

論文 2, 3 の異なるアルカリ反応性骨材を用いたモルタルの細孔溶液の限界 OH⁻イオン濃度

鍵本 広之*¹・佐藤 道生*²・川村 満紀*³

要旨：細孔溶液中の水酸化アルカリ濃度に着目し、アルカリシリカ反応（以下、「ASR」）を開始させるために必要な最小限度の OH⁻イオン濃度を明らかにするための実験的検討を行なった。パイレックスガラスおよび2種類の天然の反応性骨材を用いて作成したモルタル供試体を温度 40℃、相対湿度 100%の湿気槽内で促進養生し、材齢毎の細孔溶液中の各種イオン濃度と供試体の膨張率を測定した。その結果、限界 OH⁻イオン濃度として従来から提案されている 250mmol/l 程度 という値は妥当であること、また、パイレックスガラスの限度値は 150mmol/l と低く、リサイクルを目的としてガラスカレットをコンクリート骨材の代替材料とする場合は注意を要することが判明した。

キーワード：アルカリシリカ反応、細孔溶液、供試体膨張率、反応ゲル、アルカリ濃度、ガラスリサイクル

1. はじめに

ASRは、反応性シリカ鉱物と水酸化アルカリとの間に生ずる化学反応¹⁾である。このことから、反応性骨材を使用しないこと、コンクリート中のアルカリ総量を 3.0kg/m³以下とすること、などの防止対策²⁾が指示されている。

ASRは、水酸化アルカリを含む液体成分である細孔溶液を介して進行することから、この細孔溶液の組成に着目して現象を理解することは重要である。

コンクリート中の液相に関する研究は、凝結初期におけるセメントの水和反応による液相の組成変化を把握しようとする試みから始まったが、ASRを対象としても様々な研究^{3),4),5)}が行われている。

筆者らは、環境条件がASR劣化に与える影響などを評価するために実施した研究⁶⁾において、実在の構造物から採取したコンクリートコア中の細孔溶液を分析し、ASRの劣化程度の評価を行い、ASRで劣化した構造物の将来の劣化進行予測の可能性を示した。

本研究では、上記の劣化進行予測において重要となる OH⁻イオン濃度（以下、[OH⁻]）の限度値、すなわちASRを開始させるのに必要な [OH⁻] の

限度値について実験的検討を行った。

2. アルカリ度が異なるモルタル供試体の細孔溶液濃度と膨張率の経時変化

温度 40℃、相対湿度 100%の湿気槽内における促進試験を行い、供試体中の細孔溶液濃度と膨張率の経時変化を追跡した。

2. 1 使用材料

使用骨材は、反応性骨材としてパイレックスガラス、反応性砕砂（輝石安山岩）、反応性川砂の3種を使用し、非反応性骨材として標準砂を使用した。

表-1 セメントの組成

		普通ポルトランドセメント	白色セメント
化学分析値 (%)	SiO ₂	20.90	23.13
	Al ₂ O ₃	4.96	4.42
	Fe ₂ O ₃	2.91	0.19
	CaO	64.48	65.79
	MgO	1.26	0.51
	SO ₃	2.00	2.78
	Na ₂ O	0.48	0.36
	K ₂ O	0.36	0.10
等価 Na ₂ O 量		0.61%	0.35%
I _{gloss}		1.73	2.63

*1 電源開発（株）建設部エンジニアリング室（正会員）

*2 電源開発（株）茅ヶ崎研究センター 建設材料グループ（正会員）

*3 金沢大学 工学部 土木建設工学科 教授（正会員）

表-2 モルタル配合と供試体

配	配合比 (質量) セメント : 砂 : 水 = 1 : 2.25 : 0.6
	アルカリ濃度の調整 ①高濃度試料: [OH ⁻] = 800 (mmol/l)相当 普通ポルトランドセメント + 水酸化ナトリウム (練混ぜ水濃度で約 750mmol/l) ②中濃度試料: [OH ⁻] = 500 (mmol/l)相当 同上 (練混ぜ水濃度で約 250mmol/l) ③低濃度試料: [OH ⁻] = 200 (mmol/l)相当 白色セメント
合	
供試体	細孔溶液抽出用: φ48×100 mm (円柱供試体) 膨張率測定用: 40×40×160 mm (角柱供試体)

また、モルタル中のアルカリ量調整のために特級試薬の水酸化ナトリウムを使用した。

使用したセメントの組成を表-1に示す。

2. 2 配合および供試体

モルタルの配合は JIS A 5308 附属書 8 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(「モルタルバー法」)に準じて決定したが、水セメント比は 60%とした。

細孔溶液のアルカリ濃度の調整は、標準砂を用いて事前に実施した水酸化ナトリウム添加モルタルの材齢 7 日における細孔溶液中の [OH⁻] の測定結果から、その値がほぼ 800, 500, 200mmol/l になるように水酸化ナトリウム添加量を推定し添加量を決定した。

その結果、目標 [OH⁻] が 800, 500mmol/l のモルタルでは普通ポルトランドセメントに水酸化ナトリウムを添加し、200mmol/l のモルタルでは白色セメントのみを使用した。また、ここではそれぞれのモルタルを高・中・低アルカリ濃度試料と呼ぶ。全ての材料の調整、および供試体の作製は上記の「モルタルバー法」に準じて行い、供試体作製後 1 日で脱型し、ただちに試験を開始した。

作製した供試体は、細孔溶液抽出用として φ48×100mm の円柱供試体と、膨張率測定用として 40×40×160mm の角柱供試体である(表-2)。

2. 3 実験方法

供試体作製後 1 日で脱型し、円柱供試体を用いて細孔溶液の抽出および分析を行った。また角柱供試体を用いて基準長を測定し初期値とした。

その後、円柱供試体と角柱供試体を温度 40℃、相対湿度 100%の湿気槽内で促進養生を開始した。なお、高アルカリ濃度試料については、温度 20℃、相

表-3 実験条件

使用材料	反応性骨材 パイレックスガラス、反応性安山岩砕砂、反応性川砂 非反応性骨材 標準砂
濃度条件	アルカリ濃度条件 高 (800mmol/l 相当)、中 (500mmol/l 相当) 低 (200mmol/l 相当) ※非反応性骨材は高濃度のみである。
養生条件	温度 40℃、相対湿度 95%以上 高濃度、中濃度、低濃度試料 温度 20℃、相対湿度 95%以上 高濃度試料
実験材齢	細孔溶液抽出試験 1日, 7日, 14日, 28日, 56日, 90日, 180日, 365日 モルタルバー膨張率測定 1日, 14日, 28日, 56日, 90日, 180日, 365日

※ パイレックスガラスのみ 12ヶ月間

対湿度 100%の湿気槽内での養生も行った。

実験期間は 6ヶ月であり (一部 12ヶ月)、期間中材齢 7日, 14日, 28日, 56日, 90日, 180日, 365日において円柱供試体各 2本を用いて細孔溶液の抽出および分析を実施し、それと同時に供試体の膨張量の測定を行い材齢毎の膨張率を計算した。

使用した材料、条件、および実験実施材齢を表-3にまとめた。

3. 実験結果と考察

表-4から表-7には、パイレックスガラス、標準砂、反応性安山岩砕砂、および、反応性川砂を用いて作製した供試体の細孔溶液中の陰イオン (OH⁻) および陽イオン (Na⁺, K⁺, Ca²⁺) の濃度を示しているが、それぞれの陽イオンの合計および陰イオンの差は 10%程度であり、分析精度は十分であったと考えられる。

3. 1 標準砂およびパイレックスガラスモルタル

図-1は、パイレックスガラスモルタルの [OH⁻] と供試体膨張率の経時変化を示すが、高・中・低アルカリ濃度モルタル試料の脱型時の [OH⁻] は、それぞれ 788, 463, 152mmol/l であった。

40℃湿気槽で促進養生を実施した場合は、高・中アルカリ濃度モルタル試料の細孔溶液中の [OH⁻] は急激に減少し、材齢 90日時点で定常状態に達し、その後材齢 365日に至るまで 100mmol/l 程度で安定

表-4 細孔溶液分析結果 (パイレックスガラス)

材齢 (日)	P H	イオン濃度 (mmol/l)			Σ+	Σ-	膨張率 (%)
		Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	OH ⁻			
高濃度試料 (温度40℃、湿度100%)							
1	13.8	681.6	1.8	787.5	685.2	787.5	0.00
14	13.8	515.5	1.7	523.0	519.0	523.0	0.26
28	13.7	360.2	1.9	371.5	364.0	371.5	0.48
90	13.0	137.7	0.9	153.0	139.6	153.0	0.53
180	13.0	151.2	1.6	150.0	154.5	150.0	0.55
365	13.0	136.3	0.3	104.0	136.8	104.0	0.57
中濃度試料 (温度40℃、湿度100%)							
1	13.5	516.0	3.0	463.0	522.1	463.0	0.00
14	13.5	306.1	4.1	356.0	314.4	356.0	0.16
28	13.4	272.5	1.4	290.5	275.3	290.5	0.33
90	13.1	142.9	4.9	156.5	152.8	156.5	0.43
180	13.0	125.5	1.4	116.0	128.2	116.0	0.44
365	13.2	121.3	3.6	98.0	128.5	98.0	0.43
低濃度試料 (温度40℃、湿度100%)							
1	13.3	139.4	5.9	151.5	151.3	151.5	0.00
14	13.4	207.9	2.8	211.5	213.5	211.5	0.01
28	13.4	185.0	2.3	187.5	189.6	187.5	0.07
90	13.0	111.1	8.6	139.0	128.4	139.0	0.22
180	13.0	111.2	1.5	108.0	114.2	108.0	0.23
365	13.2	109.1	0.0	93.3	109.2	93.3	0.23
高濃度試料 (温度20℃、湿度100%)							
1	13.8	656.5	2.5	771.0	661.5	787.5	0.00
14	13.9	708.0	2.9	785.0	713.8	785.0	0.04
28	13.9	705.9	1.4	750.0	708.7	750.0	0.10
90	13.9	627.5	1.2	672.5	629.9	672.5	0.36
180	13.5	537.0	1.9	439.5	540.8	439.5	0.62
365	13.5	409.3	0.1	305.0	409.5	305.0	0.98

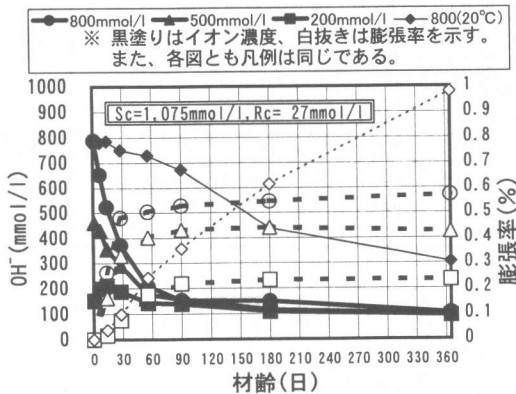


図-1 細孔溶液濃度と供試体膨張率 (パイレックスガラス)

した。また、供試体は実験開始後急激に膨張し、材齢 90 日時点では供試体の伸びはほぼ定常状態に達し、その後材齢 365 日に至るまでほとんど変化は見られなかった。

次に低アルカリ濃度試料においては、[OH⁻]は材齢 14 日まで増加を続け、その後 A S R の進行によるアルカリの消費と、これに起因する供試体の膨張が生じるが、高・中アルカリ濃度試料と同様に、材齢 90 日では収束にいたっている。

このように、低アルカリ濃度試料の挙動が高・中アルカリ濃度試料と異なるのは、初期の[OH⁻]が 152mmol/l と低かったことが原因と思われる。すなわち、脱型後材齢を経るにつれてセメントの硬化反応に伴う自由水の減少と、パイレックスガラス中に存在するアルカリの溶出などが原因で、細孔溶液中

の[OH⁻]は増加したものと考えられるが、材齢 14 日において 212mmol/l に達し、その後 A S R の進行による OH⁻ イオンの消費が卓越し濃度は減少したものと考えられる。また材齢 365 日での供試体膨張率が 0.23% にも達するという事は、パイレックスガラスのようなガラス材料を用いる場合には、低アルカリの白色セメントを用いるような場合でさえ、A S R による有害な膨張が生じる可能性があることを示している。

また、いずれの試料においても、材齢 90 日前後で A S R はほぼ終了していると推定され、そのときの細孔溶液中の[OH⁻]はいずれも 100 mmol/l 程度に収束していることがわかる。このときの高・中・低アルカリ濃度試料の供試体の膨張率の収束値は、それぞれ 0.57%、0.43%、0.23% であり、初期の[OH⁻]の差が供試体膨張率にあらわれているものと考えられる。

20℃の湿気槽養生を行った供試体 (高アルカリ濃度試料; 図中細線) については、材齢初期より A S R による供試体膨張が生じているが、細孔溶液中の[OH⁻]はパイレックスガラスからのアルカリの溶出や、セメントの硬化反応の進行に伴う水の減少により、材齢 14 日までにはほとんど変化なく、その後 A S R による消費によって減少している。このとき、材齢 365 日においても細孔溶液中の[OH⁻]は依然 305mmol/l と高いが、供試体膨張率は 40℃湿気槽養生における値を上回り 0.98% に達し、さらに膨張傾

表-5 細孔溶液分析結果 (標準砂)

材齢 (日)	P H	イオン濃度 (mmol/l)			Σ+	Σ-	膨張率 (%)
		Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	OH ⁻			
高濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	14.0	664.6	3.6	748.0	671.8	748.0	0.00
14	14.0	809.6	2.6	828.0	814.8	828.0	0.01
28	14.1	829.1	2.7	806.5	834.5	806.5	0.01
90	14.0	693.5	3.5	779.0	700.5	779.0	0.02
180	13.8	709.3	2.4	708.0	714.0	708.0	0.01
高濃度試料 (温度20°C、湿度100%)							
1	14.0	664.6	3.6	748.0	671.8	748.0	0.00
14	13.9	766.2	1.7	816.5	769.6	816.5	0.00
28	14.0	759.9	2.2	788.0	764.3	788.0	0.00
90	13.9	665.4	2.0	800.0	669.4	800.0	0.01
180	13.8	775.2	2.0	784.5	779.1	784.5	0.02

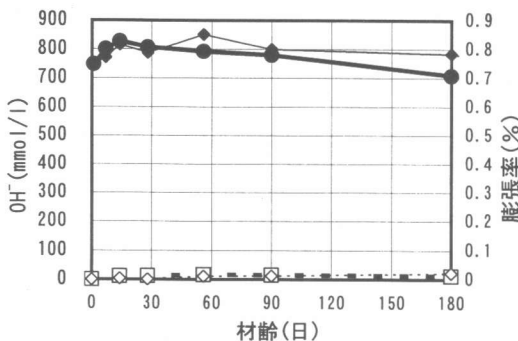


図-2 細孔溶液濃度と供試体膨張率 (40°C, 標準砂)

向にある。ASRによる[OH⁻]消費量が小さい(したがって、生成するゲルの量も少ない)にもかかわらず供試体膨張率が大きく長期的に継続するのは、低温養生において生成するASRゲルの粘性は高温時と比較して高く、発生する膨張圧も大きく、かつ長期に継続することが原因であるものと考えられる。

次に標準砂を用いた試料の[OH⁻]と供試体膨張率の経時変化を図-2に示す。いずれのケースにおいても材齢14日まで濃度増加が見られるが、これはセメントの硬化反応による水の減少が原因であると考えられる。

材齢180日で40°C養生のケースにおいて若干の濃度低下傾向が見られるが、[OH⁻]はほぼ一定の値を保ち、試験期間中供試体の膨張も見られない。

3. 2 反応性安山岩砕砂、及び反応性川砂モルタル

反応性安山岩砕砂、および反応性川砂を用いた試料の[OH⁻]と供試体膨張率の経時変化を図-3および図-4に示す。

表-6 細孔溶液分析結果 (反応性安山岩)

材齢 (日)	P H	イオン濃度 (mmol/l)			Σ+	Σ-	膨張率 (%)
		Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	OH ⁻			
高濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	14.0	435.0	2.1	538.0	439.3	538.0	0.00
14	13.9	366.2	1.5	456.0	369.2	456.0	0.13
28	14.0	344.8	1.1	387.5	347.0	387.5	0.31
90	13.5	255.3	0.3	277.0	255.9	277.0	0.58
180	13.2	241.6	1.2	256.0	244.0	256.0	0.63
中濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	13.5	151.7	4.7	209.5	161.0	209.5	0.00
14	13.5	209.1	4.3	228.0	217.7	228.0	0.03
28	13.6	251.2	3.8	251.0	258.9	251.0	0.03
90	13.3	208.0	2.1	201.0	212.2	201.0	0.03
180	13.1	196.1	2.7	200.0	201.6	200.0	0.02
低濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	13.0	45.7	12.2	84.5	70.0	84.5	0.00
14	13.2	76.6	6.8	99.0	90.2	99.0	0.00
28	13.2	82.2	6.4	99.5	95.1	99.5	0.02
90	13.2	91.9	3.6	115.0	99.1	115.0	0.01
180	13.0	106.8	2.7	114.0	112.2	114.0	0.01
高濃度試料 (温度20°C、湿度100%)							
1	14.0	435.0	2.1	538.0	439.3	538.0	0.00
14	13.8	396.4	2.6	499.5	401.6	499.5	0.00
28	14.1	462.5	2.6	540.0	467.7	540.0	0.00
90	13.8	394.0	1.4	536.0	396.8	536.0	0.03
180	13.6	443.7	2.3	505.0	448.2	505.0	0.11

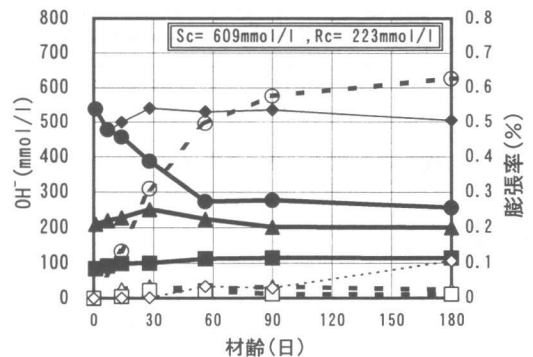


図-3 細孔溶液濃度と供試体膨張率 (反応性安山岩)

安山岩を用いたモルタル試料では、高・中・低アルカリ濃度試料の脱型時の[OH⁻]は、それぞれ538,210,85 mmol/lであり、当初目標としていた値よりかなり低い。これは、安山岩中の反応成分と水酸化アルカリとの反応が早いいため、脱型までの約1日間に、急激にOH⁻イオンが消費されたものと考えられる。

40°Cにおいては、高アルカリ濃度試料では、ASRの進行に伴い細孔溶液の[OH⁻]は急激に減少し、

表-7 細孔溶液分析結果 (反応性川砂)

材齢 (日)	P H	イオン濃度 (mmol/l)			Σ+	Σ-	膨張率 (%)
		Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	OH ⁻			
高濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	13.9	594.9	2.9	704.5	600.8	704.5	0.00
14	13.8	492.8	2.9	595.5	498.6	595.5	0.05
28	13.6	435.6	1.2	474.5	438.1	474.5	0.21
90	13.4	359.3	3.8	375.6	366.9	375.6	0.37
180	13.3	327.7	1.2	295.0	330.1	295.0	0.41
中濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	13.8	284.6	3.2	361.0	291.0	361.0	0.00
14	13.5	283.9	2.2	329.0	288.3	329.0	0.00
28	13.7	296.6	1.2	283.0	299.1	283.0	0.02
90	13.5	224.9	1.5	240.0	227.9	240.0	0.05
180	13.2	226.3	1.1	223.0	228.5	223.0	0.09
低濃度試料 (温度40°C、湿度100%)							
1	13.2	82.1	9.7	116.0	101.5	116.0	0.00
14	13.1	137.5	4.3	147.0	146.1	147.0	0.00
28	13.3	140.6	2.2	155.0	145.0	155.0	0.01
90	13.2	116.6	3.5	146.0	123.6	146.0	0.01
180	13.1	133.5	2.6	134.0	138.8	134.0	0.01
高濃度試料 (温度20°C、湿度100%)							
1	13.9	594.9	2.9	704.5	600.8	704.5	0.00
14	13.9	617.1	3.6	729.5	624.3	729.5	-0.02
28	13.8	630.2	1.2	691.0	632.6	691.0	-0.02
90	13.7	590.2	4.3	683.6	598.8	683.6	-0.01
180	13.7	521.3	1.3	585.0	523.9	585.0	0.05

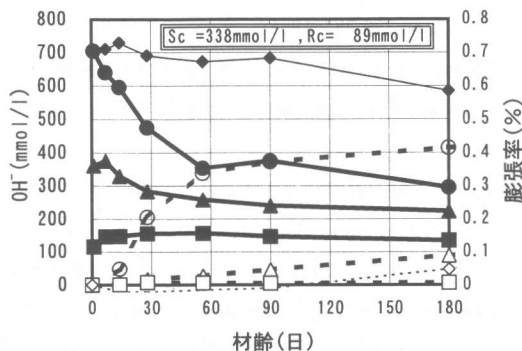


図-4 細孔溶液濃度と供試体膨張率 (反応性川砂)

供試体膨張率が増大した。また、材齢 56 日以降細孔溶液中の $[OH^-]$ は 250mmol/l 程度に収束し、供試体の終局膨張率は約 0.63%となっている。

中アルカリ濃度試料では、初期 $[OH^-]$ が 210mmol/l と低かったため、パイレックスガラスの低アルカリ濃度試料と同様の傾向を示し、材齢 28 日で 251mmol/l まで増加した後、材齢 180 日時点では 200mmol/l で安定している。しかし、供試体に膨張は認められない。

低アルカリ濃度試料では、初期 $[OH^-]$ が 85mmol/l

と非常に低かったため、材齢とともにアルカリ濃度は増加したが、材齢 180 日においても 114mmol/l 程度であり供試体の膨張は見られない。

反応性川砂を用いたモルタル試料も反応性安山岩砕砂と同様の傾向を示している(図-4)。特に、中アルカリ濃度試料では高アルカリ濃度試料と同様、脱型時の $[OH^-]$ が 361mmol/l から徐々に減少し、材齢 180 日では 220mmol/l 程度に収束し A S R は終了しているものと推定される。

また供試体は材齢初期から徐々に膨張し、材齢 180 日での膨張率が約 0.1%であることから、初期の $[OH^-]$ が 360mmol/l 程度でも有害な膨張を生ずる可能性があるものと考えられる。

高アルカリ濃度供試体では $[OH^-]$ は材齢 182 日においても未だ減少傾向が続き供試体も膨張を続けている。

3.3 細孔溶液の限界アルカリイオン濃度

A S R が生じるか否かは、細孔溶液中に溶解するシリカの量に依存する⁷⁾が、シリカの溶解には一種の触媒が必要であり、アルカリ度の高い水溶液では OH^- イオンがそのような触媒になる⁸⁾。

一般に、pH が上昇し 10 を越えると、シリカの溶解度は急激に増加するので、反応性骨材を含有するコンクリート中の細孔溶液の組成においても、A S R を開始させるために必要な最小限度の水酸化アルカリ濃度が存在するものと考えられる。

材齢 180 日までに A S R 膨張がほぼ終了した今回の実験結果から推測する限りにおいては、A S R を開始させるのに必要な最小限度の $[OH^-]$ は、骨材毎に次のようにまとめることができる。

パイレックスガラスにおいては、低アルカリ濃度試料の初期の $[OH^-]$ が 152mmol/l であっても、材齢 180 日の膨張率が 0.2% を越えている。

このことから、A S R を開始させるのに必要な最小限度の $[OH^-]$ は、パイレックスガラスの場合 150mmol/l より低いことがわかる。

またこの場合、白色セメントを用いて供試体を作製したが、リサイクルを目的としてガラスカレットをコンクリート骨材の代替材料としようとする場合は、低アルカリの代表とされる白色セメントを用い

る場合においても注意を要するといえる。

次に天然骨材を用いた場合、反応性安山岩では、初期 $[\text{OH}^-]$ が 210mmol/l (中アルカリ濃度試料) ではASRは発生することはない、有害な膨張は生じない。

また反応性川砂の場合には初期の $[\text{OH}^-]$ が 360mmol/l (中アルカリ濃度試料) であっても材齢 180 日における供試体膨張率はほぼ 0.1%であり、その後も膨張傾向にあることから判断して、有害な膨張が生じる $[\text{OH}^-]$ の下限値は 360mmol/l よりある程度低いと推定される。

これまで、ASRを開始させるのに必要な $[\text{OH}^-]$ の限度値は 250mmol/l⁹⁾程度であるという報告があるが、本研究で用いた天然骨材を対象とする実験結果から、この値はほぼ妥当な数値と考えられる。

しかし、本実験に用いた天然骨材は上記の2種類であり、今後更に多くのデータを収集し、検討を加える必要はある。

また、本研究で得られた知見の範囲内においては、有害な膨張を伴うASRを開始させるのに必要な $[\text{OH}^-]$ の限度値は、人工ガラスも含め反応性骨材によってかなり異なるとも言える。

4. まとめ

2,3 の反応性骨材を用いて作製したモルタル試料を温度 40℃、相対湿度 100%の湿気槽内で促進養生し、ASRを開始させるために必要な最小限度の水酸化アルカリ濃度について検討した。

本研究で得られた知見は以下のようにまとめることができる。

- ① 高アルカリ濃度試料では、材齢初期よりASRが進行し細孔溶液中のアルカリイオン濃度は減少したが、材齢 90 日以降一定値を示し、ASRは収束した。
- ② 低アルカリ濃度試料のアルカリイオン濃度は材齢初期では増加傾向を示し、ある材齢よりASRの進行により減少に転じたが、材齢 90 日以降一定値を示しASRは収束した。
- ③ ASRを開始させるために必要な最小限度の水酸化アルカリ濃度は骨材により異なるものと考

えられる。

- ④ パイレックスガラスの場合、低アルカリ量の白色セメントを用いても材齢 180 日の供試体膨張率は 0.2%を越えた。したがって、リサイクルを目的としてガラスカレットをコンクリート骨材の代替材料とする場合は注意を要する。
- ⑤ 天然骨材において、ASRを開始させる限界 $[\text{OH}^-]$ として提案されている 250mmol/l という値はほぼ妥当なようである。

参考文献

- 1)たとえば、川村満紀：アルカリ・シリカ骨材反応の機構、コンクリート構造物の損傷評価と補修(第12回材料講習会テキスト)、日本材料学会、12月、1989
- 2)建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発、1988
- 3)Barneyback,R.S. and Diamond, S. : Expression and Analysis of Pore Fluids from Hardened Cement Pastes and Mortars, Cement and Concrete Research, Vol.11, No.2, pp.279-285, 1981
- 4)Diamond, S.: ASR-Another Look at Mechanisms, Proc. 8th Intl. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, pp.115-119, 1989
- 5)小林一輔,瀬野康弘,河合研至,宇野祐一：反応性骨材を用いたモルタル細孔溶液の組成,コンクリート工学年次論文報告集,10-II, pp733-738, 1988
- 6)鍵本広之,佐藤道生,川村満紀：アルカリシリカ反応により劣化した構造物の劣化度評価と細孔溶液分析による劣化進行の予測,土木学会論文集, No.641/V-46, pp241-251, 2000
- 7)Urhan, S.: Alkali Silica and Pozzolan Reactions in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.17, No.1, pp.141-152, 1987
- 8)Iler, R.K. : The Chemistry of Silica, John Wiley & Sons, Inc., pp.866, 1979
- 9)Oberholster, R.E. and Davies, G. : An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates, Cement and Concrete Research, Vol.16, pp.181-189, 1986