

## 鋼製ラーメン橋脚隅角部の静的・繰り返し載荷実験

### An Experiment on the Corner Parts of Steel Frame Structures Subjected to Static and Repeated Loading

長谷川 桂\*、青木徹彦\*\*

Katsura HASEGAWA, Tetsuhiko AOKI

An experiment on corner parts of steel rigid frame structures subjected to static and repeated loading is described. The tests are performed using L-shaped models with rectangular and circular cross section column, respectively. Although yielding load of column flange near frame corner part is considered as the same for compression and tension loading, the difference found from the experiment because of local buckling of the column's inner flange of corner part. Better load-deformation relationship is observed for the circular column model than that for the rectangular column model.

#### 1. はじめに

最近、地震力等が作用する薄肉鋼構造を対象とした鋼構造部材の繰り返し挙動に関する研究が注目されている。特に、構造物の局部的損傷は許すものの破壊しないだけの耐荷力を持たせるという耐震設計の観点から、強度面のみならず変形性能の面からの検討の必要性が指摘されている。

土木鋼構造物の基本的な強度特性については、従来から基本部材の極限強度に関する研究が活発に行われてきた。しかし、これらの研究のほとんどは静的耐荷力に関するものであり、地震力のような繰り返し荷重を受ける構造部材または構造物全体の変形性能については、ここ数年やっと研究が始まったばかりというのが現状である。

都市高架道路の橋脚構造として多用されている鋼製門形ラーメン橋脚は、地震動が設計震度以下であれば構造物は安全であるが、それ以上の巨大地震での安全性についての検討は十分にされていない。したがって、巨大地震においても崩壊することなく道路機能を確保するためには、まず、地震時に最も大

きな断面力が作用する可能性のある隅角部の挙動について検討することが重要であると考えられる。

地震時の鋼製ラーメン橋脚の耐震性に関連して、その隅角部の変形特性を有効に活用するための研究として文献1)~7)がある。しかし、これらの研究では、主にはりおよび柱部材フランジに卓越するせん断遅れ現象や隅角部ウェブのせん断座屈などに着目して、その終局挙動に大きな影響を及ぼす隅角部全体の強度および変形特性についてはまだ十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、矩形および円形断面柱を有するラーメン隅角部の静的および繰り返し載荷実験を行い、応力分布状態を調べる。さらに終局強度を求めて、強度-変形特性を実験的に明らかにし、鋼製橋脚の耐震設計を合理的に行うための基本的資料を提供することを主な目的とする。

#### 2. 実験計画および実験方法

##### 2.1 実験計画

実験供試体の材質はすべてSS400とし、はり、柱部が直角に交差するL形の隅角部モデルとする。柱断面は、矩形(REC)1種、円形(CIR)1種の2種とし、

\* 愛知工業大学大学院 学生(豊田市)

\*\* 愛知工業大学 土木工学科(豊田市)

円形断面ではウェブを柱部材表面に溶接したもののみに用意する。矩形断面柱の板厚はウェブが6 mm、フランジが9 mmで、円形断面柱の板厚は9.5 mmとする。矩形断面柱の単調圧縮载荷試験用 (REC-C)、単調引張载荷試験用 (REC-T)、および繰り返し载荷試験用 (REC-R)、また円形断面柱の単調圧縮载荷試験用 (CIR-C)、および繰り返し载荷試験用 (CIR-R) の合計5体いずれも溶接組立により製作する。基本寸法を Fig. 1 に示す。Table 1 に各供試体の諸数値につ

いて示す。

2.2 実験方法

(1) 素材引張試験

断面構成板と同じ材質で板厚6 mm, 9 mm および9.5 mm の JIS Z2201 号試験片を6 mm は9本、9 mm は6本、9.5 mm は2本製作し、引張試験を行う。

Table 1 Nominal Value of Test Specimen

| Specimen | D (mm) | A <sub>b</sub> (cm <sup>2</sup> ) | A <sub>c</sub> (cm <sup>2</sup> ) | I <sub>b</sub> (cm <sup>4</sup> ) | I <sub>c</sub> (cm <sup>4</sup> ) | W <sub>c</sub> (cm <sup>3</sup> ) | M <sub>c</sub> (tf·m) |
|----------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| REC-C    | ****   | 129.6                             | 129.6                             | 54106                             | 54106                             | 2173                              | 52.15                 |
| REC-T    |        |                                   |                                   |                                   |                                   |                                   |                       |
| REC-R    |        |                                   |                                   |                                   |                                   |                                   |                       |
| CIR-C    | 558.5  | 129.6                             | 163.9                             | 54106                             | 61850                             | 2214                              | 53.14                 |
| CIR-R    | 558.5  | 305.6                             | 163.9                             | 127720                            | 61850                             | 2214                              | 53.14                 |

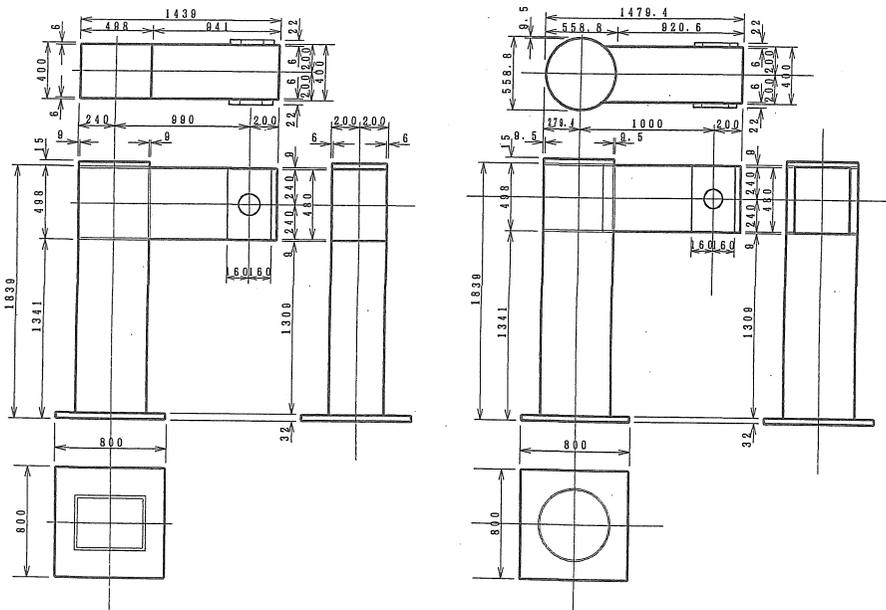
D : Outer Diameter of Column Cross Section

A<sub>b</sub> (A<sub>c</sub>) : Area of Cross Section of Beam (Column)

I<sub>b</sub> (I<sub>c</sub>) : Geometrical Moment of Inertia of Beam (Column)

W<sub>c</sub> : Modulus of Section of Column

M<sub>c</sub> : Yield Moment of Column



(a) Rectangular Section

(b) Circular Section

Fig. 1 Dimension of the Test Specimen

(2) 残留応力測定

矩形断面柱 (REC) を使い、切出し法により残留応力を求める。切断は機械的切断法 (電動ノコ使用) により、切断部に熱を与えないよう十分に時間をかけて行う。

切断の手順は、まず供試体軸直角方向に切断し、中央部より輪切り状の断面 (幅 10 cm 程度) を取り出し、次に供試体軸方向に順次各ひずみゲージ貼付部を切断していく。そして、各ひずみゲージ部切断後直ちに計測し、切断面の計測値との差をもって残留ひずみ (応力) を求める。

(3) 载荷試験

隅角部モデルは、Fig. 2 に示すように、はり、柱部を  $\phi 141$  mm のピン支持とし、300 ton 長柱試験機を用いて柱断面が矩形、円形各 1 体を単調圧縮载荷試験、矩形 1 体を単調引張载荷試験、そして矩形、円形各 1 体を繰り返し载荷試験で行う。

供試体の隅角部付近で、座屈変形が予想される部分にひずみゲージを貼付け、各荷重レベルごとに測定値を記録する。また、ピン支承間変位および隅角部の変形を調べるために変位形を設置し、各荷重レベルごとの変位を記録する。

(a) 降伏荷重の計算

予想降伏荷重  $P_y$  は Fig. 3 に示すように、圧縮载荷と引張载荷で異なる。圧縮载荷の場合は柱の内側で曲げ圧縮応力  $\sigma_M$  と一様軸圧縮応力  $\sigma_N$  との和となり、引張载荷の場合はこれらの差から求めることができる。このように求めた降伏荷重  $P_y$  を Table 2 に示す。

(b) 単調圧縮载荷

圧縮方向に、予想降伏荷重  $P_y$  まで 5 tf 刻みで荷重制御を行い、降伏荷重付近で変位制御にする。

(c) 単調引張载荷

引張方向に载荷を始め、単調圧縮载荷と同様の制御法で行う。

(d) 繰り返し载荷

圧縮方向から载荷を始め変位制御で行う。圧縮側のみ 3 サイクルごとに降伏変位  $\delta_y$  ずつピン支承間変位が進むように载荷し、最大荷重到達後は各サイクルとも最大荷重の 1/2 に達するまで繰り返し载荷を行う。また、引張側は、降伏変位  $\delta_y$  を強制変位として繰り返し载荷を行う。 $\delta_y$  は素材試験で得られた降伏ひずみ  $\epsilon_y$  に 1 サイクル目のラーメン隅角部最大ひ

ずみ点のひずみが達したときのピン支承間変位を基本降伏変位  $\delta_y$  として用いる。

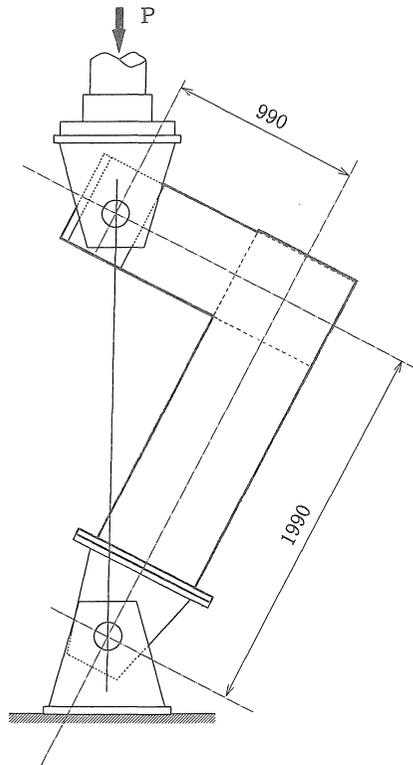
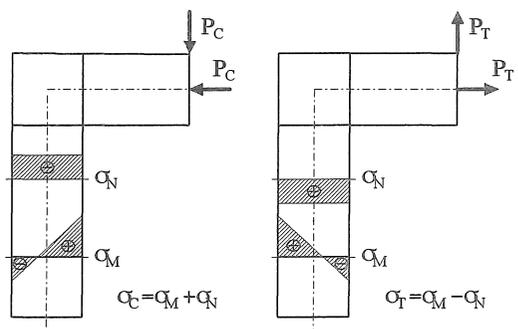


Fig. 2 Test Setup



(a) Compression

(b) Tension

Fig. 3 Calculation of Yield Strength ( $P_y$ )

Table 2 Theoretical Value of Yielding Load

|     | Compression (tf) | Tension (tf) |
|-----|------------------|--------------|
| REC | 60.25            | 76.71        |
| CIR | 96.47            | 118.22       |

3. 実験結果および考察

単調圧縮載荷より単調引張載荷の方が約5%高い応力となった。

(1) 素材引張試験

素材引張試験結果を Table 3 に示す。板厚が 6 mm の試験片の降伏強度  $\alpha_y$  は公称降伏強度  $\alpha_F = 2400 \text{ kgf/cm}^2$  より約 28% 高い値を示し、9 mm では約 8%、鋼管材から切り出した 9.5 mm では約 50% 高い値を示した。

(2) 残留応力測定

矩形断面柱と八角形断面柱の残留応力の分布図を Fig. 4 に示す。測定値は、素材引張試験により得られた降伏応力で無次元化する。これらの図より、溶接付近で引張残留応力があり、溶接から遠ざかるに従って圧縮残留応力となるような分布を示している。これは、幅の広い薄板の端部を溶接した場合の一般的な残留応力分布形状と同様である。

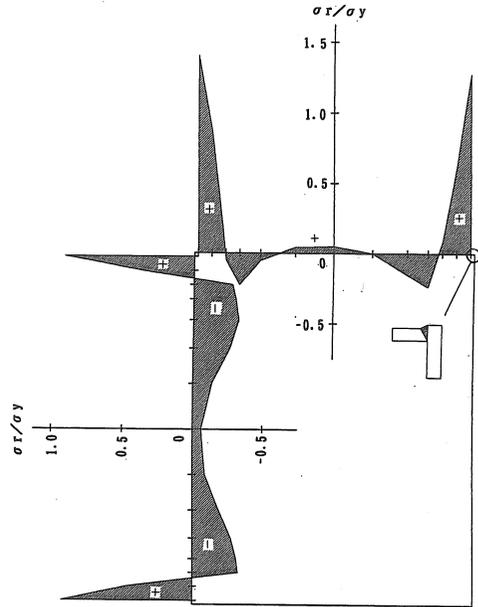


Fig. 4 Distribution of Residual Stress (Rectangular)

(3) 最大荷重の比較

Table 4 に各供試体の最大荷重を示す。矩形断面供試体 (REC) では、単調圧縮載荷 (REC-C) より単調引張載荷 (REC-T) の方が約 31% 高い荷重となった。またこの時の圧縮フランジ (圧縮載荷はラーメン隅角部内側、引張載荷は外側) の最大荷重時の応力は、

Table 3 Test Results of Tensile Coupon Test

|           | E<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\alpha_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\alpha_u$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\epsilon_y$<br>( $\mu$ ) | $\nu$ |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------|
| t= 6 mm   | 2.13 x 10 <sup>6</sup>      | 3088                                 | 4293                                 | 1442                      | 0.29  |
| t= 9 mm   | 2.11 x 10 <sup>6</sup>      | 2599                                 | 4513                                 | 1218                      | 0.29  |
| t= 9.5 mm | 2.12 x 10 <sup>6</sup>      | 3608                                 | 4762                                 | 1718                      | 0.35  |

E : Young's Modulus     $\alpha_y$  : Yield Stress     $\alpha_u$  : Maximum Stress  
 $\epsilon_y$  : Yield Strain     $\nu$  : Poisson's Ratio

Table 4 Maximum Load

| Specimen | $P_u$ (tf) | $P_y$ (tf) | $P_u / P_y$ | $\sigma_{cr}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\delta_y$<br>(mm) |
|----------|------------|------------|-------------|---|--------------------|
| REC-C    | 66.9       | 60.3       | 1.11        | 2887                                    | 8.7                |
| REC-T    | 87.9       | 76.7       | 1.15        | 2978                                    | 10.7               |
| CIR-C    | 103.5      | 96.5       | 1.07        | 3877                                    | 10.4               |

$P_u$  : Maximum Load     $P_y$  : Expected Yield Load  
 $\sigma_{cr}$  : Stress of Compressive Flange at Maximum Load  
 $\delta_y$  : Yield Displacement

(4) 単調载荷の荷重-変位 ( $P/P_y - \delta/\delta_y$ ) の関係

単調圧縮载荷および単調引張载荷の荷重  $P$ 、変位  $\delta$  をそれぞれ降伏荷重  $P_y$ 、降伏変位  $\delta_y$  で無次元化した  $P/P_y - \delta/\delta_y$  の関係を Fig. 5 に示す。 $\delta_y$  は実験による荷重-変位曲線の弾性部分の直線から、 $P_y$  に対応する値として求めた。

同図より、単調圧縮载荷を行った矩形断面柱の圧縮 (REC-C) と引張 (REC-T) を比較すると、REC-C は最大荷重後の荷重低下が大きいことがわかる。これは、ラーメン隅角部内側の圧縮フランジに、応力が集中したために早期に局部座屈を生じたためであると考えられる。一方、単調引張载荷を行った REC-T は最大荷重後の荷重低下が圧縮载荷のものよりも緩やかである。これは、外側フランジでは応力集中がほとんどなく、応力分散されたために局部座屈の発生が遅れたためであると考えられる。

また、円形断面柱の圧縮 (CIR-C) は、円形断面の柱部ではなく矩形断面のはり部が座屈したために矩形断面の柱部 (REC-C) と同様の荷重-変位性状が得られた。このことから、この実験では円形断面柱の特性というよりはり部の荷重-変位特性になっている。

## (5) 座屈変形状態

REC-C は、柱の圧縮フランジに局部的な座屈が見られた。一方、REC-T は、はじめに背面フランジに

局部座屈を生じた後、隅角部に複雑なせん断座屈を生じた。また、CIR-C は、はり部の圧縮フランジに局部的な座屈が見られた。

REC-R は、REC-C と同様に柱部の圧縮フランジに局部的な座屈が生じ溶接部分が破断した。一方、CIR-R は、はりの真下の柱部に局部的な座屈を生じ、はりと柱の溶接部分が破断した。Fig. 6 に座屈変形形状を示す。

(6) 繰り返し载荷の荷重-変位 ( $P/P_y - \delta/\delta_y$ ) の関係

繰り返し载荷を行った REC-R, CIR-R の  $P/P_y - \delta/\delta_y$  関係をそれぞれ Fig. 7 (a), (b) に示す。図中にはそれぞれ REC-C, CIR-C の関係も示す。矩形断面柱 (REC) の繰り返し载荷の場合、圧縮载荷の 1 サイクル目と単調圧縮载荷の最大荷重と同じ荷重になり、4 サイクル目に最大荷重 (80.47 tf) を得た。これは、圧縮载荷時に内側フランジに早期に座屈が生じたものの、引張载荷時に圧縮座屈変形がもとに戻され、またひずみ硬化の影響などによって強度が上昇したことが原因であると考えられる。

円形断面柱 (CIR) では、単調载荷ではり部の方が早く座屈したために、はり部に板を溶接し鋼管部より強くした後、繰り返し载荷を行った。Fig. 7 (b) に示すように、繰り返し载荷による耐力の低下は緩やかで、ねばり強い変形特性が見られた。

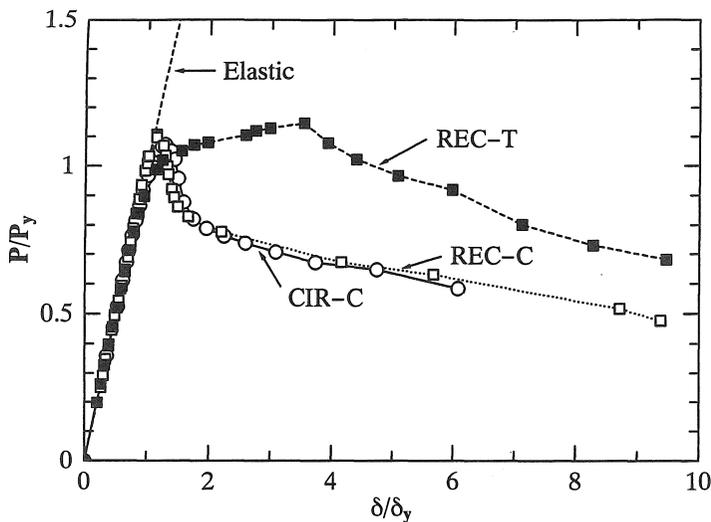
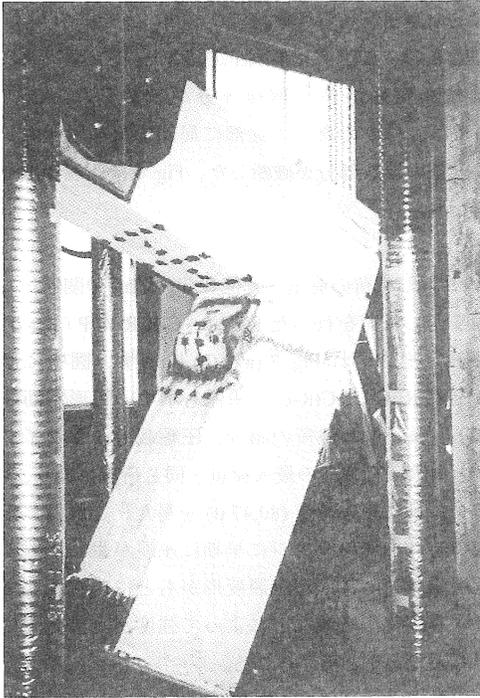
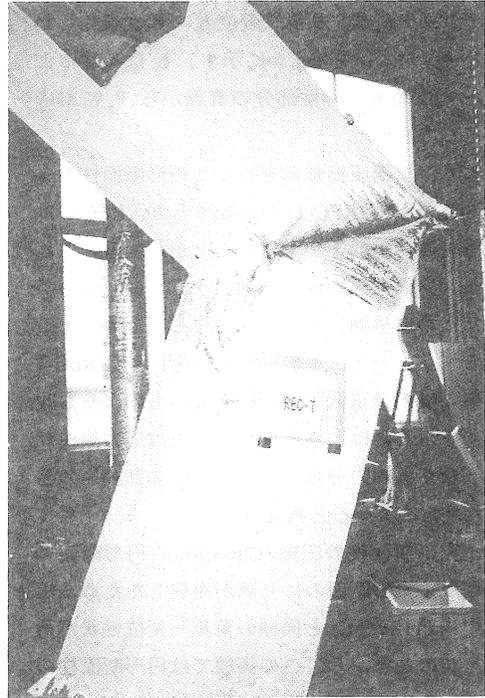


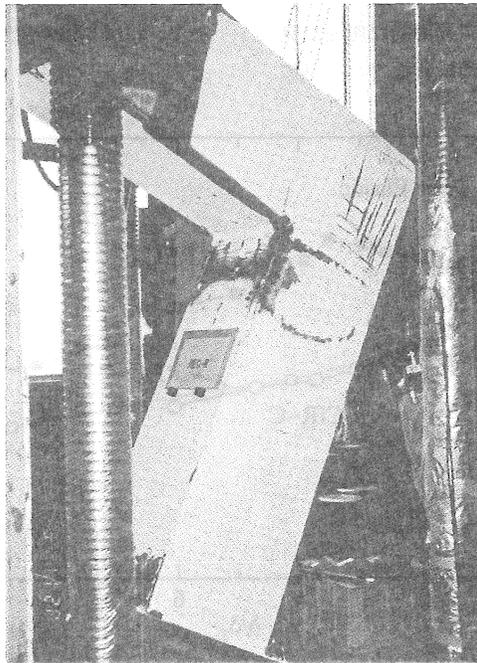
Fig. 5 Relation between Load and Displacement  
(Comparison of Monotonic Loading Specimens)



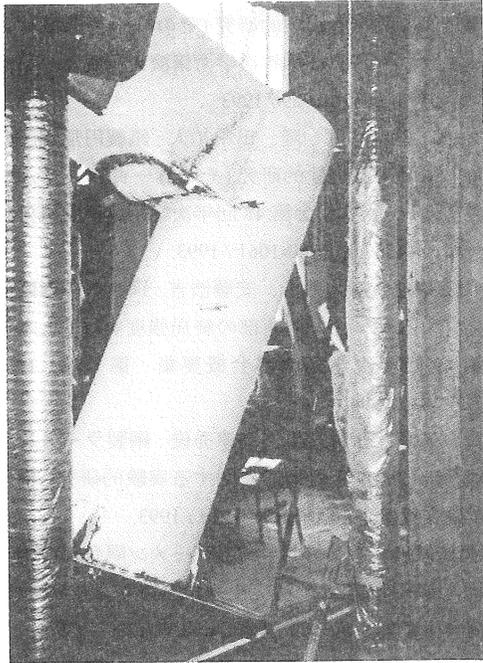
(a) REC-C (Column)



(b) REC-T (Column)



(c) REC-R (Column)

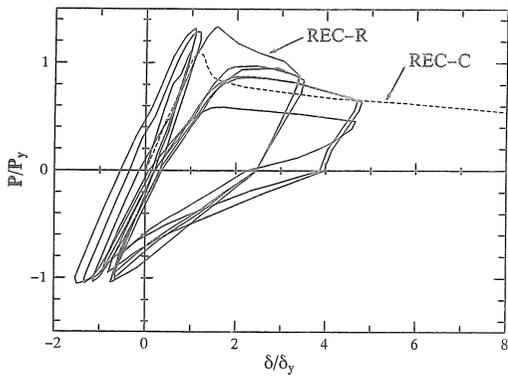


(d) CIR-C (Beam)

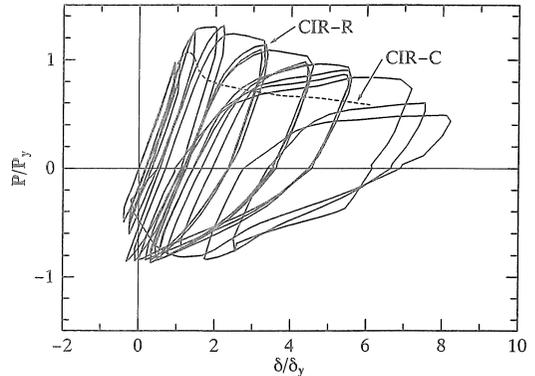


(e) CIR-R (Column)

Fig. 6 Buckling Configuration of After Test



(a) REC-R



(b) CIR-R

Fig. 7 Relation between Load and Displacement for Repeated Loading

#### 4. まとめ

本研究の結果から得られた結論を以下にまとめる。

(1) 矩形断面 (REC) の単調圧縮载荷と単調引張载荷の比較の結果、圧縮フランジ (圧縮载荷はラーメン隅

角部内側、引張载荷は外側) の最大荷重時の応力は、ほぼ等しい値となったものの、圧縮载荷と引張载荷の荷重変形特性に大きな違いが現れ、引張载荷の方が大きな変形能力が得られた。

(2) 現在の設計基準では、柱フランジの内側と外側の

強度は同じと考えているが、実際には内側で応力集中が大きいため局部座屈を生じやすく、ラーメン隅角部としての変形能力が小さい。また溶接部分が破断しやすい。よって、柱内側フランジの変形能力を求める必要がある。

(3) 円形断面 (CIR) の単調圧縮荷重の場合は、円形断面の柱部ではなく矩形断面のはり部が座屈したために矩形断面の柱部 REC-C と同様の荷重-変位性状が得られた。

(4) 矩形断面 (REC) の繰り返し荷重の場合、圧縮荷重の1サイクル目と単調圧縮荷重の最大荷重と同じ荷重になり、4サイクル目に最大荷重 (80.47 tf) を得た。これは、圧縮荷重のとき内側フランジに早期に座屈が生じたものの、繰り返し荷重では、引張荷重のときに変形がもとに戻され、またひずみ硬化の影響などによって強度の上昇があったためであると考えられる。

(5) 円形断面柱の繰り返しの場合、繰り返し荷重による耐力の低下はほとんどなく、ねばり強い変形特性が見られた。阪神高速道の破壊鋼管の  $D/t$  (径厚比) は100程度であったが、本試験ではそれより肉厚の大きな  $D/t = 58.8$  の鋼管を使用したためであると考えられる。今後は、 $D/t$  が大きく規模の大きな供試体の実験が必要であると考えられる。

## 5. おわりに

本研究は第1著者の修士論文の第3章の一部を中心にまとめたものである。実験に当たり、学部卒研究生西川 彰、森本一直、若林尚志君の協力を得た。また、技術員の永田 昇氏には実験中何かとお世話になった。実験支持装置の製作費の一部には日東学術財団の研究助成金を当てた。供試体製作費の一部に、土木学会からの奨学寄付金を当て、製作に当たっては瀧上工業㈱の協力を頂いた。ここに以上の方に深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 木暮 深、増井 隆、宇都宮紳三：鋼製円形橋脚の隅角部に関する実験的研究 (その1) - 静的載荷実験 - ; 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集 第一部 I-455, pp.1058-1059 / 1993.
- 2) 木暮 深、増井 隆、田中祐人：鋼製円形橋脚の隅角部に関する実験的研究 (その2) - 曲げ・せん断破壊実験 - ; 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集 第一部 I-456, pp.1060-1061 / 1993.
- 3) 山田尚之、青木徹彦、安藤浩吉：鋼製八角形断面柱を有するラーメン隅角部の終局強度実験 ; 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集 第一部 I-90, pp.180-181 / 1994.
- 4) 黄 元燮、西村宣男、高津秀俊：鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究 ; 構造工学論文集 Vol. 40A, pp.201-214 / 1993.
- 5) 酒造敏廣、事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能について ; 土木学会第 44 回年次学術講演会概要集 第一部 I-43, pp.138-139 / 1989.
- 6) 宇都宮紳三、西村宣男：鋼製ラーメン隅角部の耐荷力と変形性能に関する実験研究 ; 土木学会第 47 回年次学術講演会概要集 第一部 I-55, pp.286-287 / 1992.
- 7) 東郷幹生、松本憲文：鋼製橋脚の柱の有効幅に関する一考察 ; 佐藤鉄工技報 Vol.7, pp.17-23 / 1994.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 / 1990.

(受理 平成7年3月20日)