I-338　超音波スペクトロスコピーによる弾性体内部の欠損評価

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
熊本県　森　裕

1．はじめに

構造物内部の欠陥（ひび割れ，空隙など）を正しく評価することは、それを維持管理する上で重要な課題である。このような材料内部の欠陥を非破壊的に探査する方法の一つに透過超音波パルスの周波数成分に着目した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_α 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 $x\in D\to x\in B$ 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。

$$C^e u_i(x)=\int_B U_{ij}(x,y)t_j(y)dB-⨍_B T_{ij}(x,y)u_j(y)dB+u_i^{0}(x) \tag{2}$$

ただし、

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

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

ここに、u^0 は自由場の変位、C^e 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、$H_0^{(1)}$ は第1種Hankel 関数、μ はせん断弾性係数、ν はポアソン比、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 ⨍・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。

$$H_1 u_1=G_1 t_1+u^0{}_1 \quad \text{for} \quad D_1 \tag{3}$$

$$H_2 u_2=G_2 t_2+u^0{}_2 \quad \text{for} \quad D_2 \tag{4}$$

ただし、

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

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

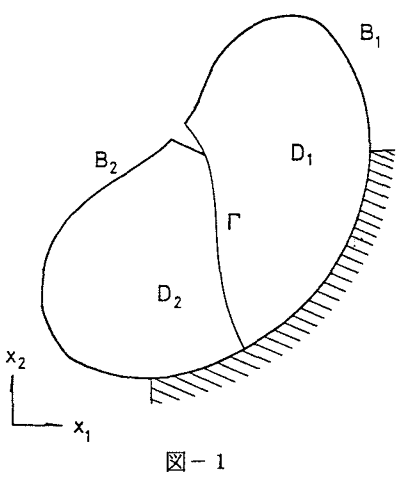
ここに、δ はKronecker のデルタ、ΔB_j は分割積分区間であり、また添字1，2は、それぞれ領域1および2に関わる量であることを意味している。式（3），（4）より次式が得られる。

$$K_1 u_1=t_1+G_1^{-1}u^0{}_1 \tag{5}$$

$$K_2 u_2=t_2+G_2^{-1}u^0{}_2 \tag{6}$$

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。

$$Ku = t \tag{7}$$

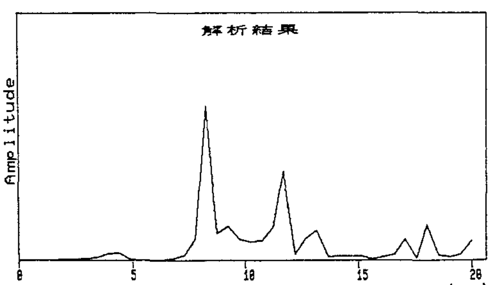
ただし、

$$K = K_1 + K_2 \;,\; u = u_1 + u_2 \;,\; t = (t_1 + t_2) + (G_1^{-1} u^0_1 + G_2^{-1} u^0_2)$$

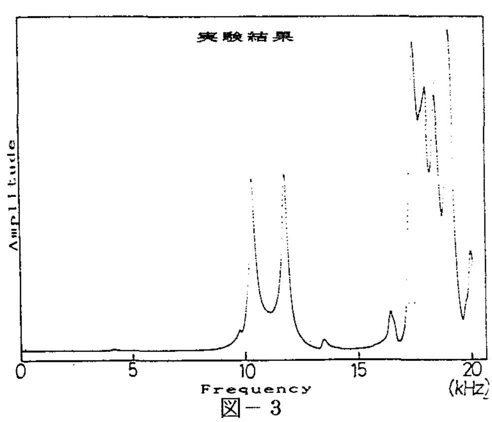
従って、複数の部分領域からなる弾性体における弾性波動問題の解は、式（7）の代数方程式を解くことによって求められる。

3．数値計算例

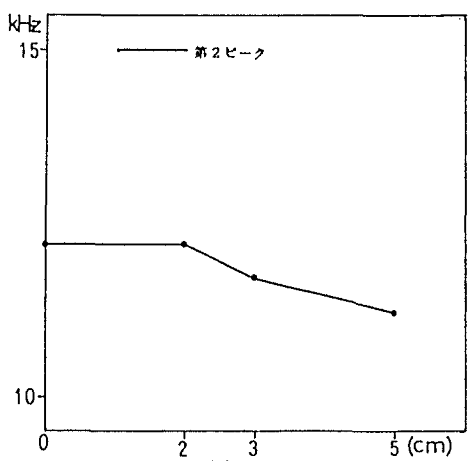
ここでは、中央に疑似ひび割れを有する10cm×10cm×40cmのコンクリート試験体について、ひび割れ深さdの違いによる透過超音波のフィルター特性[3)]の変化について考察した。なお簡単のために、ここでは2次元解析の結果についてのみ考察する。図－2は、疑似ひび割れをはさんで対称な位置にソース点と観測点を設け、入力周波数を変化させた時の観測点の応答変位（Z方向）を示したものである。同じモデルについての実験結果を図－3に示すが、両者の傾向はよく一致しており、2箇所で卓越（ピーク）が現れていることがわかる。同様にして、d＝0，2，5cmについても計算を行ったが、いずれの場合もピークが観測され、これらの結果から2番目の卓越（第2ピーク）がdに関係していることがわかった。そこで、この第2ピークの周波数とdの関係より図－4のような特性曲線（reference curve）を求め、これを用いて任意のひび割れについてその深さを推定することを試みた。表－1は、特性曲線による推定値と実測値をいくつかの場合について比較したものであるが、ここで扱ったケース（d＝5cm以下）に関する限りよい結果が得られている。詳細については、3次元解析した結果も含めて当日発表の予定である。



図－2



図－3



図－4

表－1

ノッチ深さ－番号 (cm)	第2ピーク (kHz)	実際深さ (cm)	推定深さ (cm)
2－(2)	11.62	3.1	3.3
3－(1)	11.25	3.9	4.9
3－(2)	11.28	4.3	4.6
3－(3)	11.22	4.4	5.0

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)北原，中川；積分方程式による3次元Inclusion問題の解析，境界要素法論文集，Vol.3，1986. 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.