溶接欠陥の発生と溶接継手の健全性を考慮した 超音波斜角探傷方法に関する研究

STUDY OF ULTRASONIC ANGLE BEAM TESTING CONSIDERING THE WELD DEFECTS CAUSE AND THE SOUNDNESS IN WELD JOINTS

笠原基弘^{*1}, 加賀美安男^{*2}, 廣重隆明^{*3}, 嶋 徹^{*4}
下川弘海^{*5}, 中込忠男^{*6}

*Motohiro KASAHARA, Yasuo KAGAMI, Takaaki HIROSHIGE,
Tooru SHIMA, Hiroumi SHIMOKAWA and Tadao NAKAGOMI*

To maintain the reliability and soundness in weld joints, Ultrasonic angle beam testing has been conducted in the past. Recently the weld quality has been improved, so the high heat input welding method has been widely adopted, the strength of construction has been declined for increasing weld defects. For this reason, the conventional ultrasonic angle beam testing has been weak to detect large and hazardous defects in defect height. This paper describes the easy and reasonable detection and evaluation by comparison of probe's frequencies, angles of refraction, and element sizes.

Keywords: *Ultrasonic angle beam testing, Weld joints, Weld defects, Edge defects, Defect height, Angle of refraction*
超音波斜角探傷法, 溶接継手, 溶接欠陥, 端部欠陥, 欠陥高さ, 屈折角

1. はじめに

2000年に建築基準法施行令が見直され、国土交通省告示第1464号において、溶接部は割れ・内部欠陥等の構造耐力上支障のある欠陥がないものとして母材と同等な強度を有することが規定され、それを確保するために超音波探傷検査(UT)が適用されている。

古くから溶接部の品質確保のためX線透過試験(RT)¹⁾が実施されていたものの、鉄骨継手形状はT継手が多く、RTが適用できずに品質が確保されない鉄骨製品が市場に出まわることになり²⁾、1981年に建設省告示1103号が発効されたが、UTの適用は鉄骨溶接部が法的に母材と同等とみなせる全強設計のみに義務づけられていた。

当初、UTの欠陥検出レベルはブローホールの検出が最も得意なRTを基準としていたため、ブローホールの検出が不得意なUTはかなり高感度なレベルに設定されていた³⁾⁴⁾⁵⁾。

そのような背景から日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準」⁶⁾(以下、学会UT規準)が1973年に規定され、レ形裏当金付T継手における溶込み不良及び割れを主として検出できる屈折角70度を用いた斜角探傷法が原則として適用されることになった。

UTの適用によって鉄骨造の溶接品質は格段に向上したが、裏当金T継手における溶込み状態の良否の評価方法⁷⁾や鋼材特性の改善に伴う音響異方性に対する探傷方法⁸⁾、及び固形エンドタブを用いた梁フランジ端部の欠陥検出方法⁹⁾¹⁰⁾等の諸問題に対して、現在では屈折角65度によるUTの適用が望ましい知見が得られ、屈折角70度の問題点が指摘されている¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。

しかし、学会UT規準が改定され¹⁴⁾屈折角70度だけでなく65度も同様に一般的な探傷に適用できるようになったものの、依然と屈折角70度による探傷が多用されている。

建設省告示1103号において、主に対象欠陥をL形の溶込み不良と内部割れとする屈折角70度を用いたUTを適用して静的な延性破壊が防止されてきたが、巨大地震動により脆性破壊が鉄骨造の継手耐力に支障を及ぼすことが危惧されており¹⁵⁾、溶接線中央に存在する欠陥より端部欠陥、また欠陥長さよりもむしろ欠陥高さの大きな欠陥を検出する必要があることが指摘されている¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。

溶接継手における欠陥の影響度は、断面欠損と応力集中を考慮して許容基準が設けられ²⁰⁾、学会UT規準では疲労を考慮する溶接部では欠陥の影響を考慮し、表面と内部欠陥に異なる許容値が設けられているが、それ以外については欠陥位置における許容値による差異は規定されていない。また欠陥高さについては1パスビード高さを予め5mm程度として欠陥高さについては考慮されていない¹⁴⁾。

本研究は、現在用いられている種々の超音波探傷試験法を比較検討し、建築鉄骨で広範に行われているマグ溶接において発生しやすい欠陥及び溶接継手の健全性を考慮した超音波探傷検査方法について検証を行った。

2. 学会UT規準における溶接欠陥のエコー高さの指標

鉄骨造の溶接では、古くからアーク溶接の基本である被覆アーク溶接やセルフシールドアーク溶接が主体であり、建築鉄骨ではレ形

*1 (有)アクトエイションハート技術部 博士(工学)

*2 (株)日建設計構造設計室

*3 (株)竹中工務店構造設計部

*4 戸田建設(株)建築工事技術部 博士(工学)

*5 JFEスチール(株)建材開発部 博士(工学)

*6 信州大学工学部建築学科 教授・工博

NDT-Section, Action-Creation-Heart, Co., Ltd., Dr. Eng.

Structural Engineering Department, Nikken Sekkei

Structural Engineering Department, Takenaka Corporation

Construction Technical Department, Toda Corporation, Dr. Eng.

Materials & Amp. Business Development Department, JFE Steel Corporation, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

図1 溶接欠陥のφ4×4を基準としたエコー高さの比較

図2 屈折角によるコーナー反射によるモード変換

図3 屈折角による横波の界面反射率¹⁴⁾

裏当金付T継手のためルート部にL形溶込み不良が多発していた。またシールド不足のためにブローホールやスラグ巻き込みが発生したり、拡散性水素に起因して遅れ割れが発生することもあった。そこでRTと比較するために、UTにおける溶接欠陥の検出性を整理したものが図1⁵⁾である。図1により、ブローホールやスラグ巻き込み、内部溶込み不良の場合には屈折角60度の探触子が最もエコー高さが高いため検出性が良く、L形ルート溶込み不良や内部割れの検出には屈折角70度が良いことがわかる。図1は現在の学会UT規準¹⁴⁾においてもエコー高さの指標となっているが、図2に示すように使用している斜角探触子の横波(実線)が反射の仕方によって縦波(破線)にモード変換しエコー高さが損失する。コーナー形反射による界面反射率 δ は図3に示すように屈折角 $\theta=45$ 度では $\delta=100\%$ 、70度では $\delta=50\%$ 、65度では $\delta=25\%$ 、60度では $\delta=13\%$ となる。従って、学会UT規準では使用する屈折角 θ に応じて、基準となるφ4×4に対して屈折角 $\theta=70$ 度におけるエコー高さをH線=0dBとすると、45度ではU線(+6dB)、65度ではM線(-6dB)、60度ではL線(-12dB)となり、感度設定レベルが見かけ上同等となるように配慮されている¹⁴⁾。

図1の基準エコー高さを学会UT規準¹⁴⁾のエコー高さ区分線とエコー高さ領域で置き換えて整理したものが図4である。なお、図1の実験では屈折角 $\theta=65$ 度はないため60度と70度の平均値を、また図4では $\theta=60$ 度は規定されていないが比較のために便宜上示してある。図4により、現在の学会UT規準においてもL形の溶込み不良と内部割れを主に検出対象としていることがわかる。

図4 溶接欠陥の相対的なエコー高さ領域の比較

図5 振動子寸法の変化

図6 超音波の音場

3. 超音波探傷によるエコー高さ

3.1 探触子内の振動子と特性

斜角探傷では斜角探触子内の振動子から縦波がアクリルを介して鋼材中に横波が伝搬する。図5に探触子内の実際の振動子寸法 D_0 と鋼材中から探触子内に投影した見かけの振動子寸法 D との関係を示す²¹⁾。また、超音波の伝播する音場²²⁾を図6に示す。

近距離音場内では音場が複雑なため、超音波探傷では近距離音場から十分な遠距離音場で探傷するのが原則である。横波音速を $C_s=3230$ [m/s]、見かけの振動子寸法を D [mm]、周波数を f [MHz]、波長を λ [mm]とすると、近距離音場限界距離は $X_0=4D^2/\pi\lambda=4fD^2/\pi C_s$ 、指向角は $\phi_0=25.5D/\lambda=25.5Df/C_s$ で表される。表1に超音波探傷で使用する斜角探触子の X_0 及び ϕ_0 の計算結果を示す。屈折角 θ が大きく、振動子寸法 D_0 が小さい方が X_0 も小さく、指向角 ϕ_0 も広くなる。

3.2 欠陥エコー高さの特性

欠陥エコー高さ H は、振動子から伝播する超音波の指向性と欠陥の指向性との積で決定するため、溶接欠陥の傾きや欠陥寸法 h によって適切な屈折角 θ 及び振動子寸法 D をもつ探触子を選択する必要がある。

図7に板厚に垂直な寸法 h を有する欠陥が存在しているとき、超音波が斜め入射する場合のエコー高さの概念図を示す。

表1 探触子による近距離音場限界距離と指向角

探触子の呼称	周波数 f [MHz]	実際の振動子寸法		見かけの振動子寸法		近距離音場限界距離	
		高さ [mm]	幅 [mm]	高さ [mm]	幅 [mm]	高さ [mm]	幅 [mm]
5M 5×10A45	5	5	10	4	10	38	197
5M 5×10A60				4	10	27	197
5M 5×10A65				3	10	21	197
5M 5×10A70				3	10	16	197
5M10×10A45		10	10	9	10	153	197
5M10×10A60				7	10	106	197
5M10×10A65				7	10	85	197
5M10×10A70				6	10	62	197
2M14×14A45		14	14	12	14	300	386
2M14×14A60				10	14	208	386
2M14×14A65				9	14	167	386
2M14×14A70				8	14	122	386
2M20×20A45	2	20	14	18	20	613	788
2M20×20A60				15	20	425	788
2M20×20A65				13	20	341	788
2M20×20A70				11	20	250	788

図7 斜め入射時の振動子と欠陥の作る音場²³⁾²⁴⁾

図7により超音波が欠陥に斜めに入射する場合、欠陥寸法hが小さいほど、振動子寸法Dが小さいほどエコー高さHは高くなり、hが大きくなるほど、またDが大きいくほどエコー高さHは低くなり欠陥を検出できなくなることがわかる。

図8に欠陥への超音波の入射角 β とエコー高さHとの関係を示す。入射角 β が7度までは面反射、 $\beta=7$ 度～20度までは端面反射となり、 $\beta=20$ 度を超えると先端反射のみとなってHは一定となる。

図8 欠陥への入射角と反射のパターン²⁵⁾

3.3 欠陥状モデルのエコー高さ

欠陥をモデル化した場合のエコー高さHは、標準穴と対象欠陥における界面反射率 δ と形状反射率 γ によって決まる。標準穴の界面反射率を δ_s 、形状反射率を γ_s 、また対象欠陥の界面反射率を δ_f 、形状反射率を γ_f とすると、欠陥状モデルのエコー高さ H_o は(1)式で表される²⁶⁾。

$$H_o [\text{dB}] = 20 \cdot \log(\gamma_f \delta_f / \gamma_s \delta_s) \quad \dots\dots(1)$$

図3から界面反射率 δ は屈折角 θ が45度の場合は $\delta=1.0$ 、 $\theta=60$ 度では $\delta=0.13$ 、 $\theta=65$ 度では $\delta=0.25$ 、 $\theta=70$ 度では $\delta=0.50$ である。表2に各種欠陥状モデルの形状反射率 γ を示す。

表2 各種欠陥状モデルの形状反射率 γ ²⁶⁾

欠陥状モデル	$h \leq h_R$	$h \geq h_R$	限界寸法 h_R
帯形状モデル (寸法 h_B , 長さ ∞)	$(h_B^2/2\lambda W)^{0.5}$	0.5	$(\lambda W/2)^{0.5}$
スリット状モデル (寸法 h_N , 長さ ∞)	$(4h_N^2/2\lambda W)^{0.5} \sin \theta$	0.5	$(\lambda W/8)^{0.5} / \sin \theta$
横穴状モデル (寸法 h_H , 長さ L)	$(\pi h_H L^2/16\lambda W^2)^{0.5}$	$(h_H/8W)^{0.5}$	$(2\lambda W/\pi)^{0.5}$
縦穴状モデル (直径 h_V , 深さ h_V)	$(\pi h_V^3 \sin \theta / 4\lambda W^2)^{0.5}$	$(h_V/8W \sin \theta)^{0.5}$	$(\lambda W/2\pi)^{0.5} / \sin \theta$

波長: λ [mm] ビーム路程: W [mm]

図9 各種欠陥状モデルの形状寸法

図10 欠陥面への入射角 β と屈折角 θ の関係

図9に各種欠陥状モデルの形状寸法を示す。ここで、縦穴状モデルは標準試験片STBにおける $\phi 4 \times 4$ に相当しており、帯形状モデルは超音波が欠陥面に垂直に入射した場合である。

3.4 欠陥の傾きによるエコー高さ

欠陥面に超音波が垂直に入射せずに、図10のように斜め入射する場合には入射角 β が大きくなるほどエコー高さHが低下する。エコー高さ H_β は入射角 β の傾きにより(2)及び(3)式で表される²⁷⁾。

$$H_\beta [\text{dB}] = H_o \cdot \log(\sin Z/Z)^4 \quad \dots\dots(2)$$

$$Z = 1.414D \cdot \pi \cdot f \cdot h \cdot \sin \beta / C_s (D+1.414h) \quad \dots\dots(3)$$

4. 溶接欠陥と欠陥のモデル化

4.1 マグ溶接における溶接欠陥

現在の鉄骨造の溶接は炭酸ガスアーク溶接であるマグ溶接が主流であり、従来からレ形裏当金付T継手で多発していたルート部のL形溶込み不良も開先精度の向上から少なくなったが、溶接機器容量の増大に伴って溶込み不良の形状もL形からI形に変化したことで、その検出が困難となってきている⁷⁾。マグ溶接において発生しやすい欠陥を図11に示す。

図11 マグ溶接で発生が想定される溶接欠陥

4.2 T継手における探傷方法

レ形裏当金付T継手では開先を加工した表面と裏面から直射法及び一回反射法で探傷が行われる。学会UT 規準による開先角度(ベベル角) 35 度における一般的な探傷方法を図12 に示す。使用する屈折角 θ が大きいほど超音波の伝搬距離(ビーム路程: W) が長くなり、探傷面における探触子の走査範囲も大きくなる。

図12 T継手における異なる屈折角による探傷方法

4.3 溶接欠陥のモデル化

マグ溶接で施工されたレ形裏当金付T継手において発生する溶接欠陥は図11 であるが、これらの欠陥をモデル化すると表3 になる。また開先面の融合不良は屈折角と開先角度によって入射角 β が異なるため、(2) 及び(3) 式を用いてエコー高さの低下量を算出できる。なお、I 形の溶込み不良及び高温割れ先端径は0.05 ~ 2.0mm であったことから¹²⁾²⁸⁾、先端が十分に鋭いものとして先端径を0.1mm とした。

表3 溶接欠陥のモデル化

欠陥種別	略称	欠陥モデル	寸法 [mm]	長さ [mm]
L形の溶込み不良	L形IP	スリットモデル	hN	∞
スラグ巻き込み	SI	横穴状モデル	hH	∞
連続ブローホール	連BH			
開先面の融合不良	開先LF	帯形状モデル	hB	∞
I 形の溶込み不良	I 形IP	先端横穴状モデル	0.1	L
高温割れ	HC			

5. 欠陥モデルによるエコー高さ

表3 におけるマグ溶接で発生する各種欠陥をモデル化し、学会UT 規準¹⁴⁾で規定されている探触子、周波数 $f=5\text{MHz}$ 及び 2MHz 、屈折角 $\theta=45^\circ$ 、 65° 、 70° 、振動子寸法 D_0 が 5×10 、 10×10 、 14×14 、 $20 \times 20\text{mm}$ について、学会UT 規準に従ってエコー高さ H を標準試験片STBの $\phi 4 \times 4$ を基準($H=0\text{dB}$)とし、 $\theta=45^\circ$ ではU線(+6dB)、 70° をH線(0dB)、 65° ではM線(-6dB)に感度設定を調整して求めた。

5.1 スリット状欠陥モデルの場合

各種探触子におけるスリット状欠陥モデルのエコー高さ H を図13 に示す。屈折角 $\theta=45^\circ$ は界面反射率 $\delta=1.0$ と損失がないため H が高く、 $\theta=65^\circ$ が $\delta=0.25$ のために最も低くなる。ビーム路程 W が短いほど欠陥寸法 h_N と H は比例しくなくなり、一定の欠陥寸法(限界寸法 h_R)以上では H は一定となる。

図13 スリット状モデル欠陥のエコー高さ

図14 横穴状モデル欠陥のエコー高さ

5.2 横穴状欠陥モデルの場合

各種探触子における横穴状欠陥モデルのエコー高さ H を図 14 に示す。どの屈折角においても界面反射率 $\delta = 1.0$ のために損失がなく、ビーム路程 W によっても差異は少なく、欠陥寸法 h_B が大きくなると H は緩やかに増加する。

図 15 帯形状モデルのエコー高さ ($f=5\text{MHz}$)

5.3 帯形状欠陥モデルの場合

各種探触子における帯形状欠陥モデルのエコー高さ H をビーム路程が短い $W=50\text{mm}$ と長い $W=200\text{mm}$ の場合について図 15 及び図 16 に示す。開先角度が 35 度においては、屈折角 $\theta=45$ 度及び 65 度の場合は入射角 $\beta=10$ 度、 $\theta=70$ 度では $\beta=15$ 度の場合に相当する。

図 16 帯形状モデルのエコー高さ ($f=2\text{MHz}$)

図 17 先端横穴状モデル欠陥のエコー高さ

従って、 $\theta = 70$ 度の場合が最もエコー高さ H が低下することになる。 H は β が大きく、欠陥寸法 h_B が大きいほど低下し、特に多用されている $5M10 \times 10A70$ の場合は h_B が 1mm を超えると検出レベルである L 線 (-12dB) を超えず検出できない。ビーム路程 W が大きくなるほど、また周波数 f が高く、実際の振動子寸法 D_0 が大きいほどエコー高さ H は低下することがわかる。

5.4 先端横穴状欠陥モデルの場合

各種探触子における先端横穴状欠陥モデルのエコー高さ H を図 17 に示す。先端径が 0.1mm と鋭い場合、欠陥長さ L が何れの場合も 4mm 以上でないと検出レベルである L 線 (-12dB) を超えないことがわかる。また、先端径が鋭い場合には L が長くなっても十分なエコー高さ H が得られない。

6. 学会 UT 標準による溶接欠陥のエコー高さの検証

現在、JASS6 鉄骨工事では開先角度を 35 度を標準としている。図 11 のように、マグ溶接によるレ形裏当金付 T 継手では種々の溶接欠陥が想定される。近年の溶接施工法ではロボットも頻繁に使われており、品質が安定に確保されている状態では溶接欠陥の発生も非常に少なくなっている。

そこで、欠陥状モデルで得られた結果を基に、現在多用されているマグ溶接において発生が想定される溶接欠陥を、学会 UT 標準⁽⁴⁾における探傷感度の設定で十分に検出できているかを理論的に検証する。

学会 UT 標準に従って探触子毎に STB の $\phi 4 \times 4$ を $\theta = 45$ 度では U 線、 70 度を H 線、 65 度では M 線に感度設定を調整し、ビーム路程 $W=50\text{mm}$ と近い場合及び $W=200\text{mm}$ と遠い場合における各種溶接欠陥のエコー高さ H を求めた結果を示す。

6.1 周波数が $f=5\text{MHz}$ の場合

図 18 に周波数 5MHz における各種溶接欠陥のエコー高さ H を示す。何れの探触子でも L 形溶込み不良、スラグ巻き込み及び連続ブローホールでは H は高く、容易に検出が可能である。しかし、 I 形溶込み不良

図 18 各種溶接欠陥のエコー高さ ($f=5\text{MHz}$)

及び割れはL 検出レベルである-12dB 程度であり、先端が短く鋭角な場合には検出レベルを-18dB 程度とする必要がある。また開先面の融合不良では欠陥高さ h_b が大きくなるほどHが低下し、5M10×10A70では h_b が1mmを超えると検出できないことがわかる。

6.2 周波数がf=2MHz の場合

図19に周波数2MHzにおける各種溶接欠陥のエコー高さHを示す。

図19 各種溶接欠陥のエコー高さ (f=2MHz)

L 形溶込み不良、スラグ巻込み及び連続ブローロールでは5MHz と同様な傾向であるが、I 形溶込み不良及び割れはL 検出レベル(-12dB)程度と低くなり5MHz よりも検出が困難となる。また開先面の融合不良でも5MHz と同様に欠陥高さ h_b が大きくなるほどHが低下し、2M20×20A70の場合では5MHz ほど顕著ではないが h_b が5mmを超えて大きくなると検出できない。

7. 欠陥の存在位置の有害性と検出精度

溶接継手における欠陥の影響度は断面欠損と応力集中により強度が低下するが、欠陥長さより欠陥高さ、溶接の中央部より端部が、内部より表面に存在する欠陥が構造物に与える影響が大きく、破壊力学的には欠陥が内部及び中央部にある場合に比べ、表面及び端部では応力では63%、許容欠陥では40%程度に制限しなければならない²⁹⁾³⁰⁾。

近年の溶接施工では大入熱によりI 形溶込み不良が発生しやすく、ロボットやフランジ端の折り返し溶接施工によりフランジ端部に欠陥高さが10mm 程度と高いI 形溶込み不良、融合不良及び高温割れが発生しやすくなっている⁹⁾¹¹⁾¹²⁾²⁸⁾。

端部の自然欠陥を5M10×10A70と5M5×10A65によって探傷した一例を図20に示す。5M10×10A70では学会UT 標準で想定されている欠陥高さ5mm 以上の欠陥がL 検出レベル(-12dB)以下となり検出できていない。これは端部では超音波が側面に伝搬する際に損失すること、欠陥高さが大きくなると先端反射のみとなること、また欠陥先端径が鋭くかつ短いために検出しにくいものと考えられる。なお、学会UT 標準付則.2で規定している同時端部エコー法を用いることにより、欠陥エコー高さを用いず欠陥高さが5mm 以上の端部欠陥を検出することができる¹²⁾¹⁴⁾。

8. 探傷条件に及ぼす影響

溶接継手にUT を適用する場合には、被検材の特性や環境条件等による超音波特性に影響を受けることが知られている。

8.1 被検材の音響異方性による影響¹³⁾

学会UT 標準¹⁴⁾では、付則1. に音響異方性の探傷法が規定されているが、図21のように市場鋼材中にはSTB 音速比が1.015を超えるものが30%以上も含まれている。図22のように被検材のSTB 音速比が1.015を超えると屈折角70度では探傷屈折角が72度を超え、-4dBを超える感度低下を生じる。このことから一般の被検材でも屈折角65度を用いた信頼性の高い探傷を行う必要がある。

8.2 被検材の温度による影響¹¹⁾

被検材の温度変化により図23に示すように屈折角度差及び感度が変化する。その影響は屈折角70度の場合が最も大きく被検材温度が

図20 端部欠陥の検出精度¹²⁾²⁸⁾

図21 市場鋼材のSTB 音速比

図 22 STB 音速比による屈折角度差及び感度の影響

図 23 被検材の温度による屈折角度差及び感度の変化

35℃以上では探傷屈折角が72度を超え、-6dB以上の感度低下となり屈折角70度では探傷できなくなる。従って、10℃以上の温度変化がある場合、また被検材の温度が35℃以上となる場合には屈折角65度によらなければならない。

9. まとめ

学会UT規準に規定されている探触子を用いて、マグ溶接で発生が想定される欠陥に対して種々の欠陥モデルにより、その検出性について検証を行った。その結果、下記の知見が得られた。

- 1) L形の溶込み不良、スラグ巻き込み及び連続ブローホールは何れの周波数、屈折角及び振動子寸法を用いても容易に検出できる。
- 2) 欠陥面に超音波ビームが垂直に入射せず、入射角 β が5度を超えて入射する場合には、欠陥寸法が大きいほどエコー高さが急激に低下するため欠陥を検出しにくくなる。
- 3) 5M10×10A70等の屈折角70度の探触子では、開先角度が35度の場合には入射角 β が15度と大きくなることから、欠陥高さのある開先面の融合不良を十分に検出することができない。
- 4) 欠陥高さの大きな融合不良を確実に検出するためには、周波数が2MHzの45度及び65度、または5M5×10A65が有効である。
- 5) 溶接継手の耐力を低下させる端部欠陥を確実に検出するためには5M5×10A65が最も有効である。
- 6) 先端が鋭く短いI形の溶込み不良及び高温割れを検出の対象とする場合は、欠陥検出レベルを-12dBより低い-18dB程度とする必要がある。
- 7) 欠陥高さをエコー高さHの大きさによらずに評価したい場合には、5M5×10A65を用いた同時端部エコー法による必要がある。
- 8) 探傷時に10℃以上の温度変化がある場合、また探傷温度が35℃以上となる場合には屈折角70度を使用してはならない。
- 9) 市場にはSTB音速比の異なる鋼材がかなりの割合で混入していることから、事前にSTB音速比を調査後にUTを実施する必要がある。事前に被検材のSTB音速比を調査しない場合には、屈折角65度を用いて探傷の信頼性を確保する必要がある。

参考文献

- 1) JIS Z 3104: 鋼溶接部の放射線透過試験方法, 1968
- 2) 千代田建築研究会: 建築鉄骨の実際と問題点, 1975. 2
- 3) 日本非破壊検査協会: 鋼溶接部の超音波斜角探傷試験方法及び等級分類 日本非破壊検査協会 202 小委員会勧告, 1970
- 4) 藤盛紀明: 鋼構造建築溶接部の超音波斜角探傷試験に関する研究, 清水建設研究所研究報告 第9号 1977. 1
- 5) 日本鋼構造協会関西地区スタディグループ(SAWED): 建築物の溶接接合部における欠陥の評価に関する研究, 超音波斜角探傷試験による溶接欠陥の定量化. JSSC, Vol. 12 1976
- 6) 日本建築学会: 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説, 1973 年
- 7) 日本非破壊検査協会: 裏当て金付完全溶込みT継手のルート部からのエコー判別方法に関する指針(1995 改正版), 溶接部の超音波探傷研究委員会, 1996
- 8) 日本鉄鋼協会非破壊検査小委員会: 音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角探傷法, 鉄と鋼, 1987. 6
- 9) 建築研究所、日本鉄鋼連盟、日本溶接協会: 建築構造用溶接材料と溶接接合部性能評価法の確立 最終報告書、第5章溶接欠陥位置・寸法と欠陥検出 pp. 241-291 2002. 3
- 10) 日本鋼構造協会: 建築鉄骨梁端溶接部の超音波探傷検査規準, 2008. 1
- 11) 笠原基弘、中込忠男、的場耕: 超音波斜角探傷法による柱梁溶接始終端部における溶接欠陥の評価に関する実験的研究 日本建築学会構造系論文集 第596号 pp. 117-124 2005. 10
- 12) 笠原基弘、中込忠男: 同時端部エコー法による柱梁溶接始終端部における欠陥評価に関する実験的研究 日本建築学会構造系論文集 第607号 pp. 167-174 2006. 9
- 13) 日本建築学会: 鉄骨工事運営委員会調査研究委員会: 建築鉄骨工事のあらたな取り組み 資料集 第3章 3.1 市場鋼材における音響異方性調査と探傷の適応性, 2010. 5
- 14) 日本建築学会: 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説, 2008
- 15) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告, 鉄骨造建築物 日本建築学会 1997. 10
- 16) 加藤勉、森田耕次、古沢平夫、下村波基: 欠陥を有する溶接部の耐力と変形能力に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第350号 pp. 86-93 1985. 4
- 17) 鈴木孝彦、石井匠、森田耕次、高梨晃一: 欠陥を有する柱梁溶接接合部の破断性状に関する実験的研究 日本鋼構造協会、日本鋼構造論文集 第6巻 第23号 pp. 149-164 1999. 9
- 18) 中込忠男、服部和徳、市川祐一、的場耕、岩田衛: 欠陥を有する柱梁溶接接合部の変形能力に関する実験的研究 日本建築学会構造系論文集 第556号 pp. 145-150 2002. 6
- 19) 嶋徹、石原完爾、濱田弘行、原田幸博、西川耕二、劉聖眠、鈴木眞一、森田耕次: 始終端部に欠陥を有する突合せ溶接部の脆性的破壊に関する実験的研究 日本鋼構造協会、日本鋼構造論文集 第10巻 第38号 pp. 17-29 2003. 6
- 20) 加藤勉、古沢平夫、森田耕次: 超音波斜角探傷法による溶接欠陥の評価(I)(II), 日本建築学会論文報告集 No. 241 pp. 33-41, 1976. 3, No. 244 pp. 21-31 1976. 6
- 21) 日本学術振興会: 超音波探傷の理論と基礎に関する研究報告書 pp. 95-109, 1974
- 22) A. Freedman: Sound Field of a Rectangular Piston, JASA 32 p. 197 1960
- 23) 仙田、廣瀬、中島、今岡: 超音波探傷による欠陥の定量化について(1)、非破壊検査 Vol. 20 No. 8 pp. 378 1971
- 24) 仙田、廣瀬、裏垣、西田、新川: 斜角探触子の音場特性と各種反射源の距離振幅特性について 日本非破壊検査協会 NDI 第2分科会資料 No. 2695 1978. 11
- 25) 小倉幸夫: 超音波斜角探傷における傷の傾きの影響一帯状欠陥一、非破壊検査 第27巻 2号 pp. 114-115 1978. 2
- 26) 仙田、廣瀬、裏垣: 一探触子法による模型欠陥エコー高さの計算方法2(斜角法の場合), 日本非破壊検査協会 NDI 第2分科会資料 No. 2760 pp. 1-10 1979. 11
- 27) 仙田、廣瀬、裏垣: 傾きを持った平面状欠陥の検出について 非破壊検査 Vol. 23 No. 2 p. 92 1974
- 28) 遠藤、廣重、土屋、古城、笠原: 溶接始終端部に発生する欠陥の実態調査 日本建築学会大会学術講演梗概集, 分冊A, pp. 1129-1136, 2010. 9
- 29) 下川弘海: 線形破壊力学の応用による鉄骨部材の破断荷重推定方法に関する研究, 信州大学学位論文, 2005. 3
- 30) 日本溶接協会: WES2805 溶接継手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, 2007. 11

(2011年5月10日原稿受理, 2011年7月20日採用決定)