

令和元年6月21日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04389

研究課題名(和文) アルカリラッピングを適用したASR加速試験法の確立および膨張劣化予測への応用

研究課題名(英文) Investigation of ASR acceleration test with alkali wrapping and its application for expansion prediction

研究代表者

佐川 康貴 (SAGAWA, Yasutaka)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10325508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、アルカリシリカ反応(ASR)を生じるコンクリートの膨張挙動を予測する手法を構築することを目的とした。コンクリート中の空隙水のアルカリ濃度に相当するNaOHを含浸させた不織布でコンクリート角柱をラッピングし、加速試験(AW-CPT法)を提案、実施し、膨張挙動を表す各種パラメータを求めた。それらを、反応速度論に基づく数値解析手法に導入した結果、自然環境下に設置した曝露供試体の膨張挙動を精度よく再現できることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

代表的なインフラ構造物であるコンクリート構造物において近年、アルカリシリカ反応(ASR)と呼ばれる膨張による劣化現象が散見されているが、維持管理で有用となる劣化予測手法が未だ確立されていないのが現状である。本研究で提案した加速試験法(AW-CPT)および数値解析手法による成果は、ASR膨張予測の精度・信頼性向上に寄与するとともに、抑制対策を検討する上で必要となる膨張機構の解明、加速倍率の設定に貢献できる。また、この結果は、インフラ構造物の効率的な維持管理や、適切な補修時期の選定に有用である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to demonstrate a prediction method for deleterious expansion of concrete caused by alkali-silica reaction (ASR). To identify the parameters related to the expansion model, accelerated expansion tests, AW-CPTs (Alkali-wrapping Concrete Prism Tests), were conducted. In this method, test specimens were wrapped by wet non-woven paper containing the alkaline solution equivalent to the alkalinity of pore solution in concrete. These parameters were introduced to a chemical and kinetic model for expansion prediction. The results by the numerical simulation were compared with the expansion measured by the concrete specimens exposed to the natural environment for 5 years. The model turned out to demonstrate a remarkable agreement with the experiment when environmental conditions such as precipitation and temperature were well defined.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：アルカリシリカ反応 劣化予測 膨張量 アルカリラッピング アルカリシリカゲル 反応速度論 曝露試験 アルカリ総量

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国では、1986年以降、アルカリシリカ反応(ASR)の抑制対策が実施されてきたが、現在もASRが発生した構造物が報告されており、現行の抑制対策に限界があることが明らかとなってきた。その主な原因は、ペシマムを生じる高反応性骨材と、遅延性膨張性骨材である。特に、高反応性骨材がペシマム混合率で含まれている場合、混和材のASR抑制効果は低下することも報告されている。

現時点では、ASR抑制対策の選定フローとしては以下のようなものが合理的と考えられる。すなわち、骨材の反応性を区分し、次に、骨材の反応性と構造物の環境条件からリスクレベルを設定し、リスクレベル、構造物の重要度、耐用年数から抑制レベルを設定する。最後に、抑制レベルを基に、アルカリ総量、もしくは混和材の最小使用量を設定する。このようなフローは、RILEMやAASHTOで採用されており、わが国でも原子力用コンクリートに対するフローとして提案(JNES-RE-レポート)されている。

骨材の反応性を調べる方法は、従来、日本では化学法やモルタルバー法が用いられてきたが、欧米諸国ではコンクリートプリズム試験(CPT)へ移行している。CPTのメリットには、ペシマム現象、遅延膨張が生じる骨材を検出できる、混和材の適正混入率を把握することができる、試験結果を曝露試験と整合することができる、といった点がある。

わが国でも例えば、CPTとしてJCI AAR-3が基準化されているが、制定当時は最先端ではあったものの、現在では種々の不備がある。例えば、アルカリ総量を 2.4kg/m^3 添加して半年間試験を行う試験ではアルカリ総量が不足してASRが十分に加速されないこと、また期間が半年であり短期間の判定では遅延膨張性骨材の検出精度が低いこと、などの課題が挙げられる。これを踏まえ、JCI-115FS「ASR診断の現状とあるべき姿研究委員会」で改正案が提案されている。

2. 研究の目的

ASRを取り巻く環境は、国内外で大きく変化しつつある。国内については、地域により骨材事情、混和材の供給事情が異なることから、骨材の反応性や膨張挙動の精度向上が求められている。また、原子力関連の重要施設の建設が今後進められることから、膨張リスクを念頭に置き、ASRに関する性能照査型の設計手法の構築が求められている。また、海外では、構造物のモニタリングを積極的に行うケースや、ひび割れや変形の進展を精度良く予測手法が用いられるケースなど、材料レベルのみならず部材あるいは構造物レベルでの検討が進められている。

本研究では、アルカリラッピングを適用したASR加速試験方法を確立し、さらには、自然環境下における部材の膨張挙動を予測する手法を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、アルカリシリカ反応性を有する骨材を用いて作製したコンクリート角柱(プリズム)を、コンクリートの空隙水のアルカリ濃度に相当するNaOHを含浸させた不織布でラッピングし、加速試験(Alkali-wrapping Concrete Prism Test; AW-CPT)を実施した。次に、反応速度論に基づく方法およびそれを改良した方法を用いてAW-CPTの再現解析を実施するとともに、自然環境下に置かれた曝露供試体のシミュレーション等を行った。

4. 研究成果

4.1 統一的加速試験法としてのAW-CPTの構築

(1) 概要

同じ反応性骨材を用いて異なる複数の試験機関でAW-CPTを実施し、ASR加速試験としての適用性や各機関におけるデータのばらつきについて考察を行った。

(2) 方法

試験には、次の2種類の反応性粗骨材を使用した。骨材Aは、微晶質石英および隠微晶質石英に起因する遅延膨張性の特徴を有する砂質片岩砕石である。骨材Bは、トリディマイトを含み、ペシマム現象を示す安山岩砕石である。

AW-CPTの試験方法の概要は、以下の通りである。コンクリートプリズムの寸法は $75 \times 75 \times 250\text{mm}$ とし、3本1組を標準とした。練混ぜから 24 ± 1 時間後に脱型し、プラスチック製コンテナに張った 20 ± 2 の水中に 30 ± 5 分間浸漬させた。コンテナからプリズムを取り出した後、表面の余分な水分を布で拭き取り、基準となる質量と標点間距離を測定した。

アルカリ溶脱および乾燥を防止する目的として、NaOH溶液を含浸させた不織布でプリズムを覆い、さらにプラスチックフィルムにより密封して、底部に水を張って密閉できるステンレス製の格納容器(一部、プラスチック製)に立てて格納した。格納容器を保管する養生槽の温度は 60 、 40 、 20 の3水準とした。

不織布に含浸させたNaOH溶液は設定したアルカリ総量($\text{Na}_2\text{Oeq} = 5.5\text{ kg/m}^3$ または 3.0 kg/m^3)におけるコンクリート中の空隙水のアルカリ金属イオン濃度と等しくなるよう、 1.33 mol/l または 0.726 mol/l とした。

(3) 結果および考察

代表的な例として、骨材Bを用いた配合Bの膨張率の測定結果(計6機関)を図-1に示す。26週での膨張率(図-1(a))には差が生じたものの、5週までに大きな増加を示し、その後は勾配がやや緩やかになり、収束へと向かう傾向は、全ての機関に認められた。5週までの膨張率が

小さい範囲では変動係数が大きいものの、10 週以降では変動係数が概ね 10%以下で安定している。CSA A23.2-14A において、同一の機関内での変動係数は 12%であったことが報告されている。試験方法は異なるが、本試験においても同等の精度が得られており、AW-CPT は統一的な加速試験法としての精度の高い手法として適用できるものと考えられる。

膨張挙動は、以下のように Larive 式¹⁾に定数を 1 個追加した式(1)で膨張挙動を表現可能である結果が得られた。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty \frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right)}{1 + \exp\left\{-\frac{(t - \tau_L)}{\tau_C}\right\}} \quad (1)$$

長期挙動について調べた結果(図-1(b))、特に、急速膨張性を有する骨材の場合、温度やアルカリ総量を高くすると材齢初期に大きな膨張が生じた。26 週以降も試験を継続した結果、温度が低い条件の供試体が、途中で温度が高い条件の供試体を上回るものがあった。今後、骨材の反応性に応じた加速試験条件の詳細な検討が必要であると言える。

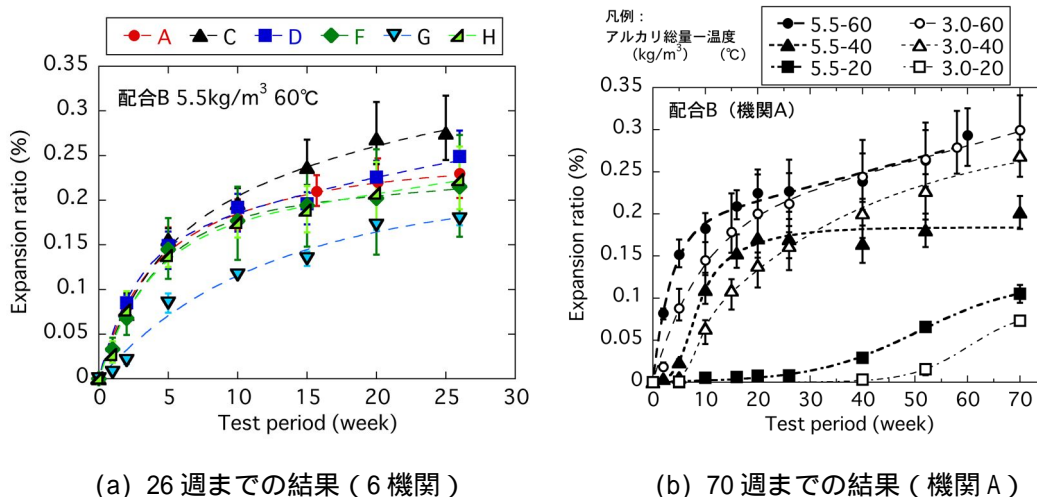


図-1 AW-CPT 結果 (急速膨張性・5.5kg/m³・60)

4.2 ASR 膨張挙動に関する数値解析

(1) 概要

反応性骨材を使用したコンクリートを対象に、AW-CPT、反応速度論を用いたモデルを用いて再現した。さらに同じ係数を用い、暴露試験体の膨張挙動と比較することにより、AW-CPT を基にしたシミュレーションの実環境での膨張予測への適用性を調べた。

(2) 方法

反応性の骨材としてオパールを多量に含有する安山岩砕石を用いたケースと、少量のカルセドニーを含み、主に隠微晶質、微晶質の石英からなるチャート砕石を用いたケースについて、実験および解析を実施した。

数値解析に用いた膨張モデルは、膨張モデルには、ASR の膨張を骨材へのアルカリの拡散律速と仮定し、経時的に膨張率を算出する U.F.O. モデル²⁾を、川端らが改良したもの³⁾を参考にした式(2)とした。

$$\varepsilon(t) = E_0 \cdot \exp(-\omega \cdot a(t)) \cdot A \sum_i \beta_i \left(\frac{a(t)_i}{60.08} - \frac{h}{R_i} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon(t)$: 時間 t における膨張率 (%), E_0 : 膨張寄与生成物量を膨張率に換算する係数の初期値 (% / mol), ω : ゲルの系外への溶出を考慮した反応率に対する膨張効率の低減割合を定める定数, A : 単位反応性骨材量 (g), β_i : 全骨材に占める半径 R_i の骨材の比率, $a(t)_i$: 半径 R_i の骨材の時間 t における体積反応率(%), 60.08: SiO_2 分子量, h : 膨張低減係数 (mol・cm/g), R_i : 骨材半径 (cm) である。

(3) 結果

まず、JIS A 1145 の化学法を元にした室内試験および AW-CPT の結果から、膨張低減係数 h と膨張寄与生成物量を膨張率に換算する係数の初期値 E_0 を決定した、具体的には、チャート砕石を用いたケースについて、図-2 に示すように、AW-CPT と数値解析の両者の結果が一致するように設定した。

次に、暴露試験体の配合は AW-CPT と同様で、アルカリ量を 5.5, 3.0 kg/m³ とした 2 体のコンクリート柱試験 (500 × 500 × 600 mm) の膨張挙動をシミュレーションした。この供試体は、九州大学伊都キャンパス内に約 5 年間設置したものである。シミュレーションでは、コンクリート

の温度は日平均気温と等しいと仮定し、既往の文献を参考に、1 mm以上の降雨があったとき、以後3日間を内部が湿潤状態でゲルが吸水膨張するとし、それ以外では計算上、生成物量を蓄積させ、係数のEを0とした。なお、気象データには、暴露場所に一番近い前原観測所の記録を用いた。図-3に示すように、AW-CPTで得た傾向から設定した係数 h を用いた計算で、「暴露5.5」については膨張開始時期が精度よく再現できた。AW-CPTの膨張挙動をシミュレーションで再現する際に、定数 h を温度とアルカリ量の影響があるとした方が再現性が高い結果となった。以上のことから、AW-CPTを基にした暴露試験体のシミュレーションは、精度よく膨張を再現できることが明らかとなった。

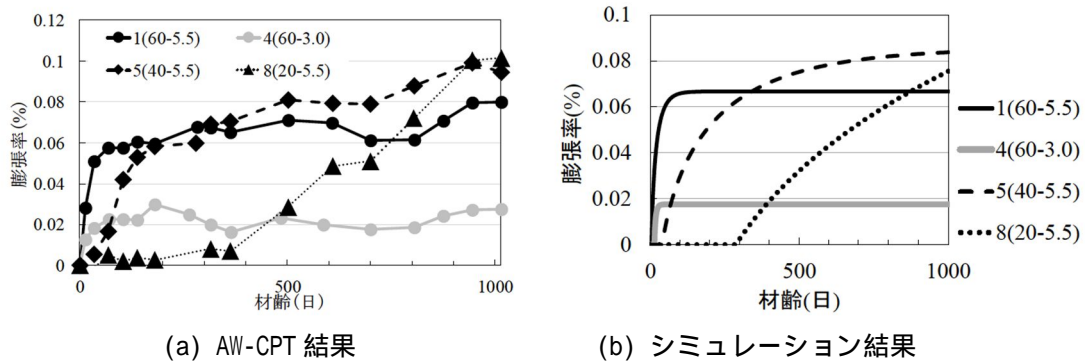


図-2 提案モデルによるAW-CPTのシミュレーション結果

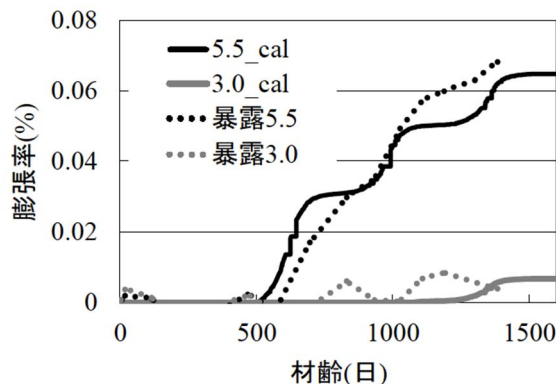


図-3 提案モデルによる曝露試験供試体のシミュレーション結果

<引用文献>

- 1) Larive, C.: Apports Combinés de l' Experimentation et de la Modelisation à la Comprehension de l' Alkali Reaction et de ses Effects Mecaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (in French), 1998
- 2) 魚本建人, 古澤靖彦: アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.109-119, 1992
- 3) 川端雄一郎, 山田一夫, 柳川貴光, 江藤淳二: アルカリラッピングしたコンクリートプリズム試験におけるコンクリートのASR膨張挙動のモデル化, コンクリートの補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.475-480, 2017

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

佐川康貴, 富山潤, 五十嵐豪, 吉田夏樹, 小川彰一: アルカリラッピングしたコンクリートプリズムを用いたASR加速試験の適用性に関する考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.17, pp.485-490, 2017

Yuichiro Kawabata, Kazuo Yamada, Yasutaka Sagawa and Shoichi Ogawa: Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT)- New Testing Protocol toward a Performance Test against Alkali-Silica Reaction -: Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, Vol.16, pp.441-460, 2018

五十嵐豪, 山田一夫, 村上充樹, 佐川康貴: コンクリート断面に現れるASRゲルの観察における二重着色法(ゲルステイン法)ゲルフルオレッセンス法との比較, コンクリート工学年次論文集, 査読あり, Vol.41, 2019

[学会発表](計6件)

上野貴之, 佐川康貴, 濱田秀則, 山田一夫, 川端雄一郎: アルカリ溶液中における ASR 反応性骨材からのシリカ溶出挙動に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017
福村英太郎, 富山潤, 藍檀オメル, 須田裕哉, 比屋根方新, 神谷和志, 上里尚也: 遅延膨張性 ASR の膨張率と強度特性の関係性およびフライアッシュの ASR 抑制効果の確認, 土木学会西部支部沖縄会第 7 回技術研究発表会, 2018
依積田新也, 佐川康貴, 濱田秀則, 山田一夫, 小川彰一: 室内試験による暴露供試体の ASR 膨張挙動の再現, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 2018
川上隆, 川端雄一郎, 山田一夫, 依積田新也, 村上光樹, 佐川康貴: 隠微晶質石英を含む骨材を使用したコンクリートの ASR 膨張の再現, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019
大久保航希, 合田寛基, 日比野誠, 佐川康貴: 高炉スラグ微粉末混合率と反応性骨材置換率に着目した ASR の膨張特性, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, 2019
依積田新也, 山田一夫, 五十嵐豪, 佐川康貴: ASR 促進試験における促進条件がアルカリシリカゲルおよび膨張挙動に及ぼす影響, 第 73 回セメント技術大会, 2019

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 合田寛基
ローマ字氏名: GODA, Hiroki
所属研究機関名: 九州工業大学
部局名: 大学院工学研究院
職名: 准教授
研究者番号(8桁): 20346860

研究分担者氏名: 富山 潤
ローマ字氏名: TOMIYAMA, Jun
所属研究機関名: 琉球大学
部局名: 工学部
職名: 准教授
研究者番号(8桁): 20325830

研究分担者氏名: 黒田 保
ローマ字氏名: KURODA, Tamotsu
所属研究機関名: 鳥取大学
部局名: 工学研究科
職名: 教授
研究者番号(8桁): 30263487

研究分担者氏名: 上田尚史
ローマ字氏名: UEDA, Naoshi
所属研究機関名: 関西大学
部局名: 環境都市工学部
職名: 准教授
研究者番号(8桁): 20422785

研究分担者氏名: 五十嵐 豪
ローマ字氏名: IGARASHI, Go
所属研究機関名: 東北大学
部局名: 工学研究科
職名: 助教
研究者番号(8桁): 10733107

(2) 研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。