

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 17 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京大学

氏 名 : Hyo Eun Joo

研究課題名 : アルカリシリカ反応によるコンクリートの局部ひび割れ発生メカニズムと力学性能との関係解明

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

アルカリシリカ反応によるコンクリートの局部ひび割れ発生

メカニズムと力学性能との関係解明

Investigation on mechanisms inducing localized cracks in concrete under alkali-silica reaction

東京大学 特任助教 Hyo Eun Joo

（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究では、アルカリシリカ反応（ASR）が生じたコンクリートのひび割れ進展パターンと力学的特性の関係を解明するため、以下の手法を構築した。

[1] 既往の研究調査および実験パラメータの設定

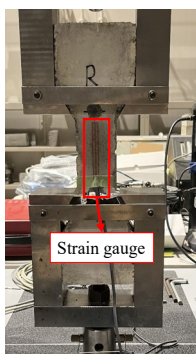
ASRの要因およびそれに伴う性能変化を考察するため、主要な先行研究の検討を行った。特に、ASRによる局所的なひび割れが構造性能を著しく低下させた Kishira et al. (2021) の研究は、3年間にわたる実環境下での曝露試験である点、および鉄筋コンクリートによる拘束条件下での実験である点が特徴的である。本研究では、従来の研究では十分に検討されてこなかった「長期的な拘束」が力学特性に及ぼす影響、および実環境下での「湿潤・乾燥の繰り返し」がひび割れパターンと力学的性能に及ぼす影響を解明することを目的とした。

[2] 長期拘束下におけるASRがコンクリートの力学的特性に及ぼす影響

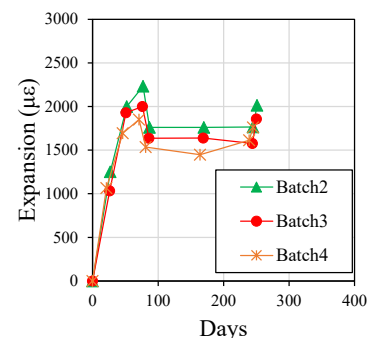
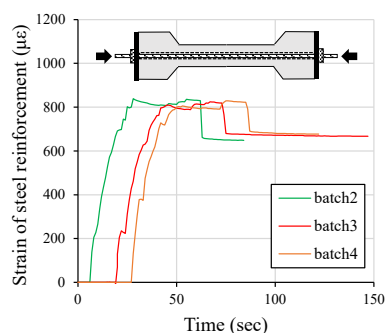
長期拘束が引張性能に及ぼす影響を分析するため、以下の実験手順を策定した。（a）直接引張試験用の供試体を作製した。骨材には反応性骨材である安山岩を用い、ASR膨張を促進させるために単位アルカリ量を 10kg/m^3 に調整した。全ての供試体は、目標膨張率 0.25% に達するまで、温度 40°C ・湿度 99% の環境下で促進養生を行った。（b）目標膨張率に到達後、長期的な拘束効果を再現するため、供試体中心部に鋼棒を配置し一軸プレストレスを導入した。一部の供試体は室温（ 20°C ）の密閉条件に移して膨張を停止させ、残りの供試体は継続的な膨張環境下に静置した。（c）一軸引張試験を実施し、引張強度、弾性係数、延性、および破壊モードの評価を行った。



〔引張試験〕



〔拘束導入〕



〔膨張挙動〕

図 1. 引張実験プロセス

[3] ASR 進展過程における内部ひび割れの進展挙動分析

本ステップでは、湿潤・乾燥の繰り返しが生じたひび割れパターンに及ぼす影響を実験的に検証した。実験仮説は以下の通りである。

1) 湿潤過程で生じた ASR ゲルの膨張圧が微細ひび割れを誘発し、続く乾燥過程におけるコンクリートの収縮がそのひび割れをさらに進展・拡大させる。

2) 再湿潤時には、新たなゲルが既往の硬化ゲルの上から更なる膨張圧を加えることで、ひび割れ先端への応力集中が生じる。このプロセスの反復により、分散していた微細ひび割れは次第に特定部位へと集中する「局所化現象」を呈する。

本仮説を検証するため、供試体表面にパターンを形成し、Digital Image Correlation (DIC) を用いて湿潤・乾燥条件下でのひび割れ挙動を追跡した。40℃の環境下で「湿潤 3 日・乾燥 4 日」を 1 サイクルとして表面画像を撮影・解析し、ひずみ分布および微細ひび割れの進展プロセスを可視化した。これにより、湿潤・乾燥条件下における ASR ひび割れの進展メカニズムを定量的に究明した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

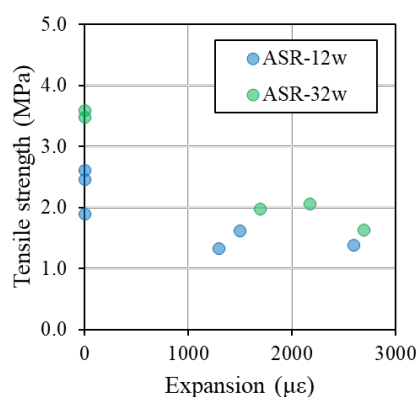
■ 長期的拘束がコンクリートの力学的特性の変化に及ぼす影響

本研究における実験結果を図 2 に示す。供試体の名称は実験条件に基づき区分されている。「N」は ASR 膨張が生じていない健全なコンクリート供試体を指し、「ASR」は ASR 膨張を誘導した供試体を指す。供試体記号のうち「(H)」はプレストレスングによる拘束を施した供試体であり、末尾の数値は試験開始から直接引張試験実施までの経過週数を示している。健全な供試体 (N-12w、N-32w) は、養生後それぞれ 12 週間および 32 週間、20℃の密閉状態で保管された。すべての ASR 供試体は、目標膨張率 $2,500\mu$ に達するまで加速条件 (RH 99%、40℃) の環境チャンバー内で管理された。目標膨張率への到達直後に ASR-12w 供試体の引張試験を実施し、ASR-32w 供試体については 20℃の密閉条件で追加保管を行い、膨張抑制が引張特性に及ぼす影響を検討した。特に拘束供試体である ASR(H)-32w-d および ASR(H)-32w-w については、12 週目にチャンバーから取り出した 3 日後に軸方向のプレストレスを導入し、その後、それぞれ密封条件および加速条件下で保管した。

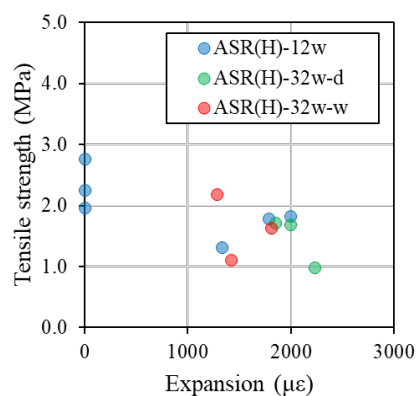
実験結果によれば、予測された通り、ASR による膨張はコンクリートの力学的性能を低下させたが、環境条件および拘束状態に応じて複合的な挙動の変化が観察された。まず、すべての条件において、ASR 損傷の進展に伴い健全な供試体と比較して延性が増加する傾向が共通して見られた。これは、内部の微細ひび割れが作用応力を分散させ、供試体の変形能を増大させた結果であると考えられる。環境変化に伴う性能回復の側面では、有意な差が確認された。外部拘束のない状態 (ASR-12w vs 32w) では、反応の進展および環境要因により、引張強度および弾性係数が一部回復する傾向を示した。これは、時間の経過とともに ASR 反応生成物 (ゲル) がひび割れ内部を充填する効果が作用したためと解釈される。一方、拘束を施した ASR(H) 供試体の場合、このような性能回復効果は観察されず、むしろ性能が悪化する様相を呈した。拘束条件下で性能回復が阻害される要因として、主に以下の 2 つのメカニズムが推察される。

1. クリープ変形の影響：持続荷重下で生じるクリープ変形が追加の微細ひび割れを誘発し、引張性能を低下させた。特にこの現象は、湿潤・乾燥の繰り返し条件下においてより顕著に現れた。
2. 反応生成物の流出：拘束による圧縮応力がひび割れ内部に存在した ASR ゲルを外部へ押し出すことで、ゲルによるひび割れ充填および剛性回復への寄与度を減少させたものと判断される。

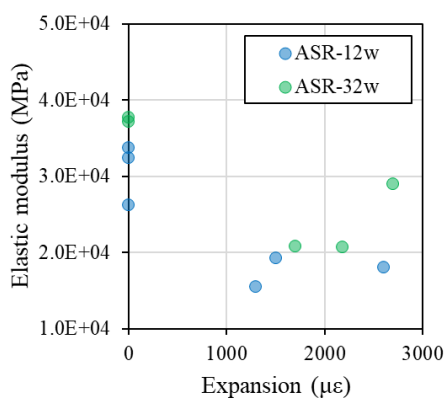
以上の通り、環境変化による膨張抑制は引張性能の回復に寄与する可能性があるものの、長期的拘束が伴う場合にはクリープ変形や反応生成物の離脱により、むしろ性能回復に負の影響を及ぼし得ることを実験的に明らかにした。



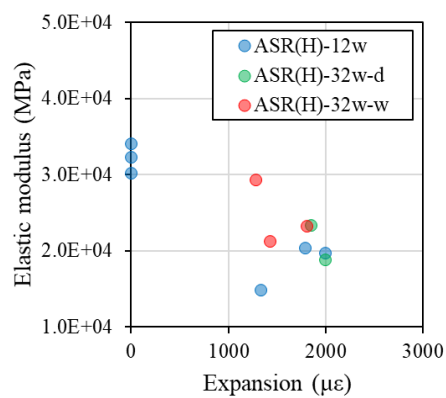
(a) Tensile strength (without restraint)



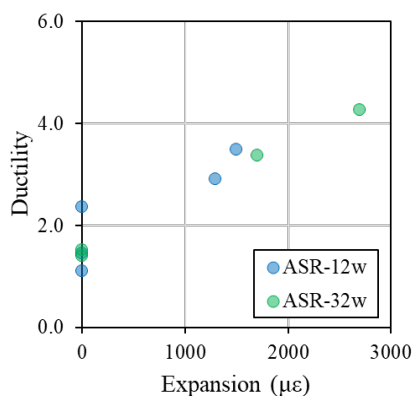
(b) Tensile strength (with restraint)



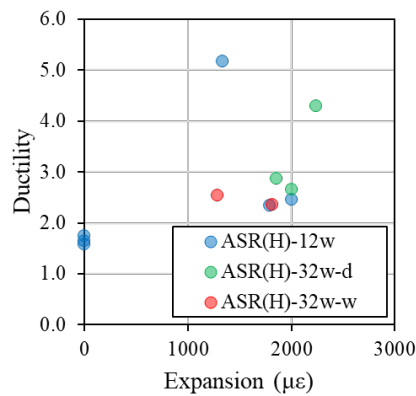
(c) Elastic modulus (without restraint)



(d) Elastic modulus (with restraint)



(e) Ductility (without restraint)

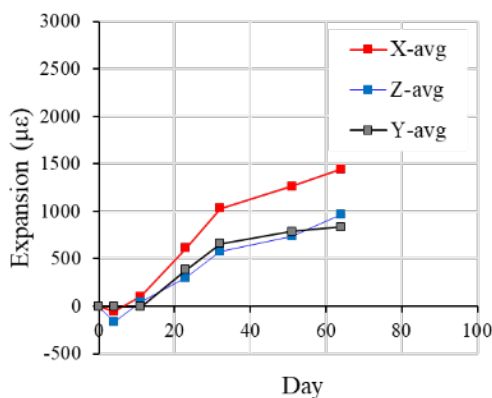


(f) Ductility (with restraint)

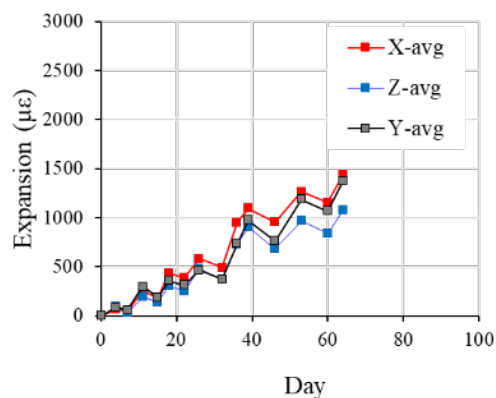
図2 引張試験結果

■ 湿潤・乾燥の繰り返し環境がひび割れ進展に及ぼす影響

湿潤・乾燥の繰り返しがASRひび割れの進展挙動に及ぼす影響を解明するため、一辺10cmの立方体供試体を6体作製し、ASR促進環境下で図3に示すように膨張を誘導した。このうち3体は持続的な湿潤環境（持続膨張）に、残りの3体は「湿潤3日・乾燥4日」のサイクル環境に曝露させた。60日間にわたる膨張測定の結果、持続膨張条件と湿潤・乾燥条件の間で、膨張速度に有意な差は認められなかった。これと並行して、図4（左）に示すように、10cm×10cmの正方形断面で厚さ1cmの板状供試体を作製し、40℃の環境下で湿潤・乾燥の繰り返し条件を与えた。実験期間中、連続的に画像を取得し、DICを用いることでひび割れの進展挙動を詳細に観察した。湿潤条件下でも表面のパターンが剥離・損傷しないよう、油性スプレーを用いてパターンを形成した。また、供試体を傾斜させて設置することで、表面への水分の滞留を防止した。カメラスタンドを用いて供試体とカメラの位置を完全に固定し、経時的な連続画像を取得した。画像解析から得られた主引張ひずみの分布を図4（右）に示す。本研究で提案した実験手法により、目視では確認が困難な微細ひび割れの発生・進展過程を鮮明に捉えられることが確認された。解析の結果、最初の湿潤・乾燥サイクルからすでに骨材周囲においてひび割れが発生し、進展していく様子が観察された。



[持続的な湿潤環境下での膨張]

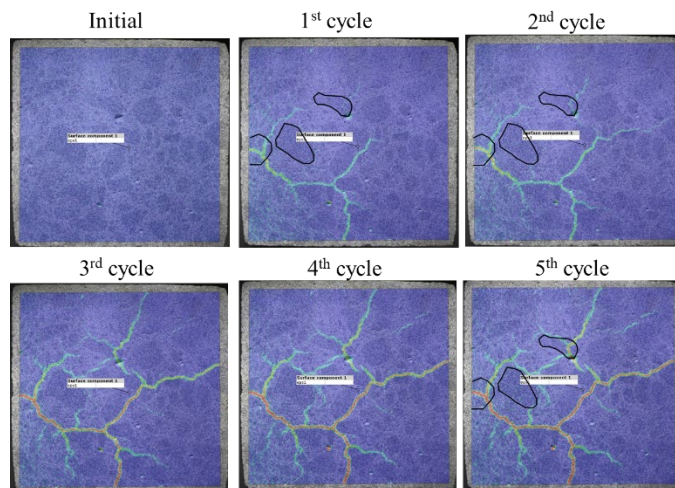


[湿潤・乾燥の繰り返し下での膨張]

図3 膨張の進展過程



[撮影セットアップ]



[湿潤・乾燥の繰り返しに伴うひび割れの進展]

図4 ひび割れの進展プロセス

また、図 5 に示すように、湿潤過程で生じたひび割れは、その後の乾燥過程において閉じることなく、むしろ更なる進展・発達を遂げることが確認された。本実験により、「湿潤・乾燥の繰り返しがひび割れの局所化（Localization）を促進させる」という仮説を部分的に実証することができた。今後は、拘束条件下におけるこれらのひび割れ挙動への影響について、さらなる検討が必要であると考えられる。

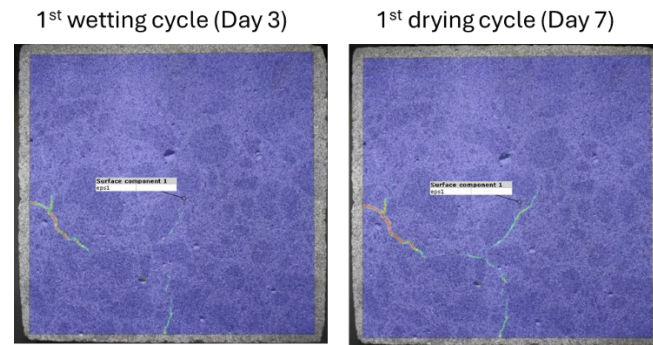


図 5 第 1 サイクル乾燥過程におけるひび割れの発達

参考文献

- [1] Kishira, R., Maeshima, T., Koda, Y. and Iwaki, I. (2021). "Investigation on punching shear capacity of RC deck slab attacked by ASR for four years on steel girders." JSCE Journal of Structural Engineering, 67A, 636-644. (in Japanese)
- [2] Olajide, O. D., Nokken, M. R. and Sanchez, L. F. M. (2022). "Alkali-Silica Reactions: Literature Review on the Influence of Moisture and Temperature and the Knowledge Gap." Materials, 15(15), 5406.

（ 発 表 論 文 ）

H.E. Joo, X. Ji, Y. Takahashi. "Tensile properties of ASR-affected concrete following a period of suppressed expansion." Proceedings of The 6th International Civil Engineering and Architecture Conference (CEAC 2026), Hong Kong, March 19-23, 2026.