

論 文

超音波探傷法にて検出される圧延鋼材中の
MnS 系非金属介在物の寸法評価

© 1985 ISIJ

石 川 登*・藤 盛 紀 明*²Size Estimation of Sulfide Inclusions in Hot Rolled Steels
Detected by Ultrasonic Testing

Noboru ISHIKAWA and Toshiaki FUJIMORI

Synopsis :

It is feared that non-metallic inclusion will impair ductility and toughness in through thickness direction of rolled steels. In beam-column joints of steel frame of building, the stress occurs in through thickness direction of steel plate. Therefore, the size estimation of inclusion in rolled steels used in actual structure is necessary to maintain the performance of joints.

This paper describes ultrasonic inspection methods for estimating the size of non-metallic inclusion.

The two kinds of ultrasonic inspection methods were examined and the abilities for measurement were discussed.

The following results were obtained.

(1) The "C-scope method" with an immersion focusing type probe is effective for inspecting the shape and size of flat form defects such as leaf type inclusion around focusing point. But, this method is difficult to apply in actual structure.

(2) The "Acrylic resin delayed method" with AVG diagram is applicable to inspection of rolled steel in actual structure. This method, however, tends to underestimate the area of defects comprised of non-metallic inclusion. This paper proposes equations for estimating the size of inclusion based on the sound field of the probe and the reflection loss on the interface between inclusion and steel matrix.

1. 緒 言

建築構造物の大型化に伴い、建築鉄骨には溶接継手が多用されるようになった。建築鉄骨の主要な構造は、柱と梁で構成されたラーメン構造となっている。そのため、造船や橋梁・圧力容器などの他の鋼構造物と主要な接合部の形式が異なり、フレームの構成の要となる柱-梁接合部には、柱のフランジ面に梁フランジが突き合わさる T 形突き合わせ継手や十字形突き合わせ継手が広く用いられている。また、超高層ビルなどの大型建築物の出現に伴い、この接合部には稀に発生する大地震に対して、ある程度の塑性変形を許容するような設計思想が盛り込まれている¹⁾。従つて、柱-梁接合部の柱フランジに対しても、極限的な状況における安全性の観点から鋼材の板厚方向の引張特性は、重要な要求性能である²⁾。

一方、従来から圧延鋼材は圧延方向に比較して、板厚方向の延性や靱性が低下することが知られている³⁾。これは鋼材中に含まれる非金属介在物による材質的な不連続性や切欠効果によるものであり、その程度は、非金属介在物の種類や体積率・圧延方向の伸長度などに依存す

ることが知られている^{4)~6)}。これらの対応策として、扁平な A 系介在物が板厚方向の延性や靱性の低下に大きく関与することから、その A 系非金属介在物の生成に寄与する S の低減や Ca や RE (稀土類元素) の添加による非金属介在物の形状制御^{7)~9)}が行われている。

非金属介在物の超音波探傷法としては、超音波の減衰¹⁰⁾や音速¹¹⁾に着目した方法や、非金属介在物の界面から発生する林状エコーを利用した方法¹²⁾および、非金属介在物からの反射エコーを高感度で測定する方法¹³⁾などが報告されている。これらの超音波探傷法の多くは、超音波評価値を鋼材の絞りや延性と関係づけることが試みられているが、非金属介在物個々の定量化を行つたものは少ない。

本研究は、継手の強度特性に影響を及ぼす比較的大きな非金属介在物の寸法評価手法を確立し、それにより、建築鉄骨に対する品質確保ならびに経済的な鋼材の利用を図ることを目的としたものである。

2. 供 試 材 料

供試材料としては、建築鉄骨に最も一般的に使用され

昭和 58 年 11 月 25 日受付 (Received Nov. 25, 1983)

* 清水建設(株)技術研究所 (Institute of Technology, Shimizu Construction Co., Ltd., 3-4-17 Etsuchujima Koto-ku 135)

*² 清水建設(株)技術研究所 工博 (Institute of Technology, Shimizu Construction Co., Ltd.)

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of the steel used.

Chemical composition (wt%)					Mechanical property		
C	Si	Mn	P	S	σ_y (kgf/mm ²)	σ_b (kgf/mm ²)	El (%)
0.17	0.37	1.40	0.022	0.008	35.8	54.7	27.4

ている溶接構造用圧延鋼材 2 種 (SM 50A) を使用した。その化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。なお、この供試材料は連続鋳造法にて製造したもので板厚 32 mm 圧延比 6.375 である。また、この材料は本実験に供することを目的として、多数の鋼材の中から比較的粗大な非金属介在物を含む鋼材を、選別抽出したものである。

3. 実験方法

3.1 超音波探傷試験

超音波探傷試験は C スコープ法とアクリル遅延法により行つた。前者は非金属介在物の形状寸法に関して、正確な情報が期待できる¹⁴⁾ことから適用した。また後者は、C スコープ法が自動探傷法であるため、実構造材料に使用できないことから、実用的な探傷法として試みた。両者の探傷装置と探傷条件を Table 2 に示す。

3.1.1 C スコープ法

C スコープ法は、試験体上の探触子位置における欠陥エコーの高さを、放射線透過写真のような平面図記録として得る測定法である。

本実験では、水浸型の集束探触子を使用し、水中にて自動的に X-Y 走査させた。また、非金属介在物に対する分解能を良くするため、探触子の焦点は非金属介在物が多く存在した試験体の板厚中央付近に結ばれるようにした。探傷感度は、STB-N1 の 5.6φ 平底穴からのエコー高さを CRT 80%+12dB とした。欠陥図形の記録には、非金属介在物からのエコー高さが、CRT の 20% 以上となるものを欠陥として表示した。このしきい値は、STB-N1 の 5.6φ 平底穴が C スコープの記録紙に

ほぼ同寸法の欠陥像として描かれるように決定した。

3.1.2 アクリル遅延法

欠陥寸法を欠陥のエコー高さから測定する手法として、AVG 線図を用いる方法がある¹⁵⁾。本実験では、試験体と探触子間にアクリル樹脂を介在させてビーム路程を大きく取り、それにより規準化距離 n の値を AVG 線図の適用可能な範囲とした探触子を使用した。探触子を Photo. 1 に示す。

3.2 非金属介在物の寸法測定

超音波探傷試験の結果を、実際の非金属介在物と比較するため、試験体を圧延方向と直交する方向に細断し、その寸法を測定した。

Fig. 1 に示すように、試験体を厚さ 1 mm 切り代 0.5 mm の短冊状の薄片に切断する。薄片の切断面を研磨し、光学顕微鏡にて非金属介在物の寸法を測定する。この測定結果を組み合わせ、もとの非金属介在物の形状と寸法を得る。

4. 実験結果と考察

4.1 非金属介在物の観察

非金属介在物の組織を Photo. 2 に示す。非金属介在物は、試験体の板厚中央付近に薄い箔状となつて分布しており、成分は主として MnS からなつていた。

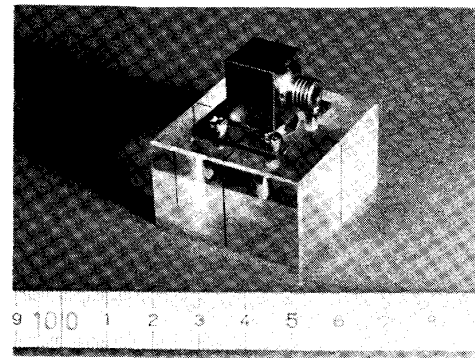


Photo. 1. Probe used in acrylic resin delayed method.

Table 2. Testing conditions.

Item	Method	C-scope method	Acrylic resin delayed method
Testing apparatus		UM 731	FD 410S SM 80D
Probe		Immersion focusing type probe Frequency: 10MHz Probe diameter: 0.25 inch Immersion focusing distance: 2 inch Focus diameter: 0.8 inch	5Z10N
Couplant		Water	Glycerin
Detective level		STB-N1 5.6φ80%+12dB	STB-N1 5.6φ50%+12dB

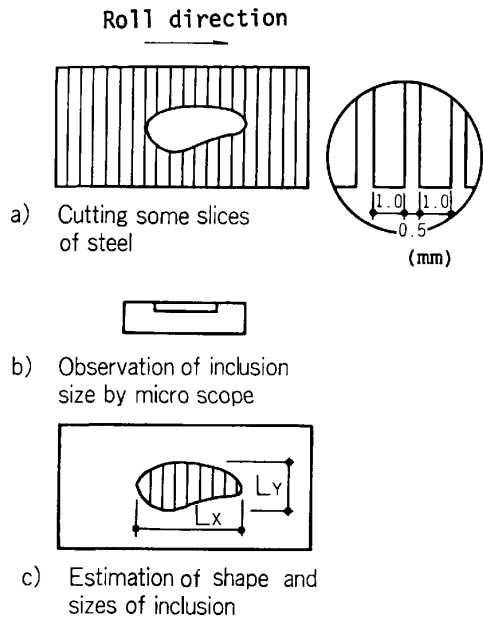


Fig. 1. Measurement method of inclusion size.

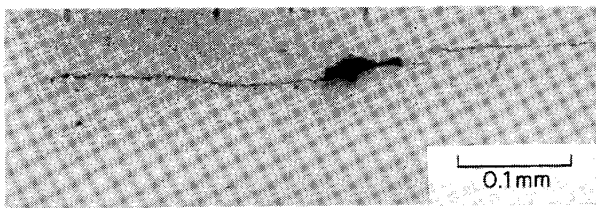


Photo. 2. Microstructure of inclusion.

4.2 C スコープ法の欠陥検出性能

4.2.1 欠陥寸法の表示特性

平底穴を有する対比試験片を用いて、Cスコープ法の欠陥寸法の表示特性を検討した。対比試験片には、Fig. 2に示すように径を2 mm~11.3 mmの6段階に、深さを5 mm~25 mmの5段階に変えた平底穴を設けた。探触子の焦点は、試験片の深さ15 mmの位置に合わせた。

Cスコープ法の欠陥像の径と平底穴の深さとの関係をFig. 3に示す。欠陥像の径は、焦点位置よりも浅いところでは、平底穴の径よりも小さく表示されるが、焦点の深さおよびそれ以遠の15 mm~25 mmでは、径の大きさに関わらず、両者はほぼ同等であった。

4.2.2 非金属介在物のCスコープ欠陥像

非金属介在物のCスコープ欠陥像の一例を、Fig. 4に示す。同じ試験体について、顕微鏡観察から得た非金属介在物の形状を、Fig. 4に併せて示す。両者の寸法を比較して、Fig. 5に示す。

Cスコープ欠陥像は、Fig. 4に示すように実際の非金属介在物の形状を再現しているとともに、両者の寸法はその大小に関わらず良い一致を示す。

以上のことから、今回適用した水浸型の集束探触子を

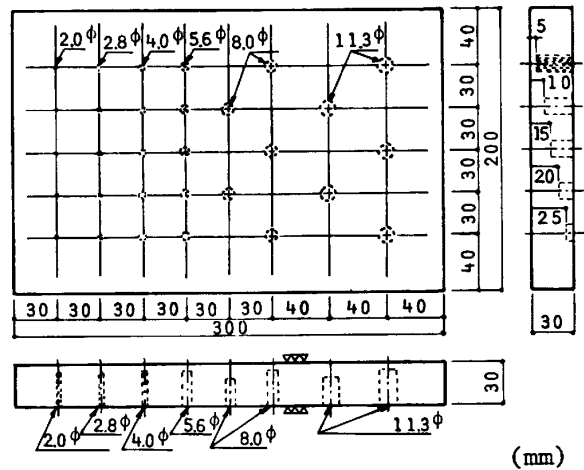


Fig. 2. Shape and dimensions of reference block.

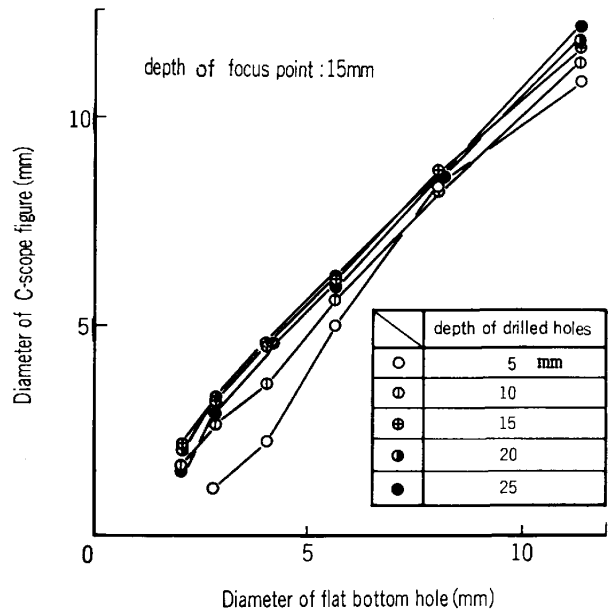


Fig. 3. Variation of C-scope figure of flat bottom holes in reference block.

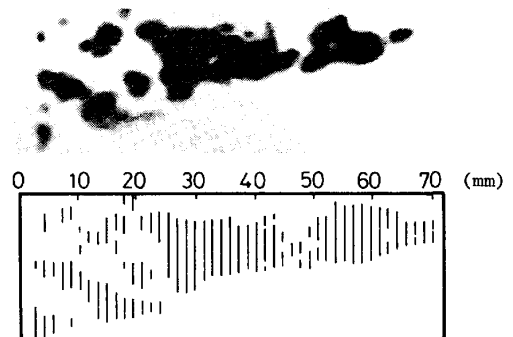


Fig. 4. Comparison of C-scope figure and microscopic observation of inclusion.

用いたCスコープ法は、探触子の焦点を非金属介在物の存在する位置と一致させることにより、その形状や寸法

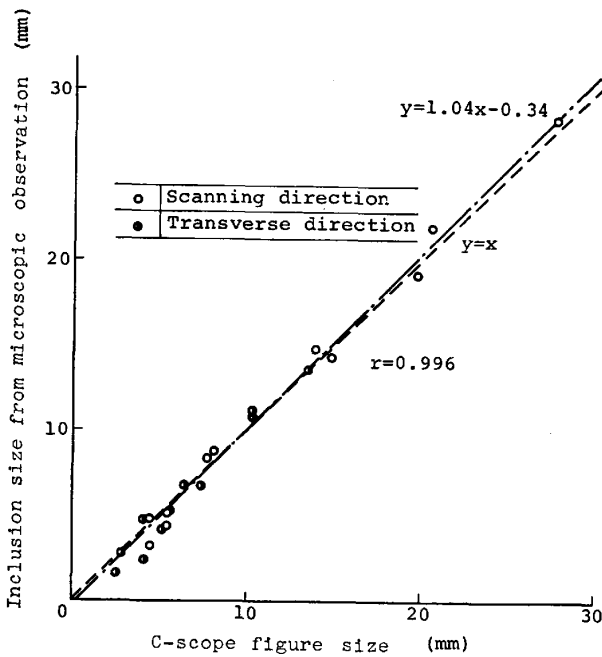


Fig. 5. Comparison of inclusion size from the C-scope figure and inclusion size obtained from micro-scope observation.

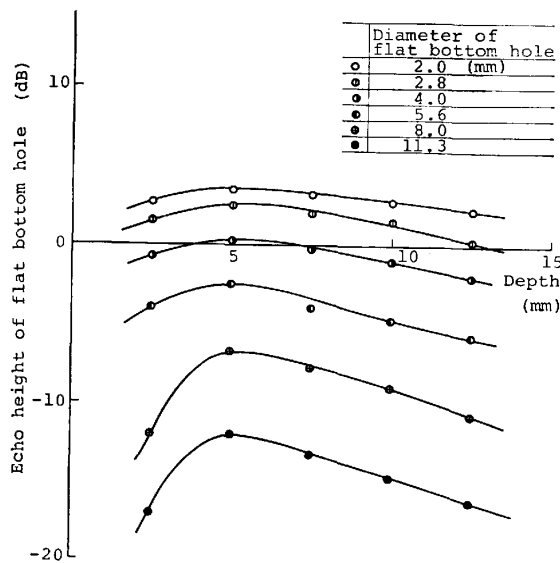


Fig. 6. AVG diagram obtained from the reference block by acrylic resin delayed method.

を測定する手法として、効果的なものと考えられる。

4.3 アクリル遅延法による欠陥寸法の推定

4.3.1 非金属介在物に対する AVG 線図の適用性

アクリル遅延法において、エコー高さから欠陥寸法を推定する際に使用する AVG 線図を、Fig. 2 に示した対比試験片を用いて、作成した。Fig. 6 に AVG 線図を示す。本実験で使用した探触子は、欠陥の深さが 5 mm 以上の場合は、近距離音場の領域から外れる。そのため、エコー高さとビーム路程から欠陥寸法を推定でき

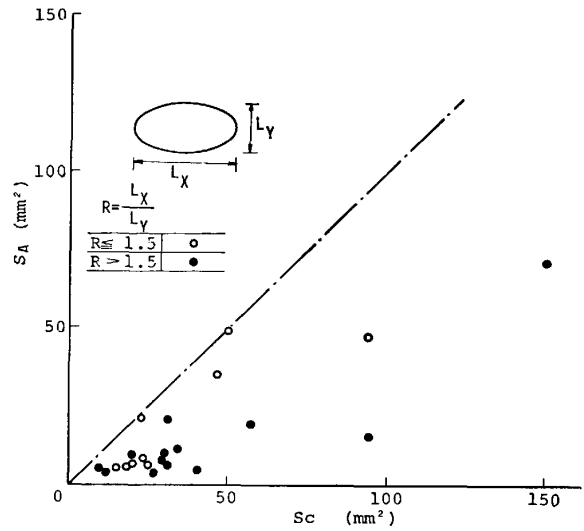


Fig. 7. Relation between the area of inclusion (S_C) on the C-scope figure and the area of inclusion (S_A) obtained from AVG diagram.

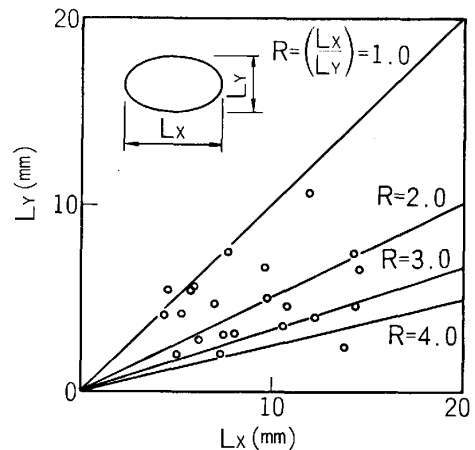


Fig. 8. Shape of inclusion by microscopic observation.

る。

非金属介在物の C スコープ欠陥像の面積 (S_C) とアクリル遅延法で求めた欠陥面積 (S_A) との関係は、Fig. 7 に示す。 S_A は実際より小さく推定されており、その主たる要因としては、以下のことが考えられる。

① 非金属介在物は、圧延方向に伸長した楕円形状を呈している。非金属介在物の圧延方向の寸法 (L_x) とその直角方向の寸法 (L_y) との関係は Fig. 8 に示す。AVG 線図による欠陥寸法の推定は、対比試験片のような円形平板状の欠陥に超音波が垂直に当たる場合に適用できる。本実験の非金属介在物のように、欠陥の形状が円形から外れる場合には、エコー高さと非金属介在物の面積が対応せず、欠陥面積を実際より小さく推定すると考えられる。

② Photo. 2 に示したように、非金属介在物は極め

て薄い箔状を呈している。このような欠陥に対しては、標準試験片の平底穴に比較して、薄膜内反射波の干渉により超音波の反射が低減する¹⁶⁾ことが考えられる。

4.3.2 楕円形欠陥に対する音圧分布の影響

非金属介在物のような圧延方向に伸長した欠陥が、その面積を過小に推定される要因として、超音波の音圧分布の影響が考えられる。遠距離音場における音圧は、探触子の中心軸上で最も高く周辺ほど低い同心円状の分布をとる。

本実験で使用した探触子の音圧分布を STB-A2 の $2\phi \times 2$ を用いて測定した。探触子の中心位置を STB-A2 の $2\phi \times 2$ から 1mm ずつ移動し、そのエコー高さの変化を Fig. 9 に示す。エコー高さ EH は、探触子の中心位置から欠陥までの平均距離 \bar{x} の 2 乗に反比例する。両者の関係を (1) 式に、その音圧分布を Fig. 10 に示す。

$$EH = (C_1 + C_2 \bar{x}^2)^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

ただし $EH: \%/ \pi \text{mm}^2$

$C_1: 0.00623$

$C_2: 0.00141$

超音波の音圧分布が以上のような特性を示すため、楕円形欠陥のエコー高さは、欠陥と探触子の中心が一致する時に最大となる。楕円形欠陥の長径を $2a$ 、短径を $2b$ とすると、エコー高さは以下ようになる。

Fig. 11 において、P, Q, R, S にて囲まれる微小面積を楕円に投影した微小面積を $\Delta S'$ とする。

$$\Delta S' = \frac{b}{a} r \Delta r \Delta \alpha \dots\dots\dots (2)$$

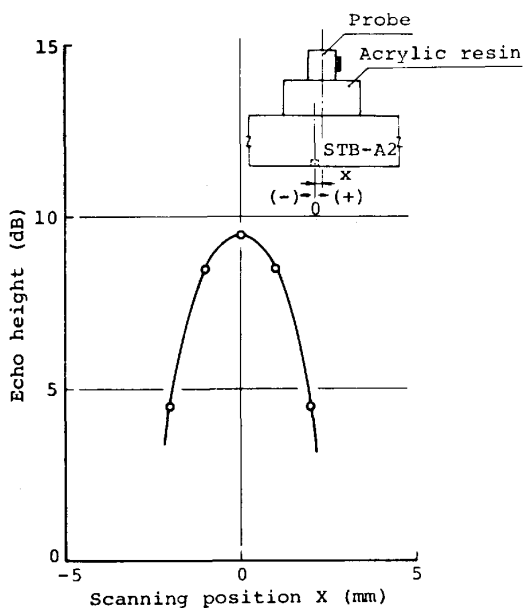


Fig. 9. Change of echo height v.s. probe position in STB-A2 by acrylic resin delayed method.

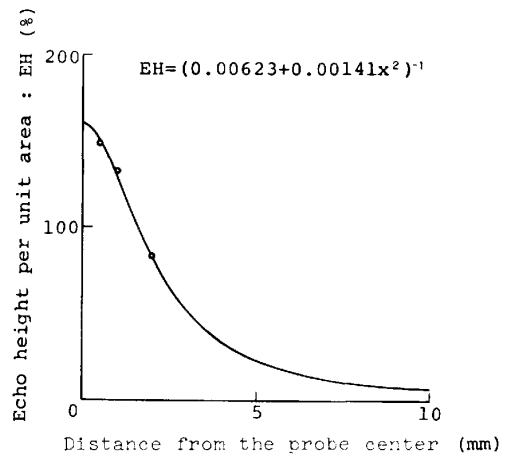


Fig. 10. Sound field of the probe used in acrylic resin delayed method.

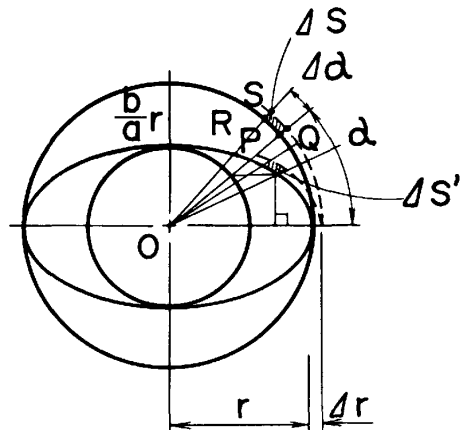


Fig. 11. Calculational model of echo height for oval shaped flaw.

中心から r の距離における音圧を $g(r)$ 、 ΔS の中心からの距離を r' とすると、楕円形欠陥のエコー高さ EH_0 は (1) 式および (3)、(4) 式により、(5) 式で表すことができる。

$$EH_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{b}{a} \cdot r g(r') dr d\alpha \dots\dots\dots (3)$$

$$r' = r (\cos^2 \alpha + \frac{b^2}{a^2} \sin^2 \alpha)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$EH_0 = \frac{ab}{2\pi C_2} \int_0^{2\pi} \frac{\ln(1 + C_2/C_1(a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha))}{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha} d\alpha \dots\dots\dots (5)$$

AVG 線図を用いた欠陥寸法の推定では欠陥はすべて円形欠陥とみなし、そのエコー高さ EH_0 から欠陥径を推定する。 EH_0 と等しいエコー高さを有する円形欠陥の径 (r_{eq}) は、(5) 式に $a=b=r_{eq}$ を代入し、(6) 式で示される。

$$r_{eq} = \left[\frac{C_1}{C_2} \left\{ \exp(C_2 EH_0) - 1 \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

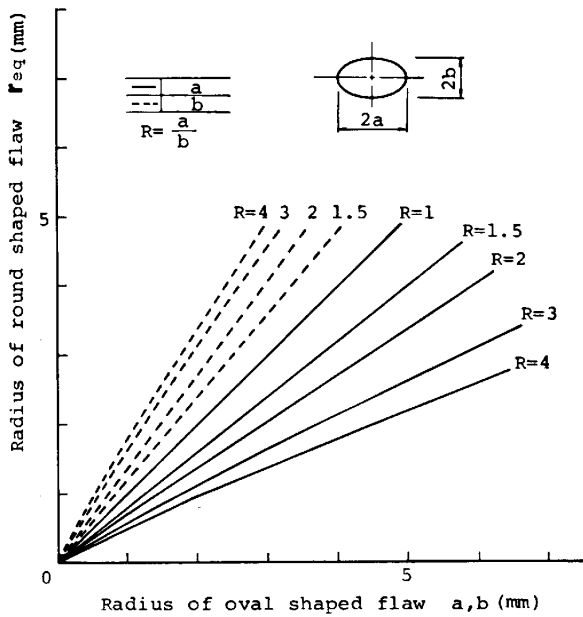


Fig. 12. Radii of oval shaped flaw and round shaped flaw which show the same echo height.

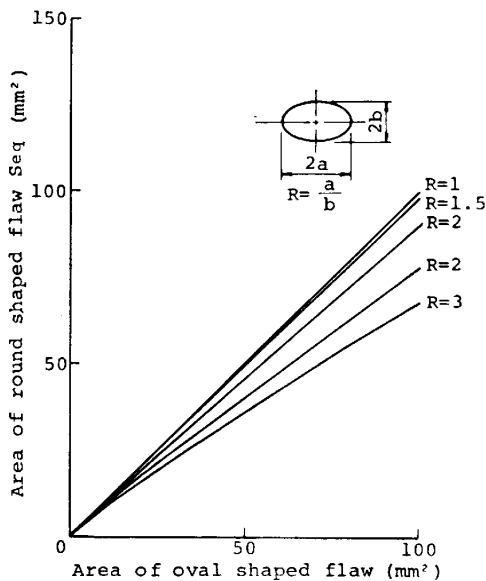


Fig. 13. Areas of oval shaped flaw and round shaped flaw which show the same echo height.

(5)式と(6)式の関係の種類々の寸法の楕円形欠陥に適用し、楕円形欠陥の寸法 a, b と r_{eq} との関係性を求めた。形状比 R を一定にした時の a, b と r_{eq} との関係を Fig. 12 に示す。また、 a, b から求められる楕円形欠陥の面積 S_0 とエコー高さが等しい円形欠陥の面積 S_{eq} との関係を、Fig. 13 に示す。 R が増すにつれて、 S_{eq} は S_0 よりも小さく推定されることとなるが、 $R \leq 1.5$ 程度の範囲では、 S_{eq} は S_0 とほぼ等しい。

4.3.3 非金属介在物の反射特性

アクリル遅延法にて非金属介在物の寸法を小さく推定

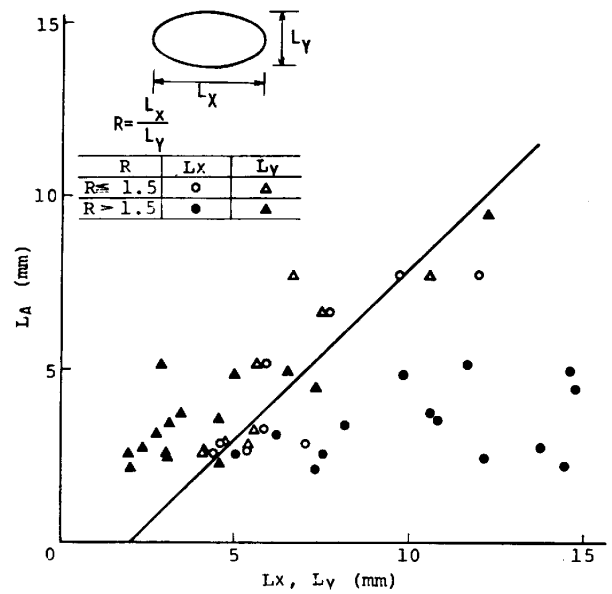


Fig. 14. Inclusion size (L_x, L_y) on the C-scope figure v.s. inclusion diameter (L_A) obtained from AVG diagram.

する今一つの要因として、非金属介在物と模擬欠陥との超音波に対する反射特性の相違が挙げられる。この反射特性の相違による影響と前述の非金属介在物の形状に起因する欠陥面積の過小な推定とを分離するため、Cスコープ欠陥像の欠陥寸法 L_x, L_y と S_A から算出した欠陥寸法 $L_A (=2\sqrt{S_A/\pi})$ を Fig. 14 に示す。すなわち、Fig. 12 に示したように非金属介在物の形状的影響は、 R が増大するにつれて、 L_A と L_x, L_y 間の差が増すこととして示される。しかしながら、 R が小さい領域では L_A と L_x, L_y は近接し、形状的影響は無視しうるものとなるため、反射特性の影響のみが示されることと考えられる。

Fig. 14 において、 $R \leq 1.5$ の非金属介在物のみを対象とすると、 L_A と L_x, L_y 間にはほぼ直線的な関係があり、 L_A は L_x, L_y に対して約 2 mm 小さな値となっている。

4.3.4 欠陥寸法の推定

前項までに得られた知見に基づき、アクリル遅延法により非金属介在物の寸法を推定する方法について検討する。

4.3.2 に示した楕円形欠陥において、欠陥の面積を一定とした場合の楕円形欠陥の寸法 a, b とエコー高さが等しい円形欠陥の欠陥寸法 r_{eq} との関係を Fig. 15 に示す。 $R \leq 4$ の範囲内において、 $r_{eq}/a, r_{eq}/b$ と R との間には、(7)式、(8)式が近似的に成り立つ。

$$\frac{r_{eq}}{a} = 1 - \log R \dots\dots\dots (7)$$

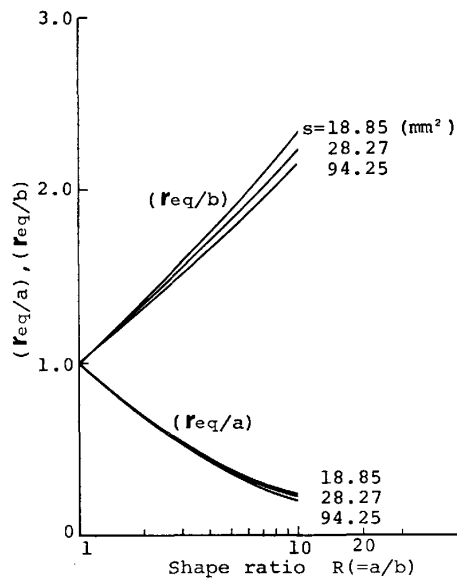


Fig. 15. Effect of shape ratio on equivalent size of oval shaped flaw of constant area (S).

$$\frac{r_{eq}}{b} = 1 + 1.2 \log R \dots\dots\dots (8)$$

4.3.3 にて示した非金属介在物の超音波に対する反射特性が、 R が大きいものに対しても成り立つと仮定すると、 L_X , L_Y は(9)式、(10)式で表される。

$$L_X = \frac{1}{1 - \log R} (L_A + 2) \dots\dots\dots (9)$$

$$L_Y = \frac{1}{1 + 1.2 \log R} (L_A + 2) \dots\dots\dots (10)$$

ただし $L_X = 2a$
 $L_Y = 2b$
 $L_A = 2r_{eq} - 2$

非金属介在物の C スコープ像の欠陥寸法と(9)式、(10)式より求めた欠陥寸法を対比して、Fig. 16 に示す。両者は、欠陥寸法が大きいところでは若干誤差が生じるが、全般的に良い対応を示している。従つて、(9)式、(10)式を用いることにより、非金属介在物の形状比とアクリル遅延法の測定結果から、欠陥寸法を推定しうるものと考えられる。

5. 結 論

圧延鋼材に含まれている平板状の非金属介在物を非破壊的に測定する手法として、水浸型集束探触子を用いた C スコープ法とアクリル遅延法の 2 種類の超音波探傷法について実験的に検討し、以下の結論を得た。

(1) 水浸型集束探触子を用いた C スコープ法は、探触子の焦点と同程度の位置にある平板状の非金属介在物に対しては、その寸法を正確に測定できる。しかしながらその位置が焦点から外れるにつれて、寸法が小さく測

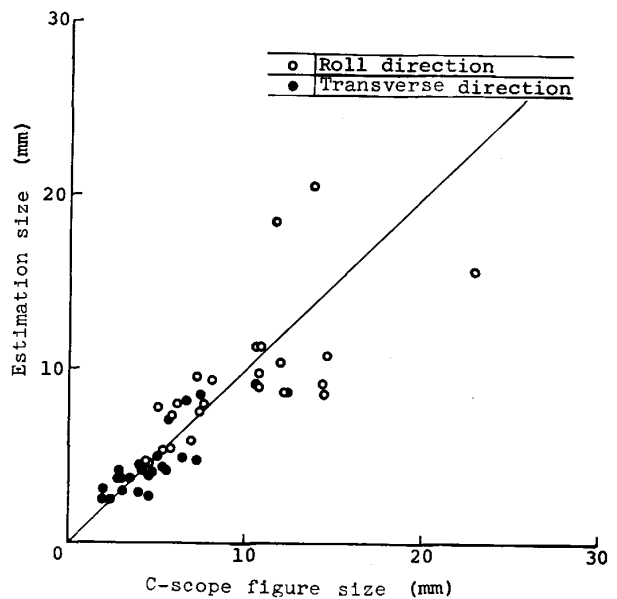


Fig. 16. Comparison of inclusion size on the C-scope and inclusion size estimated by equation (9) and (10).

定される。従つて、C スコープ法は、非金属介在物を検出する方法として効果的な方法であるが、非金属介在物が板厚断面内に分散しているような鋼材に対しては、探触子の焦点の位置を変化させ、繰り返し探傷を行うことが必要となる。

(2) アクリル遅延法の測定結果から、AVG 線図を用いて求めた非金属介在物の面積は、超音波の音圧分布や非金属介在物に対する反射特性の影響を受け、実際の面積よりも小さく推定される。

(3) 非金属介在物の形状比とアクリル遅延法にて求めた欠陥寸法を用いて、非金属介在物の寸法を以下の式により推定できる。

$$L_X = \frac{L_A + 2}{1 - \log R}$$

$$L_Y = \frac{L_A + 2}{1 + 1.2 \log R}$$

ただし L_X : 圧延方向の推定方法
 L_Y : 圧延と直角方向の推定方法
 L_A : アクリル遅延により求めた欠陥寸法
 R : 非金属介在物の形状比

文 献

- 1) 日本建築学会: 地震荷重と建築構造の耐震性 (1976), p. 5 [日本建築学会]
- 2) 日本建築学会: 鉄骨工事技術指針・同解説 (1977) p. 336 [丸善]
- 3) W. DAHL, H. HENGSTENBERG and C. DÜREN: Stahl Eisen, 88 (1968) 8, p. 364
- 4) T. GLADMAN, B. HOLMS and I. D. MCLVOR: Effect of second phase particles on the Me-

- chanical properties of steel(1971), p. 79 [ISI]
- 5) 伊藤慶典, 池田允彦, 中西睦夫, 勝本憲夫, 小溝裕一: 溶接学会誌, 46 (1977) 2, p. 62
 - 6) 岡本節男, 寺崎富久長, 邦武立郎: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1878
 - 7) 高田 寿, 金子晃司, 井上 毅, 木下修司: 鉄と鋼, 62 (1974), p. 866
 - 8) 三本木貢治: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 145
 - 9) 拜田 治, 江見俊彦, 河西悟郎, 内藤雅夫, 森脇三郎: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 354
 - 10) W. SCHÖNHERR: Metal Const. & Brit. W. J. (1974) Feb., p. 56
 - 11) C. TAMBURELLI C.: NDT Int., 10 (1977) 1, p. 3
 - 12) 磯野英二, 宇田川建志, 上野 立: 非破壊検査, 26 (1977) 2, p. 148
 - 13) ASTM Com. E-4: Mat. Res. & Std. (1969) Sep., p. 21
 - 14) 日本非破壊検査協会 202 小委員会: 非破壊検査, 30 (1981) 1, p. 30
 - 15) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会: 超音波探傷法 (1964), p. 384 [日刊工業新聞社]
 - 16) 同上, p. 33