

骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する実験的研究

Experimental Study of Evaluation of Alkali-Silica Reactivity of Aggregate

佐々木 亘 WATARU SASAKI
 谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

各地のレディーミクストコンクリート工場の骨材を入手し、化学法およびモルタルバー法、コンクリートバー法による ASR 促進試験を実施した。その結果、①外部からアルカリを供給するモルタルバー法では、化学法で無害と判定された骨材であっても大きな膨張を示すものがあること、②それらの骨材を用いたコンクリートバー法も大きな膨張を示すこと、③化学法における測定値とモルタルバー法の膨張ひずみには相関が見られること、④モルタルバー法とコンクリートバー法の膨張ひずみにもある程度の相関が見られることなどが分かった。

キーワード：アルカリシリカ反応、骨材、化学法、モルタルバー法、コンクリートバー法

In this paper, Alkali-Silica Reactivity of aggregate of some ready-mixed concrete plants were examined by chemical method, mortar bar method and concrete bar method. As a result, the followings were obtained; 1) There is the possibility that aggregate determined innocuously by chemical method expands in mortar bar method, 2) Concrete composed of the aggregate expands in accelerated curing, 3) There is a correlation between S_c and R_c by chemical method and the expansion of the mortar bar, 4) There is a limited correlation between the expansion of the mortar bar and that of the concrete bar.

Key Words: Alkali-Silica Reaction, Aggregate, Chemical Method, Mortar Bar Method, Concrete Bar Method

1. はじめに

PC 部材には設計基準強度 40N/mm^2 程度の比較的強度域の高いコンクリートが多用され、最近では設計基準強度 $50\sim 60\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートの適用も増えている。また、筆者らの調査¹⁾では、設計基準強度 40N/mm^2 程度のコンクリートであっても、設計基準強度 60N/mm^2 クラスのコンクリートと同程度の水セメント比や単位セメント量の設定がなされている例が確認されている。コンクリート標準示方書（以下、示方書と呼ぶ）²⁾では、アルカリシリカ反応対策として、高強度コンクリートに対しては、無害と判定された骨材を使用しなければならないとされているが、無害と判定された場合であっても、骨材の採取時期や場所の変化に伴い無害でないものが混入する可能性は否定できない。さらに、コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する既往の研究は RC 構造物を想定したものが多く、高強度コンクリートに対するアルカリシリカ反応についての研究は、必

ずしも十分とはいえない。

このため、筆者らは、主として PC 部材に使用される高強度コンクリートを対象とし、高い反応性を示す骨材および全国の生コン工場から収集した骨材を用いたコンクリートバー法により、促進養生下でのアルカリシリカ反応性について確認を行ってきた³⁾。本稿では、各地のレディーミクストコンクリート工場から入手した骨材を用いて化学法、モルタルバー法およびコンクリートバー法の各種アルカリシリカ反応性試験を実施し、高強度コンクリートでアルカリシリカ反応を生じる可能性のある骨材を、化学法やモルタルバー法を用いて評価することを目的とした検討を行った。

2. 骨材のアルカリシリカ反応性試験

(1) 実験概要

a) 使用材料

表-1 に実験に用いた骨材を示す。No.1~18 はいずれ

表-1 実験に用いた骨材

No.	種類	産地	表乾密度 (g/cm ³) [平均2.62]	吸水率 (%)	アルカリシリカ反応性試験結果(工場から提供のあった値)					判定
					化学法			モルタルバー法		
					溶解シリカ 量, Sc (mmol/L)	アルカリ濃 度減少量, Rc (mmol/L)	Sc/Rc	3ヶ月での ひずみ (×10 ⁻⁶)	6ヶ月での ひずみ (×10 ⁻⁶)	
1	山砂	千葉県	2.61	2.40				260	390	無害
2	砕石	鹿児島県	2.63	1.07				330	400	無害
3	川砂利	静岡県	2.65	1.03				310	810	無害
4	陸砂利	静岡県	2.66	1.12	111	114	0.97			無害
5	山砂利	岐阜県	2.60	1.20				1270	1440	無害でない
6	砕石	三重県	2.65	1.64	45	49	0.92			無害
7	海砂	山口県	2.47	1.90	51	61	0.84			無害
8	陸砂	青森県	2.55	2.57	93	118	0.79			無害
9	砕砂	山形県	2.60	1.33	14	50	0.28			無害
10	海砂	沖縄県	2.62	1.70	81	99	0.82			無害
11	砕砂	沖縄県	2.68	0.57				80	90	無害
12	砕砂	茨城県	2.62	0.97						
13	山砂	千葉県	2.61	1.95						
14	砕砂	山形県	2.65	0.90	19	28	0.68			無害
15	陸砂	宮城県	2.60	3.67	136	212	0.64			無害
16	細砂	山形県	2.57	2.13	52	87	0.60			無害
17	細砂	青森県	2.60	2.64	103	159	0.65			無害
18	砕石	宮城県	2.86	0.94	18	66	0.27			無害
19	砕砂	北海道	2.64	2.84						

表-2 モルタルバーの養生方法

記号	養生方法
J	脱型後40℃・湿度95%以上
D	脱型から材齢28日まで40℃・湿度95%以上, 材齢28日以降は50℃飽和NaCl水溶液浸せき
A	脱型から材齢2日まで80℃水中, 材齢2日以降は80℃1mol/L NaOH水溶液浸せき

表-3 化学法の試験結果

No.	化学法試験結果			
	溶解シリカ 量, Sc (mmol/L)	アルカリ濃 度減少量, Rc (mmol/L)	Sc/Rc	判定
1	130	143	0.91	無害
2	45	68	0.66	無害
3	45	48	0.94	無害
4	80	70	1.14	無害でない
5	154	48	3.21	無害でない
6	100	66	1.52	無害でない
7	36	80	0.45	無害
8	62	164	0.38	無害
9	18	66	0.27	無害
10	53	63	0.84	無害
11	3	18	0.17	無害
12	29	29	1.00	無害でない
13	141	118	1.19	無害でない
14	18	17	1.06	無害でない
15	115	190	0.61	無害
16	44	97	0.45	無害
17	84	139	0.60	無害
18	16	68	0.24	無害
19	427	98	4.36	無害でない

も、実際にレディーミクストコンクリート工場（以下、工場）で用いられている骨材である。骨材入手時に、アルカリシリカ反応性試験結果（JIS A 1145 化学法および JIS A 1146 モルタルバー法）も併せて入手できたものについては、表-1 にその結果を示している。No.19 は高いアルカリシリカ反応性が確認されている⁴⁾北海道産の安山岩砕砂である。なお、No.4, 6, 8, 9, 10 の骨材に関する後述の化学法およびモルタルバー法のうち NaOH 水溶液浸せき法のデータは、既報³⁾の中で報告しているものである。

b) 実験方法

表-1 の骨材それぞれについて、化学法およびモルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験を実施した。化学法は JIS A 1145 に準拠した。モルタルバー法は 40×40×160mm の角柱供試体を用い、表-2 に示す 3 通りの養生条件下における膨張ひずみ（長さ変化率）を測定した。養生 J は JIS A 1146 と同様の方法である。また、養生 D における 50℃飽和 NaCl 水溶液に浸せきする方法は一般にデンマーク法⁵⁾と呼ばれている方法である。養生 A は ASTM C 1260 と同様であるが、本実験ではモルタルの配合および寸法が異なる。膨張ひずみの測定は JIS A 1129-3 ダイヤルゲージ法により実施した。基長の

測定は、養生 J および D では脱型時、養生 A では材齢 2 日の溶液浸せき時に行った。

モルタルバーの配合は JIS A 1146 に示される配合を基本とした。JIS A 1146 ではモルタルバーの配合が質量比で示されているため、骨材の密度が異なれば、モルタルの単位容積あたりの細骨材とセメントペーストの容積比率が異なることとなる。そこで本実験では、骨材によらず単位細骨材絶対容積（モルタル単位容積あたりの細骨材の絶対容積）が一定となるよう、表-1 に示す骨材の密度の平均値を基準とし、それぞれの骨材の密度により

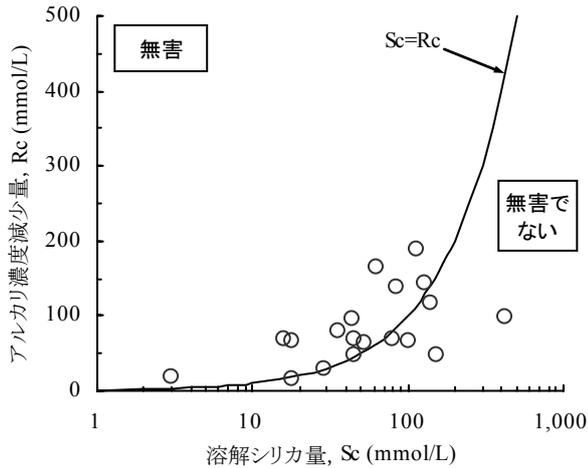


図-1 化学法の試験結果 (Sc と Rc の関係)

計量値 (質量) の補正を行った。

モルタル中のアルカリ量の調整については、養生 J および D を行う場合はセメント量の 1.2% となるよう NaOH を用いて調整した。一方、養生 A を行う場合にはアルカリ量の調整は行っていない。

(2) 実験結果および考察

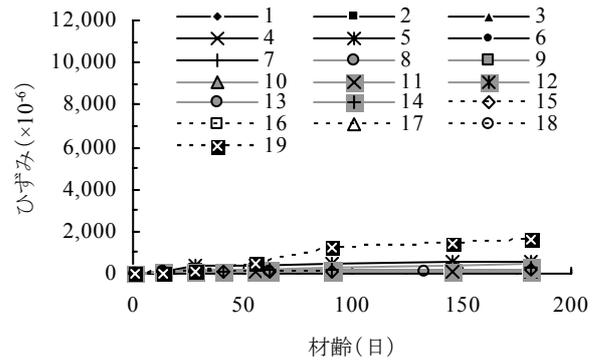
a) 化学法

化学法の試験結果を表-3 および図-1 に示す。No.4, 6, 14 の骨材は、表-1 に示す工場から入手した結果においては無害判定であったが、今回の試験では無害でないと判定される結果となった。これは、たとえば、No.4 や No.6 では表-1, 表-3 の値がいずれも判定境界付近であることから、試料採取時期の違いによる試験値のばらつきや、採取場所の変化などによって、判定が変わる可能性が高いと考えられる。

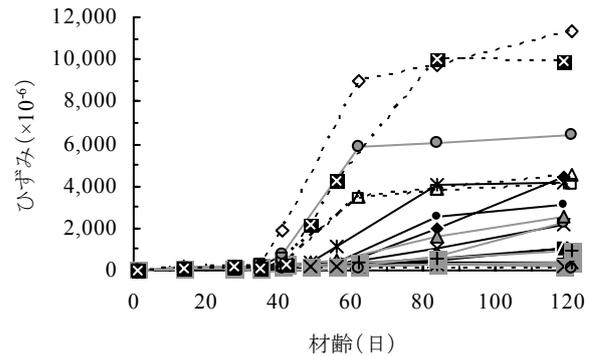
b) モルタルバー法

図-2 にモルタルバー法における膨張ひずみの経時変化を示す。モルタルバーの膨張ひずみとしては、JIS A 1146 やデンマーク法、ASTM C1260 において膨張率 0.1% (=1000×10⁻⁶) 未満では無害と判定される⁵⁾。これ以降の検討においては、膨張ひずみの大小についてこの値を参考とする。

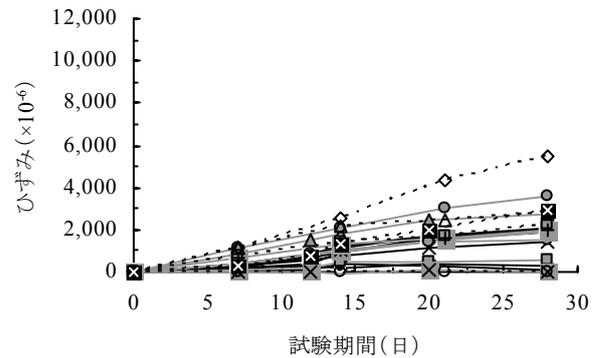
前述の化学法では 7 種類の骨材が無害でないと判定されたのに対し、図-2(a) に示す養生 J では大きな膨張を示すものはほとんど無く、JIS A 1146 の判定基準 (182 日で 0.1%=1000×10⁻⁶) では、無害でないと判定されるのは No.19 のみとなった。その他は No.5, 10 で若干の膨張がみられる程度であった。膨張したものであっても、材齢 50~100 日程度で膨張が収束する傾向にある。この方法ではアルカリシリカ反応に寄与するアルカリが供試体製作時に添加したものに限られるが、試験中にモル



(a) 養生 J



(b) 養生 D



(c) 養生 A

図-2 モルタルバーの膨張ひずみ

タル中のアルカリが溶出して膨張が収束⁶⁾している可能性が考えられる。

一方、図-2(b) に示す養生 D および図-2(c) に示す養生 A では多くの骨材で大きな膨張を示す結果となった。特に No.15 は化学法では無害と判定されたにも関わらず、双方で最も大きな膨張を示している。すなわち、過大なアルカリの供給があった場合に有害な膨張をひきおこす可能性のある骨材を、化学法で判定できていない例を示すものであると考えられる。全般的には、養生 A では直線的に膨張ひずみが増加しているのに対して、養生 D では材齢 40~60 日付近で急激に膨張ひずみが増加する傾向がみられる。

図-3 に養生 D (材齢 119 日、浸せき開始から 91 日) と養生 A (試験期間 28 日、材齢 30 日) の膨張ひずみの

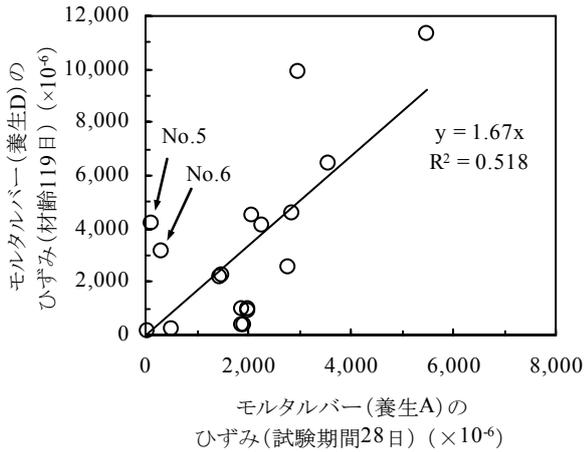


図-3 養生 A と養生 D におけるモルタルバーの膨張ひずみの関係

関係を示す。両促進方法による膨張ひずみにある程度の相関がみられるものと、どちらか一方でのみ膨張を示すものがみられた。たとえば、No.5 や No.6 は表-3 の化学法の結果からは反応性が高いと考えられるが、養生 A ではほとんど膨張を示していない。岩月ら⁷⁾は、ASTM C1260 法のような高温・高アルカリ環境では生成されるゲルの SiO₂/Na₂O 比率が異なり、ゲルの剛性や粘性の差が膨張率に現れるとしている。本実験の骨材 No.5, 6 においても同様な現象が生じた可能性がある。

3. コンクリートバーによる実験

(1) 実験概要

前章においてアルカリシリカ反応性試験を実施した骨材のうち、一部を用いてコンクリートバー供試体を製作し、促進養生下での膨張ひずみを測定した。表-4 にコンクリートの配合を示す。使用した骨材については、表-1 の No. で表示している。コンクリートに用いた骨材の組み合わせおよび細骨材の混合比率は、いずれも工場で用いられている組み合わせ、混合比率である。

配合は、設計基準強度 40N/mm² 程度の PC 上部工で用いられるコンクリートを想定したものである。セメント(記号:C)は配合 D を除き早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm³, 全アルカリ 0.46%)を使用した。配合 D には普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³, 全アルカリ 0.52%)を使用した。これは、配合 D の骨材を使用している工場の地方では早強ポルトランドセメントの入手が難しく、PC 部材であっても普通ポルトランドセメントが使用されていることに準じたものである。スランプの調整には高性能 AE 減水剤(記号:SP, ポリカルボン酸系, 標準型), 空気量(4.5±1.0%)の調整には AE 剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性

表-4 コンクリートの配合

記号	骨材No.			W/C (%)	s/a (%)	単位量, 上段:kg/m ³ , 下段:L/m ³					SP (C×%)
	S1	S2	G			W	C	S1	S2	G	
A	13	12	12*	40.0	43.0	165	413	295	445	994	1.50
						165	132	113	170	375	
B	15	-	18	40.0	41.5	170	425	700	-	1087	1.40
						170	136	269	-	380	
C	16	14	14*	40.0	43.0	170	425	323	407	1006	1.50
						170	136	126	154	370	
D	11	10	11*	42.5	45.4	162	381	654	160	991	1.50
						162	121	244	61	367	

※砕砂と同一原石の砕石

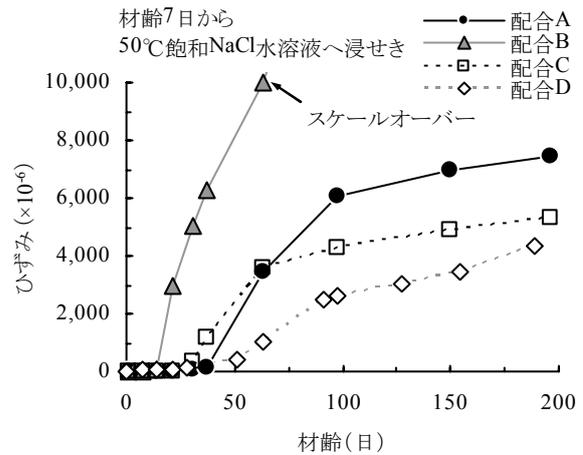


図-4 コンクリートバーの膨張ひずみ

剤)を使用した。また、ASR による膨張を促進するため、コンクリート中のアルカリ総量(Na₂O 当量)を NaOH により 9.0kg/m³ に調整した。単位水量は示方書に示される標準範囲 155~175kg/m³ を参考とし、細骨材率(s/a)は工場の標準配合を参考に、単位粗骨材絶対容積が 0.375±0.015m³/m³ の範囲内となるよう決定した。

供試体は角柱供試体(100×100×400mm)とし、材齢 1 日で脱型した後、材齢 7 日まで 50℃湿潤封緘、材齢 7 日以降は 50℃飽和 NaCl 水溶液へ浸せきさせ、膨張ひずみ(長さ変化率)の測定を行った。膨張ひずみの測定は JIS A 1129-2 (コンタクトゲージ法)により行い、脱型時を基長とした。

(2) 実験結果および考察

図-4 にコンクリートバーの膨張ひずみを示す。モルタルで大きな膨張を生じた No.15 骨材を用いた配合 B は飽和 NaCl 水溶液浸せき(材齢 7 日)直後から急激に膨張を生じ、材齢 50 日程度でコンタクトゲージの測定範囲を超える膨張ひずみとなった。配合 A と C は材齢 50 日程度ではほぼ同様の膨張ひずみであるが、その後は配合 A のほうが大きな膨張を示した。配合 D につい

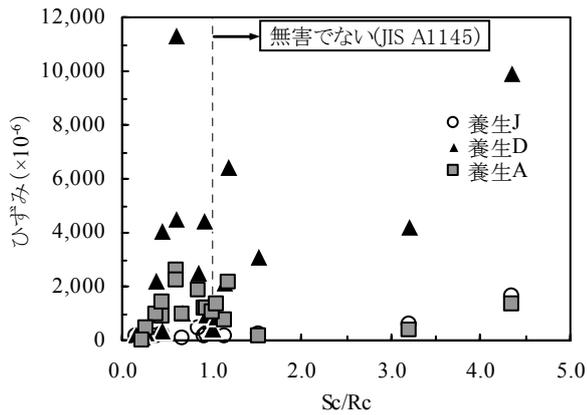


図-5 化学法の結果 (Sc/Rc) とモルタルバーの膨張ひずみの関係

ては、他の3配合に比べて膨張の開始時期が遅い。その後の膨張挙動も緩やかであり、材齢200日程度では、本実験の4配合の中では最も膨張ひずみは小さい。しかし、配合AおよびCの膨張挙動をみると材齢100日以降は収束傾向にあるのに対し、配合Dでは膨張が継続しているようにみられる。このため、長期的には配合Dの膨張ひずみが他配合の膨張ひずみより大きくなる可能性も考えられる。

配合B、Dに用いた骨材はいずれも化学法で無害と判定されたものであるが、促進養生を実施したコンクリートバーは大きな膨張を示した。このように、化学法で無害と判定された骨材であっても、アルカリの供給があった場合にはコンクリートに有害な膨張を引き起こすものが存在する。

4. 化学法、モルタルバー法およびコンクリートバー法の試験結果の関係

(1) 化学法とモルタルバー法の関係

図-5～図-7に化学法の結果とモルタルバーの膨張ひずみの関係を示す。モルタルバー法に関して、養生Jは材齢182日、養生Dは119日、養生Aは28日の膨張ひずみである。図-5は溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の比 (Sc/Rc) で整理した図である。JIS A 1145での判定基準 (Sc=Rc) を点線で示している。化学法で無害でないと判定された骨材は、モルタルバー法の養生Dでは大きな膨張を示しているが、養生Aでは必ずしも大きな膨張を示していない。その一方で、化学法で無害と判定された骨材であっても相当に大きな膨張を生じているものが多数存在する。

図-6は溶解シリカ量 (Sc) で整理した図である。Scはその値が大きいほど骨材のアルカリシリカ反応性は高いといわれる⁸⁾。本実験でも同様の傾向がみられるが、

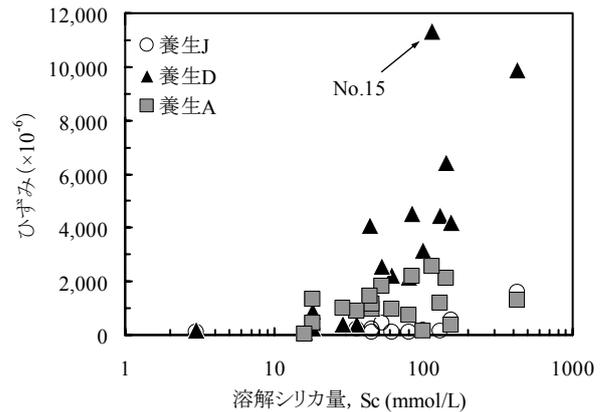


図-6 溶解シリカ量とモルタルバーの膨張ひずみの関係

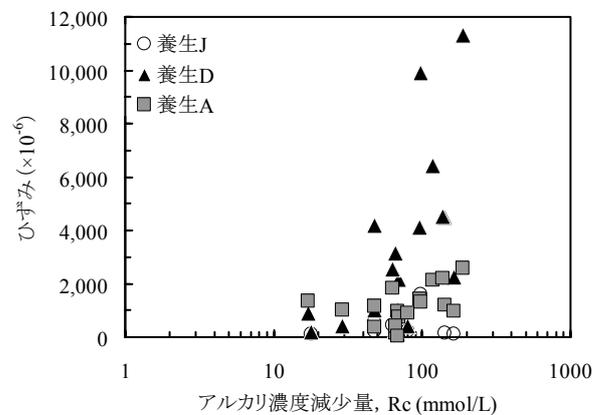


図-7 アルカリ濃度減少量とモルタルバーの膨張ひずみの関係

No.15骨材は、他の骨材と比べて同程度のScながら非常に大きな膨張ひずみを生じている。図-7はアルカリ濃度減少量 (Rc) で整理した図である。一般に、Rcが大きいとアルカリを吸着することにより膨張量が小さくなることある⁹⁾といわれる。しかし、本実験の範囲では、外部からアルカリを供給するとRcが大きいほど膨張ひずみも大きくなる傾向がみられた。これらのことから、外部からのアルカリ供給が懸念される場合、化学法の試験結果からSc、Rcそれぞれの値の大きさによってアルカリシリカ反応性を判定し、対策の検討ができる可能性がある。

(2) モルタルバー法とコンクリートバー法の関係

図-2に示したモルタルバーの膨張挙動のうち、コンクリートバーの製作に用いた骨材のみ抜き出したものを図-8に示す。ただし、養生Jについては明確な膨張ひずみが生じなかったため省略する。No.15は前述の通り、化学法で無害判定にもかかわらず非常に大きな膨張を示している。No.16、10も化学法で無害との判定であるが、比較的大きな膨張を生じた。一方、No.12、14は化学法

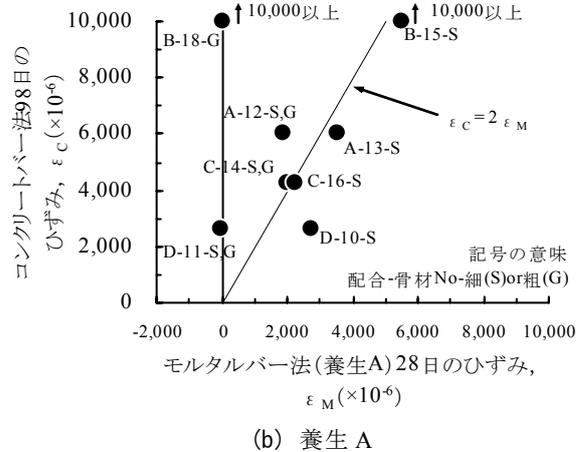
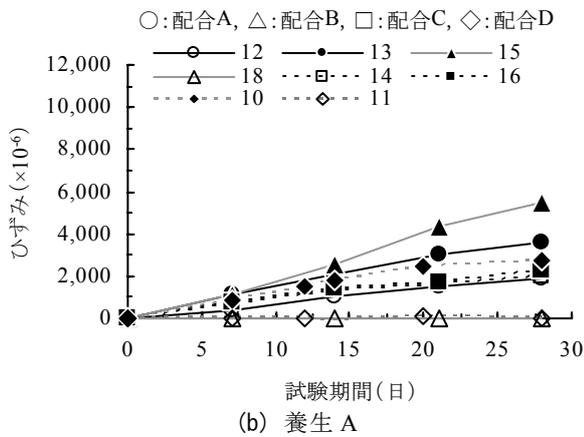
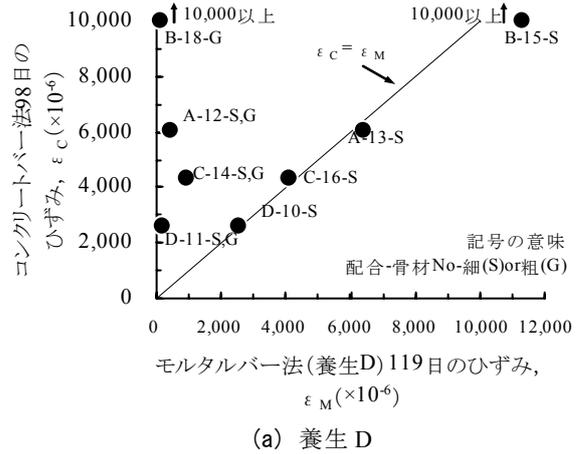
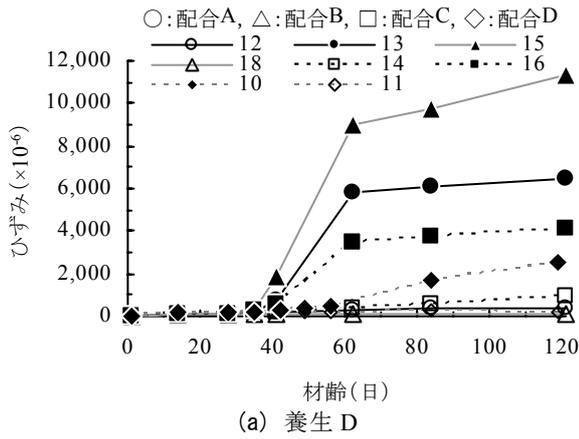


図-8 コンクリートバーの製作に用いた骨材のモルタルバー法試験結果

図-9 モルタルバーの膨張ひずみとコンクリートバーの膨張ひずみの関係

で無害でないとの判定であるが、飽和 NaCl 水溶液浸せき法ではほとんど膨張を生じていない。図-4 と図-8 を比較すると、これらのモルタルバーの膨張ひずみの大小関係は、同じ骨材を用いたコンクリートバーの膨張ひずみの大小関係と、おおむね対応していることが分かる。

図-9 に養生 D および養生 A におけるモルタルバーの膨張ひずみとそれらの骨材を用いたコンクリートバーの膨張ひずみの関係を示す。それぞれの膨張ひずみは、コンクリートバー法では材齢 98 日（水溶液浸せきから 91 日）、モルタルバー法（養生 D）は材齢 119 日（水溶液浸せき開始から 91 日）、モルタルバー法（養生 A）は試験期間 28 日（材齢 30 日）の時点で測定されたものである。

モルタルバー法の養生 D とコンクリートバー法の養生方法は、水溶液浸せき以降は同条件であり、図-9(a) は水溶液への浸せき期間も同じ条件での膨張ひずみを比較している。配合 B のコンクリートの膨張ひずみは測定範囲を超えたため、その値は定かではないが、骨材 No.13, 16, 10 のモルタルバー法による膨張ひずみの値は、それらを用いたコンクリートバー法の膨張ひずみの値と

ほぼ一致する。表-4 や図-9 から分かるように、本実験のコンクリートはいずれの配合も 2 種類の骨材を用いている。そのうち、モルタルバー法とコンクリートバー法で膨張ひずみが一致しているものはいずれも細骨材であり、配合 B に用いた骨材のうち、モルタルバー法で大きな膨張を示した骨材 No.15 も細骨材である。そのため、これらの骨材はコンクリート中であっても、他の骨材などの影響を受けず、モルタルバーの場合と同様に供試体の膨張に寄与したものと考えられる。すなわち、コンクリートに用いる骨材のうち細骨材がアルカリシリカ反応性である場合、その骨材のモルタルバー法による膨張ひずみからコンクリートバー法の膨張ひずみの傾向が把握できる。なお、今回の実験では確認できなかったが、粗骨材が反応性の場合にはモルタルバー法では粉碎して試験に供するため、モルタルバー法とコンクリートバー法の関係は傾向が異なる可能性がある。

図-9(b) はモルタルバー法とコンクリートバー法で養生条件が異なるが、モルタルバー法の膨張ひずみから、コンクリートバー法の膨張ひずみのおおまかな傾向をつかむことはできる。

5. まとめ

レディーミクストコンクリート工場から入手した骨材を用いて、骨材およびコンクリートのアルカリシリカ反応性試験を実施し、以下のことが明らかになった。

- ① 化学法において判定境界付近にプロットされる骨材は、試験時期の違いや、試料採取場所の変化などによって判定が異なる場合がある。
- ② モルタルバーを 50℃飽和 NaCl 水溶液や 80℃ 1mol/L の NaOH 水溶液に浸せきする方法では、化学法で無害と判定された骨材であっても、非常に大きな膨張を示す場合がある。
- ③ 外部からアルカリを供給する促進養生により、モルタルバーに大きな膨張ひずみを発生させる骨材は、コンクリートバーの促進養生でも大きな膨張を生じさせる。
- ④ 外部からアルカリを供給する促進養生を行ったモルタルバーの膨張ひずみは、化学法の Sc, Rc それぞれと相関が見られ、Sc, Rc それぞれの値よりアルカリシリカ反応性の評価ができる可能性がある。
- ⑤ コンクリートに用いる骨材のうち細骨材がアルカリシリカ反応性である場合、本実験の条件では、骨材の組合せによらず、モルタルバー法の膨張ひずみからコンクリートバー法の膨張ひずみの傾向が把握できる。

参考文献

1) 谷口秀明, 樋口正典, 藤田学, 河野広隆: 施工者に

よるレディーミクストコンクリートの品質評価, コンクリート工学, Vol48, No.2, pp.15-23, 2010.2

- 2) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, 2008.3
- 3) 佐々木亘, 谷口秀明, 斯波明宏, 樋口正典: コンクリートの ASR 促進膨張に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 10 巻, pp.155-162, 2010.10
- 4) 谷口秀明, 浅井洋, 三加崇, 三上浩: 高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性, 第 17 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.87-92, 2008.11
- 5) たとえば, 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特長と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp185-197, 2004.8
- 6) 鳥居和之: 骨材のアルカリシリカ反応性の品質保証, コンクリート工学, Vol.39, No.5, pp68-72, 2001.5
- 7) 岩月栄治, 森野奎二: ASTM C1260 及び JIS A5308 による ASR モルタルバーの膨張挙動と微細構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002.6
- 8) たとえば, 岡田清, 水元義久, 小野紘一: 化学法とモルタルバー法に関する一考察, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.157-160, 1985
- 9) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: 岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.689-703, 2007.1