

放電衝撃力を用いた現地岩盤破碎実験

日下部祐基* 伊東佳彦** 前畑英彦***

1. まえがき

豊浜トンネルおよび第2白糸トンネル崩落事故等を契機に、現在開発局では道路防災工事として急崖斜面の危険岩体除去工事等が鋭意進められている。岩体除去工法としては、低コストで開発の歴史も古く、工法の特徴が高度化されている発破工法が一般に採用される場合が多い。しかし、急崖斜面の岩体除去工事では、対象岩体の背面にある亀裂による大規模崩落を避けるために、周辺への振動を抑えた各種工法が採用されているが、作業効率や経済性の課題をかかえており、より効率的な工法の開発が求められている。

放電衝撃力を用いて破碎する工法（以下、放電衝撃破碎工法と呼ぶ）は、岩体除去工事での事例は少ないが、周辺環境への影響が小さく、さらに破碎効率が良好であり、今後岩盤破碎へのさらなる活用が期待される工法である。ここでは、放電衝撃破碎工法を用いた岩盤破碎現地実験を地質の異なる2現場で行って、その適用性を検討したので報告する。

2. 放電衝撃破碎工法

水などの液体中に浸した金属細線に高電圧を放電すると、金属細線は瞬時に熔融・気化する。また、金属細線周囲の液体も高温となり気化する。この時に発生する金属細線の熔融・気化に伴う膨張圧や、液体の高温蒸気圧を総称して放電衝撃力という。放電衝撃破碎工法は、この衝撃力を利用して脆性材料であるコンクリートや岩石などを破壊する工法である。本工法の特長は、非発破工法であることに加えて、瞬時に大きな衝撃力が得られること、および出力電圧により衝撃力を制御できること、などが挙げられる。

図-1は、破碎工法に用いる放電衝撃力発生装置¹⁾の基本構成回路を示したものである。本装置は、高電圧で制御充電されたコンデンサの蓄積エネルギーを、電子スイッチで金属細線へ放電供給することにより放電衝撃力を発生させるものである。表-1に放電衝撃

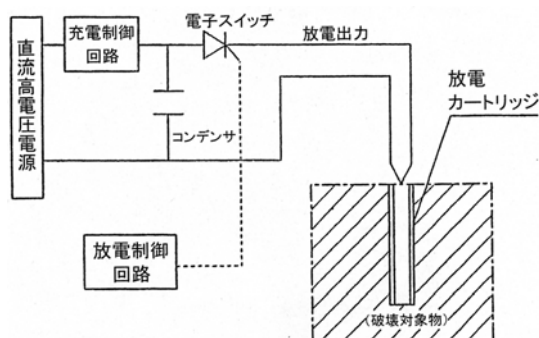


図-1 基本構成回路図

表-1 放電衝撃発生装置の仕様

外形寸法	2 ^W × 1.5 ^H × 1 ^D m
重量	約 1,300kg
放電出力	4出力
充電電圧	9,000V まで連続可変
蓄積エネルギー	20kJ/1出力
充電時間	90sec

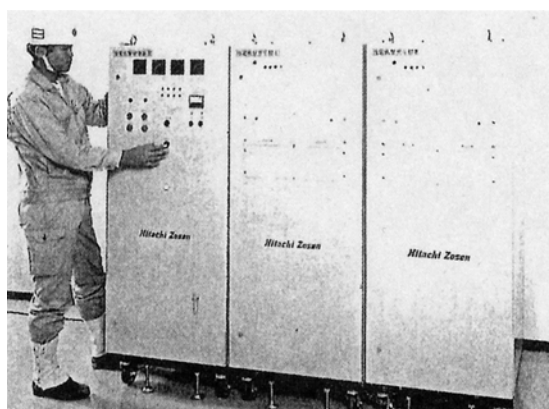


写真-1 放電衝撃力発生装置

発生装置の仕様を、写真-1に現地実験で用いた装置の外観を示す。

破碎方法は、あらかじめ穿孔した破碎対象物に金属細線と水などの圧力伝達媒体を封入した放電カートリッジを挿入した後、砂を充填して水締めし、放電カートリッジの端子に高電圧大電流を供給して放電衝

撃力を発生させ破碎するものである。放電カートリッジは、図 - 2 に示すようにプラスチック容器に水性ゼラチン（以下、ノーマル型放電カートリッジと呼ぶ）あるいはパワーアップ用の石油類の充填剤（以下、パワー型放電カートリッジと呼ぶ）が充填され、この中に 2 本の導線に接続された金属細線が挿入されている。放電カートリッジのサイズは、 $\phi 12 \times 100\text{mm}$ 、 $\phi 18 \times 100\text{mm}$ 、 $\phi 38 \times 120\text{mm}$ の 3 種類で、金属細線の太さにより 3000V ～ 9000V 用のものがある。現地実験では、6000V および 9000V ノーマル型放電カートリッジ（以下、6000V ノーマルおよび 9000V ノーマルと呼ぶ）と、3000V パワー型放電カートリッジ（以下、3000V パワーと呼ぶ）を用いた。

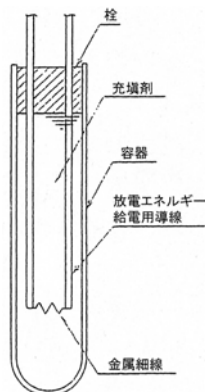


図 - 2 放電カートリッジ概要図

なお、本工法は、岩石やコンクリートの破壊²⁾およびトンネル内での弾性波探査の震源に用いる³⁾など、一部実用化もされている。

3. 現地岩盤破碎実験

実験は、平成 11 年および平成 12 年にそれぞれ北海道内の異なった場所の計 2 現場で実施した。

平成 11 年の実験⁴⁾（以下、平成 11 年実験と呼ぶ）は、一般国道 452 号美瑛町の道路改良現場において、人工的に平坦にした岩盤面および斜面高さ 20m、勾配 1 割程度の岩盤斜面天端で行った。現地の地質は亀裂の多い熔結凝灰岩が主体であり、岩石の一軸圧縮強度は 4.9 ～ 29.4 MN/m² で強度にバラツキがみられた。表 - 2 に、実施した実験ケースの条件を示す。実験では、各ケースとも放電破碎時の背面への影響を調査するために、加速度計を 3 ケ所（1 ケ所に鉛直、水平各 1 方向の 2 点測定）に設置して、破碎時に発生する振動加速度波形を計測した。図 - 3 に、各実験ケースの加速度計配置図を示す。

表 - 2 平成 11 年実験の実験ケース

Case	電圧 V	カートリッジ	位 置	孔数	孔間 隔 m	列数	孔深さ m
1	6000	ノーマル	斜面背後の平坦面	4	0.4	1	0.3
2	6000		斜面背後の平坦面	4	0.3	1	0.3
3	6000		斜面背後の平坦面	4	0.2	1	0.3
4	9000		斜面背後の平坦面	4	0.4	1	0.3
5	9000		斜面背後の平坦面	4	0.3	1	0.3
6	9000		斜面背後の平坦面	4	0.2	1	0.3
7	3000	パワー	斜面背後の平坦面	4	0.4	1	0.3
8	3000		斜面背後の平坦面	4	0.3	1	0.3
9	9000	ノーマル	斜面天端付近	4	0.2	1	0.3
10	9000		斜面天端付近	4	0.3	1	0.3
11	3000	パワー	斜面天端付近	8	0.3	2	0.3
12	3000		斜面天端付近	8	0.5	2	0.3

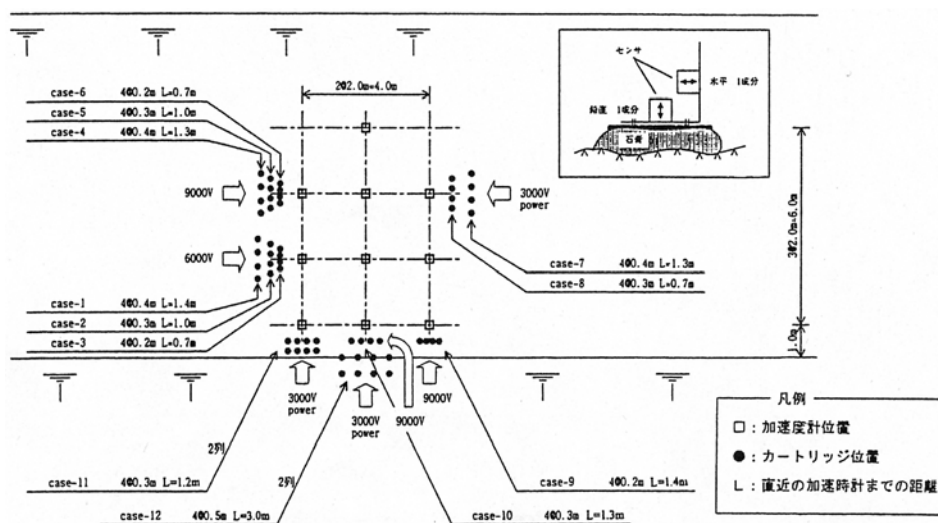


図 - 3 加速度計配置図

表 - 3 平成 12 年実験の実験ケース

Case	破碎工法	孔 数	孔間隔 (m)	列 数	孔深さ (m)
1	放電衝撃破碎工法	9	0.5	3	0.5
2	"	9		3	
3	"	6		2	
4	"	6		2	
5	"	3		1	
6	"	3		1	
7	A 在 来 工 法	9		3	
8	"	9		3	
9	"	6		2	
10	"	6		2	
11	"	3		1	
12	"	3		1	
13	B 在 来 工 法	6		2	
14	"	6		2	
15	"	3		1	

平成 12 年の実験（以下、平成 12 年実験と呼ぶ）は、一般国道 229 号神恵内村の海岸埋め立て現場において、深さ 1m 程度の溝を掘削し、その溝斜面を自由面として行った。現地の地質は流紋岩質水冷破碎岩であり、岩石試験による一軸圧縮強度が 95.7MN/m²で中硬岩に分類される。この実験では他の破碎工法との比較検討を目的に、放電衝撃破碎工法とほぼ同等のエネルギーをもつ在来工法として 2 工法（以下、A 在来工法および B 在来工法と呼ぶ）の計 3 工法を用いた実験を行っている。実験数は、放電衝撃破碎工法と A 在来工法が破碎器装填孔 9 本、6 本、3 本のケースを各 2 実験で計 12 実験、B 在来工法が装填孔 6 本のケースを 2 実験、3 本のケースを 1 実験の計 3 実験を実施した。表 - 3 に、実施した実験ケースの条件を示す。実験では、

各ケースとも破碎時の背面への影響を調査するために、加速度計を 3 ヶ所（1 ヶ所に鉛直 1 方向、水平 2 方向の 3 方向測定）に設置して、破碎時に発生する振動速度波形（積分回路を用いて加速度を速度に変換した。）を計測した。

4．実験結果

平成 11 年実験の測定結果例として、図 - 4 にケース 1 の振動源距離 1.4m で測定された振動加速度波形を示す。一般に自然地震は加速度で評価されるのに対して、破碎振動は振動速度で評価される。その理由は、破碎振動は自然地震に比べて周波数が高く、持続時間が短いという特性を有しており、破碎振動と被害の関係を調査したこれまでの報告⁵⁾によると、振動特性値を振動速度で表すとその被害との関係が実際と良く一致するということがある。そこで、平成 11 年実験のデータ整理法としては、振動加速度波形から最大振動加速度とその波形の周波数を求めて整理し、さらにそれらの値を用いて、以下の式により振動速度および変位量を求めた。

$$V = \alpha / (2 \cdot \pi \cdot f) \dots\dots (1)$$

$$A = V / (2 \cdot \pi \cdot f) \dots\dots (2)$$

ここに、V：振動速度 (kine) A：変位量 (cm)

α ：振動加速度 (gal) f：周波数 (Hz)

なお、最大振動速度については、加速度波形を 1 階積分することにより求めた速度波形からも読み取った。

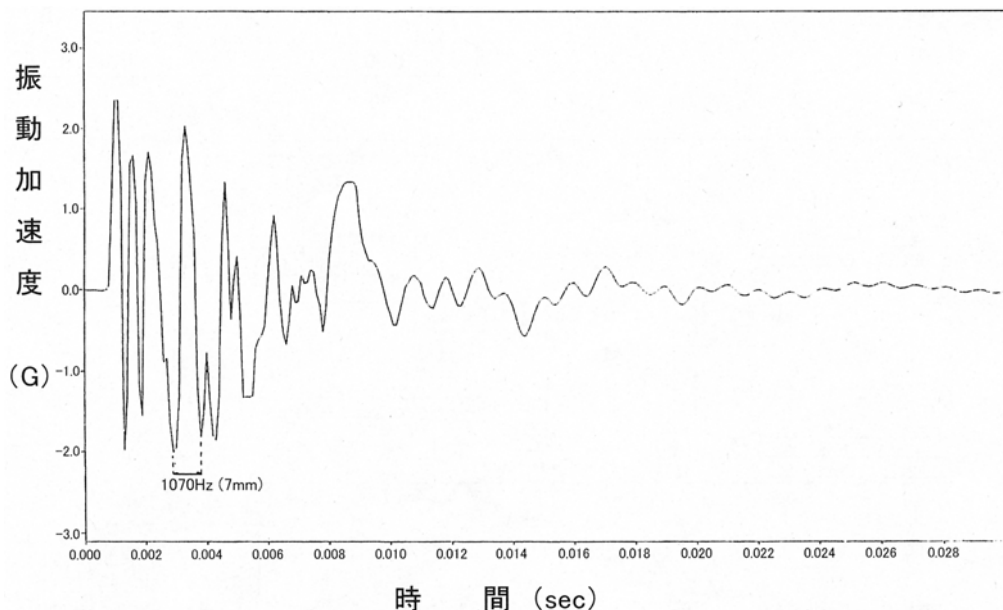


図 - 4 振動加速度波形の一測定例
(平成 11 年実験ケース 1 振動源距離 1.4m)

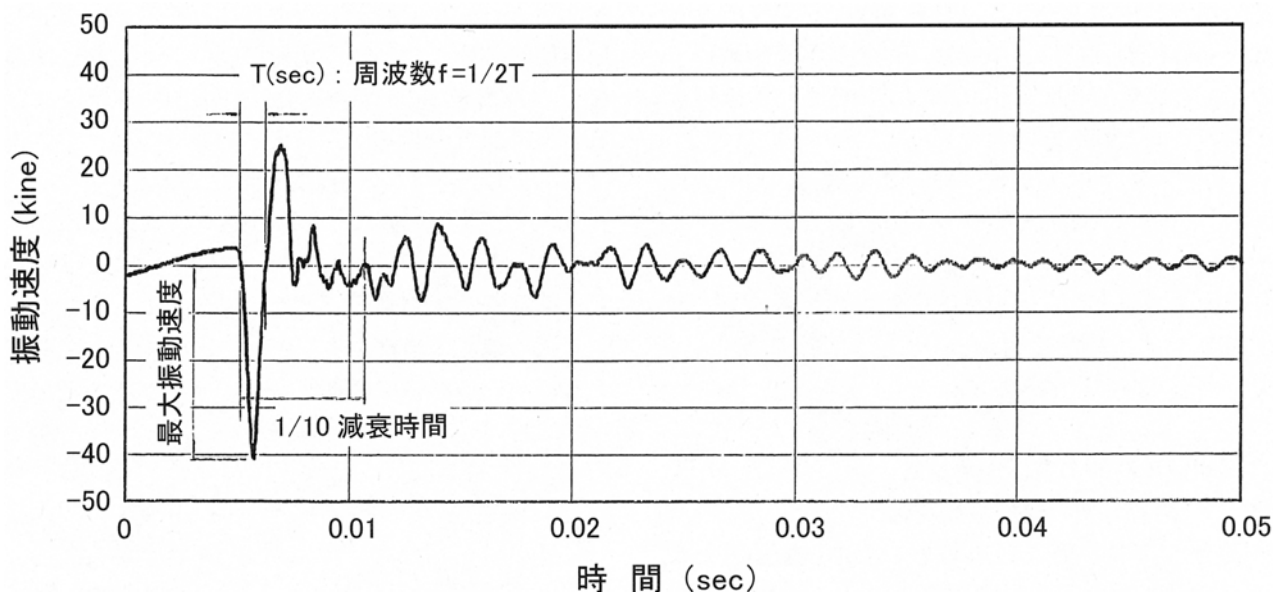


図 - 5 振動速度波形の一測定例
(平成 12 年実験ケース 1 振動源距離 3.3m)

平成 12 年実験では、前述したように振動速度波形を直接計測した。図 - 5 は、測定結果例としてケース 1 の振動源からの距離 3.3m で測定された水平方向の振動速度波形（1 方向のみ）を示したものである。データの整理法としては、振動速度波形から最大振動速度とその周波数、および振動速度が最大振動速度の 1/10 に減衰するまでの時間を求めて整理した。

5. 考察

5.1 放電衝撃破碎工法による岩盤破碎状況

平成 11 年実験では、まず最初に放電衝撃破碎工法により対象岩盤の破碎に必要な衝撃力を把握する目的で、平坦な岩盤掘削面において、コンデンサ充電電圧と放電カートリッジの種別およびそれを装填する孔の間隔を変化させて実験を行い、岩盤破碎状況の観察を行った。その結果は、6000V ノーマルを用いた実験ケース 1～3 では亀裂の発生が認められず、9000V ノーマルおよび 3000V パワーを用いた実験ケース 4～8 では、いずれの場合も孔間を結ぶ亀裂が確認された。このことから、本実験で対象とした岩盤を破碎するためには、9000V ノーマルおよび 3000V パワーの放電カートリッジにより得られる衝撃力が必要であることがわかる。

なお、これまでの研究⁴⁾で放電衝撃破碎工法による放電衝撃力は、コンデンサの充電電圧の 1.5 乗にほぼ比例することが確認されている。また、パワー型放電

カートリッジを用いた場合には、ノーマル型放電カートリッジを用いた場合に比べ約 8 倍の衝撃力があることも明らかにされている。現地実験における充電電圧および放電カートリッジの組合わせによる破碎力は、これらをもとに単純に計算すると 6000V ノーマル < 9000V ノーマル < 3000V パワーの順になる。

ベンチカットを模擬して斜面天端付近で実施した実験では、9000V ノーマルおよび 3000V パワーの放電カートリッジのみを用いた。また、3000V パワーを用いた実験では、実施工に用いる場合に岩盤を小割りにする必要があることを考慮して、孔数を 4 本から 8 本に増して格子状に破壊することを意図した。

なお、装置の能力上、充電電圧 9000V の場合には表 - 2 に示されるように放電は 4 出力以内に限られるが、3000V の場合には最大 12 出力まで使用可能である。各ケースの岩盤破壊状況については、9000V ノーマルを用いた実験ケース 9 および 10 で最長 90cm 程度の三角錐状の岩塊が認められたのに対して、3000V パワーを用いた実験ケース 11 および 12 では、意図したとおり長径 50cm 程度以下の岩塊に破碎されていた。

以上より、多くの岩体除去工事で要求される径 30～50cm 程度までの小割りがほぼ確実に行えること、および一度に多量の岩盤の破碎が可能であることから、実施工における作業効率の点からは、3000V パワーの放電カートリッジを使用するのが有利であると考えられる。

平成 12 年実験ではこの結果を受けて、放電衝撃破碎

工法に用いる放電カートリッジを3000Vパワーのみとした。破碎後の目視による観察では、放電衝撃破碎工法の全ての実験で孔間を結ぶ亀裂が確認され、破碎状況は概ね良好と判断された。

なお、平成11年実験と平成12年実験で用いた3000Vパワーの放電カートリッジは、圧力伝達媒体として充填した石油類の液量が若干異なっている。これは各実験で対象とした岩石強度を考慮したもので、平成11年実験に用いた放電カートリッジの液量7ccに対して、平成12年実験では10ccとした。

5.2 岩盤破碎時の背面地盤振動

5.2.1 岩盤地質と地盤振動特性

平成11年実験と平成12年実験の現地岩盤地質を比較すると、両岩盤とも層理や節理に沿った亀裂を有し、平成12年実験の岩盤は平成11年実験の岩盤より平均して5～6倍の強度を有する。このような地質条件をもとに、平成11年実験と平成12年実験で実験条件がほぼ同様のケースを比較検討する。

図-6は、ベンチカットを模擬した放電衝撃破碎工法の実験ケースについて、振動源からの距離と2方向の合成値とした最大振動速度の関係を示したものである。まず平成12年実験だけをみると、孔数の違いによる最大振動速度は、3孔の値が比較的小さいが、6孔と9孔の値には差がみられない。平成11年実験では、4孔と8孔で差異が認められるが、この場合には放電カートリッジの違いもある。

両実験を含めてみると、孔数よりも3000Vパワーと

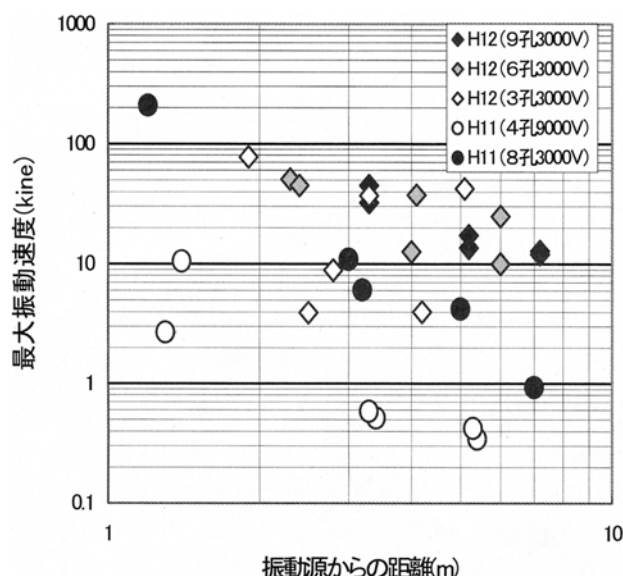


図-6 岩盤地質別振動源からの距離と最大振動速度

9000V ノーマルで差があるようにみえる。すなわち、放電衝撃破碎工法による地盤振動は、孔数差に関係がなく放電カートリッジの種別に依存すると推察される。平成11年実験の8孔3000Vパワーの最大振動速度は、平成12年実験の同程度の条件である9孔および6孔3000Vパワーの値より多少小さい。これは前述した放電カートリッジに充填した液量の違いによるものと考えられる。岩盤強度が大きい場合には、それを破碎するたあり放電衝撃エネルギーを大きくするため、その影響で振動速度も大きくなることが推測される。

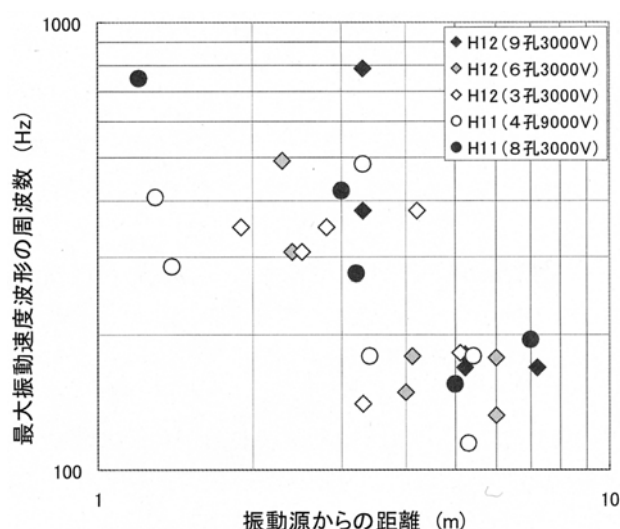


図-7 岩盤地質別振動源からの距離と周波数

図-7に、同実験ケースの振動源からの距離と最大振動速度波形の周波数との関係を示す。周波数は、振動源から離れるほど小さくなる傾向が認められ、高周波成分が減衰していることが推測される。また、平成11年実験と平成12年実験の結果には差が認められない。このことから最大振動速度波形の周波数は、岩盤地質、放電カートリッジの種別や孔数に影響されないことが推察される。

5.2.2 破碎工法と地盤振動特性

各種破碎工法と地盤振動特性の関係を、平成12年実験の結果から考察した。図-8に振動源からの距離と、3方向の振動波形を合成して求めた最大振動速度の関係を示す。各工法とも振動源から遠くなるほど最大振動速度が小さくなる傾向が認められるが、放電衝撃破碎工法の最大振動速度は在来工法の2つに比べて、全体的に大きな値を示していることが分かる。これは、放電衝撃破碎工法が他の工法よりも周辺地盤に

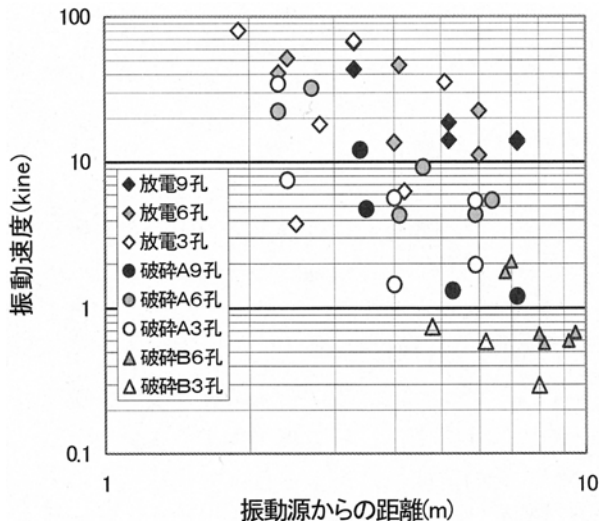


図 - 8 破碎工法別振動源からの距離と最大振動速度

大きな影響を与えることを意味する。

しかし、破碎実験後の周辺地盤を肉眼観察した結果では、放電衝撃破碎工法がA、B各在来工法に較べて周辺地盤の既存亀裂を開口させたり、あるいは新たな亀裂を発生させたような状況が確認されなかった。したがって、最大振動速度のみの比較では、周辺地盤に与える影響を評価できないと推察される。

周辺地盤に与える影響の他の要因としては、振動継続時間が考えられる。各工法の振動源からの距離と、振動速度が最大振動速度の1/10に減衰するまでの時間(3方向平均値)を振動継続時間として比較した。その結果を図-9に示す。放電衝撃破碎工法の振動継続時間は、他の工法に比べて短いことが読みとれ、最大

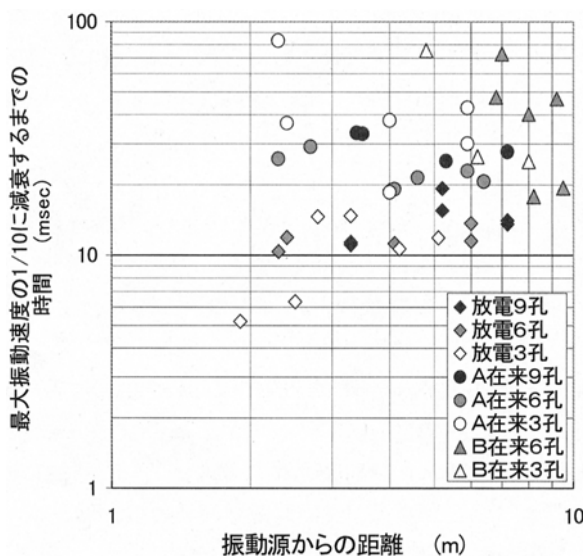


図 - 9 破碎工法別振動源からの距離と最大振動速度の1/10減衰時間

振動速度の比較より現場観測の結果に対応していると推測される。今後、これらの要因が周辺地盤の挙動にどの程度反映しているかを、定量的に評価する必要があると考える。

その他の振動特性として、図-10に各工法の振動源からの距離と最大振動速度波形の周波数(3方向平均値)の関係を示す。前に示した岩盤地質の関係では、影響する因子が認められなかったが、ここでは周波数の傾向が各破碎工法別に分別される傾向が認められる。周波数の減衰傾向は、放電衝撃破碎工法およびB在来工では認められるが、A在来工法では認められない。これらのことから、最大振動速度波形の周波数の傾向は、各破碎工法によって異なることがわかる。

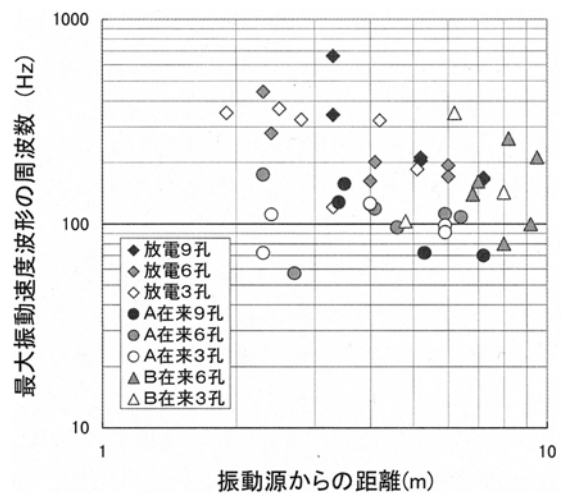


図 - 10 破碎工法別振動源からの距離と周波数

5.3 現時点での放電衝撃破碎工法の適用性評価

今回の実験結果より、背面振動の大きさを従来のように最大振動速度から評価すると、放電衝撃破碎工法は他の在来工法より背面振動が大きく、岩体除去工事には適用できないと判断される。しかし、目視観察では前述したように既存亀裂などへの影響は、放電衝撃破碎工法とA、B各在来工法とも同程度であることが確認された。また、各破碎工法による破碎後に確認された孔間を結ぶ亀裂の発生率は、放電衝撃破碎工法が各在来工法に較べて高く、対象岩体を小割りにできる可能性が高かった。このことについて、既存研究資料を基に若干の考察を加える。

トンネル掘削の最外周部の発破には、予定掘削面に沿った滑らかな破断面の形成と岩盤の発破損傷の抑制が期待されるスムーズプラスティング法により実施される。同法の破碎機構解明に関する研究の中で、金子ら⁷⁾は破壊力学に基づいた動的応力解析法を用いてシ

ミュレートしており、周辺の亀裂進展を抑制して孔間を結ぶ亀裂を卓越させる発破条件は、複数の発破孔を同時に起爆させる斉発であることが示されている。

放電衝撃破碎工法は、放電衝撃力発生装置の放電スイッチに近年のパワー半導体スイッチ技術により開発されたサイリスタスイッチを採用している。同スイッチは、低損失で大容量の充電スイッチングを可能にし、さらに μs オーダーの斉発スイッチング制御を実現できるものである。このことが今回の破碎状況に反映されたことが推測される。今後、この点についてさらに詳細な実験を行い、検証する必要があると考える。

6. まとめと今後の課題

以上をまとめると、次のとおりである。

- 1) 実験対象とした岩盤を破碎するためには、9000 V ノーマル型放電カートリッジおよび3000 V パワー型放電カートリッジにより得られる衝撃力が必要である。
- 2) 実施工では岩盤を小割りに破碎することを考慮すると、3000 V パワー型放電カートリッジを8本以上用いる方法が作業効率の上から有効であると考えられる。
- 3) 放電衝撃破碎工法における岩盤地質と地盤振動特性の関係では、岩盤強度が大きくなるほどそれを破碎するための放電衝撃エネルギーを大きくする必要があるため、その影響で最大振動速度も大きくなることが推測された。また、その周波数は岩盤地質などに影響されないことが推察された。
- 4) 破碎工法と地盤振動特性の関係では、最大振動速度は放電衝撃破碎工法がA、B各在来工法の2つに比べて全体的に大きな値を示し、振動継続時間とした最大振動速度の1/10に減衰するまでの時間は、放電衝撃破碎工法が在来工法に比べて短いことがわかった。今後、これらの要因が周辺地盤の振動による挙動に、どの程度反映しているかを定量的に評価する必要があると考える。
- 5) 放電衝撃破碎工法の最大振動速度が他工法に比べて大きいにも拘わらず、既存亀裂への影響が同程度で孔間を結ぶ亀裂の発生率が他工法よりも高かった原因としては、精度の高い斉発が可能なスイッチの採用にあることが、既存研究資料より推察され

た。今後、さらに詳細な実験を行い検証する必要があると考える。

7. あとがき

本報告では、放電衝撃破碎工法を用いた岩盤破碎現地実験を実施して、岩盤地質の違い、放電カートリッジの種別・本数、他の在来工法との比較などにより岩盤破碎性能や破碎時に発生する振動特性の違いなどについて検討を行った。放電衝撃破碎工法は、現時点では危険岩体除去工法として実用化するまでに至っていないが、その可能性はあると考えている。今後、さらに本工法の実用化に向けて試験研究する所存である。

なお、本実験を実施するにあたり、北海道開発局旭川開発建設部および小樽開発建設部の関係各位には、現地において多大のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荒井浩成、前畑英彦：放電衝撃破碎法の開発（第2報）、平成10年電気学会産業応用部門全国大会、pp311～314、1998
- 2) 荒井浩成、大江博之、塚原正徳、井上鉄也、前畑英彦：放電衝撃破圧を利用した岩石破壊法の検討、土木学会第26回岩盤破壊に関するシンポジウム要旨、p261～265、1995.1
- 3) 城まゆみ、川上純、今井博、前畑英彦、荒井浩成、井上鉄也、和田有司：放電衝撃の弾性波探査震源としての性能評価、第34回地盤工学会研究発表会講演集、pp365～366、1999.7
- 4) 日下部祐基、足田貞良、鈴木哲也、餌取貴之、前畑英彦：放電衝撃破碎工法による岩盤破碎現地実験、地盤工学会北海道支部技術報告集第40号、pp193～198、2000.2
- 5) U.Langefors, et.al: Ground Vibrations in Blasting, Water Power, Part , October. 1858.
- 6) 前畑英彦、荒井浩成、井上鉄也、玉越大介、大江博之、西田昭二、今井健治、吉井一：放電衝撃力発生装置及びその用途開発、日立造船技報、Vol.60、No.2、pp30～37、1999.7
- 7) 金子勝比古、山本雅昭、諸岡敬太、田中義晴：スームブラastingにおける起爆秒時精度の影響、火薬学会誌、Vol.58、No.3、pp91～99、1997.3



日下部 祐基*

Yuki KUSAKABE

北海道開発土木研究所

農業開発部

地質研究室

研究員



伊東 佳彦**

Yoshihiko ITO

北海道開発土木研究所

農業開発部

地質研究室

室長



前畑 英彦***

Hidehiko MAEHATA

日立造船株式会社

技術研究所要素技術センター

精密・新エネルギー研究室

室長・主席研究員