高静水圧下の引張圧縮疲労試験装置の試作と これによる二、三の実験*

大 路 清 嗣** 小 倉 敬 二**
杉 本 一 雄*** 家 治 敬 一****

Development of a Push-Pull Fatigue Testing Machine under High Pressure, and the Results of Preliminary Fatigue Tests

by

Kiyotsugu OHJI, Keiji OGURA

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

Kazuo SUGIMOTO

(Nissan Motor Co., Ltd., Tokyo)

and Keiichi YAJI

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

A push-pull fatigue testing machine under high pressure up to 6000 kg/cm² was developed. Using this machine, the preliminary fatigue tests in the low-cycle fatigue range were conducted under the load-cycling conditions with OFHC copper, 5005 Al alloy and S35C carbon steel under hydrostatic pressures up to 4000 kg/cm². The unnotched fatigue strength showed a slight but definite increase with increasing ambient pressure. No discernible difference was observed in the notched fatigue strength of OFHC copper between 0 and 3000 kg/cm² ambient pressure. The scanning electron fractograph of unnotched OFHC copper specimens revealed no apparent difference in the striated regions of fatigue-fractured specimens under 3000 kg/cm² and zero ambient pressure.

(Received Apr. 24, 1972)

1 緒 言

疲労に対する静水圧応力成分の影響に関する研究は、超高圧下で使われる機器の疲労設計という実際上の要求からのみならず、疲労に対するせん断応力成分、直応力成分および平均応力成分の役割の相違、他の機械的性質とくに破断延性と疲労の関係など、学問的にもきわめて興味ある分野である。しかしながら実験ならびに測定技術上の困難のため研究報告の数は少なく、信頼しうる資料の量は非常に限られている。

この方面の研究は1950年代後半頃、英国の University of Bristol のグループによって始められ、その後いくつかの研究報告が発表されている。最近 Crossland¹⁾による疲労に対する圧力効果の総説も出版されている。

繰返しねじりに対する圧力の影響²⁾に関しては、Crossland および Burns と Parry³⁾の論文、引張圧

縮についても White, Crossland および Morrison⁴⁾の研究があり、さらに低繰返し数疲労領域のひずみサイクル下の引張圧縮疲労に関しては Liberty^{5,6)}の報告がある。主として En25 鋼 (Ni-Cr-Mo 鋼, SNCM 8 相当) について、圧力 3750 kg/cm² までの範囲で、試験片表面の保護をするといずれの場合も疲労強度が若干増加することが示されている。

わが国でも大路、小倉、長谷川⁷⁾の低繰返し数領域ひずみサイクル下の 5005 Al に関する 3900 kg/cm² までの実験、中沢⁸⁾の 3000 kg/cm² までの 17S 高力アルミニウム合金 (平滑、切欠き) と A302B 鋼 (平滑) の片振り応力に対する実験があり、若干の寿命増が認められる傾向にある。

この他回転曲げによる Rowland, DeVries および Gibbs⁹⁾の研究があり、Fe, Al, Ni について最高 7.1 kb までの圧力について実験が行なわれている。

以上の結果からわかるように、圧力により疲労寿命の増加が認められる傾向にはあるが資料はきわめて少ない。さらに広範囲の材料と圧力・静的強度比につい

* 原稿受理 昭和47年4月24日

** 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田上

*** 日産自動車(株) 東京都杉並区桃井

**** 大阪大学工学部 吹田市山田上

て実験する必要がある。また圧力の効果は疲労に対する力学的効果のみならず、圧力媒体による腐食その他の表面効果、き裂部への油の浸入と圧縮時の閉じ込みによるくさび効果¹⁶⁾など副次的効果の大きいことが予想され、これらの面からの綿密な実験が必要である。

従来の研究の他の一つの欠点は、応力やひずみの測定精度が必ずしも常圧の疲労試験におけるほど高くはないことである。圧力を一つの力学的パラメータとして疲労の本質を追求していくためには、圧力効果があまり大きくないこともあり、精度の向上は必須条件である。

以上のような観点から、本研究では高压容器内で直接試験片についての力学量の計測が可能でかつ内圧を自己平衡させる背圧方式を採用した $6\,000\text{ kg/cm}^2$ までの高静水圧下引張圧縮疲労試験装置を試作した。また繰返し荷重に関しては、上記の計測方式と組合せ、フィードバック方式により精度の向上の見込める電気油圧サーボ方式を採用している。

この装置を用い、材料として圧力に対し静的強度の充分低い 5 005 耐食アルミニウム合金、やや低い無酸素銅、圧力よりも静的強度の高い S35C 炭素鋼を用い圧力 $4\,000\text{ kg/cm}^2$ までの実験を行ない、一部表面被覆の影響や切欠きの影響についても予備的に検討した。

2 疲労試験装置の試作

2・1 装置の構成

試作した装置の原理図が Fig. 1 に示されている。本体压力容器の内圧によって生ずる不平衡力を、平衡用压力容器を設けて釣り合せ、クロスヘッドに加えた繰返し力¹⁰⁾がそのまま試験片に負荷される繰返し力となるようにし、繰返し力の測定は压力容器内に試験片に直列に挿入された、抵抗線ひずみゲージによる荷重計によって行ない、パッキン部の摩擦の影響を除いている。現在では荷重計の信号を負帰還し、荷重制御方式の装置として構成されているが、並列に設けられている DTF 増幅器からの出力も負帰還できるように設計さ

Fig. 1. Schematic illustration of high-pressure fatigue testing machine.

れており、検出部をかえれば直ちにひずみ制御方式の試験もできる。超高压は増圧機により一定圧を発生し、繰返し力は電気油圧サーボ方式と複動アクチュエータにより発生させている。

2・2 疲労試験装置本体

Fig. 2 は本体主要部の断面図である。超高压油の供給側の漏れ止めは“金属間線接触方式”をとっている。各压力容器のクロスヘッド側は、試験片への負荷のため荷重棒が移動するので、Morrison シールも検討したが、利用できる加工精度と設計圧が実績より高压のため、最終的にはテフロンを用いた“unsupported area”原理による Bridgman 形パッキンを採用した。現在のところ、漏れおよび摩擦で大きな困難は経験していない。超高压系の常用最高圧は $6\,000\text{ kg/cm}^2$ である。

Fig. 2. Sectional view of high-pressure vessel system.

2・3 荷重計

Fig. 3 は用いた荷重計で、A 部に共和電業の箔ゲージ KFC-1-CI-11 を接着材 CC-15 で接着し、4 ゲージ法で回路を構成した。ゲージ率に対する圧力の影響についてはすでに幾つかの報告があり、数千気圧までの範囲では無視できるので本研究では大気圧下で求めた検定曲線を高压下でも用いた。

なお圧力によるひずみゲージの抵抗値の変化があり、その大部分は 4 ゲージ法で補償されるが、各ゲージのばらつきや接着技術に起因するものが残る。Fig. 4 は使用した荷重計に対する 0 荷重下の圧力による零点の移動の検定結果で、非線形性、負荷と除荷での相違など精度上の問題が多少残るが、それらは今後の改善目標とし、この検定曲線により圧力による零点の移動を

Fig. 3. Strain-gauge-type load cell.

Fig. 4. Zero shift of load cell due to pressure.

補正実験を行なった。なお疲労試験では破断により、荷重計の負荷は0となるので、零点のチェックは必ずでき、何らかの原因で平均荷重がかかっていた場合には、その資料は捨てており、これによる誤差はあまり大きな問題ではない。本研究では接着部のない半永久的寿命をもつ荷重計として 13% Al-Fe 合金を用いた磁わい形の荷重計の開発も行なった。この形式の荷重計としては静引張荷重に対し小口らにより製作され、安定に使用されている。本研究で試作の結果引張圧縮荷重に対しても作動することが明らかとなったが、精度上、非線形性、雑音などになお検討の余地があり、今回は使用しなかった。

2・4 装置全体の組立て

電気油圧サーボ方式の繰返し負荷装置はすでに確立された技術で、本研究でもたいした困難はなかった。荷重計の出力を負帰還した結果、テフロン・シール部の摩擦は数 Hz 以下の範囲で繰返し荷重 (± 3 ton) の制御に対して問題とならず、正確安定に作動した。本試作装置は現在繰返し速度 1 Hz 程度で使用されているが少なくとも (10~20) Hz 程度に上昇させることを計画中である。

サーボバルブは Moog 社製 76-103 形を用いた。また超高圧油圧源として精工工業製のニューハイポンプユニット PHU-6S2-580 形を用いた。最高圧は 4000 kg/cm²、吐出量は 2.5 c.c./ストロークである。圧力は増圧機出口に取付けられたブルドン管圧力計 (0~5000 kg/cm²) で読取った。作動油はタービン油#90 である。

3 供試材および試験片

無酸素銅 (OFHC Cu, 冷間加工材)、耐食アルミニウム合金 (5005 Al) および S35C 炭素鋼について、試作装置により疲労試験を実施した。供試材の機械的性質が Table I に示されている。

Fig. 5(a)は本研究で用いた平滑試験片、(b)は切欠き試験片の形状・寸法を示したものである。Petersonの図表によれば、応力集中係数は前者が 1.07、後者が 5.8 であった。切欠き試験片は OFHC Cu についてのみ製作した。いずれも熱処理は加えず加工のまま試験に供した。

Table I. Mechanical properties of materials tested.

	Tensile strength (kg/mm ²)	Fracture ductility	Hardness H _V
OFHC Cu	24.6	1.87	96
5005 Al	11.6	2.12	51
S35C	63.5	0.71	193

Fig. 5. Specimens for fatigue test,

圧力媒体油の疲労強度に対する影響も予想されたので、OFHC Cu および 5005 Al の平滑試験片に、東芝シリコンラバー TSE-370-RTV で被膜を施したのも一部用いた。

4 疲労試験結果および考察

4・1 静的性質の圧力による変化

Fig. 6は OFHC Cu の Fig. 5(a)に示す試験片による公称応力-伸び曲線の圧力依存性を示したものである。曲線の形は圧力によってほとんど変化しないが破断伸びが圧力とともに増加している。5005 Al および S35C 材についても同様の傾向が観察されている。

Fig. 7は破断延性 $\epsilon_F = \ln(A_0/A)$ (A_0 および A は最初および破断面の断面積) の圧力による変化を示したもので、圧力によりほぼ直線的に増加しており、従

Fig. 6. Typical examples of stress-elongation curve in tensile test under pressure (OFHC Cu).

Fig. 7. Effect of hydrostatic pressure on fracture ductility.

来の結果¹⁵⁾と同様の傾向を示している。OFHC Cu および 5005 Al について、圧力の増加とともに破面は“cup and cone”から“double cup”となり、さらに“rupture”の状態に移ることが観察されている。

4・2 平滑材の疲労試験結果

3 種類の材料に対する $S-N$ 曲線が Fig. 8, 9 および 10 に示されている。 10^4 回程度以下の寿命に対し、ばらつきはあるが、圧力により寿命の増加が認められる。中沢らの 17S Al 合金、平滑材の片振り疲労の結果によれば、最大せん断応力で整理すれば低繰返し数領域では圧力の影響は認められず、両振りの本研究の結果(縦軸の値を $\frac{1}{2}$ にすると最大せん断応力になる)

Fig. 8. $S-N$ curves for OFHC copper (unnotched).

Fig. 9. $S-N$ curves for 5005 Al alloy (unnotched).

Fig. 10. $S-N$ curves for S35C carbon steel (unnotched).

と傾向が異なっている。なお White⁴⁾らおよび Liberty⁶⁾の結果と本研究の結果は同傾向である。

圧力による疲労強度の増加は、絶対値では S35C が最も大きく、ついで OFHC Cu, 5005 Al の順になっているが、大気圧下の疲労強度との比で表わせれば、静的強度の低い 5005 Al が最も大きく、OFHC Cu, S35C の順に小さくなっている。

シリコンラバーの被膜の効果については、Fig. 8 および 9 に併記されている。寿命の増加は認められず、3000 kg/cm² または 2000 kg/cm² の下でむしろ大気圧下の疲労強度近くまで強度が低下しており、英国のグループ^{2)~4)}や Liberty⁶⁾の結果と傾向が異なっている。密閉容器内で疲労試験が行なわれているため、いつ試験片にき裂が生じたか、または試験片の破壊が被膜の破壊に先行したか否かは明らかでなく、今後更に詳細な実験が必要である。

試験片破面の巨視的観察結果によると、5005 Al では被膜処理をしない試験片では例外なく大きなしぼり(高圧下ではほとんど点まで)を伴って破断した。しかし OFHC Cu および S35C では 10^2 回付近を境としてそれ以上の繰返し数域で、最後の引張破断部を除きほとんどしぼりのない疲労破面を示した。

被膜を施した場合には OFHC Cu では、同じ破断繰返し数に対し全破面に占める最後の引張破断の面積が減少し、疲労き裂の伝ばによる破面が増加する傾向が認められた。また 5005 Al の場合も、破断繰返し数 512 回の 1 例だけではあるが、被膜試験片にしぼり破壊ではなく、き裂の発生伝ばによる疲労破面が認められている。White⁴⁾らによると En 25 で引張平均応力

が重畳されると 3000 kg/cm^2 の圧力下では常にくびれ破断が観察され、圧縮平均応力の場合には太鼓形変形などにより破断を伴わず試験が終わっていることが報告されている。破断延性の大きい 5005Al については、たとえ平均荷重が 0 でも大変形に伴い真応力の平均値はわずかながら引張りとなるのでくびれ破断は当然としても、被膜による疲労破面の出現が、純粋に被膜の影響であるのか、あるいはなんらかの原因でくびれ破断の平均応力が負荷されるなど他の因子も関与しているのかについてはさらに精密な追試が必要であろう。なお 5005Al でも両振りひずみサイクル下では、寿命が 200 回程度以上ではしぼりを伴わない、平らな疲労破面で破壊が起きている。

4・3 OFHC Cu 切欠き材の疲労

Fig. 11 に切欠き材の $S-N$ 線図を示す。この場合は圧力の影響は全く認められない。被膜試験や途中で圧力をかえた試験など、資料を積重ねなければ確実なことはいえないが、平滑材の結果と Fig. 11 の結果から単純に判断すれば、被膜を施さない場合には圧力はき裂の発生過程に影響を及ぼし、伝ば過程には影響を及ぼさないことになる。これは Rowland らの報告とは同一傾向のものであるが、「直応力のき裂発生に対する影響は小さく、き裂伝ばに大きな影響を及ぼす。」という一般的常識とは必ずしも一致しない。

Fig. 11. $S-N$ curves for notched specimens of OFHC copper.

4・4 破面のフラクトグラフィ

Fig. 12 および Fig. 13 は OFHC Cu について、大気圧下、 $\sigma_a = 19.7 \text{ kg/mm}^2$, $N_f = 1664$ と 3000 kg/cm^2 下、 $\sigma_a = 23.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f = 1263$ に対する平滑材の破面の走査形電子顕微鏡写真を示したものである。いずれの圧力下でも明りょうなストライエーションが現われている。これについてはき裂伝ば速度などの定量的検討が必要であるが、少なくとも外見的には圧力による大きい相違は認められない。

唯一の相違は、大気圧下では最後の引張破断部に顕著なディンプルが観察されるのに対し、 3000 kg/cm^2 下では、これが全く抑圧され、せん断形の流れ破面を示していることであり、 2000 kg/cm^2 でもほぼ同様と

Fig. 12. Scanning electron fractograph of unnotched OFHC copper specimen (0 kg/cm^2 , $\sigma_a = 19.7 \text{ kg/mm}^2$, $N_f = 1664$).

なっている。

5 結 言

6000 kg/cm^2 までの高圧下で繰返し引張圧縮負荷を加える疲労試験装置を試作し、この装置を用い、無酸素銅 (OFHC Cu)、耐食アルミニウム合金 (5005Al) および炭素鋼 (S35C) を用い、荷重制御方式で低繰返し数領域の疲労試験を行なった。得られた結果は次のとおりである。

(1) 電気油圧サーボ方式を用いた自己平衡形の高静水圧下引張圧縮疲労試験装置は、なお若干改良すべき点はあるが、疲労試験機としての充分の性能を有していることが明らかとなった。

(2) 平滑試験片について、両振り疲労強度は静水圧 (最大 4000 kg/cm^2) とともに増加し、大気圧下の疲労強度に対する増加率は静的強度の低いものほど大きくなる傾向が認められた。OFHC Cu および 5005Al について試験片表面の被膜による保護の効果を調べた予備的試験の結果によれば、本研究では被膜の延命効果は認められず、寿命はむしろ減少した。

(3) 被膜を施さない OFHC Cu の切欠き試験片 ($K_t = 5.8$) では、 3000 kg/cm^2 下と大気圧下で寿命の差は全く認められなかった。

Fig. 13. Scanning electron fractograph of unnotched OFHC copper specimen (3000 kg/cm^2 , $\sigma_a = 23.0 \text{ kg/mm}^2$, $N_f = 1263$).

(4) OFHC Cu の平滑材の破面を走査形電子顕微鏡で観察した結果、 3000 kg/cm^2 までの高圧下でも大気圧下と同様の疲労によるストライエーションが観察され、圧力により疲労き裂伝ばの機構に本質的な相違が生じている形跡は認められなかった。

本研究に対し、昭和45年および46年度文部省科学研究費補助金(試験研究(1))の交付をうけた。本装置の試作に関連して、昭和42年以来(株)神戸製鋼所顧問安並三男氏および超高压機器グループ課長福田 保氏から数多くのご教示とご援助を得た。また本論文の範囲では使用に至らなかったが、磁歪荷重計について金属材料技術研究所小口 醇氏、日本楽器製造(株)、高村昌幸氏および山岸友雄氏から貴重なご助言ご援助を得た。さらに供試材料の調達に際し住友電工(株)松田好夫氏のご協力を得た。あわせ心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Crossland, B., "The Mechanical Behaviour of Materials under Pressure", H. L. D. Pugh (ed.), Chap. 7, p. 299 (1970) Elsevier Publishing Co., Amsterdam-London-New York
- 2) Crossland, B., Proc. International Conf. on Fatigue of Metals, 138 (1956) Inst. Mech. Engrs.
- 3) Burns, D. J., and Parry, J. S. C., J. Mech. Engng. Sci., **6**, No. 3, 293 (1964).
- 4) White, D. J., Crossland, B., and Morrison, J. L. M., J. Mech. Engng. Sci., **1**, 39 (1959).
- 5) Liberiny, G. Z., Proc. High Pressure Engineering Conference, Paper **16**, 124 (1967) Inst. Mech. Engrs.,
- 6) Libertiny, G. Z., Proc. High Pressure Engineering Conference, Paper **19**, 150 (1967) Inst. Mech. Engrs.
- 7) 大路清嗣, 小倉敬二, 長谷川知暉, 日本金属学会誌, **36**, 9号(1972-9)掲載予定.
- 8) 中沢 一, 小泉 堯, 小林英男, 丸山 睦, 日本機械学会関西支部第46期総会講演論文集, No. 714-2, 68 (1971-3).
- 9) Rowland, S. C., K. L. DeVries, and P. Gibbs, Int. J. Fracture Mechanics, **3**, No. 2, 131 (1967).
- 10) Crossland, B., Proc. Inst. Mech. Engrs., **168**, 935 (1954).
- 11) たとえば, 坂田 勝, 大久保徹夫, 日本機械学会論文集, **36**, 281号, 33 (1970).
- 12) Oguchi, A., and S. Yoshida, Japanese J. Appl. Phys., **7**, No. 6, 672 (1968); 金材研究報告, **12**, 6号, 57 (1969).
- 13) 小口 醇, 精密機械, **36**, 7, 474 (1970).
- 14) Peterson, R. E., "Stress Concentration Design Factors" (1953) John Wiley and Sons Inc., New York
- 15) たとえば, 大路清嗣, 小倉敬二, 長谷川知暉, 間嶋 優, 松本一雄, 日本機械学会関西支部第46期総会講演論文集, No. 714-2, 35 (1971-3).
- 16) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 駒井謙次郎, 清田守男, 日本機械学会論文集, **38**, 307号, 452 (1972).