# 論文 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

山本 佳士\*1・黒田 一郎\*2・塩野谷 昇\*3・古屋 信明\*4

要旨:本研究は,高ひずみ速度下における RC 梁のせん断破壊挙動の解析における,3次元 剛体バネモデルの適用性を検討したものである。具体的には,静的載荷および高速載荷を受 ける RC 梁のせん断破壊実験を実施し,解析結果との比較検討を行っている。検討の結果, 3次元剛体バネモデルは,ひずみ速度効果を適切に評価することにより RC 梁の動的せん断 耐力およびひび割れ進展挙動を概ね評価できることを確認した。

キーワード:3次元剛体バネモデル,高速載荷,せん断破壊,ひずみ速度効果

1. はじめに

RC 構造物の耐衝撃性を把握するためには,実 験のみならず数値解析による検討も重要であり, このため,衝撃荷重を受ける RC 部材の解析的研 究が盛んに行われている。しかしながら,その 適用の多くが曲げ破壊を対象としており,せん 断破壊を対象とした研究は,著者の知るところ では岸らの有限要素法<sup>1)</sup>による研究以外見当た らない。

せん断破壊を解析的に十分な精度で評価する には、その破壊経過や最終破壊モードを支配す る様々な因子、すなわち、コンクリートのひび 割れの発生と伝播、ひび割れ面の応力伝達、圧 縮ストラットの圧壊、付着劣化といった材料の 非線形挙動を適切にモデル化する必要がある。 連続体モデルである有限要素法でこれらの非線 形挙動を記述しようとすると、構成モデルは複 雑になってしまうという問題点を有する。

そこで,著者らは衝撃荷重を受けてせん断破 壊する RC 梁の挙動評価に3次元剛体バネモデ ル(以下,RBSM)を適用することを考え,その 基礎的段階として,本論文では,高速載荷を受 ける RC 梁のせん断破壊挙動を検討対象とした。

RBSM は、対象を離散的に取り扱う不連続体

解析手法の一つであり,ひび割れを直接表現す ることができ,非線形挙動を簡便に導入できる ため,コンクリート構造物の破壊解析に多く用 いられている。さらに,近年のコンピュータ性 能の向上に伴い3次元解析にも拡張され<sup>2),3)</sup>,ボ ロノイ多面体を用いたランダムな要素分割を用 いることにより,有限要素法のような連続体モ デルでは得られない,実現象に近いひび割れの 進展や破壊挙動のシミュレーションが可能であ ることが確認されている<sup>2),3)</sup>。

#### 2. 解析手法

### 2.1 コンクリートのモデル化

本研究では、ボロノイ分割を用いたランダム 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。

RBSM では図-1に示すように、変位場として 各要素内の任意点に6自由度の3次元剛体変位 を仮定し、隣接する要素境界面上の任意の評価 点に垂直バネおよびせん断バネを配置する。さ らに、回転バネを設けることもあるが、回転バ ネの非線形特性を同定するのは困難である。そ こで、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

- \*1 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科 修(工) (正会員)
- \*2 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 博(工) (正会員)
- \*3 防衛大学校研究科 土木環境工学専攻 (正会員)

\*4 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 工博 (正会員)







図-1 剛体要素の自由度

図-3 垂直バネの構成モデル 図-2 要素境界面上の評価点





図-4 せん断バネの破壊基準 図-5 離散鉄筋モデル

 $S_2$ 図-6 付着応カーすべりモデル<sup>5)</sup>

し、その三角形の重心に垂直バネとせん断バネ を設けた。一つのボロノイ面に対して複数の評 価点を設けることにより,回転バネの代わりに, 隣接する要素間の相対回転変位に対する非線形 抵抗特性をモデル化することができる。

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。

コンクリートの材料特性は、垂直バネおよび せん断バネに、それぞれ引張-圧縮挙動および せん断すべり挙動をモデル化することで表現し た。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<sub>t</sub>に達するまでは弾性とし、その後 は破壊エネルギーG<sub>f</sub>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。せん 断バネについては、コンクリート材料によく適 用されている、図-4および次式に示すモールク - ロン型の破壊基準を設定した<sup>4)</sup>。

$$\tau_f = \begin{cases} c - \sigma \tan \phi & (\sigma > 0.5 f_c) \\ c - 0.5 f_c \tan \phi & (\sigma \le 0.5 f_c) \end{cases}$$
(1)

S.

ここに $\tau_f$ : せん断強度, c: 粘着力,  $\phi$ : 内部 摩擦角,  $f_c$ : 圧縮強度である。 $c=0.14 f_c$ および *ϕ*=37°とした。バネが破壊基準に達した後は、 せん断ひずみが 10%になるまで線形的に軟化す るものと仮定した。

## 2.2 鉄筋のモデル化

 $\tau_{\rm max}$ 

 $\tau_R$ 

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4)。図-5に示すように、 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 とにより鉄筋ー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 筋ーコンクリート間の付着応力ーすべり関係に は、図-6 で表される CEB<sup>5)</sup>のモデルコードを用 い,付着応力-すべり関係を決定する,図中に示 すパラメータ $\tau_{max}$ ,  $\tau_R$ および  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ は非拘 東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. 載荷速度を変化させた円柱供試体の一軸引 張・圧縮解析

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<sup>9</sup>。本章では,載荷速度を変化させた円 柱供試体の一軸引張・圧縮解析を行い,解析モ デルが上述のひずみ速度効果の影響をどの程度 表現し得るかについて検討する。

#### 3.1 解析モデル

図-7に解析モデルを示す。円柱供試体は,直径 100(mm),高さ 200(mm)であり,RBSM の平均要素寸法は約 20(mm)とした。次章で示す RC梁実験供試体は,最大骨材寸法 10(mm)で作成し,使用したコンクリートの圧縮強度  $f_c$ は 37(MPa)であった。解析で使用した材料パラメータは,これらの値をもとに,土木学会コンクリート構造性能照査編を参考に算定して,引張強度  $f_i$ は2.5(MPa),破壊エネルギーは0.07(N·mm)とした。 円柱供試体の両端面には載荷板要素を設け,上側の載荷板に図-8に示す速度-時間関係を与えて高速載荷を再現した。なお,図中に示す  $v_1$ は載荷速度を表し,1(m/s),100(m/s),100(m/s),

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。

$$f_{td} / f_{ts} = \exp[0.00126 \{ Log(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s) \}^{3.373} ]$$
(2)

ここに,  $f_{td}$ :動的引張強度,  $f_{ts}$ :静的引張強度,  $\dot{\epsilon}$ : ひずみ速度,  $\dot{\epsilon}_s$ :静的載荷時のひずみ速度 $[1.0 \times 10^{-7} (1/s)]$ である。

本研究では高速載荷解析時において式(2)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(2)から動的引張強度を算定し,材料モデ ルに反映させた。

## 3.2 解析結果

**図-9** に引張強度の増加率とひずみ速度の関係を示す。ここで引張強度の増加率とは、高速載荷解析で得られたマクロな引張強度を静的解



図-7 解析モデル



図-8 速度一時間関係







図-10 圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係

析で得られたマクロな引張強度で除したもので ある。比較のために静的解析の結果も同図中に, ひずみ速度 1.0×10<sup>-7</sup>(1/s)時の応答として示し,併 せて既往の動的強度応答倍率式も示す。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>6)</sup>。解析結果 は,ひずみ速度 10<sup>-1</sup>(1/s)から 10<sup>0</sup>(1/s)付近で藤掛 の提案式および ross らの提案式よりも若干小さ い強度増加率を示し, 10<sup>0</sup>(1/s)以上になると両提 案式の間の値を示していることが分かる。

図-10 に圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を示す。圧縮の場合,解析はひずみ速度 10<sup>-1</sup>(1/s)から 10<sup>1</sup>(1/s)付近において提案式よりも 小さい強度増加率を示し,10<sup>1</sup>(1/s)以上になると 若干大きな値を示している

本研究では,垂直バネに設定した引張強度の ひずみ速度依存性のみを導入したが,円柱供試 体の引張強度のみならず1軸圧縮強度の増加も 表現することができた。しかしながら,既往の 評価式と比較することにより,圧縮強度の増加 率の定量的評価には至っていないことが分かっ た。今後,1軸圧縮強度の増加率を定量的に再現 するためには、引張強度の動的応答倍率評価式 の修正、およびその他の材料パラメータ(粘着 力、破壊エネルギー等)のひずみ速度依存性の 導入を検討していくことが必要であると考えら れる。

# 4. 静的および高速載荷を受ける RC 梁のせん断 破壊解析

本章では、著者らが行った静的および高速載 荷を受けてせん断破壊する RC 梁を対象として、 解析を行い、本解析手法の妥当性の検討を行う。 4.1 実験概要

実験供試体の概要を図-11 に示す。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37(MPa),鉄筋の降伏強度および弾性係 数は,339(MPa)および1.82×10<sup>5</sup>(MPa)であった。 高速載荷実験には,最大載荷力980(kN),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<sup>6</sup>を用いた。

### 4.2 解析モデル

図-12 に解析モデルを示す。要素の平均寸法



は、前章の円柱供試体解析と同様、約20(mm)と している。ただし、載荷スパンの外は計算負荷 を軽くするために、約40(mm)としている。材料 パラメータは円柱供試体解析と同様のものを使 用した。静的挙動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。また、 高速載荷は、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一時間関 係(図-13)を入力し解析を行った。

#### 4.3 解析結果

### (1) 荷重-変位関係

図-14 に静的および高速載荷解析における荷 重-載荷点変位関係を示す。図中には併せて実 験結果も示す。実線が解析結果を示し、破線が 実験結果を示している。また、図中の一点鎖線 は高速載荷解析においてひずみ速度効果を考慮 しない場合の解析結果である。

まず,静的解析結果に着目すると,解析は実 験により得られた最大荷重を概ねシミュレート





写真-1 破壊状況(静的載荷時)

していることが分かる。最大荷重に至るまでの 荷重変位曲線の勾配および最大荷重時の変位は, 実験値と解析値で大きな相違が見られた。これ は,実験において,供試体支点付近で圧壊など の局所的な変形が発生し,解析モデルにおいて この局所的な変形を捉えることができなかった ことが要因として考えられる。この実験と解析 結果の乖離の原因解明については今後の課題と する。次に高速載荷解析の結果に着目すると, 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ことが考えられる。 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 結果を概ね捉えている。

## (2) ひび割れ性状

図-15 に最大荷重を迎えた直後(図-14 中の ○印の点)における静的解析により得られたひ び割れ図を示す。図中,緑色で示しているのが,



#### 図-17 ひび割れ性状(高速載荷解析)

\* 変形倍率 5



図-18 破壊状況(高速載荷解析)



写真-2 破壊状況(高速載荷時)



# 図-19 部材軸方向から見た変形図 (高速載荷解析)

垂直バネが引張強度に達した面,黄色で示して いるのが,垂直バネが引張強度に達した後 1/4f, まで応力が低下した面,赤色で示しているのが, 垂直バネが引張強度に達した後 0 まで応力が低 下した面である。解析では,このとき,載荷板 近傍の面のひび割れが卓越していることが確認 された。これが引き鉄となって,荷重低下に至 っている。図-16 に図-14 中の△印の点におけ る変形図を示す。また,実験による RC 梁の破壊 状況を写真-1 に示す。解析は実験の破壊状況を 良好に捉えていることが分かる。

図-17 に高速載荷解析により得られた,最大 荷重を迎えて直後(図-14 中の●印の点)のひ び割れ図を示す。高速載荷解析においても静的 解析と同様に,載荷板近傍の面のひび割れが卓 越していることが確認された

図-18に、高速載荷解析により得られたポス トピーク領域における(図-14中の▲印の点) 変形図を示す。また、写真-2に実験による破壊 状況を示す。静的解析では一つの斜めひび割れ に破壊が集中しているのに対して、高速載荷解 析では最終的に2つの斜めひび割れが進展して いる。写真-1、2に着目すると実験でも同様の 性状を示していることが分かる。また、図-19 に図-18を部材軸方向から見た変形図を示す。 載荷板近傍のコンクリート要素が梁側面法線方 向へ変形が卓越している様子が見られる。これ は、実験でも見られた現象である。3次元 RBSM により、2次元解析では得られない詳細な破壊 状況をシミュレートすることができる。 5. 結論

本研究では、3次元 RBSM を用いて円柱の高 速1軸引張・圧縮解析およびせん断破壊する RC 梁の高速載荷解析を行った。得られた結論を以 下に示す。

- (1) 3次元 RBSM において、垂直バネに設定した引張強度の動的応答倍率を評価することにより、コンクリート円柱供試体のひずみ速度によるマクロな引張・圧縮強度増加を表現できることが分かった。
- (2) 静的および高速載荷における RC 梁のせん断 耐力およびせん断破壊性状を概ね評価する ことができた。

参考文献

- 岸徳光,三上浩,松岡健一,安藤智啓:せん 断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁の弾 塑性衝撃応答解析,構造工学論文集,Vol.47A, pp. 1695-1706,2001
- Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T.: Analytical Study on influence of Mortar-Aggregate Interface Character on Concrete Strength by RBSM, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No.2, pp.151-156, 2004
- 3) 鈴木孝典, 斉藤 成彦, 檜貝 勇:メソスケー ル解析によるコンクリートの圧縮破壊性状 の予測,コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.169-174, 2005
- Saito, S., Hikosaka, H. : Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring networkswith random geometry, JSCE, No.627, V-44, pp.289-303, 1999
- 5) Comité Euro-International du Béton *CEB-FIP* Model Code 1990 First Draft. CEB, Paris, 1990
- 藤掛一典,山根茂樹,大野友則,水野淳,鈴木 
  篤:急速一軸引張試験においてコンクリート円 
  柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼ 
  す影響,土木学会論文集,No. 592,V-39,pp. 
  83-95,1998