

鉄骨充腹ばりの横座屈に関する研究（その 2）

——プラスチック模型を用いた弾性実験——

若 林 実・中 村 武
小 柳 博 義・沢 田 博

STUDIES ON LATERAL BUCKLING OF WIDE FLANGE BEAMS, Report NO. 2

——ELASTIC BUCKLING TESTS USING PLASTICS MODELS——

By Minoru WAKABAYASHI, Takeshi NAKAMURA
Hiroyoshi KOYANAGI and Hiroshi SAWADA

Synopsis

Elastic buckling tests of H-shaped beams were conducted using plastics miniature models. Test specimens were made of an Acrylite sheet with 2 mm thickness. The effects of bending moment gradient on the lateral buckling strength of a beam were examined experimentally for three testing span lengths and three end-moment ratios. Numerical studies were performed by means of finite difference method in order to obtain the lateral buckling load of the beam. Experimental buckling loads were compared with the calculated values by the present authors and other investigators. The lateral force exerted by the bracings was about 1~5% of the compression resultant force by bending moment in the beam cross-section.

1. 序

はりの横座屈現象は、鉄骨構造物のはりの耐力を決める要素としては、最も重要である。しかしその研究は、材の弾性範囲を対象とした場合には、材長に沿った任意の曲げモーメント分布を考慮した解析、あるいははりの中間に種々の横座屈に対する補剛材を設置した場合の解析など材の横座屈荷重を求めるための解析も充分であるとはいえない。また材の非弾性域においては、材の塑性設計を対象とした、横方向補剛材に必要な諸性質、設置間隔、これらに及ぼす曲げモーメント分布の影響など明らかにされなくてはならないことは多い。昭和 44 年度年報に報告した（その 1）¹⁾では、材の非弾性部分に対する基礎的実験として、横方向補剛材の剛性がほとんど剛に近い場合についての、横方向補剛間隔と横座屈モーメント、横座屈後耐力低下を起さずに可能なはりとしての回転量との関係、これに及ぼす曲げモーメント勾配の影響、横座屈に伴って横方向補剛材に生ずる力の大きさなどを調べた。これに対し、本報では材が完全に弾性の範囲での横座屈現象における、横方向補剛間隔と横座屈モーメントとの関係、これに及ぼす曲げモーメント勾配の影響、横方向補剛材に働く補剛力を、プラスチック模型を用いた実験により調べたものを報告する。同時に種々の曲げモーメント分布をもつ両端で単純支持されたはりの横座屈モーメントおよび中間に 2 点の軸方向には剛で、水平面内には回転自由な横方向補剛材をもつはりの横座屈モーメントを差分法により数値解析したので略述する。

2. 実験計画

ここで計画する実験は材の弾性範囲内での横座屈実験である。試験体の不可避の不完全性あるいは荷重の偏心などによって完全な分岐荷重としての横座屈荷重を得ることはできないので、試験体の横方向変位は最初から徐々に生じ、ある点から急激に大きくなるが、横変位の増大に従って荷重も徐々に上昇を続ける。横座屈荷重は横方向変位無限大での極限荷重として求まることとなるので、実験的に横座屈荷重を求めるためには Southwell の方法等を適用する必要がある。そこで試験体の材料的な性質としては、試験体の製作のしやすいもの、弾性係数に比して比例応力が大きく横座屈後の横変位がある程度大きくなって材料は完全弾性の範囲にとどまり、変位測定も比較的簡単に行なえるもの、荷重を重錘で与えることを考えると横座屈荷重があまり大きくならないもの、すなわち弾性係数があまり大きくないものが都合よい。この実験では試験体模型製作材料としてメタアクリル系合成樹脂アクリライトを選んだ。この材料の物理的諸性質は筆者らによって、過去に調べられている²⁾。

実験計画としては、試験スパン長を 3 種類、曲げモーメント分布を直線分布のもの 3 種類について実験することとした。荷重は試験スパン両側に張出した長さ 15 cm の載荷スパン先端に重錘によって与えることとした。試験体は鉛直面内、水平面内に単純支持とした。載荷点、支持点には試験体の横方向変位を拘束する横方向補剛材を設けた。横方向補剛材の軸方向剛性は剛に近いと考えられるものである。

3. 実験方法

3.1 試験体の製作および形状、寸法

試験体の形状としては H 形断面を選んだ。試験体の製作方法を略述すると、アクリライトの厚さ 2 mm の板より幅 15 mm および 26 mm 長さ 1200 mm の帯板を切り出し、この幅 15 mm の板を H 形断面のフランジに、幅 26 mm の板がウェブになるように組立て、その接点を連続接着した。フランジとウェブの接着は接着剤アルダイトにより隅肉溶接の要領で行なった。試験体は材の弾性範囲内で実験を行なうので、同一長の Series では各モーメント勾配に対して同一の試験体を繰返して使用した。試験体の断面形を Fig. 1 に、各試験体の実測寸法および断面諸量を Table. 1 に示す。

3.2 実験装置

実験装置の概略を Fig. 2, Photo. 1 に示す。木製反力盤の上に支点装置および載荷点、支点に設けた横方向補剛材のガイド板を任意の位置に設置できるように設計した。試験体の載荷点および支点位置に取り付けた横方向補剛材の概略を Fig. 3 に示す。この補剛材もアクリライトにより製作した。補剛材にはワイヤ

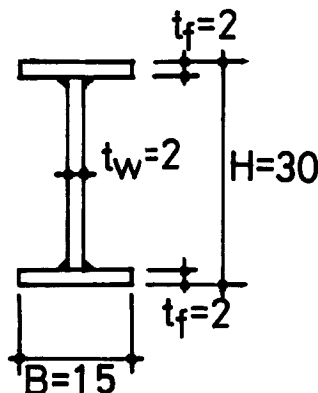


Fig. 1 Test specimen.

Table 1 Dimensions of test specimens.

	PM-60 Series	PM-75 Series	PM-89 Series
L (cm)	60.0	75.0	89.0
H (cm)	3.14	3.17	3.16
B (cm)	1.56	1.57	1.56
t_f (cm)	0.233	0.233	0.228
t_w (cm)	0.214	0.204	0.203
I_y (cm ⁴)	0.145	0.149	0.142
J_d (cm ⁴)	0.0227	0.0216	0.0205
C_M (cm ⁶)	0.312	0.325	0.310
E (kg/cm ²)	3.29×10 ⁴ (from deflection), 3.88×10 ⁴ (from W.S.G.)		
ν	0.38		

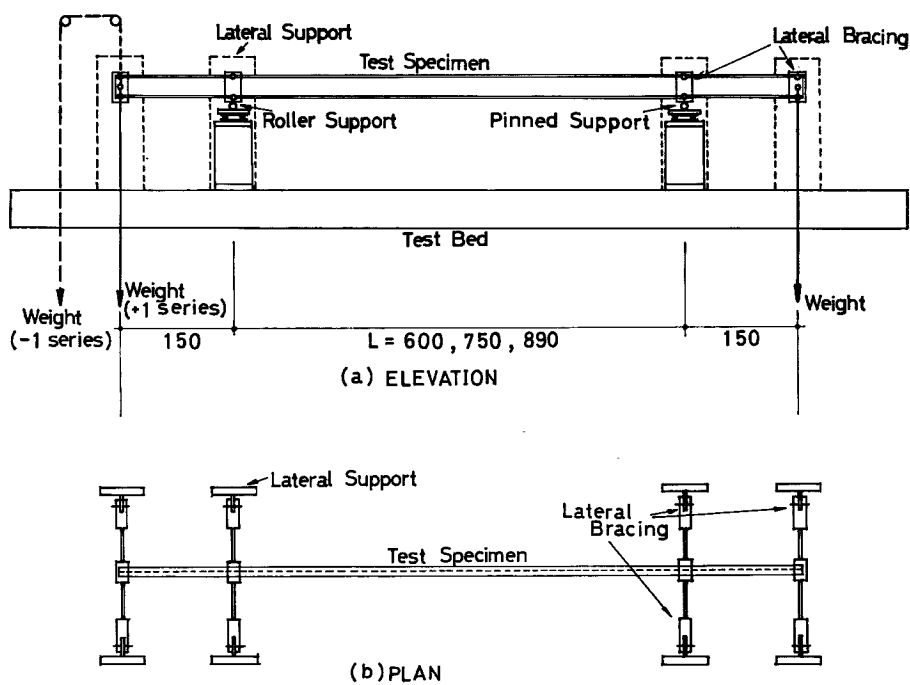


Fig. 2 Test set-up.

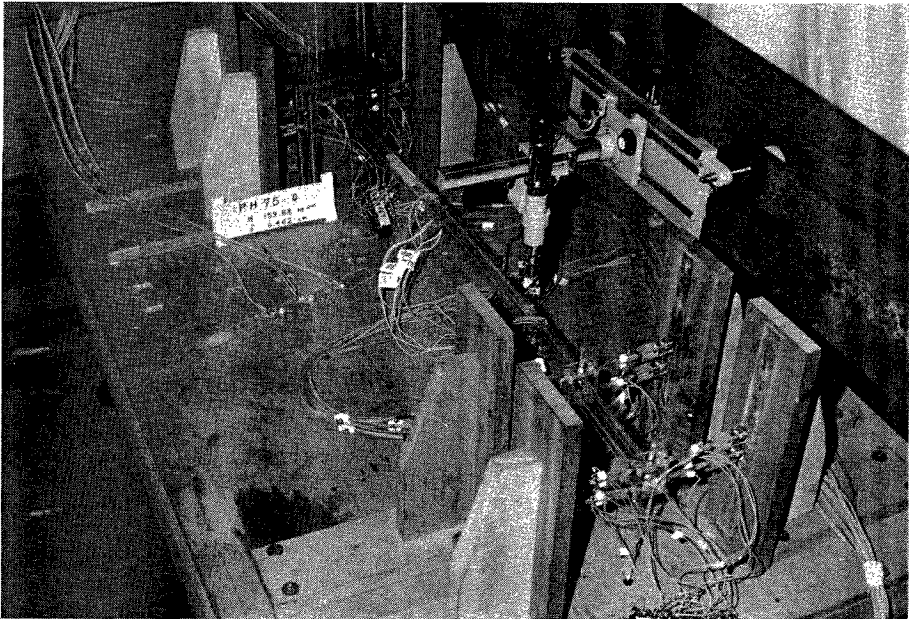


Photo. 1 Test apparatus.

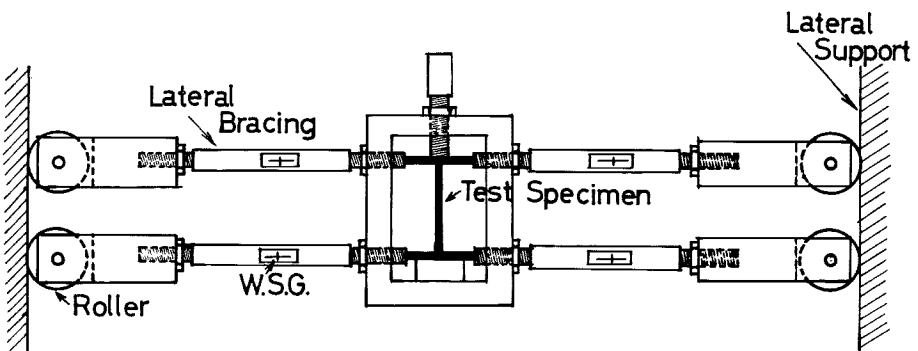


Fig. 3 Lateral bracing arrangement.

・ストレイン・ゲージ (W. S. G.) を貼付して横座屈に伴って横方向補剛材に生ずる補剛力を測定した。横方向補剛材は試験体の鉛直変位に連動して抵抗なく上下移動をすることが可能なように、先端にはボールベアリング型鋼製軸受けを取り付けた。試験体の支点は鉛直面内、水平面内に単純支持となるように、鋼と棒、鋼製ベアリングを用いた。載荷は重錘を張出しスパン先端に順次負荷することによって行なった。載荷方向を Fig. 4 に示す。載荷点では試験体の断面せん断中心に鉛直方向に荷重が加わるように、ウェブ中心に孔をあけ鋼棒を通し、細鋼線を介して重錘を吊るした。荷重の秤量はバネ計りによった。試験体の横方向変位は読取り顕微鏡で測定した。

3.3 実験方法

試験体のセットの順序を略述すると、まず横方向補剛材を試験体の所定の位置に取付ける。次に試験体を

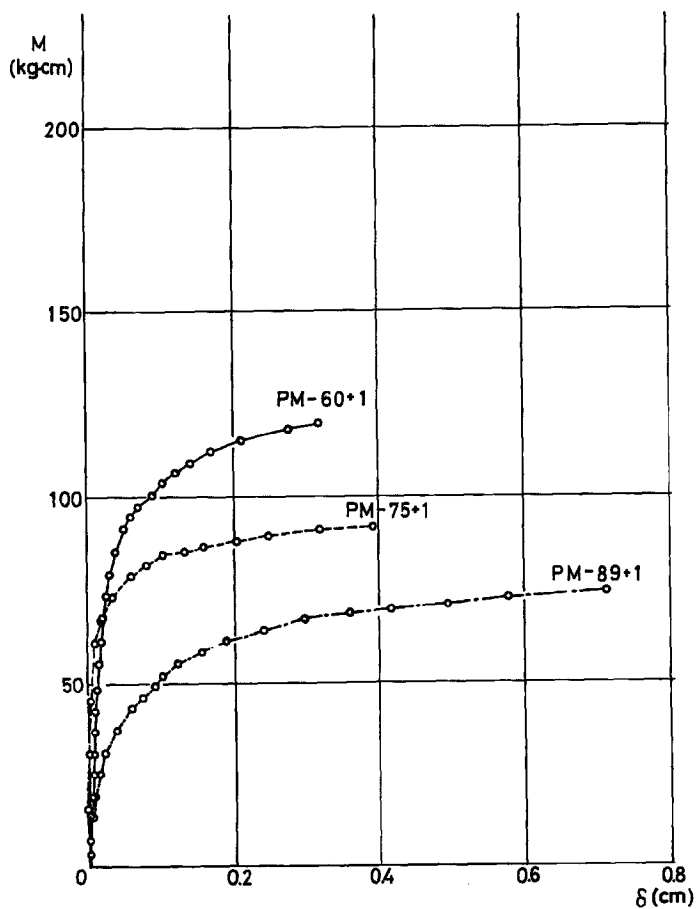
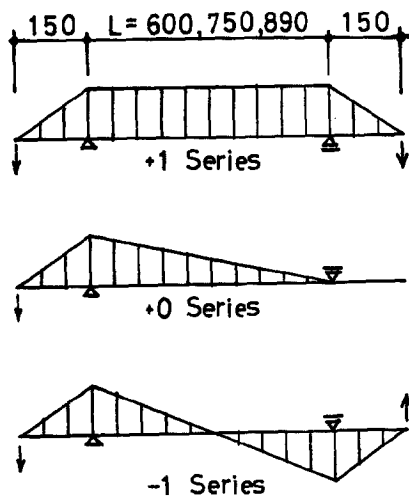


Fig. 5 (a) Bending moment vs. lateral deflection. (+1 Series)

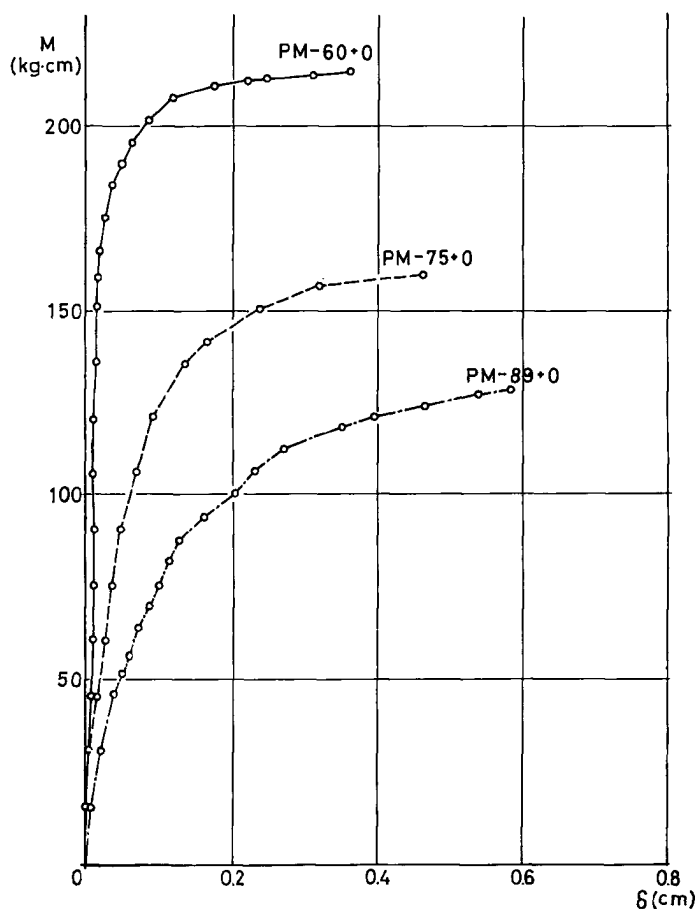


Fig. 5 (b) Bending moment vs. lateral deflection. (+0 Series)

支点の上に設置し、横方向補剛材のガイド板を試験体の両側から、試験体の鉛直方向変位を妨げないように調整を行ないながら設置、固定する。載荷は 1 kg および 200 g の重錘によった。横方向変位が増大する最終荷重段階付近では 1 g 重錘をも併用した。各変形量の測定はアクリライトのクリープ性状を考慮して、載荷作業完了後 3 分間が経過して後に開始した。これは過去の研究結果²⁾に基づくものである。

4. 実験結果

実験によって得られた曲げモーメントと横方向変位の関係を Figs. 5 (a)~(c) に示す。図に示されるように、横方向変位が増大するに従って、荷重も徐々に増大する。ここでは実験値より横座屈モーメント M_{cr} を求めるために Southwell の方法を拡張した方法を用いた。その一例を Fig. 6 に示す。横座屈モーメント M_{cr} は図中の直線の勾配の逆数より求めた。次に支点位置に設置した横方向補剛材に貼付したワイヤ・ストレイン・ゲージによって得られた横方向補剛力を Fig. 7 に示す。図中に試験体に作用する曲げモーメントによって試験体断面内に生ずる曲げ圧縮合力に対する横方向補剛力の割合を百分率で示す直線を同時に記入した。

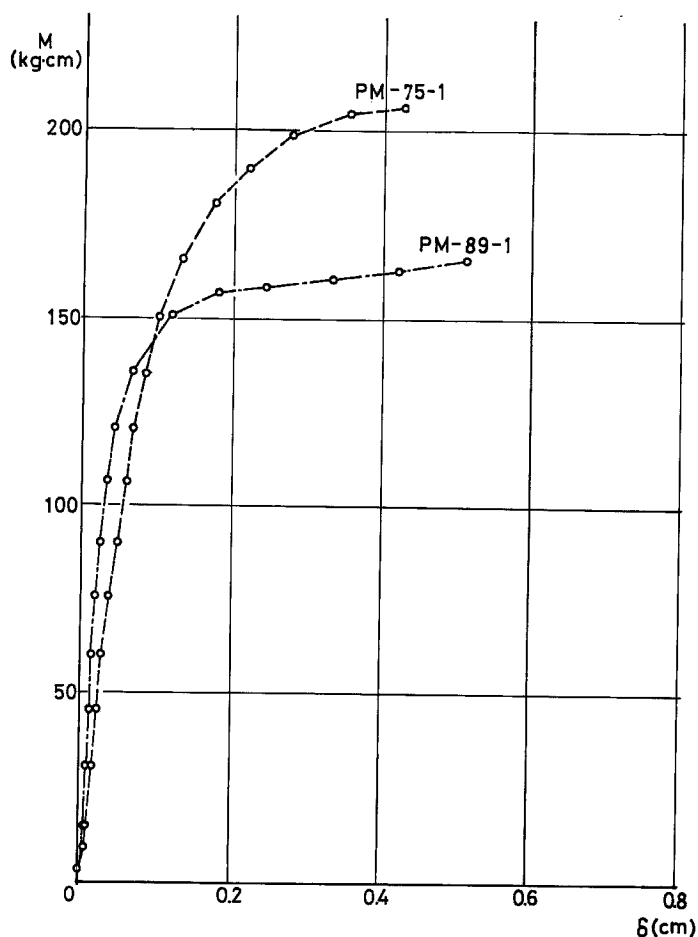


Fig. 5 (c) Bending moment vs. lateral deflection. (-1 Series)

5. 数 値 解 析

実験と同時に、任意の曲げモーメント分布をもつH形断面はりの横座屈荷重を求めるための数値解析を試みたのでその概要を述べる。

一般に任意の曲げモーメントがはりの長さ方向に沿って分布する場合、あるいははりの中間に支点または横方向補剛点がある場合には、その横座屈荷重は解析的な解としては求まらない。そこで何んらかの近似解法が必要となる。過去に多くの研究者が、主としてエネルギー法を適用することによって、単純ばりに直線的に分布する曲げモーメントが作用した場合および中間に横補剛材がある場合数例について近似的な解を得ている^{9)~10)}。ここでは近似解を得るために、電子計算機によって比較的機械的に計算を行ない易い差分法を適用した。行なった解析は2種類で、一つは一般に鉄骨充腹ばりとして用いられることの多い、H形鋼の細幅および中幅系列のものについて、これが両端で単純支持され、任意の曲げモーメント分布をうける場合の横座屈荷重を求める解析で、他方は、ここで行なった実験に対応したもので、載荷スパンおよび試験スパン内で直線的に変化する曲げモーメントをうけ、支点、載荷点で上下フランジとも軸方向には完全に剛で、水平面内には回転自由な横方向補剛材とめられている場合の解析である。これは両端で単純支持されたH形

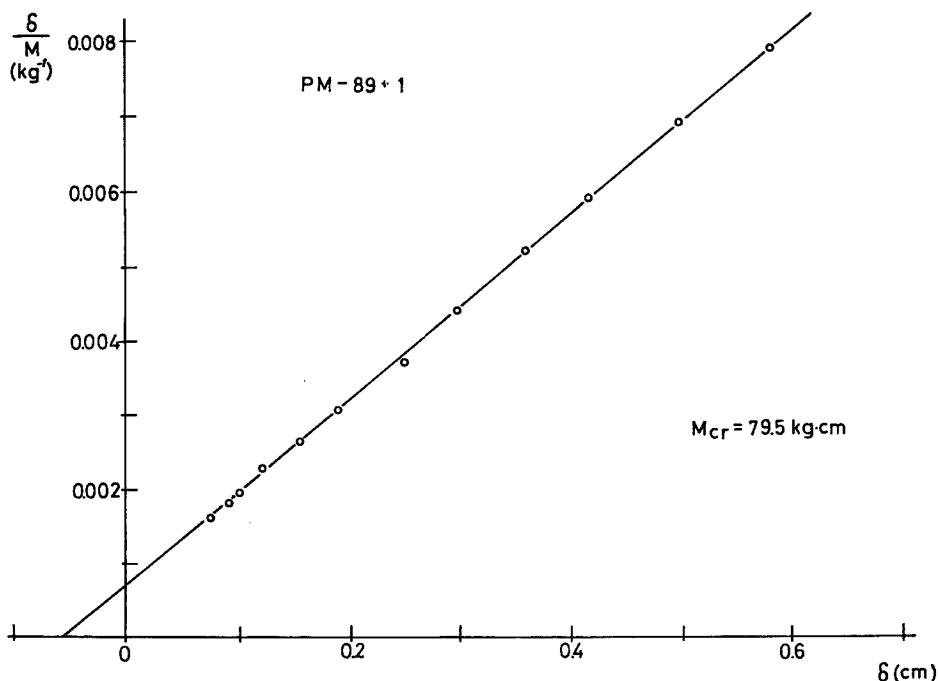


Fig. 6 Modified Southwell's method.

断面はりが任意の曲げモーメントをうけ、中間の 2 点で横方向に補剛されたはりの横座屈荷重を求めるのにも適用できる。

はりスパン内の各点で成立する釣合微分方程式は多くの文献に掲げられている通りであるから^{11), 12)}, ここでは結果だけ示す。

弱軸まわりモーメントの釣合

$$EI_y \xi''' + (M\varphi)'' = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

振りモーメントの釣合

$$EC_M \varphi''' - GJ_0 \varphi'' + M\xi'' - p v_M \varphi = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この (2) 式を差分表示した上で、はりの長さ方向に沿って区分した差分点の各点で成立させる。本解析で用いた差分点の区分法は、両端で単純支持された H 形鋼はりではスパン内で 16 等分であり、実験に用いた試験体の場合には、両側張出し載荷スパン部ではそれぞれ 8 等分、試験スパン内では 15 区分である。また単純支持の材端条件および中間横方向補剛点での条件は、

単純支持の材端では、

$$\xi = \varphi = \xi' = \varphi'' = 0, \text{ at } x = 0, L \quad \dots\dots\dots (3)$$

はり中間の横方向補剛点では、補剛点 (O) をはさむ左側の材 (l) と右側の材 (r) で、

$${}_r \xi_0 = {}_l \xi_0 = {}_r \varphi_0 = {}_l \varphi_0 = 0, \text{ at O} \quad \dots\dots\dots (4. a)$$

$${}_r \xi'_0 = {}_l \xi'_0, \quad {}_r \varphi'_0 = {}_l \varphi'_0, \quad \text{at O} \quad \dots\dots\dots (4. b)$$

$${}_r \xi''_0 = {}_l \xi''_0, \quad {}_r \varphi''_0 = {}_l \varphi''_0, \quad \text{at O} \quad \dots\dots\dots (4. c)$$

である。

なお両材端および横方向補剛点では (1) (2) 式は適用しない。これで各点で立てた釣合式と未知数 ξ_i, φ_i との数が等しくなり ξ_i, φ_i に関する多元連立一次方程式ができ、 ξ_i, φ_i が同時に零でない解をもつ条件とし

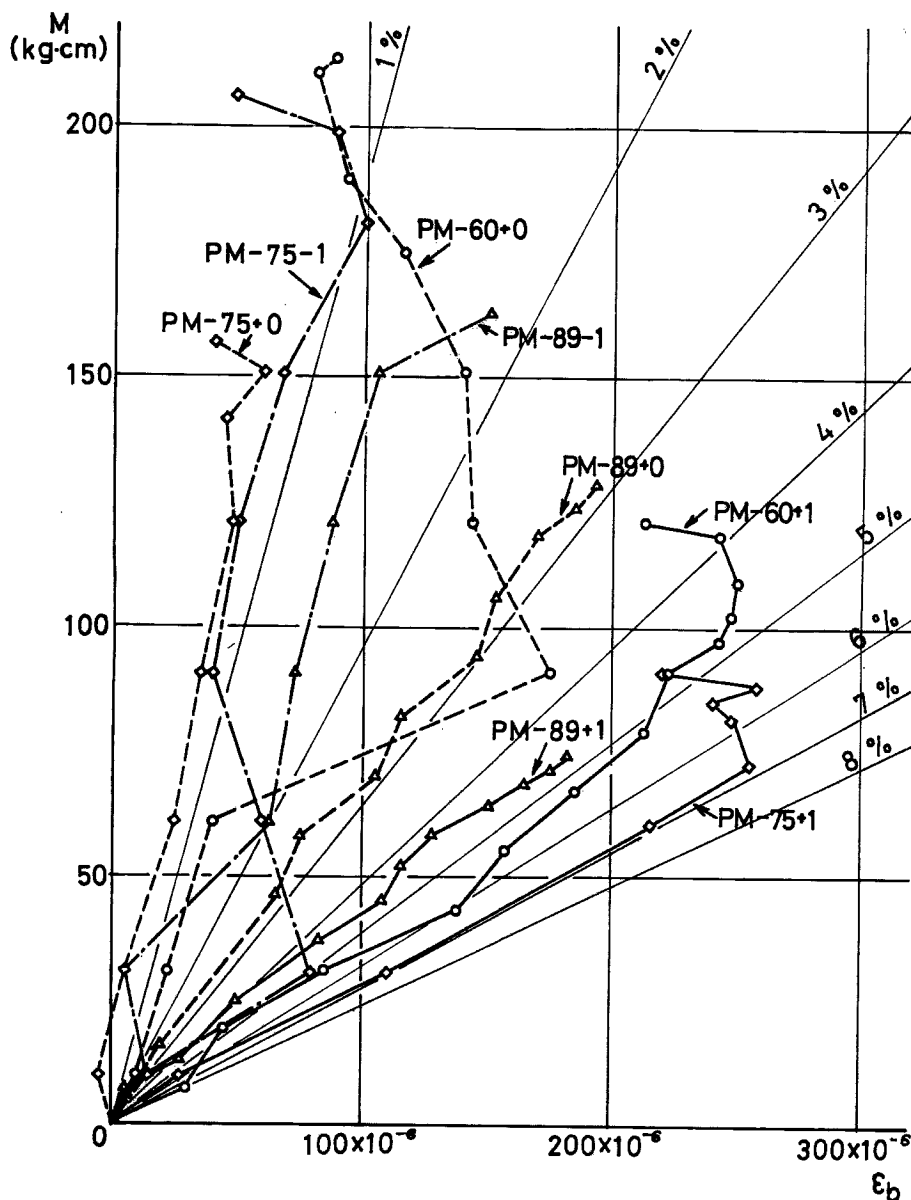


Fig. 7 Bending moment vs. bracing force.

て、座屈条件式が求まる。この座屈条件式により試索法で座屈荷重を求めた。

両端で単純支持されたH形鋼はりにおける、直線的分布する曲げモーメントの勾配 (α) による横座屈荷重の修正係数 (c) の変化を Fig. 8 に示す。ここで修正係数 c は曲げモーメントに勾配のない場合の横座屈荷重と任意の曲げモーメント勾配のある時の横座屈荷重との比である。なお同図中の○印は、ここで行なった実験によって得られた値を記入したもので、実験では載荷張出しスパンがあるので解析での材端条件とは異なるが、曲げモーメント勾配による横座屈荷重の変化をみるために試みに記入したものである。

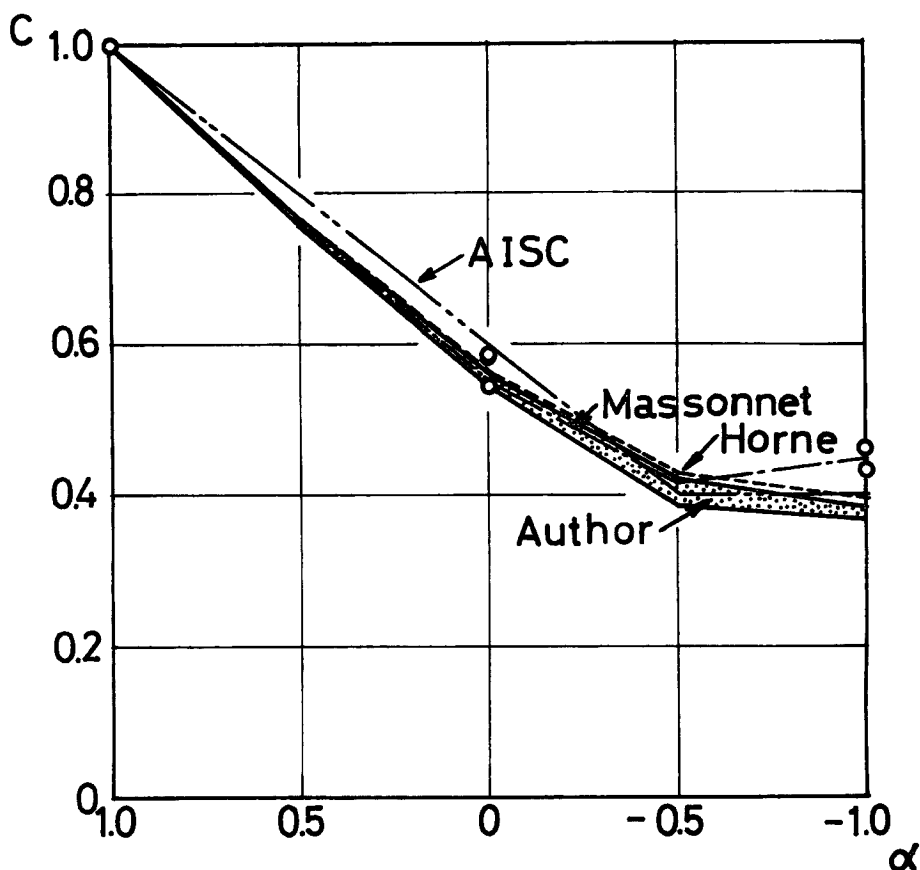


Fig. 8 Coefficient of lateral buckling strength (c) vs. end-moment ratio (α).

6. ま と め

ここで行なった実験より得られた結果および数値解析の結果をまとめてみると、

(1) 両端で単純支持されたH形断面はりに、はりの材長に沿って直線的に変化する曲げモーメントが加った場合の横座屈モーメントを評価する係数 c は図-8に示した通りどの解析によっても大きく変化していないから、実際設計上はAISC規準に示されるような簡単な式で示してもさしつかえなく、むしろ使いよいようである。

(2) はりの横座屈に伴って横方向補剛材に生ずる軸方向力は、はりに働く曲げモーメントによって断面内に生ずる圧縮合力の約1~5%の値を得ているが、この力の評価は実際技術的に非常な困難さを含んでいるので、今後も載荷法、横方向補剛材取り付け方法、横方向補剛材支持方法等に改良を加えて、なお多くの実験データを得なければならないと考える。

参 考 文 献

- 1) 若林 実・中村 武・山本春樹：鉄骨充腹ばりの横座屈に関する研究（その1），京都大学防災研究所年報，第13号A，昭45. 3, pp. 365-380.
- 2) 若林 実・野中泰二郎・中村 武：プラスチックを用いた模型実験に関する基礎的研究（その1），

- 京都大学防災研究所年報, 第 10 号 A, 昭 42. 3, pp. 451-465.
- 3) Johnston, B. G.: Column Research Council-Guide to Design Criteria for Metal Compression Members, 2nd. Ed., 1966, pp. 163-164.
 - 4) Horne, M. R.: The Flexural-Torsional Buckling of Members of Symmetrical I-Section under Combined Thrust and Unequal Terminal Moments, Quart. Jour. Mech. and Appl. Math., Vol. VII, Pt. 4, 1954, pp. 410-426.
 - 5) Horne, M. R.: The Stanchion Problem in Frame Structures Designed According to Ultimate Carrying Capacity, Proc. Inst. Civ. Engrs., Vol. 5, No. 1, Part III, April, 1956, pp. 105-160.
 - 6) Salvadori, M. G.: Lateral Buckling of I-Beams, Transactions ASCE, Vol. 120 1955, pp. 1165-1182.
 - 7) Salvadori, M. G.: Lateral Buckling of Eccentrically Loaded I-Columns, Proc. ASCE, Separate No. 607, Vol. 81, January, 1955, pp. 607-1—607-22.
 - 8) 鈴木敏郎：拘束された部材の横座屈（1. 座屈拘束とその効果），日本建築学会論文報告集，No. 65, 昭 35. 6, pp. 54-59.
 - 9) 藤本盛久・鈴木 寛：連続拘束をうける H 断面ばりの横座屈，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），昭 43. 10, pp. 961-962.
 - 10) 藤本盛久：端モーメントと等分布荷重をうける連続拘束された鉄骨 H 形断面梁の横座屈について，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），昭 44. 8, pp. 1029-1030.
 - 11) Kollbrunner, C. F. and M. Meister: Knicken, Biegedrillknicken, Kippen, 1961, pp. 170-181.
 - 12) Timoshenko, S. P. and J. M. Gere: Theory of Elastic Stability, 2nd Ed., 1961, pp. 251-277.