

論文 ASTM C1260による骨材のアルカリシリカ反応性と コアの残存膨張性の評価

掛布眞司*¹・山本満明*²・鳥居和之*³

要旨：わが国で使用されている各種骨材のアルカリシリカ反応性を ASTM C1260 により調べるとともに、ASR が発生したコンクリート構造物から採取したコアの残存膨張性を評価する試験として JCI-DD2 法、デンマーク法及び ASTM C1260 に準拠した試験法を実施し、その適用性を検討した。その結果 ASTM C1260 は、短期間で骨材のアルカリシリカ反応性を判定でき、骨材の ASR に対するスクリーニング試験として有効であることが明らかになった。また DSC 分析より外部から浸透する NaCl が ASR 膨張を促進するのは、フリーデル氏塩の生成過程で水酸化物イオンが生成されることによることが判明した。

キーワード：ASR, ASTM C1260, コアの残存膨張性, DSC 分析, フリーデル氏塩

1. まえがき

アルカリシリカ反応 (ASR) によってコンクリートの劣化・損傷が発生するには早くも数年の年月を要する。従って、コンクリートの作製時に骨材のアルカリシリカ反応性を適切に判定し、ASR の可能性がある場合には抑制対策を実施することが重要になる。わが国では、骨材のアルカリシリカ反応性の試験法 (JIS A5308, 化学法及びモルタルバー法) が昭和 63 年に確立され、それ以後、抑制対策が認識されるとともに、ASR による損傷の発生は減少している。近年、北米やヨーロッパの諸国では、骨材のアルカリシリカ反応性の試験法として、より迅速な試験である促進モルタルバー法 (ASTM C1260) が普及してきており、各国の骨材に対応した判定基準値が整備されつつある¹⁾。しかし、多種多様な骨

材が使用されているわが国では、ASTM C1260 による骨材のアルカリシリカ反応性の判定の実施例がなく、本試験法が適用できるかどうかは不明である。一方、コンクリート構造物の残存膨張性を評価する方法として、従来の湿度 100% での湿気養生 (JCI-DD2) に代わり、1N の NaOH 溶液や飽和 NaCl 溶液に浸漬した状態でコアの膨張を測定する方法が提案されている²⁾。これらの養生法では、外部からのアルカリの供給によりコアの膨張が促進されるので、短期間にコアの残存膨張性が判定できる利点があると指摘されている。

本研究は、わが国で産出する骨材のアルカリシリカ反応性の判定試験を実施して、ASTM C1260 に準拠した試験法の適用性を調べたものである。また、ASR が発生したコンクリート構

表-1 コンクリートの配合

目標強度	スランプ	空気量	水セメント比	単位量(kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
24N/mm ²	5 cm	3 %	60 %	165	275	853	1056

※普通ポルトランドセメント (等価アルカリ量:0.65%), 細骨材 (反応性のない川砂)

*1 (株) ピー・エス (正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科システム創成科学専攻 後期課程 (正会員)

*3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表-2 コンクリートコアの促進養生試験の判定基準

	促進養生の条件	判定基準
湿気槽養生法 (JCI-DD2 法)	温度 40℃, 湿度 100%の条件下にて養生	温度 40℃, 100%R. H. の条件下に 13 週間養生し, 0.05%以上の膨張量を示すものを有害と判定する。
デンマーク法	温度 50℃の飽和 NaCl 溶液中に浸漬	試験材齢 3 ヶ月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上: 膨張性有り 0.1~0.4%: 不明確 0.1%未満: 膨張性無し
カナダ法 (ASTM C1260 法)	温度 80℃の 1N の NaOH 溶液中に浸漬	ASTM C1260-94 の判定基準: 試験開始後 14 日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合: 無害 0.10~0.20%の場合: 有害と無害な骨材が含まれる (この場合, 14 日以降もさらに試験を継続する。 0.20%以上の場合: 潜在的に有害

表-3 骨材のアルカリシリカ反応性の判定結果

骨材の種類	偏光顕微鏡により同定された反応性鉱物	化学法 (mmol/l)			促進モルタルバー法 (%)		実構造物における損傷の有無
		Rc	Sc	判定	膨張量	判定	
川砂利 A	—	49	19	無害	0.244	有害	無
川砂利 B	—	92	22	無害	0.415	有害	有
安山岩碎石	火山ガラス クリストバライト	109	289	無害でない	0.701	有害	有
石灰石碎石	カルサイト	—	—	—	0.032	無害	無
チャート質 碎石	玉髄, 微小質石英	32	235	無害でない	0.075	無害	無

造物より採取したコアを使用して, コアの残存膨張量に及ぼす促進養生条件の影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 骨材のアルカリシリカ反応性の評価

促進モルタルバー法は ASTM C1260³⁾ に従って実施した。使用した骨材は川砂利 (A, B), 安山岩碎石, 石灰石碎石及びチャート質碎石である。ASTM C1260 に従って, 所定の粒度に調整した骨材試料を使用して, 水セメント比が 47%のモルタルバー (25×25×250mm) を作製した。モルタルバーは温度 80℃の水中養生を 1 日行った後, 温度 80℃の 1N・NaOH 溶液に浸漬した。ASTM C1260 における判定基準は, 14 日間の浸漬材令で膨張率が 0.1%以下であれば「無害」, 0.1~0.2%であれば「無害と有害を含む」, 0.2%以上

であれば「有害」である。促進モルタルバー試験の終了後, 破断面の ASR ゲルの生成状況を酢酸ウラニル蛍光法で確認するとともに, 骨材の周囲に生成したゲルの化学組成を SEM-EDXA により調べた。一方, コンクリートバー法は JCI-C22 に従って実施した。コンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリートバー (75×75×400mm) は 1 週間の湿空養生後, 3 種類の促進条件下 (温度 40℃の湿気槽養生, 温度 40℃の 1N・NaOH 溶液浸漬 (カナダ法) 及び温度 50℃の飽和 NaCl 溶液浸漬 (デンマーク法)) にて養生し, 膨張率, 動弾性係数および重量の変化を測定した。促進養生終了後, 破断面の ASR ゲルの生成状況を酢酸ウラニル蛍光法で確認するとともに, 中心部より採取した試料を用いて, 示差走査熱量分析 (DSC) よりフリーデル氏塩及び水酸化カルシウムの生成量を調べた。

2.2 コアの残存膨張性の評価

ASR が発生したコンクリート構造物 (A ボックスカルバート, B 橋梁, C 橋梁) よりコア (直径: 55 mm, 長さ: 約 50 cm) を採取した。これらの構造物の中で, A ボックスカルバートは内陸部, B 橋梁, C 橋梁は海岸付近に位置しており, 竣工後 20 数年が経過している。コンクリートの調査より, 細骨材は川砂が使用されており, 川砂利に含まれている火山岩粒子 (安山岩, 流紋岩及び凝灰岩) が反応性骨材と同定されている。反応性骨材の含有率は 20~50% であり, 骨材が採取された河川水系ごとにその値が相違する。採取したコアは乾燥や炭酸化の影響を受けないように, 現地で厳重に密封し, 試験室にて直ちに基長 (100 mm) を測定した。その際に, 構造物の表面部 (5 cm 程度) は, ひび割れの発生, 中性化, アルカリの溶出・濃縮の影響を大きく受けている可能性があったので, 膨張量を測定する箇所から除いた。ASR が発生したコアの測定値は微細なひび割れの影響で変動が大きくなる傾向があったので, 3 個のコアの平均値とした。コアの促進養生条件は, 温度 40℃, 湿度 100% の湿気箱 (JCI-DD2 法), 温度 80℃ の 1N・NaOH 溶液浸漬 (カナダ法) 及び 50℃ の飽和 NaCl 溶液浸漬 (デンマーク法) の 3 種類である。膨張量の測定は 1 週間毎に実施し, カナダ法は浸漬材齢 28 日まで, JCI-DD2 法及びデンマーク法は浸漬材齢 91 日まで測定を継続した。促進膨張試験の判定基準値は, 表-2 に示すように骨材のアルカリシリカ反応性の試験法に準拠したものが使用されることが多いが, 明確な値は確立されていない。

3. 実験結果および考察

3.1 促進モルタルバー法による評価

骨材のアルカリシリカ反応性の判定結果を表-3 に示す。化学法では川砂利 (A, B) が「無害」であったが, 安山岩碎石およびチャート質碎石は「無害でない」と判定された。しかし, 「無害」と判定された川砂利 B を用いたコンクリート構

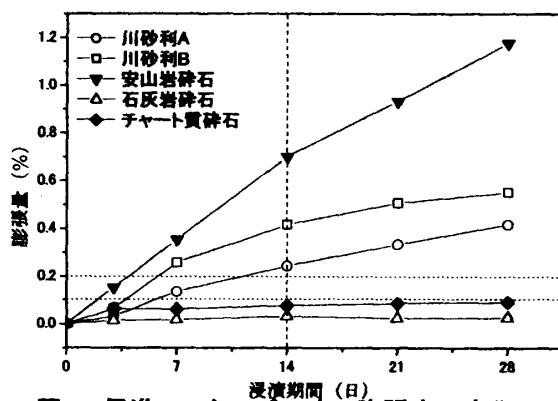


図-1 促進モルタルバー法の膨張率の変化

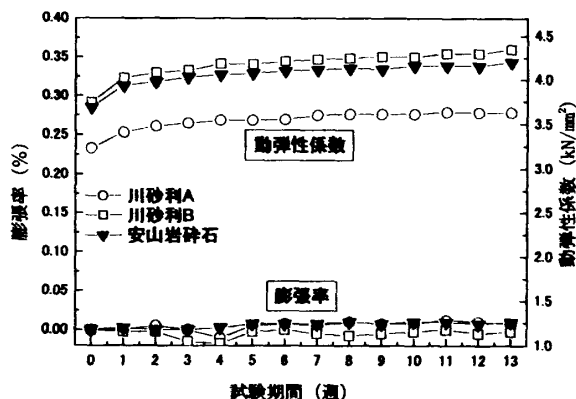


図-2 コンクリートの膨張率及び動弾性係数の変化 (40℃, 100% R.H. の湿気槽養生)

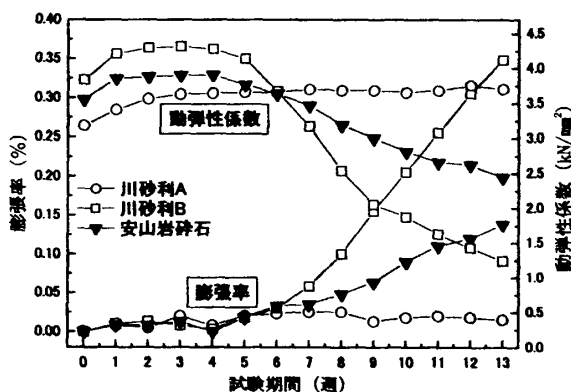


図-3 コンクリートの膨張率及び動弾性係数の変化 (50℃の飽和 NaCl 溶液浸漬)

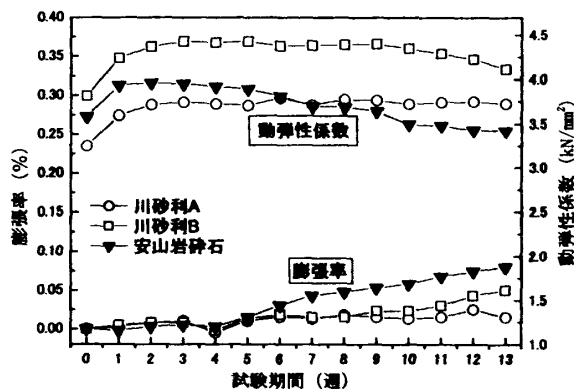


図-4 コンクリートの膨張率及び動弾性係数の変化 (40℃の 1N・NaOH 溶液浸漬)

造物では、川砂利に少量含まれる安山岩粒子によって ASR 損傷が確認されている。また、「無害でない」と判定されたチャート質碎石は実構造物での ASR 損傷は確認されていない。さらに、北米では石灰石に含まれるシリカ鉱物による ASR が報告されているが、石灰石の判定には化学法が適用できない。促進モルタルバー法の膨張率の変化を図-1 に示す。ASTM C1260 によると、川砂利 (A, B) 及び安山岩碎石が「有害」、石灰石碎石及びチャート質碎石は「無害」と判定された。この結果は化学法とは相違するが、川砂利 B を除くと、ASTM C1260 の結果は実構造物での ASR による損傷の有無とおおむね一致している。ASTM C1260 は短期間で骨材のアルカリシリカ反応性を判定できることから、骨材のスクリーニング試験としての役割を十分に果たしていると考えられた。しかし、ASTM C1260 は温度 80℃ の 1N・NaOH 溶液に浸漬するという非常に厳しい条件下での促進試験であり、本試験法で「有害」と判定されても実際には ASR が発生しない骨材も存在する。このため、さらに多くの骨材での結果を整理することにより、わが国の骨材に対応した判定の基準値を確立することが今後の課題となる。

3.2 各種養生条件下でのコンクリートの膨張挙動

各種養生条件下でのコンクリート (川砂利 (A, B) 及び安山岩碎石) の膨張率及び動弾性係数の変化を図-2, 3 及び 4 に示す。40℃の湿気槽養生の場合、今回のアルカリ量 (1.8 kg/m^3) では、いずれの骨材を用いたコンクリートも 91 日材齢における膨張率が 0.02% 以下であった。それに対して、外部からアルカリ (NaOH 及び NaCl) を供給したものは浸漬材齢とともに明確な膨張挙動を示し、それに伴って動弾性係数も大きく低下した。すなわち、40℃の 1N・NaOH 溶液浸漬の場合、川砂利 A は膨張しなかったが、安山岩碎石と川砂利 B は 91 日材齢にて 0.05% 程度の膨張を示し、両骨材では ASTM C1260 による判定との対応関係が認められた。一方、50℃の

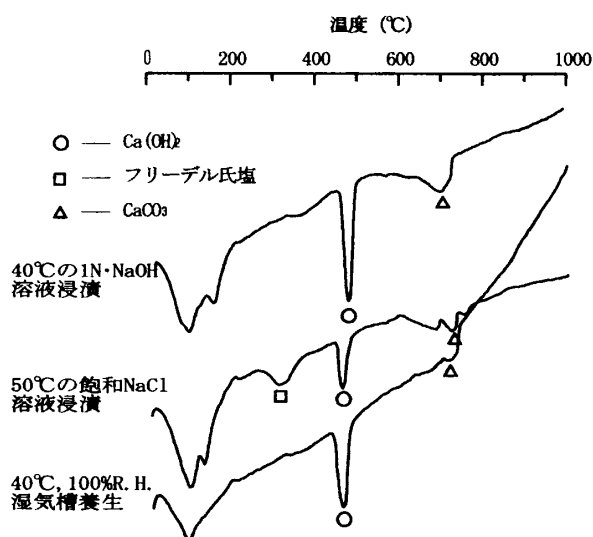


図-5 コンクリートの DSC 曲線
(川砂利 B, 浸漬期間: 13 週)

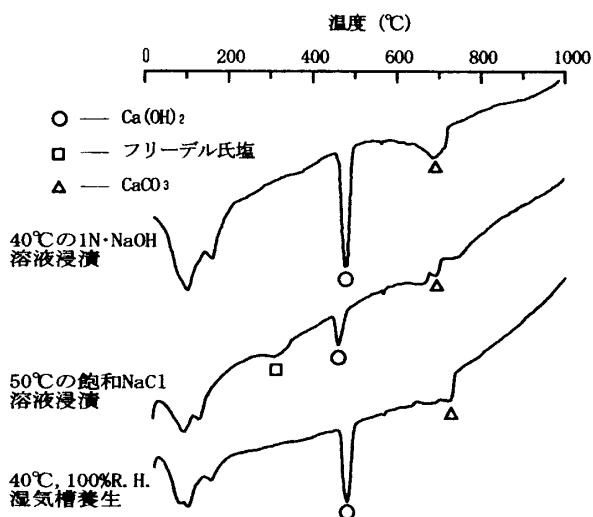


図-6 コンクリートの DSC 曲線
(安山岩碎石, 浸漬期間: 13 週)

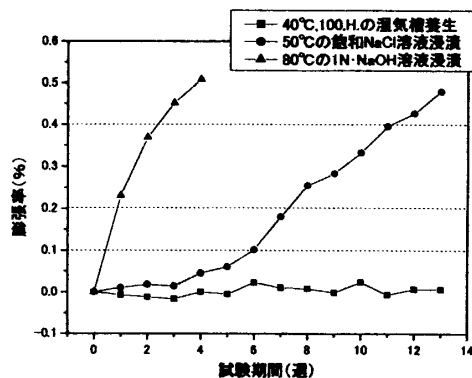


図-7 ボックスカルバートより採取したコアの膨張率の変化

飽和 NaCl 溶液浸漬の場合、川砂利 A は同様に膨張しなかったが、川砂利 B と安山岩碎石は浸漬材齢 40 日以後に大きな膨張を示し、最終的な膨張量は 1N・NaOH 溶液浸漬の場合よりも大きくなった。外部から浸透する NaCl が ASR 膨張を促進するのは、コンクリート中でのフリーデル氏塩の生成と塩化ナトリウムと水酸化カルシウムの反応で水酸化物イオン(OH⁻) が生成されることによる、との仮説がある^{4), 5)}。この場合、コンクリートに反応性成分と水酸化カルシウムが十分に存在すれば、NaCl が内部へ浸透するとともに、骨材の ASR が活発になり、膨張が継続されるようである。コンクリートの DSC 分析の結果(川砂利 B 及び安山岩碎石)を図-5 及び図-6 に示す。40℃の湿気槽養生及び 1N・NaOH 溶液浸漬の場合、DSC 曲線には水酸化カルシウムの吸熱ピーク(460℃)が存在するのみであった。それに対して、飽和 NaCl 溶液浸漬の場合、水酸化カルシウムの吸熱ピークは 40℃の湿気槽養生及び 1N・NaOH 溶液浸漬と比較して大きく減少しており、同時にフリーデル氏塩の吸熱ピーク(320℃)が明瞭に存在した。また、エトリンガイトの吸熱ピーク(110℃)も認められるが、エトリンガイトの生成が膨張に及ぼす影響は不明であった。DSC 分析の結果は上記の NaCl の浸透による膨張促進の仮説を検証したものとなっている。

3.3 コアの残存膨張性の評価

ボックスカルバートより採取したコアの膨張率の測定結果を図-7 に示す。湿気槽にて実施する方法(JCI-DD2)では、コアの直径や長さが小さくなると、コアからのアルカリの溶出の影響で、膨張量の測定結果が小さくなり、誤った評価をする可能性があることが分かる。実際、これまでに実施した北陸地方の ASR 損傷構造物の調査でも JCI-DD2 によると膨張を示さないコアが多くあり、ASR 損傷との対応は明確には認められなかった²⁾。

橋梁より採取したコアの残存膨張率の測定結

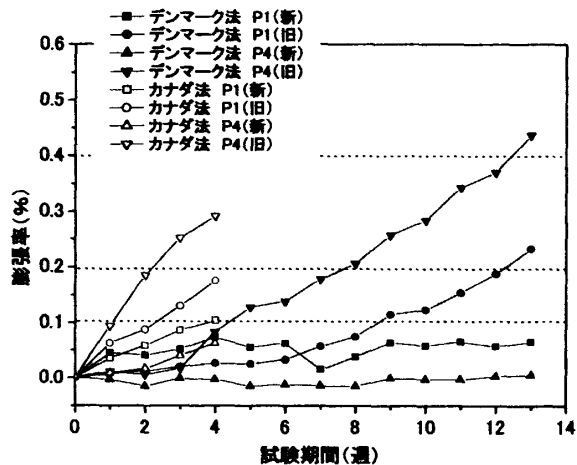


図-8 B 橋梁より採取したコアの膨張率の変化

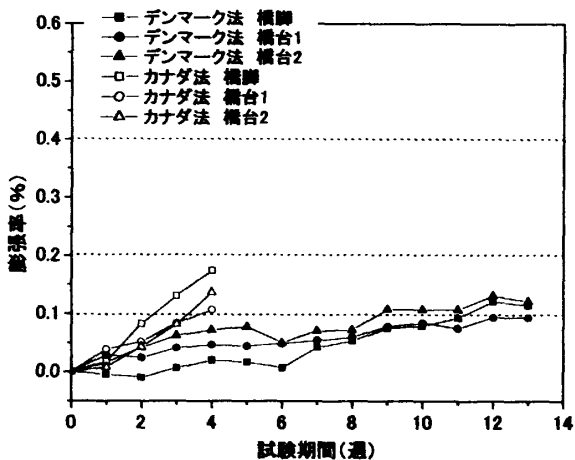


図-9 C 橋梁より採取したコアの膨張率の変化

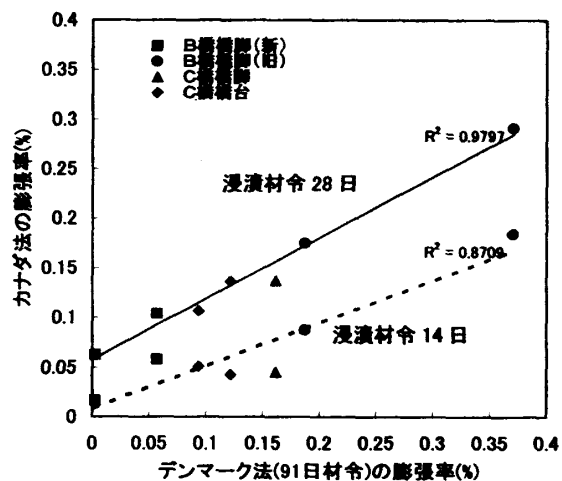


図-10 B,C 橋梁より採取したコアのカナダ法及びデンマーク法との比較

果を図-8 及び図-9 に示す。B 橋梁では旧橋脚およびその後建設された新橋脚ともにひび割れが発生していたが、新橋脚にはゲルの滲出は観察されなかった。一方、C 橋梁では橋脚の端部と

橋台にひび割れ及びゲルの滲出が観察された。

図-8 に示すように、B 橋梁では旧橋脚のコアはカナダ法及びデンマーク法にてともに残存膨張性が認められたが、新橋脚のコアの残存膨張性は小さかった。酢酸ウラニル蛍光法による ASR ゲルの確認では、旧橋脚のコアには安山岩粒子の周囲に多量のゲルが生成していたが、新橋脚ではゲルの生成はわずかであった。このため、新橋脚のひび割れは旧橋脚の ASR による 2 次ひび割れが主たるものであると判断された。一方、図-9 に示すように、C 橋梁の橋脚及び橋台の残存膨張性は全体に小さかった。これは、C 橋梁の川砂利に含まれる反応性成分がもともと少なく、すでに骨材の反応が大部分終了していたことによると推察された。

両橋梁より採取したコアのカナダ法及びデンマーク法による膨張量の比較を図-10 に示す。コアの残存膨張性に関して、カナダ法とデンマーク法とでは同様な判定が得られるとともに、カナダ法（浸漬材齢 28 日）とデンマーク法（浸漬材齢 91 日）の結果の相関性が高いことが判明した。カナダ法はデンマーク法と比較して反応機構が明確で、早期に大きな膨張を示すことから、コアの残存膨張性の判定に有利であると言える。しかし、高温の NaOH 溶液を取り扱うことによる試験実施時の安全確保や健康管理、さらに試験が実施できる機関が限定されるなど、解決すべき問題も残されている。

4. まとめ

骨材のアルカリシリカ反応性とコアの残存膨張性の評価に関して実施した一連の研究成果をまとめると次のようである。

(1) 促進モルタルバー法 (ASTM C1260) は、短期間で骨材のアルカリシリカ反応性を判定でき、実際の構造物での ASR 損傷とも一致することから、骨材の ASR に対するスクリーニング試験として有効であった。

(2) 外部からアルカリ (NaOH 及び NaCl) を

供給した環境下では、ASTM C1260 で有害と判定された骨材を使用したコンクリートは浸漬材齢とともに膨張し、動弾性係数も大きく低下した。

(3) DSC 分析および酢酸ウラニル蛍光法より外部から浸透する NaCl が ASR 膨張を促進するのは、フリーデル氏塩の生成、と塩化ナトリウムと水酸化カルシウムの反応で水酸化物イオンが生成されることによることが検証された。

(4) 構造物からのコアの残存膨張性の判定に関して、カナダ法とデンマーク法とではほぼ同様な判定結果が得られた。また、カナダ法（浸漬材齢 28 日）とデンマーク法（浸漬材齢 91 日）との結果の相関性が高かった。

謝辞：本研究の実施に当たってご指導いただいた、金沢大学工学部川村満紀教授に感謝いたします。

〈参考文献〉

- 1) B. Fourier and M. A. Berube : Alkali-aggregate Reaction in Concrete: a Review of Basic Concepts and Engineering Implications, Can. J. Civ. Eng., Vol. 27, No. 2, pp. 167-191 (2000)
- 2) 鳥居和之：凍結防止剤によるコンクリート構造物の損傷と防止対策，セメント・コンクリート，No. 635, pp. 40-46 (2000)
- 3) ASTM C1260 : Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates - Mortarbar Method, Vol. 04. 02, pp. 654-659 (1994)
- 4) S. Chatterji : An Accelerated Method for the Detection of Alkali-aggregate Reactivity, Cement and Concrete Research, Vol. 8, No. 5, pp. 647-649 (1978)
- 5) 日本コンクリート工学協会・融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会：融雪剤の影響を受けたコンクリートのアルカリ骨材反応，融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書，pp. 45-94 (1999)