

[33] コンクリートのアコースティック・エミッションの周波数特性

正会員 谷川 恒雄 (名古屋大学)
正会員 山田 和夫 (名古屋大学)
正会員 ○ 桐山 伸一 (名古屋大学)

1. まえがき

コンクリートの変形・破壊挙動の詳細を明らかにするための一つの手段として、最近注目を集めているアコースティック・エミッション法^{1)~4)}(以下、AE法と略記)がある。この方法によれば、試験体内部のクラックの発生・進展に関連する多くの情報が得られるため、AE波形を詳細に分析することによって、試験体の内部構造の変化をかなりの精度で追跡することも可能であると考えられる。

筆者らも以前からAE法を適用して、コンクリートの破壊挙動を解明するための基礎的研究を行ってきたが^{5), 6)}、本報では、コンクリートの破壊モードおよび破壊過程とAE波の周波数特性との関係について調べることにした。

2. 実験方法

2.1 実験の概要 上記の目的に従い、本報では表-1に示すような2種類のモデル実験を行った。(1)実験-I: 本実験は、モルタルの曲げ破壊、割裂引張破壊および圧縮・せん断破壊(せん断すべり角度(θ) = 0° 、 45° および 60° の3種類)時のAE特性を調べるための実験であり、水セメント比(W/C)は、30%、60%および90%の3種類とした。なお、本実験では、母材モルタル(W/C = 60%の一定)とモデル粗骨材(モルタル製、W/C = 30%、60%および90%の3種類)間の付着破壊時のAE特性を調べるためのモデル実験も併せて行った。(2)実験-II: 本実験は、AE法を適用した破壊源探査によって、コンクリートの2次元モデル試験体の破壊過程を追跡し、モデル試験体の破壊過程とAE特性との関係を調べるための実験である。本実験では、母材モルタルのみの試験体とモデル粗骨材を1個(直径 = 5 cm)および9個(直径 = 2.5 cm)を含む平板状試験体を使用した。なお、実験-Iと同様に、モデル粗骨材のW/Cは30%、60%および90%の3種類とした。

2.2 試験体の寸法および養生方法

(1)試験体の形状および寸法: 本実験で使用した試験体の形状および寸法を図-1に示す。

(2)使用材料: 試験体の製作には、早強セメントおよび木曽川産の川砂(最大寸法: 1.2 mm)を使用した。(3)試験体の製作および養生方法: 試験体は、打設後1日目に脱型し、試験材令まで実験室内で空中養生を行った。試験材令は、実験-IIの9Aシリーズが約3年、その他の試験体は1週である。

2.3 測定および解析方法

(1)測定方法: 本実験

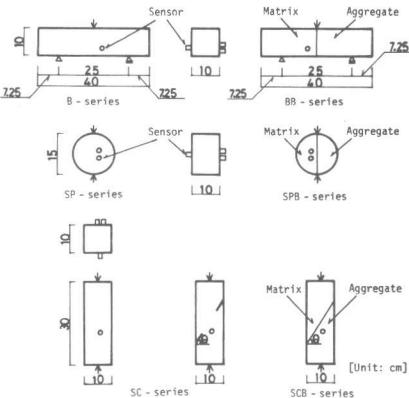
表-1 実験の概要

(a) 実験-I

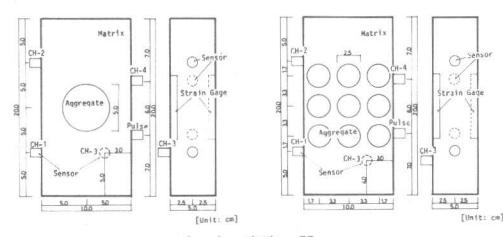
Notation of specimen	Type of failure	W/C of matrix (%)	W/C of aggregate (%)	Angle of shear plane ($^\circ$)
B-series	Flexure	30, 60, 90 60	-	-
BB-series	Flexure	30, 60, 90 60	30, 60, 90	-
SP-series	Tension	30, 60, 90 60	-	-
SPB-series	Tension	30, 60, 90 60	30, 60, 90	-
SC-series	Shear-compression	30, 60, 90 60	-	0, 45, 60
SCB-series	Shear-compression	30, 60, 90 60	30, 60, 90	45, 60

(b) 実験-II

Notation of specimen	Number of aggregate	W/C of matrix (%)	W/C of aggregate (%)
M-series	-	60	-
TA-series	1	60	30, 60, 90
9A-series	9	60	30, 60, 90



(a) 実験-I



(b) 実験-II

図-1 試験体の形状・寸法

で用いたA E計測システムを図-2に示す。図-2に示すように、センサーから検出されたA E波形は、まずトランジエントメモリー(サンプリング間隔: $1 \mu\text{s}$ 、サンプリング個数: 1024個)に一時記憶させたのち、サンプリング時間と出力時間との比を $1/20,000$ ($1 \mu\text{s} \rightarrow 20\text{ms}$)にして、データレコーダに記録される。記録されたアナログデータをA-D変換したのち、計算機に入力した。破壊源探査用データは、ペン書きオッショロに出力した。実験-Iでは、A E波形の周波数特性に及ぼすセンサーの周波数特性の影響についても調べるために、共振周波数が約 150kHz (A E-901S)、約 300kHz (A E-903M)および約 1MHz (A E-905S)の3種類のセンサーを使用し、実験-IIでは、破壊源探査用A E-903Mを、また周波数解析用A E-905Sセンサーをそれぞれ使用した。A E測定装置の各機器のレベルは、増幅度 50dB 、フィルターバンド幅を $10\text{k}\sim 300\text{kHz}$ に設定した。(2)解析方法: 1)周波数解析—FFT法を用いて、得られたA E波形(図-3参照)の周波数解析を行い、パワースペクトルを求めた。2)破壊源探査—4個のセンサーによって同時に記録されたA E波形の縦波初動の到達時間差から2次元的に算定した3組の推定破壊源の平均値をそのA E波の破壊源とみなした。なお、縦波初動が不明確なデータおよび推定破壊源が試験体外に位置したものは考察から除外した。ただし、破壊源の算定に必要な試験体中の縦波速度は一定の荷重段階(1ton)ごとに、ファンクションジェネレータによって、 $10\mu\text{s}$ の矩形パルスを試験体に入力して測定した。矩形パルスによる疑似A E波の入力位置の推定結果を図-4に示す。この図によれば、A E波の入射角が縦波の検出されにくい角度になっているパルス入力点では、推定誤差は約 $10\sim 16\text{mm}$ であるが、他の入力点では、ほぼ 10mm 以内の精度で推定できることがわかる。

3. 実験結果とその考察

3.1 A E波の周波数特性に及ぼすセンサーの共振周波数の影響

図-5(a)～(c)は、共振周波数の異なる3種類のセンサーによって得られた同一A E波のパワースペクトルと相対応力レベル(σ/σ_{\max})との関係を示した一例である。図-5によれば、共振周波数が約 150kHz のA E-901Sセンサーによって検出したA E波のパワースペクトルは、応力レベルにかかわらず約 $140\text{k}\sim 150\text{kHz}$ で最大となり、 200kHz 以上の周波数帯域では、非常に小さい値を示している。これは、センサーの周波数特性がそのままA E波の周波数特性に反映しているためと考えられる。これに対して、A E-903MおよびA E-905Sセンサーでは、センサーの共振周波数がいずれもフィルターバンド幅の外側にあるため、A E-901Sセンサーのような傾向は認められないが、A E波の周波数特性は、センサーの種類によって相違する。これは、解析の対象とした周波数帯域(本実験では、 $10\text{k}\sim 300\text{kHz}$)におけるセンサーの周波数特性が異っているためと思われる。このようにA E波形の周波数特性は、検出器であるセンサーの周波数特性の影響を顕著に受けるため、A E波形の周波数解析を行う場合には、できるだけ周波数特性のフラットなセンサーを用いる必要がある。したがって、以下の考察では、本実験で使用した3種類のセンサーのうち、 $10\text{k}\sim 300\text{kHz}$ の周波数帯域で比較的フラットな周波数特性を有するA E-905Sセンサー

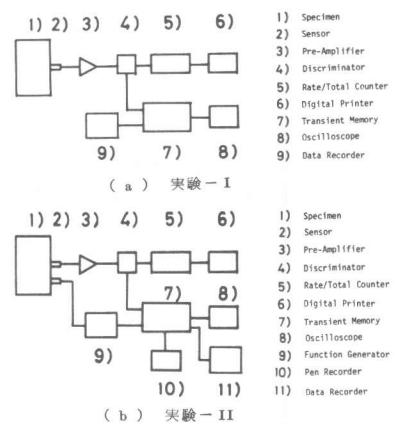


図-2 アコースティック・エミッション測定装置のブロックダイアグラム

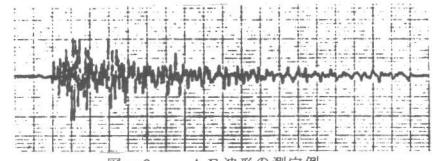


図-3 A E波形の測定例

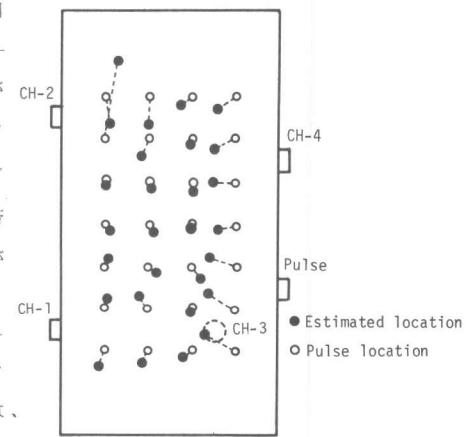


図-4 パルス発生位置の推定精度

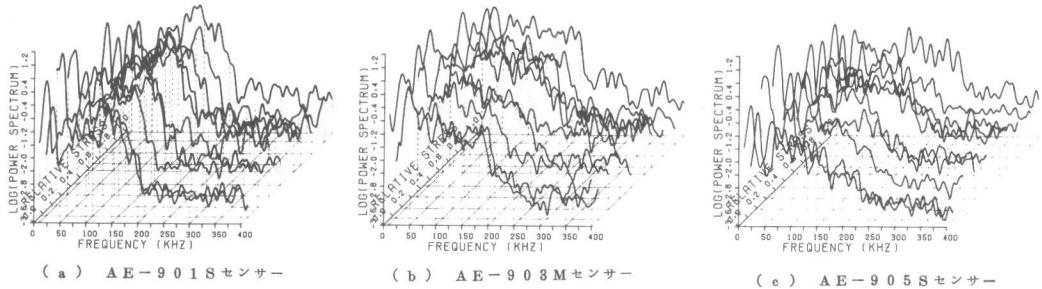


図-5 AEのパワースペクトルに及ぼすセンサーの影響

によって検出したAE波形について考察を加えることとする。

3.2 コンクリートの破壊モードとAE波の周波数特性との関係

(1)圧縮・せん断破壊：図-6は、圧縮・せん断破壊時のAEのパワースペクトルと相対応力レベル(σ/σ_{max})との関係のうち、水セメント比(W/C)が60%、すべり角度(θ)が60°の試験体によって得られた一例を示したものである。図-6によれば、AE波の周波数特性は、載荷初期には25kHz程度の低周波成分が比較的卓越しているが、応力レベルの増加に伴って、低周波成分は徐々に減少し、反対に高周波成分が相対的に大きくなる傾向を示す。さらに $\sigma/\sigma_{max} \geq 0.8$ の範囲ではAEのパワーも大きくなっている。図には示していないが、 $\theta = 60^\circ$ のW/C=30%および90%の試験体でも図-6と類似の傾向がみられたが、W/C=30%の試験体では、 $\sigma/\sigma_{max} \geq 0.5$ の範囲においてAEのパワーが増大し、W/C=90%の場合は、AEのパワーが最大応力度に達するまで、それほど変動しないという点で相違している。どの試験体においても共通に認められる傾向としては、載荷初期から中応力レベルにおいて、25kHz程度の低周波成分が大きく卓越していることである。一方、モデル粗骨材のW/Cが60%、 θ が60°の圧縮・せん断付着破壊時のAE特性をみると、応力レベルの増大とともに高周波成分がわずかに増加する傾向を示すが、その変化は圧縮・せん断破壊時と比べて非常に安定している。その他の圧縮・せん断付着破壊試験体についても、これとほぼ同様な傾向が観察されるが、最大応力度近傍までは、比較的安定したAEの変化状況を示し、最大応力度時にAEの周波数特性が急激に変化する試験体が多い。

(2)割裂引張

破壊：図-7は、割裂引張破壊時のAE波のパワースペクトルと相対応力レベル(σ/σ_{max})との関係を示した一例(W/C=90%の試験体)である。この図によると、AEは低応力レベルでは、約25kHzの低周波成分が卓越しているが、中応力レベル以上になると相対的に高周波成分が増大し、さらに最大応力度近傍では、低周波成分および高周波成分ともに増大することがわかる。この傾向はW/C=30%および90%の試験体についても、ほぼ同様に認められるが、なかには最大応力度近傍においてAEのパワーの増加傾向を示さない試験体もあった。また、割裂引張付着破壊時のパワースペクトルは割裂引張破壊時のそれとほぼ同様な傾向が観察された。

(3)曲げ破壊：図-8は、曲げ破壊時のAEのパワースペクトルと相対応力レベル(σ/σ_{max})との関係を示したものである。図-8によれば、AEは応力レベルにかかわらず、高周波成分が相対的に多く、AEのパワーも小さい。また、25kHz程度の低周波成分は破壊モードの異なる試験体に比べて少ない。一方、曲げ付着破壊用の試験体は、測定できたAEの個数が少なかったため、明確なことはいえないが、最大応力度近傍で、約150kHzの比較的高周波成分を有するAEが発生することが多い。

3.3 コンクリートの破壊過程とAE波の周波数特性との関係

(1)

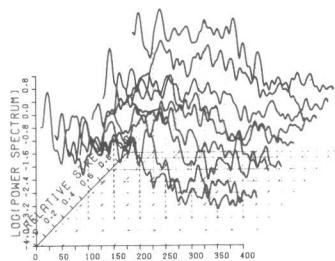


図-6 圧縮・せん断破壊時のAEのパワースペクトル

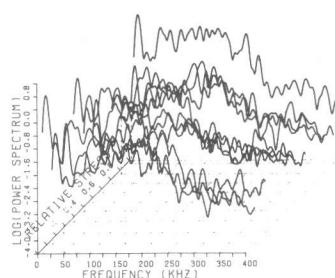


図-7 割裂引張破壊時のAEのパワースペクトル

粗骨材を1個含むモデル試験体：図-9(a)～(c)は、それぞれ粗骨材を1個含むモデル試験体の応力度一ひずみ度曲線、破壊源探査結果およびAEのパワースペクトルと相対応力レベル(σ/σ_{max})との関係の一例を示したものである。図-9(a)および(b)によれば、試験体内部の微小破壊は低応力レベル(領域I)においては、主として試験体端面付近に発生し、中応力レベル(領域II)になると粗骨材まわりを中心とした試験体中央部に集中して発生している。また高応力レベル(領域III)では、破壊は上記の領域Iおよび領域IIで発生したクラックを連結するように進展し、最終的な巨視的破壊面を形成していく過程が認められる。一方、図-9(c)によれば、AEは、領域Iでは低周波成分が卓越しており、AEのパワーも比較的小さいが、領域IIになると100kHz以上の高周波成分が多くなり、パワーも領域Iに比較して増大する。また、領域IIIでは、AEは領域IIに比べてやや低い50k～100kHzの周波数が卓越しているが、AEのパワーは領域IIとほぼ同程度である。(2)粗骨材を9個含むモデル試験体：図-10(a)～(c)は、粗骨材を9個含むモデル試験体に関する結果を図-9と同様の方法で整理して示したものである。

図-10(a)および(b)によれば、領域IおよびIIにおいては低周波成分が卓越しており、その周波数特性は応力レベルにかかわらず一定であるが、領域IIIになると高周波成分が急増する。さらに応力レベルが大きくなると、50kHz以下の低周波成分も増大し始め、AEのパワーも急激に増大する。

4. むすび

本報では、コンクリートの破壊モードおよび破壊過程とAE波の周波数特性との関係について、各種のモデル実験を行って基礎的考察を加えたが、AEの周波数特性は、上述のようにセンサーの周波数特性の影響を受けるばかりではなく、コンクリートの種類、試験体の形状・寸法、試験体中のクラックの発生状況などによっても相違するため、今後、更に多くの資料を蓄積して詳細な検討を重ねる必要がある。

[謝辞] 本研究に際して、御指導・御援助を戴きました名大・小阪義夫教授並びに実験に御協力を戴きました名大学生・三村浩君および熊谷茂君に謝意を表します。また、本研究費の一部は文部省科研費・一般研究(O)および奨励研究(A)によったことを付記する。

〔引用文献〕

- 1) Fertis, D. G., Proc. of ASCE, Jour. of ST-Div., Vol. 102, No. ST-2, Feb. 1976, pp. 387～400.
- 2) 丹羽、小林、大津、土木学会論文報告集、第261号、昭52.5、pp.107～112。
- 3) 小林、大津、コンクリート工学、Vol. 16, No. 7, July 1978, pp. 9～17。
- 4) 丹羽、小林、大津、土木学会論文報告集、第278号、昭53.8、pp. 135～147。
- 5) 谷川、小林、セメント技術年報、第33巻、昭54、pp. 286～289。
- 6) 谷川、山田、桐山、熊谷、建築学会東海支部研報、第18号、昭55.2、pp. 25～28。

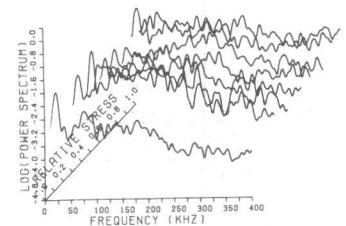
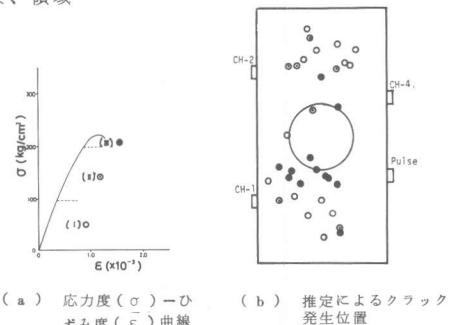
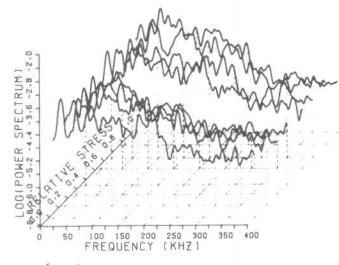


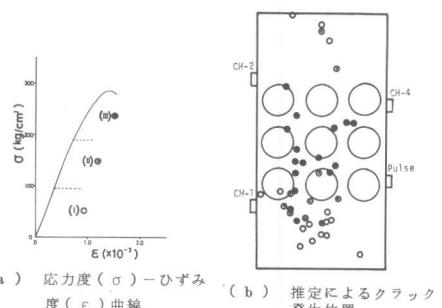
図-8 曲げ破壊時のAEのパワースペクトル



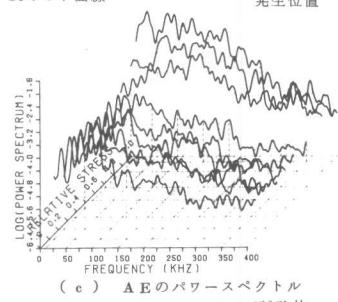
(a) 応力度(σ)一ひずみ度(ϵ)曲線 (b) 推定によるクラック発生位置



(c) AEのパワースペクトル
図-9 1Aシリーズ試験体



(a) 応力度(σ)一ひずみ度(ϵ)曲線 (b) 推定によるクラック発生位置



(c) AEのパワースペクトル
図-10 9Aシリーズ試験体