

放電破砕によるコンクリートの破壊機構

Mechanism on Concrete Fracture by Using Electric Discharge Impulses

山地 宏志 HIROSHI YAMACHI

中森 純一郎 JUN-ICHIRO NAKAMORI

放電破砕は、自己反応性溶液を電気放電により膨張させることで、爆破孔内に衝撃的に高圧力を作用させる新しい爆破工法である。その燃焼速度は、爆轟よりも小さく、爆燃領域にあるとされるため、放電破砕により、解体対象の構造物内に衝撃波動が発生するかはつまびらかでない。このため、放電破砕によるコンクリートの破壊が単なる内圧作用によるものであるか、衝撃波動伝播により誘起されるものであるかについても明確ではなく、放電破砕を利用した構造物解体を定量的に計画・設計することは難しい。

本研究において、筆者らは高速度カメラにより、コンクリート供試体の放電破砕・破壊過程を撮影することで、衝撃波の発生を確認するとともに、コンクリート供試体の破壊が衝撃波動の反射、回折、ならびに重ね合わせにより支配されることを明らかにした。

キーワード：放電破砕，衝撃波，構造物解体，高速度カメラ

Electric discharge impulse (EDI) is a new blasting method that evaporates self-reactive liquid and produce high pressures in blast holes. Because its response velocity is assumed to be smaller than detonation velocity and within deflagration region, it is not confirmed whether shock wave induced by EDI is generated in a structure to be dismantled. Also it is not clear whether destruction of concrete by EDI is due to a mere inner pressure action or by induced shock wave movement. Therefore, a quantitative planning or design of structure dismantlement involves difficulties.

In this study detailed observations were conducted utilizing a high-speed digital video camera show cracks generated in cylindrical concrete columns by means of EDI, and clarify that destruction of a concrete test piece is dominated by reflection, diffraction, and overlapping of shock wave movement.

Key Words: Electric Discharge Impulse(EDI), Shock Wave Movement, Structure Dismantle, High-speed Digital Video Camera

1. はじめに

構造部の解体は、ワイヤーソーなどによる切断工法、ブレイカーなどによる打撃（衝撃）工法、および火薬による爆破工法に大きく大別される。このうち切断工法は、鉄筋の切断が可能なこと、ならびに構造物の損傷部位を限定的にできることなどの利点を有するが、適用部位が限定され、工期・コスト的にも負担が大きいこと、その適用範囲は限定される。爆破工法は、爆轟エネルギーが発生させる衝撃波によって、構造物の広範囲に損傷を瞬間的に与えることが可能であるため、最も効率的な解体工法であるが、発生する振動・騒音のレベルが大き

く、部材の飛散なども懸念されるため、わが国では採用されることが比較的少ない工法となっている。

したがって、打撃工法がわが国の汎用的な解体工法となっているが、今日の建設機械では与えられる打撃エネルギーが限定されるため、破砕能率も限定されたものとなる。したがって、ブレイカーなどの解体作業は、環境負荷となり得るレベルの騒音と振動が長期にわたり継続し、杭打ち作業と並ぶ、建設業の騒音・振動発生源となっている。

ここに紹介する放電破砕工法は、自己反応性溶液を電気放電により膨張させることで、爆破孔内に衝撃的に高圧力を作用させる新しい爆破工法であり、打撃工法より

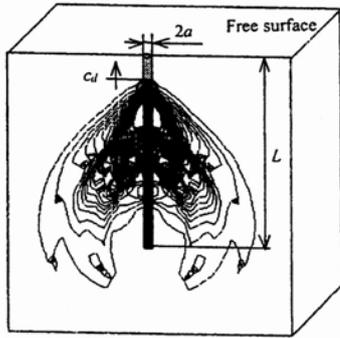


図-1 均質媒体中の発破による発破孔周辺の応力波伝播の模式図¹⁾

も効率的で、従来の爆破工法よりも騒音・振動、飛散が小さい解体工法の実現が期待される。しかしながら、その反応速度は、爆轟よりも小さい爆燃領域にあるとされるため、放電破砕により構造物内に衝撃波動が発生するかはつまびらかでなく、その構造物解体がどのような機構で実現されるかが明らかとされていない。

打撃工法は、衝撃により高いエネルギーを構造物に作用させることができるが、その作用形態は準静的なものであるため、静力学の基本原則が教えるように、力の作用点近傍にしかエネルギーを及ぼさず、打撃作用により形成される損傷領域は限定される。

一方、爆破工法では、発破孔内の火薬の爆発により、発破孔壁に爆轟圧が高圧でパルス的に作用し、応力波（衝撃波）に変換され、図-1に示す経路を爆速 c_d で伝播する¹⁾。応力波の伝播は、構造物中の離れた部位に応力を発生させ、損傷域を形成する。

このように、打撃工法と発破工法では、損傷発生機構が異なり、準静的機構と動的機構とに類別することができる。その機構の差異は、衝撃波の発生の有無によるものであるから、放電破砕による構造物破壊機構を論ずるためには、衝撃波動の発生を確認しなければならない。

近年、発破孔近傍の媒体に発生する応力波動パターンが、主として爆薬の爆速と媒体中の弾性波速度の比で定義されるマッハ数 M によって支配されることが指摘されている^{2,3)}が、衝撃波発生に至るエネルギー変換過程の詳細は未だつまびらかではない。

このため、論理的な考察から放電破砕時の衝撃波発生を論ずることは難しく、実験的にこれを確認することが望まれる。筆者らは、コンクリート供試体を放電破砕した際のひび割れ発生・進展過程を高速度カメラで撮影することで、衝撃波動発生を確認できるのではないかと考えた。すなわち、衝撃波動が持つ反射、回折、重ね合わせなどの波の特性がひび割れ発生・進展過程に現れるのではないかと考えた。

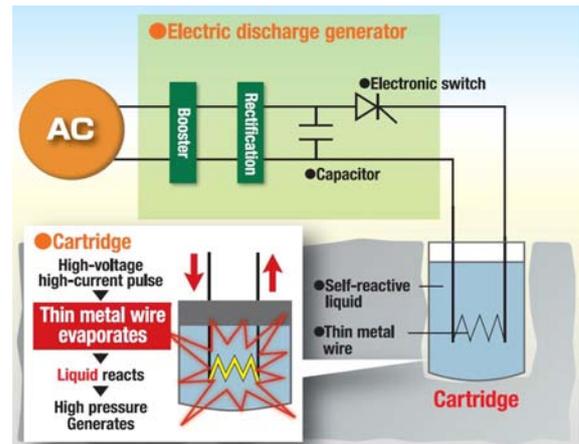


図-2 放電破砕工法の基本原理⁴⁾

以下では、放電破砕工法の概要を示した後、このような目的で実施した実証実験の概要とその結果、ならびにこれに基づく考察を示す。

2. 衝撃波動確認実験の概要

(1) 放電破砕工法の概要

図-2は、日立造船株式会社が開発した放電破砕システムEDICS（Electric Discharge Impulse Crushing System）の機器構成と基本原理を示すものである。同システムは、筆者らの知る限り、実務に供される唯一の放電破砕システムである。図-2に示されるように、EDICSでは、火薬の代わりに、自己反応性溶液中に電極を挿入したカートリッジ（エコリッジ）を使用する。起爆は、このエコリッジを装薬孔内に挿入し、放電衝撃発生装置内のコンデンサーに充電された1,500～6,000Vの電力を数百 μsec の間にエコリッジに放出して行われ、放電を受けた自己反応溶液は、瞬時に気化し、装薬孔壁にパルス状の高圧を作用させる。なお、エコリッジ内の溶液は、爆薬ではなく、自己反応性物質であるため、一定量以上の貯蔵に関する届出を除けば、法的規制を受けないため、施工時に資格・届出を必要としない。

(2) 実験概要

放電破砕時波動発生確認実験に供した供試体は、図-3、写真-1に示す円柱供試体（ $\phi=500\text{ mm}$, $H=500\text{ mm}$ ）で、無筋構造とし、コンクリートは24-12-20Nのレディーミクストコンクリートを使用した。

装薬は、起爆中心がこの円柱供試体中心と一致するよう、供試体中央に $\phi=12\text{ mm}$ の装薬孔を $L=280\text{ mm}$ 穿孔し、エコリッジSS（ $\phi 10\text{ mm}\times 59\text{ mm}$, $q=2\text{ cc}$ ）を装薬後、砂を主体とした材で穴を閉塞する（填塞）。また、

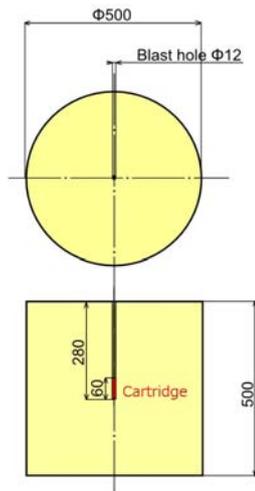


図-3 実験に供した破碎モデル

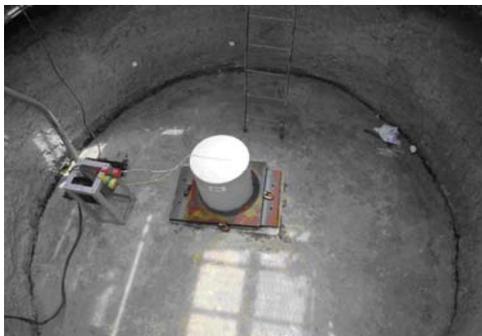


写真-1 起爆ピット内に設置された円柱供試体

表-1 衝撃発生装置 ESG-3K1 の仕様

型番	ESG-3K1	
入力電源	AC100V	
放電電圧	3,000V	
出力数	1	
充電時間	40s	
エコリッジ最大接続数	3本×6系統増設可能	
装置寸法 W×L×H	操作盤	80×240×250mm
	制御盤	200×500×685mm

起爆には表-1に仕様を示す放電衝撃発生装置ESG-3K1を使用することとした。

本来であれば、起爆時に対象構造物を防爆マットなどで囲繞し、飛散対策を施さねばならないが、ここでは放電破砕による供試体のひび割れ発生・進展状況を、直接、観察するため、専用ピット（ $\phi=3,500\text{ mm}$ ， $H=2,100\text{ mm}$ ）内で起爆することとした。また、高速度デジタルカメラと撮影照明を設置・保護するため、ピット上に写真-2のように観察ステージを設けたが、観察ステージとピット間の開口部は、写真-2に示すように防爆シートで取り囲み、周辺への飛散防止に万全を期した。



写真-2 起爆設備・実験管理設備外観



写真-3 観察ステージ上での高速度カメラの設置

表-2 高速度カメラ FASTCAM SA5 の仕様

レンズマウント	Fマウント，Cマウント，EFマウント遠隔レンズ制御
撮像方式	C-MOS イメージセンサー
濃度諧調	モノクロ：AD変換12ビット
	カラー：AD変換36ビット (RGB各12bit)
メモリ容量	8GB，16GB，32GB，64GB
メモリ分割	最大64分割
電子シャッター	最小 369ns(1/2,713,000 秒)
映像出力	NTSC，PAL，HD-SDI
トリガ信号	TTL，接点
インターフェース	ギガビットイーサネット
外形寸法	165mm×153mm×242.5mm
質量	7.15kg

また、撮影に供した高速度カメラは表-2に仕様を示すFASTCAM SA5を使用し、写真-3のように観察ステージ上に、専用照明とともに設置した。なお、撮影に際しては高速度カメラ類を、飛散から保護するため保護窓に $t=10\text{ mm}$ の亚克力板を敷設した。

3. 衝撃波動確認実験の概要

写真-4は、放電破砕時のモニタービデオ画像から抽出した円柱供試体破壊過程の例を示したものである。写真-4に示されるように、試体は円周方向に3分割する破断面と、上下に2分割する破断面とが形成され、これで区切られるコンクリートブロックがそれぞれの方向に飛散する破砕モードを示した。これは、今回、実施した3供試体に共通する破壊形態である。

当初、上下方向の破断面は飛散後、落下時に形成されたのではないかと思われたが、モニタービデオを確認したところ写真-4のように飛散前に破断面が形成されていることが確認された。したがって、上下方向の破断面は放電作用によって形成されたものである。また、円柱方向に3分割されたブロックの中心角はいずれもほぼ120度である。

写真-5に供試体表面の破壊過程を高速度カメラで撮影した画像を示す。高速度カメラ撮影は1秒間に5,000コマのフレームレート（撮影間隔 $20\mu\text{sec}$ ）で撮影した。起爆直後 $20\mu\text{sec}$ の時点をとらえた写真-5(a)をみると、非常にひび割れ幅が狭く不明瞭ではあるが、この時点で、装薬孔周辺からだけでなく、外部境界からもひび割れが発生している。当然のことながら、自己反応性溶液気化による体積膨張のみが、当該破砕事象を支配するならば、ひび割れの発生と進展は起爆点側からのみに限定されなければならない。

一方、放電作用によって装薬孔表面に衝撃波が発生するならば、自由境界面に達した応力波は引張に位相を転換させ反射する。一方、衝撃波は任意水平断面内でほぼ同心円状に伝播し、境界形状が円形だからその反射方向は断面中心へと向かう。したがって、反射による引張応力波は、外縁から中心に向かってひび割れも発生・進展することが予想される。写真-5(b)～(e)をみると、果たしてそのように起爆中心側からと、外周側からのひび割れの発生・進展が確認できる。

もちろん、衝撃波の伝播は3次元的なものであり、上記のひび割れ発生・進展経路は、より複雑なものであることは否めない。しかしながら、少なくとも写真-5で確認された供試体表面のひび割れの発生・進展経路は、衝撃波動伝播によらなければ実現されない。すなわち、放電作用による衝撃波の発生は、合理的に説明された。

また、図-5(f)にみられるように、自己反応性溶液の気化ガスが大気に漏出し始めるのは、起爆後、おおむね $2,000\mu\text{sec}$ 後であり、ひび割れの発生・進展より、1オーダー以上遅れるようである。かねてより、発破による破砕では、ガス圧によりひび割れが進展・成長するとの



写真-4 放電破砕による円柱供試体破壊

議論と、ガスの膨張速度に比べ衝撃波動の伝播速度が1オーダー以上大きいため、ガス圧はひび割れの発生進展にほとんど寄与しないとの議論が交わされてきた。今回の実験結果、すなわち写真-5の高速度カメラで確認されるひび割れ進展とガス漏出の時系列関係からすれば、放電作用による破砕事象には、ガス圧はほとんど影響しないものと判断する。

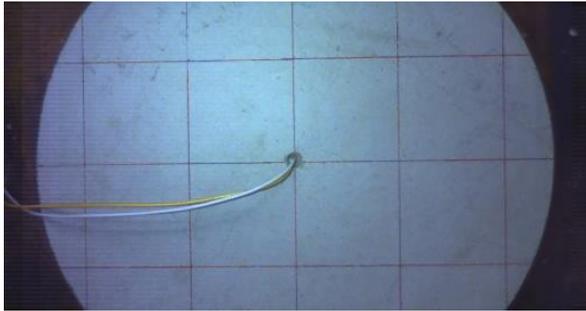
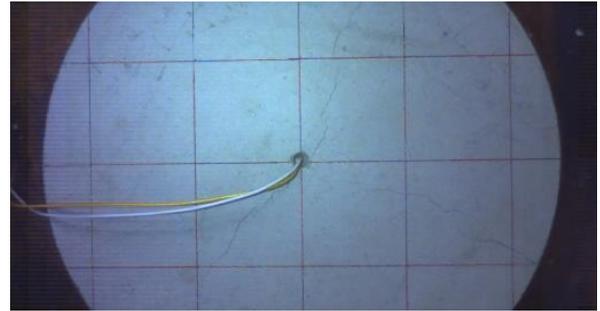
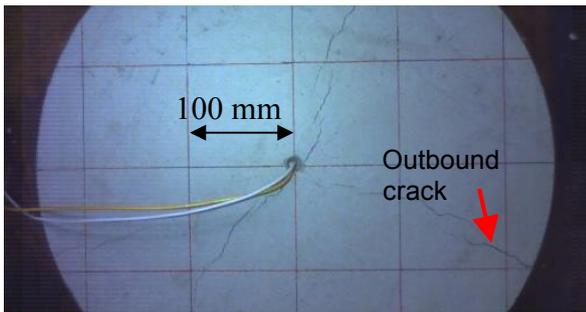
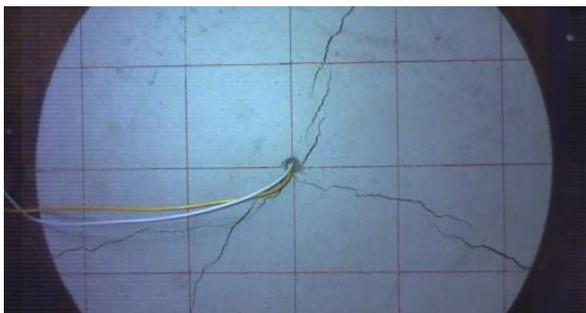
(a) 起爆後 20 μsec (b) 起爆後 200 μsec (c) 起爆後 400 μsec (d) 起爆後 600 μsec (e) 起爆後 800 μsec (f) 起爆後 2000 μsec

写真-5 高速度カメラによる円柱供試体表面の破壊形成過程

4. まとめ

筆者らは、爆破による破砕事象が衝撃波動伝播に支配されることに着目し、衝撃波動の発生と伝播を制御することで、ひび割れの発生・進展、ならびに破砕領域を制御する爆破解体工法を提唱し、PBSD（Precise Blasting and Smart Demolition）の名称で、その開発を進めてきた。

本報文では、放電衝撃の爆燃作用が、火薬の爆轟作用に比して、安定した衝撃力を精度よく発生し得る点に着目し、放電衝撃により衝撃波が発生するならばPBSDへの適用が可能になると考え、その実証実験を実施した。

したがって、本実験における最も重要な知見は放電作用により衝撃波が発生することが確認されたことにある。これは、反射、回折、重ね合わせなどの波の特性を

利用した解体工法の開発が可能であることを示唆するものであるが、PBSDへの適用を可能とするためには、放電衝撃で生じる衝撃波の伝播と破壊の進展を正しく理解する必要がある。

今回の実験において、供試体が円周方向に 120° で3分割される事象は、放電破砕の波動伝播特性と破砕特性を把握する上で重要な事象と考えられる。緩やかな冷却履歴を受ける溶岩は、冷却時の体積収縮により一様な引張応力を受け、 120° の頂点を持つ六角柱状節理を形成する事象は知られている。この事象から推定すれば、衝撃放電を受けた供試体は装薬孔を軸として円周方向に一様な引張応力場が形成された可能性が高い。しかし、図-3などから推定されるように、当該実験で発生する放電衝撃は、起爆中心から球状、あるいは楕円体状に作用する。したがって、当該実験の円周方向破断面が六角柱状

節理と同様の機構で発生することを確認するためには、衝撃波の伝播により、装薬孔を軸として円周方向に一様な引張応力場が形成されるかを検証する必要がある。

また、供試体を上下に二分する破断面も、放電衝撃から、直接、形成されたものとは考え難い。上記のように、放電衝撃は起爆中心から球状、あるいは楕円体状に作用するから、これにより形成される破壊域はこの形状と相似したものとならねばならない。一方、供試体の上下で反射する衝撃波は、時間的な遅れを伴うものの、引張波として供試体中央で重ね合わさり、水平な破断面を形成することが推定され、今回確認された破断面を強力的に形成することが期待される。

このように、今回の実験のように単純な破碎事象においても、実験的アプローチだけでは、その破壊機構を検証し得ず、衝撃波動伝播と破壊機構を追跡する数値解析的アプローチが不可欠となる。

今後、今回の実験結果を再現することのできる3次元衝撃波動伝播解析コードの開発とともに、数値上で今回の実証実験の再現を進めるものとした。実際の破碎事象を再現することのできる数値解析コードは、同時に構造物解体の定量的な設計・計画を可能とするものであり、PBSDの開発に不可欠な技術でもある。

謝辞：本報文は三井住友建設株式会社、東京大学、日立造船株式会社の共同研究「精密放電破碎工法の基礎実証実験」の成果の一環を紹介したものです。ご指導・ご協力賜りました東京大学大学院 上西幸司准教授、日立造船株式会社 田中幹雄様、飯塚信二様、坂本良様の各位には深甚の謝意と、今後も変わらぬご指導・ご助力を請い、本小文の結びとさせていただきます。

参考文献

- 1) 上西幸司, H.P.Rossmannith, N.Kouzniak : 爆速および起爆法が発破孔近傍の岩盤の動的挙動に与える影響について, 火薬学会誌, Vol.61, No.6, pp.254-259, 2000.
- 2) Isobe D., M. Eguchi, K. Imanishi K, Z. Sasaki: Development of analytical and experimental systems for blast demolition of framed structures. Journal of Structural Engineering, Vol.612, pp.73-78, 2007.
- 3) Rossmannith HP, Uenishi K, Kouzniak N. Blast wave propagation in rock mass -Part I: monolithic medium. Fragblast, Vol.1, pp. 317-59, 1997;
- 4) 日立造船株式会社 ; <http://www.hitachizosen.co.jp/gps/houden/point/>