



放電衝撃力破碎技術と施工適用例

荒井 浩成

放電衝撃力破碎法は、媒体に浸漬した金属細線に高い放電エネルギーを供給することで生じる細線と媒体の爆発的気化現象による衝撃力を利用するもので、高効率破碎と環境への影響抑制の特長を兼ね備えた非発破工法である。日立造船では、ジャイアントパルス発生技術に着目した半導体パワースイッチング技術と高衝撃力発生技術を開発し、さらに本技術独自の工法開発を進めることによって実用レベルに達し、事業化が可能となった。

本報文は、システムの構成および破碎装置（ESG シリーズ）について述べるとともに、高衝撃力発生技術を概説し、さらに、適用事例として、特に施工条件の厳しかった工事または試験施工のいくつかを紹介する。

キーワード：放電衝撃力、金属細線放電、岩盤破碎、鉄筋コンクリート解体、制御破砕

1. はじめに

発破は最も効率的かつ低コストの破碎工法であるが、作業の安全性や周辺への影響の点から、市街地またはその周辺における工事に使用することは困難である。また、市街部の主流である大型ブレーカ等の機械工法についても、周辺環境や住民への配慮から使用制限が高まり、新工法の開発が望まれている。

放電衝撃力破碎技術は、Hitz（日立造船株式会社（以下、当社））独自のオリジナル技術¹⁾で、図-1の他工法に対する位置づけに示すように、高効率破碎性と制御性に優れ、環境面での抑制効果のある工法として期待できる。

本技術の実用化に伴い、事業化に到ったのでここに

紹介する。なお、Hitz は標準仕様の装置、システムの製作販売を行い、同グループの HSE（日立造船鉄構エンジニアリング株式会社）が実施工を担当するとともに、新工法および特殊仕様装置、システムの開発を行う。

2. 放電衝撃力破碎システムの概要

(1) 基本システム構成

図-2 は、本破碎システムの基本構成を示している。同図に示すように、放電衝撃力破碎システムは、放電衝撃力破碎装置本体、放電出力ケーブルおよび複数本の放電カートリッジで構成される。

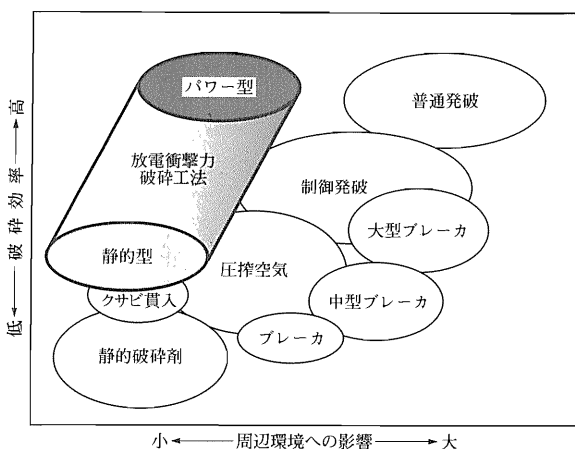


図-1 放電衝撃力破碎工の位置づけ

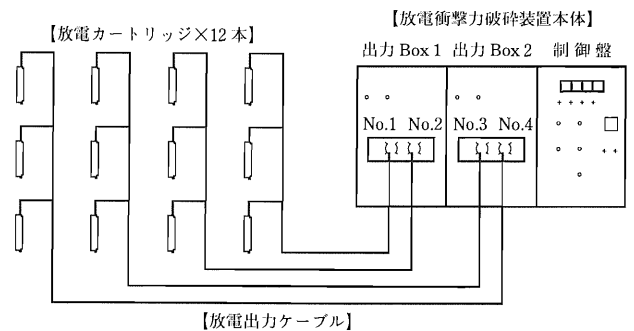


図-2 放電衝撃力破碎システム基本構成

なお、同図は当社 ESG シリーズ（表-1）の最大仕様である 10 kV 級 4 出力の“ESG-10 K 4”²⁾を例にし、1 出力に 3 本の放電カートリッジを並列接続しているが、1 本あたりの放電エネルギーは当然の事なが

表—1 ESG シリーズ標準仕様

	ESG-10 K 4	ESG-7 K 2	ESG-4 K 1
入 力 電 源	商用および発電機, 単相または 3 相 200 V-1~2 kVA, 50 Hz/60 Hz 両用		
出 力 数	4 出力	2 出力	1 出力
放 電 電 圧	~9 kV 連続可変設定	~6.5 kV 連続可変設定	~3.5 kV 連続可変設定
蓄積エネルギー	約 100 kJ	約 20 kJ	約 4 kJ
充 電 時 間	約 90 s (9 kV 充電時)	約 40 s (6.5 kV 充電時)	約 15 s (3.5 kV 充電時)
カートリッジ 接 続 本 数	静 的 : 8 本 (減衰有) パワ-型 : 12~16 本	静 的 : 4 本 (減衰有) パワ-型 : 4~6 本	静 的 : 1 本 パワ-型 : 1~2 本
安 全 機 能	充放電インターロック, 漏電遮断/過電流保護, 残電荷消去機能, 再/逆充電防止		
外 形 寸 法	W 700×H 1,500×D 950 mm/盤	W 700×H 1,200×D 950 mm/盤	W 700×H 700×D 600 mm/盤
盤 構 成	3 盤構成 (制御電源/充・放電分割)	1 盤構成 (制御電源/充・放電一体)	1 盤構成 (制御電源/充・放電一体)
総 重 量	約 1,800 kg	約 500 kg	約 120 kg
搭 載 車 輛	2tトラック以上	軽トラック以上	商用バン, 1 BOX カー

ら 1/3 となる。

しかし、後述するパワー型カートリッジを使用した場合、各カートリッジの発生力は減衰することなく自由に設定することが可能である。ただし、並列可能な本数は、装置仕様により異なる。

(2) 放電衝撃力発生装置

(a) 標準仕様装置

放電衝撃力破碎装置は、充・放電制御電源と出力数分の充・放電回路を内蔵したパワースイッチングユニットからなり、各ユニットは単独または同時に作動制御できる。また、充電コンデンサからの放電スイッチに特殊サイリスタを採用しているため、安定した放電制御ができ、斉発性に優れている。

写真—1 は、当社の放電衝撃力破碎装置の標準モデルである「ESG-7 K 2」を 2 台並べた状態を示している。

本装置は 7 kV 級 2 出力を 2 系統有し、パワー型カートリッジ 4 本の斉発が可能である。これは、1 自由面の芯抜き破碎を考慮したもので、払出し破碎などの施工として十分な破碎力を有する。



写真—1 標準モデル ESG-7 K 2 (2 台)

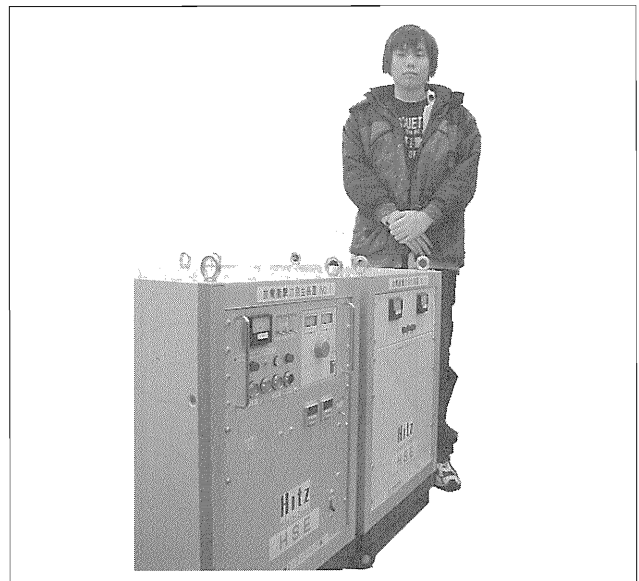
また、充・放電制御電源とパワースイッチングユニットが一体化し、複数の同一装置間での連動操作機能（オプション）も可能である。例えば、写真—1 に示すような状態で連動した場合、あたかも 4 出力装置として機能し、個々に操作すれば 2 箇所での破碎工事が可能となる。

また、4 出力装置として比較すれば、外形寸法、重量ともに「ESG-10 K 4」の約 2/3 である。

(b) 特殊仕様装置

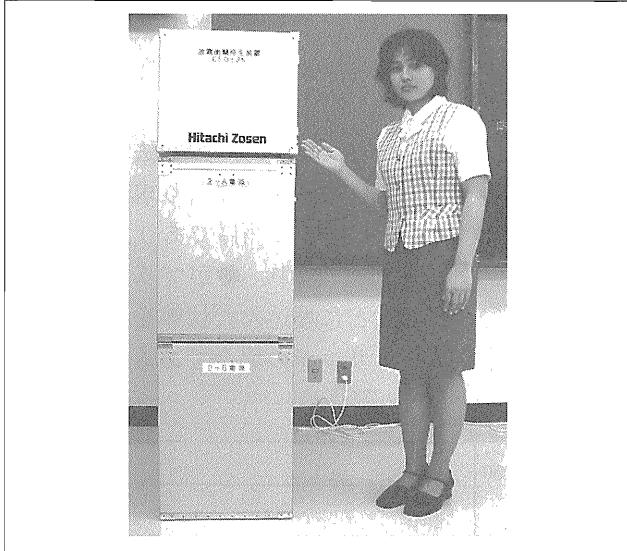
写真—2 は、コンパクト化と段発制御を目的とした、「ESG-4 K 3 AT」で、約 700 mm 角の筐体（キャスト除く）2 台で構成された 4 kV 級 3 出力の装置である。

本装置は、段発制御機能として、各出力間の放電時間差を最大 30 s まで 10 ms 単位で任意設定可能である。これにより、作業環境に適した時間差の段発を行え、騒音・振動波形の重なりを防ぐことができ、効率よい騒音・振動の低減化を図ることができる。



写真—2 ESG-4 K 3 AT

次に、写真—3は、道路崩壊や車両が入れない場所での破碎用として開発した可搬タイプ試作機「ESG-3K1A-3U」であり、3つのユニットから構成される3kV級1出力の装置である。



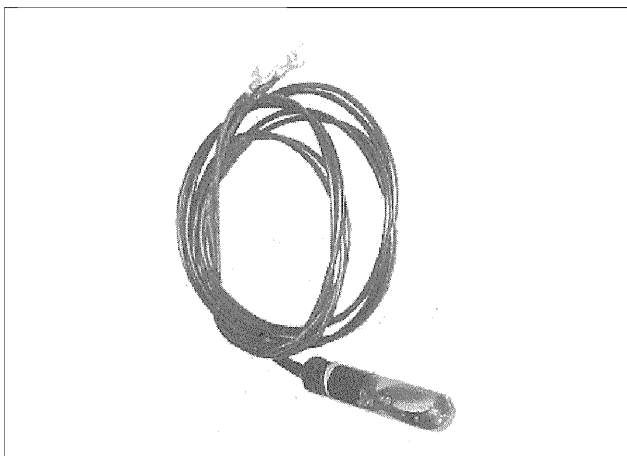
写真—3 ESG-3K1A-3U

各ユニットは中～大型の段ボールサイズで各々40～50kgであり、2人での搬送が可能である。また、2ユニットを追加接続することで3kV級2出力装置「ESG-3K2A-5U」となる。

この可搬型装置については、将来的に、災害救助用として実用化できることを目的とし、さらなる軽量化、コンパクト化および耐環境性の強化を目的に開発して行く予定である。

(3) 放電カートリッジ

放電カートリッジ(写真—4)は、放電エネルギーを衝撃力に変換する重要な構成要素である。標準仕様として、プラスチック容器内に液状またはゲル状物質



写真—4 標準カートリッジ

と金属細線を封入した直径12～40mm、長さ30～200mmのサイズを揃え、適正なサイズを使用する。

また、特殊用途用としてカートリッジ形状や材質をカスタム製作している。例として、土中での放電衝撃力を利用した弾性波探査震源用³⁾の金属カートリッジがある。

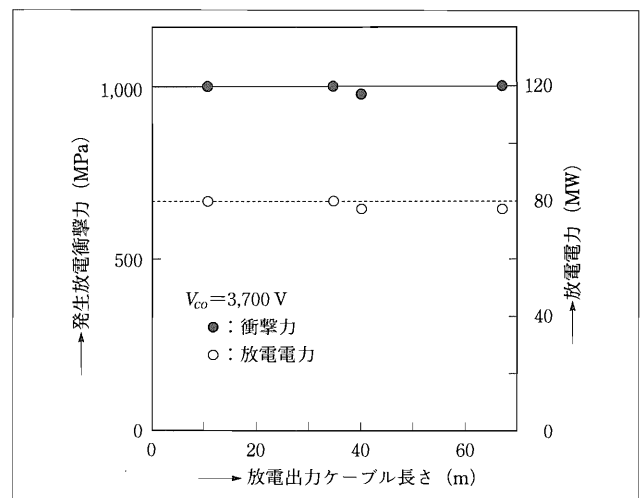
なお、カートリッジは発生衝撃力の形態により、静的型とパワー型に大別できるが、破碎性と装置仕様の優位性から実施工用としては、パワー型が主流である。

(4) 放電出力ケーブル

放電出力ケーブルは、一般的に直流高電圧に使用する同軸ケーブルを用いず、独立出力と迷走電流防止の観点から1出力につき2本を一对とし、また、人手による扱いやすさとメンテナンス交換が容易なことからキャブタイヤケーブルを採用している。

通常、放電エネルギーおよび発生衝撃力は、ケーブル長が増大するほど出力回路抵抗が比例的に増大し、電流が減少することで反比例的に減少する。しかしながら、当社では金属細線を用いた接触乖離放電を利用することで、放電ケーブルおよびカートリッジの回路定数の調整により放電エネルギーを一定、かつ発生放電衝撃力が一定であるように工夫している。

図—3はケーブル長と放電エネルギーおよび発生衝撃力との関係を示しており、同図より、ケーブル長に関係なく一定であることがわかる。



図—3 ケーブル長-発生衝撃力の関係

現在、現地試験で100mまで安定した放電が発生するのを確認済みであるが、実用的な扱いやすさから、20～40mを標準仕様としている。

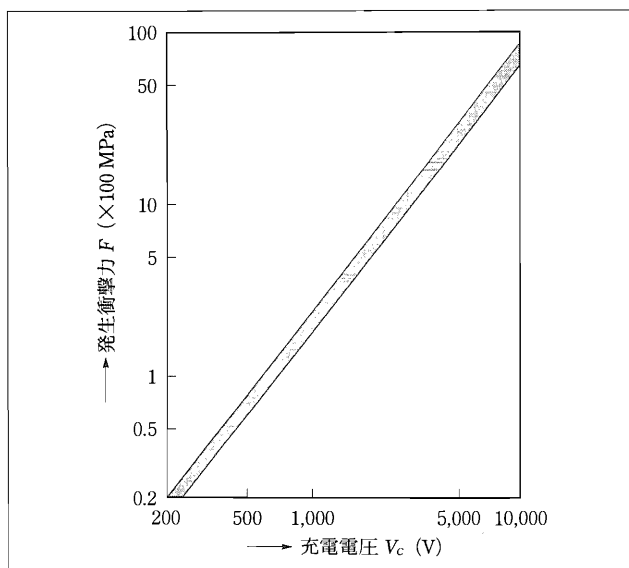
3. 放電衝撃力破碎技術

(1) 静的型放電衝撃力破碎法

高電圧エネルギーをカートリッジ内の液やゼリー状の不活性物質中に浸漬した金属細線に放電供給すると、瞬間的に金属気化現象を起こし数万倍の体積膨張力が発生、この力は衝撃力となり不活性物質を伝達して破碎対象物に作用する。

この力は数千 MPa 以上の高いピークを有するが、作用時間は数十 μs と非常に短く、破砕片を飛ばす力はほとんどない。そのため、周囲に影響を及ぼさない瞬時的な静的破碎として適している。ただし、破碎力に劣るため特殊な適用分野となる。

なお、発生衝撃力は、放電エネルギーに依存する。図—4 は充電電圧と単位距離 (1 cm) での衝撃力との関係を示している。図—4 より衝撃力は電圧のほぼ 1.5 乗に比例することがわかり、電圧により容易に制御ができる。



図—4 充電電圧-衝撃力特性

(2) パワー型放電衝撃力破碎法⁴⁾

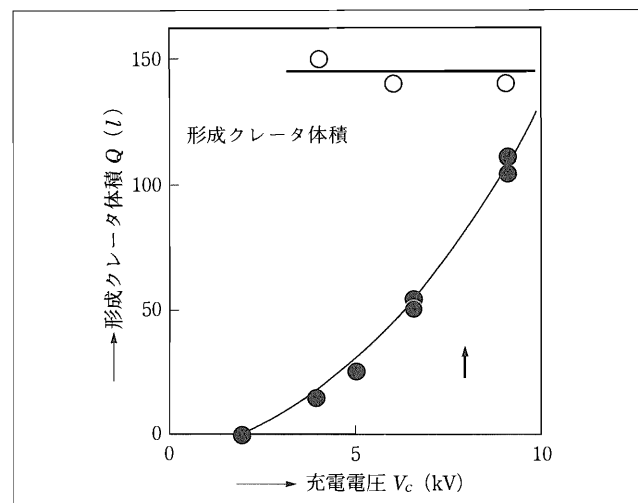
静的型に対し、パワー型では通常得ることが困難である 10 GPa 近い高衝撃力を与えることではじめて爆発燃焼させられる非火薬の特殊液を使用する。

液中に浸漬した金属細線に高電圧エネルギーを供給すると、放電衝撃力により細線周辺の特液が爆発燃焼を起こし、その後この衝撃力により容器内全体の特液が起爆する。この初期段階に反応する特殊液量は、放電衝撃力に依存し、充電電圧が低くなるほど反応可能な特殊液は放電の近傍となりかつ少量となる。この

際、カートリッジが岩盤やコンクリートなどに埋込まれて高い拘束下にあった場合、少量ながら特殊液による反応力により 2 次的にカートリッジ内全体の特液が完全に反応する。

これに対し、砂や土中の場合のように拘束性が低い場合、初期段階の反応力によりカートリッジ自体が破損され、残りの特殊液は周囲に飛散し反応しない、部分反応状態となる。

図—5 は、火薬の威力 (破碎力) 評価法である、砂中爆破によるクレータ体積評価法により求めた充電電圧 V_c と形成クレータ体積 Q の関係であり、充填量は 100 g 一定とした。なお、図中、●がプラスチック製 (低拘束)、○が岩盤などに埋込んだ状態を模擬した金属製 (高拘束) カートリッジの場合である。



図—5 充電電圧 V_c とクレータ体積 Q の関係

プラスチック製の場合、初期反応段階でカートリッジが破損し液が飛散するために部分反応となる。しかし、 Q は図—4 と同様に V_c のほぼ 1.5 乗に比例しており、破碎力を V_c で制御することが可能である。

一方、金属製の場合は、 V_c に関係なくほぼ一定体積の大きなクレータを形成し、高拘束下においては全量が完全に反応していることを示しており、完全反応する場合、破碎力は特殊液量で比例的に制御することができる。

なお、特殊液を完全反応させるためには V_c が 3 kV 程度必要で、高電圧を発生させない限り反応しない安全な破碎技術といえる。また、装置的には静的の場合に比べ、コンパクト化またはカートリッジ接続数の増加、さらには操作性の向上が可能となる。

次に、表—2 は、水溶液を充填した静的型カートリッジによるクレータ容積を 1 とした時の破碎力比較を表したものである。表—2 に示すようにパワー型は、静

表-2 クレータテストによる破砕力評価

衝撃力発生方式	使用容器	充電電圧	クレータ容積(L)	形成クレータ容積によるパワー比較 (静的の場合を1として比較)
静的型	プラスチック	9kV	2	1
パワー型	プラスチック	9kV	100	50
	低拘束	4kV	15	8
特殊液:100g	金属	4kV	150	70
	高拘束			
火薬	2号履ダイナマイト 100g		100	50
	チタマイト 100g		75	38

的型の50~70倍の破砕力を有し、かつ2号履ダイナマイトやチタマイトと同等以上の破砕力があることが確認できる。

4. 施工適用例

(1) 破砕作業について

基本的な破砕作業フローを図-6に示す。また、図中に示すように、放電単独ではなく2次破砕には機械工法を適用する。

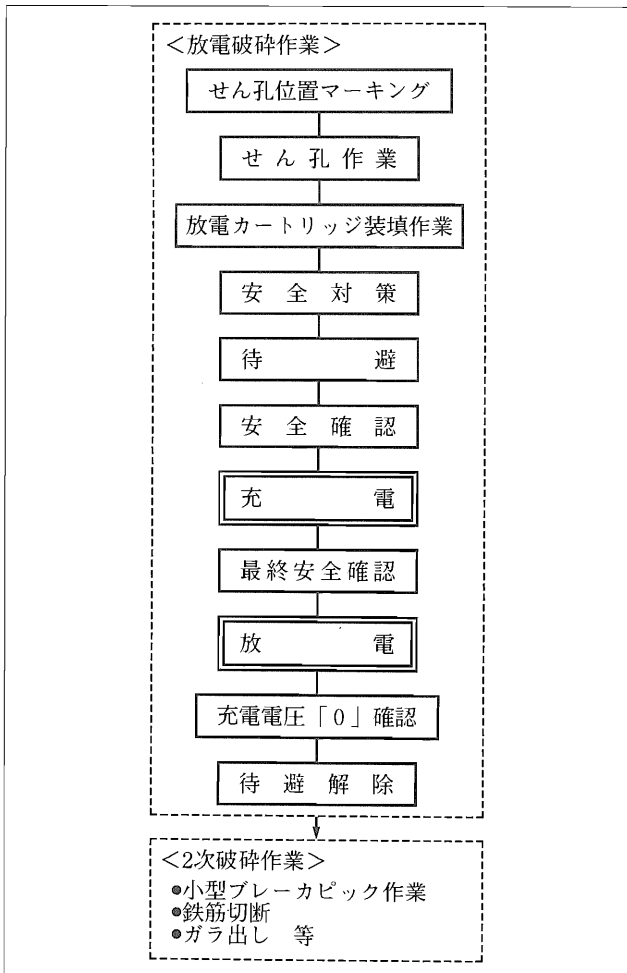


図-6 基本作業フロー

なお、作業性については、現状ではせん孔作業が全体の60~80%を占め作業時間の決定要因となっている。対策として、夜間の事前せん孔・カートリッジ装填や複数箇所の順次並列作業により時間短縮を行っているが、効率的工法ならびにせん孔手段の向上が不可欠である。

なお、写真-5は、最大仕様装置であるESG-10K4の2tトラックへの車載状況を示している。



写真-5 車輛搭載状況

(2) 岩盤破砕（トンネル工事）

本施工工事は、交通容量を増強するために既設I期線トンネルに並行するII期線トンネルを掘削する中で、各トンネル間を結ぶ避難連絡坑の掘削および防火扉の戸溝掘削を行うものである。

供用中のI期線トンネルでは常時車両が通行するため、施工時の伝達振動を4cm/s以下に抑制するという困難な条件で、かつ一軸圧縮強度が150~350MPaという硬岩が対象であった。施工は、事前に破砕条件と発生振動値および距離との特性を把握し、これに基づき施工した。写真-6、写真-7は施工前後の状況を示す。



写真-6 防火扉戸溝掘削の施工前



写真一七 防火扉戸溝掘削の施工後



写真一九 旧歩道橋基礎部の破砕状況

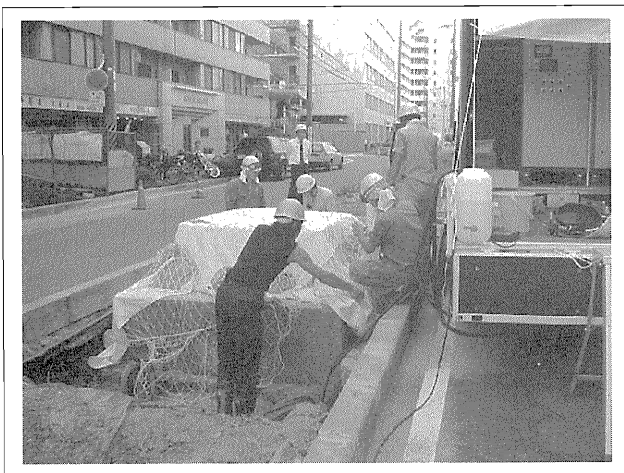
(3) 鉄筋コンクリート柱解体

グラビヤは、幅 2,430 mm、奥行 1,760 mm の基礎柱（縦主筋： $D 35/130$ mm ピッチ，横フープ筋： $D 13/250$ mm ピッチ）を対象とした試験施工の状況を示す。鉄筋がかなり強固であったため、放電破砕数回→鉄筋切断→破砕片除去というサイクルを採用した。グラビヤの左は鉄筋が露出した破砕直後、右が破砕片を除去した状況である。

(4) 鉄筋コンクリート基礎解体

本工事は、世界文化遺産である京都二条城周辺の主要道路での旧歩道橋基礎部の解体である。

有名な観光地ということで、車や人の通行に弊害を与えず、かつ歩道に並ぶ店舗、住民への騒音振動対策という厳しい環境条件のもとで施工した。振動はバックグラウンドレベルであり、騒音は 30 m 離れた位置で 70～八十数 dB ではあったが、鈍い音と数十分間に 1 度という低頻度のために問題なく完了した。写真一八は、飛石防止対策の状況を示しており、防爆シー



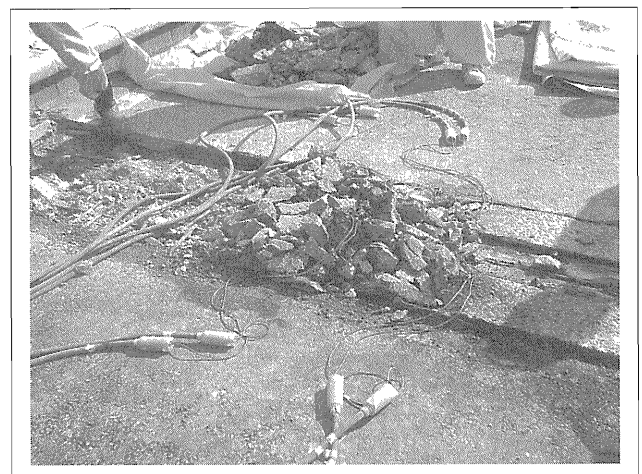
写真一八 飛石防止対策の状況

トとネットを覆う程度で十分の効果を得た。ただし、放電時は 2 分間程度の人の往来を制限した。写真一九に基礎の破砕状況を示す。

(5) 高速道路伸縮装置の補修施工

本工事は、定期的に行われる高速道路の補修工事のうち、ゴムジョイント式伸縮装置の交換に伴うはつり施工の試験例である。

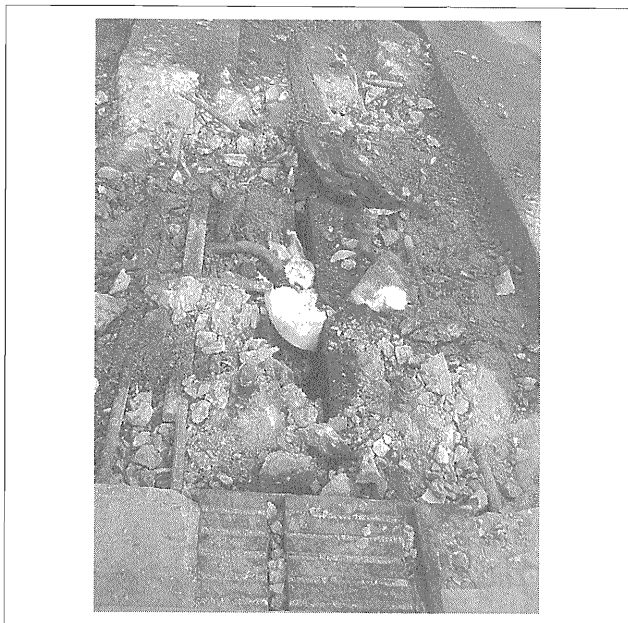
現在、この工事は 5, 6 人による手持ちブレーカによって行っているが、相当な連続的騒音が発生し、周辺住民からの苦情要因となっている。そこで、破砕性のもとより騒音抑制に主眼をおいて、試験施工を行った。写真一〇に破砕直後の状況を示す。なお、飛石防止対策は防爆シート 2 枚で十分であった。



写真一〇 伸縮装置のはつり破砕(1)(直後)

次に、写真一〇は破砕片除去後の状況で、この後、鉄筋を切断し、チップ等で 2 次破砕と成形を行う。

騒音は、最も大きく反響する高架下で 85～90 db 程度発生したが、単発音であり低頻度であることから問



写真—11 伸縮装置のはつり破碎(2)(破砕片除去後)

題ないとの評価を得た。また、成形した表面と道路の下面を目視確認した結果、亀裂の発生もなく適用可能との評価を得た。しかし、作業効率については、穿孔作業が全体の8割を占めるため、ブレーカ工法より劣る。

本工事は、適用試験が始まったばかりであり、穿孔も含めた適正工法の早期開発が必要である。

5. あとがき

放電衝撃力破碎システムおよび衝撃力発生技術について述べるとともに、施工事例を紹介した。

本技術は、平成7年からシーズ研究として始まり、その後のニーズ開拓と大幅な破碎力アップの実現および独自工法の開発により事業として確立しつつある。今後は、施工実績とデータを蓄積するとともに、さらなる技術向上に努め、作業性の効率化と低コスト化を目指す。

JCMA

《参考文献》

- 1) 荒井浩成, 前畑, 他: 土木学会第26回岩盤破壊に関するシンポジウム要旨, p.261 (1994)
- 2) 荒井浩成, 前畑他: 日立造船技報, vol.58, No.3 (1997) p.15
- 3) 城, 川上, 他: 放電衝撃の弾性波探査震源としての性能評価, 地盤工学会研究発表会 (1999.7)
- 4) 荒井浩成, 前畑, 他: 平成10年度電気学会産業応用部門全国大会論文集, p.311 (1998)

【筆者紹介】

荒井 浩成 (あらい ひろあき)
日立造船鉄構エンジニアリング株式会社
技術開発室
主任
(Hitz 技術研究所より出向中)



建設機械用語集

- 建設機械関係業務者一人一冊必携の辞典。
- 建設機械関係基本用語約2000語(和・英)を収録。
- 建設機械の設計・製造・運転・整備・工事・営業等業務担当者用辞書として好適。

B5判 200頁 定価2,100円(消費税込):送料600円
会員1,890円(消費税込):送料600円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館) Tel.03(3433)1501 Fax.03(3432)0289