

# コーナー部に曲率を有する箱型断面はり一柱の 繰り返し変形特性に関する実験的研究

## HYSTERETIC BEHAVIOR OF THIN TUBULAR BEAM-COLUMNS WITH ROUND CORNERS

渡邊英一\*, 杉浦邦征\*\*, 狩野正人\*\*\*, 高尾道明\*\*\*\*, 江見晋\*\*\*\*\*

By Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, Masato KANO, U,  
Michiaki TAKAO and Susumu EMI

The hysteretic behavior of steel thin tubular beam-columns under cyclic bending and axial compressive force is investigated experimentally, where the overall load-deformation characteristics considering the local instability of thin plate/shell elements are discussed. Special attention is paid to the effect of the presence of axial compressive force and the use of round corners on the ductility after its ultimate state. From this study, it is found that the axial compressive force may reduce the strength and ductility considerably, and also that round corners may be desirable compared with sharp edges for the ductility improvement.

### I. はじめに

軸圧縮力、せん断力、曲げといった組み合わせ荷重下での鋼製部材の最大耐力に関しては、有限要素法 (FEM) の発達により比較的容易に得られるようになって来た。しかし、局部破壊を含む荷重-変形関係の解析は、時間的、経済的制約のため依然として困難である。最近では、地震動、波動等による厳しい荷重環境での構造物の信頼性評価の必要性が認められており、それには先ず、単調荷重下での力学的性状を踏まえた上で繰り返し挙動の基本特性について研究することが急務であろう。

鋼製薄肉はり一柱の繰り返し荷重-変形挙動についての実験的研究では、特に、板・シェル要素の座屈による局部変形の影響が注目されてきた。福本らは、板要素及び箱型断面部材の繰り返し座屈についての一連の実験より、最大耐力に達してから部材強度及び剛性がサイクルの進行につれて減少する事実を示した<sup>1,2</sup>。これは広義での脆性破壊であり、鋼構造においても、不十分なダクティリティによって起こる現象である。著者らもまた、鋼薄肉箱型断面部材のサイクル挙動について一貫した実験的研究を行ってきたが、特に、繰り返し曲げと一定軸圧縮力を受ける補剛箱型断面部材を対象としてきた<sup>3,4,5</sup>。

---

|       |          |               |           |                       |
|-------|----------|---------------|-----------|-----------------------|
| *     | Ph.D, 工博 | 京都大学教授        | 工学部土木工学科  | (606 京都市左京区吉田本町)      |
| **    | Ph.D     | 京都大学助手        | 工学部土木工学科  | (606 京都市左京区吉田本町)      |
| ***   | 工修       | 日本電子計算株式会社    |           | (550 大阪市西区江戸堀 1-9-1)  |
| ****  |          | 京都大学大学院生      | 工学研究科修士課程 | (606 京都市左京区吉田本町)      |
| ***** |          | 阪神高速道路公団工務部次長 |           | (541 大阪市東区北久太郎町 4-68) |

本研究は、軸圧縮荷重の影響に注目しつつコーナー部に曲率を持たせることによる<sup>6,7</sup>ダクティリティ改善への効果を解明し、ひいては、はり一柱のサイクル挙動の評価及び、設計のための基本的繰返し特性を検討するものである。

## II. 载荷実験の概要

昭和 48 年度版の旧道路橋示方書(日本道路協会編)によれば、軸方向圧縮応力度、 $\sigma_c$ 、と曲げ圧縮応力度、 $\sigma_{bc}$ 、については、許容応力度として次式を満足しなければならない。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{ba}} \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{ca}$  と  $\sigma_{ba}$  はそれぞれ許容軸方向圧縮応力度、許容曲げ圧縮応力度である。中井らの実績調査によると、この旧道路橋示方書に基づいて設計された 88 体のラーメン橋脚において式(1)左辺の第一項と第二項の値をプロットすれば Fig.1 のようになることが

報告されている<sup>8,9</sup>。ここで、 $\sigma_c/\sigma_{ca}$  の値は、ほぼ 0.2 を平均として分散し、 $\sigma_{bc}/\sigma_{ba}$  の値は、0 ~ 1.0 の間ではほぼ全般的に分布している。本研究では繰返し曲げと一定軸圧縮力  $P/P_y = 0.2$  を受ける橋脚を想定し、Fig.2 のような载荷形式をとった。ここに、 $P_y$  は降伏圧縮荷重である。さらに、無軸力で繰返し曲げのみを受ける場合についても、実験を行った。これは、繰返し曲げ特性に及ぼす軸力の影響を見るためである。载荷装置の全体図を Fig.3 に示す。軸圧縮力は供試体の内側に挿入した PC 鋼棒の引張りに対する反力として与え、常にその値が一定であるようにした。また、繰返し曲げが供試体全体に一樣に作用するように設定した。なお、実験及び制御方法は、文献(3),(4),(10),(11)に詳しく説明されている通りである。

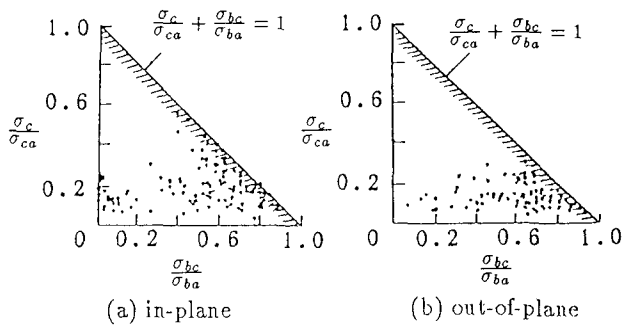


Fig. 1 軸方向圧縮力と曲げモーメントの相関関係<sup>8,9</sup>

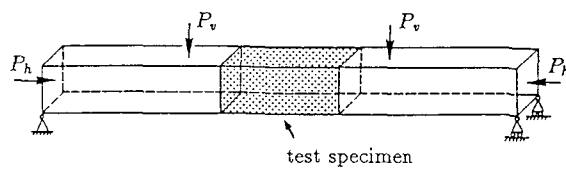


Fig. 2 载荷形式

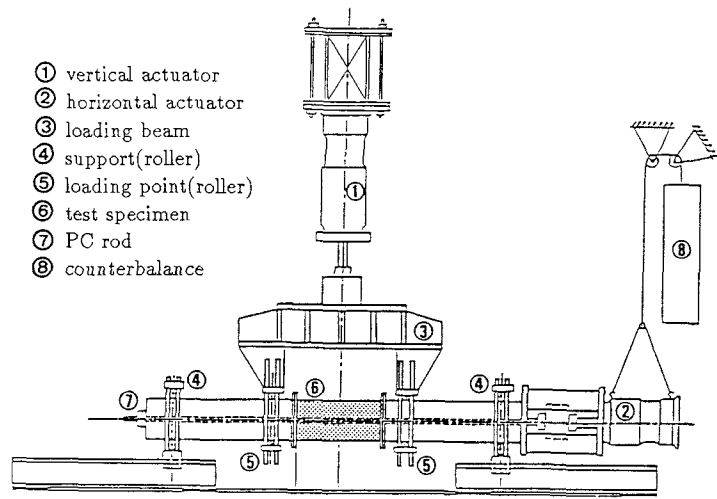


Fig. 3 载荷装置全体図

供試体は、A タイプ（コーナーが直角）と B タイプ（ラウンドコーナー）がある。B タイプについては溶接線の位置によってさらに三つのタイプ（B1,B2,B3）に分類できる。供試体の設計寸法及び形状は Fig.4 の通りである。一般化幅板厚比  $R = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{K_F \pi^2} \frac{\sigma_y}{B}}$  については、A タイプでフランジ部分 1.01、ウェブ部分 1.17 となる。B タイプでは、フランジ 0.63、ウェブ 0.79（平板部分のみ）である。材料定数については JIS 規格により標準引張試験を行い、ヤング率  $E = 2.20 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏応力  $\sigma_y = 2521 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $\nu = 0.292$ 、引張強さ  $\sigma_u = 3781 \text{ kgf/cm}^2$  及び冷間加工による降伏応力増加率約 10% が得られた。残留応力の計測は全タイプについて行ったが、Fig.5 では A タイプと B1 タイプの計測結果を示す。これより、コーナー部に曲率をもたせる際に行われた冷間加工が残留応力分布に大して影響を与えなかったことがわかる。

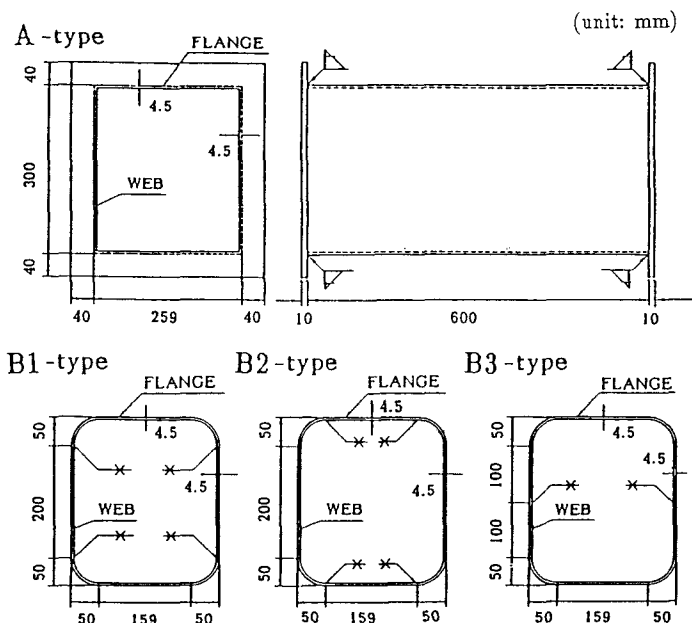


Fig. 4 供試体

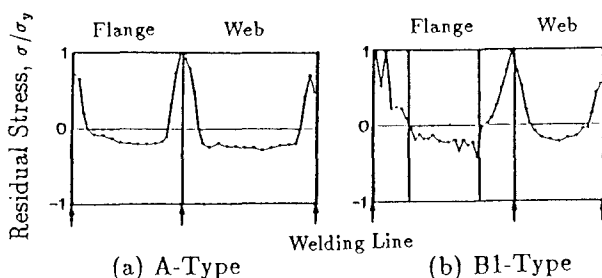


Fig. 5 残留応力分布の計測結果

### III. ラウンドコーナーの有効性

漸増荷重下での強度、ダクティリティといった力学特性に関して、MSC/NASTRAN を用い、弾塑性大変形解析を行った<sup>12,13</sup>。解析対象は対称性を考慮して供試体の 1/4 部分とした。Fig.6 に解析モデル、Fig.7 に要素分割を示す。ここで、曲げモーメントを的確に作用させるという観点から、剛体要素を取り付け、強制変位  $U_d$  を与えた。

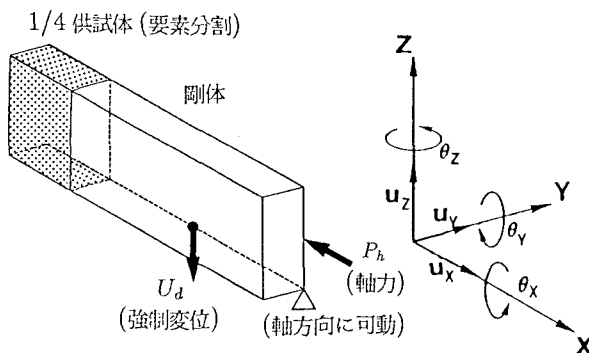


Fig. 6 解析モデル

材料特性については、 $\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu = 0.3$  の完全弾塑性体とし、降伏条件には von-Mises の降伏条件を適用した。A タイプと B タイプについてそれぞれ、(a) 曲げのみ、(b) ~ (d) 曲げと一定軸圧縮力 ( $P/P_y = 0.2, 0.33, 0.5$ ) の場合の解析結果を Fig.8 に、(e) 軸力のみについては Fig.9 に示す。

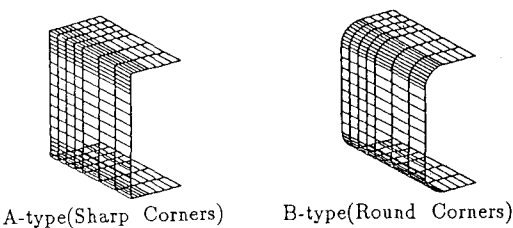


Fig. 7 要素分割

これらの図より、コーナー部に曲率を持たせることによって最大耐力以降の変形性能が向上していることがわかる。このことは、軸圧縮力が大きくなればなるほど顕著になる。さらに、単調曲げ変形時の供試体の軸方向縮みについても、ラウンドコーナーにすることで低減されていることが Table.1 からわかる。Fig.10 では、両断面形についてそれぞれの相関曲線を示している。これより、ラウンドコーナーの有効性が曲げを受ける際に、より大きく発揮されることがわかる。断面2次モーメントや平板部分の幅厚比等の違いを考えると、A タイプに比べて B タイプでは、曲げ耐荷力の絶対量は低いものの曲率を持たせることで材料自体の強度を経済的に引き出せることができダクティリティの向上も期待できる。

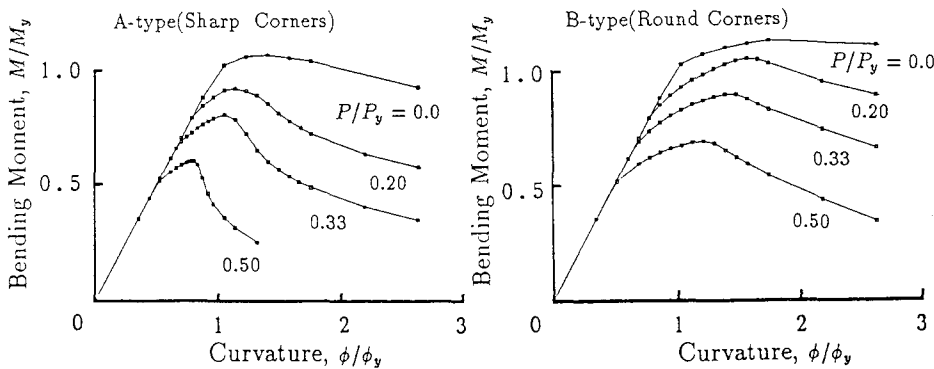


Fig. 8 MSC/NASTRAN による解析結果 (曲げモーメント-曲率関係)  
 $M_y(A) : M_y(B) \simeq 8 : 7$

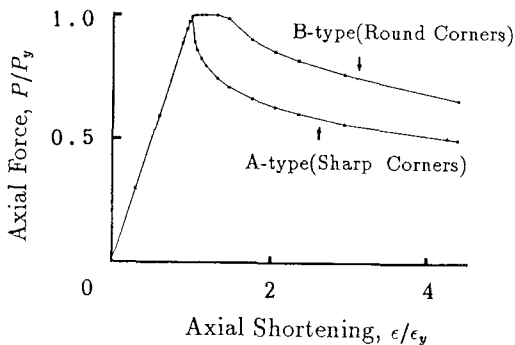


Fig. 9 MSC/NASTRAN による解析結果

Table 1 軸方向縮み  $\epsilon/\epsilon_y$  ( $\phi/\phi_y = 2.625$ )

| $P/P_y$ | A-Type | B-Type |
|---------|--------|--------|
| 0.00    | 0.844  | 0.306  |
| 0.20    | 1.968  | 1.337  |
| 0.33    | 2.399  | 1.845  |
| 0.50    | —      | 2.393  |

#### IV. 実験結果と考察

Fig. 11 では、箱型断面供試体 (A タイプ) とコーナー部に曲率のある供試体 (B1 タイプ) に一定軸力 ( $0.2P_y$ ) と漸増曲げを载荷したときの曲げモーメント ( $M$ )-曲率 ( $\phi$ ) 関係を示している。両者を比較すると、耐力力の絶対量は少しばかり低くなるものの、ラウンドコーナーの方がダクティリティに優れていることがわかる。これは、ラウンドコーナー部分によって、フランジ板の平板部分が座屈した後でもかなりの強度を維持できるためであると思われる。Fig. 12 は、A タイプと B1 タイプの供試体についての繰返し曲げモーメント-曲率関係の実験結果である。この際、ループがほぼ安定するまでは一定振幅の曲率制御を繰返し、それから振幅を増やして次のループに移るものとした。最大耐力に達するまでの間は、サイクルが進むにつれて初期残留応力の再分配による局部降伏が存在するにもかかわらず、すばやく安定状態に入り、曲げモーメントのピークは維持される。このとき A タイプでは  $\phi/\phi_y=1.37$ 、B1 タイプでは  $\phi/\phi_y=2.47$  である。ところが、いったん最大強度に達すると、曲げモーメントのピークはサイクルが進むにしたがって着実に低下していく。この結果から、静的漸増荷重下での最大耐力というものは必ずしも保証されているわけではなく、過酷な荷重条件下での安全性評価には、むしろ後座屈強度及び最大強度以降の変形に留意することが重要だと考えられる。

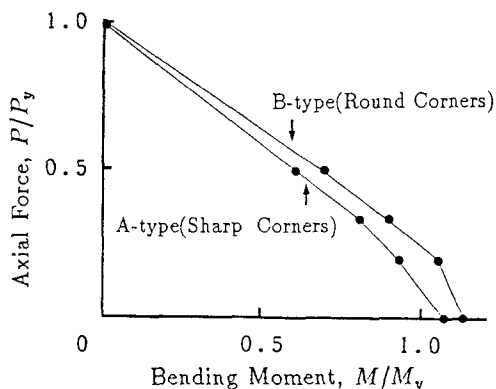


Fig. 10 軸方向圧縮力と曲げモーメントの相関関係

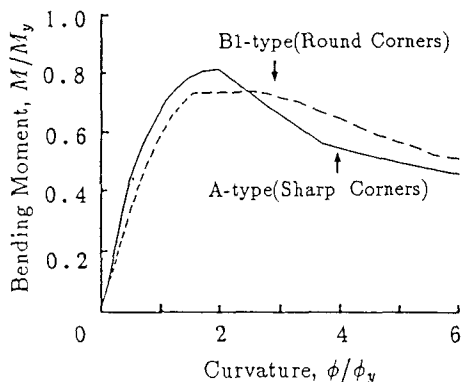


Fig. 11 漸増曲げ载荷の実験結果

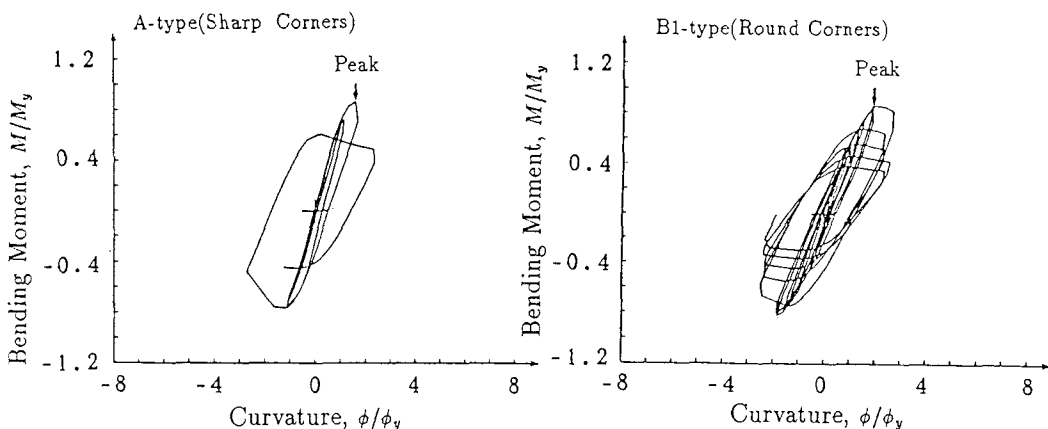
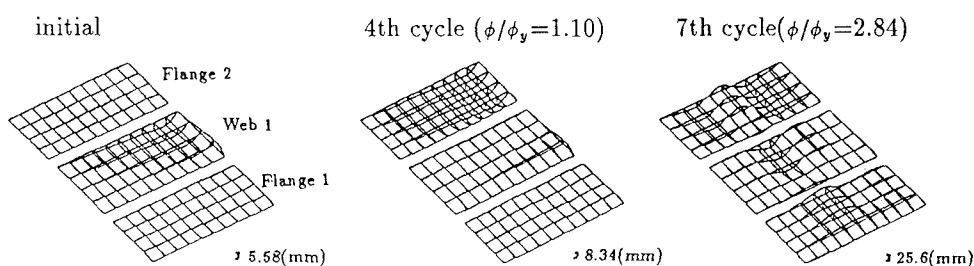


Fig. 12 繰返し曲げモーメント-曲率関係

Fig. 13 は、Fig. 12 と同じ繰返し载荷実験中の面外たわみの状態を示してある。ただし、その大きさはその時々最大面外たわみに対する比で表されている。これより、面外たわみが、最大耐力以前は顕著ではないが、最大強度に達してからは局部において急激に進行していることがわかる。このように繰返し荷重によって強度・剛性が低下する現象を広義の”低サイクル疲労”と呼ぶが、これは面内圧縮応力による板要素の局部座屈の結果である。したがって、軸圧縮力の存在は、構造物の強度及び後座屈強度に大きく影響していると言えよう。また、コーナー部に丸みを持たせた供試体 (B1 タイプ) では、最大耐力以降の座屈波形がコーナー部で非常になめらかであり、亀裂の生じにくい断面形であると言えよう。

#### A-type(Sharp Corners)



#### B1-type(Round Corners)

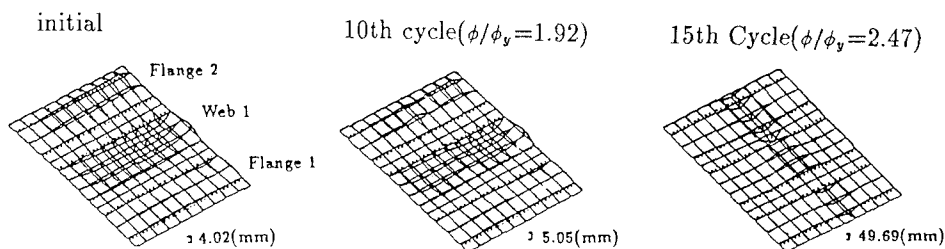


Fig. 13 面外たわみの進行状況

Fig. 14 は、B2、B3 の供試体についてそれぞれ軸力がない場合、ある場合の実験結果である。軸力の存在する場合にはサイクルの進行とともにピークは低下している。一方、無軸力の場合、比較的曲率が大きくなり剛性が低下した状態であっても、曲げ強度は維持されている。福本らの実験では、無軸力の場合でも曲げ強度は低下しているが、これは幅板厚比が比較的大きい供試体を使っているためであろう。

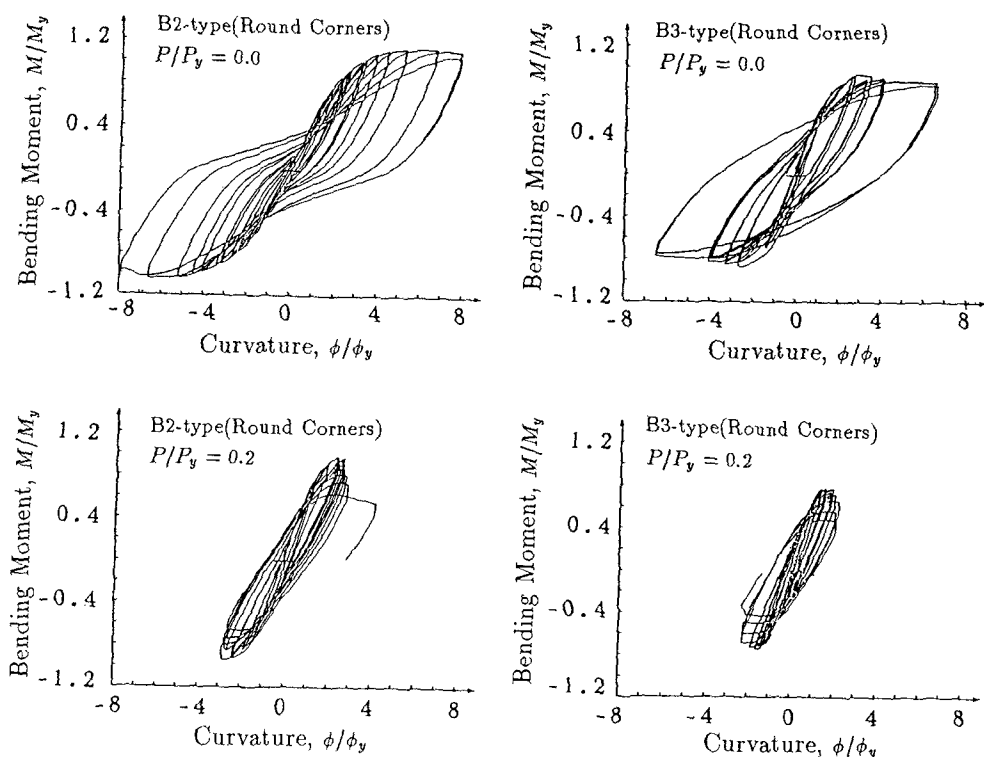


Fig. 14 軸力の繰返し曲げへの影響

## V. 結論

終局限界状態設計法の基礎資料を提供すべく、一定軸力と繰返し曲げを受ける鋼製箱型断面部材の非弾性挙動の基本特性を実験及び解析によって調査した。ダクティリティは耐震構造の設計においては特に重要であり、本研究では、コーナーに丸みを持たせることによってそれがいかに改善されるかについて注目してきた。実際、従来の箱型断面部材と比較して強度的にはたいして違いがないものの、ダクティリティは明らかに向上している。また、軸力の存在による強度及びダクティリティの低下は深刻であり、この現象は局部座屈を含む構造物の広義の低サイクル疲労と考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、文部省科学研究費総合研究A（鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究：代表 福本秀士）の助成を受けてなされたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Fukumoto, Y. and Kusama, H., "Local Instability Tests of Plate Elements under Cyclic Uniaxial Loading," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.5, 1985, pp.1051-1067.
- [2] Fukumoto, Y. and Kusama, H., "Cyclic Bending Tests of Thin-walled Box Beams," Proc. of JSCE, Structural Engng./Earthquake Engng., Vol.2, No.1, 1985, pp.141-151.

- [3] 阪神高速道路公団・財団法人防災研究協会・京都大学構造力学研究室：鋼橋脚の耐震性と健全度に関する研究－，昭和59年度報告書，昭和60年3月。
- [4] 阪神高速道路公団・財団法人防災研究協会・京都大学構造力学研究室：鋼橋脚の耐震性と健全度に関する研究（その2）－，昭和60年度報告書，昭和61年3月。
- [5] 渡邊英一，北沢正彦，奥野雅弘：鋼箱型梁・柱の荷重分担特性の簡易的解析，構造工学論文集 Vol.34A，1988年3月，pp.233-242。
- [6] 川崎重工業株式会社・財団法人災害科学研究所：コーナー部に曲率を有する橋脚柱の極限強度特性に関する研究，昭和63年3月。
- [7] 阪神高速道路公団大阪第一建設部：コーナー部に曲率を付けた鋼製橋脚の設計・施工要領（案），昭和63年3月。
- [8] 中井博・河合章好・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），橋梁と基礎，16巻6号，1982，pp.35-44。
- [9] 中井博・河合章好・吉川紀・北田俊行・酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査（下），橋梁と基礎，16巻7号，1982，pp.43-49。
- [10] Niwa, Y., Watanabe, E. and Isami, H., “Automated Structural Testing using Microcomputer system,” Proc. of JSCE, No.332, 1983, pp.145-158.
- [11] Watanabe, E., Emi, S., Isami, H. and Yamanouchi, T., “An Experimental Study on Strength of Thin-walled Steel Box Beam-columns under Repetitive Bending,” Proc. of JSCE, Structural Engng./Earthquake Engng., Vol.5, No.1, 1988, pp.21-29.
- [12] MSC/NASTRAN, “User’s Manualls and Application Manuals.”
- [13] Schaeffer, H.G., “MSC/NASTRAN Primer: Static and Normal Modes Analysis,” Schaeffer Analysis, Inc., New York, U.S.A., 1972.

（1989年10月2日受付）