

各種溶液浸漬下におけるコンクリートのアルカリ骨材反応に関する研究

A study on the Alkali Aggregate Reaction in Concrete Immersed in Various Kind of Solution

皿井 剛典* 森野 奎二** 岩月 栄治**

Yoshinori SARAI, Keiji MORINO and Eiji IWATSUKI

Abstract : The damage of concrete structure due to alkali-aggregate reaction (AAR) has been occurring in each place. Especially, it newly increases by the use of the de-icing salts such as sodium chloride. In this paper, AAR concrete prisms were made with reactive cherty aggregate. Total alkali contents of the concrete were adjusted in the quantity of 3, 6, 9 kg/m³ alkali as Na₂O eq. by the addition of NaOH reagent. Concrete prisms were stored at 40°C and not lower than 95% RH, in various kinds of solution such as 1M NaCl, 1M CaCl₂, 1M NaOH, 1M KOH, 1M Na₂SO₄ and 1M MgSO₄ solution, artificial sea water and city water. Expansion behavior of the AAR concrete prisms was investigated, and effects of NaCl and other solutions on AAR were discussed on the basis of experimental results. The expansion of the AAR concrete prism was accelerated by 1M NaCl solution and 1M Na₂SO₄ solution.

1. はじめに

コンクリートのアルカリ骨材反応(AAR)は、我が国で1983年に問題視されて以来、15年を経た今日でも新たに劣化構造物が発見されている。ある地域では骨材として山砂利がごく普通に使われているが、この山砂利はほとんどがチャートからなっており、反応性骨材を日常的に使用していることになる¹⁾。使用に当たってはサンプルによるJISの化学法の試験が行われ、「反応性あり、なし」の判断がなされるが、本質的にはチャートは反応性骨材である。試験結果が「反応性なし」となっても、実際に使用したコンクリートにひび割れなどの問題が発生することもある。最近では、一般的な構造物とは別に寒冷地などでは道路の凍結防止剤としてCaCl₂に替わってNaClが散布されるようになり、外部からアルカリイオンが供給される機会が増している²⁾³⁾⁴⁾。その他に、海岸付近の構造物では海水や海水飛沫の供給により、AARの被害がますます大きくなっている

例⁵⁾などもある。また、AARによる膨張抑制を目的として、現在最も多く行われている方法は高炉水砕スラグ粉末等の混和材の使用である。しかし、AARは長期にわたること⁶⁾⁷⁾や、前述のように外部からアルカリなどが供給される機会が増していることから、混和材のAAR膨張抑制効果⁸⁾についても長期間のデータとともに、アルカリ等が供給される環境下でのデータも必要である。このような背景からAARの長期にわたる詳細な実験及び調査を継続する必要がある。

本研究では、反応性骨材として反応性の高い岐阜県養老産のチャート砕石と、実際に骨材と使用されている愛知県瀬戸産のチャート質山砂利を用いてコンクリート角柱供試体を作製し、膨張率測定、超音波伝播速度測定および供試体表面観察を行い、(1)骨材の反応性の違いによる膨張挙動の相違および膨張挙動と超音波伝播速度の関係を検討し、(2)湿潤状態の他に、NaCl、CaCl₂、NaOH、KOH、Na₂SO₄、MgSO₄、人工海水溶液および水道水に浸漬貯蔵し、各種浸漬溶液がAARに及ぼす影響を検討した。また、高炉水砕スラグ粉末を混和材として使用したコンクリート角柱供試体のAAR膨張抑制効果について検討した。

* 愛知工業大学 建設システム工学専攻

** 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

2. 実験概要

本実験は、以下の 3 つの実験より構成される。

<シリーズ I> 湿潤状態のコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の関係の検討。

<シリーズ II-1> 各種溶液に浸漬した状態のコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の関係の検討。

<シリーズ II-2> 各種溶液に浸漬した状態のコンクリート角柱供試体の高炉水砕スラグ粉末による AAR 膨張抑制効果の検討。

2.1 使用材料

2.1.1 使用骨材

反応性骨材は、岐阜県養老産のチャート碎石 (Yo チャート) と愛知県瀬戸産のチャート質山砂利 (Se チャート) を用いた。使用骨材の JIS A 5308 化学法の試験結果を表 1、図 1 に示す。Yo チャート、Se チャートともに S_c/R_c が 1 以上で、判定は「無害でない」である。非反応性骨材には、化学法で「無害」と判定された、安定な石英からなる愛知県瀬戸産の珪砂 (Se 珪砂) を用いた。

表 1 使用骨材の化学法試験結果

| 骨材 | 形状 | 産地 | 化学法の結果 (mmol/l) | | S_c/R_c | 備考 |
|--------|-----|----|-----------------|-------|-----------|-------|
| | | | R_c | S_c | | |
| Yoチャート | 碎石 | 岐阜 | 105 | 315 | 3.0 | 無害でない |
| Seチャート | 山砂利 | 愛知 | 58 | 116 | 2.0 | 無害でない |
| Se珪砂 | 砂 | 愛知 | 28 | 12 | 0.4 | 非反応性 |

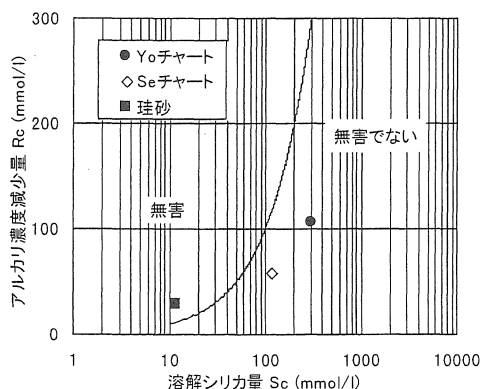


図 1 化学法試験結果

2.1.2 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(アルカリ量、 Na_2O 換算 0.69、0.60%)を用いた。実験シリーズ II では、混和材として高炉水砕スラグ粉末をセメントと置換して用い、置換率は 50%とした。添加アルカリは、NaOH(顆粒状、純度 99.8%)を練り混ぜ水に溶かして用い、コンクリート中の全アルカリ量を調整した。

2.2 実験に使用したコンクリート角柱供試体

2.2.1 供試体作製

コンクリートの配合を表 2 に示す。供試体寸法は $10 \times 10 \times 40$ cm とし、供試体両端に膨張率測定用としてビスを埋め込んだ。供試体本数は、配合毎で 3 本作製し、同一環境に貯蔵した。コンクリート中の全アルカリ量は Na_2O 換算で、シリーズ I では 3、4、5、6、7、9 kg/m³、シリーズ II では 3、6、9 kg/m³ とした。粗骨材は反応性骨材を使用し、シリーズ I では Yo チャートと Se チャート、シリーズ II では Yo チャートのみとした、細骨材には Se 珪砂を用いた。

表 2 コンクリートの配合

| 骨材の種類 | 粗骨材の最大寸法 (mm) | 水セメント比 W/C (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | 混和剤 (g/m ³) |
|-------|---------------|----------------|--------------|--------------------------|--------|-------|-------|-------------------------|
| | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | |
| Yo | 25 | 51.3 | 41.0 | 154 | 300 | 761 | 1091 | 4500 |
| Se | 25 | 51.3 | 41.0 | 154 | 300 | 761 | 1074 | 4500 |

2.2.2 シリーズ I の供試体貯蔵状態

シリーズ I、II の供試体貯蔵状態を表 4 に示す。

実験シリーズ I では、粗骨材として Yo チャートおよび Se チャートを使用し作製したコンクリート角柱供試体を使用した。供試体はすべて湿らせた保温紙を巻き、ビニール袋で 2 重に密封し湿潤状態とした。貯蔵容器は 40℃ 恒温室内および 20℃ 恒温室内に設置した。

2.2.3 シリーズ II の供試体貯蔵状態

実験シリーズ II では、粗骨材として Yo チャートを使用した。また、セメントは普通ポルトランドセメントのみと普通ポルトランドセメントの 50%を高炉水砕スラグ粉末に置換したもの 2 種類を使用した。供試体の貯蔵は湿潤状態の他に、NaCl 溶液、CaCl₂ 溶液、NaOH 溶液、KOH 溶液、Na₂SO₄ 溶液、MgSO₄ 溶液(すべて濃度は 1mol/l)、人工海水(表 3)および水道水中の浸漬貯蔵とした。貯蔵容器はすべて 40℃ 恒温室内に設置した。

表3 人工海水の成分

| 人工海水10kgを製作するのに使用した各成分 (g) | | | | | | | |
|----------------------------|------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-----|--------------------|-----|
| 水 | NaCl | MgCl ₂ | Na ₂ SO ₄ | CaCl ₂ | KCl | NaHCO ₃ | KBr |
| 9656 | 235 | 50 | 39 | 10 | 7 | 2 | 1 |

表4 供試体貯蔵状態

| 実験シリーズ | 骨材 | 全アルカリ量 (Na ₂ O換算 kg/m ³) | 貯蔵環境 | 貯蔵温度 |
|--------|--------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| I | Yoチャート | 3, 4, 5, 6, 7, 9 | 湿潤 | 40°C |
| | | | | 20°C |
| | Seチャート | 3, 4, 5, 6, 7, 9 | 湿潤 | 40°C |
| | | | | 20°C |
| II | Yoチャート | 3, 6, 9 | 湿潤, 水道水 人工海水 NaCl, NaOH KOH, CaCl ₂ Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ | 40°C |

2・3 実験方法

2・3・1 膨張率測定

膨張率測定は、室温 20 ± 2°C に保たれた室内で、1/100mm ダイヤルゲージ付きの長さ測定器を用いて行った。また、貯蔵温度 40°C の供試体は測定の前 16 時間以上前に室温 20 ± 2°C に保たれた室内へ移し測定した。脱型 24 時間後の測定値を初期値とし膨張率を算出した。

2・3・2 超音波伝播速度測定

超音波伝播速度の測定は膨張率測定と同材齢で行った。測定には、3 本の供試体の内の 2 本を用いた。供試体の縦方向 3 カ所、横方向 1 カ所の計 4 カ所の縦波伝播時間を測定した。縦波速度を算出し、シリーズ I では材齢 28 日を、シリーズ II では 7 日を 100% として超音波伝播速度の相対速度変化率を算出した。

2・3・3 供試体表面観察

供試体の表面観察は各測定日ごとに行い、ひび割れ、ゲルの浸出などを目視観察した。また、供試体のスケッチ、写真撮影を行い、ひび割れ形状、ひび割れ幅などを記録した。

3. 結果及び考察

3・1 <シリーズ I> 湿潤状態のコンクリート角柱

供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の関係

Yo チャートを用いたコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率を図 2、3 に示す。図 2 の貯蔵温度 40°C のとき、膨張は、材齢 60 日

付近から始まり、全アルカリ量に比例して高くなり、全アルカリ量 9kg/m³ で材齢約 180 日では膨張率 0.362%、材齢約 360 日で 0.452% となっている。材齢 800 日を経過した現在では、膨張はどの全アルカリ量においても収束傾向にある。全アルカリ量 4、3kg/m³ は、ほとんど膨張を示していない。図 2 の下段の超音波伝播速度の相対速度変化率は、膨張の増加時期と超音波伝播速度の減少する時期が一致しており、膨張率と超音波伝播速度の低下率とは比例関係にある。また、膨張を示さないものに関しては、変化しないまたは増加の傾向を示す。膨張が収束傾向にあるものに関しては超音波伝播速度に変化がなく、増加傾向もみられない。

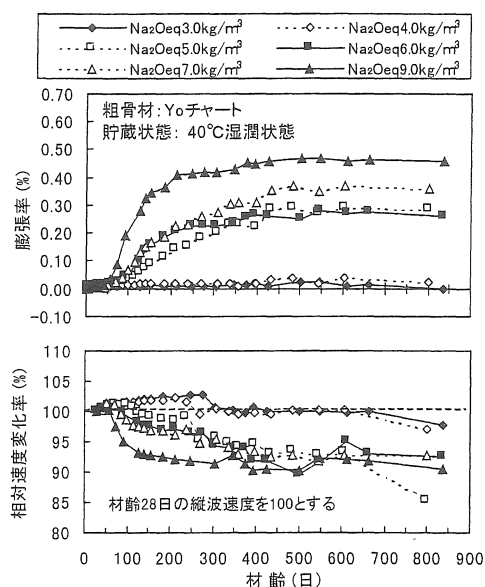


図2 コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率

図 3 の貯蔵温度 20°C では、膨張は、全アルカリ量 9kg/m³ では材齢 150 日付近、全アルカリ量 7、6、5kg/m³ では材齢 350 日付近から始まり、貯蔵温度 40°C のものと同様に全アルカリ量に比例して高くなっている。膨張挙動は、貯蔵温度 40°C のものよりも緩やかな増加を示しており、材齢約 800 日を経過した現在では収束傾向にある。膨張率は、全アルカリ量 9kg/m³ では材齢 837 日で 0.351% となり、貯蔵温度 40°C の 0.456% (材齢 836 日) よりも 0.1% ほど小さい。超音波伝播速度の相対速度変化率は、貯蔵温度 40°C のものと同様に膨張の増加時期と超音波伝播速度の低下時期が一致している。

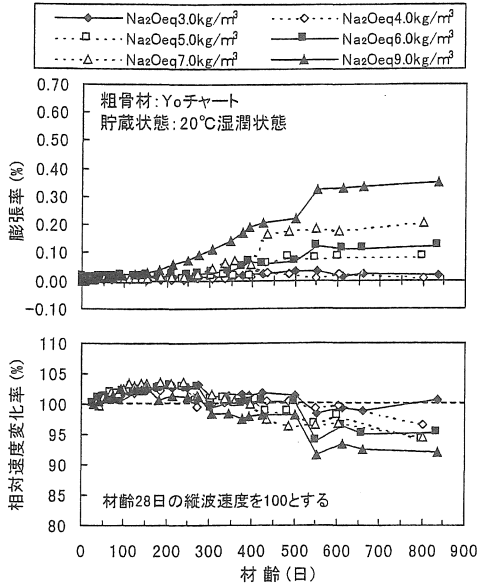


図 3 コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率

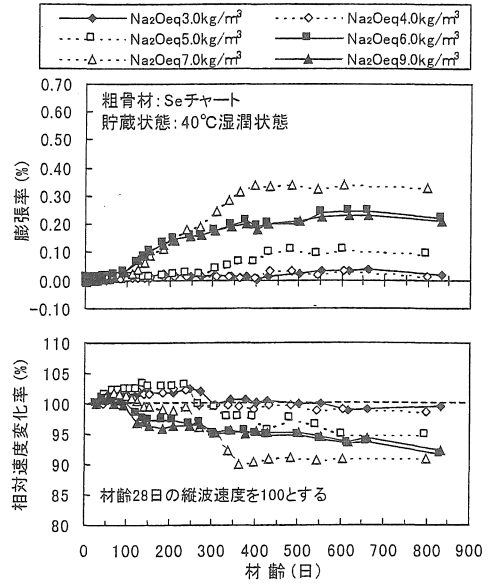


図 4 コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率

Se チャートを用いた貯蔵温度 40°C のコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率を図 4 に示す。膨張は、全アルカリ量 9、7、6kg/m³ で材齢 100 日付近から始まり、材齢 250 日付近まで全アルカリ量 9、7、6kg/m³ の膨張率に違いはみられない。しかし、全アルカリ量 7kg/m³ は、材齢 250 日を過ぎても膨張し続け、全アルカリ量 9kg/m³ をよりも膨張率は大きくなり、材齢約 360 日では 0.330% となっている。材齢約 800 日を経過した現在では、いずれの全アルカリ量においても膨張は収束傾向にあるが、全アルカリ量 9、6kg/m³ の膨張率に差はみられない。全アルカリ量 4、3kg/m³ は材齢 800 日を経過しても膨張を示していない。図 4 の下段の超音波伝播速度の相対速度変化率は、Yo チャートと同様に、膨張の増加時期と超音波伝播速度の低下時期が一致しており比例関係にある。

3・2 <シリーズⅡ-1>各種溶液に浸漬した

コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の関係

全アルカリ量 9kg/m³ のコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率を図 5 に示す。膨張は、NaCl、水道水、NaOH および KOH で貯蔵 40 日付近、その他の浸漬溶液は貯蔵 50 日付近から開始しており、NaCl 溶液、水道水、NaOH 溶液および KOH 溶液

による影響が早くから現れている。膨張率は Na₂SO₄、NaCl が高く、貯蔵約 370 日では Na₂SO₄ で 0.684%、NaCl で 0.462% となっており、Na₂SO₄ 溶液、NaCl 溶液による影響が他の浸漬溶液に比べ大きい。また、MgSO₄、NaOH、KOH の各浸漬溶液は貯蔵約 400 日の時点においても膨張傾向を示しており、膨張への影響が長期にわたり継続している。図 5 の下段に示すように、超音波伝播速度の相対速度変化率は、膨張率の増加から約 40～50 日遅れて減少傾向を示し、膨張が収束傾向を示すと超音波伝播速度も変化しなくなる。

全アルカリ量 6kg/m³ のコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率を図 6 に示す。NaCl、水道水および NaOH は貯蔵 50 日付近、KOH は貯蔵 70 日付近、他の浸漬溶液は貯蔵 110 日付近から膨張を開始しており、全アルカリ量 9kg/m³ と同様に NaCl 溶液、水道水および NaOH 溶液による影響が早くから現れている。膨張率は NaCl、Na₂SO₄ が高く、また、貯蔵 400 日を越えても膨張傾向がみられ、膨張への影響が長期にわたり継続している。また、図 6 の下段に示す超音波伝播速度の相対速度変化率も、全アルカリ量 9kg/m³ と同様に膨張率の増加から約 40～50 日遅れて減少している。

<シリーズⅠ>の実験結果では、湿潤状態で貯蔵したコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速

度の相対速度変化率の関係は、膨張率が增加する時期と相対速度変化率が減少する時期が一致しており、膨張率が高くなると超音波伝播速度の低下率が大きくなっている。しかし、〈シリーズII-1〉の実験結果では、膨張率の増加から約40~50日ほど遅れて超音波伝播速度の相対速度変化率が減少している。また、膨張率が高いからといって超音波伝播速度の低下率が大きくない。このことは、溶液浸漬によって生成する反応生成物は、超音波伝播速度を低下させないような剛性をもっており、それがコンクリート内部の初期の微少なひび割れを満たしたために、超音波伝播速度に影響が現れなかったのではないかとと思われる。

全アルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率を図7に示す。膨張は、 KOH 、 Na_2SO_4 は貯蔵130日付近から、 NaOH は貯蔵150日付近から開始し、貯蔵400日でも膨張傾向を示している。また、 MgSO_4 溶液は、貯蔵200日付近からわずかに膨張傾向を示している。しかし、その他の浸漬溶液は、貯蔵400日を越えた現在でも膨張傾向がみられない。貯蔵400日の膨張率は、 KOH 溶液で0.274%、 Na_2SO_4 溶液で0.216%、 NaOH 溶液で0.135%となっており、0.1%を越えている。コンクリート中の全アルカリ量が低い $3\text{kg}/\text{m}^3$ の場合でも貯蔵期間が長期間となると、浸漬溶液の種類によっては膨張傾向を示すものもあり、今後の膨張挙動に注意が必要である。超音波伝播速度の相対速度変化率は、膨張傾向のみられた KOH 、 Na_2SO_4 、 NaOH 、 MgSO_4 溶液浸漬で減少傾向がみられるが、全アルカリ量 $9, 6\text{kg}/\text{m}^3$ と比べて膨張率の変化が少なく、緩やかなため、急激な減少を示していない。

コンクリート中の全アルカリ量別の貯蔵400日の膨張率を図8に示す。全アルカリ量 $9\text{kg}/\text{m}^3$ の貯蔵400日の膨張率は、 Na_2SO_4 溶液では湿潤状態の約1.9倍、 NaCl 溶液で約1.4倍、人工海水、 NaOH 、 KOH 溶液で約1.2倍となっており、 Na_2SO_4 溶液浸漬による膨張への影響が顕著に現れている。全アルカリ量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ の貯蔵400日の膨張率は、 NaCl 溶液で湿潤状態の約1.7倍、 Na_2SO_4 溶液で約1.3倍、水道水で約1.2倍とその影響が他の浸漬溶液に比べて大きい。水道水浸漬の膨張率が $9, 6\text{kg}/\text{m}^3$ とともに高いことから、各浸漬溶液を構成する物質による膨張への影響の他に、供試体への水の供給による影響も大きいと考えられる。また、 NaCl 溶液浸漬、水道水浸漬において、全アルカリ量 $9\text{kg}/\text{m}^3$ と $6\text{kg}/\text{m}^3$ の膨張率に逆転が生じている。これは、浸漬溶液によって、反応生成物の性質(剛性、粘性等)に違いが生じ、膨張

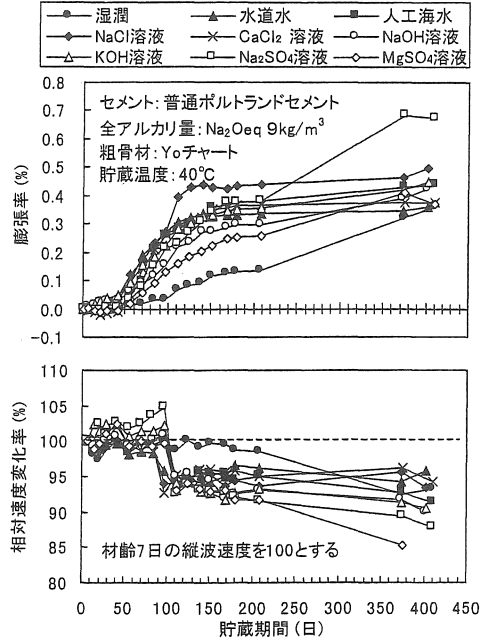


図5 コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率

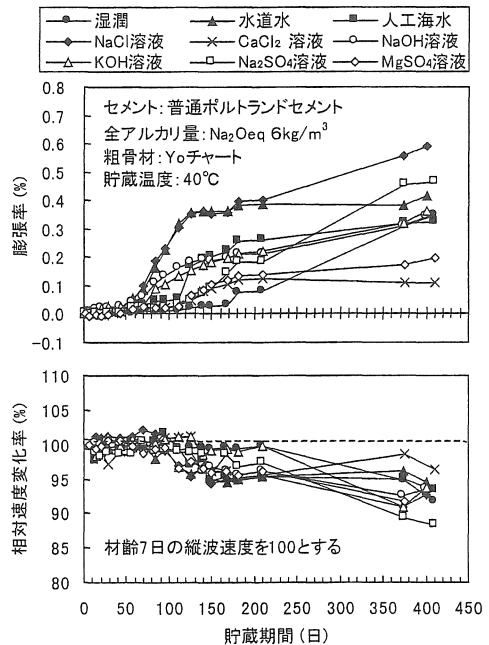


図6 コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率

に及ぼす力に相違が現れ、膨張率の逆転という現象が起こったのではないかと考えられる。コンクリート中の全アルカリ量が同じでも、9kg/m³の水道水、MgSO₄溶液およびCaCl₂溶液、6kg/m³のCaCl₂溶液、MgSO₄溶液のように、湿潤状態の膨張率と同等ないし、湿潤状態よりも小さな膨張率を示すものもあり、これらについても、生成された反応生成物の性質の違いによる影響と考えられる。

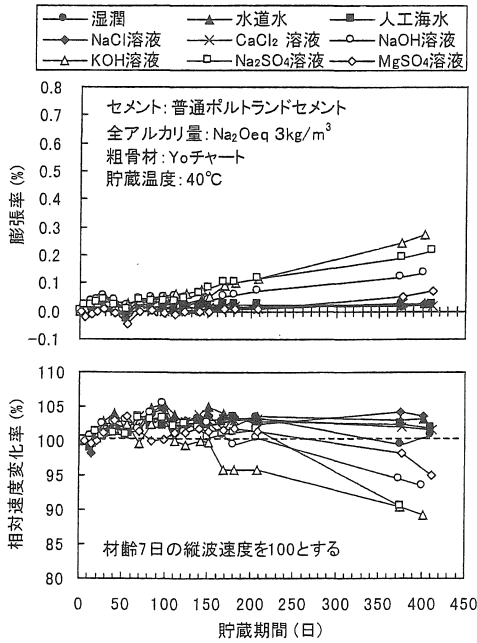


図7 コンクリート角柱供試体の膨張挙動と超音波伝播速度の相対速度変化率

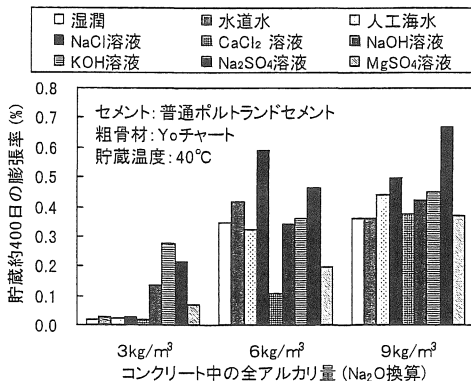


図8 全アルカリ量別の貯蔵400日の膨張率

3.3 各種溶液に浸漬した

コンクリート角柱供試体の表面観察

貯蔵370日の供試体表面観察結果と膨張率を表5に示す。貯蔵370日におけるNaCl溶液浸漬供試体の劣化状況を写真1に、CaCl₂溶液浸漬供試体の劣化状況を写真2に、人工海水浸漬供試体の劣化状況を写真3に示す。ひび割れは、全アルカリ量9kg/m³では、水道水、NaCl溶液、NaOH溶液浸漬供試体に多くみられ、全アルカリ量6kg/m³では、水道水、NaCl溶液浸漬供試体に多くみられた。全アルカリ量3kg/m³では、膨張率の高いKOH溶液、NaOH溶液浸漬供試体以外は、ひび割れはみられなかった。反応生成物は、人工海水浸漬供試体に多くみられ、供試体表面に広範囲にわたって白色の生成物がみられたが、その反面ひび割れは少なかった。また、全アルカリ量9、6、3kg/m³のすべてにおいてNa₂SO₄溶液浸漬供試体は、膨張率が高く、供試体表面の反応生成物の付着量が少ないが、ひび割れはあまりみられなかった。MgSO₄溶液浸漬供試体は、供試体表面がザラザラで、ひび割れも反応生成物もみられなかった。その他の溶液に浸漬した供試体では、供試体表面に付着している反応生成物の量は少なかったが、ひび割れは多く発生していた。これは、浸漬溶液の違いによって、粘性や剛性が異なった反応生成物が生成され、その性質の違いから膨張やひび割れ発生の程度に相違が生じると考えられる。

表5 貯蔵370日の供試体表面観察結果と膨張率

| 貯蔵状態 | 全アルカリ量 (Na ₂ O換算) | | | | | |
|-----------------------------------------|------------------------------|-----|--------------------|----|--------------------|---|
| | 9kg/m ³ | | 6kg/m ³ | | 3kg/m ³ | |
| 湿潤状態 | + | - | + | - | - | - |
| | 0.320 | | 0.310 | | 0.027 | |
| 水道水浸漬 | +++ | ++ | +++ | + | - | - |
| | 0.346 | | 0.383 | | 0.022 | |
| 人工海水浸漬 | + | +++ | ++ | ++ | - | - |
| | 0.429 | | 0.317 | | 0.020 | |
| 1M NaCl溶液浸漬 | +++ | + | +++ | + | - | - |
| | 0.462 | | 0.559 | | 0.017 | |
| 1M CaCl ₂ 溶液浸漬 | ++ | + | + | - | - | - |
| | 0.375 | | 0.107 | | 0.027 | |
| 1M NaOH溶液浸漬 | +++ | + | + | - | + | - |
| | 0.391 | | 0.309 | | 0.119 | |
| 1M KOH溶液浸漬 | ++ | - | + | - | + | - |
| | 0.419 | | 0.318 | | 0.244 | |
| 1M Na ₂ SO ₄ 溶液浸漬 | + | + | + | + | - | - |
| | 0.684 | | 0.456 | | 0.191 | |
| 1M MgSO ₄ 溶液浸漬 | - | - | - | - | - | - |
| | 0.409 | | 0.174 | | 0.055 | |

・上段左:ひび割れ、上段右:反応生成物、下段:膨張率(%)

・ひび割れ、反応生成物の程度:多い>中>少ない=+++>++>+

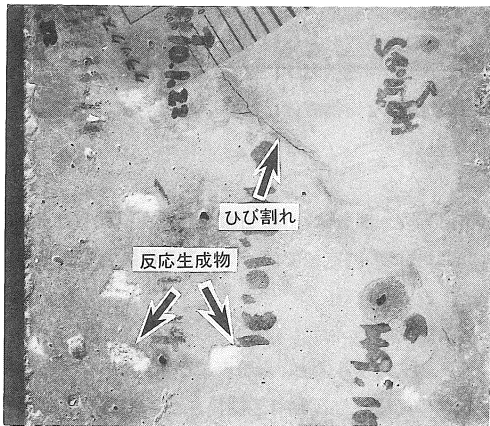


写真1 貯蔵370日における
NaCl溶液浸漬供試体劣化状況

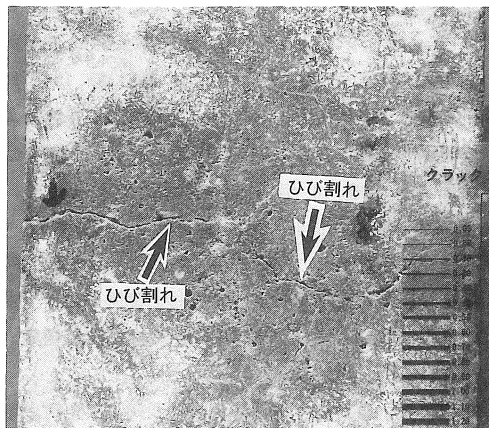


写真2 貯蔵370日における
CaCl₂溶液浸漬供試体の劣化状況



写真3 貯蔵370日における
人工海水浸漬供試体の劣化状況

3・4 <シリーズⅡ-2>各種溶液に浸漬した
コンクリート角柱供試体の高炉水砕スラグ粉末
による膨張抑制効果

各種溶液に浸漬した全アルカリ量 9kg/m³ の高炉水砕スラグ粉末 50%混入コンクリート角柱供試体の膨張挙動を図9に示す。全アルカリ量 9kg/m³ とコンクリート内部の水酸化アルカリ量が多い場合においても、セメントに普通ポルトランドセメントのみを使用したとき膨張率の高かった Na₂SO₄、NaCl 溶液浸漬をはじめ、いずれの溶液に浸漬した供試体においても、高炉水砕スラグ粉末による膨張抑制効果があることがわかる。しかしながら、貯蔵 100 日付近からわずかながら膨張増加傾向がみられ、貯蔵約 400 日では湿潤状態、MgSO₄ 溶液浸漬以外は、膨張率が 0.1% を越えている。特に KOH 溶液浸漬では膨張率 0.182%、NaOH 溶液浸漬では 0.165% となっており、長期間の貯蔵で膨張率が増加する可能性がある。

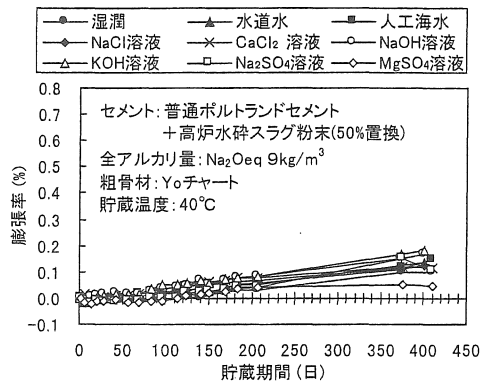


図9 高炉水砕スラグ粉末を混入した
コンクリート角柱供試体の膨張挙動

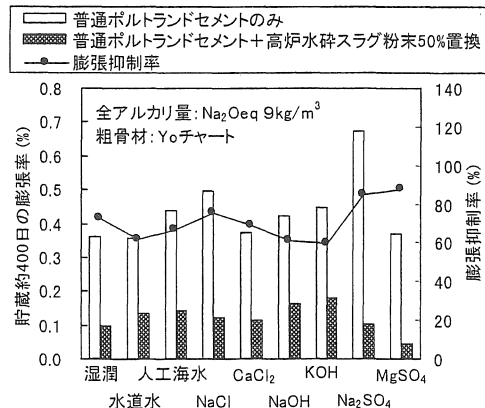


図10 貯蔵約400日の膨張率と
高炉水砕スラグ粉末による膨張抑制率

全アルカリ量 $9\text{kg}/\text{m}^3$ における貯蔵約 400 日の膨張率と高炉水砕スラグ粉末による膨張抑制率を図 10 に示す。全アルカリ量 $9\text{kg}/\text{m}^3$ では、高炉水砕スラグ粉末 50% 置換による膨張抑制率は、 MgSO_4 溶液で 88%、 Na_2SO_4 溶液で 85%、 NaCl 溶液で 75% となっている。普通ポルトランドセメントのみ使用で膨張率の高い Na_2SO_4 溶液については、特に抑制効果が大きいといえる。

各種溶液に浸漬した全アルカリ量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ の高炉水砕スラグ粉末 50% 混入コンクリート角柱供試体の膨張挙動を図 11 に示す。全アルカリ量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ でも全アルカリ量 $9\text{kg}/\text{m}^3$ のときと同様に膨張は抑制されている。いずれの溶液に浸漬した状態でも貯蔵約 400 日の膨張率は 0.1% 以下であり高炉水砕スラグ粉末による膨張抑制効果があるといえる。

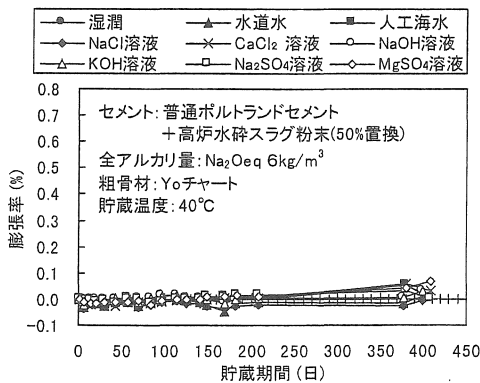


図 11 高炉水砕スラグ粉末を混入した
コンクリート角柱供試体の膨張挙動

4. まとめ

本研究の結果をまとめると次のようである。

- (1) NaCl 溶液、水道水、 NaOH 溶液、 KOH 溶液の膨張への影響は早い時期から現れた。
- (2) 湿潤状態の供試体では、膨張率の増加の時期と超音波伝播速度の減少の時期が一致した。しかし、溶液に浸漬した供試体の超音波伝播速度の減少傾向は、膨張率の増加傾向よりも約 40~50 日遅れて現れており、コンクリート内部の変状の影響が伝播速度に現れにくい。
- (3) 貯蔵約 400 日では、いずれの溶液浸漬状態でも高炉水砕スラグ粉末による膨張抑制効果があった。しかし、コンクリート内部の水酸化アルカリ量が多い全アルカリ量 $9\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体ではわずかながら膨張

傾向を示している。

- (4) 浸漬溶液の違いによって、供試体表面に付着している反応生成物の量に違いが生じ、反応生成物が多く付着している供試体にはひび割れが少なく、反応生成物が少ない供試体にはひび割れが多かった。

謝辞

本研究の一部分は、(財)日東學術振興財団(The Nitto Foundation)の助成金で行った。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 皿井剛典、岩月栄治、森野奎二：AAR コンクリート供試体の膨張とひび割れの関係、土木学会中部支部平成 8 年度研究発表会講演概要集、pp. 773-774、1997. 3
- 2) 皿井剛典、岩月栄治、森野奎二：凍結防止剤がアルカリシリカ反応に及ぼす影響、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、pp. 198-199、1998. 10
- 3) 皿井剛典、岩月栄治、不破昭、森野奎二：各種浸漬溶液がアルカリシリカ反応に及ぼす影響、土木学会中部支部平成 10 年度研究発表会講演概要集、pp. 559-560、1999. 3
- 4) 岩月栄治、森野奎二、不破昭、皿井剛典：各種溶液に浸漬した ASR コンクリート角柱の膨張挙動、土木学会中部支部平成 10 年度研究発表会講演概要集、pp. 561-562、1999. 3
- 5) 野田幹夫、小川健、小柳治、川村満紀：凍結防止剤散布環境下における ASR によるコンクリート構造物の損傷状況調査、コンクリート工学、Vol. 36、No. 9、pp. 15-21、1998. 9
- 6) 岩月栄治、皿井剛典、森野奎二：長期間貯蔵した ASR モルタルバーの膨張挙動と実構造物の劣化について、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、pp. 202-203、1998. 10
- 7) 岩月栄治、森野奎二、皿井剛典：長期間貯蔵した ASR モルタルバーの膨張に及ぼす反応性鋳物の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20、No. 2、pp. 943-948、1998
- 8) 皿井剛典、岩月栄治、森野奎二：高炉水砕スラグ粉末及びフライアッシュの ASR 長期抑制効果、土木学会中部支部平成 9 年度研究発表会講演概要集、pp. 723-724、1998. 3

(受理 平成11年 3月20日)