

論文 乾燥・湿潤繰り返しを受ける A S R 劣化コンクリート内部の湿度変化

鍵本 広之^{*1}・安田 幸弘^{*2}・木下 茂^{*3}・川村 満紀^{*4}

要旨: 乾燥状態に置かれていたコンクリートを加湿した時、表面から約 5 cm までの表層部の相対湿度は急激に増大し約 10 日以内に 80%R.H. 以上まで回復するが、20 cm 位置では加湿の影響は大きく遅れる。一度乾燥したコンクリートが乾燥・湿潤繰り返しを受ける場合、コンクリート体内の相対湿度は比較的短期間の間に湿度低下・湿度回復が生じる。太平洋岸で屋外曝露した大型円柱供試体内の相対湿度は年間の環境湿度変化に追従して変化するが、表層より 5 cm 以浅で A S R 膨張発生限界湿度 80%R.H. を下回るもののそれ以深では 90%R.H. 以上を保っていた。日間の環境湿度の変動に対しては、表層部の相対湿度の変化は殆どなかった。

キーワード: A S R, 相対湿度, 乾燥・湿潤繰り返し, 自然曝露, 表面ひび割れ

1. はじめに

A S R ひび割れはコンクリート体内に膨張差が生じたときに発生することから、A S R によるひび割れの発生やその進展を考える場合、A S R 劣化構造物の膨張が何に影響されどのように進行するかを把握することが必要となる。実際の A S R 劣化構造物の表面ひび割れの発生は構造物内部の湿度分布に関する調査結果にもとづいて、コンクリート表層部と深部における A S R 膨張差に起因すると推察されている^{1,2)}。また降雨や流水に接するコンクリート表面ではコンクリート中のアルカリが漏出することにより A S R 膨張能力が低下することが明らかになっている³⁾。A S R によるコンクリート膨張に及ぼす要因には、上記の湿度、コンクリート中のアルカリ濃度のほか、温度条件や骨材の反応性の大小など様々な要因が挙げられるが、コンクリート体内の相対湿度と A S R 膨張を取り扱った研究は多くない。

筆者らは、乾燥・湿潤繰り返し過程におかれたコンクリート円柱内部のひずみおよび相対湿度の測定を通した一連の研究から、乾燥過程における初期ひび割れは、表層部分においては徐々に湿度が低下し A S R が発生しなくなるが、高湿度状態に保たれた中央近傍は A S R 膨張が継続するため表層部分に引張力が発生する。この引張力がコンクリートの引張強度を超えると表面ひび割れが発生することを明らかにした⁴⁾。

一方、自然環境下にあるコンクリート構造物では乾燥・湿潤の繰り返しを受けることによって表面ひび割れが進展するが、自然環境下に置かれた構造物の乾燥・湿潤の繰り返しに伴うコンクリート体内の相対湿度がどのように変化するのか、表面からの深さに伴いどの程度影響を受けるのかを調査した事例は多くない。

本研究では、乾燥・湿潤の繰り返しを受ける A S R 劣化コンクリート体内の膨張挙動を詳細に考察するにあたり重要となる、コンクリート体内の相対湿度がどのように変化するのかという課題を明らかにするために、実験室内、および自然環境下に置かれた大型コンクリート円柱の表面から種々の深さに設置した温湿度センサーにより測定された相対湿度の変化を長期間にわたり追跡した。

実験室内において乾燥を経たのち急激に加湿条件に置いた A S R 反応性骨材を含有した円柱供試体内の相対湿度変化は既報⁴⁾により報告しているが、これを基本ケースとして理解した後、乾燥・湿潤を複数回繰り返した場合に加え、自然環境下に曝露した A S R 劣化コンクリート体内の相対湿度変化について考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料, 配合

反応性骨材として、常願寺川産川砂利および川砂を使用した。非反応性骨材は青梅産碎石と大井川産川砂である。反応性骨材に対するアルカリ反応性試験（化学法 (JIS A 1145), モルタルバー法 (JIS A 1146)) の結果および骨材の物理的性質を表 - 1 に示す。

表 - 1 骨材物性

反応性 骨材	常願寺川産 川砂利 (Gmax 20 mm) 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.66% Rc 91 mmol/L, Sc 253 mmol/L, モルタルバー膨張率 0.34 % (26 週) 常願寺川産 川砂 表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 1.94%, FM 2.81 Rc 61 mmol/L, Sc 190 mmol/L, モルタルバー膨張率 0.38 % (26 週)
非反応性 骨材	青梅産 碎石 (Gmax 20 mm) 表乾密度 2.71 g/cm ³ , 吸水率 0.44% 大井川産 川砂 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.42%, FM 2.82

*1 電源開発㈱ 若松総合事業所 所長代理 博士 (工学) (正会員)

*2 開発設計コンサルタント 設備保全技術開発センター 所長代理 (正会員)

*3 株式会社 シーテック 技術部 技術部長

*4 金沢大学名誉教授 (名誉会員)

使用したセメントは等価 Na_2O 量 0.53%の普通ポルトランドセメントであり、コンクリートの製造においてはスランプ値を調整するために減水剤を使用した。

コンクリートの配合を表 - 2 に示す。また、ASR膨張を促進するためにセメントの等価 Na_2O 量が 1.8%となるようにコンクリートに NaOH (1級標準試薬) を添加した。

2.2 大型コンクリート円柱供試体の作製

表 - 2 に示した配合をもつコンクリートを練混ぜ、直径45cm、高さ90 cm (非反応性骨材を用いた供試体の高さは45cm) の大型コンクリート円柱供試体を作製した。供試体の作製においては、供試体上部から温湿度計埋設のための空間を作るために、先端に直径10 mm、長さ10 mmの突起をもった直径30 mm、長さ400 mmの亚克力棒を図 - 1 に示した温湿度計埋設位置を目指して供試体上面から精度よく鉛直に埋設し、コンクリート打設後1日目に上記亚克力棒を抜き取った。図中の黒丸印は温湿度計を示し、数字は側表面からの埋設深さを表す。温湿度計はそのまま埋め込むのではなく、温湿度計埋設後完全な気密性を確保するため、事前に上記と同直径の亚克力棒 (中央に直径6 mmの穴を開けたもの) に直径6mmの温湿度センサーを接着剤で固定した温湿度計ユニットを準備し、埋設前に温度35°C、相対湿度60%の環境下でキャリブレーションを行っておいた。これらの温湿度計ユニットをコンクリート円柱の側表面から1cm、2cm、3cm、4cm、5cm、10cm、20cmの7箇所の温湿度計埋設空間 (直径30 mm、深さ300 mm) の最深部に挿入した後に、残りの上部260 mm部分を表 - 2 に示すコンクリートから粗骨材を除いたモルタルで充填した (写真 - 1)。

また温湿度計ユニット埋設と同時に膨張ひずみの計測のためひずみ計を埋設した。後述するように実験ケース毎に温湿度計の埋設深さが異なったり、またひずみ計を埋設しないケースもあるが、温湿度計ユニットとひずみ計の埋設方法は全て同じである。なお、これらの詳細については次項で詳述する。

また同時に、本実験で使用したコンクリートのASR膨張挙動を知るために、温度 35°Cと 40°C、相対湿度 95% R.H.以上、また材齢 73 日までは温度 35°C、相対湿度 60% R.H.、その後温度 40°C、相対湿度 70%R.H.の養生条件でコンクリートバー (10cm×10cm×40cm) の膨張試験を行った。

2.3 乾燥・湿潤繰り返し試験

(1) 乾燥・湿潤繰り返し条件

自然環境条件下に置かれた実際のコンクリート構造物の受ける乾燥・湿潤の繰り返しを模擬または実測するために以下の環境条件を設定し試験した。

ケース①は乾燥状態におかれていたASRひび割れを

表 - 2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				σ_{28} 強度
			W	C	S	G	
20	55	45	175	318	833 (836)	1,030 (1,057)	25.5 (40.7)

注) () は非反応性骨材の数字。強度の単位は N/mm^2 。

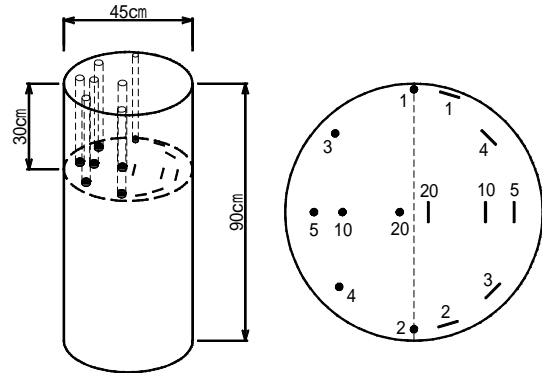


図 - 1 ケース ①の大型供試体中の温湿度計埋設位置 (左側が温湿度型、右側はひずみ計を示す)



写真 - 1 温湿度ユニットとその設置状況

有するコンクリートを急激に加湿した場合のコンクリート体内の相対湿度変化を観察することを目的とした。養生条件としては、初期に乾燥過程 (材齢 73 日まで温度 35°C、相対湿度 60%R.H.、その後温度 40°C、相対湿度 70%R.H.) でコンクリート体内の膨張ひずみが安定するまで (材齢 292 日) 養生した後、環境湿度を 95%R.H.以上に急激に上昇させたものである。

次にケース②として、初期にケース①と同様の環境に置かれたASRひび割れを有するコンクリートが乾燥と湿潤の繰り返しを受けた場合のコンクリート体内の相対湿度の変化を観察することを目的としたものである。設定した養生条件はケース①と同様の初期乾燥過程の後に加湿過程 (温度 40°C、相対湿度 95%R.H.以上) と乾燥過程 (温度 40°C、相対湿度 70%R.H.) を 60 日毎に繰り返した。

ケース③は自然環境下におかれた非反応性骨材コンクリートの相対湿度変化を観察することを目的に実施した。供試体は、神奈川県茅ヶ崎市の海岸から約 3 km程度に位置する日当たりのよい場所に曝露したものである。

ケース④はケース③と同様にASR劣化コンクリート

表 - 3 乾燥・湿潤繰り返し条件

	骨材種別	供試体	環境条件		計測頻度	備考
			乾燥過程	湿潤過程		
①	反応性	φ45×90	40℃, 70%R.H.* 292 日間	40℃, 95%R.H. 1,500 日間	1 回/日	乾燥から湿潤への移行のみ センサー設置位置：1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 cm, 歪計有
②	反応性	φ45×90	40℃, 70%R.H.* 315 日間	40℃, 95%R.H. 60 日間	1 回/日	先に続き, 乾燥・湿潤を 60 日間で 5 サイクル繰り返し センサー設置位置：1, 2, 3, 4, 5, 7, 20 cm, 歪計有
③	非反応性	φ45×45	脱枠後, 自然環境下に曝露 2 年間		1 回/週 1 回/時間	供試体上面から 22.5 cm の位置に湿度計を設置 センサー設置位置：2.5, 5, 7.5, 10 cm, 歪計無し
④	反応性	φ45×60	ケース①の実験終了後 自然環境に曝露 約 9 か月間		1 回/週 1 回/時間	①の実験後, φ45×90 cm の上部 60 cm を切断し屋外 曝露。歪計有

※初期 73 日間は 35℃, 65%R.H.

供試体を同じ場所に曝露したものである。

これら 4 条件でコンクリート体内の相対湿度測定を実施した(表 - 3)。

(2)実験に用いた供試体と相対湿度の計測

実験に用いた供試体とそれぞれの実験条件は表 - 3 に示すとおりであるが, ケース④の計測に用いた供試体は, ケース①の実験終了後にφ45×90 cm の上部 60 cm を切断してφ45×60 cm に成形したものである。

相対湿度の計測は, 急激な環境変化に伴う A S R 劣化コンクリート体内の相対湿度変化を把握するために 1 日 1 回の頻度で(ケース①, ②), 自然環境下に置かれたケース③, ④については, A S R 劣化の有無によるコンクリート体内の年間の湿度変化を比較するために 1 週 1 回(月曜日の 9:00~10:00 の間に計測することを標準)の計測の他に, 日間の湿度変化を見るために 1 時間 1 回(昼間 9 時間: 9:00~17:00 の 9 回)の計測を 3 日間にわたり行った。

2.4 大型コンクリート円柱における内部ひび割れの観察

ケース①の乾燥-加湿過程終了後, コンクリート円柱下部から厚さ約 20 mm のコンクリート円板を切り出した。コンクリート円板を 20℃, 60% R.H. の室内で約 1 週間乾燥した後 4 分割し, 真空デシケータ内で扇状コンクリート片に蛍光染料含有エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂が硬化した後, SiC 粉末を用いて試料片の切断面を研磨し, UV 光下でひび割れのパターンを観察した。

3. 結果と考察

3.1 乾燥の後急激に再加湿させた ASR 劣化円柱コンクリート内部の湿度変化⁴⁾(ケース)

乾燥および再加湿の全過程を通して測定された相対湿度の変化を図 - 2 に示す。この図から, 乾燥過程においては表面から 4cm 以内の相対湿度は時間の経過とともに徐々に低下するが, 5cm 以上の深部では相対湿度の低下

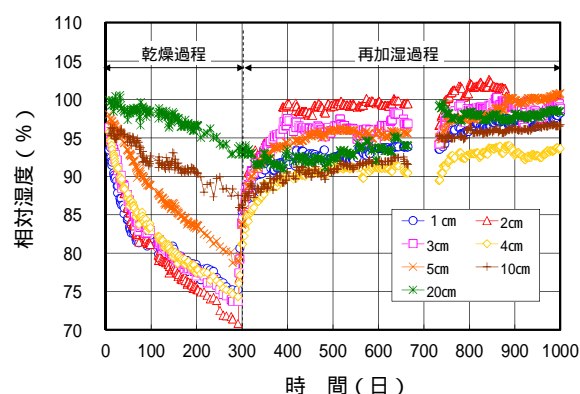


図 - 2 ASR 劣化円柱コンクリート内部の相対湿度の時間に伴う変化(ケース)

速度は小さく, 深部になるほど外部環境の影響を受けにくいことがわかる。また, 再加湿過程開始後コンクリート内部における相対湿度は深さによって異なる速度で上昇する。特に, 表面から 10cm 位置における相対湿度は直後から時間とともに徐々に増大するが, 20cm 位置では再加湿開始後約 100 日まで依然減少の傾向にあり, その後 95%R.H. に向かってゆるやかに上昇することがわかる。なお, 1 cm 位置における再加湿後の相対湿度の上昇程度がさほど大きくなく, 20 cm 位置のそれと同程度で推移している。外部環境に近い部位では外部の湿度変化に敏感に反応し湿度上昇は早く 95%R.H. に近づくはずであるが, 上記のようになった原因は不明である。

また, 実験に使用したコンクリートの膨張特性を図 - 3 に示すが, 大型コンクリート円柱が初期に置かれていた環境と同じ温度および相対湿度の環境下では全期間にわたり収縮しているが, 湿度環境が 95%R.H. 以上では材齢約 60 日から材齢約 280 日までの間急速に膨張ひずみが増大したが, それ以後一定(約 0.3%)となった。

3.2 乾燥・湿潤繰り返しを受ける ASR 劣化円柱コンクリート内部の湿度変化(ケース)

乾燥および再加湿繰り返しの全過程を通して測定され

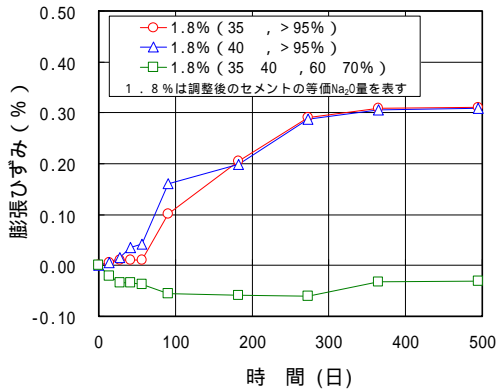


図 - 3 コンクリートバーの膨張ひずみ曲線⁴⁾

た各深さにおける時間ともなう相対湿度の変化を図 - 4 に示す。乾燥過程におけるコンクリート体内の相対湿度の変化、および再加湿過程開始後コンクリート内部における相対湿度の変化は前節の結果と同様である。ケース②では表面から 7 cm 位置に設置した温湿度計の再加湿後の湿度上昇はケース①の 10 cm 位置のそれと比較し敏感であるが、5 cm 以浅のものと比較し外部環境の変化に鈍感である。

乾燥・湿潤を経たのちの 2 サイクル目以降の乾燥過程においてはコンクリート円柱表層部の相対湿度は急激に低下するが、これはコンクリート体内の水の存在場所に関係がある。一般に、毛细管内に存在する水は径の小さいものほど蒸発しにくいことはよく知られる事実であるが、コンクリート中の水は様々な大きさの空隙に存在することから、初期の乾燥過程においてはまず径の大きい空隙に存在する水から失われ、その後順次より小さい空隙内の水の蒸発に移行していく。径の小さい空隙に存在する水は蒸発しにくいことから、初期の乾燥過程では湿度低下に時間がかかる。ある程度径が小さい空隙に存在する水も失われた初期の乾燥過程終了後、コンクリート表面を再加湿した時、外部から供給された水はまず比較

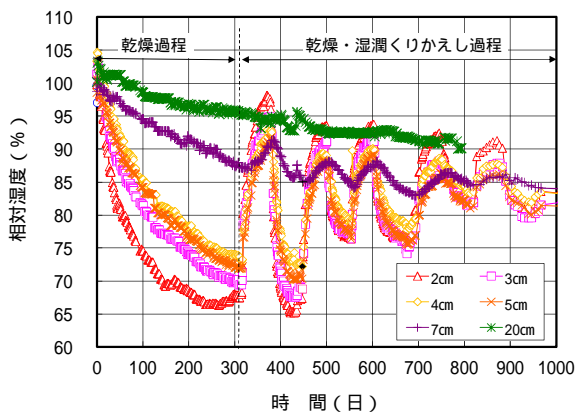


図 - 4 乾燥・湿潤繰り返しを受ける ASR 劣化円柱コンクリート内部の湿度変化 (ケース)

的大きい径の空隙を充てんすることでコンクリート体内の相対湿度を容易に上昇させることができるが、小径の空隙にまで水分が再充填されることはないと考えられる。これらの大径の空隙中の水は次の乾燥過程において容易に蒸発することになる。

このようなことから一度乾燥過程を経たコンクリートが乾燥・湿潤繰り返しを受ける場合においては、比較的短期間の間に湿度低下および湿度回復が生じることとなると考えられる。

なお、表面から 1 cm 位置にも温湿度センサーを設置していたが、センサー不良のため測定不良であった。

3.3 自然環境下に曝露されたコンクリート円柱内部の湿度変化 (ケース)

非反応性骨材を使用して $\phi 45 \times 45$ cm の供試体 (ケース③) を作製し屋外に曝露しコンクリート体内の相対湿度を計測した。図 - 5 (a) は 1 年間を通したコンクリート体内の相対湿度の変化を示す。

図中の●は暴露環境湿度を示すが、供試体を設置した場所は太平洋岸の海から約 3 km の地点であり梅雨時期には 80% R.H. 程度と高湿度、冬は 20% R.H. を切る低湿度となる。

非反応性骨材コンクリート供試体の測定結果を示す図 - 5 (a) をみると、環境湿度の変化に追従してコンクリート体内の相対湿度は夏季に高く冬季に低い傾向をもって推移していることがわかる。環境湿度が大きく低下し 20% R.H. 程度になった 10 月～11 月頃にコンクリート表面から 2.5 cm 位置では相対湿度は 70% R.H. 程度となり、冬期間を通して A S R 膨張発生限界湿度 80% R.H. を前後する相対湿度となっていることがわかる。また表面より内部に向かうに従って相対湿度は高くなり、春季～夏季では表面から 10 cm 位置では約 95% R.H. 程度で推移し、秋季～冬季においても 85% R.H. を下回ることはない。

次に A S R 劣化ひび割れが多数発生している反応性骨

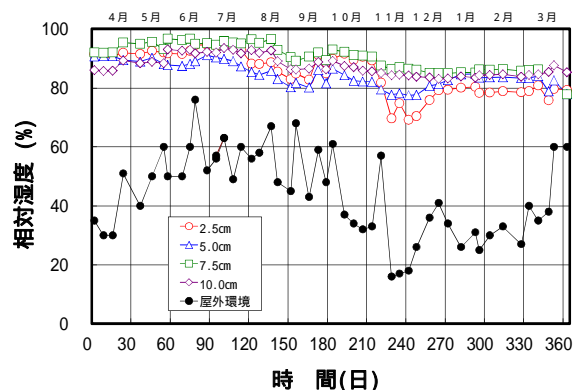


図 - 5 (a) 屋外曝露したコンクリート円柱内部の相対湿度の時間の伴う変化 (ケース)

材を含有した供試体の相対湿度変化を図 - 5 (b)に示すが、ASR劣化ひび割れが多数発生しているコンクリート体内の相対湿度の変化は非反応性骨材コンクリートのそれと概ね同様であるものの、表面から5 cmより浅い部分の相対湿度は非反応性骨材コンクリートと比較して環境湿度の低い冬季においてはより低い値を示す。ここで深さ4 cm位置における相対湿度が3 cm位置のそれと比較し低い値をとっており、表面からの深さに従った相対湿度の順序になっていない。これは、コンクリート円柱表面に多数生じたひび割れが温湿度計を埋設した空間にまで達していたものと推定される。また、当初1 cm位置にも温湿度計を設置していたが、実験期間が長期に及んだことから測定不能となったためデータから削除した。

反応性骨材コンクリートでは図 - 3 に示すようにASR膨張が生じるため、写真 - 2 (a)に示すように供試体のコンクリート表面にはASR劣化ひび割れが入っていた。ここではひび割れは幅が0.05 mm以上のものをスケッチしているが、それ以下のひび割れも多数存在する。また写真 - 2 (b)は、表面ひび割れの深さや内部ひび割れの発生状況を知るために、供試体下部から試料を採取し蛍光染料含有エポキシ樹脂を含ました扇状のコンクリート片の研磨面を普通光およびUV光の下で撮影した写真である。

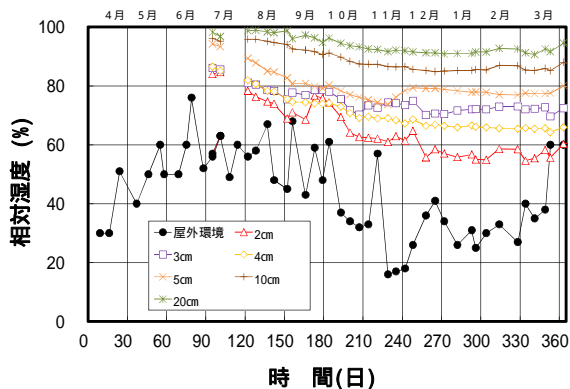


図 - 5 (b) 屋外曝露したコンクリート円柱内部の相対湿度の時間の伴う変化 (ケース)



写真 - 2 (a) 円柱表面に入ったASR劣化ひび割れ (ケース の終了時の供試体表面のひび割れ状況)

写真 - 2 (b)に見られる表面から内部に向かって進展した幅1~2 mmの太い楔形のひび割れは写真 - 2 (a)に見られる表面ひび割れのうちの1つである。この写真から、表面ひび割れの深さは実験終了時には約5 cmにまで達していたことがわかる。また、この蛍光写真から、表面ひび割れ以外に肉眼で観察できる程度のひび割れが多数存在することがわかる。

従って、再加湿および再乾燥が加わった時に、表層近傍のコンクリート体内の相対湿度が環境湿度の変化に対して比較的敏感に反応するのは、これらのASR劣化ひび割れを通して外部から水分が容易に侵入できることが原因であると考えられる。しかし幅の大きな表面ひび割れは深さ5 cm程度までしか達していないことから5 cm以深の部分については外部湿度変化の影響はさほど受けることはないと考えられ、ASR劣化コンクリートの深さ5 cm以深の部分の相対湿度の変化は非反応性供試体のそれと同程度であった。

図 - 6 はASR劣化コンクリート円柱におけるコンクリート体内の日間の相対湿度変化を示したものである。

計測は夏季の3日間の9:00~17:00までの1時間毎に実施したもので、測定期間の環境湿度は最低54%R.H., 最高88%R.H.であった。1日のうちでも環境湿度変化があるにもかかわらず、コンクリート体内の環境湿度は殆

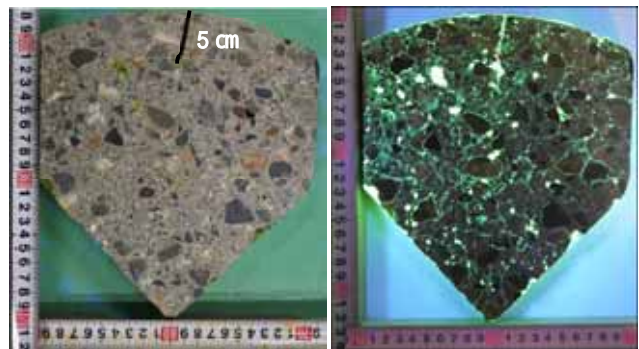


写真 - 2 (b) 円柱表面に入ったASR劣化ひび割れ (ケース 終了後の供試体内部のひび割れ状況)

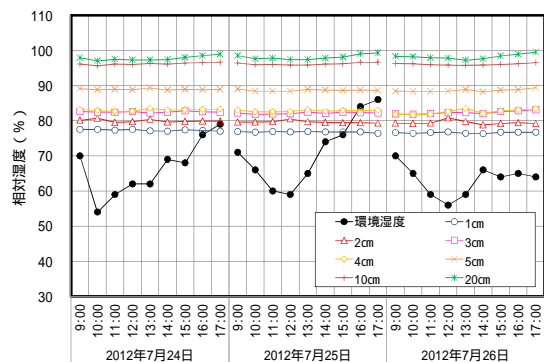


図 - 6 ASR劣化円柱コンクリート内部の日間での相対湿度変化 (ケース)

ど変化せず、表面より 1 cm位置で 78%R.H.、2 cm位置で 80%R.H. とほぼ一定の値を保っていた。

A S R劣化を受けコンクリート表面にひび割れがあるコンクリートにおいても 1 日以内で環境湿度に変化があっても短時間の環境湿度変化に対してはコンクリート体内の相対湿度はほとんど変化しないことがわかる。

4. 結論

本実験において得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) コンクリート円柱表面から 10cm 深さまでの相対湿度は再加湿を開始した初期段階でも上昇するが、20cm 深さでは環境湿度上昇のコンクリートの相対湿度に及ぼす影響は大きく遅れる。
- (2) 一度乾燥過程を経たコンクリートが乾燥・湿潤繰り返しを受ける場合においては、比較的短期間の間に湿度低下および湿度回復が生じる。
- (3) 年間の環境湿度の変化が 20%~80%R.H. である場所に自然曝露したコンクリート体内の相対湿度の変化は、曝露環境湿度の変化に伴ってゆっくり変動し 5 cm以浅で 80%R.H. を切るが、それ以深は 90%以上の湿度を保っていた。
- (4) この時 A S R劣化ひび割れを有するコンクリート体内の相対湿度は、ひび割れないコンクリートと比較して、表面より 5 cm以浅の部分で環境湿度の低下に伴いより低くなるが、それ以深においてはさほど変わらない。A S Rによりコンクリート表面にひび割れが入っても、5 cm以深の部分の相対湿度の変

化にさほど影響を与えない。

- (5) コンクリート表面に A S R劣化ひび割れがあるコンクリートにおいて、日間の環境湿度変化があっても、この程度の短時間の環境湿度変化に対しては体内の相対湿度はほとんど変化しない。

参考文献

- 1) D. Stark, The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity, in: V.M. Malhotra (Ed.), Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of concrete, ACI SP-126, Montreal, Canada, 1991, pp. 973-987.
- 2) Hagelia, Origin of map cracking in view of the distribution of air voids, strength and ASR-gel, Proceedings of the 12th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2004, pp. 870-881.
- 3) J. Lindgard, O. Andic-Cakir, I. Fernandes, T. F. Ronning, M. D. A. Thomas, Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, Journal of Cement and Concrete Research, Vol. 42, 2012, pp. 223-243.
- 4) 鍵本広之, 川村満紀, 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみ測定によるASR表面ひびわれ発生過程の解明, コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, pp.1225-1230, 2009.