

超音波を用いた疲労亀裂の検出

DETECTION OF FATIGUE CRACK USING ULTRASONIC TESTS

三木 千寿*、豊田 幸宏**、宮本 公男***、梅田 晶一****

by Chitoshi MIKI, Yukihiro TOYODA, Kimio MIYAMOTO and Shoichi UMEDA

In order to examine the applicability of ultrasonic testing for the detection of fatigue crack, experimental studies are performed. Various types of ultrasonic tests including normal beam testing, the corner echo method and the tip echo method are applied for the observations of internal and external fatigue cracks. The corner echo method is the most suitable for the detection of crack initiation, and the tip echo method for the measurement of crack size, respectively. The characteristic ultrasonic echo due to the behavior of fatigue crack closure is also observed.

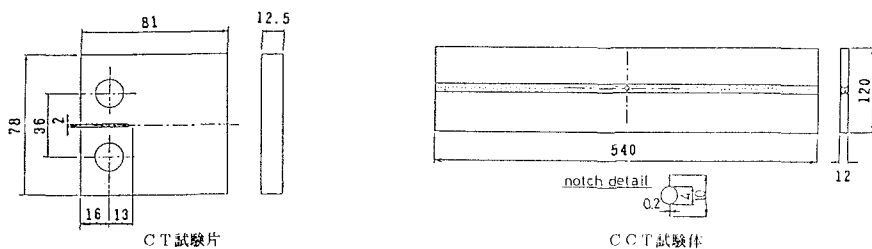
1 はじめに

橋梁構造の疲労に関して、実験および解析の両面から多くの研究がなされている。しかし未だ橋梁の疲労寿命の精度の高い予測は困難である。したがって、既存構造物を安全に使用していくためには、使用中の検査のはたす役割は大きい。疲労亀裂を初期に発見し、適切な補修を行なうことにより橋梁はその後長い間安全に使用される。

橋梁に対する現地での検査といった視点からは、使用できる可能性のある非破壊検査方法はさほど多くない。現在考えられる方法は、放射線透過試験、超音波試験、探傷液浸透試験、磁粉探傷法、および電磁気法（渦流探傷法）であろう。超音波法を除く、4つの方法は、検出できる欠陥の種類が限られていたり、検査箇所の形状に適用性が左右されたり、放射線試験では人体に危害をおよぼすおそれがあるなど、必ずしも一般的に適用性がすぐれているとは言えない。一方、超音波法は、あらゆるタイプの内部及び表面欠陥がこの方法により検出可能と考えられる。

超音波法による内部および表面欠陥検出の可能性について、ブローホール、スラグ巻き込みなどの溶接欠

-
- * 工博 東京工業大学助教授 土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
 - ** 東京工業大学 大学院修士課程 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
 - *** キヤノン販売株式会社 (〒108 東京都港区三田3-11-28)
 - **** ホロソテック株式会社 (〒150 東京都渋谷区鶯谷3-1)



図－１ 試験体形状・寸法

陥を対象として探傷感度や欠陥検出レベルの設定、および欠陥寸法の測定方法や寸法推定精度等について種々検討がなされている^{1),2)}。しかしながら疲労亀裂のような極めてシャープで応力状態によっては閉口してしまうような欠陥に対して、超音波法がどの程度適用性をもつものかは未だ不明な点が多い。

そこで本研究では、疲労亀裂の超音波に対する特性を調べる目的で、疲労亀裂に対して超音波をさまざまな方向から入射させ、エコーを検出することにより、どのような探触子がエコーを検出しやすいか、またどの程度のゲインが得られるかを調べた。さらに、超音波法の疲労亀裂に対する検出能力及び寸法推定精度がどの程度あるかをそれぞれ検討した。

2 試験体および試験方法

図－１に疲労亀裂を進展させ超音波探傷によるその検出を行なった試験体の形状および寸法を示す。コンパクトテンション型の試験片（ＣＴ試験片）では鋼素材中に疲労亀裂が進展する。ＣＣＴタイプの試験体には、溶接線が板厚中央に位置している縦継手試験体と溶接を含まない素材試験体の２種類がある。

疲労試験は、ＣＴ試験片については動的能力50kN、ＣＣＴ試験体は、500kNの電気油圧式疲労試験機により行なった。

超音波法を用いた疲労亀裂の検出では、垂直法、コーナーエコー法³⁾、端部ピークエコー法⁴⁾により、種々の探触子を用い、いろいろな方向から探傷を行なった。垂直法では超音波を疲労亀裂面に垂直に入射させ、探触子を走査して得られる欠陥エコー高さ包絡線から探触子の指向性とエコー高さ包絡線の形状の関係、また包絡線を利用したの欠陥寸法推定精度について検討を行なった。コーナーエコー法では疲労亀裂と切欠きとの間のなすコーナーからのエコーの検出能力について検討した。また、端部ピークエコー法では、

表－１ 各測定に用いた試験体、探触子

探傷法	試験体	探触子
垂直法	ＣＴ試験片	垂直型 5 Z 1 2 . 7 N 1 0 Z 1 2 . 7 N
コーナーエコー法	ＣＣＴ試験体	点集束斜角型 5 Z 1 5 A 4 5 S F 18.0-65.0
端部ピークエコー法	ＣＣＴ試験体	垂直型 5 Z 1 2 . 7 N 点集束斜角型 5 Z 1 5 A 4 5 S F 18.0-65.0 5 Z 1 5 A 6 0 S F 5.0-51.5 5 Z 2 0 A 7 0 S F 3.0-42.0

欠陥寸法推定精度について調べた。さらにこの他に、垂直法については、疲労亀裂からのエコーの特徴を調べるために、その開閉口挙動⁵⁾とエコー高さの関係を調べた。

超音波探傷器は、M-500A（キャノン製）を用い、接触媒質はグリセリンを使用して手動により探触子の走査を行なった。測定は、疲労試験を一時中断して行なった。欠陥からのエコーの記録方法は、すべてAスコープのアナログ表示である。表－１に各測定に使用した探触子、試験体を示す。

3 疲労亀裂の検出

(1) 垂直法

(a) 測定方法

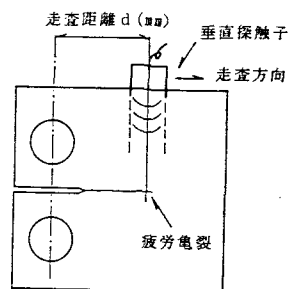
まず欠陥エコー高きの包絡線を求めるために、図-2に示すごとく C T 試験片の上表面に垂直探触子を設置し、探触子を切り欠きのある側から疲労亀裂前縁に向かって走査していった。使用した探触子は周波数が5MHzのものと10MHzの2種類である。探触子の走査は、試験片表面に接着剤で貼付した鋼尺をガイドとして探触子を左右に1~2mm 間隔に移動させその位置でのエコー高きを測定した。これを疲労試験時1サイクルの最大荷重の状態と無負荷の状態について行なった。ここで超音波を疲労亀裂面に対して垂直に入射させて得られるエコーを垂直エコーと呼ぶことにする。探傷感度は感度標準試験片 JIS-STB-G V3 の標準反射源からのエコー高きを CRT 目盛の80%に調整し、データの表示はそれに対する相対エコー高きを用いることにする。

疲労亀裂寸法の推定では、得られた欠陥エコー高き包絡線を利用して、欠陥エコー高きが最大エコー高きから半分(6dB)になるまでの探触子の移動距離から欠陥寸法を求める6dBドロップ法を用いた。この方法から求めた推定値と試験終了後、試験体を破断して破面観察から求めた実測値とを比較し、精度の検討を行なった。

(b) 試験結果

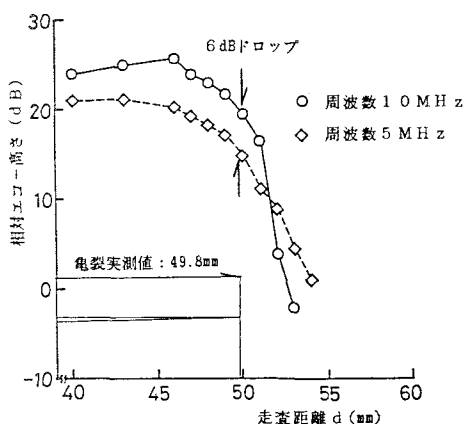
走査グラフを図-3(a),(b)に示す。(a)は亀裂が開いた状態、(b)は閉じた状態で測定した結果である。これらの図に示すごとくエコー高きの最大値は、両探触子とも疲労亀裂が開いている状態では+20dB程であることがわかる。一方、亀裂が開いた状態では+10dB程でありエコー高きの損失が認められる。垂直エコーの検出は容易であり、超音波ビームが亀裂面に垂直に入射すれば完全に閉じている亀裂でも検出可能であることがわかる。

次に探触子の指向性とエコー高き包絡線の関係について述べる。図-3(a)に示すごとく周波数5MHzと10MHzの探触子のそれぞれのエコー高き包絡線の形状に違いが認められる。即ちエコー高きの低下が5MHzの探触子は緩やかであるのに対して10MHzの探触子は急である。これは探触子の指向性の違いと考えられる。周波数5MHzと10MHzの探触子では後者の方が指向性が鋭い。したがって10MHzの探触子は広角度に感度がないために、ビームの

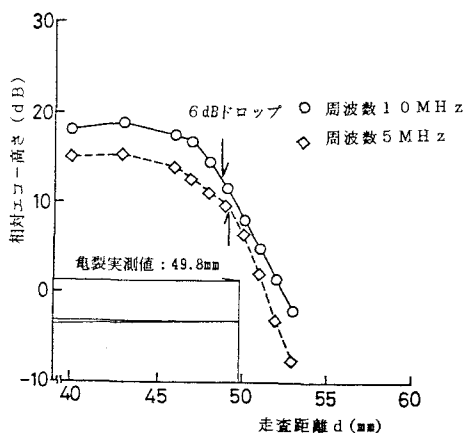


C T 試験片

図-2 探触子の走査方法



(a) 最大荷重時



(b) 無負荷時

図-3 走査グラフ

中心軸が亀裂先端をはずれると急激にエコーが検出しにくくなる。図中、走査距離 $d = 51 \sim 52 \text{ mm}$ のところのエコー高さ変化にそれが現われている。5MHzの探触子は、指向性が鈍く広角度に感度があるため、エコー高さ包絡線は緩やかに変化している。一方、図-3(b)では、エコー高さ包絡線形状は両探触子とも相似している。探触子の指向性の違いが包絡線形状に現われていない。これは、疲労亀裂の閉口によって亀裂面の反射指向性が変化したためと考えられる。したがってこの反射指向性の変化は、エコー高さ包絡線を利用して疲労亀裂の寸法を推定する際、その精度に影響を及ぼすものと考えられる。

そこで、開いた状態と閉じた状態での疲労亀裂について、6dBドロップ法を用いて寸法の推定を行なった。表-2に周波数5MHz及び10MHzの垂直探触子を用いて測定した推定値と実測値との差を示す。亀裂が開いた状態では両探触子とも誤差0.2mmと非常に正確に寸法推定ができています。一方、閉じた状態では両方とも過小評価となっている。これは、疲労亀裂先端の反射指向性の変化の影響である。また、10MHzの探触子の方が5MHzのものより誤差が大きくなっているが、これについては原因は明らかでない。

表-2 6dBドロップ法による寸法推定精度

周波数 (MHz)	(推定値) - (実測値) (mm)	
	最大荷重時	除荷時
5	-0.2	-1.6
10	+0.2	-2.4

以上より、疲労亀裂が完全に開いた状態で亀裂面に垂直に超音波ビームが入射し、亀裂の長さが探触子のビーム径よりも十分長い場合、6dBドロップ法を用いて寸法推定を行なうことは有効であることがわかる。

(2) コーナーエコー法

(a) 測定方法

疲労亀裂の発生を最も容易に知るための手法としては、この方法が適していると考えられる。図-4にコーナーエコー法の探傷原理を示す。即ち、先端幅0.1mmの切欠きと発生した疲労亀裂との間のなすコーナーからのエコーを検出することで切欠き底からの疲労亀裂の発生が知ることができると考えられる。測定は図-5に示すごとく、CCTタイプの素材試験体の側面に屈折角45度の点集束型斜角探触子を設置し試験体中央部に機械加工した切欠きからのエコーの観察を行なった。エコーの検出は、疲労試験1サイクルにおける最大引張荷重にて行なった。

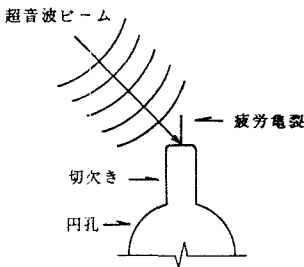


図-4 コーナーエコー法の探傷原理

これにより疲労亀裂発生時期をどの程度とらえることができるか、また亀裂発生後の初期の段階において、切り欠き先端部と亀裂とのコーナーエコーがどの程度の強度で検出できるかを調べた。基準感度は標準試験片JIS-STB-A2の縦穴基準反射源 $\phi 4 \times 4$ を直射で狙い、そのときのエコー高さをCRT目盛80%に調整し、そのときのゲイン+36dBに設定した。

(b) 試験結果

疲労試験開始時から、連続的に切り欠き先端部からのエコー高さを観察したが、レプリカによって測定した亀裂長さが0.5mmまではエコー高さに明確な変化はなく、疲労亀裂発生時期をとらえること

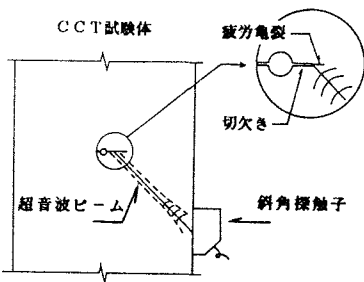


図-5 コーナーエコーの検出方法

はできなかった。しかし、亀裂長さが1mm程度になると切欠き先端部と疲労亀裂との間に生ずるコーナーからのエコーが検出できた。この時ビーム路程が150mmと非常に長いために感度が高く設定されているが、図-6に示すごとくコーナーエコーは良好なS/N比で検出されている。これは、亀裂の先端部が、使用した点集束型探触子の集束範囲内に位置しているためと考えられる。実際の探傷を考えた場合、ビーム路程が150mmよりもっと短くなると考えられるので、コーナーエコー法により、1mm以下の疲労亀裂の検出が十分可能であるということがいえる。

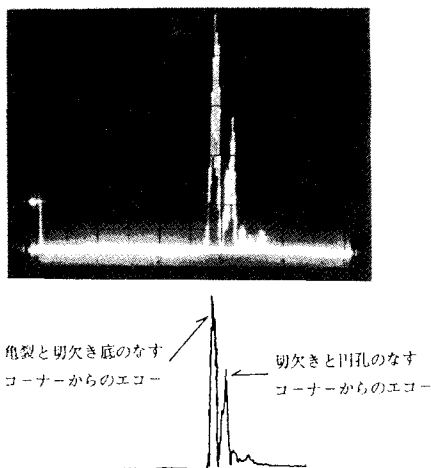


図-6 コーナーエコーの検出状況

(3) 端部ピークエコー法

(a) 測定方法

端部ピークエコー法は、図-7に示すごとく欠陥端部からのエコー（端部ピークエコー）をとらえ、それらのビーム路程と探触子の屈折角から幾何学的に次式によって欠陥高さを求める方法である。

$$a = t - w \cdot \cos \theta \quad (1)$$

a : 亀裂長さ t : 試験体板厚

w : ビーム路程 θ : 屈折角

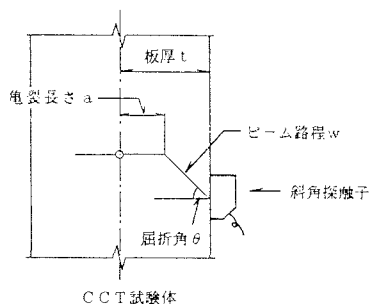


図-7 端部ピークエコー法の探傷原理

まずこの方法に適している探触子のタイプを検討するために、CCTタイプの素材試験体に対して、垂直探触子（周波数 5MHz）と屈折角45度の点集束型探触子を用い、エコー検出状況をそれぞれ調べた。斜角探触子の中で屈折角45度の探触子を選択したのは、ビーム路程が他の探触子よりも短くて済むためにエコーの検出がより有利だからである。測定は亀裂が開いている状態で行なった。探傷感度は、屈折角45度の探触子については標準試験片STB-A2の縦穴基準反射源φ4x4からのエコー高さを、CRTの目盛80%に調整し、そのゲイン+36dBに、周波数5MHzのものは標準試験片STB-G V3の平底ドリル穴φ2からのエコー高さをCRT目盛80%に調整し、そのゲイン+36dBにそれぞれ設定した。この結果を基にして欠陥寸法の測定に使用する探触子を決定した。

疲労亀裂寸法の測定に関しては、端部ピークエコー法が欠陥先端部までのビーム路程、即ち超音波の伝播時間を測定するため、探傷器の時間軸の調整方法が極めて重要となる。ここでは試験体と同じ材質、同じ形状、寸法の他の試験体を利用して時間軸の校正を行なった。まず、校正用試験体の角に超音波を入射させ、コーナーエコーを検出した。そして、CRTの距離軸上にあらかじめ幾何学的計算により求めたビーム路程と同じ距離の所にコーナーエコーが立ち上がるように調整を行なった。この操作を先の検出状況の結果から選択した探触子に対して行なった。素材試験体、縦継手試験体それぞれについて寸法測定を行ない、得られた推定値とレプリカによって測定した亀裂長さとを比較検討した。寸法推定を行なうための亀裂先端の検出は、素材試験体、縦継手試験体ともに最大荷重時に行なった。

また、それと並行して亀裂が閉口した状態で先端の検出がこの方法で可能かどうかを調べるために無負荷時にも探傷を行なった。さらに、縦継手試験体については溶接残留応力の亀裂先端検出に対する影響を調べるために、圧縮荷重時においても探傷を行なった。圧縮荷重レベルは、80kNである。

(b) 試験結果

探触子の適用性について検討する。図-8に屈折角45度の探触子による端部ピークエコー検出状況を示す。疲労亀裂は切り欠きから10mm程進展している。ビーム路程が長いために感度が非常に高いが良好なSN比で検出できている。

図-9に垂直探触子を用いた場合の検出状況を示す。疲労亀裂は30mm程進展している。探傷感度をかなり高く設定しているにもかかわらず、切り欠きや円孔からのエコーは検出されているが疲労亀裂からの端部ピークエコーは全く検出できていない。これは、疲労亀裂面と超音波の入射方向が平行になり、亀裂先端部が非常にシャープなため反射面積が微小となってしまう、エコーが非常に弱くなったと考えられる。したがって、垂直探触子をこの手法に用いることは良くない。

このことより寸法推定には点集束型斜角探触子を用いている。探触子の屈折角は、45度、60度、70度の3種類である。図-10(a)~(c)に推定値と実測値との比較を示す。図中には実測値と推定値の標準偏差を示した。これより屈折角45度の探触子が最も精度よく推定ができていることがわかる。しかしながら、いずれの探触子も超音波による推定値は若干実測値より長めになっている。そこで、試験終了後、破面観察を行なってみると亀裂先端が凸形状になっており表面より1mm程長くなっていることがわかった。このことより、端部ピークエコー法は、板厚内部を含めた平均的な疲労亀裂長さを測定しているといえよう。また、実際の探傷の場合、探傷面上に探触子の設置、走査を妨げるような障害物（溶接余盛等）がないかぎり屈折角45度の点集束型探触子を使うのがよいと考えられる。

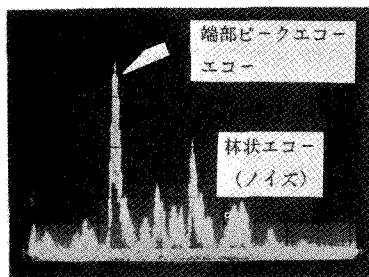


図-8 端部ピークエコーの検出状況
(点集束型斜角探触子の場合)

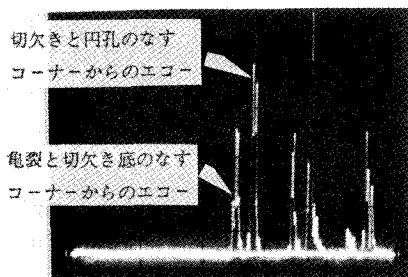
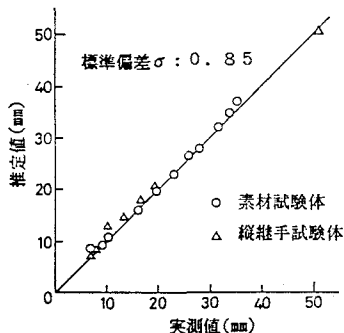
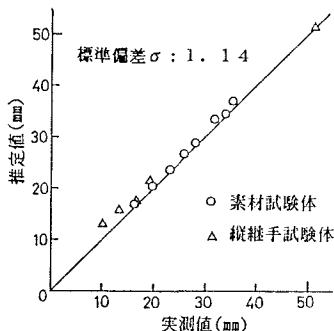


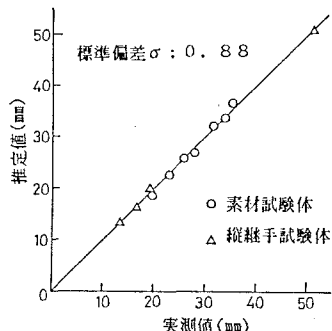
図-9 端部ピークエコーの検出状況
(垂直探触子の場合)



(a) 屈折角45度の場合



(b) 屈折角60度の場合



(c) 屈折角70度の場合

図-10 実測値と推定値の比較

図-11(a) は素材試験体の疲労亀裂進展に伴う端部ピークエコーの高さ変化を示したもので、図中、実線が最大荷重時、点線が無負荷時のエコー高さを表わしている。測定に使用した探触子は、屈折角45度の点集束型探触子である。ここでは標準試験片による相対エコー高さは使わずCRTから直読したエコー高さ(%)を用いた。亀裂長さが23mm程における端部ピークエコーは、無負荷状態で検出できていないことがわかる。また、その他の測定でもエコー高さが最大荷重時と無負荷時で大きく異なっていて、その変化量は大きいもので60%程ある。先に示した図-7中の端部ピークエコーの高さが半分になり、まわりのノイズと全く区別がつかなくなってしまうことがわかる。したがって、亀裂が閉口した状態では端部ピークエコー法によって亀裂先端を検出するのは極めて困難といえる。

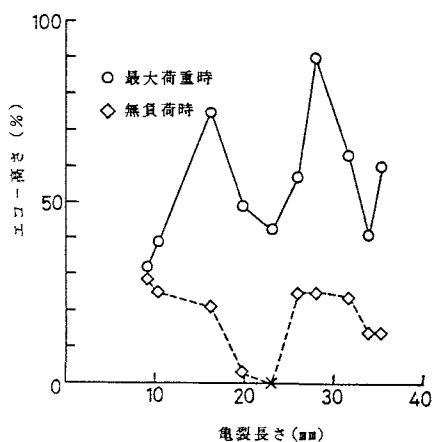
図-11(b) は、縦継手試験体に対する測定結果である。除荷に伴うエコー高さの低下現象はほとんどなく、さらに圧縮力を加えてもさほど低下しない。これは試験体に外力を作用させない場合にも残留応力の作用で亀裂が先端が開いた状態になっているためと考えられる。したがって、溶接残留応力程度の引張応力が亀裂先端に作用していれば、十分検出可能ということがいえる。

4 疲労亀裂の開閉口挙動とエコー高さ

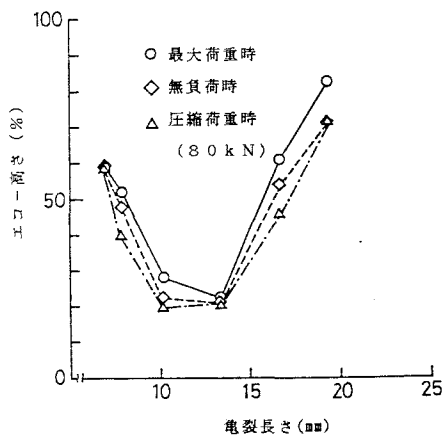
疲労亀裂は除荷時には閉口し、荷重があるレベル以上で開口する。この挙動は疲労亀裂に特有のものであり、亀裂が閉口している間は超音波パルスのかんりの部分は亀裂面を透過してしまうと考えられる。そこで、垂直エコーを検出し、疲労亀裂の開閉口とエコー高さの関係を調べ、エコーの特徴について検討を行なった。

(a) 測定方法

探触子の設置方法は、先に示した図-2と同じであり、亀裂先端とビームの中心軸が一致するように設置した。探触子は周波数5MHzのものを使用し、亀裂面に超音波を垂直に入射させ、最大荷重状態で得られるエコー高さが除荷に伴いどのように変化するかを調べた。あらかじめ除荷弾性コンプライアンス法⁶⁾によって開口点(Pop)を調べておき、それより高い荷重レベル域と低い荷重レベル域でエコー高さの減衰の仕方を比較検討した。これを、応力拡大係数範囲 $\Delta K = 15\text{MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ と下限界応力拡大係数範囲(ΔK_{th})近傍の $\Delta K = 9\text{MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ で発生させた2つの異なる疲労亀裂についてそれぞれ調べた。



(a) 素材試験体の場合



(b) 縦継手試験体の場合

図-11 亀裂進展に伴う
端部ピークエコーの変化

(b) 試験結果

図-12(a) に応力拡大係数範囲 $\Delta K = 15 \text{ MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ で発生させた疲労亀裂についての荷重レベルとエコー高さの関係を示す。最大荷重から除荷弾性コンプライアンス法によって求めた亀裂開口点 (Pop) まではエコー高さ変化はほぼ一定であるが、この荷重レベルより低くなるとそれまでに比べてエコー高さの低下の度合いは大きくなっている。これは、亀裂に開口変位が存在する状態では、亀裂面の超音波の反射率はほとんど一定であり、エコー高さは荷重レベルの影響を受けずほとんど一定になると考えられる。ところがいったん閉口すると亀裂面の反射率が変化しその反射率も亀裂面の接触圧によって変化するため、エコー高さが荷重レベルによって変化するものと思われる。

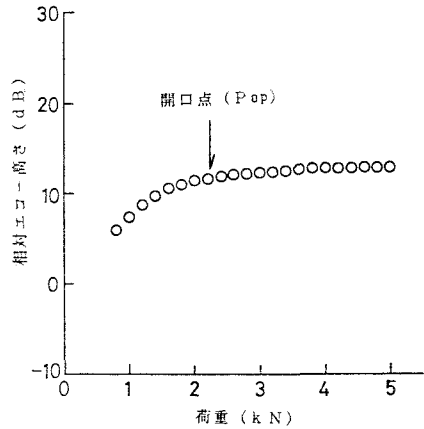
次に、図-12(b) に $\Delta K = 9 \text{ MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ で発生させた疲労亀裂についての結果を示す。この図に示すごとく開口比が上昇していることがわかる。エコー高さの変化曲線は亀裂開口点付近に明確な折れ曲がり点はなく、ほぼ一定のエコー高さを保っている。 $\Delta K = 15 \text{ MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ で発生させた疲労亀裂では、荷重レベルが 1.5 kN 以下の閉口状態におけるエコー高さの変化量は、 4 dB 程ある。しかしながら $\Delta K = 9 \text{ MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ の場合では前者同様亀裂面の接触圧の変化があると考えられるにもかかわらず、その影響がエコー高さに現われていない。何か別の原因が支配的であると考えられる。このことについては、今後の詳細な検討が必要である。

以上のようなエコー高さの変化は他の欠陥、たとえばブローホールにはみられない現象で疲労亀裂特有のものである。また、垂直エコーによって亀裂開口点を決める際、 ΔK_{th} 近傍では上述のようなエコー高さの挙動に注意しなければならない。

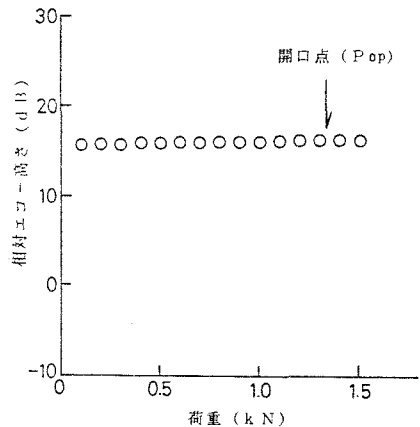
5 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 垂直法を適用して亀裂面に垂直に入射させて得られる垂直エコーは非常に強く、容易に検出できる。また、疲労亀裂が閉口していてもその検出は可能である。
- (2) 垂直エコー高さの包絡線を利用した 6 dB ドロップ法により開口している亀裂を $\pm 0.2 \text{ mm}$ の精度で寸法推定が行なえる。亀裂が閉口すると過小評価になる。



(a) $\Delta K = 15 \text{ MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ の場合



(b) $\Delta K = 9 \text{ MPa}/\sqrt{\text{mm}}$ の場合

図-12 荷重とエコーの関係

- (3) コーナーエコー法において点集束型斜角探触子を用いて 1mm以下の表面亀裂を完全に検出することが十分可能である。
- (4) 点集束型斜角探触子を用いた端部ピークエコー法は、亀裂の寸法推定に適している。板厚内部の平均的な亀裂長さが測定できる。エコーは亀裂が開口状態であれば十分検出できるが、閉口すると極めて困難となる。探傷に際しては、屈折角45度の探触子を使用することが望ましい。
- (5) 荷重を最大荷重から除荷していくと垂直エコー高さは特徴的な変化曲線を描く。この現象は疲労亀裂独特のものである。

参考文献

- 1) 藤盛紀明：鋼溶接部の超音波斜角探傷試験における検出レベルについて、日本建築学会大会学術講演梗概集 1139-1140 昭和48年10月
- 2) 藤盛紀明：鋼溶接部の超音波斜角探傷試験における欠陥寸法の推定方法について、非破壊検査 第21巻第12号 728-739 昭和47年12月
- 3) 木村ほか：溶け込み不足の斜角探傷のモデル実験、NDI資料2371 1970
- 4) 加藤、桜井、松村：超音波探傷による欠陥高さの測定について、非破壊検査 第26巻第5号 320-323 1977
- 5) Elber, W.: ASTM STP, 486, 230 (1971)
- 6) 菊川、城野ら：除荷弾性コンプライアンス法による低速度領域における疲労亀裂進展とき裂開閉口挙動の測定、材料、第25巻第 276号、899-903

(1986年10月17日受付)