

鹿児島県産碎石のアルカリ反応に関する実験的研究

久米 国幹・迫田 順一・川畑勇一郎
(受理 平成元年5月31日)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ALKALI REACTION OF CRUSHED STONE IN KAGOSHIMA

Kunimoto KUME, Junichi SAKODA, Yuichiro KAWABATA

We made a lithologic observation by a polarizing microscope and powder X-ray analysis, and we also made an analysis of harmful aggregates by the mortar bar method (JIS), the pessimum value of the expansion depends on the reactive aggregate content, and upon a comparison of concrete bar with mortar bar in the expansion of alkali reaction in used crushed-stone in Kagoshima.

The following results were obtained:

- 1) By the mortar bar method there were confirmed three reactive aggregates. These were all andesites. But, among the same andesites, some show little or no reaction.
- 2) By the lithologic observation, it was found that reactive aggregate contains Cristobalite, Chaynockite, Quartz, Volcanic-Glass-Sand and Geothite, also, there was found change in quality such as in the Hydrated-Iron in the groundmass.
- 3) It was found that the pessimum value of the expansion and its curve vary according to each aggregate.
- 4) The expansion rate of concrete bars was only 10 % of that of mortar bars.

1. 序

最近、コンクリート構造物の耐久性の低下が注目されているが、その原因の一つにアルカリ骨材反応がある。

アルカリ骨材反応は、1939年に米国カリフォルニア州国道の崩壊原因究明の際に T. E. Stanton¹⁾によって発見されて以来、全米各地でコンクリート構造物に同じ被害が続発し、大きな問題となった。

アルカリ骨材反応は、アルカリ・シリカ反応、アルカリ炭酸塩反応及びアルカリ・シリケート反応の三種類に分類されるが、わが国ではそのうち主としてアルカリ・シリカ反応によるものが多い。

アルカリ・シリカ反応は、コンクリート中に存在するナトリウム、カリウムなどのアルカリ元素と、骨材中に含まれるある種の鉱物が水との共存下で、長期的

に徐々に新たな物質を生成する反応をいう。反応生成物は吸湿して膨張し、コンクリートにひび割れ、ポップアウトなどを起こし、コンクリートの耐力を低下させる原因となる。

アルカリ・シリカ反応を起こす骨材の代表的な岩石は、安山岩類（シリカガラス、クリストバライト、トリジマイトを含む）、オパール（非晶質含水シリカの他に石英、クリストバライトを含む）ならびにチャート（潜晶質石英かクリストバライトを含む）等である。

わが国では、過去にアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の被害はあったが、その数は数例にすぎず、極めてまれなケースとして取り扱われていた。²⁾

しかし、最近コンクリートの需要の増大とともに碎石の使用が増大し、その中には反応性骨材も含まれ、広い範囲にわたって被害が目立つようになってきた。

この現象は鹿児島においても例外ではなく、いくつ

かのコンクリート構造物において被害が確認されている。³⁾

本報告は、このような現状をふまえ、鹿児島県産コンクリート用骨材のうち砕石を中心に、反応性骨材の調査・研究を行ったものである。

2. 鹿児島県産の砕石

現在、鹿児島県内でコンクリートに使用されている骨材のうち粗骨材は、そのほとんどが砕石で占められ、細骨材も一部では普通砂（海砂・陸砂・山砂）から砕石に移行しつつある。

県内で生産されている骨材（砕石）の岩石名と生産量を表・2-1⁴⁾に示す。これによれば、反応性骨材として可能性のある安山岩が全体の40%以上を占めている。

コンクリート用砕石を対象とした砕石場は県下一円に分布し、離島を含め40箇所にも達する。

このうち実験用に収集した砕石は、採取地が近接し、同じ種類と判断したものを除く、26種類（安山岩を中心に砂岩・硬質砂岩・輝緑岩・石英閃緑斑岩）である。

図2-1に鹿児島県の砕石対象岩石分布図⁵⁾と砕石採取地を示す。

3. 岩石学的試験

3.1 偏光顕微鏡による観察と粉末X線回析による同定

【1】実験目的

岩石学的見地から、偏光顕微鏡による観察（岩石の組織・岩石中の鉱物の種類）と、粉末X線回析（定性分析）による同定を行ない、非反応性と反応性骨材の特徴について調べる。

【2】実験方法

収集した砕石（以下、骨材という）のうち、安山岩11、砂岩3、硬質砂岩2および石英閃緑斑岩1種類の合計17種類について岩石薄片を作製し⁶⁾、偏光顕微鏡による観察⁷⁾（岩石の組織・岩石中の鉱物の種類）と、また、偏光顕微鏡では識別できない有害含有鉱物（クリストバライト、トリジマイトナド）を調べるため、粉末X線回析（定性分析）による同定⁸⁾を行なう。

【3】実験結果および考察

偏光顕微鏡による観察と粉末X線回析からそれぞれの骨材の特徴を調べ、その結果を表3-1（その1～9）に示す。

なお、表中の骨材番号は、以下の諸実験で使用する

骨材の番号と対応させている。

粉末X線回析によると、アルカリ骨材反応に関係する有害鉱物の一つであるクリストバライトの存在は、すべての安山岩に確認されているが、クリストバライトのピーク値と長石のピーク値が重なるため確かなものとはいえない。

実験用に採取した鹿児島県産の骨材（砕石）24種類のうち、モルタルバー法によりアルカリ反応性骨材と判定されたものは、試料番号No2, 3, 4の3種類で、いずれも安山岩である。しかし、他の非反応性・安山岩骨材との間に、はっきりした違いは確認できなかった。

上記3種類のアルカリ反応性骨材の共通点をあげると、次のことがいえる。

- a) クリストバライトを含む。(No2, 3, 4)
- b) 石基部に水酸化鉄のような部分的変質がある。(No2, 3)
- c) 紫蘇輝石と石英を含む。(No2, 3)
- d) 石基部に火山ガラスを含む。(No2, 4)
- e) 石基部にGeothiteがみられる。(No2, 4)

従って、岩石学的観察により、このような諸鉱物ならびに現象が確認された骨材については、アルカリ骨材反応を起こす可能性が大きく、改めてモルタルバー法による再確認を行なうことが必要であろう。

3.2 アルカリ反応促進試験による骨材の偏光顕微鏡観察

【1】実験目的

アルカリ反応促進試験により骨材中の鉱物の変化ならびにその特徴を観察する。

【2】実験方法

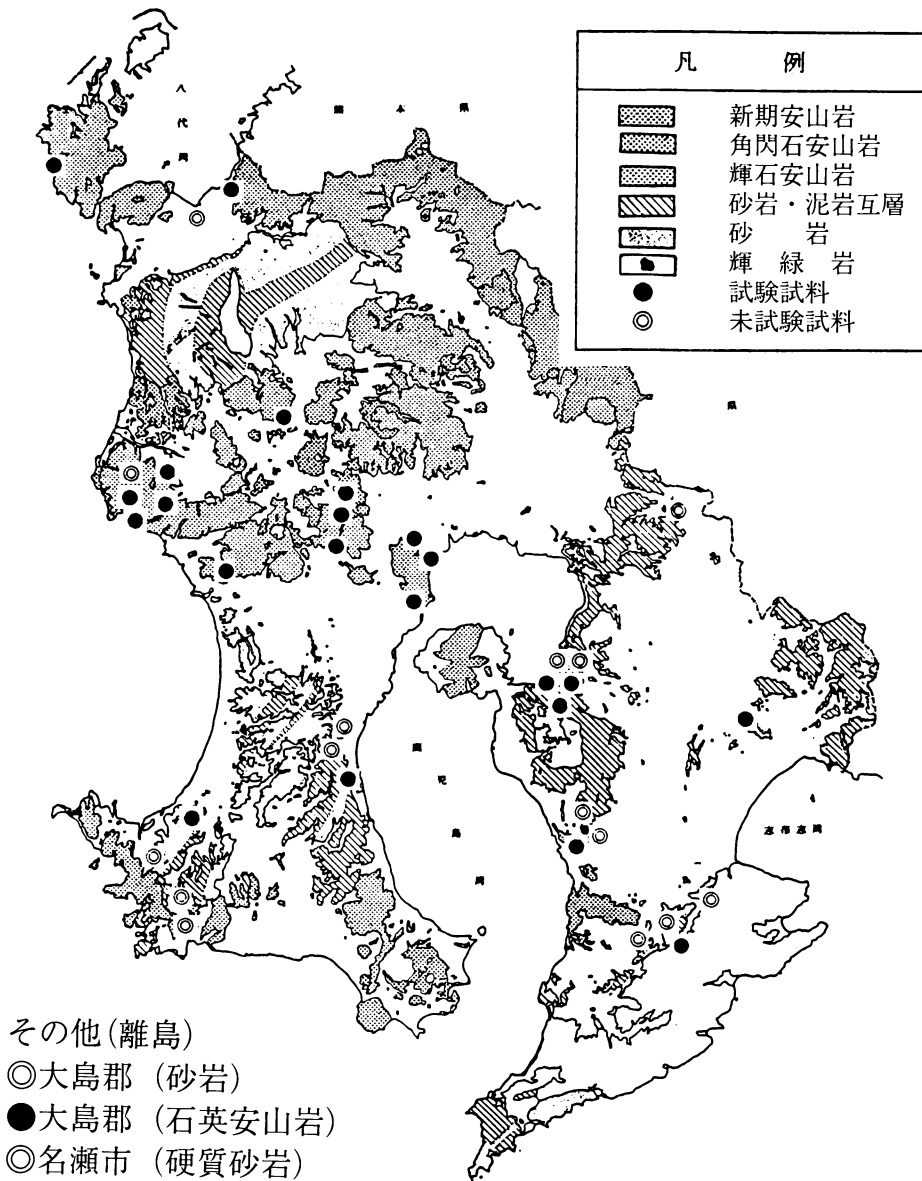
骨材を、4×4×160mmの型枠中のセメントペースト（Na₂O等価量：0.7%の普通ポルトランドセメントを水酸化ナトリウムでアルカリ濃度1.2, 1.5, 2.0%に調整した3種類）にそれぞれ埋め込み、温度60±3℃、相対湿度95%以上で4週間促進養生を施す。（公認された試験法ではない。）

使用骨材は、モルタルバー法による有害判定のNo2, 4（安山岩）、同・無害判定のNo1, 9（安山岩）とNo38, 39（砂岩）の6種類とする。

促進養生後に、供試体表面の浸出物・ひび割れと、供試体を切断し、内部の反応リム・ゲルポット・ひび割れなどの観察を行い、さらに、その切断面の薄片を作製し、骨材中の鉱物の変化や特徴を調べる。

表2-1 鹿児島県産碎石の岩石名と生産量（単位1000 t）

岩石名	安山岩	砂岩	輝緑岩	頁岩	粘板岩	その他	計
生産量	3,479	3,323	593	372	124	79	7,970
比率%	43.7	41.7	7.4	4.7	1.6	1.0	100



図・2-1 碎石対象岩石分布図と碎石場

表3-1 試料岩石のキャラクター (その1)

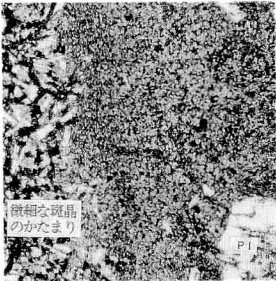
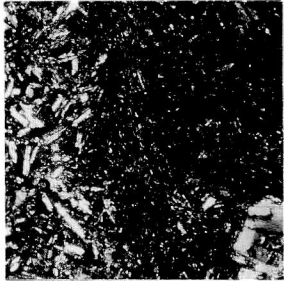
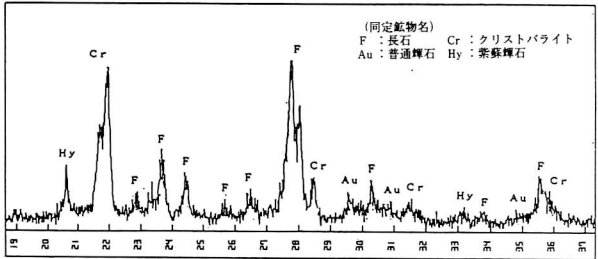
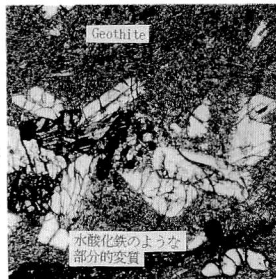
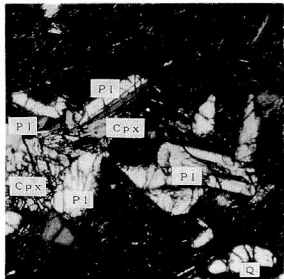
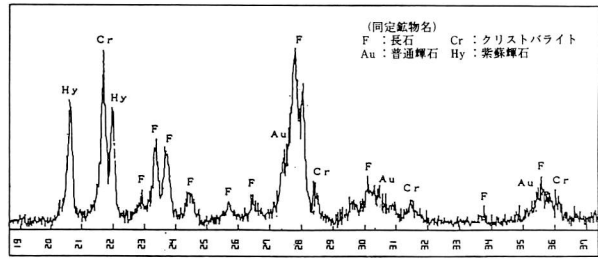
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No 1 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄鉱 石基：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱</p> <p>斑晶は小さめで少なく，石基の占める割合が大きい。 微少な斑晶（斜長石，輝石など）の塊りがある。</p> <p>【X線回析による同定】 長石，普通輝石，紫蘇輝石，クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルが少量発生している。</p>		
		
<p>No 2 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄鉱 石基：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱，ガラス</p> <p>大きな斑晶は少なく，微少な斑晶（斜長石輝石など）の塊りがある。 石基部にGeothite（黄色のすじ）および水酸化鉄のような部分的変質がある。（ひび割れに沿って水などが入り込み変質したものと考えられる） 石英の斑晶も認められる。</p> <p>【X線回析による同定】 長石，普通輝石，紫蘇輝石，クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 有害：供試体表面に反応性ゲルが多量発生している。</p>		
		

表3-1 試料岩石のキャラクター（その2）

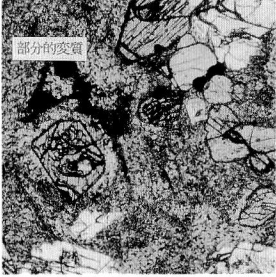
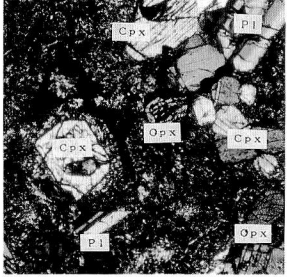
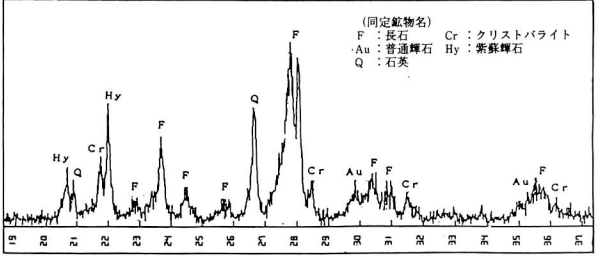
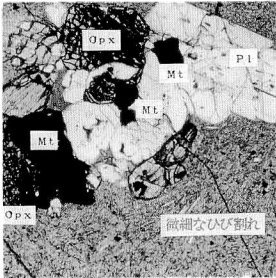
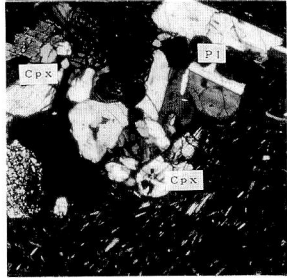
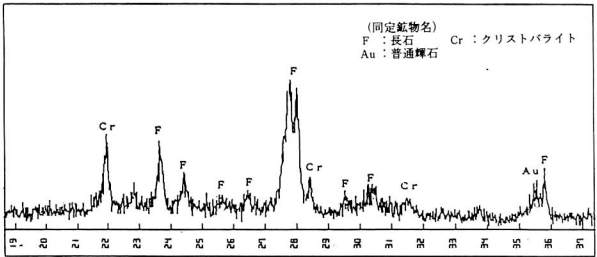
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図（2θ）	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No 3（安山岩）</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄鉱 石基：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱</p> <p>斑晶が多い。 石基は一様でなく、明暗がある。 石基部に水酸化鉄のような部分的変質がある。（ひび割れに沿って水などが入り込み変質したものと考えられる）</p> <p>【X線回析による同定】 長石，普通輝石，紫蘇輝石，石英，クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 有害：供試体表面に反応性ゲルが少量発生している。</p>		
		
<p>No 4（安山岩）</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄鉱 石基：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱，ガラス</p> <p>斑晶と石基の区別がはっきりしており、斑晶が大きい。 石基部は針状の斜長石が多く、ガラスも比較的多い。また、Geothite（黄色のすじ）があり、斜長石の斑晶も見られる。 石基部には多数のひび割れが入っている。</p> <p>【X線回析による同定】 長石，普通輝石，クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 有害：供試体表面に反応性ゲルが多量発生している。</p>		
		

表3-1 試料岩石のキャラクター (その3)

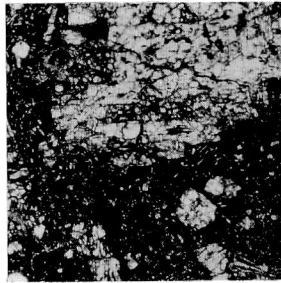
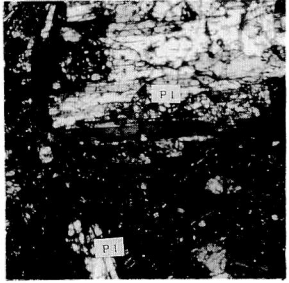
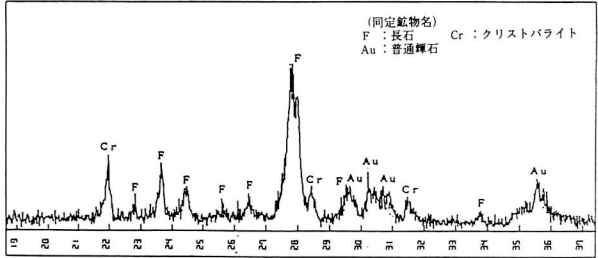
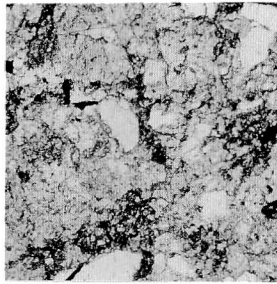
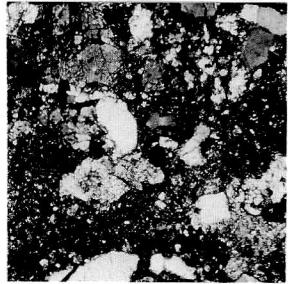
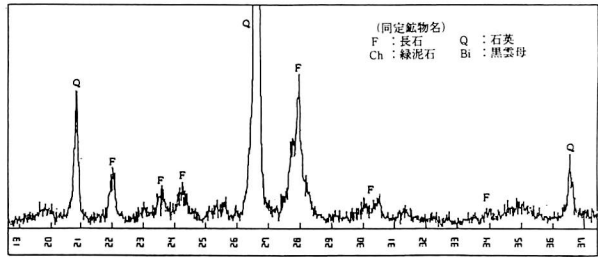
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No5 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石 石基：斜長石, 単斜輝石, 磁鉄鉱, ガラス</p> <p>斑晶ははっきりしたものが少なく、多くは斜長石である。 石基部分は暗色で、ガラス質のものである</p> <p>【X線回析による同定】 長石, 普通輝石, クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>		
		
<p>No8 (砂岩)</p> <p>【含有鉱物】 石英, 斜長石, 黒雲母, 緑泥石</p> <p>粒状組織は、比較的大きい。</p> <p>【X線回析による同定】 石英、長石、黒雲母、緑泥石が認められる</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>		
		

表3-1 試料岩石のキャラクター (その4)

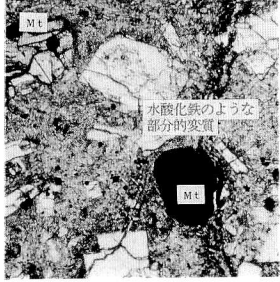
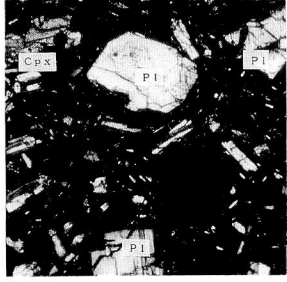
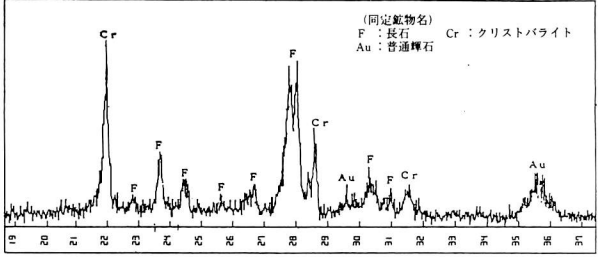
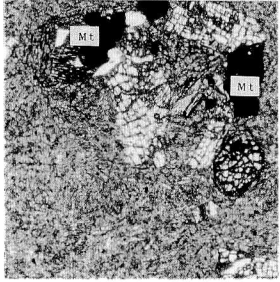
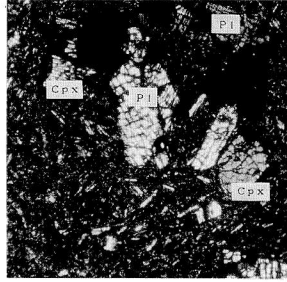
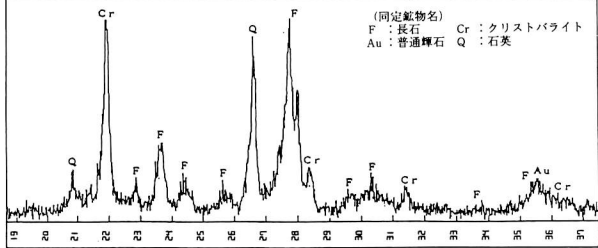
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No9 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】</p> <p>斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄鉱</p> <p>石基：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄鉱，ガラス</p> <p>中小の斜長石や輝石の斑晶が多く散在している。</p> <p>石基部には水酸化鉄のような部分的変質がある。(ひび割れに沿って水などが入り込み変質したものと考えられる)</p> <p>鉱物に変化し，斜方輝石とガラス(小)になったものを確認。</p> <p>【X線回析による同定】</p> <p>長石，普通輝石，クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】</p> <p>無害：供試体表面に反応性ゲルが少量発生している。</p>		
		
<p>No10 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】</p> <p>斑晶：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱</p> <p>石基：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱，ガラス</p> <p>斑晶は少なく，石基の占める割合が多い。</p> <p>風化作用をかなり受けている岩石である。</p> <p>【X線回析による同定】</p> <p>長石，普通輝石，クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】</p> <p>無害：供試体表面に反応性ゲルが多量発生している。</p>		
		

表3-1 試料岩石のキャラクター (その5)


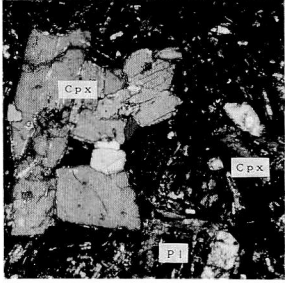
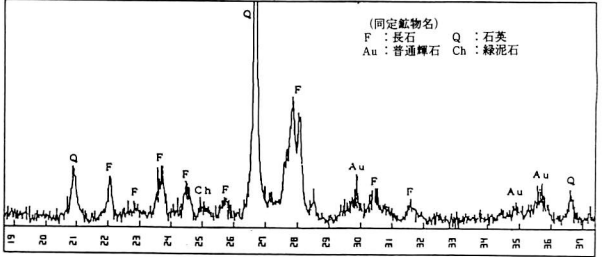
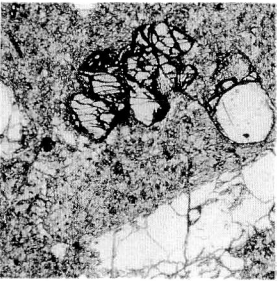
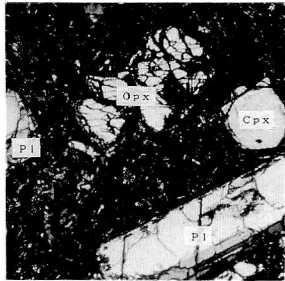
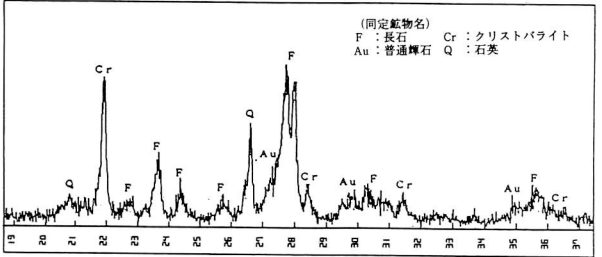
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回折図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No11 (石英閃緑斑岩)</p> <p>【含有鉱物】</p> <p>斑晶：斜長石, 単斜輝石, 磁鉄鈹</p> <p>石基：斜長石, 単斜輝石, 磁鉄鈹</p> <p>斑晶と石基部の区別がつきにくい。</p> <p>石基部が一様でない。鈹物の変質が激しい (過去に熱変化を受けた可能性大)</p> <p>角閃石類、緑泥石、方解石なども含まれている。</p> <p>【X線回折による同定】</p> <p>長石、普通輝石、石英、緑泥石が認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】</p> <p>無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>		
		
<p>No12 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】</p> <p>斑晶：斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 磁鉄鈹</p> <p>石基：斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石</p> <p>斑晶が多く、大・小の斑晶が散在している</p> <p>【X線回折による同定】</p> <p>長石、普通輝石、石英、クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】</p> <p>無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>		
		

表3-1 試料岩石のキャラクター (その6)

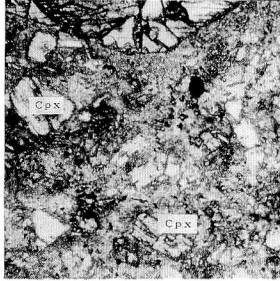
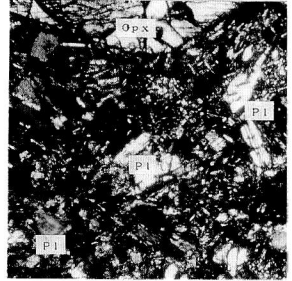
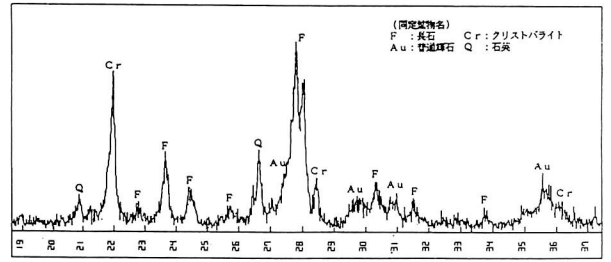
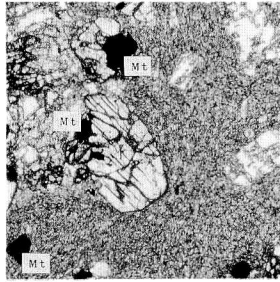
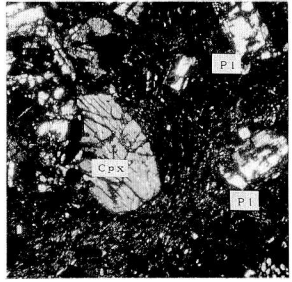
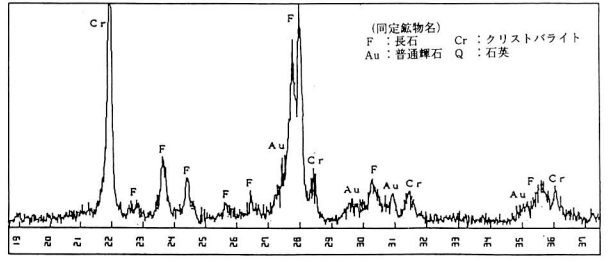
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No13 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄 鉱 石基：斜長石，単斜輝石</p> <p>大・中の斑晶の占める割合が高く、石基部 が少なく、一様でない。</p> <p>【X線回析による同定】 長石、普通輝石、石英、クリストバライト が認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルが少量発生 している。</p>		
	 <p>(同定鉱物名) F：長石 Cr：クリストバライト Au：普通輝石 Q：石英</p>	
<p>No14 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石，磁鉄 鉱 石基：斜長石，単斜輝石</p> <p>斑晶と石基部の区別がはっきりしている。 石基部には水酸化鉄のような部分的変質が ある。(ひび割れに沿って水などが入り込 み変質したものと考えられる)</p> <p>【X線回析による同定】 長石、普通輝石、石英、クリストバライト が認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められ ない。</p>		
	 <p>(同定鉱物名) F：長石 Cr：クリストバライト Au：普通輝石 Q：石英</p>	

表3-1 試料岩石のキャラクター (その7)

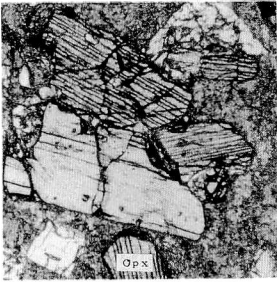
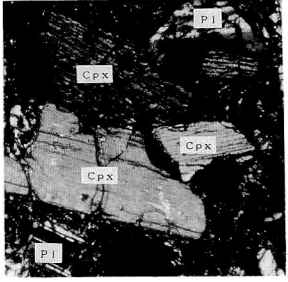
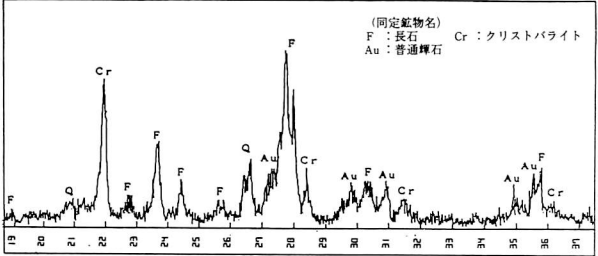
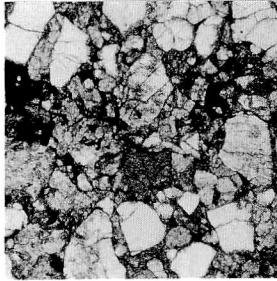
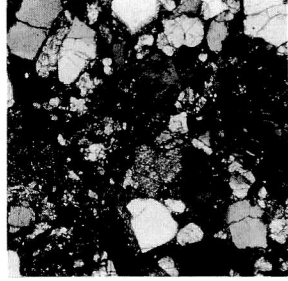
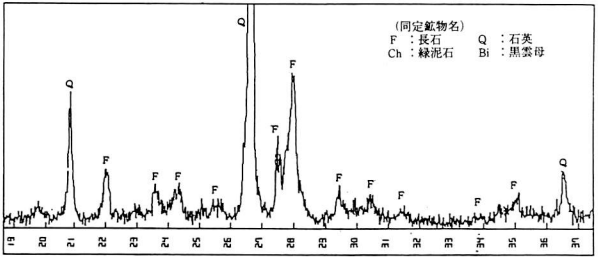
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No15 (安山岩)</p> <p>【含有鉱物】 斑晶：斜長石，単斜輝石，斜方輝石 石基：斜長石，単斜輝石，磁鉄鉱</p> <p>斑晶が多い。 石基が一樣でなく、明暗がある。</p> <p>【X線回析による同定】 長石、普通輝石、石英、クリストバライトが認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
	 <p>(同定鉱物名) F : 長石 Q : 石英 Cr : クリストバライト Au : 普通輝石</p>	
<p>No16 (砂岩)</p> <p>【含有鉱物】 石英，斜長石，黒雲母，緑泥石</p> <p>粒状組織は、比較的大きい。</p> <p>【X線回析による同定】 石英、長石、黒雲母、緑泥石が認められる</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>	 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
	 <p>(同定鉱物名) F : 長石 Q : 石英 Ch : 緑泥石 Bi : 黒雲母</p>	

表3-1 試料岩石のキャラクター (その8)

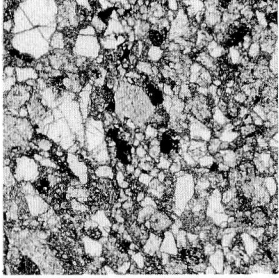
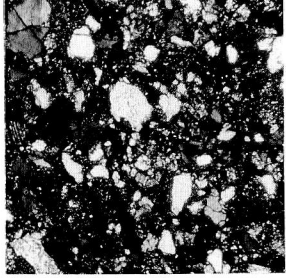
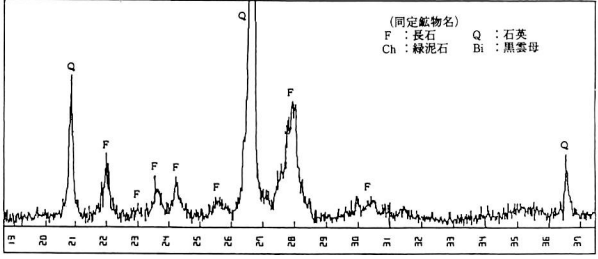
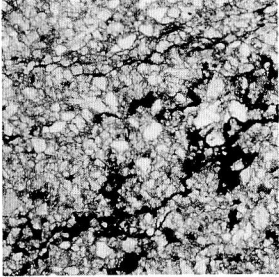
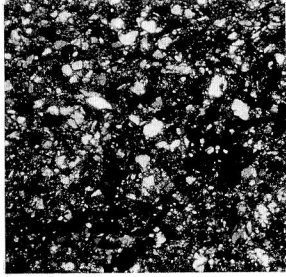
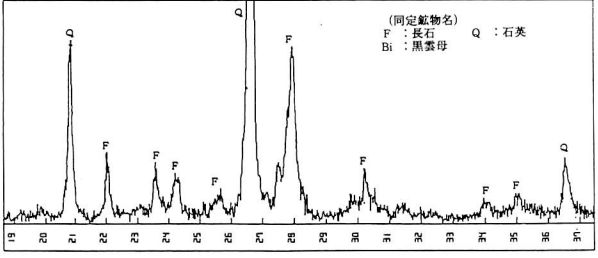
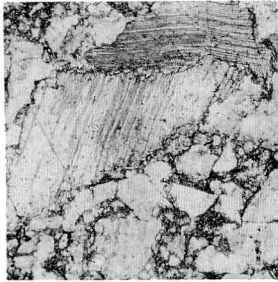
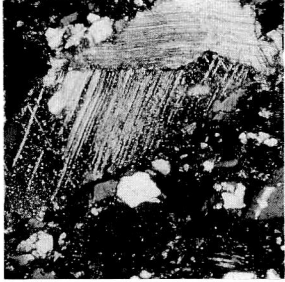
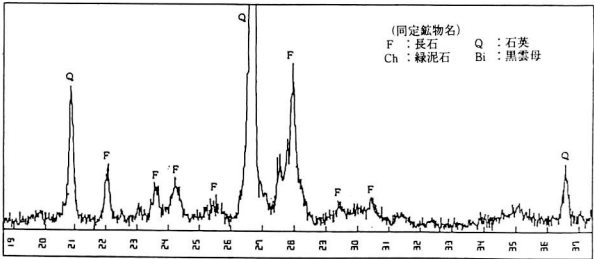
特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
<p>No18 (砂岩)</p> <p>【含有鉱物】 石英, 斜長石, 黒雲母, 緑泥石</p> <p>粒状組織は、比較的小さい。</p> <p>【X線回析による同定】 石英、長石、黒雲母、緑泥石が認められる</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>		
		
<p>No32 (硬質砂岩)</p> <p>【含有鉱物】 石英, 斜長石, 黒雲母, 緑泥石</p> <p>粒状組織は、比較的大さい。 黒雲母、緑泥石が多く含まれている。</p> <p>【X線回析による同定】 石英、長石、黒雲母が認められる。</p> <p>【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。</p>		
		

表3-1 試料岩石のキャラクター (その9)

特 徴	偏光顕微鏡写真とX線回析図 (2θ)	
	単 ニ コ ル	直 交 ニ コ ル
No38 (砂岩) 【含有鉱物】 石英, 斜長石, 黒雲母, 緑泥石, 方解石 粒状組織は、比較的大きい。 方解石が多く含まれている。 【X線回析による同定】 石英、長石、黒雲母、緑泥石が認められる 【モルタルバー法による判定】 無害：供試体表面に反応性ゲルは認められない。		
		

写真中の記号 【安山岩系岩石 (斑状組織) の斑晶名】

- P l : 斜長石 (Plagioclase)
- C p x : 単斜輝石 (Clinopyroxene)
- O p x : 斜方輝石 (Orthopyroxene)
- M t : 磁鉄鉱 (Magnetite)
- Q : 石英 (Quartz)

【3】実験結果と考察

骨材のアルカリ反応促進試験供試体の観察結果をまとめ、表3-2と写真3-1～5に示す。

実験結果によれば、モルタルバー法の判定で有害骨材 (No2, 4), 無害骨材 (No1, 9) にかかわらず、これら安山岩系の骨材を使用した4種類の供試体には、反応ゲルおよび反応リムが確認され、また、ひび割れも発生した。しかし、No2のように反応性の程度にアルカリ濃度との相関がみられないものや、No9のようにアルカリ濃度が高いほど反応度も高くなるものがある。

一方、砂岩 (No38, 39) には反応ゲル・反応リム・ひび割れともに、まったく認められなかった。

次に、反応ゲル・反応リム・ひび割れが確認された安山岩骨材 (No2, 4, 9) のアルカリ反応後の変化を、偏光顕微鏡により観察し、その結果を写真3-1～5を用いて説明する。

写真3-1はNo2 (Na₂O等価量2%) で、反応リムの内側に準反応部と思われる部分が観察された。また、石基部が反応しており、斑晶は反応前と変わらないことから、石基部に反応性鉱物が含まれていることが判る。

写真3-2はNo4 (Na₂O等価量1.5%) で、この骨材特有の微細なひび割れに沿って反応が骨材内部にま

で進んでいることが観察された。この骨材がはっきりした反応リムを形成しなかったのは、この微細なひび割れに沿って反応が骨材内部まで進んでいたためである。この骨材も斑晶には変化はみられない。

写真3-3はNo4の石基反応部を200倍に拡大したもので、火山ガラスならびに一部の斜長石に変質が観察された。写真3-4は同試料の石基未反応部の火山ガラスおよび斜長石で、反応部と異なり、正常な状態を維持している。

写真3-5はNo9 (Na₂O等価量1.5%) で、セメントペースト部の膨張ひび割れに沿って、シリカゲルの浸出がみられる。しかし、斑晶に変化は認められない。なお、この骨材はモルタルバー法では無害の判定となっている。

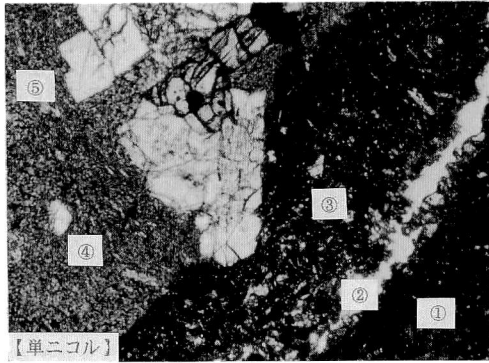
以上のように、反応性骨材でも、骨材中の斑晶は反応しておらず、石基部が変質 (反応) していることから、石基中に有害な鉱物が含まれていることが判った。その中でも、常温において熱力学的に不安定な火山ガラスが反応性であることが確認された。

また、No4の骨材のように、もともとそれ自体に微細なひび割れがあれば、反応は骨材内部まで進み、それがモルタルバー法において大きな膨張を起こす原因の一つと思われる。

表3-2 アルカリ反応促進試験供試体の観察結果表

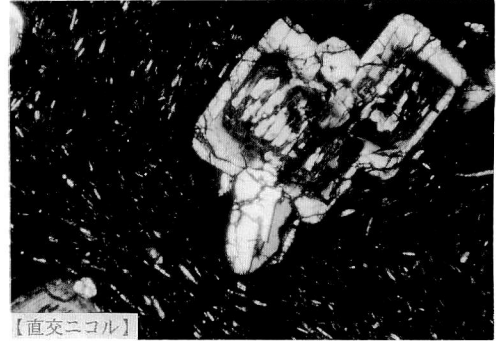
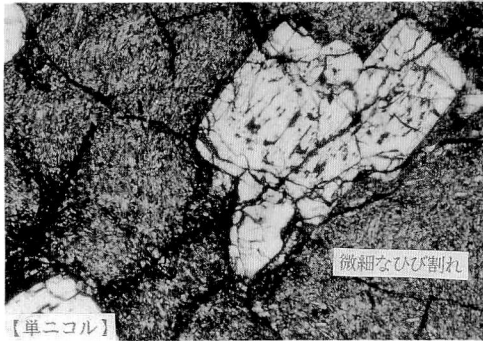
試料 No		1	2	4	9	38	39		
岩石名		安山岩	安山岩	安山岩	安山岩	砂岩	砂岩		
モルタルバー法判定		無害	有害	有害	無害	無害	無害		
表面	ひび割れ	1.2※	無	発生	無	無	無		
		1.5	無	発生	発生	無	無		
		2.0	発生	発生	発生	発生	無	無	
	反応ゲル	1.2	発生	発生	発生	発生	無	無	
		1.5	発生	発生	発生	発生	無	無	
		2.0	発生	発生	発生	発生	無	無	
	内部	反応ゲル	1.2	発生	発生	発生	発生	無	無
			1.5	発生	発生	発生	発生	無	無
			2.0	発生	発生	発生	発生	無	無
部	ゲルポット	1.2	有	有	有	有	無	無	
		1.5	有	有	有	有	無	無	
		2.0	有	有	有	有	無	無	

※アルカリ濃度 (%)

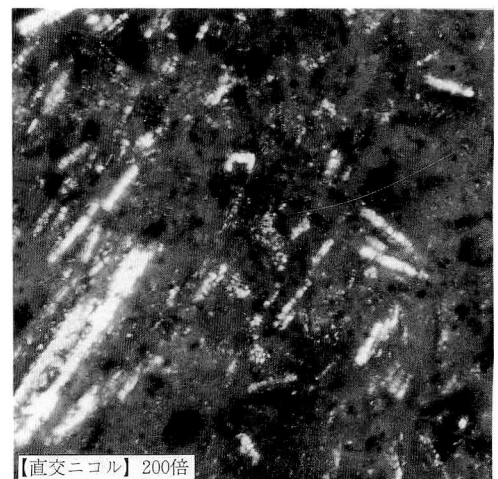
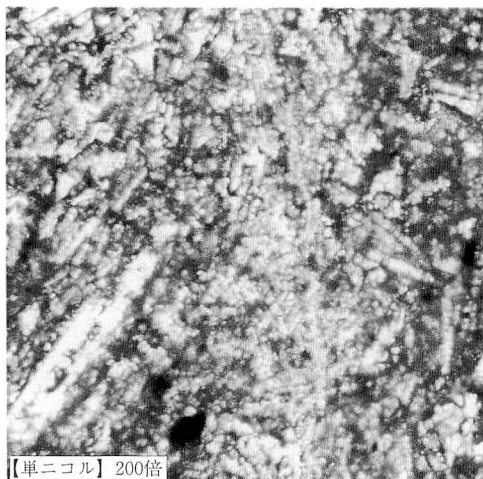


写真・3-1 アルカリ反応後の変化 (No. 2 骨材使用: Na_2O 等価量 2%)

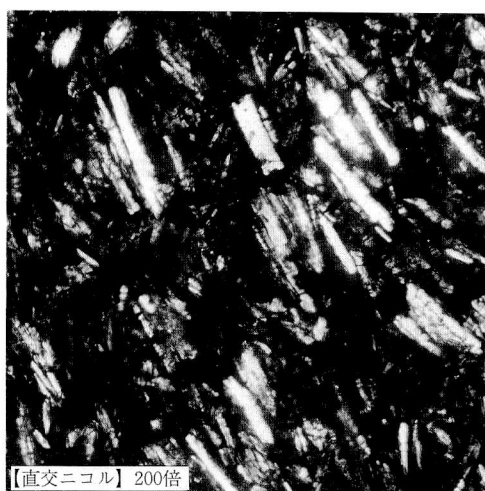
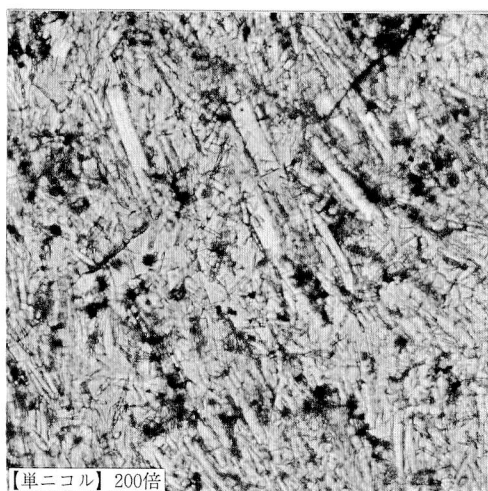
- ①: セメントペースト, ②: 反応によるひび割れ,
③: 反応リム, ④: 準反応部, ⑤: 未反応部



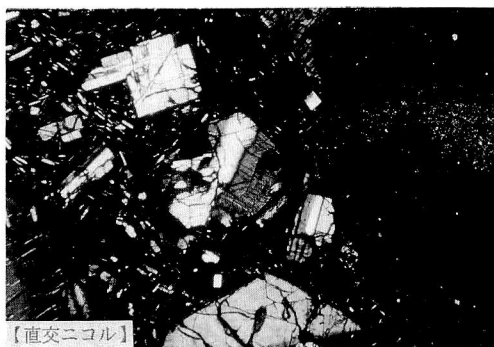
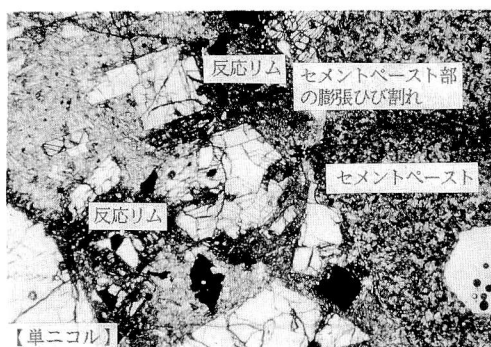
写真・3-2 アルカリ反応後の変化 (No. 4 骨材使用: Na_2O 等価量 1.5%)



写真・3-3 アルカリ反応後の変化 (No. 4 骨材: 反応部の石基)



写真・3-4 アルカリ反応後の変化 (No. 4 骨材：未反応部の石基)

写真・3-5 アルカリ反応後の変化 (No. 9 骨材使用：Na₂O 等価量1.5%)

4. モルタルバー法による膨張率試験

【1】実験目的

鹿児島県産骨材のうち、代表的な24種類の砕石について、モルタルバー法によりアルカリ骨材反応の判定を行う。

【2】実験方法

実験方法は、JIA A 5308レデーミクストコンクリート 附属書 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法) による。詳細は省略する。

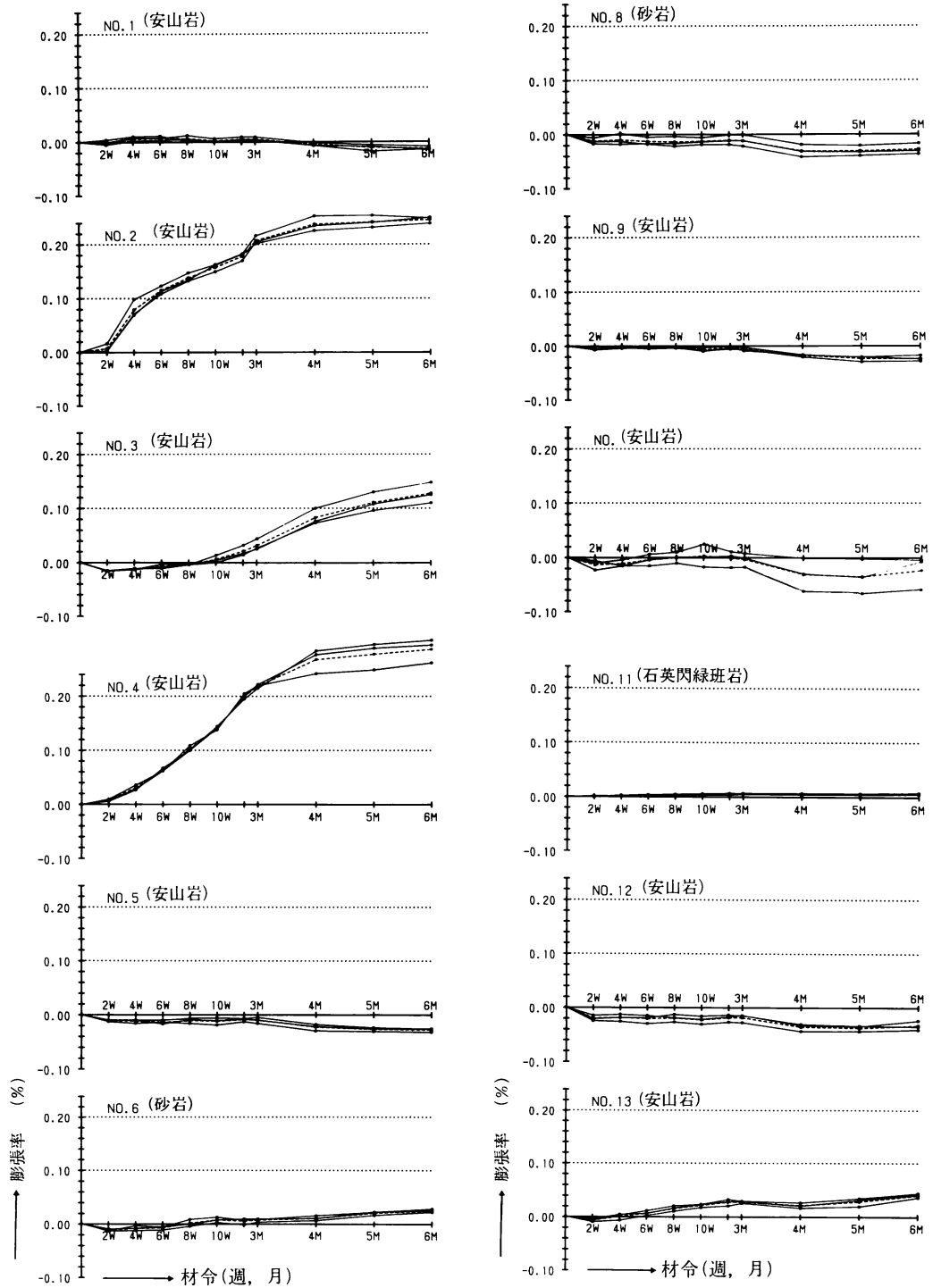
【3】実験結果および考察

実験結果を図・4-1～2に示す。

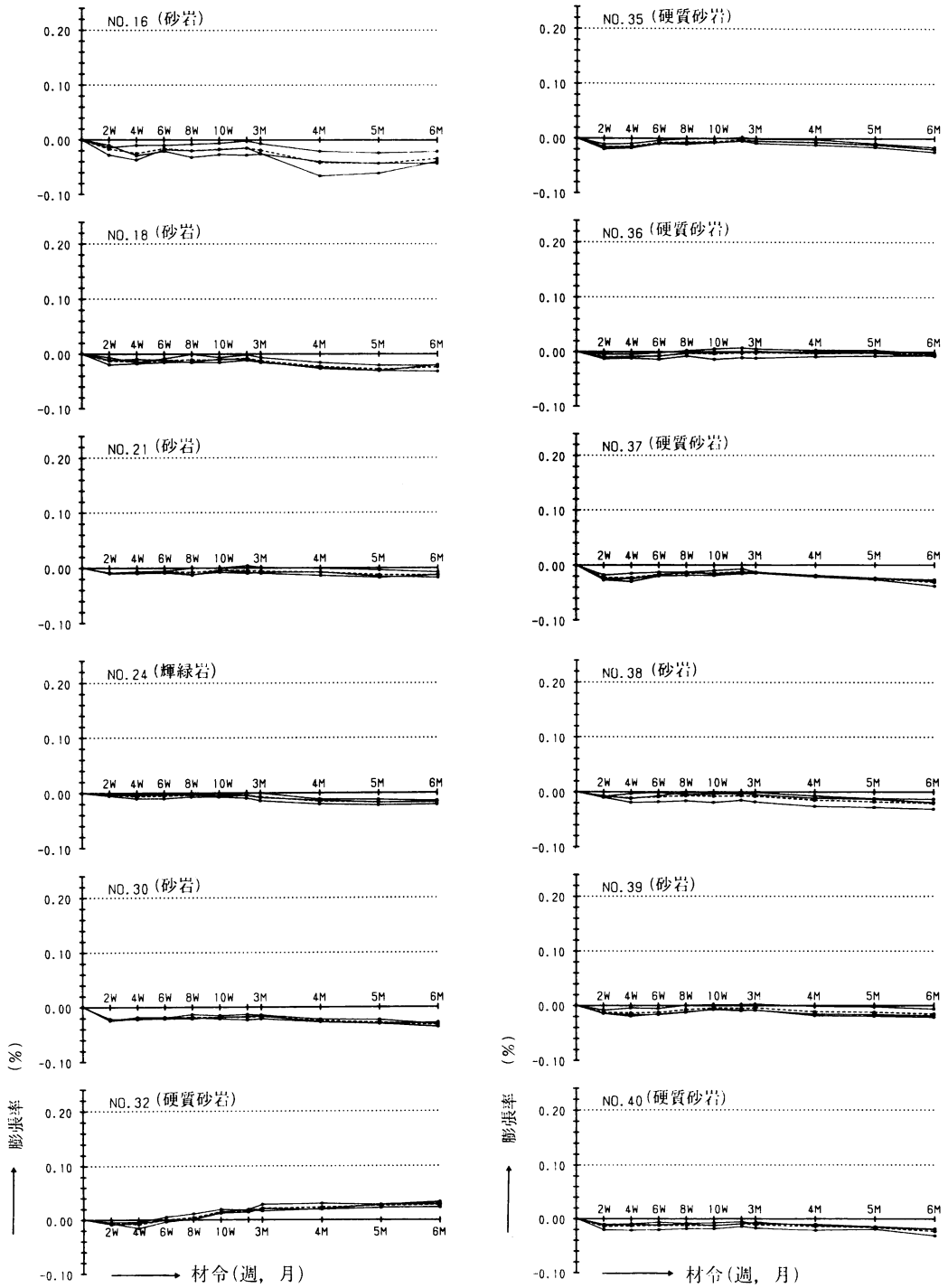
JIS・モルタルバー法による判定 (3本の平均膨張率が、6か月後に0.100%未満の場合は無害とし、0.100%以上の場合は有害とする。また、3か月で

0.050%以上の膨張を示した場合は有害としてもよいが、3か月で0.050%未満のものは6か月まで試験を続けた後に判定する。)で、有害な膨張を示した骨材は24種類中、No 2, 3, 4 (いずれも安山岩) の3種類である。なお、No 6 (砂岩)、13 (安山岩) と32 (硬質砂岩) が、やや膨張傾向を示しているが有害と判定されるまでには至っていない。

外観観察では、有害判定のNo 2, 3, 4は、いずれも多量の浸出物 (供試体表面の斑点状のしみ) やゲル (白い固形状のもの) の発生がみられた。しかし、No 10のように膨張は示さないが、浸出物やゲルの発生が多いものもあった。このように、浸出物やゲルの発生が直接膨張につながるとは必ずしも断定できない。これはモルタルの膨張が、反応性生成物の量だけではなく、その粘性や剛性などにも影響されるためと思われる。



図・4-1 モルタルバー法による膨張率の経時変化



図・4-2 モルタルバー法による膨張率の経時変化

このように、鹿児島県産コンクリート用砕石の中にもアルカリ骨材反応を起こす骨材が存在し、現在使用されていることを認識しておく必要がある。

5. ペシマム現象に関する実験

T. E. Stanton は、反応性骨材を含有するモルタルの膨張量は、骨材中反応成分の割合がある値のとき最大となることを明らかにした。^{11,9)}この値のことをペシマム量という。

したがって、反応性骨材を使用するコンクリートの配合設計ならびにボズランによる抑制効果の検討などに際し、このペシマム量の存在は重要な意味をもっている。したがって、反応性骨材のペシマムについて検討しておく必要がある。

【1】実験目的

モルタルバー法により有害と判定された3種類の骨材について、膨張量のペシマムに関連する反応性と非反応性骨材の混合比の関係について検討する。

【2】実験方法

実験方法は、前記のモルタルバー法に準ずる。

使用した骨材は、モルタルバー法で有害と判定されたNo2, 3, 4(安山岩)および同・無害判定のNo11(石英閃緑斑岩)である。

反応性骨材の混合比率は10, 20, 40, 60, 80, 100%の6種類とし、非反応性骨材にはNo11を使用した。なおセメントのアルカリ濃度は R_2O で1.2%(Na_2O 等価量0.45%の低アルカリ形・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て調整)とした。

測定材令は、脱型時, 2, 4, 6, 8, 10, 12週, 3, 4, 5, 6か月である。なお、膨張率の測定と並行して、供試体表面のひび割れや浸出物の観察も同時に行なった。

【3】実験結果および考察

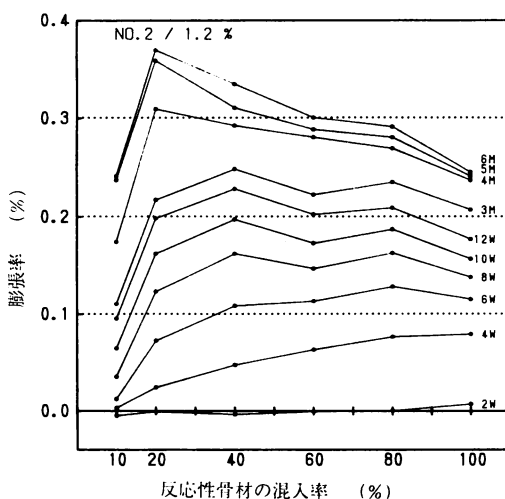
実験結果を図・5-1~3に示す。

No2骨材は、材令6週頃から徐々にペシマム傾向が現れ、材令とともにペシマム値は、反応性骨材の混合比の少ない方へ移行する。しかし、材令8週から3か月の間に混合比60%でやや膨張率に落込み現象がみられ、40と80%の二点にピーク値をもつペシマム曲線となるが、4か月以降ペシマム値は20%で落ち着く。すなわち、No2骨材のペシマム値は20%となり、その材令6か月の膨張率は0.369%で、反応性骨材100%の同材令における膨張率の約1.5倍(膨張率の差0.124ポイント)にあたる。(図5-1)

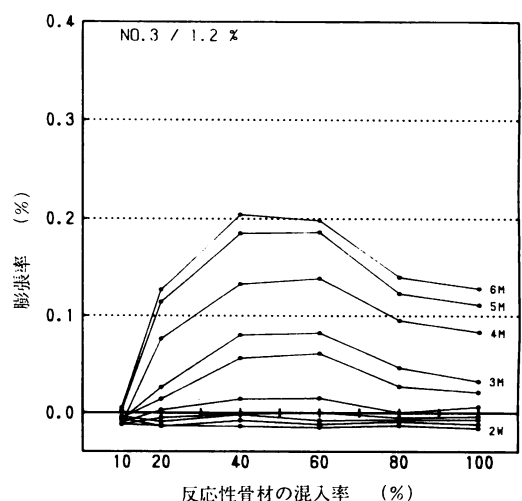
No3骨材は、膨張の発現(材令10週)が始まると同時に混合比40~60%にペシマムが現れ、その傾向は材令6か月まで持続する。材令6か月の膨張率は反応性骨材100%に対し、約1.7倍(膨張率の差0.076ポイント)にも達する。(図5-2)

No4骨材の材令3か月までのペシマム曲線は、混合比10~60%の範囲ではほぼ直線的な膨張を示すが、60~100%では、あまり変化はみられない。

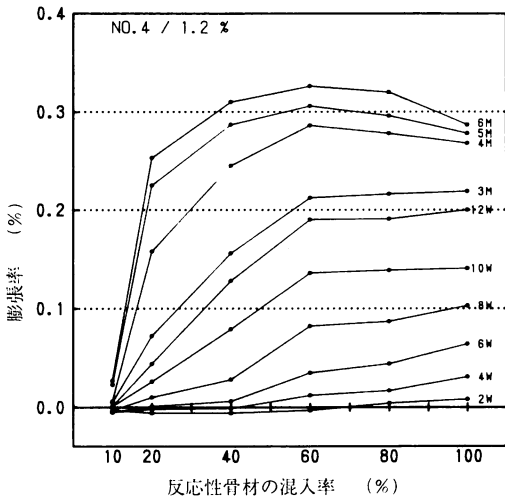
6か月でのペシマム値は60%であるが、100%の膨張率の約1.1倍(膨張率の差0.039ポイント)で、はっ



図・5-1 ペシマム曲線(使用骨材:No.2)



図・5-2 ペシマム曲線(使用骨材:No.3)



図・5-3 ベシマム曲線（使用骨材：No.4）

きりしたベシマム値は現れていない。

このように、同じ安山岩系の骨材でもベシマム値が異なることに注意しなければならない。

この実験で同時に行った供試体表面の観察によれば、No 2, 3, 4 骨材使用のいずれの供試体とも、膨張するに従って浸出物の発生量も増加し、また、膨張量の大きい供試体ほど浸出物の発生量も多く、この傾向は前述のベシマムと類似している。

浸出物は、初期の段階で透明なゾルまたは軟らかいゲル（写真3-1、濡れたような斑点）が発生し、その後、白色不透明なゲルが発生した。これは、浸出物中の陽イオン（ Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} ）の拡散速度の違いから時間的に変化するもので、高アルカリ型（ Na^+ 、 K^+ を多く含有するもの）が、セメントペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等からカルシウムを取り込むことによって高カルシウム型になると考えられている。

一方、ひび割れは、No 2 骨材使用の供試体に発生し（写真3-1）、これが膨張量を大きくした原因でもある。No 4 骨材使用の供試体（混合比60~100%）は、No 2と同様の膨張を示し、かつ、浸出物の発生量も多いが、ひび割れは発生していない。これは、アルカリ・シリカ反応によって生成されるアルカリ・シリカゲルの吸水によって発生する膨張圧およびひび割れの進展状況が、ゲルの粘性ならびに剛性に大きく左右されることによるものと思われる。

6. コンクリートバー法による膨張量試験

コンクリートバー法による骨材のアルカリ反応性判定試験方法は、試験設備が大型化することなどから、現在のところまだ確立されていない。

しかし、実際のコンクリート構造物で有害な反応が起こるか否かを試験する方法としては、モルタルバー法より適した試験方法であることはいうまでもない。また、コンクリートバー法は調査変更や混和材料の使用による劣化防止対策の検討などにも有効に利用できると考えられる。

そこで、コンクリートバー法による膨張量試験を試みた。

【1】実験目的

コンクリートバー法による膨張量試験が、骨材のアルカリ反応性判定試験方法として適用できるか検討する。また、モルタルバー法との比較により、モルタルとコンクリートのアルカリ骨材反応の違いについて検討する。

【2】実験方法

使用材料は、粗骨材が反応性骨材No 2, 3, 4と非反応性骨材No11（共に碎石）、細骨材には普通砂（モルタルバー法で非反応性を確認済み）を使用した。

セメントは普通ポルトランドセメント（低アルカリ型： Na_2O 等価量0.45%）で、アルカリ濃度を水酸化ナトリウム（試薬特級）により1.2%に調整した。

骨材の性状とコンクリートの調合表を表6-1,2に示す。

水セメント比を45%とした理由は、水セメント比にもベシマムが存在し、水セメント比が小さいほど単位セメント量が多くなるため、膨張量も増大するといわれている¹⁰⁾。したがって、通常使用されている建築用コンクリートの水セメント比のうち、膨張量の最も大きい、45%を採用した。

供試体は、80×80×300（mm）の角柱とし、コンクリート打設時に膨張量測定用プラグを埋め込み、それぞれ3本ずつ作製した。

供試体の養生は、打設後、20±3℃、RH 85%の恒温・恒湿室で前養生の後、モルタルバー法に準じ、試験期間中、気密な養生箱で温度40±2℃、相対湿度95%の養生を行なった。

測定材令は、0（脱型時）、2, 4, 6, 8, 10, 12, 13週（3か月）とした。なお、供試体は測定前日養生槽から取り出し、養生箱に入れたまま24時間除冷した後、測定を行なった。

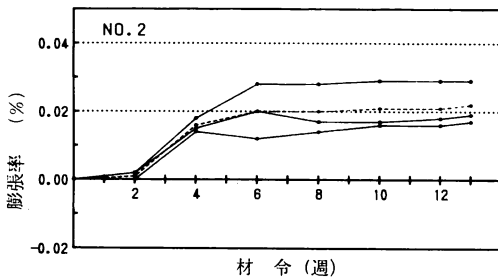
【3】実験結果および考察

表6-1 骨材の性状

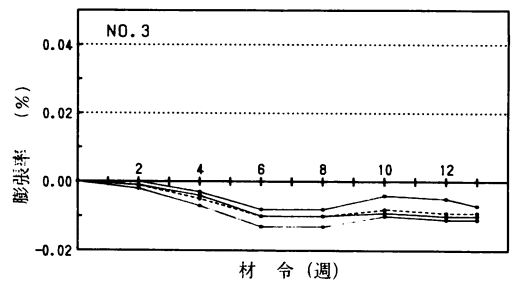
試料 No	岩石の種類	見掛比重		吸水率	モルタルバー 法による判定
		表乾	絶乾		
2	安山岩	2.56	2.52	1.74	有害
3	安山岩	2.64	2.59	1.99	有害
4	安山岩	2.50	2.47	1.42	有害
11	石英閃緑岩	2.69	2.66	1.15	無害
-	普通砂	2.50	2.42	3.50	無害

表6-2 コンクリートの調査表

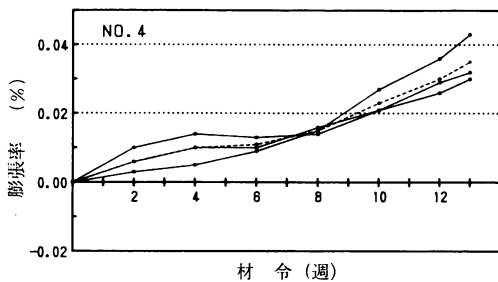
水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)		
				セメント	砂	砕石
45	18	32.5	221	156	199	414



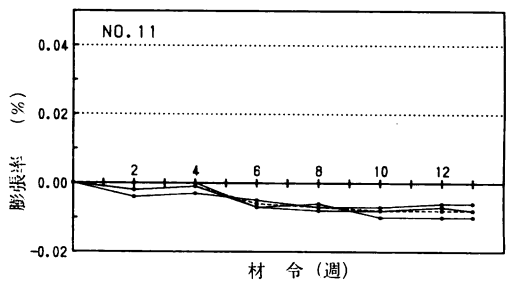
図・6-1 コンクリートバーの膨張率の経時変化 (使用砕石：No.2)



図・6-2 コンクリートバーの膨張率の経時変化 (使用砕石：No.3)



図・6-3 コンクリートバーの膨張率の経時変化 (使用砕石：No.4)



図・6-4 コンクリートバーの膨張率の経時変化 (使用砕石：No.11)

図6-1～4に、コンクリートバー法による材令3か月までの膨張率の経時変化を示す。

反応性骨材No2と4（モルタルバー法による材令3か月の膨張率は、0.20および0.22%，同6か月は0.24および0.30%で、共に有害判定）使用の供試体の膨張

率は、材令3か月で0.02および0.03%に対し、一方、同じ反応性骨材でも、No3骨材（モルタルバー法による材令3か月の膨張率は0.04%で無害判定、同6か月では0.13%で有害判定）使用の供試体は、-0.01%と収縮傾向にある。したがって、No3骨材のようにモルタ

ルバー法で反応性と判定された骨材でも、若材令での膨張傾向が緩慢なもの（モルタルバー法の3か月の判定で無害、同6か月の判定で有害）は、コンクリートバー法では膨張しないか、あるいは膨張するまでに時間がかかるものと思われる。しかし、今回の実験では試験材令を3か月としたため、その確認はできなかった。

なお、No 2, 4 供試体の材令3か月のコンクリートバーの膨張率は、同材令におけるモルタルバー膨張率の7~10%程度である。

供試体表面の観察では、いずれの供試体にも、材令3か月までひび割れや浸出物等は確認されなかった。

しかし、コンクリートバー供試体と同時に作製した円柱供試体（ $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ ）には、No 2, 4 骨材使用の供試体に膨張ひび割れならびに少量の浸出物（写真中の白い斑点）が観察された。

一方、No 3, 11 骨材使用の供試体表面には、何ら変化は見られなかった。

写真6-1に、供試体表面の状態を示す。

これらの供試体は、温度 $40 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、相対湿度95%以上の養生槽に直接入れ、供試体表面に水滴が付くような湿潤状態で養生したものである。

このことから、水分の供給が十分な場合は反応が助長され、膨張ひび割れを発生させたものと思われる。

したがって、この種の実験を行う場合、特に供試体の置かれる湿度条件を検討する必要がある。

また、コンクリートバーの膨張率はモルタルバーの

10%以下であるにもかかわらず、このひび割れは、モルタルバーに発生したひび割れよりも大きい。これは、アルカリ骨材反応によって生ずる局部膨張圧が、モルタル中の細骨材よりコンクリート中の粗骨材の方が大きいことによるものと思われる。

以上のように、コンクリートによる膨張量試験（コンクリートバー法）を、骨材のアルカリ反応判定試験法として採用するには、まだ問題点も多い。すなわち、膨張量がモルタルに比べ小さいため判定基準値を決めにくいこと、膨張に長期間を要すること、供試体が大きくなるため試験装置も大型になるなどが挙げられる。しかし、コンクリートで直接試験することから、コンクリート構造物に近い状態での試験法のため、今後検討を加え、アルカリ骨材反応試験方法として確立しなければならない。

7. 結 語

鹿児島県産のコンクリート用碎石について、JIS A 5308骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）による判定の結果、3種類の反応性骨材が確認された。これらの骨材は、いずれも安山岩である。しかし、同じ安山岩系の骨材でも非反応性のものも多い。

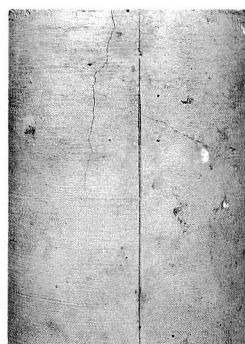
鹿児島県の岩石分布によれば、全体の40%は安山岩で占められていることから、今後あらたに安山岩系の岩石からコンクリート用碎石を製造する場合、事前調査を行い、安全性を確認しておかねばならない。



【No. 2 碎石使用】
アルカリ骨材反応特有のマップ状のひび割れの発生ならびに少量の浸出物（白い斑点）が観察された。



【No. 3 碎石使用】
変化なし



【No. 4 碎石使用】
アルカリ骨材反応特有のマップ状のひび割れの発生ならびに少量の浸出物（白い斑点）が観察された。



【No. 11 碎石使用】
変化なし

写真・6-1 コンクリートバー法（材令3か月）による円柱供試体の表面状態

この反応性骨材（碎石）を中心に各種の実験を試みたが、その結果をまとめると、以下のとおりである。

1) 岩石学的考察によれば、同じ安山岩系骨材でも反応性と非反応性骨材の含有鉱物にはっきりした違いは確認できなかったが、下記①～⑤に示すいくつかの共通点が認められ、この共通点を多く有する骨材ほどアルカリ反応性の骨材である可能性が高い。

- ① 粉末X線回析でクリストパライトのピーク値がみられる。
- ② 石基部に水酸化鉄のような部分的変質がある。
- ③ 紫蘇輝石と石英を含む。
- ④ 石基部に火山ガラスを含む。
- ⑤ 石基部にGeothiteが認められる。

2) モルタルバー法試験における浸出物（ゾルまたはゲル）の発生は、即膨張につながるものではないが、反応性骨材である可能性は強い。

3) 同じ安山岩系の反応性骨材でも、反応成分の混入割合によって、ベシマム値ならびにベシマム曲線のタイプが異なる。

4) プシマム値をもつ反応性骨材を、JIS規定のモルタルバー法だけで判定することは、有害骨材を見誤る危険性がある。（反応性骨材を100%使用した場合に膨張率が最大になるとは限らないため）

5) モルタルバー法に準じて行った、反応性骨材使用のコンクリートバーの膨張率は、モルタルバーの膨張率の10%前後と小さいが、水分の供給が十分な場合、ひび割れ発生の可能性がある。

以上、アルカリ骨材反応に関連した調査ならびに実験を行ったが、まだ不明な点も多く、今後さらに検討を加えたい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、実験に協力を得た当時の学部学生 田畑清人、祐福貴司、渡辺大祐の諸君の労に對し感謝します。特に、岩石学的試験においては、本大学教養部地学研究室の浦島幸世、根建心具両教授に終始ご指導戴きましたこと、ここに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Stanton, T. E. : Expansion of Concrete through Reaction Between Cement and Aggregates, Proc. ASCE Vol. 66, 1940
- 2) 有泉昌：コンクリート用骨材の問題点，粘土科学 Vol. 19 No 2, 1979
- 3) 九州支部材料施工委員会：九州地方における膨張性骨材に関する調査研究報告書（昭和60・61年度支部助成研究）昭和62.3
- 4) 通産統計協会：昭和60年碎石統計年報
- 5) 鹿児島県碎石協同組合連合会 鹿児島県中小企業団体中央会：活路を求めて（昭和54年度活路開拓調査指導事業報告書）昭和55年
- 6) 力田正一著：グリーンプックス 106 岩石薄片の作り方
- 7) 井上勤著：顕微鏡観察シリーズ4 鉱物の顕微鏡観察
- 8) 浅田栄一，貴家恕夫，大野勝美著：X線分析
- 9) 洪悦郎，鎌田英治，鈴木秀明：アルカリ反応性安山岩碎石のベシマム混入率・粒度に関する実験，セメント技術年報40 昭和61年
- 10) Jones, F. E. and R. D. Tarletor : National Building Studies, Research Paper No. 25, 1958