

鋼橋溶接部内部欠陥の検査法に関する調査

研究予算：運営交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 15～平 18

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁）

研究担当者：村越 潤、高橋 実

【要旨】

鋼橋溶接部の非破壊検査法として、超音波探傷法（UT）が用いられているが、より一層の品質管理の向上の観点から、機器や検査技術者の技量の影響を極力抑えた客観性、信頼性の高い探傷技術が求められている。本調査では、疲労損傷の報告されている鋼製橋脚隅角部について、主たる損傷要因である溶接欠陥を対象として、各種超音波探傷法の適用の可能性、適用方法について実験的検討を行った。その結果、製作時の検査を対象として、現在一般的に使用されている手動の UT（MUT）、自動の UT（AUT）及び検出性能の向上が期待される新技術による UT（フェイズドアレイ法等）について、内在欠陥の検出性能の違いを明らかにするとともに、フェイズドアレイ法による探傷法を提案した。また、既設橋脚の調査を対象として、汎用型の MUT について、溶接内部の未溶着欠陥に対する検出性能を明らかにし、探傷時の留意点をとりまとめた。

キーワード：鋼製橋脚隅角部、溶接欠陥、超音波探傷法、性能確認試験、フェイズドアレイ法

1. はじめに

鋼橋溶接部の非破壊検査法として、超音波探傷法(UT)が用いられてきているが、より一層の品質管理の向上の観点から、機器や検査技術者の技量の影響を極力抑えた客観性、信頼性の高い探傷技術が求められている。鋼製橋脚隅角部（以下、隅角部）の疲労損傷については、これまで各種の調査検討により、損傷原因の推定等が行われ、厳しい活荷重実態や設計、製作上の各種要因と損傷との関係について明らかにされつつある。特に柱、梁のフランジ-ウェブ間の溶接線が交差する角部(3 溶接線交差部)では溶接が難しい接合面が生じることから、設計、製作時に板組や溶接手順に配慮するとともに、適切な非破壊検査法により溶接品質を確保することが求められている。

隅角部のように立体的に組み立てられた部材の溶接継手においては、放射線透過試験の適用が困難なため、手動による超音波探傷（MUT）が一般的に用いられてきているが、これまで破壊試験等による信頼性を確認するだけの十分な資料が必ずしも得られているわけではない。MUT では検査技術者の技能に依存する部分が大きく探傷結果の記録性や再現性に乏しいこと、さらに隅角部の角部近傍は構造的に複雑であり検査自体が難しいこと等を踏まえると、各種の超音波自動探傷装置の適用の可能性を検討するとともに、検出性能に優れた探傷法を明らかにすることが必要と考えられる。一方、他の鋼構造分

野では、検出性能・精度の向上や検査の効率化等の観点から、フェイズドアレイ法など新しい探傷技術の実務への適用検討が進められており^{例えば1)}、橋梁分野への活用も考えられる。

このような背景のもと、本調査では、まず、①隅角部を対象に、探傷条件に影響を与える構造諸元（板厚、板組等）を調査するとともに、既存の溶接施工試験結果等を踏まえ、隅角部のきずの発生傾向を整理した。また、これらのきずに対して、仕様・機能の異なる各種 UT の適用の可能性について整理した。次に、②製作時の検査を対象として、汎用型の MUT、AUT 及び検出性能の向上が期待される新技術による UT（フェイズドアレイ法等）について、欠陥を内在させ対象構造を模した試験体による性能確認試験を実施し、欠陥検出性能の評価を行った。フェイズドアレイ法については一次元配列の探触子の設計・製作を行うとともに、性能確認試験結果を踏まえ、同探触子の特徴を最大限活用できる内部きずの走査法の検討を行った。さらに、③既設橋脚の調査を対象として、汎用型の MUT について、既設橋脚を模した試験体及び供用中の実橋脚隅角部に対する探傷試験を行い、主に検査技術者の技量の影響に着目し溶接部の未溶着に対する検出性能の評価を行った。

本調査の実施に当たっては、研究を効率的に進めるため、東京工業大学、道路関係 4 公団(研究当時)・3 公社、(社)日本橋梁建設協会、(社)日本鉄鋼連盟、(社)非

破壊検査工業会と共同研究（平成 14～15 年度）²⁾ を実施した。

2. 隅角部の板組・板厚、溶接きずの調査

2.1 隅角部の板組・板厚

探傷法を検討する上で重要となる鋼製橋脚隅角部の板組の種類および板厚の分布の調査を行った。調査は、道路関係 4 公団(研究当時)・3 公社において、平成 14 年度末時点で建設計画中の鋼製橋脚を対象とした。集計された鋼製橋脚の柱本数 459 本の内約 9 割が矩形断面の橋脚であった。また、矩形断面の橋脚の板組としては、そのほぼ全数 (98%) が、柱フランジ、梁フランジ、ダイアフラムの外側にウェブが取付く板組(WW タイプ)であった(図-1、図-2 参照)。

隅角部ウェブの板厚分布を図-3 に示す。探傷を行いやすいウェブ外面からの非破壊検査を想定した場合には、この範囲の板厚をカバーできる探傷法を選定する必要がある。後述する実験では、これらの板組・板厚の情報を基に試験体を製作した。

2.2 隅角部の溶接きず

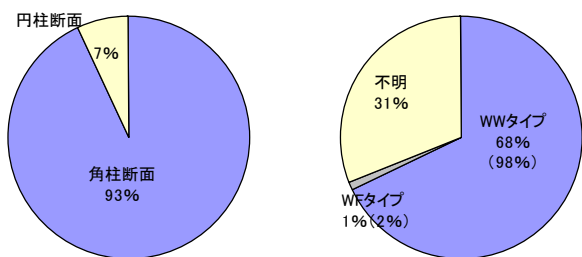
写真-1 に、従来の標準的な溶接方法により製作された溶接施工試験体より得られた断面マクロ写真の例を示す³⁾。写真中には、断面マクロ試験から推定される溶接状況及び溶接順序を示すが、溶接条件によっては、3 溶接線交差部ではこのような複雑な形状寸法のきずが発生する可能性があることが示唆される。これら既存の溶接

施工試験結果や隅角部の溶接方法より発生する可能性のあるきずを抽出・分類・整理した。具体的には、十分な施工管理の下に製作した場合でも、溶接施工時の微妙な条件（溶接トーチの運棒、前パスの積層形状、清掃状態など）の変化によって、偶発的に発生する可能性があるきずを対象として整理した。また、偶発的に発生する可能性は小さいが、内在した場合疲労への影響が大きいと考えられる溶接割れも併せて整理した。以上の結果については、実きず試験体製作時のきずの内在に反映した。

3. 超音波探傷法の隅角部への適用上の課題

従来より広く用いられている一探触子パルス反射法では、反射指向性を持つ傾きのある面状きずや、余盛近傍のきずについては検出が難しい場合が多い。特に隅角部の 3 溶接線交差部については、溶接形状やきずの入り方が一般的な突合せ溶接継手等と比較して複雑であり、ウェブ面からの垂直探傷を除き、構造上溶接ビードに対して直角方向からの探傷が困難である。このため、反射エコーの経路が予測出来ない場合が多く、傾きのある面状のきずの検出や、形状エコーときずエコーの分離が難しくなる。このため、検査技術者としては溶接の形状ときずの入り方を三次元的に頭の中でイメージするなどの技量が必要となる。結果的に、検出性能は突合せ溶接継手等と比較して、検査技術者の技能や隅角部の溶接方法や内在欠陥の知識、経験に大きく左右されるものと推測される。

このような隅角部の溶接部における面状きずの検出に



() 内は、不明を除いた場合の比率

(a) 円柱・角柱比率

(b) 角柱の板組別比率

図-1 鋼製橋脚の構造に関する調査結果 (調査数: 459 本)

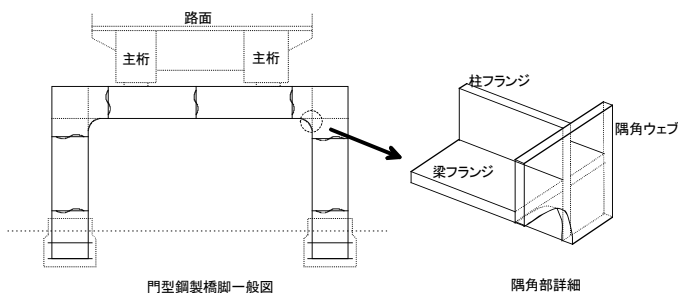


図-2 鋼製橋脚の断面形状(角柱)と隅角部の構造(WW タイプ)の例

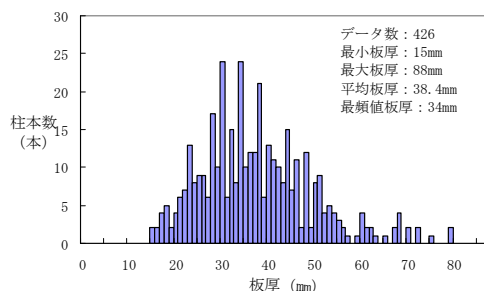
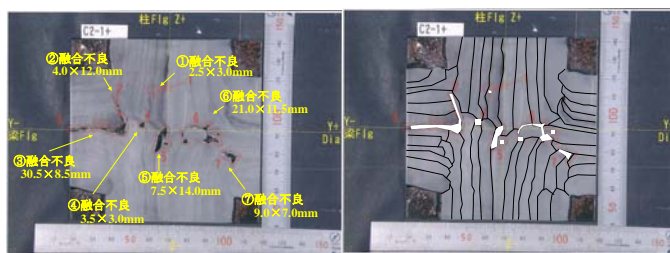


図-3 矩形断面の鋼製橋脚における隅角部ウェブの板厚分布



(a) 断面マクロ写真

(b) 想定される溶接状況および溶接パス

写真-1 隅角部を模した試験体の溶接施工試験結果の例 (ウェブ面位置で平行に切削した断面写真⁶⁾)

は、複数の探触子を用いたり、探傷角を変えることにより反射波を受信する探傷技術（フェイズドアレイ法等）や、きず端部からの微弱な回折波を受信する探傷技術（TOFD 法等）の適用が考えられる。また、形状エコーときずエコーの判別に関しては、超音波ビームの拡がり制御する探傷技術（集束型探触子を用いた垂直探傷、超音波ビームのフォーカシング等）や、開口合成法によるきずエコーの強調処理技術の適用が考えられる。図-4 に、検出性能の向上が期待される探傷技術の例を示す。なお、これらの技術は原理的にはきずの検出性能の向上が図れるが、それぞれ長所・短所があり、机上検討では優劣を評価することは困難である。本調査では各種探傷技術の中から、他分野の動向も踏まえ将来性が期待されるフェイズドアレイ法を主な対象とし、性能確認及び探傷法の検討を行った。また、同法以外の探傷法についても、隅角部の探傷に適用の可能性が高いと考えられるシステムを選定し、同等の条件により性能確認を行った。

4. 隅角部製作時の検査を対象とした探傷法の検討

製作時の検査を対象として、汎用型の MUT、AUT 及び検出性能の向上が期待される新技術による UT（フェイズドアレイ法等）について、欠陥を内在させ対象構造を模した試験体による性能確認試験を実施し、欠陥検出性能の評価を行った。本調査において探触子の設計・製作を行ったフェイズドアレイ法以外の探傷法については、

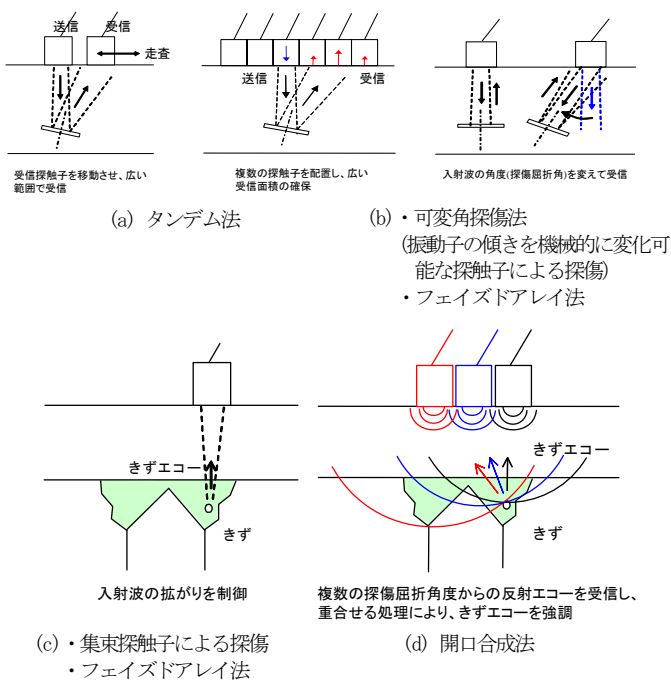


図-4 検出性能の向上が期待される探傷技術の例

(社) 非破壊検査工業会の会員会社等から検出性能が期待される探傷法を公募等により選定した（以下、参加探傷システムと呼ぶ。）。

4.1 試験体

性能確認試験に用いた試験体は、機械加工などによる人工きずを有する単純な形状の基礎試験体計 14 体、人工きずを有する隅角部を模した試験体計 10 体(4 体(t=40mm)、4 体(t=20mm)、2 体(t=80mm)、t: 板厚)、実きずを有する隅角部を模した試験体計 6 体(4 体(t=40mm)、1 体(t=20mm)、1 体(t=80mm)、t: 板厚)の 3 種類である。基礎試験体では近接した複数のきずエコーの分解能や傾きを有するきずエコーの検出性能等の性能評価を、人工きず試験体では隅角部における溶接形状と板組の幾何学的な形状や、形状エコーの影響を受ける場合の検出性能の評価を行うこととした。また、実きず試験体では探傷条件を再現するとともに、試験要領を作成し結果の評価に対し客観性が保証されるよう配慮し、内部きずの検出性能の評価を行うこととした。

図-5 に例として板厚が 40mm の場合の実きず試験体の寸法形状を示す。実きず試験体には、製作の過程で人為的に溶接条件や溶接トーチの狙い位置などを変えることにより、溶接部内部にきずを内在させている。きずについては、探傷終了後、破壊試験により、寸法形状・位置・種類を確認した。具体的には溶接線に対して直角方向に 1mm ピッチで切削を行い、各切削断面のマクロ写真を撮影した。ただし、3 溶接線交差部は、主要な探傷面となる柱・梁ウェブ面と平行に 1mm ピッチで切削(ウェブ面近傍は 0.5mm ピッチ)した。

4.2 探傷システムと性能確認試験方法

表-1 に参加探傷システム（探傷装置と検査技術者の組合せ）を示す。計 14 システムが試験に参加した。このうち、探傷システム①は本調査で設計・製作を行ったフェイズドアレイ法である。その他の参加探傷システム

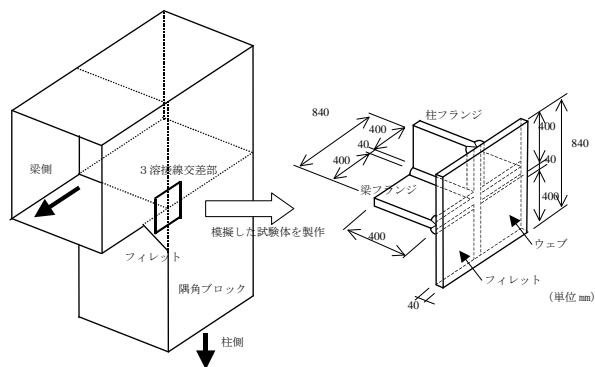


図-5 実きずを有する隅角部を模した試験体の形状寸法

には、公募により選定したもの以外に、MUT（検査技術者の条件：探傷システム⑥（熟練）、探傷システム⑦（一般）、探傷システム⑭（一般、ただし、熟練の検査技術者により実地指導を受けた検査技術者）も比較のため含めた。

参加者には土木研究所実験施設に設置した上記の3種類の試験体を所定の時間内に、定められた順番で同一条件下で検査し、検査データを2週間以内に提出してもらった。全探傷システムによる探傷終了後、提出された探傷データと破壊試験による実きずデータを比較し、各探傷システムの検出性能の確認を行った。試験に当たっては、探傷時間内に、基礎試験体の横孔3φを基準感度に設定し、受信エコー高さがL/2線（基準感度-18dB）を越えるものをきずとして記録、提出させた。

性能確認試験は、1)フェイズドアレイ法の基本性能の確認(基礎試験体14体)、2)各種探傷法の検出性能等の確認(人工きず試験体7体、実きず試験体2体)、3)探傷法の改良後の検出性能(実きず試験体6体)、現場での適用の可能性等の確認の3段階で行うこととした。

4.3 検討対象としたフェイズドアレイ探傷装置

4.3.1 探傷装置

写真-2にフェイズドアレイ探傷装置を示す。探傷器、探触子及び処理用ノートパソコンで構成されている。探傷器には市販器を用い、探触子には対象板厚等を考慮し

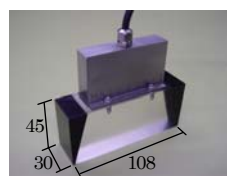
て、集束深さ範囲20mm～80mm、最大偏向角度±45度を条件として、これを満足する探触子（周波数3.5MHz（鋼中）、素子数64素子、素子配列ピッチ1mm、素子幅10mm）を設計、製作している。ある程度広い範囲の探傷屈折角を1個の探触子でカバーするために、屈折角度に応じて、垂直および斜角接触用の音響遅延材をそれぞれ取り付けた(写真-2参照)。

4.3.2 探傷方法

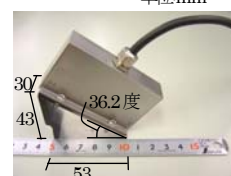
フェイズドアレイ法では任意に入射角（屈折角）および集束位置を変更可能なため、対象とする構造・探傷面等に応じて、超音波ビームの電子走査（制御）方法を検



(a) 探傷装置外観写真



(b) 垂直接触用音響遅延材付き探触子



(c) 斜角接触用音響遅延材付き探触子

写真-2 フェイズドアレイ探傷装置の外観

表-1 参加探傷システム

○：探傷実施

探傷システム	探傷技術	探触子 走査	データ 保存	周波数	探傷屈折角	3溶接線 交差部	十字 継手部
①	フェイズドアレイ法	手動走査	自動保存	3.5MHz	-45°～+45° 40°～70°	○	○
②	フェイズドアレイ法	手動走査	自動保存	5MHz	0° 45°	○	○
③	一探触子パルス反射法	自動走査	自動保存	5MHz	70°	○	○
④	一探触子パルス反射法	自動走査	自動保存	5MHz	0°	○	
⑤	TOFD法	手動走査	自動保存	5MHz	45°+45°		○
⑥	一探触子パルス反射法	手動走査	手動保存	2MHz 5MHz	0° 70°	○ ○ ^{注)}	○
⑦	一探触子パルス反射法	手動走査	手動保存	5MHz	0° 70°	○ ○ ^{注)}	○
⑧	一探触子パルス反射法	自動走査	自動保存	5MHz	0° 45° 70°	○ ○ ○	○
⑨	一探触子パルス反射法	手動走査	自動保存	5MHz	0°	○	
⑩	TOFD法	手動走査	自動保存	5MHz	32°+32°	○	
⑪	TOFD法	手動走査	自動保存	5MHz	60°+60°		○
⑫	一探触子パルス反射法	自動走査	自動保存	5MHz	45° 70°	○	○
⑬	タンデム法	手動走査	手動保存	5MHz	70°		○
⑭	一探触子パルス反射法	手動走査	手動保存	5MHz	0° 45°	○ ○	

注) ⑥、⑦の3溶接線交差部の斜角探傷は、梁フランジ、ダイヤフラム面（隅角部内面）からの探傷。
⑥、⑦以外はすべてウェブ外面からの探傷。

討、設定した。また、探傷時に同時に駆動させる振動素子は、探触子の中央部の探傷器の同時制御素子数である32素子とした。

図-6に本調査において採用したウェブ外面からの垂直探傷と斜角探傷の方法を示す。ウェブ外面からの探傷では、垂直接触用くさびを用いて、電子制御により屈折角を $-45\sim+45$ 度の範囲で2度ピッチにより変化させるとともに、探触子を機械的に走査した。また探触子の位置をずらし機械走査を複数回行うことにより、溶接部のある点に複数の角度から超音波の入射を行った。集束深さ位置については35mm~65mmまで10mmピッチで変化させている。斜角探傷では、斜角接触用くさびを用いて、電子制御により屈折角を40~70度の範囲で1度ピッチにより変化させるとともに、探触子を溶接線方向に機械的に走査した。

図-7にフェイズドアレイ法における3φドリル穴に対してエコー高さが6dBとなる超音波ビーム幅⁴⁾の実測値を示す。使用するフェイズドアレイ探触子については、簡易な数値シミュレーションを用いて、超音波ビームの入射角(屈折角)および集束位置におけるビームの集束状況を設計段階において計算したが、図より、概ね設計どおりに製造できていることを確認した。

4.4 欠陥検出性能評価方法

きず指示の領域と、破壊試験により得られた実きず領域の重なり具合を空間的に照合することにより、欠陥の検出性能を評価した。

欠陥の検出性能評価に際して、超音波探傷法の検出位置精度を考慮し、実きず領域に各断面の実きずの外形を外側へ10mm広げた範囲を用いることとした。評価指標には、文献5)を参考に検出された実きず数を検出すべき欠陥の総数で除した検出率と、未検出であったきず指示の数をきず指示総数で除した空振り率を指標とした。ここで、検出とは実きず領域 ± 10 mmときず指示がわずかでも重なる場合とした。空振りとはきず指示の領域内に実きず ± 10 mmが全く重ならない場合とした。検出すべき欠陥の長さは、 $t/6$ mm(t :板厚)とした。すなわち、板厚40mmの場合にはきず最大長さが6mm以上のきずとした。

ただし、これらの評価指標は検出性能を表現する指標にはなるが、例えば、きず指示領域を大きく評価した場合、未検出の実きずは見かけ上減少し、かつ空振りとなる指示個数が減る場合もあり状況によっては評価に際して誤解を招く危険性もある。そこで、フェイズドアレイ

法①については詳細検討として、数個のきずを例に、きずの位置、寸法形状ときずからのエコーの対応状況を直接比較し検出性能の確認を行った。なお、実きずの形状とエコーとの対応状況の三次元的な比較を試みたが、実きず自体が三次元でかつ非常に複雑に内在していることから対応状況を必ずしも明確に表現できなかった。このため、別途、今回設定した探傷方法により探傷裏面側の溶接ビード形状の探傷(画像化)、ビード形状との比較を行い、同法の適用の可能性の確認を行った。

4.5 試験結果と考察

ここでは板厚40mmの実きず試験体2体の性能確認試験結果(改良前)の一部を示す。

4.5.1 試験結果

図-8(a)、(b)に、それぞれ3溶接線交差部、十字継手部を対象とした場合における各探傷システム(横軸)

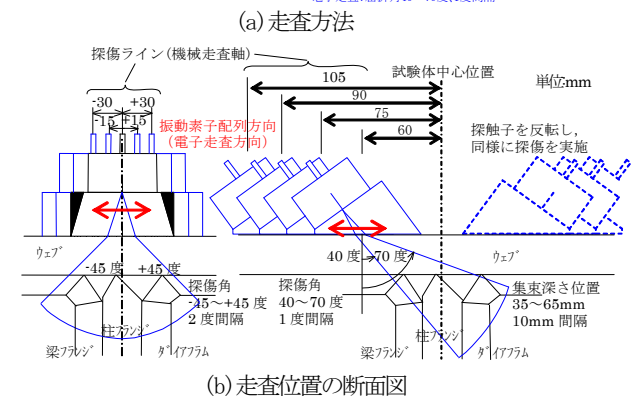
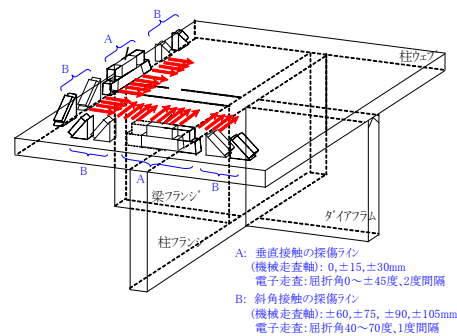


図-6 フェイズドアレイ探触子を用いた3溶接線交差部の探傷方法

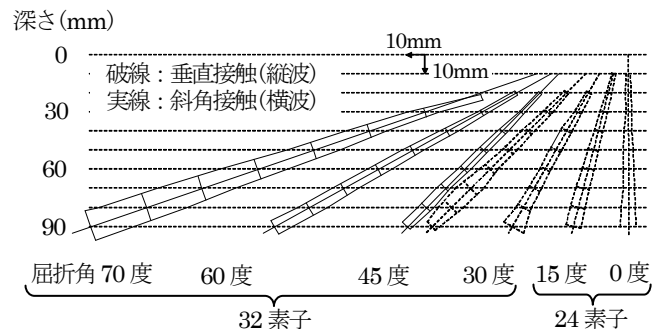


図-7 使用したフェイズドアレイ法の超音波ビーム幅

の検出率及び空振り率（縦軸）を示す。対象とするきず（寸法 6mm 以上）個数は(a)で 16 個、(b)の改良前で 12 個、改良後で 20 個である。同図中(b)のフェイズドアレイ法①の結果については、改良後(①')の値も示している。なお、①'については①とは別の実きず試験体を用いている。

表-2 に、試験体中の 3 溶接線交差部に対する個々の実きずの諸元に対するフェイズドアレイ法の検出性能結果を示す。表中の XYZ 軸方向長さとは、各軸方向に投影した最大長さを示している。また、表中のきず種別の記号 LF は融合不良、BH はブローホールを意味する。

図-8 および表-2 より、3 溶接線交差部では、検出率の最も高いシステムはフェイズドアレイ法であり、16 個中 13 個(検出率 81%)のきずが検出できており高い検出性能が得られていることがわかる。未検出の 3 つの実きずは、いずれも 3 溶接線の余盛近傍のきずで、一般的に、検出が難しいきずであるが、探傷位置によっては検出できる可能性もあったことを確認している。熟練技術者による MUT (探傷システム⑥、⑭) においても 16 個中 12 個(検出率 75%)のきずを検出しており、また、一般技術者による MUT との差が見られている。すなわち、適切な探傷が行われれば MUT においても高い検出性能(検出率 75%)が得られることがわかる。

一方、空振り率に関しては、図-8 より、フェイズドアレイ法 (35%) と比較して、熟練技術者での MUT (18%) の方が小さい。この件に関して、以下に考察する。図-9 に、試験体中の 3 溶接線交差部を対象として、フェイズドアレイ法①、各種 MUT 探傷システム (⑥、⑦、⑭) について、検出すべききずの最大長さを変化させた場合の検出率と空振り率を示す。また、図中に各探傷システムにおけるきず指示総数（ここでは長さ 6mm 以上のきず指示の総数を指す）を示す。図-9 より、対象とする実きず長さを小さくしていく場合、フェイズドアレイ法①では、検出率は大きく低下せずに、空振り率

表-2 3 溶接線交差部に対するフェイズドアレイ法の検出性能

試験体	きずNo	X方向長さ(mm)	Y方向長さ(mm)	Z方向長さ(mm)	きず種別	垂直接触	斜角接触	垂直+斜角
C1-40 板厚 40mm	きず3	10.8	4.8	17	LF	●	○	○
	きず5	12	18.9	14.3	LF	○	○	○
	きず14	19.6	27	17.8	LF	○	○	○
	きず23	7.9	24.9	7.5	LF	○	○	○
	きず25	13.1	3.2	11	LF	○	○	○
	きず34	13.6	6	0.8	LF	○	●	○
C2-40 板厚 40mm	きず38	15.2	5.4	0.8	LF	●	●	●
	きず2	12.2	1.5	15	LF	●	●	●
	きず10	8.1	18.6	5	LF	●	○	○
	きず11	6	7	1	LF	○	○	○
	きず28	8.1	4.7	6	BH	●	○	○
	きず30	7.8	6.1	9.5	LF	○	○	○
	きず32	1.3	8.5	0.5	LF	○	●	○
	きず36	10.3	4.2	14	LF	○	○	○
	きず42	7.2	2.5	4	BH	●	○	○
	きず45	16.3	2.1	0.5	LF	●	●	●

○：検出、●：未検出

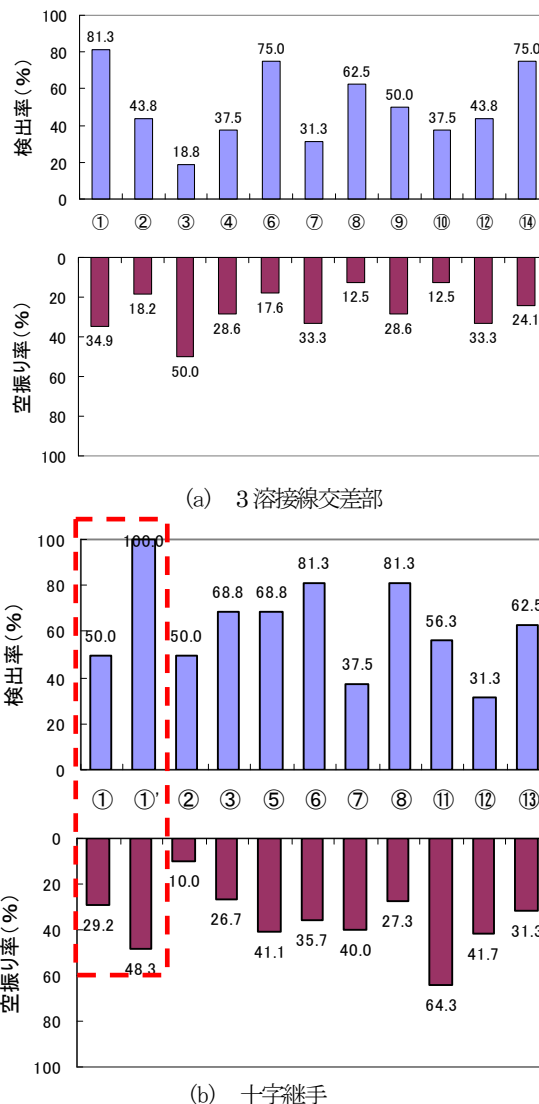


図-8 各探傷システム(横軸)の欠陥検出率及び欠陥空振り率(縦軸)

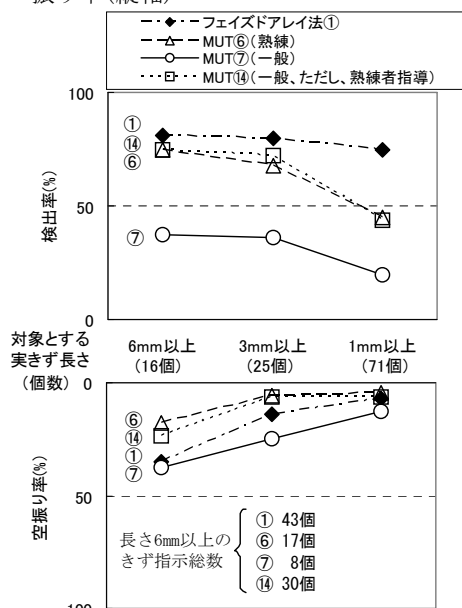


図-9 対象とするきず長さの違いによる検出率および空振り率の変化

は低下傾向にある。また、フェイズドアレイ法①は図-9により MUT の場合と比較して、きず指示総数が最も多い。以上より、フェイズドアレイ法①において空振り率が高くなった主な理由には、きず指示長さが実きず長さより大きめに計測されていることが考えられる。

十字継手では、フェイズドアレイ法の検出率は、改良前に50%であった。これは、当初、音響遅延材設計上のミスにより、探傷面側の斜角接触用音響遅延材の長さを109mm(改良後 53mm(写真-2(c)参照))としており、物理的に、超音波ビームが届かない探傷困難な領域が存在していたことによるものであった。音響遅延材の改良後では、検出率は100%に向上した。空振り率については、3 溶接線交差部の場合と同様の理由のため高くなったものと考えられる。

4.5.2 フェイズドアレイ法におけるビーム入射角ときずエコーの関係

検出されたきずのうち、発生部位や探傷面に対する反

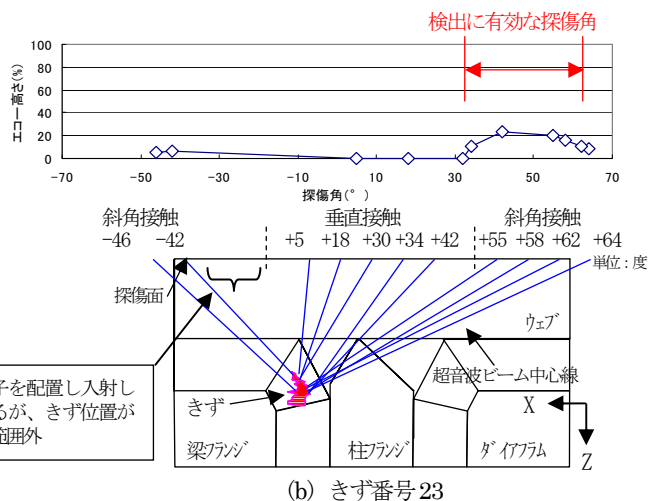
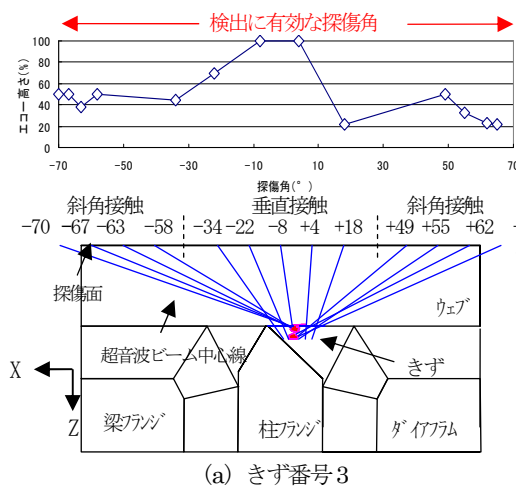


図-10 複数の角度で入射した場合のエコー高さ分布の例

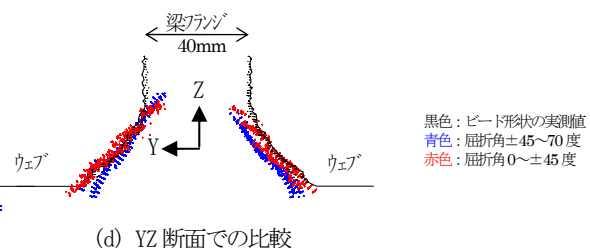
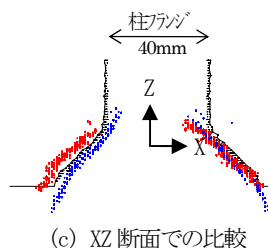
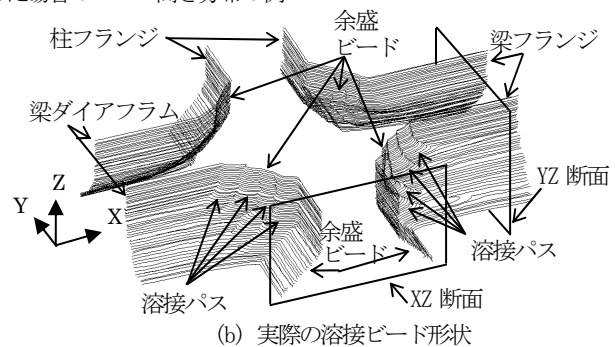
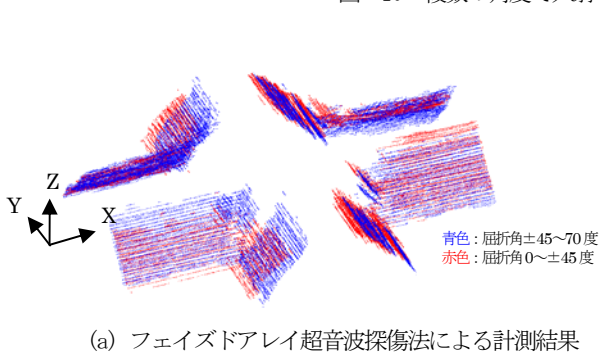


図-11 フェイズドアレイ法による3 溶接線交差部の溶接ビード形状の計測結果

果的であることが確認された。

また、図-11 に、3 溶接線交差部において、上記と同様の走査法によりウェブ面側から探傷した場合の裏面側の溶接ビード形状の計測データを画像化した結果を示す。図中(a)には、垂直接触用音響遅延材付き探触子による屈折角 0~±45 度の際の探傷結果を赤色の点で、また、斜角接触用音響遅延材付き探触子による屈折角 ±45~70 度の際の探傷結果を青色の点で示した。図中(b)には、破壊試験により得られた切削断面のマクロ写真から溶接ビード形状を計測した結果を示す。図中(c) (d)には、(a)と(b)を重合せたときの XZ 断面と YZ 断面での比較をそれぞれ示した。これらの図より、探傷結果は、溶接ビード形状を比較的精度良く検出しており、三次元的で反射指向性の強いきずの検出に適していることが確認された。なお、計測結果が実測値と若干ずれている理由としては、別途実施した基礎試験によれば、計測結果を処理するソフトウェアにおいて各振動子の時間差を算出する際に近似理論解を用いているのが主な原因と考えられる。より厳密な理論解による計測結果の処理を行うとともに、補正処理の導入により、今後改良は可能と考えられる。

4.6 フェイズドアレイ法の実橋脚への適用

フェイズドアレイ法については、実務への適用を考えると、探傷装置の価格もまだ高く、取扱いも従来のものと異なる。ただし、前述のとおり複雑な構造の溶接部に対して客観性、信頼性、記録性の高い検査結果を提示する上では非常に有効な探傷法と考えられる。本調査で使

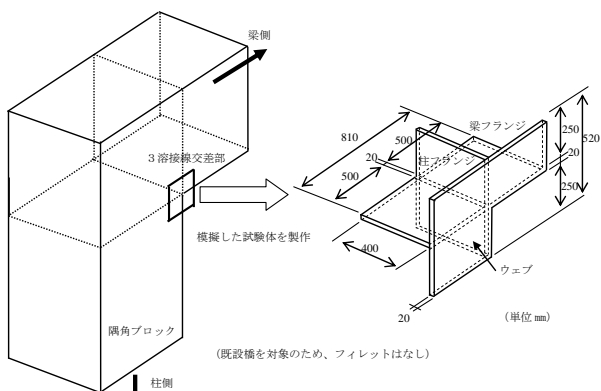


図-13 試験体形状

表-3 参加した MUT 探傷システムにおける使用探触子の種類

探傷システム	走査方法	屈折角	公称周波数	集束or非集束	集束距離	集束点t-幅
A	手動	0度(垂直)	5MHz	集束	17mm	2mm
		60, 70度(斜角)	2MHz, 5MHz	非集束	-	-
B	手動	0度(垂直)	5MHz	集束	17mm	2mm
		65, 70, 90度(斜角)	2MHz, 5MHz	非集束, 集束	不明	不明
C	手動	0度(垂直)	5MHz	集束	32.5mm	2.5mm
		70, 90度(斜角)	"	非集束, 集束	11mm	3mm
D	手動	0度(垂直)	"	集束	17mm	2mm
		70度(斜角)	"	非集束	-	-
E	自動	0度(垂直)	"	集束	15mm	不明
		45, 70度(斜角)	2MHz, 5MHz	非集束, 集束	不明	不明

上段が垂直探傷、下段が斜角探傷

用したフェイズドアレイ法については、既に実橋脚数基において試験的に適用している。首都高速道路(株)の事例では、立体隅角部という検査が難しい箇所を対象に適用し有用性が確認されている¹³⁾。また、図-12 は既設円形橋脚隅角部への適用事例であるが、未溶着部のエコーや円柱内面側からのエコーが画像として得られていることがわかる。

5. 既設橋脚隅角部の調査を対象とした探傷法の検討

既設橋脚隅角部の未溶着の状況の調査を対象として、汎用型の MUT について、既設橋脚を模擬した試験体及び供用中の実橋脚隅角部に対する探傷試験を行い、溶接部の欠陥や未溶着に対する検出性能の評価を行った。なお、MUT は既に現場で適用されており、ここでは特に検査技術者の技量の影響に着目し、複数の探傷システム(検査技術者)を選定し、検出精度に与える影響や誤検出に至る事例を検討した。

5.1 試験体

性能確認試験に用いた試験体は、既設鋼製橋脚隅角部を想定し、未溶着きずを有する隅角部を模した試験体計 2 体(1 体(t=40mm)、1 体(t=20mm)、t:板厚)とした。図-13 に例として板厚が 40mm の場合の未溶着きず試

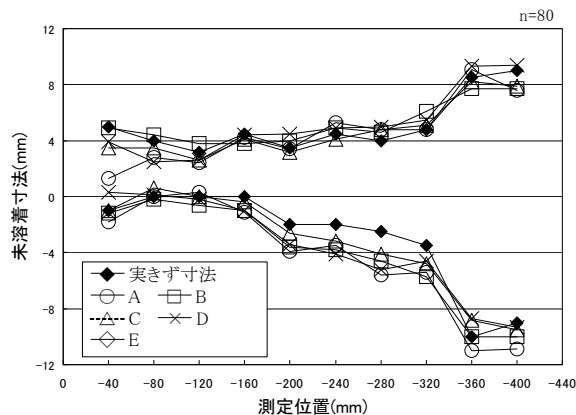


図-14 T 継手に対する各 MUT システムの斜角探傷の評価結果

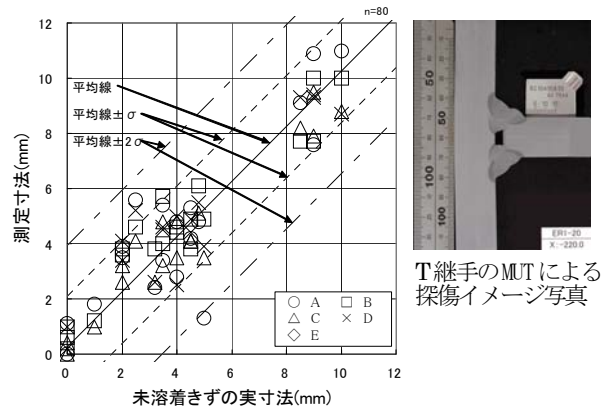


図-15 各 MUT システムの未溶着きずの測定寸法と実寸法の比較図

験体の寸法形状を示す。既設を対象としたため、フィレットは付いていない構造とした。これらの試験体には、製作過程で意図的に溶接部内部に未溶着きずを内在させた。未溶着きずについては、探傷終了後、破壊試験により溶接線に対して直交方向に 40mm ピッチで切削を行い、各切削断面のマクロ写真を撮影した。ただし、3 溶接線交差部は、主要な探傷面となる柱・梁ウェブ面と平行に 5mm ピッチで切削した。

5. 2 探傷システムと性能確認試験方法

表-3 に試験を行った MUT 探傷システム（探傷装置と検査技術者の組合せ）、計 5 システムを示す。検査技術者の条件としては、探傷システム B（熟練技術者、隅角部の検査実績あり）、探傷システム D（熟練ではない技術者、隅角部の検査実績なし）、それ以外のシステム A、C（熟練技術者、隅角部の検査実績なし）となっている。また、E（熟練技術者、隅角部の検査実績ほとんどなし）は超音波自動探傷装置との組合せとなっている。

前章の製作時を対象とした性能確認試験と同様に、参加者には土木研究所実験施設に設置した実きず試験体などを所定の時間内に定められた順番で同一条件下で検査し、検査データを 2 週間以内に提出させた。全探傷システムによる探傷終了後、試験体溶接部の破壊試験を行い、提出された探傷データと採取された実きずデータを比較し、各探傷システムの検出性能の確認を行っている。試験に当たっては、探傷時間内に、共同研究で準備した基礎試験体の横孔 3φ を基準感度に設定し、受信エコー高さが L/2 線（基準感度-18dB）を超えるものをきずとして記録、提出させた。

5. 3 試験結果

図-14 に板厚が 40mm の場合の未溶着きず試験体の T 字継手に対する試験結果の例を示す。また、図-15 に T 字継手の未溶着きずに対する各種 MUT の測定寸法と実寸法の比較図を示す。本試験体の場合、斜角探傷において、未溶着高さの誤差の平均値はほぼ 0mm、標準偏差は 2mm 程度であり、概ね、精度良く検出できていることが確認された。また本文では省略するが、誤検出の事例を整理するとともに、誤検出を防止するための方策について取りまとめた。

6. まとめ

本調査で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 鋼製橋脚隅角部を対象に、超音波探傷法（UT）による探傷条件に影響を与える構造諸元（板厚、板組等）を調査するとともに、既存の溶接施工試験結果等を踏ま

え、検査結果に影響を与える隅角部のきずの発生傾向を整理した。また、これらのきずに対して各種 UT の適用の可能性について整理するとともに、本調査の検討対象として、検出性能の向上が期待され将来性の高いフェイズドアレイ法を取り上げることとした。

(2) 製作時の検査を対象として、現在一般的に用いられている MUT、AUT 及び検出性能の向上が期待される新技術による UT（フェイズドアレイ法等）について、欠陥を内在させ対象構造を模した試験体による性能確認試験を実施し、欠陥検出性能の評価を行った。その結果、フェイズドアレイ法の場合、対象とするきず長さ 6mm 以上の欠陥の検出率は 81%（16 個中 13 個検出）と高いことを確認した。また、隅角部の探傷経験のある熟練検査技術者による MUT の欠陥の検出率も 75%と高く、熟練の検査技術者もしくは熟練の検査技術者により実地指導を受けた検査技術者においても、適切な探傷を行えば高い検出性能が得られることを確認した。

(3) フェイズドアレイ法については一次元配列の探触子の設計・製作を行うとともに、性能確認試験結果を踏まえ、同探触子の特徴を最大限活用できる内部きずの走査方法による探傷法を提案した。この探傷法は、検出が難しい 3 溶接線交差部内の三次元的でかつ反射指向性の強いきずに対して、探傷屈折角の異なる複数の超音波ビームを入射させる探傷法であり、実きずおよび溶接ビード形状の探傷結果によりその有効性を確認した。

(4) 既設橋脚の調査を対象として、汎用型の MUT について、既設橋脚を模した試験体及び供用中の実橋脚隅角部に対する探傷試験を行い、主に検査技術者の技量の影響に着目し溶接部の未溶着に対する検出性能の評価を行った。その結果、各 MUT 探傷システムにおける未溶着きずの測定精度を確認するとともに、誤検出しやすい事例を把握した。

以上の結果を基に、製作時を対象とした隅角部溶接継手の超音波探傷要領、既設隅角部の調査時を対象とした MUT による探傷マニュアルをとりまとめることとしている。

参考文献

- 1) 米山弘志:「超音波探傷検査技術の現在と将来」,非破壊検査,第 51 巻 12 号, pp.788-792,平成 14 年 12 月.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所,東京工業大学,日本道路公団,(社)日本橋梁建設協会,(社)日本鉄鋼連盟,(社)日本非破壊検査工業会:「鋼道路橋溶接部の非破壊検査手法に関する共同研究報告書(I)」,国土技術政策総合研究所資料,第 31

- 号,平成14年3月.
- 3) 建設分野における未来接合技術懇話会:「角型鋼製橋脚隅角部の溶接施工法および超音波探傷検査に関する調査・検討報告書」,平成14年12月.
 - 4) JIS Z 2350:「超音波探触子の性能測定方法」,平成14年.
 - 5) 独立行政法人土木研究所,東京工業大学,日本道路公団,首都高速道路公団,阪神高速道路公団,本州四国連絡橋公団,名古屋高速道路公社,広島高速道路公社,福岡北九州高速道路公社,(社)日本橋梁建設協会,(社)日本鉄鋼連盟,(社)日本非破壊検査工業会:「鋼製橋脚隅角部の非破壊検査法に関する共同研究報告書(Ⅰ)」,共同研究報告書第313号,平成16年3月.
 - 6) 村越潤:「隅角部の非破壊検査技術」,(財)首都高速道路技術センター,技術講演会講演概要集「鋼道路橋と疲労損傷」,pp.61-71,平成16年2月.
 - 7) 村越潤,高橋実,藤木修:「鋼橋の疲労と検査・評価技術」,(財)溶接接合工学振興会,溶接・接合部の経年劣化評価技術,第15回セミナー資料,pp.63-77,平成16年10月.
 - 8) 村越潤,高橋実,藤木修:「鋼製橋脚隅角部を対象とした超音波探傷における数値シミュレーション」,(社)日本道路協会,第25回日本道路会議論文集,平成15年11月.
 - 9) 藤木修,村越潤,高橋実:「鋼製橋脚隅角部を対象とした超音波探傷の数値解析的検討」,(社)土木学会,第58回年次学術講演会講演概要集I部門,I-236,pp.471-472,平成15年9月.
 - 10) 藤木修,村越潤,高橋実:「鋼製橋脚隅角部を対象としたフェイズドアレイ探傷法の基礎検討」,第59回年次学術講演会講演概要集I部門,I-603,pp.1203-1204,平成16年9月.
 - 11) 高橋実,藤木修,村越潤:「鋼製橋脚隅角部を対象としたフェイズドアレイ法による超音波探傷試験の性能試験について」,(社)日本道路協会,第26回日本道路会議論文集,平成17年10月.
 - 12) 藤木修,高橋実,村越潤,「三木千壽:鋼製橋脚隅角部を対象としたフェイズドアレイ法による超音波探傷試験のきず検出性能について」,第60回年次学術講演会講演概要集I部門,I-167,pp.331-332,平成17年9月.
 - 13) 長谷川,伊東,山本,齋藤,清川,村野:「首都高速道路の建設における鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性向上の技術」,橋梁と基礎,pp.31-39,平成19年2月.

RESEARCH ON ULTRASONIC TESTING METHODS IN WELDED JOINTS OF STEEL BRIDGES

Abstract : One of the most important subjects to ensure fatigue durability of welded joints of steel bridges is to secure welding quality during fabrication by non-destructive testing such as ultrasonic testing, UT. The aim of this research is to develop automatic UT methods which can detect embedded welding defects with higher accuracy and reliability compared with conventional manual UT. Using actual model specimens of beam-column connection welded joints with embedded defects, a series of performance test were conducted for several UT systems. As results of detection rate and oversight rate, it is find phased array method is effective for detecting embedded defects at beam-column connection welded joints compared to conventional AUT.

Key words : ultrasonic testing, beam-column connection welded joints, welded defects, phased array