二軸メカニカルラチェット変形挙動におよぼす 最大応力と応力比の変動の影響*

吉 田 総 仁**, 小幡谷 洋 一***
山 本 修 治†, 大 森 正 信**

Effects of Variations of the Maximum Stress and Stress Ratio on the Biaxial Mechanical Ratcheting Behaviors

by Fusahito YOSHIDA, Yōichi OBATAYA
Shūji YAMAMOTO, and Masanobu OHMORI

The effects of variations in the maximum effective stress and stress ratio on biaxial strain accumulating behaviors are experimentally investigated using thin-walled tubular specimens of a carbon steel subjected to combined steady cyclic axial load and internal pressure. When the maximum effective stress was changed with number of cycles keeping constant in the stress ratio, the strain accumulating rate under biaxial stress condition was equal to the rate under uniaxial stressing. The biaxial strain accumulating rate was smaller compared with the rate in the uniaxial condition when the stress ratio was changed with number of cycles. A constitutive equation of biaxial mechanical ratcheting is proposed. The predictions by the present equation are agreed well with the experimental observations.

Key Words: Plasticity, Mechanical Ratcheting, Cyclic Loading, Biaxial Strain Accumulation, Variation of Stress, Constitutive Equation

1. 緒 言

金属材料に比較的小さな静荷重とそれとは異なった方向の大きな繰返し外力(変位)が組合わさって作用するときに塑性ひずみが累積する二軸メカニカルラチェット変形については、これまでも多くの研究^{(1)~(7)}がなされている。これらの研究成果は、静荷重の作用している構造物に地震などによる突発的繰返し外力が加わった場合、あるいは構造物の応力集中部に非比例的繰返し応力が作用する場合などにおける変形と強度の推定に重要な手がかりを与えるものである。しかし、従来の研究のほとんどは、定常応力(静荷重)に両振り定ひずみ応力が重畳し、塑性ひずみが定常応力の方向にのみ累積する場合を扱っている。これは、静荷重を受けている構造物に両振りの強制変位が作用している場合に相当するが、こうした負荷様式はむしろまれであり、平均応力をもつ部分両振り応力が作用し、その結果、定常応力(静荷重)方向とともに繰返

し応力(外力)方向にもひずみが累積する場合はより一般的と思われる。

著者らは、前報⁽⁸⁾において、炭素鋼薄肉円筒試験片に定常内圧と繰返し軸力を組合わせて負荷する実験を行い、軸方向と円周方向の2方向ひずみ累積挙動におよぼす最大相当応力、応力比、定常応力値(応力経路折曲げ角)および繰返し数の影響について検討し、繰返し応力条件が繰返し数とともに変動しない場合の二軸メカニカルラチェット構成式を導いた。また、先に、単軸変動応力下のメカニカルラチェット構成式⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾について提案を行っている。

本報では、これらの成果をふまえ、静荷重を受ける構造物に不規則な繰返し外力が重畳する場合、あるいはラチェット変形の進行に伴い構造物内の応力分布が繰返し数とともに変化する場合⁽¹¹⁾を想定し、最大相当応力と応力比の変動が二軸方向塑性ひずみ累積挙動におよぼす影響について実験的検討を行った。

2. メカニカルラチェット構成式について

二軸応力下のメカニカルラチェット変形挙動を記述するために、次の二次元偏差応力および偏差塑性ひずみ平面⁽¹²⁾を用いる。すなわち、応力成分は、

$$\bar{\sigma}_1 = (3/2)S_{11}, \quad \bar{\sigma}_2 = (\sqrt{3}/2)(S_{11} + 2S_{22}) \cdots (1)$$

* 昭和 58 年 11 月 29 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 20 日。

** 正員、広島大学工学部 (〒724 東広島市西条町下見)。

*** 正員、福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1)。

† 新日本製鉄(株) (〒805 北九州市八幡東区枝光 1-1-1)。

であり、ひずみ成分は、

$$\bar{\epsilon}_1 = \epsilon_{11}^p, \quad \bar{\epsilon}_2 = (1/\sqrt{3})(\epsilon_{11}^p + 2\epsilon_{22}^p) \cdots \cdots (2)$$

である。ここで、 S_{ij} および ϵ_{ij}^p は、それぞれ直交座標系における偏差応力および偏差塑性ひずみである。 $\bar{\epsilon}_i (i=1, 2)$ 方向の単位ベクトルを e_i と書くとき、塑性ひずみ増分ベクトル $d\epsilon^p$ は次のようになる。

$$d\epsilon^p = d\bar{\epsilon}_1 e_1 + d\bar{\epsilon}_2 e_2 \cdots \cdots (3)$$

応力ベクトル σ は次のように表せる。

$$\sigma = \bar{\sigma}_1 e_1 + \bar{\sigma}_2 e_2 \cdots \cdots (4)$$

これらのベクトルの大きさ $|d\epsilon^p|$, $|\sigma|$ はそれぞれ Mises 形の相当塑性ひずみ増分および相当応力を表し、以下では、 $|\sigma| = \bar{\sigma}$, $|d\epsilon^p| = d\bar{\epsilon}$ と書くことにする。いま、図 1 に模式的に示すように、 $\bar{\sigma}_2$ 軸方向の定常応力 $\bar{\sigma}_2 = \sigma_d$ と $\bar{\sigma}_1$ 軸方向の繰返し応力が重畳して作用している場合について考える。図 1 において、 N サイクルめにおける最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ 、応力比 R および応力経路折曲げ角 θ_σ はそれぞれ次式のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{\max} &= |\sigma_{\max}| = \sqrt{\bar{\sigma}_{1\max}^2 + \sigma_d^2} \\ R &= \bar{\sigma}_{1\min} / \bar{\sigma}_{1\max} \\ \theta_\sigma &= \tan^{-1}(\sigma_d / \bar{\sigma}_{1\max}) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (5)$$

いま、材料の単調負荷の際の応力 σ と塑性ひずみ増分 $d\epsilon^m$ の関係が Prandtl-Reuss の式で次のように表せるとする。

$$d\epsilon^m = d\bar{\sigma} / H' \bar{\sigma} \quad (H': \text{加工硬化係数}) \cdots (6)$$

N サイクルめの繰返し応力によって生じた塑性ひずみ速度を $\dot{\epsilon}^p = d\epsilon^p / dN = \epsilon_{11}^p(N) - \epsilon_{11}^p(N-1)$ と書くとき、ラチェットひずみ速度 $\dot{\epsilon}^r = d\epsilon^r / dN$ およびその進行方向 θ_ϵ を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}^r &= \dot{\epsilon}^p - \dot{\epsilon}^m = \dot{\epsilon}_1 e_1 + \dot{\epsilon}_2 e_2, \quad \dot{\epsilon}^r = |\dot{\epsilon}^r| \\ \dot{\epsilon}^m &= d\epsilon^m / dN \\ &= \begin{cases} (1 - \bar{\sigma}_{\max}^* / \bar{\sigma}_{\max}) \bar{\sigma}_{\max} / H'; & \bar{\sigma}_{\max} \geq \bar{\sigma}_{\max}^* \\ 0; & \bar{\sigma}_{\max} < \bar{\sigma}_{\max}^* \end{cases} \\ \theta_\epsilon &= \tan^{-1}(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (7)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_{\max}^*$ は、材料が $\bar{\sigma}_{\max}$ に先行する負荷で受け

図 1 二軸応力下のメカニカルラチェットの応力経路の模式図

た最大応力である。

単軸変動応力下のラチェットひずみ累積速度 $\dot{\epsilon}^r$ は、次式で表されるひずみ硬化形構成式⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾により定式化できる。

$$\dot{\epsilon}^r = \alpha C^{1/\alpha} \exp(-\gamma R / \alpha) \bar{\sigma}_{\max}^{\beta/\alpha} \bar{\epsilon}^{(1-1/\alpha)} \cdots \cdots (8)$$

ここで、 α , β , γ は材料定数である。特に、最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ と応力比 R が繰返し数 N とともに変化しない場合には、式(8)を積分することにより次式が得られる。

$$\bar{\epsilon}^r = C \exp(-\gamma R) \bar{\sigma}_{\max}^{\beta} N^{\alpha} \cdots \cdots (9)$$

最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ 、応力比 R および応力経路折曲げ角 θ_σ が繰返し数 N とともに変動しない場合の二軸応力下のメカニカルラチェット構成式⁽⁸⁾は次式で定式化できた。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon^r &= \bar{\epsilon}^r (\cos \theta_\epsilon e_1 + \sin \theta_\epsilon e_2) \\ \theta_\epsilon &= \tan^{-1}(\bar{\epsilon}_2 / \bar{\epsilon}_1) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (10)$$

ここで、相当ラチェットひずみ量 $\bar{\epsilon}^r$ は、式(9)で表される単軸応力下のラチェットひずみ量 $\bar{\epsilon}^r$ にほぼ等しいことが実験的に確かめられている。また、ラチェットひずみ進行方向 θ_ϵ は、この場合、繰返し数 N および最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ によって変化せず、応力比 R と応力経路折曲げ角 θ_σ のみの関数として次式で表せる。

$$\theta_\epsilon = D \exp(-\xi R) \theta_\sigma^\eta \cdots \cdots (11)$$

ここで、 D , ξ , η は材料定数である。

さて、最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ と応力比 R が繰返し数 N とともに変化する場合の二軸応力下のラチェット構成式を式(10)にならって速度形式で次のようにおいてみる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}^r &= \dot{\epsilon}^r (\cos \theta_\epsilon e_1 + \sin \theta_\epsilon e_2) \\ \theta_\epsilon &= \tan^{-1}(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (12)$$

もし、応力条件が繰返し数とともに変動した場合にもラチェットひずみ速度 $\dot{\epsilon}^r$ が単軸変動応力下の速度 $\dot{\epsilon}^r$ に等しいとすれば、これは式(8)で与えられることになる。また、ラチェットひずみ進行方向 θ_ϵ が応力変動の影響を受けないとすれば、これは式(11)で与えられる。以下では、二軸変動応力下のラチェット実験を行い、塑性ひずみ累積挙動について、実験結果と構成式(8), (11), (12)を用いた計算結果とを比較しながら検討を行う。

3. 実験方法

試験片は、前報⁽⁸⁾で用いたものと同一のものである。すなわち、表 1 に示す化学成分の炭素鋼 (S25C) の丸棒を荒削り後 870°C で 1 h 焼なましを行い、図 2 に示す薄肉円筒状に切削加工した後 600°C で 30 min

真空焼なましをしたものを試験片とした。

試験片に定常内圧と繰返し軸力を組合わせて作用させ、そのときの軸方向および円周方向のひずみ累積量を測定した。このときの偏差応力成分 $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ および偏差塑性ひずみ成分 $\bar{\epsilon}_1$, $\bar{\epsilon}_2$ はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_z - \sigma_\theta / 2, \quad \bar{\sigma}_2 = \sqrt{3} \sigma_\theta / 2 \quad \cdots \cdots (13)$$

$$\bar{\epsilon}_1 = \epsilon_z^p, \quad \bar{\epsilon}_2 = (\epsilon_z^p + 2\epsilon_\theta^p) / \sqrt{3} \quad \cdots \cdots (14)$$

ここで、 σ_z , σ_θ はそれぞれ軸方向および円周方向の真応力であり、 ϵ_z^p , ϵ_θ^p はそれぞれ軸方向および円周方向の対数塑性ひずみである。実験は、軸方向応力 σ_z , 円周方向応力 σ_θ ともに真応力を制御することにより行った。すなわち、体積一定の仮定より

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_z^{(n)}(1 + e_z), \quad \sigma_\theta = \sigma_\theta^{(n)}(1 + e_z + 2e_\theta) \\ (\sigma_z^{(n)}, \sigma_\theta^{(n)}: \text{公称応力}, e_z, e_\theta: \text{公称ひずみ}) \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (15)$$

となるが、実験では、式(15)の演算を試作したアナログ演算器により行った。なお、公称応力 $\sigma_z^{(n)}$, $\sigma_\theta^{(n)}$ および公称ひずみ e_z , e_θ の測定方法は前報⁽⁸⁾のとおりである。

二軸変動応力条件は次のとおりである。すなわち、

(1) ラチェットひずみ累積挙動におよぼす最大相当応力の変動の影響を調べるための、応力比 R が一定で最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ が繰返し数 N とともに変動する実験

(2) 応力比の変動の影響を調べるための、最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ が一定で、応力比 R が変動する実験

(3) 最大相当応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ と応力比 R がともに変動する実験

である。ここで、最大相当応力と応力比の変動条件は、繰返し数とともに漸増(減)する場合とステップ状に大きく変動する場合である。漸増(減)条件は、構造

物に対する繰返し外力条件は変わらないが、ラチェット変形により応力分布が繰返し数とともにわずかながら変化する場合を想定している。また、ステップ状応力変動は、構造物に作用する外力(変位)条件が大きく変化する場合に対応する。なお、応力経路折曲げ角 θ_σ は繰返し数によらず一定とした。繰返し軸力は、0.1~0.2 Hz の sin 波で与えた。

4. 実験結果および考察

4・1 応力比一定・最大相当応力が変動する場合

図3(a)は、応力比一定のもとで、最大相当応力を繰返し数とともに線形に漸増(減)させた場合の累積塑性ひずみ $|\epsilon^p|$ と繰返し数 N の関係の例を示している。ここで、 ϵ^p は繰返しによって生じる全塑性ひずみ ϵ^p から第1回めの塑性予ひずみ ϵ_0^p を差し引いたものである。すなわち、

$$\epsilon^p = \epsilon^p - \epsilon_0^p = \bar{\epsilon}_1 e_1 + \bar{\epsilon}_2 e_2 \quad \cdots \cdots (16)$$

である。累積塑性ひずみ量の評価に

(a) 累積ひずみ量と繰返し数の関係

(b) 塑性ひずみ軌跡

図3 応力比一定・最大相当応力が漸増(減)変動する場合のラチェット変形

表1 試験片の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	sol. Al
0.27	0.29	0.38	0.023	0.017	0.033

図2 試験片

$$\bar{\epsilon}' = \int_0^{|\epsilon'|} d\bar{\epsilon} - \int_0^{|\epsilon'|} d\bar{\epsilon} \dots \dots \dots (17)$$

として定義される塑性ひずみベクトル軌跡の弧長 $\bar{\epsilon}'$ を用いずに、式(16)で示される塑性ひずみベクトルの大きさをを用いたのは、ラチェットひずみの進行方向 θ_σ が繰返し数とともに変化する場合には、実験からは弧長 $\bar{\epsilon}'$ を精度良く求めることが難しいためである。図3(b)は、このときの塑性ひずみ軌跡を $(\bar{\epsilon}'_1, \bar{\epsilon}'_2)$ 平面上に示したものである。図4(a), (b)はそれぞれ、最大相当応力をステップ状に増減させた場合の塑性ひずみ累積量および塑性ひずみ軌跡である。図3, 4の実線は構成式(8), (11), (12)による計算結果である。図3(a), 4(a)より、ラチェットひずみ累積量は、最大相当応力が変動する場合にも構成式(8), (11), (12)で良く表し得ることがわかる。また、図3(b), 4(b)より、ラチェットひずみ累積方向は、最大相当応力の変動の影響を受けず、繰返し数によらずほぼ一定となることがわかる。式(11)によるラチェットひずみ累積方向の予測は、ここで示した $R \cong -0.4$, $\theta_\sigma \cong 15^\circ$ 付近では、実験結果より若干大きめ

の値を示しているが、この差はあまり大きくない。

4.2 最大相当応力一定・応力比が変動する場合

図5(a), (b)は、それぞれ最大相当応力が一定で、応力比を繰返し数とともに漸増・減した場合の塑性ひずみ累積量および塑性ひずみ軌跡の例である。また、図6(a), (b)は、応力比をステップ状に増減した場合の塑性ひずみ累積挙動の例である。これらの図中の破線は、式(8), (11), (12)を用いた計算結果である。図5(a)に示す応力比が漸増・減する場合 ($\dot{R} \neq 0$) には、同一の繰返し応力条件であっても、単軸応力下 ($\theta_\sigma = 0$) の場合のひずみ累積量が多軸応力下 ($\theta_\sigma \cong 15^\circ$) の場合よりも大きくなっており、式(8), (11), (12)を用いた計算結果は単軸応力下の実験結果に近い値となっている。それにひきかえ、応力比がステップ状に変動する場合 (変動時以外は $\dot{R} = 0$) の塑性ひずみ量は単軸応力下と多軸応力下で大きな差が認められない。ところで、応力経路折曲げ角 θ_σ が一定の条件下で応力比 R が変動する場合のラチェットひずみ進行方向の変化率 $\dot{\theta}_\sigma$ は、式(11)を微分することにより次のように書き表せる。

(a) 累積ひずみ量と繰返し数の関係

(b) 塑性ひずみ軌跡

図4 応力比一定・最大相当応力がステップ状に変動する場合のラチェット変形

(a) 累積ひずみ量と繰返し数の関係

(b) 塑性ひずみ軌跡

図5 最大相当応力一定・応力比が漸増(減)変動する場合のラチェット変形

$$\dot{\theta}_e = -\xi D \exp(-\xi R) \theta_e^2 \dot{R} \dots\dots\dots (18)$$

したがって、多軸応力下 ($\theta_e \neq 0$) で応力比 R が漸増・減を繰返す場合 ($\dot{R} \neq 0$) にラチェットひずみ累積速度が減少する傾向は、式(18)より、ラチェットひずみ進行方向が変化するとき ($\dot{\theta}_e \neq 0$) にラチェットひずみ速度が小さくなるといえる。そこで、ラチェットひずみ進行方向変化率 $|\dot{\theta}_e|$ の大きさによってひずみ累積速度がどの程度変化するかについて調べてみる。図7に、式(8)より計算されるラチェットひずみ量 $\bar{\epsilon}_i^r$ と実験より得られた二軸応力下の相当ラチェットひずみ量

$\bar{\epsilon}^r$ の比 $\bar{\epsilon}^r/\bar{\epsilon}_i^r$ と式(8)より計算される $|\dot{\theta}_e|$ の関係を示す。ここで、本実験条件では、 $|\dot{\theta}_e|$ は繰返し数によって一定値ではないので、各実験ごとの中央値を便宜的に採用している。図7より、 $|\dot{\theta}_e|$ が大きいほど、すなわちラチェットひずみ進行方向の変化が激しいほどラチェットひずみ累積速度が小さくなる傾向があるこ

(a) 累積ひずみ量と繰返し数の関係

(b) 塑性ひずみ軌跡

図6 最大相当応力一定・応力比がステップ状に変動する場合のラチェット変形

図7 ラチェットひずみ進行方向変化率 $|\dot{\theta}_e|$ と累積ひずみ量 $\bar{\epsilon}^r/\bar{\epsilon}_i^r$ の関係

図8 g と $|\dot{\theta}_e|$ の関係

(a) 累積ひずみ量と繰返し数の関係

(b) 塑性ひずみ軌跡

図9 最大相当応力と応力比がともに変動する場合のラチェット変形

とがわかる。

5. 二軸変動応力下のメカニカルラチェット構成式

4・2節で述べたように、ラチェットひずみ進行方向変化率 $|\dot{\theta}_e|$ が大きくなるほどひずみ累積速度が小さくなるので、式(8)を修正して、二軸変動応力下のメカニカルラチェット構成式を次のようにおいてみる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}^r &= \dot{\epsilon}^r (\cos \theta_e e_1 + \sin \theta_e e_2) \\ \theta_e &= D \exp(-\xi R) \theta_e^0 \\ \dot{\epsilon}^r &= g(|\dot{\theta}_e|) \\ &\quad \times \alpha C^{1/\alpha} \exp(-\gamma R/\alpha) \bar{\sigma}_{\max}^{\beta/\alpha} \bar{\epsilon}^{r(1-1/\alpha)} \end{aligned} \right\} \dots (19)$$

ここで、 $g(|\dot{\theta}_e|) \cdot (\leq 1)$ は $|\dot{\theta}_e|$ の単調減小関数であるが、この具体形は実験から次のように求めることができる。 $|\dot{\theta}_e|$ が繰返し数 N によらず一定の場合、すなわち $g(|\dot{\theta}_e|)$ が繰返し数によらない定数として扱える場合を仮定する。このとき、式(19)の第3式を積分すると、

$$\left. \begin{aligned} g &= \bar{\epsilon}^{r(1/\alpha)} / \int_0^N h(\bar{\sigma}_{\max}, R) dn \\ h(\bar{\sigma}_{\max}, R) &= C^{1/\alpha} \exp(-\gamma R/\alpha) \bar{\sigma}_{\max}^{\beta/\alpha} \end{aligned} \right\} \dots (20)$$

となる。また、式(20)において $g=1$ とおくと、

$$\int_0^N h(\bar{\sigma}_{\max}, R) dn = \bar{\epsilon}^{r(1/\alpha)} \dots (21)$$

となるので、式(21)を式(20)に代入すると、

$$g = (\bar{\epsilon}^r / \bar{\epsilon}_u^r)^{1/\alpha} \dots (22)$$

が得られる。図8は、実験より得られた g と $|\dot{\theta}_e|$ の関係を示したものであるが、 g は次式で近似できる。

$$g = 1 - 0.9(1 - e^{-500|\dot{\theta}_e|}) \dots (23)$$

構成式(19)、(23)を用いた二軸変動応力下のラチェット変形挙動の計算結果を図3～6の実線で示す。また、図9(a)、(b)は、それぞれ最大相当応力と応力比がともに繰返し数とともに変動する場合の累積塑性ひずみ量および塑性ひずみ軌跡の実験結果と計算値の比較の例である。これらの図より、新たに提案した構

成式による計算結果は実験結果と比較的良好一致していることがわかる。

6. 結 言

二軸応力下のメカニカルラチェット変形挙動におよぼす最大相当応力と応力比の変動の影響について実験的検討を行った。得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 二軸応力下で応力比が変動するとき、すなわちひずみ累積方向が繰返し数とともに変化するときにはラチェットひずみ累積速度が減少する。

(2) ラチェットひずみの累積方向におよぼす最大相当応力と応力比の変動の影響は小さく、この方向は応力比と応力経路折曲げ角のみの関数となる。

(3) 提案した二軸変動応力下のメカニカルラチェット構成式によるひずみ累積挙動の予測は実験結果と比較的良好一致した。

本研究の実験に多大な協力をいただいた広島大学学生〔現在興亜石油㈱〕上田秀樹氏に深く感謝いたします。

文 献

- (1) Coffin, L. F., *Trans. ASME, Ser. D*, 82-3 (1960), 671.
- (2) Freudenthal, A. M. and Roney, M., *Proc. R. Soc., Ser. A*, 294 (1966), 4.
- (3) Mróz, Z., *Acta Mech.*, 7 (1969), 199.
- (4) 鶴戸口・ほか3名, 機論, 42-359 (昭51), 1982, 1993.
- (5) 田中・ほか2名, 機論, 42-358 (昭51), 1685.
- (6) 吉田・ほか3名, 機論, 43-371 (昭52), 2500.
- (7) 金子, 機論, 46-403, A (昭55), 505.
- (8) 吉田・ほか3名, 第26回材料研究連合講演会前刷集 (昭57-9), 157.
- (9) 吉田・ほか2名, 機論, 45-395, A (昭54), 769.
- (10) 吉田・ほか2名, 機論, 46-407, A (昭55), 788.
- (11) 白鳥・吉田, 機論, 46-409, A (昭55), 968.
- (12) ИАБЮШИН, А. А., *Прикл. Мат. и Мех.* 18(1954), 458.

討 論

〔質問〕 井上達雄〔京都大学工学部〕

二軸応力下のメカニカルラチェットに関して興味ある研究と拝察する。

(1) 単軸応力下のラチェット挙動に関する式(7)は、小さな応力が先行する場合、その効果はラチェットひずみ速度に影響を与えないことを意味している。しかしその繰返し回数が大きかったり、それが負荷される時期によってはかなり大きな効果をもつことが予

想されるがいかかか。

(2) 二軸応力下のラチェットにおける応力比 R はどのように定義されたか。図1のように σ_a が一定の場合には、 $R = \bar{\sigma}_{\min} / \bar{\sigma}_{\max}$ とされたようにみうけられるが、 σ_2 も変動する場合には、どのように考えればよいのか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、小さな繰返し応力が先行するときには $\bar{\epsilon}^r$ が小さいため、本構成式か

付図1 応力比 R , 定常応力 σ_d の決定法

らは、ラチェットひずみ速度におよぼす先行応力の効果は小さくなる。ただし、繰返し回数が大きくなると $\bar{\epsilon}'$ が大きくなるため、引き続きラチェット速度減少におよぼす効果は大きくなる。負荷の順序の影響もすべ

て累積ラチェットひずみ $\bar{\epsilon}'$ を通して表現される。なお、単軸応力下における本構成式の妥当性は、炭素鋼 (S45C), Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM439), 黄銅 (B5BM²) について実験的に確かめている。〔文献(8), (9)〕

(2) 本論文では σ_d = 一定かつ σ_d が $\bar{\sigma}_{\max}$ に比較して小さい場合についてのみ扱い、応力比は $R = \bar{\sigma}_{\min} / \bar{\sigma}_{\max}$ と定義している。実際には、ご指摘のとおり σ_d が繰返し数とともに変動する場合が一般的と思うが、この場合については現在検討中である。なお、実際の構造物に繰返し負荷が作用する場合の計算では、外力の最大・最小値が与えられる場合が多いと思われるので、最大・最小外力に対応する応力ベクトル $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ を用いて、付図1に示すように応力比 $R = \bar{\sigma}'_{\min} / \bar{\sigma}'_{\max}$ および σ_d を求めることになる。

50 巻 452 号, A 編 (昭 59-4) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
大路清嗣 ほか	724	式(1)		$\{(n+1)/(n-1)\}$	$\{(n-1)/(n+1)\}$
	725	右	4	白い線上	白い線状
妹尾允史 ほか	745	左	下 21	} 伝導子	伝導電子
	〃	〃	〃 19		
	〃	〃	〃 9		
	〃	右	下 13	誘電関係	誘電関数
	746	左	下 16	式(19)	式(18)
	749	左	25	一軸変形の関係	一軸変形の関数
菅原幸夫 ほか	770	左	2	676	767
	〃	右	4	調べるもいう	調べるという
江川幸一	773	左	21	しているかを	していたかを
	774	左	8	自己温度補償は	自己温度補償形は
	775	左	11	反転ページ	反転ゲージ
	776	文献(2)		<i>Pabl.</i> ,	<i>Publ.</i> ,
福田収一	780	右	下 6	KP	KR
	783	左	3	PROCOG	PROLOG
	〃	右	14	考えるのか視点	考えるかの視点
金子堅司	788	右	28	$m_1=0.86$	$m_1=1.00$
	790	左	12	処理状態前加工状態	処理状態・前加工状態
	〃	右	下 4	ϵ_{et}	ϵ_{ef}
高久田和夫 ほか	802	右	下 6	き裂が一つ	き裂が二つ
渋谷寿一 ほか	805	左	5	実際には端面が	実際にはパンチ端面が
	807		下 1	受ける場合の理解論は ⁽⁵⁾	受ける場合の理論解は ⁽⁵⁾
	808	式(16) 第1式		$\cos\left(\alpha \ln \frac{a+x}{a-x} dx\right)$,	$\cos\left(\alpha \ln \frac{a+x}{a-x}\right) dx$,
	811	左	14	に増加して $r+a$ で	に増加して $r=a$ で
	〃	文献(4)		Erdélyi, A.,	Bateman,
清家政一郎 ほか	815	左	下 7	観察	観察