

多軸応力下における鋼材の履歴則に関する 実験的研究

松本由香¹・山田哲²・鄭景洙³・小川信行⁴・秋山宏⁵

¹博士(工学) 横浜国立大学助手 建築学コース (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²博士(工学) 東京工業大学助教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

³東京工業大学大学院生 環境理工学創造専攻 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

⁴工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁵工博 日本大学教授 総合科学研究所 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

The stress-strain relationship including the plastic deformation phase is essential information for structural design of buildings. The aim of this study is to investigate the stress-strain curves of steel under multi-axial stress. For this purpose, cylindrical specimens were subjected to both axial force and torque and the uniform multi-axial stress were generated in the cross-section.

The various paths in stress space were formed by the combination of these two forces. In this study, the results of the following three groups are reported, uniaxial cyclical shear forces, the changes of path in stress space and monotonous multi-axial stress.

Key Words : stress-strain curve, hysteretic behavior, multi-axial stress, loading path,

1. 序

建築構造物においては、部材の塑性変形能力に期待した終局耐震設計が行われる。この場合、ランダムな繰返し外力によって塑性化する構造物の履歴挙動を明らかにすることが重要である。

鋼材の応力歪関係は、鋼構造物の履歴挙動を予測する上で最も基本的な情報である。既往の研究においては、主に引張・圧縮繰返し力を受ける場合を対象に履歴則の研究¹⁾²⁾³⁾などが進められてきた。しかし、構造物中にはパネルゾーンのように多軸応力状態となる部位が存在すること、地震の継続時間内において部材の変位方向が変化することなどを考慮すると、多軸応力状態や載荷経路の影響を反映できる形で履歴則を構築することが求められる。建築構造の分野においては、このような研究事例⁴⁾はまだ少ない。機械工学などの分野では、多軸応力条件下の構成則に関する研究が行われている⁵⁾などが、材質、試験条件、載荷条件等の点で建築物と相違があり、これらの知見をそのまま耐震設計に適用することは困難である。

本研究では、載荷経路の変化や多軸応力状態が応力歪関係に及ぼす影響について、基本的特性を把握することを目的としている。このため、塑性歪領域における任意の載荷経路に従って試験片を載荷し、応力歪関係を計測できるように実験装置及び試験片

を計画する。得られた実験データを不変量レベルで整理し、既往の知見と照合することにより、単軸応力下における履歴則の多軸応力に対する拡張性を検証する。

2. 実験計画

(1) 試験片

使用鋼材は、建築構造物に広く用いられている一般構造用圧延鋼材SS400である。ミルシートに記載されている化学成分を表-1に示す。JIS 4号金属材料引張試験片の準静的引張試験から得られた応力歪関係を図-1に示す。図中に、降伏強度 σ_y 、引張強度 σ_u 、一様伸び ϵ_u の値を示す。 σ_y は0.2%オフセット耐力として得られた値である。

鋼材の応力歪関係について調査するためには、一様な多軸応力状態を実験的に再現する必要がある。このため、試験片形状を図-2に示す中空円筒

表-1 使用鋼材の化学成分 (単位: %)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.14	0.19	0.52	0.026	0.02	0.09

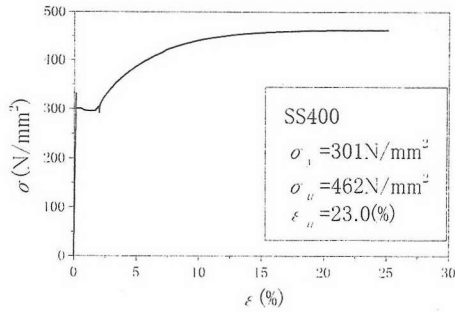


図-1 素材引張試験結果

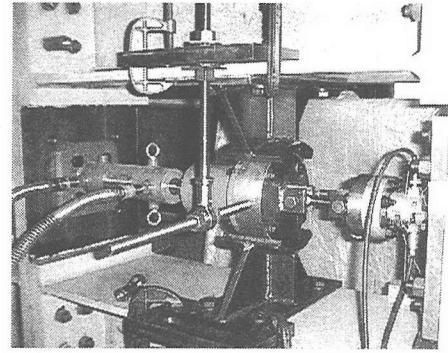


写真-1 セットアップ

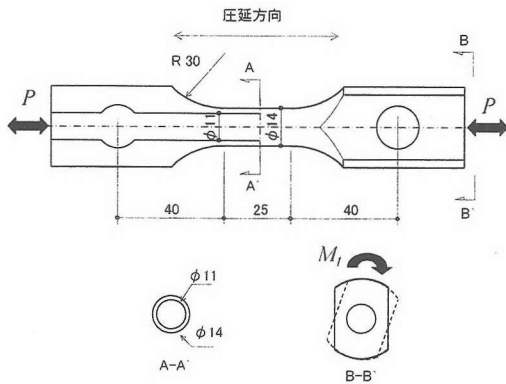


図-2 試験片形状

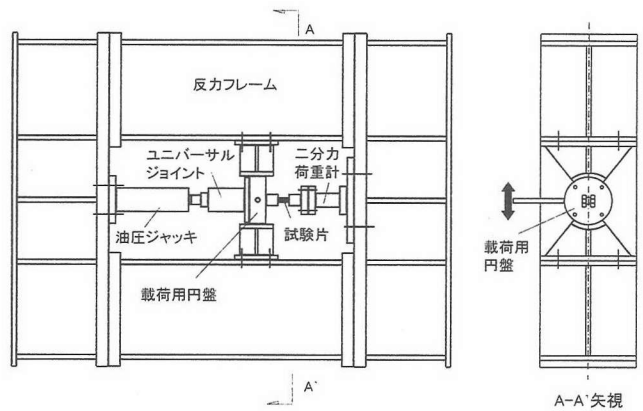


図-3 セットアップ

状とし、これに軸力とねじりを载荷することにより、試験部に軸方向応力とせん断応力が一様に作用するよう計画している。

(2) 载荷計測方法

図-3及び写真-1に試験片セットアップを示す。試験片の一端は二分力荷重計を介して反力フレームに固定され、他端は载荷用円盤に接続されている。载荷用円盤はユニバーサルジョイントを介して油圧ジャッキに接続されており、試験片に引張・圧縮軸力を加力できる仕組みになっている。図中A-A'矢視に示すように、载荷用円盤に固定した鋼棒の先端を上下させることにより、試験片にねじりモーメントを発生させる。

試験片に作用する軸力 P 及びねじりモーメント M_t は、図中の二分力荷重計により計測する。これらのデータと試験片形状により、軸方向応力及びせん断応力が得られる。

試験部には塑性三軸歪ゲージ2点、せん断歪ゲージ1点を貼付しており、これらのデータから軸方向歪 ε 及びせん断歪 γ を求める。

以降の考察においては、実験から得られた公称応力、公称歪を真応力、真歪に変換して用いている。

(3) 試験シリーズ

軸方向応力及びせん断応力の組み合わせにより、様々な载荷経路が再現可能であるが、本論文では以下に示す試験シリーズについて報告する。

a) 単軸応力下の履歴特性

多軸応力の影響を統一的に表現できる履歴則を構築するためには、軸方向応力に対する履歴則がせん断応力に対しても適用可能か、検討する必要がある。軸方向応力又はせん断応力による単軸繰返し载荷を行い、既往の履歴則の拡張性について検証する。

b) 他方向塑性履歴の影響

地震波入力方向の変化、特定部材の劣化に伴うねじれモードの発生などを想定すると、部材の変位方向は地震の継続時間中に変化する可能性がある。本シリーズは、このような载荷経路の変化による影響について検討することを目的とする。軸方向応力及びせん断応力のうち、いずれか一方に塑性履歴を与えて除荷した後、他方に载荷を行う。

c) 多軸応力下の応力歪関係

軸方向応力成分及びせん断応力成分がいずれも0でない状態で载荷する。本研究の载荷経路は、先ず基本的特性を把握する目的から、いずれかの方向に初期応力を導入し、この値を一定に保った状態で他方を単調载荷するタイプとする。

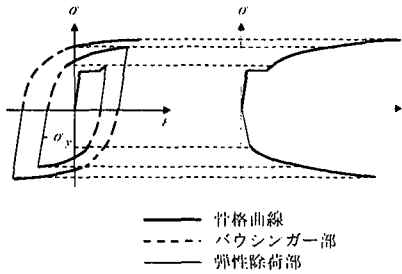


図-4 履歴曲線の構成

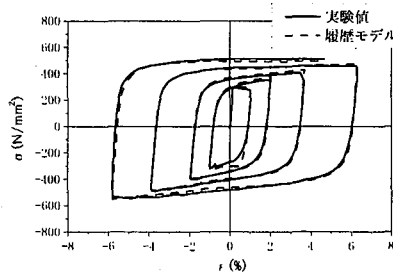


図-5 軸方向応力下の応力歪関係

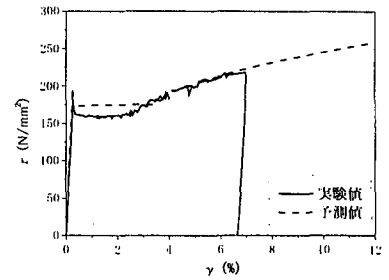


図-6 単調载荷時 τ - γ 関係

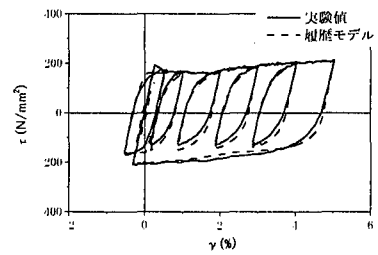
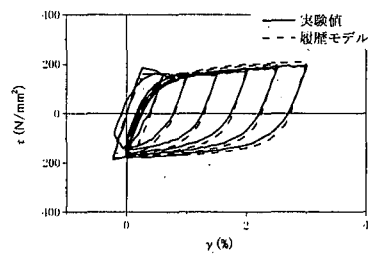
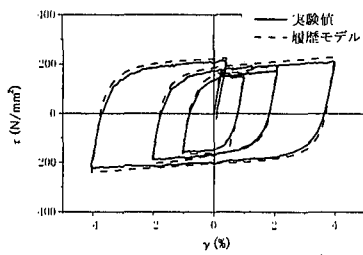


図-7 繰返し载荷時 τ - γ 関係と履歴則の対応

3. 単軸応力下の履歴特性

(1) 軸方向応力下の履歴特性

引張・圧縮に対する応力歪関係については、既に多くの予測方法が提案されているが、骨格曲線に着目する手法は、損傷に対する寄与を考察する上で有用な方法である。代表として山内モデル¹⁾が挙げられ、これの修正モデルが青木ら²⁾によって提案されている。青木らの履歴則における主要な点は以下のとおりである。

- ・ 図-4に示すように、履歴曲線は骨格曲線、バウシinger部、弾性除荷部の3つに分解できる。
- ・ 真応力-真歪上における骨格曲線の形状は、単調载荷時の応力歪関係と一致する。
- ・ バウシinger部の形状は、双曲線で表される。バウシinger部の開始点から終点(次の骨格曲線の開始点)までの歪増分 ϵ_b は、それ以前に受けた骨格曲線上の累積塑性歪量に応じて増加し、両者の関係は下式によって評価できる。

$$\epsilon_b = \alpha_1 \cdot op \sum \epsilon_s + \alpha_2 \cdot sa \sum \epsilon_s \quad (1)$$

$op \sum \epsilon_s$: 逆方向载荷側骨格曲線累積塑性歪量

$sa \sum \epsilon_s$: 同一方向载荷側骨格曲線累積塑性歪量

α_1, α_2 : 素材引張試験による応力歪関係から求められる材料定数

- ・ バウシinger部の途中で外力が反転する場合、逆方向バウシinger部は前サイクルの除荷点に

復帰する。

- ・ 各加力方向における降伏棚歪増分の和は一定であり、単調载荷時の値と一致する。

本研究においても、異なる载荷パターンを設定して引張・圧縮繰返し载荷を行い、履歴挙動を確認している。一例として、両側漸増歪振幅を与えた試験片について、軸方向応力 σ と軸方向歪 ϵ の関係を図-5に示す。前述の方法で予測される履歴曲線を図中に破線で示す。実験値と履歴モデルの対応は良好である。

(2) せん断応力下の履歴特性

単調せん断载荷した試験片について、せん断応力 τ とせん断歪 γ の関係を図-6に示す。等方性材料の場合、素材引張試験から得られた $\sigma - \epsilon$ を、相当応力-相当歪関係において等価となるよう換算することにより、単軸 $\tau - \gamma$ 関係を予測することができる。得られた予測値を破線で示す。せん断試験結果の方が降伏棚がやや低くなる傾向があるが、両者は概ね一致している。

異なる载荷パターンで実施した繰返しせん断加力試験から得られた $\tau - \gamma$ 関係を図-7に示す。図中には、前述の履歴則を参照して予測した $\tau - \gamma$ 曲線を破線で示している。予測の際に用いたバウシinger部の形状決定方法や材料定数 α_1, α_2 などは、3.(1)で述べた履歴則と同一であり、骨格曲線として単調せん断試験による $\tau - \gamma$ 曲線を用いた点のみが異なっている。実験値と予測値は概ね一致しており、せん断応力下の応力歪関係は引張・圧縮下の履歴則と同じ手法で予測できる。

4. 他方向塑性履歴による影響

(1) 载荷パターン

試験片一覧を表-2に示す. 表中には载荷手順及び各々の段階で与える目標歪の値を示している. 表中, 残留歪のある状態で次の加力手順に進むもの(図-8(a))を「除荷」, 目標歪を与えた後に逆方向に载荷し, 残留歪を0としてから次の加力手順に進むもの(図-8(b))を「原点復帰」と表記している.

表-2 試験片一覧 (他方向塑性履歴検討)

試験片	手順①		手順②		手順③	
ST-1	せん断	$\gamma = 1\%$, 原点復帰	引張	破断		
ST-2		$\gamma = 3\%$, 原点復帰				
ST-3		$\gamma = 3\%$, 除荷				
ST-4		$\gamma = 7\%$, 原点復帰				
TS-1	引張	$\epsilon = 2\%$, 除荷	せん断	$\gamma = 6\%$, 引張	破断	
TS-2		$\epsilon = 4\%$, 原点復帰				
TS-3		$\epsilon = 4\%$, 除荷				

(2) 応力歪関係の評価

試験片の全履歴ループを同一変数で評価するため, 試験結果を相当応力 σ_{eq} 及び相当歪 ϵ_{eq} で整理する.

ϵ_{eq} のうち, 塑性歪増分 ϵ_{eqp} は下式によって定義される.

$$\epsilon_{eqp} = \sum_i \sqrt{\epsilon_{p,i}^2 + \frac{\gamma_{p,i}^2}{3}} \quad (2)$$

$\epsilon_{p,i}$: 第*i*降伏点から除荷点までの軸方向塑性歪増分

$\gamma_{p,i}$: 第*i*降伏点から除荷点までのせん断塑性歪増分

各試験片の $\sigma_{eq} - \epsilon_{eq}$ を図-9~図-15に示す. 図中には, $\sigma_{eq} - \epsilon_{eq}$ から抽出した骨格曲線及び単調引張载荷時の $\sigma - \epsilon$ 関係を併せて示す.

せん断塑性履歴を受けた直後の引張応力と, 軸方向塑性履歴を受けた直後のせん断応力は, 除荷点近傍まで高い剛性を保持しており, バウシंगाー部に相当する軟化域がほとんど見られない. 特に, 原点復帰としたTS-2においては, 手順①において圧縮塑性履歴を受けているにも関わらず, せん断塑性履歴を与えた後の引張载荷部において, バウシंगाー一部がほとんど進展していない.

単調载荷時の $\sigma - \epsilon$ と $\sigma_{eq} - \epsilon_{eq}$ 上の骨格曲線は概ね一致しており, 特に除荷タイプの塑性履歴を与えたものについては, 単調载荷時 $\sigma - \epsilon$ によって全履歴が概ね包括されている. せん断応力を受けた後

の引張応力は, 除荷点を越える応力レベルで軟化する傾向が見られ, この時点で骨格曲線が階段状に上昇しているものが多い. この原因は明らかではないが, 本研究に用いたSS400材には図-7に示したように若干の異方性も見られるため, 因果関係を考察する上では注意が必要である.

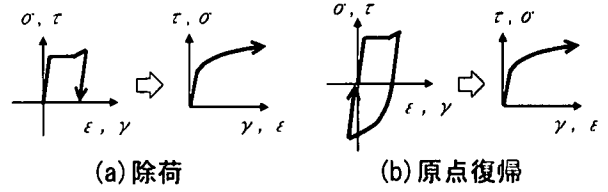


図-8 残留歪の有無

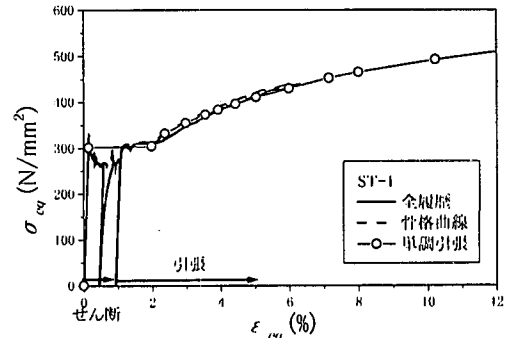


図-9 ST-1試験結果

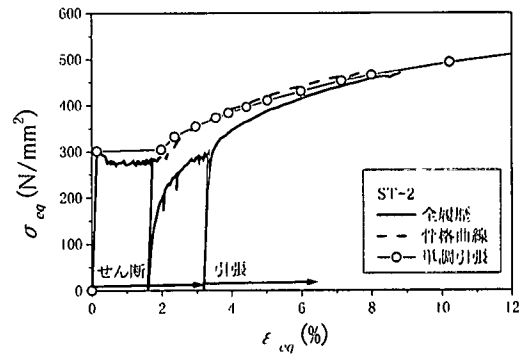


図-10 ST-2試験結果

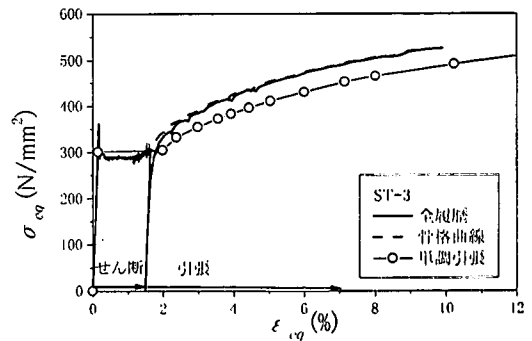


図-11 ST-3試験結果

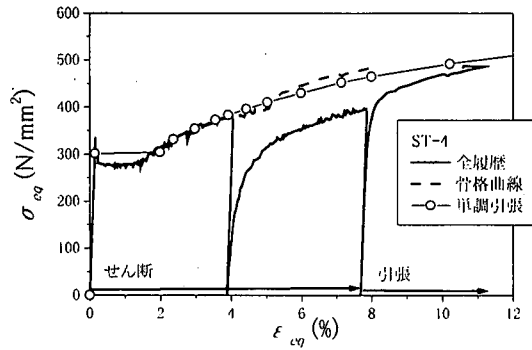


図-12 ST-4試験結果

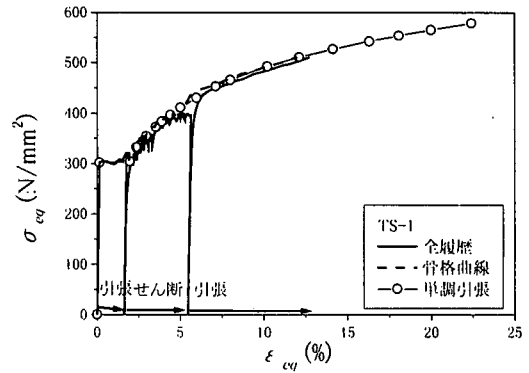


図-13 TS-1試験結果

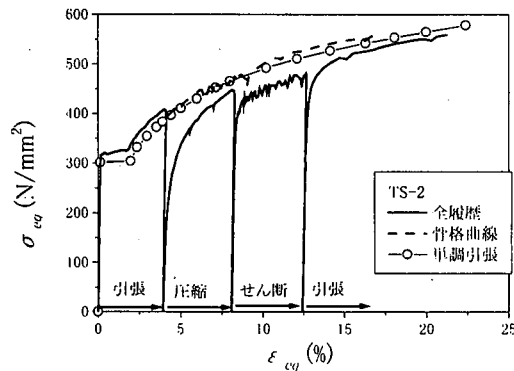


図-14 TS-2試験結果

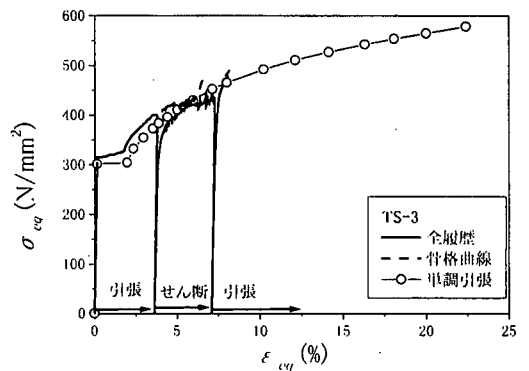


図-15 TS-3試験結果

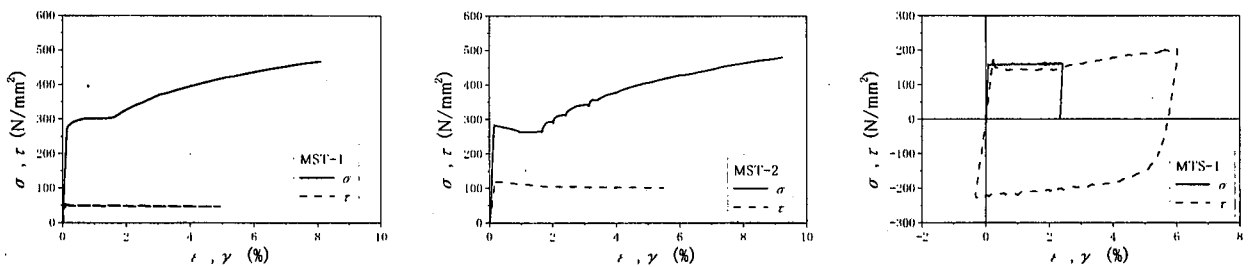


図-16 多軸応力状態における各方向応力歪成分

5. 多軸応力下の応力歪関係

(1) 载荷パターン

本シリーズでは、引張、せん断いずれか一方に初期応力を導入した後、この応力を保持した状態で他方に载荷を行う。表-3に試験片一覧を示す。MTS-1については、せん断载荷により $\gamma=6\%$ に達した時点で加力方向を反転させ、せん断変形を0に戻してから試験を終了している。得られた $\sigma-\epsilon$ 関係及び $\tau-\gamma$ 関係を図-16に示す。

(2) 応力歪関係の評価

各試験片の $\sigma_{eq}-\epsilon_{eq}$ と単調引張時の $\sigma-\epsilon$ 関係を図-17に示す。MTS-1におけるせん断力反転時以降の曲線を除き、全試験片の $\sigma_{eq}-\epsilon_{eq}$ 関係は概ね一致して

おり、初期応力の大きさや方向に依存しない。また、MTS-1の $\sigma_{eq}-\epsilon_{eq}$ 関係ではバウシinger部において歪がある程度進展している。MTS-1では、せん断力反転以前に軸方向塑性歪が約2%生じているが、4(2)で確認されたほどのバウシinger部縮小は見られない。

表-3 試験片一覧 (多軸応力検討)

試験片	载荷パターン	初期応力
MST-1	初期せん断応力 τ_i を導入後、	50
MST-2	τ_i を保持した状態で単調引張载荷	
MTS-1	初期引張応力 σ_i を導入後、 σ_i を保持した状態でせん断载荷	150

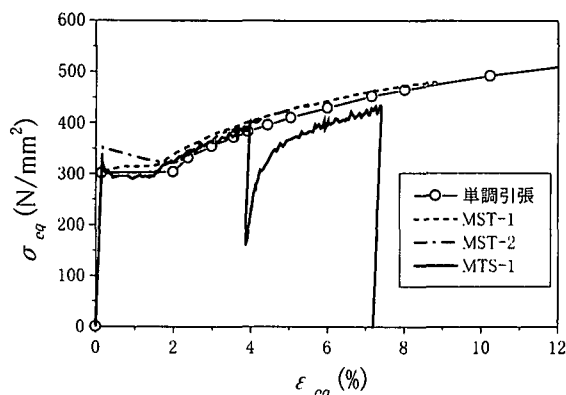


図-17 多軸応力状態における相当応力-相当歪

6. 結論

軸方向応力及びせん断応力の組み合わせによって様々な荷経路を設定し、多軸応力下における応力歪関係の基本的な特性について検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 繰返しせん断応力が作用する場合の応力歪関係は、引張・圧縮応力の場合と同様に、骨格曲線に着目した手法により予測が可能である。等方性材料の場合、素材引張試験結果から単調せん断荷時の応力歪関係が求められるため、単軸応力状態における履歴則は、軸方向応力とせん断応力の両者を対象に、統一的に評価できる。

- 2) 軸方向応力及びせん断応力のいずれか一方に塑性履歴を与えて除荷した後、他方に荷を行った。この場合、バウシinger部においてほとんど歪が進行せず、除荷点付近まで高い剛性を保持する傾向が見られた。
- 3) 軸方向応力及びせん断応力のいずれか一方に初期応力を導入し、この値を一定に保った状態で他方を単調荷した。相当応力-相当歪上で比較すると、全試験片の応力歪関係は概ね一致し、初期応力の大きさや方向に依存しない。

参考文献

- 1) 加藤勉, 秋山宏, 山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験則, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 937-938, 1973.10
- 2) 原伸次, 青木博文: 稿素材の繰返し応力度-歪度関係の数式表示に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 495-496, 1997.9
- 3) Yoshitsura Yokoo, Tsuneyoshi Nakamura, Toshiro Komiyama and Yasuo Kawada: Non-stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide-Flange Steel. 日本建築学会論文報告集, No.259, pp.53-66, 1977.9
- 4) 藤本盛久, 橋本篤秀, 中込忠男, 山田丈富: 構造用鋼材の多軸応力状態における繰返し応力-ひずみ関係, 繰返し力を受ける鋼構造溶接接合部の破壊挙動に関する研究-第1報, 日本建築学会構造系論文報告集, No.356, pp.93-102, 1985.10
- 5) 北山正司, 山内雅文, 猪狩敏秀, 中島慶一: $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の引圧-ねじり疲労条件下での変形と破壊, 材料, Vol.39, No.440, pp.82-87, 1990.5