

論文

[1178] 各保存条件下におけるコンクリートの ASR 膨張特性について

西林新蔵*1・王 鉄成*2・中野錦一*3・吉野 公*4

1. はじめに

アルカリ骨材反応による劣化はコンクリート構造物の耐久性に大きい影響をもたらす要因の一つである。アルカリ骨材反応は構造物の使用環境条件による依存性が極めて強く、かつ複雑であるので、これらの条件を実験によって再現し、それらの条件下のコンクリートのアルカリ骨材反応特性を把握しておくのは非常に重要なことである。

本研究はコンクリートのアルカリ骨材反応に及ぼす環境条件の影響を検討するために、種々の保存条件を設定して実験を行った結果について述べる。

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Na₂O当量で 0.5% である。添加アルカリ化合物としては試薬 1 級の NaOH を用い、一部の試験においてはNaClを使用した。供試体の浸漬溶液は水道水と海水である。

試験に使用した反応性骨材は鳥取産の両輝石安山岩 (T2) で、化学法 (JCI AAR-1) による分析結果より、この骨材には、Rc=67.5, Sc=301, Sc/Rc=4.46 である。非反応性骨材はNT (鳥取県産砂岩) とNS (鳥取県産、河口砂と丘砂との混合砂) である。

実験 1 では、屋外暴露、水中 (20℃, 水道水) と海水中 (20℃) に保存するコンクリートの試験を行った。屋外暴露保存における測定のフローチャートは図-1 に示すとおりである。なお、暴露環境、水中と海水中に保存する場合の反応性骨材の混合割合は 50, 100 %, 単位セメント量は 450 kg/m³、水セメント比は 0.45、供試体寸法は 10×10×40cm である。

実験 2 では、コンクリートのオートクレーブ処理後 (処理時間: 4 時間、処理圧力: 0.2 MPa)、20、40、60℃, R.H. 100 % に保存した。反応性

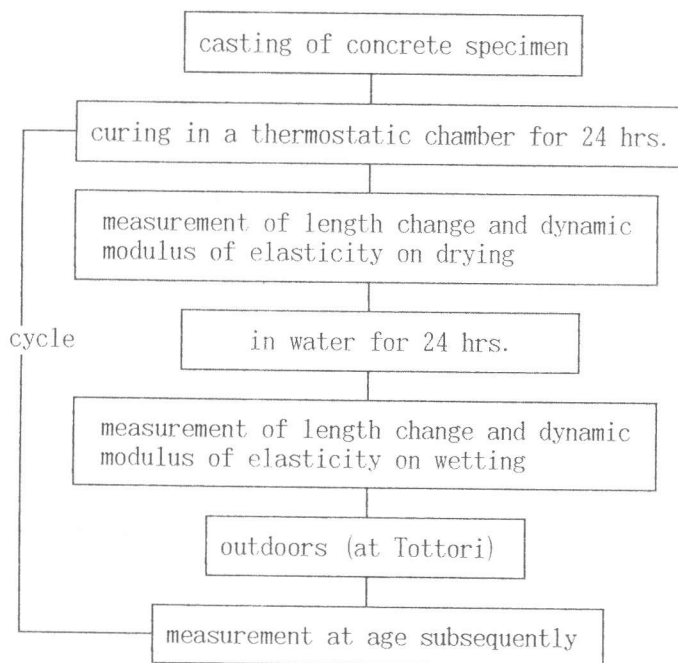


図-1 測定のフローチャート (屋外暴露)

*1 鳥取大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
 *2 大阪セメント(株)中央研究所主任研究員、工博 (正会員)
 *3 大阪セメント(株)中央研究所長、工博 (正会員)
 *4 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修 (正会員)

細骨材の混合割合は100 %、水セメント比は0.54, 0.58, 0.62、単位セメント量は350 kg/m³、供試体寸法7.5 × 7.5 × 40cmである。

実験3では、同一温度下の保存方法による試験である。試験に表-1に示すような7つの保存方法を設定する。この場合の反応性粗、細骨材の混合割合は100 %、水セメント比は0.45、単位セメント量は350 kg/m³、供試体寸法は7.5 × 7.5 × 40cm、保存温度は40°C、R.H.100 %である。

表-1 保存方法と条件

Storage condition	storage method (350kg/m ³ , 7.5 × 7.5 × 40cm, 40°C, R.H.100 %)
A	Usual method (air curing)
B	Common test method (JCI AAR-3)
C	Waterproof paper method (tap water 100g)
D	Airtight vessel method (in stainless vessel)
E	soaking NaCl solution method (density 5%)
F	Sealing method by vinyl bag (tap water 100g in bag)
G	Once curing method (for two weeks in water, next air curing)

これらの実験の条件を表-2に示す。実験には反応性骨材T2と添加アルカリとしてNaOHを使用し、アルカリ量は1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5%である。コンクリートの単位水量は、アルカリの無添加の状態におけるスランプが12~15cmになるように試し練りによって決定し、アルカリの添加によるスランプ値の補正は行っていない。

表-2 実験計画

Non reactive aggregates: NT, NS	Alkali content per cement weight (%): 0.5
Reactive aggregates: T2	Unit weights of cement (kg/m ³): [350], 450
Kind of added alkali: NaOH	Slump (cm): 12~15
Total alkali contents (Na ₂ O eq. %): 1.0, 1.5, 2.0, [2.5, 3.0, 3.5]	
Reactive aggregate contents (%): 0, 50, 100	
Size of specimen (cm): 10 × 10 × 40, [7.5 × 7.5 × 40]	
Storage conditions: Outdoors, in water, in sea water, [in 20, 40, 60 °C, R.H.100%]	
Items of measurement: Length change, Dynamic modulus of elasticity (E.D.), Crack pattern	

[]: storage condition 20, 40, 60°C, R.H.100 %

供試体は打設翌日に脱型し、初期値を測定した後、各供試体を試験条件に従ってオートクレーブ処理、保存を行う。長さ変化の測定は、材令 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0ヶ月、それ以降は1.0ヶ月ごとに行う。

3. 保存環境の影響

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張特性には、反応性骨材の混合割合によるベシマム値が存在し、しかも細骨材に反応性骨材を使用すると、反応性粗骨材単味の場合よりも膨張量が著しく大きくなることが確認されている[1]。ここでは、反応性細骨材を使用し、山陰地方の鳥取で自然暴露した場合のコンクリートの膨張特性を検討する。

図-2にアルカリ量別の暴露コンクリートの膨張量の経時変化を示す。ここで乾燥状態は、測定前に供試体を恒温槽(20℃, R.H.80%)に入れてから24時間後に測定するもので、一方、湿潤状態は水中浸漬後24時間で測定するものである。図より、乾燥および湿潤状態で測定した屋外暴露コンクリートの膨張量の経時変化曲線はほぼ同じ傾向にあり、乾燥と湿潤状態における膨張量の差も微小であるので、屋外暴露保存の場合の膨張量に及ぼす測定時の含水状態の影響はほとんどないと考えられる。また、アルカリ量の増加に伴って膨張量は増大し、これらのコンクリートはいずれも材令16ヵ月以後に大きい膨張量が現われている。屋外暴露コンクリートの場合には膨張の進展は遅く、図-2の各膨張曲線を見ると、緩慢-急激-緩慢-急激のタイプとなり、2年間に2回の急激な膨張が現れる段階のあることがわかる。その材令と季節との関係を調べると、高温と降水量が多い夏期には膨張が速く、冬期には膨張が遅くなるのがわかる。

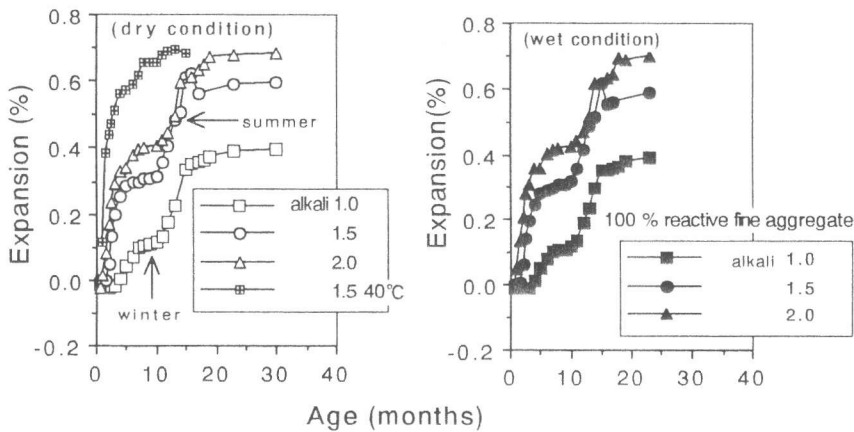


図-2 乾・湿試験における膨張量の経時変化(暴露)

図-3には屋外暴露保存の場合のアルカリ量と膨張量との関係を示す。図よりアルカリ量の増加に伴って膨張量は増大し、アルカリ量2.0%、材令24ヵ月において膨張量は0.7%程度になり、この膨張量は40℃, R.H.100%保存の場合の最大膨張量の約85%に相当する。各材令の膨張量から見ると、屋外暴露保存下のコンクリートは長期間にわたって膨張が現われることがわかる。

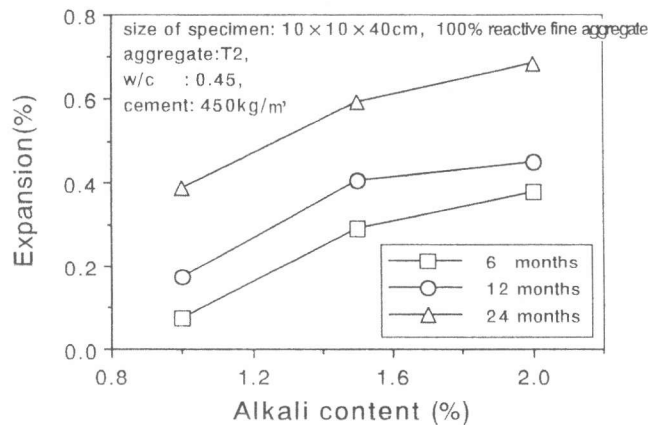


図-3 膨張量とアルカリ量との関係(暴露)

図-4に4種類の保存環境下のコンクリートの膨張量の経時変化を示す。40℃促進保存のコンクリートにおいては膨張は速く現れるが、材令10ヵ月でほとんど最大膨張量に達す

る。

るので、保存温度の促進効果が大きいと考えられる。20℃水中保存と海水保存はともに材令6ヵ月で膨張を開始し、その後の膨張の進展は大きく、膨張はほぼ直線的に増加している。これについては、水分の供給が十分であるためアルカリシリカ反応が進展し続けているものと考えられる。また、海水はアルカリの供給源であるので、海水浸漬は水中浸漬よりも膨張量は大きい。屋外暴露のコンクリートは膨張の進展が遅く、材令16ヵ月で約0.1%の膨張量になり、その後も膨張は増大し続けて、長期間を経て40℃の場合の大きい膨張量に近くなると考えられる。

コンクリート構造物が置かれている環境条件を変えたり、水の供給を全く遮断することはほとんど不可能であるので、反応が発生した後は、温度、湿度、水分、水質および環境の影響を十分モニターし、その膨張特性を把握することが重要であると考えられる。

4. 保存温度の影響

アルカリシリカ反応は化学反応であるから、環境温度が高くなると反応が促進され反応生成物の量も多くなる。しかし最大の膨張を示す温度はセメントと骨材の組合わせによって異なり、多くのモルタル試験の結果によると、ベシマム温度は40℃前後になるといわれている[2]。ここでは、コンクリートの膨張特性に及ぼす温度の影響について検討を加えることにする。

保存温度別の膨張量の経時変化を図-5に示す。これはオートクレーブ処理直後の膨張量を基長としてその後の膨張量の変化について示したのものである。図より、60℃と40℃保存のコンクリートでは初期から大きい膨張量が見られ、膨張が急激に進展する。20℃保存したコンクリートでは2ヵ月まで膨張が緩慢に進展し、2ヵ月以後膨張が大きくなり、4ヵ月以降膨張はほぼ収束している。

保存温度別の保存温度の影響を図-6～図-8に示す。なお、この場合の添加アルカリ量は2.5～3.5%の高アルカリ条件を採用した。これはオートクレーブ処理直後の膨張量を基長とし、材令6ヵ月における膨張量について比較したものである。これらの図より、アルカリ量と水セメント比によって若干異なるが、いずれも、60℃保存の場合に最も大きい膨張が現われ、また、40℃保存の場合の膨張量は20℃保存のそれよりも大きいことが認められる。このことからオートクレーブ処理後の各保存温度においては、膨張量は反応生成物の量に比例して増大し、アルカ

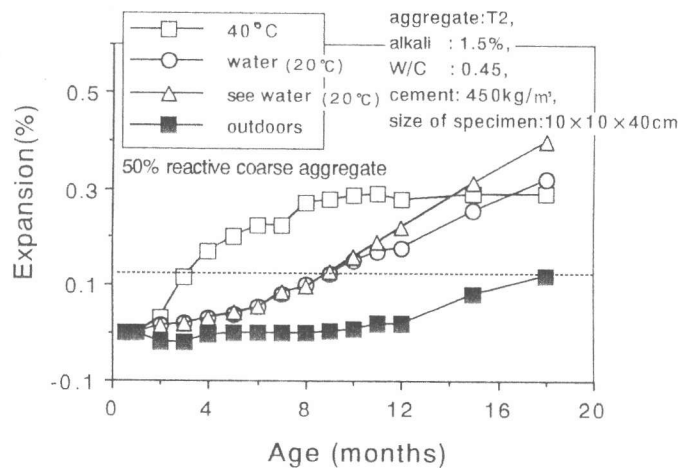


図-4 保存条件の膨張量に及ぼす影響

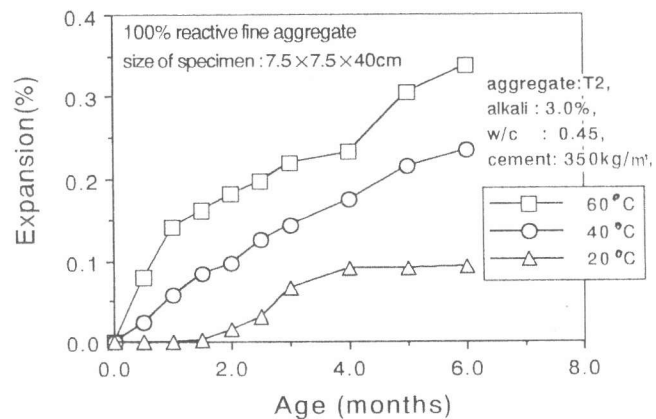


図-5 温度による膨張量の経時変化

トクレーブ処理後の各保存温度においては、膨張量は反応生成物の量に比例して増大し、アルカ

リシリカ反応による膨張の進行は温度に強く依存し、温度が高くなると膨張が速く進展するようになると考えられる。

これらの結果から、コンクリートの場合の膨張に及ぼす保存温度の影響はモルタルの場合のそれとやや異なることがわかる。コンクリートの場合には、保存温度が高いほど膨張量が大きくなり、60℃保存の膨張量は40℃、20℃保存のそのよりも大きい。一方、モルタルの場合、オパールを使用したDiamondの報告[3]と中野らのモルタルの実験結果[4]によると、膨張は初期では60℃の方が大きい、20℃保存のものは長期に膨張が急に進展し、最終40℃保存のとき膨張が最大になる。一方、Diamondの報告によると、20℃と40℃で保存したモルタルの膨張と反応率は、いずれも40℃で大きく、1ヵ月から3ヵ月以降では20℃保存の方が上回ることも確認している。このことは、膨張は温度によって一方的に支配されるものではなく、アルカリと反応性シリカ量の比率と水和の進行状態にも関係することが考えられる。この面からすると、本研究のコンクリートの試験による結果はモルタルの結果と同じ傾向にあると考えられる。

5. 一定温度下の保存方法の影響

同一配合でのコンクリートであっても、それらが置かれている保存条件によっては、膨張挙動が異なることが考えられる。図-9に反応性粗、細骨材の混合割合は100%、アルカリ量は2.5%、であり、40℃、R.H.100%に保存したコンクリートの膨張量の経時変化を示す。図より、材令3ヵ月までは膨張するが、3ヵ月以降では膨張はほとんど収束していることがわかる。保存条件D、Fの場合の膨張量は小さい。つまり、密閉容器とビニール袋で保存する場合には、膨張は顕著ではない。また、この図から、保存条件EとCの場合に膨張量が大きいことがわかる。すなわち、塩化ナトリウム溶液中浸漬と保水紙による水の供給は、外部からのアルカリや水分が補充されるために

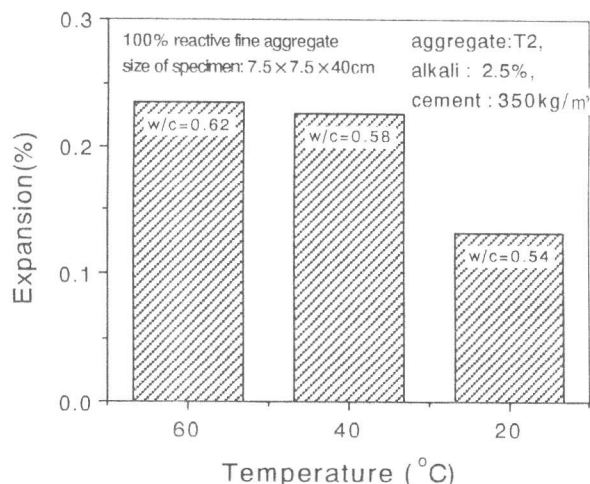


図-6 保存温度と膨張量との関係 (a)

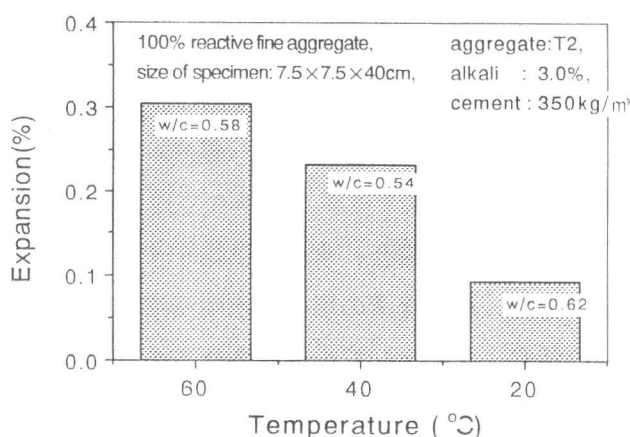


図-7 保存温度と膨張量との関係 (b)

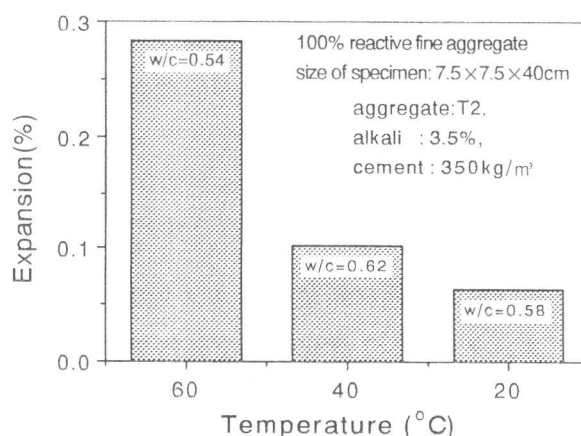


図-8 保存温度と膨張量との関係 (c)

反応が進展し、ひびわれが発生すると、発生したひびわれを通してコンクリートの内部にまで十分な水分が行きわたるので、さらに反応が促進されるものと推察される。これらの結果から、保存条件によって膨張量はかなりの影響をもたらされ、水分とアルカリが十分に供給される場合に膨張が促進されることがわかる。

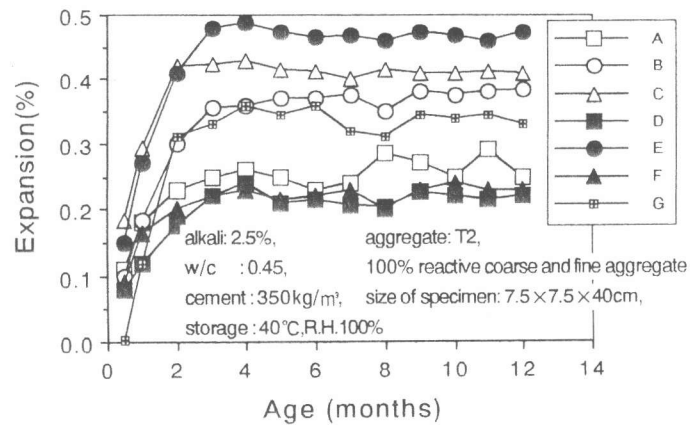


図-9 保存方法による膨張量の経時変化

6. まとめ

本研究では、コンクリートを対象として、アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張特性に及ぼす保存条件の影響を検討した。以下に得られた結果を要約する。

- (1) 屋外暴露コンクリートの膨張は遅く現れ、長期膨張の性質を呈している。温度と降水量の影響で、膨張は緩慢-急激-緩慢-急激のタイプになり、夏期では膨張が速く、冬期では膨張が遅くなる。
水中浸漬の場合、水分の供給が十分であるためアルカリシリカ反応が進展し続けている。
また、海水浸漬の場合、水中浸漬よりも膨張量が大きい。
- (2) 20°C、40°Cと60°Cの保存条件下のコンクリートでは、水セメント比の大きさにかかわらず、60°C保存における膨張量が最も大きい。なお、アルカリ量の増加に伴って40°Cと60°C保存の膨張量の差が大きくなる傾向がある。
- (3) 保存方法の影響から、同一条件でのコンクリートであっても、それらが置かれている保存方法によっては膨張挙動が異なる。同一温度の場合、水分とアルカリが十分に供給される場合にアルカリ骨材反応が促進されることが認められる。

参考文献

- 1) 王 鉄成、西林新蔵他：コンクリートのA S Rに及ぼす要因のペシマム現象，コンクリート工学年次論文報告集， Vol. 15, No.1, 1993.6
- 2) T.E.Stanton: Proc. ASTM. No.43, pp.875-904. 1943.
- 3) Diamond, Barneyback and Struble: On the Physics and Chemistry of Alkali Silica Reactions, Proc.5th ICAAR in Concrete, Concrete, S 252/22, 1981.
- 4) 中野錦一：アルカリ骨材反応の機構，セメント・コンクリート，No.473, 1986.