# 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<sup>1)-3)</sup>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<sup>1)</sup>、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<sup>2),3)</sup>。

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<sup>1)</sup>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<sup>4)</sup>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/mm<sup>3</sup>)、 $D_{50} = 0.34$  (mm)、 $U_c = 1.57$  であり、豊浦標準砂 と特性が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750mm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 2.3mm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350mm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500mmおよび250mm 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250mm 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100mm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た。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。





表-1 コンクリートの静的材料特性値

表-3 ペントライト爆薬の爆轟特性値

圧縮強度	引張強度	弹性係数	ポアソン比	密度	C-J 爆轟速度	C-J 圧力	C-J エネルキ ー	初期密度
$f_c(MPa)$	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$V_c$	$\rho_c (g/mm^3)$	$V_{CJ}$ (m/s)	$P_{CJ}(\text{GPa})$	$E_{CJ}$ (J/mm <sup>3</sup> )	$\rho_e ({ m g/mm}^3)$
30.1	3.10	24.4	0.2	2.30×10 <sup>-3</sup>	7.53×10 <sup>3</sup>	25.5	8.10	1.63×10 <sup>-3</sup>

表-2 鉄筋の静的材料特性値

呼び径	材質	降伏強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比	密度
		$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_{us}$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$V_{s}$	$\rho_s  (g/mm^3)$
D6	SD295A	352	542	206	0.3	7.85×10 <sup>-3</sup>
D10	SD295A	353	494	206	0.3	7.85×10 <sup>-3</sup>

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 100 kHz のものと,最大サンプリング周波数1 MHz のも のを用いた。サンプリング間隔は1µs 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250 mm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(12.5 mm)を参考に、背版に対し ては12 mm角で与えた。背版周囲の砂要素は、文献4)



写真一1 実験状況(爆発距離:250mm)

にならい、コンクリート要素の2倍の大きさで与えた。 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 7.5 ms 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<sup>2,3</sup>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 $\sigma_{ij}$ は,静水圧応力 $\sigma_m$ と偏差応 力 $s_{ij}$ の和 ( $\sigma_{ij} = \sigma_m \delta_{ij} + s_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$ : Kronecker のデルタ)と して表される。静水圧応力 $\sigma_m$ と体積ひずみ $\epsilon_e$ の関係は, 著者等<sup>3)</sup>の既往の研究にならい,**図**-3のように与えた。  $\sigma_m$ 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、 $\epsilon_v$ 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 $\sigma_m$ 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<sup>-1</sup>~10<sup>0</sup>/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 $f_i$ )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、  $\sigma_{yc}$ :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<sup>2),3)</sup>。降伏基準には、 $J_2^{1/2}$ が静水圧応力 $\sigma_m$ の増加に伴い増大する Drucker Prager モ







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<sup>5)</sup>を 考慮して、既報<sup>2),3)</sup>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<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, Wは材料定数、 $\rho$ および $\rho_0$ 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。

 $P = A (1 - W \eta / R_1) e^{-R_1 / \eta} + B (1)$  $-W \eta / R_2) e^{-R_2 / \eta} + W \eta \rho_0 Q$ (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<sup>60</sup>の実験結果によった。す なわち、静水圧応力 $\sigma_m$ と体積ひずみ $\epsilon_n$ 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0ms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5ms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<sup>7)</sup>



(a) 実験結果 (b) 解析結果 図-10 損傷状況(爆発距離 250 mm, 正面)

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,



(a) 実験結果 (b) 解析結果 図-11 損傷状況(爆発距離 250 mm, 45°後方)

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 解析研究室の阿曽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

- 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
- 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