

第 9 回

構造工学における数値解析法シンポジウム論文集

Proceedings of the 9th Symposium on
Computational Methods in Structural Engineering
and Related Fields

— 日本鋼構造協会創立20周年記念大会研究発表 —

昭和60年7月

日本鋼構造協会

繰返し荷重に対する構造用鋼材の高精度応力-ひずみモデル
AN ACCURATE STRESS-STRAIN MODEL OF STRUCTURAL STEELS FOR CYCLIC LOADING

菅川 勝¹⁾, 西脇威夫²⁾, 増田陳紀³⁾, 斎藤哲郎⁴⁾

1. はじめに 構造物がたとえば地震などによって複雑な変動荷重を受ける場合には、部材あるいはその局部に弾性域を越える応力が繰返して生じることがある。この場合、たとえ構造物が崩壊に至らないとしても、荷重履歴の効果によって構造物の耐荷力あるいは変形状が設計時に推定されたものとは異なっていることが予想される。著者らは土木構造物におけるこの問題を検討する上での重要な基礎として、主要な土木材料のひとつである鋼材の力学的性質におよぼす荷重履歴の影響を調べデータの蓄積を行ってきた[1]。本研究は、それらの実際の鋼材の挙動を対象として、ほぼ単軸と考えられる応力場において複雑に変化する準静的な履歴応力-ひずみ関係を、工学的に意味のある範囲で簡略にかつ精度良く表現し得るようにモデル化することを目的としたものである。鋼材の履歴応力-ひずみ関係に関する研究はこれまでもなされている(例えば[2]~[8])が、任意の負荷経路に適用することが可能であり、しかも材料パラメータの決定方法が明確かつ簡便であって、さらに任意の鋼材に容易に適用することのできる応力-ひずみモデルは少ない。これらの諸条件を満たす可能性のあるモデルのひとつとして、Petersson, Popov[7],[8]の多曲面塑性理論を用いたモデル(以後“P.P.モデル”と呼ぶ)がある。このモデルは、理論的に比較的明快で、しかも多くの試験を必要としないという利点を持つ。しかし、その一方、特に材料パラメータの決定方法が確立されているとは言いがたく、利用にあたっては未解決の部分も多い。本研究では、P.P.モデルを基本として、それでは不十分である履歴効果の評価に配慮した高精度応力-ひずみモデルを構成する。そして、任意の鋼材に対して本モデルを適用するうえで必要となる材料パラメータを決定するための測定方法ならびにその結果の適用方法について述べ、いくつかの構造用鋼材の実際の履歴応力-ひずみ関係と本モデルを適用して計算した結果を比較し、本モデルが工学的に十分な精度を持つことを示す。

2. 高精度応力-ひずみモデル P.P.モデルは、履歴応力-ひずみ挙動を主応力空間に定義された曲面の拡大・縮小ならびに移動によって表現している。各々の曲面はその大きさを表わす関数Kと中心座標を表わすベクトル{α}によって定義され、Kおよび{α}を荷重履歴の進行に伴って変化させることによって、応力-ひずみ関係に履歴効果が導入されている。同モデルでは、履歴効果の程度を表わす状態変数として次の2量を採用している。

$$\bar{\epsilon}_p = \int_{t_0}^{t_c} d\bar{\epsilon}_p, \quad \bar{\epsilon}_{pi} = \int_{t_c}^{t_i} d\bar{\epsilon}_p \quad \text{---(1)}$$

ここで $\bar{\epsilon}_p$ は載荷開始時 t_0 から応力-ひずみ経路の最も新しい反転が生じた時点 t_c までの累積相当塑性ひずみであり、 $\bar{\epsilon}_{pi}$ は t_c から現時点 t_i までの相当塑性ひずみ増分である。P.P.モデルではFig.1に示すこの2量に対する関数として求められる K_a, K_b および W を用いて曲面の大きさ K を次式によって定義している。

$$K = W K_a + (1 - W) K_b \quad \text{---(2)}$$

ここに K_a は履歴効果のない場合の曲面の大きさを表わし、 K_b は履歴効果が定常的になった場合のそれを表わしており、これらは $\bar{\epsilon}_{pi}$ の関数である。また、 W は曲面の大きさが履歴の進行に伴って K_a から K_b へと移行変わることを表現するもので $\bar{\epsilon}_p$ の関数であり、数値計算により決定するものとなっている。P.P.モデルはこれらの3つの関数を基本的な材料特性として曲面の大きさを表現するものである。

また、曲面の中心位置を表わすベクトル{α}は微小ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_p$

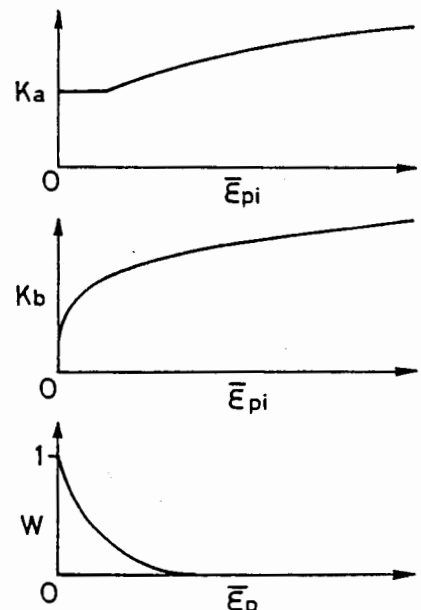


Fig.1 Petersson-Popov model.

1)武蔵工業大学 助手 工修, 2)武蔵工業大学 教授 工博, 3)武蔵工業大学 助教授 工博, 4)川田工業 工修
(研究当時 武蔵工業大学大学院)

の前後の2つの曲面 (i, j 曲面) の大きさの差と負荷の方向から次式により、負荷の進展に伴い順次更新される。

$$(\alpha_i) = (\alpha_j) + \left(\frac{(\sigma) - (\alpha_0)}{K_0} \right) (k_j - k_i) \quad (3)$$

(σ): 現在の応力状態を表わすベクトル
 添字0は初期状態を、ドットは更新前を表わす

提案するモデルはP.P.モデルを基本としてはいるが、それだけでは高精度な応力-ひずみ関係の推定には不十分である。以下に高精度応力-ひずみモデルの主な特徴を示す。

(1) 累積相当塑性ひずみとその評価 P.P.モデルでは、ある径路での応力-ひずみ挙動はそれまでの累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ のみによって定まるとする仮定が採用されており、本研究で提案するモデルにおいても、この仮定を準用する。繰返し載荷の過程における相当塑性ひずみの累積方法は以下に示すような測定結果と矛盾のないような方法をとる。Fig.2 において実線は繰返し載荷時の、破線は単調載荷時の応力-ひずみ曲線の例であり、それぞれ① および①'で荷重を反転させた場合のものである。ここで、全径路にわたって塑性ひずみを累積した場合には、① および①'での累積塑性ひずみは前者の方が大きいにも拘らず、反転後の応力-ひずみ関係はほとんど同じである。この現象は、繰返し載荷において生じる塑性ひずみが、その後の応力-ひずみ挙動に影響するものとし、分離されると考えることによって理解できる。横尾、中村ら [2] は Fig.3 において “②→③ の径路におけるひずみ振幅 E_{2-3} が ①→② でのそれ E_{1-2} より小さい場合、③からの応力-ひずみ曲線は ②の近傍の点②'を経て、その後 ②で反転しなかったならばたどったであろう曲線上をたどる” という現象を実験より確認し、これを復帰現象と名付けた。この現象を本問題に対して適用すれば、③からの径路が ①→②→④ の径路に復帰するという事は、②→③→②'の径路がその後の応力-ひずみ挙動になんら影響をおよぼしていないことを示している。上記の測定データをもとに、繰返し載荷中のある一径路において生じる塑性ひずみのうち、直前回の径路での塑性ひずみ振幅を越えた分のみが履歴効果を有するものとし、これをすべての径路について累積する。

(2) 新たな材料特性の導入 Fig.4 は引張圧縮試験における応力-ひずみ関係の一例である。通常、鋼材を引張ると、弾性部分に続いて降伏棚とひずみ硬化現象が現れる (径路 0-A-B-C-D-E)。また、降伏棚の途中で除荷が起きると、Bauschinger 効果が現れるが、その後圧縮領域において再び降伏棚が出現する (径路 0-A-B-B')。さらに、引張領域におけるひずみ硬化の時点で除荷が起これば、もはや圧縮領域では降伏棚は現れない (径路 0-A-C-C')。この現象はひずみ硬化域において除荷が起きた場合でも同様である (径路 0-A-D-D') が、Bauschinger 効果の程度は異なる。すなわち、降伏棚を終了する以前に除荷が起る場合には履歴の進行に伴う降伏棚の消失が、またそれ以後に除荷が生じる場合にはBauschinger 効果の変化 (いわゆる“繰返し硬化”あるいは“繰返し軟化”) が特徴的である。そして、これを表現し得ることが測定結果と適合する応力-ひずみモデルであるための条件のひとつであると考えられる。しかるに、P.P.モデルは上記のふたつの場合に対して共通の重み関数 W を用いていることから、この条件を満足しないモデルとなっ

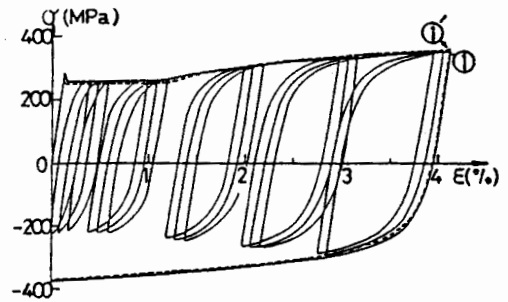


Fig.2 Accumulation of strain in cyclic tests.

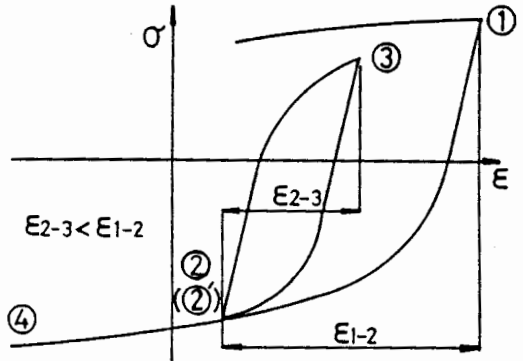


Fig.3 Return phenomenon.[2]

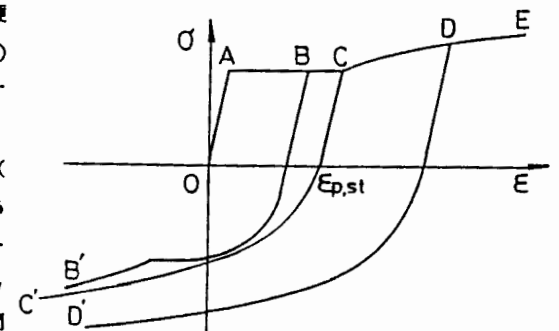


Fig.4 Unloading on yield plateau.

ている。この点を改良するために、本研究で提案するモデルでは、累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ が処女材のひずみ硬化開始時の塑性ひずみ $\epsilon_{p,st}$ に達した時の曲面の大きさ K_{ab} が、基本となる材料特性として新たに導入された。

(3) 重み関数とその定義 P.P.モデルでは重み関数 W が $\bar{\epsilon}_p$ のみの関数であり $\bar{\epsilon}_{pi}$ に対しては一定である仮定としているが、この理由は重み関数を数値計算的な試行錯誤によって実験結果と合うように決定していることから、その内容に曖昧さが残されているため、およびモデルをなるべく簡単にするためであると推測される。しかし、本研究で示すように、鋼材の現実の挙動に忠実なモデルを構成するという観点からは、重み関数は $\bar{\epsilon}_{pi}$ に対しても変化するものとして、 $W = W(\bar{\epsilon}_p, \bar{\epsilon}_{pi})$ と表わすことが必要である。このように定義される W を、すでに定義した K_a, K_{ab} および K_b に対応させて W_1 と W_2 とし、それらを用いて次式によってある履歴段階での曲面の大きさ K を定義する。

$$K = \begin{cases} W_1 K_a + (1 - W_1) K_{ab} & : 0 \leq \bar{\epsilon}_p < \epsilon_{p,st} \\ W_2 K_{ab} + (1 - W_2) K_b & : \epsilon_{p,st} \leq \bar{\epsilon}_p \end{cases} \quad \text{---(4)}$$

ここで、 $\bar{\epsilon}_p = 0$ の時 $W_1 = 1$ 、 $\bar{\epsilon}_p = \epsilon_{p,st}$ の時 $W_1 = 0$ かつ $W_2 = 1$ である。さらに、履歴が定常になった時の累積塑性ひずみを $\epsilon_{p,b}$ とすれば、 $\bar{\epsilon}_p = \epsilon_{p,b}$ の時 $W_2 = 0$ である。関数 W_1 は、降伏棚とひずみ硬化域を有する処女応力-ひずみ曲線から、Bauschinger 効果が支配的ななだらかな曲線への移行変わりを、 W_2 は履歴の進行に伴う繰返し軟化あるいは繰返し硬化を表現するための材料に固有の関数である。

(4) 弾塑性応力-ひずみマトリックス 曲面の大きさ K と中心座標ベクトル $\{\alpha\}$ の概念および Prandtl-Reuss の流れ則から、弾塑性応力-ひずみマトリックスは次式のように求まる[9]。

$$[D_p] = [D_e] - \frac{[D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e]}{-A + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}}, \quad -A = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \left\{ \frac{\partial \alpha}{\partial \bar{\epsilon}_p} \right\} \cdot \frac{\partial K}{\partial \bar{\epsilon}_p} \quad \text{---(5)}$$

$[D_e]$: 弾性応力-ひずみマトリックス
 $\{\sigma\}$: 現在の応力状態を表わすベクトル
 f : 降伏関数

3. 材料特性の評価方法 P.P.モデルを示す文献[7] および[8]には、モデルを実際の材料に対して適用する場合に必要な材料特性の評価方法が明確に示されず、特に重み関数の決定に数値計算が入っているが、これはモデル構成の目的に好ましいことではないと考えられる。そこで、本研究で提案したモデルを鋼材の履歴挙動の推定に用いるために必要な材料特性 K_a, K_{ab}, K_b, W_1 及び W_2 を決定するために必要な測定とその結果の適用方法を提示する。本研究で提案したモデルは、ある負荷あるいは除荷時の応力-ひずみ挙動がそれまでの累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ のみによって定まるという仮定によって、単調載荷試験と唯一回の荷重反転を含む引張圧縮載荷試験のみによって材料特性が評価できる。以下に材料特性の評価の手順を示す。

- 1) 履歴効果のない場合の曲面の大きさ K_a を求める。 処女応力-塑性ひずみ曲線が K_a を表わす。
- 2) 累積相当塑性ひずみが $\epsilon_{p,r}$ である時の、それに対応する曲面の大きさ K_i を求める。 塑性ひずみが $\epsilon_{p,r}$ になるまで単調に負荷したのち荷重を反転させて得られる応力-塑性ひずみ曲線と処女応力-塑性ひずみ曲線とを用いて $\bar{\epsilon}_{pi}$ の関数として K_i は求められる。 K_i の算出方法を Fig.5 に示す。反転点 O' を原点として、 $\sigma_i - \bar{\epsilon}_{pi}$ および $\sigma'_i - \bar{\epsilon}'_{pi}$ 座標を設定する。次に $\bar{\epsilon}_{pi}$ と $\bar{\epsilon}'_{pi}$ とが等しい点における応力値 σ_i と σ'_i を用いて次式から K_i が求められる。

$$K_i = [\sigma'_i(\bar{\epsilon}_{pi}) + \sigma_i(\bar{\epsilon}'_{pi})] / 2 \quad \text{---(6)}$$

3) K_{ab} および K_b を求める。 K_{ab} は $\bar{\epsilon}_p = \epsilon_{p,st}$ の場合の K_i であるから、降伏棚終了時まで負荷した後、荷重を反転させて得られる応力-塑性ひずみ曲線を用いて、Fig.5 に示した方法で求めることができる。 K_b は履歴効果が定常的になったときの K_i である。 K_b を求めるには、まず、累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ を何通りかに設定して、各々の場合について K_i を上記のように試験より求める。そして、 $\bar{\epsilon}_p$ の増加に対して K_i がほぼ同じ関数となれば、 K_i が $\bar{\epsilon}_p$ に対して収束している、すなわち履歴効果が定常的になったと判断できる。また、試験が可能なひずみの範囲において K_i が収束しない場合には、 $\bar{\epsilon}_p$ のある値における K_i を K_b として採用する。このようにすると、累積相当塑性ひず

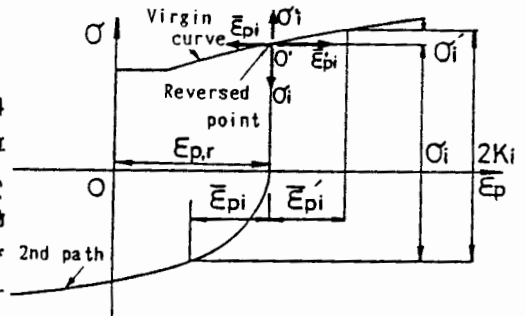


Fig.5 Evaluation of K_i .

みが測定可能な範囲での履歴性状を確実に把握することは可能であると考えられる。

4) W1 および W2 を求める。 K_a 、 K_b および K_{ab} を用いて、ある $\bar{\epsilon}_p$ に対応した曲面の大きさ K_i を求めるための重み W は次式から算出する。

$$W = \begin{cases} (K_i - K_{ab}) / (K_a - K_{ab}) & : 0 \leq \bar{\epsilon}_p < \epsilon_{p,st} \\ (K_i - K_b) / (K_{ab} - K_b) & : \epsilon_{p,st} \leq \bar{\epsilon}_p \end{cases} \quad \text{----(7)}$$

上式において、 K_i 、 K_{ab} 、 K_a および K_b は $\bar{\epsilon}_{pi}$ の関数であるから、 W も $\bar{\epsilon}_{pi}$ の関数として求まる。さらに、 W は各々の $\bar{\epsilon}_p$ によっても異なるものとなるので $W = W(\bar{\epsilon}_p, \bar{\epsilon}_{pi})$ のように示される。

4. 構造用鋼材への本モデルの適用

(1) 試験片および試験装置 供試鋼材は構造用鋼材の SM41A, SM50YB および HT70 である。Table 1 にミルシートによる鋼材の機械的性質を示す。なお、HT70 についてはミルシートが入手できなかったため、試験片による引張試験の結果を示した。用いた試験片の形状と寸法を Fig.6 に示す。用いた試験機は、容量 30 トンの万能疲労試験機（島津製作所製）である。引張圧縮の繰返し試験は、容量 20 トンの金属試験片用チャックを試験機に取り付けて実施した。荷重は試験機に設置されたロードセルにより検出し、ひずみは試験片の平行部の中央に貼付した 4 枚の塑性域用ワイヤーストレインゲージにより検出した。試験における制御量は、ストレインゲージによって検出された試験片中央断面でのひずみの平均値である。また、ひずみ速度は 0.0001 mm/mm/sec とした。

(2) 試験結果 Fig.7 に、SM41A について実施した試験の結果を真応力-対数塑性ひずみ曲線で示す。なお、試験結果の整理に当たっては、塑性変形における体積一定の仮定が採用され、応力は各試験片の下降伏点で無次元化されている。

(3) 材料特性の決定 SM41A に対する試験結果を用いて、3 節で述べた手順に従って K_a 、 K_{ab} 、 K_b 、 $W1$ および $W2$ を求める。なお曲面の大きさは下降伏点で無次元化して示す。

i) K_a 、 K_{ab} および K_b Fig.8 に算出された各材料特性を示す。Fig.9 は K_b を求めるために必要である $\bar{\epsilon}_p$ をパラメータとした $K_i - \bar{\epsilon}_{pi}$ 曲線群を示したものである。反転点での工学全ひずみ $e = 8\%$ の場合でも K_i は完全に収束しているとはいえないが、本適用例では試験における測定可能な最大値である $e = 8\%$ での K_i を K_b とする。

ii) $W1$ および $W2$ 本報告では降伏欄の領域で荷重の顕著な繰返しが起こる場合は検討の範囲から除外することとし、 $W1$ は暫定的に $\bar{\epsilon}_p$ の 1 次関数でしかも $\bar{\epsilon}_{pi}$ に対しては一定であると仮定する。Fig.10 は、(7) 式から得られる重み W と $\bar{\epsilon}_{pi}$ の関係を各々の $\bar{\epsilon}_p$ の値に対して示したものである。本適用例では、重み関数 $W2$ は任意の $\bar{\epsilon}_p$ に対して $\bar{\epsilon}_{pi}$ の 1 次関数とし、 $\bar{\epsilon}_{pi} = 0$ の時の $W2$ は $\bar{\epsilon}_p$ の 3 次関数とする。このようにして得られた重み関数を Fig.11 に示す。

5. 数値計算結果と試験結果との比較 4 節で求めた材料特性を用いて Fig.6 に示した試験体が繰返し引張圧縮荷重を受ける場合の F.E.M. 弾塑性解析を行い、その結果と試験によって得られた測定結果とを比較し、モデル化の妥当性について検討する。F.E.M. 解析における主な仮定は以下の通りである。

- i) 要素は定ひずみ三角形要素である，
- ii) 弾性及び塑性等方性である，
- iii) 要素の降伏判定は r_{min} 法による [9]，
- iv) 増分計算は、接線係数法による。

Fig.12 は相当塑性ひずみを全経路にわたって累積したものを累積相当塑性ひずみとして数値計算によって推定された

Table 1 Mechanical properties of materials.

Materials	Y. P. MPa	T. S. MPa	E l. %
SM41A	284	421	37
SM50Y	372	649	25
HT70	622	661	

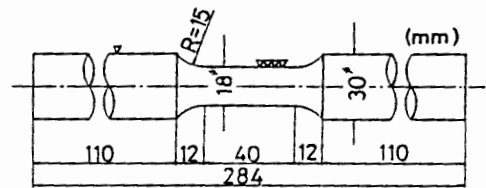


Fig.6 Test specimens.

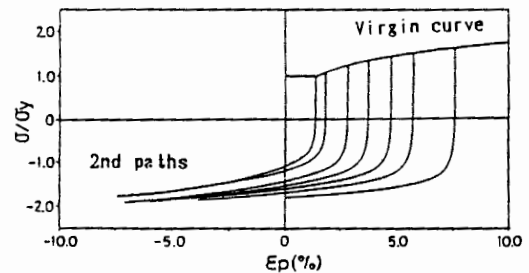


Fig.7 Experiments to evaluate material properties.

応力-ひずみ関係を実験によ
 って求められたそれと比較し
 たものである。図中の実線は
 数値計算結果を、破線は実験
 結果をそれぞれ示している。
 また、Fig.13は、2.(1)で述
 べた方法で相当塑性ひずみを
 累積した場合の数値計算結果
 と実験結果を比較したもので
 ある。これらの図より2.(1)
 で示した相当塑性ひずみの累
 積の方法がより適切であるこ
 とが数値計算によって確認さ
 れたものと思われる。Fig.14
 に他の負荷経路についての数
 値計算の結果を実験結果と合
 わせて示す。繰返しの初期に
 おけるBauschinger 効果が数
 値計算において過小に評価さ
 れている傾向がFig.13におい

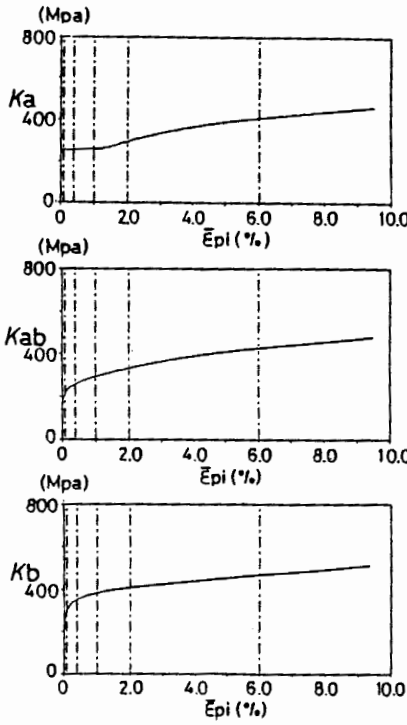


Fig.8 Ka, Kab, and Kb of SM41A.

てみられるが、これは重み関
 数 W_1 が $\bar{\epsilon}_p$ に対して直線的に減少すると仮定したことによるもので
 あると思われ、検討の余地が残されているものの、この点を除けば4
 節で述べた僅か数本の試験片による基本的試験のみから定めた材料特
 性を用いたにもかかわらず、F.E.M.解析により推定された応力-ひず
 み関係は実験結果とかなり良く一致している。また、本モデルはSM41
 A などの軟鋼にもHT70のような高張力鋼にも同様に適用できるモデル
 であることが本数値計算例から推察される。

6. おわりに 既存の応力-ひずみモデルを修正・改良して、実
 験結果を精度良く表わし得るモデルを新たに作成し、実際にモデルを
 適用する際に必要となる材料特性を決定するための測定方法ならびに

その結果の適用方法を示した。また、本モデルを3種類の構造用鋼材に対して適用し、数本の試験片による簡単な測定
 を行うことにより、履歴応力-ひずみ関係が数値計算から容易に推定できることを確認した。さらに、本研究で採用し
 た累積相当塑性ひずみの算出方法が履歴効果の程度を捉えるのに有効であることが明示された。

(参考文献) [1] 皆川, 西藤, 増田: Monotonous stress-strain properties of structural steel subjected to
 nonstationary repetitive pre-loading, The 27th Japan Congress on Materials Research, pp.25-31, 1984. [2]
 Yokoo Y., Nakamura T., Kawada Y.: Non-Stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relation of a Wide
 -Flange Steel (Part I), Proc. of A.I.J., No.259, pp.56-66, 1977. & Yokoo Y., Nakamura T.: Nonstationary
 Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relation of a Wide-Flange Steel (Part II), Proc. OF A.I.J., No.260, pp.71-
 81, 1977. [3] Kato B., Akiyama H., Yamanouchi Y.: Predictable Properties of Material Under Incremental
 Cyclic Loading, IABSE Symposiums, Theme III, Vol.13, pp.119-124, 1973. [4] Mroz M.: An Attempt to Describe
 the Behavior of Metals under Cyclic Loading Using a More General Workhardening Model, Acta Mechanica
 , Vol.7, pp.199-212, 1969. [5] 橋原, 宮武, 梁井, 道田: 任意の繰返し変動荷重を受ける鋼構造強度の弾塑性力学的
 解析, 日本造船学会論文集, 第150号, pp.398-412, 昭和56年. [6] 藤本, 中込, 山田: 繰返しを受ける鋼構造接合
 部の力学的挙動に関する非線形破壊力学的研究, 日本鋼構造協会第15回大会研究発表会マトリクス解析法研究発表論文集,
 pp.161-166, 昭和56年. [7] Pettersson H., Popov E.P.: Constitutive Relation for Generalized Loadings, Proc.
 of A.S.C.E., Vol.103, No.EM4, pp.611-627, 1977. [8] Popov E.P., Pettersson H.: Cyclic Metal plasticity
 : Experiments and Theory, Proc. of A.S.C.E., Vol.104, No.EM4, pp.1371-1388, 1978. [9] 山田: 有限要素法の基礎
 と応用シリーズ6 塑性・粘弾性, 培風館, 1970.

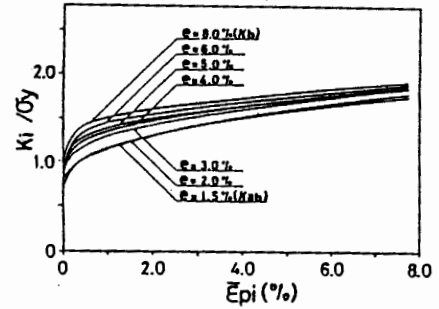


Fig.9 $K_i - \bar{\epsilon}_{pi}$ curves.

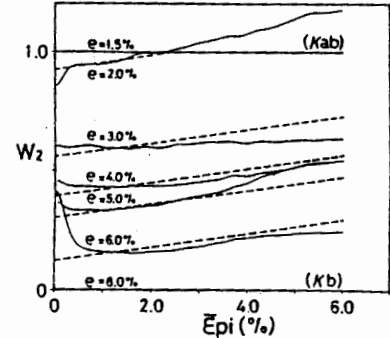


Fig.10 $W_2 - \bar{\epsilon}_{pi}$ curves.

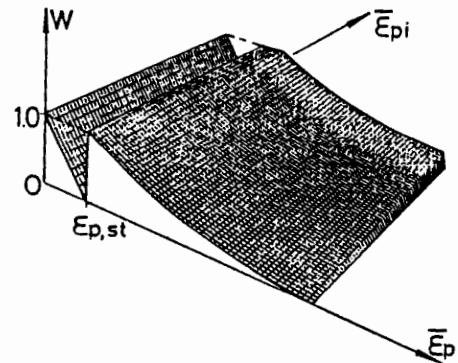


Fig.11 Weighting function of SM41A.

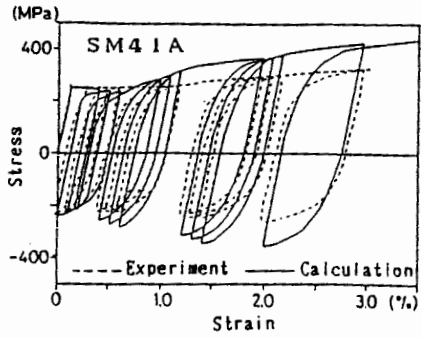


Fig.12 Experimental result and computational result using $\bar{\epsilon}_p$ integrated over all paths

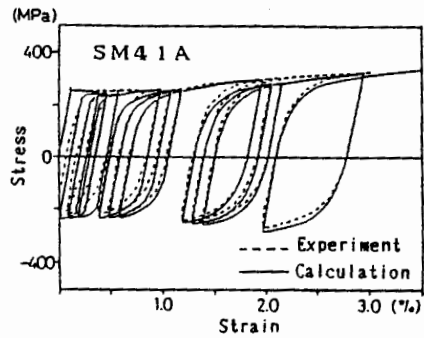


Fig.13 Experimental results and computational result using $\bar{\epsilon}_p$ integrated by the method shown in 2.(1).

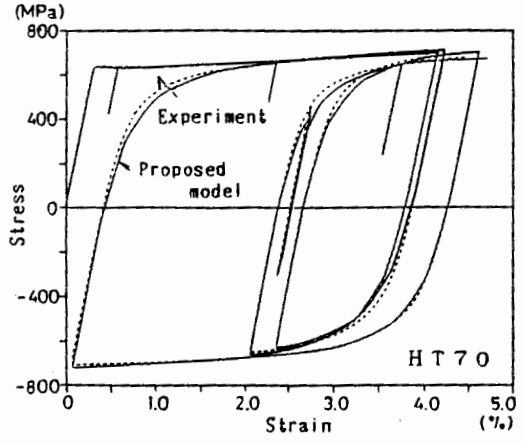
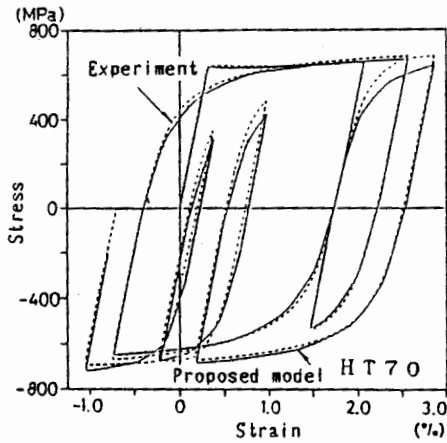
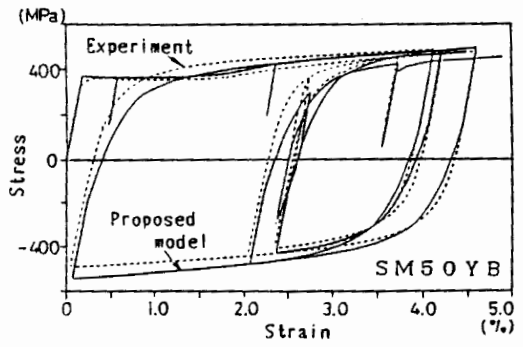
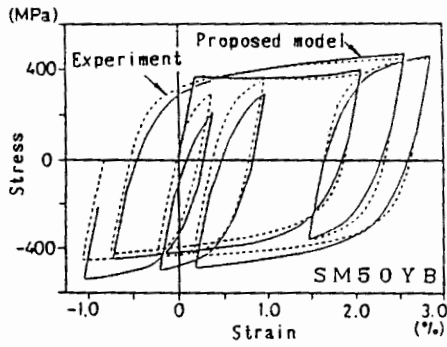
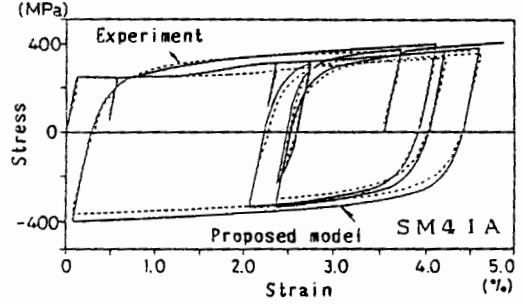
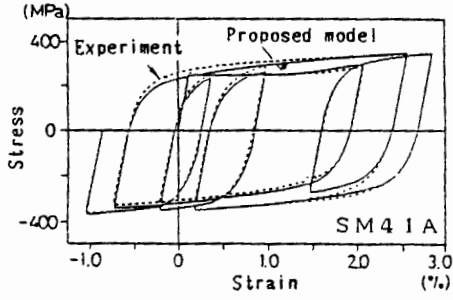


Fig.14 Stress-strain relations : comparison of experiment and proposed model.

AN ACCURATE STRESS-STRAIN MODEL
OF STRUCTURAL STEELS FOR CYCLIC LOADING

Masaru Minagawa¹⁾, Takeo Nishiwaki²⁾,
Nobutoshi Masuda³⁾ and Tetuo Saito⁴⁾

SUMMARY

In this paper we propose an accurate stress-strain model to estimate the elastic-plastic hysteretic behaviors of structural steels subjected to complicated cyclic loading in the medium strain range. Material's characteristic functions introduced in this model are K_a , K_{ab} , K_b , W_1 and W_2 , which are defined as the functions of equivalent plastic strain increment $\bar{\epsilon}_p$ and accumulative equivalent plastic strain $\bar{\epsilon}_p$. Subscripted K 's indicate sizes of characteristic multi-surfaces in the stress space corresponding to specific values of $\bar{\epsilon}_p$ and subscripted W 's are weighting functions. The sizes of multi-surfaces corresponding to arbitrary stress-strain conditions are

$$K = W_1 K_a + (1 - W_1) K_{ab} \quad ; \quad 0 \leq \bar{\epsilon}_p < \epsilon_{p,st}$$

$$K = W_2 K_{ab} + (1 - W_2) K_b \quad ; \quad \epsilon_{p,st} \leq \bar{\epsilon}_p$$

where $\epsilon_{p,st}$ is the plastic strain at the start point of strain hardening of virgin material. These characteristic functions can be easily and unambiguously estimated by a combination of a tension test and several tension-compression tests each including only one reversed point. The method to estimate them can be applied to both mild steels and high strength steels. Using these characteristic functions, elastic-plastic stress-strain relations of test specimens under random cyclic loadings are traced by finite element method. By comparing the results with those of corresponding experiments, it is confirmed that our stress-strain model was good accuracy as well as clearness.

1)M. JSCE, Research Assoc. 2)M. JSCE, Prof. 3)M. JSCE, Assoc. Prof.

Dept. of Civil Eng., Musashi Inst. of Tech, Setagaya-ku, Tokyo 158.

4)M. JSCE, Kawada Ind. Co. Ltd., Kita-ku, Tokyo 114.