OS6-7 き裂開口部からの深さサイジングに対する SPOD 法の適用性

Applicability of SPOD to Through-Wall Sizing from Crack Opening Side

正 福富広幸・電力中央研究所

Hiroyuki FUKUTOMI, CRIEPI

林 山・電力中央研究所

Shan LIN, CRIEPI

正 緒方隆志・電力中央研究所

Takashi OGATA, CRIEPI

CRIEPI has developed a high accurate, low cost, efficient flaw depth sizing technique in ultrasonic nondestructive inspection, which is easy to use in comparison to standard techniques such as crack tip diffraction and TOFD techniques. This technique is called the short path of diffraction (SPOD) technique. This paper deals with applicability to front surface flaws. SPOD is possible to apply to depth sizing of front surface flaws.

Key Words: Nondestructive Examination, Ultrasonic Testing, Flaw Depth Sizing, SPOD Techniques, Front Surface Flaws

1. 緒言

経年化の進む火力・原子力発電プラントの主要機器に対する超音波探傷試験において、き裂の早期発見および高精度なき裂深さ測定が要求されている。き裂深さの測定において、斜角探傷により微弱なき裂先端部からの回折波によるエコー、すなわち、端部エコーを材料に起因するエコーなどと識別して判断しなければならない斜角端部エコー法は、難易度が高く、検査員の技量に負うところが大きい。最近では、実機の非破壊検査にフェーズドアレイ探触子が多く用いられるようになってきており、従来の斜角探触子を用いた場合に比べ、かなり端部エコーを識別し易くなった。しかしながら、フェーズドアレイ探触子およびその探傷器は従来のものと比べて依然として高価である。また、簡便で傷深さの測定精度が高い TOFD 法は厚肉のステンレス鋼溶接継手や形状変化部に対して適用することが困難な場合がある。著者らは上記の両手法の問題点を克服するために、き裂に向け斜角探触子により超音波を送信し、き裂からの回折波を最短経路、すなわち、き裂直上で垂直探触子により受信する簡便で高精度なき裂深さ測定法“短経路回折波 (Short Path of Diffraction, SPOD) 法”を開発し、探傷面と反対の面に開口したき裂の深さ測定においてその有効性を確認している^[1]。本研究では、(1) 開口部からのき裂深さ測定法を提案^[2]し、(2) 超音波伝搬解析により提案手法を検証した上で、(3) スリットおよび疲労き裂の深さ測定を実施し、提案手法の有効性を確認する。

2. SPOD 法

SPOD 法は、図 1 に示すように斜角探触子によって超音波を送信し、き裂の先端からの回折波を縦波垂直探触子により最短経路で受信する方法である。同図の

探触子配置ではき裂先端から、直接、垂直探触子へ伝搬する縦波回折波 (L_1) と、一度底面で反射された後に垂直探触子へ伝搬する縦波回折波 (L_2) を利用することにより、簡便かつ高精度にき裂深さを測定することが可能である。具体的にはこれらのビーム路程をそれぞれ W_1 および W_2 とすると、次式からき裂深さ d を求めることができる。

$$d = \frac{1}{2}(W_2 - W_1) \quad (1)$$

文献[2]では、入射する超音波の振動モード、屈折角、探触子間隔などについて検討されている。この結果、縦波を用い、斜角および垂直探触子の交軸点をき裂先端付近に位置するように屈折角および探触子間隔を設

Fig. 1 Principle of SPOD

定することによって、疲労き裂の先端からの微弱なエコーを従来の斜角探傷よりも高い S/N 比で受信できることが示されている。詳細な説明は文献[2]に譲る。例えば、図2に示すようにスリットを有するステンレス鋼ブロックに屈折角 30° で縦波を入射し、探触子間隔を一定に保持した状態で機械走査することによって得られたデータをサイドビュー表示すると図3となる。この図から、 L_1 および L_2 によるエコー (L_1 および L_2 エコー) の指示が平行となっていることが判る。よって、 L_1 および L_2 エコーが出現する探触子位置でそれぞれのビーム路程、すなわち、 W_1 および W_2 からき裂深さを求めることができる。ここでは、送信に斜角探触子を、受信に垂直探触子を用いた場合で SPOD 法の原理を説明した。逆に、送受信で斜角探触子と垂直探触子を入れ替えても測定系が線形であれば相反性により同じ探傷結果が得られる。

3. 開口部からのき裂深さ測定法

SPOD 法により開口部からき裂の深さを測定するため、図4に示すようにき裂開口部側の面に斜角探触子および垂直探触子を配置する。垂直探触子により回折波を受信することが可能であれば、超音波が斜角探触子の入射点からき裂端部へ向けて送信され回折波とな

Fig. 2 Measurement of back surface flaw

Fig. 3 Side view image of SPOD

Fig. 4 Depth measurement of front surface flaw by SPOD

り垂直探触子に受信されるまでの間のビーム路程 W (図中の破線の長さ) と探触子間隔 S から次式によりき裂深さ d_s を求めることができる。

$$d_s = \frac{1}{2W} (W^2 - S^2) \quad (2)$$

W はき裂の深さに応じて変化し、回折波によるエコーから求めることができる。具体的な求め方の一例は以下の章で述べる。

4. 超音波伝搬解析

有限要素法に基づく超音波伝搬解析によりき裂深さ測定に対する SPOD 法の有効性を調査した。解析モデルは図5に示す通りである。送信用の斜角探触子には中心周波数 5MHz、縦波屈折角 70° の広帯域斜角探触子を想定した。縦波を用いる理由やその他の計算条件の詳細は文献[2]を参照されたい。

スリットに向けて入射された縦波の波面を図6に示す。図中の時刻は縦波入射後からの経過時間である。同図から、縦波の波面がスリットの開口部、次いで端部に到達し、縦波回折波が発生することを観測できる。

Fig. 5 Finite element model

Fig. 6 Wave front around slit from angle beam transducer

深さ 5mm のスリットに対して縦波垂直探触子で受信される A スコープ波形の予測結果を図 7 に示す. 図中の $CP = 0 \text{ mm}$ はスリット直上に垂直探触子の入射点 (中心) が位置した場合であり, $CP = -5 \text{ mm}$ は入射点が斜角探触子の方向へ 5 mm 移動した位置, $CP = +5 \text{ mm}$ は斜角探触子の逆方向へ 5 mm 移動した位置である. まず, $CP = -5 \text{ mm}$ および 0 mm では, 縦波表面波による

Fig. 7 Echoes due to slits in SPOD

Fig. 8 Echoes due to slits with different depths in SPOD

Fig. 9 Comparison between actual depth and depth calculated from predicted waveform

エコー (L_s エコー), 縦波表面波がスリット開口部で反射されることにより生じるエコー (L_c エコー), 端部で発生した回折波によるエコー (L_t エコー) が順次観測される. L_s エコーと L_c エコーの間隔が狭まっているのに対し, L_c エコーと L_t エコーの間隔はほとんど変化していない. また, $CP = +5 \text{ mm}$ においては, スリットの存在により L_s エコーおよび L_c エコーは現れず, L_t エコーのみが観測されている. L_c エコーと L_t エコーのビーム路程差は

$$\Delta W = W - S \tag{3}$$

となる. ΔW と事前に求められる S の和であることから, W は ΔW を測定することによって求められる. $CP = -5 \text{ mm}$ および 0 mm の波形から求めたスリットの深さはそれぞれ 4.8 mm および 5.0 mm であり, 実際の深さ 5 mm と良く一致する. このことから, 垂直探触子の入射点が傷開口部直上から多少ずれても, L_c エコーと L_t エコーが同時に観測された状態でビーム路程 ΔW を測

Fig. 10 Measurement of front surface flaw

Fig. 11 Side view image of slits

Fig. 12 Slit depths calculated at different scan positions

Fig. 13 Side view image of fatigue crack

定することにより、高い精度で傷深さを求められることが予想される。CP=0 mm のとき、深さが 3 mm, 5 mm, 7 mm のスリットに対する A スコープ波形を比較して図 8 に示す。同図から深さに応じて L_i エコーが出現する時刻が変化していることが判る。同波形からの ΔW と(2)式および(3)式から求めたスリット深さと真の深さを比較して図 9 に示す。同波形から求めたスリット深さは真値と良好な一致を示していることから、上記の方法で開口部からのき裂深さを高精度に測定できることが十分期待できる。

5. 実証実験

ステンレス鋼に対して縦波屈折角 70° の斜角探触子と縦波垂直探触子（振動子径 10mm, 公称中心周波数 5MHz）を用い、スリットまたは疲労き裂を有する厚さ 40mm の SUS316L 製試験体を測定した。走査方法は図 10 に示すようにスキュー角 0° の一次元走査である。探触子間隔は接近限界距離とした。受信波形は市販のデジタル探傷器を用い 1mm ピッチで収録した。試験体に加工したスリットは深さ 2mm, 5mm および 10mm, 幅 0.3mm である。疲労き裂に関しては深さ測定後、探触子の走査位置で切断し、光学顕微鏡により深さを観察した。

スリットを有する試験体の探傷結果をサイドビュー表示して図 11 に示す。超音波伝搬解析の結果と同様に L_s エコー、明瞭な L_c エコーおよび L_i エコーを観測することができる。また、同図から L_c エコーと L_i エコーが観測されている範囲における各走査位置では両エコーのビーム路程差 ΔW はほとんど変化していない。深さ 5 mm のスリットに対し、 L_c エコーと L_i エコーが観測された位置で得られた ΔW と (2) 式から求めたスリット深さを図 12 に示す。横軸の原点はスリット開口部に垂直探触子の入射点が位置した場合である。図 11 に見るように L_c エコーと L_i エコーは平行となるため、両エコーが観測される探触子位置では ΔW はほとんど変化しないことから、求められたスリット深さもほとんど変化していないことが判る。したがって、両

Fig. 14 Comparison between actual and measured depths of slits and fatigue cracks

エコーが観測される位置で ΔW を測定することによって高精度に傷深さを求めることができる。疲労き裂に対するサイドビューを図 13 に示す。疲労き裂に対しても ΔW はほとんど変化しないことが判る。図 11 および 13 の ΔW から求めたスリットおよび疲労き裂の深さを実際の深さと比較して図 14 に示す。同図から測定結果は実際の深さと良好な一致を示すことから、SPOD 法は開口部からのき裂深さ測定に対しても十分有効であることを確認できた。

6. 結言

本研究では、SPOD 法による開口部からのき裂深さ測定法を開発した。主な結果は以下の通りである。

1. SPOD 法によるき裂開口部からの探傷において、探触子間隔とき裂先端からの回折波のエコーのビーム路程からき裂深さを測定する方法を提案した。
2. 超音波伝搬解析により、縦波表面波によるエコー、縦波表面波がスリット開口部で反射されることにより生じるエコー、端部で発生した回折波によるエコーが順次観測され、提案手法の有効性が示唆された。
3. ステンレス製試験体のスリットおよび疲労き裂に提案手法を適用し、十分高い精度で深さ測定が可能であることを確認できた。

参考文献

- [1] 福富他, 電中研研究報告 Q05003 (平成 18 年 3 月)
- [2] 福富他, 電中研研究報告 (平成 19 年 3 月)