

◆特集：橋梁の耐久性を向上させる技術◆

鋼床版の疲労亀裂に対する超音波探傷法の
適用性に関する基礎検討

村越 潤* 有馬敬育** 藤木 修***

1. はじめに

厳しい活荷重実態を背景に、これまで鋼床版橋梁の溶接部において疲労損傷事例が報告されている(図-1)。これらの疲労損傷のうち、最近ではU型の縦リブ(以下、Uリブ)と走行路面であるデッキプレートとの溶接部からデッキプレート内に進展し、表面に貫通する亀裂が報告されている。この亀裂はUリブ内の溶接ルート部から発生し、デッキ板厚内を上方向(デッキ表面側)に進展するため、目視点検ではその発生・進展の状況を直接確認することは困難である。これに対して、亀裂検出の一方法として超音波探傷法の適用が考えられるが、探傷方法や検出性能等に関して必ずしも十分な知見が得られているわけではない。

本文では、亀裂検出への超音波探傷法の適用性について検討するために、Uリブとデッキプレ

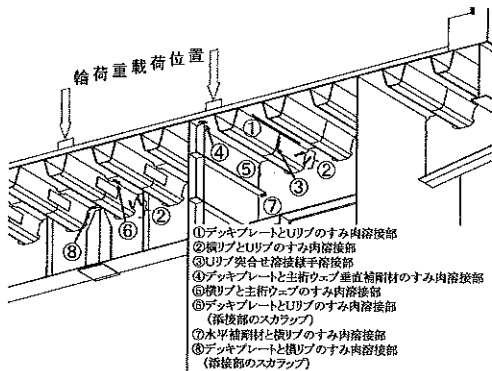
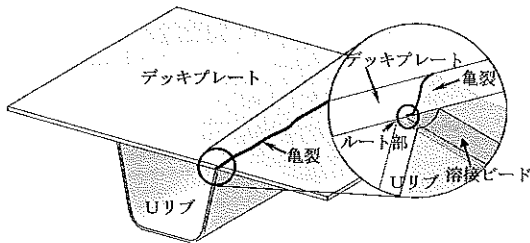


図-1 鋼床版疲労損傷例

図-2 デッキプレート-Uリブ溶接部疲労損傷
(デッキプレート進展亀裂)

トの溶接部を模擬した小型試験体を用いて実施した超音波探傷試験結果について報告する。

2. 対象とする疲労亀裂と点検上の課題

鋼床版のデッキプレート裏面の補剛縦リブには、ねじり剛性や曲げ剛性が大きい閉断面リブが使用されることが多いが、最近、この溶接部のルート部から、①デッキプレート内に進展し、デッキを貫通する亀裂(図-2参照。以下、デッキプレート進展亀裂。)と、②溶接ビード内に進展しビードを貫通する亀裂の、2タイプの亀裂が報告されている。

これらの亀裂のうち、デッキプレート進展亀裂については、今までのところ数橋において確認されているが、走行路面において舗装の変状や路面陥没等につながるおそれがあり早期発見が必要と考えられる。しかし、亀裂の起点は密閉されたUリブ内の溶接ルート部であり、鋼床版下面からの目視点検では亀裂の状態を確認することは困難である。一方、走行路面からの点検では、舗装を剥がしてデッキ表面の貫通亀裂を確認するか、あるいは進展した亀裂に伴う舗装の変状を間接的にとらえるといった方法が考えられるが、いずれもかなり進展した状態での確認にならざるを得ない。

3. 検討対象とする超音波探傷法

ここでいう超音波探傷とは、鋼床版の裏面側に接触させた探触子から鋼材内部に超音波を伝搬させ、亀裂から反射してきた超音波(反射エコー)を同一の探触子で受信し、亀裂検出を行うものである。探傷法には発生させる超音波の種類等により各種の方法が考えられるが、ここでは、溶接部の内部欠陥の非破壊検査に一般的に用いられている斜角法と、亀裂の発生状況を踏まえ鋼材表面付近に沿って伝搬する波を用いた表面SH波法及びクリーピング波法の3方法を対象とした。以下に概要と探傷時の留意点をまとめる。

(1) 斜角法

斜角探触子(入射角 $60\sim 70^\circ$)を用いて鋼材表面から斜めに超音波を入射する方法である。図-3(a)にデッキプレート裏面側からの探傷のイメージを示す。探傷方法としては、亀裂面からの反射エコー及び亀裂先端から散乱反射されるエコー

(端部エコー) を捕らえ、亀裂の有無及び亀裂深さを検出するものである。図-4に面反射エコーと端部エコーの検出イメージを示す。亀裂からの面反射を受信した状態から、探触子を前後走査し、エコー高さが小さくなる過程の中で、少しエコーが大きくなる点を捕らえ、端部エコーと判断する。その時点でのビーム路程(伝搬距離)と入射角の関係から、亀裂深さを算出する。図-5に端部エコーの受信波形例を示すが、端部エコーに関しては明瞭に現れない場合が多いこと等から判別に十分な経験が必要と考えられる。

探傷に当たっては、図-3 (a) に示すとおり、超音波を亀裂に直接当てる場合(以下、直射法)とデッキプレート表面で1回反射させ、亀裂に当てる場合(以下、1回反射法)がある。直射法では、探触子を溶接部に接触するまで接近させても、デッキプレートの標準板厚12mmの半分程度まで亀裂が進展していないと反射エコーが低いことが予想される。1回反射法では、理論上、亀裂がごく浅い場合でも亀裂検出は可能であるが、デッキプレート表面のきずや腐食等による凹部からの反射エコーを検出する可能性も高い。また、直射法と比較して、ビーム路程が長くなるため、検出精度が低くなる可能性がある。

(2) 表面SH法

図-3 (b) に探傷のイメージを示す。一般の斜角探傷に用いられるのがSV波と呼ばれる横波であるのに対して、屈折角90度近くで、探傷面に沿って15度程度の広がりをもって伝播するSH波と

と呼ばれる横波による探傷法である。クリーピング波法とともに、鋼材表面及びその近傍のきずの検出に用いられる探傷法の一つであり、建築鉄骨の溶接ルート部の溶込み不良の判断等に適用されている。探触子ときずとの間の表面に溶接があっても探傷面に垂直なきずを検出しやすい、探傷面の塗膜や表面付着物の影響を受けにくく距離減衰が少ない等の特長があり、亀裂深さの検出は難しいものの亀裂検出への適用性が期待される探傷法である。一方、同法は通常の接触媒質では探触子から鋼材中に超音波を伝播させることができないことから、粘性の高い専用の接触媒質を用いて、探触子を探傷位置で反射エコーの高さが安定するまで数分間大きな力でデッキプレート裏面に押し付ける必要がある。写真-1に現場での探傷状況の例を示すが、鋼床裏面での探傷は、無理な体勢を強いられることから、長時間の作業は難しく、ピンポイントの使用に有効と考えられる。



写真-1 実橋における探傷状況

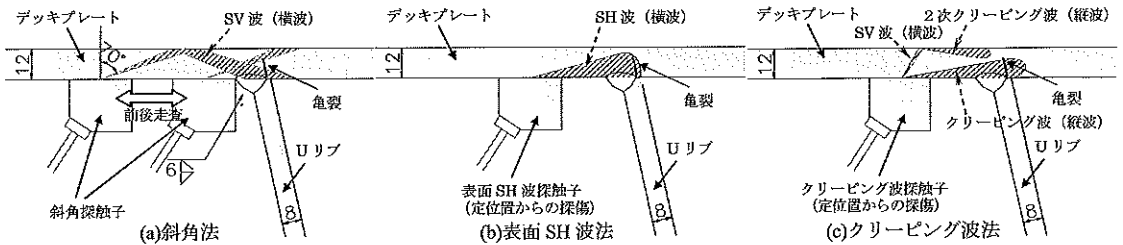


図-3 検討対象とした探傷法による探傷イメージ

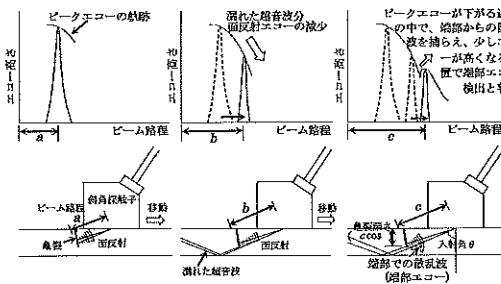


図-4 面反射エコーと端部エコーの検出

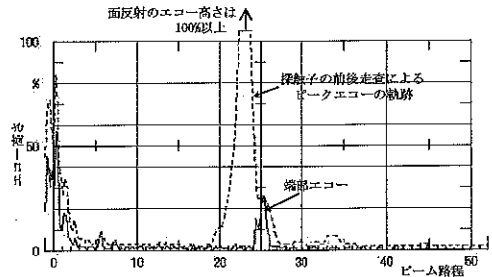


図-5 端部エコーの受信波形例

(3) クリーピング波法

図-3 (c) に探傷のイメージを示す。屈折角が90度に近い状態で伝搬する縦波（クリーピング波）による探傷法である。前述の表面SH波と同様に、鋼材表面及びその近傍のきずの検出に用いられる探傷法の一つであり、亀裂深さの検出は難しいものの亀裂検出への適用性が期待される探傷法である。ただし、探触子からはクリーピング波と横波が同時に発生し、後者は二次クリーピング波と呼ばれるデッキ表面に沿った波となるため、デッキ表面に傷等が存在する場合には、その反射エコーを検出する可能性がある。現場作業性については、一般的な斜角法と同程度である。

以上の探傷法については、既に損傷の発見された橋梁における詳細調査において試されているが、検出性能等の適用性に関する実証データが少ない状況であり、今般、小型試験体を用いた探傷試験を行ったものである。

4. 試験方法

4.1 小型試験体

図-6に試験体の寸法形状を示す。試験体はデッキプレートとUリブの一部を2枚の鋼板で模擬したものである。図中に示す荷重方法により疲労試験を行い、溶接ルート部に疲労亀裂を発生させ進展途中で適宜3探傷法による探傷試験を行った。疲労試験中は亀裂深さを計測できないことからピーチマーク疲労試験（一定の回数毎に荷重範囲を小さくし亀裂進展速度を遅くすることによって亀裂破面にピーチマークと呼ばれる年輪状の模様を刻む試験方法）を行い、試験終了後、ピーチマークより亀裂深さを推定し探傷結果と対応づけた。なお、この試験体の亀裂と実橋で確認されている亀裂では、荷重条件も亀裂の発生メカニズムも異なるが、亀裂自体はルート部からデッキ表面に鉛直方向に進展するという点で模擬できることから、この試験体と荷重方法を採用した。

表-1に試験体の種類を示す。超音波探傷による亀裂検出性能に影響を与える可能性のある因子（溶接の状態、探傷面上の塗装の有無、デッキ表面（エコー反射面）の状態）の確認を目的として6種類計7体とした。試験体(G)、(T)では、溶接部の形状の違いによる影響を確認するため、ギャップを設けたものと溶け込みを浅くしたものとした。試験体(K-2)、(K-3)および(S)では、塗装の有無の影響を確認するため、内面塗装D-4系（膜

厚240 μ m)を塗布した。試験体(K-3)では、舗装の影響を確認するため、1種ケレンの素地調整後、グースアスファルト用接着剤を0.2 l/m² × 2回塗布した。試験体(S)では、舗装の打換え時等のデッキの表面傷を想定し、探傷方向に対して直角の傷（半円r=1mm)を20mm間隔でつけた。

4.2 超音波探傷試験

(1) 測定機器

本実験では、デジタル超音波探傷器UI-25（湘菱電子製）、探触子には、斜角探触子5C10 × 10A70（屈折角69.5°）、表面SH波探触子5C5 × 5HA90、クリーピング波探触子5C10 × 5LAD90（いずれもジャパンプローブ製）を用いた。

(2) 探傷感度の設定

試験前に探傷感度の設定を行った。斜角法では、JIS Z 3060に従い、STB-A2標準試験片の ϕ 4 × 4mmからのエコー高さを画面上80%に合わせて探傷感度としたが、表面SH波法及びクリーピング波法では標準的な設定方法がない。そこで、表

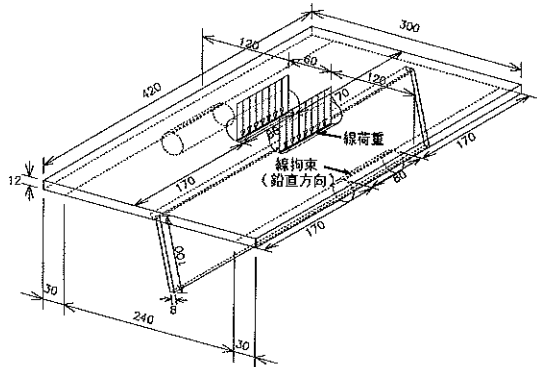


図-6 小型試験体と荷重荷重方法

表-1 試験体詳細

| | 基本形 (ギャップなし、溶込み75%) | ギャップ1mm (溶込み75%) | 溶込み4mm (溶込み50%) |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| 塗装なし (探傷時に 塗膜除去を 想定) | 試験体名: K-1 2体 | G 1体 | T 1体 |
| 塗装あり | K-2 1体 | S 1体 | |
| 塗装 +デッキ面プラスト +グースアスファルト 用接着層 | K-3 1体 | | |

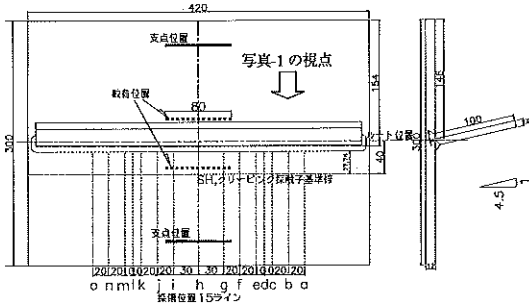


図-7 探傷位置

面SH波法では、同法を用いた鋼構造建築溶接部の検査方法である「裏当て金完全溶込みT継手のルート部からのエコー判別方法に関する指針(1995改正版)」¹⁾に従い、A2形系標準試験片φ4×4と探触子の先端との距離を40mmとした時のエコー高さが50%となるように調整した後、感度を6dB高めて探傷感度とした。クリーピング波法では、参考にできるものがないため、探触子とルート部までの距離を勘案し、STB-A1標準試験片の2mmスリットと探触子の先端との距離を15mmとした時のエコー高さが50%となるように調整し探傷感度とした。

(3) 探傷位置と探傷方法

各試験体での探傷位置は、図-7に示すa～oの15ライン上とした。各探傷位置において亀裂発生初期からデッキプレート貫通までの間に複数回探傷している。

斜角法では各探傷ライン上で前後走査を行い、端部エコーを捕らえ、亀裂深さを算出した。

表面SH波法では、図-7に示すルート部位置から40mm位置に探触子の先端を合わせ、探傷を行った。クリーピング波法では、表面SH波法と同様の位置に加えて、溶接止端に探触子先端を接触させた位置でも探傷を行った。

5. 探傷試験結果

(1) 探傷波形

写真-2に試験終了後の亀裂破面の状態(試験

体(K-1)を示す。亀裂深さを示すピーチマークが確認できるが、このピーチマークを各探傷ライン位置で測定し探傷結果と対応付けた。

図-8に表面SH波法、クリーピング波法の探傷波形の一例を示す。

表面SH波法の波形はピークが鋭く、亀裂が2mm程度の深さであっても、その有無を明確に判別できる。クリーピング波法の波形はピークが鈍く、エコー高さの変化もなだらかで、亀裂が浅い場合、亀裂からのエコーと他の反射エコーとの判別が難しいものと考えられる。また、伝搬距離による損失が大きいいため、探傷時には探触子をできるだけ亀裂に接近させる必要がある。

(2) 亀裂の検出性能

図-9に斜角法における端部エコーより求めた亀裂深さ推定値と実亀裂深さの関係、図-10に表面SH波法とクリーピング波法における探傷波形のエコー高さと実亀裂深さの関係を示す。

斜角法については、塗装なしの場合で、直射法では探傷が難しい深さ6mm程度以下の亀裂ではばらつきが大きく、直射法で探傷できる深さ6mm程度以上では、亀裂深さ推定値と実亀裂深さが概ね一致していることがわかる。塗装ありの場合では、推定値は実亀裂深さに対し、やや小さめの値を示すが、深さ6mm程度以上であれば、端部エコーにより概ね亀裂深さを推定できるものと考えられる。

表面SH波法については、塗装なしの場合で深さ2mm程度を超えると急激にエコー高さが大きくなり、2mm程度以上の亀裂の検出は十分可能と考えられる。また、塗装の介在により若干エコー高さが低くなることがわかる。

以上の斜角法と表面SH波法では、試験体溶接部の状態の違い(試験体(K-1)、(G)、(T))によるエコー高さの傾向の違いはほとんど見られなかった。

クリーピング波法については、塗装ありの場合では表面SH波法に近い傾向を示しているが、塗装なしの場合では表面SH波法に見られるようなエコー高さの明瞭な変化が見られない。特に溶接

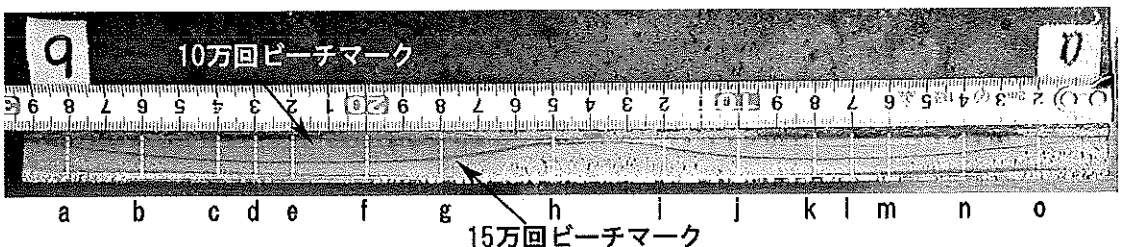
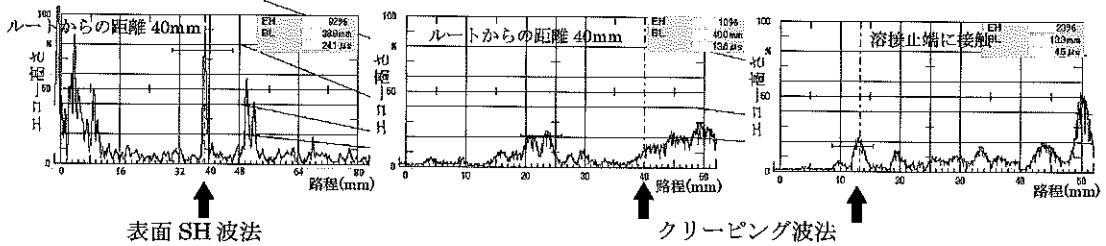


写真-2 亀裂破面(K-1-1)

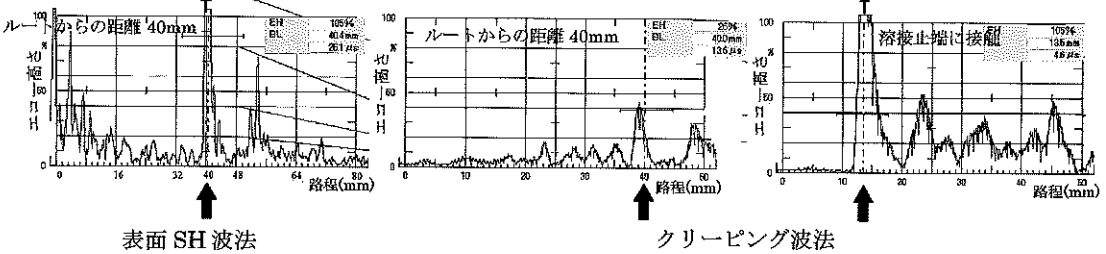
o-line 亀裂深さ 2.35mm



表面SH波法

クリーピング波法

m-line 亀裂深さ 5.15mm



表面SH波法

クリーピング波法

図-8 探傷波形 (K-1-1、正規載荷15万回) (▲は対象亀裂位置、↑は100%以上であることを示す)

部にギャップを設けた試験体 (G) や溶け込みを浅くした試験体 (T) では亀裂深さが大きくてもエコー高さが低い場合があり、かつばらつきも大

さい。溶接部の状況によっては、探傷結果を見誤る可能性もあり何らかの亀裂判別の工夫が必要と考えられる。

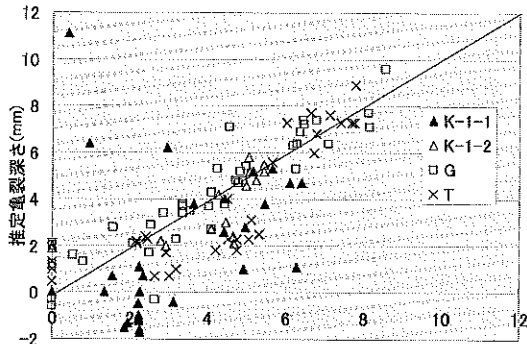
最後に、デッキプレート表面にきずをつけた試験体 (S) の探傷結果については図中に記載していないが、いずれの探傷法でもきずからの反射エコーが大きく、亀裂からのエコーを判別することは困難であった。2次クリーピング波が発生するクリーピング波法だけでなく、表面SH波法でも超音波の広がりが大きく、きずの発生状況によってはデッキプレート表面の影響を受けることが確認された。

6. まとめ

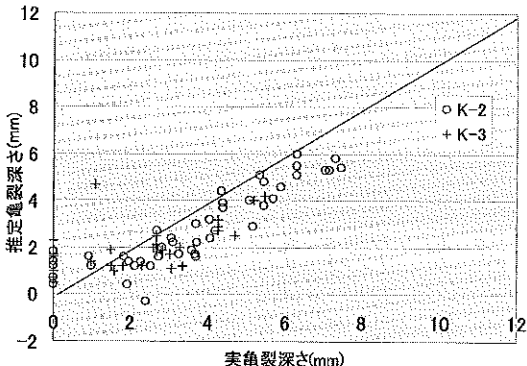
目視では確認できない鋼床版デッキプレート内に進展する亀裂検出への超音波探傷法の適用性について、小型試験体を用いた探傷試験により検討を行った。以下に主な結果をまとめる。

- (1) 斜角法では、深さ6mm程度(デッキ厚の1/2程度)以上の亀裂検出と概略の亀裂深さの推定が可能である。
- (2) 表面SH波法は亀裂の検出能力は高く、深さ2mm程度の亀裂検出が可能である。
- (3) クリーピング波法は、溶接部の形状等の影響によりエコー高さが変化する場合があります、表面SH波法ほど亀裂の検出能力が高いとはいえないが、ある程度の亀裂深さに達すれば亀裂検出は可能である。

現在、実際の亀裂の発生形態により近い条件下での小型試験体の探傷試験を検討中である。これ



(a) 塗装なし試験体



(b) 塗装あり試験体

図-9 実亀裂深さと推定亀裂深さの関係 (斜角法)

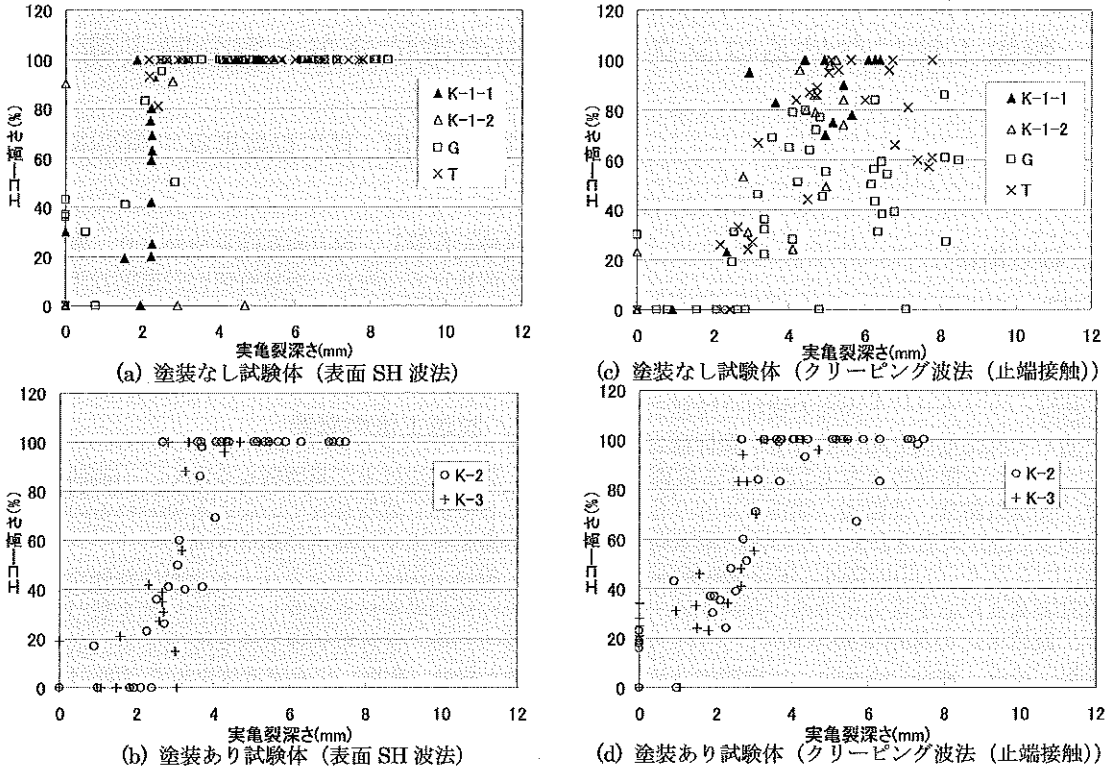


図-10 実亀裂深さとエコー高さの関係 (エコー高さ100%以上は100%としてプロット)

らの試験結果や現場での探傷試験結果等を踏まえつつ、各種探傷法の適用性・適用方法について詳細検討を行い、実用的な探傷法を明らかにしていく予定である。

探傷試験用の小型試験体の製作にあたり、(株)横河ブリッジ寺尾圭史氏に貴重な意見を頂いた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説：日本建築学会、1996
- 2) 貝沼重信, 柳沼安俊：表面SH波による十字すみ肉溶接継手のルートギャップの超音波測定、非破壊検査第51巻11号、pp.733-739, 2002.
- 3) 南 康雄：溶接部検査用探触子、非破壊検査第52巻1号、pp.9-13, 2003.
- 4) 池ヶ谷 靖：SH波用探触子とその応用、非破壊検査第52巻1号、pp.9-13, 2003.

村越 潤*



独立行政法人土木研究所構造物
研究グループ橋梁構造チーム上
席研究員
Jun Murakoshi

有馬敬育**



独立行政法人土木研究所構造物
研究グループ橋梁構造チーム主
任研究員
Noriyasu Arima

藤木 修***



独立行政法人土木研究所構造物
研究グループ橋梁構造チーム交
流研究員
Osamu Fujiki