

鉄筋溶接継手の信頼性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：基礎材料チーム

研究担当者：渡辺 博志、森濱 和正

【要旨】

超音波探傷による鉄筋溶接継手の欠陥検出の精度を向上させ、継手の信頼性を向上させるための方法を提案することを目的として調査研究を実施した。そのために、欠陥を入れた溶接継手試験片について、ガス圧接継手に用いられている JIS Z 3062 の方法（JIS 法）と鉄筋継手協会が提案している方法（JRJS 法）による超音波探傷実験を行なった。そのあと、引張試験を行い、引張強度とエコー高さの関係から、探傷精度を求めた。

その結果、溶接継手に生じやすい初層部のキズの探傷精度は、JIS 法よりも JRJS 法のほうがかなり高い。ただし、溶接継手はわずかなキズでも強度低下が大きいことから、溶接継手の利用には注意が必要である。

キーワード：異形棒鋼、溶接継手、超音波探傷、JRJS 0005、斜め K 走査法（JRJS 法）、JIS Z 3062（JIS 法）

1. はじめに

施工された鉄筋溶接継手の品質確認のために実施される超音波探傷検査は、ガス圧接継手の検査方法である JIS Z 3062（以下、JIS 法と呼ぶ）が準用されている。しかし、溶接継手とガス圧接継手ではキズの種類、発生しやすい位置、形状、大きさなどが異なる。そのため、JIS 法を溶接継手に適用すると、次のような問題がある。

JIS 法は図 1.1 のように鉄筋両側のリブ上で送信・受信探触子を走査することにより、リブを結ぶ線（以下、リブ軸と呼ぶ）上にキズがあれば、そこからの反射波を受信することによって探傷する方法である。しかし溶接継手は、溶接初層部である外周部に溶込み不良のキズを生じやすく、JIS 法ではそこに超音波が当たらないため探傷できない。

溶接外周部の探傷を行うため、日本鉄筋継手協会

（以下、継手協会と呼ぶ）では、はじめに表面 SH 波法の検討が行われた。探触子を設置したリブ位置の探傷は可能であったが、初層部の、リブから離れた位置に生じたキズは探傷しにくいことが明らかになった¹⁾。

次に、溶接継手の外周部全周を探傷する方法として斜め K 走査法の検討が行われた²⁾。斜め K 走査法とは、図 1.2 のように探触子を鉄筋軸に対して 20 度首振りを行なって走査することによって、溶接部断面図のように「く」の字に超音波が外周部を伝搬する。探触子を反対に首振りして、同様に走査することによって、外周部を菱形形状に探傷できる方法である。多くの検討の結果、2008 年度に規格 JRJS 0005 が制定されている。以下、この探傷方法を JRJS 法と呼ぶこととする。

規格が制定されたとはいえ、JRJS 法に関しては次

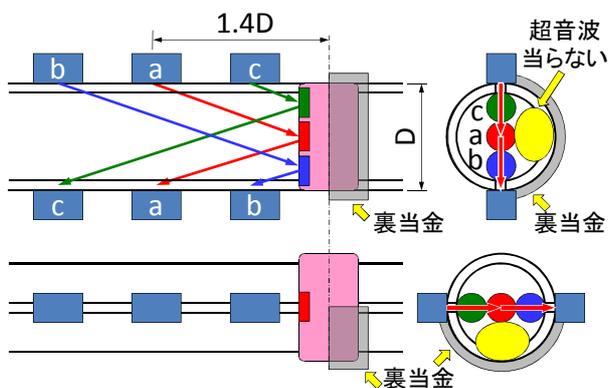


図 1.1 JIS 法

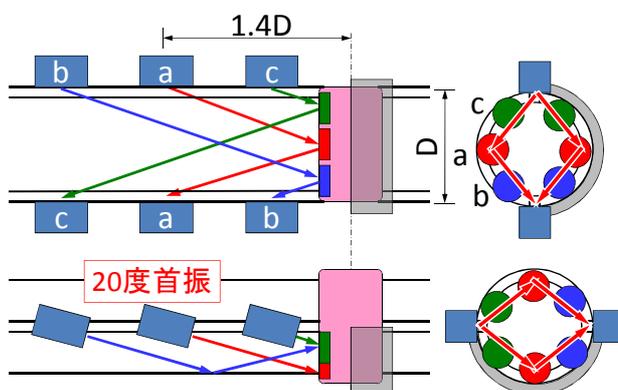


図 1.2 JRJS 法

のような検討事項も残されていることから、これらの検討を行なった。

(1) 周面反射の影響

JRJS 法によるキズの探傷は、**図 1.2** のような伝搬経路となる。すなわち、キズからの反射と、その前または後にも鉄筋周面の反射が加わる。鉄筋周面の反射位置は、節の場合と、節と節の間（以下、腹と呼ぶ）の場合が考えられる。探傷および判定基準を決めるための基準レベルを求める場合の反射位置の影響を確認しておく必要がある。

(2) 人工キズによる伝搬経路の推定、キズの位置・大きさの影響

JRJS 法は伝搬経路が複雑であるため、ドリル穴による人工キズをあらかじめ決められた位置に設けた試験片を用いて、推定した伝搬経路の妥当性、キズの位置・大きさの影響などについて検証する必要がある。

(3) 溶接継手試験片による基準レベル、探傷精度

(1)、(2)による基礎的な検討の後、実際の溶接継手への適用性についての検討を行なった。また、太径の D51 までの適用は可能かなどの検討が必要である。検討項目は次のとおりである。

- 1) 基準レベルの検討
- 2) JIS 法、JRJS 法による探傷
- 3) 引張試験による引張強度、破断面のキズの位置・面積の測定
- 4) 2)と 3)の結果から探傷精度の検討

2. 周面反射の影響に関する検討

2.1 探傷法と基準レベルの求め方

周面反射の影響の確認は、基準レベルを求める方法を用いているので、基準レベルとその求め方についてまず説明する。

基準レベルは、合否判定の基準となる値である。キズのない鉄筋を用いて、探傷時とほぼ同じ探触子距離のときの透過パルスの最大値を基準レベルとしている。

JIS 法を例に説明する。JIS 法は**図 1.1**のように探触子を走査して探傷する。溶接部の中心位置を探傷する場合を考えると、屈折角 70 度の探触子を用いるので、探傷面から 1.4D (D: リブ間距離) の位置 a に送信探触子を設置すると中心に超音波が当たる。そこにキズがなければ**図 2.1**のように透過し、さらに 1.4D 伝搬して反対のリブに達する。これと同じ状態 (**図 2.2**) のときの透過パルスの最大値を測定す

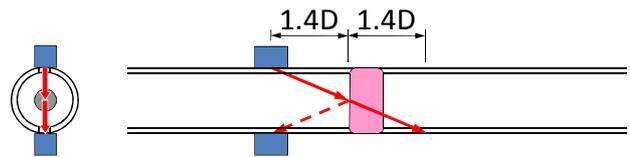


図 2.1 JIS 法のキズがない場合の伝搬

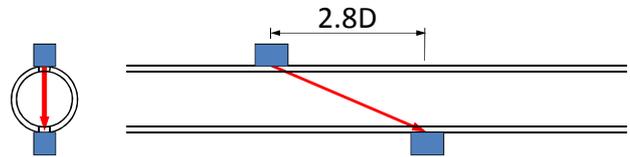


図 2.2 JIS 法の基準レベル測定法 (透過走査)

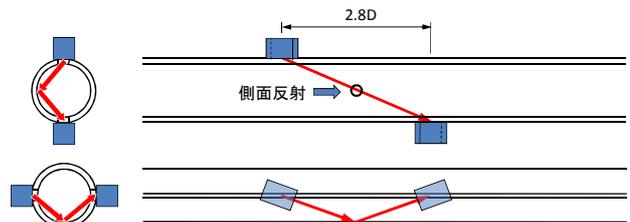


図 2.3 JRJS 法の基準レベル測定法 (斜め透過走査)

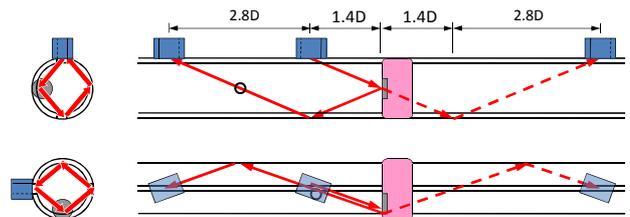


図 2.4 斜めタンデム走査法

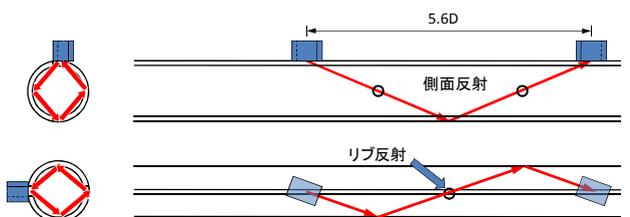


図 2.5 斜めタンデム走査法の基準レベル測定法 (斜め V 透過走査)

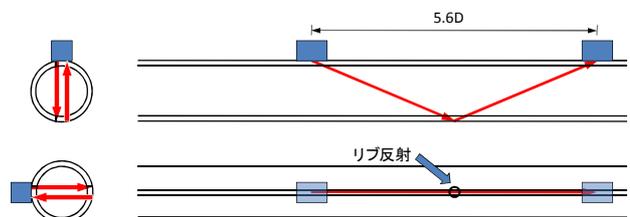


図 2.6 直角タンデム走査法の基準レベル測定法 (V 透過走査)

る。これが JIS 法の基準レベルである。この場合の測定方法を透過走査と呼ぶ。

同様の考え方に基づいて、JRJS 法の場合の基準レベルは図 2.3 のように測定する（斜め透過走査）。

JRJS 0005 には、斜めタンデム走査法も規定されている。タンデム走査法とは、2 個以上の探触子を同一面上に配置して探傷する方法である。斜めタンデム走査法は、図 2.4 のように首振りを行なった状態でタンデム走査を行う方法であり、複雑な伝搬経路となる。この場合の基準レベルの測定方法は図 2.5 のようになる（斜め V 透過走査）。鉄筋周面にはリブもあるので、その影響についても検討するため、首振りを行わないタンデム走査法（直角タンデム走査法）の場合の基準レベルの求め方である図 2.6（V 透過走査）についても検討した。

基準レベルの測定は、表 2.1 のように周面の反射がある。探傷および基準レベルの測定にとって、これらの反射がどの程度影響するのかは、非常に重要である。

表 2.1 基準レベル測定法の反射位置と回数

探傷方法	基準レベル測定法	反射位置と回数(回)	
		リブ	側面（節または腹）
JIS 法	透過走査	—	—
JRJS 法（斜め K 走査法）	斜め透過走査	—	1
直角タンデム走査法	V 透過走査	1	—
斜めタンデム走査法	斜め V 透過走査	1	2

2.2 基準レベル測定に及ぼす周面反射の影響³⁾

D32 の鉄筋を用いて、図 2.2～図 2.6 の状態で探触子を同一方向にスライドさせながら透過パルスを測定した。その結果が図 2.7 である。

透過走査時の透過パルスの大きさに対して、斜め透過は 10dB、V 透過は 17dB、斜め V 透過は 26dB 下がっており、測定方法によって透過パルスの大きさはかなり異なっており、反射回数が大きくなり、探触子距離が長くなるほど低下しており、その影響は極めて大きい。

また、いずれの結果も波打っていることがわかる。斜め V 透過の結果は、3 回も反射しているため、複雑な波形をしているが、そのほかは節の間隔である 15mm 周期になっている。そのうち斜め透過走査について、次のような検討を行なった。

斜め透過走査を行なったときの探触子距離 2.8D は、図 2.8 のようにほぼ節 6 個分に相当するため、

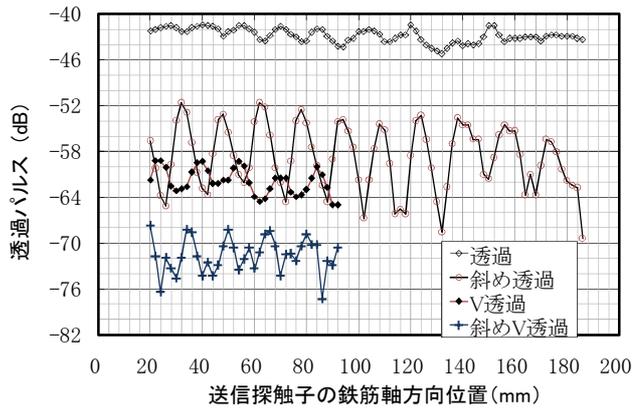


図 2.7 各基準レベル測定結果

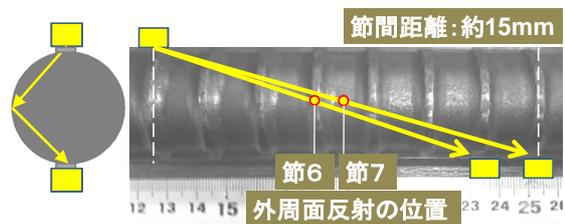


図 2.8 探触子距離と反射点の関係

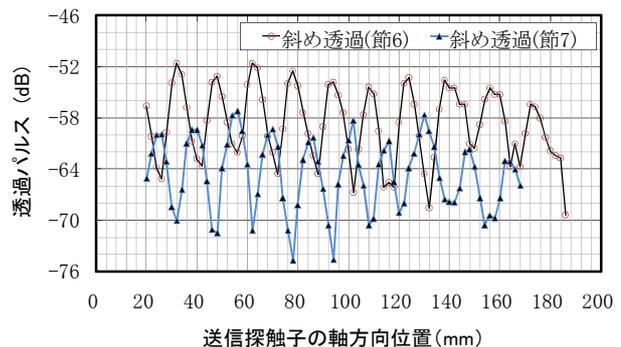


図 2.9 探触子距離節 6、節 7 の斜め透過走査

探触子が節の位置の時、反射は節の位置になる。探触子が腹の時、反射も腹になっているはずである。節の位置の時の低下が大きかったものと考え、節 7 個分の場合について測定し、探触子が節の位置の時反射は腹になるようにして測定した。その結果が図 2.9 である。節 7 の場合は、屈折角が異なっているため透過パルスは低くなっているものの、波形の位相は節 6 の場合と反転している。探触子が節の位置の場合、反射は腹、探触子が腹の場合、反射は節の位置になるためと考えられ、反射が節の位置の場合に透過パルスの低下が大きくなっている。基準レベルの測定はもちろん、探傷においても最大のパルスまたはエコーが得られるように探触子位置を考慮する必要がある。

3. 人工キズによる伝搬経路、キズの位置・大きさの影響に関する検討^{4), 5), 6)}

3. 1 人工キズ試験片と探傷方法

異形棒鋼 D32 および丸鋼 $\phi 32\text{mm}$ の切断面に、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 3.1 および図 3.2 のように円形平底穴の位置と形状を示す。

鉄筋断面の中心には、直径が 3mm、6mm、9mm の 3 種類のドリル穴を設けたものを作製した(以下、中心キズと呼ぶ)。

外周部には、鉄筋断面の中心を原点とし、送信側探触子を接触させるリブ位置を 0 度とし、右回りに 0 度、45 度、90 度の位置に直径が 6mm のドリル穴を加工した(以下、0 度キズ、45 度キズ、90 度キズと呼ぶ) 試験片を作製した。また、90 度の位置においては直径が 3mm と 9mm の試験片も作製した。外周部のキズは、図 3.1 および図 3.2 のように、異形棒鋼は鉄筋中心から 13.5mm (外周面から 1.8mm) に接するように加工した。丸鋼は中心から 15mm (外周面から 1mm) に接するように加工した。

図 3.1、図 3.2 には JIS 法と JRJS 法による探傷によって超音波の中心が当たる経路も示している。リブ軸上にある 0 度キズと中心キズの中心に JIS 法が当たっている。外周部のキズは、45 度キズの中心近くを JRJS 法が当たっているが、0 度キズと 90 度キズには直接当たっていない可能性がある。

探傷実験したのは、JIS 法と JRJS 法の 2 方法である。送信探触子はキズの中心に当たる位置に固定しておき、受信探触子はキズの中心位置で反射するものと仮定したときに受信できる位置(以下、予測位置と呼ぶ)の前後を数点移動させて測定した。135 度キズ、180 度キズについては、試験片を反転させて測定した。

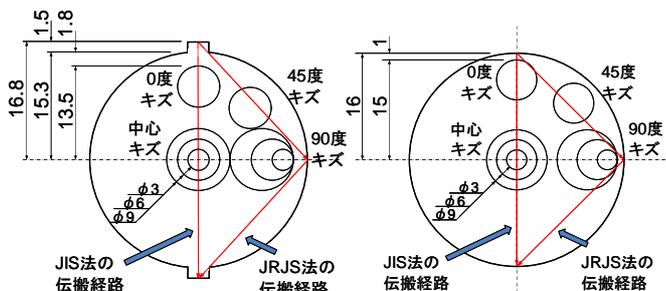


図 3.1 異形棒鋼の人工キズ

図 3.2 丸鋼の人工キズ

3. 2 人工キズ試験片の探傷結果

図 3.3 に JIS 法の探傷による、各キズからの最大エコー高さと、受信探触子のキズ面からの距離を示す。図中の縦線は、予測位置である。図 3.4 には JRJS 法の場合について示す。

図 3.3 の JIS 法の結果は、異形棒鋼、丸鋼の各キズともほぼ予測位置で最大エコー高さが測定されている。ただし、リブ軸から離れている 45 度、90 度、135 度のエコー高さは低く、探傷は難しいことを示している。

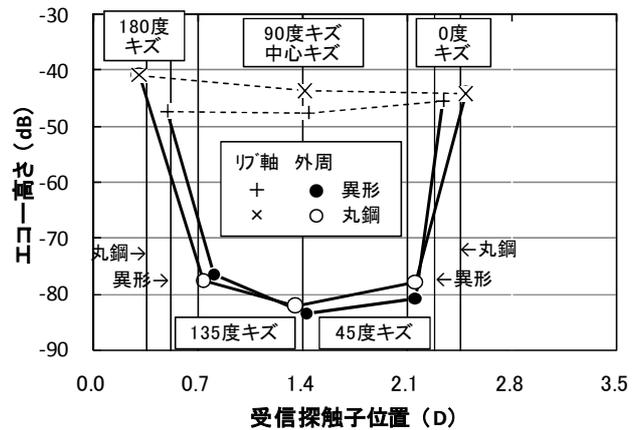


図 3.3 JIS 法の結果

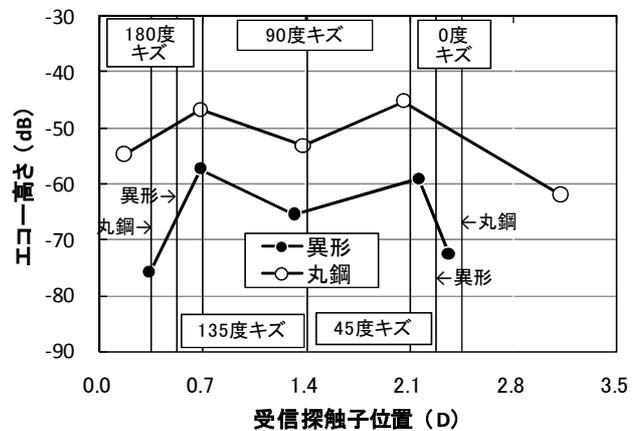


図 3.4 JRJS 法の結果

図 3.4 の JRJS 法の結果、45 度、90 度、135 度キズともほぼ予測位置で最大エコー高さが測定されている。ただし、異形棒鋼は丸鋼よりも 10dB 程度低くなっている。また、90 度キズは 45 度、135 度キズよりも低くなっている。前者の異形棒鋼と丸鋼の違いは、図 2.7 の透過走査 (JIS 法の基準レベル) と斜め透過走査 (JRJS 法の基準レベル) の違いとほぼ同じであり、異形棒鋼の場合、細幅のリブによる乱反射の影響と考えられる。後者の 90 度キズと 45 度、

135度キズの違いは、**図 3.1** と **図 3.2** のキズ位置と伝搬経路の位置関係のとおり、45度キズと135度キズは、その中心近くを伝搬しているため高いエコーが測定されたが、90度キズではキズの縁をかすめて伝搬するものであることから低くなったものと考えられる。

図 3.4 の0度キズと180度キズは、最大エコーを受信した位置が予測位置よりも離れている。特に丸鋼の離れは大きい。そこで、丸鋼について送信探触子の固定位置と、最大エコーを測定した受信位置から反射位置を求めた結果が**図 3.5**である。反射点はキズの中心ではなく、伝搬経路とキズの接している位置で反射しているものと推定される。

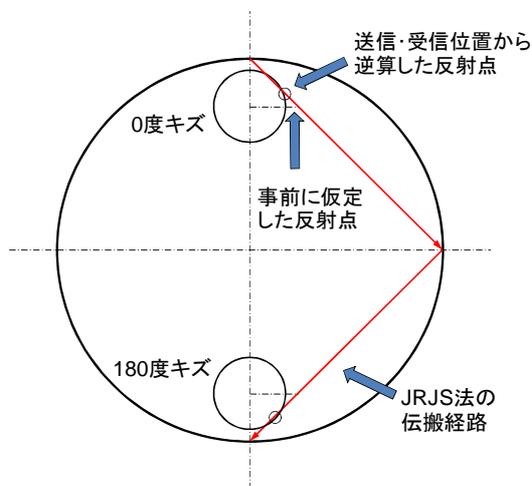


図 3.5 JRJS法の0度キズ、180度キズの反射位置

以上の結果より、JIS法はリブ軸上を伝搬している。JRJS法は、ほぼ仮定したとおりに伝搬しているものと推定される。

4. 溶接継手試験片による検討

4.1 溶接継手試験片の作製

試験片は、SD345のD19、D25、D32、D38、D51の5種類の鉄筋を用いて作製した。

溶接は、ルートギャップを10mm確保し、炭酸ガスシールドアーク溶接を行なった。

溶接部には**図 4.1**のようにキズを入れた。キズは、鉄筋断面の中央、0度、90度の3箇所に、大、中、小の大きさで入れるように計画した。

鉄筋軸方向のキズの位置は、**図 4.2**のようにキズを入れた鉄筋をA側、その開先面をA面、もう一方の鉄筋をB側、その開先面をB面とした。

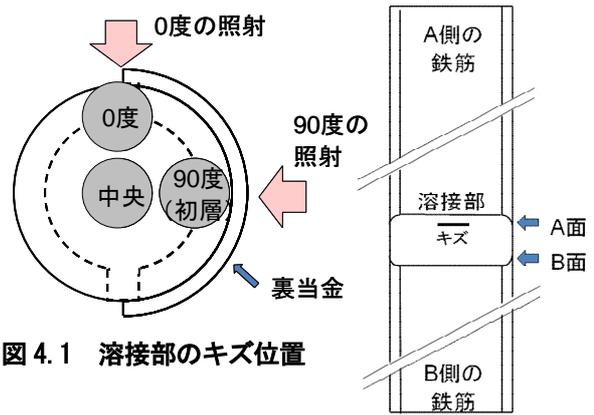


図 4.1 溶接部のキズ位置

図 4.2 軸方向のキズ位置

4.2 基準レベルの検討

探傷実験の前に、**図 4.2**のA側、B側の鉄筋の基準レベルを、**図 2.2、2.3、2.5、2.6**の4種類の方法によって測定した。

透過走査の結果に対して、斜め透過走査、V透過走査、斜めV透過走査の差を求め、鉄筋径ごとに示した結果が**図 4.3**である。鉄筋径が大きくなるほど各透過パルスの差は大きくなっている。例えば、斜め透過は、透過走査よりもD19は6dB、D51は12dBもパルスが小さくなっていることを示している。両者の関係を直線回帰すると、式(1)~(3)が得られた。

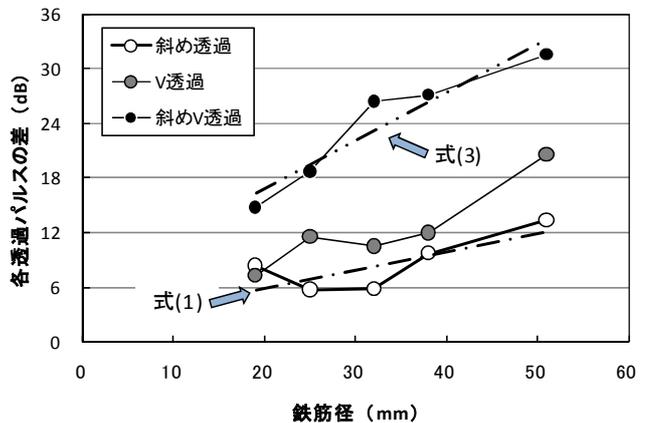


図 4.3 鉄筋径と各透過パルスの差の関係

$$\text{斜め透過} \quad y=0.196x+2.0 \quad r^2=0.59 \quad (1)$$

$$\text{V透過} \quad y=0.370x+0.1 \quad r^2=0.85 \quad (2)$$

$$\text{斜めV透過} \quad y=0.527x+6.3 \quad r^2=0.91 \quad (3)$$

ここに、y：各透過パルスと透過走査の差
x：鉄筋径

JRJS 0005 には斜めタンDEM走査法による探傷も規定されている。しかし、斜めタンDEM走査法の基準レベルを求める斜めV透過走査の結果は、透過走査に対して 20~30dB 程度も低くなっている。超音波探傷は 6dB 小さくなるごとに振幅が 1/2 になるので、斜め透過の振幅は透過走査の 1/8 程度に低下していることになる。D51 は 1/32 程度になっていることになり、ノイズとの判別はつきにくいものと考えられ、斜めタンDEM走査法は実用上、適用は難しいものと考えられる。

4.3 引張試験結果⁹⁾

基準レベル測定後に JIS 法および JRJS 法による探傷実験を行なったが、探傷精度の確認は引張強度とキズの位置・大きさを知る必要があるため、その前に引張試験結果を示す。

引張試験は JIS Z 2241 に準じて行い、引張強度を求めた。破断面ではキズ面積を測定し、キズ面積を公称断面積で除してキズ面積率を求めた。

引張試験を行なった全試験片のキズ面積率と引張強度の関係を、キズの位置ごとに分類して図 4.4 に示す。また、図 4.5 には鉄筋径ごとの結果を示す。横の一点鎖線は規格引張強さである。キズの位置は、ほぼ計画したとおり中央、0 度、90 度の位置に入っていた。キズ面積率は図のとおりほぼ連続的に分布していた。

図 4.4、図 4.5 より、引張強度はキズの位置によって傾向が多少異なり、鉄筋外周に接している 0 度キズ (■)、90 度キズ (●) は中央キズ (□) に比較して、キズ面積率が同じ場合、引張強度は小さい傾向がある。同じキズ面積でも、外周に接しているキズは内部のキズよりも強度が低下するため、検査において特に外周部のキズの探傷は、強度に対して危険側になるため、より重要であるといえる。

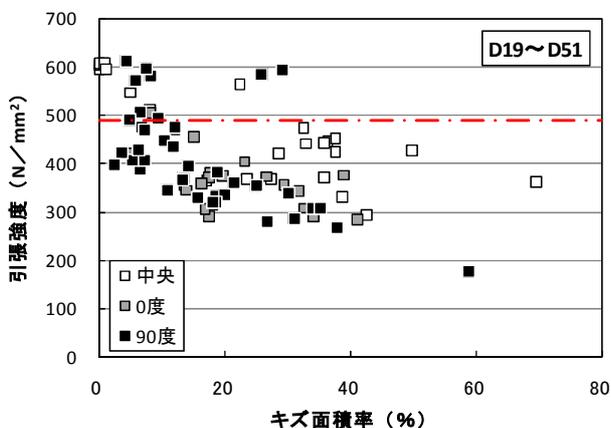


図 4.4 キズ面積率と引張強度の関係

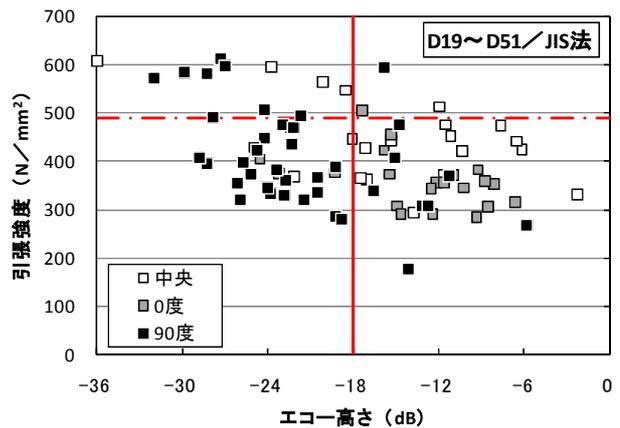
図 4.5 の斜線は、母材強度 600N/mm² のときキズ面積率 0% と、規格引張強さのときキズ面積率 10% を通る線である。これは、JRJS 0005 では、超音波探傷の判定基準は、鉄筋の引張強さの規格値を保証しており、規格引張強さを下回るのはキズ面積率 10% 以上であるといわれているので入れた線である。

D19、D25、D32 のキズ面積率と引張強度の結果は、ほぼ斜線右に分布しており、JRJS 0005 のとおりである。しかし、D38 と D51 の結果は斜線の左側に分布しており、JIS 法、JRJS 法による探傷結果と保証できる強度の関係は JRJS 0005 とは異なることが予想される。

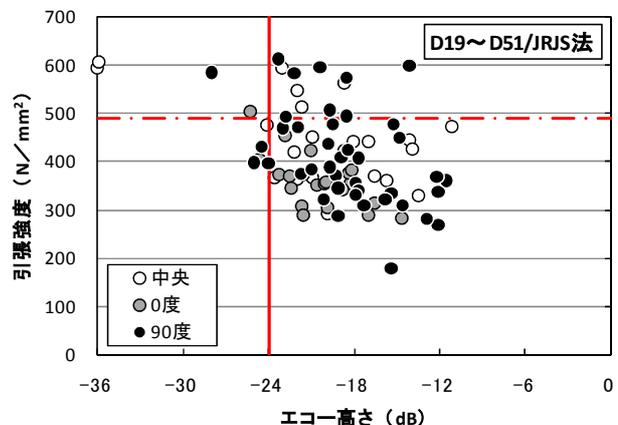
4.4 探傷精度に関する検討^{7), 8), 9)}

図 4.6 に全試験片の引張強度と探傷結果の関係を示す。(a) 図は JIS 法、(b) 図は JRJS 法の結果である。

図 4.7 には鉄筋径ごとの結果を示す。横の一点鎖線は規格引張強さ、縦の太い実線は JRJS 0005 が規定している判定基準である。



(a) JIS 法の結果



(b) JRJS 法の結果

図 4.6 エコー高さと引張強度の関係

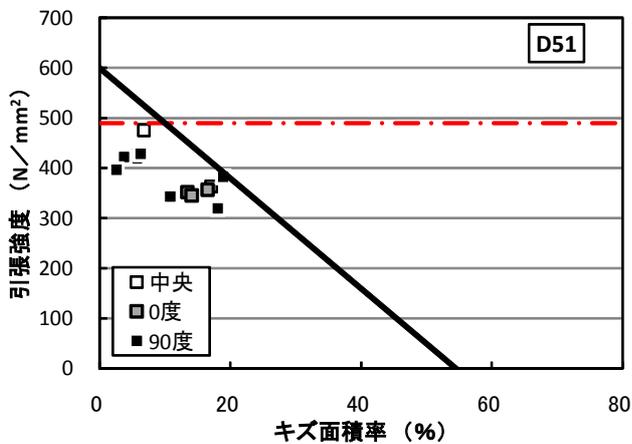
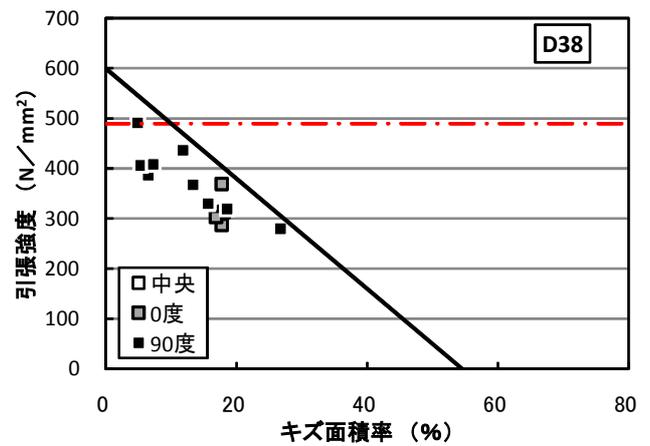
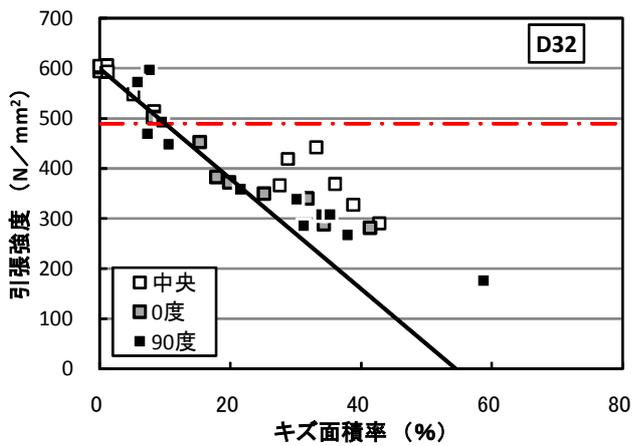
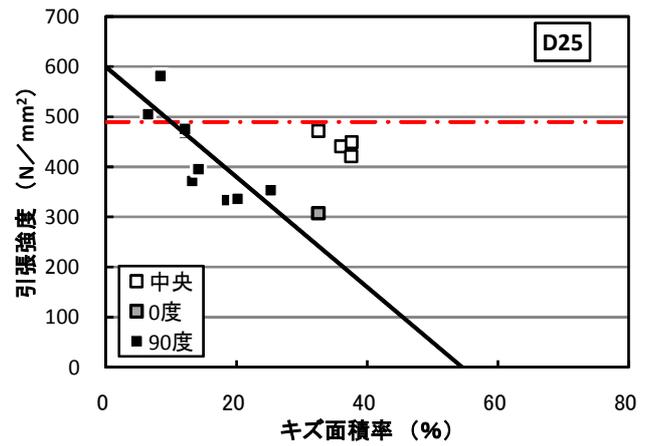
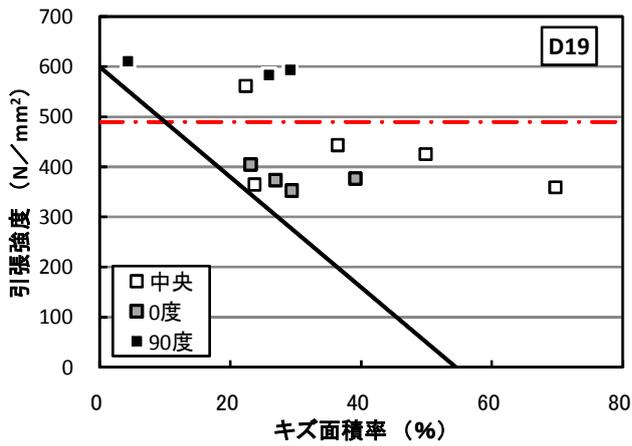


図 4.5 鉄筋径ごとのキズ面積率と引張強度の関係

規格引張強さと判定基準で区切られた部分の右上を第1象限とし、左回りに第2象限、第3象限、第4象限とすると、第1象限は強度が規格値を上回っているにもかかわらず超音波探傷の判定基準を下回っており、「安全側の誤判定」となる。第2象限は強度、探傷結果とも合格で一致、第4象限は強度、探傷結果とも不合格で一致していることを示している。第3象限は、強度は不合格にもかかわらず超音

波探傷では合格と判定する「危険側の誤判定」となる。

両図ともエコー高さが高くなるほど引張強度が低くなる傾向を示しており、ある程度の相関関係を有している。(b)図のJRJS法はキズ位置に関係なくほぼひと塊りの分布になっているが、JIS法は90度キズ(■)、0度キズ(■)、中央キズ(□)の順に左に寄っており、キズの位置によってエコー高さや引

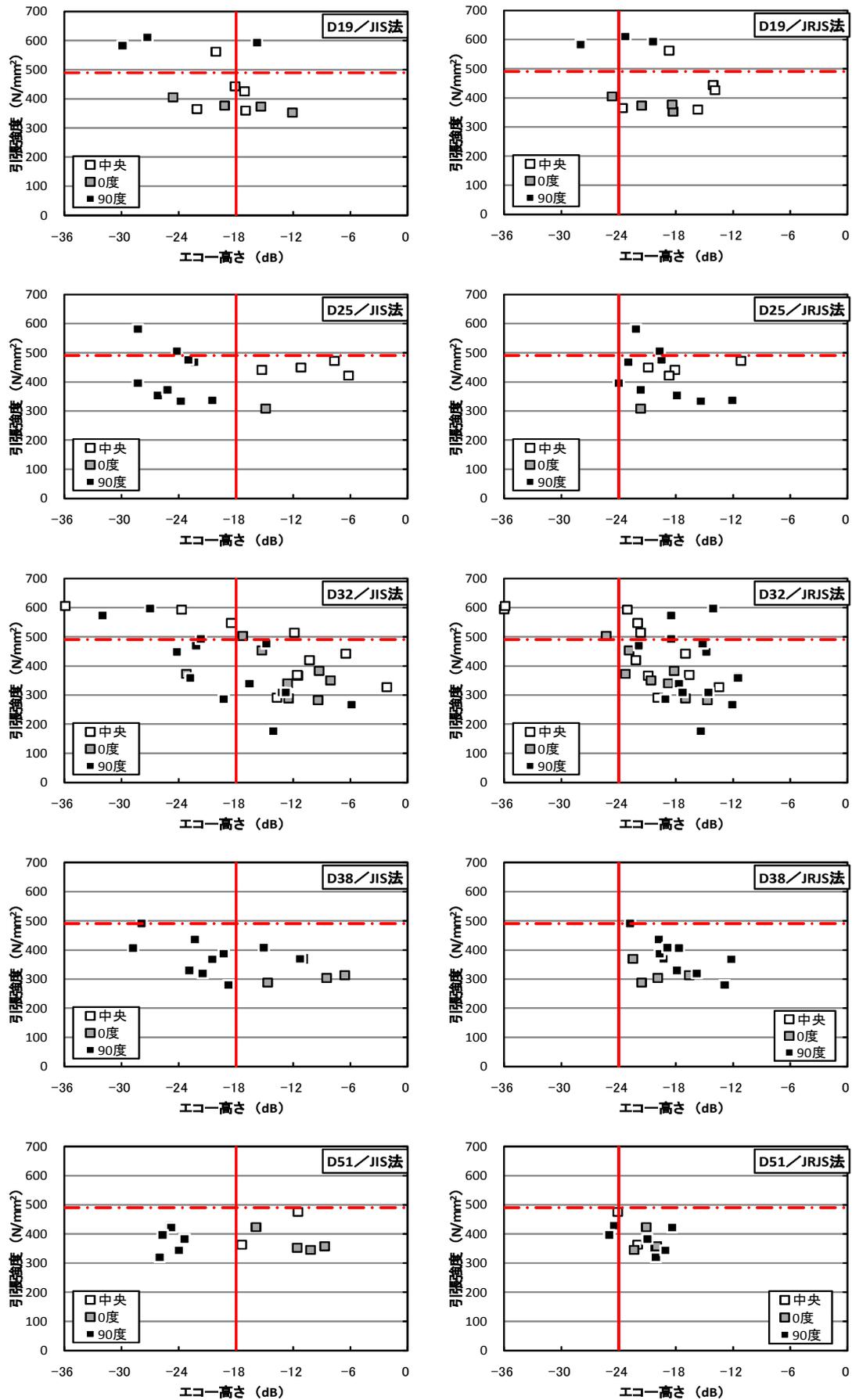


図 4.7 エコー高さと引張強さの関係（左が JIS 法，右が JRJS 法。上から D19, D25, D32, D38, D51）

張強度の関係が異なっている。90 度キズの多くは「危険側の誤判定」となっている試験片が多数ある。中央キズは JIS 法で探傷しやすい位置であるが「危険側の誤判定」がわずかにある。

対する JRJS 法は、わずかに「危険側の誤判定」があるが、JIS 法に比べると探傷精度は極めて高い。

「危険側の誤判定」になりやすい状態を確認するために図 4.7 の鉄筋径ごとの結果を見る。左の列が JIS 法、右の列が JRJS 法の結果である。

JIS 法は、鉄筋径にかかわらず 90 度キズの多くは「危険側の誤判定」であり、90 度キズの探傷には適していないことは明確である。

JRJS 法は、D19 で 1 点、D51 で 3 点、「危険側の誤判定」になっている。「安全側の誤判定」も D19～D32 に数点ずつあるものの、JIS 法と比較して探傷精度は高い。

4.5 キズ面の位置と探傷位置

キズは、図 4.2 のように A 側の鉄筋面に入れているが、探傷は A 側、B 側のどちらで行うのがいいかを、JRJS 法について検討した。エコーが高かったほうをプロットした結果を図 4.8 に示す。この実験では、A 側、B 側ほぼ同数であった。現場ではキズがどこにあるのかわからないため、両側からの探傷が必要である。

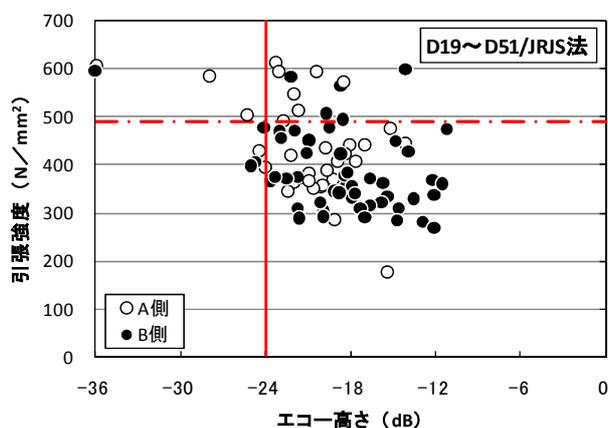


図 4.8 測定側の違いと探傷結果 (JRJS 法)

7. まとめ

以上の結果より、次のことが明らかになった。

- (1) JRJS 法は、仮定した経路である溶接部の外周をかなり厳密に菱形状に伝搬しており、外周部の探傷が可能と推定された。
- (2) 合否判定のための判定基準は、鉄筋径によって異なる結果であった。

(3) 引張強度、キズ面積率と探傷結果より、D38 以下はほぼ JRJS 0005 の判定基準で判定できる。しかし、D38 と D51 ではキズ面積率にくらべて、引張強度の低下が大きいため、結果としては危険側の判定となりうる。

(4) (3)の結果から、太径鉄筋に溶接継手を適用することには注意が必要である。

参考文献

- 1) 森濱和正, 池ヶ谷靖, 吉野次彦: 鉄筋のガス圧接継手, 溶接継手の超音波探傷検査に関する検討, 日本非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造物への非破壊検査の展開」, Vol.2, pp.237-242, 2006.8
- 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.685-690, 2008.7
- 3) 伊佐見和大, 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研究 その 1 基準レベルのとり方等に関する検討, 日本非破壊検査協会平成 22 年春季講演大会講演梗概集, pp.145-148, 2010.5
- 4) 伊佐見和大, 森濱和正, 渡辺博志: 鉄筋溶接継手を対象とした超音波探傷試験における欠陥の位置の影響に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集第 V 部, pp.477-478, 2010.9
- 5) 前掲書 3): その 2 超音波ビームの広がりと人工キズのいちの関係について, 平成 23 年春季講演大会講演梗概集, pp.97-100, 2011.5
- 6) 伊佐見和大, 森濱和正, 渡辺博志: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.607-612, 2011.7
- 7) 前掲書 3): その 3 溶接継手鉄筋の直角 K 走査法および斜め K 走査法による超音波探傷, 平成 23 年秋季講演大会講演梗概集, pp.157-160, 2011.10
- 8) 森濱和正, 渡辺博志: 斜め K 走査法による鉄筋溶接継手の超音波探傷に関する検討, コンクリート工学年次論文集 (投稿中)
- 9) 森濱和正, 渡辺博志: 鉄筋溶接継手の超音波探傷試験結果と引張強度の関係, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集第 V 部 (投稿中)

Study on ensuring performance of enclosed arc welded joints of reinforcing bars in RC Structures

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : 2009-2011

Research Team : Concrete and Metallic Materials
Research Team

Author : Hiroshi Watanabe
Kazumasa Morihama

This research is aimed at the ensuring reliability of enclosed arc welded joints performance for reinforcing bars by development of test method to detect the defects due to poor welding practice of the joints.

Therefore, our group examined the accuracy of the UT methods recently proposed from Standards of Japan Reinforcing Bar Joints Institute (JRJS method) and method of JIS Z 3062 (JIS method) by the test pieces welded joints were placed defects. After the tensile tests of test pieces, from the relationship between tensile strength and echo height, defect detection accuracy was determined.

As a result, detection accuracy of the defect first layer of welded joints is more JRJS method is much higher than JIS method. However, strength of welded joints is reduction even in a slight defect, the use of welded joints should be careful.

Key Word : reinforcing bar, enclosed arc welded joint, ultrasonic testing, JRJS 0005, angle beam technique(JRJS method), JIS Z 3062(JIS method)