

シャープな欠陥からの超音波端部エコーの発生挙動とその特性

劉 銘崇¹、三木千壽²

¹ 学生員 工修 東京工業大学大学院博士課程(現在 日本技術開発(株) 土木本部構造橋梁部)
(〒164 東京都中野区本町 5-33-11)

² 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

鋭い欠陥端部から発生する端部エコーの発生メカニズム、及び端部エコーの特性と欠陥形状、寸法との関係を数値シミュレーションと実験により検討した。端部エコーは欠陥の先端近傍がせん断変形することにより生じる散乱波であり、端部エコーの強さは欠陥先端の寸法に依存すること、端部エコーの位相は欠陥の先端から1/4周期遅れること、欠陥の上下端の端部エコーの波形が逆転することなどの特性を明らかにした。

Key Words : tip echo, numerical simulation, generating mechanism

1. はじめに

超音波端部エコー法¹⁾⁻⁶⁾とは、欠陥の鋭い先端部から散乱エコー(端部エコーと呼ぶ)が出ることを利用し、探触子を前後に走査させ欠陥の両端部から出る散乱エコーのビーム路程差を用いて欠陥寸法を推定する方法である。この方法により欠陥の寸法はある程度の精度で測定できるが、欠陥端部の形状の判定は難しい。

端部エコーの発生は経験的に認められ、欠陥寸法の測定に利用されている。最近ではそのメカニズムや特性を詳細に調べることも行われはじめており、通常の反射エコーに比べて強さが微弱であることや上端部エコーと下端部エコーでは波形が逆転することなどが知られている^{6),7)}。Krautkramer⁸⁾はホイヘンスの原理を用いて端部エコーの発生を説明し、端部エコーの強さは反射源の面積に依存せず端部の形状や寸法によって決まることを推定している。相川ら^{9),10)}は先端が方形の幅0.08~1.0 mmのスリットを用いて実験を行い、端部エコー高さスリット先端幅の関係を検討した。これから方形先端のスリットからの上端部エコー高さはスリット幅に影響されるが、下端部エコー高さはスリット幅に関係なく一定であること、またスリット幅が0.1 mm程度の場合は上端部と下端部エコーの感度差が少ないことを示している。伊達ら^{11),12)}はスリット幅0.01~1.0 mmの円形先端のスリットを用いた実験から、上端部エコー高さはスリット幅の平方根に比例して上昇しているが、下端部エコー高さはスリット幅が大きくなるほど弱くなることを示している。また、光弾性実験を行い、端部エコーが欠

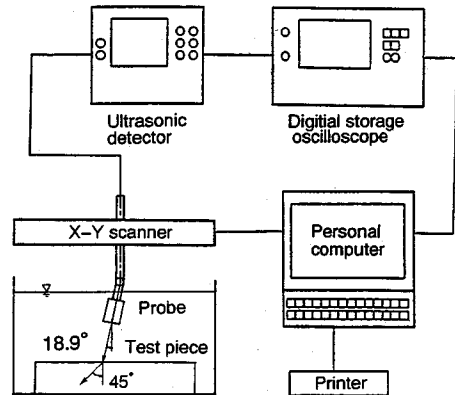


図-1 実験システム

陥先端を中心とする球面波であることを観察している。福原¹³⁾は端部エコーのシミュレーションを行い、端部エコー高さの変化はスリットの左右両端部から発生する端部エコーの干渉の結果であり、干渉によってスペクトルに波打ち現象が現れることを示している。

このように端部エコーに関するさまざまな検討が行われはじめているが、これらの研究のほとんどは端部エコーの強さに影響する因子、及び端部エコーの強さと欠陥端部の寸法との関係を実験的に明らかにすることに集中しており、端部エコーの発生メカニズムや端部エコーの特性と欠陥先端性状との関係についてはまだ不明な点が多い。本研究では、欠陥の形状を特定するためにより多くの情報を得ることを目的として超音波を弾性波動と

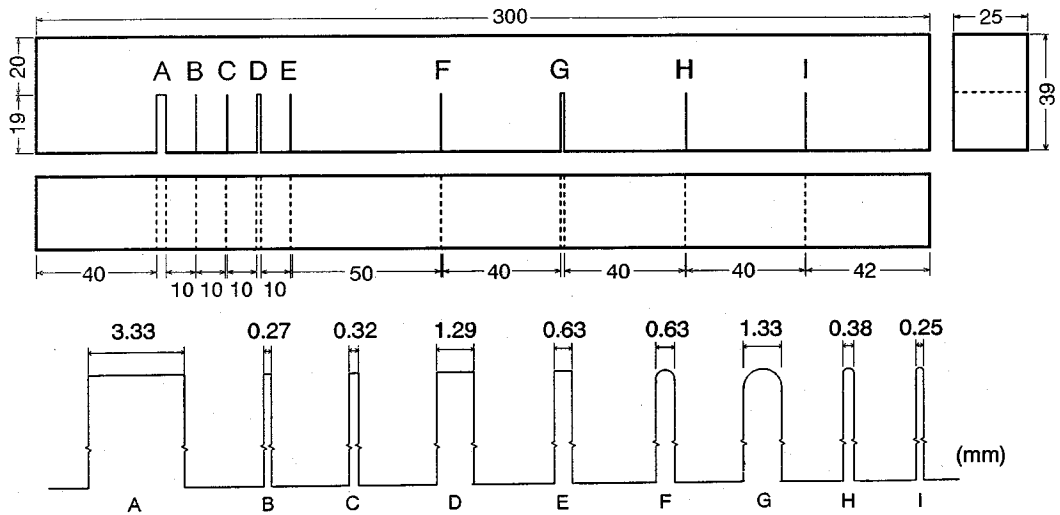


図-2 試験体及びスリット寸法

してとらえ、端部エコーのメカニズムとその特性を数値シミュレーションと実験により検討した。

2. 超音波探傷実験

本研究の実験は水浸法で行った。図-1に実験システムを示す。45度の斜角超音波を得るため、水浸用探触子は18.9度の角度で支持されており、そこから超音波が放射され、水中の鋼試験体へと伝播する。境界面でのモード変換によって鋼試験体中の波は45度の横波になる。試験体中のスリット先端で散乱した端部エコーは、再び水中を伝播した後、探触子で受信される。受信信号は探傷器で増幅されてオシロスコープに送られ、そこでA/D変換されて波形が表示される。さらにデジタル波形データはパーソナルコンピュータに送られ記録される。

図-2に9種類のスリットを含む試験体を示す。スリットは先端幅0.27、0.32、0.63、1.29と3.33mmの方形先端のスリット、及び先端の直径が0.25、0.38、0.63と1.33mmの円形先端のスリットである。これらのスリット幅は入射波の波長との関係から設定したものであり、スリット幅と入射波の波長との関係を観察できる。また、それぞれの幅でのスリット先端の形状の違いによる影響も見ることができる。方形先端のスリット幅0.32、0.63、1.29mmと円形先端直径0.38、0.63、1.33mmはそれぞれ入射波の波長の1/2、1.0、2.0倍である。また幅3.33mmはスリットの両端からの端部エコーを干渉させないためにスリット幅を大きくとったものであり、入射波の波長の約5倍である。

超音波探触子には公称周波数5MHzの水浸無焦点の

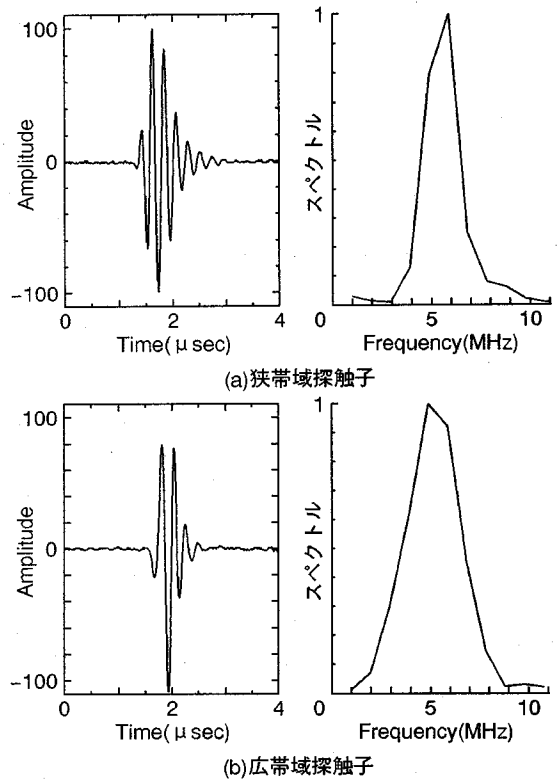


図-3 超音波の波形と周波数分布

狭帯域探触子と広帯域探触子を用いた。図-3にそれらの超音波を水平で滑らかな試験体底面に垂直入射して得た底面エコーの波形とスペクトルを示す。

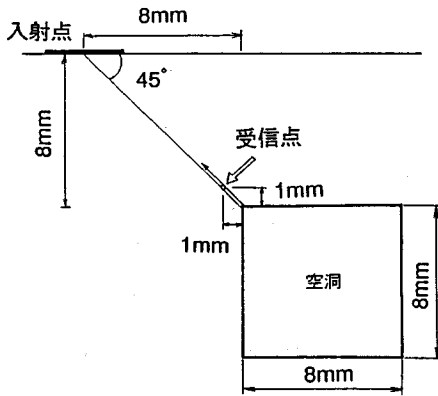


図-4 解析対象

3. 超音波の数値シミュレーション

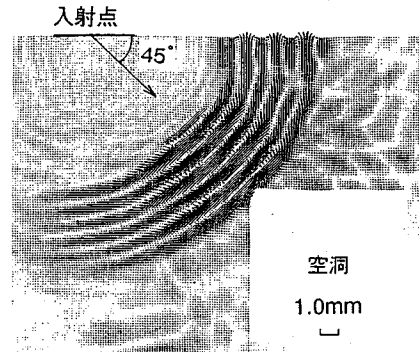
有限要素法動弾性解析により超音波の数値シミュレーションを行った。計算時間と容量の制約のため、入射波の周波数は2 MHzとした。超音波探傷においてエコーは欠陥寸法と入射波の波長との関係に依存すると考えられる。従って解析のスリット幅と入射波の波長の関係を実験とのそれを一致させることから、数値シミュレーションにより実験と同様な端部エコー特性を検討することができる。

すべての解析において、入射角度は45度を用いた。鋼中での縦波の波速は約5900 m/sec、横波の波速は約3230 m/secであるので、周波数2 MHzに対して縦波の波長は2.45 mm、横波の波長は1.6 mmとなる。解析における要素寸法は、周波数2 MHzの縦波の波長の約1/24、横波の波長の約1/13にあたる値0.125 mmを用いた。この値は周波数2.5 MHz程度の波の特性を表すのに十分小さいメッシュである¹⁴⁾。時間間隔は周波数2 MHzに対して入力超音波の周期の約1/36にあたる値0.0136825 μ secを用いた。これは入射波形を十分に表すことのできる時間間隔と考えられる。入射波の入力は所定の位置に Huygens 原理から決める時間差を付けて強制的変位を与えることにより行った。また平面波を得るために加振部に4 mmの幅を持たせた。用いた要素は三角形一次平面歪要素である。時間応答解析は線形加速度法 (Newmark の β 法, $\beta=1/6$) により行った^{15), 16)}。

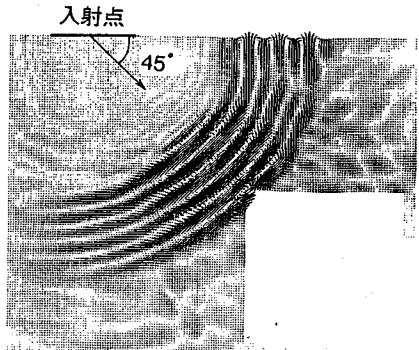
4. 端部エコーの発生メカニズムの観察

(1) 上端部エコー

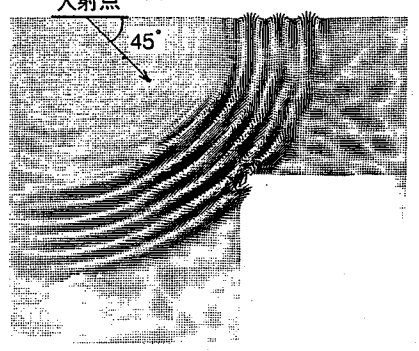
図-4に示すような8 mm×8 mmの正方形断面の欠陥を対象として数値シミュレーションを行った。この寸法は欠陥両端からの端部エコーを干渉させないために設け



(a) 1/4波長到達時



(b) 1/2波長到達時



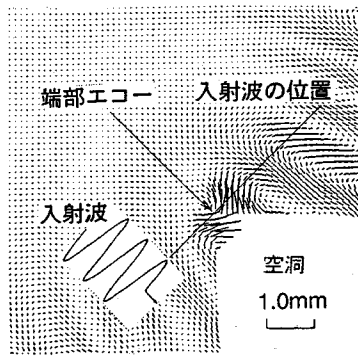
(c) 3/4波長到達時

図-5 変位ベクトル図

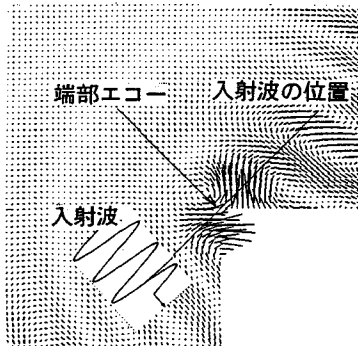
たものである。入射波形は3周期の sine 波形とした。

解析結果を図-5に示す。それぞれ入射波の1/4, 1/2, 3/4波長の位置が欠陥の先端に到着したときの変位ベクトル図である。線の長さが対応する変位の大きさを表している。欠陥先端近傍に散乱波に対応する局所的な変形が生じていることが観察できる。

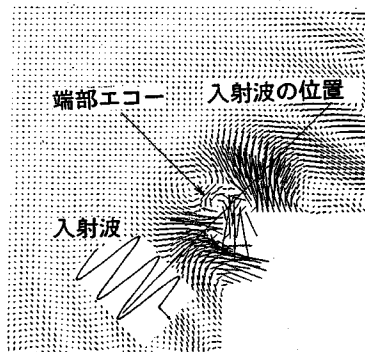
端部エコーの観察を容易にするため、入射波の成分を取り除いた¹⁵⁾。その結果を図-6に示す。端部エコーの振幅は入射波のレベルに比べて小さいため、図-6では図-5に比べて先端近傍を拡大して示している。超音波の横波が欠陥の端部に達すると、円形渦状に回転したような変位が生じるのが観察され、この変位が端部エコー



(a) 1/4波長到達時



(b) 1/2波長到達時



(c) 3/4波長到達時

図-6 変位ベクトル図 (入射波成分を除去)

を生じる原因と考えられる。変位ベクトル図の時間変化から推定すると、まず入射波により欠陥表面にせん断変形が生じ、それがシャープな端部に集中しているために回転変位が生じる。端部エコーを構成する散乱波はこの回転変位に伴うものであると考えられる。

端部エコーの発生メカニズムをさらに調べるために、図-7に欠陥先端近傍の変形とその時の入射波および上端部エコーの位相-時間関係を示した。欠陥先端近傍の最大変位は、入射波の最大振幅である波頭から1/4周期の位置(第一番目ピーク)が欠陥先端に到達したとき

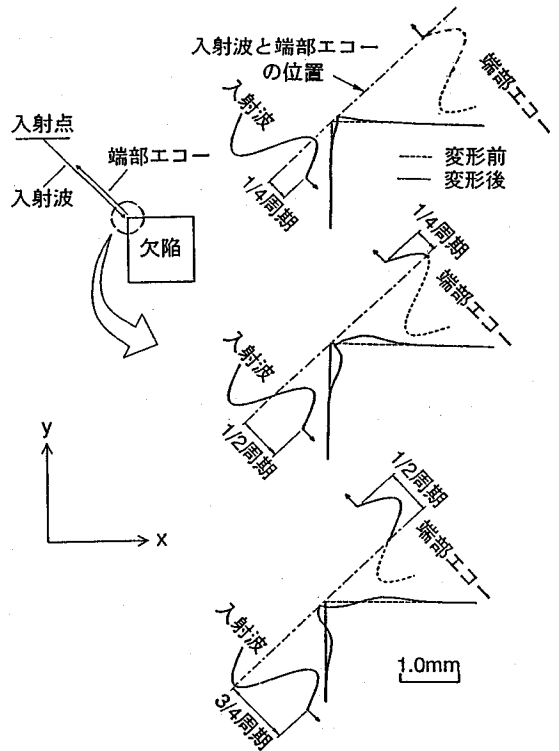


図-7 欠陥先端の変形及び入射波と上端部エコーの位相-時間関係

に生じるのではなく、それがすぎ入射波の波頭から1/2周期の位置が欠陥先端に到達したときに生じている。すなわち、欠陥端部において入射波の入射時間と受信点から逆算した端部エコーの発生時間を比べると、端部エコーの位相は欠陥端部で鏡面反射とすると仮定した場合より約1/4周期分遅れることがわかった。また端部エコーと欠陥先端の変形モードの位相が同じであることから、端部エコーの発生は欠陥先端近傍の局所的な変形に起因するものであることがわかる。1/4周期分遅れることは、欠陥のコンプライアンスと考えられる。これは欠陥の形状に依存すると考えられる。

(2) 下端部エコー

図-8に示すような5mm×5mmの正方形断面の欠陥を対象として解析を行った。入射点、欠陥下端部との距離、受信点と欠陥下端部との相対位置はすべて上端部エコーの場合と同じとした。

図-9に入射波1/4, 1/2, 3/4波長の位置が欠陥先端に到着したときの欠陥先端近傍の変形とそのときの下端部エコーの位相-時間関係を示す。変形図より空洞の底辺はほとんど変位を生じないことがわかる。これは方形先端のスリットの下端部エコーは水平方向の幅の影響を

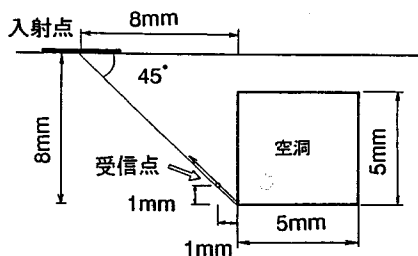


図-8 解析対象

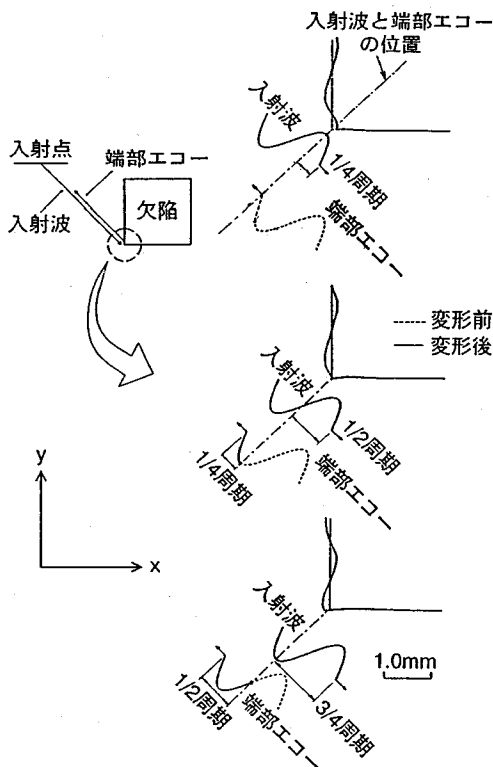


図-9 欠陥先端の変形及び入射波と下端部エコーの位相-時間関係

受けないことを示している。またこれから欠陥の底辺を固定端と考えることができる。ここでは変形が生じないため、下端部エコーの波形が入射波のそれと逆転すると推定できる。さらに端部の左側壁にしか変位が生じないことから、下端部エコーのレベルが小さい理由を説明できる。

欠陥先端における入射波の入射時間と端部エコーの発生時間の関係より、下端部エコーの位相は入射波の入射時間より約1/4周期遅れていることがわかる。この結果は上端部エコーの場合と同じである。

(3) 上下端部エコーの波形

図-10は、図-4および図-8に示す欠陥の先端近く

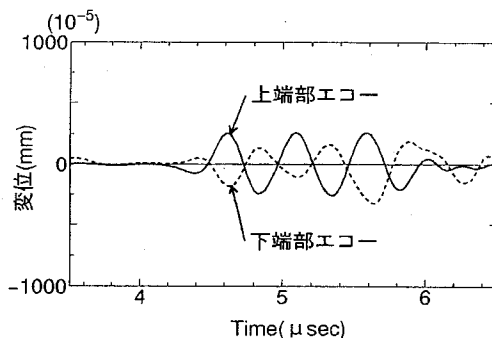


図-10 入射波と上下端部エコーのタイムヒストリー

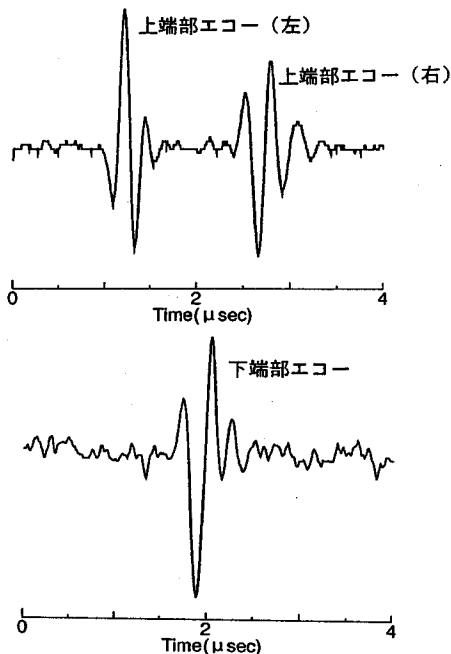


図-11 実験から得た端部エコーのタイムヒストリー

に設けた受信点での変位のタイムヒストリーを、上下端部エコーについて示したものである。実線は上端部エコーであり、破線は下端部エコーを示す。上端部エコーと下端部エコーの波形は逆転していることがわかる。この結果と変形モードから検討した結果は一致していることから、変形モードを用いて端部エコーの発生メカニズムが説明できることがわかった。また、入射波の伝播方向と方形先端欠陥の上端部右側の位置関係は、入射波の伝播方向と方形先端欠陥の下端部の位置関係と同様と考えることができる。従って上端部右側の端部エコーの波形は下端部エコーのそれと一致すると推定できる。

図-11は実験から得られた幅3.33mmのスリットの左、右側上端部及び下端部エコーのタイムヒストリーである。方形先端スリット上部の右側の端部エコーと下端

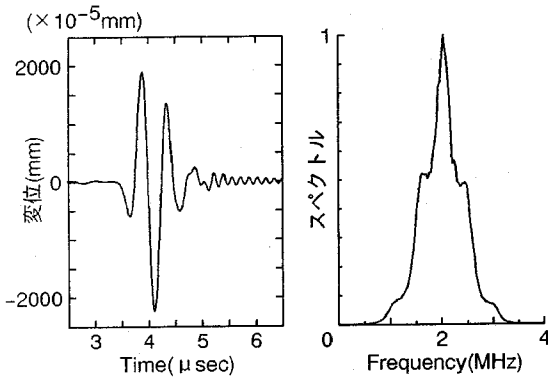


図-12 シミュレーション波形と周波数分布

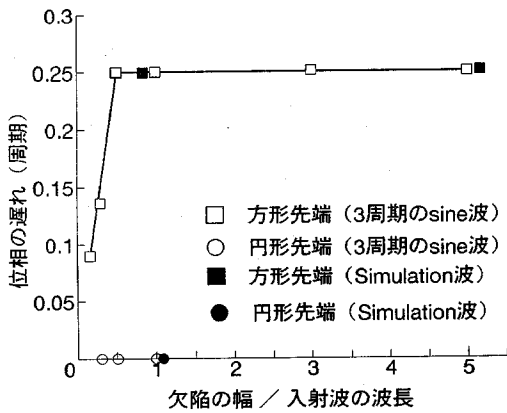


図-13 スリット幅と位相遅れの関係

部エコーの波形は一致している。また、方形先端スリット上部の左側の端部エコーと下端部エコーの波形は逆転しており、実験は数値シミュレーションと同様の結果を示している。

5. スリット先端形状による端部エコーの特性の考察

スリットの先端形状を変えたときの端部エコーの特性を調べるために解析と実験を行った。解析に用いた変数はスリットの幅 (W)、スリットの先端形状と入射波形である。スリット幅は入射波の波長の 0.16~5 倍とし、その先端形状は方形と円形とした。入射波形は 3 周期 sine 波とシミュレーション波形である。シミュレーション波形とは探触子から出た超音波の波形をシミュレートしたものである。図-12 に図-4 の受信点で取得したシミュレーション波形とその周波数分布を示す。これからシミュレーション波形は広い周波数分布を持つことがわかる。

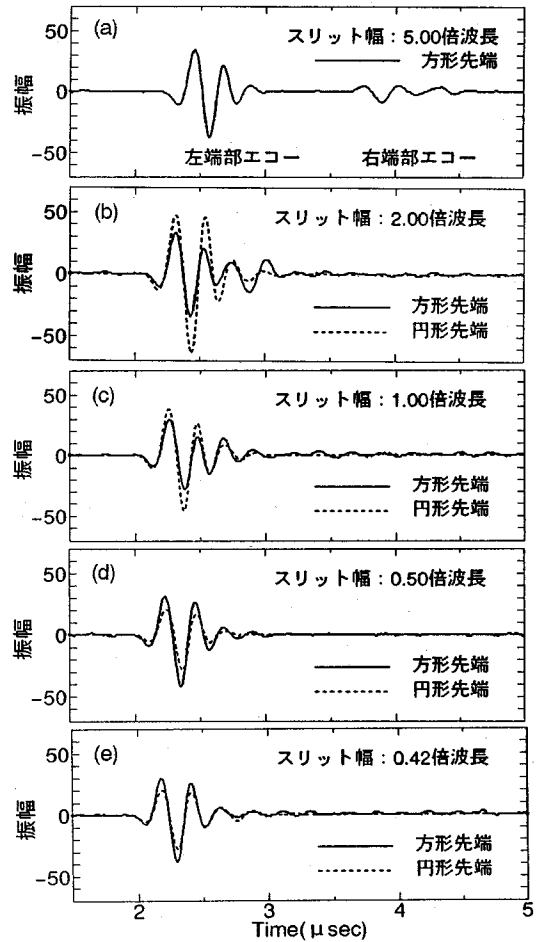


図-14 スリット幅と端部エコーのタイムヒストリー

(1) 位相の遅れ

図-13 に端部エコーの位相の遅れとスリットの幅の関係を示す。ここでの位相の遅れとは図-7 における $\pi/4$ に対応するものであり、入射波が欠陥先端に到着してからエコーが出るまでの遅れを指している。横軸はスリットの幅を入射波の波長で無次元化したもの、縦軸は位相の遅れを周期で表したものである。図に示すように、先端形状が円形の場合は欠陥の幅に関わらず位相の遅れは見られない。すなわち鏡面反射のような挙動を示す。

方形先端の欠陥に 3 周期の sine 波を入射した場合、スリット幅が入射波の波長の $1/2$ 以下の領域では、スリット幅と位相の遅れは比例している。一方、スリット幅が入射波の波長の $1/2$ 以上になると、位相の遅れはスリット幅によらず周期の $1/4$ で一定となる。入射波形がシミュレーション波形の場合も同じ結果を示しており、位相の遅れは入射波の波形によらないと言える。

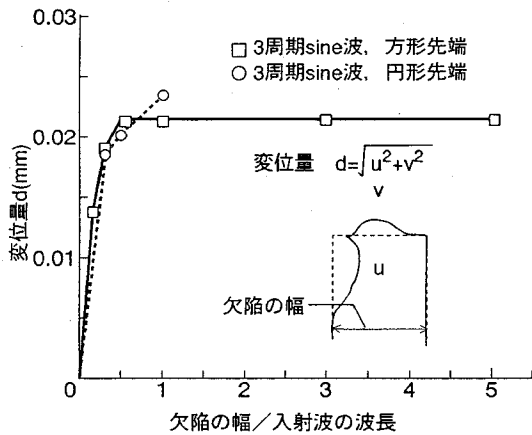


図-15 スリット幅と変位値の関係

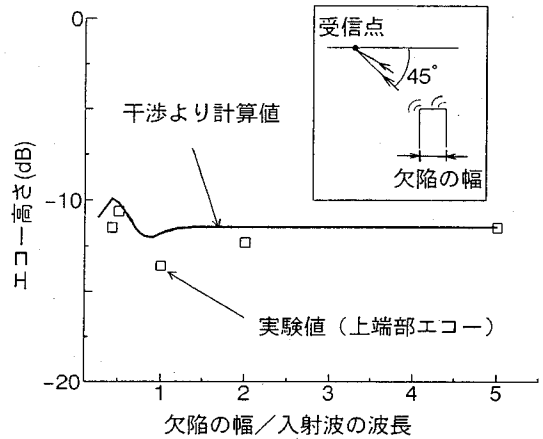


図-17 干渉を考慮した計算値と実験値

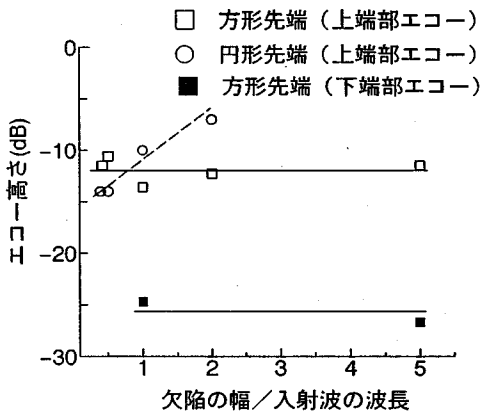


図-16 実験から得たスリット幅とエコー高さの関係

(2) 波形の変化

図-14は実験によって得られた方形先端と円形先端からの上端部エコーのタイムヒストリーである。実線は方形先端によるものであり、破線は円形先端によるものである。方形先端の場合、図-14(a)に示すようにスリットの左右両端から端部エコーが発生し、このふたつの端部エコーの波形は逆転している。円形先端の場合は端部エコーは一つしかない。従って、この特徴を利用すればスリット先端形状の区別ができると考えられる。しかし、方形先端のスリット幅が小さくなると左、右側から出る端部エコーは重なってしまい、円形先端の端部エコーと区別できなくなる。図-14(b)~(e)では、方形先端と円形先端から出る上端部エコーの波形はほぼ同様になっている。すなわち、スリット幅が小さくなると波形によって先端形状を決定するのは困難となる。

(3) エコー高さの変化

図-15に、方形先端と円形先端から出る端部エコー

が最大エコー高さを示す時刻の、スリット先端近傍の側壁の変位値を示す。この時刻は数値シミュレーションより求めた。ここでの変位値は水平方向と垂直方向の変位値の二乗の和の平方根である。この図より入射波の波長の1/2以上の幅を持つスリットでは、スリット先端近傍の変位値はほぼ一定になることがわかる。すでに述べたように端部エコーはスリット先端近傍の変形と同じ位相を持つので、端部エコー高さはスリット先端近傍の変位値と比例すると考えられる。

図-16は実験より得られた端部エコーのエコー高さである。方形先端の上端部エコー高さはスリット幅によらず一定であり、実験による上端部エコー高さとスリット幅との関係は、数値シミュレーションの結果と同じ傾向を示している。

下端部エコーのエコー高さは、データの数は少ないがスリット幅の影響を受けずほぼ一定となっている。これは数値シミュレーションの下端部エコーの変形図から推定する結果と一致している。

円形先端の場合は、スリット幅の増加に従ってエコー高さが高くなっていることがわかる。この結果は図-15の解析結果と一致している。これはスリット幅の増加に従って反射源の面積が増加することにより、端部エコーの感度が上昇するためであると考えられる。

図-16において、スリット幅が入射波の波長以下の場合には方形先端の端部エコー高さは円形のそれより高い現象がみられた。これは方形先端の両端部エコーの干渉による結果であると考えられる。そこで図-17に上端部エコーの実験値と、干渉を考慮して計算した値を示した。計算したエコー高さは図-17に示すように受信点で得た左、右側上端部エコーの波形を重ねた値である。これからスリット幅を変化させることによる干渉現象を検討することができた。用いた上端部エコーは実験から

得られた幅 3.33 mm のスリットの左, 右側エコーである。ここで干渉を考慮した計算は, 両端部エコーの波形が逆転していること, スリット幅が入射波の波長の 1/2 以上の場合に上端部エコーのエコー高さが一定していること, 下端部エコーのエコー高さがスリット幅によらないことを利用して行った。実験値と計算値の傾向はよい一致を見せており, これから干渉による説明は妥当であると言える。

6. ま と め

超音波端部エコーの数値シミュレーションと実験により以下のことが明らかとなった。

(1) 端部エコーの発生メカニズムを欠陥の先端近傍の変形挙動を用いて説明できた。

(2) 方形スリットにおいて端部エコーの発生時間は欠陥先端で入射時間より 1/4 周期分遅れている。

(3) 端部エコーの波形は欠陥幅方向の左右端あるいは垂直方向の上下端では逆転する。

(4) 端部エコーのレベルは欠陥の幅に依存している。

謝辞: 本論文をまとめるにあたり貴重な助力をいただいた奥山裕一氏(東京工業大学大学院)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 北原道弘, 広瀬壮一, 印建華, 横井幹仁: 超音波による界面クラック長の一推定法, 土木学会第 48 回年次学術講演会, pp.1324-1325, 1993. 9.
- 2) 田島二郎, 福井崇博, 三木千壽, 深沢 誠: かど溶接ルート部に発生する疲労亀裂検出に対する非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, 第 386 号/I-8(報告), pp.427-434, 1987. 10.
- 3) 稲垣道夫, 岡田 明, 小林志希男, 木村勝美, 福原照明, 松本庄次郎, 青木孝夫, 中野恵司, 兼古光行: 構造用鋼溶接継手の溶込み不良の超音波による検出と疲労試験に

よる品質評価, 溶接学会誌, 第 51 巻, 第 9 号, pp.775-783, 1982.

- 4) 三木千壽, 深沢 誠, 加藤昌彦, 大駐久雄: 表面亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, 第 386 号/I-8(報告), pp.329-337, 1987. 10.
- 5) 三木千壽, 豊田幸宏, 宮本公男, 梅田晶一: 超音波を用いた疲労亀裂の検出, 構造工学論文集, Vol.33 A, pp.383-391, 1987. 3.
- 6) 日本非破壊検査協会: 端部エコーハンドブック, 1989.
- 7) Wustenberg, H. and Erhard, A. : *Development of ultrasonic techniques for sizing defects*, Non-Destructive Examination in Relation to Structural Integrity, Applied Science Publishers Ltd, London, pp.59-83, 1980.
- 8) Krautkramer, J. and Krautkramer, H. : *Ultrasonic testing of materials*, Third revised edition. Springer-Verlag Berlin Heiderberg New York. pp.98-101, 1983.
- 9) 相川康浩, 中山昌久: 端部ピークエコー法における欠陥先端ラインの傾き, 先端面の傾き, 及び先端幅の影響について, 非破壊検査, Vol.32-9, pp.730-731, 1983.
- 10) 相川康浩: 端部エコー法マニュアル, 端部エコーハンドブック, 日本非破壊検査協会 210. 202 小委員会, pp.47-60, 1989.
- 11) 伊達和博, 伊東義晃, 島田平八: 光弾性を用いた固体内弾性波の観察, 非破壊検査, Vol.33-7, pp.513-519, 1984.
- 12) 伊達和博, 島田平八: 光弾性法による欠陥からの反射波の可視化, 非破壊検査, Vol.35-2 A, pp.150, 1986.
- 13) 福原照明: 端部エコー法マニュアル, 端部エコーハンドブック, 日本非破壊検査協会 210. 202 小委員会, pp.25-36, 1989.
- 14) 大槻 明, 春海佳三郎: 地震時の大規模地下空洞周辺の波動伝播機構, 土木学会論文集, 第 339 号, pp.227-230, 1983.
- 15) Miki, C., Ikeda, K., Tateishi, K. and Takahashi, M. : Numerical simulation of ultrasonic pulse-echo inspection, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.9, No.237s-246s, 1993.1.
- 16) 三木千壽, 池田清宏, 沖中知雄, 吉見昌宏: 超音波パルスエコー法の数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.37 A, pp.493-502, 1991.3.

(1994.9.7 受付)

A STUDY ON GENERATING MECHANISM OF ULTRASONIC TIP ECHO REFLECTED FROM THE SHARP TIPS OF A FLAW

Ming-Chung LIOU and Chitoshi MIKI

A study on clarifying the generating mechanism of tip echo, the relationship between the characteristics of tip echo and shape, size of flaw are clarified by both numerical simulation and experiment.

The tip echo is the scattered wave which results from by the shear deformation at the tip of flaw. The intensity of tip echo is dependent on the size of flaw tip. The phase of tip echo is delayed 1/4 of wave length of at flaw tip. The waveforms of tip echoes reflected from the right are reversed against those of the left ends in the direction of width of a flaw and the same phase change occurs between the waveforms from top and bottom ends of a vertical flaw.