

# RBSM による高速衝突を受ける鉄筋コンクリート部材の 局部破壊シミュレーション

Simulation of local failure behaviors of reinforced concrete members subjected to high velocity impact by RBSM

山本佳士<sup>†</sup>, 岡崎宗一郎\*, 別府万寿博\*\*, 中村光\*\*\*, 三浦泰人\*\*\*\*

Yoshihito Yamamoto, Soichiro Okazaki, Masuhiro Beppu, Hikaru Nakamura, Taito Miura

<sup>†</sup>博(工), 名古屋大学大学院准教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*名古屋大学大学院, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*博(工), 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*博(工), 名古屋大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*博(工), 名古屋大学大学院助教, 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*Key Words: RBSM, high velocity impact, local failure, concrete member*

キーワード: RBSM, 高速衝突, 局部破壊, 鉄筋コンクリート部材

## 1. はじめに

衝突を受けるコンクリート部材は, 物体の衝突条件と部材諸元の相違によって, 曲げ, せん断などの全体破壊および局部破壊が生じることが知られている. このうち局部破壊は, 貫入, 表面破壊, 裏面剥離及び貫通の4つの破壊モードに分類される. 局部破壊のうち, 裏面剥離および貫通は, 構造物内部の人命, 機材に多大な被害を及ぼすため, 防がなくてはならない破壊形態である. しかしながら, コンクリートの局部破壊発生メカニズムは未解明な点が多い. メカニズムの解明のためには, 衝突条件に応じて変化するコンクリート内部の応力伝播性状, および変形, ひび割れの進展性状までを精度良く再現できるシミュレーションモデルの確立が必要である.

本研究では, 著者らが開発している, コンクリートのひび割れ, ひび割れ面せん断伝達や, コンクリートの解析技術の現状では困難な, 圧縮軟化・局所化挙動および拘束圧依存性挙動を定量的に再現可能な RBSM を用いて, 高速衝突を受ける鉄筋コンクリート板, およびはりの局部破壊シミュレーションを試みる. 特に, コンクリート板のシミュレーションでは, 特に影響が大きかったパラメータの感度解析結果の一例を示す. 鉄筋コンクリートはりのシミュレーションでは, 実験において高速カメラで観察された表面のひび割れ進展過程を比較することにより提案モデルの発生時間, 進展速度を含むひび割れ進展過程の再現性を検証する.

## 2. 解析手法

### 2.1 RBSM

本研究では, Voronoi 分割を用いたランダム要素形状を有する3次元RBSMによりコンクリートをモデル化した. RBSMでは, 図-1に示すように各剛体要素の重心に並進変位3, 回転変位3の計6自由度を設定し, 要素境界面上には, 表面力の評価点として積分点を設定する. 積分点には, コンクリートの圧縮・引張挙動を表現する垂直バネ, およびせん断すべり挙動を表現するせん断バネを配置した(3次元解析では, 垂直バネが1個, せん断バネが2個). バネの構成モデルには, 次節に示す山本ら<sup>1)</sup>によって提案されているコンクリートの圧縮軟化・局所化挙動および拘束圧依存性を定量的に再現できる構成モデルを用いた. RBSMにより離散化された運動方程式の時間方向積分は, 中心差分法を用いて陽的に行った. また, 減衰は簡単のため考慮していない. また, 鉄筋のモデル化に関しては紙面の都合上, 例えば文献1)を参照されたい.

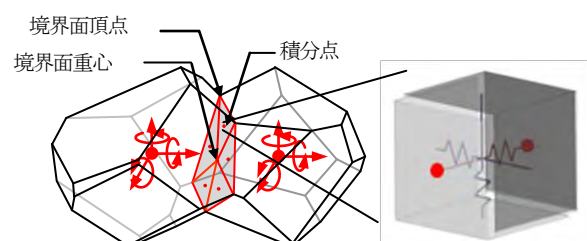
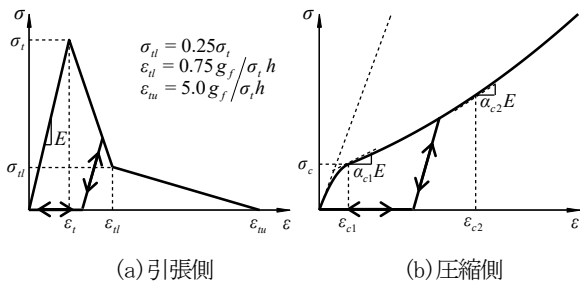


図-1 RBSM の2要素間力学モデル



(a) 引張側 (b) 圧縮側  
図-2 垂直バネの構成モデル

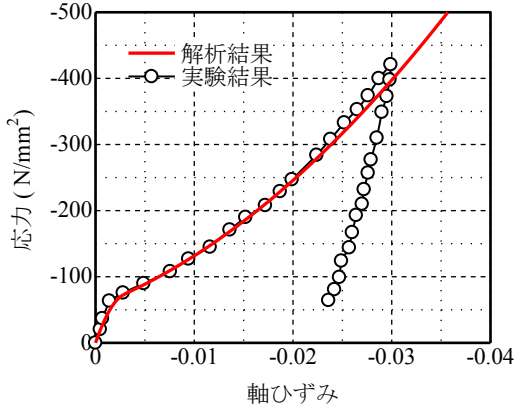
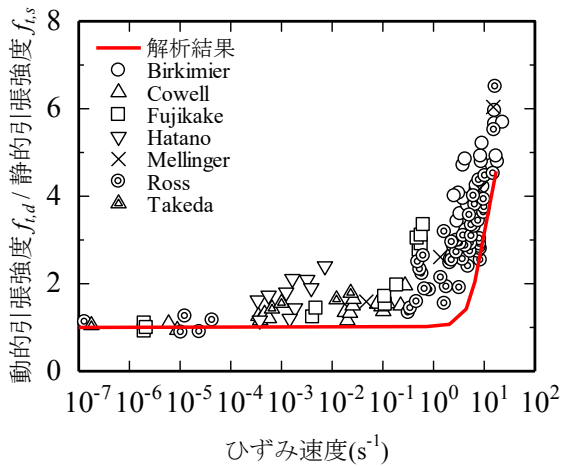
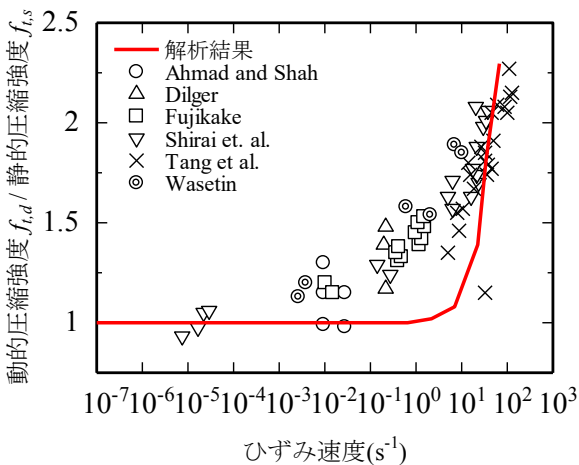


図-3 静水圧圧縮応答<sup>5)</sup> ( $f'_c = 48.4\text{MPa}$ )



(a) 引張強度



(b) 圧縮強度

図-4 動的応答倍率

## 2.2 バネの構成モデル

コンクリートの引張挙動は図-2(a)に示すように応力が引張強度に達するまでは弾性とし、その後は破壊エネルギーによって軟化勾配を変化させる1/4モデルに従って応力を低減させた。圧縮挙動に関しては、図-2(b)に示すように、圧縮強度を境にした2つの2次関数を用いた逆S字曲線でモデル化した。ここで、コンクリートは静水圧応力下において、図-3のような応力-ひずみ応答を示すことが知られている<sup>1)</sup>。図中の赤線は、提案モデルにより得られた解析結果<sup>1)</sup>であり、実験結果を再現できていることが分かる。静水圧応力下では、体積膨張は生じず、垂直バネの引張破壊とせん断バネのすべり軟化が生じないため、垂直バネの圧縮バネの応答がそのまま巨視的応答として反映される。このため、提案モデルでは、図-2(b)のような曲線を採用している。一方、以降で示すように、本研究で対象とした高速衝突実験では、図-3の範囲を超える高い静水圧圧縮状態が生じている可能性があり、また、以降で示すように同実験を再現するためには、図-3の範囲を超える領域において垂直バネの圧縮側に限界値を設定する必要がある。その感度解析の詳細は、3.3で説明するが、本研究では、文献1)で提案した垂直バネの圧縮側の構成モデルを、以下のように一部修正した。すなわち、垂直バネの圧縮応力が、コンクリート圧縮強度の10倍に達した後は、弾性係数Eの1/50の勾配で直線的に増加していくものと仮定した。

せん断バネは、せん断強度の算定にモール・クーロン型の破壊基準を適用し、垂直バネの応力およびせん断ひずみに応じて勾配を変化させながら軟化するモデルを適用した<sup>1)</sup>。

各バネの材料パラメータには、文献1)においてキャリブレーションして決定した値を適用した。上記の材料パラメータを用い、さらに10mmから30mm程度の要素寸法を用いることで、1軸引張、1軸圧縮、静水圧圧縮および3軸圧縮応力下の軟化・局所化挙動、体積膨張挙動を含むマクロな応力-ひずみ応答を再現できる。

また、提案モデルでは、構成モデルに直接ひずみ速度依存性を導入していないが、マクロな引張強度および圧縮挙動のひずみ速度効果を再現することができる。図-4に提案モデルを用いた解析および既往の実験<sup>2),3),4)</sup>により得られた引張強度および圧縮強度の動的応答倍率とひずみ速度の関係を示す<sup>5)</sup>。解析結果は、要素寸法10mmで作成した、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体の解析モデルに対して高速1軸引張・圧縮載荷解析を行って得られたものである。図より、解析では、引張強度および圧縮強度とともに、1.0/sより小さいひずみ速度域では、動的応答倍率は1.0であるが、1.0/sより大きい領域では、ひずみ速度が増加するにつれ動的応答倍率が増加していることが分かる。提案モデルによる、ひずみ速度効果の発現メカニズムについては、圧縮強度の場合には、慣性力による拘束効果によるものと考えられる。引張強

度のひずみ速度効果の発現メカニズムは、静的載荷時においては、Voronoi 多面体によるランダム要素配列の中で最弱の断面（凹凸の比較的小さい断面）で破壊するのに対し、高速載荷時には、静的載荷時と異なる断面で破断することなどが考えられる。本研究で対象とする、別府ら<sup>6)</sup>によって行われたコンクリート板およびはり的高速衝突実験では、ひずみゲージを用いて、コンクリートのひずみおよびひずみ速度を計測している。そこでは概ねひずみ速度が  $10^1 \sim 10^2/s$  の領域で生じていることを明らかにしている。図-4より、解析は、ひずみ速度  $10^1/s$  付近ではひずみ速度の増加に伴う引張強度の動的応答倍率の増加傾向を概ね再現しており、また、圧縮強度の動的応答倍率においても、実験結果のばらつきを考慮すれば、本研究で対象とするひずみ速度  $10^1 \sim 10^2/s$  の領域においては妥当な応答を示している。

### 3. 高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊解析

#### 3.1 実験概要<sup>6)</sup>

写真-1に、実験で用いた飛翔体を示す。飛翔体の質量は50g、材質は鋼材(SS400)であり、先端形状は半球型、直径は25mmである。飛翔体はナイロン製の固定具に装着し、高压空気式飛翔体発射装置を用いて、所定の速度で発射する。本研究で対象としたコンクリート供試体の寸法は、縦500mm、横500mm、厚さ80mmであり、コンクリートの圧縮強度の平均値は  $25.8N/mm^2$  である。また、供試体搬送中の損傷を防ぐため、D6異形鉄筋が板周囲に配置されている。

#### 3.2 解析モデル

図-5にコンクリート板の解析モデルを、図-6に剛飛翔体のモデルを示す。要素寸法は、計算負荷を考慮した上で、実験で観察されている、飛翔体とコンクリート板の接触部の局所的な変形状（写真-2）の再現性をできるだけ高めることを目的として以下のように設定した。すなわち、図-5に示すように、接触点近傍では要素の特性長さが約2mm、さらにそこから端部に近づくにつれて要素寸法は徐々に大きくなり、最大で要素特性長さが約20mmになるように設定した。剛飛翔体は、RBSM要素との接触判定を簡易に、かつできるだけ高い精度で表現するために、図のように441要素の球形要素でモデル化した。ただし、計算負荷の軽減のために、大きな球形要素の表面に配置した小型の球形要素は、接触判定の評価に用いるだけで自由度を持っていない。すなわち、大きな球形要素との相対位置は変えず、一体となって変位するように設定している。

#### 3.3 各種解析パラメータの感度

事前の検討解析により、提案モデルにより得られる剛飛翔体の高速衝突解析の結果は、1)垂直バネの圧縮側構

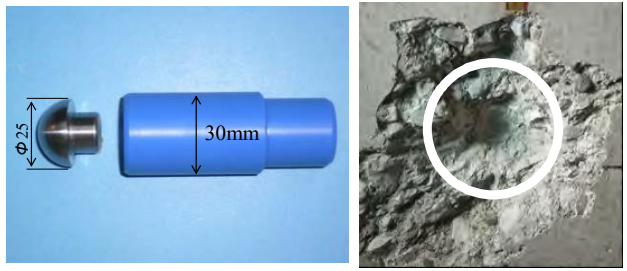


写真-1 飛翔体および固定具 写真-2 衝突部の貫入痕<sup>6)</sup>

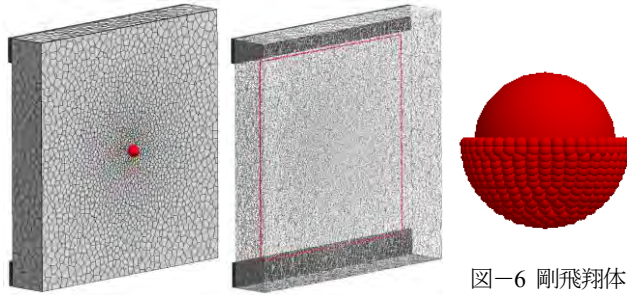
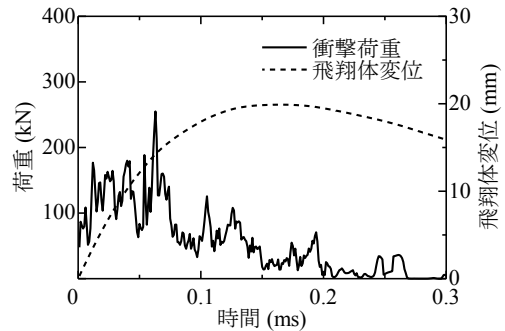
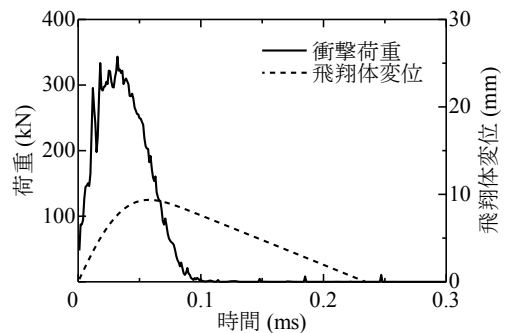


図-5 解析モデル

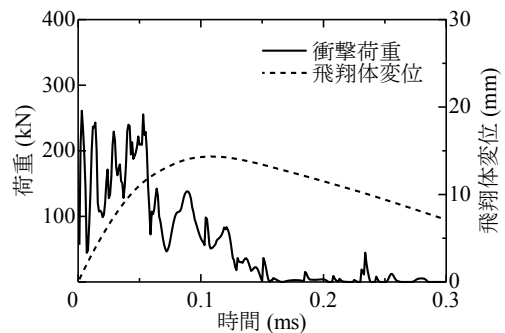
図-6 剛飛翔体モデル



(a) 標準モデル



(b) モデルA



(c) モデルB

図-7 衝撃荷重および貫入深さの時刻歴 (300m/s)

成モデルの感度が大きいことおよび 2) 参考文献 2) で示した静的荷重解析と比較して、要素寸法の感度が大きいことを確認した。ここでは、上記 2つの条件を変化させた解析結果を示す。すなわち、前述の提案モデルを標準モデルとして、本研究で新たに導入した垂直バネの圧縮側の頭打ちを導入しないモデル（以下、モデル A）および衝突点近傍の要素特性長さを、標準モデルの約 2mm から約 5mm と粗く設定したモデル（以下、モデル B）の解析結果を示す。なお、いずれも衝突速度は 300m/s のケースである。

図-7(a)および(b)に標準モデルおよびモデル A の解析により得られた衝撃荷重の時刻歴応答および飛翔体変

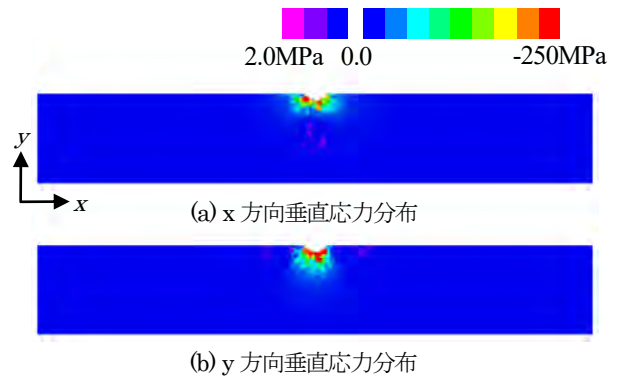


図-8 衝突点近傍の応力分布 (300m/s, 0.02ms 時)

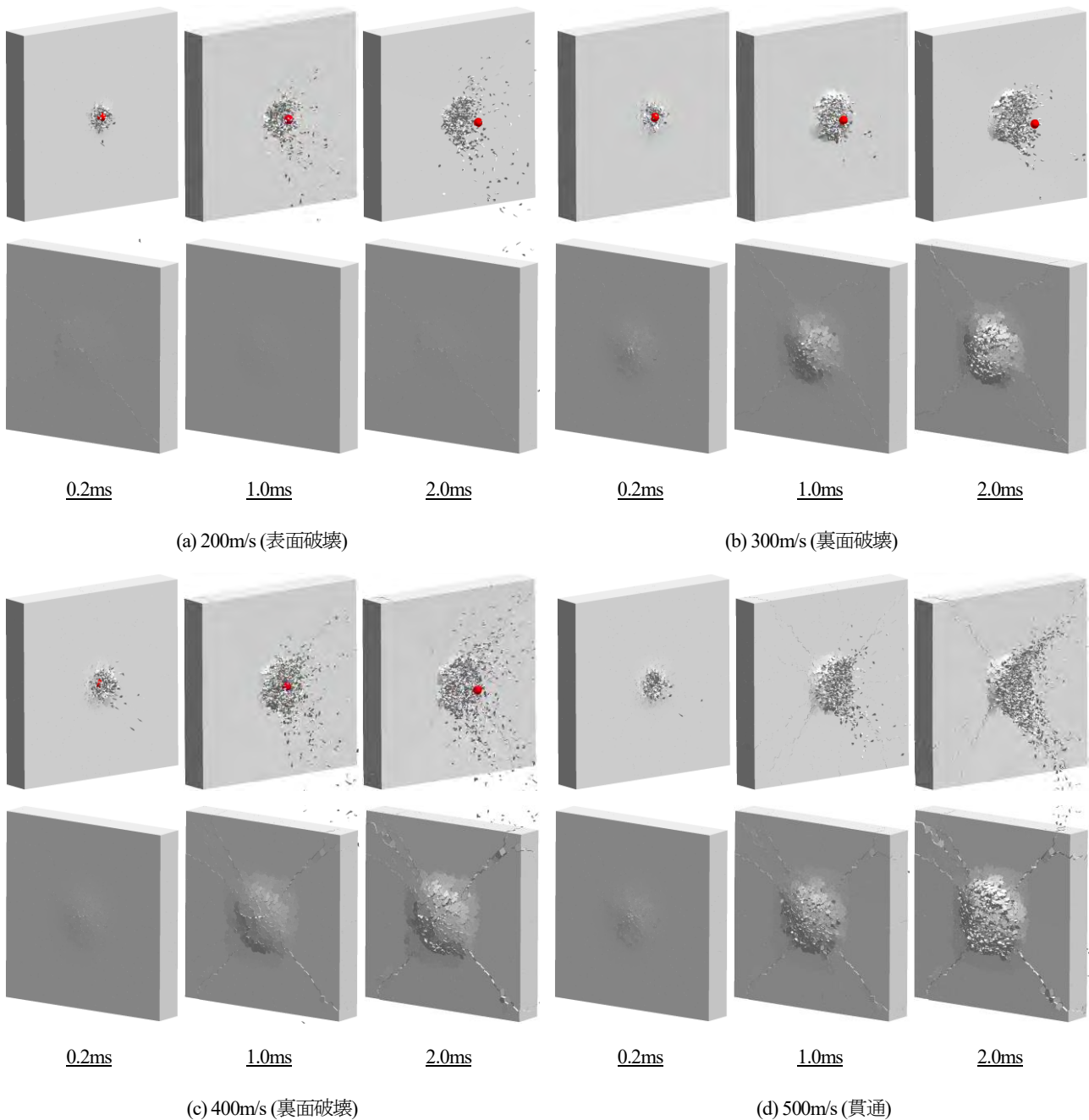


図-9 変形状

位の時刻歴応答を示す。衝撃荷重の最大値は、モデル A の場合 343kN であった。一方、標準モデルの場合、一時、急激に衝撃荷重が増加する 0.063msec 時点で衝撃荷重は最大値 255kN に達しており、その点を除くと、衝撃荷重の最大値は 0.054msec 時点の 188kN であった。以上のことより、垂直バネの圧縮側の構成モデルが剛飛翔体の衝突時に発生する衝撃荷重に与える影響は大きいことが分かる。また、モデル A の解析により得られる飛翔体の貫入量は、標準モデルと比較して小さく、衝突体の速度の方向が反転する時間は、モデル A では 0.058msec、標準モデルでは 0.108msec であり、モデル A の方が早い時点で跳ね返っていることが分かる。図-7(c)にモデル B の解析により得られた衝撃荷重の時刻歴応答および飛翔体変位の時刻歴応答を示す。図より、標準モデルと比較して、衝突直後の衝撃荷重が大きくなり、飛翔体変位の貫入量は小さくなっていることが確認できる。なお、衝撃荷重および飛翔体の変位の時刻歴応答は計測が困難であるため実験結果は得られていない。したがって、衝撃荷重および飛翔体変位の時刻歴応答に関しては、その再現性を検証することは難しいが、参考として、三輪ら<sup>7)</sup>が提案している理論モデルによって算定された最大衝撃荷重は同一条件のケースで 120kN であり、また同様に三輪らによって行われた衝撃解析コード AUTODYN を用いた解析<sup>7)</sup>では、同一条件のケースで、最大衝撃荷重は 145kN 程度（解析により得られた衝撃荷重の時刻歴応答に対して移動平均処理を施した波形から算出した値）生じている。標準モデルおよびモデル B の解析結果は、移動平均処理を施していないためそのまま比較することはできないが、モデル A の解析結果と比較すると、三輪らによる理論モデルおよび数値解析による算定結果により近い値を示している。

図-8 に、標準モデルの解析により得られた、飛翔体の衝突直後(0.02ms 後)の垂直応力分布を示す。図より、解析では、圧縮強度の 10 倍以上の垂直応力が、図の鉛直方向だけでなく、水平方向にも生じていることが確認できる。すなわち、衝突点近傍は非常に高い静水圧圧縮状態にあり、著しい圧縮強度の増加と圧縮塑性ひずみの進展が生じているものと考えられる。なお、実験においても、剛飛翔体の先端形状そのままに、コンクリートが半球状にへこんでいる衝突痕が確認されている<sup>6)</sup> (写真-2)。このような、半球状のへこみ、すなわち大きな圧縮塑性ひずみは、前述の解析により得られた、高い静水圧圧縮状態、圧縮強度の増加を示唆するもので、そこで吸収されるエネルギー量は、大きいものと推測できる。ここで検証した 2 つの解析条件は、両者とも衝突点近傍で局所的に生じる圧縮応答の再現性に影響を与えるものであり、したがって感度が比較的大きくなったものと考えられる。前述のように、提案モデルは、高静水圧応力下における強度、塑性、軟化変形特性を妥当に再現できることを確認しているが、圧縮強度 10 倍以上の静水

圧領域に対しては、その妥当性を検証していない。今後は、圧縮強度 10 倍以上の静水圧領域の応答を含む衝突点近傍の応答の再現性について詳細に検証する必要があるものと考えられる。

### 3.4 標準モデルによる解析結果と実験結果との比較

図-9 に衝突速度が 200, 300, 400 および 500m/s の場合の標準モデルによる解析により得られた破壊の進展過程を示す。実験では、200m/s で表面破壊、300m/s で裏面破壊、400m/s では裏面破壊にとどまったケースと、最終的に貫通した 2 つのケースが確認されている。解析では 200m/s で表面破壊、300m/s で裏面破壊、400m/s で裏面破壊が生じ、実験では行われていない 500m/s では貫通が生じた。解析は、貫通が発生する衝突速度を若干大きく評価しているものの、概ね各局部破壊の発生限界を評価していることが分かった。

## 4. 高速衝突を受ける鉄筋モルタルはりの局部破壊解析

### 4.1 実験概要<sup>8)</sup>

図-10 に実験供試体を示す。ここでは、コンクリートと比較してばらつきが小さく均質なモルタル供試体を使用している。モルタルの圧縮強度は 23.0N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は、19.4kN/mm<sup>2</sup>となっている。主鉄筋およびせん断補強筋には降伏強度 356.0N/mm<sup>2</sup>の異形鉄筋 D6 を用いる。実験で用いた飛翔体および発射方法は、3. で示したものと同様である。衝突速度は予備実験で裏面剥離もしくは斜めひび割れが発生するように速度を決定しており、200m/s としている。

### 4.2 解析概要

図-11 に解析モデルを示す。計算負荷を低減させるために、要素の特性長さを、衝突点近傍は約 2mm、端部では 12mm となるように勾配を付けてモデル化している。飛翔体も、前章と同様に、DEM を用いてモデル化して



図-10 供試体概要

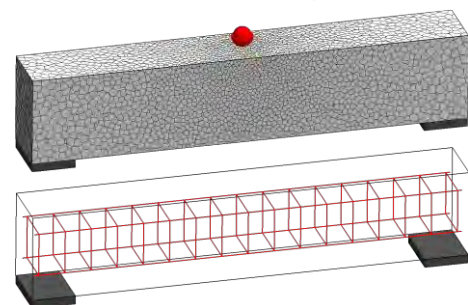


図-11 解析モデル

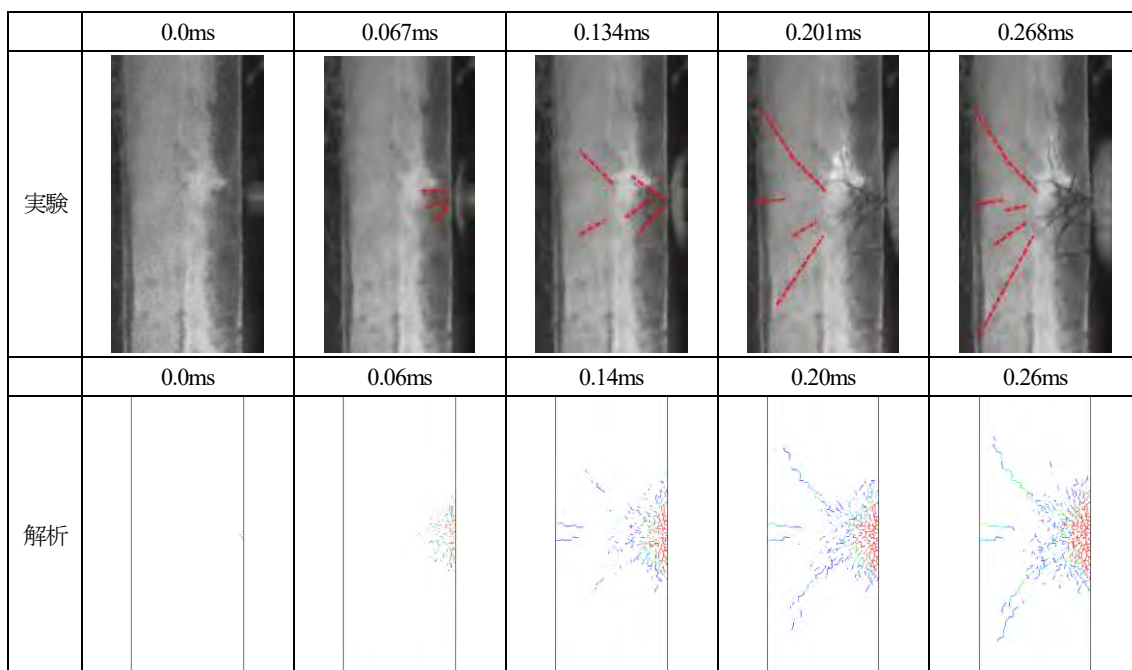


図-12 ひび割れの進展過程

いる。また、図-11 に示すように、供試体下部に RBSM 要素でモデル化した支承板を配置し、実験と同様の境界条件を再現している。

#### 4.3 解析結果および実験結果の比較

図-12 に解析および実験で得られたひび割れ進展過程を示す。実験結果は、高速度ビデオカメラを使用して撮影されたものであり、解析結果は、目視でも確認可能な、幅 0.05mm 以上のひび割れを可視化したものである。図より、解析は、曲げひび割れの発生時間が若干早いものの、斜めひび割れが発生し、進展していく様子を良好に再現できることが分かった。

#### 5. 結論

著者らが提案している RBSM を用いて、高速衝突を受ける RC 版と RC はりを対象にシミュレーションを実施した。結果、RC 版の場合、衝突点近傍で高静水圧状態になるため、強度および靱性が増大するため、高静水圧下の構成モデルの感度は大きくなり、また、衝突体の先端形状のままへこむような大きな塑性変形の再現性に影響を与える要素寸法の感度が大きくなることが分かった。RC 版の破壊性状を概ね再現できる要素寸法と高静水圧応答モデルを用いることで提案モデルは、高速衝突を受ける RC はりの、発生時間および進展速度を含むひび割れ進展性状を概ね再現できることが分かった。

#### 参考文献

1) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明 : 3次元剛体

- バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.64 No. 4, pp. 612-630, 2008.
- 2) 白井孝治, 島村和夫, 賽 晃司, 伊藤 千浩 : コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化—ホプキンソン棒方式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果—, 構造工学論文集, Vol.44A, 土木学会, pp.1793-1804, 1998.
- 3) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤 : 急速一軸圧縮荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 627/V-44, pp. 37-54, 1998.
- 4) Bischoff, P. H. and Perry, S. H. : Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates, Materials and Structures, Vol.24, No.144, pp.425-450, 1991.
- 5) 山本 佳士, 岡崎 宗一郎, 別府 万寿博, 中村 光, 三浦 泰人 : RBSM による高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊挙動評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, 土木学会, pp.945-957, 2015.
- 6) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀 : 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.178-191, 2007.
- 7) 三輪幸治, 別府万寿博, 伊東雅晴, 片山雅英 : 改良理論モデルによるコンクリート板の局部破壊評価法, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.844-858, 2009.
- 8) 柴田大希, 別府万寿博 : 高速衝突を受ける鉄筋補強モルタル梁の局部破壊メカニズムに関する一考察, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, pp.545-548, 2015.