

[1092] 弾性波フィルター特性によるコンクリート構造物の欠陥評価法に関する基礎研究

正会員 ○ 坂田康徳 (九州東海大学 工学部)
 正会員 大津政康 (熊本大学 工学部)

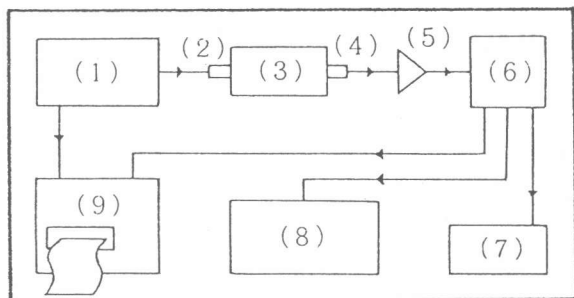
1、まえがき

近年、コンクリート構造物における各種欠陥に基づく構造物の耐久性の欠如が大きな問題となり、構造物の維持管理の面から、その健全性評価に関する効果的なコンクリート非破壊評価法の開発が望まれている。従来、コンクリート工学方面では、測定しようとするコンクリートの諸物性に応じて種々の非破壊評価法が実施検討されてきたが、現在、現場のコンクリート構造物中の欠陥を評価するための弾性波を利用した方法として、超音波法やAE法 (Acoustic Emission 法) が実施検討されている。超音波法は、主に、コンクリート中の弾性波の伝播速度を利用した時間領域における評価法であり、部材厚やひびわれ深さあるいは内部空隙の有無等を評価する方法として重要視されている。筆者等はAE法に用いられる計測機を主体とする装置による弾性波 (又は超音波) の周波数領域におけるフィルター特性 (超音波スペクトロスコピー^{1)・2)} に等価と考えられる) によるコンクリートの非破壊評価法 (ここではEFCMと略記する) を検討している。本方法によるコンクリートの劣化度評価やひびわれ評価については既に報告済みである³⁾。

本報告は、このEFCMによる実施コンクリート構造物内の欠陥評価の可能性を検討するため、発泡樹脂板による人工欠陥を埋め込んだコンクリート構造物 (壁体) 模型を造り、これを用いて欠陥評価に関する実験的検討を行なうと共に、有限要素法 (FEM) を用いて欠陥の埋め込まれている部分と埋め込まれていない部分の弾性波による2次元共振解析を行なって、実験結果との対応を検討したものである。

2、実験および解析の概要

図-1は本方法における計測システムを示している。本方法の原理および計測法についての詳細な説明は既報⁴⁾を参照されたい。実験に用いた壁体模型は、フーチング上に高さ約2.0m、長さ3.0m、厚さ25cmの板状部分を持つコンクリート駆体中に厚さ約5mmの発泡樹脂板を円形や角形に切り、その埋め込み深さや方向を変化させて壁体中に埋め込んだものである。円形欠陥は直径5,10および20cmとし、また、その埋め込み深さを発信トランスデューサー取り付け面から各各5,12.5および20cmとし

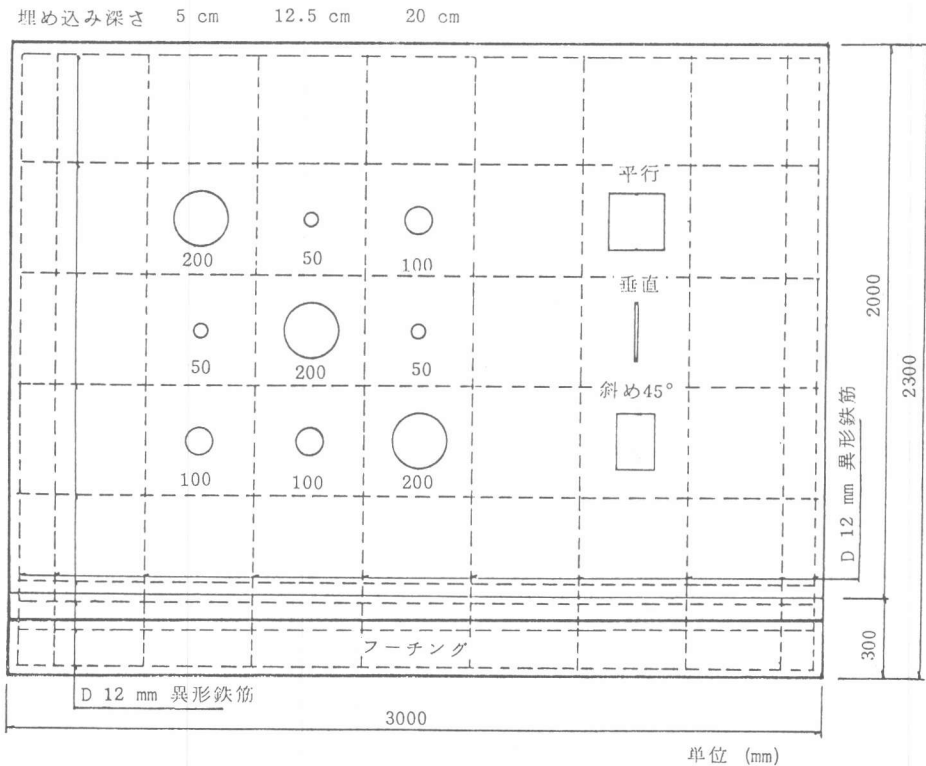


- (1) 信号発生機 (2) 発信トランスデューサー
- (3) 供試体 (4) 受信トランスデューサー
- (5) プリアンプ (6) デイスクリミネーター
- (7) デジタルマルチメーター
- (8) オシロスコープ (9) 電磁オンログラフ

(図-1) 計測システム図

、壁面に平行に埋め込んだ。角形欠陥は1辺20cmの正方形とし、壁面に平行、斜め45°および垂直の各方向に埋め込んだ。尚、この壁体模型は、その下部をブーチングと接しているため、他の縁端部との境界条件の相違によるフィルター特性の波形への影響は皆無ではないにしても、欠陥の存在に基づくピーク周波数への影響は無いものと考えられる。それ故、欠陥の配置は、壁体縁端部の境界条件の相違及び欠陥相互間のフィルター特性への影響を極力少なくするため、欠陥埋め込み位置を縁端部より離すと共に欠陥相互間の距離を大きくし、その純間隔を極力均一になるように留意した。図-2は本実験に用いた壁体模型の形状寸法および各欠陥の配置状況を示している。

フィルター特性の測定は、発、受信トランスデューサーを欠陥の埋め込まれている部分の壁面の両側に取り付けて行なう透過法で実施した。この際、発信トランスデューサーは計画された欠陥埋め込み位置の壁面中心に、また、受信トランスデューサーはその裏側とこれより左右5cmずつ離れた位置に取り付けた。また、トランスデューサー取り付けに用いるアダプターは、フィルター測定時におけるトランスデューサー周辺の影響を極力排除するため、図-3に示すような独自に製作したものを使用した。フィルター特性の測定範囲は1 - 50 kHz 間の周波数領域とし、また、送信波の電圧はフルスケールの1/2、受信波の増幅利得は70 dBとした。壁体模型の製作には市販の生コンクリート（A Eコンクリート）を使用した。表-1はこのコンクリートの配合条件および特性値を示している。尚、この壁体模型は、実験室に隣接した屋外に作られ、コンクリート打設後、約2週間で脱型し、その後、約3ヶ月ほど外気中で養生した後、計測を開始した。

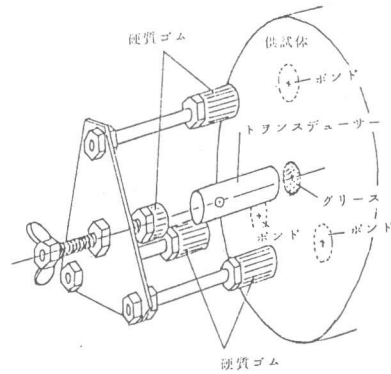


(図-2) 欠陥を埋め込んだ壁体模型

FEM解析は壁体模型に用いたコンクリートの特性値を用いて、壁体欠陥部のフィルター特性の測定における弾性波による壁体の挙動を想定して、厚さ25cm、長さ60cmの欠陥を有する部材および有しない部材の2次元共振解析を行なった。この場合の欠陥の位置および方向は部材軸方向にその表面より5、12.5、20 cmの深さとし、又、その形状は長さ20 cm、中央部の幅0.2 mmで、その端部が0となる扁平な菱形欠陥とした。解析対象は、入力トランスデューサー取り付け位置からの発信子外力に対する欠陥部裏側中央部の周波数応答であり、解析を行なった周波数帯域は10 - 35 kHz間である。尚、本解析に用いた欠陥は、その性質や形状（特に幅や端部）において実際と異なるため、実際のフィルター特性との厳密な対応はできないが、部材中における扁平な欠陥の有無に関するおおよその傾向は把握できるものとする。図-4は本解析に用いた部材の要素分割状況および支点拘束条件を示している。

3. 結果および考察

図-5-A、B、C、Dは欠陥の無い場合と、直径10cmの円形欠陥を深さ20、12.5および5cmの位置に、壁面に平行に埋め込んだ場合の周波数領域1 - 50 kHz間のフィルター特性を示している。欠陥の無い場合に比べて、欠陥の有る場合は顕著なピークが現われること、同一欠陥の周辺では、トランスデューサー取り付け位置の若干のずれに対して、卓越したピークの周波数には比較的变化が少ないこと、欠陥深さの増加に伴ってピーク周波

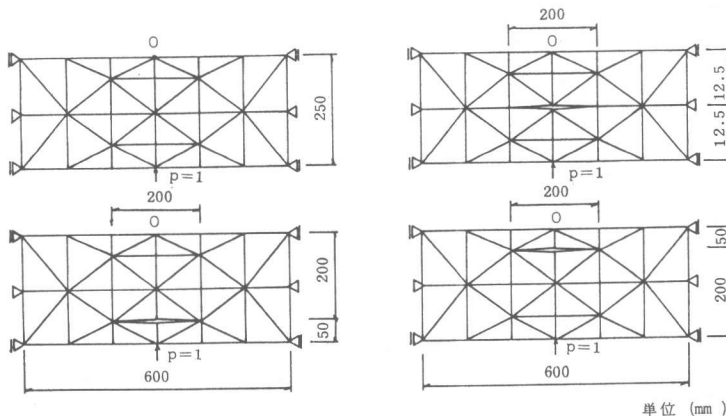


(図-3) アダプター図

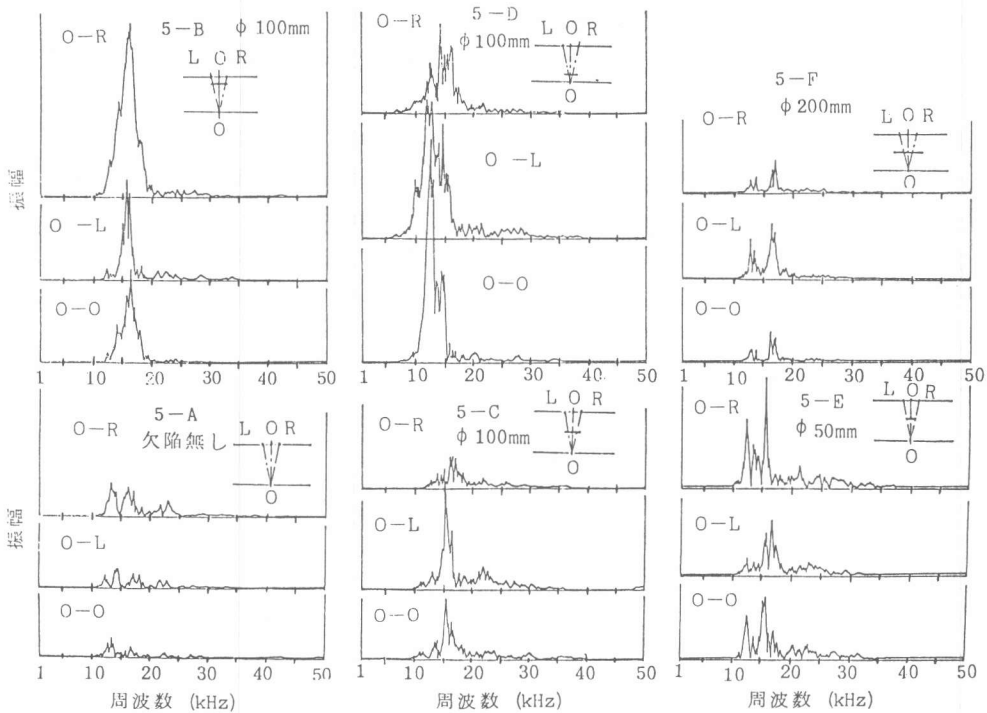
(表-1) コンクリートの配合条件および特性値

ϕ_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	W	σ_{28}	E_0 $\times 10^5$	E_1 $\times 10^5$	ν
20	18	4.0	53.5	47	187	254	3.07	2.30	0.203

ϕ_{max} は粗骨材最大寸法 E_0 は初期弾性係数 (kg/cm^2)
 W は単位水量 (kg/m^3) E_1 は割線弾性係数 (")
 σ_{28} は圧縮強度 (kg/cm^2) ν はポアソン比



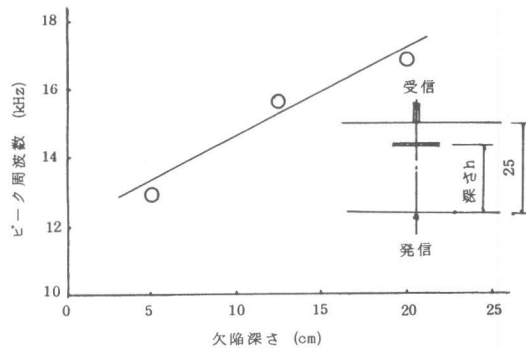
(図-4) 要素分割状況および支点拘束条件



(図-5) 欠陥の寸法および埋め込み深さの変化に伴うフィルター特性

数が若干増加すること等が判る。これは、発信トランスデューサーからの刺激によって起こされる弾性波が欠陥裏側へ回折する際、欠陥の裏側や端部と受信側壁面との間の位置関係より、特定の周波数を持つ波が共振や重合を起こして振幅を増加させるためと考えられる。また、図-5-E, C, Fは、壁体中心に直径5, 10, 20 cmの円形欠陥を壁面に平行に埋め込んだ場合のフィルター特性を示している。欠陥寸法 20 cm (図-5-F) では他の場合に比べて全帯域にわたって振幅が小さくなっているが、卓越したピークが2ヶ所に現われていることが判る。この2ヶ所にピークが現われた理由については、未だ不明であるが、全帯域にわたる振幅の低下は発信トランスデューサーのアタッチメント不良やその取り付け位置におけるコンクリート表面近くの気泡の存在等が考えられる。又、欠陥が小さい場合(図-5-E)には同程度のピークが多数現われる傾向があり、卓越したピークの識別がやや困難である。これより、欠陥寸法が小さくなると、その存在の確認が困難となることが予想される。

図-6は図-5-B, C, Dから得られた欠陥深さとピーク周波数との関係を示している。



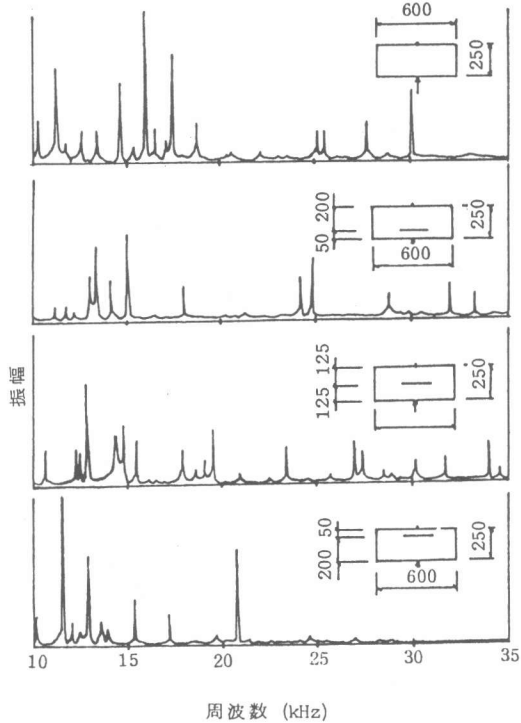
(図-6) 欠陥深さとピーク周波数の関係

欠陥深さとピーク周波数との間にほぼ直線的な関係があることが判る。

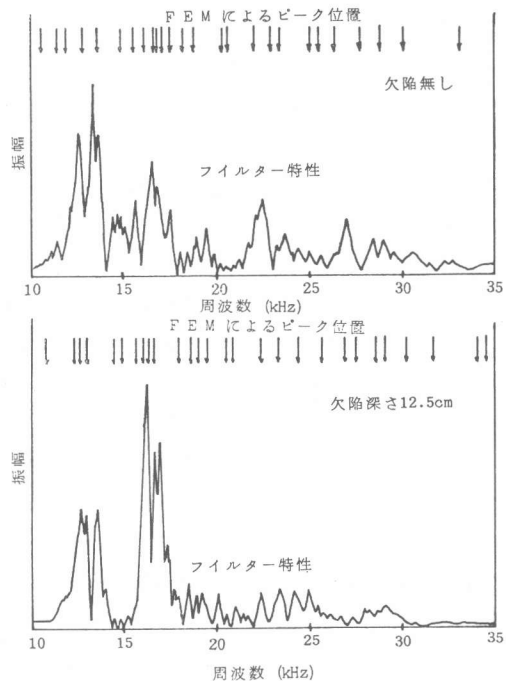
図-7は欠陥部周辺における発信子外力による部材の周波数応答をFEMを用いて解析した結果である。全領域にわたってピークが散在すること、その中でも、主なピークは10 - 20kHzの周波数帯域に現われており、実測値とほぼ同様の傾向にあること等が判る。しかしながら、解析に基づくピーク出現状況には、実測結果に見られるようなピーク群の部分的盛り上りが無く、そのため、実測結果との対応を検討する場合、そのピークの選定が一義的には困難である。これは、部材を完全弾性体とし、かつ、欠陥部を25 X 60 cmの小部材として2次元解析を行なっているため、部材軸方向の共振に基づくピークが多数混入してくるためと考えられる。コンクリートは、本来、大小粒の異種材料からなる複合材料であるため、実際の波の伝播過程では、多くの反射、屈折、回折、分散を繰り返し、伝達エネルギーを消耗するため、均一な材料に比べて減衰が激しいものと考えられる。そのため、壁体軸線方向へ伝わる波による、この周辺での部材の共振はほとんど生じず、これらに基づくピークも小さなものとなることが考えられる。故に、解析に減衰効果を取り入れたり、欠陥寸法を厳密にし、3次元解析を行なう等、より実際に近付けた解析を行なうことにより、さらに実測値に近い結果を得られるものと考えられる。

図-8は壁体中央部に壁面に平行に長さ20cmの欠陥を有する場合と欠陥を有しない場合のフィルター特性の実測結果と解析に基づくピーク周波数を同一周波数軸線上で比較した結果である。両者は欠陥形状（特に幅や端部）の相違により、厳密な対応はできないが、両者の間には、ほぼ同じ位置にピークが出現している様子判る。

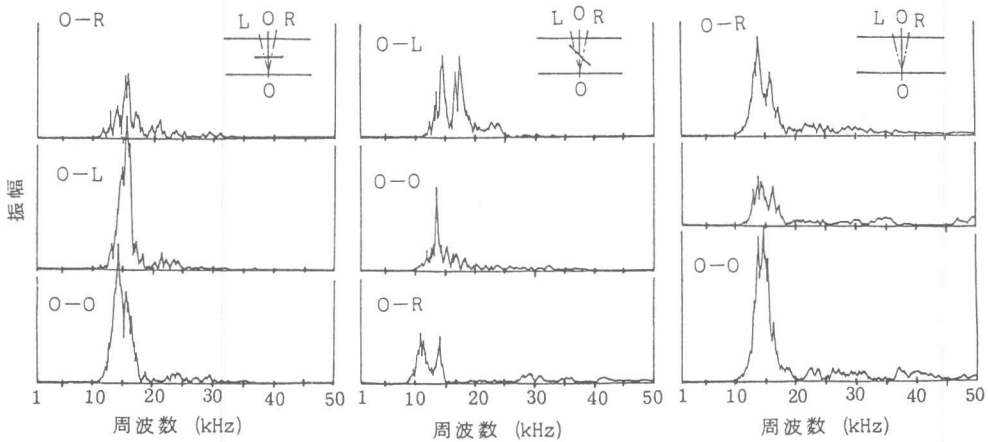
図-9は20 X 20 cmの角形欠陥を壁体中



(図-7) FEMによるピーク解析結果



(図-8) フィルター特性とFEM解析結果の比較



(図-9) 欠陥の方向の変化とフィルター特性

心において、壁面に平行、斜め 45° および垂直の各方向に埋め込んだ場合のフィルター特性を示している。斜め 45° の場合は、他の場合に比べて、受信トランスデューサーの位置によりピーク周波数が変わることが判る。すなわち、測定方向O-Rでのフィルター特性は中心方向O-Oでのそれに比べて大きく、逆に、O-L方向では小さくなっている。この現象を利用すれば、欠陥の方向がおおよそ推定できるものと考えられる。

4、結論

以上、今回行った実験および解析より得られた結果を要約すると次のような結論になる。

- (1)、コンクリート構造物内に本実験で用いたような欠陥が存在する場合、その欠陥部におけるフィルター特性には、欠陥に基づくと思われる顕著なピークが出現する。そのピーク周波数は欠陥が壁面に平行に発生している場合、その深さにほぼ比例する。
- (2)、壁面に平行に入った欠陥では受信トランスデューサー位置の若干のずれに対するピーク周波数の変化は少ないが、壁面に斜めに入った欠陥では、欠陥の傾き方向への受信トランスデューサーの若干のずれに対するピーク周波数の変化が大きい。故に、欠陥部周辺で受信トランスデューサーの位置を動かすことにより、その欠陥の傾きをおおよそ推定できる。

今回の実験では、欠陥を有する壁体の製作に当たって、欠陥の埋め込み位置や方向に若干のずれが生じたように思える。そのため、脱型後における欠陥の位置や方向の把握がやや不十分となり、測定結果に対する詳細な検討ができなかった。本方法には、まだ、多くの未解決部分が残されているが、さらに多くの実験を重ねて、本方法の確立に努力して行きたい。

参考文献 1)、W.Sachse "Ultrasonic Spectroscopy of a Fluid-filled Cavity in an Elastic solid" J. Acoust. Soc. Am., Vol.56, No.3, September 1974

2)、尼崎, 明石" 超音波スペクトロスコピーのコンクリートへの適用に関する基礎的研究"、土木学会第14回年次学術講演会概要集, 第5部, 昭和61年11月, pp121-122

3)、坂田, 大津" 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.7, July 1986, pp135-145

4)、坂田, 大津" 超音波フィルター特性によるコンクリート部材の劣化度判定法に関する研究", 熊本大学工学部研究報告, 第33巻, 第3号, 昭和59年12月, pp185-197