

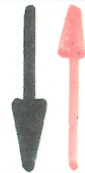
構造用鋼材の弾塑性履歴挙動の
モデル化とそれの構造部材への応用

皆川 勝

昭和62年11月11日

研究の背景

種々の変動荷重を受け、塑性変形の繰り返しを生じる構造物の安全性を評価する



応答解析を工学的に意味のある範囲精度良く実施する



繰り返し塑性ひずみを受ける材料の構成則をモデル化する必要性

構成則のモデルに必要な条件

- ①実測結果を精度良く表現できる
- ②材料特性が明快・簡便に決定できる
- ③既存の解析システムに容易に適用できる

既存のモデル

等方硬化モデル

繰り返し負荷に対するバウシंगा-効果を表現できない

移動硬化モデル

バウシंगा-効果はある程度表現できるが、繰り返し負荷に伴うひずみ硬化率の変化を表現できない。

加工硬化係数場モデル (多曲面塑性モデル)

異方硬化特性を表現できるが、比例負荷に対して区分的な線形応力-ひずみ関係となり、また、多曲面の取り扱いが煩雑である。

2曲面モデル (境界曲面モデル)

多曲面を扱う煩雑さがなく、修正モデルも比較的多く提案されているが、小さいひずみ振幅での繰り返しがある場合に実測結果と一致しない欠点がある。

Petersson-Popovモデル

2曲面モデルの上記の欠点を解消するために、多曲面モデルの考え方を再導入したモデルで、多曲面の取り扱いが煩雑であるという欠点を、補間法を用いて避けている。

例えば、

はり一柱の強度及び変形特性は非弾性解析によつて正しく評価される。

複雑な形状を有する構造部分の脆性破壊量の複雑な疲労亀裂を伝播する非線形破壊力学的に扱ふ。

低サイクル疲労強度に、繰り返し応力一影響をみる。

目 的

構造用鋼材の挙動を、ひずみ速度論的に示すに依り、存取しりれとな扱のいう構造用返材の塑性を析へ、挙動を適用する速象と性を示す。

研究の構成

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける鋼材の構成則をモデル化する
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された材料特性を評価するための基本測定方法の提案

PART-3

提案モデルによる鋼材の引張圧縮履歴応力-ひずみ関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの履歴曲げモーメント-曲率関係の推定とその妥当性の検証

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

PART-3

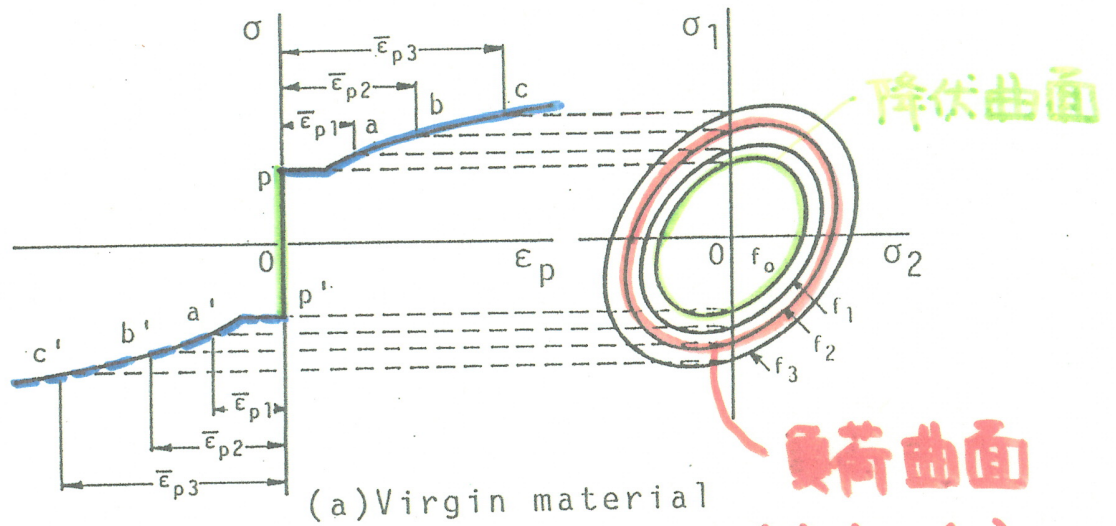
提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

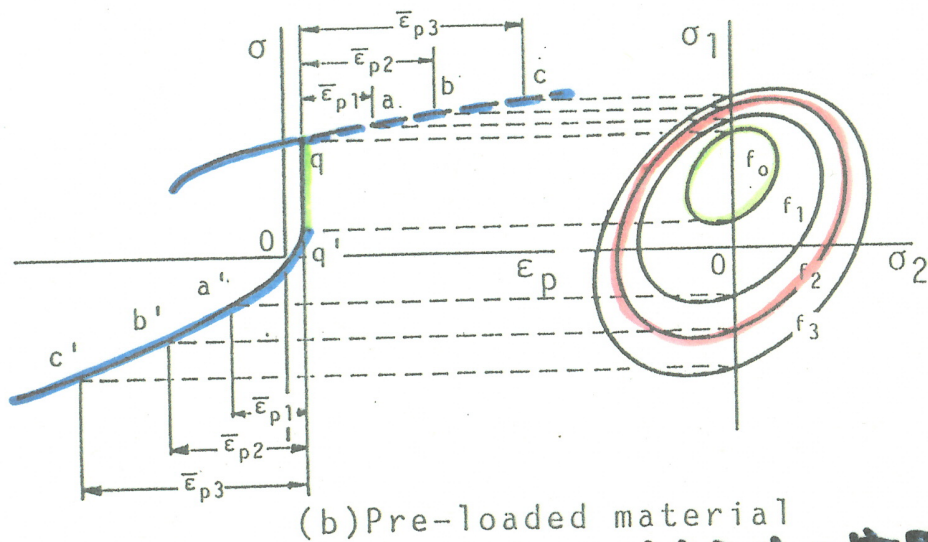
多曲面塑性モデル (Pettersson-Popov モデル) の概念

負荷履歴のない材料



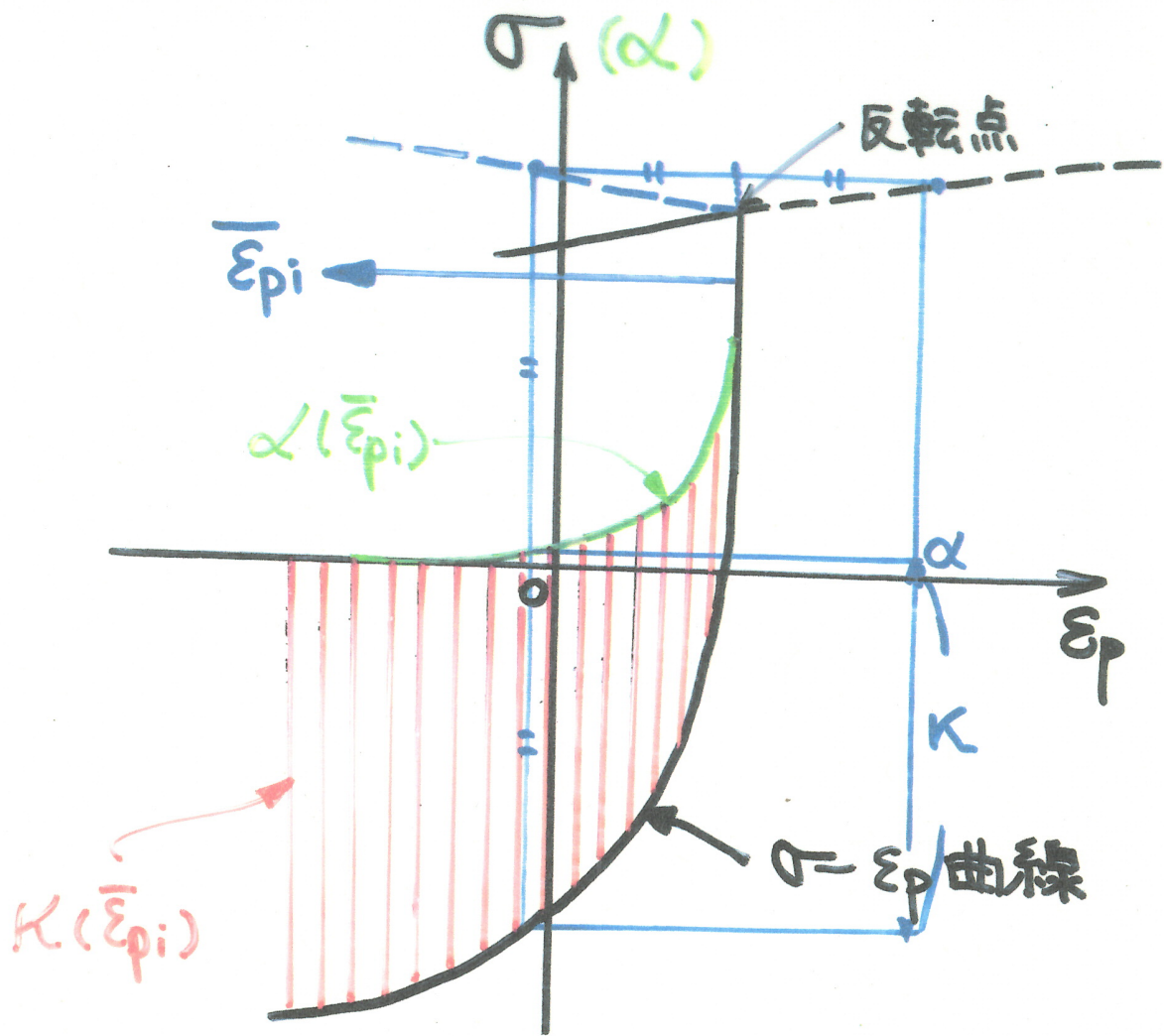
大きさに
中心が) で定義
される

負荷履歴のある材料



単軸応力-塑性ひずみ
曲線


2軸主応力空間
での多曲面の挙動



応力-塑性ひずみ曲線と K, α の関係

状態変数の定義

$$\text{相当塑性ひずみの総和} = \text{累積相当塑性ひずみ} + \text{相当塑性ひずみ増分}$$

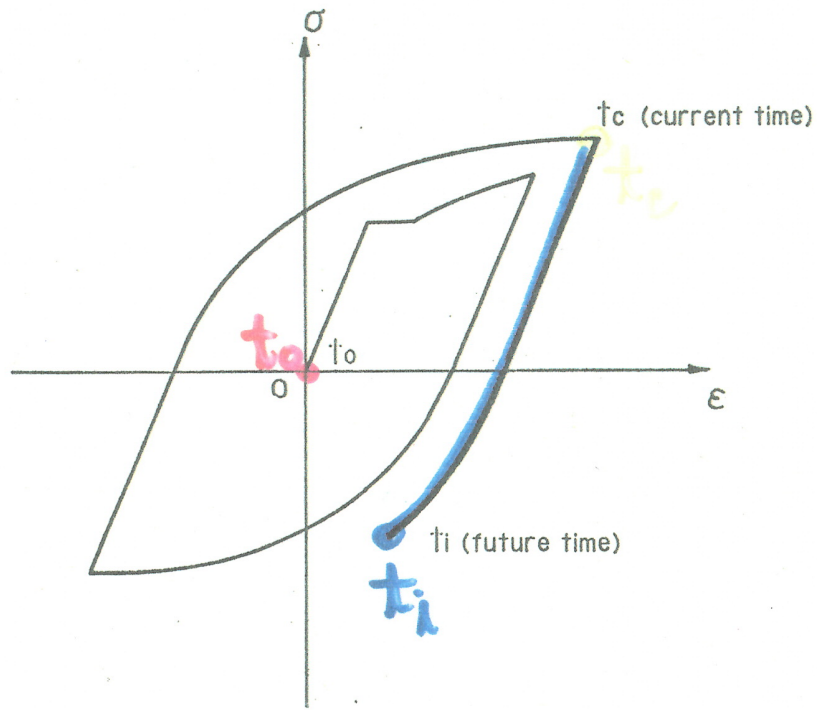

$$= \text{累積相当塑性ひずみの有効分} + \text{累積相当塑性ひずみの無効分}$$

$$+ \text{相当塑性ひずみ増分}$$

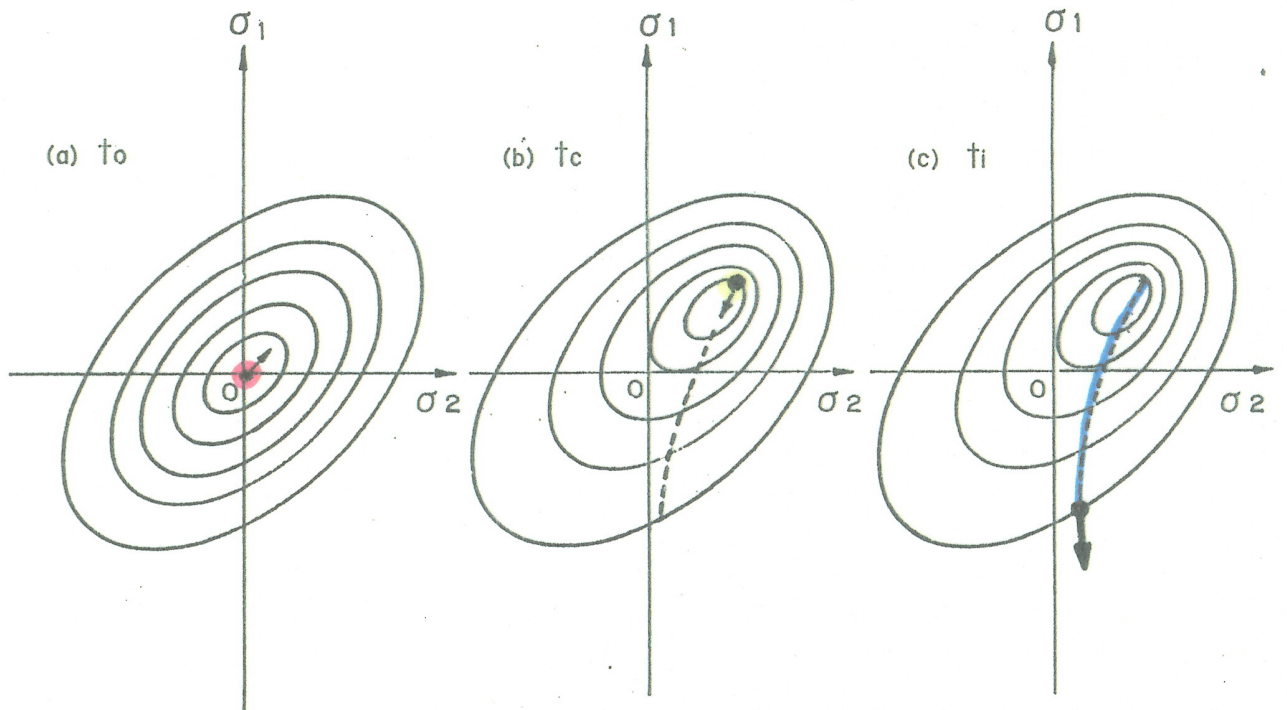
$$\geq \text{累積相当塑性ひずみの有効分} + \text{相当塑性ひずみ増分}$$

$$\bar{\epsilon}_p = \int_{t_0}^{t_0} d\bar{\epsilon}_p$$

$$\bar{\epsilon}_{pi} = \int_{t_0}^{t_i} d\bar{\epsilon}_p$$



(a) Uni-axial condition



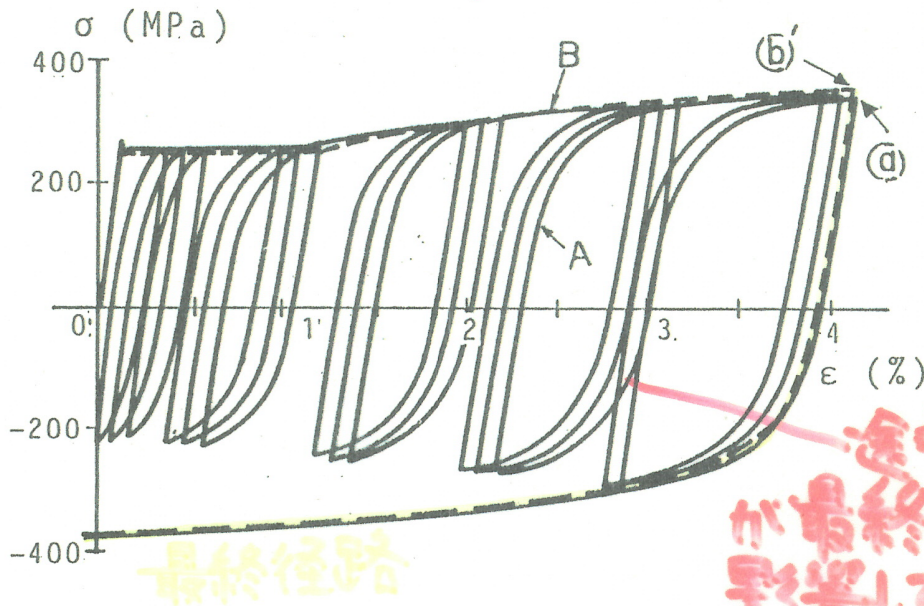
(b) Bi-axial condition

初期状態 t_0

直前の履歴 t_c

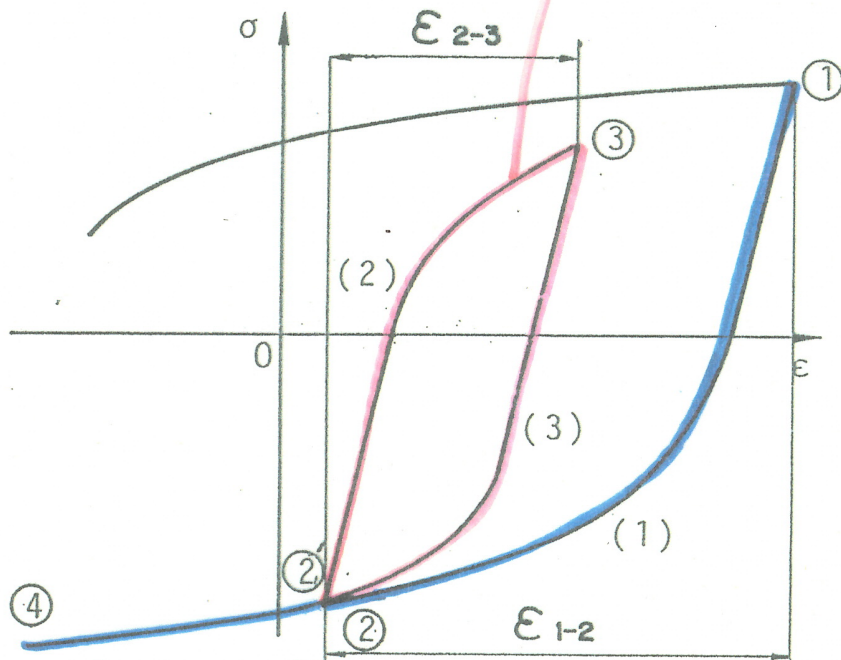
現時点 t_i

軟鋼に対する実験結果.



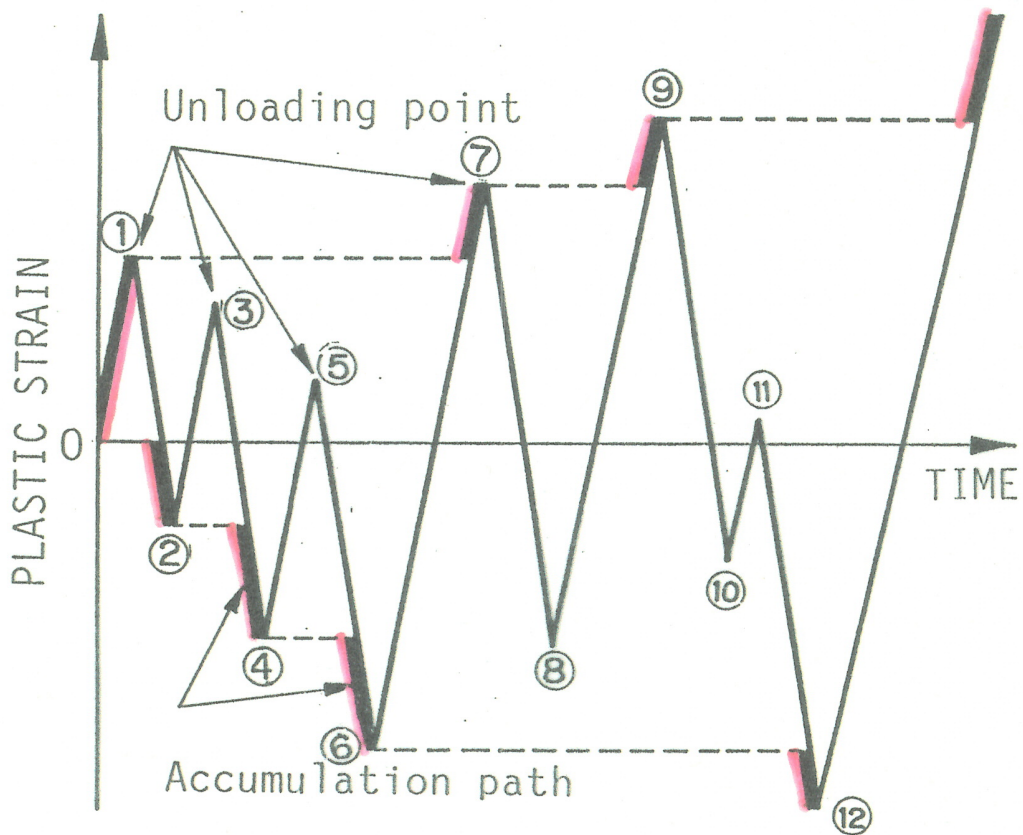
途中の経路が最終経路に影響していない。

後の応かからずみ関係に影響しない経路



復帰現象.

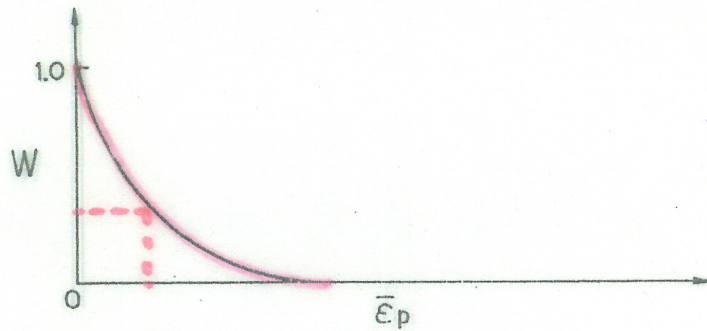
相当塑性ひずみの有効な累積量 (単軸の場合)



- 有効な径路
- 有効でない径路

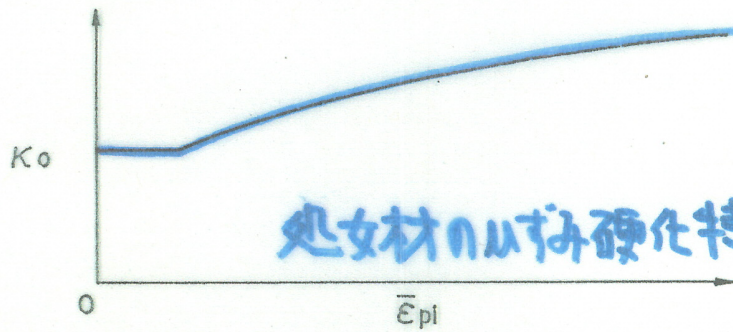
Petersson-Popovモデルにおける みずみ硬化率の表わし方

重み関数



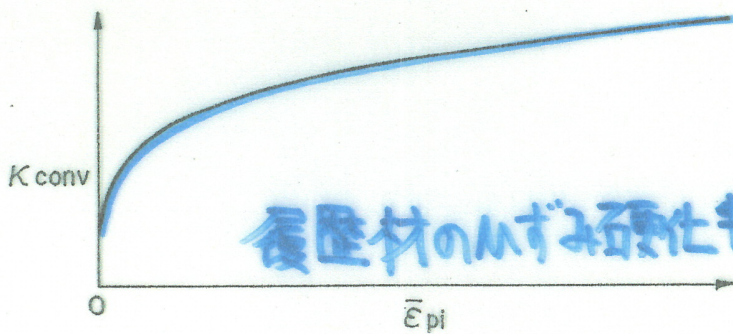
$\bar{\epsilon}_p$ の関数

基本曲面サイズ関数



処女材のみずみ硬化特性: K_0

$\bar{\epsilon}_p$ の関数

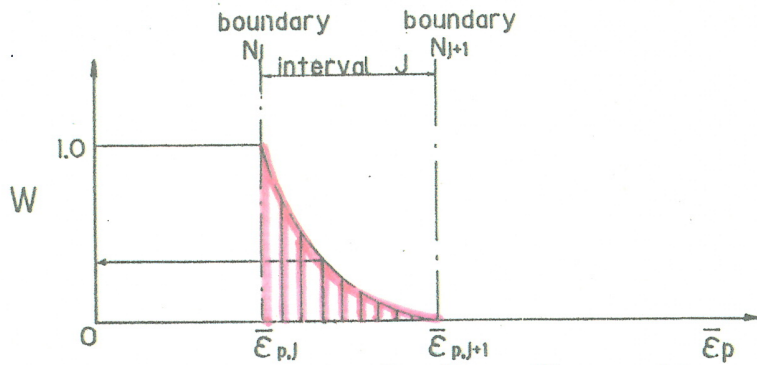


履歴材のみずみ硬化特性: K_{conv}

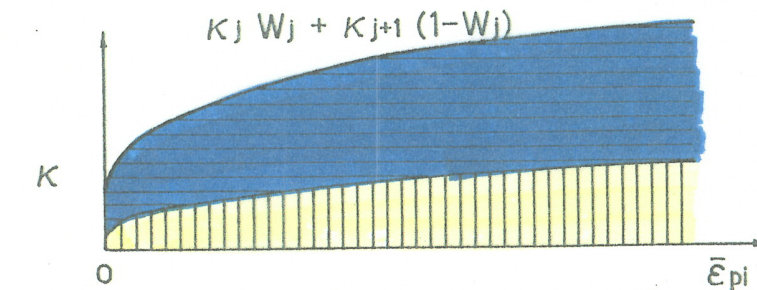
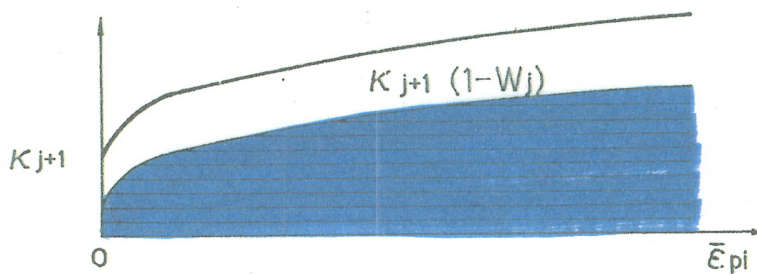
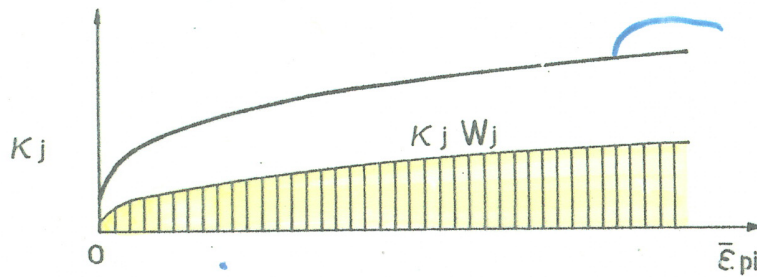
$$K = \underline{W} \cdot K_0 + (1 - \underline{W}) K_{conv}$$

提案モデルにおける ムずみ硬化率の表わし方

重み関数



有効果積 塑性ムずみ



区分的に表わす表現

基本曲面サイズ関数

塑性ムずみの
反転点からの増加量

材料特性 塑性履歴の関数

① 基本曲面サイズ関数: $K_1 \sim K_N$

ある特定の n ずみ履歴の段階での n ずみ硬化特性を表わす。

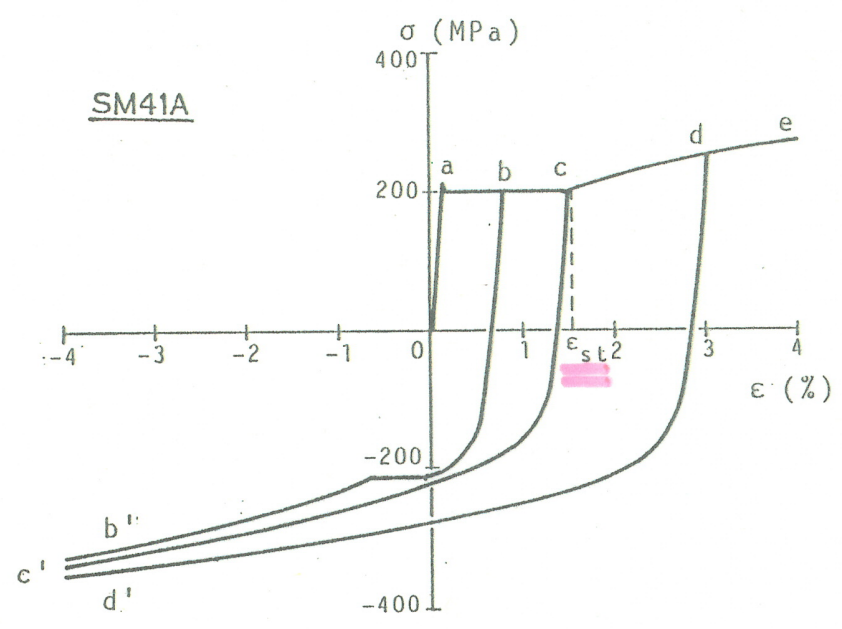
② 重み関数: $W_1 \sim W_{N-1}$

それらの中間的な n ずみ履歴の段階での n ずみ硬化特性を表わす。

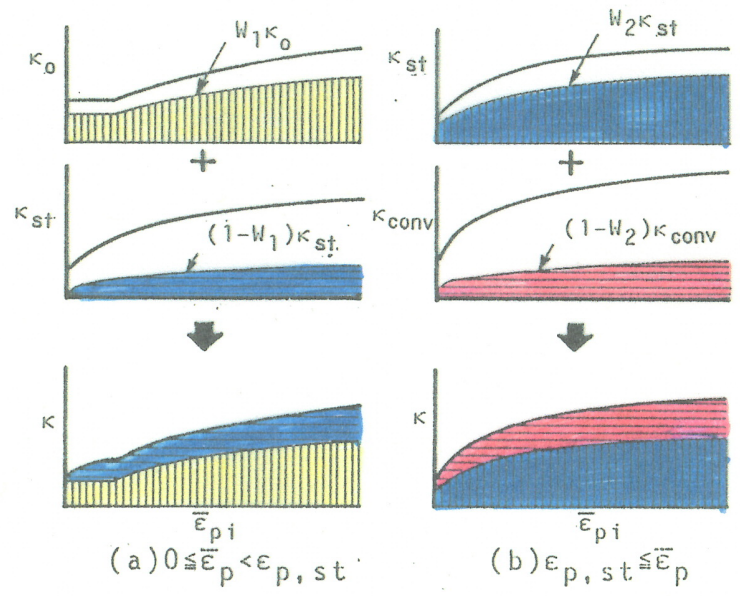
$$K = W_i K_i + (1 - W_i) K_{i+1}$$

任意の n ずみ履歴の段階での n ずみ硬化特性。

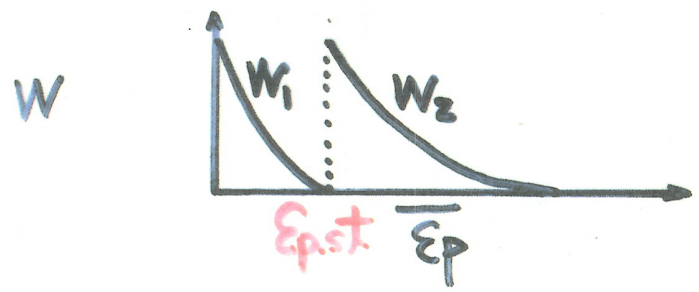
軟鋼に対する実験結果



$$W_1 \cdot K_0 + (1-W_1) \cdot K_{st} = K$$

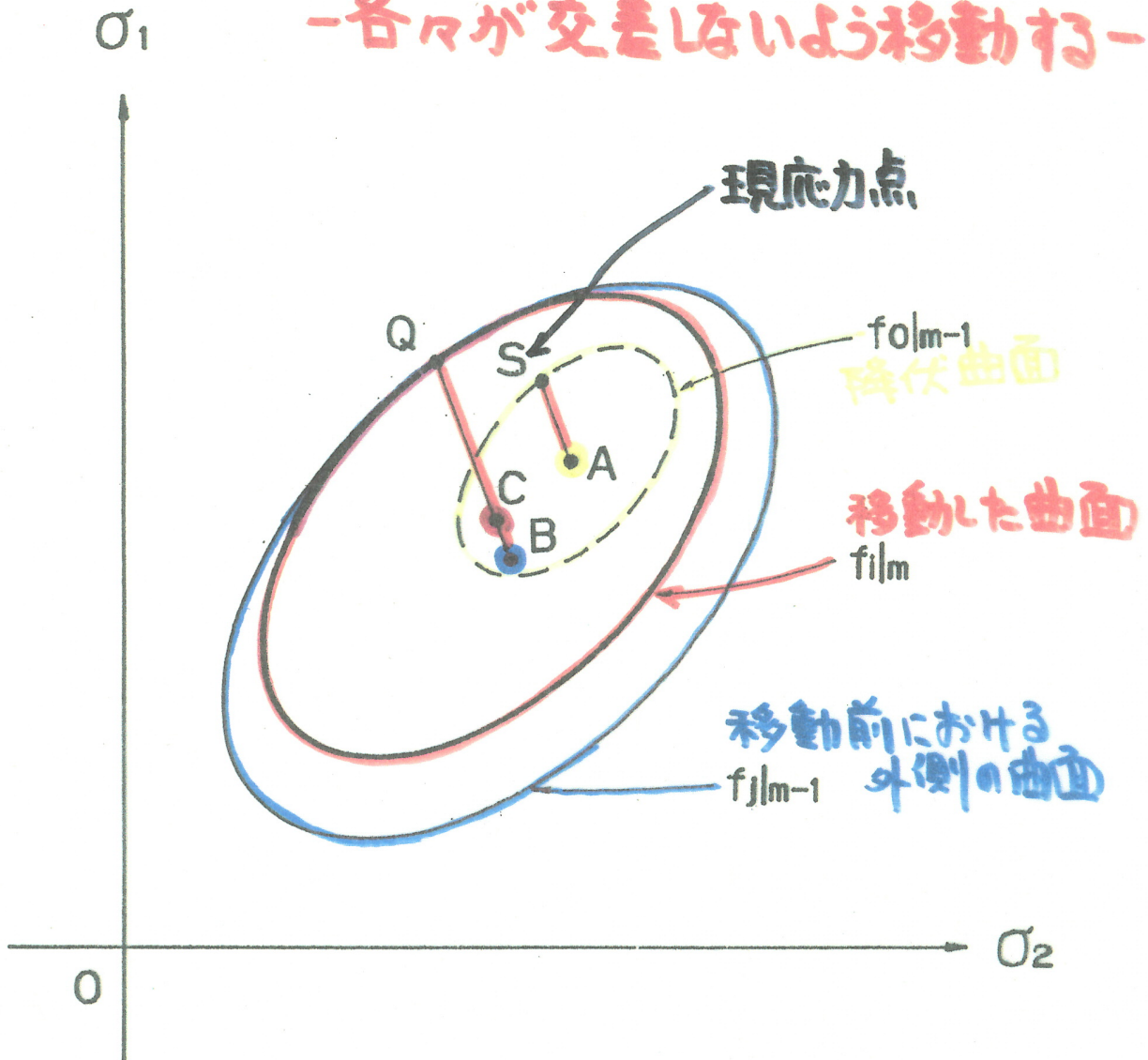


$$W_2 \cdot K_{st} + (1-W_2) \cdot K_{conv} = K$$



多曲面の移動の法則.

-各々が交差しないよう移動する-



$$\overline{BQ} = K(\bar{\epsilon}_{p|m-1}, \bar{\epsilon}_{pl} + \Delta \bar{\epsilon}_{p|m})$$

$$\overline{CQ} = K(\bar{\epsilon}_{p|m}, \bar{\epsilon}_{pl})$$

$$\overline{AS} = K(\bar{\epsilon}_{p|m-1}, 0)$$

$$AS \parallel BQ$$

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

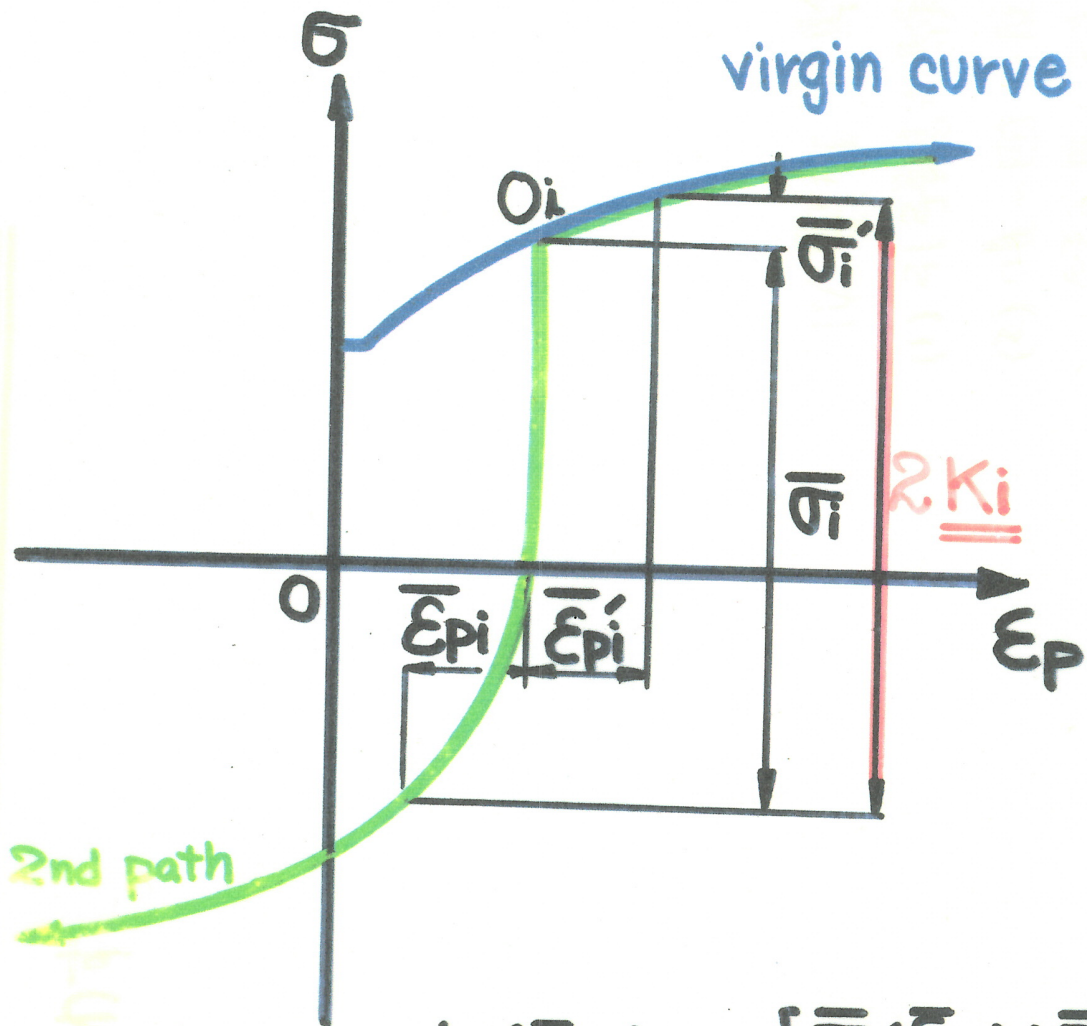
PART-3

提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

Kiの算出方法

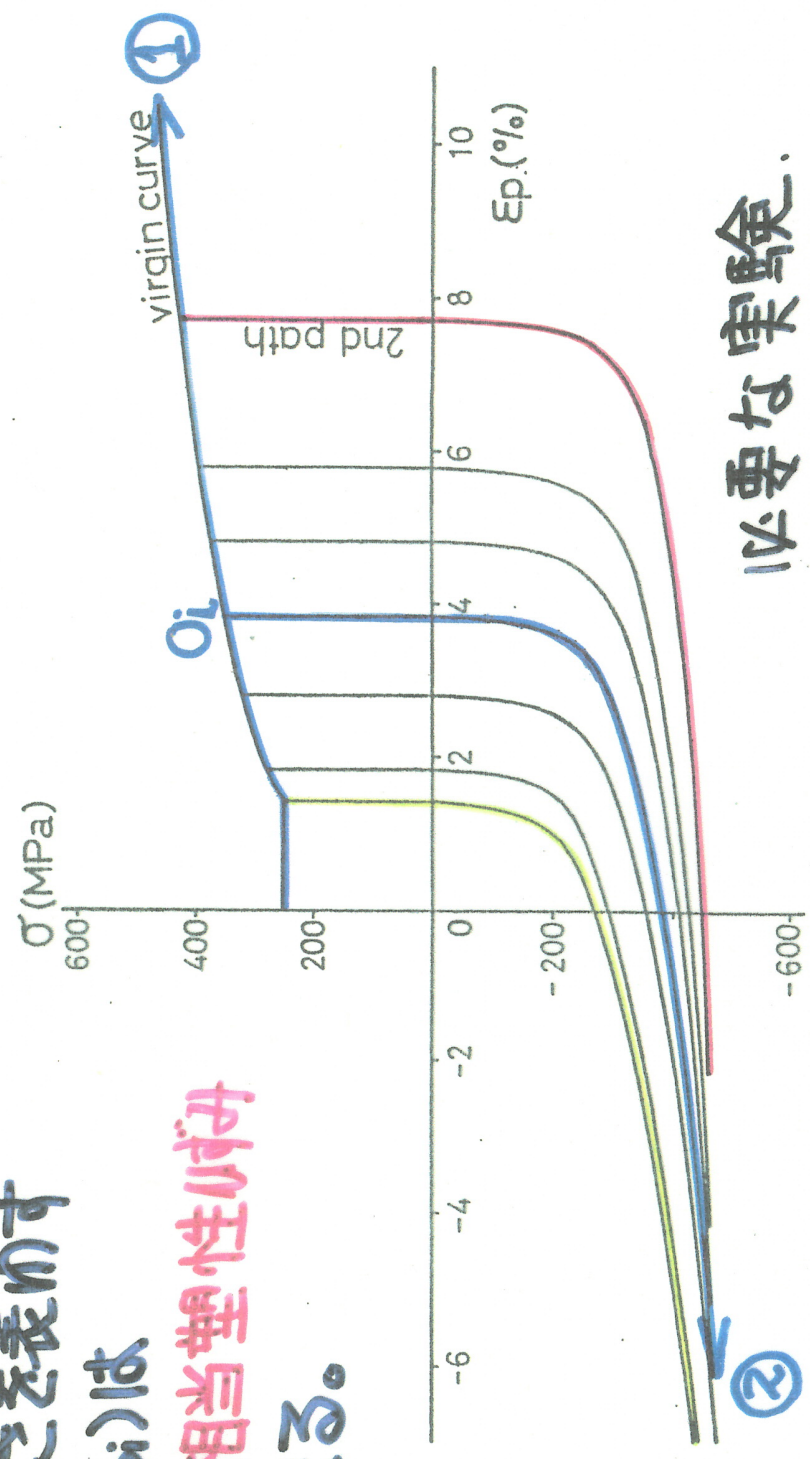


$$K_i(\bar{\epsilon}_{pi}) = \frac{[\bar{\sigma}_i(\bar{\epsilon}_{pi}) + \sigma_i'(\bar{\epsilon}_{pi})]}{2}$$

K_i : ある履歴段階での曲面サイズ関数

実験 - 材料特性の決定 -

曲面の大きさを表ゆす
関数 $K_i(\xi_i)$ は
有効累積相当塑性 ξ_i だけ
によって定まる。



必要な実験.

- (1) 引張試験.
- (2) 唯一回の反転を含む繰返し試験.

SM41A 試験結果

重み関数の決定方法.

$$K = w_i \cdot K_i + (1 - w_i) K_{i+1}$$

$i = 1, N_b$

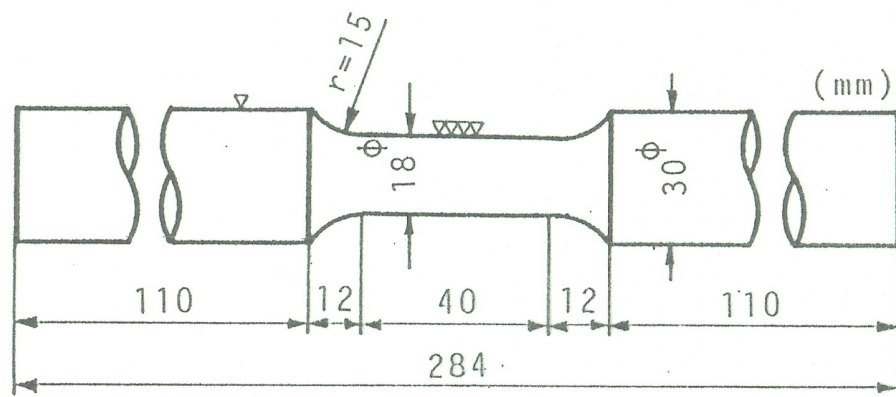


$$w_i = \frac{K - K_{i+1}}{K_i - K_{i+1}}$$

K, K_i, K_{i+1} は $\bar{\varepsilon}_i$ の関数で既知.

∴ 特定の $\bar{\varepsilon}_p$ の値に対する重み w_i が $\bar{\varepsilon}_i$ の関数として求められる。

試験片の形状寸法.

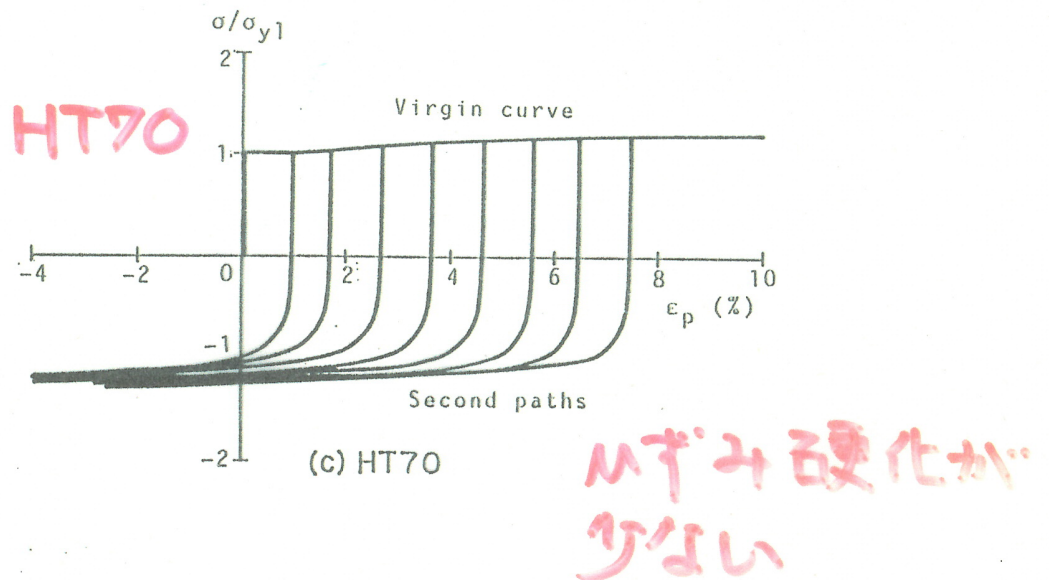
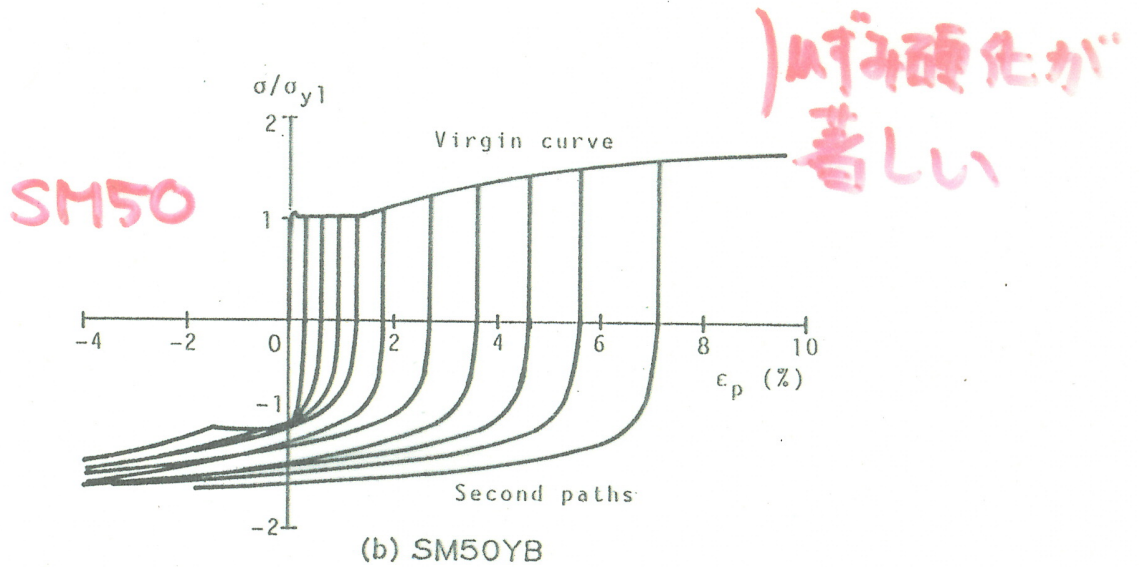
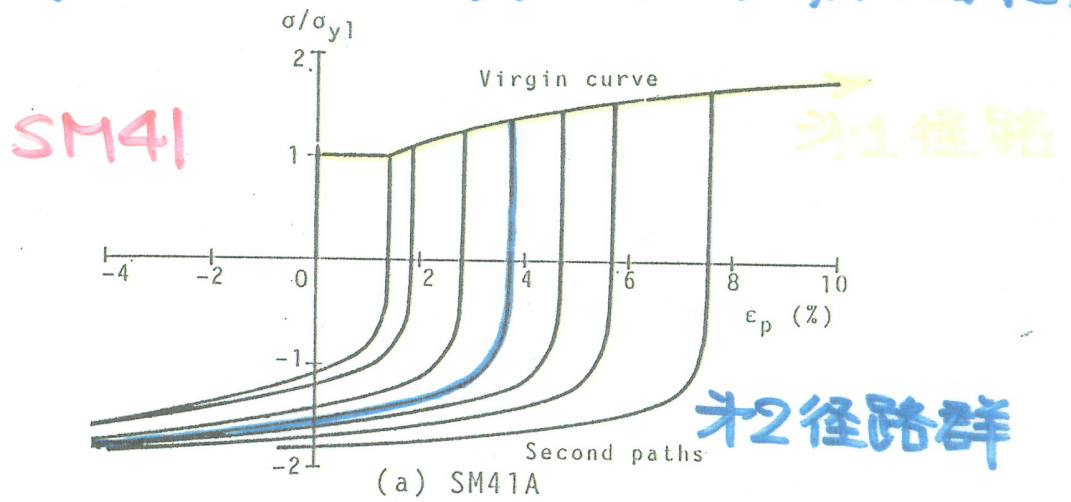


供試鋼材:

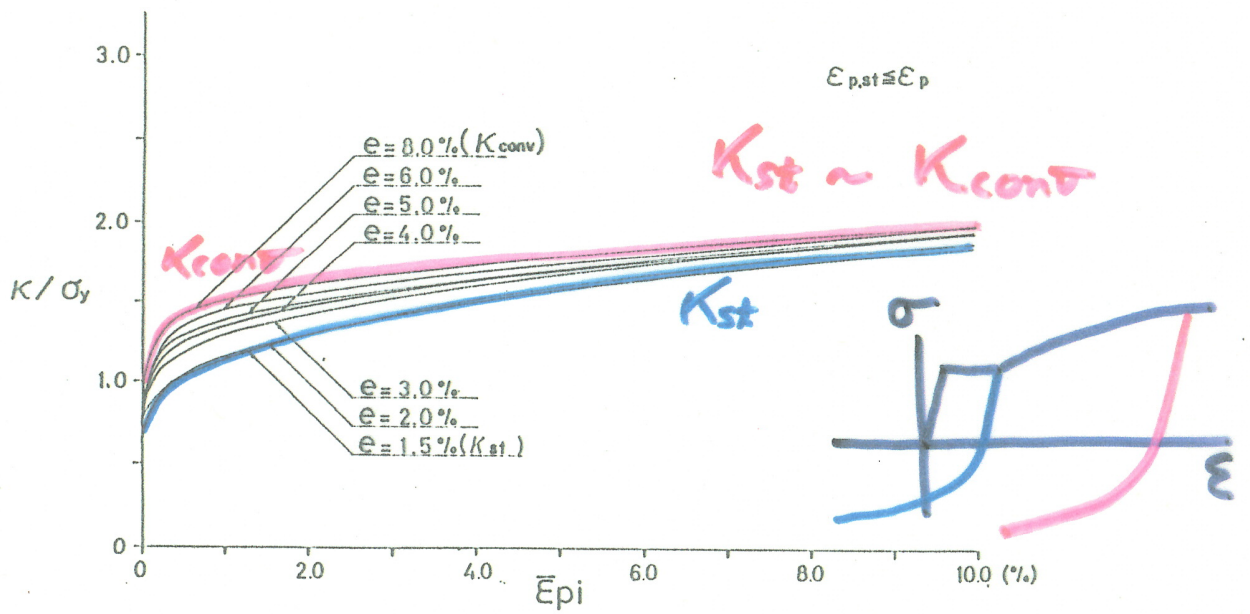
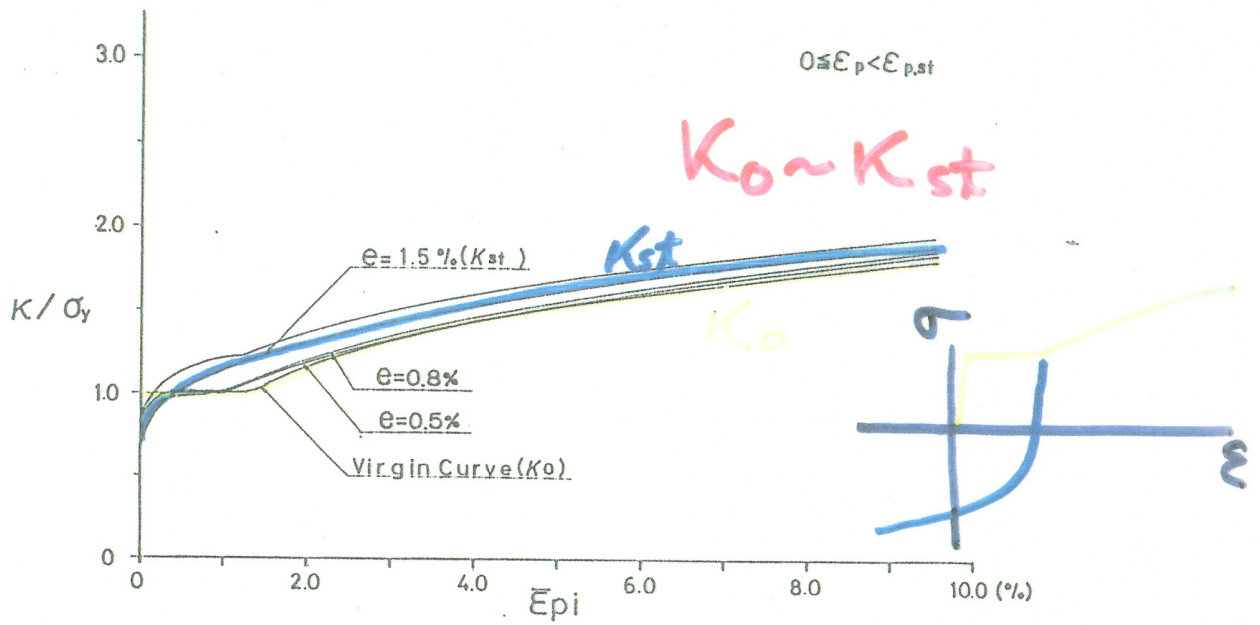
軟鋼 → SM41, SM50

高張力鋼 → HT70

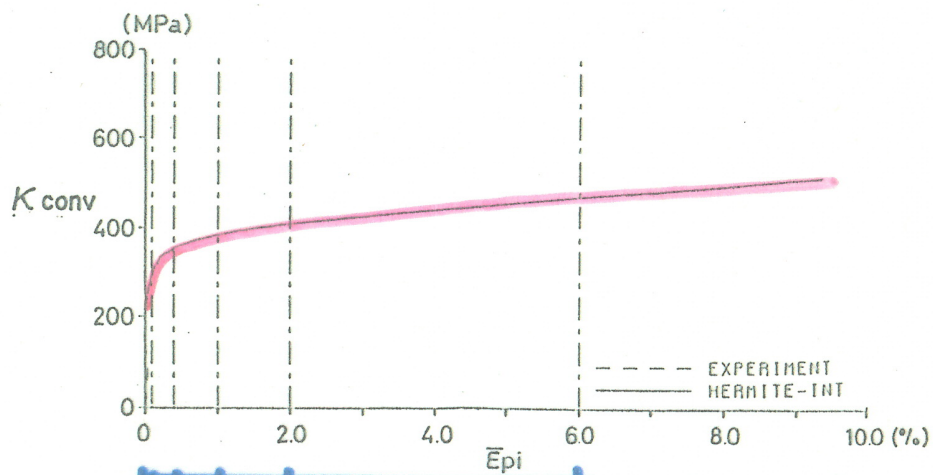
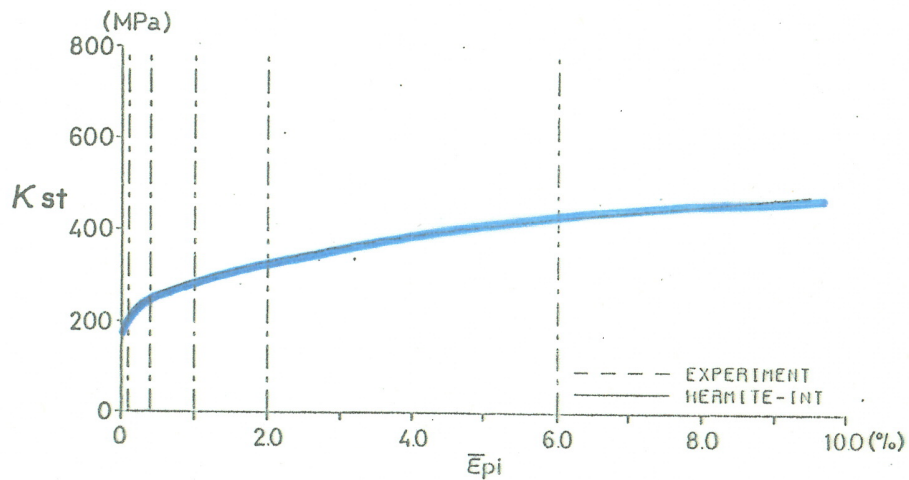
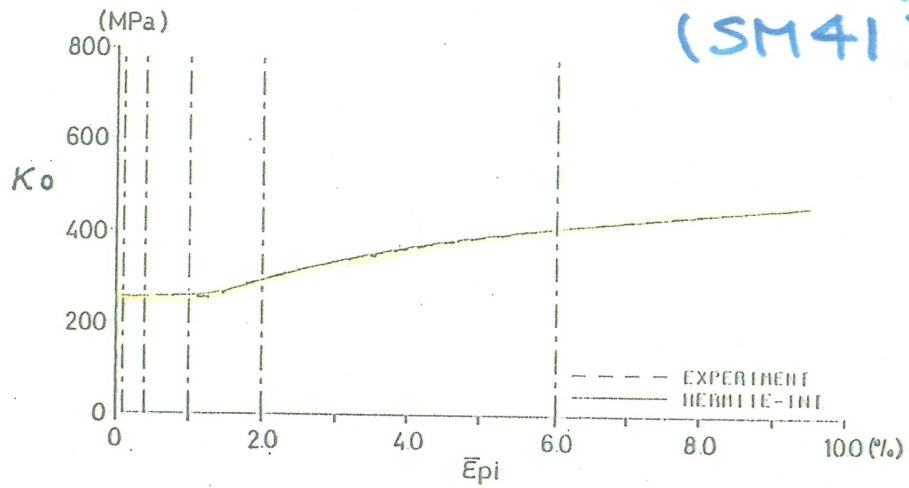
材料特性を決定する実験の結果



実験結果が計算した曲面サイズ関数群.

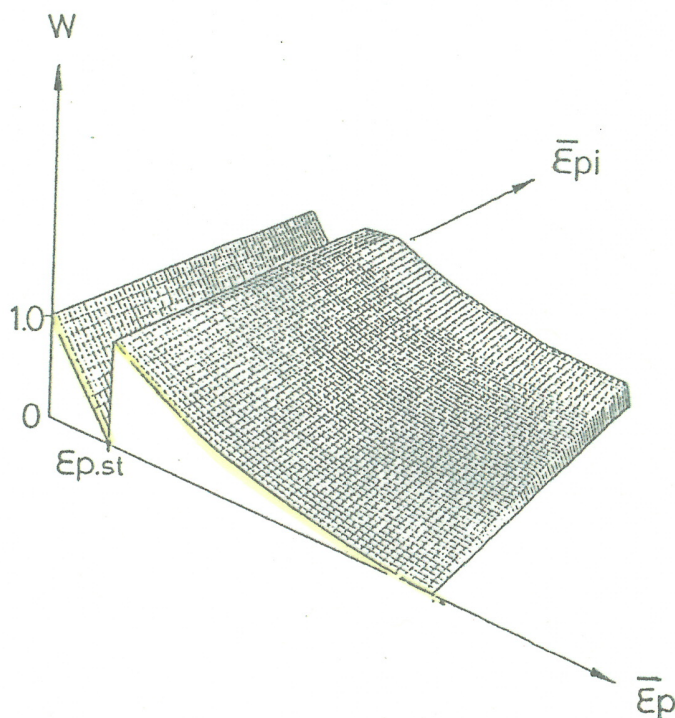
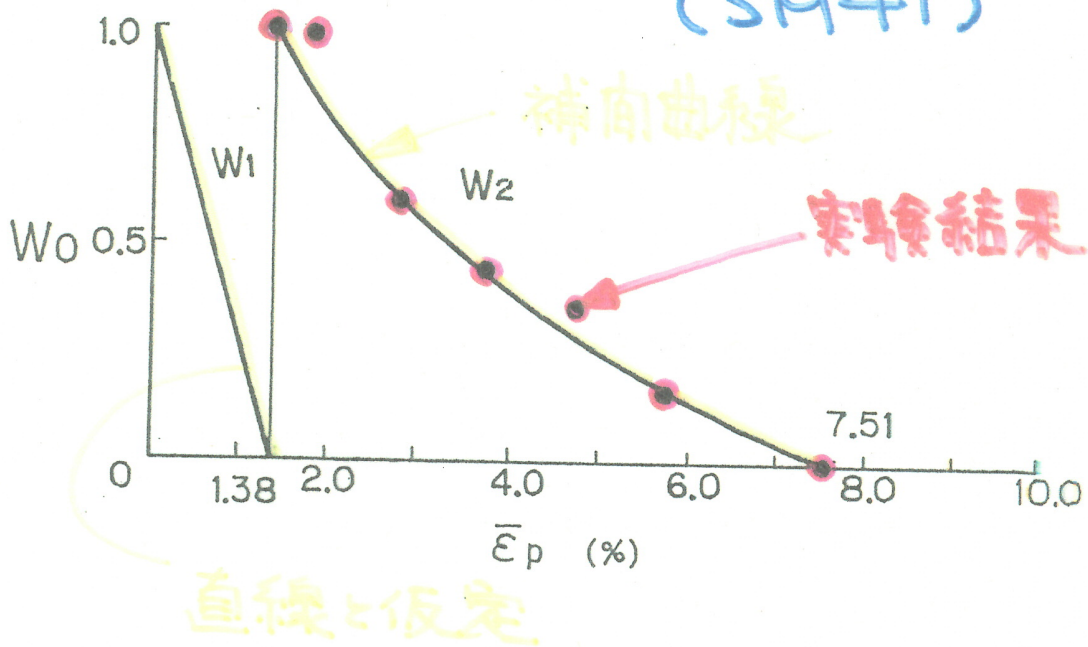


実験結果から求められた基本曲面の関数 (SM41)



各区間でエルミート補曲.

実験から求められた重み関数 (SM41)



(1) 材料特性である基本曲面的サイズの関数とい関係
材重み測定から決定されること
基本力がこの曲本塑で
面的性き
サイズの試験にのみ
関数とい関係

① 単調引張試験

② 1回の除荷を含む引張圧縮試験

(2) 適用例として、3種の構造用鋼の材料は、をを述
適用性を、材料として、果求めらるるは、をを述
特別な使用のする。と実こ材料にこの材料は、をを述
適用性を、材料として、果求めらるるは、をを述
特別な使用のする。と実こ材料にこの材料は、をを述

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

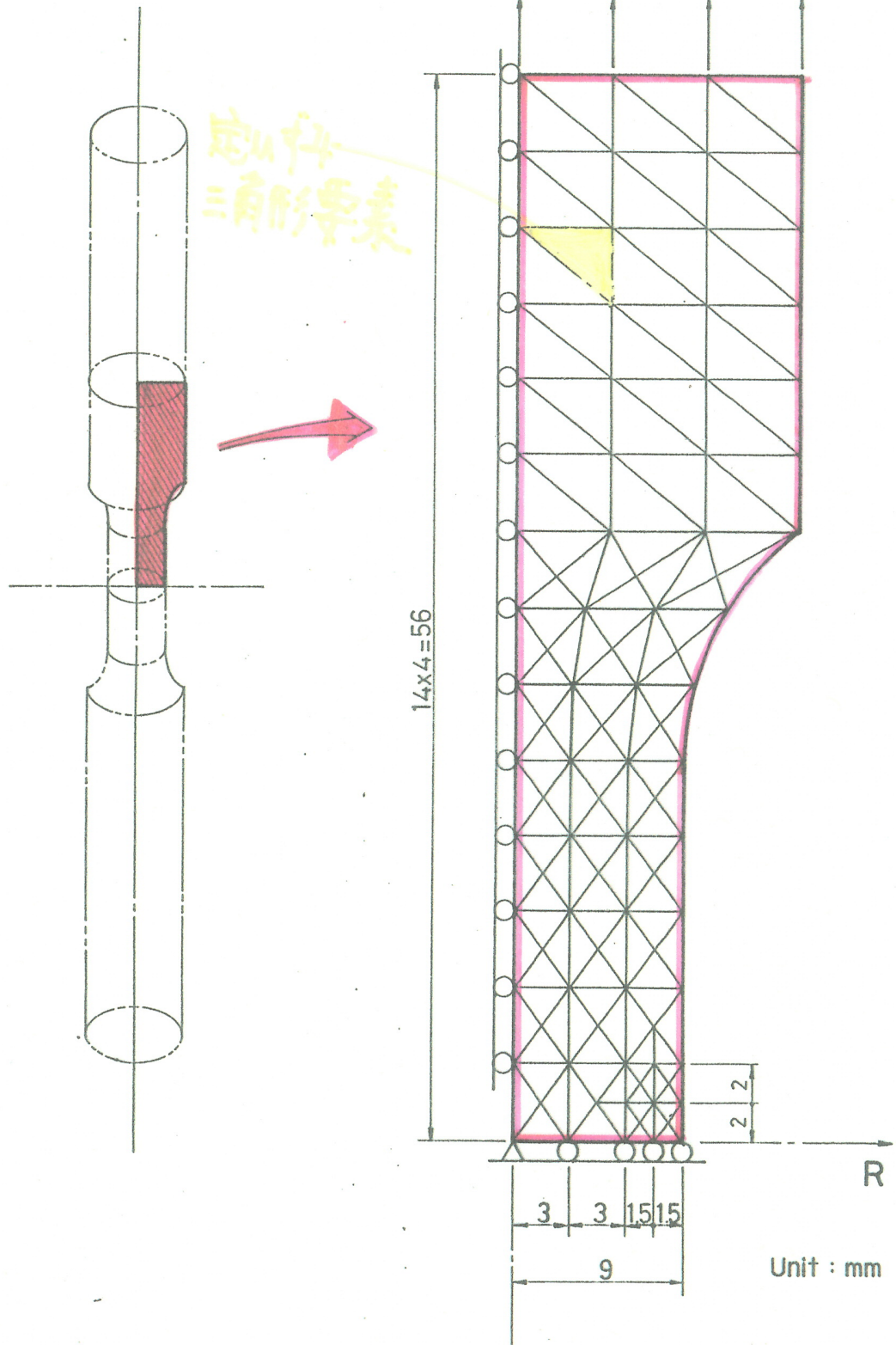
PART-3

提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

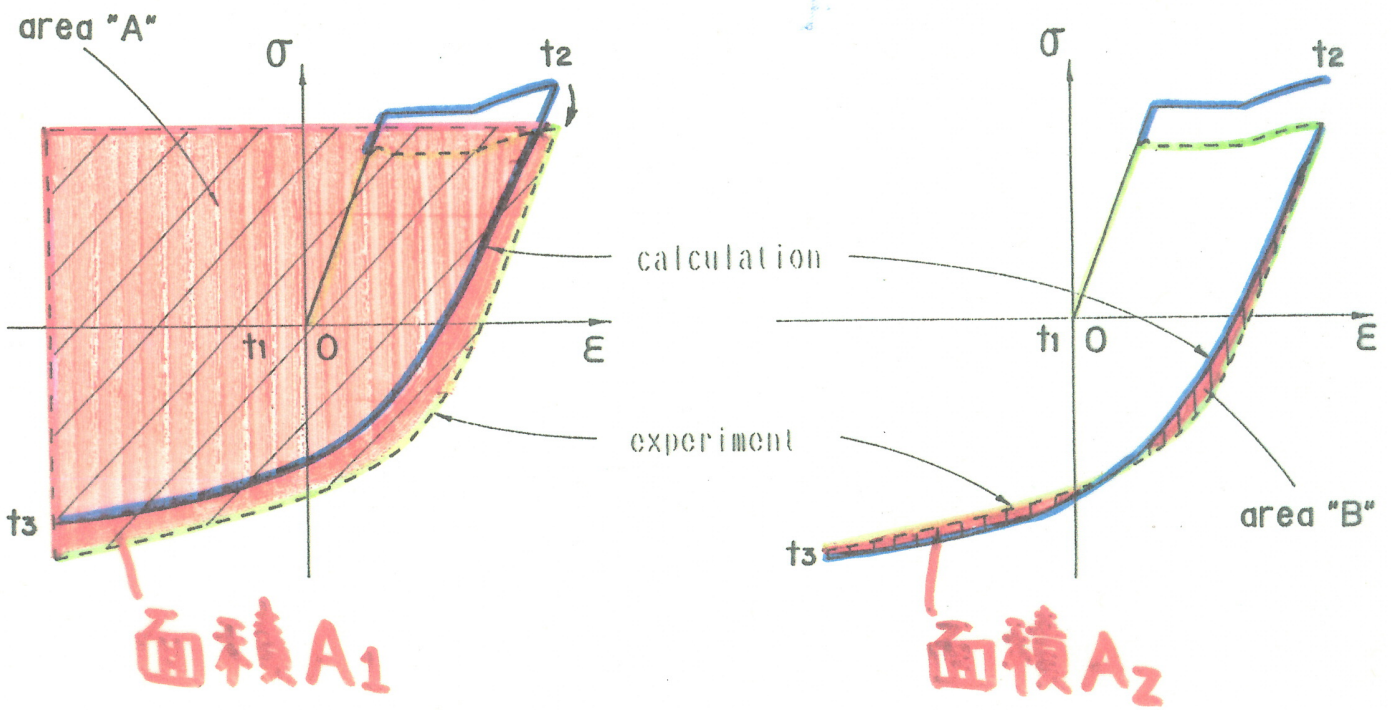
PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

解析対象のモデル化



推定誤差の定義



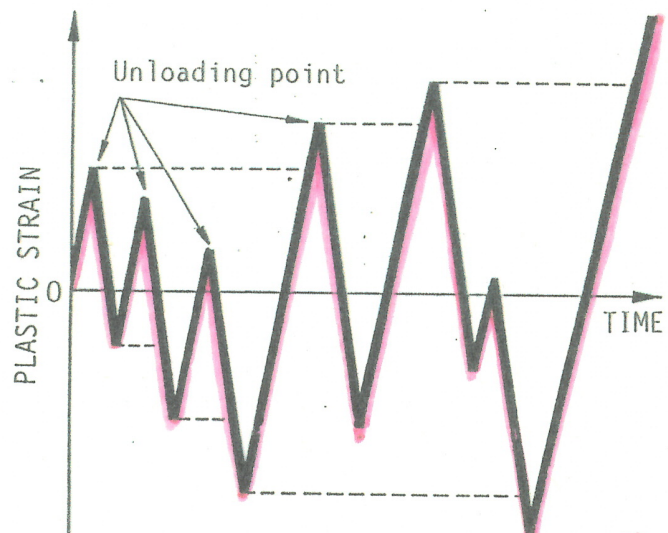
$t_2 \rightarrow t_3$ 径路の誤差.

$$\gamma = \frac{A_2}{A_1} \times 100 (\%)$$

提案モデルの特徴とその効果

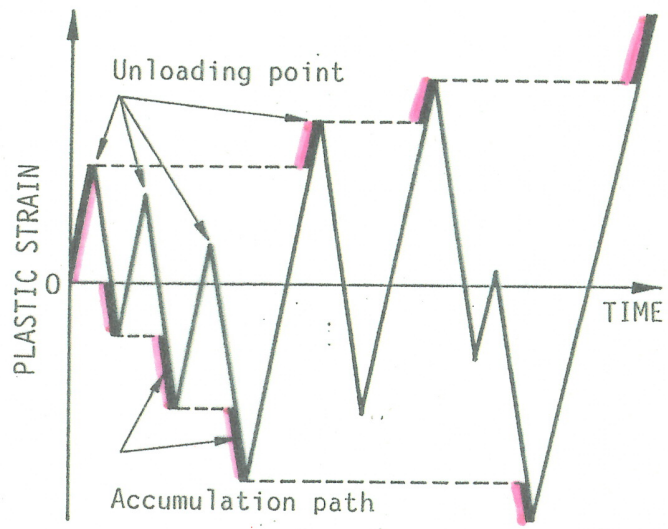
<モデルの設定>

	$\bar{\varepsilon}_p$	基本曲面サイズ関数
モデル-1	全径路	K_0, K_{conv}
モデル-2	提案方法	K_0, K_{conv}
モデル-3	全径路	K_0, K_{st}, K_{conv}
提案モデル	提案方法	K_0, K_{st}, K_{conv}



全
徑
路
モデル1,モデル3

(a)

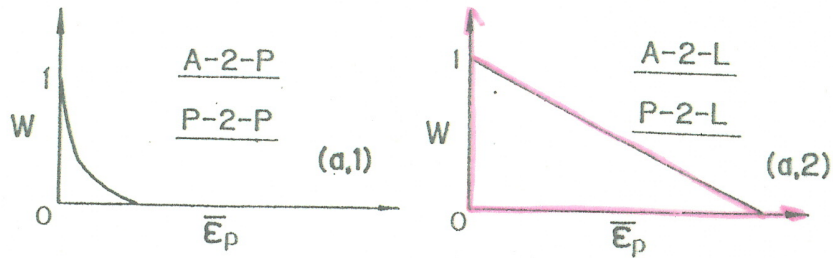
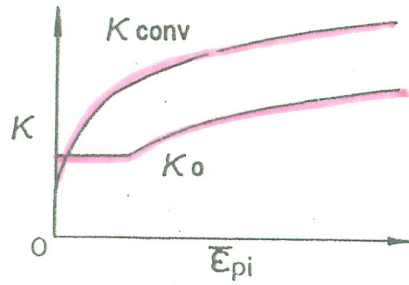


提
案
方
法

モデル2,提案モデル

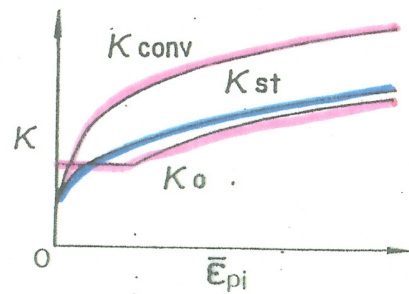
(b)

単軸状態での塑性ひずみの累積

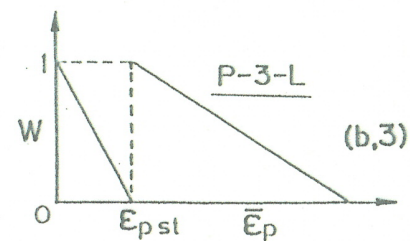
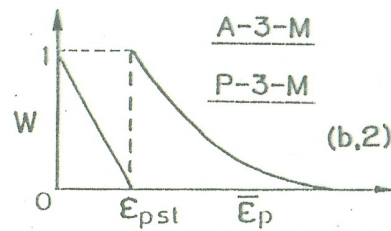
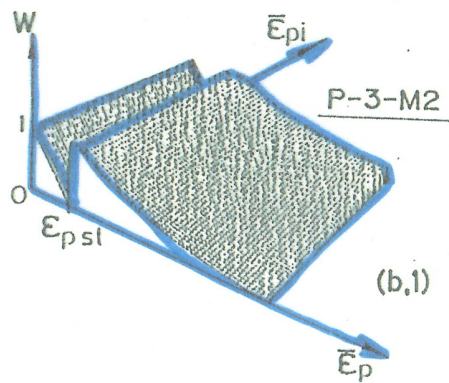


モデル1
モデル2

(a) Case of two fundamental surface size function



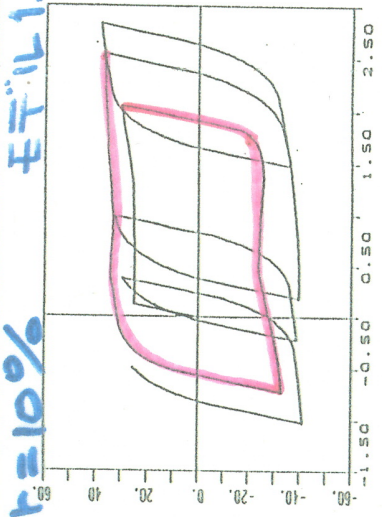
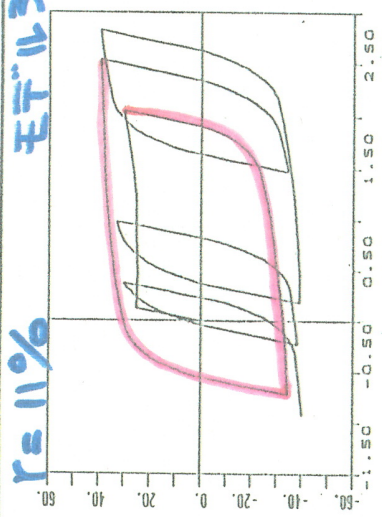
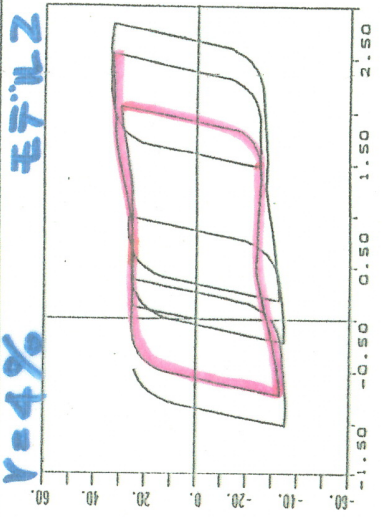
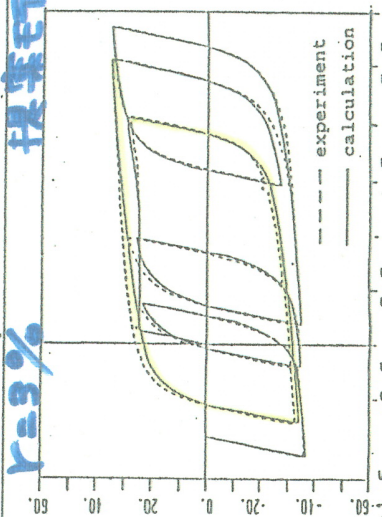
モデル3
提案モデル



(b) Case of three fundamental surface size function

基本曲面サイズ関数と重み関数

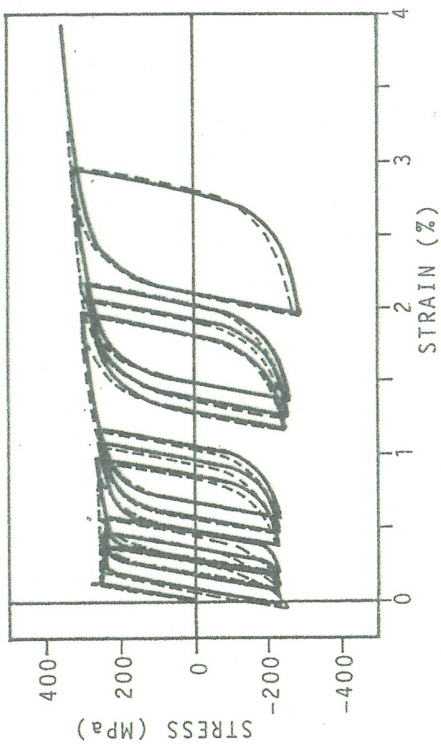
基本曲面サイズ関数

<p>全径路</p>	<p>k_o, k_{conv} モデル1 $r=10\%$</p> 	<p>k_o, k_{st}, k_{conv} モデル3 $r=11\%$</p> 
<p>提案方法</p>	<p>$r=4\%$ モデル2</p> 	<p>提案モデル $r=3\%$</p> 

ε_p

設定されたモデルと提案モデルによる数値計算例

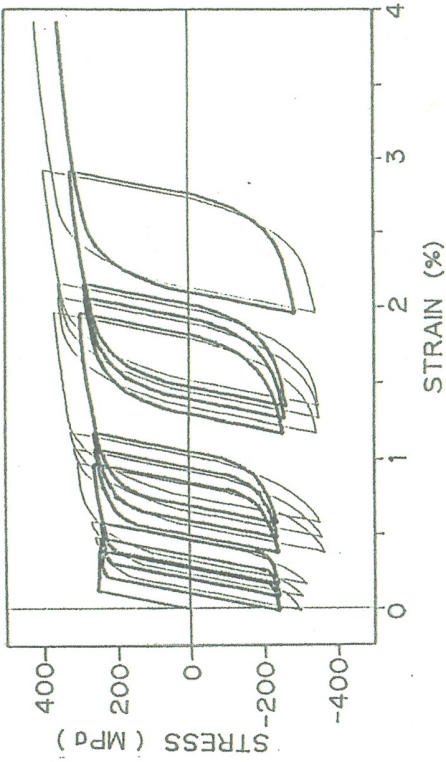
提案モデルと実験結果
の比較



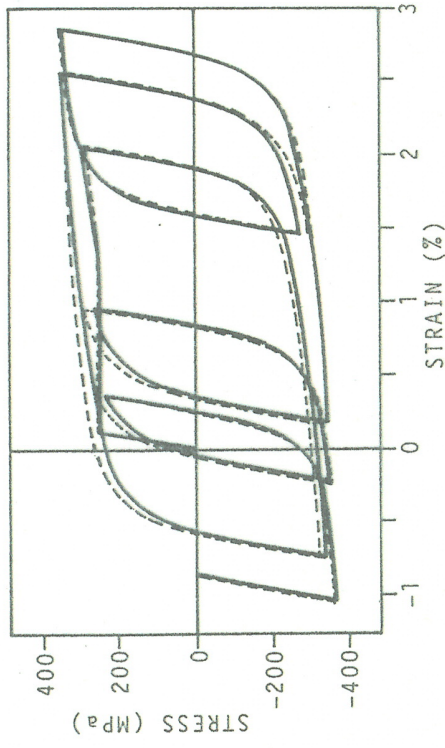
例1

提案モデルとPeterson-Popov
モデルの比較

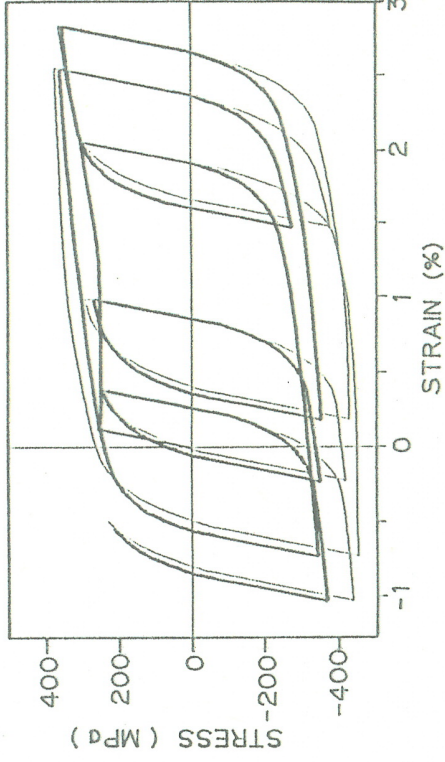
誤差
19% → 4%



提案モデルとPeterson-Popov
モデルの比較



例2



10% → 3%

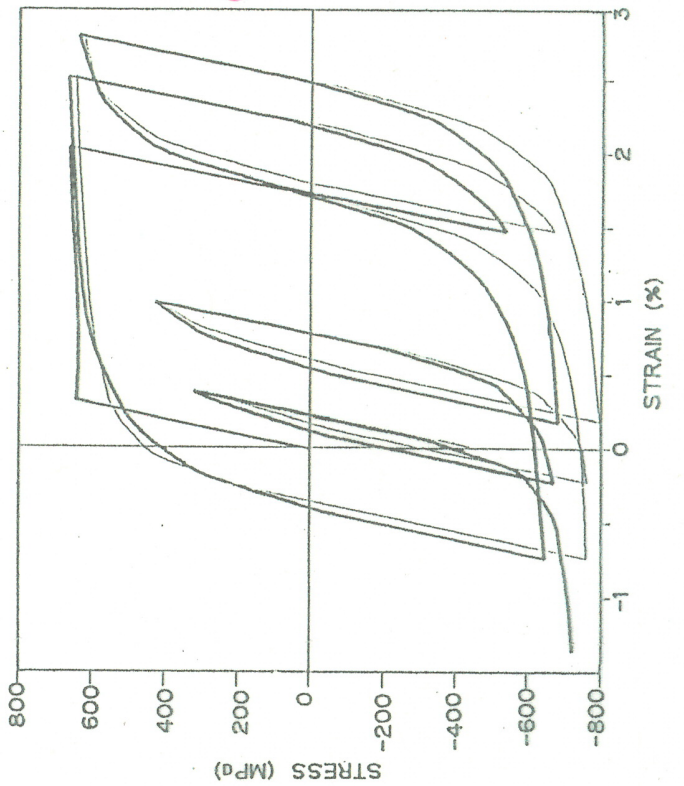
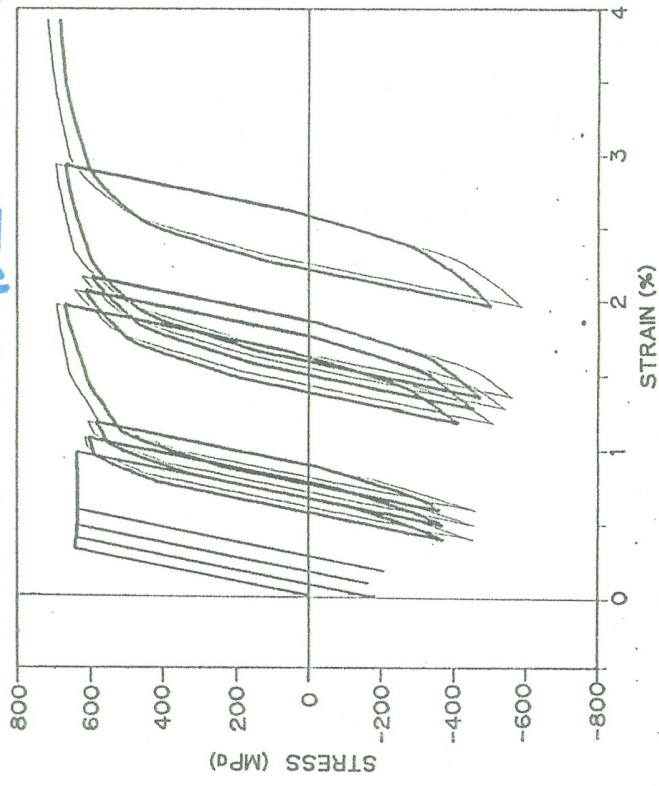
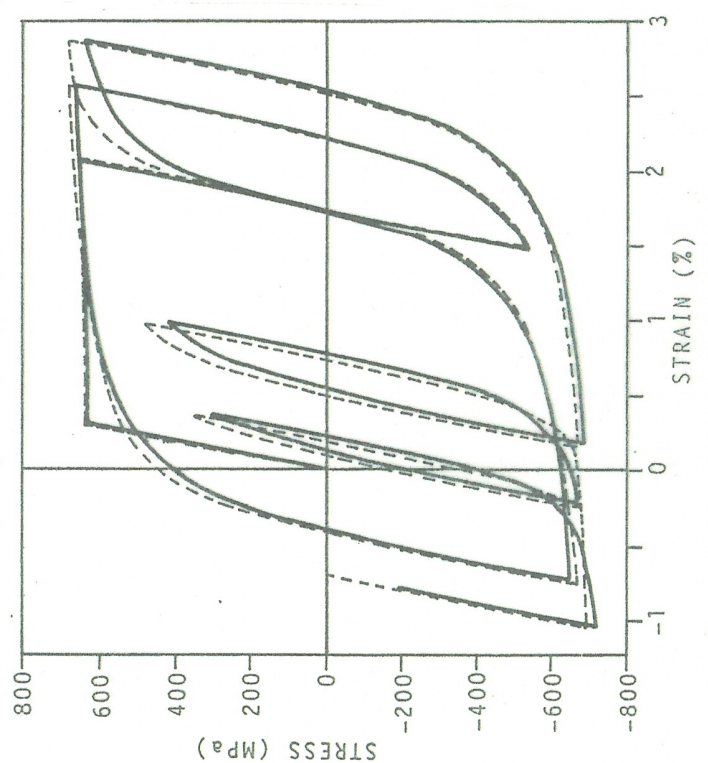
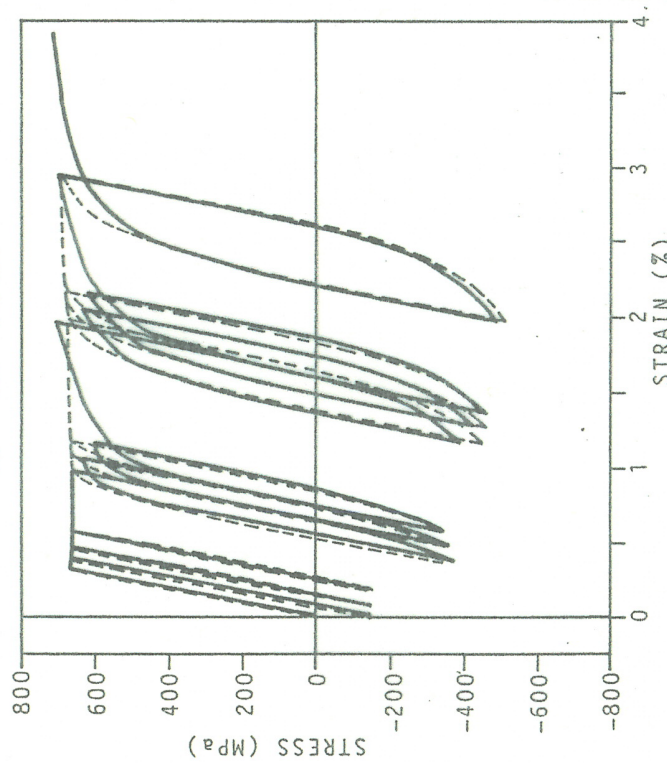
＜軟鋼 SH41＞

提案モデルと実験結果
の比較

提案モデルとPeterson-Popov
モデルの比較

例3

例4



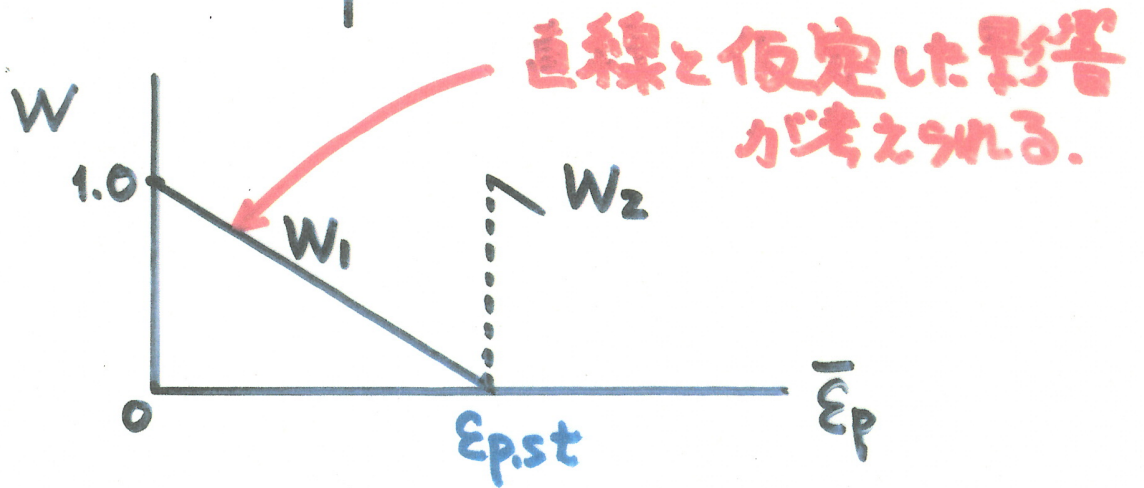
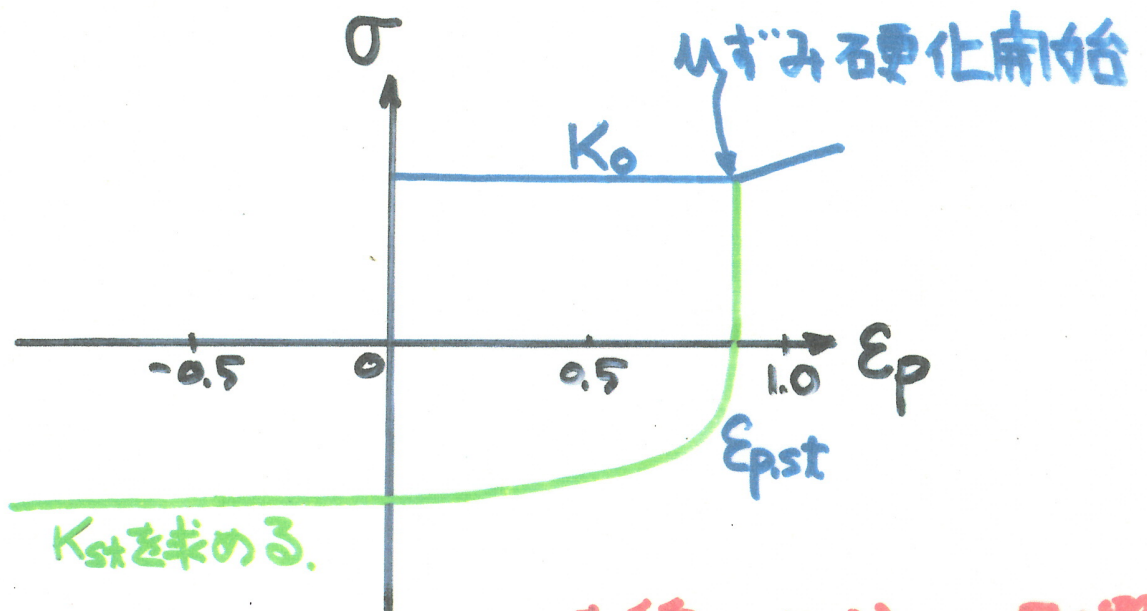
差
誤
5% → 2%

9% → 5%

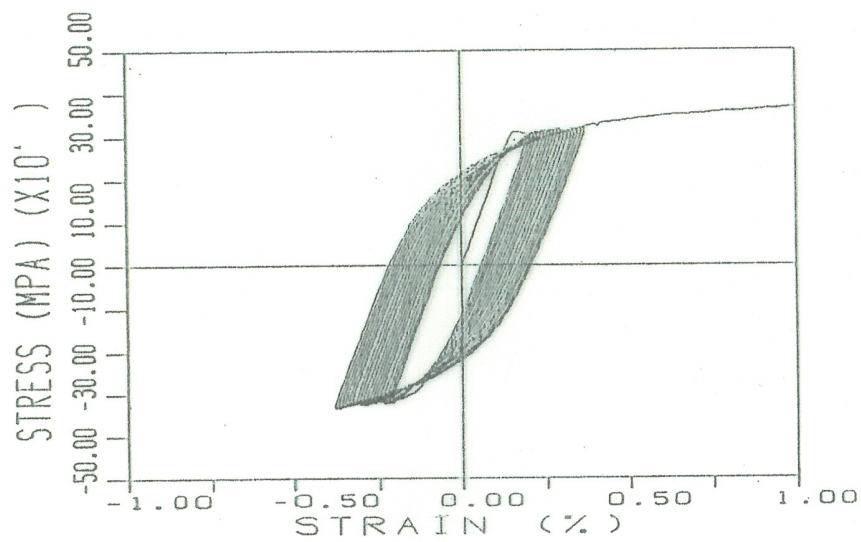
〈高張力鋼 HTA〉

非硬化ひずみ領域での推定

... ひずみのオーダー 10^{-3}

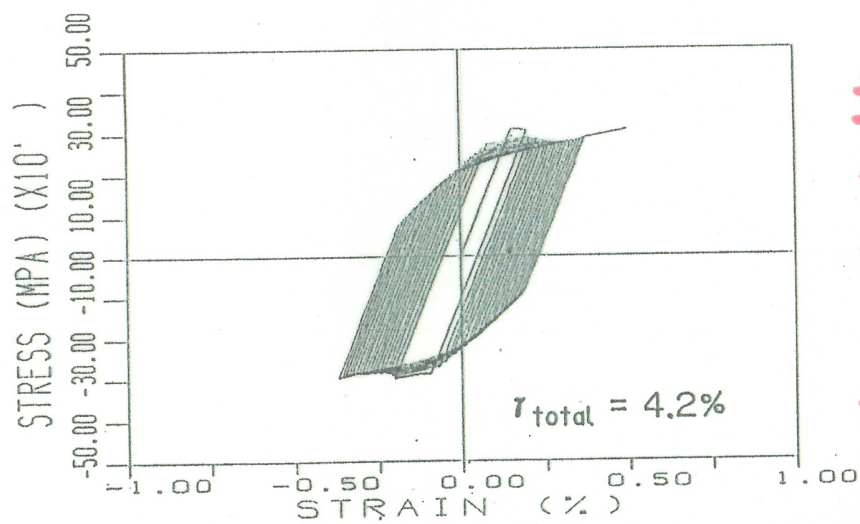


実験結果と数値計算結果の比較



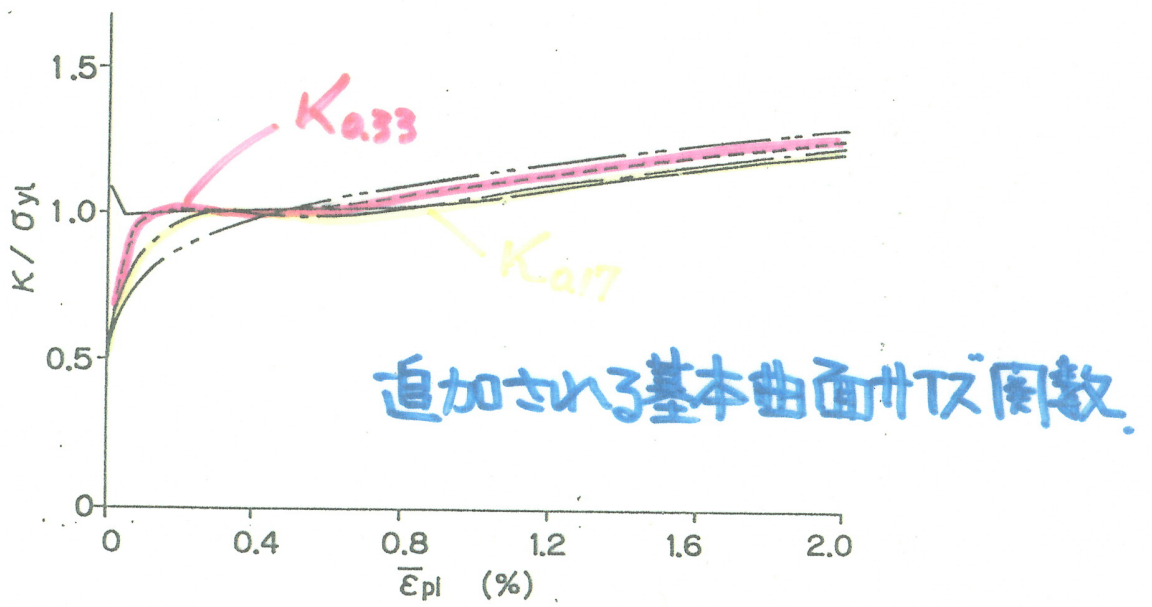
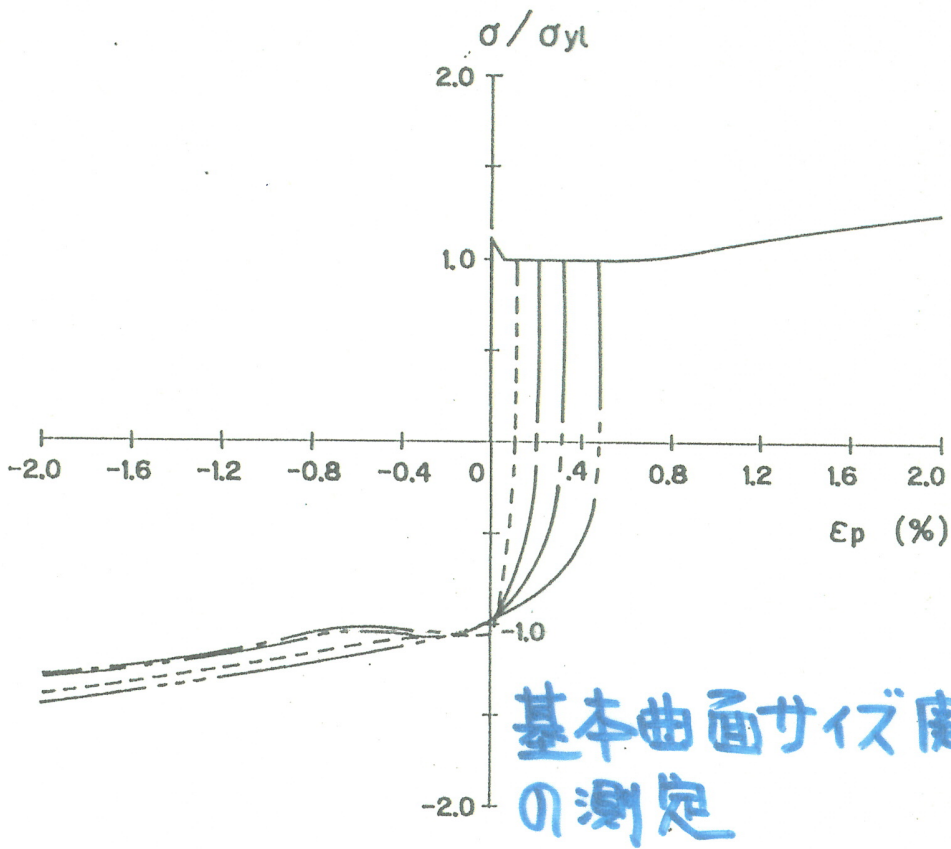
実験

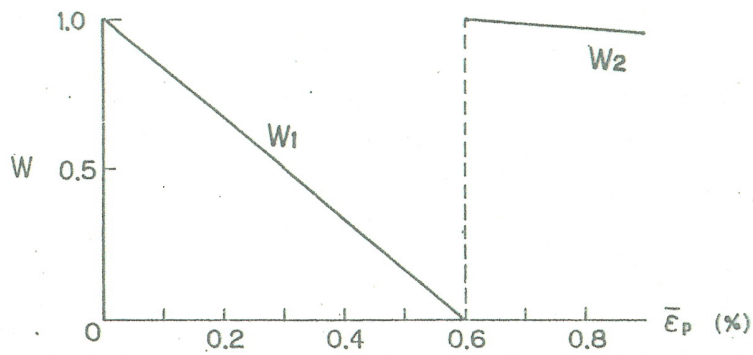
(a) Experiment



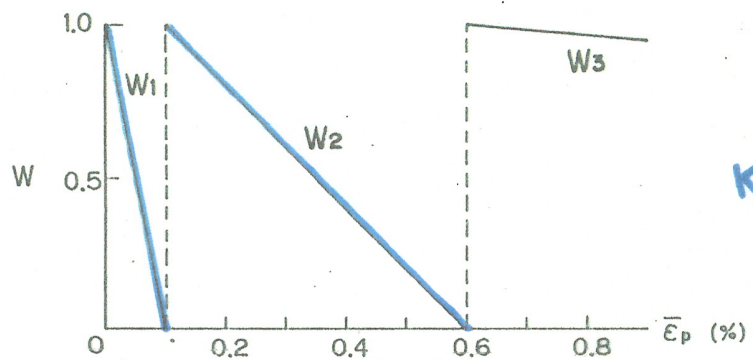
数値計算

(b) Calculation



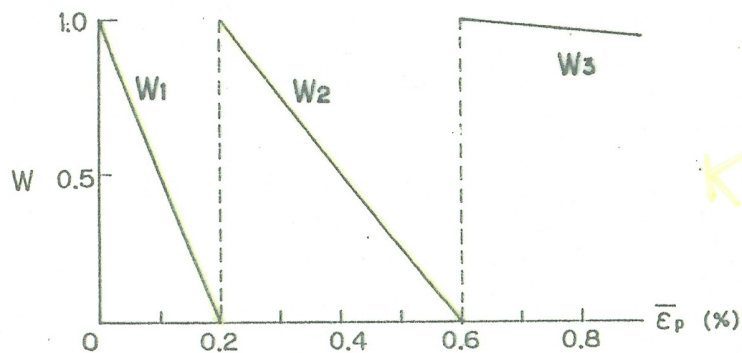


(a) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were not introduced



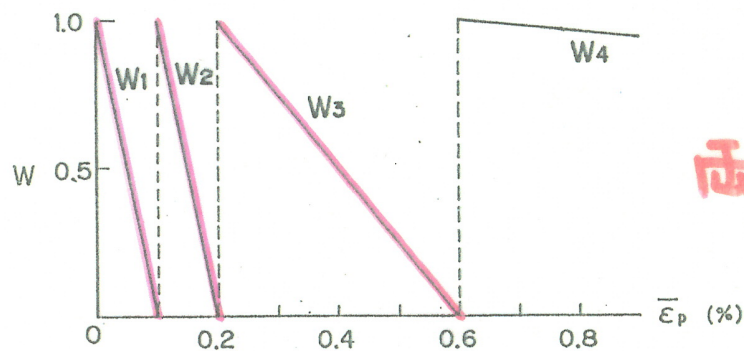
$K_{0.17}$ 追加

(b) $K_{0.17}$ was introduced



$K_{0.33}$ 追加

(c) $K_{0.33}$ was introduced

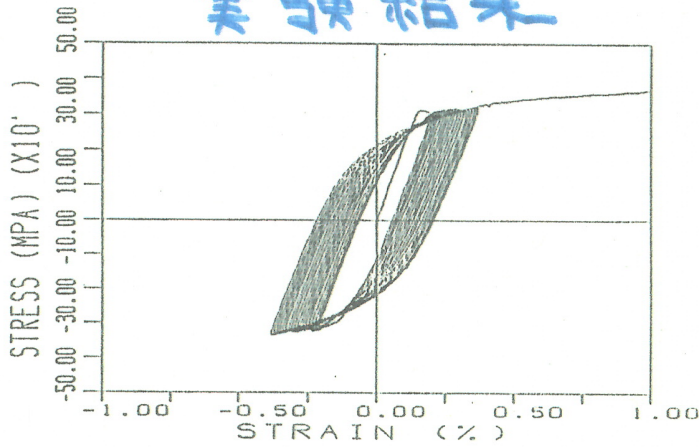


両方追加

(d) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were introduced

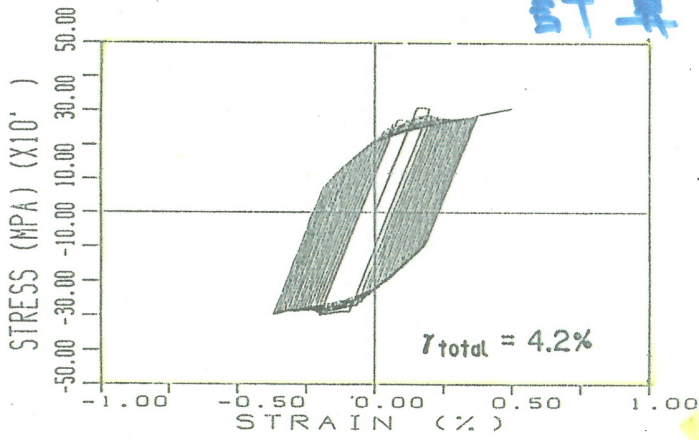
重み関数の変更

実験結果

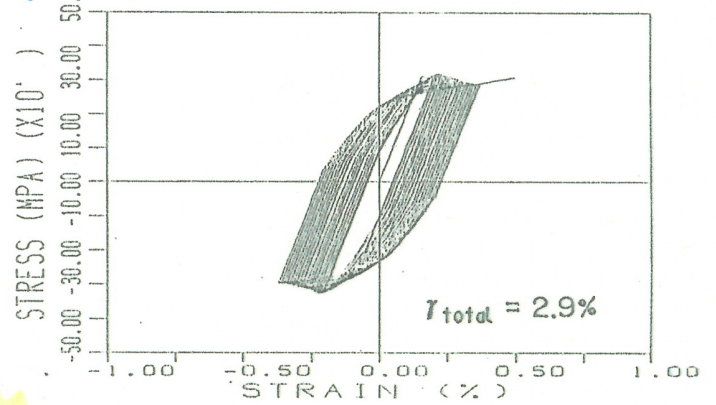


(a) Experiment

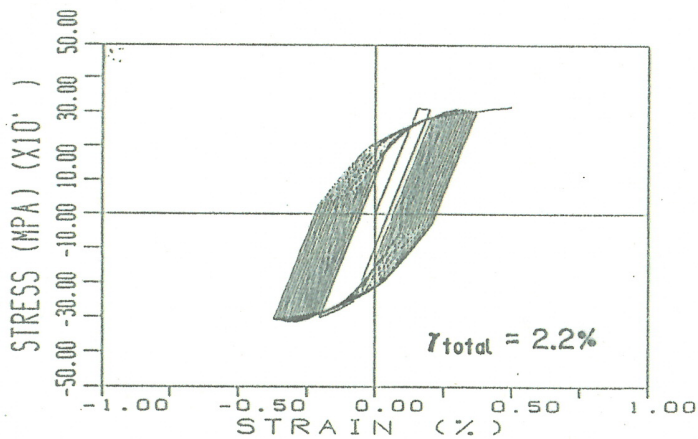
計算結果



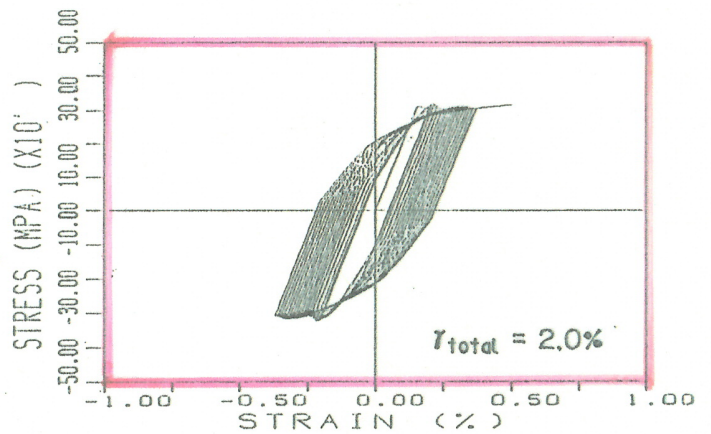
(b) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were not introduced



(c) $K_{0.17}$ was introduced



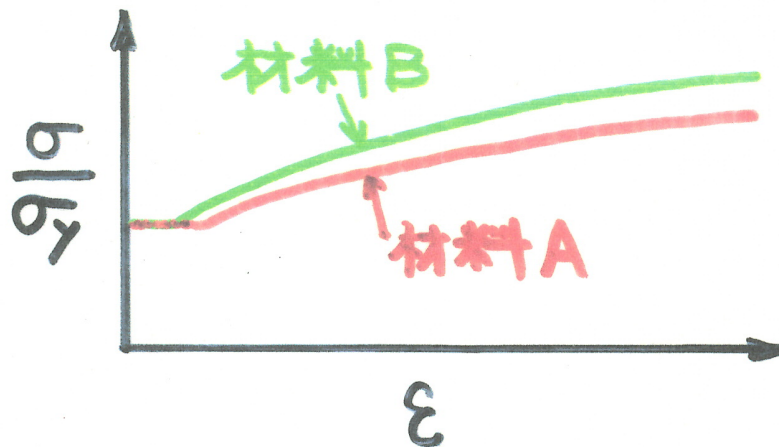
(d) $K_{0.33}$ was introduced



(e) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were introduced

実験結果と数値計算結果の比較

引張応力-ひずみ特性から材料特性を評価する。



提案モデルに含まれる材料特性

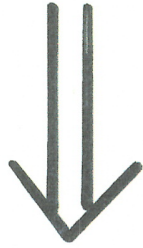
材料 A K_0, K_{st}, K_{conv} 既知

材料 B K_0 既知

K_{st}, K_{conv} 未知

これらをどのように決定するか?

未知の材料特性をどう評価するか



$$K_{st,B} = K_{st,A} \times C$$

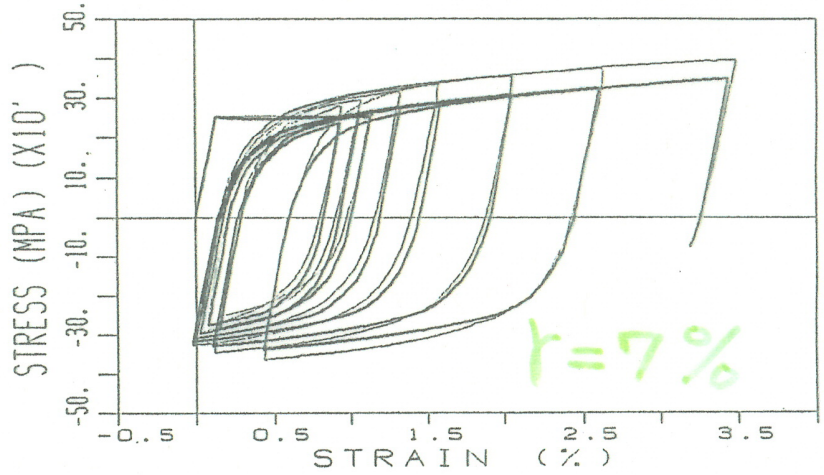
$$K_{conv,B} = K_{conv,A} \times C \quad \text{既知}$$

< Bの材料特性 = Aの材料特性 × 定数 >

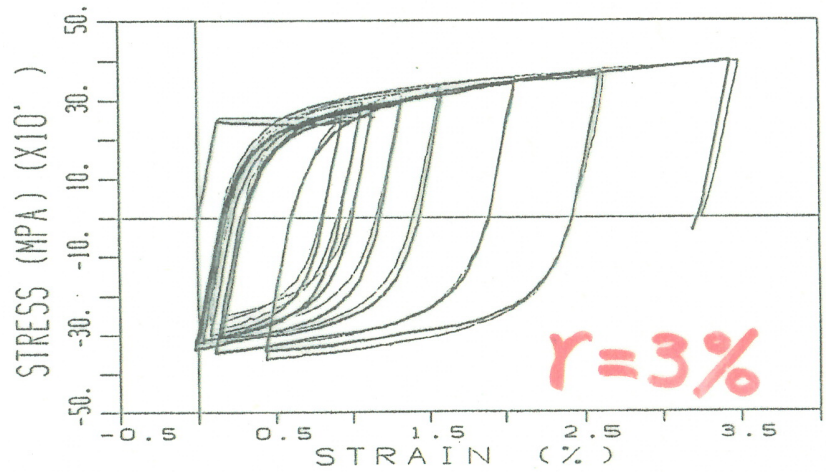
定数C：処女引張応力-塑性ひずみ
曲線において、ひずみが顕著に進
展した領域での応力値の比

—計算, —実験

本研究で求めたSM411に
対する材料特性を
そのまま用いた場合



修正式により
得られる材料特性
を用いた場合



応力-ひずみ関係の比較 - 実験と計算 -

- (1) 提案モデルの第1の適用例としてみ、構
 造用鋼場が10⁻²の履歴引張圧縮のひずみ
 係数推定実施性を個別に実測した結果は、
 こた材と特殊は別個に実施され、先の本
 案を比較し、基礎的
 提案モデルの基本的としたPopovらのモ
 デルを用いて同様の推定を行った。ひ
 Popovらのモデルを過度に評価し、た
 み硬測の結果を現は著大な硬
 化結その傾向顕著な硬
 化結その傾向顕著な硬

(3) 10⁻³ のオーダ一のひずみを受関係るを構造
用鋼材の履用歴応力推囲のひずみを受関係るを構造
モ程究にることが示さ結れ果たが。が。分な精度のを有す
にることが示さ結れ果たが。が。分な精度のを有す

(4) 提案モデに導入された材力特と性ひがる得
ら関で特れ案の推定は材、研可の料で能履の得た歴引らあ料力特と性ひがる得
れ案の推定は材、研可の料で能履の得た歴引らあ料力特と性ひがる得

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

PART-3

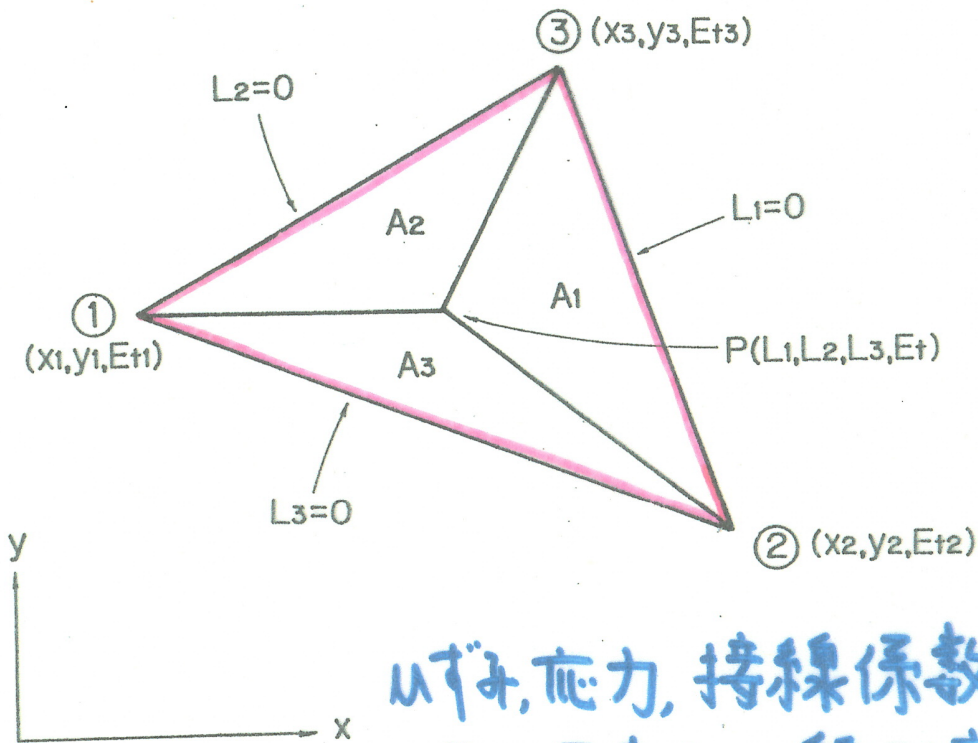
提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

接線剛性法を用いた M- ϕ 関係の計算.

断面を三角形要素に分割する。

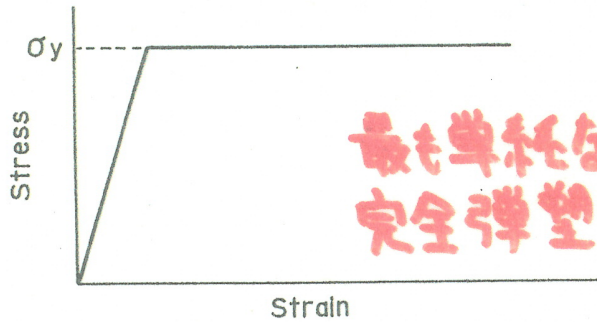


ムズみ, 応力, 接線係数が
三角形要素内で線形変化
するものと仮定.



提案モデルで表わされる応力-ムズみ関係を
断面各部に適用して M- ϕ 関係を計算。

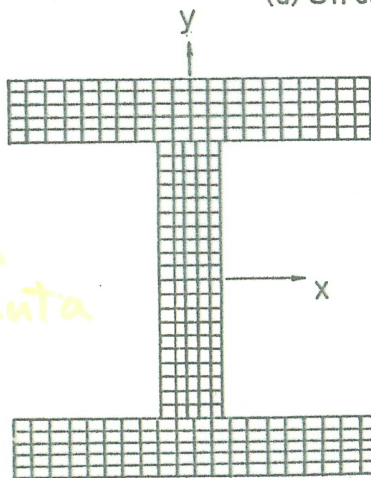
解析システムの妥当性の確認



最も単純な例として、
完全弾塑性材料に仮定

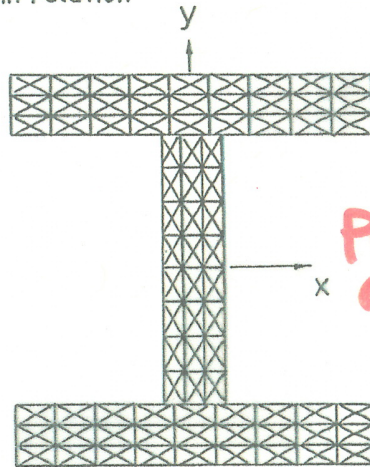
(a) Stress-strain relation

Chen & Atsuta



Chen and Atsuta

Present analysis

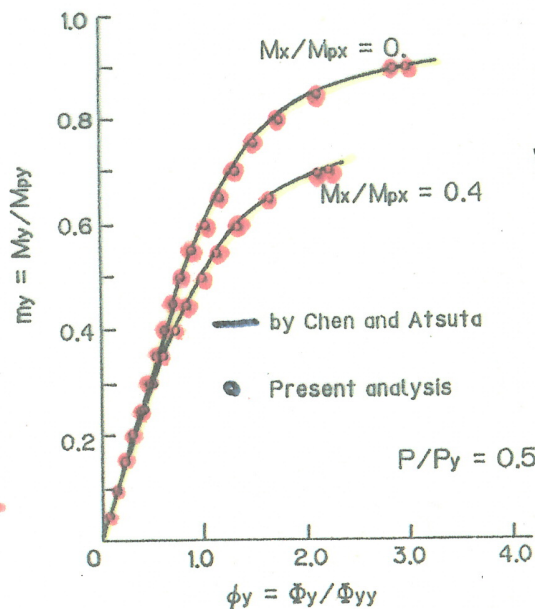


Present analysis

(b) Mesh pattern

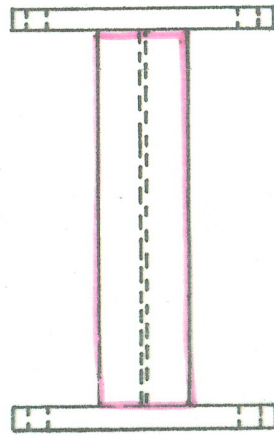
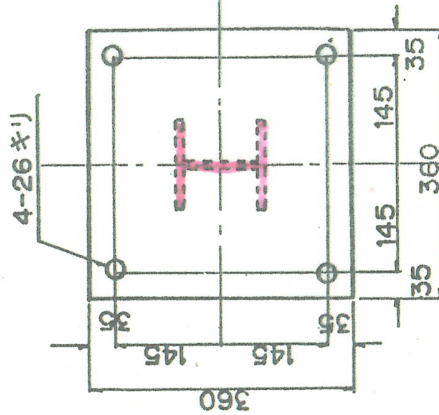
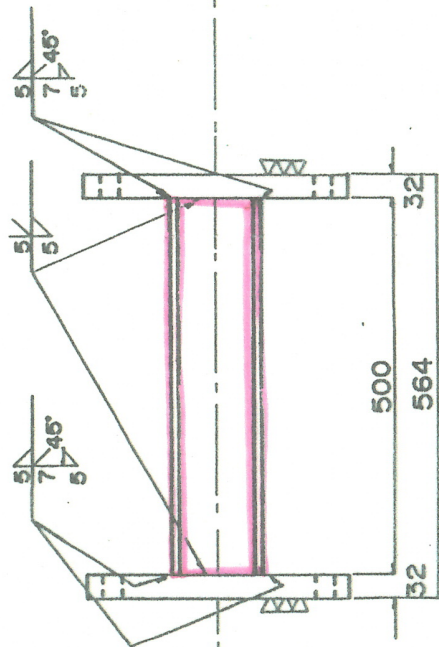
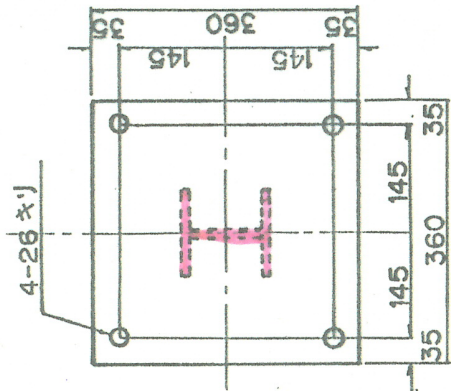
Chen & Atsuta
による結果

●
本解析結果

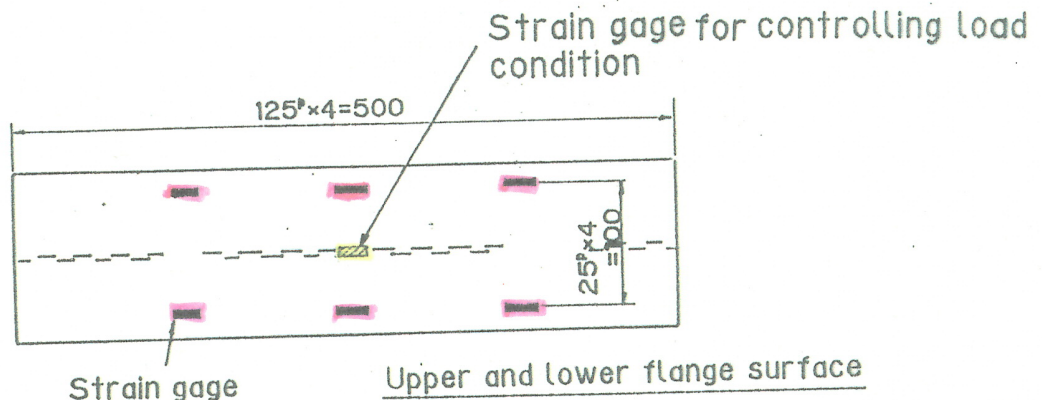


定軸力
定強軸曲げ)
の下での
弱軸曲げ

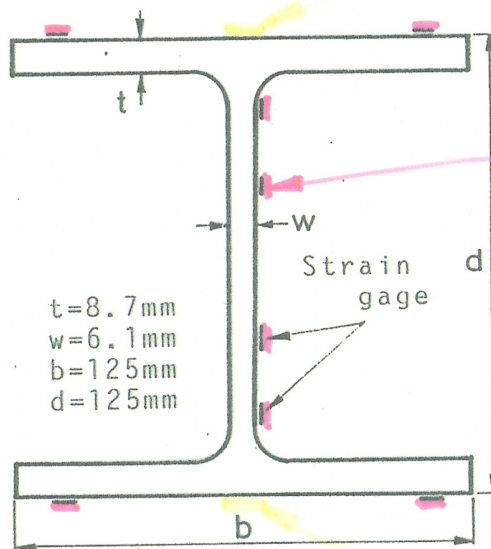
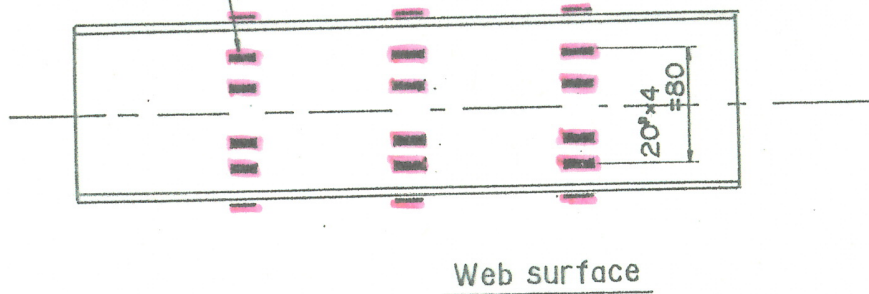
(c) Analytical results



圧延H型鋼により製作された試験部。



(a)



負荷の制御用の
ひずみゲージ
0.0001mm/mm/sec

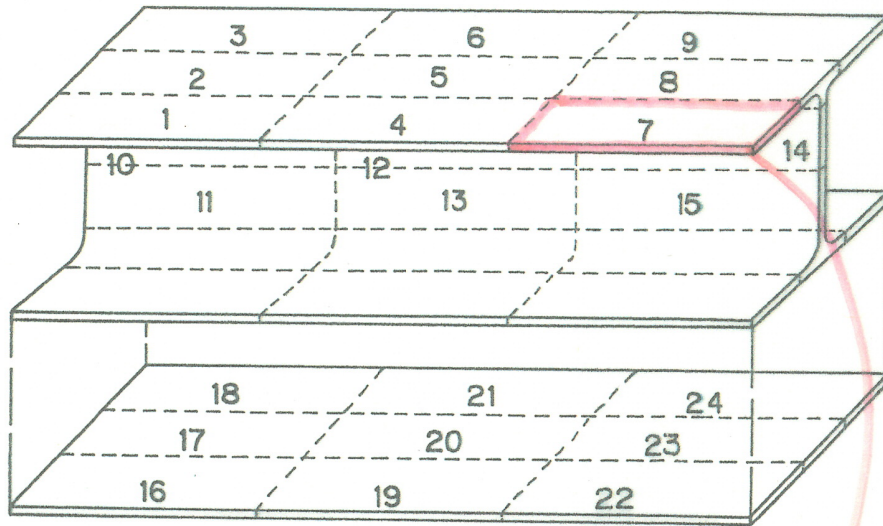
計測用の
ひずみゲージ

(b)

負荷の制御用の
ひずみゲージ

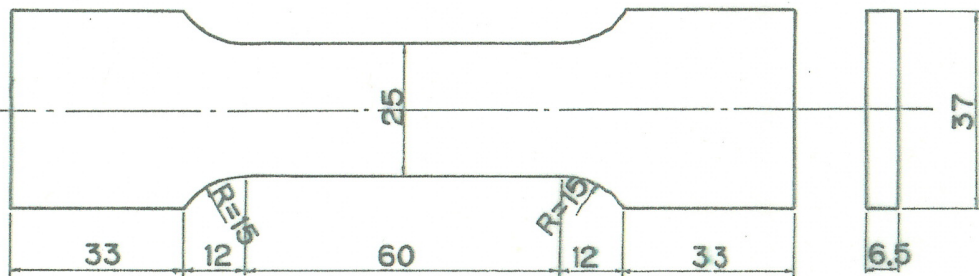
負荷の制御と曲率の測定

素材試験のための試験片の作成



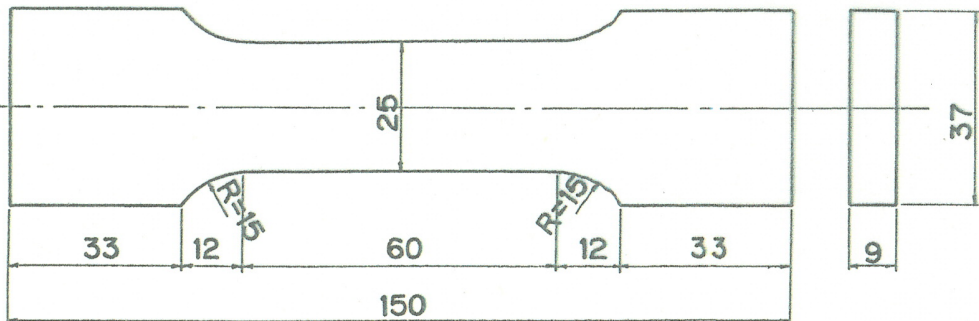
FNJ

6体



FNJ

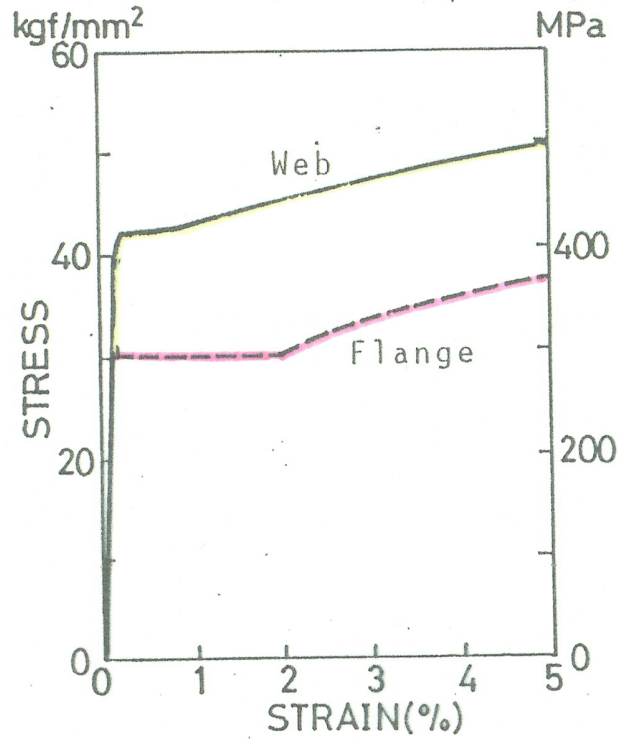
18体



(unit : mm)

—JIS5号型— (表面切削せず)

引張試験の結果

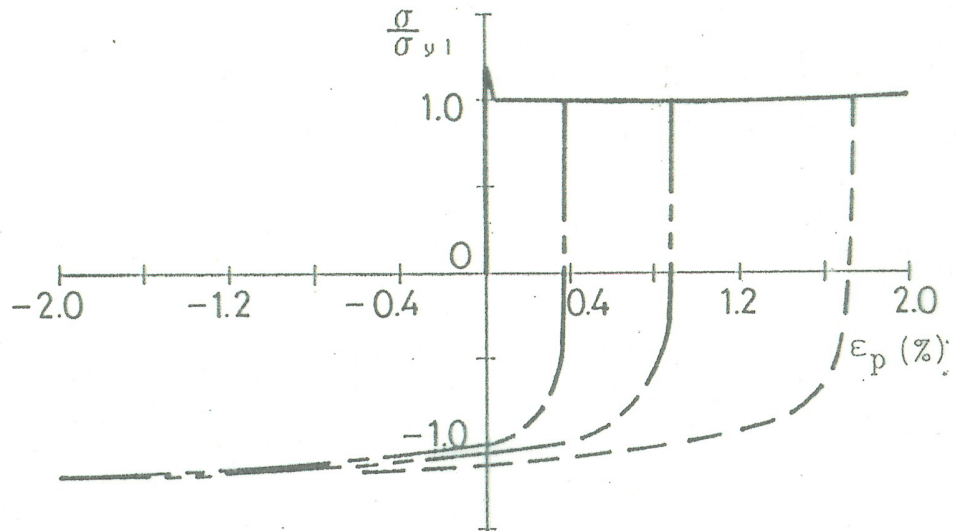


降伏点 引張強さ 破断強さ ヤング率

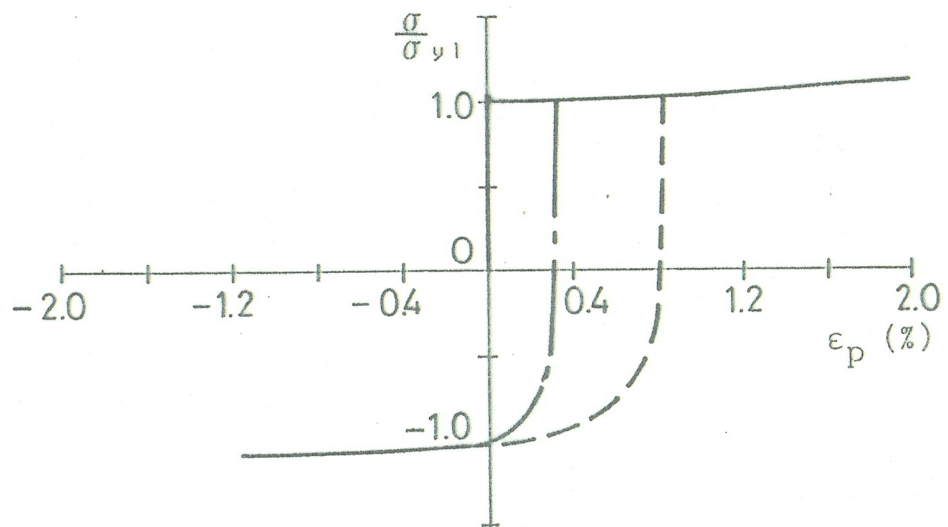
	σ_{yu}	σ_{y1}	σ_B	σ_b	E $\times 10^5$
flange	344	301	440	347	2.10
web	---	402	498	402	2.10

unit : MPa

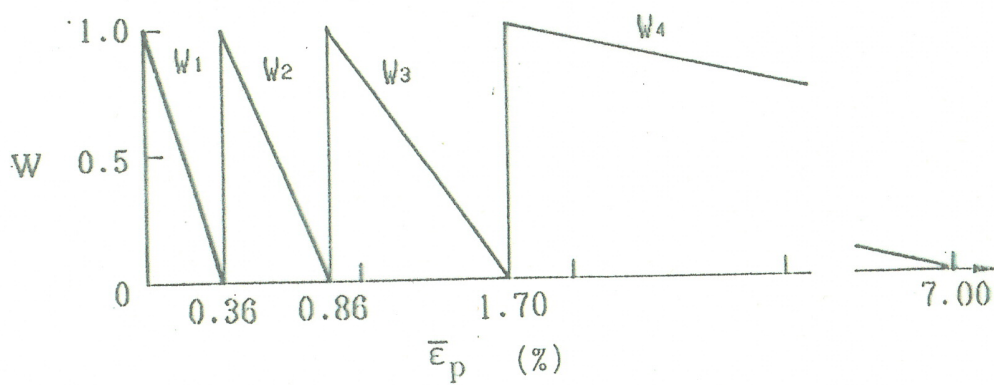
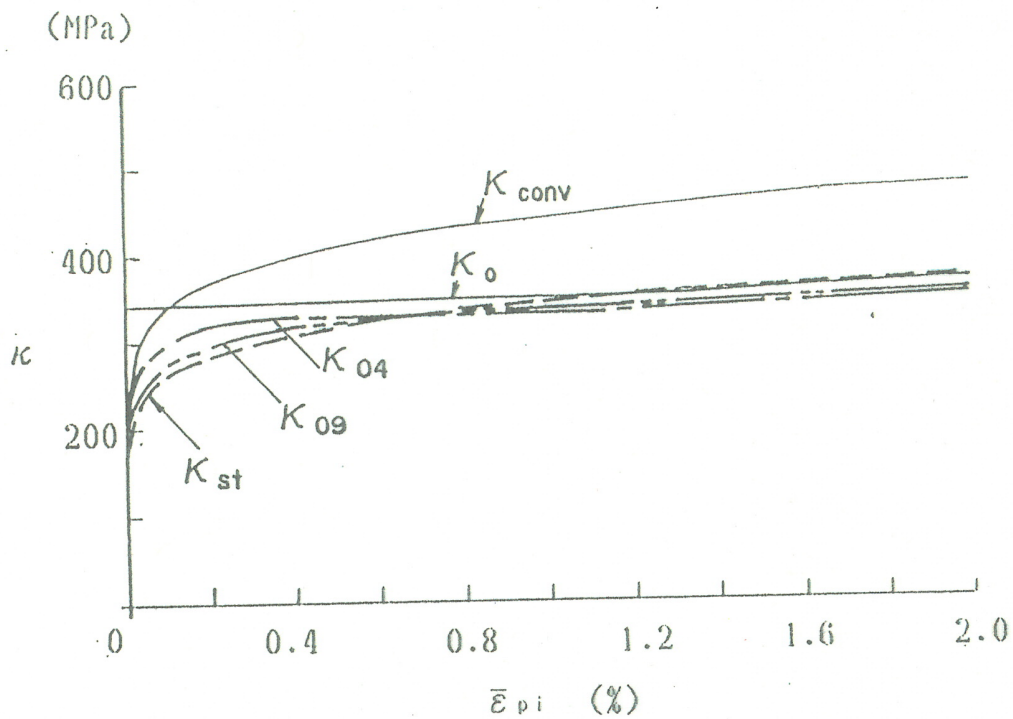
提案モデルのための材料特性を 求める実験結果.



(a) Flange

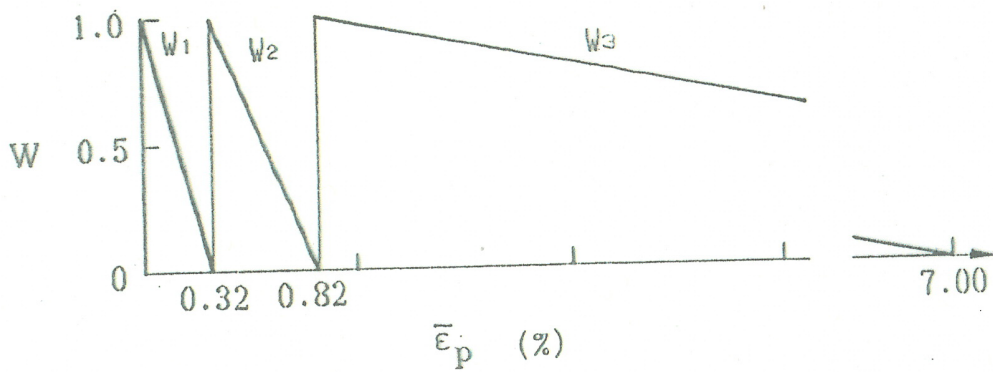
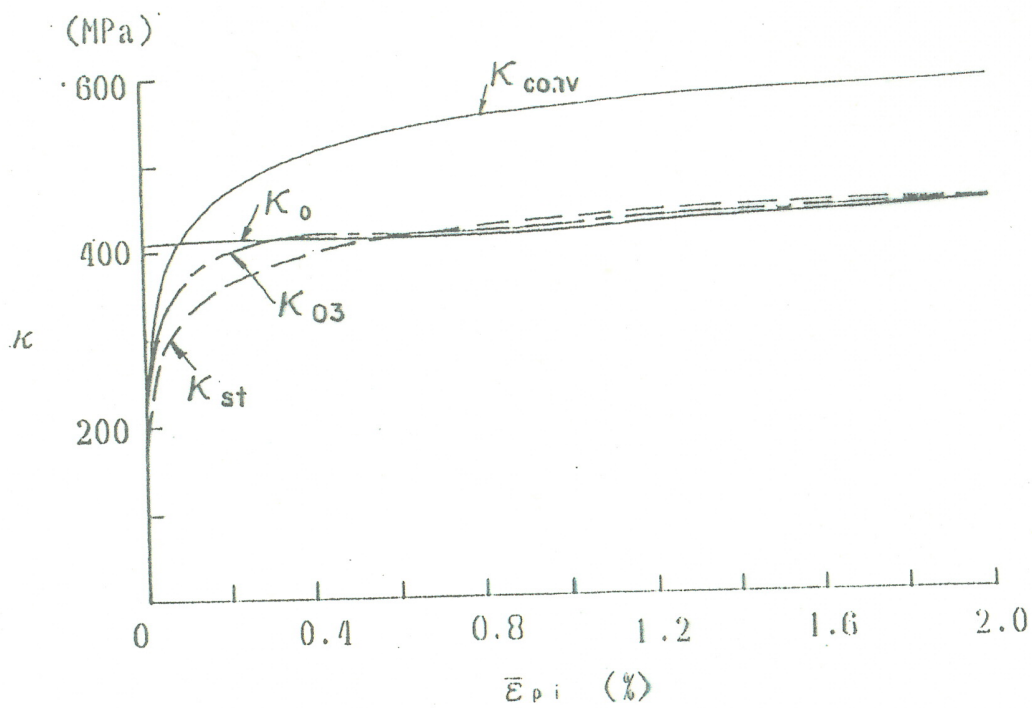


(b) Web



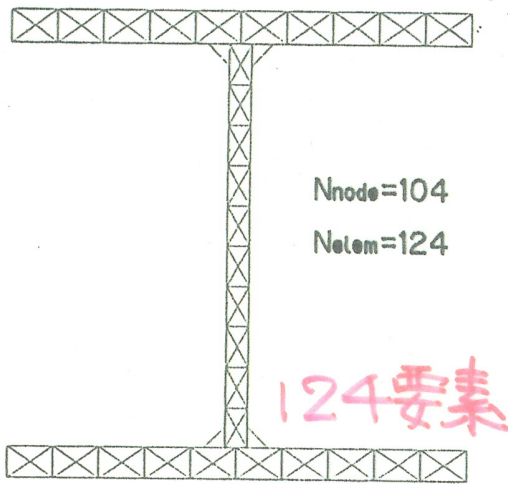
(a) Flange

フランジの材料特性

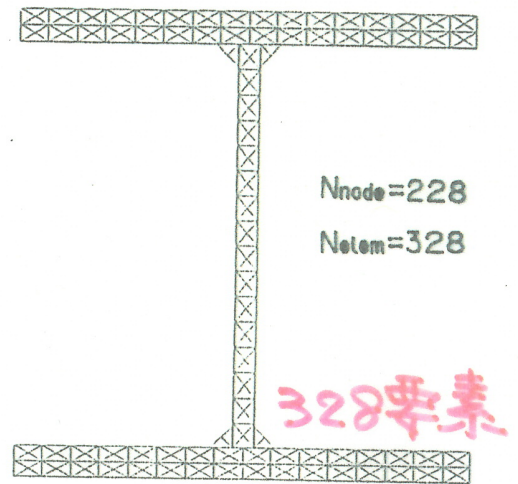


(b) Web

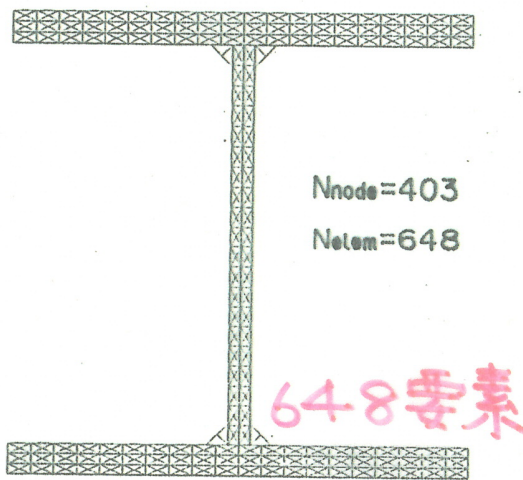
ウェブの材料特性



(a) Mesh pattern A



(b) Mesh pattern B



(c) Mesh pattern C

解析結果に及ぼす
要素分割数の
影響。

解析結果

Moment (kN-m)	Curvature (1/m)		
	Mesh-A	Mesh-B	Mesh-C
9.8	0.00571	0.00571	0.00571
19.6	0.0114	0.0114	0.0114
29.4	0.0171	0.0171	0.0171
39.2	0.0228	0.0228	0.0228
41.2	0.0240	0.0240	0.0240
43.1	0.0251	0.0251	0.0251
45.1	0.0263	0.0263	0.0263
47.0	0.0280	0.0278	0.0277
49.0	0.0321	0.0321	0.0321
50.0	0.0384	0.0381	0.0381
51.0	0.0504	0.0500	0.0500
51.9	0.0846	0.0839	0.0837
52.9	0.219	0.218	0.217
53.9	0.428	0.423	0.422
54.9	0.644	0.637	0.636
55.9	0.860	0.853	0.852
N_{node}	104	228	403
N_{elem}	124	328	648
CPU(sec)	24.7	48.7	85.2
N_{step}	166	167	167
CPU/ N_{step} (sec)	0.149	0.292	0.510

N_{node} is number of nodes.
 N_{elem} is number of elements.
 N_{step} is number of calculation steps.

Computations were carried out on HITAC M682H.

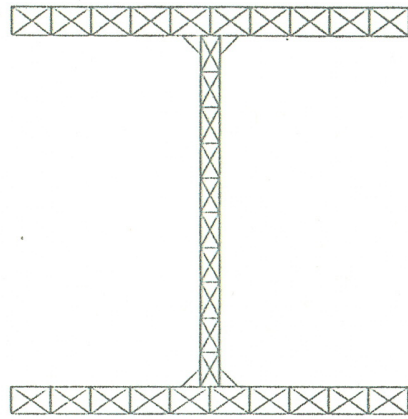
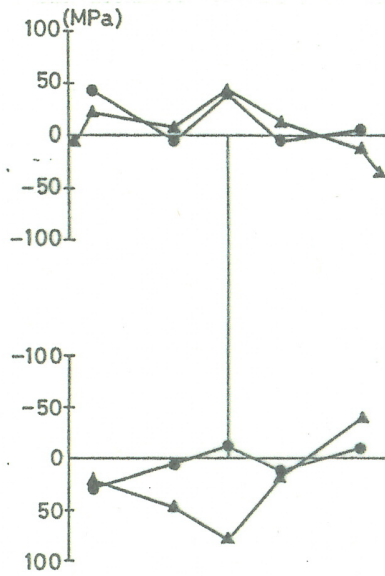


Fig.9 Mesh pattern.

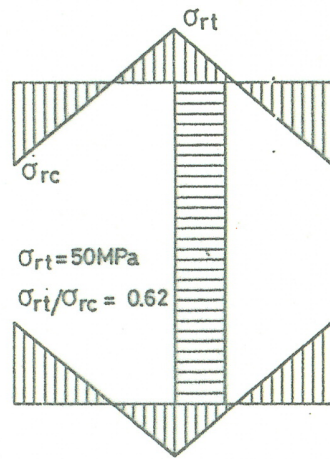
断面の分割

124要素

要素内はずみ線形
変化



(a) measurement



(b) modelling

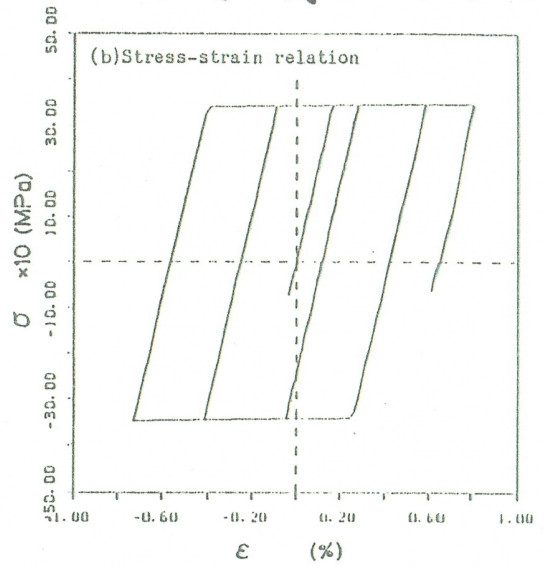
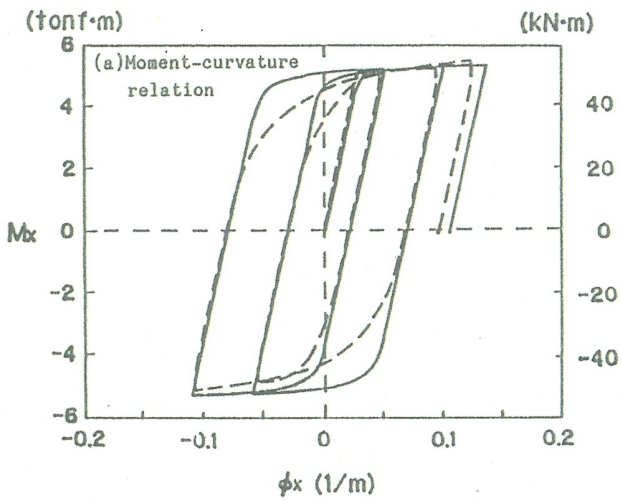
Fig.8 Residual stress distribution.

残留応力分布

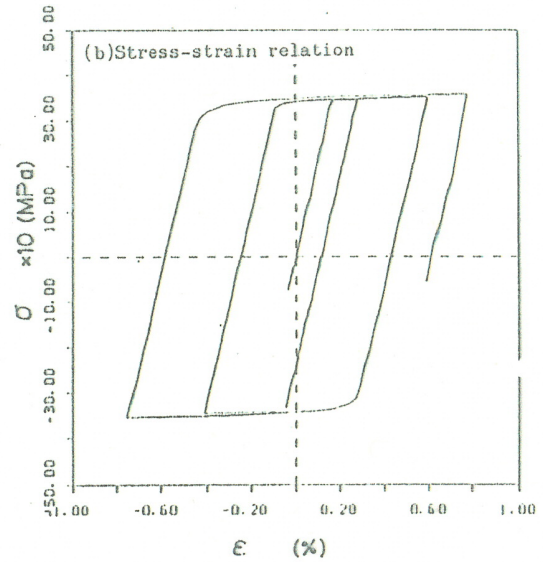
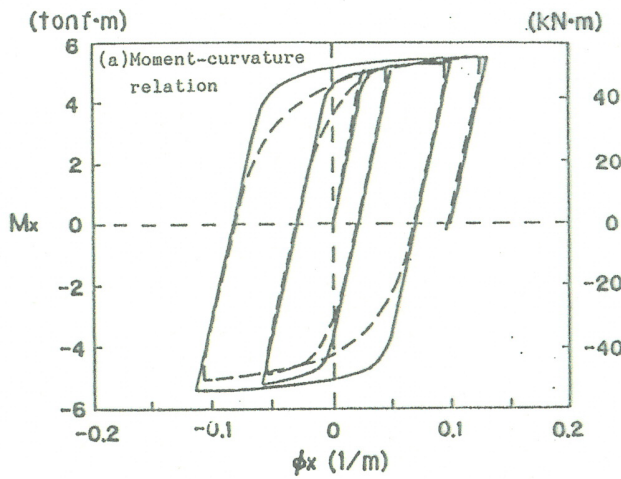
<測定結果> <モデル化>
 孔あけ法による残留応力の測定とモデル化

M-φ 関係

77:2:2の応力-ひずみ関係



バイリニア応力-ひずみ関係を用いた場合
 — 計算, --- 実験



Petersson-Popovモデルを用いた場合

共に、Bauschinger効果を
 表現できない。

- (1) 提案モデルの第2の適用例として、鋼率は
 提は関係モ断面推定の履した。曲げモーメント
- (2) 推定方法は、接線剛性法を修正して、し
 こたれもの提案は、モル線を単軸状態を導入し
- (3) 推定精度を調べるため、圧延H型鋼を
 用い受ける測成結果を調りしたか。型求め、成一片を、延、ト、い型番一試た鋼曲曲験素材
- (4) 実測結果と推定結果の比較から、簡略
 なを異りモ必要測バ用な、デ要結イいる精ルが果りた曲度のあると二場良よる。推ア合モいう。定モに一推な結果、ンを密のやP o p o v 測一うモ比較から果率めルから、との関にをモか係は用

結 論

- (1) 既存の多曲面塑性モデルを改良して、繰り返し塑性モデルを提案した。
- (2) 提案モデルは以下のような特徴を持つ
 - ① 状態変数として累積相当塑性ひずみの有効量を定義している。
 - ② 非硬化ひずみ領域と顕著なひずみ硬化を有する材料に適用できるように配慮されている。
 - ③ 材料特性が、簡単な基本的な測定から決定できる。

(3) 鋼材の履歴引張圧縮応力－ひずみ関係を提案モデルを用いて推定した。

その結果、 10^{-2} 程度のひずみが繰り返される場合、および 10^{-3} 程度のひずみが繰り返される場合の両方に対して、精度良く推定できることが、実測結果との比較から確認された。

(4) 鋼H型断面はりの履歴曲げモーメント－曲率関係を提案モデルを用いて推定した。

その結果、接線剛性法を修正して用いて、応力－ひずみ関係を提案モデルによって表現することによって、精度の良い推定ができることが、載荷試験の結果との比較から示された。

研究の背景

種々の変動荷重を受け、塑性変形の繰り返しを生じる構造物の安全性を評価する



応答解析を工学的に意味のある範囲精度良く実施する



繰り返し塑性ひずみを受ける材料の構成則をモデル化する必要性

構成則のモデルに必要な条件

- ①実測結果を精度良く表現できる
- ②材料特性が明快・簡便に決定できる
- ③既存の解析システムに容易に適用できる

既存のモデル

等方硬化モデル

繰り返し負荷に対するバウシング-効果を表現できない

移動硬化モデル

バウシング-効果はある程度表現できるが、繰り返し負荷に伴うひずみ硬化率の変化を表現できない。

加工硬化係数場モデル (多曲面塑性モデル)

異方硬化特性を表現できるが、比例負荷に対して区分的な線形応力-ひずみ関係となり、また、多曲面の取り扱いが煩雑である。

2曲面モデル (境界曲面モデル)

多曲面を扱う煩雑さがなく、修正モデルも比較的多く提案されているが、小さいひずみ振幅での繰り返しがある場合に実測結果と一致しない欠点がある。

Petersson-Popovモデル

2曲面モデルの上記の欠点を解消するために、多曲面モデルの考え方を再導入したモデルで、多曲面の取り扱いが煩雑であるという欠点を、補間法を用いて避けている。

例えば、

はり一柱の強度及び変形特性は非弾性解析によって正しく評価される。

複雑な形状を有する構造部分の脆性破壊や疲労亀裂伝播を非線形破壊力学で定量的に扱う。

低サイクル疲労強度に、繰返し応力-ひずみ関係や履歴応力-ひずみ関係が影響する。

目 的

構造用鋼材の、ひずみ速度に依存しない繰返し塑性挙動を現象論的に取り扱う構成モデルを構築するとの適用性を示すこと

研究の構成

PART-1

繰返し塑性ひずみを受ける鋼材の構成則をモデル化する

(繰返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された材料特性を評価するための基本測定方法の提案

PART-3

提案モデルによる鋼材の引張圧縮履歴応力-ひずみ関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの履歴曲げモーメント-曲率関係の推定とその妥当性の検証

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

PART-3

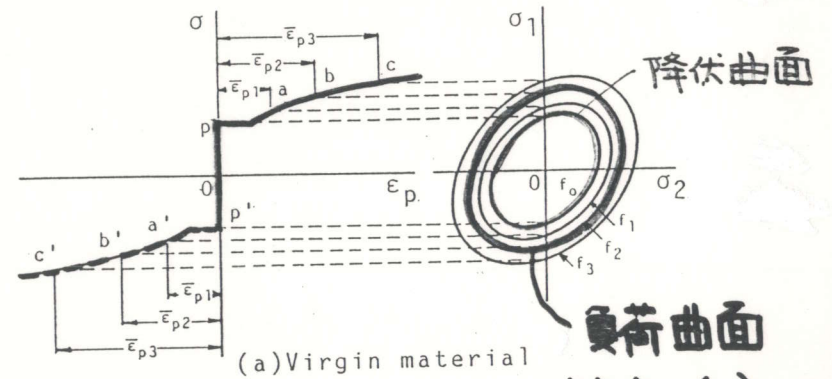
提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

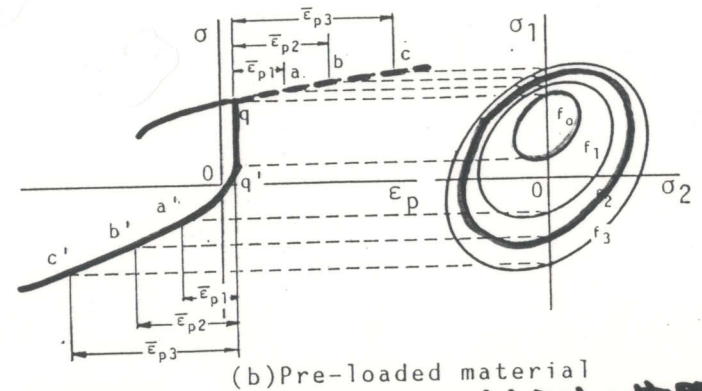
多曲面塑性モデル (Peterson-Popovitch) の概念

負荷履歴の
ない材料

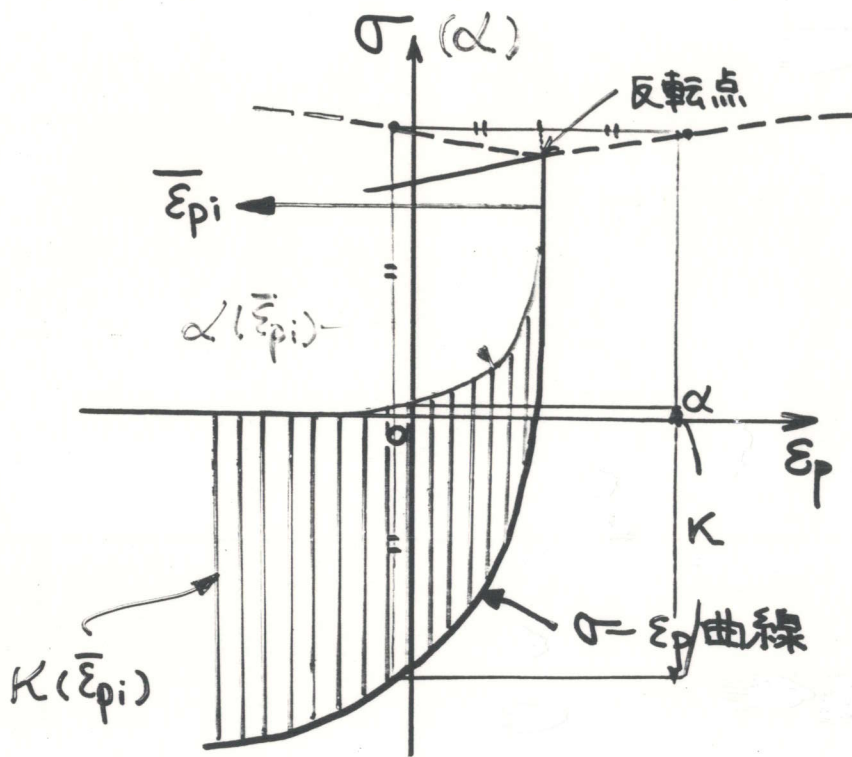


大きさを
中心対して) 定義
される

負荷履歴の
ある材料



単軸応力-塑性ひずみ
曲線 2軸主応力空間
での多曲面の挙動



応力-塑性ひずみ曲線と K, α の関係

状態変数の定義

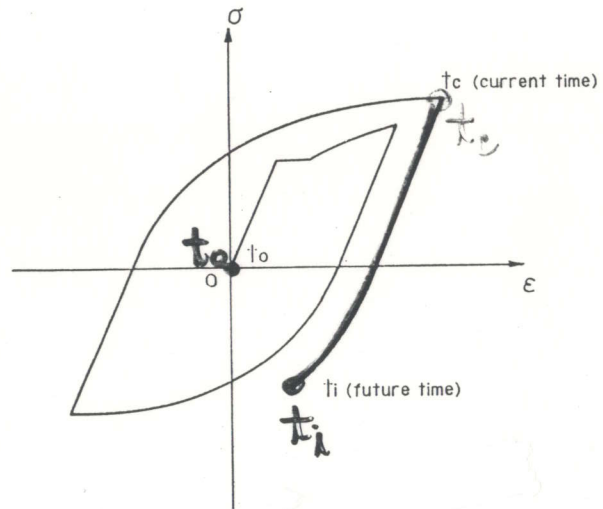
$$\text{相当塑性ひずみの総和} = \text{累積相当塑性ひずみ} + \text{相当塑性ひずみ増分}$$

$$= \underbrace{\text{累積相当塑性ひずみの}}_{\text{有効分}} + \underbrace{\text{累積相当塑性ひずみの}}_{\text{無効分}}$$

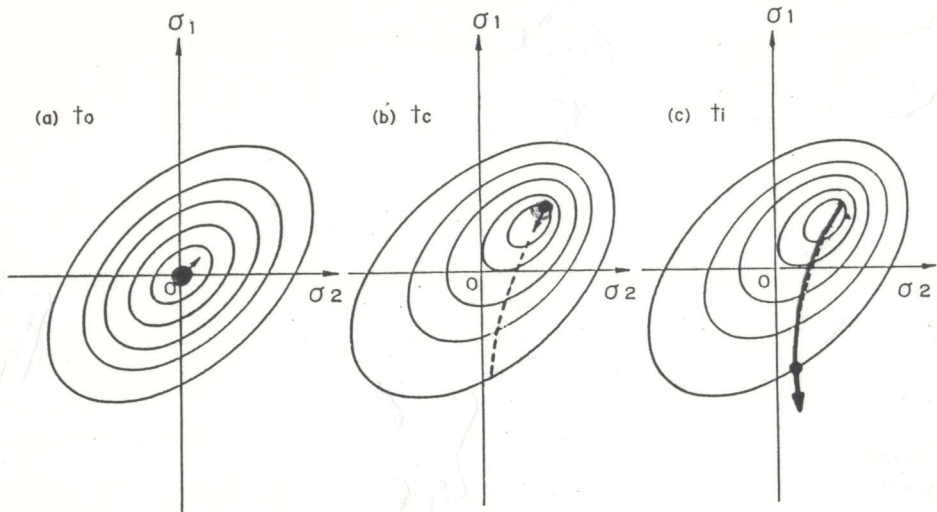
$$+ \text{相当塑性ひずみ増分}$$

$$\geq \underbrace{\text{累積相当塑性ひずみの}}_{\text{有効分}} + \text{相当塑性ひずみ増分}$$

$$\underline{\underline{\bar{\epsilon}_p = \int_{t_0}^{t_1} d\bar{\epsilon}_p}} \quad \underline{\underline{\bar{\epsilon}_{pi} = \int_{t_0}^{t_i} d\bar{\epsilon}_p}}$$



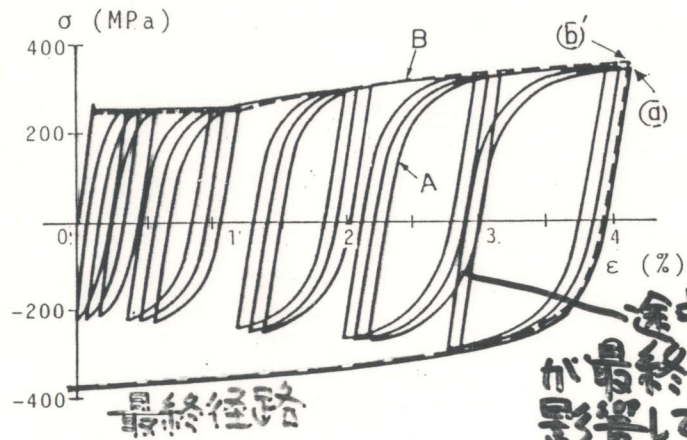
(a) Uni-axial condition



(b) Bi-axial condition

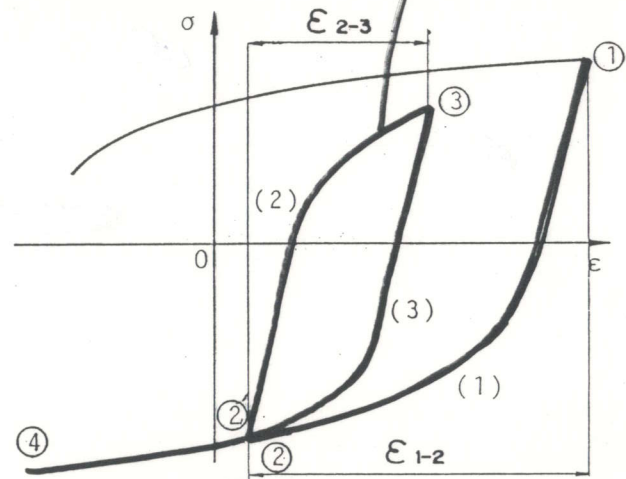
初期状態 t_0 直前の除荷 t_c 現時点 t_i

軟鋼に対する実験結果



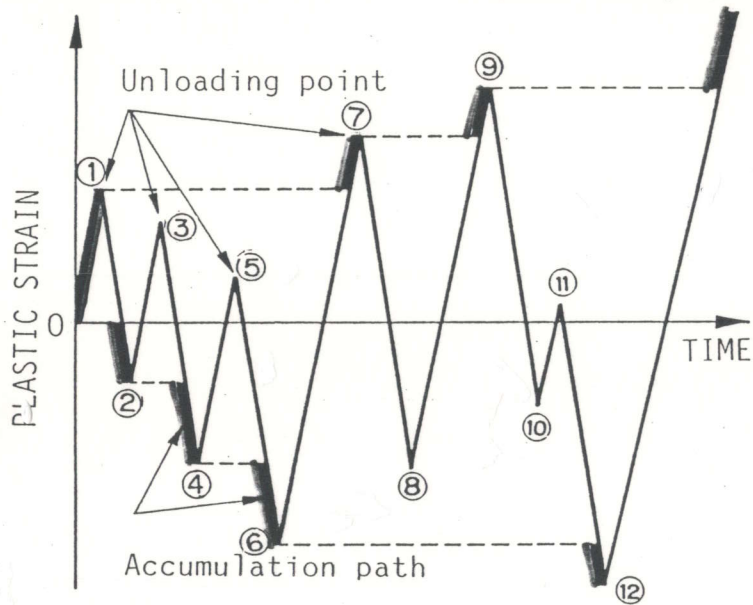
途中の繰返し
が最終経路に
影響していない。

後の応かみずみ関係に
影響しない経路



復帰現象

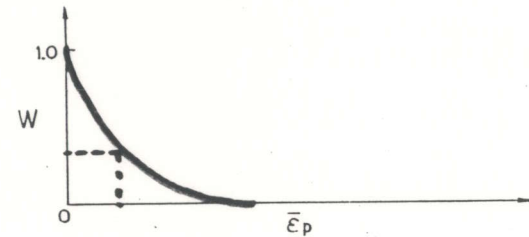
相当塑性ひずみの有効な累積量
(単軸の場合)



— 有効な径路
- - - 有効でない径路

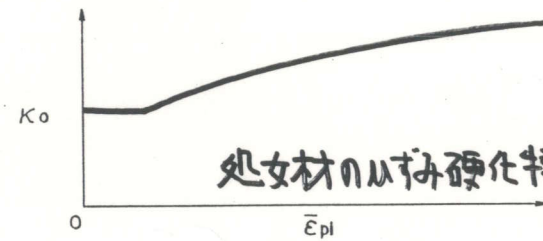
Petersson-Popovモデルにおける
ひずみ硬化率の表わし方

重み関数



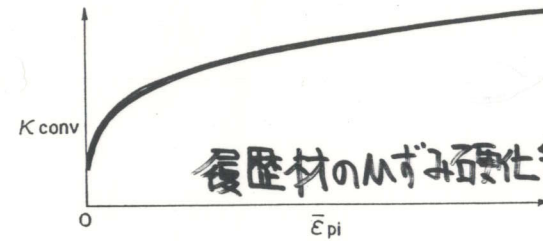
$\bar{\epsilon}_p$ の関数

基本曲面サイズ関数



処女材のひずみ硬化特性: K_0

$\bar{\epsilon}_{pi}$ の関数

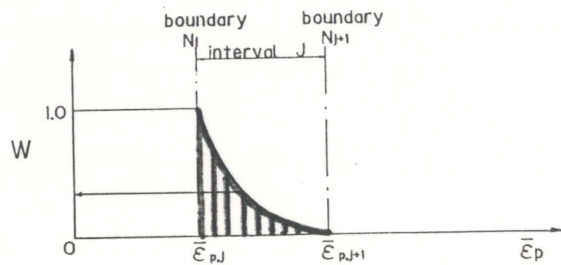


履歴材のひずみ硬化特性: K_{conv}

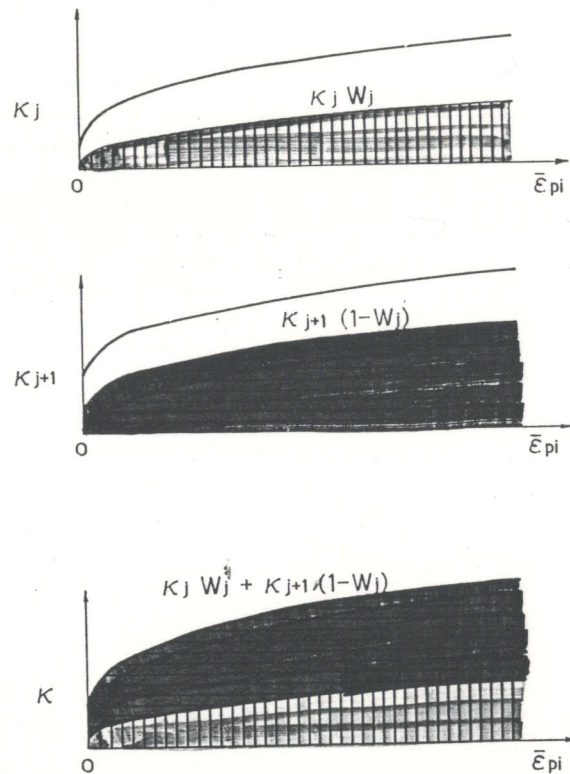
$$K = \underline{W} \cdot K_0 + (1 - \underline{W}) K_{conv}$$

提案モデルにおける
Mずみ硬化率の表わし方

重み関数



基本曲面サイズ関数



材料特性 塑性履歴の肉致

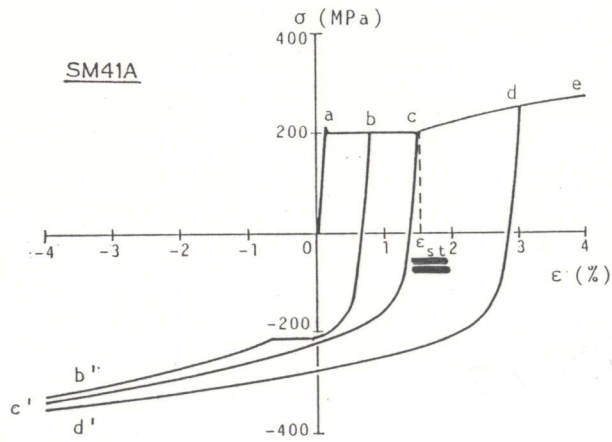
① 基本曲面サイズ関数: $K_1 \sim K_N$
ある特定のMずみ履歴の段階での
Mずみ硬化特性を表わす。

② 重み関数: $W_1 \sim W_{N-1}$
それらの中間的なMずみ履歴の
段階でのMずみ硬化特性を表わす。

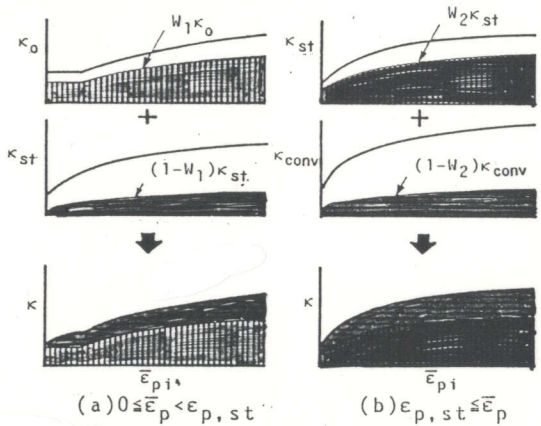
$$K = W_i K_i + (1 - W_i) K_{i+1}$$

任意のMずみ履歴の段階での
Mずみ硬化特性

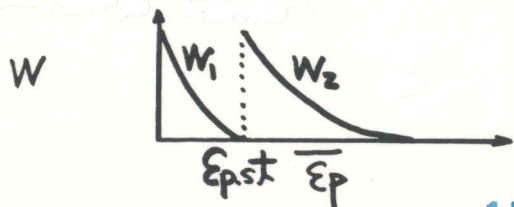
軟鋼に対する実験結果



$$W_1 \cdot K_0 + (1 - W_1) \cdot K_{st} = K$$

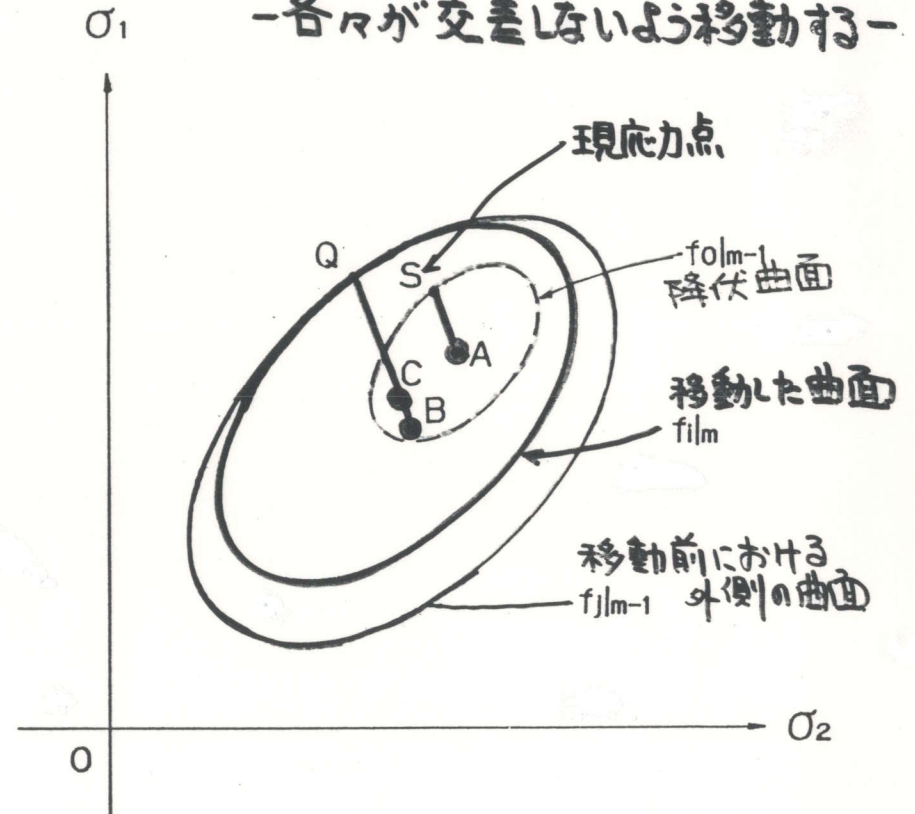


$$W_2 \cdot K_{st} + (1 - W_2) \cdot K_{conv} = K$$



多曲面の移動の法則.

-各々が交差しないよう移動する-



$$\overline{BQ} = K (\overline{\epsilon}_{p|m-1}, \overline{\epsilon}_{p|l} + \Delta \overline{\epsilon}_{p|m})$$

$$\overline{CQ} = K (\overline{\epsilon}_{p|m}, \overline{\epsilon}_{p|l})$$

$$\overline{AS} = K (\overline{\epsilon}_{p|m-1}, 0)$$

$$AS \parallel BQ$$

- (1) Popovらによって先に提案された多曲面塑性モデルを基本とした、繰り返し塑性モデルを提案した。
- (2) 提案モデルにおける状態変数は、累積相当塑性ひずみおよび累積相当塑性ひずみ増分である。
- (3) 単軸試験において観察される復帰現象を表現するため、累積相当塑性ひずみの有効量を定義した。
- (4) 材料特性は、いくつかの特定の履歴段階でのひずみ硬化特性を表す基本曲面履歴サイズ関数と、それらの中間的履歴段階でのそれを表す重み関数である。これらによって、多曲面の履歴依存性が表現される。
- (5) 多曲面の移動は、すべての曲面が交差しないような法則に従う。

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

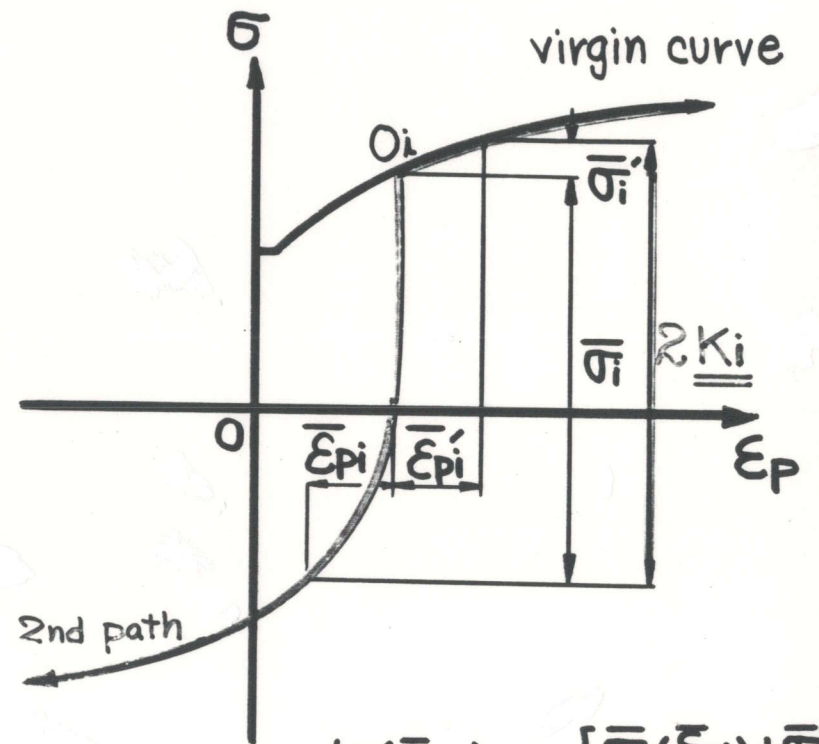
PART-3

提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

Kiの算出方法

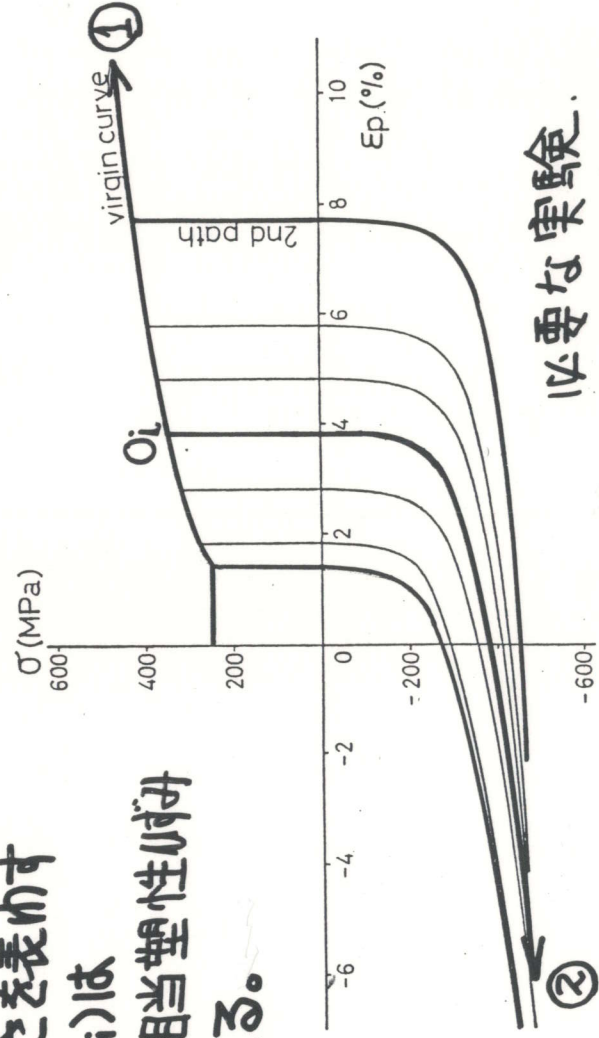


$$K_i(\bar{\epsilon}_{pi}) = \frac{[\bar{\sigma}_i(\bar{\epsilon}_{pi}) + \bar{\sigma}'_i(\bar{\epsilon}_{pi})]}{2}$$

K_i : ある履歴段階での曲率に対する割数

実験 - 材料特性の決定 -

曲面の大きさを表わす
関数 $K_i(\bar{\epsilon}_p)$ は
有効累積相当塑性ひびき
によって定まる。



必要な実験.
(1) 引張試験.
(2) 唯一回の反転を含む
繰返し試験.

SM41A 試験結果

重み関数の決定方法.

$$K = w_i \cdot K_i + (1 - w_i) K_{i+1}$$

$i = 1, N_b$

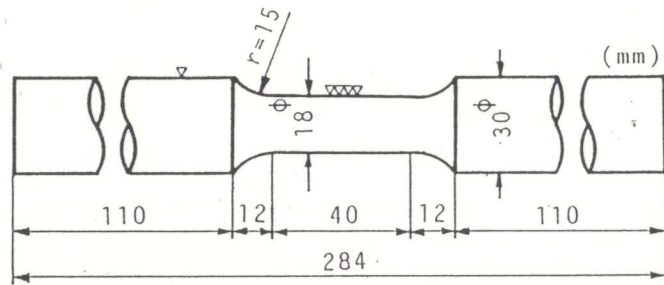
⇓

$$w_i = \frac{K - K_{i+1}}{K_i - K_{i+1}}$$

K, K_i, K_{i+1} は $\bar{\epsilon}_p$ の関数で既知.

∴ 特定の $\bar{\epsilon}_p$ の値に対する重み w_i が
 $\bar{\epsilon}_p$ の関数として求められる。

試験片の形状寸法.

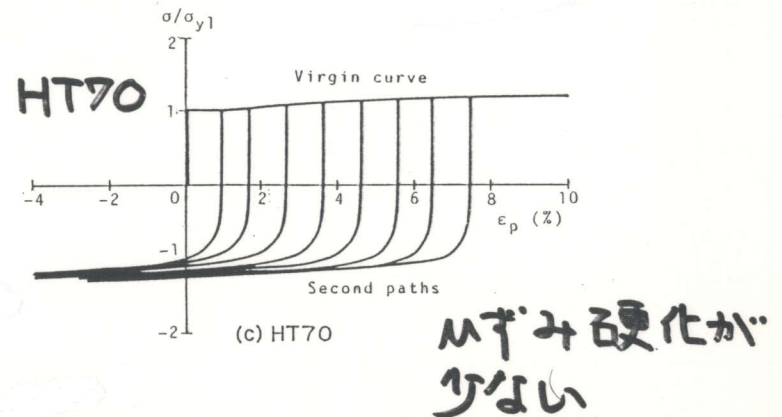
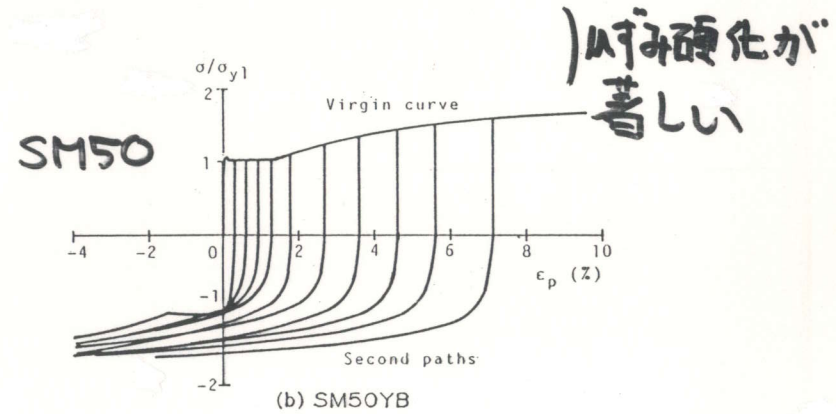
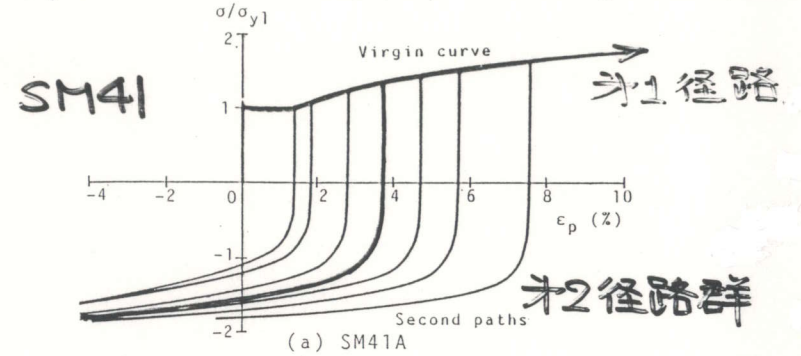


供試鋼材:

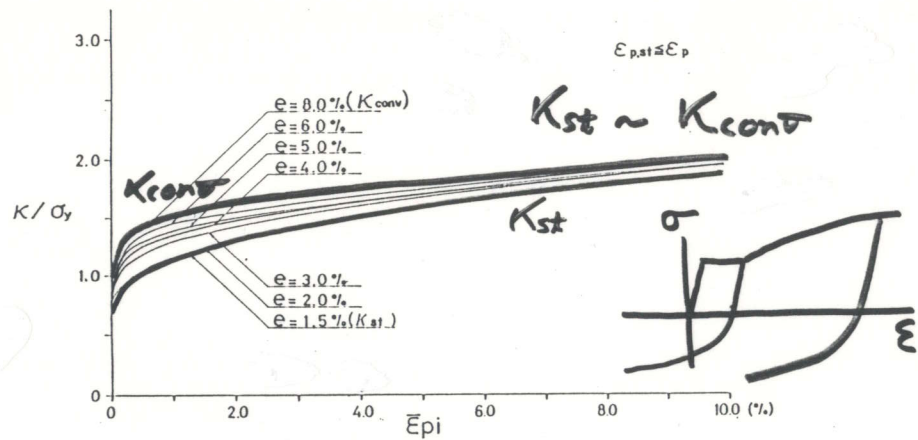
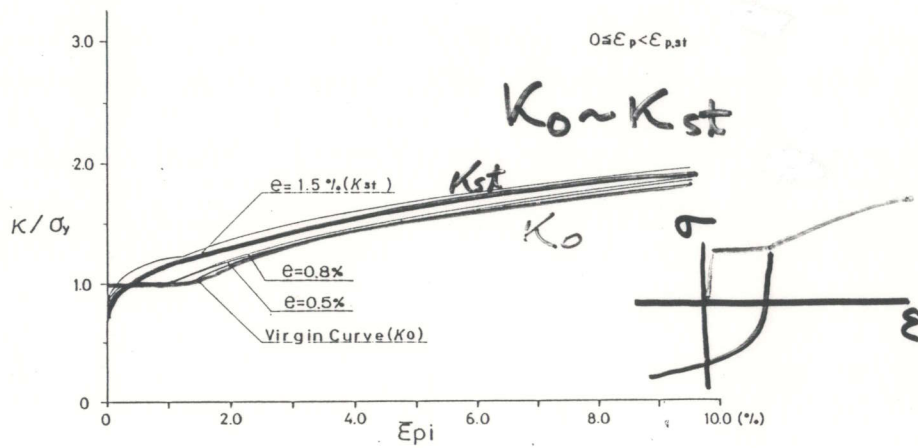
軟鋼 → SM41, SM50

高張力鋼 → HT70

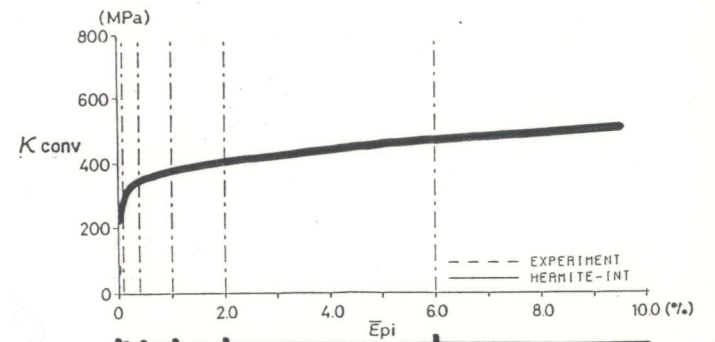
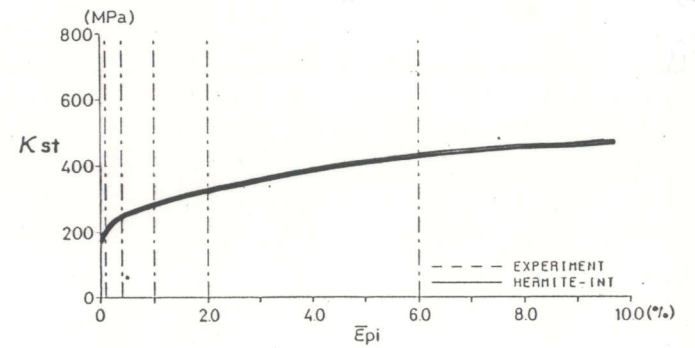
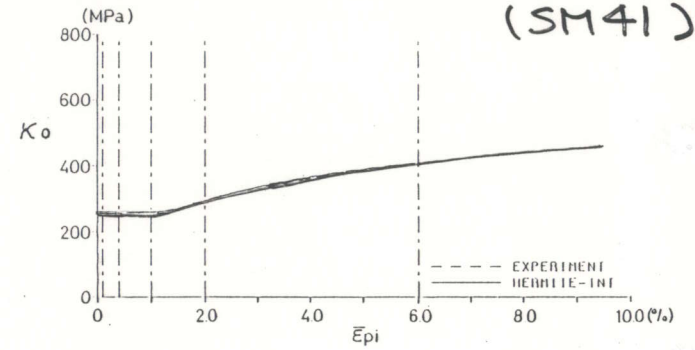
材料特性を決定する実験の結果.



実験結果から計算された曲面サイズ関数群

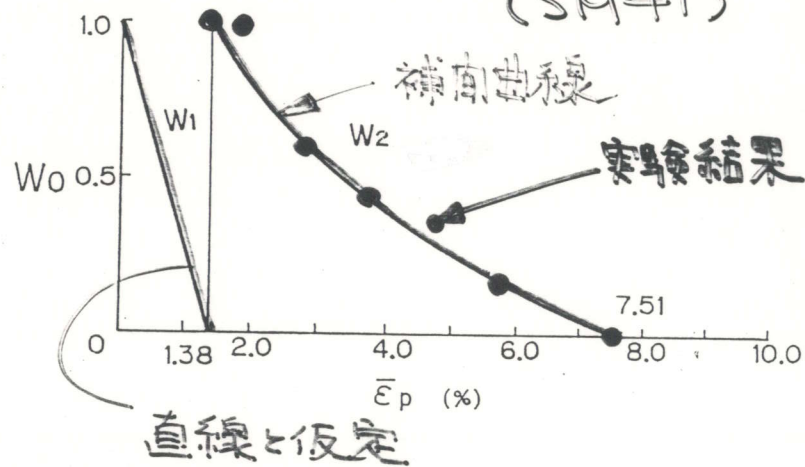


実験結果から求められた基本曲面サイズ関数 (SM41)

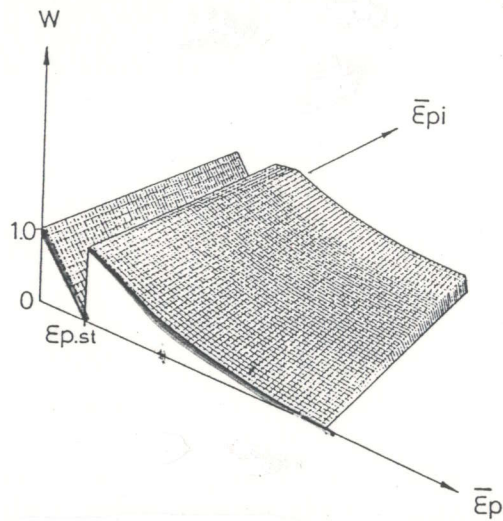


各区間でエリミナ補面

実験から求められた重み関数 (SM41)



直線と仮定



PART - 2

まとめ

(1) 材料特性である基本曲面サイズ関数と重み関数は、次の基本的な試験において測定される応力と塑性ひずみの関係から決定することができる。

① 単調引張試験

② 1回の除荷を含む引張圧縮試験

(2) 適用例として、3種の構造用鋼の材料特性を、実測結果から決定した。特性は、これを特別な使用材料に直接適用する。この点に関してはPART-3で述べる。

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

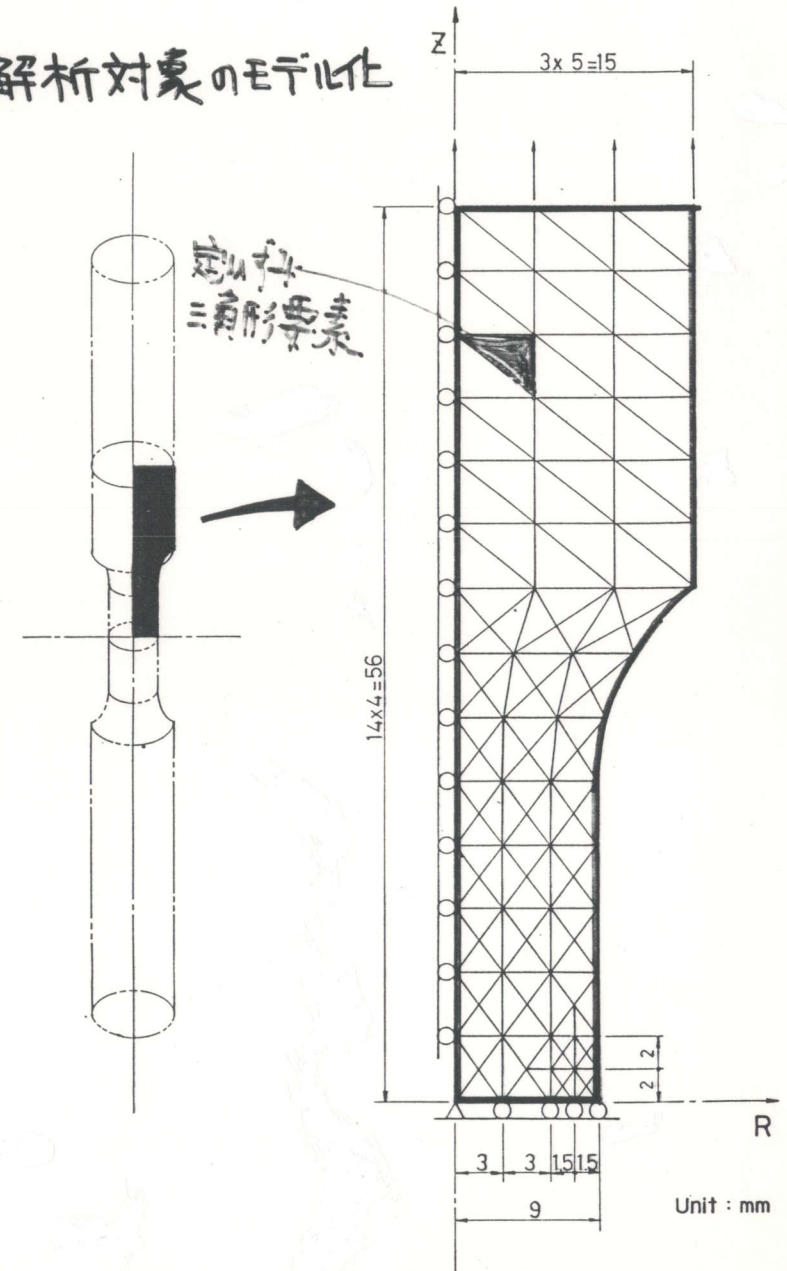
PART-3

提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

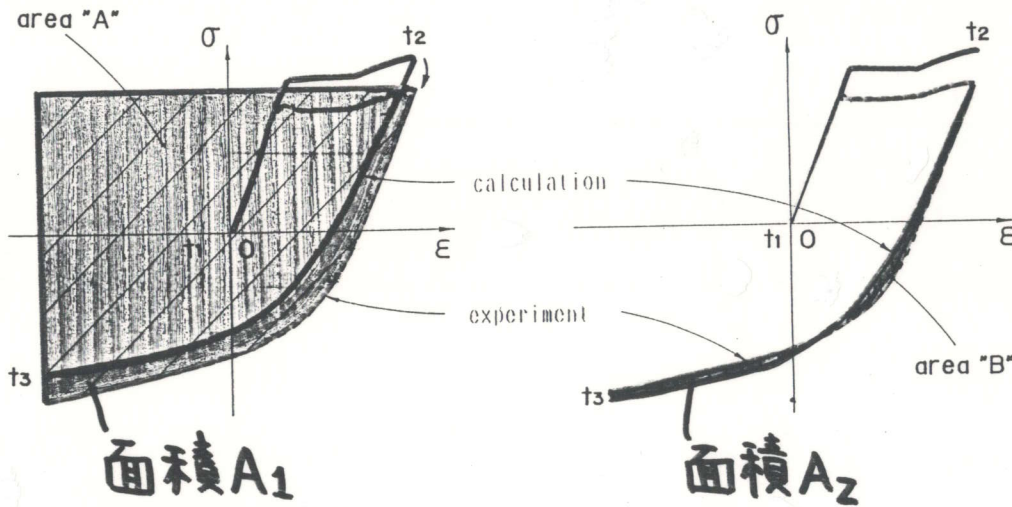
解析対象のモデル化



提案モデルの特徴とその効果

<モデルの設定>

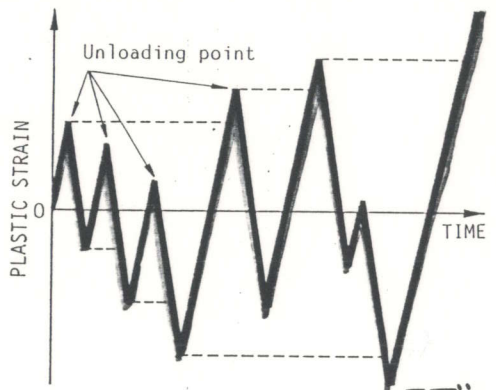
推定誤差の定義



t₂→t₃径路の誤差.

$$\gamma = \frac{A_2}{A_1} \times 100 (\%)$$

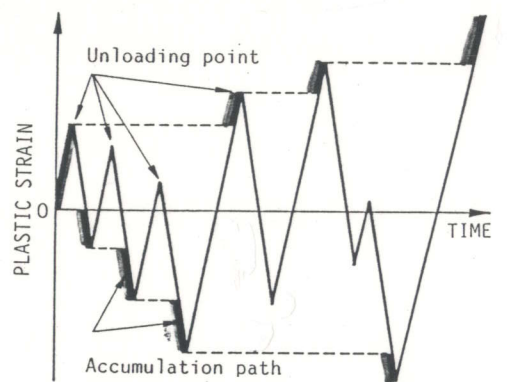
	$\bar{\epsilon}_p$	基本曲面サイズ関数
モデル-1	全径路	K_0, K_{conv}
モデル-2	提案方法	K_0, K_{conv}
モデル-3	全径路	K_0, K_{st}, K_{conv}
提案モデル	提案方法	K_0, K_{st}, K_{conv}



(a)

モデル1, モデル3

全
経
路

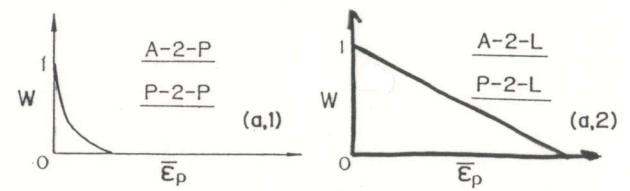
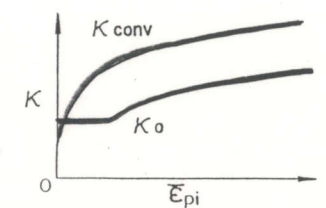


(b)

モデル2, 提案モデル

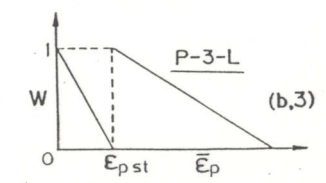
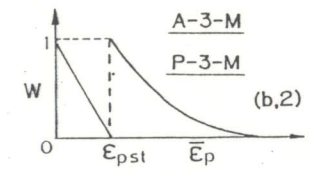
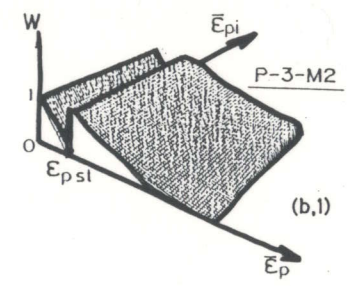
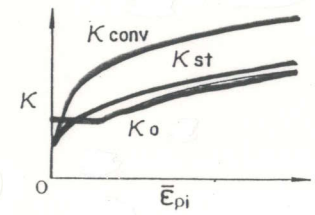
提
案
方
法

単軸状態での塑性ひずみの累積



(a) Case of two fundamental surface size function

モデル1
モデル2



(b) Case of three fundamental surface size function

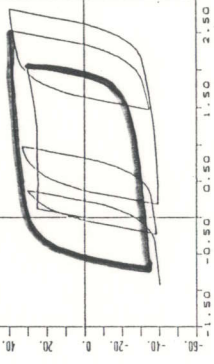
モデル3
提案モデル

基本曲面サイズ関数と重み関数

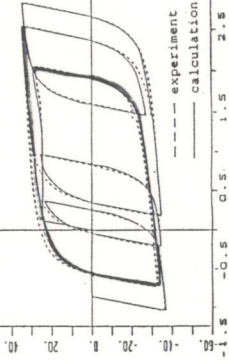
基本曲面サイズ関数

$\kappa_0, \kappa_{st}, \kappa_{conv}$

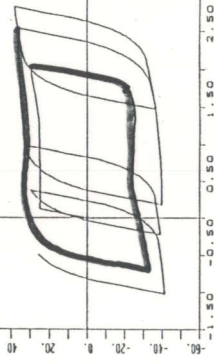
$\nu=11\%$ モデル3



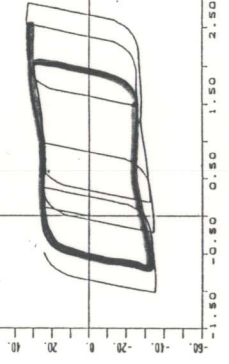
$\nu=3\%$ 提案モデル



$\nu=10\%$ モデル1



$\nu=4\%$ モデル2

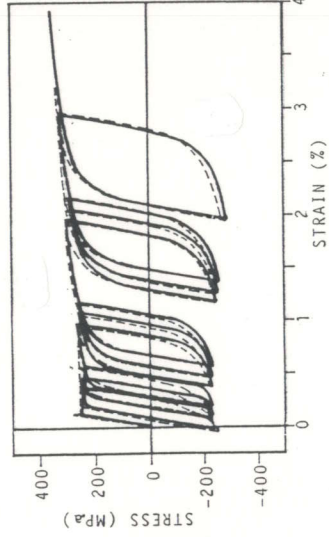


全径路

提案方法

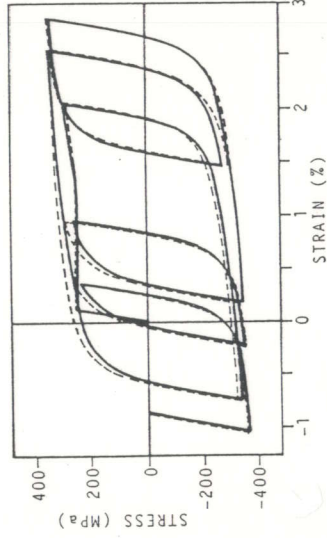
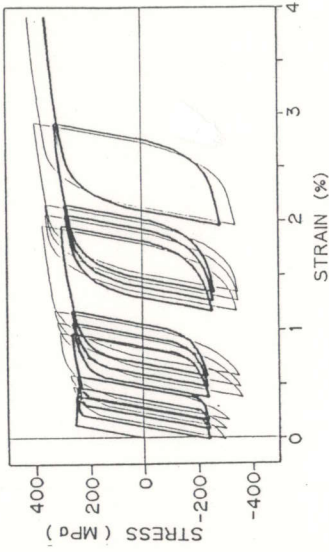
設定されたモデルと提案モデルによる数値計算例

提案モデルと実験結果
の比較

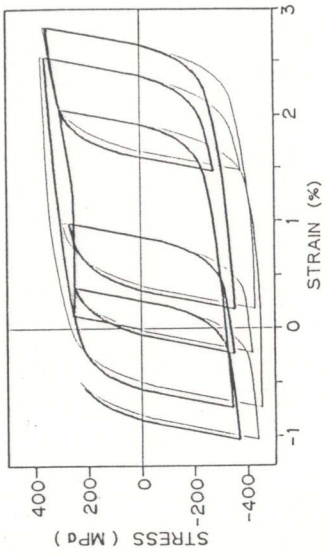


例1

提案モデルとPeterson-Popov
モデルの比較

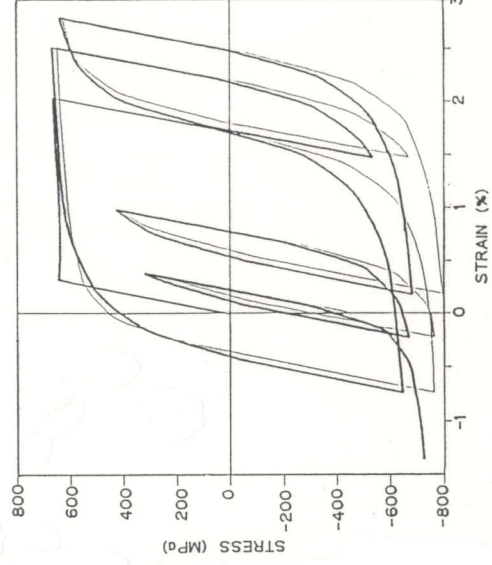
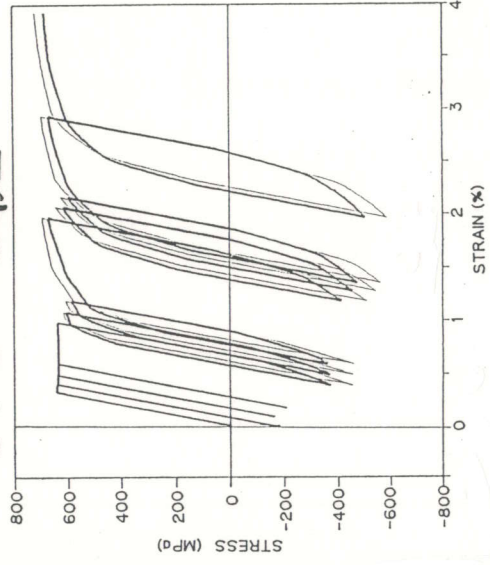


例2

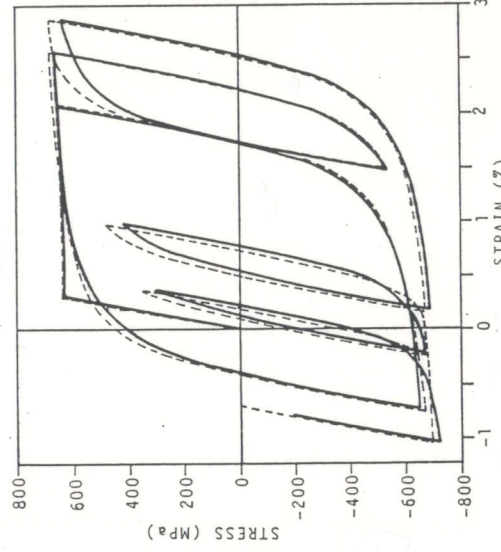
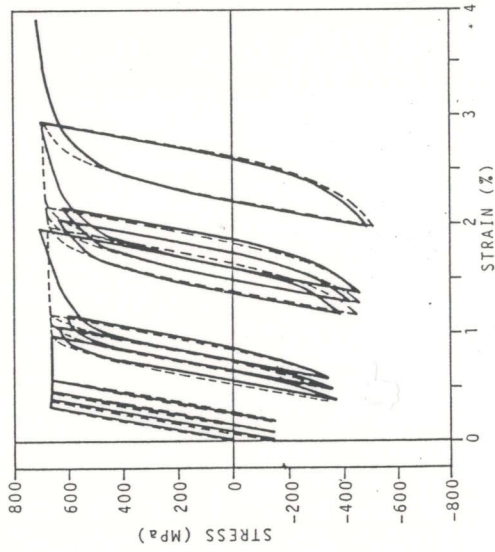


＜軟鋼例 SM41＞

提案モデルとPeterson-Popov
モデルの比較



提案モデルと実験結果
の比較

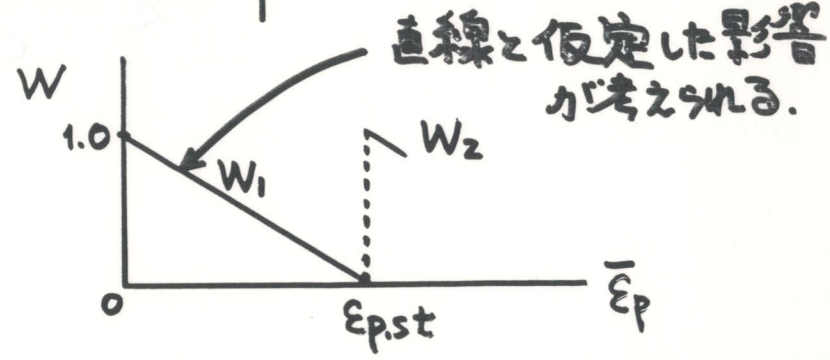
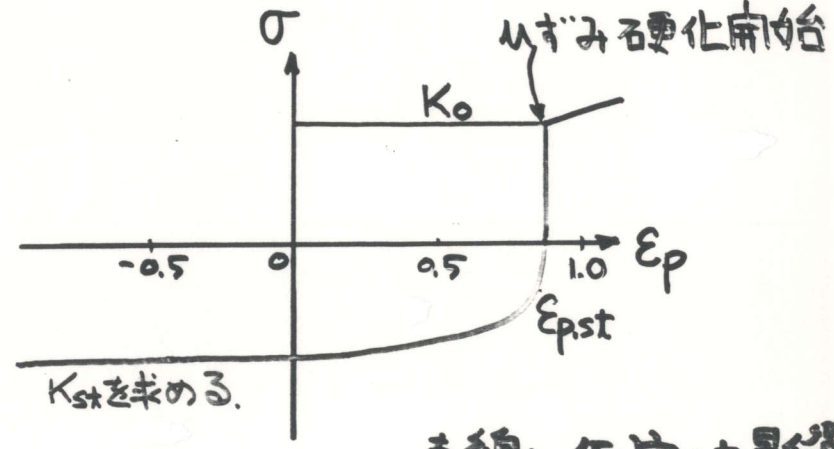


例3

37

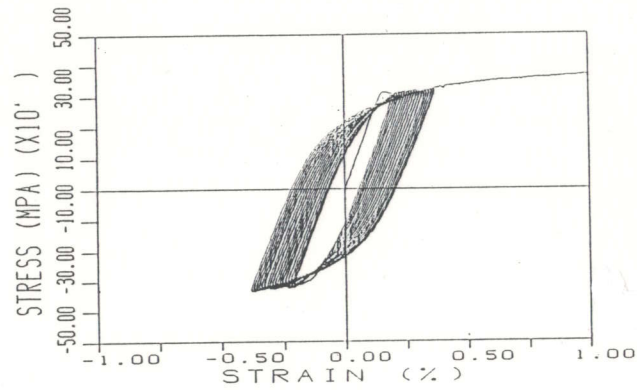
例4

非硬化ひずみ領域での推定
...ひずみのオーダー 10^{-3}



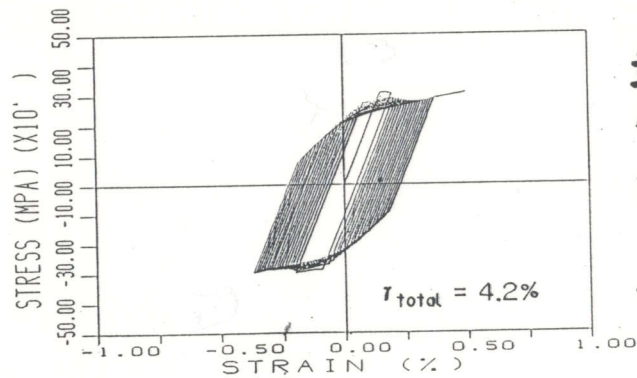
38

実験結果と数値計算結果の比較



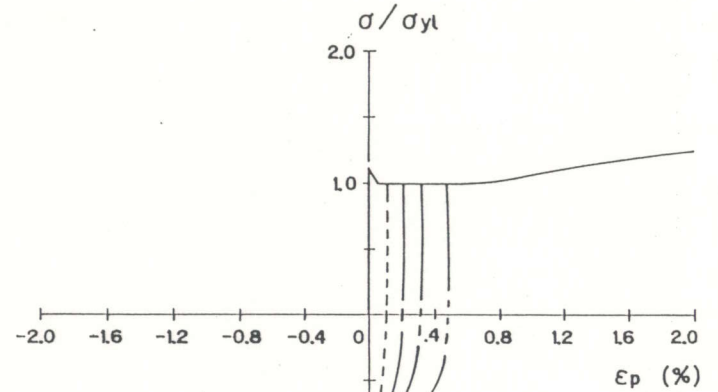
(a) Experiment

実験

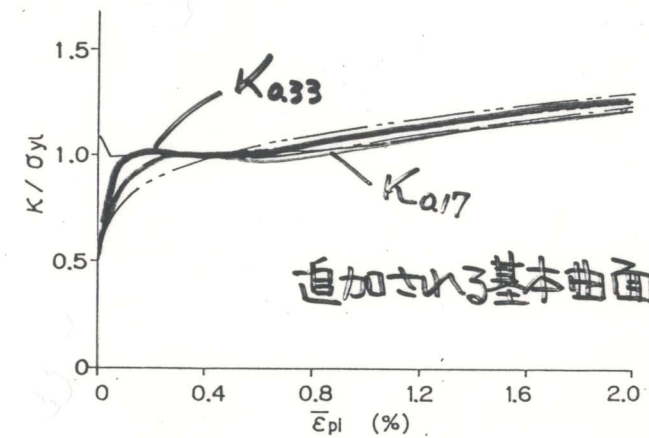


(b) Calculation

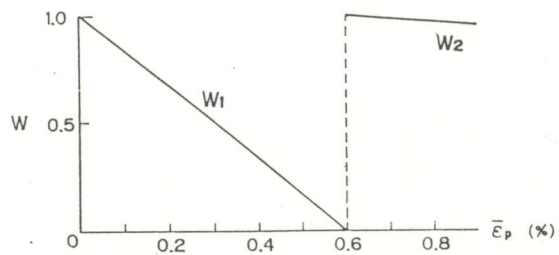
数値計算



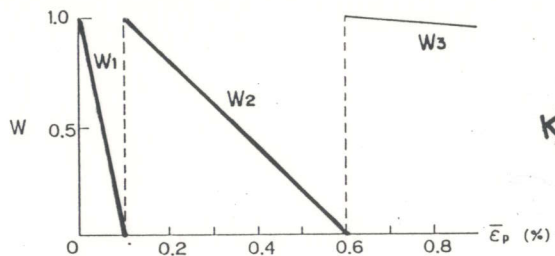
基本曲面サイズ関数の測定



追加される基本曲面サイズ関数

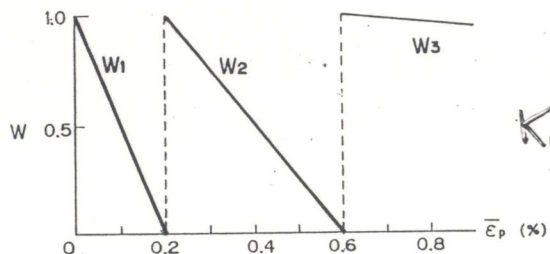


(a) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were not introduced



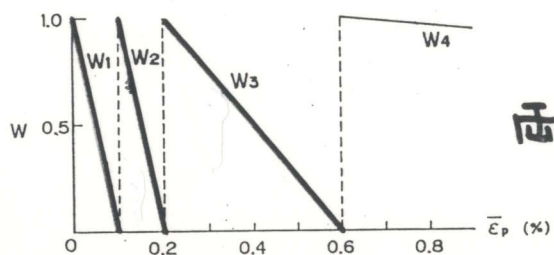
(b) $K_{0.17}$ was introduced

$K_{0.17}$ 追加



(c) $K_{0.33}$ was introduced

$K_{0.33}$ 追加

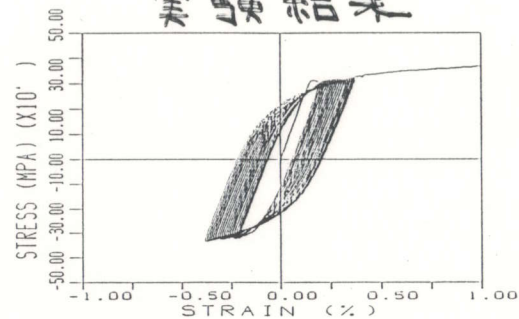


(d) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were introduced

両方追加

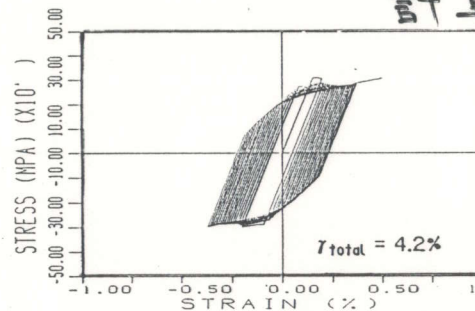
重み関数の変更

実験結果

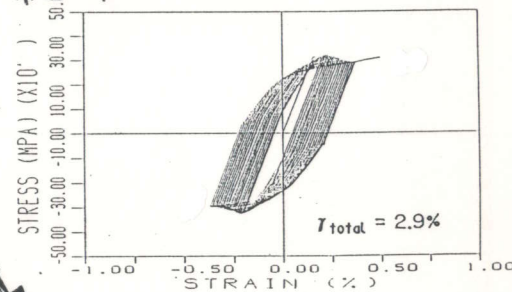


(a) Experiment

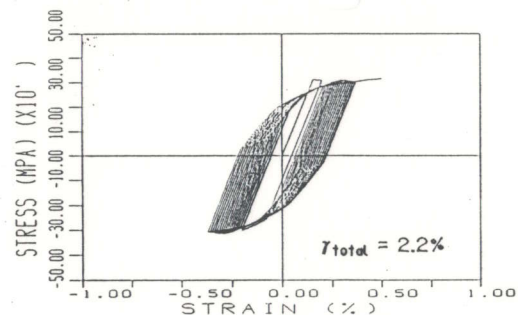
計算結果



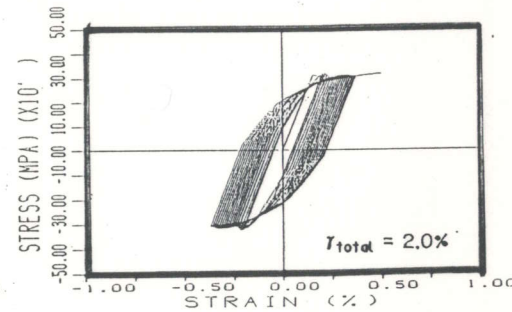
(b) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were not introduced



(c) $K_{0.17}$ was introduced



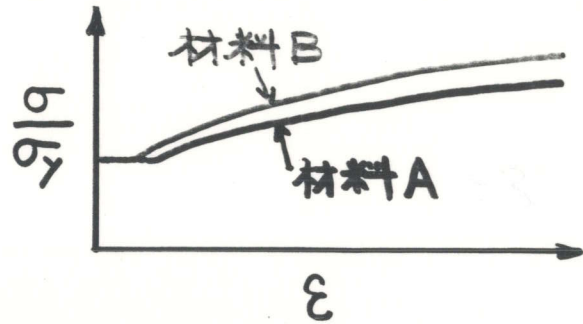
(d) $K_{0.33}$ was introduced



(e) $K_{0.17}$ and $K_{0.33}$ were introduced

実験結果と数値計算結果の比較

引張応力-ひずみ特性から材料特性を評価する。



提案モデルに含まれる材料特性

材料 A K_0, K_{st}, K_{conv} 既知

材料 B K_0 既知
 K_{st}, K_{conv} 未知

これらをどのように決定するか?

未知の材料特性をどう評価するか



$$K_{st,B} = K_{st,A} \times C$$

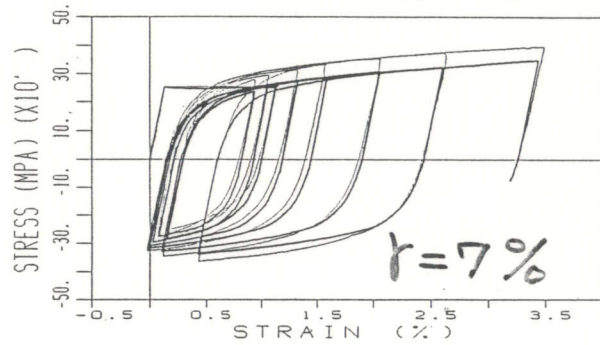
$$K_{conv,B} = K_{conv,A} \times C \quad \text{既知}$$

< Bの材料特性 = Aの材料特性 × 定数 >

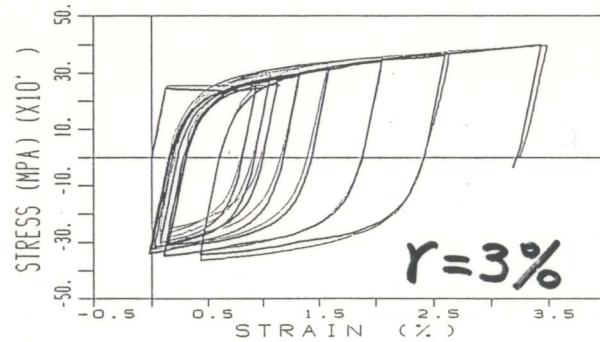
定数 C : 処女引張応力-塑性ひずみ
 曲線において、ひずみが顕著に進
 展した領域での応力値の比

—計算—実験

本研究で求めたSM41に
対する材料特性を
そのまま用いた場合



修正式によって
得られる材料特性
を用いた場合



応力-ひずみ関係の比較 - 実験と計算 -

PART - 3

まとめ

- (1) 提案モデルの第1の適用例として、構造用鋼が 10^{-2} のオーダーのひずみを受け、履歴引張圧縮応力-ひずみ関係を推定し、実測結果と比較した。ここで、実施した試験は、先に実施した材料特性を決定するための基本試験とは別個に実施されたものである。
- (2) 提案モデルの基本としたPopovらのモデルを用いて同様の推定を行った。Popovらのモデルを用いた場合、ひずみ硬化の程度を過大に評価するため、実測結果を表現できないことが分かった。その傾向はひずみ硬化の大きい材料において顕著である。

(3) 10^{-3} のオーダーのひずみを受ける構造
用鋼材の履歴応力 - ひずみ関係をも
モデルをひらずに推定する。従って、
程度はほとんどの範囲で実測結果が十
究により、推定された。
るこ

(4) 提案モデルに導入された材料特性を
得られたいは、材料の履歴引張れるこ
関係の推定、本材、研究可能
で特

PART-1

繰り返し塑性ひずみを受ける
鋼材の構成則のモデル化
(繰り返し塑性モデルの提案)

PART-2

提案モデルに導入された
材料特性を評価するための
基本測定方法の提案

PART-3

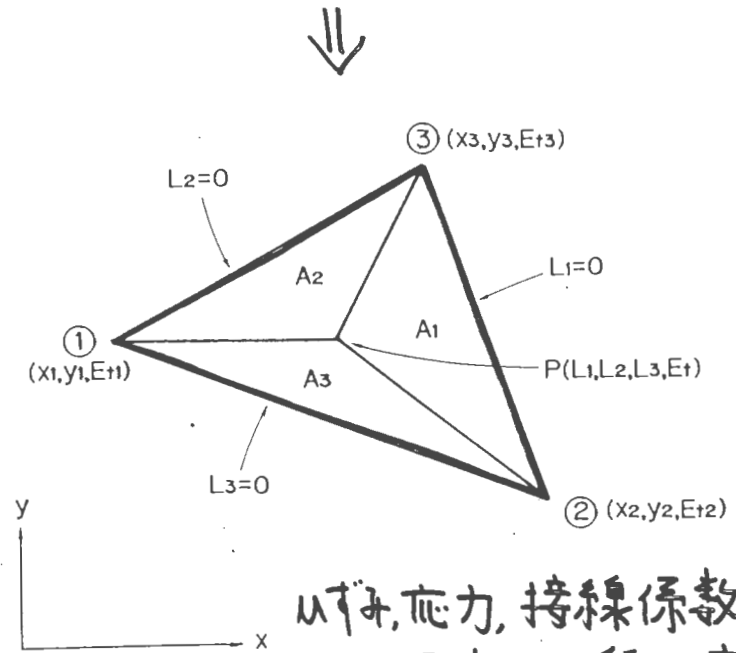
提案モデルによる鋼材の
引張圧縮履歴応力-ひずみ
関係の推定とその妥当性の検証

PART-4

提案モデルによる鋼はりの
履歴曲げモーメント-曲率関係
の推定とその妥当性の検証
- 構造部材への応用として -

接線剛性法を用いた M- θ 関係の
計算.

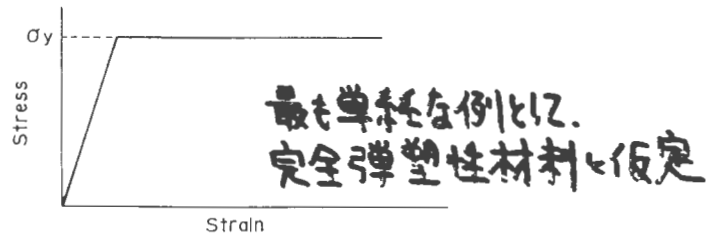
断面を三角形要素に分割する。



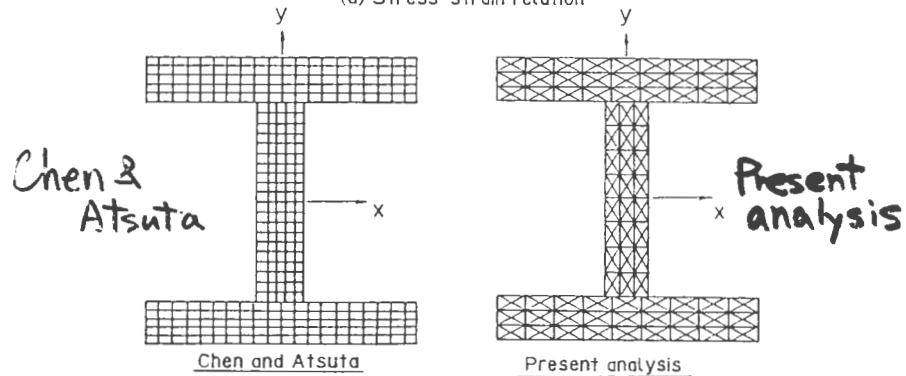
ひずみ, 応力, 接線係数が
三角形要素内で線形変化
するものと仮定.

提案モデルで表わされる応力-ひずみ関係を
断面各部に適用して M- θ 関係を計算。

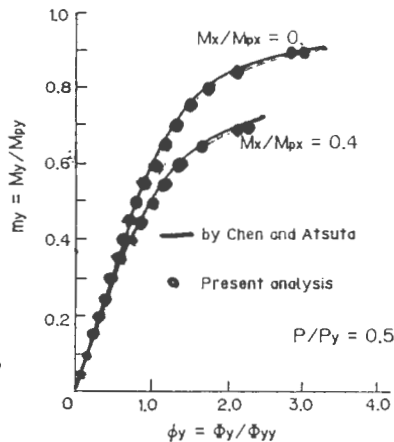
解析システムの妥当性の確認



(a) Stress-strain relation



(b) Mesh pattern



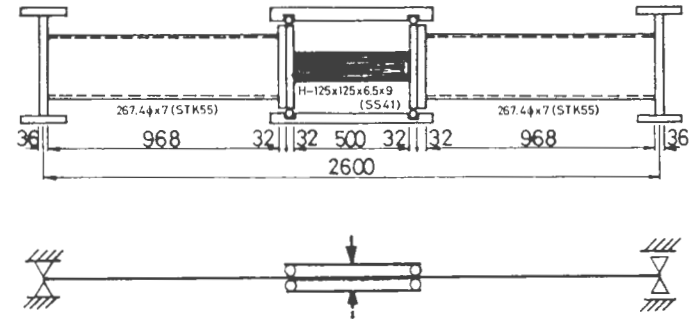
(c) Analytical results

Chen & Atsuta
による結果

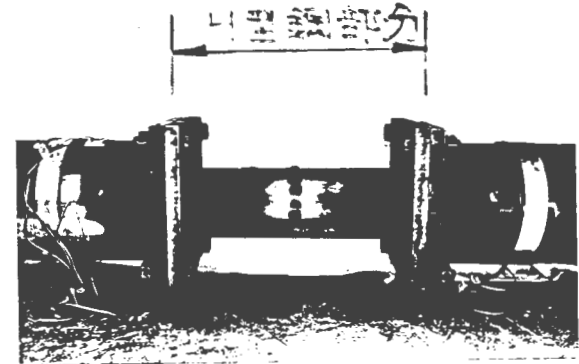
●
本解析結果

定軸力
定強軸曲げ
の下での
弱軸曲げ

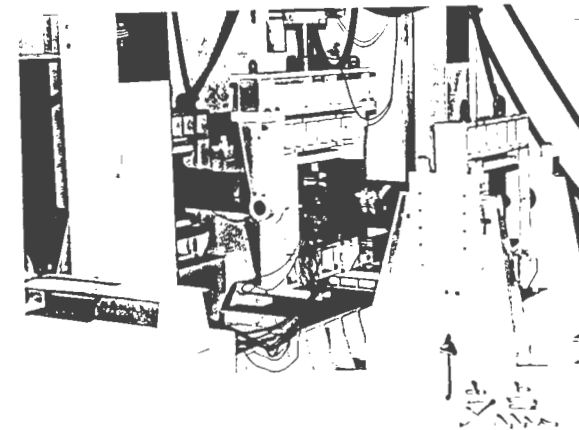
交番曲げ载荷実験用供試体

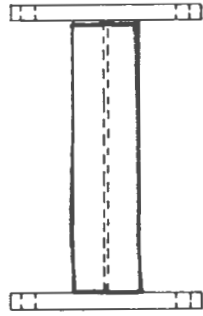
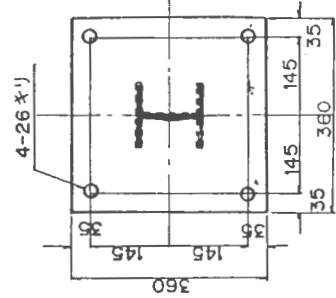
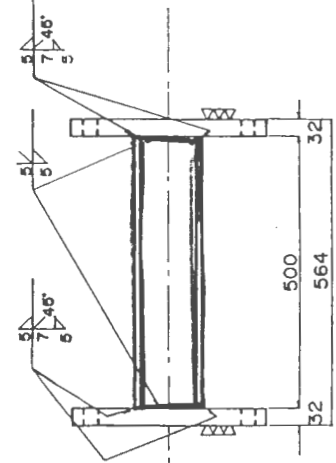
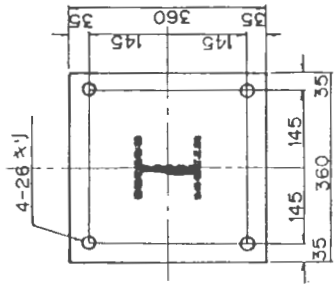


2点载荷
純曲げ

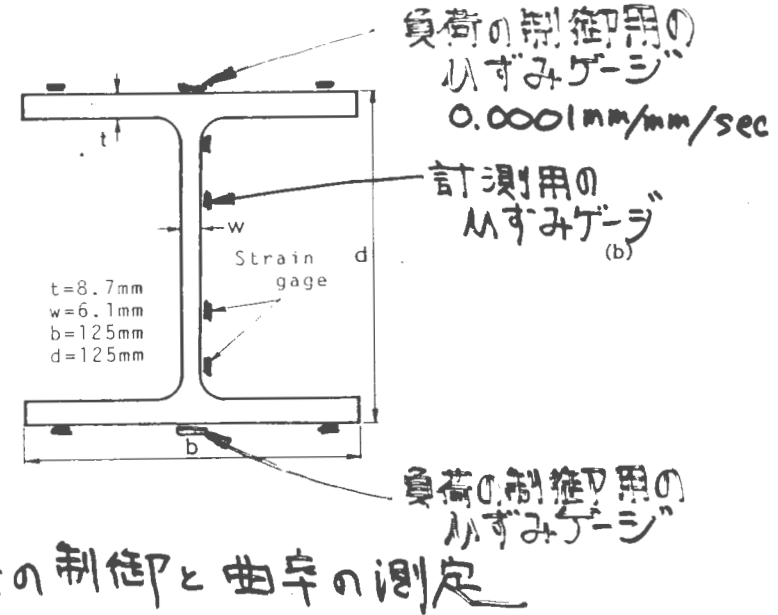
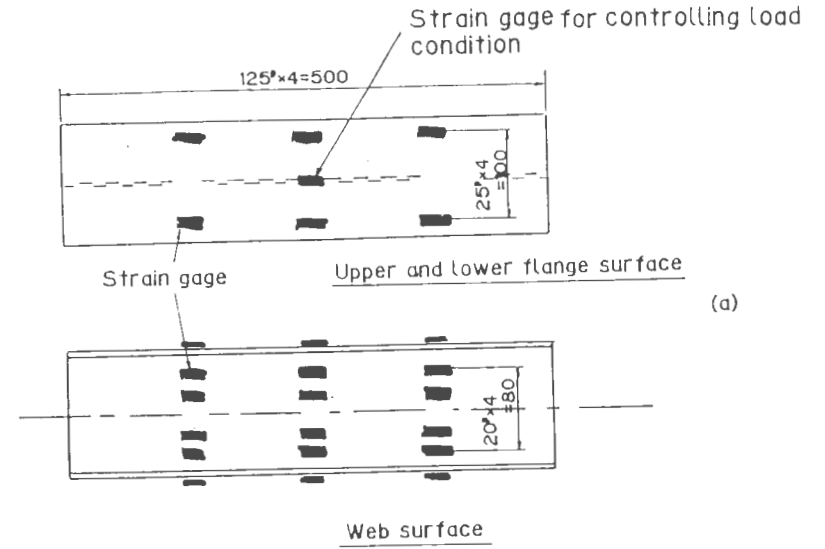


実験の実施状況

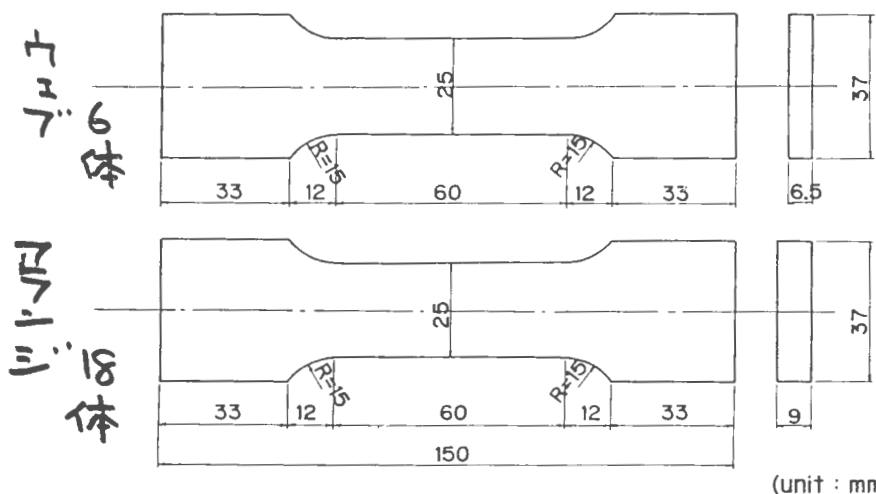
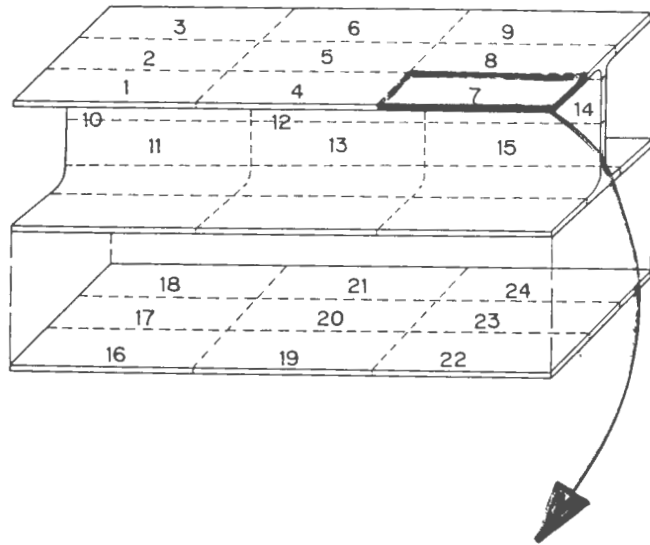




圧延H型鋼により製作された試験部。

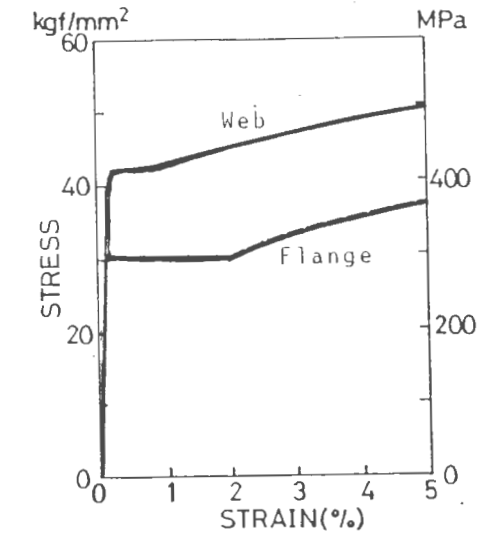


素材試験のための試験片の作成



—JIS5号型— (表面切削せず)

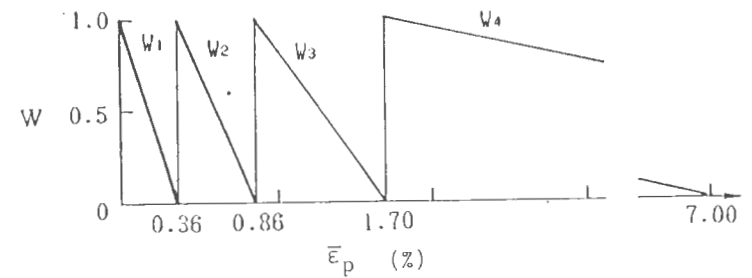
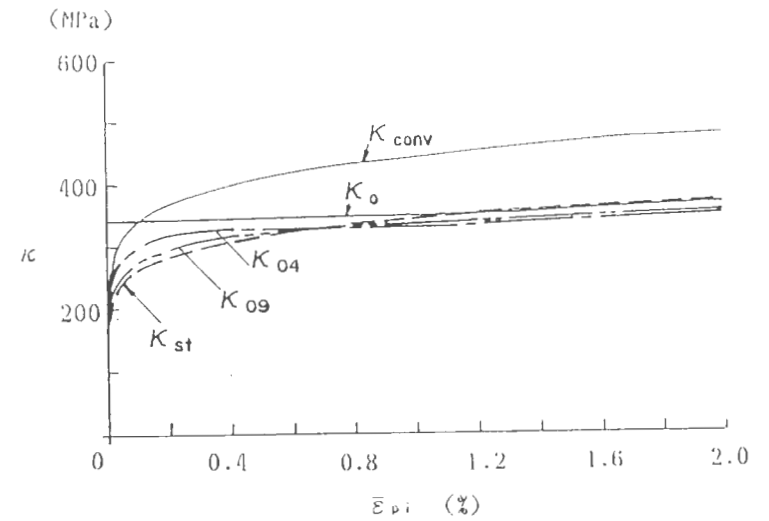
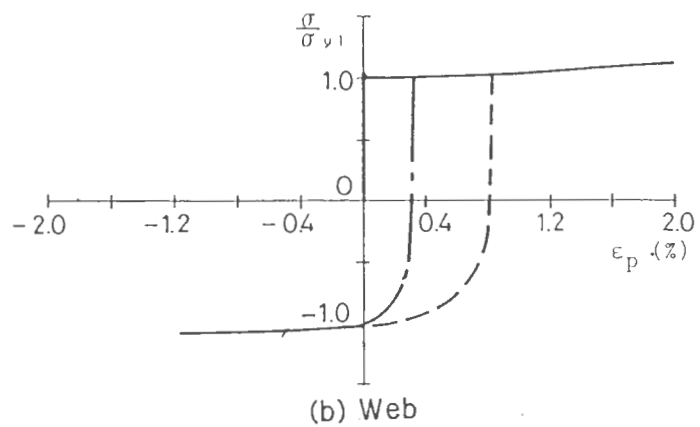
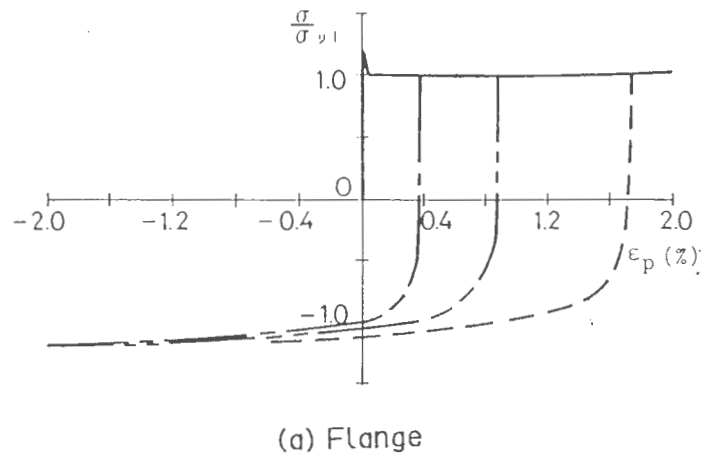
引張試験の結果



	降伏点 σ_{yu}	引張強さ σ_{y1}	破断強さ σ_B	伸び率 σ_b	ヤング率 E $\times 10^5$
flange	344	301	440	347	2.10
web	---	402	498	402	2.10

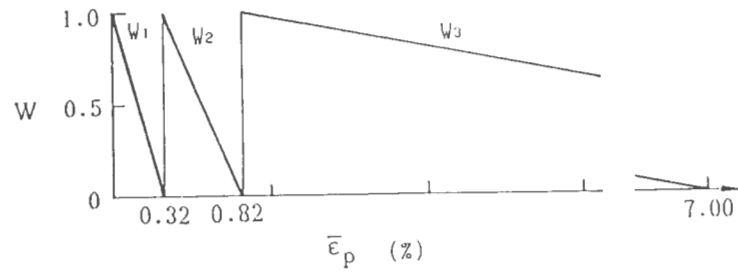
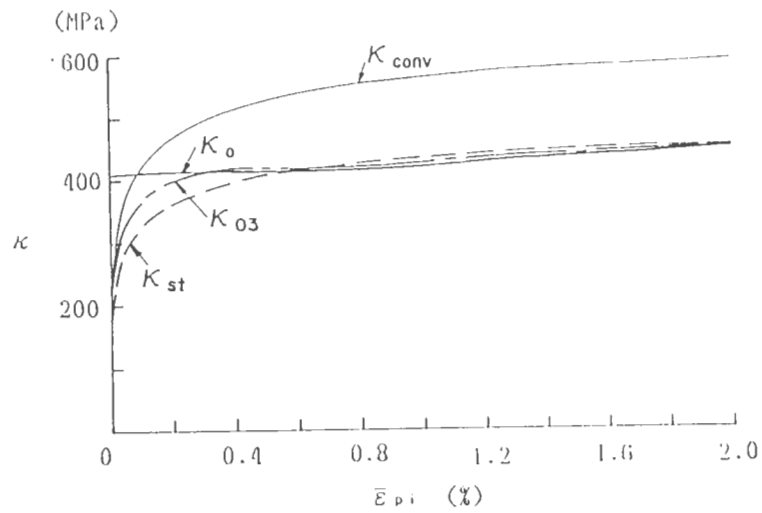
unit : MPa

提案モデルのための材料特性を
求める実験結果



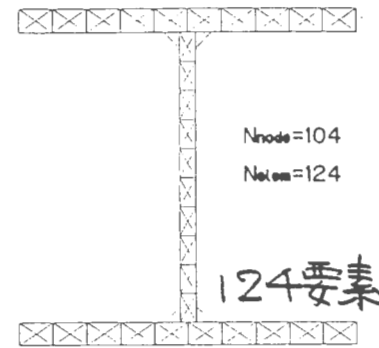
(a) Flange

フランジの材料特性

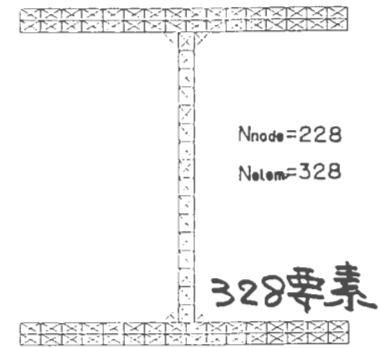


(b) Web

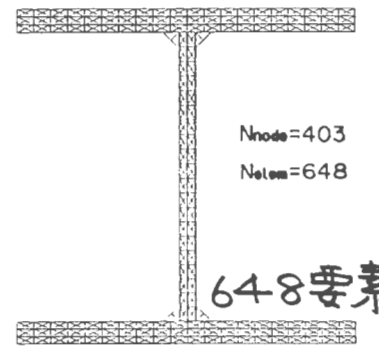
ウェブの材料特性



(a) Mesh pattern A



(b) Mesh pattern B



(c) Mesh pattern C

解析結果に及ぼす
要素分割数の
影響。

解析結果

Moment (kN-m)	Curvature (1/m)		
	Mesh-A	Mesh-B	Mesh-C
9.8	0.00571	0.00571	0.00571
19.6	0.0114	0.0114	0.0114
29.4	0.0171	0.0171	0.0171
39.2	0.0228	0.0228	0.0228
41.2	0.0240	0.0240	0.0240
43.1	0.0251	0.0251	0.0251
45.1	0.0263	0.0263	0.0263
47.0	0.0280	0.0278	0.0277
49.0	0.0321	0.0321	0.0321
50.0	0.0384	0.0381	0.0381
51.0	0.0504	0.0500	0.0500
51.9	0.0846	0.0839	0.0837
52.9	0.219	0.218	0.217
53.9	0.428	0.423	0.422
54.9	0.644	0.637	0.636
55.9	0.860	0.853	0.852
N_{node}	104	228	403
N_{elem}	124	328	648
CPU(sec)	24.7	48.7	85.2
N_{step}	166	167	167
CPU/ N_{step} (sec)	0.149	0.292	0.510

N_{node} is number of nodes.
 N_{elem} is number of elements.
 N_{step} is number of calculation steps.

Computations were carried out on HITAC M682H.

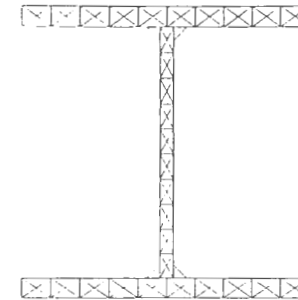
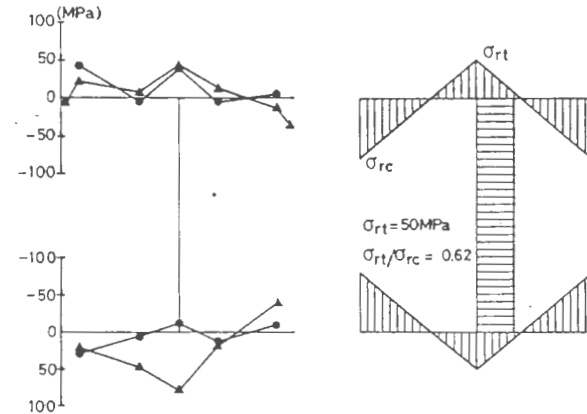


Fig.9 Mesh pattern.

断面の分割

124要素

要素内メッシュ線形変化



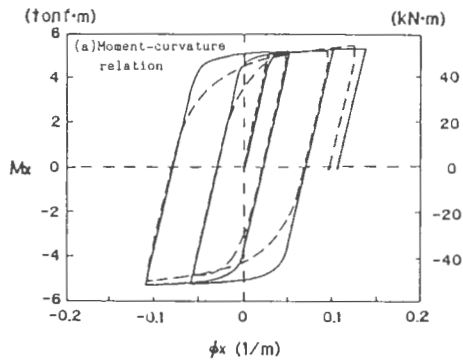
(a) measurement (b) modelling

Fig.8 Residual stress distribution.

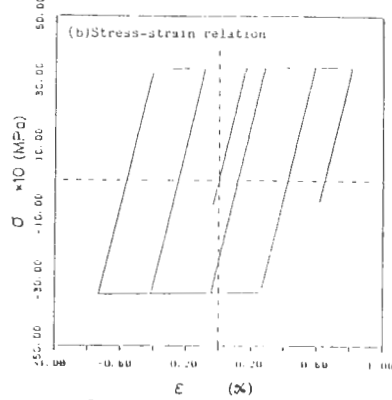
残留応力分布

<測定結果> <モデル化>
 孔あけ法による残留応力の測定とモデル化

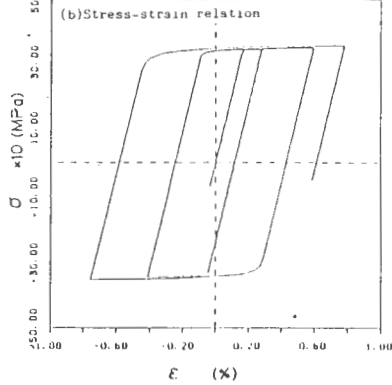
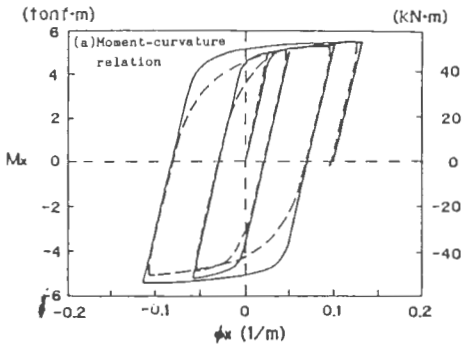
M-φ関係



ラニジエの応力-ひずみ関係

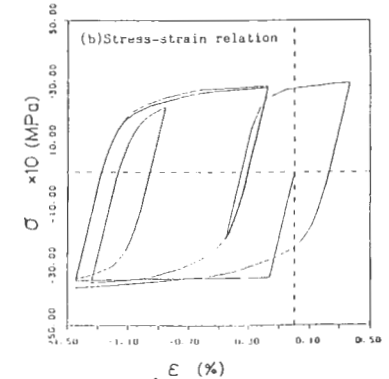
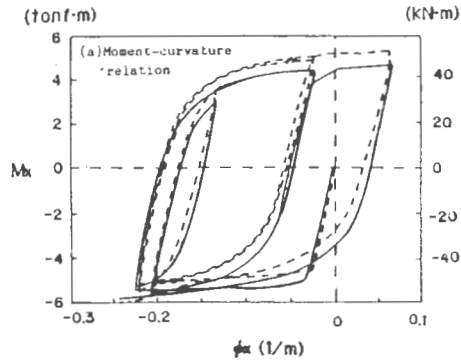
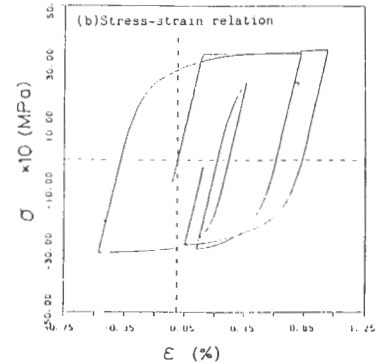
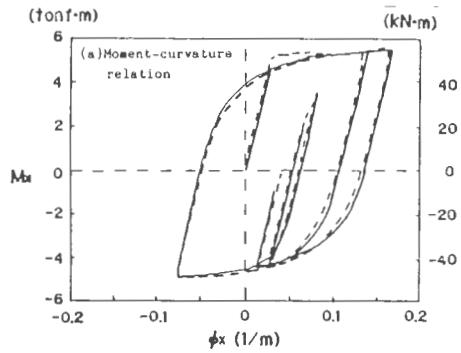
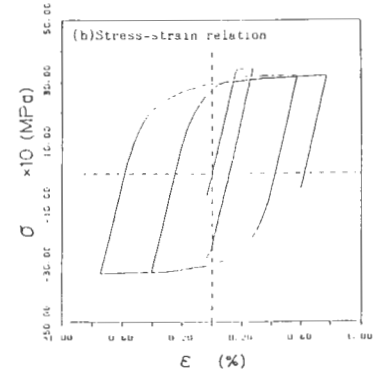
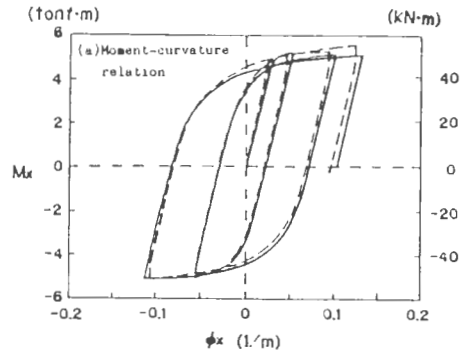


バイリニア応力-ひずみ関係を用いた場合
— 計算, --- 実験



Peterson-Popovモデルを用いた場合

共に、Bauschinger効果を
表現できない。



提案モデルを用いたの数値計算
— 計算, --- 実験

- (1) 提案モデルの第2の適用例として、鋼はり断面の履歴曲げモーメント-曲率関係を推定した。
- (2) 推定方法は、接線剛性法を修正して、これを提案モデルを単軸状態で導入したものである。
- (3) 推定精度を調べるため、圧延H型鋼を曲げ率を調べる試験の曲げ材料特性は、試験体材を用いて測定した。試験片を用いた。試験片を求めた。
- (4) 実測結果と推定結果の比較から、簡略モデルを用いた場合、精度が良くなる。実測結果と推定結果の比較から、簡略モデルを用いた場合、精度が良くなる。

[メモ]

結 論

- (1) 既存の多曲面塑性モデルを改良して、繰り返し塑性モデルを提案した。
- (2) 提案モデルは以下のような特徴を持つ
 - ① 状態変数として累積相当塑性ひずみの有効量を定義している。
 - ② 非硬化ひずみ領域と顕著なひずみ硬化を有する材料に適用できるように配慮されている。
 - ③ 材料特性が、簡単な基本的な測定から決定できる。

- (3) 鋼材の履歴引張圧縮応力-ひずみ関係を提案モデルを用いて推定した。

その結果、 10^{-3} 程度のひずみが繰り返される場合、および 10^{-1} 程度のひずみが繰り返される場合の両方に対して、精度良く推定できることが、実測結果との比較から確認された。

- (4) 鋼H型断面はりの履歴曲げモーメント-曲率関係を提案モデルを用いて推定した。

その結果、接線剛性法を修正して用いて、応力-ひずみ関係を提案モデルによって表現することによって、精度良い推定ができることが、載荷試験の結果との比較から示された。