

論文 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひびわれ発生過程の解明

鍵本 広之^{*1}・川村 満紀^{*2}

要旨: 大型コンクリート円柱供試体内部におけるひずみおよび相対湿度の測定結果から、ASR 劣化構造物表面におけるひび割れ発生過程の解明を試みた。温度 40℃、相対湿度 70%の促進環境下におかれた大型コンクリート円柱供試体は、表面部分から徐々に乾燥し、ASR が発生しなくなる限界湿度 80%を下回っても、供試体の中央近傍は高湿度環境下にあるため、ASR 膨張が継続する。その結果、コンクリート体内部にひずみ差が生じ、表面ひび割れが発生することが明らかになった。本研究で得られた実験結果は、表面ひび割れ発生限界膨張ひずみを求める簡易計算法によって求められた推定結果とも極めてよく一致する。

キーワード: ASR, 大型供試体, 湿度, ひずみ, ひび割れ, ひび割れ発生過程, 限界湿度

1. はじめに

自然環境条件下に置かれた反応性骨材コンクリート供試体ではかなり膨張が進行した後表面に巨視ひびわれが発生するが¹⁾、コンクリートの膨張と表面ひびわれの発生過程の関係の詳細はまだ不明である。

コンクリート構造物の表面近傍の相対湿度が 80%以下の部分においては、ASR 膨張は生じないことを示す室内実験結果や実際の ASR 劣化コンクリート構造物内部の相対湿度分布の測定結果^{2, 3)}に基づいて、表面ひびわれ発生限界膨張ひずみを求める簡易計算法が提起されている^{4, 5)}。しかし、自然環境下にあるコンクリート体内部では、ASR 膨張発生開始までの乾燥収縮過程から次第に ASR 膨張過程に移行するので、表面ひびわれ発生までのコンクリート体内部の応力状態は非常に複雑であると推察される。

本研究は、比較的大型のコンクリート円柱(直径 45 cm, 高さ 90 cm) 内部における湿度およびひずみを測定するとともに、表面ひびわれの発生状況を観察することによって、ASR 膨張過程と表面ひびわれ発生との関連を明らかにし、ASR 劣化コンクリート構造物の補修設計や補修技術の向上に役立つ情報を得ることを目的としたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料, 配合

実験に用いるコンクリート供試体を作製するために、反応性骨材として常願寺川産川砂利, 川砂, また非反応性骨材として青梅産砕石, 大井川産川砂を用いた。反応性骨材に対する化学法 (JIS A 1145) およびモルタルバー法 (JIS A 1146) の結果を含め、それぞれの骨材物性を表-1 に示す。

使用したセメントは等価 Na₂O 量 0.53%の普通ポルトランドセメントであり、スランプ値調整のため減水剤を使用した。コンクリートの配合を表-2 に示す。また、反応性骨材を用いたコンクリートには ASR 膨張を促進するためにセメントの等価 Na₂O 量が 1.8%になるように一級標準試薬の NaOH を添加した。

2.2 コンクリートの自由膨張試験

表-1 に示した反応性骨材を用いて作製したコンクリートの自由膨張量を知るために、温度 35℃と 40℃において、相対湿度>95%の環境条件下において、コンクリート直方体 (10 cm×10 cm×40 cm) に対する促進膨張試験を実施した。

温度 20℃, 湿度 60%以上の実験室内で表-2 に示し

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 2.64, 吸水率 1.66% Rc 91 mmol/L, Sc 253 mmol/L, モルタルバー膨張率 0.34 %
	常願寺川産 川砂 表乾密度 2.61, 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 %
非反応性骨材	青梅産 砕石 (Gmax 20 mm) 表乾密度 2.71, 吸水率 0.44% 大井川産 川砂 表乾密度 2.62, 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 ³)			
			W	C	S	G
20	55	45	175	318	833	1,030

注) 上記は反応性骨材を用いたコンクリートの配合であり、非反応性骨材配合は S=836 kg, G=1,057 kg となる。

*1 電源開発(株) 技術開発センター茅ヶ崎研究所 土木基盤研究室 (正会員)

*2 金沢大学名誉教授 (正会員)

た配合のコンクリート（スランプ値 12 cm程度）を型枠に打設し、24 時間後に脱型し、その後促進養生条件下で膨張ひずみを測定した。膨張ひずみの測定は、材齢 2 週、4 週、6 週、8 週、13 週、26 週、35 週において、それ以降は 2 週毎に実施した。

2.3 大型コンクリート円柱供試体の促進膨張試験

(1) 供試体の作製と温湿度計、ひずみ計の埋設

表-2 に示した配合でコンクリートを練混ぜ、直径 45 cm、高さ 90 cm の大型コンクリート円柱供試体を作製した。供試体は反応性骨材と非反応性骨材コンクリート円柱の 2 種類であり、反応性供試体、非反応性供試体作製のため打設したコンクリートのスランプ値、空気量はそれぞれ 9.5 cm、5.3%、13.3 cm、4.7%であった。

供試体の作製においては、高さ 60 cm までの第 1 層を打設した直後に、図-1 に示すように、側表面から 1 cm、2 cm、3 cm、4 cm、5 cm、10 cm、20 cm の各位置にひずみ測定方向が円周の接線方向となるようにひずみ計を埋設した。

次に、埋設したひずみ計の位置が動かないように注意深く第 2 層（高さ 60 cm～90 cm 部分）を打設した後、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 のアクリル棒を図-1 に示した温湿度計埋設位置（ひずみ計埋設位置と同じ 60 cm の高さ：図中黒丸印）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 1 日後に上記アクリル棒を抜き取った。

湿度計はそのまま埋め込むのではなく、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ア

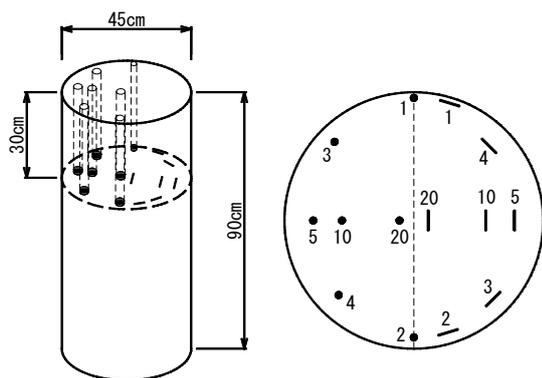


図-1 大型供試体中の温湿度計、ひずみ計の埋設位置



写真-1 埋設した温湿度計ユニットとひずみ計



写真-2 促進養生室内の大型円柱供試体

クリル棒（中央に直径 6 mm の穴を開けたもの）に直径 6 mm の湿度センサーを接着剤で固定した湿度計ユニットを準備しておいた。これらの温湿度計ユニットを、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。なお、図-1 中の太線はひずみ計を、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。

設置したひずみ計は埋設型ひずみ計（標点距離 50 mm、容量 $5,000 \times 10^{-6} \mu \epsilon$ ）、温湿度計は高分子温度センサ（直径 6 mm、温度・湿度測定範囲 $-10 \sim +80^\circ\text{C}$ 、 $20 \sim 95\% \text{rh}$ ）であり（写真-1）、温湿度計は埋設前に温度 35°C 、相対湿度 60% の環境下でキャリブレーションを行った。

また、膨張ひずみおよび圧縮強度測定用供試体として、それぞれ、 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ の直方供試体および $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体を作製した。

(2) 促進膨張試験

促進養生室に設置した大型コンクリート円柱供試体を写真-2 に示す。

温湿度計ユニット埋設後（供試体作製後 1 日）直ちに促進膨張試験を開始した。養生条件は、材齢 73 日まで温度 35°C 、相対湿度 60%、それ以降は温度 40°C 、相対湿度 70% とした。

$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ の直方供試体と $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体は、大型円柱供試体と同環境（温度 $35 \rightarrow 40^\circ\text{C}$ ；相対湿度 $60 \rightarrow 70\%$ ）、相対湿度 $> 95\%$ （温度条件は同じ）のもとで養生し、膨張ひずみと圧縮強度の測定を実施した。膨張量ひずみの測定は、大型コンクリート円柱供試体については 1 日 1 回、 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ の直方供試体については週 1 回を標準とした。また圧縮強度試験は、材齢 7 日、28 日、91 日、180 日において実施した。

大型コンクリート円柱供試体の膨張ひずみ測定と同時に、表面ひび割れ発生の有無を観察し、ひび割れ発生後はそれらの幅、長さを 1 週間に 1 回測定し、それらの進展状況をスケッチした。

3. 結果と考察

3.1 大型コンクリート円柱供試体内部のひずみおよび相対湿度の変化と表面ひび割れ

図-2は、反応性骨材を用いて作製したコンクリート直方体（10 cm×10 cm×40 cm）を温度 35℃および 40℃、相対湿度>95%の環境下に、また大型コンクリート円柱と同環境に置いたときの膨張ひずみ曲線を示したものである。この図から、コンクリート供試体は 40 日において多少膨張し始めるが、急速な ASR 膨張は 60 日以後発生することが分かる。

また、図-2に示されるように、コンクリート円柱供試体と同環境に置かれた直方供試体（10cm×10cm×40cm）のひずみ-時間曲線から、相対湿度(60%→70%)においては、乾燥収縮のみが進行し ASR 膨張が生じていないことがわかる。

反応性骨材を用いて作製したコンクリート円柱の表面からの深さ 1cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 10cm, 20cm の各位置で測定されたひずみおよび相対湿度の時間に伴う変化をプロットすると図-3, 4 のようである。

図-3より明らかなように、深さ 2cm 位置を除いて、各深さにおいて生じる収縮ひずみ（圧縮ひずみ）は、約 40 日まで時間の経過にしたがって増大するが、その後、ひずみ-時間曲線は、多少膨張ひずみ（引張ひずみ）の発生を示すようになる。

深さ 2cm 位置では材齢約 70 日まで収縮ひずみ（圧縮ひずみ）は増大し、その後膨張方向に反転して徐々に膨張ひずみが増大するようになる。

一方相対湿度の測定結果（図-4）については、材齢約 110 日（コンクリート直方体の急速な ASR 膨張開始後約 50 日）でコンクリート円柱の表面から 2cm 位置における測定値は ASR 膨張が生じなくなる限界値 80%に達する。

コンクリート円柱内部においても ASR 膨張が発生しなくなる相対湿度が 80%であるとすると、深さ 2cm 位置に

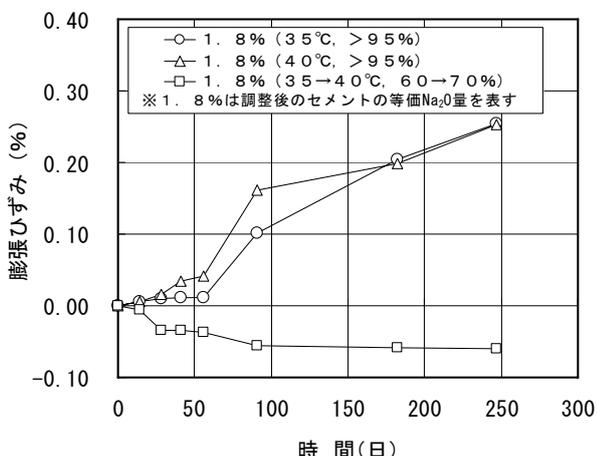


図-2 コンクリート直方供試体の膨張ひずみ曲線

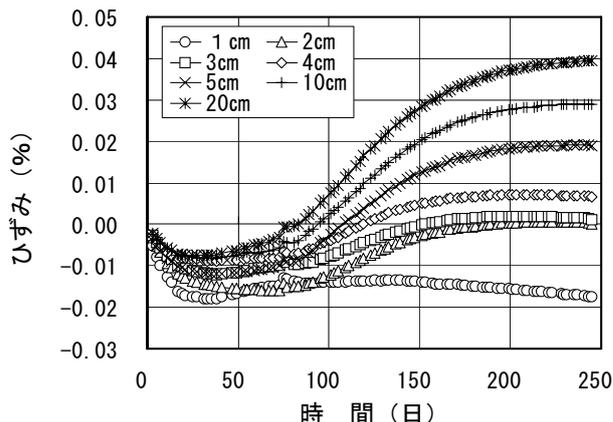


図-3 大型コンクリート円柱内部のひずみの時間に伴う変化

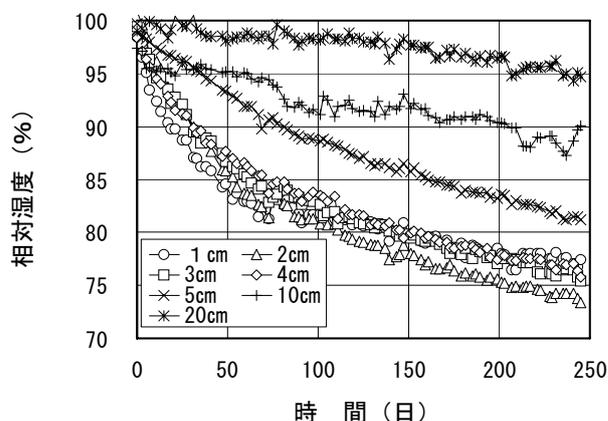


図-4 大型コンクリート円柱内部の相対湿度の時間に伴う変化

において材齢 110 日以後も時間とともに増大する引張ひずみは、その位置より内部で発生する ASR 膨張に起因すると言える。その後、非膨張層フロントは徐々に内部に向かって進行し、材齢 145 日以後、表面から深さ 4cm 以下の部分の相対湿度は 80%以下となる。しかし、図-3に示されるように、深さ 2cm, 3cm, 4cm における材齢 145 日以後の膨張ひずみは依然増加するが、その増加分は小さく、測定ひずみは材齢約 200 日以後ほぼ一定となる。また、深さ 1cm 位置で測定されるひずみは、収縮（圧縮）から膨張（引張）へ反転した後、材齢 140 日あたりまでは多少膨張方向に向うが、その後再び非常にゆるやかに収縮する傾向を示す。この深さ 1 cm における特異なひずみ挙動は、表面に近い部分では乾燥収縮が大きくなることによるものと思われる。

コンクリート円柱内部の各位置において測定される膨張ひずみが、コンクリート自体の ASR 膨張であるか、またはその位置より内部の膨張によって生じる膨張ひ

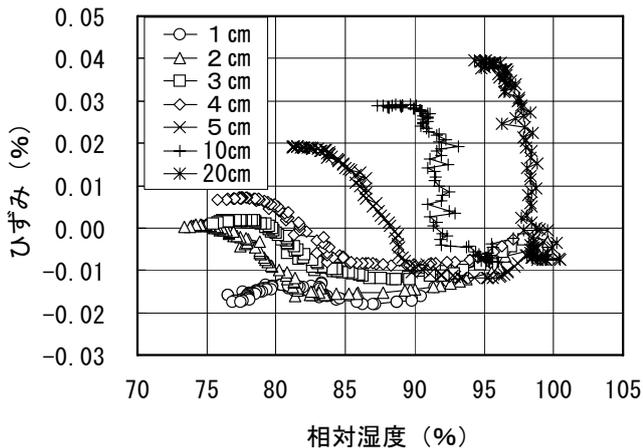


図-5 コンクリート円柱内部のひずみと相対湿度の関係

ひずみのいずれであるかは、相対湿度とひずみの関係をプロットすることによって得られる図-5によってより明確に示される。

この図に示されるように、測定開始以後現在まで相対湿度 80%以上の高湿度下にある深さ 5cm, 10cm, 20cm における膨張ひずみは時間とともに次第に増大している。すなわち、深さ 5cm 以上の中央部分では材齢約 40 日以後 ASR 膨張が持続している(図-2, 3, 4)。

一方、表面から 1cm, 2cm, 3cm, 4cm の各位置では、コンクリートの膨張開始以前(材齢 40 日以前)においては、湿度の低下とともに収縮ひずみ(圧縮ひずみ)が増大しているが、各位置毎に相対湿度(82~86%)の範囲のある湿度から、測定ひずみは膨張の方向に反転し始める。また、特異なひずみ挙動を示す深さ 1cm 位置のひずみを除いて、各位置の膨張ひずみは、相対湿度が 80%以下になっても増大し続けている。特に、深さ 2cm 位置における膨張ひずみは、限界相対湿度 80%以下でも、湿度の低下にもなっただけでかなり大きく増大する。このことから、相対湿度 80%以下で表面から 4cm 以浅の部分において生じる膨張ひずみは円柱の中央部分の膨張に起因することがわかる。また、表面から 4cm 位置における相対湿度は、コンクリート直方体の急速な膨張開始直後(材齢約 65 日)に 85%に達する(図-4)。一般に相対湿度 85%における ASR 膨張量は非常に小さいという事実(例えば文献3)では約 0.0015%)を考慮に入れると、コンクリートの急速な ASR 膨張開始後(約 60 日以後)深さ 4 cm 以浅の表面近傍の膨張ひずみの大部分は、その部分のコンクリート自体の ASR 膨張によるものではなく、内部のより大きな ASR 膨張に起因するものであると言える。

全体として、各位置で測定されるひずみには ASR 膨張ひずみの他、表面からの深さに応じて乾燥収縮ひずみ、乾燥収縮応力や ASR 膨張ひずみ差応力(湿度が高い部分ほど ASR 膨張ひずみが大きいことに起因する応力)によ

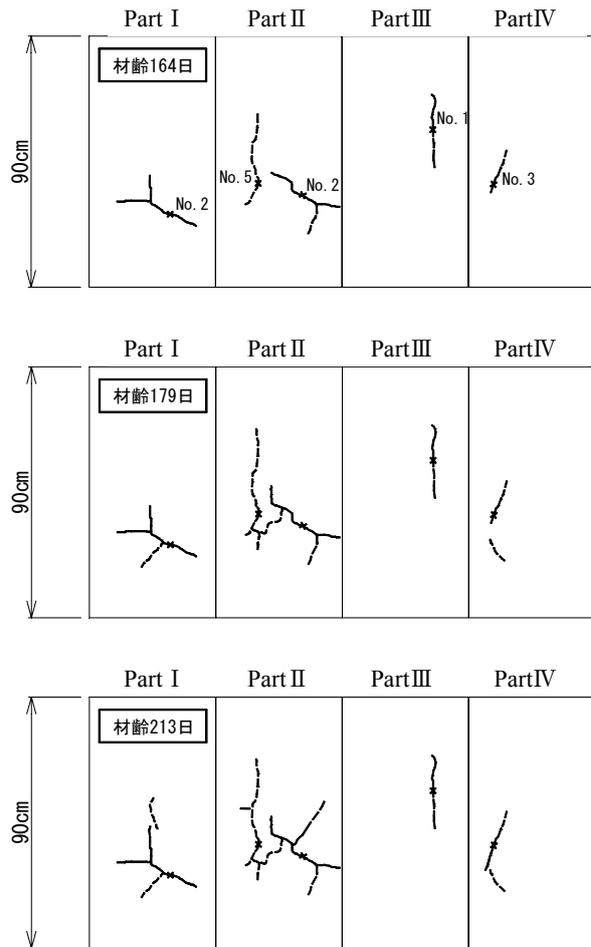


図-6 大型コンクリート円柱に発生したひび割れ

るひずみが含まれる。ただし、乾燥収縮に起因するひずみや応力は ASR 膨張よるものに比べて非常に小さい。

大型コンクリート円柱供試体の促進膨張期間の全期間、内部のひずみおよび相対湿度の測定とともに供試体表面のひび割れ発生の有無とその進行程度を注意深く観察したところ、促進膨張試験開始後 150 日目に、円柱供試体表面の 5 箇所において、ほぼ縦方向にひび割れが発生していることを確認した(ひびわれ幅: 0.1mm)。

図-6 はひび割れ発生から 14 日後の材齢 164 日目、表面から深さ 4 cm および 5 cm までのひずみ変化が落ち着いた 179 日目、材齢 213 日目のひび割れパターンを示す(図-3 参照)。図中の点線部はひび割れ幅が 0.10

表-3 材齢毎のひび割れ幅の進展

(単位: mm)

		材齢 164 日	材齢 179 日	材齢 213 日
I	No.2	0.25	0.25	0.25
	No.2	0.15	0.15	0.25
II	No.5	0.10	0.10	0.20
	No.1	0.10	0.15	0.15
IV	No.3	0.10	0.15	0.15

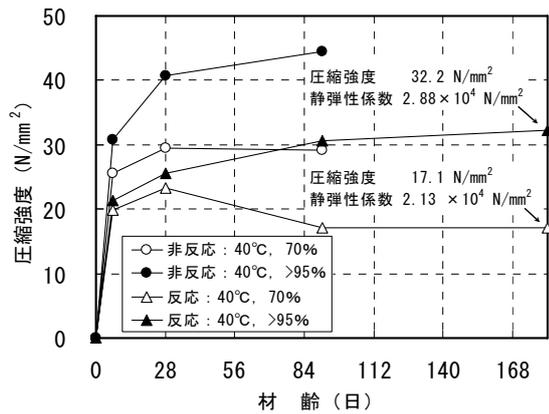


図-7 圧縮強度試験結果

mm未満の部分、実線部は0.10mm以上の部分を示す。

供試体表面に発生するひび割れは、材齢が進むにつれてその数や範囲が拡大し、ひび割れ幅も増大していることがわかる。また、材齢213日以降はひび割れの進展は殆ど見られなかった(図-6, 表-3)。

3.2 コンクリートの圧縮強度

大型コンクリート円柱供試体と同じコンクリートでφ10cm×20cm円柱供試体を作製し、温度40°C、相対湿度>95%、および大型円柱供試体と同環境(温度35→40°C、相対湿度60→70%)で養生した供試体の圧縮強度の変化を図-7に示す。大型円柱供試体と同環境で養生した非反応性供試体の圧縮強度は相対湿度>95%養生のものと比較して、低湿度環境のために圧縮強度は低い。反応性骨材コンクリート供試体も同様の傾向を示すが、非反応性供試体と比較してNaOHの添加の影響のためさらに強度は低い。特に、大型円柱供試体と同環境で養生した反応性骨材コンクリートにおいては、材齢28日と91日の間で強度がかなり低下している。

図-4から、大型コンクリート円柱においては、表面からの深さ1cm~4cm範囲の材齢91日における相対湿度は81%~83%の範囲に達することが分かる。前述のように、この範囲の湿度をもつコンクリートでは僅かなASR膨張が発生する。しかし、一般に、コンクリートの乾燥収縮は容積/表面積比に依存する。φ45cm×90cm、φ10cm×20cmコンクリート円柱および10cm×10cm×40cm直方体の容積/表面積比は、それぞれ、9.0、2.0および2.2である。したがって、図-2に示されるように、相対湿度が60→70%の環境下にあるコンクリート直方供試体は材齢91日で約0.05%だけ収縮するという結果を考慮すると、φ10cm×20cmコンクリート円柱も材齢91日まで収縮していた可能性が高い。相対湿度が60→70%環境で養生した反応性骨材供試体の材齢91日における圧縮強度の低下はASR膨張に起因するものではないようである。

3.3 表面ひび割れ発生限界膨張ひずみと内部応力

表面ひびわれ発生限界膨張量の簡易計算法^{4,5)}では、表面近傍の非膨張層が膨張する中央部分を拘束するときに発生する膨張圧に相当する圧力が非膨張層(円筒)の内面に一様に作用したとき、円筒内面に発生する円周方向の引張応力がコンクリートの引張強度を超えるとときひび割れが発生すると仮定するが、この考え方により実験結果の解釈を試みた。

前述のように、本実験においては、コンクリートの急速なASR膨張開始以後深さ4cm以浅の部分において発生する引張ひずみのほとんどは、5cm以深の部分のASR膨張に起因すると考えられる。そこで、表面近傍の非膨張層の厚さを4cmと仮定して、簡易計算法によって表面ひびわれ発生限界膨張ひずみを計算した。

ひび割れが生じた部分のコンクリート体のひび割れ発生前の圧縮強度を32.2N/mm²(養生条件:温度35→40°C、相対湿度>95%)、引張強度=(1/10)×圧縮強度とすると、表面ひび割れ発生限界膨張ひずみ ϵ_f は式(1)、(2)から求められる⁴⁾(図-8参照)。

$$\sigma_{\theta t} = p_i \{r^2 + (r - \delta)^2\} / \{r^2 - (r - \delta)^2\} \quad (1)$$

$$p_i = \alpha_i \times \epsilon_f \quad (2)$$

ここで、

$\sigma_{\theta t}$: コンクリート体内の円周方向の引張り応力

r : 供試体半径

δ : 非反応層の厚み

p_i : 非膨張層内面に加わる圧力

α_i : 拘束の程度による係数

ϵ_f : 表面ひび割れ発生限界膨張ひずみ

上式により表面ひび割れ発生限界膨張ひずみを計算すると0.16%となった。

図-2に示すように、コンクリート円柱の表面ひびわれ発生時(材齢150日)の温度35°C、40°Cにおけるコンクリート直方体の膨張ひずみの平均値は0.18%であり、簡易計算法によって得られる表面ひびわれ発生限界膨張ひずみの推定値は、表面ひびわれ発生時(材齢150日)におけるコンクリート直方体の膨張ひずみに極めて近い値を示す。

実際の大型コンクリート円柱内部におけるASR膨張ひ

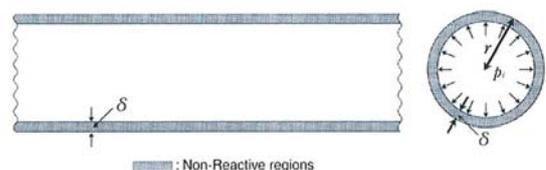


図-8 ASR劣化コンクリート円柱の模式図⁴⁾

表-4 表面ひび割れ発生時における膨張量および
応力の推定値

	ひずみ測定値から の推定値	簡易計算法 推定値
内部応力 (N/mm ²)		
深さ 1 cm	(4.09)	[2.72]
深さ 2 cm	(6.74)	[2.86]
深さ 3 cm	(5.99)	[3.02]
深さ 4 cm	(6.13)	[3.22 (=32.2×1/10)]
ひび割れ発生時の コンクリート直方体の膨張量(%)		
	0.18	[0.16]

注) []内の数字は、表面ひび割れ発生限界膨張量を求める簡易計算法により計算された数字。

()内の数字は、ひずみ測定値とコンクリートの静弾性係数から計算された数字。

ずみ差による応力分布は明確でないが、表面ひびわれ発生時における表面近傍の引張応力領域と内部の圧縮応力領域の境界位置は深さ 4 cm 以上の位置にあると仮定して、深さ 1 cm から 4 cm の位置で測定されたひずみに基づき円周方向の引張応力を計算した。

表面ひびわれ発生時(材齢 150 日)において反応性骨材大型円柱供試体内部の各位置で測定されたひずみを非反応性骨材大型供試体内部のひずみ(乾燥収縮ひずみ)で補正し、材齢 180 日におけるφ10cm×20cm 円柱供試体に対して得られた静弾性係数(図-7)を用いて表面からの深さ 4 cm までの各位置における応力を計算した結果を表-4に示す。

非膨張層-膨張層境界における引張応力がコンクリートの引張強度 3.22 N/mm²に達するとき、円筒内部に加わる膨張圧は 0.62 N/mm²となるが、これが非膨張層(円筒)内面に一様に作用したと仮定して、簡易計算法^{4, 5)}により各位置における引張応力を求めた結果を表-4に示す。深さ 4 cm 位置において、ひずみ測定値から求めた応力は 6.13 N/mm²であり、簡易計算法^{4, 5)}による推定値の約 2 倍となる。両者間に大きな差が生じる原因の 1 つとして、測定ひずみから応力を求める計算においてコンクリートのクリープおよび ASR 膨張ひずみの影響が考慮に入れられていないことが考えられる。

深さ 1 cm と 4 cm 位置における測定値と推定値の引張応力比は、それぞれ 0.67 と 0.85 であり、両者間の差はあまり大きくない。ただし、表-4において、測定ひずみから求めた応力(測定値)は、表面からの深さ 2 cm において最大(6.74 N/mm²)となっている。この事が、深さ 2 cm までの非膨張層は表面ひびわれ発生時(材齢 150 日)よりかなり以前(材齢約 110 日)に形成されることに関係するか、または単なる測定誤差によるかは不

明である。

4. 結論

本研究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) 温度 35→40℃, 相対湿度 60→70%の環境条件に曝された大型コンクリート円柱では、材齢約 110 日において(コンクリート直方体の急速な膨張開始後約 50 日)、表面から深さ約 2 cm 以下の部分は限界相対湿度 80%に達し、材齢約 145 日において、表面から 4 cm 深さまでの非膨張層(相対湿度 80%以下の部分)が形成される。
- (2) 大型コンクリート円柱供試体の表面から 4 cm まで非膨張層が形成された頃でも、円柱内部のコンクリートの ASR 膨張程度は依然大きく非膨張層を内部から押し広げるような力がはたらき、コンクリート表面層にひび割れが発生する。その後時間を経るにつれ表面ひび割れは多少拡大するが、コンクリート内部の膨張が落ちついた材齢 213 日頃にはひび割れの進展も収束する。
- (3) 表面ひびわれ発生時(材齢 150 日)における非膨張層厚さは 4 cm であると仮定して、簡易計算法^{4, 5)}によって表面ひびわれ発生限界膨張量を計算すると、材齢 150 日におけるコンクリート直方体の自由膨張量に極めて近い値が得られた。

参考文献

- 1) Grattan-Bellew, P.E., Evaluation of Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity, Proc. the 6th Intl. Conf. on Alkalies in Cement, Copenhagen, pp. 303~314., 1983.
- 2) Stark, D., The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity, Proc. the 2nd Intl. Conf. on Durability of Concrete (ACI SP-126), Montreal, pp. 973~987, 1991.
- 3) Lenzner, D. and Ludwig, V., The Alkali Aggregate Reaction with Opaline Sand Stone from Schleswig-Holstein, Proc. the 4th Intl. Conf. on Effects of Alkalies in Cement and Concrete, pp. 11~34, 1978.
- 4) Kawamura, M., Estimation of Critical Free Expansions Related to Surface Cracking in ASR-Affected Concretes, Cement and Composites, Vol. 29, No. 4, pp. 324~329, 2007.
- 5) 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物の耐久性力学・耐久性力学WG 報告書, pp. 171~173, 2007