

# 座屈拘束ブレース用心材LYP100/225材の 負荷履歴 及び ひずみ速度依存性に関する検討

三村耕司<sup>1</sup>・榎田努<sup>2</sup>・松田陽三<sup>3</sup>・山田哲<sup>4</sup>・谷村眞治<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工博 大阪府立大学助教授 工学研究科機械システム工学分野 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>2</sup>工博 大阪府立大学助手 工学研究科機械システム工学分野 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>3</sup>大阪府立大学大学院学生 工学研究科機械システム工学分野 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>4</sup>工博 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)

<sup>5</sup>工博 愛知工科大学教授 工学部機械システム工学科 (〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2)

Buckling resistant braces are now often introduced into a large scale structure to protect its main part from the violent oscillations in the case of earthquakes. Their main aim is to absorb the oscillation energy by their plastic deformation. In order to effectively design such a brace, the mechanical property of its core material, especially its strain- and strain rate- history dependencies as well as its strain rate-dependence must be precisely investigated through experiments, and be modeled properly since the fast- and cyclic- three dimensional loads are likely to act on the braces.

**Key Words :** Buckling resistant brace , vibration control , strain rate dependence , strain history dependence , strain rate history dependence

## 1. 緒言

構造物に強い地震動が作用する場合、梁端接合部には高速かつ多軸性の負荷が懸かり、また応力集中が起き易いため破壊の危険性が高くなる。

このような梁端接合部の応力レベルを低減し保護するために、地震時の入力エネルギーを塑性ダンパーで吸収する座屈拘束ブレースの、骨組み構造への組込みが積極的に行われるようになり、実大振動試験体を用いた性能評価試験等の試みも、行われている<sup>1)</sup>。

一方、制振用の座屈拘束ブレースの効果的な設計と骨組み構造への組込みを支援するためには、上述のような実大試験体での評価試験と並んで、その心材の力学的特性の把握とモデル化の試みが必要不可欠となる。

本研究では、このような制振ダンパー心材として用いられる LYP 100 及び LYP225 材を供試材に選び、それらの変形抵抗のひずみ速度依存性と、ひずみ履歴(負荷履歴)及びひずみ速度履歴依存性について実験による系統的な評価を行った結果について報告する。

## 2. 実験方法及び装置

### (1) 実験条件

#### a) ひずみ速度依存性評価試験

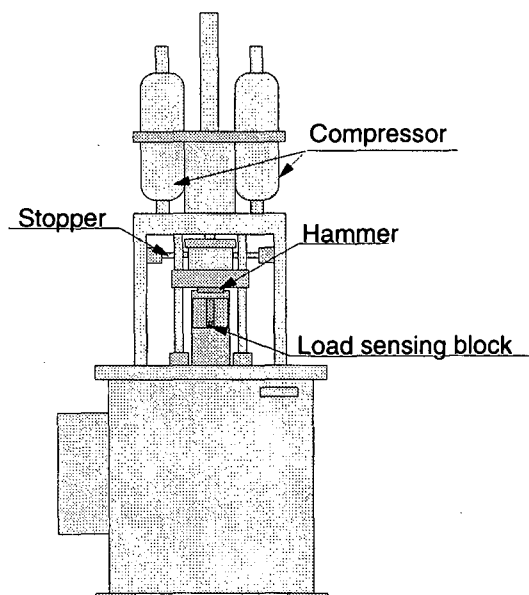


図-1 検力ブロック式高速材料試験機

6種類のひずみ速度 (0.01/s, 1.0/s, 10/s, 100/s, 500/s, 1000/s) で平板引張実験を行なった。同時に、負荷方向が、板圧延方向に平行な試験片と垂直な試験片に区別し、その違いについても考察を行なった。

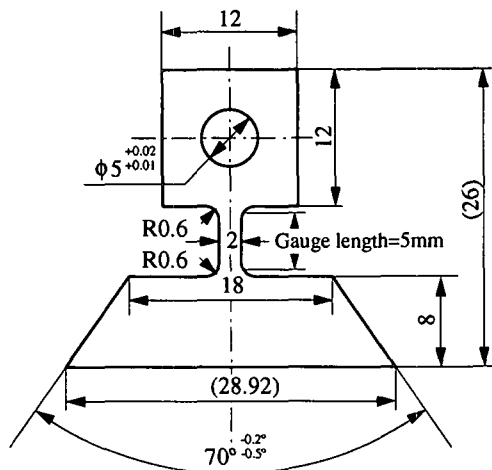


図-2 検力ブロック式高速材料試験機用試験片

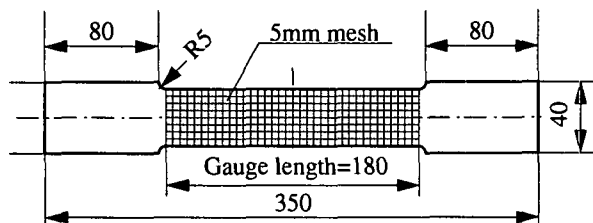


図-3 予ひずみ用試験片

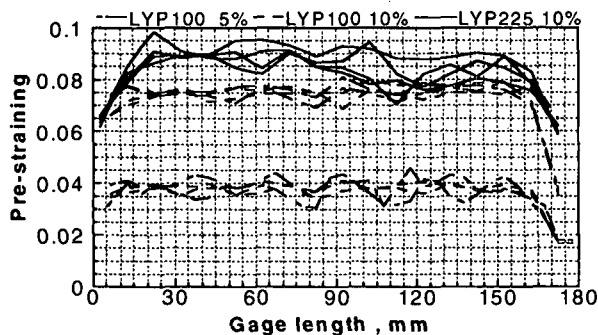


図-4 試験片平行部における予ひずみ分布

b) ひずみ履歴及びひずみ速度履歴評価試験

予ひずみ用試験片をひずみ速度0.001/sで引張り予ひずみ(予負荷)を与え、後続荷重方向が予負荷方向と同方向及び垂直な方向になるように、試験片を切り出した。そして3種類のひずみ速度(0.01/s, 10/s, 500/s)で引張実験を行った。

(2) 実験装置ならびに試験片

a) 試験片

供試材は低降伏点鋼LYP100及びLYP225の2種類の鋼材で、共に350<sup>w</sup>mm×350<sup>w</sup>mm×15<sup>t</sup>mmの圧板から厚さ方向に1mm厚の薄板を切り出し、試験片に加工した。

b) 試験装置

検力ブロック式高速材料試験機の概略図を図-1に示す。この試験機は荷重測定に検力ブロック式衝撃端力検出法、変位測定には高速応答の可能な非接触型磁気式リアエンコーダが用いられている。負荷システムには電気・油圧サーボ方式を採用するこ

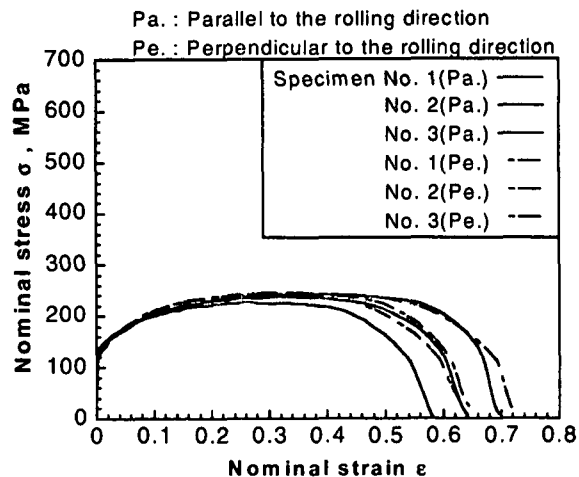


図-5(a) 圧延方向に平行及び垂直な試験片の公称応力-公称ひずみ線図(LYP100, 0.01/s)

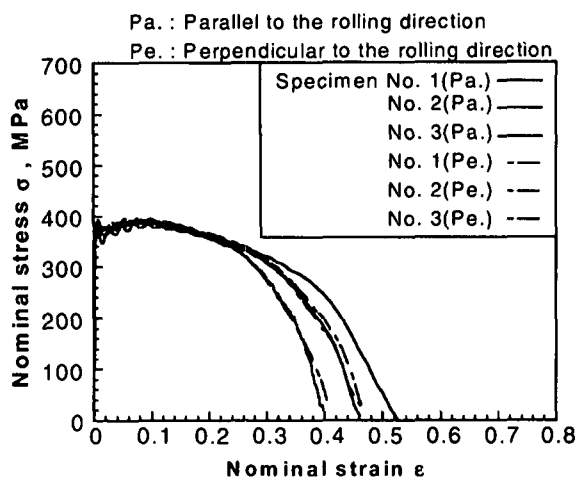


図-5(b) 圧延方向に平行及び垂直な試験片の公称応力-公称ひずみ線図(LYP100, 500/s)

とによって、低速域でもハンマー速度を保つことができ、幅広いひずみ速度域での材料引張試験が可能となっている。

検力ブロック式高速材料試験における試験片の形状および寸法を図-2に示す。この試験片は板厚1mmの平板で、試験片平行部の一方はつかみ部となっており、その中央には試験機のピンに取り付けるための穴があけてある。もう一方は55度の角度の斜辺を持つ台形になっており、同じ角度を持つハンマー突起部で直接荷重を加えるようになって

いる。予ひずみを与えるためには、インストロン型万能試験機を用い、変位測定にはひずみゲージ式伸び計を利用した。

試験片の概略を図-3に示す。予ひずみを与えた後の試験片の平行部より、引張方向に対して平行及び垂直な方向に複数の検力ブロック式高速材料試験機用試験片を切り出した。

均一な予ひずみを与えられているかどうかを検証するために、図に示すように、予ひずみ用試験片の平行部には5mm間隔のメッシュが切られており、各

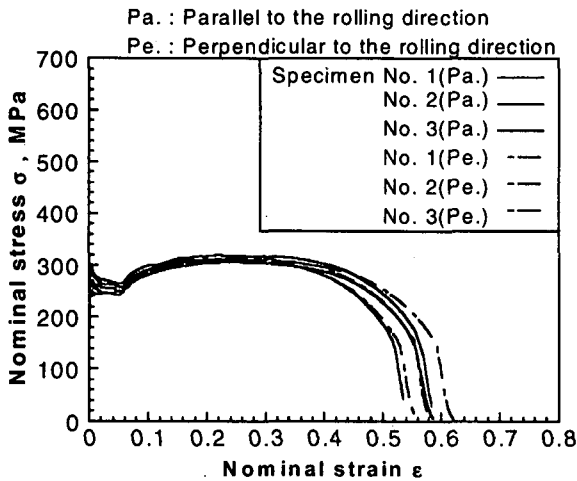


図-6 (a) 圧延方向に平行及び垂直な試験片の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP225, 0.01/s)

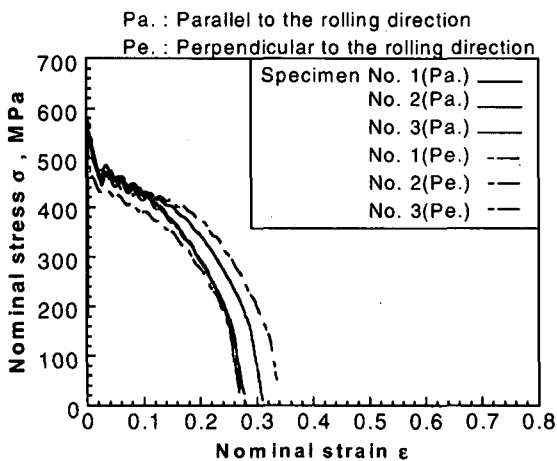


図-6 (b) 圧延方向に平行及び垂直な試験片の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP225, 500/s)

格子点の変位を計測することによって、ひずみ分布を求めた。得られた予ひずみの分布の一例を図-4に示す。図より中央の140mmの範囲でほぼ一様な軸ひずみ分布が得られていることがわかる。

### 3. ひずみ速度依存性

図-5 (a), (b) にLYP100, 図-6 (a), (b) にLYP225の、それぞれひずみ速度0.01/s, 500/sにおける公称応力-公称ひずみ線図を示す。LYP100, LYP225共に引張強度までの再現性は良いが、破断伸びについては不安定でばらつきがある。他のひずみ速度でも同様の傾向が認められた。また、LYP225は上降伏点、下降伏点を示すが、LYP100は示さなかった。なお、図中の記号PaとPpは、それぞれ圧延方向と同方向に引張った場合と、Ppは圧延方向に直交する方向に引張った場合を表す。

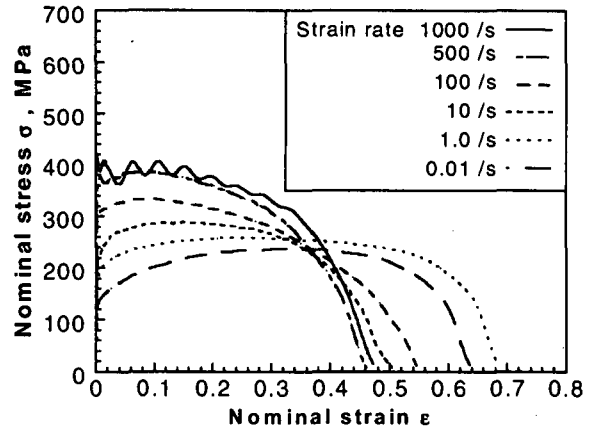


図-7 各ひずみ速度の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP100)

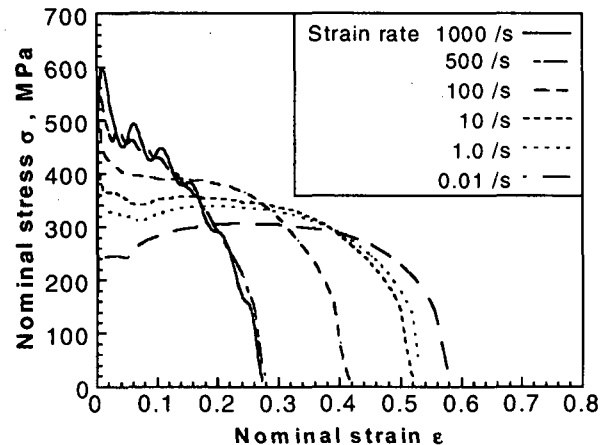


図-8 各ひずみ速度の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP225)

#### (1) 初期異方性の検討

図-5 (a), 6 (a) より、圧延方向に沿った引張、これと垂直な方向への引張とも準静的な応力-ひずみ関係の差異は認められず、圧延方向の影響はみられない。同様に、図-5 (b), 6 (b) に示すようにひずみ速度500/sにおいても応力ひずみ関係においても圧延方向の影響はみられなかった。また、ひずみ速度1.0/s, 10/s, 100/s, 1000/sにおいても同様であった。

これらの事実から、LYP100, LYP225には圧延平面内での初期異方性はないといえる。

#### (2) 応力ひずみ関係のひずみ速度依存性

図-7, 8は、それぞれLYP100及びLYP225の各ひずみ速度における代表的な公称応力-公称ひずみ速度関係を比較したものである。図-7, 8より、LYP100, LYP225共にひずみ速度が大きくなるにしたがって、初期降伏点が上昇しているのがわかる。破断伸びについては、多少ばらつきはあるものの、ひずみ速度が大きくなるほど、伸びが小さくなる傾向にある。

#### (3) 応力ひずみ速度関係の定式化

任意のひずみ速度での動的降伏応力 $\sigma$ を記述する1つの構成式として、次式<sup>2)</sup>がある。

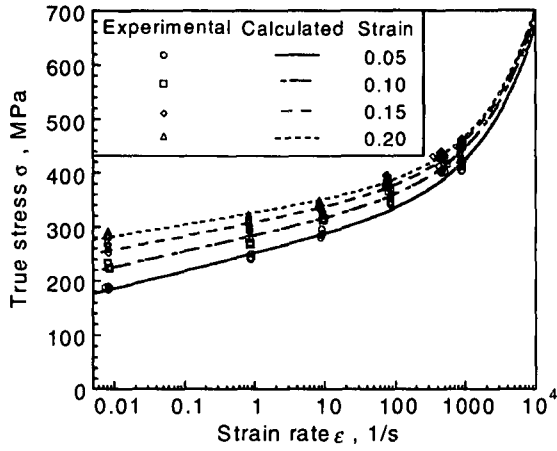


図-9 真応力-ひずみ速度線図 (LYP100)

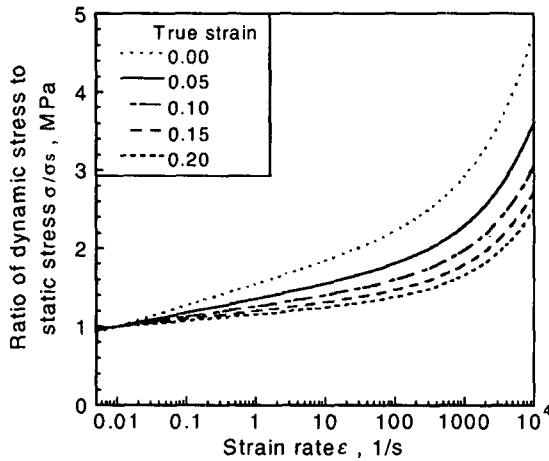


図-10 真応力-ひずみ速度の静動比 (LYP100)

$$\sigma = \sigma_s + (\alpha \epsilon^p + \beta) \left( 1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{CR}} \right) \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_s^p} \right) + B \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_u} \right)^m \quad (1)$$

$$(\dot{\epsilon}_s^p \leq \dot{\epsilon}^p \leq 10^4 \sim 10^5 / s)$$

$$\sigma_s = \sigma_y + a(1 - e^{-b\epsilon^p}) \quad (2)$$

ここで  $\sigma_s$  : 準静的降伏応力,  $\sigma_{CR}$  : 臨界応力,  $\epsilon^p, \dot{\epsilon}^p$  : 塑性ひずみ及び塑性ひずみ速度,  $\dot{\epsilon}_s^p$  : 基準ひずみ速度,  $\dot{\epsilon}_u$  : 単位ひずみ速度,  $\sigma_y$  : 初期降伏応力,  $\alpha, \beta, B, m, a, b$  : 材料定数である。なお, 式(1)の右辺第3項はひずみが約  $10^4/s$  のオーダー以上でのひずみ速度依存性のために導入されている。

前述の材料定数は鋼に特有のものとして与えることもできるが, 本報では正確さを優先することとし, 個別の材料ごとの定数として同定することとした。得られた LYP100 に対する材料定数を表-1 に示す。また表-1 の値に基づくひずみ依存性の計算結果と実験結果の比較を図-9 に示す。両者は非常に良く一致しており式(1)によるモデル化は妥当なものと考えられる。

表-1 LYP100の材料定数

$\sigma_{CR}$	4.7 (GPa)	$\alpha$	-31.2	$B$	1.51	$a$	240
$\sigma_y$	135 (MPa)	$\beta$	16.1	$m$	0.572	$b$	4.77

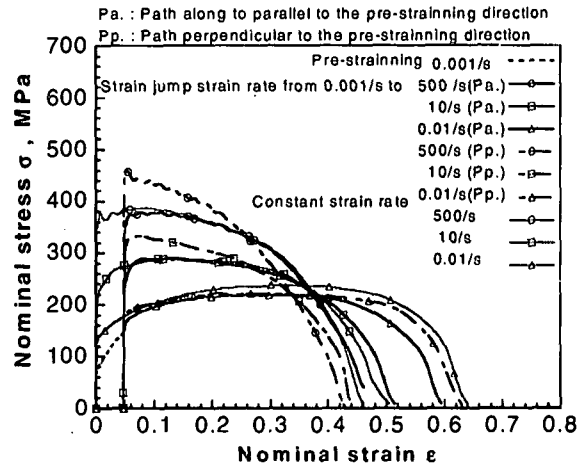


図-11 5%の予ひずみを与えた時の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP100)

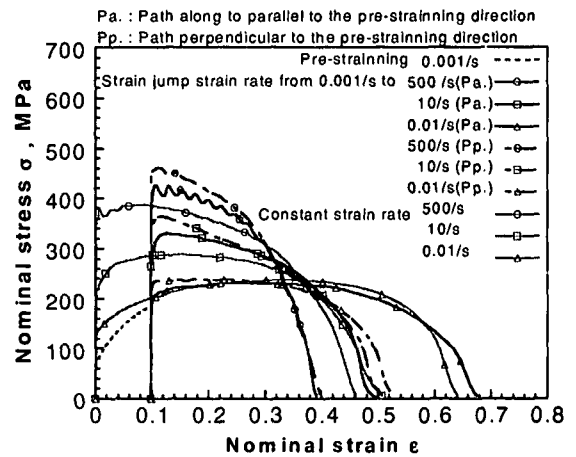


図-12 10%の予ひずみを与えた時の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP100)

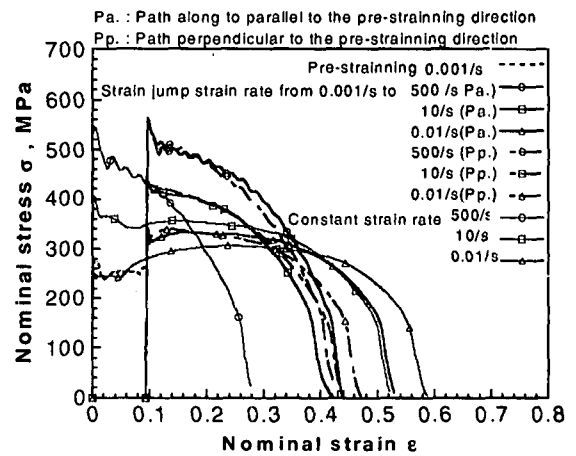


図-13 10%の予ひずみを与えた時の公称応力-公称ひずみ線図 (LYP225)

#### 4. ひずみ速度履歴及び負荷履歴依存性

##### (1) ひずみ速度履歴依存性

一般に金属材料は、変形速度が異なると、生成される変形組織が異なることが予想される。このような変形組織の差異(例えば転位密度の差異など)が後続の組成変形に影響を与える時、材料はひずみ速度履歴依存性を持つと呼ばれる。

ひずみ速度履歴依存性の有無を判断する最も簡便な方法は、ひずみ速度急変試験であり、先行ひずみ速度から後続のひずみ速度にひずみ速度を急変させた時、一定ひずみ速度(=後続のひずみ速度と等しい)で変形させた場合の変形抵抗と一致しなければ、ひずみ速度履歴依存性を持つと判断できる。

図-11, 12, 13は先行ひずみ速度(=予ひずみ速度)を0.001/sに選び、予ひずみ量を5%及び10%として、その後、後続のひずみ速度を種々に変化させた場合

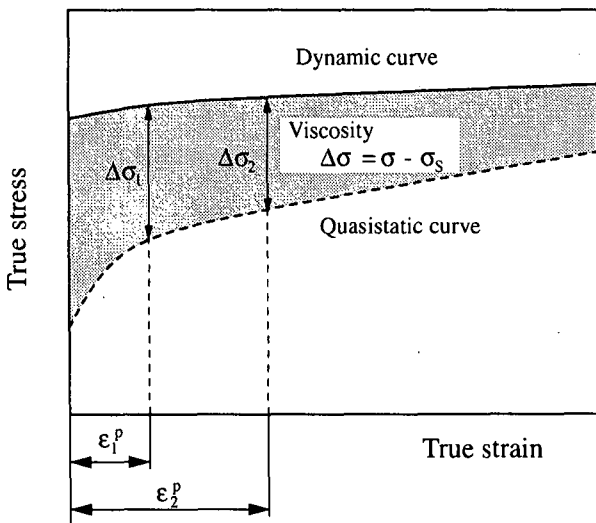


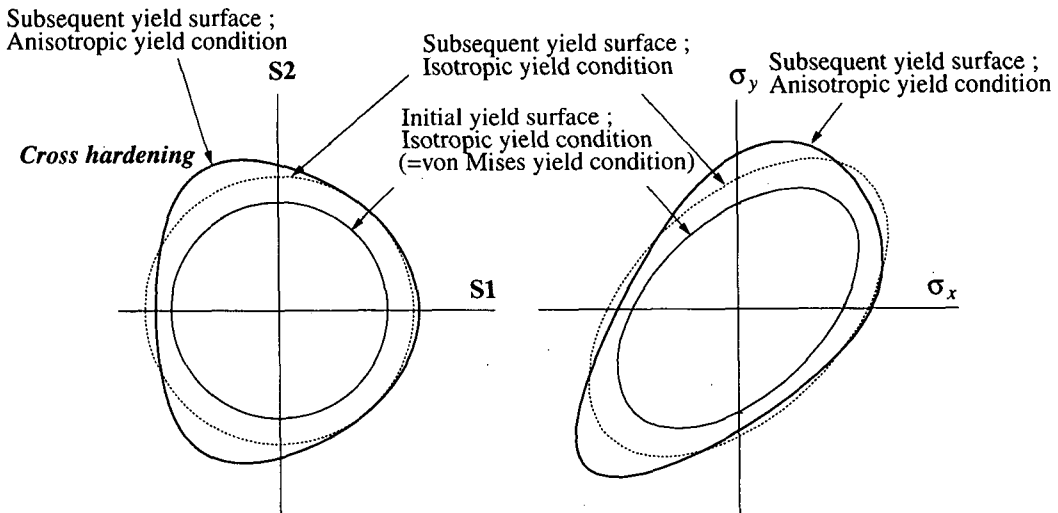
図-14 超過応力のひずみ量依存性

のLYP100及びLYP225の変形抵抗の推移を示したものである。なお、図には後に説明するように、後続の負荷経路を先行の負荷経路と異なる方向に選んだ結果も示しているため、これらを区別するため、Pa(後続負荷経路が先行負荷経路と同方向)及びPp(後続負荷経路が先行負荷経路に直交)の記号を付してある。

図より、先行負荷方向と後続の負荷方向が一致する場合(記号Pa)、後続のひずみ速度を500/sに選んだ場合には、ひずみ速度急変後の変形抵抗は、ひずみ速度を500/sで一定変形させた場合の変形抵抗をおよそ50MPa上回ることがわかる。ひずみ速度を10/sとした場合にも同様の傾向が認められる。ただし変形抵抗の差異はおよそ40MPaとなり、速度急変時のひずみ速度差異が大きいほど、応力のひずみ超過量は大きくなる傾向にある。

また、後続のひずみ速度を0.01/sとした場合にも、ひずみ速度急変時に応力がかなり増加しているが、これは、ひずみ速度0.01/s一定の変形時の応力-ひずみ曲線を比べた場合、差異は小さいことから、ひずみ速度が0.001/sから0.01/sに上昇したことによる、粘性抵抗によるものと考えられる。

このようなLYP100について現れたひずみ速度依存性はBCC系の鋼に共通に現れる特性の1つであるが、FCC系の銅、アルミとは傾向が反対のものとなる。一般に高速変形では、生成される転位密度は増加し、また転位密度の上昇は、加工硬化の原因となるため、低ひずみ速度から高ひずみ速度へひずみ速度を急変させた直後の応力は高ひずみ速度一定の変形より小さくなる。鉄鋼系で示される現象は、これとは正反対となり、高速変形になるほど逆に生成される転位密度は小さく、加工硬化量も小さくなるものと考えられる。



A.A. Ilyushin's deviatoric stress plane S1-S2 Stress plane  $\sigma_x - \sigma_y$

図-15 後続降伏曲面の交差硬化

## (2) ひずみ履歴依存性

図の記号Paを付した、予負荷方向( $\sigma_x$ 方向)と同方向に後続負荷を与えた場合の変形抵抗の推移と、記号Ppを付した、後続負荷方向を先行負荷方向に垂直( $\sigma_y$ 方向)に与えた場合の変形抵抗の推移と比較すると、後者の応力は前者のそれを大きく上回り、明確なひずみ履歴依存性が認められる。

この現象の説明には2通りの解釈が考えられる。その1つは予負荷と直交する方向への負荷における応力の上昇を後続負荷方向に対するひずみ速度依存性の差異と帰着させる考え方である。図-14に示すような単軸引張においては、鋼の場合ひずみ量が増加するほど、準静的応力と動的応力の差、すなわち粘性応力による応力上昇分は小さくなる傾向にある。これは鋼において式(1)中の $\alpha$ の値が負になることとも関連している。もしこのような、ひずみ量がひずみ速度依存性に与える影響に方向性があるとすれば、予ひずみ方向と直交する方向でのひずみ速度依存性は、初期状態に保たれ、高い粘性応力を示すと考えられる。ただし、比較的ひずみ速度が小さいひずみ速度0.001/sから0.01/sへのひずみ速度急変試験(ほぼ準静的とみなしてもよい)においても、同様の現象が認められることから、ひずみ速度依存性よりも、このようなひずみ速度依存性の差異にもとづく解釈よりも、降伏曲面そのものの異方硬化(形状変化)<sup>3,4)</sup>にともなう交差硬化に原因を求めるのが妥当なように思われる。

第2の解釈では、図-15に示すように初期ミーゼスの降伏曲面が変形の進行にともない、等方硬化による降伏半径の増加とともに形状変化(異方硬化)をおこし、予負荷と直交する方向へ拡大すると考える。図-15左図はこの様子をIlyushinの偏差応力平面で表したものであり、右図はこれを $\sigma_x - \sigma_y$ 平面での表示に変換したものである。この図によれば、予負荷方向( $\sigma_x$ )の応力よりも直交する $\sigma_y$ 方向の応力のほうが高くなり、考えられる準静的後続負荷においても予負荷と直交する方向の応力上昇を矛盾なく説明でき、また、粘性応力は降伏曲面の降伏半径に比例することから高速変形ほど、応力上昇が顕著となる傾向も同時に説明することが可能である。

## 5. 結言

本研究では、LYP100及びLYP225について6種類のひずみ速度で引張試験を行ない、また、予ひずみを与え、その方向性も考慮した上で、3種の速度で引張試験を行なった。その結果、LYP100, LYP225について以下のようなことがわかった。

- ①(ひずみ速度依存性) 変形抵抗のひずみ速度依存性があり、ひずみ速度が大きくなると変形抵抗が大きくなる。
- ②(ひずみ速度履歴依存性) 準静的に予ひずみを与えたとき、予ひずみ量が多くなると転位密度が上昇するため、一定速度で引張った時よりも変形抵抗が大きくなる。

- ③(ひずみ履歴依存性) LYP100は、予ひずみ方向に対し、再負荷方向が同方向なものよりも垂直なものの方が、交差硬化により変形抵抗が大きくなる。LYP225については、強い異方性はみられない。

謝辞：本研究の1部は平成14年度科学技術振興調整費(総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上の研究」の第三分科会の分担課題の1つ)による支援を受けたことを付記し、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 山田哲, 松本由香, 山口路夫, 松岡三郎, 小川信行, 秋山宏: 実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊抑止策の検証, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, C-3, pp. 119-124, (2001.3)
- 2) 谷村真治, 三村耕司, 山田哲: 鋼構造材の動的強度, 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, c-3, pp135-140, (2001.3)
- 3) K.Mimura, S.Tanimura: Strain and strain rate history dependent constitutive model and its application to large high speed deformation, Proc. of 2<sup>nd</sup> Asia-pacific Conf. on Shock and Impact Load on structure, pp369-376 (1997)
- 4) A.A.Ilyushin: On the relation between stress and small strain in the mechanics of continua, PMM 18,6,pp641-666 (1954)