

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：11301
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560495
 研究課題名（和文） ハイブリッド FRP の材料と構造の設計ツールの開発

研究課題名（英文） Development of a Tool to Design
 Materials and Structures of Hybrid FRP

研究代表者

岩熊 哲夫（IWAKUMA TETSUO）
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：60120812

研究成果の概要（和文）：複合材料の解析的平均化手法では、設定する母材によって精度が大きく異なり、複数種類の介在物や界面剥離の剥離後の扱いが困難であった。本手法では弾塑性材に任意の母材を選択できる手法を新しく提案し、数値解析によって介在物が多種にわたる場合の解析を容易にし、界面剥離後も安定して解析できる解析手法を提案し、任意のハイブリッド複合材料およびそれをを用いた構造の開発のために数値解析的設計ツールの開発を行った。

研究成果の概要（英文）：Accuracy of analytical averaging methods of composite materials depends on the choice of the matrix materials especially in elastoplastic estimates with various inclusions. We proposed a new averaging method using the virtual matrix together with a finite element. In addition, the progressive debonding phenomenon along the interface was simulated by a simple model. Several numerical examples and comparisons with experimental results showed the characteristics and feasibility of this tool.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：複合材料、均質化、平均化

1. 研究開始当初の背景

複合材料による社会基盤構造物建設では、鋼構造建設の歴史に影響されたためか、メーカーの供給する材料を利用するという傾向が強く、部材の特性に沿って材料を設計し直すという方針はあまり強くない。それは、多

くの実験によって材料を開発せざるを得なかったり、数値解析が複雑すぎて設計段階では使えないからではないかと考えた。一方、解析的方法は精度があまり良くないことから、一部の分野を除いて直接利用されているようでもなかった。しかし、材料開発実験の手間とコストを下げるために利用した成功

例ももちろん存在していた。そこで、最適設計にも利用できる解析的手法の精度を上げることが考えた。特に複合材料の弾塑性挙動の平均化予測においては、用いる母材で答がかなり異なることもわかっていたので、その精度向上についても別の角度から考察することを考えた。

2. 研究の目的

そこで、弾性では成功していた仮想母材を用いた平均化手法を、弾塑性に対しても適用できるように拡張し、簡単な数値解析によって得られる程度の巨視的な挙動予測を解析的に精度良く実現することを主目的とした。また、複合材料の終局強度は界面剥離が原因となることも多く観察されていることから、そのような界面剥離の発生と進展を追跡できるような半解析的な数値解析ツールを開発することを目指した。さらに、FRP 梁の実験でも観察されている層間剥離についてもモデル化を行って、その挙動予測を数値的に実施することも一つの目的とした。それを用いて FRP のハイブリッド化の定量的な評価と設計に役立つ手法を提案する。

3. 研究の方法

まず、弾性で提案してあった、仮想母材を用いた平均化手法を、弾塑性の増分理論に対して拡張し、予測される挙動の精度や特性について、その用いる仮想母材の違いという観点から整理し、設計段階を想定して比較的容易な予測が可能な方法を検討した。主に、エネルギー的なアプローチと self-consistent 的な方法を比較し、まずは理想的な材料設定でその解析特性を数値的に検討し、得られる巨視的な材料特性に及ぼす微視的な材料条件の影響を定量的に示した。さらに、実在する材料を用いた実験等との比較に基づき、手法の優劣について検討した。それを用い、他研究者による材料試験の実測データと比較して精度を比較した。

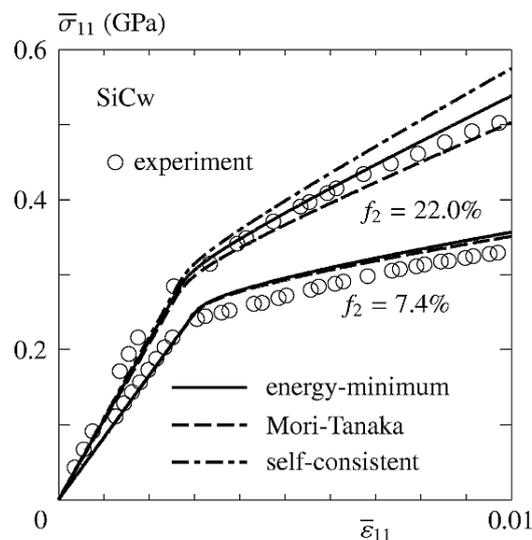
また剥離が生じたという報告のある材料実験および構造実験における実測データとも比較し、提案している剥離に関するモデルの良し悪しを検討した。得られた手法を用いて、FRP をハイブリッド化したときの優位性を定量的に示し、構造の例としての FRP 梁の実測データとの比較を行い、手法および剥離モデルの精度を考察した。

4. 研究成果

(1) 森・田中の手法に代表される弾塑性挙動の解析的平均化手法では、平均時に用いる母材によっては剛な結果しか求められなかつ

たりする。そのため、力学的な根拠も無いまま、接線係数や割線係数を流用してより実験結果に近い予測ができるようにする研究もある。一方、弾性挙動の予測でも種々の異なる平均化手法が提案されているが、それは結局は、平均時に用いる母材が個々に異なっているだけであることを我々は以前に説明することができた。つまり、平均時の見かけ上の母材を「仮想母材」と呼ぶことにした上で、その選択によって別々の平均化予測手法を説明することができた。そこではさらに、新しい方法としてエネルギーの考察に基づく最適な仮想母材を提案したが、その予測結果は、self-consistent 法として良く知られた手法による結果とよく似た特性を持っていることが明らかになっていた。そこで、本研究の弾塑性体の場合にも、エネルギー的な手法と self-consistent 法を併用する手法との二つを比較検討することにした。

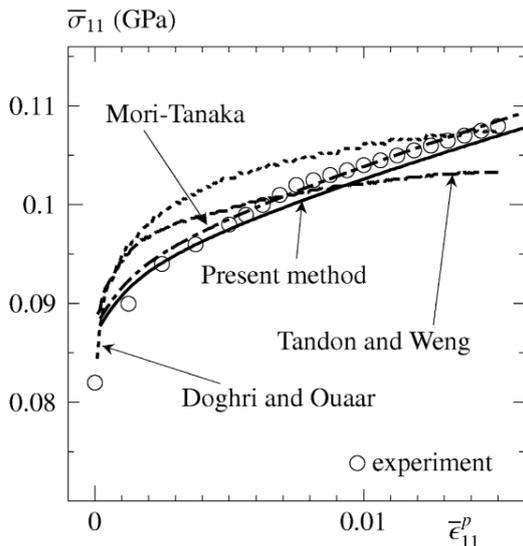
まず弾性の場合の「仮想母材」の概念を取り入れるために、弾塑性の増分理論の枠組の中で森・田中の手法を展開し、新しい増分森・田中の手法を提案した。定式化からは母材と介在物間の界面でのミスフィットをも自動的に非弾性ひずみとして定義すべきことが明らかになり、手法の適切さを式の上でも示すことができています。そこで仮想母材を増分的なエネルギー率を用いて一種の最適な材料で置き換えた場合と、self-consistent 法によって得られる材料で置き換えた場合とを比較検討した。ここで注意すべきことは、仮想母材を弾性体としたことである。通常、森・田中の方法では弾性母材を用いると予測の精度が悪いことがわかっている。この手法の比較をした一つが次の図である。数少ない



実験値との比較ではあるが、本手法の2方法の精度が従来の方法よりも改善できていることがわかる。また self-consistent 法を併用することには、それほどの力学的根拠は無

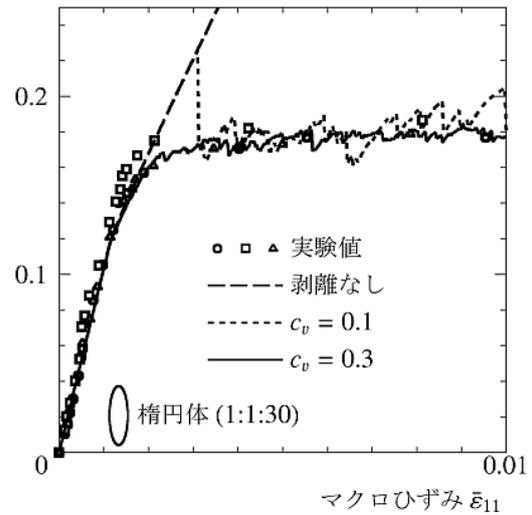
いものの、数値結果から判断されるその精度は良好である。特に設計段階の弾塑性解析に必須の繰り返し計算あるいは増分計算を念頭に置くと、self-consistent法の優位性も否定できない結果だった。

前述の接線係数や割線係数を用いた他のアプローチとの比較を行ったのが次の図である。これはエネルギー的アプローチによる本手法との比較であるが、実験値との差異から見ても、精度がかなり良くなっていることが明らかになった。



(2) 次に、界面剥離が生じた場合の予測された挙動の特性の検討と、得られた結果の実験との比較を実施した。まず数値解の正確さを確認するために、球形介在物が分布する複合材料の弾塑性挙動をいくつか予測した。球形介在物であることから、剥離はすべての介在物で同時に起きることになり、巨視的な応力ひずみ曲線は急激な応力降下が発生する。しかし、その降下後の弾塑性挙動は、最初から剥離をした介在物を入れた材料の巨視的挙動と完全に重なった。これは剥離が弾性域で生じても降伏後に生じても同様だった。これに対し、介在物形状や向きがランダムに異なって分布する場合には、剥離は徐々に発生し、巨視的な応力ひずみ関係には数多くの小さい応力の急下降現象が発生した。もちろん、剥離が発生する規準を設けなければ解析はできないが、本手法では最も単純で過去の研究でも提案されていた規準、つまり介在物界面の引っ張り主応力がある基準値に達したときに剥離が発生するとした。またこの基準値も実験値が無いため、実験で最初に剥離が発生する点を参考にしながら数値的に基準値を同定して与えた。ある実験値と比較したひとつの代表的結果が右上の図である。剥離後の残留強度についても実験値をよく説明する結果が得られていることから、剥離規

マクロ応力 $\bar{\sigma}_{11}$ (GPa)

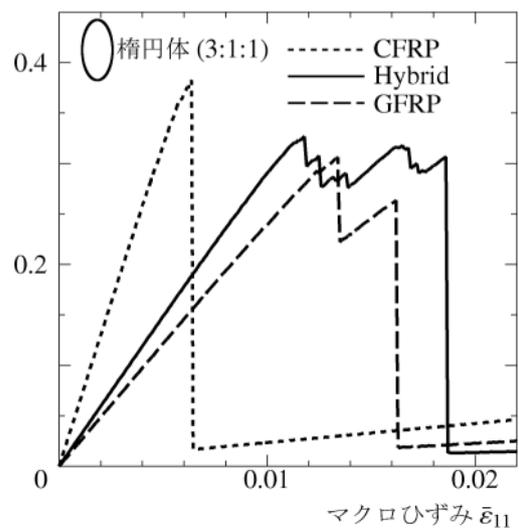


準の正当性を示すことができている。

剥離については系統的な実験結果が見当たらなかったことから、以上の結果に基づき、剥離の発生基準値のばらつきや、介在物の形状や向きの分布に対する平均挙動の違いを数値的に考察した。その結果、残留強度は主に剥離発生時の基準値に強く影響されることを示すことができた。また形状による差異は剥離発生にしか影響が無いことも示すことができた。

(3) さらに、FRPのハイブリッド化による巨視的な靱性改善を定量化したのが次の図である。一種類の繊維による補強の場合よりも、ハイブリッド化によって破壊までに必要なエネルギーが高くなっていることを示すことができています。

マクロ応力 $\bar{\sigma}_{11}$ (GPa)



(4) 最後に、FRP梁の実験の挙動予測を行った。主に外国の材料実験については、母材と

繊維の物性や形状等を明らかにした研究結果が公表されているため、(3)までの成果のような比較が容易であったが、わが国の建設材料に用いられる複合材料の場合、メーカーはその微視的なデータの詳細は公表せず、巨視的な強度や物性のみがわかっているだけだ。そのため、まず実験で用いられた梁の巨視的な特性から微視的な材料を予測することから始めざるを得なかった。この部分に、本研究で提案した平均化手法を用いて同定を実施した。GFRPの場合の同定の精度が今のところまだ十分とは言えないものの、巨視的な曲げ挙動のうちの崩壊前までの線形挙動はとてもいい精度で予測できるような材料設定にすることができている。

さて実験では、層間剥離で崩壊した場合と、部材の局部座屈で崩壊した場合とが観察されていた。特に層間剥離発生モデル化は困難である。というのも梁の場合に層の法線方向に生じる応力はかなり小さいからだ。そこで、本研究では、プレートガーダのウェブの鉛直座屈のモデル化で用いられる手法を流用し、梁に生じる曲げ圧縮応力が層間にみかけ上作り出す剥離を促す応力を算定し、それがある基準値に達したときに層間剥離が生じるとしてみた。これは他研究では採用されていないモデルである。このモデルで剥離を予測したところ、3種類の実験梁の崩壊の違いを説明することができた。つまり、座屈前に剥離が生じる梁の場合には、そうなることを定性的に示すことができた。また逆に、剥離前に座屈して崩壊した梁の場合にも、座屈以前には剥離条件が成立しないことも示すことができた。数少ない実験データのために、精度の検討まではできなかったが、モデルと本手法の有用性は示すことができたと考えている。

(5) 最終的に、本ツールは他の平均化手法をすべて説明できる最も一般化されたものとして捉えることができ、さらに力学的に意味のある母材を選択した上で精度良く複合材料の弾塑性挙動を予測できることを示すことができた。また、構造部材の設計段階で、構造のみならず材料の最適設計ができるようになる点では、他のアプローチに対して有用性がかなり高いものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① S. Koyama, S. Katano, I. Saiki and T. Iwakuma, A Modification of the Mori-Tanaka Estimate of Average

Elastoplastic Behavior of Composites and Polycrystals with Interfacial Debonding, *Mechanics of Materials*, 査読有、Vol.43, 2011, pp.538-555.

- ② 片野俊一、斉木功、小山茂、岩熊哲夫、ハイブリッド複合材料のはく離を考慮した有限要素の開発、*応用力学論文集*、土木学会、査読有、Vol.12, 2009, pp.299-310.

[学会発表] (計 1 件)

- ① T. Iwakuma, Alternative Mori-Tanaka Averaging Approach of Elasto-plastic Composites and Polycrystals, the Symposium in Memory of Professor Toshio Mura, 'Recent Advances in Nano-Micromechanics of Materials,' 2010年5月24日、米国イリノイ州ノースウェスタン大学。

[その他]

ホームページ等

<http://mechanics.civil.tohoku.ac.jp/~bear/iwakuma.html> (報告冊子体を置いた)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩熊 哲夫 (IWAKUMA TETSUO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60120812

(2) 研究分担者

斉木 功 (SAIKI ISAO)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40292247

山田 真幸 (YAMADA MASAKI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30323083