

動的陽解法による不連続体解析手法の開発

八木, 唯夫 / YAGI, Tadao

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

118

(発行年 / Year)

2015-09-15

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第368号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2015-09-15

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012338>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名	八木 唯夫
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 586 号
学位授与の日付	2015 年 9 月 15 日
学位授与の要件	本学学位規則第 5 条第 1 項(1)該当者(甲)
論文審査委員	主査 教授 竹内 則雄 副査 教授 吉田 長行 副査 教授 酒井 久和 副査 東北大学教授 寺田 賢二郎

動的陽解法による不連続体解析手法の開発

1. 論文内容の要旨

不連続体は、石積みなどのブロック構造のように、離散的な固体が集まって構成されているものと、元は連続体であった固体や構造体内に外力の作用によって塑性やクラックなどの破壊が発生し、それらが進行してメカニズムを形成した後、流動状態、すなわち、不連続体となるものの 2 通りに分類される。前者の場合であれば、個別要素法（DEM：Distinct Element Method）や不連続変形法（DDA：Discontinuous Deformation Analysis）が有力なシミュレーション手法となる。後者の場合は、連続体と不連続体の間に位置するメカニズム状態を境として有限要素法（FEM：Finite Element Method）に代表される連続体的手法と不連続体手法が使い分けられることが多い。

一方、最近、防災・減災などの観点から、壊れる前の状態から、壊れた後の状態までを連続的にシミュレーションするマルチステージ破壊シミュレーション（MFS：Multistage Failure Simulation）が着目されている。しかし、現在のところ、連続体から不連続体まで、同一の理論に基づき、一貫して解析する手法はなく、例えば、結合有限要素－個別要素法（CFDEM：Combined FEM/DEM）のように、幾つかの異なった解析手法を結合する方法が提案されている。

本研究は、このような現状において、ハイブリッド型仮想仕事の原理に基づくハイブリッド型ペナルティ法（HPM：Hybrid-type Penalty Method）を基礎として、連続体から不連続体までを一貫してシミュレーションするための統一的な理論展開を示しており、MFS 手法を開発するための一つの考え方を提案している。さらに、MFS 手法にとって不可欠なせん断すべりの影響が残されている流動化後の初期の状態に対する解析のため、剛体変位場を仮定した HPM を拡張して個別要素法的アルゴリズムを適用した陽的手法を提案し、簡単な数値計算例を通して、その性能を評価している。この手法は、既存の離散化極限解析用のモデルである剛体－ばねモデル（RBSM：Rigid Bodies-Spring Model）を拡張した手

法と同等な手法となっており、他の方法と区別するため、動的陽解法 **RBSM** と称している。

本論文は7章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、上述した研究背景を述べ、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章では、本論文の主題である連続体と不連続体の定義を示し、既往の不連続体解析手法に関するモデル化の考え方の違いについて整理している。さらに、**MFS** の必要性について述べるとともに、本研究の目的である、**MFS** 手法に対する一つの考え方を提案している。さらに、適用事例として、斜面安定問題を取り上げ、**MFS** との関係を示している。

本研究では、ハイブリッド型仮想仕事の原理を基に誘導された **HPM** を基礎として、不連続体解析手法の統一的展開を試みるため、第3章において動的問題に対するハイブリッド型仮想仕事の原理に基づく **HPM** の定式化を展開している。また、不連続体解析の統一的展開のため、変位場として剛体変位を含む線形変位場を用いて離散化方程式を誘導している。

第4章では、メカニズム形成後の初期流動状態に対するシミュレーション手法を提案するため、第3章で離散化した **HPM** の変位場を剛体変位場と仮定している。このときの質量行列は、**DEM** と同じ対角成分のみで表されることを陽な形式で示している。この関係を用い、さらに、要素間作用力が、隣接する要素間に設けられたばねに蓄えられるエネルギーを評価して求められことを用いると、運動方程式が要素単位に、陽に計算できることが述べられている。さらに、この関係を用い、特定要素の周辺に作用している表面力の合計を一般化することで外力として利用する方法が示されている。なお、**DEM** は、本章で示した一般化された外力に対して、点接触として計算する特殊なケースになることが指摘されている。要素運動の際に境界や別の要素と衝突する場合、**DEM** は点接触をベースとしているのに対し、**RBSM** は面接触としていることから、線分交差判定を接触判断に利用する方法が提案されている。また、接触面上に複数の積分点を配置することで、接触の精度を向上する方法も提案している。最後に、破壊の取り扱いについて述べている。本章では摩擦力や粘着力を付加するための破壊条件として、モールクーロンの破壊基準を採用している。**DEM** のような点接触では取り扱いが難しい摩擦によるエネルギー損失を、せん断方向にスライダーを設定し、せん断力が降伏条件を超える場合、スライダーが摩擦抵抗力として作用することで表現する方法を展開している。

第5章では、動的問題に対する時間積分法について述べている。はじめに、各要素境界面上にペナルティ関数を配置した場合の変位を未知数とする **Newmark** の β 法の適用方法が示されている。次に、本研究の目的である、陽解法による時間積分の定式化が示されている。陽解法には、中心差分近似を用いる方法と、**DEM** で用いられている接触力と加速度の差分近似から、運動量を算出する方法があるが、離散体の取り扱いとしては、**DEM** 的アプローチを用いて運動を表現する動的陽解法 **RBSM** が適切で、第3章で示した接触の取り扱いの違い以外は **DEM** と同じアルゴリズムになることを示している。

第6章では、逐次的に進展する崩壊挙動の再現性や、地すべり問題への適用性を数値解析の立場から検討している。はじめに、本論文で提案した動的陽解法 **RBSM** の性能を評価

するため、単純ブロックを用いた簡単なモデルにより跳躍運動やすべり運動に対する理論解と比較し、一致した解が得られることを示している。また、任意の角度で衝突した場合に、接触面の積分点を増やすことで、精度をコントロールできることを示している。次に、複数ブロックを用いて、単層すべりと複層すべりの問題を解析し、簡便法との比較検討を行っており、簡便法と同等の解が得られている。これは、面接触を採用することで、流動初期のすべりに伴う安全率の変化が追跡できることを意味している。すべりが連鎖的に発生する場合、簡便法では解析が難しいが、提案手法によれば、そのような場合においても順次崩壊パターンを評価できることが示されている。

第7章では、本研究で得られた成果を総括している。本研究では、統一化された定式化のもと、連続体からメカニズムを経て不連続体を形成する地盤や構造物の崩壊過程を、横断的に解析するマルチステージ破壊シミュレーション手法の中核をなす HPM を元にした動的陽解法 RBSM を提案し、その適用性を示すことができた結論づけている。

2. 審査結果の要旨

破壊の進展に伴い、連続体が不連続体へと変わり、流動状態に至る過程を解析する MFS において、数値モデル化を難しくしているのがメカニズムの存在である。多くの場合、メカニズムを形成する前後において FEM を主とする連続体的手法と、DEM や DDA のような離散体を取り扱う手法に使い分けて解析するのが一般的である。DEM や DDA を用いれば、ばらばらな離散体がぶつかり合いながら、それぞれに運動するような挙動を解析することができる。これらの解析手法を連続体にも適用し、マルチステージ破壊シミュレーション(MFS)手法として利用するための様々な工夫がなされている。しかし、元々、離散体を前提に開発されたモデルであるため、近似精度は高くなく、設計レベルでの定量的な利用には多くの問題も残されている。

一方、連続体力学に基づき開発された FEM を不連続体の解析手法である DEM と結合することで精度の向上をはかる CFDEM といった MFS 手法も提案されている。しかし、それぞれ、異なった背景で開発されたモデルであるため、自由度の考え方や接触のとらえ方など、理論的な統一性はなく、両者を結合するアルゴリズムは、複雑なものとなっている。

以上のような現状において、MFS 手法の確立のためには、既存の不連続体解析手法の理論的な関係を明らかにしておく必要がある。本研究では、動的問題の基礎方程式を基にハイブリッド型仮想仕事の原理を用いて理論展開を行い、要素毎に独立な変位場によって誘導した離散化方程式を用いてこの点を検討し、DEM, DDA, RBSM, HPM の4つの解析法に関する関係を明らかにしている。

次に、HPM の離散化方程式に DEM と同等の時間積分に関するアルゴリズムを適用することで、剛体変位場を用いた HPM と同等の動的陽解法 RBSM 手法を提案している。RBSM は、本来、連続体がメカニズムを形成する際の状況を解析する離散化極限解析を目的として開発されたモデルで、アルゴリズム上は剛性方程式を解く連続体的手法に分類される。本研究では、これを不連続体解析に拡張している。メカニズム形成後の初期の流動状態では、せん断に伴う摩擦の影響が不連続体の挙動を支配することが多々あるが、DEM などの点接触を主体とする方法では、この点を考慮するのが難しかった。本研究で提案された方法は面接触を取り扱っているため、この点を容易に考慮することができ、初期流動状態の解析に適したモデルとなっている。すなわち、本研究は (HPM-動的陽解法 RBSM-DEM) の手順で、連続体から流動状態の不連続体をシミュレーションする新しい MFS 手法への道筋をつけたものととらえることができる。

このように、本研究は、MFS の理論的研究に資することが大であると判断される。また、提案された手法は統一的な理論展開の元、新しい MFS 手法の開発に貢献するものとする。

よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。