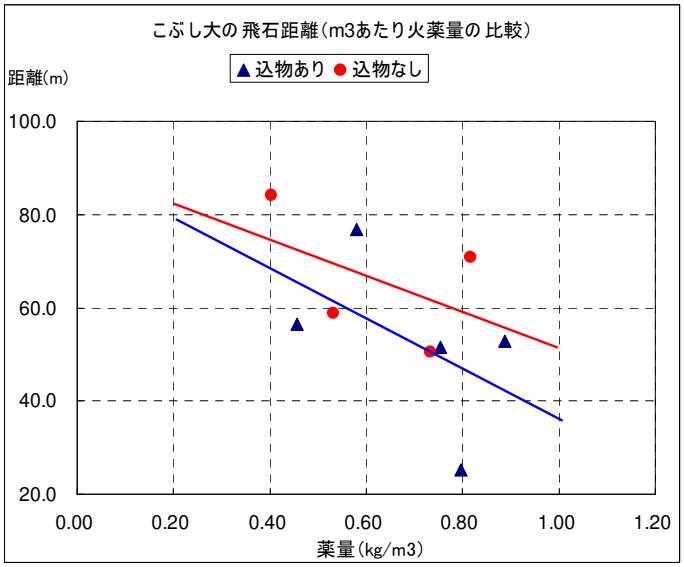
こぶし半分~ こぶし大のズリが飛んだ最大距離を支保工 No で記載し、発破後に飛石距離を算出した。

その結果をまとめたもの（添付資料-1 抜粋）を表- 1 に示し、図- 1 に m3 あたり火薬量と飛石距離の関係及び表- 2 にその回帰式データを示す。

表－ 1　飛石距離及びズリ足長さ算出結果

試験No	日時	点火時間	切羽位置 (ST)	支保パターン	進行 (m)	込物	孔数 (本/発破) 上半	孔数 (本/発破) 下半	薬量 (kg/発破)	薬量 (kg/m3)	ST位置(測定値) こぶし大	ST位置(測定値) ズリ長さ	飛石距離 こぶし大 (m)	ズリ長さ (m)
1	2007/3/5	10:50	301	C2	1.2	あり	103	20	103.4	0.89	257	292	**52.8**	**10.8**
2	2007/3/5	19:00	302	C2	1.2	あり	95	－	53.8	0.75	259	290	**51.6**	**14.4**
3	2007/3/6	11:03	306	C2	1.2	あり	92	－	56.8	0.80	285	298	**25.2**	**9.6**
4	2007/3/6	16:34	307	C2	1.2	なし	75	22	62.0	0.53	258	296	**58.8**	**13.2**
5	2007/3/7	10:02	310	C2	1.2	なし	89	22	95.2	0.82	251	300	**70.8**	**12.0**
6	2007/3/7	15:46	311	C2	1.2	あり	91	－	41.4	0.58	247	303	**76.8**	**9.6**
7	2007/3/8	9:06	314	C2	1.2	なし	78	－	52.3	0.73	272	306	**50.4**	**9.6**
8	2007/3/8	15:36	315	D1	1.0	あり	44	10	13.6	0.14	不明	310	**－**	**5.8**
9	2007/3/9	11:04	319	D1	1.0	なし	61	－	24.3	0.40	248	313	**84.2**	**6.2**
10	2007/3/9	18:10	320	D1	1.0	あり	73	－	27.6	0.46	272	314	**56.4**	**6.0**

単純平均	込物あり	**52.6**	m
	込物なし	**66.1**	m
最大飛距離	込物あり	**76.8**	m
	込物なし	**84.2**	m



	込物あり	込物なし
回帰式	-53.8x＋90.0	-39.0x＋90.2
重相関	0.51	0.50
標準誤差	18.3	15.6

図－ 1　m3 あたり火薬量と飛石距離の関係

b) 考察

イ) 結果からの考察

表－ 1，図－ 1 より、込物の有無による飛石距離を単純な平均で比較すると、ほぼ同等~ 10m 程度、込物なしの方が飛石距離が長い結果となった。

しかし、図－ 1 の回帰式データ表で示されるように、10m 程度の違いは標準誤差範囲内のため、バラツキの範囲内であると考えられる。

よって、本結果より、込物の有無による飛石距離の違いに大きな差はないと判断ができる。

ﾛ）異常な飛石発生について

今回、現場作業員に通常発破でのヒアリングも行った。その際に、「従来の手込め装薬（込物あり）でも、極まれに点火場所付近まで小石が飛んでくる場合がある。しかし、点火 BOX 内に退避していれば問題ない」とのヒアリング結果が得られた。

また、明かり発破において飛石事故を招くような異常な飛石が発生する原因を考慮すると、過装薬・弱装薬による鉄砲現象等の装薬条件も原因の一つであるが、主に岩盤の条件（潜在亀裂や前段の影響で想定外に抵抗線が薄くなる等）により左右されることが多い。込物なしの発破を行う場合でも、込物ありと同様に、装薬後に薬長を確認する等で抵抗線が薄くなっていないことを確認すれば問題ない。

c)まとめ

測定結果より、単純な平均では若干込物なしの方が飛石距離が長いが、その差はバラツキの範囲内と考えられるため、込物有無による飛石距離の違いに大きな差は認められなかった。

トンネル発破の飛石に対して安全を確保するには、込物の有無よりも、切羽の状態や抵抗線・火薬量等の諸条件により、通常よりも飛石が遠くへ飛んでくる可能性があることを認識し、適切な退避（切羽からの退避距離や鋼製点火 BOX 内への退避遵守等）を行うことが重要であり、それにより込物なしの発破であっても従来と同等の安全性を保持することが可能であると考えられる。

②ズリ足長さ

a)測定結果

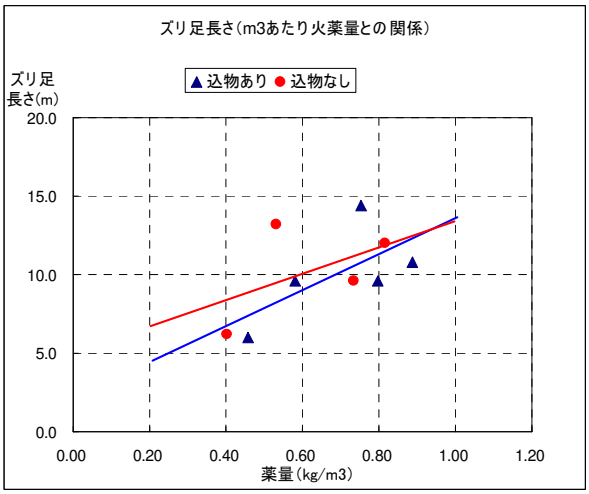
表- 1 のズリ足長さの測定結果を元に、図- 2 に m3 あたりの使用火薬量とズリ足長さの関係及び図- 3 にズリ足長さと飛石距離の関係を示す。

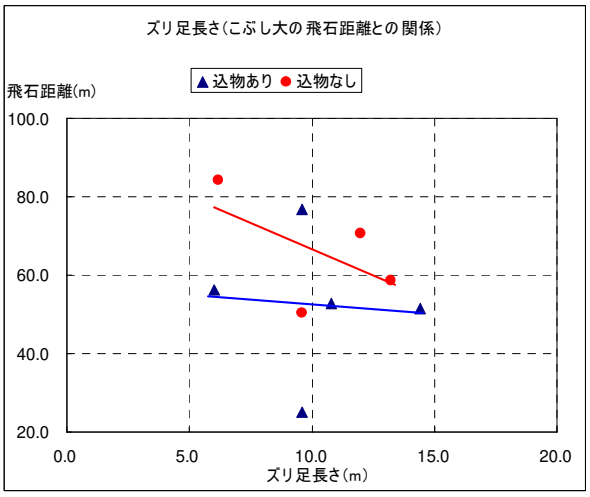
b)考察

図- 2 によると、込物有無によるズリ足長さの違いは特に見られず、m3 あたりの火薬使用量が多いほどズリ足長さが長いという結果となった。

また、図- 3 からは、込物ありは余り相関性がないため一概に言えないが、込物あり・なし共に、ズリ足が長いほど飛石距離が短い傾向が得られた。

その要因は、推測ではあるが、ズリ足が短くなるような場合には弱装薬気味であり、それによる鉄砲現象によって飛石距離が長くなっていることも考えられる。





	込物あり	込物なし
回帰式	11.4x＋2.2	8.4x＋5.1
重相関	0.66	0.51
標準誤差	2.62	3.25

図－２　m3 あたり火薬量とズリ足長さの関係

	込物あり	込物なし
回帰式	-0.5x＋57.6	-2.7x＋93.4
重相関	0.08	0.56
標準誤差	21.15	14.9

図－３　飛石距離とズリ足長さの関係

③不発残留の有無について

不発残留の有無について、ズリ出し後の作業員・火薬番へのヒアリングやズリ捨て場の確認を行った。その結果、添付資料－１に示すとおり、込物あり・なしの発破ともに発破後の不発残留は見られなかった。

④穿孔数・火薬使用量と起砕効果について

a)起砕効果について

添付資料－１に示すとおり、過装薬気味の試験 No1 を除いても込物あり・なしの発破で違いはほとんど見られず、全ての発破でほぼ良好な起砕効果であった。

（試験 No4 で切羽左側が「あたり」となったが、前回の発破で心抜き部分がある程度進行が出ていため、該発破では心抜きをせず、払いだけの発破となり、さらに左側の岩盤が硬かったため「あたり」となったと考えられる）

但し、込物あり・なしの起砕効果（＝込物の起砕効果に与える影響）については、今回の試験発破では、一発破の薬量・孔数が同条件で複数回の比較を行えた訳ではないため、さらなるデータ取得を行って比較することが好ましいと考えられる。

b)穿孔数・火薬使用量について

穿孔数については、基本的には、ほとんど込物有無に関わらず変更しない方針で行い、あとは、地山状況により作業員が穿孔本数を調整した。

火薬使用量については、込物なしの場合には、最初は孔によって 100g/孔づつ増加させたが、図- 4 に示すとおり、込物あり・なしで m3 あたりの使用火薬量はほぼ同等であった。

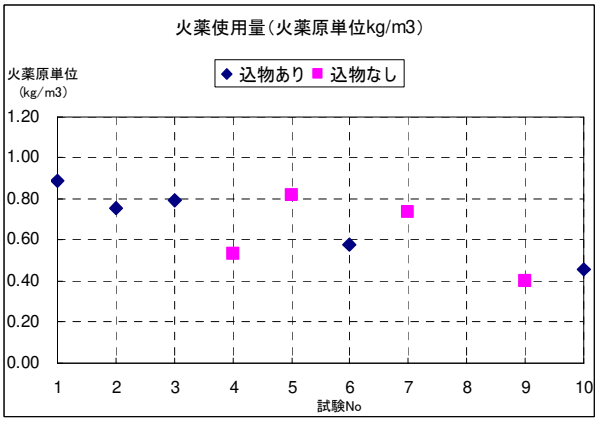


図- 4　試験 No 毎の火薬使用量（kg/m3）

⑤爆薬の密装填率の測定について

a)計測方法及び密装填率算出方法

添付資料- 2 に示すとおり、全 17 回、穿孔長及び爆薬装填後の孔長（＝未装薬長），込物装填後の孔長を測定した。

その結果から、爆薬長（密装填された増ダイの長さ）及び込物長を算出し、爆薬の見かけの爆薬直径を算出して、実際の孔への爆薬密装填率を算出した。

b)結果

17 回の測定の結果、以下のとおりとなった。

・装填時の爆薬みかけの直径＝29~ 43mmΦ（単純平均：35mmΦ）

※みかけの直径とは、孔内で潰れた爆薬を円筒状に直した場合の直径のこと

・孔への密装填率＝42~ 91%（単純平均：62%）

【25mmΦの爆薬手込めの場合＝密装填率 30%】

孔への爆薬の密装填率向上のためには、「装薬の慣れ」も大きく影響する。より装薬に慣れれば、密装填率はさらに向上してくると考えられる。

c)考察

上記のような密装填率であったが、込物なしで、100g の増ダイ装填においてもある程度爆薬が潰れていれば、電気雷管の脚線を引っ張った時に抜けることもなく、作業性も良好であった。

機械装填において込物なしを論ずる場合、密装填率よりも「作業上安全であること」や「岩盤がきちんと起砕されること」，「不発残留が無いこと」の方が重要であると考えられる。

5. まとめ

①こぶし大のズリの飛石距離

・測定結果より、単純な平均では約 10m 前後、込物なしの方が込物ありよりも飛石距離が長い結果であったが、回帰分析結果より考察すると、その差はバラツキの範囲内と考えられるため、込物有無による飛石距離の違いに大きな差は認められなかった。

・通常装薬（手込め装薬・込物あり）のヒアリング結果（極まれに点火場所付近まで小石が飛んでくることもある）や明かり発破における飛石事例を考察すると、異常な飛石が発生する原因としては、弱装薬による鉄砲現象や過装薬等の装薬条件も原因の一つであるが、主に岩盤の条件（潜在亀裂や前段の影響で想定外に抵抗線が薄くなる等）により左右されることが多い。込物なしの発破を行う場合でも、込物ありと同様に、装薬後に薬長を確認する等で抵抗線が薄くなっていないことを確認すれば問題ない。

・上記より、トンネル発破の飛石に対して安全を確保するためには、込物の有無に関わらず、想定外の飛石が生じる可能性があることから、込物なしにおいても、従来通りの鋼製点火 BOX 内への退避や切羽から適切な退避距離を守ることの方が重要であり、それを行うことで従来と同等の安全性が保たれると考えられる。

②不発残留の有無・起砕効果について

・込物なしの発破でも不発残留爆薬は見られなかった。

・起砕効果についても込物ありの場合とほぼ同等であった。

6. おわりに

貴現場の積極的なご協力により、試験全般に渡りスムーズに進めることができ、貴重なデータ取得ができました。また、貴重なご意見やご指摘も頂戴し、深く感謝致します。

●添付資料

添付資料 2-1：北方トンネル　込物あり・なし試験発破　データ一覧

添付資料 2-2：爆薬の密装填率　測定結果

添付資料 2-3：試験発破　写真集

－以　上－

添付資料 2)

北関東自動車道　蓬田トンネル東工事
込物使用・不使用発破の飛石確認試験結果
報告書（案）

2007 年 4 月

㈱高速道路総合技術研究所　トンネル研究室

北関東自動車道　蓬田トンネル東工事において、機械装填システムを用いて粒状爆薬によるトンネル掘削を行うにあたり、込物の使用・不使用による飛石距離の違いについて確認試験を実施した。

１．工事概要

工事概要を以下に示す。

工事名：北関東自動車道　蓬田トンネル東工事

発注者：東日本高速道路株式会社　関東支社

工　期：平成 16 年 10 月 28 日　～ 平成 19 年 10 月 12 日

施　工：前田建設工業(株)・東亜建設工業(株)特定建設工事共同企業体

２．トンネル概要

本トンネル工事は、茨城県筑西市小栗より茨城県桜川市西飯岡に至る総延長 3,405ｍのうち、起点（栃木・茨城県境付近）より上り線 929ｍ（全長 1,610.1ｍ）・下り線 897ｍ（全長 1,597.6ｍ）のトンネルを新設するものである。

３．使用爆薬及びシステム

試験に使用した爆薬および装填システムを以下に示す。使用した粒状爆薬（ランデックス）の性能については、比較のため含水爆薬（アルテックス）と ANFO 爆薬を合わせて表-1 に示す。今回使用した粒状爆薬の爆轟速度は 4,000m/sec 前後で含水爆薬と ANFO 爆薬の中間の値を有する。

【下り線：従来装填・込物有り】

採用システム：手装填、使用爆薬：紙巻含水爆薬　アルテックス

【上り線：機械装填・込物無し】

採用システム：ランデックス装填システム（写真-3、4、5、6、7）

使用爆薬：粒状エマルション爆薬　ランデックス（写真-1、2）

表-1　各種爆薬の性能表

	粒状爆薬（ﾗﾝﾃﾞｯｸｽ）	含水爆薬（ｱﾙﾃｯｸｽ）	ANFO 爆薬
比　　重	1.16~ 1.20(薬比重) 0.60~ 0.70(嵩比重) 0.70~ 0.90(装填比重)	1.15~ 1.23	0.8~ 0.9
爆轟速度（m/sec）	3500~ 4500	5800~ 6000	2500~ 3000
弾動振子(mm)	72~ 78	78~ 84	62~ 68
耐水性	優良	優良	なし
後ガス性能	優良	優良	要注意
落つい感度	８級	８級	８級
摩擦感度	７級	７級	７級

写真 -1　粒状爆薬（ランデックス）

写真-2　非電気式雷管

写真 -3　上半装薬状況

写真 -4　下半装薬状況

写真 -5　踏まえ装薬状況

写真 -6　非電気式雷管結線状況（上半）

４．地質概要

当トンネルには 10 本の断層が確認又は想定されていた。工区境付近の F4 断層を境に西側のチャート・頁岩の層状岩盤分布域と東側の泥質ホルンフェルス・砂岩の塊状岩盤分布域に分かれる地質となっている。坑口より約 550m付近までは砂岩及び泥質ホルンフェルス（一軸圧縮強度 30~ 110N/mm²）が互層状に分布し、その先到達付近にかけては泥質ホルンフェルス（一軸圧縮強度 50~ 110N/mm²）が分布している。ただし、全体として 10 本の低速度帯が確認され亀裂の発達が伺えることから恒常的湧水の多い地山と想定されていた。

５．データ取得区間の地質概要

粒状爆薬試験区間（下り線 STA.3+29.35-STA.2+55.0 の 74.35m区間）の切羽は泥質ホルンフェルスが主体であった。亀裂は発達し、茶褐色に変色作用を受けた地山が STA.3+5.0 付近より増加した。また、岩芯まで風化した箇所も出現頻度が増加した。岩片の一軸強度は 20~ 70N/mm² 程度であった。

６．飛石および騒音結果

今回、粒状爆薬と含水爆薬を用いた発破時にそれぞれ４回、飛石を目視により測定した。両者の測定値を比較した結果を、表-1 および図-1 に示す。

表-1 及び図-1 に示すように飛石は切羽から 40m程度で、粒状爆薬と含水爆薬の違いはほとんどなかった。また、使用爆薬量による飛石距離の違いも見られなかった。

７．まとめ

今回のトンネル上下線においての上り線：含水爆薬込物あり、下り線：粒状爆薬の機械装填込物無しでの試験結果であるが、込物の使用・不使用による飛石距離の大きな違いは見られなかった。

表１　粒状爆薬と含水爆薬での飛石測定結果

上り線（通常爆薬）						
孔尻込物有り						
支保 No	支保ﾊﾟﾀｰﾝ	TD	削孔数	段当り最大削孔数	総火薬量	飛石距離
		(m)	（箇所）	（箇所）	kg	(m)
688	CⅡ-L	778.95	92	17	69.8	40
689	CⅡ-L	780.15	76	17	34.2	42
690	CⅡ-L	781.15	83	22	39.0	38
692	CⅡ-L	783.75	87	17	45.0	42

下り線（粒状爆薬）						
孔尻込物なり						
支保 No	支保ﾊﾟﾀｰﾝ	TD	削孔数	段当り最大削孔数	総火薬量	飛石距離
		(m)	（箇所）	（箇所）	kg	(m)
756	CⅡ-b	875.65	55	17	71.0	39
758	CⅡ-b	878.05	53	18	68.6	35
759	CⅡ-b	879.25	28	12	11.6	45
762	CⅡ-b	882.85	38	12	12.6	40

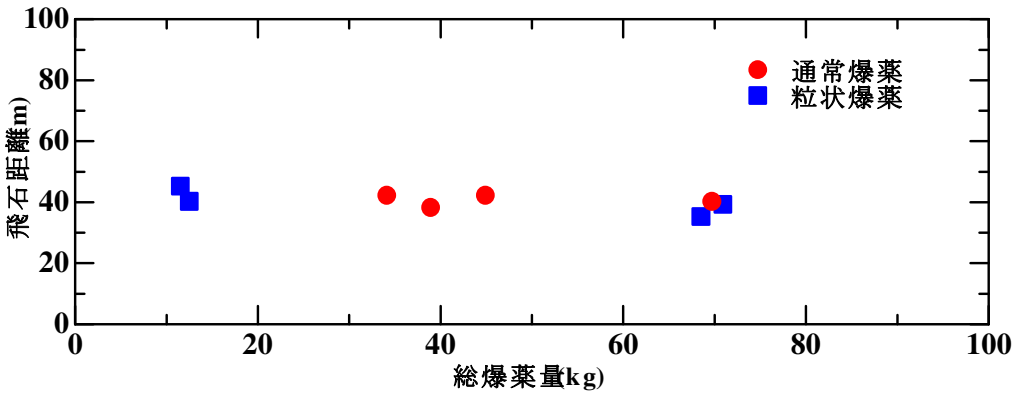


図１　飛石測定結果（粒状爆薬と含水爆薬の比較）

添付資料 3)

国道 106 号　茂市トンネル工事

込物使用・不使用発破の飛石確認試験結果

報　告　書

2019 年 1 月

カヤク・ジャパン株式会社

国道 106 号　茂市トンネル工事では、機械装填システムを用いた粒状含水爆薬によるトンネル掘削を行っている。

今回、込物使用・不使用による飛石距離の違いについて確認試験を実施した。

1. 工事概要

工事名：国道 106 号　茂市トンネル工事

発注者：国土交通省　東北地方整備局

延　長：1,885m

工　期：H28.11.26～H31.3.15

場　所：岩手県宮古市蟇目

施　工：前田建設工業株式会社

2. トンネル概要

宮古盛岡横断道路は、宮古市と盛岡市を結ぶ全長約 100km の地域高規格道路で、そのうち「宮古箱石道路（宮古～箱石）」は、宮古市藤原から箱石間の 33km において、岩手県より権限代行で整備する区間である。

国道 106 号の線形不良区間を回避し、走行性が向上するとともに、所要時間の短縮により県都盛岡市と宮古市間のアクセス向上、救急医療施設への速達性向上等の効果が期待される。

3. 使用爆薬及びシステム

試験に使用した爆薬および装填システムを以下に示す。

使用した粒状含水爆薬（ランデックス）の性能を表－１に示す。粒状含水爆薬の爆轟速度は 4,000m/sec 前後で、含水爆薬と ANFO 爆薬の中間の値を有する。

使用爆薬：粒状含水爆薬（ランデックス、写真－１、２）、含水爆薬（ハイジェックス、写真－３）

使用雷管：導火管付き雷管（アイデット、写真－３）、電気雷管（起爆用）

表－１　爆薬の性能

	粒状含水爆薬 （ランデックス）	含水爆薬 （ハイジェックス）	ANFO 爆薬
比　　重	0.60～0.70（嵩 比 重） 0.70～0.90（装填比重）	1.1～1.2	0.8～0.9
爆轟速度（m/sec）	3,500 ～ 4,500	5,500 ～ 6,000	2,500 ～ 3,000
弾動振子(mm)	72 ～ 78	74 ～ 80	62 ～ 68
耐水性	優良	優良	なし
後ガス	優良	最優良	要注意
落つい感度	８級	８級	８級

写真－１　ランデックス（左：爆薬、右：包装）

写真－２　ランデックス装填機

写真－３　親ダイ

写真－４　穿孔状況

写真－５　爆薬装薬状況

写真－６　込物装填状況

写真－７　結線状況

写真－８　起砕状況

4. 試験期間、立会者

試験期間：2019 年 1 月 15 日（火）～18 日（金）

立 会 者：国立研究開発法人産業技術総合研究所　安全科学研究部門長　緒方雄二（18 日立会）

カヤク・ジャパン株式会社　東北営業部　佐藤善政

技　術　部　品部修、中村聡磯

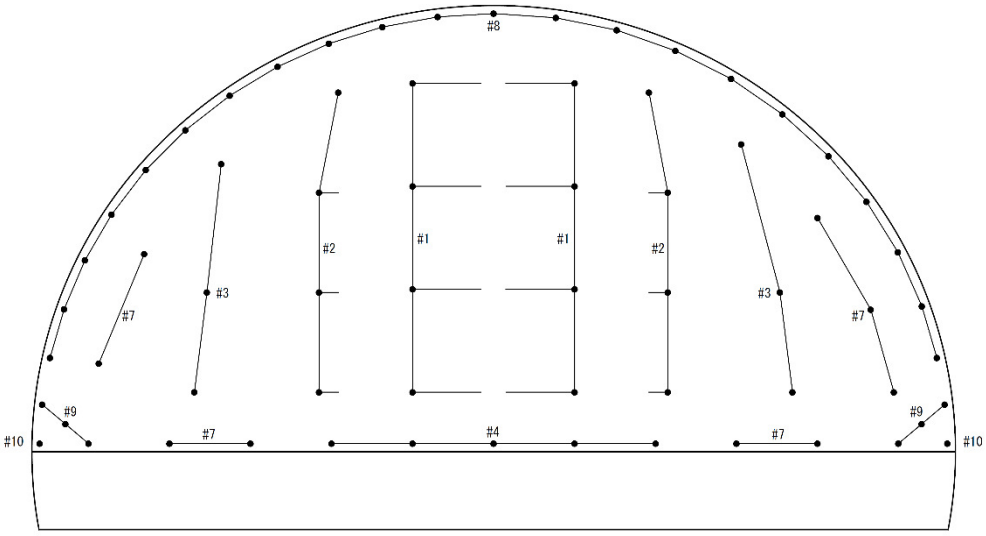
5. 確認内容

・こぶし大の飛石の到達距離を、支保工 No.で計測。

・ズリ足長さを、支保工 No.で計測。

・起砕効果。

・穿孔数及び爆薬使用量。



図－１　発破パターンの例

6. データ取得区間の地質概要

試験区間（支保 No.666～678）の岩質は粘板岩、掘削区分は CⅡで、やや亀裂が発達していた。

7. 試験結果

粒状含水爆薬を使用し、込物使用と不使用の飛石範囲を目視により測定した。

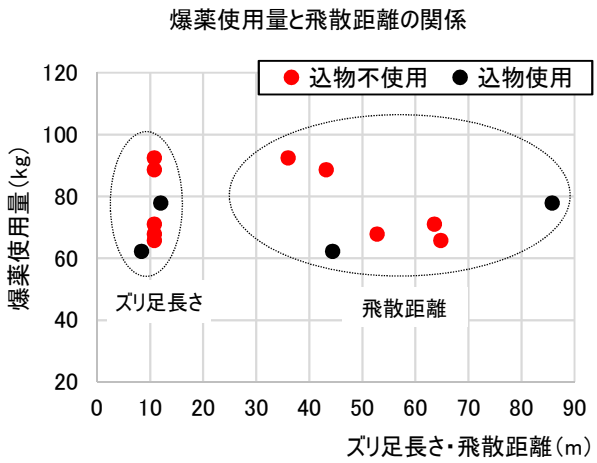
試験結果を表－２、図－２に示す。

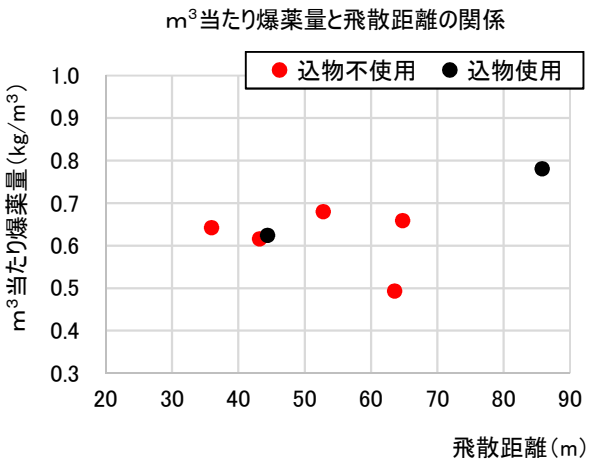
こぶし大の石の飛散範囲は 36～86m で、発破ごとで大きく異なる。図－２より、爆薬使用量との相関は低く、m^3当たり爆薬量との相関がやや高い傾向にある。

込物使用、不使用による飛石距離の大きな違いは見られない。飛石距離が発破ごとで大きく異なるのは、込物の有無より、m^3当たり爆薬量や芯抜周辺の孔数、切羽の凹凸、節理等の影響が大きいのではないかと考えられる。

表－２　試験結果

No	発破日時	支保 No.	支　保 パターン	込　物	穿孔数 （孔）	爆薬使用量 （kg）	m³当たり 爆薬量 （kg/m³）	起砕 効果	飛石距離 （m）	ズリ足長さ （m）
1	1/15　8:40	666	CⅡ	不使用	66	65.7	0.66	良好	64.8	10.8
2	1/15 13:50	667	CⅡ	不使用	85	88.6	0.62	良好	43.2	10.8
3	1/16　8:48	670	CⅡ	使用	59	62.2	0.62	良好	44.4	8.4
4	1/16 14:22	671	CⅡ	不使用	84	92.4	0.64	良好	36.0	10.8
5	1/17　8:55	674	CⅡ	使用	72	77.8	0.78	良好	85.8	12.0
6	1/17 14:15	675	CⅡ	不使用	68	71.0	0.49	良好	63.6	10.8
7	1/18　8:40	678	CⅡ	不使用	67	67.8	0.68	良好	52.8	10.8





図－２　試験結果

８．まとめ

粒状含水爆薬を使用し、込物使用・不使用で飛石距離を比較した結果、込物使用、不使用による飛石距離の大きな違いは見られなかった。飛石距離が発破ごとで大きく異なるのは、込物の有無より、m³当たり爆薬量や芯抜周辺の孔数、切羽の凹凸、節理等の影響が大きいのではないかと考えられる。

以　上

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
1	1 月 15 日	8:40	666	66 孔	65.7 kg
込 物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
不使用	良好	611	64.8 m	656	10.8 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	8	8	6	5	–	–	9	22	6	2	66

結線状況

起砕状況

最大飛散位置

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
2	1 月 15 日	13:50	667	85 孔	88.6 kg
込 物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
不使用	良好	630	43.2 m	657	10.8 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	4	6	14	5	6	6	11	25	6	2	85

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
3	1 月 16 日	8:48	670	59 孔	62.2 kg
込 物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
使用	良好	632	44.4 m	662	8.4 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	5	6	8	5	–	–	8	20	5	2	59

結線状況

起砕状況

最大飛散位置

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
4	1 月 16 日	14:22	671	84 孔	92.4 kg
込　物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
不使用	良好	640	36.0 m	661	10.8 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	6	5	11	4	10	6	11	23	6	2	84

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
5	1 月 17 日	8:55	674	72 孔	77.8 kg
込　物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
使用	良好	601.5	85.8 m	663	12.0 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	8	9	8	6	–	–	9	24	6	2	72

結線状況

起砕状況

最大飛散位置

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
6	1 月 17 日	14:15	675	68 孔	71.0 kg
込　物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
不使用	良好	621	63.6 m	665	10.8 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	2	1	10	9	8	–	9	22	6	1	68

試験 No.	試験日	発破時間	支保 No.	穿孔数	爆薬使用量
7	1 月 18 日	8:40	678	67 孔	67.8 kg
込　物	起砕効果	飛散支保 No.	飛散距離	ズリ足支保 No.	ズリ足長さ
不使用	良好	633	52.8 m	668	10.8 m

段数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合計
孔数	7	8	7	6	–	–	8	23	6	2	67

結線状況

起砕状況

最大飛散位置