

論文

[1131] 反応性細骨材を用いたコンクリートの膨張特性に関する研究

正会員 ○西林新蔵 (鳥取大学工学部)

正会員 井上正一 (鳥取大学工学部)

正会員 林 昭富 (鳥取大学工学部)

橋本義信 (熊谷組)

1. まえがき

骨材の反応性は、通常、化学法とモルタルバー法によって評価、判定されてきているが、最近になって、実際の構造物に用いられるコンクリートを対象に、コンクリートに生じたアルカリ骨材反応による膨張あるいはひびわれ損傷をもとにして反応性の評価を試みんとする機運が高まってきた。

コンクリートによるアルカリ骨材反応性試験では、通常、粗骨材のみに反応性の骨材が使用される例が多く、反応性細骨材が単独使用または反応性粗骨材と併用された場合の膨張挙動については、ほとんど明らかにされていないのが現状である。

本研究は、反応性細骨材を使用したコンクリートで供試体を作製し、反応性細骨材および反応性粗骨材の混合割合、アルカリ含有量、セメント量さらには骨材の最大寸法などを実験要因に選び、これらの要因を組合わせた場合の膨張挙動ならびにひびわれ特性について実験的に検討を行ったものである。

表-1 実験計画

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験で設定された要因は、反応性粗骨材の混合割合、反応性細骨材の混合割合、アルカリ量含有量、粗骨材の最大寸法および単位セメント量である。また、保存条件は40°C, R. H. 100%とした。

これらの要因と水準を表-1に示す。

なお、供試体記号は、反応性粗骨材混合割合-反応性細骨材混合割合-アルカリ量の順で示す。例えば、100-100-2.0は、反応性粗骨材の混合割合 100%、反応性細骨材

試 験 条 件	骨材	反応性骨材	T2 △	セメントのアルカリ量 (eq. Na <sub>2</sub> O %)	0.47
		非反応性骨材	NT ●		0.50
		最大寸法 (mm)	10, 20	添加アルカリの種類	NaOH
		単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	350 450	アルカリ量 (eq. Na <sub>2</sub> O %)	0.5
		スランブ (cm)	12~15		1.0
		供試体寸法 (cm)	10×10×40 4×4×16	反応性骨材混合割合 (%)	1.5
測定項目			2.0		
長さ変化、動弾性係数、ひびわれ特性			2.5		
			0		
			25		
			50		
			75		
			100		

[注] 4×4×16cm供試体は最大寸法10mmの配合の場合のみ作製

表-2 骨材の物理的性質

骨材の種類		岩石名	比重	吸水率 (%)	化学法による結果		S <sub>c</sub> /R <sub>c</sub>
					RC	SC	
反応性骨材	T2	斜方輝石安山岩	2.64	1.48	67.5	301	4.46
非反応性骨材	NT	砂岩	2.70	0.65	21.5	30	1.39

材の混合割合 100%、アルカリ含有量 2.0%であることを示す。

### 2.2 使用材料

本実験に使用した骨材は、鳥取県産反応性粗骨材 T2、非反応性粗骨材 NT とこれらを破碎して粒度調整した細骨材（砕砂）である。これら骨材の物理的性質および化学法による結果を表-2、図-1 に示す。

使用したセメントは普通ポルトランドセメント 2種類で、アルカリ含有量はセメント重量比で、 $\text{Na}_2\text{O}$ 等量 0.47% および 0.5% である。また、アルカリ量調整用のアルカリ化合物は試薬 1 級の  $\text{NaOH}$  で、これを練混ぜ水で解かして使用した。コンクリートの配合を表-3 に示す。

### 2.3 実験方法

#### (1) 練混ぜ手順および供試体の作製、保存方法

可傾式ミキサーで練り混ぜたコンクリートを  $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$  の型枠に 2 層に分けて詰め、1 層ごとに棒状バイブレーターで締め固めて成形した後、恒温室 ( $20^\circ\text{C}$ , R. H. 85% 以上) 中で 24 時間養生し、脱枠後に供試体を  $40^\circ\text{C}$ , R. H. 100% 中にて保存した。なお、最大寸法 10mm を用いた場合においては  $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$  の供試体を上と同様な手順で作製した。

#### (2) 測定

脱枠直後に、長さ変化、重量、動弾性係数の初期値を測定してから、供試体を  $40^\circ\text{C}$ , R. H. 100% に保存し、材令 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 ヶ月、その後は 1 ヶ月ごとに各測定を行った。また、測定の前日に供試体を温度  $20^\circ\text{C}$  の恒温室中に移して、恒温状態になってから各測定を行った。コンクリートに生じたひびわれの評価は、そのスケッチならびにひびわれ幅、ひびわれ数、ひびわれ密度を求めることによって行った。

## 3 結果と考察

### 3.1 反応性骨材の混合割合の影響

図-2 に膨張率および動弾性係数の経時変化の一例を示す。図より、反応性の細骨材を

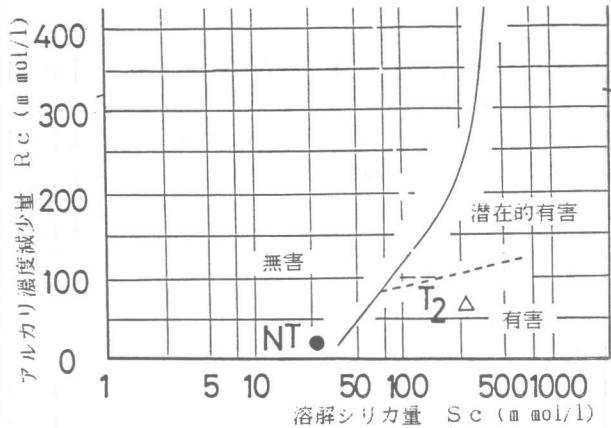


図-1 化学法の結果

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a (%)	単位容積重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
					W	C	S	G
10	12~15	2	0.53	50	185	350	315*	315*
			0.50	50	225	450	315*	315*
20			0.54	43	190	350	756	1033
			0.45	40	203	450	654	996

注: \* 絶対容積 ( $1/\text{m}^3$ )

100%含むコンクリートのうち、とくに0-100-2.0, 50-100-2.0においては、材令の初期からかなり大きい膨張が現われ、その後も膨張が持続して進展し、材令がおよそ7ヶ月で膨張はほぼ平衡状態に達している。これを反応性粗骨材を100%含むコンクリート、100-0-2.0と比較してみると、材令3ヶ月においては約2倍、材令12ヶ月においては約1.5倍の膨張が現われていることになる。なお、骨材が全て反応性のコンクリート、すなわち100-100-2.0の膨張量が最も小さくなっていることもわかる。

動弾性係数の経時変化を見ると、脱枠直後はいずれの供試体においても、動弾性係数の値は $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 前後とほぼ一定であるが、粗骨材のみが反応性骨材のコンクリートでは、材令2ヶ月まで動弾性係数の値が増加している。これは40°C, R.H. 100%の高温養生によってコンクリートの強度の発現が促進され、アルカリ骨材反応による劣化よりも強度増加の方が勝ったためであると考えられる。しかし、その後アルカリ骨材反応による劣化が進行し、材令3ヶ月以降では動弾性係数が低下している。これに対して反応性細骨材を含むコンクリートにおいては、強度の発現に伴う動弾性係数の増加があまり見られず、材令1ヶ月からすでに動弾性係数が低下している。とくに、膨張量の場合と同様に、0-100-2.0, 50-100-2.0の両供試体においてかなりの動弾性係数の低下が見られた。

このように、反応性細・粗骨材の使用割合の違いによって、膨張率および動弾性係数に差が現われた原因としては、反応性骨材に細骨材を使用すると反応性骨材の表面積が増加し、そのため若材令から反応が進行したと考えられる。また、100-100-2.0の供試体では、材令6ヶ月以降は、粗骨材のみ反応性のコンクリート、100-0-2.0よりも膨張率は小さくなっている。これは、反応性骨材の表面積が大きくなりすぎたため、反応に寄与するアルカリ量よりも反応によって消費されるアルカリ量の方が多くなって低膨張性の高カルシウム型アルカリ珪酸塩ゲルが生成されるため膨張が小さくなったものと考えられる<sup>1)</sup>。

次に、図-3は粗骨材の最大寸法10mm、コンクリートの供試体寸法4×4×16cmの場合について、X軸に反応性細骨材の混合割合、Y軸に反応性粗骨材の混合割合、Z軸に材令3ヶ月における膨張率をそれぞれとり、膨張率と混合割合との関係を3次元座標上で表わしたものである。図より、細骨材に反応性骨材が使用された場合に大きな膨張を示し、それぞれの骨材の混合割合が変化すると膨張率も変化してくることがわかる。反応性粗骨材と反応性細骨材とを組

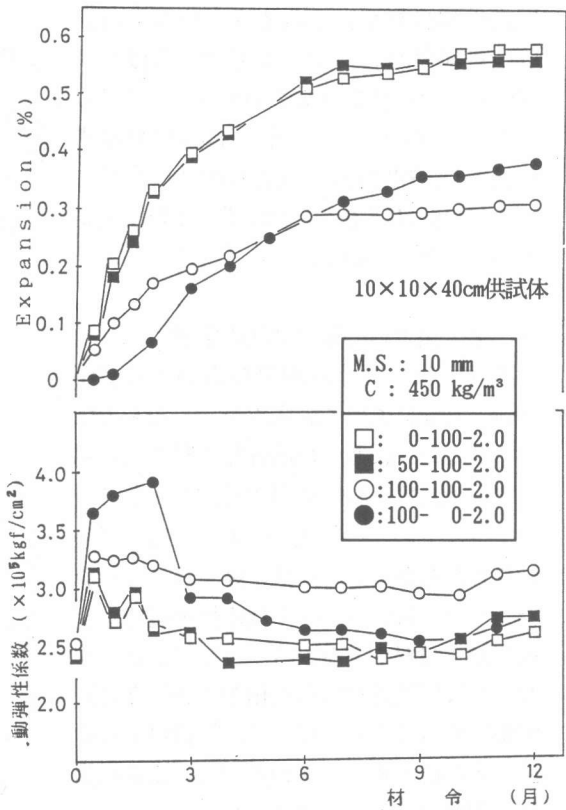


図-2 膨張量および動弾性係数の経時変化

み合わせた場合のペシマム混合割合は、反応性粗骨材が含まれていない場合は、反応性細骨材のペシマム混合割合は75～100%、反応性粗骨材が50%含まれている場合は、そのペシマム値は50%に移動する。また、粗骨材が全て反応性の場合、ペシマム値は明確に現われず、また膨張量も小さくなっている。

### 3. 2 粗骨材の最大寸法の影響

図-4は、反応性粗骨材の最大寸法が10mmと20mmにおける膨張率を示したものである。この図より、反応性細骨材を含む場合は、反応性粗骨材の最大寸法が大きいコンクリートの方が膨張率が大きくなることがわかる。これは、図-3でみられたように、細骨材が全て反応性の場合、反応性粗骨材の混合割合が少ないほど、すなわち反応性骨材の表面積が小さいほど膨張量は大きくなる。従って、粗骨材の表面積の大小による反応性の差がそのまま膨張率に現われたものと考えられる。

### 3. 3 セメント量およびアルカリ量の影響

#### (1) 単位セメント量の影響

単位セメント量の影響は、アルカリ量  $\text{Na}_2\text{O eq. 1.5\%}$  のコンクリートについて検討を加えた。図-5にセメント量を350, 450 $\text{kg/m}^3$ と変化した供試体における反応性粗骨材の混合割合と膨張率との関係を示す。この図より、セメント量450 $\text{kg/m}^3$ の供試体では、材令1ヶ月から膨張を開始し、それ以降も著しい膨張率の増加が見られる。また、図には示していないが、50-100-1.5, 100-100-1.5の供試体においても、材令1ヶ月から膨張は開始するが、0-100-1.5に比べて膨張はやや小さく、それぞれ約70%、約30%程度の膨張であった。次に、セメント量350 $\text{kg/m}^3$ の供試体の膨張率を見ると、

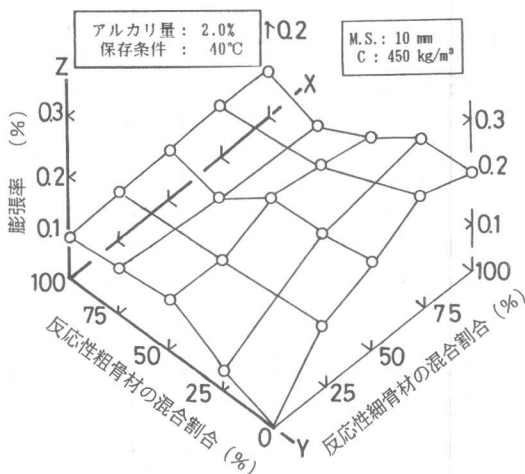


図-3 膨張率と混合割合の関係

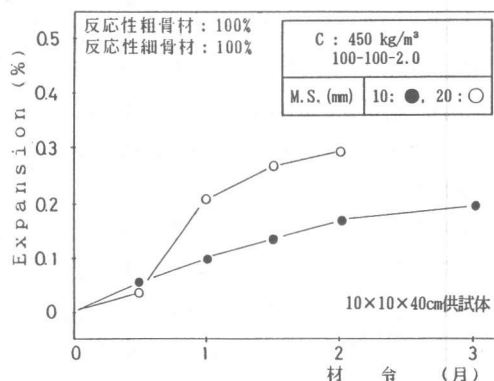


図-4 膨張率の経時変化

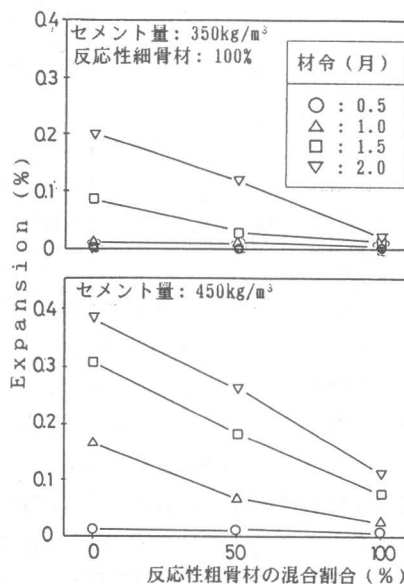


図-5 反応性粗骨材の混合割合と膨張率の関係

その傾向はセメント450kg/m<sup>3</sup>の場合と同じであるが、膨張率は小さく、反応性粗骨材の混合割合の違いによる膨張率の差も小さくなっている。

これは、アルカリ量は1.5%で同一であるが、総アルカリ量に換算すると単位セメント量350kg/m<sup>3</sup>では5.25kg/m<sup>3</sup>、450kg/m<sup>3</sup>では6.75kg/m<sup>3</sup>と1.5kg/m<sup>3</sup>の差があるため、セメント量450kg/m<sup>3</sup>のコンクリートの方が膨張が大きく現われたものと考えられる。

### (2) アルカリ量の影響

図-6にアルカリ量と膨張率との関係を示す。この図より、アルカリ量が多くなるほど膨張は大きくなるが、アルカリ量1.0%以下、すなわち総アルカリ量が4.5kg/m<sup>3</sup>以下では膨張は全く現われていない。しかし、粗骨材のみが反応性骨材のコンクリートでは、材令12ヶ月頃から膨張を開始し、材令21ヶ月で約0.15%の膨張を示すことが確認されている<sup>2)</sup>。従って、現時点ではまだ膨張が現われていないアルカリ量1.0%以下のコンクリートであっても、材令が経過するに伴って膨張する可能性があるものと考えられる。また、粗骨材のみが反応性である場合を想定した限界値、つまりアルカリ総量3.0kg/m<sup>3</sup>以下であっても、反応性の細骨材を使用した場合には、この限界値以下の総アルカリ量でも膨張が起る可能性のあることを示唆するものである。

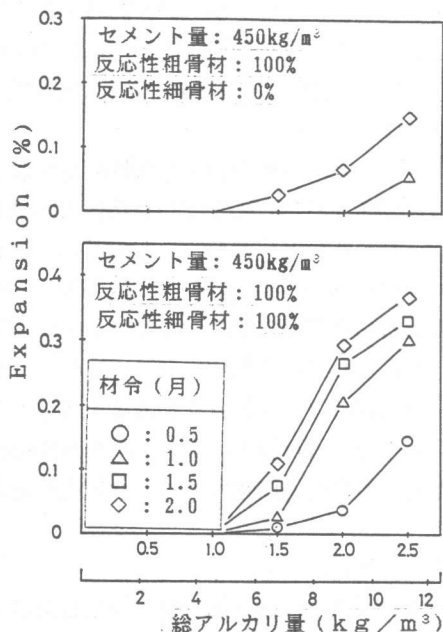


図-6 アルカリ量と膨張率の関係

### 3.4 ひびわれ特性

ここでは、反応性細骨材を用いた供試体に生じたひびわれを、トラバース法によってひびわれ本数、ひびわれ幅を定量化し、これをもとにして検討を加えることにする。

図-7に膨張率とひびわれ本数との関係を、図-8に膨張率と平均ひびわれ幅との関係を示す。図中の実線は最小二乗法によって求めた回帰直線である。この図より膨張率が增大するに従ってひびわれ本数および平均ひびわれ幅はともに増大しており、正の相関のあることがわかる。また、0-100と50-100の供試体を比較すると、同じ膨張率では0-100の供試体の方が50-100の供試体よりもひびわれ本数が多くなっている。これは、細骨材の方が骨材粒子の数が多いので、反応によるゲルの生成量が同じであればひびわれ発生源の数が多くなったためと考えられる。従って、図-8にもその傾向が見られるように、50-100供試体

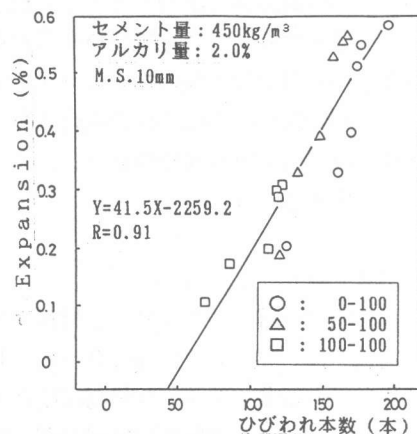


図-7 膨張率とひびわれ本数の関係

では膨張率は大きいが生ひびわれの数が少ないのでひびわれ幅が大きくなったものと考えられる。

次に粗骨材のみが反応性のコンクリートと比較すると、平均ひびわれ幅は同程度であるがひびわれ本数が多くなっている。従って、細骨材に反応性細骨材が含まれる場合、若材令からひびわれが発生し、粗骨材のみが反応性の場合に比べてひびわれの幅は同程度、あるいはそれ以下であるが、ひびわれ本数がかなり多くなっている。

コンクリート構造物の耐久性の診断および補修の要否を判断する場合のひびわれ特性の指標として、最大ひびわれ幅がとられることが多い。しかし、凍結融解作用においては、ひびわれ数が増えるような反応性細骨材を含有するコンクリートの方が損傷が大きくなることが認められており<sup>3)</sup>、このような場合にはひびわれ幅だけでは的確な判断はできなくなる。

アルカリ骨材反応によるひびわれ損傷の診断においては、最大ひびわれ幅に加えてひびわれ本数をも併せ考慮されるような指標を考えることが望ましい。

#### 4. まとめ

本研究は、反応性細骨材を使用したコンクリートの膨張挙動について検討した。以下に本実験によって得られた結果を列挙し、まとめとする。

- (1) 細骨材に反応性の骨材が含まれると反応速度は速くなり、膨張量も大きくなる。また、反応性細骨材と反応性粗骨材の組合せによってペシマム混合割合の移動が見られる。
- (2) 粗骨材最大寸法のアルカリ骨材反応に及ぼす影響は、反応性細骨材の含有の有無によって異なり、反応性細骨材を含む場合は最大寸法が大きい方が膨張は大きくなる。
- (3) 細骨材が反応性の場合、セメント量やアルカリ量のアルカリ骨材反応に及ぼす影響は、粗骨材のみが反応性の場合よりも顕著になる。
- (4) 反応性の細骨材を含むコンクリートでは、若材令から非常に細かいひびわれが数多く発生する。

#### [参考文献]

- 1) 田村 博：コンクリート材料とアルカリ骨材反応、コンクリート工学、Vol. 24, No. 11, pp. 26~27, 1964
- 2) 西林新蔵：アルカリ骨材反応とそれに伴う損傷の評価方法に関する研究、文部省科学研究費一般研究(B) 研究報告書、昭和63年 3月
- 3) 西林新蔵他：アルカリ骨材反応が生じたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性、鳥取大学工学部研究報告 (印刷中)

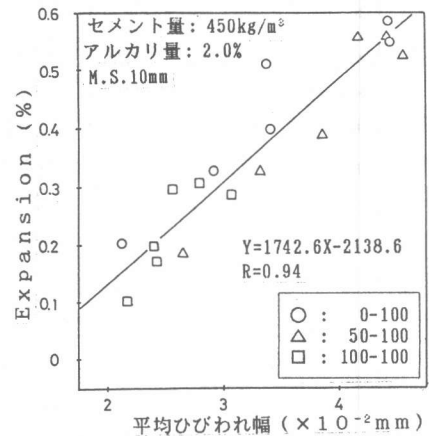


図-8 膨張率と平均ひびわれ幅の関係