

論文 放電衝撃破砕による生体遮へい壁模擬試験体の解体基礎実験

小尾 博俊^{*1}・平 治^{*2}・佐々木 加津也^{*3}・阪本 良^{*3}

要旨：本研究は、生体遮へい壁等の大規模な RC 構造物を安全かつ効率的に部分解体するための破砕工法を確立することを目的として、生体遮へい壁を模擬した RC 構造部材の解体実験とそのシミュレーション解析を実施したものである。その結果、1) 適量の反応液と斉発により、制御爆破工法と同程度の破砕が可能であること、2) 破砕面の施工性は良好で、計画的な区分解体が可能であること、3) シミュレーション解析は、RC 構造部材の破砕性状を概ね予測できること、などが確認できた。

キーワード：放電衝撃破砕, 生体遮へい壁, 大規模 RC 構造物, 陽解法 FEM, ひずみ速度効果

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、火薬発破に比べ騒音・振動が小さく環境に配慮した破砕工法とされている。この工法は、**図-1**に示すように、破砕対象物に穿孔し、金属細線と自己反応性物質（以下、反応液）を封入した放電カートリッジを埋め込み、金属細線に瞬時に電力供給することで発生する衝撃力を利用して、対象物を破砕するものである。破砕力の大きさは、カートリッジ内に封入する反応液量で調整できるように規格化されている。

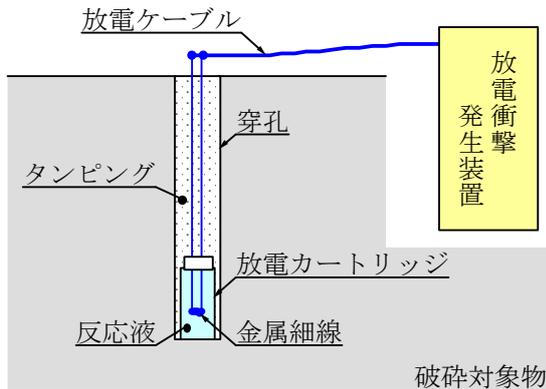


図-1 放電衝撃破砕の概念

従来、RC 構造物を解体する工法としては、ブレーカーやワイヤーソー等による機械的破砕工法や火薬発破による制御爆破工法、あるいは水和反応による膨張圧を利用した静的破砕工法等が一般的に用いられている。しかし、生体遮へい壁のように放射化した構造物の解体では、汚染濃度に応じた区分解体の必要が生じ、作業効率はもちろんのこと、破砕対象となる部位のみを区分して解体することができる、破砕の計画性・制御性の高い解体工法が求められている。

そこで、本研究では、大規模な RC 構造物を安全にか

つ効率的に部分解体する工法として、放電衝撃破砕工法の有効性を検証し、この工法の破砕予測手法を構築することを目的として、生体遮へい壁を模擬した RC 構造部材の解体実験とそのシミュレーション解析を実施した。

解体実験では、反応液量をパラメータとしたときの破砕性状と破砕面の施工性を調べ、また、陽解法 FEM によるシミュレーション解析では、破砕の予測性について検証した。その結果について次章以降に述べる。

2. 解体基礎実験

2.1 実験概要

解体実験に用いた RC 構造部材の形状寸法および配筋条件を**図-2**に示す。試験体は生体遮へい壁を模擬し、かぶり 130mm の位置に D25、ピッチ 200mm のメッシュを配筋することとし 2 体を製作した。本実験で 1 回あたりの破砕対象とする領域は、**図中**、赤色の点線で示した幅 900mm×深さ 500mm×奥行き 300mm で、1 試験体に付き 4 面設けることにした。その内の 2 面（試験体 B の片面）には、表面にライナープレートとして厚さ 6mm の鉄板をスタッドジベルにより貼り付けた。また、試験体の片隅に設けた幅 500mm×深さ 500mm×奥行き 300mm の欠損部は、連続壁の解体をイメージし、解体済みの領域であることを表している。

実験ケースは制御爆破工法との比較のため、制御爆破工法を用いた場合に想定される 1 回あたりの破砕厚さ 300mm、穿孔間隔 300mm、穿孔深さ 500mm を基準に、放電カートリッジに封入する反応液量をパラメータとして全 8 回実施した。**表-1**に実験ケースを示す。ここで、ケース A-2, A-3 は A-1 と、A-4, B-2 は B-1 と基本的に同一破砕条件となるため、本稿ではケース A-1, B-1, B-3 および B-4 の結果について後述する。

*1 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所（正会員）

*2 大成建設（株） 原子力本部原子力技術第二部

*3 日立造船（株） 機械・インフラ本部インフラ事業部

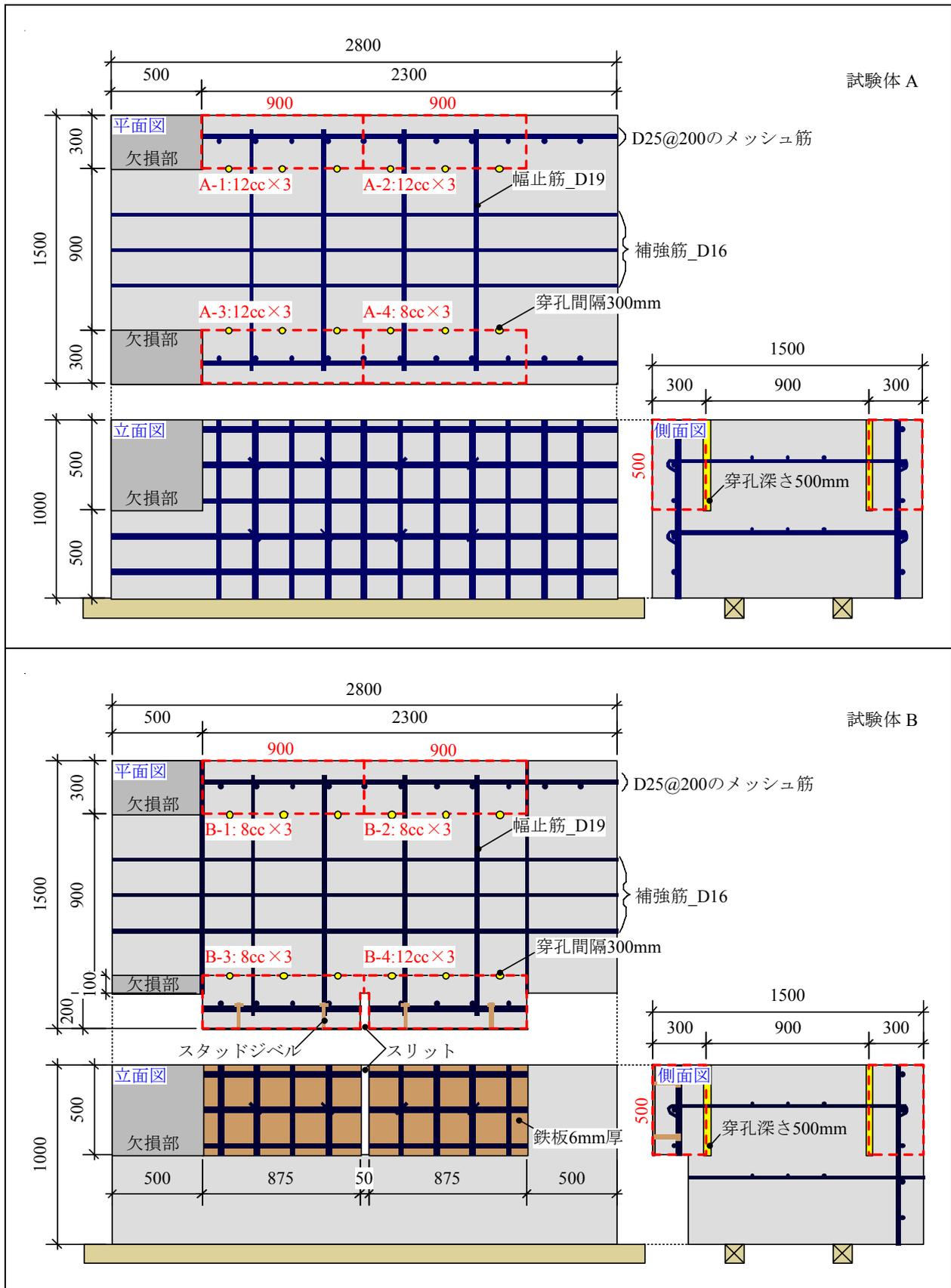


図-2 試験体の形状寸法と配筋（投影図）

実験時におけるコンクリート強度は、圧縮強度が 36.6MPa、引張強度が 2.88MPa であった。また、鋼材の強度については、破砕時に鉄筋等が破断する恐れはない

ため、強度試験は行なわず、後述するシミュレーション解析では表-2 に示す規格値相当の値を用いることにした。

表-1 実験ケース

| ケース | 反応液量×斉発数 | 破砕面の条件 |
|-----|----------|--------------|
| A-1 | 12cc×3 発 | 鉄板なし，幅止筋 4 本 |
| A-2 | 12cc×3 発 | 鉄板なし，幅止筋 4 本 |
| A-3 | 12cc×3 発 | 鉄板なし，幅止筋 4 本 |
| A-4 | 8cc×3 発 | 鉄板なし，幅止筋 4 本 |
| B-1 | 8cc×3 発 | 鉄板なし，幅止筋 2 本 |
| B-2 | 8cc×3 発 | 鉄板なし，幅止筋 2 本 |
| B-3 | 8cc×3 発 | 鉄板あり，幅止筋 2 本 |
| B-4 | 12cc×3 発 | 鉄板あり，幅止筋 2 本 |

表-2 コンクリート・鋼材の材料定数

| | コンクリート | 鋼材(鉄筋, 鉄板) |
|--------------------------|--------|------------|
| 弾性係数 (GPa) | 29.7 | 185.0 |
| ポアソン比 | 0.21 | 0.30 |
| 密度 (ton/m ³) | 2.31 | 7.75 |
| 圧縮強度 (MPa) | 36.6 | 345.0 |
| 引張強度 (MPa) | 2.88 | (降伏強度) |

2.2 実験結果

破砕実験後の亀裂またはひび割れ状況を写真-1 に示す。ケース A-1 は反応液量 12cc×3 発，ケース B-1 は 8cc×3 発で破砕したケースである。A-1 と B-1 を比較すると，外観上は顕著な差は無いように見えるが，試験体上面の亀裂幅は A-1 が 40~50mm あるのに対し，B-1 は

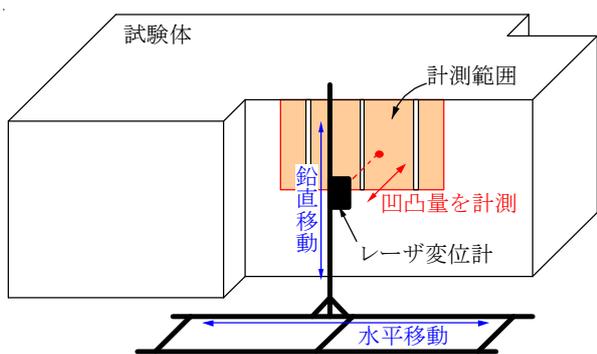
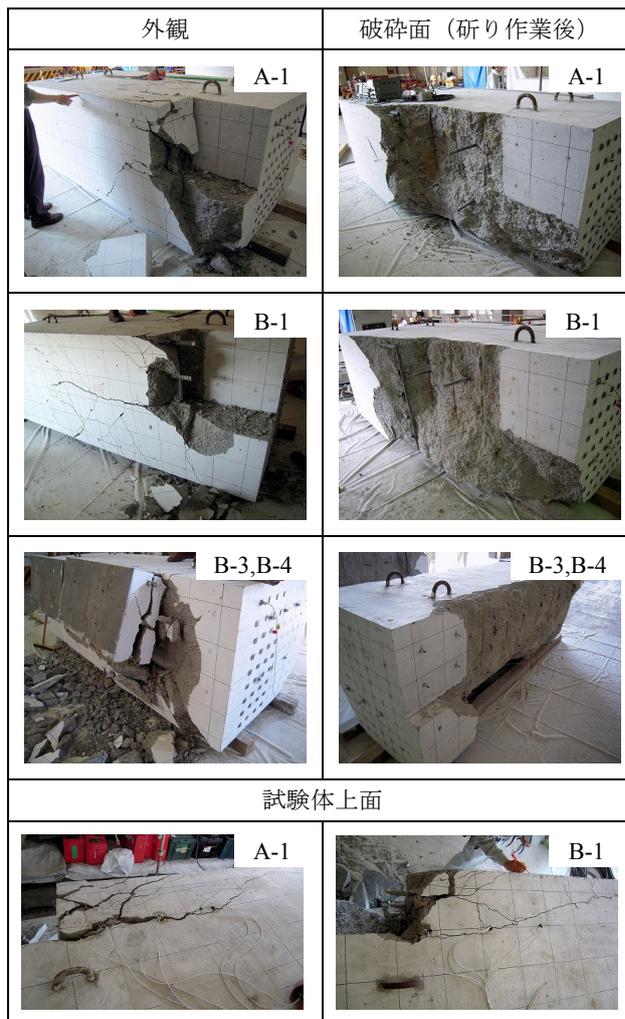


図-3 破砕面の凹凸計測

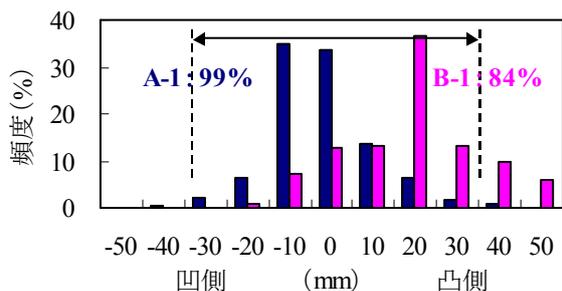
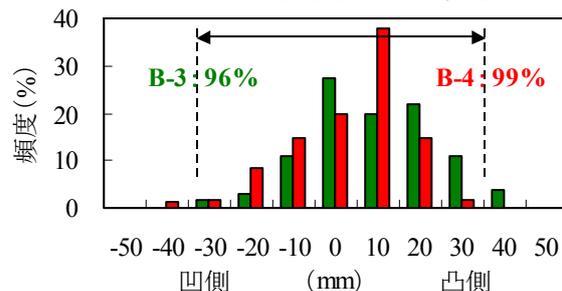


図-4 破砕面の凹凸量

数 mm 程度であり有意な差が生じている。また，鉄板を貼り付けたケース B-3 と B-4 について比較すると，やはり液量 12cc で破砕した B-4 の方が，鉄板面が大きく外側に傾き破砕程度が大きいことを示している。なお，本実験では汚染濃度に応じた区分解体を想定しているため，試験片が飛散するような過度な破砕は避けている。そのため，幅止筋の破断や本数の違いによる有意な差は観測されなかった。

次に，破砕面の施工性を検証するため，ハンドブレイカーによる研り作業後，図-3 に示すようにレーザー変位計を用いて破砕面の凹凸状況を計測した。幅 900×深さ



500 の範囲について、レーザ変位計を水平および鉛直方向に移動させながら 300~400 点を計測した。その結果、**図-4** に示すように、穿孔位置を基準としてほとんどの計測点が±30mm の範囲に収まっており、放電衝撃破砕により良好な精度で施工できることが確認できた。

ところで、実験当初、深さ方向の破砕領域は穿孔深さに概ね等しい 500mm と想定していたが、実際には**写真-1** から分かるように試験体の下端まで破砕面は形成されている。この要因としては、試験体の高さが不十分であったためと考えられることから、後のシミュレーション解析では試験体の高さを十分な大きさにした解析ケースで検討を加えることとした。

3. シミュレーション解析

3.1 放電衝撃の圧力波形

放電衝撃により発生する圧力波形の計測実験が佐々木ら¹⁾により行われている。それによると、通常の火薬類はわずか数 μsec で数 GPa の高圧力が発生するが、放電衝撃ではこのような急峻な圧力波は発生せず、**図-5**、**6** に示すように穏やかな圧力上昇をたどることが報告されている。計測結果から、放電衝撃のピーク圧力は 1GPa 強で、ピーク圧到達までの時間は百数十 μsec 程度かかることが確認されている。後のシミュレーション解析ではこの計測結果を用いることとし、**図-7** に示すように、

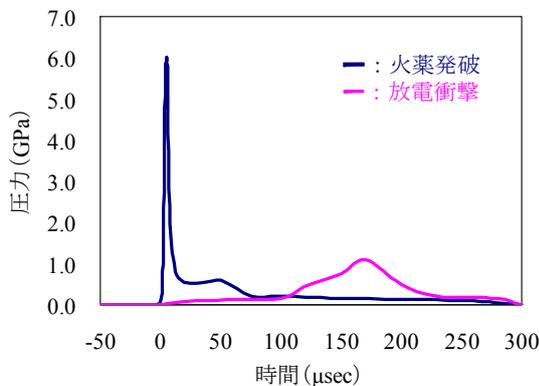


図-5 圧力波形の比較¹⁾

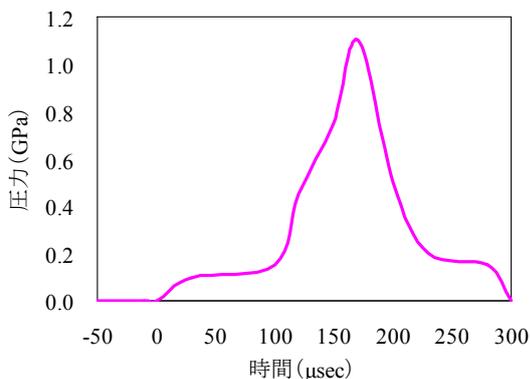


図-6 放電衝撃の圧力波形¹⁾

放電カートリッジ位置でのコンクリート内壁に圧力波形を載荷させ計算している。

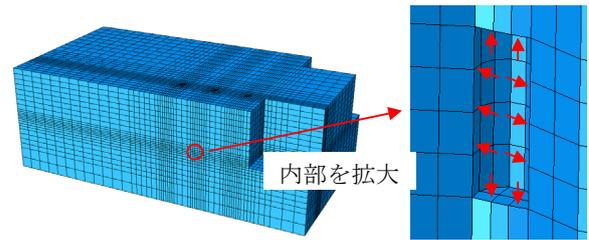


図-7 圧力波形の載荷方法

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、強度試験の結果を基に静的な応力-ひずみ関係を定義し、その後、ひずみ速度効果を取り入れた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、圧縮側は応力の軟化域を含めた簡略化した履歴モデル²⁾を用いた。引張側は 1/4 モデル²⁾を踏襲し、ひび割れ幅 w を等価長さ L_{eq} で除してひずみに変換した。このとき、破壊エネルギー G_f は式(1)から 90.1N/m、引張応力が 0 となる時のひび割れ幅 w は式(2)から 0.16mm と求まる。また、等価長さ L_{eq} には強度試験に用いた供試体の代表寸法である 100mm 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 20mm、圧縮強度 f_c 、引張強度 f_t は表-2 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)³⁾に参考資料として、ひずみ速度の影響が、ひずみ速度と静的な圧縮強度の関係式として示されている。

この関係式に本実験のコンクリート強度を代入し図化すると**図-8~10** のようになる。**図-8** はひずみ速度の増加がコンクリートの材料強度に及ぼす影響で、縦軸の倍率は一般に DIF (dynamic increase factor) として引用されている。また、**図-9** と **10** は各ひずみ速度に応じたコンクリート強度を示したものであり、本解析ではこれらの関係を入力データとして与えている。

一方、鉄筋、鉄板の材料定数は表-2 に示す値を用い、降伏強度は 345.0MPa の完全弾塑性とし、簡単のため、ひずみ速度効果の適用は省略した。

解析モデルは**図-11** に示すようにフルモデルとし、試験体底面の境界条件は、剛表面との面接触とした。コンクリート要素には 8 節点ソリッドの低減積分要素を用い、鉄板はシェル要素で、鉄筋はトラス要素でモデル化した。また、コンクリート-鉄板間およびコンクリート-鉄筋間は完全付着を仮定した。

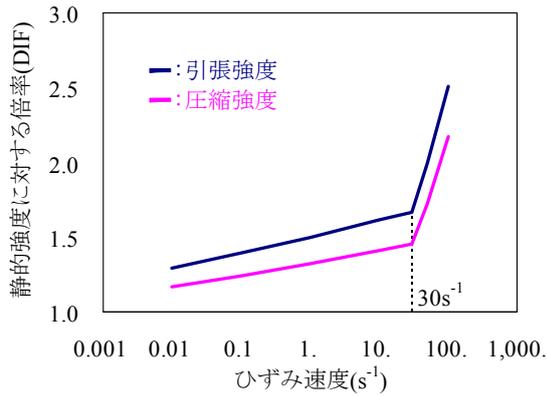


図-8 ひずみ速度効果

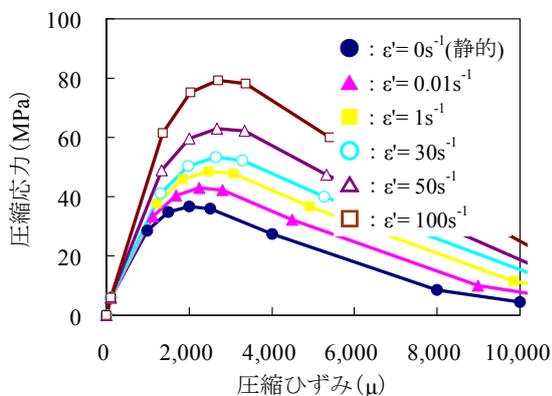


図-9 コンクリートの圧縮強度特性

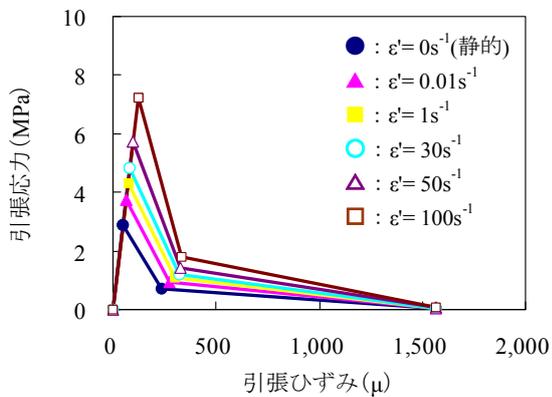
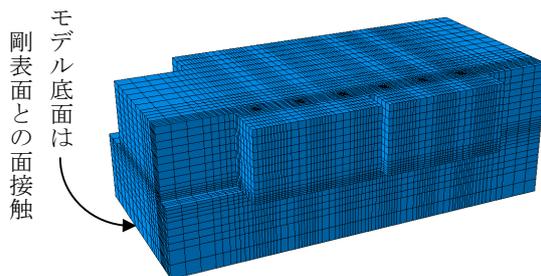


図-10 コンクリートの引張強度特性



ケース B-3, B-4 節点数 : 58,175 要素数 : 53,866

図-11 解析モデル

3.3 解析結果

破砕実験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（ひずみがほぼ一定値に収斂）したと見なせる時刻 $3,000 \mu \text{ sec}$ 時の引張ひずみを採用した。このときのひずみ分布を図-12に示し、以下に実験結果と比較する。

まず、ケース A-1 および B-1 の外観からは、実験時の試験体表面に散見していた微細なひび割れは必ずしも表現できていないものの、3つの穿孔を結ぶ主要なひび割れは再現されている。また、コンクリート表面から奥行き 300 mm 前後の位置に形成された破砕面は、試験体の下端へと達しており、実験結果と概ね一致している。

一方、鉄板面を有するケース B-3、B-4 の外観からは、破砕目標とした領域を取り囲むように亀裂が生じており、実験結果をうまく表現できている。また、奥行き 300 mm 前後に形成された破砕面も実験結果をほぼ再現できていると思われる。

実験当初に想定していた深さ方向の破砕領域について検討するため、試験体 A の下方に高さ 2 m のコンクリートを付加した仮想試験体の解析を実施した。破砕条件は $12 \text{ cc} \times 3$ 発でケース A-1 と同条件である。その結果、図-13に示すように、亀裂の深さは 1 m 程度に止まり、深さ方向に十分な大きさがあれば、概ね計画通りの破砕が可能であると推測される。

4. まとめ

本研究では、大規模な RC 構造物を部分解体する工法として、放電衝撃破砕を適用する場合の施工性や破砕の予測性を検証することを目的として、解体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) 適量の反応液と斉発により、制御爆破工法と同程度の破砕が可能である。例えば、破砕領域の厚さを 300 mm とした場合、反応液量 12 cc 、穿孔間隔 300 mm とした斉発が比較的良好な結果であった。
- (2) 破砕面の凹凸量は $\pm 30 \text{ mm}$ 程度で施工でき、計画的な区分解体が可能である。
- (3) シミュレーション解析は、主要な破砕面、破砕の領域および施工性等を概ね表現できる。

今後、実機への適用を考えた場合、課題として以下の項目が挙げられる。

- (1) 2段配筋等を施した高密度に配筋された構造物に対する破砕性を確保すること。
- (2) 解体作業の効率向上のため、1穿孔あたり深さ方向に2個の放電カートリッジを配置する多段破砕の有効性を確認すること。

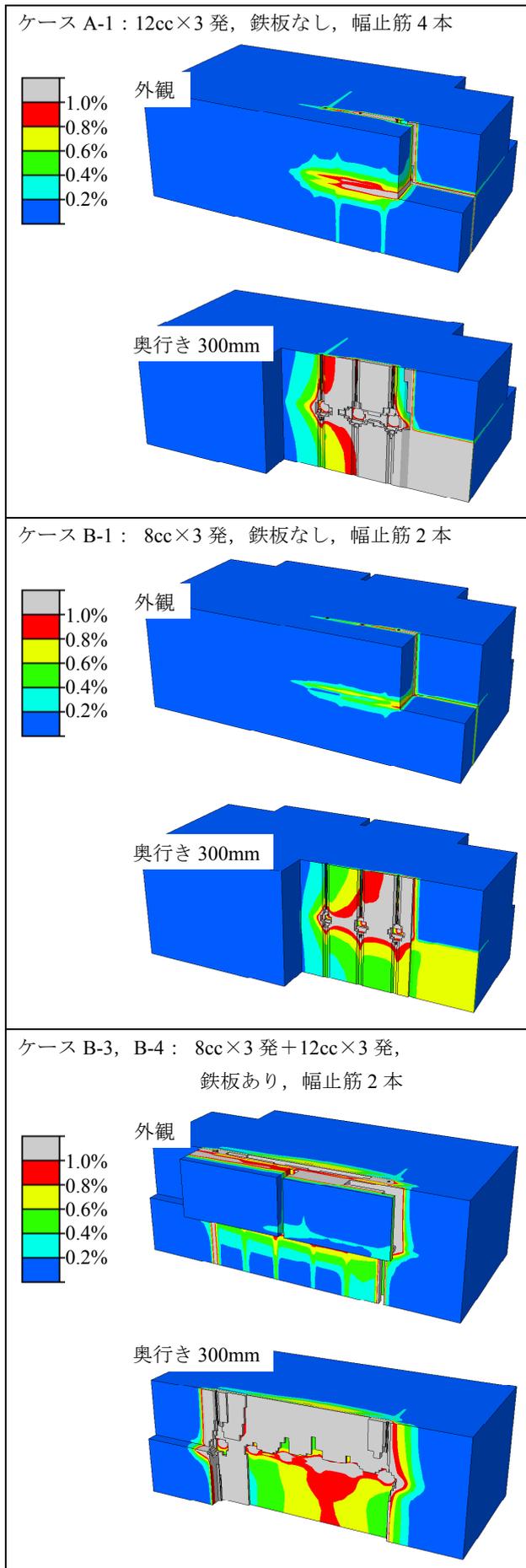


図-12 ひずみ分布

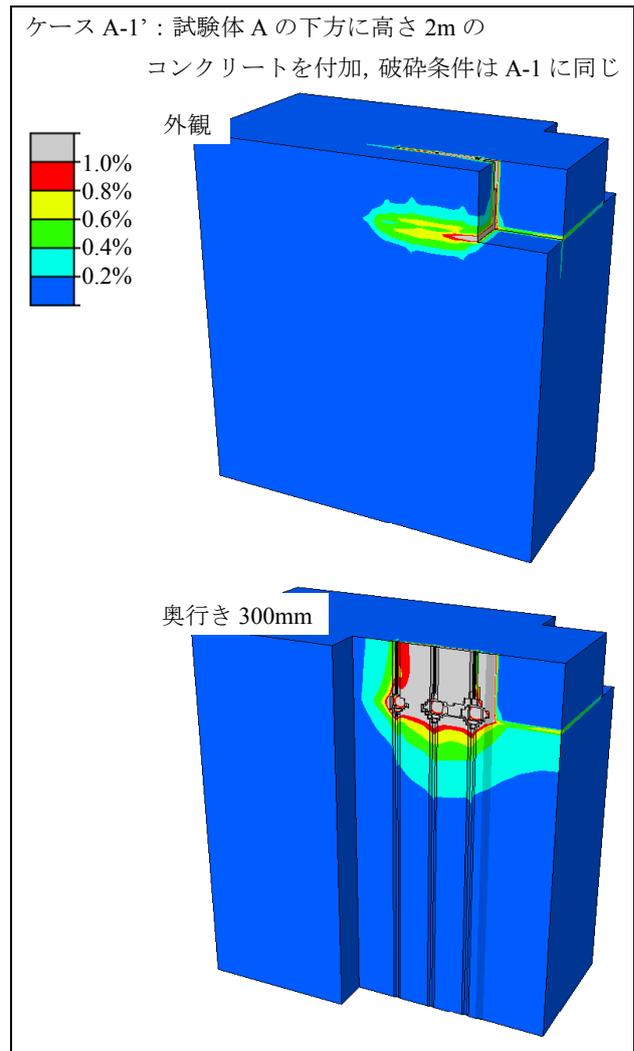


図-13 仮想試験体のひずみ分布

(3) 上記の破砕に対するシミュレーション解析の予測性を確保すること。

これらの課題を克服しつつ、本破砕工法および破砕予測手法の高度化を図ってまいりたい。

謝辞

本実験に際しては、大成建設(株)の伊東章氏、日立造船(株)の部谷桂太郎氏および林薫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) 佐々木加津也, 阪本良, 大西孝明, 北嶋秀昭, 久保田士郎, 佐分利禎, 緒方雄二: 放電衝撃破砕工法の破砕メカニズムに関する検討, 土木学会平成 22 年度全国大会, pp.617-618, 2010.9
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.