

論文 爆土圧を受ける鉄筋コンクリート構造物模型の三次元数値解析

安藤 智啓^{*1}

要旨: 本研究では、爆土圧を受ける実 RC 構造物の応答や損傷が精度良く予測可能な数値解析方法の確立に資するため、砂中に埋設された RC 構造物模型に対して三次元爆発解析を試みた。そして、本解析方法の有効性を実験結果と比較する形で検討した。その結果、コンクリートおよび鉄筋に静的な材料物性値に基づく比較的簡易な材料モデルを適用し、かつコンクリートの引張破壊圧に適切な値を仮定する既往の解析方法により、爆土圧を受ける RC 構造物模型の応答および損傷が大略シミュレートできることが明らかになった。

キーワード: 埋設 RC 構造物, 爆土圧, 応答, 三次元爆発解析, 引張破壊圧

1. はじめに

2001年9月11日に米国で発生した同時多発テロを契機として、国内においても社会的に重要な鉄筋コンクリート (RC) 製施設の防護対策が重要視されるようになってきた。特に、最近諸外国で多発している爆破テロに対する対策が緊急課題の一つと考えられ、著者等¹⁾³⁾も RC 部材や RC 構造物を用いた爆発実験や爆発解析を実施し、基礎的なデータの蓄積を行ってきた。その結果、爆発荷重を受ける RC 版の局所損傷の予測法を提案するとともに¹⁾、爆発荷重を受ける RC 部材や RC 構造物の応答および損傷をある程度予測可能な解析方法を提示した²⁾³⁾。

しかしながら、これらの提案・提示は、爆風圧を受ける RC 部材や RC 構造物に対して行われたものであり、爆土圧を受ける場合に対して行われたものではない。重要な RC 製施設の中には地下構造や覆土式の構造のものもあることから、森下等¹⁾は RC 版を砂中に埋設した状態での爆発実験にも着手してきた。しかしながら、砂が RC 版の局所損傷を緩衝させる効果は確認したものの、データが十分ではなく、砂中に埋設された RC 版の損傷予測法の提案には至っていない。一方、解析については、著者等⁴⁾の地下構造物を対象とした爆発解析の実績があるものの、構造物として金属製のものを対象としており、RC 構造物を対象とした爆発解析の実績はない。

そこで、本研究では、爆土圧を受ける実 RC 構造物の応答や損傷が精度良く予測可能な数値解析方法の確立に資することを目的として、砂中に埋設された RC 構造物模型 (以下、RC 構造物) に着目し、爆土圧を受ける RC 構造物の三次元数値解析を試みた。そして、本解析方法の有効性を別途行った実験結果と比較する形で検討した。なお、本数値解析には Autodyn-3D (Ver. 6.1) を用いた。

2. 実験の概要

2.1 RC 構造物, 爆薬および砂

図-1に、本実験に用いた RC 構造物の形状寸法およ

び配筋状況を示す。構造物は二層造りの RC 構造物を簡易に模したものであり、本研究では下層部が砂中に埋設される設定とした。また、構造物には実験時にセンサーの設置を容易にするために、一方向の側面に開口部を設けた。正面図の手前側が開口部である。版厚は 100 mm である。鉄筋は、主に D6-SD295A を用い、各版部材において真かぶり 25 mm の位置に、縦横に基本的に 120 mm 間隔で複鉄筋配置した。背版には土圧計、加速度計およびひずみゲージ (鉄筋用) を設置・貼付している。このうち、土圧計は版部材に直径 24 mm の小さい貫通孔を設け、この孔を利用して設置した。表-1と表-2に、コンクリートおよび鉄筋の静的材料特性値を示す。

爆薬は質量 440 g のペントライト爆薬を用いた。形状は、直径と高さが 70 mm の円柱体である。表-3に、ペントライト爆薬の爆轟特性値を示す。砂は、土粒子の密度、50 % 粒径および均等係数が各々 $\rho_s = 2.76 \times 10^3$ (g/mm³), $D_{50} = 0.34$ (mm), $U_c = 1.57$ であり、豊浦標準砂と特性に近い青森県下北郡東通村の砂を用いた。

2.2 実験方法

写真-1に本爆発実験の状況を示す。RC 構造物は縦置きに、全高の 1/2 の 750 mm が砂中に埋設するように設置した。下層の開口部は、砂の流入を防ぐため、厚さ 2.3 mm の SS400 鋼板を用いて蓋をした。一方、爆薬は埋設深さ (砂表面から爆薬中心までの距離) が 350 mm で、下層の背版中心に対応する位置に、背版外側表面から爆薬までの水平距離 (爆発距離) が 500 mm および 250 mm となるように設置した。この爆発距離は、爆発により RC 構造物にひび割れが顕在化しない場合と顕在化する場合の二通りを考慮して決めた。写真は、爆発距離が 250 mm の場合を例に示している。爆薬の設置方法は、厚紙で底を塞いだ直径 100 mm のダンボール筒の中に爆薬を入れ、筒ごと砂表面に垂直に埋設し、その後筒の中に砂を表面高さまで充填することによって。なお、爆薬は、6号電気雷管を用いて上面中心から起爆させた。

*1 防衛省技術研究本部 陸上装備研究所耐弾・耐爆構造研究室 主任研究官 博(工) (正会員)

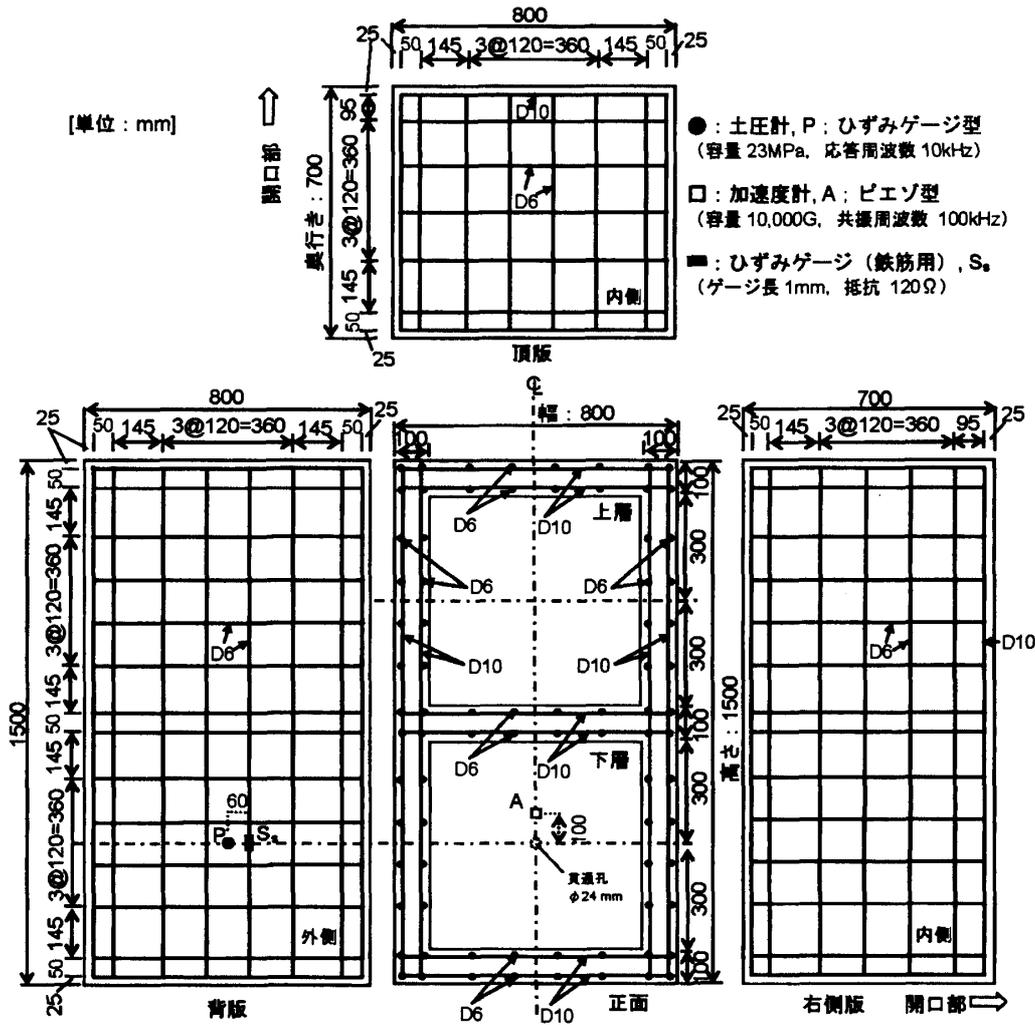


図-1 RC構造物の形状寸法

表-1 コンクリートの静的材料特性値

圧縮強度 f_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c	密度 ρ_c (g/mm ³)
30.1	3.10	24.4	0.2	2.30×10^{-3}

表-3 ペントライト爆薬の爆轟特性値

C-J爆轟速度 V_{CJ} (m/s)	C-J圧力 P_{CJ} (GPa)	C-Jエネルギー E_{CJ} (J/mm ³)	初期密度 ρ_0 (g/mm ³)
7.53×10^3	25.5	8.10	1.63×10^{-3}

表-2 鉄筋の静的材料特性値

呼び径	材質	降伏強度 σ_{ys} (MPa)	引張強度 σ_{ts} (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	密度 ρ_s (g/mm ³)
D6	SD295A	352	542	206	0.3	7.85×10^{-3}
D10	SD295A	353	494	206	0.3	7.85×10^{-3}

実験時には、RC構造物の下層の背版中心に作用する爆土圧波形、背版内側表面の加速度波形および背版内側に配置した鉄筋のひずみ波形を計測した(図-1参照)。また、アンプおよび記録装置には、各々最大応答周波数100kHzのものと、最大サンプリング周波数1MHzのものを用いた。サンプリング間隔は1 μ sとし、計測時に特にフィルター処理は施さなかった。なお、実験終了後には、RC構造物の損傷状況を記録した。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

図-2に、爆薬の爆発距離250mmの場合を例に解析モデルを示す。ここでは、対称性を考慮して全体の1/2をモデル化した。図中、コンクリート、砂および爆薬はSolid要素、鉄筋はBeam要素でモデル化した。メッシュサイズについては、コンクリート要素は文献2)で採用したメッシュサイズ(12.5mm)を参考に、背版に対しては12mm角で与えた。背版周囲の砂要素は、文献4)

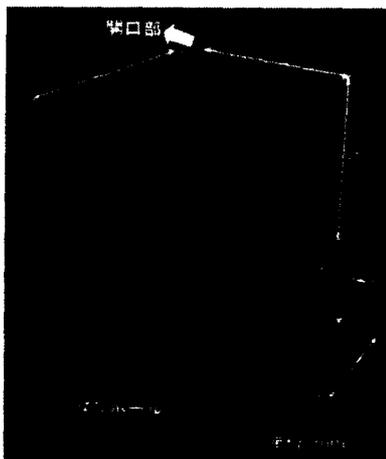


写真-1 実験状況 (爆発距離: 250mm)

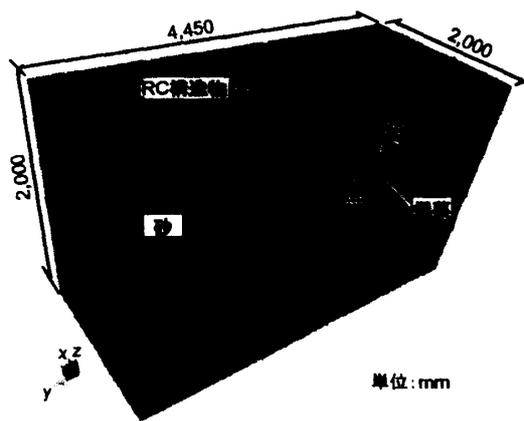
にならない, コンクリート要素の2倍の大きさと与えた。爆薬要素は, 文献4)の直径を8分割にして計算した事例を参考に, 直径および高さをこれと同程度の10分割とした。全要素数は約27万である。なお, 砂要素の端面には面に対して垂直方向の変位を拘束する境界条件を与えた。砂要素のモデル化の範囲は, 実現象に即した形となるようなるべく広い領域で与えた。

本解析では, 実験波形と比較するため, 実験で設置・貼付したセンサー位置に対応する要素に評価点を与えている。図示していないが, 爆土圧波形に係る評価点は砂要素側に与えた。また, 解析時間は爆薬の起爆時から7.5msまでとした。なお, 粘性減衰定数および自重は, 著者等の既往の爆発解析^{2), 3)}と同様に, 本解析でも特に考慮していない。

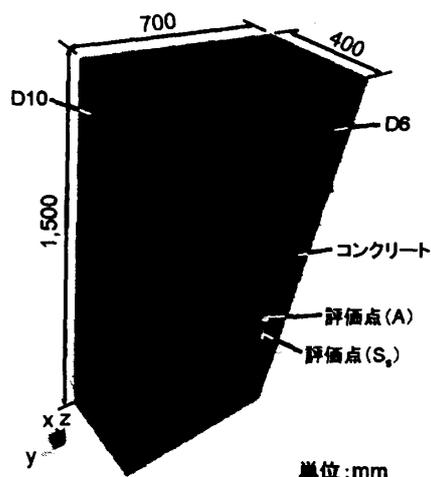
3.2 材料モデル

コンクリート要素の応力 σ_y は, 静水圧応力 σ_m と偏差応力 s_y の和 ($\sigma_y = \sigma_m \delta_y + s_y$, δ_y : Kroneckerのデルタ)として表される。静水圧応力 σ_m と体積ひずみ ϵ_v の関係は, 著者等³⁾の既往の研究にならない, 図-3のように与えた。 σ_m は周囲から等しい応力を受ける場合の評価であることより, ϵ_v の増大に伴い増加するモデルになっている。引張領域については, 引張破壊圧 P に達した段階で σ_m が零応力まで除荷される。ここでは, 実験で得られた鉄筋ひずみ波形のひずみ速度が $10^{-1} \sim 10^0/s$ であったことから, 過去の研究者等によって計測されたコンクリートの引張強度に関する動的応答倍率とひずみ速度との関係⁵⁾を参考に, 引張破壊圧 P はこのひずみ速度域における同倍率の実測データ (概ね1~2.5倍)の平均値 ($P = -1.75 f_t$)で与えた。

偏差応力は, $J_2 = \sigma_{yc}^2 / 3$ (J_2 : 偏差応力の2次不変量, σ_{yc} : 降伏応力)が満たされると, 降伏曲面上にスケールバックされるモデルを用いた^{2), 3)}。降伏基準には, $J_2^{1/2}$ が静水圧応力 σ_m の増加に伴い増大するDrucker Pragerモ



(a) 全体図



(b) 配筋状況および評価点位置

図-2 解析モデル (爆発距離: 250mm)

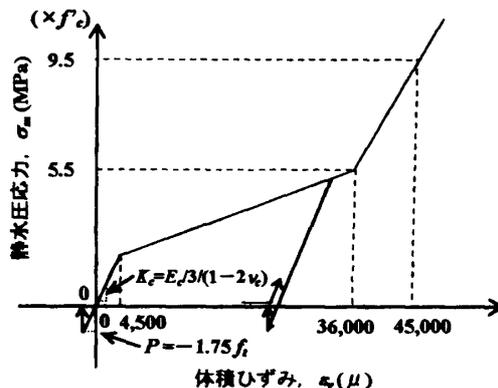


図-3 コンクリートの静水圧応力-体積ひずみ

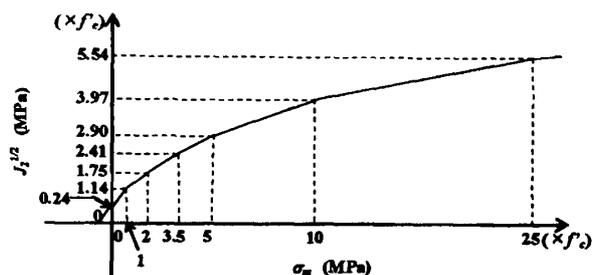


図-4 コンクリートの降伏基準

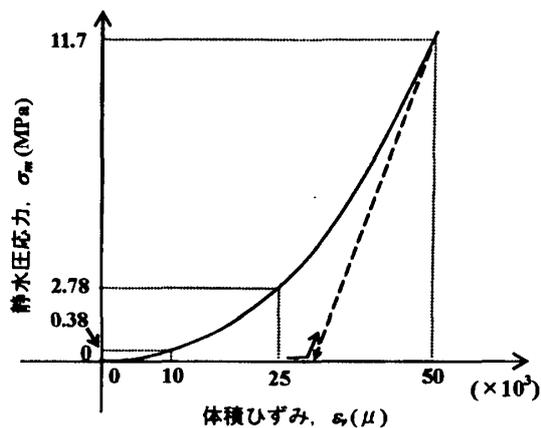


図-5 砂の静水圧応力-体積ひずみ

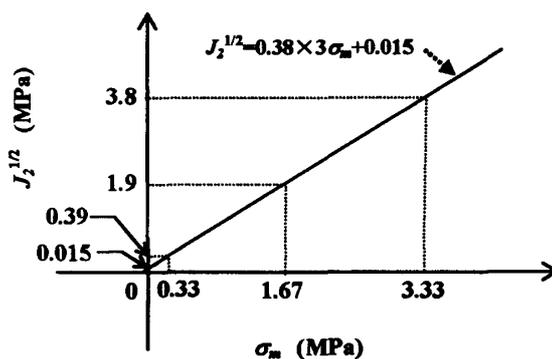
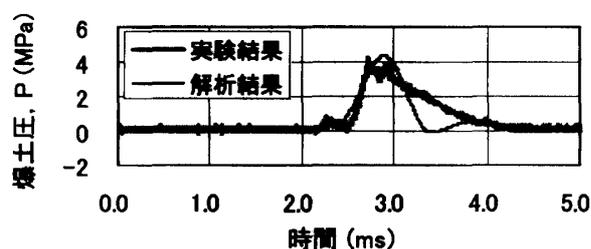
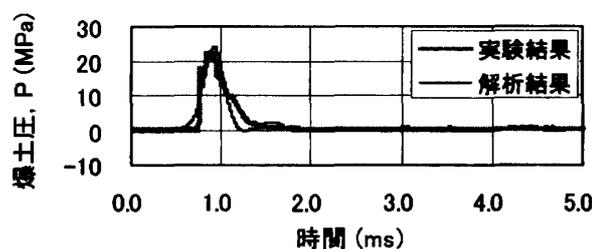


図-6 砂の降伏基準



(a) 爆発距離 500 mm



(b) 爆発距離 250 mm

図-7 爆土圧波形の比較 (下層の背版中心)

デルを用いた (図-4)。なお、コンクリートの材料パラメータは、なるべく簡易であることが解析者にとってより利便であること、またコンクリートのひずみ速度効果は引張側の材料特性に与える影響がより大きいこと⁹⁾を考慮して、既報^{2), 3)}にならって上述の引張破壊圧 P を除き表-1に示す静的な値を用いた。

鉄筋要素および爆薬要素の材料モデルは、文献2), 3)に同じ応力-ひずみ関係と Jones-Wilkins-Lee (JWL) の状態方程式を用いた。このうち、鉄筋の材料パラメータは、上述したコンクリートの場合と同様に、表-2に示す静的な値を用いた。なお、JWL の状態方程式は式(1)に示すとおりであり、式中の P は圧力、 Q は内部エネルギー、 A, B, R_1, R_2, W は材料定数、 ρ および ρ_0 はそれぞれ密度と初期密度を表し、 $\eta = \rho / \rho_0$ である。紙面の都合により、その他の詳細は同文献に譲る。

$$P = A (1 - W \eta / R_1) e^{-R_1 / \eta} + B (1 - W \eta / R_2) e^{-R_2 / \eta} + W \eta \rho_0 Q \quad (1)$$

砂の材料モデルは、高圧・高速荷重条件下において砂の材料データを取得した藤本⁹⁾の実験結果によった。すなわち、静水圧応力 σ_m と体積ひずみ ϵ_v の関係および降伏基準を、それぞれ図-5、図-6で与えた。なお、砂についても引張破壊圧 P を定義しているが、ここでは文献4)にならい、零に近い値 ($P = -0.001$ MPa) を与えた。

4. 解析結果

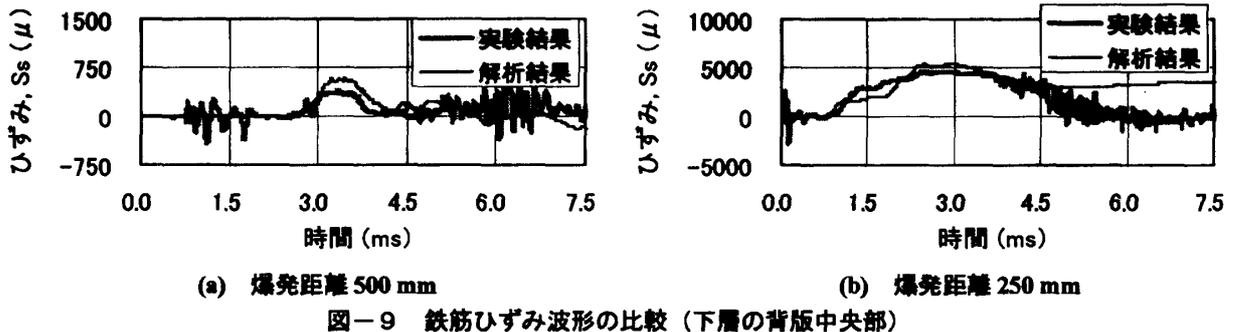
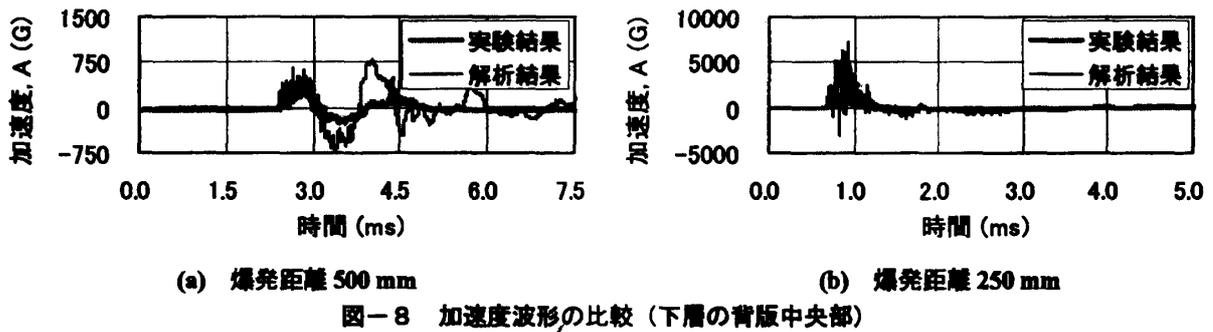
4.1 爆土圧波形

図-7には、RC 構造物の下層の背版中心に作用する爆土圧波形を示している。図中、横軸は、爆薬の爆発時間を 0 ms として整理している。また、縦軸は背版が正載荷となる状態を正としている。これらは、以降の加速度波形および鉄筋ひずみ波形の場合も同様である。なお、ここでは、波形は 5 ms 間を拡大して示している。

図より、爆発距離 500 mm および 250 mm の場合とも、実験波形は急激に立ち上がりピーク値に達した後、徐々に零レベルに減少していることが分かる。また、爆発距離が短い 250 mm の方が、ピーク値は大きく、波形の継続時間が短く示されている。解析波形は、爆発距離によらず、振幅が大小の二つの正弦半波が連なった性状を呈していることが分かる。しかしながら、ピーク値や波形の継続時間は、いずれの爆発距離の場合にも実験波形を概ねシミュレートしていると考えられる。なお、解析波形の二波が連なった波形性状は、爆土圧の伝播状況を計算の時間間隔毎に追って調べた結果、背版との相互作用により解析上生じるものであることを確認している。

4.2 加速度波形

図-8には、下層の背版中央部の加速度波形を示している。ここでは、波形は爆発距離 500 mm の場合には 7.5 ms までを取って、爆発距離 250 mm の場合には 5 ms 間



を拡大して示している。図より、実験波形についてみると、爆発距離 500 mm の場合には、波形は正負に振幅を繰り返して零レベルに至る弾性的な挙動を呈していることが分かる。一方、爆発距離 250 mm の場合には、波形は正側に大きく推移し、その後零レベルに至る挙動を呈している。なお、爆発距離 250 mm の場合は若干オーバーレンジとなったため、正確なピーク値は取得できなかった。

解析波形についてみると、爆発距離によらず、波形には高周波成分が顕在化している様子が認められる。しかしながら、爆発距離 500 mm の場合には波形は全体的に正負に振動状態を呈し、爆発距離 250 mm の場合には波形は正側に大きく励起した後に零レベルに至っており、実験波形に類似した傾向を呈していることが認められる。

4.3 鉄筋ひずみ波形

図-9には、下層の背版中央部の鉄筋ひずみ波形を示している。ここでは、波形は本解析の計算終了時間である 7.5 ms まで取って整理している。図より、実験波形についてみると、爆発距離によらず、図-7に示した爆土圧波形が立ち上がる前に、数百 μ のひずみが正負に励起している様子が確認できる。これは起爆時の発破信号によるノイズ等の影響と考えられ、ここではこのノイズは無視して検討を行うこととする。

実験波形について、爆土圧波形の立ち上がり以降をみると、爆発距離 500 mm の場合には、ピーク値が約 400 μ 程度で、半周期が約 1.5 ms の正弦半波が正側 (引張側) に励起していることが分かる。その後の波形は自由振動

状態に至ると考えられるが、ここでは高周波の振動成分が顕在化したため、その挙動は明確には確認できない。なお、本 RC 構造物の背版の固有振動周期は、別途行った背版を鋼棒で軽く打撃させた弾性範囲内の応答解析により、約 1.8 ms であることを確認している。一方、爆発距離 250 mm の場合には、ピーク値が約 5,000 μ で、半周期が約 5 ms の正弦半波が同じく引張側に励起していることが分かる。爆発距離 500 mm の場合に比較して、ピーク値および周期が増大していることから、RC 構造物にはひび割れ等の損傷が生じたと推察される。

解析結果についてみると、爆発距離によらず、初期の正弦半波のピーク値と周期が、実験結果と大略同様であることが確認できる。

4.4 RC 構造物の損傷状況

図-10には、爆発距離 250 mm の場合における正面から見た RC 構造物の損傷状況を示している。解析結果は、実験結果と比較するために、幅方向に鏡面展開した全体表示で示している。また、損傷状況がほとんど変化しなくなる爆発後 3 ms の結果で示している。さらに、破壊領域は、圧力が仮定した引張破壊圧に達し零応力にカットオフされたコンクリート要素を示しており、ひび割れの発生箇所を示している。その他は弾性領域 (非破壊領域) を示している。なお、爆発距離 500 mm の場合には、解析結果および実験結果ともひび割れがほとんど顕在化しなかったため、図を省略している。

図より、実験結果には背版に曲げに起因する放射状のひび割れが生じていることが分かる。これは、著者等⁷⁾

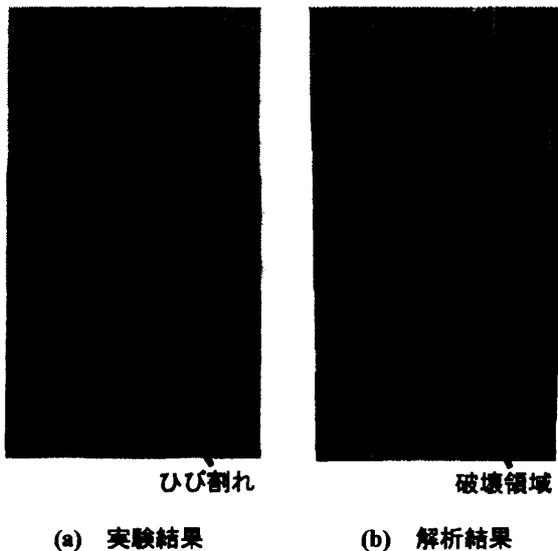


図-10 損傷状況 (爆発距離 250 mm, 正面)

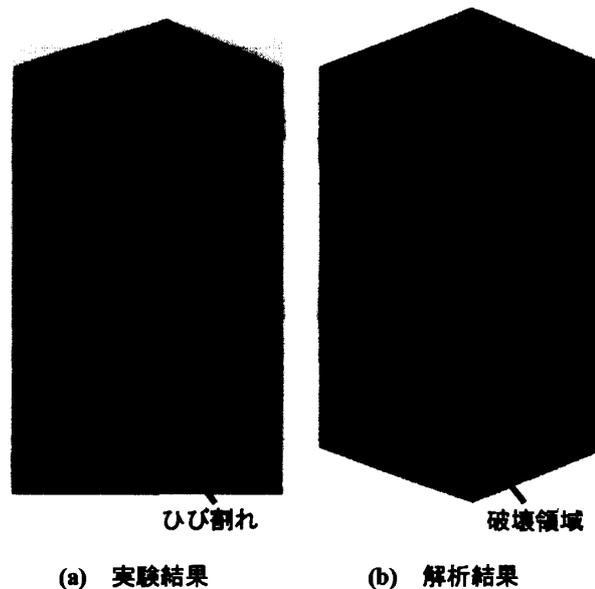


図-11 損傷状況 (爆発距離 250 mm, 45° 後方)

が過去に行った4辺が固定されたRC版の低衝突速度実験においてみられた曲げひび割れの分布性状に類似している。また、底版や側版にもひび割れが一部に発生している様子が認められる。一方、解析結果においても、実験結果と同じく、背版に放射状の破壊領域が顕在化しており、また底版や側版にも数本の破壊領域が励起されていることが確認できる。

図-11には、爆発距離250 mmの場合における背版の45°後方から見たRC構造物の損傷状況を示している。図より、実験結果には、背版の外周に沿った形で励起する四角形状のひび割れが発生していることが分かる。また、側版にも一部に開口部に向かって延びるひび割れの発生している様子が確認できる。解析結果にも、このような背版外側の四角形状の破壊領域や、側版の数本の破壊領域が発生しており、実験結果に比較的類似した損傷状況を呈している様子が読み取れる。

5. まとめ

本研究では、爆土圧を受けるRC構造物の三次元数値解析を試みた。そして、本解析方法の有効性を別途行った実験結果と比較する形で検討した。その結果、コンクリートおよび鉄筋に静的な材料物性値に基づく比較的簡易な材料モデルを適用し、かつコンクリートの引張破壊圧に適切な値を仮定する既往の解析方法により、爆土圧を受けるRC構造物の応答および損傷が大略シミュレートできることが明らかになった。

しかしながら、精度や信頼性のより高い数値解析方法を確立するためには、さらに多くの実験データとの比較検討が必要であると考えられる。今回、数少ない貴重な爆発実験データを用いて数値解析的な検討を行ったが、

今後さらに爆発実験データを蓄積し、多くのケースに対して本研究のような検討を行っていきたいと考えている。

謝辞：本研究の取り纏めにあたり、防衛省技術研究本部企画課の森下政浩氏および同本部陸上装備研究所残存性解析研究室の阿曾沼剛氏には有益なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森下政浩ほか：近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷と覆土の緩衝効果，土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.865-876, 2006.10
- 2) 安藤智啓ほか：爆発荷重を受けるRCはりの応答に与える材料モデルの影響に関する解析的研究，土木学会構造工学論文集, Vol.53, pp.1261-1272, 2007.3
- 3) 安藤智啓ほか：爆発荷重を受けるアーチ型鉄筋コンクリート構造物の三次元爆発応答解析，コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.775-780, 2007
- 4) 安藤智啓ほか：遠心模型実験による砂中埋設構造物の衝撃応答に関する一考察，土木学会構造工学論文集, Vol.43, pp.1469-1480, 1997.3
- 5) Joosef Leppanen: Concrete subjected to projectile and fragment impacts: Modelling of crack softening and strain rate dependency in tension, International Journal of Impact Engineering 32, pp.1828-1841, 2006
- 6) 藤本一男：高速荷重を受ける土と構造物の動的相互作用に関する基礎的研究，大阪大学博士論文, 1985
- 7) 小暮幹太ほか：配筋状態の異なるRC板の衝撃挙動と耐衝撃性に関する実験的考察，土木学会構造工学論文集, Vol.42, pp.1315-1323, 1996.3