

構造用鋼材の一樣伸びと降伏比の関係の定式化

鈴木 博 之*

A theoretical equation of relationship between uniform elongation and yield ratio of structural steels

Hiroyuki SUZUKI

Percent elongation in the specifications is a representative of ductility. The percent elongation consists of uniform elongation and local elongation. The specifications do not show the uniform elongation. Another representative of ductility is yield ratio. It is well known experientially that the uniform elongation decreases generally according to increase in the yield ratio.

In this paper, it is attempted that the uniform elongation of SM41 and HT80 is clarified from the percent elongation in the specifications. A theoretical equation of relationship between the uniform elongation and the yield ratio is derived.

1. 緒 言

鋼道路橋に用いられる鋼材について示方書では、日本工業規格(JIS)に適合する鋼材を使用することを標準としている¹⁾。鋼材の機械的性質の中で、最も基本的な性質であるとされている引張特性は、引張試験片の載荷試験により求められる。鋼材の機械的性質には降伏点、引張強さ、伸び、絞りなどがある。JISにおいては、延性の尺度として伸びが用いられている。これは静的引張試験における破断までのひずみをパーセント表示したものであり、一樣伸びと局部伸びの両方を含んでいる。局部伸びはくびれによって生じるもので、塑性変形能力に直接結びつくのは一樣伸びである。JISでは一樣伸びが明示されていない。

いま一つの延性の尺度に降伏比(Yield ratio)がある。これは延性という変形に関する性質を強度に関する性質である降伏点と引張強さをを用いて表現できるものである。高強度鋼になるにしたがって、降伏点と引張強さが近づき、降伏比は大きくなることが知られており、HT80の降伏比は0.875となっている²⁾。JISの構造用圧延鋼材の機械的性質には、引張強さの上限値と下限値が定められているのに対し、降伏点または耐力は下限値だけが定められている³⁾。したがって、規格上の降伏点に比べて鋼材の降伏点の実状は10数%~20数%高いとの報告もある⁴⁾。一般に、降伏比が大きくなると一樣伸びは減少することが知られており、これは現在使用されている鋼材について経験的にも確認されている⁵⁾。また、一樣伸びと降伏比の関係について理論曲線も求められ

*建設工学科

ている^{6),7)}。しかし、これらの理論曲線は、特に物理的な意味のない耐力を用いて導出されている。降伏点を用いた理論曲線は、著者の知る限り未だ見当たらない⁸⁾。

ところで、構造物の限界状態は耐荷力だけでなく変形能にも依存する。特に、地震時に構造物が吸収できるエネルギーは大きい方が好ましく、構造物の変形能が重視される。構造物の変形能は部材および材料そのものの変形能に左右されることは言うまでもない。

本研究では、一様伸びと降伏比の関係の定式化に先立って、JIS³⁾およびHBS²⁾における伸びの規格値から規格で考えられているSM41とHT80の一様伸びを明らかにすることを試みる。次に、降伏点と最大荷重点を用いて一様伸びと降伏比の関係を導出する。

2. 規格における一様伸び

JIS³⁾やHBS²⁾においては、降伏点は下限値が規定されており、上限値が与えられていない。これに対して、引張強さは下限値と上限値の両方が示されている。それ故、降伏比の規格上の下限値

$$Y_{R,min} = \sigma_{Y,min} / \sigma_{U,max} \quad \text{---- (1)}$$

ここに、 $\sigma_{Y,min}$ は降伏点の下限値、 $\sigma_{U,max}$ は引張強さの上限値が与えられていることになり、規格上の上限値

$$Y_{R,max} = \sigma_{Y,max} / \sigma_{U,min} \quad \text{---- (2)}$$

ここに、 $\sigma_{Y,max}$ は降伏点の上限値、 $\sigma_{U,min}$ は引張強さの下限値は与えられていない。したがって、一様伸びの下限値の目安が示されていない。ここでは、伸びの規格値から規格で考えられているSM41とHT80の一様伸びについて検討する。

引張試験後の試験片の伸び ε は、平行部の全体に一様に生じる一様伸び ε_u とくびれ部だけに生じる局部伸び δ_N から成っている。静的引張試験において荷重の小さい間は、試験片は長さ方向にほぼ一様に伸びるが、最大荷重点付近で最も弱い部分に変形が集中し、くびれを生じる。一般に、最大荷重点とくびれ開始点は一致しないが、本論文では最大荷重点とくびれ開始点は同一であるものとし、最大荷重点のひずみを一様伸び、それ以後破断までを局部伸びとする。

Barbaは、局部伸びが試験片平行部の断面積 A の平方根に比例するとして、伸びを次のように与えている⁹⁾。

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \delta_N / \ell = \varepsilon_u + \gamma \sqrt{A} / \ell \quad \text{---- (3)}$$

ここに、 ε は任意の標点間距離に対する伸び、 ε_u は一様伸び、 δ_N は局部伸び、 γ は局部伸びを表わすパラメーター、 A は試験片平行部の断面積、 ℓ は標点間距離

JIS³⁾やHBS²⁾の機械的性質に規定されている伸びは一様伸びと局部伸びの両方を含んでおり、式(3)の左辺に相当する。

さて、図1は軟鋼の伸びと \sqrt{A}/ℓ の関係を示したものである¹⁰⁾。図中の

$$\varepsilon = 0.22 + 0.62 \times \sqrt{A} / \ell \quad \text{---- (4)}$$

は実験データの平均的な関係を表している。実験データの下限に近い実験式を求めると、

$$\varepsilon = 0.18 + 0.54 \times \sqrt{A}/\ell \quad \text{---- (5)}$$

となる。したがって、軟鋼の一樣伸びは少なくとも18%と考えて良いものと思われる。しかし、これは軟鋼の一樣伸びの実状の下限であり、規格で考えられている一樣伸びではない。

JIS³⁾では表1に示すように16mmをこえ40mm以下のベース厚さのSM41に対して、24kgf/mm²以上の降伏点を与えているので、この厚さに対応する伸びから一樣伸び $\varepsilon_{0.41}$ を求めることとする。式(3)か

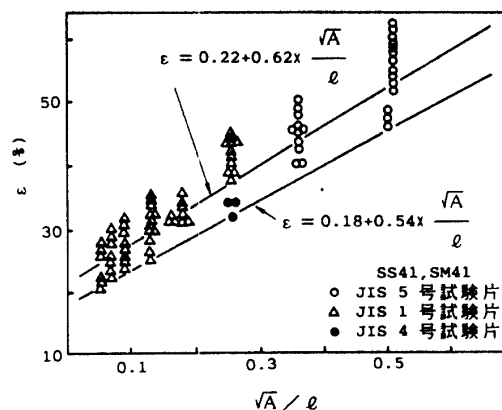


図1 軟鋼(SS41, SM41)の伸びと \sqrt{A}/ℓ

表1 SM41の機械的性質

(1kgf/mm²=9.8N/mm²)

降伏点または耐力 (kgf/mm ²)			引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び		
鋼材の厚さ (mm)				鋼材の厚さ (mm)	試験片	(%)
16以下	16をこえ 40以下	40をこえ るもの	41～52	5以下	5 号	23以上
25 以上	24 以上	22 以上		5をこえ16以下	1A 号	18以上
				16をこえ50以下	1A 号	22以上

らわかるように伸びが一定のとき試験片平行部の断面積が大きいほど一樣伸びは小さくなるので、ここでは試験片平行部の厚さとしてベース厚さの最大値である40mmを用いる。表1に示すように板厚40mmのSM41の伸びは、図2に示す1A号試験片を用いて22%以上と規定されている。式(3)の局部伸びを表わすパラメーター γ に式(5)の0.54を用い、伸びの規格値、試験片平行部の断面積および標点間距離を代入すると、

$$\varepsilon_{0.41} \geq 0.11 \quad \text{---- (6)}$$

を得る。従って、JIS³⁾ではSM41の一樣伸び $\varepsilon_{0.41}$ として11%を考えていることになる。

次に、HT80について考える。図3はHT80の伸びと \sqrt{A}/ℓ の関係を示したものである¹⁰⁾。図中の

$$\varepsilon = 0.06 + 0.61 \times \sqrt{A}/\ell \quad \text{---- (7)}$$

は実験データの平均的な関係を表している。実験

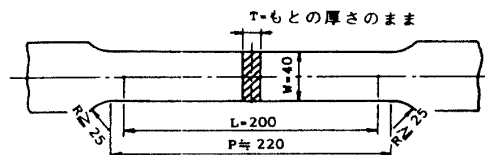


図2 JIS 1A号試験片

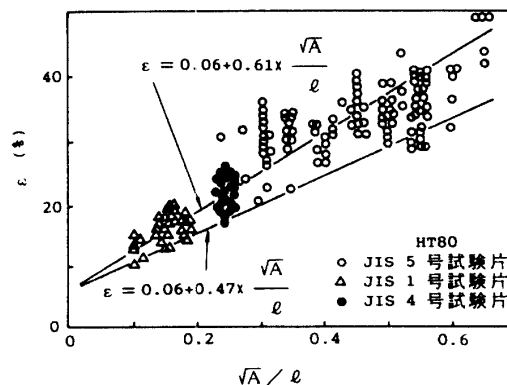


図3 HT80の伸びと \sqrt{A}/ℓ

表2 HT80の機械的性質 (1kgf/mm²=9.8N/mm²)

板厚区分 t (mm)	降伏点 または耐力 σ_y (kgf/mm ²)	引張強さ σ_u (kgf/mm ²)	伸 び		
			板厚区分 t (mm)	試験片 JIS	(%)
8 ≤ t ≤ 50	70 ≤	80~95	8 ≤ t ≤ 16	5号	16 ≤
			16 < t ≤ 25	5号	22 ≤
50 < t ≤ 75	68 ≤	78~93	25 < t ≤ 75	4号	16 ≤

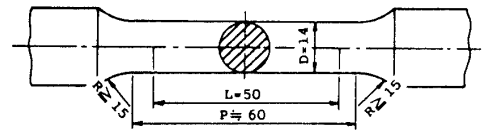


図4 JIS 4号試験片

データの下限に近い実験式を求めると、

$$\varepsilon = 0.06 + 0.47 \times \sqrt{A}/\ell \quad \text{---- (8)}$$

となる。したがって、HT80の一樣伸びの下限は6%と考えて良いものと思われる。当然のことながら、これは規格で考えられている一樣伸びではなく、HT80の一樣伸びの実状の下限である。

HBS²⁾においては、表2に示すように8mm以上50mm以下の板厚のHT80に対して70kgf/mm²以上の降伏点を与えているので、この厚さに対応する伸びから一樣伸び $\varepsilon_{u,80}$ を求めることとする。SM41とは異なり、降伏点の板厚区分8mm以上50mm以下に対して伸びの板厚区分は3種類に分けられており、引張試験片も8mm以上25mm以下では5号試験片、25mm以上50mm以下では4号試験片を用いることとなっている。ところが、式(3)の適用には

$$\ell/\sqrt{A} \geq 4 \quad \text{---- (9)}$$

が必要であるとも言われている⁵⁾。また、本州四国連絡橋上部構造において使用されたHT80はほとんどが25mm以上の板厚であったので、ここでは25mm以上の板厚の鋼材を考慮することとする。したがって、引張試験片は図4に示す4号試験片であり、伸びは16%以上が要求されている。式(3)における局部伸びを表わすパラメーター γ に式(8)の0.47を用い、伸びの規格値、試験片平行部の断面積および標点間距離を代入すると、

$$\varepsilon_{u,80} \geq 0.04 \quad \text{---- (10)}$$

が得られる。したがって、HBS²⁾はHT80の一樣伸び $\varepsilon_{u,80}$ として4%を考えていることになる。

3. 一樣伸びと降伏比の関係

降伏比 Y_R は、周知のように公称応力 σ を用いて

$$Y_R = \sigma_y / \sigma_u \quad \text{---- (11)}$$

ここに、 σ_y は降伏点、 σ_u は引張強さ

で与えられる。

ここで、降伏比を一樣伸び ε_u で表示することを考える。公称応力 σ と真応力 s には

$$\sigma = \frac{s}{1 + \varepsilon} \quad \text{---- (12)}$$

ここに、 ε は公称ひずみ $\left(= \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} \right)$ 、 ℓ_0 は载荷前の標点間距離、

l は任意の荷重における標点間距離

の關係があるので、式(11)は

$$Y_R = \frac{\sigma_Y}{\sigma_U} = \frac{s_Y}{s_U} \times \frac{1 + \varepsilon_U}{1 + \varepsilon_Y} \quad \text{---- (13)}$$

ここに、 s_Y は降伏点、 s_U は引張強さ、

ε_Y は降伏ひずみ、 ε_U は一樣伸び

となる。降伏ひずみ ε_Y は

$$\varepsilon_Y \ll 1 \quad \text{---- (14)}$$

であるから、結局、式(11)は

$$Y_R = \frac{s_Y}{s_U} \times (1 + \varepsilon_U) \quad \text{---- (15)}$$

となる。

さて、鋼材の真応力 s と真ひずみ e の關係を
示すると、図5のような單調増加曲線となる。原点
から降伏点までの真応力と真ひずみの關係は

$$s = E \cdot e \quad \text{---- (16)}$$

ここに、 E はヤング係数

で表わされ、降伏点から引張強さまでの曲線は、
 n 乗硬化式と呼ばれる

$$s = H \cdot e^n \quad \text{---- (17)}$$

ここに、 H は強度係数、

n はひずみ硬化指数

で表わされるものとする、降伏点 s_Y および引張
強さ s_U は

$$s_Y = E \cdot e_Y = H \cdot e_Y^n \quad \text{---- (18)}$$

$$s_U = H \cdot e_U^n \quad \text{---- (19)}$$

ここに、 e_Y は降伏ひずみ、 e_U は一樣伸び

となる。したがって、

$$\frac{s_Y}{s_U} = \left(\frac{E}{H} \times \frac{1}{e_U^{n-1}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad \text{---- (20)}$$

を得る。さらに、降伏点から引張強さまでの曲線に n 乗硬化式を仮定すると、一樣伸びとひずみ
硬化指数が一致すること

$$e_U = n \quad \text{---- (21)}$$

および公称ひずみと真ひずみの關係

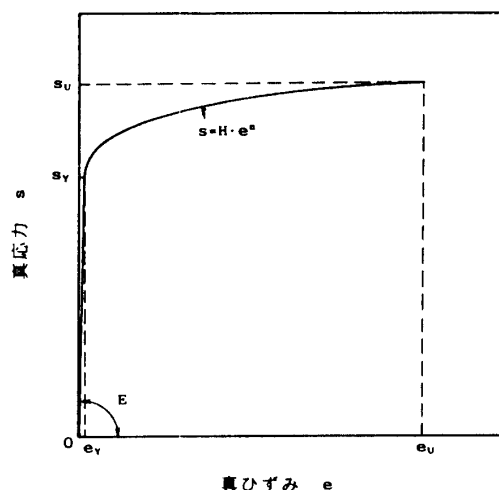


図5 真応力－真ひずみ曲線

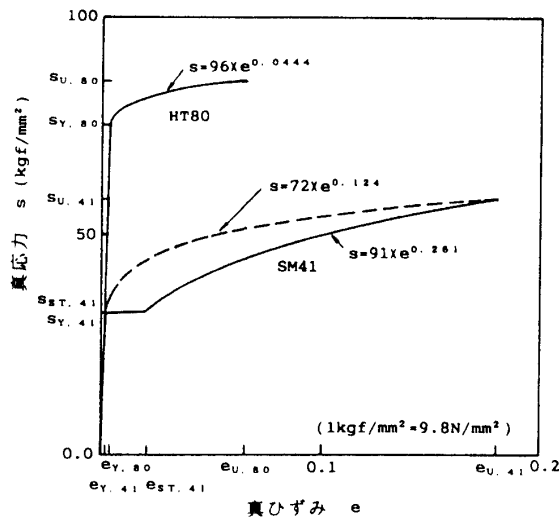


図6 SM41とHT80の真応力-真ひずみ曲線

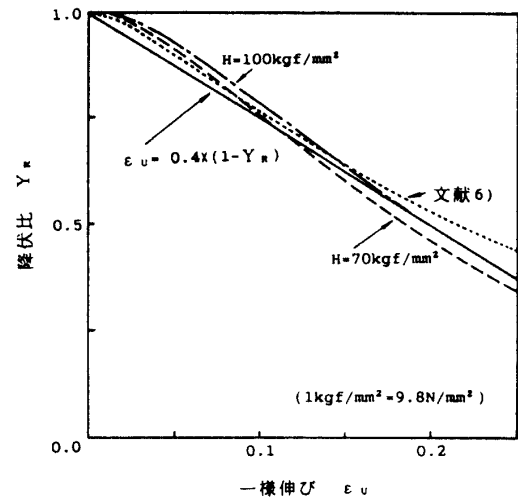


図7 一様伸びと降伏比の関係

$$e = \ln(1 + \varepsilon) \quad \text{---- (22)}$$

から、式(20)は次のようになる。

$$\frac{s_y}{s_u} = \left[\frac{E}{H} \times \frac{1}{\{\ln(1 + \varepsilon_u)\} \{\ln(1 + \varepsilon_u) - 1\}} \right] \frac{\ln(1 + \varepsilon_u)}{\{\ln(1 + \varepsilon_u) - 1\}} \quad \text{---- (23)}$$

したがって、式(23)を式(15)に代入すると、降伏比と一様伸びの関係

$$Y_r = \left[\frac{E}{H} \times \frac{1}{\{\ln(1 + \varepsilon_u)\} \{\ln(1 + \varepsilon_u) - 1\}} \right] \frac{\ln(1 + \varepsilon_u)}{\{\ln(1 + \varepsilon_u) - 1\}} \times (1 + \varepsilon_u) \quad \text{---- (24)}$$

が得られる。ヤング係数Eは、道路橋示方書¹⁾に規定されている構造用鋼材などの金属材料においては $2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ の定数と考えると良いから、式(24)より、降伏比 Y_r は強度係数Hと一様伸び ε_u の関数であることがわかる。したがって、降伏比と一様伸びの関係を求めるためには強度係数が必要となる。文献11)によれば、SM41とHT80の真応力-真ひずみ曲線は図6の実線に示すとおりであり、強度係数はそれぞれ 91 kgf/mm^2 と 96 kgf/mm^2 である。しかしながら、文献11)においてSM41の強度係数を求めるにあたっては、おどり場が考慮されており、ひずみ硬化開始点と最大荷重点の2点を用いて強度係数が求められている。式(24)を誘導する際には、おどり場を考慮していないので、SM41の強度係数を降伏点と最大荷重点の2点を用いて求めると 72 kgf/mm^2 となり、真応力-真ひずみ曲線は図6の点線のようなになる。したがって、SM41の強度係数として 70 kgf/mm^2 を、HT80の強度係数として 100 kgf/mm^2 を使用することにし、式(24)を図示すると図7のようなになる。図には降伏点の代わりに0.2%耐力を用いた佐藤らの結果も示してある⁹⁾。この図より、降伏比と一

一樣伸びの関係は強度係数にあまり依存しないことがわかる。

図8は、いろいろな構造用鋼材についてまとめられた降伏比と一樣伸びの関係であり、この結果を基に

$$\epsilon_u = 0.6 \times (1 - Y_R) \quad \text{---- (25)}$$

なる実験式が提示されている⁸⁾。式(25)は実験データの平均的な関係を表しているが、実験データの下限に近い実験式を求めると、

$$\epsilon_u = 0.4 \times (1 - Y_R) \quad \text{---- (26)}$$

となる。図7の直線は式(26)であり、式(24)で示される降伏比と一樣伸びの関係は、実験データの下限を表わしているといえる。

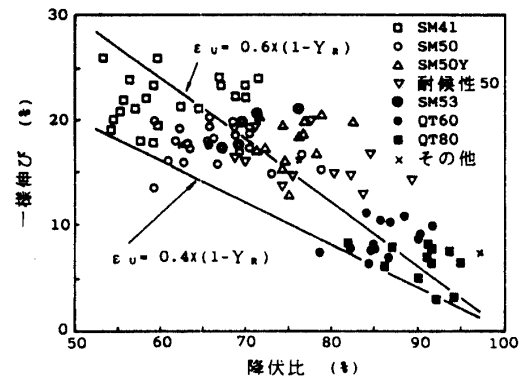


図8 種々の構造用鋼材における一樣伸びと降伏比の関係

4. 結 言

本研究の結果は以下のとおりである。

- (1) JIS³⁾ およびHBS²⁾ における伸びの規格値からSM41とHT80の一樣伸びの下限値を求めたところ、SM41では11%、HT80では4%であった。
- (2) 物理的意味の明確な降伏点と最大荷重点を用いて一樣伸びと降伏比の関係を定式化した。
- (3) この理論式は鋼材の一樣伸びと降伏比の関係の実状の下限を表していた。
- (4) この理論式を用いて降伏比と一樣伸びの关系到及ぼす強度係数の影響を調べたところ、降伏比と一樣伸びの関係は強度係数にあまり依存しないことが明かとなった。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説，1990.
- 2) 本州四国連絡橋公団；鋼上部構造用70キロ・80キロ鋼，HBS G 3102-1977.
- 3) 日本規格協会；溶接構造用圧延鋼材，JIS G 3106-1988.
- 4) 加藤ら；鋼構造の各種接合部、部材の耐力・変形能力，カラム，Vol. 79, pp. 11-66, 1980.
- 5) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・鋼材分科会；本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書 別冊4 鋼上部構造用鋼板の所要性能，1973.
- 6) 佐藤ら；溶接熱サイクル過程において塑性予歪をうけた鋼の室温における延性，溶接学会誌，Vol. 38, No. 3, pp. 87-98, 1969.
- 7) P. H. Chang; The relationship among yield ratio, yield point elongation and n-value of materials, Journal of materials science letters, No. 7, pp. 270-272, 1988.
- 8) 土木学会関西支部共同研究グループ中間報告書；鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究，1990年6月.
- 9) Egor P. Popov; Seismic Behavior of structural subassemblages, Journal of the

- structural division, ASCE, Vol.107, No.ST7, pp.1451-1474, 1980.
- 10)木原ら；延性強度について，高圧力，Vol.2, No.6, pp.17-24, 1964.
- 11)鈴木ら；応力集中を有する材の降伏後の挙動に及ぼす応力－ひずみ曲線の影響(第2報)，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，I-86, pp.171-172, 1982.
- 12)加藤 勉；建築用鋼材の降伏比について，鉄と鋼，Vol.74, No.6, pp.11-21, 1988.
- 13)土木学会関西支部共同研究グループ最終報告書；鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究，1991年6月.

(平成5年12月16日受理)