

## 爆薬要素のモデル化が鉄筋コンクリート構造物の爆発応答特性に与える影響

Effects of modeling method of explosive mesh on response characteristics of RC structures subjected to blast loadings

安藤智啓\*

Tomohiro Ando

\*博（工）防衛省陸上装備研究所主任研究官 耐弾・耐爆構造研究室（〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1）

In this study, effects of modeling method of explosive mesh on responses of reinforced concrete (RC) structures subjected to blast loadings from a relatively long standoff are numerically discussed comparing analytical results with the corresponding experimental ones. Here, an explosive is modeled by Euler mesh and Lagrange mesh, respectively. RC structures (a RC beam and a box-type RC structure) are modeled by Lagrange mesh. The material model of concrete is given as a relatively simple model used by the authors in the past. The main results obtained here are as follows: 1) in case of the long standoff detonation condition, effects of modeling method of explosive mesh on response characteristics of RC structures subjected to blast loadings may be large, 2) applying Euler mesh as the explosive model, the responses of RC structures subjected to blast loadings would be simulated relatively well by using the simple material model of concrete.

*Key Words: RC structure, Euler mesh, Lagrange mesh, blast analysis, response*

キーワード: RC 構造物, オイラー要素, ラグランジュ要素, 爆発解析, 応答

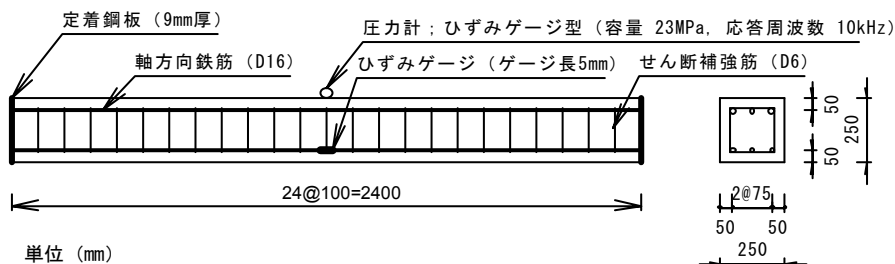
## 1. 緒言

近年、我が国においても、爆薬の爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート (RC) 構造物に対する損傷評価法や耐爆設計法に資する基礎的な知見を得ることを目的として、RC 構造部材や RC 構造物を用いた爆発実験が各研究機関で盛んに行われるようになってきた<sup>1)~7)</sup>。一方、最近ではコンピュータの著しい発展に伴い、RC 構造部材や RC 構造物を対象とした爆発解析も行われるようになってきた<sup>8)~12)</sup>。しかしながら、流体と固体の相互作用を伴う爆発解析については、固体同士の衝突解析<sup>13)~17)</sup>に比べて研究事例が非常に少なく、爆薬要素の適切なモデル化方法についてさえも十分に分かっていないのが現状である。

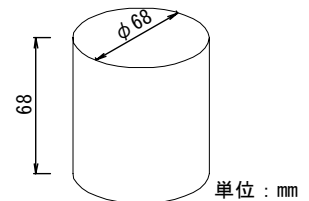
一般に、爆薬要素のモデル化としては代表的な方法として二種類が考えられる。一つは Lagrange 要素でモデル化する方法で、他方は Euler 要素でモデル化する方法である。前者は固体の挙動を、後者は流体の挙動を解析する場合に適していると言われている<sup>9)</sup>。既に著者等<sup>18)</sup>は、爆薬が極至近距離で爆発する場合には、上述の爆薬要素のモデル化が RC はりの支点反力波形、鉄筋ひずみ波形および破壊性状にほとんど影響を与えないことを確認している。また、丹羽ら<sup>19)</sup>も、接触爆発時においては、

爆薬要素のモデル化が RC 版に生じるクレータやスポールの直径に有意な差のないことを報告している。しかしながら、爆薬が比較的遠距離で爆発する場合の爆薬要素のモデル化に関する検討は、著者等の知る限り例を見ない。

本研究では、爆薬が比較的遠距離で爆発する場合を対象として、爆薬を Lagrange 要素と Euler 要素によりモデル化した場合の RC 構造物の応答に与える影響を検討した。ここで、爆薬と RC 構造物との隔離距離（以下、爆発距離）は、本研究目的が RC 構造物の損傷評価法に資する知見を得ることであることに鑑み、RC 構造物に若干のひび割れ損傷が生じる程度の距離に設定した。最初に、文献 18)と同様にコンクリート構造の基本部材である RC はりに対して検討を行い、次に、建物の一区画を模した実構造により近いボックス型 RC 構造物に対して検討を行った。また、これらの検討は各々の実験結果と比較する形で実施し、過去に著者等が行った簡易な材料モデルによる解析方法の有用性も合わせて確認した。なお、本数値解析は、有限差分法に基づく衝撃応答解析用汎用コード Autodyn-2D/3D(Ver. 4.3)<sup>20)</sup>を用いて行った。計算機は、hp 社の workstation xw8000 (CPU : 3.06 GHz)を使用した。



図－１ RC はりの形状寸法



図－２ 爆薬の形状寸法

表－１ コンクリートの静的力学的特性値（RC はりの場合）

| 圧縮強度<br>$f'_c$ (MPa) | 引張強度<br>$f_t$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_c$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_c$ | 密度<br>$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| 24.7                 | 2.47                | 22.2                | 0.163            | 2.334                               |

表－２ 鉄筋の静的力学的特性値（RC はりの場合）

| 呼び径 | 規格     | 降伏強度<br>$\sigma_y$ (MPa) | 引張強度<br>$\sigma_u$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_s$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_s$ | 密度<br>$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----|--------|--------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| D16 | SD295A | 377                      | 503                      | 206                 | 0.3              | 7.85                                |
| D6  | SD295A | 394                      | 543                      |                     |                  |                                     |

表－３ ペントライト爆薬の爆轟特性値

| C-J 爆轟速度<br>$V_{CJ}$ (m/s) | C-J 圧力<br>$P_{CJ}$ (GPa) | C-J エネルギー<br>$E_{CJ}$ (J/mm <sup>3</sup> ) | 初期密度<br>$\rho_e$ (g/mm <sup>3</sup> ) | JWL の状態方程式中の材料定数   |                    |       |       |      |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|------|
|                            |                          |                                            |                                       | $A$ (MPa)          | $B$ (MPa)          | $R_1$ | $R_2$ | $W$  |
| $7.53 \times 10^3$         | 25.5                     | 8.10                                       | $1.62 \times 10^{-3}$                 | $5.41 \times 10^5$ | $9.37 \times 10^3$ | 4.50  | 1.10  | 0.35 |

## 2. 爆発実験の概要

### 2.1 RC はりの場合<sup>10), 11)</sup>

#### (1) RC はりおよび爆薬

図－１に、本解析対象とした爆発実験に用いた RC はりの形状寸法を示す。RC はりは断面 250×250 mm で、全長 2.4 m の矩形はりである。軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋には、それぞれ D16、D6 を用いている。表－１および表－２に、コンクリートおよび鉄筋の静的力学的特性値を示す。

図－２に、RC はりの爆発実験に用いたペントライト爆薬の形状寸法を示す。爆薬の形状寸法は直径と高さが 68 mm の円柱体であり、その質量は 400 g である。表－３に、ペントライト爆薬の爆轟の反応完結点における C-J (Chapman-Jouguet) 爆轟速度、C-J 圧力、C-J エネルギー等を示す。

#### (2) 実験方法

写真－１に、RC はりの爆発実験の状況を示す。実験は、内径が約 8 m の鉄筋コンクリート造のドーム状施設内で行った。RC はりは、支点反力測定用の 6 個のロードセル（容量：250 kN/個、最大応答周波数：2.4 kHz）が組み込まれた鋼製の支点治具の支持部上に設置した。支点間は 2 m である。RC はりの上面中心には圧力計（容量：23 MPa、最大応答周波数：10 kHz）を設置した。な



写真－１ RC はりを用いた爆発実験の状況

お、支点治具全体は、回転部において回転のみが許容されるピン支持に近い支持条件になっている。ペントライト爆薬は、RC はりのスパンおよび幅方向中心から爆発距離 750 mm の位置に施設の天井から細い糸で吊るすことにより設置した。また、爆薬は電気雷管を用いて上面中心から起爆させた。

実験時には、支点反力、鉄筋ひずみ（ひずみゲージの貼付位置は図－１参照）および圧力を計測した。アンプと記録装置には、最大応答周波数 500 kHz およびサンプリング周波数 400 kHz のものを用いた。また、計測時にフィルター処理は特に施さなかった。これは、後述のボックス型 RC 構造物の場合も同様である。なお、実験終

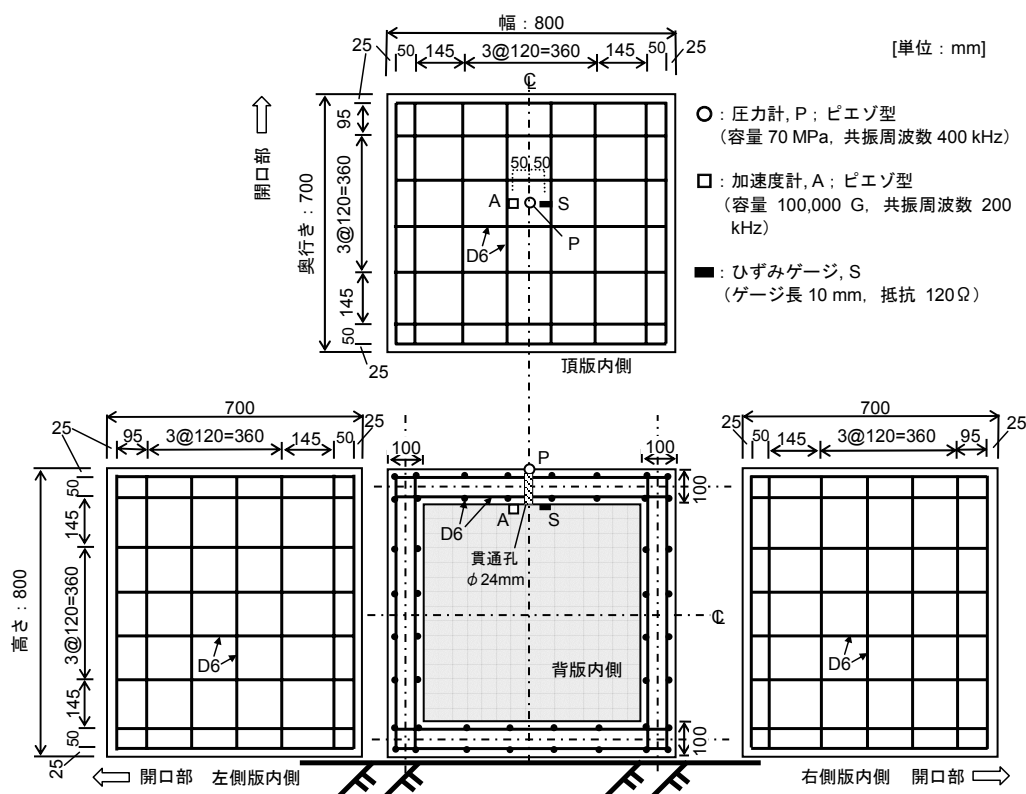


図-3 RC 構造物の形状寸法

表-4 コンクリートの静的力学的特性値 (RC 構造物の場合)

| 圧縮強度<br>$f'_c$ (MPa) | 引張強度<br>$f_t$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_c$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_c$ | 密度<br>$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| 30.1                 | 3.10                | 24.4                | 0.2              | 2.30                                |

表-5 鉄筋の静的力学的特性値 (RC 構造物の場合)

| 呼び径 | 規格     | 降伏強度<br>$\sigma_y$ (MPa) | 引張強度<br>$\sigma_u$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_s$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_s$ | 密度<br>$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----|--------|--------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| D6  | SD295A | 352                      | 522                      | 206                 | 0.3              | 7.85                                |

了後には、RC はりのひび割れの発生状況を記録した。

## 2.2 ボックス型 RC 構造物の場合<sup>7)</sup>

### (1) RC 構造物および爆薬

図-3に、本解析対象とした爆発実験に用いたボックス型 RC 構造物の形状寸法を示す。本構造物は、後述するセンサーの設置を容易にするために、一面に開口部を設けている。図中の下段中央図の手前側が開口部である。幅および高さは 800 mm、奥行きは 700 mm である。版厚は 100 mm である。鉄筋には D6 を採用している。表-4および表-5に、コンクリートおよび鉄筋の静的力学的特性値を示す。

爆薬は、RC はりの場合と同じく、直径と高さの等しい円柱体のペントライト爆薬である。寸法・質量も、直径および高さ 70 mm、質量 440 g であり、RC はりの場合にほぼ同様である。爆薬の爆轟特性値は表-3に示すとおりである。

### (2) 実験方法

写真-2に、ボックス型 RC 構造物の爆発実験の状況を示す。実験は、野外の爆破試験場で行った。RC 構造物は、砂地盤上に単純に直置きした。頂版中央部には上面に圧力計 (容量: 70 MPa, 共振周波数: 500 kHz) を、下面に加速度計 (容量: 100,000 G, 共振周波数: 200 kHz) およびひずみゲージを設置・貼付している。センサーのスペックや測定項目が RC はりの場合と異なるが、これは実験の目的等が RC はりの場合と異なっていることによるものである。すなわち、本実験の実施時期は RC はりの場合より後であったことより、圧力計は RC はりの場合の経験を踏まえ、より高応答性のものを用いた。また、RC はりの場合にはレーザ式変位計を用いて変位波形の計測を試みたが、爆発時の著しい閃光のためにデータが取得できなかったことから<sup>11)</sup>、本実験ではピエゾ型の加速度計を用いた加速度波形の計測に測定項目を変更した。各々のセンサーの設置・貼付位置は、図-3に

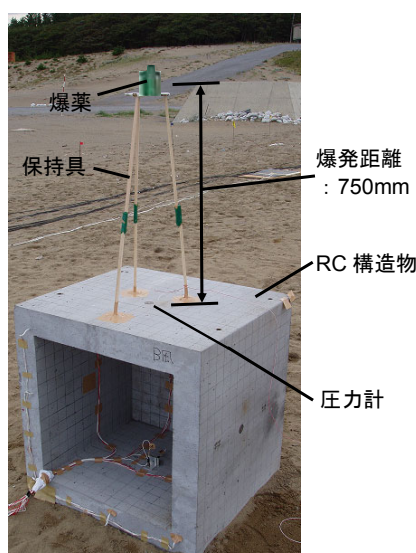


写真-2 RC 構造物を用いた爆発実験の状況

示すとおりである。

ペントライト爆薬は、RC はりの頂版の幅方向中心、奥行き方向については開口部から 300 mm、高さ方向については爆発距離 750 mm の位置に設置した。なお、爆薬は単純に薄紙の上に設置した。このような設置条件の下、爆薬は、電気雷管を用いて上面中心から起爆させた。

実験時には、加速度、コンクリートひずみおよび圧力を計測した。アンプと記録装置には、それぞれ最大応答周波数 100 kHz およびサンプリング周波数 1 MHz のものを用いた。また、実験終了後には、RC 構造物のひび割れの発生状況を記録した。

### 3. 解析の概要

#### 3.1 爆薬のモデル化

爆薬要素のモデル化としては代表的な方法として二種類が考えられる。一つは Lagrange 要素でモデル化する方法で、他方は Euler 要素でモデル化する方法である。一般的には、前者は固体の挙動を、後者は流体の挙動を解析する場合に適していると言われている<sup>9)</sup>。

本解析コードでは、連続体力学に基づき、質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則の三つの保存則に、状態方程式を連立させて解を導く<sup>20)</sup>。これらの方程式を Lagrange の方法により定式化する場合には、物理量は時間の関数として記述される。この場合、座標系は物質に固定され、物質の変形とともに変化する（図-4(a)）。他方、Euler の方法により定式化する場合には、物理量は空間座標と時間の関数として記述される。この場合、座標系は空間に固定され、物質はこの空間座標系の上を移動する（図-4(b)）。

Lagrange の方法および Euler の方法の特性としては、前者の場合には、応力、ひずみの評価が容易であること、物質間の境界が明瞭であること等の利点と、変形が進む

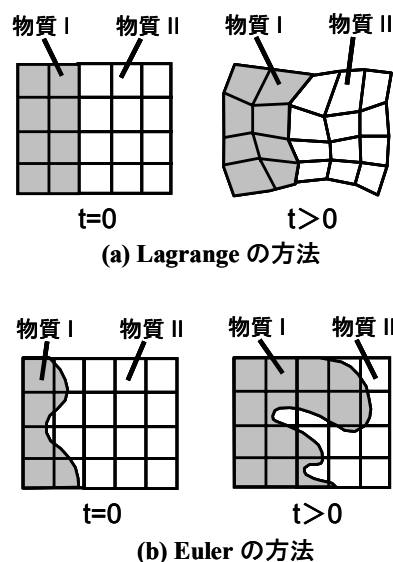


図-4 Lagrange と Euler の方法

と要素の形状がいびつになり、計算のタイムステップが著しく小さくなること等の欠点がある<sup>21)</sup>。また、後者の場合には、要素自体の変形がないため物質の変形が極端に大きい場合でも計算が可能であること、衝撃波のまわり込みが再現できること等の利点と、物質間の境界が不明確であること、計算処理に多大な時間がかかること等の欠点がある<sup>21)</sup>。

上述の特性を踏まえ、RC はりの場合およびボックス型 RC 構造物の場合の各解析対象に対して、解析方法、解析モデルおよび材料モデルの詳細を以下に述べる。

#### 3.2 RC はりの場合

##### (1) 解析方法

爆薬をLagrange要素でモデル化する場合には、計算当初から3次元解析コードを用いて爆発応答解析を実施した。ただし、上述したLagrangeによる方法の特性により、爆薬要素はコンクリート要素に作用した後非常にいびつに変形し、やがて計算のタイムステップが極端に小さくなる現象が生じる。しかしながら、著者等は、爆轟圧がコンクリート要素に作用し終えて、爆発によるエネルギーが同要素に伝達されたとみなせる場合には、爆薬要素を削除して計算を続けても、比較的良好な精度で実験結果がシミュレートできることを過去に確認している<sup>10), 11), 18)</sup>。本研究でもこれと同様の方法に基づき、タイムステップが極端に小さくなる前に爆薬要素の削除を行った。ここでは、後述の圧力波形（図-17）に照らして、爆轟圧が構造物にほとんど作用し終えたと判断される爆薬の爆発後400  $\mu$ sで爆薬要素の削除を行った。なお、爆薬要素の削除方法については、後述のボックス型 RC 構造物の解析でも同じとした。

一方、爆薬をEuler要素でモデル化する場合には、爆薬が極至近距離で爆発する場合の検討に用いた方法<sup>18)</sup>と同様に、最初に爆薬と周囲の空気を2次元要素でモデル化

し、2次元解析コードを用いて軸対称による爆発応答解析を実施した。爆轟波の先頭波面が本解析で設定した爆発距離に達する直前で解析を終了させ、この時点の圧力分布状態を3次元座標系に投影（リマップ）した。その後、3次元解析コードを用いて爆発応答解析を行った。なお、最初に2次元要素でモデル化した理由は、本解析コードのバージョンでは、3次元解析の場合に一つのEuler座標系に爆薬と空気の二種類の異なる物質が定義できないため、また仮に定義できたとしても2次元軸対称でモデル化可能な場合には、3次元の場合より細かい要素分割が施せて計算精度がより向上するためである。

## (2) 解析モデル

図-5に、爆薬をLagrange要素でモデル化した場合の3次元解析モデルを示す。爆薬はSolid要素でモデル化し、その分割は既報の数値解析<sup>10), 11), 18)</sup>にならって、高さ方向および直径方向に各々20分割とした。この分割数に関しては、爆発距離が100mm～500mmの範囲においては、解析結果が実験のRCはりの応答を比較的良くシミュレートしたことを既報で確認している。また、コンクリートおよび支点治具についても、同じくSolid要素でモデル化した。鉄筋および定着鋼板はそれぞれBeam要素、Shell要素でモデル化した。モデル全体の要素数および節点数は、各々64,088、75,019である。

図-6に、爆薬をEuler要素でモデル化した場合の解析モデルを示す。(a)図は、爆薬要素と周囲の空気要素のみをモデル化した2次元解析モデルである。モデルの外周には、爆轟波の反射を防ぐための流出境界条件を与えている。モデル全体の要素数および節点数は、それぞれ1,080,000、1,082,101である。なお、要素サイズは、爆薬が極至近距離で爆発する場合の検討に用いたサイズ<sup>18)</sup>にほぼ同じとした。一方、(b)図は、リマップ前に準備した3次元解析モデルである。図中、Euler要素には空気を定義している。ここでも、Euler要素モデルの端面には流出境界条件を与えている。また、Euler要素の幅方向のモデル化範囲については、はりから張り出した治具の部分はRCはりの応答に与える影響が小さいと考え、図に示すようにはり幅と同じ250mmとした。RCはりおよび支点治具は、爆薬をLagrange要素でモデル化した場合のモデルに同じである。モデル全体の要素数および節点数は、各々506,088、541,974である。

実験波形と比較するための評価点は、爆薬のモデル化方法に係わらず、支点反力波形を出力するためにRCはりに接している支点治具の治具支持部の各要素（図-5、6の評価点1）と鉄筋ひずみ波形を出力するために下側に配筋した軸方向鉄筋のスパン中央要素（図-5、6の評価点2）に与えた。また、爆薬をEuler要素でモデル化する場合には、Euler空間内の任意座標において伝播してくる圧力の時刻歴波形が出力可能であることから、RCはり上面中心の直上要素（図-6の評価点3）にも評価点を与えた。なお、支点治具には実験と対応する回転部

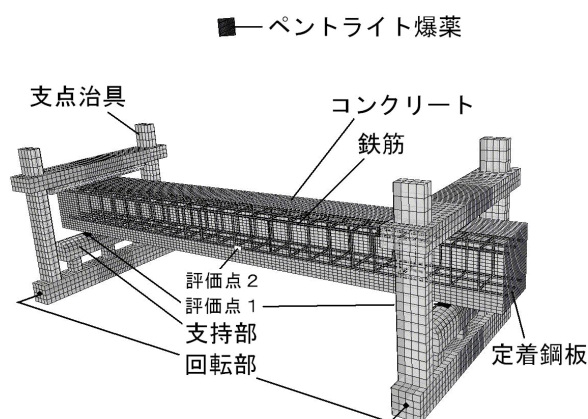
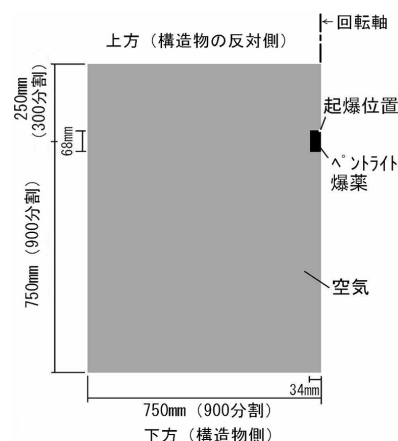
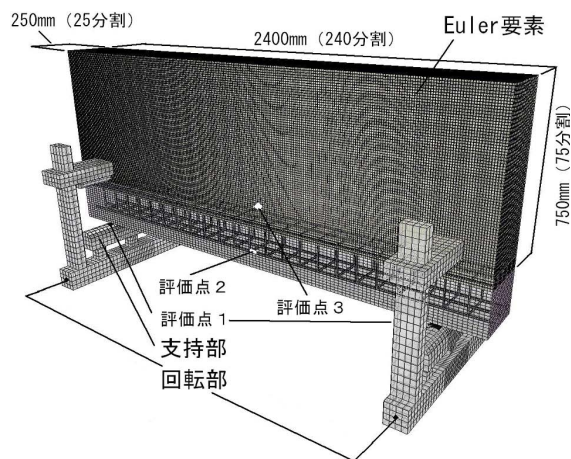


図-5 爆薬をLagrange要素でモデル化した場合



(a) 2次元解析モデル（軸対称）



(b) 3次元解析モデル

図-6 爆薬をEuler要素でモデル化した場合

中心軸上の全節点に回転のみ許容する境界条件を与えた。解析時間は、実験時の計測時間に合わせて、爆薬の起爆時から40msまでとした。

## (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<sup>20)</sup>を用いた。

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

ここで、 $P$ は圧力、 $Q$ は内部エネルギー、 $A, B, R_1, R_2, W$ は材料定数を表している。 $\eta$ は、 $\eta = \rho/\rho_e$  ( $\rho$ : 密度、 $\rho_e$ : 初期密度)である。これらのパラメータは、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  $1.225 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup> の理想気体とした。

コンクリート要素では、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。前者の場合には既報<sup>10), 11), 18)</sup>を参考に、図-7に示す単純なトリリニア型の静水圧応力 $\sigma_m$ —体積ひずみ $\varepsilon_v$ 関係で与えた。 $\sigma_m$ は3方向の垂直応力の平均値であり、 $\varepsilon_v$ は単位体積あたりの体積変化である。静水圧応力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、要素内の静水圧応力は体積ひずみの増大に伴い増加するモデルになっている。除荷勾配は、初期勾配と同じである。引張側ではコンクリート要素の破壊を考慮しており、静水圧応力が引張破壊圧 $P$ に達した段階で零応力までカットオフされる。一方、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、 $\sigma_{yc}$ : 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) モデルを採用した<sup>11)</sup> (図-8)。コンクリートモデルの入力値には、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>22)</sup>を考慮して、既報<sup>10), 11), 18)</sup>にならい引張破壊圧 $P$ を除いて表-1に示す静的な値を用いた。 $P$ については、同じく既報<sup>10), 11), 18)</sup>を参考に $P = -2f_t$ で与えた。

鉄筋要素の材料モデルは、図-9に示す多直線で近似した<sup>10), 11), 18)</sup>。入力値については、上述のコンクリート要素の場合と同様の理由から、表-2に示す静的な値を与えた。降伏の判定には von Mises 条件を用いた。定着鋼板要素および支点治具要素については、単純に弾性体でモデル化した。弾性係数およびポアソン比は、それぞれ  $E = 206$  GPa、 $\nu = 0.3$  とした。なお、本解析では粘性減衰定数は考慮しておらず、自重についても特に考慮していない。

### 3.3 ボックス型 RC 構造物の場合

#### (1) 解析方法

ボックス型RC構造物を対象とした場合の解析方法は、RCはりの場合と同様とした。すなわち、爆薬をLagrange要素でモデル化する場合には、計算当初から3次元解析コードにより解析を行った。また、爆薬をEuler要素でモデル化する場合には、2次元軸対称による解析を行った後、構造物に作用する直前の圧力分布状態を3次元座標系にリマップし、続いて3次元解析コードにより解析を実施した。

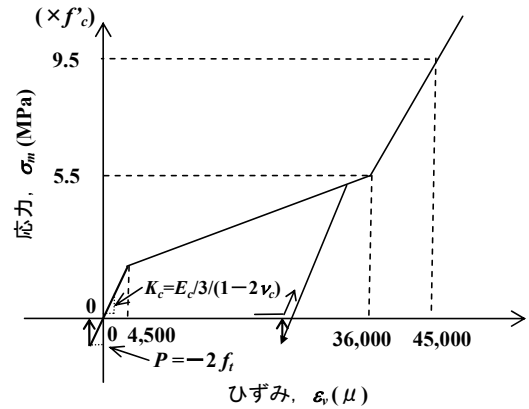


図-7 コンクリートの静水圧応力—体積ひずみ関係

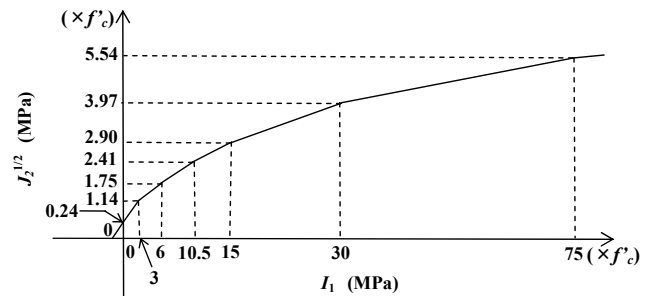


図-8 コンクリートの降伏基準

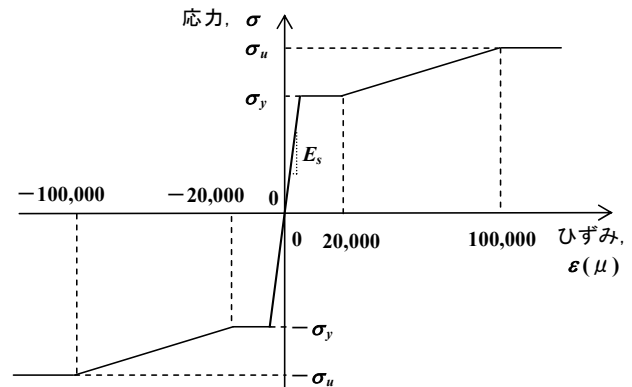


図-9 鉄筋の応力—ひずみ関係

#### (2) 解析モデル

図-10に、爆薬をLagrange要素でモデル化した場合の3次元解析モデルを示す。ここでも、爆薬はSolid要素でモデル化し、高さ方向および直径方向にそれぞれ20分割した。コンクリートおよび鉄筋もRCはりの場合と同様に、各々Solid要素、Beam要素でモデル化した。モデル全体の要素数および節点数は、各々101,968, 118,710である。

図-11に、爆薬をEuler要素でモデル化した場合の解析モデルを示す。2次元解析モデルについては、爆薬の寸法を除くとRCはりの場合と同じであるため、ここでは割愛する。図中、Euler要素には空気を定義しており、同要素モデル端面には流出境界条件を与えている。RC構造物は、爆薬をLagrange要素でモデル化した場合と同

じモデルである。モデル全体の要素数および節点数は、それぞれ 541,968, 584,541 である。

実験波形と比較するための評価点は、爆薬のモデル化方法に係わらず、RC 構造物の加速度波形を出力するために、頂版下面の中央近傍要素（図－１０の評価点１）とコンクリートひずみ波形を出力するために、同じく頂版下面の中央近傍要素（図－１０の評価点２）に与えた。また、爆薬を Euler 要素でモデル化する場合には、RC はりの場合と同様に、圧力波形を出力するために RC 構造物頂版における上面中心の直上要素（図－１１の評価点３）にも評価点を与えた。なお、RC 構造物底版の下面には、実験条件と対応させるために、下方向への移動を拘束する境界条件を与えた。解析時間は爆薬の起爆時から 5 ms までとした。

### (3) 材料モデル

爆薬要素、コンクリート要素および鉄筋要素は、RC はりの場合と同じモデルを採用した。ただし、コンクリート要素に用いた材料モデルのうち、引張破壊圧  $P$  については、実験のコンクリートひずみ波形から求めたひずみ速度が 8 /s 程度であり、RC はりの場合（0.8 /s 程度）に比べて同速度が 1 オーダーほど大きく示されたため、RC はりの場合より若干大きい値を与えた。ここでは、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<sup>22)</sup>を参考に、引張破壊圧  $P$  はひずみ速度 8 /s 程度における同倍率の実測データ（概ね 1.5 倍～4 倍に分布）の平均値付近である  $P = -2.75 f_t$  で与えた。なお、コンクリートモデルおよび鉄筋モデルの入力値には、RC はりの場合と同様の理由により、コンクリートの引張破壊圧  $P$  を除き表－４および表－５に示す静的な値を与えた。

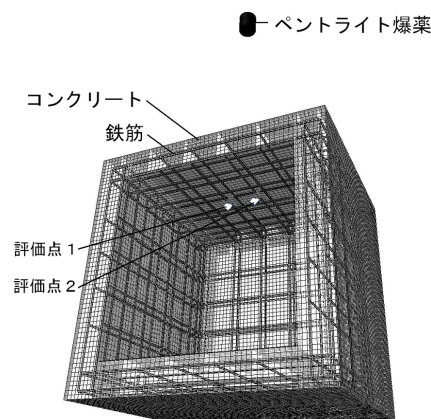
## 4. 解析結果

### 4.1 RC はりの場合

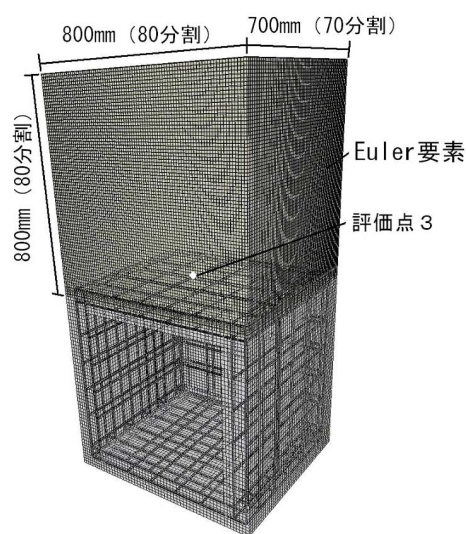
#### (1) 破壊性状

図－１２および図－１３には、RC はりの破壊性状に関する各解析結果を実験結果と比較して示している。解析結果については、圧力が仮定した引張破壊圧に達して零応力に至った破壊要素を自動的に表示させる機能<sup>20)</sup>を用いて示している。図中、灰黒色部分が破壊要素を、その他が非破壊要素（弾性要素）を示している。なお、解析結果は、引張破壊域の分布がほとんど変化しなくなる時間（爆発後約 6 ms 経過時）で示している。一方、実験結果については、コンクリートに発生したひび割れを実線で強調して示している。

図－１２および図－１３より、両解析結果の破壊性状はお互いに異なっていることが分かる。まず、図－１２のはり側面の破壊性状を見ると、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、スパン中央部のはり下面側に水平方向に広がる引張破壊域が顕在化している様子が分



図－１０ 爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合



図－１１ 爆薬を Euler 要素でモデル化した場合

かる。Euler 要素でモデル化した場合には、スパン中央部にはり下縁から鉛直方向に伸びる 2 本の引張破壊域とその 2 本の間を水平方向に 1 本の引張破壊域が励起されている様子が確認できる。一方、実験では、スパン中央部にはり下縁から鉛直方向に延びる数本の曲げひび割れが発生している。解析結果と実験結果を比較すると、Euler 要素でモデル化した場合が、このような実験の曲げひび割れ性状を比較的良くシミュレートしていると考えられる。

次に、図－１３のはり上面の破壊性状を見ると、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、はりのスパン中央部を中心に広い範囲に引張破壊域が顕在化していることが認められる。Euler 要素でモデル化した場合には、引張破壊域は顕在化していない。一方、実験でも、ひび割れ等の損傷は発生していなかった。ここでも、Euler 要素でモデル化した場合の解析結果が、実験結果に対応していることが分かる。なお、Lagrange 要素と Euler 要素でモデル化した場合の差異は、爆轟圧が RC はりに作用する際の次のような両者の違いに起因しているものと考えられる。すなわち、図－１４に示すように、Lagrange 要素でモデル化した場合には、座標系が物質の変形と

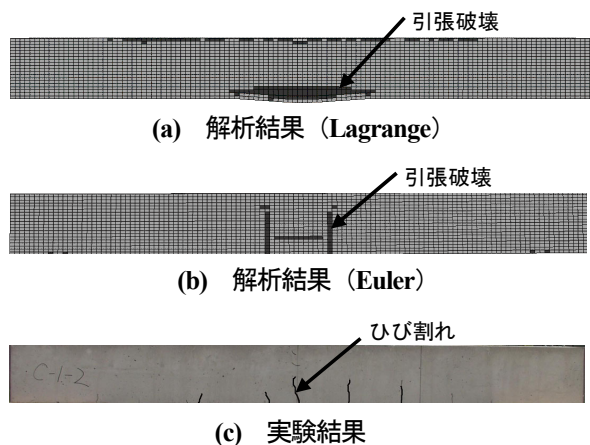


図-12 RCはりの破壊性状の比較（側面）

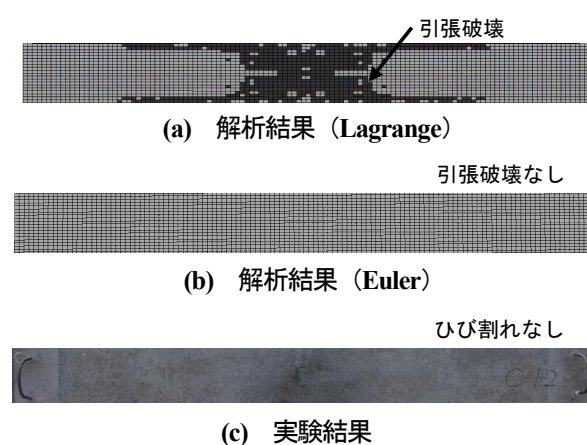


図-13 RCはりの破壊性状の比較（上面）

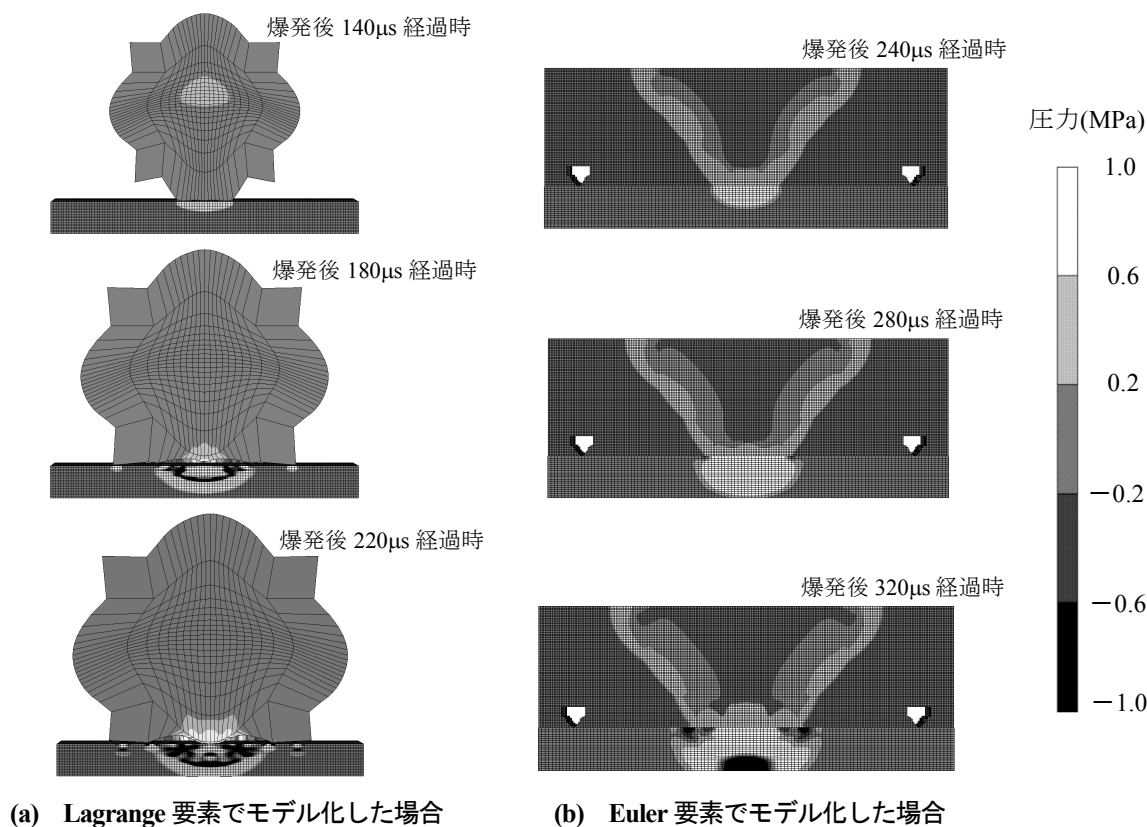


図-14 爆轟圧がRCはりに作用した直後の圧力分布の時間的変化（中央断面）

もに変化する特性から、①時間の経過に伴い大きく膨張した爆薬要素が、RCはりのスパン中央部上面に接触する（爆発後140  $\mu$ s経過時）。②その後、中央部の爆薬要素は一度RCはりから離れ（爆発後180  $\mu$ s経過時）、③再びRCはり中心部に集中的に作用する（爆発後220  $\mu$ s経過時）。なお、本解析のように比較的遠距離での爆発問題を解析する場合には、図に示すように爆薬要素はRCはりに接触する時点で既に変形している。しかしながら、ここではLagrangeの方法による適用限界を把握するために、著者等が過去に行った近距離爆発の解析方法にならって、このまま計算を続けた。一方、Euler要素でモデル化した場合には、物質が空間座標系を移動する特性から、爆轟

圧がはり中心部上面で作用した後、スパン両端部に向かって順次流動的に作用していく。なお、爆薬をEuler要素でモデル化した場合には、Lagrange要素でモデル化した場合より、100  $\mu$ s程度遅くRCはりに爆轟圧が到達することも認められる。

以上より、Lagrange要素とEuler要素によりモデル化した場合に、モデル化の違いがRCはりの応答に与える影響は、近距離爆発時にはほとんど生じなかった場合でも、比較的遠距離での爆発時には生じる場合のあることが明らかになった。

## (2) 支点反力波形

図-15には、支点反力波形に関する各解析結果を実

験結果と比較して示している。図中、各波形は正載荷時の値を正として整理している。また、時間軸は、後述する圧力波形の立ち上がり時間を 0 ms としている。これは、以降の波形全てについて同じとした。また、波形が見やすくなるように、-3 ms~15 ms 間を拡大して示している。図より、ここでも両解析結果の支点反力波形は、お互いに異なる性状を呈していることが分かる。すなわち、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、波形は約 5 ms で立ち上がり最大応答値を示した後急激に減少し、約 6 ms で零レベルに至っている。また、約 12 ms 時にもこれと同様な半波が出現している。一方、Euler 要素でモデル化した場合には、波形は約 1 ms で立ち上がり最大応答値を示した後一旦除荷し、約 3 ms で再び立ち上がり第 2 ピーク値を示している。そして、さらにもう一度減少と増加を繰り返して約 8 ms で零レベルに至っている。

実験波形について見ると、0 ms 前に 200 kN を超える支点反力が瞬間的に生じていることが認められる。これは、起爆時の発破信号による電氣的なノイズによる影響と考えられる<sup>2)</sup>。0 ms 以降については、解析波形には顕在化していない高周波成分が見られるものの、全体としては、波形は立ち上がり後最大応答値を示して一旦除荷し、その後再度立ち上がり増減を繰り返して約 8 ms で零レベルに至っている様子が伺える。Euler 要素でモデル化した場合の解析結果は、最大応答値や継続時間等を含め、このような実験波形の性状を比較的良くシミュレートしているものと考えられる。一方、Lagrange 要素でモデル化した場合の支点反力波形は実験波形と大きく異なるが、これは前述した RC はりの破壊性状に照らして、RC はりのスパン中央部下面および上面のコンクリートの損傷に爆発エネルギーの大半が消費され、支点部に力が十分に伝達されなかったためと考えられる。

### (3) 鉄筋ひずみ波形

図-16には、軸方向鉄筋のひずみ波形に関する各解析結果を実験結果と比較して示している。図中、正側が引張を表している。また、時間軸は、解析終了時間である 40 ms まで取って整理している。図より、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、最大振幅値が約 250  $\mu$  で、振動周期が 7 ms 前後の波形が励起されていることが分かる。一方、Euler 要素でモデル化した場合には、最大振幅値が約 1,100  $\mu$  であり、波形は引張側に推移した状態で約 15 ms 周期で振動していることが分かる。

実験波形について見ると、約 3 ms で急激に圧縮側（負側）に移行していることが認められる。ひずみゲージには、ノイズ防止のためにベースヤリード線に被覆や防水処置等を施しているが、ゲージ貼付位置にまさに曲げひび割れが発生していることに照らして（図-12参照）、このひび割れにより瞬間的に圧縮ひずみが励起されたものと考えられる。Euler 要素でモデル化した場合には、実験波形の 3 ms 前後の挙動を除くと、初期半波の振幅の大きさ、振動周期、引張側に推移した状態で振動してい

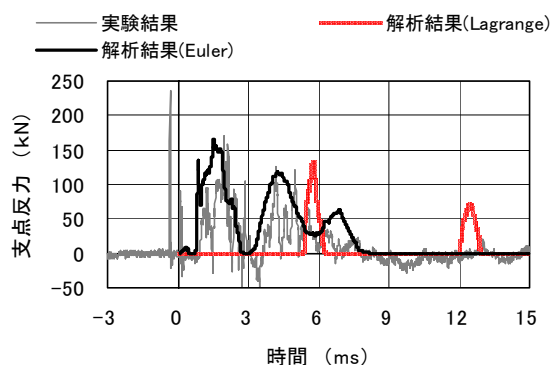


図-15 支点反力波形の比較

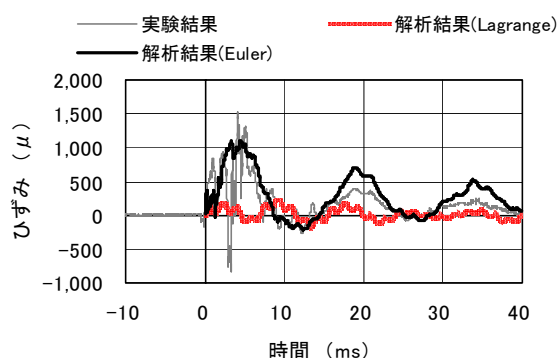


図-16 鉄筋ひずみ波形の比較

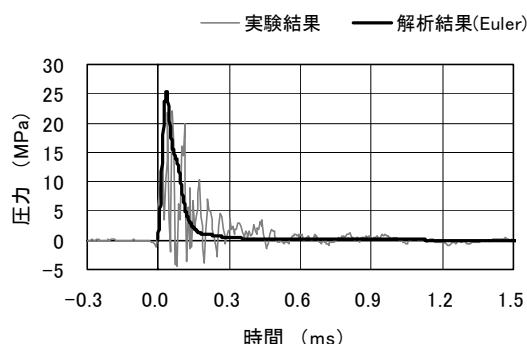
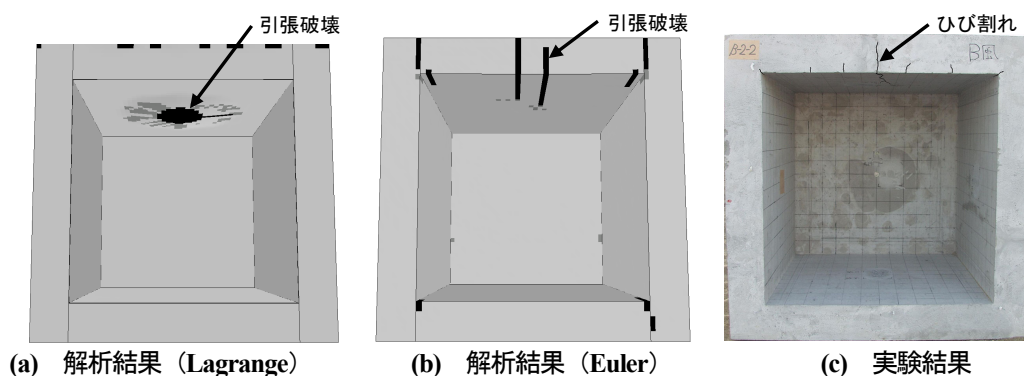


図-17 圧力波形の比較

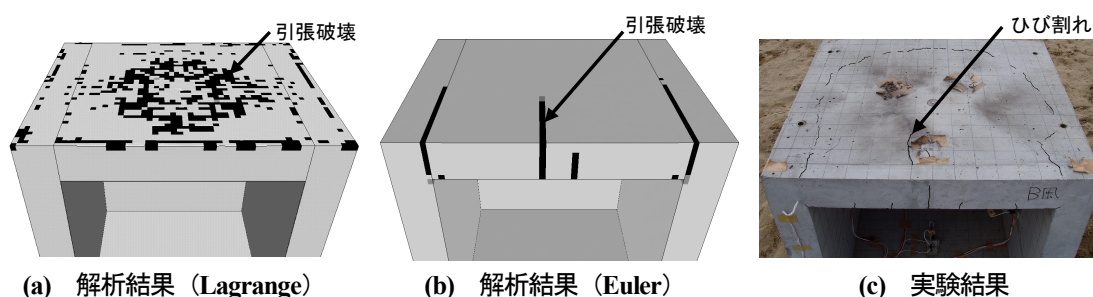
る様子等が、実験結果に良く合致しているものと考えられる。なお、ここでも Lagrange 要素でモデル化した場合の波形は実験波形と異なっているが、これは前述と同じ理由により、鉄筋ひずみに爆発エネルギーがあまり消費されなかったためと考えられる。

### (4) 圧力波形

図-17には、RC はりのスパン中心上面に作用する圧力波形に関して、爆薬を Euler 要素でモデル化した場合の解析結果と実験結果を比較して示している。時間軸は、-0.3 ms~1.5 ms 間を拡大して示している。図より、解析波形を見ると、波形は急激に立ち上がり最大応答値を示した後、過減衰的に減少し零レベルに至っていることが分かる。実験波形は、同じく急激に立ち上がり最大



図－１８ RC 構造物の破壊性状の比較（正面）



図－１９ RC 構造物の破壊性状の比較（上面）

応答値を示した後、高周波成分を含有した状態で徐々に零レベルに至っている。この高周波成分は次節で述べるボックス型 RC 構造物の場合の圧力波形には見られなかったことから、ここで用いたセンサーの周波数特性に起因して現れたものと推察される。全体的には、ピーク値や継続時間等、両波形はお互いに対応しているものと考えられる。

以上より、爆薬を Euler 要素でモデル化する場合には、構造物に作用する圧力が評価可能になることが分かった。また、(1)～(4)項より、爆薬を Euler 要素でモデル化する場合には、コンクリートの引張破壊圧に適切な値を設定する簡易な材料モデルによる既報<sup>10), 11), 18)</sup>の解析方法によって、爆発荷重を受ける RC はりの応答がある程度シミュレートできることも確認できた。

## 4.2 ボックス型 RC 構造物の場合

### (1) 破壊性状

図－１８および図－１９には、RC 構造物の破壊性状に関する各解析結果を実験結果と比較して示している。図中、灰黒色部分が破壊要素を示している。ここでも、解析結果は、引張破壊域の分布がほとんど変化しなくなる時間（爆発後約 1.5 ms 経過時）で示している。実験結果については、コンクリートに発生したひび割れを実線で強調して示している。

図－１８および図－１９より、両解析結果の破壊性状は、RC はりの場合と同様に、お互いに異なっていることが分かる。図－１８の構造物正面の破壊性状を見ると、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、爆薬直下

の頂版下面部に局所的に円形状の引張破壊域が顕在化している様子が分かる。Euler 要素でモデル化した場合には、このような引張破壊域は発生していないが、頂版の側面および下面に数本の引張破壊域が生じている。Euler 要素でモデル化した場合のこのような破壊性状は、同じく爆薬直下の頂版下面部に円形状の局所的損傷が顕在化しておらず、他方で頂版側面および下面に曲げひび割れが励起されている実験結果に比較的類似しているものと考えられる。また、図－１９の構造物上面の破壊性状を見ると、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、頂版の中央部およびエッジ部に引張破壊域が点状に分布していることが分かる。Euler 要素でモデル化した場合には、頂版の中央部および側版との接合部において開口部から奥行き方向に延びる引張破壊域が生じていることが確認できる。実験結果では頂版と背版との接合部近傍にもひび割れが発生しているものの、Euler 要素でモデル化した場合の解析結果は全体的には実験結果を比較的良くシミュレートしているものと考えられる。

以上より、RC 構造物についても、爆薬が比較的遠距離で爆発する場合には、爆薬のモデル化の違いにより構造物の応答が異なってくることが明らかになった。

### (2) 加速度波形

図－２０には、RC 構造物の頂版の加速度波形に関する各解析結果を実験結果と比較して示している。時間軸は、 $-0.2 \text{ ms} \sim 0.8 \text{ ms}$  間を拡大して示している。図より、ここでも両解析結果の加速度波形は、お互いに大きく異なる性状を呈していることが分かる。爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、波形は約  $0.15 \text{ ms}$  で立ち上

がり最大応答値を示した後急激に減少し、約 0.18 ms で零レベルに至っている。最大応答値は約 70,000 G にも達している。Euler 要素でモデル化した場合には、波形は圧力波形が励起された直後に立ち上がり、最大応答値（約 18,000 G）を示した後約 0.07 ms の周期で振動している。Euler 要素でモデル化した場合には、ピーク値や振動周期等を含め波形性状が実験波形に比較的類似しているものと考えられる。なお、Lagrange 要素でモデル化した場合の加速度波形のピーク値が実験波形と比べて非常に大きく示されているが、これは前述の RC 構造物の破壊性状に照らして、爆薬直下の RC 構造物の頂版下面におけるコンクリート要素が著しく損傷したことに起因していると考えられる。

### (3) コンクリートひずみ波形

図-21には、コンクリートのひずみ波形に関する各解析結果を実験結果と比較して示している。時間軸は、解析終了時間である 5 ms まで取って整理している。図より、爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合には、最大振幅値が約 23,000  $\mu$  で、そのピーク値発生時間が 4 ms 前後の波形が励起されていることが分かる。一方、Euler 要素でモデル化した場合には、最大振幅値が約 3,000  $\mu$  で、そのピーク値の発生時間が 1.2 ms 前後の波形が励起されている。Lagrange 要素でモデル化した場合のコンクリートひずみのピーク値は、Euler 要素でモデル化した場合の約 8 倍も大きい。これは、Lagrange 要素でモデル化した場合に、爆薬直下のコンクリート要素が著しく損傷したことに対応している。

実験波形について見ると、0.7 ms～1.5 ms 間の波形がオーバーレンジになっていることが分かる。そのため、解析結果と正確な比較はできないが、実験波形は全般的には爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合より弾性的に、Euler 要素でモデル化した場合より塑性化の度合いを大きく評価していることが分かる。ただし、残留ひずみについては、Euler 要素でモデル化した場合にほぼ同様であることが伺える。

### (4) 圧力波形

図-22には、RC 構造物の頂版に作用する圧力波形に関して、爆薬を Euler 要素でモデル化した場合の解析結果と実験結果を比較して示している。時間軸は、-0.3 ms～1.5 ms 間を拡大して示している。図より、解析波形を見ると、波形は急激に立ち上がり最大応答値を示した後、過減衰的に減少し零レベルに至っていることが分かる。実験波形も解析波形と同様な性状を呈しており、最大応答値および波形継続時間が解析波形と良く合致していることが確認できる。

以上より、RC 構造物についても、爆薬を Euler 要素でモデル化することにより、構造物に作用する圧力の評価が可能となることが示された。また、(1)～(4)項より、爆発荷重を受ける RC 構造物の応答は、コンクリートの引張破壊圧に適切な値を設定する簡易な材料モデルによ

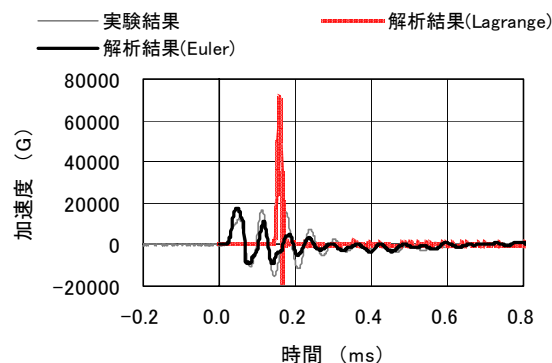


図-20 加速度波形の比較

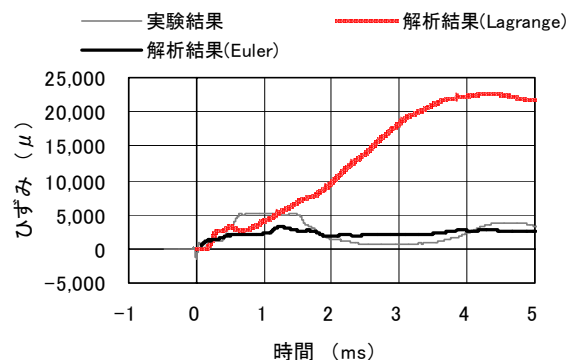


図-21 コンクリートひずみ波形の比較

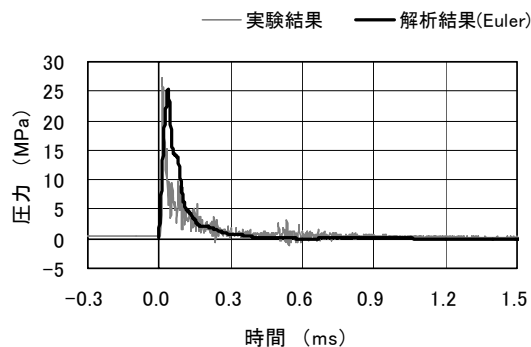


図-22 圧力波形の比較

る既報<sup>10), 11), 18)</sup>の解析方法によって、ある程度シミュレートできることも確認できた。

## 5. まとめ

本研究では、爆薬が比較的遠距離で爆発する場合を対象として、爆薬を Lagrange 要素と Euler 要素によりモデル化した場合の RC 構造物の応答に与える影響を検討した。また、過去に著者等が行った簡易な材料モデルによる解析方法の有用性も合わせて確認した。本研究の範囲内で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 爆薬を Lagrange 要素と Euler 要素によりモデル化した場合に、モデル化の違いが RC 構造物の応答に与える影響は、近距離爆発時にはほとんど生じなかった場合でも、比較的遠距離での爆発時には生じる場合がある。
- (2) 爆薬が比較的遠距離で爆発する場合の RC 構造物の応答は、爆薬を Euler 要素でモデル化し、かつコンクリートの引張破壊圧に適切な値を設定する簡易な材料モデルに基づく解析方法によってある程度シミュレートできる。
- (3) 爆薬を Euler 要素でモデル化する場合には、構造物に作用する圧力の評価が可能となる。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたり、防衛省技術研究本部企画課の森下政治氏および経済産業省安全保障貿易審査課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) 森下政治, 田中秀明, 安藤智啓, 萩谷浩之: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, 第 15 巻第 2 号, pp.89-98, 2004.5.
- 2) 安藤智啓, 阿曾沼 剛, 森下政治, 松尾 啓: 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの損傷および応答に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.28, No.2, pp.829-834, 2006.
- 3) 森下政治, 阿曾沼 剛, 栗木茂幸, 竹本憲介, 齋藤和伸, 松尾 啓: 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.
- 4) 加藤勝美, ガンダ M. シマングンソン, 佐分利禎, 堀川貴広, 黒田英司, 久保田士郎, 和田有司, 緒方雄二, 中山良男: 爆発による構造物の破壊に伴う飛散物の飛散状況, (社) 火薬学会 秋季研究発表講演会講演要旨集, pp.83-84, 2006.11.
- 5) 大久保一徳, 大山浩代, 別府万寿博, 大野友則, 片山雅英: C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート版の損傷評価, 土木学会構造工学論文集 Vol.53, pp.1273-1283, 2007.3.
- 6) 大久保一徳, 別府万寿博, 大野友則, 佐藤和幸: 繊維シート補強によるシート板の耐爆性能向上に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.3, pp.769-774, 2007.
- 7) 齋藤和伸, 安藤智啓: ボックス型鉄筋コンクリート構造物を用いた内部爆発実験, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.3, pp.781-786, 2007.
- 8) 萩谷浩之, 森下政治, 安藤智啓, 田中秀明, 松尾 啓: 数値シミュレーションを用いた鉄筋コンクリート版の爆発損傷の評価, Science and Technology of Energetic

- Materials, Vol.64, No.5, pp.192-200, 2003.9.
- 9) M. Katayama, M. Itoh, S. Tamura, M. Beppu, and T. Ohno: Numerical analysis method for the RC and geological structures subjected to extreme loading by energetic materials, International Journal of Impact Engineering 34, pp.1546-1561, 2007.
- 10) 安藤智啓, 森下政治, 阿曾沼 剛, 松尾 啓: 近接爆発荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの応答に関する三次元数値解析, コンクリート工学論文集, 第 18 巻第 1 号, pp.21-32, 2007.1.
- 11) 安藤智啓, 齋藤和伸: 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.
- 12) 安藤智啓, 齋藤和伸: 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.
- 13) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4.
- 14) 岸 徳光, 安藤智啓, 井元勝慶, 河西良幸, 香月 智, 上林厚志, 榎谷 浩: 矩形 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関するラウンドロビンプレアナシリス, 土木学会構造工学論文集 Vol.49, pp.1299-1310, 2003.3.
- 15) 山本満明, 榎谷 浩, 中村桂彦: RC はりの衝撃挙動特性に関する DEM によるパラメトリック解析, 土木学会構造工学論文集 Vol.51A, pp.1635-1644, 2005.3.
- 16) 岡田慎哉, 岸 徳光, 今野久志, 川瀬良司: RC アーチ構造の衝撃解析応答手法の開発に関する研究, 土木学会構造工学論文集 Vol.53A, pp.1203-1208, 2007.3.
- 17) 玉井宏樹, 園田佳巨, 後藤恵一, 梶田幸秀, 濱本朋久: 桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究, 土木学会構造工学論文集 Vol.53A, pp.1219-1226, 2007.3.
- 18) 安藤智啓, 齋藤和伸: 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講演論文集, pp.171-176, 2006.11.
- 19) 丹羽一邦, 藤掛一典: 鉄筋コンクリート版の衝撃爆破破壊シミュレーション, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.171-174, 2004.11.
- 20) Autodyn. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software: Theory Manual, Century Dynamics Limited, 1999.
- 21) 構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会, pp.104, 1993.12.
- 22) 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.

(2007 年 9 月 18 日受付)