

内外に温度差を受けるコンクリート製円筒のひびわれ特性

CRACK CHARACTERISTICS OF CONCRETE CYLINDERS UNDER TEMPERATURE GRADIENTS

秋田 宏*・山信田正美**・尾坂 芳夫***

By Hiroshi AKITA, Masami YAMASHIDA and Yoshio OZAKA

Plain concrete cylinders were subjected to the temperature gradients from inside to outside surface. The gradients were gradually increased with time. In order to investigate the cracking behaviour of the cylinders, acoustic emission count, outside surface strain and crack formation process were observed. The temperature gradients corresponding to crack formation were larger than the predicted one from elastic solution. The results obtained from finite element analysis suggest that the above behaviour is mainly affected by stress relaxation and Young's modulus descent. In almost of all cases, the twin cracks on opposite side of the cylinder were found. The formation process of the twin cracks can be partially explained from the calculated distributions of stress and displacement.

Keywords: concrete cylinder, temperature gradient, crack formation, acoustic emission, finite element method

1. ま え が き

貯蔵タンク、消化槽、原子炉の格納容器・圧力容器等の円筒形構造物は、内外に温度差を受け温度応力を生じる¹⁾。これらの温度応力は、弾性理論により容易に求められるが²⁾、弾性理論で求めた曲げ応力がコンクリートの曲げ強度に達すると、ひびわれが発生するのかどうかは、必ずしも明らかではない。たとえば、猪俣は温度応力はクリープにより1/2に減少するとの考え方を示し³⁾、Clarkは実験により80%の減少が認められたと報告している⁴⁾。ただし、森本らが指摘しているように⁵⁾、温度応力に対しては、クリープとして扱うよりも、リラクセーションとして扱う方が合理的であると考えられるため、本稿でも以下リラクセーションとして扱う。

また、実際に円筒の内外に温度差を与えた実験でも、青柳らは31°C程度の温度差でひびわれが開始されたと報告しており⁶⁾、Castellaniらは47°Cで最初のひびわれが認められたと報告している⁷⁾。もちろん、これらの実験では、供試体の寸法やコンクリートの強度、温度上昇の

速度や乾燥の程度に違いがあり、単に数値を比較するだけでは不十分であるが、この種の研究が少なく、温度応力によるひびわれ特性について、未解明な部分が多いのが実状である。

本研究は、温度応力によるひびわれ特性に関する基礎資料を得るため、小型のコンクリート製円筒を対象として、実験的ならびに解析的に調べたものである。実験は、円筒内外の温度差を徐々に増やしながらひびわれを発生させ、AE(アコースティック・エミッション)⁸⁾の発生数とひずみの計測および目視による観察を行った。すなわち、本研究の特色は、

- ① ひびわれ検知のモニターとしてAE発生数の測定結果を利用したこと
- ② ひずみゲージ接着時の乾燥の影響を調べたこと
- ③ 内部温度の上昇速度を変え、リラクセーションの影響を調べたこと

などである。それらの測定結果および実験後のひびわれ観察結果をもとに、さらに有限要素法により温度解析や弾性解析・リラクセーション解析を行い、ひびわれの発生挙動について検討した。

2. 実験方法

供試体は無筋の円筒で、寸法を内径24 cm、外径36 cm、高さ20 cmの1種類としたが、材料は、普通コンク

* 正会員 工修 東北工業大学教授 工学部土木工学科
(〒982 仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

** ビーエス・コンクリート(株)仙台支店工務部
(〒980 仙台市青葉区一番町 2-1-1)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

表-1 使用コンクリートの配合

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					セメント C	水 W	細骨材 s	粗骨材 G	混和剤
普通コンクリート	20	9	43.0	42.0	365	157	734	1106	1.46(ホソリス)
軽量コンクリート	15	9	41.0	42.0	383	157	726	634	0.96(ホソリス)

表-2 各材料の物性

	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	ヤング率 ($\times 10^4$ MPa)	ポアソン比 (1)	熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度 ($\times 10^3$ kg/m ³)	比熱 ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	線膨張率 ($\times 10^{-6}K^{-1}$)
普通コンクリート	54	6.2	3.7	0.20	1.34	2.44	1.05	11.4
軽量コンクリート	40	4.6	2.4	0.21	0.96	1.89	1.05	10.9
モルタル	61	6.4	3.2	0.23	-	2.22	-	14.7
セメントペースト	50	6.8	2.8	0.26	-	2.15	-	22.6

リート、メサライトを用いた軽量コンクリート、モルタルおよびセメントペーストの4種類で計24体とした。すなわち、ひびわれのような破壊挙動に対しては、複合材料としてのコンクリートの性質が影響してくると思われるため、材料による差を調べることを重視したものである。使用コンクリートの配合は表-1のようであり、モルタルは細骨材、セメント、水の比が10:5:2であり、セメントペーストは水セメント比で30%である。供試体は、脱型から実験開始までの3か月間以上、養生槽にそのまま保存した。

実験に先だてて試験により求めた各材料の物性は、表-2のようである。ここで曲げ強度は、はりの高さを円筒の厚さに等しくした11×6×40cmの供試体で、3等分点載荷(4点曲げ)により求めた。この曲げ試験用供試体は、JISの寸法から外れているが、円筒供試体に近い応力状態で試験することを重視したものである。熱伝導率は、平板比較法により試験し⁹⁾、必要な補正を行っている。また、セメントペーストの線膨張率が他に比べて大きい¹⁰⁾、文献等に報告されている程度である¹⁰⁾。モルタルとセメントペーストについては、熱伝導率と比熱の試験は行わなかった。

実験装置は図-1であり、目視によりひびわれを観察するために透明な容器を用い、円筒の上下を発泡スチロールで断熱して上下方向の温度変化を小さくした。円筒の内側はラボスターラーで攪拌しながら、デジタルプログラム調節計で温度制御したパイプヒーターにより加熱した。当該調節計は、0.1°C単位での制御が可能なので、本実験の所要精度では滑らかな温度上昇ができる。外側は、4台の水中ポンプにより攪拌し、投げ込み式冷却機とセンシティブリレーで制御したパイプヒーターにより一定温度に保った。温度測定は、内外の水温のみとしたが、内外の水を十分攪拌しているため、水とコンクリート表面の温度差が、十分小さいと考えられるからで

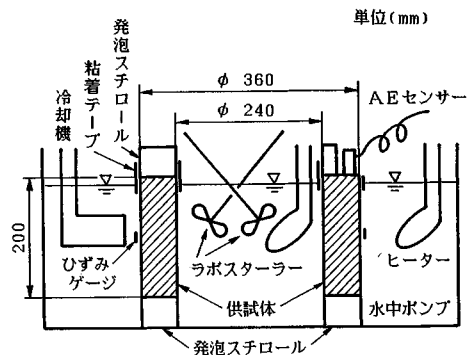


図-1 実験装置

ある。

AE発生数の測定における機器の設定は表-3によった。ここで、ディスクリベルとは、ハイレベルを越えローレベルを下まわるまでを1AE波と認定するためのしきい値である。

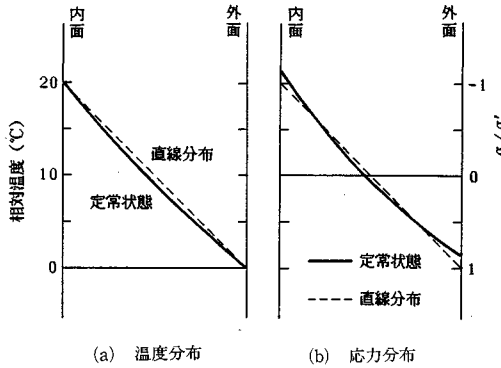
ひずみ測定はゲージ長7cmのひずみゲージを用い、水との絶縁が必要な部分には1液型シリコンゴムを塗った。ひずみゲージを接着する過程で、必然的にある程度の乾燥を伴うが、乾燥が曲げ強度に大きな影響を与えることは良く知られている。そこで、以下の3ケースについて実験した。ケース1は、接着のために室内(気温20±3°C、相対湿度65~75%)において10数時間乾燥させ、ケース2は乾燥を3時間に限定し、ゲージ接着後は湿布で覆い乾燥の進行を小さくした。ケース3はひずみ測定を行わず、実験直前まで供試体を水中に保存した。

3. 温度分布および応力分布

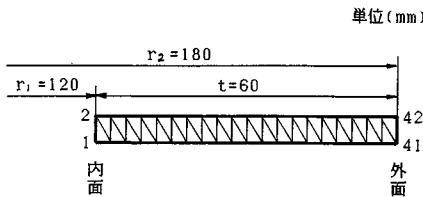
リラクセーションの影響を調べるため、円筒内側の温度を上げる速さを、1°C/10分、1°C/20分の2種類と定めた。そこで、温度を上げる速さの差が、どの程度厚さ

表一3 AE装置の設定

ディスクリ ハイレベル (mV)	ディスクリ ローレベル (mV)	ゲイン (dB)	デッドタイム (ms)	ハイパス フィルター (MHz)	ローパス フィルター (MHz)
150	100	60	0.3	0.1	1.0



図一2 断面内の温度および応力分布



図一3 温度および応力解析用計算モデル

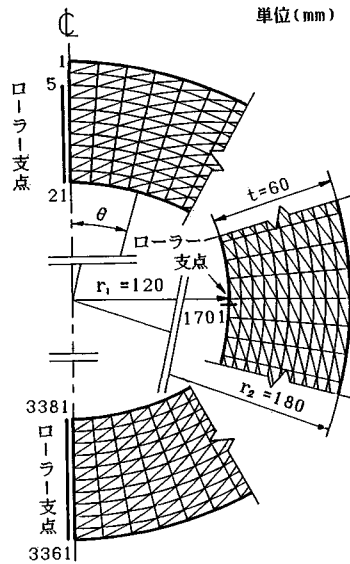
方向の温度分布に影響するのかを調べてみた。

最初に、普通コンクリート供試体に関し円筒の内側が外側に対し 20℃ 高い定常状態について求めてみる。定常状態における円筒の温度分布は解析的に求めることができ¹¹⁾、

$$T = T_1 - (T_1 - T_2) \cdot \frac{\ln r/r_1}{\ln r_2/r_1} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。ここに、 r 、 r_1 、 r_2 は任意の位置および円筒の内外面に対応する半径、 T 、 T_1 、 T_2 は r 、 r_1 、 r_2 に対応する温度である。これは、図一2 (a) に実線で示したように、この寸法に関してはほぼ直線分布に近く、厚さの中心での温度のずれが約 1℃ である。

内側の温度を一定速度で上げてゆく場合については、有限要素法により、図一3の軸対称三角形要素モデルを用いて計算した¹²⁾。必要な物性値は表一2を用い、時間積分は完全陰解法、時間きざみを 30 秒とした。内外表面の温度を直線で結んだ温度分布からのずれは、中央面において 1℃/10 分では 2.8℃、1℃/20 分では 1.4℃ である。図には示さないが、軽量コンクリートの場合も、熱



図一4 応力解析用計算モデル

伝導率には差があるにもかかわらず、温度分布では普通コンクリートとの差が、厚さの中央面でわずかに 0.05℃ であった。

上記の温度分布に対応する応力分布を求めるために、三角形 6 節点要素による図一4の計算モデルを用いた。このモデルは、後にひびわれ発生後の応力や変位分布を計算するのが主目的であるが、境界条件を変えるだけで済むのでここでも用いたものである。結果は図一2 (b) に示すように、温度および応力の直線分布を仮定した簡易計算によるものとかかりかけはなれている。簡易計算による外縁の引張応力 σ' は、

$$\sigma' = \frac{1}{2} \alpha (T_1 - T_2) E \dots\dots\dots (2)$$

で求められ、図には σ' に対する比で表わしてある。ここで、 α 、 E はそれぞれ線膨張率、ヤング率を表わす。特に、簡易計算に比べひびわれ発生に関係の深い外表面の引張応力が小さくなることは重要で、 σ' との差は定常状態および 1℃/10 分に対してそれぞれ 13.3%、21.0% にも達する。したがって、後に行うひびわれ開始温度差の計算には、式(2)ではなくこのモデルによる計算結果を用いる。

4. リラクセーション解析

リラクセーション関数には双曲線形の実験式

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A+C(t-\tau)}{A+(t-\tau)} = R(t, \tau) \dots\dots\dots (3)$$

を用いる。ここで、 t ：時間、 τ ：載荷時の t 、 A, C ：定数、 σ_t ： t における応力、 σ_i ：載荷時の応力である。定数 A, C を森本らの実験式により¹³⁾、本実験の平均材令90日に対して求めると、引張については、

$$A=0.32, C=0.85 \dots\dots\dots (4)$$

圧縮については、

$$A=7.43, C=0.72 \dots\dots\dots (5)$$

となる。ただし、本実験では円筒内側の温度が最高で90°C近くまで上昇するため、リラクセーションに対する温度の影響を考慮する必要があると考えられる。リラクセーションについて温度の影響を調べた例が見当たらないが、クリープについては20~80°Cまでに2.5~6倍になるとの報告があるので4倍を採用し¹⁴⁾、全ひずみに対するクリープひずみの割合が応力緩和量に比例すると仮定して、次のように逆算で求めた。すなわち、定数 C が最終緩和量に対応するので、引張りリラクセーションを例に取れば、20°Cの C は0.85であり、逆算してクリープひずみは0.18となる。80°Cでこの4倍とすれば、全ひずみ1.72に対する C は0.58となる。同様に圧縮では C が0.39となる。これらを用いたリラクセーション関数を24時間に対して図示すれば、図-5のようになる。なお、20~90°Cの範囲は直線補間により用いた。

ここで、圧縮と引張で応力-ひずみ関係が異なるため、異方性材料として扱う必要がある。軸対称問題については、主応力の方向が θ 方向であるため、応力緩和マトリックスは¹⁵⁾、

$$[D_r] = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu-2\nu^2n)} \times \begin{bmatrix} 1-\nu^2n & \nu(1+\nu n) & \nu(1+\nu) & 0 \\ & 1-\nu^2n & \nu(1+\nu) & 0 \\ & & (1-\nu^2)/n & 0 \\ \text{Sym.} & & & \frac{1-\nu-2\nu^2n}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで、 ν ：ポアソン比、 n ： $R(t, \tau)$ の θ 方向に対する z 方向および r 方向の比である。これを用い履歴理論による応力-ひずみ関係は⁹⁾、

$$\{\sigma\} = [D_r] \int_0^t R(t, \tau) \frac{\partial \{\epsilon\}}{\partial \tau} d\tau \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。

5. 累積AE発生数とひずみ測定結果

図-6は、ケース3で温度上昇速度1°C/10分の場合について、4種類の材料に関し累積AE発生数の時間的変化を示したものであり、他の温度上昇速度とも共通にするために、内外温度差に対して表わしてある。AE発生総数は、材料により大きな差がみられるが、他のケース・温度上昇速度では大小の順序が逆転する場合もあり¹⁶⁾、必ずしも固定的なものと考えすることはできない。

累積AE発生数が階段状に増加している部分が目立つことは、温度差を与えた場合の大きな特徴である。この傾向は、圧縮試験や曲げ試験のように、最初微増し破壊間近で急増するのはまったく異なっている¹⁷⁾。しかし、累積AE発生数の増加が階段状になることは、温度応力の性質からうなづけるところである。すなわち、高温の内側コンクリート部は熱膨張により、外側コンクリート部を伸ばして引張応力を与え、その反作用として圧縮応力を受ける。ここで、外側コンクリート部にマイクロ

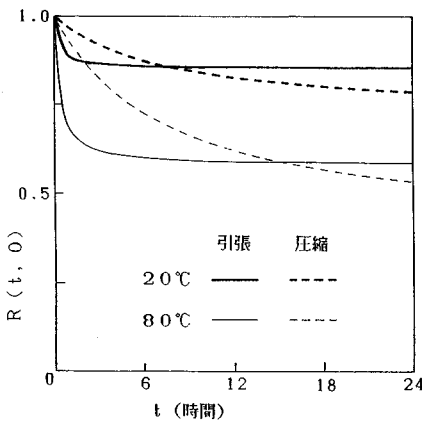


図-5 リラクセーション関数

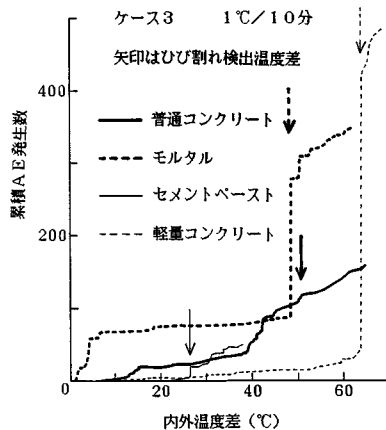


図-6 累積AE発生数

ラックが発生すれば、外側コンクリートの引張応力が減少し、結果として内側コンクリートの圧縮応力も低下する。したがって、一連のマイクロクラックが発生し温度応力が低下すると、さらに内外温度差が増加し温度応力が大きくなるまでは、次のマイクロクラックしたがってAEの発生が起らない。これが、累積AE発生数が階段状に変化する理由だと思われる。

図-6の矢印は、目視観察によるひびわれ検出温度差である。セメントペーストの場合は、音をたてて一気にひびわれが貫通破断したため、AE発生数急増期と目視検出の時期が一致する。また、軽量コンクリートとモルタルでは、AE急増期とひびわれ検出時期が一致しているが、普通コンクリートはわずかな増加と対応しているだけである。ただし、この傾向も材料に固有のものとはいいがたく、他のケース・温度上昇速度では異なる場合もあるので、むしろ供試体の差ではないかと思われる。

図-7~9は、それぞれケース2におけるモルタル、普通コンクリート、軽量コンクリート供試体に関し、ひずみ変化と累積AE発生数とを対比させたものである。ここで、ひずみは円周上に等間隔に設けた4測点のうち、特徴的な2点を示した。モルタルと軽量コンクリート供試体では、目視によるひびわれ検出時期が、ひずみの急変、AE発生数の急増期と良く一致していることがわかる。一方、普通コンクリート供試体では、内外温度差46℃付近で測点1のひずみが急増しているが、温度差66.8℃(表-4)までは、目視によるひびわれ検出ができず、AE発生数もこのとき急激に増えている。この例では、ちょうど測点1をひびわれが通っており、ひびわれを含んだ状態でゲージ長間の平均ひずみとして観測された最終値が 1.6×10^{-3} であった。

これらの図中には、図-3と同形の応力解析用有限要素

モデルにより、弾性解析で求めたひずみも対比させてある。ここで、境界条件は底面をローラー支持とし、物性値は表-2を用い、3.で行った温度解析結果を用いて温度ひずみを与えた。ひびわれ検出温度差近傍では、実測ひずみはいずれも弾性解よりも40~60%小さいことが認められる。ひずみの実測値が小さいことが、ひずみゲージの接着不良によるものではないと判断できる理由が2つある。1つは図-8に現われているように、ちょうどひずみゲージの位置にひびわれが生じた供試体が2例あり、いずれも平均的なひずみで 1×10^{-3} を越える値まで観測されていることである。もう1つは、ひびわれを生じる限界のひずみとして、青柳らは類似の実験で 1×10^{-4} 程度を報告しており、Evansらは直接引張試験で 1×10^{-4} から 2×10^{-4} の範囲を報告しているが、本実験においても後者と同様の範囲にばらついていることであ

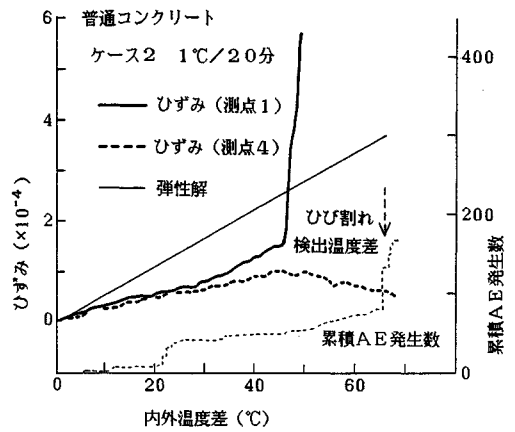


図-8 ひずみ変化とAE発生数の対比(2)

289

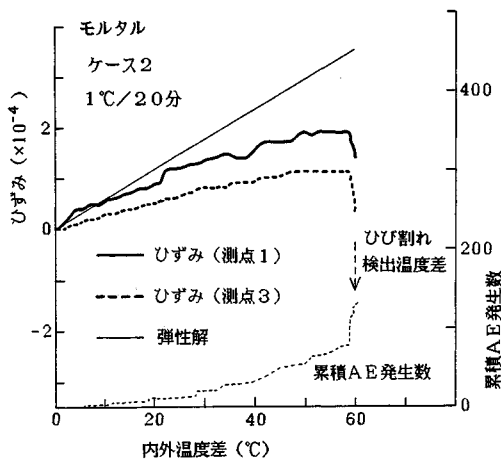


図-7 ひずみ変化とAE発生数の対比(1)

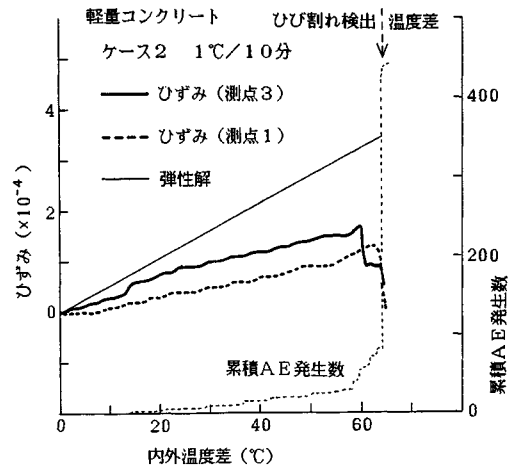


図-9 ひずみ変化とAE発生数の対比(3)

表-4 ひびわれ検出温度差(°C)

		1°C/10分	1°C/20分
普通コンクリート	弾性解	33.2	32.6
	ケース1	46.5	43.4
	ケース2	58.7	66.8
	ケース3	51.0	68.3
軽量コンクリート	弾性解	39.8	39.0
	ケース1	55.9	58.0
	ケース2	64.0	71.9
	ケース3	64.3	79.3
モルタル	弾性解	30.9	30.3
	ケース1	50.0	45.2
	ケース2	47.0	60.0
	ケース3	49.3	53.7
セメントペースト	弾性解	24.3	23.9
	ケース1	13.0	7.3
	ケース2	31.9	25.9
	ケース3	26.0	25.0

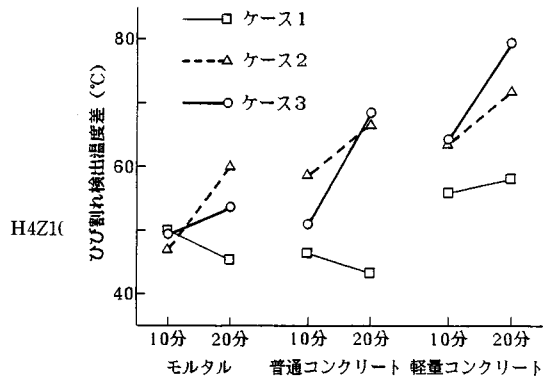


図-10 ひびわれ検出温度差の比較

る。したがって、接着不良が原因で実測ひずみが小さくなったものではないと考えられる。

6. ひびわれ観察結果

実験中のひびわれ発生状況では、セメントペースト供試体はいずれも音をたてて一気に貫通破断しており、以後は温度差の増加につれて破断部の開口幅が増加するだけであった。他の材料では、ほぼ軸対称な位置(円筒の軸を中心として180°回転した位置、ただし実際には160°から180°の範囲でばらついている)に2本のひびわれがみられた。ひびわれ発生時の検出は目視のみでは困難であり、累積AE発生数やひずみの変動を手がかりとして検出するのが普通であった。セメントペースト供試体ではひびわれが急激に進行し、モルタルやコンクリート供試体で安定成長することは、Moavenzadehらがノッチつきはりの曲げ試験で得た結果と共通である¹⁸⁾。

表-4にひびわれ検出温度差をまとめて示してある。ここで、弾性解とは3.の結果をもとに温度分布・応力分布の直線分布との差を考慮して算出した、外縁の引張応力が曲げ強度に達する温度差である。弾性解であるにもかかわらず、温度上昇速度に応じて若干差があるのは、温度分布に違いがあるためである。実験結果は弾性解に比べ、ケース1でもかなり大きく、ケース2・3ではさらに大きくなり温度上昇速度が小さくなるに従い一層大きくなっている。ひびわれ検出温度差が特に小さいセメントペースト供試体を除いて、これらの関係を図-10に示した。ここで、10分、20分とは温度上昇速度1°C/10分、1°C/20分を意味する。ケース2・3において、いずれも温度上昇速度が小さくなるにつれてひびわれ検出温度差が大きくなるのは、リラクゼーションが起こっているためだと思われる。この傾向がケース1では明瞭でなく、かつひびわれ検出温度差も小さくなっているのは、乾燥により生じた初期応力の影響だと思われる。セメン

トペーストは特に乾燥の影響を受けやすいことが知られているが、実際ケース1では極端に小さな温度差でひびわれている(表-4)。本実験の結果からは、乾燥の影響が現われる時間の限界を知ることはできないが、ケース2と3で明瞭な差がみられないことから、3時間以内の乾燥であればその影響が無視できることが知られる。

ひびわれ検出温度差について既往の実験結果と比較すると、ケース1はCastellaniらと近い値を示している⁷⁾。そのままの数値では青柳らの結果とかなりかけはなれているが⁸⁾、円筒の厚さの差が6:50であるため、曲げ強度に及ぼす寸法効果を考慮すると本実験は1.5倍に相当し^{19),20)}、ケース1はほぼ近い値を与えていることになる。

実験終了後のひびわれ観察では、乾いた状態では検出が困難であり、供試体が濡れた状態から乾燥する過程でやっと検出できる程度であった。これから、内外温度差によりコンクリート製円筒に生じたひびわれは、温度差が取り除かれるとほぼ完全に閉じることがわかる。ただし、本実験は水中で行っているため、乾燥を伴う場合はこの限りではない。ひびわれは円筒の軸にほぼ平行な面であり、普通コンクリートだけは外表面側が複雑に屈曲しているのが特徴である。

セメントペースト以外の供試体に生じた2本のひびわれは、ひびわれ自体は貫通していないが、破壊進行領域(Fracture process zone)²¹⁾は内表面まで到達したものと考えられる。なぜならば、供試体は2つに分かれることなく円筒を保っているが、普通コンクリート供試体を除いては円筒内表面にまでひびわれが検出されたためである。ただし、その場合もひびわれが断面の全周にわたって確認されたわけではない。また、普通コンクリート供試体でも、外表面のひびわれの裏側に当たる内表面だけが、幅約3cmにわたり乾燥が遅れることが認められている。さらに、供試体を割って調べた際もひびわれ断面全体が濡れており、ところどころに濡れない部分が島の

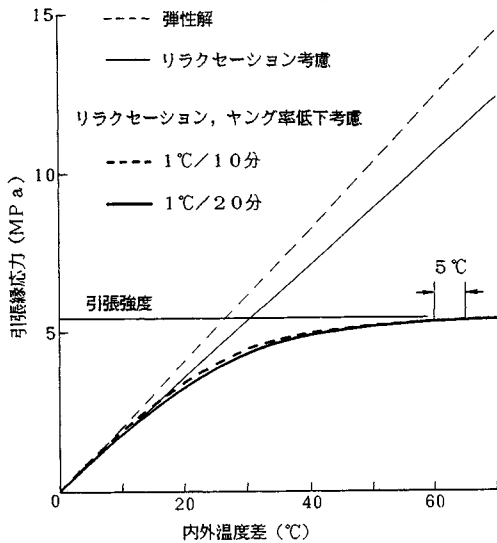


図-11 引張縁応力の計算値

ように点在している状態であった。

温度上昇速度によりひびわれ開始温度差が変わることが、リラクセーションの影響かどうかを確認するために、4.の解析手法により、図-3のモデルでリラクセーション解析を行った。その結果を、普通コンクリートの引張縁応力について示せば、図-11のようになる。リラクセーションによる応力低下は、ひびわれ開始温度差付近では16%程度であり、温度上昇速度による差が小さいため、図では両者を区別していない。すなわち、単にリラクセーションを考慮するだけでは、温度上昇速度によりひびわれ開始温度差が変わることが説明できない。そこで、試算として引張過程におけるヤング率低下を考慮してみた。

Evansらは直接引張試験において、ひずみ軟化領域まで含めた応力-ひずみ(平均的な)曲線を求めており²²⁾、破壊力学的考察では最大応力(引張強度:本稿では圧縮強度の1/10と仮定)以降の曲線が重要となる²³⁾。ここでは、最大応力までの曲線を使うため、これらの文献を参考にして、

$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = \sin\left(\frac{\pi \epsilon}{2 \epsilon_u}\right) \dots\dots\dots (8)$$

と仮定する。これから $E = d\sigma/d\epsilon$ を求め ϵ/ϵ_u を消去すれば、

$$E = E_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^2} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここで、 σ_u :引張強度、 ϵ_u :引張強度に対応するひずみ、 E_0 : $\sigma=0$ でのヤング率である。ただし、式(9)において σ が σ_u に達した後は $E=0$ として、引張塑性

を考慮するものとする。

リラクセーションとヤング率低下を同時に考慮した計算値が図-11に示してあるが、この結果では σ が σ_u に漸近するだけであり、ひびわれ開始温度差を定めることができない。しかしながら、 σ が σ_u に近づいたときの同一 σ に対する、温度上昇速度に応じた内外温度差の相対的な差は、ひびわれ開始温度差の相対的な差に対応するものと思われる。この計算では、ほぼ5°Cの相対的な差がみられる程度で、図-10では10~20°Cの相対的な差が観測されており、両者に隔たりはあるが、定性的な傾向は示し得たものと思われる。

ヤング率が低下することは、解析上ひずみが増加することであるが、それはマイクロクラックなどによる変形を含めた平均的なひずみである。実際には、それらのマイクロクラックがひずみゲージの位置から外れていれば、ひずみの低下として観測されることになる。しかし、そのために図-3~5にみられるように、実測ひずみが弾性ひずみの1/2あるいはそれ以下まで低下するかどうかは明らかではない。

ひずみ低下の原因を探るために、リラクセーション以外の物性についても温度依存性の影響を調べてみた。本実験の温度範囲では線膨張係数の変動が小さいこと、ポアソン比の影響は小さいと思われること、熱伝導率は適当な資料がないことから考慮していない。ヤング率については、20~100°Cまでに20%程度減少するとの報告があるので、これを考慮して計算した結果、引張ひずみに対して最大5%程度の減少が認められた。したがって、実測ひずみが小さくなることに対して、供試体の物性値の温度依存性も原因の1つではあるが、それだけでは十分説明できないことも知られる。

7. 対クラック発生メカニズム

セメントペースト供試体を除いては、ほとんどがほぼ軸対称な位置に2本のひびわれ(以下対クラックとよぶ)が生じた。この実験結果は、同じ無筋の円筒に対するものでありながら、Castellaniらの3本生じたとする報告と異なっている⁶⁾。しかし、本実験の条件では対クラックが生じる可能性が大きいことは、ひびわれが生じた状態での円筒の応力分布・変位分布からある程度推定できる。

円筒にひびわれが生じた状態での応力分布や変位分布を知るために、図-4のモデルを用いて計算した。ひびわれ面が平面であると仮定し、最初のひびわれに着目すると、対称性から全体の1/2を取りだしてモデル化すれば良い。ひびわれが生じた場合の境界条件は、対称軸上の支点を取り去ることにより実現でき、図-4は節点5までひびわれが進展した場合を示している。さらに、図-12のように等間隔な複数のひびわれが生じた状態を

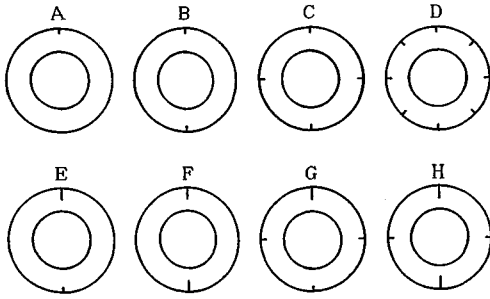


図-12 解析対象ひびわれ状態

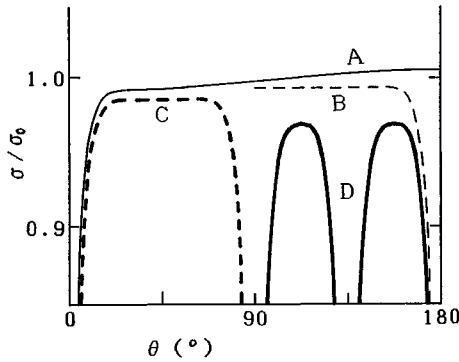


図-13 外縁の応力分布(1)

想定した計算も行った。その場合、対称軸上にないひびわれについては、同一座標をもち相互に連結されていない、2つの節点を用いてモデル化した。

ひびわれが生じた状態の応力解析等を、弾性連続体力学で扱う場合には、ひびわれ先端での集中応力が無限大となる²⁴⁾。しかし、現実にはひびわれに先行して破壊進行領域が形成されてひずみ軟化が起こるため、引張強度以上の応力が生じることはない。ここでの計算は弾性連続体力学によっており、ひびわれ先端に先行して生じる破壊進行領域の存在を考慮していないため十分ではないが、ひびわれの先端から遠い外縁の応力や変位を問題とするので、差し支えないものと思われる。

図-13は、ひびわれが発生した場合の外縁の引張応力 σ の円周方向分布を、ひびわれがない場合の縁応力 σ_0 に対する比で表わしたものである。浅いひびわれ($d/h=0.1$ 、 d はひびわれ深さ、 h は円筒の厚さ)を対象に、ひびわれ分布A~D(図-12)に関して示したもので、A以外は対称性から半分のみ描いてある。

内外温度差が大きくなって、ひびわれ開始温度差に達すると、外縁の最も弱い部分に最初のひびわれが生じAの状態となる。セメントペースト供試体では、単独のひびわれが進行して破断するが、コンクリートやモルタル

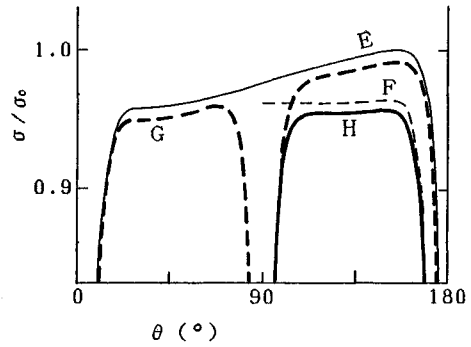


図-14 外縁の応力分布(2)

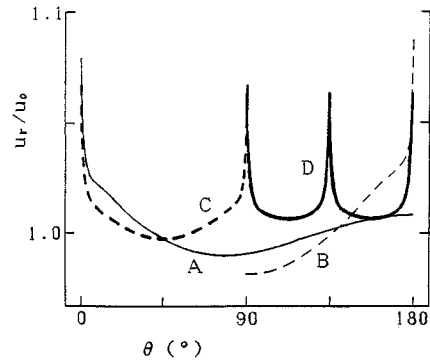


図-15 外縁の変位分布

では骨材のクラックアレスト効果により途中で止まる^{18),25)}。このことは、コンクリートのような複合材料のひびわれ挙動が、連続体(セメントペーストを一例と考える)と本質的に異なることを、端的に示すものと思われる。そのひびわれが浅い場合には、図-13のAから知られるように、ひびわれの反対側の縁応力は、わずかではあるがひびわれ以前よりも大きくなる。しかも、図には示していないが、最初のひびわれが深くなるにつれ、反対側の縁応力はさらに大きくなるのである。これは、対クラックが発生しやすいことを意味する。

図-14は、すでに浅いひびわれがある状態で、やや深いひびわれ($d/h=0.2$ ただし図-12には誇張して描いてある)が生じた場合E~Hについて示したものである。この図でEとGの状態を比較するとわかるように、最初のひびわれから測った90°の方向にひびわれがあるなしにかかわらず、最初のひびわれが少し深くなると、反対側の縁応力が相対的に大きくなる。これは、対クラックがともに進行しやすいことを示唆する。しかも、対クラックが発生した場合、F、Hにみられるように、90°の位置で縁応力が大きくなることはない。

図-15は、半径方向の変位 u を外表面に沿って示した

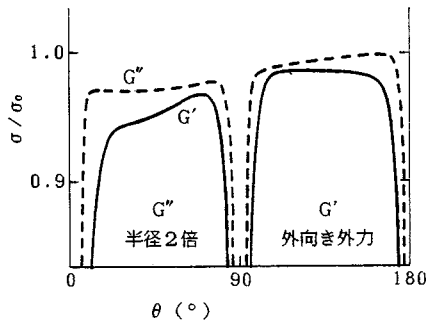


図-16 外縁の応力分布(3)

もので、ひびわれのない状態での変位 u_0 に対する比で表わしてある。対クラックが生じた場合には B から知られるように、対クラックから 90° の位置の半径方向変位は、ひびわれ以前より小さくなる。これは、円筒が楕円筒に近づく変形、すなわち変形が対クラック近傍に集中し、他の部分の変形が緩和されることを示す。したがって、対クラックはそれ自体発生しやすく、ひとたび対クラックが発生すれば、以後は対クラックのみが進行し、他のひびわれはあったとしてもそれ以上には進行しないことが示唆される。

図-16 の G' は、図-12 の G のひびわれ状態で、浅いひびわれ3か所の半径方向変位を等しくするように、やや深いひびわれから 90° の位置に外向きの力を加えた状態の応力分布である。すなわち、円筒が底版などの拘束により、楕円筒に近づく変形が妨げられると、やや深いひびわれから 90° の近傍で縁応力が大きくなることを示している。したがって、円筒が楕円筒に近づく変形が妨げられた場合は、むしろ3本あるいはそれ以上のひびわれが生じる可能性がある。

また、図-16 の G'' は同じひびわれ状態で円筒の厚さの中心で測った半径を2倍に、すなわち $r_1=27\text{ cm}$ 、 $r_2=33\text{ cm}$ とした場合の応力分布である。これは、図-14 の G の応力分布と同様であり、このような応力分布が本実験の供試体寸法に固有のものではないことを示している。すなわち、対クラックが本実験の供試体寸法に、特有の現象ではないことが知られる。

8. あとがき

内外に温度差を受けるコンクリート製円筒のひびわれ特性を調べるために、AE発生数とひずみの測定および目視観察を行い、有限要素法による弾性解析およびリラクセーション解析結果と照らし合わせて検討した。ここで行った実験では、供試体は無筋の円筒であり寸法は外径36 cm、内径24 cmの1種類であるが、材料、乾燥状態、温度上昇速度を変えて計24体の円筒について調べ、

ひびわれ挙動についていくつかの有益な資料を得ることができた。本研究から得られた結果は以下のようである。

(1) セメントペースト供試体は、1つのひびわれが一気に貫通破断し、コンクリートやモルタル供試体と際違った違いがみられた。

(2) コンクリートやモルタル供試体では、ほぼ軸対称な位置に2本のひびわれが発生し、ひびわれ自体は貫通してはなくても、破壊進行領域は貫通しているものと思われる。

(3) 底面から拘束を受けないコンクリート製円筒には、軸対称な位置に2本のひびわれが発生しやすいことが、ひびわれを生じた円筒の応力分布・変位分布からある程度推定できる。

(4) 内外温度差によりコンクリート製円筒に生じたひびわれは、温度差が取り除かれればほぼ完全に閉じ、ひびわれの検出が困難となる。ただし、乾燥を伴った場合はこの限りではない。

(5) ひびわれ検出温度差に及ぼす乾燥の影響は顕著であるが、乾燥が3時間以内ならば、無乾燥のものと同様な差が認められなかった。

(6) 乾燥を伴わないまたは乾燥が3時間以内の供試体では、内外温度差の増加速度が小さくなるとひびわれ検出温度差が大きくなるのが認められた。これは、リラクセーションが起こっているためと考えられ、リラクセーションとヤング率低下を考慮した解析によっても、そのような傾向が示唆される。

(7) ひびわれ検出温度差は弾性理論で曲げ強度から定まる値よりも1.6~2倍大きかった。

(8) ひびわれ検出温度差を直接比較すると従来の報告よりも大きい値が得られたが、寸法の差および曲げ試験における寸法効果を考慮すると、10数時間乾燥させた供試体に関してはほぼ近い値となる。

参考文献

- 1) 荒川敏雄・斎藤雄三・林 三雄：プレストレストコンクリート円形構造物，プレストレストコンクリート，Vol. 31, No. 1, pp.19~25, 1989.
- 2) 秋田 宏・尾坂芳夫：PC貯水タンクの温度応力に関する一考察，土木学会論文集，No.372, pp.93~100, 1986.
- 3) 猪俣俊司：プレストレストコンクリート製容器，F.K.K. 技術資料，No. 7, 1976.
- 4) Clark, J.L.: Concrete cylinders under cyclic temperature gradients, CEB Bull., No. 154, pp.239~251, 1982.
- 5) 森本博昭・小柳 治：マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析に関する研究，土木学会論文集，No. 402, pp.125~134, 1989.
- 6) 青柳征夫・大沼博志：温度勾配による鉄筋コンクリート中空円筒のひびわれ性状，セメント技術年報，Vol.30, pp. 476~479, 1976.

- 7) Castellani, A. and Fontana, A.: Thermal cracking in reinforced concrete containment structures, 3rd Int. Conf. Struc. Mech. Reactor Tech., J 3/2, 1975.
- 8) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論，森北出版，1988.
- 9) 秋田 宏・尾坂芳夫：コンクリートの熱物性および熱物性試験に関する一考察，土木学会論文集，No.384, pp. 119~127, 1987.
- 10) 岩崎訓明・西林新蔵・青柳征夫：フレッシュコンクリート・硬化コンクリート，新体系土木工学 29, 技報堂出版，1981.
- 11) 北山直方：図解伝熱工学の学び方，オーム社，1982.
- 12) 矢川元基・宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985.
- 13) 森本博昭・平田正成・小柳 洽：若材令コンクリートのリラクゼーション特性とその評価法に関する研究，土木学会論文集，No.396, pp.59~68, 1988.
- 14) Schneider, U. (森永 繁 監訳)：コンクリートの熱的性質，技報堂出版，1983.
- 15) Zienkiewicz, O.C. (吉識雅夫・山田嘉昭 監訳)：基礎工学におけるマトリックス有限要素法，培風館，1975.
- 16) 秋田 宏・山信田正美・尾坂芳夫：内外に温度差を受ける円筒のひびわれ実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No. 2, pp.391~396, 1988.
- 17) 富士 岳：コンクリート中の AE の挙動，非破壊検査，Vol.34, No.10, pp.736~742, 1985.
- 18) Moavenzadeh, F. and Kuguel, R.: Fracture of concrete, J. Materials, Vol. 4, No. 3, pp.497~519, 1969.
- 19) 谷川恭雄ほか：構造材料実験法，森北出版，1980.
- 20) セメント協会コンクリート専門委員会：コンクリートの曲げ強度試験における供試体の寸法および載荷方法，セメント・コンクリート，No.311, pp.41~49, 1973.
- 21) 三橋博三：コンクリートの破壊力学の現状と展望，コンクリート工学，Vol.25, No. 2, pp.14~25, 1987.
- 22) Evans, R.H. and Marathe, M.S.: Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension, *Materiaux et Constructions*, Vol. 1, No. 1, pp.61~64, 1968.
- 23) Petersson, P.E.: Crack growth and development of fracture zone in plain concrete and similar materials, Report TVBM-1006, Lund Inst. of Tech., Sweden, 1981.
- 24) 岡村弘之：線形破壊力学入門，破壊力学と材料強度講座 1, 培風館，1976.
- 25) 大岸佐吉・小野博宣：コンクリートおよび繊維補強モルタルの破壊力学特性値 (G_{IC} , G_F) に及ぼす試験要因の影響，コンクリート工学，Vol.26, No. 2, pp.103~118, 1988.

(1990.2.23・受付)