

引張鋼材のくびれ挙動に関する形状効果

岡澤 重信¹・寺澤 大樹²・池田 清宏¹・寺田 賢二郎¹

¹正会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

²学生員 東北大学 大学院理学研究科物理学専攻 (〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉)

引張鋼材の形状に起因する分岐不安定メカニズムの相違が、くびれ挙動における2種類の形状効果を生み出すことを示し、その効果が機械的性質を評価する際の優位な影響因子であることを明らかにする。日本工業規格(JIS)に沿った形状の引張試験片が用いられている現状において、本研究で示したこのような形状効果に対する考察は、機械的性質の評価法に対して新たな知見を与えるものである。

Key Words : shape effect, tensile strength, ductility, necking, bifurcation

1. 序論

引張力が作用する鋼材において、くびれ挙動を示す分岐点が荷重極大点後に発生することは、鋼材の形状によらず共通の現象である。しかし荷重極大点からの程度遅れて分岐が発生するかは、端部の影響が大きく関与し、部材が細長くなるほど分岐点が荷重極大点に近づく傾向にある^{1),2)}。また断面の幅厚比により局所変形モードが著しく異なることが3次元有限要素解析により示されており³⁾、分岐後の挙動についても鋼材の形状が大きく関与する。このように、引張鋼材のくびれ挙動において、以下の2種類の形状効果が存在する。

- 細長比に対する分岐点発生位置
- (直方体における) 断面幅厚比に対する分岐後の局所的な局所変形モード

筆者らは最近の研究^{4),5),6)}において、引張鋼材がその形状の違いにより、全く異なる分岐不安定メカニズムを有することを理論的及び解析的に解明している。そこで本研究では、数理的な側面にしか触れていないこれらの研究成果を実地的な見地から整理し直し、鋼材の形状と強度及び変形性能との関連について工学的観点から議論する。

2. 細長比に関する形状効果

種々の細長比の引張鋼材の分岐解析を行い、その細長比とくびれ発生を示す分岐点の発生位置との関係を調べ、工学的洞察を与える。

(1) 解析手法及び条件

有限要素法の定式化には、updated Lagrangian法を用いるが、その詳細については文献⁷⁾に譲る。また、大ひずみを扱う際の構成方程式には、Kirchhoff応力のJaumann速度を用いた J_2 流れ則を採用する。塑性応答には次のような相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ \bar{e}^p の関

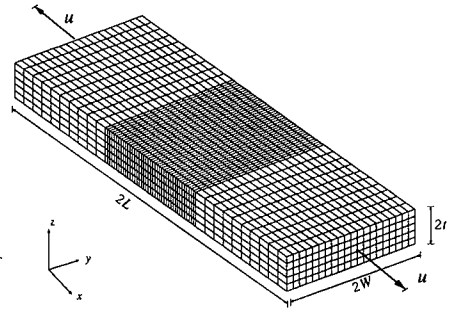


図-1 解析モデル

係を仮定した。

$$\bar{\sigma} = \sigma_y \left(1 + \frac{\bar{e}^p}{e_y} \right)^n, \text{ where } e_y = \frac{\sigma_y}{E} = \frac{1}{500} \quad (1)$$

ここで、右下付き文字の“y”は降伏値を示すものである。

以下の解析では、ヤング係数 $E = 200$ (GPa)、ポアソン比 $\nu = 0.333$ とする。また、式(1)において $n = 0.0625$ として硬化型の構成関係を仮定することで、材料不安定性を明確に排除して、幾何学的不安定性のみに着目した引張鋼材の形状効果を取り扱う。なお、他の部材面の応力が発生しないように端面に引張力を作用させ、完全系の分岐解析によってくびれをシミュレートする。

(2) 種々の細長比の部材のくびれ解析

図-1に示す解析モデルにおいて t は一定 ($t = 2.50$ cm) とし、細長比だけを変化させた分岐解析を行う。扱った部材は表-1のような細長比の異なる5種類であり、図-2にはそれら全てのつり合い経路を示す。縦軸は公称応力を降伏応力で除して無次元化された応力、横軸は u/L で示されるひずみである。

ここで、主経路と荷重極大点●は、すべての部材において完全に一致する。 $L/W = 2.00$ の部材Aにおい

表-1 鋼材の細長比

specimen	W (cm)	L (cm)	L/W
A	10.0	20.0	2.00
B	10.0	30.0	3.00
C	10.0	50.0	5.00
D	10.0	70.0	7.00
E	10.0	100	10.0

表-2 鋼材の断面幅厚比

specimen	W (cm)	t (cm)	W/t
F	10.0	1.00	10.0
G	10.0	2.50	4.00

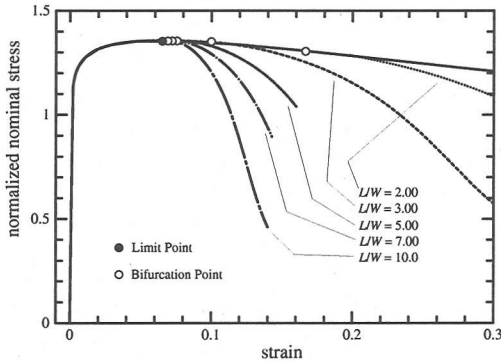


図-2 種々の細長比の部材におけるつり合い経路

ては、荷重極大点●が発生する場合の2倍以上の軸ひずみで分岐点○によるくびれが発生する。そして荷重極大点はすべての部材で同一であるが、細長比が大きくなるにつれて、分岐点が荷重極大点に接近する傾向がある。分岐点と荷重極大点が一致する点は多重不安定点の一種で、頂上分岐点と呼ばれる^{4),8)}。分岐点が荷重極大点より遅れて発生することは、鋼材の端部の影響が作用しているものと考えられており¹⁾、端部の影響のない十分に細長い鋼材においては、引張強度は頂上分岐点によって与えられることになる。

(3) 工学的考察 - 引張強度

一般に、“引張強度”は荷重極大点●で定義される。よって、初期不整の全くない理想的な鋼材においては、細長比の大小に関わらず引張強度はすべて同一となる。しかし、実際の鋼材は幾何学的及び材料的な初期不整を有するため、その強度はそれぞれの最初の特異点における初期不整感度則に支配される。例えば、部材Aにおいては、引張強度は単純特異点である荷重極大点●として与えられるが、部材Eにおいては引張強度はもはや多重特異点の頂上分岐に支配される。

筆者らは荷重極大点と頂上分岐点について、対応する初期不整感度則と強度の確率分布を理論的に与え⁴⁾、くびれ解析においても応答の違いを確認している⁵⁾。ゆえに細長比は、くびれが発生するひずみのみならず、強度の確率の変動にまで大きな影響を及ぼすことになり、その評価に際しての重要な因子と位置づけられる。

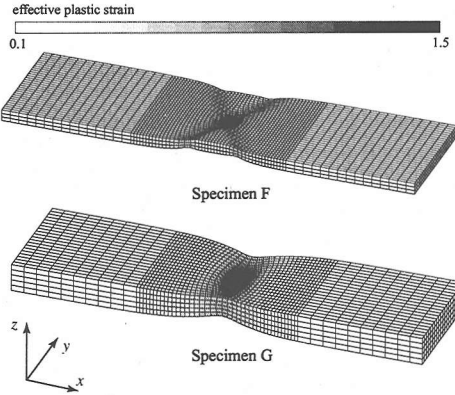


図-3 分岐経路上における相当塑性ひずみ分布と変形状態

3. 断面幅厚比による形状効果

断面の幅厚比がくびれ後の終局的な局所変形モードに及ぼす影響を解析的、実験的に検討し、その工学的役割について議論する。なお解析手法、材料パラメーター等は前節と全て同一である。

(1) 種々の断面幅厚比の部材のくびれ解析

断面幅厚比のみを変化させるため、図-1におけるLは一定として、表-2のような2種類の断面幅厚比の異なる部材を扱った。断面幅厚比の違いによる相対的な挙動の変化を対象とするためLの寸法は任意であるが、ここでは $L = 3W$ と設定した。

図-3は2つの部材それぞれの分岐経路を追跡した際の、相当塑性ひずみ分布と変形状態である。分岐モードは共に拡散くびれモードを示すにも関わらず、終局的な局所変形モードは大きく異なる。部材Fでは×状の局部くびれが発生し、その領域に塑性ひずみが集中している。また部材Gでは、くぼみ状の局部くびれが発生すると共に、塑性ひずみは部材Fにくらべて狭い領域に集中している。拡散くびれモードからそれぞれの局所変形モードへの移行は分岐ではなく、単に拡散くびれモードによって引き起こされた除荷域以外の塑性域に変形が集中することによって発生するものである。また同じ拡散くびれモードであるにもかかわらず、このような局所変形モードの違いが発生するのは、除荷域の進展具合に依存するもので、その進展状況は断面幅厚比に大きく影響される³⁾。

また図-4はそれぞれの部材のつり合い経路である。分岐が1回しか発生しない部材Gに対して、部材Fにおいては分岐経路上において2次分岐点が検出される。

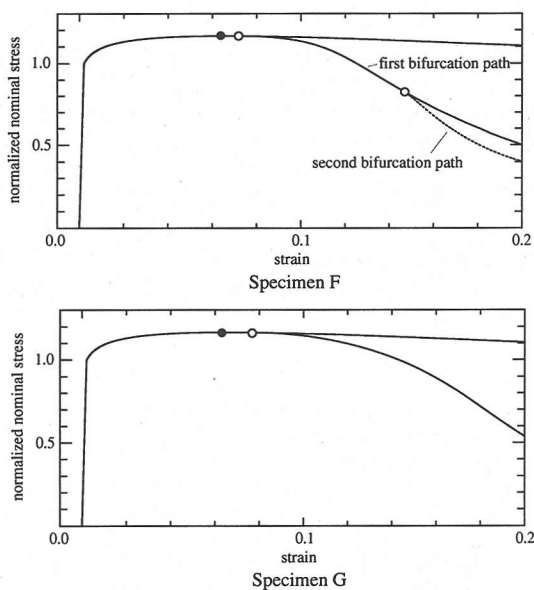


図-4 部材 F,G のつり合い経路

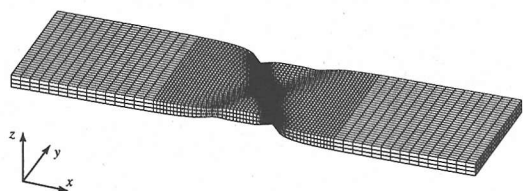


図-5 2次分岐経路における相当塑性ひずみ分布と変形状態

この分岐点から新たな分岐経路に移り移ることによって、図-5に示すような×状の局部くびれの片一方に変形が集中する挙動がシミュレートされる¹。

実際の鋼材は何らかの初期不整を有し不完全系となる。よって、つり合い経路は完全系における分岐経路に擦り寄ったものとなり、2次分岐はおろか1次分岐点さえも消滅する。しかしながら、このような不完全系の挙動は完全系における分岐構造を明らかにしてはじめて議論可能なものである。

(2) 引張実験

上記の解析と同様な断面幅厚比の鋼材試験片を用意して引張試験を行い、断面幅厚比が終局的な局所変形モードに及ぼす形状効果を定性的に観察した。材質は全て日本工業規格 (JIS)⁹⁾ の SM490 である。

写真-1 が部材 F と同じ断面幅厚比を有する部材の引張試験中の変形遷移である。荷重極大点直後に (a) のような拡散くびれが始まり、その後に (b) のような×状の局部くびれが発生する。そして、×状の片一方に変形が集中することによって、鋼材はさらに伸び続け、(c) のように真ん中から亀裂が起き、その亀裂が徐々に広

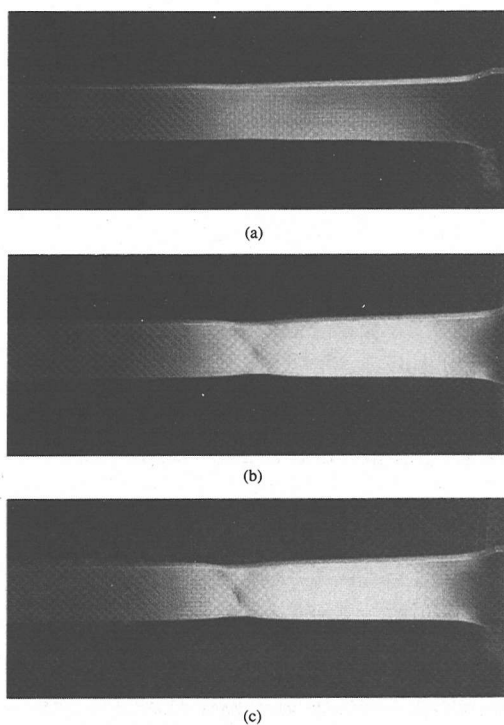


写真-1 部材 F の変形遷移 (実験)

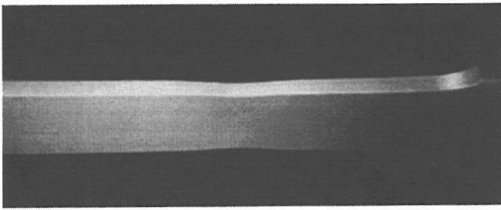
がることによって鋼材は延性的に破断する。一方、写真-2 は部材 G と同様な断面幅厚比の試験片における変形遷移である。ここでも荷重極大点直後に (a) のような拡散くびれが始まり、その後に (b) のようなくぼみ状の局部くびれが発生する。その後は幾何学的な変形は見られずに、ある荷重レベルで突如として大音響と共に (c) のような形態を伴う脆性破壊に至る。

(3) 工学的考察 - 変形性能

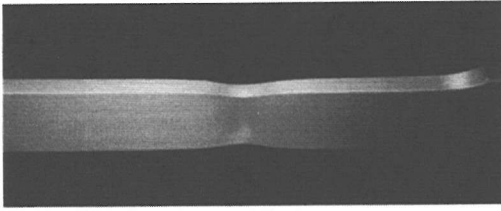
破断時の評点間の距離を、初期の評点間距離で除した値が“伸び”として定義される。これは鋼材の変形性能を表すものであり、先の“引張強度”と並んで工学的に重要な量である。部材 F においては拡散くびれへの分岐の後に2回目の分岐が発生し、初期の均一変形以外の2つの幾何学的形状を破断前に許容することになる。よって1回しか分岐の発生しない部材 G に比べて、部材 F ではより大きな形状変化つまり変形性能が期待できる。この変形性能の違いが、実験で示したような延性・脆性という最終的な破断状態の差異をもたらしていると考えられる。よって脆性破壊を示す部材 G 程度の断面幅厚比が引張試験片として設定されている日本工業規格 (JIS)⁹⁾ のものより薄い部材を用いることによって、通常よりも大きな変形性能が得られると予想される。

以上のように、断面幅厚比に関する形状の違いは、破断までの分岐メカニズムの相違を生み出し、結果的に変形性能に大きな影響を及ぼす。

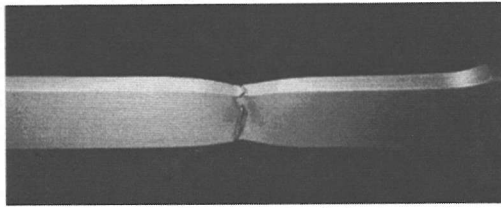
¹ この多段階に及ぶ現象は、群論的分岐理論による階層的な分岐法則によって説明可能である⁶⁾。



(a)



(b)



(c)

写真-2 部材 G の変形遷移 (実験)

4. 結論

本研究では、引張鋼材のくびれ挙動に関して2種類の形状効果を概説し、鋼材の主な機械的性質である“引張強度”と“伸び”を評価する際の優位な影響因子であることを明らかにした。引張試験片の平行部の長さや鋼材の幅厚比などの形状は日本工業規格 (JIS)⁹⁾によって規定されており、それに沿った形状の引張試験片を用いて機械的性質が決定されている。しかしながら、実際の鋼構造物を構成する部材の細長比や断面幅厚比は JIS 規格のものに限定されるわけではなく、その状況に応

じた様々な形状のものが存在する。本研究で示した鋼材形状のもたらす幾何学的不安定性による効果は、機械的性質の評価法に対して新たな知見を与えている。今後は材料不安定性も考慮し、不安定性に関する包括的な研究が期待される。

謝辞: 慶應義塾大学・野口裕久助教授には、くびれ解析に対して、また名古屋大学・宇佐美勉教授においては、鋼材の強度や変形性能などの工学的考察に対してそれぞれ貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation Phenomena in the Plane Tension Test, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.23, pp.239-264, 1975.
- 2) Burke, M. A. and Nix, W. D.: A Numerical Study of Necking in the Plane Tension Test, *Int. J. Solids Struct.*, Vol.15, pp.379-393, 1979.
- 3) 岡澤重信, 宇佐美勉, 野口裕久, 藤井文夫: 3次元塑性不安定解析による引張鋼材の局部くびれ挙動, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.285-296, 2000.
- 4) Ikeda, K., Oide, K. and Terada, K.: Imperfection Sensitive Variation of Critical Load at Hilltop Bifurcation Point, Preprint.
- 5) Okazawa, S., Oide, K., Ikeda, K. and Terada, K.: Imperfection Sensitivity and Stochasticity of Tensile Strength of Steel Specimen, Preprint.
- 6) Ikeda, K., Okazawa, S., Terada, K., Noguchi, H. and Usami, T.: Recursive Bifurcation of Tensile Steel Specimens, Preprint.
- 7) Bathe, K. J.: *Finite element procedures*, Prentice Hall, 1996.
- 8) Thompson, J. M. T. and Schorrock, P. A.: Bifurcation Instability of an Atomic Lattice, *J. Mech. Phys. Solid*, Vol.23, pp.21-37, 1975.
- 9) 日本規格協会: JIS ハンドブック 鋼材 I, pp.123-130, 1999.

(2000.3.23 受付)

SHAPE EFFECTS OF NECKING BIFURCATION IN TENSILE STEEL SPECIMENS

Shigenobu OKAZAWA, Daiju TERASAWA, Kiyohiro IKEDA and Kenjiro TERADA

The shape effects of tensile steel members, which stem from the complex bifurcation mechanism, are discussed from the engineering viewpoints. It is found that the aspect ratio affects the strength while the cross-sectional width-thickness ratio does the ductility. This kind of study provides insight into the evaluation of the mechanical property when the instability phenomena are involved.