

# 論文 斜めK走査法による鉄筋溶接継手の超音波伝搬経路の検討

伊佐見 和大\*1・森濱 和正\*2・渡辺 博志\*3

**要旨：**(社)日本鉄筋継手協会規格 JRJS 0005 の中の、斜めK走査法等の鉄筋溶接継手の探傷法は複雑な超音波伝搬経路を想定している。そのため、きずの位置や大きさ、異形棒鋼の形状の影響による検出精度の低下が考えられる。そこで、各探傷法の探傷の精度を検討するために、超音波伝搬経路を検討し、探触子の走査する位置による超音波の強さやエコー高さの変化を調べた。JIS法との比較、異形棒鋼および丸鋼の比較、等を実施した結果、斜めK走査法等では、節の影響を受けて音圧が上下に変動する場合があるものの、おおよそJIS法と同様の走査基準線をもとにした送受信探触子の幾何学的な位置関係で探傷できることが分かった。  
**キーワード：**鉄筋溶接継手, 超音波探傷試験, 走査グラフ, 異形棒鋼, 人工きず

## 1. はじめに

近年、異形棒鋼の突合せ接合部において、従来から使用されてきた圧接継手に代わり、溶接継手の採用が増えている<sup>1)</sup>。従来から、異形棒鋼の溶接継手の品質検査では、JIS Z 3062「鉄筋コンクリート用異形棒鋼ガス圧接部の超音波探傷試験方法及び判定基準」を準用することで異形棒鋼溶接継手の品質検査を行っていた。しかし、JIS Z 3062の探傷不能領域が、溶接欠陥の生じやすい溶接の初層部付近に存在するため、欠陥を検出できないケースの多いことが指摘されている<sup>2)</sup>。

そのため、近年新たな探傷法として、(社)日本鉄筋継手協会から、JRJS 0005「鉄筋コンクリート用異形棒鋼

溶接部の超音波探傷試験方法及び判定基準(案)」が制定された。JRJS 0005の制定にあたり、内部に欠陥を有する鉄筋溶接継手の試験片を用いて、超音波探傷試験の結果と引張試験の結果の関係を調べた研究が行われている<sup>2)</sup>。

ただし、JRJS 0005の探傷法で想定する超音波伝搬経路は複雑であり、きずの位置や大きさ、異形棒鋼の形状の影響による検出精度の低下が考えられる。しかし、各探傷法の探傷の精度を検討するために、探触子の走査する位置による超音波の強さやエコー高さの変化について詳細な検討を実施した文献は存在しない。そこで、JRJS 0005の各探傷法での実際の走査と同様に、異形棒鋼のリブ上で探触子を走査して、各位置の音圧を測定した走査グラフを取得して、超音波伝搬状況の詳細について検討を行った。なお、異形棒鋼はリブや節があり超音波伝搬状況を把握するうえで複雑な形状であるため、比較対象として丸鋼についても同様の検討を行った。

## 2. 検討項目

JRJS 0005には表-1のように3種類の超音波探傷法が制定されている。

まず、「直角K走査法」(以降「直K」と略す)は、図-1(a)のように、K走査により鉄筋断面中心部の探傷を行う方法である。次に、「斜めK走査法」(以降「斜K」と略す)は図-2(a)のように、探触子を鉄筋軸に約20度傾けているため(以降「首振状態」と称す)、溶込不足等の溶接欠陥が生じやすい鉄筋断面外周部付近を超音波が伝搬すると考えられるが、鉄筋断面の外周面における反射(以降「周面反射」と称す)が一回加わり、より複雑な超音波伝搬経路となる。

斜めタンデム走査法(以降「斜T」と略す)は、双方

表-1 各探傷法の特徴

探傷方法	直K	斜K	斜T
図による説明	図-1	図-2	
ビーム路程	2.8D	2.8D	5.6D
首振状態	なし	あり	あり
リブ反射	なし	なし	1回*
周面反射	なし	1回	2回
判定基準	透過走査より-18dB	透過走査より-24dB	透過走査より-34dB
きずが無い状態を考慮	透過	斜め透過	斜めV
本稿での検討	あり 丸鋼 異形	あり 丸鋼 異形	なし

\* 探触子を設置しているリブの反対側のリブが反射面となった場合のみ。

\*1 (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ基礎材料チーム 研究員 (正会員)  
 \*2 (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ基礎材料チーム 総括主任研究員 (正会員)  
 \*3 (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ基礎材料チーム 上席研究員 工博 (正会員)

の探触子を同一リブ上に配置し、首振状態にして探傷を行う方法である。このとき、斜Tでは斜Kに対して、ビーム路程が2倍の $5.6D$ となり、探触子を走査しない側のリブでの超音波の反射（以降「リブ反射」と称す）が一回加わり、周面反射が2回加わることとなり、さらに複雑な超音波伝搬経路となるため、本稿では検討対象外とする。

本稿では、各探傷法による超音波探傷の際の超音波伝搬状況を把握するために段階を追って検討をすすめた。

図-1～図-2に、各探傷法で想定される超音波伝搬経路を示す。図-1(b)、図-2(b)の各走査法は、JRJS 0005において、きずによる反射がない場合（以下「きず無し」と称する）の超音波伝搬経路を示している。初めにこのような単純化された超音波伝搬経路での検討を実施し、それから、きずがある場合（以下「きず有り」と称する）の超音波伝搬経路について検討を行った。

このとき、首振状態を含む斜Kは、丸鋼での超音波伝搬経路をモデルとしているので、段階を追って検討を行う際に、異形棒鋼の節等の形状の影響がどのように作用するのかについて、異形棒鋼と丸鋼の結果と比較しながら検討することとした。

### 3. 実験方法

#### 3.1 概要

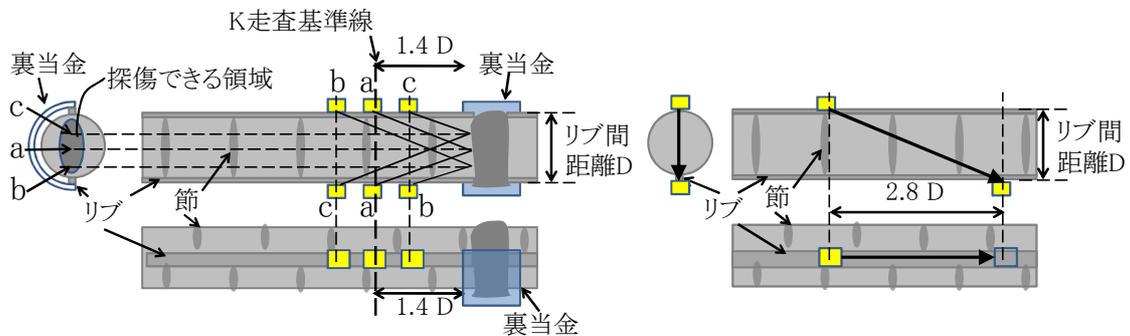
きず無しの場合、およびきず有りの場合について、直

径32mmのSM490の丸鋼とD32のSD345の異形棒鋼（リブ間距離 $D=33.5\text{mm}$ ）を対象に探触子の走査する位置による超音波の強さやエコー高さの変化を測定した「走査グラフ」を作成した。走査グラフを作成する際には、送信探触子を固定し、受信探触子を移動させながら、図-3に示すように探傷器が最大音圧を記録する受信探触子の位置と音圧を記録し、そこから約12dB低下する範囲までの走査グラフを記録した。そして、音圧が最大音圧から12dB小さくなるまでの受信探触子の走査範囲を「山幅」と称した。

このように走査グラフを取得する際には、非常に正確な音圧の測定を行う必要がある。そこで、走査用治具を使用して測定を行った。

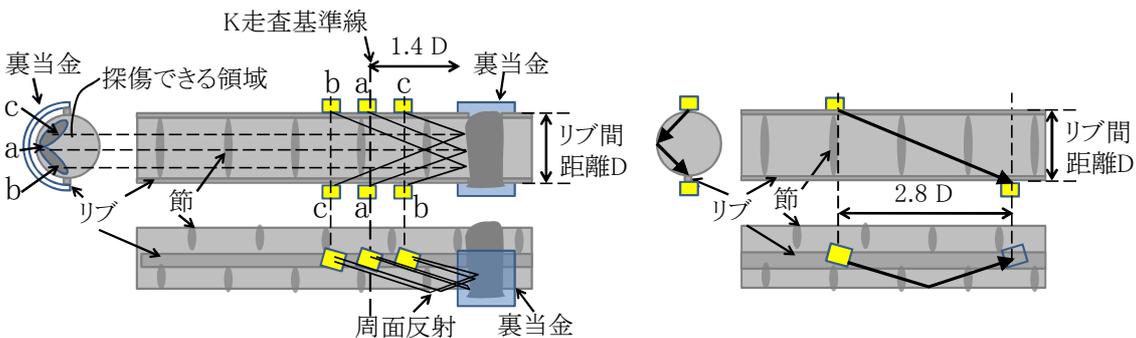
#### 3.2 走査用治具の主な仕様

図-4に、走査用治具の機構を示す。走査用治具は、写真のように鉄筋を台に水平に配置し、探触子をリブに接触させて鉄筋軸方向に走査する際に、探触子のリブに対する位置および接触圧を一定に保つものである。走査用治具は、探触子を鉄筋のリブ外面に対して押さえつけた状態で磁石により自立し、手で鉄筋軸方向にスライドすることが可能な機構となっていて、斜Kを実施する際に首振状態にするため、回転機構が取り付けられている。走査用治具の中に、市販の鉄筋用超音波探触子5Z5×5A70で接触面が平面のものを組み込んで使用した。なお、接触媒質としては80%グリセリン水溶液を用いた。



(a) きずによる反射の有る場合（きず有り） (b) きずによる反射の無い場合（きず無し）

図-1 直Kの超音波伝搬経路



(a) きずによる反射の有る場合（きず有り） (b) きずによる反射の無い場合（きず無し）

図-2 斜Kの超音波伝搬経路

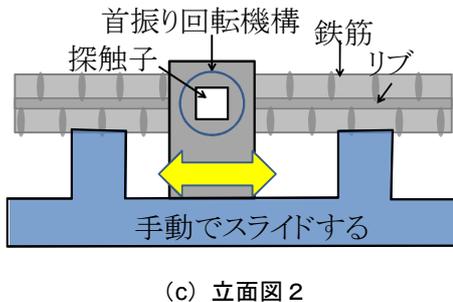
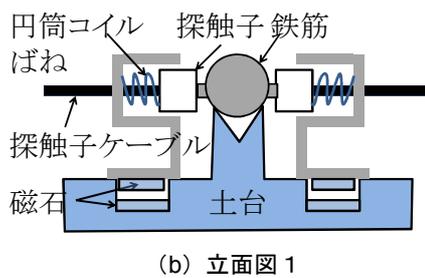
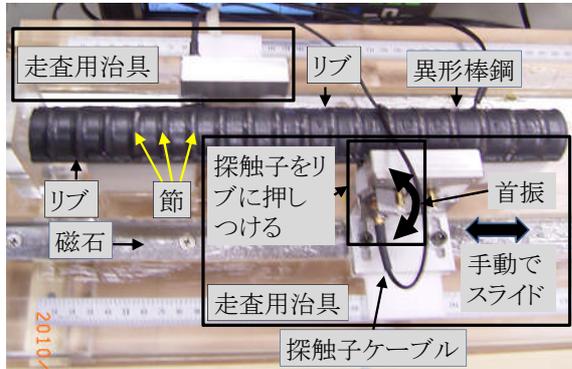
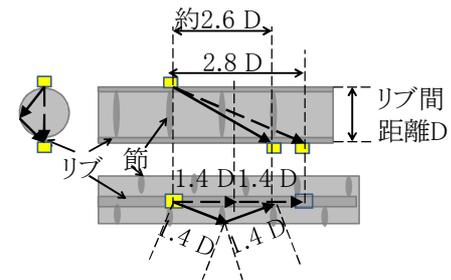
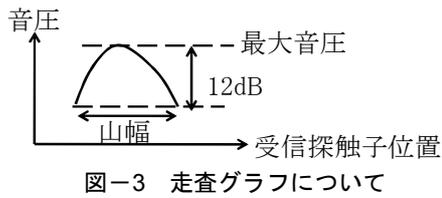


図-4 走査用治具の機構

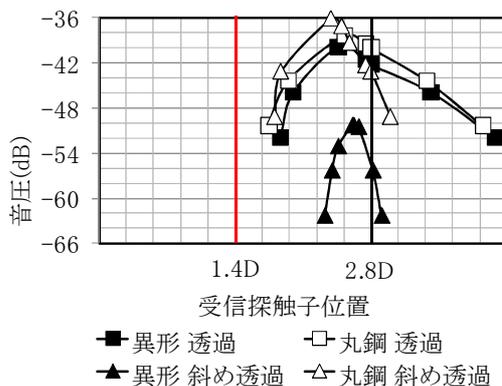


図-5 透過走査および斜め透過走査の結果

#### 4. きず無しの場合の超音波伝搬経路の検討

図-1 (b), 図-2 (b) に示した, 透過走査および斜め透過走査のきず無しの場合について検討した。送信側探触子を鉄筋軸方向の一箇所に固定して, 受信側探触子を走査した際の走査グラフを図-5 に示す。図の縦軸は, 超音波探傷器の示す音圧 (dB) で, 横軸は送信探触子の鉄筋軸方向の位置を 0 としたときの受信探触子の鉄筋軸方向の位置である。

まず, 図-5 の透過走査では, 異形棒鋼・丸鋼で走査グラフは上に凸の山形となった。そして, 異形棒鋼 (■) および丸鋼 (□) では山幅および最大音圧がほぼ一致し, 受信探触子の位置は共にリブ間距離  $D$  の約  $2.8D$  の位置となった。このことより, 透過走査では, 異形棒鋼と丸鋼の形状の違いの影響はほとんどない。これは, 送信探触子から超音波が広がるものの, 受信できる超音波の伝搬経路が, 相対する探触子間を直進した場合の一通りに限定されるためであると考えられる。

次に, 図-5 の斜め透過走査について考える。

丸鋼 ( $\Delta$ ) の場合, 最大音圧のビーム路程は透過走査の場合と比べて若干短くなった。これは, リブ間を超音波ビームの中心軸が伝搬するために  $2.8D$  の距離を要するとしたとき, 図-6 のように斜め透過走査の場合,  $2.8D$  の長さを鉄筋軸に対して  $20$  度傾けているため, 鉄筋軸でみると, 約  $2.6D$  となり若干短くなることによるものと考えられる。なお, 走査グラフの山幅が狭まることから斜め透過走査における送信探触子と受信探触子との間の超音波伝搬経路は, 図-6 のような一通りに限られる可能性の高いことが分かった。

次に, 異形棒鋼 ( $\blacktriangle$ ) の場合は, 1) 最大音圧のビーム路程が約  $2.8D$  となり, 探傷における超音波伝搬経路として想定している幾何学的な経路 (図-6 の破線) とほぼ一致したが, 2) 最大音圧は丸鋼と比べて約  $12\text{dB}$  小さな値となり, 3) 走査グラフの山幅は狭まった。これらの原因は, a) 周面反射の際の丸鋼と異形棒鋼での反射率の違いや, b) 周面反射の位置と節の位置とがね合い, 等によるものと考えられる。なお, 異形棒鋼の音圧のピーク位置が丸鋼の場合よりも  $2.8D$  にやや近くなるのは, 丸鋼の

リブ間距離が 32mm であるのに対して、異形棒鋼のリブ間距離が 33.5mm と若干大きいためであると考えられる。

## 5. きず有りの場合の超音波伝搬経路の検討

### 5.1 概要

各探傷法での基本的な伝搬経路を検討するため、きずの位置・大きさ・面の粗さ等を一定の条件のもとにそろえた人工きずによる検討を行った。

まず、直Kについて、相対するリブ間に設けた人工きずを対象に探傷して超音波伝搬状況を検討した。そのあと、斜Kについて鉄筋断面外周部に設けた各種人工きずを探傷し、超音波伝搬状況を検討した。

### 5.2 人工きずの位置と形状

丸鋼および異形棒鋼切断面において、先端が直角なドリルにより、鉄筋軸方向に深さ 20mm の円形平底穴を加工した。図-7 に円形平底穴の位置と形状を示す。まず、試験片として鉄筋断面の中心に直径が 3mm, 6mm, 9mm のドリル穴を設けたものを作製した（以降「C きず」と称す）。次に、鉄筋断面の中心を原点として極座標系をとり、送信側探触子を接触させるリブ外面の方向を 0 度方向として、時計回りに 45 度きざみで鉄筋断面外周部付近に直径が 6mm のドリル穴を加工した（以降「45 度きず」「90 度きず」等と称す）試験片を作製した。また、90 度きずにおいては直径が 3mm と 9mm の試験片も作製した。以降、各円形平底穴を位置と直径により「90-6 きず」、「C-9 きず」のように称する。

### 5.3 走査方法

各人工きずの走査グラフを取得する際に、図-8 のように送信探触子の鉄筋軸方向の位置をきずから 1.4D の位置に固定し、受信探触子を鉄筋軸方向にスライドさせて超音波の音圧の変化を取得した。その際、直Kの探傷の幾何学的条件に合わせて、図-8 に示すように、人工きずの中心位置の鉄筋の相対するリブ間を a:b に内分する位置にある場合、送信探触子の入射点の位置は、直Kまたは斜Kのビーム路程である 2.8D を a:b の比で配分した距離だけ人工きずから離れた位置として固定した。そして、直K・斜Kにもとづき、受信探触子を走査して走査グラフを取得した。

### 5.4 直Kによる中心きずの走査グラフ

#### (1) 断面中央の人工きずで大きさが異なる場合

図-9 に C-3 きず、C-6 きず、C-9 きずの走査グラフを示す。図の縦軸は音圧 (dB) で、横軸は受信探触子の人工きずからの距離である。図-9 より、異形棒鋼、丸鋼ともに、走査グラフのピークは人工きずから約 1.4D の位置となったため、直Kで幾何学的に仮定している超音波伝搬経路のとおり、直Kのビーム路程はほぼ 2.8D となることがわかった。

※人工きずの直径は6mmが標準で、断面中心および90度軸には直径3mm, 9mmの検討もした。

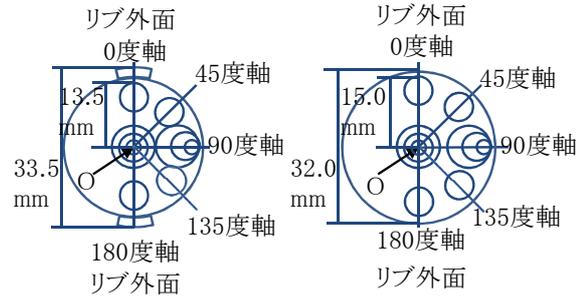


図-7 検討した人工きずの位置

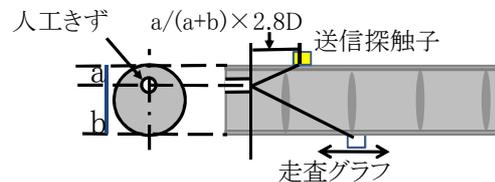


図-8 走査グラフ取得時の走査方法

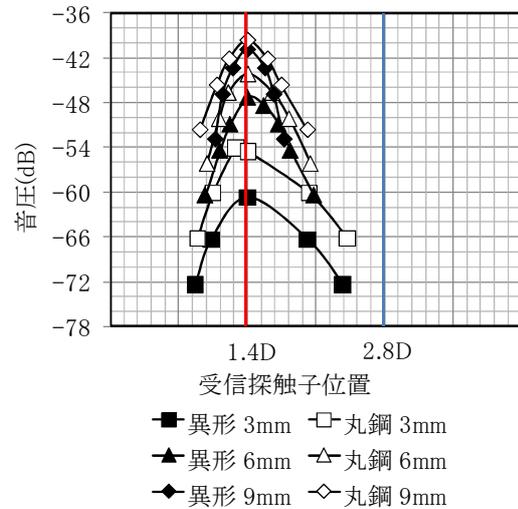


図-9 直KによるCきずの走査グラフ

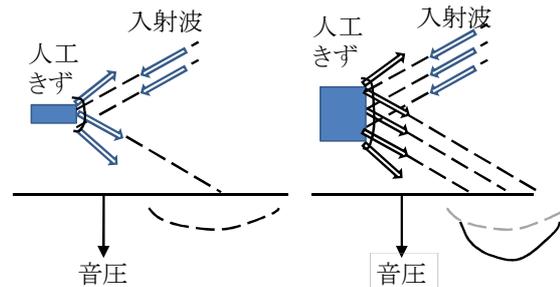


図-10 人工きずからの反射波の走査グラフ

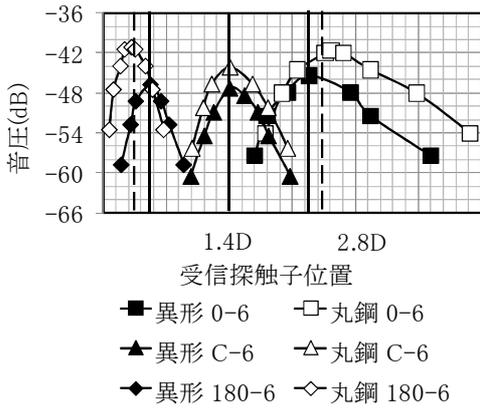


図-11 直Kの各位置のきずの走査グラフ

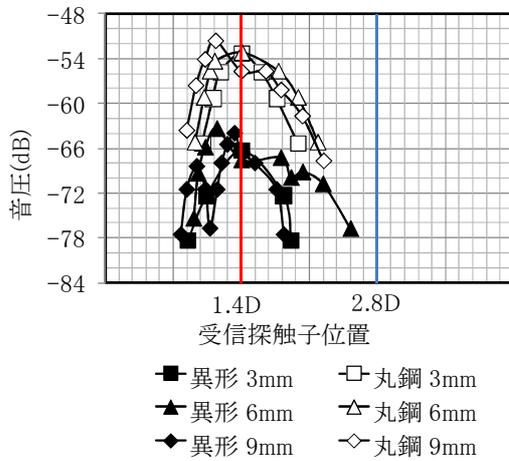


図-12 斜Kによる90度きずの走査グラフ

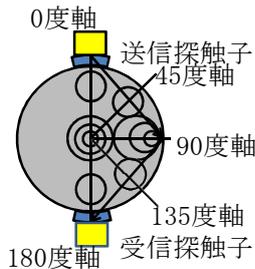
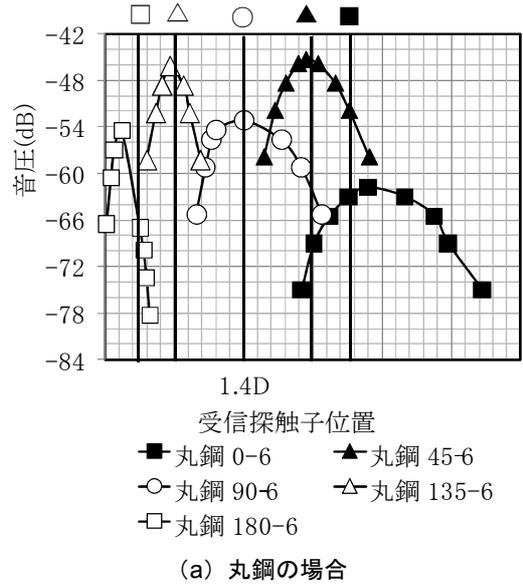


図-13 斜Kの超音波ビームの中心軸

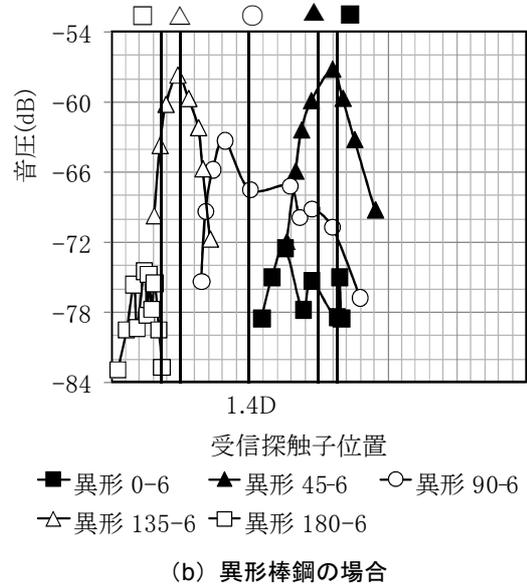
走査グラフの山幅はきずが小さいほど広がり、最大音圧は低くなる。この理由は、図-10のように、きずが小さいと、きずの端部で反射して反射波としての指向性を失う割合が相対的に多くなるためであること、等によるものと考えられる。

(2) 人工きずがリブ直下にある場合

直径6mmの人工きずがリブ直下にある場合(0度きずおよび180度きず)と比較用にきずが断面中心にある場合(Cきず)の直Kの走査グラフを図-11に示す。図中に理論上のビームの中心軸を実線(異形棒鋼)および点線(丸鋼)で示す。



(a) 丸鋼の場合



(b) 異形棒鋼の場合

図-14 斜Kの各位置のきずの走査グラフ

送信側探触子を図-8に述べた探傷上の幾何学的条件のもとに設置した場合に、0-6きず、180-6きずのエコー高さがあまり変わらないことから、幾何学的に図-8に示した条件で、伝搬経路が予測可能であることがわかった。これより、探傷では図-8に示した幾何学的な経路が使用できることがわかった。なお、丸鋼および異形棒鋼では、0-6きず、C-6きず、180-6きずとなるにつれて走査グラフの山幅が狭まる傾向が見られた。

5.5 斜Kによる外周部人工きずの走査グラフ

(1) 90度きずで大きさが異なる場合

90-3きず、90-6きず、90-9きずの走査グラフを図-12に示す。丸鋼、異形棒鋼ともに、人工きずの直径が大きくなっても、最大音圧は変わらず、走査グラフの形も

ほとんど変わらなかった。このことは、図-13に示すように超音波ビームの中心軸が人工きずの中心を通過せず、超音波ビームの広がりなきずから反射した波を受信しているため、きずの大きさの影響が現れにくかったものと考えられる。

次に、異形棒鋼の場合も丸鋼とほぼ同様にきずの大きさにかかわらず、音圧がほぼ一定となった。理由は、丸鋼の場合と同様である。

#### (2) 人工きずの位置が鉄筋外周部の場合

直径 6mm の人工きずが鉄筋断面外周部の 0 度きず、45 度きず、90 度きず、135 度きず、180 度きずの走査グラフを図-14に示す。図中に図-9の理論上による超音波ビームの中心軸を示す。

まず、図-14より、45-6 きず、135-6 きずの音圧のピーク値は、90-6 きずよりも約 6dB 大きくなった。これは、図-13のように斜Kおよび斜Tの超音波ビームの中心軸が人工きずの中心を通るためであると考えられる。

図-13より超音波ビームの中心軸が通過する 45-6 きずと 135-6 きずとの走査グラフの山幅よりも 90-6 きずの走査グラフの山幅が広がる傾向にあることがわかった。このことは、超音波ビームが 45 度と 135 度はきずのほぼ中心を伝搬しているのに対し、90 度はビームの広がりを受信したためと考えられる。

#### 6. まとめ

本研究では、JRJS 0005 の各超音波探傷法について溶接欠陥が無い場合と人工きずからの反射波の超音波伝搬の特徴について、走査グラフにより整理した。その結果得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 斜Kのきず無しでは、送受信探触子を結ぶ超音波伝搬経路は一通りに限られる可能性が高いことがわかった。また、最大音圧のビーム路程が約 2.8D の位置であった。
- (2) 直K・斜Kともに、人工きずからの反射は、ほぼ探傷法において想定している超音波伝搬経路のとおりであり、鉄筋軸方向のビーム路程が約 2.8D であった。
- (3) 斜Kでの 90 度きずの走査グラフより、90 度外周部では斜Kの幾何学的な理論の通り、超音波が表面付近を通過することが分かった。
- (4) 斜Kは、鉄筋外周の反射を伴うため、節の影響等により、人工きずからの反射エコーであっても音圧の上下変化が不規則となる場合があることが分かった。

#### 参考文献

- 1) (社)日本鉄筋継手協会鉄筋継手市場調査委員会：鉄筋継手市場調査報告書，pp.11，2010
- 2) 倉持貢，森濱和正：鉄筋エンクローズ溶接継手の超音波斜角探傷検査法に関する研究，コンクリート工学，Vol.30，No.3，pp.685-690，2008
- 3) 伊佐見和夫，森濱和正，渡辺博志：鉄筋溶接継手の超音波探傷方法に関する検討（その1），(社)日本非破壊検査協会春季講演大会講演概要集，pp.145-148，2010