

氏名	鍵本 広之
生年月日	
本籍	兵庫県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第487号
学位授与の日付	平成14年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	アルカリ骨材反応からみたダムコンクリートの維持・管理に関する基礎的研究
論文審査委員(主査)	川村 満紀(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	鳥居 和之(工学部・教授) 梶川 康男(自然科学研究科・教授) 榎谷 浩(工学部・助教授) 宇野 尚雄(岐阜大学工学部・教授)

学位論文要旨

ABSTRACT

This study aims at investigating the influence of local environmental conditions on the degree of damage in existing ASR-damaged concrete structures and proposing a method for predicting the future progress of ASR damage on the basis of the resulting data. ASR damage was found to proceed rapidly after the number of annual freezing-thawing cycles increased as a result of climate changes. It was also found that the degree of deterioration in concrete depends on local conditions, such as temperature, humidity, and the supply of water from the outside. A combination of the alkalinity of extracted pore solution and residual expansion of concrete cores taken from the structures as measured by the NBRI test provides a useful means of predicting the future progress of ASR damage in concrete structures.

In connection with above, focusing on the alkali hydroxide in the pore solution, experiments were conducted to clarify the minimum OH^- ion concentration required to initiate ASR. Mortar samples were produced using Pyrex glass and 2 types of natural reactive aggregate and cured in sealed containers at 40°C and 100% relative humidity. Some ion concentrations in the pore solution and the expansion ratio of the sample for each material age were then measured. It was clarified that as conventionally proposed, approx. 250mmol/l was appropriate for minimum OH^- ion concentration and that caution was required when substituting glass cullet for concrete aggregate for recycling purposes since the minimum OH^- ion concentration of Pyrex glass was as low as 150mmol/l.

In addition to above, the characteristics of fry-ash concrete were investigated.

本論文は、アルカリ反応（以下、「ASR」）により劣化したダムコンクリート構造物を対象とした、経済的で信頼度の高い維持・管理、および補修法を確立するために、コンクリートの細孔溶液分析による劣化進行予測のための研究、および、ASR抑制材としてフライッシュを用いた場合のコンクリートの諸特性に関する研究、また、ダムコンクリート構造物全体の安定性に影響を及ぼす基礎岩盤の調査・評価手法に関する一連の研究をまとめたものである。

まず、従来の研究において明らかとなっている ASR 促進要因が実在の構造物の劣化程度に及ぼす影響について検討を加えた。

定点観測写真から、コンクリート体全体の劣化が著しく進行している時期が確認されたが、これは冬季の凍結融解日数の増加が原因であると考えられた。このことから、ASR による劣化の進行には、凍結融解等によるひび割れ大きく影響し、それら諸要因の複合作用により劣化が進行していくものと推定された。

また、コンクリート表面のひび割れ密度、表面硬度、および、コアの圧縮強度、静弾性係数により劣化度の定量的評価を行った結果、温度、湿度、凍害やそれらの複合によって、ASR によるコンクリート劣化程度が局部的に異なること、また、温度や湿度変化の軽減、および水分供給が遮断されていた部位では、ひび割れや強度低下が極めて軽微となることが明らかとなった。これらの結果より局所的な環境条件の差違が ASR による劣化に及ぼす影響はかなり大きいことがわかった。また、構造物から採取したコアの残存膨張量(JCI 法)はほとんどなかったが、外部からアルカリを補給する促進試験においてはコアは急速に膨張し、骨材には未だ反応成分が残存していることが明らかとなった。すなわち対象構造物ではコンクリート中のアルカリが ASR によって消費され、また、漏出したために、アルカリ濃度が ASR を生じさせるのに必要な限度値以下にまで減少しているものと推定された。

次に ASR 促進試験と凍結融解を組み合わせた実験を行うことにより、複合劣化条件下におけるコンクリートの劣化性状を明らかにするとともに、凍結融解の程度がコンクリートの劣化に与える影響を評価した。

その結果、供試体は初期に発生した ASR 等による微細なひび割れがきっかけとなり、ASR と凍害との複合作用により著しく劣化が進行することが明らかになった。このとき、凍結融解過程で相対動弾性係数が低下するが、ASR 促進過程では回復する傾向にあったことから、堰コンクリートの劣化は、建設後の初期段階において ASR 等により微細なひび割れが発生し、これに冬季の凍結融解の影響が加わることにより劣化が促進されたと推定された（図 1）。

さらに、劣化度評価を目的としたコア供試体の細孔溶液分析とその評価を行った。その結果、表面近傍に存在する多数のひび割れを通しての炭酸化、および、

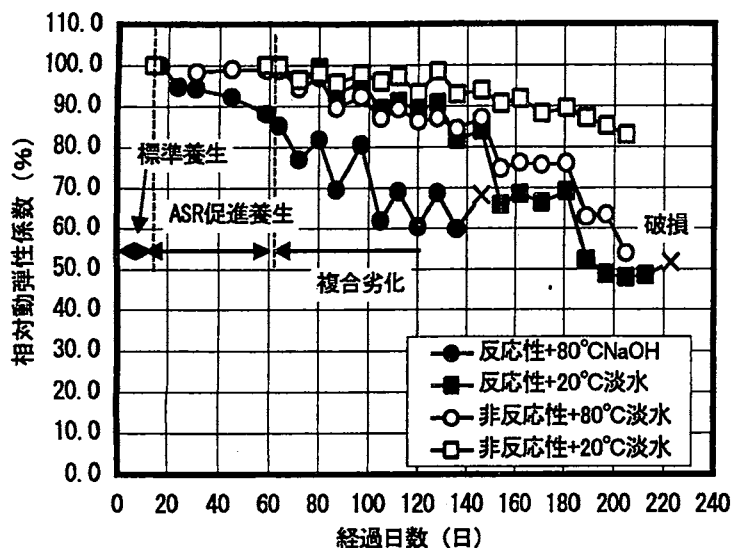


図1 NBRI法によるASR促進劣化と凍結融解の複合劣化試験

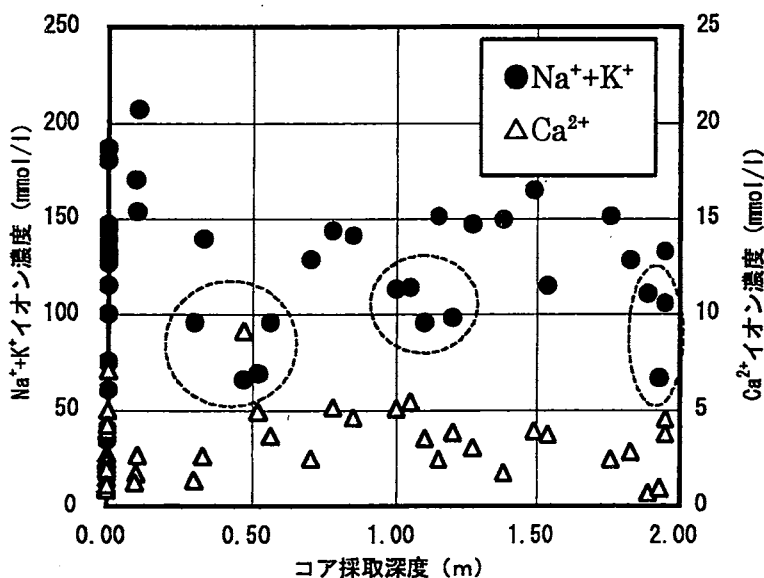


図2 コア採取深度と細孔溶液のイオン濃度(ゴム堰擁壁)

乾燥によるアルカリの固定、雨水によるアルカリの漏出の結果、表面部ではアルカリイオン濃度の変動幅が大きいこと、また、日射の影響を強く受けることによってASRが促進されていたと推定される部位は、細孔溶液中のアルカリイオン濃度が低いことが明らかになった(図2)。またコンクリートの Na^+ 、 K^+ 、 OH^- イオン濃度はASR進行の結果、建設当初と比較してほとんどが1オーダー低い値となっていた。

先に実施したコアの促進膨張試験において、ゴム堰コンクリートのASRによる膨張は収束しているが、骨材には未だに反応性成分が残留していることを確認したが、これらの結果からコアに膨張が生じないのは、コンクリート中の OH^- イオン濃度がある限度値以下に低下したことが原因であると

したが、細孔溶液の評価結果からこのことが裏付けられた。

以上の事実から、ASRがコンクリート中の細孔溶液と骨材中の反応性成分との間の化学反応であることに着目し、コンクリートコア内に残存する反応性成分の有無の判定と、細孔溶液中の OH^- イオン濃度との組み合わせにより、将来の劣化進行予測の可能性を示唆した。

次に、ASR劣化を生じた構造物の将来の劣化進行予測手法の構築を目的として、2,3の反応性骨材を用いてアルカリ量が異なるモルタル供試体の細孔溶液濃度と膨張量の経時変化、アルカリ濃度に対する骨材のASR反応性を評価した。

パルクスガラスを用いた試料で40°C湿気槽での促進養生を実施した実験から、試料の細孔溶液中の OH^- イオン濃度は、ASRの進行により急激に減少し、材齢90

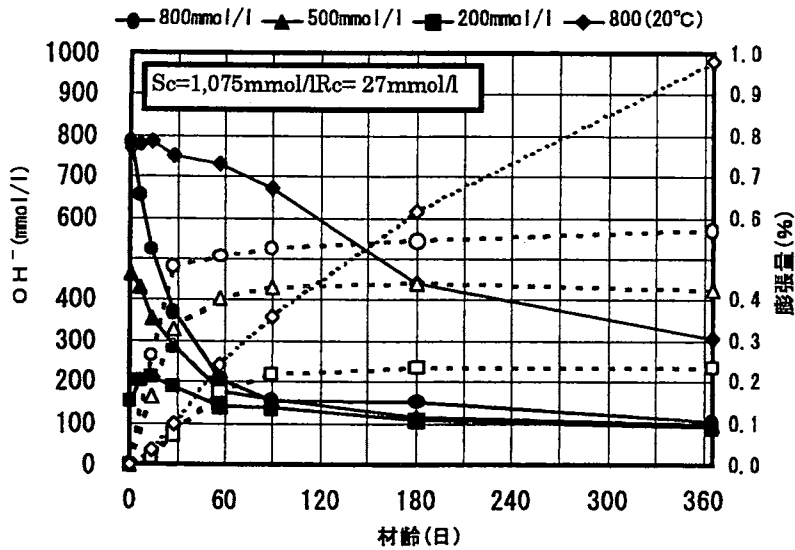


図3 細孔溶液濃度とモル比-膨張量 (パイルックスガラス)

日時点で定常状態に達し、その後材齢 365 日に至るまで 100 mmol/l 程度で推移した。またこのとき、供試体は細孔溶液濃度の変化と対応した膨張を示し、材齢 90 日で収束した (図 3)。低アルカリセメントである白色セメントを用いた試料では、初期 OH⁻イオン濃度が 152 mmol/l と低かったが、脱

型後材齢を経るにつれてセメントの水和反応に伴う自由水の減少と、パイルックスガラス中に存在するアルカリの溶出などが原因で、細孔溶液中の OH⁻イオン濃度は 212 mmol/l にまで増加したのち、ASR の進行による OH⁻イオンの消費とこれに起因する供試体の膨張が生じ、材齢 365 日での供試体膨張量は 0.23% に達した。このことから、コンクリート骨材としてガラス廃材を用いる場合には、低アルカリ型の白色セメントを用いるような場合でさえ、ASR による劣化による有害な膨張が生じる可能性があることが判明した。

反応性安山岩、反応性川砂を用いた供試体でも細孔溶液中の各イオンの挙動はパイルックスガラスの場合と同様で、材齢 90~180 日で定常状態に達した。

今回の実験では、初期 OH⁻イオン濃度が低かったこともあり高濃度試料を除いてほとんど膨張は生じなかったが、反応性安山岩においては、OH⁻イオン濃度が 210 mmol/l 程度でも化学反応は進行するものの、膨張を伴った劣化は生じていない。逆に、反応性川砂においては、初期 OH⁻イオン濃度が 360 mmol/l であっても、材齢 180 日での供試体膨張量がほぼ 0.1% であり、その後も膨張傾向にあることから、有害な膨張の生じる OH⁻イオン濃度の下限値は 360 mmol/l よりある程度低いと推定された。これまで、ASR を開始させるのに必要な OH⁻イオン濃度の限度値は 250 mmol/l 程度であるという報告があるが、本研究で得られた知見から、この値はほぼ妥当な数値と考えられる。

以上の検討結果をもとに、ASR が骨材中の反応性物質とコンクリート中の細孔溶液との間の化学反応であることに着目した劣化進行予測法の考え方を示した (表 1)。この考え方は、NBRI 試験による骨材中の残留反応性成分の有無の判定と、細孔溶液中の OH⁻イオン濃度の組み合わせにより実施するものであり、この方法に

表 5.12 劣化進行予測の考え方

		細孔溶液分析による OH ⁻ イオン濃度 (mmol/l)	
		250以上	250未満
N B R I 試験によるコア の膨張量 (材齢14日)	0.1%以上	判 定 A	判 定 B
	0.1%未満	判 定 C	判 定 D

判定A : 骨材中の残留反応性成分、細孔溶液中の水酸化アルカリとも多く、将来劣化が進行する可能性が大きい。
 判定B* : 骨材中の残留反応性成分は多いが、水酸化アルカリの濃度は低いため将来の劣化進行の可能性は小さい。
 判定C : 水酸化アルカリの濃度は高いが、骨材中の残留反応性成分は少ないため、将来の劣化進行の可能性は小さい。
 判定D : 骨材中の残留反応性成分も少なく、細孔溶液中の水酸化アルカリ濃度も低いので、将来の劣化進行は殆どない。
 ※ コア採取箇所のひび割れなどの影響で、OH⁻イオン濃度にばらつきがあることから、これらに対する考慮が必要である。

よって ASR で劣化した構造物の将来の劣化進行の可能性を、今まで以上に正確に把握できるものと考えられる。

また、フライッシュを混入したコンクリートはポゾラン反応による強度発現特性、耐久性、および、発熱特性を総合的に評価して配合設計することが望ましい。本章では、フライッシュ混入コンクリートの各種特性について実験、評価を行なった。

まず、フライッシュ置換率を変化させて実施したモルタル強度試験の結果、ベースメントとして普通ポルトランドセメントを使用し、フライッシュ置換率を高くすることにより、材齢28日から91日の範囲においてフライッシュのポゾラン反応をより活発化させることができることを明らかにした (図4)。

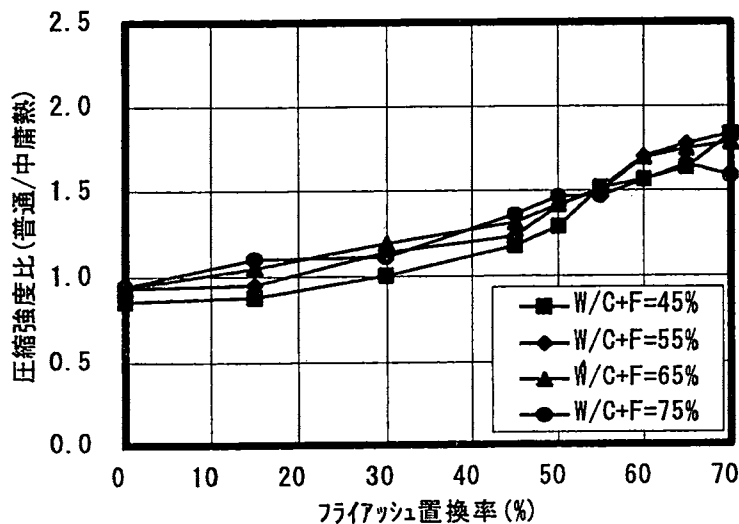


図4 モルタルの圧縮強度比

(普通ポルトランドセメント/中庸熱ポルトランドセメント)

また、フライッシュ置換率を高くすることにより、ASR に対してより大きな抑制効果を期待できるが、ベースメントを含めた配合選定を考える場合、発熱特性の変化を考慮に入れる必要がある。コンクリートの発熱特性を正確に評価するためには、断熱温度上昇試験の精度確保が重要となるが、本研究では、断

熱温度上昇試験機の制御精度の検証を目的として、アルミニウムブロックにジュール熱を与えてコンクリートの発熱現象を模擬する検証システムを提案した。

次に、フライアッシュ混入コンクリートの諸特性を評価した結果、フライアッシュ混入により単位水量の低減とブリーディング量の減少が図れること、強度発現特性は遅延するが、早強ポルトランドセメントをベースメントとすることでそれを改善できること、長期強度の伸びが期待できること、また、塩水、凍結融解、乾燥収縮、ASR に対する抵抗性は、フライアッシュの混入により向上することを確認した。

最後に、ダムコンクリート構造物全体の安定性に影響を及ぼすダム基礎岩盤の調査・評価方法について検討した。ダム基礎岩盤には多数の不連続面が存在するが、不連続面の構成要素（節理の方向性、大きさ、数、開口性）の調査・評価方法を検討した後、実際の岩盤を対象として評価を行なった。

学位論文審査結果の要旨

本学位論文に関して、平成 14 年 1 月 22 日に第 1 回審査委員会を開催し、面接審査を実施した後、論文の内容を検討した。さらに、2 月 1 日に行われた口頭発表の後に開催された第 2 回審査委員会において協議をした結果、以下のように判定した。

本論文においては、まず、アルカリ骨材反応によって劣化したダムコンクリート擁壁に関する調査結果に対して詳細な分析を行うことによって環境条件がコンクリート構造物の劣化におよぼす環境について貴重な知見を得ている。また、その調査の過程において得られた特異な現象に着目し、さらに室内実験を実施することによって劣化コンクリートの将来における損傷進行に対する独自の予測法を提案している。さらに、ダムコンクリートにおけるアルカリ骨材反応防止対策の 1 つとしてフライアッシュの有効利用の問題を取り上げ、それに関連してダムコンクリートの発熱特性などについても重要な成果を得ている。一方、ダム全体の安定性という観点から、基礎岩盤の力学特性を評価することが重要であるとして、岩盤内に存在する不連続面を定量的に評価するための解析モデルを構築し、その実際の岩盤への適用性を検討している。

以上の研究成果は、アルカリ骨材反応によって損傷を受けたダムコンクリートの劣化進行予測およびコンクリートダムの安定性に関連する技術の発展に大きく貢献するものであり、博士論文として価値あるものと判定した。