論文　長期間貯蔵したコンクリートから取り出した骨材のアルカリシリカ反応に関する研究

岩月　栄治*1・森野　奎二*2

要旨：11～14 年間にわたってアルカリシリカ反応の劣化状況を観察してきたコンクリート供試体（粗骨材にチャート 4 種類、安山岩 3 種類、その他 2 種類）を破砕・摩砕して，吸水率 3%以下の粗骨材を取り出し，残存反応性を調べた。化学法試験結果では，骨材によって溶解シリカ量が原骨材と比べて多いものがみられた。また，取り出した粗骨材を用いたコンクリート供試体の膨張率は，同じ岩種の反応性骨材であっても採取地や原コンクリートの膨脹量によって差がみられ，9k/m^3 の高アルカリであっても有害な膨脹を示さないものがあった。

キーワード：アルカリシリカ反応，残存反応性，チャート，安山岩，膨張率，化学法

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASRと称す）によって劣化した構造物の調査では，劣化状態の把握と，ASRの残存反応性を検討することが重要である。残存反応性の調査方法は，コアを採取して残存膨張を測定することが一般的な手段であるが，コアの採取場所が限られることや，採取した位置や深さなどによって膨張率が異なるなどの問題がある[1)]。また，劣化構造物を解体し，再度，コンクリート片を再生骨材として使用する場合においても，残存反応性を把握しておくことは重要である。しかし，ASRをおこした骨材の残存反応性を検討した研究は少なく，今後，データを蓄積していく必要がある。

本研究は，11～14年間に渡ってASRの劣化状況を観察してきたコンクリート供試体から粗骨材を取り出し，化学法やコンクリート供試体による膨張率測定を行いASRの残存反応性について調べた。

2. 実験方法

2.1　実験に使用した骨材

実験に使用した骨材の種類と化学法結果を**表－1**に示す。チャートYoは岐阜県の中・古生層の岩盤から採取した砕石である。チャートSeとチャートJは愛知県，チャートTは岐阜県の第三紀層の地層から採取した山砂利である。いずれも，岩石の起源は中・古生層のチャートよりなる。これらの化学法の結果では「無害でない」に判定される。なお，X線回折の2θ＝68°（Cukα$_1$）付近の石英の5重線から算出する結晶性指標は，Yoは5.01，Seは7.22，Jは7.14，Tは6.81であり，岩石学的にYoの反応性が高いといえる。

表－１　実験に使用した骨材の化学法結果

骨　材	使用種別	産　地	化学法の結果（mmol/l）			
			Sc	Rc	Sc/Rc	判　定
チャートYo	粗骨材	岐阜県	391	88	4.44	無害でない
チャートSe		愛知県	116	58	2.00	無害でない
チャートJ		愛知県	92	83	1.11	無害でない
チャートT		岐阜県	108	57	1.89	無害でない
安山岩M		香川県	502	169	2.97	無害でない
安山岩Y		香川県	268	173	1.55	無害でない
安山岩N		長崎県	700	166	4.22	無害でない
橄欖岩M		三重県	14	64	0.22	無　害
輝緑岩N		新潟県	8	163	0.05	無　害
珪　砂	細骨材	愛知県	12	27	0.44	無　害
川　砂		愛知県	19	103	0.18	無　害

*1　愛知工業大学　工学部都市環境学科土木工学専攻講師　工修（正会員）
*2　愛知工業大学　工学部都市環境学科土木工学専攻教授　理博（正会員）

表－２　11～14 年間観察をおこなったコンクリート供試体の作製および貯蔵状況

作製年	形状	配合等	使用骨材			使用セメントのアルカリ量	供試体のアルカリ	貯蔵状態
1985年	100×100×390mm	単位セメント量：300kg/m^3	粗骨材	反応性	チャートYo	0.81%	2.4kg/m^3（無添加）3.0kg/m^3（NaOH添加）	貯蔵容器にて湿潤貯蔵（温度は季節によって10～30℃に変動する）
					チャートSe			
					チャートJ			
					チャートT			
					安山岩M			
					安山岩Y			
					安山岩N			
				非反応性	橄欖岩M			
					輝緑岩N			
			細骨材		珪砂及び川砂			
1988年		水セメント比：58.1%	粗骨材	反応性	チャートYo	0.72%	3.6kg/m^3（NaOH添加）6.0kg/m^3（NaOH添加）	
					チャートSe			
			細骨材	非反応性	珪砂及び川砂			

表－３　11～14 年間観察をおこなったコンクリート供試体の配合

使用した骨材		粗骨材の最大寸法	水ｾﾒﾝﾄ比	細骨材率	単 位 量　(kg/m^3)				
粗骨材	細骨材	(mm)	W/C(%)	s/a(%)	水	ｾﾒﾝﾄ	細骨材	粗骨材	混和剤
チャート:4種類	珪砂川砂	20（チャートYoのみ15mm）	60.0	40.0	180	300	736	1109	－
安山岩:3種類									
橄欖岩，輝緑岩									

安山岩M，安山岩Y，安山岩Nは中国～九州地方の瀬戸内火山岩区に属する斜方輝石安山岩で，砕石工場から採取したものである。化学法では「無害でない」に判定される。火山ガラスの含有量は偏光顕微鏡観察やX線回折から6～15%程度で，その他にクリストバライト，トリジマイトを含んでいる[2)]。

その他に，比較用として「無害」に判定される橄欖岩M（三重県産），輝緑岩N（新潟産）を用いた。細骨材には珪砂および川砂（いずれも愛知県産で無害）を用いた。

2.2　長期間貯蔵したコンクリート供試体の作製および貯蔵状況

11～14年間観察してきたコンクリート供試体の作製および貯蔵状況を**表－２**に，配合を**表－３**に示す。1985年に作製した供試体には，Na_2O等量0.81%の普通ポルトランドセメントを使用した。アルカリ量は，セメントのみの2.4 kg/m^{3}と，NaOHを添加して3.0kg/m^{3}に調整した2種類とした。また，1988年に作製した供試体は粗骨材にチャートYoとSeを使用した。セメントはNa_2O等量0.72%の普通ポルトランドセメントを使用し，NaOHを添加して3.6および6.0 kg/m^{3}に調整した。供試体の貯蔵には実験室内（気温約10～30℃で天候による温度の変化あり）に設置したステンレス製の貯蔵器を用い，貯蔵器の底部に水を入れて供試体を湿潤状態に保った。

2.3　長期間貯蔵したコンクリート供試体からの骨材の採取方法

11～14年間観察した後の1999年に強度試験と内部のASR劣化状況を行った。その後，試験片を，ブレーキジョークラッシャー（350kg/h）を用いて最大粒径20mm程度に破砕して，粗骨材と細骨材にふるい分けた。さらに粗骨材をロサンゼルスすりへり試験機に投入して，付着しているモルタル分を摩砕した。摩砕時間は既往の実験結果から3時間とし，吸水率が3%以下にならなかったものは再度1～2時間摩砕した[3)]。調整後の粗骨材はASR残存反応性を調べるため，再度，コンクリート供試体の粗骨材に使用した。

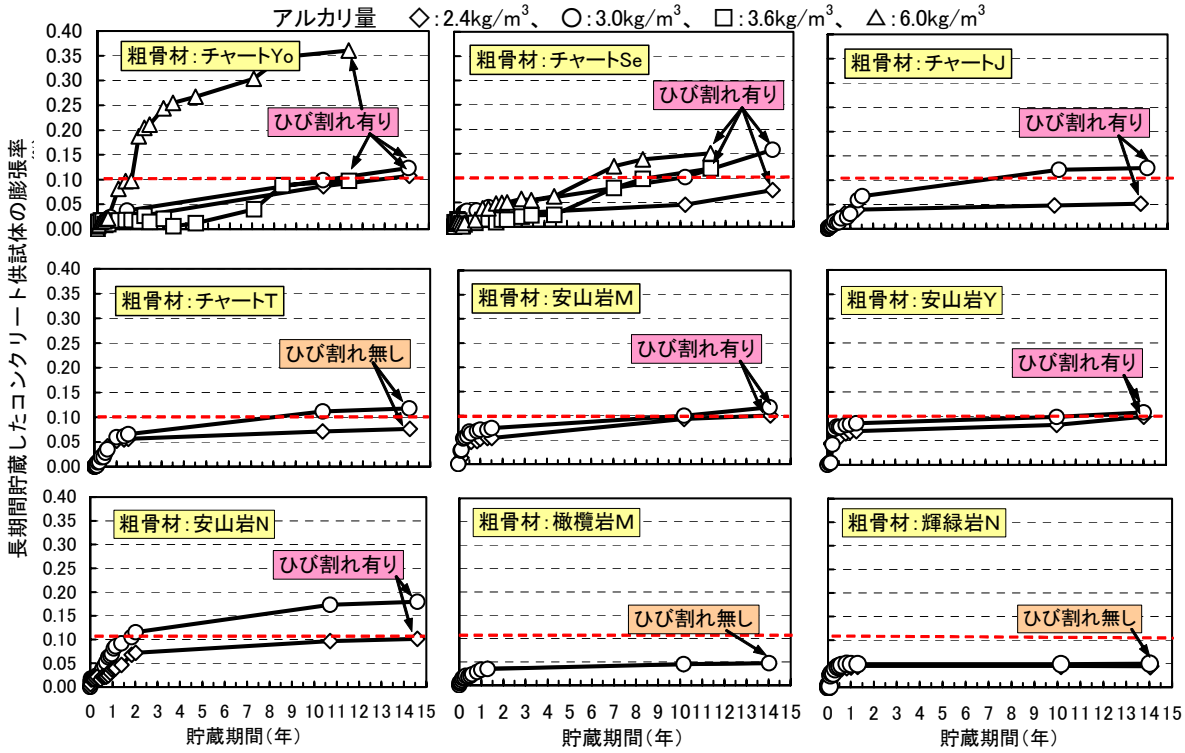
また，吸水率3%以下に摩砕した骨材の一部を工業用硝酸溶液（HNO_3，濃度67.5%）に48時間浸漬（粗骨材300gに対して硝酸溶液1リットルの比率）して，付着しているモルタルを取り除いてから化学法を行った[4)]。

表－４　11～14 年観察をおこなった ASR コンクリート供試体から取り出した粗骨材を再度使用したコンクリートの配合

原コンクリートに使用していた骨材		再生粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
粗骨材	細骨材				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
チャート:4種類 安山岩:3種類 橄欖岩，輝緑岩	珪砂	20	51.3	41.0	154	300	761	1025～1091	0.3

表－５　11～14 年観察をおこなった ASR コンクリート供試体から取り出した粗骨材を再度使用したコンクリートに用いたセメントの化学成分

化学成分 (%)														アルカリ(%)
ig.loss	insol	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	Cl	SO_3	Na_2Oeq
0.59	0.1	21.65	4.85	2.98	65.02	1.41	0.28	0.52	0.3	0.16	0.13	0.002	1.8	0.62



図－１　11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体（原コンクリート供試体）の膨張挙動

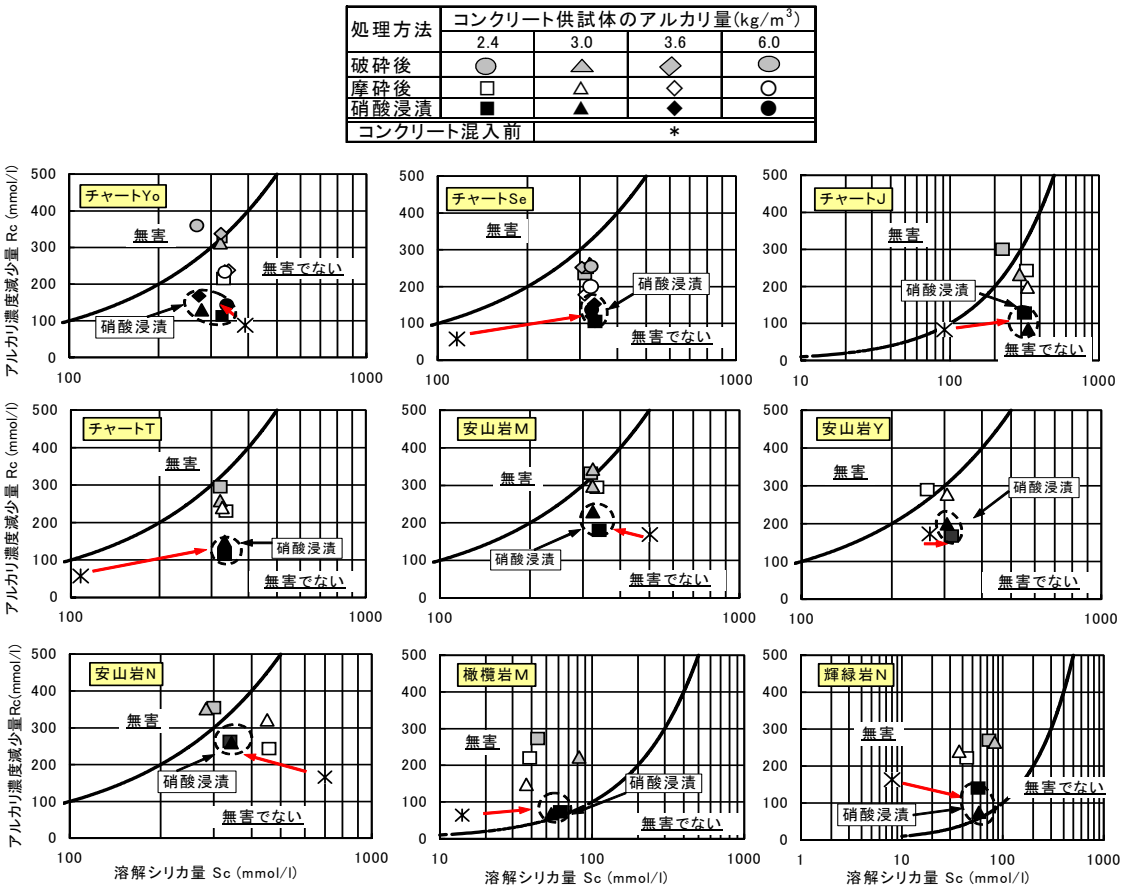
2.4　11～14年間観察した供試体から取り出した粗骨材を使用したコンクリート供試体の膨張率測定

11～14年間観察してきたコンクリート供試体を破砕・摩砕して吸水率3%以下に調整した粗骨材を用いたコンクリート供試体を作製して，膨張率の測定を行った。使用セメントはNa_2O等量0.62%の普通ポルトランドセメントを用い，練混ぜ時にNaOHを添加して全体のアルカリ量を3.0と9.0kg/m³に調整した。供試体の形状は試料量の都合で60×60×150mmとした。コンクリート打設後24時間で脱型し，膨張率の基準を測定してからただちに40℃湿潤貯蔵(RH95%以上)を行った。コンクリートの配合を表－４に，使用したセメントの化学成分を表－５示す。

3.　結果および考察

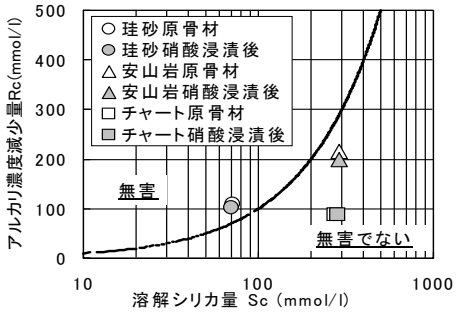
3.1　11～14 年間観察したコンクリート供試体の ASR 劣化状況 [2,5)]

図－１に 11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体の ASR 膨張挙動を示す。チャート Yo，Se，J，T はアルカリ量 3.0kg/m³ であっても貯



図－２　11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体から取り出した粗骨材の化学法結果

蔵 10 年以上で 0.1%以上の有害な膨張を示している。この中でも，チャート Yo は 2.4kg/m^3 であっても貯蔵 14 年では 0.1%以上の膨張を示しており，アルカリが低くても長期にわたって反応が継続していることから反応性が高いといえる。また，チャート Se の 2.4 kg/m^3 と 3.0kg/m^3 は貯蔵 10 年以後から膨張が増加しはじめており，貯蔵 14 年の 3.0kg/m^3 は Yo の同アルカリよりも膨張率が高くなっている。これらのことから，アルカリ量が低い場合であっても長期間では Se は Yo よりも劣化が著しいといえる。安山岩もチャートと同様に貯蔵 10 年で 2.4 および 3.0kg/m^3 のアルカリ量で 0.1%以上の膨張を示している。特に安山岩 N の膨張が著しく，化学法結果（**表－１**）の溶解シリカ量が他と比べて高いことからも反応性が高いといえる。供試体表面のひび割れはチャート T 以外のチャートと安山岩を使用した供試体で確認され，そのひび割れ幅は 0.05～0.40mm で



図－３　硝酸溶液浸漬が化学法におよぼす影響の検討結果

あった。

比較用の橄欖岩 M と輝緑岩 N は，チャートや安山岩と同じ条件で貯蔵・測定をしていたが，貯蔵 14 年の膨張率は 0.05%以下であり，ひび割れも確認されておらず，化学法の結果とも一致している。

3.2　11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体から取り出した粗骨材の化学法結果

図－２に 11～14 年間貯蔵したコンクリート

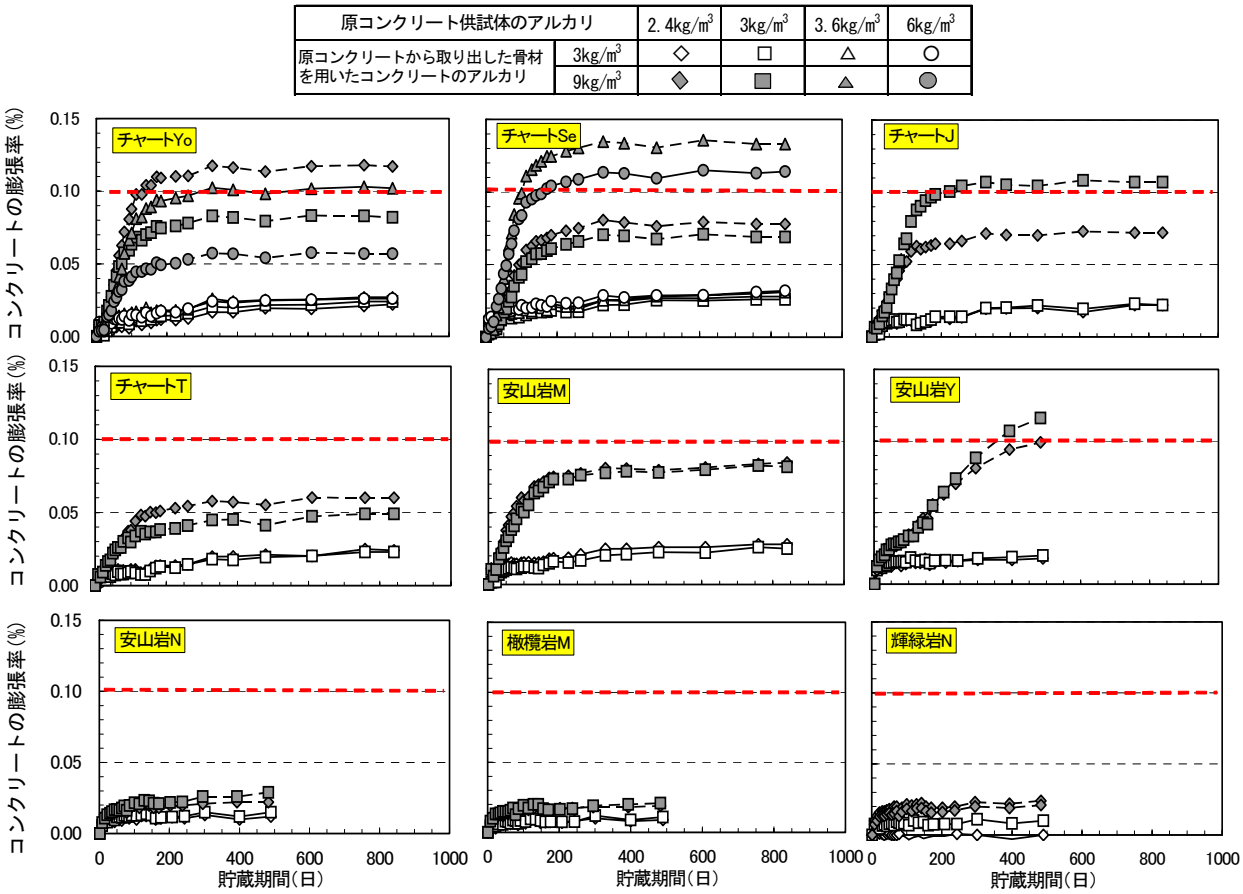
供試体から取り出した粗骨材の化学法試験結果を示す。図中には，コンクリートに用いる前の骨材，11～14 年経過後の供試体を破砕した時点の骨材，摩砕によって吸水率 3%以下に調整した骨材，および硝酸溶液に浸漬して付着モルタルを取り除いた骨材の 4 種類の結果を示した。このうち，硝酸溶液浸漬が化学法結果に及ぼすの影響を検討するため，珪砂，チャート，安山岩の 3 種類を硝酸浸漬前と浸漬後で化学法を実施したが，**図－３**に示すように硝酸浸漬の影響はほとんど無いことがわかる。

ASR による骨材の化学法結果の変化を，コンクリート使用前の骨材（図中＊印）と，コンクリートから取り出して硝酸でモルタル分を除去した骨材（図中の黒に塗り潰した印）の結果を比較すると，チャート Yo は溶解シリカ量が若干減少しており，反応性のシリカが消費されていることを示している。反対に，Se，T，J は溶解シリカ量が多くなっており，長期間コンクリート中に含まれていたことによって，シリカが反応しやすくなっていると考えられる。

安山岩では，安山岩 Y の溶解シリカ量が若干増加し，M と N は減少している。このことから，Y は反応しやすくなり，M と N は反応性シリカが消費されたと考えられる。

3.3　11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体から取り出した粗骨材を用いたコンクリートの膨張挙動

図－４に 11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体から取り出した粗骨材を用いたコンクリート供試体の膨張挙動を，また，使用した粗骨材の吸水率とモルタル付着率を**表－６**に示す。粗骨材に付着しているモルタルから溶出するアルカリは供試体作製時には考慮せず，新たに使用するセメントのアルカリと NaOH を添加して，コンクリートのアルカリ量を 3kg/m^3 と，



図－４　11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体から取り出した粗骨材を使用したコンクリート供試体の膨張挙動

反応を早期に確認するためにアルカリ量を極端に高めた 9kg/m^3 の 2 種類に調整した。

チャートのアルカリ量 9kg/m^3 では，貯蔵直後から膨張しはじめ，200 日以後はほとんど収束している。このうち，チャート Se の原コンクリートのアルカリ量 3.6kg/m^3(図中の▲印)，6kg/m^3(●)，およびチャート J の原コンクリートの 3kg/m^3(■)は，Yo の同様のアルカリ量よりも膨張している。これは，原コンクリートの反応によって Yo よりも反応性が高くなったと考えられ，前述の溶解シリカ量の増加と一致している。

また，安山岩のアルカリ量 9kg/m^3 では，安山岩 M は膨張率 0.08%，Y は 0.1～0.12%，N は 0.03%であり，骨材によって差が大きい。このうち，安山岩 Y は貯蔵直後から急激な膨張が継続しており，溶解シリカ量もチャート Se，J と同様に増加していることから骨材の反応性が高くなっている。一方，安山岩 N は 9kg/m^3 の高アルカリ状態であってもほとんど膨張しておらず，溶解シリカ量も原骨材の 700mmol/l から 340mmol/l に減少していることから骨材の反応性が低くなっている。

これらのことから，ASR 膨張によって反応が進んでいればコンクリート中の骨材の残存反応性は低い。しかし，コンクリート中の骨材の溶解シリカ量が増加している場合は，さらに反応しやすくなり，残存反応性が高い言とえる。実構造物の ASR 劣化が一定期間経過後に急激に進む現象を示唆している。

アルカリ量 3kg/m^3 では，チャート，安山岩とも貯蔵 480～840 日時点で膨張率は 0.03%以下であるが，微量に膨張が継続しており，さらに化学法の結果からも，長期の膨張測定では，今後，膨張が増加する可能性がある。

表－６　11～14 年間貯蔵したコンクリート供試体から取り出した粗骨材の吸水率（3%以下に調整）とモルタル付着率

骨　材	チャートYo				チャートSe				チャートJ		チャートT	
原コンクリートのアルカリ量(kg/m^3)	2.4	3.0	3.6	6.0	2.4	3.0	3.6	6.0	2.4	3.0	2.4	3.0
吸水率3%以下に摩砕後の吸水率(%)	2.22	2.49	2.44	2.86	2.82	2.41	2.52	2.03	2.20	2.31	2.43	2.65
摩砕後のモルタル付着率(%)	14	19	18	21	16	13	13	10	11	15	13	14

骨　材	安山岩M		安山岩Y		安山岩N		橄欖岩M		輝緑岩N	
原コンクリートのアルカリ量(kg/m^3)	2.4	3.0	2.4	3.0	2.4	3.0	2.4	3.0	2.4	3.0
吸水率3%以下に摩砕後の吸水率(%)	2.02	2.24	2.67	2.33	2.76	2.65	1.68	1.49	1.50	1.64
摩砕後のモルタル付着率(%)	8	10	20	19	22	23	17	15	16	13

4. まとめ

本研究の ASR 試験結果を以下にまとめる。

(1) チャート Se，J と安山岩 Y は，原コンクリート中の ASR によって溶解シリカ量が増加し，さらに取り出した骨材を用いたコンクリートは膨張していることから，骨材の残存反応性が高くなっている。

(2) 安山岩 N のように，原コンクリートの膨張が高く，取り出した骨材の溶解シリカ量が減少している場合は、残存反応性は低くなる。

謝辞：本研究は平成 13 年度愛知工業大学教育・研究特別助成の助成金で行った。実験は院生の田中隆範君に協力いただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 岩月栄治，森野奎二: チャート骨材使用劣化コンクリート構造物から採取したコアのアルカリシリカ反応性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.957-962，2001.6
2) 岩月栄治，森野奎二: 長期間貯蔵した反応性骨材混入コンクリートの膨張と強度性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.277-282，2000.6
3) 森野奎二，岩月栄治：再生骨材のコンクリートへの適用のための品質改善，建設用原材料, Vol.9, No.1，pp.26-33，1999.10
4) 飯島亨，鶴田孝司，立松英信：再生骨材の物理的性質に及ぼす原コンクリートの品質の影響，資源・素材学会秋季大会企画発表・一般発表(D)資料, pp.99-100，1997.9
5) 岩月栄治，森野奎二: 長期間貯蔵した反応性骨材混入コンクリートの膨張と強度性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.277-282，2000.6