

(31) RC 構造物内外の爆発問題の数値解析

Numerical simulation of internal and external explosion of RC structures

片山 雅英* **
Masahide Katayama

*博士(工学), スーパーエンジニア, 伊藤忠テクノソリューションズ(株) (〒100-6080 東京都千代田区霞が関 3-2-5)

**博士(工学), 客員教授, 東京工業大学応用セラミックス研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

Key Words: detonation, explosion, fluid-structure interaction, hydrocode, numerical erosion, RC structure

キーワード: RC 構造物, 衝撃解析コード, 数値的エロージョン, 爆ごう, 爆発, 流体-構造連成

1. はじめに

爆発(explosion)という用語は, 物理的観点からは明確な意味を表しておらず, 厳密には, 爆ごう(detonation)と爆燃(deflagration)に分類される. 両者の違いの詳細については, 別の稿¹⁾に譲るが, ここでは, より強い爆発である「爆ごう(轟)」を対象にして, 鉄筋コンクリート(RC)構造物が著しい変形と破壊を被るような極めて厳しい条件下にあることを想定し, このような問題に対しても, 数値解析の手法が適用可能であることを示す.

2. 解析対象構造物と各ケースの解析モデル

本稿では表-1 に示す 3 種類の解析事例を示すが, 解析対象とする構造物は同一の RC 構造物である. 図-1 の(a)と(b)にその概要を示す. 3 種類の解析のうち 2 種類は内部爆発, 1 種類は外部爆発の問題である. また, 爆発物に関しては, 2 種類は爆薬, 1 種類は反応性予混合気体である. 内部爆発のケースに対しては Euler-Lagrange の相互作用計算モデルを, 外部爆発のケースに対しては, Lagrange 座標系間の相互作用計算モデルを用いて模擬する. その根拠については, 参考文献 2) を参照されたい.

3. 構造物内での気体爆ごう解析 (CASE-1)

このケースでは, 図-1 に示した構造物の中に, 化学量論比の水素と空気の混合気が標準状態で一様に混合され, 構造物の中央床部から 50 cm の位置で着火し, 定常爆ごうが開始されるものと仮定する. 構造物内のみ混合気が充満しており, 外部には標準状態の空気が存在している.

図-2 に 0.5 ms から 25 ms に至る, 混合気体中の圧力分布を半透明に表示したコンター図を示す. 1.0 ms では, 中心から水平方向に 2 m の位置に存在する壁に, 2.0 ms では屋根に爆ごう波が衝突して, この混合気の Chapman-Jouguet の爆ごう圧力である約 1.6 MPa を大きく上回る圧力が評価されていることが確認できる. 4.0 ms 以降では, コンクリートと窓ガラスの破壊によって起こったと考えられる, 混合気の構造物外への噴出が生じているのが分かる. 少し確認し辛いのが 3.0 ms 時には窓ガラスが破壊して破片化(数値モデル上, 球状破片に置き換えて表示している)し始め, 20 ms の時点ではそれらの破片が明確に確認できる.

実際の解析は, 図-2 に示した 25 ms の時点の 2 倍の 50 ms まで実施した. 図-3 に主に構造系の変形, 塑性化, 破損・破壊の様子を概観するための図を示す. 図-3(b)に示した, コンクリートの損傷度は, ドイツのエレンスト・マッハ研究所の W. Riedel らが提案している, コンクリートの構成則・破壊則である R-H-T のモデル³⁾における, 損傷度という変数のコンター図で, この変数

表-1 解析ケース一覧

ケース名	爆発場所	爆発物の種類	爆発物のモデル化法	相互作用 [※]
CASE-1	内部爆発	気体(水素-空気)	Euler	E-L
CASE-2	内部爆発	爆薬 (C-4)	Euler	E-L
CASE-3	外部爆発	爆薬 (C-4)	Lagrange	L-L

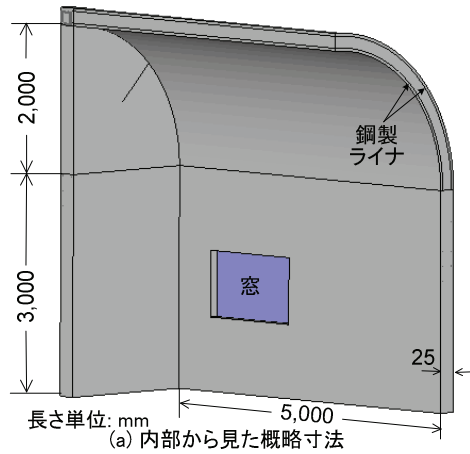
※ E-L: Euler-Lagrange 相互作用, L-L: Lagrange-Lagrange 相互作用

の値が0の場合は損傷なし、1の場合は完全に損傷し破壊状態にあることを意味している。但し、図-3(a)~(c)のガラスの破片の色が損傷度が1の時と同じなのは、R-H-Tのモデルの損傷度を意味しているものではなく、別のモデルに基づく破壊状態にあることを意味している。

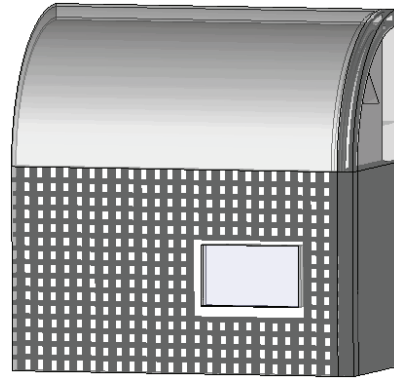
4. 構造物内での爆薬の爆ごう解析 (CASE-2)

このケースでは、図-1に示した構造物内の大気雰囲気中で、172 kgのコンポジションC-4爆薬（直径、高さ共に51.5 cmの直円柱形状の裸薬で、エネルギー的には前項に示した水素と空気の混合気とほぼ同等である。）が、構造物の中央床部に置かれ軸中心上部で点火され、定常爆ごうが生じるものと仮定する。構造物外部にも標準状態の空気が存在している。

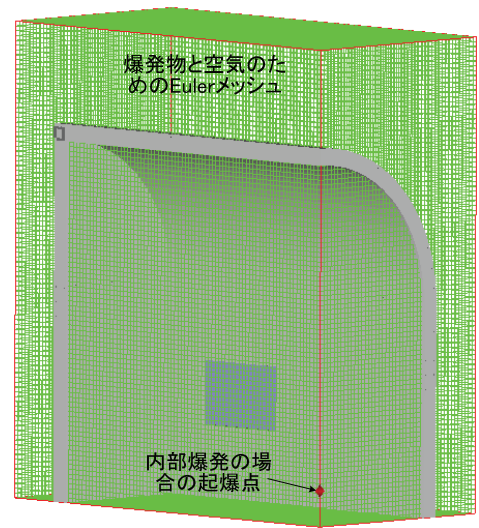
このケースでは、本解析の予備解析として、爆薬の爆ごう過程、及びその後、圧力波が構造物内をある程度まで伝播する過程の計算を実施した。これは、初期段階の爆源近傍で生じる現象を、本解析よりも十分に細かい計算メッシュで精度良く模擬することを目的としている。図-4にその手順と概要を示す。0.08と0.16 ms時の上段は、爆ごう（燃焼）生成物が膨張し空気の領域を圧縮して行く過程を示しており、下段は圧力分布を示すコンターである。かなり判別し辛いですが、0.16 msの時点では完全に爆ごうが終了し、空気の界面で反射してきた圧力波が床底面に衝突し、生成気体を圧縮することによって床面近



長さ単位: mm (a) 内部から見た概略寸法



(b) 外部から半透明にして見た配筋等の様子



(計算メッシュ数)

Euler: 400,950 (内部爆発の場合のみ)
Lagrange: 22,800
Shell: 2175
Beam: 3251

接地部には全て固着境界条件を適用

図-1 構造物内外での爆発解析の解析形状モデル概要 (1/4モデル)

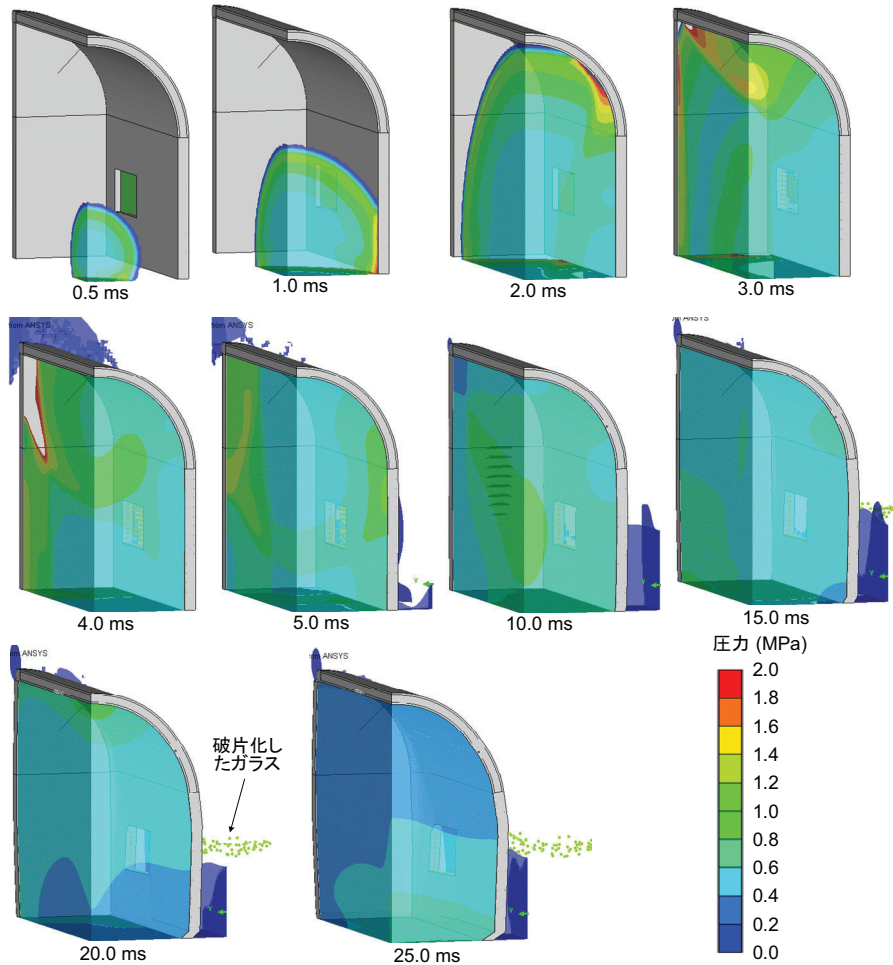


図-2 CASE-1の爆ごうに伴う圧力上昇と構造物の変形の様子

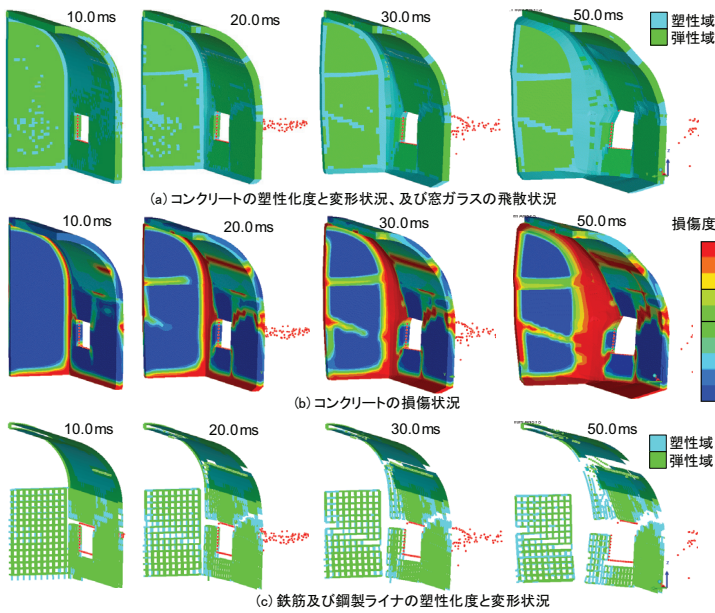


図-3 CASE-1における構造系の变形・損傷の様子

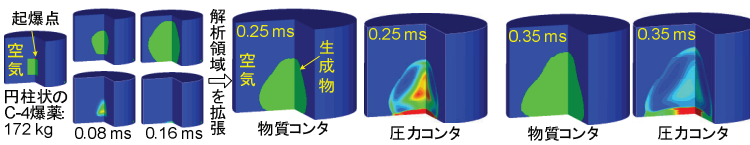


図-4 CASE-2 予備解析の手順と概要

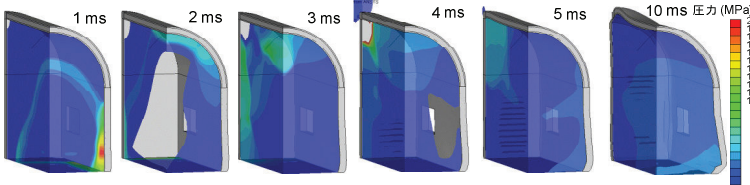


図-6 CASE-2 本解析の構造物内圧力伝播と構造物の変形の様子 (10ms まで)

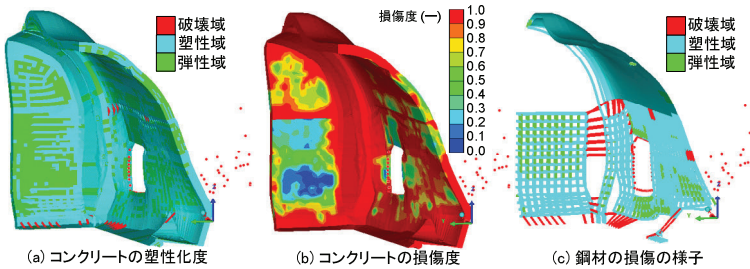


図-7 CASE-2 本解析の 30ms 時の構造物の変形と破損の様子



図-5 CASE-2 本解析の初期モデル

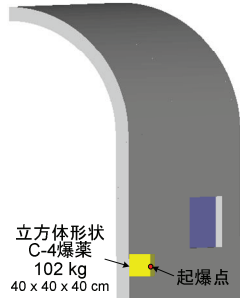


図-8 CASE-3 の計算モデル図

傍に高圧域を生じている。約 0.2 ms 時に、最初の直径、

高さ共に 3 m の直円柱の Multiple Material Euler 領域を、直径、高さ共に 2 倍の領域に拡張すると同時に、2 倍の粗さのメッシュに切り直し、そのメッシュに物理量を Remapping している。

図-4 の拡張後のモデルによる計算を 0.4 ms まで実施し、その状態を図-1 右上に示した Euler メッシュに Remapping すると同時に、構造系の計算メッシュを追加した。その結果得られた本計算の初期モデルを図-5 に示す。図中の赤い点は予備解析の起爆点の位置を示している。

図-5 の計算モデルを用いて、爆ごう生成物が構造物内の空気を圧縮し、構造物を変形させて行く様子を図-6 に示す。4 ms 時に上部コーナ部分から気体が噴出している様子が見える。この図では、10 ms までしか表示していないが、計算は 30 ms まで実施した。

図-7 に 30 ms における構造物の変形と損傷・破壊の様子を概観する図を示す。凄まじい変形の様子を呈している。この状態に重力が掛かれば、構造物は完全に崩壊するものと考えられる。図-3 の各図と比較すると、このケースの方が早い時点でより深刻な被害を被っていることが分かる。

5. 構造物外での爆薬の爆ごう解析 (CASE-3)

このケースでは、図-1 に示した構造物の壁の外に設置された、102 kg のコンポジション C-4 爆薬 (一辺 40 cm の直方体形状の裸薬) が起爆され、定常爆ごうが生じるものと仮定する。図-8 に本解析の計算モデル図を示す。この場合には、爆薬は Lagrange 座標系で模擬し、その関係で構造物外部の空気は無視した。

図-9 には、100 μs に至る爆薬の爆ごう過程とコンクリート壁の変形の様子を示す圧力分布のコンター図を示す。爆ごう波がコンクリート壁に衝突する時点 (約 50 μs) では数 10 GPa の圧力が発生し、その結果、25 cm の厚さの鉄筋コンクリートの半分程度まで 5 GPa を超える高圧領域を生じさせている状況が確認できる。

図-10 に、500 μs に至る鉄筋コンクリート壁の変形の様子を概観する圧力分布のコンター図を示す。この図では爆薬物質 (爆発生成物) は非表示とした。また、多少確認し辛いですが、球状に表示された粒子はコンクリートもしくは鉄筋が著しい変形を被った結果、次章で述べる数値的エロージョンが生じ、Lagrange 要素やビーム要素が質点に置き換えられたものである。内部爆発の両ケース

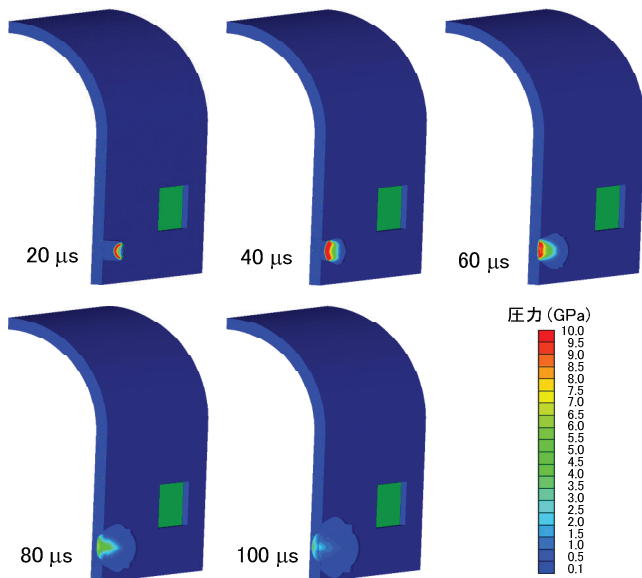


図-9 CASE-3 の 100 ms までの爆ごうに伴う圧力分布のコンター図

のシェルで模擬された窓ガラスと同様である。これらの図では、先程に比べて 1/1,000 程度の圧力まで減衰していることが分かるが、この時点でもなお、コンクリートの場合には十分にスポール破壊（負の静水圧による破壊）が生じ得る絶対値が MPa オーダ以上の圧力レベルを保持していることが分かる。

6. 数値的エロージョン法

ここで論じるエロージョンは物理現象としてのエロージョンではなく、数値的な手法であることに注意する。Lagrange の方法で計算メッシュが潰れて Courant 条件が厳しくなったり、計算精度に問題が生じた際に、問題の計算メッシュを計算系から削除する方法である。リゾーニング法に比べると、基本的には 3 保存則を無視してしまう方法であり、解析精度は低下するが 3 次元の複雑な形状の問題に対しても容易に適用できる利点がある。潰れてしまった計算メッシュを完全に削除してしまうのではなく、その時点の計算メッシュの質量と慣性力を質点に持たせ、以後、他の Lagrange メッシュとの相互作用

を考慮する改良策も場合によっては非常に有効である。この手法の適用に際しては、運動量の授受が一義的な意味を持つ衝撃問題に対しては精度の低下は無視できるものと考えられるが、置き換えられた後の質点では圧力等の状態量は評価できないため、圧力による衝撃力が支配的な問題に対しては適用性がない。また、同手法では 2 次元軸対称系の計算に関しては、軸中心上で異常が生じることが指摘されている⁴⁾ことに注意する。

また、エロージョンを起こさせる基準にも注意を要する。Lagrange メッシュが物理的に破壊すると同時にエロージョンをさせてしまうと、例えば貫通問題の場合、貫通口を過大評価してしまう。これは、高速衝突問題において衝突面近傍の固体材料が破壊したとしても、圧縮モードにある場合には、破碎したり流体化したりしながらも静水圧成分は残留して抵抗力を保持するものと考えられるのに対して、その要素を取り除くことによって物理的にはあり得ない圧力緩和が生じてしまうためである。材料強度の喪失を意味する物理的破壊条件でエロージョンさせるのではなく、幾何学的ひずみ量等、別のエロージョン基準を採用することによってこの問題を解決できる。延性材料の超高速衝突では、300%程度の幾何学的ひずみの適用が実験結果と比較的良く一致し⁵⁾、±100%の程度の差に対して結果に有意な差異は見られず、余り感度は高くないことが経験的に知られている。但し、同じ Lagrange 座標系でも、体積変化を伴わないシェルやビーム要素では物理的破壊条件を数値的エロージョンひずみとして採用せざるを得ない場合が多いことに注意する。

第 3 章～5 章に示した 3 つの解析事例のうち、コンクリートが著しい変形を被った結果、エロージョンさせなければ計算の続行が最も困難な問題は CASE-3 である。図-10 に示したコンクリートに対しては、エロージョンひずみを 100%とし、エロージョン後は質点として慣性力を保持するように設定した。一方、鉄筋に対しては 20%の相当塑性ひずみで破壊し、それと同時にエロージョンが生じ質点化するものと仮定した。脆性材料であるコンクリートは、延性材料に比べるとより小さなひずみで破壊するものと考えられるが、本問題において数%以

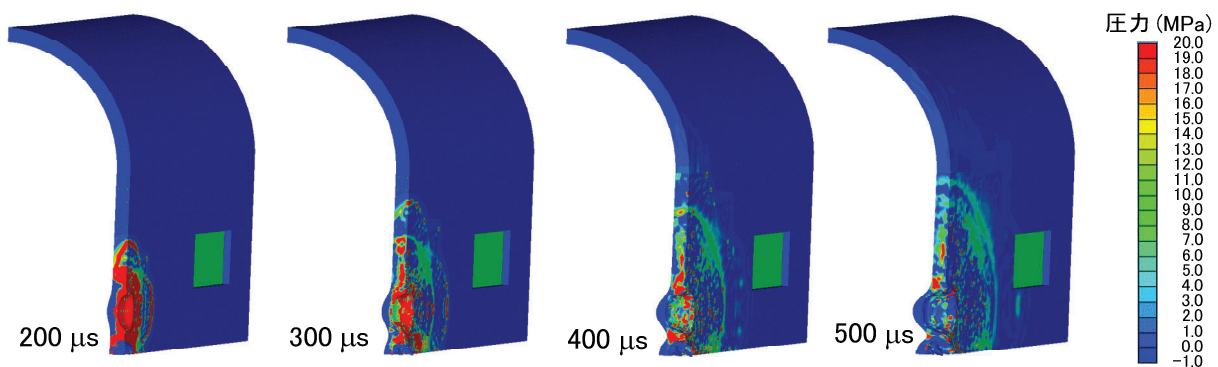


図-10 CASE-3 における RC 壁の圧力コンター図 (200～500 μs)

下の小さなひずみの値で数値的エロージョンを起こさせてしまうと、上述の高速衝突に晒された標的の圧縮モードにある計算要素と同様、コンクリートの貫通口を過大に評価してしまうことが危惧される。したがって、計算過程においては、100%というコンクリートにとってはあり得ないような大きな幾何学的ひずみによって破壊することを仮定することが妥当であると考えられる。しかしながら、我々が実際に観察するのは、試験後少なくとも秒オーダー以上の時間が経過した供試体や、事故後の構造物であり、爆発現象が完全に終了し、コンクリートの破壊した部分が重力によって崩落した状況であると考えられる。このような状況においては、コンクリート本来の破壊条件である小さなひずみ値を経験した部分は削除した方がその状態を正しく評価できるものと考えられる。

図-11は、図-10の最後の状態からさらに50 μ s計算を続行した後、爆薬設置近傍を構造物内外から見た場合、及び対称面を切断した状態を見た場合を拡大表示したものである。上段は数値的エロージョンした後の質点を非表示に、下段は表示したものである。それに対して、図-12(a), (b), (c)は、それぞれ、図-11の状態(55 μ s)から、エロージョンひずみの値を、30, 3, 0.3%に再設定した後、1サイクルだけ計算を実施した結果を図-11の上段と同様に表示したものである。

図-11の各図に比べて、図-12の各図の方がより現実に近いことが示唆される。

7. おわりに

以上で示した解析事例は、鉄筋コンクリート構造物の内外で爆薬と気体が爆発した場合のうちでも、極限状況に相当するような非常に厳しい条件に晒された場合にも、コンクリートの変形・破壊の評価が可能であるかどうかという観点に立ち、想定した条件下の現象を解析した、言わば数値実験的事例である。陽解法でしばしば見られるエネルギー誤差のような、明らかな数値的不具合を経験することなく計算を終了することができた。

内部爆発の2ケースの比較からは、爆源から遠く離れた位置での爆風効果の評価とは異なり、爆源近傍での現象の評価においては、TNT換算量のような考え方が適合

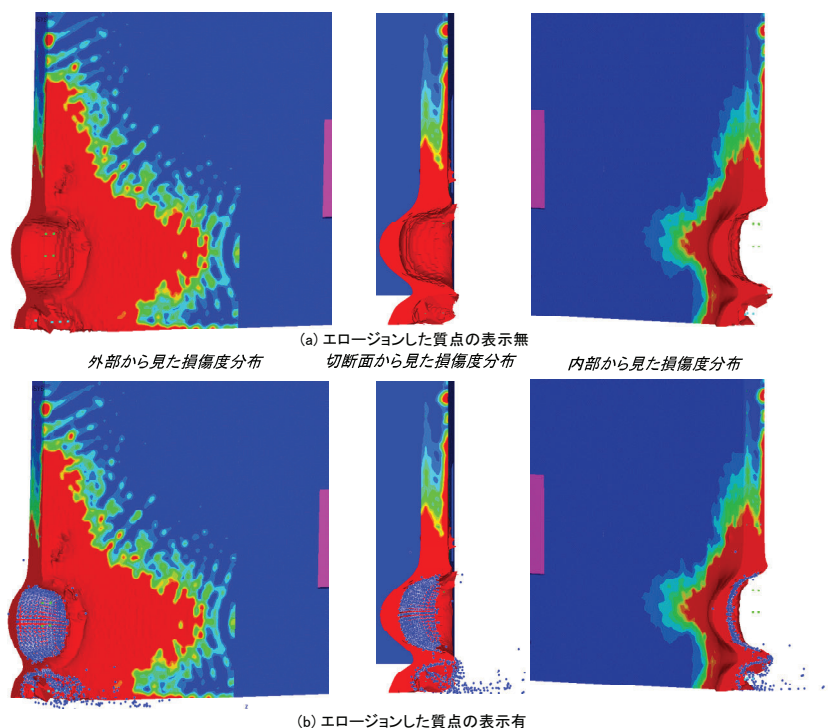


図-11 CASE-3の内外から見たRC壁の圧力コンター図(550 μ s)

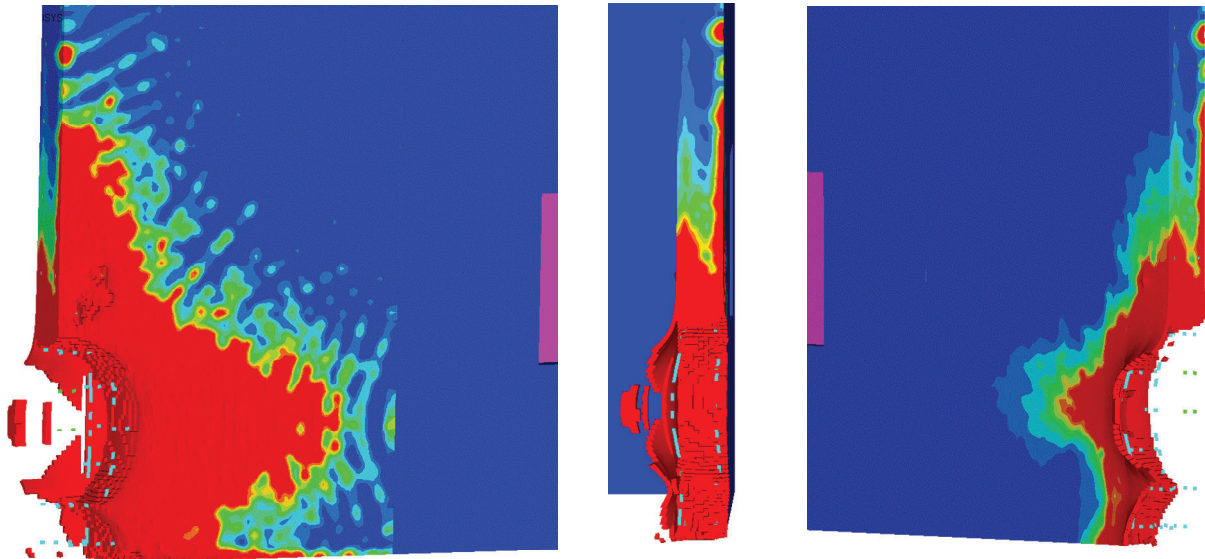
しないことを如実に示している。

今後、第6章で示した、主要計算終了後のエロージョンひずみによる破壊状況の表示方法の妥当性の検討を、実験結果との比較によって遂行することが有用かつ重要であると考えられる。

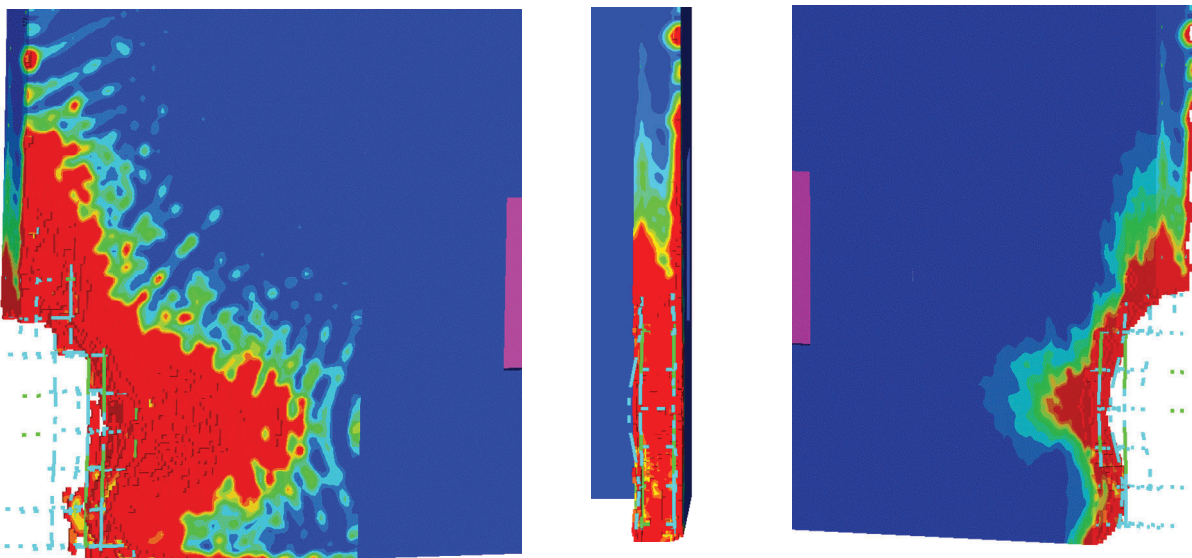
尚、本記事で示した解析事例は、全て ANSYS AUTODYN を用いて解析した事例である。

参考文献

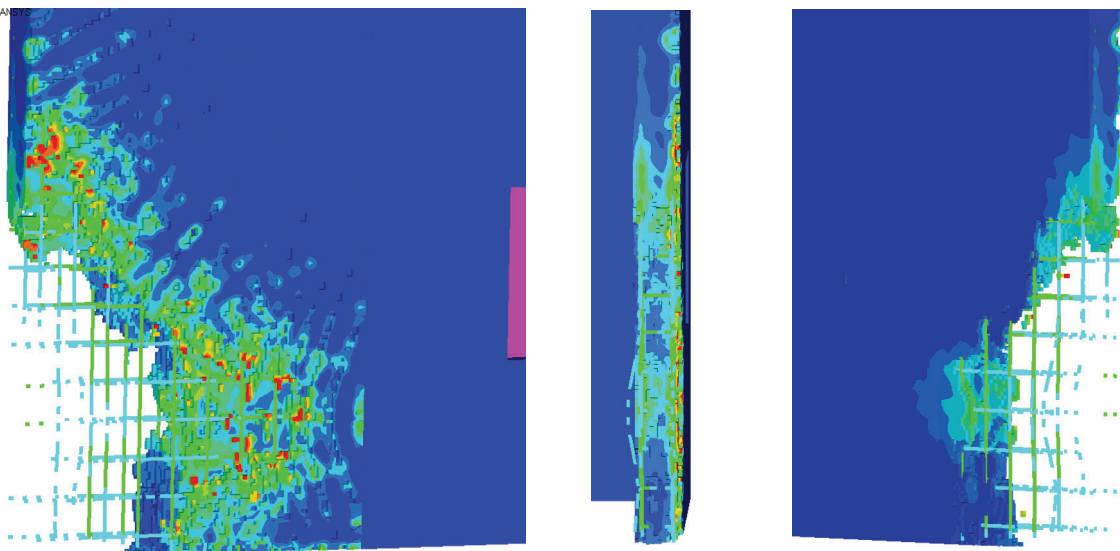
- 1) 片山雅英, 「防護技術の動向 — 爆発現象の数値解析法」, 防衛施設学会誌 MIRAI, 第10巻, pp.56-7, 2010.
- 2) M. Katayama, M. Itoh, S. Tamura, M. Beppu, T. Ohno: Numerical analysis method for the RC and geological structures subjected to extreme loading by energetic materials, Int. J. Impact Engng., Vol.34, pp.1546-1561, 2007.
- 3) W. Reidel, K. Thoma, S. Hiermaier and E. Schmolinske: Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500, numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes, Proc. 9th ISIEMS, Berlin, Germany, 1999.
- 4) D. R. Scheffler and J. A. Zukas: Practical aspects of numerical simulation of dynamic events: material interfaces, Int. J. of Impact Engng., Vol.24, pp.821-842, 2000.
- 5) C. J. Hayhurst, H. J. Ranson, D. J. Gardner and N. K. Birnbaum: Modelling of microparticle hypervelocity oblique impacts on thick targets, Int. J. of Impact Engng., Vol.17, pp.375-386, 1994.



(a) エロージョンひずみ: 30 %



(b) エロージョンひずみ: 3 %



(c) エロージョンひずみ: 0.3 %

外部から見た損傷度分布 切断面から見た損傷度分布 内部から見た損傷度分布

図-12 エロージョンひずみの違いによる変形・破壊の比較 (550 μ s)