

石灰石地山における長孔発破の試行と 振動測定結果

蛭子 清二¹・塚本 耕治²・浅野 剛²・岩本 容昭³・田浦 義真³

¹正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)
E-mail:seiji.ebisu@okumuragumi.jp

²正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

³株式会社奥村組 東日本支社 土木第3部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

山岳トンネル工事の合理化対策として、地山が良好な場合には長孔発破が有望である。しかし、その実用化には、地山の正確な評価や出来形確保に対する信頼性の高い発破方法の選定等の課題が残されている。それらの解決に向けて、CH～CM級の石灰岩地山において長孔発破の試験施工を行った。

試験施工では、芯抜きに大口径の空孔を設けたシリンダカットを採用し、爆薬は粒状エマルジョン系含水爆薬を密充填することにより目標進行長4mを実証した。また、通常発破よりも薬量の多い長孔発破の振動速度が小さく、岩盤にも環境にも好ましい結果が得られた。このような振動低減の原因については、使用した爆薬の爆速が小さかったこと、発破のエネルギーの一部がずりの小割や切羽後方への移動に費やされた可能性を指摘した。

Key Words : long-hole blasting in limestone cavities, blasting vibration measurements

1. はじめに

発破方式で掘削する山岳トンネル工事の合理化策として、一掘進長を長くする長孔発破が有望である。とくに、地山がB級相当に良好な場合には、長孔発破を行うことによる急速施工とコストダウンの効果が期待される。しかし、その実用化にあたっては、対象地山の正確な評価や出来形確保に対する信頼性の高い発破方法の選定、機械と設備のバランスの良い組合せ、火薬量が増加することによる発破振動の増大、ずりの大粒径化によるずり出しの作業効率の低下等のいくつかの課題が残されている。

一掘進長については、発注者ごとに地山等級に応じた標準的な長さが規定されているため、普通のトンネルでは長孔発破の試行が難しい。幸いにして、筆者らは地下空洞掘削工事を担当しており、その分割掘削の一環として底設導坑を掘削する機会があった。そこで、この機会を活用して長孔発破の試験施工を行った。試験施工では、粒状エマルジョン系含水爆薬を密充填する発破方法の性能を検証するとともに、芯抜き中央部に設けた大口径の空孔および装薬孔の削孔精度、掘削外周面の平滑性、掘削出来形、ずりの粒度、発破振動・騒音等の諸データを測定した。

ここでは、長孔発破の試験施工結果の概要を示すと

もに、とくに振動測定データに見られた振動速度低下の分析結果について報告する。

2. 試験場所の地形地質

試験施工の場所は、後期古生代デボン紀～ペルム紀（約3億6000万～2億5000万年前）の石灰岩の山体内にある。この石灰岩は、約1億年にわたって海底で堆積した厚さ約1,000mの石灰岩体が地上に隆起したものであり、塊状、無層理で灰白色を呈するものが多い。試験場所近くで採取した石灰岩の岩石試験結果によると、一軸圧縮強度：77 MPa、ヤング率：55 GPa、縦波速度：5.86 km/sである。

試験場所のボーリングの30 m区間の孔壁を撮影した画像を図-1に示す。試験場所には、同図と同様な石灰岩が分布しており、その岩級はおおむねCH～CM級である。すなわち、今回の試験施工で対象とした岩盤は、長孔発破の適用対象であるB級岩盤よりも1～2ランク悪い状況であった。

3. 長孔発破の方法と試験施工の概要

図-2に示す地下空洞の底設導坑で試験施工を行った。長孔発破による周辺地山への損傷が通常発破の場合よりも大きくなっても、完成後の地下空洞の坑壁に対する損傷のリスクが小さくなるように配慮した。底設導坑の掘削幅は7.7 m、断面積は45.3 m²である。

試験施工における測定項目を表-1に示す。試験施工では、まずこの工事で通常行っている目標進行長1.5 mの発破方法（通常発破と呼ぶ）で2回の発破（通常1および通常2の2ケース）を行い、表-1に示すデータを収録した。次に長孔発破では、目標進行長を4.0 mとした長孔1と長

孔2および目標進行長を7.0 mとした長孔3の合計3ケースを試行した。

通常発破と長孔発破の削孔パターンを図-3に示す。芯抜きは、通常発破がVカット、長孔発破がシリンダカットである。長孔発破の場合、芯抜き中央に直径225 mmの空孔を設けた。また、装薬孔径は芯抜きをφ64、払い、

表-1 試験施工における測定項目

調査測定項目	目的	使用機器	数量、仕様等
孔曲がり	芯抜き用の空孔、装薬孔の直進性	水平孔対応ジャイロ孔曲がり測定器	油圧削岩機試験孔：φ65×3m、φ120×7m 空孔：φ225×12m 装薬孔：φ65×7m×2本、φ65×4m×3本
振動	トンネル底盤を伝播する発破振動	MC型速度振動計振動記録計	切羽後方50m、100m、200mの直線上3箇所 共振周波数：4.5Hz 計測対象周波数域：10Hz～1000Hz
騒音	トンネル内空を伝播する発破騒音	普通騒音計	振動測定位置と同じ底盤からの高さ1m
ズリ径	掘削ズリの粒度分布	デジタルカメラ	発破直後の坑内坑外のズリ仮置き場
掘削出来形	1発破進行の掘削出来形	3次元形状スキャナ	ノンプリズム型トータルステーション 縦横断0.5mピッチ、縦断延長15.5m

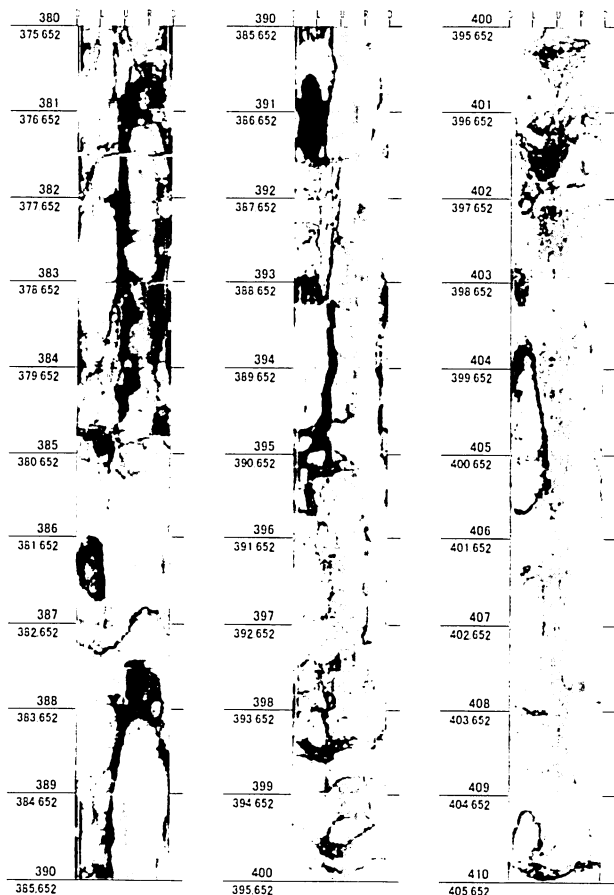


図-1 試験場所におけるボーリングの孔壁画像

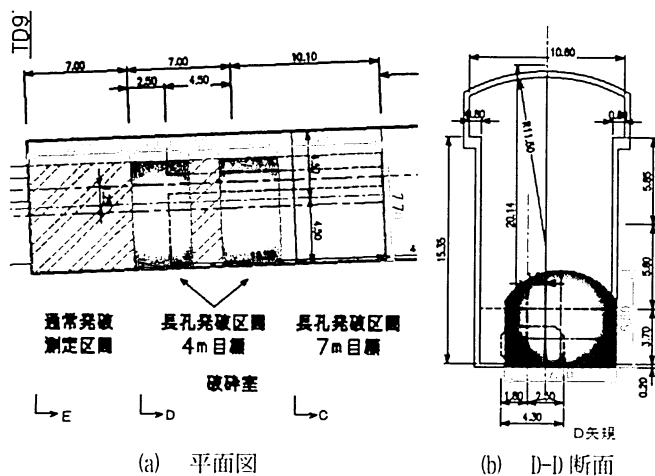


図-2 試験場所の地下空洞概要

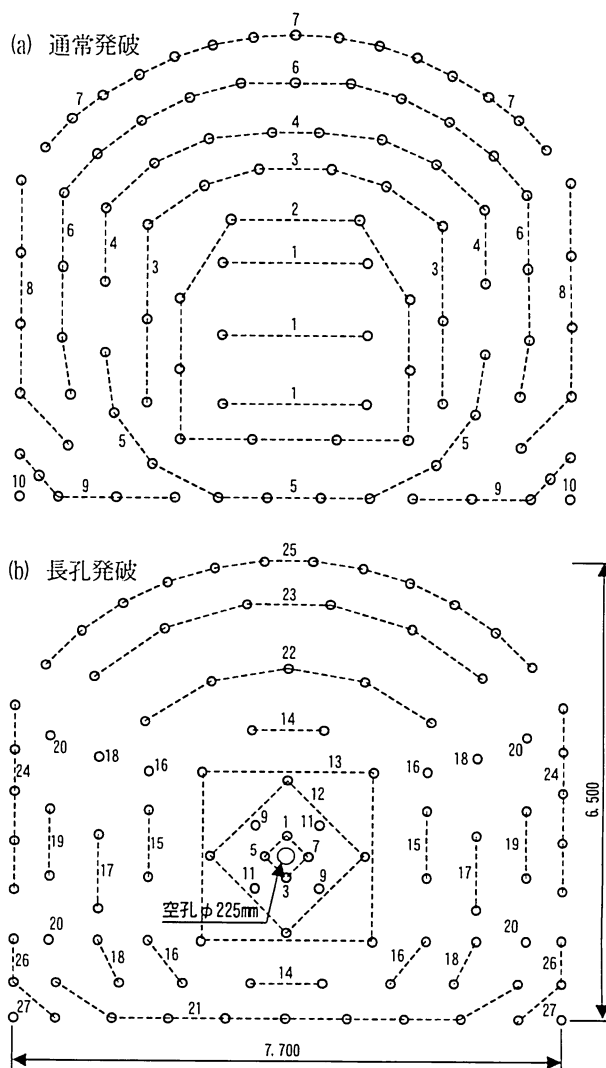


図-3 削孔パターン

外周，踏まえは径の小さなφ45とし，削孔時間の短縮を図った。

図-4に長孔発破の装薬状況を示す。紙筒タイプの膠質状のエマルジョン系含水爆薬を親ダイにして孔底に置いた。増しダイは，粒状のエマルジョン系含水爆薬を密度が0.75～0.85 g/cm³となるように圧縮空気で機械装填した。また，周辺孔ではスムーズプラスティングを行った。長孔発破の雷管には非電気式の導火管付きDS雷管を使用し，段数を通常発破の10段から27段に増加させた。

なお，通常発破では紙筒タイプの膠質状エマルジョン系含水爆薬のみを使用した。使用した爆薬の性能をANFOと対比して表-2に示す。

4. 出来形精度

試験施工の結果から，通常1および長孔1における一発破進行長を表-3に示す。同表には装薬孔や爆薬の緒元も併記した。

長孔発破の内，長孔2と長孔3のケースでは，開口亀裂

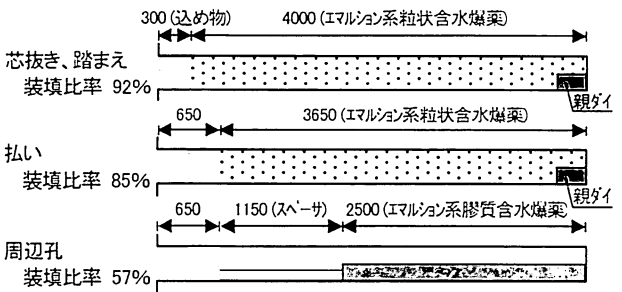


図-4 長孔発破における装薬状況

表-2 含水爆薬と ANFO の性能比較

状態	エマルジョン系含水爆薬		ANFO トンネル用
	膠状	粒状	粒状
かさ密度 (g/cm ³)	1.15～1.23	0.60～0.70	0.80～0.90
爆速 (m/s)	5800～6000	3500～4000	2500～3000
弾道振子 (mm)	78～84	66～72	—
雷管起爆感度	起爆	不爆	不爆
落つい感度 (等級)	8	8	8
殉爆度	2～4	—	—
耐水性	優良	優良	無し
後ガス	優良	最優良	要注意

表-3 試験施工における一発破進行長

試験 施工 ケース	目標 進行 長 (m)	芯抜き 方法 空孔径 (mm)	削孔径 (mm)		削孔 長 (m)	装薬 孔数	段数	装薬量(kg)		一発破 進行長 Lmax (m)	Lmax/D (%) D: 掘削幅*1
			一般	芯抜き				全体	最大/段		
通常1	1.5	Vカット	45	45	1.8	100	10	75.0	12	1.7	22
長孔1	4.0	バーンカット φ225 ×1孔	45	65	4.3	98	27	484.4	47.7	3.7	48

*1: 掘削幅 D=7.7 (m)

の分布や亀裂開口部に風化した粘土が挟在する悪条件が重なり，進行長が目標を下回ったり，当たりが生じた。

このように，長孔発破の一発破進行長は亀裂の性状や分布状況に大きく影響された。しかし，地山状態が相対的に良かった長孔1のケースでは，ほぼ4.0 mの進行長を達することができた。この長さはトンネル掘削幅7.7 mの52%に相当しており，最近報告されている長孔発破の進行長¹⁾と同程度の比率である。また，発破後の掘削外周面には，亀裂の少ない範囲に写真-1に示すノミ跡が残っていた。スムーズプラスティングの効果が発揮され，孔間が直線で結ばれて計画どおりの形状に掘削されている状況が分かる。

5. 発破振動

発破振動は，切羽後方の50m（測点1），100m（測点2），200m（測点3）の3箇所のトンネル底盤に振動速度計を配置し，鉛直および水平2方向の合計3方向の振動速度を測定した。

最大振動速度と震源からの距離の関係を図-5に示す。長孔発破では，段当たりの薬量が通常発破の約4倍となっているにもかかわらず，最大振動速度は通常発破の50～60%に小さくなった点が大きな特徴である。

震源からの距離が近い測点1における通常1と長孔1の鉛直方向の振動速度波形を図-6に，鉛直方向振動速度と段当たり薬量の関係を図-7に示す。図-7では各段の振動速度を図-6の速度波形から抽出している。

通常発破では，段当たりの薬量は芯抜きが4.5 kg，アーチの払いと外周が12.75 kgと11.25 kg，それ以外は7.5 kgであり，段ごとに大きな差はなかったが，振動速度は大きくばらついた。すなわち，通常発破の振動速度は，芯抜きとその周辺の払いで大きく，次いで外周孔，踏まえ，アーチの払い，踏まへの隅の順に小さくなった。

一方，長孔発破の場合には，段当たりの薬量は10kg

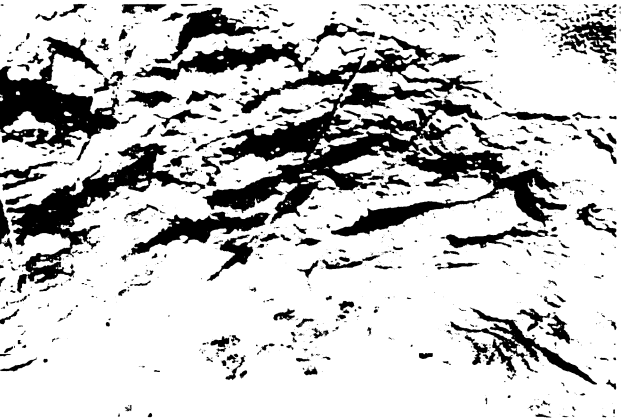


写真-1 スムーズプラスティングにおけるアーチ部のノミ跡

～50 kg程度までの範囲に設定したが、振動速度は通常発破に比較して全体に小さく、また、ばらつきも小さく特定の段で振動速度が大きくなることはなかった。

そこで、発破地点に最も近い測点1の鉛直方向の振動速度波形から、通常発破と長孔発破の違いを分析した。

通常発破では初段の芯抜きから最終の10段までを0.25秒間隔で起爆しており、波形は段ごとに繋がった状態となり、約3秒で振動は収束した。図-8に通常発破の場合のスペクトルを示すが、段ごとのスペクトル形状は良く似ており、特定の段の周波数が卓越することはなかった。切羽から50 m離れた位置で観測した振動特性から見れば、切羽では各段の発破ごとに構造が変化しても同じ破壊現象が起こっていた可能性が示唆される。

長孔発破の場合には、27段までの秒時ごとに速度振幅

に単独の波動が順に独立して現れ、主要な振動は通常発破よりも長い8秒まで続いた。このときの波形は、1～10段（0.0～1.0 sec）の芯抜き、11～21段（1.3～5.4 sec）の芯抜き周りの払いと踏まえ、22～25段（5.5～7.6 sec）のアーチの払いと外周、それ以降の26および27段の隅踏まへの区間ごとに類似していた。この内、21段までとそれ以降とで減衰の様子が異なった。21段までは波形のピークが生じた後の減衰が大きかった。これに対して、22段以降のアーチの払いと外周では、ピーク後の減衰が小さく振動が長く続いた。芯抜き周りの払い（16, 18, 19段）とアーチの払いとアーチの外周（22, 23, 25段）のスペクトルは図-9, 10のようであり、両者でスペクトル形状が異なった。長孔発破の場合には、22段以降に切羽の構造が変化してそれまでと異なった破壊現象が起こっ

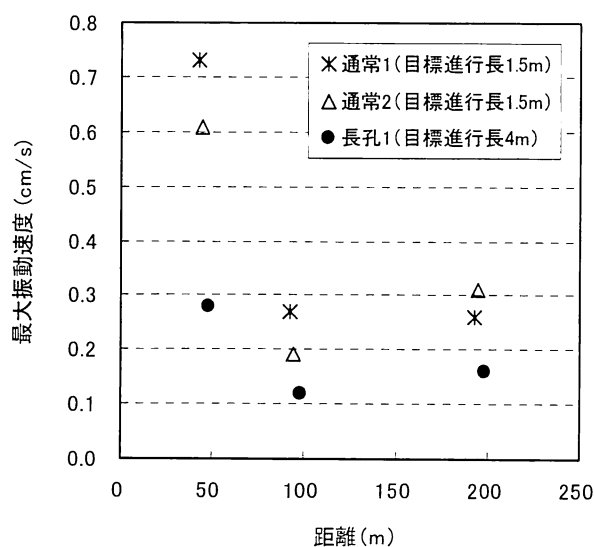


図-5 最大振動速度と震源からの距離の関係

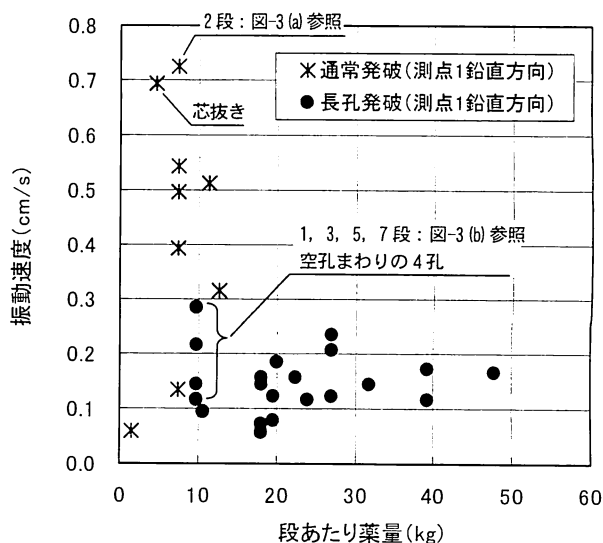


図-7 振動速度と段あたり薬量の関係（震源から50m地点）

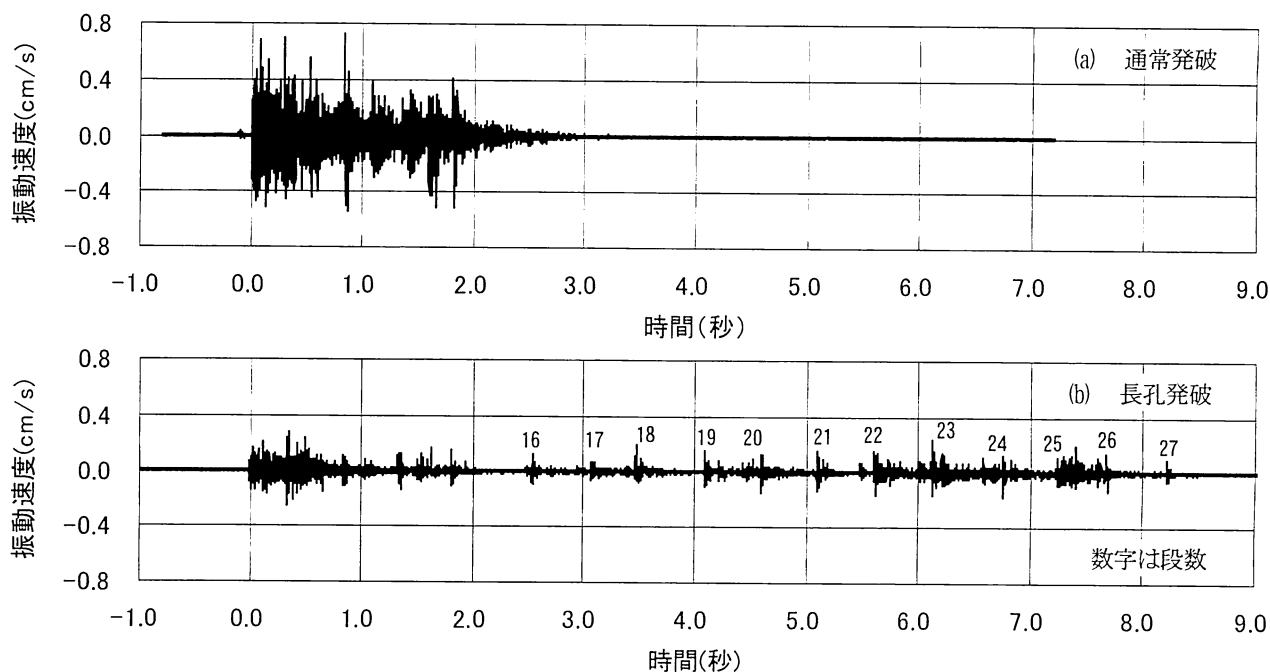


図-6 計測された速度波形（震源から50m地点、鉛直方向）

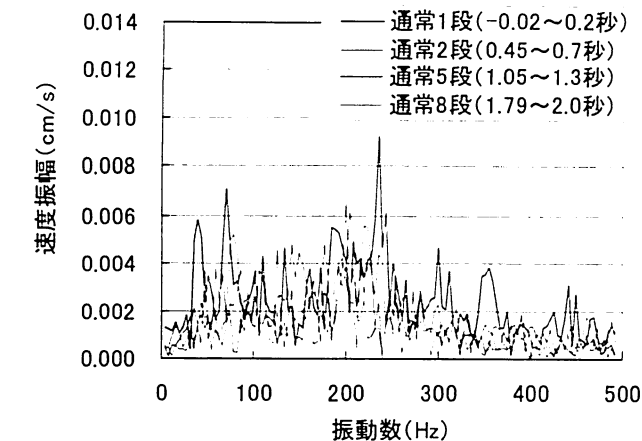


図-8 フーリエスペクトル（通常発破）

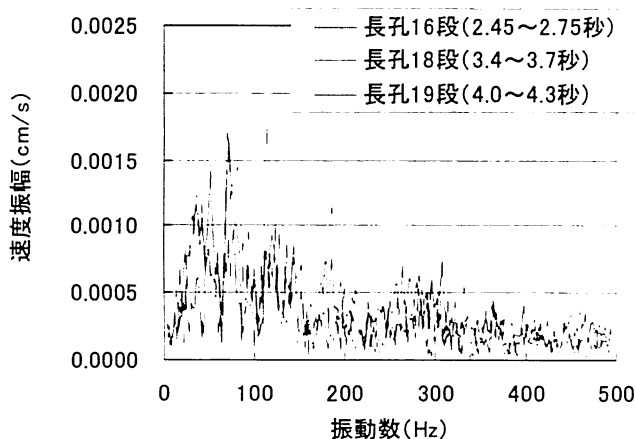


図-9 フーリエスペクトル（長孔発破、芯抜き周りの払い）

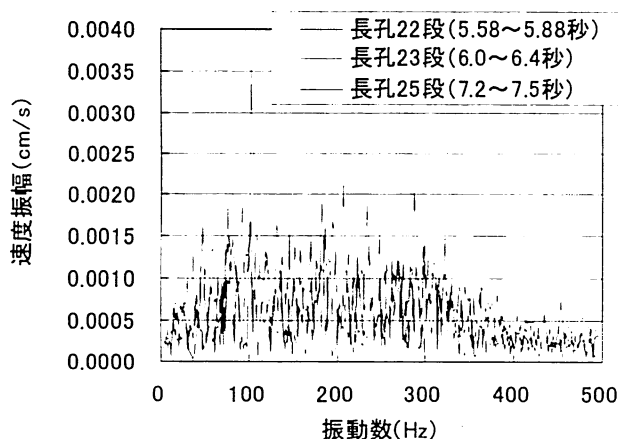


図-10 フーリエスペクトル（長孔発破、アーチの払いと外周）

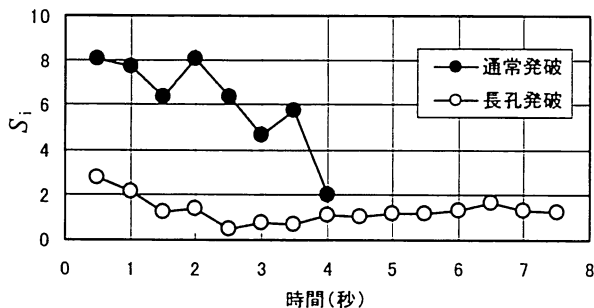


図-11 平均的な振動エネルギー

ていた可能性が示唆される。

図-6の振動速度波形を $\Delta T=0.5$ 秒ごとに区切り、振動速度を V_i とし、式(1)から0.5秒区間ごとの面積 S_i すなわち0.5秒区間ごとの平均的な振動エネルギーを求め図-11に示す。長孔発破の方が段当たりの薬量で約4倍、総薬量は約6.5倍であるにもかかわらず、計測された波形の面積は通常発破の1/3~1/4と小さく、振動が継続している間は段ごとにほぼ一定であった。したがって、掘削断面外側の地山に伝播した振動エネルギーは小さいので、残りのエネルギーがずりの小割や切羽後方へのずりの移動に費やされたと考えられる。また、伝播したエネルギーが段ごとにほぼ一定なので、通常よりも径の大きな空孔とシリンダカットの削孔パターンの組合せが適切であったと考えられる。

$$S_i = \sqrt{\sum V_i^2} / \Delta T \quad (1)$$

今回の長孔発破では、通常よりも大きな $\phi 225$ mmの空孔を設けて平行芯抜きを実施した。平行芯抜きでは、空孔が自由面として機能することに加え、空孔周辺から順次段発を行なうことで、振動低減効果も得られる。一般的なVカットに対して、空孔径100 mmの場合に40~50%の振動が低減された事例が報告されており²⁾、今回の試験施工においても、空孔による振動低減効果が発揮されたものと考えられる。

6. 掘削ずり径

長孔発破では掘削ずり径が大きくなり、ずり搬出に支障となることが懸念されている。長孔発破におけるずり径の分布を確認するために、写真-2に示す長孔発破直後の坑内で撮影したデジタル写真から、図-12に示すずりの粒径分布を算定した。その結果、径が10 cm以下のずりが支配的であり、長大トンネルのずり搬出に用いら



写真-2 長孔発破直後の切羽の状況

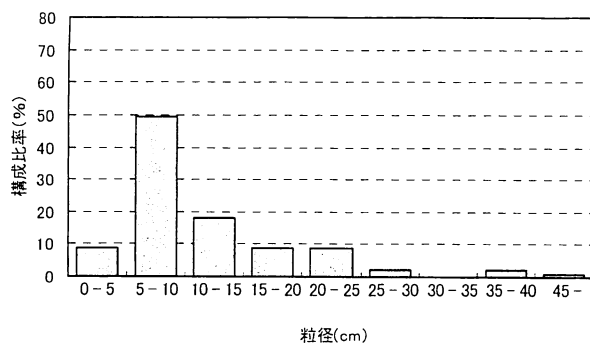


図-12 長孔発破におけるずり径の分布

れる連続ベルコンへの適応についても、クラッシャーに投入可能な粒径が多いことが確認された。

7. おわりに

今回の長孔発破の試験施工では、芯抜きに大口径の空孔を設けたシリンダカットを採用し、爆薬は粒状エマルジョン系含水爆薬を密充填することにより目標進行長

4mを実証した。

また、通常発破よりも薬量の多い長孔発破の振動速度が小さく、岩盤にも環境にも好ましい結果が得られた。爆薬と雷管の種類、その充填密度および削孔パターンの組合せが効果を発揮したと考えられ、掘削効率と掘削品質の両方を向上させ得る方策が示唆された。このような振動低減の原因については、使用した爆薬の爆速が小さかったこと、発破のエネルギーの一部がずりの小割や切羽後方への移動に費やされた可能性を指摘できる。

参考文献

- 1) 川島 義和, 田辺 洋一: 硬岩地山における長孔発破 (最長 7.2m) の施工ー 亥谷山 (いがたにやま) トンネル (賀田工区) ー, 日本トンネル技術協会第 70 回施工体験発表会, 2011. .
- 2) 火薬学会: 現場技術者のための発破工学ハンドブック, pp.454-456, 2001.

(2012. 9. 3 受付)

EXAMINATION CONSTRUCTION AND VIBRATION MEASUREMENT RESULTS OF LONG-HOLE BLASTING IN LIMESTONE TUNNEL

Seiji EBISU, Koji TSUKAMOTO, Takeshi ASANO,
Yoshiaki IWAMOTO and Yoshimasa TAURA

In the case of good rock mass conditions, the long-hole blasting is promising as measures of the rationalization of the mountains tunnel construction. However, the problem concerning an accurate evaluation method of the rock mass properties and concerning the selection of the blasting method with high reliability have been left in the practical use. Aiming at the solution of those problems, the examination construction of the long-hole blasting is carried out in the limestone tunnel of the CH-CM rock mass class. Here, the outline of the examination construction result of the long-hole blasting is shown, and detailed considerations of analysis results of the vibration measurement data are presented.