

# 論文 鉄筋コンクリート円柱部材の放電衝撃破砕実験とそのシミュレーション解析

小尾 博俊\*1・伊東 章\*2・佐々木 加津也\*3・北嶋 秀昭\*4

**要旨:** 本研究では、放電衝撃破砕工法の破砕予測手法を構築することを目的として、衝撃力の大きさをパラメータとした、鉄筋コンクリート造の円柱部材による破砕実験とそのシミュレーション解析を実施した。その結果、1) 円柱部材の破砕性状は、鉄筋に沿ってひび割れが進行すること、2) 放電衝撃力による圧力の時間的変化は、火薬発破のそれよりも圧力の立ち上がりが緩やかであること、3) 放電衝撃力の圧力波形を仮定した FEM 解析は、円柱部材の破砕性状をある程度再現できること、などが確認された。

**キーワード:** コンクリート柱、放電衝撃破砕、衝撃力、陽解法 FEM、ひずみ速度依存性

## 1. はじめに

放電衝撃破砕工法は火薬類を用いないため安全性が高く、また、発破に比べ騒音・振動が小さく周辺環境に配慮した破砕工法として注目されている。この工法は、図-1に示すように、破砕対象物に穿孔し、金属細線と特殊液を封入した放電カートリッジを埋め込み、金属細線に高速大電流を流すことで発生する高い衝撃力を利用して、対象物を破砕するものである。発生する衝撃力の大きさは、カートリッジ内に封入する特殊液量で調整できるように規格化されている<sup>1)</sup>。

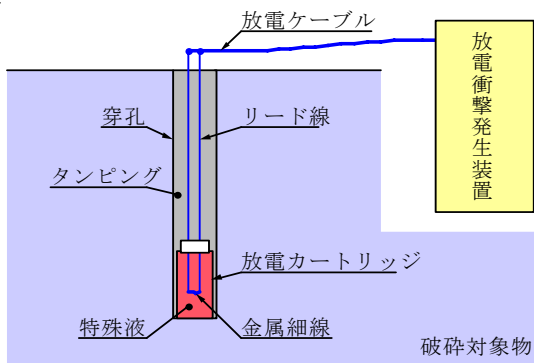


図-1 放電衝撃破砕工法のご概念図

本工法を実工事に適用する場合、FEM 解析によりあらかじめ構造物の破砕範囲や残存部の健全性・強度低下等を予測することができれば、施工計画を立てる上で極めて有益な情報となり、破砕作業の最適化・コストダウンに貢献できるものと考えられる。本研究では、FEM 解析による放電衝撃破砕工法の破砕予測手法を構築することを目的としている。

これを実現するためには、破砕対象物に穿孔した内壁

に作用する放電衝撃力の圧力波形等、その力学的特性を把握することが必要となる。施工に必要な液量と衝撃力の関係についてはほぼ把握できているものの、圧力波形を特定するには至っていない。本研究では、鉄筋コンクリート造の円柱部材を用いた破砕実験を行い、特殊液量をパラメータとした円柱部材の破砕性状を調べた。また、鋼製治具による放電衝撃力の計測結果から圧力波形を仮定し、陽解法 FEM を用いたシミュレーション解析を実施した。解析では、材料モデルにひずみ速度依存性を取り入れ、特殊液量に合った圧力波形を用いることで、円柱部材の破砕性状をある程度再現できることを示した。

## 2. 鉄筋コンクリート柱の破砕実験

### 2.1 実験概要

破砕実験に用いた円柱部材の寸法および配筋条件を図-2に示す。試験体 A は、寸法が直径 600mm×高さ 600mm、配筋は 1 重で、放電カートリッジを埋め込む穿孔は上面中心より深さ 350mm とした。試験体 B は、寸法が直径 600mm×高さ 800mm、配筋は 2 重で、穿孔は深さ 500mm とした。いずれの試験体も主筋は D22\_SD345 を 1 重あたり 8 本配筋し、帯筋は D10\_SD295 を 100mm 間隔で配筋した。放電カートリッジを埋め込む穿孔は実験直前に電動コア抜きドリルにて施工した。

コンクリートおよび鉄筋の材料定数は表-1に示す通りであり、実験時のコンクリート強度は、圧縮が 24.5N/mm<sup>2</sup>、引張が 1.99N/mm<sup>2</sup>であった。

実験ケースは表-2に示すように、特殊液量をパラメータとして試験体 A, B それぞれ 2 体ずつ実施し、液量の大小、すなわち、衝撃力の大小による破砕性状の違いを調べた。

\*1 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所 工修 (正会員)

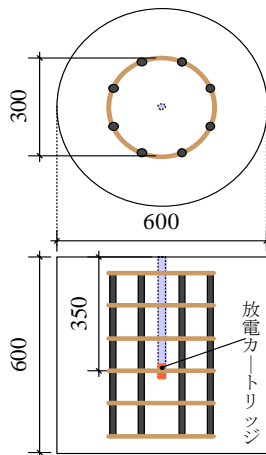
\*2 大成建設 (株) 原子力本部デコミッション部 工修

\*3 日立造船 (株) 事業・製品開発センター製品開発部

\*4 日立造船 (株) 放電破砕エンジニアリング部 工修

試験体 A

主筋:D22×8,L=500  
帯筋:D10×6@100



試験体 B

主筋:D22×8×2,L=700  
帯筋:D10×7@100

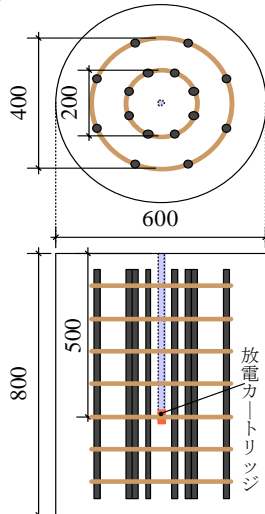


図-2 円柱部材の寸法 (mm) と配筋

表-1 コンクリート・鉄筋の材料定数

材 料	ヤング 係数 E (kN/mm <sup>2</sup> )	密度 ρ (ton/m <sup>3</sup> )	ポア ソン 比 ν	圧縮 or 降伏 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )
コン クリ ート	27.6	2.35	0.24	24.5	1.99
D22 SD345	185	7.8	0.3	396	574
D10 SD295	186	7.8	0.3	371	505

表-2 円柱部材の破砕実験ケース

特殊液量(cc)	5	10	15
試験体 A	○	○	—
試験体 B	—	○	○

2.2 実験結果

実験後の各試験体の破砕状況を写真-1に示す。本研究では、制御破砕によるコンクリート構造物の部分解体・撤去に力点を置いているので、コンクリート塊が飛散するような過度な破砕は避けることにした。無論、使用する特殊液量を増せば、コンクリート塊が飛散するような大きな衝撃力を発生させることも可能である。

試験体 A\_特殊液量 5cc のケースおよび試験体 B\_特殊液量 10, 15cc のケースでは、側面に最大で幅数 mm のひび割れが観測された。試験体 A\_特殊液量 10cc のケースは最も大きな破砕が生じたケースで、最大で幅 20~

試験体 A\_特殊液量 5cc



試験体 A\_特殊液量 10cc



試験体 B\_特殊液量 10cc



試験体 B\_特殊液量 15cc



試験体 A\_特殊液量 10cc

外周コンクリートを撤去

撤去したコンクリート塊



写真-1 円柱部材の破砕状況

30mm 程度のひび割れが観測された。このケースは、配筋外周のコンクリートがひび割れによって完全に分離された状態になり、大きな力を入れずとも簡単にコンクリート塊として撤去できる状態であった。鉄筋は主筋・帯筋ともに破断した個所は観測されなかった。

次に、各試験体の上面と、側面を展開したひび割れ分布を図-3に示す。図中、薄墨色の線は鉄筋を表し、赤線は幅 1.0mm 以上のひび割れを、青線は幅 1.0mm 未満のひび割れを表す。この図から以下のことが分かる。試験体 A の上面ではひび割れが観測されたが、試験体 B では観測されなかった。また、試験体 A では、側面の鉛直方向のひび割れが、上下面の縁に達しているものが多いが、試験体 B では達していないものの方が多い。このことは、試験体の高さや放電カートリッジの埋め込み深さに起因するものと考えられる。試験体 A\_特殊液量 10cc のケースは典型的であるが、配筋位置とひび割れ位置は

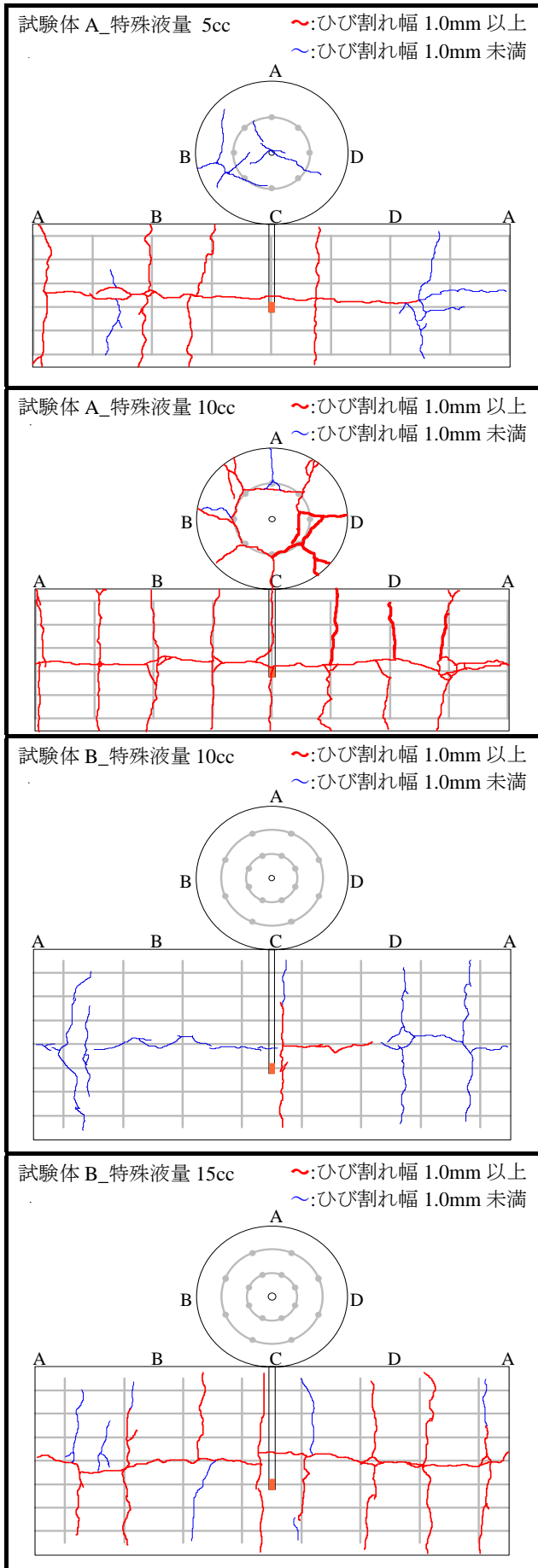


図-3 円柱部材のひび割れ図

極めて良く一致しており、鉄筋コンクリート部材において放電衝撃力が適度な大きさであれば、鉄筋位置に沿ったひび割れが進展することを示している。

### 3. シミュレーション解析

#### 3.1 圧力波形の仮定

火薬発破を対象とした既往の研究によれば、火薬類を装薬孔で爆破させると図-4に示すように、装薬孔の内壁に作用する圧力は、薬種によっては、わずか数 $\mu$ s程度の短時間で最大圧力に達し、その後、爆破に伴って発生するガス圧力が200 $\mu$ s前後に渡って継続するものとされている<sup>2)</sup>。

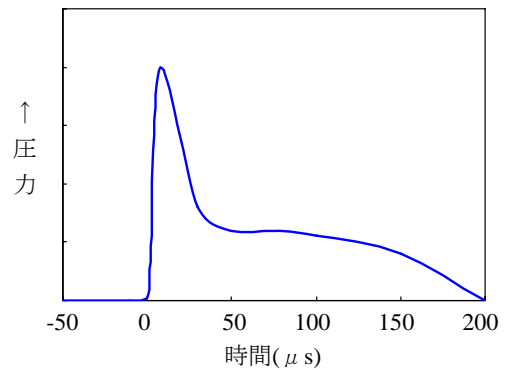


図-4 火薬発破による圧力波形の一例

本研究においても、円柱部材の破砕実験をシミュレーションするにあたり、穿孔した内壁に作用する放電衝撃力の圧力波形を特定する必要がある。そこで、圧力波形の計測方法に検討を重ね、図-5に示す方法を考案した。厚肉の鉄管中心に放電カートリッジを配置し、鉄管内径の曲率と合致するようにアクリル製プレートを作成し、このプレートの平面側に圧力ゲージを貼り付け、圧力波形を計測した。鉄管内の空洞には珪砂を詰め、鉄管の上下面は鉄板で拘束した。圧力ゲージにはPVDF(ポリフッ化ビニリデン)フィルム：Dynasen社製を用いた。

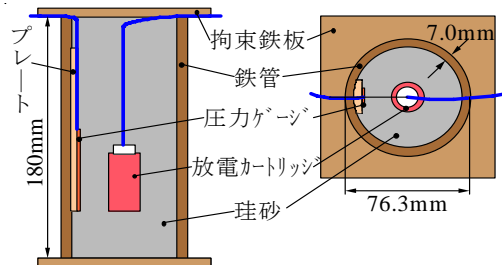


図-5 放電衝撃力の圧力計測

その結果、図-6に示す圧力波形を得た。圧力の立ち上がりから最大圧力に達するまでの時間は数10 $\mu$ sで、火薬発破の計測例に比べ桁長くなっている。その後、計測された圧力は緩やかに低減しているが、火薬発破では、最大圧力に達した後は急激な圧力低下を示し、圧力

の立ち上がりから終息までの全反応時間は概ね  $200 \mu\text{s}$  程度である。最大圧力後は、コンクリートに生じたひび割れによって圧力が急減するものと理解することができるので、本研究でも発破の計測例に倣い、最大圧力に達した後は  $200 \mu\text{s}$  で圧力が 0 となる曲線 CD を仮定することにした。また、特殊液量の違いによる圧力波形は、特殊液の反応による最大圧力 C が C' へ移行するものとして区間 BC'D で表現することにした。以後のシミュレーションでは、実験の破砕状況を再現できるように最大圧力（区間 BC'D）を変化させながら、解析を繰り返すことにした。

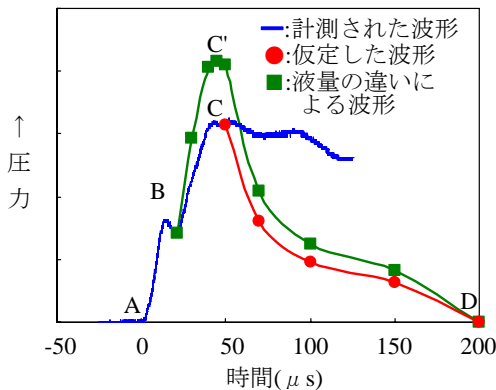


図-6 放電衝撃力の圧力波形

### 3.2 解析条件

解析に用いたコンクリートの材料モデルは、材料試験の結果をもとに静的な応力-ひずみ関係を定義し、その後、ひずみ速度依存性を取り込んだ材料モデルへと拡張した。まず、静的な材料モデルについて、圧縮側は応力の下降域を含めた簡略化した履歴モデル<sup>3)</sup>を用いた。引張側は軟化域に 1/4 モデル<sup>3)</sup>を踏襲し、ひび割れ幅  $w$  を特性長さ  $L_{ch}$  で除してひずみに変換した。(図-7, 8 の  $\dot{\epsilon}'=0\text{s}^{-1}$ )。このとき、破壊エネルギー  $G_f$  は式(1)から  $78.8\text{N/m}$ 、引張応力が 0 となるときひび割れ幅  $w$  は式(2)から  $0.2\text{mm}$  と求まる。特性長さ  $L_{ch}$  には材料試験に用いた供試体の代表寸法である  $100\text{mm}$  を用いた。

$$G_f = 10 \cdot (d_{\max})^{1/3} \cdot f_c^{1/3} \quad (\text{N/m}) \quad (1)$$

$$w = 5 \cdot G_f / f_t \quad (2)$$

ここで、粗骨材の最大寸法  $d_{\max}$  は  $20\text{mm}$ 、圧縮強度  $f_c$ 、引張強度  $f_t$  は表-1 に示す値である。

一方、動的な材料モデルについては、コンクリート標準示方書[構造性能照査編](2002)<sup>4)</sup>に参考資料として、ひずみ速度の影響が、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}'$  と静的な圧縮強度  $f_{cs}$  の関係式として示されている。

$\dot{\epsilon}' \leq 30\text{s}^{-1}$  に対して、

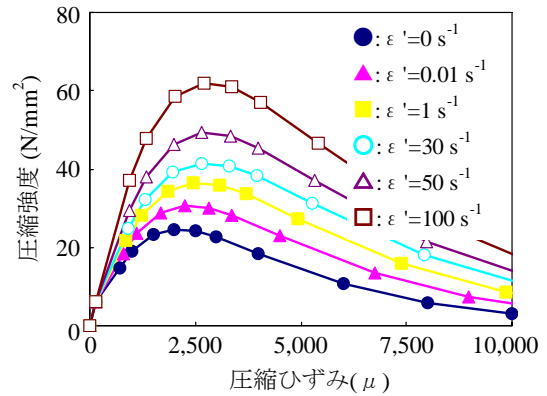


図-7 静的・動的なコンクリート圧縮強度

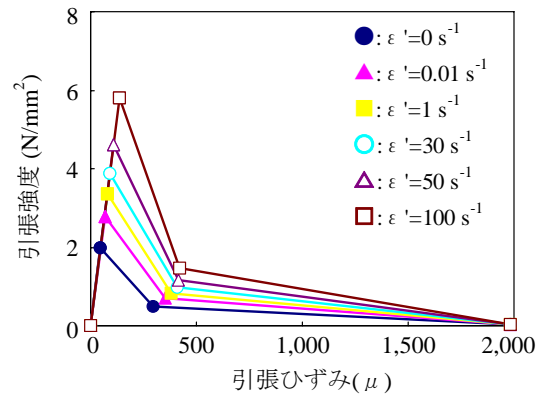


図-8 静的・動的なコンクリート引張強度

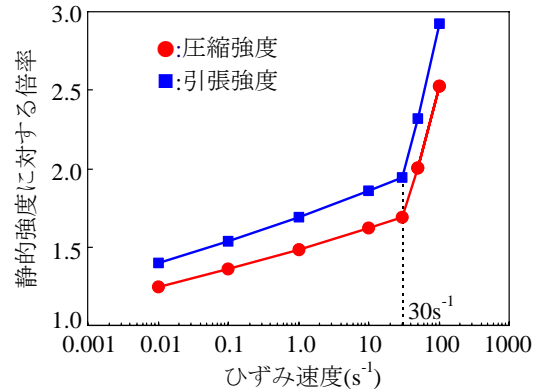


図-9 ひずみ速度依存性

$$f_{cd} / f_{cs} = [\dot{\epsilon}' / (30 \times 10^{-6})]^{1.026\alpha} \quad (3)$$

$$f_{td} / f_{ts} = [\dot{\epsilon}' / (3 \times 10^{-6})]^{1.016\delta} \quad (4)$$

$\dot{\epsilon}' > 30\text{s}^{-1}$  に対して、

$$f_{cd} / f_{cs} = \gamma \cdot [\dot{\epsilon}' / (30 \times 10^{-6})]^{1/3} \quad (5)$$

$$f_{td} / f_{ts} = \beta \cdot [\dot{\epsilon}' / (3 \times 10^{-6})]^{1/3} \quad (6)$$

ここで、 $f_{cd}$ 、 $f_{td}$  は動的な圧縮強度、動的な引張強度、 $f_{cs}$ 、 $f_{ts}$  は静的な圧縮強度、静的な引張強度であり、各係数は、

$$\alpha = 1/(5 + 0.9f_{cs}), \quad \delta = 1/(10 + 0.6f_{cs}),$$

$$\gamma = 10^{(6.156\alpha - 2)}, \quad \beta = 10^{(7.112\delta - 2.33)}$$

上記の関係式を図化すると図-9のようになり、この関係式を適用し、動的な応力ひずみ関係を算出した(図-7, 8の $\varepsilon' = 0.01 \sim 100s^{-1}$ )。

解析モデルは試験体の形状および作用荷重の対称性を考慮して1/4モデルとし、切り出した側面を面対称とした。試験体底面の境界条件には、剛表面を定義し面接触とした。また、鉄筋はトラス要素でモデル化し、コンクリート-鉄筋間は完全付着とした。コンクリートには8節点ソリッドの低減積分要素を用い、穿孔部の要素分割は孔周を16分割、すなわち、1/4モデルでは4分割とした。図-10に解析モデルと圧力作用部の拡大図を示す。

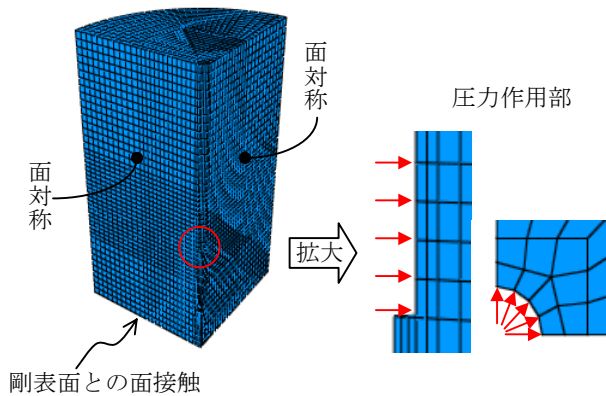


図-10 解析モデル (試験体 A)

### 3.3 解析結果

破砕性状のシミュレーション解析では、コンクリートの破砕領域を評価する指標として、破砕が終了し十分な時間が経過(ひずみが一定値に収斂)したと見なせる時刻 3,000  $\mu s$  での引張ひずみを採用した。このときの最大主ひずみ(引張ひずみ)の分布を図-11に示す。実験結果と比較すると、試験体上半部へのひび割れの進展がやや過小評価されているものの、側面におけるカートリッジ位置での水平方向のひび割れ、主筋に沿った鉛直方向のひび割れ、さらに、試験体 A のみで観測された上面における帯筋に沿った多角形のひび割れ等は、前述した実験結果とほぼ整合している。また、試験体内部のひび割れ状況も主筋に沿って進展しており、特に試験体 A\_特殊液量 10cc のケースでは、配筋位置によって内側と外側にコンクリート塊が分離するような筒状のひび割れ面が形成されている様子が分かる。

解析結果から得られた、特殊液量と穿孔内壁に作用する最大圧力の関係をまとめると図-12のようになる。液量が 5, 10 および 15cc の場合の最大圧力は 1.5, 1.8 および 2.0  $kN/mm^2$  となった。

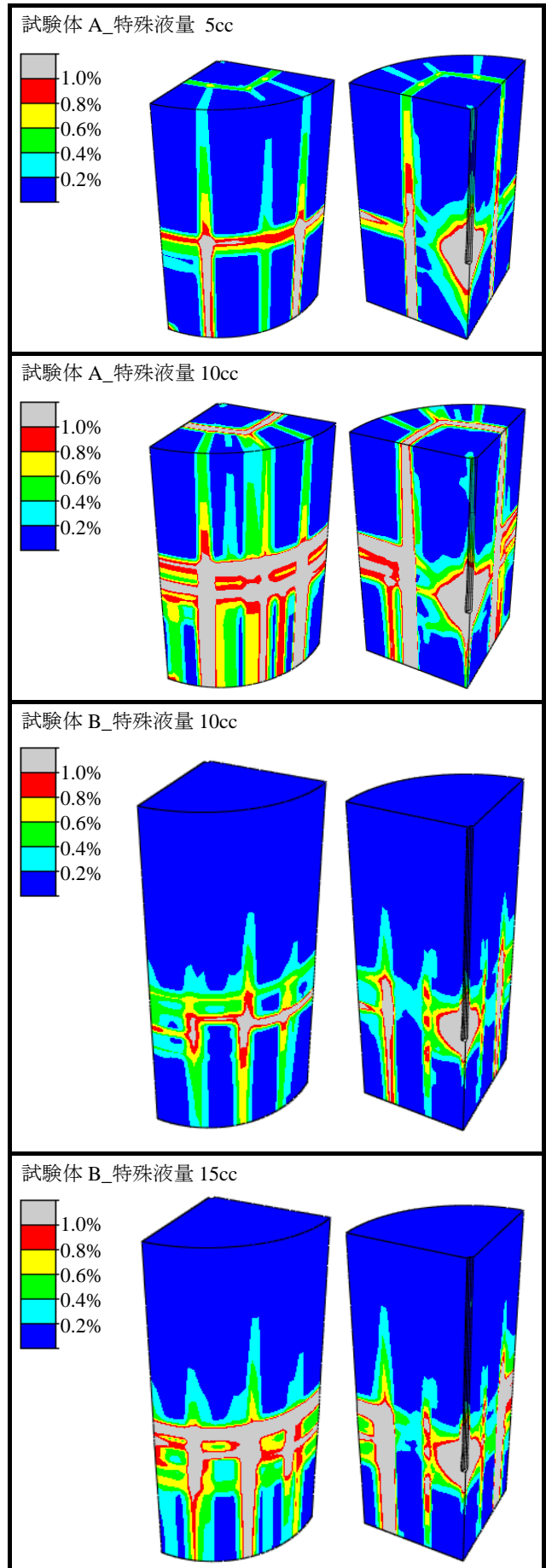


図-11 円柱部材のひずみ分布

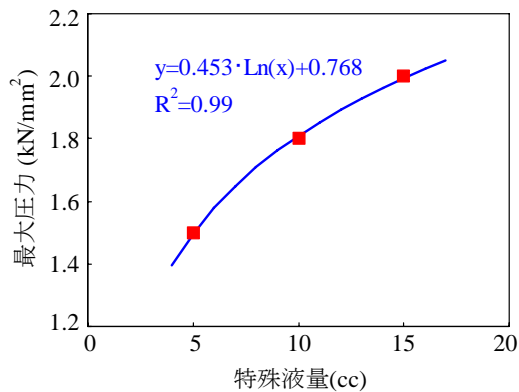
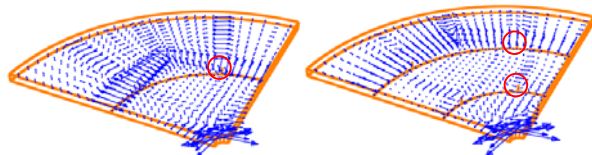


図-12 特殊液量と最大圧力の関係

次に、試験体カートリッジ位置の断面における最大主ひずみのベクトル図を図-13に示す。穿孔近傍では、当然ながら半径接線方向に大きなひずみが生じている。特徴的なのは、帯筋位置でひずみの方向が半径方向に変化しており、また、試験体Aでは主筋から外縁に向かって、試験体Bでは内側の主筋から外側の主筋に向かって接線方向のひずみが卓越している。このように、鉄筋の存在によってひずみの方向が変化し、鉄筋に沿った、または、鉄筋から外縁に向かったひび割れが生じる様子が読み取れる。なお、試験体Aの帯筋位置でのひずみ分布が角張っているのは要素分割の影響と思われる。



試験体 A\_特殊液量 10cc 試験体 B\_特殊液量 15cc

図-13 断面内のひずみ分布

さらに、試験体カートリッジ位置の断面内で、主筋と帯筋が交差する位置(図-13の赤円)におけるコンクリート要素と帯筋要素のひずみ時刻歴を図-14に示す。試験体Aの帯筋は約0.3%、試験体Bの内側の帯筋が約0.4%、外側が約0.2%のひずみが発生し、時刻500 $\mu$ s程度で一定となる。これに対し、試験体Bの内側コンクリートは

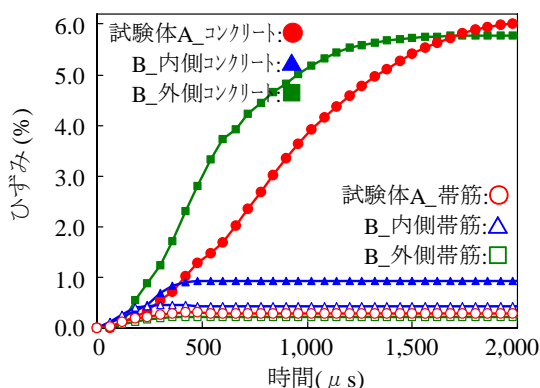


図-14 各部のひずみ時刻歴

約1.0%で一定となるが、配筋外側のコンクリートでは試験体A、Bともに6.0%程度のひずみに達している。これは中心部から外側に進行する圧力波が外縁(自由面)で反射し、後続する圧力波と重なり、ひずみが成長したものと考えられる。また、ひずみ時刻歴曲線の勾配は、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 'を表すことになるが、配筋外側のコンクリートでは $\dot{\epsilon}$ 'が数 $10s^{-1}$ となり、この種の解析ではひずみ速度依存性を考慮した材料モデルの設定が必須となる。

#### 4. まとめ

本研究では、放電衝撃破砕工法の破砕予測手法を構築することを目的に、鉄筋コンクリート造の円柱部材による破砕実験とそのシミュレーション解析を実施した。以下に本研究の範囲内で得られた知見をまとめる。

- (1) 円柱部材の破砕性状は、鉄筋に沿ってひび割れが進展し、また、鉄筋の存在によってひずみの方向が変化する。
- (2) 鋼管を用いた圧力波形の計測結果から、放電衝撃力による圧力の時間的変化は、火薬発破で計測される圧力の立ち上がりより緩やかと考えられ、最大圧力に達するまでの時間は数 $10\mu s$ である。
- (3) 放電衝撃力の圧力波形を仮定したFEM解析は、ひび割れの発生位置、進展方向など、円柱部材の破砕性状をある程度再現することができる。

既往の研究によれば、穿孔内壁に作用する圧力の大きさとその時間的変化(圧力波形)が異なれば、破砕性状も大きく異なることが報告されており<sup>9)</sup>、破砕性状の解析精度は圧力波形の正確な把握に大きく依存していると言える。今回の解析で用いた圧力波形は、限られた条件下での計測を基に仮定したものであり、破砕予測シミュレーションの精度向上のためには、特殊液量の違いによる圧力波形の計測が不可欠になると考える。

#### 謝辞

本破砕実験に際しては、日立造船(株)の阪本良氏にご協力を得ました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 北嶋秀昭, 田中幹雄, 荒井浩成: 放電衝撃破砕工法とその施工例, 建設機械, 2005.9
- 2) 工業火薬協会: 新・発破ハンドブック, 山海堂, 1989.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編], 2002.
- 5) 趙 祥鎬, 三宅秀和, 木村 哲, 金子勝比古: 一自由面破砕の破壊プロセスに及ぼす圧力波形の影響に関する数値解析, 火薬学会誌, Vol.64, No.3, 2003.