

論文 厚壁 RC 構造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：本研究は、放電衝撃破砕工法を用い、大規模な RC 構造物を計画的に部分破砕するための破砕予測手法を構築することを目的として、厚壁構造部材の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) 破砕面の周囲にスリットを設けることで、適量の反応液と斉発により効果的な破砕が可能であること、2) 破砕による残存部への影響は限定された範囲に留まり、背面側の健全性は保たれること、3) 放電衝撃力の圧力波形を仮定した FEM 解析は、厚壁部材の破砕性状をある程度再現できること、などが確認できた。

キーワード：厚壁 RC 構造, 放電衝撃破砕, 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、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、金属細線に高速大電流を供給する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反応液量で調整できるように規格化されている¹⁾。

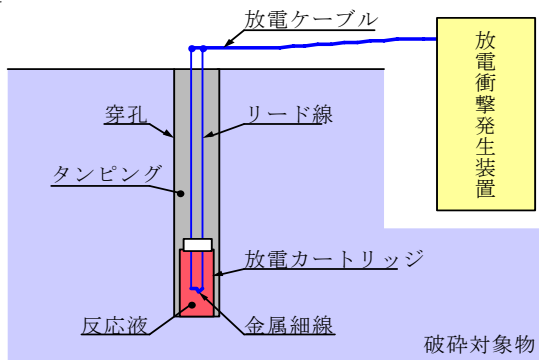


図-1 放電衝撃破砕工法概念

従来、RC構造物を解体する工法としては、ブレイカーやワイヤーソー等による機械的破砕工法や水和反応による膨張圧を利用した静的破砕工法、あるいは発破による爆破工法等が一般的である。しかし、大規模なRC構造物の解体では、解体効率が工期・コストに大きく影響するため、より効率的な解体工法が求められている²⁾。

そこで、本研究では、大規模な RC 構造物を安全かつ効率的に解体する工法として、放電衝撃破砕工法の有効性を検証するとともに、この工法の破砕予測手法を構

築することを目的として、厚壁 RC 構造部材の破砕実験とそのシミュレーション解析を実施した。

本研究で対象とする厚壁構造とその破砕手順の一例を以下に述べる。連続した厚壁構造物を想定し、壁の表面から深さ数 10cm 程度のコンクリート表層を計画的に破砕することを考える。まず、厚壁の破砕対象面に対し上下左右にスリット切断を施す。このとき、壁の表層内部にある縦横方向の鉄筋は切断されるため、無筋コンクリートと同様な破砕が期待できる。その後、カートリッジ挿入用の穿孔作業を行い、放電衝撃にて破砕するシナリオである。本研究では、厚壁構造部材を用いた破砕実験を行い、反応液量と斉発数をパラメータとした破砕性状を調べた。また、既往研究を基に放電衝撃力の圧力波形を仮定し、陽解法 FEM によるシミュレーション解析を

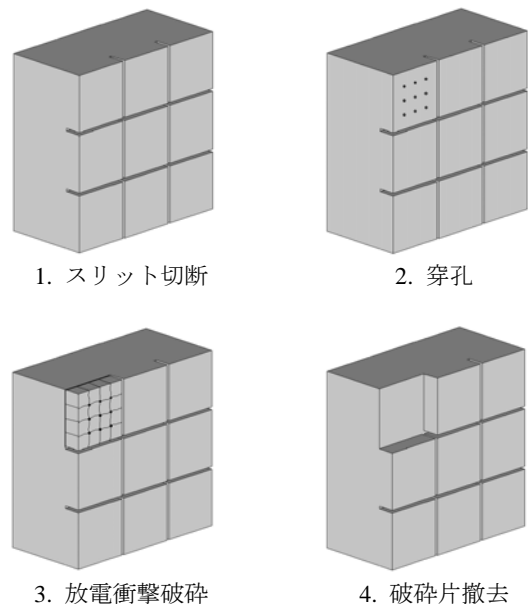


図-2 破砕手順の一例

*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・製品開発本部技術研究所

*4 日立造船 (株) 放電破砕エンジニアリング部 工修

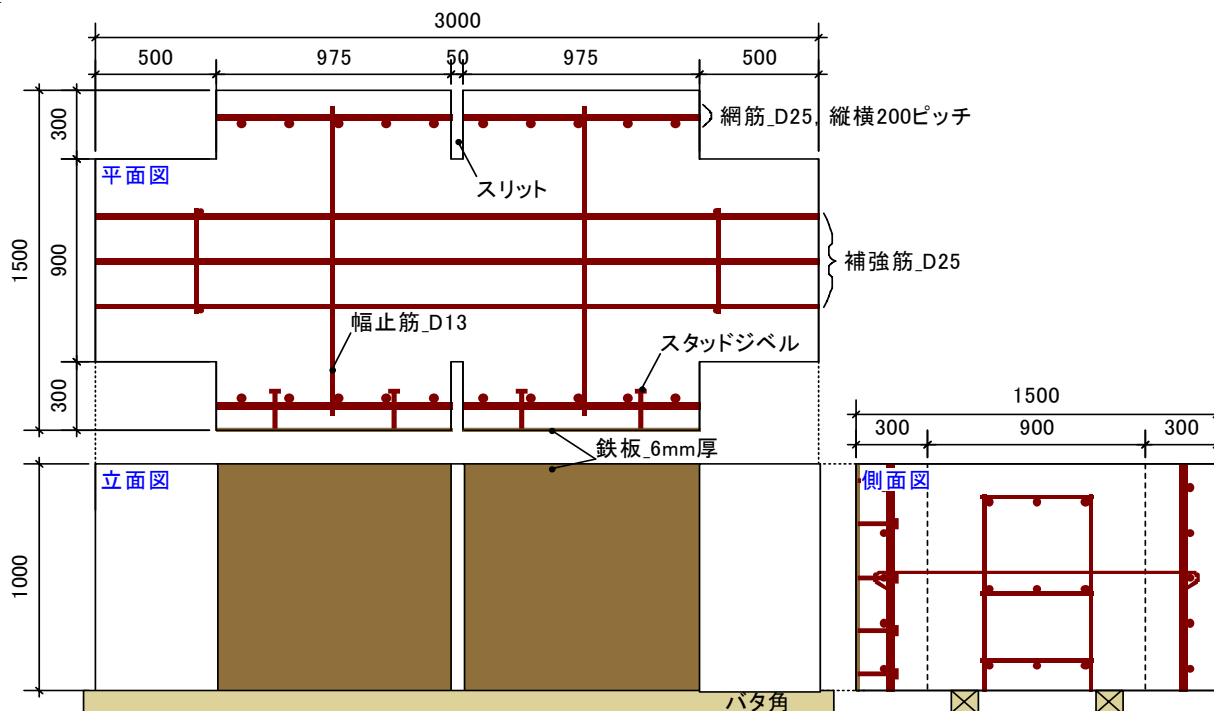


図-3 厚壁構造部材の寸法と配筋

実施した。その概要について次章以降に述べる。

2. 厚壁 RC 構造部材の破砕実験

2.1 実験概要

破砕実験に用いた厚壁構造部材の寸法および配筋条件を図-3に示す。試験体は形状寸法を共通とし、表裏両側面の網筋を拘束する幅止筋の有る試験体と無い試験体の2体を製作した。本実験で破砕の対象とする領域は幅975mm×高さ1,000mm×奥行き300mmで、1試験体に付き4箇所設けることにした。その内、半数の破砕対象面には、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、縦横200mmピッチの網筋は幅50mmのスリットにより完全に分割されている。

実験ケースとしては、放電カートリッジに封入する反応液量と斉発数による試し破砕を行った後、表-1に示す4ケースを実施した。ケース1と2は全16発の放電カートリッジの内、1列を4発とし、右側の2列8発を先行し、続いて左側の2列8発を後続する手順とした(図-4参照)。ケース1と2の違いはコンクリート表面の鉄板の有無である。ケース3はケース1,2と同じ反応液量2ccであるが16発の同時斉発とした。また、ケース4は1カートリッジあたりの反応液量を12ccとし4発の同時斉発とした。

実験時におけるコンクリートの材料定数は表-2に示すように、圧縮強度が28.7MPa、引張強度が2.21MPaであった。また、鋼材強度については、コンクリートの数

十~数百倍に及ぶため強度試験は行わず、後のシミュレーション解析には表-2に示す規格値相当の値を用いた。

表-1 破砕実験ケース

ケース	反応液量と斉発数	破砕対象面の条件
1	2cc×8発+2cc×8発	鉄板なし、幅止筋あり
2	2cc×8発+2cc×8発	鉄板あり、幅止筋あり
3	2cc×16発	鉄板あり、幅止筋なし
4	12cc×4発	鉄板なし、幅止筋あり

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)	31.0	185.0
ポアソン比	0.21	0.30
密度 (ton/m ³)	2.35	7.75
圧縮強度 (MPa)	28.7	345.0
引張強度 (MPa)	2.21	(降伏強度)

2.2 実験結果

破砕実験の条件を図-4に、破砕後の亀裂およびひび割れの分布状況を図-5に示す。ケース1と2は2cc×8発を2回に分けて実施したケースである。表面から奥行き300mmの位置を破砕の目標とすると、概ねこの付近に比較的大きなひび割れが発生している。試験体の上面、側面を観察すると、このひび割れは連続していることから、内部では一つの破砕面を形成していると推察される。

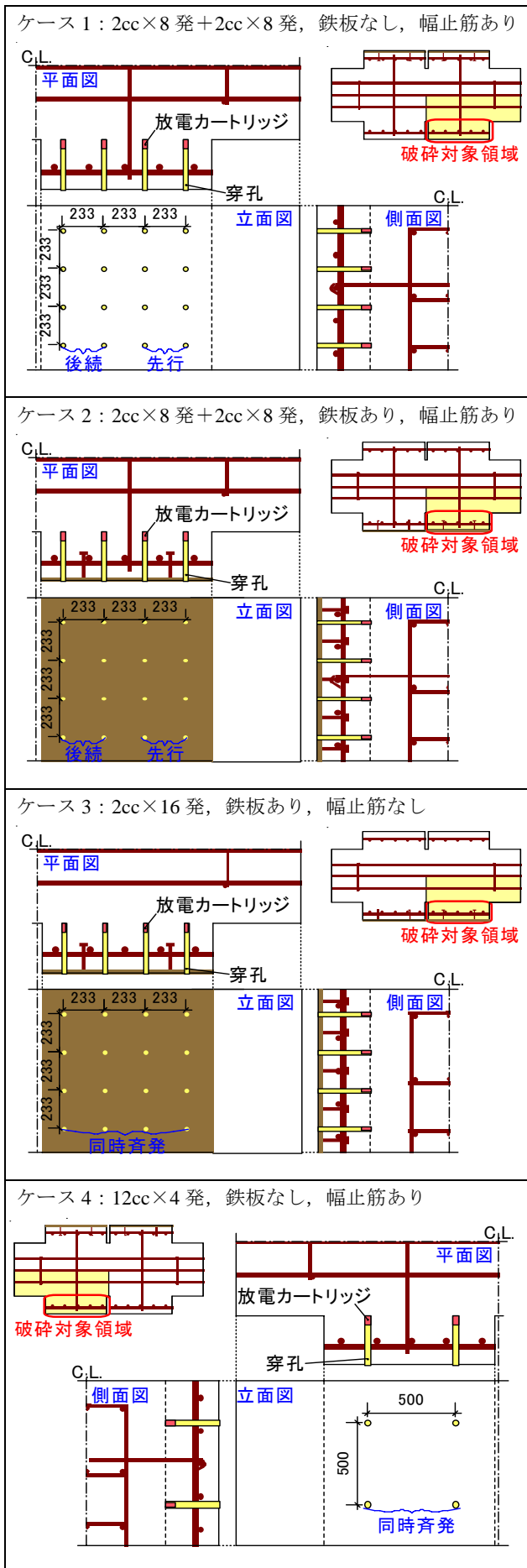


図-4 破碎条件

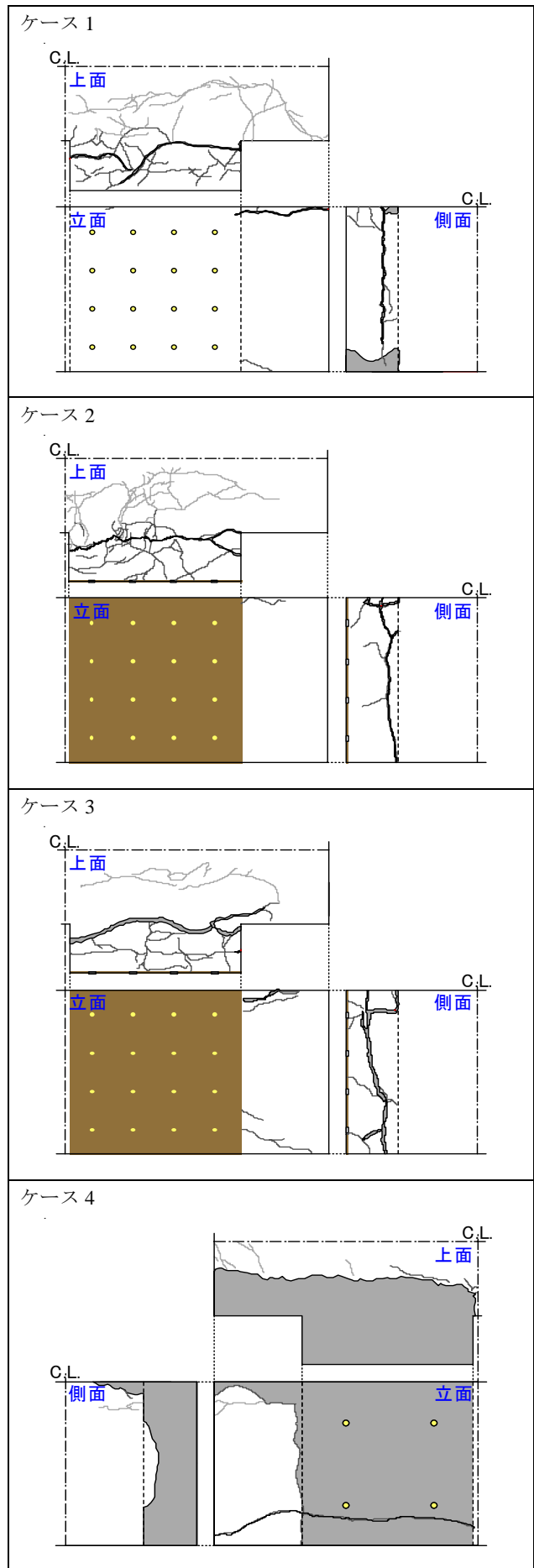


図-5 亀裂・ひび割れ分布

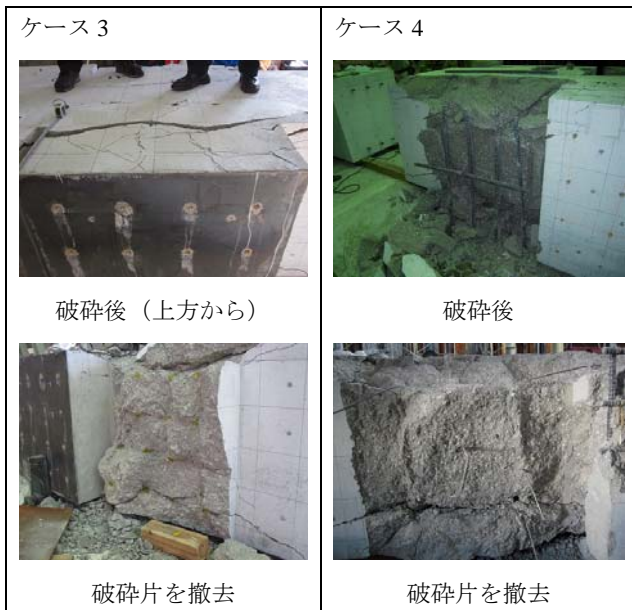


写真-1 破砕状況

しかし、後述するケース3と比べると、主要なひび割れ幅は小さく、また、上面において微細なひび割れが数多く散見された。この理由としては、2回の斉発に分けたことで、衝撃力が分散し破砕面として大きく成長できなかったものと思われる。ケース1と2の条件の違いは表面鉄板の有無であるが、ひび割れ分布の傾向からは明確な違いは確認できなかった。

2cc×16発の同時斉発としたケース3は、幅20~30mm程度の大きな亀裂が生じ、一度に斉発したことが有効に機能したと思われる。破砕面が顕著になったもう一つの理由としては、幅止筋のないことが可能性として挙げられる。

1カートリッジあたりの反応液量を12ccとし、4発の同時斉発としたケース4では、表面側のかぶりコンクリートが破砕の瞬間に剥がれ落ち、かぶり100mmの位置に設けた幅止筋の定着フックが解け、網筋の一部は崩れ落ちていた。幅止筋による拘束が想定されたケースであったが、比較的良好な破砕結果となった。

破砕程度の大きかったケース3と4について、破砕片を撤去し、破砕面(背面側)について目視による観察とハンマーによる打音検査を行った。その結果、残存部の損傷はカートリッジ孔の近傍に限られ、背面側の健全性はほぼ保たれているものと判断された。

3. シミュレーション解析

3.1 圧力波形の仮定

破砕実験のシミュレーションを実施するにあたり、穿孔した試験体内壁に作用する放電衝撃力の圧力波形を用意する必要がある。ここでは、佐々木ら³⁾による径100mm×高さ100mmのPMMA供試体を用いた計測結果を基に

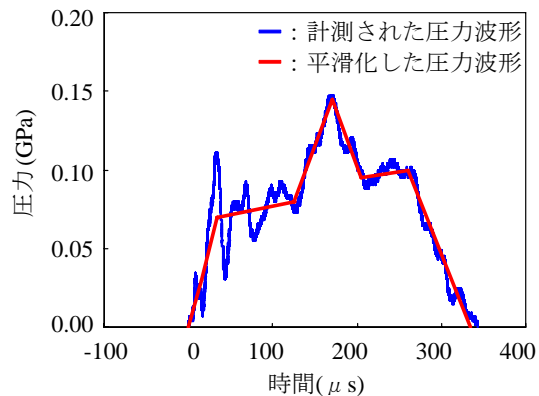


図-6 放電衝撃力の圧力波形

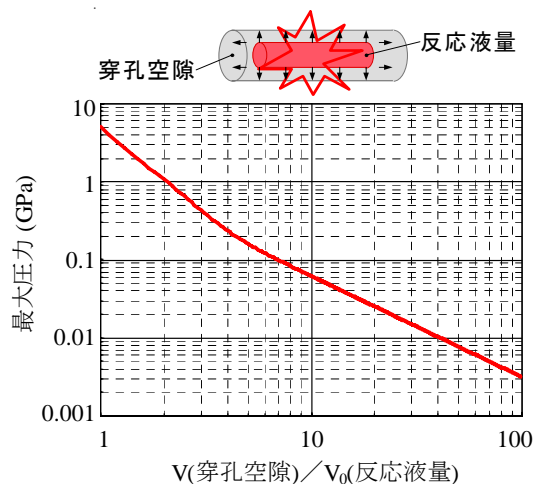


図-7 体積比と最大圧力の関係

以下のように仮定した。まず、図-6に示すように、計測された圧力波形と波形面積が等しくなるように、また、高周波成分は平滑化し最大圧力とその発生時間に着目した圧力波形を仮定した。さらに、最大圧力は図-7に示すように、反応液が燃焼するときの周辺の空隙量により、その値は大きく変化することが報告されている。本解析では、使用した反応液量とそのとき想定される空隙量から、液量2ccの場合に0.31GPa ($V/V_0=3.5$)、12ccの場合に1.06GPa ($V/V_0=2.0$)と設定した。

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³⁾を用いた。引張側は軟化域に1/4モデル³⁾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。このとき、破壊エネルギー G_f は式(1)から83.1N/m、引張応力が0となるときのひび割れ幅 w は式(2)から0.19mmと求まる。また、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。

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

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

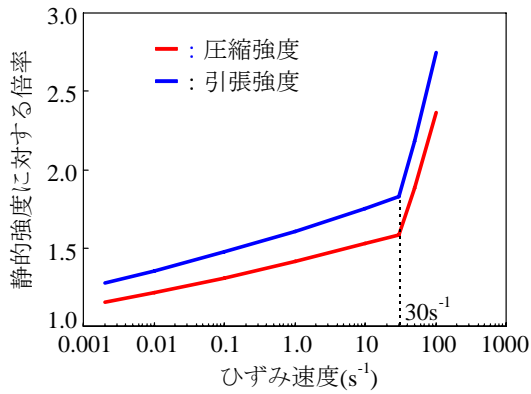


図-8 ひずみ速度効果

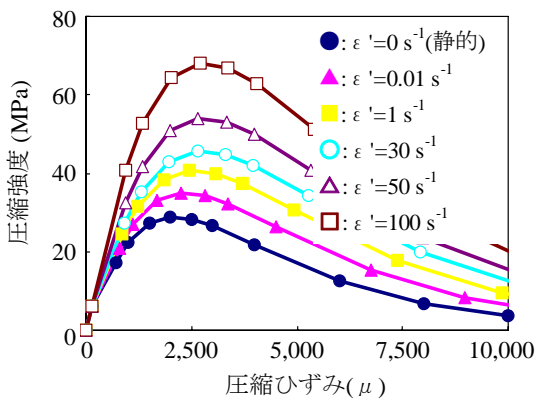


図-9 コンクリートの圧縮強度

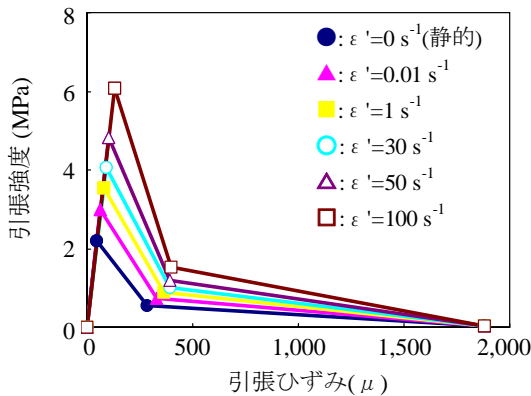
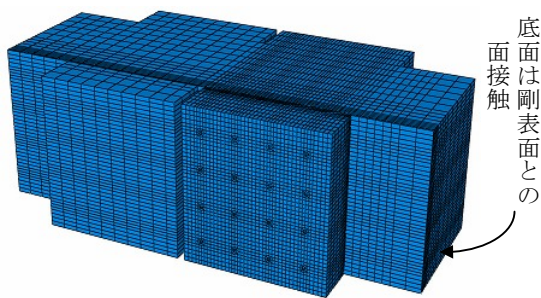


図-10 コンクリートの引張強度



ケース1：節点数：88,397 要素数：84,054

図-11 解析モデル

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)⁴⁾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すると図-8~10のようになる。図-8はひずみ速度がコンクリートの材料特性に及ぼす影響で、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は各種のひずみ速度におけるコンクリートの圧縮強度、引張強度を示したものである。

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、剛表面を定義し面接触とした。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、鉄板はシェル要素で、また、鉄筋はトラス要素でモデル化し、コンクリート-鉄板間およびコンクリート-鉄筋間は完全付着とした。

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 μ 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-12に示し、以下に実験結果と比較する。

2回に分けて破砕したケース1と2では、コンクリート表面から奥行き300mm前後の主要なひび割れ面は表現できているが、実験時の上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。しかしながら、ひび割れ分布の傾向は表面鉄板の有無に関わらず、実験同様に明らかな違いは見当たらない。一方、16発の同時斉発としたケース3の解析結果からは、明らかに亀裂幅の大きな破砕面が予測でき、実験結果と概ね一致している。また、反応液量を12ccとし4発の同時斉発としたケース4は、目標とする奥行き300mmの領域が殆んど破砕しており、実験結果をほぼ表現できていると思われる。ケース4の解析結果によると、幅止筋に発生する引張応力は降伏値に達しており、実験結果で定着フックが解けるほどの引張力が働いていたことに対応するものと考えられる。

残存部の健全性について実験結果と比較するため、破砕程度の大きかったケース3と4について、破砕部の要

素を削除しカートリッジ位置で切断したときのひずみ分布を図-13に示す。この図から、破碎の範囲はカートリ

ッジ孔の周辺に限られ、実験結果と同様に背面側は健全であると判断される。

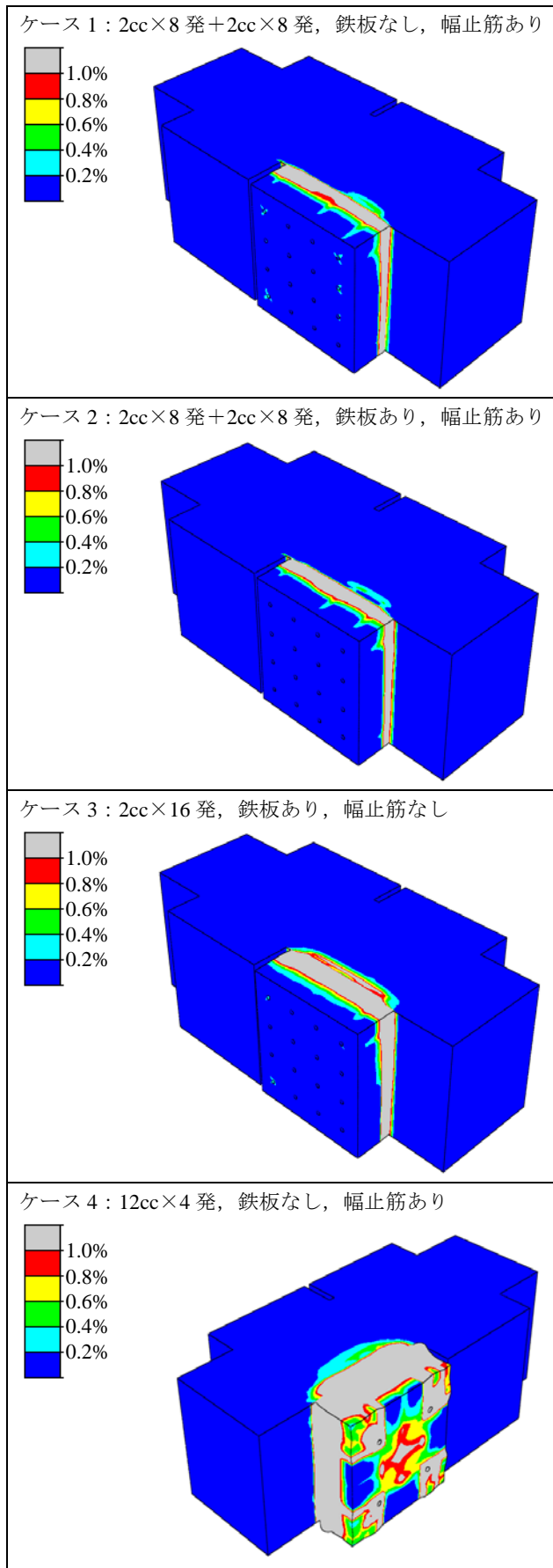


図-12 ひずみ分布

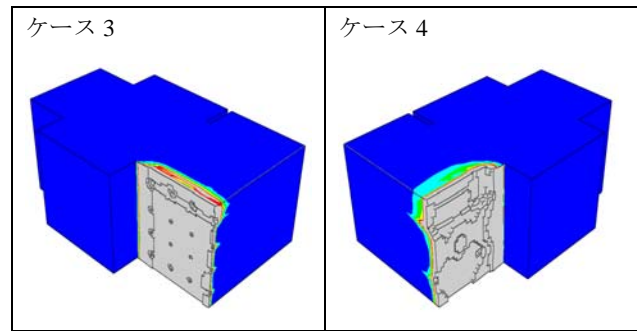


図-13 カートリッジ周辺のひずみ分布

4. まとめ

本研究では、厚壁 RC 構造物の破碎工法として、放電衝撃破碎を適用する場合の破碎性や破碎の予測性を検証することを目的として、破碎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) 破碎面の周囲にスリットを設けることで、適量の反応液と斉発により効果的な破碎が可能となる。例えば、破碎面を 1m×1m とした場合、反応液量 12cc×4 発とした斉発が比較的良好であった。
- (2) 破碎による残存部への影響は、カートリッジ孔の近傍に限定され、背面側の健全性はほぼ保たれる。
- (3) 解析シミュレーションは、主要な破碎面、破碎の方向性および残存部の健全性等を概ね表現できる。

今後は実工事への適用を見据え、本破碎工法の最適化および破碎予測手法の高度化を図る予定である。

謝辞

本実験に際しては、大成建設（株）の石原 哲氏および日立造船（株）の飯塚信二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：放電衝撃破碎工法とその施工例，建設機械，2005.9
- 2) 例えば，伊東 章，鳥居和敬：廃止措置技術—コンクリート解体／はつりの技術動向，日本原子力学会誌，Vol.51，No.10，2009.
- 3) 佐々木加津也，北嶋秀昭，阪本 良，緒方雄二，久保田士郎，佐分利 禎：放電衝撃破碎法の衝撃力発生メカニズムに関する検討，資源・素材，2009.9
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002.