法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-28

引張破壊エネルギーを考慮したハイブリッド型ペナルティ法によるコンクリート構造の離散化解析法に関する研究

上林, 厚志 / KAMBAYASHI, Atsushi

(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
99
(発行年 / Year)
2022-03-24
(学位授与番号 / Degree Number)
32675甲第548号
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2022-03-24
(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/10.15002/00025231

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	上林　厚志
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 801 号
学位授与の日付	2022 年 3 月 24 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　田中　豊
	副査　教授　山本　佳士
	副査（学外）東京大学教授　鈴木　克幸

引張破壊エネルギーを考慮したハイブリッド型ペナルティ法による コンクリート構造の離散化解析法に関する研究

１．論文内容の要旨

ひび割れを評価する方法として，分布ひび割れモデルと離散ひび割れモデルがある．後者の離散ひび割れを扱う解析手法には個別要素法(DEM)や不連続変形法(DDA)などがあるが，これらは動的解析を基本としており点接触を扱っている．これに対して，剛体バネモデル（RBSM）やハイブリッド型ペナルティ法（HPM）は連続体から離散体へ移行する崩壊過程を表すことを目的としており，接触判定を要素（部分領域）間の面で行う．

RBSM と HPM のどちらも離散ひび割れモデルを用いる解析方法であるが，RBSM では要素を剛体と仮定しているため，要素間変位をひび割れ幅としてみなすには，要素変形がひび割れ幅に比べて極めて小さい必要がある．これに対して HPM は，変形が許容された離散体（部分領域）をペナルティ関数で接続しており，離散ひび割れの発生はペナルティの消滅というシンプルな手法で評価することができ，部分領域間の相対変位をひび割れ幅とみなすことができる．このひび割れ幅を用いれば，ひび割れ後の応力解放に，ひび割れ後の応力とひび割れ幅の関係で表される引張軟化曲線を用いることができる．この引張軟化曲線下の面積が引張破壊エネルギー（G_f）であるため引張軟化曲線を用いた解析は G_f を考慮した解析となる．

また，HPM は部分領域に変形体を仮定しているため，離散ひび割れが発生する直前までの連続体の変形精度がよく，FEM と同等の精度を有している．一方で，HPM は要素間のペナルティ関数に大きな値を用いているため荷重項が極端に大きくなり変位制御手法の適用が難しく，これまでは荷重制御による解析が行われていた．しかし，ピーク後に荷重が低下する現象の解析は変位制御でなければ難しい．

本論文では，このピーク後の荷重低下現象を含むひび割れ進展問題を正確に解くことができる解析手法の開発を目的として，HPM に変位制御手法を導入した新しい非線形解析ア

ルゴリズムの開発を行っている．また，引張破壊エネルギーを考慮して応力を解放するアルゴリズムを開発し，提案手法に導入している．さらに，この提案手法を用いて，無筋コンクリートのひび割れ進展解析および鉄筋コンクリート Deep Beam の解析を行い，その適用性について検討している．

本論文は 5 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，本研究の目的や意義を明確にしている．

第 2 章では，ハイブリッド型仮想仕事式にもとづく HPM の基礎方程式および離散化方程式の誘導と，荷重制御アルゴリズムによる材料非線形解析法の詳細を述べている．HPM では連続体を部分領域に分割し，部分領域間の変位の連続性を付帯条件により導入している．離散化にあたり，この付帯条件を Lagrange の未定乗数を用いて仮想仕事式に導入し，ハイブリッド型の仮想仕事式を誘導する．Lagrange の未定乗数は物理的には表面力となるが，これに剛体バネモデルの考え方を適用して離散化方程式を誘導している．次に，荷重制御によるコンクリートの材料非線形解析法について述べている．解放力を考慮した増分法による荷重制御手順は，第 3 章で述べる変位制御のアルゴリズムと密接に関係するため，詳細な計算フローについても新たに整理して記述している．

第 3 章では，コンクリートのひび割れに伴う進行性破壊の計算に適した変位制御によるアルゴリズムの提案と．引張破壊エネルギーの取り扱い方の 2 点について詳細が述べられている．はじめに，変位制御を用いた HPM における離散ひび割れの計算フローが示されている．次に，変位制御点のペナルティ行列の定式化と外力項の求め方が示されている．なお，初期ひび割れ発生後に解放応力だけでひび割れが進む，いわゆる進行性破壊を起こした時にも安定的に解析結果が得られることを確認している．

つづいて，引張破壊エネルギーを考慮した解析手法を用いて，HPM のひび割れ構成モデルが要素寸法に依存しないことの確認を行っている．次に破壊エネルギーを現実的な範囲で変更した場合の解析の適用性を確認するとともに，破壊エネルギーをパラメータとして曲げ引張実験を解析し，その再現性の確認を行っている．破壊エネルギーでは，開口変位をパラメータに設定しているが，HPM でも開口変位が求められるため，そのまま，破壊エネルギーの評価に利用している．

第 4 章では，ひび割れ計算手法の適用性の確認を行っている．最初に，引張破壊エネルギーを求める実験を行い，支持点拘束の影響の程度と 3 次元的なひび割れ進展状況を確認している．支持点での拘束は実験値の荷重変形関係に少なからず影響している．また，ひび割れはひび割れ面に沿って三次元的に広がっており，側面から観察されるひび割れが分岐していても内部では一つのひび割れとなっているような状況が確認されている．

次に，この実験を HPM 変位制御で解析し，その適用性を示している．さらに，引張強度，弾性係数等をパラメータとした感度解析を行い，実験結果の荷重－開口変位関係を包絡する解析が可能であることが示されている．ここに示した実験だけでは圧縮強度が異なった場合やノッチ深さが異なる場合の適用性の確認が十分でないため，既往の研究における三

点曲げ実験に対するシミュレーション解析を行い，ノッチ深さを変えた場合とコンクリート強度を増加した時の変化を適切に解析できることを示した．

最後に，鉄筋コンクリート造の Deep Beam の実験に対するシミュレーション解析を行った．鉄筋を含むコンクリート構造においても，初期の曲げひび割れの発生からせん断ひび割れが進展し破壊に至るまで実験とほぼ同様の結果となった．

第 5 章では，本研究で得られた成果を総括し，今後の課題についても述べている．

以上のように，本論文では，HPM によるコンクリート構造の引張破壊エネルギーを考慮した変位制御に基づく新しい解析手法を提案している．この方法はピーク後における荷重低下現象の解析が可能であり，いくつかの数値解析例を通して，コンクリートのひび割れ進展問題に対する本手法の適用性が示されている．

２．審査結果の要旨

コンクリート部材の解析では，ひび割れを表す方法の一つして，FEM で広く用いられている要素内に分布したひび割れを扱う方法がある．このような分布ひび割れとして扱う場合は鉄筋の付着によるコンクリートの応力分担をコンクリートの引張軟化曲線として与えることができる．この方法は付着を詳細にモデル化せずに全体の解析を精度よく解析できるが，ひび割れが要素全体に分散すると仮定するため，ひび割れ本数を陽に設定することができない．このため，要素寸法に依存する解析となる．

これに対し，DEM や DDA，RBSM，HPM など不連続体解析手法を用い要素間のひび割れを離散ひび割れとして扱う方法がある．DEM や DDA は動的解析を基本とし点接触を扱っているため，破壊エネルギーの評価が難しい．一方，RBSM と HPM は連続体から離散体へ移行する崩壊過程を表すことを基本としており，接触判定を要素（部分領域）間の面で行う．しかし，RBSM は要素を剛体と仮定しており，ボロノイ分割以外での変位の精度が低いと言う問題点がある．さらに，HPM は要素間の連続性をペナルティ関数により取り込んでいるため，変位制御アルゴリズの構築が難しいという問題点があった．

このような，ひび割れ解析において様々な問題が山積する状況のなか，コンクリートのポストピーク挙動に対する課題がクローズアップされてきている．この挙動はピーク後に荷重が低下する現象で，従来の荷重制御による方法では解析が困難であり，変位制御を用いる方が有利となる．そのような現状ににあって，本研究は，以下の２点の提案を行って課題の解決を図っている．

① ひび割れに伴う表面力の解放に伴う荷重増分アルゴリズムとポストピークの解析に必要な変位制御アルゴリズムを同時に考慮するため，荷重制御と変位制御が混在するハイブリッド的なアルゴリズムを提案し，安定した解が得られるように工夫している．
② 要素間の相対変位を開口変位として取り扱い，破壊エネルギーを考慮する方法を提案している．これによって，要素寸法に依存しにくい解析結果につながる．

以上のように，本論文では，HPM によるコンクリートの引張破壊エネルギーを考慮した変位制御に基づく新しい解析手法を提案した．この方法はピーク後における荷重低下現象の解析が可能であり，いくつかの数値解析例や実験による検証を通して，コンクリートのひび割れ進展問題に対する本手法の適用性を示すことができた．

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．