

(10) $F(n)$ と R_i の間の Fourier 變換の關係は定性的に成立つ様でもあるが判然としない。

全般的に云つて、自然風に關する規模の大きな亂流が人工的に作られた規模の小さい亂流境界層内の流れと定性的に似た性質を持つていと云うことができよう。これは最近 Weizsäcker の提唱している様な“一様性の要請”，即ち亂流の統計的な示標はその規模の絶對的な大さには關係しない、と云う様な性質が或る程度満されているのかも知れない。

以上で不完全な實驗ではあつたが、自然の風に關する研究の第一歩として試みた結果を報告した。一層完全な裝置を用いて廣い周波數範圍に亙る精密な實驗が行われる様に切望して筆を擱きたい。

尙この研究は文部省科學研究費並びに農林省林野局治山課の委託實驗費に依るものである。御指導を頂いた河田所員を始め、河村所員並びに測定に御協力下さつた兩研究室の諸賢に深く感謝致す次第である。

(1949.9.)

文 獻

- (1) F. Albrecht, Meteor. Zeitschr., 47 (1930), 465.
- (2) L. Prandtl and H. Reichardt, Deutsche Forschung, H 21, Berlin, (1934). (参照できなかつた).
- (3) W. Paeshke, Beiträge zur Phys. der freien

Atmosphäre, 24 (1938), 163.

- (4) 熱線 1, 2 の太さが等しいので平均の R 數も等しくなる。従つて 1, 2 に對し同じ $f(V)$ が適用できる。
- (5) L. V. King, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A 214 (1914), 373.
- (6) H. L. Dryden and A. M. Kuethe, N. A. C. A. Tech. Rep., No. 320 (1929); No. 342 (1930).
- (7) L. F. G. Simmons and A. Baily, Phil. Mag., 3 (1927), 81.
- (8) S. Goldstein, Modern Developments in Fluid Dynamics, I, 192, Oxford, (1938).
- (9) H. Reichardt, Naturwissenschaften, 26 (1938), 404.
- (10) 竹山壽夫, 治山事業參考資料第 I 輯, 海岸砂地造林に關する調査報告, 16 頁, 林野局, 1949 年 2 月。
- (11) A. A. Kalinske and E. R. Van Driest, Proc. V. Intern. Congr. App. Mech., 416, Cambridge, (1939).
- (12) F. L. Wattendorf, Journ. Aero. Sci., 3 (1936), 200.
- (13) S. Goldstein, Modern Developments in Fluid Dynamics, I, 194, Oxford, (1938).
- (14) G. I. Taylor, Proc. Roy. Soc., A 164 (1938), 476.
- (15) 押田勇雄, 氣象集誌, II, 22, (1944), 104.
- (16) 原論文では分母の w^2 がおちている。

加工硬化した鋼材の疲勞 (第1報)

福井伸二・佐藤四郎

On the Fatigue of Work-hardened Steel (1st Report)

By Shinji Fukui and Shiro Sato.

ABSTRACT: Usual carbon steel (0.2% C) was deformed by statical tensile or compressive stress beyond the yield-point, and then the Haigh type tensile and compressive fatigue limit, One type uniform bending fatigue limit, usual tensile properties and hardness value were measured. Tensile and compressive deformation by pre-loading affected the measured results similarly. The fatigue limit of the strained material decreased by about 6% as compared with the annealed material for the strain smaller than about 4%, and then the limit raised to about 20% for the larger strain, but the other properties changed monotonously with the strain.

(1949 年 10 月 19 日 受理)

1. 緒 言

一般に材料に常温加工を加えると、材質の變化並に残留應力の爲に疲労強度は變化する。例えば五十嵐、深井兩氏⁽¹⁾によれば同轉曲げ疲労限は、キュープロニックルでは常温加工率の増加と共に増加し、七三黄銅は加工率 15%迄は急激に増加するがその後は略一定となり、アルミニウム合金は 10% 常温加工を加えると稍減少するが、その後加工率の増加するにつれて僅か乍ら再び増加している。又西原氏外三氏⁽²⁾の炭素鋼の實驗では、振り加工により振り疲労限は加工の程度が大なる程大となるが、餘り加工を大にするとかえつて上昇率は減少する事を示されている。あらかじめ引張加工を加えた材料の曲げ疲労限の増減については、Moore & Kommers⁽³⁾, W. Wiss⁽⁴⁾, Aders⁽⁵⁾, F. Körber & M. Hempel⁽⁶⁾等の實驗があり、共に 5% 至 10% 程度の加工に對し 10% 程度から 15% 程度の疲労限の上昇を得ている。

本研究に於ては、あらかじめ單純引張加工を與えた場合のみでなく、壓縮加工をも與えて、疲労限がどのやうな變化をするかを明らかにせんとした。尙引張壓縮加工後の機械的性質についても合せ測定した。

2. 實驗材料及び實驗方法

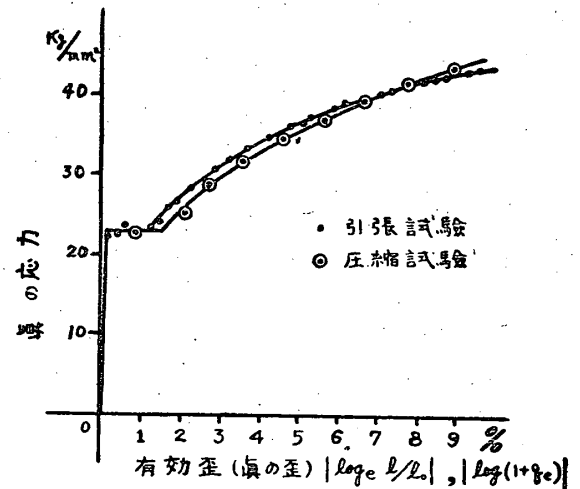
實驗に供した材料は 0.22% 炭素鋼で、15 mm 板厚の鋼板より取り、850 度で 1 時間焼鈍したものである。焼鈍材の機械的性質を第 1 表に示す。

第 1 表 焼鈍材の機械的性質

弾性係數 kg/mm ²	降伏點 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	破斷強さ kg/mm ²	* 伸び %	斷面收縮率 %	硬 度	
						ブリネル 硬度數	ビッカース 硬度數
2.05 × 10 ⁶	21.5	41.4	78.3	30.2	56.4	116	116

* 伸びは直径の 8 倍の長さに對するものである。

使用材料の引張加工に對する性質と、壓縮加工に對する性質とを比較して置く爲に、引張、壓縮加工の時の應力-歪線圖を取つたのが第 1 圖である。縦軸に眞の應力 P/A 、横軸に有效歪 $1n l_0/t = 1n(1+q_0)$ の絶對値を取つてある。こゝで l_0 : 最初の標點距離、 l : 加工後の標點距離、 q_0 : 斷面收縮率、 P : 荷重、 A : P の時の斷面積である。尙引張試験の時の歪は、試験片にダイヤルゲージを取付け、壓縮試験の時の歪は、直径の變化をマイクロメーターで測定した。圖よりわか



第 1 圖 引張、壓縮試験の眞の應力有效歪線圖

る如く、兩者の曲線は實驗誤差範圍内でよく一致して居り、引張加工も壓縮加工も、材料の機械的性質に及ぼす影響は類似のものと考えられる。

疲労試験前に與える加工の程度として、第 2 表に示す如く、引張りは材料の降伏が完全に終り、應力-歪

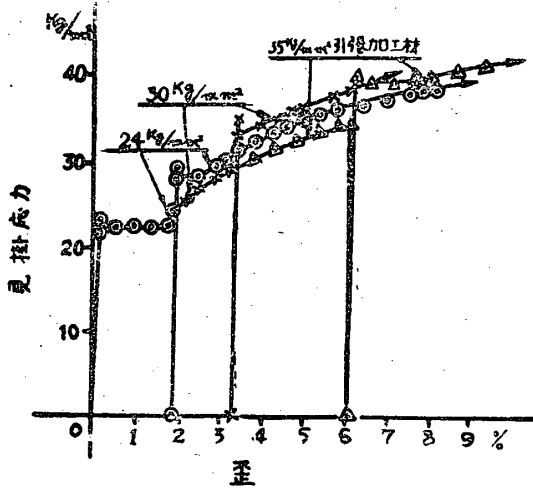
第 2 表 疲労試験前に與へた加工の程度

	引 張 加 工			
見掛應力 kg/mm ²	24.0	30.0	35.0	40.0
眞の應力 kg/mm ²	24.5	31.1	37.5	45.3
歪 %	1.81	4.07	7.18	13.3
有效歪 %	1.79	3.89	6.93	12.48
	壓 縮 加 工			
見掛應力 kg/mm ²	25.0	40.0	48.0	60.0
眞の應力 kg/mm ²	24.6	38.2	43.8	48.8
斷面積變化率 %	1.87	5.20	9.68	22.79
有 效 歪 %	1.78	5.07	9.20	20.52

線圖が上昇し始めて直ぐの 24.0 kg/mm² と、斷面收縮を起す少し前の 40.0 kg/mm² と、兩者の中間に 30.0 kg/mm², 35.0 kg/mm² の二種類と計四種を選び、壓縮の程度も四種を選び、25.0 kg/mm² は引張應力の 24.0 kg/mm² に相當するもので、降伏が終り加工硬化し始めた點の應力である。

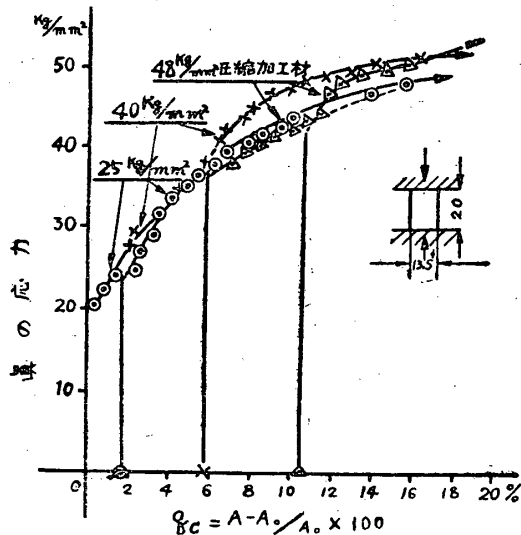
猶、豫め加工を受けた材料の時効硬化の様子をしらべる爲に、引張りでは 24.0 kg/mm², 30.0 kg/mm² 及び 35.0 kg/mm² の三種の加工 (40.0 kg/mm² の引張加工を與えた場合は材料の都合で行わなかつた) を與えた引張試験片を 7 ヶ月間放置せる後、再引張試験を行つた時の應力-歪線圖を第 2 圖に示して置く。いづれの場合も加工後又明らかに上下降伏の如き現象が

見られ、加工硬化の結果甚だしく母材よりも高くなつて居る。しかし時効硬化は、應力-歪線圖より見て母材のそれより5~10%程度増加して居るにすぎず、引張強さは降伏點程の上昇を示して居らない。再引張加工後の降伏點抗張力の値を第3表に示す。豫め壓縮加工



第2圖 引張加工後の應力-歪線圖

工を加えられた場合の時効硬化の様子は、25.0 kg/mm²、40.0 kg/mm² 及び 48.0 kg/mm² の壓縮應力を與えた壓縮試験片を、約4ヶ月間放置して後再壓縮試験を行い、眞の應力と斷面積變化率との關係線圖は第3圖の如くであつた。いずれの場合も時効硬化が見られるが、豫め與えた壓縮加工程度が少なければ少ない程時効硬化も少ない事が解かる。

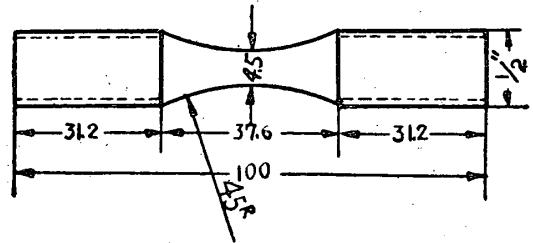


第3圖 壓縮加工後の應力-歪線圖

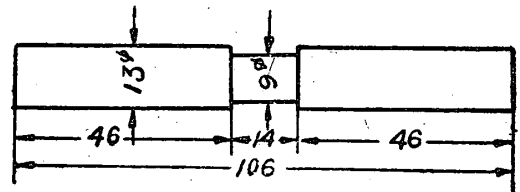
3. ヘイグ式疲勞實驗

疲勞試験片に引張塑性加工を與えるには、アムスラ一萬能試験機で第2表に示した四通りの塑性變形を夫

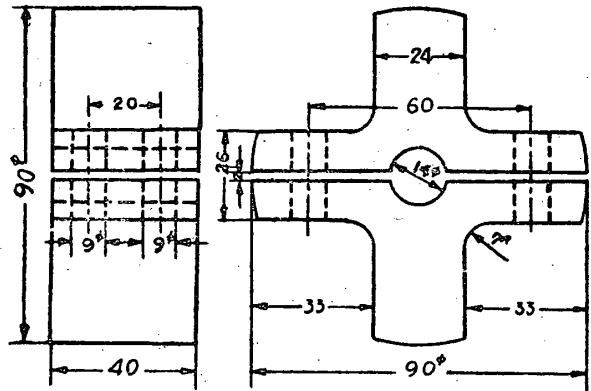
々與えた、直徑 13.5 mm 長さ 230 mm 丸棒より、第4圖に示す如きヘイグ式引張壓縮疲勞試験片を、丸棒1本につき2本づつ取つた。尚加工に際し所定の最大荷重で約1分間繼續荷重後、荷重を除去した。



第4圖 ヘイグ式疲勞試験片



第5圖 壓縮試験片



第6圖 壓縮試験片保持金具

疲勞試験片に壓縮塑性變形を與えるには、第5圖に示すやうな壓縮試験片の兩端を第6圖に示すやうな保持金具で支持し、壓縮試験機に掛け、第2表に示した四通りの塑性變形を與えた。引張加工を與えた時と同様、この場合も最大荷重で約1分間繼續荷重後荷重を除去した。このやうな壓縮加工を與えた試片から第4圖の如き疲勞試験片を製作した。

疲勞試験片表面はすべてバフ仕上とし、顯微鏡でしらべて未だ著しい痕のあるものは試験より除去した。引張、壓縮塑性加工を與えてから、疲勞試験に掛ける迄に4ヶ月から約10ヶ月間の期間を置いたので、時効の進行は充分で安定状態に達して居たと看做される。

疲勞試験機はヘイグ式引張壓縮試験機を使用し、毎分2000回の繰返兩振引張壓縮應力を與えた。疲勞限

の決定には 10^7 回を基準として求めた。

*並に引張試験、硬度試験結果を第3表に一括して

あらかじめ引張加工を與えた場合の疲勞試験結果、* 示す。

第3表 引張加工を與へた時の疲勞限及び機械的性質

引張加工 見掛應力 kg/mm ²	疲勞限 σ_w kg/mm ² %		降伏點 σ_s kg/mm ² %		引張強さ σ_B kg/mm ² %		伸率 ¹⁾ %	断面收 縮率 %	フリネル ²⁾ 硬度數 H_B %		ビッカース ³⁾ 硬度數 H_V %		σ_w/σ_B
	kg/mm ²	%	kg/mm ²	%	kg/mm ²	%			H_B	%	H_V	%	
母材	17.5	100	21.5	100	41.4	100	30.2	56.4	116	100	116	100	0.42
24.0	16.5	94	28.0	113	42.4	102	28.9	55.4	127	110	137	118	0.39
30.0	16.5	94	35.0	163	44.3	107	28.0	56.1	137	118	148	128	0.37
35.0	18.0	103	41.7	194	46.0	111	24.8	56.1	148	128	161	139	0.39
40.0 ⁴⁾	19.2	110	—	—	—	—	—	—	156	135	169	146	—

- 1) 伸率は直径の8倍につき求めた。
- 2) 直径5mmの鋼球、750kgの荷重を使用。
- 3) 荷重50kgを使用。
- 4) この場合の引張試験は行はなかつた。

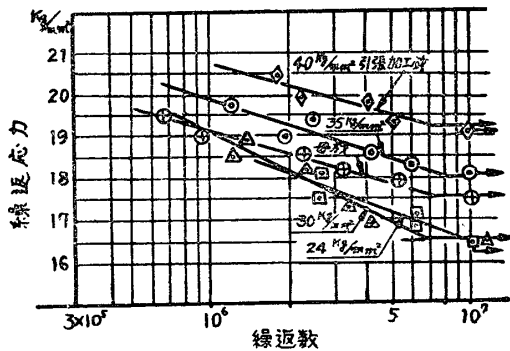
又疲勞試験結果を、縦軸に應力、横軸に繰返數 N の對數値 $\ln N$ を取れば第7圖の如くなる。

24.0 kg/mm², 30.0 kg/mm² の引張加工即ち 1.8% 4.1% の引張歪を與えると、引張強さは各々 2%, 7% 増加し、硬度はビッカース硬度數で 18%, 28% 増加して居るに拘らず、疲勞限は兩者共に 6% 減少している。更にそれより大きな 35.0 kg/mm², 40.0 kg/mm² 即ち引張歪で 7.2%, 13.3% の加工を加えると、疲勞限は 3%, 10% 増大して来る。

の結果を第4表に示す。繰返應力と繰返數との關係を示すと第8圖の如くなる。

第4表 壓縮加工を與へた時の疲勞限と硬度

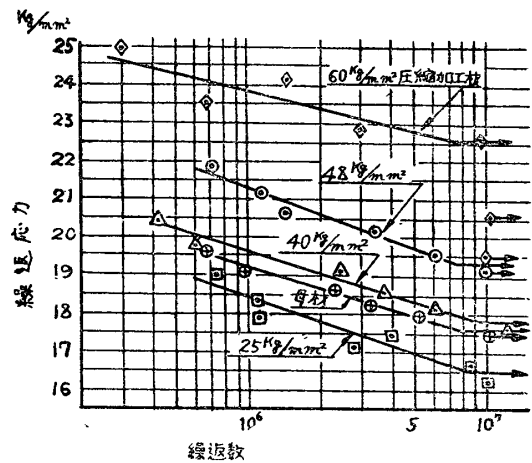
引張加工 見掛應力 kg/mm ²	疲勞限 σ_w kg/mm ² %		フリネル 硬度數 H_B %		ビッカース 硬度數 H_V %	
	kg/mm ²	%	H_B	%	H_V	%
母材	17.5	100	116	100	116	100
25.0	16.5	94	125	108	132	114
40.0	17.8	102	143	123	153	132
48.0	19.3	110	147	127	165	142
60.0	22.5	129	159	137	179	154



第7圖 疲勞限—繰返數 (引張加工材)

Moore & Kommers³⁾ が 0.18% 炭素鋼で、8%, 17~18% の断面收縮率を與える如く引張加工を加えた時に、回轉曲げ疲勞限は 10%, 19% 増加して居る事を示して居るが、著者等の結果はそれ程大きな増加は示して居ない。1.8%, 4.1% の如く僅かな引張加工を與えた時の疲勞限については、今迄の所實驗されて居らないやうである。かくの如き僅かな引張加工を與えた場合、引張強さ、降伏點、硬度等は上昇するに拘らず、疲勞限が減少する理由については今の所明らかでない。

壓縮加工を與えた場合の疲勞試験、並びに硬度測定

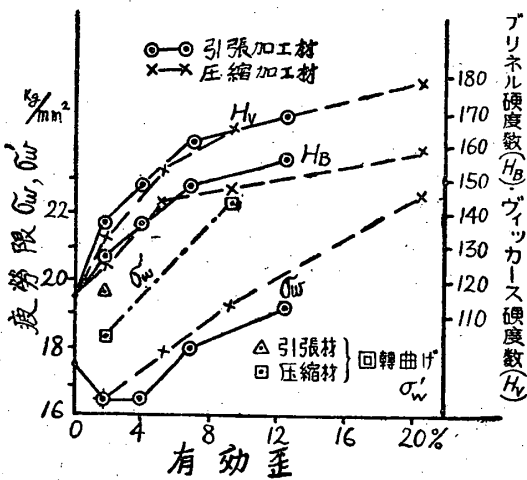


第8圖 疲勞限—繰返數 (壓縮加工材)

この場合も豫め引張加工を與えた時と同様、25.0 kg/mm² の壓縮見掛應力、即ち断面變化率で 1.9% の如く僅かな壓縮加工を加えると、硬度はビッカース硬度數で 14% も増加して居るに拘らず疲勞限は 6% 程減少して居る。それより大きな 40.0 kg/mm², 48.0 kg/mm², 60.0 kg/mm² の壓縮見掛應力、断面變化率で言えば 5.2%, 9.7%, 22.8% の如く大きな壓縮加

工を加えるに従つて、疲労限も2%、10%、29%と増大して行く。

豫め引張、壓縮加工を與えた時の疲労限と有效歪、ブリネル硬度數、ビッカース硬度數との關係を圖示すると第9圖の如くなり、有效歪、硬度の増加と共に、始め減少してから次第に上昇して行く事が見られ、引張加工の場合も、壓縮加工の場合も同様な傾向を示して居る事が解かる。従つて靜的な引張、壓縮試験や、兩者の豫め加工を加えた時の疲労試験から、引張も、壓縮も塑性加工としては、强度的には同種の影響を與えるものであると思われる。



第9圖 有效歪と疲労限、硬度關係

4. 回轉曲げ試験機による補足的實驗

以上はヘイグ式引張壓縮疲労試験機を使用して行つたものであるが、補足的に小野式回轉曲げ疲労試験機を使用して豫め引張加工を與えた場合を一つ、豫め壓縮加工を與えた場合を二つ行つて見た。

使用した材料は前の場合と同じ材料であり定めた豫定荷重は

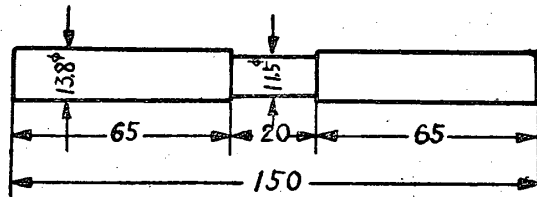
- (イ) 豫め引張加工見掛應力 24.0 kg/mm²
- (ロ) 豫め壓縮加工見掛應力 25.0 kg/mm²
- (ハ) 豫め壓縮加工見掛應力 48.0 kg/mm²

の三通りである。(イ)に對しては第11圖に示す引張試験片を、アムスラー萬能試験機に掛け、24.0 kg/mm²の豫定荷重を與えて後、小野式疲労試験片を製作した。(ロ)(ハ)に對しては第10圖に示す壓縮試験片を、前の場合と同様、第6圖に示す保持金具を使用して壓縮加工を加へ、小野式疲労試験片を製作した。小野式疲労試験片の直徑は8.5mmとし、前と同様バフ仕上とした。

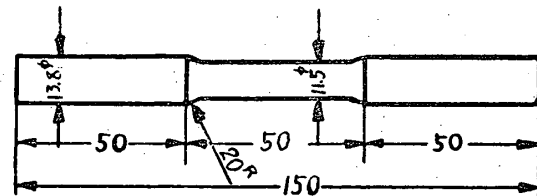
得られた結果は第5表の如くであり、繰返應力と繰返數との關係は第12圖に示す如くである。

第5表 加工程度と回轉曲げ疲労限

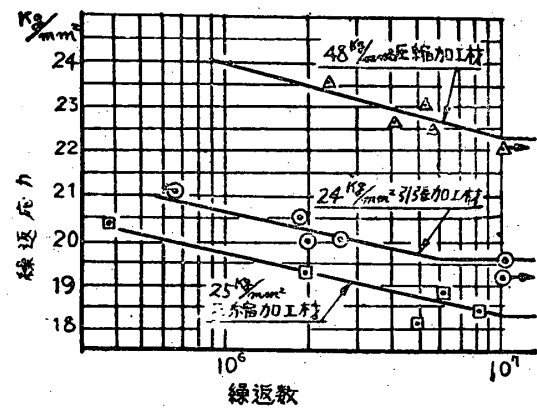
加 工 程 度	見掛應力 (kg/mm ²)	疲労限 (σ _w , kg/mm ²)
豫め引張加工	24.0	19.6
豫め壓縮加工	25.0	18.3
豫め壓縮加工	48.0	22.3



第10圖 壓縮試験片



第11圖 引張試験片



第12圖 繰返應力—繰返數 (回轉曲げ)

豫め引張加工を與えた後の回轉曲げ疲労限については、Moore & Kommers 等の人々によつて實驗されて居り、引張加工度が大なる程曲げ疲労限も大となっている。豫め壓縮加工を與えた後の回轉曲げ疲労限についても同様な事が言えると思われる。この事は前の引張壓縮疲労限の時に得られた結果と同様である。只本實驗は試験片の都合上上記三つの場合のみしか行い得ず、引張壓縮疲労の場合に見られた、僅かな加工に對して母材より疲労限が落ちる事については、回轉曲

げ試験により確める事は出来なかつた。又後日あらためて実験を行いたく思っている。

5. 結 論

あらかじめ降伏點以上の引張、又は壓縮加工を加えて加工硬化せしめた 0.22% 炭素鋼の引張壓縮疲労限を求めた結果

(1) 引張塑性加工を加えると、加工程度の上昇と共に疲労限は始めや、減少し、その後加工度と共に上昇して行く。本実験では 4%程度 of 引張加工に對し母材より約 6%減少し、それ以上の加工に對しては上昇を示している。

(2) 壓縮塑性加工を加えても、引張加工の時と同様、加工度の上昇と共に疲労限は初めや、減少し、その後加工度と共に上昇して行く。本実験では 2%程度の壓縮加工に對し母材より約 6%減少し、それ以上の加工に對しては上昇を示している。

(3) 引張加工も壓縮加工も靜的試験、疲労試験の結果から見て強度的には同じ種類の影響を及ぼすものと考えられる。

(4) 僅かな引張、壓縮加工を加えても明らかに硬

度、降伏點、引張強さは上昇して居るに拘らず疲労限が減少する。この理由は今の所明らかでない。

尙小野式回轉曲げ試験機を用いて補足的実験を行い回轉曲げ疲労限についても同様な傾向のある事を確めた。

終りに臨み材料について御便宜をたまわつた三菱重工業横濱造船所赤木、櫻井兩技師に厚く御禮申し上げる。尙本実験は文部省科學研究費の補助を受けたので重ねて謝意を表する次第である。

文 獻

- (1) 五十嵐、深井：機械學會論文集 5, 20 (1939, VIII).
- (2) 西原外三氏：機械學會論文集 14, 46(1948).
- (3) Moore and Kommers: Univ. Illinois Eng. Exp. Stat. Bull. 124 (1921).
- (4) W. Wiss: Dr.-Ing.-Diss. Darmstadt (1929).
- (5) K. Aders: Mitt. Forsch.-Inst. d. Verein, Stahlwerke A-G. Dortmund, 1 (1928/30).
- (6) F. Körber u. M. Hempel: Mitt. Kaiser-Wilh. Inst. Eisenforschung, Band XVII (1935).

外 壓 に 因 る 球 形 殻 の 挫 屈

吉 村 慶 丸・植 村 益 次

The Buckling of Spherical Shells due to External Pressure
By Yoshimaru Yoshimura and Masuji Uemura.

ABSTRACT: Amongst many trials which have been made to explain the discrepancy between the experimental buckling value of a spherical shell and theory, the concept of "Durchschlag" suggested by Biezeno, Th. von Kármán and H. Tsien is considered to be the most reasonable one. But as the assumption used in Kármán's calculation with regard to the deformation of the shell is not natural, we solved the same problem once more as exactly as possible, by dealing with the equilibrium equations with finite displacement and assuming the reasonable functional form of the deformation.

The considerable differences of the results obtained in the present paper from that of Kármán and Tsien are that the postbuckling stable equilibrium positions exist also in the region of internal pressure beyond certain values of deformation and solid angle of the buckled part, and that the minimum of the envelope of the post-buckling equilibrium curves does not exist. Using these results, we proposed an opinion as to the mechanism of buckling.

(1949年12月15日受理)