

# 論文 乾燥・湿潤繰り返しを受ける反応性骨材含有コンクリート円柱内部のひずみ, 相対湿度および表面ひび割れの進展

鍵本 広之<sup>\*1</sup>・川村 満紀<sup>\*2</sup>

要旨：乾燥繰り返し過程におけるコンクリート円柱内部のひずみおよび相対湿度の測定から、乾燥過程における初期ひび割れの発生および再飽和過程のひび割れの進展は中央部分のA S R膨張量が表面近傍のそれよりも大きいことによって生じることが明らかになった。乾燥過程においては活発なA S R膨張開始時までには表層に非膨張層が形成され、その後ひび割れが発生した。また、再飽和過程では既存ひび割れを通して水分が急速に浸入し、ひび割れは活発に進展する。このとき円柱内部では湿度回復程度に差ができることによって、場所により引張りひずみの増大速度が異なることによる複雑な内部拘束応力状況となっていると思われる。

キーワード：A S R, 膨張, 乾燥・湿潤繰り返し, ひずみ, 表面ひび割れ, 内部拘束応力

## 1. はじめに

モルタルのA S R膨張量は供試体が置かれている環境湿度に依存すること、および相対湿度80%以下ではA S R膨張は生じないことが実験によって明らかになっている<sup>1)</sup>。また、実際のA S R劣化構造物内部の湿度分布に関する調査結果に基づいて、構造物表面に見られる巨視ひびわれは表面近傍と深部との間に生じる膨張量の差によって表層部に発生する引張応力に起因すると考えられてきた<sup>1, 2)</sup>。筆者らは、相対湿度70%、温度40の環境条件下に置かれた比較的大型の反応性骨材含有コンクリート円柱(45cm×90cm)内部のひずみと相対湿度を測定することにより、活発なA S R膨張が開始するまでにコンクリート円柱の表層部に厚さ約4cmの非膨張層(相対湿度80%以下の領域)が形成されること、および材齢150日において表面に最初のひび割れが発生することを明らかにした<sup>3)</sup>。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と考えられるが、乾燥・湿潤の繰り返しがコンクリートのA S R膨張や表面ひび割れの進展に及ぼす影響は明らかではない。そこで、実際のコンクリートが受ける乾燥・湿潤の繰り返しを模擬するために筆者らが行った実験<sup>3)</sup>において相対湿度70%、温度40の環境下(乾燥過程)でコンクリート円柱内部のひずみが定常状態に達した後、環境湿度を95% R.H.以上に上昇させた(再飽和過程)。

本研究では、乾燥・湿潤の繰り返しを受けるA S R劣化コンクリートの表面ひび割れの進展過程を明らかにするために、乾燥および再飽和の全過程を通しての大型コンクリート円柱の表面からの種々の深さにおける時間ともなう相対湿度とひずみの変化、および表面ひび割れの進展状況を長期間にわたって追跡した。本論文は、

これらの実験結果にもとづいて、特に再飽和過程における表面ひび割れの成長過程およびA S R膨張による内部拘束応力の特徴について詳細に考察したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料, 配合

使用した反応性および非反応性骨材は、それぞれ常願寺川産の砂利、川砂および青梅産砕石、大井川産川砂である。反応性骨材に対して実施した化学法およびモルタルバー法の結果を含めその物性を表-1に示す。反応性骨材コンクリートのA S R膨張を促進するためにセメントの等価Na<sub>2</sub>O量が1.8%になるようにNaOH(1級標準試薬)を添加した。コンクリートの配合を表-2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 <sup>3</sup> , 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 <sup>3</sup> , 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 砕石 (Gmax 20 mm) 表乾密度 2.71 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.44% 大井川産 川砂 表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.42%, FM 2.82

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				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<sup>2</sup>。

\*1 電源開発(株) 火力エンジニアリング部(前技術開発センター茅ヶ崎研究所) (正会員)

\*2 金沢大学名誉教授(名誉会員)

## 2.2 コンクリートバーの自由膨張量試験

マッシュパンのコンクリート体内部のひずみ挙動や表面ひび割れの進展状況を明らかにするためには、そのコンクリートの A S R 膨張の特徴、特に急速な A S R 膨張が始まるまでの期間（潜伏期間）を知る必要がある。本実験では、温度 35 と 40、相対湿度 95%以上、また大型コンクリート円柱の置かれている環境と同条件下（材齢 73 日まで温度 35、相対湿度 60%、その後温度 40、相対湿度 70%）においてコンクリートバー（10cm x 10cm x 40cm）の膨張試験を行った。

## 2.3 大型コンクリート円柱供試体の乾湿くり返し実験

### (1) コンクリート内部の相対湿度およびひずみの測定

図 - 1 に示すように、反応性および非反応性骨材を使用して作製された大型コンクリート円柱の表面からの深さ 1cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 10cm, 20cm の位置に温湿度計およびひずみ計を埋設した<sup>3)</sup>。コンクリート打設後約 24 時間で脱型し、その直後からひずみと相対湿度の測定、表面ひび割れの発生および進展状況の観察を開始した。

### (2) 環境条件の設定

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・湿潤の繰返しを模擬するために、初期の乾燥過程（材齢 73 日まで温度 35、相対湿度 60%、その後温度 40、相対湿度 70%）の後、反応性骨材および非反応性骨材含有コンクリート円柱の環境湿度をそれぞれ材齢 292 日および材齢 643 日において 95% R.H. 以上に上昇させた（再飽和過程）。ここで非反応性骨材含有コンクリート円柱の養生条件が異なるのは、本実験に先立ち相対湿度、ひずみの変化傾向を把握することを目的に事前に行っていたためである。反応性骨材コンクリート円柱におけるひずみおよび湿度の測定は現在も続行しているが、非反応性骨材コンクリート円柱における測定は材齢 971 日で終了した。

### (3) 表面ひび割れ長さおよびひび割れ幅の評価法

乾燥過程開始後材齢 150 日でコンクリート円柱表面に発見された最初のひび割れの最大幅の位置に印を付け、その部分のひび割れ幅の変化を追跡するとともに、

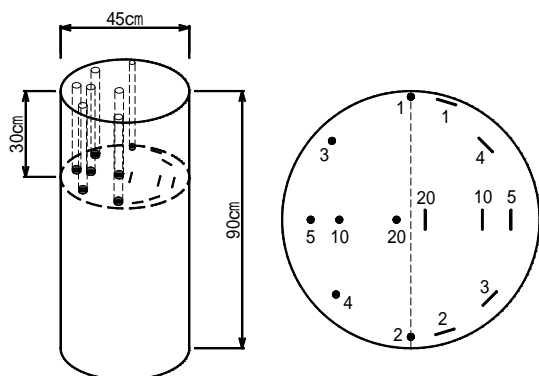


図 - 1 大型供試体中の温湿度計、ひずみ計の埋設位置

1 つのひび割れが枝分かれしたり、または新たに形成されたりしたひび割れ幅も同様に定期的に測定した。

ひび割れ幅は 0.05mm 目盛のクラックスケールを用いて測定し、時間とともに成長するひび割れ長さはコンクリート円柱表面の曲面に沿って測定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 コンクリートバーの自由膨張量試験

図 - 2 は反応性骨材コンクリートバーの 3 種類の環境条件下における膨張ひずみ曲線である。この図に示すように、コンクリート円柱の置かれていた環境と同じ湿度および相対湿度の環境下（材齢 73 日まで; 35、60% R.H., 材齢 73~292 日; 40、70% R.H.）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 乾燥過程におけるコンクリート円柱内部の相対湿度とひずみ

乾燥および再飽和の全過程を通して測定された各深さにおける時間ともなう相対湿度の変化を図 - 3 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急速に低下するが、

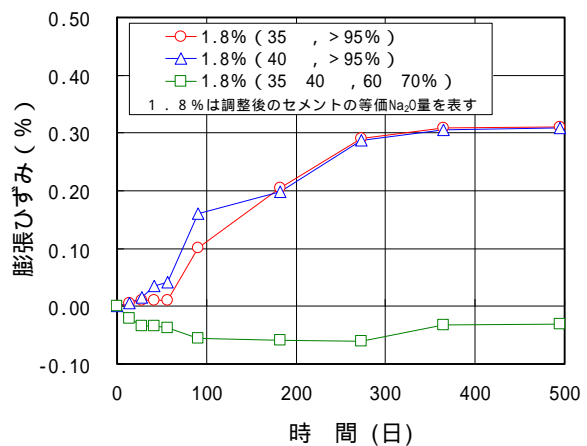


図 - 2 コンクリートバーの膨張ひずみ曲線

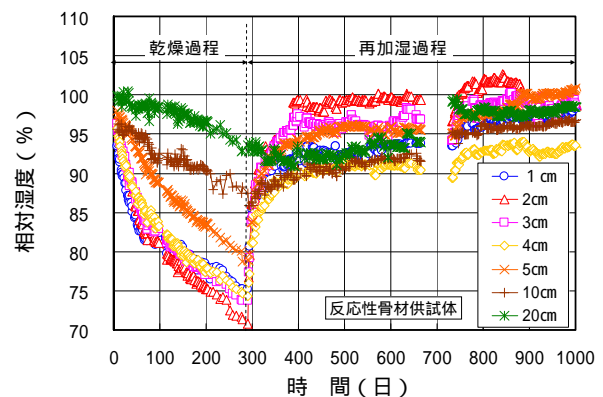


図 - 3 大型コンクリート円柱内部の相対湿度の時間に伴う変化（反応性骨材供試体）

5cm以上の深部では相対湿度の低下速度は小さく、乾燥過程終了時においてもA S R膨張発生限界湿度 80%以上の相対湿度が維持されていることがわかる。

図 - 4 に乾燥・再飽和過程を通しての各深さにおけるひずみ - 時間曲線を示す。この図から、材齢 40~60 日までの初期においては圧縮ひずみが発生するが、その後次第にひずみは引張方向に転換し、引張ひずみは時間とともに増大したことがわかる。このように乾燥過程におけるコンクリート円柱内部のひずみの変化は、本実験において使用した反応性骨材コンクリートの膨張特性（潜伏期間：約 60 日、図 - 2）を反映したものとなっている。

図 - 5 は非反応性骨材コンクリート円柱内部の各深さにおけるひずみ - 時間曲線である。各深さにおいて時間とともに増大する圧縮ひずみ(乾燥収縮ひずみ)は5cmにおいて特に大きいとその原因は不明である。

### 3.3 A S Rのみに起因する補正ひずみ - 時間曲線

コンクリート円柱内部において測定されたひずみは A S R膨張ひずみ、乾燥収縮ひずみおよびクリープを含む内部拘束応力によるひずみから成る。したがって、A S Rのみに起因するひずみは反応性骨材コンクリート

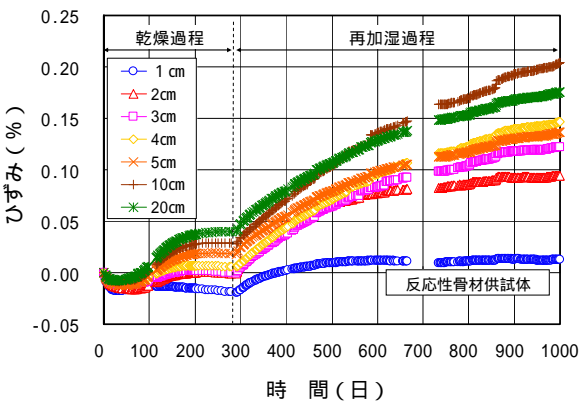


図 - 4 大型コンクリート円柱内部のひずみの時間に伴う変化（反応性骨材供試体）

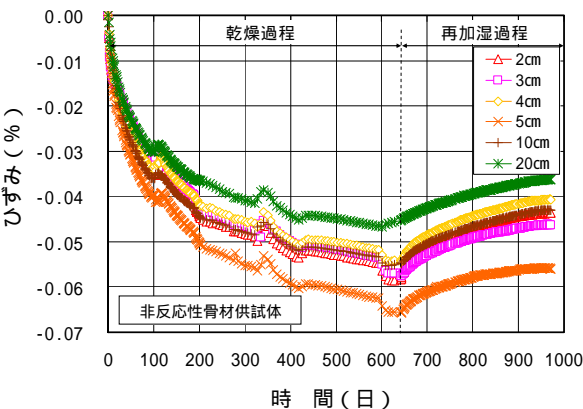


図 - 5 大型コンクリート円柱内部のひずみの時間に伴う変化（非反応性骨材供試体）

円柱において測定されたひずみを非反応性骨材コンクリート円柱内部の相当する位置で測定されたひずみを用いて補正することによって得られる。

図 - 6 は各深さにおける補正ひずみ - 時間曲線を示す。前述のように、反応性および非反応性骨材コンクリート円柱の置かれている環境相対湿度を、それぞれ材齢 292 日および材齢 643 日において 95% R.H. 以上に上昇させた。吸水膨張ひずみは A S R ひずみと比較して十分小さいことから、補正に用いる吸水膨張ひずみは再飽和開始材齢の異なる非反応性骨材コンクリートのひずみを用いることとした。また、再飽和過程開始以後の十分に材齢が経過した時点では吸水に起因するコンクリートの膨潤ひずみの増大はさほど大きくないと考えられるので、非反応性骨材コンクリート円柱の再飽和開始時点から材齢 951 日までの膨張ひずみを用いて再飽和過程の材齢 951 日以後の補正ひずみを求めた。

このようにして得られた補正ひずみは A S R のみによって生じるひずみと考えられるが、図 - 6 に示される補正ひずみ - 時間曲線にはコンクリートバーの膨張曲線（図 - 2）において見られる潜伏期間が存在しない。これは、図 - 2 に示すようにコンクリートは潜伏期間においても 0.02% 程度の膨張が生じていることから考えて、初期でもコンクリート円柱中央部分が膨張し、またそれによって表面近傍に引張ひずみが発生するためと推察される。

図 - 6 に示すように、すべての深さにおける補正ひずみは材齢約 150 日まで時間の経過とともに直線的に増大し、表層部および中央部分の補正ひずみは、それぞれ材齢約 200 日および材齢約 230 日以後停止する。コンクリートバー試験における膨張ひずみは材齢約 270 日まで増大し、5cm、10cm および 20cm 深さにおける相対湿度は A S R 膨張を持続させるに十分高いレベル（84% R.H. ~ 97% R.H. : 図 - 3）が維持されている。したがって、

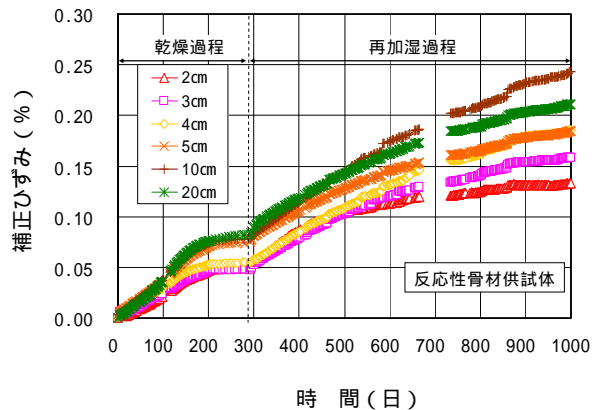


図 - 6 大型コンクリート円柱内部の補正ひずみの時間に伴う変化（反応性骨材供試体）

乾燥過程においてコンクリート円柱内部における補正ひずみが比較的早い時期に潜在膨張ひずみ（約 0.3%）よりはるかに小さい値（0.05%～0.08%）に収束する原因の1つとして、表層部に形成される非膨張層による内部コンクリートの膨張の拘束が考えられる<sup>3)</sup>。また、中央部分（深さ 10cm および 20cm）でも乾燥過程に湿度が多少低下することもコンクリート円柱内部の終局補正ひずみ低下の一因である（図 - 3）。

### 3.4 再飽和過程におけるコンクリート円柱内部の相対湿度とひずみ

図 - 3 に見られるように、再飽和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。環境湿度を急に 95%R.H. 以上に上昇させると（再飽和過程開始）深さ 5cm 以浅の表層部の相対湿度は急速に増大し、約 10 日以内に 80%以上になる。これは乾燥過程において形成されたミクロおよびマクロひび割れ<sup>3)</sup>を通しての水分の移動が表層部における相対湿度を急激に上昇させたものと考えられる。

図 - 3 から、10cm 深さにおける相対湿度は、環境湿度を 95%R.H. 以上に上昇させた直後から時間とともに徐々に増大するが、20cm 深さでは再飽和開始後約 100 日まで相対湿度は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。このように、環境湿度を急に 95%R.H. 以上に上げた場合、コンクリート円柱表面から 10cm 深さまでの相対湿度は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。

再飽和過程の始まりを原点として時間にもなうひずみの変化をプロットとすると図 - 7 および図 - 8 のようになる。

図 - 7 に見られるように、反応性骨材含有コンクリート円柱では環境湿度が 95%R.H. 以上に上昇した直後から 1cm 深さを除いていずれの深さにおける引張ひずみも

急速に増大する。材齢 100 日頃から表面からの深さの相違によるひずみの差異が徐々に大きくなる。しかし、図 - 8 からわかるように、非反応性骨材コンクリート円柱内部において発生する引張ひずみ（膨潤）は反応性骨材コンクリートにくらべて極めて小さい。反応性および非反応性骨材コンクリート円柱内部のひずみ変化を比較すると、反応性骨材コンクリート円柱では環境湿度を 95% R.H. 以上に上昇させた直後から A S R 膨張が開始したことがわかる。再飽和過程においては A S R 膨張やコンクリートの膨潤が始まると同時に乾燥過程にコンクリート円柱内部において生じた内部拘束応力が解放されると推察される。しかし、多くの表面ひび割れが発生したコンクリート円柱において再飽和過程で新たに発生する内部応力について言及することは難しい。

図 - 7 において、再飽和過程開始後の深さ 10cm におけるひずみの増加速度は深さ 20cm のそれよりも大きく、材齢約 75 日で前者のひずみは後者を超える。このことは、再飽和過程開始後間もなくコンクリート円柱の表面と中央部分の中間において周囲よりも大きなひずみを示す円筒状の領域が生じることを示す。深さ 10cm と 20cm におけるこのような特異なひずみ挙動は前述の再飽和過程開始後の両者間の相対湿度変化の相違（図 - 3）に起因すると思われる。これらの結果は、再飽和過程開始後深さによって A S R 膨張量が異なるために新たに内部応力が発生し、応力分布は非常に複雑になることを示唆している。

図 - 7 に示すように、再飽和過程開始後 600 日頃からすべての深さにおけるひずみ - 時間曲線は徐々に水平になり始める。図 - 6 から、反応性骨材コンクリート円柱中央部分の 10cm および 20cm の終局補正ひずみは、それぞれ約 0.24% および約 0.21% である。次節で述べるように、乾燥および再飽和の全過程を通してコンクリート円柱の表面近傍の非膨張層には多数のひび割れが発

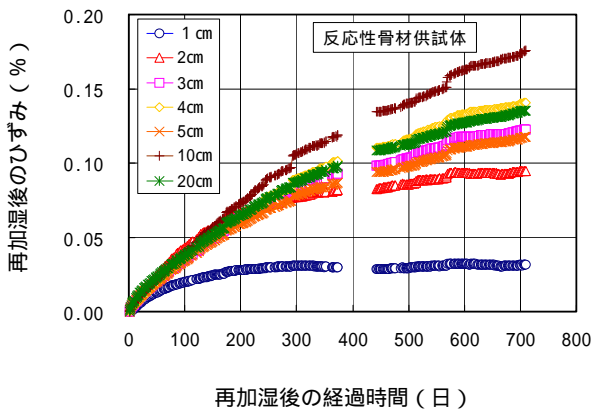


図 - 7 再加湿後の大型コンクリート円柱内部のひずみの時間に伴う変化（反応性骨材供試体）

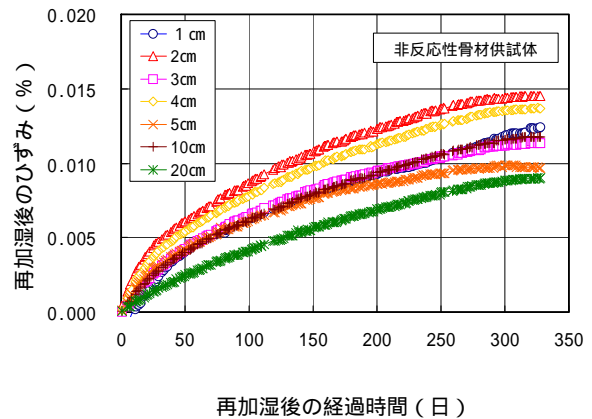


図 - 8 再加湿後の大型コンクリート円柱内部のひずみの時間に伴う変化（非反応性骨材供試体）

生しているが、まだ表層部は内部コンクリートを拘束するのに十分な剛性を保持していると考えられる。したがって、再飽和過程における終局補正ひずみがコンクリー

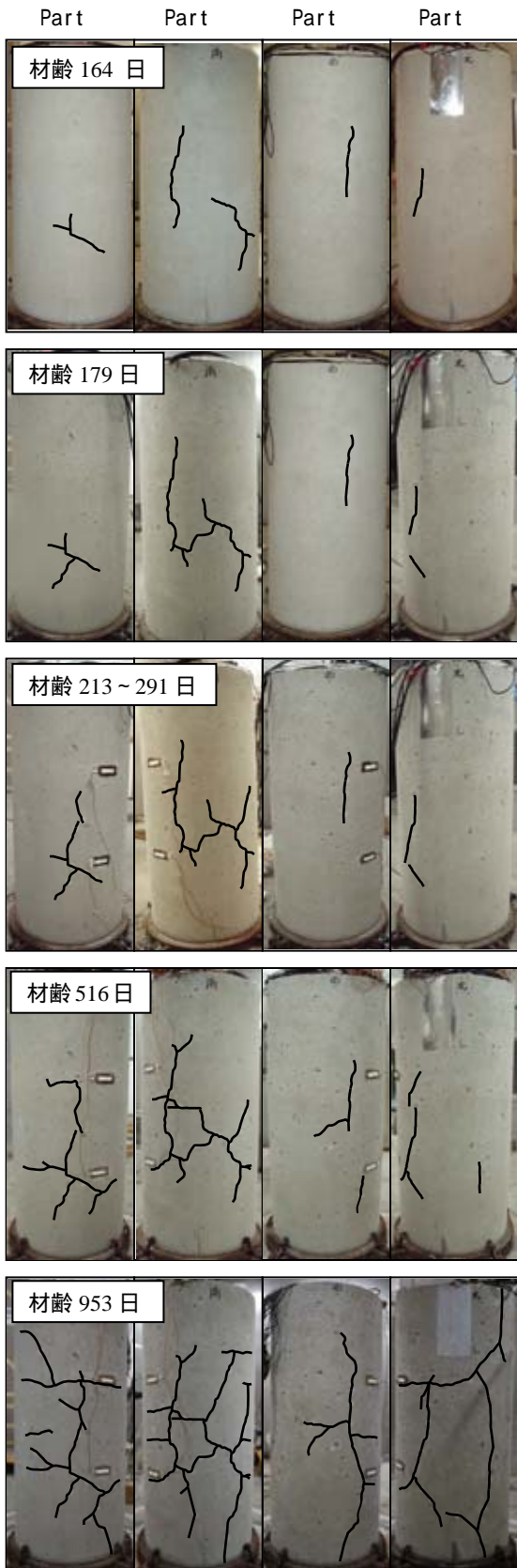


図 - 9 大型コンクリート円柱に発生したひび割れの進展状況

トの潜在膨張量(約0.30%, 図 3 参照)に比べてかなり低いのは表層部による中央部分の膨張の拘束と中央部分の相対湿度の低下の両方に起因すると考えられる。

### 3.5 表面ひび割れ進展の観察

筆者らは、乾燥過程 150 日においてコンクリート円柱表面の 4 箇所に長さ方向に並ぶ傾向をもつひび割れが発生し、それらが亀甲状ひび割れパターンに成長して行く過程を示した<sup>3)</sup>。その後、再飽和過程においてもこれらのひび割れの進展状況を注意深く観察した。ここでは、乾燥および再飽和の全過程を通してコンクリート円柱内部のひずみ挙動と関連づけながら表面ひび割れの成長過程について詳細に考察した結果について述べる。

図 - 9 は材齢 164 日, 179 日, 213~291 日(乾燥過程)および材齢 516 日, 953 日(再飽和過程)の各材齢においてコンクリート円柱の表面ひび割れをトレースした写真である。図 - 9 においてトレースしたひび割れの幅は 0.05mm 以上のものである。これらの図では、ひび割れは時間とともに拡大し、枝分かれして行く様子が示されている。また、乾燥過程において、材齢 213 日以後再飽和過程開始(材齢 291 日)までの間ひび割れの成長が停止している。この期間中すべての深さにおいてコンクリート円柱内部のひずみの変化もないことが図 - 4 からわかる。また、図 - 9 の Part II では、最初別々の位置に独立して生じたひび割れが合体して実際の A S R 劣化コンクリート構造物表面にしばしば見られる亀甲状のひび割れパターンが形成されて行く様子が明確に示されている。

図 - 10 および図 - 11 は乾燥および再飽和過程においてこれら 4 つの各部分において時間ともなうひび割れ幅およびひび割れ密度(1 m<sup>2</sup>あたりのひび割れの総延長)の変化をプロットしたものである。これらの図からも、乾燥過程においてひずみが増大しなくなる材齢 213 日から材齢 291 日までの間ひび割れ幅およびひび割れ密度ともほとんど変化しなくなることがわかる。

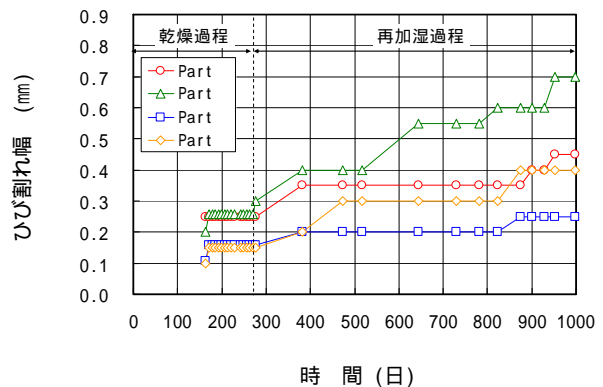


図 - 10 大型コンクリート円柱表面のひび割れ幅の変化

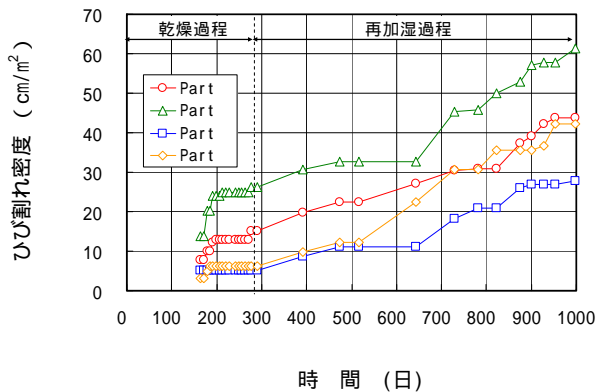


図 - 1 1 大型コンクリート円柱表面のひび密度の変化

図 - 1 0 に示されるように、Part I、II および IV では、再飽和過程開始から少なくとも材齢 950 日までの間 2、3 回、Part II では 4 回、ひび割れ幅が階段状に増大している。このことは、これらの表面ひび割れは再飽和過程において円柱の内部方向にも成長していることを示唆している。また、図 - 1 1 に示されるように、各部分のひび割れ密度も材齢約 950 日まで時間とともに増大し続けている。このように再飽和過程を通してひび割れが成長し続けたという結果から、その期間中表面近傍領域に生じた引張応力が増大し続けたことがわかる。

乾燥・湿潤の繰り返しが A S R 膨張におよぼす影響については、一時的に乾燥状態に置かれた A S R 劣化コンクリートに再び水を供給すると新たに A S R 膨張が生じたという実験結果<sup>4)</sup>や初期段階で乾燥条件下に置かれたモルタルバーをその後 95% R.H. 以上の雰囲気<sup>5)</sup>に曝すと、最初から 95% R.H. 以上の環境湿度条件下に置かれたものよりも大きな膨張を示したという報告<sup>5)</sup>がある。本実験においては、深さ 4 cm 以下の表面近傍の相対湿度は乾燥過程において 70~75% まで低下している<sup>5)</sup>ので、再飽和過程において表面近傍に再び A S R 膨張が発生したか否かを明言できない。しかし、もし表面近傍で A S R 膨張が生じていたとしても、その膨張量は中央部分の膨張量よりも小さいと言える。すなわち、本実験結果は、A S R 劣化コンクリートを一度低い湿度環境 (70~75% R.H.) に曝すと、コンクリートが再び飽和状態になっても元のコンクリートほど大きな A S R 膨張が生じないことを示している。

#### 4. 結論

乾燥および再飽和過程における反応性骨材コンクリート円柱内部のひずみおよび相対湿度の測定から、乾燥過程における初期ひび割れの発生および再飽和過程の

ひび割れの進展は中央部分の A S R 膨張量が表面近傍のそれよりも大きいことによって生じることが明らかになった。

その他得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 環境湿度を急に 95% R.H. 以上に上昇させると深さ 5cm 以下の表層部の相対湿度は急速に増大し、約 10 日以内に 80% 以上になる。乾燥過程において形成されたマイクロおよびマクロひび割れを通しての水分の移動が表層部における相対湿度の上昇を助長したものと考えられる。
- 2) 再飽和過程開始間もなくコンクリート円柱の中央部と表面との中間領域にその周辺部分よりも大きな引張ひずみを示す領域が形成された。
- 3) 再飽和過程においては表面からの深さによって引張ひずみの増大速度は異なる。このことは、再飽和過程では A S R 劣化構造物の内部拘束応力は複雑になることを示唆している。
- 4) 乾燥・再飽和の全過程を通して、表面ひび割れは徐々に拡がり枝分かれするとともに、それらの幅も時間とともに増大した。その結果、最終的にコンクリート円柱全体を覆う亀甲状ひび割れパターンが形成された。

#### 参考文献

- 1) Stark, D., The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity, Proceedings of the 2nd Intl. Conf. on Durability of Concrete, Montreal, Canada, ACI SP-126, pp.973-987, 1991.
- 2) Hobbs, D.W., Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford Ltd, p.183, London, p.183, 1988.
- 3) 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 A S R 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.
- 4) S. Multon, F. Toutlemonde, Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures, J. Cem. Concr. Res. Vol. 40, No.7, pp.924-934, 2010.
- 5) D. Lenzner, V. Ludwig, The alkali aggregate reaction with opaline sand stone from Schleswig-Holstein, Proceedings of 4th International Conference on Effects of Alkalies in Cement and Concrete, Purdue University, U.S.A., pp. 11-34, 1978.