論文　反応性を有する再生骨材を用いたコンクリートの諸性状

黒田　泰弘[*1]

要旨：反応性を有する骨材を使用したコンクリートから再生骨材を製造し，再生骨材コンクリートを練り混ぜ，その諸性状について調査した。軽微なASRが生じている原コンクリートから製造した再生骨材を用いた場合でも，今回の実験の範囲では，問題となるフレッシュ性状や強度特性の低下は認められなかった。また，再生骨材コンクリートのASR特性に関しては，練混ぜ時にアルカリを添加して行った湿気槽養生法では実用上問題となる劣化は生じなかったものの，外部からアルカリが供給される飽和 NaCl 溶液浸漬法では，ASRが生じている原コンクリートから製造した再生骨材を用いた場合において，ASRの進行が顕著となった。

キーワード：アルカリシリカ反応，加熱すりもみ，高品質再生骨材，湿気槽養生法，飽和NaCl溶液浸漬法

1. はじめに

昭和 61 年以前に建てられた建築物では多くの骨材がアルカリシリカ反応（以下，ASR）を評価されずに使われており，表面上ほとんど劣化が認められないケースでも，反応性を有する骨材が使われ， ASR を生じている可能性がある。しかしながら，反応性の高い骨材を用い，非常に高いアルカリを添加したコンクリートを対象にした検討は行われているものの，現実にありそうな比較的穏やかな反応性を有する骨材を使用したコンクリートを対象とした検討は行われていない。このため，既報[1)]では，比較的穏やかな反応性を有する骨材を用い，アルカリ添加量を変え，劣化状況を変えたコンクリートを対象に，加熱すりもみ法による高品質再生骨材の製造実験を実施し，アルカリ添加量や劣化状況の違いが再生骨材の品質や回収率の変化に及ぼす影響について調べた。

本報では，同じ原コンクリートを対象に再生骨材を製造し，再生骨材コンクリートを練り混ぜ，フレッシュ性状，強度特性およびコンクリートバーによるASR特性を検討した結果について報告する。

2. 原コンクリートの概要および再生骨材の製造

2.1 原コンクリートの概要

原コンクリートとして，他の実験目的で製作された鉄筋コンクリート造の梁状試験体を譲り受けた。寸法は250×250×2,000㎜，主筋にD16を4本配筋し，帯筋にD10を150㎜間隔で配筋したものである（軸方向の鉄筋比は1.28%，帯鉄筋比は0.38%）。

原コンクリートの調合は**表－１**のとおりであり，調合NとBには，ASRを進行させるため，調合Nの単位セメント量（307kg/m^3）に対してNa_2Oeq=2.5%となるように，同量の水酸化ナトリウムが添加されていた。

梁状試験体は打込み後，約 30 ヶ月の間，屋外曝露した後，温度 40℃，湿度 90%RH 以上の促進養生条件下で，調合 NX と調合 B の試験体は 6 ヶ月，調合 N の試験体は 12 ヶ月養生され，各種実験が実施された。解体時の諸物性は**表－２**のとおりである。調合Nの試験体の膨張率は他の調合に比べて大きく，コア強度やヤング係数も小さかったことなどから，外観での判別は難しいが，ASRによる劣化が進行していたものと推測される。

なお，原粗骨材および原細骨材の種類とASR試験結果（化学法（JIS A 1145），迅速法（JIS A 1804））は**表－３**のとおりであり，いずれもASRの判定が「無害でない」ものが使用されていた。原粗骨材は堆積岩であり，反応性は比較的穏やかと考えられるものである。また，山砂には流紋岩が混入していた。

2.2 再生骨材の製造

再生細・粗骨材の製造は，加熱すりもみ法[2)]により行った。すりもみには小型のチューブミルを用い，投入口にふるい網を設置して，アンダー分を過粉砕しないように，順次ミル外へ排出するようにした。再生骨材の製造手順は，次の(1)～(6)に示すとおりである。

(1) ハンドブレーカによって梁状試験体を100㎜程度以下に粗割りし，鉄筋を除去した。（**写真－１**）

(2) 粗割りしたコンクリート塊を 40㎜ ふるいでふるって，40㎜ オーバー分はジョークラッシャで 20㎜ 程度以下となるように破砕した。

表－１　原コンクリートの調合

調合	W/C (%)	単位量（kg/m^3）					NaOH
		C	BS	W	S	G	
NX	58.6	307	0	180	786	999	無添加
N	58.6	307	0	180	786	999	添加
B	47.6	169	169	161	786	999	添加

*1 清水建設（株）　技術研究所生産技術センター　主任研究員　工修(正会員)

表－２　原コンクリートの解体時の物性

調合	コア強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	膨張率(%)	
			コンクリートひずみ	鉄筋ひずみ
NX	44.5	25.9	0.009	0.020-0.050
N	27.4	14.0	0.064	0.050-0.095
B	45.8	28.5	0.019	0.025-0.060

表－３　原骨材の種類と ASR 試験結果

種類	化学法（JIS A 1145）		迅速法 (JIS A 1804)
	Sc	Rc	
粘板岩・頁岩砕石	90	50	0.236
山砂	136	88	0.165

写真－１　ハンドブレーカによる解体状況

(3) ハンドブレーカによる 40mm アンダー分とジョークラッシャによる破砕物を混合した。

(4) 空気循環式加熱炉を用いて，(3)を 300℃で 5 時間加熱後，自然冷却した。

(5) チューブミルの投入口に 4mm のふるい網をセットし，D19 の鉄筋を媒体（投入原料に対する媒体比 1.0）とし，すりもみ時間を 5 分，15 分として，(4)をすりもんだ。チューブミル内に残った処理品を 25mm のふるいで分級し，通過分を再生粗骨材とした。再生粗骨材は，調合 N より製造した N5（すりもみ時間 5 分），N15（すりもみ時間 15 分），調合 B より製造した B5，B15，および調合 NX より製造した NX5，NX15 の 6 種類である。

(6) チューブミルの投入口に 0.25mm のふるい網をセットして，φ6～19mm の鉄球を媒体（投入原料に対する媒体比 3.0）とし，すりもみ時間を 45 分として，(5)で分離した 4mm 以下の細粒分（集塵機により浮遊微粉分は除去）をすりもみ，チューブミル内に残った処理品を再生細骨材とした。再生細骨材は，調合 N より製造した NS と調合 NX より製造した NXS の 2 種類である。

表－４　使用材料の一覧

項目	種類	主な性質等
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm^3，比表面積3,240cm^2/g 全アルカリ0.48%
細骨材	山砂 MS	表乾密度2.62g/cm^3，絶乾密度2.57g/cm^3 吸水率1.78%，FM2.62
	再生細骨材 NXS	表乾密度2.56g/cm^3，絶乾密度2.48g/cm^3 吸水率3.12%，FM3.19
	再生細骨材 NS	表乾密度2.56g/cm^3，絶乾密度2.48g/cm^3 吸水率3.06%，FM3.23
粗骨材	硬質砂岩砕石 CG	表乾密度2.66g/cm^3，絶乾密度2.64g/cm^3 吸水率0.68%，実積率61.8%，FM6.57
	再生粗骨材 NX5	表乾密度2.52g/cm^3,絶乾密度2.43g/cm^3 吸水率3.54%,実積率64.0%，FM6.50
	再生粗骨材 NX15	表乾密度2.65g/cm^3，絶乾密度2.62g/cm^3 吸水率1.30%，実積率63.8%，FM6.39
	再生粗骨材 N5	表乾密度2.51g/cm^3，絶乾密度2.41g/cm^3 吸水率3.98%，実積率63.7%，FM6.49
	再生粗骨材 N15	表乾密度2.67g/cm^3，絶乾密度2.64g/cm^3 吸水率1.05%，実積率63.4%，FM6.33
	再生粗骨材 B5	表乾密度2.52g/cm^3,絶乾密度2.43g/cm^3 吸水率3.68%，実積率63.8%，FM6.47
	再生粗骨材 B15	表乾密度2.66g/cm^3，絶乾密度2.63g/cm^3 吸水率1.10%，実積率63.6%，FM6.42
	抽出骨材 OG	表乾密度2.66g/cm^3，絶乾密度2.63g/cm^3 吸水率1.15%，実積率63.2%，FM6.38
混和剤	AE減水剤	標準タイプ

表－５　付着セメント量とアルカリ量の測定例

試料	不溶残分 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	Na_2Oeq (%)	ペーストに対する Na_2Oeq (%)
再生粗骨材 NX15	95.7	0.01	0.01	0.02	0.5
再生粗骨材 N5	89.3	0.11	0.03	0.13	1.2
再生細骨材 NXS	89.2	0.06	0.07	0.11	1.0
再生細骨材 NS	89.8	0.16	0.07	0.21	2.1

3. 実験の概要

3.1 使用材料および調合

使用材料の一覧を**表－４**に示す。

加熱すりもみ法によって製造した再生粗骨材 N5，B5，NX5 は，JIS A 5022 の M クラスに相当する中品質再生骨材であり，再生粗骨材 N15，B15，NX15 および再生細骨材 NS，NXS は，JIS A 5023 の H クラスに相当する高品質再生骨材であった。また，抽出骨材 OG は調合 NX の破砕片の残りから 5%の希塩酸を用いてセメント分を除去して得た（原）粗骨材である。なお，山砂 MS と硬質砂岩砕石 CG は，いずれも ASR の判定が無害のものを使用した。

表－５は JIS A 5022 の附属書 C に示されている「再生骨材中のアルカリ含有量の測定方法」[3] による再生骨材のアルカリ含有量の測定結果の例である。

再生細骨材に比べ，再生粗骨材のアルカリ含有量が全体に小さく測定され，原コンクリートが同一である再生

表－６　再生骨材コンクリートの調合

調合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				AE減水剤 (C×%)
			W	C	S	G	
NX5-C	55.0	46.9	170	309	844	920	0.25
NX15-C	55.0	46.9	170	309	844	967	0.25
N5-C	55.0	46.5	173	315	831	916	0.25
N15-C	55.0	46.5	173	315	831	975	0.25
B5-C	55.0	46.9	170	309	844	920	0.25
B15-C	55.0	46.9	170	309	844	971	0.25
NXS-C	55.0	46.9	170	309	824	971	0.25
NS-C	55.0	47.9	170	309	842	952	0.25
OG-C	55.0	46.9	173	315	831	975	0.25

表－７　フレッシュ性状と強度特性

調合	スランプ(cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m³)	圧縮強度(N/mm²)		ヤング係数(kN/mm²)	
				7日	28日	7日	28日
NX5-C	18.0	4.5	2.250	21.0	31.0	26.4	27.5
NX15-C	18.0	4.7	2.298	24.1	36.0	28.0	33.0
N5-C	18.0	4.4	2.243	23.8	33.6	25.2	27.7
N15-C	19.0	4.6	2.305	24.1	37.1	27.3	33.1
B5-C	17.5	4.3	2.262	24.3	35.5	27.3	28.5
B15-C	18.0	4.3	2.333	24.9	36.5	29.6	31.3
NXS-C	18.5	4.6	2.309	26.6	39.1	26.9	29.9
NS-C	18.0	4.4	2.310	26.3	41.0	26.4	30.3
OG-C	18.0	4.6	2.328	27.2	37.8	30.6	34.8

粗骨材と再生細骨材で，セメントペーストに対するアルカリ含有量は合致しなかった。結合水量を 20～30%程度とした場合のセメントペーストに対するアルカリ含有量は，調合 NX で 0.5%程度，調合 N で 2.0%程度と推定されるので，再生粗骨材 N5 のアルカリ含有量は推定値より小さく，再生細骨材 NXS のアルカリ含有量は推定値より大きいと考えられる結果といえる。

再生骨材の製造時あるいは保管時の取り扱い，サンプルの代表性の問題などが，こうした乖離を生じた原因として考えられるが，現状のデータだけでは判断できなかった。なお, JIS A 5022 のアルカリ含有量の測定方法は，付着するセメントペーストを溶解するのに 70 倍の容積の塩酸（1＋100）を加え，24 時間連続して振とうする必要があり，それを数回繰り返すには，非常に労力がかかり，サンプル数を増やすのが難しい。もっと簡易で実用的な方法の提案が望まれる。

調合表を**表－６**に示す。コンクリートの調合はいずれも水セメント比を 55%とし，スランプ 18.0±2.5cm，空気量 4.5±1.5%を目標に，試験練りを行って設定した。調合 NX5-C，NX15-C，N5-C，N15-C，B5-C および B15-C は，再生粗骨材 NX5，NX15，N5，N15，B5，B15 と山砂 MS の組合せによる再生粗骨材コンクリートであり，調合 NXS-C および NS-C は硬質砂岩砕石 CG と再生細骨材 NXS, NS の組合せによる再生細骨材コンクリートである。また，調合 OG-C は抽出骨材 OG と山砂 MS の組合せによる比較用の普通骨材コンクリートである。

3.2 試験方法

(1) フレッシュ性状および強度特性に関する試験

コンクリートのフレッシュ性状試験として，スランプ（JIS A 1101），空気量（JIS A 1128），単位容積質量および温度を測定した。また，強度特性試験として，材齢 7, 28 日の標準養生供試体について，圧縮強度（JIS A 1108）とヤング係数（JIS A 1149）を測定した。なお，中品質再生粗骨材を用いた調合では，骨材修正係数を 0.2%とし，空気量の補正を行った。

(2) アルカリシリカ反応性試験

再生骨材コンクリートの ASR 特性を把握するための試験では，促進養生条件を変えて，長さ変化率を測定した。養生条件は，湿気槽養生法（温度 40℃，湿度 100%）と飽和 NaCl 溶液浸漬法の 2 種類とした。

外部からアルカリ溶液を浸透させない湿気槽養生法では，フレッシュコンクリートの試験後に，所定量の水酸化ナトリウムの粉末を添加して，試験体を採取した。再生骨材コンクリートについては，アルカリ添加量が Na_2Oeq=0.6, 1.2, 1.8, 2.4kg/m^3 となるように水酸化ナトリウムを添加した。また, 比較用の調合 OG-C については，アルカリ添加量が Na_2Oeq=1.2, 2.4, 3.6kg/m^3 となるように水酸化ナトリウムを添加した。養生は脱型直後より開始した。

一方，飽和 NaCl 溶液浸漬法では，供試体を材齢 6 か月まで封緘養生した後，50℃の飽和 NaCl 溶液による養生を開始した。

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュ性状および強度特性

表－７にフレッシュ性状と強度特性に関する試験結果の一覧を示す。また，調合別の圧縮強度の比較を**図－１**に，ヤング係数の比較を**図－２**に示す。

いずれの調合も，スランプ，空気量とも目標の範囲を満足した。また，見掛けのフレッシュ性状に関して，使用骨材の違いによる変化は特段認められなかった。今回用いた再生骨材の品質は全体的に高く，普通骨材の品質に比較的近いことに起因すると考えられる。

また，ASR が進行し，強度特性の低下が認められる試験体から製造した再生骨材を用いた調合 N5-C，N15-C および NS-C では，調合 NX5-C, NX15-C, B5-C, B15-C および NXS-C と比較し，圧縮強度やヤング係数の低下が危惧されたが，特に差のないことがわかった。

なお，今回の実験の範囲では，原コンクリートの違いによらず，M クラスの中品質再生粗骨材 NX5，N5，B5

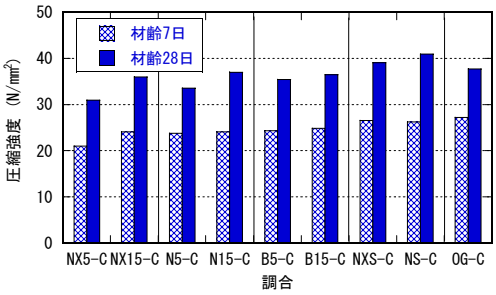
（付着モルタル量が多い）を用いたコンクリートの方が，H クラスの高品質再生粗骨材 NX15，N15，B15（付着モルタル量が少ない）を用いたコンクリートよりも，圧縮強度，ヤング係数とも，幾分低くなる傾向が認められた。

再生骨材は原骨材と付着モルタルの混合物であり，吸水率が高い付着モルタルを減じることにより，再生骨材コンクリートの強度性状は一般に改善するものと考えられているが，最近の研究[4)，5)]では，再生骨材コンクリートのヤング係数は再生骨材に付着するモルタルの量に依存するものの，再生骨材コンクリートの圧縮強度は付着モルタル量には依存せず，むしろ原コンクリートの圧縮強度に依存するといった傾向にあるとされている。今回の結果はこれと相違する結果であり，原因究明のためには更なる検討が必要と考えられる。

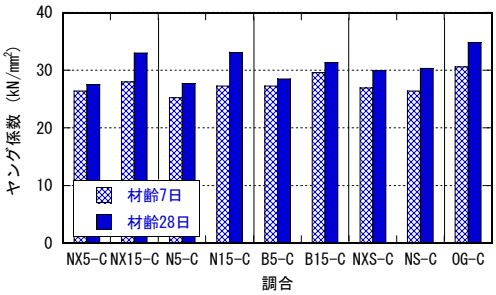
4.2 アルカリシリカ反応性

(1) 添加アルカリ量の影響

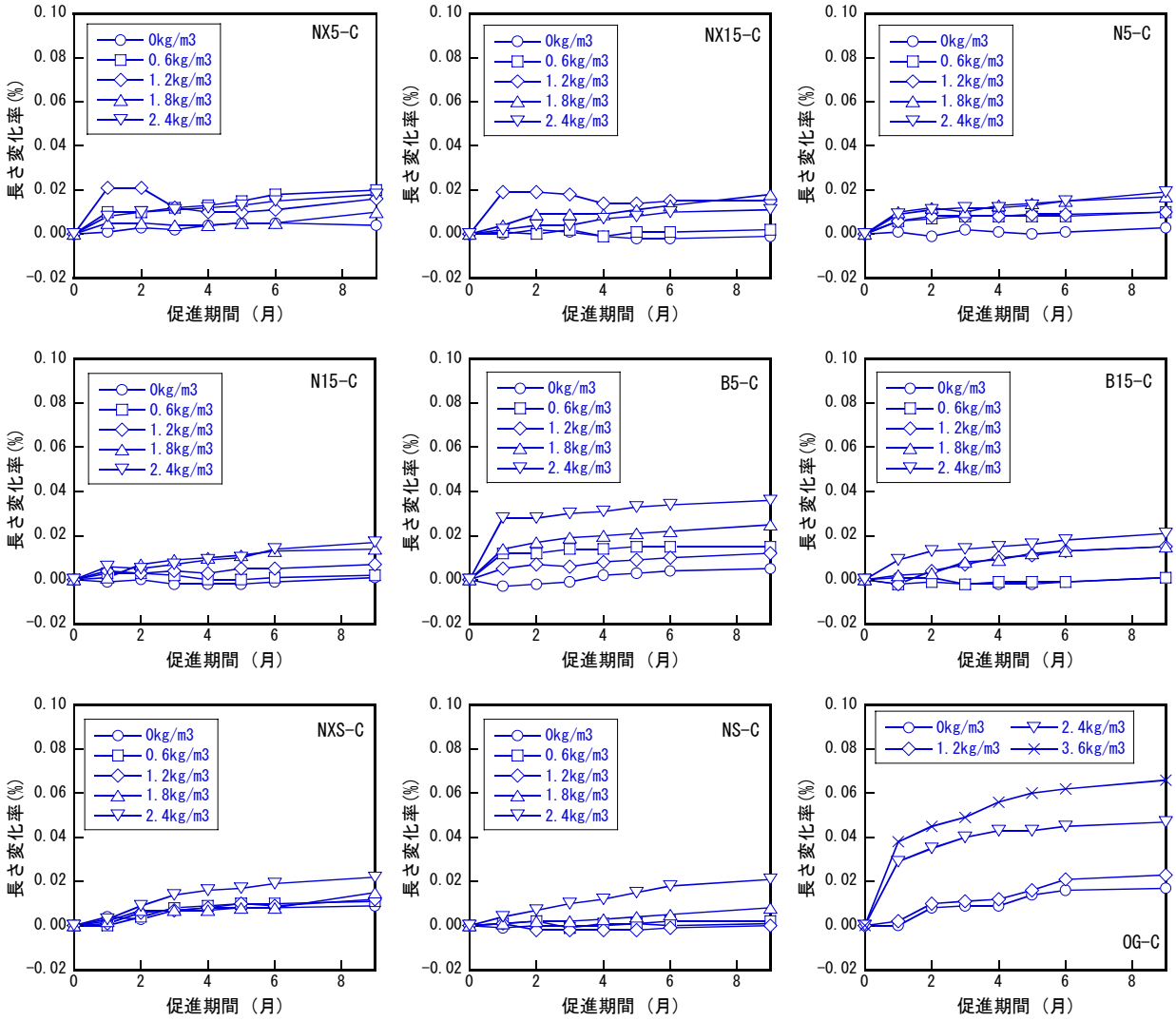
湿気槽養生法による長さ変化率の測定結果を調合別に図－３に示す。



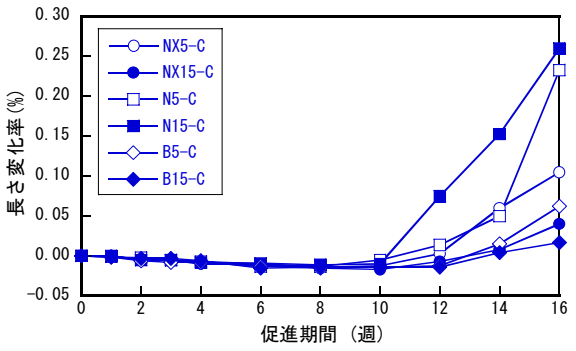
図－１　調合別の圧縮強度の比較



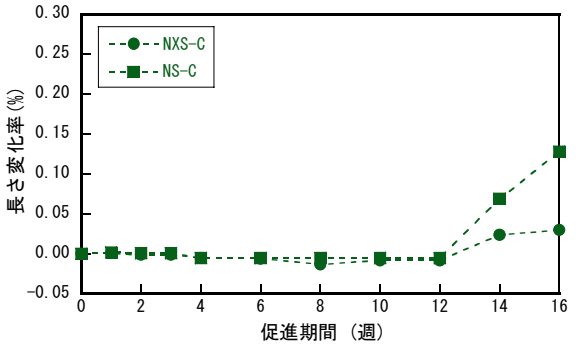
図－２　調合別のヤング係数の比較



図－３　湿気槽養生法による測定結果



図－４　飽和 NaCl 溶液浸漬法による測定結果
（再生粗骨材コンクリート）



図－５　飽和 NaCl 溶液浸漬法による測定結果
（再生細骨材コンクリート）

一部の試験体を除き，全体的な傾向としては，アルカリ添加量が増えるほど，また促進期間が長くなるほど，再生骨材コンクリートの長さ変化率は大きくなった。しかし，Na_2Oeq=2.4kg/m^3 のアルカリの添加でも，9 か月後の膨張率は，大きくても 0.04%程度にとどまり，膨張は収束しつつあるように思われる。したがって，この範囲のアルカリ添加量では，今回の再生骨材の場合，問題となる ASR の進行はないと考えられる。

また，比較用の抽出骨材を粗骨材として用いたコンクリートの場合でも，Na_2Oeq=2.4kg/m^3 以上のアルカリの添加での最初の 1 か月の促進養生による膨張率は 0.03%を超えるものの，養生期間の進行とともに長さ変化は徐々に収束しつつある傾向にあり，実用上は将来的にも ASR の問題はないと考えられる結果となった。

なお，再生骨材に付着するセメントペースト量やアルカリ含有量が ASR の進行に及ぼす影響に関しては，一定の傾向を確認できず，よくわからなかった。今回の実験の範囲では，再生骨材に付着するセメントペースト中のアルカリ含有量が ASR の進行に及ぼす影響は小さいと考えられる。再生骨材中の含有アルカリが膨張を助長する傾向は特に認められなかった。

(2) アルカリ供給の影響

飽和 NaCl 溶液浸漬法による再生粗骨材コンクリートの長さ変化率の測定結果を**図－４**に，再生細骨材コンクリートの長さ変化率の測定結果を**図－５**に示す。

試験開始から 10 週までの長さ変化率は，全体的に，むしろ収縮する傾向にあったが，12 週目からは膨張に転じる試験体が多くなり，外部からのアルカリ供給下では，このように反応性が穏やかな再生骨材を用いた場合でも ASR が進行することがわかった。

ASR による膨張が特に顕著であったのは，ASR による劣化の進行が認められた原コンクリートから製造した再生骨材を用いた調合 N5-C，N15-C および NS-C であった。これらについては 16 週において，膨張率は 0.1%を超えていた。また，残りの調合についても，まだ引き続き膨張する傾向が認められるため，このようなアルカリ供給のある環境下では，長期的な膨張率は 0.1%を上回るものと思われる。

なお，調合 NX5-C と NX15-C，調合 B5-C と B15-C について，それぞれの長さ変化率を比較すると，16 週の時点では，M クラスの中品質再生粗骨材を用いたコンクリートの方が，付着セメントペースト量が少なく，品質の高い H クラスの高品質再生粗骨材を用いたコンクリートより，膨張量は幾分大きくなっていた。調合 N5-C と N15-C の関係とは逆であり，異なる傾向である。

5. まとめ

比較的穏やかな反応性を有する骨材を使用したコンクリートから，加熱すりもみ法によって，一定の品質を有する再生骨材を製造し，再生骨材コンクリートを練り混ぜ，その諸性状について調査した。今回の実験の範囲で得られた主な試験結果は以下のとおりである。

(1) 軽微な ASR が生じているコンクリートから製造した再生骨材を用いた場合でも，問題となるフレッシュ性状や強度特性の低下は認められなかった。

(2) 練混ぜ時にアルカリを添加して行った湿気槽養生法では，添加アルカリ量が Na_2Oeq=2.4kg/m^3 までの範囲では，実用上問題となるような ASR による劣化は生じなかった。

(3) 外部からアルカリが供給される飽和 NaCl 溶液浸漬法では，ASR が生じている原コンクリートから製造した再生骨材を用いたコンクリートで ASR の進行が顕著となった。なお，その他の調合についても最終的には膨張率は 0.1%を超える可能性は高いと考えられる。

建築構造物の場合，土木構造物と異なり，外部からのアルカリの供給について考えなくてもよいケースがほとんどであり，アルカリ総量による ASR 抑制対策が可能と考えられることから，再生骨材中の含有アルカリの影響については，さらに詳細な検討が必要と考えられる。

参考文献

1) 黒田泰弘：反応性骨材を用いたコンクリートからの高品質再生骨材の製造，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1459-1464，2007.07
2) 古賀康男ほか：原子力発電所解体コンクリートからの骨材の分離技術，放射性廃棄物研究 16，No.2，pp.17-25，1996
3) 日本工業標準調査会:附属書C 再生骨材コンクリートMのアルカリシリカ反応抑制対策の方法，JIS A 5022（再生骨材Mを用いたコンクリート），pp.23-28, 2007.03
4) 黒田泰弘ほか：高品質再生骨材を使用したコンクリートの基本性状，コンクリート工学年次論文集,Vol.22, No.2, pp.1105-1110, 2000.06
5) 長瀧重義ほか：建設材料第 76 委員会　ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発（平成 8 年度～平成 12 年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業成果報告書），pp/67-92，2001.04