

高強度鋼組立材の横座屈性状に関する研究

(その1 横座屈試験装置の開発)

玉井 宏章*, 高松 隆夫*, 山西 央朗**, 松尾 彰***

(平成20年10月31日受理)

Lateral Buckling Behavior of Build-Up Member Made of HSA700 High Strength Steel (part 1 Development of loading system)

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Akira MATUO

(Received Oct. 31, 2008)

ABSTRACT

A new building structure, which absorbs the severe earthquake input energy into a damper, is developed by Japanese steel companies. If we use the high strength steel member (HSA800 steel) as a main frame of a new building structure. We are able to prevent completely main frame under a severe earthquake from damage, and easily repair the building after the earthquake. We proposed the high strength build-up beam member made of two channels' (HSA800 steel), fastened each other by friction bolts.

The high strength build-up member has the following engineering subjects. :

- 1) Weak axial flexural rigidity of the member depends on friction bolt pitch.
- 2) Elastic buckling may occur in ordinary design dimension because applying stress of the member is twice higher than ordinary steel member.

In this study, we performed three point weak axial bending loading tests and four point strong axial bending loading tests to clarify the weak axial flexural rigidity and lateral buckling behavior of the presented high strength build-up beam member.

Keywords: high strength steel, lateral buckling, build-up member

1. はじめに

激震(震度7=計測震度6.5)に対しても建築物は倒壊、損壊せず、さらに、速やかな機能復旧を可能とする新しい建築構造システムとして、建築物の主要部材に800N/mm²級の高強度鋼材を使用して激震時においても部材を弾性範囲に留め、地震エネルギーを専用ダンパーで吸収させる柔

剛混合構造物等が、著者等も含めた研究者により開発が行われている。本研究は、これらの目標を達成するために、建築物の主架構に必要となる高強度鋼部材、接合部等の構造を開発するものである。

新規に、高強度鋼でできた2本の溝形鋼の背を合わせてボルト接合した断面をもつ乾式組立材を提案する。

この乾式組立材は1) ボルト接合のボルトピッチによっ

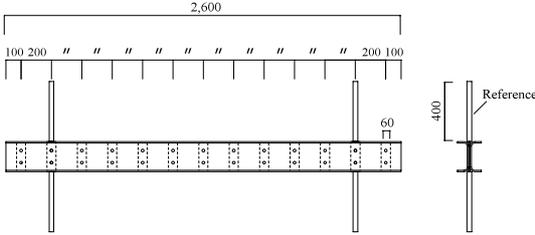
* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

*** 広島大学大学院社会環境システム専攻

表 1 高強度鋼材 (HSA700) の素材特性

鋼種	降伏点	引張強さ	破断伸び	加工硬化開始至
	N/mm ²	N/mm ²	%	
HSA700	773	832	11	1.8
SM490 ウェブ	389	536	25	2.5
SM490 フランジ	364	530	26	2.0



(a) W-1 試験体



(b) W-2 試験体

図 2 弱軸曲げ剛性検定のための試験体

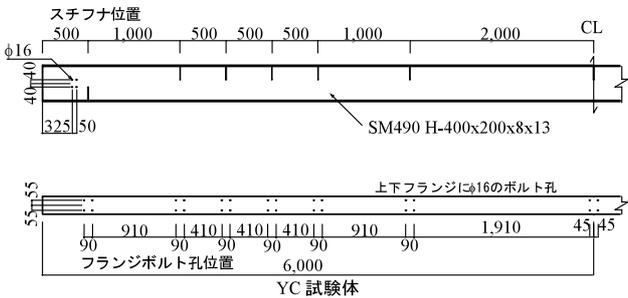


図 4 加力装置の境界条件等を検定する予備試験体

て弱軸曲げ剛性が変化すること, 2) 材が高強度のため, 作用応力度が高くなること, かつ, 断面がスレンダーになることから普通鋼の部材と比べて座屈現象, 特に梁材では弾性横座屈が問題となると考えられる。

そこで, 本研究では, 高強度鋼乾式組立材についてボルトピッチを実験変数とした弱軸 3 点曲げ載荷試験及び等曲げの弾性横座屈載荷試験を行う。特に弾性横座屈試験では, 支点間距離が長くなるため, 新規に載荷装置を設け制作するとともにその試験装置の支持条件, 載荷条件を含む精度の検定も本実験前に実施したので併せて報告する。

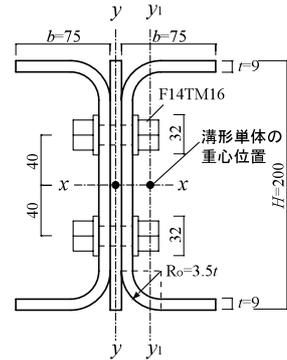
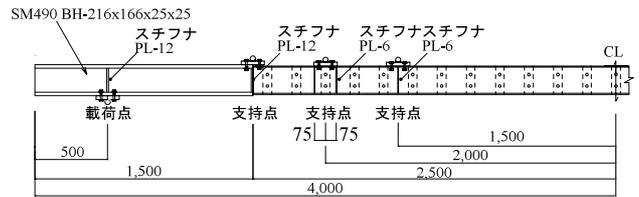
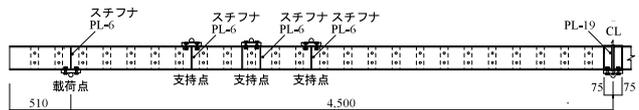


図 1 高強度組み立て材の断面



(a) HS4 試験体



(b) HS3L 試験体

図 3 弾性横座屈性状を調査する試験体

2. 高強度鋼組立材

2.1 概要

提案する高強度鋼組立材の概要を図 1～3 に示す。普通鋼の約 2 倍の強度を有する HSA700 鋼 (板厚 9mm) の鋼板を冷間プレス成形して溝形鋼を作成し, 断面を背合わせに綴り材 (HSA700, 板厚 9mm) を挟んで, 等ピッチで 1 列 2 本の超強力ボルト F14TM16 で組立てたものである。

表 1 に, HSA700 鋼材の JIS1 号 B 試験片の素材特性を示す。この表からわかるように, 降伏応力が高く, 強度に比べて剛性が低いので梁材では弾性横座屈も設計では十分に留意する必要がでてくることがわかる。

2.2 諸断面定数と弾性横座屈耐力評価式

一般に設計に用いられる横座屈耐力評価式を文献 1～3 から示すと次式となる。

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot E \cdot I_y \cdot E \cdot I_w}{k \ell_b^4} + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y \cdot G \cdot J}{\ell_b^2}} \quad \dots\dots (1)$$

あるいは,

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{\ell_b^2} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{k \ell_b^2} + G \cdot J \right)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

表2 各試験体の断面性能

(a) 溝形鋼の形状				(b) 溝形鋼単体の断面性能				(d) H形鋼の形状			
せい	幅	板厚	外径	断面積	x軸回り	y1軸回り	重心距離	せい	幅	ウェブ板厚	フランジ板厚
H (mm)	b (mm)	t (mm)	R_o (mm)	断面2次モーメント	断面2次モーメント	断面2次モーメント	x_o (mm)	H (mm)	B (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)
200.2	75.16	9.05	31.67	A (mm ²)	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	x_o (mm)	400.0	200.00	7.65	12.50
				2797	1.488×10^7	1.389×10^6	20.96				

(c) 組み立て材断面性能 (HS3L, HS4 試験体)					(e) H形鋼の断面性能 (YC 試験体)				
断面積	x軸回り	y軸回り	サンパナのねじり定数	曲げねじり定数	断面積	x軸回り	y軸回り	サンパナのねじり定数	曲げねじり定数
A (mm ²)	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	I_w (mm ⁶)	A (mm ²)	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	I_w (mm ⁶)
5595	2.975×10^7	6.411×10^6	1.527×10^5	2.314×10^{11}	7869	2.214×10^8	1.668×10^7	3.164×10^5	6.262×10^{11}

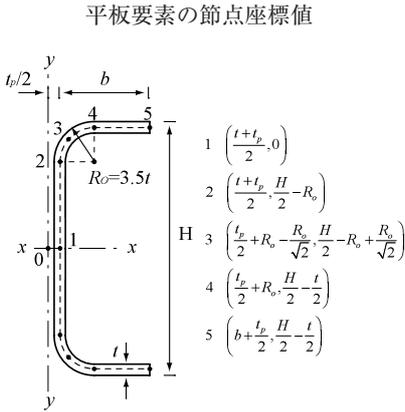


図5 平板要素への近似

ここに、 C_b ：モーメント係数、 E ：ヤング係数、 G ：せん断弾性係数、 I_y ：弱軸断面2次モーメント、 J ：サンパナのねじり定数、 I_w ：曲げねじり定数、 ℓ_b ：横座屈補剛間長さ（横曲げに対する横座屈長さ）、 ℓ_b ：横座屈長さ（曲げねじれに対する横座屈長さ）である。

次に、検討のための溝形鋼単体、組立材および予備試験体の断面定数を以下に整理して示す。

溝形鋼単体について、断面積 A_1 、 x 軸回りの断面2次モーメント I_x 、重心の y_1 軸回りの断面2次モーメント I_{y1} ウェブの背と重心との距離 x_0 は、次式で与えられる。

$$A_1 = t \cdot (H - 2 \cdot R_o) + 2 \cdot t \cdot (b - R_o) + \frac{\pi}{2} \cdot (R_o^2 - R_f^2) \quad \dots (3.a)$$

$$I_{x1} = \frac{1}{12} \left\{ t \cdot (H - 2 \cdot R_o)^3 + (b - R_o) \cdot h^3 - (b - R_o) \cdot (H - 2 \cdot t)^3 \right\} +$$

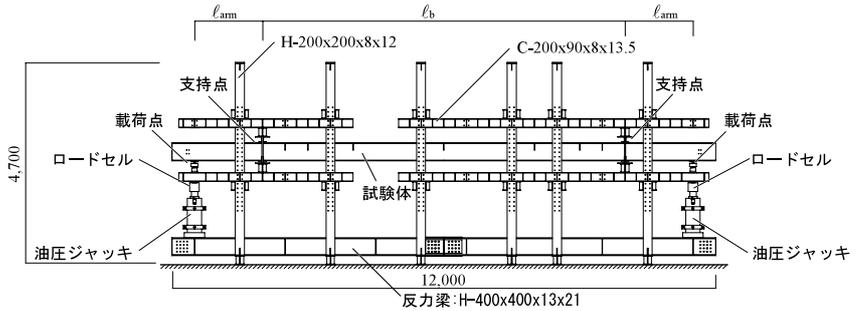
$$2 \cdot \left\{ \frac{\pi}{16} \cdot (R_o^4 - R_f^4) + \frac{2}{3} (R_o^3 - R_f^3) \cdot \left(\frac{H}{2} - R_o \right) + \frac{\pi}{4} (R_o^2 - R_f^2) \cdot \left(\frac{H}{2} - R_o \right)^2 \right\}$$

$$I_{y1} = I_{y1}' - A \cdot x_0^2 \quad x_0 = \frac{S_{y1}}{A_1} \quad \dots (3.b-d)$$

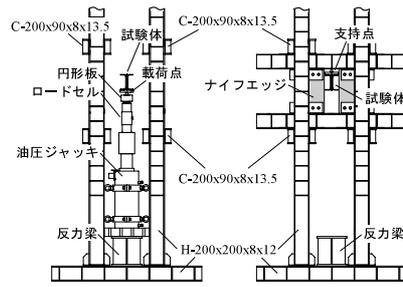
ここに、

$$S_{y1} = \frac{1}{2} \cdot t^2 \cdot (H - 2 \cdot R_o) + t \cdot (b^2 - R_o^2) - \frac{2}{3} \cdot (R_o^3 - R_f^3) + \frac{\pi}{2} \cdot R_o \cdot (R_o^2 - R_f^2)$$

$$I_{y1}' = \frac{1}{12} \left\{ (H - 2 \cdot R_o) \cdot t^3 + 2t \cdot (b - R_o)^3 \right\} + \frac{t^3}{4} (H - 2 \cdot R_o) + \frac{t}{2} (b - R_o)(b + R_o)^2 +$$

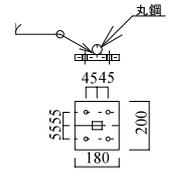


(a) 荷重装置全体



(b) 荷重点詳細

(c) 支持点詳細



(d) 荷重器具詳細

図6 荷重装置の概要

$$2 \cdot \left\{ \frac{\pi}{16} \cdot (R_o^4 - R_f^4) - \frac{2}{3} (R_o^3 - R_f^3) \cdot R_o + \frac{\pi}{4} (R_o^2 - R_f^2) \cdot R_o^2 \right\} \quad \dots (3.e,f)$$

上式を用いると組立材の断面積 A 、弱軸（ y 軸）回りおよび強軸（ x 軸）回りの断面2次モーメント I_y 、 I_x は次式で得られる。

$$A = 2 \cdot A_1$$

$$I_y = 2 \cdot \left\{ I_{y1} + A_1 \cdot \left(x_0 + \frac{t_p}{2} \right)^2 \right\}$$

$$I_x = 2 \cdot I_{x1} \quad \dots (4.a-c)$$

また、文献3, 4を参考にして、サンパナのねじり定数 J は、

$$J = \frac{2}{3} \left\{ H - 2 \cdot R_o + 2 \cdot (b - R_o) + \pi \cdot (R_o - \frac{t}{2}) \right\} \cdot t^3 \quad \dots (4.d)$$

また、曲げねじり定数 I_w は、図5に示す節点座標の平板要素で構成される断面に近似して次式で算定する。

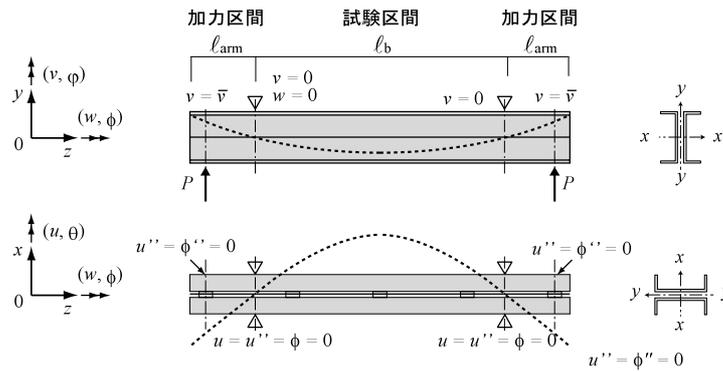


図7 等曲げ横座屈試験（強軸4点曲げ試験）の境界条件

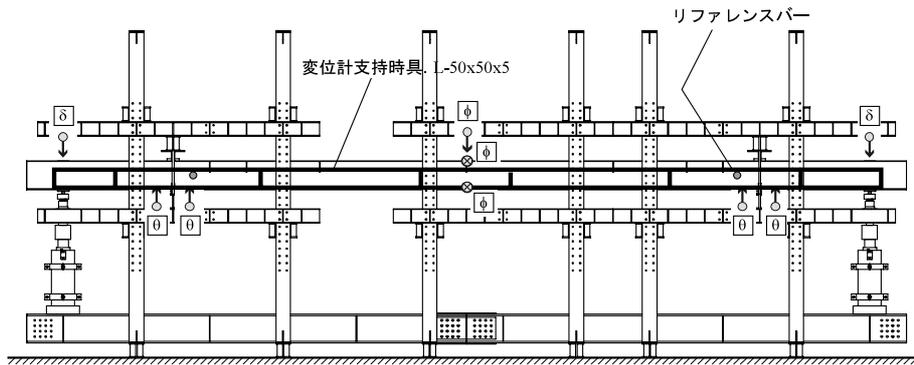


図8 変位計支持治具

$$I_w = \frac{1}{3} \sum_m (w_{ni}^2 + w_{ni} \cdot w_{nj} + w_{nj}^2) \cdot t^{(m)} \cdot \ell^{(m)} \dots (5.a)$$

ここに,

$$w_{nj} = \frac{1}{2 \cdot A} \sum_m (w_{0i} + w_{0j}) \cdot t^{(m)} \cdot \ell^{(m)} - w_{0j} \dots (5.b)$$

$$w_{0j} = \frac{1}{2 \cdot A} \sum_{m=1}^j \rho_0^{(m)} \cdot \ell^{(m)} \dots (5.c)$$

であり, \sum は平板要素の総和を, $t^{(m)}$, $\ell^{(m)}$ は平板要素の板厚と長さ, i, j は, 平板要素の始端と終端を $\sum_{m=1}^j$ は, 要素1から要素 m の終端までの総和を $\rho_0^{(m)}$ は, せん断中心と平板要素との距離を示しており, $\rho_0^{(m)}$ は次式で算定できる。

$$\rho_0^{(m)} = \frac{1}{\ell^{(m)}} \left\{ (x_j - x_i) \cdot (y_s - y_i) - (y_j - y_i) \cdot (x_s - x_i) \right\} \dots (5.d)$$

ここに, (x_i, y_i) , (x_j, y_j) は, m 番目の平板要素の始端と終端の座標, (x_s, y_s) はせん断中心の座標である。図1の断面の場合, 2軸対称断面であるので, せん断中心の座標は座標原点となる。これらの式を用いて実測断面形状を代入して算出した断面定数を表2に示す。

3. 実験概要

3.1 横座屈試験装置

横座屈試験装置の概要と荷点, 支持点の詳細を図6(a)

~(d)に示す。

全長12mの反力梁(H-400x400x13x21)に先端に圧縮型ロードセルを取り付けた2本の油圧ジャッキが設置されている。柱材にH形鋼材(H-200x200x8x12)と溝形鋼材(C-200x90x8x13.5)で門形フレームを形成し, これら6つの門形フレームを溝形鋼材を用いて連結し2箇所に試験体用の支持点を設けている。門形フレームは, 反力梁に連結してあり, 支持点および油圧ジャッキの位置は, 反力梁内の範囲でほぼ任意に設定可能となっている。試験体(最大11m)は, 荷点と支持点の間に設置し, 試験体の荷点治具を介して荷点では下方向から試験体下フランジに鉛直力が作用し, 支持点では, 上方向から試験体上フランジに反力が生じるようになっている。荷点と支持点には, 図6(d)に示す, 鋼板(PL-175x165x25)に丸鋼($\phi 30$, $L=30$ mm)をフレア溶接した荷点治具を試験体フランジ上下に取り付けて, 作用力がウェブ位置からはずれないようにしている。荷点では, 油圧ジャッキの先端のロードセルを介して鋼板がこの治具を上向きに押す。治具と鋼板との間には, 治具が構面外方向と材軸方向に滑るよう, また構面外回転を拘束しないようにテフロンシートが敷いてある。支持点では, 治具は門形フレームのフランジ上の鋼板から反力を受ける。断面のそり拘束を極力抑え, 構面外変形とねじり角については拘束できるように先端を

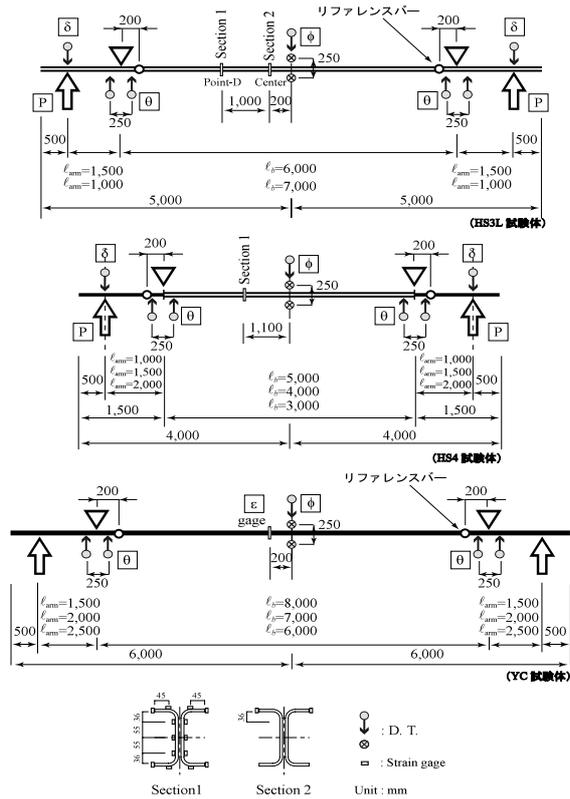


図9 等曲げ横座屈試験の計測量の模式図

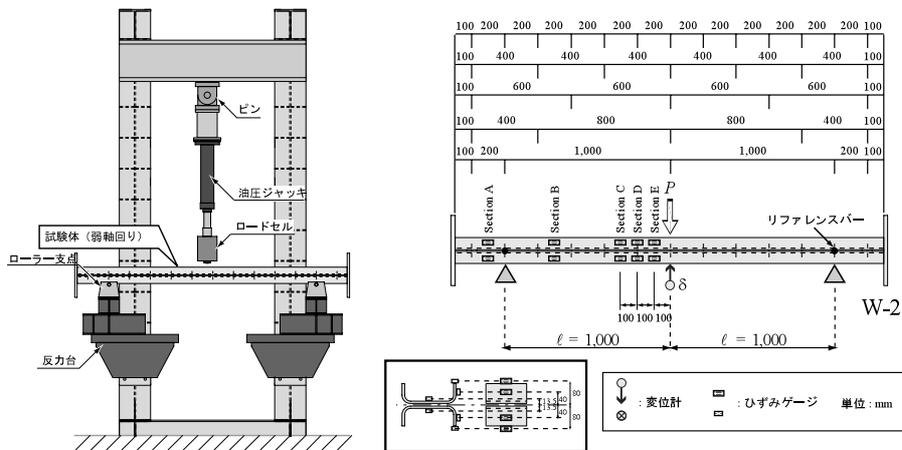


図10 3点弱軸曲げ試験の加力装置と計測方法

R=2mm程度に尖らせたナイフエッジでフランジ先端を両側から挟んで拘束した。治具と鋼板との間、ナイフエッジとフランジ先端との接触部では摩擦力を低減するようにテフロンシートを敷いた。

3.2 境界条件

この加力装置で想定される境界条件を等曲げ横座屈試験の場合を図7に示す。

いずれの試験も(1), (2)式の理論に対応する試験区間は、支持点間距離となり、付与すべき支持点における境界条件は、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v &= w = 0 \\ u &= u'' = 0 \\ \phi &= \phi'' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.a-c)$$

ここに、 $u = u'' = 0$ (横曲げ単純支持条件)

$\phi = \phi'' = 0$ (ねじり単純支持条件)

加力区間を有する側の支持点の境界条件のうち、次式のそり拘束する点が試験と理論とで異なる可能性がある。

$$\phi'' \neq 0 \dots\dots\dots (6.d)$$

なお、荷重点、支持点に材軸方向に拘束が生じると梁には、引張力が作用するため、横座屈耐力値は大幅に上がる。

また、荷重点の構面外変形をナイフエッジ等で拘束する

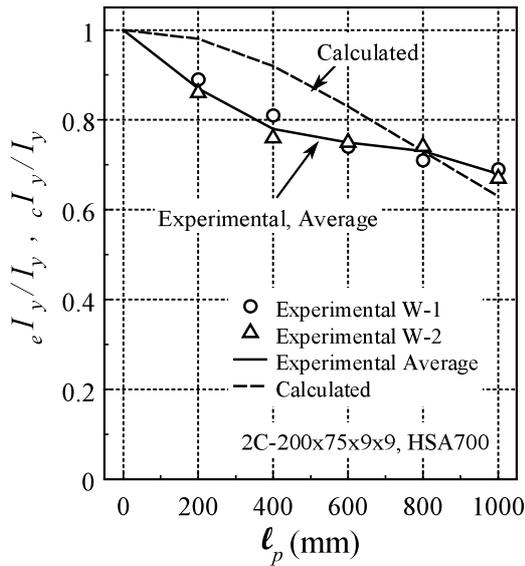


図 11 ボルトピッチの弱軸曲げ剛性に及ぼす影響 (実験 I)

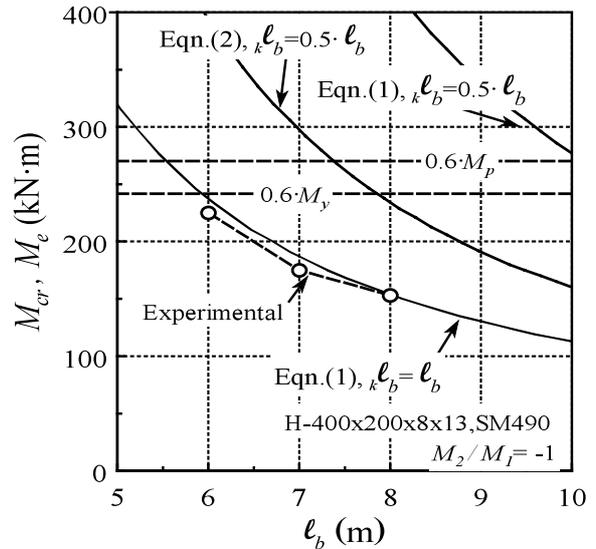


図 12 予備試験結果 (等曲げ横座屈試験, 実験 II) (境界条件の確認)

表 3 弱軸 3 点曲げ荷試験結果 (実験 I)

ℓ_p mm	Specimen	Exp. δ mm	Exp. J_y mm ⁴	Exp. J_y / I_y mm ⁴	Exp. Average	Calc. δ mm	Calc. J_y mm ⁴	Calc. J_y / I_y mm ⁴	J_y / I_y
200	W-1	2.96	5487736	0.86	0.87	2.59	6266353	0.98	1.12
200	W-2	2.84	5731464	0.89					
400	W-1	3.35	4853780	0.76	0.78	2.77	5869091	0.92	1.21
400	W-2	3.13	5203252	0.81					
600	W-1	3.37	4820683	0.75	0.75	3.06	5308224	0.83	1.10
600	W-2	3.41	4764185	0.74					
800	W-1	3.42	4755824	0.74	0.73	3.47	4681849	0.73	0.98
800	W-2	3.57	4553392	0.71					
1000	W-1	3.81	4267759	0.67	0.68	4.00	4065109	0.63	0.95
1000	W-2	3.67	4430562	0.69					

W-1 試験体は、エンドプレートなし、W-2 試験体は、エンドプレート付き

表 4 予備試験結果 (等曲げ横座屈試験, 実験 II)

ℓ_b m	ℓ_{arm} m	Exp. M_{cr} kN·m	Cal.		Specimen
			M_e kN·m	M_e / M_{cr}	
8.0	1.5	156	154	0.99	YC
7.0	2.0	180	187	1.04	YC
6.0	2.5	225	238	1.06	YC

と支持点における横曲げを拘束することになり、前述と同様に横座屈耐力は上昇することになるので注意を要する。

3.3 計測方法

等曲げ横座屈試験における、変位計の支持治具を図 8 に、計測諸量の模式図を図 9 に示す。

計測は、荷重については、油圧ジャッキ先端のロードセルから鉛直荷重、 P と加力区間の長さに乗じて支持点部の試験体に作用する曲げモーメント、 M を、変位については、加力点鉛直変位、 δ 、支持点から 250mm 離れた 2 点の鉛直変位から強軸回りの支持点回転角、 θ 、試験体中央における上下に 250mm 離れた 2 点の構面外変位からねじれ角、 ϕ を計測した。

ひずみは、試験体中央から 200mm、1200mm 離れた断面について材軸方向軸歪を計測した。特に、断面 2 の圧縮側フランジ左右端面の歪ゲージ値から横座屈現象を判定することとした。

なお、各変位計は支持点から内に 200mm 位置の試験体に取り付けたリファレンスバーに設置した支持治具に支持

されており、不動点は左側のリファレンスバーとなる。

3.4 弱軸曲げ剛性評価試験装置と計測方法

併せて、高強度鋼組立て部材の弱軸曲げ剛性を評価するために 3 点曲げ試験を行う。

その加力装置と計測方法を図 10 に示す。2000mm 間隔のローラー支点間に設置した試験体の中央に油圧ジャッキから鉛直力を作用させる。荷重は中央の鉛直荷重、 P を、変位は中央たわみ、 δ を計測する。変位計は前述の実験と同様に支持点におけるリファレンスバーに設置した支持治具に取り付けられている。ひずみについては、図 10 の各断面について材軸方向歪を計測した。

3.5 試験シリーズ

試験シリーズは弱軸曲げ剛性を評価する 3 点弱軸曲げ試験 (実験 I)、加力装置の境界条件等を検定する、等曲げ横座屈試験 (実験 II) 及び、高強度組立材の横座屈性状を調査する、等曲げ横座屈試験 (実験 III) の 3 シリーズとした。弱軸曲げ剛性を評価する 3 点弱軸曲げ試験 (実験 I)

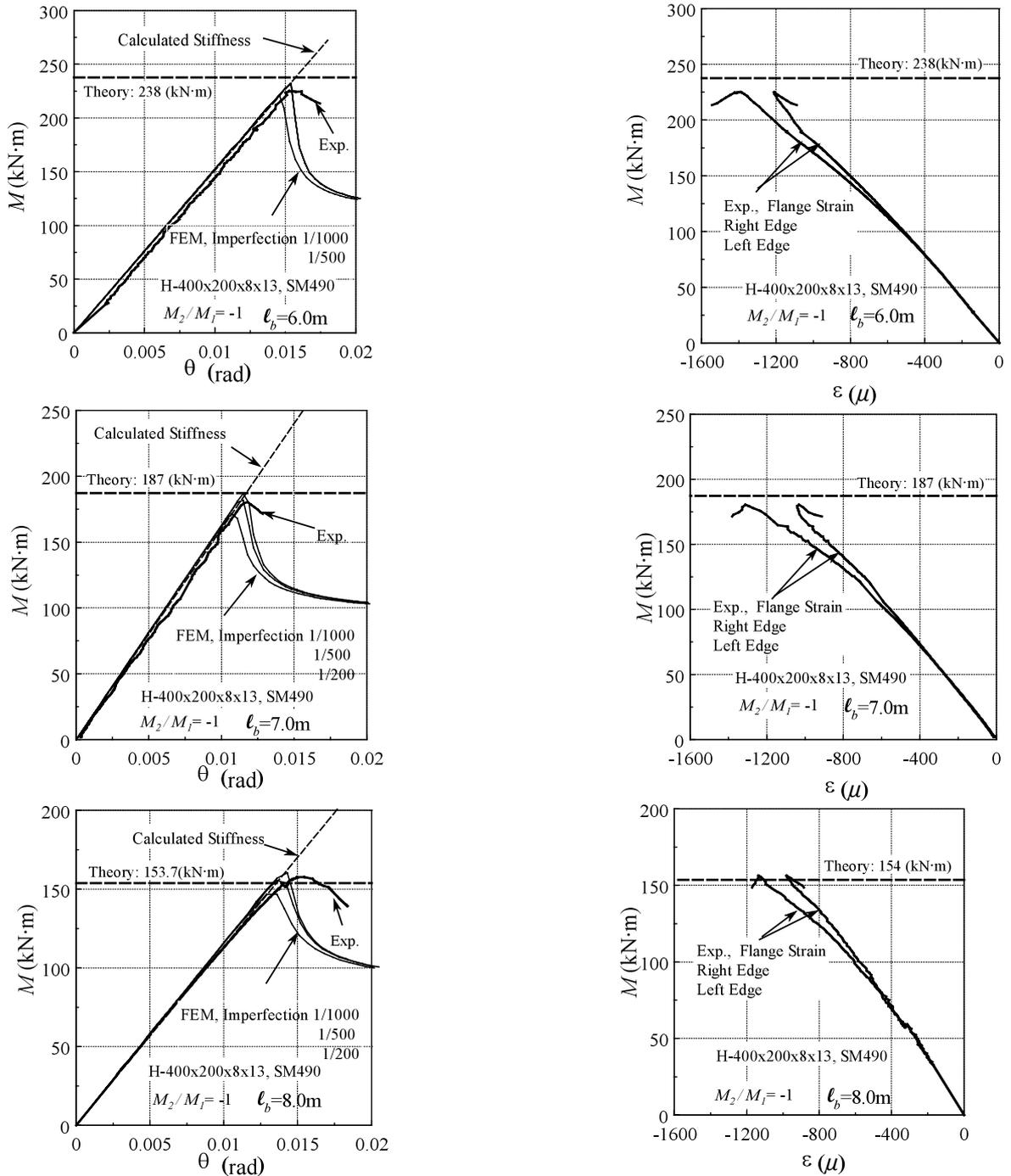


図13 予備試験結果（等曲げ横座屈試験，実験Ⅱ）（横座屈基準耐力の判定法）

は、試験体を図2のW-1試験体（エンドプレートなし）、W-2試験体（エンドプレートあり）を計2体用意した。図12に示すように、ボルトピッチ ℓ_b を200mm, 400mm, 600mm, 800mm, 1000mmと変化したケースについて、中央鉛直荷重が20kNとなるまで単調に载荷した。

実験Ⅱは、試験体区間、 ℓ_b を8.0, 7.0, 6.0mとし、それに対応して加力区間長さ ℓ_{arm} を1.5, 2.0, 2.5mと変化したものについて、左右载荷点に等しい鉛直上方向の強制変位を単調に与えた。

最後に、高強度鋼組立材の横座屈性状を調査する等曲げ

横座屈試験（実験Ⅲ）は、図3のHS4, HS3L試験体を、各1体用意して行った。

HS4試験体は、5mの乾式組立材に、加力区間のBH-216x166x25x25のビルトH形鋼（L=1.5m）を両端に溶接したものであり、HS3L試験体は5mの乾式組立材を12mm板厚の鋼板を介して溶接し、全長を10mとしたものである。

実験Ⅲは、試験体区間長さ ℓ_b を7.0m（HS3L）、6.0m（HS3L）、5.0m（HS4）、4.0m（HS4）、3.0m（HS4）とし、それに対応して加力区間長さ ℓ_{arm} を2.0m, 2.5m, 1.0m,

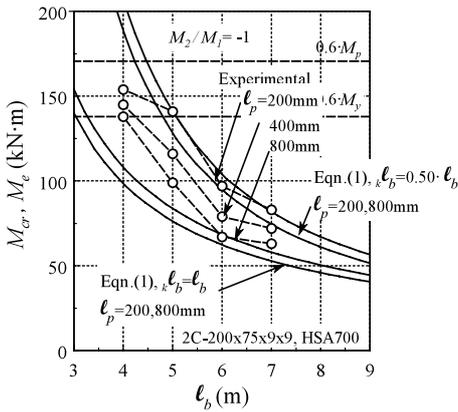


図 14 等曲げ横座屈試験結果図 (実験Ⅲ, HS4, HS3L 試験体)

表 5 等曲げ横座屈試験結果 (実験Ⅲ)

l_b m	l_{arm} m	l_p mm	Exp.	Eqn.(1), $k l_b = l_b$	Eqn.(1), $k l_b = 0.50 l_b$	Specimen		
			M_{cr} kN·m	M_c kN·m	M_c / M_{cr}		M_c kN·m	M_c / M_{cr}
7.0	1.0	800	63	53	0.84	75	1.19	HS3L
7.0	1.0	400	75	55	0.73	78	1.04	HS3L
7.0	1.0	200	83	58	0.70	83	1.00	HS3L
6.0	1.5	800	67	62	0.93	95	1.42	HS3L
6.0	1.5	400	79	65	0.82	99	1.25	HS3L
6.0	1.5	200	97	68	0.71	104	1.07	HS3L
5.0	1.0	800	99	76	0.77	128	1.29	HS4
5.0	1.0	400	116	79	0.68	133	1.15	HS4
5.0	1.0	200	141	84	0.59	141	1.00	HS4
4.0	1.5	800	138	99	0.71	189	1.37	HS4
4.0	1.5	400	145	103	0.71	196	1.35	HS4
4.0	1.5	200	154	108	0.70	207	1.34	HS4
3.0	2.0	800	(152)	140	(0.92)	319	(2.10)	HS4
3.0	2.0	400	(164)	146	(0.89)	331	(2.02)	HS4
3.0	2.0	200	(172)	154	(0.89)	350	(2.03)	HS4

1.5m, 2.0mとしたものについて, それぞれ, ボルトピッチ, l_p を 800mm, 400mm, 200mmと変化させて, 左右荷重点に等しい鉛直上方向の強制変位を単調に与えた。

尚, 実験Ⅱ, Ⅲでは, 試験体の計測歪が弾性限度に達する前で荷重を終了した。

4. 実験結果と考察

4.1 弱軸曲げ剛性評価試験

弱軸曲げ剛性評価試験 (実験Ⅰ) の結果を, 表3および図13に示す。表3には, 荷重 $P=20$ kNの時の中央点たわみ, δ と次式で求めた平均的な断面2次モーメント, I_y , 法線が保持されると仮定したときの断面2次モーメント, I_y に対する ϵI_y の比, 同一ボルトピッチの時のW-1試験体とW-2試験体の $\epsilon I_y / I_y$ の平均値を示す。

$$\epsilon I_y = \frac{P \cdot \ell^3}{6 E \cdot \delta} \dots \dots \dots (7)$$

ここに, ℓ : 支持点間距離の半分長 (=1,000mm) である。

文献5には, 綴り材個々の曲げ変形を考慮した次のたわみの式が提案されている。

$$\delta = \frac{P \cdot \ell^3}{6 \cdot E \cdot I_y} + \frac{P \cdot \ell_p \cdot t_p^3 \cdot \ell}{24 \cdot E \cdot I_b \cdot h^2} + \frac{P \cdot \ell_p^2 \cdot \ell}{48 \cdot E \cdot I_{y1}} \dots \dots \dots (8)$$

ここに, h : 2本の溝形鋼の図心点間距離 (= $2 \cdot x_0 + t_p$), I_b : 綴り材の断面2次モーメント (= $3.6 \times 10^6 \text{mm}^4$) である。

(8)式でたわみを用いて, (7)式に代入すると, ボルトピッチ, l_p を変数とする組立材曲げ剛性 ϵI_y が算定できる。表3には, これらの算定結果を示している。

これらの結果から, 以下のことが分かる。

- 1) エンドプレートの有無で弱軸曲げ剛性は殆ど変化しない。
- 2) ボルトピッチを長くすると, 弱軸曲げ剛性は低下し, 断面の法線を保持すると仮定した場合と比べて, l_p

=400mmで2割, $l_p=800$ mmで3割ほど低下する。

- 3) 算定式は, 実験値との対応は十分とはいえない。

4.2 横座屈試験装置の検定

加力装置の境界条件を検定するために行った等曲げ横座屈試験 (実験Ⅱ) の結果を図12, 表4, 図13に示す。

図12には, 等曲げ時における試験区間長さ, l_b と横座屈基準曲げ耐力, M_{cr} ^{注1)}の関係を示す。併せて, 同図には, 全塑性モーメント, 降伏曲げモーメントの0.6倍, $0.6M_p$, $0.6M_y$ の直線と, (a)図には $k l_b = l_b$, $C_b = 1.0$ とし, (1)式から算定した弾性横座屈耐力, M_e と l_b との関係を示す。

表4には, 実験から求めた横座屈基準曲げ耐力, M_{cr} ^{注1)}, $k l_b = l_b$, $C_b = 1.0$ とした(1)式から求めた弾性横座屈曲げ耐力, M_e を示す。

図13には, 曲げモーメント, M と支持点回転角, θ との関係, 曲げモーメント, M と試験体中央断面上フランジ左右端面におけるとの関係を, 各試験区間の場合の結果について示す。尚, 同図の $M-\theta$ 関係には, 強軸断面2次モーメント, I_x から求めた弾性曲げ剛性の直線と付録に示した4節点シェル要素を用いた有限要素法解析値を示している。

これらの図表より, 以下のことが分かる。

- 1) いずれの試験体も, $M-\theta$ 関係の初期曲げ剛性は, 強軸曲げ剛性に一致することから, 本加力装置, 計測方法によれば, 強軸曲げ剛性を十分な精度で把握できる。
- 2) 弾性範囲の横座屈曲げ耐力値は, 曲げモーメントと圧縮側フランジ両端面の歪との関係において, 両歪の値の差が急激に大きくなり, 一方の歪の進行が反転を始める時点で求められる。
- 3) 初期不整を1/1000程度とした有限要素法解析値は,

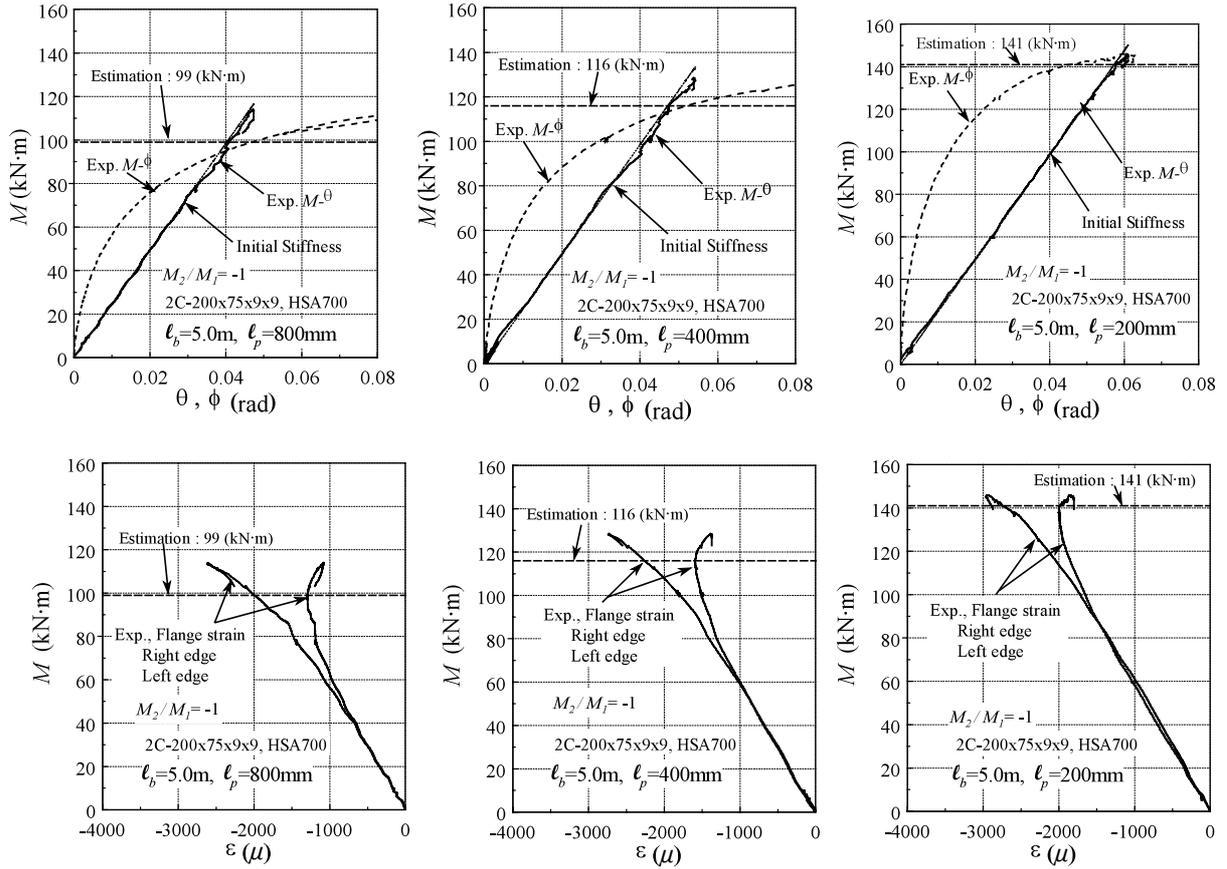


図 15 等曲げ横座屈試験結果 (HS4 試験体) (ボルトピッチの影響)

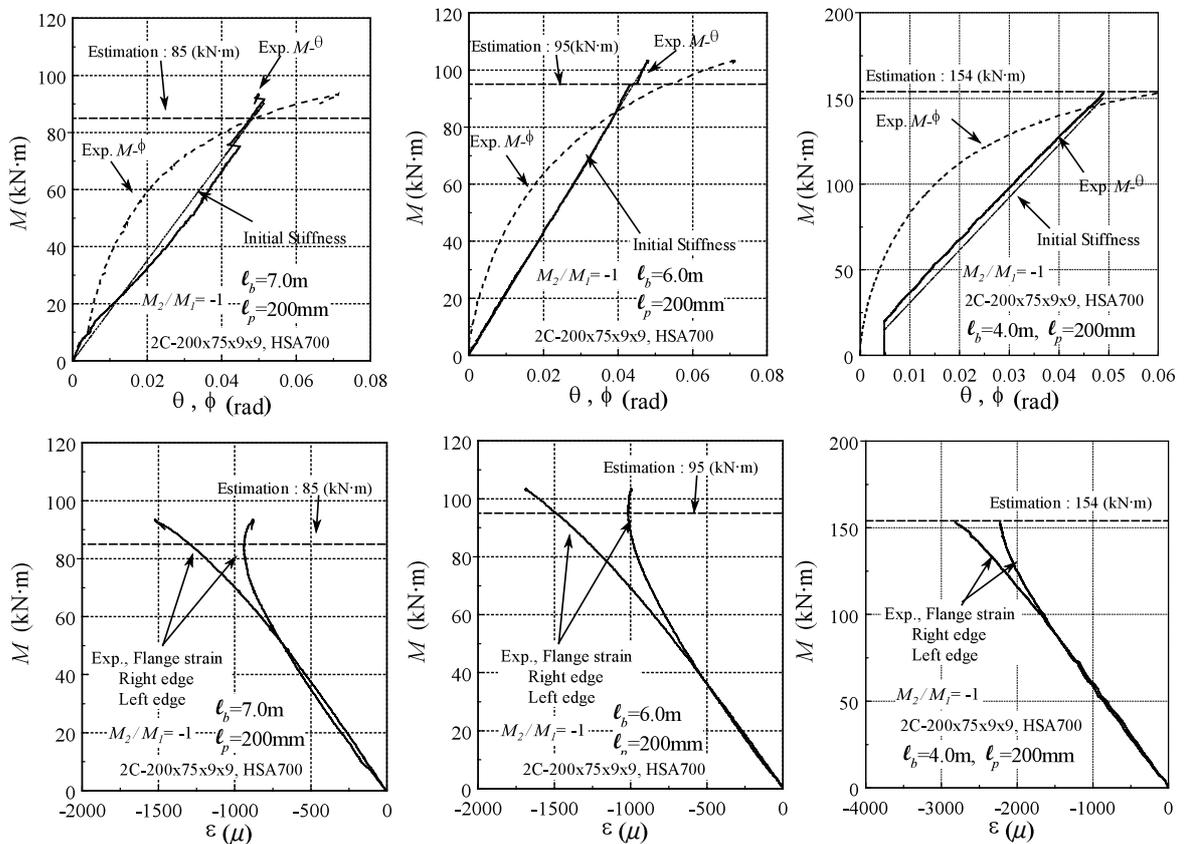


図 16 等曲げ横座屈試験結果 (HS3L, HS4 試験体) (支点間距離の影響)

ポストピークの挙動は実験値と異なるものの、初期曲げ剛性と最大曲げ耐力はほぼ一致する。

- 4) モーメント係数を 1.0 とした弾性座屈耐力評価式（両端横曲げ・ねじり単純支持等曲げ梁の理論式）から求められる耐力値は、実験における曲げ耐力値と良好に一致する。
- 5) 以上のことから、本加力装置は、両端横曲げ・ねじり単純支持条件をほぼ満足できる。

以上のことから、等曲げ時には、載荷点の構面外変形を拘束しないことにより支持点では、横曲げとねじりについて単純支持条件をほぼ満足できること、実験における横座屈の基準曲げ耐力値として上フランジ左右端面の歪の進行が反転する時点の曲げモーメント値が利用できることがわかる。

4.3 高強度鋼組立材の横座屈性状

前節までの結果から、本横座屈試験装置の載荷条件、境界条件が明確となった。また、横座屈耐力の1つの基準として、横座屈基準曲げ耐力（上フランジの左右端面の歪の進行が反転する時点の曲げモーメント値）が利用できることもわかった。本節では、この横座屈試験装置を用いて、高強度鋼組立材の等曲げ試験を実施し、実験結果を横座屈基準曲げ耐力を用いて整理して、その横座屈性状を究明する。

また、併せて(1)、(2)式の横座屈耐力評価式におけるそり拘束の影響を、横座屈長さ（ $k\ell_b$ 、曲げねじれに対する横座屈長さ）を変化させて考慮し、その感度も検討する。

最後に、本高強度鋼組立材に対する弾性横座屈耐力設計式の考察を行う。

高強度組立材の横座屈性状を調査する、等曲げ横座屈試験（実験Ⅲ）の結果を、図14～16、表5に示す。

図14は、試験区間長さ、 ℓ_b と横座屈基準曲げ耐力 M_{cr} （注1）の関係をボルtpitch、 ℓ_p が200mm、400mm、800mmとした場合について○と破線で示している。併せて、同図には全塑性モーメント、降伏曲げモーメントの0.6倍、 $0.6M_p$ 、 $0.6M_y$ の直線と、 $C_b=1.0$ とし(1)式を用い、 $k\ell_b=\ell_b$ とする場合と $k\ell_b=0.50\ell_b$ とする場合の評価式から得た、弾性横座屈曲げ耐力、 M_e と ℓ_b との関係を、ボルtpitch ℓ_p が200mm、800mmの場合について示している。

評価式では、弱軸回りの断面2次モーメントとしてボルtpitch、 ℓ_p が200mm、800mmに対応して、実験Ⅰの実験平均値、 $0.87 \cdot I_y$ 、 $0.73 \cdot I_y$ を採用している。

図15には、ボルtpitch、 ℓ_p および試験区間長さ、 ℓ_b の横座屈基準曲げ耐力に及ぼす影響を示すために、曲げモ

ーメント、 M と支持点回転角、 θ との関係、 M と中央ねじれ角、 ϕ との関係を、それぞれ、示す。

図20には、試験区間長さ、 ℓ_b と横座屈曲げ基準耐力 M_{cr} （注1）との関係をボルtpitch、 ℓ_p が200mmと800mmとした場合について示している。

表5には、実験Ⅲから求めた、横座屈基準曲げ耐力、 M_{cr} と $C_b=1.0$ として $k\ell_b=\ell_b$ で(1)式を用いた場合、 $k\ell_b=0.50\ell_b$ で(1)式を用いた場合の評価値を示す。

これらの結果から以下のことが分かる。

- 1) 初期からねじり角が生じるものの、曲げモーメント-支持点回転角関係において、剛性はほとんど変化しない。
- 2) ボルtpitchの横座屈基準曲げ耐力に及ぼす影響は大きい。
- 3) $k\ell_b=\ell_b$ 、 $C_b=1.0$ とし(1)式を用いた評価式はいずれのボルtpitchの場合についても、等曲げ試験結果から求めた横座屈基準曲げ耐 M_{cr} より低く評価する。
- 4) いずれの評価式も、ボルtpitchによる影響を実験値より低く評価する。
- 5) $\ell_b=4.0m$ 、 $5.0m$ の実験結果は、 $k\ell_b=\ell_b$ 、 $C_b=1.0$ とした評価式よりもかなり高い傾向にあり、 $k\ell_b=0.50\ell_b$ とした評価式に近い傾向を示すこと、試験体はHS4試験体で加力区間に板厚が2.7倍のものを接続していることから、そり拘束（ $\phi'=0$ ）の効果が生じている可能性がある。

以上のことから、実験で求めた横座屈基準曲げ耐力、 M_{cr} は、真の横座屈耐力より低いことが保証されるので、等曲げ時 $C_b=1.0$ として、実測した弱軸曲げ剛性を用いた(1)式によれば、 $0.6M_y$ 以下の範囲において、高強度鋼組立材の横座屈耐力を安全側に評価できる。

5. まとめ

高強度鋼乾式組立材について、ボルtpitchを実験変数として弱軸3点曲げ試験、等曲げ弾性横座屈試験を行った。併せて、横座屈試験装置の精度も検定した。得られた知見は、以下のように要約できる。

弱軸3点曲げ試験から、

- 1) ボルtpitchを長くすると、弱軸曲げ剛性は、法線保持を仮定した算定値と比べて低下する。
横座屈試験装置の検定結果から
- 2) H形鋼梁については、横曲げねじり単純支持等曲げ梁の理論解と実験における最大曲げ耐力とが良好に一致する。
- 3) 本装置は、試験体の断面が均一であれば、試験区間

の両端で、横曲げとねじりについて単純支持の条件をほぼ満足する。

- 4) 中央のフランジ左右端面の歪の進行が反転する時点の曲げモーメント実験値（横座屈基準曲げ耐力）は、(1)式的设计式と良好に一致する。

高強度鋼組立材の横座屈試験より

- 5) ボルトピッチの横座屈基準曲げ耐力値に及ぼす影響は大きい。
 6) 等曲げ時においては、 $C_b = 1.0$ 、 $i\ell_b = \ell_b$ として、実測した弱軸曲げ剛性を用いた(1)式によれば、 $0.6M_y$ 以下の範囲において、高強度鋼組立材の横座屈耐力を安全側に評価できる。

注

- 注1) 実験における横座屈曲げ耐力として、以降の考察から、上フランジ左右端面のひずみのうち1つのひずみの進行が反転した時点における値を採用している。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 技報堂, 2002.9.
- 2) 鈴木敏郎, 木村祥裕, ラーメン架構におけるH形鋼梁の横座屈長さ, 日本建築学会構造系論文集, 第521号, pp.127-132, 1997.7.
- 3) Galambos, T.V., 福本嘯士, 西野文雄 共訳, 鋼構造部材と骨組－強度と設計－, 丸善, pp.24-68, 1970.
- 4) Lue, D.M., Liu, J., Liu, C., Numerical evaluation on warping constants of general cold-formed steel open sections, Steel structures, Vol.7, pp.297-309, 2007.
- 5) Timoshenko, S.P., Gere, J.M., Theory of elastic stability, Second edition, McGraw-Hill, 1959