

構造用鋼材の一樣伸びに関する二、三の考察

On the uniform elongation of structural steels

鈴木博之*・堀川浩甫**

By Hiroyuki SUZUKI and Kohsuke HORIKAWA

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 correlation of the uniform elongation to the yield ratio is derived. A relation between the uniform elongation and material coefficient is studied on the basis of the equation. Material ductility factor to be obtained from the specifications is examined using the uniform elongation of SM41 and HT80, and the theoretical equation.

1. 緒 言

道路橋示方書においては、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⁾。

* 工博 大阪大学 助手 溶接工学研究所(〒567 茨木市美穂ヶ丘11-1)

** 工博 大阪大学 教授 溶接工学研究所(〒567 茨木市美穂ヶ丘11-1)

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。E.P.Popov は変形能を表わすパラメーターとしてダクティリティ・ファクタ μ を定義し、フレームあるいは部分構造の水平変位に関連した変位のダクティリティ・ファクタ μ_D 、部材の挙動を算定するための回転のダクティリティ・ファクタ μ_R および材料のダクティリティ・ファクタ μ_M の間の関係を与えている⁹⁾。これらのダクティリティ・ファクタを定量的に求めることは構造物の変形能を評価するうえで重要である。

本研究では、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の一樣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樣伸びと降伏比の関係式を導出する。また、この理論式に基づいて一樣伸びと材料係数の関係について考察する。最後に、SM41とHT80の一樣伸び、ならびに一樣伸びと降伏比の理論式を用いて規格から得られる材料のダクティリティ・ファクタ μ_M について検討する。

2. 規格における一樣伸び

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
 と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
 と与えられていない。したがって、一樣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の一樣伸びについて検討する。

引張試験後の試験片の伸び ϵ は、平行部の全体に一樣に生じる一樣伸び 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樣に伸びるが、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樣伸び、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⁵⁾。

$$\epsilon = \epsilon_U + \delta_N / l = \epsilon_U + \gamma \sqrt{A} / l \quad \text{---- (3)}$$

ここに、 ϵ は任意の標点間距離に対する伸び、
 ϵ_U は一樣伸び、 δ_N は局部伸び、 γ は局部伸びを表わすパラメータ、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樣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

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

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

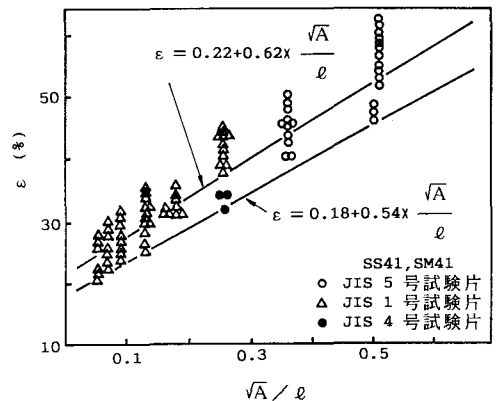


図1 軟鋼(SS41, SM41)の伸びと \sqrt{A}/l の関係

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				
25 以上	24 以上	22 以上	41~52	5以下	5号	23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

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

となる。したがって、軟鋼の一樣伸びは少なくとも18%と考えると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 $\epsilon_{u.41}$ を求めることとする。

式(3) か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 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、

$$\epsilon_{u.41} \geq 0.11 \quad \text{----- (6)}$$

を得る。したがって、JIS³⁾ ではSM41の一樣伸び $\epsilon_{u.41}$ 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

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

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

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

となる。したがって、HT80の一樣伸びの実状の下限は6%と考えると良いものと思われる。しかし、これは規格で考えられている一樣伸びではない。

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 $\epsilon_{u.80}$ 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

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

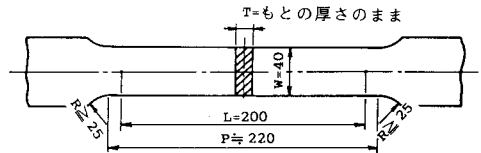


図2 JIS 1A号試験片

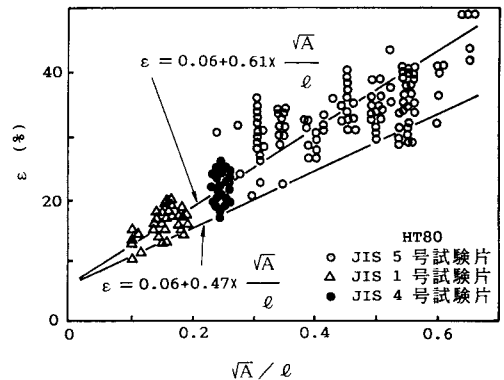


図3 HT80の伸びと \sqrt{A} / ℓ の関係

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 ≤

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 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。

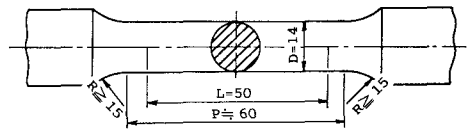


図4 JIS 4号試験片

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 は載荷前の標点間距離、 ℓ は任意の荷重における標点間距離

の関係があるので、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 の関係を図示すると、図5のような単調増加曲線となる。原点から

降伏点までの真応力と真ひずみの関係は

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

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、

$$\left(\frac{s_y}{s_u} \right) = \left(\frac{E}{H} \times \frac{1}{e_u^{n-1}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad \text{----- (20)}$$

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関係

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

から、式(20)は次のようになる。

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

したがって、式(23)を式(15)に代入すると、降伏比と一樣伸びの関係

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

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と一樣伸び ϵ_u の関数であることがわかる。したがって、降伏比と一樣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

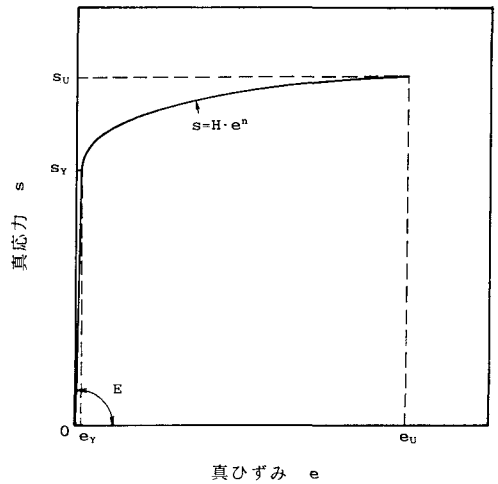


図5 真応力-真ひずみ曲線

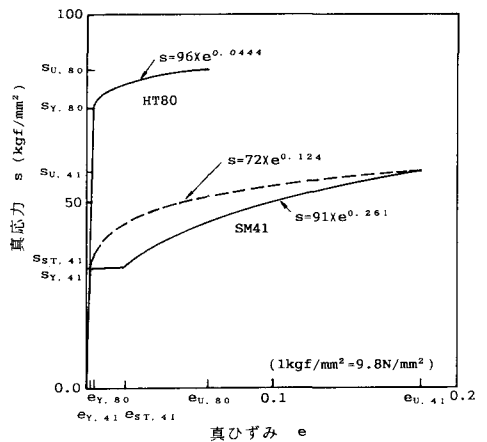


図6 SM41とHT80の真応力-真ひずみ曲線

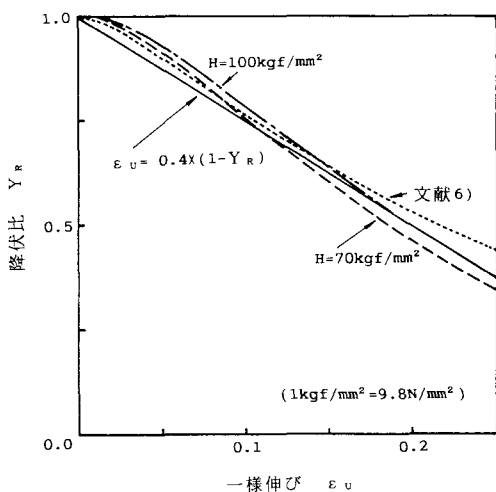


図7 一様伸びと降伏比の関係

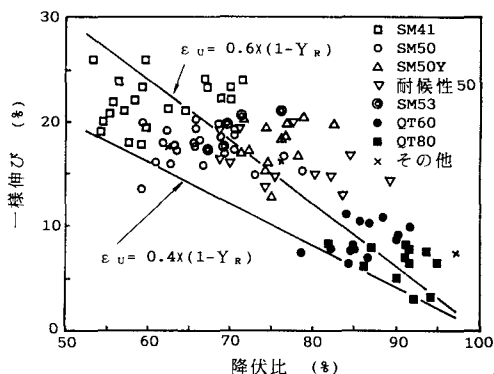


図8 種々の構造用鋼材における一様伸びと降伏比の関係

めると 72kgf/mm^2 となり、真応力-真ひずみ曲線は図6の点線のようにになる。したがって、SM41の強度係数として 70kgf/mm^2 を、HT80の強度係数として 100kgf/mm^2 を使用することにし、式(24)を図示すると図7のようになる。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⁵⁾。この図より、降伏比と一様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様伸びの関係であり、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⁵⁾。式(25)は実験データの平均的な関係を表わしているが、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様伸びの関係は、実験データの下限を表わしているといえる。

4. 一様伸びと材料係数の関係

構造物の設計に用いられている許容応力度 σ_a は、降伏点 σ_Y を構造物ごとに定められている安全率 α で除しているが、高張力鋼になると降伏後最大荷重までの余力が少なくなること、および伸びが少なくなることなどを考慮して、安全率に割増しが行われており、この割増し係数は材料係数 β と呼ばれている。すなわち、

$$\sigma_a = \frac{\sigma_Y}{\alpha \cdot \beta} \quad \text{----- (27)}$$

である。

本州四国連絡橋の鋼上部構造に用いられる鋼材について、経験的に定められている安全率 α 、材料係数 β と降伏比 Y_R の関係を整理したところ、

$$\alpha = 1.7 \quad \text{----- (28)}$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & Y_R \leq 0.77 \text{ の鋼種について} \\ 1.3 \times Y_R & Y_R > 0.77 \text{ の鋼種について} \end{cases} \quad \text{----- (29)}$$

の関係があり、降伏比が 0.77 より大きい材料については、

$$\sigma_a = \frac{\sigma_Y}{1.7 \times 1.3 \times Y_R} = \frac{\sigma_U}{2.2} \quad \text{----- (30)}$$

となり、引張強さに対して $\alpha' = 2.2$ の安全率をもつように材料係数が定められていたといわれている⁵⁾。すなわち、本州四国連絡橋上部構造設計基準²⁾においては降伏点を 1.7 で除したものと引張強さを 2.2 で除したものの小さい方をもって許容応力度としていることになる。したがって、許容応力度を規定するために用いられる引張強さには文献2)に規定されている引張強さの下限値が使用されている。また、降伏点は下限値が規定されているだけであって、上限値は規定されていない。それ故、上述の降伏比 Y_R は、

$$Y_R = \sigma_{Y, \min} / \sigma_{U, \min} \quad \text{----- (31)}$$

ここに、 $\sigma_{Y, \min}$ は降伏点の下限値、 $\sigma_{U, \min}$ は引張強さの下限値

であり、降伏比の上限値でも下限値でもなく、一様伸びの下限値あるいは上限値に対応していない。これについては、文献5)に「高張力鋼の規格上から計算される降伏比は、その強度レベルの鋼材の実状の平均的な値とするのがよいと考えられ、……」と述べられていることから明らかである。文献5)においては、降伏比が降伏後最大荷重までの余力という強度に関する性質と一様伸びという変形に関する性質を同時に表わすパラメータとして用いられたものと考えられるが、実際には、一定値以上の一様伸びを確保するために降伏比に制限を設けているものではなく、鋼材の強度レベルにおいて適当な降伏比、すなわち、適当な一様伸びをもち、鋼種間に矛盾がないように降伏比が選定されている。

さて、降伏比と一様伸びの関係が図7に示すように求められたので、これを用いて式(29)の $Y_R = 0.77$ に相当する一様伸びを求めると約10%となる。したがって、本州四国連絡橋の鋼上部構造に用いられている鋼材のうち、10%以上の一様伸びがある鋼種については材料係数が 1.0 であり、一様伸びが10%に満たない鋼種については材料係数が $1.3 \times Y_R$ であることになる。ただし、ここに言うところの一様伸びは規格から計算される降伏比に対応する一様伸びの下限である。

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & \varepsilon_U \geq 10 \% \text{ の鋼種について} \\ 1.3 \times Y_R & \varepsilon_U < 10 \% \text{ の鋼種について} \end{cases} \quad \text{----- (32)}$$

5. 一様伸びとダクティリティ・ファクタ

E.P.Popov は材料のダクティリティ・ファクタ μ_M 、

$$\mu_M = \varepsilon_m / \varepsilon_Y \quad \text{----- (33)}$$

ここに、 ε_m は最大応力時の絶対最大ひずみ、 ε_Y は降伏時のひずみ

部材の挙動を算定するための回転のダクティリティ・ファクタ μ_R

$$\mu_R = \theta_m / \theta_Y \quad \text{----- (34)}$$

ここに、 θ_m は部材の終局または最大回転容量、 θ_Y は降伏時の回転

およびフレームあるいは部分構造の水平変位に関連した変位のダクティリティ・ファクタ μ_D

$$\mu_D = \delta_m / \delta_Y \quad \text{----- (35)}$$

ここに、 δ_m は構造物の終局あるいは最大水平変位、 δ_Y は降伏時の同じ点における水平変位

の間には

$$\mu_M > \mu_R \geq \mu_D \quad \text{----- (36)}$$

の関係があるとしている⁹⁾。この関係は繰返し荷重を受ける場合だけに限られたものではなく、静的引張試験の結果から材料のダクティリティ・ファクタ μ_M を考えると、最大応力時の絶対最大ひずみ ε_m は一様伸び ε_U に相当するので、

$$\mu_M = \varepsilon_U / \varepsilon_Y \quad \text{----- (37)}$$

となる。

既に2章において規格で考えられている一様伸び ε_U が得られているので、ここで、SM41およびHT80の規格から得られるダクティリティ・ファクタ $\mu_{M, 41}$ および $\mu_{M, 80}$ を求めてみる。ダクティリティ・

ファクタ μ_M の規格値を得るためには降伏時のひずみの上限値 $\varepsilon_{y,max}(=\sigma_{y,max}/E)$ が必要となる。そこで、規格で考えられている一様伸びに対応する降伏比を図7から求めると、SM41およびHT80の降伏比の上限値 $Y_{R,max}$ として、それぞれ0.72と0.95を得る。式(2)より、これらの鋼材における降伏点の上限値 $\sigma_{y,max}$ は30kgf/mm²と76kgf/mm²となり、SM41およびHT80の規格から得られるダクティリティ・ファクタ μ_M が以下のように求められる。

$$\mu_{M,41} \geq 77 \quad \text{----- (38)}$$

$$\mu_{M,80} \geq 11 \quad \text{----- (39)}$$

したがって、規格で考えられているHT80の一様伸びはSM41のその36%であったが、ダクティリティ・ファクタという点ではHT80はSM41のその14%しかないことがわかる。また、式(36)から、回転および変位のダクティリティ・ファクタは式(39)以下であり、HT80の構造物への使用にあたってはダクティリティが要求されるような部材あるいは部分構造に降伏比の低い鋼材を使用するなどの配慮が必要であると考えられる。

6. 結 言

本研究の結果は以下のとおりである。

- (1) JIS⁸⁾ およびHBS²⁾ における伸びの規格値からSM41とHT80の一様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) 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した。この理論式は鋼材の一様伸びと降伏比の関係の実状の下限を表わしていた。
- (3) 一様伸びと材料係数の関係について考察したところ、本州四国連絡橋の鋼上部構造に用いられている鋼材のうち、材料係数が1.0であるのは一様伸びが10%以上である鋼種であり、材料係数が $1.3 \times Y_R$ であるのは一様伸びが10%に満たない鋼種であることがわかった。ただし、ここに言うところの一様伸びは鋼材の降伏比の実状の平均的な値に対応する一様伸びの下限である。
- (4) SM41およびHT80の規格から得られる材料のダクティリティ・ファクタ $\mu_{M,41}$ 、 $\mu_{M,80}$ の下限値を求めたところ、それぞれ77と11であった。したがって、ダクティリティ・ファクタという点ではHT80はSM41のその14%しかなく、HT80の構造物への使用にあたってはダクティリティが要求されるような部材あるいは部分構造に降伏比の低い鋼材を使用するなどの配慮が必要であると考えられる。

本研究は土木学会関西支部共同研究グループ「鋼構造物のダクティリティ評価に関する調査研究」の活動を契機として行ったものである。共同研究グループの代表である渡邊英一京都大学教授、評価ワーキンググループの代表である三上市藏関西大学教授をはじめとする委員の皆様から貴重な討論を頂いた。また、西村宣男大阪大学教授には本原稿の執筆を勧めて頂いた。記して謝意とします。

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。

(1991年9月30日受付)