

外部から供給されるNaClのアルカリ・シリカ反応に及ぼす影響

金沢大学 工学部 正会員 川村 満紀
同 上 学生員 O五十嵐 正巳

1. まえがき

海水のしぶきや融氷剤の散布などによって、外部より供給されるNaClが、アルカリ・シリカ反応 (ASR) によるコンクリートの劣化を促進することが指摘されて来た。外部から供給されるNaClがASRによる膨張を促進するメカニズムについては、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が重要な役割をはたしていることが2、3の研究者によって提起されている。本研究は反応性骨材としてオパールを使用することによって広範囲のアルカリ/シリカ比 ($(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$) を有するモルタルバー供試体を1NのNaCl溶液に浸漬させたときのそれらの膨張挙動とモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量との関係について比較検討することによって、外部からのNaClがASRを促進するメカニズムについて一考察を加えたものである。

2. 実験方法

2-1 使用材料: セメントは等価 Na_2O 量0.97%の高アルカリセメントであり、使用した反応性および非反応性骨材は、それぞれ、石川県赤瀬産オパール (粒径 1.2~0.3 mm) および豊浦標準砂である。

2-2 実験方法: モルタルの配合は、セメント:水:骨材 (標準砂+オパール) = 1:0.4:0.75 (重量比) である。また、オパール全量を反応性シリカとしてセメント中のアルカリに対して所定のアルカリ/シリカ比になるように全骨材中のオパール含有量を決定した。モルタル供試体 (25×25×285 mm) は、材令28日まで湿気槽中 (38℃, RH 100%) において貯蔵し、その後1N NaCl 溶液 (38℃) 中に浸漬させ、それらの長さ変化を測定した。また DSC-TG分析によってモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を求めるための供試体を作製し、膨張試験と同じ条件下で貯蔵した。1N NaCl 溶液中に浸漬後21日において、供試体表面より5mmの深さまでの部分のモルタルについて DSC-TG分析を行った。

3. 実験結果および考察

図-1は、アルカリ/シリカ比 (対数) とモルタルの膨張量との関係を示したものである。この図より38℃、相対湿度100%の条件下におけるベシマムのアルカリ/シリカ比は0.05であることが分かる。しかし、1N NaCl 溶液中に浸漬したモルタルにおいては、材令とともにベシマムのアルカリ/シリカ比はより小さい方に移行する。すなわちNaCl溶液浸漬後21日および102日において最大膨張量を示すアルカリ/シリカ比はそれぞれ、0.03および0.015である。またアルカリ/シリカ比=0.01および0.0064のモルタルバーは370日現在においても膨張は発生していない。これらの結果より、NaCl溶液中においても、全く膨張を示さない限界のアルカリ/シリカ比が存在することが分かる。また、アルカリ/シリカ比=0.01と0.015の間でNaCl溶液中の膨張挙動に急激な差異が生ずる。このようなアルカリ/シリカ比のわずかな相違によってもたらされる膨張挙動の大きな変化は、モルタル中に28日材令までに形成されていたアルカリ・シリカゲルの組成が外部からのNaClの供給によって変化したかまたはNaClによるASRの促進によって新たにアルカリ・シリカゲルが生成されたためと考えられる。

図-2はアルカリ/シリカ比と28日材令およびNaCl溶液浸漬21日におけるモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量の関係を示す。28日材令およびNaCl溶液浸漬21日における反応性骨材を含んでいない標準モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量は、それぞれ9.07% および9.00% ある。すなわち、オパールを含有しないモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量はNaCl溶液に浸漬中にほとんど変化しなかった。しかし、図-2より明

モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量は NaCl 溶液に浸漬中にほとんど変化しなかった。しかし、図-2より明らかなように、反応性骨材を含むモルタルは、いずれのアルカリ/シリカ比においても21日間 NaCl 溶液浸漬中に、モルタル供試体の外側部分(5mm厚さ)の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量が大きく減少した。また材令28日ではアルカリ/シリカ比が0.05(ベシマム)より大きい範囲ではアルカリ/シリカ比が大きくなるにしたがって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量が大きくなる傾向が見られた。一方、21日間 NaCl 溶液中に浸漬したモルタルにおいては、ベシマムのアルカリ/シリカ比=0.05以下では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量はアルカリ/シリカ比とともにやや増大し、その後かなり大きく低下した。

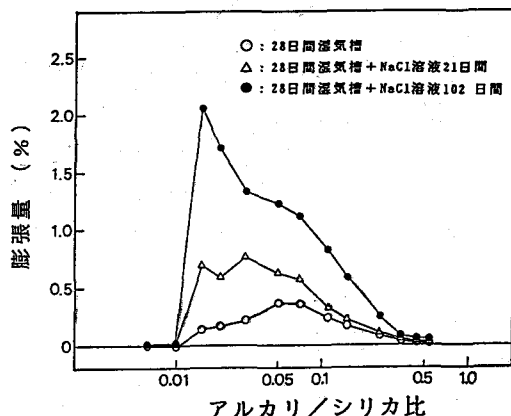


図-1 アルカリ/シリカ比と膨張量

図-3は21日間 NaCl 溶液中に浸漬した種々のアルカリ/シリカ比をもつモルタルに対するDSC曲線を示したものである。反応性骨材を含まない標準モルタルでは、約350℃においてフリーデル氏塩による幅広い吸熱ピークがみられる。一方、アルカリ/シリカ比=0.05より大きいモルタルにおいては約350℃近傍の吸熱ピークはほとんど消失するとともに490℃において新たな吸熱ピークのふくらみが現われる。以上の結果より反応性骨材含有モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量が21日間 NaCl 溶液浸漬中に大きく減少するのはフリーデル氏塩の形成によって消費されるためでなく、 NaCl 浸漬中に消費された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は反応性骨材が関与する反応によって使われたことが分かる。また、図-2と図-3の結果を対応させるとアルカリ/シリカ比=0.05以上におけるより多量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費は、DSC曲線で約490℃において吸熱ピークを示す新たな反応生成物の形成と関係していることが推察される。

図-2 アルカリ/シリカ比と

モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量

温度(℃)

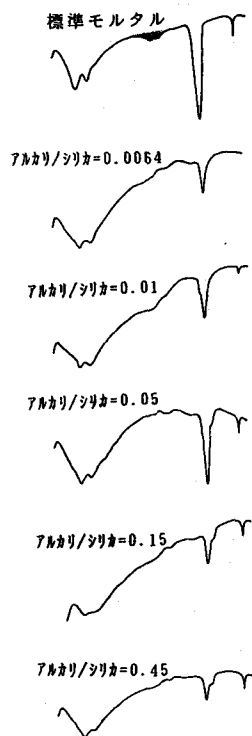


図-3 DSC曲線

得られた主な結果をまとめると次のようである。

- (1) NaCl 溶液に浸漬しても、全く膨張を示さない限界のアルカリ/シリカ比が存在することが分かった。
- (2) アルカリ/シリカ比のわずかな相違(例えば0.01と0.015)によって NaCl 溶液浸漬における膨張挙動に大きな差異が生じる。
- (3) アルカリ/シリカ比=0.05以上におけるより多量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費は、DSC曲線において約490℃の吸熱ピークを示す新たな反応生成物の形成と関係していることが分かった。

して破線で示すように単純化して、(2) 式に重ね合わせた。一般に、繊維がひびわれ面に対して傾いている場合、最大引き抜き荷重および最大荷重後の耐力が増大することが明かとなっているが〔2〕、ひびわれ幅を繊維の引き抜き変位とみなした場合は傾いていない場合とのそれらの差は小さいものと考え、傾きによる効果は無視した。

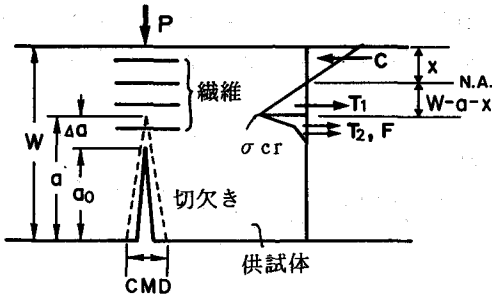


図-3 はり断面の応力分布の仮定

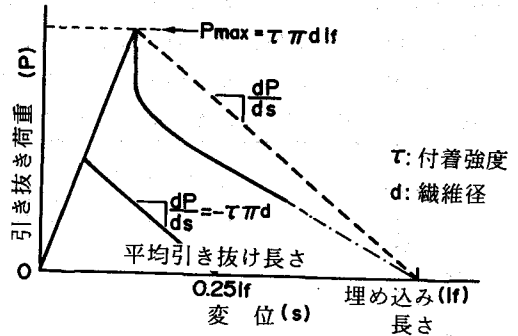


図-4 鋼繊維引き抜き荷重-変位曲線の仮定

4. 結果

図-5 に実験より得られた荷重-開口端変位曲線と(2)式により求めた曲線の対応を示す。J 積分値を(2)式により求めた切欠き先端開口変位に対してプロットし、その勾配から引張軟化曲線を求めると図-6 のようである。鋼繊維の混入による G_F の増大は明かであり、限界開口量を使用繊維長さの1/2として、軟化曲線を外挿して曲線下の面積から G_F を求めると $G_F = 1.611 \text{ kgf/cm}$ である。

図-6 の引張軟化曲線を用いて有限要素法により求めた切欠きはりの荷重-たわみ曲線を図-7 に示す。実験値と比較すると、計算値の方が最大荷重は大きい、荷重の低下傾向は現れているようである。この差を生じた原因としては、(2)式を用いると最大荷重付近の切欠き先端の開口変位が著しく小さく評価され実際の開口量とは大きく異なるため、軟化曲線の初めの部分の応力が過大に評価されているためと考えられる。軟化曲線の初めの下降部分の勾配は荷重・変形特性に顕著に影響すること〔3〕、および引張強度は材料定数として扱われるべきであることを考えると、概略の推定された軟化曲線を開口量軸方向に補正することにより、引張軟化曲線の同定が可能と考えられる。このようにして補正した結果を図-6 および図-7 にあわせて示す。

5. まとめ

繊維の架橋力およびマトリックスの軟化曲線を用いて簡便に推定した鋼繊維補強モルタルの引張軟化曲線により荷重変形特性の概略は推定でき、軟化曲線同定のための初期値として用いることは可能であると考えられる。

参考文献 [1]Aveston, J. et al, National Physical Lab. Conf. Proc., April, 1974, pp. 93-103. [2]Naaman, A. E. & S. P. Shah, J. Structural Div., ASCE, vol. 2, ST8, 1976. [3]三橋博三、コンクリート工学年次論文報告集、12巻、1号、1990, pp. 1175-1180.

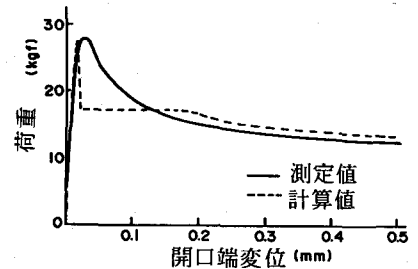


図-5 荷重-開口端変位曲線

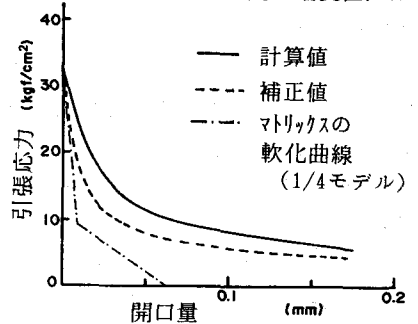


図-6 鋼繊維補強モルタルの引張軟化曲線

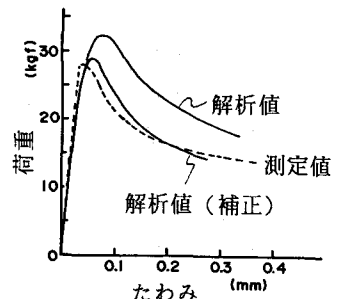


図-7 荷重-たわみ曲線の比較