

論文

[1156] コンクリートの ASR に及ぼす要因のペシマム現象

王 鉄成\*<sup>1</sup>・西林新蔵\*<sup>2</sup>・木村厚之\*<sup>3</sup>・権 赫文\*<sup>4</sup>

1. まえがき

アルカリシリカ反応 (ASR) においては、それに影響を及ぼす要因の大きさによって膨張量が最大となるペシマム (pessim) 現象の存在することが知られている [1], [2]。このペシマム現象は、反応性骨材の混合割合、アルカリ量、水セメント比、養生温度などで現れ、その条件は、化学反応と硬化体の性状や物理的性質の変化とが複合されたもので、とくにアルカリ量と反応性シリカ量との関係が重要である。これまでのペシマム現象についての研究のほとんどはモルタル試験の結果に対するものであり、実際の構造物に用いられるコンクリートについての試験はあまり多くなく、種々の要因によるペシマム現象については不明の点が多くに残されている。

本研究は反応性骨材の混合割合、アルカリ量、水セメント比、温度に関するコンクリートのペシマム条件について検討するとともに、この内のアルカリ量、水セメント比、温度の要因を組合わせた 3 水準の直交表に基づき実験結果を分析し、検討を加えたものである。

表-1 実験計画

Non reactive aggregates: NT, NS	Alkali content for cement weight (%) : 0.5
Reactive aggregate: T2	Kind of added alkali: NaOH
Unit weight of cement : 450 (kg/m <sup>3</sup> ) (autoclave: 350)	Total alkali contents : 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 (Na <sub>2</sub> O eq.%) (autoclave: 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5)
Slump (cm): 12~15	Reactive aggregate contents (%): 0, 50, 100
Size of specimen (cm): 10 × 10 × 40, (autoclave: 7.5 × 7.5 × 40)	
Curing condition: 40°C, R.H.100 %, (autoclave: 20°C, 40°C, 60°C)	
Items of measurement: Length change, Dynamic modulus of elasticity (E <sub>D</sub> ), Cracking	

2. 実験概要

試験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、アルカリ含有量が Na<sub>2</sub>O 当量で 0.5% である。添加アルカリ化合物としては NaOH を練混ぜ水に溶か

表-2 直交表 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) による実験計画と結果

No.	1	2	3	4	Level combination	Data (1)	Data (2)
1	1	1	1	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	0.2989	0.0556
2	1	2	2	2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	0.3108	0.2180
3	1	3	3	3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	0.2366	0.1963
4	2	1	2	3	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0.5604	0.1444
5	2	2	3	1	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	0.4620	0.2180
6	2	3	1	2	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	0.2088	0.0672
7	3	1	3	2	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	0.5279	0.1741
8	3	2	1	3	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	0.3574	0.0290
9	3	3	2	1	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0.3091	0.0712

A<sup>\*</sup>: alkali content A<sub>1</sub> 2.5%, A<sub>2</sub> 3.0%, A<sub>3</sub> 3.5%  
 B<sup>\*</sup>: water-cement ratio B<sub>1</sub> 0.54, B<sub>2</sub> 0.58, B<sub>3</sub> 0.62  
 C<sup>\*</sup>: storage temperature C<sub>1</sub> 20°C, C<sub>2</sub> 40°C, C<sub>3</sub> 60°C

して使用した。反応性粗、細骨材は T2 (JCI AAR-1の化学法の結果 (mmol/l) より、Rc=67.5, Sc=301, Sc/Rc=4.46) で、非反応性粗骨材は NT で、非反応性細骨材は NS である。

\* 1 鳥取大学研究生 土木工学科、工修 (正会員)

\* 3 鳥取大学大学院生 土木工学科、

\* 2 鳥取大学教授 土木工学科、工博 (正会員)

\* 4 鳥取大学研究生 土木工学科、工博

実験計画を表-1 (オートクレーブの場合、( ) 中の数字である) に、3水準直交表による実験計画と結果を表-2に示す。コンクリートの配合は、単位セメント量 $450\text{kg}/\text{m}^3$ と $350\text{kg}/\text{m}^3$ の2種類、水セメント比は0.45で、アルカリの無添加の状態におけるスランプが12~15cmになるように単位水量を試し練りによって決定した。なお、アルカリの添加によるスランプの変化に対する水量の補正は行っていない。

供試体は2種類で、 $10\times 10\times 40\text{cm}$ の供試体は初期値を測定した後、 $40^\circ\text{C}$ 、R.H.100%および暴露(鳥取)で保存する。この供試体の記号は(反応性粗、細骨材の混合割合) - (アルカリ含有量)で表す。一方、 $7.5\times 7.5\times 40\text{cm}$ の供試体はオートクレーブ処理( $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ , 4時間)を行い、恒温室( $20^\circ\text{C}$ , R.H.80%以上)で24時間保存して膨張量を測定してから、 $40^\circ\text{C}$ 、R.H.100%の促進保存を行う。これらの供試体はすべて、材令0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3ヶ月、それ以降は1ヶ月ごとに長さ変化、動弾性係数を測定する。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 反応性骨材の混合割合

##### (1) 反応性粗骨材の混入の影響

非反応性細骨材を使用し、反応性粗骨材の混入量を変化させた場合の膨張量の経時変化を図-1に示す。図より、反応性粗骨材の混入量の増加に伴って膨張量がやや増大するものの、ほとんど同じ膨張量が現れ、ペシマムの存在は明確ではない。

図-2に反応性細骨材50%を用い、反応性粗骨材の混入量を変化させた場合の膨張量の経時変化を示す。図より、反応性粗骨材の混入量が増加するに伴って膨張量が明らかに減少し、反応性粗骨材100%の混入で膨張量は約50%低減し、反応性粗骨材50%の混入で約20%低減することが認められる。このように反応性細骨材を使用すると膨張特性に顕著な影響をもたらし、大きな膨張が現れるが、反応性粗骨材量の増加に伴って膨張量が低減する。

図-3は反応性細骨材100%を用いた場合の反応性粗骨材の混入量の違いによる膨張量の経時変化を示したものである。反応性細骨材を使用すると、反応に参与する骨材の総表面積が増えるので、膨張量が増大したものと考えられる。また、図-2と同じ傾向、すなわち、反応性粗骨材量の増加に伴って膨張量が低減することが認められる。

##### (2) 反応性細骨材の混入の影響

図-4より、非反応性粗骨材を使用した場合、反応性細骨材の混入量の増加に伴って膨張量が増大する。膨張は材令12ヶ月以後にほとんど変化しない。反応性細骨材100%を用いた場合、膨張量は最大である。反応性細骨材50%を用いた場合、膨張量は材令12ヶ月で、反応性細骨材100%の場合の約75%であることがわかる。

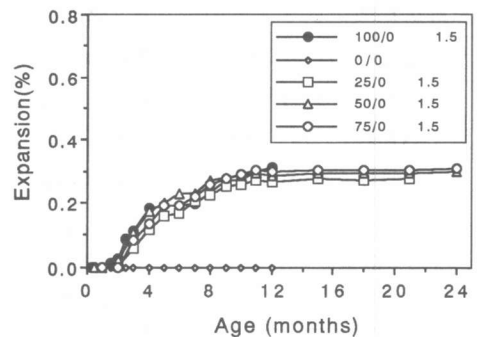


図-1 膨張量の経時変化(1)

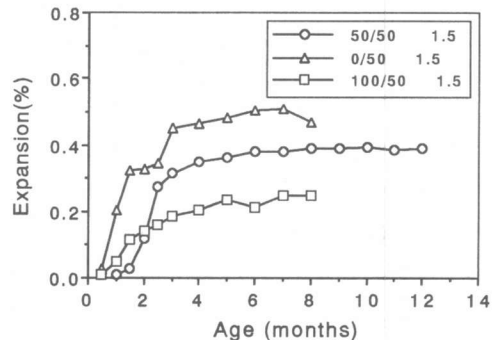


図-2 膨張量の経時変化(2)

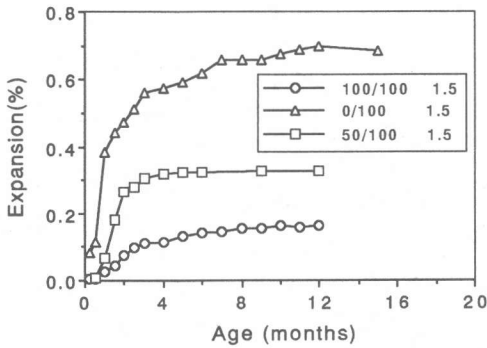


図-3 膨張量の経時変化(3)

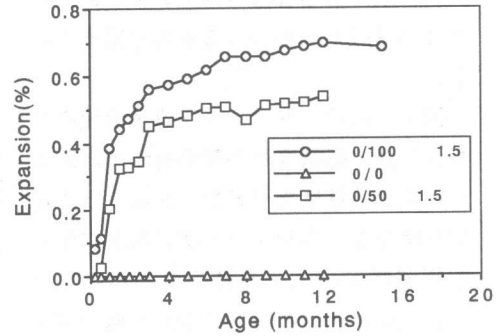


図-4 膨張量の経時変化(1)

図-5より、反応性粗骨材を50%と一定にすると、反応性細骨材の混入量の増加に伴って膨張量は増大し、反応性細骨材50%を使用した膨張量は反応性細骨材100%の場合のよりも大きい。図-6に、反応性粗骨材を100%と一定にした場合の反応性細骨材の混入量の違いによる膨張量の経時変化を示す。反応性骨材の総混入量の増加に伴って膨張量は減少する傾向のあることがわかる。すなわち、反応性細骨材50%を混入して膨張量はほとんど増加せず、反応性細骨材を100%混入した場合には膨張量は逆に減少する。この場合、反応性粗骨材のみを使用した場合に膨張量が最大になる。

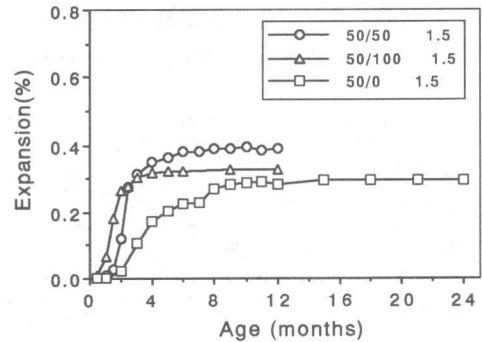


図-5 膨張量の経時変化(2)

### (3) 混合割合におけるベシマム値

図-7はX軸に反応性細骨材の混合割合を、Y軸に反応性粗骨材の混合割合を、Z軸に材令12ヶ月における膨張量をそれぞれとり、膨張量と混合割合との関係を3次元座標で表したものである。これらの図から、反応性細、粗骨材の混合割合を変化させることによって膨張量は変化し、反応性細骨材だけを使用したコンクリートの膨張量が最大で、材令12ヶ月に約0.7%にも達することが認められる。

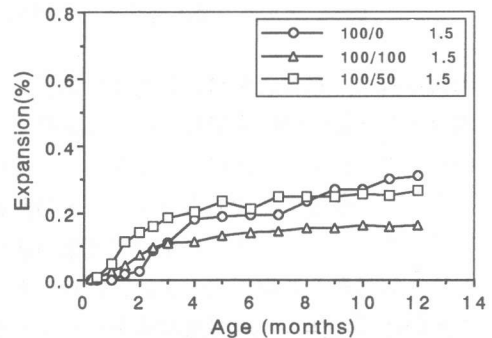


図-6 膨張量の経時変化(3)

### 3. 2 膨張に及ぼすアルカリ量の影響

図-8は40℃保存条件下のコンクリートの膨張に及ぼすアルカリ量の影響を示す。図より、水セメント比0.45の場合、細骨材に反応性骨材を使用したもの(0/100)は、アルカリ量の増加に伴って膨張量が増大し、アルカリ量2.0%で膨張量が最大となり、ベシマムアルカリ量が存在することが確認された。一方、粗骨材に反応性骨材を使用したもの(100/0)、粗、細骨材ともに反応性骨材を使用したもの(100/100)および反応性粗、細骨材をそれぞれ50%ずつ使用したもの(50/50)では、アルカリ量が増加するのに伴って膨張が大きくなることがわかる。従って、

0/100 以外の場合はベシمامアルカリ量は 2.5%以上で現われるものと推察される。

図-9 にオートクレーブ処理直後のアルカリ量と膨張量との関係を示す。図より、膨張特性は水セメント比によってかなり異なり、水セメント比の減少に伴って膨張量が增大する傾向がある。水セメント比0.54のとき、アルカリ量 3.0%で大きい膨張量が現われ、ベシمامアルカリ量は 3.0%である。また、水セメント比0.58と0.62の場合、アルカリ量 4.0%のときに、最大膨張量が現れ、ベシمامアルカリ量は 4.0%であることが

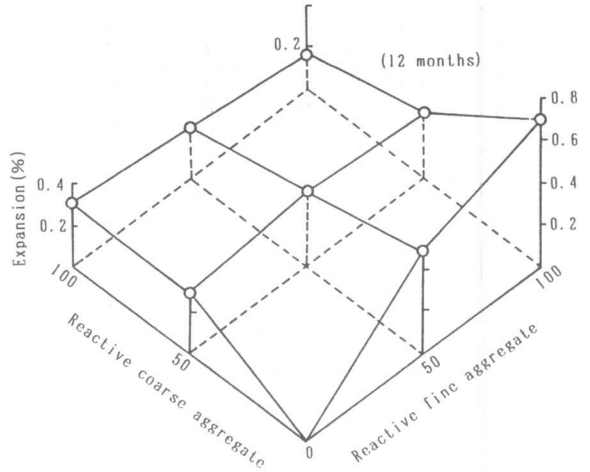


図-7 反応性粗 細骨材材量の影響

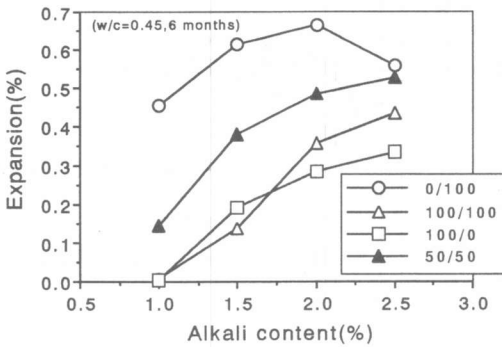


図-8 アルカリ量と膨張量との関係

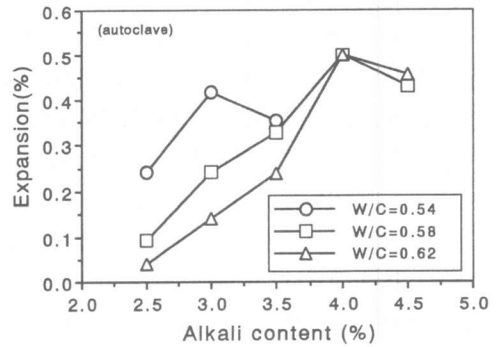


図-9 アルカリ量と膨張量との関係

確認された。なお、水セメント比の増加に伴ってベシمامアルカリ量が大きくなる傾向がある。水セメント比0.58以上では、ベシمام値に及ぼす水セメント比の影響は小さくなり、アルカリ量のベシمام値がほとんど変化しないと考えられる。

### 3.3 膨張に及ぼす水セメント比の影響

図-10 にオートクレーブ処理直後の水セメント比と膨張量との関係を示す。図より、水セメント比の増大に伴って膨張量が減少することが認められる。水セメント比が大きいほど硬化組織中の空隙が多くなり、反応によって生成したゲルがその中に移動し、膨張圧が小さくなるので、膨張量は低下したと考えられる。また、この場合、ベシمام水セメント比は確認できなかったが、ベシمامの水セメント比は0.5以下であると推察される。

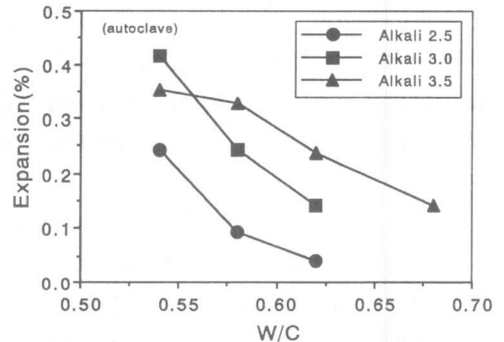


図-10 水セメント比と膨張量との関係

### 3.4 膨張に及ぼす温度の影響

図-11 にオートクレーブ処理後の各保存条件下における温度と膨張量との関係を示す。図よ

り、材令 2 ヶ月では、60℃の方がより大きい膨張が現われている。これはDiamond のモルタルの試験結果 [2] と同じ傾向である。

図-12 に、暴露したコンクリートの膨張量の経時変化を示す。図より、自然暴露のものは40℃保存のものよりも膨張の進展は遅く、曲線は2度の急激な膨張段階のあることがわかる。その材令と季節を調べると、温度と降水量の影響から夏期には温度と湿度が高いので膨張が速く、冬期には温度は低くなるので膨張が遅くなったと考えられる。

### 3.5 要因の組合わせの影響

要因の組合わせの影響は実験計画法による分散分析によって解析した [3] 。

#### (1) オートクレーブ処理の影響

表-2 のデータ (1) は脱型後オートクレーブ処理前の膨張量を基長とし、処理後材令 3 ヶ月における各水準の膨張量を示すものである。膨張量が最大となる水準の組合は  $A_2 B_1 C_2$ 、すなわち、アルカリ量 3.0%以上、水セメント比0.54、40℃の場合で、膨張量0.56%が現われている。

表-3 のデータ (1) は分散分析の結果を示すものである。結果から、 $F(2, 2; 0.05) = 19$ 、 $V_B/V_0(F_0) = 30.73 > F = 19$  であるから、Bの水準間に有意な差があり、Bは5%で有意である。

この場合のベシマム水準は  $\mu(B_1) = 0.4624$  である。ベシマム水準の組合せ (工程平均) では、Bの主効果の  $B_1$  より、95%信頼限界には  $\mu(B_1) = 0.4624 \pm 0.082$  である。すなわち、促進保存条件、アルカリ量および水セメント比を組合わせた場合、膨張に及ぼす水セメント比の影響が大きいことがわかる。

#### (2) 保存温度の影響

表-2 データ (2) は各促進保存温度下の膨張特性を調べるために、オートクレーブ処理直後の膨張量を基長とした各水準における膨張量を示すものである。膨張量が最大となる水準の組合せは  $A_1 B_2 C_2$  と  $A_2 B_2 C_3$  とであることがわかる。なお、水準の組合せ  $A_1 B_2 C_2$  と  $A_2 B_2 C_3$  とでは、同じ膨張量 0.218%が現われ、すなわち、アルカリ量 2.5%と 3.0%、水

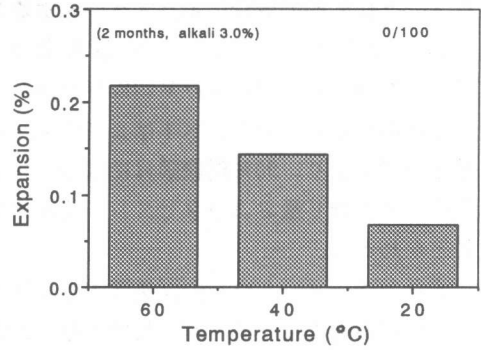


図-11 保存温度の影響

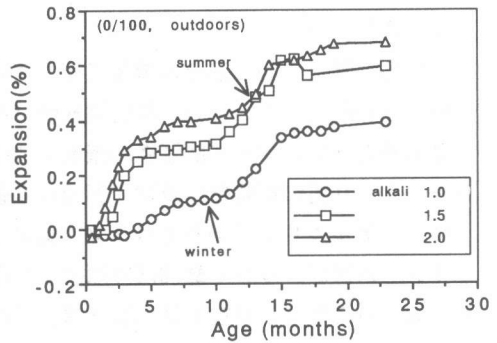


図-12 環境温度の影響

表-3 分散分析表

Fluctuation factor	Sume of square		Degree of freedom	Mean square		F <sub>0</sub>	
	(1)	(2)		(1)	(2)	(1)	(2)
A	0.0301	0.0071	2	0.0151	0.0036	13.73	3.00
B	0.0675	0.0030	2	0.0338	0.0015	30.73 *	1.25
C	0.0258	0.0327	2	0.0129	0.0164	11.72	13.6 *
Error (e)	0.0021	0.0024	2	0.0011	0.0012		
Total	0.1255	0.0452	8				

セメント比0.58の場合により大きい膨張量が現われることがわかる。

表-3のデータ(2)は分散分析の結果を示すものである。解析の結果から、 $F(2.2; 0.1) = 9$ 、 $V_c/V_o(F_0) = 13.67 > F = 9$ であるから、Cの水準間に差がある。有意となった因子Cのベシمام水準は $\mu(C_3) = 0.1961$ である。ベシمام水準の組合せではCの主効果のC<sub>3</sub>より、90%信頼限界には $\mu(C_3) = 0.1961 \pm 0.086$ である。結果から、促進保存条件、アルカリ量および水セメント比を組合わせた場合、膨張に及ぼす保存温度の影響が大きいことがわかる。

すなわち、オートクレーブ処理中においては、セメントの水和による強度の発現とアルカリ骨材反応が同時に進行するが、強度の発現の方がASRの進行よりも顕著であるので、水セメント比の影響が大きく現れたと考えられる。一方、オートクレーブ処理後においては、セメントの水和反応が緩慢となり、ASRの進展が保存(温度)条件によって促進するため、水セメント比よりも保存条件の影響が大きくなったものと考えられる。

#### 4. まとめ

- 1) 反応性骨材の混合割合の増加に伴う膨張量には、膨張量が最大になるアルカリ-反応性骨材量の比が存在する。一方、反応性細骨材を用いた場合には、より大きい膨張が現れ、反応性粗骨材量の増加に伴って膨張量が低減する傾向のあることが認められる。
- 2) アルカリ量の膨張量に及ぼす影響を考慮とすると、反応性細骨材だけ(0/100)を使用した場合に、アルカリ量2.0%でベシمام値が存在する。それ以外の混合割合ではアルカリ量によるベシمام値がアルカリ量2.5%以上であることが推察される。
- 4) 細骨材に反応性骨材を使用した場合、水セメント比0.45、0.54で、ベシمامアルカリ量はそれぞれ2.0、3.0%であることが確認された。
- 5) 水セメント比の増加に伴ってアルカリ量のベシمام値も増大し、水セメント比の減少に伴ってアルカリ量のベシمام値は減少する傾向がある。水セメント比0.58、0.62で、アルカリ量のベシمام値は約4.0%である。水セメント比0.58以上ではアルカリ量のベシمام値がほとんど一定になることが認められた。水セメント比0.4以下では、ベシمام値が存在するアルカリ量の範囲は2.0%以下であることが推察される。
- 6) 保存温度の上昇に伴って膨張量は増大する。高温では膨張は速く、低温では膨張は遅くなることが考えられる。20℃、40℃と60℃で保存したコンクリートの膨張は、材令2ヶ月までは、60℃のほうがより大きい膨張が現われる。
- 7) 要因による組合わせの影響を解析した結果から、水セメント比および保存温度の影響は大きいことが認められる。

#### 参考文献

- [1] 中野錦一他：モルタルバーの膨張量に及ぼすアルカリ量および養生条件の影響。大阪セメント技報，53：pp.12-18，1986。
- [2] Diamond, S., Barneyback, R. S. Jr. and Struble, L. J.: On The Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reaction. Ibid. S 252/22, 1981.
- [3] 実験の計画と解析 岩波書店 鷲尾泰俊 著