

厚板突き合わせ溶接部に存在する面状欠陥の 超音波非破壊評価に対する基礎的検討

三木千壽¹・白旗弘実²・塩崎匡克³

¹フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 修 (工) 武蔵工業大学助手 工学部土木工学科 (〒 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

³工修 西松建設

鋼橋の突き合わせ溶接部の検査に超音波探傷試験の適用が検討されている。溶接欠陥のうちでも特に構造部材の強度に影響の大きい割れなどの面状欠陥の検出能が問題となっている。現場溶接継手モデルに対し、数値シミュレーション、実験を行い欠陥エコー特性の検討を行い、複数経路を考慮した開口合成を行った。

Key Words : field welded joint, defect, ultrasonic testing, photoelastic test, numerical simulation, tip echo

1. 序論

鋼部材の突き合わせ溶接継手部の検査に超音波の適用が検討されている。特に現場溶接に対しては、作業安全性の面からも従来からの放射線検査に代えて超音波探傷の適用が強く要望されている。また板厚が50mmを越えるようになると橋梁で通常使用されている放射線検査装置では欠陥の検出能力がかなり悪くなり、そのかわりとしても超音波探傷の適用が考えられる。

超音波探傷検査は従来より橋梁の検査に適用されてきた。しかし検査結果の判定は現場の技術者が行うため、その結果は技術者の経験や能力に左右されやすいこと、記録性や再現性さらには客観性にも問題があるなどの点が指摘されてきた。それに対して近年適用が増えてきた自動超音波探傷^{1),2)}はそれらを一気に解決したような印象を与えている。

自動超音波探傷は本州四国連絡橋瀬戸大橋のトラス弦材の角継手の検査に適用されて以来、鋼床版や鋼橋脚の現場溶接部の検査に適用されてきている。しかし瀬戸大橋の角溶接部に適用して以来、いわゆる見落としや空振りと呼ばれる欠陥検出の精度や、欠陥寸法の測定精度については改善の余地があることが常に指摘されてきた。特に工場溶接の検査を放射線から超音波にかえることの可能性を検討する目的で行われた鋼橋技術研究会の研究では特に割れや融合不良などの面状欠陥に対する検出能力に問題のあることが明らかにされている³⁾。示方書類⁴⁾の放射線検査において、割れが検出されればその寸法のいかんによらず不合格としているように、部材の安全性を考えた場合、このような面状欠陥は特に注意が必要であり、それらに対する検出特性を改

善することは、今後超音波探傷の適用を推進していく上で極めて重要かつ火急の課題である。

面状欠陥に対して検出精度が悪い理由は、超音波の伝播特性、特に大部分の自動超音波システムに使われている斜角超音波の伝播特性を考えれば、ある程度理解できる。すなわち面状欠陥による反射波はきわめて指向性が強くしばしば斜角探傷試験で検出対象とする無指向性の端部エコーがその中に埋もれてしまうことになる。この問題は板が厚くなったときに特に深刻になる。溶接部には波の反射源となるものが多く、たくさんの波が重なってしまうからである。しかしこのような観点で超音波波動の伝播を検討した例はあまりない。

したがって、ここでは厚板溶接部に存在する面状欠陥に対する超音波探傷の検出精度を改善することを目的に、数値シミュレーション、超音波実験、および超音波光弾性実験により基礎的な検討を行う。本研究で最終的な検出目標とする欠陥は、特に問題の多い片側の溶接ビードの裏面に近い位置に残される割れあるいはとけ込み不足である。

2. 現場溶接継手モデル試験体を用いた実験

本研究では図-1に示すような現場溶接継手の試験片をつくり、実験を行った。これは厚さ60mmと80mmの板をV字開先溶接したもので、主桁フランジの継手部をモデルとしたものである。この試験片にはあらかじめ溶接条件をかえることで高温割れなどの欠陥を含んでいる。本研究では図-2に示す初層ビードに発生した長さ6mmの高温割れを試験の対象とした。

まず、この高温割れ欠陥のエコーレベルについて検討

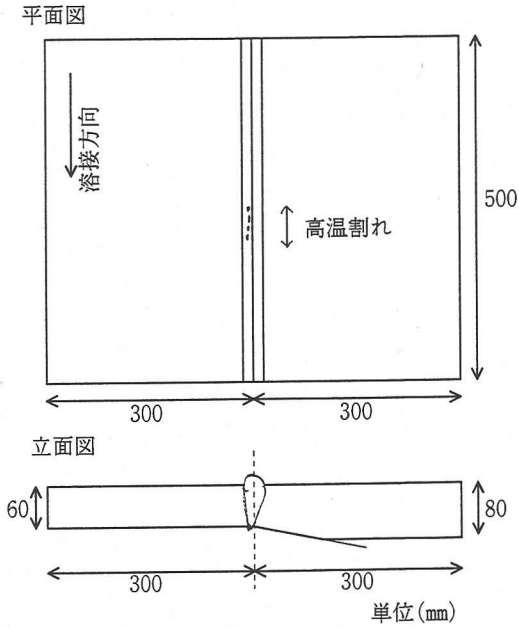


図-1 現場溶接継手モデル試験体

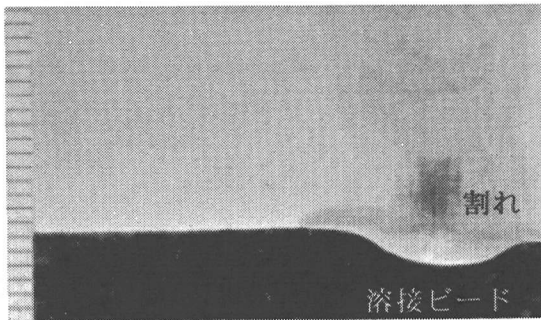


図-2 対象とした高温割れ

を行った。使用した探触子は 5C12.7A45 広帯域探触子である。この探触子は 1MHz から 6MHz までの広い帯域の超音波を送信、受信することができる。図-3(a) は受信帯域を 0MHz から 10MHz とし、パルス波を受信したときの受信波のスペクトル分布である。この探触子で探傷器の送信周波数と受信帯域の感度を調整することで 2MHz、5MHz 両方の場合において実験を行った。図-3(b) は 2MHz、(c) は 5MHz を中心に感度をあわせ、送信されるパルス波の波形とそのスペクトル分布図である。

図-4 に送信周波数 2MHz のときの高温割れを探傷したときの A スコープ像を示す。ビーム路程が 82mm の位置において、大きなエコーが見られる。またビーム路程が 65mm の位置にもエコーが見られる。探触子を溶接

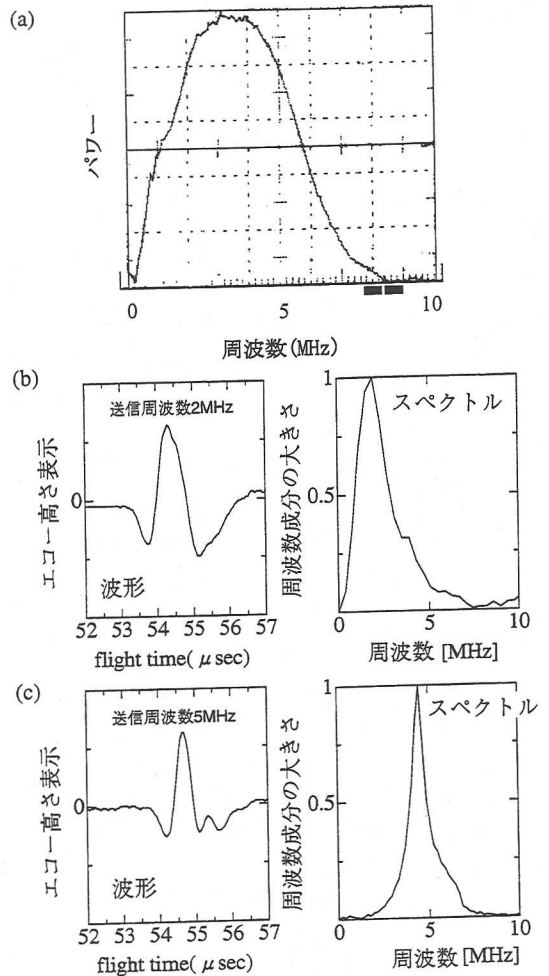


図-3 広帯域で受信したときの (a) 受信波スペクトル、(b)2MHz、(c)5MHz に感度をあわせたときのパルス波波形とスペクトル分布

線に平行に移動させてもビーム路程 82mm にあらわれているエコーには変化はそれほど見られなかった。しかしビーム路程 65mm に位置しているエコーは探触子を溶接線に平行に移動させると消えてしまった。よってこのビーム路程 65mm にあるエコーは、欠陥からのエコーであると考えられる。図-5 に送信周波数を 5MHz としたときの高温割れの A スコープ像を示す。この場合にもビーム路程 65mm、82mm あたりにエコーが見られる。

2MHz、5MHz いずれの場合においても欠陥エコーの背後には大きなエコーがあらわれている。この背後のエコーは溶接ビードからの形状エコーである。通常、一探触子法で面状欠陥を検出するには欠陥端部から発生する無指向性のエコーをとらえることにより可能となる⁵⁾。端部エコー高さは探触子を前後に走査させてもゆるやかに変化していく。

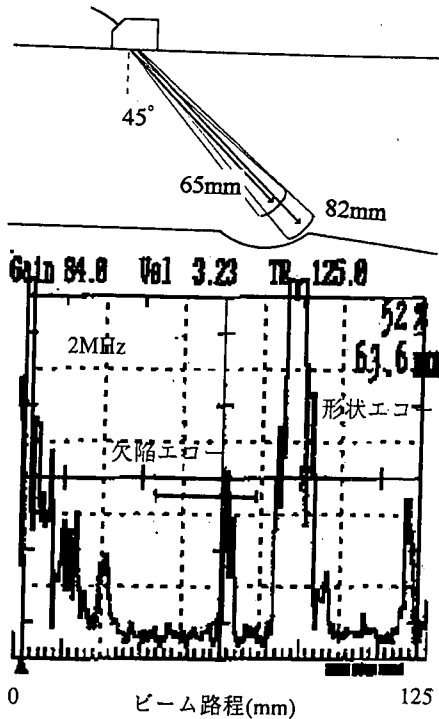


図-4 高温割れの A スコープ画面, 送信周波数 2MHz

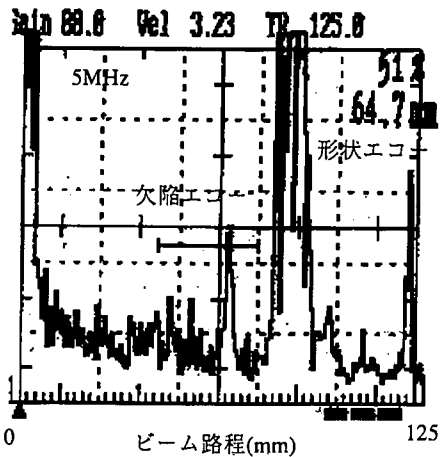


図-5 高温割れの A スコープ画面, 送信周波数 5MHz

実験ではビーム路程 65mm に位置するエコーをとらえるために探触子を前後左右に、ときには首振り走査も行って検出した。探触子の位置が溶接線と直角方向にほんのわずかずれただけで欠陥からのエコーはとられなくなった。このことからビーム路程 65mm に位置するエコーは欠陥で面反射されたエコーであると考えられる。

図-6 に示すように JIS で定められた A2 試験片を用いて、探触子の距離感度特性を得て、欠陥からのエコー高さがどのくらいになるのかを調べた。A2 試験片の $4\phi \times 4\text{mm}$ の穴に対して、0.5, 1, 1.5, 2 スキップのように

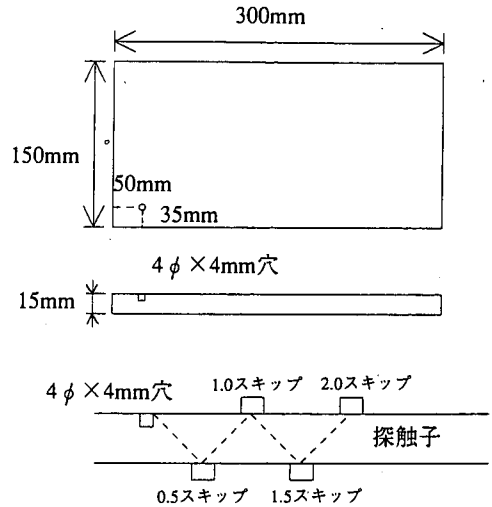


図-6 A2 標準試験片

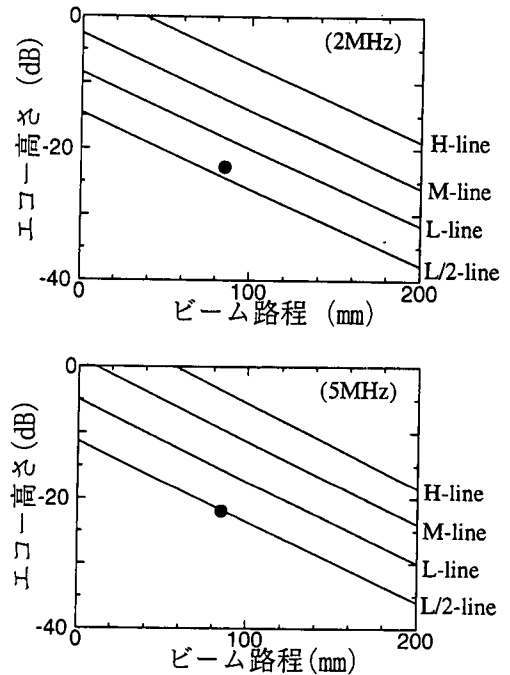


図-7 高温割れの A2 標準試験片 $4\phi \times 4\text{mm}$ 穴に対する相対エコー高さ

0.5 スキップずつ位置をかえ穴からのエコー高さを求めた。標準試験片の厚さは 15mm であり、各スキップ数から求められる波動伝播距離とエコー高さをプロットすることで H 線が得られる。H 線より 6dB 低いレベルを M 線, 12dB 低いレベルを L 線, 18dB 低いレベルを L/2 線として距離感度曲線が得られる。得られた曲線上に欠陥からのエコーをプロットしたのが図-7 である。周波数 2MHz の場合、この高温割れからのエコーは $4\phi \times 4\text{mm}$ 穴からのエコーレベルに比較し、-17dB の強さである。

周波数 5MHz の場合、割れからのエコーは -18dB の強さである。

割れのエコー高さは周波数 5MHz の波を用いたときが若干であるが 2MHz の波よりも低かった。また、A スコープ表示からも周波数 5MHz のときは林状エコーの影響を受け、周波数の低い 2MHz のときのほうが有利であることがいえる。

このように割れからのエコーはきわめて弱く、検出レベルを L/2 線レベルにまで下げなければこの割れを検出できないことになる。欠陥検出のためには探傷器の感度を高めなければならなくなるが、そのようにすると周囲からの形状エコー、その他林状エコーの高さも高くなってしまふ。

高温割れのような面状欠陥で反射された波は強い指向性をもっている。このような反射波の一部は溶接ビード裏側からの形状エコーとなったり、溶接止端部を中心とするコーナーエコーとなって探触子へもどっていきと予想される。

3. 探傷結果の画像化

図 4, 5 に示すように欠陥からと考えられるエコーは得られたが、欠陥エコーであるという判定は容易ではない。端部エコーは探触子位置とともにエコー高さがゆるやかに変化していくことが知られている。そこから欠陥検出の判断をするがこの欠陥エコーは指向性が強く、探触子位置とともにゆるやかな変化をしない。形状エコーとも認識されかねない。そこで A スコープ以外に表示方法の工夫を試みる。画像には通常の自動探傷で用いられる B スコープを用いる。さらに開口合成も試みた。

(1) 高温割れの B スコープ表示

実験装置を図 8 に示す。実験は直接法で行った。現場溶接継手モデル試験片に対し、探触子を走査させ、B スコープ表示を行った。探触子にはエンコーダが取り付けられており、1mm おきに波形を取得できる。波形データはパーソナルコンピュータに送られそこで蓄えられる。

欠陥のエコー高さは第 2 章から A2 標準試験片の $4\phi \times 4\text{mm}$ の穴より 17dB ほど低く、それをしきい値のレベルとした。これは各スキヤニング点で得られる A スコープ画面で 40% に相当するレベルである。図 9 に得られた B スコープ像を示す。溶接ビード内に像が見られる。

図 10 は欠陥エコーの見られない健全部であると思われる位置での B スコープ像である。こちらは欠陥部の像のような溶接ビード内の像がそれほど見られない。

健全部の B スコープ像は右側の溶接止端部からのエコーからであると理解できる。それに対し欠陥部の B ス

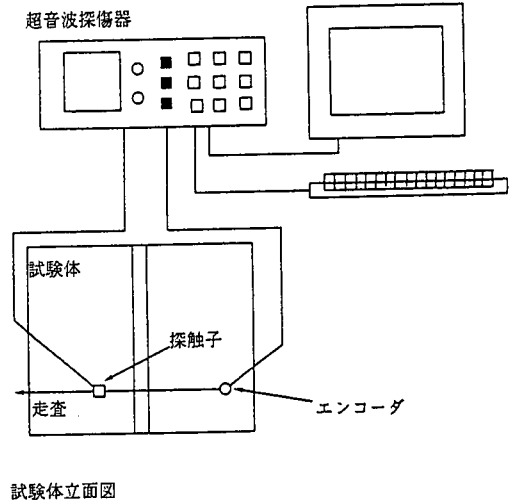


図-8 実験システム

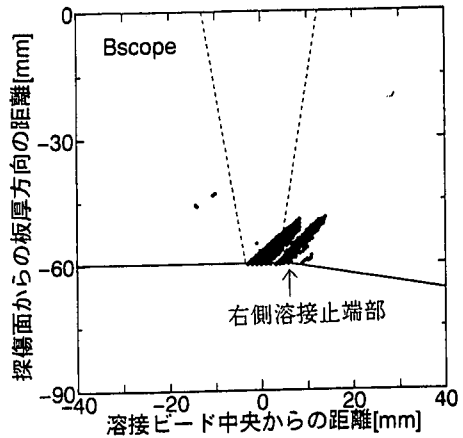


図-9 高温割れの B スコープ表示

コープ像は右側止端部だけではなくビード全体が像として現れている。これだけではこれらの像がビードの形状から得られているものなのか、欠陥からのエコーが写し出されているのか見分けがつかない。欠陥があるのかわかりにくいという問題がある。

(2) 複数の伝播経路を考慮した開口合成

入射超音波は広がりをもっており、その中に溶接止端部、スリットなど反射源が存在する場合、そこで入射波は反射され、複雑な挙動を示す。スリットや底面で反射する波や欠陥端部からの無指向性の波など、複数の波の伝達経路が存在する。

よって複数の音波の伝播経路を考慮し開口合成^{6),7),8),9),10)}を行うことは有効であると思われる。考慮した超音波の伝播経路の種類を図 11 に示す。これ

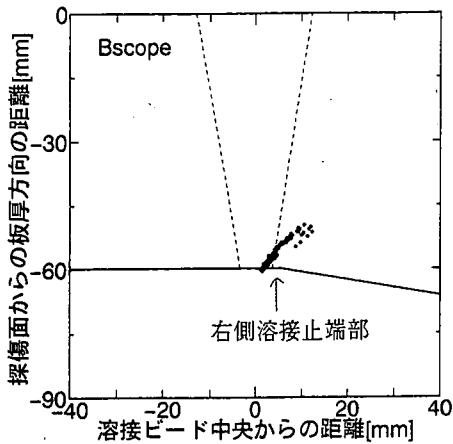


図-10 健全部の B スコープ表示

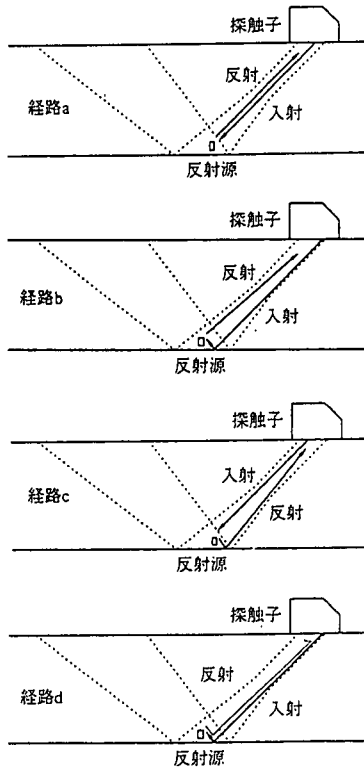


図-11 開口合成で考慮する超音波伝播経路

らを経路 a, 経路 b, 経路 c, 経路 d とする。経路 a は探触子から送信された波が直接反射源に到達し、直接探触子にもどっていく経路である。経路 b は探触子から送信された波が反射源に到達する前に底面で一度反射され、探触子にもどるときは直接もどっていく経路である。経路 c は経路 b とは逆の向きである。つまり探触子から送信された波が直接反射源で反射され、探触子へともどっていく際に、底面で反射される経路である。経路 d は底

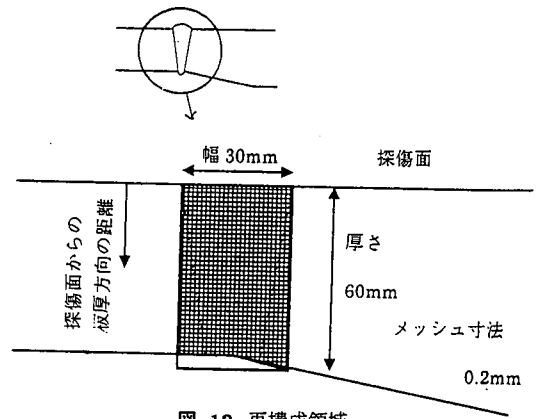


図-12 再構成領域

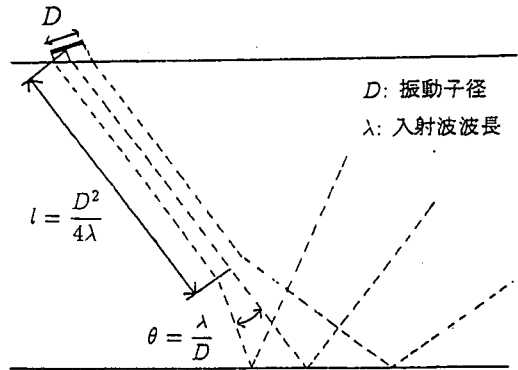


図-13 探触子からつくられる音場のモデル

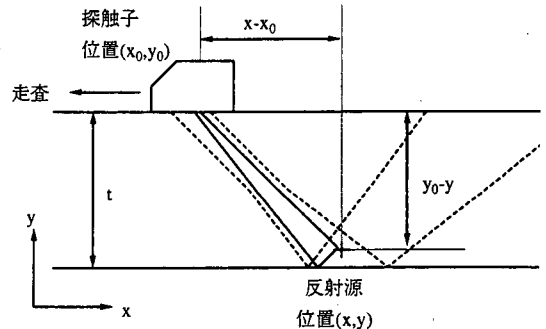


図-14 各格子点での反射レベルの計算

面で反射された入射波が反射源に到達、反射源で反射されたあともう一度底面で反射され探触子へもどる経路である。

再構成する領域を決定し、その領域を格子状に分割する。再構成領域を図-12 に示す。溶接部を中心として幅 30mm, 板厚 60mm の領域である。探触子位置、ビーム幅を考慮し、余盛部からきたと思われるエコーは再構成のデータとして用いなかた。溶接余盛部を含めなかつたのは形状を厳密に再現できるものではなかつたからである。分割メッシュの大きさは 0.2mm である。

探触子から作られる音波のビームは図-13 のようにモ

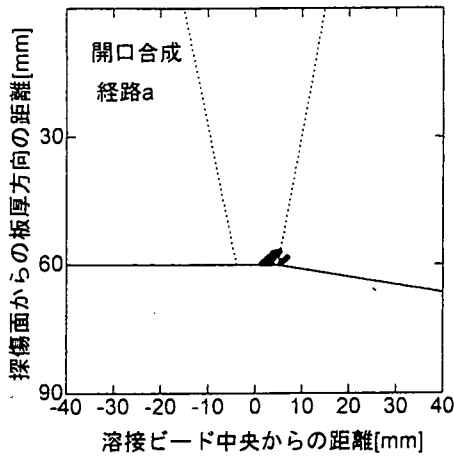


図-15 伝播経路 a のみを考慮して得られた像

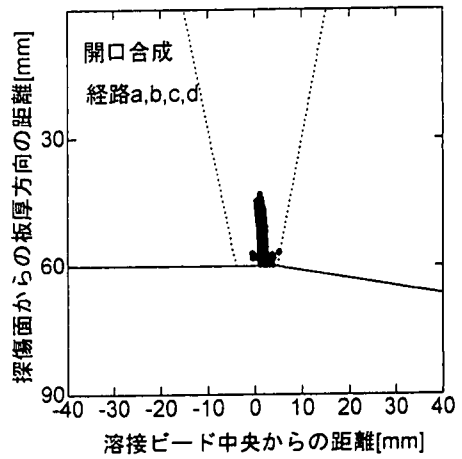


図-17 伝播経路 abcd を考慮して得られた像

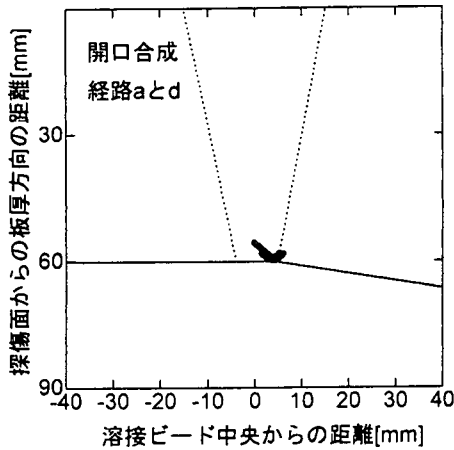


図-16 伝播経路 a と d を考慮して得られた像

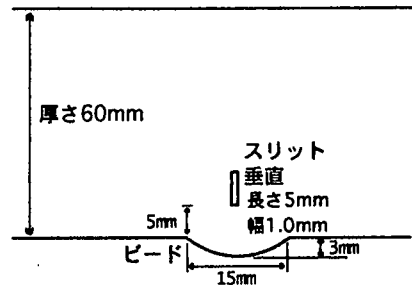


図-18 光弾性試験で用いた試験体

$$+ \sum r(x_0, y_0, l_c/c) + \sum r(x_0, y_0, l_d/c) \quad (5)$$

で表される。ここに c は波速, r は探触子で得られる波形の振幅を表している。

図-15 は経路 a のみを考慮して得られた再構成像である。しきい値は B スコープ表示のときと同じく 40% である。図-9 の B スコープ像と比較して像が明瞭になっている。図-16 は経路 a と d を考慮して得られた再構成像である。図-17 は経路 a, b, c, d を考慮して得られた再構成像である。通常、開口合成を行うと音源となる点の像が得られることになる。これらの複數経路のうち経路 b, c を考慮することでビード内部にたて割れのような像が得られていく。これはスリット、底面のコーナー反射エコーの影響によるものである。

B スコープによる画像を示したが、それと比較するとビード内部に含まれる欠陥の存在は認識しやすくなったといえる。高温割れの実際の高さは 6mm であった。これに対し、すべての経路を考慮した開口合成法により得られた像では欠陥先端部位置は底面から 10mm ほどである。この場合もしきい値を 40% としたが、欠陥高さを大きく評価することになる。実際の高さと同じになるのはしきい値を 50% にしたときであった。

デル化されている¹⁴⁾。超音波の広がり角度 θ は λ/D である。 λ は超音波の波長, D は振動子の径である。この場合, λ は 1.6mm, D は 12.7mm であり, θ は 7.2 度である。図-14 に示すように、再構成領域内の各格子点 (x, y) において探触子位置の座標が (x_0, y_0) のとき、経路 a, 経路 b, 経路 c, 経路 d の長さを計算する。経路 a の長さを l_a , 経路 b の長さを l_b , 経路 c の長さを l_c , 経路 d の長さを l_d とすると、

$$l_a = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \times 2 \quad (1)$$

$$l_b = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + \sqrt{(2t - (x - x_0))^2 + (y - y_0)^2} \quad (2)$$

$$= l_c \quad (3)$$

$$l_d = \sqrt{(2t - (x - x_0))^2 + (y - y_0)^2} \times 2 \quad (4)$$

ここに t は板の厚さである。各格子点の反射レベル $H(x, y)$ は、

$$H(x, y) = \sum r(x_0, y_0, l_a/c) + \sum r(x_0, y_0, l_b/c)$$

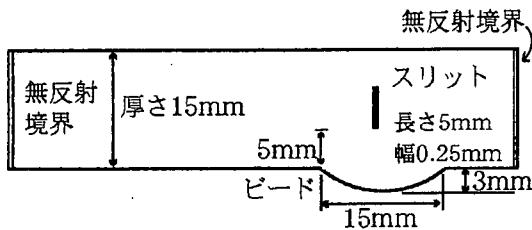


図-19 溶接継手の数値シミュレーションモデル

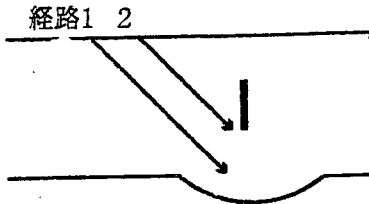


図-20 考慮した超音波入射経路中心

4. 溶接継手部内の波動伝播の可視化, 数値シミュレーションと光弾性試験の比較検討

画像化の工夫により欠陥検出もある程度は可能になったが, さらに精度よく面状欠陥を検出するには, 波動伝播挙動を理解することが必要である。端部エコーの受信が困難な理由, 欠陥エコーの経路, 形状エコーの発生などは溶接継手内部を伝播する波動を可視化することにより理解することができる。

ここではとくに B スコープ表示で得られたような形状エコーはどのようにして得られるのか, 端部エコーは発生しているのか, 発生しているならばどのようにすれば受信が可能となるか, 指向性の強い欠陥エコーはどのような経路で得られるのかを調べることを目的とする。

ここでは超音波伝播のシミュレーションとして有限要素法動的弾性解析^{12),13)}を行った。波動伝播の現象を可視化し, 挙動を観察することと数値シミュレーションとの比較をするために光弾性試験¹¹⁾も行った。波動伝播挙動は複雑であることが予想され, 二つを比較して両者が類似していれば, その結果はより信頼できるということが示される。

光弾性試験で行ったガラス製試験片の形状を図-18に示す。これはビード内に含まれる割れをモデル化したものである。この試験片の厚さは 60mm で溶接ビードがついた形となっている。ビード幅は 15mm, 余盛り高さは 3mm である。ビード内部にスリットが含まれている。スリットの長さは 5mm, 幅は 1mm, 傾きはなく垂直である。

図-19 は数値シミュレーションで対象としたモデルである。ビード部形状は図-18 に示した試験片と同じであるが, スリットは幅が 0.25mm となっている。数値シミュレーションにおいて計算機の容量を節約するため

にモデルの厚さを 15mm とした。入射横波の再現にはホイヘンスの原理を適用して節点に時間差をつけながら強制変位を与えることで行った¹²⁾。強制変位かわりに強制外力を節点に与えることでも波の入射は可能である。強制変位を与えたほうが所要の周波数を入力できるのでここでは強制変位を与えている。

図-20 に示すように, 入射波の中心がスリット下部にくるような超音波の経路を経路 2, スリットの直下 5mm に入射中心がくる経路を経路 1 とする。送信波の周波数はいずれの場合も 2MHz, 入射角度は 45 度とした。このような超音波経路を選んだ理由として, 経路 1 は溶接止端部での波の散乱, 入射波のスリットでの反射が同時におこるときの波動場について調べるためであり, 経路 2 はスリット端部エコーの発生と形状エコーの発生, ビード内伝播挙動について調べるためである。

図-13 で考えたときと同様に探触子からのビームの広がり考えた。光弾性実験において用いた振動子の径は 8.0mm, 周波数 2MHz の場合, 波長は 1.6mm である。図-13 のモデルから超音波が直進する距離 l は 10mm ほどであり, それ以上は音波は角度 θ が 11.5 度ですすむ。板厚を 60mm と考えれば, 探触子をでた音波は溶接ビード付近では幅 26mm ほどになる。数値シミュレーションにおいてもこのビーム幅と同じ幅となるよう強制変位を与えた。

探触子からの入射波の中心がスリット直下 5mm の位置である経路 1 を考える。図-21(a) から図-21(c) はそのときの変位ベクトル図を時系列順に示したものである。入射波の一部は底面やスリットで反射される。底面エコーはスリットへと向かい, スリットで反射された波は溶接止端部へと向かう。図-21(a) は入射波がビード左側止端部とスリットに到達した直後である。図-21(b) は底面で反射された波がスリットへ, スリットで反射された波がビード止端部に到達した直後である。図-21(c) はビード止端部で反射された波がスリットで, スリットで反射された波が底面で, それぞれもう一度反射された直後である。経路 2 では入射波の一部は, スリット, 底面の順に反射され探触子にもどっていくコーナー反射伝播経路をとる。また, 入射波には底面, スリットの順に反射され探触子にもどっていく経路をとる成分も存在する。

このコーナー反射された波は一探触子法でも受信することのできる波である。この位置から探触子が離れると面状欠陥で反射される指向性をもった波は探触子で受信されることはできない。2 章で行った実験では探触子位置によりエコー高さが急激に変化したので欠陥エコーと思われるエコーはこのコーナー反射されたエコーである可能性が高い。

図-22 は経路 1 となる位置に探触子を置いたときの光

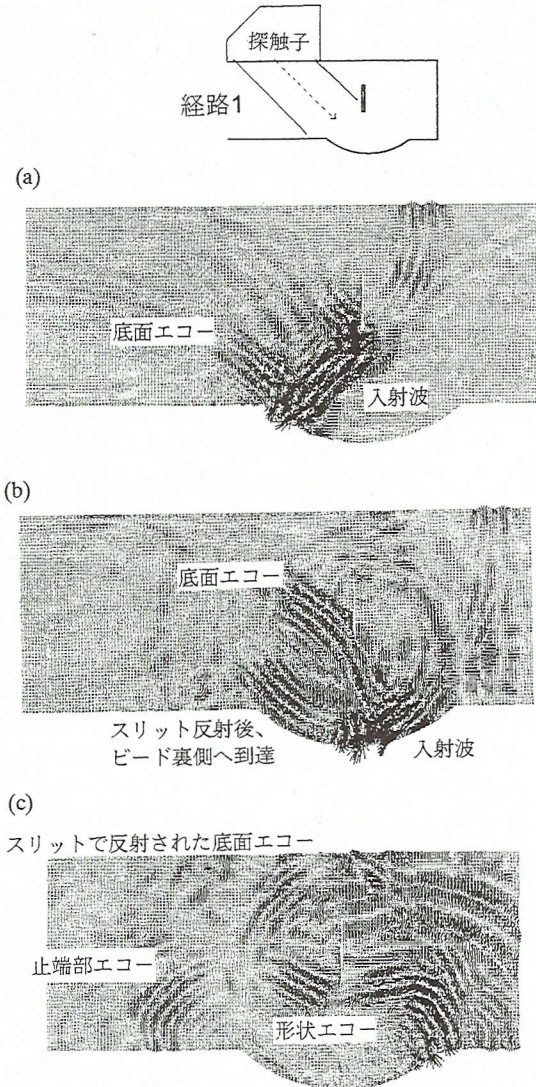


図-21 入射波中心経路1の場合の波動伝播の時系列変化

弾性試験による可視化実験の1部である。図-21(c)と同じ時点に相当するものである。図において、端部エコーと示されたエコーは、まず底面で反射されたエコーがスリットに向かい、スリットで反射されたエコーである。そしてこのエコーは探触子で受信される。図で止端部エコーと示されているのははじめスリットで反射され止端部へと向かい止端部で反射されたエコーである。数値シミュレーションで観察されたエコーと同様の現象を示しており、両者による波動伝播挙動の再現は一致しているといえる。

コーナーエコーの伝播距離と探触子で受信される時刻とを考慮しBスコープ表示を行うならば、図-23に示されるような位置に像が得られる。欠陥部のBスコープ

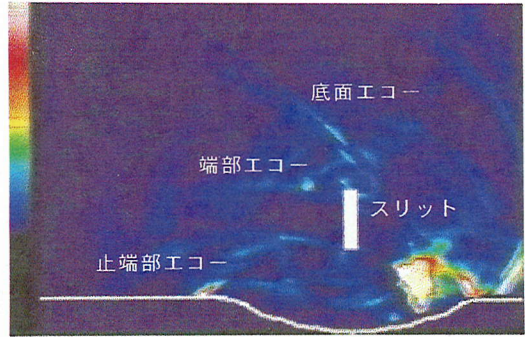


図-22 光弾性試験との比較

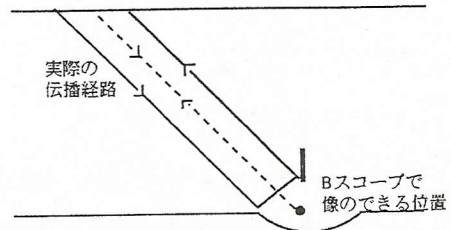


図-23 コーナー反射した波の像

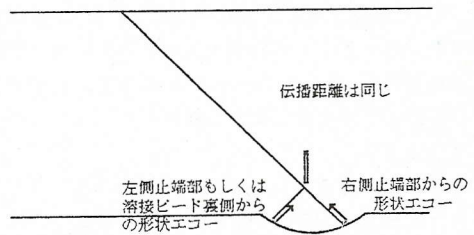


図-24 形状エコーとなる波動の伝播経路

表示で溶接ビード内に多くの像が見られた原因の一つと考えられる。

Bスコープ像からも理解できるが形状エコーは右側の溶接止端部からのエコーの影響が大きい。数値シミュレーションでも止端部で反射される波動が見られた。経路1ではスリットで反射された後、ビード裏側で反射され、スリットへもどっていく波が見られた。この波も探触子でとらえられる波であるが、伝播距離は図-24に示すように右側の溶接止端部で反射されて探触子にもどっていく波と同じである。この波は探触子でとらえられると、ビードの右側溶接止端部からの形状エコーとして認識されると考えられる。

スリット下端部に入射中心がくる経路2となるような場合を考える。図-25(a)は入射波がスリットを通過したところである。スリットに到達した波の一部はそこで面反射されて左側の溶接止端部へ向かう。図-25(b)はスリットで反射された波とスリットを通過した波がそれぞれ左右の溶接止端部まで到達したところである。スリット上下端部を中心とした無指向性の波が見られ

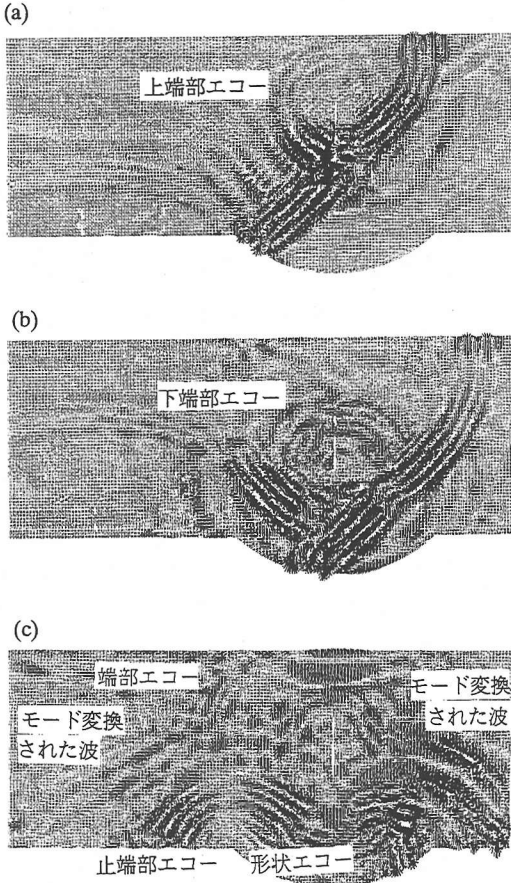
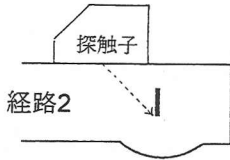


図-25 入射波中心経路2の場合の波動伝播の時系列変化

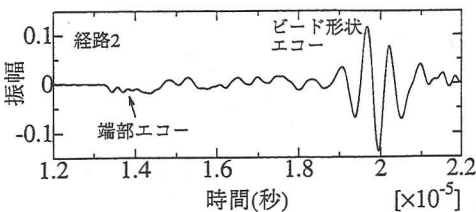


図-26 数値シミュレーションで得られた波形(経路2)

る。図-25(c)は面反射された波が左側溶接止端部で反射された直後である。ほかにもビード裏側に達しスリットへもどっていく波、右側の溶接止端部に達しそこで散乱している波が見られる。これらのエコーもまたビー

ドの形状エコーとして認識されると考えられる。

スリットの上下の端部からは無指向性の端部エコーが発生しているのが見られる。図-25(c)では左側溶接止端部で反射された波が見られるが、中には縦波にモード変換された波もある。数値シミュレーションで加振点での変位の時刻歴応答を図-26に示す。波動伝播時間から考えると13.5 μ 秒あたりに見られる波が端部エコーである。そのあとの15 μ 秒前後に波形が見られる。これらの波は止端部でモード変換された波などが重なりあって来たものである。19 μ 秒の大きなエコーはビードからのエコーである。端部エコーはきわめて小さく、実際の探傷においては雑音などの影響を受け端部エコーと認識するのが困難であったと思われる。

2章の実験において受信された欠陥エコーはコーナー反射されたものと考えるべきである。複数経路を考慮した開口合成においてコーナー反射経路をとり入れたことにより欠陥の像が得られた。複数経路を考慮した有効性を示している。

5. まとめ

本研究では溶接継手部内に含まれる面状欠陥を検出するために、フランジ部の現場溶接継手をモデルとした試験体を用いて実験を行った。

(1) 溶接ビード裏側近くにあるたて割れからのエコーはきわめて弱い。A2標準試験片の4 ϕ ×4mm穴からのエコーと比較して、2MHzの場合-17dB、5MHzの場合-18dBも低かった。林状エコーの影響なども考慮すると周波数2MHzのほうが5MHzよりも有利であるといえる。

(2) 欠陥エコーは近傍の溶接ビードからの形状エコーの影響を大きく受ける。このレベルでBスコープ表示を行うと、止端部からのエコーなどによりビード部全体に像が広がり欠陥の検出が困難である。

(3) 有限要素法による数値シミュレーションを行い、溶接ビード内部の波動伝播の様子を可視化した。入射波動はスリット先端、ビード止端部のような点音源、スリットのような反射源に達することで複雑に反射される。光弾性試験でもこれらの反射源で散乱される波が可視化された。

(4) 形状エコーは右側溶接止端部で反射された波と内部の欠陥に到達し反射されビード裏側にまで達したのち、探触子へともどっていくものがあつた。

(5) 実験で得られた欠陥エコーはスリットと底面で反射されたコーナー反射エコーである。これをBスコープ表示するだけではビード内に明瞭でない像が得られた。コーナー反射経路など複数の経路を考慮した開口合成法は有効である。この開口合成において、Aスコープ表示したときの欠陥エコーレベルにしきい値を選び、欠陥

高さを評価すると実際より若干高めに評価した結果となった。

謝辞： 光弾性試験は三菱電気株式会社応用機器部の小池光裕氏、馬目裕一氏により実施されました。ここに記して御礼の言葉とさせていただきます。

参考文献

- 1) 三木 千壽, 田中 靖資, 奥川 淳志: "瀬戸大橋トラス弦材角溶接部の非破壊検査に対する確率および破壊力学手法を用いた評価", 構造工学論文集, Vol.37A, pp.511-520, March 1991.
- 2) 松本 雅治, 南莊 淳, 杉山 守久: "鋼製橋脚現場溶接継手の超音波自動探傷検査", 橋梁と基礎, Vol.28, No.6, 1994.
- 3) 三木 千壽, 成宮 隆雄, 森下 統一, 加藤 昌彦: "自動超音波探傷システムの板継ぎ溶接部品質保証への適用性の検討", 鋼構造論文集, Vol.1, No.4, pp.105-117, December 1994.
- 4) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 社団法人 日本道路協会.
- 5) Harumi, K., Ogura, Y. and Uchida, M.: "Ultrasonic defect sizing -Japanese tip echo handbook-" Japanese society for Non-Destructive Inspection.
- 6) Ozaki, Y., Sumitani, H., Tomoda, T. and Tanaka, M.: "A new system for real-time synthetic aperture ultrasonic imaging", IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol.35, No.6, pp.828-838, November 1988.

- 7) 石井 潤市, 佐々木 莊二: "開口合成超音波探傷法に関する基礎検討", 非破壊検査, Vol.34, No.5, pp.326-332, May 1985.
- 8) Busse, L.J., Collins, H.D. and Doctor, S.R.: "The emerging technology of synthetic aperture focusing for ultrasonic testing", ASME Paper, 84-PVP-122, 1984.
- 9) Howard, P.J. and Chiao, R.Y.: "Ultrasonic maximum aperture SAFT imaging", Review of Progress in QNDE, Vol.14, pp.901-908, 1995.
- 10) 岩立 次郎, 田中 雅人, 館石 和雄, 三木 千壽: "回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み", 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.121-127, 1995.
- 11) 伊達 和博, 島田 平八: "固体内超音波の光弾性可視化による定量評価", 非破壊検査, Vol.36, No.9, 1987.
- 12) Chitoshi Miki, Kiyohiro Ikeda, Kazuo Tateishi and Masanori Takahashi: "Numerical Simulation of Ultrasonic Pulse-echo Inspection", Proc. of JSCE, No.459, I-22, pp.39-48, 1993.
- 13) Cundall, P.A., Kunar, R.R., Carpenter, P.C. and Marti, J.: "Solution of Infinite Dynamic Problems by Finite Modelling in The Time Domain", Proc. 2nd Int. Conf. Appl. Number of Modelling, Madrid Spain, pp.339-351, 1978.
- 14) Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H.: "Ultrasonic Testing of Materials", Springer-Verlag, 1983.

(1997.9.29 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF BUTT WELDED JOINTS OF THICK STEEL PLATE CONTAINING PLANAR DEFECTS

Chitoshi MIKI, Hiromi SHIRAHATA and Masakatsu SHIOZAKI

Ultrasonic testing will be applied to evaluate field welded butt joints of steel girder bridges. The detectability of planar defects such as cracks is a serious problem because cracks may do damage to structures without appropriate treatment. Characteristics of flaw echoes from planar defects were investigated by doing numerical simulations and experiments. Considering multiple paths of ultrasonic wave, synthetic aperture focusing technique was conducted to reconstruct a planar defect.