

用途を限定した新しい超音波探傷法の提案 ～クリーピング波探触子を用いて断面欠損率を求める超音波探傷法～

Development of Method for Ultrasonic Testing Using Creeping Wave Probe under Conditions of Limited Defect Detection

成 宮 隆 雄*¹ 森 下 統 一*² 鈴 木 雄 幸*³
Takao NARUMIYA Toichi MORISHITA Yukou SUZUKI

Summary

The author of this paper has recently developed the method for ultrasonic testing which emphasizes detecting dynamically significant defects quantitatively. This is done by defining welded joints to be inspected in terms of type of steel, plate thickness, type of joint, welding method, etc.

This paper presents the development concept of the method for ultrasonic testing which draws on sectional loss rate determined using a creeping wave probe. The scope of application and major types of defects the method can be used to discover are also described. Quantified detection of such defects and the results of experiments related to the method are also provided.

キーワード：溶接欠陥，非破壊検査，超音波探傷法，クリーピング波探触子，縦波斜角，可視化像

1. はじめに

橋梁を初めとした鋼構造物の溶接部の検査には一般に放射線透過試験が適用される場合が多い。放射線透過試験は撮影された写真の画像から溶接部内のきずの種類を推定することができ、構造物の安全上有害なきずを厳しく評価することが可能である。

しかしながら、放射線透過試験方法は片面より放射線を照射して、他面に設置したフィルムに透過線量による投影画像を得る方法であることから、撮影方法がやや大掛かりであり、放射線障害防止のための配慮が必要であり、さらにフィルム現像等の作業時間の関係でリアルタイムに試験結果を得ることができない。また、鋼板と鋼板の突合せ溶接継手（以後板継ぎ溶接継手という）以外のT継手および、十字継手等の立体的な構造継手では放射線透過試験そのものが難しい。

以上のような理由から、放射線透過試験の代わりに、また放射線透過試験が困難な個所への非破壊検査に超音波探傷試験が採用されることが多くなってきている。

最近では探傷作業の能率向上および試験結果の信頼性と記録性の確保を目的とした超音波自動探傷試験法が実用化されるようになってきた。

一方、超音波自動探傷ではコンピュータを用いて探傷データを自動収録し、探傷結果を画像処理化したり、自

動判定処理をしたりするデータ処理が容易にできるようになったため、あたかも超音波探傷は万能であるかのような錯覚に陥っている傾向がある。

使い方によっては、超音波探傷はきずの長さに限らず、深さを推定することが可能であり、さらに、きずの位置座標データも入手できるため、優れた非破壊検査方法であることは言うまでもないことである。しかしながら、球状のブローホール、パイプ状のウォームホールも、溶接部の縦割れ、ミクロ的な横割れ、および溶け込み不足等の面状欠陥等形状と方向性の異なる全ての溶接部のきずを、同じ信頼性で検出できる訳ではない。

経済的な超音波探傷方法では、一般的な超音波探傷結果により、きずの種類を推定することは難しいという前提に立つ必要がある。

最近、筆者らは鋼種、板厚、継手の種類および溶接工法等を限定した溶接継手について、力学的に重要なきずの定量的な検出に重点をおいた超音波探傷法の開発を行った。

本報では、その適用範囲と重点的に検出すべききずの種類を限定し、それを定量的に検出する超音波探傷法として、クリーピング波探触子を用いて断面欠損率を求める超音波探傷法の開発の考え方を提案し、それに関連する幾つかの実験結果について報告する。

*¹ 取締役生産事業本部長

*² 千葉工場生産技術研究所次長

*³ 千葉工場品質保証部品質保証課課長代理

2. クリーピング波探触子を用いた超音波探傷を適用する溶接継手の特徴

道路橋の疲労設計において重要な対象部材として鋼床版がある。鋼床版の縦リブは6mmまたは8mmのUリブが使用される場合が多く、その工場突合せ溶接継手または現場突合せ溶接継手は裏当金を用いた片面溶接である。また鉄道橋のフランジのコバに突合せ溶接されるガセット（板厚9～12mm）継手も薄板鋼板（ここでは12mm以下とする）での疲労上の重要な突合せ溶接継手である。図-1にこれらの溶接継手の例を示した。

通常このような薄板の突合せ溶接継手では、高温割れ

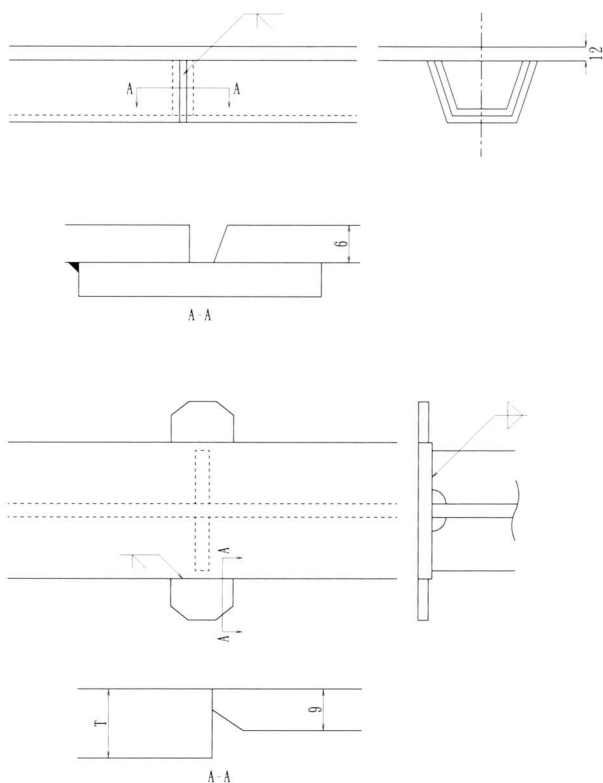


図-1 本超音波探傷法を適用する溶接継手の例

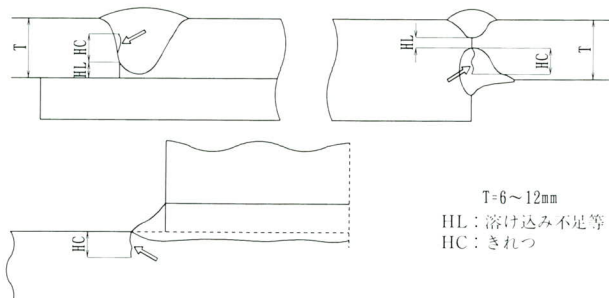


図-2 本超音波探傷法で定量的に検出したいきずの例

や低温割れが発生することはほとんどない。

考えられる溶接継手の欠陥は図-2に示すようなルート溶込み不足または融合不良である。また、供用中に発生する可能性のあるきずとして、疲労亀裂が考えられる。

鋼床版のUリブの突合せ溶接継手、フランジとガセットの突合せ溶接継手の面状欠陥および供用中に発生する可能性のある疲労亀裂の探傷等はそれが工場における場合でも、現場における場合でも放射線透過試験の適用が難しく、また通常の超音波斜角探傷試験も板厚が薄いこと、裏当金および余盛ビードによる妨害エコーと欠陥エコーとの分離ができないこと等により信頼性に欠けるため、適切な非破壊検査法が見当たらない。

本報では、図-2に示した薄板突合せ溶接継手の溶接部のきず、および供用中に発生した疲労損傷の非破壊検査方法として、非常に有用と考えられる「クリーピング波探触子を用いて断面欠損率を求める超音波探傷法」について報告する。

3. クリーピング波探触子を用いて断面欠損率を求める新しい探傷方法

薄板の突合せ溶接継手に発生するきずは、現在の鋼材および溶接材料の特性と溶接方法からみて、高温割れや低温割れは考えられず、溶込み不足および融合不良等の面状きずであることは、前述した通りである。また、供用中の疲労損傷等も表面またはルートから発生した面状きずと見なすことができる。これらの面状きずはどちらかという、板面に垂直なきずと考えられる。

非破壊検査結果としてはこの面状きずを溶接継手にかかる応力に直角な断面欠損率（きずの長さ×深さの積）で求められるのが、理想的である。即ち旧JIS Z3060¹⁹⁸⁸解説8に示されたタンデム探傷法の試験結果の等級分類では、等級を欠陥断面積（欠陥長さ×欠陥高さの積）に基づいて行う方法が示されているが、非常に合理的な評価であると考えられる。

クリーピング波探触子を用いた超音波探傷では、探触子より屈折角80～85°の縦波（以後、第1波縦波という）として伝播する超音波と屈折角33°前後で入射した横波が裏面で反射した際、モード変換した縦波（以後、第2波縦波という）が伝播する。第1波と第2波縦波は大きな屈折角で板中を伝播するため、あたかも板面に平行に縦波が伝播しているようになる。

図-3にクリーピング波探触子を用いた縦波斜角超音波探傷法の原理を示した。

写真-1に東北大学工学部材料加工学科所有の超音波可視化装置で撮影した、クリーピング波探触子を用いた第1波縦波と第2波横波入射超音波パルス可視化像を、写真-2に第1波縦波と第2波横波—縦波モード変換前後の超音波パルス可視化像を示した。

これらの可視化像から、第1波縦波およびモード変換したと第2波縦波が、図-3に示したように、ほぼ板表面に平行に伝播していることが認識される。

本超音波探傷法は薄板の場合、板表面に沿った縦波が表面にほぼ直角に入った面状きずで反射したエコー高さ

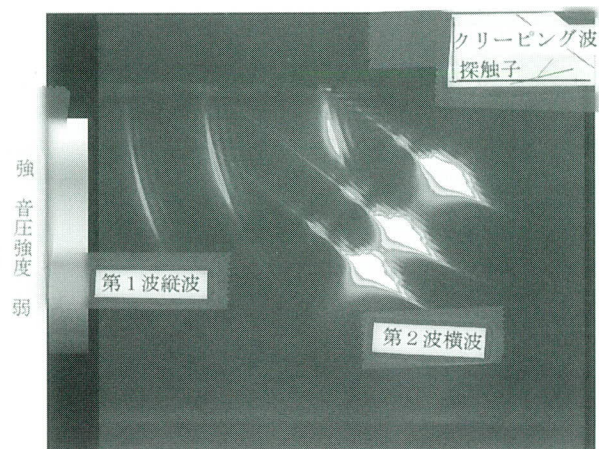


写真-1 クリーピング波探触子による第1波縦波と第2波横波入射超音波パルス可視化像

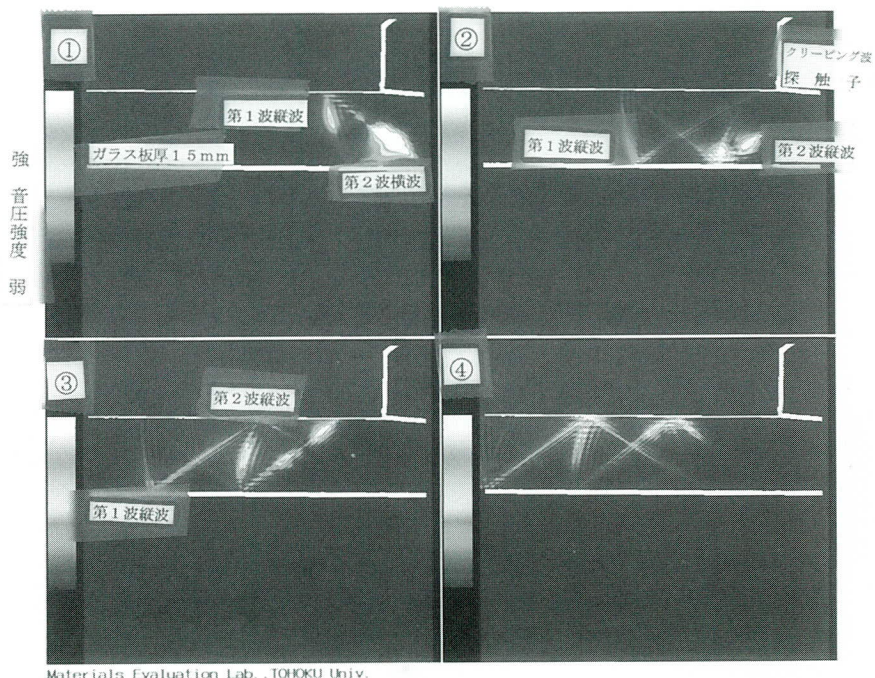


写真-2 クリーピング波探触子による第1波縦波と第2波横波—縦波モード変換前後の超音波パルス可視化像

と面状きずによる断面欠損率が比例するという原理に基づいている。

また、この縦波を用いると表面または裏面から表面に直角に入った小さな疲労亀裂も、定量的に検出できる。これらの超音波探傷法の理想的な概念図を図-4に示した。

クリーピング波探触子を用いた縦波斜角探傷の特徴を下記に示す。

①板表面に沿った縦波のため、表層部の面状きずの検出に優れている。

②表・裏の余盛ビードおよび裏当金の肌隙等の妨害エコーの影響受け難い。

③薄板の場合、第1波および第2波縦波を利用することにより、6dB程度までの集束範囲が板厚相当となるため、前後操作無しで全板厚をカバーした探傷ができる。

④一般に、面状きずの傾きによるエコー高さへの影響が比較的少ない（ただし、今回の探傷法では面反射を主体としているので必ずしも、この通りではない）。

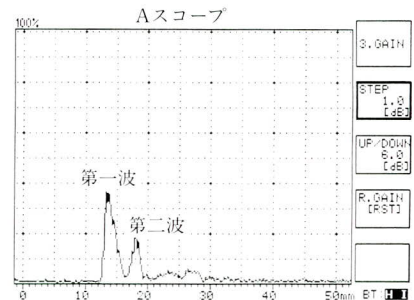
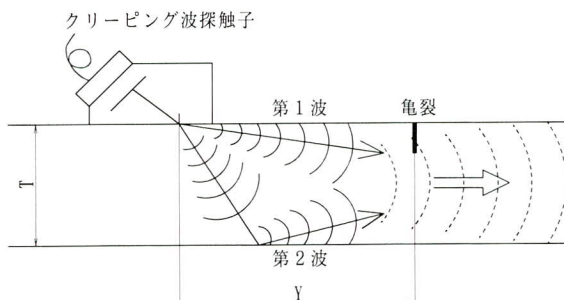
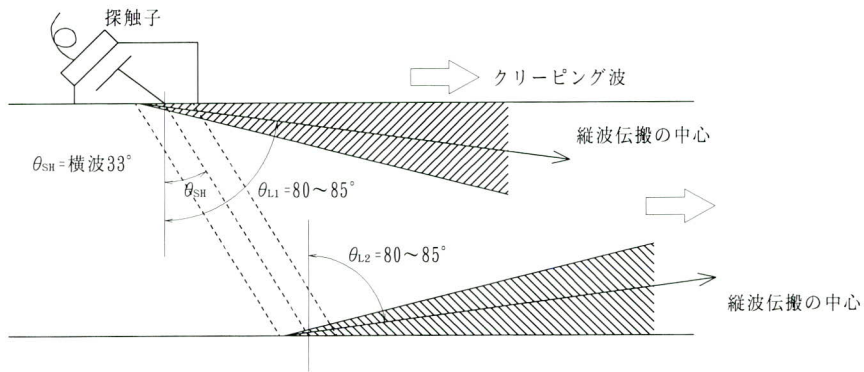
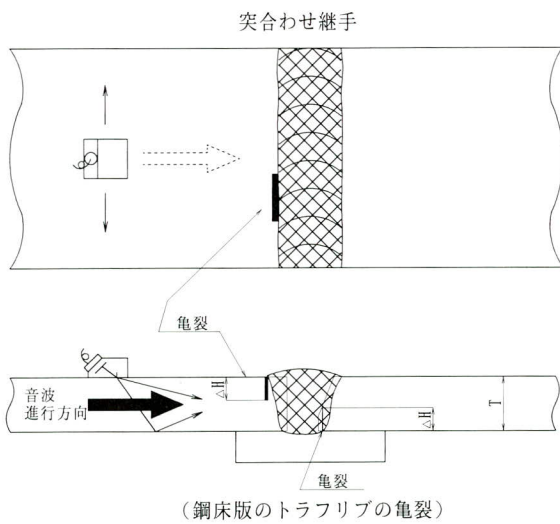
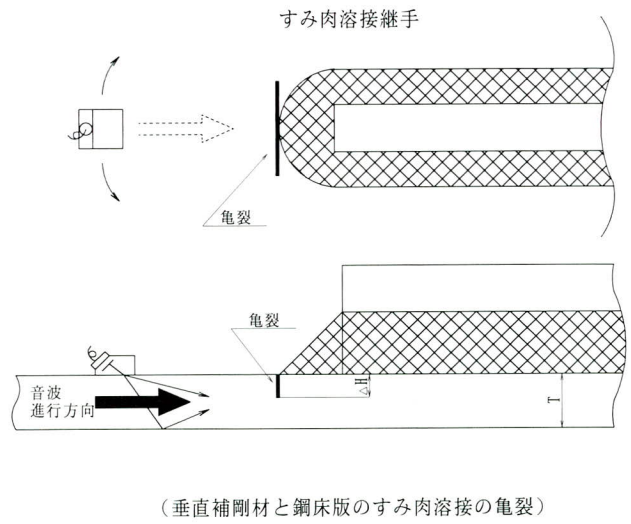


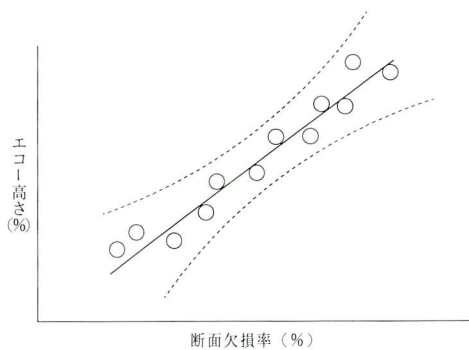
図-3 クリーピング波探触子を用いて断面欠損率を求める超音波探傷法の原理



(鋼床版のトラフリップの亀裂)



(垂直補剛材と鋼床版のすみ肉溶接の亀裂)



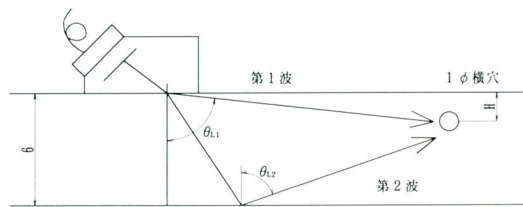
$$\text{断面欠損率} = \Delta H / T \times 100$$

図-4 本超音波探傷試験における理想的な概念図

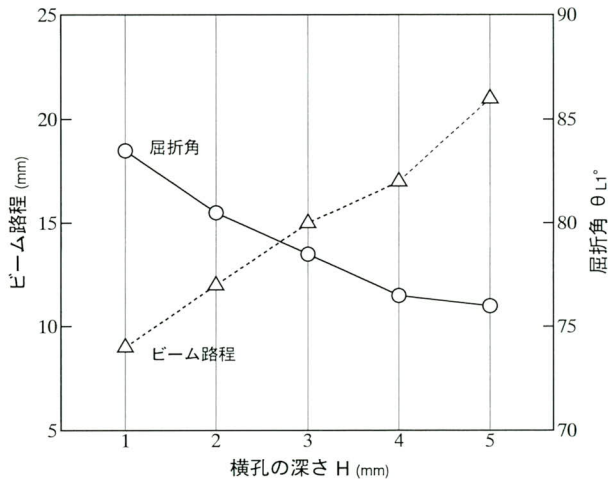
⑤縦波—横波のモード変換を頻繁に行うため、音波の伝播経路が複雑かつ多数となり、ブラウン管に現れたエコーの選別に注意が必要である。従って板厚毎に確認と調整が必要である。

⑥探触子距離によって全く異なった超音波探傷の伝播経路となるため、探触子距離の取り扱いが重要である。

⑦横波—縦波のモード変換を頻繁に行うため、音圧エネルギーの損失が複雑であり、距離振幅補償または補正が難しい。



第1波縦波の場合



第2波縦波の場合

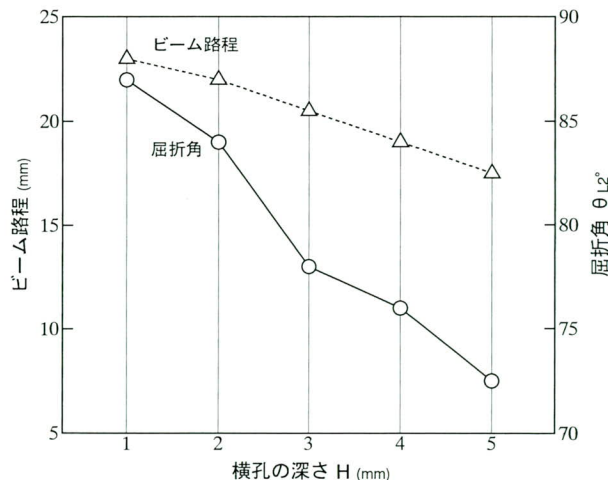


図-5 横穴深さとピークエコーでの屈折角およびビーム路程

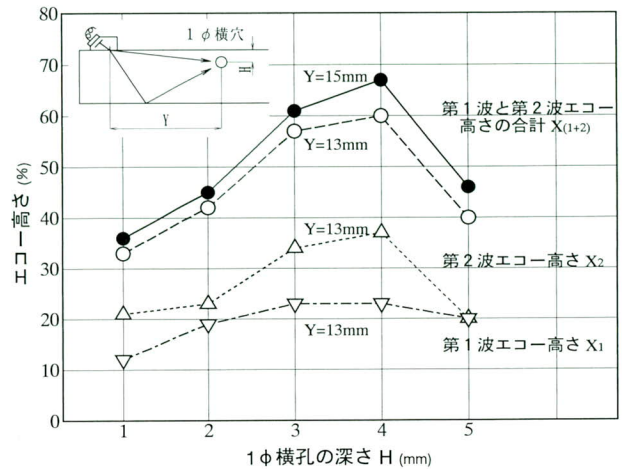


図-6 探触子距離を一定とした場合の横穴位置とエコー高さの関係

4. クリーピング波探触子を用いた定量的超音波探傷法の基礎試験結果

(1) 試験に用いた探触子の第1波と第2波縦波屈折角

本試験に用いたクリーピング波探触子は(株)検査技術研究所製2振動子型の5C10×5LAD90(N011465)である。

今回の試験板厚である6mm鋼板に、深さ1mmピッチに1mmφの横穴を明けた試験片を用いて第1波縦波の屈折角(θ_1)と第2波縦波の屈折角(θ_2)の測定結果を示す。

一般にクリーピング波探触子を用いた第1波縦波の屈折角 θ_1 は80~85°と言われているが、実測では主ビームピークエコー位置での屈折角は横穴深さによって変化する。

図-5に第1波縦波と第2波縦波の横穴深さと屈折角およびビーム路程の関係を示した。第1波および第2波縦波とも横穴位置が深くなるほど屈折角は小さくなり、第1波縦波は82~75°、第2波縦波は85~75°となっている。

従ってピークエコー高さから、きずの評価をする場合、そのきずの位置(深さ)は探触子距離と屈折角の影響を考慮しなければならないが、今回提案している超音波探傷法は探触子距離一定で行うため、試験条件を踏襲している限り、特に問題とはならない。

(2) 断面欠損率とエコー高さの関係

図-6に第1波と第2波縦波のそれぞれのエコー高さおよび第1波と第2波のエコー高さの和と1mmφ横穴の

深さHmmの関係を示した。横穴であることから、原則的には音波がどの方向からきてもその反射率は変わらないが、6mm板厚で探触子距離を13~15mmとすると、ほぼ板厚中央が主ビーム位置となるため、板厚中央近くの横穴の反射エコー高さが最も高くなるが、第1波と第2波のエコー高さの和と横穴深さの関係からみると、全板厚がほぼ6dB集束範囲に入っていることが分かる。

板表面に直角な面状きずの場合、面状きずが表面または裏面に関係なく、板厚のどの位置に存在しても第1波と第2波のエコー高さの和と断面欠損率とが比例関係となる探触子距離を見つけることが可能である。

これらの関係を確認するため、6mm鋼板を用いて図-7に示す対比試験片を作成し、断面欠損率と第1波と第

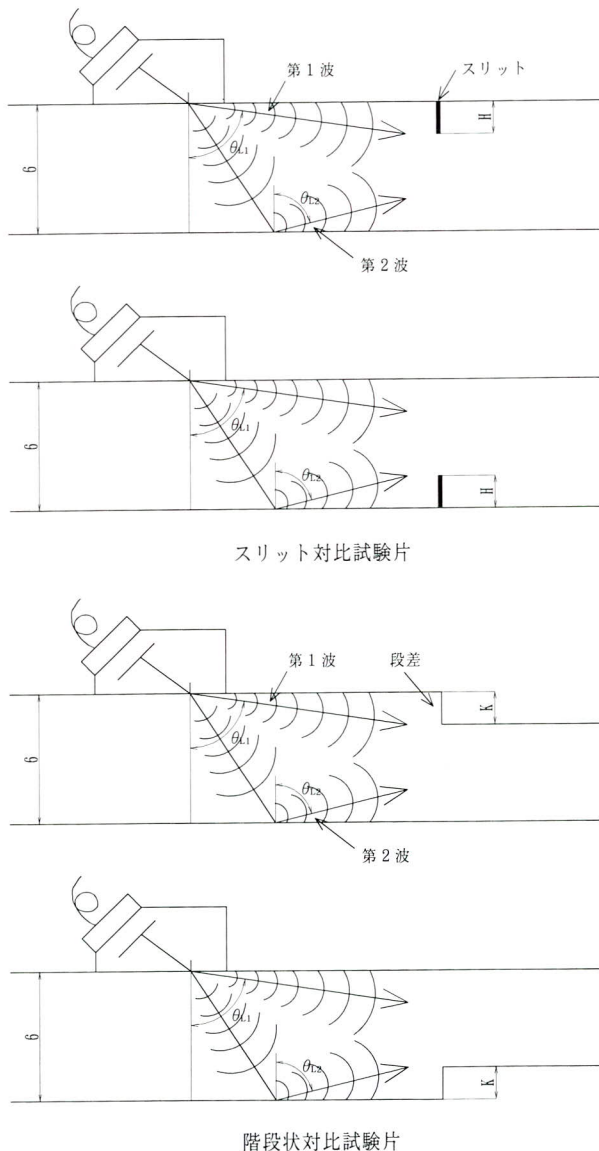


図-7 試験に用いた対比試験片

2波縦波エコー高さの和の関係を調査した。

図-8にスリット対比試験片を用いた断面欠損率と第1波と第2波のエコー高さの和の関係を、図-9に階段状対比試験片を用いた断面欠損率と第1波と第2波のエコー高さの和の関係を示した。いずれも探傷感度と探触子距離は同一である。

スリット及び階段状対比試験片において、スリットおよび階段状の断面欠損率P%と第1波と第2波のエコー高さの和の関係は断面欠損が探傷面と同一面か反対面かに関わらず非常に良い相関を示した。その相関式は第1波と第2波のエコー高さの和を $X_{(1+2)}$ %とすると

$$P(\%) = 0.2X_{(1+2)} + 8 \text{ —— [1] となる。}$$

(3) 面状きずの傾きと第1波と第2波エコー高さの和との関係

図-7に示したスリット対比試験片の板面垂直スリットを傾き 0° として、スリットを 10° 、 20° 、 30° と傾けた斜めスリット対比試験片をスリットの両側から探傷した2つの探傷エコー高さの平均値($X_{(1+2)}$)とスリット傾き θ の関係を図-10に示した。クリーピング波探触子を用いた縦波はきずの傾きの影響を受け難いとはいえ面反射が主体であることから、 10° の傾きでエコー高さは約 $1/2$ となる。傾きが 30° となると面反射はほとんど期待できず、スリットの端部エコーのみとなるため、エコー高さはスリットの深さに無関係となり一定値となる。

従って、本探傷法は板面に直角な面状きずに限定した場合のみ、式[1]が用いられることになり、対象となるきずは図-2に示したものが主体となる。また、以上の観点から敢えて溶接継手の両側から探傷しなければ成らない理由はなく、片面、片側の探触子距離一定の直線操作で良いことになる。

5. 表面から入った小さな面状きずの定量的な超音波探傷法

すみ肉溶接回し溶接止端部に発生した小さな疲労亀裂の深さを推定する方法として、図-4における探傷法の第1波縦波のみを用いた斜角探傷法が優れている。

探傷面側の亀裂を面状きずとして扱う場合は、第1波縦波のみを用いるので、特に板厚には無関係である。階段状対比試験片と板厚を変化させた機械加工板端部を用いて、面状きずの深さと第1波縦波のエコー高さの関係を求め、図-11に示した。探触子距離 $Y = 15\text{mm}$ で第1波縦

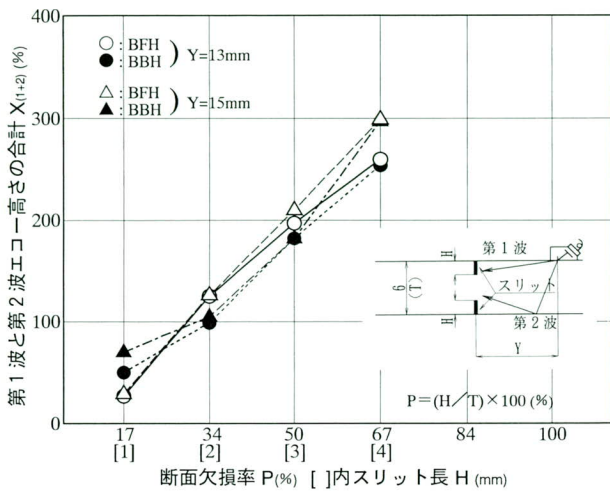


図-8 スリット対比試験片による断面欠損率と「第1波と第2波エコー高さの合計」の関係

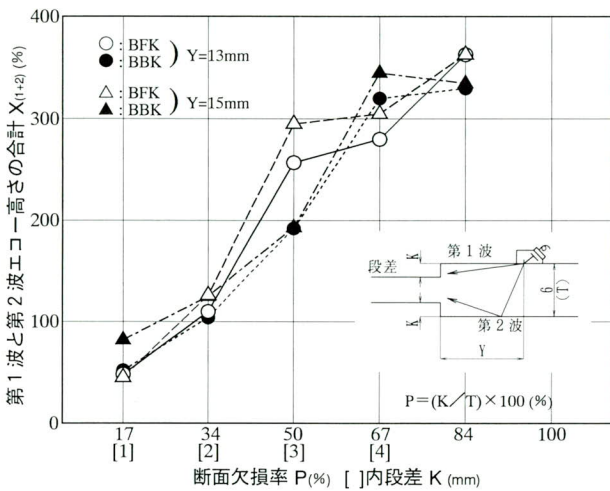


図-9 階段状対比試験片による断面欠損率と「第1波と第2波エコー高さの合計」の関係

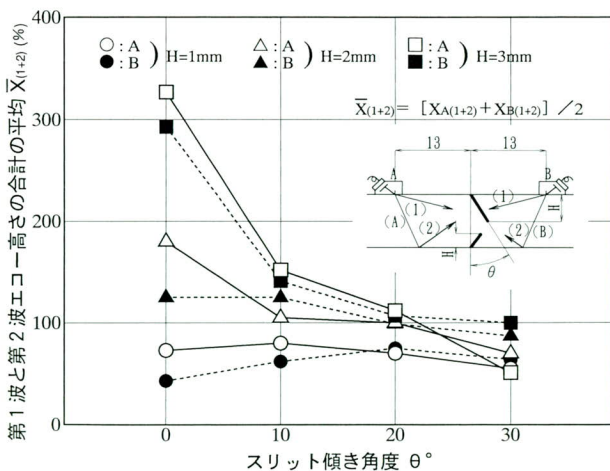


図-10 両側探傷における「第1波と第2波エコー高さの合計 $X_{(1+2)}$ 」の平均 $\bar{X}_{(1+2)}$ とスリットの傾き角度 θ の関係

波のみを用いて探傷した結果、階段の高さ $K = 3 \text{ mm}$ まではエコー高さと階段の高さ K は比例関係にあるが、 4 mm 以上ではエコー高さはほぼ一定となる。

言い換えると、探触子距離 $Y = 15 \text{ mm}$ ではきずの深さが 2 mm 以上なのか 2 mm 未満なのかの判定ができ、 2 mm 未満での深さの定量予測が可能であるが、 2 mm 以上のきずの深さを定量的に推定できない。しかしながら図-5に示したように探触子距離を変化させることにより、縦波屈折角が変化することを利用して、任意に判別可能深さを変化させることが可能と思われる。現在、対比試験片による追加試験と実疲労試験片による試験を予定しており、任意の限界判別深さでの探傷が可能な方法の開発に取り組んでいる。

6. Uリブ突合せ溶接継手のルート溶込み不足の定量的な超音波探傷法

図-1に示したUリブの突合せ溶接継手のルート部の溶込み不足による断面欠損率を、図-8~9の[1]式から求め、破面試験から求めた溶込み不足値と対応させるように補正した。第1波と第2波のエコー高さの和 $X_{(1+2)}\%$ と溶込み不足による断面欠損率の関係式は

$$P = 0.36 X_{(1+2)} + 9.2 \quad [2]$$

図-12に、[2]式より求めた断面欠損率 P と破面試験から求めた溶込み不足による断面欠損率 G との関係を示した。相関率は 0.93 である。

7. クリーピング波探触子を用いた定量的な超音波探傷法施工手順と要領

本超音波探傷法は板厚 12 mm 以下で、検出すべき、きずが板厚に直角な面状傷の場合に適用する。

適用する場合は下記の手順と要領による。

- ①適用すべき板厚毎に深さ $1 \sim 2 \text{ mm}$ ピッチで孔明け加工した $1 \text{ mm} \Phi$ 横穴試験片を作成する
- ②適用すべき板厚と継手形式および検出すべき面状きずをもつ擬似試験体を作成する。
試験体の表面は被探傷物の表面状態と同一とする。
また面状きずはその断面欠損が少なくとも、 25% 、 50% 、 75% となる3点程度の断面欠損率のきずを持つことが必要であろう。
- ③用意したクリーニング波探触子の固有性能を把握する。特に探触子距離と第1波と第2波縦波の屈折角

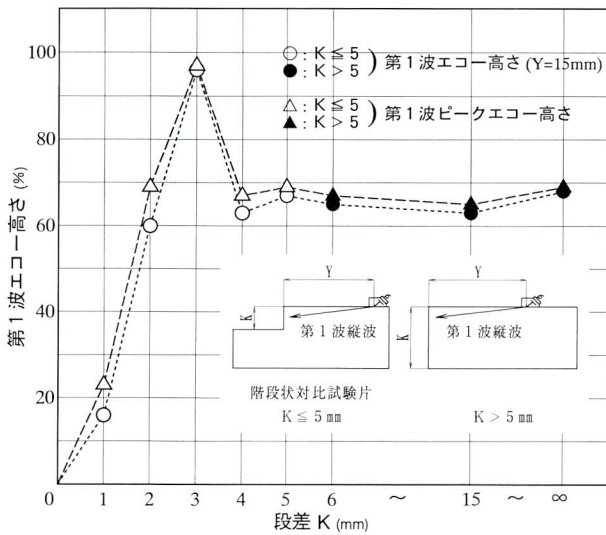


図-11 反射面の深さ(段階K)と第1波エコー高さの関係

の関係を求めておく(図-5参照)。

- ④横穴試験片を用いて、第1波と第2波のエコー高さの和と横穴と探触子の距離との関係図を求める。この図を用いて、第1波と第2波のエコー高さの和と断面欠損率とが比例関係となる探触子距離を求める(図-6参照)。
- ⑤擬似試験体を用いて、第1波と第2波エコー高さの和と断面欠損率の関係を求める(図-7, 図-8および図-9参照)。
- ⑥Aスコープにおける多数の反射エコーのうち、正確にどれが第1波および第2波のエコーなのかを、超音波探傷の伝播経路を基に、ビーム路程から確定しておくことが必要である。

その際、当然のことながら横波と縦波の音速の違いを考慮してビーム路程を計算することが必要である。

8. おわりに

限定した板厚の、限定した継手に対して、品質上重要でかつ特異なきずを定量的に探傷する新しい超音波探傷法を開発し、それらについて報告した。

筆者らは、一般に投影平面画像しか得られない放射線透過試験よりも、超音波の伝播経路を変えることにより比較的任意の方向から探傷でき、3次元的な位置情報が得られ、リアルタイムに結果が分かる超音波探傷法の方が優れた非破壊検査方法だと考えており、工場板継溶接ラインへの超音波自動探傷法の適用に関する研究に積極的に取り組んできた。しかしながら、ある一つの超音波

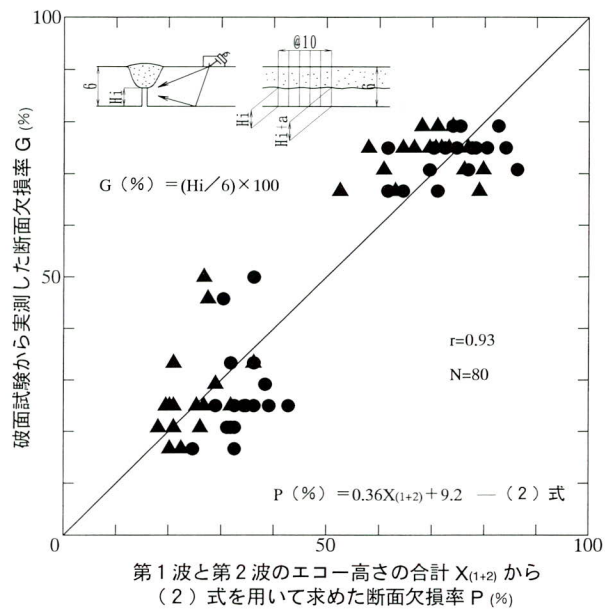


図-12 超音波探傷推定断面欠損と破面試験断面欠損率の関係

探傷システムが、全ての溶接継手、全てのきずの探傷に有効であるという考え方、またコンピューターを用いてデータをブラックボックス的に処理して結果だけしか出力しない超音波自動探傷システムには疑問を持っている。

超音波探傷法は超音波の特徴を最大限に活用し、高価なハードに頼るのではなく、限定した溶接継手を、その継手において重要かつ特異なきずの検出を行うことを重視し、施工手順と要領およびその超音波探傷法の限界を明確にして行うべきであると考えている。

溶接時および供用中の損傷等に発生するあらゆる欠陥、例えばブローホール、パイプ、融合不良、溶込み不足、高温割れ、低温割れおよび疲労亀裂等を全てを同等の検出精度をもって検出することは、現状では技術的にも不可能であり、また可能としても経済的に成り立つものではない。

最近の溶接技術および溶接管理の著しい進歩の結果、施工保証の基では発生し得ない欠陥、溶接施工条件のばらつきによって発生し得る欠陥および、決して許容できない欠陥等を予測、分類して、その継手に対して非破壊検査のターゲットを絞ることは可能となってきた。その条件の下なら、超音波探傷により断面欠損としてのきずの定量的な検出も可能となると考えた。

本提案はこれらの考え方にに基づき、クリーピング波探触子を用いて断面欠損を定量的に求める超音波探傷法を紹介した。今後更に、工場溶接、現場溶接および供用中

の橋梁部材の損傷調査等に適用できるように、対比試験体および擬似欠陥試験体等を用いて十分なデータ収集と分析を行うつもりである。関係各位の御批判を仰ぎたい。

最後に、クリーピング波探触子を用いた定量的超音波探傷法を開発するに当り、(株)アスペクトの久下幹雄氏、日本クラウトクレーマー(株)顧問の白岩俊男博士より、御指導と御助言を頂いた。また、東北大学三原助教授および古川助手にはクリーピング波探触子を用いた超音波の可視化写真撮影をして頂いた。ここに、誌上を借りて深謝する次第です。

<参考文献>

- 1) 202小委員会：クリーピング波探触子の性能測定方法と使用方法に関する提案，NDI資料21223，S 63. 11. 24

- 2) 岩本他：SH波およびクリーピングウェーブによる溶接部の超音波探傷，NDI資料21432，1993. 7. 15
- 3) Rontgen Technische Dienst bv：CREEPING WAVE ULTRASONIC PROBES，QUALITY SERVICE，1988
- 4) 清田他：クリーピングウェーブとその応用（1），NDI資料2631，S 57. 9. 9
- 5) 高橋：クリーピングウェーブ探触子の指向性に関する問題点，NDI資料21448，1994. 5
- 6) 鋼橋技術研究会非破壊検査適合性研究部会：板継ぎ溶接継手への自動超音波探傷検査の適用に関する研究，1995. 3

1997. 10. 31 受付

グラビア写真説明

(仮称) 相鉄・横浜高島屋共同ビル新築工事

横浜駅で電車を降り、大勢の人達の行き交う地下通路を抜けて西口に出ると、目の前に巨大なビルが立ちはだかります。淡いベージュとグレーの色調は、落ち着いた雰囲気を出し、高く垂直感を感じさせる姿は新しい横浜の今後を指向しているように思えてきます。昭和30年代、駅前には数軒の建物のみ、まだ砂利置場さえあったという話を聞いた事がありますが、駅前をとり囲むように建設された現在の高層ビルやデパートを見る限り、当時の状況を思い起こすことは困難です。

かつての横浜から連想する言葉を、思いつくまま上げてみますと“港町山下公園、港の見える丘、中華街、日本近代文明の発祥地、赤い靴、しゅうまい”等々でしょう。然しながら横浜もそのイメージを着々と変えつつあります。今、誰もが最初に上げるのはベイブリッジであり、MM21地区の近代的超高速ビルの建つ美しい町の姿です。情緒あふれる港町から近代的な国際都市へ変貌しつつあると言っても良いでしょう。当ビルもその役割の一角を果たすようになるに違いありません。

(西原)

(仮称) 下飯田駅上家等工事（相模鉄道いずみ野線）

本工事は、相模鉄道がいずみ野線を湘南台まで延伸する為に建設したものであり、最初の新駅となるものです。これまでの駅のホーム上家のスタイルは、鉄骨でT型あるいは門型に組み、これにスレートを張るといったのが一般的でした。然し、人々の要求はホーム上家のスタイルにも目を向けるようになってきたのでしょうか。本駅は、そうした人々の要求に答えるべく全く異なった発想に立っています。H型鋼を楕円形に曲げ、これを構造材にしてホームに柱が全くない構造とし、更にこの構造材に飾り穴を配し斬新で近未来を思わせるものとなりました。ホーム上家も、これからは、単に風雨をしのぐだけのものからその町にふさわしいデザインを採り入れ、更に防音、防震対策も施して、文化的、機能的にも、町の中に溶け込んでいくようなものになっていくのでしょうか。

(西原)