

# 円弧ハンチ付ラーメン隅角部の耐荷力に関する実験的研究

大島要一\* , 井浦雅司\*\*

\*学生会員 東京電機大学大学院理工学研究科建設工学専攻修士課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

\*\*正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

本報告では、多層ラーメン構造系における隅角部の構造に注目し、隅角部に円弧ハンチ無と円弧ハンチ付の T 型供試体について実験を行った。さらに、隅角部における補剛方法を変化させ、梁の先端部に横力を変位制御により載荷し、その横力を正負漸増一回繰返して増大させることにより、最大耐力や塑性率、梁フランジプレートの応力分布に円弧ハンチと補剛方法がどのような影響を与えるのか調べることを目的とした。また、本実験の供試体と補剛方法がほぼ同一の解析モデルを用いて、汎用有限要素法プログラム NASTRAN により数値解析を行った。本実験より、円弧ハンチの有無や隅角部の補剛方法を変化させることにより、最大耐力や梁フランジプレートの応力分布に差異があることが確認された。また、円弧ハンチ無供試体に比べて円弧ハンチ付供試体の方がフランジとウェブプレートの接合部付近の応力集中が顕著に見られ、さらに最大耐力の低下も観察された。

*Key Words : Framed structures, Ultimate strength, Ductility, Elasto-plastic*

## 1. はじめに

既往のラーメン隅角部についての研究は、奥村、石沢<sup>1)</sup>をはじめとして数多くの研究<sup>2), 3), 4), 5), 6), 7)</sup>が報告されているが、その耐震安全性については、まだ多くの検討余地が残されている。梁と柱部材の接合部である隅角部には、地震時に最も大きな断面力が作用する可能性がある。その隅角部に円弧ハンチを設ける(以後 R 付と略す)。形状については、文献 1)において研究されているものの、多層ラーメン構造系における隅角部については未解明な点が多く、それらの隅角部の挙動特性をより正確に検討する必要があると考えられる。

本報告では、多層ラーメン構造系における隅角部の構造を R 無のものとして R 付のものについて補剛方法を変化させ、繰返し載荷実験を行い、隅角部の形状や補剛方法の差異により座屈挙動や最大耐力、梁フランジプレートの応力分布に対する影響について考察する。また、汎用有限要素法プログラム NASTRAN による数値解析と実験結果を、比較・検討することを目的としている。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験方法

実験装置の全体図を図-1 に示す。T 型供試体の柱を実験装置の鉛直方向に両端ピン支持で設置した。柱に変位測定枠を設置し、梁の先端で変位を測定した。実験は、横力をアクチュエータによって変位制御により載荷し、正負漸増一回繰返し載荷で行った。ここで、基準とした 1 $\delta$  の変位は、実験中の荷重-変位曲線がほぼ直線とみなせる範囲

から僅かに外れた時か、または、梁フランジプレートで測定している歪から求まる応力が降伏応力に達する時の変位である。

### 2.2 実験供試体

実験供試体として、図-2(a)に示した鋼製ラーメン橋脚の梁と柱の交差部が直角の供試体(以後 R 無供試体と呼ぶ)を2体、図-2(b)に示した梁と柱の交差部が R 付の供試体(以後 R 付供試体と呼ぶ)を6体の計8体を作製した。供試体断面は、図-2(c)に示したように一辺が 25cm の正方形断面とした。供試体寸法は、隅角部の形状や補剛方法の影響について考察するため、実構造物を対象とした寸法ではない。材料はすべて SS400 であり、その素材の引張試験の結果と各供試体の板厚を表-1 に示す。

### 2.3 供試体の補剛方法

図-3 に各供試体の補剛方法を示した。R 無供試体 S-1, S-2 は、梁と柱の交差部が直角であり、S-1 は、梁が柱を貫通しているように作製し、S-2 では柱が梁を貫通しているように作製した。

R 付供試体 R-1~R-6 においては、隅角部近傍で梁および柱にダイヤフラムを設置した。R-1~R-4 の円弧ハンチの曲率半径は 4cm であり、R-5, R-6 の曲率半径は 21.25cm である。R-1 と R-2 の差異は、フランジプレートにあり、R-1 のそれは梁と柱が 1 枚板よりなり、R-2 のそれは柱部分で溶接されている。R-3 は R-1 の梁円弧ハンチ終点に補剛材を入れたものであり、柱が梁を貫通させたモデルに近似

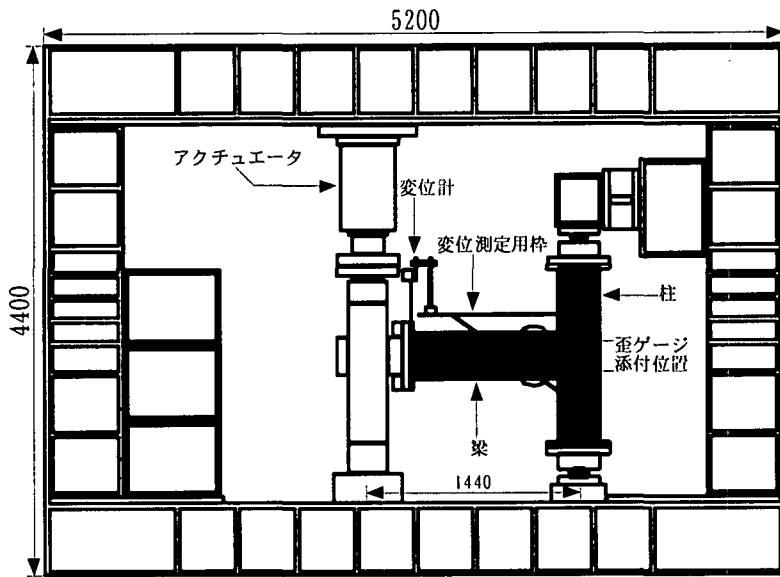


図-1 実験装置

表-1 材料定数

供試体 No.	材料特性			
	板厚 (mm)	降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 $\times 10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
S-1	5.74	3202	1.972	0.284
S-2	5.74	3202	1.972	0.284
R-1	5.74	3202	1.972	0.284
R-2	5.74	3202	1.972	0.284
R-3	5.74	3202	1.972	0.284
R-4	5.74	3202	1.972	0.284
R-5	5.59	3388	1.955	0.286
R-6	5.62	3420	2.043	0.290

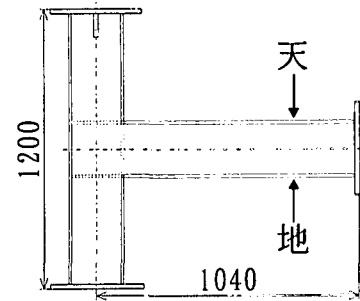


図-2(a) R 無供試体

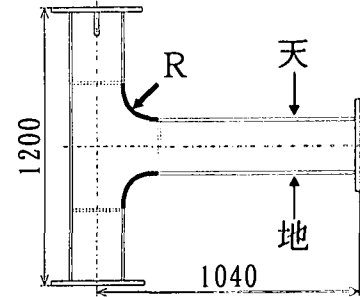


図-2(b) R 付供試体

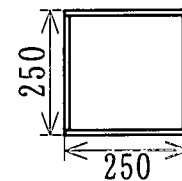


図-2(c) 供試体断面

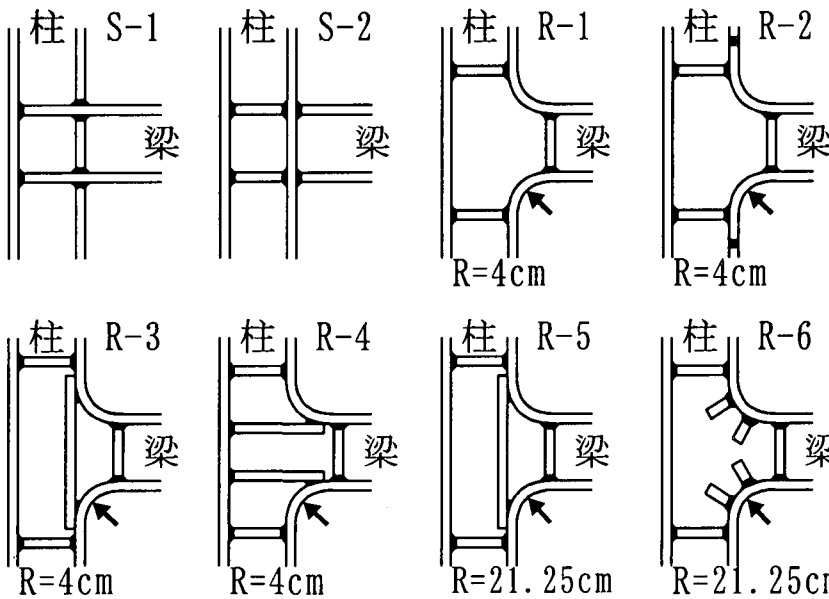


図-3 供試体の補剛方法

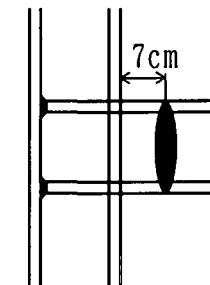


図-4(a) R 無供試体

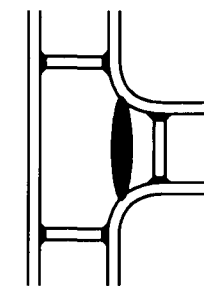


図-4(b) R 付供試体

させている。R-4 は R-1 の梁円弧ハンチ始点から柱に向けて補剛材を入れたものであり、梁が柱を貫通させたモデルに近似させている。R-5 は R-3 と同様の補剛方法であり、曲率半径が異なっている。R-6 は梁のフランジおよびウェブプレートを補強するために、30 度間隔で補剛材を挿入したものである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 座屈挙動

R 無供試体と R 付供試体の座屈箇所を図-4(黒色部)に示す。図-4(a)に示すように、R 無供試体(S-1, S-2)は、梁と柱の接合部より梁側に約 7cm 付近で座屈が発生した。それに対し、図-4(b)に示すように、R 付供試体(R-1~R-6)は、

表-2 最大耐力, 座屈発生ループと塑性率

供試体 No.	最大耐力 (KN)	座屈発生ループ	塑性率
S-1	126	4	3.0
S-2	124	4	4.2
R-1	105	4	3.0
R-2	105	3	3.0
R-3	101	3	3.0
R-4	105	2	3.0
R-5	103	2	2.0
R-6	120	3	3.0

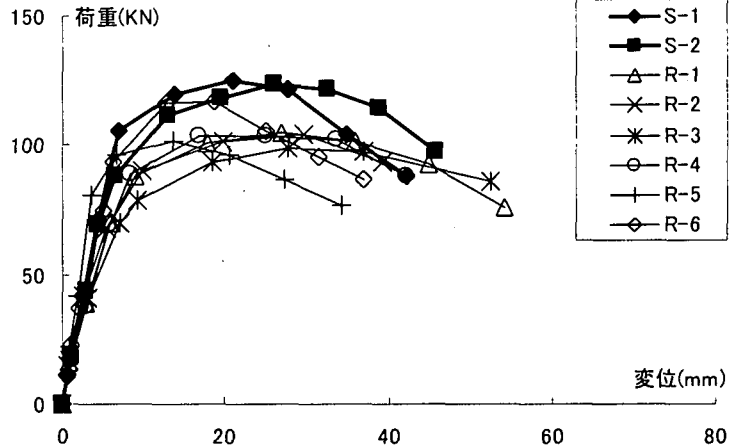


図-5 包絡線(実験結果)

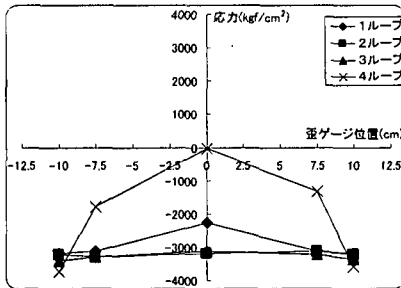


図-6(a) 応力分布(S-1)

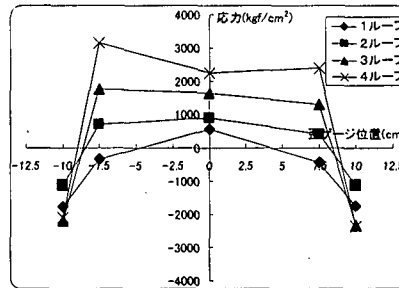


図-6(b) 応力分布(R-1)

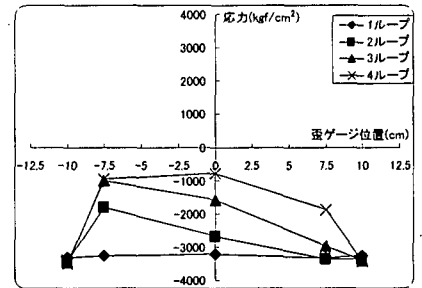


図-6(c) 応力分布(R-4)

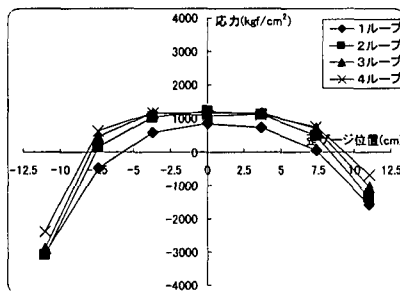


図-6(d) 応力分布(R-5)

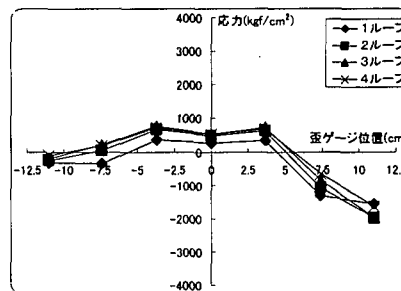


図-6(e) 応力分布(R-6)

梁と柱の接合部付近でウェブプレートが最初に座屈し、最終的には座屈発生部分のフランジとウェブプレートの溶接部から亀裂が入った。しかし、R-6 では他の R 付供試体と比べ、図で示したより梁側のダイヤフラム近傍で座屈が発生した。

### 3.2 最大耐力と塑性率

実験から得られた最大耐力と座屈発生ループを表-2 に示す。また、縦軸に荷重、横軸に梁先端部の変位をとった包絡線を図-5 に示す。これより、R 無供試体は、R 付供試体に比べて最大耐力が高くなる事が分かる。しかし、R-6 は、R 付であるが最大耐力が R 無供試体とほぼ同じであることがわかる。これは、リブによる補剛の影響で最大耐力が高くなっていると考えられる。

最大耐力時の変位  $\delta_{max}$  と降伏耐力時の変位  $\delta_y$  との比  $\delta_{max}/\delta_y$  を塑性率とし、各供試体の塑性率を表-2 に示す。これより、S-2 が他の供試体よりも高く、R-5 は、他の供試体よりも低いことがわかる。その他の供試体では、塑性

率は一定であることがわかる。

### 3.3 梁フランジプレートの応力分布

図-2 に示した供試体の梁フランジプレートの天側表面において、R 無供試体では梁と柱の接合部より梁フランジ側に 5cm の所で、R 付供試体は梁のダイヤフラムより若干梁先端部側の所で 2 軸ゲージを貼付することにより歪を測定した。横力を天側に载荷した時の各ループの最大耐力における応力分布を図-6 に示す。

図-6(a)は S-1 の応力分布を示しているが、S-2 の応力分布も S-1 のそれと同様であるため、ここでは省略した。これより、座屈が発生する前の 1~3 ループ目ではほぼ均一の応力分布をしており、座屈が発生した 4 ループ目では応力分布が不均一になることがわかる。図-6(b)は R-1 の応力分布を示しているが、R-2、R-3 のそれも同様であるため、ここでは省略した。図より、1 ループ目から梁フランジプレート表面の中心近傍が正の応力となっていることがわかる。また、ループが進むにつれ、この正の応力の値も大きくなってい

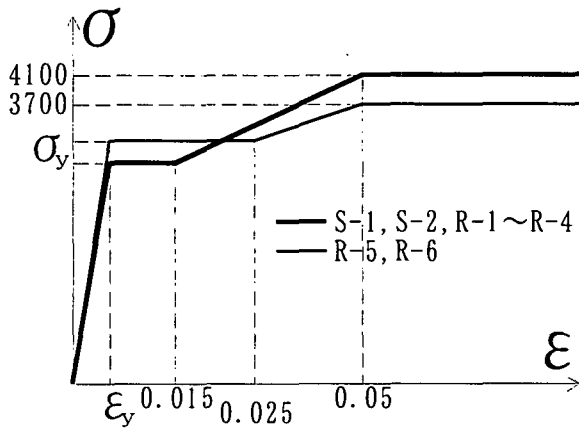


図-7 応力-歪関係

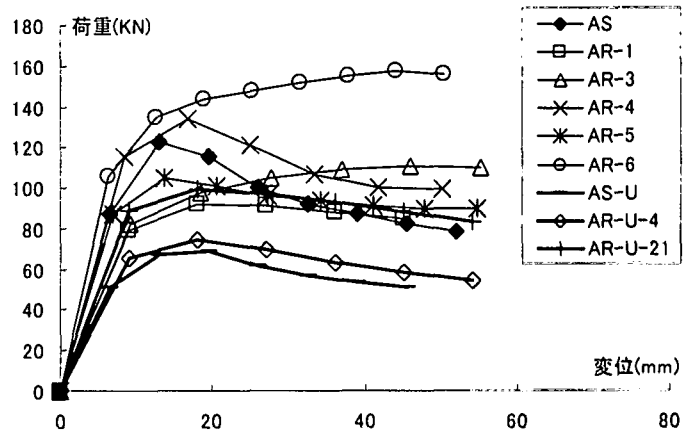


図-9 包絡線(解析結果)

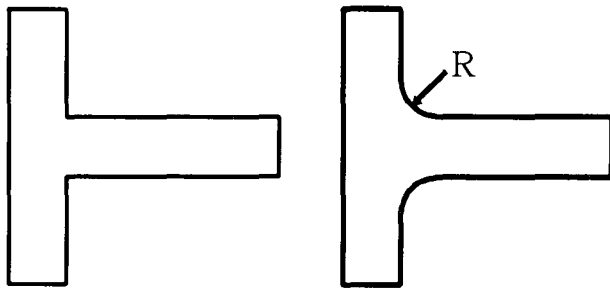


図-8(a) AS-U

図-8(b) AR-U

表-3 最大耐力、座屈発生ループと塑性率

供試体 No.	最大耐力 (KN)	座屈発生ループ	塑性率
AS	125	2	2.0
AR-1	93	2	2.0
AR-3	110	5	5.0
AR-4	135	2	2.0
AR-5	106	2	2.0
AR-6	158	7	7.0
AS-U	68	3	3.0
AR-U-4	74	2	2.0
AR-U-21	99	2	2.0

ることがわかる。図-6(c)は R-4 の応力分布を示している。これより、1 ループ目は均一の応力分布をしており、2 ループ目で座屈が発生しているため応力分布が不均一となっている。図-6(d)は R-5 の応力分布を示している。図より、ループが進んでも応力分布はほぼ一定で変化が見られない。図-6(e)は R-6 の応力分布を示している。図より、応力分布に対称性が見られず、また他の供試体と比べ、応力の値が小さいことがわかる。

#### 4. 汎用有限要素法プログラム NASTRAN による数値解析

##### 4.1 解析条件

汎用有限要素法プログラム NASTRAN により数値解析を行う。応力-歪関係は、素材の引張試験結果に基づき、図-7 に示すような多角形曲線近似とし、硬化則は複合硬化とした。その他の材料特性は、表-1 の値を用いた。R 無供試体 S-1, S-2 の解析モデルを AS, R 付供試体 R-1, R-2 の解析モデルを AR-1 と呼ぶ。R 付供試体 R-3~R-6 の解析モデルは、AR-1 のモデルに実験供試体と同様な補剛方法のモデルとし、R-3 を AR-3, R-4 を AR-4, R-5 を AR-5, R-6 を AR-6 と呼ぶ。また、図-8(a)は、R 無供試体隅角部における補剛材を取り除いたモデルであり、これを AS-U と呼ぶ。図-8(b)は、R 付供試体隅角部における補剛材を取り除いたモデルであり AR-U とし、円弧ハンチの曲率半径が 4cm と 21.25cm の 2 モデルを考え、それぞれ AR-U-4, AR-U-21 と呼ぶ。

#### 5. 解析結果と実験結果との比較

##### 5.1 最大耐力と塑性率

数値解析から得られた最大耐力と座屈発生ループを表-3 に示す。また、縦軸に荷重、横軸に梁先端部の変位をとった包絡線を図-9 に示す。これより、R 無供試体においては、実験値(S-1, S-2)と解析値(AS)とがほぼ一致していることがわかる。一方、R 付供試体においては、実験値と解析値とが離れており、それ程良い一致が見られないが、AR-3 と AR-5 の解析値は実験値に近い値となっていることがわかる。

補剛材を取り除いた無補剛モデル AS-U と AR-U-4 は、他のどの解析モデルより最大耐力が低くなっている。これより、補剛材を取り除くことにより最大耐力を低くすることがわかる。しかし、AR-U-21 のように曲率半径を大きくすることにより、補剛材の入っている R 付モデル AR-1 とほぼ同じ耐力になることがわかる。

塑性率は、実験のそれと同様に  $\delta_{max}/\delta_y$  とし、各解析モデルの塑性率を表-3 に示す。これより、R 付モデル AR-3 と AR-6 は、他の解析モデルと比べ、高い塑性率を示していることがわかる。補剛方法は同様であるが曲率半径が異なっている AR-3 と AR-5 とを比較すると、最大耐力がほぼ同じにも拘わらず、塑性率では倍以上の差が見られ、塑性率に円弧ハンチの曲率半径が大きく影響することがわかる。

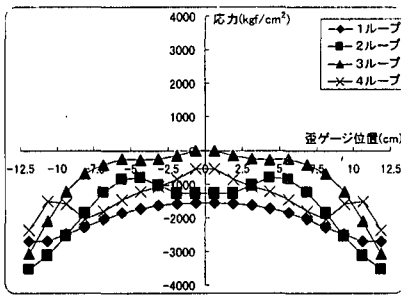


図-10(a) 表面応力分布(AS)

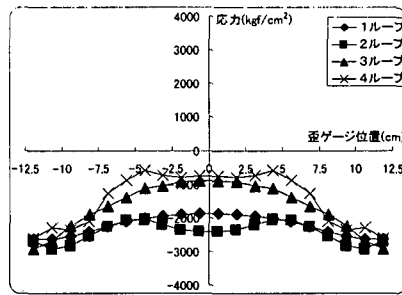


図-11(a) 面内応力(AS)

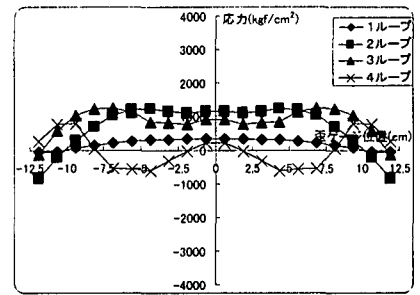


図-11(b) 面外応力(AS)

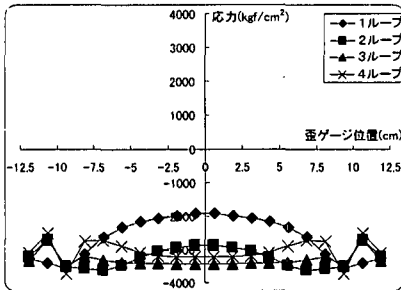


図-10(b) 表面応力分布(AR-1)

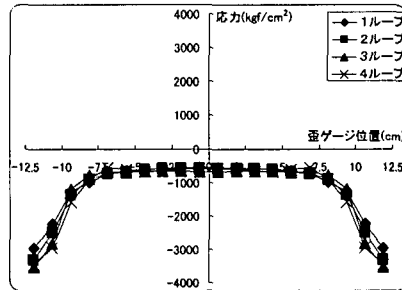


図-12(a) 面内応力(AR-1)

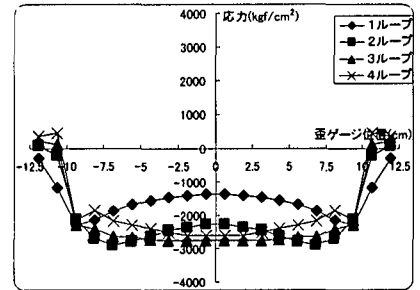


図-12(b) 面外応力(AR-1)

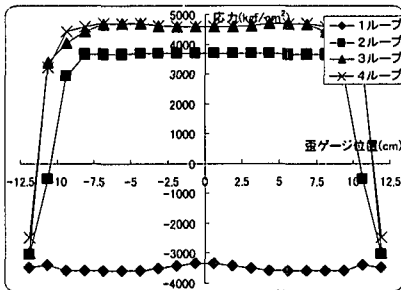


図-10(c) 表面応力分布(AR-4)

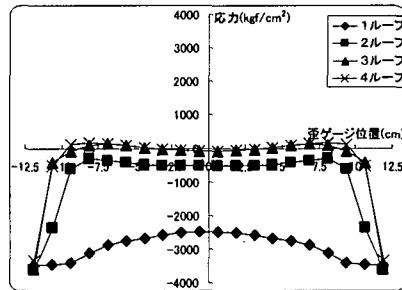


図-13(a) 面内応力(AR-4)

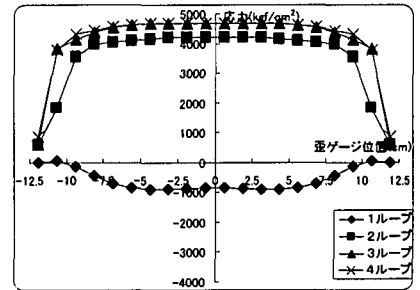


図-13(b) 面外応力(AR-4)

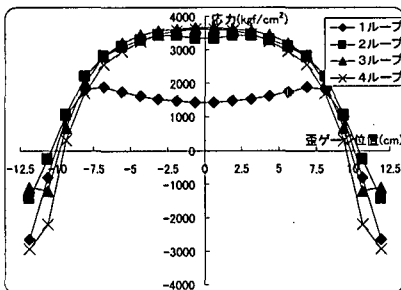


図-10(d) 表面応力分布(AR-U-4)

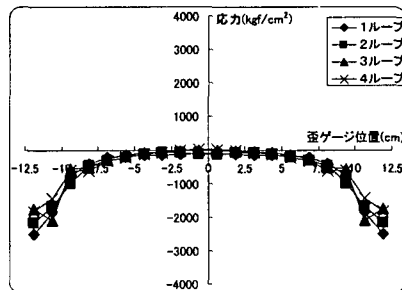


図-14(a) 面内応力(AR-U-4)

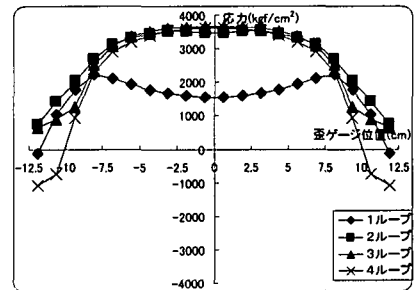


図-14(b) 面外応力(AR-U-4)

## 5.2 梁フランジ応力分布

実験結果と比較するために、解析より得られた梁フランジプレートにおける応力分布を図-10に示す。R無モデルASの応力分布を図-10(a)に示す。これより、1ループ目では実験供試体S-1の応力分布とほぼ同様であり、座屈が発生した2ループ目からは、不均一になることがわかる。R付モデル(AR-1~AR-6)では、AR-4を除きほぼ同様の応力分布が見られたため、ここでは代表としてR付モデルAR-1の応力分布を図-10(b)に示した。解析より求めた応力分布は、実験供試体R-1の応力分布と異なることがわかる。図-10(c)はR付モデルAR-4の応力分布を示している。1ループ目では応力分布が均一であり、実験供試体R-4と同様であるが、2ループ目からは座屈が発生することにより不均一

になることがわかる。図-10(d)は図-8に示した補剛材の入っていない解析モデルAR-U-4の応力分布を示しているが、図-8に示す補剛材を取り除いたモデルではすべて同様の傾向が見られた。図より、1ループ目から梁フランジプレートの中心近傍で正の応力を受けていることがわかり、これは、実験供試体R-1~R-3とR-5の応力分布と同様の傾向であることがわかる。

## 5.3 面内応力と面外応力

R無モデルASの面内応力と面外応力を図-11に、R付モデルAR-1のそれを図-12に、R付モデルAR-4のそれを図-13に、無補剛モデルAR-U-4のそれを図-14に示す。各解析モデルの面内応力を見ると、せん断遅れ現象が見ら

れる。AS においては、2 ループ目と 3 ループ目とで大きな差が見られるのがわかる。AR-1 と AR-U-4 では、局部座屈の影響が見られず、各ループにおける最大耐力時の面内応力はほぼ同じ値となっていることがわかる。一方、AR-4 においては、1 ループ目と 2 ループ目以降の面内応力分布は異なっており、これは AS と同様に局部座屈の影響と思われる。

面外応力に注目すると、AS は他の解析モデルと比較してそれ程大きな面外応力は発生せず、局部座屈が生じた後の方が応力度が小さくなっていることがわかる。AR-1 は、局部座屈が発生した後も面外応力は常に負となっており、他のモデルとは異なる傾向を示している。AR-4 は、1 ループ目だけが負の面外応力であり、2 ループ目以降は正の面外応力が発生している。AR-U-4 は、1 ループ目から正の面外応力が生じており、このために表面の応力分布も図-10(d)に示すような正の応力分布となっている。

## 6. まとめ

本報告では、多層ラーメン隅角部に関する実験、および汎用有限要素法プログラム NASTRAN による数値解析を行うことにより、実験、解析ともに、ラーメン隅角部の形状や補剛方法の違いによって、座屈挙動、最大耐力と梁フランジプレート上の応力分布に影響が出た。

実験では、R 無供試体の最大耐力は、R 付供試体の最大耐力よりも高かった。しかし、R-6 のように円弧ハンチ部に補剛材を設けることにより、最大耐力が R 無供試体のそれに近づくことがわかった。解析では、実験結果を全て定量的に説明することはできず、各解析モデルの補剛方法により最大耐力に影響が出ることがわかった。

実験では、R 無供試体と R 付供試体 R-4 の応力分布は、線形範囲で同様の傾向であった。また、R-4 を除く R 付供試体では、1 ループ目から梁フランジプレート表面で正の応力を持つ応力分布となり、AR-4 を除く R 付モデルの応力分布とは異なった。しかし、実験の R 付供試体と解析の無補剛モデルの応力分布で、1 ループ目から梁フランジ

プレート表面で正の応力を持つ応力分布となり同様の傾向が見られた。解析より、梁フランジプレートには、面内応力だけでなく面外応力の影響も大きく無視できないことがわかった。

以上のように、円弧ハンチの曲率半径の大きさ、補剛材の有無や位置によっても最大耐力と梁フランジプレート上の応力分布に大きな影響が見られ、これらを定性的に説明することは難しく、現在検討を行っている。

## 参考文献

- 1) 奥村敏恵・石沢成夫: 薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について, 土木学会論文集, 第153号, pp. 1~18, 1986年5月
- 2) 中井博・福岡悟・酒造敏廣・明橋克良: 鋼製ラーメン隅角部の Shear lag と耐荷力に関する実験的論文, 構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 193~206, 1987年3月
- 3) 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関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 121~134, 1991年3月
- 4) 中井博・酒造敏廣・橋本良之: せん断遅れ現象を考慮した鋼製ラーメン隅角部の限界状態設計法について, 土木学会論文集, No. 455, pp. 95~104, 1992年10月
- 5) 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, 1994年3月
- 6) 黄元燮・西村宣男・西野滋博: 鋼製ラーメン隅角部パネルの強度および変形能の評価法, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 215~226, 1994年3月
- 7) 鈴木賢治・大島要一・井浦雅司: 円弧ハンチ型ラーメン隅角部に関する実験的研究, 土木学会第54回年次学術講演会, pp. 338~339, 1999年9月

(1999年11月19日受付)

## TESTS ON FRAMED STRUCTURES WITH CURVED FLANGE PANELS

Yoichi OSHIMA and Masashi IURA

The results of tests conducted on framed structures with or without curved flange panels are reported. The column was simply supported while the end of beam was subjected to cyclic lateral load. The effects of curved flange panels and stiffeners on the static behaviour were investigated. The FEM program, NASTRAN, was used to obtain the numerical results for comparing them with the experimental ones. The ultimate strength, ductility and stress distribution of flange panels were discussed in detail.