論文

弾性棒式高速引張試験における試験片形状最適化

広瀬 智史* 上西 朗弘*

樋渡 俊二** 吉田 博司*

Optimization of Specimen Geometry
for Elastic-Bar-Type High-Strain-Rate Tensile Testing

Satoshi HIROSE*, Akihiro UENISHI*,

Shunji HIWATASHI** and Hiroshi YOSHIDA*

(Received on March 22, 2013)

In the finite element analysis (FEA) of high-speed forming for rate-sensitive materials, the accuracy significantly depends on tensile testing data obtained at high-strain-rate. The measurement accuracy of the testing data depends on the design of the specimen geometry. In this study, the effects of important parameters of the specimen geometry, i.e., parallel length, the width of the parallel part, and the radius of the transition zone, on the measurement accuracy were investigated by dynamic explicit FEAs for three different sets of material parameters. The results of the FEAs in the present study revealed the range of optimal specimen geometry. Additionally, the result showed that the consideration of work hardenability is important for the optimization of the specimen geometry. Finally, our prediction by the present simulations was experimentally verified by tensile test performed at high-strain-rate.

Key words: high-energy-rate forming, material testing, high-strain-rate tensile testing, specimen geometry.

1. 緒言

高速成形等の高速変形を伴う現象の高精度解析のため、材料特性値の1つであるひずみ速度依存性の正確な把握が重要である。高ひずみ速度域での材料物性値の把握のため、引張速度を上げた引張試験が重要となるが、変形速度を上げるのみでは良好な引張試験精度は確保できない¹⁾。

高精度な応力評価のためには、試験片の弾塑性変形や荷重計測部の弾性変形などにおける変形の伝播現象²⁾を考慮する必要があり、検力台方式³⁾や弾性棒方式^{4)~6)}の引張試験方法が提案されている。また、ひずみの評価方法は試験方式の制約により異なり、例えば弾性棒方式では通常計測される棒端変位の差により試験片に生じる伸びが計測され、ひずみが算出される。

一方、測定・算出される高ひずみ速度域での応力値とひずみ値は試験片形状により変化する⁷⁾。通常の低ひずみ速度域での引張試験でも同様であり、福井ら・吉田らにより単軸応力状態維持を達成する高精度引張試験のための試験片形状条件が検討されている^{8), 9)}。しかし、高ひずみ速度域では、低ひずみ速度域で無視できた応力波の伝播の影響

を無視できなくなるため、試験片中央部以外での変形集中が発生し、単軸応力状態を維持できなくなる¹⁰⁾。

そこで、著者らは特に薄鋼板を対象に、高ひずみ速度域での高精度な弾性棒方式の高速引張試験のための試験片形状条件を、シミュレーション結果に基づき体系化し、具体的な試験片形状(試験片長さ L_t 、平行部長さ L_p 、幅 W 、肩半径 R (Fig.1))を見出した。さらに、材料特性の最適な試験片形状への影響を見出したので報告する。

まず、第2章で高速引張試験片形状として想定される要件について述べ、第3章では本検討で用いた複数の試験片形状モデル、材料特性等の解析条件を述べる。第4章では、第2章で示す複数の前提条件の各々を満足する試験片形状の検討結果を示し、最後に最適な試験片形状を具体化する。

2. 弾性棒方式の高速引張試験で満たすべき条件

弾性棒方式の高速引張試験で試験片形状の満たすべき条件として以下の第2.1節~第2.4節で示す4つが予想される。

2.1 条件Ⅰ：単軸応力状態の維持

福井ら⁸⁾、吉田ら⁹⁾は低ひずみ速度域での引張試験で単軸応力状態維持を達成する試験片形状要件を検討し、試験

Fig. 1 Specimen geometry

* 新日鐵住金(株) 鉄鋼研究所 〒293-8511 富津市新富 20-1
Steel Research Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation,
20-1 Sintomi, Futtsu-city, Chiba, 293-8511, Japan.

** 新日鐵住金(株) 名古屋技術研究部 〒476-8686 東海市東海町 5-3
Nagoya R&D Laboratory, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation,
5-3 Tokai, Tokai-city, Aichi, 476-8686, Japan.

片平行部長さと幅の関係の重要性を指摘しており、高速引張試験でも同様に重要である。

2.2 条件 II : 早期平衡状態の達成

応力算出の前提として、引張方向に垂直な断面における荷重が試験片内で一定(平衡状態)でなければならないが、高速引張試験では、変形初期、試験片内の応力波の伝播・反射が十分ではないため、平衡状態を満たしていない。そのため、早期に平衡状態を達成しうることが試験片形状の要件として考えられる。

2.3 条件 III : 試験片中央部以外の早期ネッキングの回避

応力波は弾性波と塑性波に分類される。条件 II の早期平衡状態には弾性変形を伴う弾性波の伝播・反射が重要となる一方、塑性波は塑性変形を伴うため、変形に大きく影響する。塑性波が伝播せず停留すると、変形が局所化し易いため、不適切な試験片形状では試験片中央部以外でネッキングが早期に生じ、一様伸びを著しく過小評価¹⁰⁾してしまう。すなわち、試験片中央部でネッキングさせうることが試験片形状の要件として考えられる。

2.4 条件 IV : R 部起因のひずみの不均一分布の軽減

この条件は弾性棒方式の引張試験特有のものである。伸び計の追従性の問題から、肩半径 R 部を含む棒端変位を伸びとして扱うため、R 部に起因したひずみの不均一分布の影響が測定結果に現れる可能性がある。そのため、上記不均一分布の影響を無視できるような試験片形状の工夫が重要となると考えられる。

3. 解析条件

3.1 解析モデル

汎用的な動的陽解法 FEM ソフトである LS-Dyna により、弾性棒方式の高速引張試験シミュレーションを実施した

Fig. 2 Simplified model of elastic bar type tensile testing

(Fig.2). 試験片形状として、主要部長さ(Fig.1)を複数変更したモデルを用いた(Table 1). C 部に右向きの強制変位(速度 v)を $v/L_1 = 1000 \text{ s}^{-1}$ となるように与え、AB 間を長くし、さらに A 部および D 部に無反射条件を導入した¹¹⁾. これにより試験片部 BC 間に伝播する応力波は強制変位によるものと、B 部および C 部の断面急変部に生ずる反射波のみとなる。また、計算コスト低減のため AB 間と CD 間は、実際は円柱形状であるところを、BC 間の試験片厚さと同じの板状としてモデル化し、B 部および C 部での応力波の反射率を実際と合わせるため、音響インピーダンスを考慮し密度を調節した。また、Swift + Cowper – Symonds 型の構成方程式(式(1))を採用した。

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{X} \right)^{\frac{1}{Y}} \right) \quad (1)$$

材料として 980MPa 級鋼板相当材(Table 2 中 α)、加工硬化能に大きな差のある 590MPa 級鋼板相当材 (Table 2 中の高加工硬化能材: β および低加工硬化能材: γ) を対象とし

た。なお強度および加工硬化能は塑性波伝播速度に大きく影響する¹²⁾。

Table 1 Specimen geometries

Thickness [mm]	L_1 [mm]	W [mm]	R [mm]
1.4	10~90	3~12.5	0.5~25

Table 2 Material parameters

Case	K [MPa]	ε_0	n	X [s^{-1}]	Y
α	1650	0.0004	0.14	3.40×10^{11}	6.4
β	1050	0.0020	0.22	5.00×10^6	4.0
γ	900	0.0020	0.12	6.00×10^7	5.0

3.2 解析モデルの検証

Fig.2 の解析モデルは計算コスト低減を目的として形状を簡略化した簡易モデルである。そこで、簡易モデルと実際の実験での形状等の差異が試験結果に与える影響について検討した。検討したモデルは対称性から 1/4 モデルとし、代表的な弾性棒方式である One-Bar 法と SHPB 法に基づいている(Fig.3)。試験片形状、材料特性および引張速度は第 3.1 節で説明した簡易モデルを加えた 3 つのモデルで全て同一とし、高速引張シミュレーションでの応力-ひずみ関係の履歴を比較した(Fig.4)。すべてのモデルでほぼ同一の結果が得られており、簡易モデルの妥当性が確認できる。

Fig. 3 Analysis models

Fig. 4 Stress-strain curves

4. 最適な試験片形状

4.1 条件 I : 単軸応力状態の維持

単軸引張状態での材料特性を評価したい場合、試験片内の引張方向に垂直な少なくとも 1 つの断面で均一な単軸引張応力状態を満たす必要がある。準静的試験では幅 W に対し平行部長さ L_p (本報内の試験片モデルでは $(L_t - 2R)$ と同値) を大きくしてこの条件を達成している^{8), 9)}。そこで、単軸応力状態から最も外れやすい試験片中心点(長さ・幅および板厚方向全てで中心)に注目し、比較的高ひずみ域(10%)での幅方向応力 σ_w と、 L_p と W の比の関係を調査した(Fig.5)。Fig.5 の縦軸は幅方向応力 σ_w を引張強さ σ_u で規格化した値を示す。Fig.5 より、全ての対象材料で L_p/W が小さいと幅方向応力が大きくなること、すなわち条件 I を満足するため式(2)の考慮が必要であることが確認できる。

Fig. 5 Relation between σ_w/σ_u and L_p/W

4.2 条件 II : 早期平衡状態の達成

高速引張試験では準静的試験で無視できる応力波の影響が顕著となり、特に変形初期において Fig.2 中の B および C での断面力が釣り合わない。したがって、応力算出のため力の釣り合いを確保する必要があり、条件 II の早期成立が重要となる。その方法として、試験片長さ L_t を極力小さくすることで、短時間で弾性波を反射・往復²⁾させ、変形の不均一時間を短縮させる方法が考えられることから、まず L_t の異なる試験片モデルに注目し、条件 II を評価した。試験片の釣り合い状態は Fig.2 中の B, C 部の断面力(F_b ,

Fig. 6 History of equilibrium for specimens of material α

F_c)の差と試験片 BC 間(L_t に相当)の最大荷重 F_{max} の比により評価した。検討の結果、全ての対象材料で L_t が小さいものほど早期に上記条件を満足することを確認した(Fig.6)。すなわち、条件 II の早期成立のための L_t を極力小さくする必要がある(式(3))。また対象とした材料による閾値の相違は見られなかった。これは変形初期の応力波、すなわち弾性波伝播速度はヤング率と密度により決まる²⁾ため、対象材料間で相違がなかったことが原因と考えられる。

また、弾性波の反射は断面積の変化部で生じるため、連続的に断面積が変化する肩半径 R 部では複雑な反射および弾性波の重ね合わせが生じ、瞬間的に大きな応力が生じてしまう。Fig.7 は、肩半径 R 部のみ形状の異なる 3 種の試験片の真応力-真ひずみ曲線であるが、 R 部が大きいほど不自然な応力変動が大きくなることがわかる。すなわち、応力の高精度評価のため R 部は極力小さくする必要がある。

Fig. 7 Stress-strain curves

4.3 条件 III : 試験片中央部以外の早期ネッキングの回避

まず試験片形状と軸方向ひずみ分布の履歴を観察した。平行部長さ L_p と幅 W の比 L_p/W が 3.4 および 5.7 の場合の軸方向ひずみ分布図を Fig.8 に示す。対象とした全ての試験片形状で、引張荷重付加後試験片平行部端部近辺で変形集中部が発生する。その後一部の試験片では徐々に試験片中央部に変形が伝播し変形の均一化が達成され、中央でネッキングが生じる(Fig.8(a))。一方、 L_p/W が大きいものはそのまま端部の変形集中部が解消されずネッキングを引き起こす(Fig.8(b))。

Fig. 8 Distribution of axial strain

そこで、大ひずみ域での変形集中部位置で試験片形状を分類したところ材料 α , β , γ それぞれについて Fig.9 のおおよその線で示される特有の遷移域があることが確認された。

Fig. 9 Influence of W and L_p for location of necking

また対象材料それぞれに、条件 III を成立させる L_p/W の閾値が存在することが確認できる(式(4)). すなわち、 L_p/W 値は単軸応力状態維持の逸脱に留意しつつ、小さくすることが望まれる。

$$L_p/W \leq C_{III} \quad (4)$$

$$c_p = \sqrt{H/\rho} \quad (H = \partial\sigma/\partial\varepsilon) \quad (5)$$

この現象は大ひずみ域であることから塑性波伝播速度に大きく影響すると考えられる。応力がひずみの関数であると仮定した場合、上式(5)で算出される塑性波伝播速度 c_p ¹²⁾ は材料 α と β でほぼ同等であるが、これらに比べ材料 γ では極めて小さい。すなわち、塑性波伝播速度の小さい材料 γ は端部での変形集中を生じ易く、大ひずみ域での一様変形維持を許容する試験片形状はより限定されると考えられ、その傾向が Fig.9 に現れていると推察される。Fig.10 は 10%ひずみ時の塑性波伝播速度 c_p の分布図である。材料 α および材料 β と比べ、材料 γ の塑性波伝播速度は全体的に小さい。さらに試験片平行部端部周辺で特に小さく、塑性波が停留し易い、すなわち局所変形が生じ易い箇所であることがわかる。

Fig. 10 Distribution of propagation rate of plastic wave

4.4 条件 IV : R 部起因のひずみの不均一分布の軽減

条件 II は応力算出上必要不可欠な条件であるが、ひずみ測定についても注意する必要がある。弾性棒式高速引張試験のひずみ計測は、棒端部(Fig.1 の試験片長さ L_t の位置)の変位を用いるため、肩半径 R 部に起因するひずみの不均一分布の影響を受ける。低速引張試験では試験片平行部内の一部の伸びを計測しその長さをゲージ長さ(以下 GL と略

称)とすることで R 部に起因するひずみ分布の影響を除去している。高速引張試験では伸び計の追随性の問題から通常の伸び計を活用できないため、 R 部に起因する不均一分布の影響は避けられない。この問題を解消するため 2 つの方法が考えられる。ひとつはサンプリングレートの高い特殊かつ高価な非接触式の伸び計を活用し、ひずみ分布の影響を取り除くこと¹³⁾、もうひとつは試験片形状を工夫することで、ひずみ分布の影響を軽減することである。高速引張試験は基本的な材料特性を把握するための材料試験であるため、特殊な計測系でのみ測定できるような状況は避け、汎用的に活用されている計測系で測定可能であることが望まれる。そこで、筆者らは後者のアプローチを試みた。具体的には加工硬化特性およびひずみ速度の 2 点について試験片形状の妥当性を検証した。

(1) 高精度加工硬化特性把握のための適切な GL 算出されるひずみ値により結果的に評価される加工硬化特性は当然変化する。加工硬化特性は、成形性等の重要な製造上の性能に大きく寄与する特性であるため、ひずみの高精度測定は重要である。まずそれぞれの試験片モデルごとに入力した材料特性(応力-ひずみ関係)と近似できる適切な GL(有効 GL L_e)を最小二乗法により求め、高精度なひずみを測定・算出できる試験片形状条件を探索した。次に GL として L_p ¹³⁾もしくは L_t ¹⁴⁾が採用される例が見られるが、どちらが適切かを確認するため、 L_e と L_p との比および L_e と L_t との比と R と L_t との比の関係を調査した。

その結果、① $L_e = L_t$ と見なせる R が存在すること、②常に $L_e > L_p$ となり、 L_p を用いると R とともに誤差が拡大することが判明した(Fig.11, Fig.12)。したがって、GL として L_t を採用することが好ましく、さらに最適な R/L_t の領域の試験片形状を設計する必要がある(式(6))。なお、対象とした材料間で C_{IVa} と C_{IVb} に大きな相違は見られない。

Fig. 11 Relation between L_e / L_p and R / L_t Fig. 12 Relation between L_e / L_t and R / L_t

$$C_{Iva} \leq R/L_t \leq C_{Ivb} \quad (6)$$

(2) 高精度ひずみ速度依存性把握のための適切な条件 高速引張試験では材料のひずみ速度依存性を把握することが重要であるため、ひずみ速度の計測には注意を要する。肩半径 R 部に起因するひずみの不均一分布の影響により、計測されるひずみ速度 $\dot{\epsilon}_E$ と、実際に試験片平行部中央で生じるひずみ速度 $\dot{\epsilon}_C$ に大きな差異が生じる場合が考えられ、ひずみ速度依存性の計測精度を低下させるおそれがある。そこで、上記計測精度の維持のための試験片形状条件を探索した。具体的には、 $\dot{\epsilon}_E$ および $\dot{\epsilon}_C$ による静動差(高ひずみ速度と低ひずみ速度での変形応力の差)の差異が無視できる形状要件を探索した。静動差の差異が小さければ、ひずみ速度依存性の計測精度は維持される。

材料のひずみ速度依存性を式(1)により定義したとき、 $\dot{\epsilon}_E$ での静動差に対する $\dot{\epsilon}_C$ の静動差の比 θ と、 $\dot{\epsilon}_E$ に対する $\dot{\epsilon}_C$ の比 ξ の関係は式(7)で表される。

$$\xi = \theta^Y \quad (7)$$

ここで、 Y は式(1)中のひずみ速度依存性を示す材料定数であり、小さいほどひずみ速度依存性が大きいことを示す。したがって、ひずみ速度依存性の大きい材料 β の場合、例えば、静動差の差異を 5% ($\theta=1.05$) 以下とするためには、 $\dot{\epsilon}_E$ と $\dot{\epsilon}_C$ の差異が約 21% ($\xi=1.21$) 以下であればよい。

上記 ξ 値は R と L_t だけではなく、第 4.3 節のとおり変形集中部の位置に大きく影響する W にも依存すると考えられることから、 ξ 値と R と W の積に対する L_t の比 ($L_t/R/W$) の関係を調査した。Fig.13, Fig.14 はそれぞれ 5%、10% ひずみ時の ξ と、 $L_t/R/W$ の関係図であり、全ての対象材料で

Fig. 13 Relation between ξ and $L_t/R/W$ at 5 % strain

Fig. 14 Relation between ξ and $L_t/R/W$ at 10 % strain

変形量に関係なく、 $L_t/R/W$ が大きいほど、 ξ 値が小さくなること、すなわちひずみ速度依存性の計測精度が維持されることがわかる(式(8)). なお、図中の実線は近似曲線であり、式(9)でおおよそ表される。

$$L_t/R/W \geq C_{Ivc} \quad (8)$$

$$\xi = \frac{\dot{\epsilon}_C}{\dot{\epsilon}_E} = 1 + \frac{1}{3} \frac{RW}{L_t} \quad (9)$$

4.5 最適試験片形状

第 4.1 節～第 4.4 節で示された式(2), (3), (4), (6), (8)をすべて満たす最適な試験片形状は、ある範囲を持って与えられる。 C_I , C_{II} , C_{III} , C_{Iva} , C_{Ivb} , C_{Ivc} を前節のシミュレーション結果に従い、それぞれ 1.4, 10.0, 2.0, 0.07, 0.12, 1.4 とし、 L_t を 10.0mm と仮定した場合、最適試験片形状範囲は例えば Fig.15 の網掛け部で示される。なお、図中の矢印は各境界線からの最適範囲方向を示している。

Fig. 15 Range of optimal specimen geometry

鉄鋼材料の場合、特に式(4)は加工硬化特性に大きく依存するため注意が必要である。自動車への適用が加速しつつある超高強度鋼板は一般的に強度が大きくなる一方、延性に乏しく、大変形域での加工硬化能が小さいため、条件 III を満たし難く、一様伸びを著しく小さく評価してしまうおそれがある。

そこで、Fig.15 で示される最適試験片形状の超高強度鋼板への適用可否を確認するため、その相当材 δ (Table 3) を用い第 3.1 節で示した解析条件に基づいた高速引張試験シミュレーションを実施した。材料 δ で想定される引張強度および一様伸びは、それぞれ約 1640MPa, 0.05 である。なお、試験片形状は Fig.15 の網掛け部の範囲内のもの ($(L_t, W, R) = (10.0, 4.0, 1.0)$) とした。Fig.16 は解析により予測された応力-ひずみ曲線であり、出力結果は入力された応力-ひずみの関係と一致し、かつひずみ速度の誤差は 5% 以内に抑えられた。すなわち第 2 章で予想された試験片形状に求められる条件は妥当であり、結果見出された最適試験片形状は超高強度鋼板に十分適用可能であることが確認された。

Table 3 Material parameters

Case	K [MPa]	ϵ_0	n	X [s ⁻¹]	Y
δ	2000	0.0001	0.05	5.00×10^{12}	7.0

Fig. 16 Stress-strain curves

5. 結 言

ひずみ速度依存性の高精度測定のための試験片形状を動的陽解法に基づく FEM により高速引張試験シミュレーションを実施し、測定結果に対する試験片形状および材料特性の影響について調査した。結果、以下の結論を得た。

- (1) 単軸応力状態維持のため、低速引張時と同様に、材料特性に関係なく試験片幅 W に対する平行部長さ L_p の比が一定以上である必要がある。
- (2) 応力の計測精度維持のため、試験片内での引張荷重の早期平衡状態の達成が重要であり、試験片長さ L_t が一定以下の必要がある。これは弾性波の伝播速度に依存するものであり、鉄鋼材料の場合共通の条件である。
- (3) 加えて、 R 部内での弾性波の複雑な反射現象を起因とする材料特性と異なる応力変動回避のため、 R 部を小さくする必要がある。
- (4) 試験片中央部以外での早期ネッキング発生を回避するため、試験片幅 W に対する平行部長さ L_p の比が一定以下である必要がある。この閾値は材料の加工硬化能に大きく依存する。
- (5) 加工硬化能の高精度評価のため、 R 部に起因したひず

みの不均一分布の影響を軽減する必要がある、ゲージ長さとして試験片長さ L_t を採用し、かつ L_t に対する肩半径 R の比を一定の範囲内にする必要がある。

- (6) さらにひずみ速度の測定精度確保のため、肩半径 R および幅 W に対する試験片長さ L_t の比を一定以上にする必要がある。
- (7) 本研究で見出した最適試験片形状は、超高強度鋼板相当材に対しても、高ひずみ速度域での応力-ひずみ関係を高精度に測定することができる。

参 考 文 献

- 1) 上西朗弘・吉田博司: 第 258 回塑性加工シンポジウムテキスト, (2007), 31-38.
- 2) 林卓夫: 衝撃工学, (1988), 日刊工業新聞社.
- 3) Chiba, A., Tanimura, S. & Hokamoto, K.: Impact Engineering and Application, Elsevier Science, **I** (2001), 57-64.
- 4) Hopkinson, B.: Phil. Trans. A, **213** (1914), 437-452.
- 5) Kolsky, H.: Proc. Phys. Soc. B, **62** (1949), 676-700.
- 6) Kawata, K., Hashimoto, S., Kurokawa, K. & Kanayama, N.: Mechanical properties at high rates of strain, ed. J. Harding, (1979), 71-80, Institute of Physics.
- 7) Rodriguez, J., Navarro, C. & Sanchez-Galvez, V.: J. De Physique IV, **4-8** (1994), C8-83 - C8-88.
- 8) 宮内邦雄・吉田清太・福井伸二: 理研報告, **41-1**(1965), 5-15.
- 9) 吉田清太・吉田和夫: 理研報告, **39-3**(1963), 137-150.
- 10) 作井誠太・森勉: 日本金属学会誌, **28-9** (1964), 537-542.
- 11) JRI Solutions Ltd: LS-Dyna 971 User's Manual, **I** (2007).
- 12) Karman, T. & Duwez, P.: J. Appl. Phys., **21-8** (1950), 987-994.
- 13) Verleysen, P. & Degrieck, J.: Int. J. Impact Engineering, **30-3** (2004), 239-253.
- 14) Itabashi, M.: JSME Int. J. Ser. A, **46-3** (2003), 316-321.