

# 論文 拘束条件下での ASR によるモルタルの膨張圧力に関する研究

堂下 航<sup>\*1</sup>・二村 誠二<sup>\*2</sup>・長友 昌章<sup>\*3</sup>

**要旨** : ASR によるコンクリート構造物の劣化は, 内部鉄筋の破断に見られるように, 構造的にも大きな影響を与えている。ここでは, モルタル供試体をステンレス製の円筒容器に打設し, その変位量から膨張圧力を求めた。また, 同時に打設したモルタルバーの膨張量と細孔溶液の化学組成の変化から, ASR のメカニズムについて検討した。その結果, ペシマム混入率によって生成されるアルカリシリカゲルの品質が変化し, 膨張圧力はそのアルカリシリカゲルの質的要因によって影響を受けることが明らかとなった。

**キーワード** : アルカリシリカ反応, 膨張圧力, アルカリシリカゲル, ペシマム混入率

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下, ASR と記す) に伴う膨張圧力の大きさを検討するためには, そのメカニズムを明らかにする必要がある。

ASR を解明する方法には, 岩石学的方法・化学的方法・物理的方法など<sup>1)</sup>があり, それぞれに対して多くの研究がなされてきた。しかし, ASR にはアルカリシリカゲルの生成に伴う『化学反応過程』と, アルカリシリカゲルの吸水に伴う『吸水膨張過程』という 2 つの過程が存在し, これらが相互に影響しあうために ASR のメカニズムの解明を困難なものにしている。

そこで本論文は, ステンレス製円筒容器を用いた拘束条件下での ASR による膨張圧力測定試験を行い, 物理的な立場から ASR のメカニズムについて検討した。同時に JIS A 1146 に準じた試験を行い, モルタルバーの膨張量とモルタルの

膨張圧力の比較・検討を行った。さらに, 細孔溶液中の各種イオン濃度を分析し, 化学的な立場からも ASR のメカニズムと膨張圧力との関係について検討を行った。

## 2. 実験計画

反応性骨材「A」, 非反応性骨材「B」を用い, 骨材 B に対し骨材 A を 20%ピッチで混入して(以下, A0, A100 などと表す) 実験を行い, 以下の項目について検討した。

- 1) 膨張圧力とモルタルバー膨張量 (開放モルタルバー及び封緘モルタルバー)
- 2) 膨張圧力とペシマム混入率
- 3) 膨張圧力と細孔溶液の化学組成変化

### 2.1 使用骨材および各種試験結果

使用骨材の品質および各種試験結果を表 1 に示す。

表 1 使用骨材の品質および各試験結果

記号	種別	主な反応性鉱物名	JIS化学法				開放モルタルバー		封緘モルタルバー	
			Sc	Rc	Sc/Rc	判定	26W 膨張量(%)	判定	26W 膨張量(%)	判定
A	輝石安山岩 砕石	クリストバライト	533.5	284.5	1.88	D	0.02	I	0.22	D
B	珪砂	—————	28.2	20.2	1.40	D	0.01	I	0.00	I

Rc:アルカリ濃度減少量(mmol/l) Sc:溶解シリカ量(mmol/l) 試験結果の判定 I:「無害」D:「無害でない」  
JIS化学法: Sc/Rc $\geq$ 1.00 なら無害でない モルタルバー: 膨張量 $\geq$ 0.10 (%) なら無害でない

\*1 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 大阪工業大学 工学部建築学科助教授 (正会員)

\*3 大阪アサノコンクリート (株)

ステンレス製円筒容器にひずみゲージを溶接する
ステンレス製円筒容器の応力-ひずみによる補正係数の測定
供試体の作製：ステンレス製円筒容器にモルタルを充填し、 恒湿恒温室にて24±1時間養生 上端面を研磨し、封緘する
初期養生：40±2℃、相対湿度95%以上の養生槽で養生
基準ひずみ量の測定：材齢2dでのひずみ量を基準とする
養生：40±2℃、相対湿度95%以上の養生槽で養生
測定：2時間ピッチで材齢26Wまで連続的に測定し、 測定されたひずみに補正係数を乗じて膨張圧力を求める

図-1 膨張圧試験のフローチャート



写真-1 ステンレス製円筒容器

## 2.2 実験概要

本実験では、膨張圧力が現れやすいようにモルタルのアルカリ量を1.4%と高アルカリに設定した。また、セメントはモルタルバー法用の普通ポルトランドセメント ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0.68\%$ ) を用い、不足分のアルカリ量は1 (mol/l) の NaOH 水溶液 (JIS K 8576) を添加して調整を行った。

## 2.3 試験方法

膨張圧力測定試験：図-1にフローチャートを示す。また、膨張圧力は写真-1のようなステンレス製円筒容器（充填モルタル寸法：長さ200mm，直径54mm）を用いて測定した。

開放モルタルバー：JIS A 1146 に準拠し、26W まで試験を行った。

封緘モルタルバー：JIS A 1146 に準拠し、図-2のように、供試体に耐薬品性耐水性を有する塩化ビニール製チューブで封緘し、26W まで試験を行った。

イオン濃度分析：細孔溶液の抽出後、1/20 (mol/l) の塩酸で100倍に希釈し、中和滴定およびICP(高周波プラズマ発光分光分析装置)によってOHおよびNa, K, Si, Caの各イオン濃度を測定した。

## 2.4 反応性珪物について

本実験で使用している骨材は輝石安山岩砕石であり、反応性珪物としてクリストバライトを多く含有するものである。クリストバライトは不安定なシリカ珪物であり、アルカリ反応性は極めて激しい性質を持つものである。

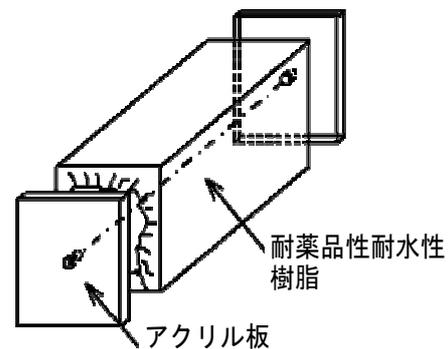


図-2 封緘モルタルバー供試体

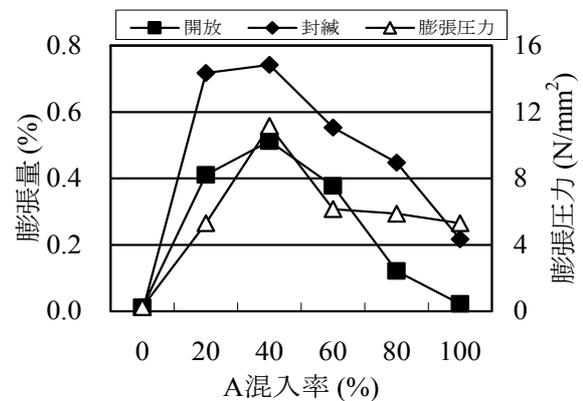


図-3 混入率別 膨張量・膨張圧力 (26W)

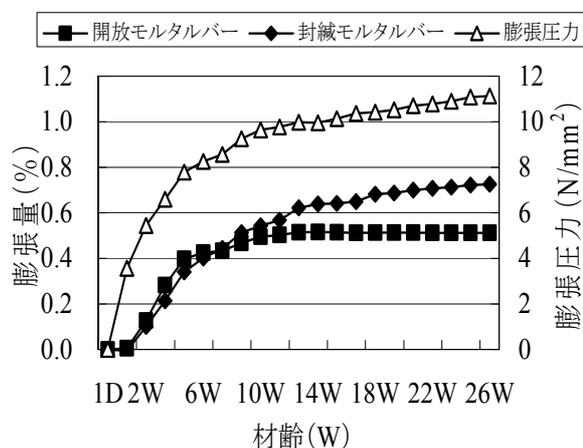


図-4 各試験における膨張量経時変化 (A40)

### 3. モルタルバー膨張量と膨張圧力について

反応性骨材 A の各混入率と材齢 26W における膨張量・膨張圧力との関係<sup>2)</sup>を図-3に示す。また、ペシマム混入率と考えられる A40 について、各試験における膨張量経時変化を図-4に示す。

図-3から、骨材 A は開放モルタルバーの A100 の時には「無害」と判定されているが、A40 の時に最も膨張しており、ペシマム現象を起こす骨材であるといえる。

図-4から、材齢初期に膨張圧力が大きく増加する要因としては、モルタル内でのアルカリシリカゲルの生成量は微量ではあるが、拘束されているため、膨張圧力は測定されたと考えられる。

#### 3.1 モルタルバー膨張量について

図-4から、若材齢時では供試体が外部環境と直に接する開放モルタルバーが封緘モルタルバーの膨張量を上回っている。これは養生時に開放モルタルバーは水分の供給が十分に行われているので、初期膨張が大きくなったためである。しかし材齢が進むにつれ、外部へのアルカリの流出が起こるため、長期材齢では膨張はほとんど進まない。これに対して、水の供給が内部水分にしか期待できない封緘モルタルバーは、初期膨張は小さいが開放モルタルバーのようなアルカリの流出が起こらないため、最終膨張量は大きくなったと考えられる。

それに加え図-4からも明らかのように、材齢初期における『化学反応過程』で生成された大量のアルカリシリカゲルは、封緘されたことによって『吸水膨張過程』を抑制されているためと考えられる<sup>3)</sup>が、内部に存在する自由水だけでも十分に大きな膨張を示すことが確認できる。この反応は、特にペシマム混入率にあたる A40 で最も顕著に現れているといえる。

#### 3.2 膨張圧力について

反応性骨材 A の各混入率における封緘モルタルバー膨張量とモルタル膨張圧力との関係(26W)を図-5に示す。図-5から、A0・A40以外のものは膨張圧力が 6.0 (N/mm<sup>2</sup>) 前後とほ

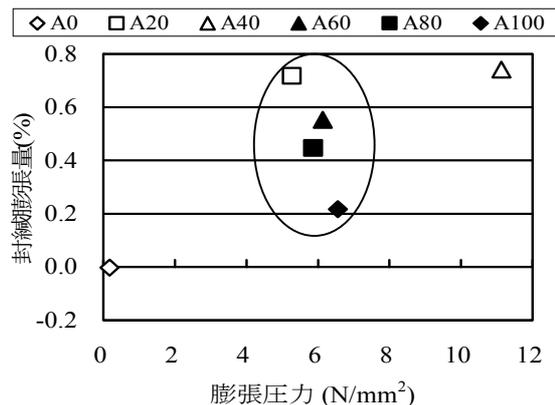


図-5 封緘モルタルバー膨張量とモルタル膨張圧力との関係 (26W)

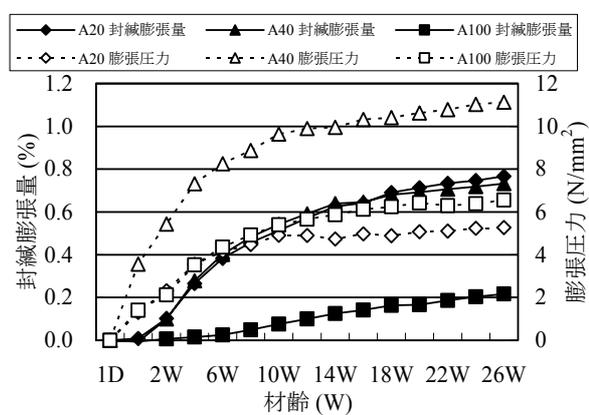


図-6 封緘膨張量・膨張圧力の経時変化

ぼ同様の値が測定された。しかし、封緘モルタルバーの膨張量を見ると必ずしも同じような値を得ていないことから、次のようなことが考えられる。

ステンレス製円筒容器による膨張圧力測定試験において同一膨張圧力を示したものは、モルタル内に生成されるアルカリシリカゲルが同質であるため、吸水による膨張圧力が同じだと考えられる。このことから、A40 以外におけるアルカリシリカゲルの質的要因<sup>3)</sup>は同じであるといえる。

一方、A40 の膨張圧力は他と比べても極端に大きいので、生成されたアルカリシリカゲルの品質は吸水膨潤性の高い硬質なゲルであると考えられる。しかし、質的要因が同じアルカリシリカゲルでも、拘束を受けない各モルタルバーによる膨張量は異なっていることから、生成されたアルカリシリカゲルの量的要因が膨張量に

影響したと思われる。この結果、モルタルバーの膨張量とモルタルの膨張圧力との間には明確な相関関係が認められない。

### 3.3 モルタルバー膨張量と膨張圧力について

A20・A40・A100 における膨張量・膨張圧力と材齢との関係を図-6に示す。図-6から、封緘モルタルバーの膨張量は材齢26Wまで増加する傾向を示すが、A20・A100の膨張圧力は材齢10W程度からほぼ同程度の値を示している。このことから、無拘束条件下におけるモルタルバーの自由膨張量は、生成されたアルカリシリカゲルの質的要因と量的要因に依存するが、吸水膨潤したアルカリシリカゲルの量的要因の影響を強く受けることを示している。これに対して、A40は吸水膨潤性が大きい硬質なアルカリシリカゲルを生成するため、その膨張圧力も大きくなったものと思われる。

ここで封緘モルタルバーと膨張圧力測定試験との膨張性状の違いを挙げてみると以下のものである。

- 1) 封緘モルタルバーは無拘束条件下における密封型養生なので、モルタルの膨張に関しては自由膨張と同じである。そのため、生成されたアルカリシリカゲルが吸水膨潤すると、ゾル化が進んで膨張圧力が低下しても、膨張量として表れるようである。
- 2) 膨張圧力測定試験でのステンレス製円筒容器は密封型養生であるとともに、モルタルの膨張を拘束した状態であることから、この拘束力より小さいアルカリシリカゲルの膨張圧力は、膨張量として表れないようである。

以上のことから、同一の骨材を使用したにも関わらず、反応性骨材混入率によってアルカリシリカゲルの特性に違いが生ずる要因は、封緘モルタルバーの膨張量とステンレス製円筒容器から得られた膨張圧力との関係（物理的現象）から説明することは困難といえる。

## 4. 細孔溶液中の各イオン濃度の検討

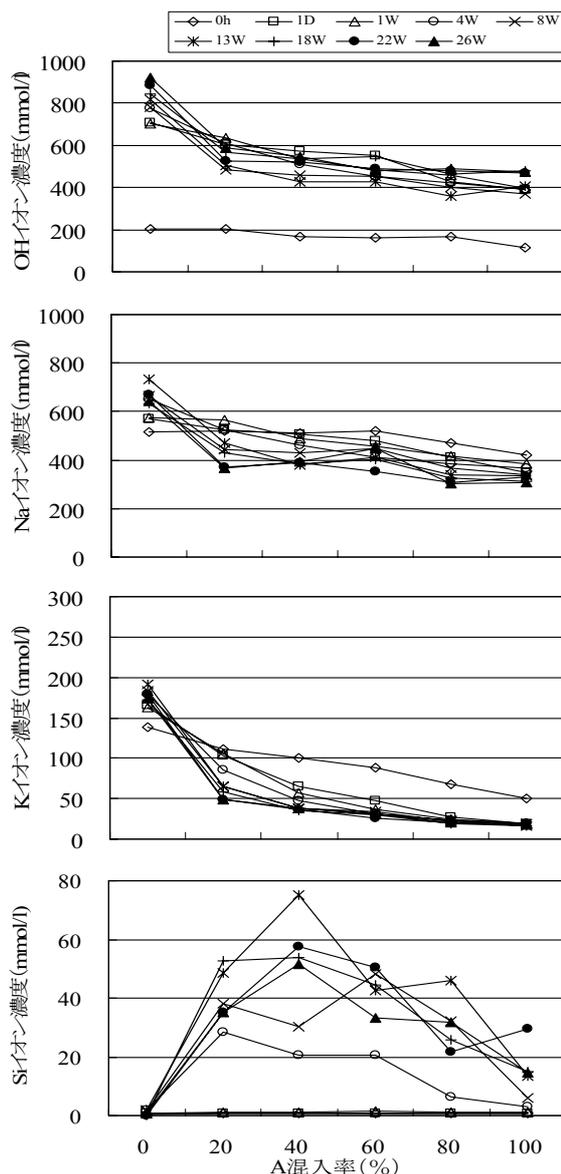


図-7 混入率別 各イオン濃度 測定結果

今回は材齢26Wまでの測定結果で検討した。また、各イオン濃度の混入率別経時変化を図-7に示す。なお、Caイオンは溶出量が微量であるため、検討しないこととする。

### 4.1 細孔溶液中のOHイオン濃度について

図-7より、A0では反応性骨材が混入されていないことからOHイオンの消費が少なく、モルタルバーの膨張もほとんど示さなかった。また、A100では反応性骨材混入率が高いため他の混入率よりもOHイオン濃度の低下が大きく、A20といった低混入率のものに比べ、アルカリシリカゲルの生成が著しく進んでいるように見える。しかし、A100の膨張量は小さく、膨張圧

力は A40 以外の混入率とほぼ同様の値を示していることから、OH イオンの消費量とアルカリシリカゲルの生成量は比例関係にないことを示している。このことから、アルカリシリカゲルの生成に関連するシロキサン基の切断に必要な OH イオン濃度は、一定以上の濃度が必要となることを示唆している。

#### 4.2 細孔溶液中の Na・K イオン濃度について

図-7より、Na・K イオン濃度は OH イオン濃度と同様の傾向を示し、切断されたシロキサン基と Na・K イオンとの間でアルカリシリカゲルが生成されたと考えられる。OH と Na・K イオンは、A100 において最も低い濃度を示した。これは、反応性骨材である A の骨材量が、細孔溶液中に必要とされる OH イオン量を上回ったため、ある範囲までしか反応が進まなかったからと考えられる。また極端な膨張量を示した A20・A40 においては、シロキサン基の切断が効率よく行われ、アルカリシリカゲルの生成が活発であったといえる。図-7より、OH・Na・K イオンは極めて短時間の内にアルカリシリカゲルの生成に消費されていることを示している。

#### 4.3 細孔溶液中の Si イオン濃度について

図-7より、他の混入率と比較して Si イオンが 0.10 (mmol/l) 前後とほとんど溶出されなかった A0 では、シラノール基の生成やシロキサン基の切断等といった反応が少なからず見られるが、活発な反応が起こっていないことを示している。

A100 においても Si イオン濃度は小さくなった。しかし、A0 とは異なり、A100 では OH イオンの消費と Si イオンの溶出が見られることから、反応は進んでいると考えられる。だが、OH イオンの消費量の傾向と Si イオンの溶出量の傾向が一致していない。このことから、OH イオンが A100 供試体内で不足し、十分なシロキサン基の切断が行われなかったため、アルカリシリカゲルの生成も十分にされていないと考えられる。

図-8に骨材 A 混入率別膨張圧力と Si イオン濃度の関係 (26W) を示す。混入率別の Si イオン濃度の傾向は、膨張圧力とほぼ同様の傾向を示している。また、過大な膨張を示した A40 で

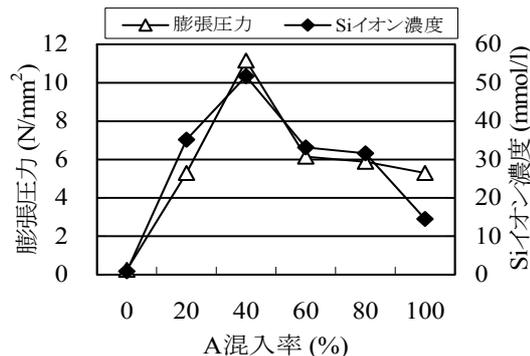


図-8 混入率別 膨張圧力と Si イオン濃度の関係 (26W)

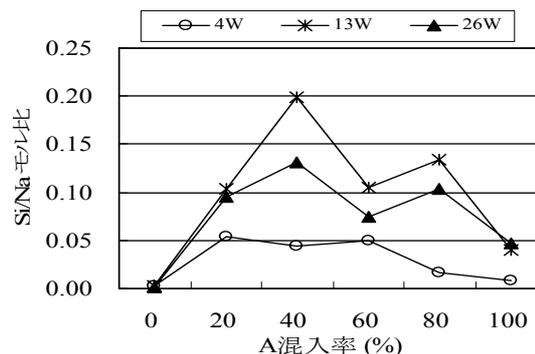


図-9 混入率別 Si/Na モル比 測定結果

は Si イオンの溶出が顕著に表れていた。このことから、膨張圧力と細孔溶液中の Si イオン濃度には何らかの関係があると考えられる。

#### 4.4 Si イオンと Na イオンのモル比について

図-9に混入率別 Si/Na イオンのモル比を示す。アルカリシリカゲルの吸水膨潤性には、Si/Na のモル比が関与していると考えられている。A40 のモル比が他の混入率よりも大きな値となり、膨張圧力および Si イオン濃度との相関関係が見られた。A40 以外のモル比はほぼ同様の値を示しており、A40 のモル比だけが突出している。このことから、アルカリシリカゲルの吸水膨潤性は Si/Na モル比からもある程度推測することができると考えられる。

なお、今回の実験で得られた値はアルカリシリカゲルそのものの  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  のモル比ではなく、細孔溶液中に溶出した Si イオンと Na イオンにより Si/Na のモル比を求めたものであるが、ある程度はアルカリシリカゲルの特性を示すものと考えられる。

## 5. 細孔溶液中のイオン濃度と膨張圧力の検討

A20・A40・A100の膨張圧力とSi・Na+Kイオン濃度変化を図-10に示す。A20・A40・A100を比較すると以下のようなことが挙げられる。

- 1) A20・A40のNa+K・Siイオン濃度の経時変化を見るとほぼ同じ挙動を示しているが、膨張圧力の経時変化を見ると各々の挙動は異なる。
- 2) A20よりA100の方がNa+Kイオンの消費は少なく、Siイオンの溶出も少ないが、膨張圧力は同じ挙動を示している。

以上のことから、アルカリシリカゲルの質的要因が膨張圧力に強く影響していることがわかる。また、アルカリシリカゲルの量的要因は膨張圧力にはあまり影響していないように思われる。

## 6. まとめ

拘束条件下でのASRによる膨張圧力測定およびモルタルバーの膨張量、細孔溶液中の各イオン濃度を比較し、以下のことが明らかとなった。

- 1) モルタルバー膨張量はアルカリシリカゲルの量的要因・質的要因によって影響を受けるが、特に量的要因がより強い影響を与えると考えられる。
- 2) ペシマム混入率によってアルカリシリカゲルの質的要因は変化し、それによって膨張圧力は強い影響を受ける。本実験では、A40で最大膨張圧力11(N/mm<sup>2</sup>)を示した。
- 3) 最も顕著な膨張がみられたA40では、シロキサン基とOH・Na・Kイオンの反応が活発に行われたと考えられる。その反応により、吸水膨潤性の強いアルカリシリカゲルが生成され、それが高い膨張圧力を生み出したと考えられる。
- 4) 拘束条件下でのアルカリシリカゲルの膨張圧力は細孔溶液中のSiイオン濃度と良く似た傾向を示す。
- 5) Si/Naモル比がアルカリシリカゲルの吸水膨潤性にある程度影響していると考えられる。

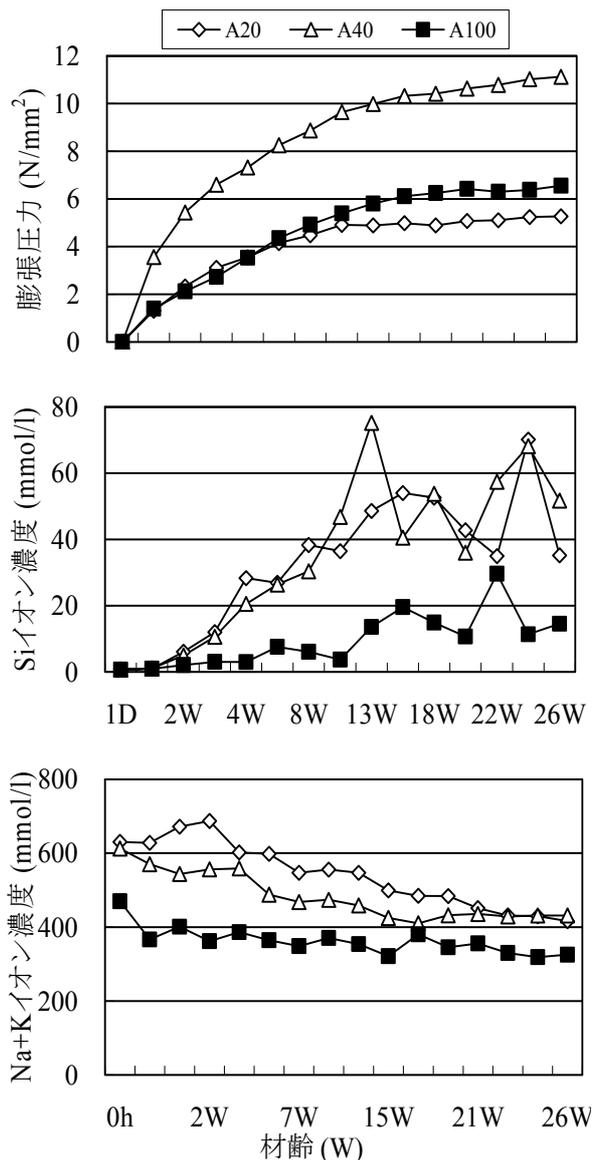


図-10 膨張圧力とSi・Na+Kイオン濃度の比較

## 参考文献

- 1) 中部セメントコンクリート研究会編：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応，理工学社，1991
- 2) 長友昌章，二村誠二：拘束条件下でのアルカリシリカ反応による膨張圧に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.973-974，2004
- 3) 村上あい，二村誠二，乾義尚：アルカリシリカ反応における反応性鉱物の違いが細孔溶液の化学組成に及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.937-942，1998