

高強度薄鋼板の疲労強度

長江 守康*・加藤 昭彦*・香川 裕之*²栗原 正好*・岩崎 紀夫*・稲垣 裕輔*²

Fatigue Properties of High Strength Steel Sheets

Moriyasu NAGAE, Akihiko KATO, Hiroyuki KAGAWA

Masayoshi KURIHARA, Toshio IWASAKI, and Hirosuke INAGAKI

Synopsis:

Fatigue properties of high strength steel sheets were studied in connection with the effects of tensile strength, sheet thickness, yield ratio and tensile prestrain.

Materials examined in the present study were cold rolled and hot rolled steel sheets of conventional and low yield ratio types. Fatigue tests were carried out under the conditions of pulsative axial tension and alternative out-of-plane bending.

Principal results are as follows:

(1) Fatigue strength increased in proportion to the increase in tensile strength up to 70kgf/mm², then it gradually leveled off above 70kgf/mm² up to 140kgf/mm².

(2) The thinner steel sheets had the higher fatigue strength. This tendency was more significant under out-of-plane bending condition than under axial tension condition.

(3) Low yield ratio type steel sheets in virgin state had lower fatigue strength compared with conventional steels of the same tensile strength. However, this difference in fatigue strength almost disappeared after prestraining of sheets.

(4) Empirical formulas to estimate fatigue endurance limit were proposed on the basis of a multiple regression analysis in connection with tensile strength, sheet thickness, yield ratio and elongation of steel sheet.

1. 緒 言

自動車業界では、燃費節減のための車体重量の軽減と衝突時の乗員の安全性確保を目的に、使用鋼板の薄肉化高強度化を積極的に推し進めている。これに伴い、二相組織鋼板をはじめとする各種高強度鋼板の開発・製品化が進められているが、同時に薄肉化による負荷応力の上昇に対応して高強度薄鋼板の疲労強度特性の把握が重要な課題としてクローズアップされてきた。

薄鋼板の疲労強度に影響をおよぼす因子としては、

(1)引張強さ、(2)降伏比、(3)板厚、(4)組織と化学成分などが考えられ、またその使用に際しては、(5)加工予ひずみ、(6)焼付塗装の効果、(7)切り欠き感受性、(8)荷重負荷形式 など多くの要因が考えられる。薄鋼板の疲労強度はこれら諸因子の組み合わせにより特性づけられるものであるが、系統的に上記因子の影響を把握するための研究は十分行われておらず、個々の因子

の影響についてもいまだ不明な点が多く残されている。

そこで本論文では、系統的な疲労強度特性把握の第一歩として、(i)引張強さ、(ii)降伏比、(iii)板厚、(iv)加工予ひずみの各因子が、冷延および熱延薄鋼板の疲労強度におよぼす影響について調べた結果を報告する。

2. 実験方法

供試材の化学成分と機械的性質を、冷延鋼板と熱延鋼板のそれぞれについて、Table 1, 2 に示す。

冷延鋼板としては、引張強さが 30~140 kgf/mm² 級、板厚が 0.6~1.6 mm の範囲にある 15 鋼種を用い、熱延鋼板としては、引張強さが 35~60 kgf/mm² 級、板厚が 1.6~4.5 mm の範囲にある 11 鋼種を用いた。なお、熱延鋼板は板厚が 4.5 mm のものを除いて他はすべて酸洗材である。

試験片は、その長手方向が圧延方向と直交するように切り出し、疲労試験は、荷重制御片振り引張方式と変位

昭和 56 年 10 月 15 日受付 (Received Oct. 15, 1981)

* 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)技術研究所 工博 (Technical Research Center, Nippon Kokan K.K.)

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of cold rolled steel sheets.

Steel No.	Sheet thickness mm	Chemical composition (%)						Mechanical properties			
		C	Si	Mn	P	S	Others	Y S (kgf/mm ²)	T S (kgf/mm ²)	El (%)	YR (%)
1	0.8	0.034	tr	0.24	0.013	0.015		18.3	30.3	45.6	60.4
2	0.6	0.045	tr	0.21	0.011	0.018		26.3	39.9	39.8	65.9
3	0.8	0.050	0.02	0.23	0.011	0.017		26.1	39.2	39.8	67.1 *
4	1.6	0.046	tr	0.20	0.011	0.018		26.3	38.3	39.2	68.7
5	0.8	0.005	0.66	0.63	0.023	0.008	Ti 0.143	26.5	44.1	40.1	60.1
6	0.75	0.008	0.21	1.57	0.019	0.014	Ti 0.253	22.8	42.2	39.5	54.0 *
7	0.8	0.058	0.06	0.25	0.062	0.006		23.9	38.4	40.2	62.2 *
8	0.8	0.090	0.15	0.72	0.070	0.012		44.6	70.5	24.9	63.3
9	1.4	0.090	1.46	1.78	0.012	0.004	Nb 0.038	42.8	60.5	29.0	70.7 *
10	1.4	0.086	0.15	0.50	0.065	0.010		39.4	61.6	27.3	64.0
11	0.8	0.100	0.54	1.63	0.010	0.003		32.1	62.9	34.4	51.0 *
12	1.4	0.090	0.53	1.64	0.012	0.004		33.5	65.6	30.5	51.1
13	1.6	0.080	0.52	1.60	0.010	0.003		31.2	61.1	25.6	51.1
14	1.2	0.118	0.05	0.67	0.015	0.004		89.7	103.4	6.0	86.8
15	1.0	0.180	0.06	0.76	0.017	0.005		85.6	144.0	7.1	59.4

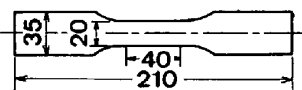
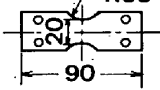
* Prestrained effect examined

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of hot rolled steel sheets.

Steel No.	Sheet thickness	Chemical composition (%)						Mechanical properties			
		C	Si	Mn	P	S	Others	Y S (kgf/mm ²)	T S (kgf/mm ²)	El (%)	YR (%)
16	2.6	0.048	tr	0.17	0.012	0.008		22.3	34.7	46.1	64.3
17	2.6	0.088	tr	0.34	0.014	0.006		29.3	41.0	35.5	71.5 *
18	2.6	0.086	tr	0.35	0.012	0.004		28.3	39.9	39.9	71.0
19	2.6	0.120	tr	0.58	0.015	0.004		33.3	45.9	31.1	72.5
20	2.6	0.100	tr	0.39	0.020	0.012	Ti 0.045	40.5	51.0	30.5	79.4
21	1.6	0.110	0.54	1.57	0.021	0.007	Nb 0.033	54.5	64.4	22.2	84.6
22	2.6	0.100	0.52	1.49	0.018	0.008	Nb 0.029	54.1	65.7	21.9	82.3 *
23	2.6	0.091	0.27	1.23	0.014	0.001	Nb 0.037	54.5	62.5	24.7	87.2
24	4.5	0.160	0.40	1.44	0.020	0.007	Nb 0.028	51.2	62.9	24.3	81.4
25	2.6	0.080	0.44	2.65	0.012	0.006		45.3	66.3	28.0	68.3 *
26	2.6	0.071	0.52	1.50	0.012	0.001	Cr 0.180 V 0.072	43.1	60.6	32.3	71.1

* Prestrained effect examined

Table 3. Test conditions.

	Axial tension	Out-of-plane bending
Specimen geometry (unit in mm)		
Testing machine	Electro-magnetic resonance type fatigue testing machine	Out-of-plane bending fatigue testing machine
Frequency (Hz)	80 - 150	25
Stress ratio	0	-1

制御両振り平面曲げ方式の2 負荷方式により実施した。

試験片形状, 試験機, 繰り返し速度, 応力比条件を

Table 3 に示す。

試験結果の整理に際しては, 引張疲労試験では, 引張荷重を試験片断面積で除した公称応力範囲を用い, 平面曲げ疲労試験では, モーメントを断面係数で除した公称曲げ応力振幅を用いて結果を示した。また疲労限は, 10⁷ 回の負荷繰り返しに対応する疲労強度とした。

3. 実験結果および考察

3-1 引張強さが疲労強度におよぼす影響

本試験で得られた, 引張強さの異なる冷延鋼板の引張および平面曲げの疲労試験結果の一例を, Fig. 1 に示す。引張強さが 100 kgf/mm² 級, 板厚 1.2 mm の曲げ試験結果を除き, 引張強さが高くなるにしたがい疲労強度は上昇する傾向にあることが認められる。Fig. 2 は熱延鋼板の結果であるが, 冷延鋼板と同じく引張強さの増加とともに疲労強度の上昇が認められる。

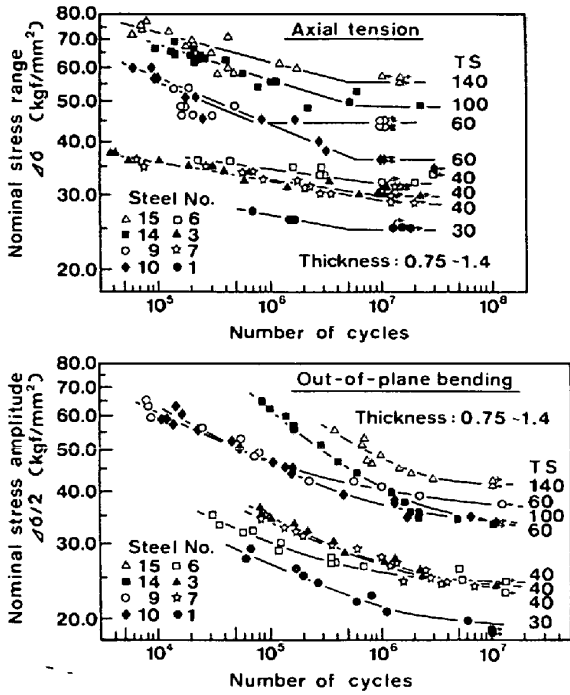


Fig. 1. Effect of tensile strength on fatigue strength of cold rolled steel sheets.

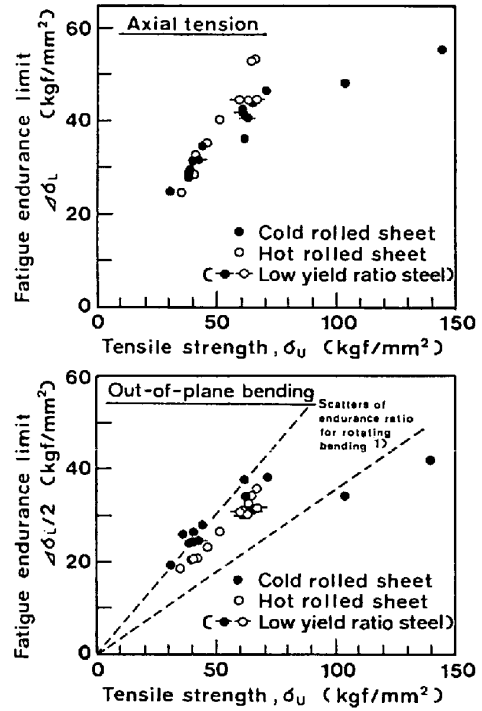


Fig. 3. Relationship between fatigue endurance limit and tensile strength.

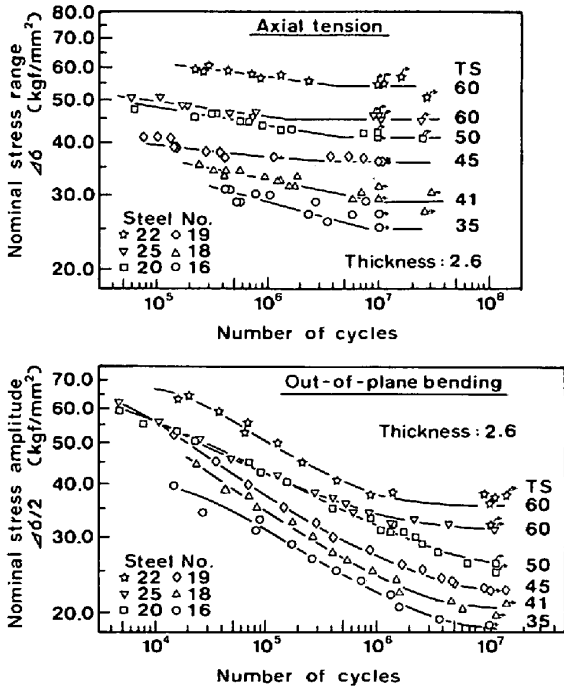


Fig. 2. Effect of tensile strength on fatigue strength of hot rolled steel sheets.

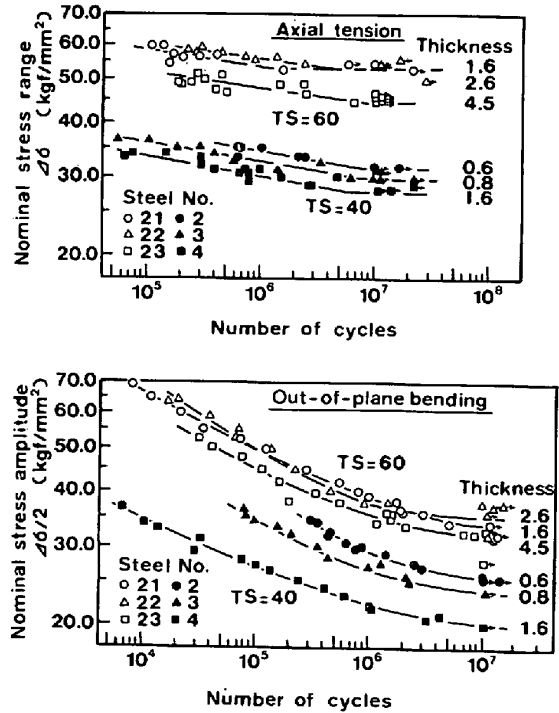


Fig. 4. Effect of sheet thickness on fatigue strength.

Fig. 3 は、今回得られた全データについて、引張強さと疲労限の関係を調べたものである。図より、引張強さが 70 kgf/mm² までは、疲労限は引張強さにほぼ比例して上昇するが、引張強さが 100, 140 kgf/mm² 級の材料では直線関係から外れる傾向を示している。Fig. 3 の平面曲げ疲労試験結果において、点線ではさまれる領域

は、厚鋼板の回転曲げ試験について報告されている疲労限と引張強さの相関関係を示すものであり¹⁾、今回の平面曲げ試験結果も引張強さが 70 kgf/mm² まではこの範囲と良く一致している。一方、引張強さが高くなるにしたがい耐久化(疲労限/引張強さ)が低下する原因として

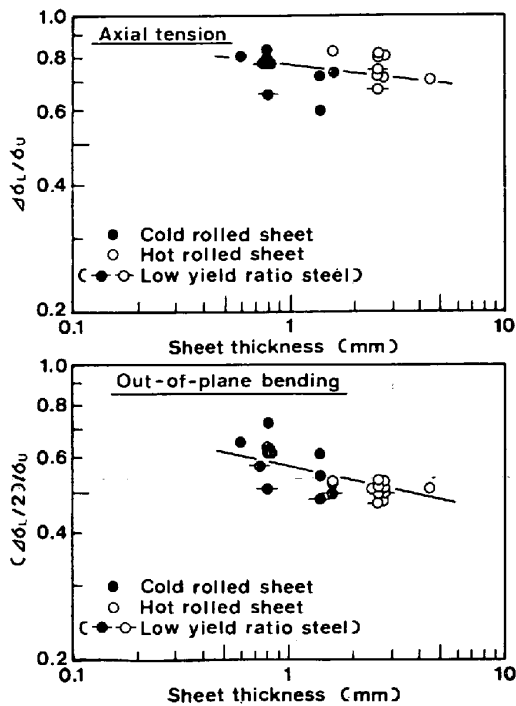


Fig. 5. Relationship between fatigue endurance ratio and sheet thickness.

は、介在物あるいは組織の不均一性による応力集中効果、内部応力の存在などが指摘されている¹⁾。

3.2 板厚が疲労強度におよぼす影響

高強度薄鋼板は、従来の軟質薄鋼板より高強度である利点を生かすため、板厚を減少して使用される場合が多く、疲労強度におよぼす板厚の影響は重要な検討課題とされる。

Fig. 4 に、ほぼ同一の機械的性質と化学成分を有し板厚だけの異なる、冷延鋼板(引張強さ: 40 kgf/mm² 級)と熱延鋼板(引張強さ: 60 kgf/mm² 級)の S-N 線図の一例を示す。熱延鋼板の板厚 1.6 mm と 2.6 mm の結果はほぼ同等の疲労強度を示すものの、一般に板厚の減少に伴い疲労強度は上昇する傾向にあることが認められる。

Fig. 5 は、引張りと平面曲げの疲労試験結果を、板厚と耐久比の関係で示したものである。引張り・平面曲げともに、板厚の減少に伴い耐久比は上昇する傾向にあり、引張りよりも平面曲げ疲労試験結果の方が板厚減少効果がより顕著にあらわれている。この原因の一つとして、平面曲げ疲労試験では試験片表面で同一の公称曲げ応力であつても、板厚により板厚の方向の応力勾配が異なることなどが考えられる。

一般に、平滑試験片の回転曲げ試験結果では、試験片直径の減少に伴い疲労限の上昇する傾向が示されており、一方、両振り引張圧縮の場合には、寸法効果はある

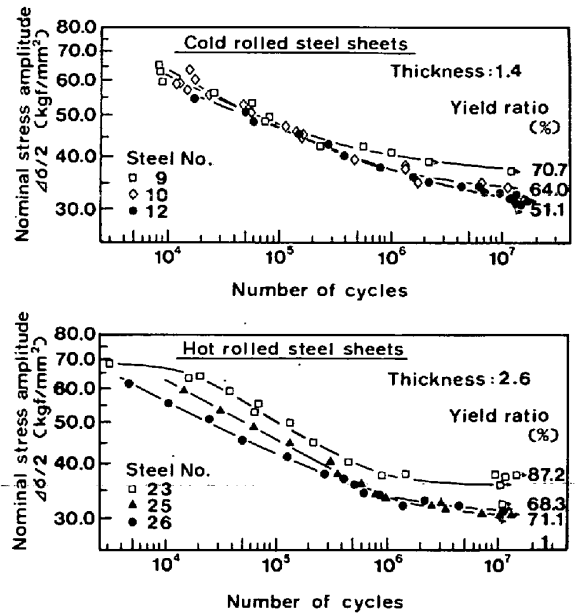


Fig. 6. Effect of yield ratio on fatigue strength under the out-of-plane bending condition.

としてもきわめて小さいことが報告されている²⁾。これらの結果は今回薄板について得られた傾向と一致するものであり、板厚が疲労強度におよぼす影響を検討するに際しては、荷重負荷形式も考慮に入れた検討が必要とされることが明らかとなった。

3.3 降伏比が疲労強度におよぼす影響

低降伏比材の疲労限は、同等の引張強さを有する通常材に比べて低くなる傾向が Fig. 5 において認められる。

ほぼ同一の引張強さ・板厚を有する薄鋼板の疲労強度におよぼす降伏比の影響を調べることを目的に実施した試験結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は、引張強さが 60 kgf/mm² 級の冷延および熱延鋼板の平面曲げ疲労試験結果である。冷延・熱延鋼板ともに、降伏比が低いほど疲労強度も低くなることが認められる。この疲労強度低下の傾向は、引張疲労試験においても認められた。

今回用いた低降伏比材は、大部分が二相組織鋼板であることを考えると、降伏比の影響は組織的特性に依存している可能性が大きい。そこで析出強化型(Steel 9)と二相組織型(Steel 11)の 60 kgf/mm² 級冷延鋼板について、繰り返し応力を負荷する前後の組織変化を透過型電子顕微鏡により観察した。

繰り返し応力を負荷する前の状態では、析出強化型では 1 μ 以下の大きさの析出物と調質圧延に由来する転位が認められ、二相組織型ではマルテンサイトとフェライトの界面に多量の転位が認められた。一方疲労限直下の応力を 10⁷ 回以上負荷した場合は、Photo. 1 に示すよう

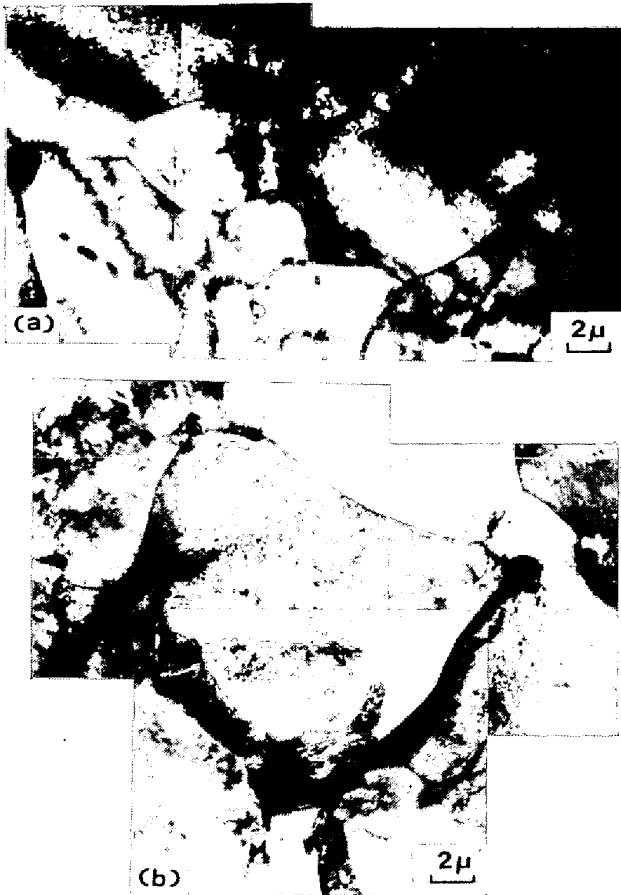


Photo. 1. Transmission electron micrographs after fatigue test (a) precipitation hardening type, and (b) dual phase type steel sheets.

に、析出強化型では明瞭なサブグレイン組織の発達が認められる。これに対し、二相組織型ではマルテンサイトの近傍から不規則的な分布をした高密度の転位が発達し明瞭なサブグレインは形成されがたい傾向にある。

疲労挙動の解明を目的に、銅、アルミ、軟鋼などではすべり帯形成・疲労き裂発生・伝播の各疲労過程における転位構造の変化が調べられている³⁾。しかし、二相組織鋼板の疲労特性については、第2相の強度・体積率・分布形態や結晶粒径などの影響についてこれまで調べられているものの⁴⁾、転位構造の変化との関係は明らかとされていない。今後さらに二相組織鋼板の疲労挙動を解明していくためには、Photo. 1 に示したような転位構造の変化に着目した検討が有効な手法とされよう。

これまでに、引張強さ・板厚・降伏比が薄鋼板の疲労強度におよぼす影響について調べてきたが、それらの影響を定量的に評価するために重回帰分析を行い、疲労限に対して次の回帰式を得た。

・片振り引張疲労試験

$$\Delta\sigma_L = 0.02156 \cdot (TS)^{1.0369} \cdot (t)^{-0.0282} \cdot (YR)^{0.5101} \times (El)^{0.3603} \dots \dots \dots (1)$$

・両振り平面曲げ疲労試験

$$\Delta\sigma_L/2 = 0.0078 \cdot (TS)^{1.2531} \cdot (t)^{-0.1441} \cdot (YR)^{0.6301} \times (El)^{0.4626} \dots \dots \dots (2)$$

$\Delta\sigma_L, \Delta\sigma/2$: 疲労限 (kgf/mm²) TS: 引張強さ (kgf/mm²) t: 板厚 (mm) YR: 降伏比 (%) El: 全伸び (%)

TS, t, YR の各項の指数は、本研究で調べた各因子の疲労強度におよぼす影響の傾向と一致している。特に疲労限と引張強さの単相関係数は、引張りで 0.895 平面曲げで 0.875 と各因子中で最も大きく、疲労強度が引張強さに大きく影響されることが認められた。この引張強さの影響は、薄鋼板について従来報告されている結果とその傾向が一致している。なお伸びについては単独に変化させた試験を行っていないが、疲労強度に影響を及ぼし得る重要な材料特性値であることから、パラメータとして回帰式に入れた。

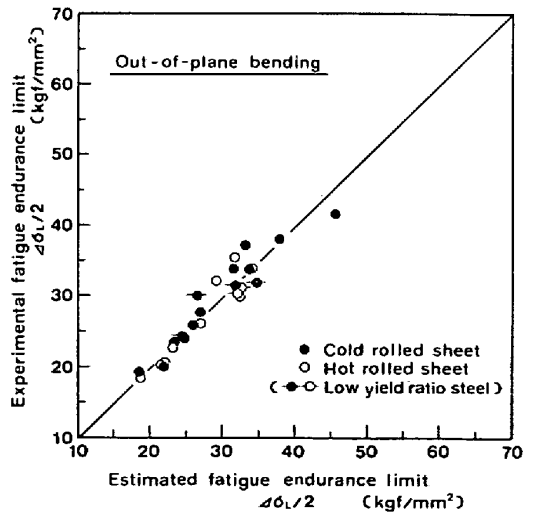
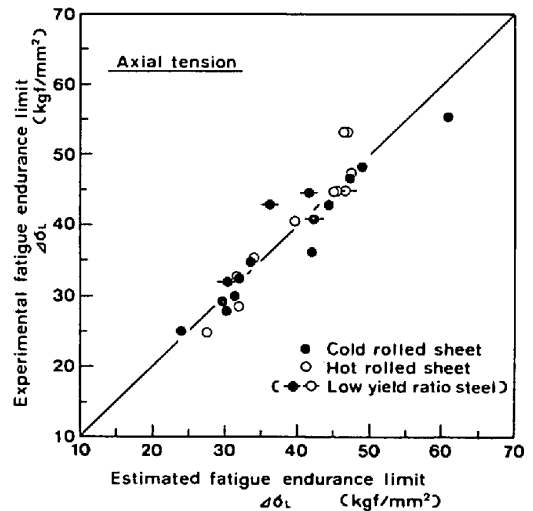


Fig. 7. Comparison between experimental and estimated fatigue endurance limit.

Fig. 7 に、式(1)、(2)より求めた疲労限の推定値と実験値との比較を示す。推定値と実験値とは良い相関を示し、今回の実験の範囲： $0.6 \leq t(\text{mm}) \leq 4.5$ 、 $30 \leq TS(\text{kgf/mm}^2) \leq 144$ 、 $51 \leq YR(\%) \leq 87$ 、 $6 \leq El(\%) \leq 46$ 、の機械的性質を有する薄鋼板の疲労限は、式(1)、(2)より推定可能なことが認められる。なお、Fig. 7 に示した推定値と実験値との相関係数は、引張りで 0.9375、平面曲げで 0.9471 であった。

3.4 引張予ひずみが疲労強度におよぼす影響

自動車用薄鋼板は、自動車製造工程においてプレス加工をはじめとする加工予ひずみを受ける。本節では、加

工予ひずみとして、2、4、8%の引張予ひずみを与え、それらが疲労強度におよぼす影響について検討した。

Fig. 8 に、試験結果の一例として板厚が 2.6 mm、引張強さが 40、50、60 kgf/mm²の熱延鋼板と、60 kgf/mm²の低降伏比熱延鋼板について実施した平面曲げ疲労試験結果を示す。

Fig. 9、10 は、冷延・熱延鋼板それぞれについて、降伏強さ、引張強さ、引張疲労試験の疲労限、平面曲げ疲労試験の疲労限の予ひずみ量による変化を示したものである。図より予ひずみ量の影響として次の傾向が認められる。

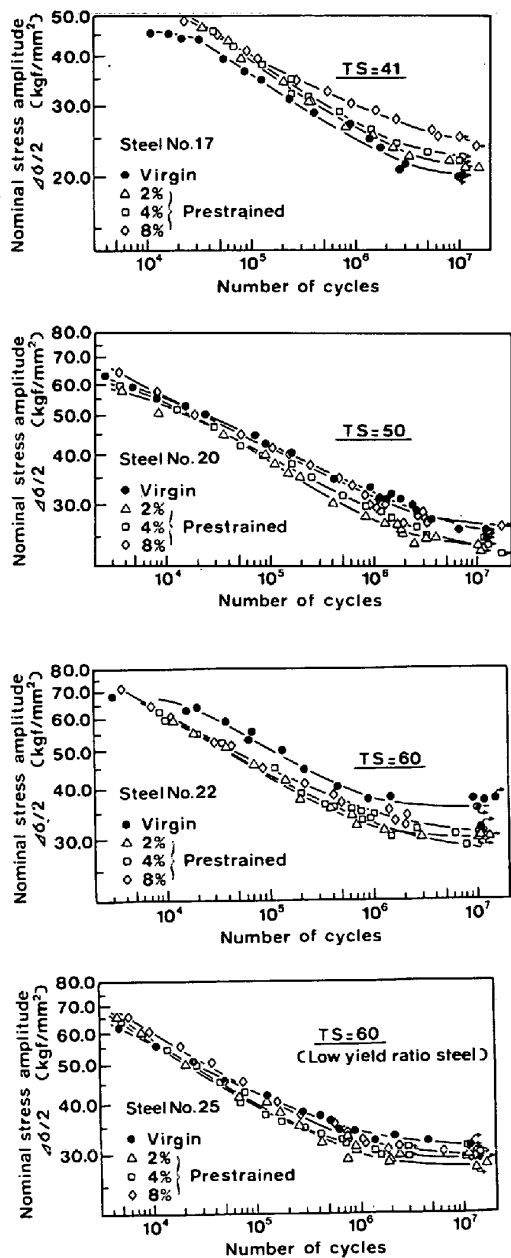


Fig. 8. Effect of prestrain on fatigue strength of hot rolled steel sheets under the out-of-plane bending condition.

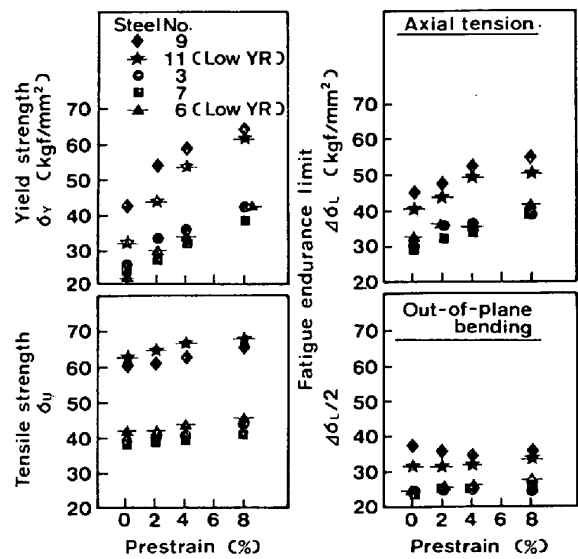


Fig. 9. Effect of prestrain on mechanical properties and fatigue endurance limit of cold rolled steel sheets.

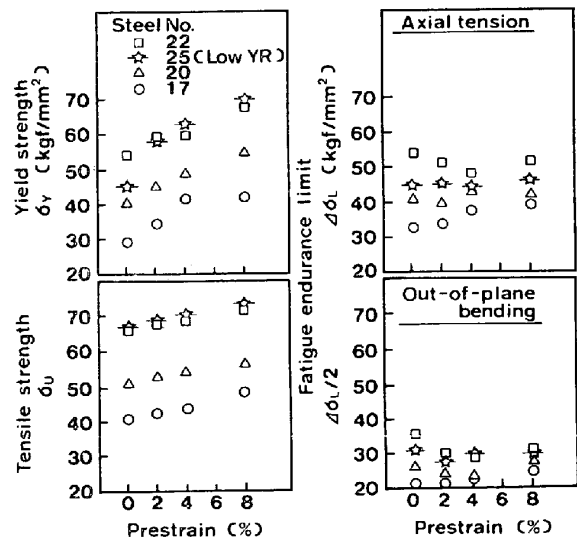


Fig. 10. Effect of prestrain on mechanical properties and fatigue endurance limit of hot rolled steel sheets.

(1) 40 kgf/mm² 級の鋼板では、冷延・熱延ともに予ひずみ量の増加とともに疲労限は上昇する。

(2) 60 kgf/mm² 級の通常材では、冷延材の引張疲労試験結果を除き予ひずみにより疲労限は低下する傾向にあり、低下傾向は 2, 4% で著しい。

(3) 60 kgf/mm² 級であつても、低降伏比材では予ひずみによる疲労限の低下は少なく、通常材と比較して処女材の疲労限は低いもの予ひずみ付与後はほぼ同等の疲労限を示す。

薄鋼板の疲労強度におよぼす予ひずみの影響として、二相組織鋼板では予ひずみにより繰り返し応力-ひずみ特性には変化がなく、疲労強度もわずかに上昇するだけであるとの報告がみられる⁵⁾。また通常の厚鋼板では、2% 程度のわずかな予ひずみにより疲労限は低下するが、さらに大きな予ひずみを与えると逆に上昇し⁹⁾、この挙動は加工硬化による疲労限の上昇と、加工硬化の不均一性に基づく応力集中による疲労限の低下の相乗作用に起因するものであると報告されている⁹⁾。本実験で得られた結果は、これらの報告と傾向的に一致するものであるが、通常材と二相組織鋼板の疲労挙動の差異を究明するためには、転位構造の変化などの組織的メカニズムに着目した研究をさらに進めることが必要とされよう。

4. 結 言

高強度薄鋼板の疲労強度におよぼす、引張強さ・板厚・降伏比・予ひずみの影響を調べ、次の結論を得た。

(1) 引張強さが 70 kgf/mm² 以下の鋼板では、疲労強度は引張強さに比例するが、70 kgf/mm² を超えると直線関係からはずれて飽和する傾向にある。

(2) 板厚の減少とともに疲労強度は上昇する傾向にあり、引張りよりも平面曲げ荷重条件でこの傾向は著しい。

(3) 二相組織鋼板を中心とする低降伏比材の疲労強度は、同じ引張強さの通常材よりも処女材では低下する傾向を示す。

(4) 疲労限と機械的性質との関係式として、重回帰分析により引張強さ・板厚・降伏比・全伸びをパラメータとする実験式を得た。

(5) 疲労強度におよぼす予ひずみの影響は、母材の引張強さに依存し、通常材と二相組織鋼板で挙動は異なる。

文 献

- 1) P. G. FORREST: Fatigue of Metals (1962), p. 56 [Pergamon Press]
- 2) 日本機械学会: 疲れ強さの設計資料 I, (1961), p. 154 [日本機械学会]
- 3) たとえば、越智保雄, 佐々木茂美: 機械学会論文集, 47 (1981), p. 483
- 4) たとえば、友田 陽, 立花信好, 田名部菊次郎, 黒木剛司郎: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 962
- 5) A. M. SHERMAN and R. G. DAVIES: Met. Trans., 10A (1979), p. 929
- 6) T. E. PARKER: SAE Congress, February (1979), Paper 790463
- 7) J. M. HOLT: SAE Congress, February (1981), Paper 810434
- 8) たとえば、福井伸二, 佐藤四郎: 東京大学理工学研究所報告 (1949 より 1954 まで数編): 戸梶恵郎, 安藤善司, 中野典彦: 材料, 24 (1975), p. 933
- 9) 戸梶恵郎, 安藤喜司, 中野典彦, 竹腰久二雄: 材料, 27 (1978), p. 285