

放電衝撃波動伝播の数値解析的評価

The Numerical Evaluation of Shock Wave Propagation Caused by Electric Discharge

山地 宏志 HIROSHI YAMACHI
中森 純一郎 JUN-ICHIRO NAKAMORI

本論文は、2013年度の実証実験時で観察された、放電破碎による円柱コンクリートの動的破壊過程を3次元数値シミュレーションし、その詳細な破壊過程を検証したものである。シミュレーションにおいて、放電破碎により円柱コンクリートに誘起されるひびわれが、発破工法等と同様、直接波と反射波により支配されることが明らかとなった。したがって、発破爆破過程シミュレーションのために開発された波動伝播解析手法は放電破碎工法に関しても有効であり、建設材料・構造の制御爆破解体を実現する有用な手段となる。

キーワード：放電破碎、動的制御解体、波動力学、破壊力学、有限差分法

In this paper, 3-dimensional simulations of dynamic fracture process of cylindrical concrete columns caused by electric discharge impulses (EDI), which has been observed in the verification experiment carried out in 2013, is conducted. The simulations show cracks generated in the columns by means of EDI are controlled by direct and reflected waves. Thus, wave-based analysis developed for blasting using explosives is valid also for EDI crushing, making it an ideal methodology to achieve controlled smooth dynamic fragmentation of construction materials and structures.

Key Words: Electric discharge impulse, Controlled dynamic demolition, Wave dynamics, Fracture mechanics, Finite difference method

1. はじめに

放電破碎工法¹⁾は、自己反応性薬剤を高圧放電により励起させることで、薬剤を急速蒸発膨張させ、その膨張圧を装薬孔壁に作用させ媒体を破壊する工法である。装薬孔壁に膨張圧が作用するとき、発破のように膨張エネルギーが装薬孔壁で、瞬時に運動エネルギーに変換され媒体内を衝撃波が伝播して媒体破壊が進行する破壊機構と、静的破碎材のように準静的な内圧が継続して孔壁に作用し、装薬孔からひび割れが徐々に進展する破壊機構の二つが存在する。

放電破碎工法の爆速は火薬よりも1オーダー遅い爆燃領域にあるとされるが、爆燃継続時間は $T = 300 \mu\text{s}$ 未満であることから、その破壊機構は前者によるものと考えられるが、その実際はいまだ詳らかでない。われわれは、発破により生じる衝撃波を制御することで、安全、効率的、かつ低環境負荷で爆破解体を実施する精密爆破解体工法（SMart-BD：Sumitomo-Mitsui Advanced wave

Reflecting Technique in Blasting Demolition）を提案し、その実用化と普及に取り組んできた。前述の放電破碎工法は、その爆破特性や波動伝播特性から、狭小な室内や活線交通近傍等でのSMart-BDの起爆剤として採用することが可能ではないかと考えた。

この考えに基づき、無筋のコンクリート円柱供試体を放電破碎工法で爆破し、その上面に発生・成長するひび割れをハイスピードカメラで撮影する実験を2013年度に実施し、放電破碎によるコンクリートひび割れは、起爆により発生するガス圧によってではなく、ガス膨張エネルギーが装薬孔壁面で変換されて生成・伝播する衝撃波に支配されることを確認した。

本稿では、このような衝撃波動伝播とひび割れ成長の過程を詳らかとする目的で、筆者らの開発した3次元衝撃波動伝播解析コードBLAST-3D²⁾により、当該実験をシミュレーションした。以下に、そのシミュレーションの概要と、衝撃波の伝播経路の差異により生じる破壊形態の違いについて考察を加える。

2. 放電破碎実験の数値シミュレーション

(1) 爆破実験概要とその数値計算モデル³⁾

図-1に2013年度実験に供した供試体寸法と、シミュレーションに供した装薬パターンを示す。写真-1,2には、その頂部表面のひび割れ発生成長過程を、また、図-2,3には供試体のひび割れ分布をそれぞれ示す。なお、参考のため爆破実験施設を写真-3に、また写真-4にCase-1の爆破状況を示す。

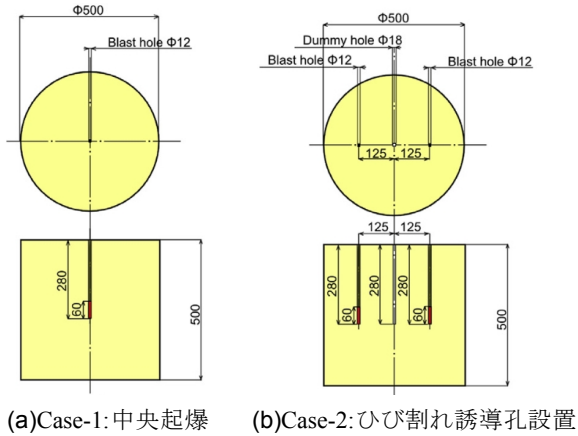


図-1 解析に供した供試体寸法と装薬パターン³⁾

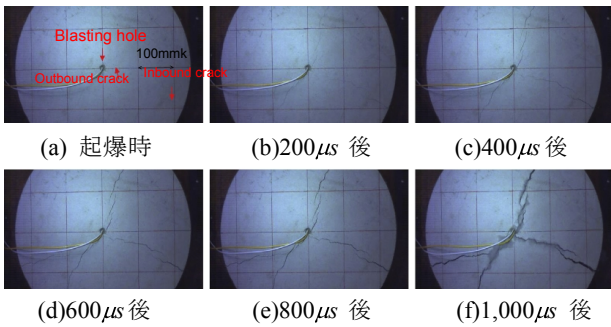


写真-1 Case-1のひび割れ発生・成長過程³⁾

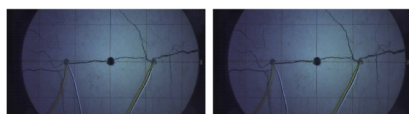
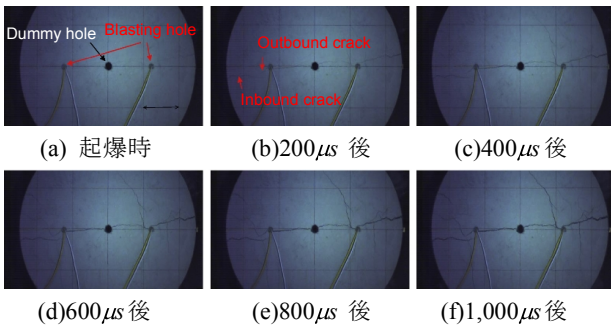


写真-2 Case-2のひび割れ発生・成長過程³⁾

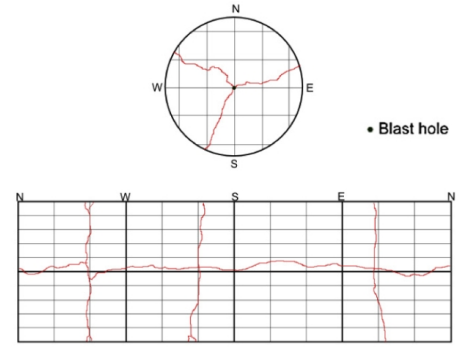


図-2 Case-1の爆破後ひび割れ状況

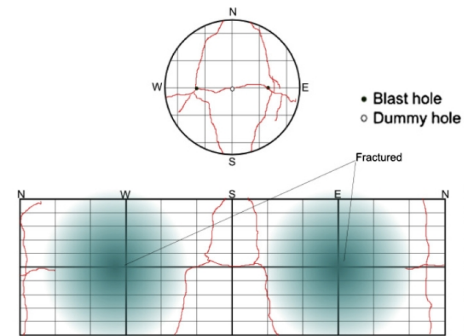


図-3 Case-2の爆破後ひび割れ状況³⁾

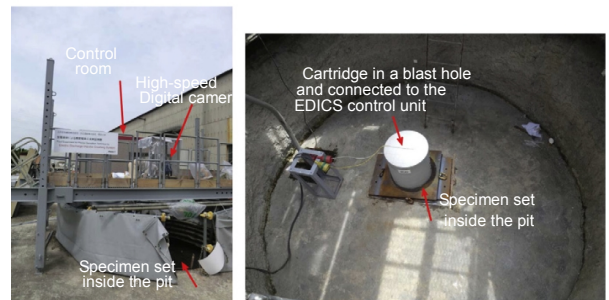


写真-3 爆破実験施設³⁾

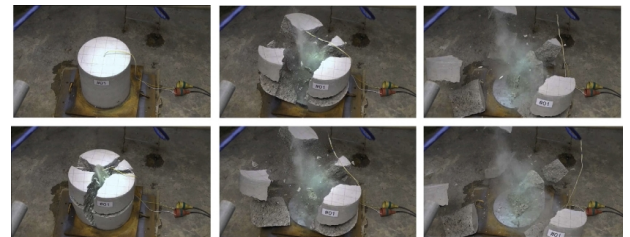


写真-4 Case-1 爆破状況³⁾

Case-1は、図-1(a)に示すとおり、円柱供試体の中心で起爆するものであり、写真-1,4および図-2から明らかなように、供試体は円周方向に中心角 $\theta=120^\circ$ で3分割され、かつ高さ方向には起爆中心高さ $H=250\text{ mm}$ で上下に二分割される。一方、Case-2は供試体中心に $H=280\text{ mm}$ の空孔（以下、ひび割れ誘導孔）を設け、その一直

線上の両側に等間隔 $\Delta L = 125 \text{ mm}$ で装薬し、起爆するものである。この場合、写真-2、図-3から明らかのように、両起爆孔とひび割れ誘導孔を結ぶ線上にひび割れが成長・発達し、さらにこれと垂直な方向に起爆孔から2次のひび割れが遅れて進展する。このとき、起爆孔とひび割れ誘導孔を結ぶひび割れは、起爆孔からだけでなく、ひび割れ誘導孔からも発生していることに注意が必要である。

表-1 計算に供したコンクリート物性

density	ρ	2,320 kg/m^3
Yong's modulus	E	34.2 GPa
Poisson ratio	μ	0.25 (ND)
velocity of primary wave	V_p	4,200 m/s
velocity of secondary wave	V_s	2,400 m/s

シミュレーションでは、写真-1,2に示される供試体頂部表面、および装薬高さ平面 ($H=250\text{mm}$) のひび割れ発生

に着目するものとし、供試体寸法や装薬孔、ひび割れ誘導穴の位置、および深さ等は図-1に示した幾何学条件と同一とした。また、爆破媒体であるコンクリートは等方均質な線形弾性体であると仮定し、非均質体である填塞材料（実験では砂材を使用）もコンクリートと同一材料であると計算上仮定した。表-1に計算に供したコンクリートの物性値を示す。

以上の幾何学条件に基づけば、Case-1は単に軸対称問題であるにとどまらず、装薬高さ平面 ($H=250 \text{ mm}$) に対しても対称となり、ひび割れ発生・進展に関する衝撃波動伝播の影響を検討することが容易となる。

放電起爆により装薬孔壁に作用する爆圧 $P(t)$ の時間的变化は完全に解明されていないが、ここでは参考文献4)に示された実験データを参照に、次式のような一般的関係を適用し、計算の入力爆圧とした。

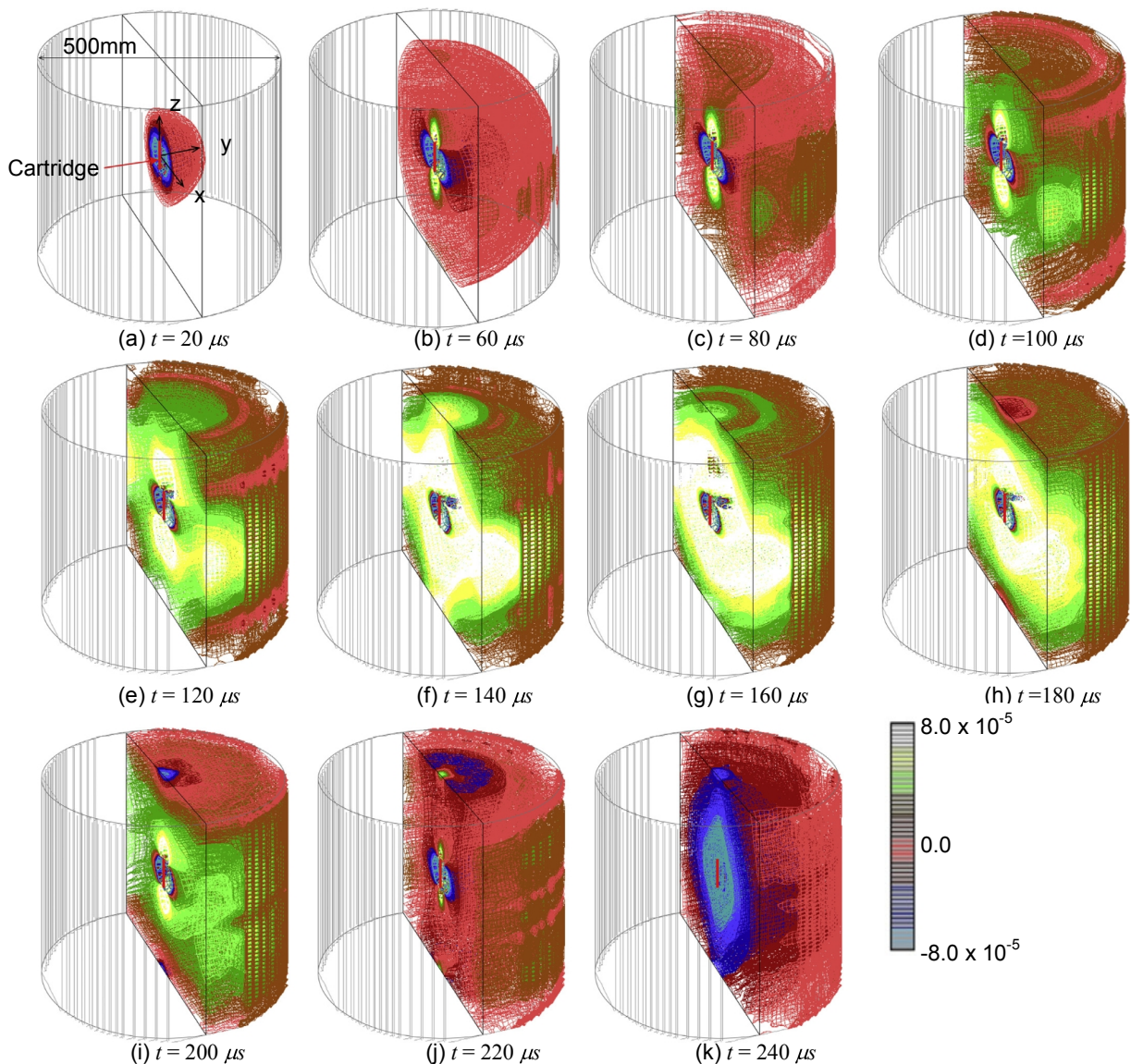


図-4 Case-1の数値シミュレーションによる体積ひずみ分布経時変化

$$P(t) = \begin{cases} A \sin^2 \frac{\pi}{T} t & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) において、 A は最大爆圧、 T は爆圧の継続時間、また t は起爆後の経過時間（起爆時 $t=0$ ）をそれぞれ示し、シミュレーションでは、放電破砕による爆破時の圧力測定結果⁴⁾を参照に、 $A=1 \text{ GPa}$ 、 $T=260 \mu\text{s}$ として計算を実行した。筆者らの開発した有限差分コードでは立方格子を採用しているため、装薬孔や空孔断面は実際の断面形状と異なり、四角形となる。しかしながら、起爆により衝撃波の伝播形態、すなわち中央断面から軸対象に伝播する波と、起爆材の上下端から半球状に伝播する波のいずれもを、計算上、適確に評価することは可能である。

計算モデルは $\Delta x = 10 \text{ mm}$ の均等幅グリッドポイントと

し、その領域分割は $51 \times 51 \times 51$ とした。また、計算時間刻み Δt は安定化条件 $\Delta t < \Delta x / 2V_p$ より定めた。これは、計算資源の制約から定められたモデルサイズであり、亜音速で爆破媒体中を伝播する衝撃波伝播問題を解析するには粗いモデルであるかもしれない。しかし、以降で示すように、実験の波動場を良好に再現し、観測されたひび割れの発生・進展を破壊力学的に説明し得る。

(2) 媒体中心起爆の数値シミュレーション

爆破媒体中心で起爆した Case-1 の衝撃波動伝播を考察するため、ひずみの一次不変量である体積ひずみの分布を時系列で図-4に示す。体積ひずみは、各時間段階において膨張域（dilatational region）、縮小域（contractive region）が変化するため、最も直接的に、衝撃波伝播を考察し得ると考えた。また、供試体が軸対象であるため、分布図は装薬孔を含む奥半分（ $y > 0 \text{ mm}$ ）だけを表

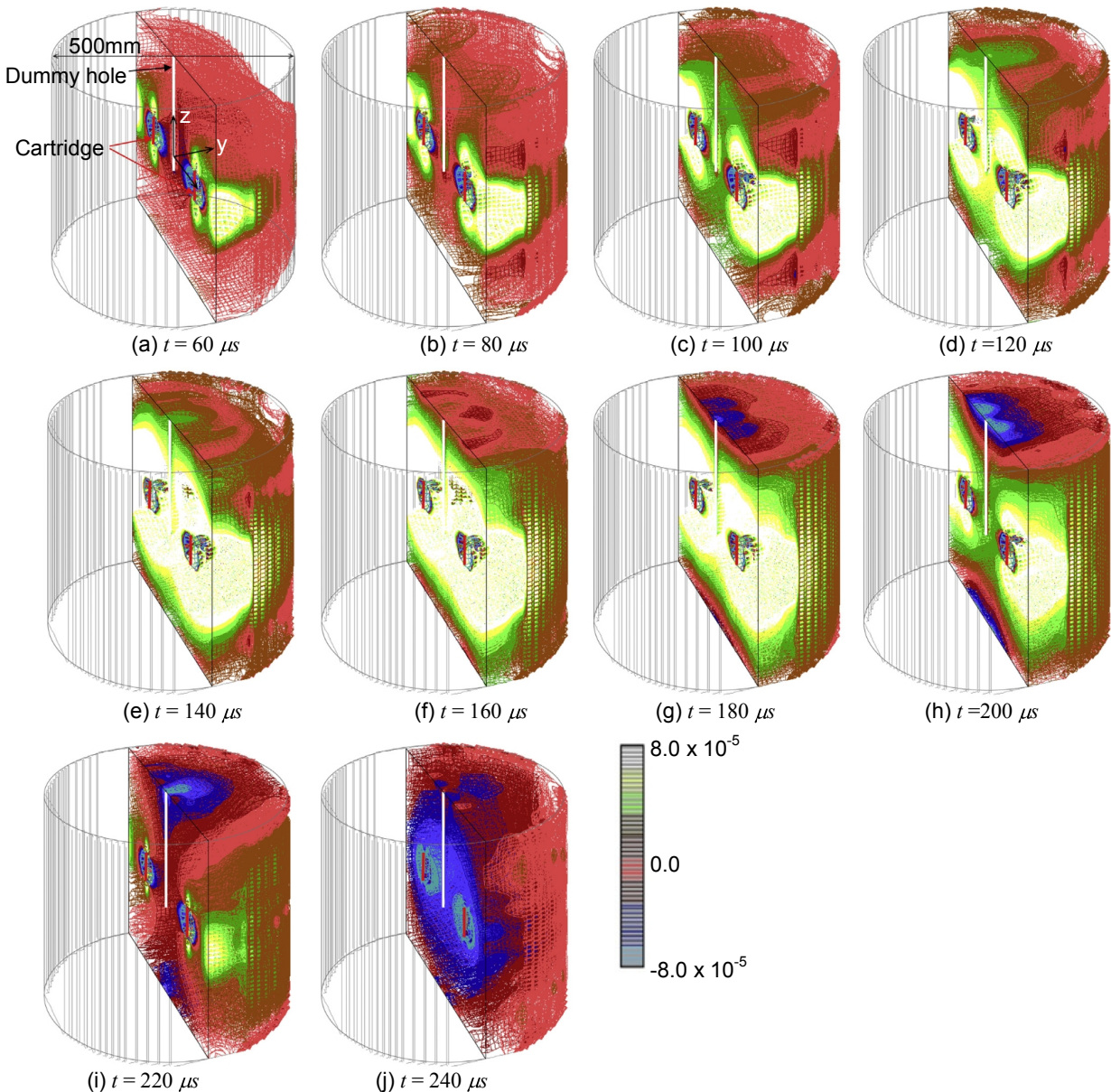


図-5 Case-2の数値シミュレーションによる体積ひずみ分布経時変化

示した。なお、記述の便のため起爆点を中心として図-4(a)のように座標を設定する。

起爆後 $t = 20 \mu\text{s}$ の体積ひずみ分布を示す図-4(a)をみると、自己反応性起爆剤の急速な蒸発膨張により、爆破媒体は圧縮の載荷作用を受け、起爆剤周辺に体積圧縮（負の体積ひずみ）が一様に広がっているが、起爆後 $t = 60 \mu\text{s}$ の図-4(b)では、起爆剤の直上・直下に引張領域（正の体積ひずみ）が生じている。

図-4(c)で、注目すべきは、爆破媒体の上下面に同心円形状の引張領域が発達し、起爆点と同じ高さ付近 ($z = 0 \text{ mm}$) の媒体外周もある種の引張変形を受けている点である。これは、爆破実験で確認されたように、媒体上下面中心から外側へ向かうひび割れが伝播するであろうこと、また中央高さ ($z = 0 \text{ mm}$) 付近で爆破が切断されるように引張ひび割れが発達する可能性を示唆するものである。これは、動的なコンクリートの破壊は引張ひずみに支配され、その破壊ひずみは非常に小さく、引張域の発生がそのまま破壊域を形成すると評価されるためである。

さらに、起爆後 $t = 100 \mu\text{s}$ の図-4(d)では、爆破媒体の上下面で反射波が確認される。反射波の後続領域は体積ひずみとして引張状態にあり、図-4(e),(f),(g)の段階では媒体上下面で引張領域が優勢となり、外周の自由境界の反射波に誘起され、媒体中央に向かうひび割れが発達すると考えられる。さらに、起爆点高さ ($z = 0 \text{ mm}$) 付近の水平面内に高いレベルの引張の体積ひずみが発達することが確認される。

媒体上下面の圧縮領域は、反射波が中央に達した時点で始めて図-4(i),(j)のように形成され、起爆後 $t = 240 \mu\text{s}$ の段階では、図-4(k)のように爆破媒体全体が圧縮の体積ひずみ状態となる。

図-4は、円柱媒体の動的挙動が起爆点の圧力波動の継続時間 $T = 260 \mu\text{s}$ よりも短い時間内で、急激な変動を呈し、かつひび割れや破碎が生成・発達することを示すものである。

(3) ひび割れ誘導孔設置時の数値シミュレーション

図-1(b)のように、爆破媒中央にひび割れ誘導孔を設け、これと離間距離 $\Delta L = 125 \text{ mm}$ の一直線上に二つの起爆孔を設けた Case-2 の衝撃波動伝播を考察するため、ひずみの一次不変量である体積ひずみの分布を時系列で図-5に示す。図-5は、図-4と同様に装薬孔を含む半分 ($y > 0 \text{ mm}$) だけを表示し、起爆点を中心とした座標を設定した。

図-5を見ると、比較的初期の図-5(a),(b),(c)の段階で、起爆点高さ ($z = 0 \text{ mm}$) 付近の水平面内で引張体積ひずみ

が発達していることが、直ちに認識される。このとき、起爆孔とひび割れ誘導孔を結ぶ面内 ($y = 0 \text{ mm}$) でも引張体積ひずみ領域が確認される。これは、二つの起爆点中央にひび割れ誘導孔を設けたために生じた現象であり、起爆点からひび割れ誘導孔に向かい引張体積ひずみが成長するだけでなく、図-5(c)の段階からは、ひび割れ誘導孔表面での反射により、ひび割れ誘導孔から起爆孔に向かい引張体積ひずみが成長していることも確認される。写真-2において、ひび割れ誘導孔から起爆孔に向かいひび割れが成長している事象を合理的に説明するものである。

また、起爆後 $t = 120 \mu\text{s}$ 経過後の図-4(e)と図-5(d)を比較すると、爆破媒体上下面の対象性は消失し、 $y = 0 \text{ mm}$ の面に垂直に体積引張ひび割れが発生・成長している。これは、写真-2において、起爆孔とひび割れ誘導孔を結ぶ線と垂直な方向に二次のひび割れが発達する事象を評価し得るものである。

3. おわりに

本稿では、2013年度に実施した放電破碎による精密爆破解体工法実験を、筆者らの開発した衝撃波動伝播解析コード BLAST-3D により数値シミュレーションし、実験結果を合理的に説明し得ることを示した。このように、BLAST-3D は発破だけでなく、放電破碎についても、その動的破壊過程を理解し、ひび割れ制御設計に供し得るものと判断する。

現時点での、われわれの目標は放電破碎により誘起されるコンクリートの動的破壊機構を理解することにあるが、将来的には衝撃波動によるひび割れを制御することで、安全で、効率的、かつ低環境負荷の爆破解体工法を確立することを目指すものである。このために、爆破事象を適確に評価し得る数値解析コードの開発は不可欠であるが、BLAST-3D は、十分、その任に堪えうるものと、本稿における数値シミュレーションを通して判断する。

今後、BLAST-3D の改良だけでなく、演算資源等の整備も平行して実施し、実構造物寸法の爆破解体シミュレーションを実現し、われわれの提唱する精密爆破解体工法を実用化すべく、研究を継続する。

謝辞：東京大学大学院工学研究科上西幸司准教授には、研究全般にわたりご指導賜るとともに、BLAST-3D の開発とその実用化に向け、たゆまぬご鞭撻を賜りましたことを、ここに深くお礼申し上げます。今後とも変わらずご協力いただけますことを心よりお願い申し上げます。また、

2013年度実験の実施に際しましては、日立造船株式会社放電破砕チーム（現株式会社ニチゾウテック）田中幹雄様、坂本良様をはじめとする皆様に多大なご指導・ご協力を賜りました。ここに、深甚の謝意を表し、本小論の結びといたします。

参考文献

- 1) 日立造船株式会社ホームページ：放電破砕工法，
<http://www.hitachizosen.co.jp/products/products030.html>
- 2) Uenishi K, H. Takahashi, H. Yamachi and S. Sakurai: PC-based simulations of blasting demolition of RC structures. *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp.2401–2410, 2010.
- 3) Uenishi, K., H. Yamachi, K. Yamagami, R. Sakamoto: Dynamic fragmentation of concrete using electric discharge impulse, *Construction and Building Materials*, Vol.67, pp.170–179, 2014.
- 4) Fukuda D, K. Moriya, K. Kaneko, K. Sasaki, R. Sakamoto and K. Hidani: Numerical simulation of the fracture process in concrete resulting from deflagration phenomena, *International Journal of Fracture*, Np.180, pp.163-175, 2013.