

一定鉛直荷重と複曲率曲げを受けるH形鋼柱の変形性状 及び塑性変形能力に関する実験的研究

三谷 勲・林原光司郎*・今門 一弘**
(受理 昭和60年5月31日)

ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR AND PLASTIC ROTATION CAPACITY OF H-SHAPED STEEL BEAM-COLUMNS SUBJECTED TO UNEQUAL END-MOMENT UNDER CONSTANT VERTICAL LOAD

Isao MITANI, Koshiro HAYASHIHARA* and Kazuhiro IMAKADO**

The wide-flange steel beam-columns were tested under constant vertical load and unequal end-moment. Experimental variables were end-moment ratio $\rho(=M_2/M_1, M_2, M_1 = \text{bending moment at the lateral supports, } |M_2| < |M_1|)$, axial load ratio $n(=N/N_y, N = \text{constant vertical load, } N_y = \text{yield axial load})$, and lateral slenderness ratio $\ell_b/i_y(\ell_b = \text{distance between lateral supports, } i_y = \text{radius of gyration of a cross section about weak axis})$. The selected values of $\rho, n, \ell_b/i_y$ were as follows; $\rho=0, -0.4, -0.8, n=0, 0.15, 0.3, 0.6, \ell_b/i_y=45, 60, 75, 90, 105$. Based on the experimental results, the effects of $\rho, n, \ell_b/i_y$ to the elastic-plastic behavior and plastic rotation capacity of H-shaped beam-columns were discussed.

1. 序

鋼構造建築物の耐震安全性あるいは塑性設計法への適用性と関連して、H形鋼柱あるいははりの塑性変形性状に関する研究が数多く行われ、H形鋼部材の塑性変形能力あるいは耐力とこれらに關係する諸要因(板要素の幅厚比、横補剛間隔、両材端に作用する曲げモーメントの比率、材端の支持条件、軸力比、鋼材質等)との關係が定量的に明らかにされつつある¹⁾。

筆者は牧野博士らと協同して、局部座屈を伴うH形鋼柱の変形性状を実験的に調べ、実験結果に基づき、i)フランジ幅厚比、ii)ウェブ幅厚比、iii)鋼材の降伏応力度、iv)軸力比、v)横補剛支点間長さ、vi)両材端に作用する曲げモーメントの比率、vii)材端の支持条件、を変数とした塑性変形能力評価式を提案した²⁾。しかしこの実験ではi)~iv)を変数として採用したため、v)~vii)については評価式の適用範囲の検討が不

充分であった。また、軸力比 n については $n=0 \sim 0.3$ の間で塑性変形能力の変動が大きく、 $n > 0.3$ の範囲では変動が少ないことが認められたが、 $0 < n < 0.3$ の範囲の資料を得ていなかったので、 $n=0$ の場合と $n=0.3$ の場合について評価式を示した。

局部座屈を伴うH形鋼柱の変形性状は降伏線理論に基づく極限解析により追跡することができる³⁾。しかし横補剛支点間長さが短くない限り、H形鋼柱は局部座屈後構面外変形を伴って耐力が低下する。従って一般の柱材の耐力低下域での挙動を極限解析で追跡するためには、局部座屈及び構面外変形が可能な解析モデル(崩壊機構)を仮定する必要がある。

本実験は前記要因のうちiv)~vi)がH形鋼柱の塑性変形能力に及ぼす影響を定量的に明らかにすること、及び極限解析結果と比較するための実験曲線を得ることを目的としている。

本論では実験結果に基づき、曲げモーメント比、軸

*川鉄建材工業(株) **世紀東急工業(株)

力比, および横補剛間隔が H 形鋼柱の変形状なら
びに塑性変形能力に及ぼす影響を論ずる。

2. 実験

2.1 実験計画

両材端に作用する曲げモーメントの比率
 $\rho=(M_2/M_1, M_2, M_1=$ 横補剛支点での曲げモーメント
で $|M_1|>|M_2|$, 一様曲げのとき $\rho=1$), 横補剛間
隔 $\ell_b/i_y \ell_b=$ 横補剛支点間距離, i_y 弱軸回りの断面
二次半径), および軸力比 $n=(N/N_y, N=$ 一定鉛直
荷重, $N_y=$ 全断面降伏軸力) が軽量 H 形鋼柱の変
形状及び塑性変形能力に及ぼす影響を調べる目的で

実験を計画した。

純ラーメン骨組に地震力等の水平力が作用するとき,
柱は一般に複曲率曲げを受けるので, ρ の値は負の範
囲で 0, -0.4, -0.8 を選んだ。 ℓ_b/i_y の値は非弾性
域で構面外変形が生ずると予想される範囲で, 45, 60,
75, 90, および 105 を選んだ。 n の値は $n \leq 0.3$ を主
とし, 0, 0.15, 0.3, および 0.6 を選んだ。

冷間圧延鋼板を用いて製造される軽量形鋼の応力度
-ひずみ度曲線は, 熱間圧延鋼材の場合に比べ塑性流
れ域が少ない。鋼材の応力度-ひずみ度曲線が部材の
変形状に及ぼす影響を調べる目的で, 焼鈍処理を行
った試験体も数体加えた。

表1 実験条件(文献4の資料を含む)

Specimen name	L=ℓb (cm)	D (cm)	B (cm)	t _f (cm)	t _w (cm)	A (cm ²)	$\frac{b}{t_f} \sqrt{f_y}$	$\frac{D}{t_w} \sqrt{f_y}$	$\frac{\ell_b}{i_y}$	n	ρ	$\frac{\ell}{i_x}$	Steel
I-045-0-0	75	15.04	7.49	0.426	0.294	10.5	14.9	85.5	44.6	0.00	0.00	12.0	A
I-060-0-0	100	14.92	7.49	0.428	0.306	10.7	15.5	81.5	60.5	0.00	0.00	16.2	B
I-075-0-0	125	14.97	7.49	0.424	0.302	10.6	15.0	82.8	74.7	0.00	0.00	20.2	A
I-090-0-0	150	14.92	7.49	0.432	0.306	10.8	15.4	81.2	89.6	0.00	0.00	24.3	B
I-105-0-0	175	14.97	7.43	0.423	0.294	10.5	14.9	85.0	104.0	0.00	0.00	28.2	A
I-045-0-4	76	15.01	7.44	0.441	0.337	11.4	14.8	76.4	45.7	0.00	-0.38	8.8	C
I-060-0-4	96.5	15.04	7.55	0.437	0.338	11.4	15.1	76.4	58.1	0.00	-0.38	11.2	C
I-075-0-4	130	14.97	7.52	0.437	0.338	11.3	15.0	76.1	78.6	0.00	-0.41	15.2	C
I-090-0-4	153	14.97	7.51	0.437	0.338	11.3	15.0	76.1	92.7	0.00	-0.39	17.8	C
I-105-0-4	172.5	15.00	7.53	0.436	0.337	11.3	15.1	76.4	104.2	0.00	-0.39	20.1	C
I-045-0-8	75	14.95	7.46	0.427	0.290	10.5	15.3	82.2	44.6	0.00	-0.81	6.7	D
I-075-0-8	125	14.94	7.48	0.425	0.290	10.4	15.4	82.1	74.2	0.00	-0.80	11.2	D
I-105-0-8	175	14.94	7.49	0.425	0.290	10.4	15.5	82.1	103.7	0.00	-0.80	15.7	D
I-045-15-4	75	14.98	7.50	0.438	0.312	11.0	15.0	80.7	44.8	0.13	-0.40	8.7	E
I-060-15-4	100	15.03	7.51	0.440	0.312	11.0	15.0	82.2	59.5	0.13	-0.40	11.5	E
I-075-15-4	125	14.92	7.50	0.439	0.312	11.0	15.0	81.5	74.9	0.15	-0.40	14.5	E
I-090-15-4	150	15.03	7.52	0.438	0.312	11.0	14.9	82.2	89.2	0.14	-0.40	17.2	F
I-105-15-4	175	14.91	7.49	0.438	0.312	10.9	14.8	81.5	104.2	0.15	-0.39	20.3	F
I-045-30-4	75	15.00	7.47	0.440	0.312	11.0	14.9	82.1	44.9	0.26	-0.40	8.6	E
I-060-30-4	100	15.03	7.50	0.437	0.312	11.0	15.1	82.2	59.5	0.26	-0.40	11.5	E
I-075-30-4	125	14.98	7.49	0.438	0.312	11.0	15.0	81.9	74.7	0.30	-0.40	14.4	E
I-090-30-4	150	15.01	7.50	0.439	0.312	11.0	14.8	82.1	89.5	0.28	-0.40	17.3	F
I-105-30-4	175	14.90	7.49	0.439	0.312	11.0	14.8	81.5	104.2	0.30	-0.39	20.3	F
I-045-60-4	75	15.00	7.50	0.439	0.312	11.0	15.0	82.1	44.6	0.52	-0.40	8.6	E
I-060-60-4	100	14.91	7.50	0.438	0.312	11.0	15.0	81.5	59.5	0.52	-0.40	11.6	E
I-105-60-4	175	15.03	7.50	0.439	0.312	11.0	14.8	82.2	104.2	0.60	-0.39	20.1	F
I-045-30-0	75	15.03	7.50	0.439	0.312	11.0	14.7	80.7	44.6	0.30	0.00	12.1	G
I-075-30-0	125	14.93	7.48	0.439	0.312	11.0	14.7	80.2	74.9	0.31	0.00	20.3	G
I-105-30-0	175	14.99	7.49	0.438	0.312	11.0	14.8	80.3	104.8	0.31	0.00	28.3	G
I-045-30-8	75	15.03	7.51	0.438	0.312	11.0	14.8	80.7	44.6	0.31	-0.81	6.7	G
I-075-30-8	125	15.02	7.51	0.438	0.312	11.0	14.8	80.5	74.0	0.30	-0.80	11.2	G
I-105-30-8	175	15.01	7.50	0.438	0.312	11.0	14.8	80.5	104.8	0.30	-0.79	15.7	G
I-090-0-0-A	150	14.98	7.50	0.440	0.314	11.0	14.2	77.9	89.3	0.00	0.00	24.2	H
I-090-0-4-A	150	15.08	7.51	0.445	0.314	11.1	14.0	78.4	89.2	0.00	-0.40	17.2	H
I-090-30-4-A	150	15.14	7.46	0.437	0.314	11.0	14.2	78.8	90.5	0.30	-0.40	17.2	H
I-105-15-4-A	175	15.06	7.52	0.438	0.314	11.0	14.3	78.4	104.4	0.15	-0.39	20.1	H
I-105-30-0-A	175	15.01	7.53	0.438	0.333	11.3	14.5	80.2	105.4	0.30	0.00	28.4	I

L= 試験体長, $\ell_b=$ 横補剛支点間長, D= 断面せい, B= フランジ幅, $t_f=$ フランジ板厚, $t_w=$ ウェブ板厚,
A= 断面積, $b=B/2$, $\sigma_y=$ 降伏応力度 (t/cm^2), $i_x, i_y=$ それぞれ強軸及び弱軸回りの断面二次半径,
 $n=N/N_y$, N= 一定鉛直荷重, $N_y=$ 全断面降伏軸力, $\rho=M_2/M_1$, $M_2, M_1=$ 横補剛支点での曲げモーメント
($|M_1|>|M_2|$, 一様曲げのとき $\rho=1$), Steel=表2の鋼材番号と対応させている。

表1に実験条件を示す。試験体名 I- \square - \square - \square は各試験体の実験条件を表わし、 \square は l_b/i_y の概数、 \square は $n \times 100$ の概数、 \square は $\rho \times 10$ の絶対値の概数であり、末尾に A を付した試験体は焼鈍（600℃ 2時間保持、炉中冷却）を行ったものである。

2.2 試験体

試験体は図1中の○印の部分モデル化したもので

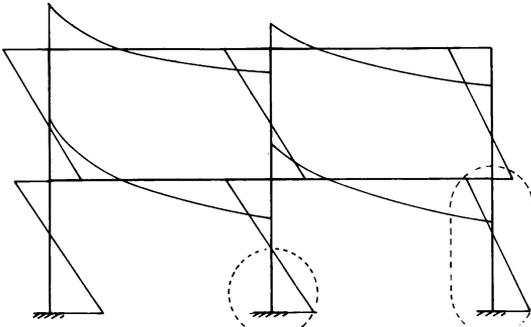


図1 水平力と鉛直荷重を受ける骨組の曲げモーメント分布

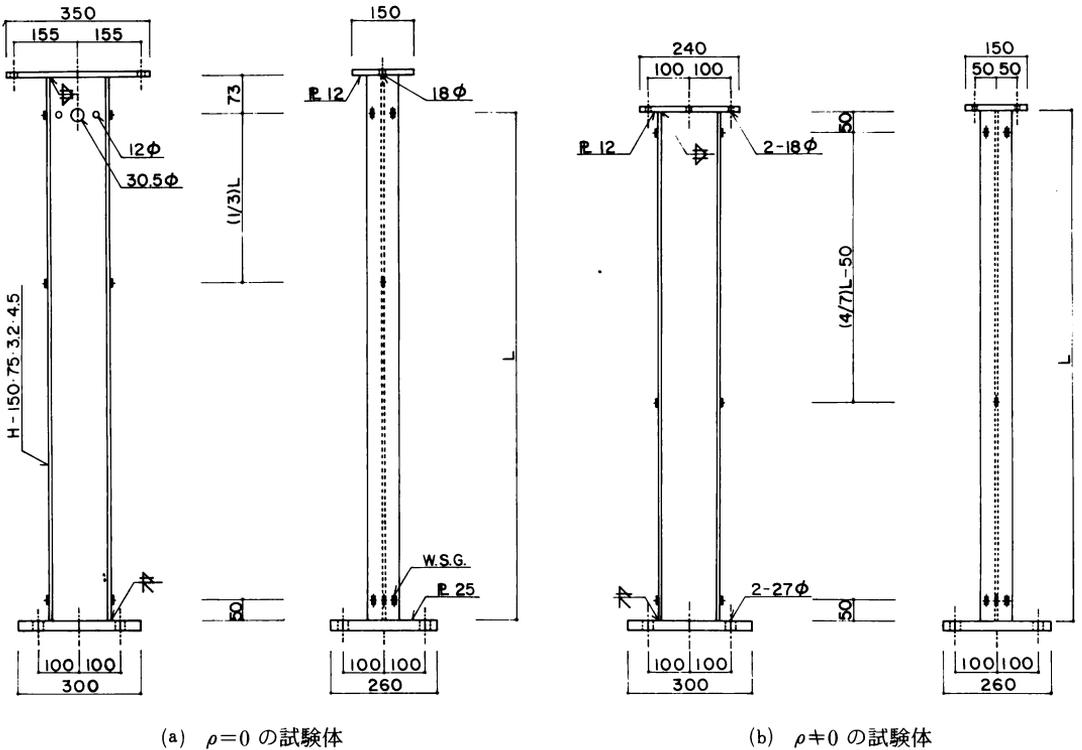
ある。その形状・寸法を図2(a), (b)に示す。全試験体とも試験部は市販の軽量H形鋼（H-150×75×3.2×4.5）を用いており、その材質はSWH41で、サーマツール高周波抵抗溶接により製造されている。

実験に使用した軽量H形鋼のフランジ幅厚比は約8.5、ウェブ幅厚比は約44で、塑性設計指針¹⁾に示される柱材の幅厚比制限値に近い。

試験体下端部には、試験体を加力装置に固定するためのベースプレート（P.25）が溶接されており、上端部には加力装置を取り付けるためのトッププレート（P.12）が溶接されている。なお炉の容量制限のため焼鈍試験体では最長60cmのH形鋼を焼鈍した後、溶接接合により図2(a), (b)に示す形状とした。但し同図には溶接接合位置を記入していない。

2.3 鋼材の機械的性質

試験体に使用したH形鋼より引張試験片および短柱試験片を採取し素材実験を行った。非焼鈍材の応力度 σ -ひずみ度 ϵ 曲線の例を図3に示す。実線はフランジ部、一点鎖線はウェブ部、破線は短柱の σ - ϵ



(a) $\rho=0$ の試験体

(b) $\rho \neq 0$ の試験体

図2 試験体の形状・寸法

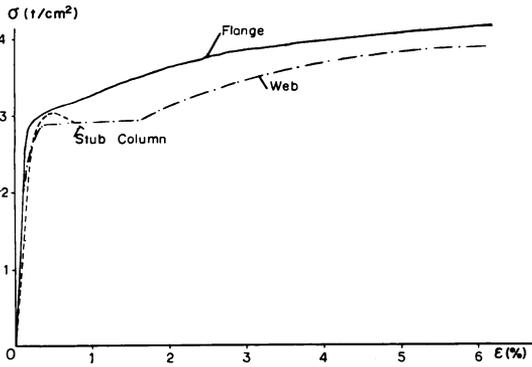


図3 鋼材の応力度—ひずみ度関係の例

曲線である。同図からわかるように、非焼鈍材のフランジでは塑性流れ域が認められず bi-linear 型に近い $\sigma-\epsilon$ 曲線となっている。この場合の降伏応力度は 0.2 % 残留ひずみ時の応力度を採用した。短柱圧縮試験では試験機耐圧盤間の相対変位を測定したため、めり込みなどによる変位も含まれている。実験結果を表 2 に示している。

表 2 鋼材の機械的性質

Steel	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ϵ_{st}/ϵ_y	ϵ_u (%)	E_{st}/E (%)
A flange	2.87	4.08	1.00	24.7	1.19
A web	2.79	4.41	1.00	26.4	1.48
B flange	3.15	4.61	1.00	25.5	1.81
B web	2.79	4.32	1.00	31.1	1.43
C flange	3.06	4.14	1.00	26.1	1.76
C web	2.95	4.31	1.00	28.8	2.14
D flange	3.08	4.56	1.00	23.4	1.86
D web	2.54	4.17	1.00	27.8	1.33
E flange	3.09	4.48	1.00	22.1	1.63
E web	2.91	4.38	1.00	30.0	1.48
F flange	3.01	4.54	1.00	23.9	1.76
F web	2.91	4.34	1.00	27.9	1.80
G flange	2.98	4.48	1.00	25.5	1.93
G web	2.80	4.32	1.00	29.9	1.64
H flange	2.76	4.18	10.6	26.8	2.00
H web	2.67	3.90	13.6	30.8	1.51
I flange	2.83	4.06	15.4	31.1	0.97
I web	3.16	4.28	16.1	30.3	0.98

σ_y = 降伏応力度, σ_u = 引張強さ, ϵ_{st} = ひずみ硬化開始時のひずみ度, $\epsilon_y = \sigma_y/E$, E ヤング係数 (=2100 t/cm²), E_{st} = ひずみ硬化域での接線係数

2.4 加力装置

加力装置の概略を図 4 に示す。同図は両材端の曲げ

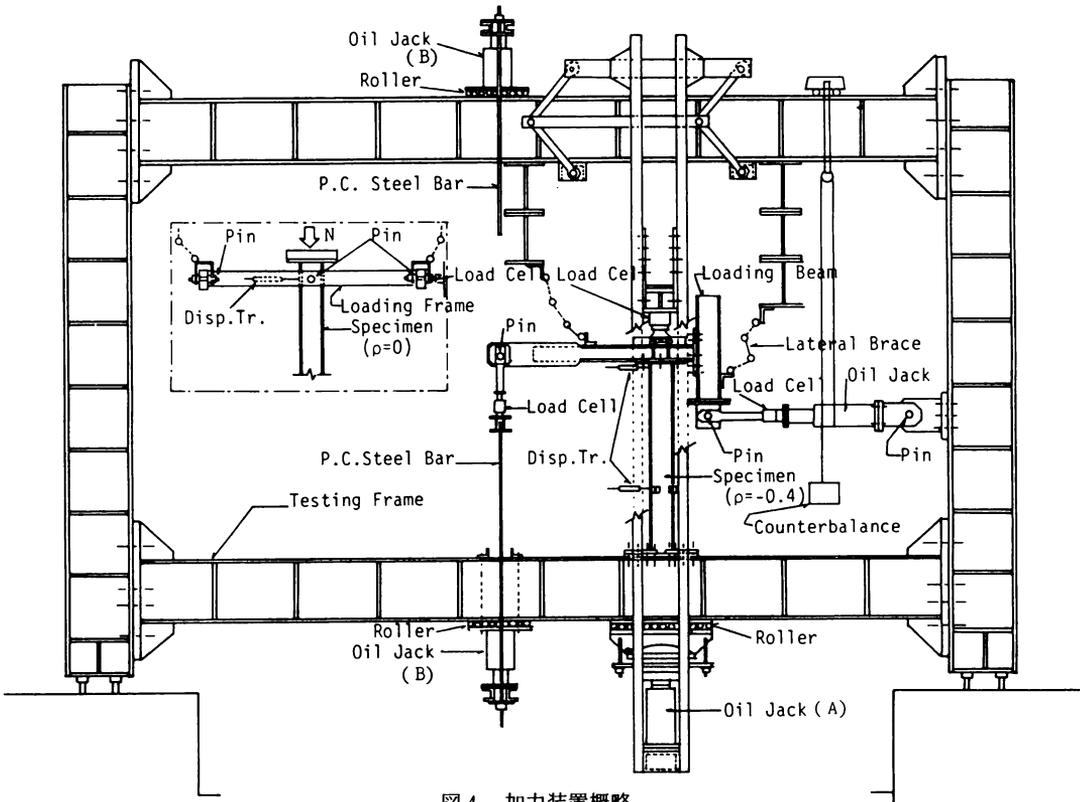


図4 加力装置概略

モーメント比 $\rho = -0.4$ の場合である。 $\rho = -0.8$ の場合は水平加力位置の高さのみが異なる。 $\rho = 0$ の場合は水平加力装置が $\rho \neq 0$ の場合とは異なるので、同図中の挿図に水平加力部（試験体の上端部）のみを示した。

$\rho = 0, \neq 0$ の場合とも試験体の下端部は高力ボルトを用いて口型加力フレームの下部ビームに固定される。

$\rho \neq 0$ の場合は試験体の上端部に水平力および補正曲げモーメント加力用の T 形骨組が取り付けられる。この加力骨組は構面外補剛装置（構面内変形自由、構面外変形拘束）を介して口型加力フレームに連結されている。

$\rho = 0$ の場合は試験体の構面外変位拘束、構面外回転自由、構面内変形自由となるよう設計された水平加力装置が試験体の上端部に取り付けられる（詳しくは文献4)参照）。

鉛直加力装置は加力装置の鉛直性を保持しつつ水平移動できるように、口型加力フレームの下部ビームとジャッキ (A) の間にはローラーが挿入されており、上部には加力装置の鉛直性を保持するための装置（パンタグラフ状の装置）が設けられている。

試験体上端部と鉛直荷重載荷装置の間には中心合せが可能な球座が挿入されているが、 $\rho \neq 0$ の場合は球座の回転中心と反曲点（水平力作用線高さ）が一致していないため、鉛直荷重を受ける試験体では水平変位に伴い、水平力作用線上（計画上の反曲点）において付加モーメント（鉛直荷重 × 付加たわみ）が生ずる。ジャッキ (B) はこの付加モーメントを打消すのに必要な様曲げモーメントを試験体に加えるためのものである。

2. 5 加力方法および測定方法

水平加力に先立ち、試験体に貼付した歪ゲージ（図2中、WSG参照）による歪分布を参考にして、鉛直荷重の中心合せを行った。中心合せ終了後、一定鉛直荷重の下で繰返し水平力を加えるが、水平加力中、水平力作用線上での付加モーメントを常時求め、この付加モーメントを打消すための様曲げモーメントをジャッキ (B) を用いて試験体に加えた。これらの荷重はロードセルを用いて検出した。

試験体上端部および反曲点位置での構面内水平変位、試験体下端部より $\ell/3$ ($\ell =$ 下端部より反曲点までの距離) の点での構面内・外の水平変位およびねじれ角を変位計を用いて検出した。

試験体重心軸に対する鉛直荷重の偏心、水平加力に伴う反曲点高さの変動、およびひずみの進行状況を知る目的で図2に示す位置にWSG（合計12枚）を貼付し、ひずみの測定を行った。

3. 実験結果およびその検討

3. 1 繰返し荷重一変形曲線

水平力 H と反曲点高さでの水平変位 Δ より、 $M = H \cdot \ell + N \cdot \Delta$, $\theta = \Delta / \ell$ を求め、それぞれを各試験体の M_{pc} （軸力による低下を考慮した全塑性モーメント）および θ_{pc} （軸力による剛性低下を考慮した弾性直線と M_{pc} との交点の θ ）で無次元化して得られる $M/M_{pc} - \theta/\theta_{pc}$ 曲線を図5(a)~(x)に示す。各図中、 ∇ , \blacktriangledown , および \downarrow 印はそれぞれ視察に基づくフランジ座屈、ウェブ座屈、および横座屈（構面外変形）発生点を表す。

図5に示す弾性直線のうち実線は軸力による剛性低下を考慮した場合であり、二点鎖線はせん断変形をも考慮した場合である。

実線の弾性直線は

$$\theta = M \cdot \ell / (\eta \cdot EI)$$

ここに、 $EI =$ 強軸回りの曲げ剛性

$$\eta = (Z^2 \sin Z) / (\sin Z - Z \cos Z), \quad Z = \sqrt{N \ell^2 / EI}$$

二点鎖線の弾性剛性は

$$\theta = M \ell / (\eta EI) + M / (A_w G \ell)$$

ここに、 $A_w =$ ウェブ断面積、 $G =$ せん断弾性係数より求めた。

図5より次の事柄が認められる。

- i) せん断変形を考慮した弾性剛性は実験弾性剛性と良く一致している。
- ii) 剛性が急激に変化する点は、非焼鈍試験体の場合 $M/M_{pc} \approx 1.2$ （図5(a)~(s)参照）、焼鈍試験体の場合 $M/M_{pc} \approx 1.1$ （同(t)~(x)参照）である。
- iii) フランジ座屈 (∇ 印)、ウェブ座屈 (\blacktriangledown 印)、および横座屈 (\downarrow 印) のうち1つの座屈発生では耐力の低下は認められない。

剛性が急激に変化する点が $M/M_{pc} = 1.0$ より高くなった理由として、i) 非焼鈍材のフランジ部の鋼材の $\sigma - \varepsilon$ 関係が bi-linear 型であったこと、ii) 種々の拘束を受ける柱脚部では曲率最大点が材端より約 $D/2$ ($D =$ 断面せい) 部材側に寄ること（付録参照）が挙げられる。

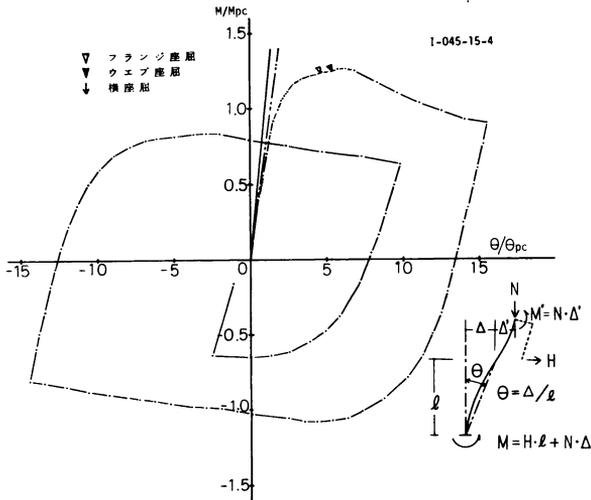


図5 (a) I-045-15-4

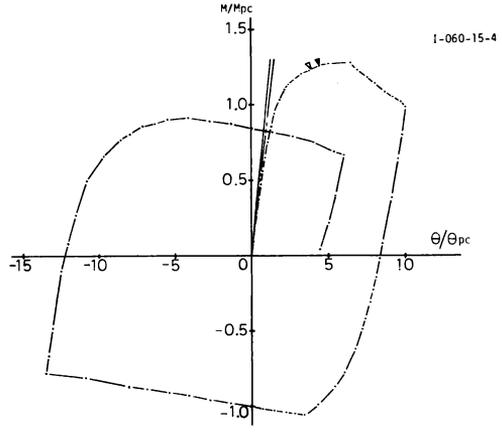


図5 (d) I-060-15-4

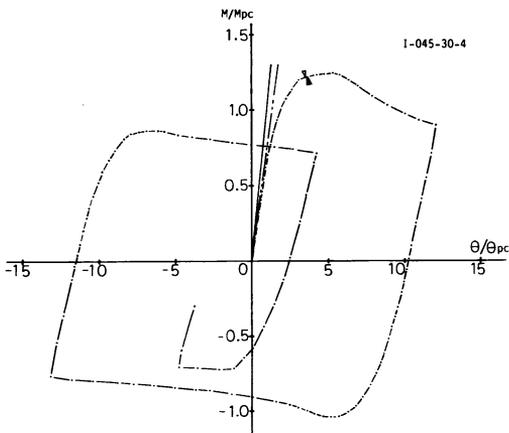


図5 (b) I-045-30-4

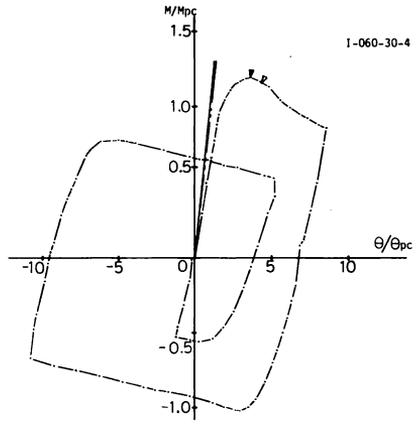


図5 (e) I-060-30-4

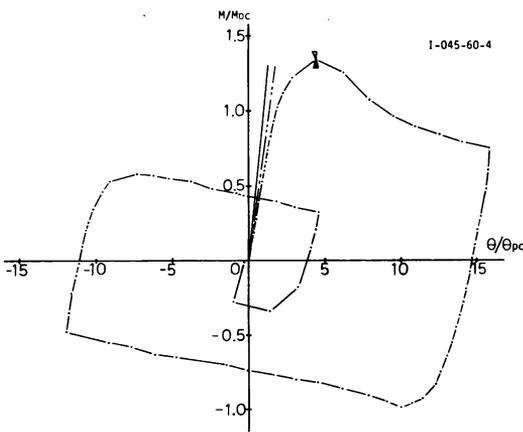


図5 (c) I-045-60-4

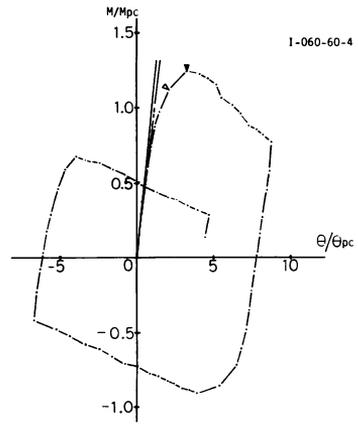


図5 (f) I-060-60-4

図5 M/M_{pc}-θ/θ_{pc} 曲線 (その1)

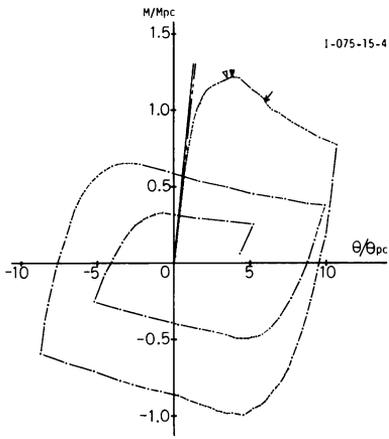


図5 (g) I-075-15-4

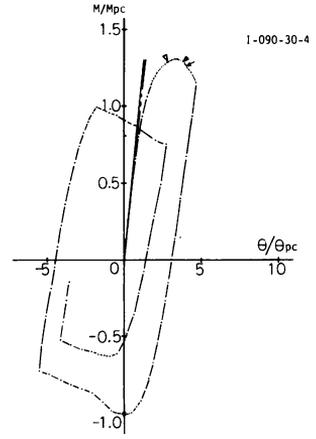


図5 (j) I-090-30-4

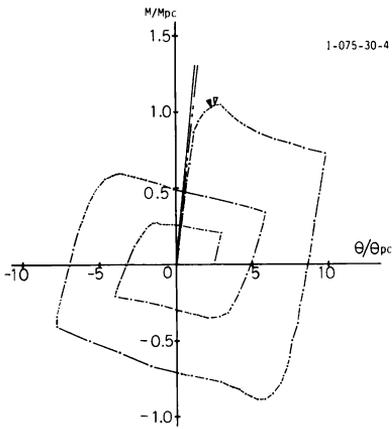


図5 (h) I-075-30-4

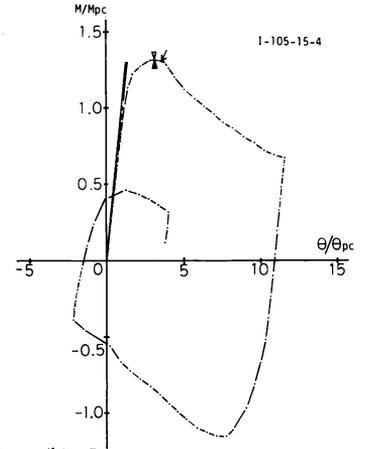


図5 (k) I-105-15-4

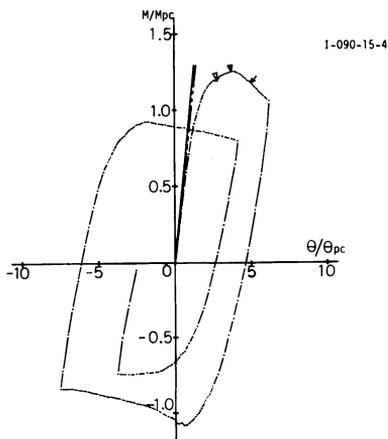


図5 (i) I-090-15-4

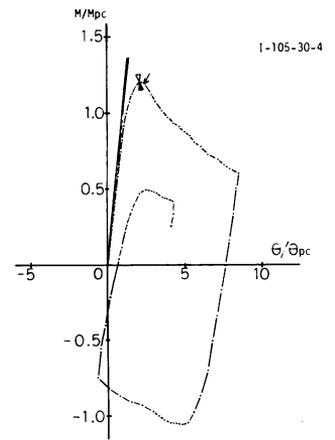


図5 (l) I-105-30-4

図5 $M/M_{pc}-\theta/\theta_{pc}$ 曲線 (その2)

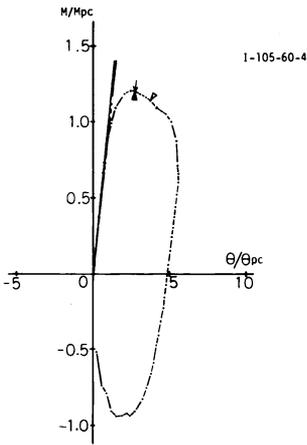


図5 (m) I-105-60-4

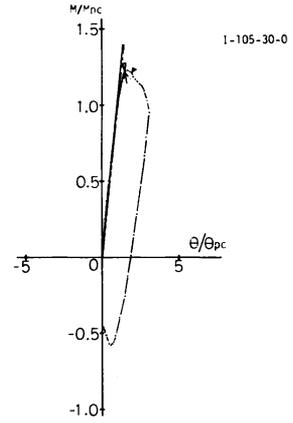


図5 (p) I-105-30-0

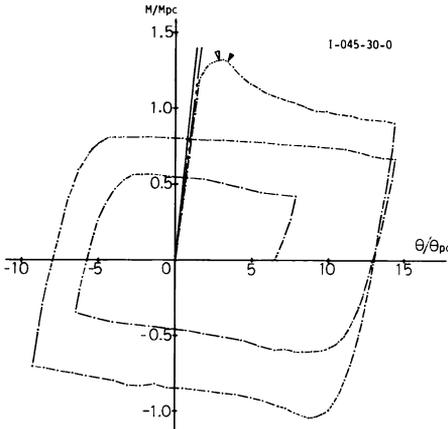


図5 (n) I-045-30-0

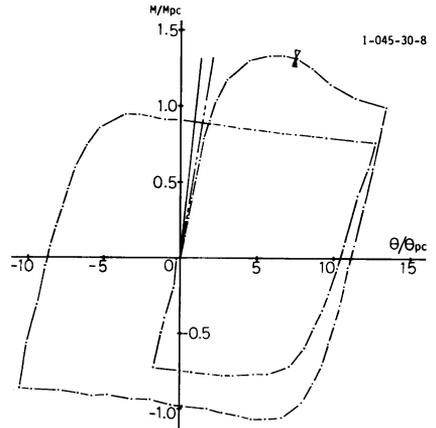


図5 (q) I-045-30-8

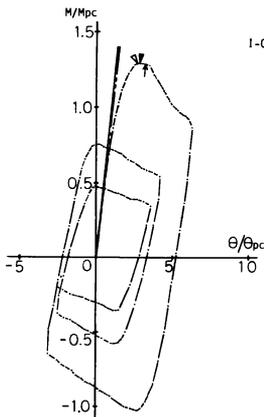


図5 (o) I-075-30-0

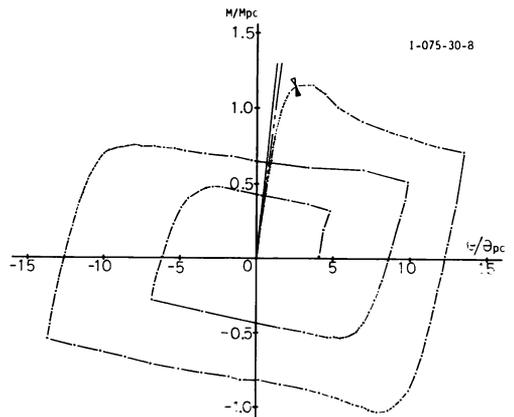


図5 (r) I-075-30-8

図5 $M/M_{pc} - \theta/\theta_{pc}$ 曲線 (その3)

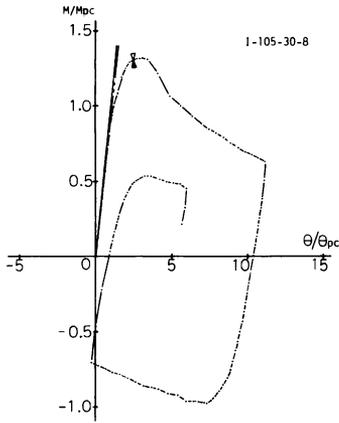


図5 (s) I-105-30-8

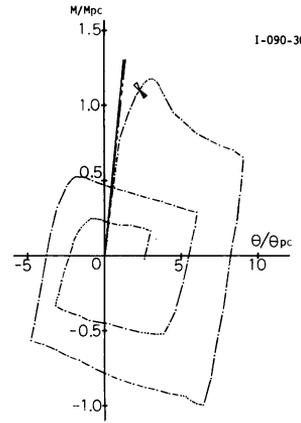


図5 (v) I-090-30-4-A

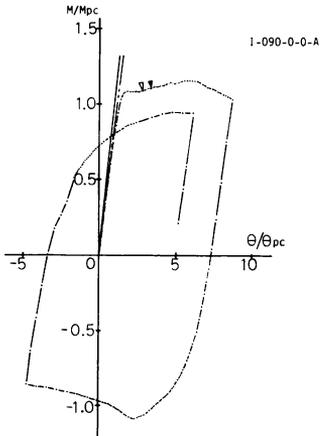


図5 (t) I-090-0-0-A

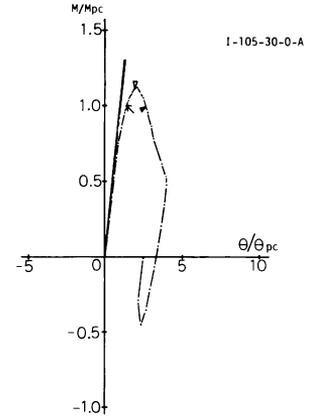


図5 (w) I-105-30-0-A

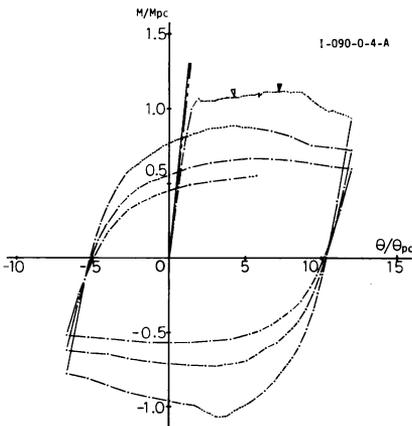


図5 (u) I-090-0-4-A

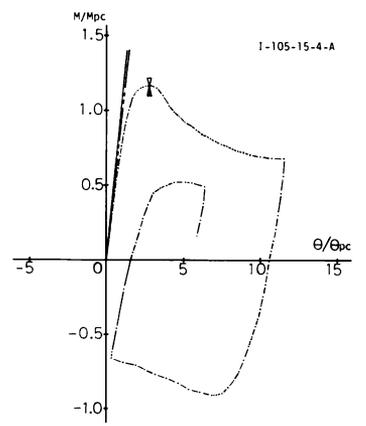


図5 (x) I-105-15-4-A

図5 $M/M_{pc} - \theta/\theta_{pc}$ 曲線 (その4)

3. 2 塑性変形能力

各試験体の塑性変形能力 $R=(\theta_{cr}/\theta_{pc})-1$ を表3に示す。同表中、 R_m 、 $R_{0.95}$ はそれぞれ $M/M_{pc}-\theta/\theta_{pc}$ 曲線における最大耐力点および最大耐力の95%まで耐力が低下した点を限界変形 θ_{cr} とした場合である(図6参照)。同表には文献4)に示される実験資料も示した。

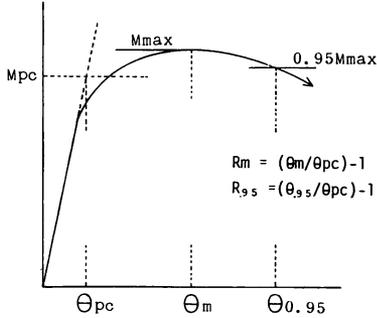


図6 塑性変形能力 R_m 、 $R_{0.95}$ の定義

4. 考 察

4. 1 荷重-変形関係

本節では図5に示した $M/M_{pc}-\theta/\theta_{pc}$ 曲線のうち正側荷重(モーメント)領域の曲線を順次連続させて得られる曲線(図7参照)に基づいて、横補剛間隔 ℓ_b/i_y 、軸力比 n 、モーメント比 ρ 、および鋼材の $\sigma-\epsilon$ 関係(焼鈍処理の有無)がH形鋼柱の変形状に及ぼす影響を論ずる。

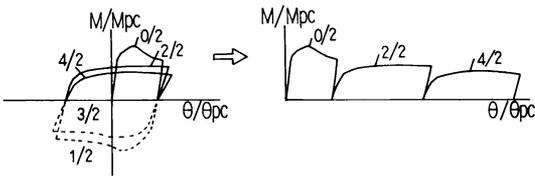


図7 図8~11に示した $M/M_{pc}-\theta/\theta_{pc}$ 曲線の作図法

表3 塑性変形能力

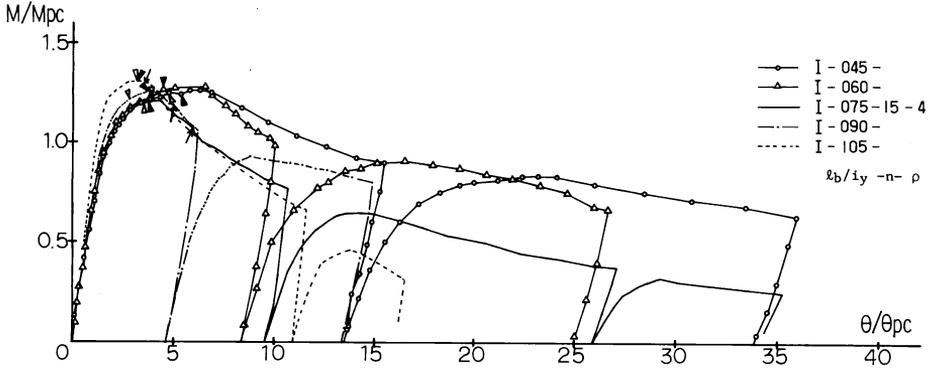
	試験体名	R_m	$R_{0.95}$	
本	I-045-15-4	5.3	7.0	
	I-060-15-4	4.5	6.2	
	I-075-15-4	3.4	3.9	
	I-090-15-4	2.7	3.8	
	I-105-15-4	2.1	3.2	
	I-045-30-4	4.3	5.6	
	I-060-30-4	2.6	3.9	
	I-075-30-4	2.0	2.5	
	I-090-30-4	2.2	3.4	
	I-105-30-4	1.1	1.8	
実	I-045-60-4	3.5	4.9	
	I-060-60-4	2.3	3.8	
	I-105-60-4	1.4	2.8	
	I-045-30-0	2.1	3.3	
	I-075-30-0	1.9	2.8	
	I-105-30-0	0.7	1.4	
	験	I-045-30-8	4.8	7.4
		I-075-30-8	2.8	3.4
		I-105-30-8	2.1	2.9
		I-090-0-0-A	4.7	6.6
I-090-0-4-A		6.3	8.3	
I-090-30-4-A		2.2	2.6	
I-105-30-0-A		1.1	1.5	
I-105-15-4-A		1.6	2.7	
文		I-045-0-0	4.3	6.9
		I-060-0-0	4.1	5.3
	I-075-0-0	3.4	4.7	
	I-090-0-0	2.8	4.2	
	I-105-0-0	2.3	3.3	
	献	I-045-0-4	8.4	11.0
		I-060-0-4	6.3	8.2
		I-075-0-4	4.6	6.7
		I-090-0-4	3.9	6.0
		4	I-105-0-4	3.5
I-045-0-8			12.5	15.9
I-075-0-8			6.3	7.9
I-105-0-8			3.0	5.2

a. 横補剛間隔の影響

図8(a)~(d)に l_b/i_y 以外はほぼ同じ実験条件下の荷重-変形曲線をまとめて示す。

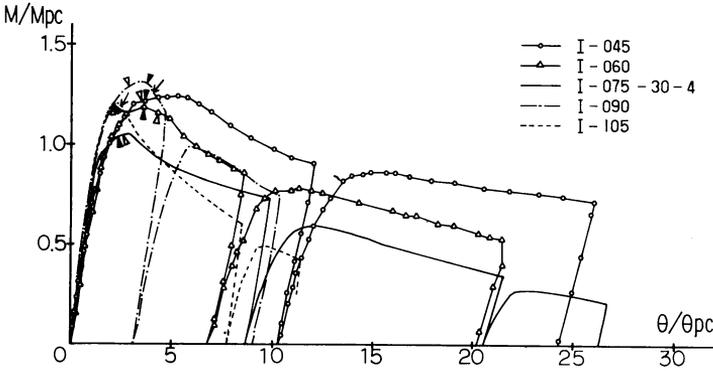
同図より l_b/i_y の値が大きいほど最大耐力時の変

形量 (θ/θ_{pc}) が小さく、最大耐力以後の耐力低下の度合いが大きくなる傾向があること、 $l_b/i_y=75\sim 105$ の範囲では l_b/i_y の値が最大耐力以後の耐力低下の度合いに及ぼす影響は小さいことがわかる。



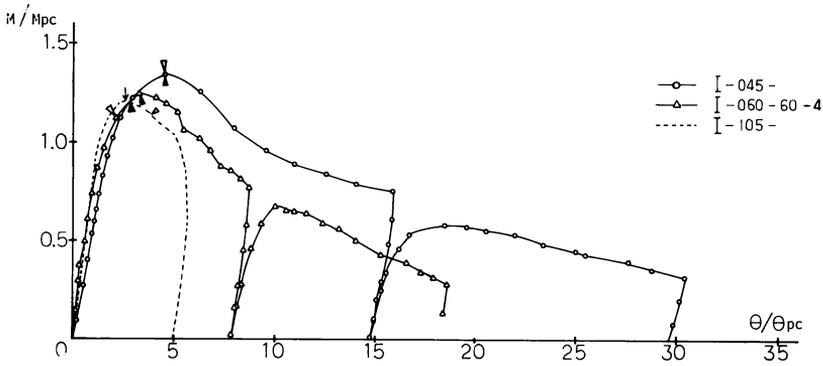
(a) I-□-15-4

図8



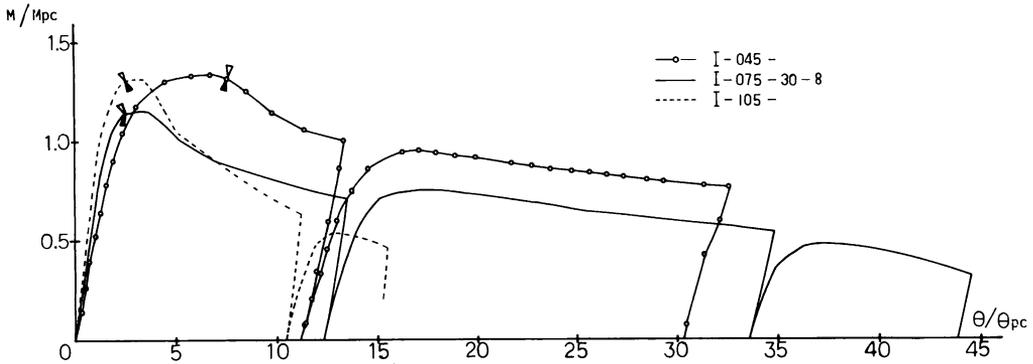
(b) I-□-30-4

図8



(c) I-□-60-4

図8



(d) I-□-30-8

図8 横補間隔の影響

b. 軸力比の影響

図9(a)~(b)に軸力比以外の実験条件がほぼ等しい場合の荷重-変形関係をまとめて示す。

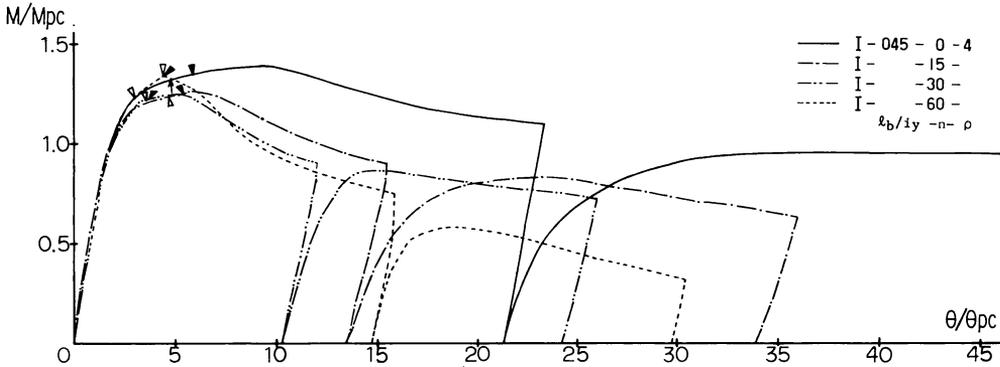
同図より下記の事柄が認められる。

i) 軸力比が大きくなるほど最大耐力時の変形量は小さくなるが $n=0.3$ の場合と 0.6 の場合の差は小さい。

ii) 軸力比が最大耐力時の変形量に及ぼす影響は l_b/i_y の値が小さいほど大きい。

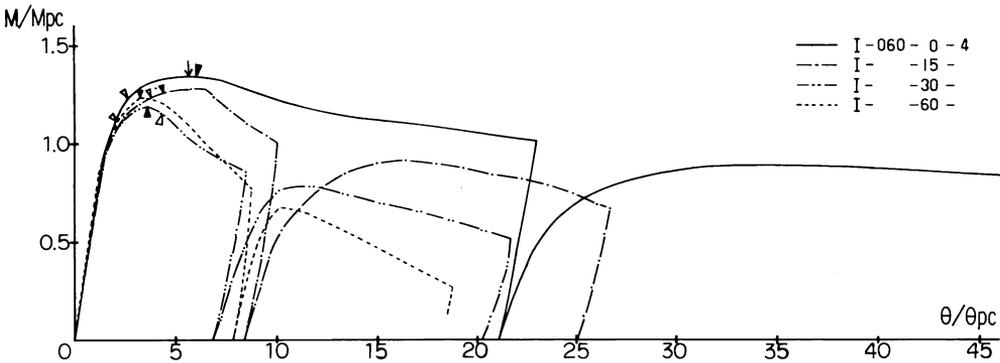
iii) 最大耐力以後の耐力低下は軸力比 n の値が大きいほど大きい。

iv) 軸力比 n が大きいほど諸座屈発生時の変形量が小さい。



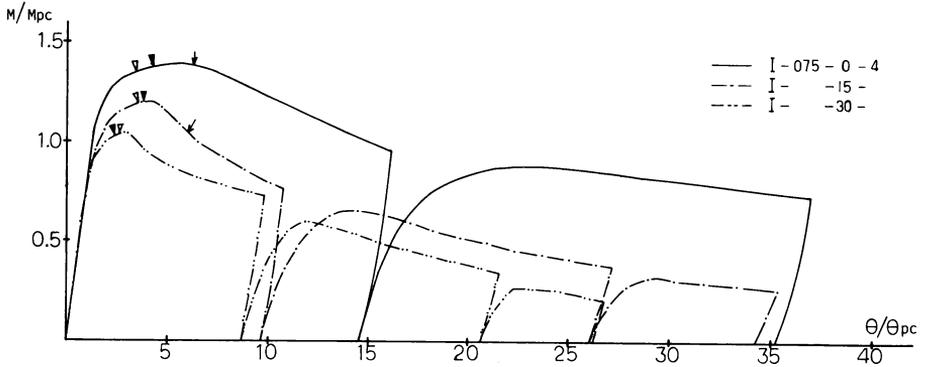
(a) I-045-□-4

図9



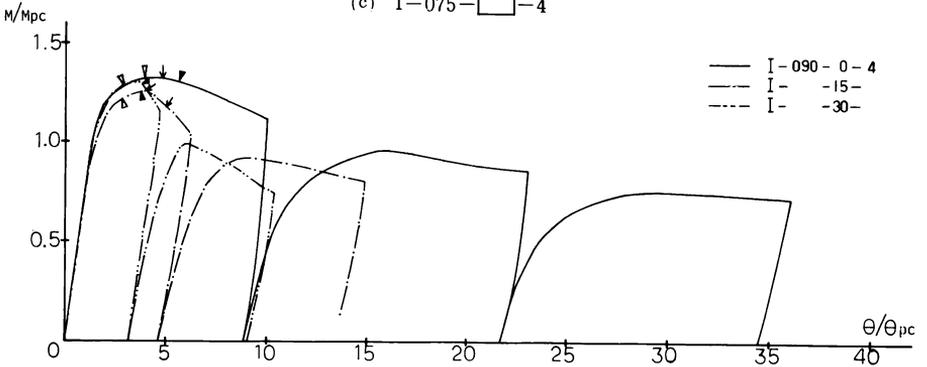
(b) I-060-□-4

図9



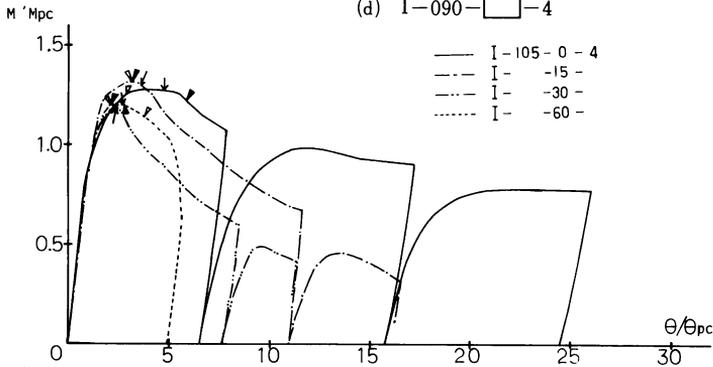
(c) I-075-□-4

図 9



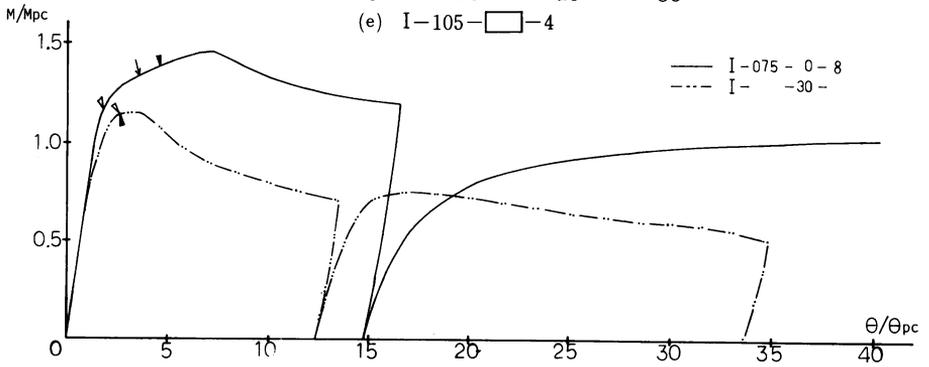
(d) I-090-□-4

図 9



(e) I-105-□-4

図 9



(f) I-075-□-8

図 9

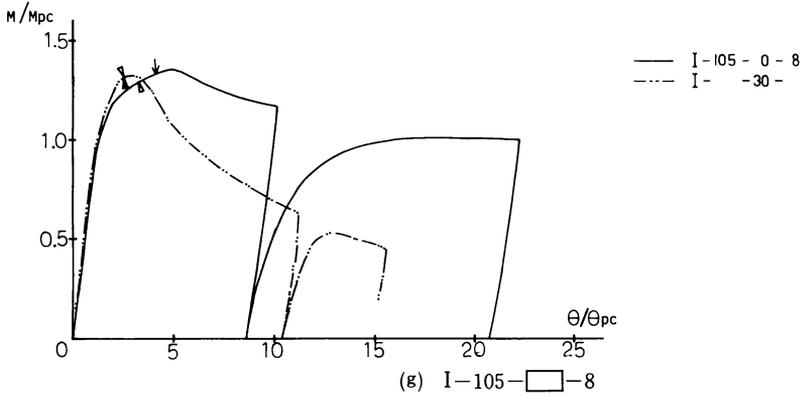


図9 軸力比の影響

c. 曲げモーメント比の影響

図10(a)~(c)に両材端の曲げモーメント比 ρ 以外の実験条件がほぼ等しい場合の荷重-変形関係をまとめて示す。

同図より、 ρ の値が小さい(本実験の範囲では絶対値が大きい)ほど、最大耐力時の変形量が大きく、最大耐力以後の耐力低下の度合は小さいことがわかる。

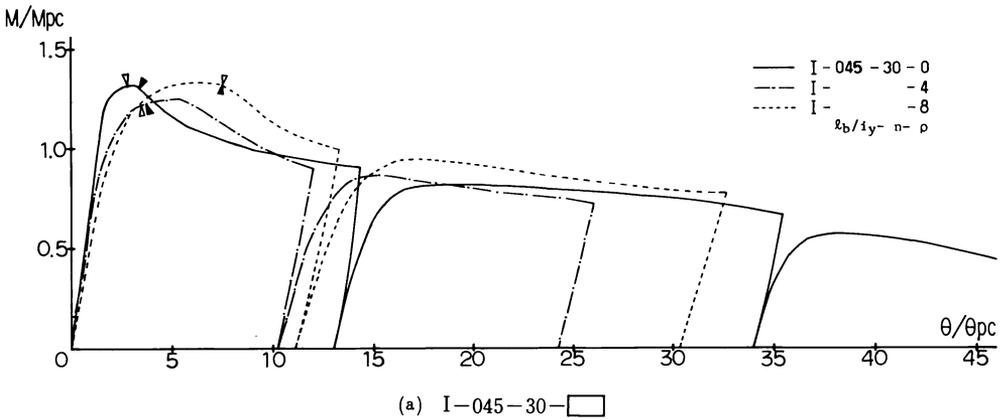


図10

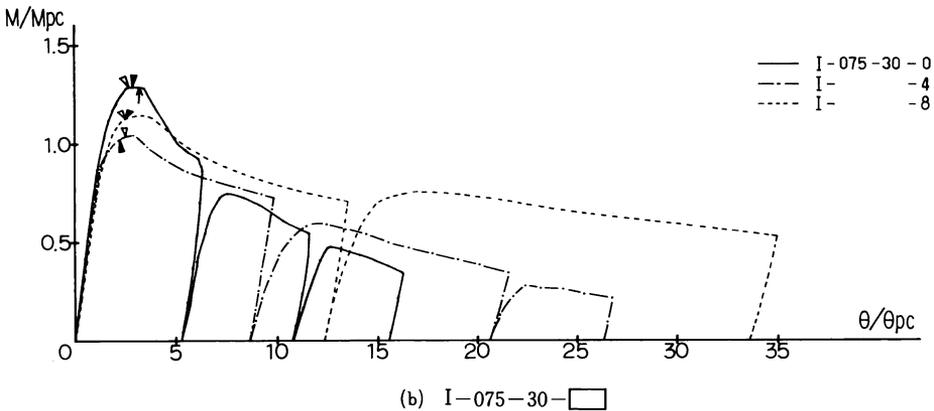
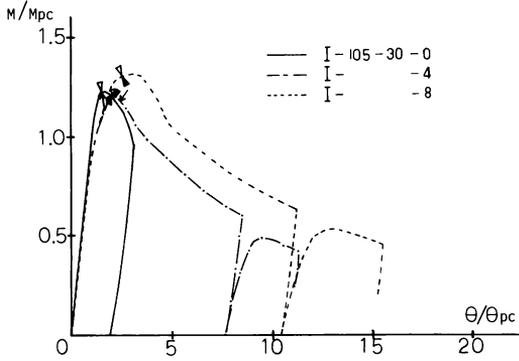


図10



(c) I-105-30-□

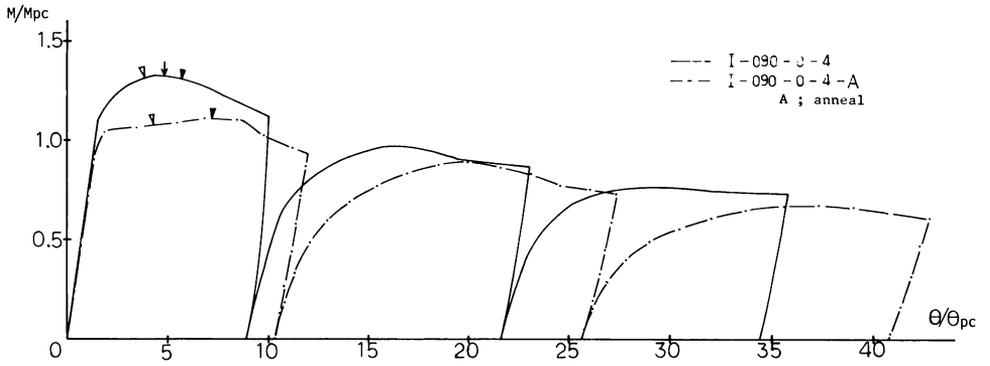
図10 曲げモーメント比の影響

d. 鋼材質（鋼材の $\sigma-\epsilon$ 曲線）の影響

図11(a)~(e)は焼鈍処理の有無について比較したものである。非焼鈍材の場合、フランジ部の $\sigma-\epsilon$ 曲線は bi-linear 型に近いものであり、焼鈍材の場合は明瞭

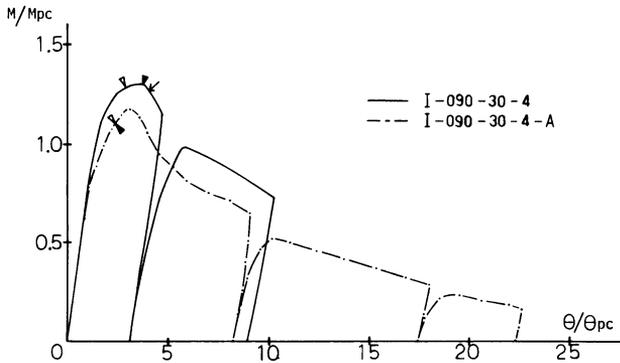
な降伏だなが認められた。

同図より鋼材の $\sigma-\epsilon$ 曲線の差（降伏だなの有無）は降伏から最大耐力に達する間の変形性状ならびに最大耐力に大きく影響していることがわかる。



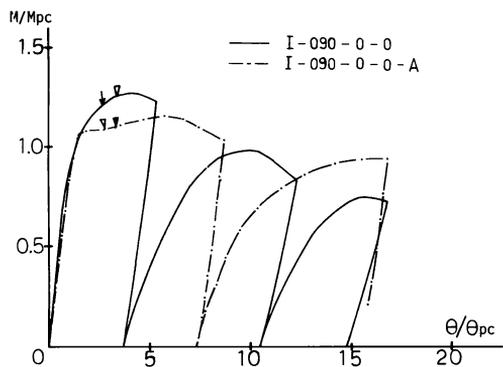
(a) I-090-0-4

図11

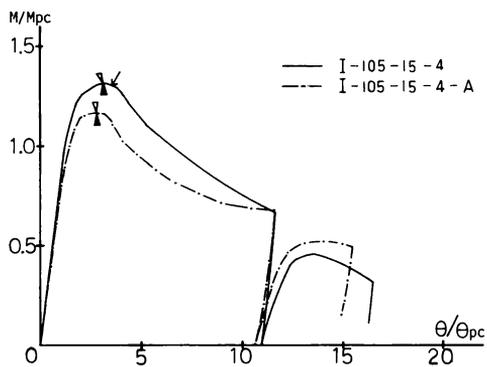


(b) I-090-30-4

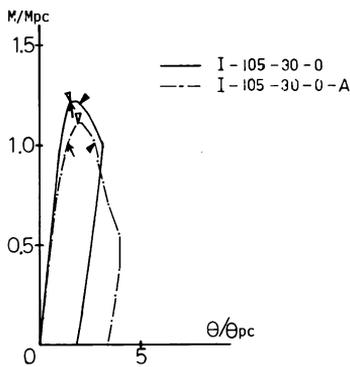
図11



(c) I-090-0-0



(d) I-105-15-4



(e) I-105-30-0

図11

図11 鋼材質 ($\sigma-\epsilon$ 曲線) の影響

4. 2 塑性変形能力

本節では軸力比 n , 横補剛間隔 l_b/i_y , 曲げモーメント比 ρ が塑性変形能力に及ぼす影響を論ずる。

a. 軸力比の影響

軸力比以外の実験条件が大略等しい実験資料 ($n=0$ の場合は文献4) の資料) より $R/R(n=0)$, ここに $R(n=0) : n=0$ の場合の塑性変形能力, を求めた。

$R/R(n=0)-n$ 関係を図12に示す。同図中, 実線は R_m , 破線は $R_{0.95}$ に関するものである。同図より軸力比 n が 0.3 より小さい範囲では, n の増大に伴い塑性変形能力が直線的に低下し, 0.3 より大きい範囲ではほぼ一定であることがわかる。

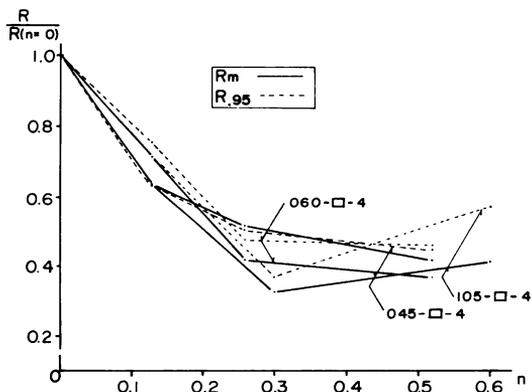


図12 塑性変形能力に及ぼす軸力比の影響

b. 横補剛間隔の影響

文献2)に提案した塑性変形能力評価式は次式である。

$$R = G \{ C_f \lambda_r - 0.65 \}^2 - C_w \lambda_w + C \quad \dots(1)$$

ここに
$$G = \sqrt{\frac{500}{k(l/i_x)(l_b/i_y)}} \cdot \sqrt{\frac{F}{\sigma_y}}$$

k = 構面外に関する支持条件によって決まる定数,
 l_b = 横補剛支点間長さ, l = 塑性化側材端から反曲点までの距離, i_x, i_y = それぞれ強軸, 弱軸に関する断面二次半径, $F = 2.4 \text{ ton/cm}^2$, σ_y = 降伏応力度 (t/cm^2), $\lambda_r = (b/t_f) \sqrt{\epsilon_y}$, $2b$ = フランジ幅 t_f = フランジ厚, ϵ_y = 降伏ひずみ度, $\lambda_w = (D/t_w) \sqrt{\epsilon_y}$, D = 断面せい, t_w = ウェブ厚, C_f, C_w, C = 定数

本実験の場合 ρ の値が同じでも l_b/i_y の値が変化すると l/i_x の値も変化する。しかし断面寸法は同じであるので, ρ の値が同じであれば, $(l_b/i_y)/(l/i_x)$ の値は同じであり, $\sqrt{(l_b/i_y)(l/i_x)} = \alpha(l_b/i_y)$, α = 定数, となる。

l_b/i_y 以外の実験条件がほぼ等しい試験体について $R/R(105)$, (ここに, $R(105)$: $l_b/i_y = 105$ の試験体の塑性変形能力), を求め, $R/R(105) - \sqrt{X(105)/X}$ 関係 ($X = (l_b/i_y)(l/i_x)$, $X(105)$: $l_b/i_y = 105$ の試験体の X) を図13に示した。同図中太い一点鎖線は(1)式で得られる $R/R(105) - \sqrt{X(105)/X}$ 関係である。

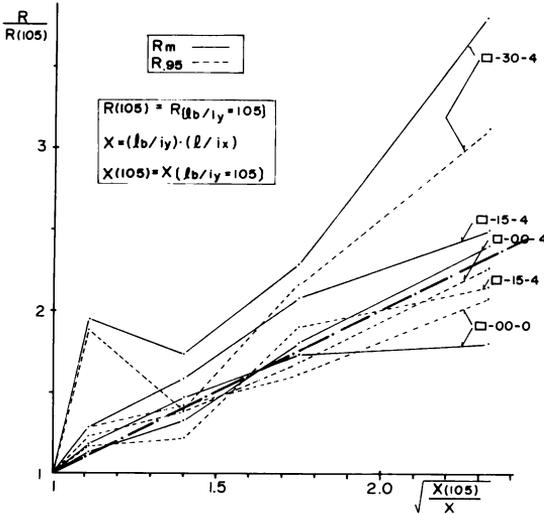


図13 塑性変形能力に及ぼす $(l_b/i_y) \cdot (l/i_x)$ の影響

同図より塑性変形能力は $\sqrt{1/X}$ に比例し, (1)式は $(l_b/i_y) \cdot (l/i_x)$ の変化に伴う塑性変形能力の変動をうまく表現していることがわかる。

c. 曲げモーメント比の影響

幾何学的な関係より $l/l_b = 1/(1-\rho)$ の関係が満たされるので,

$$1-\rho = \frac{l_b/i_y}{l/i_x} \left(\frac{i_y}{i_x} \right) \quad \dots(2)$$

本実験では同一断面のH形鋼を使用しているため, ρ 以外は同一実験条件下の実験資料においては, $1-\rho$ は l/i_x に反比例する。 ρ 以外の実験条件がほぼ等しい実験資料より, $R/R(\rho=0) - \sqrt{1-\rho}$ 関係, ここに $R(\rho=0)$: $\rho=0$ の場合の R , を求め図14に示した。

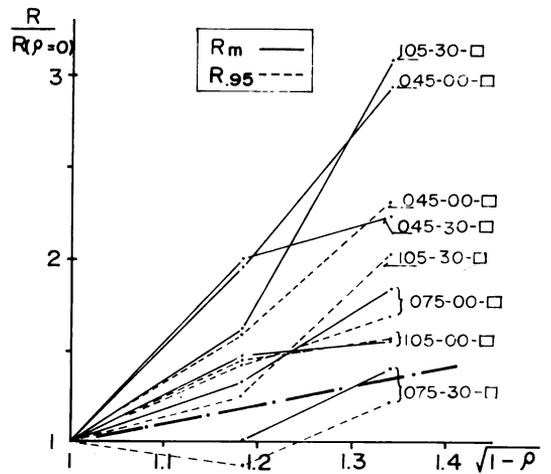


図14 塑性変形能力に及ぼす ρ の影

(1)式の評価式においては, l/i_x 以外の条件が同一であれば, 塑性変形能力 R は $1/\sqrt{l/i_x}$ 即ち $\sqrt{1-\rho}$ に比例する (同図中, 太一点鎖線参照)。図14よりわかるように(1)式の評価式は ρ の変化に伴う塑性変形能力の変化に充分には追従していないことがわかる。この傾向は l_b/i_y の値が小さい場合に顕著である。

5. 結 び

曲げモーメント比, 軸力比, 横補剛間隔を実験変数とし, 一定鉛直荷重の下で繰返し水平力を受けるH形鋼柱の弾塑性変形性状を求めた。

実験結果に基づき, 曲げモーメント比, 軸力比, および横補剛間隔がH形鋼柱の変形性状ならびに塑性変形能力に及ぼす影響について論じた。

謝 辞

実験・資料整理に際し, 池田教仁 (昭和57年度卒論

生), 枝元俊一(昭和58年度卒論生), 長井正人(昭和59年度卒論生), 及び茶園茂博事務官の御協力を得ました。試験体用の鋼材は社団法人鋼材倶楽部より寄贈を受けました。試験体の製作に際しては鹿児島大学工学部中央実験工場の御協力を得ました。ここに記して深謝の意を表します。

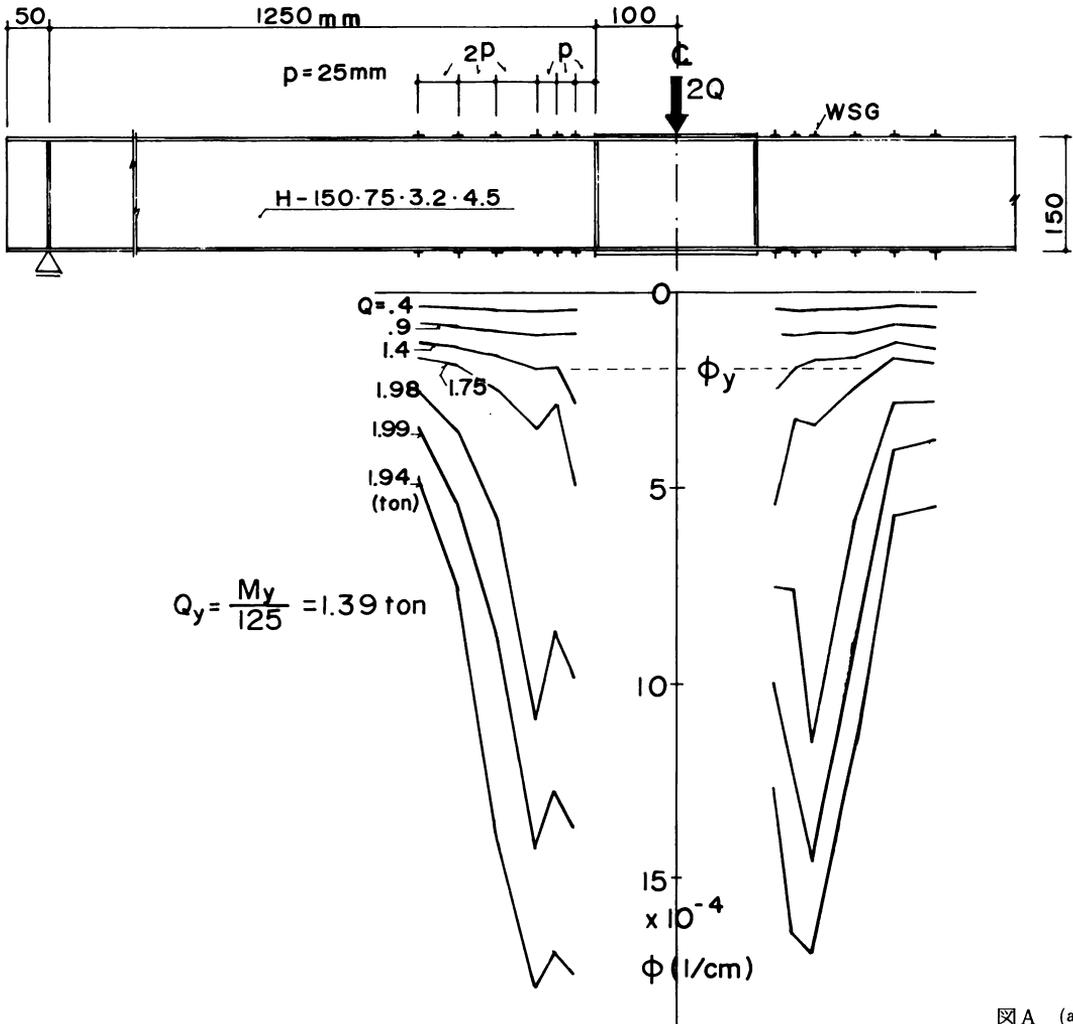
文 献

- 1) 日本建築学会, “鋼構造塑性設計指針”, 1975, 11.
- 2) 牧野稔, 松井千秋, 三谷勲, “H形鋼柱の局部座屈後の変形性状 その4 塑性変形能力”, 日本建築学会論文報告集, 第290号, 1980. 4, pp. 45-55.

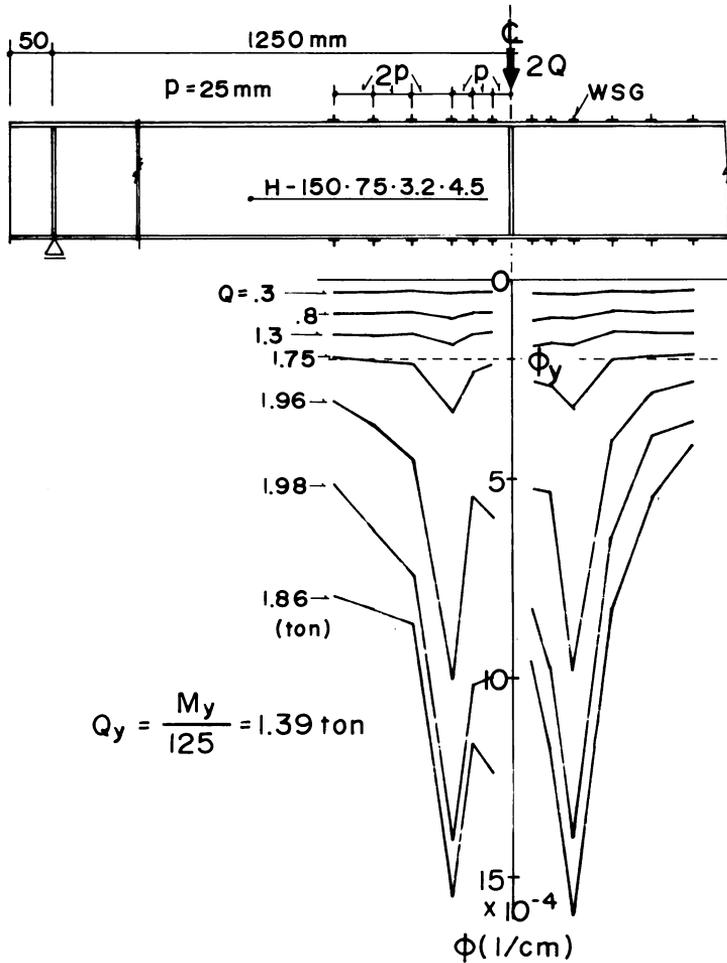
- 3) 三谷勲, 牧野稔, 松井千秋, “H形鋼柱の局部座屈後の変形性状に関する解析的研究 その1 単調荷重を受ける場合”, 日本建築学会論文報告集, 第296号, 1980. 10, pp. 37-47.
- 4) 三谷勲, 山崎達司, “H形鋼ばりの塑性変形能力及び曲げ耐力に及ぼすモーメント勾配の影響に関する実験的研究”, 鹿児島大学工学部研究報告, 第25号, 1983. 11, pp. 59-73.

付 録

塑性化領域での曲率分布を調べる目的で単純ばりに一点集中荷重を加える実験を行った。試験体に用いたH形鋼はH-150×75×3.2×4.5で, 柱の実験に用い



図A (a)



図A (b)

図A 塑性化領域の曲率分布

たものと同じである。荷重は単調載荷で、各部のひずみを歪ゲージ（WSG）を用いて測定した。

試験体形状と曲率分布を図A (a), (b)に示す。(a)図の試験体では中央部のフランジが補強されている。

両図より、塑性化領域では、曲率が最大となる点は塑性化側材端より約 $D/2$ 、 D = 断面せい、部材側に入っていることがわかる。

この実験結果に基づけば、実験塑性耐力 Q_{exp} は塑性関節が材端に形成されると仮定して得られる塑性耐力 Q_p の $l/(l-D/2)$ 倍となる。但し、 l = 塑性化側材端から反曲点までの距離。

なお、本章に示したH形鋼柱の試験体では $D/2l = 0.04 \sim 0.18$ である。