

[2026] コンクリートの乾燥収縮時の AE 特性に関する研究

正会員 山本 俊彦 (東急建設技術研究所)

正会員 ○大岡 督尚 (東急建設技術研究所)

1. はじめに

構造体コンクリートにおいて、壁や床のように部材が薄く、周囲の拘束が大きい場合、コンクリートの乾燥収縮によってひびわれが発生する。このひびわれの発生機構を解明するため、拘束試験体によるひびわれ発生までのひずみ状態の測定、および乾燥収縮応力によるアコースティック・エミッション (以下AEと略す) の発生状況を調べた。

本報告は、乾燥収縮ひびわれの発生過程におけるひずみ測定結果とAE計測結果について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 試験体形状寸法

試験体¹⁾は図1に示す形状寸法の3種類とし、各試験体にD10鉄筋、D6鉄筋を埋め込んだもの、および無筋のものを作製した。また、圧縮クリープ試験用としてφ10x20cmの供試体を3本、自由乾燥収縮量の測定用としてφ10x20cmの供試体3本と10x10x40cmの供試体3本を作製した。

使用したコンクリートの調合を表1に、使用した鉄筋の性状を表2に示す。また、試験体一覧を表3に示す。

2.2 ひずみ測定方法

コンクリートおよび拘束鋼材のひずみは、ひずみゲージとコンタクトスト

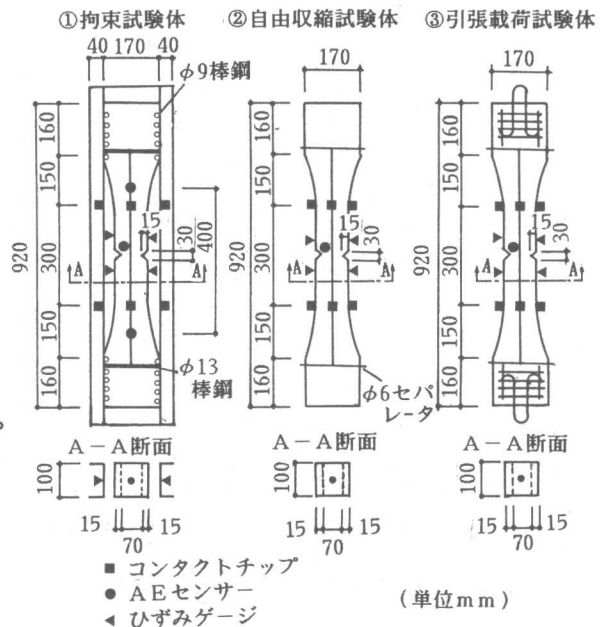


図1 試験体形状寸法

表1 コンクリート調合 (kg/m³)

W/C	スランブ	セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
60%	15cm	270	162	887	997	2.7

表2 鉄筋性状 (SD30)

種類	公称断面積(mm ²)	降伏点 (Kgf/mm ²)	引張強度 (Kgf/mm ²)	伸び (%)
D6	32.0	-	52.6	16
D10	71.3	36.6	57.6	20

表3 試験体一覧

試験体	記号	埋め込み鉄筋	AE計測
拘束	K10	D10	位置標定、波形取込
	K6	D6	1chのみ
	K0	なし	1chのみ
自由	F10	D10	1chのみ
	F6	D6	1chのみ
	F0	なし	1chのみ
引張	C10	D10	1chのみ

レインゲージによって測定した。また、鉄筋のひずみは、図2に示す位置とし、鉄筋のリップ両面にひずみゲージを貼って測定した。

2.3 AE計測方法

センサーは150KHz共振型および1MHz共振型(波形取り込み用)とし、プリアンプで40dB、メインアンプで20dB増幅し、しきい値を32 μ V(センサー出力値換算)に設定して計測した。

AE周波数解析用に使用したセンサーの周波数特性を図3に示す。

2.4 養生・試験方法

コンクリート打設・養生・試験はすべて恒温恒湿室(20 \pm 1 $^{\circ}$ C、60% \pm 10%)で行なった。養生期間中は、散水・シートがけ養生とし、コンクリート材令7日で脱型して測定を開始した。なお、引張载荷試験は、図4に示す载荷装置を使用し、145kgfの重りを載せることによって、荷重を1,450kgfとした。

また、圧縮クリープ試験は、図5に示す装置により64kgf/cm²の一定応力を加えた。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリート強度等

コンクリート強度等を表4に示す。

3.2 拘束試験体ひずみ

図6~8は拘束試験体のひずみ状況を示したものである。埋め込み鉄筋のない試験体(図8)の場合、ひびわれ発生後、拘束鋼材ひずみは応力が解放されてほとんど0に戻るが、埋め込み鉄筋のある場合(図6,7)は、鉄筋の拘束により0に戻らず、残留する鋼材ひずみは鉄筋径に依存する。

3.3 乾燥収縮応力

図9~図11は拘束試験体におけるコンクリートの乾燥収縮による引張応力と材令の関係を示

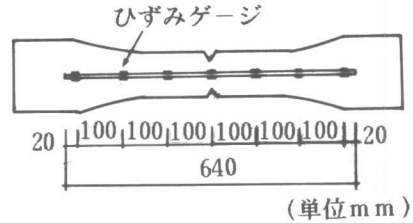


図2 鉄筋ひずみゲージ位置

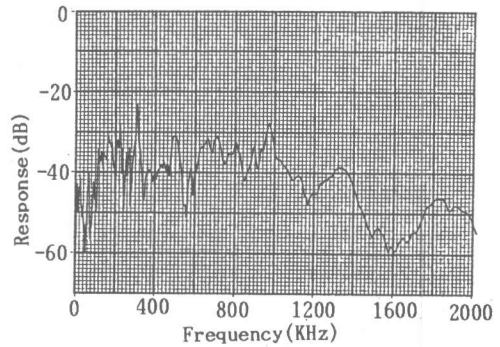


図3 センサー周波数特性(1MHz共振型)

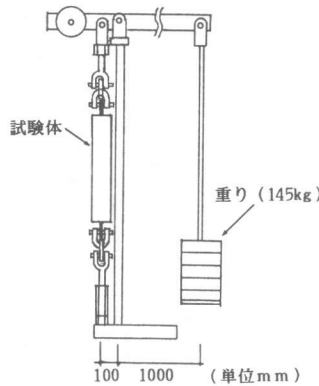


図4 引張载荷装置

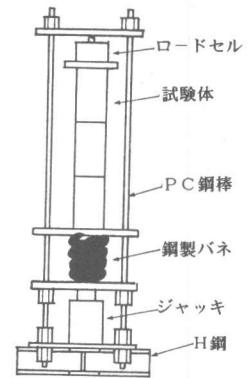


図5 圧縮クリープ試験装置

表4 コンクリート強度等

材令	圧縮強度 (Kgf/cm ²)		引張強度 (Kgf/cm ²)		曲げ強度 (Kgf/cm ²)		静弾性係数 (x10 ⁵ Kgf/cm ²)		乾燥収縮量 (x10 ⁻⁶)	クリープ係数
	標準	気中	標準	気中	標準	気中	標準	気中		
1	48.4	-	5.8	-	16.2	-	1.03	-	-	-
3	131	-	13.7	-	32.4	-	1.88	-	-	-
7	192	-	17.6	-	41.0	-	2.41	-	-	-
14	223	251	20.9	24.2	43.0	37.6	2.39	2.42	161	1.06
28	237	264	20.8	24.1	48.5	48.6	2.64	2.62	329	1.86

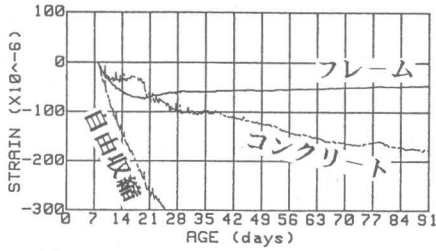


図6 拘束試験体ひずみ (K10)

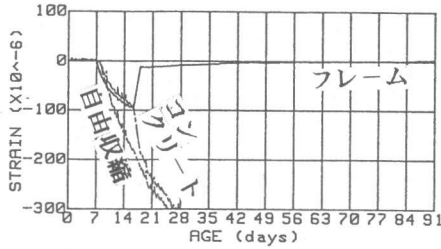


図8 拘束試験体ひずみ (K0)

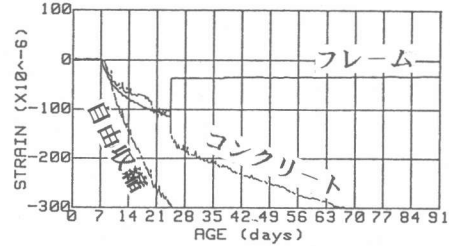


図7 拘束試験体ひずみ (K6)

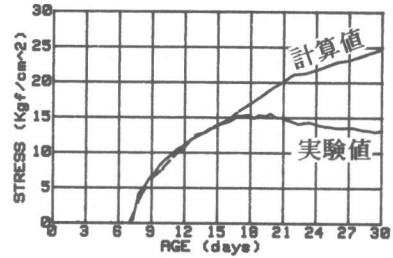


図9 引張応力度と材令の関係 (K10)

したものである。これらの図中の実験値は拘束鋼材ひずみから求めたコンクリートの引張応力であり、①式によって計算したものである。この時、コンクリートの断面積は埋め込み鉄筋を考慮して、断面積 100cm^2 の位置における等価断面積とした。

$$\sigma_{ct} = \varepsilon_s \times E_s \times A_s / A_c \dots \textcircled{1}$$

ここに、 σ_{ct} :コンクリート引張応力度(Kgf/cm^2)

ε_s :拘束鋼材のひずみ

E_s :鋼材の静弾性係数(Kgf/cm^2)

A_s :拘束鋼材の断面積(cm^2)

A_c :コンクリート断面積(cm^2)

また、図中の計算値は逐次計算法²⁾を用いて計算した結果であり、コンクリート強度・静弾性係数・乾燥収縮量・クリープ係数は、それぞれ実験で得られた値を使用した。

これらの図によると、材令7~15日程度までは実験値と計算値は比較的良く一致している。

なお、ひびわれ発生時の引張応力度とコンクリートの引張強度との関係は、表5に示すように、試験体のノッチ部分の応力度で比較した場合、(引張応力度)/(引張強度)が0.86~1.06の時点でひびわれが発生した。

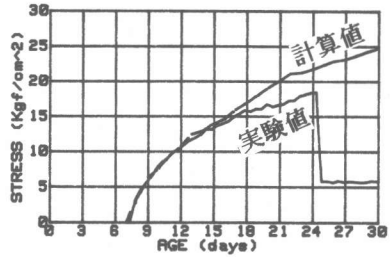


図10 引張応力度と材令の関係 (K6)

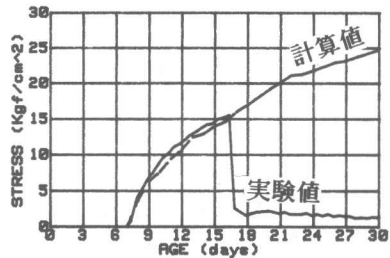


図11 引張応力度と材令の関係 (K0)

表5 ひびわれ発生時の引張応力度 (ノッチ部分)

試験体種類	K10	K6	K0
ひびわれ発生材令 (日)	17	24	16
等価断面積 (cm^2)	76.2	72.6	70.0
引張応力度 (Kgf/cm^2)	20.8	25.6	22.4
引張強度 (Kgf/cm^2)	24.2	24.2	24.2
(引張応力度)/(引張強度)	0.86	1.06	0.93

3.4 AEイベント発生率

図12~17は1chAE計測における単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率である。コンクリートの乾燥収縮時のAEは、乾燥開始直後に多くのAEが発生し、それ以降発生率が低下していく傾向がある。また、拘束試験体のようにひびわれが発生する場合は、ひびわれ発生時にかなり多くのAEが発生し、今回の実験では、K0、K6共に1分間に集中してAEが発生しており、その数は、両者共に、約80個であった。このことから、乾燥収縮によるひびわれの発生は、突発的であると予想される。このように、ひびわれ発生時には多くのAEが発生するので、AEイベント発生率を調べることによって、ひびわれ発生時期を特定することが可能と考えられる。ただし、K10の試験体のように、ひびわれ発生時の応力解放が少ないものは(図6参照)、ひびわれ発生時のAE発生数も少なく、ひびわれ発生時期は明確でない。

拘束試験体(Kシリーズ)と自由収縮試験体(Fシリーズ)を比較すると、F0試験体を除いて、全体的に拘束試験体の方がAEイベント発生数が多い。この原因として、拘束試験体は、外部拘束による応力が発生すること、または、外部拘束鋼材やその鋼材とコンクリートの付着面から発生するAEが加算されることなどが考えられる。

一般的なコンクリートの圧縮試験において、低応力で発生するAEは少なく、破壊応力に近くなってから大量のAEが発生するが、

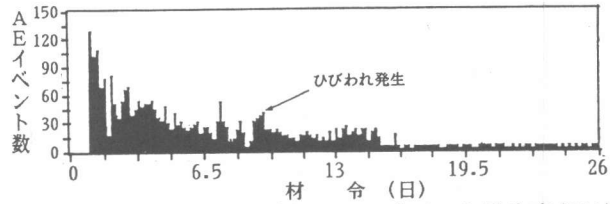


図12 単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率(K10)

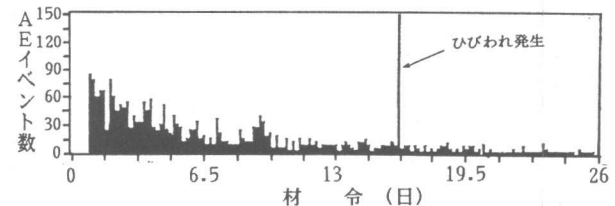


図13 単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率(K6)

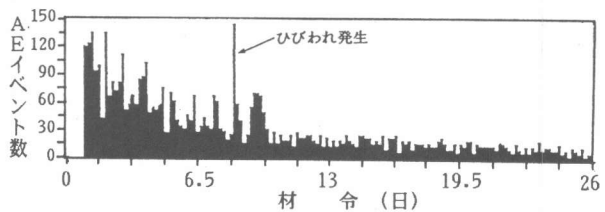


図14 単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率(K0)

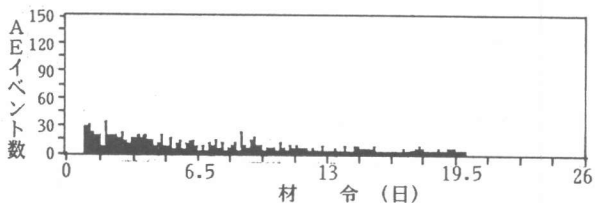


図15 単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率(F10)

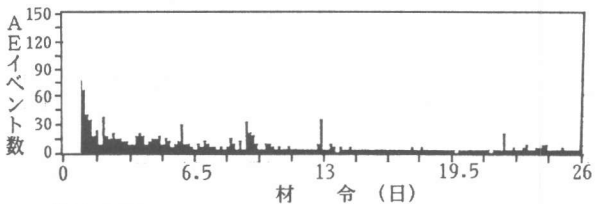


図16 単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率(F6)

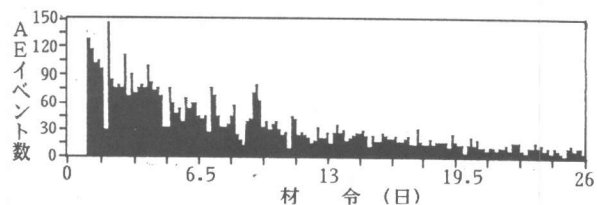


図17 単位時間(3.9時間)当たりのAEイベント発生率(F0)

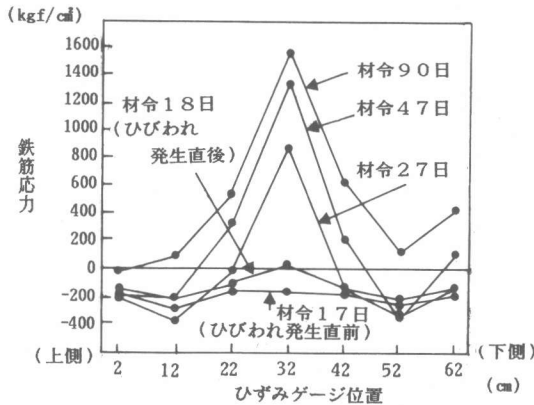


図18 鉄筋応力分布

図17のように拘束がない場合でも乾燥収縮によってA Eが発生することから、乾燥収縮時には局部的にかなり大きな応力が生じていると考えられる。

3.5 直線位置標定

図18にK10の鉄筋応力分布を、図19に直線位置標定結果を示す。これらの図をみると、ひびわれ発生前は乾燥収縮によるA Eが鉄筋全長にわたって発生しているが、ひびわれ発生以降は、ひびわれ発生位置付近に多く発生している。このことは、コンクリートのひびわれや鉄筋のすべり等の状況を良く表わしている。

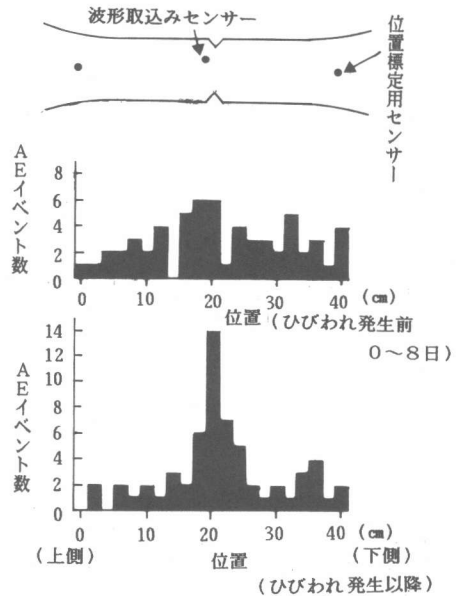


図19 直線位置標定結果

3.6 A E波形

図20、21はC10の載荷時に発生したA Eの波形である。図20はひびわれ発生前に多く見られた波形であり、図21はひびわれ発生後に見られた波形である。センサーの周波数特性(図3)と比較してみると、図20はセンサーの周波数特性とほとんど同じ傾向であるが、図21の波形は20KHz付近の成分が多くなっている。この波形は、発生した時期から、鉄筋のすべりによって発生したA Eと考えられる。

図22~24はK10試験体から発生したA Eの波形であるが、ひびわれ発生前の波形(図22, 図23)を見ると、図22のようにセンサー近傍で発生したA Eは低周波成分が少ないが、センサーから離れた位置で発生した図23のような波形は、低周波成分が多くなる。このように、A E発生源からセンサーまでの距離が遠くなると、高周波成分の減衰等により、取り込まれた波形の周波数特性が異なると考えられる。

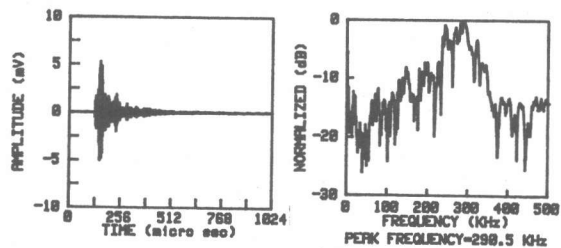


図20 A E波形と周波数特性(C10ひびわれ前)

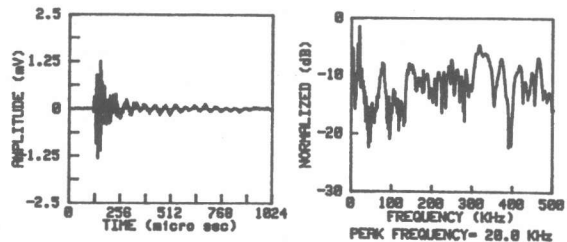


図21 A E波形と周波数特性(C10ひびわれ後)

図24は、ひびわれ発生後、センサー近傍で発生したAE波形であるが、この波形も低周波成分を多く含んでおり、これが、鉄筋のすべりによって発生したAEであると考えられる。

このように、AE波形の周波数解析を試みた結果、鉄筋のすべりによるAEは低周波成分を多く含んでいると推測されたが、更にAE特性を明確にするには、AE発生源からセンサーまでのコンクリートのフィルター特性を調べ、それを差し引いて検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

コンクリートの乾燥収縮時のひずみ測定、およびAE計測を行なった結果、以下のことが判明した。

(1)拘束試験体において、ひびわれ発生時に残留する鋼材のひずみは、鉄筋径に依存する。

(2)拘束試験体の引張応力において、逐次計算法による計算値と実験値は材令7~15日程度において、比較的良く一致した。

(3)AEイベント発生数は、乾燥初期に多く、それ以降発生率は低下する。

(4)ひびわれ発生時には、AEが短時間(約1分)に集中して発生したことから、乾燥収縮応力によるひびわれの発生は突発的であると考えられる。

(5)ひびわれ発生時の応力解放が十分大きければ、AEイベント発生率でひびわれの発生時期が特定できる。

(6)コンクリートの乾燥収縮時には、局部的にかなり大きな応力が生じると考えられる。

(7)AE直線位置標定は、欠陥発生位置を十分に特定できる。

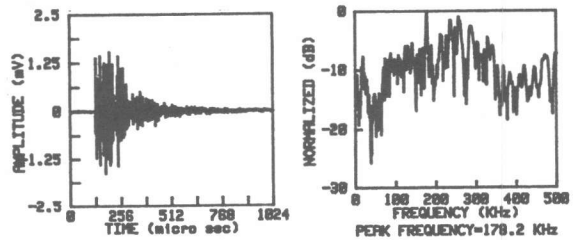
(8)鉄筋すべり時のAEは低周波成分が多い。

5. おわりに

今回の実験で、コンクリートの乾燥収縮時のAE特性がかなり把握できた。今後の課題として、AEイベント発生数とコンクリートの収縮量の関係を調べる事、および、欠陥の種類をAE波形で識別するために、鉄筋コンクリートのフィルター特性を調べることが必要であると考える。

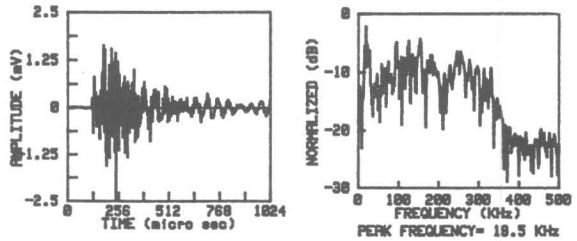
参考文献

- 1) 仕入、青柳他；コンクリートのひびわれ試験方法(案)、コンクリート工学、1985、3
- 2) Neville; Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed, North-holland, 1970



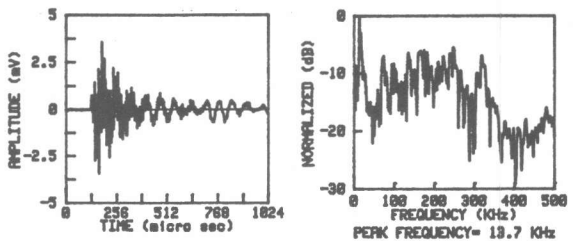
(センサーから0cmの位置)

図22 AE波形と周波数特性(K10ひびわれ前)



(センサーから12cmの位置)

図23 AE波形と周波数特性(K10ひびわれ前)



(センサーから1cmの位置)

図24 AE波形と周波数特性(K10ひびわれ後)