

# Salome-Meca による炭素鋼の応力-ひずみ線図実験データの再現

広田 憲亮<sup>1†</sup> 藤岡 照高<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OPEN CAE 勉強会@関東 <sup>2</sup>東洋大学理工学部

## Reproduction of experimental data on stress-strain curve of carbon steel using Salome-Meca

Noriaki HIROTA<sup>\*†</sup> Terutaka FUJIOKA<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>OPEN CAE study group@Kanto <sup>\*\*</sup>Toyo University, Science & Engineering Department

### Abstract

Through the tensile test results using SS400, attempts were made to reproduce the stress-strain curve in the FEM analysis. As a result, the upper yield point and the lower yield point appeared from the tensile test. Next, from the true stress and true strain derivation by the Bridgeman rule, it was also found that the true stress did not always increase, and decreased at the time of fracture. As a result of FEM analysis based on these data, yield point and true stress reduction due to constriction was reproduced.

**Keywords:** Stress-Strain curve, yield point, Bridgeman, true stress reduction, constriction

## 1. はじめに

これまで Salome-Meca を用いた構造解析の検討は、数多くの方々のご尽力により、その適用事例の幅を格段に増大させてきた[1]。一方で、解析はあくまでも実際現象との整合がとれて初めて応用への展開が図れるツールである。したがって、本来であれば、解析担当者は、その検討する現象に対して、あらかじめ身をもって、体感する経験が必要である。しかしながら、昨今の製造業では、業務の分業化がますます加速しており、実験担当者、解析担当者といったように、各作業を分担する企業も増えてきている。これにより、一部の企業では、解析担当者が、実験担当者の意図を深く理解せずに、解析モデルを作成してしまい、結果的に何かおかしい解析結果を会議の場で紹介するといった話も聞く。以上のことから、今後の解析担当者には、実験結果との **Validation** を行うとともに、得られた実験結果を基に、構成則等の見直し等を図れる経験が必要であると考えられる。しかしながら、金属材料の機械的性質調査に最も広く用いられる室温引張試験を例に挙げても、その実施には、社内部署間での融通が利かない等何かと制約が多い。本研究では、今回個人的なネットワークにより、丸棒を用いての室温引張試験を実施できる環境が整ったため、FEM 解析結果と炭素鋼の応力-ひずみ線図実験データとの比較、またその後構成則の修正を試みたので、以下に報告する。

## 2. 実験方法

供試材とした丸棒は、炭素鋼である SS400 の  $\phi 19\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 42\text{mm}$  である。これを石井鐵工所磯部様のご協力により、東京衝機製造所製のアムスラー型引張試験機にて、引張試験を行った。あらかじめそれぞれの試験片には、標点間距離をポンチで打ち込み、破断後の試験片突合せにより、破断伸びの測定も行った。また応力-ひずみ線図作成のため、荷重、ストロークをチャートにて測定した。

## 3. 解析方法

解析には、Code-Aster (Ver.7.5.0)での応力解析を用いた。解析対象は、図 2 に示すように、藤岡らが以前報



Fig. 1 Appearance of Amsler type tensile tester manufactured by Tokyo Koki Co. Ltd owned by Ishii Iron Works Co., Ltd.

<sup>†</sup> E-mail address of corresponding author: 020045hirota@gmail.com

告した軸対称丸棒試験片の2次元1/4モデルとした[2]. 3種類の試験片に対して、それぞれ標点間距離、並行部直径を縦横寸法とした。拘束条件は、下端エッジを軸方向に拘束し、上端エッジを変位速度で引張る形とした。また要素は軸対称2次要素とした。なおくびれが生じやすいように、下端エッジ部には、初期不整を付与した。物性値としては、実験で得られた公称応力、公称ひずみを基に作成された真応力-真ひずみ線図を用いた。最大荷重点以降の値については、文献のRamberg-Osgood 則を用いての外挿を行った[3]。また弾性率は208GPaとし、ポアソン比は0.3に設定した。応力解析のコマンドファイルについては、特に藤岡らの研究結果から明らかとなったくびれ再現に有効なSIMO MIEHEを用いることとした[2].

#### 4. 実験結果

SS400 は、低炭素鋼やステンレス鋼とは異なり、上降伏点、下降伏点を示すことが、今回の引張試験からも明らかとなった。また径の異なる試験片のいずれも最大応力は448~462MPa、伸びは34~39%と各種引張特性に大きな差は生じなかった。以上のことから、引張試験片はいずれもほぼ同等の成分組成であったといえる。

#### 5. 解析結果

最初の解析結果では、上降伏点、下降伏点の存在により、いずれも弾性領域での再現が図3(a)に示すように全くできていなかった。そこで、全体的に実験結果と整合できる形で、弾性域での応力値に関しては、意図的に増加させることとした。これにより、下降伏点以前の応力ひずみ線図が図3(b)に示すように精度よく再現可能となった。この際のRamberg-Osgood 則による実験値への外挿の結果、k値は0.112、n値は1.8となった。

次にもう一つの課題として、最大荷重以降のくびれ曲線が再現できない問題があった。これについては、以下に示すBridgeman 則による引張試験片破断時の真応力導出を試みた[4].

$$\sigma = \frac{P}{\pi a^2 \left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)} \quad (1)$$

この際の  $P$  は荷重、 $a$  はくびれ部の最小半径、 $R$  は曲率半径である。特に  $R$  は、以下の式により、導出可能である。

$$R = \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + h^2}{2h} \quad (2)$$

この際の  $W$  は破断後の試験片突合せ時のくびれ楕円部における幅であり、 $h$  は高さとなっている。さらに破断時の真ひずみ導出は、以下の式で導出される。

$$\varepsilon = 2 \ln \frac{a_0}{a} \quad (3)$$

これにより、各試験片の真応力を導出した結果、900~915MPa となり、真ひずみは1.8~2.0となった。この結果から、真ひずみ0.5以降の真応力値は、Ramberg Osgood 則から大きくはずれ、1.8以降では徐々にその値を低下させるものと推察した。実際にこの予測に基づき、コマンドファイルに値を入力した結果、いずれも図3(c)に示すように、やや異なる部分もあるが、ほぼ実測値に近

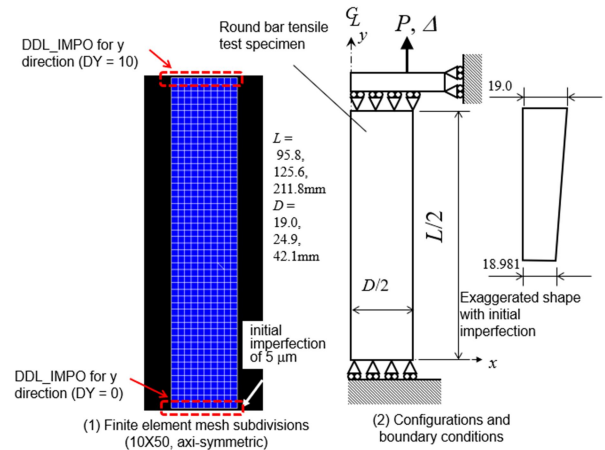


Fig. 2 Two-dimensional model outline of static analysis constructed for reproduction of tensile test.

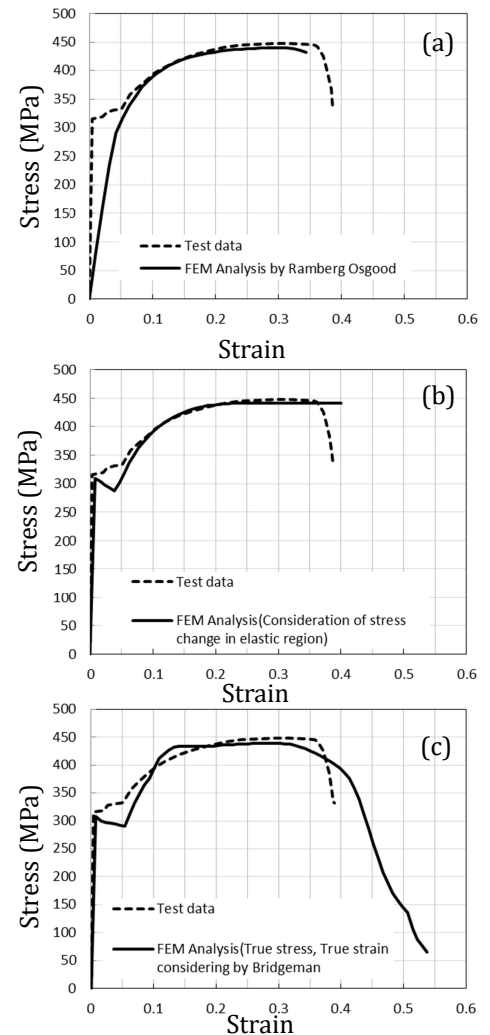


Fig. 3 Comparison of experimental results and FEM analysis results. (a)Ramberg Osgood applied, (b)Elastic region stress value change, (c)True stress, True strain considering by Bridgeman.

い形で、下降伏点、くびれによる応力減少を再現できた。

## 6. 結言

SS400 を用いた  $\phi 19\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 42\text{mm}$  の引張試験結果を通じて、FEM 解析での応力ひずみ線図の再現を試みた結果、以下の結論を得た。

- ・SS400 の応力、ひずみ線図では、上降伏点、下降伏点が観察された。径の異なる試験片のいずれも最大応力は 448~462MPa、伸びは 34~39%と各種引張特性に大きな差は生じなかった。
- ・SS400 の応力ひずみ線図実験データを再現すべく、Ramberg Osgood 則を用いた FEM 解析を行った結果、上降伏点、下降伏点の存在により、弾性域での再現は困難であった。
- ・弾性域での応力値に関して、意図的に増加させる試みを行った結果、下降伏点以前の応力ひずみ線図が精度よく再現可能となった。この際の Ramberg Osgood 則での  $k$  値は 0.112、 $n$  値は 1.8 となった。
- ・Bridgeman 則による引張試験片破断時の真応力、真ひずみを、破断後の試験片突合せにより、求めた結果、真応力値は、Ramberg Osgood 則から大きくはずれ、真ひずみ 1.8 以降では徐々にその値を低下させた。
- ・Bridgeman 則により導出された真応力、真ひずみ線図を用いて、FEM 解析を再度実施した結果、ほぼ実測値に近い形で、下降伏点、くびれによる応力減少を再現できた。

## 参考文献

- [1] 柴田良一. オープン CAE 「Salome-Meca」ではじめる構造解析. 工学社, 2014.
- [2] 藤岡照高. 構造解析ソルバ検証用参照解の整備. オープン CAE 学会論文集, 2015. OpenCAE2015-GP20,
- [3] 藤岡照高 他 3 名. 日本材料学会学術講演会講演論文集, 61, 77-78, 2012.
- [4] P. W. Bridgman. The Effect of Nonuniformities of Stress at the Neck of a Tension Specimen, Studies in Large Plastic Flow and Fracture, Harvard University Press, Cambridge, 9-37, 1964.