

論文

[1106] スペクトロスコピー法によるコンクリート表面ひびわれの
定量的深さ評価法に関する研究磯部 佳明*¹・大津 政康*²

1. はじめに

高度成長期より現在まで、急激な建設投資により造られたきたコンクリート構造物において、アルカリ骨材反応や塩害、交通量の増加等の原因で、ひびわれや空隙等によると考えられるコンクリート構造物の早期劣化が多発している。今日、そういったコンクリート構造物の耐久性の欠如が大きな社会問題となると共に、その対策として非破壊評価法の開発が急がれている。

ひびわれはコンクリート構造物の欠陥の中で最も普遍的であり、従来より様々な評価法が検討されてきた。ひびわれ深さの評価においては、弾性波動の到達時間差に基づく方法が提案されている。しかし、この方法はコンクリート中に弾性波の伝播速度の異なる介在物（鉄筋等）が存在する場合、その性質上適用が困難である。

本研究は、超音波法のこの点での改良を目的としたスペクトロスコピー法[1]の概念を用いて、鉄筋コンクリート部材のひびわれ深さを定量的に評価し、実用化する方法について検討を行った。現在に至るまでこの研究は小型の梁部材についてなされていたが、この目的のために、より梁高さのあるもの（ブロック供試体）を使用した。さらに、AEセンサの固定器具を開発し、手軽な計測を試みた。また、校正曲線を理論的に境界要素法（BEM）により決定する手段について検討した。

2. 実験および解析概要

2. 1 使用材料と供試体

実験ではAE剤を混和したコンクリートを用い、鉄筋で補強した25cm×25cm×25cmの立方体ブロック供試体を作成した。表-1にその配合を示す。なお、粗骨材の最大寸法は20mmであり、表中の空気量、スランプは打設時における実測値である。

ひびわれは、供試体の打設時に厚さ1mmの鉄板を型枠の中央に固定し、脱型時にその鉄板を取り除くことにより人工的に作成した。ひびわれ深さは0cm, 1cm, 3cm, 5cm, 7cm, 10cmの6種類を用意した。鉄筋は、D10の異形棒鋼をスペーサーを用いて、かぶり5cmで固定した。供試体の配筋を図-1に示す。全

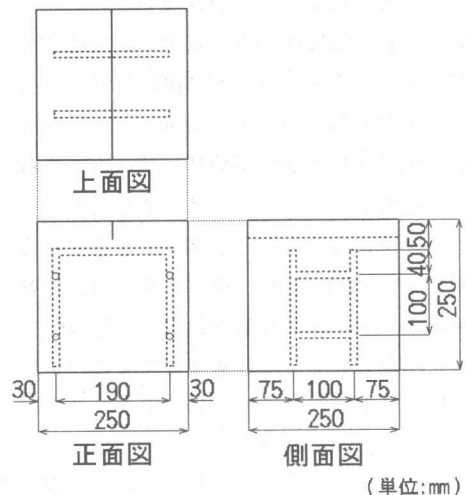


図-1 供試体配筋図

* 1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻（正会員）

* 2 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博（正会員）

ての供試体は、打設後 2 4 時間で脱型し、恒温室で 2 8 日間の水中養生の後、養生槽より取り出し気乾状態として応答スペクトルの計測を行った。表-1 には同じ配合で作成した 3 本の標準円柱供試体の材齢 2 8 日で求められた圧縮強度、引張強度、ヤング率も示してある。

表 1 コンクリート供試体の配合および力学特性

W	C	S	G	AE	slump	air	compressive strength	tensile strength	Young's modulus
kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	cc	cm	%	Mpa	Mpa	Gpa
168	420	740	992	150	3.2	5.0	53.3	4.07	32.0

2. 2 実験方法

実験は、図-2 のようなシステムにより応答スペクトルを計測した。ひびわれから両側 10cm、奥行き方向中央部 (12.5cm) に市販の AE センサを取り付け、入力側の AE センサにファンクションシンセサイザより電圧一定で出力周波数が時間に伴って連続的に変化する sine 波形の電気信号 (スイープモード出力) を 1kHz から 40kHz まで約 39 秒間入射した [2]。この時、受信センサで検出された弾性波は、

FFT 法 [1] 等を用いることなく、検出信号の電圧をデジタルレコーダに直接記録させることにより応答スペクトルを求めた。計測時には、供試体は全底面が床に完全に固定されるよう設置した。AE センサの取り付けは、両面テープによるものと、図-3 に示すような AE センサ固定器具 (デバイス) の 2 通りを用いた。デバイスは実用性および簡易性を考慮し開発したもので、適度な強度のバネが取り付けられている左右の円筒に AE センサをはめ込み、中央部に設けてある取っ手を持ち、

中心をひびわれ位置にして押しつけて測定する。実際の測定には AE センサの先端にグリースを塗布して行った。さらに計測は、全供試体において 2 種の方法を用い、周りの雑音等の影響を受けていないことを確認しながら供試体 1 本につき少なくとも 3 回測定を行い、記録した応答スペクトルの再現性を確認した。また、2 つの AE センサを張り合わせ、システムの感度自身に特別なピークが発生していないことを確認した。なお、計測にあたっては、測定する供試体の全体を

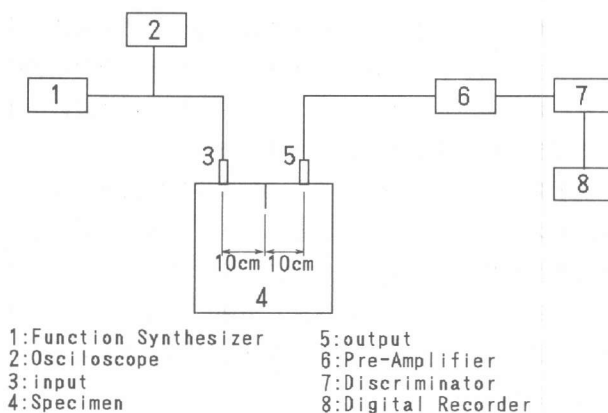
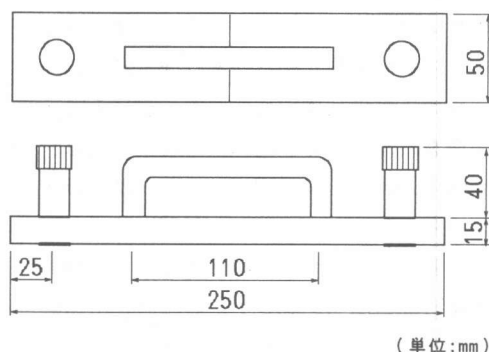


図-2 応答スペクトルの計測システム



(単位:mm)

図-3 AE センサ固定器具 (デバイス)

通じて測定周波数領域内のピークが全て飽和することなく確実に記録できるように、予め入力信号の電圧と受信波増幅率を調整して測定した。従って、以下に示す応答スペクトルの振幅は全て相対的なものである。

2. 3 BEM解析

スペクトル上のピークは、部材の共振周波数に係していると考えられるため、境界要素法（BEM）を用いて2次元での動的応答解析を行った。解析には、実験で得た供試体のヤング率およびポアソン比を用い、周波数を0kHzから40kHzまで500Hzごとに入射した。解析モデルは、各ひびわれ深さごとに、実験に対応させた箱型と実際の床版への適用を考慮した半無限体の2つを用いた。図-4にひびわれ深さ10cmの箱型モデルと半無限体モデルを示す。寸法は箱型モデルが25cm×25cm、半無限体モデルが90cm×25cmである。図中の数字は代表的な節点番号を表しており、約1cmから2cmの間隔で、モデルの左下より反時計回りにとっている。支点の拘束条件はモデルの下部中央をピン支承、その他全ての下部をローラ支承とした。

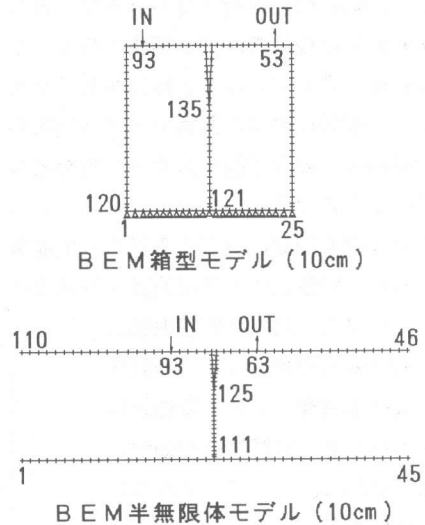


図-4 BEM解析モデル

3. 結果および考察

3. 1 応答スペクトル

ひびわれ深さ10cmの供試体において、AEセンサを両面テープおよびデバイスを用いた場合に得られた応答スペクトルを図-5に示す。計測方法の違いにより個々のピークの振幅値の対応は若干異なっている。しかし、その出現傾向は非常によく一致していることが分かる。これにより本デバイスを用いた測定方法は、実験を容易にするためにかなり有効であるということが確認された。

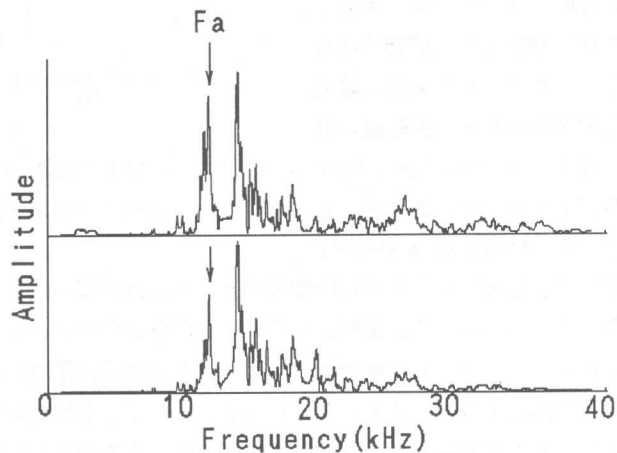


図-5 デバイス（上）と両面テープ（下）の応答スペクトル（ひびわれ深さ10cm）

ここで、スペクトルを再認識することも含め、BEM解析の有効性を確かめるために、ひびわれ深さが10cmの供試体について図-5中にFaと示したピーク（12kHz付近）について簡単な検証実験を行った。実験方法は、このFaピークの周波数を入射側のAEセンサより連続的に送信し、供試体のひびわれ面上で受信AEセンサを聴診器の要領で順次移動させ、垂直方向の振幅をとる。図-6はこれをプロットして、解析で得られた共振モードと対応させたものである。これを見る

と、振幅の相違が若干見られるが、BEM解析での理論モードと実験でのモードはほぼ一致していることが分かる。すなわち、解析における共振モードは実際の供試体のその周波数に対する挙動を表しているものである。また、スペクトルは個々の周期関数に対応する出力の振幅値であり、順番に個々の周波数を供試体に一定振幅で入力した応答振幅と対応するものである。この結果により本研究における弾性理論を用いたBEM解析の有効性が確認された。従って、この解析の結果を用いて、スペクトル受信点での各周波数入射に対する応答垂直方向振幅の絶対値をプロットすれば、実験で得られた応答スペクトルと比較することができる。図-7にひびわれ深さ10cmの応答スペクトルを示す。この実験で用いたシステムでは、周波数の増加と共に感度特性も変化するため、BEM解析結果と実験結果はピーク振幅値の対応は必ずしも一致しない。図中の箱型モデルでの応答スペクトルは、約10kHzから30kHzの間

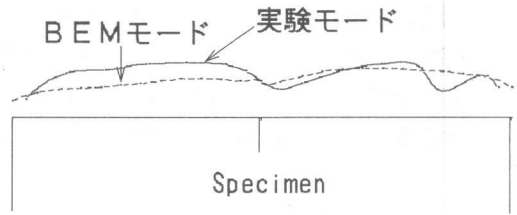


図-6 ひびわれ深さ10cm供試体における共振モードの検証実験

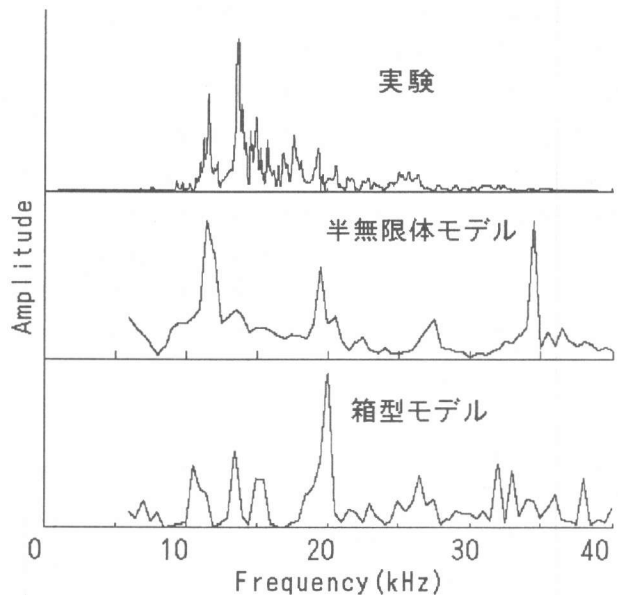


図-7 ひびわれ深さ10cm供試体の実験結果と半無限体モデルおよび箱型モデルの応答スペクトル

において、実験結果に現れた特徴的なピークとはほぼ一致していることが分かる。しかし、半無限帯モデルにおいては、全体としてピークの数が少ないことが認められた。これは、モデルを大きくすることによりモデル全体の共振ピークが低周波数域に現れるため、比較的高い周波数域のピークが減少するためであると思われる。従って、半無限体モデルでの解析では、形状共振のピークはほとんど出現せず、それ以外の何らかの情報を主として示していると考えられる。すなわち、これらはひびわれ周辺の情報を含んでいる可能性が高いと思われる。そこで、20kHz付近のピークに着目すると、その出現状況は実験結果のそれと類似していることが認められた。これにより、この周波数帯にひびわれ周辺の情報を持つピークがあると考えた。

ところで、図-7において、ピークの出現位置が僅かに異なる等、これらの解析結果に差異が含まれることが認められる。この理由として、実際には3次元である供試体を2次元解析したため、周波数間隔が500Hzと粗いこと、モデルの拘束条件が実際の現象と微妙に異なる、実験で使用する供試体の諸条件が一様でない、等が考えられる。しかし、これらの解析結果は、ピークの出現状況や大まかな発生周波数帯を求めるうえでは有効であると思われ、結果考察には大きな影

響を持たないものであると考えた。

3. 2 較正曲線

梁部材のような比較的その高さが小さいものにおいては、ひびわれ深さが大きくなるにつれ、スペクトル上の特定の共振ピークが低周波数域に移動することは既に報告されている[2][3]。図-8にひびわれ深さが0cmから10cmの応答スペクトルを示す。ここで、ひびわれ深さ0cmの応答スペクトルにおいて23kHz付近に現れたピーク周波数をFbとする。これは、特徴的なピークの中で13番目の周波数に当たる。以下、ひびわれ深さが1cmから10cmの応答スペクトルにおいても同様に、出現形状を考慮しながら13番目のピーク周波数に着目して決定した。また、供試体全体の共振によって生じたものと思われるピーク周波数Fcを参考のため示しておく。これは1番目のピーク周波数である。

ここで、ひびわれを持つ全ての供試体の応答スペクトルから、Fbピークがひびわれ深さの増加により低周波数側へ移動することが認められた。これは、前節で示したFaピークには認められておらず、それぞれのピーク周波数により異なることも確認した。

そこで、ひびわれを持つ全ての実験、箱型断面BEM解析、半無限体BEM解析の応答スペクトルに対して、ひびわれ深さ0cmのFbと各ひびわれ深さにおけるFbの比(F_b/F_{b0})を求めた。縦軸には a/d (ひびわれ

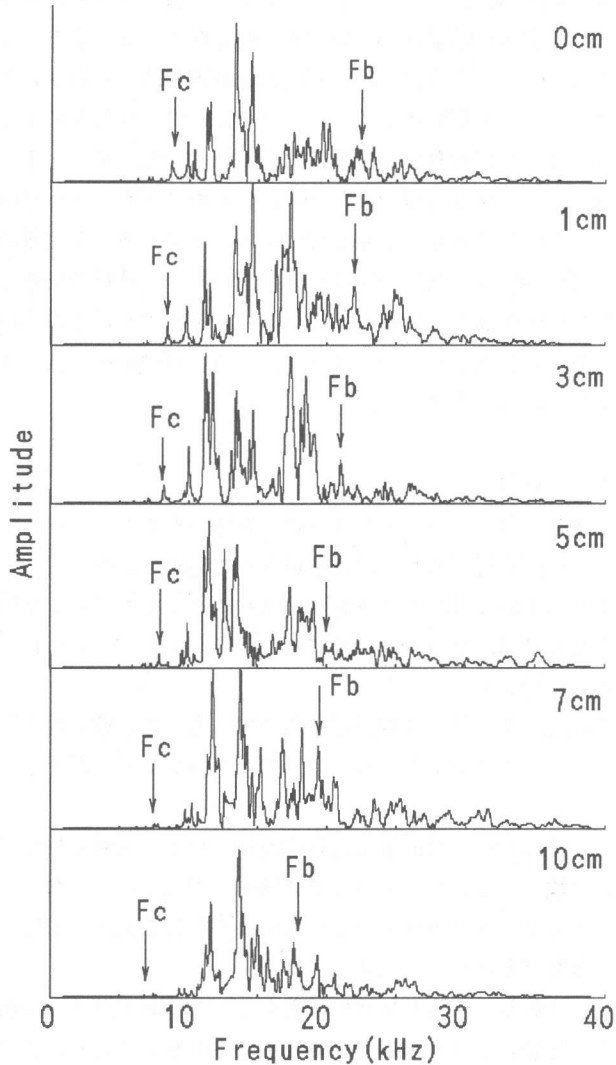


図-8 応答スペクトル (0cm~10cm, TAPE)

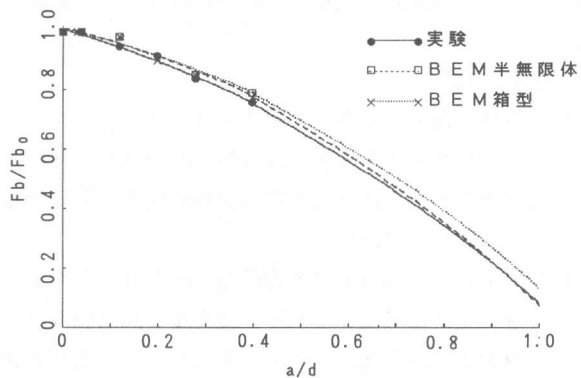


図-9 較正曲線 (Calibration Curve)

深さ／供試体高さ）をとる。それを2次曲線で近似した結果を図-9に示す。BEM解析の結果に対し、実験の結果が高い精度で近似されている。また、これらの曲線は全て上に凸の形状を示しており、ピーク周波数比の変化状況が理論的に考察されたと考えられる。較正曲線は、供試体の形状に大きく左右される[4]。しかし、供試体形状による変化の程度が分かっているならば、この曲線のみでひびわれ深さを推定することは可能である。従って、このような較正曲線(=Calibration Curve)が予め得られていれば、応答スペクトルを求めるだけで、この曲線からひびわれ深さを予測することができると思われる。すなわち、この較正曲線をより有効に使うために、深さ(d)-周波数帯(f)曲線を別に作成しdの時の周波数帯を確認し、実験データの周波数帯ピークを検索し、較正曲線に乗せればよい。RC部材における鉄筋の影響は、ほとんど見られないことは既に報告されている[4]。従って、このd-f曲線を作成する際に重要となるのは供試体の形状とひびわれ深さのみである。

4. 結論

本研究では、スペクトロスコープを用いたコンクリートひびわれ深さ評価法の実用化について検討、考察を行った。これより得られた結論は、次の通りである。

(1) 人工的なひびわれを有し、RC構造としたブロック供試体を用い、ひびわれ周辺の情報を得るため1kHzから40kHzまでの応答を計測した。これにより、ひびわれの影響を受けている共振ピークを認めた。

(2) 応答スペクトルの計測において、実用性、簡易性の目的でAEセンサ固定器具(デバイス)を開発し、その適用を試みた結果両面テープによる固定法と類似しており、その有効性を確認した。

(3) 共振ピーク周波数の出現状況について、境界要素法(BEM)の2次元動的応答解析を行い、実験での応答スペクトルと共振モードによってつながりがあることを検証実験により確かめた。さらに、半無限体モデルを用いてひびわれ周辺の影響をもつ共振ピークを考察し、これにより20kHz付近にそれを認めた。

(4) 実験およびBEM解析結果より、ひびわれ深さが増加するにつれ、ピーク周波数が低周波数側に移動していくピーク(Fb)を確認した。このピークに着目し、周波数比 Fb/Fb_0 とひびわれ深さの関係を較正曲線(=Calibration Curve)として求めたところ、BEM解析の結果と実験の結果が、ほぼ同一の較正曲線で近似されることが認められた。これより、このような較正曲線を用いてピーク周波数の変化からひびわれ深さを定量的に評価する可能性が示されたと思われる。

[参考文献]

- 1) 明石外世樹・尼崎省二：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの品質評価、セメントコンクリート論文集、No. 489、pp. 23-30、1987
- 2) 大津政康：超音波でRCのひびわれ深さを評価する、セメント・コンクリート論文集、No. 530、pp. 9-16、1991. 4
- 3) 中川照久・上杉真平・大津政康：超音波スペクトロスコープ法によるRC部材のひびわれ検査法に関する考察、土木学会論文集、No. 442/V-16、pp. 53-60、1992. 2
- 4) 坂田康徳：超音波スペクトロスコープ法に基づくコンクリートの欠陥評価法に関する研究、熊本大学自然科学研究科博士課程学術学位論文、pp. 81-pp. 130、1992