多端部エコー法による底面疲労クラックの定量化[†]

春海佳三郎* 大島淳一** 内田正則**
朝隈康司*** 小倉幸夫****

Defect Sizing of Fatigue Crack on Free Surface by the Use of Multi-Tip-Waves

by

Kasaburo HARUMI*, Jun-ichi OOSHIMA**, Masanori UCHIDA**

Kouji ASAKUMA*** and Yukio OGURA****

The most effective means of ultrasonic defect sizing is considered to be the tip wave method. However, the intensity of the tip wave is very weak, and sometimes it prevents the use of tip waves. Several digital flaw detectors have been recently developed which are appropriate for use in the tip wave method, since they have rather low noise and more convenient functions of recordability and flexibility than the conventional analogue flaw detectors. The effectiveness of the full digital flaw detector HITACHI-DT-2000 has been described for the defect sizing of an artificial slit with round tip shape on a free surface. The newly developed model DT-2200 is greatly improved and almost noiseless, with a wide range of intensity of 100 dB and very high resolution of 0.1 mm. The sizing of five types of fatigue cracks is attempted here by using the result of numerical experiment. The knowledge obtained from the numerical experiment is proved to be very effective in discriminating several (multi-) tip waves generated in the reflection of ultrasonics by a fatigue crack. The technique is very easy and simple to use, but the accuracy of defect sizing is greatly improved at below 0.2 mm: for the conventional analogue detectors, the accuracy is possible only at larger than 2 mm. This level of accuracy will make it possible to estimate the defect sizing of fatigue crack, which is considered to be impossible by using ultrasonics. It is anticipated that this method will fill the gap and eliminate the distrust which has existed between ultrasonic testing and fracture mechanics.

Key words: Defect sizing, Tip wave, Fatigue crack, Numerical experiment, Digital flaw detector, Accuracy

1 緒言

破壊力学の分野では欠陥の定量化は重要な課題の一つであるが、理論的研究に比べて超音波による測定技術の精度が不十分であると聞いている。

非破壊検査の分野においては、超音波探傷は簡便で材料の内部の検査には便利な方法ではあるが、欠陥の存在を知る程度の方法であるとの評価しか得られていないようである。その原因として、実用化を目的とした研究が多く、基礎研究特に理論的研究が実験的研究に比べて少なく、超音波による欠陥の定量化を実現するための基盤が確立していなかったことがあげられる。

固体内の弾性波の理論研究が遅れていたのは、この現象が動力学的問題であり、静力学的問題に比してその扱いがはるかに困難であるためである。

超音波探傷の分野でも欠陥の定量化の重要性が指摘され、10 数年前からコンピュータ・シミュレーションを用いてさまざまな問題が解かれるようになり、定量化の基礎が確立されてきた。さらに実験では、超音波の反射ではクラックの先端を中心とする端部エコーが発生し、

これが欠陥の定量化には最良の方法であることがわかってきた。このため非破壊検査協会内に小委員会が組織され端部エコーの研究が行われてきた。しかし精度が不十分であったので、本研究では数値実験の結果を用いて、底面上の疲労クラックの定量化を試みた。

2 弾性波と数値実験

超音波探傷の分野では従来は理論的研究は空気中の音波理論を用いて行われてきた。これは固体内弾性波動の解析が困難なためと、実験がアナログ探傷器で行われたため精度が十分でなく、従来の超音波探傷法では反射波の中で一番強度の大きい反射波のみを用いて研究が行われたためである。

弾性波では音波と異なり縦波と横波が存在するために、反射が非常に複雑になり多くの反射波が生じるが、従来は最大の反射波のみに着目し、その他の反射波は雑音として利用しなかった。このため超音波は欠陥の存在はわかるが、定量的測定には不十分であると考えられていた。

我々は弾性波の数値実験を利用して、超音波の理論的研究を行ってきた。その結果、超音波の反射の場合には

[†] 原稿受理 平成 5 年 12 月 14 日 Received Dec. 14, 1993

* 正会員 東京情報大学経営情報部情報学科 〒265 千葉市若葉区谷町, Dept. of Information Systems, Tokyo Univ. of Information Sci., Wakaba-ku, Chiba, 265

** 日本大学生産工学部数理工学科 〒275 習志野市泉町, Dept. of Math. Eng., Nihon Univ., Izumi-cho, Narashino, 275

*** 日立プラント建設(株) 〒271 松戸市上本郷字船付, Hitachi Plant Eng. & Construction Co., Kami-hongo, Matsudo, 271

**** 日立建機(株) 〒113 東京都文京区湯島, Hitachi Construction Machinery Co. Ltd., Bunkyo-ku, Tokyo, 113

複数の反射波が生じることが判明し、従来雑音として無視されてきた複数の反射波を利用することが定量的測定には必要と考えた。また数値実験の結果、これらの複数の反射波の中で欠陥の端を中心とする端部エコーが反射には重要なことに着目して、研究を行ってきた。^{1),2)}しかし端部エコーは強度が通常の反射波に比べて -20 dB ないし -30 dB 弱いので、従来のアナログ型の探傷器ではその検出には相当な熟練を必要とした。しかし最近、アナログ型の探傷器に比べて、ノイズの少ないデジタル型探傷器が生産されるようになり、端部エコーの利用が容易になった。

3 多端部エコー法による定量化

デジタル探傷器を用いると多くのパルスが検出されるためこれらのエコーの識別が問題であるが、数値実験の結果とフルデジタル探傷機 DT-2000 (日立建機製) による実験結果と比較することにより、多くの端部エコーを識別することが可能となった。^{3),4)} その一例として、Fig. 1 に示される先端が円形の傾斜底面スリットによる横波の反射の数値実験のベクトル図と実験結果の探傷図形を Fig. 2 に示す。ここに Fig. 1 で傾斜面と底面とのなす角が鈍角の方向を A とし、鋭角をなす方向を B とする。傾斜角 θ は Fig. 1 に示されるように底面の垂線と斜面とのなす角である。Fig. 2 は B 方向からの場合で、傾斜底面スリットは傾斜角 40° 、高さ 1.5 mm、幅 0.2 mm である。また図に示されるようにスリット先端は円形になっている。入射横波の入射角は矢印で示されるように 45° である。

Fig. 2 のベクトル図の A, B, C, D, E は右上部の DT-2000 による実験で得られた探傷図形の A, B, C, D, E に対応している。A はクラック先端からの端部エコーで、B は A の底面による反射である。C はコーナーからの反射で D は入射波がクラック右斜面のコーナーにより反射した波が右斜面に沿って伝ばしたのが先端で端部エコーとなったものである。E は D の底面によ

Fig. 1. Configuration of inclined crack and transducer.

Table I. Comparison of numerical value with experimental value for a 40° inclined crack. (mm)

	AB	BC	CD	CE
Numerical	1.08	0.65	0.41	1.15
Experiment	0.88(0.04)	0.78(0.063)	0.60(0.105)	1.06(0.05)

る反射波である。この場合のパルス間距離の数値実験値と実験値との比較を Table I に示す。良好な一致がみられる。このように数値実験を用いると、複数のエコーが識別できることが判明した。これらのエコー間の距離よりクラックの傾斜角および高さを推定したところ、探触子の位置に関係しない安定な結果が得られた。詳しくは文献 3) を参照されたい。例えば、B は A の底面反射であるから簡単な幾何学的考察で欠陥の高さ $H = \sqrt{2} AB$ であることが分かるが、Table I の実験値では $AB = 0.88$ mm であるから $H = 1.24$ mm となる。端部エコー A は先端が円形であるため、伝ば中心は円形部の中心に近い点となり、最上部ではない。このため高さを求めるには伝ば中心と最上部との差の補正を Fig. 2 より求め約 0.13 mm となる、この補正を行うと $H = 1.37$ mm となり、 0.13 mm の誤差となった。

4 DT-2200 の精度

DT-2000 の改良型 DT-2200 はノイズ比が 100 dB と格段とノイズが少なくなった。また精度も向上したので Fig. 2 と同じ実験を行った。結果を Fig. 3 に示す。Fig. 2 の A, B, C が Fig. 3 の A, B, C となり Fig. 2 の B が

Fig. 2. Vectors diagram of reflection by a 40° incline slit with round tip, and its scanning graph of DT-2000.

Fig. 3. Scanning graph by DT-2200 same case as in Fig. 2.

Fig. 3 では 2 本に分離した。B の後の高い方のエコーが A の底面反射であることが、底面を触れることにより判別できた。

Fig. 2 のベクトル図では B が底面反射とヘッドウェイブとが重なっているが、Fig. 2 ではこれが一本になっていたのが Fig. 3 では 2 本が分離して、 $AB=1.0 \text{ mm}$ となった。これより高さ $H=1.54 \text{ mm}$ となり、誤差は 0.04 mm となる。5 MHz の波長が 0.65 mm であることから考えると信じ難い精度であるが、これは DT-2200 では全波整流してピークを取ったために誤差が 0.1 mm 以下になったのである。したがって $H=\sqrt{2} AB$ による欠陥高さの推定も非常に精度が良いことがわかる。

5 数値実験と実験

最近大島により本研究用の有限要素法の自動メッシュ生成プログラムが開発され、これを用いると複雑な形状のクラックによる反射の数値実験が可能になったので、自然欠陥による反射の問題を取扱うことにした。

実験には DT-2200 を用い、探触子には集束型の探触

Fig. 4. Crack shape of MS15.

Fig. 5. Crack shape of ML10.

Fig. 6. Crack shape of Z05.

Fig. 7. Crack shape of Z20.

Fig. 8. Crack shape of Z30.

子を用いた。これは疲労クラックのように複雑な形状の場合には反射を簡単にするため、通常よく利用される集束型を用いた。また約 1.5 波の広帯域型と約 6 波程度の狭帯域型の 2 種類の探触子を用いた。これらはいずれも約 2 mm 程度の集束幅を持っている。

テストピースは複雑な形状のクラックでおおの 10°, 15° の傾斜角を持った ML10 と MS15, および比較的単純な形状のクラックで傾斜角がおおの 5°, 20°, 30° の Z05, Z20, Z30 の 5 種類を用いた。これらのクラックの横断面形状は Fig. 4~8 に示されている。

6 実験例と定量化

実験例として Fig. 4 に示される底面クラック MS15 による反射波の定量化を説明する。

MS15 による横波の反射のベクトル図を Fig. 9 に示す。図の左上の矢印で示される方向からの 45 度入射の横波の反射のベクトル図中 A は Fig. 9 に示される MS15 のクラックの先端を中心とする端部エコーで、B は同じく Fig. 9 に示される端部エコー A の底面による反射波である。Fig. 9 は Fig. 2 と異なって多くの反射波がクラックの各部から発生していることがわかる。

Fig. 2 のように単純な形状の欠陥の場合には A および

Fig. 9. Vector diagram of reflection by MS15.

Fig. 10. Crack height estimation of MS15 using tip wave A and bottom reflected wave B (wide band).

Fig. 11. Crack height estimation of MS15 using tip wave A and bottom reflected wave B (narrow band).

BはFig. 3のように分離したパルスとして測定されたが、疲労クラックの場合には、形状が複雑なのでクラックの各箇所から反射波が生じる。Fig. 9中Bでは白く見える部分を生じるのが見られるが、底面反射波Bは他の反射波と位相が180度ずれるために干渉して強度がゼロの点を生じるのである。このためBは実験結果ではFig. 10およびFig. 11に見られるように、鋭い空げきとして観察される。この空げきが底面反射Bと他の反射波との干渉による物であることはオシログラフにより確認されている。

MS15による反射の実験結果をFig. 10～12に示す。

Fig. 12. Estimation of MS15 length using surface waves on MS15.

DT-2200による探傷図形およびA, Bを、広帯域の探触子による探傷図形をFig. 10に、狭帯域の探触子の場合をFig. 11に示す。

広帯域の場合は端部エコーAはコーナーエコーの前の一番高いエコーとして比較的容易に見いだされる。底面反射エコーBはコーナーエコー等と干渉して、それらエコーの内部に生じる空げきとして見いだされるが、複数個発生するのでその内で一番前のエコーで最大深さの空げきをとると良い結果が得られる。一方、狭帯域の場合はFig. 11のAで見られるように端部エコーの波形が広がりを持ったパルスになるので、Aは探触子进行操作して端部エコーの最前部が鋭く立ち上がるように操作し、先端近くのピークをとると良い。Bは容易に狭く鋭い空げきとしてパルス中に見つけられる。その中で最も深い空げきを取ると精度の良いB点を得られる。これはクラック面の先端が最大の反射波を生じる点になるように入射波の方向を取ることになる。

図中の $W=15.7\text{ mm}$ が破線の位置の探触子からの距離を表わす。広帯域のFig. 10では $H=\sqrt{2}AB=\sqrt{2}$

Table II. Comparison of estimated crack heights, lengths, and inclined angles with actual value.

	MS15A	MS15B	ML10A	ML10B	Z05A	Z05B	Z20A	Z20B	Z30A	Z30B
Estimate height (W)	5.65	5.8	7.21	7.35	5.8	5.95	3.96	3.96	3.53	3.81
Estimate length (W)	6.09	6.09	7.92	7.92	5.94	5.94	4.18	4.18	3.94	3.94
Estimate height (N)	5.85 (0.17)	5.89 (0.17)	7.24 (0.06)	7.41 (0.13)	6.00 (0.07)	5.94 (0.11)	3.68 (0.12)	3.93 (0.15)	3.73 (0.07)	3.65 (0.12)
Estimate length (N)	6.3	6.3	7.45	7.45	5.85	5.85	4.01	4.01	3.90	3.90
Actual H.	5.9	5.9	7.22	7.22	5.88	5.88	3.89	3.89	3.62	3.62
Actual L.	6.15	6.15	7.34	7.34	5.9	5.9	4.14	4.14	4.18	4.18
Estimate angle (W)	21°	17°	11°	6°	11°	0°	19°	19°	25°	12°
Estimate angle (N)	21°	21°	13°	6°	0°	0°	23°	11°	17°	20°
Actual angle	15°	15°	10°	10°	5°	5°	20°	20°	30°	30°

(19.7-15.7)=5.65 mm となり、Fig. 11 では $\sqrt{2}$ (16.2-12.0)=5.94 mm となり、Table II の MS15 の推定値 Height (W) および推定値 Height (N) になる。これは真値 5.9 mm と比べてそれぞれ 0.25 mm および 0.04 mm の誤差となる。

また Fig. 12 にクラックの長さ L を推定するための等間隔に並んだ A, B 等のパルスを示す。長さの推定値は 6.3 mm で誤差は 0.15 mm である。クラックの長さ L はクラック面上を先端とコーナーとの間を表面波が伝ばするために、Fig. 12 に示されるようにコーナーエコーの後方に数個のエコーが等間隔に発生するが、これらの間隔を表面波の速度を横波の速度に補正して L を求める。

傾斜角 θ は長さ L と高さ H とから $\theta = \cos^{-1}(H/L)$ より求めることができる。これらの H, L の値から傾斜角を推定すると H/L が広帯域でも、狭帯域でもほぼ 0.93 となり、21 度となるが真値は 15 度である。Table II では MS15 の列で推定角 Estimate Angle (N) の行に示している。

端部エコー A およびこの底面反射 B を上に述べたようにとると、クラック面の先端が最大の反射波を生じる点になるように入射波の方向をとることになる。これより前方のエコー高さの低いものは、微少な欠陥、粒界ノイズ、この他欠陥の形状に起因した擬似端部エコー等の色々の場合があるので、面反射の先端からの端部エコーをとることが欠陥の大きさの判定に最適であり、それより前方の低いエコーは、強度に影響するものは塑性領域の存在だけであるが、塑性領域の大きさは文献 5) の Dugdale モデルおよび文献 6) によって推定可能であり、本研究の場合の材料の鋼材では約 0.1 mm である。したがって欠陥面の先端を端部エコーで推定できれば塑性領域による微小量を端部エコーによる欠陥高さに補正して、破壊力学に必要な欠陥の大きさを大きい誤差なしで推定できると考えている。

7 実験結果

実験結果を Table II に示す。MS15A, Z20A らは Fig. 1 の A 方向からの値を、Z20B らは B 方向からの値を、(W) は広帯域の、(N) は狭帯域の値を示す。狭帯域の推定高さ Height (N) の行で 5.84 (0.17) となっているのは 5 ないし 12 個の実験値より求めた平均値 5.84 mm と標準偏差 0.17 mm である。広帯域では実用上 unnecessary の標準偏差等は求めなかった。実験値による推

定値の高さ Estimate Height の誤差は、広帯域 (W) の場合は最大値が MS15A の場合 0.25 mm で、その他はほとんど 0.2 mm 以下である。また狭帯域 (N) の場合は最大値が Z20 の場合の 0.21 mm でその他は 0.1 mm 以下である。従来超音波探傷の場合は、端部エコーの場合で、集束型探触子を用いても誤差は 2.0 mm 以上であると考えられていた。今回は従来と全く異なる考えで、端部エコーとその底面反射を用いると誤差は広帯域の探触子を用いた場合で 0.2 mm 以下、狭帯域の探触子を用い、複数個のデータの平均を取ると 0.1 mm 以下になることがわかった。長さ L の推定値の誤差は広帯域 (W) では最大値が ML10 の場合 0.58 mm で、狭帯域 (N) では Z30 の場合の 0.28 mm である。これは高さの推定値の誤差より大きい、これを用いて傾斜角を推定した場合の誤差はほとんどの場合 10 度以下で実用上差し支えない誤差である。

8 結 論

デジタル型探傷器 DT-2200 を用いて、底面上の疲労クラックの定量化を試みた。その結果、次のことが判明した。

(1) DT-2200 の精度は 5 MHz の場合で広帯域の探触子を用い、高さのわかっている人工スリットの高さを測定した場合、誤差は 0.1 mm 以下であった。これは波長が 0.65 mm であるにも拘らずエコーのピークを取ることとデジタル化によって可能となった。

(2) クラック高さは、端部エコー A とその底面反射エコー B を用いて $H = \sqrt{2} AB$ で精度良く推定可能である。これは数値実験の結果 Fig. 2 で示される、形状の簡単な場合に文献 3) で発見されたものであるが、この式は形状の複雑な底面上の疲労クラックの場合も精度よく用いることができた。

(3) 広帯域の探触子を用いた場合、端部エコー A はコーナーエコーの前の高いエコーとして比較的容易に見いだされる。底面反射エコー B はコーナーエコー等と干渉して、それらエコーの内部に生じる空けきとして見いだされる。

(4) 狭帯域の探触子の場合にはコーナーエコーの前の最大のエコーが端部エコー A であるが、先端近傍のピークをとると良い。B は容易に空けきとしてコーナーエコーのパルス中に見つけられる。その中で最も深い空けきを取ると精度の良い B 点を得られる。

(5) クラックの長さ L は, コーナーエコーの後に見られる等間隔にならんだ複数個のエコー間隔より求まるが, この間隔を表面波の速度を用いて横波の速度に補正し, 長さ L を推定する.

(6) 傾斜角は H, L を用いて $\theta = \cos^{-1}(H/L)$ より求めることができる.

(7) この方法の精度は高さ H は広帯域の場合 0.2 mm 以下, 狭帯域の場合複数個のデータの平均をとれば 0.1 mm 以下である. これは従来の超音波探傷の場合の誤差が約 2.0 mm であるのと比較して約 1/10 以下の誤差である.

(8) 複雑な形状の疲労クラックのような問題も本研究用の有限要素法の自動要素分割のプログラムができたので容易に解くことができた. このシミュレーション結果のベクトル図は実験結果の疑問点を解決するのに有効であった.

(9) この方法は周波数を高くすることによってさらに精度を上げることが可能であろう.

多端部エコー法は傾斜底面クラックのように複雑な形状の場合も注意深く実験を行えば精度よい結果が得られることがわかった. この方法はクラック進展のモニタリングにも利用できるであろう.

従来は超音波探傷は欠陥の存在を検出する程度の信頼性しかないと考えられていた. また非破壊検査では欠陥高さの計測は不可能と考えられて欠陥の長さ方向の検出が欠陥評価の基準とされ, 破壊力学の要求する高さ方向の計測は重要視されなかった. このため破壊力学と超音

波探傷とは互いに必要な分野であるにも拘らず, あまり交流がなかった.

今回の実験により, 破壊力学が必要とする欠陥高さの測定が可能となった. これにより超音波探傷と破壊力学とのギャップが無くなることを希望する.

本研究に際して, 日立機械研究所の中村真行氏に色々ご教示頂いた. また相川康浩氏, 宮島 猛氏, 畑田 健氏, 中林政広氏, 松村民久氏他, 非破壊検査協会・端部エコー小委員会メンバー各位の協力を深く感謝の意を表明したい. また計算には東大大型計算センタの S3800 を使用した.

(平成 5 年 9 月 21 日 日本材料学会第 7 回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 210・202 小委員会 WG, “端部エコーハンドブック” (1988) 日本非破壊検査協会.
- 2) K. Harumi and M. Uchida, Jn. Nondestr. Evaluation, **9**, Nos. 2/3, 81 (1990).
- 3) K. Harumi, M. Uchida, T. Miyajima and Y. Ogura, NDE International, **25**, 3, 135 (1992).
- 4) 春海佳三郎, 内田正則, 宮島 猛, 小倉幸夫, 日本非破壊検査第 2 分科会資料, No. 21310 (1990).
- 5) 日本材料学会編, “材料強度学”, p. 72 (1993) 日本材料学会.
- 6) 日本材料学会編, “Stress Intensity Factors Handbook”, Vol. **1, 2, 3** (1993) 日本材料学会.