

2 軸応力下における鋼板の降伏曲面に関する基礎的研究

熊本大学 正会員 ○葛西 昭

日本製鉄(株) 非会員 永田 幸伸

熊本大学 正会員 森山 仁志

1. 緒言

数値解析技術の発展により、土木構造物や機械製品等の様々な構造物の性能評価において、有限要素解析が極めて重要な役割を担っている。しかし、例えば、溶接鋼管は鋼板を冷間成形することで製造されるため、製品には造管における複雑な塑性ひずみが付加され、加えて使用環境では内圧や曲げ等の多軸的な応力が作用するため、数値解析により再現するには、二軸かつ正負反転を伴う複雑な応力状態を考慮する必要がある。近年、板材の二軸負荷試験法の代表として、十字型試験片(図-1(a))を用いた二軸引張試験や I 型試験片(図-1(b))による二軸圧縮引張試験がある¹⁾。この考えを導入し、二軸状態における鋼材の弾塑性状態を把握した。

2. 鋼材 (SM490YB) に対する載荷試験

溶接構造用圧延鋼材である SM490YB の載荷試験を行った。化学成分は表-1 のとおりである。各種試験片は板厚 12mm の厚板から採取した。

(1) 一軸負荷試験の概要

一軸応力状態での引張、圧縮、圧縮引張繰返し試験を行った。

a) 単調引張試験

丸棒試験片 (Φ=6mm) を厚板の圧延方向 (L 方向) と幅方向 (W 方向) より採取した。ストロークは 1.5 mm/min の一定とした。

b) 単調圧縮試験

座屈しない程度での試験を考慮して Φ8.4×L16.8 mm の円柱圧縮試験を行った。この圧縮試験では単調引張試験と同様、L 方向と W 方向より採取した。

c) 引張圧縮繰返し試験

部材軸方向に繰返し負荷を与えられる丸棒試験片を用いて、荷重－ひずみ曲線の繰返し載荷時の弾塑性挙動を確認する。負荷パターンは表 2 に示すように、予ひずみを種々変化させた。

(2) 二軸負荷試験の概要

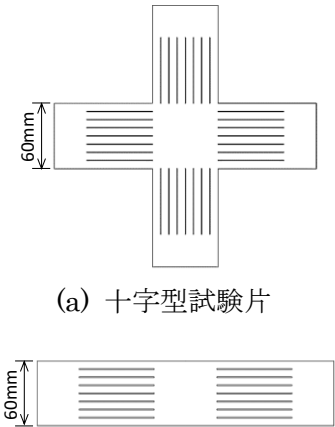
a) 二軸引張試験用十字型試験片に任意の二軸引張応力を作用させ、二軸引張応力状態における弾塑性変形挙動や降伏曲面を測定した。各腕部は、長さ 60 mm×幅 0.25 mm のスリットを入れることで、変形拘束の影響を極力小さくした。

表-1 試験片の化学成分

Grade	C	Si	Mn	P	S	Ceq
SM490YB	0.16	0.33	1.46	0.021	0.004	0.42

表-2 引張圧縮繰返し試験のひずみ負荷パターン

サンプル No.	負荷ひずみ		
	Step 1	Step 2	Step 3
L-1	0.50%	-0.50%	引張破断
L-2	引張破断	—	—
L-3	-1.0%	引張破断	—
L-4	-1.5%	引張破断	—
L-5	-2.0%	引張破断	—
W-1	引張破断	—	—
W-2	-0.5%	引張破断	—
W-3	-1.0%	引張破断	—
W-4	-1.5%	引張破断	—
W-5	-2.0%	引張破断	—



(a) 十字型試験片

(b) I 型試験片

図-1 試験片

キーワード 多軸応力状態，降伏曲面，構成式モデル，Tresca の降伏条件，von Mises の降伏条件

連絡先 〒850-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1 熊本大学大学院先端科学研究部 Tel 096-342-3579

b) 二軸引張圧縮組合せ試験

I 型試験片の直交方向にそれぞれ引張応力と圧縮応力を組合せ作用させた。腕部は、長さ 60 mm×幅 1.0 mmのスリットを 7.5 mm間隔に 7 本有し、60 mm×60 mmの中心領域（応力測定部）に及ぼす腕部の変形拘束の影響を極力小さくしている。

c) 等塑性仕事面の測定方法

二軸応力を受ける板材の加工硬化特性を定量的に評価するために、等塑性仕事面を測定した。応力点を主応力空間にプロットすれば、塑性ひずみ ε_p に対する等塑性仕事面が決まる。

3. SM490YB 鋼の载荷試験結果

(1) 一軸負荷試験結果

a) 単調引張試験，単調圧縮試験

引張および圧縮試験について、5%のひずみ範囲では L, W 方向の異方性は見られなかった。

b) 引張圧縮繰返し試験

図-2 から分かるように、反転負荷後、上降伏点消失し、初期の上降伏点以下の応力で再降伏している。

(2) 二軸負荷試験の結果

a) 二軸引張試験

各応力配分にて二軸引張試験を実施した。

b) 圧縮引張組合せ応力試験

塑性仕事量 W と各軸の真応力の関係の一例を図-3 に示す。

c) 等塑性仕事面

図-4(a)に等塑性仕事面を示した。塑性ひずみ ε_p の増加に伴い、曲面が外側に拡大していく様子が分かる。本実験結果では SM490YB 鋼の材料異方性はほとんど見られず、曲面は等二軸に対して対称形である。一方で、 $\varepsilon_p=0.01$ (図-4(b))から $\varepsilon_p=0.02$ (図-4(c))にかけて、曲面の形状が変化している。具体的には、 ε_p が小さい範囲、すなわち初期降伏曲面は、曲面が平坦な Tresca 型の降伏曲面に極めて近く、一方、 ε_p が大きい範囲では Mises の降伏曲面に似ている。

4. 結言

SM490YB 鋼材を対象に、二軸負荷試験の基礎的検討を行った。本研究で得られた知見として、二軸負荷試験の結果より、SM490YB 鋼材の降伏曲面は相当塑性ひずみ ε_p が 2%程度までの低ひずみ域で Tresca 型から Mises 型へ変化する異方硬化性を有することが分かった。この成果を受けて、構成式モデルの開発を行えば、より厳密な検討が可能と考える。

参考文献

- 1) 桑原利彦，堀内義雅，上間直幸，ヤナジーゲルハイモヴァ：金属薄板の面内に引張圧縮組合せ応力を負荷する材料試験法，塑性と加工 48-558，pp. 630-634，2007。

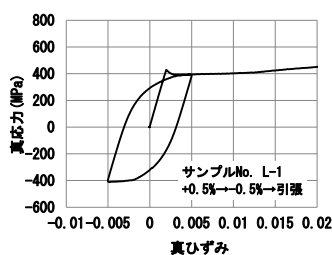


図-2 圧縮引張繰返し試験のヒステリシスループ

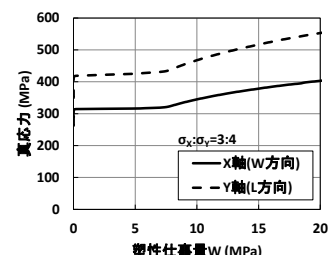
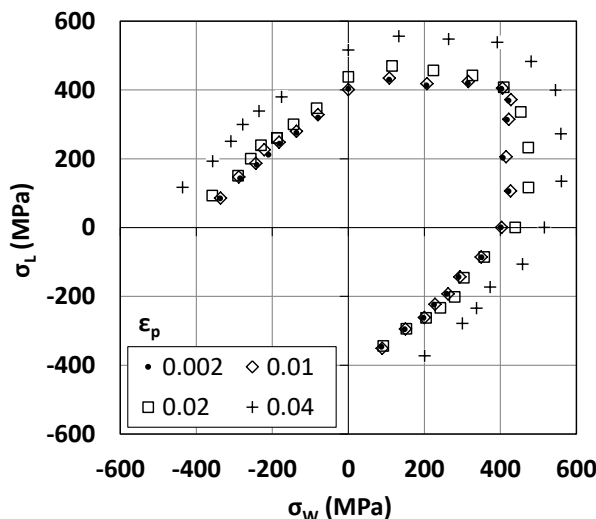
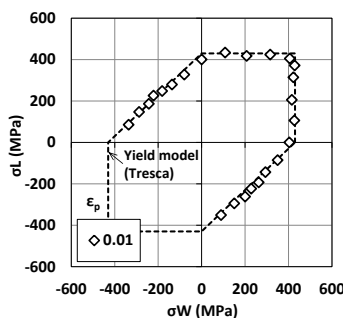


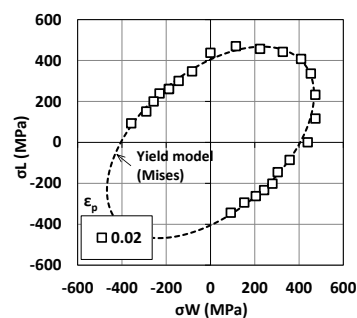
図-3 二軸引張時の真応力－塑性仕事量



(a) 各塑性ひずみに対する等塑性仕事面



(b) 等塑性仕事面 ($\varepsilon_p=1\%$)



(c) 等塑性仕事面 ($\varepsilon_p=2\%$)

図-4 等塑性仕事面（平面応力下）