

鋼床版き裂の超音波探傷法

村越 潤¹・高橋 実¹・小池 光裕²・木村 友則³

¹(独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ
(〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

²菱電湘南エレクトロニクス(株) 検査計測事業部システム部システム二課
(〒 247-0065 鎌倉市上町屋 214)

³三菱電機(株) 情報技術総合研究所アンテナ部波動素子チーム
(〒 247-8501 鎌倉市大船 5-1-1)

近年、交通条件の厳しい鋼床版橋においてデッキプレートとU型の縦リブの溶接ルート部を起点とするデッキプレートを貫通するき裂が報告されている。このき裂は、目視点検では確認困難な部位に発生することから、き裂の有無や進展状況を把握するためには超音波探傷等の非破壊検査技術を適用する必要がある。本研究では、鋼床版デッキプレート内に進展する浅いき裂の検出を目的として、超音波の入射角を臨界屈折角近傍に調整した横波斜角探触子に着目し、現場の探傷条件に応じた超音波エコー高さ測定の精度向上のための感度調整方法を提案するとともに、き裂とエコー高さとの関係を分析し実用性の高い超音波探傷法を提案した。

キーワード 超音波探傷, 鋼床版, 疲労き裂, 臨界屈折角探触子, 感度調整

1. はじめに

近年、交通条件の厳しい鋼床版橋において、デッキプレートとU型の縦リブ（以下、Uリブ）の溶接部を起点とするデッキプレートを貫通するき裂が報告されている¹⁾。図-1.1に示すとおり、このき裂は目視点検では発生・進展過程を直接確認することは困難な位置に発生する。このため、デッキプレートを貫通する前にき裂を発見するには、超音波探傷等の非破壊調査技術を適用する必要があるが、き裂の有無を検出でき、その深さを定量的に推定可能な方法としては、現状ではデッキプレート下面側からの超音波探傷法が唯一の方法と考えられる。

一方では、超音波探傷法は一般的には検査技術者の技量に左右されやすく、客観性・信頼性の高い結果を得るためには、探触子の選定や探傷法、き裂とエコー高さの関連付け等による検出結果の評価方法について十分な検討が必要である。また、実用面では、塗膜を除去せずに探傷することが効率的であり、塗膜等による鋼床版の表面状態の違いが探傷結果に及ぼす影響について検討しておく必要がある。さらに、図-1.2は実橋での上向き探傷によるき裂の手動探傷の様子を示しているが、輪荷重直下の溶接線を橋長全長にわたって調査するには現場での作業性の高い探傷法であることが重要である。

このような背景のもと、著者らはデッキプレート

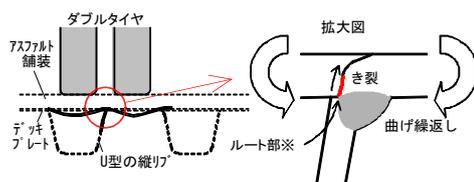


図-1.1 鋼床版デッキプレート内に進展する疲労き裂の概要

内の板厚方向にある程度進展したき裂を確実に検出するために、屈折角が臨界屈折角近傍となるように超音波の入射角を調整した横波斜角探触子（以下、臨界屈折角探触子）に着目し、き裂調査への適用性、適用方法に関する解析的・実験的検討を行ってきた²⁾。本文では、これら一連の検討結果について報告する。まず、デッキ進展き裂の探傷法の検討にあたって性能・仕様の目標を整理するとともに、探傷時の技術的課題と本研究における検討項目を示す。次に、エコー高さ計測の精度向上のための感度調整方法を提



図-1.2 超音波(手動)探傷によるデッキ進展き裂の調査状況

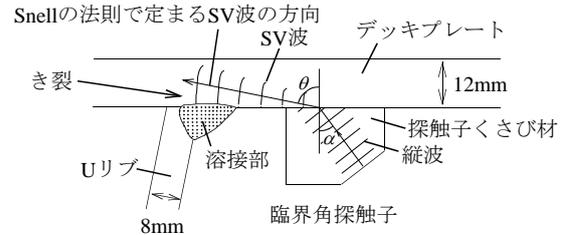
案するとともに、種々の深さの実き裂を模擬した小型試験体を用いた探傷試験及びき裂の発見された実橋鋼床版における探傷試験を実施し、き裂の検出性能を確認するとともに実橋鋼床版への適用性を検討する。

2. 臨界屈折角探触子と疑似表面SV波の概要

臨界屈折角探触子に着目した主な理由は、入射角を大きくすることで、より浅いき裂を検出しやすくなることと、同探触子特有の送信波の伝搬特性をき裂探傷時の感度調整に利用できることである。ここでは、同探触子と送信される横波（以下、SV波）に伴い鋼材表面に発生する波の特性について概要を示す。

図-2.1に同探触子によるデッキ進展き裂の探傷の状況と、Snellの法則(ここでは探触子とデッキプレートの境界における超音波の入射角と屈折角の関係を指す。)で決まる波の方向を模式的に示す。鋼構造物の探傷には、一般にSV波の公称屈折角が70度の斜角探触子を使用されることが多いが、本研究で対象とする臨界屈折角探触子は屈折角を70度より大きくし、臨界屈折角である90度(SV波が理論上、鋼材表面で全反射し鋼中に入射できない状態の角度)に近づくように調整・製作した探触子である。具体的には鋼材の音速のばらつきを考慮して全反射しないようにするため、SV波の屈折角が90度近くになるように、振動子からの超音波パルスの入射角を45.8度(ただし、製作誤差として±0.3度を考慮)とした探触子である。この入射角は、探触子のくさび材のポリスチレンの縦波音速2,339m/sに対して、鋼材のSV波音速を3,263m/sとした場合の値である。

屈折角を90度に近づけた場合、被調査物を伝搬

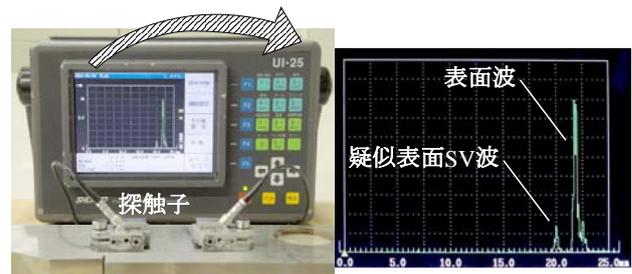


$$\text{Snellの法則} \quad \frac{\sin \alpha}{C_1} = \frac{\sin \theta}{C_2} \quad \dots (1)$$

($C_1 < C_2$)

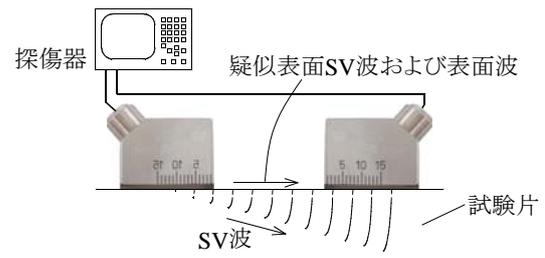
ここで、 α : 入射角、 C_1 : 探触子くさび材(ポリスチレン等)の音速
 θ : 屈折角、 C_2 : デッキプレートの音速

図-2.1 臨界角探触子による探傷イメージ



a) 臨界屈折角探触子を対向させた状態

b) Aスコープ画像



c) 波面と伝搬経路の模式図

図-2.2 透過法により疑似表面SV波が得られる状況

していくSV波は、境界面としての鋼材表面の影響を受ける。すなわち、SV波はその特性から鋼材中を拡がって伝搬しようとするが、被調査物の表面側では拡がることのできないような状態になる。その結果、鋼材表面に微弱ながらSV波と同じ音速のパルスを観測することができる。既往の研究(例えば⁴⁾では、このパルスを表面SV波と称しているが、SV波は固体と気体との境界面では存在することができないので、これは正確にはSV波ではなく、また表面波(Rayleigh波)でもないパルス³⁾である。本文では、このパルス³⁾を便宜的に疑似表面SV波と呼ぶ。図-2.2は、同じ臨界屈折角探触子を対向させ、透過法により、一方からSV波を送信し、もう一方で受信させた場合の、疑似表面SV波の透過パルスが受信側探触子で得られる様子を示している。図中のAスコープ画像では、表面波より音速が速い位置(表面波の透過パルスの前)に、波形高さの低い透過パルスが確認できるが、これが疑似表面SV波である。

この疑似表面 SV 波の存在は、前述の研究^{例えば 4)}において明らかにされているが、本研究では、SV 波によるき裂探傷を行う際に、この疑似表面 SV 波を感度調整に利用するものである。

3. 探傷法の要求性能・仕様の整理

臨界屈折角探触子を用いた超音波探傷法（以下、臨界屈折角探傷法）の検討にあたって、検出性能及び実用性の観点から、本研究では探傷法に必要なとされる性能・仕様の目標を以下のとおり整理した。

- a) 板厚方向深さ 3mm 程度のごく浅いき裂を直射法により確実に検出可能であること
- b) 上記 a) の前提の下で、以下の要件を満たす客観性・実用性の高い方法であること
 - ・塗膜を除去せずに、塗膜上から探傷可能であること
 - ・デッキプレートの下面側から比較的簡易に探傷可能であること

a) に関して、き裂はできる限り進展初期の段階で検出することが望ましいが、深さ 1 ~ 2mm 程度のごく浅いき裂をルート部等からのエコーと識別するのは困難と判断し、深さ 3mm 程度のき裂を検出することを目標とした。下里ら⁵⁾は、デッキ進展き裂を鋼床版試験体に発生させ、そのき裂（板厚方向高さ 7.5mm、橋軸方向長さ 62mm）を残した状態で SFRC 舗装を施工し、輪荷重走行試験（軸重 137kN で 400 万回載荷）を行い内在き裂の進展が見られなかったことを確認している。き裂深さに若干の余裕を考慮しても、その半分以下の 3mm というき裂深さは発見後の対応の観点からも検出性能として概ね妥当な数値と考えられる。また、実橋ではデッキプレート上面には腐食による凹凸や舗装打替時の施工機械によるきずが存在する可能性がある。このため、デッキ下面からの一回反射法では信頼性が劣る可能性があり、直射法を前提とした。

b) に関して、現場での作業性を確保しつつ、客観性・信頼性を向上させるためには、エコー高さに含まれる誤差を極力抑えた探傷法とする必要がある。デッキ進展き裂の場合、デッキプレート下面側からの上向き探傷となり、膨大な溶接線長の調査が想定されることから、作業性の点で自動走査（探触子の走査が自動であり、探触子位置の座標及びエコー高さのデータ収録が自動的に行えるもの）による探傷によることとした。また、5.(1)に示す屈折角の調整を行うことができ、探傷時に接触圧の影響を受けない客観性の高い探傷とするために、探傷法として

は探触子とデッキプレート下面の間に、接触媒質を介して 0.3mm 程度の一定厚の隙間を設ける方法（ギャップ法）を採用した。

4. き裂の検出性能向上のための課題と検討項目

3 章に述べた探傷法の性能・仕様を満たすためには、エコー高さに含まれる種々の誤差を極力小さくし、測定精度を向上させる必要がある。ここで、誤差の要因には主に以下の影響が考えられる。

- a) 感度調整用の基準試験片と被調査物の音速の相違
- b) 感度調整用の基準試験片と被調査物の探傷面の状態（表面の凹凸、塗装の状態）の相違
- c) 対象とする個々のき裂の状態（傾き、形状等）の相違

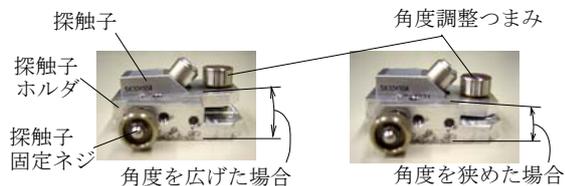
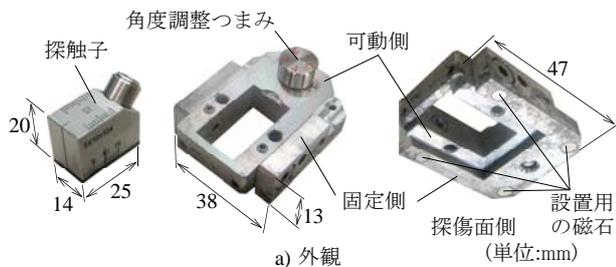
a) について、斜角探傷では、一般に同型式の斜角探触子 2 個を用いた透過法により探傷屈折角と探触子間距離を測定し STB 屈折角（JIS 標準試験片を用いて測定した屈折角）⁶⁾との違いと鋼材音速の違いを補正するか、もしくは横波垂直探触子を用いて板厚方向の鋼材音速の相違を測定し屈折角および鋼材の音速の違いを補正する方法が適用されている⁶⁾。前者の透過法では、誤差が含まれやすく、後者は測定すべき音速の方向が異なるという課題が挙げられる。

b) について、表面状態や音響インピーダンス（音速と密度とを乗じて得られる、弾性体における超音波等の弾性波の伝わり難さを表すパラメータ）が被調査物毎に異なるため、超音波の伝達損失の程度が異なる可能性がある。特に塗膜については橋梁毎に種類、厚さ、表面粗さ等が異なり、これらがエコー高さの測定精度に影響を与える。現状では、前述の透過法によって伝達損失の違いを補正する方法が適用されている⁶⁾が、a) と同様の課題が挙げられる。

c) については、上記 a), b) の影響を極力抑えた探傷法の適用を前提とした上で、実際の疲労き裂もしくはそれに近い模擬き裂に対して、エコー高さとき裂深さを定量的に関連付けるのが最も妥当な方法と考えられる。

以上より、上記 3 項目の影響を極力排除するために、本研究では以下の 2 項目について検討を行った。

- i) 疑似表面 SV 波を活用することによる、被調査物の探傷面の状態に対するエコー高さ計測の精度向上方法の検討
- ii) き裂深さとエコー高さの相関性の分析による、



注：わかりやすく示したものであり、実際の角度の調整量とは異なる。

b) 屈折角の角度調整の状況

図-5.1 試作した探触子ホルダの寸法と外観と角度調整の状況

適切な探傷位置（溶接線からの距離を一定に保った状態での走査を前提とした場合の探触子位置）、き裂の有無の検出性能、深さ推定精度の検討

5. エコー高さ計測の精度向上のための感度調整方法の検討

基準試験片と被調査物間の音速及び屈折角の違いの調整方法として、探傷面と探触子間の角度をギャップの範囲内で変化させることにより、疑似表面SV波の透過パルスの高さが最大となるように調整する方法を提案する。図-5.1に探触子と試作した角度調整機能を有する探触子ホルダの概要を示す。また、図-5.2に同ホルダを用いた屈折角の調整方法を示す。まず、基準試験片に対し、透過法において、疑似表面SV波の透過パルスが最大となるように入射角を調整した上で、探触子間隔を、例えば 30mm、60mm と変化させてそれぞれ透過パルスを計測する。音速は、それぞれの探触子間隔における透過パルスの伝搬時間を用いて算出できる。この調整を被調査物に対しても行うことにより、それぞれの音速の違いを考慮でき、前章に述べたように基準試験片と被調査物のSV波の屈折角を同一にすることが可能となる。

次に、基準試験片と被調査物間で、屈折角を同一に調整した場合、両者の違いは基本的に鋼材表面の状態の違いによる超音波の伝達効率の違いだけとなる。図-5.3に基準試験片と被調査物において、探触子間距離が 30mm のときの疑似表面SV波の透過パルス高さの違いを模式的に示す。すなわち、伝達効

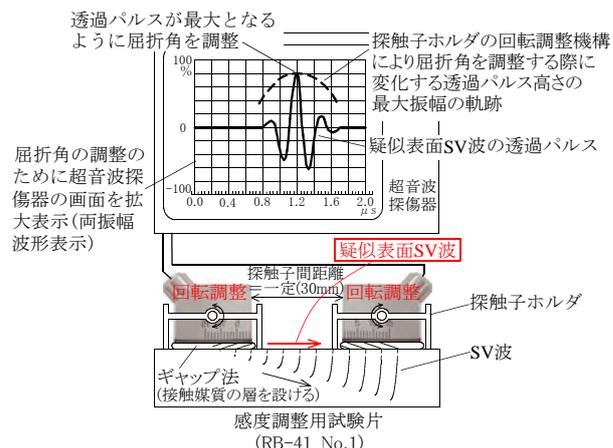


図-5.2 疑似表面SV波を用いた屈折角の調整方法

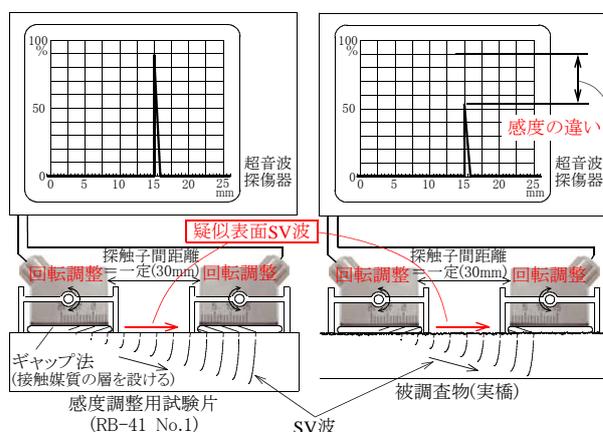


図-5.3 疑似表面SV波の透過パルス高さの比較

率の差が透過パルスの高さの差となって現れるので、この差を用いて探傷器における探傷感度（ゲイン値）を調整すれば表面状態の違いによるエコー高さの違いの調整が可能となる。

なお、以上の方法では、鋼床版デッキプレート下面側のみを利用して感度調整を行うため、デッキプレート上面側の状態が不明な場合でも適用できる。

6. 模擬き裂試験体、実橋鋼床版を用いた臨界屈折角探傷法の適用性の検討

(1) 模擬き裂試験体

試験体は、鋼床版デッキプレートとUリブの溶接部を模擬した小型試験体に対して疲労試験を実施し、実き裂に近いき裂を発生させ、それを加工（表面は塗装なし、黒皮の状態）することにより製作した。図-6.1に製作した模擬き裂を有する小型試験体の寸法形状と疲労試験の状況を示す。鋼種はSMA490A、板厚は 12mm である。Uリブの板厚は 8mm である。デッキプレートとUリブとの溶接は、

炭酸ガスアーク溶接により溶込み量 75%を目標に施工した。なお、図に示すストラットによる拘束と載荷方法は、実き裂に近い進展方向を模擬するため事前に FEM 解析によるルート周辺の応力性状の検討を行い決定した。

き裂深さが板厚に対してほぼ平行になっている部分を対象とするため、ビーチマーク試験の結果を踏まえ、元の試験体の中央部分（幅 100mm のうち中心線から $\pm 20\text{mm}$ （幅 40mm））を切り出して探傷用のき裂を内在させた小型試験体計 19 体に加工（塗装なし、黒皮の状態）した。

(2) 試験方法

探傷試験では、各小型試験体に対して探触子の前後走査を行いき裂からの反射エコーを計測した。また、前述の感度調整方法を適用するとともに感度調整用の基準試験片 (RB-41 No.1) の標準穴（深さ 5mm の $\phi 3\text{mm}$ の横穴）からのエコーを用いて、探触子を前後走査させながら得られるエコー高さの軌跡を求め、これを H 線としたエコー高さ区分線を作成した。探触子は、現場作業性を踏まえ、溶接線からの距離を一定に保った状態で溶接線に沿って走査することとした。

(3) 模擬き裂試験体に対する探傷結果

図-6.2にき裂深さからの距離が一定 (27mm) となる探触子位置におけるエコー高さ比の関係を示す。図中の黒丸印 (●) は 19 体の小型試験体の探傷結果である。白三角印 (△) は、著者らが別途実施した実大鋼床版試験体の輪荷重走行試験において発生したデッキ進展き裂（半楕円型のき裂）の探傷結果である⁷⁾。これらの結果より、6mm 程度までのき裂に対して、き裂深さとエコー高さ比の間には相関性が見られ、ノイズ等の影響を想定しても、4mm 程度以上のき裂はほぼ検出できるものと考えられる。また、き裂がある程度深くなると、エコー高さ比が増加せずに頭打ちになる傾向が見られる。

(4) 実橋鋼床版に発生したき裂への適用性の検討

前述の模擬き裂試験体での探傷試験とは別に、実橋鋼床版で発見されたデッキ進展き裂⁷⁾に対して、これまで述べてきた臨界屈折角探傷法により探傷を行い、き裂深さの実測値とエコー高さ比の関係の分析により適用性を検討する。試験方法は同様とした。

現場での自動探傷を行うにあたって、Uリブと探触子との距離を一定にするための走査用レール及び一定速度で走査する駆動装置を試作した。写真-6.1に別の鋼床版橋での適用状況と探傷装置の構成を示

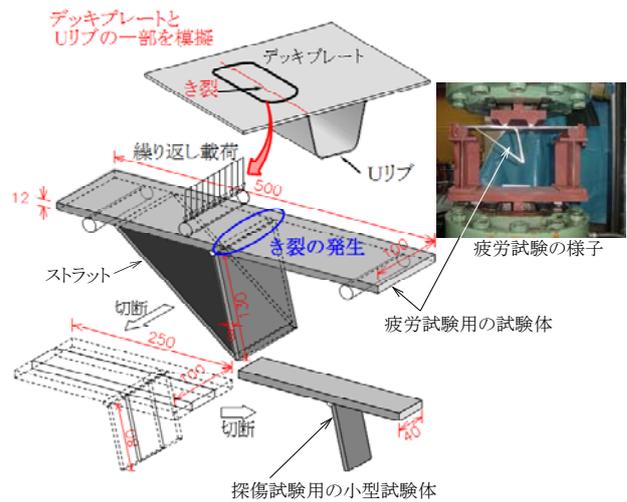
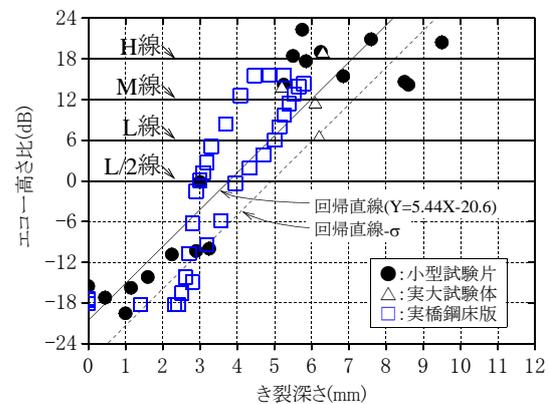


図-6.1 疲労試験用の試験体と疲労試験後に製作した探傷試験用の小型試験体の寸法形状



注) エコー高さ比はL/2線を基準(0dB)とした。
Y: エコー高さ比(dB), X: き裂深さ(mm), σ : 標準偏差。

図-6.2 エコー高さ比とき裂深さの関係

す。

図-6.2に探傷結果を追記する。図中の回帰直線は、図中の模擬き裂検体の結果を含めた全プロットに対する一次回帰式である。プロットにばらつきは見られるが、深さ 6mm 程度までのき裂に対して概ね良好な対応を示している。一方、その先の 6mm 程度以上のき裂部位では、エコーの伝搬経路が複数存在し、エコーが複数現れ明瞭なピークエコーが得られず、エコー高さ比が頭打ちになる傾向が見られた。

本研究で適用した自動探傷の場合、浅いき裂先端部位から深いき裂部または深いき裂部から浅いき裂先端部位に向かってき裂深さが徐々に変化する状況を連続的に探傷することになる。このため、エコー高さの連続的な変化により、き裂の両先端部を特定することは十分可能であり、かつその部分は浅いき裂であることも容易に推定できるものと考えられる。2 ~ 6mm 程度のき裂の場合、き裂の傾きや形状に対するエコーの変化も比較的少ないと考えられ、き裂が図-1.1に示されるような傾きや形状にほ

ば限定される場合には、図-6.2中の回帰直線を用いてエコー高さよりき裂深さを概略推定できる可能性がある。なお、推定値の信頼性については、今後、実き裂に対する探傷を積み重ねることによってそのばらつきを確認する必要があると考えられる。

以上の実橋鋼床版におけるき裂深さとエコー高さの関係を模式的に図-6.3にまとめるが、これらの関係は、小型試験片の結果と同様の傾向である。

なお、き裂が貫通しているか否かについては応急対策を判断する上で重要な情報である。同探触子による方法では貫通の有無を直接判別することは難しいと言える。ただし、浅いき裂を確実に捉えられるので、溶接線方向のき裂の進展状況とエコーの傾向からき裂の状態を概略判断することは可能と考えられる。また、貫通き裂の場合には、汎用性の高い斜角 70 度の探触子による探傷において、き裂面からの強い反射エコーの検出が期待できるため、臨界屈折角探傷法を適用した上で、疑わしい部位について斜角 70 度の探触子による探傷を組み合わせることにより、より実用性の高い効率的な探傷が可能と考えられる。

7. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 臨界屈折角探触子から発生する疑似表面 SV 波を利用し、音速測定、屈折角調整を精度良く実現でき、かつ、探傷面の状態（塗装系、塗膜厚、鋼材の表面状態等）がエコー高さに及ぼす影響を考慮できる実用的な感度調整方法を提案した。
- (2) 深さの異なるき裂を模擬した小型試験体を用いた探傷試験結果に基づき、エコー高さ比とき裂深さの関係を分析した。その結果、エコー高さ比とき裂深さとの相関性を把握するとともに、提案した探傷方法により 4mm 程度以上の深さのき裂についてはほぼ確実に検出できることを確認した。
- (3) 提案する自動探傷法を、実橋鋼床版で発見されたデッキ進展き裂に適用し、(2)の結果との比較を行った。その結果、実鋼床版のき裂に対して、3 ～ 6mm 程度の浅いき裂部位に対するき裂の検出性能及びき裂深さとエコー高さ比の相関性が確認され、かつ誤検出も見られず、探傷法として実橋鋼床版に十分適用可能な実用性の高い探傷法であることを示した。

本研究は、土木研究所、菱電湘南エレクトロニクス株式会社および三菱電機株式会社情報技術総合研

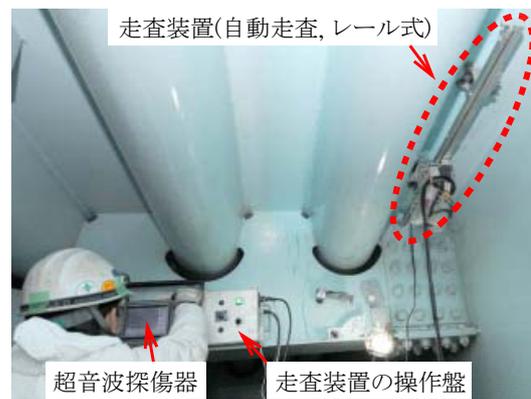


写真-6.1 現場での適用状況

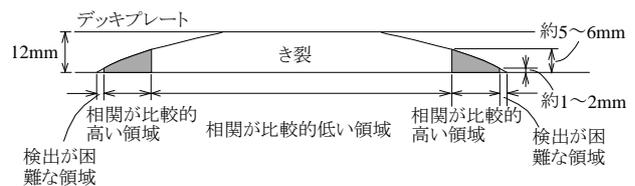


図-6.3 き裂深さとエコー高さの相関が比較的高い領域

究所の三者による共同研究「鋼床版デッキプレート内進展き裂の非破壊調査法に関する研究」(2006年度～2007年度)として実施したものである。

謝辞：実鋼床版のデッキ進展き裂の探傷にあたっては、阪神高速道路(株)より、き裂の探傷試験の現場提供とき裂破面のデータ提供の協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村越潤, 梁取直樹, 宇井崇: 鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討, 鋼構造と橋に関するシンポジウム, (社)土木学会, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 第10回, 鋼床版の疲労損傷とその対策一, pp.19-37, 2007.8.
- 2) 村越潤, 木村嘉富, 高橋実: 鋼床版デッキプレート進展亀裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案), 土木研究所資料, 第4138号, 2009.3.
- 3) 木村友則, 三須幸一郎, 和高修三, 小池光裕: 試験体表面に沿って伝搬するSV波による端面エコーに関する検討, (社)日本非破壊検査協会超音波分科会, 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 第14回, 2-6, pp.39-44, 2007.1.
- 4) 高橋雅和, 星野充宏: 表面及びその近傍を伝搬する超音波に関する実験的検討(第2報), 非破壊検査, 第43巻, 第10号, pp.658-664, 1994.10.
- 5) 下里哲弘, 若林登, 稲葉尚文, 富田芳男, 小野秀一, 渡辺真至: 疲労損傷を受けた鋼床版におけるSFRC補強後の疲労耐久性検証試験, (社)土木学会, 年次学術講演会講演概要集, 第62回, 1-022, pp.43-44, 2007.9.
- 6) (社)日本規格協会: JIS Z 3060, 鋼溶接部の超音波探傷試験方法, 2002.
- 7) 杉山裕樹, 崎谷浄, 小林寛, 高村義行, 塚本成昭: 鋼床版デッキプレート貫通き裂の詳細調査および補修設計, (社)日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, 報告, pp.345-350, 2009.11.

