

報告

[1133] アルカリ量, スラグ量を変えたコンクリートの AAR に  
 関する屋外暴露実験

正会員 ○ 加藤 雅彦 (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)  
 銀山 功 (住友セメント㈱技術開発センター)  
 田代 芳文 (住友セメント㈱技術開発センター)

1. まえがき

AAR 膨張を起こす天然反応骨材と、高・低アルカリセメントおよびスラグ微粉末を用いた AAR 膨張抑制効果についてコンクリート供試体による室内促進実験 [1] および屋外暴露実験を行ってきた。今回は、22ヶ月経過した屋外暴露の実験結果について報告する。

なお、一部の項目については、室内促進試験結果もあわせて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 骨材

非反応性骨材 (Gn) として岩瀬産砕石、スラグ砕石および室木産海砂を、また、反応性骨材 (Gr) として A, B, C, D の 4 種類を用いた。使用した骨材の物理的性質を表-1 に、化学法による性状および岩質を表-2 に示す。

(2) セメント

R<sub>2</sub>O=1.11% の高アルカリ普通セメント (以後 HAC と呼ぶ) および R<sub>2</sub>O=0.51% の低アルカリ普通セメント (以後 LAC と呼ぶ) の 2 種類を用いた。表-3 に化学成分を示す。

(3) スラグ微粉末

住友金属工業㈱鹿島製鉄所の水冷高炉スラグ微粉末 (ブレン: 3930cm<sup>2</sup>/g) を用いた。表-3 に化学成分を示す。

(4) アルカリ調整剤

特級の NaCl 試薬を用いた。アルカリ量の調整は、セメント中のアルカリ量が R<sub>2</sub>O で 1.20% になるように補正した。

(以後 HAC あるいは 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 および H・LAC と呼ぶ)

表-1 骨材の物理的性質

試験項目	細骨材						
	室木	岩瀬	A	B	C	D	スラグ
骨材の粗粒率	2.46	6.72	6.72	6.51	6.92	6.90	6.78
単位容積質量 (kg/l)	1.55	1.59	1.59	1.47	1.46	1.39	1.44
実積率 (%)	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
安定性損失量 (%)	6.9	1.3	2.5	1.8	0.5	9.9	3.3
コンクリート用砕石粒形判定実積率 (%)	-	60.2	58.4	57.8	59.2	-	-
細骨材の塩分含有量 (%)	0.002	-	-	-	-	-	-

表-2 骨材の化学法による性状と岩質

種別	骨材名	化学法		判定区分	岩質
		Sc	Rc		
細骨材	室木	38	42	無害	—
	岩瀬	19	62	無害	砂、頁岩 メソゾイカス
粗骨材	A	240	187	潜在的有害	輝石 安山岩
	B	427	103	有害	安山岩 (火山岩)
	C	614	212	潜在的有害	古銅輝石 安山岩
	D	571	213	有害	安山岩
	スラグ	4	67	無害	—

表-3 化学成分

種別	化 学 分 析 (%)													
	igloss	insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	S	TOTAL	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O
HAC	0.57	0.10	22.46	6.08	2.80	-	62.41	1.46	1.96	-	97.84	0.66	0.69	1.11
LAC	1.32	0.20	21.97	5.54	3.22	-	63.08	1.62	1.85	-	98.80	0.14	0.56	0.51
高炉スラグ微粉末	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. 2 コンクリートの配合および供試体寸法と成形方法

### (1) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、表-4に示す条件で行なった。コンクリート中の反応性骨材混合率は、全粗骨材に対する比  $(Gr / (Gr + Gn) \times 100 \%)$  で示した。

### (2) 供試体寸法と成形方法

供試体寸法は、圧縮強度および動弾性係数測定用として  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、曲げ強度用として  $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、長さ変化率測定用として  $10 \times 10 \times 38\text{cm}$  (以後小型供試体と呼ぶ) および  $40 \times 60 \times 80\text{cm}$  (以後大型供試体と呼ぶ) を作成した。成形は、棒状振動機 ( $\phi 27\text{mm}$ ) でコンクリート中の空気量が2%程度になるまで締め固めた。

## 3. 屋外暴露実験の概要

### 3. 1 供試体の屋外暴露条件

各供試体は、脱型時の圧縮強度を80~100kgf/cm<sup>2</sup>にあわせ、材令1ヶ月まで屋外養生(宇都宮市当社試験所内:時期は10月)した。養生後、各種供試体を茨城県鹿島町住友金属工業(株)鹿島製鉄所の敷地内に暴露した。また、供試体の設置場所が海岸から約200mと離れていた為、供試体に暴露12ヶ月までは1回/1ヶ月、暴露22ヶ月までは1回/2ヶ月の割合で海水を散布した。供試体の暴露状況を写真-1に示す。

### 3. 2 屋外暴露環境

供試体を暴露した鹿島港沿岸の年平均気温は13.3℃であり、冬場は夜間に零度以下(最低-4℃程度)となる日も幾日かはあるが、供試体が凍結融解を受けることはほとんどない。風速は一年を通して1.5~2.0m/secと比較的穏やかであり、また年間降雨量は約1450mmである。

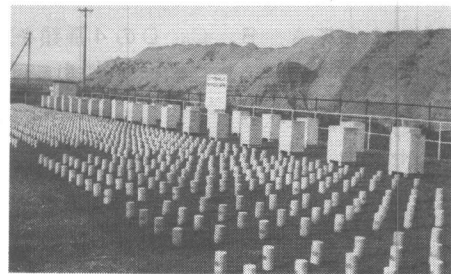


写真-1 供試体の暴露状況

### 3. 3 屋外暴露供試体の試験

屋外暴露供試体の測定項目を表-5に示す。その測定方法は以下の通りである。

- (1) 圧縮強度 : JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」
- (2) 動弾性係数 : JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数試験方法」
- (3) 曲げ強度 : JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」
- (4) 大型および小型供試体の長さ変化

#### (a) 大型供試体の長さ変化測定

供試体4側面の定位置(縦、横方向に250mm)に埋め込んだ凹型特殊端子間(38測点)の長さ変化を、先端を特殊加工したノギスを用いて測定した。測定に際し、外気温の影響は標準尺を用いて補正した。大型供試体の測定点の位置関係を図-1に、測定状況および特殊端子を写真-2に示す。

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 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
② 単位セメント量	335 (kg/m <sup>3</sup> )
③ 水セメント比	55.0 (%)
④ 目標空気量	4±0.5 (%)
⑤ 反応性骨材混合率	100%および34%

表-5 暴露供試体の測定項目と測定材令

供試体	測定項目	測定材令 (暴露期間で示す)
円柱供試体 $\phi 10 \times 20\text{cm}$	圧縮強度 動弾性係数	2M, 5M, 12M, 22M
大型供試体 $40 \times 60 \times 80\text{cm}$	長さ変化	1M, 2M, 3M, 4M, 5M, 7M, 10M 12M, 16M, 18M, 22M (継続中)
	ひびわれ観察	5M, 7M, 10M, 12M, 16M, 18M, 22M (継続中)
小型供試体 $10 \times 10 \times 38\text{cm}$	長さ変化	1M, 2M, 3M, 4M, 5M, 7M, 10M 12M, 16M, 18M, 22M (継続中)
$10 \times 10 \times 40\text{cm}$	曲げ強度	5M, 12M
百葉箱中の自己 温度・湿度計	外気温度 および湿度	暴露開始~継続中

(b) 小型供試体の長さ変化測定

コンクリート供試体の長辺方向の中心部における長さ変化率をダイヤルゲージ式一軸膨張測定器 (1/100mm) を用いて現場で測定した。なお、大小供試体の長さ変化測定は、原則として海水を散布した翌日に行った。大小供試体の測定用埋め込み端子はステンレス製で、その保護のためゴム製キャップをはめて暴露した。

4. 実験結果

4. 1 気候とAAR膨張

アルカリ・シリカ反応によるコンクリートの膨張は、反応性シリカと水酸化アルカリとが化学反応し、その反応生成物が吸水し、膨張する現象であり、温度と湿度に影響すると言われている。図-2は、特に膨張量が大きかった骨材Aを用いたコンクリート大型供試体の長さ変化率と現場で実測した外気温度および湿度の履歴とを対比させて示したものである。

(1) 図によると、AARによって膨張が増大した時期は、暴露開始後7~10ヶ月と18~22ヶ月の間であり、この間は平均気温21℃、平均湿度RH82%と高温多湿の時期にあたる。一方、膨張が停滞もしくは比較的緩やかに増加している暴露開始後10~18ヶ月の間は、(℃)外気温度および湿度が低下している時期にあっている。これらの現象からAARを引き起こすコンクリートは、外気温度が高く多湿となる雨季から夏場にその反応が促進され、大きな膨張となって現われるものと推察される。

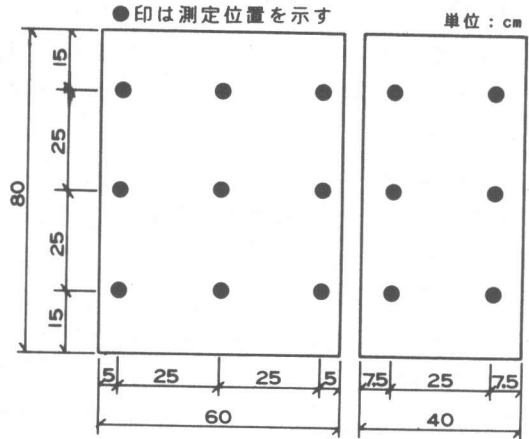


図-1 大型供試体の測定位置

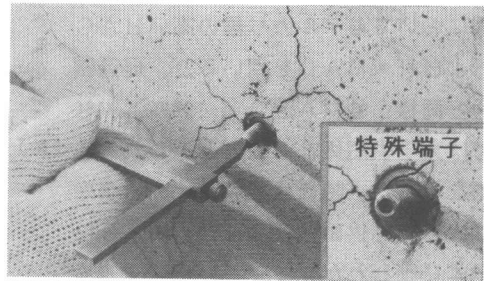


写真-2 大型供試体の測定状況

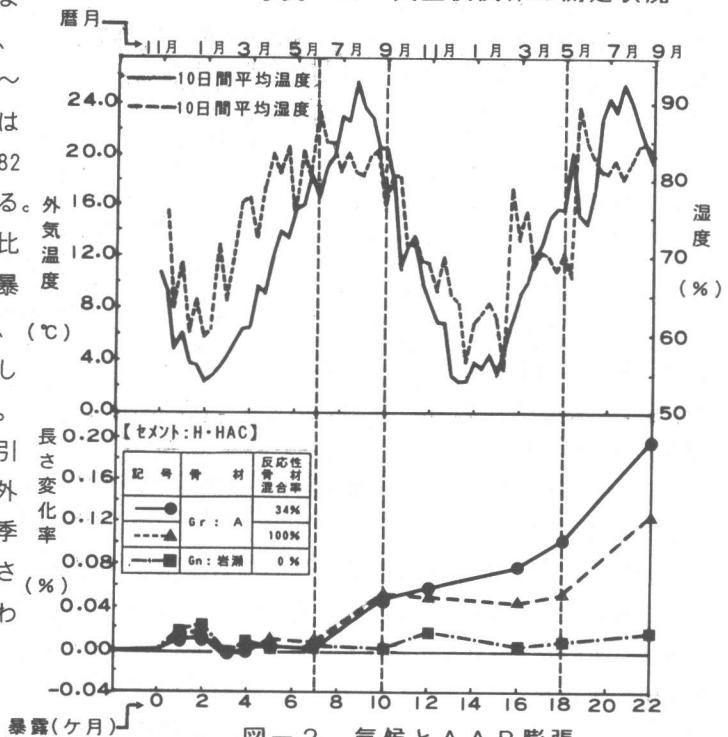


図-2 気候とAAR膨張

4. 2 LAC, HACおよびH・HACを用いた屋外暴露供試体のAAR膨張

反応性骨材はAおよびCを、セメントとしてアルカリ量の異なるLAC, HACおよびH・HACを用いたコンクリート供試体を屋外で暴露し、アルカリ量の違いとAAR膨張について調べた。

表-6 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 Gr (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材		混和剤 Poz. 70 C × %
								非反応性 Gr	反応性 Gr	
LAC HAC および H・HAC	A	100	55.0	42.5	335	184	740	—	1029	0.25
		34						676	352	
	C	34						730	661	

図-3 (a) に骨材A, 図-4 (a) に骨材Cを用いた大小供試体の屋外暴露22ヶ月の膨張率とセメント中のアルカリ量との関係を示し、併せて図-3 (b), 図-4 (b) に促進試験結果 (40°Cの湿空養生, 供試体: 10×10×38cm) を示す。なお、コンクリートの配合を表-6に示す。

(1) 図-3 (a) の骨材Aでは、屋外暴露においてもアルカリ量の高いHACおよびH・HACを用いると、促進試験と同様、骨材A混合率 100%, 34%では大小供試体とも有害と思われる膨張を示した。特に大型供試体の膨張率は大きく、供試体表面には写真-3に示すひびわれが発生している。一方、LACを用いた大小供試体は、AAR膨張やひびわれの発生も無く、LACは膨張抑制効果が大いと思われる。

(2) 図-4 (a) の骨材Cでは、屋外暴露22ヶ月でアルカリ量の最も高いH・HACを用いた大型供試体だけがその表面に写真-4に示すようなひびわれが発生した。H・HACを用いた小型供試体およびHACを用いた大小供試体は、屋外暴露では共にAAR膨張を生じていない。これは、図-4 (b) の促進試験では、HACを用いた場合でもひびわれが発生していることからすると暴露期間が短くAARが十分進行していないためと思われる。したがって、さらに屋外暴露試験を継続し、自然環境下でのAAR膨張の有無を確認する必要がある。

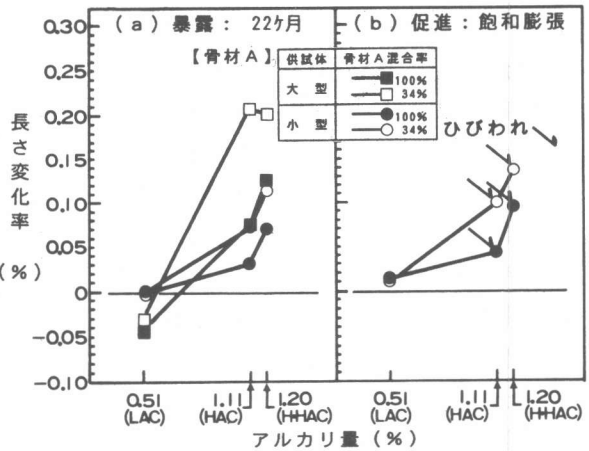


図-3 セメント中のアルカリ量と長さ変化率

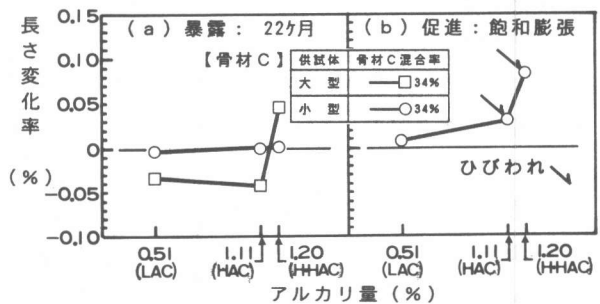


図-4 セメント中のアルカリ量と長さ変化率



写真-3 ひびわれ外観 1 写真-4 ひびわれ外観 2

#### 4. 3 スラグ微粉末の置換率と屋外暴露供試体のAAR膨張

反応性骨材はCを、また、スラグ置換率30%、50%、65%の結合材を用いたコンクリート供試体を屋外で暴露し、スラグ置換率とAAR膨張抑制効果の関係について調べた。

図-5 (a) にスラグ置換率と暴露22ヶ月の大小供試体の膨張率との関係を示し、併せて、図-5 (b) に促進試験結果を示す。なお、結合材のベースセメントにはHACおよびH・HACを用い、H・HACにスラグを置換した場合は、スラグ置換によるアルカリ量の希釈を防ぐため、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は無視した。用いたコンクリートの配合を表-7に示す。

表-7 コンクリートの配合

反応性骨材種別	ベースメントの種類	スラグ置換率 (%)	反応性骨材混合率 Gr Gr+Gn (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						セメント	水	細骨材	粗骨材		混和剤 Poz.70 C×%
									非反応性 Gn	反応性 Gr	
C	HAC および H・HAC	30, 50, 65	34	55.0	42.1	335	184	720	664	345	0.25

(1) 図-5 (a) に示すように、スラグ置換率30%で、大型供試体は膨張率も抑制され、また、ひびわれも認められずスラグ置換によるAAR膨張抑制効果が認められる。しかし、同配合の小型供試体の膨張率は、スラグ置換率0%より幾分増大しており、大小供試体で実験結果が一致していない。このことは、骨材Cの場合は屋外暴露22ヶ月ではまだ期間が短いと思われる。

また、図-5 (b) に示す促進試験結果

では、スラグ置換率30%のアルカリ量を強化した同種のコンクリート供試体はひびわれが認められ、スラグ置換率30%では、AAR膨張抑制効果が十分でないことを示している。

(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の抑制効果については、比較の対象とするスラグ置換率0%の供試体が、屋外暴露22ヶ月でまだ膨張していないため、さらに実験を継続し、確認する必要がある。

#### 4. 4 AARとコンクリートのひびわれ

AARによる異常膨張は、コンクリートの圧縮強度、引張強度および動弾性係数等に影響を及ぼすといわれている。そこで、屋外に暴露した供試体の長さ変化とコンクリートの物性の関係を図-6に示す。

図は、セメントとしてHAC、反応性骨材A（混合率34%）を用いた大小供試体の長さ変化率と圧縮強度、曲げ強度および動弾性係数の経時変化を対比させたものである。また、図-7に大型供試体の高さ方向の上、中、下部における長さ変化率を示す。

(1) 図-6によると、屋外暴露5ヶ月から12ヶ月にかけての長さ変化率は、大型供試体の場合はかなり大きな膨張傾向を示しているが、小型供試体はわずかに膨張傾向を示している程度である。しかし、同期間において曲げ強度は大幅に低下しており、小型供試体においても内部ひびわれが進行しているものと推察される。一方、φ10×20cmの供試体による圧縮強度

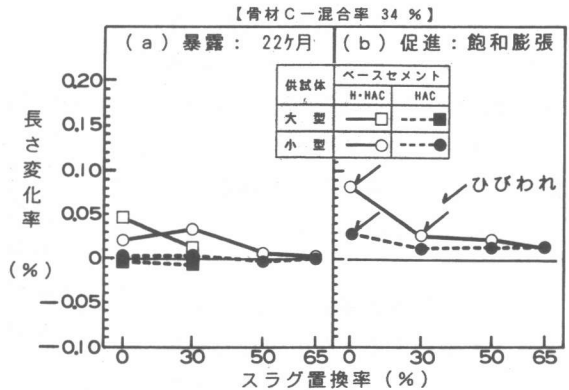


図-5 スラグ置換率と長さ変化率

および動弾性係数の測定値は、暴露12ヶ月においても上昇しており、まだ内部劣化の進行状況を示していない。しかし、暴露22ヶ月においてはどちらの測定値も著しく減少し、内部ひびわれが進んだことが窺われる。

(2) 図-7によると、屋外暴露10ヶ月までの初期においては、上、中、下部の長さ変化率に大きな差は認められない。しかし、膨張が増大し始めた10ヶ月以降の長さ変化率は供試体の上部により大きく認められた。また、AAR膨張を生じた大型供試体の外観ひびわれ観察では、上部ほどひびわれが多くその幅が広がる傾向が認められた。一方、非反応性の骨材を用いた大型供試体では、上、中、下部の長さ変化率に大きな差は認められない。

5. まとめ

AARの屋外暴露実験により得られたことを要約すると次の通りである。

- (1) AARによるコンクリートの膨張は、高温多湿の夏場に促進される。
- (2) 低アルカリセメントは、促進試験と同様に、AAR膨張も無く、抑制効果が大きい。

(3) スラグ置換によるAAR膨張抑制効果は確認することができた。しかしながら、アルカリ量を強化したコンクリートのスラグ微粉末の有効混入率は、露期間が22ヶ月と短いため、結論には至らなかった。

(4) AARによるコンクリート内部の劣化状況を把握するには、力学特性（圧縮強度、曲げ強度、動弾性係数、等）の経時変化測定が有効である。特に、AARの初期の段階におけるコンクリートの内部劣化は、曲げ強度に影響を及ぼすものと思われる。

(5) AARによる大型供試体の膨張は、上側ほど大きく、ひびわれを生じやすい。また、その進展も早くなる傾向が窺われた。

6. あとがき

LACおよびスラグ微粉末置換によるAAR膨張抑制効果については、長期にわたっての観察が必要と思われる、今後さらに実験を継続して行く予定である。最後に、本実験に当たり協力いただいた住友金属工業(株)鹿島製鉄所利材室の皆様に感謝の意を表します。

【参考文献】

[1] 銀山功、川村政喜、田代芳文、山本親志：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：第9回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 585~590

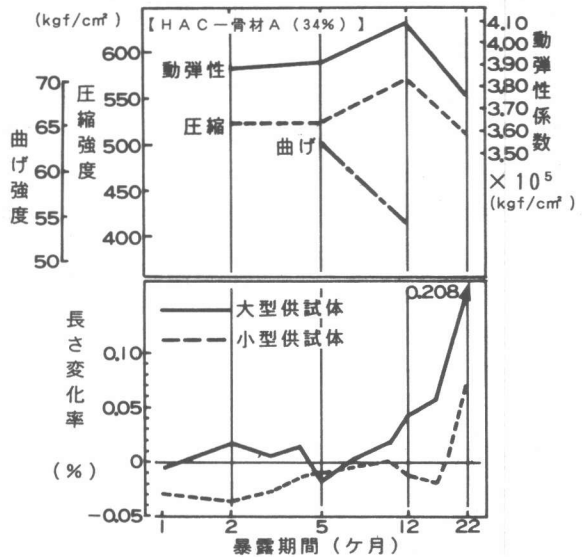


図-6 AARとコンクリート物性の変化

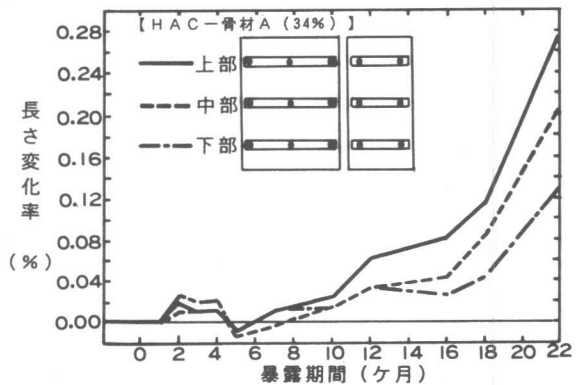


図-7 大型供試体の上、中、下部における長さ変化率