

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01407

研究課題名（和文）破壊力学的観点に基づく内部膨張反応メカニズムの解明と構造物性能照査手法の提案

研究課題名（英文）Clarification of internal swelling reaction mechanism from the viewpoint of fracture mechanics and proposition of assessment methodology of structural performance

研究代表者

三浦 泰人 (Miura, Taito)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10718688

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンクリートの内部膨張反応であるASR（アルカリシリカ反応）とDEF（遅延エトリングイト生成）固有の膨張挙動・コンクリートの力学特性変化・鉄筋の付着性状の変化・RC部材レベルの構造性能の変化を、実験・解析的検討により評価した。その結果、ASRとDEFの膨張異方性において、膨張相の時空間分布がマクロな膨張挙動に大きく影響することを提唱した。また、力学的なひび割れと膨張ひび割れのいずれのひび割れにおいても適用可能な力学特性低下の体系的なメカニズムを提唱した。日仏国際共同研究を実施し、膨張による鉄筋の付着劣化に関する世界初の実験データを取得するとともに、そのメカニズムを提唱した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膨張に関する力学現象を評価可能な世界最先端の数値解析手法を開発し、破壊力学的観点から統一的・体系的に説明可能な膨張異方性メカニズムを提唱しており、次世代の膨張研究の潮流の中核となる研究成果を輩出した。膨張異方性メカニズムに立脚したひび割れ情報に基づく破壊力学指標による膨張異方性と力学特性低下の推定手法により、膨張劣化した構造物の耐久性照査手法を刷新することができる可能性が非常に高く、学術的分野への貢献だけでなく、高い工学的価値を有している。

研究成果の概要（英文）：In this study, the expansion behavior, changes in mechanical properties of concrete, changes in adhesion properties of reinforcing bars, and changes in structural performance at the RC member level inherent in the internal expansion reactions ASR (alkali-silica reaction) and DEF (delayed ettringite formation) of concrete were evaluated through experimental and analytical studies.

As a result, we proposed that the spatio-temporal distribution of the expansion phase has a significant influence on the macroscopic expansion behavior in the expansion anisotropy of ASR and DEF. A systematic mechanism of mechanical property degradation applicable to both mechanical and expansion cracks was proposed. Conducted an international joint research project between Japan and France to obtain the world's first experimental data on adhesion degradation of steel bars due to expansion and proposed a mechanism for this degradation.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：内部膨張劣化 離散解析 破壊力学 付着性状

### 1. 研究開始当初の背景

体積膨張によるひび割れの発生によりコンクリート構造物の性能が変化する事例が世界各地で報告されている。コンクリートの体積膨張として、セメント中のアルカリと骨材との反応によって生成する ASR ゲルが膨張に起因するアルカリ骨材反応 (ASR)、高温養生を経てセメント中の硫酸成分とセメント水和物との反応によって生成するエトリンガイトが膨張に起因する遅延エトリンガイト生成 (DEF) があり、内部膨張反応 (ISR) として知られる。ASR ではコンクリートに網の目状のひび割れを生じさせるだけでなく、鉄筋の破断を引き起こすことが知られている。DEF も同様のひび割れが生じるものの、その膨張量は ASR と比較して 10 倍程度に至ることもある。ASR と DEF の事例は世界的に見ても増加傾向にあり、重要構造物での発生事例が確認されている。いくつかの抑制施策が提案されているものの、それが適切に機能しないケースもある。また、近年のプレキャスト製品の増加に伴って、特にプレキャストの RC 部材では DEF の発生リスクが高まっていることが懸念されている。

ISR により劣化した RC 構造物を議論する上で、拘束下の膨張異方性、弾性係数や強度といった力学特性の低下、鉄筋付着性状の変化、RC 部材レベルの持続荷重を含む長期変形性能の変化は把握しておくべき情報である。申請者のこれまでの研究から、ISR 膨張に関する拘束下の膨張異方性と力学特性低下は、膨張ひび割れがそのメカニズムに直接的に関与している可能性が高いことが分かってきた。ISR 膨張 (特に、DEF) による鉄筋の付着性状変化については実験データが皆無に等しい。鉄筋腐食の付着劣化メカニズムにおいて腐食ひび割れの発生によりコンクリートの拘束力が減衰することが主要因であることを踏まえると、付着性状は膨張ひび割れの発生により大きく低下すると予想できる。また、長期変形性能に関しては、ASR 膨張後の RC 部材のたわみ量が通常の 5 倍以上も発生するというデータも確認されているが、持続荷重作用の影響を含めて実験データ自体が極めて少ないことに加えて、変形性能に及ぼす鉄筋の付着性状変化の影響などの構造工学的視点が乏しい。これには ISR による膨張ひび割れを主軸として、コンクリートの膨張挙動、力学特性低下、鉄筋付着性状の変化、RC 部材レベルの長期変形性能の変化を破壊力学的観点から統一的・体系的に整理することが有効であると考えられる。ISR 膨張の問題を破壊力学的観点から整理すると、下記のボトルネックが挙げられる。①拘束下の膨張異方性のメカニズム (膨張圧発現メカニズム) が未解明、②膨張量ベースの力学特性低下の整理では本質的な低下メカニズムの議論ができない、③鉄筋付着性状の変化に関する実験データがない、④RC 部材レベルの持続荷重を含む長期変形性能に関する実験データが極めて少ない。これらの ISR 膨張の課題を破壊力学的観点からのアプローチによって解決を試みた。

### 2. 研究の目的

本研究では、ISR 膨張に対してひび割れを主軸とした破壊力学的観点からのアプローチによって、ASR と DEF 固有の拘束下の膨張異方性・コンクリートの力学特性変化・鉄筋の付着性状の変化・RC 部材レベルの持続荷重作用を含む長期変形性能に関する一連の研究を行い、ISR 膨張の未解明なメカニズムを根本的な解決に導くとともに、膨張量という寸法・形状依存性のある不確かなマクロ指標以外の統一指標を導出することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、上述した 4 つのボトルネックの解消に向けた個別研究について、ASR と DEF の劣化現象をそれぞれ横並びにして「実験的評価⇔解析的検証」を並列で実施した。

#### 研究I：ISR 膨張の拘束下の膨張異方性のメカニズムの解明

ボトルネック①「拘束下の膨張異方性のメカニズム (膨張圧発現メカニズム) が未解明」について、未解明な膨張圧発現メカニズムの解明に向けた数値解析的研究を実施した。数値解析手法は、開発を進めているメソスケールの離散解析手法の一つである 3D-RBSM (剛体バネモデル) を用いた。

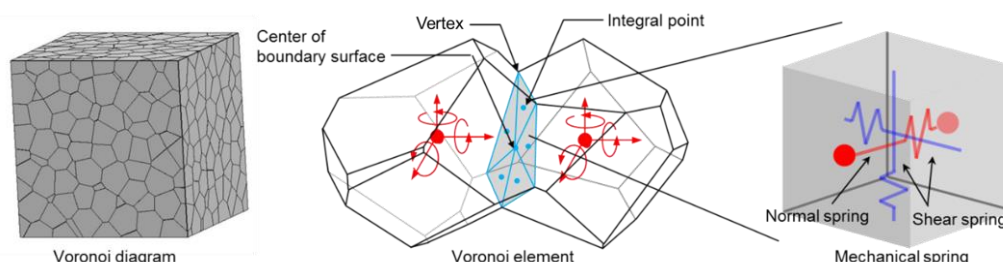


図-1 3D-RBSM の概要

**研究II：ISR 膨張による内部構成相の応力抵抗機構の解明**

ボトルネック②「膨張量ベースの力学特性低下の整理では本質的な低下メカニズムの議論ができない」ことについて、画像解析 (DIC) と RBSM を駆使した実験・解析的研究を行った。

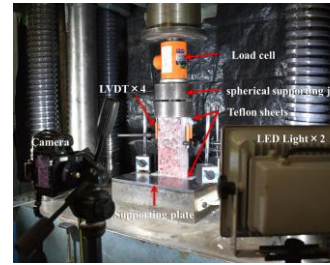


図-2 DICの様子

**研究III：ISR 膨張による鉄筋の付着劣化メカニズムの解明**

ボトルネック③「鉄筋付着性状の変化に関する実験データがない」ことについて、ISR 膨張後の RC 試験体による両引き試験を実施した。

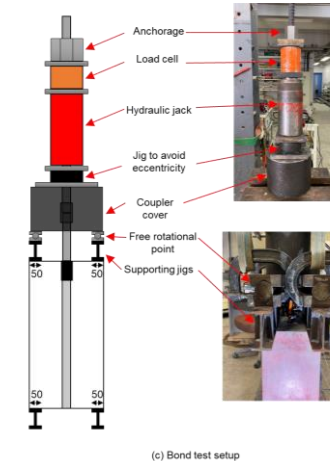


図-3 付着試験の様子

**研究IV：ISR 膨張に伴う RC 部材の長期変形性能評価**

ボトルネック④「RC 部材レベルの持続荷重を含む長期変形性能に関する実験データが極めて少ない」ことについて、RC はり部材の膨張後の部材性能に関する実験を行った。

**4. 研究成果**

本研究の成果の概略を、個別研究ごとに下記に示す。

**研究I：ISR 膨張の拘束下の膨張異方性のメカニズムの解明**

本研究では、球形仮定した骨材を解析上で直接表現することで、骨材内部やセメントペースト相の膨張相の時空間分布の影響を数値解析的に評価した (図-4)。その結果、膨張メカニズムとしては、ASR では骨材の岩種の違いによって骨材内部の膨張圧蓄積機構が異なり、さらにマクロな膨張異方性性状が大きく異なること解明した。DEF では、実験で観察される膨張異方性を説明可能な膨張モデルとして、断面内で膨張相が時々刻々と変化する膨張モデルを提案した。

**研究II：ISR 膨張による内部構成相の応力抵抗機構の解明**

本研究では、画像解析 (DIC) と RBSM を駆使することで、種々の要因で生じたひび割れによるコンクリートの力学特性低下のメカニズムを検討した。その結果、膨張ひび割れが生じた構成相によってマクロな力学特性への影響が異なることが明らかとなった。また、漸増持続荷重載荷試験を実施して、膨張ひび割れによる塑性ひずみの発生を評価したところ、塑性ひずみが時間依存で非常に大きく発達するが、塑性ひずみの発達過程で微細ひび割れの進展が生じないことを確認した。一方、弾性ひずみはひび割れの有無に関係なく常に一様に発達することを確認した。これらの実験結果を基に、力学特性の低下メカニズムとして、従来のように ASR と DEF の膨張ひび割れを評価するのではなく、ひび割れが生じていない弾性領域が重要であることを提唱し

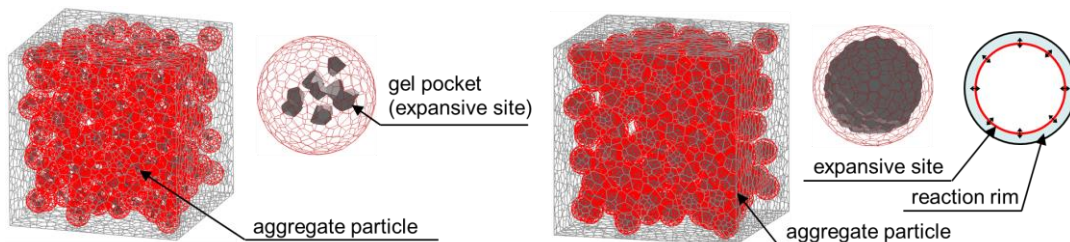


図-4 骨材モデルによる骨材内部の異なる膨張相の空間分布のモデル化

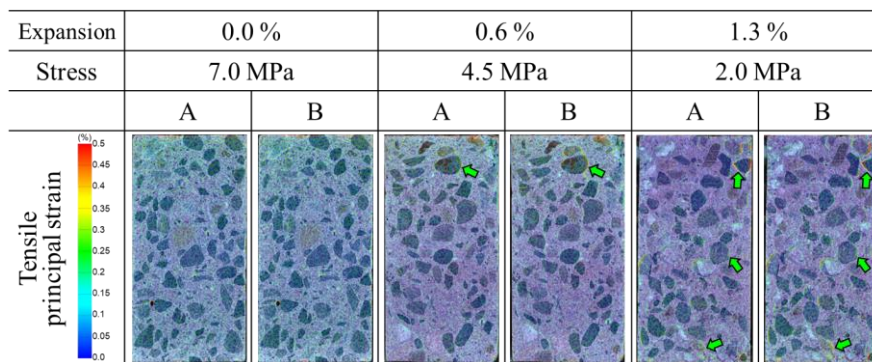


図-5 持続荷重載荷中の DEF 膨張ひび割れの閉合の様子 (A：目標応力レベル 25%到達時点、B 塑性ひずみ停滞後)



た。さらに、弾性ひずみによる力学特性の低下を説明可能な指標を提案した。また、力学的なひび割れによる力学特性への影響の違いを説明するコンセプトを構築した。

### 研究III：ISR 膨張による鉄筋の付着劣化メカニズムの解明

本研究では、膨張劣化した鉄筋コンクリートの付着性状の変化を評価する実験を行った。ASRでは付着性状に大きな影響はないものの、DEFでは膨張量0.5%以上では付着性状が大きく低下することを確認した。膨張過程と鉄筋引き抜き過程における付着応力とすべりの鉄筋軸の分布を評価したところ、鉄筋界面の付着性状の劣化によってマクロな付着特性が低下することを実験的に示した。DEF膨張による付着性状の低下に関する実験は世界で初めてのデータである。このデータに基づいて、付着劣化メカニズムを提唱し、DEF膨張では付着への影響が著しく大きいことを示した。

### 研究IV：ISR 膨張に伴うRC部材の長期変形性能評価

膨張劣化したRC部材の構造性能として、特に実験データのないDEF膨張によるRC部材性能の変化について実験を行った。その結果、断面内の鉄筋の拘束によって鉄筋軸方向のDEFによるコンクリートの膨張が強く抑制される結果を得るとともに、膨張ひび割れに方向性が生じることを確認した。さらに、DEF膨張によってコンクリート強度が大きく低下することから、膨張後の荷重変位関係が通常の挙動とは異なり、不明瞭な降伏点やポストピーク挙動を示すことを確認した。最終的に、DEFによるコンクリート強度の低下によって、一般的に用いられるRC部材の耐力算定式が適用できる可能性があることを確認した。

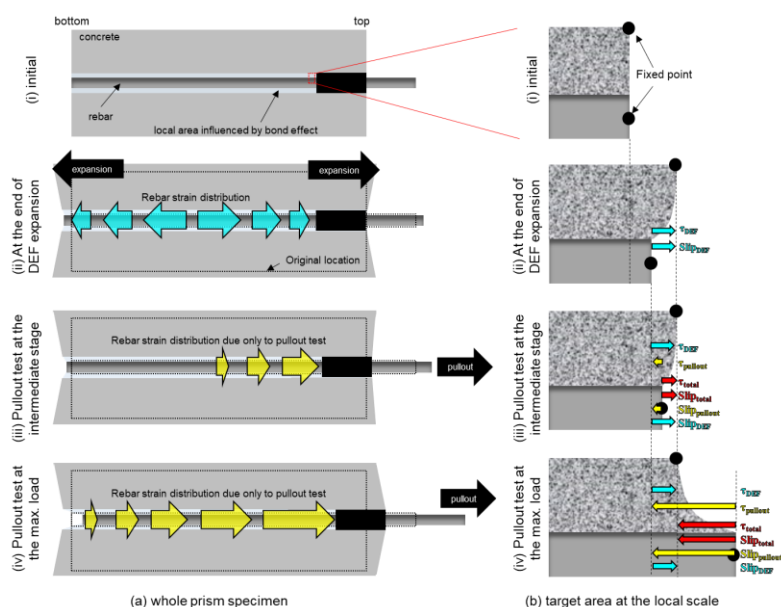


図-6 DEF 膨張過程と鉄筋引き抜き過程における付着性状の変化の概念図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sara Farooq, Gentaro Aoki, Taito Miura, Yuichiro Kawabata, Hikaru Nakamura	4. 巻 151
2. 論文標題 Anisotropic expansion behavior and crack orientation of reinforced concrete due to the alkali-silica reaction	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 105568-105568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cemconcomp.2024.105568	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taito Miura, Misato Fujishima, Yuichiro Kawabata, Stephane Multon, Renaud-Pierre Martin, Naoshi Ueda, Yuya Takahashi, Shingo Asamoto, Jean-Francois Seignol	4. 巻 21
2. 論文標題 Influence of Reinforcing Rebar on Expansion due to Delayed Ettringite Formation along the Bonding Length Part II: Bond Performance of Reinforced Concrete Affected by DEF Expansion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 869-888
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3151/jact.21.869	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 該当する

1. 著者名 Yuichiro Kawabata, Taito Miura, Misato Fujishima, Naoshi Ueda, Yuya Takahashi, Shingo Asamoto, Stephane Multon, Renaud-Pierre Martin, Jean-Francois Seignol	4. 巻 21
2. 論文標題 Influence of Reinforcing Rebar on Expansion due to Delayed Ettringite Formation along the Bonding Length Part I: The Role of Bond on Expansive Behavior of Concrete	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 851-868
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3151/jact.21.851	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 該当する

1. 著者名 Taito Miura, Stephane Multon, Yuichiro Kawabata	4. 巻 144
2. 論文標題 Influence of the expansive sites distribution on alkali-silica reaction expansion under applied stress: Crack orientation as a key factor for expansion transfer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 105300-105300
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cemconcomp.2023.105300	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 Fujishima Misato, Miura Taito, Kawabata Yuichiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Stress-bearing Mechanism of Concrete Damaged by Delayed Ettringite Formation under Compressive Stress with Various Loading Patterns	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 294 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.21.294	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 Miura Taito, Sato Katsuki, Fujishima Misato, Nakamura Hikaru, Kawabata Yuichiro	4. 巻 128
2. 論文標題 Mechanism for reduction in compressive properties of cementitious materials in relation to internal crack patterns due to ASR and DEF expansion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 104441 ~ 104441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2022.104441	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miura Taito, Multon Stephane, Kawabata Yuichiro	4. 巻 142
2. 論文標題 Influence of the distribution of expansive sites in aggregates on microscopic damage caused by alkali-silica reaction: Insights into the mechanical origin of expansion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Research	6. 最初と最後の頁 106355 ~ 106355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconres.2021.106355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Misato Fujishima
2. 発表標題 Influence of DEF expansion on mechanical behavior under uniaxial compressive stress evaluated by Digital Image Correlation
3. 学会等名 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taito Miura
2. 発表標題 Influence of different expansion models on the anisotropy of ASR expansion under restraint evaluated by 3D-RBSM
3. 学会等名 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taito Miura
2. 発表標題 ANISOTROPY OF ALKALI-SILICA REACTION FROM THE VIEWPOINT OF MECHANICS EVALUATED BY MESOSCALE DISCRETE ANALYSIS
3. 学会等名 3rd International Conference on Concrete and Steel Technology, Engineering and Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学研究者総覧 <a href="https://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/html/100007041_ja.html">https://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/html/100007041_ja.html</a>
---

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			
フランス	University of Toulouse	University Gustave Eiffel		