予変形が種々の方向に重畳されるときその後の塑性変形挙動*

(第3報, 繰返し予変形後の再負荷変形特性)

金子堅司**, 有山 堯**, 丸山重明***

Plastic Behavior of Metals after Cyclic Prestraining (3rd Report, Deformation properties of reloading after cyclic prestraining)

by Kenji KANEKO, Takashi ARIYAMA, and Shigeaki MARUYAMA

The plastic behavior of metals (SUS 304, 2-1/4Cr-1 Mo steel and Al alloy) after cyclic prestraining is systematically and experimentally investigated in a stress (strain) plane that consists of axial and torsional stress (strain) components. A useful multiaxial deformations sensor for both a cyclic test and a following large straining test is developed. The stress level in reloading after cyclic prestraining is never below the initial stress-strain curve, independently of the loading direction, even after cyclic softening has occurred. An initial plastic anisotropy is never weak and never vanishes due to cyclic prestraining, but may become strong depending on the prestraining direction. The larger the cyclic strain hardening, the smaller the coefficient of work hardening in reloading. Therefore, it is suggested that the initial stress-strain relations should/can be used as basic material data for a strength and safety analysis of a structure that is subjected to both an usual cyclic load and an abrupt overload due to accident, earthquake and so on.

Key Words: Plasticity, Stress-Strain Relations, Multiaxial stresses, Cyclic Prestraining, Nuclear Structural Metals

1. 緒 言

一般に、原子力圧力容器(配管系を含む)、タービン、航空宇宙機器などの機械構造物は、通常運動時に荷重を繰返し受けるが、さらに突発的事故とか地震などにより一時的な過荷重を受ける可能性がある。したがって、このような構造物に使用される材料の強度について規定し、強度設計上安全性を確認するためには、あらかじめ繰返し負荷を与えた後の材料の大変形特性について詳細に検討する必要がある。このような研究は、また材料の変形特性を予負荷履歴の関数として一般的に表示しようとする一般構成方程式構築の研究の一環としても重要な意味をもっている。

本研究は、従来あまり検討されていない、金属材料の繰返し予負荷後の塑性変形特性について、比較的大きいひずみ範囲に至るまで3種類の材料に対して二次元的負荷下で系統的な実験を行い検討を加えたものである。本報は、その前報として、実験上の問題についてまず述べ、実験結果から直接得られる変形特性につ

いての法則性について述べる。統報により、今回得られた複雑な材料特性を表示・予測する構成モデルについて検討した結果を提示する。

2. 実 験

2.1 試験装置および変位計 実験に用いた試験装置は、円筒試験片に引張り(圧縮)、内圧およびねじり荷重を任意の組合せで繰返し負荷することができる、閉ループ電気油圧サーボ制御の組合せ応力試験装置である。試験片に生ずるひずみの検出に関しては、いわゆる抵抗線ひずみゲージを試験片に貼りつけて用いる方法は、簡便で精度もかなり期待できるが、10%程度の単純な引張負荷や数%のねじり負荷の場合にはほぼ使用が限られる。これ以上大きな変形の場合にはゲージの貼り換えやゲージの回転に対する考慮が必要となる。また本実験のような繰返し負荷の場合には、ゲージ抵抗が増加する方向にかなり大きなゼロシフトを生ずる。多軸変位を検出する変位計として二、三報告されているが、大変形に対しては問題があるようである。そこで、繰返し変形とそれに続く大変形を精度よく測定する必要のある本実験を遂行するために、以下に述べる多軸変位計を開発して用いた。

図1および図2に変位計の平面図および正面図を示

* 昭和61年4月2日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年10月7日。

** 正員、東京理科大学工学部(〒161 東京都新宿区神楽坂1-3)。

*** 正員、ソニー(株)(〒141 東京都品川区北品川6-7-35)。

す。腕 A は、スラスト、ラジアル軸受と L 字形ハウジング B を介して変位計本体部 C に取付けられている。腕 A の先端の針 E は高速度鋼製で、試験片 D の平行部表面 (間隔 20 mm) につけられたポンチによる微小なくぼみに押し当てられている。腕 A の他端に取付けられた 2 個の差動変圧器 F の相対的出力変化によって軸変位、2 個の差動変圧器 G の相対的出力変化によってねじり変位が各々独立に検出される。棒 H は、リニアモーションの軸受に抱かれており、試験片が変形しても圧縮バネにより針 E がほぼ一定圧で押し当てられるように工夫されている。

図 3 に、引張り-圧縮負荷したときの荷重・変位曲線を多軸変位計とひずみゲージとを併用して求めた結果を示す。両者にほとんど差異が認められないことから、開発した変位計は、バックラッシュもほとんどない十分な性能を有している。変位計の分解能は、差動トランスを用いているのでアナログ記録する限り基本的には無限小であるが、本実験ではマイコンによりデジタル記録していることおよび本実験に用いた試験片で引張りひずみ $\epsilon_1 (= \epsilon_2)$ が 0.125 (12.5%) まで測定できるように感度調整を行っていることから、実質的に試験

片ひずみに換算して $122 \mu\text{strain}$ となっている。ねじりひずみについては、相当ひずみ $\epsilon_3 (= 2/\sqrt{3} \cdot \epsilon_{xy})$ に換算して、 $70 \mu\text{strain}$ となっている。なお、本変位計によりねじれ角を測定する場合には、測定値がねじれ角に対して非線形となるのでそれなりの演算処理が必要である。

さらに、本実験のために開発した直径変位計の側面図を図 4 に示す。腕 1 および 2 の先端にはラジアル玉軸受 1 対が取付けられ、バネの作用により試験片中央部をほぼ一定圧力で挟み込む。試験片が変形して挟む位置が移動しても追従するように、支柱 5 は自由に回転する構造となっている。分解能は、 $34 \mu\text{strain}$ である。

2.2 試験片 試験片材料には、原子力機器材料でしかも積層欠陥エネルギーレベルの異なる、Al-合金 (A 2017)、低合金鋼 (STPA 24) およびオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 304) の 3 種類を用いた。表 1 (a)~(c) に、各々の材料の成分を示す。試験片材料は特別な熱処理を行わず、受入れ状態のまま図 5 に示す形状に機械切削加工された。円筒内面はホーニング仕上げしている。

2.3 実験方法 図 6 に、実験に用いた代表的なひずみ経路を示す。引張り・圧縮あるいはねじり繰返し負荷により、繰返し全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_1^* = 0.5, 1.0$ あるいは 2.0% で繰返し数 $N = 1, 30$ あるいは 400 回の予負荷 (第 1 次負荷) を行った後、繰返し予負荷と同じ方向の負荷あるいはひずみ経路を 90° 折り曲げる負荷により、 $\epsilon'' = 10\%$ 程度の再負荷 (第 2 次負荷) を行った。さらに第 2 次負荷と逆方向に第 3 次負荷を行った場合

図 1 多軸変位計平面概略図

図 2 多軸変位計正面概略図

図 3 ひずみゲージと多軸変位計による引張り-圧縮荷重・変位曲線

もある。なお、Al-合金は弾性係数が小さいため $\Delta\epsilon_t^I = 0.5\%$ の実験で塑性変形がほとんど生じなかったので $\Delta\epsilon_t^I = 3.0\%$ の実験を追加した。また Al-合金では $N = 400$ に至る前に疲労破損する場合があった。

ひずみ速度は $\dot{\epsilon}_t = 250 \mu\text{strain/s}$ に制御した。前述したように、変位制御に用いた変位計の出力と試験片のねじれ角の関係は非線形であるので、時々刻々のデータに基づき次の発信増分電圧を計算するというマイコン利用のリアルタイム制御を行った。1回当たりのデータ収集、計算および発信に要した時間は、およそ 0.385 秒であった。

3. 実験結果および考察

3 種類の材料に対して得られた実験データの内、SUS 304 と Al 合金についてのものは、試験片ごとの流動応力に比較的大きなバラツキがあったので、予負荷時の応力が平均的な応力値と一致するように全応力データに係数を掛けてバラツキの影響を取り除いた。

得られた全データを整理した結果、Al 合金についての結果は STPA 24 ($2\frac{1}{4}\text{Cr-Mo}$ 鋼) の結果と初期

負荷時のいわゆる踊り場がない以外極めて類似したものであったので、本報ではその掲載を割愛した。また、ひずみ幅 $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ の場合の結果は、いずれの材料についても、 $\Delta\epsilon_t = 0.5\%$ と 2.0% の結果の中間的傾向を示すにすぎなかったので、再負荷曲線の掲載は割愛した。図中(図 7～図 13)の記号を説明すると、 T_e は引張り、 C_0 は圧縮、 T_0 はねじり、 $R \cdot T_0$ は逆ねじりを表す。さらに、 $T_e - C_0$ は引張り・圧縮の繰返し、 $T_0 - R \cdot T_0$ はねじり・逆ねじりの繰返しを表す。

3-1 繰返し応力幅の変化 図 7(a)および(b)は、各々 SUS 304 および STPA 24 について、繰返し数に対する繰返し応力幅の変化を、繰返しひずみ幅をパラメータとして示したものである。このようなデータ自体は極めてありふれたものかもしれない⁽¹⁾、本結果は、試験片材料にあらかじめの等方化処理を行っていない、より現実的材料に対する結果であることおよび軸荷重とねじり荷重による二軸負荷実験結果であることが他と異なっている。

本結果は、繰返し変形特性についての従来の常識⁽²⁾を否定しようとするものではないが、同じ材料でも負荷方向あるいは $\Delta\epsilon$ の大きさにより、軟化後硬化したり、硬化後軟化する場合があることなどなど、単純には扱えない繰返し挙動の複雑さを改めて確認するものとなっている。本結果にほぼ共通して観察される点の

表 1 試験片材料成分表

(a) Chemical Composition (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti	Ti	Al
0.3	0.2	4.1	0.5	0.5	0.01	0.02	0.02	0.02	Rms.

(JIS H4040 A2017BE-T4)

(b) Chemical Composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.1	0.3	0.48	0.28	0.07	2.17	0.9	Rms.

(JIS G3458-24 STPA 24)

(c) Chemical Composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.042	0.39	1.82	0.031	0.01	8.82	18.49	Rms.

(JIS G3459 SUS304 TP)

図 5 試験片形状寸法

図 4 直径変位計側面図概略図

図 6 実験に用いたひずみ経路

図 7 繰返し応力幅対繰返し数 ($i=1, 3$)

図 8 軸方向予負荷後再負荷引張曲線

図 9

一つは、 $N=10\sim30$ 回で一時的に硬化あるいは軟化が飽和状態になったかの挙動を呈することである。繰返し変形特性を記述・予測しようとする従来の理論の多くは繰返し数 $N=10$ 回程度までを対象としたもので、本実験結果はそれらが十分なものではないことを示している。

3.2 繰返し予負荷後の再負荷変形挙動

3.2.1 一般的傾向 図8～11の各(a)および(b)は、各々 SUS 304 および $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼に対し、繰返し予負荷後再負荷時の応力・ひずみ曲線について得られた実験結果の一部を示している。図8は、引張再負荷曲線に及ぼす引張り・圧縮繰返し予負荷の影響を繰返しひずみ幅 $\Delta\varepsilon_I^I$ と繰返し数 N をパラメータとして示している。図9は、繰返し予負荷と同方向ある

いは直角方向の再負荷曲線を $N=400$ の場合について $\Delta\varepsilon_I^I$ をパラメータとして示し、いわゆる交差効果を観察する図となっている。図10は、ねじり再負荷挙動について、繰返し予負荷方向の影響を、 $N=400$ の場合について、 $\Delta\varepsilon_I^I$ をパラメータとして示している。

このような検討項目すべてについて、種々の条件での比較図を本報にすべて掲載することは不可能であるので、図8～10に未掲の代表的結果を図11に示す。

これら一連の実験結果から得られる一般的知見として以下の各項目が挙げられる。

(1) 繰返し硬化した材料は、硬化した度合に応じて再負荷応力レベルが高い。

(2) 繰返し軟化した材料で応力振幅が初期材料の流動応力レベル以下になっても、再負荷直後急速に硬

(a)

(b)

図10 ねじり再負荷特性への予変形方向効果

(a) 軸方向予負荷後のねじり再負荷曲線

(b) ねじり予負荷後の引張再負荷曲線

図11

化し初期流動応力レベルを下回ることはない。

再負荷直後からたかだか2%変形する間に観察される遷移的な高硬化係数領域を除いて

(3) 再負荷時の応力-ひずみ曲線の硬化係数は、繰返し硬化あるいは軟化する場合ともに初期の値以下であり、応力-ひずみ曲線は、変形の進行とともに初期の曲線に漸近ないし一致する。

以上の傾向は、材料の種類、繰返し予負荷方向、繰返し数、繰返しひずみ幅および再負荷方向のいかんを問わず一般的に観察された。これらの傾向を少しく定量的に整理したものが図12および図13の各(a)、(b)である。これらの図の横軸は、繰返し予負荷時の

最終のヒステリシス曲線における応力幅 $\Delta\sigma$ と塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon^p$ との積を表示しており、近似的に繰返し1 cycle 当たりの塑性仕事の4/3倍に等しい。 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p$ を繰返し予変形後の挙動を整理する際の主パラメータと考えることには、異論があるかもしれないが、本実験データの整理には比較的有效であった。図12の縦軸は、再負荷曲線の硬化係数 $E_s = d\sigma/d\epsilon$ 、図13の縦軸は、再負荷流動応力レベル $\bar{\sigma}$ 対初期材料の流動応力レベル $\bar{\sigma}_{in}$ 比を示しており、ともに再負荷開始後2.0%変形した時点でのほぼ定常硬化状態となったところの値で整理した。記号の説明は図中に示してある。各

図 12 再負荷時の硬化係数対 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p$

図 13 再負荷時硬化比対 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p$

図の(a)および(b)は、各々 SUS 304 および $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼に対する結果である。

図 12 から、(1) 再負荷時の硬化係数は再負荷方向の影響を強く受けること、(2) $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p$ が大きいほど、換言すれば、繰返し加工硬化が大きいほど硬化係数は低下すること、が明りょうに観察される。太い実線および破線は得られた実験点の近似曲線であり、式(1)の形式で表示し得る。

$$E_s = \alpha(\beta + \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p)^n \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 α, β および n は材料定数である。

図 13 から、(1) 繰返し負荷による硬化比 σ/σ_{in} は、 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p$ の値の増加に伴い、ほぼ線形に増加すること、(2) 繰返し軟化する場合でも σ/σ_{in} の値は、1.0 を下回らないこと、(3) $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon^p$ の硬化寄与度(図の直線の傾き)とその予負荷方向依存性は、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼ではともども小さいのに対して、SUS 304 ではともに大きいこと(これについては、積層欠陥エネルギーの大小あるいは、交差すべりの難易の効果と考えられる)、などが知見される。

3・2・2 交差効果について 繰返し予負荷方向への再負荷曲線と直角方向への再負荷曲線との結果の比較により交差効果についての知見が得られる。本実験結果、例えば図 9 から、繰返し予負荷に対する交差効果は、基本的に単純予変形ないし単純予変形の重畳する場合⁽³⁾と同様な傾向の見られることがわかる。すなわち、予変形による加工硬化は予変形と直角な方向にも、予変形方向とほぼ同程度ないしそれ以上のものが認められること、とくに SUS 304 では、予負荷方向のいかにかわらず、直角方向の加工硬化のほうが予負荷方向のそれより大きい。これらの結果は、換言すれば次のことを意味する。すなわち、初期異方性を有する材料に繰返し予変形が作用するとき負荷の繰返しによって異方性が消滅することはなく、かえって助長される場合がある。

ところで、単純予変形後再負荷時の応力-ひずみ曲線の硬化係数は、初期材料の硬化係数とほぼ一致するのに対して、繰返し予負荷後では、既述したようにかなり低い値となるのが一般的であることから、再負荷後変形が進行するに伴い、交差効果は消滅する。

3・2・3 予負荷方向の影響 例えば、図 10 の結果から、再負荷ねじり流動応力に及ぼす予変形方向の影響は比較的顕著に認められ、引張予変形の硬化に寄する度合は、ねじり予変形のそれよりかなり大きい。この傾向は、繰返しひずみ幅が大きいとき、あるいは、材料が SUS 304(交差すべりが難しい材料)のとき、さらに顕著となる。一方、再負荷引張流動応力について

は、同様に引張圧縮による予変形の硬化寄与度のほうが、ねじりによる予変形のそれより大きいのであるが、その差はわずかである。これらの傾向も、単純予変形の場合と類似した結果である。

4. 結 言

本報は、金属材料の繰返し予変形後の再負荷変形特性について、軸方向応力(ひずみ)とねじり応力(ひずみ)で構成する応力(ひずみ)平面内での系統的な実験により検討したものである。

繰返し負荷を受ける航空機、原子力機器の強度を見積もり、安全性を確認する上で極めて重要と思われる次の三点が確認された。

(1) 繰返し予変形を受けて軟化が起こる場合でさえも再負荷曲線は、再負荷初期の遷移域(ひずみ量でたかだか2%程度)を除けば、予変形を受ける前の初期の応力-ひずみ曲線のレベルより低下することはない。

(2) 初期異方性を有する材料に繰返し予変形が負荷されるとき、負荷の繰返しによって塑性異方性が消滅することはなく、予負荷の方向によってはかえって異方性が助長される場合がある。

(3) 繰返し予変形を与えて硬化した材料では一般に、加工硬化係数が初期材料のそれより小さい。繰返し加工硬化の度合が大きいほど、再負荷時の硬化係数は小さくなる。

以上の知見から、繰返し負荷を受ける機器の強度設計においては、初期材料の塑性変形特性をあくまでもベースに据えればよく、繰返し硬化によって、突発的過負荷に対する安全性が向上する、と見込むべきではないし、また逆に繰返し軟化によって安全性が低下する、と考える必要もないことが示唆される。

なお、本研究で得られたような材料挙動を説明し、精度よく予測するためには、初期異方性の状況、引張りと単純せん断の変形機構の相違と相乗効果、材料の違い(交差すべりの難易、飽和転位組織の相違)などを詳しく調べるが必要になると考えられる。しかし、これらの検討は一朝一夕に成るものではないし、それらの効果を適正に組み込んだ構成方程式を構築することも容易ではない。したがって、即戦力的構成方程式としては、目下のところ、二曲面硬化モデル⁽⁴⁾のような連続体力学的構成モデルによる以外にないと考えられる。これについては、続報にて詳細に検討し報告する。

終わりに、本研究は、昭和 59 年度文部省科学研究費補助金により行われた。また、本研究の実験遂行に

当たっては、東京理科大学工学部機械工学科昭和59年度卒業研究生 川戸敬司、藤本一彦および松田剛の各氏の協力によるところ大であった。ここに記して深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) 例えば, Jaske, C. E. and Leis, B. N., *Report No. ORNL*

4004 to Oak Ridge National Laboratory, Battelle's Columbus Laboratories, (1975).

- (2) 例えば, Klensnil, M. and Lukas, P. (荒木・堀部共訳), 金属疲労の力学と組織学, (昭59), 4, 養賢堂.
(3) 例えば, 金子, 機論, 48-435, A (昭57), 1464.
(4) 例えば, Kaneko, K., *Eng. Fract. Mech.*, 21-4 (1985), 721.

討 論

〔質問〕 井上達雄 (京都大学工学部)

組合せ引張-ねじりのひずみを測定するため精巧な変位計を試作され、有益な実験データを示され興味深く拝見した。

(1) 緒言、結言などに多く記されているように、本研究では原子力機器、タービンなど高温構造物設計の基礎資料の提供をめざしておられるようであるが、その意味で試作された変位計は高温でのひずみ測定も可能か。また、図3の波形に波打ちなどがみられるが、これは、材料固有のものか、それとも変位計の特性か、ねじりについてはどうか。

(2) 文中に定義が見当たらないが、図8~9からすると $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_3 = \sqrt{3} \sigma_{xy}$ とみなしてよいか。また、 σ_i は σ_1 か σ_3 のいずれか。すると、図7(a)-(b)の白印と黒印の差異はあまりに大きいように見えるが、いかがか。

〔回答〕 (1) 今回試作した変位計では高温でのひずみ測定は無理である。しかし、図1の針E、棒Hを高温に耐えるように工夫すれば、ご指摘の高温測定が可能になると考えている。つまり、高速度鋼製の針Eをセラミックス製の丸棒に替え、この丸棒を腕Aの内部のリニアモーションの軸受に抱かせ、腕Aの内部に固定させた圧縮バネで、試験片に一定圧で押し当てるようにするなどの改良を行えば、測定可能になると考えられる。図3における波形の波打ちは材料固有のものではなく、変位計の特性および直流増幅器などによるノイズによるものと考えられる。さらに、ねじりについても同様の原因に基づくものと思われる。

(2) 応力とひずみの定義は第2報⁽³⁾と同じであり、 $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_3 = \sqrt{3} \sigma_{xy}$, $\epsilon_1 = \epsilon_x^p$, $\epsilon_3 = (2/\sqrt{3}) \epsilon_{xy}^p$ である。図7(a), (b)の白印と黒印の差異が大きいとのこと質問だが、本結果は試験片材料にあらかじめの等方化処理を行っていない材料に対する結果であり、同じ材料でも負荷方向の違いにより、繰返し応力幅に差異が生じたという実験結果を表している。

〔回答〕 大野信忠 (豊橋技術科学大学)

大変形にしても精度よく使用できる変位計を開発されたことについて敬意を表す。

(1) 貴論文のようにひずみが大きい場合には、応力とひずみの定義が問題となるが、貴論文ではどのような定義を用いて実験結果を整理されているのか。構成式の定式化との関連も含めてご教示願いたい。また、ねじりひずみについて相当ひずみを $\epsilon_3 = (2/\sqrt{3}) \epsilon_{xy}^p$ としておられるが、この ϵ_3 は、大変形でも引張ひずみに“相当”するか。

(2) ひずみのフルレンジの小さい場合 (例えば1%)に、貴変位計の精度が検定されているならば、その結果をお示し下されば幸いである。

〔回答〕 (1) 応力とひずみの定義は井上氏への回答(2)を参照されたい。また、ねじりひずみについて、相当ひずみを $\epsilon_3 = (2/\sqrt{3}) \epsilon_{xy}^p$ として実験結果を整理したが、この ϵ_3 が大変形においても、引張ひずみに“相当”するかどうかは不明である。

(2) 本実験においては、とくにひずみが小さい場合の変位計の精度を定量的に検定していない。