

Structural Characteristics of "K Column R®" Manufactured by Roll-Forming Process



菊川 春三

Shunso Kikukawa
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建築
建材研究室 主任研究
員(課長)



高橋 功

Isao Takahashi
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所建築
建材研究室 室長(部
長)・工博



橋本 順次

Junji Hashimoto
エンジニアリング事業
部 鉄構技術部鉄構開
発室 主査(課長)



富沢 良信

Yoshinobu Tomisawa
鉄鋼技術本部 鋼管技
術部 主査(課長)



清水 哲雄

Tetsuo Shimizu
技術研究本部 鉄鋼研
究所鋼材研究部鋼管研
究室 主任研究員(掛
長)



杉本 徹

Tōru Sugimoto
知多製造所 技術生産
管理部技術管理室 主
査(課長)

要旨

冷間ロール成形角形鋼管は設計上の優位性のゆえに一般普及して
いる一方、建築構造部材の実用サイズでの力学的性状調査例は少な
い。そこで、K コラム R® を対象として、断面内の機械的性質調
査や短柱圧縮試験、部材繰返し曲げ試験といった構造特性の調査に
加え、部材変形能に関する若干の理論的考察を試みた。この結果、
次の所見を得た。

- (1) 断面内各位置での機械的性質にばらつきはあるが、コーナ
ー部の影響はわずかである。構造特性はコラムの一般辺部機械的
性質で代表し得る。
- (2) ロールコラムの地震時エネルギー吸収特性は断面内が均質な
低 YR 材とそれほど異なる。

Synopsis:

Cold roll formed rectangular column is now generally used be-
cause of its superiority in the steel structural design, although some
statements have been announced on the wrong influence of the cold
forming process such as reduction in the ductility or toughness of
column members. This paper deals with investigation on the me-
chanical properties and structural characteristics of "K Column
R®", which has been manufactured by the roll forming process,
and an analytical study on the ductility of column members. Major
findings are: (1) Structural characteristics of a roll-formed column
can be estimated by the mechanical properties of the straight side
of the column section, and (2) the capability of "K Column R"
for the absorption of seismic energy is comparable to that of the
member which has uniform and low YR characteristics.

1 緒 言

当社は1990年11月より、連続冷間成形加工したロールコラム
(商品名: K コラム R®) の生産を開始した。本商品は従来製品に
比して大形(550 mm 角)、厚肉(22 mm t)、かつ高寸法精度である
ことを特徴としている。

ロールコラムを含めた角形断面材(角コラム)が100万 t /年を超
えるに至った理由は、角コラムが局部座屈しにくい材料であること
や、直交する両軸で断面性能に差が無いこと等の建築構造部材とし
ての性能はもちろん、デザイン性や経済性の点で優れているからで
ある。こうして角コラムが多用される一方で、冷間成形品(ロー
ル、プレス)に関する情報量の不足から、これらの製品の無制限的
使用への懸念が一部識者から表明されている^{1,2)}。

本報告は上記の状況を踏まえ、K コラム R の製造方法や製品寸

法精度について紹介するとともに、K コラム R の力学的性状調査
を通じて大形ロールコラムの構造特性解明と安全性実証を図るもの
である。

2 製造方法と形状・寸法精度

K コラム R の製造工程を Fig. 1 に示す。熱延コイルを素材に、ロ
ールコラムとしては最大サイズである 550 mm $\times$ 550 mm $\times$ 22 mm t
まで製造可能である(Fig. 2)。

K コラム R は JIS G 3466 を満足することはもちろんであるが、
形状に関しては JIS よりも厳しい日本鋼構造協会規格に準拠して管
理している。工程材での測定結果を Fig. 3 に例示するが、寸法諸
元は規格を十二分に満足するものである。コーナー部形材に関し
ても、肉厚との比 $R/t \approx 2.5$ 程度と安定している。

* 平成4年5月18日原稿受付

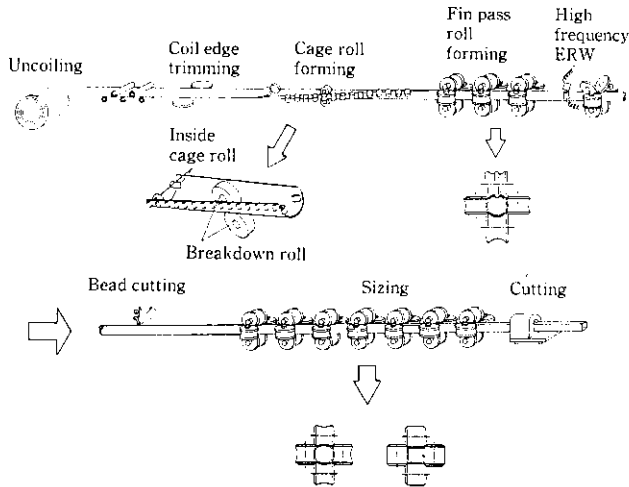


Fig. 1 Manufacturing process of K Column R

Column Shape (mm)	Thickness (mm)					
	6	9	12	16	19	22
250×250						
300×300						
350×350			Length: 6~12m			
400×400						
450×450						
500×500						
550×550						

Fig. 2 Production range of K Column R

3 構造特性

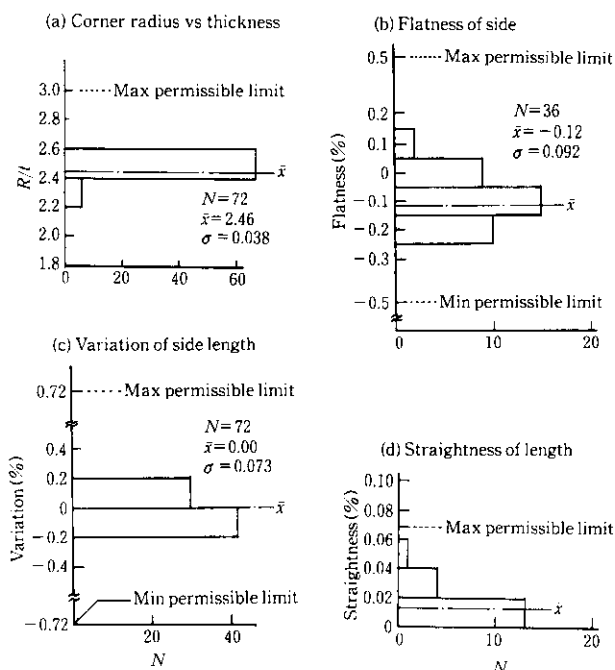
建築構造用部材に一般的に求められる特性としては、高強度であること、変形能に富んでいること、さらには、これら力学的性状のばらつきが少なく、安定していること等である。以上に加え、中低層鉄骨架構は実質上柱崩壊型となる可能性が高いことをも考慮すると、材料としてのロールコラムには他の構造部材にも増して安定した高履歴吸収エネルギー特性の確保が必要とも考えられる。このため、本実験では、以下に詳述する供試体を対象として、部材の変形性状を調査し、架構に用いる際に期待される履歴特性について検討した。

3.1 供試体

ロールコラムは冷間成形を行っていること、辺部とコーナーR部とで加工度が異なること等の理由により、断面内各部の機械的性質は一樣ではない⁴⁾。また、残留応力も大である⁴⁾。これらが柱部材としての力学的性状にどの程度影響するかについて実験的に調査した。供試コラムは STKR 400 450 mm×450 mm×12, 19, 22 mm 厚の3形状とし、断面内各部の強度試験、歪ゲージ法による残留応力調査、構造材の基本特性試験である短柱圧縮試験、部材曲げ試験を実施した。供試コラムの化学成分を Table 1 に示す。なお、19 mm²についてはノルマ処理したものについても同種の試験を実施し、残留応力が無く、機械的性質が均質な材料と冷間加工材との比較検討を行った。

Table 1 Chemical compositions of column specimens used (wt%)

Column	C	Si	Mn	P	S
12 mm ²	0.17	—	0.69	0.016	0.005
19 mm ²	0.15	0.20	0.67	0.017	0.009
22 mm ²	0.15	0.15	0.84	0.020	0.007


 Fig. 3 Dimensional accuracy of K Column R (measured for STKR 400, 550 mm × 550 mm × 16 mm²)

3.2 コラム断面内強度分布

JIS 5号もしくは12B号試験片を用いた機械的性質の調査結果を Table 2 に示す。JIS G 3466 の規定値 (YS ≥ 245 MPa, TS ≥ 402 MPa, 伸び ≥ 23%) はコラムの辺部を対象としているが、コーナー部においてもこれらの規定値を満たすことがわかる。コラム辺部からのコーナー部の強度上昇はYSで60~120 MPaと、薄肉材の方が上昇程度が高くなる傾向を示した。また、TSに関しては一樣に、ほぼ100 MPaの強度上昇となっており、伸びについては、逆に全供試コラムとも10%前後の低下を示した。

Fig. 4 は19 mm²のコーナー部の硬度測定結果であるが、内面が最も高い値を示しているものの、コーナー部を離れると一定値に収束する傾向がうかがえる。コーナー部と辺部の面積比率を考えると、本コラムの場合、部材断面の強度特性は辺部の特性で代表し得ると推定される。

3.3 コラム断面内残留応力分布

3軸歪ゲージ (GL=2 mm) を供試コラム内外面に貼付し、30×30 mmの大きさに切断したときの解放歪を弾性的に計算処理して得た残留応力分布例を Fig. 5 に示す。本図で、最大主応力の方向

Table 2 Mechanical properties and cyclic bending conditions of test specimen

Column specimen		YS(MPa)		TS(MPa)		Elongation(%)		Loading pattern	Loading direction
No.	Size (mm)	Straight side ^a	Corner ^b	Straight side ^a	Corner ^b	Straight side ^a	Corner ^b		
1	450×450×12 (as received)	415	533	466	567	40.5	28.1	I	
2	450×450×19 (as received)	426	489	466	558	44.2	32.3		
3	450×450×19 (normalized)	292	310	428	466	40.2	41.9		
4	450×450×22 (as received)	436	483	473	564	41.3	34.2		
5	450×450×19 (as received)	426	489	466	558	44.2	32.3	II	
6	450×450×19 (normalized)	292	310	428	466	40.2	41.9		

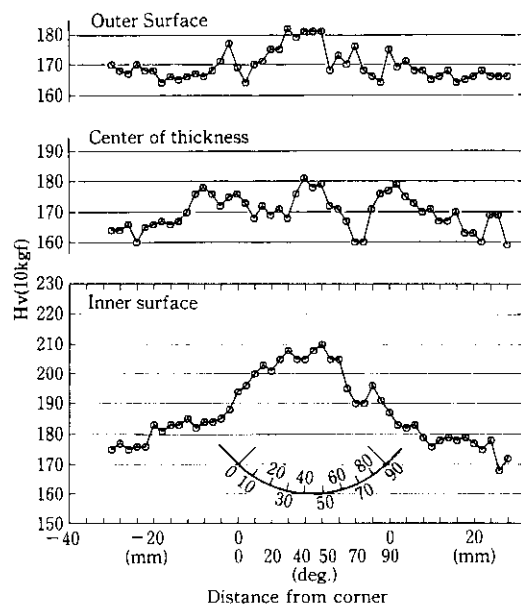
^aJIS No.5 test piece cut from a straight side of column^bJIS No.12B test piece cut from a corner of column

Fig. 4 Hardness distributions at the corner of a column (19 mm, as received)

は管軸方向とほぼ一致している。したがって、残留応力の絶対値は周方向よりも軸方向の方が大とわかる。また、軸方向で見れば、コーナーR部の方が残留応力レベルとしては低いと言える。Fig. 6は冷間材 19 mmの外面残留応力の主応力図の一部であるが、主応力の方向は辺部中央からコーナー部に近づくにしたがい、管軸方向から次第にずれる傾向にある。ずれ角が生じるのはロール成形加工のうちの絞り加工に起因すると推定され、最大角は20度程度であり、加藤らの測定結果⁴⁾と大差無いものである。

3.4 短柱圧縮試験

局部座屈する場合の基本的な部材塑性変形能力を調査するため、長さ1350 mm (径 D の3倍) の供試コラムを中心圧縮試験した。加力は日本大学理工学研究所の3000 t大型構造物試験機を用いた単調載荷とし、応力 (荷重/コラム公称断面積) と歪 (コラム平均変位/3 D) の関係を求めた (Fig. 7)。残留応力の有無により、弾性

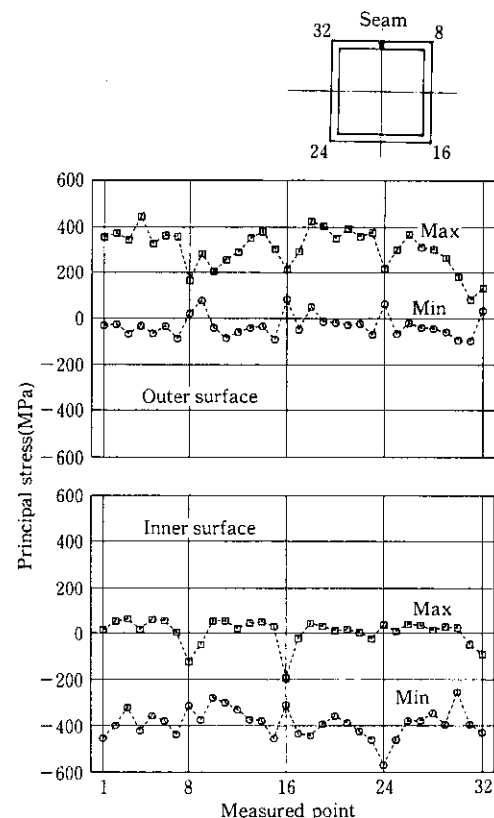


Fig. 5 Residual stress distributions obtained for 19 mm (as received)

時の挙動に若干の差はあるものの、初期勾配の0.2% オフセットで定義した圧縮応力度 $\sigma_{y,c}$ は素材辺部の引張降伏応力度 $\sigma_{y,t}$ とほぼ一致する。したがって、本コラムの場合、均等な局部座屈やコラム辺部が支配的な局部座屈時の力学的挙動はコラム辺部降伏応力度で説明できる。

本実験で得られた最大応力度 σ_{max} を $\sigma_{y,c}$ で除して得た応力上昇率 S と、最大応力度に対応する歪 ϵ_{max} を見掛けの降伏歪 $\sigma_{y,c}/E$ で除して得た塑性率 μ との相関を Fig. 8 に整理した。冷間成形品の場合、幅厚比の増加とともに、 μ , S とともに増加する一方、ノルマ材

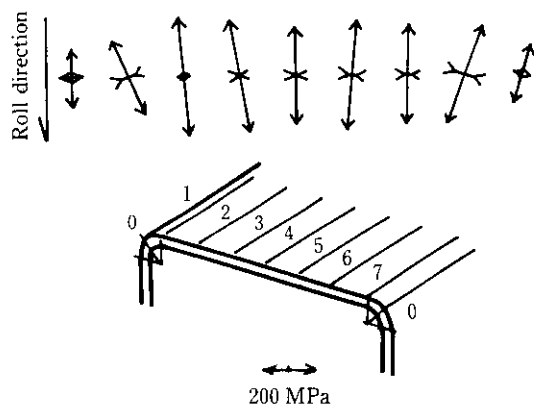


Fig. 6 Direction of principal stress (19 mm t, as received)

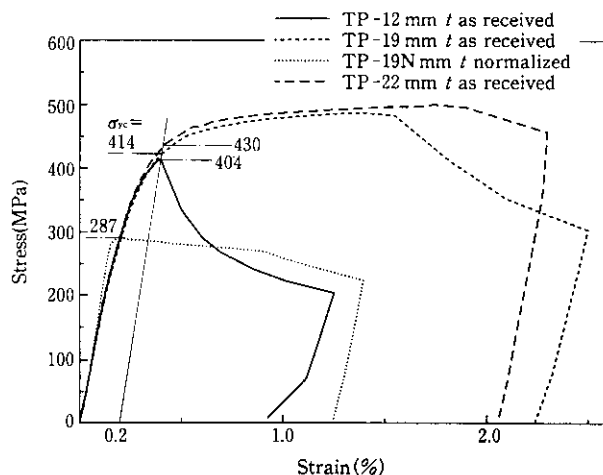


Fig. 7 Stub column test results

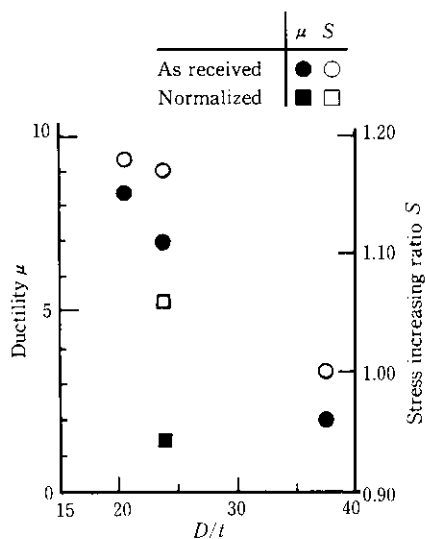


Fig. 8 Ductility vs strength obtained by stub column test

については変形能は期待できない。ノルマ材の場合、 D/t が 20 以下の範囲を除き、ほとんど剛性が期待できない降伏棚領域で座屈が生じる結果、変形能力を発揮しないまま耐力低下をきたすことが報告されている³⁾。本実験の場合も $D/t=23.7$ であり、既往実験結果を裏付けるものであるが、ロールコラムに限定すれば、 D/t は 16~

50 の範囲にあることから、変形能力に関してはほとんどの場合、現行冷間材の方が熱処理材を上回ると言える。

3.5 曲げ試験

ロールコラムの塑性変形能調査を目的として Fig. 9 と Table 2 に示す繰返し単純曲げ試験を行った。柱梁接合部は梁貫通型としたが、パネルゾーンの変形の影響を避けるため、梁フランジは SM 490 B 70 mm t を用いた。柱梁接合部はコラム側に開先を取ったレ形開先とし、辺部、コーナー R 部をそれぞれ下向き（入熱 2.5 kJ/mm）、立向き上進（入熱 9.0 kJ/mm）溶接した。溶接法は GMAW (KC50, 1.2 mm φ 使用) である。加力は当社鋼構造研究所の 1000 t 構造物試験機を用い、計 6 体試験した中で、4 体についてはコラムウェブ面を鉛直方向に置いた一般的な方法とし、残る 2 体についてはコラム対角線方向に加力するといった、いわゆる 2 方向載荷形式を採用した。

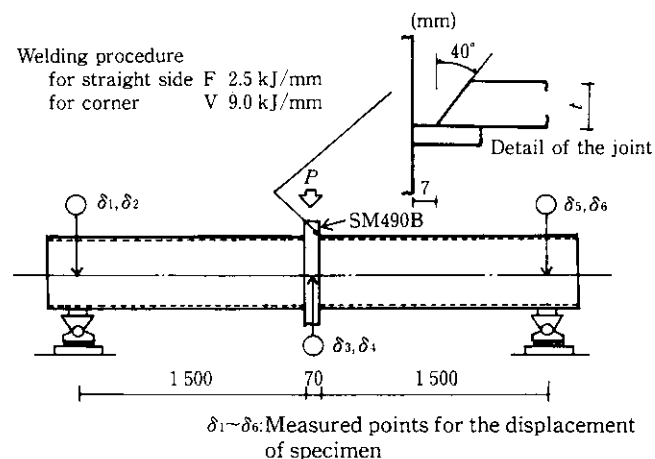


Fig. 9 Cyclic bending test specimen

Fig. 10 に繰返し曲げ試験の結果得られた荷重-供試体中央部変位の履歴特性を示す。載荷は初期剛性の急変点 (δ_1) で制御した。すなわち、 $\delta_1 \rightarrow -\delta_1$ 以後 $\pm \delta_1$ ずつ漸増させ、4 サイクル目で実験を終了させた。

全供試コラムとも、上下フランジに局部座屈が発生→進行の過程で最大耐力に到達した後、耐力劣化し、十分塑性変形させたくて実験を終了した。終了後に柱-梁溶接部を目視観察したが、割れの発生は認められなかった。

また、Table 3 にコラム辺部の素材試験で確認した YS の平均値に基づく最大耐力 P_{Mp} (全塑性モーメントに対応する荷重) を実験で得た最大荷重 $P_{max,0}$ と比較すると、 $P_{max,0}/P_{Mp}$ は 1.02~1.26 の範囲にあり、耐力の予測精度としては、実用上申し分ないと言える。

Fig. 11 は Fig. 10 の結果をもとに、19 mm 厚のコラムについて最大荷重点に到達するまでのスケルトン曲線に再整理したものである。上述の YS を用いて、降伏モーメント $M_y (=YS \cdot Z_0)$ 、ここで Z_0 はコラムの断面係数から算出した荷重 $P_y (=4 M_y/l)$ 、ここで l は曲げスパン) を降伏荷重と考え、Fig. 11 中の P_y に対応する変位 δ_y を降伏変形とみなし、 δ_{max} ($P_{max,0}$ に対応する変位) との比、塑性変形倍率 $\eta = (\delta_{max}/\delta_y - 1)$ を求めると、正負両域を考慮して、

$$\text{冷間材} \quad \begin{cases} \eta \div 5 \cdots \cdots \text{一方向載荷} \\ \eta \div 11 \cdots \cdots \text{二方向載荷} \end{cases}$$

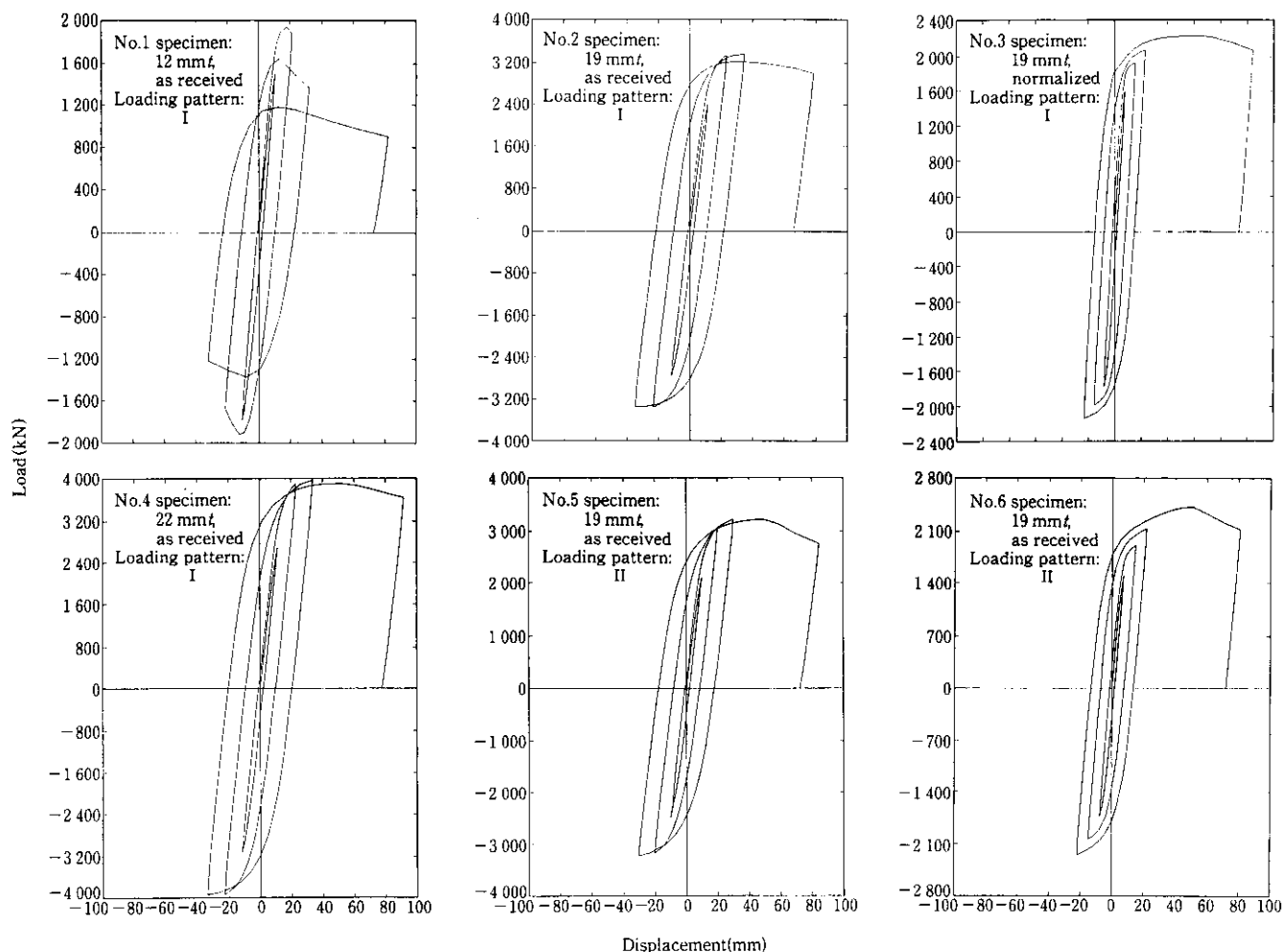


Fig. 10 Cyclic loading test result

Table 3 Bending test results

Column No.	D/t	YS (MPa)	Calculated strength P_{MP} (kN)	Obtained strength $P_{max,e}$ (kN)	$\frac{P_{max,e}}{P_{MP}}$
1	37.5	415	1 864	1 901	1.02
2	23.7	426	2 888	3 292	1.14
3	23.7	292	1 983	2 181	1.10
4	20.5	436	3 364	3 869	1.15
5	23.7	426	2 750	3 163	1.15
6	23.7	292	1 888	2 379	1.26

Note (1) $P_{MP} = \frac{4}{l} \cdot M_P$

M_P : Full plastic moment of a column

l : Bending span of the test specimen

ノルマ材 $\begin{cases} \eta=10 \cdots \cdots \text{一方向載荷} \\ \eta=20 \cdots \cdots \text{二方向載荷} \end{cases}$

のごとく、ノルマ処理が塑性変形能確保の観点からは有利なことが明らかである。

大地震を想定した場合に、構造物が構成部材にどの程度のエネルギー吸収能力を要求すべきかは、本来、設計者側で明示すべきと考えるが、ここでは、井上の研究⁹⁾を参考に、必要 η 量の算定を試みる。

K コラム R は中層規模の建物を対象としているため、整形ラー

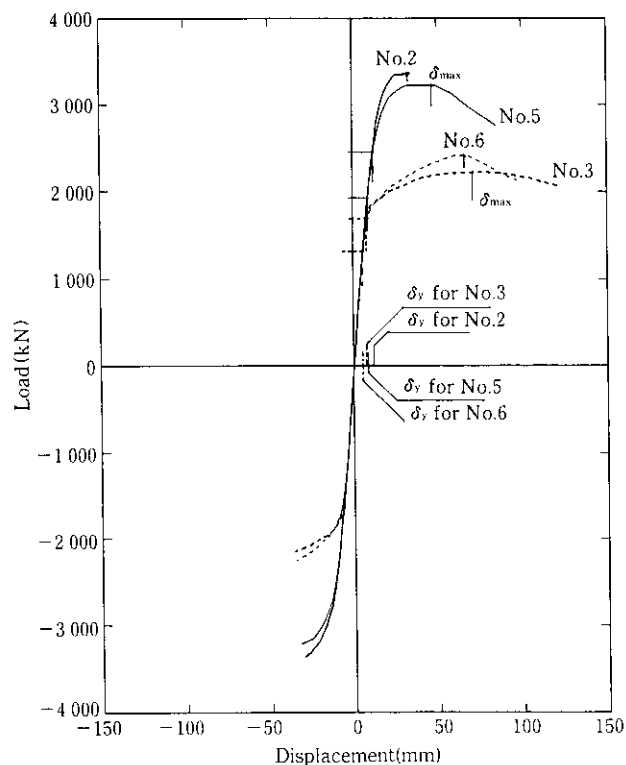


Fig. 11 Skeleton curves obtained for No. 2, 3, 5 and 6 specimens

メン構造で高さが10階までの建物について試算する。建物の崩壊が3Fまでの塑性変形で決定すると仮定し、簡単化のため、各階の階高や重量はそれぞれ等しく、さらに、地域係数 $Z=1$ と置くと、 η に関し、次式が成立する。

$$\eta \geq \frac{\sum_{i=1}^N i^2 \left\{ \left(\frac{1}{\gamma D_s} \right)^2 - 1 \right\}}{2N \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{N-i+1}{N}} \times \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{N-i+1}{N}}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

N : 階数

$$D_s: \text{構造特性係数} = \begin{cases} 0.25 \dots\dots \text{FA ランクの場合} (D/t \leq 33) \\ 0.35 \dots\dots \text{FC ランクの場合} (37 > D/t \geq 48) \end{cases}$$

γ : 層せん断力に関する余裕度

γ は設計上の降伏現象に関する余裕度を意味する。すなわち、鋼素材の実降伏応力度は JIS 規定最小降伏応力度を常に上回るため、単純計算をすれば、実部材の耐力は設計値を実降伏点の上昇分だけ上回ると予想される。この設計値からの上昇比率を余裕度と名付ける⁹⁾。 γ を構成する要因としては、他に床スラブの拘束による梁の局部座屈上昇や壁の補強効果等、種々のものが考えられるが、ここでは、特に γ =辺部実降伏応力度/設計上の基準強度 (F 値, STKR 400 の場合は $F=235$ MPa) と見なし、Table 2 の機械的性質調査結果を参考にして、

$$\gamma = \begin{cases} 1.5 \dots\dots \text{冷間材} \\ 1.0 \dots\dots \text{ノルマ処理材} \end{cases}$$

と考え、(1) 式から10階建ての建物の柱にこれらのコラムを使用すると、必要塑性変形倍率 η_r が計算できる。

こうして求めた η_r と、 $F=235$ MPa として計算した許容荷重 P_a を Fig. 11 に例示したスケルトン曲線にあてはめ、全供試コラムについて算出した保有塑性変形倍率 η_o とを Table 4 に示す。これよりただちに、 η_o は η_r を上回ることが明らかである。また、変形能に関する安全率を η_o/η_r と定義すれば、本実験の範囲では、冷間材の方がノルマ処理したものよりも安全度が高いと言える。なかでも、二方向載荷とした No. 5 のごとく、冷間材でも塑性変形能力が実用上十分あることに加え、冷間加工による降伏応力度の上昇効

Table 4 Cumulative ductility factor of roll formed column

Specimen No.	P_a (kN)	η_o	η_r	η_o/η_r
1	913	4.7	2.5	1.88
2	1 353	9.5	5.8	1.64
3	1 353	21.2	14.3	1.48
4	1 522	9.5	5.8	1.64
5	1 052	19.1	5.8	3.29
6	1 052	26.6	14.3	1.86

Note P_a : Design load

η_o : Obtained cumulative ductility factor

η_r : Required cumulative ductility factor

果が期待できる場合には、地震等に対する安全性は熱処理材 (No. 6) に比して一段と向上することがわかる。

4 結 語

本一連の実験の結果、明らかになった諸事項を以下に列挙する。

- (1) K コラム R の機械的性質は冷間加工の影響を受け、断面内で変化する。コーナー部は一般辺部に比して強度が上昇する一方、伸びは低下する。
- (2) 熱処理条件により、冷間加工の影響を緩和し、断面内機械的性質を平均化できる。
- (3) コラムが一樣圧縮変形を受けるとき、伸び特性の良好な低 YR 材の方が冷間加工を受けた高 YR 材よりも低い塑性率となる場合がある。
- (4) 繰返し曲げ試験で得た累積塑性変形倍率は熱処理材の方が冷間加工材を上回る。この一方、冷間加工材は耐力の余裕度が熱処理材を上回るため、両者の大地震等に対する安全性は同程度である。

本実験で検討した材料特性以外に建物としての激震時のエネルギー吸収能力を左右する要因としては、構造部材の溶接継目の健全性や裏当金、スカラップ形状⁷⁾等、施工条件に基づくものが数多くある。これらはコラムの変形能とあわせて今後とも、検討を進めるべき課題と考える。

参 考 文 献

- 1) 巻頭座談会、「冷間成形大径コラム柱の現況と今後の課題」、鉄構技術、(1990) 10, 19-34
- 2) 日本建築センター:「構造計算指針・同解説 1991 年版」, (1991), 173
- 3) 渡辺和喜, 橋本篤秀, 山田文富:「冷間ロール成形角形鋼管の機械的性質に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21460, (1991), 1333-1334
- 4) 加藤 勉, 青木博文, 黒澤隆志:「冷間成形角形鋼管の塑性ひずみ履歴と残留応力」, 日本建築学会構造系論文報告集, (1988) 385, 39-48

- 5) 加藤 勉, 西山 功:「冷間成形角形鋼管の局部座屈強さおよび変形能力」, 日本建築学会論文報告集, (1980) 294, 45-51
- 6) 井上一朗:「冷間成形角形鋼管柱の必要塑性変形能」, (1989), 私信
- 7) 金谷 弘:「冷間成形角形鋼管柱の最近の課題」, 鉄と鋼, 77 (1991) 5, 29-30