

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11857

研究課題名（和文）並列ペリダイナミクスによる大規模接触破壊シミュレーションの実現

研究課題名（英文）Large-scale contact fracture simulation based on parallel peridynamics

研究代表者

椎原 良典（Shiihara, Yoshinori）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：90466855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、接触破壊問題の解析が可能な粒子法ベースのシミュレーション手法、NOSBペリダイナミクスの確立を目的として研究を実施した。その成果は、(1) 重み関数法による接触計算の高度化、(2) 速度粘性法による数値計算安定化、(3) これら手法による接触破壊問題の実現、の3点にある。一軸引張り問題等の基本的な問題において重み関数法と速度粘性計算の妥当性を検証し、手法として確立した。また、それらの手法を平板への円筒の貫入問題と小球衝突による積層板の剥離問題に適用し、実験結果との比較を通じてその妥当性・有用性を立証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、NOSBペリダイナミクスによる実用的な接触衝撃破壊シミュレーションをはじめ実現した。ペリダイナミクスによる同様のシミュレーションはNOSB以外の定式で行われているものの、その材料モデルは高度な材料非線形に対応できない。本手法は、(1) これまでに蓄積された豊富な構成則データベースを利用可能な上で、(2) 実験を模擬しうるレベルの接触破壊シミュレーションを実現した、という意味で大きなインパクトがある。本研究の成果物となるプログラムは、接触破壊が介在する様々な工業上の問題解決局面で利用される基底的ツールへの発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research aimed at establishing NOSB peridynamics, a simulation technique based on particle methods capable of analyzing contact fracture problems. The outcomes of this research include three main achievements: (1) improved contact calculations through the weighted function method, (2) stabilization of numerical computations using the velocity viscosity method, and (3) successful application of these methods to solve contact fracture issues. The validity of the weighted function and velocity viscosity methods was verified using fundamental problems, such as uniaxial tension tests, thereby establishing them as reliable techniques. Additionally, these methods were applied to the penetration of a cylinder into flat plates and the delamination of laminated plates caused by small sphere impacts, demonstrating their validity and utility through comparison with experimental results.

研究分野：機械工学

キーワード：粒子法 接触 破壊 ペリダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

物体同士の接触により生じる破壊は、工学上重要な現象である。ある飛来物が構造物に衝突することで生じた破片は連鎖的な破壊を招く。自動車、航空機等の輸送機器においては、その構造信頼性を担保するために設計過程で衝突試験が繰り返される。衝突下でどのような破壊が生じるのか、破片がどのような挙動で運動するのか、衝突にさらされる機械構造物の強度設計には、接触がもたらす破壊現象への理解が不可欠である。ここでは、この問題を接触破壊問題と呼称する。

近年では、コスト減等を目的として、実験の一部をシミュレーションへと置換する試みが進んでいる。衝突試験においても例外ではない。しかしながら、連続体の変形を扱う標準的シミュレーション手法である有限要素法には、破壊現象において不可避の問題がある。その主なものは、(1) その定式に破壊現象を含んでいないこと、(2) 過大な応力集中が構造強度を低く見積らせてしまうこと、の2点である。(1)については、破壊のモデリングに特殊なモデルを要求する格好となる。そのようなモデルにはいずれも短所があり、事前に想定されたき裂進展のみしか再現できない等の瑕疵がある。(2)は、有限要素法が立脚する局所弾性論の問題である。き裂近傍等の応力特異場では応力が発散するため、破壊が実現象より早い段階で生じてしまう。このような理由から、接触破壊問題は既存の手法によって適切に扱えない未開拓問題として残されていた。

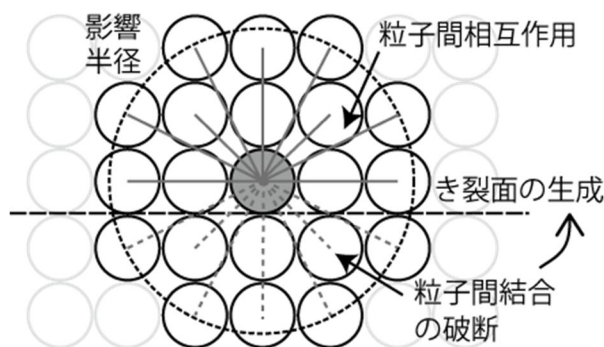


図 1 ペリダイナミクスにおける粒子間結合関係とその破断による破壊のモデリング

ペリダイナミクスは粒子法をベースとする新しい連続体シミュレーション法である。粒子により連続体を数値離散化し、変形を粒子の運動、内力場を粒子の相互作用により表す。その唯一無二な特徴は、破壊現象に適した定式を有する点にある。ペリダイナミクスでは物質点を粒子として扱うことから、破壊を粒子間の破断として直接モデル化できる。また、非局所弾性論に基づくことから、応力特異場においても過度な応力集中が生じない。ペリダイナミクスを用いることで、既往の手法では難しい破壊現象(き裂の進展速度、分岐等)を実験と比較可能なレベルで再現できることが知られている。

一方で、ペリダイナミクスは新しい手法であることから、現時点で有限要素法に比肩するレベルで確立したとは言えない。特に、高度な材料非線形を有する材料の扱いに問題がある。応力ひずみ関係が非線形となる材料非線形材料は、金属等の塑性材料や、ゴムや生体材料等の超弾性材料などの重要な構造材を含んでいる。一般的なペリダイナミクスの定式は応力とひずみという概念を有さないことから、それらの高度な材料モデルを扱えない。Non-Orthogonal State-Based (NOSB) ペリダイナミクスはひずみと応力という概念を定式に内包する手法である。粒子配置の変化から変形勾配テンソルを近似することで、そこからの Green-Lagrange ひずみと構成則を通じた応力の計算を可能としている。しかし、NOSB ペリダイナミクスも同様に新しい手法であり、十分に確立した連続体シミュレーション法であるとは言えない。特に、接触破壊問題のような複雑で高度なモデリングが要求される問題においては、全く適用例が存在しない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、接触破壊問題の解析が可能な NOSB ペリダイナミクスの確立を目的として研究を実施した。特に着目した点は、接触モデルの高度化である。従来検討されてきたペリダイナミ

クスでは、規則的に粒子が配列した構造（構造格子）を用いるため、曲面同士の接触を精度よく再現できないことがわかった（図2）。曲面に沿った粒子配置とするためには、粒子を非規則的（非構造格子）に配置できる必要がある。本研究では、定式の変更により、非構造格子状粒子配置を可能とすることで従来不可能であった接触問題の高精度化を実現する。このことにより、接触面積を正しく再現でき、接触計算の精度が向上する。さらには、階段状に並んだ粒子同士が接触することで生じる偽の摩擦現象も防ぐことができる。この提案手法を、本研究では重み関数法と呼称する。重み関数法によるペリダイナミクス法を確立し、接触問題に適した手法へと発展させる。

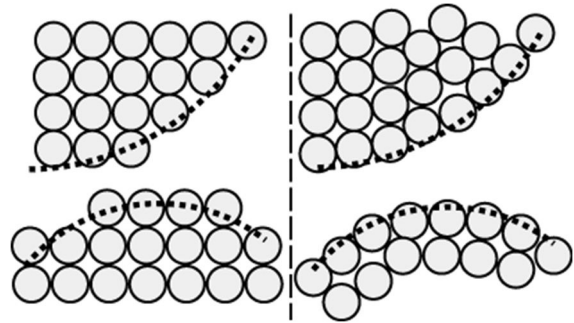


図2 粒子配置による曲面表現の違い
左：構造格子，右：非構造格子

さらに、ゼロエネルギーモードと呼ばれる NOSB 法に特有の数値計算不安定性についても検討を実施した。周囲粒子との速度差により粒子の非物理的な振動を抑制する速度粘性法を提案し、他手法との比較を通じてその優位性を確認した。

構築したプログラムを実際の接触破壊問題に適用し、その実用性を明らかとすることも本研究の目的の一つとした。定式の改良を通じて、これまでに例のない、NOSB ペリダイナミクスでの接触破壊問題を目指した。

なお当初計画では、接触破壊問題の大規模シミュレーションの実現のために領域分割による並列計算にも取り組む予定であった。研究の中で、接触破壊が進む中での並列負荷のリバランス機能の実装に困難が生じたため、OpenMP によるスレッド並列化へと方針を切り替えた。このことにより、数十万粒子を有する衝突破壊シミュレーションを実現することができた。

3. 研究の方法

本研究の成果は、(1) 重み関数法の開発、(2) 速度粘性法の開発、(3) 接触破壊問題への適用、の3点にある。その研究方法の具体的内容を記す。

(1) 重み関数法の開発

一般的な NOSB ペリダイナミクスでは、次式で i 粒子における変形勾配テンソルを評価する。

$$\hat{\mathbf{F}}_i = \left[\sum_{j=1} \omega(\xi) (\mathbf{Y}(\xi) \otimes \xi) V_{ij} \right] \left[\sum_{j=1} \omega(|\xi|) (\xi \otimes \xi) V_{ij} \right]^{-1} \quad (1)$$

ここでは、粒子 i を中心としたある影響半径内に存在する粒子 j について和を取る。 \mathbf{Y} は現配置での粒子 ij 間相対位置ベクトル、 ξ は基準配置での粒子 ij 間相対位置ベクトル、 ω は粒子 ij 間の結合がある場合 1、ない場合 0 となるスカラーである。また、 V_{ij} は i の影響半径内に j が有する体積である。この式では V_{ij} を定めるために、粒子を構造格子の格子点上に配置することを要求する。

一方で、重み関数法では式(1)の V_{ij} を次式の W'_{ij} で置き換える。

$$W'_{ij} = \begin{cases} \beta V \left(1 - \frac{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^2}{\delta^2} \right) & (|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| < \delta) \\ 0 & (|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| \geq \delta) \end{cases} \quad (2)$$

δ は影響半径であり、 β はパラメータである。 W'_{ij} は基準配置での粒子間距離 ($|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|$) で決まる。 V_{ij} を定める必要がないことから、粒子配置に自由度を設けることができる。これにより、図2右のような滑らかな材料表面を表現することが可能となる。 β は簡単な問題で式(1)での結果を再

現するように定めた。

(2) 速度粘性法の開発

ゼロエネルギーモードは、NOSB ペリダイナミクスに特有の数値計算不安定性問題である。その発生原因は、式(1)の変形勾配テンソルの近似にあるとされる。その結果エネルギー的に等価な構造が複数生じることによって、そのエネルギーの間を往來することで振動が生じる。この振動の速度が計算過程において次第に増幅することで計算が発散する。

本研究の提案手法である速度粘性法では、次式の抑制力を粒子に働く力へ付与することを通じてゼロエネルギーモードを抑制する。

$$\mathbf{T}^{ZE}[\mathbf{x}]\langle\xi\rangle = c_v \frac{2\omega_v \rho}{DV} \left(\varsigma(\mathbf{x}) \frac{\int_H \omega\langle\xi\rangle v' dV'}{\int_H \omega\langle\xi\rangle dV'} - v \right) \quad (3)$$

ここで、 C_v は速度粘性係数、 ω_v は粒子の最小振動数であり、いずれも妥当な値に設定する必要がある。 ω_v については、抑制力を与えない計算における粒子の振動から決定した。また、 C_v は適切な結果を与えるために調整可能なパラメータとして利用した。式(3)において、抑制力の対象である粒子の速度が v であり、その影響領域 H 内にある粒子の速度 v' を平均化したものが積分項である。これらが一致したときには非物理的な粒子の振動がないものとして抑制力がゼロになるが、そうでない場合は振動が生じているものとして値が生じる。速度粘性は、その名の通り速度を減少させるためエネルギーが保存しない。一方で、構造シミュレーションにおいてこのようなダンピング力は簡易に計算を安定化させる手法として需要がある。この提案手法は、ペリダイナミクスにおいてそのような安定化手法を提供するものである。

(3) 接触破壊問題への適用

これらの手法の有用性を検証するために、本研究課題では平板への円筒の貫入問題と小球衝突による積層板の剥離問題を対象として、NOSB ペリダイナミクスによるシミュレーションを実施した。本稿では、平板への円筒の貫入問題での結果のみを示し、小球衝突による積層板の剥離問題の結果は割愛する。

平板への円筒の貫入モデルを図3に示した。円筒の投射体を剛体、衝突対象である平板は弾塑性体の鉄鋼とした。比較対象となる先行研究の実験結果では、投射体の初速度を変化させたケースにおいて、プレート貫通後の残留速度がそれぞれ計測されている。ここではNOSBによるその再現を目指した。

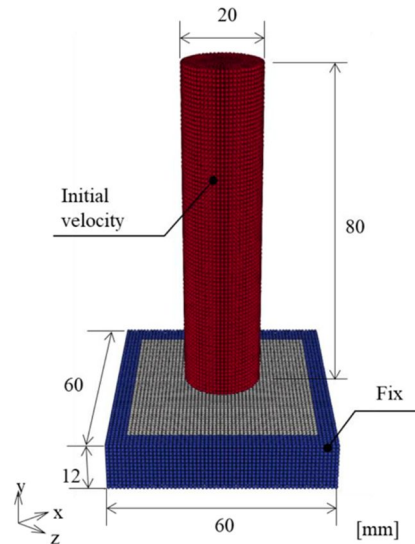


図3 平板への円筒の貫入モデル

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

本研究課題の遂行を通じて得られた主な成果をここに列挙する：一軸引張り問題等の基本的な問題において重み関数法と速度粘性計算の妥当性を検証し、手法として確立した。また、それらの手法を平板への円筒の貫入問題と小球衝突による積層板の剥離問題に適用し、実験結果との比較を通じてその妥当性・有用性を立証した。本稿では平板への円筒の貫入問題におけるシミュレーション結果を記述する。

平板への円筒の貫入問題での結果を示す。設定すべき材料パラメータである平板における弾塑性特性とエネルギー解放率は、一軸引張り試験を通じて同定し

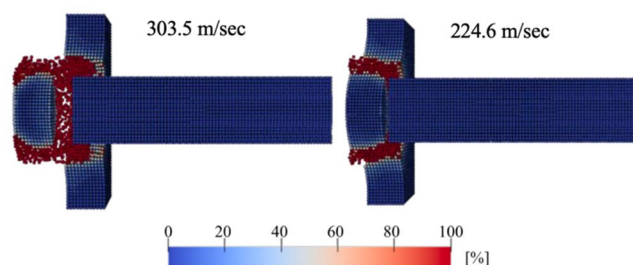


図4 平板の接触破壊におけるダメージ

た。また、速度粘性法におけるパラメータ ω_v も同様に一軸引張試験を通じて同定した。

初速度を 303.5 m/s、あるいは、224.5 m/s とした条件における平板の接触破壊の様子を図 4 に示す。これらの速度条件下においては、破断が主にせん断によって生じていること明確に捉えられた。このことは先行研究における実験を通じて観察された結果と定性的に一致している。なお、このような結果は速度粘性法を用いることなしに得られなかった。図 5 に見られるように、既往の安定化手法では衝突部が全て挫滅する結果となった。このことから、速度粘性が接触破壊を実現するための鍵となったことがわかる。

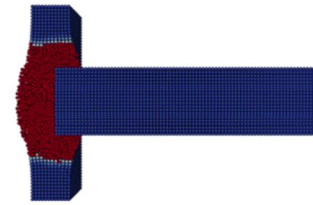


図 5 既往の安定化手法による平板の接触破壊傾向。

図 6 に、初速度 303.5 m/s での各粘性速度係数に対する残留速度と、実験による残留速度 200.6 m/s を比較した結果を示した。粘性速度係数が増加するにつれて残留速度は減少する。これは、粒子の速度が人工粘性により減じることでエネルギー損失が生じることを意味している。また、実験値を再現する係数が 6.0 近辺であることがわかった。図 7 ではこの粘性係数を用いて、初速度と残留速度の関係を調べた結果を示した。図のように、適切に速度粘性係数を設定することで、実験を再現する接触衝突シミュレーションを NOSB ペリダイナミクスにより実現することができた。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究課題は、NOSB ペリダイナミクスによる実用的な接触衝撃破壊シミュレーションをはじめて実現した。ペリダイナミクスによる同様のシミュレーションは NOSB 以外の定式で行われているものの、前述のとおり、その材料モデルは高度な材料非線形に対応できない。本手法は、(1) これまでに蓄積された豊富な構成則データベースを利用可能な上で、(2) 実験を模擬しうるレベルの接触破壊シミュレーションを実現した、という意味で大きなインパクトがある。

(3) 今後の展望

本研究では、定式の改良と並列計算を通じて接触破壊問題におけるペリダイナミクスの欠点の克服を実現した。さらに大規模並列化に適したアルゴリズム開発を進めていくことで、極めて動的な大規模接触破壊シミュレーションを高精度に解くことが可能となる。本研究の成果物となるプログラムは、接触破壊が介在する様々な工業上の問題解決局面で利用される基軸的ツールへの発展が期待できる。

以上

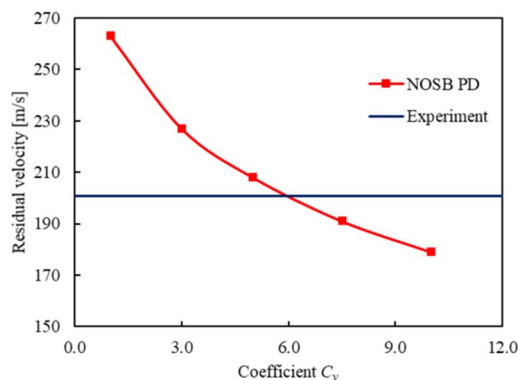


図 6 速度粘性係数と残留速度の関係。実験の残留速度を再現するように速度粘性係数を設定した。

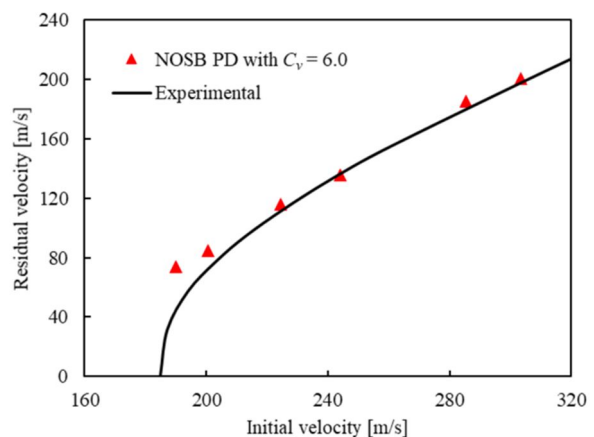


図 7 残留速度：NOSB-PD によるシミュレーション結果と実験結果の比較。速度粘性係数を適切に設定することで実験結果を再現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------