
H型鋼彎曲部材の極限強度について

Ultimate Strength of Curved H-Beams

福本 ゆうし(Yushi Fukumoto) 伊藤 満(Mitsuru Ito) 嶋 文雄(Fumio Shima)

要旨：

トンネル支保工などに使用される圧延H形鋼で断面形状の異なる 3 種類を選びロールベンダーによる冷間曲げ加工性試験と細長比が小さい (L/r_x : 11.5~16.0) 直材および彎曲部材 (曲率半径 4~6m) の圧縮強度試験をおこなった結果、次のことがわかった。(1) 冷間曲げ加工による圧延H形鋼の最小曲げ半径は、フランジの局部座屈によって決まり、引張試験よりえられたひずみ硬化開始時を限界ひずみ量として最小曲げ半径を決めることが可能である。(2) 本実験に用いたような細長比の小さい圧延H形鋼の彎曲部材ではひずみ硬化域における強度が期待できる。

Synopsis：

This study is to examine into the bending property (workability) of H-beams by cold bending tests on the following three sizes of rolled H-beams : H-200×200×8×12, H-175×175×7.5×11, H-150×150×7×10, and also into elements affecting compressive strength by means of compressive strength tests on straight material (L/r_x : 11.5~16.0) and curved material (radius curvature: 4~6m) of a small slenderness ratio. From those tests, the following results have been obtained. (1) As the minimum curvature radius of rolled H-beam by cold bending is determined by the local buckling of the flange, it is possible to decide the minimum curvature radius by taking as the critical strain the strain at the beginning of strain hardening to be obtained from tensile test. (2) As a result of the compression test, curved material of rolled H-beam of a small slenderness ratio can be expected to hold strength at the strain hardening zone.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

H形鋼彎曲部材の極限強度について

Ultimate Strength of Curved H-Beams

福 本 勇 士*

Yushi Fukumoto

伊 藤 満**

Mitsuru Ito

嶋 文 雄***

Fumio Shima

Synopsis:

This study is to examine into the bending property (workability) of H-beams by cold bending tests on the following three sizes of rolled H-beams: H-200×200×8×12, H-175×175×7.5×11, H-150×150×7×10, and also into elements affecting compressive strength by means of compressive strength tests on straight material (L/r_x : 11.5~16.0) and curved material (radius curvature: 4~6 m) of a small slenderness ratio.

From those tests, the following results have been obtained.

- (1) As the minimum curvature radius of rolled H-beam by cold bending is determined by the local buckling of the flange, it is possible to decide the minimum curvature radius by taking as the critical strain the strain at the beginning of strain hardening to be obtained from tensile test.
- (2) As a result of the compression test, curved material of rolled H-beam of a small slenderness ratio can be expected to hold strength at the strain hardening zone.

1. はじめに

わが国におけるトンネル用支保工として鋼アーチ支保工が導入されてからすでに十数年になる。この間、鋼アーチ支保工が従来の木製支保工に比べ、強度が高く作業空間が大きくとれ、かつ支保工の組立てが安全で容易であることなどすぐれた点が広く認められ、現在ではトンネル用支保工としてほとんど鋼製のものが使用されるようになった。

一方、現状における支保工の設計は、たとえば

トンネル標準示方書解説(土木学会, 昭和39年)を参考としておこなわれているが、支保工そのものの強度ならびに変形性状についてはまだ不明な点が多々あるように思われる¹⁾。また、過去における鋼アーチ支保工の事故例を見ると支保工の破壊機構は鋼アーチ断面の局部変形により支配されている場合が多い。すなわち、鋼アーチ部材に作用する軸方向力、曲げモーメントなどの断面力による、断面を構成する板要素の局部座屈によってひきおこされた過度の局部変形である。本研究は、以上のような観点にたつて鋼アーチ支保工の一部としてとりだした彎曲部材の部材両端に軸方

* 名古屋大学工学部土木工学科助教授

** 和歌山工業高等専門学校土木工学科講師

*** 本社建材開発部土木開発室部長代理兼鋼構造研究所構造研究室長

向力と曲げモーメントを作用させた状態での部材断面と部材の強度と変形について調べたものである。

はじめに圧延H形鋼の冷間曲げ加工性を調べ、つづいてアーチ状に彎曲させた部材の圧縮強度試験をおこなって部材の変形性状および極限強度を求めた。なお彎曲部材の強度に影響をおよぼす要素として、冷間曲げ加工時に生ずる初期応力、曲率半径の大小、荷重の偏心率、フランジ幅厚比などのもつ効果を検討した。

2. 圧延 H 形鋼部材の冷間曲げ加工性試験

2-1 実験目的

トンネル支保工などに用いられるアーチ状彎曲部材は、直部材をロール・ベンダーなどによって冷間曲げ加工をほどこし、所定の曲率をもつ円弧状に永久変形を与えたものである。このような曲げ加工過程に部材は、弾性変形、塑性変形、荷重除荷の荷重履歴をうけることになる。ここでは、冷間曲げ加工性試験として次の3項目を調べた。

- (1) ロール・ベンダーにより規定の曲率まで曲げ加工を行なう過程での部材に発生する塑性変形ならびに荷重除荷後に断面に生ずる残留ひずみ分布および残留応力分布。
- (2) 曲げ加工時に生ずるフランジおよびウェブの局部変形の有無。
- (3) 実験に用いた断面について、冷間曲げ加工が可能な最小曲率半径。

2-2 供試体および実験方法

供試体は表1に示すように断面形状の異なる3

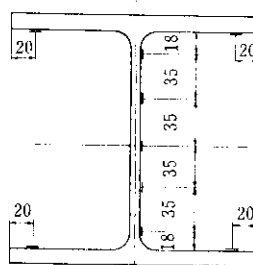
表1 断面寸法

タイプ	材質	寸法	長さ (m)	重量 (kg/m)	供試 体数
AS	SS41	200×200×8×12	12.6	49.9	2
BS	SS41	175×175×7.5×11	12.6	40.2	2
BK	SM50Y	175×175×7.5×11	12.6	40.2	2
CK	SM50Y	150×150×7×10	12.6	31.5	2

種類のH形部材を用いた。材質は、SS41とSM50Yの2種類である。供試体は、AS、BS、BK、CKの各タイプについて、長さ12.6mのものを2本ずつ用意した。供試体を2体としたのはそれぞれ異なった曲げ加工を与えるためである。

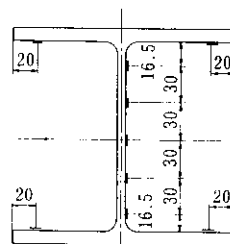
各タイプ別の断面におけるひずみゲージ貼付位置は、図1に示す通りであり、1本の供試体に計

ASタイプ



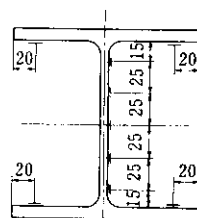
H-200×200×8×12

BS, BKタイプ



H-175×175×7.5×11

CKタイプ



H-150×150×7×10

-----ひずみゲージ

図1 冷間曲げ加工性試験ひずみゲージ貼付位置

9枚を使用した。使用ゲージは、東京測器研究所製の塑性域ひずみゲージ Y L-15(型式：単軸，ゲージ長：15mm)である。

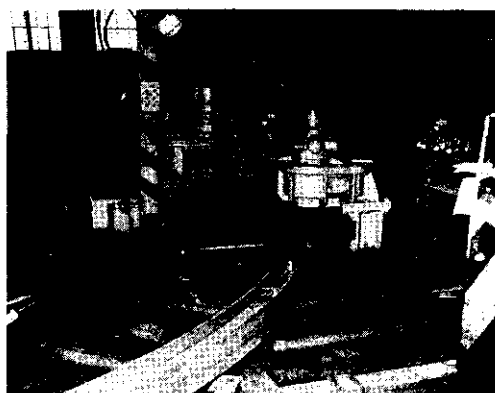


写真1 ロール・ベンダー

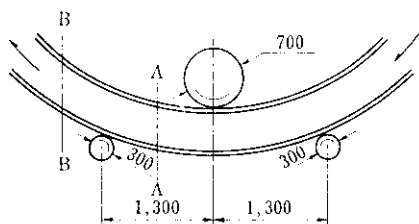


図2 ロール・ベンダー

曲げ加工は、川崎製鉄(株)荻合工場にある3本のロールからなるロールベンダー(写真1参照)を用いた。部材内に発生する残留ひずみの測定は、図2に示したように、あらかじめひずみゲージを貼ったH形部材を、3本のロールの間に通し、ゲージ貼付位置が塑性曲げを受けるとき(図のA-A点)と荷重除荷のとき(図のB-B点)の2回行なった。なお、曲率半径の調整は中央のロールを回転しながら上下方向に任意に移動させることによって行なった。

2.3 実験結果とその検討

(1) 材料試験結果

各供試体のフランジから鋼板2枚を、ウェブから鋼板1枚を切り取り、JIS 1号試験片による引張試験を行なった。引張試験結果およびこれらの結果をもとに計算した各供試体の材料特性を表2に示す。断面定数は表3に示す。以後の数値計算にはすべて表2および表3に示す値を用いた。

(2) 残留ひずみ分布および残留応力分布

冷間曲げ加工により断面に生ずる残留ひずみ分布および残留応力分布の計算値と実験値を図3と図4に示す。なお、残留応力の計算値は次のようにして求めた。除荷した状態の残留曲率から載荷中の曲率を逆算し、その曲率に相当する曲げモー

表2 引張試験結果

タイプ	材質	降伏点 応力度 (kg/cm ²)	破壊 応力度 (kg/cm ²)	降伏点応力度 破壊応力度	降伏点 ひずみ度 × 10 ⁻³	ひずみ硬化 開始時 ひずみ度 × 10 ⁻³	ひずみ硬化開始 時ひずみ度 降伏点ひずみ度	ポアソン 比	弾性係数 × 10 ⁶	ひずみ硬化 係数 × 10 ⁶	弾性係数 ひずみ硬化 係数	せん断弾性 係数 × 10 ⁶	伸び率 (%)	試験片 数
A S	SS41	2,550	3,937	0.648	1,330	23,000	17.29	0.231	1.917	0.0429	45	0.777	31.0	3
B S	SS41	2,681	4,342	0.618	1,400	16,600	11.86	0.261	1.915	0.0377	53	0.769	30.0	3
B K	SM50Y	3,767	4,852	0.777	1,800	23,000	11.22	0.266	2.092	0.0512	40	0.809	28.1	3
C K	SM50Y	3,973	5,223	0.757	1,900	22,000	12.31	0.263	2.022	0.0460	44	0.799	26.1	3

表3 断面諸定数

タイプ	材質	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	r _x (cm)	Z _x (cm ³)	f = $\frac{Z_p}{S_x}$	b/t	L/r _x	M _x (t・m)	M _p (t・m)
A S	SS41	61.18	4484	450	8.56	502	1.115	16.86	11.65	11.49	12.81
B S	SS41	50.43	2776	320	7.42	359	1.120	15.74	13.45	8.58	9.62
B K	SM50Y	50.35	2772	320	7.42	358	1.120	15.77	13.44	12.06	13.50
C K	SM50Y	40.49	1604	217	6.29	244	1.127	14.70	15.84	8.61	9.71

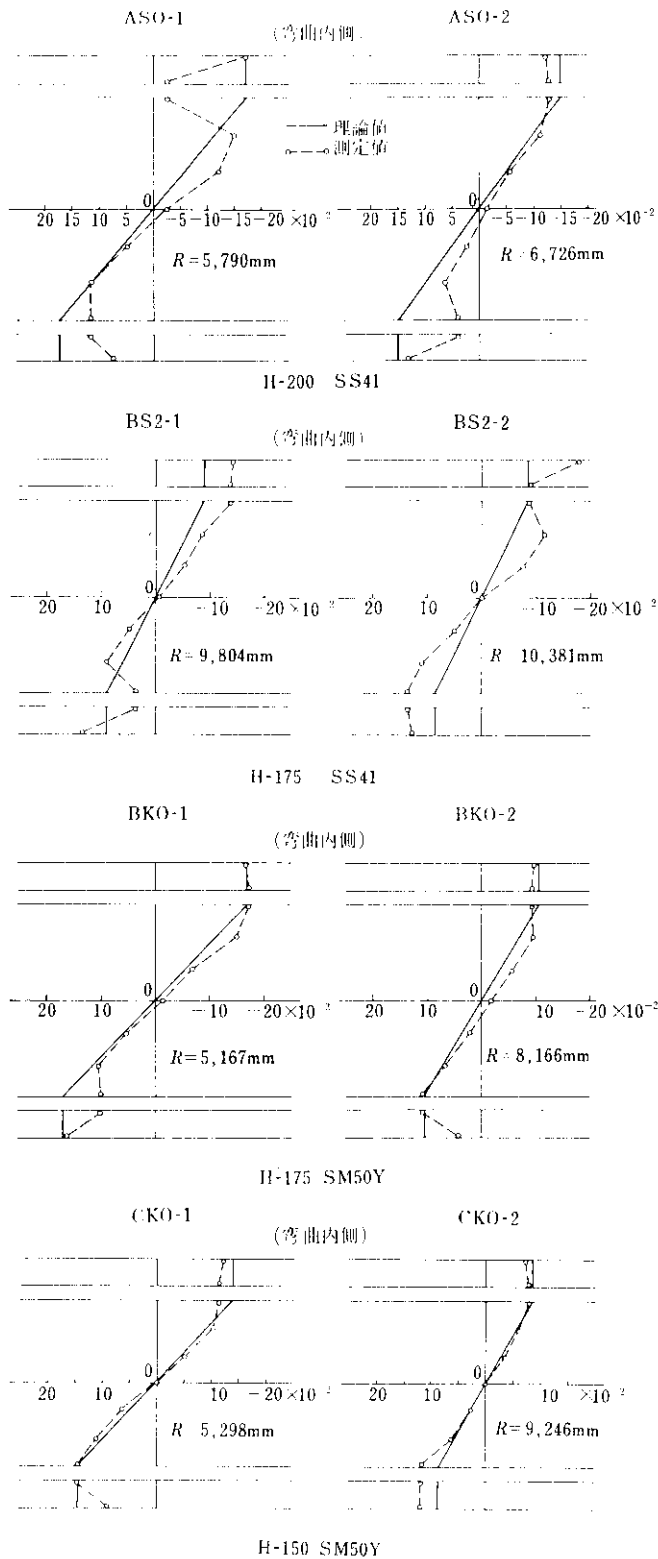


図 3 冷間曲げ加工後の残留ひずみ分布 (圧延による残留ひずみを除く)

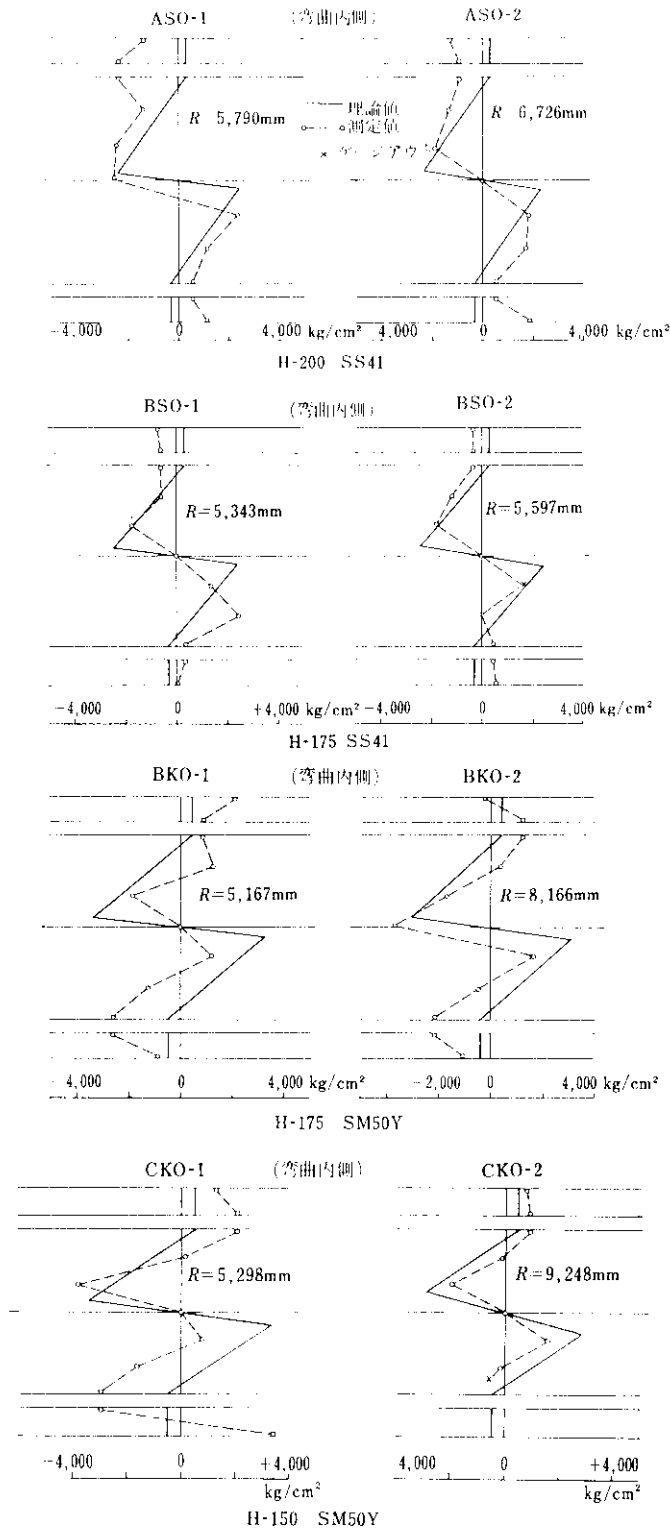


図 4 冷間曲げ加工後の残留応力分布 (圧延による残留応力を除く)

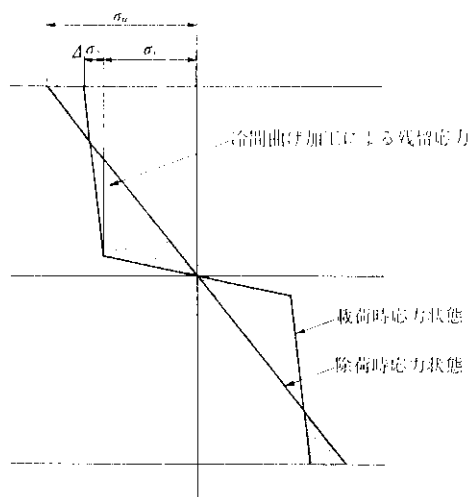


図5 冷間曲げ加工による残留応力計算方法

メントを除荷時曲モーメント M_u とした場合, M_u を弾性断面係数で除した値は弾性除荷による垂直縁応力 σ_u である。したがって, 残留応力 σ_r は次式で与えられる (図5参照)。

$$\sigma_r = (\sigma_y + \Delta\sigma_s) - \sigma_u \quad (1)$$

実験値は, 実測残留ひずみ量に鋼材のもつ弾性係数を用いて算出した値である。ここで用いた試験体は, 後に述べる圧縮試験用にも使用した。

図からわかるようにどの試験材も, ひずみ分布の実験値と理論値は比較的よく一致していること, および圧縮側の残留ひずみはおおよそ $15,000 \times 10^{-6} \sim 17,000 \times 10^{-6}$ の範囲にあり, 各鋼材のひずみ硬化開始付近のひずみ量にほぼ等しいことが認められる。なお, ほとんどの試験材は, 曲率半径が4 m以下になると写真2のように降伏線を生

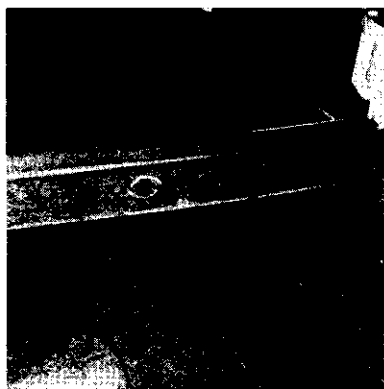


写真2 降伏線



写真3 座屈形状

じ始め, さらに曲げを加えると写真3のような座屈変形を呈する。本実験から, 局部変形が観察されない曲率半径 (5~6 m) を有する部材の加工前と加工後の断面の縮みは, 約2%位であった。

また, 直材の熱間圧延による残留応力の分布を切断法により求めた結果を図6に示す。冷間曲げ加工時の部材に生じる残留ひずみは, 上に述べたようにひずみ硬化開始近傍のものであり, 図に示すようなたかだか弾性限内の残留応力が曲げ加工性に与える影響は無視できる。

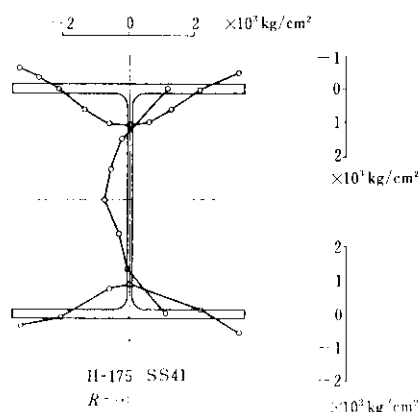


図6 直材の熱間圧延による残留応力分布

(3) 加工性

加工時の実測ひずみ量をもとに計算した曲率半径を, あらかじめ決められた目標曲率半径で除したものを加工性効率とした場合, 各タイプについては表4のようになる。全平均効率は128.6%で

表 4 加工性効率

タイプ	効率 (%)	タイプ	効率 (%)	タイプ	効率 (%)	タイプ	効率 (%)
AS0-1	86.5	BS0-1	145.8	BK0-1	107.5	CK0-1	145.6
AS0-2	133.5	BS0-2	165.0	BK0-2	110.8	CK0-2	95.4
AS3-1	97.2	BS2-1	174.0	BK2-1	117.8	CK1-1	150.8
AS3-2	119.0	BS2-2	174.5	BK2-2	225.0	CK1-2	97.6
平均	109.1	平均	164.8	平均	139.9	平均	122.4

あり、目標とする曲率半径に比較的近い曲率が得られており、加工性は良好なことがわかる。

図7は、横軸に曲率（加工時の彎曲度）、縦軸に曲げ加工時のウェブにおける上下端のひずみ量を引張試験から得られた降伏ひずみで無次元化し

た値をとり、各試験体の値をプロットしたものである。図にみられる曲線は、図8を参考に次式から計算したものである。

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_{max}}{h/2(1-\epsilon_{max})-a\cdot\epsilon_{max}} \quad (2)$$

SS41材(AS, BS)および SM50Y材(BK, CK)の両方とも比較的理論曲線の付近にばらついている。したがって、加工時の彎曲度とウェブのひずみ量との関連性は、良好といえる。このことから冷間曲げ加工性は良好といえる。

(4) 最小曲率半径

冷間曲げ加工時における断面の最小曲率半径を求めるには次のような3つの方法が考えられる。

- 冷間曲げ加工時の局部変形発生時のひずみ量をもって限界ひずみ量と定め、最小曲率半径を算出する方法。
- すべての試験材のフランジの幅厚比が小さいこと(14.0~16.8)から、局部座屈は、ひずみ硬化域に入ってから始まるものとみて²⁾、引張試験から得られたひずみ硬化開始時のひずみ量をもって限界ひずみ量として、最小曲率半径を算出する方法。
- 曲げ試験(2点载荷)において視覚的に観察した局部変形発生時のひずみ量を限界ひずみ量として、最小曲率半径を算出する方法。

H-200, H-175の幅厚比はそれぞれ16.7, 15.9であり、17に近いと局部座屈はひずみ硬化開始直後に生ずるものと考えられる²⁾。したがってここでは(b)の方法によりSS41材のH-200, H-175の最小曲げ曲率を(2)式によって算出し冷間曲げ加工によるロールベンダーの変位量と曲率半径の

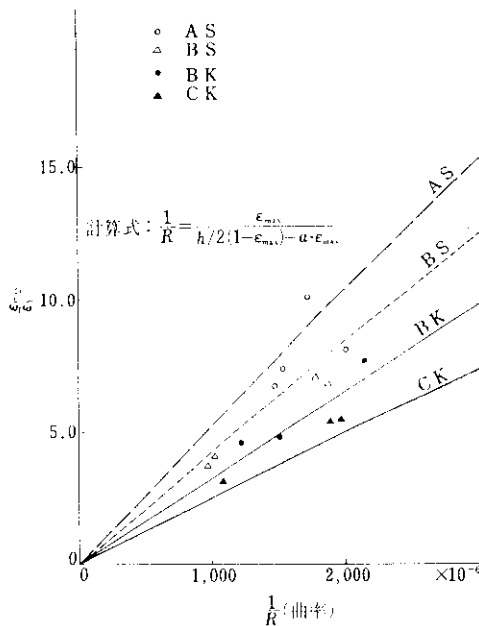


図 7 冷間曲げ加工による残留ひずみ量と曲率の関係

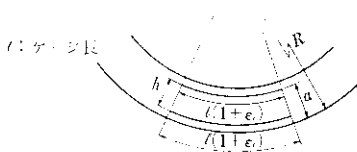


図 8 ひずみと曲率半径

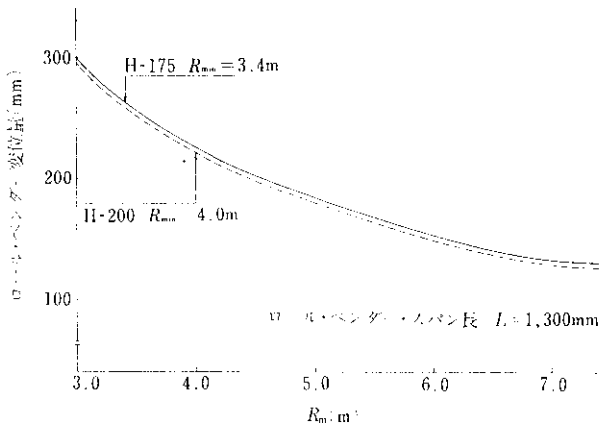


図9 冷間曲げ加工によるロール・ベンダー変位量と曲率半径の関係

関係をプロットしたのが図9である。

ただしH-200のひずみ硬化開始時のひずみ度は一般にいわれている降伏点のひずみ度の10～12倍に比べ高いので除外し、H-175のひずみ硬化開始時のひずみ度を用いて計算した。これらの値は曲げ加工性について経験的にいわれている最小曲げ曲率半径とほぼ一致しており、このような方法による最小曲げ曲率半径の推定が可能になった。

3. 圧延H形鋼彎曲部材の圧縮試験

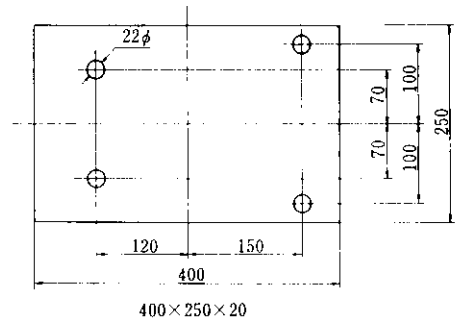
3.1 実験目的

冷間加工により曲げられた部材に偏心圧縮力が作用したとき、部材の極限強度、変形性状が部材の残留応力分布、曲率半径、荷重の偏心量、フランジの幅厚比、などによってどのように影響されるかを明らかにしようとしたものである。

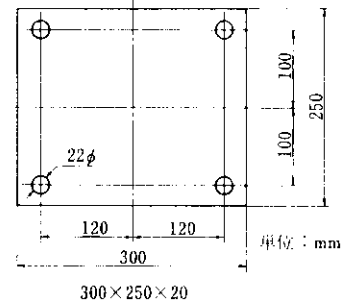
3.2 試験柱および実験方法

試験柱は、圧延H形鋼部材の直材のものと冷間曲げ加工によりアーチ状に曲げられた部材を長さ1mに切り取り、その両端に受圧板を溶接したものである。受圧板の詳細図を図10に示す。

受圧板には加圧板を剛結するためのボルト用の穴(径2.2mm)がけられており、加圧板の詳細図を図11に示す。直試験柱および彎曲試験柱の詳細図をそれぞれ図12、図13に示す。

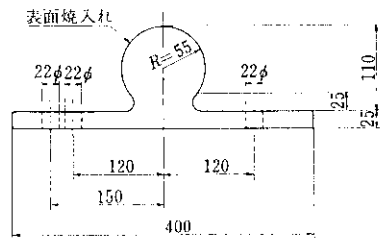


(a) 偏心圧縮柱端板

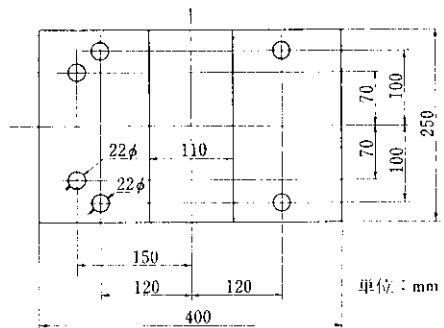


(b) 中心圧縮柱端板

図10 試験柱端板



(a) 側面図



(b) 平面図

図11 加圧板

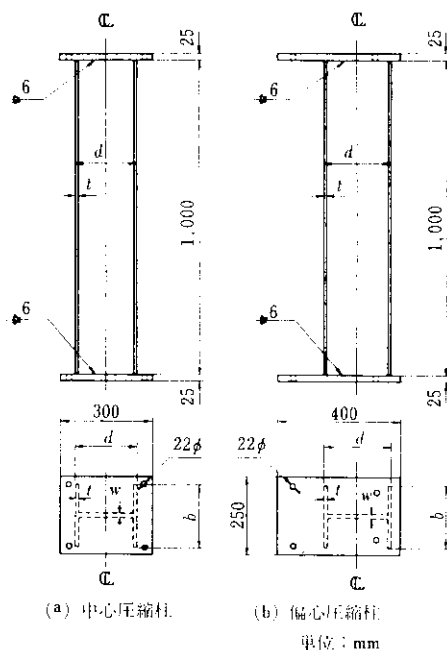


図 12 彎曲度のない試験柱

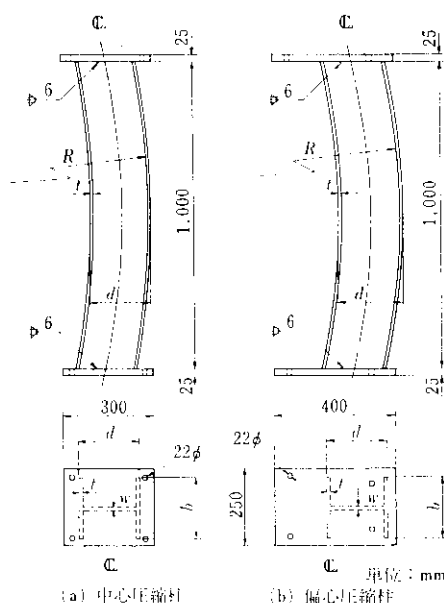


図 13 彎曲度のある試験柱

表 5 圧縮試験柱断面寸法

タイプ	寸 法	材 質	試験柱数量	
			$e=0$	$e=d/2+10$
A S	P H-200×200× 8 ×12	SS 41	3	3
B S	P H-175×175×7.5×11	SS 41	3	3
B K	P H-175×175×7.5×11	SM50 Y	3	3
C K	P H-150×150× 7 ×10	SM50 Y	3	3

試験柱の数量を鋼材の種類および断面形状と一緒に各タイプ別に示したのが表 5 である。実験に使用した 24 本の試験柱の実測寸法を表 6 に示

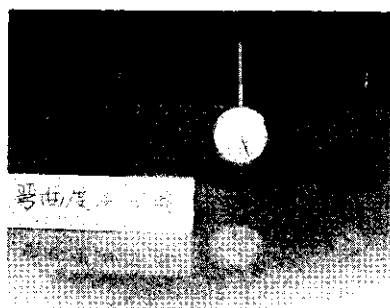


写真 4 彎曲度測定器

す。

なお、彎曲度の測定は、写真 4 にみられるような彎曲度測定器を用い、試験柱の任意の 3 点で測定することによりおこなった。表 6 の実測断面寸法を各タイプ別に平均して示したのが表 7 であり、以後の数値計算に用いた値である。

試験は名古屋大学工学部建築科に設置されている前川製作所製 300 t 長柱試験機を用いておこなった。全景を写真 5 に示す。載荷は、弾性域では荷重制御でおこない、塑性域にいったからは垂直方向に取りつけたダイヤルゲージを用いてひずみ制御をおこなった。水平たわみ量およびフランジの局部変形量の測定は、試験柱中央部の測定点を

表 6 試験柱断面寸法

試験柱	d (cm)	b (cm)	w (cm)	t (cm)	L (cm)	R (mm)
AS0-1	19.80	19.97	0.82	1.19	99.70	5.790
AS0-2	19.95	19.85	0.85	1.17	99.70	6.726
AS0-3	20.14	19.82	0.78	1.19	99.67	—
AS3-1	19.71	19.93	0.81	1.18	99.73	4.946
AS3-2	19.77	19.95	0.81	1.18	99.73	6.519
AS3-3	20.09	19.90	0.78	1.18	99.75	—
BS0-1	17.25	17.40	0.80	1.10	99.60	5.343
BS0-2	17.24	17.40	0.75	1.12	99.80	5.597
BS0-3	17.50	17.50	0.77	1.12	99.97	—
BS0-3*	17.48	17.54	0.74	1.09	100.00	—
BS2-1	17.28	17.50	0.79	1.10	99.77	9.804
BS2-2	17.29	17.50	0.76	1.10	99.80	10.381
BS2-3	17.47	17.51	0.77	1.10	99.81	—
BK0-1	17.21	17.51	0.77	1.12	99.69	5.167
BK0-2	17.39	17.52	0.78	1.12	99.61	8.166
BK0-3	17.47	17.50	0.77	1.12	99.54	—
BK2-1	17.17	17.51	0.76	1.10	99.78	4.692
BK2-2	17.26	17.49	0.73	1.10	99.82	6.581
BK2-3	17.44	17.50	0.77	1.12	100.08	—
CK0-1	14.70	15.36	0.72	1.05	99.48	5.298
CK0-2	14.74	15.15	0.74	1.02	99.52	9.246
CK0-3	14.98	15.06	0.73	1.11	99.89	—
CK1-1	14.68	15.11	0.72	1.02	99.80	5.073
CK1-2	14.72	15.13	0.74	1.02	99.68	7.722
CK1-3	14.95	15.05	0.73	0.97	99.88	—

* 残留応力測定用供試体

表 7 圧縮試験柱平均断面寸法

タイプ	d (cm)	b (cm)	w (cm)	t (cm)	L (cm)
AS	19.91	19.90	0.81	1.18	99.71
BS	17.34	17.47	0.77	1.11	99.79
BK	17.32	17.51	0.76	1.11	99.75
CK	14.80	15.14	0.73	1.03	99.71

1台のトランシットを用いておこなった。ひずみ量の測定には、引張試験に用いたと同じ型の塑性ひずみゲージを1つの断面につき計13枚使用した。水平たわみ量、フランジ局部変形量およびひずみ量の測点の詳細図を図14および図15に示す。

縦方向変位量、部材端での回転量は、写真6にみられるように、ダイヤルゲージを3点に設置し測定した。その他試験柱の表面に石灰を水に溶かして塗り乾燥後、载荷による石灰の剝離状態から試験柱の降伏状態を観察した。

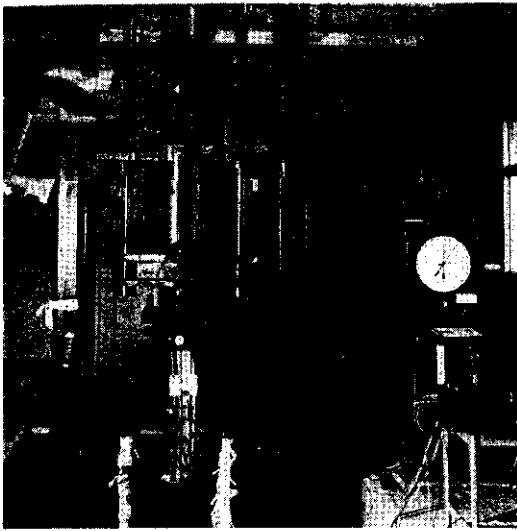


写真5 圧縮試験機

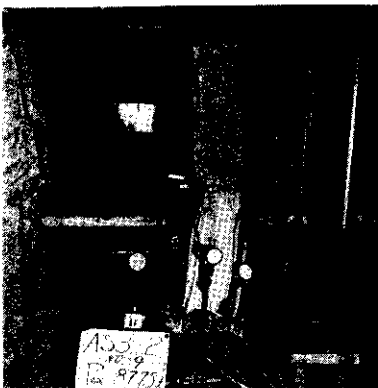
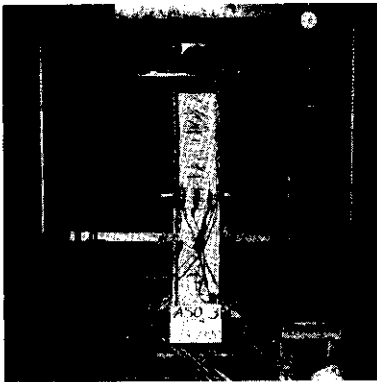
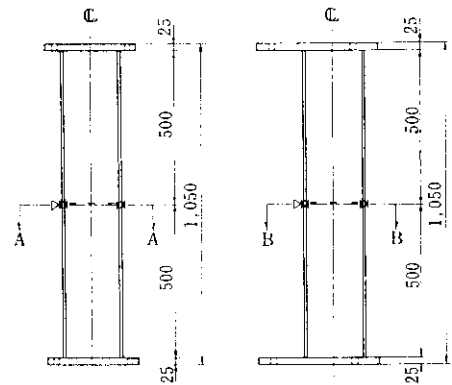


写真6 圧縮試験



- : ひずみゲージ貼付位置
- : 中央断面のフランジ水平変位測定点
- ▷ : 中央断面の試験柱水平変位測定点

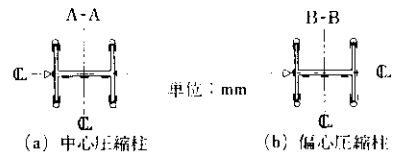
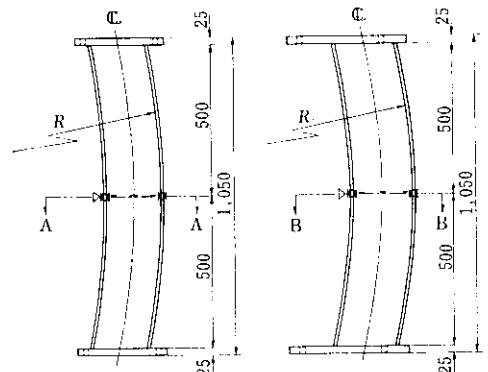


図14 彎曲度のない試験柱の測定点



- : ひずみゲージ貼付位置
- : 中央断面のフランジ水平変位測定点
- ▷ : 中央断面の試験柱水平変位測定点

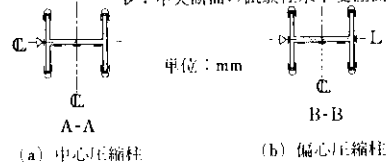


図15 彎曲度のある試験柱の測定点

3.3 実験結果とその検討

(1) 荷重と水平たわみの関係

図16は各試験柱について、実験および理論計算より求めたものである。なおこの場合、縦軸は実測荷重を降伏荷重 $P_F (=A\sigma_F)$ で無次元化している。図中の弾性曲線は、弾性理論をもとにして得られる弾性曲線を示しており、この場合の荷重と水平たわみの関係は次式で示される³⁾。

$$\delta = \frac{\alpha \cdot a}{1 - \alpha} + e \left[\sec \frac{kL}{2} - 1 \right] \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $\alpha = \frac{k^2 \cdot L^2}{\pi^2}$, $k = \sqrt{\frac{P}{EI_x}}$

ここに、柱のたわみ形は、サイン曲線とみなしてある。

塑性崩壊曲線^{4),5)}は鋼の応力-ひずみ曲線を剛-塑性とみなしたときの塑性崩壊曲線を示している。すなわち、仮定した応力-ひずみ曲線に対して、与えられた断面形の極限状態における曲げモーメント、軸方向力および曲率の関係は次式で示される。

$$M = F(P, \phi) \dots \dots \dots (4)$$

また、柱の中央断面における曲げモーメントは、偏心率、初期たわみを考慮すれば次のようになる。

$$M = P \cdot (e + a + \delta) \dots \dots \dots (5)$$

したがって(4)式と(5)式を等置し、試行錯誤法によって荷重 P と水平たわみ δ の関係を求めれば崩壊曲線を得ることができる。

ひずみ硬化崩壊曲線⁵⁾は鋼材の応力-ひずみ曲線を剛-ひずみ硬化曲線とみなしたときのひずみ硬化崩壊曲線を示している。この曲線の求め方は塑性崩壊曲線の場合と同じである。

図16から一般に次のことが言えよう。

- (a) 実験で求めた荷重-たわみ曲線は、塑性崩壊曲線とひずみ硬化崩壊曲線をそれぞれ下界、上界曲線とした時の中間に位する。また、変形は塑性崩壊曲線をすぎると急激に増加する傾向にある。
- (b) 直材の場合は、偏心のある場合、ない場合とも、塑性域での変形性状は、塑性崩壊曲線に沿って変化するようにである。すなわち、直

材では断面の垂直応力分布がひずみ硬化域に入ることなく変形が増大していくが、実験に用いたような細長比(11.48~15.97)の彎曲部材では、断面の垂直応力分布は、ひずみ硬化域に入っており、その後に変形が急増する。

- (c) フランジの局部座屈の発生(矢印)にもなつて、柱の耐荷力は、ほとんど増加しなくなり極限強度に達する。

また、荷重-たわみ曲線の実験値を直材、曲率半径の比較的大きい試験柱($R=6.5 \sim 10.4$ m)、曲率半径の比較的小さい試験柱($R=4.6 \sim 5.8$ m)に分けて示すと図17のようになる。

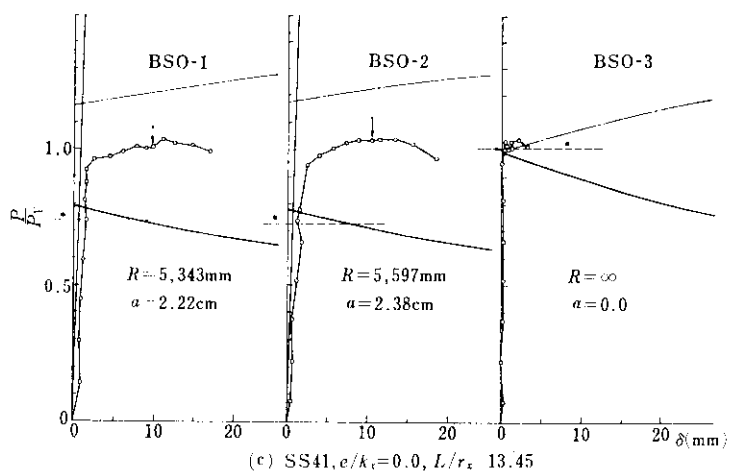
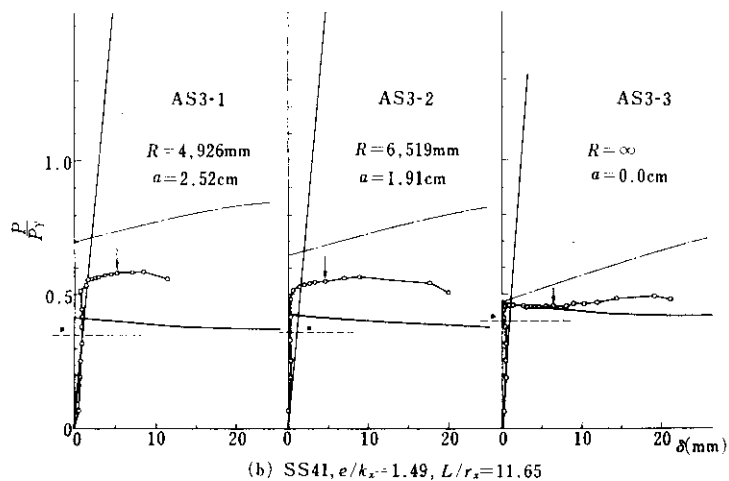
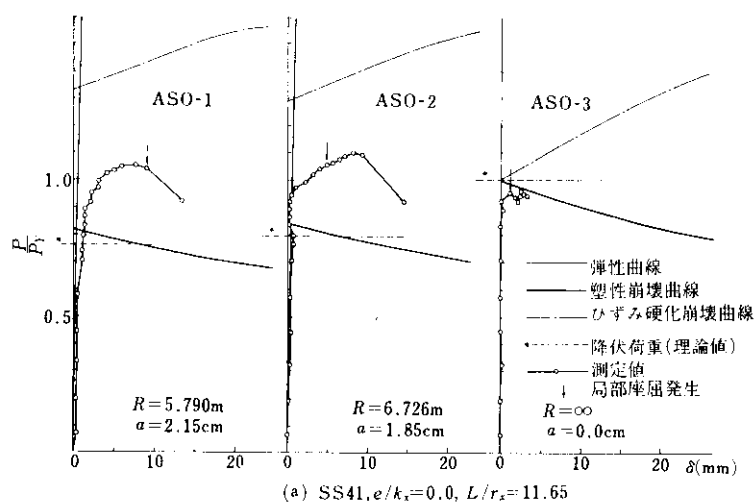
この図から次の傾向がみられる。すなわち、偏心率のない($e=0$)圧縮試験では、極限強度は曲率半径の大小に影響されているのに対して、偏心率をもつ圧縮試験柱($e=8.5, 9.75, 11.0$ cm)では、彎曲部材の極限強度は直材のそれよりも幾分高くなっている。また偏心のない場合は直材、彎曲部材とも荷重-変形曲線は、最高荷重近傍では急激な変化を示しているが、偏心のある場合の荷重-変形曲線は、最高荷重近傍では急激な変化はなく平坦である。

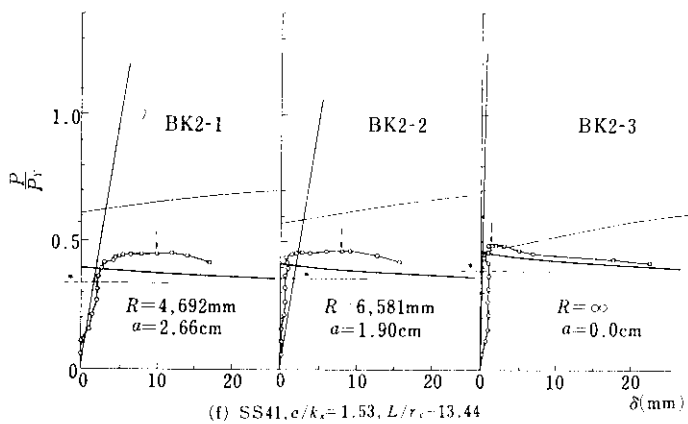
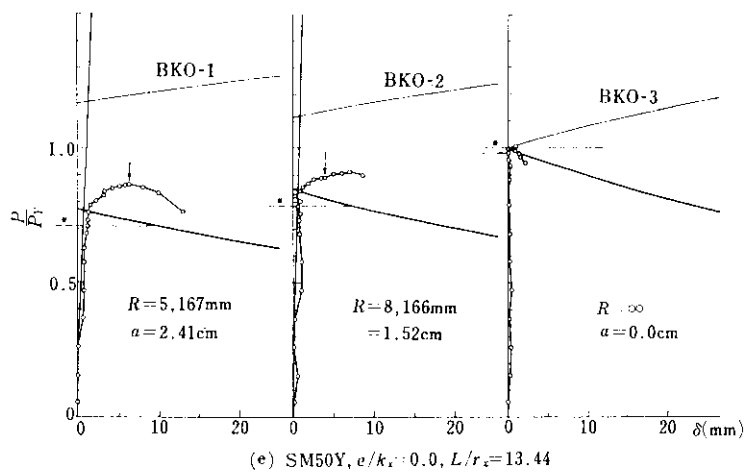
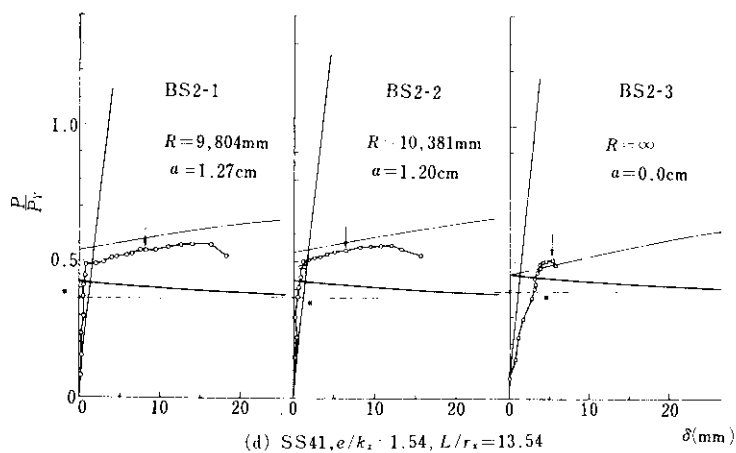
(2) 荷重とフランジの局部変形との関係

図18に中央断面におけるフランジの局部変形量と荷重との関係を示す。フランジの局部変形量が急激に変化する直後に部材は最高荷重に達していることがわかる。これらの図から局部変形開始点はかなり明確につかむことができるようである。一方、彎曲度(初期たわみ量)の大小による荷重フランジの局部変形量の曲線形の相違は、あまりみられないようである。

(3) 荷重とフランジのひずみ量との関係

図19にフランジのひずみ量と荷重との関係を示す。ほとんどの場合、最高荷重付近での彎曲内側におけるフランジの最高圧縮ひずみ量は、約 $20,000 \times 10^{-6} \sim 30,000 \times 10^{-6}$ であるのに対して、彎曲外側におけるフランジの最高引張ひずみ量は、約 $1,500 \times 10^{-6} \sim 2,000 \times 10^{-6}$ である。また、ひずみの反転(strain reversal)がみられるのは、ひずみ量が約 $15,000 \times 10^{-6} \sim 20,000 \times 10^{-6}$ である。これは、引張試験から得られた鋼材のひず





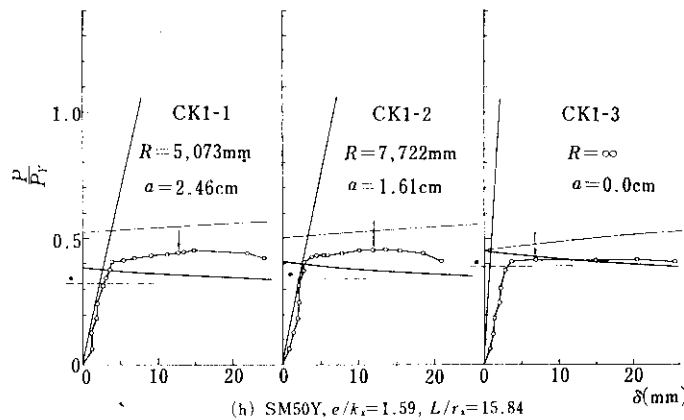
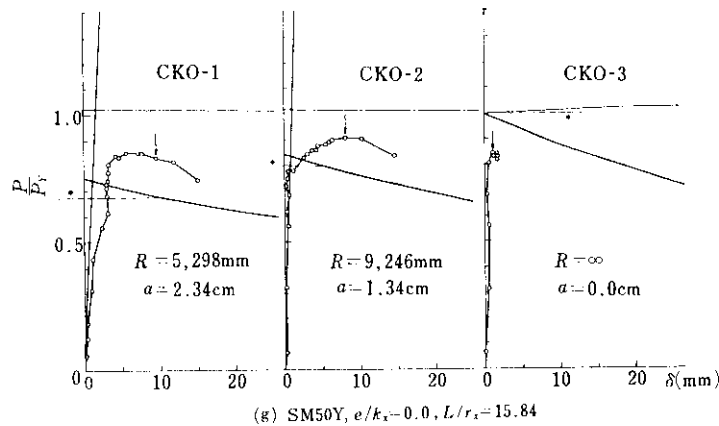


図 16 荷重—水平たわみ曲線

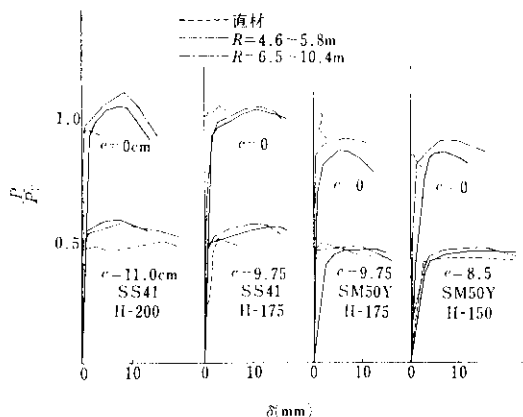


図 17 荷重—水平たわみ曲線

み硬化開始付近のひずみ量の大きさであり、ひずみの反転，すなわち，局部座屈の発生は，ひずみ硬化開始点付近で起こることがわかる。

(4) 軸方向力と曲げモーメントの相関関係

圧縮試験から得られた結果を無次元化した軸方向力 (P/P_y , $P_y=A\cdot\sigma_y$)，と曲げモーメント (M/M_p , $M_p=Z_x\cdot\sigma_y$) の相関関係曲線上にプロットすると図20のように示される。図中，点線は軸方向力と曲げの両方の影響によって断面が初めて降伏する時の状態を示し，太実線は，鋼材の性質を剛塑性体と仮定して求めた，極限時における軸方向と曲げモーメントの相関曲線を示す。曲線(1) (一点鎖線)，曲線(2) (二点鎖線)，曲線(3) (細実線) は，鋼材の性質を剛ひずみ硬化性と仮定して

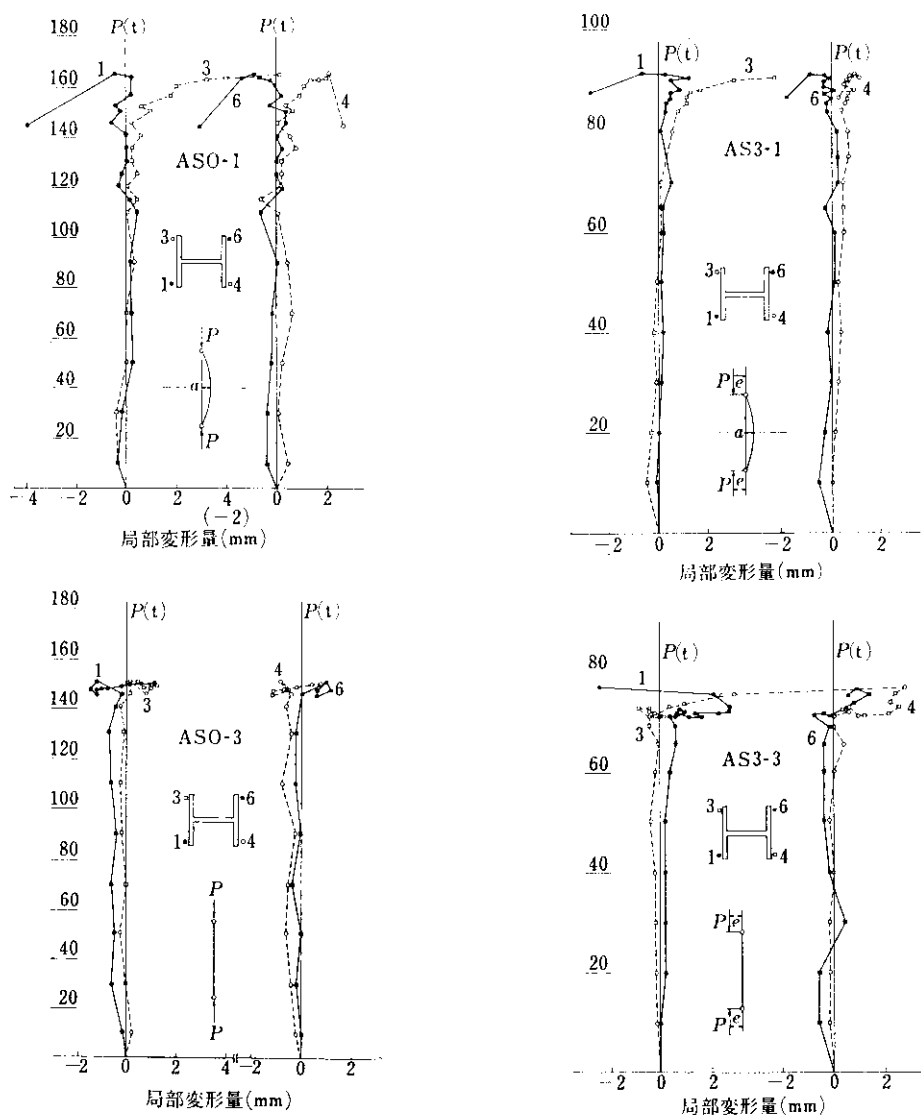


図 18 荷重とフランジ局部変形量の関係

求めた極限時における軸方向力と曲げモーメントの相関関係を示すものであり、(6)式⁴⁾において、それぞれ、曲率を(1) $\phi = 1.0\phi_Y$ (2) $\phi = 7.0\phi_Y$ (3) $\phi = 12.31\phi_Y$ として求めた曲線である。

〔中立軸がウェブ内にある場合〕

$$\frac{M}{M_P} = 1 - \frac{w}{4Z_x} \left[\frac{(P/P_Y)}{\frac{w}{A} + \frac{K \cdot \phi}{d}} \right]^2 + \frac{K \cdot \phi}{Z_x \cdot d} \times \left[b \cdot t (d \cdot d_w + t) + \frac{1}{6} (w \cdot d w^3 + b \cdot t^3) \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$0 \leq P/P_Y \leq d_w \left(\frac{w}{A} + \frac{K \cdot \phi}{d} \right)$$

〔中立軸がフランジ内にある場合〕

$$\frac{M}{M_P} = \frac{b}{Z_x} (d - h_f) h_f + \frac{K \cdot \phi}{Z_x \cdot d} \times \left[b \cdot t (d \cdot d_w + t) + \frac{1}{6} (w \cdot d w^3 + b \cdot t^3) \right] \quad \dots\dots\dots (6')$$

$$d_w \left(\frac{w}{A} + \frac{K \cdot \phi}{d} \right) \leq P/P_Y \leq 1 - \frac{2b}{A}$$

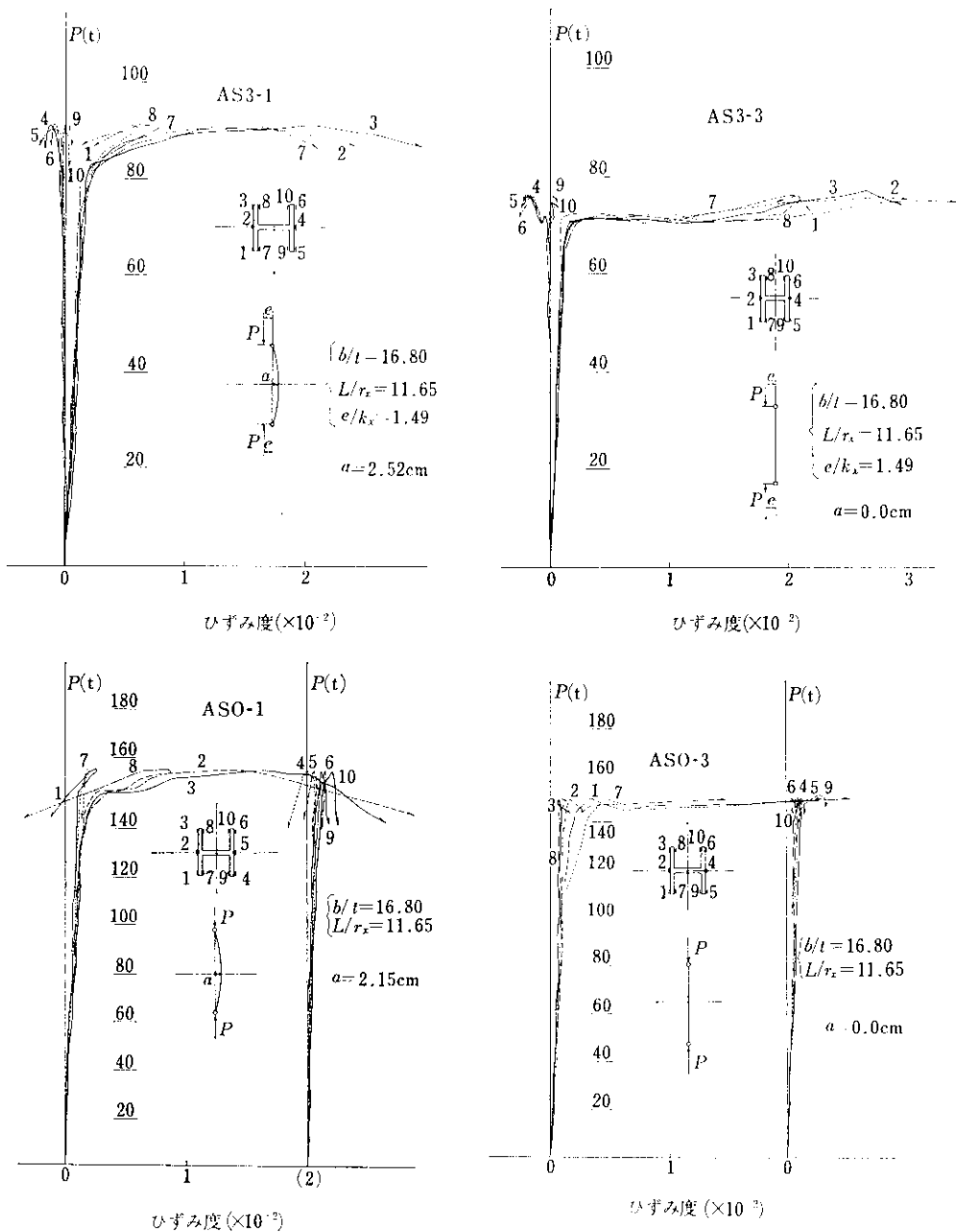


図 19 荷重とひずみ度の関係

$$\times \left[\frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} + \frac{K\varphi}{bd}\beta} + \frac{2K\varphi}{d} \sqrt{\frac{d^2}{4} + \frac{K\varphi}{bd}\beta} \right]$$

ただし, $\varphi = \phi / \phi_r$,

$$\beta = bt(d \cdot d_w + t) + \frac{1}{6}(w \cdot d_w^3 + bt^3)$$

$$h_f = \frac{P/P_Y + K\varphi - 1 + 2bd/A}{2(b/A + \frac{K\varphi}{d})} \cdot K = E_{ST}/E$$

なお計算値は、試験柱の中で平均断面に相当するBSタイプ (SS41, H-175) の断面について求めたものである。図から次のことがいえる。

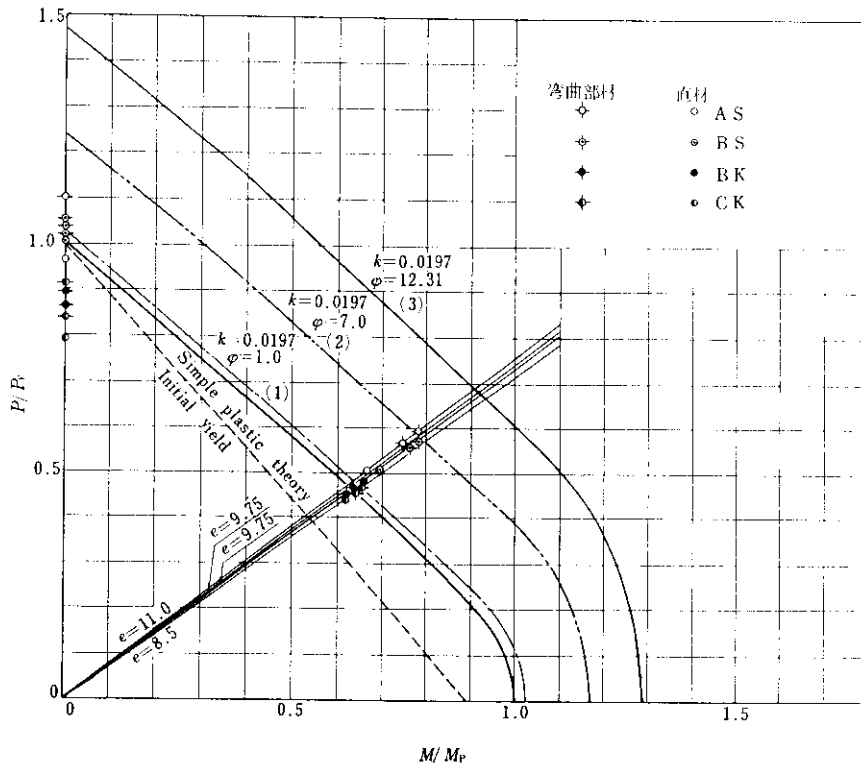


図 20 軸方向力-曲げモーメント相関曲線

(a) 直材よりも彎曲部材の方が極限強度は高いようである。これは、図16の塑性崩壊曲線と実験値を比較してもわかるように、直材よりも彎曲部材の方が早期にひずみ硬化域に入るため、ひずみ硬化域に入った後の荷重の増加が期待できるためである。その影響の著しいことは、図16の実験値をみても明確にわかる。その他、直材は一般に荷重とひずみの調整(alignment)において彎曲部材より困難なため、全断面が降伏する前に、弱軸まわりの曲げによって崩壊する場合がある。それに対して彎曲部材は、彎曲度の影響によって部材中央断面にて最大曲げモーメントが集中し易く、その断面での垂直応力分布により強度が決定されるためと考えられる。

(b) SS41は、ひずみ硬化の影響が著しく、曲線(2)付近に実験値のばらつきがみられる。

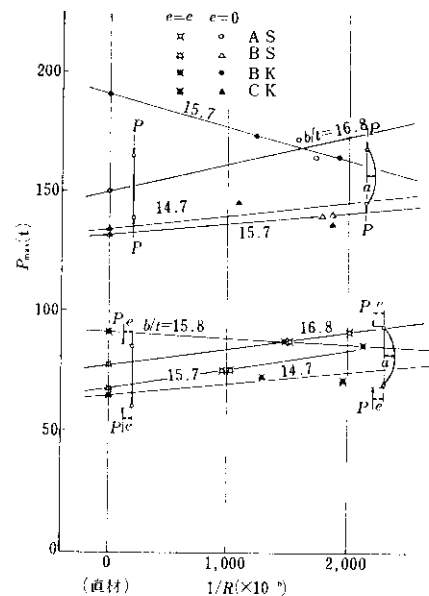


図 21 極限荷重と彎曲度の関係

表 8 圧縮試験結果

試験柱	材 質	$A(\text{cm}^2)$	$e(\text{cm})$	$R(\text{m})$	$a(\text{cm})$	b/t	L/r	$P_{\max}(\text{t})$	$P_{\max}/P_y$	$M_{\max} = P_{\max} \times e$	$M_{\max}/M_p$	座屈形式
AS0-1	SS41	61.81	—	5.790	2.15	16.8	11.72	164.50	1.044	—	—	*
AS0-2	SS41	61.42	—	6.726	1.85	16.9	11.67	172.00	1.098	—	—	*
AS0-3	SS41	61.02	—	—	0.0	16.7	11.48	150.00	1.968	—	—	**
AS3-1	SS41	61.09	11.00	4.946	2.52	16.9	11.76	91.25	0.585	10.038	0.792	*
AS3-2	SS41	61.18	11.00	6.519	1.91	16.9	11.73	87.75	0.562	9.653	0.759	*+**
AS3-3	SS41	60.79	11.00	—	0.0	16.9	11.52	76.75	0.495	8.443	0.655	*
BS0-1	SS41	50.32	—	5.343	2.22	15.8	13.54	140.00	1.038	—	—	*
BS0-2	SS41	50.23	—	5.597	2.38	15.5	13.50	140.50	1.043	—	—	*
BS0-3	SS41	50.95	—	—	0.0	15.6	13.35	142.00	1.040	—	—	**
BS2-1	SS41	50.41	9.75	9.804	12.7	15.9	13.52	75.50	1.559	7.361	0.770	*
BS2-2	SS41	49.97	9.75	10.381	12.0	15.9	13.48	75.75	0.565	7.386	0.776	*
BS2-3	SS41	50.61	9.75	—	0.0	15.8	13.35	68.00	0.501	6.630	0.682	***
BK0-1	SM50Y	50.75	—	5.167	2.41	15.6	13.53	164.50	0.860	—	—	*
BK0-2	SM50Y	51.06	—	8.166	1.52	15.6	13.40	173.00	0.899	—	—	*
BK0-3	SM50Y	50.93	—	—	0.0	15.6	13.31	190.50	0.993	—	—	*+**
BK2-1	SM50Y	49.90	9.75	4.692	2.66	15.9	13.57	86.50	0.460	8.434	0.636	*
BK2-2	SM50Y	49.47	9.75	6.581	1.90	15.9	13.46	88.00	0.472	8.580	0.647	*
BK2-3	SM50Y	50.90	9.75	—	0.0	15.6	13.41	91.00	0.475	8.873	0.646	*+**
CK0-1	SM50Y	41.33	—	5.298	2.34	14.6	15.88	137.50	0.837	—	—	*
CK0-2	SM50Y	40.30	—	9.246	1.34	14.9	15.89	145.50	0.909	—	—	*
CK0-3	SM50Y	42.75	—	—	0.0	14.6	15.68	134.50	0.792	—	—	***
CK1-1	SM50Y	39.93	8.5	5.073	2.46	14.8	15.97	72.00	0.454	6.120	0.644	*+**
CK1-2	SM50Y	40.25	8.5	7.722	1.61	14.8	15.94	73.25	0.458	6.226	0.650	*+**
CK1-3	SM50Y	38.69	8.5	—	0.0	14.5	15.73	66.75	0.434	5.674	0.608	*

* 局部座屈

** 弱軸まわりの曲げによる座屈

*** ジャッキの傾き過ぎ(除荷→再負荷)

SM50Yの方は、鋼材の性質を剛塑性体として求めた曲線上によくのっている。SS41, SM50Yとも、それぞれの鋼材のひずみ硬化の特性によって柱の実験結果がよく説明されるようである。

(5) 極限荷重と彎曲度との関係

彎曲度と $(1/R)$ 極限荷重との関係をグラフ化したものを図21に示す。傾向として、彎曲度の増加とともに極限荷重の増加が幾分みられるようである。

表8に圧縮試験結果をまとめて示す。

4. ま と め

以上得られた結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 冷間曲げ加工により生ずる断面の初期応力分布の理論値と実験値との間には良好な一致が見られた。実験に用いた断面が冷間曲げ加工によって局部変形を生じる限界の曲率半径、すなわち、冷間曲げ加工が可能な最小曲率半径は、H-175の断面で約3.5m、H-200の断面で約4mである。これは、当社葺合工場で採用されている支保工アーチ曲げ許容半

径の値、H 175 で 3.5m, H 200 で 3.8m と良好な一致をみせている。このことから、従来経験的に求められていた彎曲H形鋼の最小曲率半径を理論的に説明することが可能である。

- (2) 曲げ加工性および、圧縮強度試験における極限強度におよぼす残留応力の影響はないことがわかった。すなわち冷間曲げ加工によって部材に与えられる彎曲度は R が 4 ~ 6 m であり鋼材のひずみ硬化域近傍まで変形があたえられるので、残留応力のもつひずみの影響は小さくほとんど問題にならない。また圧縮強度試験における極限強度を生じている時点での部材の変形はひずみ硬化域まで進んでいるので曲げ加工性と同等なことがいえる。
- (3) 圧縮試験における彎曲部材の極限強度は、彎曲内側の圧縮側フランジの局部座屈によって決定されている。
- (4) 中心圧縮、偏心圧縮のいずれの試験柱についても、ひずみ硬化の影響が顕著にあらわれている。これは、実験に用いた試験柱の細長比およびフランジの幅厚比が小さいためであり、各鋼材(SS 41, SM 50Y)のひずみ硬化の特性を良くあらわしているようである。
- (5) 直材よりも、彎曲部材の方が極限強度は高いようである。これは、直材よりも彎曲部材の方が早期にひずみ硬化域に入るため、ひずみ硬化域に入った後の荷重の増加が期待できることが原因と思われる。

以上、本研究で得られた結果を、鋼アーチ支保工部材に適用するにはさらに細長比の大きな彎曲部材の強度に対する検討、ならびに部材中間に作用する土圧強度とその分布形をも考慮したより実際の考察が必要であろう。

使用記号

A	H形鋼の総断面積
a	柱の中央における初期たわみ量、式(2)においては図8に示すもの
b	フランジ幅
c	$=d/2$
d	H形鋼断面高
d_w	ウェブ高
E	弾性係数
E_{ST}	ひずみ硬化係数
e	荷重の偏心量
h	図8に示すゲージ間距離
I_x	x 軸まわりの断面2次モーメント
k_x	断面の核半径 ($=S_x/A$)
L	柱長
ℓ	図8に示すゲージ長
M	曲げモーメント
M_u	除荷時曲げモーメント
M_Y	降伏曲げモーメント
M_P	全塑性曲げモーメント
P	軸方向力
P_Y	降伏軸方向力
R	彎曲部材の曲率半径
r_x	x 軸まわりの断面2次半径
S_x	断面係数 ($x-x$ 軸)
t	フランジ厚
w	ウェブ厚
Z_x	x 軸まわりの塑性断面係数
δ	柱中心部水平たわみ量
ε_c	圧縮ひずみ
ε_t	引張ひずみ
ε_{max}	最大ひずみ
ε_Y	降伏点ひずみ度
σ_r	残留応力
$\Delta\sigma_s$	ひずみ硬化による応力の増分
σ_u	弾性除荷による垂直縁応力
σ_Y	降伏点応力度
ϕ	曲率
ϕ_Y	降伏曲率 ($=2\varepsilon_Y/d$)

参考文献

- たとえば、坂本真雄：トンネル鋼アーチ支保工，〔山海堂〕，今田徹：鋼アーチ支保工の力学的性質，第9回日本道路会議一般論文集，昭和44年など
- 日本建築学会：鋼構造塑性設計規準案・同解説，24
- Timoshenko, S.; Gere, J.M.: Theory of Elastic Stability; (1961), 35 [McGraw Hill, New York]
- Murrey, N.W.: "The Determination of the Collapse Loads of Rigidly Jointed Frameworks with

Members in Which the Axial Forces are Large." Proc. of ICE, Part III, 5 (1956)

- 5) 草間孝志：“偏心圧縮柱の荷重・変形状に与えるひずみ硬化の影響”，土木学会論文報告集，（1970）184，1

