BEMを用いたスペクトロスコピー法に基づく固体内部欠陥の非破壊的評価

熊本工業大学　正員　○上杉　真平
熊本大学工学部　正員　大津　政康

1．はじめに

超音波を用いた非破壊検査法（UT）は、構造物の健全性の診断や補修を行うのに必要な情報を得るための手段として広く用いられている。このようなUT法の1つに、透過波（高周波数域の弾性波）の周波数特性の変化を調べることにより固体内部の状況を評価しようという超音波スペクトロスコピー法[1]がある。本研究では、境界要素法[2]を用いて、弾性体内部の欠陥（ここではひび割れを扱っている）評価への超音波スペクトロスコピー法の適用性について検討した。

2．手法の定式化

対象とする領域Dが均質、等方かつ線形の弾性体であると考え、物体力はないものと仮定すると、この周波数領域における弾性波動場の支配方程式は次のNavierの式で表される。

$$\left(\frac{k_T^2}{k_L^2}-1\right)u_{j,ji}(x)+u_{i,jj}(x)+k_T^2 u_i(x)=0 \quad , \qquad i,j=1,2,3 \tag{1}$$

ここに、u_i は変位ベクトル, $k_L=\omega/C_L$, $k_T=\omega/C_T$ は、それぞれP波, S波の波数であり、C_L およびC_T は、P波, S波の波速, ωは円振動数である。領域の境界がBで表されるものとしてGreenの公式を用い、さらに$x\in D\rightarrow x\in B$なる極限移行操作を行うことにより、次のような境界積分方程式が得られる。

$$C^{\circ}u_i(x)=\int_B U_{ij}(x,y)t_j(y)dB-\int_B T_{ij}(x,y)u_j(y)dB \tag{2}$$

ただし、

$$U_{ij}(x,y)=\frac{1}{4\pi\mu}\left[\frac{\exp(ik_T r)}{r}\delta_{ij}+\frac{1}{k_T^2}\left\{\frac{\exp(ik_T r)}{r}-\frac{\exp(ik_L r)}{r}\right\}_{,ij}\right]$$

$$T_{ij}(x,y)=-\{\lambda U_{jm,m}(x,y)\delta_{iK}+\mu U_{ji,k}(x,y)+\mu U_{jk,i}(x,y)\}n_k$$

ここに、C° は二重層核の自由項の係数、U_{ij}, T_{ij}は、それぞれ第1種および第2種Green 関数、λ, μはLaméの定数、nはy点における法線方向単位ベクトルであり、また、右辺第二項目の$\int\cdot dB$はCauchyの主値積分を意味している。いま、ひび割れを有することより図－1に示すような2つの部分領域D_1, D_2 からなる領域について考えると、各領域に対する積分方程式は、式（2）より、次のように表される。

$$H_1u_1=G_1t_1 \qquad \text{for} \quad D_1 \tag{3}$$

$$H_2u_2=G_2t_2 \qquad \text{for} \quad D_2 \tag{4}$$

ただし、

$$G_{ijpq}=\int_{\Delta B_j}U_{ij}(x,y)\,dB$$

$$H_{ijpq}=\int_{\Delta B_j}T_{ij}(x,y)\,dB+C^{\circ}\delta_{pq}\delta_{ij}$$

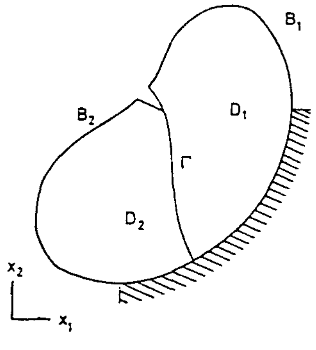
ここに、δはKronecker のデルタ、ΔB_j は分割積分区間であり、また添字1, 2は、それぞれ領域1および2に関わる量であることを意味している。式（3）,（4）より次式が得られる。

$$K_1u_1=t_1 \tag{5}$$

$$K_2u_2=t_2 \tag{6}$$

ただし、

$$K_1=G_1^{-1}H_1 \quad , \qquad K_2=G_2^{-1}H_2$$



図－1

ここで、式（5）,（6）の両辺を加え合わせて接合境界Γ上での連続条件、$u_1=u_2$, $t_1+t_2=0$を

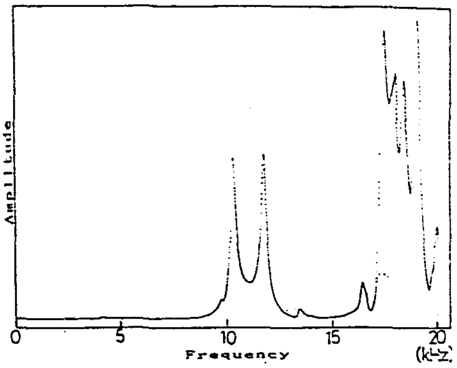
用いることにより次式が得られる。

$$Ku = t \qquad (7)$$

従って、複数の部分領域からなる弾性体における弾性波動問題の解は、式（7）の代数方程式を解くことによって求められる。

3．数値計算例

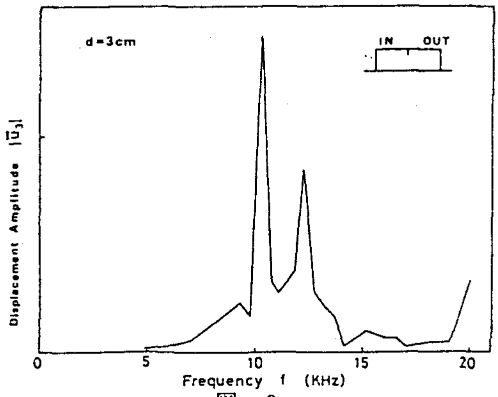
ここでは、中央に疑似ひび割れを有する10cm×10cm×40cmのコンクリート試験体について、ひび割れ深さdの違いによる透過波の応答スペクトル[3]の変化について考察した。なお、実験においては、疑似ひび割れをはさんで対称な位置にソース点と観測点を設け、入力波の周波数を変化させた時の観測点の応答を計測した。図－2にひび割れ深さd＝3cmの場合の実験結果を示す。同じモデルについてBEMにより3次元解析し、観測点の応答（x_3 方向）を計算した結果が図－3であるが、両者の傾向はよく一致しており、2箇所で卓越（ピーク）が現れていることがわかる。同様にして、d＝0，2，5cmについても計算を行い、その結果を表－1に示す。いずれの場合もピークが観測され、かつ2番目の卓越（第2ピーク）がdに関係して変化していることがわる。そこで、ひび割れ深さdとピーク周波数の関係を調べるために、dとそれに対応する周波数の値をプロットし、図－4のような特性曲線（reference curve）を求めた。これより、ひび割れ深さとピーク周波数の間に密接な関係があることがわかった。この特性曲線はひび割れ形状に依存するものであるので、もし詳細な特性曲線が得られるならば、これを用いてひび割れ深さを推定することが可能であると考えられる。なお参考のために、表－1および図－4には2次元解析した結果も併せて示してある。



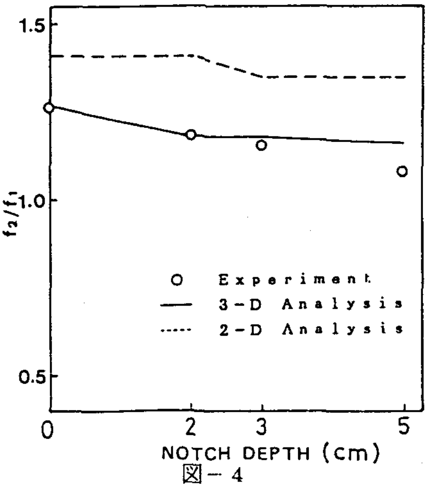
図－2

表－1

Notch Depth d (cm)	Frequency (kHz) First peak Exper.	First peak Analysis 3-D	First peak Analysis 2-D	Second peak Exper.	Second peak Analysis 3-D	Second peak Analysis 2-D
0	10. 4	10. 4	8. 3	13. 2	13. 2	11. 7
2	10. 5	10. 5	8. 3	12. 4	12. 4	11. 7
3	10. 3	10. 3	8. 3	11. 8	12. 2	11. 2
5	10. 5	10. 5	8. 3	11. 3	12. 2	11. 2



図－3



図－4

参考文献 1)明石，尼崎；超音波ｽﾍﾟｸﾄﾛｽｺﾋﾟｰによるｺﾝｸﾘｰﾄの品質評価，ｾﾒﾝﾄ・ｺﾝｸﾘｰﾄ，No.489，1987. 2)上杉，大津，松山，重石；ｽﾍﾟｸﾄﾛｽｺﾋﾟｰによる欠陥評価に関するBEM解析；境界要素法論文集，Vol.6，1989. 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.24，No.7，1986.