

合理的なアルカリシリカ反応抑制対策に関する研究開発①

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 21～平 25
担当チーム：基礎材料チーム
研究担当者：渡辺 博志、古賀 裕久

【要旨】

アルカリ総量規制による対策の効果について、23年以上屋外に暴露した供試体の調査結果から検証した。その結果、アルカリ量を 3kg/m^3 と抑制した場合でも ASR によるひび割れを完全には防げなかった。ただし、アルカリ量を抑制した場合は、ひび割れの程度は明らかに小さかった。アルカリ量 3kg/m^3 でもひび割れが生じた骨材には、化学法で溶解シリカ量が 100mmol/L より大きい骨材が多く、アルカリ総量の規制と使用骨材の試験を組み合わせることが有効と考えられた。高炉セメントによる抑制対策については、骨材をペシマム条件で用いても抑制効果が大きいことを確認した。

キーワード：コンクリート、アルカリシリカ反応、アルカリ総量規制、高炉スラグ、長期暴露試験

1. はじめに

1. 1 検討の背景

アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリートの膨張は、コンクリート構造物の主要な劣化要因の一つである。我が国では、1980年代前後に、ASR や塩害により著しく劣化したコンクリート構造物の存在が報道で取り上げられるなどして広く知られるようになり、コンクリート構造物の耐久性が社会問題となった。

そこで、1985年から、当時の建設省が中心となって建設省総合開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」（以下、耐久性総プロ）が実施され、産学からも多くの研究者が参加して、新たに建設する構造物で ASR の発生を抑制するための対策などについて検討が行われた。検討結果は、1986年の旧建設省の通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」などとして実務に反映された。また、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートにも通達を基に同様の規定が取り入れられた。ASR の抑制対策については、その後も見直しがなされているが、その骨格部分は、現在まで大きくは変更されていない。また、暫定対策が運用されるようになった1987年以降に竣工したコンクリート構造物では、ASR による劣化の発生率が大幅に低下したものと考えられている。

一方で、近年、抑制対策を適用しても、ASR によるひび割れ等が生じた事例があることが少しずつ報告されるなど、抑制対策の限界についても指摘され

るようになってきた。そこで、より合理的な ASR 抑制対策を確立するために検討を行った。

1. 2 ASR 抑制の考え方

ASR によるコンクリートの膨張は、(1)骨材に反応性の物質が含まれていること、(2)コンクリート中の pH が大きいこと、(3)外部から水が供給されること、の3つの要因がそろった場合に生じると考えられている。

このうち水分の供給を完全に防止することは困難なので、新設構造物については、反応性の物質を含まない骨材の使用もしくはコンクリート中の pH を過剰に大きくしない観点から、対策が行われている。現行の抑制対策では、表-1.1 に示す対策のいずれかをとることが求められている¹⁾。

1. 3 ASR 抑制対策に関する近年の指摘

暫定対策が運用されるようになった1987年以降に竣工したコンクリート構造物では、ASR による劣化の発生率が大幅に低下したものと考えられている。

表-1.1 ASR 抑制対策の概要

種類	対策の概要
アルカリ総量規制	コンクリート 1m^3 に含まれるアルカリ総量を Na_2O 換算で 3.0kg 以下にする。
混合セメント等	JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント[B種またはC種]あるいは JIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント[B種またはC種]等を使用する。
無害な骨材	骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法またはモルタルパー法）の結果で無害と確認された骨材を使用する。

国土交通省（旧建設省）では、例えば、土木コンクリート構造物に対する実態調査（1999年実施）²⁾や道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）に基づく調査（2003年実施）³⁾など行って劣化実態を調査しているが、抑制対策を取った構造物で ASR による劣化が生じたと見られる事例はほとんどなかった。ただし、これらの調査は主に目視観察によって行われており、劣化が軽微な段階では、ASR の可能性について、十分には検討されなかったおそれもある。

一方で、抑制対策を適用しても ASR を防げなかった事例も報告されている。例えば、上田ら⁴⁾は、モルタルバー法で「無害」と判定された骨材を使用した構造物で ASR による変状が生じた事例を報告している。また、尾花、鳥居⁵⁾も、化学法またはモルタルバー法で「無害」と判定された骨材を使用した構造物で ASR による変状が生じた事例を報告している。山田ら⁶⁾は、少量のオパールを含む細骨材が用いられた事例で、アルカリ量が $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下と考えられるコンクリートに ASR による劣化が生じた事例を報告している。

1. 4 本課題での検討方針

前節で述べたように、ASR 抑制対策について種々の課題が指摘されているところであるが、ASR の抑制をさらに確実にすることは必ずしも容易ではなく、対策に大きなコストが発生することも考えられる。抑制対策の合理的な改善方法を検討するためには、現行の対策を取った場合でも ASR が発生する場合やその割合について、調査研究が必要と考えられた。

そこで、土木研究所では、屋外に暴露されていたコンクリート供試体の調査を行ったり、新たに供試体を作製して実験を行ったりして、抑制対策の課題について検討した。本課題は、基礎材料チーム、新材料チーム、地質チームの3研究室で図-1.1のように分担して検討した。

本報では、基礎材料チームが担当したアルカリ総量規制に関する検討、および基礎材料チームと新材料チームが共同で検討した混和材を用いた対策に関する検討について報告する。

2. アルカリ総量規制に関する検討

2. 1 実施した検討の概要

アルカリ総量規制の有効性を検討するため、総量規制値と同じアルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ となるように製作され、23年以上屋外に暴露されていた供試体の調査

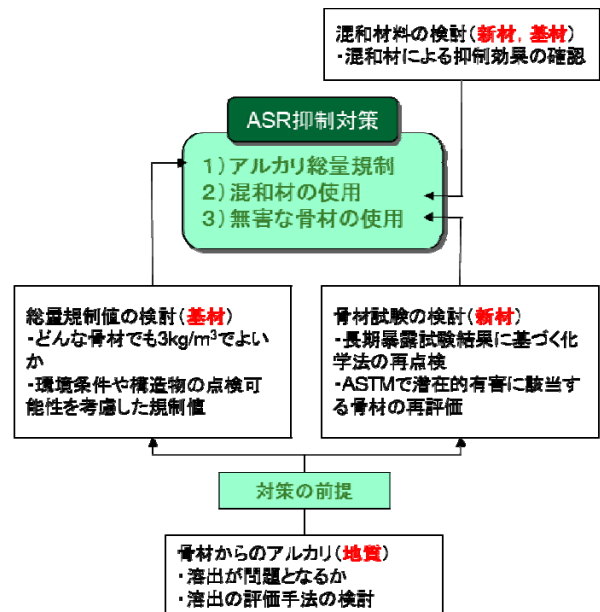


図-1.1 本課題の主な検討項目

を行った。その結果を2.2節に示す。

また、アルカリ量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ より低減した場合の効果を検討するため、新たに供試体を製作して促進養生試験等を行った。その結果を2.3節に示す。

ところで、海からの塩分 (NaCl) の飛来がある地域では、コンクリートに外部からナトリウムイオンが供給されるため、ASR による劣化が促進されるおそれがあるとされている。この点について検討した結果を2.4節に示す。

2. 2 長期暴露供試体の調査^{7),8)}

土木研究所では、耐久性総プロの検討を行った際に、我が国の様々な地域から収集した粗骨材（砕石）を用いてコンクリート供試体を作製し、1987年から屋外に暴露していた。供試体には、ASR を促進する目的でアルカリ量を $5\text{kg}/\text{m}^3$ にしたものと、総量規制と同じ $3\text{kg}/\text{m}^3$ にしたものがあつた。総量規制の効果の評価するため、暴露開始から23年以上が経過したこの供試体の調査を行った。

2. 2. 1 暴露供試体の製作及び暴露の条件

1) 暴露供試体製作

供試体に用いられた粗骨材の産地及び岩種を表-2.1、表-2.2に示す。当初、供試体は100種類の粗骨材を用いて製作されていたが、銘板等の不備もあり、使用骨材を確認できたのは94種類であつた。細骨材は、いずれの供試体でも反応性のない石灰石砕砂が使用されていた。そこで、本節の以降の記述では、特に断りのない限り、骨材は粗骨材を指すものとする。

表-2.1 使用骨材の産地

産地の区分	産地の数
東北	30
関東	1
中部	2
近畿	13
中国	19
四国	9
九州	20
(合計)	94

※産地の区分は、旧建設省（国土交通省）の機関の管轄区分によるものである。

※北海道及び沖縄県の骨材は含まれていなかった。

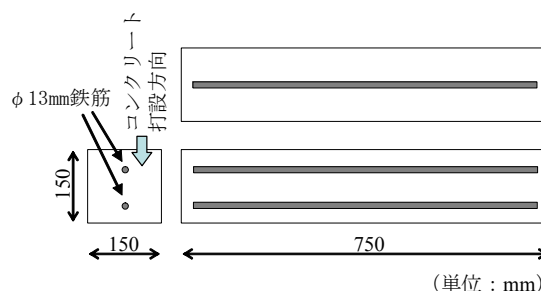
表-2.2 使用骨材の岩種

岩種による分類		試料の数
深成岩	カンラン岩	1
	花崗岩	1
半深成岩	細粒ハンレイ岩	4
	斑状安山岩	1
火山岩	玄武岩	5
	安山岩	36
	デイサイト	15
	流紋岩	6
火山砕屑岩	変成玄武岩質火山砕屑岩	1
	安山岩質火山砕屑岩	2
	デイサイト質火山砕屑岩	4
堆積岩	砂岩	12
	頁岩	1
	粘板岩	3
	石灰石	1
変成岩	ホルンフェルス	1
(合計)		94

使用骨材は、全国（北海道、沖縄を除く）の砕石場の位置の調査、地質図上での岩体の確認をした上で、比較的反応性が高いと考えられる岩種を中心に、それ以外の岩種も含まれるように収集された骨材から選定されていた。なお、砂利は、一般に多様な岩種から構成され、岩種と膨張の関係を明確にすることが困難なため、選定されなかった。

コンクリート供試体の形状を図-2.1 に、コンクリートの配合を表-2.3 に示す。供試体は、骨材ごとにコンクリートのアルカリ量が Na_2O 当量で 3kg/m^3 または 5kg/m^3 のものが 2 体ずつ（合計 4 体）あり、アルカリ量は練混ぜ水に水酸化ナトリウム水溶液を混入して調整されていた。

コンクリートの打設は、2 層打ちで、締固めは棒状パイプレータを用いて行われていた。養生は 24 時間まで湿布養生で、その後は屋外にて水中養生が行われていた。水中養生の期間については、記録が



※鉄筋の位置は、その中心がコンクリート表面から約 40mm 程度の場合が多かった。ただし、供試体によって位置が大きく異なるものもあり、打設時に位置がずれたものと考えられた。

図-2.1 供試体の形状

表-2.3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				空気量 (%)
		W	C	S	G	
50	44	177	354	780	803 ~ 1114	4.5

※セメントは、普通ポルトランドセメント（アルカリ量は Na_2O 当量で 0.56%）を使用

※細骨材は、秩父産石灰石砕砂を使用

※単位粗骨材量は、使用する粗骨材の密度により相違

※AE剤をセメントの 0.25% 使用



図-2.2 暴露状況

無く明確ではなかった。

2) 暴露条件

暴露場所は、茨城県つくば市にある土木研究所内で、日射や降雨を妨げるものがない草地であった。供試体は図-2.2 のように約 1/3 の部分を土中に埋めて設置されていた。適宜、除草を行ったが、時期によっては供試体が隠れる程度まで草が生育している場合もあった。

供試体は、1987 年から屋外暴露されていた。暴露から 23 年以上が経過した 2010~2012 年の間に種々の調査を行った。調査を行った時期に幅があるが、暴露開始から長期間経過していることもあり、この

期間中の ASR の進行は顕著ではなく、供試体の劣化程度は変化していないものと仮定して以降の検討を行った。

2. 2. 2 暴露供試体の調査方法

暴露試験の前後に行った調査の方法を表-2.4 に示した。

1) コンクリート供試体製作時の調査

製作時には骨材の岩種の判定、反応性を有する鉱物等の有無の判定および、骨材のアルカリシリカ反応性試験が行われていた。

骨材の岩種は、肉眼で骨材を観察した結果に、粉末 X 線回折による分析、薄片試料の偏光顕微鏡観察を行った結果を加味して判定されていた⁹⁾。

化学法、モルタルバー法による骨材のアルカリシリカ反応性試験は、建設省暫定案¹⁰⁾によって行われていた。この暫定案では、化学法の試験結果に基づく判定は ASTM C 289 の判定曲線により行うこととされている。本報では、我が国の抑制対策について検討することから、現行の JIS A 1145 の判定方法で試験結果を再判定した結果を主に報告した。

2) 暴露後の調査

供試体の外観を観察し、ひび割れの有無やひび割れ幅を記録した。ひび割れ幅は、クラックゲージを用いて測定し、供試体各面の中央付近で最もひび割れ幅の大きい位置の測定結果を代表値とした。

ひび割れ幅については、供試体の 2 側面が交差する角部で、大きなひび割れが観察される場合が少なくなかった。しかし、このような位置のひび割れには局所的に開口しているものが多く、ひび割れ幅を精度良く測定することが困難である上に、その値が供試体全体の劣化程度を適切に表現する指標とはなりがたいものと考えられることから、各面の中央付近でのひび割れ幅を採用した。

超音波伝播速度の測定は、供試体に生じた ASR による劣化の程度を定量的に評価する試みの一つとして行った。測定には、28kHz の超音波を用いて超音波伝播速度を測定できる装置を用い、図-2.3 のように発振子、受振子を設置して透過法で行った。暴露期間中に気中であつた部位と土中であつた部の二箇所測定し、測定結果の平均値を用いた。

一部の代表的な供試体について、薄片試料を作製し偏光顕微鏡による ASR 発生状況の観察を行った。観察結果として、ASR の進行状況、ASR の原因となっている反応性鉱物等の種類などの情報を得た。ASR の進行状況は、既往研究における分類¹²⁾を参考

表-2.4 調査の方法

項目	方法	対象	備考
岩種の判定 (肉眼観察)	肉眼での観察に加え、粉末X線回折、薄片の顕微鏡観察の結果も加味して検討 ⁹⁾ 。	全ての骨材	暴露前に実施。
骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法, モルタルバー法)	建設省暫定案 ¹⁰⁾ による。	全ての骨材	暴露前に実施。
供試体の外観観察	肉眼での観察による。ひび割れ幅の測定はクラックゲージによる。	全ての供試体	期間中に複数回実施。ひび割れ幅は暴露後の2012年に測定。
超音波伝播速度の測定	透過法で測定した(図-2.3参照)。	全ての供試体	暴露後の2010年に測定。
偏光顕微鏡観察	観察結果は表-2.5の分類法により、整理した。	合計9供試体 (骨材9種類)	暴露後の2010~2012年の間に実施。
硬化コンクリート中のアルカリ量の測定	コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法(案) ¹¹⁾ に準じて行った。	合計56供試体 (骨材14種類)	暴露後の2010年に測定。

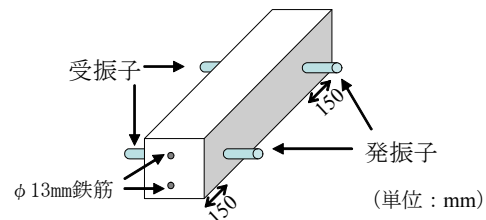


図-2.3 超音波伝播速度の測定位置

に表-2.5 に示す k1~k4 の 4 段階で表現した。

硬化コンクリートのアルカリ量の測定は、アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 の供試体の取り違えがないことを確認することを主目的とし、アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR によるひび割れが生じたと疑われた供試体を対象に行った。なお、得られたアルカリ量測定結果の平均値等を表-2.6 に示す。暴露後のアルカリ量は、当初計画した値の半分程度となっており、暴露期間中に供試体外部に溶出したことも疑われる。ただし、今回、暴露期間中の ASR による劣化の進行

表-2.5 薄片資料の観察結果に基づくASRの進行状況の分類 (Katayama¹²⁾に基づく)

分類	反応の程度
(k1) 潜在的	反応リム, ASRゲルの滲出が認められる。
(k2) 軽微	ASRゲルが骨材中のひび割れを満たしている。
(k3) 中程度	ASRゲルがセメントペースト中のひび割れを満たしている。
(k4) 顕著	ASRゲルがセメントペースト中の空隙を満たしている。

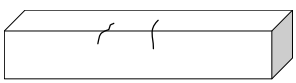
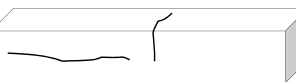

表-2.6 暴露後のアルカリ量測定結果

製作時の計画値 (kg/m ³)	測定した供試体数	測定結果 (kg/m ³)		
		平均	最小	最大
3.00	28	1.55	0.85	2.33
5.00	28	2.20	1.21	2.72

※測定結果は、耐久性総プロ報告書の方法により補正した値とした。

※測定試料は、主として暴露中に地中にあった部位から採取したが、気中にあった部位から採取した場合も数試料あった。両者の差は必ずしも一定していないが、平均では、気中部の方が地中部より0.2kg/m³程度大きかった。

表-2.7 観察されたひび割れ状況による分類

ひび割れ状況	説明	模式図
(c1) 角部限定ひび割れ	供試体の角部に限定した局所的な（一面での長さがおおよそ50mm未満）ひび割れが一本、または複数ある。	
(c2) 単独ひび割れ	供試体の長軸方向に一本、または複数のひび割れがある。同時に、長軸直角方向にもひび割れが認められる場合もあるが、各ひび割れは単独に存在しており、マップ状ひび割れには到っていない。	
(c3) マップ状ひび割れ	供試体の長軸方向および長軸直角方向の複数のひび割れが交差したマップ状ひび割れとなっている。	

やアルカリ量の推移は不明であり、アルカリ溶出の影響を詳細に検討するにはは到らなかった。

2. 2. 3 ASRによる膨張の有無の判定

1) 判定方法の概要

ASRによるコンクリートの膨張を把握するには、ダイヤルゲージ、コンタクトゲージなどを用いて長さ変化を測定するのが一般的である。しかし、本報で報告する供試体では、長さ変化測定のために取り付けられていた標点の多くが暴露期間中に失われており、長さ変化を測定することができなかった。また、暴露期間中の調査結果も散逸しており、製作時のものを除くと信頼できる記録がなかった。

このため、暴露供試体でASRによる膨張が生じているかどうかの判定は、主に外観観察等の結果に基づいて行った。この方法の有効性については、一部の供試体を対象に行った薄片試料の観察結果や超音波伝播速度の測定結果から確認した。

また、超音波伝播速度の測定結果から、ひび割れ状況と膨張量の関係を考察した。なお、ひび割れが生じた供試体の切断面を観察した結果、深さ方向へのひび割れの進展はわずかであった。このため、コンクリート表面で測定できるひび割れ幅は、ASRの進行の程度を定性的に比較することには使用できる

ものの、ひび割れ幅から膨張量を定量的に推定することは困難と考えた。

2) 外観観察及び薄片試料の観察に基づく分類

暴露後の供試体を観察した結果、供試体に生じたひび割れの状況は、表-2.7に示す3種類に分類することができた。このうち、マップ状ひび割れ(c3)については、外観からもASRによるものとの疑いが強いものと考えたが、角部限定ひび割れ(c1)や、単独ひび割れ(c2)については、ひび割れ幅も小さく、ひび割れの原因が明確ではなかった。

そこで、使用骨材が異なり、ひび割れの状況が異なる供試体9体から薄片試料を作製し、偏光顕微鏡観察を行って外観観察結果と比較した(図-2.4)。その結果、マップ状ひび割れが生じた供試体では、薄片試料でも顕著なASRの進行が認められ、ひび割れはASRによって生じたものと確認できた。

単独ひび割れが生じた供試体についても、マップ状ひび割れに移行する前の状態であると考えられることや、いくつか切断面を観察した供試体で鋼材に腐食が生じていないことを確認したことから、ASRによって生じたものである可能性が高いものと考えた。なお、供試体表面で観察できるひび割れは、ひび割れ幅が比較的大きい事例でも、表面から数10mm

表-2.8 アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体でc2またはc3に該当するひび割れが生じた骨材

記号	岩種	地域	化学法		モルタル パー法	薄片試料の観察結果*	ひび割れ状況**			
			Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)			3A	3B	5A	5B
1	砂岩	東北	63	20	無害でない	供試体3B, 進行状況k3, 隠微晶質または微晶質石英	c1	c2 (0.1)	c3 (0.25)	c3 (0.3)
2	安山岩	東北	356	168	無害		c2 (0.1)	c1	c1	c2 (0.1)
3	細粒ハンレイ岩	東北	21	26	無害	供試体3A, 進行状況k2, 隠微晶質または微晶質石英	c2 (0.1)	c1	c2 (0.1)	c1
4	安山岩	東北	247	70	無害でない		c1	c2 (0.2)	c1	c2 (0.15)
5	安山岩	東北	528	244	無害でない		c1	c2 (0.1)	c2 (0.15)	c3 (0.25)
6	安山岩	東北	258	106	無害でない	供試体3A, 進行状況k2, クリストバライト, トリディ マイト, 火山ガラス	c1	c2 (0.15)	c3 (0.3)	c3 (0.35)
7	安山岩	中国	366	68.4	無害でない	供試体3A, 進行状況k4, クリストバライト, 火山ガラ ス	c3 (0.3)	c3 (0.3)	c3 (0.5)	c3 (0.5)
8	玄武岩	四国	220	140	無害でない	供試体3A, 進行状況k2, ガラス, クリストバライト	c2 (0.1)	c2 (0.1)	c2 (0.2)	c2 (0.1)
9	安山岩	四国	451	138	無害でない		c2 (0.2)	c1	c3 (0.3)	c3 (0.4)
10	安山岩	九州	549	176	無害でない	供試体3A, 進行状況k4, トリディマイト, 火山ガラス	c3 (0.25)	c3 (0.4)	c3 (0.5)	c3 (0.6)

* 薄片試料の観察結果は、観察した供試体、進行状況、反応性を有する物質の順に記した。実施していない場合は空欄とした。

** 供試体は、アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $5\text{kg}/\text{m}^3$ のものが2体ずつあったので、便宜的に、3A、3B、5A、5Bと記号を付けて整理した。ひび割れ幅は、供試体の隅角部で局所的に大きくなっている場合が多く見られたが、その大きさが供試体の劣化状況を表しているとは考えにくかったので、各面の中央付近で測定した値を示した。

とんど影響が生じていないと考えられる。

4) 膨張有無の判定結果のまとめ

外観観察結果、薄片試料の観察結果及び超音波伝播速度の測定結果から、単独ひび割れ (c2) またはマップ状ひび割れ (c3) が生じた供試体では、ASR による膨張が生じているものと判定した。一方、ひび割れが無い供試体、または角部限定ひび割れ (c1) が認められた供試体については、ASR による膨張が生じていないものと判定した。ただし、参考のため、角部限定ひび割れが生じた場合とひび割れが無い場合は区別して整理を行った。

2. 2. 4 アルカリ量の総量規制値に関する考察

1) アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体でも ASR が生じた骨材の特徴

現行の抑制対策では、コンクリート中のアルカリ総量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に規制することで ASR が抑制できると考えられている。しかし、長期暴露供試体の観察を行ったところ、アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体でも表-2.7 の c2 または c3 に相当するひび割れが生じた供試体が 13 体あり、骨材としては 10 種類であった。これらについて、骨材の岩種や採取した地域、

薄片試料の観察結果、ひび割れ状況、化学法の試験結果などを表-2.8 に示した。また、化学法・モルタルパー法の試験結果と比較して図-2.7 に示した。

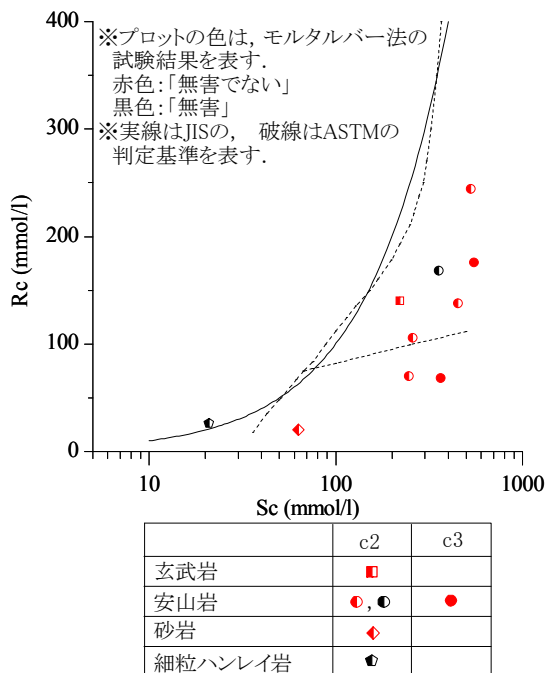
アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ でも ASR が生じた骨材は、火山岩が 8 試料 (うち、安山岩が 7 試料、玄武岩が 1 試料) と多く、漸新世よりも新しい火山岩 48 試料の 17% に相当していた。これらの骨材は、いずれも Sc が $100\text{mmol}/\text{L}$ 以上と大きく、反応性を有する物質として、火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトなどの存在が認められた。なお、クリストバライトは火山ガラスからの変質物と思われるものが、玄武岩骨材の石基部分にも含まれていた。

一方、砂岩、細粒ハンレイ岩も 1 試料ずつあった。これらの骨材では、隠微晶質または微晶質石英が反応していた。すなわち、反応性の高い鉱物等が含まれていない骨材でも、割合としては小さいが、長期的にはアルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリート中で ASR を生じさせるおそれがあることが確認された。

なお、化学法の試験結果では反応性が高いと見られてもアルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体ではひび割れが認められなかった骨材も多数ある。そこで、表-2.9

表-2.9 アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体でひび割れ無しの骨材（薄片試料の観察を行ったもの）

記号	岩種	地域	化学法		モルタル パー法	薄片試料の観察結果*	ひび割れ状況 ※()内は、最大ひび割れ幅（単位：mm）			
			Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)			3A	3B	5A	5B
I1	デイサイト	東北	28	94	無害	供試体3A, 進行状況k1 隠微晶質または微晶質石英	無し	無し	c1	c2 (0.1)
I2	安山岩	中国	537	110	無害でない	供試体3A, 進行状況k2 トリディマイト	無し	無し	c2 (0.2)	c3 (0.1)
I3	安山岩	九州	710	161	無害でない	供試体3A, 進行状況k2, クリストパライト, 火山ガラス	無し	無し	c2 (0.25)	c3 (0.2)



※ひび割れ状況 (c2, c3) は、同条件の供試体2体のうち、より厳しい結果で代表させた。
図-2.7 アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の暴露供試体でASRひび割れが生じた骨材のアルカリシリカ反応性試験結果

に示す一部の供試体で薄片試料の観察を行った。表-2.9 中の記号 I2 は表-2.8 の記号 7 と、表-2.9 中の記号 I3 は表-2.8 の記号 10 と、同一の県内にあって碎石場間の距離が比較的近かったのでこれらを選定した。その結果 I2 や I3 でも、火山ガラス、クリストパライト、トリディマイトなど、反応性の高い鉱物等が確認されたが ASR の進行状況は k2 までにとどまっていた。反応性の高い鉱物等を含む骨材でもアルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートで ASR の発生状況に差が生じた理由は、明確にはできなかった。
2) アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ と $5\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体のひび割れ程度の比較

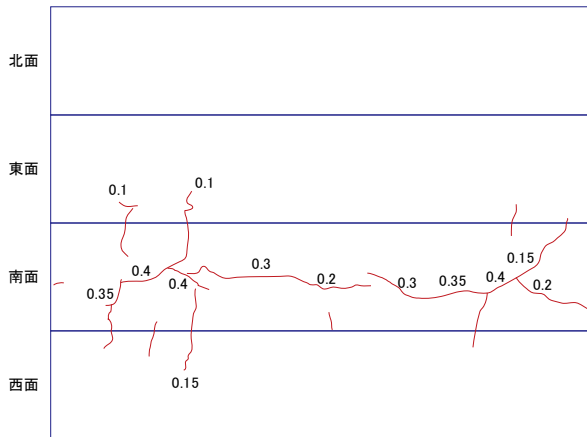
暴露した供試体の調査結果から、コンクリート中のアルカリ量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に規制した場合でも、ASR に起因するひび割れが発生するおそれがあることが確認された。しかし、ひび割れが生じた場合であっても、膨張の程度が抑制されていれば、アルカリ量総量規制に一定の効果があつたと考えることができる。すでに表-2.8 に示したように、アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体は、ひび割れ状況が c2 までに留まっているものが多かった。

図-2.8 及び図-2.9 に代表的な供試体のひび割れ図を示す。図-2.8 に示した骨材（表-2.8 の記号 10）のひび割れ状況は、アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ のものとしては、最も顕著なものであつた。しかし、同一の骨材を用いてアルカリ量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ で製作した供試体と比較すると、ASR による膨張の程度が抑制されている。

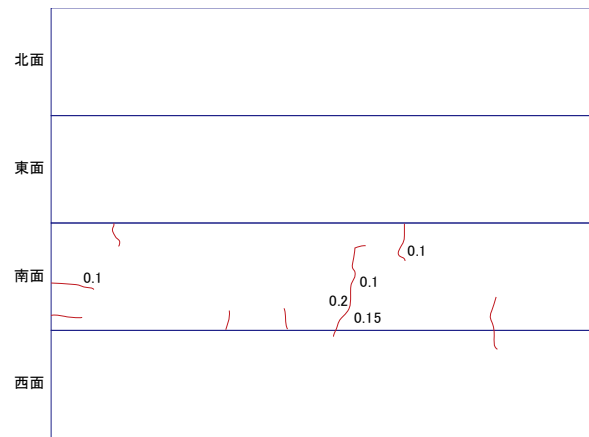
また、図-2.9 に示した骨材（表-2.8 の記号 4）は、最大ひび割れ幅が、アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の方が $5\text{kg}/\text{m}^3$ よりも大きい事例であつた。しかし、ひび割れ図を総合的に評価すると、最大ひび割れ幅が測定された箇所は局所的であり、ASR による膨張の程度は、アルカリ量に関わらず比較的軽微であつた。
3) アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体でも膨張が生じた骨材についてのまとめ

アルカリ量が $3\text{kg}/\text{m}^3$ となるように調整したコンクリート供試体について調査した結果、94 種類の骨材のうち 10 種類では、ASR による膨張が生じていると判定された。骨材の岩種としては化学法で、Sc が $100\text{mmol}/\text{L}$ 以上と大きい火山岩が多く、この分類に該当する 43 種類の骨材の 19% で ASR による膨張が生じたと考えられた。

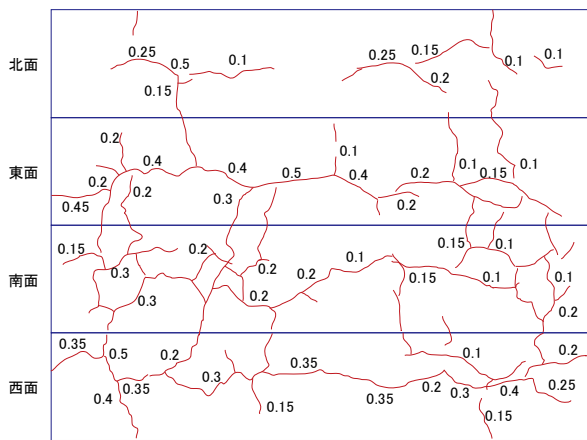
一方で、アルカリ量が $3\text{kg}/\text{m}^3$ で ASR による膨張が生じた骨材には、反応性物質として隠微晶質または微晶質石英を含む砂岩、細粒ハンレイ岩も 1 試料ずつあつた。化学法による試験結果で Sc が $100\text{mmol}/\text{L}$



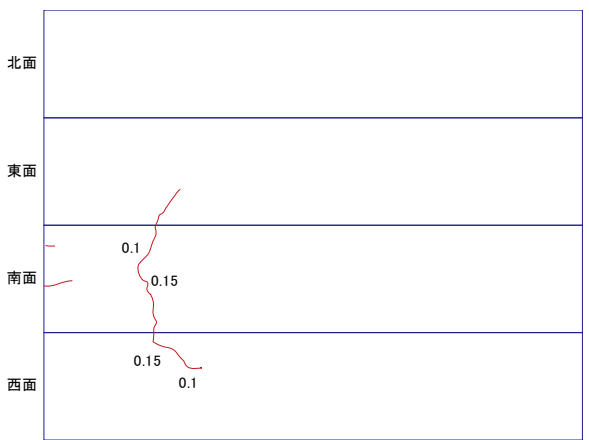
← 暴露時に天端 暴露時に底面 (地下) →
アルカリ量 3kg/m^3 (供試体 3B) ひび割れ状況 c3



← 暴露時に天端 暴露時に底面 (地下) →
アルカリ量 3kg/m^3 (供試体 3B) ひび割れ状況 c2



← 暴露時に天端 暴露時に底面 (地下) →
アルカリ量 5kg/m^3 (供試体 5A) ひび割れ状況 c3
※ひび割れ幅の単位は mm



← 暴露時に天端 暴露時に底面 (地下) →
アルカリ量 5kg/m^3 (供試体 5B) ひび割れ状況 c2
※ひび割れ幅の単位は mm

図-2.8 ひび割れ状況の例 (表-2.8 の記号 10)

図-2.9 ひび割れ状況の例 (表-2.8 の記号 4)

未満となった 51 試料の 4%に相当した。

このように、コンクリート中のアルカリ量を 3kg/m^3 に抑制しても ASR による膨張の発生を完全には防げないことが確認され、特に反応性の高い火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトなどを含み、化学法の試験結果で Sc が 100mmol/L 以上の骨材では、アルカリ量を 3kg/m^3 に抑制していても膨張が生じる割合が比較的大きかった。

なお、アルカリ量を 3kg/m^3 の供試体のひび割れの程度はアルカリ量 5kg/m^3 の供試体と同じか軽微なものであり、アルカリ量を 3kg/m^3 以下に抑制することによる膨張抑制効果はある程度認められた。

2. 3 アルカリ量を 3kg/m^3 より低減した供試体による実験

2. 3. 1 検討目的

長期暴露供試体の調査結果から、アルカリ量を 3kg/m^3 に規制しても、使用する骨材によっては ASR

による膨張でひび割れが生じる場合があることが確かめられた。ただし、アルカリ量が 5kg/m^3 の場合と比較すると、ASR による膨張は抑制されていた。これらの結果から、抑制対策の高度化として、アルカリ総量規制の値をより厳しくすることも考えられる。

アルカリ量が 3kg/m^3 よりも小さいコンクリートに関する既往研究としては、例えば、Katayama¹⁴⁾による実構造物の調査で、アルカリ量が $2.6\sim 3.1\text{kg/m}^3$ と見られるコンクリートで ASR が生じた事例が報告されている。一方で、鶴田ら¹⁵⁾は、アルカリ量を $2.7, 3.0, 3.5\text{kg/m}^3$ としたコンクリート供試体を用いた促進養生試験を行っており、この範囲でアルカリ量が少ないほど ASR を抑制できることを示唆している。しかし、鶴田らは、アルカリ量が 2.7kg/m^3 の場合でも、わずかにゲルの滲出が認められることを報告しており、これらの研究結果から、アルカリ総量規制の値を定めることは難しいと考えられた。

そこで、反応性が高いと推測される骨材を用いて、さらにアルカリ量を抑制した供試体を新たに製作し、促進養生試験を行った。

2. 3. 2 検討方法

1) 供試体の製作

試験には特に反応性が高いと考えた安山岩を含む砂利 J、砂 J、安山岩砕石 H、砕砂 H と、これらと組み合わせ、砂岩砕石 K、砂 K を用いた。アルカリシリカ反応性試験（化学法）の結果を、表-2.10 に示す。砕石 H や砂利 J は、化学法で測定される Sc が大きく、低アルカリ環境下でも ASR を生じる可能性が高いと考えた。

一方、砕石 K および砂 K は、反応性の高い骨材と混合してペシマム条件とするために実績から「無害」と考えた骨材を用意したものである。しかし、後日試験したところ、砕石 K は化学法で「無害でない」の結果であった。ただし、砕石 H や砂利 J と比較すると反応性は小さいものと考えられる。

コンクリートの配合を表-2.11 に示す。砂利 J、砂 J は、すでに複数の岩種の骨材が混ざったものであり、ペシマム条件に近いと考えられたので、そのまま用いた。砕石 H、砕砂 H は、ペシマム混合率を有すると考えられるため、砕石 K、砂 K と混合して用いた。

配合 JA および HA は、コンクリート供試体を用いた骨材の試験方法である RILEM TC 106-3¹⁶⁾を参考に、水セメント比 45%とした。ただし、単位水量は一般的な土木用コンクリートにおいて上限値である 175kg/m³とした。配合 JB では、RILEM で指定された配合と同様の単位水量 200kg/m³の配合とした。ただし、最大粗骨材寸法を RILEM で指定された 10mm とすると試料が不足するおそれがあったので、15mm とした。配合 HB は、低アルカリ環境下であることを考慮して、反応性の高い砕石 H の使用割合を特に小さくした場合とした。

供試体のアルカリ量の種類を表-2.12 に示す。なお、アルカリ量は、練混ぜ水に NaOH を混入することによって調整した。供試体の寸法は 100×100×400mm とし、3 体を 1 組とした。

2) 養生・暴露条件

実験ケースとして、促進養生を行うものと、行わないものの 2 ケースを行った。各ケースの条件等を表-2.13 に示す。

3) 養生・暴露期間中の観察

養生・暴露中の供試体は、測定日の前日に気温

表-2.10 使用した骨材

種類	産地	化学法試験結果	
		Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)
砂利 J	北陸	213	71
砂 J		200	86
砕石 H	北海道	296	77
砕砂 H		—	—
砕石 K	関東	51	31
砂 K	東海	—	—

表-2.11 コンクリートの基本配合

No.	単位量 (kg/m ³)							
	W	C	S			G		
			砂 J	砕砂 H	砂 K	砂利 J	砕石 H	砕石 K
JA	175	389	766	—	—	1055	—	—
HA	175	389	—	395	379	—	546	542
JB	200	440	513	—	—	1196	—	—
HB	175	389	—	—	758	—	273	812

※空気量は 0% として配合計算を行った。練混ぜ時に A E 減水剤と消泡剤を用いた。フレッシュ時の空気量は、おおよそ 1~2% であった。

表-2.12 供試体のアルカリ量

配合 (表-2.11)	アルカリ量 (kg/m ³)
JA	3.8
	3.0
	2.7
	2.2
HA	3.8
	3.0
	2.7
	2.2
JB	2.7
	2.4
HB	3.0
	2.7

表-2.13 養生・暴露条件

種類	養生・保管条件
促進有り	脱枠後、材齢 50 週まで、気温 60℃、RH95% に設定した恒温恒湿槽に設置した。その後、屋外（土木研究所内）に暴露した。
促進無し	脱枠後、材齢 7 週まで気温 20℃ の室内に設置した。その後、屋外（土木研究所内）に暴露した。一部の配合のみ行った。

※恒温恒湿槽または室内に設置した際には、供試体の乾燥を避けるため、湿布およびビニール袋で封緘した。屋外に暴露する際には、これらを取り去った。

20℃の部屋に移し、供試体の長さを JIS A 1129-3 のダイヤルゲージ法により測定した。また、供試体の各面を観察しひび割れ等の変状がないか調べた。

2. 3. 3 検討結果

1) 供試体の長さ変化

長さ変化の例として、基本配合 HA の測定結果を図-2.10 に示す。促進有りの供試体は、当初膨張する傾向を示すものもあったが材齢 16 週ごろから膨張量が停滞し、その後、材齢 39 週の測定まで収縮に転じていた。これは、装置の不調のため湿度の制御が十分にできず、供試体が乾燥してしまったためと考えられた。供試体の質量変化の例を図-2.11 に示す。供試体は、湿布およびビニール袋で養生していたが槽内の乾燥の影響を受け、材齢 20 週頃から質量が減少していた。

供試体を恒温恒湿槽で促進養生していた材齢 50 週までの長さ変化率は最大でも約 0.02% で、ASR による膨張であるか、この時点では必ずしも明確ではなかった。しかし、促進養生後の供試体を屋外に約半年間暴露したところ、配合 HA、アルカリ量 3.8kg/m³ のケースでは長さ変化率が約 0.04% に達し、ひび割れも認められた (図-2.12)。ひび割れの特徴や長さ変化の測定結果から ASR によるものと考えた。

上記の配合以外では、ほとんどのケースで供試体は収縮に転じていた。ただし、促進養生した供試体は、促進養生していない供試体と比較すると、収縮量が小さかった。材齢 77 週の時点では、約半年間屋外に暴露していたこともあり、供試体質量に促進養生の有無による違いは認められなかった。促進養生の有無による収縮量の違いに ASR が影響していることも疑われる。

2) 供試体の外観

配合 JA、JB では、供試体によっては恒温恒湿槽で養生していた材齢 16 週ごろから、表面のモルタル部分の軽微な浮きが認められていた。その後、屋外暴露後を経ると、モルタル部分が剥がれ落ち、変状が明確になった (図-2.14)。はく離は、促進養生有りの供試体で認められ、促進養生無しの供試体では認められないこと、はく離箇所やそれ以外の表面に白色の物質の析出が認められることなどから、ASR による膨張に伴うポップアウトであると考えられた。

はく離は、アルカリ量が 2.2kg/m³ の供試体にも認められており、アルカリ量を低減しても、ASR を完全に防止するには到らなかった (表-2.14)。

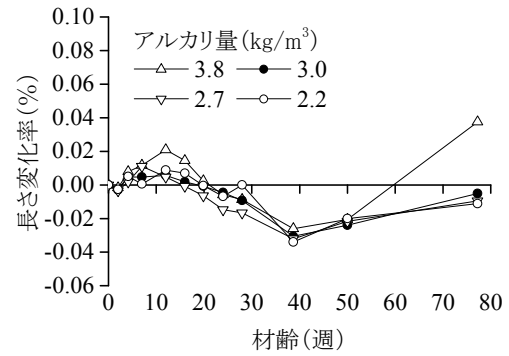


図-2.10 長さ変化の推移 (配合 HA)

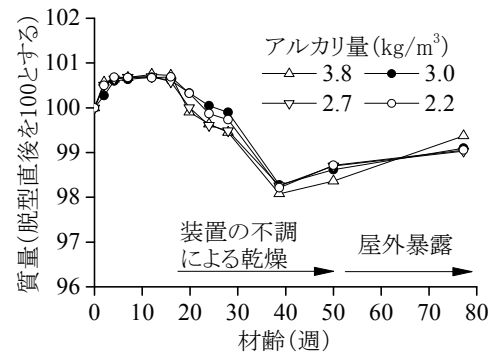


図-2.11 質量の推移 (配合 HA)



図-2.12 ひび割れ状況 (HA, アルカリ量 3.8kg/m³)

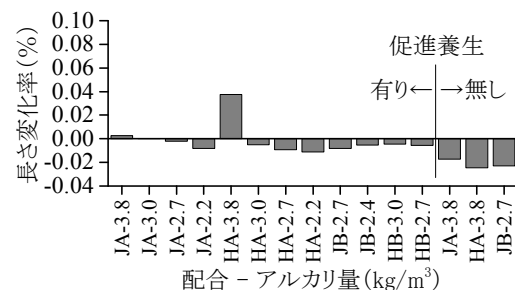


図-2.13 長さ変化量の比較 (材齢 77 週)



図-2.14 はく離の状況 (JA, アルカリ量 2.2kg/m^3)

2. 3. 4 アルカリ量を 3kg/m^3 より低減した供試体による実験結果のまとめ

アルカリ量 3kg/m^3 に変わる新たな規制値の設定を念頭において、高い反応性を有する安山岩碎石および安山岩を含む砂利を用いて、アルカリ量が $2.2 \sim 3.7\text{kg/m}^3$ と小さいコンクリート供試体を製作して促進養生・屋外暴露し、長さ変化等を測定した。しかし、材齢約1年半までの測定結果では、アルカリ量が 3.0kg/m^3 以下の場合、ASR による膨張は明確ではなかった。

ただし、安山岩を含む砂利を用いた場合、長さ変化は生じていないが ASR によるものと疑われるポップアウトが生じた場合があった。ポップアウトの発生箇所は1つの供試体で多くても2~3箇所であった。ポップアウトはアルカリ量 2.2kg/m^3 でも生じていた。砂利は種々の岩石の粒子から構成されているが、その一部に極めて反応性の高い物質を含むもの存在し、アルカリ量が小さい条件下でも反応したおそれがある。

今回の実験の範囲では、アルカリ量 $3 \sim 2.2\text{kg/m}^3$ の範囲で ASR による劣化の程度が明確に変化するようなアルカリ量を見いだすには至らなかった。

2. 4 外来アルカリに関する検討^{17),18)}

2. 4. 1 検討目的

コンクリートに外部から多量のアルカリイオンを供給すると ASR が促進されることが知られており、骨材のアルカリシリカ反応性の試験方法として、供試体を飽和食塩水中に保管する方法がある。

このことから、海水または潮風の影響を受けるコンクリート構造物では、ナトリウムイオンの供給によって ASR が促進されるおそれがあると考えられている。国土交通省の通知¹⁾では、海水または潮風

表-2.14 はく離状況 (配合 JA, JB)

配合	アルカリ量 (kg/m^3)	はく離が発生した供試体数 はく離の大きさ (最大)
JA	3.8	3 体中 2 体, $15 \times 12\text{mm}$
	3.0	3 体中 1 体, $28 \times 33\text{mm}$
	2.7	無し
	2.2	3 体中 3 体, $20 \times 20\text{mm}$
JB	2.7	無し
	2.4	3 体中 3 体, $28 \times 36\text{mm}$

※5mm 以上の長さのあるものを対象に調査した。各供試体のはく離箇所数は1~数箇所と多くはなかった。

表-2.15 セメントの化学成分 (%)

	WC	OPC
Ig.loss	2.73	1.38
SiO ₂	23.0	20.9
Al ₂ O ₃	4.83	5.34
Fe ₂ O ₃	0.19	3.00
CaO	65.1	64.7
MgO	1.07	0.95
SO ₃	2.64	2.01
Na ₂ O	0.06	0.35
K ₂ O	0.07	0.35
Cl	0.001	0.022

の影響を受ける地域において、アルカリ骨材反応による損傷が構造物の安全性に重大な影響を及ぼすと考えられる場合には、塩分の浸透を防止するための塗装等の措置を講ずることが望ましい (アルカリシリカ反応性試験で、無害の骨材を用いる場合を除く) とされている。

しかし、過去に土木研究所で塩水に半年間浸せきした供試体の測定を行ったところ、ナトリウムイオンの侵入性状は塩水の濃度によって異なり、海水程度の濃度ではほとんど侵入していない結果を得ていた¹⁹⁾。

そこで、作用する塩水の濃度や乾湿繰返し条件、供試体内外のナトリウムイオンの濃度差に着目した実験的な検討を行った。

2. 4. 2 検討方法

Na₂O 当量を調整した W/C=0.5, s/c=3.0 のモルタルを種々の濃度の塩水に浸せき、または乾湿繰返し条件において、これらの環境条件とナトリウムイオンの侵入量の関係を調べた。

セメントはアルカリ量の少ない白色セメント (WC) および普通ポルトランドセメント (OPC) を用いた (表-2.15)。細骨材には静岡県掛川産山砂 (表乾密度: $2.57/\text{cm}^3$, 吸水率: 1.87%) を用いた。セメントのアルカリ量が Na₂O 当量として 0.3, 0.6,

1.0%となるように、試薬のNaOHを練混ぜ水に混入して調整した（OPCモルタルは0.6%の水準のみ）。以下、供試体については、使用セメントとNa₂O当量の組合せでWC-0.6%等と表記する。

モルタル供試体の寸法はφ50×100mmで、14日間封かん養生を行った。脱型後に片側端面を切断して塩水浸透面とし、浸透面以外をエポキシ系樹脂でシールした。塩水的作用条件は、塩水浸せき（2,3,4,5,6,7,8,9および10%）91日間、ならびに3%塩水を用いた乾湿繰返し条件とした。乾湿繰返しは3日間の塩水浸せきと4日間の乾燥（20℃）を1サイクルとして13サイクル行った。

アルカリ量の測定は、試験前後の供試体の浸透面から10mmまでの範囲を採取し、総プロ法¹¹⁾に準じてナトリウムイオンを抽出し、原子吸光度計で定量した。また、別途、14日間封かん養生を行った供試体から細孔溶液を抽出し、ナトリウムイオン量を測定した。なお、試料の採取範囲は、類似の条件で試験を行った結果、10mmを超えて侵入するナトリウムイオンの量がほとんどなかった¹⁷⁾ことから定めた。

2. 4. 3 検討結果

1) 浸せき試験

浸せきした塩水の濃度とナトリウムイオンの侵入量の関係を図-2.15に示す。図中には、全測定点の回帰直線も示した。浸せきする塩水が高濃度になるほど、ナトリウムイオンの侵入量は多かった。海水に相当する3%塩水では、ナトリウムイオンはほとんど侵入しておらず、逆に溶出（侵入量がマイナス）する供試体もあった。

図-2.15では、供試体製作時のアルカリ量（Na₂O当量）が少ないほど、ナトリウムイオンの侵入量が多かった。そこで、浸せきした塩水と供試体から抽出した細孔溶液中のナトリウムイオンの濃度差を横軸に取って図-2.16に示す。ナトリウムイオンの侵入量は、濃度差との相関性がより高かった。

2) 乾湿繰返し試験

乾湿繰返しを行った場合のナトリウムイオンの侵入量を浸せきの場合と比較して図-2.17に示す。乾湿繰返し条件ではナトリウムイオンの侵入量が多くなり、3%の塩水浸せき環境ではナトリウムイオンが溶出するような供試体でも、乾湿繰返し環境では内部に侵入した。この理由として、浸せき時の水の移動とともにナトリウムイオンが侵入することが考えられる。なお、初期アルカリ量が少ないほどナトリ

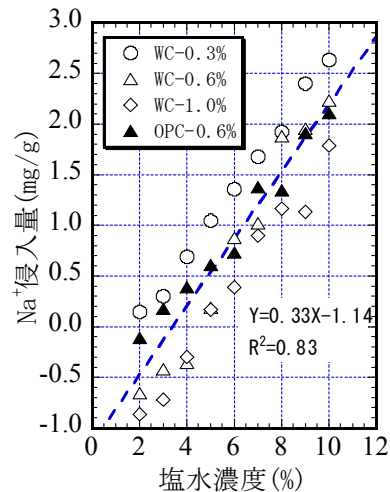


図-2.15 塩水濃度とナトリウムイオン侵入量の関係

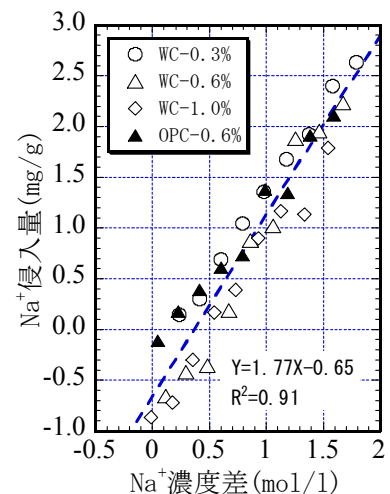


図-2.16 ナトリウムイオンの供試体内外での濃度差と侵入量の関係

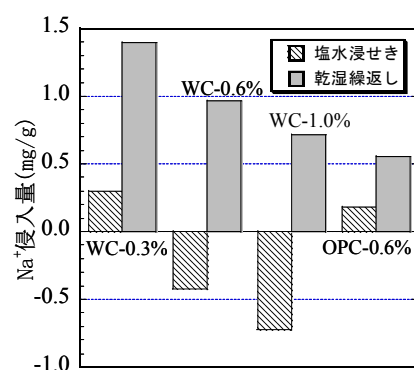


図-2.17 促進環境の異なる供試体の比較（塩水濃度3%）

ウムイオンの侵入量が多い点では、塩水浸せき試験と同様な傾向を示した。

濃度の異なる塩水浸せき環境でのナトリウムイオン侵入量と、濃度3%での乾湿繰返し環境下での侵

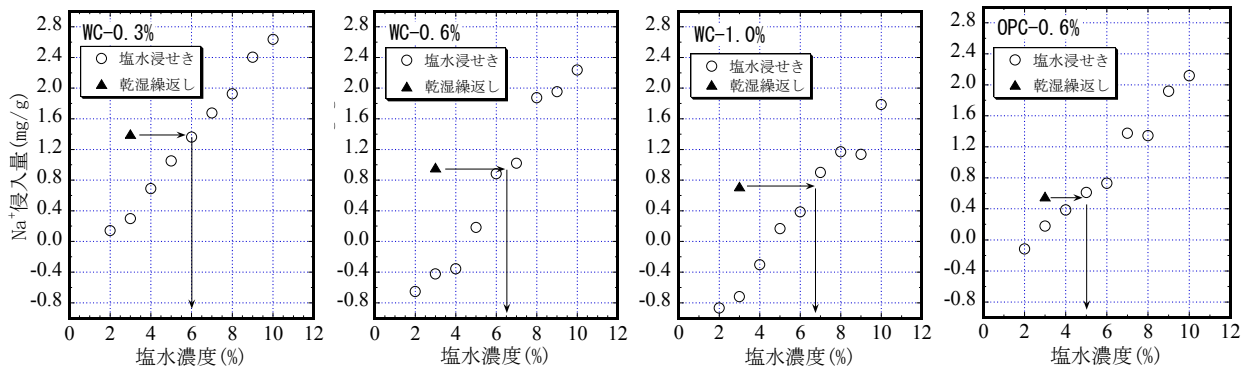


図-2.18 促進環境の異なる供試体の比較（塩水濃度 2～10%）

入量を比較して図-2.18 に示す。この実験の乾湿繰返し方法での侵入量は、塩水浸せき試験における塩水濃度として、5～7%とした場合に相当した。

実環境の乾湿繰返しの条件によっては、さらにナトリウムイオンが侵入しやすくなるおそれがあることも否定できない。

2. 4. 4 外来アルカリに関する検討のまとめ

コンクリートへのナトリウムイオンの侵入について、モルタル供試体を用いて検討したところ、塩水浸せき環境でのナトリウムイオンの侵入量は、作用する塩水と細孔溶液のナトリウムイオンの濃度差と良い関係があり、海水と同程度の濃度 3%の塩水に浸せきし、セメントのアルカリ量として 0.6%相当以上の場合、ナトリウムイオンはほとんど侵入しなかった。

ただし、濃度 3%の塩水でも、乾湿繰返しを受ける条件とした場合、濃度 5～7%程度の塩水に浸せきした場合に相当するナトリウムイオンが侵入した。セメントのアルカリ量として 1.0%相当とした場合でも、ナトリウムイオンの侵入が認められた。

したがって、干満帯や飛沫帯に位置するコンクリート構造物では、長期的には外部から侵入するアルカリの影響を受け、コンクリート中のアルカリ量が 3kg/m^3 以上となることも否定できなかった。

3. 混合セメントによる抑制に関する検討

3. 1 検討の目的

高炉スラグ、フライアッシュなどの抑制効果のある混和材を使用した抑制対策については、我が国では ASR の被害事例がほとんど報告されていない。また、報告例も、混和材置換率⁵⁾や塩分を含む海砂使用の可能性²⁰⁾などの点で、現行の ASR 抑制対策か

ら若干逸脱している事例である。このような点を考慮すると、現時点では、混和材を使用する方法は、比較的风险の低い対策であると考えられる。

混和材を用いた場合は、置換によるポルトランドセメント使用量の減少や高炉スラグ、フライアッシュの反応によって細孔溶液中の水酸化物イオンの濃度が低下し、ASR が抑制されると考えられている。しかし、混和材を使用した場合でも、極めて反応性の高い骨材をペシマム条件で用いると、ASR による膨張が生じるおそれが指摘されている。Kawabata²¹⁾らは、アルカリ量が 4kg/m^3 になるように調整したフライアッシュ置換率 15%のコンクリート供試体で、半年間の促進養生 (40°C , RH100%) 後、0.1%近い膨張量を示したことを報告している。

抑制対策を導入する際に行われた耐久性総プロの検討^{22), 23)}では、反応性の高い骨材が用いられていたもののペシマム条件については必ずしも詳細には検討されていなかった。

近年、土木構造物では、混合セメントである高炉 B 種セメントを用いることで抑制対策としている場合が多いので、これを想定した場合について、反応性の高い骨材を用い、またその混合率を変えるなどして抑制対策に不利な条件を与え、検討を行った。

3. 2 検討方法

混和材の置換率や反応性を有する骨材の種類・使用量、アルカリ添加量の条件を種々変更した供試体を作製し、JIS A 1146 に準拠したアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）を行った。また、コンクリート供試体を作製して促進養生試験を行った。

試験に用いた骨材を表-3.1 に示す。安山岩砕石 H、砕砂 H および砂岩砕石 K は、2.3 節の検討に用いたものと同じである。また砕砂 K は、ジョークラッシャーで砕石 K を粉砕して製造したものである。

表-3.1 使用した骨材

種類	産地	化学法試験結果	
		Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)
碎石 H	北海道	296	77
砕砂 H		—	—
碎石 O	九州	235	84
砕砂 O		219	78
碎石 K	関東	51	31
砕砂 K		—	—
石灰石砕砂	北海道	—	—

安山岩碎石 O, 砕砂 O は, 2.2 節の調査において, アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR によるひび割れが生じていた産地の骨材を新たに収集したものである。化学法の試験結果から反応性が高い骨材であると考えられる。別途岩石学的調査を行い, 反応性を有する物質として火山ガラスを含むことを確認している。

モルタルの配合を表-3.2 に示す。砕砂 H, 砕砂 O ともに事前の実験から, 使用割合が 50% 程度のときにペシマム条件になると予想し, これを中心に使用割合がより少ない/多いケースを適宜設けた。混合セメントを模擬した配合では, 高炉スラグ微粉末によるセメント置換の割合 40% または 50% とした。置換率を考慮してアルカリ量を低減することを基本としたが, 一部の実験ケースではアルカリを添加して結合材に対して 1.2% のアルカリ量とした。

コンクリートの配合を表-3.3 に示す。配合は, RILEM TC 106-3¹⁰⁾ を参考に定め, 細骨材には無害と考えられる石灰石砕砂を用いた。アルカリ量は単位セメント量 (または結合材量) に対して 1.25% とした。

作製したモルタル, コンクリート供試体は, 水を含ませた吸取紙で覆った上にビニール袋に入れて乾燥を防ぎ, 気温 40°C , RH95% の恒温恒湿槽内で養生した。材齢 1 年まで養生し, ダイアルゲージ法で長さ変化を測定した。

3. 3 検討結果

3. 3. 1 モルタル供試体

モルタル供試体の膨張量を図-3.1 に示す。普通ポルトランドセメントを単味で使用した配合では, いずれの配合でも材齢約 6 箇月の時点で長さ変化率が 0.1% (JIS A 1146 の判定基準) を大きく上回っており, 骨材の反応性は高いことが確認された。砕砂 H を用いた配合では, 砕砂 H の使用量を変更した配合を種々作製したが, 今回の実験の範囲 (骨材の使用割合が 30~70%) ではいずれも長さ変化率が 0.5%

表-3.2 配合 (モルタル)

記号	使用量 (g)					アルカリ量 (%)	
	W	C	B	S			
				砕砂 H	砕砂 O		砕砂 K
M0-H5	300	600	—	675	—	675	1.2
M0-H3				405	—	945	
M0-H7				945	—	405	
M0-O5				—	675	675	
M4-H5	360	240	—	675	—	675	0.7
M4-H3				405	—	945	
M4-H7				945	—	405	
M4-O5				—	675	675	
M4-O3				—	405	945	
M4-O7				—	945	405	
M5-H5				300	300	—	
M5-H3	405	—	945				
M5-O5	—	675	675				
M4-H5-A	360	240	—	675	—	675	1.2
M5-H5-A	300	300	—	—	—	—	—

※C: 普通ポルトランドセメント (アルカリ量 0.59%)

B: 高炉スラグ微粉末 (アルカリ量 0.47%, 比表面積 $3980\text{cm}^2/\text{g}$)

※アルカリ量は結合材量 (C+B) に対する百分率で表した。

※アルカリ量は NaOH を添加することによって調整した。高炉スラグ微粉末中のアルカリが ASR に与える影響は明確でないので, 無視した。

表-3.3 配合 (コンクリート)

記号	単位量 (kg/m^3)						アルカリ量 (%)	
	W	C	B	S	G			
					砕砂 H	砕砂 O		砕砂 K
C0-H5	200	442	—	528	619	—	614	1.25
C0-H3					371	—	860	
C0-H7					866	—	368	
C0-O5					—	587	614	
C4-H5	256	171	—	—	619	—	614	0.75
C4-H3					371	—	860	
C4-H7					866	—	368	
C4-O5					—	587	614	
C4-O3					—	352	860	
C4-O7					—	821	368	
C5-H5					212	212	—	
C5-H3	371	—	860					
C5-O5	—	587	614					
C4-H5-A	256	171	—	—	619	—	614	1.25
C5-H5-A	212	212	—	—	—	—	—	

※使用したセメント, 高炉スラグ, アルカリ量の表記については, 表-3.2 と同様である。

※アルカリ量をコンクリート体積当たりの質量で表すと, 5.5kg/m^3 , 3.3kg/m^3 (40%置換), 2.8kg/m^3 (50%置換) である。

※空気量は 0% で配合計算した。練混ぜ時に AE 減水剤に加え消泡剤を用いて気泡を除去した。フレッシュコンクリートの空気量は概ね 1.0% 以下であった。

を超えるなど膨張量が大きく、骨材の使用割合の影響は、この範囲では明確には現れなかった。

一方、高炉スラグ微粉末による置換を行い、置換率に応じてアルカリ量を低減した配合では、いずれの場合でも材齢 6 箇月の時点で長さ変化率が 0.1% を下回っていた。材齢 1 年まで観察すると、材齢 6 箇月よりもやや膨張が進行した配合があったが、最大でも 0.05% であった。

なお、高炉スラグ微粉末による置換を行った場合でも、置換による単位セメント量の減少を補うように NaOH を混入してアルカリ量を結合材あたり 1.2% とすると、ASR による膨張が生じ長さ変化率が 0.1% を超えた。ただし、膨張量は普通ポルトランドセメント単味の場合よりも抑制されていた。

3. 3. 2 コンクリート供試体

コンクリート供試体の膨張量を図-3.2 に示す。普通ポルトランドセメンを単味で使用した配合で、砕石 H を用いたものは、材齢約 6 箇月の時点で長さ変化率が 0.1% を上回っていた。砕石 H の使用割合に着目すると、使用割合が 30% の場合に膨張量が最も大きくなった。ただし、使用割合 30~70% の範囲で差は顕著ではなかった。砕石 O を用いた場合は、材齢 1 年で長さ変化率が 0.1% を上回った。このように、高炉スラグを用いていない配合ではいずれも ASR による膨張が認められた。

一方、高炉スラグ微粉末による置換を行い、置換率に応じてアルカリ量を低減した配合では、供試体の長さがほとんど変化していなかった。

置換による単位セメント量の減少を補うように NaOH を混入してアルカリ量を結合材あたり 1.25% とした場合でも、長さ変化率は材齢 1 年で 0.02% に留まっており、ASR による膨張の傾向は明確ではなかった。モルタルとコンクリートで傾向が異なる理由は明確ではないが、モルタルの場合、供試体中でセメントが占める体積が大きく、供試体体積あたりのアルカリ量が多くなることが影響したおそれがある。体積当たりのアルカリ量は、モルタル供試体の場合約 7.2kg/m³ となり、コンクリートの 5.5kg/m³ より大きかった。

3. 4 混合セメントによる抑制に関する検討のまとめ

高炉スラグの使用による抑制の効果について確認するため、反応性が高いと考えられる安山岩砕石を用い、かつ、ペシマム条件を考慮して砕石の使用量を種々変更するなど、ASR 抑制に不利と思われる条

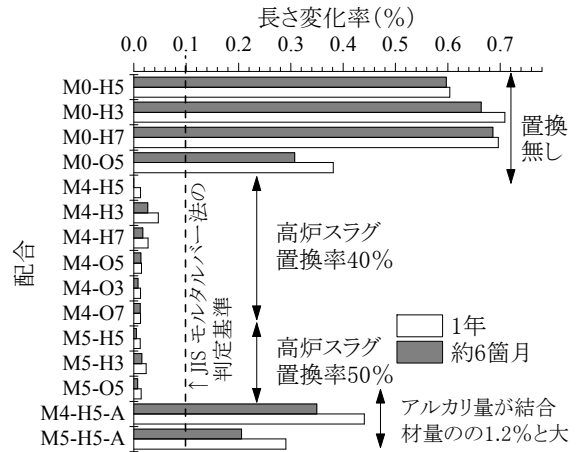


図-3.1 材齢約 6 箇月及び 1 年での長さ変化率 (モルタル)

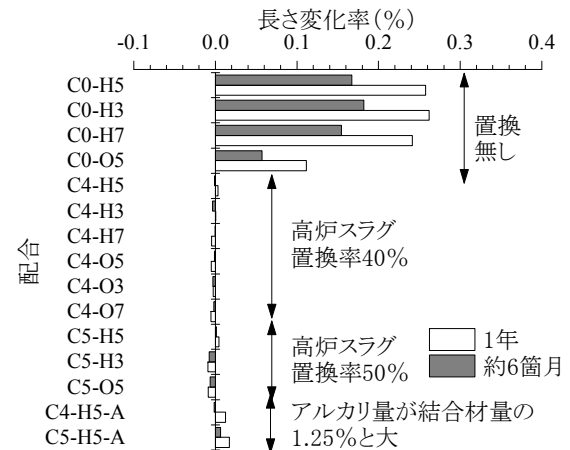


図-3.2 材齢約 6 箇月及び 1 年での長さ変化率 (コンクリート)

件の供試体を製作して最大 1 年間の促進養生試験を行った。

その結果、高炉スラグを使用し、単位セメント量を低減した供試体では、長さ変化率が 0.1% 未満であり、ASR による膨張を抑制できていた。

なお、高炉スラグによる置換を行った場合でも、置換による単位セメント量低減の効果をなくすように多量の NaOH を添加したモルタル供試体では、ASR による膨張が生じた。ただし、このモルタル供試体のアルカリ量は約 7.2kg/m³ と極めて大きく、普通ポルトランドセメントの全アルカリ量が 0.75% 以下に規制されていることを考えると、高炉セメントが用いられたコンクリートで同様なアルカリ量となることは考えにくいようなケースであった。

4. まとめ

コンクリート構造物におけるアルカリシリカ反応抑制対策のうち、基礎材料チームでは、アルカリ総量規制について検討した。また、基礎材料チームと新材料チームの共同で、混和材を用いた抑制対策について検討した。

アルカリ総量規制による対策の効果について、23年以上暴露した供試体の調査結果から検証した結果、アルカリ量を 3kg/m^3 と抑制した場合でも ASR によるひび割れの発生を完全に防ぐことはできないことが明らかになった。ただし、アルカリ量の大小によって劣化の程度は異なり、抑制対策をとった場合は、ひび割れの程度は明らかに小さかった。なお、アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR によるひび割れが生じたものには、化学法による試験の結果溶解シリカ量が 100mmol/L より大きく、クリストバライト、トリディマイト、火山ガラスなど特に反応性が高い物質を含む骨材の割合が大きかったため、アルカリ量の規制と使用骨材の試験を組み合わせることで、ASR による劣化のリスクを低減できる可能性があった。

混和材を用いた対策については、反応性の高い骨材をベシマム条件で用いた場合に ASR によるリスクが大きくなるおそれがあると考え検証実験を行った。しかし、促進養生試験 1 年間の範囲では、その影響は明確ではなかった。

参考文献

- 1) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策について、国官技第 112 号、国港環第 35 号、国空建第 78 号、2002.7
- 2) 古賀裕久，河野広隆，渡辺博志：「コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果」，土木技術資料，Vol.42, No.12, pp.58-63, 2000.12
- 3) 河野広隆，古賀裕久：「道路橋に見るアルカリ骨材反応の実態」，土木技術資料，Vol.47, No.12, pp.66-71, 2005.12
- 4) 上田洋，松田芳範，石橋忠良：「アルカリ反応性の観点から見た骨材の現状」、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.607-612、2001.6
- 5) 尾花祥隆，鳥居和之：「プレレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証」，コンクリート工学年次論文集，Vol.30、No.1、pp.1065-1070、2008.6
- 6) 山田一夫，川端雄一郎，河野克哉，林建佑，広野真一：岩石学的考察を含んだ ASR 診断の現実と重要性，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.7, pp.21-28, 2007.11

- 7) 古賀裕久，百武壯，渡辺博志，脇坂安彦，西崎到，守屋進：「屋外に 23 年以上暴露したコンクリートの観察結果に基づく骨材の ASR 反応性の検討」，土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.361-376, 2013.10
- 8) 脇坂安彦ほか：「骨材のアルカリシリカ反応性に関する長期屋外暴露試験結果」，土木研究所資料，No.4281, 2014.3
- 9) Wakizaka, Y.: "Reactivity of rocks and minerals in alkaline solution", Journal of Research, Public Works Research Institute, Vol.34, pp.15-28, 1998.3
- 10) 成田信之ほか：「アルカリシリカ反応の調査と対応に関する建設省暫定案」，土木研究所資料，No.2375, pp.107-159, 1986.4
- 11) コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案），建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発，土木研究センター，pp.159-160, 1989.5
- 12) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y. Zaha K. and Yamato, T.: "Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan", Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.862-873, 2008.6
- 13) JIS A 1804 : 1992 (コンクリートの生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (迅速法)) 解説, 1992
- 14) Katayama, T.: "Alkali-Aggregate Reaction in the Vicinity of IZMIR Western Turkey", 11th International conference on alkali-aggregate reaction, pp.365-374, 2000.6
- 15) 鶴田孝司，上原元樹，上田洋：「アルカリ総量 3.0kg/m^3 付近におけるコンクリートの膨張特性」，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9, pp.157-162, 2009.10
- 16) RILEM TC 106-AAR : "Alkali-Aggregate Reaction Recommendations", Materials and Structures, Vol.33, pp.283-293, 2000.6
- 17) 松本健一，古賀裕久，渡辺博志：「塩水に浸せきしたセメントペースト硬化体中のナトリウムイオン挙動」，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-270, 2010.9
- 18) 松本健一，古賀裕久，渡辺博志：「モルタルへの塩水作用条件とナトリウムイオン侵入特性」，土木学会第 66 回年次学術講演会，V-535, 2011.9
- 19) 山口順一郎，渡辺博志，河野広隆，古賀裕久：「コンクリート中のナトリウムイオンの移動と ASR 膨張へ

の影響」, 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.5, pp.175-178, 2005.10

- 20) Imai, H., Yamasaki, T., Maehara, H. and Miyagawa, T. :
“The deterioration by alkali-silica reaction of Hanshin
expressway concrete structures – Investigation and repair”,
Concrete Alkali-aggregate reactions, Proceedings of the 7th
International Conference, pp.131-135, 1986.7
- 21) Kawabata, Y., Ikeda, T., Yamada, K., and Sagawa, Y. :
“Suppression Effect of Fly Ash on ASR Expansion of
Mortar/Concrete at the Pessimum Proportion”, Proceedings
of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate
Reaction in Concrete, 2012.5
- 22) 桑原啓三ほか:「高炉スラグ微粉末による ASR 抑制に
関する共同研究報告書」, 土木研究所資料, No.2527,
1987.12
- 23) 桑原啓三ほか:「フライアッシュによる ASR 抑制に関
する共同研究報告書」, 土木研究所資料, No.2653,
1988.3

STUDY ON THE EFFECTIVE PREVENTION METHODS FOR ALKALI-SILICA REACTION IN CONCRETE

Budgeted: Grants for operating expenses

General account

Research Period: FY2009-2013

Research Team: Concrete and Metallic
Materials Research Team

Author: WATANABE Hiroshi and
KOGA Hirohisa

Abstract: In this project, prevention methods for Alkali-Silica Reaction of concrete are reviewed and developed. The effectiveness of the specification of total alkali content in concrete and were discussed with the data of concrete specimens that are made with 94 various kinds of aggregate in Japan and exposed outdoor for more than 23 years. Control of total alkali content effectively mitigated ASR in most cases. However, ten aggregates caused cracking due to alkali-silica reaction, while total alkali content of those concrete specimens were controlled as 3kg/m^3 . Risk of ASR were considerable in highly reactive aggregate whose amount of dissolved silica measured by chemical method was over 100 mmol/L . It is considered that combined specification of total alkali content and chemical method will be more effective to mitigate ASR. As the mitigation method with blast furnace slag cement, the effectiveness was confirmed with the specimens that were made in view of pessimum proportion of highly reactive aggregate.

Key words: concrete, alkali-silica reaction, specified maximum alkali content in concrete, blast furnace slag, long-term exposure test