

正会員 ○ 川村 満紀 (金沢大学複合材料  
応用研究センター)

正会員 柳場 重正 (金沢大学)

竹本 邦夫 (金沢大学大学院)

## 1. ま え が き

コンクリート構造物におけるアルカリ骨材反応による被害がアメリカで発見されて以来約40年間多くの研究・調査が行われて来た。アルカリ骨材反応による膨張量は反応によって生ずる生成物の組成に依存すると考えられる。実際の反応性骨材の混入したモルタルまたはコンクリート中において生成するゲルの組成は反応性骨材の性質、粒度、混入量およびコンクリート空隙中に存在する溶液のアルカリおよび水酸基イオン濃度等によって変化する。著者らがすでに行った我国において通常使用されているセメントを用いたモルタルに関する研究結果によると<sup>1), 2)</sup> 5mm~0.1mm程度の大きさの反応性骨材が比較的少量(実験に使用したモルタルの配合<sup>1)</sup>において、セメントに対する重量百分率で約7%)混入するときかなり膨張が大きく、ひびわれ発生の危険性も高い。さらに最近のコンクリート工事の現況から、海砂の使用、防錆剤としての亜硝酸ソーダの添加、高性能減水剤の使用にともなう低水・セメント比のコンクリートにおける間隙溶液中のアルカリイオン濃度の増加等を考慮すると細骨材中に少量の反応性の細粒子骨材が混入するだけでアルカリ骨材反応が生ずる可能性が考えられる。しかし、アルカリ骨材反応による膨張およびひびわれ発生におよぼす要因は多種多様であるので、実際には従来のASTM規格のみによってアルカリ骨材反応の可能性を予測するだけでは不十分であり、基礎的な反応機構の解明が必要である。しかし、これまでの研究においては、コンクリート内部に存在する反応生成物の組成、形態等について研究することは技術的に多くの困難をとまなうので、コンクリート表面に浸出した反応生成物、または人工的に合成された物質に関する研究が主体である。本研究は予め想定された種々のコンクリート間隙溶液と反応性骨材間の反応生成物を走査型電子顕微鏡によって観察し、おもに反応生成物の形態と溶液中のアルカリイオン濃度との関係さらにモルタルバーの膨張性との関係について2, 3の考察を加えたものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 モルタルバーの膨張に関する実験

使用セメントは普通ポルトランドセメント(N社製)であり、アルカリ成分としては $\text{Na}_2\text{O}=0.48\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}=0.35\%$ を含んでおり、 $\text{Na}_2\text{O}$ 等価百分率は0.71%である。反応性骨材は無定形シリカ、クリストバライト、石英より成り、各粒度範囲の比重と吸水量は表-1に示す通りである。

モルタルの配合はすべてセメント:骨材=1:0.75(重量比)とし、豊浦標準砂の一部分を反応性骨材によって置換した。置換率は全骨材量に対する重量百分率で10%, 20%, 50%, 75%, 100%である。コンクリート中の間隙溶液のアルカリおよび水酸基イオン濃度を变化させるためにセメントに対する重量百分率で0.5%, 1.0%および2.0%の水酸化ナトリウムを添加した。モルタル供試体の作製法および養生条件はASTM C-227「セメント骨材の潜在性アルカリ反応試験方法(モルタルバー法)」に準じたものである。各測定値は2本の供試体の平均値である。

表-1 使用骨材の物理的性質

粒 度(mm)	表乾比重	吸水率(%)
4.76 ~ 2.38	1.81	20.51
2.38 ~ 1.19	1.82	19.11
1.19 ~ 0.595	1.86	18.45
0.595-0.297	1.88	16.30
0.297-0.149	1.92	15.26
0.149-0.074	1.95	5.12
0.074 以下	1.96	4.71

## 2.2 アルカリ骨材反応生成物に関する実験

コンクリート中におけるアルカリ骨材反応は反応性骨材がコンクリート中の間隙溶液によって浸されることによって生ずる。本実験においては、コンクリート中におけるアルカリ骨材反応による生成物について明らかにするために、反応性骨材をなるべく実際のコンクリート中の間隙溶液に類似した溶液(モデル溶液)中に浸漬した

状態で反応させることによって生じた反応生成物を走査型電子顕微鏡および光学顕微鏡によって観察した。モデル溶液は水酸化カルシウム飽和溶液に想定したコンクリートの間隙溶液成分に相当する量の水酸化ナトリウムを添加したものである。本実験では

ナトリウムイオン濃度が0.5 moles/l, 1.0 moles/l, 2.0 moles/l となるように水酸化ナトリウムを添加した。反応性骨材の粒度は4.76~2.38mm, 1.19~0.595mm, 0.297~0.149mm および0.074mm以下の4種類であり、浸漬された反応性骨材量はモデル溶液1ccあたり1gである。両面接着テープを貼りつけた時計皿上に所定量の骨材を一様に分布するように載せた後、所定量のモデル

溶液を注ぎ、シャーレ中に密封した状態で温度38°Cの蒸気槽内に貯蔵した。4週まで1週間ごとに実体顕微鏡によって骨材の状況を観察した。4週目に真空乾燥後炭素および金で蒸着した試料を走査型電子顕微鏡による観察に供した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 モルタルバーの膨張特性

モルタルバーの膨張ひずみの経時変化の例を示すと図-1および図-2のようである。これらの図より明らかなように、反

応性骨材の粒度, NaOH添加率, 反応性骨材の量(置換率)によって最終の膨張量および時間ともなう膨張量の増加過程が大きく異なることがわかる。これらの膨張特性を定量的に把握するために膨張ひずみ( $\epsilon_e$ ) - 時間( $t$ )関係にクリーブ時間方程式としてよく使用される双曲関数

$$\epsilon_e = \frac{mt}{n+t}$$

を適用して最終膨張ひずみ( $m$ )および $m$ の $\frac{1}{2}$ に達するに必要な日数( $n$ )を求め

る。置換率10%および50%における各粒度およびNaOH添加率に対する $m$ および $n$ を図示すると図-3, 図-4, 図-5および図-6のようである。

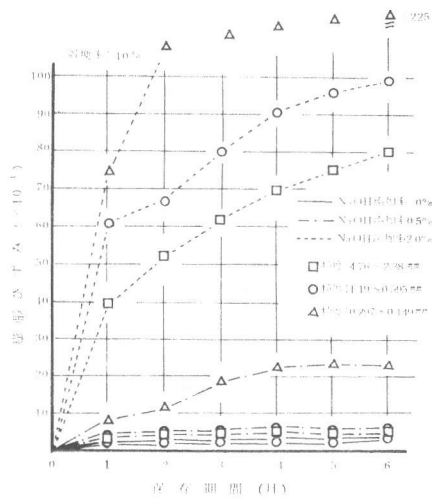


図-1 膨張ひずみの経時変化

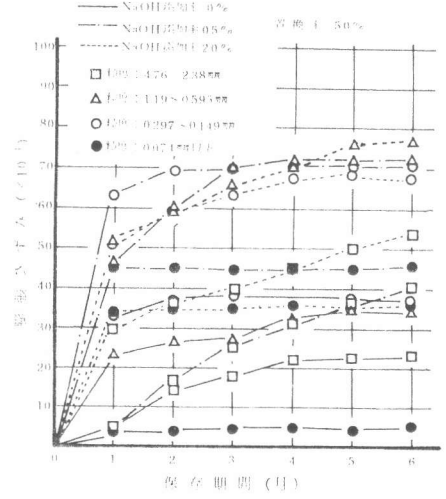


図-2 膨張ひずみの経時変化

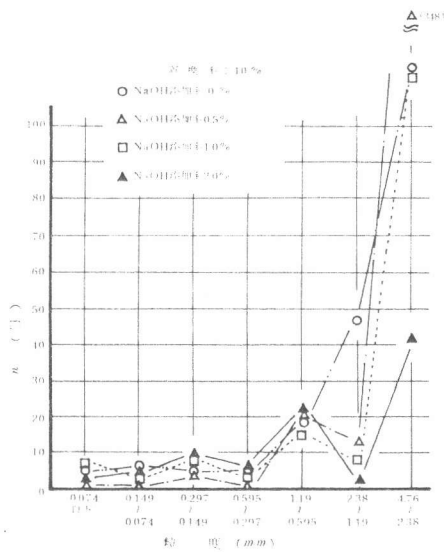


図-3  $n$ と粒度の関係

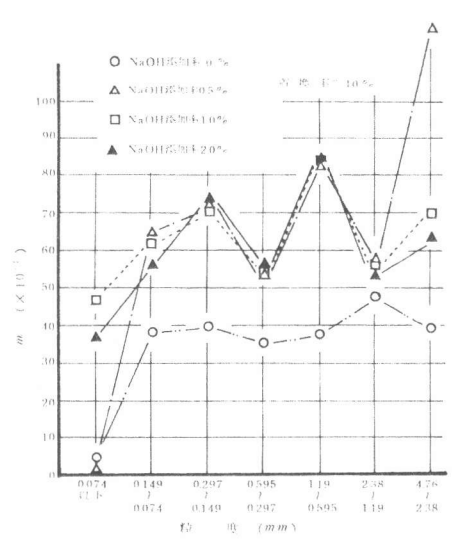


図-4  $m$ と粒度の関係

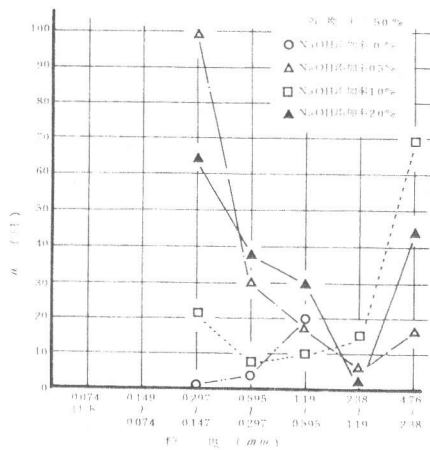


図-5  $n$ と粒度の関係

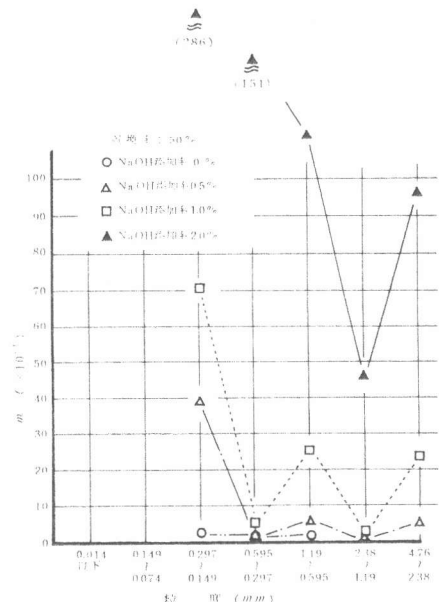


図-6  $m$ と粒度の関係

膨張ひずみの進行速度を示す  $n$  については、図-3および図-5より明らかなように、反応性骨材量の少ない置換率10%においては粒径が小さくなるとともに  $n$  は急に小さくなるが、置換率50%においては10%とはかなり異なった傾向を示す。置換率10%においては、1.19mm以下の小さい粒径の骨材においては膨張は急速に進行し、0.074mm以下の微粒子骨材を使用したNaイオン濃度の低い場合を除いてはかなり大きな最終膨張量に達する。また、各粒度の最終膨張量の間にはあまり大きな差異はないが、4.76~2.38 mmの骨材を使用したモルタルバーの膨張は非常にゆっくりと進むのが特徴である。一方、置換率50%においては、NaOH添加率0%を除いて2.38mm以下の粒度範囲では粒径が小さいものほど  $n$  の値は大きくなり、最終膨張量(m)は置換率10%の場合より小さいものが多い(図-5)。しかし、Naイオン濃度の高いNaOH添加率2.0%の最終膨張量は非常に大きい(図-6)。また置換率10%の場合と同様に、粒度範囲(4.76~

2.38mm)の反応性骨材を使用したモルタルバーの膨張量の進行速度は小さい。

### 3.2 走査型電子顕微鏡による反応生成物の観察

写真-1および-2はCa(OH)<sub>2</sub>飽和溶液およびCa(OH)<sub>2</sub>+2.0 moles/l NaOHの溶液中に4週間浸漬した0.074 mm以下の反応性骨材のSEM像である。

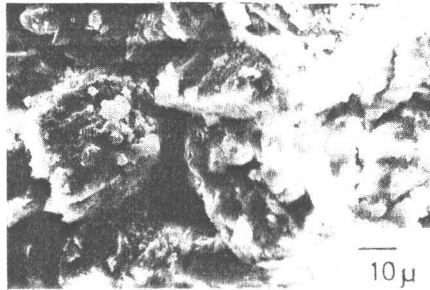


写真-1 粒度: 0.074 mm 以下  
Ca(OH)<sub>2</sub> 飽和溶液

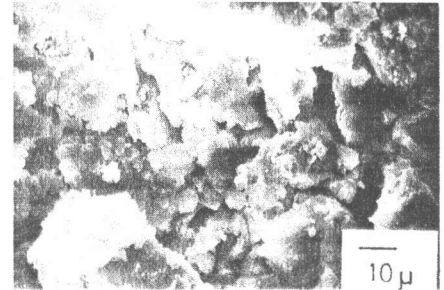


写真-2 粒度: 0.074 mm 以下  
Ca(OH)<sub>2</sub>+2.0 moles/l NaOH

両者ともにあまり特徴のある形態の反応生成物は見られずまた両者間に大きな相違はない。本実験に関する限り、いずれの粒度範囲の骨材もCa(OH)<sub>2</sub>飽和溶液中に浸漬したものには骨材自体の変化も明確でなく、ほとんど特徴的な反応生成物も認められない。

粒度範囲0.297~0.149 mmにおいてはCa(OH)<sub>2</sub>+1.0 moles/l および+2.0 moles/l NaOH溶液中の骨材表面にはそれぞれ写真-3および-4にみられるような微粒子状の生成物の存在が確認された。一方、粒径の大きい骨材においては極めて特徴的な形態の反応生成物がみられた。写真-5および-6はCa(OH)<sub>2</sub>+0.5 moles/l NaOH溶液に浸漬した粒度範囲1.19~0.595 mmの骨材表面および骨材が載っているテープ面上に存在した反応生成物を示す。

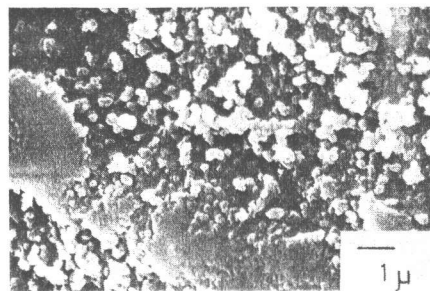


写真-3 粒度: 0.297~0.149 mm  
Ca(OH)<sub>2</sub>+1.0 moles/l NaOH

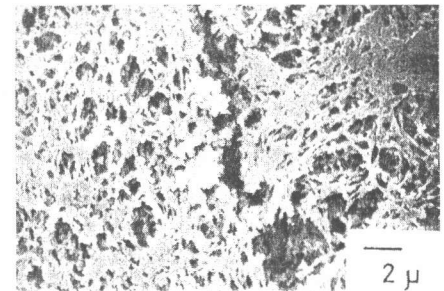


写真-4 粒度: 0.297~0.149 mm  
Ca(OH)<sub>2</sub>+2.0 moles/l NaOH

さらに、Naイオン濃度の高いCa(OH)<sub>2</sub>+1.0 moles/l および2.0 moles/l NaOH溶液に浸漬した粒度範囲

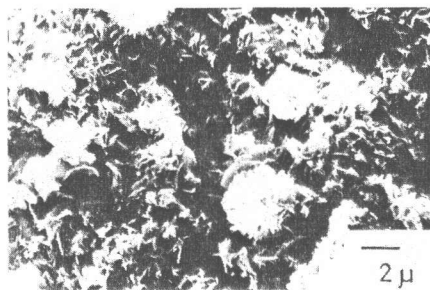


写真-5 粒度: 1.19~0.595 mm  
Ca(OH)<sub>2</sub>+0.5 moles/l NaOH

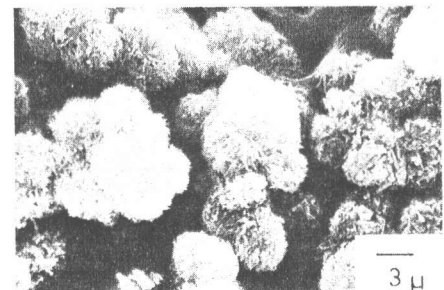


写真-6 粒度: 1.19~0.595 mm  
Ca(OH)<sub>2</sub>+0.5 moles/l NaOH

1.19~0.595 mmの骨材表面およびテープ面上には写真-7, 8, 9および10にみられるように多量の膨張性ゲルが生成した状況が観察される。また粒度範囲4.76~2.38 mmにおいてもCa(OH)<sub>2</sub>+1.0 moles/l および2.0 moles/l NaOH溶液中で反応した骨材表面およびテープ面上に写真-11および-12に示されるように多量の膨張性ゲルの生成が確認された。このモデル溶液-骨材反応系のNa<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>比はほぼ置換率50%のモルタルバーに相当し、Naイオン濃度0.5 moles/l, 1.0 moles/l および2.0 moles/l はそれぞれモルタルバーの配合におけるNaOH添加率0%, 0.5% および

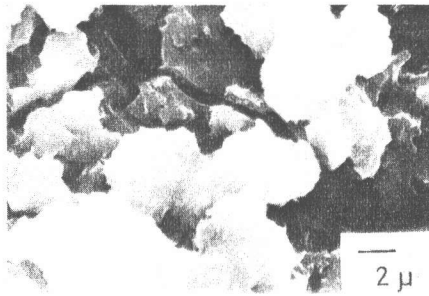
2.0多に相当する。反応生成物の観察結果をモルタルバーの膨張特性と関連づけるためにモデル溶液—骨材反応系に相当するモルタルバーの膨張ひずみを図—7に示す。図—7より、多量の膨張性ゲルの生成がみられた粒度範囲 4.76 ~ 2.38mm, 1.19~0.595mm の反応性骨材をCa(OH)<sub>2</sub>+2.0moles/l NaOH 溶液に浸漬した場合に相当するモルタルバーの膨張は非常に大きいことがわかる。とくに膨張量の大きい0.297~0.149mm の骨材のSEM像には膨張性ゲルの生成した形跡はみられないが、写真—13に示すように実体顕微鏡によって水ガラス状のゲルの生成が明確に認められた。

#### 4. 結 論

モデル溶液中に浸漬した反応性骨材の走査型電子顕微鏡による観察の結果、骨材の粒径およびNaイオン濃度の相違によって反応生成物の形態がかなり異なることが明らかになった。さらに、これら反応生成物の観察結果とモルタルバーの膨張特性との間にはかなりの関連性が認められた。

#### 参考文献

- 1) 柳場, 川村, 岡田: 材料, 第26巻 第290号 pp.1078~1084, '77.
- 2) 柳場, 川村, 竹本: 土木学会第33回年次学術講演会概要集, 第5部 pp.175~176, '78.
- 3) Taylor, D.H.: J. of Testing and Evaluation, Vol. 5, No. 2 pp. 102~105, March, '77.



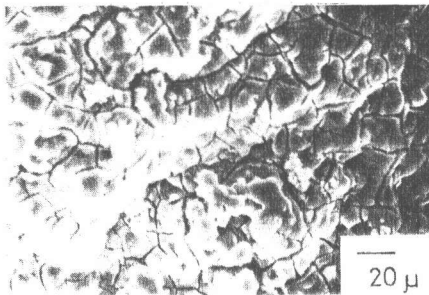
写真—7 粒度: 1.19~0.595mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+1.0moles/l NaOH



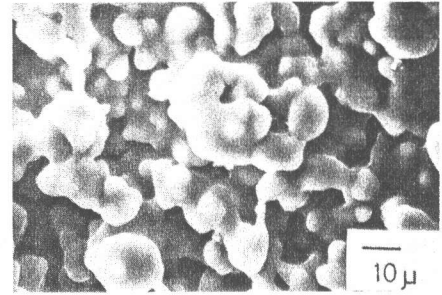
写真—8 粒度: 1.19~0.595mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+1.0moles/l NaOH



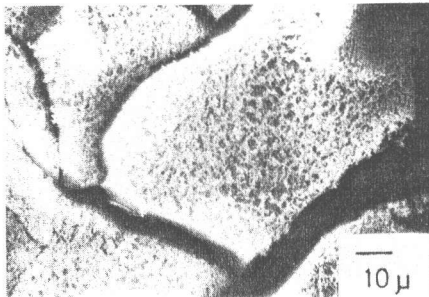
写真—9 粒度: 1.19~0.595mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+2.0moles/l NaOH



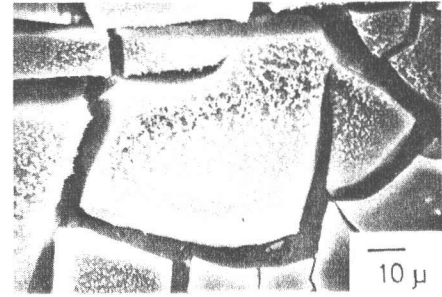
写真—10 粒度: 1.19~0.595mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+2.0moles/l NaOH



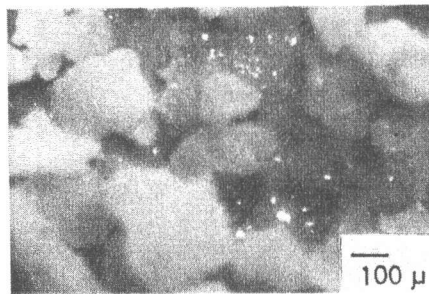
写真—11 粒度: 4.76~2.38mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+1.0moles/l NaOH



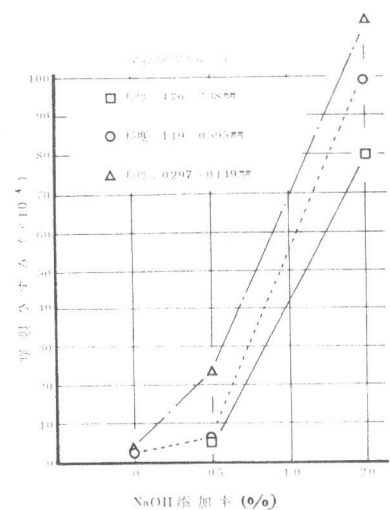
写真—12 粒度: 4.76~2.38mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+2.0moles/l NaOH



写真—13 粒度: 0.297~0.149mm

Ca(OH)<sub>2</sub>+2.0moles/l NaOH



図—7 NaOH 添加率と膨張量の関係