

[1104] AAR に及ぼすアルカリ量、スラグ量及び締固め条件等の影響に関する研究

銀山 功 (住友セメント 技術開発センター)
 正会員 ○ 川村 政喜 (住友セメント コンクリート技術試験所)
 田代 芳文 (住友セメント 技術開発センター)
 正会員 山本 親志 (住友金属工業 利材室)

1. まえがき

本研究は、AAR膨張を起こす天然反応骨材と高、低アルカリセメント及びスラグ粉末を用い、スラグ粉末と低アルカリセメントのAAR膨張抑制効果について、また、モルタル・コンクリートの反応性骨材のペシマム混合率やコンクリートの締固め条件が、AAR膨張に及ぼす影響について実験を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

- (1) 骨材：非反応性骨材として岩瀬産碎石、スラグ碎石及び室木産海砂を、反応性骨材としてA、B、C、Dの4種を用いた。使用した骨材の物理的性質を表-1に、化学法による性状を表-2及び図-1に示す。
- (2) セメント： $R_2O = 1.11\%$ の高アルカリ普通セメント（以後HACと呼ぶ）及び $R_2O = 0.51\%$ の低アルカリ普通セメント（以後LACと呼ぶ）の2種を用いた。表-3に化学成分を示す。
- (3) スラグ微粉末：住友金属工業鹿島製鉄所水冷高炉スラグ微粉末（ $Bl_{eq} 3930cm^2/g$ ）を用いた。表-3に化学成分を示す。
- (4) アルカリ調整剤：特級NaClを用いた。アルカリ調整は、セメント中のアルカリ量が、 R_2O で1.20%になるよう補正した。（以後HAC或はLACにNaClを加え、1.20%に補正したアルカリ調整セメントを、各々、H・HAC及びH・LACと呼ぶ。）

2.2 モルタル及びコンクリートの配合と長さ変化

- (1) モルタル：ASTM C-227のモルタル供試体法によった。但し、骨材にコンクリート用細骨材もASTMの規格通り粒度調整し、反応性及び非反応性粗骨材の粉碎粒調骨材と混合使用した。細骨材（S：室木）と反応性

表-1 骨材の物理的性質

試験項目	細骨材		粗骨材				
	室木	岩瀬	A	B	C	D	スラグ
骨材のふるい分け(F.M)	2.46	6.72	6.72	6.51	6.92	6.90	6.78
単位容積重量(kg/l)	1.55	1.59	1.59	1.47	1.46	1.39	1.44
実績率(%)	61.8	60.6	59.5	56.6	58.1	59.4	57.7
比重	2.56	2.65	2.70	2.65	2.55	2.45	2.56
吸水率(%)	3.12	0.95	1.03	2.05	1.39	4.25	2.62
安定性試験(%)	6.9	1.3	2.5	1.8	0.5	9.9	3.3
コンクリート用碎石 単位質量(2005碎石) 実績率	-	1.58	1.56	1.50	1.49	-	-
細骨材の塩分含有量(%) (土木学会基準)	0.002	-	-	-	-	-	-

表-2 骨材の化学法による性状と岩質

種別	骨材種別	骨材の潜在アルカリ反応試験				
		化学法		岩質判定		
		Sc	Rc	判定区分	岩石名 鉱物名	
細骨材	S: 室木	38	42	無害	—	石英 石長 英石
	Gn: 岩瀬	19	62	無害	砂、頁岩、結晶質	石英 英母
粗骨材	Gr: A	240	187	潜在的有害	輝安山岩	クワスサイト
	Gr: B	427	103	有害	安山岩 (火山岩)	クワスサイト
	Gr: C	614	212	潜在的有害	古銅輝石 安山岩	クワスサイト
	Gr: D	571	213	有害	安山岩	トリプレイト
	Gn: スラグ	4	67	無害	—	—

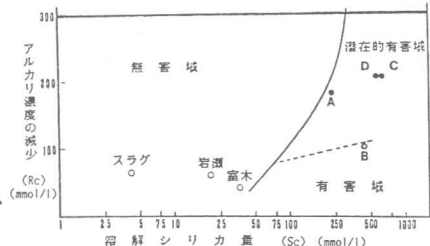


図-1 骨材の化学法による判定区分

粗骨材 (G_r) 及び非反応性骨材 (G_n : 岩瀨) 分の混合比は、コンクリート中の骨材比に合わす為、示方配合の単位重量比とした。

表-3 化学成分

種別	化 学 分 析 (%)													
	gloss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	SO ₃	S	TOTAL	Na ₂ O	H ₂ O	R ₂ O
H A C	0.57	0.10	22.45	6.08	2.80	-	62.41	1.46	1.96	-	97.84	0.66	0.69	1.11
L A C	1.32	0.20	21.97	5.54	3.22	-	63.08	1.62	1.85	-	98.80	0.14	0.56	0.51
高炉スラグ粉末	-0.01	0.23	31.81	14.80	0.52	0.56	42.81	4.70	2.20	0.79	98.65	0.24	0.27	0.42

- (2) コンクリート：表-4に示す配合条件で行い、成形は10×10×40cm型枠を用いた。コンクリート中の反応性骨材混合率は、全骨材 ($S+G_r+G_n$) に対する比 (%) で表示し、必要に応じて、粗骨材分 (G_r+G_n) に対する比 (%) を () 値で示した。
- (3) 長さ変化：モルタル供試体及びコンクリート供試体は、20℃恒温室で成形し、1～2日間養生後、脱型し基長を測定した。その後、40±2℃、RH95%以上の恒温恒湿槽で養生した。長さ変化は、測定前日に20℃恒温室に移し、濡れタオルで包み、更にシートで覆い翌日測定した。

表-4 配合条件

コンクリートの配合条件	
①	単位粗骨材かさ容積： 0.64 (m ³ /m ³)
②	単位セメント量： 355 (kg/m ³)
③	水セメント比： 55 (%)
④	目標空気量： 4±0.5 (%)
⑤	反応性骨材混合率は、(注1) 58%又は55%(100%)及び20%とした。

(注1) 反応性骨材の子想ベシマム混合率で、ASTM化学法に於けるアルカリ濃度減少量(Rc)と、骨材の子想ベシマム量の関係から、骨材A、B、C、Dの平均値を用いて求めた。

3. 実験方法及び結果

3.1 反応性骨材の混合率とモルタル・コンクリートのAAR膨張特性(ベシマム混合率)

3.1.1 実験方法

セメントは、アルカリ調整セメントのH・HACを用い、反応性骨材A、Cの各々の骨材混合率によるモルタルとコンクリートの膨張を測定し、本実験の範囲で、各々のベシマム条件を調べた。コンクリートの配合を表-5に示す。コンクリートの成形は、棒状振動機(BM28電動式φ27mm)でコンクリートの空気量が約2%になるまで締固めた。(以後過剰締固めと呼ぶ)

3.1.2 実験結果

図-2に骨材A、図-3に骨材Cの骨材混合率とモルタル及びコンクリートのAAR膨張率の関係を示す。

- (1) モルタルの場合、図-2(a)及び図-3(a)が示すように、骨材A、骨材Cとも材令3ヶ月で既に膨張のピークを示し、材令3ヶ月と6ヶ月との膨張率を比較すると、ほとんど差がなく、比較的早い時期に膨張が停滞した事が判る。モルタルのベシマム混合率(以後ベシマムと呼ぶ)は、骨材Aで47%骨材Cで34%と骨材Aと骨材Cとは異なったベシマムとなった。
- (2) コンクリートの場合、図-3(b)の骨材Cは、モルタルと同様材令3ヶ月で既にベシマム20%(34%)を示した。しかし、モルタルと異なり、材令3ヶ月から6ヶ月の間にベシマムでの膨張は増大した。

表-5 コンクリートの配合

セメントの種類	反応性骨材種類	反応性骨材混合率 $\frac{G_r}{S+G_r+G_n}$ (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					水	細骨材	粗骨材		混和剤	
							C	W		非反応性 G_n
H・HAC (7%調整セメント)	A	58 (100)	55	43.1	335	184	740	0	1029	C#0.25
		47 (80)		42.5			730	207	829	
		35 (60)		42.5			730	413	619	
		20 (34)		42.5			730	676	352	
		12 (20)		42.5			730	819	205	
H・HAC (7%調整セメント)	C	55 (100)	55	44.5	335	184	763	0	949	C#0.25
		34 (60)		43.1			740	395	592	
		20 (34)		42.5			730	661	348	
		12 (20)		42.5			730	810	203	
				42.5			730	810	203	

一方、図-2(b)の骨材Aは材令3ヶ月では未だベシマムがはっきりしない。しかし、材令6ヶ月にかけて膨張が増大し、6ヶ月では明瞭なベシマム20% (34%)を示した。コンクリートの場合は、骨材Aと骨材Cのベシマムは一致した。

- (3) 同一骨材でのモルタルとコンクリートとのベシマムの関係は、骨材Aでは、両者は異なり、骨材Cではコンクリートのベシマムを()値、即ち反応性骨材を粗骨材中での割合で見れば、モルタルのベシマムと一致する。
- (4) 本実験では反応性骨材2例について検討したが、骨材Aのようにモルタルとコンクリートとのベシマムが一致しない場合もあり、また、図-2と図-3から判るように、モルタル供試体の膨張率の大小とコンクリート供試体の膨張率の大小とは関係がないようである。

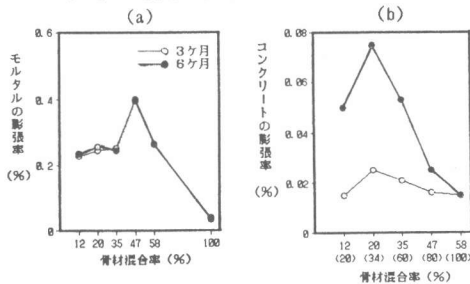


図-2 反応性骨材Aの混合率と
モルタル・コンクリートの膨張率

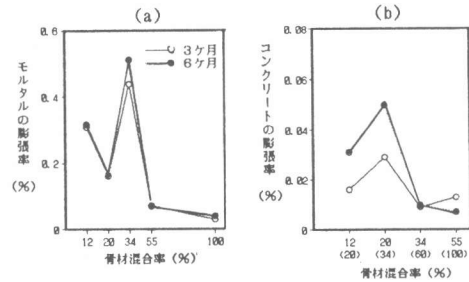


図-3 反応性骨材Cの混合率と
モルタル・コンクリートの膨張率

3.2 スラグ微粉末置換によるAAR膨張抑制効果の検討

スラグ粉末置換によるAAR膨張抑制効果を検討する為、下記の実験を行った。

3.2.1 実験方法

骨材はC (G_r) を、非反応性骨材は岩瀬産 (G_n) と室木産 (S) を用いた。スラグ置換は、ベースセメントにHAC及びH・HACを用い、置換率を30%、50%、65%とした。H・HACにスラグを置換した場合、スラグ置換によるアルカリ希釈を防ぐ為、結合材中のアルカリ量が1.20%になるようNaClを添加し調整した。この際、スラグ中のアルカリ量は無視した。用いたモルタルの配合を表-6に、コンクリートの配合を表-7に示す。また、コンクリートの成形は、過剰締めで行った。

3.2.2 実験結果及び考察

図-4にHAC、H・HACのスラグ置換と骨材混合率によるモルタルの膨張率を、図-5にHAC、図-6にH・HACのスラグ置換によるモルタルとコンクリートとの膨張率を比較したものを示す。

- (1) モルタルの場合、図-4で、スラグ置換率が増すごとにAAR膨張率は減少を示した。また、結合材中のアルカリを一定としたものでも、スラグ置換率が増すごとに膨張率は減少した。このことから、スラグには特有の膨張抑制効果があるものと考えられる。
- (2) スラグ置換により、結合材中のアルカリが希釈される場合、モルタルとコンクリートの膨張は、図-5に示すようにスラグ置換30%で膨張抑制効果が見られる。スラグ置換30%でモルタル及びコンクリートの膨張率は、各々、HAC単味の膨張の約15%及び約30%まで減少した。
- (3) NaClによってアルカリを一定にしたものは図-6に示すように、モルタルの場

表-6 モルタルの配合

配合	反応性骨材 混合率 Gr S+Gn+Gr (%)	70-率 (%)	砂セメント比 S+Gn+Gr C	粒調砂の混合比(%)		
				非反応性	非反応性	反応性
				S	Gn	Gr
I	20	105	2.25	42	38	20
II	55	120		45	0	55

表-7 コンクリートの配合

配合	反応性骨材 混合率 Gr S+Gn+Gr (%)	W/C	S/a	単 位 量 (kg/m ³)					
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材		混和剤 POZ.70
							非反応性 Gn	反応性 Gr	
I	20	55	42.1	335	184	720	664	345	C#0.25
II	55					44.1	750	0	

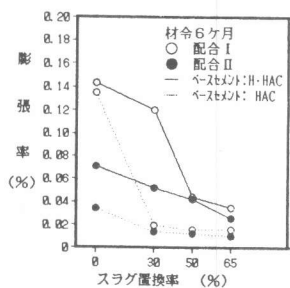


図-4 スラグ置換と骨材混合率によるE1列の膨張率

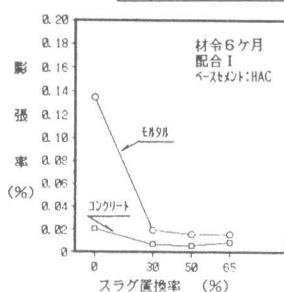


図-5 HACのスラグ置換と膨張率

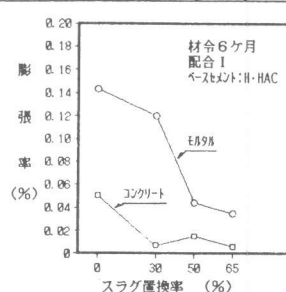


図-6 H・HACのスラグ置換と膨張率

合はスラグ30%の置換では余り抑制効果が見られないものの、コンクリートでは、図-5の場合と同様にAAR膨張抑制効果を示し、モルタルとコンクリートの膨張傾向の違いを示した。

3.3 LAC、HAC及びアルカリ調整したH・LAC、H・HACのAAR膨張特性

3.3.1 実験方法

セメントは、LAC、HAC及びH・LAC及びH・HACを骨材はA、Cを用い、モルタル及びコンクリートの膨張率を測定し、アルカリ量の違い及びアルカリ添加による影響を調べた。コンクリートの配合を表-8に示す。また、コンクリートの成形は、過剰締固で行った。

3.3.2 実験結果

図-7に骨材A、図-8に骨材Cに対するセメント中のアルカリ量とモルタル、コンクリートの膨張との関係を示す。

- (1) 図-7(a)及び図-8(a)のLACとHACのモルタル供試体の膨張

率を比較すると、HACでは材令3ヶ月でASTM6ヶ月の判定値0.1%を上廻り有害な膨張を引き起こす可能性がある事を示している。一方、LACでは両骨材とも、膨張率は非常に小さく、膨張抑制効果が大きい事を示している。

- (2) コンクリートの場合、膨張率0.025%程度からひび割れが認められ、図-7(b)、図-8(b)が示すように、HACではいずれの骨材でも材令6ヶ月ではひび割れがかなりはっきりと肉眼で認められた。一方、LACを用いたものは、モルタルの場合と同様その膨張率は小さく、ひび割れも見られず抑制効果が大きい事を示した。

- (3) セメント中のR₂O量が1.20%になるようNaClで補正したアルカリ調整セメントでは、ベースセメントをLACとするか或はHACとするかによって、モルタル及びコンクリート供試体の膨張率は大きく影響され、図-7の骨材Aの場合では、

表-8 コンクリートの配合

セメントの種類	反応性骨材 混合率 Gr S+Gn+Gr (%)	W/C	S/a	単 位 量 (kg/m ³)						
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材		混和剤 POZ.70	
							非反応性 Gn	反応性 Gr		
HAC, LAC 及び H-HAC, H-LAC	A	20	55	42.5	335	184	730	676	352	C#0.25
	C						730	661	348	

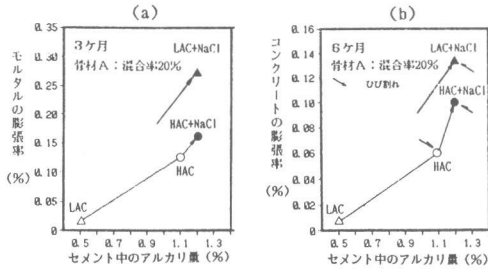


図-7 セメント中のアルカリ量とモルタル・コンクリートの膨張率

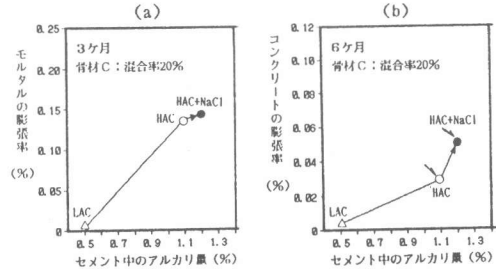


図-8 セメント中のアルカリ量とモルタル・コンクリートの膨張率

H・LACの膨張率はH・HACに対し、材令3ヶ月のモルタル供試体で1.7倍、材令6ヶ月のコンクリート供試体で1.3倍と、より過大な膨張を示した。これは外から添加したアルカリは、セメント中のアルカリよりAAR膨張に大きく寄与する事を示している。

3.4 締固め条件を変化（コンクリート中の空気量の変化）させた時のAAR膨張⁽¹⁾

3.4.1 実験方法

コンクリート中の空気量が過剰な締固めによって減少した場合のAAR膨張の影響について調べた。締固め方法は、棒突きによる締固め（JIS A 1132）と過剰な締固めの2方法とし、過剰な締固めは、10×10×40cmの型枠にコンクリートを1層詰めし、バイブレーターで4点、振動時間10秒/点で行った。空気量の測定は、フレッシュコンクリートと硬化コンクリート（ASTM C-457-71 修正ポイントカウント法）について行った。

3.4.2 実験結果

(1) 表-9にコンクリートの配合及び空気量の測定結果を示す。過剰な締固めにより空気量は棒突き（4%）と

表-9 コンクリートの配合

試体の種類	反応性骨材の種類	反応性骨材混合率 (%)	W/C	S/a	単位量 (kg/m ³)						空気量				
					水		細骨材 S	粗骨材		混和剤 POL.70	フレッシュコンクリート		硬化コンクリート		
					試体	W		非反応性 Gr _n	反応性 Gr _r		棒突き (%)	過剰直後→締固め後 (%)	(ASTM C 457-71) 気泡空気量, 空隙係数		
HAC	A	20	55	42.5	335	184	730	676	352	①±0.25	11.2	4.0	-	-	-
HAC	C	20	55	42.5	335	184	730	661	348	②±0.25	12.1	-	4.2 → 1.5	-	-
											14.7	4.0	-	3.73, 340 μ	
											15.0	-	4.4 → 1.2	1.67, 370 μ	

比べ、1.2~1.5%と半分以下になった。

(2) 図-9にコンクリートの膨張率を示す。コンクリート中の空気量の減少は、AAR膨張を助長する可能性のある事を示唆している。特に、骨材Cでは、過剰な締固めによって空気量が減少した供試体には、材令5ヶ月でひび割れが認められ空気量の多い棒突き供試体は、膨張率も小さくひび割れも認められていない。このように、コンクリート中の気泡には、AAR膨張を緩和する効果があり必要以上の締固めには注意する必要がある。

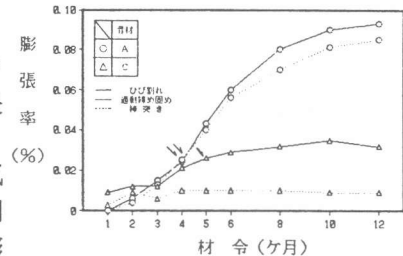


図-9 コンクリートの膨張率

3.5 コンクリート供試体のAAR膨張率とひび割れ

C SA-A 23.2-14Aのコンクリート供試体によるアルカリ骨材反応判定試験では、骨

材の有害の有無を表-10に示す値によって行う。(2)

表-10 CSAの規定値

($23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿潤養生)

- 1) 各材令 膨張率 $\geq 0.03\%$: 有害な反応性有り
- 2) 材令3ヶ月 膨張率 $\geq 0.02\%$: 湿潤環境下で使用される場合
過大な膨張であると考える。
- 3) 材令3ヶ月 膨張率 $\geq 0.04\%$: 乾燥環境下で使用される場合
過大な膨張であると考える。

しかし、わが国ではコンクリート供試体による骨材判定試験は、未だ確立されておらず判定値の目安もないのが現状である。図-10は、AARによるコンクリート供試体の膨張で、ひび割れが目視で発見される膨張率の限界を見る為図示したものである。

本実験で膨張測定時に行ったひび割れの目視観察で、ひび割れが認められた供試体(▲印)については発見時の膨張率と材令を、ひび割れが未だ認められない供試体(○印)については、その膨張率が0.02%以上のものを対象にし、それが過去1ヶ年間に示した最大の膨張率と材令を示してある。

図から判るように、膨張率0.03%以上では、すべてひび割れが認められている。そして、ひび割れは、膨張率が0.025%程度で認められ、この前後の範囲ではひび割れが認められたものと、未だ認められていないものが混在する。コンクリート供試体による骨材のAAR試験で有害とする基準を『供試体にひび割れが発生する膨張』と仮定すると本実験によれば、その膨張の限界は0.025%であり(勿論ひび割れの発生の時期は、試験条件によって左右される事になるが)、カナダ法の0.03%では、コンクリートの配合、骨材粒度の違い、養生温度の違い等から、危険側で骨材判定をする事になる。

また、カナダ法では、構造物が使用されている環境条件によって表-10の通り、材令3ヶ月での判定値を設けている。

しかし、養生温度 40°C やセメント中のアルカリ量 R_2O で1.20%と、カナダ法に比べ更に促進された条件で行うAAR試験では、図-11(b)に示すように、岩瀨砕石(無害骨材)でさえ0.02%弱程度膨張し、反応骨材では、図-11(a)(b)の材令3ヶ月の比較で判るように更に強い促進作用をうける。従って、このカナダ法の判定値は、上記のような促進法にそのまま適用すると、相当安全側の骨材判定値となる可能性があり、カナダ法と条件が異なる場合は、条件に合った新しい判定値を見い出さなければならないことになる。

4. まとめ

本実験で明らかになった事を要約すると、

- (1) 反応性骨材のベシマム混合率は、モルタルとコンクリートでは一致しない。
- (2) セメントのスラグ置換(置換率30%以上)及びLACの使用は、AARによる膨張抑制に有効である。
- (3) コンクリート中の空気泡には、AAR膨張を緩和する効果がある。
- (4) AAR膨張によりコンクリート供試体には、膨張率0.025%程度でひび割れが認められる。

参考文献

- 〔1〕 岸谷孝一、西沢紀昭他編 「アルカリ骨材反応」技報堂
- 〔2〕 大賀宏行 抄訳 アルカリ骨材反应用標準モルタルバー試験及びコンクリートプリズム試験の再評価 コンクリート工学 V0122 No.10,1984

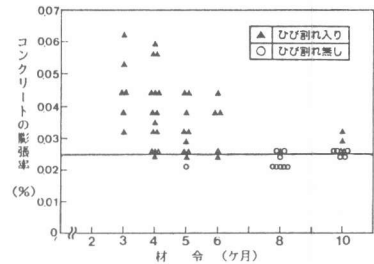


図-10 コンクリートの膨張とひび割れ

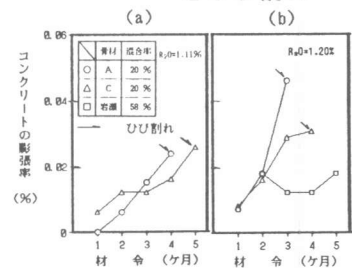


図-11 アルカリ条件と膨張率