

(29) 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

EFFECTS OF MODELING METHODS OF EXPLOSIVE MESH ON RESPONSES OF RC BEAMS SUBJECTED TO BLAST LOADINGS

安藤智啓*, 齋藤和伸**
Tomohiro Ando, Kazunobu Saito

*博 (工) 防衛庁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)
**工修 防衛庁陸上装備研究所 耐弾・耐爆構造研究室 (〒153-8630 東京都目黒区中目黒2-2-1)

キーワード: ラグランジュ要素, オイラー要素, RC はり, 爆発応答解析
(Lagrange mesh, Euler mesh, RC beam, Blast response analysis)

1. はじめに

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) 構造部材に関して爆発応答解析を行う場合、爆薬要素のモデル化としては代表的な方法として2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¹⁾。

丹羽ら²⁾は、RC 版の表面に接触した状態で爆薬が爆発した場合の RC 版に生じるクレータおよびスポールの直径に着目して、爆薬を Lagrange 要素と Euler 要素でモデル化した場合の数値解析を行い、両解析結果の比較を行っている。結果としては、接触爆発条件においては、両解析結果の有意な差異はあまり見られなかったようである。しかしながら、丹羽らの研究は、爆薬の爆発後の RC 版の損傷状況に着目したものであり、部材の応答に関して検討したものではない。

本研究では、同じくコンクリート構造の基本部材である RC はりに着目し、爆薬を Lagrange 要素と Euler 要素によりモデル化した場合に、これら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について検討を

行った。解析対象には著者ら³⁾の既往の爆発実験のうち、上述した丹羽らの爆発条件に近い極近接爆発条件での実験の一つを選んだ。また、上述の検討は、この実験結果と比較する形で行った。なお、本数値解析には陽解法に基づく衝撃応答解析用汎用コード Autodyn-2D/3D(Ver. 4.3)⁴⁾を用い、計算機には hp 社の workstation xw8000 (CPU: 3.06 GHz) を用いた。

2. 実験概要

2.1 RC はりおよび爆薬

図-1に、本爆発実験に用いた RC はりの形状寸法を示す。RC はりは、断面が 150×250 mm、長さが 2.4 m の複鉄筋矩形はりである。軸方向鉄筋には D22 を採用し、上面および下面のかぶり 50 mm となる位置に配筋した。せん断補強筋には D6 を採用し、100 mm ピッチに配筋した。表-1および表-2に、コンクリートと鉄筋の力学的特性値を示す。

図-2に、本実験に用いたペントライト爆薬の形状寸法を示す。ここで、ペントライト爆薬とは、トリニトロトルエン爆薬とペンスリッド爆薬を質量比で50%ずつ混合した爆薬である。爆薬の形状は直径と高さの等しい円

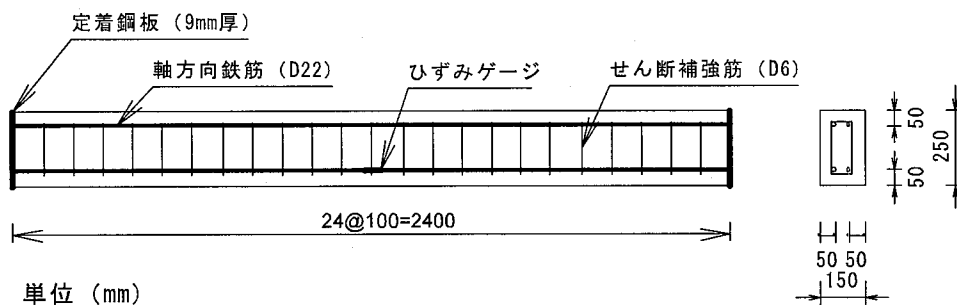


図-1 RC はりの形状寸法

表-1 コンクリートの力学的特性値

| | | | |
|---------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| 圧縮強度 f_c (MPa) | 弾性係数 E_c (GPa) | ポアソン比 ν_c | 密度 ρ_c (g/cm ³) |
| 24.7 | 22.2 | 0.163 | 2.334 |

表-2 鉄筋の力学的特性値

| 呼び径 | 規格 | 降伏強度 σ_y (MPa) | 引張強度 σ_u (MPa) | 弾性係数 E_s (GPa) | ポアソン比 ν_s | 密度 ρ_s (g/cm ³) |
|-----|--------|--------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| D22 | SD345 | 385 | 566 | 206 | 0.3 | 7.85 |
| D6 | SD295A | 394 | 543 | | | |

表-3 ペントライト爆薬の材料特性値

| 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) | 密度 ρ_c (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 | 1.62×10^{-3} | 5.41×10^5 | 9.37×10^3 | 4.50 | 1.10 | 0.35 |

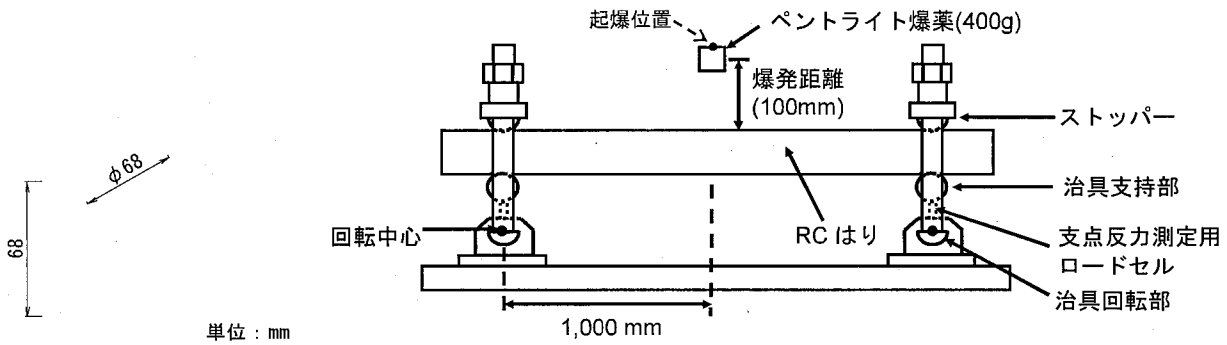


図-2 爆薬の形状寸法

図-3 RC はりの設置状況

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。

2.2 実験方法

図-3にRCはりの設置状況を、写真-1に爆発実験の状況を示す。実験は、内径が約8mの鉄筋コンクリート造のドーム状施設内で行った。爆薬は、RCはりのスパンおよび幅方向中心の爆発距離100mm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。ここで爆発距離は、爆薬の中心からはり上面までの距離とした。最終的には、爆薬は電気雷管を用いて爆薬の上面中心から起爆させた。一方、RCはりは、はりの跳ね上がり防止用のストッパーを備えた鋼製の支点治具の支持部上に設置した。支点間は2mである。治具全体は単純支持に近い構造となっている。また、支点治具には支点反力波形を計測するために、片側に3個ずつロードセル(容量: 250 kN/個, 最大応答周波数: 2.4 kHz) が組み込まれている。

爆発実験時には、上述した支点反力波形および軸方向下側鉄筋片側のスパン中央部のひずみ波形(ひずみゲージの貼付位置は図-1参照)を計測した。なお、本ひず

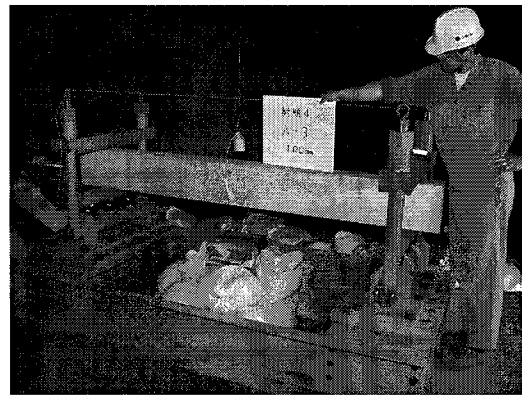
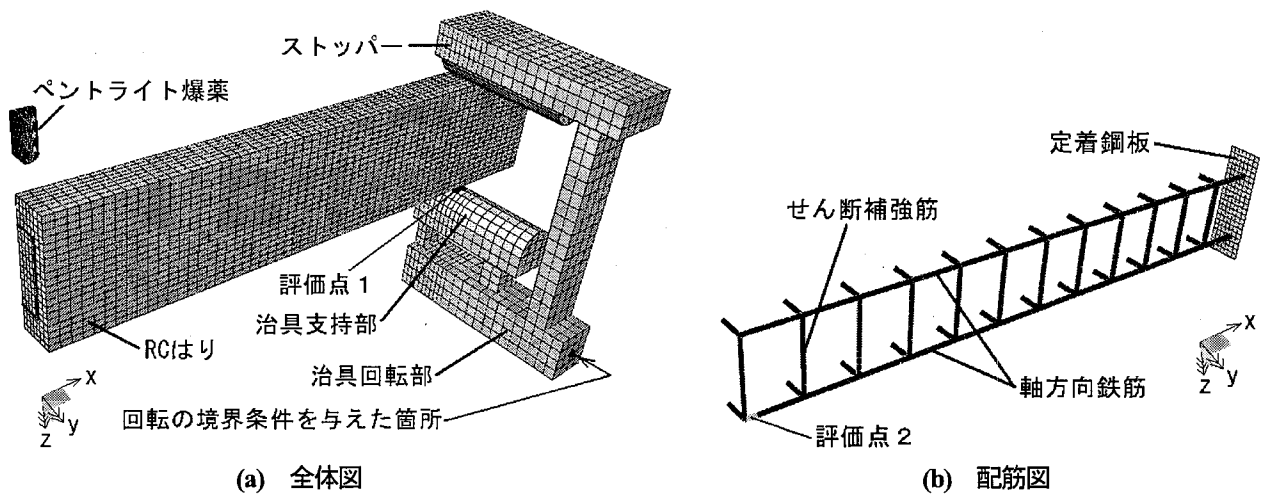
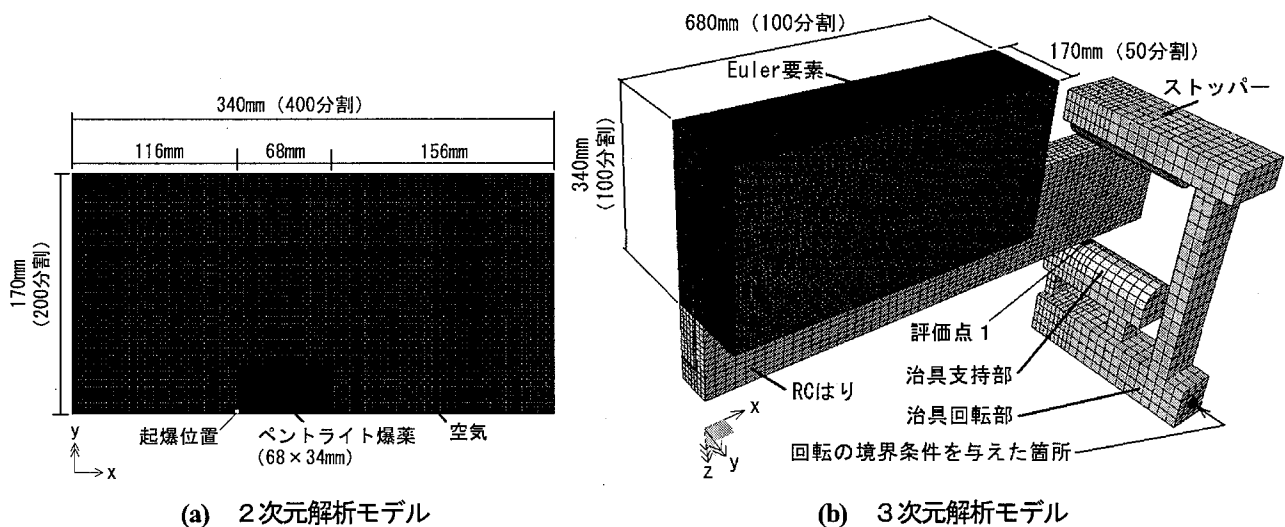


写真-1 爆発実験の状況

みゲージ(ゲージ長: 5 mm)の貼付方法は、通常衝撃実験で用いられる方法と同様であり、専用の接着剤を用いてひずみゲージを鉄筋に貼付した後、ゲージ全体に防水処置を施すものである。また、リード線には、ノイズが励起されにくくかつ防水性の高いケーブルを使用している。アンプおよび記録装置には、それぞれKYOWA CDV-700(最大応答周波数: 500 kHz)およびNicolet MultiPro(最大応答周波数: 400 kHz)を用いた。データのサンプリングタイムは5 μ sとした。また、実験終了後には、RCはりの剥落(スポール破壊)およびひび割れ発生



(a) 全体図 (b) 配筋図
 図-4 爆薬を Lagrange 要素でモデル化した場合の3次元解析モデル



(a) 2次元解析モデル (b) 3次元解析モデル
 図-5 爆薬を Euler 要素でモデル化した場合の解析モデル

状況を記録した。その他詳細は文献3)に譲る。

3. 解析概要

3.1 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。なお、計算時間の短縮のため、爆薬要素は爆発によるエネルギーが十分にコンクリート要素に伝達されたとみなされる時間で削除した。これは、後述の爆薬を Euler 要素でモデル化する場合の3次元解析でも同様である。

一方、爆薬を Euler 要素でモデル化する場合には、片山ら¹⁾を参考に、最初に爆薬と周囲の空気を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対象である RC はりの上面位置に対応する距離に達する直前で解析を終了させ、この物理的状態を3次元座標にリマップした後、3次元解析コードを用いて爆発応答

解析を行った。

3.2 解析モデル

図-4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。ここでは、対称性を考慮して全体の1/4をモデル化した。これは、後述の爆薬を Euler 要素でモデル化する場合の3次元解析モデルでも同様である。爆薬は solid 要素でモデル化し、その分割は RC 版の接触爆発問題に関する既報⁵⁾の数値解析にならって、高さ方向に20分割、半径方向に10分割とした。また、コンクリートおよび支点治具も 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。なお、鉄筋とコンクリートおよび定着鋼板とコンクリートの節点は完全付着を仮定した。モデル全体の要素数は12,274である。

図-5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。モデル化の

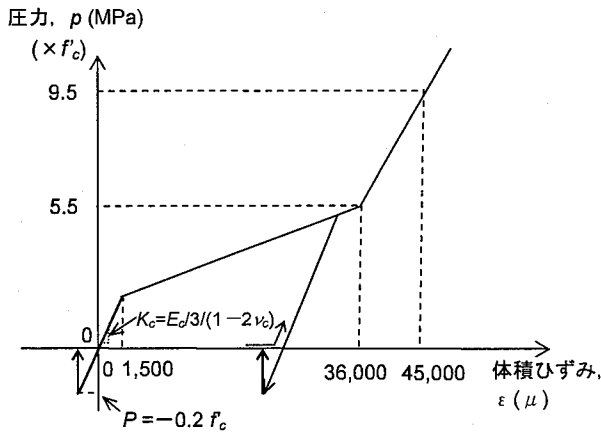


図-6 コンクリートの圧力-体積ひずみ関係

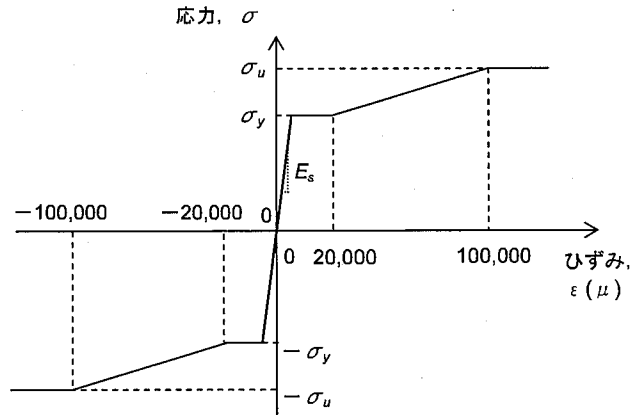


図-7 鉄筋の応力-ひずみ関係

範囲は、爆薬の各辺からの距離が本解析対象の爆発距離 (= 100 mm) より大きい領域とし、x, y 方向の長さの比は爆薬の場合に一致させた。モデル全体の分割は、分割数が発生する爆轟圧力の分布性状に与える影響に関して事前に検討した結果を基に、この影響がほとんどなくなる 400×200 分割とした。

(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。Euler 要素のモデル化の範囲は、y, z 方向については2次元解析の場合と同じとした。x 方向については、局所的な破壊がはりスパン中央部のみに卓越した爆発実験³⁾の結果に鑑みて、支点間の2/3程度とした。Euler 要素の端面には、無反射境界条件を与えた。リマップ後は、この Euler 要素に2次元解析で得られた物理的状態を投影している。なお、3次元の場合には2次元の場合と同じ要素サイズで Euler 要素を分割すると1千万要素以上になる。そのため、本計算機の計算処理能力では解析が不可能となることより、3次元の要素サイズは2次元の場合より y, z 方向に対しては4倍、z 方向に対しては8倍粗くした。RC はりおよび支点治具については、図-4に同じである。この場合のモデル全体の要素数は510,274である。

粘性減衰定数については、爆薬要素のモデル化の方法によらず、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、はりの自重もここでは考慮していない。解析時間は爆薬の起爆時から40 msまでとした。

実験波形と比較するための評価点は、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-4, 5の評価点1)と鉄筋の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-4評価点2)に与えた。

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⁴⁾を用いた。

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

ここで、Pは圧力、Qは内部エネルギー、A, B, R₁, R₂, 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、η = ρ/ρ_{ref}である。本爆薬に対するJWLの状態方程式中の材料定数、数値解析に必要となるC-J爆轟速度、C-J圧力等を表-3に示す。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1.225×10⁻³ g/cm³の理想気体とした。

コンクリート要素の圧力-体積ひずみ関係は、爆発問題の場合には爆発荷重を受けるコンクリートが高圧力状態に至るとの報告⁹⁾もあることから、森下ら⁷⁾の高圧3軸圧縮試験の結果を参考に図-6に示すような単純なトリリニア型に与えた。除荷勾配は初期勾配と同じとした。また、引張側については、圧力が圧縮側の初期勾配と同勾配で線形に増加した後、引張破壊域に達した段階でコンクリート要素が破壊に至るものと仮定した。そして、同要素の剛性は零となり圧力も零圧力まで除荷されるものと仮定した。なお、PにはP = -0.2f_cを与えた。一方、降伏条件は、重錘落下衝撃問題に対して解析精度の検討を行った文献⁸⁾において、その検討の基本として採用した条件にならない von Mises 条件を採用した。なお、降伏応力は、圧縮強度f_c = 24.7 MPaに等しいと仮定した。

鉄筋要素の材料モデルには、一般的な鋼材の応力-ひずみ関係^{9), 10)}を参考に図-7に示すような多直線で近似した。降伏の判定には von Mises 条件を用いた。なお、重錘要素、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。

4. 解析結果

4.1 支点反力波形

図-8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いる。また、時間軸は、波形が見やすくなるように30 msに拡大して示している。図より、両解析の支点反力波形の波形性状はお互い非常に良く一致していることが分かる。すなわち、両波形は約1 msで立ち上

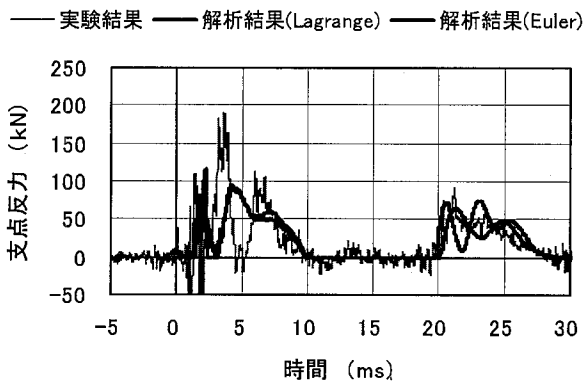


図-8 支点反力波形の比較

がり最大応答値を示した後一旦除荷し、約3msで再び立ち上がり最大応答値程度の値を示した後約10msで零レベルに至っている(第1波)。そして、両者とも20ms以降に再び継続時間が8ms程度の波形が励起されている(第2波)。この第2波は、支点治具の治具支持部に対して、RCはりが正載荷状態に至った後一旦荷重の開放状態に移行し、その後再び正載荷状態となった際に生じたものと推察される。

実験結果と比較すると、解析結果の第1波のピーク値が実験結果より小さく示されていることが認められる。しかしながら、第1波と第2波の立ち上がり時間およびそれぞれの波形継続時間、第2波のピーク値については、解析結果は実験結果と良く対応しており、全体的には実験結果を比較的良く模擬しているものと考えられる。

4.2 ひずみ波形

図-9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40msまで取って整理している。図より、ここでも両解析のひずみ波形の波形性状はお互い非常に良く一致していることが分かる。すなわち、両波形は爆発直後に急激に立ち上がり鋸歯状に増減を繰り返した後に、支点反力波形の第1波の継続時間とほぼ同じ周期で徐々に減少し、それに続く振動状態に移行している。

実験結果と比較すると、解析結果の引張側の振幅が実験結果より若干小さく示されているものの、波形形状や振動周期は実験結果に良く対応しており、全体的には解析結果は実験結果を比較的良く模擬しているものと考えられる。

4.3 RCはりの破壊状況

図-10および図-11には、RCはりの破壊状況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零応力に至った破壊要素を自動的に表示させる機能⁴⁾を用い

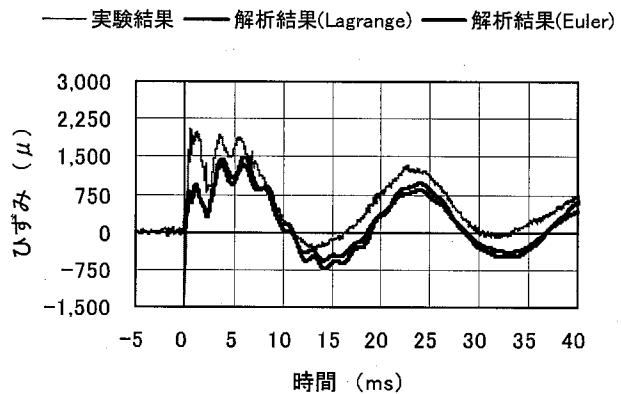


図-9 ひずみ波形の比較

て示している。図中、灰黒色部分が破壊要素を、その他が弾性要素を示しており、破壊要素にはひび割れやスポール破壊が生じているものと推察される。なお、解析結果は、ひび割れ分布がほとんど変化しなくなる時間(爆発後約6ms)で示している。また、実験結果と比較しやすくするため鏡面展開した全体表示で示している。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およびスポール破壊をそれぞれ実線と斜線領域で強調して示している。

図-10より、両解析結果のひび割れは、いずれもスパン中央部に顕在化していることが分かる。爆薬をEuler要素でモデル化した場合が若干顕在化の度合いが小さいものの、ひび割れの発生箇所および分布性状は大略同様であるものと考えられる。実験結果と比較すると、スパン中央部にひび割れが顕在化している性状や、スパン中央上面部のコンクリートに凹みが見られること等の性状が実験結果に良く対応していると考えられる。

図-11より、両解析結果のスパン中央上面部のコンクリート要素が大きくはり幅方向に張り出しており、両者同様の性状を呈していることが分かる。これは実験結果に照らしてコンクリートがスポール破壊したことに対応していると考えられ、コンクリート要素を連続体によりモデル化する本解析方法の場合にも、実験で生じるこのような局所的な破壊の発生が予測可能であることを示している。なお、本RCはりは静的載荷時には曲げ型で破壊するよう設計されたはり³⁾であるが、本結果よりこのようなはりも至近距離で爆発荷重を受ける場合には極めて局所的に破壊するとの知見も得られた。この局部破壊のメカニズムについては文献³⁾に詳細を述べている。

5. まとめ

本研究では、コンクリート構造の基本部材であるRCはりに着目し、爆薬をLagrange要素とEuler要素によりモデル化した場合に、これら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について検討を行った。

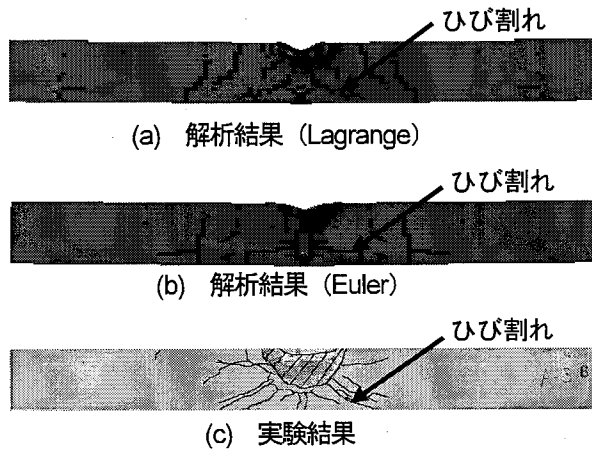


図-10 RCはり側面の破壊状況の比較

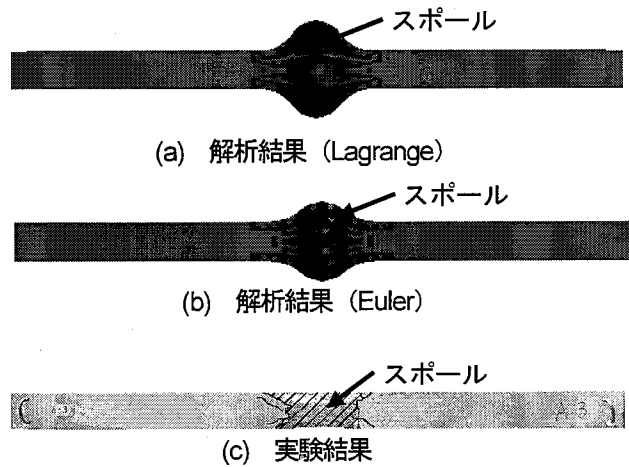


図-11 RCはり上面の破壊状況の比較

本研究の範囲内で得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 極近接爆発条件では、爆薬を Lagrange 要素と Euler 要素によりモデル化した場合に、これらのモデル化が RC はりの応答に与える影響はほとんどない。
- (2) 爆薬要素のモデル化の方法によらず、仮定した比較的簡易な材料モデルを用いることにより、RC はりの応答が比較的良く模擬できる。

今後は、爆発距離がさらに大きい場合や、鉄筋コンクリート造の基本構造部材のみならず、多部材から構成される実 RC 構造物により近い場合についても同様な検討を行っていきたいと考えている。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたり、防衛庁技術研究本部先進技術推進センター研究管理官（先進技術担当）の山口弘氏、同技術研究本部技術企画部企画課の森下政浩氏および経済産業省貿易経済協力局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) 片山雅英, 伊藤雅晴, 田中茂之, 別府万寿博, 大野友則: 爆薬の空中爆発に伴う鉄筋コンクリート構造物の損傷に関する数値解析, 平成 15 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 耐衝撃波研究会・宇宙科学研究所・流体科学研究所, pp. 215-218, 2004.3.
- 2) 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論文集, pp. 171-174, 2004.11.

- 3) 安藤智啓, 阿曾沼剛, 森下政浩, 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.
- 4) Autodyn. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software: Theory Manual, Century Dynamics Limited, 1999.
- 5) 萩谷浩之, 森下政浩, 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.
- 6) N. Gebbeken, S. Greulich, A. Pietzsch: Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests, International Journal of Impact Engineering 32, pp.2017-2031, 2006.
- 7) 森下政浩, 阿曾沼剛: 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.
- 8) 構造工学シリーズ 15: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 土木学会, pp.219-242, 2004.3.
- 9) 小阪義夫, 森田司郎: 鉄筋コンクリート構造, 丸善株式会社, pp. 46, 1975.12.
- 10) Edward J. Conrath, Ted Krauthammer, Kirk A. Marchand, and Paul F.: STRUCTURAL DESIGN FOR PHYSICAL SECURITY, State of the Practice, ASCE, pp. 3-25, 1999.