

# 性能照査型設計法における 鋼部材の座屈耐荷力算定法

池田 学\* 江口 聡\*\* 加藤 博之\*\*\*

## Evaluation Method of Buckling Resistances of Steel Members based on the Performance Based Design Method

Manabu IKEDA Satoshi EGUCHI Hiroyuki KATO

In designs of steel structures, it is important to evaluate accurately the buckling resistances of steel members. In the performance based design method, the more general evaluation method that can be applied to various steel materials is needed. In this paper, we review the problems of the evaluation method provided by the previous design standard and newly propose the evaluation method of the buckling resistances of the steel members. We calculate provisionally the resistances of various steel members by using the proposed method. As a result, we confirm that the calculation results roughly correspond the results by using the previous method.

キーワード：鋼部材，座屈耐荷力，性能照査型設計法，全体座屈，局部座屈，降伏点一定鋼

### 1. はじめに

鋼部材は、鉄筋コンクリート部材などの他部材と比較して、断面が薄板構造でかつ細長いという形状上の特徴がある。そのため、鋼部材に軸圧縮力や曲げモーメント等が加わると、鋼材が降伏する以前に、部材全体の座屈や、鋼板の局部的な座屈等の限界状態に至ることがある。

「鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物)」(以下、現行の設計標準という)<sup>1)</sup>では、これらの座屈の影響を考慮した耐力の算定法を定めており、想定される作用に対する断面力とその耐力以下であることを照査している。鋼構造物の設計においては、この鋼部材の座屈耐荷力に対する照査によって断面が決定されることが多い。そのため、座屈耐荷力に対する照査は設計上重要な照査項目であり、算定法の変更による照査結果に与える影響も大きい。

現行の設計標準は限界状態設計法を取り入れた鋼鉄道構造物の最初の設計標準である。しかしながら、座屈耐荷力の算定法は、鋼材の材料強度の特性値に座屈の影響を考慮する手法を採用しており、それまでの許容応力度設計法の延長上の算定法が用いられている。この算定法は、限定された鋼材を対象にしており、種々の鋼材への柔軟な適用が困難な面があった。

最近の技術基準は、性能照査型設計法への移行が必要不可欠となっている。性能照査型設計法の最大の利点

は、種々の材料、部材および構造などの新技術の導入が図りやすいという点である。性能照査型設計法への移行にあたっては、種々の鋼材や部材にも適用できる汎用性の高い算定法が必要とされる。

そこで、設計標準が性能照査型設計体系に改訂されるにあたり、材料種別に依存しない部材の耐力算定式を提案することを目的に検討を行った。本論文では、座屈耐荷力の算定法の設計上の課題、提案する算定法の特徴とその根拠、さらに試算結果に基づく提案する算定法の実設計への適用性などについて述べる。

### 2. 鋼部材の座屈耐荷力の算定法の課題

現行の設計標準における、材料強度の設定から鋼部材の設計断面耐力までの算定法の流れを図1(a)に示す。図1(b)には、説明は後述するが、提案する手法についても合わせて示している。

図1(a)は、鋼種毎に板厚によらない材料の強度(基本強度)を定め、これに座屈の影響を考慮して材料強度の特性値を算定し、その後、部材の耐力を算定する流れとなっている。材料強度の特性値は鋼種毎に定められており、これに座屈の影響が考慮されていたため、限定された鋼種に対する算定法となっている。この方法は、設計実務面を考えると便利な方法である反面、以下のような問題点がある。

- ①鋼材の材料強度は、本来、座屈の影響で変わるものでなく、材料固有のものである。
- ②適用の自由度が低く、新しい材料や部材の適用、新

\* 構造物技術研究部(鋼・複合構造)

\*\* (株)復建エンジニアリング(元 鉄道総研)

\*\*\* 北武コンサルタント株式会社

特集：鋼・合成構造物の設計技術

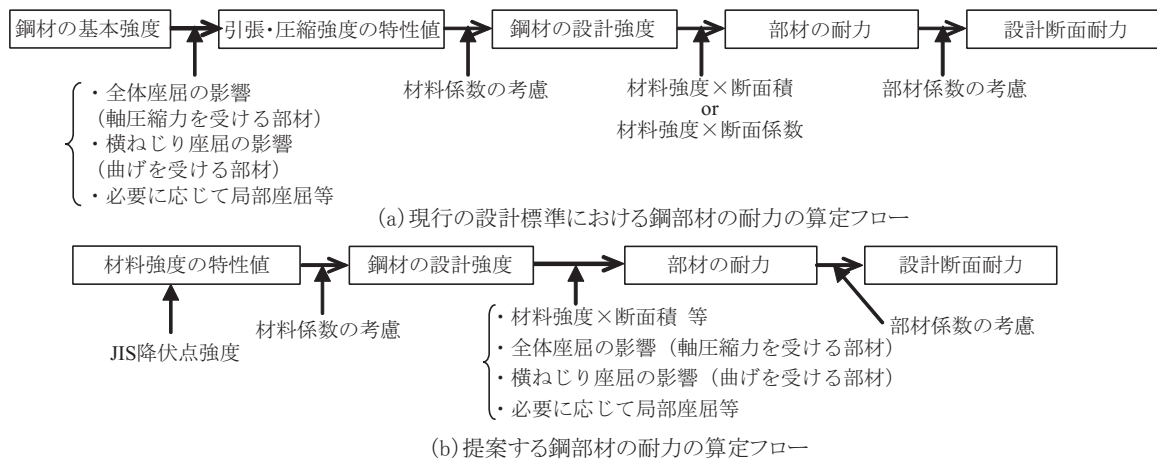


図1 鋼部材の耐荷力の算定の流れ

たな座屈耐荷力曲線の導入などに対応できない。

- ③材料係数の中に座屈耐荷力の算定式のばらつきも含まれてしまうため、数値の根拠がわかりにくい。
- ④将来的には材料の非線形性を考慮した耐力算定が必要となることが想定されるが、これに対応できない。

### 3. 鋼部材の座屈耐荷力の算定式の提案

#### 3.1 鋼部材の座屈耐荷力の算定の基本的な考え方

座屈現象は幾何学的な非線形性による影響であり、本来は、応答値を算定する構造解析で考慮するのが理想である。しかしながら、通常の構造物の設計において、幾何学的な非線形性を考慮した解析を行うのは煩雑であり、部材の限界値側である耐力算定時に考慮する手法が一般に用いられている。そのため、本論文でも部材の耐力算定時に座屈の影響を考慮する。また、設計実務での適用を考えて、可能な限り簡単な算定方法を基本とする。

部材の形状に依存する全体座屈などの非線形性の影響を、材料強度の特性値に含めることは適切ではない。そこで、図1 (b) に示すように、鋼材の設計強度から部材の耐力を算定する際に考慮する方法を提案する。図1 (a) の方法との違いは、主として以下の点である。

- ①材料強度の特性値にJISの降伏点強度の下限値を用いる。
- ②座屈の影響を、材料強度の設定時ではなく、部材の耐力算定時に考慮する。
- ③材料係数は、座屈耐荷力の算定のばらつきは含めずに、材料強度に関する安全係数とする。

#### 3.2 鋼部材の座屈耐荷力算定式の基本

図1 (b) の方法に対応した算定法として、例えば軸方向力を受ける鋼部材の場合、次式のような耐力算定式を提案する。

$$N_{ud} = \rho_{bg} \cdot \rho_{bl} \cdot A_n \cdot f_{syd} / \gamma_b \quad (1)$$

ここに、

- $N_{ud}$ ：鋼部材の設計軸方向耐力
- $\rho_{bg}$ ：全体座屈の影響を考慮した低減係数
- $\rho_{bl}$ ：板要素の局部座屈の影響を考慮した低減係数
- $A_n$ ：照査する断面の有効断面積
- $f_{syd}$ ：鋼材の設計降伏強度で、降伏強度の特性値を材料係数で除して算定する。なお、降伏強度の特性値はJISの降伏点強度の下限値を用いる。
- $\gamma_b$ ：部材係数

座屈の影響を考慮した耐力低減係数である $\rho_{bg}$ と $\rho_{bl}$ の算定方法については後述する。ちなみに、引張軸力を受ける場合には、座屈の影響を考慮する必要がないため、これらの係数を1.0とすれば式(1)により算定することができる。

式(1)の一番の特徴は、通常使用している構造用鋼材については、鋼材種によらず1つの式で表現できる点にある。すなわち、新たな鋼材や部材に対しても、座屈の影響を考慮した耐力低減係数である $\rho_{bg}$ と $\rho_{bl}$ を定めることにより適用することができる。そのため、単純な式ではあるが、設計式としての適用の自由度は高いと考えられる。

なお、式(1)は、座屈の影響を考慮した耐力低減係数である $\rho_{bg}$ と $\rho_{bl}$ を積の形で考慮した、いわゆる“積公式”<sup>2)</sup>を用いて耐力を算定することを基本としている。この全体座屈と局部座屈の連成を耐力算定時にどのように考慮するかは種々の方法があるが、積公式は従来から設計に一般に適用されている手法であり、かつ安全側の評価であるため、これを用いるのがよいと考えられる。

#### 3.3 鋼材の材料強度の特性値

表1にJISの降伏点強度の下限値を示す。一般に鋼材は、板厚が大きくなると強度が低下する傾向を示す。そのため、JISでは表1のように板厚に応じて段階的に定めている。現行の設計標準では16～40mmのJISの降伏点強度の下限値をその鋼材種の基本強度として用いている。この理由は、鋼板の板厚の上限を50mmに制限して

表1 JISの降伏点強度の下限値

鋼材種	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 75	t > 75
SM400, SMA400	245	235	215	215
SM490	325	315	295	295
SM490Y, SMA490, SM520	365	355	335	325
SM570, SMA570	460	450	430	420

注) t: 板厚 (mm), 降伏点強度の単位は (N/mm<sup>2</sup>)

現行の設計標準の基本強度は 16 < t ≤ 40 の強度を適用

おり、この範囲では実降伏強度はほとんど変わらないためである。

今後は、板厚 50mm を超える厚板が適用されるケースも想定されるため、降伏強度の特性値も板厚に応じて定めるのがよいと考えられる。また、鋼鉄道橋には JIS に適合する鋼材を用いるのがほとんどであるため、設計における材料強度の特性値を JIS に合わせると、製作上も管理しやすい。これらのことから、鋼材の降伏強度の特性値として、JIS の降伏点強度の下限値を適用するのが望ましいと考えられる。

なお、JIS に定められていない鋼材を適用する場合には、材料試験結果に基づいて材料強度の特性値を定めることが必要で、これにより式(1)に示す耐力算定式を適用することができる。

### 3.4 材料係数および部材係数の設定

設計標準では、材料係数は表2のように定めている。ここで、400 N/mm<sup>2</sup>級～520 N/mm<sup>2</sup>級の鋼材において圧縮側の方が引張側より数値が大きいのは、座屈の影響を考慮しているためである。また、570 N/mm<sup>2</sup>級の鋼材の材料係数を他鋼材種より高く設定しているのは、降伏比(降伏強度/引張強度)が大きく、破断に対する余裕度が他鋼材種より小さいことを考慮したものである。

提案する耐力の算定法では、材料係数は表2の右欄のように定めることができる。すなわち、材料強度に座屈の影響は含まれないため、圧縮側と引張側を同じ材料係数を用いることが可能である。

570 N/mm<sup>2</sup>級の鋼材については、材料係数は、降伏強度のばらつきはそれ以外の鋼材と変わらないため、同じ 1.05 として問題ないと考えられる。ただし、降伏から破断までの余裕度が小さいことについては、別途、部材係

表2 構造用鋼材の材料係数  $\gamma_m$

鋼材種	現行の設計標準		提案	
	力の種類	$\gamma_m$	力の種類	$\gamma_m$
SM400, SMA400, SM490, SM490Y, SMA490, SM520	引張, せん断, 支圧	1.05	引張 圧縮 せん断 支圧	1.05
	圧縮	1.1		
SM570, SMA570	引張, せん断, 支圧	1.15		
	圧縮	1.1		

数等で考慮するのがよいと考えられる。

また、部材係数については、式(1)の耐力算定式を用いる場合には、座屈の影響を含む耐力の算定式のばらつきを部材係数として考慮する必要がある。

### 4. 耐力算定時の部材の全体座屈の影響

鋼部材の全体座屈の形態としては、軸圧縮力を受ける長柱が全体的に座屈する形態と、軸圧縮力や曲げモーメントを受ける開断面の鋼部材が横方向に回転するように変形する横ねじれ座屈の形態がある。ここでは、前者の座屈形態を主として考える。

軸圧縮力を受ける長柱の耐力は、部材の細長比に応じて、図2のような傾向を示す。これは全体座屈の基準耐荷力曲線である。式(1)における部材の全体座屈の影響を表す耐力低減係数  $\rho_{bg}$  は、この耐荷力曲線の式として与えることができる。このとき、次式で表すことができる。

$$\rho_{bg} = \begin{cases} 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.1) \\ 1.0 - 0.53(\bar{\lambda} - 0.1) & (0.1 < \bar{\lambda} \leq \sqrt{2}) \\ \frac{1.7}{2.8\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > \sqrt{2}) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、

$\bar{\lambda}$ : 式(3)により算定される細長比パラメータ

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{syk}}{E}} \cdot \frac{\ell}{r} \quad (3)$$

$f_{syk}$ : 鋼材の降伏強度の特性値

$E$ : 鋼材のヤング係数,  $\ell$ : 有効座屈長

$r$ : 断面二次半径

式(2)の詳細については説明を省略するが、座屈による耐力の低下がない短柱域、Eulerの座屈で支配される弾性座屈域、そしてその中間の領域の3つで連続するように定めたものである。

これまで材料強度の特性値は式(2)をもとに定めているが、近似式を用いて定めている。ここで提案する方法はその近似も不要となるため、基準耐荷力曲線を忠実に算定できる手法であるといえる。

曲げモーメントを受ける場合には、横ねじれ座屈が支

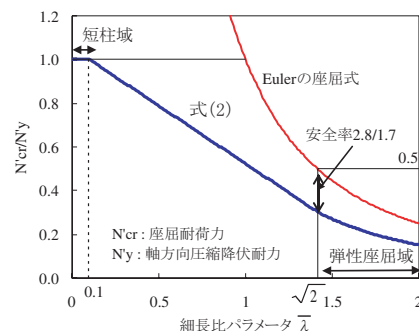


図2 鋼部材の全体座屈の耐力曲線

特集：鋼・合成構造物の設計技術

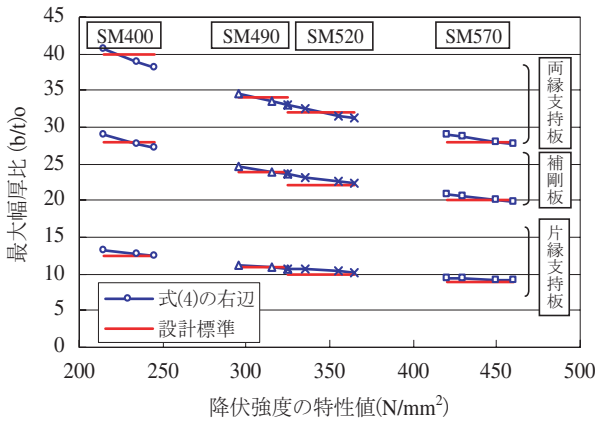


図3 鋼板の最大幅厚比

配的となる。この場合も、ここでは説明は省略するが、式(2)の  $\rho_{bg}$  に横ねじり座屈による耐荷力曲線を用いることにより、式(1)と同様に曲げ耐力を算定することができる。

5. 耐力の算定時の局部座屈の影響

鋼板の局部的な座屈の形態としては、軸圧縮力や面内曲げモーメントを受ける場合に板が局部的に曲がる座屈や、面内曲げモーメントやせん断力を受ける場合のせん断座屈などの形態がある。ここでは、軸圧縮力を受ける鋼板の局部座屈を主として考える。

鋼構造物の設計においては、鋼材が降伏する以前に鋼板の局部座屈が生じないように幅厚比を制限するのが望ましい。今までの設計標準では、この限界となる幅厚比を最大幅厚比とし、鋼種毎に最大幅厚比を定めている。この方法では種々の鋼材への適用が困難となる。そこで、より汎用性ある手法とするため、最大幅厚比の基本となる次式を用いて、最大幅厚比以下であることを確認する手法を提案する。

$$\left(\frac{b}{t}\right) \leq R_{cr} \sqrt{\frac{\pi^2 k_0}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{E}{f_{syk}}} \quad (4)$$

ここに、

$b$ ：板要素の板幅、 $t$ ：板要素の板厚

$R_{cr}$ ：限界座屈パラメータで、片縁支持板および両縁支持板の場合0.7、補剛板の場合0.5が一般に用いられる。

$k_0$ ：座屈係数で、一般に、片縁支持板の場合0.425、両縁支持板の場合4.0、および補剛板の場合  $4.0n^2$  ( $n$ ：補剛材による分割数) が用いられる。

$E$ ：鋼材のヤング係数、 $\nu$ ：鋼材のポアソン比

$f_{syk}$ ：鋼材の降伏強度の特性値

式(4)の右辺が最大幅厚比である。また、式(4)は、片縁支持板、両縁支持板および補剛板についても、 $k_0$ の値を変えることにより、同一の式で表すことができる。

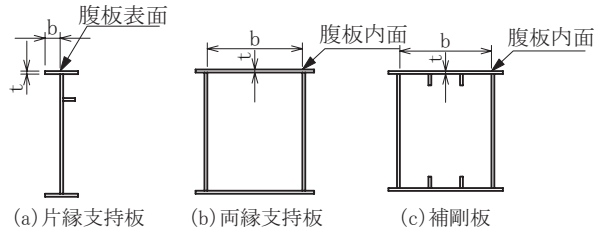


図4 鋼板要素の板幅と板厚の取り方

図3に、式(4)の右辺の最大幅厚比と、現行の設計標準の最大幅厚比を比較して示す。また、図3に示す各板要素の板幅と板厚の取り方を図4に示す。

現行の設計標準は、同一鋼種では、1つの基本強度を用いているため、最大幅厚比は一定値となる。一方、式(4)を適用した場合には、前述のように、鋼材の降伏強度の特性値にJISの降伏点強度の下限値を用いているため、同一鋼種でも板厚16mmと40mmを超えると強度が変わり、最大幅厚比が変わる。式(4)による最大幅厚比は、同一鋼種の中では、強度が低いと最大幅厚比を大きめに、逆に強度が高いと最大幅厚比を小さめにとる(幅厚比が厳しく制限される)傾向がある。この傾向は、式(4)に示すとおり、最大幅厚比の算定式の分母に降伏強度の特性値を用いているためである。また、両者を比較すると、板厚16~40mmの範囲ではほぼ同一であり、それ以外でも最大幅厚比の差はわずかである。そのため、提案する手法を用いても、従来とほぼ同程度の幅厚比の断面となることが確認できる。

鋼構造物の設計においては、すべての鋼板を上記の最大幅厚比以下に制限するのは非合理的であり、鋼板に生じる応力度が小さい場合には最大幅厚比を緩和できるようにするのがよいと考えられる。現行の設計標準では、生じる応力度に応じて最大幅厚比を緩和し、この最大幅厚比以下とする方法が用いられている。さらに、最大幅厚比の緩和に応じて、材料強度の特性値も低減している。しかしながら、鋼板の幅厚比に応じて耐力を低減すれば、本来は緩和した最大幅厚比以下であることを確認する必要はない。そこで、鋼板の幅厚比が式(4)の右辺で算定される最大幅厚比を超える場合には、式(1)のように部材の耐力算定時に局部座屈の影響を考慮して、部材の耐力を低減する方法を提案する。

このとき、板要素の局部座屈の影響を考慮した低減係数  $\rho_{bl}$  は、柱の全体座屈と同様に、板要素の局部座屈に対する基準耐荷力曲線の式を用いることができる。すなわち、 $\rho_{bl}$  は次式で算定することができる。

①片縁支持板、両縁支持板の場合

$$\rho_{bl} = \begin{cases} 1.0 & (R_t \leq 0.7) \\ 0.49/R_t^2 & (0.7 < R_t) \end{cases} \quad (5)$$

②補剛板の場合

$$\rho_{bl} = \begin{cases} 1.0 & (R_r \leq 0.5) \\ 1.5 - R_r & (0.5 < R_r \leq 1.0) \\ 0.5/R_r^2 & (1.0 < R_r) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、

$R_r$ :式(7)により算定される板要素の幅厚比パラメータで、式中の記号は式(4)と同じである。

$$R_r = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_0} \cdot \frac{f_{syk}}{E}} \quad (7)$$

式(5)の第2式の右辺の0.49は、これまで0.5が用いられてきたが、幅厚比パラメータ  $R_r = 0.7$  で  $\rho_{bl}$  が連続するように設定したものである。

鋼板の幅厚比が式(4)の右辺で算定される最大幅厚比以下であれば、降伏に至る前に局部座屈は生じないため、上式(5)および(6)における上限値である  $\rho_{bl} = 1.0$  を用いて、式(1)により部材の耐力を算定することができる。

## 6. 提案法による耐力の算定に関する検討<sup>3)</sup>

### 6.1 提案法の適用による鋼部材の耐力の傾向

式(1)を適用した場合の耐力の傾向を把握するため、また現行の設計標準との違いを確認するため、試算を実施した。ここでは、特に、材料強度の特性値、座屈の影響の考慮の方法による違いに着目するため、安全係数は全て1.0とした。また、一般の鉄道構造物では、幅厚比は最大幅厚比以下に抑えるため、局部座屈の影響による耐力低減係数  $\rho_{bl}$  は1.0として計算を行った。

図5に示すような箱断面およびI断面の部材を基準と

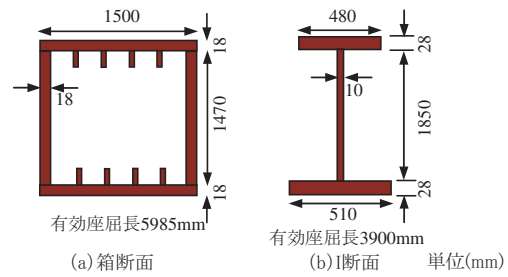


図5 試設計に用いた鋼部材の基準断面

し、フランジ厚や有効座屈長をパラメータとして、これらを変化させた場合に耐力がどのような傾向を示すかについて算定を行った。箱断面の部材については軸方向耐力、I断面の部材については曲げ耐力を算定した。

試算結果の一例として、フランジ厚のみ変化させた場合および有効座屈長のみ変化させた場合の箱断面の軸方向耐力を図6(a)に、I断面の曲げ耐力を図6(b)に示す。フランジ厚を変化させた場合に20mm以下で耐力が急激に落ちているのは、非短柱域 ( $\rho_{bg} < 1.0$ ) となるためである。また、提案する手法は、板厚16mmと40mmの材料強度の特性値が変化する点で耐力が急変している。特に板厚40mm前後では、板厚が増しても耐力が低下するという逆転した傾向を示している。現行の設計標準と比較すると、板厚16mm以下では2~8%程度大きく、また板厚40mmを超えると4~8%程度小さく算定される。これは、鋼材の降伏強度の特性値に用いている基本強度とJISの降伏点強度の下限値との差異による影響が大きい。

また、全体座屈の影響に関しては、図6の有効座屈長を変化させた結果より、軸方向耐力、曲げ耐力ともに、現行の設計標準とほぼ同等となることが確認できる。

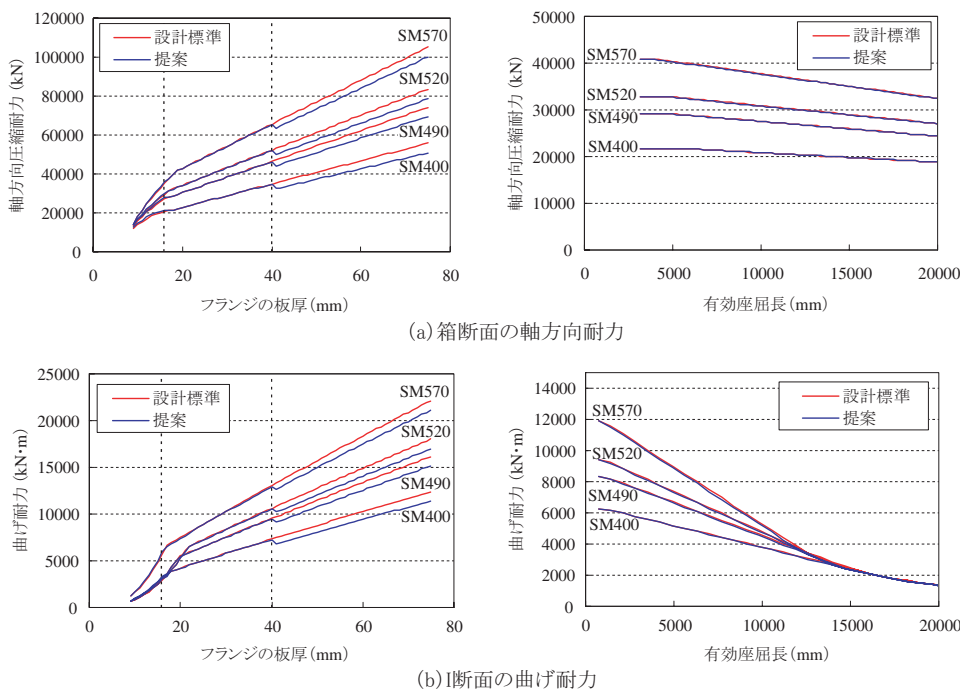


図6 耐力の試算結果の一例

特集：鋼・合成構造物の設計技術

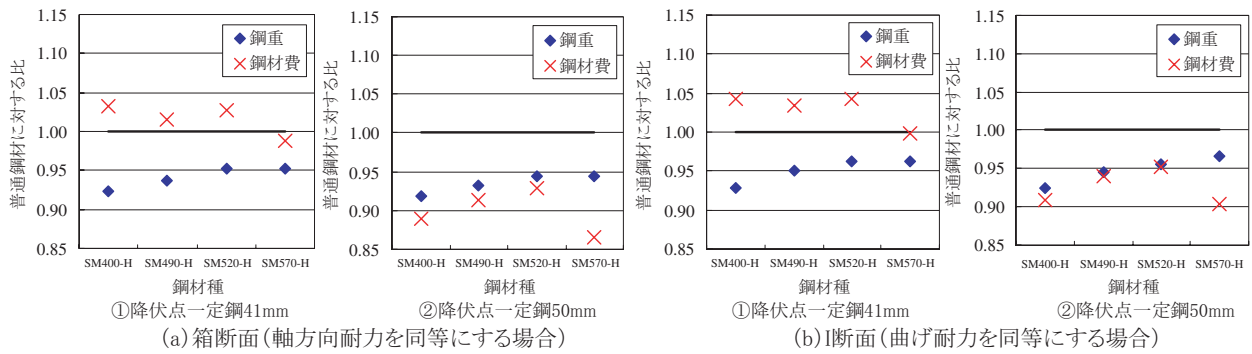


図7 降伏点一定鋼を適用した場合の鋼重および鋼材費の比較

6.2 降伏点一定鋼の適用に関する検討

降伏点一定鋼は、板厚によらず降伏点強度が変わらないことを保証した鋼材で、道路橋での適用実績は多い<sup>4)</sup>。降伏点一定鋼を用いることにより、前述の板厚と耐力の逆転現象は解消される。ここでは、部材の耐力確保の観点から、降伏点一定鋼の適用性について検討する。

図5の断面において、フランジの板厚41mmまたは50mmの降伏点一定鋼を用いた断面と同じ耐力が得られる普通鋼材の断面をそれぞれ求め、鋼重および鋼材費の比較を行った。図7に、鋼種毎に、普通鋼材との比を示す。ここで、鋼材費は建設物価に基づき算定した。

図7より、板厚41mmの降伏点一定鋼を用いた場合、鋼重は4～7%程度低減できる。これは、降伏点一定鋼と同等の耐力とするためには普通鋼材の板厚は44～47mm程度とする必要があるためである。ただし、鋼材費は、570 N/mm<sup>2</sup>級の鋼材を除いて若干高くなる。板厚50mmの降伏点一定鋼を用いた場合は、普通鋼材は板厚53～57mmを用いる必要があり、その結果、鋼重は4～8%、鋼材費は5～14%低減できる。鋼材種による傾向に着目すると、鋼重は低強度のものの方が大きく低減でき、鋼材費は570 N/mm<sup>2</sup>級の鋼材が一番低減する結果となっている。

以上より、部材の耐力確保の観点から、板厚40mmを超える鋼板を用いる場合には、降伏点一定鋼を適用することにより鋼重が低減でき、さらに板厚50mmを超える場合には鋼材費も低減できる利点があることがわかった。

7. まとめ

鋼部材の座屈耐荷力の算定法について、設計上の問題点を見直し、性能照査型設計法への移行に対応した新たな算定式を提案した。提案する方法を設計に適用した場合の鋼板の幅厚比や耐力の傾向を試計算により検討した。さらに、部材の耐力確保の観点から降伏点一定鋼の適用性について検討を行った。本研究で得られた結論を以下に記す。

- (1) 提案する鋼部材の耐力算定法は、簡便な式でかつ1つの式で表現でき、さらに新しい材料や部材への適

用の自由度が高い。

- (2) 鋼材の降伏強度の特性値にJISの降伏点強度の下限値を用いると、JISの下限值が変わる板厚16mmと40mmで部材の耐力が段階的に変化する。特に板厚40mmを境に板厚と耐力の関係が逆転する傾向もみられる。また、板要素の最大幅厚比も、これらの板厚区分に応じて変わる。
- (3) 提案する座屈耐荷力の算定法は、現行の設計標準と比較すると、降伏強度の特性値の違いにより多少差があるものの、座屈による耐力への影響はほぼ同じである。
- (4) 降伏点一定鋼を用いることにより、同等の耐力となる普通鋼材と比較して、厚板では鋼重および鋼材費ともに低減できる。そのため、降伏点一定鋼の適用は、提案する耐力算定法においてメリットを有している。

なお、本検討では耐力の算定式の枠組の変更に伴う検討に主眼をおいたが、今後、性能照査型設計法により相応しい照査法とするためには、個々の座屈耐荷力の算定式の精度向上や、その算定精度に基づいた安全係数の設定などについて検討する必要がある。

謝辞

本検討は、国土交通省からの委託を受けて実施した「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として行ったものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

文献

- 1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，2000
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書〔総則編〕〔構造計画編〕〔設計編〕，土木学会，2007.3
- 3) 江口聡，永井絃作，山口慎，池田学：鋼鉄道構造物における座屈耐荷力評価法に関する一考察，土木学会第61回年次学術講演会，2006.9
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 2002.3