漏洩表面波を用いた鋼板の異方性非均質性 の評価

1. はじめに

代表的な土木材料である鋼板は,製造時の圧延加工や熱処理によって,異方性や板厚方向に非均質性を持つことが知られている.この異方性や非均質性は,超音波探傷試験において入射角の大きい斜角探触子を用いた場合,欠陥の位置推定に誤差を生じさせる原因となるので,鋼板の材料特性を精度良く求めることは重要である.

材料の表面を伝搬する表面波はそのエネルギーが表面に 集中し,周波数に応じてエネルギーの板厚方向の分布が変 化する.そして,材料の性質が板厚方向に非均質で,弾性 定数が変化するときは,表面波は分散性を示す.そこで, 本研究は表面波の分散特性を計測することによって鋼板の 異方性ならびに板厚方向の非均質性を非破壊評価したもの である.

2. 漏洩表面波の測定と分散特性

図 1 に示すように,水浸ピッチキャッチ法によって鋼板 と水の界面から漏洩する表面波の波形を送受信した.用い た探触子は,中心周波数が 0.5, 2.25, 5.0(MHz)の一対の 探触子で,一波長当たり 3 点の測定点で受信できるように それぞれの周波数に応じて受信探触子を $\Delta x=0.84$, 0.42, 0.24(mm)ずつ移動させ,いずれの探触子の場合も 64 点 で波形を取得した.鋼板は 140 × 160 × 50(mm)の大き さで,ターンテーブルに乗せており,テーブルを回転させ ることにより,圧延方向(L方向)とそれと直角方向(C方 向)に表面波を伝搬させて計測を行った.



図-1 漏洩表面波の測定

計測されたデータは次式のように時間-空間域から周波 数-波数域に変換できる.

$$\bar{u}(k,f) = \int \int u(x,t)e^{-i(kx-2\pi ft)}dxdt$$
(1)

キーワード 超音波非破壊評価,漏洩表面波,異方性,非均質性,分散特性,集合組織理論 連絡先 〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, W8-22 Tel/Fax 03-5734-2692

東京工業大学大学院	正会員	廣瀬 壮一
大成建設	正会員	戸塚 孝文

一例として,2.25MHzの一対の探触子を用いて得た64個の波形をフーリエ変換して得た周波数-波数域でのスペクトルを図2に示す.この図に示すように,波数のピークが周波数とともに変化しており表面波には分散性があることがわかる.各周波数のピークの値を連ねることにより,表面波の分散曲線を得ることができる.

図 3 は,3 つの探触子で得られた波形の周波数-波数域 でのスペクトルから求められた表面波の分散曲線を $\lambda = 2\pi/k = c/f(\lambda: 波長, k: 波数, c: 波速, f: 周波数) の関$ 係を用いて波長-波速空間に描きなおしたものである.実線が圧延方向,破線が圧延幅方向に表面波を伝搬させたときの分散曲線を表している.これより,波長が長くなるにつれて圧延方向には表面波速度がわずかに減少し,圧延幅方向には増加していることがわかる.表面波は波長が長いほど深層部までの影響を反映することから,鋼板は異方性であり,かつ板厚方向に弾性波の伝搬速度すなわち弾性定数が変化していると考えられる.



図-2 波数-周波数スペクトル





3. 集合組織理論による異方性の表現

前節の測定結果からもわかるように,鋼板の異方性はそれほど強くはないものの存在する.このような異方性は結

晶粒がある特定の方向に向くことによって形成される集合 組織(texture)によるものとして結晶粒の方位分布によっ て説明されることが多い.すなわち,多結晶体の弾性定数 は等方性の部分と異方性の部分に分けられ,異方性は結晶 粒方位分布によって表される.例えば,Voigt記法での弾 性定数 C_{ij} は次式のように表される¹⁾.

$$C_{11} = \lambda^{A} + 2\mu^{A} + dc^{A}(3W_{400} - 2\sqrt{10}W_{420} + \sqrt{70}W_{440})$$

$$C_{22} = \lambda^{A} + 2\mu^{A} + dc^{A}(3W_{400} + 2\sqrt{10}W_{420} + \sqrt{70}W_{440})$$

$$C_{33} = \lambda^{A} + 2\mu^{A} + 8dc^{A}W_{400}$$

$$C_{12} = \lambda^{A} + dc^{A}(W_{400} - \sqrt{70}W_{440})$$

$$C_{13} = \lambda^{A} - 2dc^{A}(2W_{400} - \sqrt{10}W_{420})$$

$$C_{23} = \lambda^{A} - 2dc^{A}(2W_{400} + \sqrt{10}W_{420})$$

$$C_{44} = \mu^{A} - 2dc^{A}(2W_{400} + \sqrt{10}W_{420})$$

$$C_{55} = \mu^{A} - 2dc^{A}(2W_{400} - \sqrt{10}W_{420})$$

$$C_{66} = \mu^{A} + dc^{A}(W_{400} - \sqrt{70}W_{440})$$

ここに $d = 4\sqrt{2\pi^2/35}$ であり, λ^A , μ^A は等方性の材料定数, c^A は異方性比とよばれる定数で, いずれも単結晶の材料定数から求められる既知の定数である.また, W_{lmm} は結晶粒の方位分布を表す方位分布関数である.一般の直交異方性材料の場合には,上記の9個の C_{ij} が独立となるが,方位分布関数を用いれば $W_{400}, W_{420}, W_{440}$ の3つの係数だけで異方性を表せることがわかる. C_{ij} は $C_{11} = C_{1111}, C_{44} = C_{2323}$ など弾性係数 C_{ijkl} を縮約したものであるが, C_{ijkl} の指標の1,2,3 はそれぞれ圧延方向,圧延幅方向,板厚方向を表す.そうすると,式(2)より, $C_{11} \ge C_{22}, C_{13} \ge C_{12}, C_{44} \ge C_{55}$ など,圧延方向と圧延幅方向に関わる係数の差をとれば, W_{420} の係数だけが残ることがわかる.

4. 表面波波速を用いた方位分布関数の推定

第2節の漏洩表面波の測定では,圧延方向と圧延幅方向の表面波の分散曲線を得た.そこで,両方向の波速の差をとれば,方位分布関数 W420 に関する情報が得られることになる.以下では W420 の推定方法を述べ,その結果を示す.

用いた鋼板の板厚は 50mm と有限であるが,用いた超 音波の波長は長くても 8mm 以下であるので,ここでは鋼 板を半無限体として扱うことにする.式 (2) で与えられる 材料定数をもつ異方性半無限体の表面を伝搬する Rayleigh 波速度が λ^A , μ^A を持つ等方弾性体の場合の速度からいか 程変化したかという変動分 δV は圧延方向からの角度 ϕ の 関数として次のように表される²⁾.

$$\frac{\delta V(\phi) = (3)}{\frac{dc^A \int_0^\infty (R_1 W_{400} + 4R_2 W_{420} \cos 2\phi + 2R_3 W_{440}) dx_3}{2V^0 \int_0^\infty R_0 dx_3}$$

ここに, V^0 は材料が λ^A , μ^A なる定数からなる等方性と したときの Rayleigh 波の波速であり, $R_0 \sim R_3$ は等方性材 料における Rayleigh 波の変位成分からなる関数である. さて,鋼板の非均質性を層状の弾性体でモデル化する. $z_i \leq x_3 \leq z_{i+1}$ における i 番目の層での W_{420} を一定の値 W^i_{420} とする.そして, $\delta V(0^\circ)$ と $\delta V(90^\circ)$ の差,すなわち, $V(0^\circ)$ と $V(90^\circ)$ の差は V^0 に対する比の形で次式のよう に表される.

$$\frac{V(0^{\circ}) - V(90^{\circ})}{V^{0}} = -\frac{4dc^{A}}{(V^{0})^{2} \int_{0}^{\infty} R_{0} dx_{3}} \sum_{i=1}^{n} W_{420}^{i} \int_{z_{i}}^{z_{i+1}} R_{2} dx_{3} \quad (4)$$

式 (4) における未知数は i 番目の層の方位分布係数 W_{420}^i と層厚 $z_{i+1} - z_i$ である.計測によって,圧延方向と圧延 幅方向の表面波の波速 $V(0^\circ)$, $V(90^\circ)$ は得られているの で,式 (4) の左辺と右辺の誤差が最小となるような W_{420}^i と $z_{i+1} - z_i$ を求める最適問題として定式化される.ただ し,図 3 に示したように表面波は分散性を示すので,計測 された波長 (周波数) の範囲のすべての波速データについ て式 (4) の残差が最小となるように W_{420} と $z_{i+1} - z_i$ を推 定した.

図 4 の実線は層の数を n = 3として求めた W_{420} の板厚 方向の分布である.一方,破線は鋼板を表面から 5mm ず つ切削し,その都度 5MHz の探触子を用いて得た波速か ら求めた W_{420} の値である.周波数 5MHz のときの表面波 の波長は 1mm 以下となることから,破線は切削された表 面近傍の局所的な W_{420} を示していると考えられる.図 4 の実線と破線は完全には一致していないものの,板表面に 近づくほど W_{420} の絶対値は大きくなっており,鋼板の異 方性は板表面において大きくなっていることがわかった.

今回は $\phi = 0^{\circ} \ge 90^{\circ}$ の方向の測定しか実施しなかった ため W_{420} の値しか求めることができなかったが,今後, 様々な方向の計測を行うとともに,その精度を向上させて 他の異方性パラメータも明らかにする予定である.



図-4 推定された W420 の分布.

謝辞:今回使用した試験体は新日本製鐵永田泰昭氏より 提供いただきました.ここに感謝の意を表します.

参考文献

- 1) Sayers, C.M., J. Phys. D:Appl. Phys., 15, 2157-2167, 1982.
- Smith, M.L. and Dahlen, F.A., J. Geophys. Res., 78, 3321-3333, 1973.