

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月12日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
東北大学・災害科学国際研究所
[職・氏名]
教授・寺田賢二郎
[課題番号]
JPJSBP 120208801

1. 事業名 相手国: 韓国 (振興会対応機関: NRF) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 複合材料の微視構造の特徴付けと力学性能評価のためのデータ駆動アプローチ

(英文) Data-driven approach for microstructure characterization and mechanical performance assessment of composite materials

3. 共同研究実施期間 令和2年4月1日 ～ 令和5年3月31日 (3年 0ヶ月)【延長前】 令和2年4月1日 ～ 令和4年3月31日 (2年 0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Yonsei University・Professor・Han Tong-Seok

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		2,280,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,140,000 円
	2年度目執行経費	1,140,000 円
	3年度目執行経費	— 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	27 名
相手国側参加者等	8 名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	(0)
2年度目	0	0	(0)
3年度目	7	0	3(0)

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

複合材料のばらつきを評価する手法は多く提案されているが、限られた因子による評価にとどまっており、網羅的に因子を考慮し、さらに予測したばらつきの抑制までを検討できる手法は確立されていない。本研究は、このような課題を背景として、不確実性を考慮した数値解析に基づく複合材料の材料特性評価について、実務レベルの設計・開発に対して具体的な枠組みを提案し、その適用事例を示すことを目的としている。なお、日本側では一方向強化ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)、韓国側では繊維補強コンクリート(SHCC)を評価対象として、お互いの有する技術を有機的に活用して研究目的の達成を目指すものである。これまでの研究交流状況は下記のとおりである。なお、研究計画の中では日本側の評価対象を CFRP(炭素繊維強化プラスチック)としていたが、韓国側への供試体の提供が難しい状況があったため、類似した材料である GFRP に変更している。

- ① 2022 年 11 月 11 日に延世大学校を訪問し、学生ワークショップを実施した。本ワークショップでは日韓両方から合計 11 名の学生が力学シミュレーションを中核とした計算科学、およびそこから得られる結果に対してデータ駆動分析を可能とするデータ科学の融合に関する最新の研究成果が共有された。
- ② 2023 年 1 月 25 日から同 2 月 15 日までの期間、韓国側から留学生 2 名を受け入れ、韓国側が進めている、複合材料のマクロな弾性特性を決定づけるマイクロ構造の幾何学的特徴量の主要な因子の特定に関する研究や、マイクロ構造の実測画像(CT 画像)からディープラーニングモデルを用いて 3 次元のマイクロ構造(図 8-1 (a))をコンピュータ内で仮想的に生成する研究について議論した。また、訪日した Tong-Seok Hang 延世大学校教授にこれらの研究成果の報告を行い、今後の方向性と研究計画について検討した。
- ③ 上記2の期間中、留学生に対して GFRP および SHCC の微視的(マイクロ)な構造と母材と繊維材の材料特性から複合材料の微視的(マイクロ)な応答を算出し(図 8-1 (b)), 巨視的(マクロ)な材料特性を評価する手法について技術提供し、その基盤となる均質化理論やコンピュータソフトウェアの具体的な使用方法について指導した。
- ④ GFRP 供試体の CT 画像をベースとしてマイクロ構造を作成し、力学特性を評価する手法を構築した(図 8-2)。CT 画像ベースで作成したマイクロ構造は非周期的な構造を有しており、従来の周期構造を前提とする数値材料試験を行って材料特性を適切に評価することは困難であったが、minimal kinematic constraints を考慮することで制約を緩和し、非周期的なマイクロ構造に対する数値材料試験による評価を可能とした。

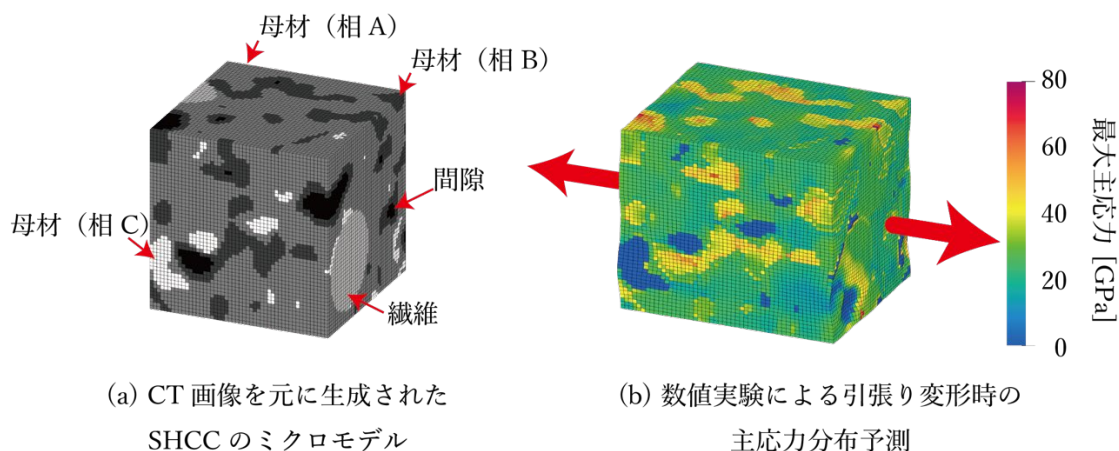


図 8-1 CT 画像を元に生成された SHCC のマイクロ構造と数値実験結果

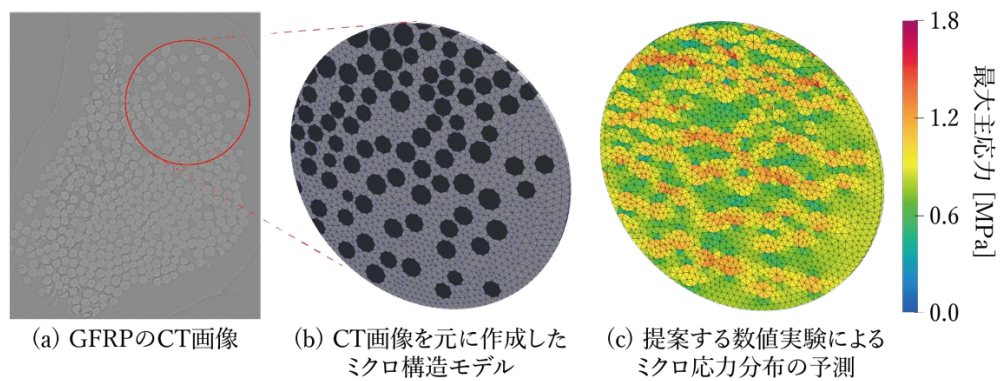


図 8-2 CT 画像ベースのマイクロ構造モデル作成と非周期性を考慮したマイクロ応力特性評価

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

- ① 8-(1)-③の成果として、複数の相(セメント, 混合物, 繊維, 間隙)を有する SHCC の周期的なマイクロ構造に対して、母材の損傷を考慮した数値材料試験を実施することで、実際のマイクロ構造を反映したマクロな力学特性の評価が可能となった。今後は、得られたマクロ材料特性を反映したマクロ材料構成則の定式化を行うことで、SHCC 製ブロックの亀裂実験をシミュレーションで再現することを目指すことになっている。
- ② 8-(1)-④で開発した数値材料試験手法を用いて GFRP のマクロな力学挙動のデータベースを作成し、本事業と並行して日本側で開発したデータ駆動型マルチスケール解析手法に適用することで、周期性を仮定しない任意のマイクロ構造に基づく分離型マルチスケール解析手法の開発に発展した。
- ③ 8-(2)-②の完成後、韓国側の研究と統合することで、GFRP や SHCC のマイクロ構造の非周期性に加えて、マイクロ構造のばらつきによる構造物中のマクロな力学特性のばらつきを反映したマルチスケール解析手法のプロトタイプが完成した。これにより、実際の複合材料構造物における、スケール間の相互作用に駆動される複雑な力学挙動がシミュレーション可能となり、複合材の力学特性決定メカニズムが明らかになると期待される。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

- ① 先述のように、両国の研究グループが保持する技術や経験を活かし、かつ両者の強みを融合した形で技術や情報を相互に提供したことで、複合材料の評価のための解析手法あるいはそのプロトタイプ、およびデータ取得方法を構築することができた。不確実性を考慮した数値解析の結果に基づく複合材料の材料特性評価に対して、実務レベルの設計・開発に対して有益な枠組みの提案と具体的な評価対象に関する適用事例の創出に向けて、本研究の学術交流が大きな原動力となった。
- ② 延世大学校にて対面で行ったワークショップでは、複数の学生の研究成果発表および意見交換を行うことにより相互の研究内容の理解を深めることができた。これにより、計画していた研究の範囲を超えた学術交流が実現し、研究者間だけでなく、学生間の交流を活性化することができた。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

- ① FRP を始めとする複合材料は金属に比して対腐食性に優れていることから、複合材料構造物は長寿命かつ低いメンテナンスコストで運用可能であり、サステナブルな社会基盤の構築において有用な材料である。しかしながら、既に述べたように、マイクロ構造に依存してマクロな力学特性にばらつきが生じることが複合材料構造物の設計において課題となっている。本研究では、この課題に対して複合材料のマイクロ構造とマクロな力学特性の関係を統計的手段によって明らかにすることで、ばらつきの影響を反映した予測シミュレー

ション手法を構築できただけでなく、ディープラーニングのための学習データの効率的な収集方法を提案することができた。この成果は、当初の目的であった複合材料の力学特性のばらつき要因の解明に貢献するだけでなく、CAEの実務におけるデータ取得方法としても有用であり、実際、この方法を汎用有限要素解析ソフトウェアに実装する作業に取りかかっている。

- ② 均質化法に基づく数値材料試験については、日本側研究代表者の著書「数値材料試験～有限要素法によるマルチスケール解析、丸善、2021」を韓国側研究代表に提供し、韓国語訳することになった。韓国には、同等の教科書・参考書が存在せず、この韓国語版の発刊により、先方の計算力学分野およびCAEの実務分野においてマルチスケール解析手法がよりいっそう浸透することが期待される。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

R2 および R3 年度は新型コロナウイルス感染拡大防止のために中止され、その機会が失われたが、そのなかでもオンラインによるワークショップは貴重な発表の機会になった。しかしながら、対面でのワークショップで英語による発表やディスカッション、およびその前後の情報交換は、若手研究者の養成において非常に重要な経験であることは誰もが認めるところである。本事業の1年延長の許可を得て、この対面での二国間交流が実現したことは、参画した若手研究者にとって大きな実りとなったものと確信している。また、R4 年度は、延世大学校から2名の博士課程学生を1ヶ月程度受け容れ、当方からは数値材料試験の理論と技術をプログラムソースレベルで提供したことで、彼らの研究を飛躍的に発展させることができたことも、本事業による大きな成果といえる。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

- ① 本研究が明らかにした複合材料のミクロ特性のばらつきとマクロ特性の関係を明らかにするための知見やシミュレーションに反映する方法論は GFRP や SHCC 以外の複合材料にも適用可能なものであり、様々な複合材料構造物の設計において強度のばらつきの予測や抑制が可能となることが期待される。
- ② 本共同研究代表者と相手国研究者は本事業実施前より10年来の交流があったが、本事業によってより信頼・協力関係を強固なものにすることができた。また、本事業で行われた取り組みによって、若手研究者や学生の間で新たな交流が生まれ、将来的な共同研究の基盤が固めることができた。本事業終了後も研究室単位で継続的に交流および協力する予定であり、より高度な研究開発が実現することが期待される。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

- スカラーシップアワード、日本計算工学会、2022年6月2日、韓霽珂