

I-393 超音波によるクラック深さの推定

東海大学海洋学部 学生員 梅田 耕一
 東海大学海洋学部 学生員 森口 哲行
 東海大学海洋学部 正員 北原 道弘
 三菱総合研究所 野竹 正義

1.はじめに

構造部材の裏面に存在するクラックの検出と評価を目的として、ニューラルネットワークによるクラック深さの一推定システムについて考えた。ネットワークの特徴は、学習に採用したトレーニング用波動知識ベースにあり、これは実験による参照信号と弾性波動解析を組み合わせて、数値解析的に生成される。実際の計測波形を学習後のネットワークに入力することにより、このネットワークのパフォーマンスの確認を行ったので報告する。

2.後方散乱波形とクラック深さの推定システム

Fig.1に示すように、深さ a の表面クラックが部材の裏面に垂直に入った場合を考える。このクラックの深さ a を非破壊的に推定したい。このために、水中圧電型トランスデューサーにより、部材内でクラックに対し 45° で入射する横波にモード変換するように、トランスデューサーの角度を部材法線に対し 18.9° に設定し、水中超音波(縦波)を発信する。このとき、発信と同一のトランスデューサーで受信されるクラックによる後方散乱場は、周波数域で次のように書ける。

$$Y_{exp}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{crack}^{exp} H_{sw} H_w T_r \quad (1)$$

ここに、 $T_o(\omega)$: 発信トランスデューサーの影響、 $H_w(\omega)$: 水中超音波経路の影響、 $H_b(\omega)$: 水中における超音波ビームの広がりの影響、 $H_{ws}(\omega)$: 水→固体界面の影響、 $H_{crack}^{exp}(\omega)$: 固体内における弾性波のクラックとの相互作用、 $H_{sw}(\omega)$: 固体→水界面の影響、 $T_r(\omega)$: 受信トランスデューサーの影響である。

いま、固体内における弾性波のクラックとの相互作用を除いて、実験に完全に対応する解析が出来たとする。このとき、解析的なトランスデューサーでの受信後方散乱場は次のように書ける。

$$Y_{theory}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{crack}^{BEM} H_{sw} H_w T_r \quad (2)$$

ここに、 $H_{crack}^{BEM}(\omega)$ は固体内での弾性波のクラックとの相互作用を表し、この項は積分方程式法により評価する。

いま、解析波形(2)に実験波形(1)に対応した波形処理を加えるため、部材コーナー部での反射波形を参照信号として選ぶ。このとき、トランスデューサーの位置、角度などは Fig.1 と全く同一の状態に配置されており、固体内のクラックが 45° の部材コーナーに置き換えられた点だけ異なるものとする。このコーナーでの反射参照信号は次のように書ける。

$$X_{ref}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{cor} H_{sw} H_w T_r \quad (3)$$

ここで、 $H_{cor}(\omega)$ は固体内における弾性波のコーナー部での反射を表し、この項 $H_{cor}(\omega)$ は解析的に評価できる。解析波形(2)と参照信号(3)を組み合わせると、解析波形 $Y_{theory}(\omega)$ を次のように表現することができる。

$$Y_{theory}(\omega) = \frac{X_{ref}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} H_{crack}^{BEM}(\omega) \quad (4)$$

上式(4)は、固体内での弾性波のクラックによる後方散

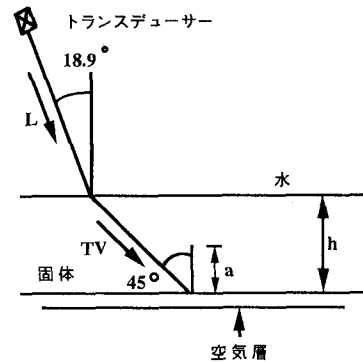


Fig.1 Surface breaking crack of depth a in a steel plate

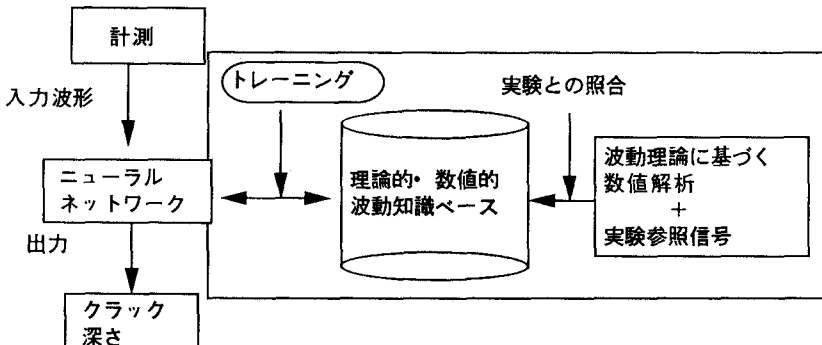


Fig.2 Crack detection strategy

乱場 $H_{crack}^{BEM}(\omega)$ を、水中超音波パスの影響を表す項 $X_{ref}(\omega)/H_{cor}(\omega)$ で補正したものを、解析波形 $Y_{theory}(\omega)$ とすることを意味している。以後、式(4)の意味における $Y_{theory}(\omega)$ を解析波形と呼ぶ。

式(4)に基づいて、理論・数値的にニューラルネットワークの学習用波動知識ベースを作成し、これを基にネットワークをトレーニングすることにより、クラック深さの一推定システムが完成する。Fig.2に、このシステムの概念を示す。

3. 波動知識ベース

ここでは、クラックの深さ a として 0.6mm から 2.4mm までを考慮し、0.1mm 毎にクラックの深さを変え、計 19 ケースについて式(4)に基づいて、後方散乱場の時間域の波形と周波数域の波形を生成した。Fig.3 に時間域の波形の一部を、Fig.4 に周波数域の波形の一部を示す。

4. クラック深さの推定結果

システムのパフォーマンス確認の第一階として、前記3. で作成した波動知識ベースのうち、0.2mm 間隔の深さを持つ計 10 通りのクラックに対する知識ベースを利

用して、ネットワークをトレーニングした。このトレーニング終了後のネットワークに、深さ 1.05mm, 1.49mm, 2.19mm なる 3 通りの深さのクラックによる実際の計測波形を入力した場合のネットワークのパフォーマンスを Table.1 にまとめてみた。Table の最上段は 10 個の出力ユニット番号とそのユニットが識別すべきクラックの深さを示している。Table 中の第 2 行以下に書き込まれた数値が、各出力ユニットが実際に出力した数値である。例えば、Table の第 2 行目を書き込まれた数値 0.22 と 0.97 は、深さ 1.05mm のクラックに対する時間域の計測波形をネットワークに入力した場合の、出力ユニットの出力値であり、0.8mm と 1.0mm のクラックを識別するユニットが、それぞれ 0.22 と 0.97 の意味で発火している。Table の第 3 行は、深さ 1.05mm のクラックに対する周波数域の実験波形を入力した場合の出力ユニットの出力値であり、1.2mm のクラックを識別するユニットが 0.99 と発火している。以下同様に、1.49mm, 2.19mm の深さのクラックに対する各ユニットの発火状況を見ると、クラックの深さが大きくなるにつれて、クラック深さの識別能力は高まっていることがわかる。

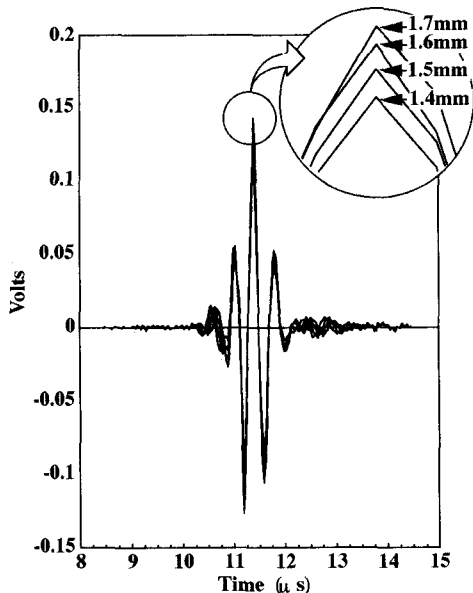


Fig.3 Backscattered waveform (Time domain)

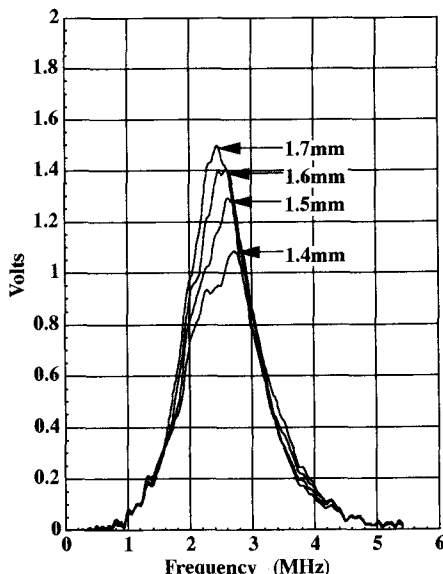


Fig.4 Backscattered waveform (Frequency domain)

Table.1 Network performance

出力ユニット クラック深さ(mm)	① 0.60	② 0.80	③ 1.00	④ 1.20	⑤ 1.40	⑥ 1.60	⑦ 1.80	⑧ 2.00	⑨ 2.20	⑩ 2.40
1.05mm	time	-	0.22	0.97	-	-	-	-	-	-
	freq.	-	-	-	0.99	-	-	-	-	-
1.49mm	time	-	-	-	-	0.52	0.45	-	-	-
	freq.	-	-	-	-	0.29	1.00	-	-	-
2.19mm	time	-	-	-	-	-	-	-	0.97	-
	freq.	-	-	-	-	-	-	-	0.98	-