

## 論文 アルカリシリカ反応の環境湿度依存性に関する基礎的検討

小寺 周<sup>\*1</sup>・丸山 一平<sup>\*2</sup>・小川 彰一<sup>\*3</sup>・山田 一夫<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究ではアルカリシリカ反応の相対湿度依存性を評価する目的で、異なるアルカリ量を有するモルタルについて、材齢3日で脱型してそのまま異なる湿度に静置する通常条件と、一度、窒素条件下の105℃で乾燥させた後に異なる湿度に静置する105℃条件の2つの条件でひずみと質量変化を測定した。その結果、本研究で用いた骨材のアルカリシリカ反応性は相対湿度90%以上で生じ、それ以下の湿度ではひずみの観点では無視し得るほど小さいことを確認した。

**キーワード：**アルカリシリカ反応、環境湿度、モルタル、ひずみ、質量変化

## 1. はじめに

汚染飛灰等を処分や貯蔵する中間処理場や最終処分場の設計と維持管理において、アルカリシリカ反応性を有する骨材判定は重要だが、現状では必ずしも完全な判定基準はないことと、アルカリシリカ反応(ASR)についてすべてが理解されていることではないため、発生条件も明解でない<sup>1)5)</sup>。そのため、建設後の維持管理においてASRが生じたのちにも将来予測を行うとともに、対策までの尤度の評価を行うことは重要である。しかしながら、ASRを生じたコンクリート部材の将来挙動予測に資するデータは十分ではない。特に一般可燃性廃棄物の焼却飛灰は吸湿性のCaCl<sub>2</sub>を含有し、コンクリートは外壁が屋外で雨水の影響を受け、内壁は低湿度環境にさらされる可能性もある。

そこで、本研究では、特に環境湿度に着目し、ASRの湿度に依存する挙動を明解にする目的で、異なる含水状態の試験体を用い、異なる湿度環境におけるひずみと質量の経時的な変化に着目した実験を行うこととした。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体の作製

表-1に使用したセメントの化学組成、表-2に使用材料の物理的性質等を示す。本実験では普通ポルトランドセメント、石灰石砕砂、反応性細骨材、水酸化ナトリウムを用いて表-3に示す調合で4種類のモルタルを作製した。反応性骨材はYamadaらの実験<sup>6)</sup>に用いられた骨材Bを用いた。この骨材は著しい反応性を実構造物に

おいても示したオパールを含有する安山岩であり、室内のコンクリートプリズム試験ではアルカリ総量2.50kg/m<sup>3</sup>で半年から、屋外暴露試験においてもアルカリ総量2.60kg/m<sup>3</sup>で1年程度から、顕著なひび割れが認められる膨張を示した<sup>7)</sup>。

本研究では、反応性のモルタルをR(Reactive)、非反応性のモルタルをN(Normal)として表し、さらにアルカリ量の違いを考察する目的で、アルカリ量が多いものをH(High density)、少ないものをL(Low density)とし

表-2 使用材料

| 材料   | 記号 | 物理的性質等                                                     |
|------|----|------------------------------------------------------------|
| セメント | C  | 普通ポルトランドセメント、密度：3.16g/cm <sup>3</sup>                      |
| 細骨材  | B  | 反応性骨材 <sup>6)</sup> 、表乾密度：2.49g/cm <sup>3</sup> 、吸水率：2.79% |
|      | L  | 石灰石砕砂、表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.74%                 |

表-3 モルタルの調合

| モルタル種類 | 1m <sup>3</sup> のコンクリートを想定したときの単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |       |
|--------|--------------------------------------------------------|-----|-----|------|-------|
|        | W                                                      | C   | B   | L    | NaOH  |
| RH     | 279                                                    | 558 | 407 | 1002 | 4.590 |
| RL     | 279                                                    | 558 | 407 | 1002 | 1.365 |
| NH     | 279                                                    | 558 | 0   | 1432 | 4.590 |
| NL     | 279                                                    | 558 | 0   | 1432 | 1.365 |

表-1 使用したセメントの化学組成

| ig.loss<br>(%) | 化学組成(mass%)      |                                |                                |       |      |                 |                   |                  |                  |                               |      |                 |        |
|----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|-----------------|--------|
|                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  | Cl <sup>-</sup> | 合計     |
| 2.49           | 20.41            | 5.22                           | 3.07                           | 64.34 | 0.95 | 2.09            | 0.37              | 0.36             | 0.28             | 0.36                          | 0.09 | 0.020           | 100.05 |

\*1 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

\*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

\*3 (株)太平洋コンサルタント 営業推進部・セメントコンクリート営業部 博士(工学) (正会員)

\*4 国立環境研究所 福島支部汚染廃棄物仮研究室 主任研究員 博士(工学) (正会員)

て、RH, RL, NH, 及び NL の 4 種類のモルタルを作製した。アルカリ量の決定は、コンクリート単位体積当たり 5.5kg と 3.0kg 相当となるよう、セメント中のアルカリ濃度を同定した上で決定した。想定したコンクリートは、粗骨材が非反応性であり、反応性が高い急速膨張性の骨材を細骨材にペシマム割合としたものである。その際、コンクリート中のアルカリは非反応性粗骨材とは反応しないものと仮定しており、文献<sup>6)</sup>のコンクリート調合から粗骨材を除去したものを基本とした。表-3に 1m<sup>3</sup>のコンクリートを想定したときの水、セメント、反応性細骨材、非反応性細骨材及びアルカリ量を示す。

試験体の作製にあたってモルタルを  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の軽量型枠に打込み、 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  の一定条件下で封緘養生し、次工程の加工が可能な強度発現を待ち、材齢 3 日で脱型した。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  のモルタルをダイヤモンドカッターにより厚さ約 10mm に切断し、 $\phi 100 \times 10\text{mm}$  としたものを試験体として用いた。この際、壁効果を考慮し、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  のモルタルにおいて上面、下面からそれぞれ 10mm を除く範囲から試験体を作製した。

## 2.2 測定条件

試験体の質量及び長さ変化を経時的に測定するにあたって、脱型後の処理に 2 通りの測定条件を設定した。一方は材齢 3 日にダイヤモンドカッターを用いて切断した後、基長を測定し、各湿度条件に静置した。こちらを通常条件 (Normal) と呼ぶ。他方は材齢 3 日において、一度、試験体内部の水分の影響を除去し、水和を完全に停止させることを目的として  $105^\circ\text{C}$ 、窒素環境下で 7 日間乾燥をさせた後、各湿度に試験体を静置した。この処理条件を  $105^\circ\text{C}$  乾燥条件 ( $105^\circ\text{C}$ ) と呼ぶこととした。両条件とも調湿後の温度及び測定環境の温度は  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  である。

## 2.3 湿度条件

設定した湿度条件は飽水 (Wet)、相対湿度 95%, 90%, 85%, 80%, 60% の 6 水準である。試験体数は 1 水準それぞれ 2 体とした。飽水条件では、試験体を、純水 50g を含ませた不織布で覆い、アルミバックを用いて封緘した。

## 2.4 計測

乾燥前後の試験体の長さを、レーザー変位計 (LK-G30(KEYENCE 社製、精度:  $1/2000\text{mm}$ )) を用いて測定した。長さが既知のステンレス鋼との差から基長を求め、1 試験体につき 3 か所の直径を測定し、その平均値をもってその試験体のひずみを算出した。基長測定時に印を付け、毎測定時に同一の印を測定した。質量変化は、精密天秤で 0.01g まで計測した。飽水試験体の場合は、不織布を取り外し、軽く表面を拭ってから計測を行い、改めて湿らせた不織布で梱包した。以上の条件では、飽水条件の場合、アルカリとシリカゲルの一部が、不織布に

逃げてしまう可能性があることを付記する。調湿後 1, 2, 4, 8, 12, 16, 26, 34 週時にそれぞれ計測を行った。図-1 から図-6 において、図中のプロットはそのパラメーターの平均値を示し、上下のバーは測定値と平均値の差を示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 通常条件でのひずみ及び質量の経時変化

図-1 及び図-2 に通常条件での各湿度に静置した 4 種類のモルタル試験体が平衡に達するまでのひずみ及び質量変化率の経時変化を示す。

まず、ASR の生じない NH と NL に着目すると、飽水状態の質量変化において、NH と NL の差は無い。同じく、質量変化の観点から、他の湿度条件でも差がなく、当初、アルカリが水溶液に溶解することによって生ずる凝固点降下による平衡相対湿度の変化が含水率に影響を及ぼすかと考えられたが、本研究の範囲では特段の影響はなかった。既往研究では、セメント 1g 当たりでアルカリ量として約 0.004g 以上の範囲では、影響が同程度となることが報告されているので、本研究ではアルカリ量の差による影響がなかったと考えられる<sup>9)</sup>。

ひずみについては、相対湿度 90%, 60%において、若干の差が確認されたが、全体的なトレンドの中では特筆すべき差ではないと考えられる。

全体的な挙動としては、材齢 1 週までに大きな変化が生じ、質量変化は 8 週までで概ね挙動が落ち着いている。ひずみについても概ね同じ週数で落ち着いており、8 週以降はほとんど変化が無い。

次に ASR が生じた RH と RL に着目すると、質量変化挙動は、N シリーズと同様にほぼ 8 週で収まっている。一方、ひずみは、飽水及び相対湿度 95%と 90%の条件で特に顕著であるが、8 週以降もひずみの変化が生じており、特にこれらは ASR の反応、ゲルの生成、その吸湿による膨潤挙動によって決定されたものと考えられる。RH と RL の差に着目すると、アルカリ量の多い RH の方が最大膨張ひずみは大きく、同じく、質量変化も大きい。これはゲル生成量が RH の方が多いこと、その吸湿した水分量も多いことを意味している。RH では相対湿度 85%以上の場合、一旦収縮してから明らかな膨張挙動が見られている。相対湿度 80%の場合はばらつきの範囲の可能性もあるが、4 週から 8 週の間に  $10\mu$  の膨張が確認された。この現象は、初期に乾燥の影響を受け収縮したが、収縮の影響による長さ変化は早期に収束したが、より長期にわたり継続した ASR による膨張がその後収縮を上回り膨張を引き起こしたと解釈できる。RH の条件では、相対湿度 80%あるいは 85%以上で ASR が生じているように判断できる。一方、RL の場合も同様に相対湿度 85%

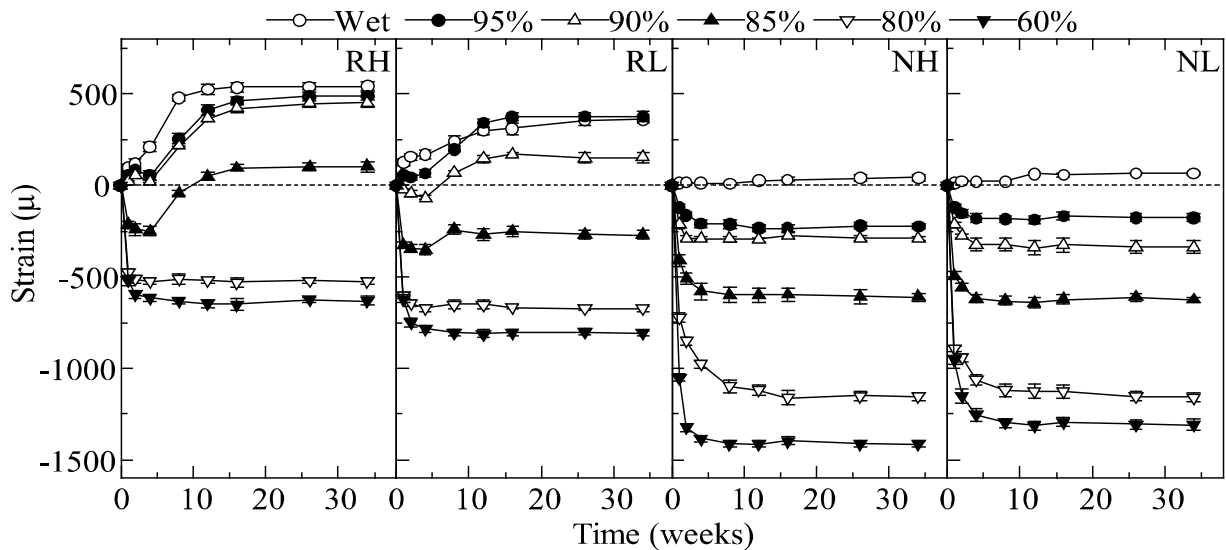


図-1 ひずみの経時変化（通常）

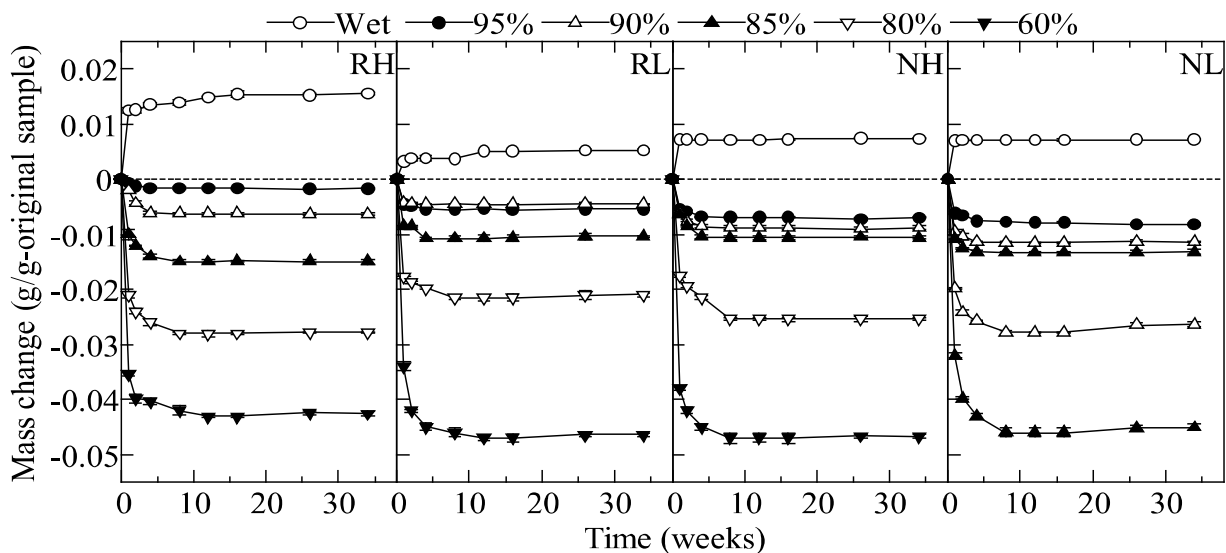


図-2 質量変化率の経時変化（通常）

で一旦収縮した後の膨張挙動が確認された。相対湿度 80%でも、ばらつきの範囲に相当するが 4 週から 8 週の間に  $21\mu$  の膨張が確認できている。このため、RH と同様に RL の場合でも、相対湿度 80%あるいは 85%以上の条件で ASR が生じると考えられた。

しかしながら、ひずみの観点のみに着目すると、ASR の膨張とその他のマトリクスであるセメントペーストの収縮がバランスして、ひずみが生じていないように見える場合がある。すなわち、NH や NL の相対湿度 80%条件に着目すれば、乾燥収縮ひずみや質量減少は材齢 8 週まで継続している。このことを考えると材齢 4 週と 8 週の間にマトリクスの収縮と ASR の膨張がバランスしてひずみが出てこないということが想像される。

また、RL のひずみに着目すると飽水のひずみが相対湿度 95%を 12 週以降で下回っている。これは飽水試験体に用いた不織布にアルカリとシリカゲルが逃げたこと

が原因と考えられる。

### 3.2 105℃乾燥条件でのひずみ及び質量の経時変化

図-3 及び図-4 に 105℃乾燥条件で一度、断水及び水和停止を行った試験体を各湿度に静置した 4 種類のモルタル試験体の平衡に達するまでのひずみ及び質量変化率を示す。

まず、ASR の生じていない NH と NL に着目すると、材齢 8 週までの範囲の相対湿度 80%と 95%の条件で一貫性の無い変動が確認されている。ひずみもその影響を若干受けている。しかしながら、全体的な挙動として、質量変化は調湿後 1 週で全体の 8 割以上の変動が決定しており、その後、調湿後 4 週までに若干の推移があり、その後は落ち着いている。なお、質量変化を検討するに当たって、骨材の吸水率が細骨材 B と L で異なっているので、本検討では ASR の反応による吸湿以外にも両者の差が顕著に出て来ることを考慮する必要がある。ひずみに

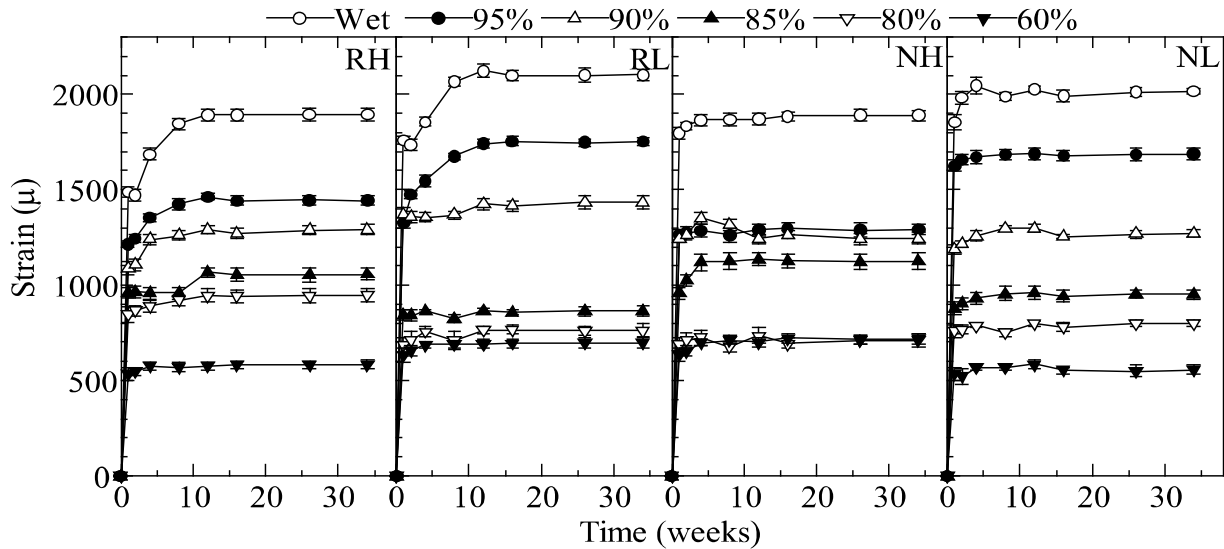


図-3 ひずみの経時変化 (105°C)

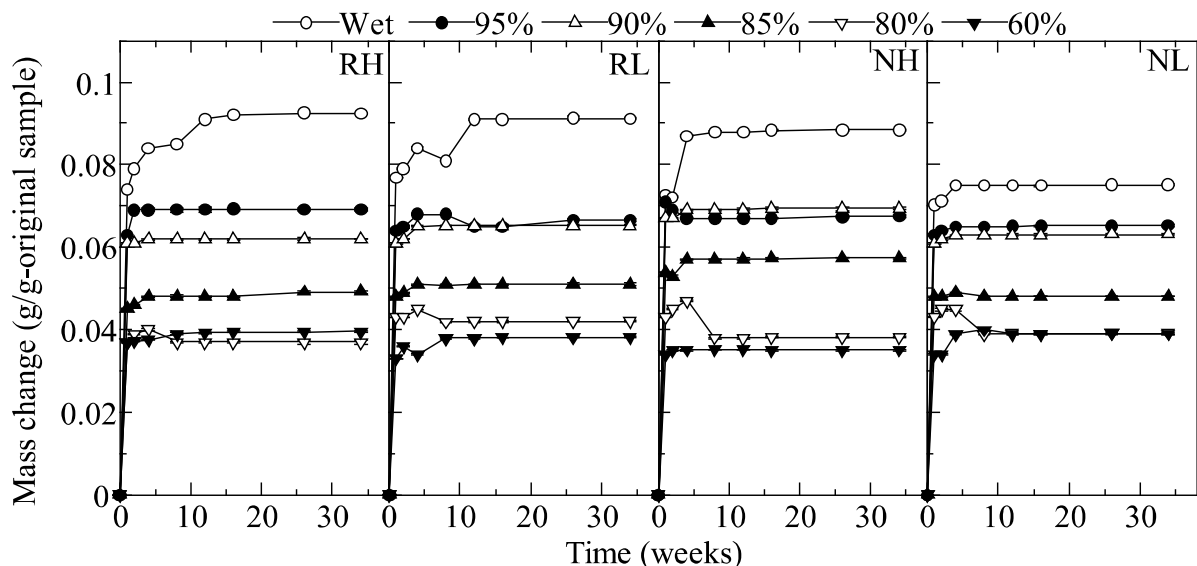


図-4 質量変化率の経時変化 (105°C)

についても同じく調湿後1週で8割以上の変化が確定し、調湿後4週以降は極めて安定した挙動を示した。

### 3.3 通常条件でのひずみ及び質量変化率と湿度の関係

図-5に、通常条件における質量変化率と湿度の関係、図-6に通常条件における最終ひずみと湿度の関係を示す。図-5に示されるようにアルカリ量の多少はほとんど質量変化に差異を生じさせない。高湿度域で質量が大きく増加しているRHは、シリカゲルが大量に発生して吸湿した結果であると推察される。

図-6に見られるひずみと相対湿度の関係において、NHとNLに着目すると、アルカリ量のひずみへの影響が小さいことが確認された。質量変化と同じく、非反応性のモルタルにおいてアルカリ量の違いは本研究の範囲ではひずみに作用しないことが明瞭である。しかし、RHとRLに着目するとアルカリ量によってひずみに差が生

じており、アルカリ量の多いモルタルは全ての湿度においてアルカリ量の少ないモルタルよりも膨張側にあり、アルカリ量がASRの反応を経由して影響したと考えられる。

また、反応性の無いNH、NLに対して、ASRの生じているRH、RLは、差分として大きな差が生じている。単純に考えるとNH、NLとRH、RLの差がASRによるひずみと考えられ、この検討の場合相対湿度60%でもASRが生じているということになる。骨材の総体積は同じであるが、収縮に対する応答が異なっており、反応性骨材Bを含んだ方が収縮は小さいか、あるいは、調湿後1、2週間で骨材にASRが生じてモルタルのひずみに影響したものと考えられる。現在の実験の範囲では、これらの影響を分離することができない。

#### 4. 考察

##### 4.1 105℃乾燥条件における比較

各湿度での ASR 反応性の有無を評価する目的で、105℃乾燥条件で一度、断水及び水和停止を行った試験体について、ASR を生じない試験体 (NH, NL) で吸湿によるひずみ変化が落ち着く調湿後 2 週を原点として考え、RH と NH 及び RL と NL の差を図-7 にプロットした。

RH と NH の差をとったものは相対湿度 90%以上で ASR による膨張ひずみが間違いなく確認された。相対湿度 80%においても 80  $\mu$  程度の膨張が確認されているが、相対湿度 85%では膨張は確認されなかった。また、相対湿度 60%でも膨張は確認されていない。これらは、吸湿の速度と ASR の膨張速度の兼ね合いで決定されるものであり、湿度に依存した水分移動の問題も内在している。

RL と NL の比較からは、相対湿度 95%以上で明らかな膨張が確認されており、相対湿度 90%, 85%, 80%ではひずみが下がってから膨張する挙動が確認される。ASR を生じた試験体において、水蒸気の移動経路である比較的大きな空隙やひび割れ、遷移帯にシリカゲルが進入している場合、外部からの水蒸気の侵入、ゲルへの吸着、ゲルの膨張が生じて空隙を閉塞する可能性が高い。このため、シリカゲルへの吸着と移動経路の閉塞によって内部まで水分が浸透しにくくなることと予測され、このことにより ASR を生じた試験体への水分侵入とそれによる膨潤速度が緩やかになることが考えられる。このとき、NH や NL の吸湿による膨潤が、RH や RL よりも相対的に速く生じることによって、見かけ上図-7 では一旦収縮するように見られることが生じうる。相対湿度 85%及び 80%において、この ASR は初期材齢 4 週間及び 105℃乾燥中に生じたものの可能性も高いため、調湿後の ASR 影響とは考えにくい。しかし、相対湿度 90%においては、相対湿度 85%及び 80%と比べ、調湿後 8 週以降の膨張量が大きく、ASR による膨張であると考えられる。このことから、本図からは ASR は相対湿度 90%以上で生じたものと考えられる。

##### 4.2 通常条件における比較

通常条件において調湿後 4 週を原点として RH と NH、RL と NL の差分をとったものを図-8 に示す。RH と NH の比較では、相対湿度 80%の条件であっても、調湿後 8 週以降も膨張を継続しており、調湿後 16 週から膨張ひずみが収束する傾向を示した。これは、乾燥プロセスであっても試験体の内部に水分が残存していることから、その水分の影響によって内部に ASR 反応性が確保されているために生じたものと考えられる。RL と NL の比較の観点からは、相対湿度 85%, 80%, 60%でも膨張挙動が調湿後 4 週から 8 週の範囲で確認できる。しかし、相対湿度 85%, 80%, 60%において、8 週以降膨張量は最大

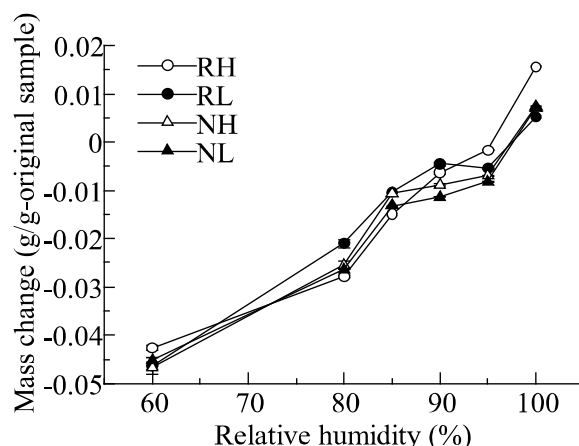


図-5 質量変化率と相対湿度の関係 (通常)

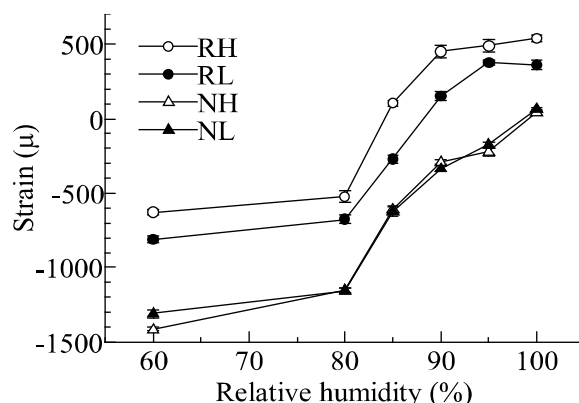


図-6 ひずみと相対湿度の関係 (通常)

で 19  $\mu$  であり、膨張挙動はほとんど見られなかった。このことから、これらも乾燥プロセス中に残存した水によって反応性が確保されただけであり、調湿後に継続的に ASR が生じたものとは考えられない。既往の研究<sup>1)~5)</sup>では試験体内部の湿分が制禦された湿度環境になるまでの時間を要する水分移動を十分には考慮していないため、骨材の反応性に応じ、60-90%といった本来 ASR 膨張が生じないとも考えられる湿度環境においても ASR 膨張が測定された可能性もある。以上を総括すると本研究で用いた ASR が生じる湿度は相対湿度 90%以上であり、それ以下では生じないと考えられた。

#### 5. まとめ及び今後の展望

本研究では、異なるアルカリ量を有するモルタルについて、材齢 3 日で脱型してそのまま異なる湿度に静置する通常条件と、一度、窒素条件下の 105℃で乾燥させた後に異なる湿度に静置する 105℃条件の 2 つの条件でひずみと質量変化を測定した。

##### 1) 105℃乾燥条件における比較

相対湿度 90%以上で ASR による膨張ひずみを確認した。相対湿度 85%及び 80%における膨張挙動は、ASR を生じた試験体 (RH, RL) と生じていない試験体 (NH, NL) の吸湿による膨張の速さが異なることによる見かけ上の

膨張であり，ASR の影響ではないと考えられた。

## 2) 通常条件における比較

相対湿度 90%以上で ASR による膨張ひずみを確認した。相対湿度 90%未満において膨張挙動が確認されたが，乾燥プロセス中に試験体内部に残存した水により反応性が確保されただけであり，調湿後に継続的に反応性が生じたとは考えられない。

以上から，本研究で用いた骨材の ASR 反応性は相対湿度 90%以上で生じ，それ以下ではひずみの観点では無視し得るほど小さいことを確認した。

また，飽水条件ではない，一般屋外環境における ASR 部材のひずみ予測には，暴露環境における雨水の影響を考慮することが重要である例が示されているが<sup>9)</sup>，本研究の結果から，乾燥プロセスにおいて試験体の内部に残存している水分が ASR 反応性を確保する可能性が示されたため，反応性骨材とアルカリ細孔溶液が接触する時間，すなわち，液水の滞在時間が重要であると推察された。これらの精緻な数値予測モデルの構築には，水分移動のポテンシャルは蒸気圧としつつも，液水の存在形態と滞在時間を考慮したモデルを構築した上で，部材内部の水分の形態と分布を考慮した膨張予測を行うことが重要であると考えられた。

## 参考文献

- 1) Vivian, H. E.: The effect of drying on reactive aggregate and mortar expansions, Proceedings of the 5th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in concrete, pp.252-28, 1981
- 2) Nilsson, L. O.: Moisture effects on the Alkali-Silica Reaction, Proceedings of the International Conference on Alkalies in Concrete, pp.201-208, 1983
- 3) Olafsson, H.: The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars, Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions, pp.461-466, 1986
- 4) Tomosawa, F. Tamura K. and Abe M.: Influence of water content of concrete on alkali-aggregate reaction, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in concrete, pp.881-885, 1989
- 5) Kurihara, T. and Katawaki, K.: Effects of moisture control and inhibition on alkali silica reaction, Proceedings of the 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in concrete, pp.629-634, 1989
- 6) Yamada, K., et al.: CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion, Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191, 2014

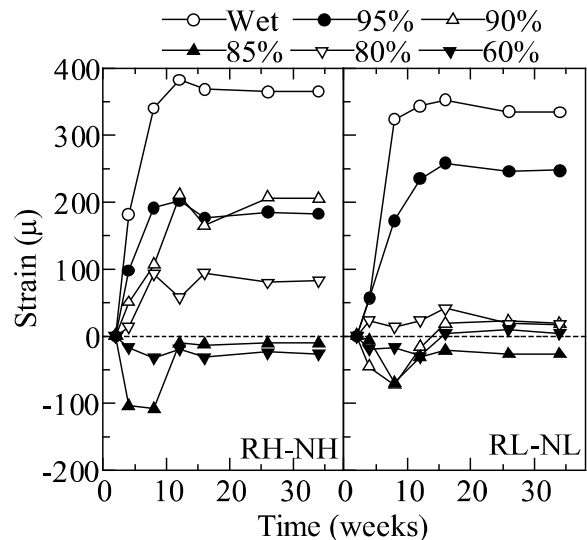


図-7 105℃条件における RH と NH 及び RL と NL のひずみの差（調湿後 2 週を原点）

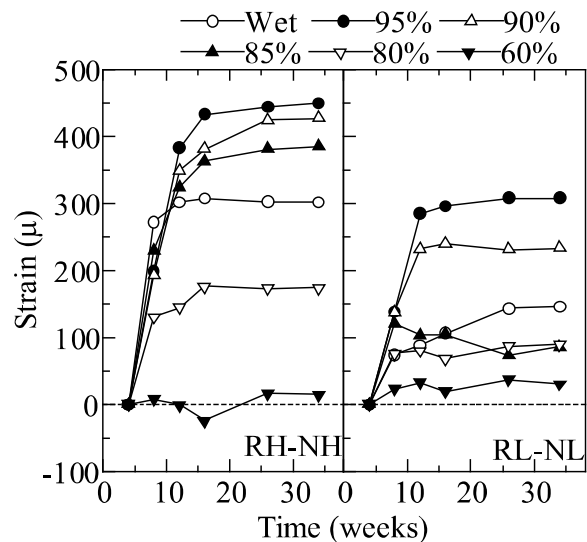


図-8 通常条件における RH と NH 及び RL と NL のひずみの差（調湿後 4 週を原点）

- 7) 小田聡ほか: 促進コンクリートプリズム試験及び屋外暴露試験による ASR 膨張挙動の違いに関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.16, pp. 61-66, 2016
- 8) He, Z. and Li, Z.: Influence of alkali on restrained shrinkage behavior of cement-based materials, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No.3, pp.457-463, 2005
- 9) Kawabata, et al: Correlation between laboratory expansion and field expansion of concrete: Prediction based on modified concrete expansion test, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in concrete, 034, 2016