

論文 爆発荷重を受けるアーチ型鉄筋コンクリート構造物模型の三次元爆発応答解析

安藤 智啓*¹・齋藤 和伸*²

要旨：本研究では、爆発荷重を受ける実 RC 構造物の応答や破壊性状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、アーチ型 RC 構造物模型に対して三次元爆発応答解析を試みた。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、静的な材料物性値に基づく比較的簡易な材料モデルを用い、コンクリートの引張破壊圧に適切な値を仮定する解析方法によって、RC 構造物模型に作用する圧力および同模型の応答を比較的良く模擬できることが明らかになった。

キーワード：アーチ型 RC 構造物、爆発荷重、応答、三次元解析、引張破壊圧

1. はじめに

著者らは、これまで爆薬の爆発に伴い生じる爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート (RC) 版や RC はりの応答および破壊性状に関して、実験データを蓄積してきた^{例えば¹⁾}。そして、部材に生じるコンクリートの剥離 (スポール破壊) の発生限界が、爆薬量、コンクリート厚さおよび爆薬と部材との離隔距離 (スタンドオフ距離) からある程度予測できること等を明らかにしてきた。しかしながら、実用上は、形状がより複雑な実 RC 構造物の応答や破壊性状が予測できるか否かが重要であり、構造物の形状あるいは爆発条件によっては部材レベルの予測法では十分でない場合も考えられる。

一方、実 RC 構造物を用いた爆発実験を実施することにより、構造物の応答や破壊性状に関するデータを取得する方法も考えられるが、費用や場所等の制約から実爆実験の実施は容易ではないと思われる。このため、実 RC 構造物の応答や破壊性状を数値解析的に予測する方法の確立が待たれているところである。著者らも RC はり等を対象に、爆発荷重を受ける場合の部材の応答や破壊性状に関する三次元数値解析を実施してきた^{例えば²⁾}。その結果、部材レベルの応答や破壊性状については、比較的良く実現象を模擬で

きる解析方法を提示した。しかしながら、この解析方法が、形状がより複雑な実 RC 構造物に対して有効か否かについては明らかではない。

そこで、本研究では、爆発荷重を受ける実 RC 構造物の応答や破壊性状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、一例としてアーチ型の耐爆構造物を対象として、これを簡易に模した同型 RC 構造物模型に対する三次元爆発応答解析を試みた。そして、本解析方法の有効性を別途実施し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-2D/3D (Ver. 6.0) を用いた。

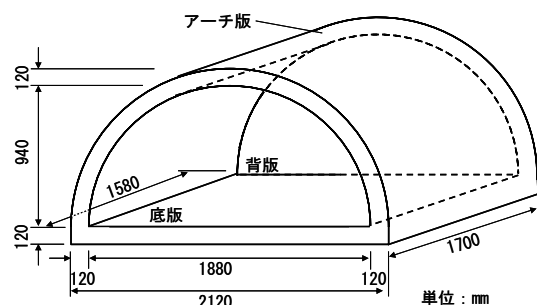
2. 実験の概要

2.1 RC 構造物および爆薬

図-1 に、本実験に用いたアーチ型 RC 構造物模型 (以下、RC 構造物) の形状寸法を示す。本 RC 構造物は、アーチ版、底版および背版から成り、一面に開口部を有する。各版部材の厚さは、いずれも 120 mm である。図-2 には、アーチ版の配筋とセンサー位置を示している。アーチ版は複鉄筋配置とし、開口部と背版間の奥行き方向に対しては芯かぶり 25 mm の位置に D6 を 150 mm ピッチで配筋した。また、これと直交方向に D6 を 7.5 度ピッチで配筋した。なお、紙面の都

*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)

*2 防衛省陸上自衛隊 地理情報隊 工修 (正会員)



図－１ RC 構造物の形状寸法

合により図示していないが、底板および背版も同じく複鉄筋配置とし、D6 を縦横に 150 mm ピッチで配筋している。表－１および表－２に、コンクリートと鉄筋の材料物性値を示す。

実験に用いた爆薬は、表－３に示す材料物性値を有するペントライト爆薬である。ここでは、質量が 110 g と 440 g の２種類を用いた。形状はいずれも直径と高さの等しい円柱体であり、質量 110 g の場合が直径 44 mm、質量 440 g の場合が直径 70 mm である。

2.2 実験方法

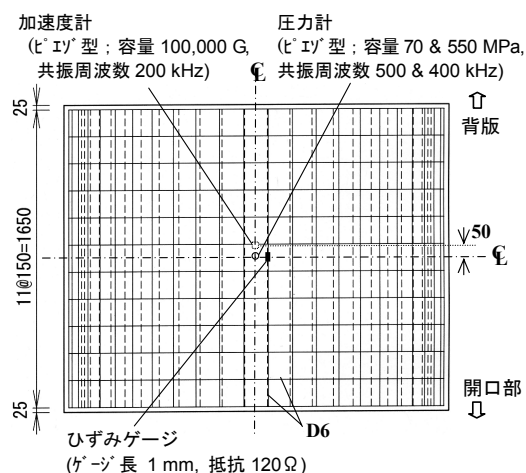
写真－１に、質量 440 g の爆薬を用いた場合を例に本爆発実験の状況を示す。RC 構造物は単純に砂地盤上に直置きした。一方、爆薬はアーチ版中心の鉛直方向に爆発距離が 400 mm となるように上方から糸で吊す形で設置した。この設置位置は、計測する圧力等の最大値が用いるセンサーの容量を超えないよう考慮して決定した。なお、爆薬は、6 号電気雷管を用いて上面中心から起爆させた。

爆発実験時には、アーチ版に作用する圧力波形、アーチ版の加速度波形および同鉄筋ひずみ波形を計測した（図－２参照）。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 $1\mu\text{s}$ とし、計測時にフィルター処理は特に施さなかった。

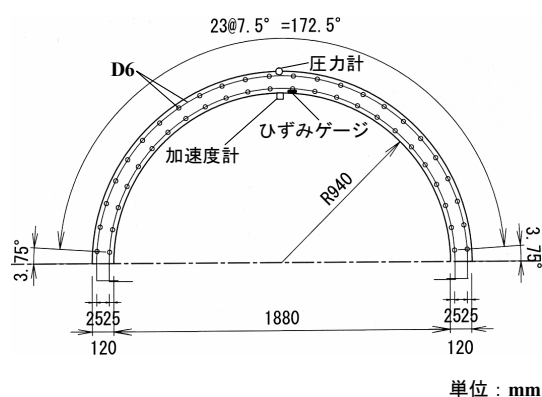
3. 解析概要

3.1 解析方法

本研究では、文献 2)を参考に、最初に爆薬と



(a) 上面図



(b) 断面図

図－２ アーチ版の配筋とセンサー位置

周囲の空気を２次元要素でモデル化して、２次元解析コードによる爆発応答解析を行った。そして、衝撃波の先頭波面が前述した実験における爆発距離（＝ 400 mm）に達する直前で解析を終了させ、この時の圧力分布状態を３次元座標に投影（リマップ）した後、３次元解析コードによる爆発応答解析を行った。

3.2 解析モデル

図－３に本解析モデルを示す。(a)図は、爆薬要素と周囲の空気要素のみを Euler 要素でモデル化した２次元軸対称解析モデルである。ここでは、爆薬 440 g の場合を例に示している。モデル化の範囲は、爆薬の下方と側方については本解析対象である爆発距離（＝ 400 mm）程度とした。ただし、上方については構造物の反対側となるため、要素数の節約を図り爆発距離の 1/3 程度とし、上辺の境界条件には無反射境界条件を

表－１ コンクリートの材料物性値

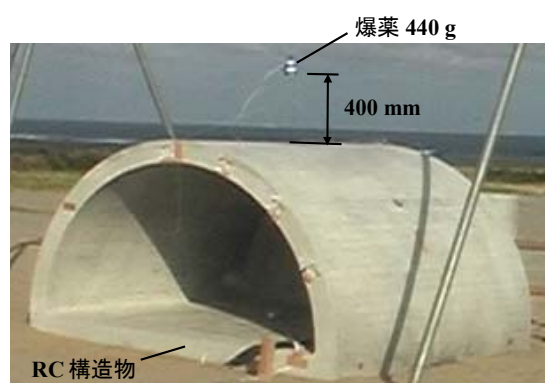
圧縮強度, f'_c (MPa)	引張強度, f_t (MPa)	弾性係数, E_c (GPa)	ポアソン比, ν_c	密度, ρ_c (g/mm ³)
35.0	3.29	26.7	0.20	2.26×10^{-3}

表－２ 鉄筋の材料物性値

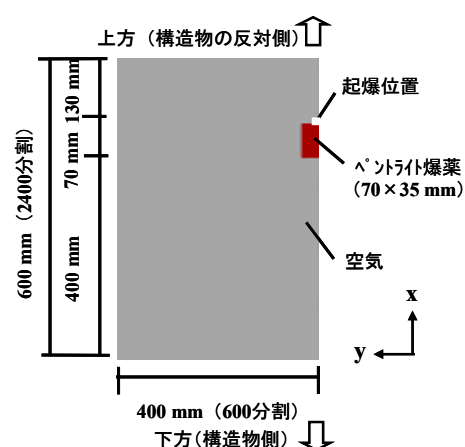
規格	降伏強度, σ_{ys} (MPa)	引張強度, σ_{us} (MPa)	弾性係数, E_s (GPa)	ポアソン比, ν_s	密度, ρ_s (g/mm ³)
D6-SD295A	352	522	206	0.3	7.85×10^{-3}

表－３ ペントライト爆薬の材料物性値

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)	密度 ρ_e (g/mm ³)	JWL の状態方程式中の材料定数				
				A (MPa)	B (MPa)	R_1	R_2	W
7.53×10^3	25.5	8.10	1.64×10^{-3}	5.41×10^5	9.37×10^3	4.50	1.10	0.35



写真－１ 爆発実験の状況（爆薬 440 g）

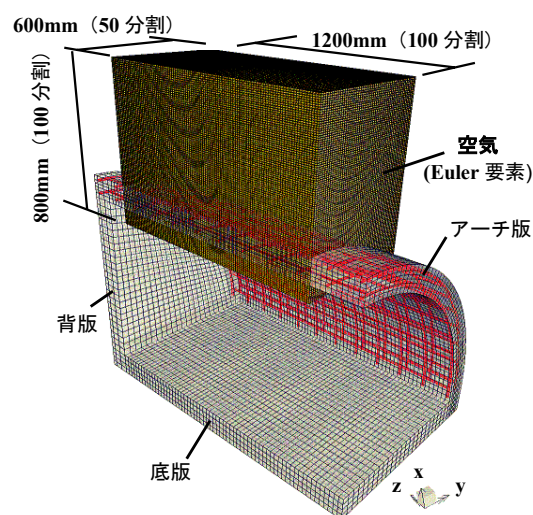


(a) 2次元軸対称（爆薬 440 g）

与えた。また、要素分割は文献 2)の場合と同程度のメッシュサイズにより施した。全要素数は 1,440,000 である。

(b)図は、リマップ前に準備した 3 次元解析モデルである。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、空気は Euler 要素でモデル化した。同要素のモデル化の範囲は、実験後にアーチ版に付着したすすの分布より、爆発荷重が主にアーチ版の中央部に作用したことが推察されたため、これを網羅するように図中 $0.8 \times 0.6 \times 1.2$ m の領域に決めた。なお、同要素端面には無反射境界条件を与えた。

一方、RC 構造物は、アーチ版についてはコンクリートを solid 要素、鉄筋を beam 要素でモデル化した。この際、要素分割は、文献 2)の RC はりの場合と同程度のメッシュサイズにより施した。また、コンクリートと鉄筋の節点は、完全付着を仮定した。なお、紙面の都合により詳細な図は省略するが、図－２に示す各種センサ



(b) 3次元

図－３ 解析モデル

一位置に対応する要素には応答波形を出力させるための評価点を与えている。底版および背版については、特に損傷が見られなかったことより、モデル作成および計算時間短縮を図り、コ

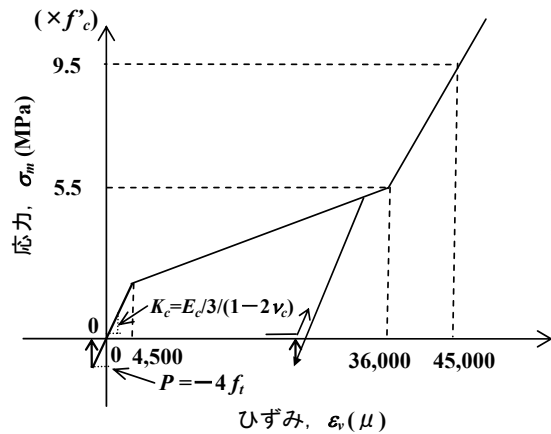


図-4 コンクリートの静水圧応力-体積ひずみ

ンクリートと鉄筋を単一材の solid 要素にモデル化した。また、底版の底部には x 方向の下向きの変位を拘束する境界条件を与えた。なお、RC 構造物全体と前述の空気を合わせた全要素数は 531,393 である。

粘性減衰定数は、本コードではこれを設定できないため考慮していない。また、構造物の自重もここでは考慮していない。なお、解析時間は爆薬の起爆時から 5 ms までとした。

3.3 材料モデル

爆薬要素の材料モデルには、式(1)に示す JWL (Jones-Wilkins-Lee) の状態方程式を用いた。

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

ここで、 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_{ref} はそれぞれ密度と参照密度を表し、 $\eta = \rho / \rho_{ref}$ である。本爆薬に対する JWL の状態方程式中の材料定数、数値解析に必要な C-J 爆轟速度、C-J 圧力等は、表-3 に示すとおりである。なお、爆薬要素の周囲の空気は、比熱比 1.4、初期圧力 101.3 kPa、初期密度 $1.225 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ の理想気体とした。

アーチ版のコンクリート要素については、要素の応力 σ_{ij} は、静水圧応力 σ_m と偏差応力 s_{ij} の和 ($\sigma_{ij} = \sigma_m \delta_{ij} + s_{ij}$, δ_{ij} : Kronecker のデルタ) として表される。前者の場合には、文献 2) にない図-4 に示すトリニア型の静水圧応力 σ_m -体積ひずみ ε_v 関係で与えた。 σ_m は 3 方向の垂直応力の平均値であり、 ε_v は単位体積あたりの体積変

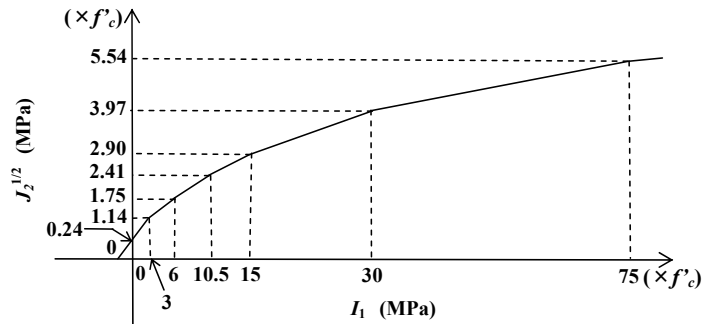


図-5 コンクリートの降伏基準

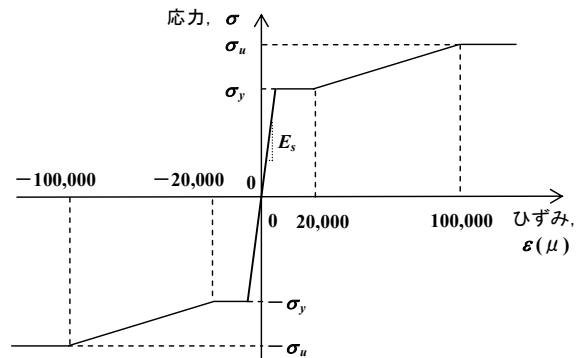
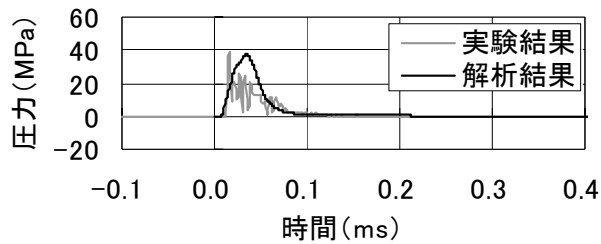


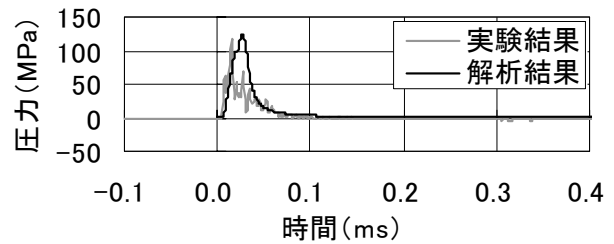
図-6 鉄筋の応力-ひずみ関係

化である。図中、引張領域については、応力が圧縮側の初期勾配と同勾配で線形に増加し、引張破壊圧 P に達した段階で零応力まで除荷されるモデルとした。各々の値は、 P 値を除き、森下ら³⁾の高压 3 軸圧縮試験の結果に基づき決定している。後者の場合には、降伏前の弾性領域では $s_{ij} = 2 G_c e_{ij}$ (e_{ij} : 偏差ひずみ) に従うが、 $J_2 = \sigma_{yc}^2 / 3$ (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、偏差応力が降伏曲面上にスケールバックされる。ここでは、 $J_2^{1/2}$ が応力の 1 次不変量 I_1 ($=3\sigma_m$) の増加に伴い増大する Drucker Prager (非線形) を採用した (図-5)。また、各々の値は、ここでも文献 3) に基づき決定した。

上述したコンクリートの材料物性値には、なるべく簡単な方法によって実現象を予測できる解析方法とすることが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 (例えば 4)) を考慮して、引張破壊圧 P を除き全て静的な値を用いた。 P については、後述する爆薬直下の鉄筋ひずみ波形のひずみ速度が $10^1 / \text{s} \sim 10^2 / \text{s}$ であること、文献 4) によるとこの場合のコンクリート

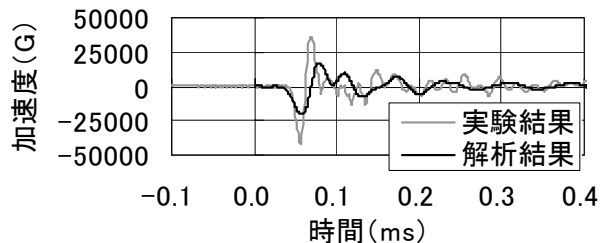


(a) 爆薬 110 g

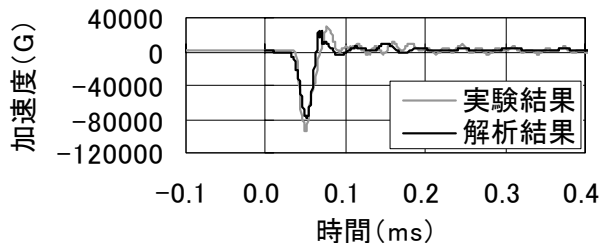


(b) 爆薬 440 g

図－7 圧力波形の比較



(a) 爆薬 110 g



(b) 爆薬 440 g

図－8 加速度波形の比較

の引張強度は静的な場合の4倍以上になることから、ここでは $P=-4f_t$ で与えた。

アーチ版の鉄筋要素の材料モデルは、文献 2) に同じ応力-ひずみ関係とした(図-6)。また、要素の降伏判定には von Mises 条件を用いた。なお、ここでも、より簡便な方法で実現象を予測する観点から、材料物性値には静的な値を用いた。底版と背版については、弾性体モデルを採用した。材料物性値は、表-1と表-2の値を基に、構造物全容積に対する鉄筋容積の比(≒0.0037)を用いて複合則^{例えば5)}により算出した。

4. 解析結果

4.1 圧力波形

図-7には、爆薬直下の RC 構造物に作用する圧力波形を示している。図中、縦軸はアーチ版が正載荷となる状態を正にとって整理している。これは、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。

図より、爆薬 110 g および爆薬 440 g 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、過減衰的な状態を呈して約 0.1 ms 後に零レベルに達していることが分かる。解析波形は、爆薬量によらず実験波形の最大値および波

形継続時間を良く模擬しており、比較的類似の波形性状を呈しているものと考えられる。

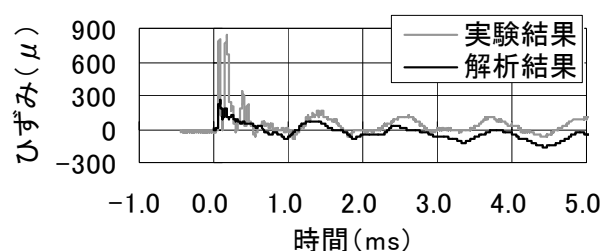
4.2 加速度波形

図-8には、爆薬直下の RC 構造物の加速度波形を示している。図より、いずれの爆薬量の場合とも実験波形は正負に1度大きな応答を示した後、微小な振幅を繰り返している性状が確認できる。解析波形は、両爆薬量の場合とも実験波形のピーク値を過小に評価しているものの、上述のような実験波形の性状を大略模擬しているものと考えられる。

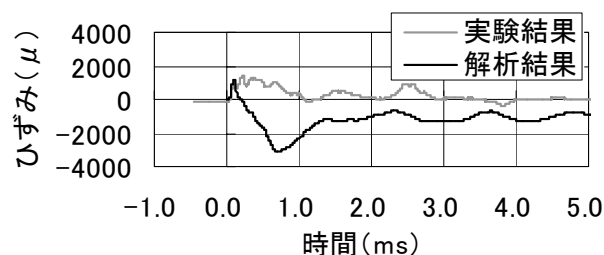
4.3 鉄筋ひずみ波形

図-9には、爆薬直下のアーチ版における下端の鉄筋ひずみ波形を示している。図より、爆薬 110 g の場合には、実験波形が立ち上がり直後に 600 μ を超える引張ひずみが励起され、その後振動状態を呈している性状が認められる。解析波形については、初期の振幅が小さく評価されているものの、振動状態は実験波形に比較的類似しているものと考えられる。

一方、爆薬 440 g の場合には、実験波形は立ち上がり直後に 1,000 μ を超える引張ひずみが励起され、その後同じく振動している。しかしながら、解析波形は 1,000 μ 程度までは実験波形に良



(a) 爆薬 110 g



(b) 爆薬 440 g

図－9 鉄筋ひずみ波形の比較

い一致を示すものの、その後圧縮ひずみに転じ実験波形と大きく異なった挙動を示している。今後、同点の局所的な性状なのかどうかを含め、原因を調べていきたいと考えている。

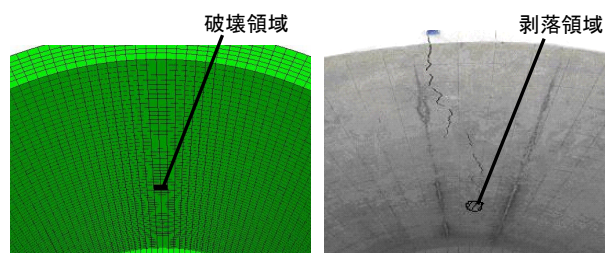
4.4 RC 構造物の破壊状況

図－10には、爆薬 440 g の場合における爆薬直下のアーチ版内側の損傷を示している。解析結果は爆発後 5 ms の結果であり、幅方向に鏡面展開した全体表示で示している。図中の破壊領域は、圧力が仮定した引張破壊に達し零応力にカットオフされた要素を示している。その他は弾性領域を示している。なお、爆薬 110 g の場合には、解析および実験結果ともひび割れ等の損傷が健在化しなかったため、図を省略している。

図より、解析結果の爆薬直下のアーチ版内側に、破壊領域が顕在化していることが分かる。これは、実験結果に見られたコンクリートの剥落領域に良く対応している。しかしながら、実験結果に見られる開口部から爆薬直下近傍に進展している微細な曲げひび割れは、解析結果には出現しておらず、今後この点の解析精度向上を図っていきたいと考えている。なお、アーチ版の外側（爆薬側）については、実験結果と解析結果にひび割れ等の損傷は認められなかった。

5. まとめ

本研究では、爆発荷重を受けるアーチ型 RC 構造物模型に対して三次元爆発応答解析を試みた。その結果、静的な材料物性値に基づく比較的簡易な材料モデルを用い、コンクリートの引張破壊圧に適切な値を仮定する解析方法によって、RC 構造物模型に作用する圧力および同模型の



(a) 解析結果

(b) 実験結果

図－10 アーチ版内側の損傷（爆薬 440 g）

応答を比較的良く模擬することができた。他方、同模型のひずみ波形や曲げひび割れが一部再現できない結果も見受けられた。今後更なる解析精度向上のための検討を行いたいと考えている。

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：爆薬要素のモデル化が爆発荷重を受ける RC はりの応答に与える影響，第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.171-176, 2006.11
- 3) 森下政浩ほか：衝撃 3 軸負荷及び衝撃静水圧負荷を受けるコンクリートの変形・破壊挙動，コンクリート工学論文集，第 16 巻第 2 号，pp.13-21, 2005.5
- 4) Yong Lu et al: Numerical simulation of concrete break-up under explosive loading, 1st International Conference on Design and Analysis of Protective Structures against Impact/Impulsive/Shock Loads, pp.278-286, 2003.12
- 5) 堂山昌男ほか：材料テクノロジー17 複合材料，東京大学出版会，pp.84-85, 1988.8