

## (10) RC 部材の ASPH 法衝撃解析における破壊モード評価に関する研究

A study on the estimation of RC member's failure mode using ASPH impact analysis

深澤仁\*, 園田佳巨\*\*, 後藤恵一\*\*\*

Jin Fukazawa, Yoshimi Sonoda, Keichi Gotou

\*九州大学大学院博士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*\*鉄道総合技術研究所研究員, 鉄道力学研究部構造力学研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

*Key Words: ASPH method, failure mode, orthotropic constitutive equation*

キーワード: ASPH 法, 破壊モード, 直交異方性構成則

## 1. 緒言

近年, 安価で高性能な計算機の普及にともない, 大規模な構造計算が容易に行えるなど解析環境が著しく進歩する中で, SPH 粒子法は, 大変形後の破壊挙動を粒子の逸散により比較的簡易に表現できることから, 弾性から塑性および破壊挙動までを統一した手法で表現できる可能性があるとして, 様々な構造計算に適用されつつある<sup>1)</sup>. SPH 法は, 1970 年代後半に Lucy, Monaghan らによって提案され, 圧縮流体理論を元にした粒子表現による解析手法で, これまでに流体問題や惑星衝突問題などに適用されてきた実績がある. 基本的なアルゴリズムは, 連続体力学に基づき<sup>2)</sup>, 解析対象とする固体を粒子の集合体として離散化し, 個々の粒子挙動を影響半径内に存在する他粒子との相互作用によって求める解析手法である. 粒子間距離に応じた重みによって粒子どうしの相互作用力を変化させながら運動方程式を解くことから, メッシュに依存しない解析方法である<sup>3), 4), 5)</sup>. この特徴により, SPH 法は, 個々の粒子が初期配置から大きく移動しても解析を継続することが可能であり, 従来の有限要素法<sup>6), 7)</sup> などでは取り扱いが困難であったひび割れ・貫通・破壊・飛散などの破壊現象に広く適用できるため, 1990 年代には宇宙工学におけるスペースデブリによる超高速破壊問題などに適用されている.

一方, 構造部材としてのはり部材は, 断面内に生じる曲げモーメントとせん断力の状態によって, 部材が十分に曲げ変形した上で破壊に至る曲げ破壊型と, ウェブ部に斜め方向に発達するひび割れが進展することで急激な崩壊を伴うせん断破壊型に大別される. 鉄筋コンクリートはりのせん断破壊型の挙動は, ひび割れ発生から破壊に至る過程であまり変形せずに耐力が急激に低下することが多く, 曲げ破壊型に比べて危険である場合が多

い. この理由から, 土木分野で一般的に用いられる RC はり部材では, せん断破壊型の破壊モードが発生しないように断面寸法や軸方向鉄筋が設計されるが, 衝撃的な荷重が作用した場合にはせん断破壊型の挙動に移行することも懸念され, 破壊モードに関する安全照査にも特別な配慮が必要であると考えられる. 基本的な構造部材の全体挙動に関する研究は数多く報告されているが<sup>8), 9)</sup>, 本研究では RC はり部材を対象に, 適切に曲げ破壊とせん断破壊を区別できるような衝撃応答解析手法の開発を試みた.

コンクリート部材のひび割れ後の変形挙動を精度良く解析するには, 所々にひび割れが存在するコンクリートの剛性を定量的に評価する必要がある. そこで, 本研究では提案する引張軟化モデルを用いて, ひび割れの進展(引張ひずみの増加)にともなう剛性低下を考慮した. また, はりのせん断ひび割れのように, せん断応力が大きくなるような特徴的な応力場での破壊挙動を精度良く表現するため, 主ひずみ方向別に剛性の低下を設定可能な材料異方性を考慮した構成則の適用を試みた. すなわち, 粒子間の力学的な影響範囲に等方性を仮定した従来の SPH 法を改良した ASPH 法 (Adaptive Smoothed particle Hydrodynamics<sup>10)</sup>) を適用し, kernel 関数の影響領域に引張軟化特性の影響を考慮した低減率  $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$  を用いることで, 広範な条件下の RC はりの破壊モード・応答性状の表現を試みた.

2. 影響低減率  $\phi$  を用いた計算フロー

## 2.1 ASPH 法の適用

SPH 法を固体問題に適用する際の, 計算フローおよび kernel 近似を実施する部分について示す. 概略の計算フローは, 以下の 1)~6) の手順で実施される.

- 1) 時間増分 (更新) の最初に、個々の粒子の影響範囲に存在する粒子の探索を行う。
- 2) Kernel 関数を用いて計算した粒子間の重みを用いて、相互作用力を求める。同時に、衝突問題の場合には接触粒子間の作用力を求める。
- 3) 2)で求めた作用力をもとに各粒子で運動方程式を解き、加速度・速度・変位を更新する。
- 4) 粒子間の相対速度をもとに、式(3)を用いた空間微分を行うことで各粒子のひずみ速度を求める。
- 5) 4)で求めたひずみ速度を時間積分してひずみを更新する。
- 6) 5)で求めたひずみに構成式を用いて応力を更新する。この計算フローの中で、SPH 法の演算の特徴である kernel 近似 (任意の物理量の一階偏微分が、kernel 関数の一階偏微分を計算することで近似される) を用いる部分は、3)の運動方程式と 4)のひずみ速度を算出する部分である。一般に、運動方程式は応力の勾配を用いて式(1)のように表わされる。

$$a = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \sigma \quad (1)$$

ここで、 $a$  は加速度、 $\rho$  は密度、 $\sigma$  は応力である。評価点  $I$  および評価点  $I$  の影響半径内にある評価点  $J$  で離散化した場合、式(1)の応力勾配の部分に kernel 近似<sup>1)</sup>を適用すると式(2)のようになる。

$$a_i^I = - \sum_{J=1}^N m^J \left( \frac{\sigma_{ij}^I}{(\rho^I)^2} + \frac{\sigma_{ij}^J}{(\rho^J)^2} + \Pi^{\mu} \right) \frac{\partial W}{\partial x_i^I} \quad (2)$$

ここで、 $\Pi^{\mu}$  は粘性減衰項であり、数値振動を抑えるために導入することが推奨されている。本研究では Monaghan が提案した人工粘性を使用した。

一方、ひずみ速度は、一般に次式で表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式(2)と同様に、速度勾配の部分に kernel 近似を適用すると式(4)のようになる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{J=1}^N \left( \frac{m^J}{\rho^J} v_i^J \frac{\partial W}{\partial x_j^I} + \frac{m^J}{\rho^J} v_j^J \frac{\partial W}{\partial x_i^I} \right) \quad (4)$$

ここで、 $v_i^J = (v_i^J - v_i^I)$ 、 $v_j^J = (v_j^J - v_j^I)$  である。

式(2)および式(4)で、SPH 法の演算の特徴である kernel 近似が用いられることになるが、本研究では、引張軟化特性や局所的な材料異方性を全体座標系の各軸に沿った影響低減率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  を用いて規定することから、従来の SPH 法を拡張し、各軸それぞれに kernel 関数を適用できる Michael Owen らの提案する ASPH 法を用いた。ASPH 法は直交する 3 軸にそれぞれ独立した 3 つの kernel 関数を規定するため、同様に 3 軸それぞれに規定する影響低減率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  の作用を直結させることができると考えた。ASPH 法の重みおよび重みの一次導関数は、式

(5)、(6)のように表わされる<sup>11)</sup>。

$$W = W_x \times W_y \times W_z \quad (5)$$

$$\nabla W = \left( \frac{\partial W_x}{\partial x} W_y W_z, W_x \frac{\partial W_y}{\partial y} W_z, W_x W_y \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) \quad (6)$$

その際、式(7)に示すように、影響低減率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  より算出された 0.0~1.0 までの範囲で設定される係数  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  を用いて、3 方向それぞれ個別に重み付き平均の影響を減少させて、引張軟化を表現することを試みた。係数  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  の算出方法などの引張軟化アルゴリズムに関する詳細は、2.3 項に示す。

$$\nabla W = \left( \frac{\partial W_x}{\partial x} W_y W_z \times \alpha_x, W_x \frac{\partial W_y}{\partial y} W_z \times \alpha_y, W_x W_y \frac{\partial W_z}{\partial z} \times \alpha_z \right) \quad (7)$$

## 2.2 影響低減率 $\phi$ による直交異方性構成則

RC はりの曲げ引張破壊は、はりの下端側に曲げ変形によるひび割れが等間隔に発生することで生じる典型的な破壊形態で、適度な靱性を有しており脆性的な破壊を生じにくいことから、一般的に RC はりの設計は曲げ破壊を前提に行われる。しかし、はり内部には曲げ応力とせん断応力が混在する複雑な応力場が存在し、せん断スパン比や荷重条件によっては、はりの破壊モードはせん断破壊型となることが知られている。

せん断ひび割れの発生メカニズムの概略図を図-1 に示す。図に模式的に示すように、荷重の作用点から支点までの圧縮応力とそれに直交する引張応力の影響が相対的に大きな応力状態となるにつれて、曲げ破壊からせん断破壊へ破壊モードが移行することになる。これらの互いに直交するような特徴的な応力場を精度良く評価するためには、等方的な場を想定した kernel 関数や構成則ではなく、直交する 3 軸にそれぞれ独立した kernel 関数を用いた ASPH 法と直交異方性構成則の導入が適切であると考えられる。

### (1) 影響低減率を用いた直交異方性構成則

本研究では、一般的な等方弾性構成則に、直交座標系の 3 軸方向に沿って個々に求めた影響低減率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  を導入することで、直交異方性を考慮した構成則に拡張した。Ignacio Carol, Egidio Rizzi, Kasper William らは、従来の弾性構成則に各軸方向の剛性低下を考慮することで、簡易に異方性を考慮した構成式を提案している<sup>11)</sup>。この手法は、従来と同様の方法で弾塑性構成則にも拡張することができることから、本研究では彼らの手法を準用し、Mises の降伏条件を仮定した弾塑性構成則を適用した。

また、次節(2)で示す影響低減率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  を式(8)のように適用し、コンクリート材料の引張破壊による局所的な材料異方性を考慮することを試みた。

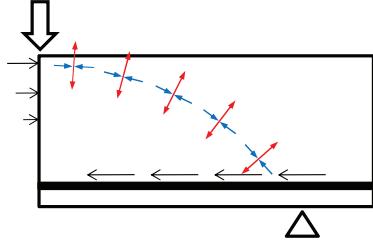


図-1 せん断ひび割れ発生メカニズム

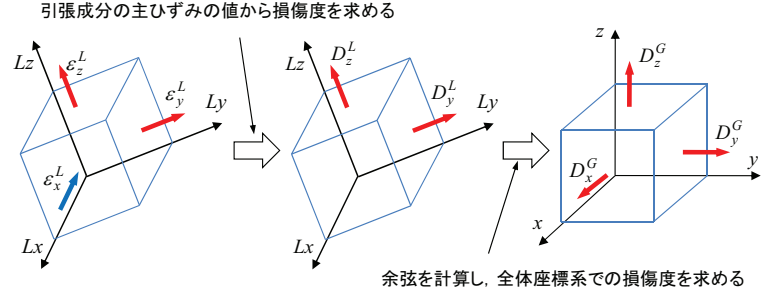


図-2 損傷  $D_x$   $D_y$   $D_z$  の概念

$$\{\sigma_{ij}\} = [D_{ijkl}^e] \{\varepsilon_{kl}\}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_x^2(\lambda+2\mu) & \phi_x\phi_y\lambda & \phi_x\phi_z\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \phi_y\phi_x\lambda & \phi_y^2(\lambda+2\mu) & \phi_y\phi_z\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \phi_z\phi_x\lambda & \phi_z\phi_y\lambda & \phi_z^2(\lambda+2\mu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_x\phi_y 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_y\phi_z 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_x\phi_z 2\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (8)$$

## (2) $\phi_x$ $\phi_y$ $\phi_z$ の算出方法

影響低減率  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  は、各粒子で計算される主ひずみ値をもとに決定した。図-2 に  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  の算出方法に関する概略図を示す。まず、粒子  $i$  における各ひずみ成分をもとに固有値解析を行い、主ひずみ値とその方向を求める。次に3つの主ひずみの中で正值（引張成分）だけを抽出し、それらの値を元に主ひずみ方向の損傷度  $D_x^L$   $D_y^L$   $D_z^L$  を求める（右上添字  $L$  は主値による座標空間を表わす）。さらに、全体座標系の各軸に対して余弦を計算し、全体座標系における損傷度  $D_x^G$   $D_y^G$   $D_z^G$  に変換する（右上添字  $G$  は全体座標系での座標空間を表わす）。最後に、全体座標系での損傷度を用いて式(12)のように定義された、各軸方向の影響低減率  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  を算出した。

式(9)は  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  と  $D_x$   $D_y$   $D_z$  および  $\varepsilon_x^L$   $\varepsilon_y^L$   $\varepsilon_z^L$  の関係を示している。ここでは、 $\varepsilon_x^L$   $\varepsilon_y^L$   $\varepsilon_z^L$  が  $1000\mu$  に達すると、同方向に引張破壊が発生したと仮定し、影響低減率  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  の値が、ほぼゼロに減少するように  $D_x^L$   $D_y^L$   $D_z^L$  を定義した。ここで引張破壊による剛性低下は、破壊後、回復不可能な非可逆な現象とみなし、 $D_x^G$   $D_y^G$   $D_z^G$  には過去の最大履歴値を適用するようにした。ただし、周囲粒子との力学的な影響が極端に減少することによる計算上の不安定を防ぐため、影響低減率の下限値を 0.25 とした。なお、これらの剛性低下は引張時のみに適用され、圧縮時には適用されないアルゴリズムとして用いた。

$$\begin{aligned} \phi_x &= \sqrt{1-D_x^G}, \quad (D_x^L = \frac{\varepsilon_x^L}{0.001}, \phi_x \geq 0.25) \\ \phi_y &= \sqrt{1-D_y^G}, \quad (D_y^L = \frac{\varepsilon_y^L}{0.001}, \phi_y \geq 0.25) \\ \phi_z &= \sqrt{1-D_z^G}, \quad (D_z^L = \frac{\varepsilon_z^L}{0.001}, \phi_z \geq 0.25) \end{aligned} \quad (9)$$

以上のようなアルゴリズムを適用することで、図-3 の赤線に示すように、直交する3軸に沿った材料異方性を考慮することができる。

## 2.3 影響低減率 $\phi$ を用いた軟化表現

本研究では、SPH 計算に用いる kernel 関数の影響領域を縮減させることにより、コンクリート材料の引張軟化を表現することを考えた。その際、全体座標系における kernel 縮減率  $\alpha$  を影響低減率  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  の2次式で表すことで、2.2 で示した内容との関連性を図った<sup>11)</sup>。すなわち、異方性構成則を定義する際に用いたパラメータである影響低減率  $\phi$  を、コンクリート材料の引張軟化特性にも用いるという試みである。

粒子  $i$  の物理量の導関数  $\frac{\partial f}{\partial x}$  は、式(10)のように、周囲の粒子  $j$  の物理量の重み付き平均により求めている。

$$\frac{\partial f(x_i)}{\partial x} = \sum_{j=1}^N f(x_j) \frac{\partial W(h, x)}{\partial x} \quad (10)$$

ここに、各軸方向の影響半径  $h$  を縮減することは、軟化による周囲への影響度の低減と力学的に等価と考え、kernel 縮減率  $\alpha$  を用いてコンクリート材料の引張軟化を表現した。しかし、影響半径が減少し、その方向の重み付き平均に寄与する粒子数が極端に少なくなると SPH 法による計算自体に不安定が生じてしまう恐れがあるので、重み付き平均した値（一次導関数の総和）に kernel 縮減率  $\alpha$  を乗じることで近似した。

$$\sum_{j=1}^N f(x_j) \frac{\partial W(\alpha_x h_x, x)}{\partial x} \approx \alpha_x \sum_{j=1}^N f(x_j) \frac{\partial W(h_x, x)}{\partial x} \quad (11)$$

ここに kernel 縮減率  $\alpha_x$   $\alpha_y$   $\alpha_z$  は、影響低減率  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  を用いた以下の式で定義した<sup>11)</sup>。

$$\alpha_x = \phi_x^2, \quad \alpha_y = \phi_y^2, \quad \alpha_z = \phi_z^2 \quad (12)$$

以上の方法で、影響低減率  $\phi_x$   $\phi_y$   $\phi_z$  を用いてコンクリートの引張軟化特性をモデル化すると、図-4 の赤線に示すように、2.2 で示した材料異方性に加えて直交する3

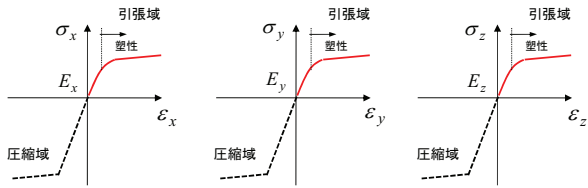


図-3 x, y, z 軸方向の異方性構成則

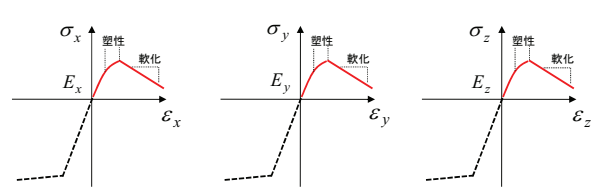


図-4 軟化勾配を考慮した x, y, z 軸方向の構成則

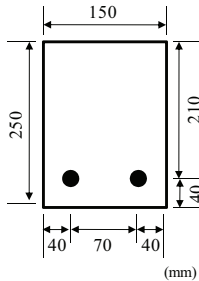


図-5 断面図

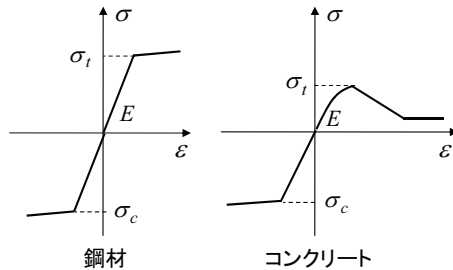


図-6 材料特性

表-1 材料特性値

	$\sigma_c$ 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_l$ 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	E 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
鋼材 (D13)	394	394	206000	0.3
コンクリート	31.7	3.17	24000	0.22
まくらぎ	65.9	6.59	38400	0.22

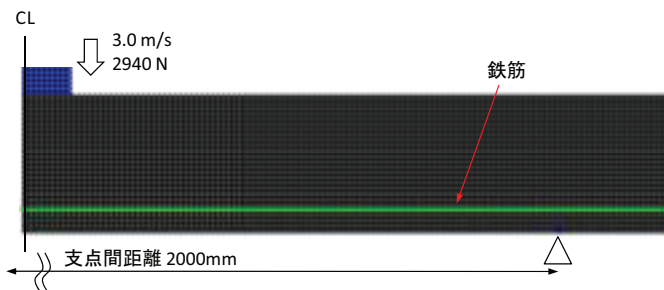


図-7(a) 曲げ破壊型モデル

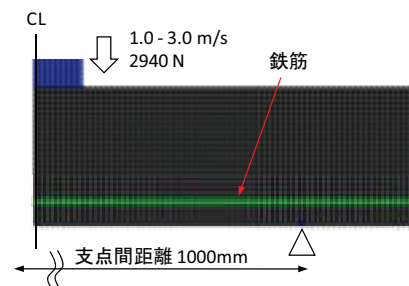


図-7(b) せん断破壊型モデル

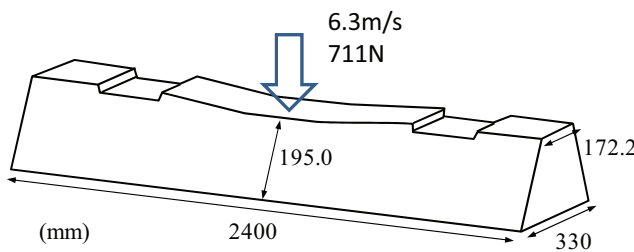


図-8 まくらぎ衝撃実験概要

表-2 解析ケース一覧

解析ケース	支点間距離 (mm)	重錘衝突速度 (m/s)	破壊モード
S2000-V3	2000	3.0	曲げ破壊型
S1000-V3	1000	3.0	せん断破壊型
まくらぎ		6.3	曲げ破壊型

軸それぞれの方向に独立した軟化勾配を設定することが可能となる。

### 3. 解析モデルおよび解析ケース

解析モデルは、室蘭工業大学の岸らの実施した重錘落下衝撃実験<sup>12), 13)</sup> および鉄道総合技術研究所で実施されたまくらぎ衝撃実験を参考にした。岸らの重錘落下衝撃実験は、図-5 に示すように、はり断面は 150×250mm、下端に D13 の鉄筋をかぶり 40mm の位置に配置している。図-6 および表-1 に鉄筋とコンクリートの材料特性を示す。鋼材には Mises の降伏条件式を仮定した弾塑性構成則<sup>14), 15)</sup>を用い、圧縮・引張両域の降伏強度以降の特性については 1/100 の硬化を仮定した。コンクリートについては、圧縮域では降伏強度以降に鋼材と同様に 1/100

の硬化特性を与え、引張域については 2. で示したような、影響低減率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  を導入した異方性構成則を適用すると同時に引張軟化特性を仮定した。

図-7(a) および (b) に解析モデルの鉄筋位置での側方断面図を、表-2 に解析ケースを示す。単純ばりの支点間距離は 2000mm および 1000mm の 2 種類とし、重錘重量は 2.94kN で初速度は 3.0m/s を入力した。モデルは、スパン中央を通るはり断面および側断面に沿って対称面を設定した 1/4 モデルとした。粒子径については、適切な離散化の程度がいくつか報告されているが<sup>16)</sup>、ここでは、はり高さ方向に 25 分割となるよう、粒子径は 10mm を採用した。実験においてはスパン 2000mm のはりおよびスパン 1000mm で衝突速度が 1.0m/s のはりは曲げ破壊モードを示し、その他のスパン 1000mm で衝突速度が 2.0

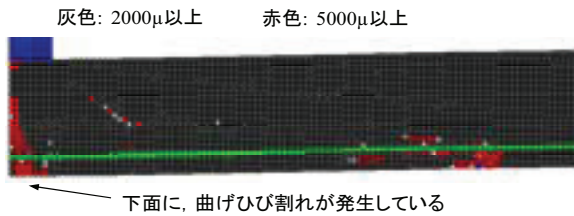


図-9(a) S2000-V3 のひび割れ分布性状

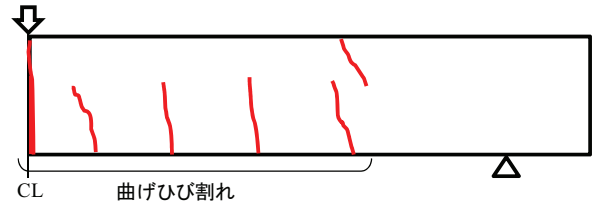


図-9(b) S2000-V3 のひび割れ分布性状

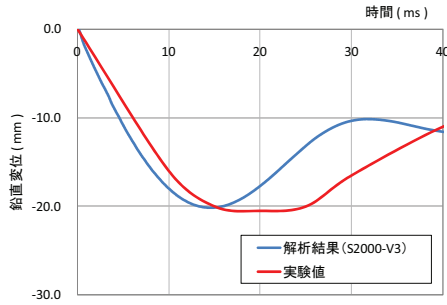


図-10(a) S2000-V3 (曲げ破壊型) の変位応答比較

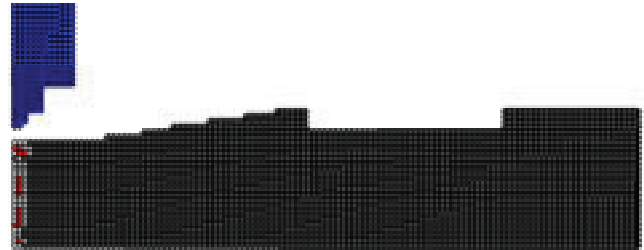


図-11 まくらぎ解析のひび割れ分布性状

および3.0m/sのはりはせん断破壊モードを示したことが報告されている<sup>12),13)</sup>。

一方、鉄道総合技術研究所で実施されたまくらぎ衝撃実験は、図-8に概略を示すように、床面に直置きされたまくらぎ中央部に、重さ711Nの車輪型接触子を自由落下させ、6.3m/sで衝突させたときの、ひび割れ分布性状を記録したものである。まくらぎの材料特性は表-1に示すように、圧縮強度が65.9N/mmの高強度コンクリートで、硬化特性や影響低減率 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$ などは、上述のモデル化をそのまま準用した。

#### 4. ひび割れ分布性状および変位応答

##### 4.1 曲げ破壊型解析の解析結果

図-9(a)および(b)に曲げ破壊モードを示したRCはりの解析および実験でのひび割れ分布性状を示す。図中には、最大変位時の最大主ひずみが2000 $\mu$ を超えた粒子は灰色、5000 $\mu$ を超えた粒子は赤色で表示しており、コンクリートにひび割れが発生したと考えられる部位を表現している。図より、荷重位置直下のはり下端の曲げひび割れが表現できていることがわかる。

図-10(a)に解析ケースS2000-V3の荷重位置下端の変位応答結果を示す。実験値および解析値ともに、14~15ms時に最大変位が約20.0mmであることがわかる。このことから、最大変位までの応答は実験値を概ね捉えていると考える。また、図-11のまくらぎ解析の場合、中央部にまげひび割れが発生している。これは、図-12に示すように、まくらぎ実験でのひび割れ分布性状を、良く一致していることが確認できる。これらのことから、本アルゴリズムは、曲げ破壊型の変位応答やひび割れ分布を精度良く表現することができると思われる。



図-12 まくらぎ実験のひび割れ分布性状

##### 4.2 せん断破壊型解析の解析結果

図-13(a)に、S1000-V3解析ケースにおける、等方的な軟化および硬化を適用した従来のSPH解析におけるひび割れ分布性状を示す。また、図-13(b)に本研究にて提案している影響低減率 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$ を用いた異方性構成則と引張軟化を適用したASPH解析結果を示す。さらに、実験結果におけるひび割れ分布の概略図を図-13(c)に示す。これらの図を比較すると、従来のSPH解析ではせん断破壊型のせん断ひび割れを精度良く表現できていないのに対して、影響低減率 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$ を適用したASPH解析は実験結果を概ね表現できていることがわかる。これは、従来のSPH解析のような等方的な軟化や硬化則では、せん断応力が局所的に大きくなるような特徴的な応力場を有するせん断破壊型の挙動を精度良く表現できないためであると考えられる。これらのことから、せん断破壊モードを適切に表現するためには、影響低減率 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$ による異方性構成則と引張軟化を適用したASPH解析の方が適していると考えられる。

図-14に図-13(b)のS1000-V3ケースにおける変位応答結果を示す。この図より、せん断破壊型の変位応答は、解析結果の方が実験値よりもかなり小さい値となった。

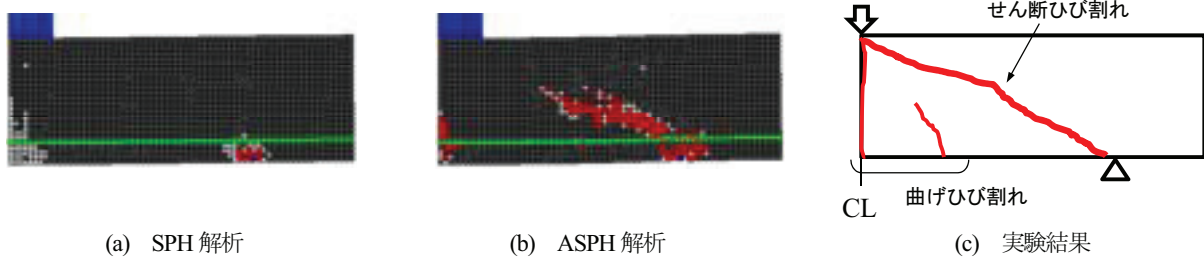


図-13 S1000-V3 (せん断破壊型) のひび割れ分布性状比較

特に、図中に矢印で示すように、最大変位後の挙動が実験値と大きく異なっている。これは、せん断ひび割れが発生した後も解析モデルにおいては粒子間で力を伝達していることが原因であると考えられる。そのため、残存剛性の下限値の定量的な評価や提案手法以外の破壊アルゴリズムを適用するなどの改善が必要であると考ええる。

## 5. 結言

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) ASPH 法、影響低減率  $\phi$  を用いた異方性構成則および引張軟化アルゴリズムを導入することにより、はりの曲げ破壊型とせん断破壊型のひび割れ分布性状を、応力状態に応じて適切に区別して解析できることを示した。
- (2) はりのせん断破壊挙動を精度良く解析するには、異方性構成則や引張軟化アルゴリズムだけではなく、粒子消去など、ひび割れ発生後の破壊挙動を表現できるような破壊アルゴリズムの検討が必要である。

## 参考文献

- 1) G.R.Liu, M.B.Liu : Smoothed Particle Hydrodynamics, World Scientific, 2003.
- 2) Lawrence E. Malvern : Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, 1969.
- 3) 深澤仁, 園田佳巨 : SPH 粒子法の構造部材の弾塑性解析への適用に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp1358-1365, 2009.3.
- 4) 酒井譲, 山下彰彦 : SPH 理論に基づく粒子法による構造解析の基礎的検討, 日本機械学会論文集(A 編)Vol.67, No.659, 2001.7.
- 5) 酒井譲 : SPH 法大変形解析の基礎と応用, 計算工学講演会論文集 Vol.13, pp481-484, 2008.5.
- 6) 久田俊明, 野口裕久 : 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 2002.
- 7) 日本塑性加工学会 : 非線形有限要素法, コロナ社, 1994.
- 8) 岸徳光, 三上浩, 小室雅人, 松岡健一 : 弾塑性衝撃応答解析法の RC 梁への適用性, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp1579-1588, 1997.3.
- 9) 井元勝慶, 大野友則, 佐々木昇, 小暮幹太, : 重錘落

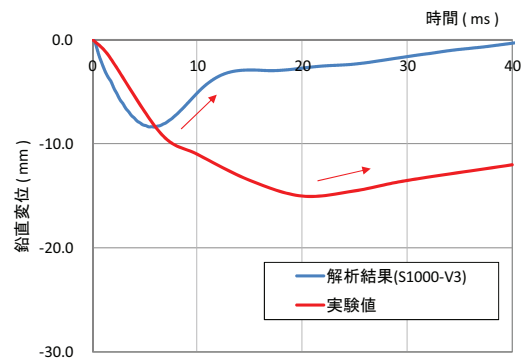


図-14 S1000-V3 の変位応答

下衝突を受ける RC はり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp1201-1212, 1995.3.

- 10) Paul R. Shapiro, Hugo Martel, Jens V. Villumsen and J. Michael Owen : Adaptive smoothed particle hydrodynamics with application to cosmology: methodology, The astrophysical journal supplement series 103, 269-330, 1996.
- 11) Ignacio Carol, Egidio Rizzi and Kasper William : On the formulation of anisotropic elastic degradation. I. Theory based on a pseudo-logarithmic damage tensor rate, International journal of solid and structures 38, 491-518, 2001.
- 12) 岸徳光, 三上浩, 安藤智啓 : せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp1689-1699, 1999.3.
- 13) 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, pp1695-1706, 2001.3.
- 14) 土木学会 : 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ 15, 丸善, 2004.
- 15) W. F. Chen : Plasticity in reinforced concrete, Maruzen Co., Ltd, 1985.
- 16) 深澤仁, 園田佳巨, 玉井宏樹 : SPH 法を用いた衝撃解析の離散化程度および解析精度に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp1169-1176, 2010.3.