

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19812

研究課題名（和文）き裂の発生から進展に至る破壊の段階を矛盾なく移行可能なシームレス解析の開発

研究課題名（英文）Development of a seamless simulation that enables consistent transition of fracture stages from crack initiation to propagation

研究代表者

新宅 勇一 (Yuichi, Shintaku)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：80780064

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行するために、中間段階における変位場の不連続性が遷移する過程を表現可能な数値解析手法の提案である。最終的に、破壊力学に基づく数理モデル（埋込型損傷構成則）を用いてすべての段階を扱うことで、各段階の移行時に無用な近似を排除して、初期段階で生じた疲労損傷が最終段階のき裂進展に及ぼす影響を力学的に首尾一貫して評価可能な手法の構築を目指すものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行するために、中間段階における変位場の不連続性が遷移する過程を表現可能なPetrov-Galerkin法およびMicromorphic approachに基づく非局所アプローチを提案した。双方の手法ともに埋込型損傷構成則の枠組みで定式化を行うことで、破壊の初期段階から最終段階までを力学的に首尾一貫して評価可能となった。さらに、有限被覆法と組み合わせることで、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行可能な数値解析手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to propose a numerical method that represents the transition process of discontinuity of displacement field in the middle stage of fracture for an end goal that realize seamlessly the transition from from the initial stage to the final stage. With the end of goal in mind, a numerical method in which the whole stages are represented by the same mathematical model based on the fracture mechanics is developed to coherently evaluate the effect of fatigue damage at the initial stage on the crack propagation at the final stage without any approximation method.

研究分野：計算力学

キーワード：破壊力学 損傷力学 計算力学 き裂進展解析 計算力学 非局所アプローチ Micromorphic approach Petrov-Galerkin法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

原子炉や橋梁などの鋼構造物が地震動による繰り返し载荷を受けると、溶接部などの応力集中部では塑性変形が生じ、それに起因して疲労損傷が発生することが知られている。さらに、兵庫県南部地震では疲労損傷によって発生したき裂が急速に進展へ至り、多くの構造物が脆性破壊となったことが報告されている[1]。その原因として、塑性変形に誘起された疲労損傷によって破壊靱性値が低下したことが考えられる[2]。これに対して、既存の設計手法では破壊現象ごとに分類して評価するため、疲労損傷が破壊靱性値に及ぼす影響は考慮されていない。さらに、脆性破壊は構造物の崩壊に繋がるため、発生したき裂が進展、もしくは停止するかを評価する必要がある。そのため、疲労損傷によってき裂が発生する破壊の初期段階から進展に至る最終段階までを網羅的に取り扱える数値解析手法を用いて、疲労損傷による破壊靱性値の低下を考慮して脆性破壊の有無を評価する必要がある。

既存の破壊に関する数値解析手法は、損傷力学モデルと通常の有限要素法を組み合わせた弱不連続解析と、破壊力学モデルとメッシュフリー法を併用した強不連続解析に大別され、き裂による変位の不連続性の表現方法が異なる。前者は変位が不連続で、その一階微分であるひずみは連続となるのに対して、後者は変位とひずみの両方とも不連続である。これに起因して、双方の手法は相反する利点と欠点を有しており、片方だけでは疲労損傷によってき裂が発生する破壊の初期段階と、脆性的に進展する最終段階を網羅的に扱えない。換言すると、前者は破壊の初期段階において疲労損傷によって発生するき裂を予測するのに適しており、後者はき裂の進展解析と親和性が高い。すなわち、破壊の初期段階に弱不連続解析を適用し、最終段階に強不連続解析を実施すれば両者の欠点は解消されるが、変位が弱不連続から強不連続へ移行する破壊の中間段階を扱える数値解析手法が欠如しているため、実際に両者の間を数値的な振動などなく、シームレスに移行することは困難である。

2. 研究の目的

そこで本研究課題の目的は、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行するために、中間段階における変位場の不連続性が遷移する過程を表現可能な数値解析手法の提案である。最終的に、破壊力学に基づく数理モデル(埋込型損傷構成則)を用いてすべての段階を扱うことで、各段階の移行時に無用な近似を排除して、初期段階で生じた疲労損傷が最終段階のき裂進展に及ぼす影響を力学的に首尾一貫して評価可能な手法の構築を目指すものである。

3. 研究の方法

まず、埋込型損傷構成則を非局所アプローチの枠組みで再定式化したうえで、き裂進展問題におけるメッシュ分割の方向依存性を回避するために Petrov-Galerkin 法を提案した。加えて、有限要素法の高次形である Isogeometric 解析のプログラムを開発し、両者を組み合わせることで解析可能とした。具体的には、これまでに提案してきた局所理論に基づく結合力埋込型損傷構成則を非局所アプローチへ拡張するために、応力と結合力の釣り合い式の弱定式化を導入した。また、形状関数の C^0 連続性に起因するメッシュ分割の方向依存性を回避するために、応力と結合力の釣り合い式の重み関数に対して Petrov-Galerkin 法を採用した。すなわち、有限要素間でのき裂面の連続性を考慮するために、重み関数を従来の試行関数の一階微分の関数から、見かけ上のひずみを差分近似した試行関数と同次の関数へとき裂進展に伴って変化させた。これにより、従来の手法ではメッシュの分割に依存してき裂が進展していた問題を解決し、適切な解析結果を得られるようになった。

次に、提案した Petrov-Galerkin 法に基づく非局所アプローチでは、応力と結合力との局所的な釣り合い式を弱形式化した方程式、および構造物全体における力の釣り合い表す方程式を連成して解くために、数値計算が不安定になる問題が生じた。そこで、既存の非局所アプローチの一種である Micromorphic approach を参考にして、埋込型損傷構成則の枠組みに整合するように再定式化を行った。Micromorphic approach では、材料内部における局所的な状態を表す内部状態変数に対して、構造物全体における大域的な変数として Micromorphic 変数を定義し、双方の変数が等しくなるように拘束条件を導入する。ただし、埋込型損傷構成則はき裂の方向に応じた異方性を表すモデルであるため、客観性の原理を満足するように Micromorphic 変数を定義した。さらに、従来の Micromorphic approach では拘束条件を満足させるためにペナルティー法が採用されるが、それに加えて Lagrange の未定乗数による定式化も行った。

最終的に、強不連続解析手法の一種である有限被覆法と新たに定式化した Micromorphic approach に組み合わせることで、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行可能な数値解析手法を構築した。具体的には、き裂の開口変位が臨界値に達した有限要素に対して、有限被覆法を適用することで不連続面を導入し、複数の有限被覆へと分割するアルゴリズムを開発した。また、分割前後の有限要素と有限被覆では数値積分の位置が異なるため、分割前の各積分点における状態量を分割後の積分点にマッピングするアルゴリズムも実装した。

4. 研究成果

(1) Petrov-Galerkin 法に基づく非局所アプローチ

従来手法 (Galerkin 法に基づく局所アプローチ) との比較

Petrov-Galerkin 法に基づく非局所アプローチにおいて新たに導入した数値パラメータ c_0 を変化させた際の応力ひずみ線図を図 1 に示す。ただし、従来の局所理論に基づく結合力埋込型損傷構成則を用いた有限要素法による結果を実線で併記している。図 1 に示すように、 c_0 の値によらず、全て従来手法と完全に一致する結果が得られている。したがって、均一な単純引張の問題において数値パラメータ c_0 の感度はなく、本提案手法は従来手法と等価な手法であることがわかる。なお、 $c_0=0.00$ と設定した場合は、 Galerkin 法に基づく非局所アプローチの定式化と一致する。

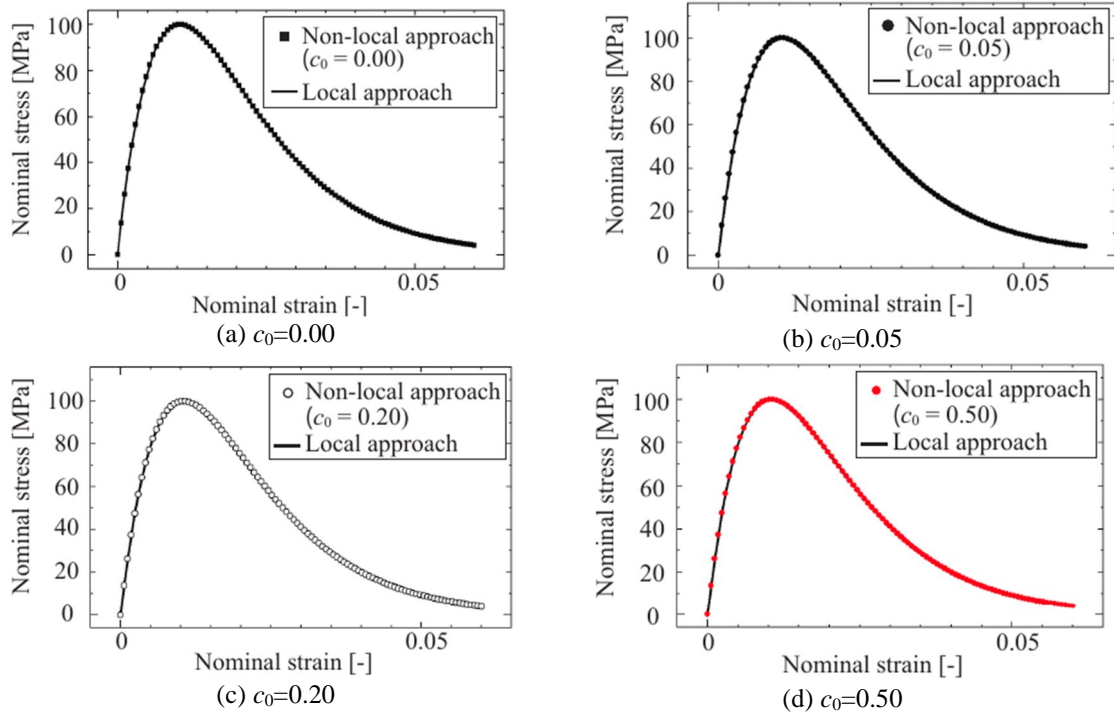


図 1 従来手法および提案によって得られた応力ひずみ線図

メッシュ依存性の検証

まず、従来の局所アプローチに基づく有限要素法を適用した際の数値解析結果を図 2 に示す。ただし、正方形のみで分割された有限要素メッシュ、および歪んだ形状を含む有限要素メッシュに対して解析を実施した。この図から有限要素法を適用した場合、数値解析より得られたき裂進展経路はメッシュ分割によって大きく異なっていることがわかる。図 2 に示された有限要素法の結果は、損傷の局所化の影響によるものと考えられる。すなわち、従来手法では幾何学的に連続なき裂面が表現されず、基底関数の C^0 連続性に起因して有限要素ごとに変位の局所化が生じる。そのため、図 2 のように解析結果がメッシュ分割に大きく依存するものと考えられる。

次に、Petrov-Galerkin 法に基づく有限要素法を適用した際に得られたき裂進展経路を図 3 に示す。この図から両メッシュにおいてき裂は初期き裂から真っすぐに進展しており、一致した結果が得られていることが確認できる。本提案手法においてはき裂の進展に伴って結合力に対応する重み関数を変化させている。その際に、重み関数は基底関数の 1 階微分から 0 階微分へと遷移するため、き裂進展方向の連続性が高次化される。また、遷移に際して最大主方向に生じる結合力に対して移流の効果が生じると考えられる。そのため、損傷の局所化が回避され、メッシュ分割に依存しない結果が得ることができている。なお、紙面の都合で省略するが、提案手法に基づく Isogeometric 解析を用いることで、有限要素法と同様に、従来の Isogeometric 解析でも生じるメッシュ依存性の問題を解決可能なことを確認している。

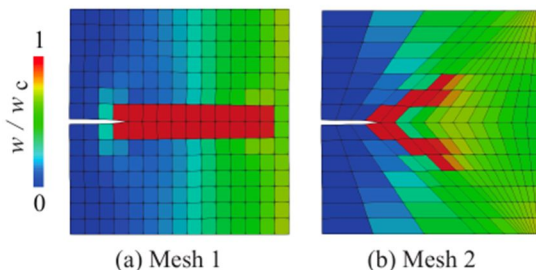


図 2 従来手法

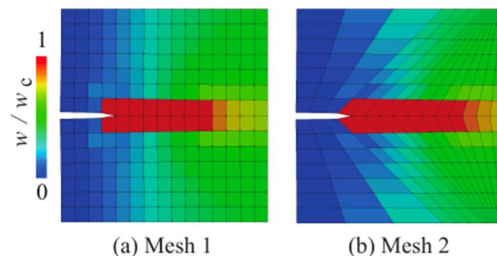


図 3 提案手法

(2) Micromorphic approach に基づく非局所アプローチおよび有限被覆法

Micromorphic approach に基づく非局所アプローチと有限被覆法を組み合わせた数値解析手法によって得られたき裂進展の様子を図4に示す。ただし、前節のように正方形のみで分割された有限要素メッシュ、および歪んだ形状を含む有限要素メッシュ、さらにそれらを細かく分割した有限要素メッシュの計4種類に対して数値解析を実施する。この図より、強制変位の各段階においてほぼ同じき裂の進展速度であることが確認できる。また、前節の結果と比較すると、有限被覆法と組み合わせたことで、破壊の最終段階においてき裂の開口を陽的に表現できていることが確かめられる。

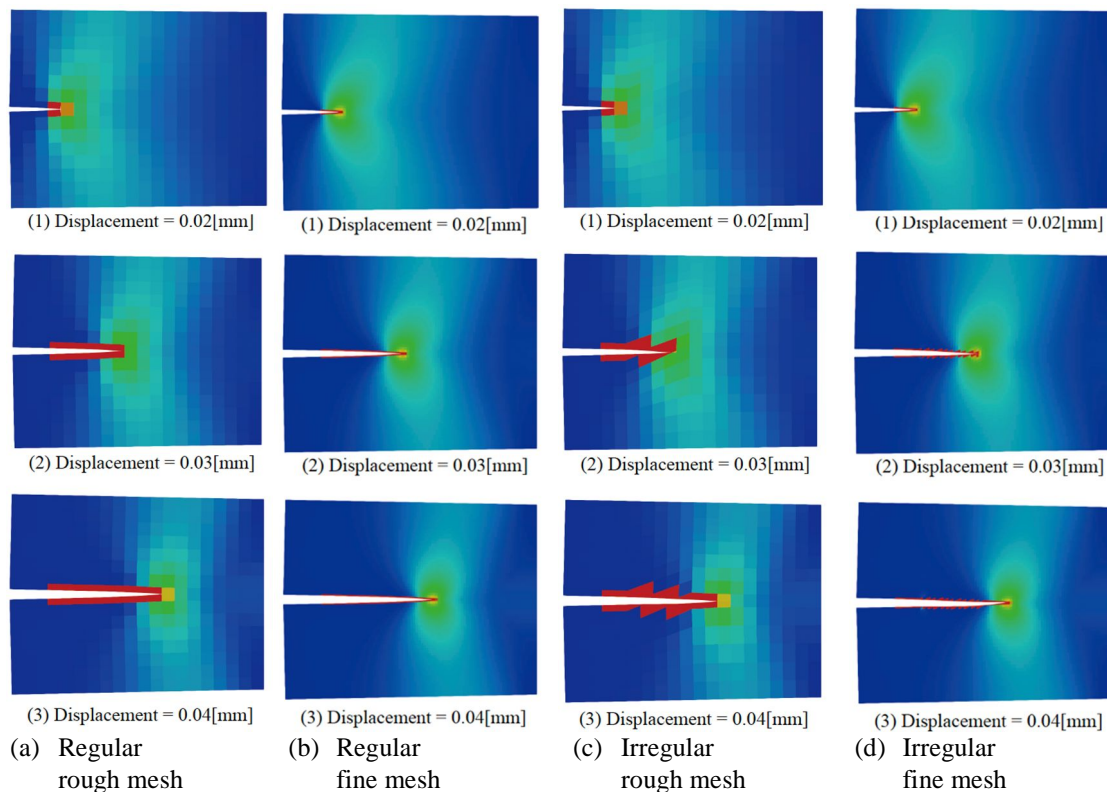


図4 提案手法によって得られたき裂進展挙動

(3) まとめ

本研究では、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行するために、中間段階における変位場の不連続性が遷移する過程を表現可能な Petrov-Galerkin 法および Micromorphic approach に基づく非局所アプローチを提案した。双方の手法ともに埋込型損傷構成則の枠組みで定式化を行うことで、破壊の初期段階から最終段階までを力学的に首尾一貫して評価可能となった。さらに、有限被覆法と組み合わせることで、破壊の初期段階から最終段階へシームレスに移行可能な数値解析手法を構築した。

<参考文献>

- [1] 土木学会構造委員会：鋼構造物の安全性の調査 1995
- [2] 三木ら：土木学会論文集 2000

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 金澤 凌平、新宅 勇一、寺田 賢二郎	4. 巻 2021
2. 論文標題 非局所アプローチに基づく結合力埋込型損傷構成則および Petrov-Galerkin 法の適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20210008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jscses.2021.20210008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 新宅 勇一、中村 文俊、堤 成一郎、寺田 賢二郎	4. 巻 2022
2. 論文標題 塑性ひずみ範囲の依存性を考慮した硬化則を用いた弾塑性モデルのための主双対内点法による陰的解法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20220001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jscses.2022.20220001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shintaku Yuichi、Tsumumi Seiichiro、Terada Kenjiro	4. 巻 153
2. 論文標題 A CDM-like constitutive law for predicting degradation of strength and ductility of steel subjected to cyclic loading	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Plasticity	6. 最初と最後の頁 103237 ~ 103237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijplas.2022.103237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 SHINTAKU Yuichi、IMAI Daiki、TERADA Kenjiro	4. 巻 88
2. 論文標題 Numerical material testing based on homogenization method for non-periodic media (Formulation using microscopic fluctuation displacement and macroscopic strain)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 22-00049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 稲岡龍彦, 新宅勇一
2. 発表標題 超弾性モデルに基づく結合力埋込型弾塑性損傷構成則によるポイドおよび破壊靱性値に関する不確実性評価
3. 学会等名 日本機械学会第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎本巨, 新宅勇一
2. 発表標題 き裂面の連続性を考慮した結合力埋込型損傷構成則を用いた非局所アプローチ
3. 学会等名 日本機械学会第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Imai, Y. Shintaku, K. Terada
2. 発表標題 A new homogenization scheme based on energy and kinematic preservation: application for predicting dispersion of macroscopic material strength on ferrite-perlite steel
3. 学会等名 XVI International Conference on Computational Plasticity
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Nakamura, Y. Shintaku, K. Terada
2. 発表標題 Prediction of fracture toughness at steel bridge after cyclic loading by a CDM-like constitutive law combined with cohesive zone model and memory surface
3. 学会等名 XVI International Conference on Computational Plasticity
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井大貴, 新宅勇一
2. 発表標題 金属材料の脆性破壊に対する強度のばらつき評価に向けた非周期性を許容する均質化法の提案,
3. 学会等名 第29回茨城講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村文俊, 新宅 勇一
2. 発表標題 塑性誘起損傷および塑性ひずみ振幅依存性を考慮した結合力埋込型弾塑性モデルによる地震動を受けた鋼橋の残存耐荷力評価
3. 学会等名 第29回茨城講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲岡龍彦, 新宅勇一
2. 発表標題 確率的選点法を用いた延性脆性遷移領域における破壊靱性値のばらつき評価
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎本 亘, 新宅勇一
2. 発表標題 塑性解析における計算時間の短縮を目的とした有限要素法の検討
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村文俊、新宅勇一
2. 発表標題 Memory surfaceによる硬化の影響を考慮した材料モデルに対する主双対内点法の適用
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井大貴、新宅勇一
2. 発表標題 数値材料試験を用いたへき開破壊に起因する材料強度のばらつき評価
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金澤凌平、新宅勇一
2. 発表標題 き裂進展解析に対する損傷の非局所性の影響に関する数値解析的検討
3. 学会等名 日本機械学会 2020年茨城講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井大貴、新宅勇一
2. 発表標題 フェライト - パーライト鋼における結晶すべりおよびへき開破壊を考慮した数値材料試験
3. 学会等名 日本機械学会 2020年茨城講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村文俊、新宅勇一
2. 発表標題 Memory surface を考慮した弾塑性モデルによる地震時の鋼橋の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 2020年茨城講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神田寛明、新宅勇一
2. 発表標題 主双対内点法を用いた非線形材料モデルのパラメータ同定
3. 学会等名 日本機械学会 2020年茨城講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F. Nakamura, Y. Shintaku, S. Tsutsumi and K. Terada
2. 発表標題 Assessment of residual strength and toughness of steel bridge by a cohesive-force embedding constitutive law combined with plasticity-induced damage and memory surface
3. 学会等名 COMPSAFE2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Imai, Y. Shintaku, K. Terada
2. 発表標題 Multiscale prediction of macroscopic material strength dispersion on ferrite - pearlite steel by numerical material testing
3. 学会等名 COMPSAFE2020
4. 発表年 2020年

〔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
---------	---------