

論文 反応性を有する再生粗骨材を用いたコンクリートの ASR 特性と改質再生骨材による抑制効果の検討

松田 信広^{*1}・Abdullahi Abdulkareem Abdulkadeer^{*2}・伊代田 岳史^{*3}

要旨：再生骨材コンクリートの普及に向けて、低品質再生骨材の利用促進が望まれる。本研究では、反応性を有する原骨材を用いて再生粗骨材 L および H を作製し、その再生粗骨材を用いたコンクリートの ASR 特性を確認した。また、再生粗骨材 L については強制炭酸化による改質を行い、改質再生骨材による ASR 抑制効果について検討を行った。その結果、反応性の高い原骨材を用いた場合、NaOH の添加によって再生骨材コンクリートは膨張し、NaOH の添加のないものは膨張しなかった。さらに、NaOH の添加があるものは再生粗骨材 L よりも H の方が膨張量は大きくなった。また、改質再生骨材は ASR に対して高い抑制効果を示した。

キーワード：低品質再生骨材、再生骨材コンクリート、改質、炭酸化、ASR

1. はじめに

再生骨材コンクリートの普及に向けて、副産微粉末の発生量が少なく、エネルギーやコストをあまりかけずに製造することができる低品質再生骨材の利用促進が望まれる。再生骨材コンクリートを構造部材に適用する場合、アルカリシリカ反応（以下、ASR）に関する検討は非常に重要である。特に解体コンクリート塊の中には ASR 抑制対策前のもも含まれていることから、原骨材の反応性が不明確である。更に、一般的に低品質再生骨材は、不特定の解体現場から発生する解体コンクリート塊を用いること、また、骨材に付着または混入しているモルタル部分（以下、混入モルタル）の影響から再生骨材中のアルカリ量が不明確であること等から特に留意する必要がある。これまでに再生骨材コンクリートの ASR に関しては多くの研究が報告^{例えば 1), 2)}されている。しかし、その多くは構造部材への適用を主体とする中・高品質再生骨材に関するものであり、主な適用範囲が非構造部材とする低品質再生骨材に関する研究についてはそれほど多くはなく、十分な知見が得られていないと考える。2018 年に改正された JIS A 5022（再生骨材コンクリート M）においては、再生骨材 L を普通骨材と混合使用し、一定の条件を満たすことで再生骨材コンクリート M として扱え、地下構造物や杭等の適用範囲は限定されているものの構造部材に適用することができるようになった。将来的に低品質再生骨材の利用促進を目指す上で、ASR に関する知見を深めることは非常に重要であると考えられる。

一方、これまでに筆者らは低品質再生骨材の改質を目的に、炭酸化による改質技術を提案^{3), 4)}してきた。この技術はコンクリートの炭酸化メカニズムに着目し、再生骨材に二酸化炭素を吹き付けることで再生骨材中の混入

モルタルを炭酸化させ、再生骨材自体の改質を図るものである。この技術によって改質させた再生骨材（以下、改質再生骨材）は、コンクリートの強度、長さ変化率、凍結融解抵抗性、耐久性を改善させることが可能であるが、ASR に関しては検討を行っていない。

そこで本研究では、反応性を有する粗骨材を用いて原コンクリートを作製し、ASR を生じさせ、その ASR を起こした原コンクリートから再生粗骨材 L および H を作製した。そして、その再生粗骨材を用いてコンクリートを作製し、ASR 特性を確認した。また、再生粗骨材 L については、強制炭酸化による改質を行い、改質再生骨材による ASR 抑制効果について検討を行った。

2. 再生粗骨材の製造

2.1 原コンクリート試験体の作製

(1) 原骨材の性質と ASR 試験結果

再生粗骨材を作製するため、原コンクリートとなる φ100×200mm の円柱試験体（以下、原コンクリート試験体）を作製した。使用した骨材の種類および物性を表-1 に示す。各粗骨材の岩種については、OG は硬質砂岩砕石、KG は安山岩砕石、SG は砂利である。使用した骨材の ASR 特性は、化学法（JIS A 1145）およびモルタルバー法（JIS A 1146）、促進モルタルバー法（ASTM C 1260）において確認した。なお、細骨材は化学法のみ実施した。化学法試験結果を表-2 に示す。OS、OG、SG は「無害」であり、KG は「無害でない」の判定であった。つぎに、モルタルバー法試験結果を図-1 に示す。全ての粗骨材において材齢 26 週で 0.1% を下回り「無害」の判定であった。ただし、KG については材齢 13 週以降では膨張量が増加しており、材齢 26 週以降もさらに膨張量は増加し

*1 (株) 東京テクノ 工場長 (正会員)

*2 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 修士課程

*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 使用した骨材の種類および物性

記号	種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
OS	細骨材	2.55	2.18	2.82
OG	粗骨材	2.63	0.89	6.62
KG		2.72	1.72	6.41
SG		2.60	1.18	7.41

表-2 化学法 (JIS A 1145) 試験結果

記号	Sc (mol/L)	Rc (mol/L)	判定
OS	28	84	無害
OG	40	78	無害
KG	388	94	無害でない
SG	73	107	無害

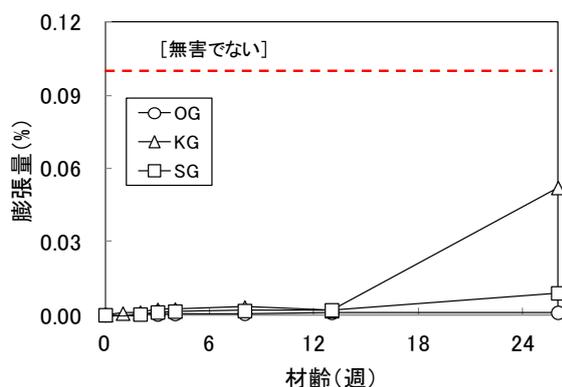


図-1 モルタルバー法 (JIS A 1146) 試験結果

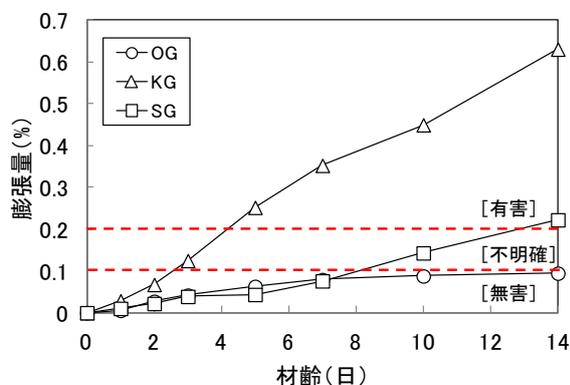


図-2 促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) 試験結果

ているものと推測される。促進モルタルバー法試験結果を図-2に示す。KGおよびSGは「有害」と判定され、OGは「無害」であった。KGの膨張量は、材齢14日で0.2%を大きく上回り反応性が高いことがわかる。SGは材齢5日あたりから徐々に膨張量が大きくなり、材齢14日で0.2%を超えたことから、低～中程度の反応性を有する骨材といえる。以上の結果から、KGおよびSGは反応性骨材であり、OGは無害骨材であると判断した。

(2) 原コンクリートの性質とASR特性

表-1に示す骨材を使用して3種類の原コンクリート試験体を作製した。原コンクリートの配合を表-3に示

表-3 原コンクリートの配合

記号	粗骨材種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	S	G
OC	OG	50	330	165	823	981
KC	KG					1021
SC	SG					962

表-4 原コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)
OC	11.0	4.7	25	29.4
KC	6.5	4.3	24	28.7
SC	16.0	4.1	23	27.9

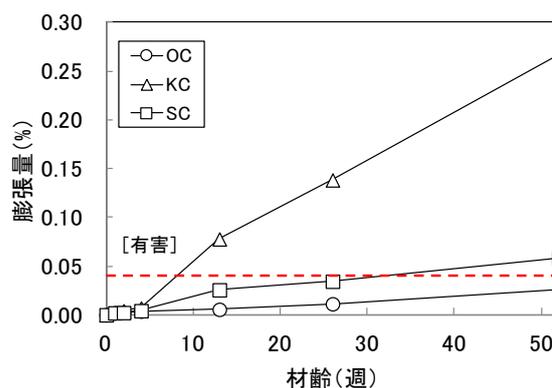


図-3 RILEM AAR-3 試験結果

す。セメントは Na₂O 等量が 0.57%の普通ポルトランドセメントを使用した。また、ASRの発生を促進させる目的で、コンクリート中のアルカリ量が 7.0kg/m³になるよう練り混ぜ時に NaOH を添加した。当初、ASR 促進のため更に多くの NaOH を添加することを考えたが、既往の文献⁵⁾では、高アルカリセメントを用いるだけで相当の強度低下やセメント硬化体組織の細孔径を増大させ多孔質化をもたらすことが報告されている。実状の受け入れている原コンクリートの性状を考慮するとこの値が限度と考えた。原コンクリートのフレッシュ性状と材齢 28 日における圧縮強度 (標準養生) を表-4 に示す。原コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度は、スランブは若干ばらついているがそれぞれ大きな差はみられていない。ただし、圧縮強度については若干低いものと感じられ、NaOH を添加した影響がみられる。ついで、原コンクリートの ASR 特性として RILEM AAR-3 (38°Cコンクリートプリズム試験) 試験を行った。RILEM AAR-3 試験結果を図-3に示す。RILEM AAR-3 の判定基準は、材齢 52 週で膨張量が 0.04%を超えるものを「有害」と判定するが、KCにおいては材齢 10 週あたりから膨張量が増大し、52 週では 0.04%を大きく上回る結果となった。なお、14 週の時点でひび割れを確認した。SCの膨張量は、材齢 10 週を超えたあたりから徐々に増大し、52 週で若干 0.04%を超える結果となった。一方、OCは「無害」

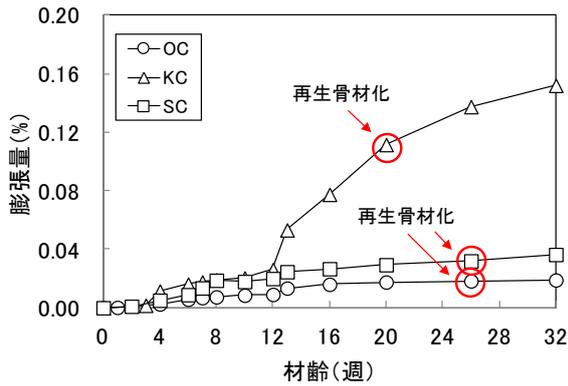


図-4 モニタリング試験体の膨張量

と判定された。これらの結果は、原骨材の促進モルタルバー法試験による ASR 特性と同様の傾向を示している。

原コンクリート試験体については、ASR をさらに促進させるため 1~3 週間屋外環境下で保存し、その後、40℃ の水中養生を行った。原コンクリート試験体の膨張量の確認については、原コンクリート試験体作製時に 100×100×400mm の角柱試験体を作製（以下、モニタリング試験体）し、そのモニタリング試験体の膨張量を観察しながら再生骨材化のタイミングを決定した。モニタリング試験体の膨張挙動は RILEM AAR-3 試験による膨張挙動と比較して反応が遅かった。これは、モニタリング試験体は、原コンクリート試験体と同一条件下で養生を行っているため、40℃ の水中養生を行うまでの期間が空いたことが要因であると考えられる。しかし、KC の膨張量は材齢 13 週から急激に増大しており、原骨材および原コンクリートの膨張挙動と同様の傾向を示している。また、材齢 20 週では試験体にひび割れを確認している。一方、SC においては、若干膨張量が小さいが、RILEM AAR-3 試験による膨張挙動と大きな差はみられなかった。原コンクリート試験体の再生骨材化は、モニタリング試験体の材齢で KC はおおそ 20 週、OC と SC は 26 週で行った。

2.2 再生粗骨材の製造

OC, KC, SC のそれぞれの原コンクリート試験体から再生粗骨材 L および H, また、改質再生骨材を製造した。なお、KC においてはこの時点で ASR による膨張とひび割れを確認している。再生粗骨材 L は破碎処理（ジョークラッシャ・インパクトクラッシャ）のみで作製した。再生粗骨材 H は、再生粗骨材 L からさらに磨砕処理（ボールミル）を行い作製した。改質再生骨材は、再生粗骨材 L を強制炭酸化したものとした。強制炭酸化の条件はこれまでの検討³⁾と同様に、促進中性化装置において温度 20℃、湿度 60% の条件下で期間を 1 週間とした。また、作製した再生粗骨材は全て水洗いを行い、微粒分を取り

表-5 再生粗骨材の概要

骨材名称	原コンクリート	原骨材種類	改質有無	粗粒率
OL	OC	OG	なし	6.86
OLC			あり	—
OH			なし	6.80
KL	KC	KG	なし	6.78
KLC			あり	—
KH			なし	6.78
SL	SC	SG	なし	6.76
SLC			あり	—
SH			なし	7.01

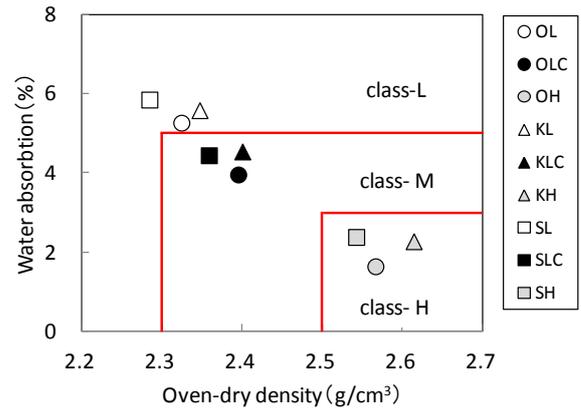


図-5 再生粗骨材の密度・吸水率

除いた。再生粗骨材の概要を表-5 に示す。SH の粗粒率は他のものと比較して若干大きいですが、原骨材の特徴が現れたものと考えられる。再生粗骨材の密度・吸水率を図-5 に示す。改質再生骨材はすべての種類で密度・吸水率は改善され、再生粗骨材 M の品質までクラスアップしている。原コンクリート試験体の種類の比較では、吸水率は原骨材に OG を用いたものが最も小さくなり、絶乾密度は KG を用いたものが最も大きかった。これは原骨材の特徴が表れている。各品質クラスにおけるそれぞれの混入モルタルは、原コンクリート試験体の配合が同一であり強度に大きな差がないこと、それぞれが同じ製造方法であることから量、質ともに大きな差はないと考えている。原骨材に KG を使ったもののみではあるが、再生粗骨材中の全アルカリ量を測定した（以下、実測値）。測定方法は、JIS A 5022（再生骨材コンクリート M）附属書 C（以下、M 規格）の再生粗骨材中のアルカリ含有量測定方法に準拠した。また、各再生粗骨材の付着ペースト量から推定される換算アルカリ量（以下、換算値）についても算出し、実測値と比較した。算出方法は、各再生粗骨材の付着ペースト量に単位ペースト量あたりのアルカリ量を乗じた値とした。再生粗骨材中の全アルカリ量を図-6 に示す。なお、付着ペースト量は測定に際し得られたものである。KL および KLC の全アルカリ量はほぼ同程度であり、M 規格に示されている再生粗骨材 M お

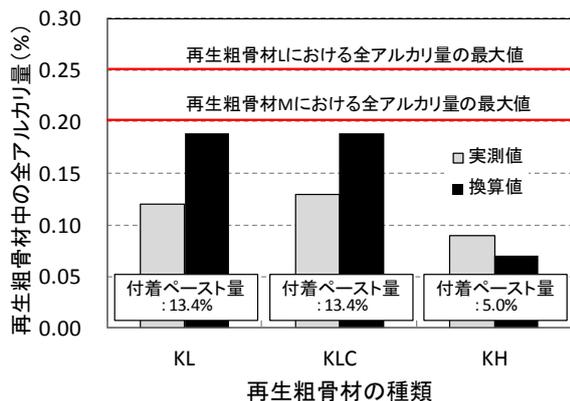


図-6 再生粗骨材中の全アルカリ量

よびLにおける全アルカリ量の最大値を下回る結果であった。しかし、何れも換算値を下回る結果となった。これは、水中養生を含めた原コンクリート試験体の保存状況や再生粗骨材を水洗いしたこと等によって、試験体もしくは混入モルタル中のアルカリが溶脱した可能性が考えられる。原コンクリートはNaOHの添加によって若干強度が低下しており、セメント硬化体組織の細孔径を増大させたこと⁵⁾で溶脱し易い状況にあったためと考えられる。一方、KHの全アルカリ量は最も小さいものの、KLおよびKLCと比較して付着ペースト量が小さいが値は大きい。また、換算値と比較して実測値の方が大きくなり、KLおよびKLCの傾向と異なる結果であった。KHの原コンクリートはKLおよびKLCと同一であり、アルカリが溶脱している可能性がある。また、骨材表面に付着しているアルカリは洗い流されているとすると、原骨材自体がアルカリ分を内在した可能性が考えられる。ただし、これらの解明には更に検討を重ねる必要がある。いずれにせよ、本検討の範囲では再生粗骨材LとHでは、骨材の全アルカリ量に大きな差は確認されなかった。

3. 再生骨材コンクリートのASR特性

3.1 実験概要

表-5に示す再生粗骨材を用いてコンクリートを作製しASR特性を確認した。再生粗骨材以外の使用材料については、原コンクリート試験体作製時と同一のものを使用した。再生骨材コンクリートの配合は、W/C50%、s/a46%、単位水量165kg/m³とした。また、ASR促進を目的として、再生骨材コンクリート中の総アルカリ量がセメントからのアルカリ量を含めて7kg/m³になるようNaOHを添加したものと、NaOHを添加しないものの2種類をそれぞれ作製した。なお、NaOHを添加したものの総アルカリ量の計算は、原骨材にOGおよびSGを用いた再生粗骨材の全アルカリ量の測定を行っていないことから、骨材からのアルカリ量は計算に含まれていない。

表-6 再生骨材コンクリートの概要

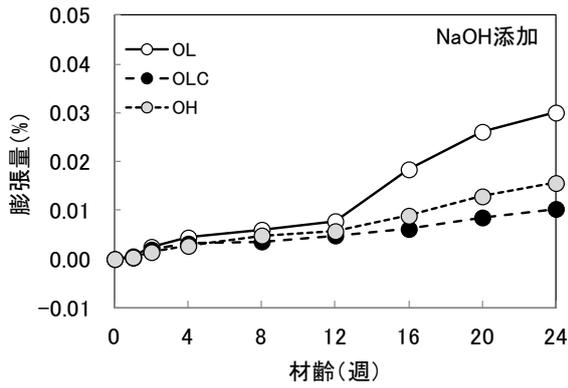
粗骨材種類	原コンクリート	原骨材種類	圧縮強度 (N/mm ²)	
			NaOH 無	NaOH 添加
OL	OC	OG	37.1	24.2
OLC			38.5	27.5
OH			39.5	29.0
KL	KC	KG	39.3	25.5
KLC			40.3	30.7
KH			40.1	27.3
SL			35.8	24.5
SLC	SC	SG	38.5	26.7
SH			39.9	27.8

再生骨材コンクリートのASR特性は、100×100×400mmの角柱試験体を作製し、脱型後に温度20℃、湿度65%の環境下で1週間養生し、その後、40℃の水中養生を行ったもので膨張量を測定し確認した。なお、膨張量の測定は脱型後の材齢1日を初期値とした。再生骨材コンクリートの概要を表-6に示す。なお、圧縮強度は上記環境下における材齢28日の結果である。原骨材種類で比較するとSGを用いたもので圧縮強度は小さくなったが、これは原骨材の岩種が砂利であることが影響している。また、再生粗骨材の品質で比較すると、Hクラスで圧縮強度が大きい傾向を示していることから、混入モルタル量が影響している。更に、改質再生骨材はこれまでの検討⁴⁾と同様に、炭酸化による改質によって圧縮強度が増加している。NaOHの添加の影響は、いずれも添加したもので圧縮強度が低下しており、既往の文献⁵⁾の示す通りNaOHの添加によって強度低下を招いていると考える。

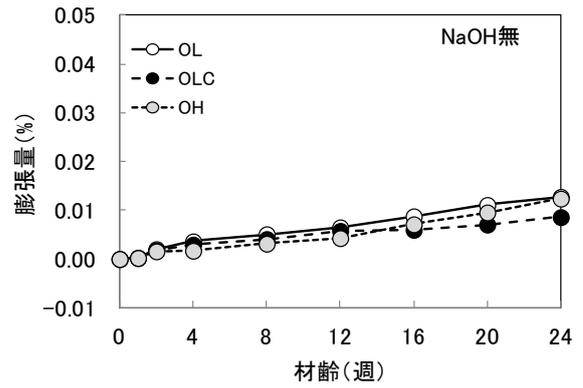
3.2 実験結果および考察

(1) 原骨材種類の影響

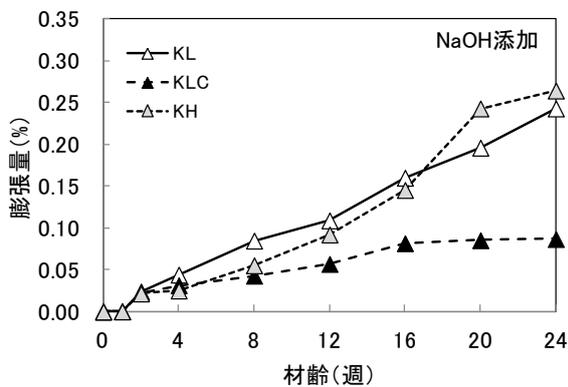
再生骨材コンクリートの膨張量を図-7に示す。原骨材の種類で比較すると、反応性のない原骨材OGを用いたものは、NaOHの添加の有無にかかわらずほとんど膨張していない。反応性のない原骨材から作製した再生粗骨材を用いた場合、再びASRが起きる危険性はないことがわかる。反応性の高いKGを用いたものは、NaOHを添加したもので膨張量が顕著に大きくなった。これは、原骨材や原コンクリートの膨張挙動と同様である。一方、モニタリング試験体の膨張は、図-4に示すとおり再生骨材化を行った材齢以降も継続している。以上のことから、再生粗骨材とした時点ではシリカは残存しており、再生骨材コンクリートにした場合、更にASRを起こしたと考えられる。なお、他のものとも比較しても膨張挙動は顕著に大きいことから、この図のみ縦軸の膨張量の最大値をかえている。一方で、SGを用いたものは、原骨材のASR特性として低～中程度の反応性を有する骨材であったが、OGと同様にほとんど膨張がみられない。しかし、再生骨材コンクリートの試験体は、水中養生を行っているもので膨張量を測定しており、試験体中から



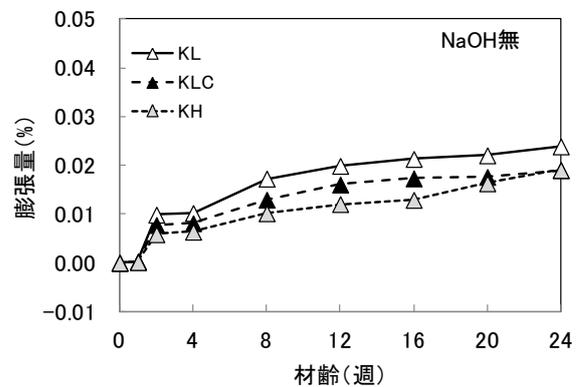
a) NaOH 添加・原骨材 OG



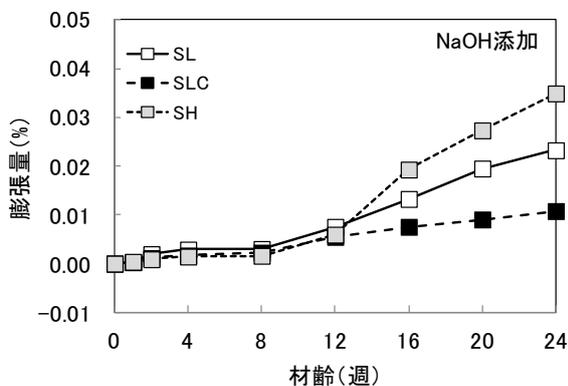
b) NaOH 無・原骨材 OG



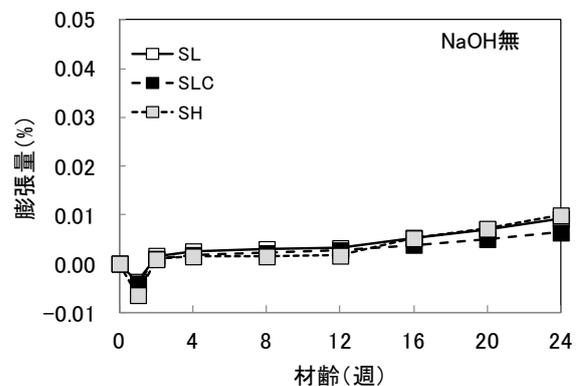
c) NaOH 添加・原骨材 KG



d) NaOH 無・原骨材 KG



e) NaOH 添加・原骨材 SG



f) NaOH 無・原骨材 SG

図-7 再生骨材コンクリートの膨張量

のアルカリ溶脱の影響が不明であることから、更に検討を重ねる必要がある。また、原骨材の ASR 特性から長期的に膨張量が増大していく可能性も考えられ、引き続き膨張挙動を観察していく必要がある。

(2) NaOH 添加の影響

反応性のない原骨材 OG を用いたものは、NaOH の添加の有無にかかわらずほとんど膨張していないものの、NaOH を添加したものは添加のないものと比較して膨張している。しかし、その差は僅かであり大きな影響はな

いものとする。反応性の高い KG を用いたものは、NaOH を添加したもので顕著に膨張しているが、NaOH を添加していないものはほとんど膨張がみられない。これは、KG を用いた NaOH を添加していない再生骨材コンクリートのアルカリ総量は 2.9kg/m^3 であったことから、ASR を招くアルカリ量に達していなかったことが考えられる。しかし、3.2 (1) にも述べたように、アルカリ溶脱の影響が不明であることから、更に検討を重ねる必要がある。一方、SG を用いたものについて、NaOH を添

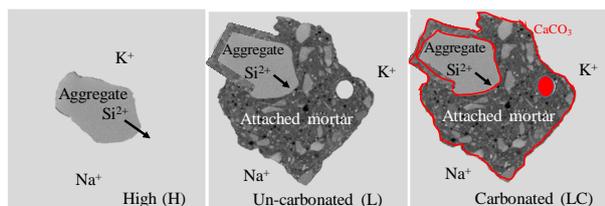


図-8 ASR 抑制メカニズムのイメージ

加したものは添加のないものと比較して膨張しているが、その差は僅かであり大きな影響はないと考える。

(3) 再生粗骨材の品質の影響

L と H を比較すると、反応性骨材を用いた NaOH の添加があるもので H の方が膨張量は大きくなっている。これは、混入モルタルの存在が影響していると考えられる。鳥居ら⁶⁾は、再生粗骨材 L および H を使用したモルタルバー法試験において L の膨張挙動が小さかった理由として、添加アルカリが付着モルタル中の CSH や炭酸カルシウムに消費され、ASR に携わるアルカリが少なくなったことが原因であると指摘している。また、再生粗骨材 L の化学法試験結果において「無害」と判定された理由として、付着モルタル量が増大すると溶解シリカ量が減少する傾向にあると報告している。この様に、新たに供給されるアルカリが多い場合は、混入モルタルの存在が ASR の抑制に寄与する可能性があると考えられる。一方で、反応性の高い KG を用いた NaOH の添加がないものでは、L の方が僅かに膨張している。黒田の研究⁷⁾では、ASR に対する再生粗骨材の品質の影響について、新たにもたらされるアルカリ量が少ない場合、再生後の ASR 進行に寄与するのは付着セメントペースト中にまだ消費されずに残存しているアルカリであると指摘している。以上のことから、混入モルタルの存在が ASR に及ぼす影響については、再生骨材コンクリートからのアルカリの供給条件によって左右されると考える。

(4) 改質再生骨材の抑制効果

NaOH 添加の結果から、すべての種類で改質再生骨材を用いることで膨張量が大きく抑制されている。特に原骨材に反応性の高い KG を用いたものは非常に顕著であり、ASR に対して高い抑制効果を示した。この ASR 抑制メカニズムのイメージを図-8 に示す。改質再生骨材は混入モルタルの存在に加え、強制炭酸化によって混入モルタルの緻密化を図っていることから、侵入してくるアルカリの浸透を抑制し、さらに原骨材中のシリカの溶出も抑制することで ASR を抑制していると考えられる。ただし、今回の実験では、原コンクリートの ASR がある程度進行したもので検討を行っている。今後は、ASR が進行する前の原コンクリートで検討を重ねるとともに、改質再生骨材による抑制メカニズムの検証についても確認する必要があると考える。

4. まとめ

本研究の範囲において以下の知見を得た。

- (1) 原骨材における促進モルタルバー法と原コンクリートにおける RILEM AAR-3 による ASR 特性は同様の傾向を示していた。
- (2) 再生粗骨材 L および改質再生骨材の全アルカリ量は、JIS A 5022 附属書 C に示されている最大値を下回る結果であった。また、再生粗骨材 L と H では全アルカリ量に大きな差はなかった。
- (3) 反応性の高い原骨材から作製した再生粗骨材を用いた場合、再び ASR が起きる危険性はないことがわかった。反応性の高い KG を用いたものは、NaOH を添加したもので膨張量が顕著に大きくなった。これは、再生粗骨材とした時点ではシリカは残存しており、再生骨材コンクリートにした場合、再び ASR を起こしたと考えられる。
- (4) L と H を比較すると、反応性骨材を用いた NaOH の添加があるもので H の方が膨張量は大きくなった。これは、混入モルタルの存在が影響し、再生骨材コンクリートからのアルカリの供給条件に左右される。
- (5) 改質再生骨材を用いることで膨張量が大きく抑制され、原骨材に反応性の高い KG を用いたものは非常に顕著であり、ASR に対し高い抑制効果を示した。

参考文献

- 1) 岩月栄治, 森野奎二: 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol25, No1, pp.1229-1234, 2003
- 2) 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集, Vol29, No2, pp.421-426, 2007
- 3) 松田信広, 亀山敬宏, 松田美奈, 伊代田岳史: CO₂ ガスの強制吸着による低エネルギー型再生骨材製造方法の検討, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, pp.1732-1737, 2014
- 4) 松田信広, 鈴木創太, 伊代田岳史: 改質再生骨材を用いた骨材置換法でのコンクリートの強度および耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No1, pp.1791-1796, 2016.7
- 5) オーム社: コンクリート実務便覧, 2004
- 6) 鳥居和之, 杉山彰徳, 酒井賢太: 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性の評価と抑制対策に関する研究, 土木学会論文集 G, Vol.63, No4, pp.313-325, 2007.11
- 7) 黒田泰弘: 再生骨材のアルカリシリカ反応性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.31, No.1, pp.1765-1770, 2009