

電炉平鋼の Z 方向の力学的性能に関する研究

矢部 喜堂
(技術研究所)

倉持 貢
(技術研究所)

小早川 恵実
(技術研究所)

§ 1. はじめに

近年、電炉メーカーでは広幅で板厚の厚い平鋼が生産されており、高炉鋼板より低廉なため、電炉平鋼が建築鉄骨の主要構造材として使用される機会が増えてきた。しかし、現状では突合せ溶接部、特に柱・梁接合部等で Z 方向（板厚方向）に応力が作用する部位への使用は避けられることが多い。これは、電炉平鋼が鉄くず（スクラップ）を主原料としていることから、鋼材の機械的性質や溶接性などの品質にばらつきが生じることが懸念されているためである。また、建築鉄骨の仕口部は激震時に降伏点を越えるような、高応力の繰り返し荷重を受ける可能性がある。したがって、仕口部に使用する鋼材は地震時の繰り返し応力に対して Z 方向の性能が健全でなければならないが、現状の電炉平鋼の Z 方向の性質は必ずしも明確ではないとの指摘があるためである。

電炉平鋼に関する既往の研究報告としては数例¹⁾²⁾見られるが、単一メーカーの製品に関する報告がほとんどである。これらの背景から、筆者らは複数メーカーを対象にして一連の調査研究を実施してきた。

本報では、電炉平鋼を建築鉄骨に使用する場合の重要な指標と考えられている Z 方向の性能の一つである絞り値(ϕ_z)を取り上げ、現状の電炉平鋼において ϕ_z に及ぼす冶金学的因子等の影響を明らかにするとともに、Z 方向に高応力の低サイクル疲労を受けた場合の諸性能について調査する一方、これらの諸性質の非破壊的（超音波）推定法について検討したので、高炉鋼板と対比しながら報告する。

§ 2. 絞り値 (ϕ_z) に及ぼす冶金学的因子の影響

2.1 供試材

実験に供した電炉平鋼は、代表メーカー 5 社の SS 41

および SM 50 A 材で、それぞれ板厚は 16mm および 25mm とした。また、高炉鋼板についてもこれらと対比するために同一の鋼種、板厚とした。供試材の数量は 58 である。図-1 は、WES-1106（鋼材の厚さ方向の引張試験方法）に準じて、平行部の直径を 10mm ϕ とした Z 方向引張試験片の形状・寸法である。

2.2 重回帰分析

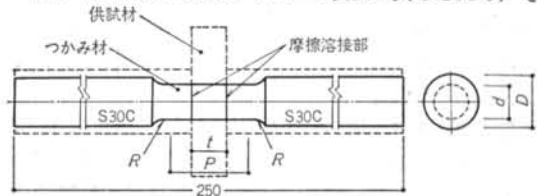
ϕ_z に及ぼす冶金学的因子等の影響を明らかにするために ϕ_z を目的変数とし、化学成分、圧延条件および光学顕微鏡組織の各因子を説明変数とする重回帰分析を行なった。この場合、変数選択は変数増減法を用いて、F 値 2.0 で検定して有意要因を採択した。

表-1 は、各供試材に関する諸因子を製法別に示したものである。表中の化学成分は 12 元素についてのチェック分析値であり、圧延条件における庄下比と仕上げ温度は各メーカーの標準値とした。また、光学顕微鏡組織ではフェライト結晶粒度、パーライト面積率および組織の状態を取り上げた。しかも、組織の状態では断面方向にフェライトとパーライトが層状となるものと、粒状を呈するものとに大別した。

2.3 分析結果および考察

2.3.1 重回帰式

電炉平鋼と高炉鋼板とでは互に製法が異なるため、そ



〔単位: mm〕				
鋼材の厚さ(t)	平行部の直径(d)	平行部の長さ(P)	両部の半径(R)	つかみ部径(D)
15以上120未満	10	t+12	d以上	16以上

図-1 Z方向引張試験片

種 別	変 数	化 学 成 分 (%)											圧延条件		光学顕微鏡組織			Z方向引張り	
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn	N	圧下比 (%)	仕上温度 (°C)	粒度	パーライト (%)	状態*	ϕ_Z (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
電炉平鋼 (n=22)	平均値	0.145	0.238	0.902	0.025	0.015	0.0495	0.0943	0.0121	0.1232	0.0109	0.0110	0.0096	9.40	930	8.32	18.2	0.36	37.2
	\sqrt{V}	0.025	0.077	0.420	0.0055	0.0027	0.0132	0.0372	0.0049	0.0062	0.0007	0.0005	0.0002	2.60	63	1.19	7.0	0.49	14.1
	最大値	0.19	0.40	1.42	0.037	0.020	0.070	0.140	0.020	0.290	0.022	0.022	0.013	13.1	1,020	10.0	32.4	1	59
	最小値	0.11	0.15	0.42	0.017	0.009	0.026	0.032	0.006	0.031	0.001	0.004	0.007	5.8	825	6.0	9.1	0	12
	範囲	0.08	0.25	1.00	0.020	0.011	0.044	0.108	0.014	0.259	0.021	0.018	0.006	7.3	195	4.0	23.3	1	47
高炉鋼板 (n=36)	平均値	0.167	0.253	1.054	0.0224	0.0105	0.0197	0.0261	0.0006	0.0058	0.0254	0.0051	0.0036	11.84	820	8.76	20.9	0.97	40.6
	\sqrt{V}	0.023	0.098	0.324	0.0045	0.0038	0.0038	0.0249	0.0023	0.0250	0.0090	0.0012	0.0014	2.67	77	1.03	6.7	0.17	19.7
	最大値	0.22	0.40	1.40	0.031	0.024	0.030	0.160	0.010	0.150	0.043	0.009	0.009	15.5	985	10.0	32.7	1	74
	最小値	0.12	0.03	0.39	0.011	0.006	0.010	0.010	0.000	0.000	0.009	0.004	0.002	7.2	710	7.0	10.1	0	8
	範囲	0.10	0.37	1.01	0.020	0.018	0.020	0.150	0.010	0.150	0.034	0.005	0.007	8.3	275	3.0	22.6	1	66

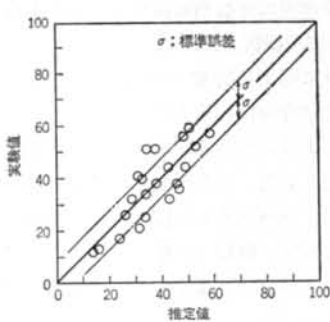
*) 粒状の場合: 0.0, 層状の場合: 1.0

表一 重回帰分析因子の諸量

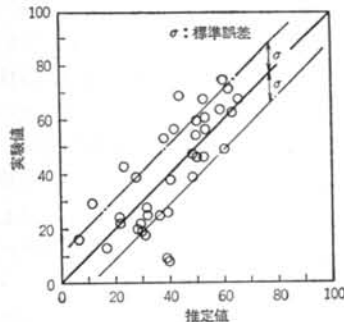
種 別	重 回 帰 式	重相関係数	寄 与 率
電炉平鋼	$\phi_Z = 42.69 - 1.215 x_4 - 2.528 x_5 - 1.316 x_{13} + 0.08532 x_{14} - 9.355 x_{17}$	0.827	0.684
高炉鋼板	$\phi_Z = 156.8 - 44.99 x_5 - 1.73 x_{13} - 49.75 x_{17}$	0.744	0.554

注) x_4 : P含有量 (%), x_5 : S含有量 (%), x_{13} : 圧下比 (%), x_{14} : 仕上げ温度 (°C), x_{17} : 組織の状態

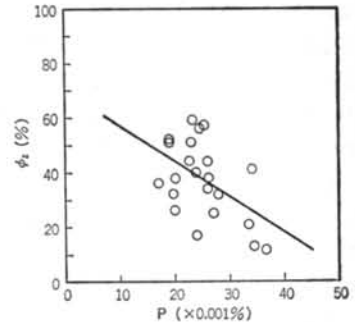
表二 重回帰分析結果



図二 電炉平鋼の ϕ_Z の推定値と実験値との対応



図三 高炉鋼板の ϕ_Z の推定値と実験値との対応



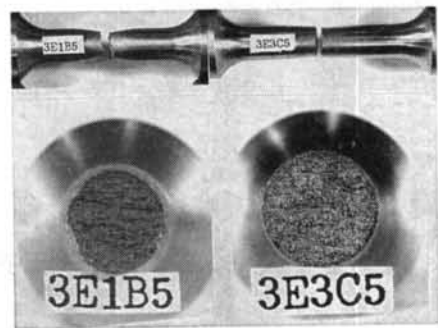
図四 P含有量と ϕ_Z の関係 (電炉平鋼)

それぞれ別々に行なった重回帰分析結果を表二に示す。電炉平鋼の ϕ_Z に影響を及ぼす有意要因として、P含有量、S含有量、圧下比、仕上げ温度、組織の状態が挙げられる。また一方、高炉鋼板の場合にはS含有量、圧下比、組織の状態等が挙げられる。

図二、三は、電炉平鋼および高炉鋼板の重回帰式による ϕ_Z と、機械試験で得られる絞り値との対応関係を示したものである。両者の間に比較的高い相関が見られることが明らかである。このことは逆に、得られた重回帰式が妥当であることを示すものであるといえる。

2.3.2 有意要因の影響

有意要因のうち、P含有量と ϕ_Z の関係を図四に示



写真一 Z方向引張り試験片の破面

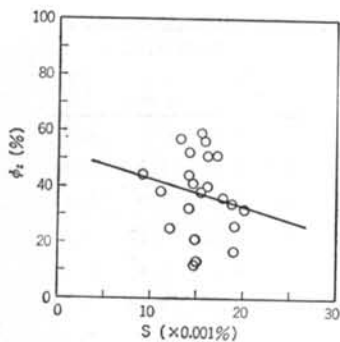


図-5 S含有量と ϕ_z との関係
(電炉平鋼)

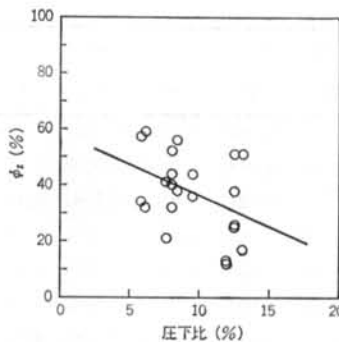


図-6 圧下比と ϕ_z の関係
(電炉平鋼)

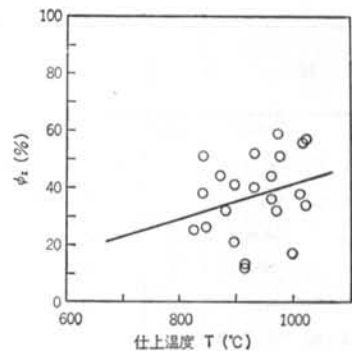


図-7 仕上げ温度と ϕ_z の関係
(電炉平鋼)

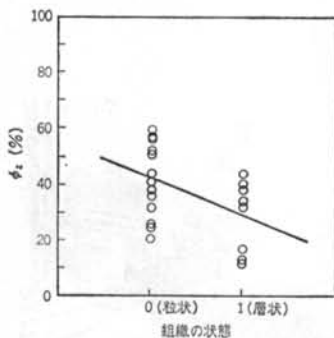


図-8 組織の状態と ϕ_z の関係 (電炉平鋼)

す。P含有量が高くなるほど ϕ_z は低下する傾向にある。これは、一般的にPが多くなれば引張強さは若干増加するが靱性は減少する傾向にあり、そのため ϕ_z も低下すると考えられる。Z方向引張試験後の破面の一例を写真-1に示す。図-5は、S含有量と ϕ_z の関係を示したものである。S含有量が高くなるほど ϕ_z が低下する傾向は、P含有量の結果と同様である。しかし、高炉鋼板の場合にはこれらの因子の間にかかなり高い相関が見られるが、電炉平鋼の場合には相対的に低い相関を示すといえる。図-6は、圧下比と ϕ_z の関係を示したものである。圧下比が大きくなると ϕ_z は低下する傾向にある。これは、圧下比が増大するに伴ってMnS系介在物が進展され、面積が拡大されるためと考えられる。図-7は、仕上げ温度と ϕ_z の関係を示したものである。本結果は、仕上げ温度が低くなると ϕ_z が低下することがあることを示すものであり、制御圧延鋼のように特別な配慮をした場合を除き、低温圧延には注意を要するといえる。図-8に、光学顕微鏡組織の状態と ϕ_z の関係を示す。光学顕微鏡組織が層状を呈する度合いが強くなるほど、 ϕ_z が低下する傾向にある。層状組織は、一般にL方向の靱性に対しては効果的であるが、Z方向の靱性に対しては必ずしも効果的であるとはいえない。したがっ

て、L方向とZ方向の性能のバランスが重要であると考えられる。

§ 3. 低サイクル疲労実験

3.1 供試材

本実験に用いた供試材の鋼種は、前項の実験と同様にSS41およびSM50Aで、いずれも板厚は25mmとした。供試材の選定に当たっては、電炉平鋼および高炉鋼板を含めて市中より100チャージの鋼板を無作為に収集し、Z方向引張試験を行なって全チャージの ϕ_z を調べた後、これらの ϕ_z の頻度分布(図-9)をもとにして、各鋼種とも電炉平鋼と高炉鋼板を合せて12チャージずつ、計24チャージを供試材として選定した。これらの供試材の化学成分および機械的性質(L方向)は、表-3に示すとおりである。

3.2 試験体

低サイクル疲労実験のための試験体の形状・寸法を図

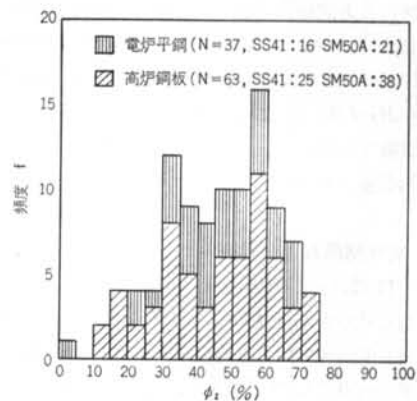
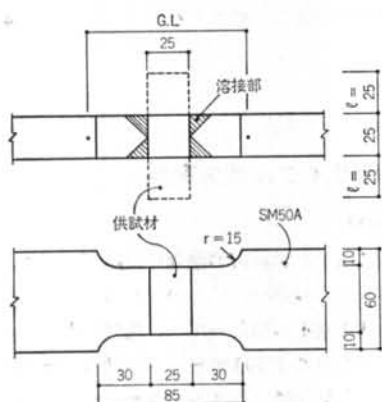


図-9 ランダムサンプリングした鋼板の ϕ_z の頻度分布

種 別			化 学 成 分 (%)								機 械 的 性 質		
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	N	σ_y (kg/mm ²)	σ_u (kg/mm ²)	EI (%)
電 炉 平 鋼	SS 41 (n=5)	\bar{x}	0.146	0.162	0.526	0.0208	0.0182	0.2340	0.1300	0.0101	28.5	45.5	32.5
		\sqrt{V}	0.025	0.028	0.102	0.0102	0.0056	0.0702	0.0495	0.0022	1.12	1.50	2.83
	SM 50 A (n=6)	\bar{x}	0.170	0.273	1.273	0.0217	0.0232	0.1783	0.1167	0.0123	34.2	55.0	29.1
		\sqrt{V}	0.006	0.036	0.078	0.0044	0.0057	0.0757	0.0432	0.0037	1.17	2.17	1.53
高 炉 鋼 板	SS 41 (n=7)	\bar{x}	0.176	0.181	0.734	0.0236	0.0124	0.0014	0.0214	0.0033	28.1	44.4	34.2
		\sqrt{V}	0.019	0.055	0.196	0.0040	0.0029	0.0038	0.0038	0.0008	1.54	1.28	1.22
	SM 50 A (n=6)	\bar{x}	0.173	0.347	1.363	0.0238	0.0107	0.0283	0.0433	0.0036	36.5	53.5	29.3
		\sqrt{V}	0.016	0.034	0.023	0.0050	0.0024	0.0646	0.0575	0.0005	2.68	1.48	1.66

表一 3 供試材の化学成分および機械的性質 (L方向)



図一 10 Z軸方向繰り返し試験体の形状・寸法

10に示す。供試材のZ方向に、引張試験用つかみ板 (SM 50 A) を十字突合せ溶接し、供試材の突出部はつかみ板と同厚になるように切削加工した。

3.3 载荷方法

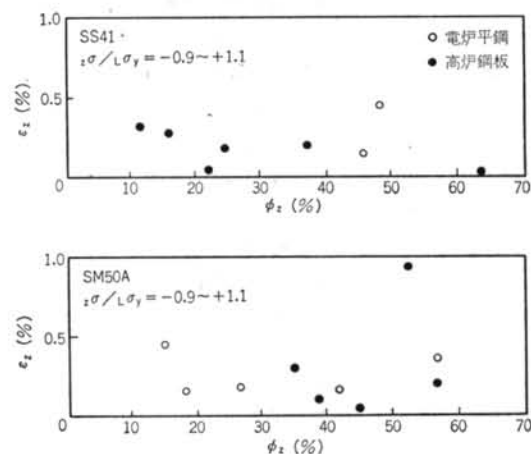
試験体の载荷は、写真一 2 に示すような ±60 ton 疲労試験機を用いて行なった。この場合の応力レベルは、各供試材のL方向引張試験時の降伏点 ($L\sigma_y$) を基準にして、引張側は $1.1 L\sigma_y$ または $1.3 L\sigma_y$ 、圧縮側は $0.9 L\sigma_y$ として、100 回の正負繰返し载荷を行ない、Z 方向のひずみ ($\epsilon_z = \Delta G, L/G, L$) および破断の有無を調べた。また、疲労試験で破断に至らなかった試験体については、さらに静的引張試験を行なってZ方向強度の変化を調べた。

3.4 実験結果および考察

図一 11 に、引張側応力レベルが $1.1 L\sigma_y$ で、100 回の繰返し载荷後のZ方向のひずみを示す。高炉鋼板の1チャージ ($\phi_z = 53\%$) を除けば、 ϕ_z にかかわらずZ方向のひずみは 0.5% 以下であり、電炉平鋼と高炉鋼板の差異は見られない。しかし、図一 12 に示すように引張側応

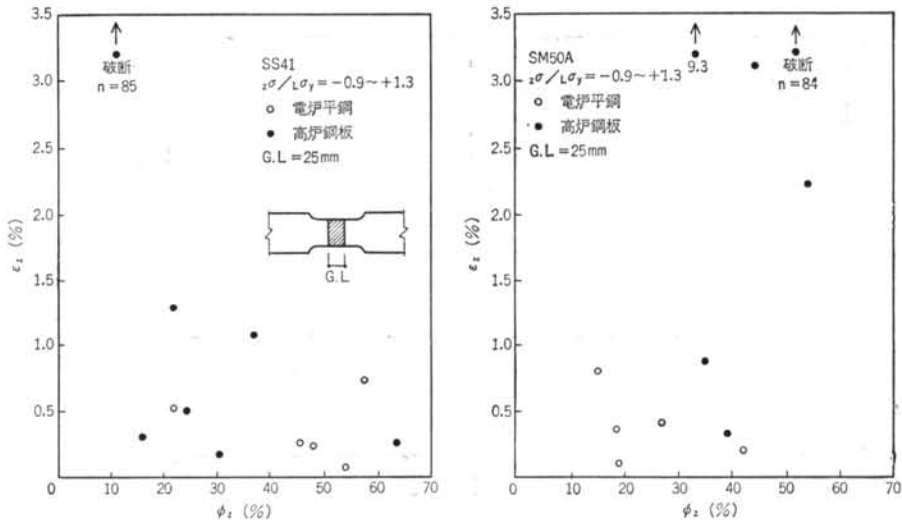


写真一 2 疲労試験機 (±60 ton)

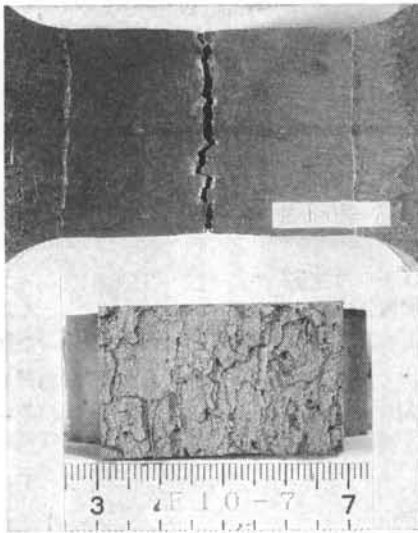


図一 11 引張側応力レベル $1.1 L\sigma_y$ で 100 回繰返し载荷後の Z 方向のひずみ (ϵ_z) と ϕ_z との関係

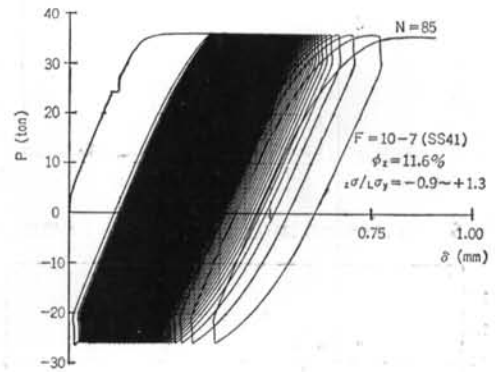
力レベルが $1.3 L\sigma_y$ の場合、電炉平鋼は両鋼種とも ϕ_z にかかわらずZ方向のひずみが少ないのに対して、高炉鋼板のそれは電炉平鋼に比較して大きく、また85回前後の繰返しで破断に至ったものが2体見られる。この試験体の $P-\delta$ 関係および破面の一列を、図一 13 および写



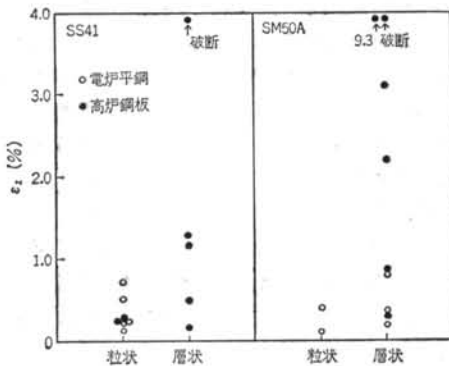
図一12 引張側応力レベル $1.3 L\sigma_y$ で100回繰り返し载荷後のZ方向のひずみ (ϵ_z) と ϕ_z との関係



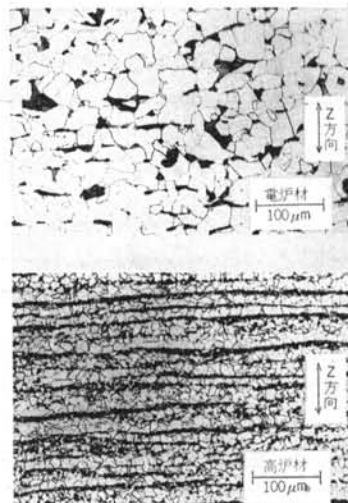
写真一3 Z方向繰り返し試験体の破面



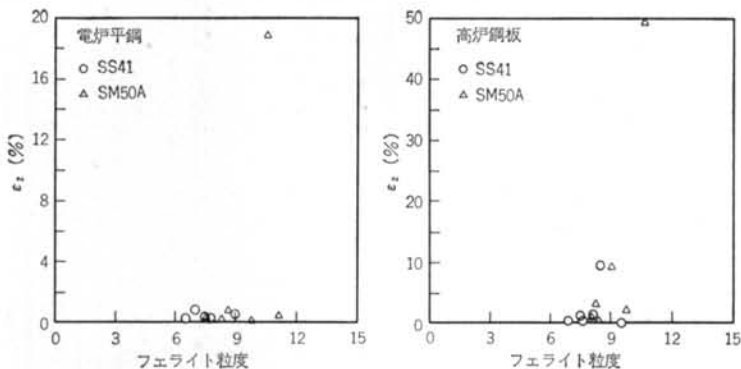
図一13 繰り返し载荷における P-δ 関係



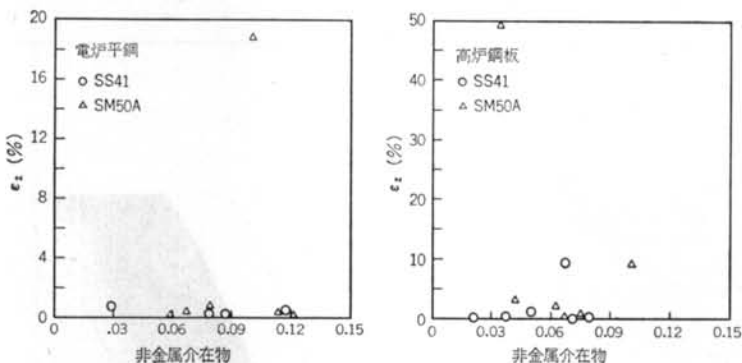
図一14 光学顕微鏡組織の層別結果とZ方向のひずみとの関係



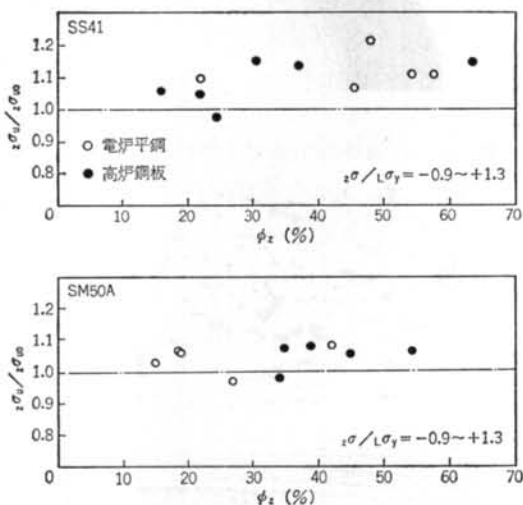
写真一4 光学顕微鏡組織の一例 (×100)



図一15 フェライト結晶粒度とZ方向のひずみとの関係



図一16 非金属介在物の含有量とZ方向のひずみとの関係



図一17 100回繰返し載荷後の残存強度 ($z\sigma_u/z\sigma_{u0}$) と ϕ_z との関係

真一3に示す。Z方向のひずみ (ϵ_z) は鋼材の塑性変形能力を表わすとともに、逆にラメラティアの発生状態を示していると解釈される。本実験の範囲では ϵ_z が1%を超えているものは後者の意味が強く、 ϵ_z が大きくなる

ことは必ずしも良好な結果とはいえない。

光学顕微鏡組織の層別結果とZ方向のひずみとの関係を示したものが、図一14である。本実験の供試材は写真一4に示すように、電炉平鋼はおしなべて粒状組織を呈し、高炉鋼板は層状組織を呈するものが多いが、層状組織を呈する供試材は粒状組織の供試材に比べてZ方向のひずみが大きく、しかも高応力繰返しで破断に至るものが多くなる傾向にある。85回前後の繰返しで破断した供試材は、いずれも層状組織を呈している。したがって、相対的にZ方向のひずみが大きくなる要因の一つはこのような層状組織であることが考えられる。なお、この組織の差異は圧下比など、電炉平鋼と高炉鋼板の製法の相違によるものと考えられる。因みに、粒状組織を呈する電炉平鋼の1体について、最終破断に至るまでの繰返し回数を調べたところ1025回であった。

図一15, 16はフェライト粒度または清浄度、すなわち非金属介在物の含有量とZ方向のひずみとの関係を示したものである。電炉平鋼、高炉鋼板ともに両者の相関は見られず、フェライト粒度と清浄度はZ方向のひずみに対してさほど影響していないといえる。

図一17は、100回の高応力繰返しで破断に至らなか

った試験体について、単調载荷によるZ方向引張り強さに対する繰り返し载荷後のZ方向引張り強さの比（残存強度）と ϕ_z の関係を示す。 ϕ_z にかかわらず、総じて強度の低下は見られず、残存強度に対しては電炉平鋼と高炉鋼板の差異はないといえる。

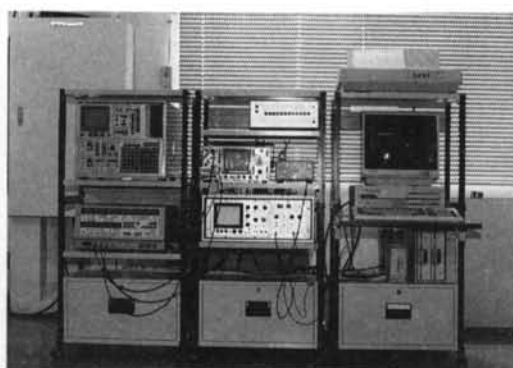
§ 4. 超音波による ϕ_z および ϵ_z の推定方法

4.1 供試材

本試験に用いた供試材は、低サイクル疲労実験に用いた24体を含む、総計53体である。

4.2 超音波試験方法

本試験では、写真一五および表一四に示すような超音波試験装置を用いた。本装置は、送信パルス形状と送信周波数を可変できる機能を有している。また、探触子は5, 10, 15 MHzの一振動子型垂直探触子を用いた。超音波試験は素材段階で行ない、各探触子ごとに送信周波数を変化させ、最も超音波伝播特性の良い状態における底面エコーを検出し、この場合の受信周波数やパルス高さ等の変化について解析した。



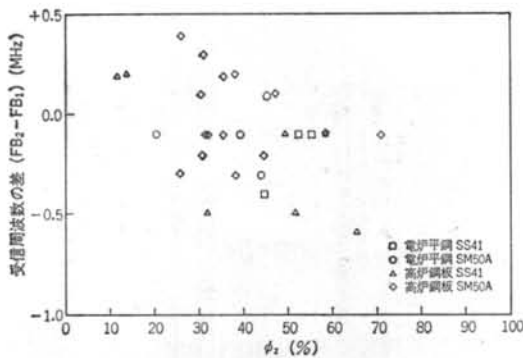
写真一五 超音波試験装置

4.3 推定結果

図一八は、15 MHzの探触子を用いた場合の受信周波数の変化と ϕ_z の関係を示したものである。第2回目の底面エコーの受信周波数と第1回目の底面エコーの受信周波数の差が大きくなるほど ϕ_z は大きな値となる、負の相関が見られる。すなわち、 ϕ_z が大きいほど第2回目の底面エコーの周波数は低い方に変化していることを示し、結晶粒の大きさが ϕ_z に影響を及ぼしているものと推定される。なお、上記の相関は探触子の周波数が高くなるほど顕著となる傾向にある。

名 称	型 式	主 要 性 能
超音波試験装置	スウィプトリケンシー (KARL DEUTSCH 社製)	①励振周波数範囲: 80 KHz~10 MHz ②パルス幅: 0.4 μ s~140 μ s ③変調モード(エンベロープ): sin, triangle ④変調乗数: 1, 2, 4乗 ⑤ゲイン調整器: 80 dB ⑥寸法: W 164×H 177×D 325
パルスレシーバー	MODEL 5052 PR (PANAMETRICS 社製)	①帯域幅: 1 KHz~35 MHz ②ゲイン調整器: 68 dB ③寸法: W 175×H 89×D 250
シンクロスコープ	SS-5121 (岩通社製)	①周波数帯域幅: DC~100 MHz ②感度: 5 mV/div~10 V/div
デジタルメモリー	DM-2350 (岩通社製)	①周波数帯域: DC~12.5 MHz ②記憶長: 4096 word/cH ③サンプル感度: 20 n.s~1 s ④寸法: W 420×H 199×D 527
シグナルアナライザー	SM2100A (岩通社製)	①周波数帯域: DC~12.5 MHz ②記憶容量: 64 Kword ③フロッピーディスク記憶容量: 256Kバイト ④寸法: W 420×H 350×D 504
探触子	5 Z10N, 10 Z10N, 15 Z10N (ジャパンプローブ社製)	
接触媒質	グリセリン	

表一四 超音波試験装置一覧

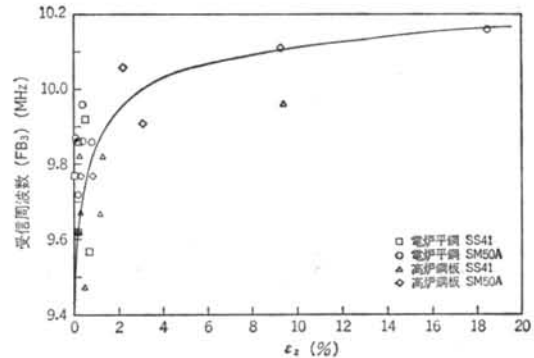


図一18 受信周波数の差と ϕ_z との関係 (15 MHz)

図一19に、超音波試験結果とZ方向のひずみとの関係を示す。両者にはほぼ双曲線で近似される相関がみられるが、超音波でZ方向のひずみを精度良く推定できるまでには至っていない、今後さらに検討する必要がある。

§ 5. おわりに

本報では、電炉平鋼の ϕ_z に及ぼす冶金的因子等の影響について分析するとともに、高応力の低サイクル疲労を受けた場合の諸性能について調査した。前者では、電炉平鋼の ϕ_z に対してP, Sの含有量, 圧下比, 仕上げ温度, 層状組織の有無が大きく影響していることを明ら



図一19 受信周波数とZ方向のひずみとの関係 (15 MHz)

かにした。後者では、市中の電炉材を無作為に収集して降伏点を越える高応力でZ方向に正負繰り返し载荷を行なった結果、電炉平鋼は100回の繰り返しに対してZ方向の開裂は生じず、繰り返し後の静的強度の劣化も見られないことを明らかにした。また、構造用鋼材の重要な指標と考えられる ϕ_z の非破壊的評価手法として、高周波超音波の受信周波数の変化を利用することが可能であることを示した。

電炉平鋼の製造技術は日々格段に向上しつつある。上記の実験結果は、これらを実証していると考えられる。ただし、建築鉄骨の主要構造材として高炉鋼板と同等に使用するためには、さらに数多くの実験データの蓄積が必要であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 藤本：“構造用鋼材における転炉材と電炉材” 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和59年10月）
- 2) 藤本, 橋本, 中込, 山本：“電炉鋼板の力学的性能に関する実験的研究（その1）,（その2）” 同上（昭和59年10月）