

# [100] AE法によるコンクリートの最大履歴応力推定手法に関する研究

正会員 ○ 佐藤 成 (東京大学大学院)

正会員 魚本健人 (東京大学生産技術研究所)

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化がクローズアップされ、大きな社会問題になっている。塩分環境下でのコンクリート中の鋼材腐食、アルカリ骨材反応、予想を大きく上回る交通量や車両の大型化など、劣化の原因が数多く報告されている。しかも、その劣化は、阪神高速道路、山陽新幹線、首都高速道路といった、非常に重要な構造物にまで及んでいる。半永久構造物の神話が崩壊するとともに、補修・補強工事によって耐用年数を延ばしていく必要に迫られている。したがって、コンクリート構造物の劣化程度や範囲、適切な補修時期などを知ることが重要であり、構造物の使用を一時たりとも停止することなく、非破壊的に劣化度を判定できる検査手法の確立が望まれている。

AE (アコースティックエミッション) 法は、非破壊試験の中でも材料内部の変化に伴って放出される弾性波を検出し、情報を得る受動手法の一つであり、時々刻々の動的な挙動が把握できるため、構造物を、常時あるいは定期的に監視することによって劣化程度を知る手掛りになる可能性を持っている。しかし、検出信号の物理的意味が不明確であること、周波数帯が広いこと、信号が微弱であることなどの測定技術における問題と、弾性波の伝播に及ぼす材料特性の影響が明らかにされていないことなど材料自体の問題があり、その適用は実験室レベルにとどまっている。したがって、現段階では野外におけるモニタリングは困難な点が多く、むしろ、実構造物からサンプリングしたコアを実験室内に持ち込んで行う測定手法の方がより有効であると思われる。

本研究では、①弾性波の伝播特性に及ぼすコンクリートの品質、クラックの存在、伝播距離の影響について実験的な検討をするとともに、②除荷の際、載荷板と供試体端面を完全に離してから再載荷する方式で、一軸繰返し圧縮試験を行った場合と、先行荷重を与えたコンクリートから切り出したサンプルを圧縮した場合のAEの発生状況を調べ、最大履歴応力を推定する手法について考察を加えた。

## 2. 弾性波の伝播特性

本実験でAEの伝播特性と呼ぶのは、伝播速度と減衰の2つであり、周波数、位相その他の要素は含まれない。これは、使用した変換子が140kHzに共振特性を持つPZT圧電型であり、周波数解析が困難であることや、適用するAEパラメータが事象と振幅分布であるため、変換子に到達するまでの減衰が結果に大きく影響すること、さらに伝播速度が材料定数(弾性定数や密度)や幾何学的条件(内部の細孔構造など)と深い関係があることなどからこのように定めた。図-1に測定装置を示す。コンクリートに変換子を取り付け、一方にパルスジェネレーターから発信させた100kHzの矩形波を入力し他方のAEセンサーで検出し、AE装置によってそのピーク値を測定した。また、伝播速度については、現在既に多くの場所で利用されている超音波測定装置を使用した。

### 2.1 コンクリートの品質の影響

コンクリートの品質のうち、水セメント比、空気量、含水状態の3つを選び、10×10×40cmのコンクリート供試体について実験を行った。表-1に示す配合のコンクリートを打設後材令2日で脱型し、標準水中養生(20℃)を施した後5週目から気中乾燥(20℃、湿度50%RH.)させ表乾状態で伝播試験を行った。その後、60℃の乾燥器で乾燥させ、1日、3日、1週、4週目で取り出し随時伝播試験を行った。

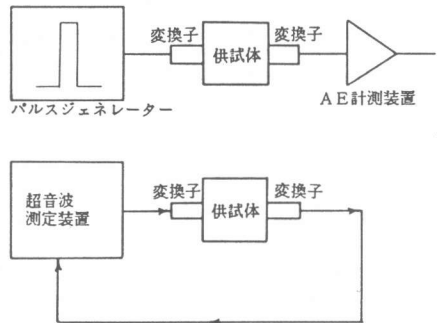


図-1 伝播試験に用いた測定装置の概要

表-1 配合 (W/C シリーズ)

W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	SL (cm)	Air (%)
4.0	4.6	193	482	779	941	10	1.2
5.0	4.8	193	385	852	950	10	1.2
6.0	5.0	193	321	916	941	10	1.1

(空気量シリーズ)

W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	SL (cm)	Air (%)
5.0	4.8	192	385	851	949	10	1.3
5.0	51.2	172	344	898	876	10	5.5
5.0	51.2	168	337	879	858	10	7.5

図-2および図-3は、W/C、空気量の異なる3種類のコンクリートに対する伝播試験の結果である。横軸は表乾状態を基準とした重量変化率である。また、縦軸は0 dB=250 μVとする検出ピーク値と伝播速度を示した図である。この実験に先立って、検出ピーク値の読み取り誤差を測定したところ、コンクリートを介さない場合±1 dB、介した場合に±2～±3 dBの誤差が見込まれることが明らかとなった。これを考慮に入れば、表乾状態ではW/Cや空気量が異なっても伝播特性はそれほど変化がない。従来、伝播速度はW/Cによって変化するとされていたが、むしろ、乾燥による影響の方が大きいことが判明した。

## 2.2 クラックの存在による影響

クラックの存在によって、弾性波の伝播特性がどのように変化するかを調べるため、中央点集中載荷方式による曲げ試験ならびに圧縮試験時の伝播特性を測定した。表-2に示す配合のコンクリートを打設後、脱型、5週標準水中養生し、1週ないし2週間実験室に放置し試験を実施した。試験体寸法は図-4に示す10×10×40cmの梁およびφ10×20cmの円柱である。梁試験体の鉄筋量は0%、1.4%および2.9%の3種類とした。

図-5および図-6は、各々無筋および鉄筋コンクリートばりの中央点集中載荷試験時の、各荷重レベル(強度比)における伝播特性を示したものである。無筋の場合、中央に曲げクラックが生じると同時に主破壊に至るため、試験前後での値を示した。検出ピーク値は12dB、伝播速度は5%低下していることが明らかである。一方、鉄筋コンクリートの場合、主破壊以前から既に曲げクラックが生じており、検出ピーク値が徐々に低下していくことが認められる。

一方、図-7は、圧縮試験時における伝播特性の変化を示すものである。圧縮強度の70～80%付近まではほぼ一定のピーク値が検出されておりそれ以上の荷重であってもピーク値の低下は小さい。これらの結果から、A E弾性波の伝播は連結したクラックを横切る方向に伝播するよりも、分散したクラックが存在する場合の方が減衰は小さいことが判明した。

## 2.3 伝播距離の影響

表-2に示す配合の、10×10×120cm および10×10×40cmのコンクリート供試体を作製し、材令20～25週で伝播試験を行った。供試体中央からパルスを入力し、検出する変換子を伝播距離が変化するように取り付け、検出信号のピーク値を測定した。

図-8は、10×10×120cm 供試体に対する検出ピーク値と、パルス入力位置から検出位置までの距離との関係を示したものである。ばらつきがあるものの、ほぼ、直線的に検出ピーク値は低下する傾向が認められる。これによると、10cm伝播するごとに10dB程度減衰していくことがわかる。

図-9は、10×10×40cm供試体に対するもので、パルス入力変換子を取り付けてある面と、同一面、側面、裏面の3つの面で、供試体中央からの距離を変えて検出した結果を示したものである。低下する傾向は明瞭ではないが、少なくともパルス発生位置の両側15cm程度までは減衰が小さいことが認められる。この結果、10

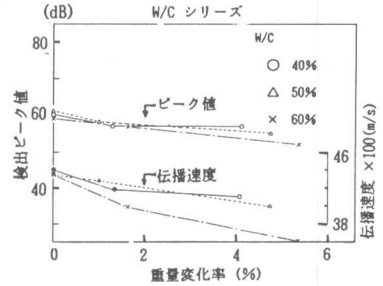


図-2 乾燥による伝播特性の変化

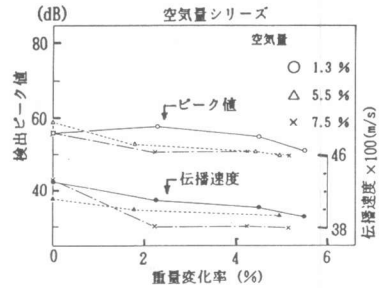


図-3 乾燥による伝播特性の変化

表-2 配合

W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	SL (cm)	Air (%)
5.0	4.8	19.3	38.5	8.52	9.50	1.0	1.2



図-4 無筋・鉄筋コンクリート梁

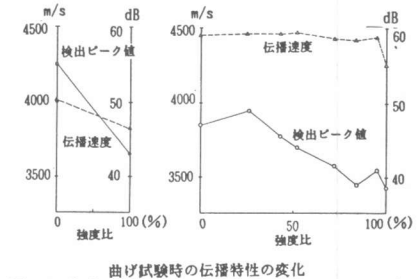


図-5 (無筋コンクリート) 図-6 (鉄筋コンクリート)

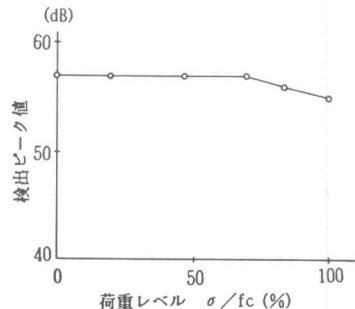


図-7 一軸圧縮試験時の検出ピーク値

～20cmのコンクリート試験体を用いた場合には弾性波の減衰が小さいため、供試体全体の挙動をとらえることができることが明らかとなった。

### 3. 最大履歴応力の推定

コンクリートにもカイザー効果が認められることは、これまでも比較的多く報告されている。しかし、実際の構造物に適用する手法は明らかにされておらず、材料研究的なものが多い。そこで本研究においては、実構造物からサンプリングしてきたコアを載荷してAEを計測し、そのコンクリート要素が過去に受けた最大履歴応力を推定する手法を明らかにすることを目的として室内実験による検討を実施した。

#### 3. 1 円柱供試体の一軸繰り返し圧縮試験

除荷の際、供試体端面と載荷板を離さず再び載荷する従来の方法（方法1）と供試体端面と載荷板とを完全に離してから再載荷する方法（方法2）、ならびに厚さ1mmのテフロンシートを使用して載荷する方法とを比較した。コンクリートは表-2に示す配合で、材令60～80週、圧縮強度 550～600 kg/cm<sup>2</sup>のφ10×20cm供試体について実験を行った。使用したAE測定装置の概要を図-10に示す。試験に際しては数居値 30mV（主アンプ出力時）、増幅60dB（40dB（プリアンプ）+20dB（メインアンプ））、フィルター 50kHz～2MHzに設定し全試験を通じて固定した。AEパラメータは、事象率、事象総数、振幅分布を採用した。

図-11は、方法1と方法2の場合のAEの発生状況の違いを示したものである。横軸は時間、縦軸に荷重とAE事象総数をとっている。端面を離さない場合には、カイザー効果が明瞭に認められるが、一度離してしまうと、処女載荷同様、最初からAEが頻発する結果となっている。これに対し、図-12は、テフロンシートを用いて繰り返し圧縮したもので、完全に端面を離し再載荷した場合の結果である。図-12から明らかなように、端面を完全に離した場合であってもテフロンシートを用いると明瞭にカイザー効果が認められる。従来の方法との比較のために、図-13に各ステップにおける振幅分布を示した。奥行きは荷重レベルを表す。荷重レベルが高くなると、規模の大きい破壊が起こると対応して、大振幅のAE事象が発生している。従来の方法では、最初の段階で既に大振幅の事象が認められるのに対し、テフロンシートを用いると載荷初期から認められる載荷端面で発生する大振幅の弾性波の影響が軽減されることが示された。

次に、AE発生頻度が急増する荷重から、最大履歴応力の推定を試みた。事象総数-時間曲線において、事象の急増する部分の前後で接線を引き、その両接線の交点から最大履歴応力を推定した。その結果が図-14である。荷重レベルが高くなると精度が悪くなるものの、平均4.2%という誤差範囲におさまり、一軸繰り返し圧縮試験に対しては、限界応力以下で十分目的が達成できた。

#### 3. 2 コアサンプルによる載荷応力の推定

表-2に示す配合で、材令60～80週、圧縮強度550～600kg/cm<sup>2</sup>のφ15×30cmおよびφ10×20cmのコンクリート供試体を用い先行荷重を与えた後各々10×10×10cm、φ10×9cmの寸法となるように

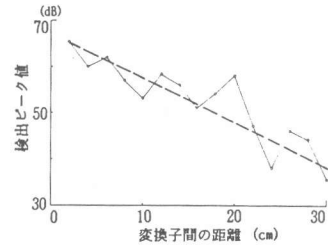


図-8 10×10×120cmにおけるピーク値の減衰

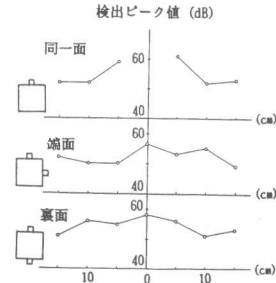


図-9 10×10×40cmにおけるピーク値の減衰

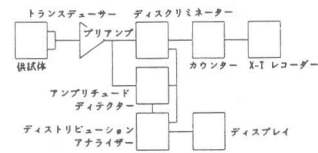


図-10 AE測定装置の概要

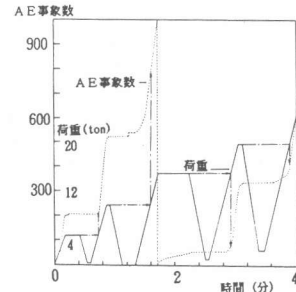


図-11 端面を離した場合と離さない場合のAEの発生状況

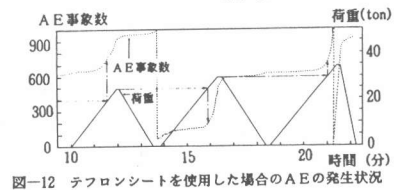
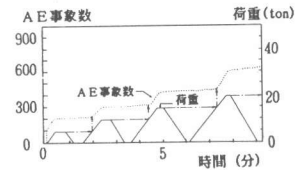


図-12 テフロンシートを使用した場合のAEの発生状況

上下部から2つずつコアを切り出し、先行荷重と同じ方向に載荷してAE事象を計測した。円柱供試体の場合と同様に、AE発生頻度が急増する荷重から先行荷重の推定を試みた。

表-3に推定結果を示した。なお、表中で推定不可となっているのは、AE発生頻度の急増点が既に破壊域に達している場合であり、処女載荷と同じ傾向を示したものである。円柱供試体の場合に比べ、推定精度が悪いだけでなく、ばらつきが大きく、これだけのデータではその傾向をつかむことが困難である。このように推定結果が大きく異なっている原因として、材料内のクラック分布が均等でなくコアの採取位置による影響が大きいことや、増幅、しきい値など、設定条件に問題があることなどが考えられる。設定条件は、予備実験によって決定したが、AE計測は一般にAEパラメータの形で記録するため、同一条件でパラメータを変更した場合の結果を求めることができない。このようなパラメータで記録するシステムを用いる場合には、今後さらに同様の実験データを蓄積することが必要であるが、さらにパラメータによる記録方法そのものに関する検討も必要であろう。

#### 4. 結論

伝播特性に関する実験結果をまとめて示す。

- (1) W/C、空気量の影響に比べ含水率の影響が大きく、含水状態によって伝播特性が大きく変化する。
- (2) 弾性波の伝播は、伝播垂直方向のクラックの存在およびクラック幅によって大きく妨げられる。
- (3) 伝播距離が20cmを越えるような場合には、弾性波の伝播の減衰が大きくなる。
- (4) 通常サンプリングされるコアは寸法が小さく、また圧縮試験時の伝播特性の変動も小さいことから、AE計測には良好な寸法である。

最大履歴応力の推定手法に関する実験結果を次に示す。

- (1) 一軸繰返し圧縮試験においては、テフロンシートを使用すれば、端面を完全に離してもカイザー効果が認められ、5%以内の精度で最大履歴応力の推定が可能である。
- (2) 先行荷重を与えたコンクリートから切り出したコアによる先行荷重の推定を行った場合、ばらつきが大きく、推定不可能となる場合も認められる。その原因は材料内のクラック分布が不均一なことやパラメータで記録する計測システムに問題があると推定される。

#### 参考文献

- 1) 尾上守夫他、アコースティックエミッションの基礎と応用、コロナ社、昭和51年、
  - 2) 大津政康、コンクリート材料におけるアコースティックエミッション特性とその発生機構に関する基礎的研究、京都大学学位論文、昭和52年、
- (付記) 本研究費の一部は昭和59年度小川育英会学術研究助成金および昭和60年度文部省科研費「一般研究C」によるものであることを付記する。

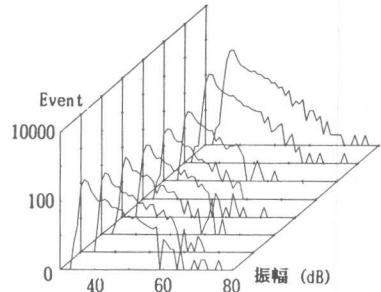


図-13(a) 従来的方法で載荷した場合の各荷重レベルでのAEの振幅分布

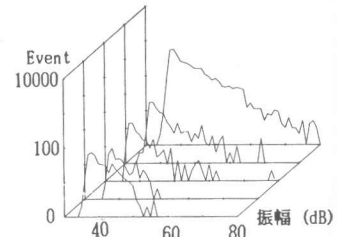


図-13(b) テフロンシートを用いて載荷した場合の各荷重レベルでのAEの振幅分布

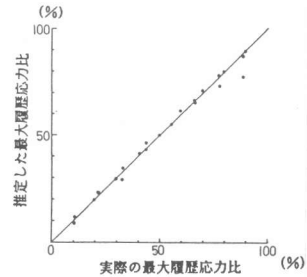


図-14 一軸圧縮試験における最大履歴応力の推定結果

表-3 切り出したサンプルによる先行荷重の推定結果

供試体寸法 cm	先行応力 ( $\sigma_0$ ) kg/cm <sup>2</sup>	推定応力 ( $\sigma_e$ ) kg/cm <sup>2</sup>	出 ( $\sigma_e/\sigma_0$ )
$\phi 15 \times 30$	153	上 236	1.54
		下 222	1.45
	153	上 229	1.49
		下 275	1.80
	153	上 180	1.18
		下 不可	—
$\phi 10 \times 20$	198	上 191	0.96
		下 不可	—
	190	上 不可	—
		下 不可	—
	190	上 162	0.85
		下 不可	—