

[1089] コンクリート内部で発生したアコースティック・エミッションの伝播特性

正会員 ○ 山田 和夫 (愛知工業大学工学部)
正会員 小阪 義夫 (名古屋 大学工学部)

1. まえがき

材料内部の微小破壊に伴って発生する応力波を測定の対象とする AE (Acoustic Emission) 法は、コンクリートの内部破壊過程を追跡するための在来計測手法と比較して、材料内部の変形、破壊などの微小変化を動的かつ高感度に検出できるという点で格段に優れている。そのため、筆者らも、コンクリートの微視的破壊機構を解明するために AE 法を適用し、静的載荷時の AE 挙動や繰返し載荷時のカイザー効果並びに AE の周波数特性など、コンクリート内部で発生する AE の基礎的特性を調べるとともに、AE 法による破壊源探査や微視的破壊過程の追跡などを試み、AE 法の妥当性や可能性を確かめるための一連の検討を行ってきた[1]~[4]。

通常、検出された AE は、計測システムやセンサーの特性、コンクリート中を伝播する時の減衰特性など、多くの要因の影響を受けるため、AE 法を破壊機構解明のための有力な測定方法として確立するためには、まず AE の伝播・減衰特性の詳細を正確に把握することが肝要である。そのための手段の一つとしての AE の原波形解析手法は、AE の発生から検出までの過程を時間に対して線形系であるものと仮定して定式化を行い、検出波形から源波形を推定しようとするものであり、破壊機構解明のための有力な手法になりうるものと期待されている[5]~[9]。

本研究では、その AE の原波形解析手法を適用し、コンクリート内部で発生する AE、すなわち源 AE の実態を正しく把握するための手法の確立を目的とし、その第 1 段階として、コンクリートの累積損傷と AE の伝播・減衰特性との関係について検討することとした。

2. 実験方法

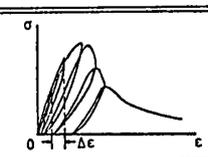
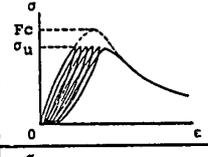
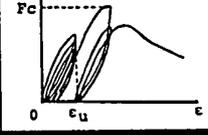
2.1 実験の概要

10×10×20cmの縦打ちコンクリート角柱試験体を使用して、漸増繰返し載荷、定荷重繰返し載荷並びに定ひずみ繰返し載荷時の AE の伝播・減衰特性と載荷履歴との関係を調べた。載荷方法の概要を表-1に示す。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、早強ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(最大寸法=5mm、比重=2.60)および天竜川産の川砂利(最大寸法=15mm、比重=2.65)を使用した。コンクリートの調合は、水セメント比を0.6、設計スランプを15cmとした。試験体は、打設後2日目に脱型し、その後試験時まで養生室(温度=20°±2℃、

表-1 載荷方法の概要

載荷タイプ	載荷方法の概要
漸増繰返し	 $\Delta \epsilon = 125 \mu$
定荷重繰返し	 $\sigma_u / F_c = 0.8, 0.85, 0.9$
定ひずみ繰返し	 $\epsilon_u = 780, 1080, 1400 \mu$

湿度=75±5%)内で空中養生を行った。試験材令は、約2週である。なお、材令12日目に硫黄キャッピングを施した。

2.3 計測方法

ファンクション・ジェネレータによって発生させた疑似AE (パルス幅10μsecの矩形パルス)は、発信用センサー(AE-901S、共振周波数:約150kHz)を介して試験体に入力し、受信用センサー(AE-905S、共振周波数:約1MHz)で検出した。

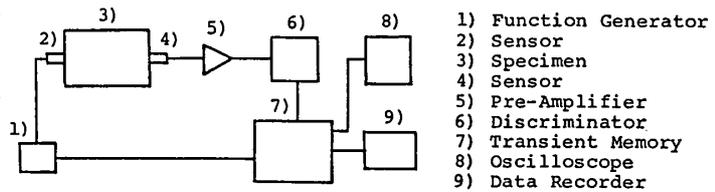


図-1 計測システムのブロック・ダイアグラム

表-2 計測機器の設定感度

アンプの増幅度 (dB)			フィルターバンド幅 (kHz)	サンプリング間隔 (μs)
プリ	メイン	計		
20	40	60	10~300	1

計測システムのブロック・ダイアグラムを図-1に、計測機器の各設定感度を表-2に示す。なお、センサーは、熱可塑性樹脂で試験体に直接接着した。

2.4 コンクリートの伝達関数の算定方法

AEの伝播経路を線形システム論によって定式化すると、入・出力関係は次式で表される。

$$Y(j\omega) = G_s(j\omega) \cdot G_m(j\omega) \cdot X(j\omega) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、Y(jω) : 検出波のフーリエ変換、G_s(jω) : センサーを含む計測系の伝達関数、G_m(jω) : コンクリートの伝達関数、X(jω) : 源AE (入力波) のフーリエ変換。

式(1)からわかるように、検出波から源AEの推定を行うためには、計測系およびコンクリートの伝達関数を定量化することが必要となる。コンクリートの伝達関数G_m(jω)は、式(1)より次式で与えられる。

$$G_m(j\omega) = Y(j\omega) / \{G_s(j\omega) \cdot X(j\omega)\} \dots\dots\dots (2)$$

本実験では、コンクリートの伝達関数を算定する際に必要な式(2)中の入力波(X(jω))としては、パルス幅10μsec、立上り・立下がり時間50nsecの矩形パルス波を使用し、またセンサーを含む計測系の伝達関数(G_s(jω))は、入力波としてパルス幅1.5μsec、立上り・立下がり時間50nsecの矩形パルス波を用いて算定したものを用いた。

3. 実験結果とその考察

3.1 漸増繰返し载荷時のAEの伝播特性

図-2は、同一試験体に入力した矩形パルス波に対する検出波の伝播速度、最大振幅および初動振幅と除荷開始点のひずみ度との関係を示したものである。ただし、図には所定のひずみ度まで载荷した後、除荷して試験体をフリーな状態にした時点で計測した値がプロットしてある。図からわかるように、最大振幅および初動振幅は、繰返し载荷の初期の段階から急激に減少するが、矩形パルス波の伝播速度は、ひずみ度(ε)が1,300μ(相対応力度≒0.86)付近までは、ひず

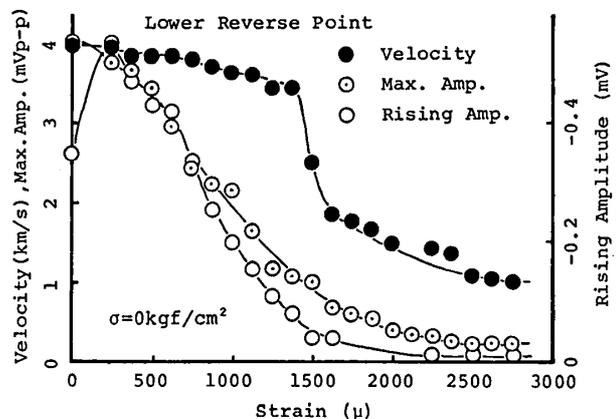


図-2 コンクリート中を伝播した矩形パルス波の伝播速度、最大振幅および初動振幅と除荷開始点のひずみ度との関係(漸増繰返し载荷時)

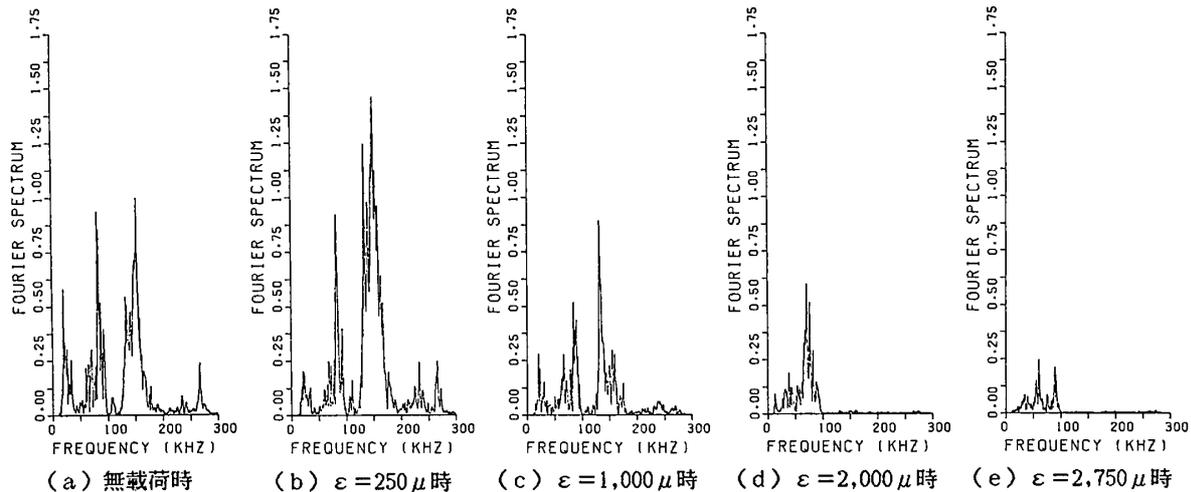


図-3 コンクリートの伝達関数のスペクトル (漸増繰返し載荷時)

みレベルの増大とともに徐々に減少し、その後ひずみ度が1,600 μ までの範囲で急減する傾向を示す。このように、構造鈍感性に属する物理量である伝播速度が、ひずみ度が1,300 μ ~1,600 μ で急減するのは、このひずみレベルで試験体の内部構造が大きく変化していることを意味する。ただし、試験体が最大耐力($\epsilon \approx 2,000 \mu$ 相当)に達した後は、矩形パルス波の伝播速度の減少率は再び低下している。なお、図には示していないが、以上の傾向は、除荷開始点においても同様に観察された。

図-3は、前掲の式(2)を用いて算定した除荷時のコンクリートの伝達関数の振幅スペクトルを示したものである。ただし、図中の伝達関数の振幅スペクトルは、いずれも無載荷時の伝達関数の振幅スペクトルの最大値で除して無次元化してある。図によれば、250 μ のひずみ履歴を受けたコンクリートでは、約150kHzの周波数帯で、周波数成分が無載荷時の値を上回っている領域があるが、これは、初期の荷重によってコンクリート内部の空隙が閉鎖する、いわゆる圧密現象によってコンクリートの密度が大きくなり、入力した矩形パルス波がコンクリート中を伝播し易くなったためではないかと考えられる。それ以降は、コンクリートの伝達関数は荷重に従って全体的に徐々に減衰するとともに、卓越周波数が低周波数領域へと移行する傾向を示し、最大耐力到達時の2,000 μ のひずみレベルになると、100kHz以上の高周波数成分は殆ど消失する。

3.2 定荷重繰返し載荷時のAEの伝播特性

図-4は、繰返し上限設定応力度を変化させた3体の試験体で得られた検出波の最大振幅と荷重繰返し回数との関係を示したものである。ただし、図の縦軸は、検出波の最大振幅を無載荷時の最大振幅で除して無次元化してある。図によれば、検出波の最大振幅は、繰返し上限設定応力レベルにかかわらず、荷重繰返し回数の増加に伴って直線的に減少することがわかる。また、繰返し上限設定応力

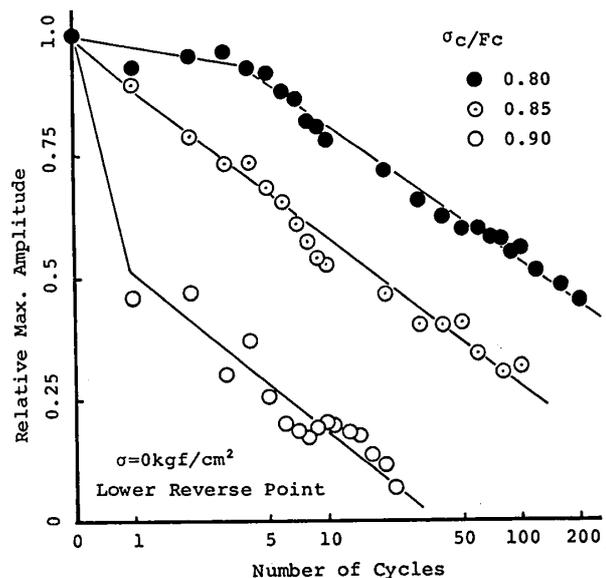


図-4 コンクリート中を伝播した矩形パルス波の最大振幅と除荷開始点の繰返し回数との関係 (定荷重繰返し載荷時)

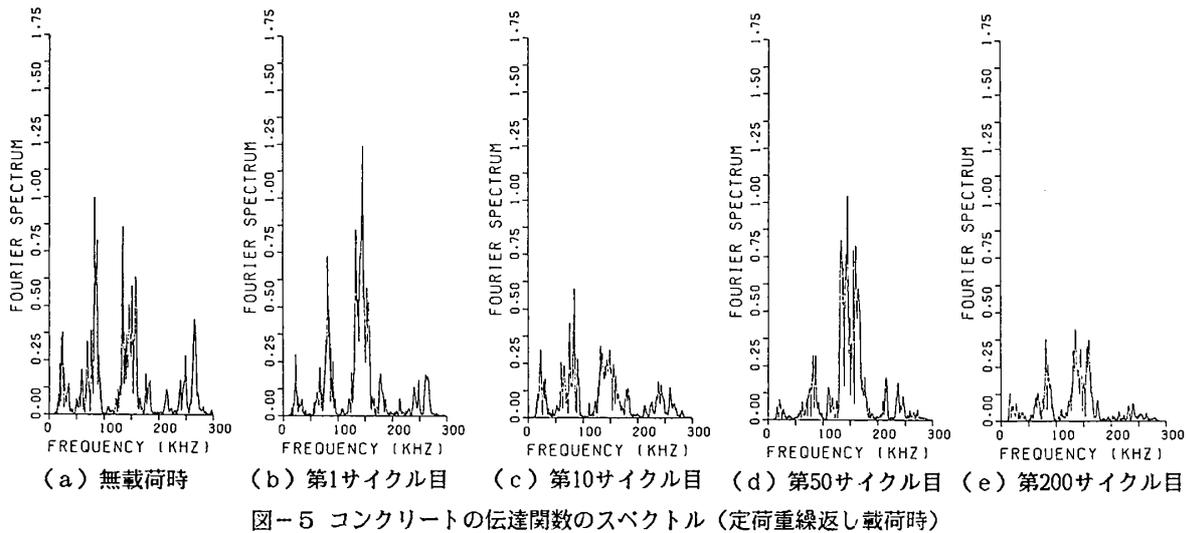


図-5 コンクリートの伝達関数のスペクトル (定荷重繰返し載荷時)

度が相対応力度にして0.80、0.85および0.90と増大すると、検出波の最大振幅と載荷繰返し回数との関係を表す直線は、ほぼ等間隔で下方に平行移動する傾向を示す。

図-5は、式(2)を用いて算定した除荷時のコンクリートの伝達関数の振幅スペクトルを、繰返し上限設定応力度が相対応力度にして0.80の試験体に対して示したものである。ただし、図中の伝達関数の振幅スペクトルは、図-3と同様の方法で無次元化してある。図によれば、第1サイクル目のコンクリートの伝達関数は、漸増繰返し載荷時の場合と同様に、約150kHzの周波数帯で、周波数成分が無載荷時の値を上回っている領域がある。その後、コンクリートの伝達関数は載荷繰返し回数の増加とともに減衰するが、第50サイクル目になると、再びコンクリートの伝達関数が大きくなる傾向を示す。載荷中にモニターしたコンクリートの応力度(σ)-ひずみ度(ϵ)曲線によれば、この付近の載荷繰返し回数の範囲では、載荷繰返し回数の増加に伴って1サイクル当りの残留ひずみ度の増分が減少するとともに、再載荷時の剛性が増大する傾向にあった。したがって、第50サイクル目でコンクリートの伝達関数が再び増大したのは、そのようないわばコンクリートの硬化現象のためではないかと考えられる。これ以降の範囲になると、コンクリートの伝達関数は載荷繰返し回数の増加とともに減衰するが、第200サイクル目においても100kHz以上の高周波数成分がまだかなり残存しており、この段階では試験体が完全には破壊に至っていないことがわかる。なお、図には示していないが、繰返し上限応力度を相対応力度にして0.90に設定した場合には、コンクリートの伝達関数は載荷繰返し回数の増加に伴って単調に減衰する傾向を示し、第10サイクル目ですでに100kHz以上の高周波数成分が殆ど減衰し、破壊に至った第20サイクル目になると、高周波数成分ばかりでなく低周波数成分も殆ど消失することも明らかとなった。

3.3 定ひずみ繰返し載荷時のAEの伝播特性

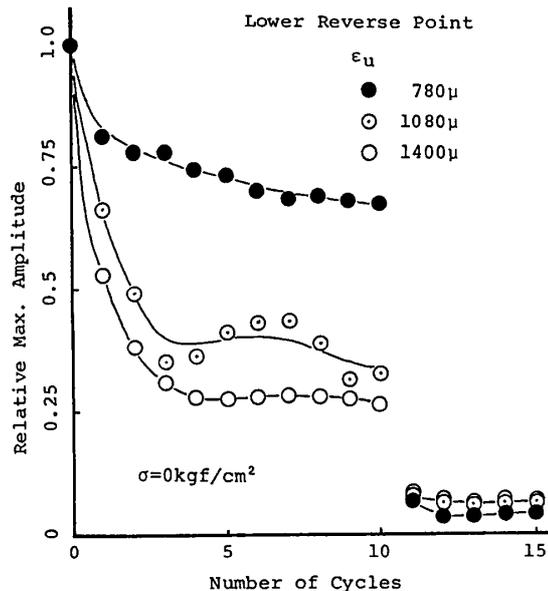


図-6 コンクリート中を伝播した矩形パルス波の最大振幅と除荷開始点の繰返し回数との関係 (定ひずみ繰返し載荷時)

図-6は、繰返し上限設定ひずみ度(ϵ_u)を、それぞれ780 μ (相対応力度 ≈ 0.65)、1,080 μ (相対応力度 ≈ 0.80) および1,400 μ (相対応力度 ≈ 0.90) に設定した場合の 検出波の最大振幅と载荷繰返し回数との関係を示したものである。ただし、図の縦軸は、図-4と同様の方法で無次元化してある。図-6によれば、各試験体とも载荷繰返し回数が増加するにつれて検出波の最大振幅は減少して、最終的には所定値に漸近する傾向を示す。これらの漸近値は、繰返し上限設定ひずみ度が大きいほど低下する。このことから、定ひずみ繰返し载荷時には、载荷繰返し回数が増加しても試験体は不安定場へは移行せず、ひずみレベルに応じて特定の安定場に落ち着くことがわかる。なお、図-6において、第11サイクル目になると、検出波の最大振幅が著しく減少しているが、これは、第11サイクル目以降、繰返し上限設定ひずみ度を最大耐力時の値に増大させて定ひずみ繰返し载荷を行ったためである。ただし、この場合の検出波の最大振幅は、载荷繰返し回数およびそれまでの载荷履歴に殆ど影響を受けない。

図-7および図-8は、それぞれ繰返し载荷時の上限設定ひずみ度を、それぞれ780 μ および1,400 μ とした場合の 下限設定応力時のコンクリートの伝達関数の振幅スペクトルを示したものである。ただし、図中の伝達関数の振幅スペクトルも、図-3と同様の方法で無次元化してある。図によれば、繰返し上限設定ひずみ度を780 μ に設定した場合、第1サイクル目のコンクリートの伝達関数は、漸増繰返しおよび定荷重繰返し载荷時の場合と同様に、約150kHz

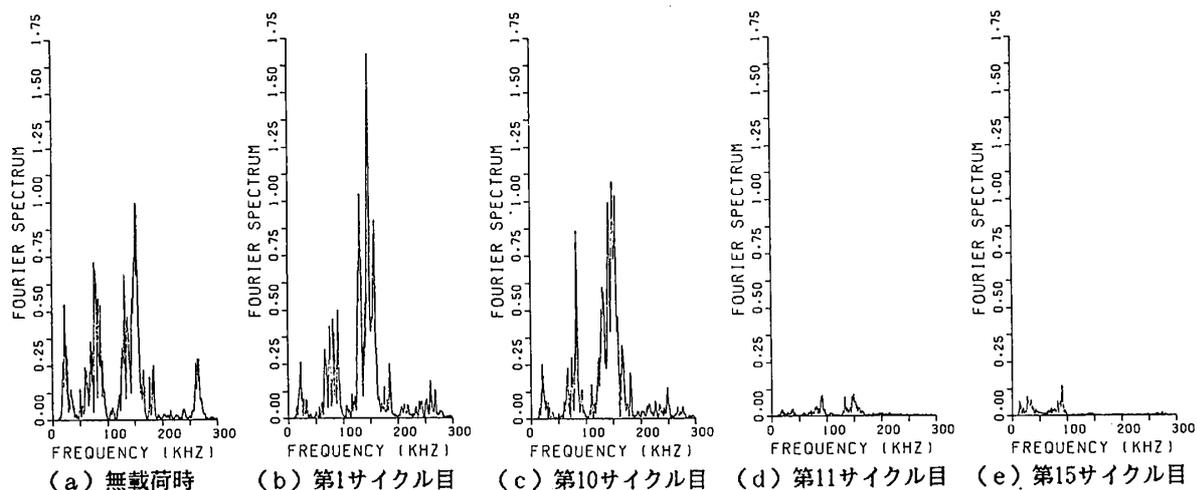


図-7 コンクリートの伝達関数のスペクトル (定ひずみ繰返し载荷時、 $\epsilon_u=780\mu$ 時)

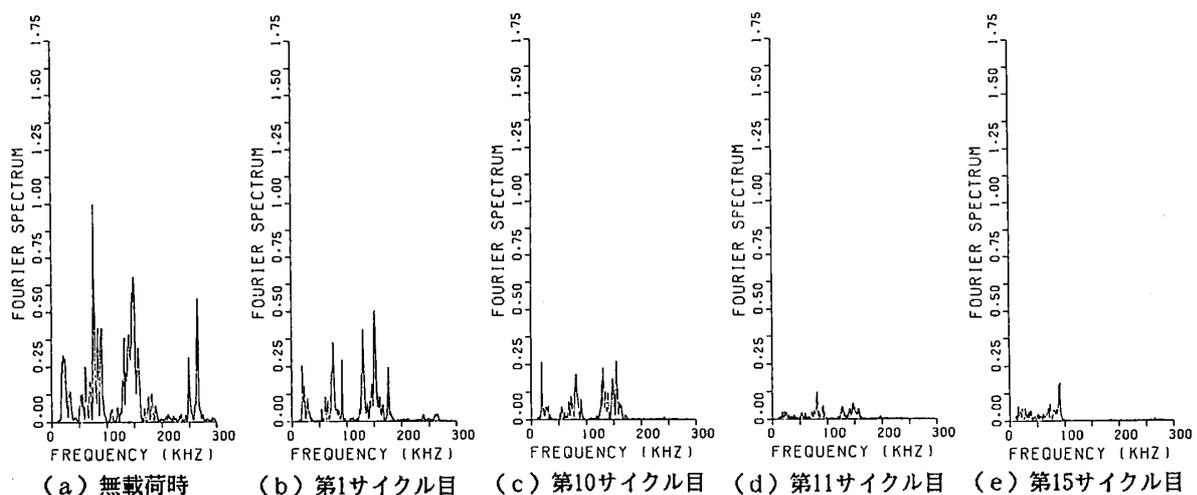


図-8 コンクリートの伝達関数のスペクトル (定ひずみ繰返し载荷時、 $\epsilon_u=1,400\mu$ 時)

の周波数帯で、周波数成分が無載荷時の値を上回る領域があるが、繰返し載荷時の上限設定ひずみ度を $1,400\mu$ に設定した場合には、このような現象は認められず、コンクリートの伝達関数は載荷繰返し回数の増加に伴って徐々に減衰する傾向を示す。

以上のように、AEの源波形を算定する際に必要なコンクリートの伝達関数は、コンクリートの累積損傷度の程度によって著しく相違するため、載荷中に発生したAEの正確な原波形解析を行うためには、時々刻々と変化するコンクリートの内部構造に対応した伝達関数を定量的に把握しておく必要のあることがわかる。

4. 結 論

本研究では、AEの源波形を推定する際に必要なコンクリートの伝達関数に及ぼす累積損傷の影響について一連の検討を行った。得られた結果を要約すると、およそ次のようになる。

- 1) 漸増、定荷重および定ひずみ繰返し荷重を受けるコンクリート中を伝播した矩形パルス波の伝播速度、最大振幅および初動振幅は、載荷繰返し回数が増加して試験体の劣化が進行するに伴って減少する。
- 2) コンクリートの伝達関数は、載荷前の段階では $100\sim 200\text{kHz}$ の周波数成分が卓越している。しかし、載荷によりコンクリート内部の損傷が進行するとともに、高周波数成分、特に $100\sim 200\text{kHz}$ の周波数成分の減衰が著しくなり、最終的には 100kHz 以上の周波数成分が殆ど消失する。
- 3) コンクリートの伝達関数は、コンクリートの内部構造の変化に伴って時々刻々と変化するため、載荷中に発生したAEの原波形解析を行う際には、その実態を明らかにする必要がある。

〔謝 辞〕

最後に、本研究の実施に際して有益なる御助言を賜りました三重大学谷川恭雄教授、並びに実験およびデータ整理に際して御助力を得た土田崇仁君（名古屋大学大学院生）および土屋宏明君（名古屋大学学部学生）に対して謝意を表します。なお、実験データの整理には、名古屋大学大型計算機センターのFACOM M-382を使用し、また、本研究費の一部は、昭和61年度文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)）によったことを付記する。

〔引用文献〕

- [1] 谷川恭雄、山田和夫、桐山伸一：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、コンクリート工学年次講演会講演論文集、第2巻、pp.129-132、1980。
- [2] 谷川恭雄、山田和夫、桐山伸一：コンクリートの破壊モードとアコースティック・エミッションの周波数特性との関係、セメント技術年報、第35巻、pp.405-408、1981。
- [3] Tanigawa, Y., Yamada, K. and Kiriya, S.: Relationship between Fracture Mode and Acoustic Emission Characteristics of Mortar, Proc. of JCMR, Vol.24, pp.241-247, 1981.
- [4] 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫：コンクリートのアコースティック・エミッション特性と破壊挙動に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第358号、pp.22-34、1985。
- [5] 丹羽義次、小林昭一、大津政康、奥田和男：アコースティック・エミッションの周波数特性に関する考察、土木学会論文報告集、第314号、pp.137-147、1981。
- [6] 大平貴規、岸輝雄：AE原波形解析による破壊の動的素過程に関する研究、日本金属学会誌、第46巻、第5号、pp.518-525、1982。
- [7] 岸輝雄、若山修一、篠崎泰夫、香川豊、中田栄一：AE原波形解析によるアルミナの破壊靱性試験におけるき裂進展の評価、日本金属学会誌、第49巻、第9号、pp.707-713、1985。
- [8] 尼崎省二、明石外樹、高木宣章、平野博範：超音波スペクトル解析によるコンクリートの品質評価について、第40回セメント技術大会講演要旨、pp.92-93、1986。
- [9] 坂田康徳、大津政康：弾性波フィルター特性によるコンクリートのひび割れ評価法に関する基礎研究、コンクリート工学、Vol.24、No.7、pp.135-145、1986。