

鋼変断面片持ち柱の弾塑性履歴性状に関する基礎的実験

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ELASTO-PLASTIC HYSTERETIC BEHAVIORS
OF CANTILEVER COLUMNS WITH VARIABLE CROSS-SECTION* ** ***
酒造敏廣、事口壽男、西 幸二

By Toshihiro MIKI, Hisao KOTOGUCHI and Kouji NISHI

This paper performs an experimental study on the elasto-plastic hysteretic behaviors of steel cantilever columns of which box cross-section changes abruptly. Eight columns are tested under the loading patterns of constant vertical and alternating horizontal loads. Test results show that the collapse behaviors of such columns can be classified into three types of modes Y^* , V^* and S . These modes depend on the location of plastic zone every half cycle, accumulated plastic deformation and $P\Delta$ effects. If the difference between critical loads such as initial yield or rigid plastic loads every cross-section is canceled due to $P\Delta$ effects, the mode S appears and corresponding load-displacement curves become unstable compared with those of modes Y^* and V^* .

1. まえがき

土木分野における鋼製ラーメン構造物では、断面寸法や材料強度を部材軸方向に変化させた変断面構造の柱部材（以下、変断面ラーメン柱、あるいは、変断面柱という）が採用されている¹⁾。ところが、弾性限度をもとにした従来の設計法²⁾において、この種の柱の断面構成には、非弾性域で繰り返し水平力が作用する地震時の弾塑性挙動はとくに考慮されていない³⁾。このような繰り返し力下では、断面構成の方法によっては、柱基部や隅角部の部材格点部近傍だけでなく、断面変化点付近でも塑性域が容易に発生することが予想される。そのため、変断面ラーメン柱の弾塑性性状について、十分な検討が必要であると考えられる。

筆者らは、上記の点に着目して、まず数値解析によって、定鉛直荷重下で繰り返し水平力を受ける変断面片持ち柱の弾塑性挙動を調べてきた⁴⁾。そして、変断面性に起因した柱の履歴挙動の一つとして、柱基部と断面変化点付近で塑性変形が半サイクルごとに交番して著しい耐力低下が現れ、たわみモードがS字形になるような一種の不安定現象があることを示した。しかし、この種の現象を確認した変断面柱の実験は、ほとんど見あたらない。

これまで、繰り返し力を受ける柱の弾塑性挙動については、主として、力と変形の関係を表す復元力特性から耐震性能を検討する目的で、等断面ラーメン柱を対象に数多くの実験が行われている（たとえば、文献5)~9)参照）。それらの中で、横尾、中村、上谷、竹脇¹⁰⁾、山田、辻、竹下¹¹⁾は、上記のように柱が特異

* 工博 大同工業大学助教授 工学部建設工学科 (〒457 名古屋市南区白水町40)

** 工博 大同工業大学教授 工学部建設工学科 (〒457 名古屋市南区白水町40)

*** 大同工業大学大学院 工学研究科在学中 (〒457 名古屋市南区白水町40)

なたわみモードを示す場合があることを実験で確かめている。横尾らは、定軸圧縮力下で繰り返し曲げを受ける両端単純支持された角形鋼管柱の実験から、柱のたわみモードが対称・非対称となる一つの分岐点が存在することを指摘し、その後、中村、上谷¹²⁾は、等断面片持ち柱を対象にして、たわみモードが対称・非対称となる対称限界曲線を提示している。また、山田らは、定鉛直荷重下の繰り返し水平力のもとで、上下端が回転拘束されたH形鋼柱の履歴崩壊実験を行い、柱がくの字形のたわみモードを呈する場合があることを示し、このようなモードが発生すると、柱の耐力は急激に低下することを報告している¹¹⁾。

これらの研究には、変断面柱の弾塑性性状を解明していく上で参考になる点が多い。しかし、部材軸方向に塑性断面性能が変化する変断面柱の弾塑性挙動と等断面柱のそれとは基本的に相違すると考える。

本研究は、断面寸法の相違する2種類の箱形断面からなり、断面変化位置を種々変化させた片持ち柱8体を製作し、定鉛直荷重下で繰り返し水平力を受けるときの弾塑性性状を実験的に明らかにしようとしたものである。すなわち、①荷重-変位曲線の履歴ループの変動、②載荷パターンによる弾塑性性状の差異、③塑性変形の集中箇所の分析、④たわみモードの変化と崩壊形式、ならびに、⑤履歴エネルギー吸収特性に着目して、変断面柱に特有な弾塑性履歴崩壊性状について検討する。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

Fig.1 に示すように、柱高さ h (=一定) で、2種類の正方形箱形断面 Sec.1 および Sec.2 からなり、柱基部から約 $0.2h \sim 0.5h$ の位置で $0.1h$ ごとに断面変化位置を変化させた4種類の鋼製片持ち柱 (SS400) を2体ずつ、合計8体製作した。

各供試体の Sec.1 および Sec.2 断面の実測寸法諸元、幅厚比、ならびに、断面性能の平均値は Table 1 に示すとおりである。本研究では、以下のような点を踏まえて、これらの寸法諸元等を決定した。

まず、各断面のフランジ・プレートと腹板には、十分なかど溶接が可能となるように、 $t=9\text{mm}$ 厚の鋼板を用いた。また、繰り返し力下で、早期の局部座屈発生による急激な耐力低下が起こらないように、幅厚比を小さくした。さらに、2つの構成断面の断面積比 A_1/A_2 ($=1.18$) と断面2次モーメント比 I_1/I_2 ($=1.64$) とが、実績調査データ¹⁾ から調べた橋脚柱部材の最大・最小断面の面積比・断面2次モーメント比の分布範囲内 (ともに、約 $1 \sim 2$)¹³⁾ に入るようにした。

また、対象とする柱の高さ h には、同図(a)に示すような境界条件 (後述の(5)参照) を考慮して、柱基部の35mm厚の載荷板上面から、柱頭部のピン銚の回転中心までをとった ($=1,725\text{mm}$)。

さらに、断面変化点の構造としては、35mm厚の鋼板を配置して、Sec.1とSec.2断面とを溶接接合し、同図(c)に示すように高さ30mmの

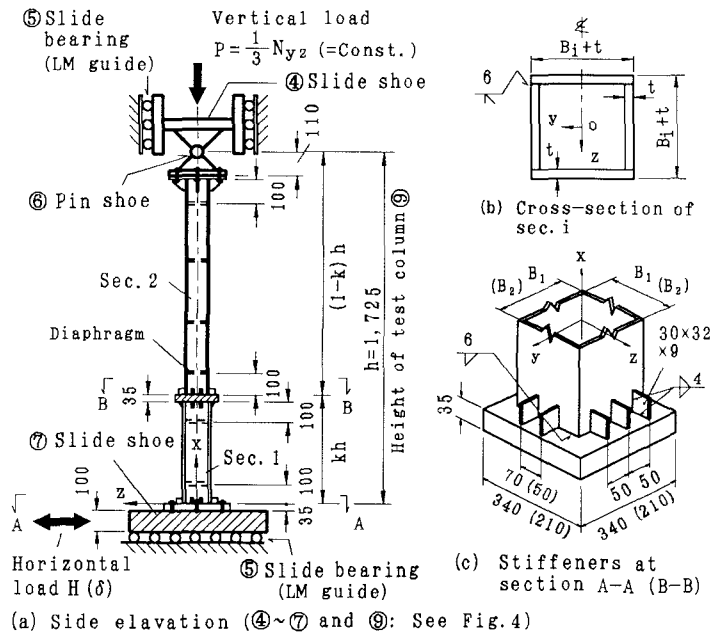


Fig. 1 Test specimen and testing device (Unit: mm)

補強リブも取り付けた。

実験結果を整理するに際して、断面変化点の35mm厚の鋼板部分を剛域として取り扱い、これと柱基部の載荷板上の補強リブについては、後述する各種抵抗荷重に与える影響が2%程度であったため、その影響を無視した。

なお、本文では、柱基部から高さ kh の位置を断面変化位置あるいは断面変化点と呼び、柱基部および断面変化位置付近の Sec.1および Sec.2断面を、それぞれ下部断面および上部断面と言うことにする。

(2) 上・下部断面の各種の抵抗荷重と抵抗荷重比

各供試体の各種無次元パラメーター、初期降伏荷重 H_v 、および、各種の抵抗荷重比を Table 2にまとめる。ここで、供試体には、以下の表記方法を用いている。

〔表記例〕 C6-0.31-0.75-L3— ④水平方向の加力パターン (Fig.4 参照)

①供試体の番号 — ③柱の無次元細長比 $\bar{\lambda}_{v2}$ の参考値⁴⁾ (Table 2 参照)
— ②断面変化位置までの高さ h と柱高さ H との比を表す k 値 (Fig.1(a) 参照)

後述の実験結果の考察では、各供試体を①、①-②または①-④と記す。

まず、同表中の $\bar{\lambda}_{v2}$ は、各供試体を Sec.2断面を有する等断面柱に置換したときの無次元細長比であり、文献4)を参考にして求めた。 $\bar{\lambda}_{v2}$ 値は約0.64~0.80の範囲にあり、細長比からみると、実験供試体はすべて弾塑性座屈の領域にある。

つぎに、繰り返し水平力下における柱の弾塑性挙動の参考とするため、上・下部断面の初期降伏および全塑性状態に相当する各種抵抗荷重の変化を調べてみた。すなわち、定鉛直荷重下(=P)で柱頭部に単調増加の水平荷重Hが作用する場合を想定し、上・下部断面ごとの初期降伏荷重 H_{v1} と H_{v2} 、塑性崩壊荷重 H_{p1} と H_{p2} 、および、 H_{pu1} と H_{pu2} を調べた。ここで、変断面柱の初期降伏荷重 H_v は H_{v1} と H_{v2} との小さい方として与えられ、4つの塑性崩壊荷重 H_{p1} 、 H_{p2} 、 H_{pu1} および H_{pu2} は、次に示す式(1)と線形弾性解との交点から求めた。

これらの抵抗荷重間の関係を模式的に示すと、Fig.2 のような荷重 H—水平変位 δ の関係が得られる。図中、負勾配を有する直線は、柱基部あるいは断面変化点に塑性ヒンジを仮定した2つの崩壊機構(挿入図参照)、それぞれモード V(V_u)および Y(Y_u)に対する2次剛塑性解である。これらは、文献4)を参照すると、

Table 2 Non-dimensionalized parameters and yield properties of test columns

Items Specimen	k	$\bar{\lambda}_{v2}$	$\frac{P}{N_{v2}}$	$\frac{\delta_v}{h}$ ($\times 10^{-3}$)	H_v (kN)	$\frac{H_{v1}}{H_{v2}}$	$\frac{H_{p1}}{H_{p2}}$	$\frac{H_{pu1}}{H_{pu2}}$	$\frac{H_p}{H_v}$	$\frac{H_{pv}}{H_v}$
C1-0.21-0.80-L1	0.21	0.802	0.323	8.836	19.3	1.20	1.20	1.14	1.27	1.48
C2-0.31-0.75-L2	0.31	0.753	0.334	9.195	21.8	1.05	1.06	1.02	1.28	1.49
C3-0.41-0.70-L2	0.41	0.697	0.333	9.028	22.8	0.89	0.94	0.90	1.30	1.46
C4-0.51-0.64-L2	0.51	0.639	0.333	8.618	22.8	0.74	0.81	0.77	1.31	1.47
C5-0.21-0.80-L3	0.21	0.802	0.334	8.700	19.0	1.20	1.21	1.14	1.27	1.48
C6-0.31-0.75-L3	0.31	0.753	0.335	9.177	21.7	1.05	1.06	1.02	1.28	1.49
C7-0.41-0.70-L3	0.41	0.697	0.334	9.017	22.8	0.89	0.94	0.90	1.30	1.46
C8-0.51-0.64-L3	0.51	0.639	0.335	8.599	22.8	0.75	0.81	0.77	1.31	1.47

Notes: 1)k: See Fig.1. 2) $\bar{\lambda}_{v2}$: Non-dimensionalized column slenderness⁴⁾. 3)P: Vertical load during test. 4) N_{v2} : Squash force of Sec.2 (See Table 1). 5) δ_v : Sway displacement corresponding to initial yield load H_v (See Fig.2). 6)h: Height of test columns(=1,725mm, See Fig.1(a)). 7) $H_v = \min.(H_{v1}, H_{v2})$, where H_{v1} and H_{v2} are horizontal loads when initial yield occurs at $x=0$ (Sec.1) and $x=kh$ (Sec.2), respectively. 8) H_{p1} , H_{p2} , H_{pu1} and H_{pu2} : Rigid plastic loads (See Fig.2). 9) $H_p = \min.(H_{p1}, H_{p2})$. 10) $H_{pv} = \min.(H_{pu1}, H_{pu2})$.

次のようにまとめられる。

i) 柱基部に塑性ヒンジを仮定したモードVおよび V_u

$$H = \frac{M_1}{h} - \frac{P\delta}{h} \quad \dots(1)a$$

ただし、モードVのとき $M_1 = M_{pn1}$ 、 V_u のとき $M_1 = M_{p1}$ とおく。

ii) 断面変化点の Sec.2断面に塑性ヒンジを仮定したモードYおよび Y_u

$$H = \frac{M_2}{(1-k)h} - \frac{P\delta}{(1-k)h} \quad \dots(1)b$$

ただし、モード Y のとき $M_2 = M_{pn2}$ 、 Y_u のとき $M_2 = M_{p2}$ とおく。

ここに、 M_{pn1} と M_{p1} は、Sec.1の塑性モーメント ($P \neq 0$) と全塑性モーメント ($P = 0$) である (Table 1 参照)。

以上から、上部断面の抵抗荷重を基準にして、初期降伏と塑性崩壊に対する抵抗荷重比を求めた (Table 2 参照)。断面変化位置 (k 値) をパラメータとして、各供試体の抵抗荷重比の変動を Fig.3 に示す。

この図から、初期降伏・塑性崩壊が上・下部のどちらの断面で先行するかがわかり、供試体を以下のように分類できる。

- ・ 下部断面の抵抗荷重 > 上部断面の抵抗荷重の場合 ($H_{y1} > H_{y2}$, $H_{p1} > H_{p2}$, $H_{pu1} > H_{pu2}$)
柱C1とC5 ($k=0.21$)、および、C2 とC6 ($k=$

0.31) では、初期降伏および塑性崩壊が上部断面で起こると予想される。ただし、柱C2とC6では、上・下部断面の抵抗荷重差はわずか2～6%である。

- ・ 下部断面の抵抗荷重 < 上部断面の抵抗荷重の場合 ($H_{y1} < H_{y2}$, $H_{p1} < H_{p2}$, $H_{pu1} < H_{pu2}$)

上記とは逆の場合で、柱C3とC7($k=0.41$)、および、C4とC8($k=0.51$)がこれに相当する。ただし、柱C3とC7では、上・下部断面の抵抗荷重差は、柱C4とC8に比べて小さく、高々11%である。

実験では、塑性崩壊モードとこれらの荷重比をもとに、変断面片持ち柱の上・下部断面ごとの弾塑性性状を調べていく。なお、3つの抵抗荷重比間の差異は比較的小さいため、以下では算出が最も容易な初期降伏荷重比 H_{y1}/H_{y2} を単に抵抗荷重比ということにする。

(3) 供試体の初期不整と機械的性質

各供試体の部材軸方向の初期曲がり を無載荷状態で測定した。初期たわみの最大値は、柱が直立している状態を基準にして、柱頭部で 0.6h/1,000、また柱中央部で 0.3h/1,000であった。残留応力については、これまでの数値解析結果⁴⁾から、柱の弾塑性履歴性状に及ぼす影響は小さいと判断して、測定していない。

また、供試体製作用の SS400 鋼板から、JIS 1号および5号材料試験片を合計15本製作して引張試験を行った。試験結果から得られた鋼板の機械的性質の平均値は Table 3 に示すとおりとなった。

(4) 荷重の載荷方法

まず、鉛直荷重Pとしては、塑性断面性能の小さいSec.2断面の圧壊荷重 N_{y2} (Table 1参照) を基準にして

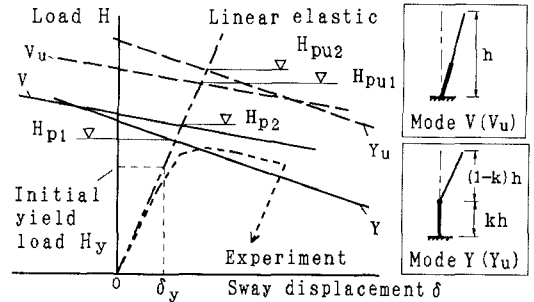


Fig.2 Rigid plastic mechanism lines of column with variable cross-section and rigid plastic loads

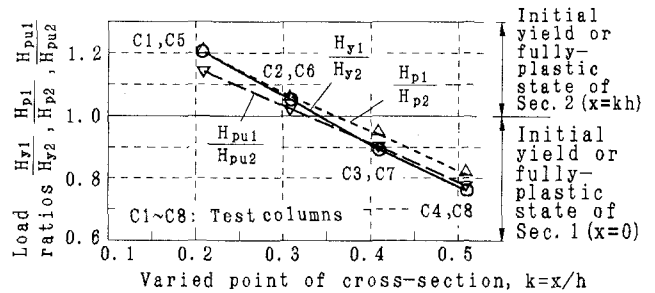


Fig.3 Load ratios concerning initial yield and rigid plastic loads of test columns

Table 3 Mechanical properties of test columns (SS400)

Young's modulus E(MPa)	Poisson's ratio μ	Yield point σ_y (MPa)	Tensile strength σ_s (MPa)	ϵ_H
2.11×10^5	0.281	282	422	$12.6 \epsilon_y$

Notes; ϵ_y : Yield strain($=\sigma_y/E$), ϵ_H : Strain when strain hardening begins to occur.

約 $N_{02}/3$ を作用させ、実験中、その値を保持した。ここで、文献1) から橋脚柱部材に作用する鉛直荷重を推定すると、大きくとも $0.3N_{02}$ 程度であり、本実験で仮定した値はそれよりも若干大きいものである。

つぎに、柱基部位置に水平変位 δ を変位制御によって与えた。初期降伏変位 δ_y (Table 2 参照) をパラメーターとして、実験で仮定した3つの载荷パターンを Fig.4 に示す。

- ・ パターンL1(柱C1): 水平変位 δ を単調载荷する。柱C1とC5については、上・下部断面の抵抗荷重差が大きいため、柱C1の方をこのパターンで実験し、今後の理論解析等で用いる比較データを得ることとした。
 - ・ パターンL2(柱C2~C4): 柱の履歴性状を調べるための反復载荷であり、変位 δ を反転させるときの振幅 δ_m の初期値を δ_y に設定し、 δ_m を1サイクルごとに $0.5\delta_y$ ずつ増加させる。
 - ・ パターンL3(柱C5~C8): δ_m の初期値を $2\delta_y$ に設定し、5サイクルごとに δ_y ずつ増加させる。ただし、 δ_m が $5\delta_y$ に達した後は、供試体の崩壊状況を見ながら、 δ_m を増分せずに実験を続けた。このパターンは、同じ変位振幅のもとで、繰り返しの影響を調べることができる点で、パターンL2と相連する。
- 実験では、 δ の増分を $0.1\delta_y \sim 1.5\delta_y$ の間で設定し、増分ごとに、水平反力 H の値が十分に収束するまでその状態を保持し、その後に荷重、変位、および、ひずみの測定を行った。

(5)実験装置と柱の境界条件

実験には、Fig.5 に示すような装置を用いた。鉛直・水平荷重 载荷用に、2基の油圧サーボ・アクチュエーター①および②が組み込まれている。

この装置では、⑤スライド軸受(LMガイド)と⑥球面軸受を利用して、供試体の境界条件が、柱頭部で鉛直方向にのみ可動のピン支持、柱基部で水平方向にのみ可動の回転固定支持となるようにした(Fig.1(a)参照)。すなわち、鉛直荷重 P (変位 u) を柱頭部に、水平荷重 H (変位 δ) を柱基部に作用させて、柱頭部で鉛直荷重と水平荷重とを同時に受ける片持ち柱の崩壊挙動を再現できるようにした。

なお、崩壊実験に先だって、鉛直・水平荷重の各種組み合わせ条件下で弾性実験を行い、この実験装置は、片持ち形式の供試体に対して、ほぼ満足できる精度を有していることを確かめた。

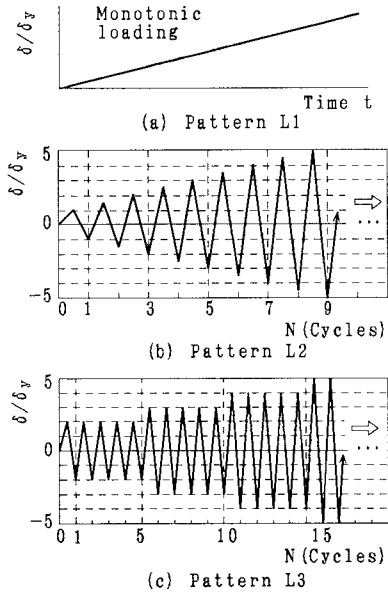


Fig.4 Loading patterns for sway displacement at the bottom of test columns

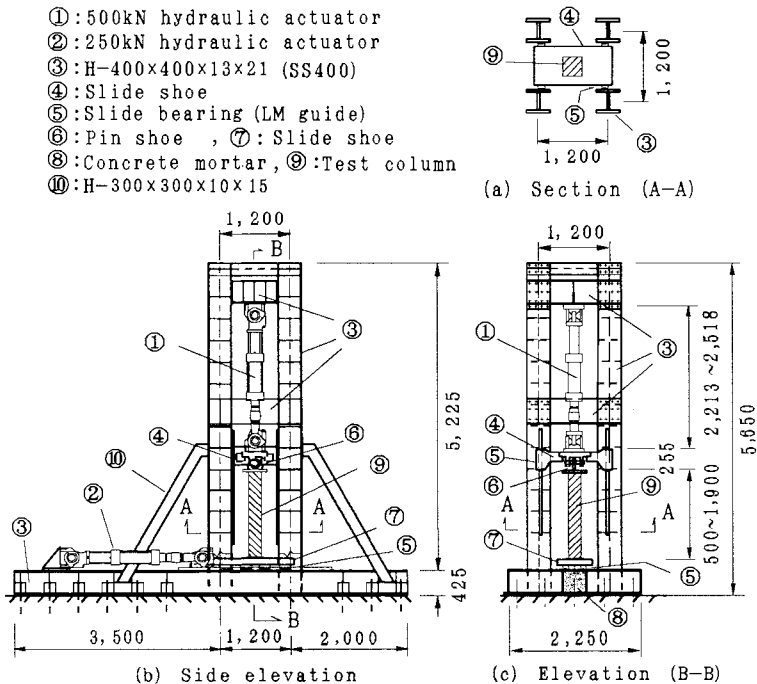


Fig.5 General view of testing frame equipped with two hydraulic actuators (Unit: mm)

(6) 荷重、変位、および、ひずみの測定方法

まず、水平荷重 H と水平変位 δ 、および、鉛直荷重 P と鉛直変位 u の測定には、アクチュエーターにセットされているロード・セルと差動トランスを利用した。柱のたわみについては、実験中の水平変位 $\delta=0$ および最大振幅 δ_m のときに撮影した供試体の写真から、実験前に設定した基準点の座標をデジタイザで読み取り、そのモードを把握できるようにした。

また、供試体の軸方向ひずみを測定するため、柱基部・断面変化点から柱上方100mmの位置で、断面の4隅の腹板直上フランジ・プレートに1軸塑性ひずみゲージを貼り付けた。その際、ひずみゲージが塑性域で繰り返しを受けるときの抵抗素子自体の残留ひずみと測定精度との関係が十分に明らかでないため、標点間距離 50mmのクリップ型変位計もセットした¹⁴⁾。そして、両者の測定値を比較・検討の上、ひずみゲージの測定値は、上・下部断面で塑性変形が顕著になり始めるおよその点を把握するために用いることとした。

3. 荷重 H －変位 δ 曲線、履歴ループの変動特性、および、軸方向変位に関する実験結果と考察

(1) 柱の水平荷重 H －水平変位 δ 曲線

載荷パターンL1～L3ごとに、代表的な供試体の水平荷重 H －変位 δ の実験曲線を Fig.6～Fig.8 に示す。これらの図中には、上述した2次剛塑性解のモード $Y(Y_u)$ および $V(V_u)$ に対応する H － δ 曲線 (Fig.2、式(1)参照) も示す。

a) 載荷パターンL1: 柱 C1-0.21 (Fig.6)

この図からわかるように、最大耐力点以後の曲線は、断面変化点に塑性ヒンジを仮定した塑性崩壊モード Y_u に漸近している。この柱は、上部断面の抵抗荷重が下部断面のそれよりも約20%も小さいため、上部断面に塑性変形が卓越する弾塑性挙動を呈したものである (Fig.3 参照)。

b) 載荷パターンL2: 柱 C2-0.31、C4-0.51 (Fig.7)

まず、同図(a)からわかるように、柱C2では、変位振幅 $|\delta_m| \leq 6\delta_y$ の範囲で、荷重 H の負側よりも正側で履歴ループが繰り返しごとに大きくなっている。そして、 $\delta_m = 6.5\delta_y$ の履歴ループから、 H の負側では、最大耐力点と変位反転点間の曲線の負勾配が徐々に大きくなり、モード Y のそれに近づいている。また、 H の正側では、耐力上昇が顕著になり、最大耐力点以後の曲線の勾配はモード V のそれとほぼ一致している。さらに、最終ループでは、 H の負側で耐力低下が著しくなっていることがわかる。この状態では、上・下部断面の相対するフランジ・プレートに比較的大きな局部座屈波形が観察された。

一方、同図(b)から、柱C4では、実験した範囲内で、履歴ループは上限の塑性崩壊モード V_u の外側まで拡大していることがわかる。また、最大耐力点以後の曲線の勾配はモード V にほぼ等しく、柱基部での塑性変形が卓越した弾塑性挙動を呈しているものと思われる。

c) 載荷パターンL3: 柱 C5-0.21、C6-0.31 (Fig.8)

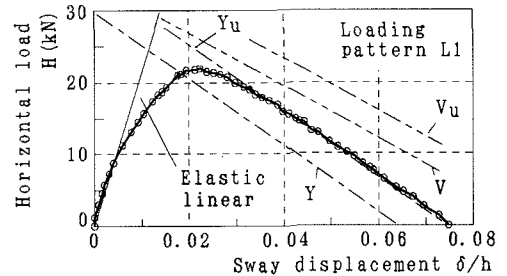
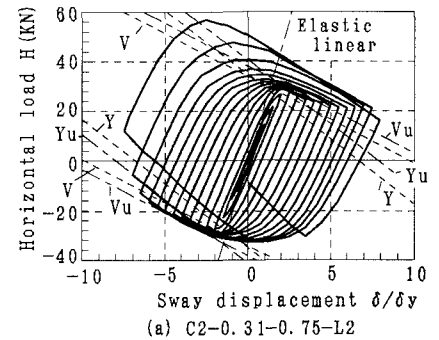
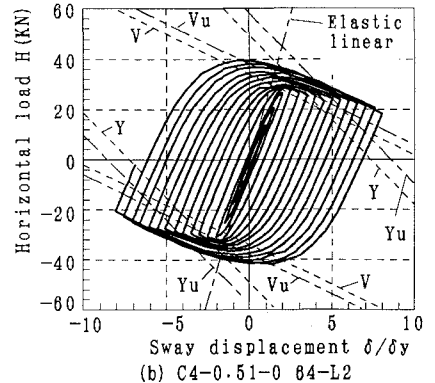


Fig. 6 Load - displacement curve of test column C1



(a) C2-0.31-0.75-L2



(b) C4-0.51-0.84-L2

Fig. 7 Load - displacement curves test columns (Loading pattern L2)

同図(a) から、柱 C5では、変位振幅 δ_m が等しいときの履歴ループ群はほぼ一つのループを描き、 δ_m の増大につれて少しずつ拡大していることがわかる（詳細は(2)参照）。

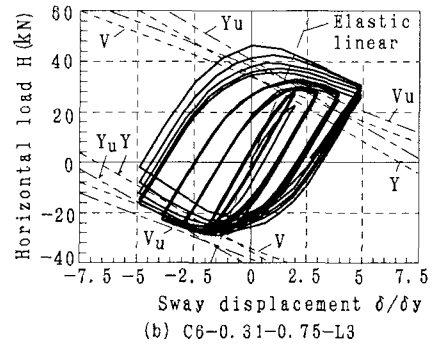
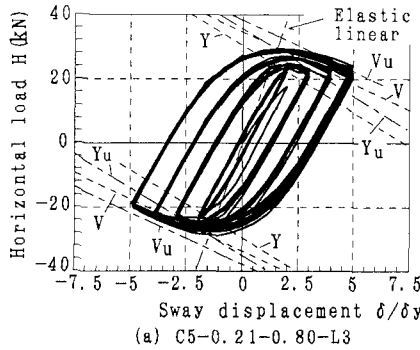


Fig. 8 Load-displacement curves of test columns (Loading patterns L3)

一方、同図(b) からわかるように、柱

C6の履歴ループは、 $\delta_m = 5\delta_y$ の状態で、上記の柱C2と同様に、最大耐力点～変位反転点間の勾配が、半サイクルごとにモードV および Yの勾配にほぼ等しくなり、ループはモードV が現れた方 ($H > 0$) へ移動している。また、最終ループの変動は若干大きい、このときには、柱C2と同様に、上・下部断面のフランジ・プレートに局部座屈が観察された。

柱C7-0.41およびC8-0.51の $H-\delta$ 曲線には、柱C6のような現象はとくに見られなかった。

以上から、柱C2およびC6の $H-\delta$ 曲線で現れた特徴は、文献4)の数値解析で得られた結果をほぼ裏づけているものであり、塑性変形の箇所（崩壊モードVとY）が半サイクルごとに変化する履歴崩壊現象を確認できたものとする。

(2) 履歴ループの拡大率と移動量の変動

つぎに、Fig.9 に定義するパラメータ α_H および α_L を用いて⁴⁾、荷重 H - 変位 δ 曲線から履歴ループの大きさと移動量について調べた。すなわち、

$$\alpha_H = \left| \frac{H_{u+}}{H_{u-}} \right|, \quad \alpha_L = \frac{L_{u+}}{2H_y} \quad \text{or} \quad \frac{L_{u-}}{2H_y} \quad \dots (2)a, b$$

α_H は、履歴ループの正負の最大耐力比の絶対値であり、 H の正負方向へのループの移動を表す。また、 α_L は、ある変位反転点から次の最大耐力点までの荷重差と2倍の初期降伏荷重との比を表し、ループの拡大率を意味する。

繰り返しサイクル数 N による各供試体の α_H および α_L の変動を Fig.10～Fig.11 に示す。ここに、 N は1回目の変位 δ の反転点を 0.5サイクル点とし、ある反転点から次の反転点までを 0.5サイクルと数えている。

a) 載荷パターンL2の供試体C2～C4 (Fig.10)

まず、同図(a) からわかるように、柱C2-0.31およびC3-0.41の α_H 値は、それぞれ $N = \text{約}10$ および14から、徐々に大きくなり、ループの移動が顕著に現れている。また、柱C4-0.51の α_H 値は $N \geq 4$ の範囲で1に漸近しており、ループの移動はほとんど見られない。

一方、同図(b) から、柱C2の α_L 値は $N \geq 12$ の範囲で半サイクルごとに増減し始め、 $N = 14.5$ でループが急

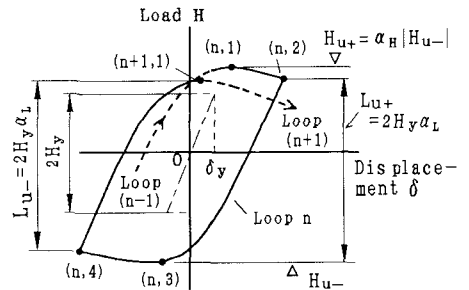
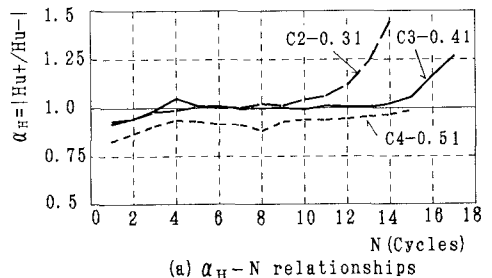
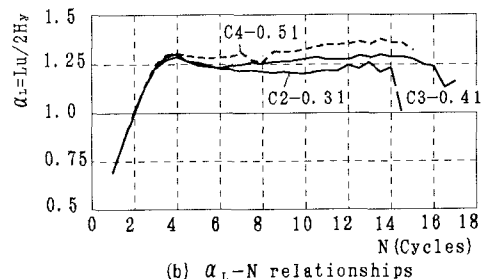


Fig. 9 n-th hysteresis loop and restoring force quantities, α_H and α_L



(a) α_H -N relationships



(b) α_L -N relationships

Fig. 10 Variation of restoring force quantities, α_H and α_L , with cyclic times (Loading pattern L2)

激に小さくなっていることがわかる。これは、上述した $H-\delta$ 曲線 (Fig.7(a)) の最終ループに対応している。柱C3でも、 $N=16.5$ のときに同様な傾向がある。なお、柱C4の α_H 値には、とくに著しい低下は現れていない。

b) 荷重パターンL3の柱C5～C8 (Fig.11)

同図(a) から、柱C5～C8では、変位振幅を変更した直後 ($N=6, 11, 16$) にループの大きさが変わるため、 α_L 値は若干小さくなっていることがわかる。しかし、柱C6-0.31を除くと、 α_H 値は $2 \leq N \leq 20$ の範囲で約0.9～1.1の間にあり、ループの移動は小さい。柱C6では、 α_H 値は $N \geq 16$ ($\delta_m = 5\delta_y$) の範囲で急激に大きくなり、ループの移動が著しくなっている (Fig.8(b)参照)。

また、同図(b) から、 $3 \leq N \leq 15$ の範囲では、各供試体の α_L 値は約 1.2～1.3の間で変動していることがわかる。ループの移動が大きかった柱C6では、 $N \geq 15$ の範囲で、 α_L 値が半サイクルごとに増減しながら全体として小さくなり、局部座屈が観察された最終の半サイクル ($N=20 \sim 20.5$) ではループの縮小が顕著に現れている。

ここで、柱C2およびC6の α_H と α_L とを比較すると、ループの縮小は、ループが移動し始めてから何回かの繰返し後の後に発生している⁴⁾。また、荷重パターンL3では、ループの移動・縮小は、パターンL2よりも小さな変位領域で生じており、履歴性状を調べるときのパラメータとしては、同じ変位振幅でも、繰返し回数が重要であることがわかる。

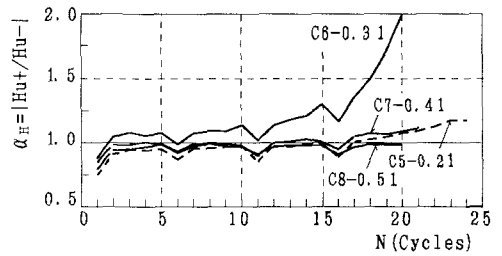
さらに、柱C2～C8を通じて、ループの縮小が顕著になる前の状態では、 α_L 値はおおよそ1.2～1.35である。このことから、初期降伏荷重と最大耐力点とを基準にすれば、履歴ループは、塑性域の広がりおよびひずみ硬化の影響で、1.25倍程度拡大していることになる。この値は、鋼種にもよると考えられるが、本実験で用いたような SS400 鋼板からなる変断面柱 ($P=N_y A_2/3$) の履歴曲線を推定する際に、一つの参考値を与えるものとする。なお、Table 2 中に示した下限の塑性崩壊荷重と初期降伏荷重との比 $H_o/H_y (=1.27 \sim 1.31)$ をみると、 H_o/H_y は α_L のよい近似値を与えている。

(3) 柱上端の軸方向変位の変動特性

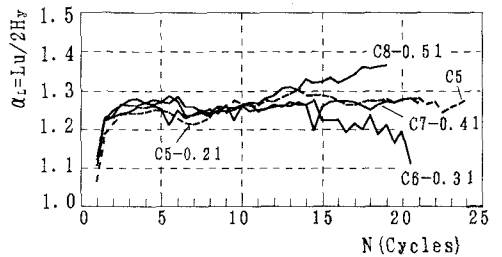
各供試体の繰返しサイクル数 N による柱頭部の軸方向変位 u の変動を Fig.12 に示す。ここで、 u は、軸方向力を受けて、Sec.2 断面が降伏するときの軸方向変位 u_y で無次元化した。すなわち、

$$u_y = (kh - 35) \cdot \frac{\sigma_y A_2}{EA_1} + (1 - k)h \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (\text{Unit: mm}) \quad \dots(3)$$

まず、同図(a) からわかるように、柱C2～C4を通じて、 u/u_y 値は実験した範囲内ではほぼ同一の曲線上にある。しかし、柱C2-0.31では、 $N \geq 12$ の範囲で、 m を正の整数として、 $N = m + 0.5 \sim m + 1$ のときに変位 u が急増し、

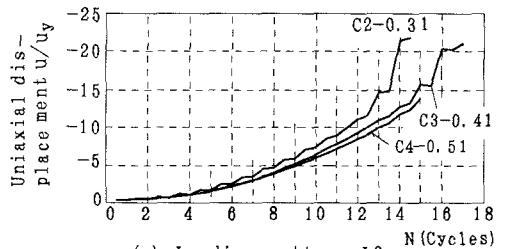


(a) α_H - N Relationships

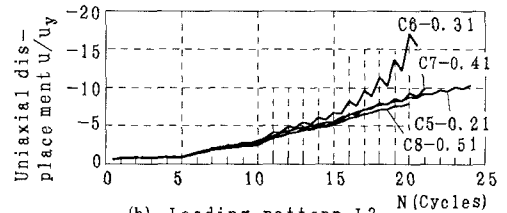


(b) α_L - N Relationships

Fig.11 Variation of restoring force quantities, α_H and α_L , with cyclic times (Loading pattern L3)



(a) Loading pattern L2



(b) Loading pattern L3

Fig.12 Variation of uniaxial displacement, u , at the top of test columns with cyclic times

$N=m \sim m+0.5$ のときにその変動は小さくなっている。上述の $H-\delta$ 曲線 (Fig.7(a)) と照合すると、前者はモードY が現れた領域 ($H<0$)、後者はモードV が現れた領域 ($H>0$) に対応している。柱C3でも、 $N \geq 14$ の範囲で同様な傾向が見られる。

つぎに、同図(b)から、柱C5、C7およびC8では、 $N=5$ 以後 ($\delta_m = 3\delta_v$)、 N の増加とともに u/u_v 値の増加率が大きくなり、同じ変位振幅であれば、その値はほぼ直線的に増加していることがわかる。しかし、柱C6-0.31 では、 $N \approx 11$ 以後 ($\delta_m \geq 4\delta_v$)、半サイクルごとに u の変動が大きくなっている。すなわち、 $N = m+0.5 \sim m+1$ のときに柱の縮みが大きくなり、 $N=m \sim m+0.5$ のときに縮みが小さくなっている。これらは、この柱の $H-\delta$ 曲線 (Fig.8(b)) で、それぞれモード Y および V が現れた区間に対応している。

したがって、変断面片持ち柱で半サイクルごとのモード変化が現れ始めるとき、載荷パターンL2の場合には軸方向変位 (縮み) のほとんどがモードY の側で生じ、L3の場合には、モードY 側では柱の縮みが大きくなり、モードV 側では戻りが生じることになる。

また、載荷パターンL3の結果を見ると、同じ変位振幅でも変位 u が漸増していることから、一定の軸圧縮力 ($=N_v/3$) のもとで、塑性変形の進んだ柱基部や断面変化点付近に繰り返し曲げが作用するとき、部材軸方向への塑性域進展が無視できない程度に大きくなることを指摘できる。

4. ひずみ、たわみモード、および、履歴吸収エネルギーに関する実験結果と考察

(1) 軸ひずみ、および、曲率による塑性変形箇所の分析

ひずみゲージの測定値の和・差から、曲率 ϕ と部材軸線の軸ひずみ ε の概略値を換算し、塑性変形が大きくなり始める繰り返しサイクル数 N を調べた。着目断面は、柱基部および断面変化点から $0.058h (=0.71B_1 = 0.83B_2)$ の位置の Sec.1および Sec.2断面である (2. (6) 参照)。

ここでは、定変位振幅下での繰り返しの影響が重要であると考えて、載荷パターンL3の柱について、 N による ϕ および ε の変動を整理した。その結果を Fig.13に示す。また、 ε の結果には、クリップ型変位計の測定結果から換算した ε の実験値も示す。図中、 ϕ および ε は、それぞれ降伏曲率 $\phi_{vi} (=2\varepsilon_v/(B_i+t))$ および降伏ひずみ ε_v で無次元表示している。

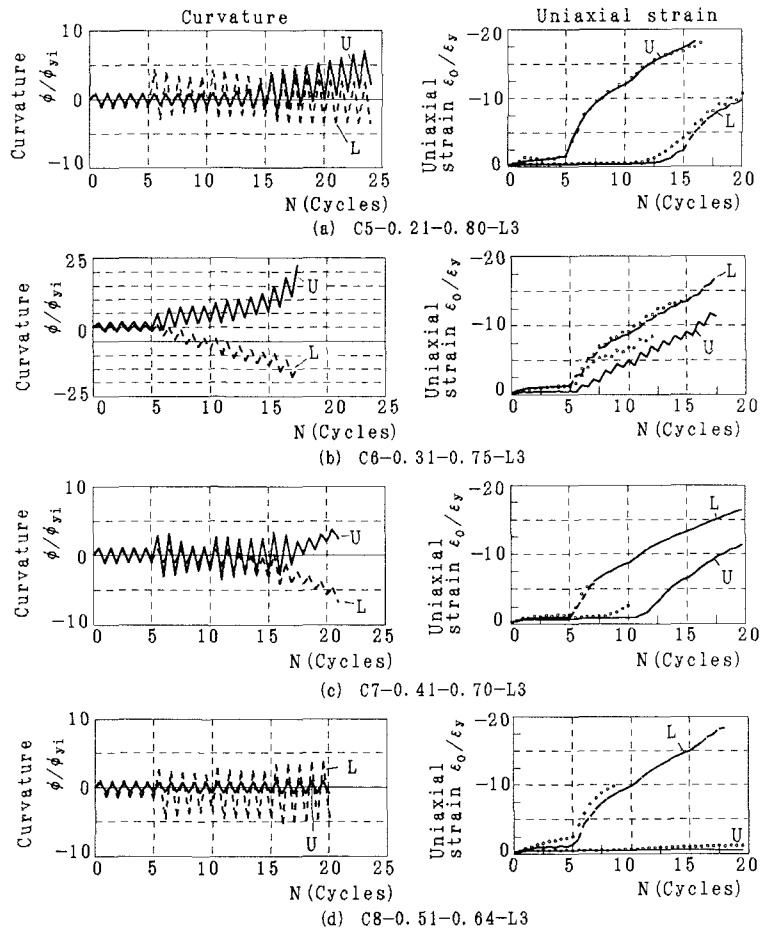
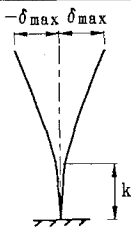
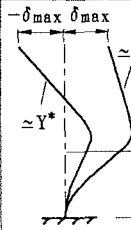
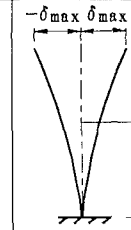


Fig. 13 Variation of uniaxial strain, ε_0 , and curvature, ϕ , of Sec.1 and Sec.2 with cyclic times

Table 4 Elasto-plastic collapse modes of test columns

Specimen	Items	$\frac{H_{y1}}{H_{y2}}$	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$	Collapse mode	References		
					Classification of collapse modes		
C1-0.21-0.80-L1		1.20	—	Y*			
C2-0.31-0.75-L2		1.05	7.5	S			
C3-0.41-0.70-L2		0.89	7.5	S			
C4-0.51-0.64-L2		0.74	8.0	V*			
C5-0.21-0.80-L3		1.20	5.0	Y*			
C6-0.31-0.75-L3		1.05	5.0	S			
C7-0.41-0.70-L3		0.89	5.0	V*			
C8-0.51-0.64-L3		0.75	5.0	V*			

Notes; 1) δ_y and H_{y1}/H_{y2} : See Table 2. 2) δ_{max} : Maximum sway displacement applied to test columns.

a) 柱C5-0.21およびC6-0.31 (上部断面の抵抗荷重<下部断面の抵抗荷重)

まず、同図(a)から、抵抗荷重比が約1.20の柱C5では、上・下部断面の ε 。値は、それぞれN=約5および15から急増していることがわかる。N=15以後、上部断面では、 ϕ 値が半サイクルごとに正側に大きくなり、残留曲率が現れ始めている。しかし、下部断面の ϕ 値は正負ではほぼ対称に変動し続けている。

つぎに、同図(b)からわかるように、抵抗荷重比が約1.05の柱C6では、 ε 。値はN=約5($\delta_m=3\delta_y$)から上・下部断面でほぼ同時に急増し、かつ、 ϕ 値が正負逆方向に半サイクルごとに増減しながら漸増している。すなわち、この時点で塑性変形の箇所が上・下部断面で交番する傾向にある。

b) 柱C7-0.41およびC8-0.51 (上部断面の抵抗荷重>下部断面の抵抗荷重)

また、同図(c)からわかるように、抵抗荷重比が約0.89の柱C7の上・下部断面の ε 。値は、それぞれN=約11および5から急増している。そして、上部断面の ε 。値の急増とほぼ同時に、柱C6と同様に上・下部断面での ϕ 値が正負逆方向に漸増し始めている。この柱では、下部断面の塑性化が先行し、その後に変位振幅の増大に伴ってP Δ モーメントが大きくなり、これが上部断面の塑性化を進めたものと推測できる。

さらに、同図(d)からわかるように、抵抗荷重比が約0.75の柱C8では、下部断面の ε 。値がN=5から急増しているが、上部断面の ϕ および ε 。はともに小さな値に留まっている。

以上から、変断面柱の弾塑性履歴性状として、次のことを考察できる。すなわち、①上・下部断面での軸ひずみが同時に急増し始めたとき、塑性曲げ変形が上・下部断面で半サイクルごとに交番する傾向にある、②変位振幅の増大によるP Δ モーメントの変動が構成断面間の抵抗荷重差を小さくし、塑性変形の箇所が一つの断面に限定されない、③軸ひずみは、塑性化した断面から部材軸方向に進展し、断面の圧縮側で塑性域を大きくするため、構成断面ごとに残留曲率を生じさせる。

上記①の点については、次にたわみモードを分析することにより詳細に調べていく。

(2) 変断面柱のたわみモードと崩壊のメカニズム

ここまで得られた変位およびひずみに関する実験結果と各供試体の実験時のたわみモードから、変断面片持ち柱の崩壊モードを分類すると、Table 4 のようになった。具体的には、以下の3つである。

- ・モード Y*: 下部断面よりも上部断面での塑性曲げ変形が卓越して、たわみモードがY字に類似したもの。
- ・モード V*: 上部断面よりも下部断面での塑性曲げ変形が卓越して、たわみモードがV字に類似したもの。
- ・モード S: H- δ 曲線でループの移動・縮小が見られ、塑性曲げ変形が卓越する箇所が半サイクルごとにV*とY*のパターンで現れ、たわみモードがS字に類似したもの。

ここで、モードV*およびY*は、2. (2)で示した塑性崩壊モードV(V_0)およびY(Y_0)と酷似しているが、実験での柱の変形挙動は塑性変形が1点に集中しない弾塑性挙動であるため、上添字*を付けて区別した。

つぎに、モードY*およびV*を呈した供試体の内、柱C5およびC8の最終ループの変位反転時の崩壊状況

を Photo.1に示す。同写真には、実験中の変位反転時のたわみモードの変化図も示す。

同写真より、柱C5およびC8は、それぞれYおよびV字形に類似したたわみモードを呈していることがわかる。ただし、柱C5では、 $N=19.5$ のときに柱基部から0.4hの付近で若干の曲がりが見られ、上部断面で残留曲率が累積していく影響が現れている (Fig.13(a) 参照)。

さらに、柱C6 については、モードSに至るまでの過程がわかるように、代表的な変位反転点での変形状況とたわみモードの変化図を Photo.2にまとめた。

同写真においてAは初期状態であり、状態B～Iのモード変化、塑性変形集中、および、局部座屈発生について考察すると、以下のとおりである。
状態B～C：正負の変位 δ に対して、ほぼ対称なたわみモードを呈している。

状態D：下部断面での塑性曲げ変形が大きく、モード V^* を呈している。

状態E：下部断面は、状態Dからの残留変形の影響で、ほぼ直立した状態に近い。一方、上部断面の曲がりが大きく（モード Y^* ）、Dと比較すると、塑性曲げ変形の箇所が移動している。これは、下部断面に作用する $P\Delta$ モーメントが残留変形の影響で小さくなり、抵抗荷重差が小さい上部断面の方で塑性化が進んだと考えられる。

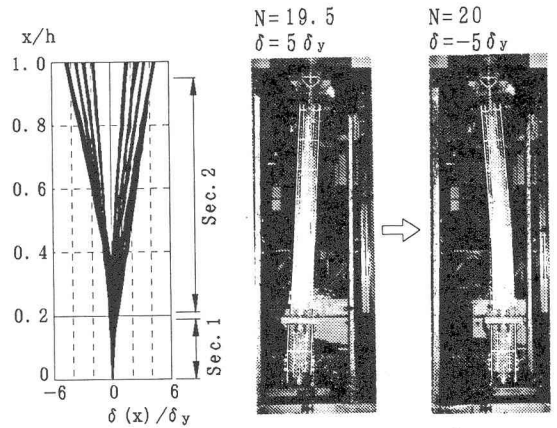
状態F：状態Dの変形がより顕著になり、下部断面の塑性曲げ変形が進行して（モード V^* ）、柱基部付近のフランジ・プレートに、わずかな局部座屈が観察された。また、上部断面には、状態Eからの残留変形が若干認められる。この状態では、下部断面の $P\Delta$ モーメントがDからの残留変形の影響でより大きくなり、上部断面のそれはEからの残留変形の影響で逆に小さくなることわかる。これは、残留変形と $P\Delta$ モーメントとが構成断面間の抵抗荷重差を相殺してしまうことを意味する。

状態G：状態Eの傾向が顕著になり始めている。すなわち、下部断面では残留変形が大きく現れ、上部断面では塑性曲げ変形がさらに進み（モード Y^* ）、たわみモードは、徐々にS字に近づきつつある。ここで、本実験では幅厚比の小さい板要素を用いたが、状態Fにおけるわずかな局部座屈による残留変形が無視できない程に大きいことがわかる。

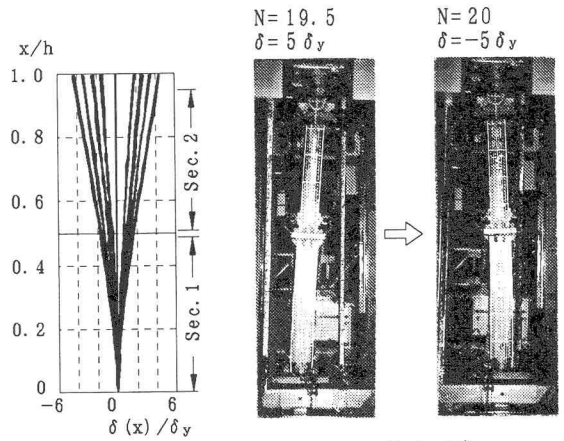
状態H：状態Fに比べて、柱基部付近のフランジ・プレートの局部座屈が若干大きくなり、断面変化点から約 $h/10$ 上の部分の残留曲がりが大きくなった。柱は、ほぼS字形モードを呈している。

状態I：写真に向かって、柱基部から約 $h/10$ 上方の下部断面右側と断面変化点から約 $h/10$ 上方の上部断面左側の相対するフランジ・プレートにおいて、局部座屈が大きくなった。

したがって、一つの構成断面で塑性化が進行して残留曲げ変形が顕著になり、他の構成断面でそれとは逆方向の塑性曲げ変形が大きくなった場合に、 $P\Delta$ モーメントが構成断面間の抵抗荷重差を相殺し、柱はモー



(a) C5-0.21-0.80-L3 (Mode Y^*)



(b) C8-0.51-0.64-L3 (Mode V^*)

Photo.1 Collapse modes of test columns, C5 and C8

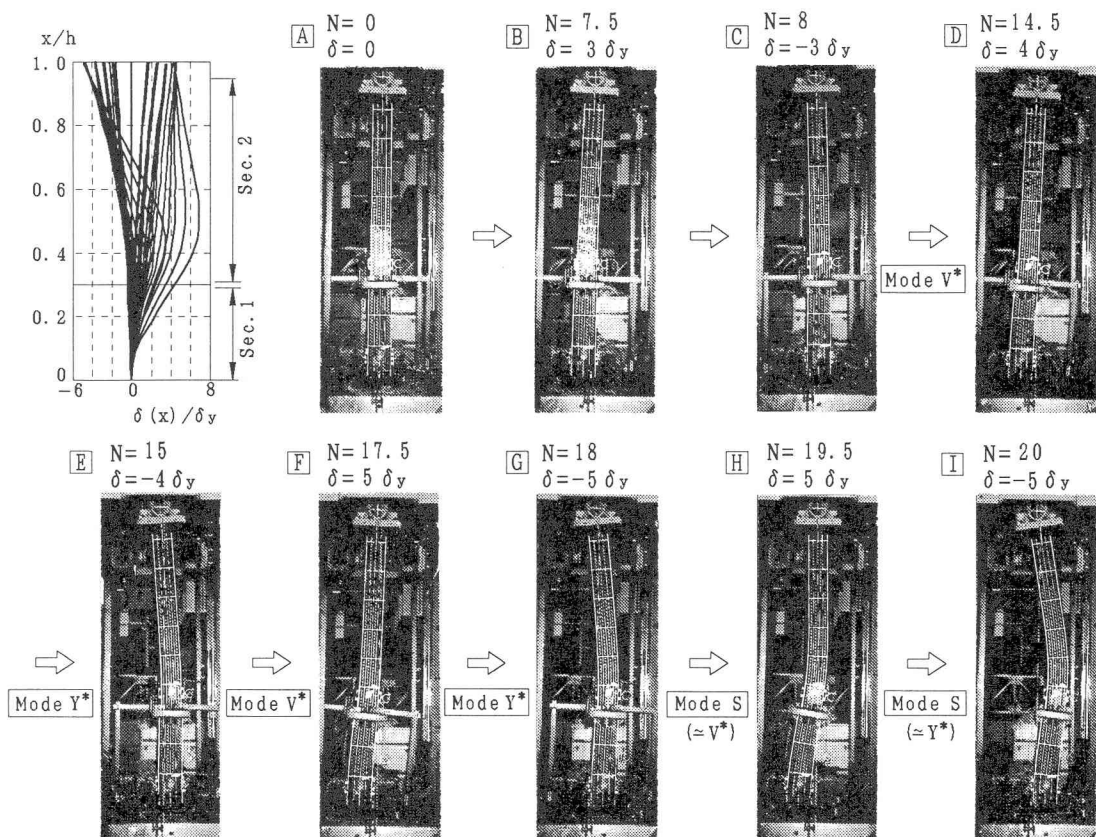


Photo.2 Change of sway displacement modes of test column, C6-0.31-0.75-L3

ド Sを呈することになる。このとき、塑性域は部材軸方向に進展しているため、部材軸方向に残留変形がかなり累積し（(1)および3. (3)参照）、それが塑性曲げ変形を広い範囲にわたって一層大きくしているということも考慮に入れておく必要がある。

これらの結果とひずみの実験結果（Fig.13参照）を踏まえると、モードV*あるいはY*を呈した柱C4、C5、C7およびC8については、その崩壊性状を次のように説明できる。まず、柱C7は、上・下部断面での曲率が正負逆方向に漸増し始めていたことから、モードSに移行していく途中にある。また、柱C4およびC8では、柱上方に位置する断面変化点でのPΔモーメントが小さく、かつ、上・下部断面の抵抗荷重差も大きいために、上部断面で塑性化は生じず、下部断面の塑性変形によりモードV*が現れた。さらに、柱C5では、上部断面の塑性変形が卓越した後、抵抗荷重差が大きいにもかかわらず断面変化点が柱基部に近いために、PΔモーメントが大きくなって下部断面の塑性化を進めた。しかし、下部断面の長さが短いために塑性曲げ変形は小さな範囲に留まり、実験の範囲内では塑性変形箇所の交番が顕著にならずに、モードY*を呈したと考えられる。

以上の結果をまとめると、変断面柱の弾塑性性状を定量的に調べていくに際して、小さな局部座屈も含めた塑性変形に起因する残留変形（軸ひずみ、曲率）の累積、および、構成断面ごとの抵抗荷重差とPΔ効果が重要なファクターであると思われる。その際、本文の実験は1サイクル間の水平変位振幅が正負対称であるという条件で行ったものであるため、今後、地震動による柱の動的応答性状も考慮の上、これらの点を検討していく必要がある。

(3)履歴エネルギー吸収の特性

実験から得られた荷重-変位関係から、水平荷重H および鉛直荷重 Pによる半サイクルごとの増分仕事、

それぞれ ΔW_H および ΔW_P を換算し、柱の履歴エネルギー吸収増分 ΔW の変動を調べた。すなわち、

$$\Delta W = \Delta W_H + \Delta W_P \quad \dots(4)$$

$$\Delta W_H = \sum_{j=m}^n \{ H_j \cdot \Delta \delta_j + \frac{1}{2} (H_j - H_{j-1}) \Delta \delta_j \} \quad \dots(5)a$$

$$\Delta W_P = \sum_{j=m}^n P \cdot (u_j - u_{j-1}) \quad \dots(5)b$$

ここに、 m 、 n ：着目する半サイクル区間の最初と最後の荷重ステップ、 u_i 、 H_i および $\Delta \delta_i$ ：荷重ステップ i における軸方向変位、水平反力および増分水平変位。

繰り返しサイクル数 N による柱C2～C8の ΔW の変動を Fig.14 に示す。ここで、実験開始直後の鉛直荷重 P による仕事については、 $N=0$ のときの ΔW 値に含めている。

まず、同図(a) からわかるように、荷重パターンL2 の柱C2～C4の ΔW 値は、 $N \leq 12$ の範囲でほぼ

同じ曲線上にある。しかし、崩壊モードS を呈した柱C2-0.31の ΔW 値は、 $N \geq 4$ の範囲で半サイクルごとに増減が大きくなり、 $N=12$ のとき急増している。柱C3-0.41の ΔW 値も、 $N \geq 12$ の範囲で、増減が大きい。

また、同図(b)から、荷重パターンL3の柱C5～C8の ΔW 値は階段状に増加し、同じ変位振幅の範囲では、柱C5の値が若干小さいが、同程度のエネルギー吸収特性を示していることがわかる。しかし、モードS を呈した柱C6-0.31では、 $N \geq 17$ ($\delta_m = 5\delta_p$) の範囲で、 ΔW 値は半サイクルごとに増減しながら大きくなっている。

これらの結果の中で、モードS が現れた柱の ΔW 値の増減は、半サイクルごとの軸方向変位の変動（3．(3)参照）、すなわち塑性変形の箇所が交番し始めたことに起因するものである。また、モードSが現れると ΔW 値が全体として増加することは塑性域が広範囲に進展していることを示すものであり、このことは柱C6の上・下部断面で残留変形が大きく現れていたことから確認できる（Photo.2 参照）。

5. 結 論

本研究は、繰り返し水平力を受ける変断面片持ち柱の崩壊実験を行い、変断面性に起因した柱の弾塑性性状を明らかにしたものである。

本文で得られた主な結論は、以下のとおりである。

- 1)柱基部と断面変化点の付近で塑性変形が半サイクルごとに交番し、S字に類似したたわみモードを呈する変断面片持ち柱の弾塑性挙動を実験で確かめることができた。
- 2)このとき、水平荷重－水平変位曲線には履歴ループの移動・縮小という特徴が現れ、柱基部と断面変化点の付近で、軸ひずみが同時に急増する傾向にあった。
- 3)この弾塑性挙動は、一つの構成断面で塑性変形が卓越して残留曲がりが増著になった後、他の断面でそれとは逆方向の塑性曲げ変形が生じたときに現れた。その際、局部座屈は残留変形に大きな影響を与えた。
- 4)この現象は、変位振幅と繰り返しサイクル数の増加とともに、塑性化した断面の残留変形が、柱基部・断面変化点付近の $P \Delta$ モーメントを増減させ、構成断面間の抵抗荷重差を相殺してしまうことに起因する。
- 5)変断面片持ち柱の崩壊モードを3つに分類できた。すなわち、①断面変化点付近で塑性曲げ変形が卓越するモード Y^* 、②柱基部の塑性曲げ変形が卓越するモード V^* 、および、③半サイクルごとに、モード Y^* と V^* の

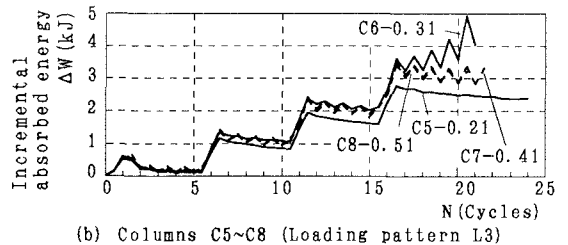
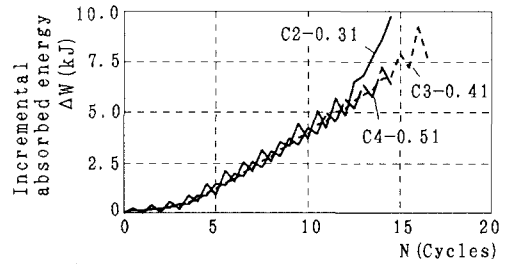


Fig.14 Variation of incremental absorbed energy of test columns with cyclic times

パターンが交番するモードS。

- 6)初期降伏変位を基準にした载荷パターンが同じであれば、半サイクルごとの増分エネルギー吸収量の変動は、ほぼ同程度となった。ただし、崩壊モードSが現れ始めると、塑性域の広がり方が構成断面ごとに大きくなるため、モード V^* あるいは Y^* が現れる場合に比べて、エネルギー吸収は大きくなった。
- 7)変断面柱の弾塑性性状を明らかにしていく上で、繰り返しによって累積する残留変形、構成断面間の抵抗荷重差、および、 $P\Delta$ 効果が重要なファクターであり、今後、地震動を受ける変断面柱の動的応答性状も考慮の上、これらの点を検討する必要がある。

謝 辞

本研究の実施には平成3年度の大同工業大学・研究奨励金の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

また、実験反力フレームの製作に際しては、瀧上工業株式会社にご支援賜りました。とくに、同・設計部の安藤浩吉部長、ならびに、同・橋梁技術室の高木録郎室長には、実験を行うにあたって種々配慮いただきました。ここに記して、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1)中井 博、河井章好、吉川 紀、北田俊行、酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査(上)、(下)、橋梁と基礎、Vol.16、pp.35～40、1982年6月、および、Vol.16、pp.43～49、1982年7月。
- 2)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II鋼橋編、1990年2月。
- 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1990年2月。
- 4)酒造敏廣：繰り返し水平力を受ける鋼変断面片持ち柱の弾塑性挙動に関する研究、土木学会論文集、No.446/I-19、pp.127～136、1992年4月。
- 5)若林 實：耐震構造(建物の耐震性能)、防災シリーズ1、森北出版(株)、1981年10月。
- 6)若林 實：鉄骨構造学詳論、丸善(株)、1985年5月。
- 7)日本建築学会：地震荷重—その現状と将来の展望、1987年11月。
- 8)日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)、1990年10月。
- 9)土木学会関西支部・共同研究グループ最終報告書：鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究、鋼構造物のダクティリティーに関する調査研究グループ、1991年6月。
- 10)横尾義貴、中村恒善、上谷宏二、竹脇 出：繰り返し両振り塑性曲げを受ける鋼片持梁—柱の構面内変形の収束と発散に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第316号、pp.41～52、1982年6月。
- 11)山田 稔、辻 文三、竹下勝弘：鉄骨柱の変形硬化と塑性崩壊、日本建築学会、昭和57年度大会学術講演梗概集(東北)、構造II-2701、1982年10月。
- 12)中村恒善、上谷宏二：両振り繰り返し塑性曲げを受ける片持梁—柱のための対称限界曲線と設計基礎曲線、日本建築学会論文報告集、第346号、pp.78～90、1984年12月。
- 13)酒造敏廣、池田範行：鋼製ラーメン部材の変断面性に関する設計パラメータの調査研究、研究発表会講演概要集、I-11、土木学会中部支部、1992年3月。
- 14)皆川 勝：構造用鋼材の弾塑性履歴挙動のモデル化とその構造部材への適用、学位論文(武蔵工業大学)、昭和63年3月。

(1992年9月21日受付)