

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02227

研究課題名（和文）内部膨張反応を生じたコンクリートの広域微細損傷評価および膨張履歴推定手法の構築

研究課題名（英文）Evaluation of microstructural damage and estimation of expansion attained to date due to internal swelling reaction of concrete

研究代表者

川端 雄一郎（Kawabata, Yuichiro）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長

研究者番号：10508625

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：電子顕微鏡を用いてモンタージュ画像を作成し、広域での微細損傷評価を行うための手法を検討した。特に、時空間統計解析モデルを用いた評価手法を考案し、内部膨張反応への適用性について検討した。また、微細損傷を考慮した膨張モデルを検討し、温度変化を受けるコンクリートにおける膨張挙動を概ね再現することができた。さらに、コンクリートの膨張履歴の推定手法として、微細損傷の特徴量と膨張率の関係を比較し、ある角度域のひび割れ総延長を求めることで、過去の膨張率を推定できる可能性があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はコンクリートに生じる微細領域の損傷（ひび割れ等）について、広域で評価し、その時空間情報をモデル化することでコンクリートの膨張履歴を推定することを目標として検討を行ったものである。本成果は内部膨張反応で劣化したコンクリート構造物における過去の膨張履歴を推定する上で工学的に有用であり、また従来の膨張率と異なる指標を活用したより高度な評価手法への足掛かりになるものとする。

研究成果の概要（英文）：A method for evaluating micro-damage in a wide area, using a montage image created with 500-900 backscattered electron images, was investigated. In particular, an evaluation method using a spatio-temporal statistical analysis model was devised, and its applicability to internal swelling reactions was examined. In addition, an expansion model in which micro-damage was taken into account was investigated to reproduce the expansion behavior of concrete subjected to temperature variation. Furthermore, as a method for estimating the expansion history of concrete, the relationship between micro-damage features and the expansion to date was compared. As a result, it was shown that it is possible to estimate the expansion to date by determining the total crack length in a certain angular region.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 内部膨張 統計解析 微細構造分析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アルカリシリカ反応 (ASR) やエトリンガイトの遅延生成 (DEF) などのコンクリートの内部膨張反応 (ISR) は構造物のひび割れ発生や性能低下を招く。近年の良質な資源の枯渇に伴って ISR 劣化のリスクが高まっている中、ISR の適切な維持管理は重要な課題である。ISR 研究のうち、予測に関しては近年飛躍的に進展した一方、ISR による劣化が生じたコンクリートでの過去の膨張履歴の推定は現状の技術で困難である。

2. 研究の目的

本研究課題では「ISR による劣化が生じたコンクリートの膨張履歴を推定できるか?」という学術的「問い」に答えるため、以下を目的とした。

- [1] 効率的かつ高精度な広域の微細損傷および原因物質の評価
- [2] 微細損傷を考慮した膨張モデルの構築
- [3] 広域微細損傷データを用いたコンクリートの膨張履歴の推定

3. 研究の方法

(1) 効率的かつ高精度な広域の微細損傷および原因物質の評価

従来、微細損傷は電子顕微鏡を用いて評価がなされる場合が多い一方、その局所的な情報の取扱いについては議論がなされていた。これまでの研究事例では、10 枚程度の画像を取得し、取得画像のばらつき等も踏まえた議論がなされている。一方、近年の分析機器の開発により、比較的容易にモンタージュ画像の作成が可能となった。本研究では、モンタージュ画像を作成し、その画像から微細損傷等を抽出し、時空間統計解析を行うことで、微細損傷の時空間的な変化をモデル化することを試みた。

(2) 微細損傷を考慮した膨張モデルの構築

上記の成果を基に、既存の膨張解析モデルについて、微細損傷の影響を考慮した膨張モデルを検討し、試算を行った。

(3) 広域微細損傷データを用いたコンクリートの膨張履歴の推定

広域微細損傷データを用いたコンクリートの膨張履歴の推定手法として、特に DEF による劣化について検討を行った。特に、拘束による微細ひび割れパターンの変化に着目し、その定量化を行った。実験では、拘束の程度の異なるコンクリートの膨張率や膨張圧を測定し、合わせて微細ひび割れ情報 (長さ、角度) を定量化した (図-4)。

また、これらの成果を活用し、実構造物を対象に、膨張ひび割れ履歴を推定し、今後 20 年後の膨張予測を行った。

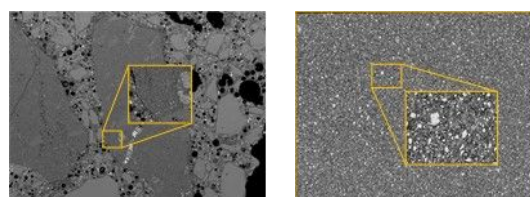
4. 研究成果

本研究の主な成果を以下に示す。

(1) 効率的かつ高精度な広域の微細損傷および原因物質の評価

広域での微細損傷評価を行うため、電子顕微鏡を用いてモンタージュ画像を作成し、微細損傷を抽出する手法を検討した。まず、サンプルを作成して電子顕微鏡で観察し、500~1000 倍での反射電子像を約 500~900 枚取得した。次に、取得画像を用いてモンタージュ画像を作成し (図-1)、画像解析で微細損傷を抽出した。次に、空間統計手法を用いて微細損傷の空間分布を評価する手法を検討した (図-2)。一例として、図-2 は図-1 の DEF サンプルの空隙構造を空間統計手法でモデル化し、統計的な空間分布の推定値をマップ化したものである。なお、サンプルの劣化が長期的にも生じなかったため、図-2 では空隙をマップ化しているが、微細ひび割れなどを画像解析で抽出することで、本手法の適用は可能である。

温度変動下で ASR を生じさせたコンクリートで生じた微細損傷について、SEM モンタージュ技術と画像解析で抽出し、空間統計解析を用いて時空間情報を整理した。その結果、微細損傷と膨張履歴に明確な傾向は認められなかつ



(a) ASR サンプル (b) DEF サンプル
図-1 モンタージュ画像の一例

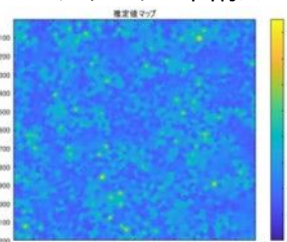


図-2 空間統計手法で得た DEF サンプルの推定値マップ (空隙)

た。また、温冷繰返し条件下で ASR 膨張を促進させたところ、ある段階までは高温での膨張が顕著であるのに対し、それ以降では低温での膨張の方が卓越することを新たに解明した。これは微細損傷の発生・進展とも関係があり、それによって微細損傷量と膨張履歴に明確な相関がなかったものと推察した。一方、広域微細損傷評価の結果から、温度の違いで損傷パターンに違いが生じることが明らかになった。この結果は、温度によって膨張圧の発現機構が異なることを示唆しており、より詳細なメカニズムの解明が今後必要である。

また、DEF が生じたコンクリートの圧縮過程における微細損傷の発生・進展プロセスをマイクロフォーカス X 線 CT 装置やデジタル画像相関法を用いて評価した。圧縮方法として、単調载荷や繰返し载荷等を行い、弾性・塑性ひずみ挙動を評価した。また、マイクロフォーカス X 線 CT 装置で微細ひび割れの進展、特に骨材界面に生じたギャップ（微細損傷の一種）の挙動を観察した。その結果、応力直行方向に対してギャップ幅が拡大し、ある応力レベルを超えるとギャップ同士をひび割れが連結し、最終的に破壊に至ることが分かった。これらの結果を基に、DEF で劣化したコンクリートの応力負担モデルを提案した。

固体 NMR について、分析条件の見直しによりピーク分解能が若干改善されたことを確認し、その条件で DEF 劣化したサンプルを分析した。ただし、DEF による劣化は顕在化していないため、引き続きデータの取得を進める予定である。

(2) 微細損傷を考慮した膨張モデルの構築

ASR 膨張について、微細損傷を考慮した膨張モデルを検討した。上述した通り、異なる温度で微細損傷と膨張率の関係を検討した結果、明確な傾向は認められなかった。この原因として膨張物質の膨張圧の発現機構が異なることが推定されたことから、膨張圧の発現に関して、温度影響を考慮したモデルを検討した。本モデルを実装し、試算した結果、初期には高温で膨張率が大きく、長期には低温で膨張率が大きくなる現象を再現することができた(図-3)。この結果は、これまで寒冷地で ASR が長期に継続することを意味しており、これまでの経験則を強く裏付けるものである。ASR による膨張は一般に高温ほど早く大きいと考えられている。一方、欧州・北米では、寒冷地における ASR も深刻であるなど、必ずしも温度と ASR 膨張は相関がない結果となっている。実際に、欧州各地に同一のコンクリートブロックを暴露した結果によれば、ASR 膨張の温度依存性は明確でない。本研究では、微細損傷を用いた ASR 膨張履歴の評価にまでは至っていないが、新たな現象を発見することができたと考えている。

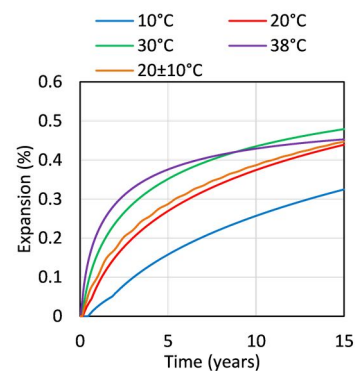


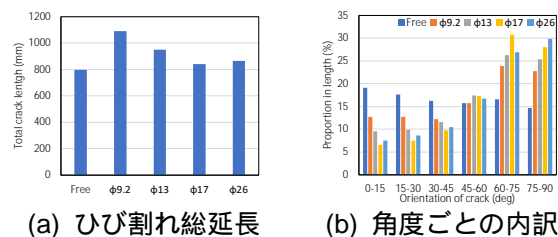
図-3 試算結果の一例

(3) 広域微細損傷データを用いたコンクリートの膨張履歴の推定

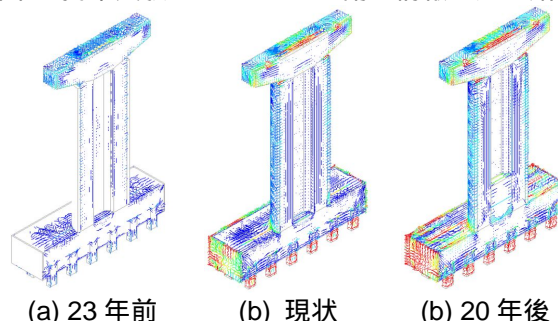
広域微細損傷データを用いたコンクリートの膨張履歴の推定手法として、特に DEF による劣化について検討を行った。特に拘束条件で微細ひび割れパターンが変化することから、その定量化を行った。実験では、拘束の程度の異なるコンクリートの膨張率や膨張圧を測定し、合わせて微細ひび割れ情報（長さ、角度）を定量化した(図-4)。その結果、拘束の程度によらずひび割れ総延長は同等であること、ある角度領域のひび割れ総延長を求めることで、過去の膨張率を推定できる可能性があることが示された。

また、ASR に関しては微細損傷と膨張履歴に明確な傾向は認められなかったが、損傷パターン等も考慮することで膨張履歴の推定が可能になる可能性がある。

これらの成果を基に、共用約 40 年の実構造物を対象に、膨張ひび割れ履歴を推定し、今後 20 年後の膨張予測を行った(図-5)。解析にあたっては、構造物の補強履歴等も考慮した。膨張解析を行った後にブッシュオーバー解析を実施し、当該橋脚の耐荷力を評価した。これらの結果を整理し、今後の課題を抽出した。



(a) ひび割れ総延長 (b) 角度ごとの内訳
図-4 拘束実験での DEF ひび割れ情報の定量化結果



(a) 23 年前 (b) 現状 (c) 20 年後
図-5 膨張ひび割れ履歴の推定と今後の進展予測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kawabata Y., Dunant C., Nakamura S., Yamada K., Kawakami T.	4. 巻 72
2. 論文標題 Effects of temperature on expansion of concrete due to the alkali-silica reaction: A simplified numerical approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materiales de Construcción	6. 最初と最後の頁 e282 ~ e282
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3989/mc.2022.17121	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 Joshi Nirmal Raj, Matsumoto Ayumu, Asamoto Shingo, Miura Taito, Kawabata Yuichiro	4. 巻 128
2. 論文標題 Investigation of the mechanical behaviour of concrete with severe delayed ettringite formation expansion focusing on internal damage propagation under various compressive loading patterns	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 104433 ~ 104433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cemconcomp.2022.104433	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 Kawabata Yuichiro, Takahashi Haruka, Watanabe Sadayuki	4. 巻 310
2. 論文標題 The long-term suppression effects of fly ash and slag on the expansion of heat-cured mortar due to delayed ettringite formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 125235 ~ 125235
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conbuildmat.2021.125235	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 Kawabata Yuichiro, Yahata Masahiro, Hirono Shinichi	4. 巻 209
2. 論文標題 Petrological assessment of drying shrinkage of sedimentary rock used as aggregates for concrete	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 109922 ~ 109922
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matdes.2021.109922	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 松本歩、Nirmal Raj Joshi、浅本晋吾、川端雄一郎	4. 巻 43
2. 論文標題 DEF膨張が生じたコンクリートの圧縮応力下での内部損傷進行の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 227 ~ 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 川端雄一郎	4. 巻 892
2. 論文標題 セメントコンクリートを「科学」する 遅延エトリンガイト生成 (DEF)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート	6. 最初と最後の頁 44 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Kawabata Yuichiro, Yamada Kazuo, Kawakami Takashi, Sagawa Yasutaka	4. 巻 30
2. 論文標題 Environmental impacts on expansion of concrete due to alkali-silica reaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Magazine of Concrete Research	6. 最初と最後の頁 1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jmacr.22.00158	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 Kawabata Y., Yamada K., Ogawa S., Sagawa Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Mechanisms of internal swelling reactions: Recent advances and future research needs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations	6. 最初と最後の頁 2599 ~ 2607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1201/9780429279119-355	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 Kawabata Yuichiro, Ueda Naoshi, Miura Taito, Multon St?phane	4. 巻 121
2. 論文標題 The influence of restraint on the expansion of concrete due to delayed ettringite formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Composites	6. 最初と最後の頁 104062 ~ 104062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cemconcomp.2021.104062	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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

〔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
研究分担者	川野 秀一 (Kawano Shuichi) (50611448)	九州大学・数理学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	小西 敏功 (Konishi Toshiisa) (10587843)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部地域技術支援部城南支所・副主任研究員 (82670)	
研究分担者	渡邊 禎之 (Watanabe Sadayuki) (70463065)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部技術開発支援部計測分析技術グループ・上席研究員 (82670)	

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	Universite de Toulouse	Universite Gustave Eiffel		
英国	University of Cambridge			