

論文

[1069] 内外に温度差を受ける円筒のひびわれ実験

正会員 ○ 秋田 宏 (東北工業大学 工学部)
 山信田正美 (ビーエスコンクリート (株) 仙台支店)
 正会員 尾坂 芳夫 (東北大学 工学部)

1. はじめに

PCタンクのような円筒形構造物が、内外に温度差を受ける場合の温度応力は、境界条件が明瞭であるため弾性理論により容易に求められる。しかし、弾性理論で求めた引っ張り応力が、コンクリートの引っ張り強度に達すると、ひび割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、温度応力はクリープにより1/2に減少するとの考え方もあり¹⁾、80%の減少が認められたとの実験報告もある²⁾。また、円筒の内外に温度差を与えた実験でも、31℃程度の温度差でひび割れが開始されたとの報告もあれば³⁾、47℃で最初のひび割れが認められたとの報告もある²⁾。

本稿は、温度応力によるひび割れの特性を、実験的ならびに解析的に調べたものの報告である。実験は、小型のコンクリート製円筒供試体の、内外温度差を徐々に増やしながらかひび割れを発生させ、AEの発生数やひずみの計測を行った。それらの測定結果及び実験後のひび割れ観察結果を基に、さらに有限要素法によりひび割れ時の応力分布を計算し、ひび割れの特性について検討した。

2. 供試体および実験装置

供試体は、内径 24cm，外径 36cm，高さ 20cm の円筒で、普通コンクリート製およびメサライトを用いた軽量コンクリート製の2種類とし、それぞれ無筋で3体を作成した。使用コンクリートの配合および試験により求めた物性は、それぞれ表-1，表-2のようである。

実験装置は図-1であり、円筒の内側は水中ポンプで攪はんしながら、センシティブリレーで温度制御したパイプヒーターにより加熱した。外側は、2台のラボポンプおよび2台の水中ポンプにより攪はんし、冷却機とパイプヒーターにより一定温度に保った。内側の温度上昇は、人手によりセンシティブリレーの指示針を、ケース1では5分、ケース2では10分、ケース3では30分毎に1℃ずつ上げることにより行った。ただし、ケース3では内外温度差10℃を出発点とし30分に1℃ずつ上げた。温度測定は、内外の水温のみとしたが、内外の水を十分攪はんしているため、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ある。また、AE発生数の測定における機器の設定は表-3によったが、ここでディスクリレベルとは、ハイレベルを越えた時からローレベルを下まわるまでを1つのAE波と認定するための限界を表わしている。

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 (%)	単用量 (kg/ml)				混和剤
					セメント C	水 W	細骨材 s	粗骨材 G	
普通コンクリート	20	9	43.0	42.0	365	157	734	1106	1.46 (ボゾリス)
軽量コンクリート	15	9	41.0	42.0	383	157	726	634	0.96 (ボゾリス)

表-2 使用コンクリートの物性

	圧縮強度 (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 (kg/m^3)	比熱 ($KJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	線膨張率 (K^{-1})
普通コンクリート	54	3.7	0.20	1.34	2440	1.05	13.6×10^{-6}
軽量コンクリート	40	1.8	0.21	0.83	1890	1.05	14.5×10^{-6}

表-3 AE計測時の設定

ディסק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 (MHz)	ローパス フィルタ (MHz)
300	200	70	0.3	0.1	1.0

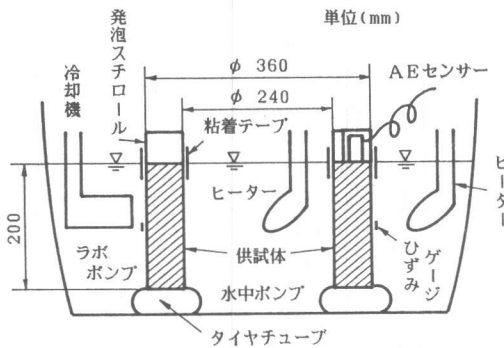


図-1 実験装置

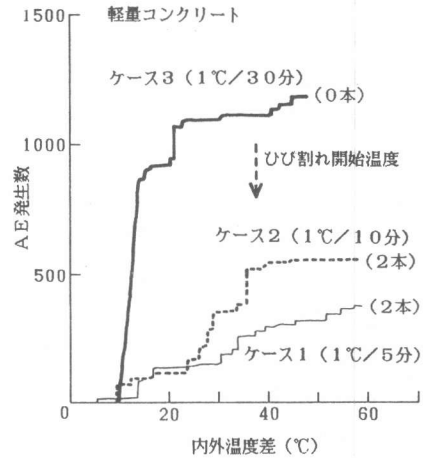


図-2 軽量コンクリートのAE発生数

3. AE発生数とひずみ測定結果

図-2は、軽量コンクリート供試体について、ケース1、ケース2、ケース3におけるAE発生数の変化を内外温度差に対して、またかつこ内には最終的なひび割れ本数を示してある。AE発生数が階段状に増加していることが特徴であるが、温度上昇時とAE増加時とは対応していないので、温度上昇が階段状であることが原因で、AE発生数が階段状になったものとは思われない。この階段状に増加する傾向は、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⁴⁾。

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が膨張し、外側コンクリート部を伸ばして引張り応力を与え、その反作用として圧縮力を受ける。ここで、外側コンクリート部にひび割れあるいは微小破壊が発生すれば、外側コンクリートの引張り応力が減少し、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、一度ひび割れあるいは微小破壊が発生し温度応力が低下すると、さらに内外温度差が大きくなって温度応力が大きくなるまでは、ひび割れの進展あるいはAEの発生が起こらない。これが、AE発生数が階段状に変化する理由だと思われる。

図-2の矢印は、弾性理論による簡易計算で求めた、ひび割れ開始温度差である。すなわち、温度およびひずみを厚さ方向に直線分布とし、クリープを無視し、引張り強度を圧縮強度の1/10として、外縁の引張り応力が引張り強度に達する温度差である。これは、

$$\Delta T = \frac{2\sigma}{\alpha E}$$

ここで、 ΔT ：温度差、 σ ：引張り強度
 α ：線膨張率、 E ：ヤング率

を用い、表-2の物性値を代入すれば良い。AEは上記の計算値よりもかなり低い温度差から発生し始めており、ケース2ではそれに近い温度差でAE発生数が急激に増えているが、ケース1およびケース3ではまったく関連が見られない。また、内外温度差の増加がゆっくりになるに従い、AE発生数が増える傾向にあるが、この原因の1つにデッドタイムの影響が考えられる。

デッドタイムとは、発生したAE波が境界で反射して何度もカウントされるのを避けるために、1つのAE波を捕らえた後一定時間ノーカウントにする、その時間長のことである。ところが、このデッドタイムは1つのAEを2重に数えない反面、その間に発生した新しいAEをも無視してしまう。したがって、AE発生数が急激に増える部分の勾配(図上では垂直に見えるが、ある勾配を持っていなければカウントできない)が、もし内外温度差の増加速度に比例するならば、増加速度が遅いほど無視されるAEが少ないことになる。すなわち、見かけ上は内外温度差をゆっくり上げるほど、検出されるAE発生数が多い結果となるのである。

図-3は、普通コンクリートにおけるケース1、ケース2、ケース3の比較である。ただし、ケース3は1度36℃までの内外温度差を与え、1カ月後に再実験した結果である。したがって、ケース3でAE発生総数がケース2よりも小さいのは、そのためだと思われる。簡易計算によるひび割れ開始温度差との関係は、ケース3ではそれらしいものが見られ、ケース1およびケース2ではみられない。なお、全ケースともほぼ30℃の温度差でAEが急増しており、これは青柳³⁾らが報告しているひび割れ開始温度差と良く一致している。

図-4は、ケース2の軽量コンクリートで、ひずみ変化と温度差およびAE発生数との対応を示したものである。ひずみは測点1と2について示したが、両者は内外温度差15℃までは似たような変動をしている。その後、 100×10^{-6} 程度かけ離れた値になっていること、圧縮ひずみが観測されていることの原因は定かではないが、実験後測点2の近くにひび割れが認められたことも1つの理由であろう。図の直線は、内外温度差と外縁のひずみの関係を、簡易計算により求めたもので、ひび割れ開始温度まで示してある。測点1のひずみ変化は、部分的に簡易計算による値に沿っており、AE発生数が増え始めた25℃前後で、それよりも低下しているのが認められる。これは、AE発生数が急激に増えるところでひび割れが生じることを示唆するが、簡易計算によるひび割れ開始温度差よりもかなり低い値となっている。

4. ひび割れ観察結果

実験終了後ひび割れを観察したが、乾いた状態では検出が困難であり、供試体を濡らし表面が乾燥する過程でやっと検出可能であった。ひび割れは円筒の軸にほぼ平行な面であり、表-4にまとめたが1本または軸対称な位置(円筒の中心を軸として180°回転した位置)に2本見られた。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割れは、温度差が取り除かれるとほぼ完全に閉じること、ほぼ軸対称な位置に2本のひび割れが発生し易いことがわかった。

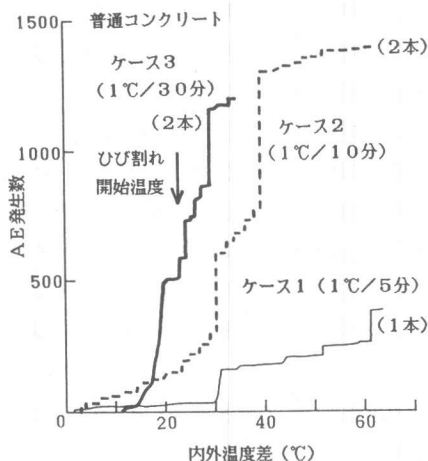


図-3 普通コンクリートのAE発生数

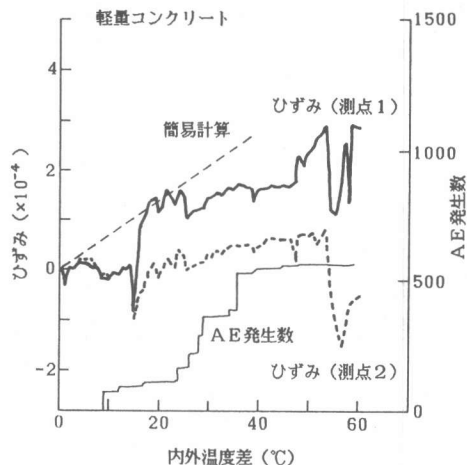


図-4 ひずみ変化

ケース1、ケース2のように、内外温度差を60℃程度まで上げた供試体では、ひび割れが断面の全周に見られ貫通していると考えられる。しかしながら、軸対称な位置に2本のひび割れがあるにもかかわらず、供試体は2つに分かれることなく円筒を保っているのである。この理由が、ひび割れ断面内にまだ割れていない部分が残っているためか、ひび割れ断面の凹凸による噛み合いのためかは明らかでない。ただし、普通コンクリートではひび割れが粗骨材を回り込んでいるが、軽量コンクリートでは粗骨材自体も割れており、ひび割れ断面の噛み合わせが良いとは思われない。

5. ひび割れを生じた円筒の応力分布

円筒にひび割れが生じた状態での応力分布を知るために、三角形6節点要素による図-5のようなモデルにより計算した。ひび割れ面が平面であると仮定し、最初のひび割れに着目すると、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。ひび割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、図は節点5までひび割れが進展した場合を示している。さらに、等間隔な複数のひび割れが生じた状態を想定した計算も行った。その場合、対称軸上に無いひび割れについては、同一座標を持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。

ひび割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、ひび割れ先端での集中応力が無限大となる。しかし、現実にはひび割れの先端近傍には塑性域が生じ、この塑性域が小さければ、その部分を除いて、弾性連続体力学による解が使えることが示されている⁵⁾。

図-6は、外縁の引っ張り応力の円周方向分布を、浅いひび割れ(ひび割れ深さが厚さの10%)に対し、等間隔なひび割れ1, 2, 4, 8本(それぞれA~Dに対応)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。計算上は内外温度差20℃を与えてあるが、結果はひび割れの無い場合の外縁の引っ張り応力 σ_0 に対して表わしてあるため、温度差が直接影響する訳ではない。これから、次のようなことがわかる。

(1) ひび割れによる縁応力の減少は、ひび割れの近傍で著るしく、ひび割れから離れると影

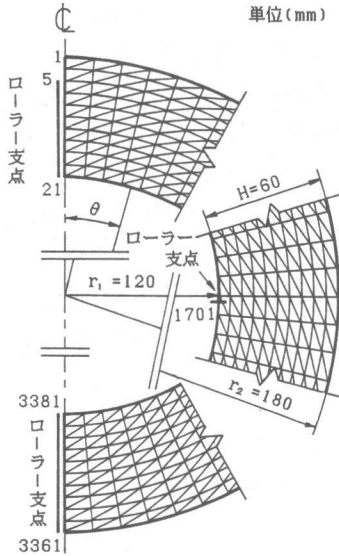


図-5 計算モデル

表-4 ひび割れ観察結果

	ケース1	ケース2	ケース3
普通コンクリート	1本 貫通	2本 約180° 部分的貫通	2本 約180° 20%程度
軽量コンクリート	2本 約180° 貫通	2本 約180° 1本貫通 1本部分的	0本 検出されず

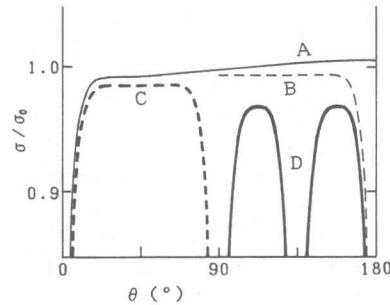


図-6 外縁の引っ張り応力

響が小さい。

(2) 単独のひび割れが生じた場合、わずかではあるが反対側の（ひび割れ面から測った θ が $90^\circ \sim 180^\circ$ ）部分で、引っ張り応力がひび割れ以前よりも大きくなる。

(3) ひび割れ間隔が狭くなるに従い、ひび割れから離れた部分の引っ張り応力も小さくなってくる。

6. ひび割れ進展のメカニズム

前節に示した応力分布や実験結果から、内外温度差を受ける円筒のひび割れ進展のメカニズムが推定できる。ここでは簡単のため、外縁の引っ張り応力が引っ張り強度に達するとひび割れが起こる、として話を進める。

内外温度差が大きくなり、外縁の引っ張り応力が引っ張り強度に等しくなると、外縁のもっとも弱い部分に最初のひび割れが生じAの状態（図-6）となる。そのひび割れが浅い場合には、図-6から知られるように、ひび割れの反対側の縁応力は、わずかではあるがひび割れ以前よりも大きくなる。したがって、2番目のひび割れはその範囲に生じると思われるが、差が小さいのでどこに発生するのかわかることは断定できない。この点に関しては、今回の実験では行わなかったが、A Eの位置標定により有力な資料が得られるものと思われる。ただし、微々たる差でも縁応力が最大である $\theta = 180^\circ$ の位置が、もっとも発生の可能性が高いはずである。

軸対称な位置に第2のひび割れができるとBの状態となり、縁応力が若干低下するので、さらに内外温度差が大きくなるまでは新たなひび割れは起きない。この状態では縁応力が一定である範囲が広いので、次のひび割れが生じる位置に任意性があるが、ほぼ中間にできるとすればCの状態となり、再び縁応力が低下する。こうしてさらに温度差が大きくなりDの状態に達するとすれば、A Eの発生が階段状になることが良く説明できる。

ひび割れの間隔が狭くなるにつれ、縁応力の低下が著しくなるので、新しくひび割れを作るために必要な温度差は一段と大きくなる。したがって、ついには既にできたひび割れが進展するようになる。その場合、1本のひび割れだけが進展するのか、軸対称な位置で対になった2本のひび割れが進展するのか、すべてのひび割れが均衡しながら進展するのかは明らかではない。しかし、1本だけのひび割れが断面を貫通すれば、ひび割れ面が完全に離れ、もはや円筒ではなく曲面となり、変形が拘束されないで温度応力は消滅する。そうすると、その後に内外温度差を上げたとしてもひび割れが増えることはなく、2本のひび割れが検出された実験結果と相反する。したがって、1本のひび割れだけが単独で断面を貫通することは有り得ないのである。

7. まとめ

内外に温度差を受けるコンクリート製円筒のひび割れ特性を調べるために、AE発生数、ひずみ等の測定を行い、有限要素法による計算結果と照らし合わせて検討した結果、ある程度ひび割れ進展のメカニズムを明らかにすることができた。本研究の範囲で結論づけられる点は以下のようである。

(1) 内外温度差を受けるコンクリート製円筒のAE発生数は、温度差を次第に大きくしてゆくと、ほぼ階段状に増加する。

(2) 弾性理論による簡易計算で得られた、ひび割れ開始温度差よりも低い温度差で、すでにかなりのAEの発生が認められる。

(3) 上記のひび割れ開始温度差と、AE発生数が急激に増える温度差とには、6体中2体に対応が見られた。

(4) 普通コンクリートでは、温度上昇速度に無関係に30℃前後でAE発生数が急激に増えており、青柳らの実験によるひび割れ開始温度差31℃と良く一致した。

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

(6) 内外に温度差を受ける円筒は、断面の約半分が圧縮領域でありながら、本実験の寸法では、内外温度差60℃程度で貫通していると思われるひび割れが生じた。

(7) 本実験に用いた円筒では、6体中4体に軸対称な位置に1対のひび割れが発生しており、そのメカニズムはひび割れを有する円筒の応力分布からある程度説明することができる。

参考文献

- 1) 猪俣俊司：プレレストコンクリート製容器，F.K.K.技術資料，No.7，1976.
- 2) Clark, J.L. : Concrete cylinders under cyclic temperature gradients, CEB Bull., No.154, 1982, pp.239-251.
- 3) 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，セ技年報，Vol.30，1976，pp.476-479.
- 4) 大津政康：コンクリート構造物の健全度診断へのアコースティック・エミッションの適用，コンクリート工学，Vol.25，No.12，1987，pp.5-11.
- 5) 岡村弘之：線形破壊力学入門，破壊力学と材料強度講座1，倍風館，1976.