

鋼中の非金属介在物の超音波探傷に関する研究(その1)

石川 登
藤盛 紀明

§ 1. はじめに

建築構造物の大型化に伴い、建築鉄骨には溶接構造が多用されるようになった。溶接構造のうち、建築鉄骨はその主要な構造を、柱と梁から成る骨組構造とした、いわゆるラーメン構造によっており、造船や橋梁・圧力容器などの他の鋼構造物と接合部の形式を異にしている。

すなわち、建築鉄骨におけるフレームの構成の要となる柱-梁接合部においては、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の設計が広く用いられており、その結果として、柱のフランジには板厚方向に力を受けることとなる。

また、超高層建築などの大型鋼構造物の出現に伴い、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おり、接合部の柱フランジの板厚方向引張特性は溶接部とともに、安全上留意さるべき重要な要素となってきた。

一方、従来から圧延鋼板には、圧延方向に比して板厚方向の延性・靱性が低下する性質があることが知られている。そして、鋼板中に非金属介在物が含まれた場合には、介在物の切欠効果により延性の低下が顕著となる。その程度は、介在物の種類や体積率^{1),2)}・圧延方向の伸長度³⁾あるいは破面上の面積率³⁾などに依存すると報告されている。さらに、鋼板中にラミネーションなどの粗大な母材欠陥を含む場合には、板厚方向強度が低下し、開裂や剝離破壊が発生する。

本研究は、圧延鋼板中の非金属介在物やラミネーションなどの母材欠陥が、柱-梁接合部の継手性能に及ぼす影響を調べるとともに、鉄骨構造全体から示される柱-梁接合部の要求性能との関係から、その結果を設計・製作・検査に反映させ、建築鉄骨の安全性を更に確立することを目的とする。本報はその第一段階として、鋼板中の非金属介在物の実際的な検査手法を確立することを目

的とし、数種の超音波探傷法による非金属介在物の検出性の比較をこころみた。

なお、本研究は「T形突き合わせ溶接継手に関する共同研究」として、鶴田明・早稲田大学名誉教授の指導のもとに、株式会社日建設・日本鋼管株式会社・株式会社東京鉄骨橋梁製作所・川崎重工株式会社・株式会社駒井鉄工所との共同研究として実施されたものの一部である。

本報文中に使用する用語は以下のとおりとする。

(系統的)点計数: Cスコープ欠陥分布図上に5mmピッチの正方格子の交点を想定し、この標本点が非金属介在物像中に含まれるか否かを計数することにより、欠陥分布図中における非金属介在物像の面積分率を求める方法。

N_{C1} : 点計数を実施した欠陥分布図上の200×100の領域内の非金属介在物像の数。

AR_C : 点計数にて求めた欠陥分布図上の200×100の領域内の非金属介在物像の面積分率。

準面積解析: Cスコープ欠陥分布図中の個々の非金属介在物像の面積を求めるため、その代表値として、圧延方向長さ l と直角方向長さ w を測定する方法。

N_{02} : 準面積解析を実施した欠陥分布図上32×200の領域内の非金属介在物像の数。

A_C : 準面積解析より求めた欠陥分布図上32×200の領域内の非金属介在物像の面積和。非金属介在物像の面積算出は像を楕円形と仮定し、測定して2軸の長さより求めた。

\bar{F} : 格子点探傷のFエコー高さの平均値。STB-N1 5.6φ, 50%を基準エコー高さとした時の、各点のFエコーのCRT上における指示値の相加平均値。

N_A : アクリル遅延法により検出した100×200の領域内における非金属介在物像の数。

N_A' : 同上、32×200の領域内における非金属介在物像の数。

	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	σ_y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	EI (%)
A11, A12, A13, A33	16	38	138	19	8	35.1	52.9	26.9
A31, A32, C11, C12 C13, C31, C32, C33	17	36	140	25	9	38.1	54.7	25.4
E11, E12, E13 E31, E32, E33	17	37	140	22	8	35.8	54.7	27.4

表—1 供試材料の化学成分と機械的性質

A_A : アクリル遅延法により検出した非金属介在物を、AVG線図を用いて円形平板状の欠陥として寸法を推定して得られる非金属介在物の面積和。

AR_A : アクリル遅延法による探傷領域内における非金属介在物の想定面積率。

$$AR_A = \frac{A_A}{100 \times 200}$$

§ 2. 供試材

供試材は溶接構造用圧延鋼材 (SM 50 A) とし、その化学成分ならびに圧延方向の機械的性質を表—1に示す。鋼板は連続鋳造圧延法により、板厚32mmに圧延されたものである。非金属介在物を含んだ鋼板の採取を目的とした目的圧延を行ない、非金属介在物の程度をあらかじめ3段階となるように調整した。

試験体は、非金属介在物の程度ごとに各6体ずつ、計18体とした。

§ 3. 実験方法

試験体は、以下に示す4種類の超音波探傷試験法により非金属介在物の深傷を行なった。各探傷法における探傷条件を表—2に示す。

1) JIS G 0801:「压力容器用圧延鋼板の超音波探傷検査」にもとづく超音波探傷試験

従来の鋼板探傷のデータとの対応を得るために、わが国において最も一般的な鋼板の垂直探傷規格である JIS G 0801 にもとづき、供試鋼板を全面探傷する。

探傷は局部水浸式超音波探傷法にて行ない、介在物より欠陥エコーの最高エコー高さを測定した。

2) Cスコープ法

Cスコープ法は、非金属介在物の位置および相対的な寸法に対して、他の手探傷法よりも正確な情報を提供する

ことに着目し採用した。本法は水中にて探触子が自動的に X-Y 走査し、鋼板内の母材欠陥の平面分布図が得られる水浸式の自動探傷法である。探触子は、含まれる母材欠陥に対する分解能を良くするため、表—2に示す性能の焦点接触子を用いた。

探傷に際しては、供試鋼板の板厚中央付近に探触子の焦点が結ばれるように水距離を設定した。探傷感度は STB-N1 5.6φ, 80%+12 dB とし、介在物からの反射エコー高さが20%以上となるものが、鋼板中の母材欠陥として記録されるようにした。

3) 直接接格子点探傷法

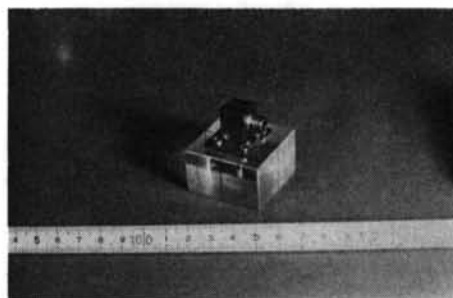
JIS G 0801 にもとづく鋼板の全面探傷は欠陥エコー高さを測定するため、探傷に熟練を要するとともに、個人差があり再現性に欠ける面がある。そこで、垂直探傷法の簡易化を図る目的で、本法を実験的に試みた。

鋼板表面に10mmメッシュの格子点を想定し、この格子点(9×19点)上を直接接の垂直探触子を用いて探傷し、欠陥エコー高さ(F)および、有欠陥部の第1回底面エコー高さ(B_F)を測定した。

4) アクリル遅延法

本法は、鋼板と探触子間にアクリルを介在させて、ビーム路程を大きくすることにより、規準化距離 K の値をAVG線図の適用可能な範囲とし、鋼中の介在物の面積をAVG線図を用いて推定するために実施する。

鋼板と接触子間には写真—1に示すように、厚さ25mmのアクリル樹脂を挿入し、供試鋼板の探傷領域内を全面探傷し、欠陥エコーの最高エコー高さを記録した。



写真—1 アクリル遅延探触子

項目	探傷法	JIS G 0801法	Cスコープ法	直接接点格子点探傷法	アクリル遅延法
探傷器		USM-2: 西独クラウトクレーマ社製 FD210P: 三菱電機機軸製	UM731: 東京計器機軸製	FD410S: 三菱電機機軸製 SM80D: 東京計器機軸製	FD410S: 三菱電機機軸製 SM80D: 東京計器機軸製
探触子		5L20I (局部水浸探触子):	米国パナメトリック社製水浸焦点探触子 (周波数10 MHz, 振動子直径 0.25 inch: 6.3mm, 水中焦点距離 2inch: 50mm, 焦点直径約 0.8mm)	5Q20N: 三菱電機機軸製	5Z10N: 三菱電機機軸製
接触媒質		水	—	グリセリン濃度98.5%以上	グリセリン濃度98.5%以上
検出レベル		STB-N1 5.6φのエコー高さを目盛板の50%として、25%以上	STB-N1 5.6φ, 80%+12dB として、20%以上	STB-N1 5.6φのエコー高さより 24dB 低いエコー高さ	深さ $\frac{3}{4}t$ (t : 板厚) の位置にある直径の 2mm 円板状欠陥のエコー高さ、 $t=32\text{mm}$ の時は STB-N1 5.6φのエコーの高さより 12dB 低いエコー高さ
その他		日本鋼管株式会社横浜製鉄所の検査課で実施	探触子の走査器は米国 Automation Industry 社製		アクリルは厚さ25mm

表一 2 探傷条件

	JIS G 0801 法		C ス コ ー プ 法						格子点法		アクリル遅延法		
	(100×200)		点 計 数			準面積解析			\bar{F}	(F/B _F)	(100×200)		
	○欠陥数 (個)	△欠陥数 (個)	N _{C1} (個)	AR _C (%)	平均面積 (mm ²)	N _{C2} (個)	A _C (mm ²)	平均面積 (mm ²)	(%)	(%)	N _A (個)	A _A (mm ²)	AR _A (%)
A材	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0
C11	9	2	707	22	5.6	278	1274	4.6	18.9	—	47	165	0.83
C12	8	1	678	18	4.4	265	817	3.1	17.4	—	51	181	0.91
C13	—	0	699	22	5.4	297	1283	4.3	20.2	—	48	174	0.87
C31	15	1	601	19	5.4	—	—	—	16.0	—	45	146	0.73
C32	—	2	712	26	6.3	—	—	—	22.8	—	64	276	1.38
C33	—	0	707	20	4.9	—	—	—	17.2	—	38	128	0.64
E11	3	3	379	17	7.7	129	1269	9.8	11.5	3.3	41	204	1.02
E12	5	0	467	16	5.9	207	1070	5.2	10.7	3.0	59	207	1.03
E13	1	2	413	15	6.2	160	1052	6.6	10.1	2.9	53	193	0.97
E31	4	1	341	12	6.0	—	—	—	11.4	3.3	50	167	0.83
E32	4	1	305	9	5.1	—	—	—	6.7	2.4	27	104	0.52
E33	6	0	359	16	7.6	—	—	—	10.1	3.0	68	244	1.21

表一 3 超音波探傷試験結果

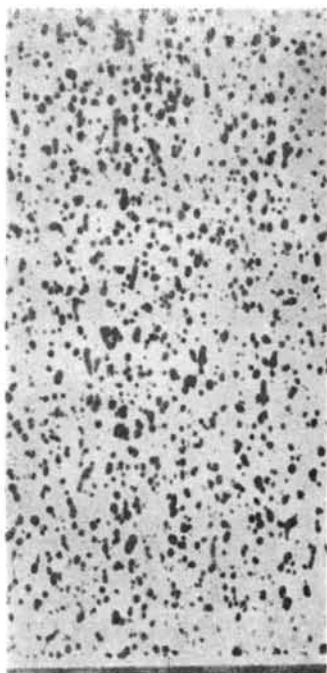
欠陥の程度	欠 陥 の 分 類	表示記号
軽	25% < F _i ≤ 50% ただし、B _i が100% 未満の場合は、25% < F _i /B _i ≤ 50%	○
中	50% < F _i ≤ 100% ただし、B _i が100% 未満の場合は、50% < F _i /B _i ≤ 100%	△
重	F _i > 100%, F _i /B _i > 100% または B _i ≤ 50%	×

表一 4 垂直探触子による欠陥分類

§ 4. 実験結果

各超音波探傷試験の結果をまとめて表一 3 に示す。

1) JIS G 0801 法は、探傷領域(200×100)内に検出された欠陥を、F エコー高さと F/B_F エコー高さとから表一 4 にもとづき○欠陥、△欠陥、×欠陥と判定し、領域内における各欠陥の個数を記録した。



図一1 Cスコープ欠陥分布図

2) Cスコープ法で得られた欠陥分布図上の200×100の領域内にある非金属介在物像を点計数により観測し、領域内における面積分率を求めた。また、同じく32×100の領域内にある非金属介在物像の寸法を準面積解析により抽出測定し、領域内における非金属介在物像の面積和および寸法に関する度数分布を求めた。

3) 格子点探傷法による各点のFエコー高さの平均値、および有欠陥点における底面エコー高さの平均値を求めた。

4) アクリル遅延法により検出した欠陥をAVG線図を用いて、円形平板状欠陥と見なした場合に想定される欠陥寸法を算出して、本法で検出された非金属介在物の(想定)面積和、および(想定)面積率を求めた。

§ 5. 考察

5.1 非金属介在物の寸法

Cスコープ欠陥分布図における非金属介在物像を、面積および圧延方向の長さで整理した結果を図2～5に示す。C材の介在物像は4mm²以下の微小なものが大多数を占めるのに対し、E材は比較的大きな介在物像から構成されている。圧延方向の長さに関しても、同様な傾向が観察された。

ここで、非金属介在物像を圧延方向長さで整理したのは、鋼材の板厚方向特性が、単位面積内における圧延方向長さが50μm以上の非金属介在物の圧延方向総長(ΣI₅₀)⁴⁾や、含まれる非金属介在物の圧延方向総長⁵⁾と相関することが主張されていることに起因するものである。

5.2 Cスコープ法と格子点探傷法の相関

点計数により求めたCスコープ欠陥分布図上200×100の領域内における非金属介在物像の面積分率(AR_C)と格子点探傷法のFエコー高さの平均値(\bar{F})との関係を図6に示す。

Cスコープ欠陥分布図中の非金属介在物像は、鋼板内に含まれる介在物の位置と大きさを近似的に表示したものである。一方、 \bar{F} は一般の垂直探傷と異なり、欠陥の最高エコー高さを測定しておらず、構成された格子点におけるFエコー高さの平均値である。このFエコー高さには、鋼板内の介在物の形状(平板状か球状か)と大きさ、個数、性状(鋼基地との密着度および欠陥の表面状況)などが影響するが、平板状で平滑な表面をもった介在物の場合には、超音波のビーム透過部内における、ある特定な深さの介在物が占める面積が影響すると考えられる。今回の格子点探傷法は、図7に示すように、格子点の間隔に対して使用された探触子の径が大きいため、鋼板はどの位置においても、重複して垂直探傷が行なわれている。したがって、(Fエコー高さが、超音波のビームの透過部内に占める介在物の割合により一義的に決定される場合には)鋼板内に介在物が重層して存在していなければ、 \bar{F} は面積分率AR_Cと相関すると予想される。

今回の試験結果から、 \bar{F} とAR_Cとの間には次式の関係が得られた。

$$AR_C = 0.87\bar{F} + 5.2 \quad (\text{相関係数} = 0.93)$$

5.3 Cスコープ法とアクリル遅延法の相関

AR_Cとアクリル遅延法により検出した介在物をAVG線図を用いて推定した介在物の想定面積率(AR_A)との関係を図8に示す。

介在物の寸法や分布を異にする2種の鋼種を通しての相関関係は得られなかったが、各鋼種内ではAR_CとAR_Aとの間に相関が見い出せた。直線回帰を行なった際の両者の関係式を以下に記す。

$$AR_A = 7.09 \times 10^{-2} AR_C - 0.07 \quad \text{C材} \quad r = 0.92$$

$$AR_A = 7.04 \times 10^{-2} AR_C - 0.05 \quad \text{E材} \quad r = 0.78$$

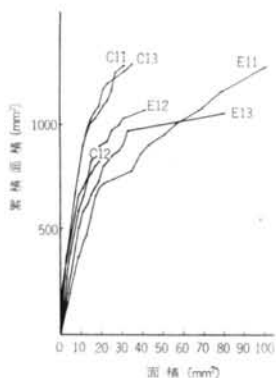


図-2 Cスコープ法準面積解析
介在物像累積面積分布

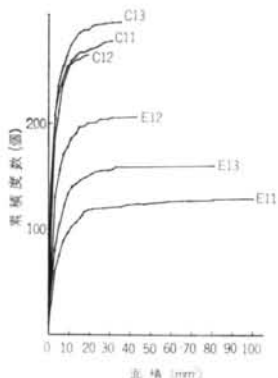


図-3 Cスコープ法準面積解析
介在物像累積度数分布

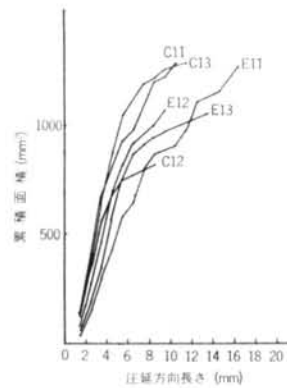


図-4 Cスコープ法準面積解析
介在物像累積面積分布

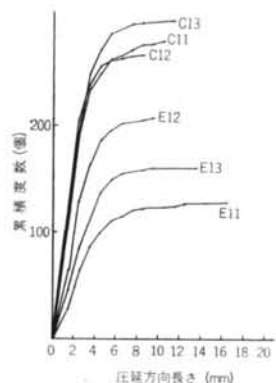


図-5 Cスコープ法準面積解析
介在物像累積度数分布

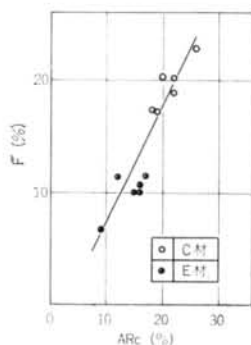


図-6 Cスコープ法介在物像面積分率
と直接接触格子点探傷Fの関係

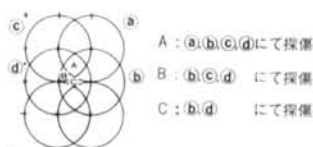


図-7 格子点探傷による重複
回数

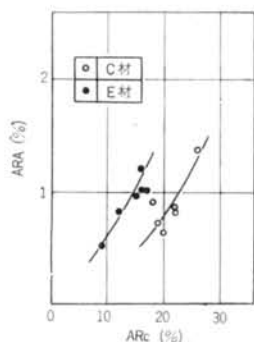


図-8 Cスコープ法とアクリル
遅延法における介在物面
積率の関係

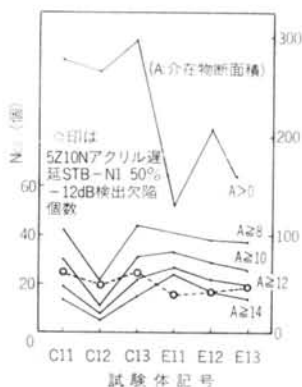


図-9 Cスコープ法における介
在物断面積とアクリル遅
延法の欠陥個数との関係

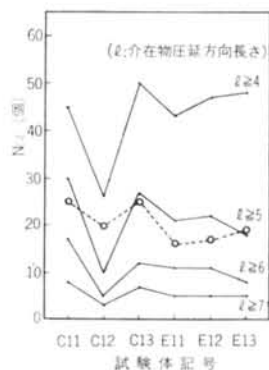


図-10 Cスコープ法における介
在物投影長とアクリル遅
延法の欠陥個数との関係

C, E両鋼種の AR_A と AR_C の変化率 $\left(\frac{dAR_A}{dAR_C}\right)$ は、ともに約 7×10^{-2} と同じであるが、小さな介在物を多く含むC材と、比較的大きな介在物から構成されているE材とでは、 AR_A はC材の方が小さく評価される。これは、アクリル遅延法の欠陥検出レベルがCスコープ法の

それより高く、 AR_C が微小な介在物まで対象とした介在物像の面積分率であるのに対して、 AR_A はある大きさ以上の介在物のみを評価の対象として求めた介在物の想定面積率であるためと考えられる。

Cスコープ欠陥分布図を準面積解析を行ない、求めたある面積以上の介在物像の個数を、同じ探傷範囲内にお

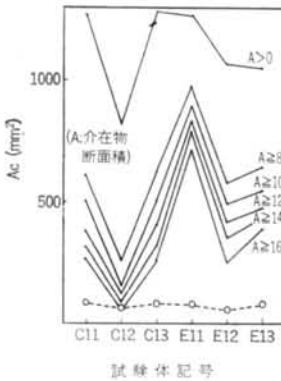


図-11 介在物面積率に関するCスコープ法とアクリル遅延法の関係

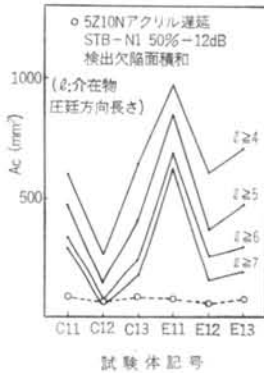


図-12 介在物面積率に関するCスコープ法とアクリル遅延法の関係

けるアクリル遅延法の検出欠陥個数 (N_d') と比較して図-9に示す。また、圧延方法の介在物長さに関する同様な関係を図-10に示す。

アクリル遅延法により検出される欠陥は、Cスコープ欠陥分布図上で $10 \sim 14 \text{ mm}^2$ 以上の介在物像を有するものと推測され、圧延方向の長さに関しては約 5 mm 以上のものと考えられる。今後、さらに多くのデータの蓄積を必要とするが、圧延方向にある長さ以上に伸延した介在物を検出するのにアクリル遅延法が有効であることが明らかになれば、鋼板の板厚方向の靱性⁹⁾や溶接性¹⁾を評価する指標となりうると考えられる。

アクリル遅延法により検出した介在物を、AVG線図を用いて求めた介在物の想定面積 (A_d') と、Cスコープ欠陥分布図上におけるある面積以上の介在物像の面積和 (A_c') との対比を図-11に示す。また、 A_d' とある圧延方向長さ以上の介在物像の面積和 (A_c'') との関係を図-12に示す。

両図とも、Cスコープ欠陥分布図上の介在物像の大きさとAVG線図を用いて求めた欠陥想定寸法が大きく異なっている。介在物などの欠陥が含まれている鋼板の使用可否を検討する場合、その欠陥の寸法を知る必要がある。しかしながら、Cスコープ法およびアクリル遅延法はともに、必ずしも実際の欠陥の寸法を表示したものではない。両法とも、欠陥寸法の基準としてSTB-N1の $5.6 \text{ mm}\phi$ 平底ドリル穴を利用しているが、鋼板内に含まれる介在物は、理想欠陥のように平滑な境界面を有するとは限らず、また鋼と介在物の境界はある程度の強度を有する圧着状態にある¹¹⁾と考えられている。したがって、今後、実欠陥の寸法と対応のとれた欠陥寸法の推定法の確立が望まれる。

§ 6. 結び

非金属介在物を含んだ鋼板に数種の超音波探傷法を適用し、以下の結論を得た。

- 1) 直接接触格子点探傷法によるFエコー高さの平均値は、Cスコープ法で得られる欠陥分布図中の介在物像の面積分率とよい対応を示した。鋼板内に介在物が重層して含まれていない場合には、格子点探傷法は、鋼板内の介在物の総面積を得るのに有効な方法と考えられる。
- 2) 鋼板と探触子間にアクリル材を挿入して行なったアクリル遅延法による全面探傷は、その検出レベルにより決定される、ある大きさ以上の介在物を探傷の対象としている。実施した探傷結果をAVG線図を用いて求めた想定面積率とCスコープ上での介在物像面積分率は、介在物の寸法に関する分布が類似している鋼種内では良い相関が見られた。
- 3) 検出した介在物の寸法に関するアクリル遅延法とCスコープ法との対比は、圧延方向介在物長さで整理した検出欠陥個数は比較的良い対応を示したのに対して、欠陥の面積に関しては余り良い一致を示さなかった。

介在物の鋼材の板厚方向特性に及ぼす影響は、体積中における介在物量、介在物の大きさ^{4), 9), 10), 7)}、介在物間の相互距離^{9), 10)}、あるいは破面上における介在物面積率³⁾などが指摘されている。今後の研究の課題として、以下の事柄が考えられる。

- 1) 鋼材の板厚方向特性に影響を及ぼす介在物の性状 (ex. 寸法, 量, 介在物間の相互距離など) を明らかにする。

- 2) 破壊機構の理論的説明,あるいは現象論的説明.
- 3) 非破壊検査法の高精度化により,破壊に寄与する因子に関する情報を得る.あるいは,現象論的な観点から,板厚方向特性と非破壊検査より得られる情報を関連づける.
- 4) 実構造物にて想定される応力下での欠陥の挙動,および許容欠陥寸法,許容欠陥個数などの介在物群に対

する評価の確立.

本研究の遂行に当り,多大な御指導と御教授を賜りました鶴田明早大名誉教授ならびに榊日建設計高田十治氏に深く感謝致します.また,Cスコープ法の実験に当り,実験機器の利用に便宜を図っていただきました石川島播磨重工業榊技研,岸上氏・米山氏に感謝致します.

〈参考文献〉

- 1) 伊藤,池田,中西,勝本,小溝:“板厚方向の溶接われ感受性に関する研究”溶接学会誌 Vol.46, No.2(1977) pp.62~67
- 2) 小指:“硫化物系介在物と構造用鋼の延性および靱性”鉄と鋼 Vol.61, No.14(1975) pp.2998~3021
- 3) 高田,金子,井上,木下:“圧延材の延性におよぼす MhS 介在物の形状変化の影響”鉄と鋼 Vol.62, No.4 (1974) pp.866~874
- 4) J.E. Croll:“Through-thickness Properties of Structural Steels” Journal of Australian Institute of Metals, Vol.20, No.3(Sept.1975) pp.171~179
- 5) T.J. Baker & J.A. Charles:“Influence of Deformed Inclusions on the Short Transverse Ductility of Hot-rolled Steel”
- 6) J.C.M. Farrar:“Inclusions and Susceptibility to Lamellar Tearing of Welded Structural Steels” Welding Journal, Vol.53, No.8 (Aug.1974) Res. Suppl. pp.321S~331 S
- 7) Kjell Eriksson:“Fracture Toughness and Distribution of Inclusions” Scand.J.Metallurgy, Vol.4, pp.173~176
- 8) T.J. Baker, K.B. Gove & J.A. Charles:“Inclusion Deformation and Toughness Anisotropy in Hot-rolled Steels” Metals Technology (April 1976) pp.183~193
- 9) 村田,佐藤,松尾,岡田:“鉄鋼材料の水素誘起割れ機構と対策”鉄と鋼 Vol.61, No.4(1975) S 235
- 10) 森田,河嶋,池田,寺崎:“有限要素法による水素誘起割れ伝播機構の解析”鉄と鋼 Vol.62(1975) S 251
- 11) 岡本,寺崎,邦武:“高張力鋼の延性および延性破壊過程におよぼす MhS 介在物の影響”鉄と鋼 Vol.63, No.12 (1977) pp.1878~1886
- 12) R.T. Dehoff & F.N. Rhines:“計量形態学”内田老鶴圃新社

