

論文 長期間貯蔵した ASR コンクリート供試体の微細構造

岩月栄治*1・森野奎二*2

要旨: アルカリシリカ反応の長期性状を検討するため、反応性骨材と非反応性骨材を各々6種類づつ用いた貯蔵 11~14 年のコンクリート供試体の膨張率測定と強度試験を行った。また、偏光顕微鏡と電子顕微鏡を用いて微細構造の観察を行った。その結果、あまり膨張せず強度低下もみられない場合でも、内部には微細なひび割れや反応生成物がみられた。この生成物は、膨張率に比例してその生成量が多くなる状態が観察された。

キーワード: アルカリシリカ反応, チャート, 膨張率, 曲げ強度, 微細構造

1. はじめに

筆者らはアルカリシリカ反応(以下 ASR と称す)の膨張が長期間にわたって継続することをコンクリート供試体やモルタルバーで確認してきている^{1,2)}。また実構造物においても、施工後数十年経てからひび割れが発生したり、数回の補修を行ったにも関わらず ASR の劣化が継続している例を調査・観察している³⁾。このように、ASR を検討する上では、長期間にわたって膨張特性、強度性状及び微視的状态などの検討が必要である。そこで本研究では、その後の継続して測定・観察している結果を報告する。

研究では、反応性骨材のチャート 4 種類、安山岩 2 種類を用いた貯蔵 11~14 年のコンクリート供試体の膨張、強度及び微細構造の観察を行い、相互の関係について検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート供試体

に使用した骨材

コンクリート供試体に使用した骨材を表-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り、岩石の起源は中・古生層のチャートよりなる。X 線回折の $2\theta = 68^\circ$ ($\text{CuK}\alpha_1$) 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¹⁾。安山岩 M 及び安山岩 Y は、瀬戸内火山岩区に属する斜方輝石安山岩であり、いずれも砕石工場の製品置場から採取したものである。火山ガラスの含有量は X 線回折や偏光顕微鏡観察から、安山岩 M は 6%, Y は 3%程度である。これらの JIS A5308 化学法の結果では「無害でない」に判定される。その他の、石灰岩 Y

表-1 使用骨材の産地と化学法結果

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
石灰岩Y		三重県	12	48	0.25	無害
石灰岩A		岐阜県	9	190	0.05	無害
橄欖岩M		三重県	14	64	0.22	無害
砂岩Y		徳島県	48	243	0.20	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	0.43
川砂	愛知県		19	103	0.18	無害

*1 愛知工業大学講師 工学部土木工学科 工修 (正会員)

*2 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 理博 (正会員)

表-2 コンクリート供試体の作製年, 作製状況及び貯蔵状態

供試体	作製年	形状(mm)	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
コンクリート角柱	1985年	100×100×390	粗骨材	反応性	チャートYo	0.81%	0.81%(無添加) 1.0%(NaOH添加)	貯蔵容器にて湿潤貯蔵(温度は季節によって10~30°C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			
			粗骨材	非反応性	石灰岩Y			
					石灰岩A			
					砂岩Y			
					橄欖岩M			
	細骨材	非反応性	珪砂					
			川砂					
1988年	粗骨材	反応性	チャートYo	0.72%	1.2%(NaOH添加) 2.0%(NaOH添加)			
			チャートSe					
	細骨材	非反応性	珪砂					
			川砂					

表-3 コンクリート供試体の配合

コンクリート角柱に使用した細・粗骨材		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/m ³)				
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	珪砂	20 (チャートYoのみ 15mm)	58.4	42.0	181	310	745	1053	-
安山岩:2種類									
石灰岩:2種類									
その他:3種類									

及びA, 橄欖岩M, 砂岩Y, 輝緑岩Nは化学法では「無害」であり比較用に用いた。細骨材には珪砂及び川砂を用いた。

2.2 長期間貯蔵したコンクリート 供試体の作製状況

コンクリート供試体の作製及び貯蔵状況を表-2に, 配合を表-3に示す。作製年は1985年と1988年で, 貯蔵期間は11~14年である。1985年作製の供試体の粗骨材は, 反応性骨材のチャートYo, Se, T, Jと安山岩M, Yの6種類, 非反応性骨材の石灰岩Y, 石灰岩A, 砂岩Y, 橄欖岩M, 輝緑岩Nの5種類であり, 細骨材には珪砂及び川砂を用いた。セメントはNa₂O等量0.81%の普通ポルトランドセメントを使用し, NaOHを添加して0.81及び1.0%に調整した。また, 1988年に作製した供試体は, 粗骨材にチャートYoとチャートSeを使用している。セメントはNa₂O等量0.72%の普通ポルトランドセメ

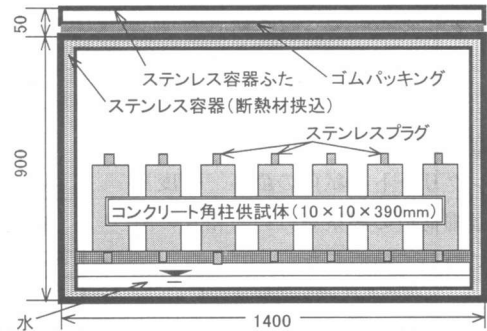


図-1 コンクリート供試体貯蔵器の概要

ントを使用し, アルカリ量は1.2及び2.0%に調整したものである。供試体の貯蔵には実験室内(気温約10~30°C)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。図-1にステンレス製貯蔵器の概要を示す。

2.3 コンクリート供試体の強度試験 及び微細構造の観察

コンクリート供試体は、貯蔵11~14年の膨張率測定後にひび割れ観察を行った。その後、曲げ強度試験(三等分点載荷)を行い、その折片で圧縮強度及び静弾性係数の測定を行った。静弾性係数の測定には60mmのひずみゲージを使用した。強度試験後にフェノールフタレイン溶液を用いて中性化試験を行った。微細構造の観察には、偏光顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 長期貯蔵したコンクリート供試体の膨張率

図-2に貯蔵11~14年後のコンクリート供試

体の膨張率を示す。チャートY₀は、アルカリ量0.81%で0.1%以上膨張しているが、チャートSe, J, Tは0.1%以下である。アルカリ量が1.0%以上になるといずれも膨張率は0.1%以上となっている。アルカリ量が2.0%ではチャートY₀は0.36%、Seは0.15%であり、同じチャートであっても反応性に大きな差がある。これは化学法や結晶性指標の結果とも一致している。また、安山岩はアルカリ量0.81%で1.0%以上の膨張を示しているが、ア

ルカリ量が1.0%になっても膨張の増加は少なく、同アルカリ量のチャートよりも膨張率が低くなっている。材齢毎の膨張挙動は、文献²⁾に示したようにチャート、安山岩とも貯蔵11~14年時点でも若干の膨張を継続している。

非反応性骨材では、アルカリ量1.0%で砂岩、石灰岩、輝緑岩が0.05%前後膨張しているが、後二者はシリカのない岩石であり、ASRによる膨張とは考えられないので別の要因と思われる。また、図-3の曲げ強度試験結果でもアルカリ量が多いにも関わらず強度低下していないなど複雑である。

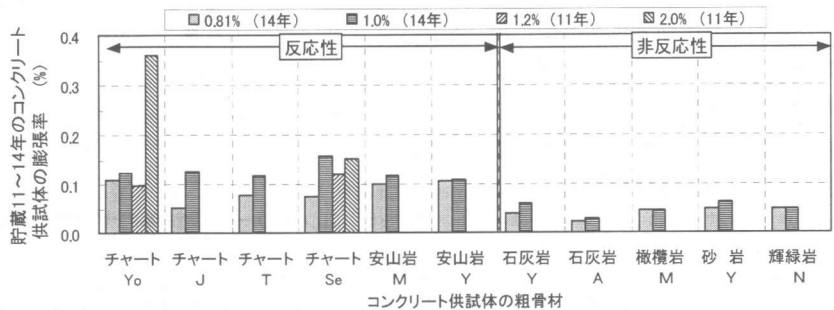


図-2 貯蔵11年及び14年貯蔵後のコンクリート供試体の膨張率

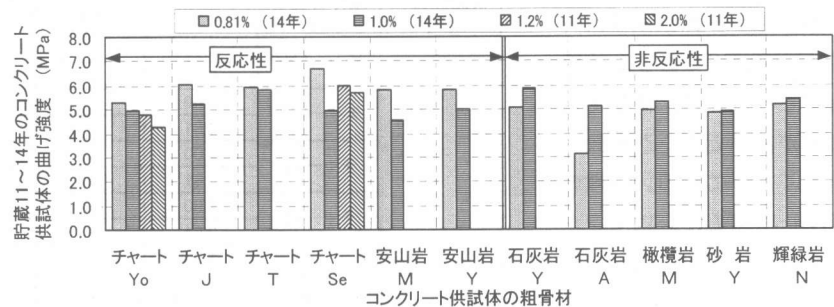


図-3 コンクリート供試体の曲げ強度試験結果

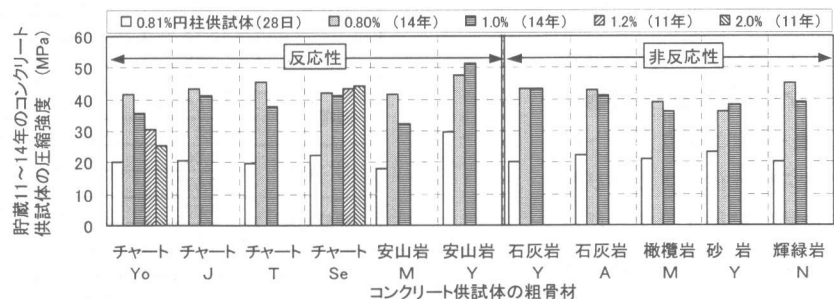


図-4 コンクリート供試体の圧縮強度試験結果

3.2 コンクリート供試体の強度性状

図-3 にコンクリート供試体の曲げ強度試験結果を示す。膨張率(図-2)と比較すると、反応性骨材使用は膨張率が高いと曲げ強度が低くなっているが、膨張率に対する曲げ強度の低下の割合にばらつきがあり、単純ではない。図-4 にコンクリート供試体の圧縮強度試験結果を示す。この図には、材齢 28 日での円柱形供試体の結果(φ10cm×20cm, アルカリ量 0.81%)を併記した。概して反応性骨材は曲げ強度と同様の傾向を示しているが、チャート Se と安山岩 Y のように膨張率が高くても圧縮強度が高く、前述の膨張率と曲げ強度の傾向と異なっている例もある。これらから、膨張率と強度の関係は圧縮強度よりも曲げ強度に相関関係がみられる。

図-5 にコンクリート供試体のヤング係数と膨張率の関係を示す。反応性骨材使用のヤング係数は 1.4~3.6×10⁴MPa であった。膨張率との関係は、概して膨張率が高いとヤング係数は小さくなっている。同種のチャートでも、J はヤング係数の低下が他と比べて著しく、ASR によるヤング係数の低下は岩種によって差があるといえる。

3.3 コンクリート供試体のアルカリ性状とひび割れ

表-4 にコンクリート供試体の中性化深さとひび割れの観察結果を示す。反応性骨材使用の中性化深さは 1~6mm 程度であった。貯蔵 14 年を経ても供試体内部は

アルカリを保っていることから、今後も ASR の反応が継続する可能性がある。

供試体表面のひび割れは、反応性骨材ではチャート T 以外にひび割れがみられ、温度変化が 10~30℃ 程度で乾湿の変化が少ない貯蔵状態であっても劣化している。ひび割れ幅は、チャート Se のアルカリ量 2.0% と J の 1.0% は、Y₀ の同

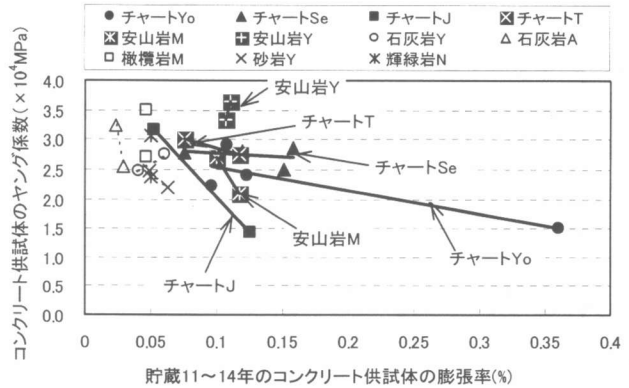


図-5 コンクリート供試体のヤング係数と膨張率の関係

表-4 コンクリート供試体の中性化深さとひび割れの観察結果

コンクリート供試体の作製年	コンクリート供試体の粗骨材	アルカリ量 Na ₂ O _{eq} %	最大中性化深さ(mm)	ひび割れの有無	ひび割れ幅(最大値mm)
1985 年 (貯蔵14年)	チャートYo	1.00	3	有り	0.10
		0.81	4	有り	0.08
	チャートSe	1.00	3	有り	0.10
		0.81	1	有り	0.08
	チャートJ	1.00	5	有り	0.40
		0.81	5	有り	0.05
	チャートT	1.00	3	無し	—
		0.81	2	無し	—
	安山岩M	1.00	4	有り	0.05
		0.81	2	有り	0.05
	安山岩Y	1.00	6	有り	0.08
		0.81	2	有り	0.05
	石灰岩Y	1.00	5	無し	—
		0.81	3	無し	—
石灰岩A	1.00	8	無し	—	
	0.81	5	無し	—	
橄欖岩M	1.00	5	無し	—	
	0.81	3	無し	—	
砂岩Y	1.00	5	無し	—	
	0.81	4	無し	—	
輝緑岩N	1.00	7	無し	—	
	0.81	3	無し	—	
1988 年 (貯蔵11年)	チャートYo	2.00	4	有り	0.10
		1.20	5	有り	0.05
	チャートSe	2.00	4	有り	0.30
		1.20	6	有り	0.05

アルカリ量と較べてひび割れ幅が大きく、同種のチャートであっても差がみられる。

3.4 コンクリート供試体の偏光顕微鏡観察

曲げ強度試験後の切片から薄片を作製して偏光顕微鏡観察を行った。薄片の試料採取位置は、供試体の上部から3cm付近で、長さ方向に対して直角の面で岩石カッターを用いて切り出した。

写真-1~5にチャートY₀のアルカリ量0.81~2.0%の偏光顕微鏡写真を示す。アルカリ量0.81%では、写真-1, 2に示すように骨材にひび割れが発生し、モルタルまで達している。また、ひび割れによって骨材自体が破断している

状態が観察されており、アルカリ量が0.81%であっても内部の微視的状态では劣化が進んでいる。アルカリ量が1.0~2.0%では写真-3~5に示すようにほとんどの骨材にひび割れがみられ、モルタルや骨材との境界面にもひび割れが多くみられた。

写真-6~9にチャートSeの偏光顕微鏡写真を示す。アルカリ量が多くなるにつれて骨材やモルタルにひび割れが多くみられた。アルカリ量2.0%はチャートY₀よりも膨張率が小さいが、ひび割れの程度はほぼ同じであることから、膨張にはASR生成物の性質が影響していると思わ

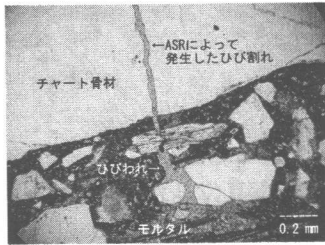


写真-1 チャートY₀の偏光顕微鏡写真(アルカリ量0.81%)

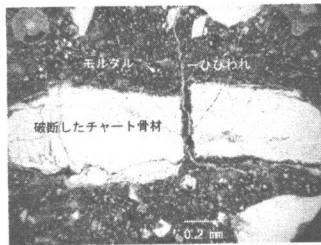


写真-2 チャートY₀の偏光顕微鏡写真(アルカリ量0.81%)

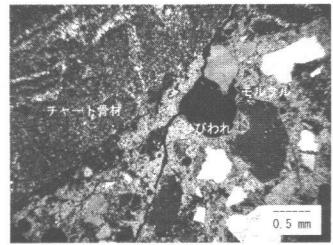


写真-3 チャートY₀の偏光顕微鏡写真(アルカリ量1.0%)

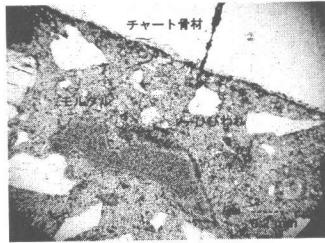


写真-4 チャートY₀の偏光顕微鏡写真(アルカリ量1.2%)

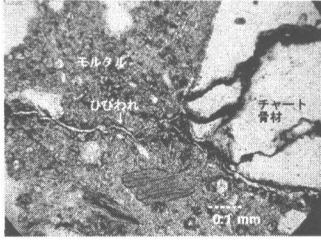


写真-5 チャートY₀の偏光顕微鏡写真(アルカリ量2.0%)

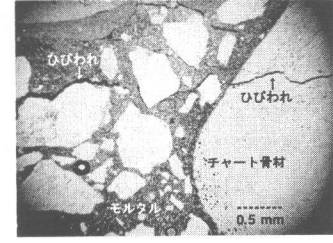


写真-6 チャートSeの偏光顕微鏡写真(アルカリ量0.81%)

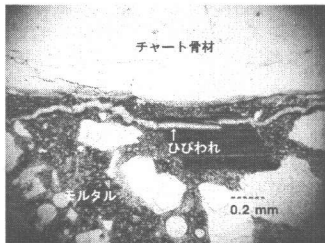


写真-7 チャートSeの偏光顕微鏡写真(アルカリ量1.0%)

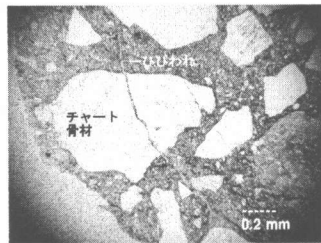


写真-8 チャートSeの偏光顕微鏡写真(アルカリ量1.2%)

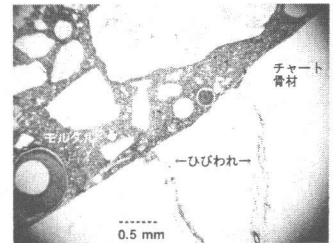


写真-9 チャートSeの偏光顕微鏡写真(アルカリ量2.0%)

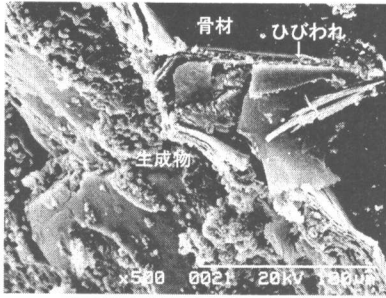


写真-10 チャートYoの走査電子顕微鏡写真(アルカリ量0.81%)

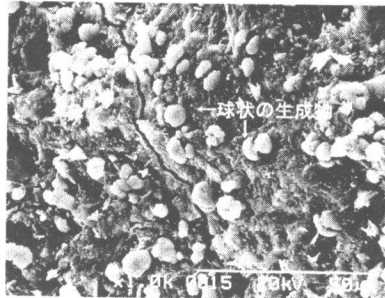


写真-11 チャートYoの走査電子顕微鏡写真(アルカリ量0.81%)
写真-10の生成物付近の拡大

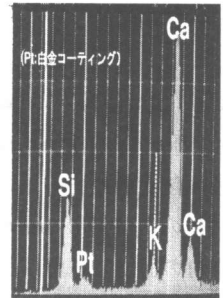


図-6 写真-11の球状生成物のX線マイクロアナライザー分析結果

れる。

3.5 コンクリート供試体の走査電子顕微鏡観察

チャート Yo のアルカリ量 0.81%の走査顕微鏡写真を写真-10に示す。骨材にひび割れが発生し、その周りのモルタル部分には球状の生成物が点在していた(写真-11)。この生成物のX線マイクロアナライザー分析結果(図-6)ではCa, Si, Kであり, Naは検出されなかった。また, 同骨材のアルカリ量 2.0%は, 写真-12に示すように骨材にひび割れが多くみられ, 偏光顕微鏡観察の結果と一致している。ひび割れの内部には生成物はみられなかったが, その周囲にはゲル状や球状の生成物が多くみられた。これは, アルカリが多いとゲルの粘性が小さくなるので, ゲルが流れ出したと考えられる。チャート Se では, 写真-13に示すようにモルタル部分や骨材との境界にひび割れが多くみられ, チャート Yo と異なっている。また, 生成物はチャート Yo よりも少なく, 膨張率が小さいことと一致している。

4. まとめ

貯蔵 11~14年のコンクリート供試体について, 膨張率, 強度性状及び微細構造について調べた結果をまとめると以下のである。

(1) 膨張率と曲げ強度においては, 膨張率が高い

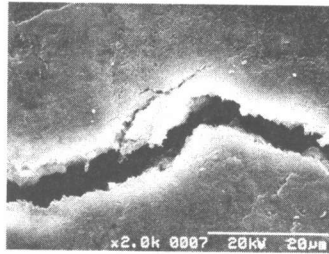


写真-12 チャートYoの走査電子顕微鏡写真(アルカリ量2.0%)

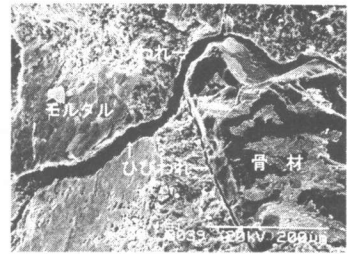


写真-13 チャートSeの走査電子顕微鏡写真(アルカリ量2.0%)

と曲げ強度が低くなる傾向が圧縮強度よりも明瞭であった。

(2) チャート骨材を用いた供試体ではアルカリ量が 0.81%であっても, 内部には微細なひび割れや反応生成物が観察され, 膨張率が低く強度低下がみられなくても, ASRによる劣化がみられた。(3) ASR 生成物の観察では, チャート Yo は生成物が多くみられ, チャート Se は少なかった。このように同名のチャートでも著しい相違がみられた。

参考文献

- 1) 岩月栄治, 森野奎二, 皿井剛典: 長期間貯蔵した ASR モルタルバーの膨張に及ぼす反応性鉱物の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 943-948, 1998. 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) Morino, K., Iwatsuki, E. and Sarai, Y.: ASR Expansion and Microstructure of Concrete with Cherty Aggregate, East Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar, Tottori, Japan, pp. 113-124, Nov. 1997