

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82707

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686052

研究課題名(和文) コンクリート中における骨材の体積変化機構の地質・岩石学的解明

研究課題名(英文) Petrological study on mechanism of volume change of aggregate in concrete

研究代表者

川端 雄一郎 (KAWABATA, YUICHIRO)

独立行政法人港湾空港技術研究所・その他部局等・その他

研究者番号：10508625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、岩石学的特長と骨材の体積変化挙動の関係について検討し、また骨材に起因するコンクリートの体積変化に及ぼす相互作用を明らかにすることを目的とした。まず、各種骨材を用いたコンクリートの膨張挙動をモデル化した。また、セメント系材料の相組成から硬化体の空隙水組成を推定する手法を提案し、これによりASR膨張に及ぼす空隙水組成の影響を定量的に評価できた。さらに、室内試験に基づく実環境におかれたコンクリートのASR膨張挙動を予測する手法を提案した。骨材の収縮に関して、収縮量は変質～変成作用、母岩の堆積年代、母岩の岩質で概ね説明することができた。

研究成果の概要(英文)：The volume change of aggregate was investigated from the viewpoint of petrographic evaluation in this study. For alkali-silica reaction, the expansive behaviors of concrete with various aggregates were modeled. A model to evaluate the alkalinity of pore solution based on phase composition of cement hydrates with SCMs was also proposed. The proposed method enables to clear the relationship between composition of pore solution and ASR suppression effect quantitatively. Simplified prediction method using accelerated concrete prism test (CPT) was proposed. The result suggested that the proposed prediction method is useful for the evaluation of actual expansive behavior of field-exposed concrete although the method includes some points to improve. Shrinkage of aggregate can be explained with petrogenesis and character of base rock.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ASR 収縮 膨張予測 岩石学的評価

1. 研究開始当初の背景

構造物の長期変形特性を明らかにするため、コンクリートの体積変化に関する研究が精力的に行われている。このうち、セメント系材料の体積変化に関しては多くの知見が得られ、高度な予測モデルも提案されている。一方、コンクリートのうち半分以上の体積を占める骨材の体積変化に関しては十分な知見がないのが現状である。

コンクリートが膨張する原因の一つとして、アルカリシリカ反応 (ASR) や遅延エトリンサイト生成 (DEF) に代表される内部膨張反応が挙げられるが、コンクリートの膨張を予測する上で、骨材の体積変化のメカニズムを地質岩石学的観点から検討することは重要である。また近年では、骨材自身の収縮によってコンクリートの収縮量が大きくなる場合があることが指摘されており、骨材の収縮に関しても、地質岩石学的観点から評価する必要性が高まっている。地質岩石学的観察を基に、現象のモデル化等を行うことで、より確度の高いコンクリートの長期変形予測が可能になる。

2. 研究の目的

以上の背景を基に、本研究課題は、岩石学的特長と骨材の体積変化挙動の関係について検討するとともに、骨材に起因するコンクリートの体積変化に及ぼすセメント系材料との相互作用を明らかにすることを目的とした。特に ASR に関して、これらの成果を基に試験法やモデルを改良し、実環境におけるコンクリートの ASR 膨張挙動を予測する手法を検討した。

3. 研究の方法

(1) 骨材の岩石学的特長と ASR 膨張挙動の関係性の評価

国内の代表的な反応性骨材を用いたコンクリートを作製し、岩石学的特長と ASR 膨張の関係について評価した。特に、ASR が発生したコンクリートについて、岩石学的観察を行った。また欧州の PARTNER プロジェクトで使用された骨材を対象に、各種試験温度と膨張挙動の関係を整理し、ASR 膨張挙動の温度依存性について評価した。

(2) 相組成に基づく空隙水組成の推定モデルと ASR 膨張の関係性の評価

ASR 膨張は骨材と空隙水のアルカリに強く依存する。特に、これまでの研究で、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などのセメント系材料 (SCM) をセメントの一部に置換すると、アルカリシリカ反応 (ASR) による膨張を抑制することが知られているが、その程度は SCM の種類や置換率によって大きく異なる。この化学的相互作用を解明することは重要である。したがって、水和物の相組成から空隙水組成を推定し、ASR 膨張との関係について検討した。本研究では、セメント系

材料から生成される水和物を粉末 X 線回折/リートベルト解析により同定した。水和物のうち主要なカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) の組成と量から、セメント硬化体に含まれる空隙水の水酸化イオン濃度を算出し、ASR 抑制効果との比較を行った。

(3) 骨材の岩石学的特長と収縮の関係性の評価

日本国内から約 20 種類の骨材 (主に砂岩) を収集し、その岩石学的特長を把握した。これらの骨材について、骨材単体の収縮実験を行い、骨材の岩石学的特長と骨材収縮の関係を把握した。また、代表的な数種類の骨材で作製したコンクリートの収縮実験も行い、骨材の収縮とコンクリートの収縮の関係について検討した。

(4) 室内膨張試験に基づく ASR 膨張の膨張予測

(1) の検討結果を基に、室内膨張試験に基づいて実環境のコンクリートの ASR 膨張を簡易的に予測する手法について検討した。特に、コンクリートの促進試験について、研究協力者とともに試験法の改良案を提案し、その試験法に基づいた膨張予測を行う手法を検討した。

4. 研究成果

(1) 骨材の岩石学的特長と ASR 膨張挙動の関係性の評価

偏光顕微鏡の観察結果から、骨材の岩石学的特徴によって、生成物である ASR ゲルの膨張圧発現機構が異なることを明らかにした。特に、ASR ゲルが反力を得るための障壁の存在の有無によって膨張挙動は大きく異なる結果であった。一例として、反力を得ることが難しい組織では、ペーストに ASR ゲルが逸散することで膨張圧が緩和され (図-1)、必ずしも ASR ゲルの生成量と膨張量は明確な関係を示さない可能性が示唆された。また、緻密な骨材であっても、骨材内での微細ひび割れ発生後の ASR ゲルのひび割れを介した流出状況などが促進試験と実環境のコンクリートでは異なった。これらの知見は申請者らの既往の研究と一致するとともに、コンクリートの ASR 膨張を予測する上で重要な点を示唆している。すなわち、コンクリートの ASR 膨張では、ASR ゲルが如何にして反力を得るかが重要であって、促進試験が現実的な現象を適切に踏まえていない可能性を示している。骨材の組織構造が ASR 膨張に及ぼす影響のモデル化は今後引き続き検討する所

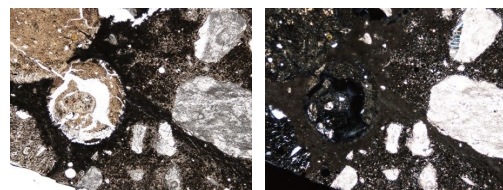


図-1 ASR ゲルのペーストへの逸散

存である。

複雑な挙動を示す ASR 膨張について、工学的に ASR 膨張挙動を評価するため、コンクリートの膨張試験結果を以下の Larive が提案する式でフィッティングし、各定数の温度依存性を評価した。Larive の式は以下の式(1)で表され、各定数と膨張挙動の関係は図-2 に示す通りである。

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

ここに、 ε_t : 時間 t における膨張量 (%), ε_∞ : 最終膨張量 (%), τ_C, τ_L : 時間を表す定数 (年)

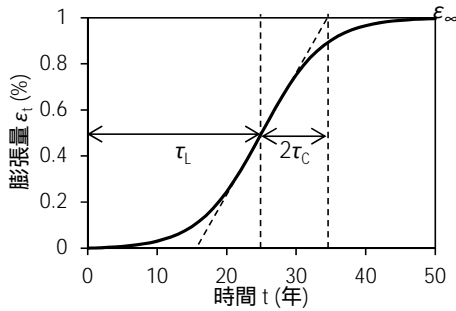


図-2 ASR 膨張挙動の概念図

PARTNER プロジェクトで使用された約 10 種類の骨材についてフィッティングを行い、その結果をアレニウスプロットで整理した。図-3 に各定数のアレニウスプロットを示す。図より、各骨材によって各定数の温度依存性は大きく異なることが確認された。図中では、急速膨張性もしくは並みの反応性骨材（白塗りプロット）、遅延膨張性の反応性骨材（黒塗りプロット）で比較も試みたが、明確な傾向は得られなかった。

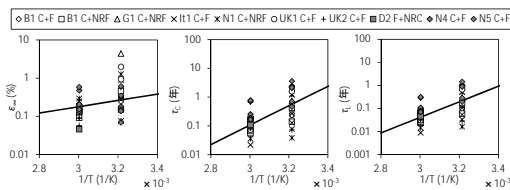


図-3 各定数のアレニウスプロット

図-3 におけるデータについて、最小二乗法によって回帰式を求め、式(2)~(4)を導出した。また、図-3 に示した回帰式の傾きから求めた活性化エネルギーは以下の通りである。

$$\frac{\varepsilon_\infty(T_1)}{\varepsilon_\infty(T_2)} = \exp \left[\frac{U_\infty}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (2)$$

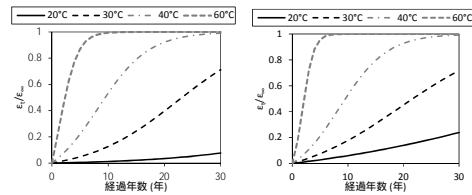
$$\frac{\tau_C(T_1)}{\tau_C(T_2)} = \exp \left[\frac{U_C}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\tau_L(T_1)}{\tau_L(T_2)} = \exp \left[\frac{U_L}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (4)$$

ここに、 $R=8.314$ [JK⁻¹mol⁻¹], $U_\infty=15.8$ [kJmol⁻¹],

$U_C=64.6$ [kJ/mol⁻¹], $U_L=64.7$ [kJ/mol⁻¹]

本研究で得られた活性化エネルギーは Larive の既報と若干異なった。本研究では Larive よりも多種の骨材を扱ったことが理由である。なお、Larive と本研究の活性化エネルギーを用いてそれぞれの膨張挙動を比較したところ(図-4),各定数の温度依存性の違いが ASR 膨張に及ぼす影響は小さいと判断された。ただし、低温(20°C)で、本研究で計算された膨張が Larive のそれよりも大きかった。なお、図-4 では、最終膨張量は規格化した値を用いている。



(1)Larive (2)本研究

図-4 ASR 膨張挙動の比較

ASR 膨張のアルカリ濃度依存性について、14 種類の骨材の膨張挙動を Larive 式でフィッティングし、各定数のアルカリ濃度依存性を把握した(図-5)。その結果、各骨材によってアルカリ濃度依存性は大きく異なった。アルカリ濃度依存性については、温度との複合作用もあり、より複雑な挙動を示すことが推察された。本研究では、簡易なアルカリ濃度依存性モデルを構築したが、より膨張機構に立脚したモデルを今後検討する予定である。

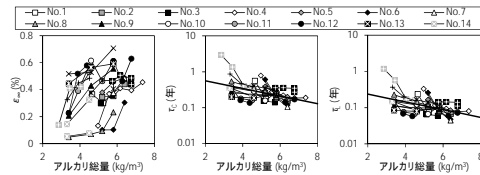


図-5 各定数のアルカリ濃度依存性

(2)相組成に基づく空隙水組成の推定モデルと ASR 膨張の関係の評価

セメント系水和物の相組成から空隙水組成を推定するモデルを提案した。ペースト単位容積あたりのアルカリ量 (C_{alkali}) は、C-S-H 量 (C_{CSH}), 空隙水量 (C_{fw}) を用いて式(5)が得られる。

$$C_{alkali} = R_s C_{CSH} + R_l C_{fw} \quad (5)$$

また、過去の実験結果を基に、空隙水のアルカリイオン濃度 (R_l) に対する C-S-H 単位量あたりのアルカリのモル数 (R_s) の比、すなわち分配係数 (R_d) を C-S-H の Ca/Si モル比の関数として定式化した。

$$R_d = \alpha(Ca/Si)^\beta \quad (6)$$

$$R_d = R_s / R_l \quad (7)$$

式(5)～(7)を用いれば、XRD/Rietveld 法や選択溶解法で得られた水和物の相組成から、空隙水の OH 濃度を推定することができる。

本手法で推定される OH 濃度と ASR の抑制効果（膨張比が小さいほど抑制効果が高い）は、SCM の種類や置換率に関係なく、比例関係を示した（図-6）。したがって、SCM による ASR 抑制機構は空隙水の OH 濃度の低減が主要因と考えられた。また、本モデルで、ASR を抑制するために必要な SCM 置換率を試算した。その結果、本モデルで必要な SCM 置換率は国内の経験則と概ね一致するとともに、国外で示されている SCM 置換率とほぼ整合する結果となった。

以上の結果は、骨材のアルカリ濃度依存性のモデル化がより高度化できれば、本モデルを用いて SCM の効果を事前に計算できる可能性があることを示唆しており、多様なコンクリート配合に対応可能となることが期待できる。

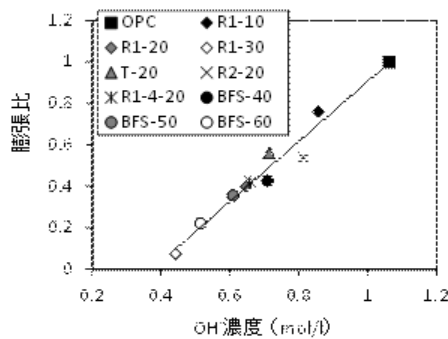


図-6 OH濃度の推定値と膨張比の関係

(3)骨材の岩石学的特長と収縮の関係の評価

国内から採取した約 20 種類の骨材について岩石学的特長と骨材収縮の関係を整理した（図-7）。その結果、骨材の収縮量は変質～変成作用、母岩の堆積年代、母岩の岩質で概ね説明することができた。また、骨材とコンクリートの収縮量は概ね比例関係を示した。また、粘土鉱物の含有量は収縮量と必ずしも比例関係がなく、粘土鉱物が閉じた空隙内に存在するなど、空隙の連続性を考慮する必要があることが示唆された。

また、骨材の岩石学的特長がコンクリートの破壊エネルギーに大きな影響を与えることを実験的に示した。これは、骨材内部の劈開の存在や粒子間結合の脆弱性に起因して骨材架橋効果が小さくなったためであった。骨材の岩石学的特長がコンクリートの体積変化だけでなく、様々な物性に強く影響していることをあわせて示した。

(4)室内試験に基づく ASR 膨張の予測

(1)の検討結果を発展させ、室内試験に基づ

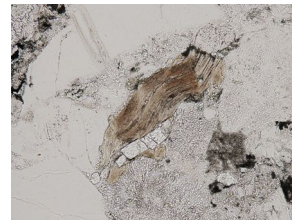


図-7 収縮が大きな骨材の観察事例

く実環境におかれたコンクリートの ASR 膨張挙動を予測した。CPT で得られた膨張挙動を基に、ASR 膨張の温度依存性およびアルカリ濃度依存性を考慮して、実環境に暴露されたコンクリートの ASR 膨張の予測を行った。室内膨張試験では、コンクリートをアルカリ溶液を含んだ湿布で包み、アルカリ溶脱の影響を排除した試験法を提案した（AW-CPT）、その結果、図-8 に示すように、AW-CPT を基に予測した結果は実験結果と比較的近い挙動を示した。一方、従来の室内膨張試験の結果を基に予測した場合には過小評価となった。これらの結果を基に、AW-CPT の有効性を示した。

また、本内容を発展させて、ASR 膨張に及ぼす環境作用の影響について新たな知見を得た。この点について、今後さらに検討を進める予定である。

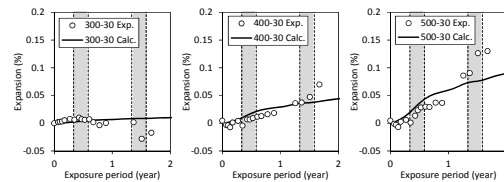


図-8 ASR 膨張挙動の予測結果

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 13 件)

川端雄一郎, 山田一夫: ASR 膨張に及ぼす空隙水組成の推定値の修正とその影響に関する再考察 土木学会論文集 E2 2015 (搭載決定), 査読有

山田一夫, 川端雄一郎, 小川彰一, 丸山一平: 原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察, セメントコンクリート論文集, Vol.68, pp.457-464, 2015, 査読有 <http://doi.org/10.14250/cement.68.457>

川端雄一郎: アルカリシリカ反応入門(2) アルカリシリカ反応の基礎～抑制対策～, コンクリート工学, Vol. 52, No. 1, pp.1018-1024, 2014.11, 査読無

川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保, 河村直哉: 重量コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりの構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1768-1773, 2014, 査読有

川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴: 加速コンクリートプリズム試験を用いたコンクリートの ASR 膨張の簡易予測, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.449-455, 2014, 査読有

川端雄一郎, 加藤絵万, 河村直哉, 山路徹, 岩波光保: 重量コンクリートの港湾構造物への適用に関する実験的検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1287, 2014, 査読無

川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.402-420, 2013, 査読有

<http://dx.doi.org/10.2208/jscejmcs.69.402>

川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 大迫政浩: 加速コンクリートプリズム試験を用いたコンクリートの ASR 膨張予測に関する試み, 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, Vol.13, pp.453-458, 2013, 査読有

川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保, 河村直哉: 重晶石および人工重量骨材を用いたコンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1477-1482, 2013, 査読有

河村直哉, 川端雄一郎, 片山哲哉: 岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1015-1020, 2013, 査読有

H. Goda, M. Hibino, Y. Kawabata, M. Uchino and H. Matsuda: Application of full-field non-contact measurement technique to clarification of deterioration mechanism on constructional material, Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability – Biondini & Frangopol (Eds), pp. 2182- 2189, Taylor & Francis Group, London, 2012, 査読有

川端雄一郎, 山田一夫, 古賀裕久, 久保善司: アルカリシリカ反応を生じた構造物の診断に対する技術者の意識調査 - ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会の活動 -, コンクリート工学, Vol. 50, No. 7, pp.593-600, 2012, 査読無

Yuichiro Kawabata, Ema Kato and Mitsuyasu Iwanami: Enhanced long-term resistance of concrete with marine sessile organisms to chloride ion penetration, Journal of Advanced Concrete Technology, pp.151-159, 2012, 査読有

[学会発表](計4件)

山田一夫, 大迫政浩, 小川彰一, 佐川康貴, 川端雄一郎: アルカリ骨材反応の抑制効果の評価方法と膨張予測の新しい考え方, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 2014 年 9 月, 大阪

山田一夫, 大迫政浩, 小川彰一, 佐川康貴, 山本大介, 川端雄一郎: 急速膨張性および遅延膨張性骨材を用いたコンクリートにおける ASR 膨張挙動の予測, 第 69 回土木学会年次学術講演会 2014 年 9 月, 大阪

小川彰一, 山田一夫, 大迫政浩, 佐川康貴, 川端雄一郎: コンクリートの ASR による膨張挙動予測に関する研究, コンクリート技術大会, 2014 年 9 月, 新潟

Yuichiro Kawabata, Ema Kato, Mitsuyasu Iwanami, Toru Yamaji: High-durable concrete structures co-habiting with marine tidal ecological system, 1st International Conference on Concrete Sustainability, Tokyo, 2013.5

[図書](計 件)

[産業財産権]
出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川端 雄一郎 (KAWABATA YUICHIRO)
独立行政法人港湾空港技術研究所・構造研究領域・構造研究チーム・主任研究官
研究者番号: 10508625

(2) 研究分担者

()
研究者番号:

(3) 連携研究者

()
研究者番号: