

大回転・接触挙動を考慮したRBSMによる コンクリートの動的破壊シミュレーションの検証

Verification of Dynamic Failure Simulation of Concrete by RBSM
Considering Large Rotation and Contact Behavior

木村管杜¹⁾, 山本佳士²⁾

Kanto Kimura and Yoshihito Yamamoto

1) 法政大学大学院 デザイン工学研究科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: kanto.kimura.9x@hosei.ac.jp)

2) 博(工) 法政大学 デザイン工学部 教授 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: y.yamamoto@hosei.ac.jp)

In this study, we developed a dynamic fracture simulation method for concrete using the Rigid Body Spring Model (RBSM), considering large rotations and contact behavior, to reproduce the behavior of concrete structures subjected to forces exceeding design assumptions until failure and collapse. Specifically, we applied the proposed method to analyze the impact of a spherical element on a cantilever concrete beam discretized using Voronoi diagram. The verification analysis confirmed that the proposed method reasonably reproduces the dynamic fracture behavior of concrete members, including large rotations and contact, by verifying energy balance and other factors.

Key Words : RBSM, Collapse simulation, Geometric nonlinearity, Dynamic, Contact problem, Verification

1. はじめに

日本においては、阪神・淡路大震災や東日本大震災に代表される、設計時の想定を超える規模の地震が稀に発生している。このような極めて稀な地震動に対して、原子力発電所をはじめとする重要な土木・建築構造物には、復旧性、構造システム全体としての冗長性・頑健性といった高度な性能の確保が強く求められている。特に、鉄筋コンクリート構造物が地震動を受けた際に生じる、ひび割れの発生・進展、鉄筋の降伏・座屈、コンクリートの圧壊などの非線形な過程を経て、部材レベルの破壊から構造システム全体の崩壊に至るまでの挙動を精度良く再現する数値解析技術の確立は、こうした構造物の安全性評価において極めて有用なツールとなりうる。

コンクリート構造物を対象とした数値解析手法は、非線形有限要素法を中心に多くの研究が行われてきており、複雑な非線形応答を再現できるようになってきている。しかしながら破壊・倒壊挙動の再現となると未だいくつかの課題が残されている。その中でも特に、コンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、およびその拘束圧依存性挙動の再現は難しい課題として残されている[1]。

コンクリート材料は引張に弱く、圧縮に強い材料であるため、構造物中で引張を受ける領域には十分な鉄筋が配置される。このため、部材として抵抗機構を喪失する領域では、補強鉄筋による拘束効果を含むコンクリートの圧縮破壊挙動が支配的となるケースが多い。したがって、破壊・倒壊挙動を再現するためには、まず上記の課題の克服が特に重要な課題となる。そこで、著者らは、各種応力下におけるコンクリート材料の軟化・局所化挙動および

部材レベルの破壊挙動、特に現状のコンクリートの数値解析技術では再現が困難な圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動までを再現可能な、剛体バネモデル(RBSM)を開発している[2,3]。一方で、一般的に、RBSMは微小変形の仮定に基づいているため、材料レベルで破壊が局所化した後、鉄筋の座屈や、大変位・大回転を伴って部材が倒壊していく挙動は再現できなかった。

そこで著者らは、RBSMを大変位・大回転挙動を伴う倒壊問題へ適用するために、幾何学的非線形性を考慮可能な3次元RBSMの開発を行った[4,5,6]。提案手法では、従来手法では再現できない、例えば、曲げを受ける鉄筋コンクリートはり部材がはり上縁の圧縮破壊の局所化およびその後の圧縮側鉄筋の座屈を経て、鉄筋による拘束機構を失ったコアコンクリートが破壊して終局に至るという複雑な破壊過程を再現可能であることを明らかにしている。

このように、静的な問題に限られた範囲ではあるものの、著者らは破壊、大回転・大変位挙動を再現できる手法を開発した。しかし、耐震性などを直接評価するためには、この手法を動的に拡張する必要がある。そこで、著者らは幾何学的非線形性を考慮したRBSMを動的解析応答手法へと拡張することに成功している。

しかしながら、幾何学的非線形性を考慮しても、RBSMはDEMとは異なり、基本的に初期の要素ネットワークを参照し続けるため、初期のネットワークを超えて要素同士が新たに接触した際には、その要素間で力をやり取りすることができなかった。例えば、要素界面で大きなせん断すべりが生じる挙動、あるいは図-1に示すような、倒

壊過程で破片同士が新たに接触する挙動などである。そこで、著者らは、剛体要素（多面体要素）に複数の接触判定用の球を配置し、接触が判定された際に要素ネットワークを更新することで、大変位・大回転が生じた後の接触・衝突現象を再現する手法を提案した[7,8]。これにより崩壊過程にて起きる破碎片同士の衝突を再現できるようになっている。しかしながら、同手法[7,8]の動的解析手法への拡張、およびその検証は実施できていなかった。

そこで本研究では、大回転、接触挙動を考慮した動的RBSMを提案、実装するとともに、簡単な解析例を用いて検証を行う。なお、本研究で扱う解析は、非線形の強い問題であり、理論解が存在しない。したがって、大回転、接触挙動を含む非線形応答解析の過程においてエネルギーの釣合い等を評価することにより検証を行う。

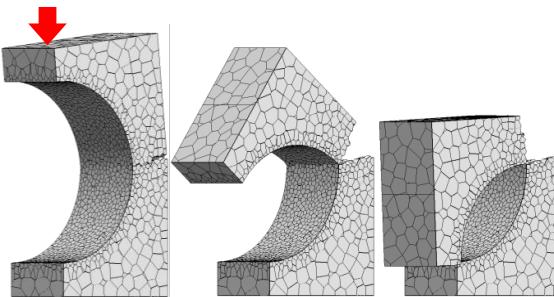


図-1 幾何学的非線形性を考慮したRBSMによる倒壊シミュレーション結果の例

2. 提案手法の概要

(1) RBSM

本研究では、Voronoi分割によるランダム多面体要素を用いた、3次元剛体バネモデル(RBSM)によりコンクリートをモデル化した。RBSMはKawaiにより提案された離散体解析手法の一つであり[9]、対象を剛体要素とバネの集合体としてモデル化し、要素間に分布するバネのエネルギーを評価することにより、対象の力学的挙動を追求する手法である。この要素間に分布するバネに非線形構成モデルを導入することで、ひび割れ、すべり等の不連続挙動を簡便に表現することができる。図-1に示すように、剛体要素内のVoronoi母点に並進3、回転3の計6自由度を設定し、要素内に剛体変位関数を仮定する。

また、図-2中に示す、2つの要素界面上の積分点に、垂直バネ1つおよびせん断バネ2つを配置する。このバネのひずみは、積分点における垂直方向の相対変位 δ_n およびせん断方向の2成分の相対変位 δ_l, δ_m から評価され、バネの応力は、2.2に示す非線形構成モデルによって評価される。

$$\varepsilon = \frac{\delta_n}{h} \quad (1)$$

$$\gamma_l = \frac{\delta_l}{h} \quad (2)$$

$$\gamma_m = \frac{\delta_m}{h} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon, \gamma_l, \gamma_m$ はそれぞれ垂直バネとせん断バネ2つのひずみであり、 h は隣り合う剛体要素のVoronoi母点間の距離である。

また、提案手法では、積分点は、要素境界面の重心と頂点からなる3角形の重心に設定する。このように、要素境界面内に複数の積分点を配置することで、回転バネを導入することなく要素間のモーメントの伝達を表現できる。

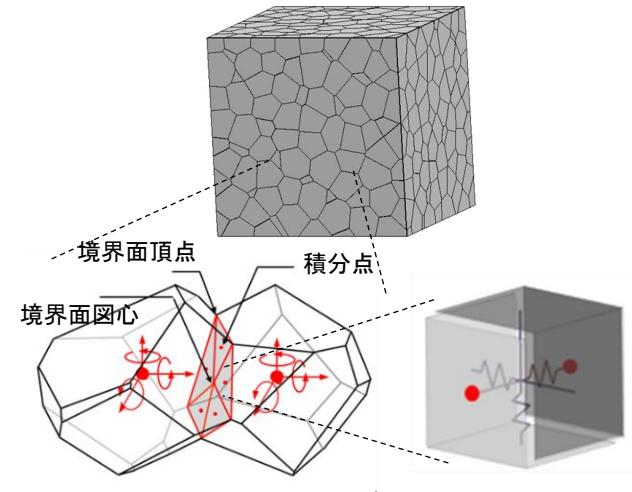


図-2 RBSMの概要図

(2) コンクリート材料のバネ構成モデル

図-3に垂直バネおよびせん断バネの構成モデルを示す。垂直バネの引張側は、図-3(a)に示すように、引張強度 σ_t に達するまでは線形弾性挙動を示し、その後は破壊エネルギーを考慮した1/4モデルにしたがって軟化するモデルを仮定した。ここで図中の ε は垂直バネのひずみ、 σ は垂直バネの応力を示している。図-3(b)に垂直バネの圧縮側の応力-ひずみ関係を示す。圧縮側は図のような、2つの2次関数を用いた逆S字曲線でモデル化した。図中の、 $\sigma_c, \varepsilon_{c1}, \alpha_{c1}, \alpha_{c2}$ は垂直バネの圧縮挙動における非線形性を制御する材料パラメータである。

せん断バネの構成モデルでは、まず以下のようない合成せん断ひずみ γ を定義する

$$\gamma = \sqrt{\gamma_l^2 + \gamma_m^2} \quad (4)$$

ここで γ_l および γ_m は積分点における2方向それぞれのせん断ひずみである。合成せん断ひずみ γ は以降に示す構成モデルにより、合成せん断応力 τ に変換される。さらに、積分点における2方向のせん断応力で τ_l および τ_m は合成せん断応力 τ から次式で算定される。

$$\tau_l = \tau \frac{\gamma_l}{\gamma}, \tau_m = \tau \frac{\gamma_m}{\gamma} \quad (5)$$

合成せん断応力-合成せん断ひずみ関係は、図-3(c)に示すように、せん断強度に達するまでは線形と仮定し、せん断応力がせん断強度に達すると、せん断ひずみの進展に応じて軟化するものと仮定した。ここで、図中の G はせん断バネの弾性係数、 K はせん断軟化係数である。せん

断強度は、RBSM の構成モデルとしてよく用いられている、図-3(d)に示すモール・クーロン型の破壊基準を用いた。ここで、 c は粘着力、 φ は内部摩擦角、 σ_b はせん断強度が増加する圧縮応力の限界値である。また、せん断軟化係数 K は、図-3(e)に示すように、垂直バネの応力に依存するものと仮定した。ここで、 β_0 、 β_{max} 、 χ は、せん断軟化係数の、垂直バネの応力依存性を制御する材料パラメータである。

表-1 に使用する材料パラメータの一覧を示す。上付き * は、コンクリートの材料試験により得られる材料特性値であることを示しており、 E^* ：ヤング係数、 f_t^* ：引張強度、 G_f^* ：破壊エネルギー、 f_c^* ：圧縮強度である。提案手法では、バネの材料パラメータは、一般的な材料試験により得られる材料特性値の関数として同定されており、最大粗骨材寸法程度の要素寸法 (10~30mm) を用いることで軟化、破壊局所化領域などを含むコンクリートの各種応力下の応力-ひずみ応答を再現できる[3]。

(3) 幾何学的非線形性の導入

本研究では、RBSM と低減積分ティモシェンコはり要素の等価性に着目して新たに開発した、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮した手法を用いた。図-3 に提案手法の概要を示す。提案手法では、2 つの剛体要素間の力

学モデルとして、図中の青線で示すように、Voronoi 面を断面を持つ、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した低減積分ティモシェンコはり要素を仮定する。ここで、Voronoi 分割の性質上、Voronoi 面は 2 つの母点を結ぶ線分の垂直二等分面になる。Toi は、RBSM の積分点位置が 2 つの剛体要素の自由度設定点のちょうど中間の断面に位置している場合、その要素剛性マトリクスは、同様に軸方向中央断面に 1 点の積分点を持つ低減積分ティモシェンコはり要素の要素剛性マトリクスと、完全に一致することを明らかにしている[10]。すなわち、断面を Voronoi 面とし、Voronoi 母点を節点とする、低減積分ティモシェンコはり要素のネットワークからなる構造は、要素配列に Voronoi 分割を適用し、Voronoi 母点を自由度設定点とした RBSM と、微小変形の仮定のもとでは完全に一致する。すなわち、2 つの剛体要素間の力学モデルとして低減積分ティモシェンコはりを仮定すれば、微小変形領域においては、従来の微小回転の仮定に基づく RBSM と等価になり、さらに、有限回転を含む幾何学的非線形性を考慮することで、大変位・大回転挙動の再現が可能になる。本研究で用いた有限回転を考慮したはり要素有限要素法は例え、[11]と同じであり、定式化等の詳細はそちらを参照されたい。

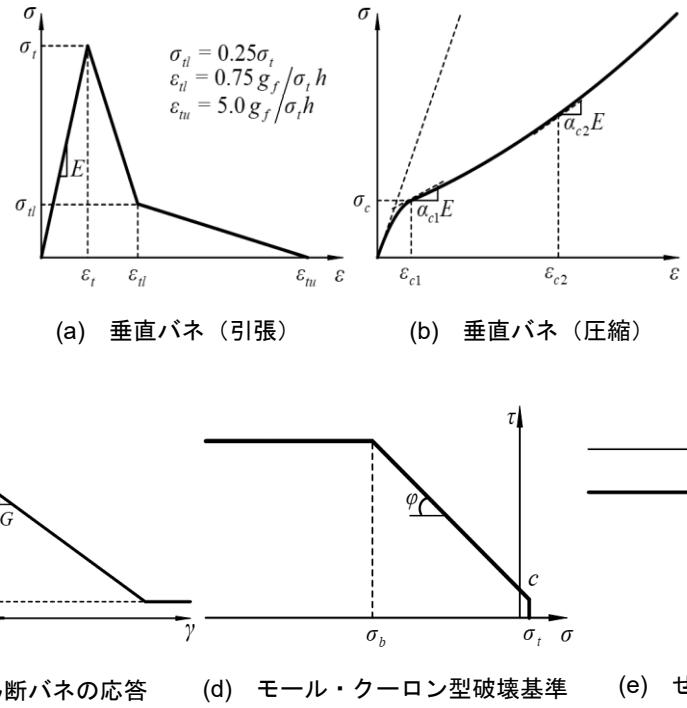


図-3 構成モデル

表-1 構成モデルの材料パラメータ

弹性係数	垂直バネ						弹性係数	せん断バネ				軟化挙動			
	引張領域		圧縮領域					破壊基準		せん断バネ		軟化挙動			
E (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	g_f (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	ϵ_{c2}	α_{c1}	α_{c2}	$\eta = \frac{G}{E}$	c (N/mm ²)	φ (degree)	σ_b (N/mm ²)	β_0	β_{max}	χ	κ	
$1.4E^*$	$0.8f_t^*$	$0.5G_f^*$	$1.5f_c'^*$	-0.015	0.15	0.25	0.35	$0.14f_c'^*$	37	$f_c'^*$	-0.05	-0.025	-0.01	-0.3	

また、提案手法では、ティモシェンコはり要素の断面を分割し、その断面内の積分点は、従来の手法と同様に、Voronoi面の重心と頂点からなる三角形の重心に配置（図-4 参照）する。さらに、提案手法では、積分点で得られるGreen-Lagrangeひずみの、はり軸方向の垂直ひずみ成分および軸方向を含むせん断ひずみ成分（2成分）を、従来のRBSMにおける垂直バネおよびせん断バネのひずみと仮定し、著者らが提案している従来の構成モデルを適用して応力を算定し、これを第2 Piola-Kirchhoff応力として評価して内力計算を行った。

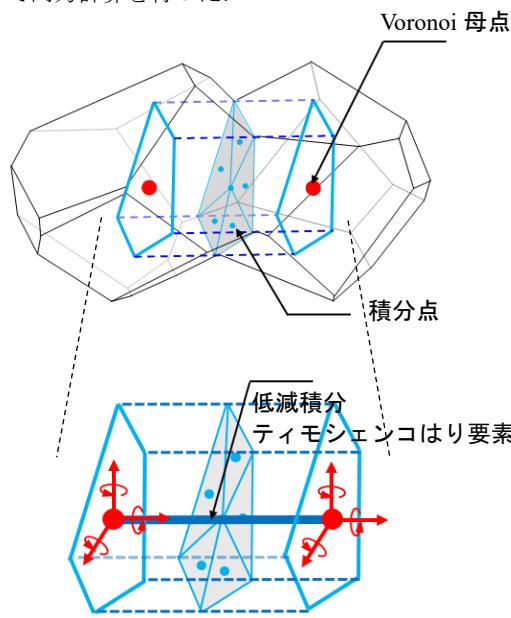


図-4 幾何学的非線形性を考慮したRBSM

（4）接触の考慮および動的解析手法への拡張

従来のRBSMは個別要素法(DEM)のように接触判定は行わず初期のネットワークを参考し続けるが、提案手法では、以下のように要素ネットワークを更新する。

要素ネットワークを更新する際には、その前段階として、まず、多面体要素同士の接触判定を行う。多面体要素同士の接触判定の方法としては、Common Plane法[12]や、GJK法[13]など多くの手法が提案されているが、アルゴリズムが複雑であるという問題点がある。そこで本研究では、Matsushimaら[14]が提案している動的最適化法を適用し、複数の球形要素でVoronoi多面体の形状を近似し接触判定を行った。動的最適化法の詳細は[14]を参照されたい。ここでは、その概略を説明する。動的最適化法では、まず適当な数および寸法の球形要素を、近似したい多面体要素の内部に配置する。ここで接触球の初期位置は、Voronoi頂点、Voronoi辺中点、Voronoi面重心近傍からそれぞれVoronoi母点に向けて引いた直線上に設置するものとする。そして、この球形要素には多面体の表面点から仮想的な引力が与えられる。この引力と運動方程式に従って球形要素を移動させるとともに球形要素に生じる応力を評価して膨張・収縮させる。さらに、複数球による多面体の近似の精度を表す指標である表面誤

差指標を定義し、この指標が十分小さくなるまで上記の運動を時間発展させる。このように、移動と変形を繰り返すことによって多面体の表面形状を近似する最適な球形要素の位置および寸法が導かれる。（図-5参照）

また、本研究では、接触判定球により判定された接触点に垂直バネ1つ、せん断バネ2つを配置した。構成モデルは、2.(2)に示したコンクリートを対象としたものと同様の物を用いた。ただし、引張強度および粘着力は0にした。

以上で示した手法は、静的解析手法として定式化、実装し、前節で示したように、いくつかの検証例によりその妥当性を示している。本研究では、さらに、同手法を時間積分法にNewmark- β 法を用いて動的解析手法へと拡張した。なお、幾何学的非線形性を考慮した非線形増分解では、Updated Lagrangian Formulation[11,15]を用いた。

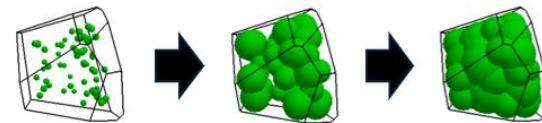


図-5 複数球形要素によるVoronoi多面体の近似

3. 検証解析例

（1）解析モデル

Voronoi分割を用いて離散化したコンクリート片持ちはり部材に、球部材が衝突する解析例を示す。図-6(a) (b)に要素分割と境界条件の概要を示す。片持ちはりの長さは、500mm、断面は100mm×80mmであり、はり部材の右側上部には、直径100mmの弾性球部材を設置した。はり部材の左端の要素の全自由度を固定し、球部材には同図中の矢印の方向に初速6(m/sec)を与えてはり部材に衝突させた。表の弾性係数に関するパラメータは2章で示したヤング係数 E^* を28.0GPaと設定して算定した値を適用した。また、衝突体(球部材)、非衝突体(はり部材)それぞれの材料の密度は $2.5 \times 10^6 \text{ kg/mm}^3$ 、圧縮強度 f_c^* は30MPa、引張強度 f_t^* は2.22MPa、破壊エネルギー G_f^* は84.3N/mとし、重力は無視した。また、平均要素寸法はそれぞれ20mmとして、1step毎の時間増分を $1.0 \times 10^{-7} \text{ sec}$ として解析を行った。

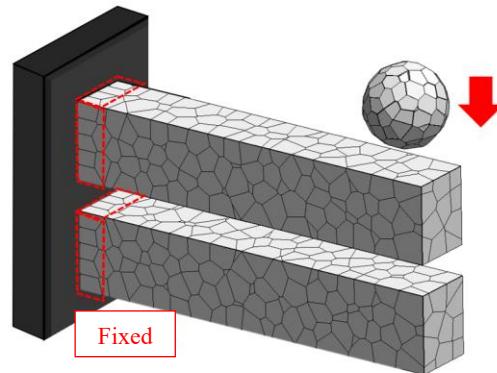


図-6(a) 破壊を考慮した片持ちはりの衝突解析及び連鎖衝突挙動における解析概要図

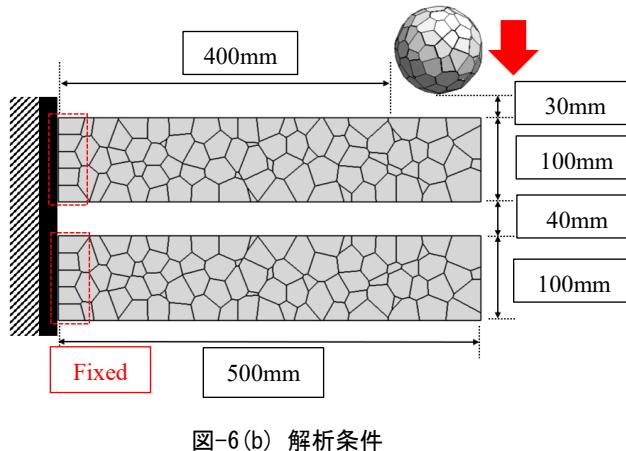


図-6(b) 解析条件

(2) コンクリートはりモデルによる連鎖衝突解析

図-7に解析により得られた変形図を示す。この解析では、上側のはりにおいてひび割れが貫通、倒壊していく、その破片が下側のはりに衝突し、下側のはりも衝突作用を受けて連鎖的ひび割れ・倒壊が進展していくという一連の挙動が定性的に表現できている。以下にそれぞれのひび割れの詳細な情報について示す。

ここで、静的解析で片持ちはりの右側端部に集中荷重を作用させた場合、当然、曲げモーメントが大きくなる、左側端部の上縁から下縁へ一本のひび割れが進展して終局に至る。一方、図-7に示すように、動的解析では、慣性力の影響により、複数本のひび割れが生じておらず、また、せん断力およびせん断変形が大きくなる領域では、ひび割れが斜めに進展していることも確認できる。以下にひび割れの詳細について示す。

まず、はりと球同士が衝突し(図-7(a))、その1.84(msec)後に、上部はりにおいて、せん断力が大きくなる領域で、ひび割れが斜めに進展する(図-7(b))。それから、5.76(msec)後に、上部はりにおいて、曲げモーメントが大きくなる、左側端部の上縁から下縁へひび割れが生じる(図-7(c))。また、はりとはり同士が衝突し(図-7(d))、その1.44(msec)後に、下部はりに衝突点近傍から斜め方向にひび割れが入る(図-7(e))。そして、最後にはりとはり同士が衝突してから17.64(msec)後に、下部はりにおいて、曲げモーメントが大きくなる、左側端部の上縁から下縁へひび割れが生じる(図-7(f))。

また、図-8に、運動エネルギー、内部エネルギー(蓄えられる弾性エネルギーと熱として散逸するエネルギーの和)、接触バネに蓄えられる内部エネルギー(以降、接触エネルギー)および総エネルギーと時間の関係を示す。5.0(msec)にて接触が開始し、運動エネルギーが内部エネルギーへと変換され、各値が変化している様子を確認することができる。また、16.56(msec)にて、上部はりと下部はりが接触することにより、上記と同じようなエネルギーの変換を確認することができた。しかし、総エネルギーに関しては、終始一定の値を保っていることが確認できる。すなわち、エネルギーは保存されていると言える。

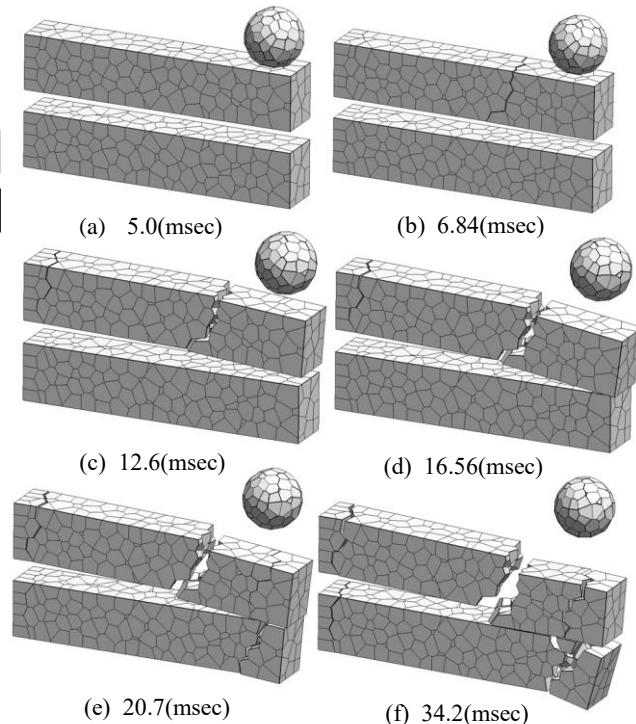


図-7 破壊を考慮した片持ちはりの衝突解析及び連鎖衝突挙動における変形図

このように、図-7で再現した動的崩壊問題はいずれも非線形性が強いモデルであり、このような問題に対して、提案手法を用いることで定量的に表現できることを確認できた。ただ、解析で得られたひび割れの本数や角度などは実験データと比較することで評価できるが、そのような実験データが存在しないのが現状である。そのため、実験データとの妥当性の確認は今後の課題である。

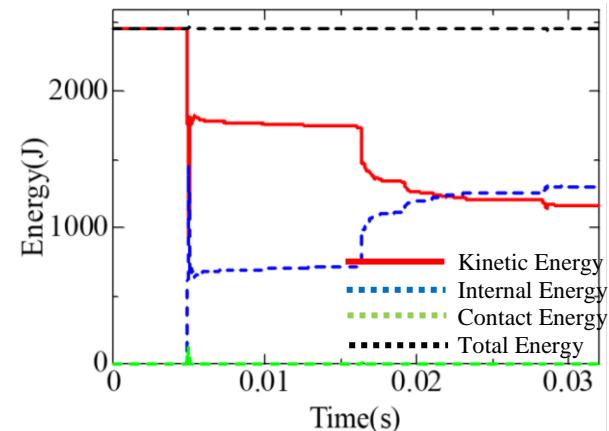


図-8 各エネルギーの変遷

4. 結論

本研究では、提案手法を用いた、接触を伴うコンクリート部材の破壊シミュレーションを行った。検証解析の結果、提案手法は、ひび割れの発生・進展、大変位・大回転挙動、部材片の衝突、連鎖的倒壊挙動など、複雑な動的挙動を定性的に再現できることが分かった。また、複数回の

衝突を経ても、エネルギーは保存されており、妥当な計算結果が得られていることが分かった。

今後は、破壊、大回転、接触挙動を含む、実験を実施し、定量的に提案手法の妥当性を確認する予定である。

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解析研究委員会：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、日本コンクリート工学協会、2003。
- [2] 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。
- [3] Yamamoto, Y., Nakamura, H., Kuroda, I. and Furuya, N.: Crack propagation analysis of reinforced concrete wall under cyclic loading using RBSM, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.8, Issue7, pp.780-792, 2014.
- [4] 伊佐治優、山本佳士、中村光、三浦泰人：破壊の局所化および大回転変位を伴うRC構造物の倒壊シミュレーションのための新しい離散体解析手法の開発、計算工学講演会論文集 Vol.22, 2017.
- [5] Yamamoto, Y., Isaji, Y., Nakamura, H. and Miura, T.: Collapse Simulation of Reinforced Concrete Including Localized Failure and Large Rotation Using Extended RBSM, Proceedings of 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-10), 2019.
- [6] 山本佳士：幾何学的非線形性を考慮したRBSMを用いたRCはりの破壊シミュレーションにおける妥当性確認、計算工学講演会論文集 Vol.28, 2023
- [7] 山本佳士、中島達也：要素ネットワークの更新を考慮したRBSMによるコンクリート部材の倒壊シミュレーション、計算工学講演会論文集 Vol.26, 2021.
- [8] 菊池綾嶺、中村光、山本佳士：接触挙動を考慮したRBSMによるコンクリート構造のひび割れ進展・倒壊シミュレーション、土木学会論文集E, Vol.80, No.15, 2024.
- [9] Kawai, T. : New discrete models and their application to seismic response analysis of structures. Nuclear Engineering and Design, 48, pp.207-229, 1978.
- [10] Toi, Y.: Shifted Integration Technique in One- Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.31, pp.1537-1552, 1991.
- [11] 久田俊明、野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用、丸善出版、1995。
- [12] Cundall, P. A.: Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 25, Issue 3, pp. 107-116, 1988.
- [13] Gilbert, E. G., Johnson, D. W., and Keerthi, S. S.: A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space, IEEE Journal on Robotics and Automation, Volume: 4 Issue: 2, pp. 193-203, 1988.
- [14] Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete element modeling for irregularly-shaped sand grains. Proc. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, pp. 239-246, 2002.
- [15] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学、丸善出版、2020。