

(別紙 1)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書概要版作成要領

- (1) 研究課題名： 鋼床版のデッキプレートと U リブとの溶接部に発生する疲労クラックの高精度検査システムの開発
- (2) 研究期間 (元号)： 平成 25 年-平成 26 年
- (3) 代表者 (所属機関・職名)： 白旗弘実(東京都市大学・准教授)
- (4) 研究代表者 (所属機関・職名)： 白旗弘実(東京都市大学・准教授)
- (5) 分担研究者 (所属機関・職名)： 三木千壽(東京都市大学・教授)
- (6) 補助金交付総額 (円)： 44,200,000

(7) 研究・技術開発の目的

鋼橋の鋼床版はコンクリート床版と比較して軽量であり、長大橋梁および空間の制約のある都市内などの高架橋に多く適用されてきた。鋼床版はデッキプレート、縦リブおよび横リブより構成される。デッキプレートとは、道路舗装の下にある鋼板であり、輪荷重がほぼ直接載荷される。縦リブと横リブはデッキプレートを補剛するための部材であるが、縦リブは U 型形状をした閉断面のものが多く用いられている。鋼床版は比較的薄い板を溶接して製作されるが、疲労損傷の問題が指摘されている。本研究は疲労き裂の中でもデッキプレートと U リブに生じるき裂を対象として、高精度に検出することのできる非破壊評価システムを構築するものである。

(8) 研究・技術開発の内容と成果

対象とする疲労き裂は U リブの溶接ルート部に発生し、デッキプレートを進展するもの、溶接ビードに進展するものの 2 種類に分けられる。いずれの場合においても、U リブは閉断面であるので、肉眼で外から検出できるものではない。そこで非破壊検査手法を適用する必要が生じる。非破壊検査手法の中でも超音波探傷を適用する。最近になって、フェーズドアレイと呼ばれ、小さな圧電素子を密に配置したプローブが使われるようになってきている。圧電素子の励振時間を電子的に制御することで、入射波の角度を変えたり、任意の点に集束させたりすることが可能である。しかし、既存のフェーズドアレイ超音波探傷システムを適用するだけでなく、鋼床版溶接部の特性に合わせたシステムにすることが重要である。

本研究では、下記の 5 項目に分けて鋼床版探傷システムの構築を行った。

1) フェーズドアレイ超音波探触子の条件の選定

フェーズドアレイ超音波探触子の性能に影響を与える要因として、公称周波数、素子数、素子の配置があげられる。超音波探傷において、異なる二点を二点と識別することのできる最小距離を分解能と呼ぶ。分解能は入射波の波長に依存する。周波数が高いほど波長は短くなるので、分解能は高くなる。周波数が高くなると距離による減衰が大きくなるなどのデメリットもある。

超音波を受信することのできる範囲を開口というが、開口が広いほうが散乱波を受信しやすくなるので、検出性能は高くなる。フェーズドアレイ超音波探触子では、素子数と関連があることになる。アレイ探触子では入射波の波面を滑らかにするには素子のサイズは波長の半分が好ましいとされている。半波長よりも素子のサイズが大きいと、サイドローブと呼ばれる副軸が発生するといった問題がある。

ここでは 5MHz で 64 素子より構成されるフェーズドアレイ探触子および 10MHz で 32 素子構成のフェーズドアレイ探触子を使用した。5MHz の探触子では開口を大きくとることのメリットを検討するため、10MHz の探触子では探触子を溶接部にできるだけ近づけられるように、との配慮で選定した。5MHz64 素子の探触子では、溶接部から遠い素子ではき裂からのエコーが得られないこと、試験体の平滑度の影響を受けやすく 10MHz32 素子のほうが扱いやすいことがわかった。

## 2) フェーズドアレイ探触子の制御方法の検討

探触子の制御方法では、どのような位置に探触子を配置してどのように入射波の条件を設定するかといった項目を検討する。本研究ではデッキ進展き裂だけではなく、従来型の超音波探傷では検出することが難しかったビード進展き裂の検出も検討対象としている。

デッキ進展き裂およびビード進展き裂に対してはそれぞれデッキとリブにフェーズドアレイ探触子を配置することが考えられる。探傷にかかる時間を短縮するためには、これらデッキおよびリブに配置した探触子から同時に波形を収集する必要がある。つまり、マルチフェーズドアレイ探傷ができることが望ましい。当初は 64 素子の探触子 2 個を使うことも念頭に入れていたので、合計で 128 素子の送受信が可能なフェーズドアレイ超音波探傷器が必要であると判断された。

波形データの収集法としては、探傷器内で励振の時間を設定し、入射波をフォーカスあるいは可変角で探傷する方法、および一つ一つの素子で送受信し、得られた波形をあとから合成する方法が考えられた。前者を従来型フェーズドアレイ探傷、後者をフルマトリクスキャプチャと呼ぶ。フルマトリクスキャプチャは、超音波探傷は弾性波動であり、あとから線形的に重ねあわせても従来型探傷波形が再現できるという考えに基づいている。

## 3) 高速データ収集装置の開発

対象としているデッキプレートとリブとの溶接部は鋼床版システムにおいてももっとも溶接長の長い溶接部である。効率的な維持管理を行うには、迅速であることが重要であることは明らかである。現行のシステムでは 1 日に 100m の溶接線を検査することができるようである。現行の作業効率を保つために 2,3cm/秒の走査速度を目標とした。

対象とする溶接部は現場では上向きでの探傷となる。探触子を安定した上向きで抑えるには特殊な装置が必要でこれを開発する。

従来型フェーズドアレイ探傷においては、上記とほぼ同じ 2cm/秒のデータ収集は可能であった。しかし、フルマトリクスキャプチャでは、1 つで 1000 サンプリングの波形を 64 × 64 パターンの送受信の組み合わせで収録するならば、1 箇所約 20 メガバイトのデータが送受信されることになる。データはコンピュータと探傷器の間を、LAN ケーブルを介して通信しているが、このスピードがボトルネックとなってしまう、1 箇所のデータ収集に 6 秒がかかることとなった。

## 4) き裂の画像化手法の開発

得られた波形データをもとに疲労き裂画像の再構成を行う。き裂の画像化に際しては、開口合成法を適用する。超音波探触子からの入射波は幅を持っているため、たとえば底面近傍にある反射源からエコーが得られたとしても入射幅の中で反射しあう反射経路となる場合があり、反射源位置を正確に推定できなくなる可能性がある。開口合成法では、入射波は幅を持っているものとして取り扱っており、反射経路もいくつかのパターンにあてはめて考えることができる点で従来の画像表示法と比べてもすぐれている。点音源である疲労き裂先端もエコーによる像が重ね合わさる形になり強調されるようになる。

開口合成法では、画像再構成領域を設定し、領域内を格子分割する。デッキ-U リブ溶接部においては格子の寸法は 0.2~0.5mm 程度とした。探触子の位置と入射波の進行方向および入射波のビーム幅を考慮して、ビーム幅の範囲で反射する経路を数パターン用意し、そ

のパターンに合致したエコーを格子点の画像値として合算していく。

ここで用いるフェーズドアレイ探触子には、入射波を溶接ルート部に効果的に集束させるために、アクリル製のくさびを用いることになる。アクリルと鋼材界面において屈折が生じるため若干計算が複雑になるが、開口合成法による画像化プログラムを作成した。

#### 5) 疲労き裂の高さおよび溶接線方向の寸法の判定

き裂の先端は点音源であり、そこからは無指向性の波が散乱されることになる。開口合成法では、多数の波を重ね合わせるため、点音源が重ねあわされ、強調されることになる。再構成像が強調される箇所がき裂先端であり、き裂の高さを推定することができる。特にフルマトリクスキャプチャでの画像化では解像度が高くなることが示された。

溶接線方向の寸法を判定するために圧電素子が平面配置されたフェーズドアレイ探触子(プラナー型フェーズドアレイ探触子)の使用も検討していた。しかしながら、開口合成プログラムの作成および実験が間に合わず、研究期間内での検討はできなかった。

今後の課題としては、プラナー型フェーズドアレイを用いた溶接線方向のき裂寸法の判定、画像化の高速化、スキヤニングの高速化があげられる。ここで開発したプログラムを3次元に拡張することおよび処理の並列化などで速度向上がはかれるものと考えている。これらの検討は研究期間がすぎても続ける予定である。スキヤニングの高速化はデータ通信の高速化と関連がある。

#### (9) 研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表: 刊行書籍又は雑誌名(雑誌の時は、雑誌名、巻数、論文名)、刊行年月日、刊行書店名、執筆者氏名

- 第 69 回土木学会年次学術講演会, I-163, マルチフェーズドアレイ探触子を用いた鋼床版疲労き裂検出システムの構築, 平成 26 年 9 月, 白旗弘実, 三木千壽
- 第 70 回土木学会年次学術講演会, フェーズドアレイ探触子を用いた鋼床版ビード進展疲労き裂の検出, 平成 27 年 9 月(提出), 白旗弘実, 三木千壽, 上田竜輝

#### (10) 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

特許の出願はなし。

#### (11) 成果の実用化の見通し

研究期間中に数回、大型疲労試験体で探傷実験することができた。試験体は長さ 5m, 幅 2m ほどで縦リブ 3 本および横リブ 3 本がある構造となっている。縦リブおよび横リブの大きさや間隔は実物と同じものとなっている。この試験体で、疲労き裂があると思われる箇所を中心に探傷実験を行った。

実験は上向きで行った。き裂があると思われる箇所は縦リブと横リブの交差部であり、交差部にフェーズドアレイ探触子を可能な限り近づけて、き裂のないと思われる箇所までの 100mm 程度を探傷した。スキヤナは上向きの使用にも十分に耐えられるものであることが確認された。また、き裂からの指示と思われるエコーを受信することもできた。

#### (12) その他