

## (19) RBSM による RC 部材の動的破壊解析

## Dynamic failure analysis of RC beams by RBSM

山本佳士\*, 吉村太郎\*\*, 黒田一郎\*\*\*, 古屋信明\*\*\*\*

Yoshihito Yamamoto, Taro Yoshimura, Ichiro Kuroda, Nobuaki Furuya

\*修(工), 防衛大学校助教, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*防衛大学校理工学研究科, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*博(工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*博(工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: RBSM, RC 梁, ひずみ速度効果, せん断破壊  
(RBSM, RC beam, strain rate effect, shear failure)

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐力および変形性能を精度良く予測するためには、ひび割れの発生およびその進展、鉄筋コンクリート間の付着の劣化、コンクリートの圧壊などの非線形力学挙動を適切にモデル化し、最終的な破壊モードまでを再現する必要がある。コンクリートの構造解析ツールとしては、有限要素法(以下、FEM)が代表的であるが、FEMは連続性を前提とする手法であるため、上記の、変位の不連続性が卓越する現象を表現するためには、未だ多くの課題を残している<sup>1)</sup>。

コンクリートの構造解析手法の一つに、剛体-バネモデル(以下、RBSM)がある。RBSMは対象を剛体要素と要素間のバネで離散化する手法であり、バネに破壊やすべり等の非線形特性を導入することにより、連続体解析手法と比較して容易にコンクリートのひび割れ等の不連続挙動を表現することができる。また、近年ではVoronoi分割を利用したランダムな要素分割手法の導入により、ひび割れの発生と進展の要素分割依存性は改善され、簡単な構成モデルの組み合わせで、コンクリート構造物の耐荷力の評価のみならず、実験で観察されるひ

び割れの分散性や進展状況および部材の破壊モードまでを良好に再現できるようになってきている<sup>2),3)</sup>。

そこで、著者らはRC部材の衝撃解析手法としてRBSMを適用することを考え、その基礎的段階として、高速载荷を受けるRC梁のせん断破壊解析を試みた。本研究では、まず、コンクリートの衝撃問題において影響が顕著になる、ひずみ速度効果のモデル化およびその妥当性の検証を行う。さらに、RC梁の静的せん断破壊挙動を再現できることを示した後に、著者らが行った高速载荷を受けてせん断破壊するRC梁の解析を行い、提案手法の適用性を検証する。

## 2. 解析手法

## 2.1 RBSM

本研究では、ボロノイ分割(図-1)を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSMによりコンクリートをモデル化した。図-2に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に6自由度の3次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、境界面法線方向および接

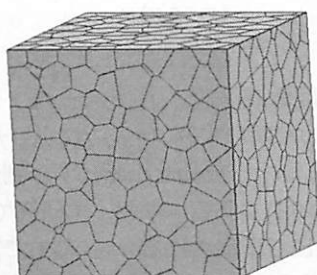


図-1 Voronoi 分割

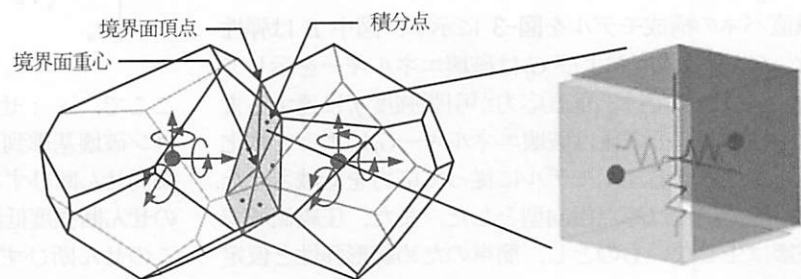


図-2 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

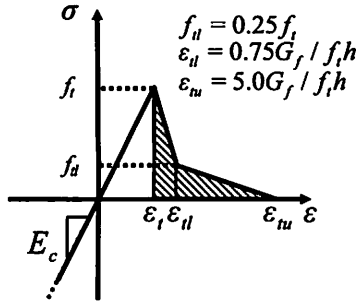


図3 垂直バネのモデル

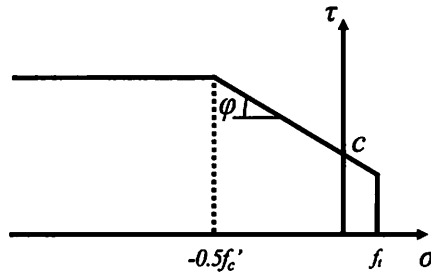


図4 モール・クーロン型の破壊曲面

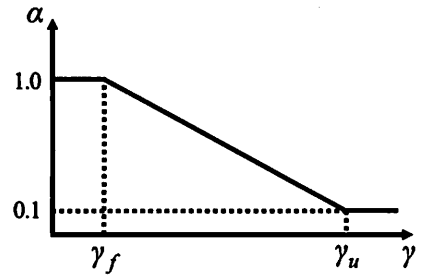


図5 せん断軟化モデル

線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する（垂直バネが1個、せん断バネが2個）。既往のRBSMではこの積分点を境界面の重心に設定しているが、本研究では、図-2に示すように、境界面を、境界面重心と境界面頂点からなる三角形に分割し、その三角形の重心に積分点を設定した。一つの境界面に対し複数の垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置することにより、回転バネを導入することなく、隣接する要素間の曲げモーメントおよびねじりモーメントの伝達を評価でき、さらに、垂直バネおよびせん断バネを導入する非線形挙動が要素間のモーメント-相対回転変位関係に反映されるため、回転バネの非線形性に相当する挙動を簡便に評価できる。

本解析では、静的挙動に対しては、RBSMにより離散化された剛性方程式を解き、材料の構成モデルに従って非線形解析を行う手法を用いている。一方、動的挙動に対しては、RBSMにより離散化された運動方程式を中心差分法を用いて解いた。

## 2.2 コンクリートの構成モデル

コンクリートの材料特性は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動を以下のようにモデル化することで表現した。RBSMにおいて、バネのひずみは積分点において算出される隣接要素の相対変位を特性長さ $h$ で除したものと定義される。ここで特性長さ $h$ とは、隣接する要素 $i, j$ の重心から要素境界面上に下ろした垂線の長さ $h_i$ と $h_j$ の和である。以下では、垂直バネのひずみを $\varepsilon$ 、2個のせん断バネのひずみを $\gamma_l, \gamma_m$ と記し、これらのひずみに対する応力をそれぞれ、 $\sigma, \tau_l, \tau_m$ と記す。

垂直バネの構成モデルを図-3に示す。図中 $E$ は弾性係数、 $f_t$ は引張強度および $G_f$ は破壊エネルギーを示している。引張領域では、垂直応力が引張強度 $f_t$ に達するまでは弾性とし、その後は破壊エネルギー $G_f$ 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。また、除荷過程は原点指向型とした。また、圧縮領域では破壊は生じないものとし、簡単のため線形弾性と仮定した。

本解析手法では、せん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化に際し、次式で表す、合成せん断ひずみ $\gamma$ を定義した。

$$\gamma = \sqrt{\gamma_l^2 + \gamma_m^2} \quad (1)$$

$\gamma$ は設定した構成モデルにより、合成せん断応力 $\tau$ に変換される。合成せん断応力 $\tau$ から $\tau_l$ および $\tau_m$ は次式で算定されると仮定した。

$$\tau_l = \tau \frac{\gamma_l}{\gamma}, \tau_m = \tau \frac{\gamma_m}{\gamma} \quad (2)$$

合成せん断応力-合成せん断ひずみ関係は、せん断強度に達するまでは線形と仮定し、合成せん断応力-合成せん断ひずみ関係の弾性係数 $G$ は垂直バネの弾性係数 $E$ に等しいものとした。せん断強度は、図-4に示すモール・クーロン型の破壊基準を用いて、式(3)で算出されるものと仮定した<sup>2)</sup>。

$$\tau_f = \begin{cases} c - \sigma \tan \phi & (\sigma > -0.5 f_c') \\ c + 0.5 f_c' \tan \phi & (\sigma \leq -0.5 f_c') \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $\tau_f$ ：せん断強度、 $c$ ：粘着力、 $\phi$ ：内部摩擦角、である。また、図-5および式(4)に示すせん断強度低減係数 $\alpha$ を導入し、せん断バネの軟化をモデル化した。

$$\alpha = \begin{cases} 1.0 & (\gamma \leq \gamma_f) \\ 1.0 - \left( \frac{1.0 - \alpha_u}{\gamma_u - \gamma_f} \right) (\gamma - \gamma_f) & (\gamma_f < \gamma \leq \gamma_u) \\ \alpha_u & (\gamma_u < \gamma) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$ ：せん断強度低減係数、 $\gamma_f$ ：モール・クーロン破壊基準到達時のせん断ひずみ(=  $\tau_f / G$ )、 $\gamma_u$ ：終局せん断ひずみ(=0.1)、 $\alpha_u$ ：終局せん断ひずみ到達時のせん断強度低減係数(=0.1)である。なお、本研究では、このせん断ひずみに応じて算定される $\alpha$ を式(3)で算定されるせん断強度に乗ずることで、破壊曲面を縮小させ、

せん断バネの軟化をモデル化した。さらに、ひび割れ面（垂直バネが引張強度に達した面）において、ひび割れ開口に伴うせん断剛性の低下を表現するために、次式で示す、せん断剛性低減係数  $\beta$  を導入した<sup>2)</sup>。

$$G_{cr} = \beta G \quad (5a)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \exp\left\{-\frac{0.3}{\varepsilon_{tu}}(\varepsilon - \varepsilon_t)\right\} \quad (5b)$$

ここに、 $G_{cr}$ ：ひび割れ面のせん断剛性、 $\varepsilon_t$ ：ひび割れ発生時の垂直ひずみ、 $\varepsilon_{tu}$ ：引張終局ひずみである。

### 2.3 鉄筋のモデル化

鉄筋のモデル化には Saito らによって開発された離散鉄筋要素を用いた<sup>2)</sup>。鉄筋は一連の梁要素としてモデル化され、リンク要素を介してコンクリート剛体要素に結合される。リンク要素に、非線形特性を導入することにより鉄筋-コンクリート間の付着特性を表現することができる。鉄筋の構成モデルには、bilinear型を用い、鉄筋-コンクリート間の付着応力-すべり関係には、CEB<sup>4)</sup>のモデルコードを用いた。付着応力-すべり関係を決定する、パラメータは非拘束でかつ付着条件の良いコンクリートに関するものを用いた。

### 3. ひずみ速度効果の再現性の検証

コンクリートは、高ひずみ速度下において、強度等の

材料パラメータが増大することが知られている。本章では、荷重速度を変化させた円柱供試体の1軸引張・圧縮解析を行い、解析モデルが上述のひずみ速度効果をどの程度表現し得るのかについて検討する。

#### 3.1 解析モデル

図-6に解析モデルを示す。円柱供試体は、直径100mm、高さ200mmであり、RBSMの平均要素寸法は約20mmとした。解析で使用した材料パラメータを表-1に示す。表-1のパラメータのセットは、図-6の解析モデルを用いて1軸引張解析および1軸圧縮解析を行い、次章で示すRC梁の高速荷重実験で用いているコンクリートの引張強度および圧縮強度に一致するようキャリブレーションして決定した値である。円柱供試体の両端面には荷重板要素を設け、上側の荷重板に図-7に示す速度-時間関係を与えて高速荷重を再現した。なお、図中に示す  $v_1$  は荷重速度を表し、1m/s、10m/s、100m/s、1000m/sの4ケースについて解析を行った。

ひずみ速度による引張強度増加率の評価式の代表的な式として、以下に示す Ross らの式がある。

$$f_{td}/f_{ts} = \exp\left[0.00126 \left\{ \text{Log}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s) \right\}^{3.373}\right] \quad (6)$$

ここに、 $f_{td}$ ：動的引張強度、 $f_{ts}$ ：静的引張強度、 $\dot{\varepsilon}$ ：ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_s$ ：静的荷重時のひずみ速度  $1.0 \times 10^{-7} 1/s$  である。本研究では高速荷重解析時において式(6)を解析モデルに導入した。具体的には、解析ステップごとにひずみ速度を算定し、ひずみ速度に応じて式(6)から動的引張強度を算定し、材料モデルに反映させた。

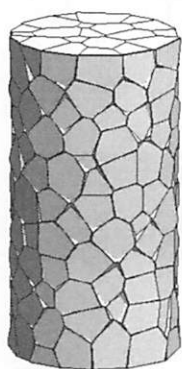


図-6 解析モデル

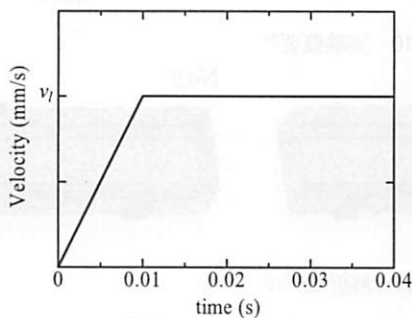


図-7 速度-時間関係

表-1 材料パラメータ

	concrete						steel	
	$E_c$ (GPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$G_f$ (N/mm)	$c$ (MPa)	$\phi$ (degree)	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)
Experiment	-	37.9	3.11	0.0718	-	-	182	339
Analysis	30.0	37.9	2.50	0.0718	3.79	37	182	339

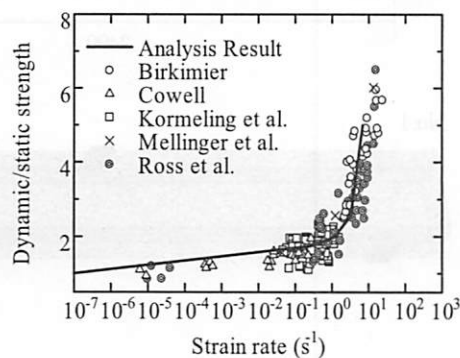


図-8 引張強度の増加率

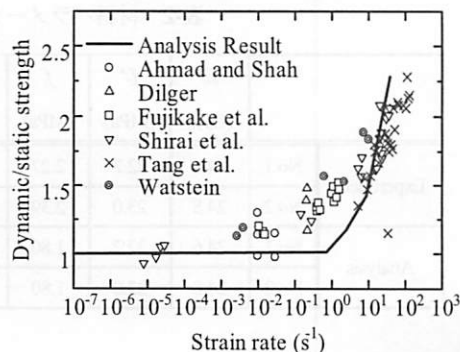


図-9 圧縮強度の増加率

### 3.2 解析結果

図-8, 9 に引張強度および圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を示す。ここで強度の増加率は、高速載荷解析で得られたマクロな強度を静的解析で得られたマクロな強度で除したものである。併せて既往の実験結果も示す。また、解析結果におけるひずみ速度とは多くの既往の実験的研究と同様、載荷開始点から最大荷重に至るまでのひずみの平均速度とした<sup>9)</sup>。

引張強度の増加率に着目すると、解析結果は、実験結果と概ね一致していることが分かる。圧縮強度の増加率に着目すると、解析はひずみ速度  $10^{-1}/s$  から  $10^1/s$  付近において実験結果よりも小さい値を示しているが、それ以降は、概ね実験結果を捉えている。

本研究では、垂直バネの引張応答に、簡単に、Ross の式を導入したが、本モデルでは、圧縮強度の増加率に対して、既往の実験結果との乖離が見られた。今後は、ここで検証した以外の応力状態および破壊エネルギーなどの材料特性値に対するひずみ速度効果についても、詳細に検証し、モデルを適切に修正していく予定である。

## 4. RC 梁のせん断破壊解析

本章では、まず、提案モデルを用いて RC 梁の静的載

荷解析を行い、静的荷重下におけるせん断破壊挙動を良好に再現できることを示す。さらに、高速載荷を受けてせん断破壊する RC 梁の解析を行い、提案手法の動的せん断破壊挙動に対する再現性を検証する。

### 4.1 静的載荷解析

#### (1) 対象実験概要および解析モデル

解析対象実験は山谷ら<sup>9)</sup>によって行われた、せん断スパン比  $a/d$  を 3.85, 1.92 と変化させた RC 梁の静的載荷実験とした。実験供試体の概要を図-10 に示す。荷重載荷方法はスパン中央への単調集中載荷とし、応力集中を緩和するために荷重載荷点および支承には幅 80mm の支圧板を配置している。

図-11 に解析モデルを示す。要素の平均寸法は、約 20mm としている。解析は載荷点部に設けた載荷板要素を変位制御することによって解析した。解析で使用した材料パラメータを表-2 に示す。表には、実験の材料試験値も併せて示している。表-2 のパラメータのセットは、図-11 に示した解析モデルと同じ平均要素寸法を用いて円柱供試体モデルを作成し、1 軸引張解析および 1 軸圧縮解析を行い、対象実験で用いているコンクリートの引張強度および圧縮強度に一致するようキャリブレーションして決定した値である。

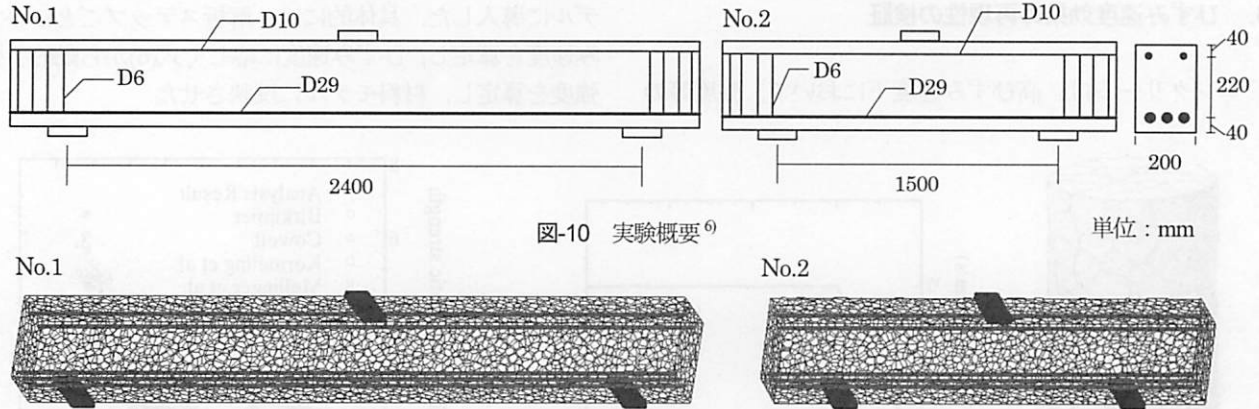


図-10 実験概要<sup>9)</sup>

単位 : mm

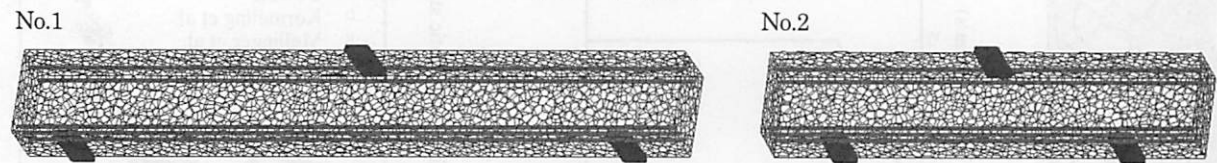


図-11 解析モデル

表-2 材料パラメータ

		$E_c$ (GPa)	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$G_f$ (N/mm)	$c$ (MPa)	$\phi$ (degree)
Experiment	No.1	24.6	22.7	2.27	0.164	-	-
	No.2	24.8	23.0	2.39	0.165	-	-
Analysis	No.1	24.6	22.7	1.80	0.164	2.27	37.0
	No.2	24.8	23.0	1.80	0.165	2.30	37.0

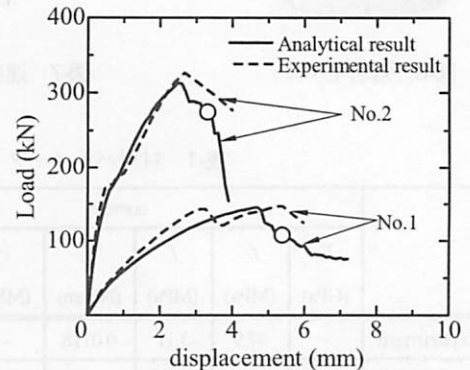


図-12 荷重-変位関係

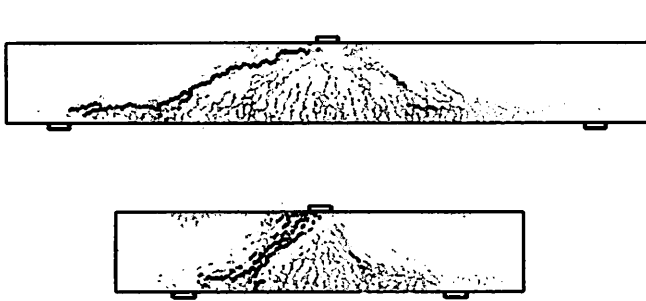


図-13 解析により得られたひび割れ性状

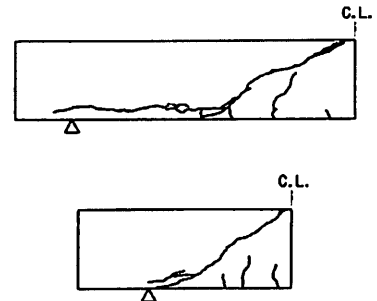


図-14 実験終了時のひび割れ状況<sup>9)</sup>

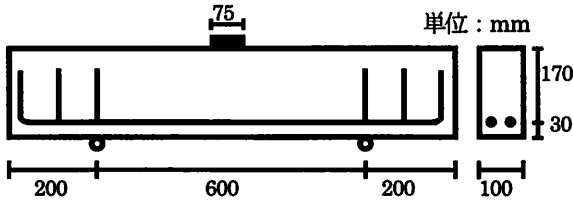


図-15 実験供試体概要

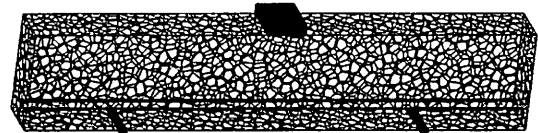


図-16 解析モデル

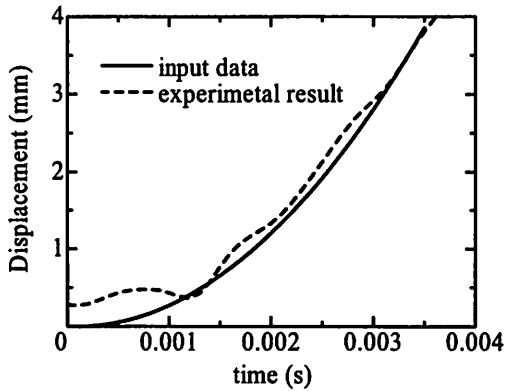


図-17 変位-時間関係

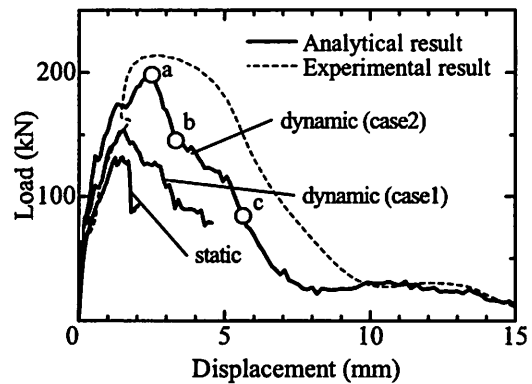


図-18 荷重-変位関係

## (2) 解析結果

図-12 に解析および実験により得られた荷重-変位関係を示す。解析は実験の最大荷重および最大荷重時の変位を良好に再現していることが確認できる。

図-13 に最大荷重を迎えた直後（図-12 中の○印の点）の解析により得られたひび割れ性状を、図-14 に実験終了時のひび割れ状況図を示す。図-13 は、梁奥行中央の断面図を示しており、黒実線は、垂直バネが引張強度に到達後、応力が 1/4 まで低下した面を示し、灰色の実線は、垂直バネが引張強度に到達後、除荷状態にある面を示している。解析は実験のひび割れ性状に概ね対応していることが確認できる。

以上のことより、提案モデルは静的荷重下における RC 梁のせん断破壊挙動を良好に再現できることが確認された。

## 4.2 高速載荷解析<sup>7)</sup>

### (1) 対象実験概要および解析モデル

解析対象実験は著者らが行った RC 梁の高速載荷実験とした。実験供試体の概要を図-15 に示す。載荷は、 $a/d$

を 1.76 とし、高速載荷には、最大載荷力 980kN、最大載荷速度 4(m/sec)の能力を有するサーボ制御式高速載荷装置を用いた。荷重載荷点には幅 75mm の支圧板を配置している。主鉄筋は D16(SD295)を 2 本配置した。コンクリートの圧縮強度は 37MPa、鉄筋の降伏強度および弾性係数は、339MPa および  $1.82 \times 10^5$ MPa であった。

図-16 に解析モデルを示す。要素の平均寸法は、約 20mm としている。解析は載荷板要素に、実験により得られた載荷治具の変位応答を模擬した変位-時間関係（図-17）を入力し解析を行った。解析で使用了材料パラメータは表-1 の通りである。

### (2) 解析結果

図-18 に解析および実験により得られた荷重-変位関係を示す。同図中には、静的解析結果、ひずみ速度効果を考慮していない解析結果(case1)およびひずみ速度効果を考慮した解析結果(case2)を示している。ひずみ速度効果を考慮しない場合、最大荷重は静的解析に比べ約 1.15 倍の値を示している。これは、慣性力の影響であると考えられる。ひずみ速度効果を考慮した場合、最大荷重は静的解析に比べ約 1.53 倍の値を示しており、実験結果を

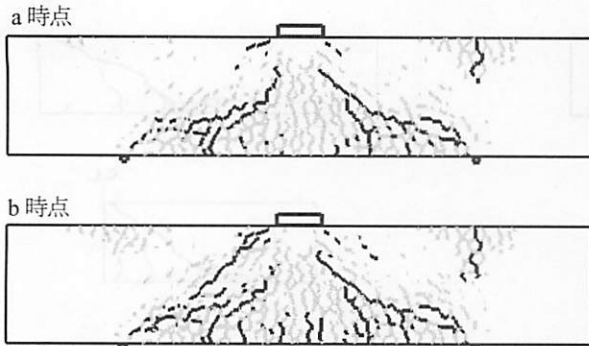


図-19 解析により得られたひび割れ性状

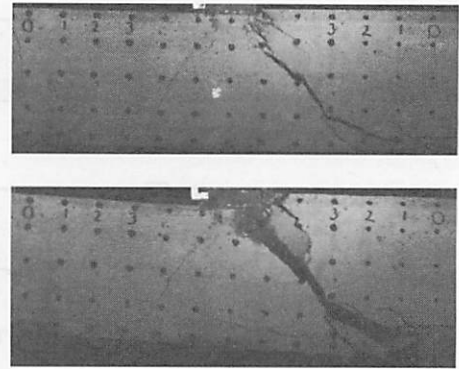


写真-1 実験で観察された破壊進展過程



図-20 変形状 (c 時点)

概ね捉えている。

図-19に、図-18中のaおよびb点における解析により得られたひび割れ図を示す。また、実験において高速カメラで撮影したRC梁の破壊進展状況を写真-1に示す。解析は実験のひび割れ状況を概ね捉えていることが分かる。

図-20に、図-18中のc点における、解析により得られた変形図を示す。解析は、写真-1のように、実験で観察された、載荷板近傍のコンクリートが面外方向へ剥離していく様子を再現していることが確認できる。

## 5. まとめ

本研究は、RBSMを用いて、せん断破壊するRC梁の静的および高速載荷解析を行ったものである。検証した範囲では、提案手法を用いて、RC梁のせん断耐力、ひび割れ性状および破壊モードを概ね評価することができた。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, pp.167-183, 2003.
- 2) Saito, S. and Hikosaka, H. : Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network model, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, Japan Society of Civil Engineers, No.627/V-44, pp.

289-303, 1999.

- 3) Bolander, J.E. and Hong, G. S. : Rigid-Body-Spring Network modeling of prestressed concrete members, *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.5, pp. 595-604, 2002.
- 4) Comité Euro-International du Béton *CEB-FIP Model Code 1990 First Draft*. CEB, Paris, 1990
- 5) 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.
- 6) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, No. 620/V-43, pp.187-199, 1999.
- 7) 山本佳士, 黒田一郎, 塩野谷昇, 古屋信明: 剛体バネモデルによる高速載荷を受けるRC梁のせん断破壊解析, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.29, No.3, pp.805-810, 2007.