

論文 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

倉持 貢^{*1}・森濱 和正^{*2}

要旨: 鉄筋のエンクローズ溶接は, ガス圧接法の代替接合法として一般RC造にも採用事例が急増している。しかし, 施工は特殊技能を有する有資格者に拠るが有害欠陥を多発させることがあり, 検査方法の開発が切望されている。本研究では, 鉄筋溶接継手部の超音波法として, 従来法の直角K走査法の他に新たに直角タンデム走査法と斜めタンデム走査法を提案し, 溶接試験体での探傷実験を行い, 新探傷法の基本的な超音波特性や実用性等を明らかにすると共に引張試験結果との相関を検証した。斜めタンデム走査法及び直角タンデム走査法は直角K走査法との併用法または代用法として有効であることが確認された。

キーワード: 鉄筋継手, エンクローズ溶接, 超音波斜角探傷検査法, 斜めタンデム走査法, 引張強さ

1. はじめに

鉄筋のエンクローズ溶接(図-1)は, 鉄道レールの接合法として開発された後, 鉄筋工事の工業化工法等の開発に伴って建築業界に広く進展している。近年はその経済性や作業効率上の優位性から, ガス圧接法の代替接合法として一般RC造にも採用される事例が急増している。

しかし, 施工は特殊技能を有する有資格者に拠るが由に, その品質は技能者の技量に左右されることが多く, 有害欠陥を多発させることもある。特に, 裏当て金近傍の初層部に溶込み不良や開先面に沿った融合不良等が発生し易く, これらの欠陥に対する有効な検査方法の開発が切望されている。

(社)日本圧接協会 非破壊検査小委員会では, 数年前から鉄筋溶接継手の超音波探傷法に関する研究¹⁾を推進してきた。この度, 新たな超音波探傷法を提案すると共にその有効性を実験的に検証したので報告する。本研究の概要は表-1に示す通りである。

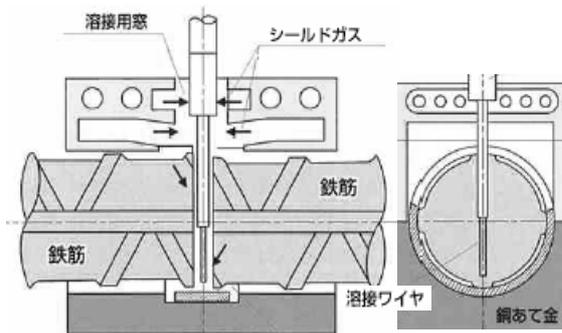


図-1 エンクローズ溶接法(KEN-SH)の例

2. 新たな超音波探傷試験法の概要

鉄筋溶接継手の非破壊検査としては, ガス圧接部と同様に JIS Z 3062 に基づく斜角二探触子法や首振り法による超音波探傷試験が実施されている事例が多い。しか

表-1 研究開発概要

実施項目	実施内容
1 研究計画書立案	新探傷法の検討・提案
2 新規探傷法の基礎実験	探傷法: 4種類の探傷法 鉄筋径: D19, 25, 32, 38 模擬欠陥: 10%公称断面積のSDH
3 欠陥入り溶接試験体の製作	溶接工法名: N-NT, SB, メッシュ NT (各56本) 鉄筋種類: SD345 鉄筋径: D19, 25, 32, 38
4 欠陥入り溶接試験体の探傷実験	探傷法: 4種類の探傷法 試験体: 193体
5 欠陥入り溶接試験体の引張試験・曲げ試験・断面観察 etc.	試験体: 193体

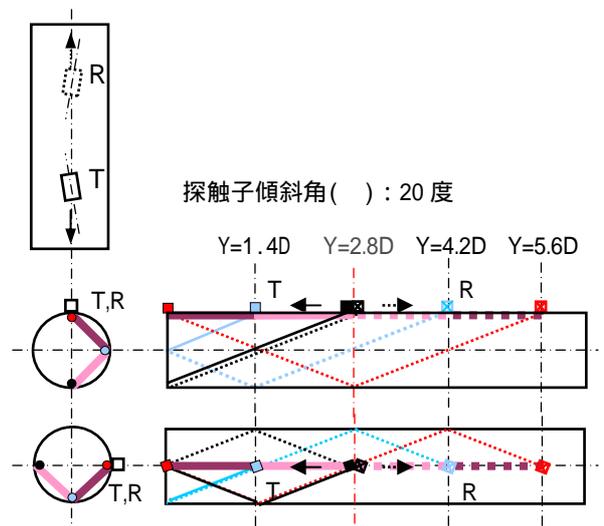


図-2 溶接継手の斜めタンデム走査法

し, 溶接欠陥の発生位置と探傷可能領域を考慮すると, 欠陥検出能力は必ずしも充分とは言えない。

*1 清水建設(株) 建築事業本部 建築技術部 上席エンジニア (正会員)

*2 (独) 土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメントチーム 主任研究員 (正会員)

そこで、探傷断面に対して直角となるように送受信探触子を配置した従来法(直角K走査法と称す)と異なり、図-2に示すように送受信探触子(5C5X5A70)に傾斜をつけて、その傾斜角()を保持したままで同一縦リブ上を前後走査することにより、探傷断面内を通過する超音波ビームの伝播経路が探傷幾何学を満足する多角形を形成して、探傷可能領域を拡大する探傷法(斜めタンデム走査法と称す)と同一縦リブ上に送受信探触子を直角に配置し、その状態で縦リブ上を前後走査する探傷法(直角タンデム走査法と称す)を提案した。因みに、探傷幾何学を満足した多角形を形成する超音波ビームの伝播経路とは、図-3に示すような経路のことを指している。また、探触子の傾斜角()は以下のように求めることができる。ここでは伝播経路が図-2(b)の場合を例示する。図-4に示すように、鉄筋径をD、探触子の屈折角()を70°とすると、abcにおいて、

$$Y = \overline{ab} = (D/2) \times \tan = (D/2) \times \tan 70 = 1.37D \quad (1)$$

$$W_1 = \overline{bc} = (D/2) \div \cos = (D/2) \div \cos 70 = 1.46D \quad (2)$$

また、bcdにおいて、

$$(\text{探触子の傾斜角}) = \tan^{-1}(D/2W_1)$$

$$= \tan^{-1}(D/2 \times 1.46D) = \tan^{-1}(0.342) = 19^\circ \sim 20^\circ \quad (3)$$

となり、探触子の傾斜角()が算出される。

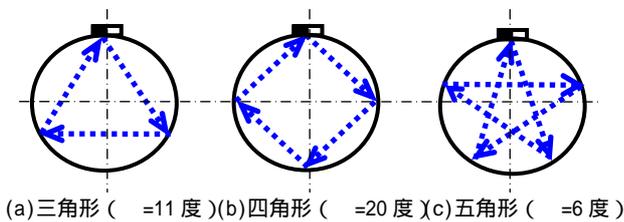


図-3 超音波ビームの伝播経路

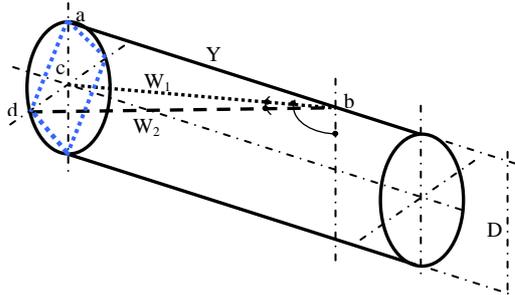


図-4 探触子の傾斜角()の求め方例

3. 模擬欠陥入り試験体を用いた新探傷法の基礎実験

3.1 実験目的

模擬欠陥(ドリル孔)入り試験体を用いて、従来法である直角K走査法(JIS Z 3062の斜角二探触子法)の他に、今回提案の直角タンデム走査法と斜めタンデム走査法(傾斜角:11度,20度)の計4種類の走査法による探傷を行い、これらの基本的な超音波特性を明らかにするとともに以下に示す探傷上の課題について検証した。

a)縦リブや節がある異形鉄筋に於いて、超音波ビーム

が探傷幾何学を満足する経路で伝播するか否か。また、側面反射に起因する伝播性能の低下が探傷上の障害となるか否か。

b)異形鉄筋の側面反射時に発生する妨害エコーと欠陥エコーとの分離・識別が可能か否か。

c)欠陥検出能力の向上が、期待通りに図れるか否か。

3.2 試験体

a)材質:SD345 b)径:D19,D25,D32,D38

c)試験体形状寸法:図-5に示すように、円形欠陥を模擬して鉄筋端面にドリル孔を削孔した。孔径は欠陥面積率が各鉄筋公称断面積の10%となるように選定した。

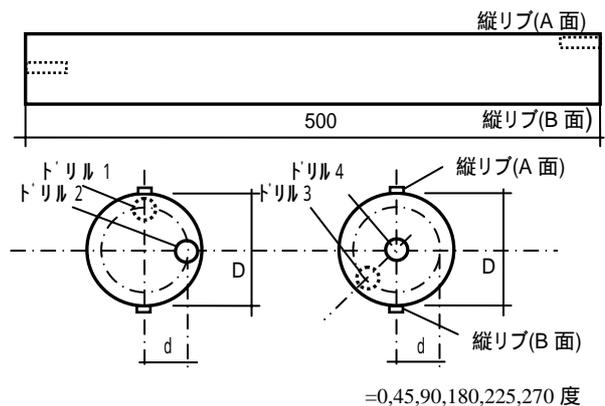


図-5 模擬試験体の形状寸法

3.3 使用装置及び付属品

a)探傷装置:デジタル型超音波探傷器

b)探触子:5C5X5A70(接触面:フラットタイプ)

c)接触媒質:グリセリン水溶液

3.4 実験方法

各試験体について、4種類の走査法に基づく探傷を行い、模擬欠陥からの受信波形や欠陥エコー高さ等の探傷データを取った。尚、探傷はアクリル製の探触子保持治具を製作・使用して、実施した。

3.5 実験結果及び考察

(1)距離振幅特性曲線(DAC)

各探傷法による距離振幅特性曲線(DAC)を図-6に示す。上下の縦リブ間での反射を繰返して得られる直角K走査法や直角タンデム走査法の距離振幅特性曲線と鉄筋側面と縦リブ間での反射を繰返して得られる斜めタンデム走査法の距離振幅特性曲線は、ともに比較的スムーズな減衰曲線となることが明らかである。しかも各探傷法間の相違点も差ほど顕著でないといえる。一方、受信波形については、何れの探傷法も鮮明であり、所要信号と妨害エコーとの識別は比較的容易との結果を得た。これらの結果は、他の鉄筋径でも同様である。

(2)各探傷法によるドリル孔の探傷結果

4種類の探傷方法をパラメータにして、ドリル孔の探傷結果を示したものが図-7である。従来法である直角K

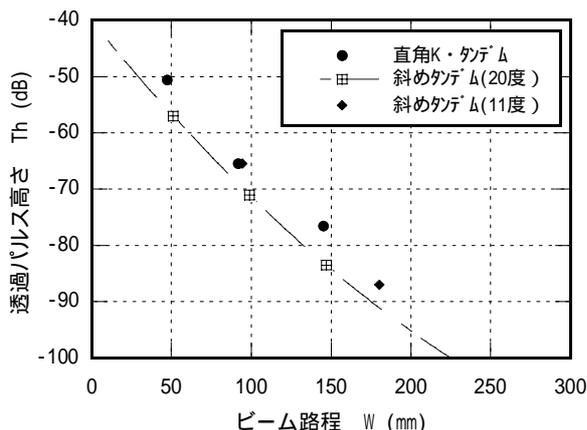
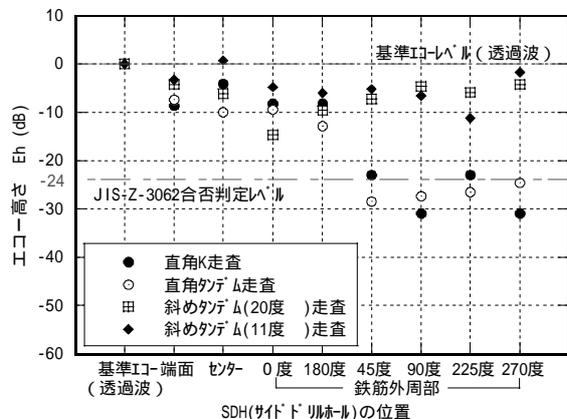


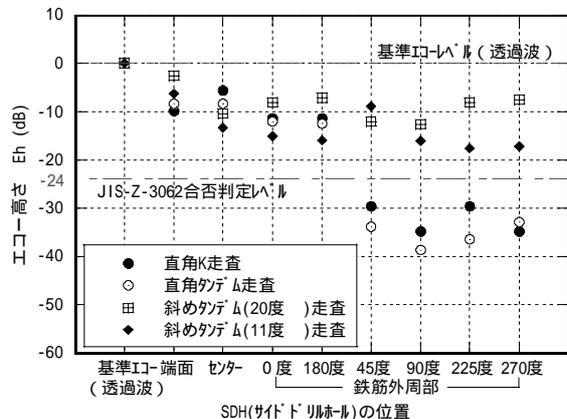
図-6 距離振幅特性曲線 (DAC, D32)

走査法と直角タデム走査法では、上下の縦リブを結ぶ線上にある欠陥（セクタ、0度、180度）は何れも良好に検出されているが、鉄筋外周部の欠陥（45度、90度、225度、270度）は欠陥エコー高さが -20 dB 以下と小さくなり、検出が困難な状況を示している。しかも、その傾向は鉄筋径が太径になるほど顕著となっている。これは、実験に供した模擬欠陥が鉄筋公称断面積の 10% と小さいことや元来直角K走査法の探傷可能領域が鉄筋公称断面積の約 30% 弱であることに起因していると考えられる。

一方、探傷可能領域が三角形又は四角形となる斜めタ



(a) D25



(b) D38

図-7 各種走査法によるドリル孔の探傷結果

ンデム走査法では、如何なる方向の鉄筋外周部の欠陥でも、ほぼ同じレベルで欠陥エコーが検出されていることが明らかである。これは、鉄筋軸に対して 20 度の傾斜角を有して発信された超音波ビームが鉄筋外周部にも伝播されて、直に欠陥で入射・反射されて、より適正な状態で受信されたものと考えられる。

上記から、異形鉄筋の節等が新探傷法の伝播特性に重大な障害をもたらすことは無いことから、新探傷法の超音波ビームは異形鉄筋でも直角K走査法と同様に探傷幾何学を満足する経路で伝播されると判断される。

4. 欠陥入り溶接試験体の探傷実験

4.1 実験目的

模擬試験体に引続き、欠陥入り溶接試験体の探傷実験を行い、新規提案した探傷方法（直角タデム走査法や斜めタデム走査法）の実用性等を検証した。また、探傷後は引張試験や破断面観察等を実施して、これらと超音波探傷検査結果との関係を明確にした。

4.2 試験体

実験に供した溶接試験体を表-2 に示す。試験体総数は 193 体である。人工欠陥は、表-2 中の図に示す位置に薄鋼板小片を TIG 溶接で仮固定した後に本溶接をする方法で挿入した。なお、人工欠陥の大きさは鉄筋公称断面積の約 10%、20%、30% の 3 種類とした。

表-2 欠陥入り溶接試験体

材質	溶接工法	節	径	数量	人工欠陥（鋼板小片）の挿入位置
SD345	NNT SB MNT	竹節	D19	67 体	 A 欠陥 B 欠陥
			D25	42 体	
			D32	42 体	
			D38	42 体	

4.3 使用装置

- 探傷装置：デジタル型超音波探傷器
- 探触子：5C5X5A70（接触面：フラットタイプ）
- 接触媒質：グリセリン水溶液
- 探傷治具：アクリル製の探触子保持治具

4.4 実験方法

各試験体について、直角K走査法（JIS Z 3062 の斜角二探触子法）・直角タデム走査法・斜めタデム走査法（傾斜角：20度）に基づく探傷を行い、受信波形や欠陥エコー高さ等の探傷データを採取した。また、探傷後は引張試験（or 曲げ試験）及び破断面観察を行い、溶接継手の引張強さ（以下、継手引張強さと略す）を求めると共に欠陥の発生位置や欠陥面積率（鉄筋公称断面積に対する欠陥面積の割合）を計測した。

4.5 実験結果及び考察

試験体総数 193 体中 54 体は、探傷後の引張試験及び曲げ試験に於いても溶接部破断ができなかった。この結果、欠陥の詳細が未確認となったことから、以降に示す実験結果の整理・検討は 139 体のデータを用いて行った。

(1) 引張試験及び破面観察結果

溶接試験体の引張試験結果と欠陥面積率との関係及び破断面写真を図-8,9 に示す。溶接欠陥の大半は裏当て金近傍の外周部に発生した溶込み不良で、その欠陥面積率は 12% ~ 50% と比較的大きなものである。一方、継手引張強さは母材の JIS 規格値に対して 1.3 倍 ~ 0.4 倍の値を示している。

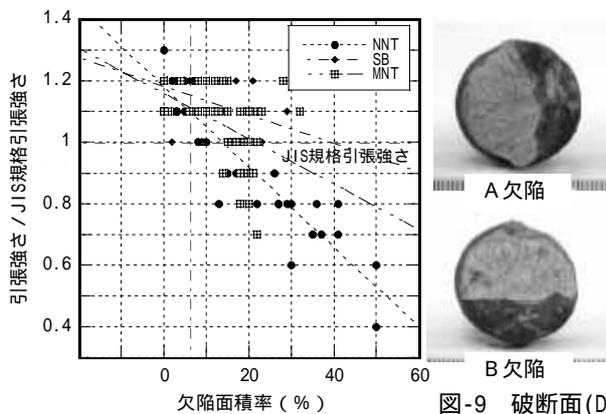


図-9 破断面(D32)

図-8 欠陥面積率と引張強さ

図から明らかなように、欠陥面積率との間には明瞭な負の相関が見られるが、欠陥面積率の継手引張強さへの影響度は溶接工法によって異なっている。

この主原因は、使用した溶接ワイヤの種類及び溶接施工条件(電流・電圧等)が溶接工法毎に異なっているため、溶接金属の引張強さに差異が生じたものと考えられる。

総じては、欠陥面積率が 10 数%程度を超えると、継手引張強さは JIS 規格値以下となることが明白である。したがって、このレベルが溶接 UT 法に要求される必要最低限の欠陥検出能力と捉える必要がある。

(2) 超音波探傷結果

(2.1) 受信波形

溶接継手の探傷時に得られる受信波形の 1 例を示したものが図-10 である。溶接継手の探傷に於いて懸念される妨害エコーの発生源は、溶接余盛、裏当て金、裏当て金と母材

との隙間、縦リブ、節等である。しかし、これらに起因する妨害エコーの発生は何れの探傷法に於いても雑音レベル程度であり、欠陥エコーの識別は比較的容易であると言える。

(2.2) 各探傷法による欠陥エコー高さの比較

欠陥発生位置(A, B欠陥)をパラメータとして、各探傷法によって得られる欠陥エコー高さを比較した結果が図

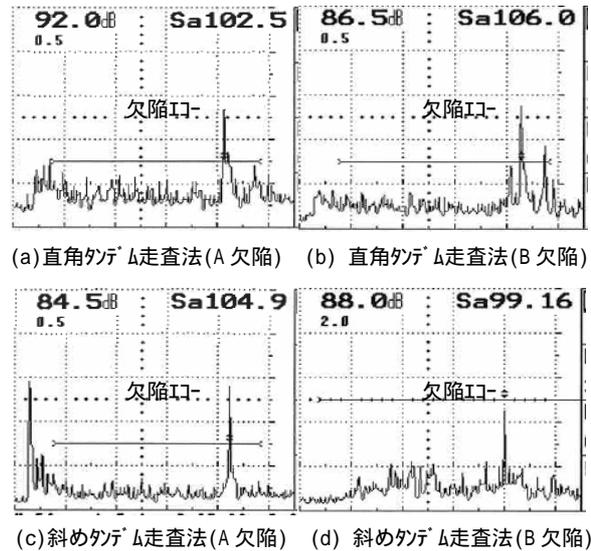


図-10 受信波形例 (D32)

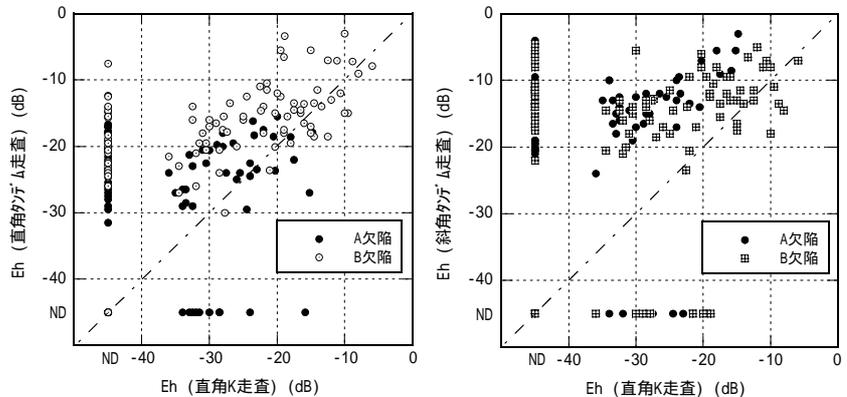


図-11 各探傷法による欠陥エコー高さの比較

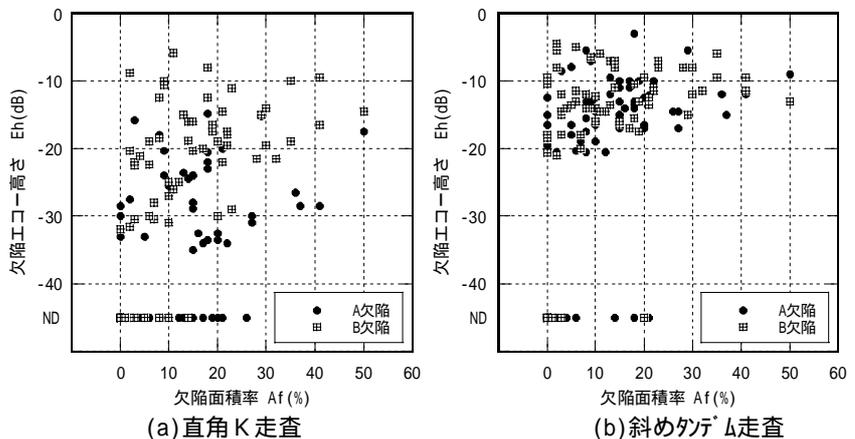


図-12 欠陥面積率と欠陥エコー高さの関係

-11である。欠陥エコー高さは基準レベル(各鉄筋の透過パルス高さ)との差で表示している。

上下の縦リブを結ぶ線上にあるB欠陥は、従来法である直角K走査法(JIS Z 3062の斜角二探触子法)は勿論のこと何れの探傷法でも良好に検出されている。

一方、縦リブに直交する外周部のA欠陥の場合は、直角K走査法と直角タンデム走査法の欠陥エコー高さが他の探傷法よりも著しく小さな値を示し、模擬欠陥と同じ結果となっている。特に、斜めタンデム走査法の欠陥エコー高さが直角K走査法等のそれよりも約10~15dB高めとなっており、前者の優位性が顕著である。

(2.3) 欠陥面積率と欠陥エコー高さの関係

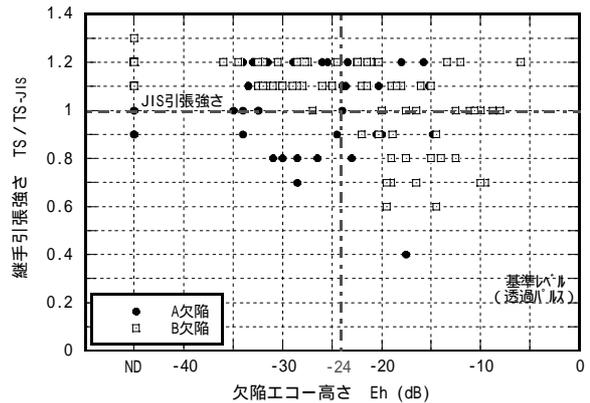
欠陥面積率と欠陥エコー高さとの関係を示した結果が図-12である。斜めタンデム走査法に於いて、微かではあるが欠陥面積率が増加するほど欠陥エコー高さが漸増する傾向が見られるが、何れの探傷法の結果もばらつきが大きく、欠陥面積率と欠陥エコー高さとの関係は明瞭ではない。

これは、一時に超音波ビームがカバーできる範囲は複雑形状で大面積の欠陥では部分的になることによると推定される。欠陥面積率と欠陥エコー高さとの関係が改善するためには、現状よりも更に超音波ビームを広げる等の方策が必要となると考えられる。この場合には使用する溶接ワイヤの種類(溶接工法)毎に合否判定基準を作成する必要はなく、統一基準を提案することが可能となると考えられる。

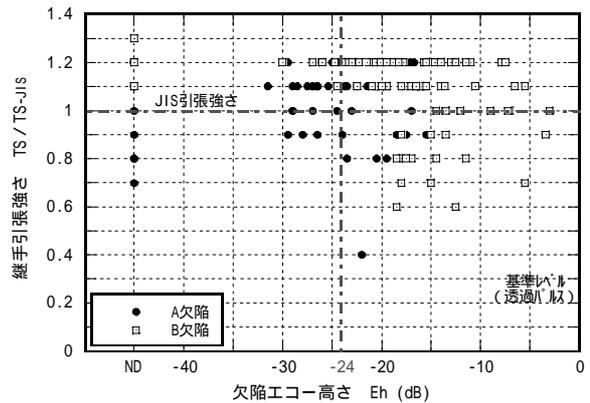
(2.4) 欠陥エコー高さと継手引張強さの関係

欠陥エコー高さと継手引張強さとの関係を探傷方法別に示した結果が図-13である。同図の縦軸はJIS規格値で基準化した継手引張強さを示し、横軸は透過パルスを基準レベルとした相対欠陥エコー高さを示している。探傷方法は直角K走査法、直角タンデム走査法及び斜めタンデム走査法であるが、夫々を単独に用いた場合の他に、直角K走査法と斜めタンデム走査法の併用法(直角K走査法と斜めタンデム走査法を適用し、評価の厳しい方を採用する方法)の結果も併せて表示した。総じては、欠陥エコー高さが高くなるほど継手引張強さは低くなる傾向にあることが明らかである。

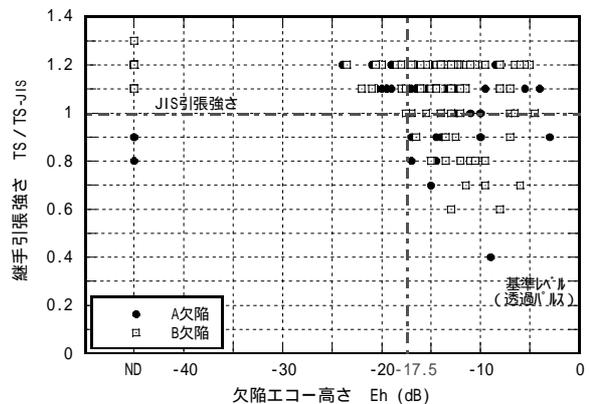
また、図-13(a)(b)(d)には基準レベル -24dB を合否判定レベルとするラインと、図-13(c)には基準レベル -17.5dB を仮の合否判定レベルとするラインを表記している。この2つのラインから、同図は4つの領域(第1,2,3,4象限)に区分される。第1象限は欠陥エコー高さが合否判定レベル以上となると共に継手引張強さがJIS規格値以上となる領域、第2象限は欠陥エコー高さは合否判定レベル未満となるが継手引張強さはJIS規格値以上となる領域、第3象限は欠陥エコー高さが合格



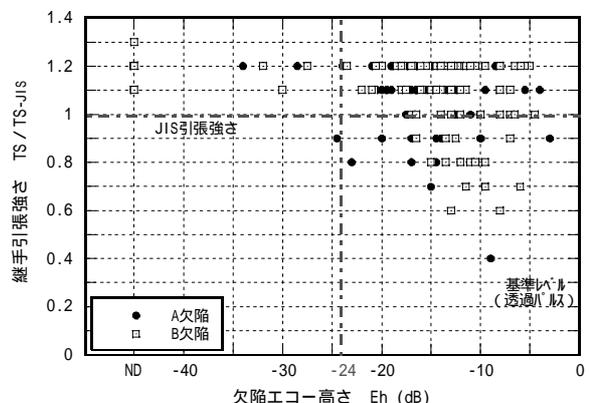
(a) 直角K走査法



(b) 直角タンデム走査法



(c) 斜めタンデム走査法



(d) 直角K走査法 + 斜めタンデム走査法

図-13 欠陥エコー高さと引張強さとの関係

値以上となる領域、第3象限は、欠陥エコー高さが合格

判定レベル未満となるが継手引張強さは JIS 規格値未満となる領域、第4象限は欠陥エコー高さが合否判定レベル以上となるが継手引張強さは JIS 規格値未満となる領域である。この内、第2,4象限のプロット点は超音波探傷試験結果と継手引張強さの相関が適正に対応しているが、第1,3象限のプロット点は両者が必ずしも適正な関係にないことを示している。超音波探傷試験の信頼性の観点からは、前者に含まれるプロット点を「一致」、後者のプロット点は「不一致」として、全データ数に対する両者の割合を下式のように算出することができる。

$$\text{一致率} = \frac{(\text{第2象限} + \text{第4象限のプロット点})}{\text{全データ数}} \quad (4)$$

$$\text{不一致率} = \frac{(\text{第1象限} + \text{第3象限のプロット点})}{\text{全データ数}} \quad (5)$$

上記の観点から、探傷データを整理した結果が表-4である。図-13及び表-4に示す結果は以下のように要約される。

- a) 何れの探傷法に於いても、欠陥エコー高さが高くなるほど、継手引張強さは低くなる傾向にある。
 b) 直角K走査法では、他の探傷法に比較して正解率が最も高くなるが、基準レベル - 24dB 未満とエコー高さの低い欠陥でも継手引張強さが JIS 規格値を下回るものが数多く出現する。

この種の欠陥の多くは縦リブに直交する外周部欠陥(A欠陥)であり、仮に合否判定基準を JIS Z 3062の基準レベル - 24dB とした場合は、継手引張強さの低い溶接継手でも見逃すことになると共に「合格」と過大評価する極めて危険側の判定となる。

- c) 直角タンデム走査法は、直角K走査法とほぼ同様の結果を示しているが、過大評価の割合は若干低下している。
 d) 斜めタンデム走査法の場合は、鉄筋外周部の欠陥でも検出可能であることから、継手引張強さの低い溶接継手を見逃す確率は極めて低くなる。ただし、エコー高さが比較的高いにも拘らず継手引張強さが JIS 規格値を満足するものが直角K走査法の場合よりも増加している。この傾向は鉄筋径が細径(D19, D25)になるほど、顕著となる。上記から、「良品」を「不合格品」と誤判定する現象が生じている。

不一致と評価した主な原因としては、探傷技術に対する習熟度に課題があったものと考えられる。

- e) 直角K走査と斜めタンデム走査法の併用法では、直角K走査法で主に鉄筋中央部の欠陥を検出し、斜めタンデム走査法では鉄筋外周部の欠陥を検出することになることから、継手引張強さの低い溶接継手を見逃す割合は0.5%と極めて低くなる。

f) 欠陥エコー高さと継手引張強さの関係が溶接工法毎に異なる原因としては、同一強度レベルの鉄筋に対して使用する溶接ワイヤの種類及び施工条件が溶接工法毎に異なることが考えられる。また、同一強度レベルの鉄筋でも細径になるほど、母材の引張強さは高い値を示す傾向が見られ、この結果が欠陥エコー高さと継手引張強さの関係に影響していると考えられる。

上記から、溶接継手に於ける超音波探傷検査の合否判定基準は、現状では鉄筋及び溶接ワイヤの種類毎に作成する必要があると考えられる。

表-4 各探傷方法による欠陥評価結果

探傷方法	一致率	不一致率	
直角K走査法	79.3%	20.7%	過小評価：15.0%
			過大評価：5.7%
直角タンデム走査法	40.9%	59.1%	過小評価：5.5%
			過大評価：3.6%
斜めタンデム走査法	46.7%	53.4%	過小評価：51.8%
			過大評価：1.6%
直角K + 斜めタンデム走査	32.1%	67.9%	過小評価：67.4%
			過大評価：0.5%

5.あとかぎ

今回提案した斜めタンデム走査法は、片面片側からの探傷が可能となると共に鉄筋外周部の欠陥をビーム中心軸で適正に検出できるメリットがあることから、鉄筋溶接継手の超音波探傷法である直角K走査法との併用法として有効である。また、直角タンデム走査法で片面片側での探傷はもとより、送受信探触子が溶接部から離れた位置に配置される為に細径鉄筋の直角K走査法で問題と成りがちな探傷不能領域を減少させるメリットがあることから、直角K走査法に代用法として使用可能である。

今後、SD390, SD490に関する開発研究を推進すると共に探傷データの蓄積を図り、鉄筋溶接継手の新たな超音波探傷検査法の確立と規準化を目指す予定である。

〔参考文献〕

- 1) 森濱和正他：超音波を用いた鉄筋継手の検査法に関する研究 その5、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 pp.47-48, 2004年8月
- 2) 倉持 貢他：鉄筋溶接継手部の超音波探傷試験に関する研究 その1,2、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 pp.97-100, 2007年8月