

# 座屈実験データベースによる鋼はりの横ねじれ 基準強度に関する実証的研究

## LATERAL-TORSIONAL BUCKLING STRENGTH OF STEEL BEAMS FROM TEST DATA

福本 秀士\*・伊藤 義人\*\*

By Yuhshi FUKUMOTO and Yoshito ITOH

### 1. 緒 言

現在、各国の構造設計示方書は限界状態を基準とし、確率論的手法を取り入れた設計思想のもとに改訂されつつある<sup>38),42)</sup>。その場合、構造部材の基準強度決定のためには解析解とともに精度のよい実験データを用いて強度を評価する必要がある。解析解を求める際も材料定数、初期不整などの入力データは実測データを考慮した値を使う必要がある<sup>32)~35)</sup>。

これまでに著者らは、鋼構造部材の実験データの数値データベース (NDSS)<sup>36)</sup>を作成し、鋼柱については  $N=1665$  体の実験データについて文献<sup>37)</sup>で報告済みである。一方、著者らは、はりの横ねじれ座屈強度とその変動性に着目した一連の実験<sup>23),24),29)</sup>を行いデータの蓄積に努めるとともに、実験データのデータベースの作成を行ってきた。

一般に、鋼はりの横ねじれ座屈強度はねじれを伴う座屈変形を対象とするため、鋼柱のように柱の細長比によって座屈強度のための形状パラメーターが一意的に決定できず、単純化と精度との兼ね合いから各国の示方書は、異なる形状パラメーターを規定しているのが現状である。その中で、代表的なものとしては、ECCS の鋼はりの基準強度評価式<sup>39)</sup>が挙げられる。

$$M_u/M_p = \{1 + (\sqrt{M_p/M_E})^{2n}\}^{-1/n} \dots\dots(1)$$

ここで、 $M_u$ =座屈モーメント、 $M_p$ =全塑性モーメント、 $M_E$ =弾性座屈モーメントである。 $n$  は、システム係数とよばれ圧延 I 形はりに対して強度の平均値を  $n=2.5$ 、下限値を  $n=2.0$  が与えるとしている。

一方、福本・久保<sup>39),40)</sup>は、275 体 (圧延はり 159 体、溶接はり、プレートガーダー 116 体) の内外の実験データを収集評価し、圧延はりについては強度の平均値を  $n$

$=2.5$ 、下限値を  $n=1.5$  とし、溶接はりとプレートガーダーは同じく  $n=2.0$  と  $n=1.0$  を提案している。

本論文は、これ以後行われた実験データ 269 体<sup>23)~28)</sup> (圧延はり 189 体、溶接はり 68 体、プレートガーダー 12 体、うち著者らのもの 143 体) を加えて、データベース化したデータをもとに、より詳細な統計計算を行い、強度評価式などについて実証的に検討するものである。なお、溶接はりとプレートガーダーは、通常、中間鉛直補剛材の有無によって分類できる。本論文では  $h_{wt}/w\sqrt{\sigma_y/235} \geq 70$  の範囲で、中間鉛直補剛材または鉛直補剛材と水平補剛材のあるものをプレートガーダーとして分類してある。

### 2. 実験データとデータベース

#### (1) 実験データの収集

これまでに座屈実験数値データベース (NDSS) にフェイル化した横ねじれ座屈強度に関する鋼はりの実験体数を、圧延はり、溶接はり、プレートガーダーに分類し、実験実施国別に示したのが Table 1 である。ただし、ここには不静定はりの実験データ 66 体<sup>29)~31)</sup> (うち著者らのもの 21 体) は含まれていない。また、ここで収集したデータの中にはフランジなどの局部座屈が横ねじれ座屈に先行した実験結果は含まれていない。

全実験体数は、544 体であり、これらのデータを収録

Table 1 Number of Beam Data in NDSS.

	Rolled Beams	Welded Beams	Plate Girders	Total
Japan	240	152	28	420
U.K.	35	0	14	49
U.S.A.	31	2	0	33
West Germany	27	0	0	27
Australia	15	0	0	15
Total	348	154	42	544

\* 正会員 Ph.D. 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部土木工学科

している文献を参考文献1)~28)に示す。

**Table 2** (a), (b), (c) には、それぞれ圧延はり、溶接はり、プレートガーダーの実験データの分類とその数を示している。ここでは、実験の載荷・境界条件、データ収録文献番号、断面形状、横方向固定点間距離、データ数をそれぞれについて示してある。載荷・境界条件の

図の中において、×印は横方向変位拘束点を示し、(8)の太線は剛な箱形断面の載荷用はりを示している。なお、今回の実験データは、横方向変位拘束点で水平方向変位とねじれが十分に拘束されているとみなせる実験結果であり、プレーシングなどによって横方向拘束されたはりには入っていない。( ) 中の数は焼鈍したはりの

**Table 2** (a) Summary of Rolled Beam Data in NDSS.

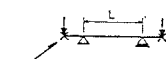
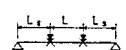
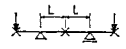
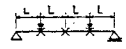
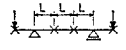
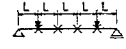
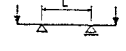
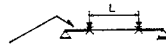
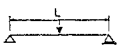
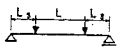
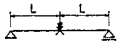
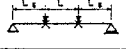
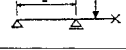
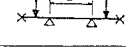
Boundary and Loading Conditions	Ref. Nos.	Shape (mm)	L (cm)	Number of Beams
(1)  laterally supported point	21	200×100×5.5×8	70~150	18
	22	200×100×5.5×8	100, 150, 200, 300	4
	2	203×133×5.5×7.8	186~603	9
		222×209×13×21	215, 377	4
		309×102×6×9	105, 377	10
158×153×6.6×9.3		216~603	6	
254×102×5.8×6.8	360	1		
(2) 	16	200×100×5.5×8 194×150×6×8	90~130 140	4 1
	26	256×146×6.4×10.9	250, 300, 350	3
(3) 	21	200×100×5.5×8	80	6
(4) 	16	200×100×5.5×8	90, 130	3
(5) 	21	200×100×5.5×8	70, 80, 90	13
(6) 	16	200×100×5.5×8	70, 90, 140	3
(7) 	18	200×100×5.5×8	150~800	21(7)**
(8)  loading beam	3	203×58×3.4×5.8	608, 914	5
	7	200×100×5.5×8	350, 600	2
(9) 	11	261×151×7.7×12.3	244~610	6(2)**
	17	200×100×5.5×8	220~550	12
	23	200×100×5.5×8	150, 200, 260	75
	25	200×100×5.5×8	150, 175, 225, 350	34
		150×75×5×7	175	10
28	152×120×6×9(160×9)* 152×160×6×9(120×9)*	120, 130, 150, 190 130, 190	8 6	
(10) 	9	254×118×7.9×12.7	152~ 915	14
		305×165×6.4×9.5	305~ 915	7
		457×191×9.5×14.3	305~1524	10
25	200×100×5.5×8 150×75×5×7	225, 300 225	26 8	
(11) 	26	256×146×6.4×10.9	400, 450, 550	3
(12) 	26	256×146×6.4×10.9	350, 400, 450	3
(13) 	29	152×120×6×9(160×9)*	300, 320, 350	4
		200×100×5.6×8.5	350	1
(14) 	29	152×120×6×9(160×9)*	130, 150, 190	6
		200×100×5.6×8.5	130	2
Total				348

Table 2 (b) Summary of Welded Beam Data in NDSS.

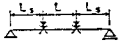
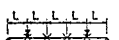
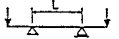
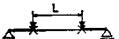
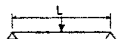
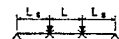
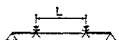
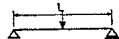
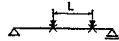
Boundary and Loading Conditions	Ref. Nos.	Shape (mm)	L (cm)	Number of Beams
(2) 	4	454×220×6×12	200	4
		454×190×6×12	200	2
	20	250×125×12×12	110~160	12
	10	324×110×6×12	200	5
(6) 	19	500×125×9×12	60~100	8
		375×125×9×12	90	2
		250×125×9×12	100	2
		175×125×9×12	120	1
(7) 	18	250×125×9×12	150~450	9
		200×100×6×9	200~400	3
(8) 	5	250×100×6×8	300, 400, 450	12(6)**
		300×100×6×8	300, 400, 450	6(3)**
		250×100×7×10	250, 300, 350	6(3)**
		250×120×7×10	250, 300, 350	3
		300×100×7×10	250, 300, 350	3
	6	300×100×6×8(150×8)*	300, 400	2
		300×150×6×8(100×8)*	300, 400	2
		489×120×10×19(150×19)*	400	1
		489×150×10×19(120×19)*	400	1
(9) 	24	250×100×6×8	180, 260	68
Total				154

Table 2 (c) Summary of Plate Girder Data in NDSS.

Boundary and Loading Conditions	Ref. Nos.	Shape (mm)	L (cm)	Number of Beams
(2) 	14	816×84×3.2×8	168	1
		818×100×3.2×9	168	1
	1	980×200×3.2×10	192	1
		820×160×3.2×10	160	1
15		818×195×6×14	150	5
		830×180×6×25	150	4
		1 150×182×6×16	150	2
(8) 	5	1 000×130×6×10	410	1
		1 000×120×6×8	410	1
		800×110×6×10	280, 330	3
		800×130×6×10	280, 330	2
		1 000×120×3.2×10(160×10)*	280, 330	6
(9) 	12	432×89×4.8×25.4	437	2
(15) 	29	515×120×6×10(180×12.5)*	162.5, 310.4, 449.5	12(6)**
Total				42

\* : for tension flange      \*\* : numerals in ( ) for annealed beams contained

Table 3 Sectional Properties of Test Beams.

	Rolled Beams			Welded Beams			Plate Girders		
	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
$h/b\sqrt{\sigma_y}/235$	1.02	2.20	4.49	1.49	3.08	5.60	4.64	7.33	13.3
$L/b\sqrt{\sigma_y}/235$	7.40	27.5	198.4	0.51	26.6	62.8	8.80	26.8	54.7
$h_w/t_w\sqrt{\sigma_y}/235$	19.3	37.7	71.9	17.9	46.3	119.5	77.1	192.5	370.5
$b/t_f\sqrt{\sigma_y}/235$	9.36	14.6	25.9	6.57	14.5	34.3	3.40	14.4	22.8

$h$ =beam height,  $b$ =compressive flange width,  $L$ =laterally unsupported length,  $t_f$ =compressive flange thickness,  $h_w$ =web height,  $t_w$ =web thickness,  $\sigma_y$ =yield stress (N/mm<sup>2</sup>)

内数である。

**Table 3** に、圧延はり、溶接はり、プレートガーダーに分類し、それぞれの実験はりを実測断面寸法によるはり高さ $h$ と圧縮フランジ幅の比 $(h/b)$ 、固定点間距離と圧縮フランジ幅の比 $(L/b)$ 、腹板高さ $h_w$ と板厚 $t_w$ の比 $(h_w/t_w)$ 、および圧縮フランジ幅と圧縮フランジ板厚の比 $(b/t_f)$ の統計値を示す。ただし、それぞれの比に $\sqrt{\sigma_y/235}$  ( $\sigma_y$ =降伏点応力, N/mm<sup>2</sup>) の値を乗じて供試体の鋼種の影響を考慮した。現行鋼道橋設計示方書<sup>41)</sup>に規定される制限値は $(L/b)\sqrt{\sigma_y/235} \leq 30$ ,  $(h_w/t_w)\sqrt{\sigma_y/235} \leq 152$  (鉛直補剛材のみ),  $\leq 256$  (一段水平補剛材あり),  $(b/t_f)\sqrt{\sigma_y/235} \leq 26$  となっている。

実験はりに使用されている鋼材は、圧倒的に普通鋼が多く、 $\sigma_y=430$  N/mm<sup>2</sup>(=4 385 kgf/cm<sup>2</sup>, ECCS の高強度鋼最低規定値) をこえるはりは、全体の約 12% にすぎない。

(2) データの種類

鋼はりの強度を整理するにあたって直接必要となる a)  $M_u$ =最大曲げモーメント, b)  $M_p$ =全塑性モーメント, c)  $M_y$ =降伏モーメント, d)  $M_E$ =弾性座屈モーメントのほか、以下のパラメーターが利用できるようにデータベースは作られている。

- 1) 断面形—断面対称軸の数—軸対称断面, 二軸対称断面, 鉛直, 水平補剛材の有無  
断面呼称…250 UB 37.3, IPE 200 など 58 種
- 2) 断面の大きさ—実測断面寸法…はり高さ, フランジ幅, フランジ板厚, ウェブ板厚, フィレット長, 補剛材寸法  
断面の大きさ—公称断面寸法
- 3) 製作方法—組立方法…圧延はり, 溶接はり, プレートガーダー  
—後処理…残留応力除去の有無
- 4) 降伏点応力…公称降伏点応力, 実測降伏点応力
- 5) 荷重・境界条件…荷重条件, 境界条件 (鉛直, 水平ねじれ変位), 固定点間距離, 座屈有効長さ, 荷重作用位置 (断面内)
- 6) 初期不整値—残留応力測定値  
—初期変形量測定値
- 7) 出典—参考文献番号ならびに参考文献  
—実験実施国
- 8) 実験体識別子—供試体名 例 A-1, TS01, …  
—データ通番

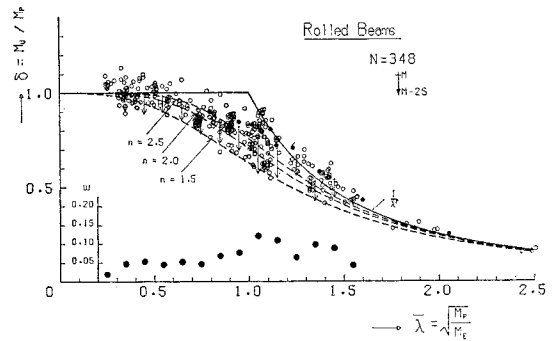
弾性座屈モーメント  $M_E$  は、原則として文献 39), 40) において用いられている方法によっている。すなわち、横方向拘束のない単純支持はりの解析解を基本にして、座屈有効長さの概念を用いており、厳密解に比べてきわ

めて精度の高い近似解を与えている。ただし、座屈強度に及ぼす面内たわみの影響は考慮していない。

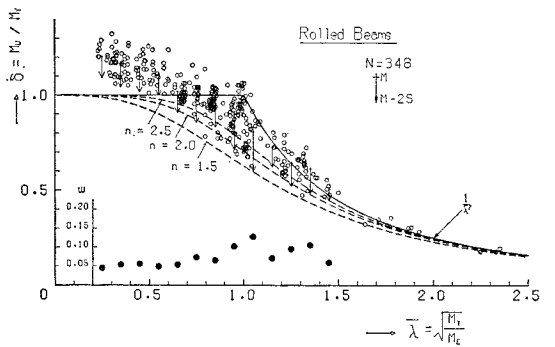
3. 鋼はりの製作加工方法などによる強度特性の違い

(1) 圧延はり

**Fig. 1** (a) に圧延はりの実験データ  $N=348$  の実験値を示す。縦軸には、実験値の最大曲げモーメント  $M_u$  を全塑性モーメント  $M_p$  で無次元化したものを、横軸の形状パラメーターとしては、無次元細長比  $\bar{\lambda} = \sqrt{M_p/M_E}$  を用いている。 $M_E$  の値は、それぞれのはりの荷重・境界条件を考慮した弾性座屈モーメントであり、弾性域ではこの条件の違いの影響が無視できるような横軸となっている。なお、全塑性モーメント  $M_p$  の計算においては、実測の降伏点応力とできるかぎり実測の断面寸法を用いている。破線の 3 曲線は、式 (1) の  $n=1.5, 2.0, 2.5$  の曲線である。+と↓は、無次元細長比  $\bar{\lambda}$  の 0.1 間隔に入るデータの平均値  $\bar{M}$  と平均値から 2 倍の標準偏差を差し引いた ( $M-2S$ ) 値を示す。また、図の下部に ● で示した値は、同じ区間別の変動係数  $\omega$  である。無



(a) non-dimensionalized using  $M_p$



(b) non-dimensionalized using  $M_y$

**Fig. 1** Test Results of Rolled Beams and the ECCS Beam Curves.

**Table 4** Ratios of the Test Results to Eq. (1) or (2).

System Factor <i>n</i>	Rolled Beams <i>N</i> =348 Exp <sub>a</sub> /Eq. (1) or (2)		Welded Beams <i>N</i> =154 Exp <sub>a</sub> /Eq. (1) or (2)		Plate Girders <i>N</i> =42 Exp <sub>a</sub> /Eq. (1) or (2)	
	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>S</i>
$M_u/M_p$ Eq. (1)	<i>n</i> =2.0 1.071	0.114	1.050	0.134	0.891	0.124
	<i>n</i> =2.5 1.022	0.103	0.998	0.122	0.859	0.123
$M_u/M_y$ Eq. (2)	<i>n</i> =2.0 1.175	0.113	1.161	0.137	0.981	0.124
	<i>n</i> =2.5 1.123	0.106	1.104	0.123	0.948	0.127

次元化された実験値は○で示しているが、9体の焼鈍されたはり、●で示している。この9体の焼鈍はりの実験値と式(1)の *n*=2.5の曲線との比の平均値は、1.12と焼鈍しないはりの平均値の1.02に比べて大きく、焼鈍はりのデータは全データの比較的上限付近でばらついているのがわかる。

**Fig. 1** (b)には、同様のデータを、降伏モーメント *M<sub>y</sub>* を使って整理した結果である。破線の3曲線は、式(1)の *M<sub>p</sub>* を *M<sub>y</sub>* に置き換えた次式を示している。

$$M_u/M_y = \{1 + (\sqrt{M_y/M_E})^{2n}\}^{-1/n} \dots\dots(2)$$

ここに、*n*=1.5, 2.0, 2.5 について示したものである。*M<sub>p</sub>* で整理した **Fig. 1** (a) と比較すると、 $\bar{\lambda}$  の小さい範囲のデータは縦軸の1.0よりかなり高い所で分布しており、塑性モーメントが期待できることがわかる。図の下部に示した変動係数は、*M<sub>p</sub>* で整理した場合と大きな差はなく、0.046~0.129の範囲にある。

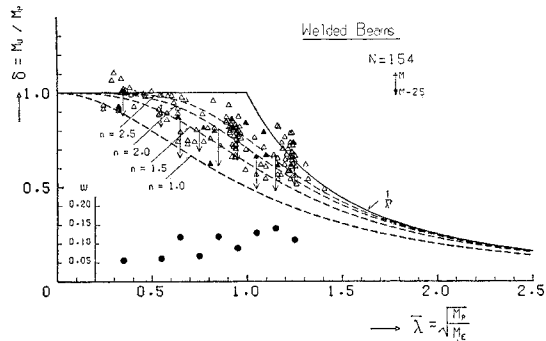
**Table 4** には、圧延はりの実験データと対応する式(1)または式(2)の基準曲線 (*n*=2.0, 2.5) との比の平均値と標準偏差を示す。**Table 4** には、*M<sub>p</sub>* で整理した場合(式(1))と、*M<sub>y</sub>* で整理した場合(式(2))の両方について示してある。

(2) 溶接はり

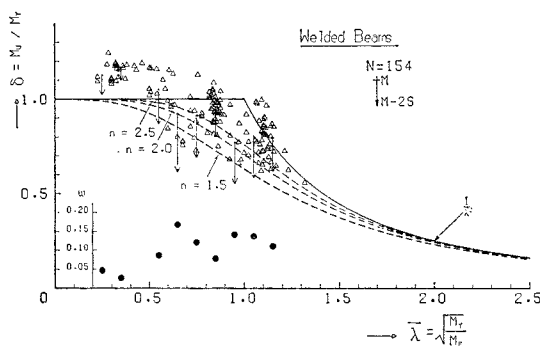
**Fig. 2** (a), (b) にそれぞれ、圧延はりと同様、全塑性モーメント *M<sub>p</sub>* と降伏モーメント *M<sub>y</sub>* によって無次元化した溶接はりの実験データ *N*=154 を示す。**Fig. 2** (a) では、12体の焼鈍したはりの結果を▲で示しており、1点を除いて圧延はりと同様、比較的高い所でばらついている。

変動係数は、*M<sub>p</sub>* で整理した場合が0.056~0.140の範囲にあり、*M<sub>y</sub>* で整理した場合は0.027~0.170となり、*M<sub>y</sub>* で整理した場合の方がばらつきが大きくなる傾向にある。

**Table 4** には、圧延はりと同様、溶接はりの各実験データと対応する式(1)または式(2)の基準曲線の値との比の平均値と標準偏差を示す。圧延はりと比較すると、式(1)の曲線との比の平均値は、溶接はりの方が少し小さい程度であるが、変動係数はかなり溶接はりの方が大きく、その結果データの下限値は、溶接はりの方が



(a) non-dimensionalized using *M<sub>p</sub>*



(b) non-dimensionalized using *M<sub>y</sub>*

**Fig. 2** Test Results of Welded Beams and the ECCS Beam Curves.

圧延はりに比べて相当下まわっている。

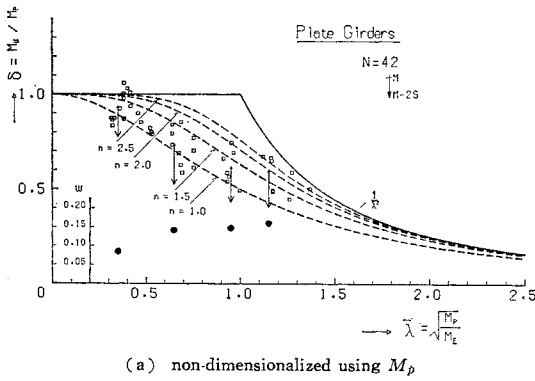
(3) プレートガーダー

**Fig. 3** (a), (b) に圧延はり、溶接はりと同様、プレートガーダーの実験データ *N*=42 を示す。プレートガーダーの実験体数は42体と少なく、水平補剛材のある8体、一軸対称断面の18体を含んでいる。コンパクトな圧延はり、溶接はりと比べると実験結果のばらつきは大きく、その下限値は、かなり低い値を示している<sup>4)</sup>。プレートガーダーでは、その限界強度として *M<sub>p</sub>* よりも *M<sub>y</sub>* がより实际的であり、**Fig. 3** (a), (b) を比べても、*M<sub>y</sub>* で無次元化の方が実験値のばらつきは小さいことがわかる。なお、一軸対称断面では圧縮フランジ側の断面係数を用いた降伏モーメントを用いている。

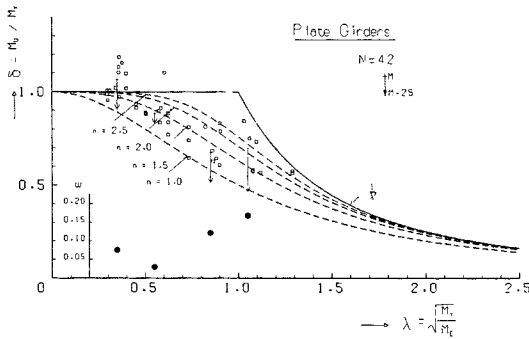
4. 各種設計曲線との比較

(1) ECCS のはりの設計提案曲線との比較

**Table 4** によれば、*n*=2.5の曲線は圧延はりと溶接はりについてはほぼ強度の平均値を示していることになるが、**Fig. 1** (a), **Fig. 2** (a) からわかるように、 $\bar{\lambda} >$



(a) non-dimensionalized using  $M_p$



(b) non-dimensionalized using  $M_y$

Fig. 3 Test Results of Plate Girders and the ECCS Beam Curves.

1.0 の範囲では安全側となり、 $\bar{\lambda} \leq 1.0$  の範囲では、特に溶接はりでは危険側となり、この曲線が、必ずしも強度の平均値を示す関数としてすぐれているものではないといえよう。また、プレートガーダーに関しては、 $n = 2.0$  でも平均値を示す曲線としては危険側の評価となっている。ちなみに、圧延はり、溶接はり、プレートガーダーについて式(1)のECCSの提案関数を用いて、最小二乗近似によって求めたシステム係数  $n$  の値は、それぞれ  $n = 2.89, 2.54, 1.30$  となる。ただし、溶接はりは、著者らの同一条件下での実験値 ( $N = 68$ , スパン長  $L = 2.6 \text{ m}, 1.8 \text{ m}$ )<sup>24)</sup> の影響が大きく、これを平均値で代表させて最小二乗近似を行うと  $n = 1.96$  となる。

(2) 現行道路橋示方書基準曲線との比較

Fig. 4 に、次式で示す現行道路橋示方書のはりの基準強度と実験値を比較している。図中、圧延はり、溶接はり、プレートガーダーは、それぞれ○, △, □で示してある。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1.0 & (\alpha \leq 0.2) \\ \sigma_{cr}/\sigma_y &= \beta \{1.0 - 0.412(\alpha - 0.2)\} \leq 1 & (\alpha > 0.2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

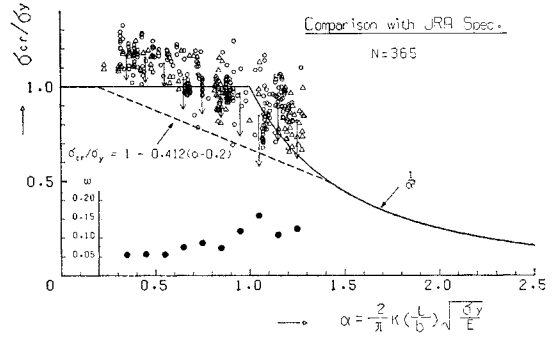


Fig. 4 Strength Variation and JRA Design Formula.

$$\alpha = \frac{2}{\pi} K(L/b) \sqrt{\sigma_y/E}, \quad (L/b) \sqrt{\sigma_y/235} \leq 30$$

$$\beta = \frac{1}{0.6 + 0.4 \kappa} \leq 2.5$$

$$K = \begin{cases} 2 & (A_w/A_c \leq 2) \\ \sqrt{3 + A_w/2 A_c} & (A_w/A_c > 2) \end{cases}$$

ここに、 $L$  = 固定点間距離、 $b$  = 圧縮フランジ幅、 $E$  = ヤング率、 $\sigma_y$  = 降伏点応力、 $A_w$  = 腹板断面積、 $A_c$  = 圧縮フランジ断面積、 $\kappa = M_2/M_1$ 、 $M_1, M_2$  = 固定点間での端モーメント、 $|M_1| > |M_2|$ 、等曲げ  $\kappa = 1$  である。実験値は道示の制限値  $(L/b) \sqrt{\sigma_y/235} \leq 30$ 、をこえる断面はりのもの ( $N = 156$ ) は除いてある。また、Fig. 4 では、式(3)において  $\kappa = 1$  に対応する実験値のみを用いて比較してある。形状パラメーター  $\alpha$  は St. Venant のねじり剛性を無視した単純化を行っている。図の下部に●で示した変動係数は、ほぼ  $\alpha$  の値に比例して大きくなっている。道示の基準曲線は、 $\alpha$  の全域にわたって実験データの下限值をおさえている。また、道示の制限値をこえるはりの実験値も、 $\alpha$  の全域にわたって、基準強度曲線で下限値をおさえられることを確認している。なお、前報<sup>24)</sup>の Fig. 15 に示した図は、 $L$  として座屈有効長さをとっており、今回は横方向固定点間距離をとっている。

(3) ECCS の柱の評価関数の適用

ECCS では、中心軸圧縮柱の耐荷力基準曲線として製作加工方法などにより5つに分類し、(a<sup>o</sup>), (a), (b), (c), (d) と称し数表により表示していたが、1982年に、次の評価関数を採用した<sup>43)</sup>。

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 - \sqrt{\{1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\}^2 - 4 \bar{\lambda}^2}] / 2 \bar{\lambda}^2 \dots\dots\dots (4)$$

(a<sup>o</sup>), (a), (b), (c), (d) に対して  $\alpha$  の値は、それぞれ 0.125, 0.206, 0.339, 0.489, 0.756 が与えられている。

この評価関数をはりの横ねじれ座屈の場合に適用を試

みる。最小二乗近似により、圧延はりと溶接はりの強度の平均値に対して  $\alpha$  を求めると、それぞれ  $\alpha=0.077$ ,  $0.104$  が得られる。ただし、 $\bar{\lambda}=\sqrt{M_p/M_E}$  を用いている。プレートガーダーについては  $\bar{\lambda}$  として  $\sqrt{M_p/M_E}$  と  $\sqrt{M_y/M_E}$  を用いたときで、それぞれ  $\alpha=0.373$ ,  $0.198$  が得られる。この曲線の特徴は、ECCS のはりの評価関数、式 (1) と同様に未知数が 1 個であるが、曲線の始まりが (0.2, 1.0) であることと、Euler 曲線への漸近が式 (1) に比べて緩やかであることである。しかし、おおむね  $\bar{\lambda}$  全域にわたって、先に求めた ECCS のはりの評価関数を用いた結果とほぼ一致した結果となった。このように、はりと柱で同じ評価関数を用いて強度を表わすことができる。

### 5. 実証的にみた鋼はりの横ねじれ座屈強度曲線

#### (1) はじめに

今後、限界状態を基準にした設計法を考える場合には、できるだけ抵抗強度のばらつきをおさえる必要があり、そのためには形状パラメーターの小さい範囲で  $M_u=M_p$ 、大きな範囲で  $M_u=M_E$  となるような座屈軸のとり方が望ましい。そして、弾塑性域では、はりの初期不整、載荷・支持条件によって実験的にばらつきがみられるが、これを実験値をもとに統計処理により合理的な分類を行えばよい。これまでの数多くの研究により、一軸対称、二軸対称断面ばりの弾性座屈荷重  $M_E$  は、中間横方向拘束のないはりについては解析解<sup>(45), (47), (49)</sup>があり、横方向の拘束あるはりについては有効長さの概念<sup>(46)</sup>を用いれば正確に計算できる。

以下では圧延はりと溶接はりについては  $M_u/M_p \sim \sqrt{M_p/M_E}$  座屈軸を、プレートガーダーについては  $M_u/M_y \sim \sqrt{M_y/M_E}$  座屈軸をとるものとする。

なお、以下では実測の降伏点応力とできるかぎり実測の断面寸法を用いて計算した  $M_p$  と  $M_y$  を用いるので、実際の設計に適用するためには、実測の降伏点応力と公称の降伏点応力の比である材料特性値を考慮する必要がある。ちなみに、今回用いる  $N=544$  の供試体の実測降伏点応力と公称降伏点応力の比の平均値は、 $M=1.18$  であった。

#### (2) 圧延はり

弾塑性域での実験値のばらつきに対して、強度の平均値曲線を考えるのに、 $M_u/M_p \sim \sqrt{M_p/M_E}$  座屈軸にて  $(C_1, 1.0)$  で  $M_u=M_p$  とし、 $(C_2, 1/C_2^2)$  で弾性座屈曲線と一致する、 $M_u=M_E$  とし、その間の遷移曲線を

放物線で表わす。すなわち、

$$E[M_u/M_p|\bar{\lambda}] = \begin{cases} 1.0 & (\bar{\lambda} \leq C_1) \\ C_R\{(\bar{\lambda}-C_1)^2 - (C_2-C_1)(\bar{\lambda}-C_1)\} \\ \quad + \frac{1-C_2^2}{C_2^2(C_2-C_1)}(\bar{\lambda}-C_1) + 1 & (C_1 < \bar{\lambda} \leq C_2) \\ 1/\bar{\lambda}^2 & (\bar{\lambda} > C_2) \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

また、重みつきの非線形回帰分析をするため、非定常分散を仮定した。条件付分散の平方根は、鋼柱<sup>37)</sup>と同じ 2 つの双曲線を仮定する。

$$\sqrt{Var[M_u/M_p|\bar{\lambda}]} = \begin{cases} 0 & (\bar{\lambda} \leq C_3) \\ S_R\left(-\frac{1}{\bar{\lambda}^2} + \frac{1}{C_3^2}\right) & (C_3 < \bar{\lambda} \leq C_4) \\ S_R\left\{-C_4 + \left(\frac{C_4}{C_3}\right)^2/\bar{\lambda}^2\right\} & (\bar{\lambda} > C_4) \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

そして、 $M_u/M_p=1.0$  となる  $\bar{\lambda}_1=C_1$  としては、鋼柱<sup>37)</sup>では  $\bar{\lambda}_1=0.2$  の値を採用したが、鋼はりの場合は実験値のばらつきをもとに  $\bar{\lambda}_1=C_1=0.4$  を採用した。 $C_2$  の値としては鋼柱と異なり、実験値のばらつきをもとに  $M_u/M_p=0.5$  の近傍で弾性座屈曲線に漸近もしくは一致するものと考え、 $C_2=\sqrt{2}$  を採用した。 $C_3$  の値は鋼柱と同じ値  $C_3=0.2$  を取り、 $C_4$  についてはデータの標準偏差のピーク点  $C_4=1.05$  を採用した。

その結果、圧延はりについての非線形回帰分析により、 $C_R=-0.306$ ,  $S_R=0.00345$  が得られた。ただし、 $N \geq 10$  の同一条件下での実験値<sup>(23), (25)</sup>は平均値で代表させた。Fig. 5 (a) に、この結果を実験値とともに示す。実験データは Table 5 に示すように鋼種と製作後の熱処理の有無により記号を変えてある。図中の破線で示したのが平均値関数、標準偏差関数 (S 関数) および平均値関数から 2 倍の標準偏差関数を差し引いた曲線である。

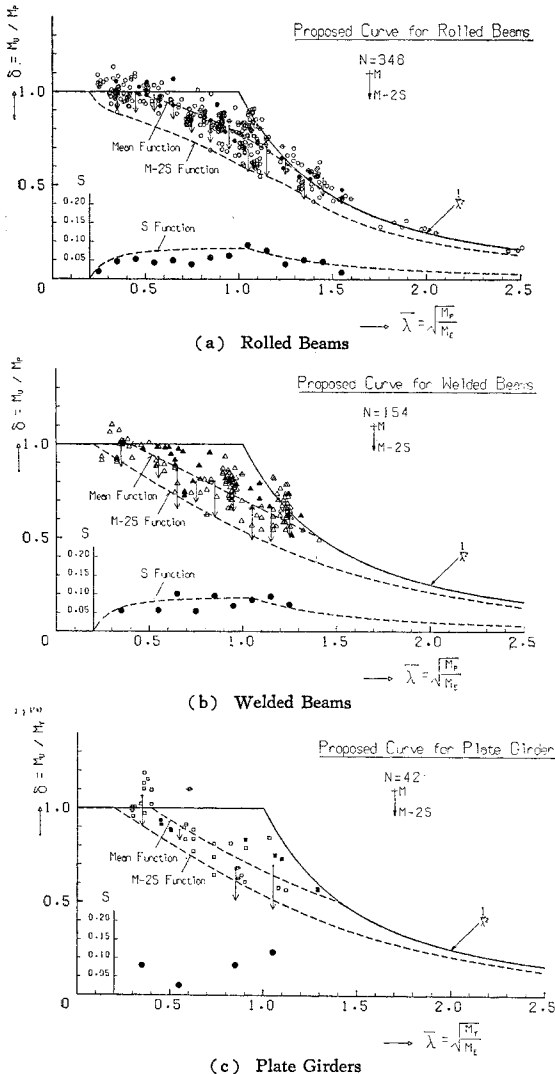
Table 5 に示すように、得られた平均値関数と全実験データとの比の平均値は  $M=1.003$  となり、横軸の  $\bar{\lambda}=0.1$  区間ごとにみた実験値の平均値ともよい一致を示している。鋼種による強度の差は、平均値関数との比では、ほとんど差はなく、高強度鋼の圧延はりの方が、平均値関数により接近して分布しているのが標準偏差の値と Fig. 5 (a) からわかる。また、標準偏差関数と図の下部に●印で示した横軸の  $\bar{\lambda}=0.1$  区間ごとの実験値の標準偏差は比較的良好一致を示している。さらに  $(M-2S)$  関数は、データの下限を安全側でうまくおさえているといえよう。

#### (3) 溶接はり

**Table 5** Ratios of the Test Results to the Proposed Mean Curves.

Type of Process			Symbol	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>S</i>
Rolled Beams <i>M<sub>u</sub>/M<sub>p</sub></i>	mild steel	as-delivered	○	310	0.999	0.091
		annealed	⊖	9	1.075	0.036
	high strength steel	as-delivered	●	29	1.024	0.058
		annealed		0	—	—
Total				348	1.003	0.089
Welded Beams <i>M<sub>u</sub>/M<sub>p</sub></i>	mild steel	as-delivered	△	116	1.041	0.114
		annealed	▽	9	1.011	0.117
	high strength steel	as-delivered	▲	26	1.040	0.088
		annealed	◆	3	1.185	0.084
Total				154	1.042	0.111
Plate Girders <i>M<sub>u</sub>/M<sub>y</sub></i>	mild steel	as-delivered	□	26	1.007	0.113
		annealed	⊠	6	1.012	0.137
	high strength steel	as-delivered	■	10	1.036	0.101
		annealed		0	—	—
Total				42	1.015	0.112

high strength steel :  $\sigma_y \geq 430 \text{ N/mm}^2$



**Fig. 5** Beam Data and Proposed Curves.

圧延はりと同じ関数形を用いて溶接はりについて同様の回帰分析を行った結果が **Fig. 5 (b)** である。(M-2S) 関数については、 $\bar{\lambda} = C_3 = 0.2$  付近で連続性がよくないので、4次関数で近似した結果である。 $C_R = -0.0076$ ,  $S_R = 0.00377$  の値が得られた。ただし、ここでも  $N \geq 10$  の同一条件下の2組のデータ<sup>24)</sup> は平均値で代表させた。**Table 5** には度平均値関数と実験値の比の統計値を示す。鋼種別の強差は残留応力を除去しないはりにおいては認められない。残留応力を除去した高強度鋼のはりの実験値と平均値関数との比は大きな値を示しているが、供試体数が  $N=3$  と少なく強度差は明確でない。得られた3曲線は、圧延はりと同様実験データとのよい適合性を示している。

(4) プレートガーダー

プレートガーダーのデータ数は  $N=42$  と少なく回帰分析の精度はあまりよくない。特に標準偏差の値は実験データから精度よく得ることができない。そこで、ここでは重みをつけない回帰分析で、圧延はりと溶接はりで用いたと同じ関数形を用いて平均値関数のみを求めた。**Fig. 5 (c)** と **Table 5** にその結果を示す。 $C_R = 0.154$  の値が得られている。なお、**Fig. 5 (c)** には、溶接はりで求めた (M-2S) 関数を参考のため示してある。ただし、無次元パラメータは  $M_p$  の代わりに  $M_y$  を用いている。**Fig. 5 (c)** によれば、溶接はりより求めた (M-2S) 関数は、プレートガーダーのときも実験データの下限值を表わすものとみなすことができる。プレートガーダーの設計においては、一般に、十分な横構、対傾構などにより桁の横倒れを防止し、桁の面内強度を十分に発揮させるように考慮するので、たとえば **Fig. 5 (c)** のプレートガーダーの横ねじれ座屈曲線上の  $\bar{\lambda}$  のかなり小さな所に位置し、腹板や圧縮フランジの局部座屈の発生の可能性がある場合には、これとの連成を考えた強度<sup>48)</sup> を考える必要がある。

以上の考察より、圧延はりの平均値関数の未知数を  $C_R = -0.30$  とし、溶接はりの未知数  $C_R$  は非常に小さいため  $C_R = 0$  とした直線式を考え、プレートガーダーは  $C_R = 0.15$  の値を用いることにする。

以上の結果をまとめると、次のようになる。ただし、下限値曲線は (M-2S) 関数を4次関数で近似したものである ( $0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 1.8$ )。

圧延はり

平均値曲線：

$$(\bar{\lambda} > 1.0)$$

$$(\bar{\lambda} \leq 0.4)$$



$$M_u/M_p = \begin{cases} -0.30 \bar{\lambda}^2 + 0.0513 \bar{\lambda} + 1.028 & (0.4 < \bar{\lambda} \leq \sqrt{2}) \\ 1/\bar{\lambda}^2 & (\bar{\lambda} > \sqrt{2}) \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

下限値曲線：

$$M_u/M_p = 0.0592 \bar{\lambda}^4 - 0.281 \bar{\lambda}^3 + 0.491 \bar{\lambda}^2 - 0.806 \bar{\lambda} + 1.144 \quad (0.2 < \bar{\lambda}) \dots\dots(7)$$

溶接はり

平均値曲線：

$$M_u/M_p = \begin{cases} 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.4) \\ -0.493 \bar{\lambda} + 1.197 & (0.4 < \bar{\lambda} \leq \sqrt{2}) \\ 1/\bar{\lambda}^2 & (\bar{\lambda} > \sqrt{2}) \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

下限値曲線：

$$M_u/M_p = -0.0235 \bar{\lambda}^4 + 0.119 \bar{\lambda}^3 - 0.0621 \bar{\lambda}^2 - 0.623 \bar{\lambda} + 1.126 \quad (0.2 \leq \bar{\lambda}) \dots\dots(10)$$

なお、プレートガーダーに関しては、その崩壊モードは複雑であり、また、横倒れを主とした崩壊モードの実験データの数は十分とはいいがたく、横倒れに伴うプレートガーダーの崩壊に関する式の提案は今後の問題とする。

## 6. 結 論

本研究により得られたおもな結論は、次のようである。

(1) 鋼はりの横ねじれ耐荷力実験データを各種パラメーターにより検索できる数値データベースを作成し、収集した実験値の評価、統計処理を通じて、はりの曲げ抵抗強度の実体を明らかにすることができた。

(2) 鋼はりの横ねじれ強度を表示する際の形状パラメーターおよび無次元パラメーターの選択について考察し、圧延はりおよび溶接はりについては、 $M_u/M_p \sim \sqrt{M_p/M_E}$  座標軸により、また、プレートガーダーは、 $M_u/M_y \sim \sqrt{M_y/M_E}$  座標軸によって評価することの妥当性を示した。

(3) 平均値曲線で比較すると溶接はりは圧延はりに比べ横ねじれ強度が小さく、かつ実験値のばらつきが大きいことを定量的に明らかにした。

(4) 鋼柱と鋼はりの強度評価関数の比較を行い、同じ関数形を用いて強度を表わすことができることを示した。

(5) ECCS の提案している基準曲線は、必ずしも無次元細長比の全域にわたって強度を精度よく表わしているとはいえない。特に溶接はりの場合にはその傾向が著しいことが判明した。

(6) 鋼はりの横ねじれ強度曲線を複数で表示することの妥当性と、その場合には圧延はり、溶接はり、プレ

ートガーダーの3種に分類できることを示した。そして、この分類に従って、式(7)~(10)により強度の平均値曲線と下限値曲線を示す強度評価曲線を実験データから実証的に精度よく表わし提案した。

最後に、各種実験データを収集するにあたり、引用させていただいた原論文著者各位に対し厚く感謝する次第である。また、名城大学の久保助教ならびにシェフィールド大学の Nethercot 博士には、実験データ収集に際してご協力いただいた。ここに深謝する次第である。なお、データベースは、名大大型計算機センター M-200 を利用している。

また、本研究の遂行にあたり昭和57年度、58年度の日本学術振興会国際共同研究事業費を受けたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) Abe, H., N. Mizukoshi and H. Okuda : Buckling Tests on Plate Girders under Bending, Preprint, Annual Meeting of JSCE, pp. 141~142, Oct. 1973 (in Japanese).
- 2) Dibley, J.E. : Lateral Torsional Buckling of I-Sections in Grade 55 Steel, Proc. ICE, Vol. 43, pp. 559~627, Aug. 1969.
- 3) Errera, S.J., G. Pincus and G.P. Fisher : Columns and Beams Braced By Diaphragms, Proc. ASCE, Vol. 93, No. ST 1, pp. 295~318, Feb. 1967.
- 4) Fukumoto, Y. and Y. Kikuchi : Ultimate Strength of High-strength Steel Members, Research Report No. 5001, Nagoya Univ., Oct. 1966 (in Japanese).
- 5) Fukumoto, Y., M. Fujiwara and N. Watanabe : Inelastic Lateral Buckling Tests on Welded Beams and Girders, Proc. JSCE, No. 189, pp. 39~51, May 1971 (in Japanese).
- 6) Fukumoto, Y. and M. Kubo : Inelastic Lateral Buckling Strength of Monosymmetrical I-Beams, Preprint, Annual Meeting of JSCE, pp. 161~162, Oct. 1971 (in Japanese).
- 7) Fukumoto, Y. and M. Kubo : Lateral Buckling Strength of Girders With Bracing Systems, Preliminary Report, 9th Congress IABSE, Amsterdam, pp. 299~304, May 1972.
- 8) Fukumoto, Y. and M. Kubo : Ultimate Bending Strength of Plate Girders with Longitudinal Stiffeners, Failed by Lateral Instability, Der Stahlbau, pp. 365~371, 12/1977.
- 9) Hechtman, R.A., J.S. Hatrup, E.F. Styer and J.L. Tiedemann : Lateral Buckling of Rolled Steel Beams, Trans. ASCE, Vol. 122, pp. 823~843, Nov. 1955.
- 10) Hisamitsu, S. and K. Okuto : Lateral Buckling Tests on Beams with Residual Stresses, Preprint of Annual Meeting of AIJ, pp. 363~364, May 1971 (in Japanese).
- 11) Kitipornchai, S. and N.S. Trahair : Inelastic Buckling of Simply Supported Steel I-Beams, Proc. ASCE, Vol. 107, No. ST 7, pp. 1333~1347, July 1975.
- 12) Longbottom, E. and J. Heyman : Experimental Verification of The Strength of Plate Girders Design,

- According with Revised BS 153, Proc. ICE, Vol. 5, Part III, pp. 463~521, Aug. 1956.
- 13) Modermott, J.F. : Plastic Bending of A 514 Steel Beams, Proc. ASCE, Vol. 95, No. ST 9, pp. 1851~1871, Sept. 1969.
  - 14) Mikami, I. : Study of Buckling of Thin Walled Girders under Bending, Doctoral Thesis Presented to Nagoya Univ., Dec. 1972 (in Japanese).
  - 15) Moriwaki, R., S. Fujino, G. Tanaka and O. Mori : Ultimate Strength of Plate Girders, Preprint of Annual Meeting of JSCE, pp. 153~156, Oct. 1971 (in Japanese).
  - 16) Suzuki, T. and T. Ono : Experimental Study of Inelastic Beams (1)—Beam under Uniform Moment—, Trans. AIJ, No. 168, pp. 77~84, Feb. 1970 (in Japanese).
  - 17) Suzuki, T. and T. Ono : Experimental Study of Inelastic Beams (3), Trans. AIJ, No. 175, pp. 69~74, Sept. 1970 (in Japanese).
  - 18) Suzuki, T. and M. Kubodera : Inelastic Lateral Buckling of Steel Beams, Preprint of Annual Meeting of AIJ, pp. 987~988, Oct. 1973 (in Japanese).
  - 19) Suzuki, T. and T. Ono : Post-lateral Buckling of The Welded Beams, Preprint of Annual Meeting of AIJ, pp. 991~992, Oct. 1973 (in Japanese).
  - 20) Suzuki, T. and T. Ono : Deformation Capacity of High-strength Steel Members, Preliminary Report, 10th Congress IABSE, Tokyo, pp. 397~402, Sept. 1976.
  - 21) Udagawa, K., M. Saisho, K. Takahashi and H. Tanaka : Experiments on Lateral Buckling of H-shaped Beams Subjected to Monotonic Loadings, Trans. of Architectural Institute of Japan, No. 212, pp. 23~33, Oct. 1973.
  - 22) Wakabayashi, M., T. Nakamura, et al. : Studies on Lateral Buckling of Wide Flange Beams (1), Disaster Prevention Research Institute Annuals, No. 14 a, Kyoto Univ., pp. 365~380, March 1970 (in Japanese).
  - 23) Fukumoto, Y., Y. Itoh and M. Kubo : Strength Variation of Laterally Unsupported Beams, Proc. ASCE, Vol. 106, No. ST 1, pp. 165~181, January 1980.
  - 24) Fukumoto, Y. and Y. Itoh : Statistical Study of Experiments of Welded Beams, Proc. ASCE, Vol. 107, No. ST 1, pp. 89~103, January 1981.
  - 25) Fukumoto, Y. and M. Kubo : Lateral Buckling Tests With Two Concentrated Loads, Preprint, Annual Meeting of JSCE, pp. 265~266, Oct. 1980 (in Japanese).
  - 26) Dux, P.F. and S. Kitipornchai : Inelastic Beam Buckling Experiments, Research Report No. CE 24, Univ. of Queensland, May 1981.
  - 27) Lindner, J. and R. Gietzelt : Biegedrillknicken-Erläuterungen Versuche Beispiele, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Stahlbau Verlag, 10/1980.
  - 28) OhEachteirn, P. and D.A. Nethercot : Lateral Torsional Buckling Tests on Reduced Scale Welded Steel Bridge Girders, Report No. BE 22/2/065/3, University of Sheffield, September 1982.
  - 29) Fukumoto, Y., Y. Itoh and R. Hattori : Lateral Buckling Tests on Welded Continuous Beams, Proc. ASCE, Vol. 108, No. ST 10, pp. 2245~2262, January 1982.
  - 30) Poowannachaikul, T. and H.S. Trahair : Inelastic Buckling of Continuous Steel I-Beams, Reserch Report No. R 51, University of Sheffield, November 1974.
  - 31) Bansal, J.P. : The Lateral Instability of Continuous Steel Beams, Thesis presented to the University of Texas, 1971.
  - 32) Schulz, G. : Die Traglastberechnung von Planmässigen Mittig Belasteten Druckstäben aus Baustahl unter Berücksichtigung von Geometrischen und Strukturellen Imperfektionen, Dissertation, juni, 1968.
  - 33) Strating, J. and H.J. Vos : Computer Simulation of the ECCS Buckling Curve using a Monte-Carlo Method, Stevin Laboratory, Delft University of Technology, 1972.
  - 34) Bjorhovde, R. : Deterministic and Probabilistic Approach of the Strength of Steel Columns, Ph.D. Dissertation, Lehigh University, 1972.
  - 35) 青島泰之 : 圧延 H 鋼ばりの横倒れ座屈公式, 土木学会論文報告集, 第 267 号, 1977 年 11 月.
  - 36) 福本啓士・伊藤義人 : 鋼構造部材の耐荷力評価システムのための数値データバンクの作成と利用, 土木学会論文報告集, 第 312 号, pp. 59~72, 1981 年 8 月.
  - 37) 福本啓士・伊藤義人 : 座屈実験データベースによる鋼柱の基準強度に関する実証的研究, 土木学会論文報告集, 第 335 号, 1983 年 7 月.
  - 38) ECCS : Manual of the Stability of Steel Structures, Second International Colloquium on Stability, Introductory Report, 1976.
  - 39) Fukumoto, Y. and M. Kubo : A Supplement of a Survey of Tests on Lateral Buckling Strength of Beam, ECCS, Final Report, Second International Colloquium on Stability of Steel Structures, Liege, Belgium, pp. 115~117, Apr. 1977.
  - 40) Fukumoto, Y. and M. Kubo : An Experimental Review of Lateral Buckling of Beams and Girders, International Colloquium on Stability of Steel Structures under Static and Dynamic Load, ASCE, pp. 541~562, 1977.
  - 41) 日本道路協会 : 道路橋示方書, 1980 年.
  - 42) British Standards Institution, Draft Standard for the Structural Use of Steelwork in Building part I : Simple Construction and Continuous Construction, Doc. 77/13908 DC, BSI, London, 1977.
  - 43) Maquoi, R. and J. Rondal : An Towards a Unified Approach to Main Stability Problems of Steel Structures, Staveb, Cas., 28, C. 12, VEDA, Bratislava, 1980.
  - 44) Fukumoto, Y. : Lateral Collapse of Plate Girders in Bending, Proceeding of Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength, IABSE, London, pp. 28~38, 1971.
  - 45) Clark, J.W. and H.N. Mill : Lateral Buckling of Beams, Proc of ASCE, Vol. 86, No. ST 7, July 1960.
  - 46) Nethercot, D.A. and N.S. Trahair : Lateral Buckling Approximations for Elastic Beams, The Structural Engineer, No. 6, Vol. 54, pp. 197~204, June 1976.
  - 47) Allen, H.G. and P.S. Bulson : Background to Buckling, McGraw-Hill Book Co., New York, 1980.
  - 48) Basler, K. and B. Thürlimann : Strength of Plate Girders in Bending, Transactions of ASCE, Vol. 128, Part II, pp. 655~682, 1963.
  - 49) 福本啓士 : 構造物の座屈・安定解析, 土木学会編, 新体系土木工学 9, 技報堂, 1982 年.