

# 曲げを受ける鋼 I 形断面の 降伏限界幅厚比に関する研究

永藤 壽宮\*・小林 清\*\*

## Experimental Investigation On Yield Limiting Width-Thickness Ratios of Steel I-Sections In Bending

Toshimiya NAGATO, Kiyoshi KOBAYASHI

The limiting width-thickness ratios for yield strength, full plastic strength and plastic analysis are also influenced by the coupling of flange and web.

In this paper the limiting width-thickness ratios for yield strength of steel I-section in bending are investigated by the experiment of well planned models.

Test results are discussed by the comparisons of the numerical simulations and current design codes.

### 1. ま え が き

各種の鋼骨組構造物を対象とした統一的限界状態設計基準においては、塑性設計を可能とする厚肉断面部材から部材強度に対して、局部座屈強度が支配的となる薄肉断面部材までを含んだ部材強度の包括的評価法と断面強度の選択基準を定義する必要がある。

本研究では曲げを受ける鋼 I 形断面を対象として、断面強度と降伏限界幅厚比に関するフランジとウェブの相互作用の効果を明らかにすることを目的とする。

### 2. 実 験 概 要

#### (1) 供試体

プレートガーダーの曲げ耐荷力実験ではフランジの幅厚比パラメータがウェブのそれに比べて小さな断面に対象が限定されている。そこで本研究の目的であるフランジ幅厚比とウェブ幅厚比の任意の組み合わせについて、フランジとウェブの相互作用や応力再分配等の特性を調査し合理的な断面強度評価式を作成するために、代表的な設計基準による限界幅厚比パラメータをもとにフランジとウェブの幅厚比を組み合わせた3体の供試体を設計した。表-1に供試体の断面寸法、表-2に各供試体のフランジとウェブの幅厚比を掲げる。表-2のフランジとウェブの幅厚比は式-1によって算出した値である。また、供試体の一般形状を供試体Bを例にとり図-1に示す。供試体は実際の溶接サイズを守るように製作し、製作

\* 土木工学科 助教授

\*\* 文部技官

原稿受付 平成5年9月30日

表-1 供試体の断面寸法  
支承, 荷重点パネル寸法

供試体番号	A	B	C
h	58.3	58.3	42.4
tw	0.86	0.76	0.76
b	19.7	12.7	19.7
tf	0.56	0.36	0.56
wb	15.7	8.7	15.7
wtf	1.15	0.96	1.15

テストパネル寸法 (cm)

供試体番号	A	B	C
h	58.3	58.3	42.4
tw	0.36	0.36	0.36
b	19.7	15.4	19.7
tf	0.56	0.56	0.56
a	45.0	45.0	45.0

表-2 フランジとウェブの幅厚比

	フランジ幅厚比	ウェブ幅厚比
A	1.055	1.320
B	0.820	1.320
C	1.055	0.959

設計図 (供試体 B)

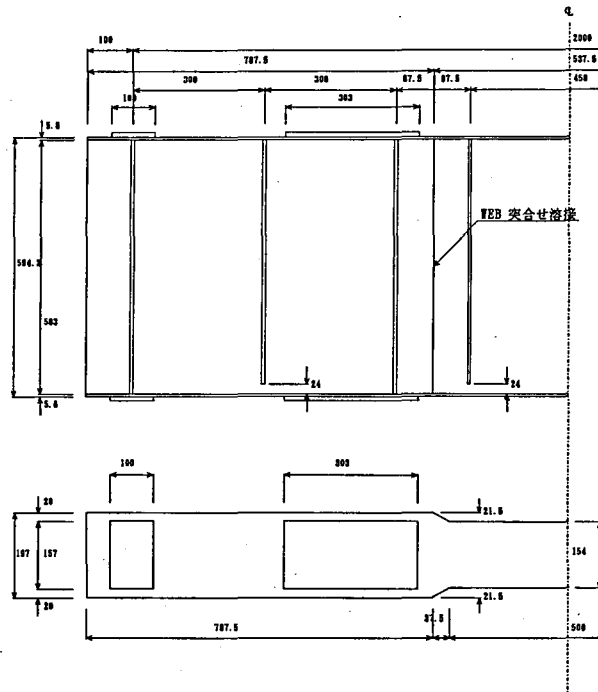


図-1 供試体B一般図

$$\text{フランジ幅厚比パラメータ: } \bar{\lambda}_{pf} = \frac{b'}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_Y}{k_f \cdot \pi^2 E}}$$

$$\text{ウェブ幅厚比パラメータ: } \bar{\lambda}_{pw} = \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_Y}{k_w \cdot \pi^2 E}}$$

h: ウェブ高, b: フランジ幅, b': フランジ突出幅, t<sub>w</sub>: ウェブ板厚, t<sub>f</sub>: フランジ板厚

k<sub>f</sub>: フランジ座屈係数 (=0.425), k<sub>w</sub>: ウェブ座屈係数 (=23.9), σ<sub>Y</sub>: 降伏応力度

a: 垂直補剛材間隔, A<sub>w</sub>: ウェブ断面積, A<sub>f</sub>: フランジ断面積, S: フランジ幅・ウェブ高比

k: 形状係数, M<sub>Y</sub>: 降伏モーメント, M<sub>p</sub>: 全塑性モーメント, W: 断面係数, Z: 塑性断面係数

式-1

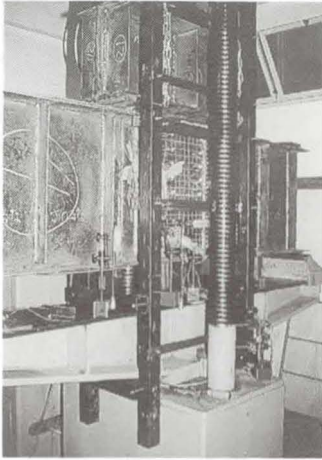
精度に関しても道路橋示方書の施工条件を満たすように設計した。テストパネルの両側の垂直補鋼材は道路橋示方書の必要鋼比を満たすように設計した。

## (2) 載荷方法

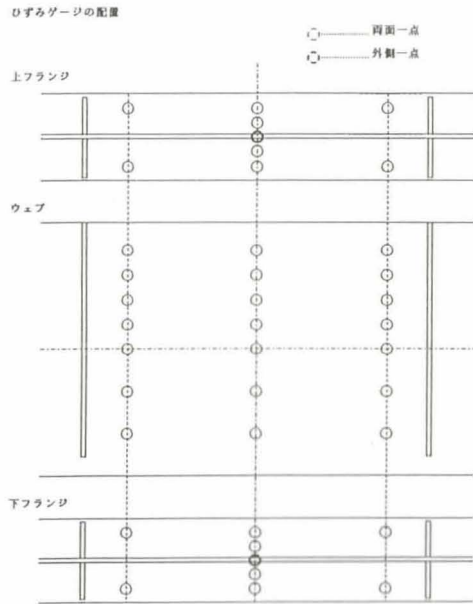
供試体のスパン長はすべて2 mとし両点単純支持で支え、スパン長の3/10点及び7/10点に2点集中荷重を載荷し、テストパネルを含む中央部分45cmの区間を等曲げ状態とした。テストパネルの両側の隣接パネルの支点側垂直補鋼材の位置2箇所、横倒れ防止枠により面外変位を拘束した。載荷用装置は耐圧試験機200 tを用いた。(写-1)

## (3) 測定項目

変位: 桁の鉛直変位はテストパネルの載荷点, 中央点, 1/4点, 3/4点の位置に変位計を何



写－1



図－2 ひずみゲージの配置図

れも下フランジ下面に取り付けて計測した。補助的に両側の支承の鉛直変位及びテストパネル中央の上フランジの面外変位も計測した。

ひずみ：テストパネルについて図－2 に示す配置でひずみゲージを貼り付けて、自動ひずみ測定機により計測した。

#### (4) 初期たわみ

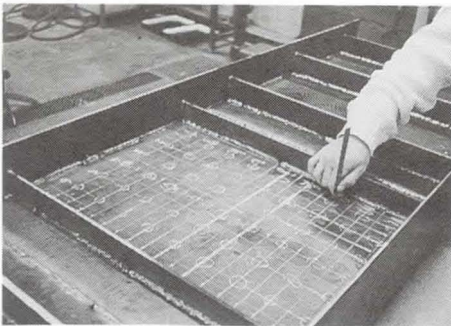
テストパネルのフランジ及びウェブについてメッシュ割りを行い初期たわみを測定した。(写－2) 各供試体のフランジとウェブについて計測した初期たわみの最大値を表－3 に示す。また、供試体 B の初期たわみの解析結果を図－3、図－4 を示す。

#### (5) 残留応力度

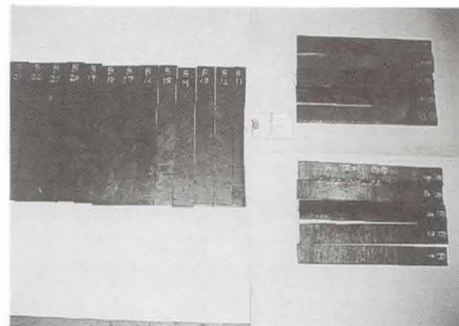
供試体のテストパネルの断面寸法を用いて切断法で行い、溶接後に鉄球を打ち込み距離をコンタクトゲージ

表－3 初期たわみの最大値 (mm)

	フランジ	ウェブ
A	1.2	1.2
B	0.8	1.7
C	1.6	0.6



写－2



写－3

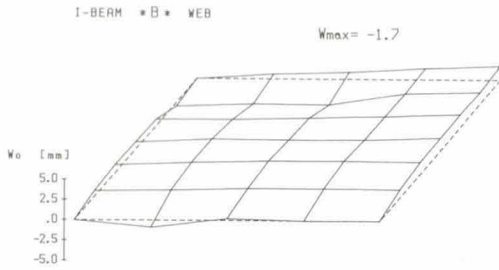
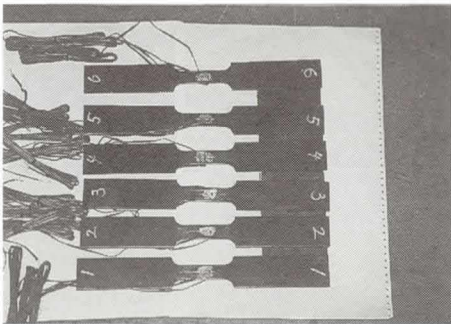


図-3 供試体Bの初期たわみ（ウェブ）

表-4 材料試験結果

E	$\nu$	$\sigma_{yu}$
2.09 E 06	0.29	3120.0
$\sigma_{yl}$	$\sigma_t$	$\delta$
2980.0	4543.0	36.6



写-4

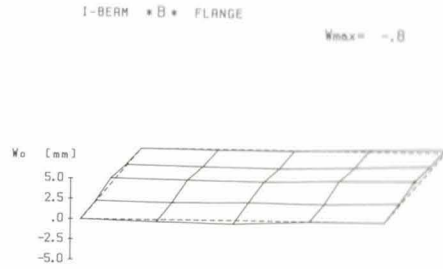


図-4 供試体Bの初期たわみ（フランジ）

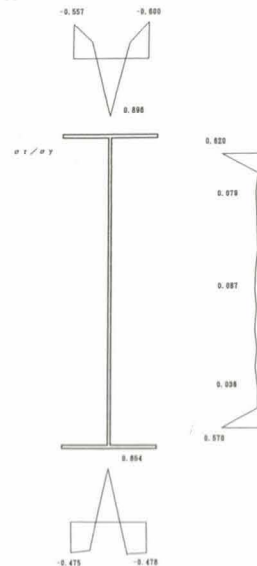


図-5 残留応力度の解析結果

(1/1000mm)で測定し算出した。(写-3) 残留応力度の解析結果を図-5に示す。解析結果よりフランジとウェブの溶接部では引っ張りを受けフランジ突出部では圧縮を受けており、上フランジ突出部及び下フランジ溶接部では早い荷重段階で降伏に達すると考えられる。

#### (6) 材料試験

供試体のテストパネルに使用した公称板厚 4 mm (SS41) について材料試験 (JIS 5 号試験片) を行った。(写-4) 材料試験結果の平均値を表-4に示す。

### 3. 実験結果

#### (1) 荷重-桁たわみ

各供試体の荷重と桁の鉛直変位の関係を図-6, 図-7, 図-8に示す。ここで荷重は、作用モーメント  $M$  を降伏モーメント  $M_y$  で除した無次元量で表し、鉛直変位は桁中央断面の鉛直変位から両側荷量載荷点の鉛直変位の平均値を差し引いた等曲げを受ける区間の変位量  $Y$  を、同区間の降伏モーメントに対応する鉛直変位  $Y_y$  で除した無次元量で表している。供試体Aでは  $M/M_y$  が 0.8 付近で極限荷重に達し、同様に供試体B, C では 0.85 付近で、極限

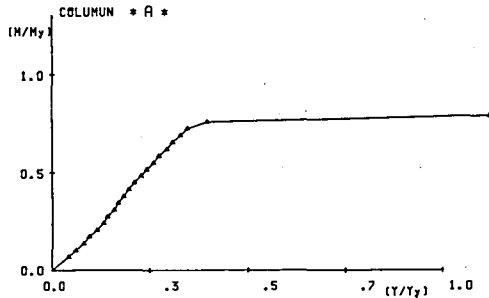


図-6 供試体Aの桁-たわみの関係

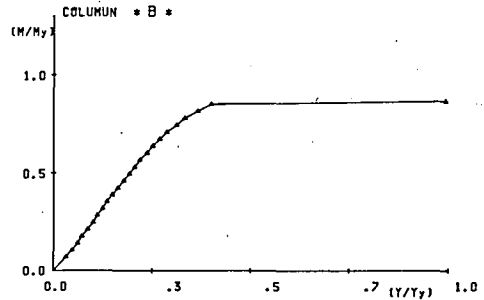


図-7 供試体Bの桁-たわみの関係

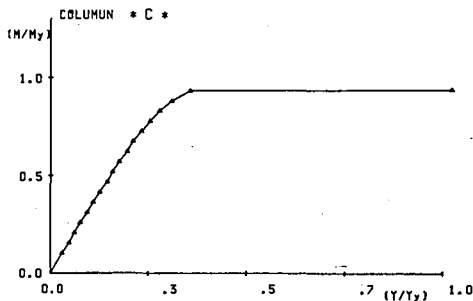


図-8 供試体Cの桁-たわみの関係

表-5 残留たわみの最大値

	フランジ	ウェブ
A	35.5	24.1
B	31.3	19.6
C	18.1	11.0

荷重に達している。

## (2) 残留たわみ

測定方法は初期たわみの時と同様に行い測定した。極限状態時での断面の変形状態における各供試体の残留たわみの最大値を表-5に、供試体Bの解析結果を図-9、図-10に示す。解析結果の図より、下記(3)で述べるようにフランジの変形による影響を受けウェブのひずみが制限されている事が観察できる。

## (3) 断面内の軸方向直ひずみ分布

各供試体のテストパネル中央断面の軸方向直ひずみの分布を極限強度に至るまでの各荷重段階について図-11～図-16に示す。供試体Aと供試体Bはウェブ幅厚比が等しく、供試体Aと供試体Cはフランジ幅厚比が等しい組み合わせとなっている。供試体Aの最終荷重段階

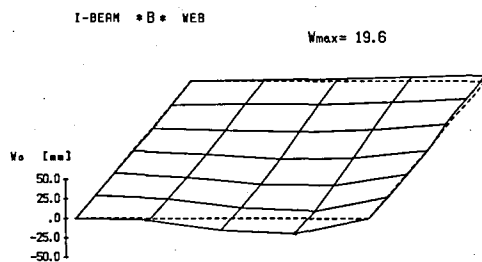


図-9 供試体Bの残留たわみ

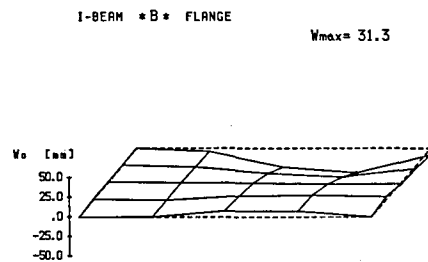


図-10 供試体Bの残留たわみ

時の軸方向直ひずみは、極限強度を越えて変形量が増大している時のものである。

ここで供試体Aと供試体Cの軸方向直ひずみ分布図を比較すると、ウェブ幅厚比の低い供試体Cではウェブの軸方向直ひずみ分布が上下対称になっているのに対して、ウェブ幅厚比が高い供試体Aではウェブの圧縮側でひずみが拘束されている事が観察できる。これは、圧縮フランジの局部曲げによる局部座屈の変形によってウェブのひずみが制限されたと考えられ、ウェブ幅厚比が高いほどフランジの変形による影響を多く受けウェブのひずみが制限されるといえる。

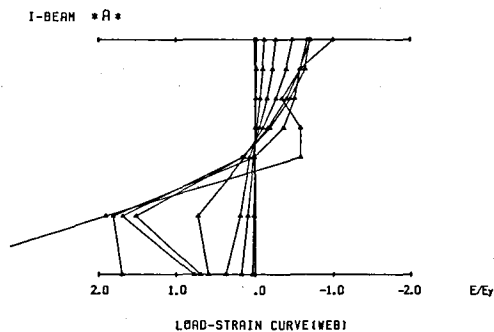


図-11 供試体A (ウェブ)

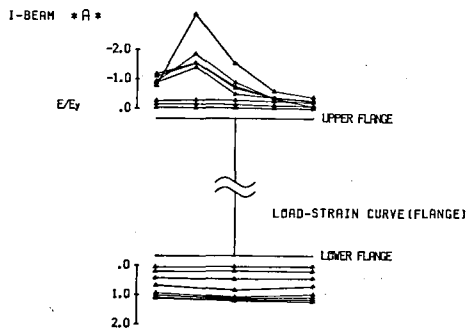


図-12 供試体A (フランジ)

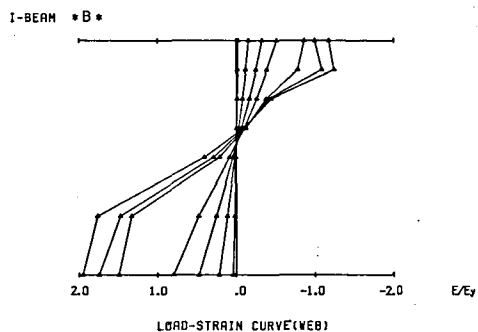


図-13 供試体B (ウェブ)

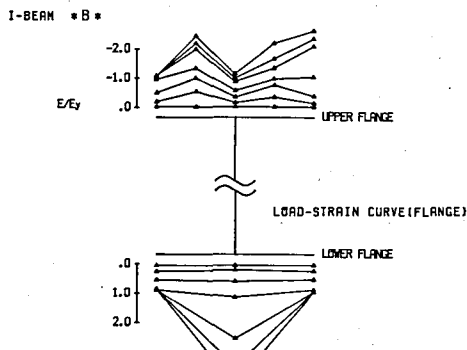


図-14 供試体B (フランジ)

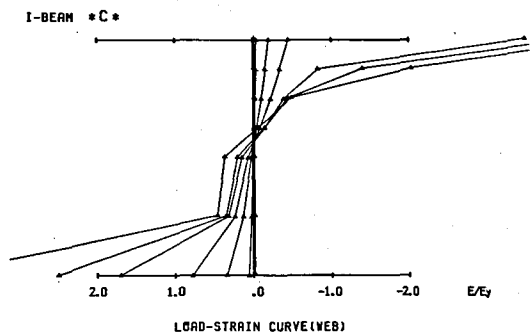


図-15 供試体C (ウェブ)

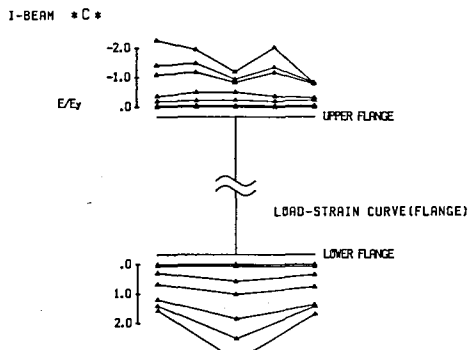


図-16 供試体C (フランジ)

また同様に供試体 A と供試体 B の軸方向直ひずみ分布図を比較すると、上フランジとウェブの接合部においてフランジ幅厚比の低い供試体 B の方が直ひずみ大きい事が観察でき、フランジ幅厚比が高いほど、上フランジとウェブの接合部において変形能が大きくなると考えられる。

#### 4. 降伏限界幅厚比に関する考察及び結論

実験結果により、曲げを受ける I 形断面の降伏限界幅厚比は、ウェブとフランジの相互作用の影響を顕著に受けることが明らかになった。そこで実験値と、現行の代表的鋼構造設計基準における降伏限界幅厚比規定とを比較すると、次のような考察をすることが出来る。

(図-17、表-6 参照)

ここで本研究での供試体を○でプロットしてみると、西村、大崎、長谷川らの研究の供試体●と合致する事が分かる。図での実線は、本研究の実験結果と西村、大崎、長谷川らの実験結果より求められた降伏限界曲線であり代表的鋼構造設計基準は、CSA がカナダ、SIA がスイス、AIS がアメリカ、BS がイギリス、JSHB が日本道路橋示方書、DIN がドイツ、AIJ が日本建築学会のスペックである。

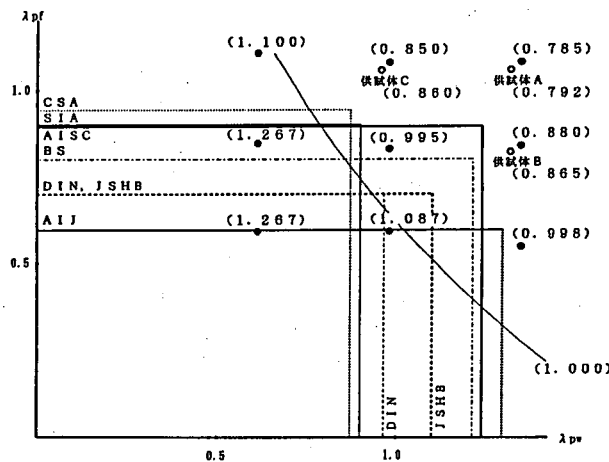


図-17 代表的設計基準の降伏限界との比較

表-6 実験結果

供試体番号	降伏モーメント My	塑性モーメント MP	最終モーメント Mu	Mu/My	Mu/MP
A	25.13	23.93	19.90	0.792	0.832
B	20.56	24.24	17.78	0.865	0.865
C	17.52	18.94	15.07	0.860	0.796

実験により検証された降伏限界（実線）にはほぼ対応する限界幅厚比が規定されている基準は、DINのみである。CSA及びSIAは、ウェブの限界幅厚比を厳しく制限する代わりにフランジの幅厚比を大きくとっているが、AIJは逆に、フランジの限界幅厚比を厳しく制限し、ウェブの幅厚比を大きくとっている。道路橋示方書は、ウェブとフランジの両方とも中間的な幅厚比を採用している。これに対してBS及びAISCの限界幅厚比は、ウェブとフランジの両方に対して大きな幅厚比の採用を認めており、実験で示した降伏限界の外側になる板要素で構成された断面を使用する可能性がある事が予想される。<sup>1)</sup>

以上のことからBS及びAISCを除いては、ウェブとフランジの相互拘束効果を考慮した降伏限界を導入することによって、基準によって個々に規定されている降伏限界に統一性を与えることが出来ることが解った。

## 参 考 文 献

- 1) 西村宣男, 大崎史淳, 長谷川徹雄: 曲げ受ける鋼I形断面の局部座屈強度と限界幅厚比に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 135-144, 1991.
- 2) 小松定夫, 北田俊行: 初期不整を含む自由突出圧縮鋼板の極限強度特性について, 土木学会論文報告集, No. 314, pp. 15-27, 1981.
- 3) 福本嘯士, 伊藤義則: フランジの局部座屈強度とフランジの幅厚比制限, 土木学会論文報告集, No. 160, pp. 27-38, 1968.
- 4) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 1980.
- 5) DIN18800: Stahlbauten, Stablilitätsfalle, Knicken von Stäben und Stabwerken, Teil 2, 1988.
- 6) CSA: Specification for design of highway bridges, 1978.
- 7) SSEA: SIAI61, Steel Structures, 1979.
- 8) 日本建築学会: 鋼構造塑性設計指針, 1975.
- 9) BSI: BS5400, Part3, Code of practice for design of steel bridges, 1982.
- 10) AISC: Specification for the design, fabrication, and erection of structural steel for buildings, 8th Ed., 1978.
- 11) 土木学会: 座屈設計ガイドライン(福本嘯士編) 第3章 構造物の材料強度と初期不整, 技報堂, pp. 67-68, 1987.
- 12) 小松定夫, 北田俊行, 宮崎清司: 残留応力と初期たわみ有する圧縮板の弾塑性解析, 土木学会論文報告集, No. 244, pp. 1-14, 1975.
- 13) 西村宣男, 吉田信博: 鋼H形断面柱部材の連成座屈強度特性と設計公式, 土木学会論文集, No. 398, pp. 311-318, 1988.
- 14) 前田幸雄, 大倉一郎: プレートガーダーウェブの初期たわみと疲労亀裂発生との相に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 319, pp. 1-11, 1982.