

## 曲面を有する鋼製橋脚に関する実験

大阪第一建設部	設 計 課	堀 松 正 芳
同 部	同 課	明 神 正 章
工 務 部	工務第一課	佐々木 一 則

### 要 約

柱断面のコーナー部に曲率を設けた鋼製橋脚（R柱）の設計・施工に関しては、昭和63年に作成された「コーナー部に曲率を付けた鋼製橋脚の設計・施工要領（案）」により行われているが、この要領は、すべて通常の長方形箱型断面の力学的条項に基づいた内容となっており、R付断面の構造特性を十分に反映したものではない。また、隅角部の構造が応力伝達上、大きな部材となるために輸送上の問題が生じる等、いくつかの設計・施工上の課題が残されている。

これらの問題を解決するために2種類の構造改良案を提案し、供試体を作成してせん断遅れ特性・終局曲げ耐力・隅角部の応力性状・圧縮補剛板としての耐力についての一連の実験を行った。

この結果、R付断面梁は、①せん断遅れ現象が通常の箱型断面に比べて大幅に軽減される。②ひずみ硬化現象により耐力及び変形特性が改善される。③圧縮補剛板としての円弧状板パネルの局部座屈は問題とならない。また、縦方向補剛材の配置により各板パネルの局部座屈強度を高めることができる。④隅角部の構造改良案は梁腹板において応力集中現象が見られるものの、新しい構造形式のひとつとして適用可能である。等の結果が得られ、今後、設計・施工要領（案）をより合理的で充実したものに改訂していくための基礎資料が得られた。

キーワード：R柱、せん断遅れ、応力集中、曲げ耐力、ひずみ硬化、局部座屈、鋼製橋脚

### まえがき

近年、景観上の理由から断面のコーナー部に曲率を設けた鋼製橋脚柱（以下、R柱という）が各地で積極的に採用されるようになってきた。すでに、当公団（大阪第一建設部）では、この種の部材を活用するべく「コーナー部に曲率を付けた鋼製橋脚の設計・施工要領（案）」をとりまとめて設計・施工を進めた。

ところが、現行要領（案）（昭和63年制定）は、すべて通常の長方形箱型断面の力学的条項に基づ

いた内容となっており、柱部材のコーナー部に曲率が付いているという構造特性を十分に反映させた基準には至っていない。

この種の橋脚は、今日、要求されている美観の面から優れた構造形式であり、今後、曲面を有した鋼製脚を採用するに当り、現行要領（案）をより合理的なものにして充実させる必要がある。

そのためには、主に以下に示すような未知な課題を解決しておかなければならない。

- ①コーナー部に曲率を有する箱断面（R柱）のせん断遅れ特性と曲げ耐荷力。
- ②梁・柱隅角部の合理的で望ましい構造形式（応力の流れ）とその応力集中現象。
- ③R柱（圧縮補剛板）としての耐荷力。

本稿は、これらの課題を解決するために行った一連の実験結果を報告するものである。

## 1 R柱のせん断遅れ特性に関する実験

### 1-1 実験概要

本実験は、R付断面梁のせん断遅れ特性を明らかにするために行った。

実験は、実橋の橋脚柱の断面諸元を参考にFEM解析を用いた数値解析結果より、コーナー部の曲率半径Rと箱の幅Bあるいは高さDとの比、すなわちパラメータR/B、R/Dに着目して図-1に示すような2体の供試体を製作し、スパン中央に集中荷重を載荷して行った。なお、2種類（Type A及びB）の供試体についてそれぞれ弱軸及び強軸回りの合計4ケースの載荷実験を行った。

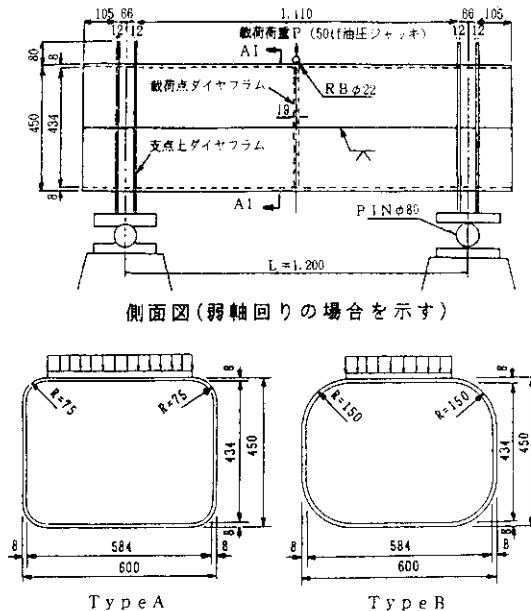


図-1 実験供試体

### 1-2 実験結果

図-2は載荷ケースBW（Type Bの弱軸回りに載荷）の測定断面A1における垂直応力度の分布を示す。この図は梁理論による応力度で無次元化している。この図よりR付断面梁のせん断遅れ現象は曲率半径R/B、あるいはR/Dの影響を受け、通常の箱型断面梁に比べて大幅に軽減されていることがわかる。

図-3には、載荷ケースBN（Type Bの強軸回りに載荷）における垂直応力度の分布を示す。この図からL/B、L/Dが3程度でR/B、R/Dが1/3程度になると顕著なせん断遅れ現象が現れなくなることがよくわかる。

表-1 実験ケースと載荷荷重

実験ケース	実験供試体	載荷方向	載荷荷重と荷重サイクル
A W	Type A	弱軸回り	15tf, 30tf, 45tfと3段階で3回の荷重サイクルで実験を行った。
B W	Type B	弱軸回り	12tf, 24tf, 36tfと3段階で3回の荷重サイクルで実験を行った。
A N	Type A	強軸回り	15tf, 30tf, 45tfと3段階で3回の荷重サイクルで実験を行った。
B N	Type B	強軸回り	12tf, 24tf, 36tfと3段階で3回の荷重サイクルで実験を行った。

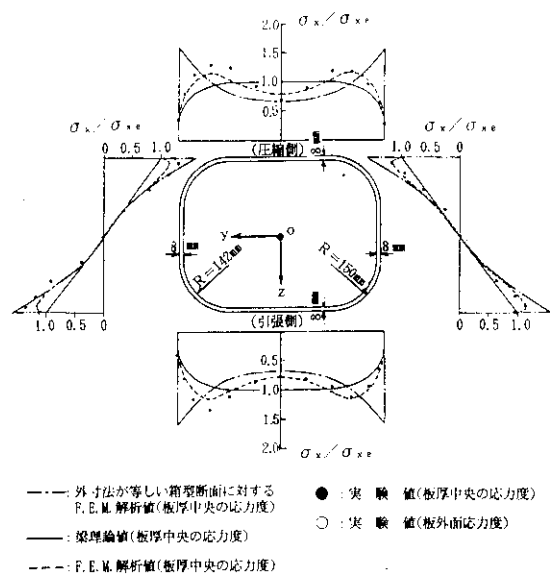


図-2 BW載荷（断面A1における垂直応力度分布：R/B=1/4、L/B=2.0）

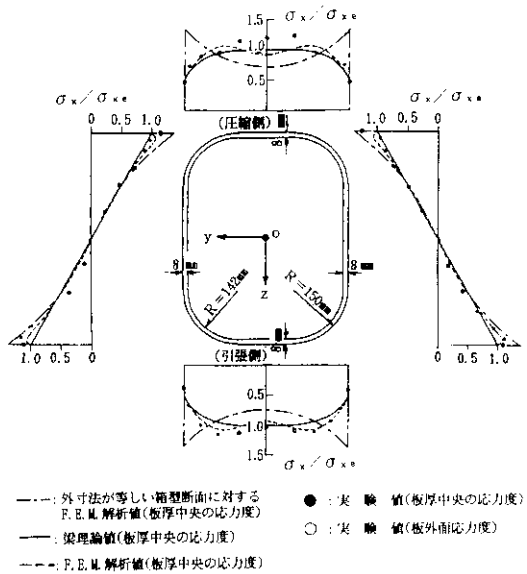


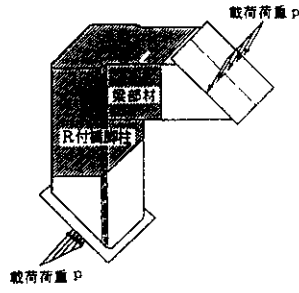
図-3 BN載荷(断面A-1における垂直応力度分布:  $R/B=1/3$ 、 $L/B=2.7$ )

## 2 梁・柱隅角部の応力性状に関する実験

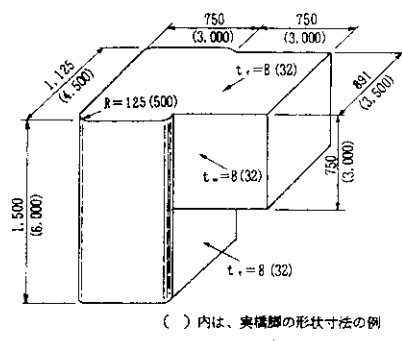
### 2-1 実験概要

図-4 に選定した2種類の構造改良案に対して梁・柱隅角部をモデル化した実験供試体を示す。

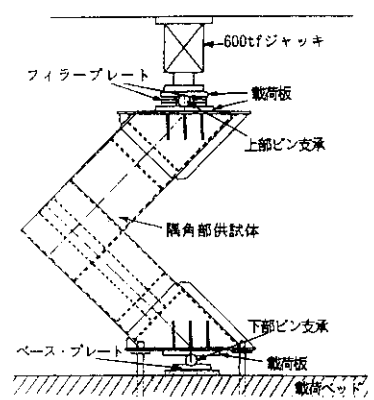
供試体は、隅角部内部の製作性を考慮して、実橋脚の形状寸法の約1/4とした。すなわち、Type A 供試体は、梁腹板が柱部材の中に割り込んだ二重構造(ただし、外側部分も応力部材)である。また、Type B 供試体は、柱断面のコーナー部に補強プレート(以下、コーナープレートという)を取り付けた構造である。載荷荷重としては、図-4 (C) に示すように、集中荷重を与え、供試体に曲げモーメント、せん断力、及び軸方向力を作用させた。



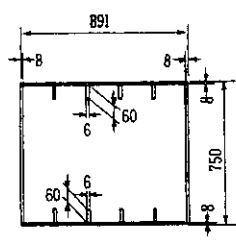
(a) 梁・柱隅角部のモデル化



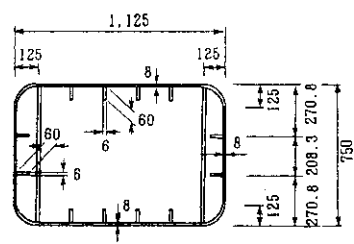
(b) 実験供試体の形状寸法 (Type A, B 共通)



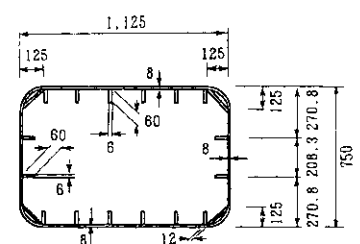
(c) 載荷方法



(d) 梁断面 (Type A, B 共通)



(e) Type Aの柱断面A-A



(f) Type Bの柱断面A-A

図-4 実験供試体

## 2-2 実験結果

図-5には、各供試体の梁・柱接合部の付け根断面の垂直応力度分布を示す。図中には、FEM

解析値、梁理論値、及び現行設計基準による計算値も示している。

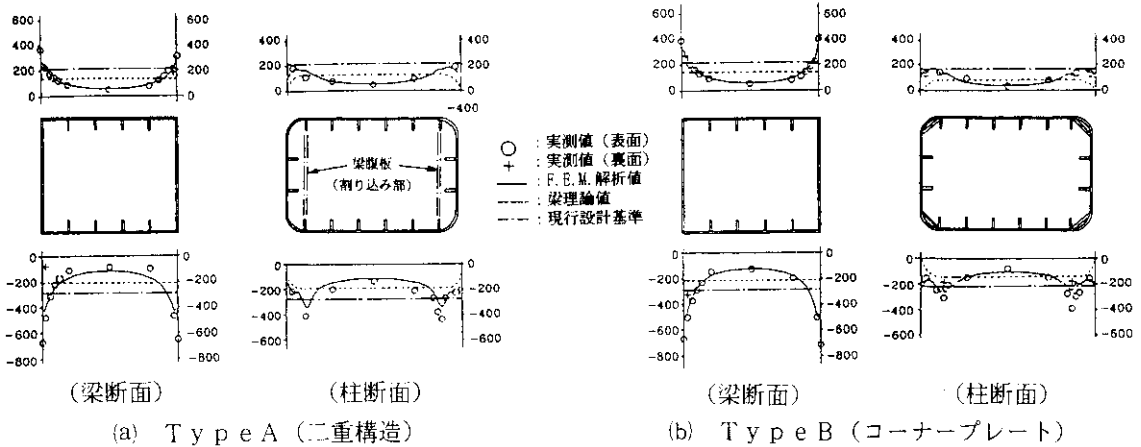


図-5 梁・柱接合部の付け根断面の垂直応力度分布 (荷重  $P = 12tf$ )

これらの図より以下のことがわかる。

- ① 梁断面 (箱型断面) の上下フランジには、両供試体とも顕著なせん断遅れ現象が現れている。両供試体を比較すると、Type B 供試体の方が Type A 供試体よりもせん断遅れ現象が若干大きく現れている。
- ② 柱断面 (R 付き断面) の上下フランジでは、両供試体とも梁断面と比較してせん断遅れ現象がかなり緩和されている。両供試体を比較すると

「①」とは逆に Type A 供試体の方が Type B 供試体よりもせん断遅れ現象が若干大きく現れている。

- ③ 紙面から割愛したが、接合部断面から  $B/2$  ( $B$ : 梁と柱とのフランジ幅) 離れた位置においては、両供試体とも、初等梁理論による応力分布とほぼ一致しており、せん断遅れ現象が消失している。

図-6には、各供試体の腹板の断面内のせん断応力度分布を示す。

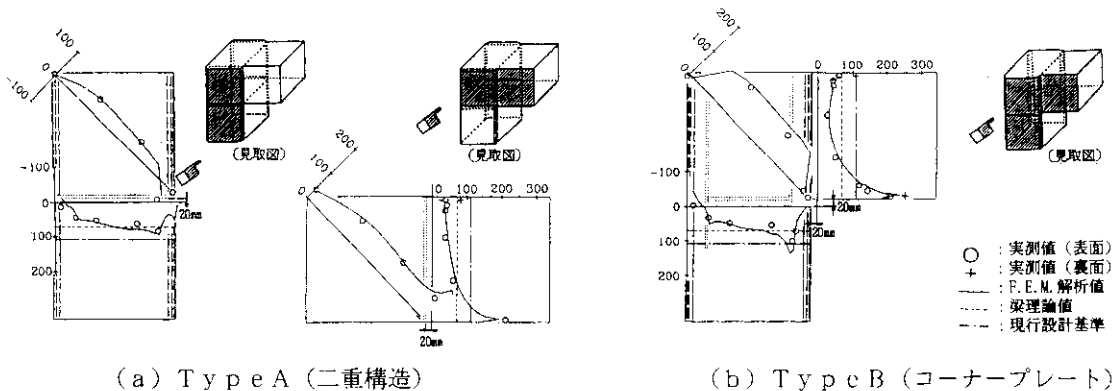


図-6 腹板の断面内のせん断応力度分布 (荷重:  $P = 12tf$ )

これらの図より以下のことがわかる。

- ①梁・柱接合部では、両供試体とも下フランジとの接合部近傍の梁腹板においてせん断応力度が局部的に大きくなっており、顕著な応力集中現象が発生している。両供試体を比較すると、Type B 供試体のほうがType A 供試体よりも応力集中現象が大きく現れている。
- ②Type B の実験結果によると、梁腹板を割り込ませなくてもせん断力を正常に伝達することができる。

### 2-3 まとめ

両供試体とも、梁腹板において相当な応力集中現象が見られる。しかし、その他の部分の応力の流れは正常であると判断され、梁・柱隅角部の構造形式のひとつとして、今後、適用可能であると考える。

## 3 R柱の終局曲げ耐力特性に関する実験

### 3-1 実験概要

実験供試体は、図-7に示すように片持梁のR付橋脚柱の基部断面に着目し、2倍の支間を有する単純梁として設計し、支間中央に集中荷重を作用させた。供試体のスパン・フランジ幅比 $L/B$  ( $L$ : 橋脚柱の高さの2倍、 $B$ : 橋脚柱断面のフランジ幅)は、実橋の橋脚柱を想定し、しかも曲げ破壊が先行するように、 $L/B=5.5$ とした。そして、圧縮側フランジの縦方向補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータは、その部分に終局座屈が生じないように、実際的な値 $R_t=0.53$ にし

た。ここに、 $B$ : フランジ幅、 $t_f$ : フランジプレート板厚、 $n_f$ : 縦方向補剛材の本数 (=2)、 $\sigma_f$ : 降伏点、 $\mu$ : ポアソン比、 $E$ : ヤング係数。また、本実験では、特にコーナー部の曲率半径の差異による曲げ耐力特性の比較を行うために、コーナー部の曲率半径 $R$ の相違する2体の $R=75\text{mm}$  ( $R/B=1/8$ )、及び $R=150\text{mm}$  ( $R/B=1/4$ )を製作した。

なお、供試体の断面寸法は、実橋のR付橋脚柱の断面諸元と相似させた形状・寸法とし、箱内面にもひずみゲージが添付できる最小寸法450mm (高さ)×600mm (幅)とした。さらに、供試体の右半分の部分には、縦方向補剛材を追加して十分に補剛し、荷重載荷板をはさんだ左側のパネルを実験対象部分とした。

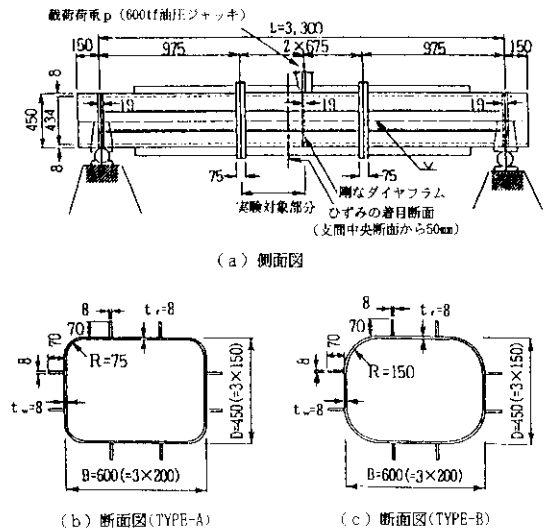


図-7 実験供試体

表-2 実験供試体の断面特性 ( $1\text{tf}=9.8\text{kN}$ )

供試体	断面積 $A(\text{cm}^2)$	腹板の断面積 $A_w(\text{cm}^2)$	断面二次モーメント $I_y(\text{cm}^4)$	フランジの降伏曲げモーメント $M_{Fy}(\text{tf}\cdot\text{m})$	全塑性曲げモーメント $M_p(\text{tf}\cdot\text{m})$	全塑性せん断力 $Q_p(\text{tf})$	形状係数 $S_r = M_p/M_{Fy}$
TYPE-A	200.5	65.84	69,028	106.4	117.2	131.2	1.101
TYPE-B	190.2	60.69	62,569	96.5	108.1	120.9	1.120

### 3-2 鋼材の機械的性質

実験供試体の製作に用いた鋼板（S S 400）の機械的性質を調べるために引張試験を行った。引張試験片は、実験供試体を構成する鋼板と同じものを使用し、母材の鋼板（平坦部）より3本、また、曲げ加工を施した後の曲率を有する部分より、Type A（R=75mm）、及びType B（R=150mm）に対してそれぞれ3本切り出した。

応力-ひずみ曲線の一例を図-8に示す。この図より、曲率を有する試験片では、明確な降伏点が認められず、低ひずみ領域から徐々にひずみ硬化現象が発生していることがわかる。そこで、曲率を有する試験片の降伏応力は、0.2%耐力として求めた。そして、実験データの整理にあたっては、3本の平均値を用いることとした。また、降伏応力 $\sigma_f$ は平坦部における降伏点 $\sigma_f = 3450\text{kgf/cm}^2$ を用いることとした。

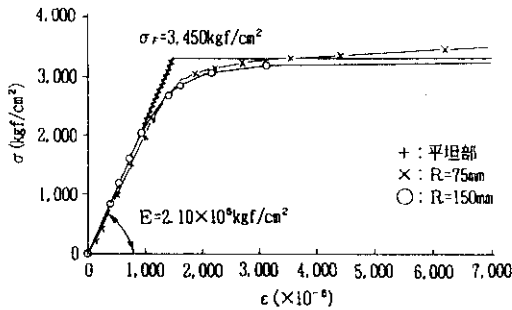


図-8 応力-ひずみ曲線の一例

### 3-3 実験結果及び考察

図-9には、支間中央断面における曲げモーメント-鉛直たわみ曲線を示す。ここで、縦軸は作用曲げモーメントMをフランジの降伏曲げモーメント $M_{fy}$ で無次元化した値としている。そして、図中には無次元化した全塑性曲げモーメント $M_p/M_{fy}$ も記入し、最高荷重 $P_{max}$ と、そのときの $M_m/M_{fy}$ の値も併記してある。

また、図中の弾性解は、前述のせん断遅れ現象に伴って発生する付加曲げモーメント及びせん断たわみの計算値である。

この図より実験供試体Type Aの場合は、M

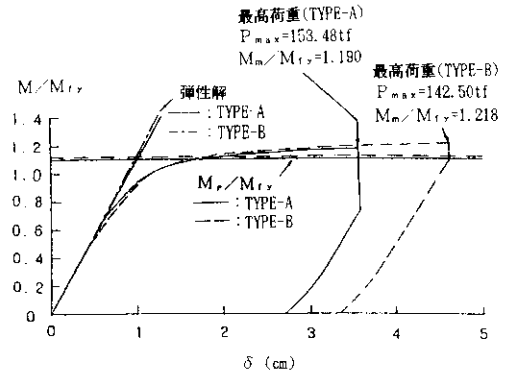


図-9 曲げモーメント-鉛直たわみ曲線

$M/M_{fy} = 0.65$ 付近までたわみの線形性は保たれている。ところが、Type Bは、 $M/M_{fy} = 0.45$ 付近までしかたわみの線形性が保たれていない。そして、その後、残留応力の影響と円弧状の板パネルの応力-ひずみ特性（図-9参照）に起因して、たわみ曲線は曲がり始め、弾性解とかなり離れている。

本来、はり断面に局部座屈が発生しなければ、作用曲げモーメントが全塑性曲げモーメント $M_p$ に達すると、たわみは急増して終局状態に至る。しかし、本実験に用いた供試体は、コーナー部に曲率を有しているため、3-2の鋼材の機械的性質で示したように、この部材の材料では、明確な降伏点が存在せず、低ひずみ領域から徐々にひずみの硬化現象が発生し始める。このひずみ硬化の影響のために、曲げモーメント-鉛直たわみ曲線は、断面に局部座屈が発生するまで上昇を続けると考えられる。そして、実験供試体Type AよりもType Bのほうがコーナー部の曲率半径が大きいので、ひずみ硬化の影響が大きくなる。そのため、Type BのほうがType Aより終局強度は大きくなっている。すなわち、コーナー部に曲率を設けることでひずみ硬化が期待でき、終局曲げ耐荷力に関しては箱型断面より有利となることがわかる。

また、同図において、曲げモーメント-鉛直たわみ曲線によって囲まれた部分の面積は、実験供試体が崩壊に至るまでの吸収エネルギーであり、

部材のダクティリティーを表す一つの指標となる。したがって、Type AよりもType Bの方が積分値が大きいことから、Type Bの方がダクティリティーの面から優れているといえる。

以上のことより、コーナー部に曲率を設けることによってひずみ硬化の現象が現れ、耐荷力及び変形特性が改善されることがわかる。さらに、この特性は、曲率が大きくなるに伴って向上すると考えられる。

### 3-4 線形限界状態についての検討

前述のように供試体Type Bでは、ひずみ及びたわみの線形限界が低くなっていることが判明した。そこで、圧縮側フランジの各部の軸方向ひずみと鉛直たわみに関して、その線形限界値について調べてみる。

すなわち、そのときの係数 $\Phi$ を次式で求め、道路橋示方書による係数 $\Phi = 1/1.7 = 0.588$ (1.7は必要とされる安全係数である。)と比較してみる。

$$\phi = \frac{M_x}{M_{Fy}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $M_x$  : 軸方向ひずみ、および鉛直たわみの線形限界モーメント (tf・m)  
 $M_{Fy}$  : フランジの降伏曲げモーメント (tf・m)

表-3には、式(1)により求めた係数 $\Phi$ の値を示す。この表より、Type Aでは、いずれの項目に対する係数 $\Phi$ も道路橋示方書で規定の0.588以上であり、実用上、問題がないことがわかる。しかしながら、Type Bはコーナー部中央の軸方向ひずみと鉛直たわみに関して、係数が0.588を下回っており、線形限界状態という観点に立てば、現行の道路橋示方書に定められた安全率(=1.7)を確保できていないことがわかる。そこで、以上のことから実際のR柱では軸方向力が同時に作用する過酷な載荷状態にあることも考慮し、フランジの曲率半径板幅比R/Bとして、1/6程度を上限としておくことが望ましいと考えられる。

表-3 線形限界係数 $\Phi$

調査項目	TYPE-A		TYPE-B	
	$M_x$ (tf・m)	係数 $\phi$ の値	$M_x$ (tf・m)	係数 $\phi$ の値
圧縮フランジ中央の縦方向ひずみ	70.2	0.660	65.4	0.678
圧縮フランジとコーナー部の境界の軸方向ひずみ(左側)	—	—	61.9	0.641
圧縮フランジとコーナー部の境界の軸方向ひずみ(右側)	68.9	0.629	63.7	0.660
コーナー部中央の軸方向ひずみ(左側)	71.6	0.673	48.3	0.501
コーナー部中央の軸方向ひずみ(右側)	70.7	0.664	48.9	0.507
コーナー部と腹板の境界の軸方向ひずみ(左側)	—	—	48.3	0.501
コーナー部と腹板の境界の軸方向ひずみ(右側)	70.7	0.664	40.4	0.419
鉛直たわみ	69.4	0.652	44.5	0.461

## 4 R柱の圧縮補剛板としての耐荷力に関する実験

### 4-1 実験概要

本実験は、R柱断面の円弧状の板パネルを含む圧縮補剛板としての耐荷力特性を明らかにし、その補剛設計法を検討することを目的として行ったものである。

実験供試体は、図-10に示すように、円弧状部分の縦方向補剛材位置と補剛板の幅厚比(B/t)とに着目して、3体の供試体を製作し、軸方向圧縮力を作用させた。各供試体の断面諸元を表-4に示す。

表-4 実験供試体の断面諸元

供試体	R/B	断面積A (cm <sup>2</sup> )	標厚比パラメータR/t
Type A	1/4.9	79.197	0.707
Type B	1/4.9	79.197	0.564
Type C	1/5.9	94.497	0.707

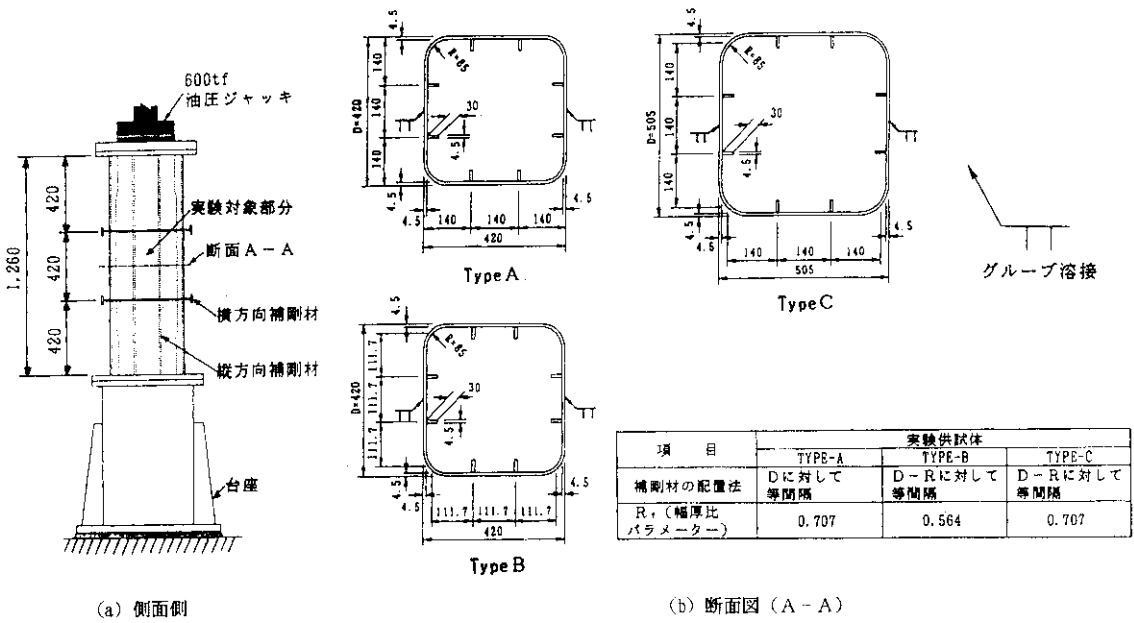


図-10 実験供試体

#### 4-2 実験結果

図-11には、崩壊した部分（圧縮補剛板）における平均圧縮応力度（降伏点 $\sigma_y$ で無次元化）と軸方向ひずみ（降伏ひずみ $\epsilon_y$ で無次元化）との関係を示す。

この図より、Type Aでは、まず平坦部分の板パネルに、 $\sigma/\sigma_y = 0.8$ 付近で局部座屈が発生

し、その後円弧状部分で荷重を負担していることがわかる。すなわち、円弧状の板パネルには局部座屈挙動が発生せず、平坦部分の板パネルとは局部座屈強度が異なることがわかる。

一方、Type Bでは、円弧状部分と平坦部分との各板パネルがほぼ等しい局部座屈強度（ $\sigma/\sigma_y = 0.9$ 程度）となっていることがわかる。

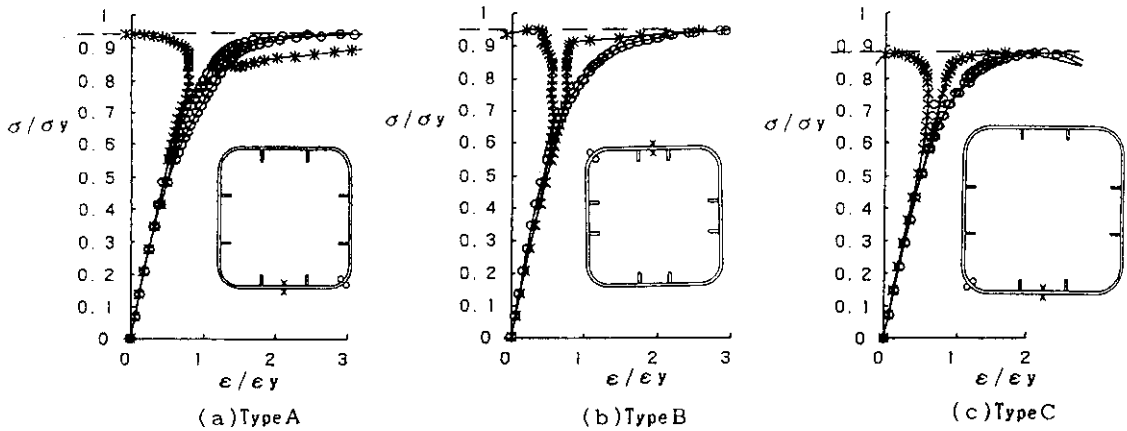


図-11 平均圧縮応力度-軸方向ひずみ曲線



この挙動は、Type Cでも同様である。しかしながら、終局時の最大平均圧縮応力度は、Type A、Type Bともに $\sigma/\sigma_y = 0.95$ 程度であり、差異がないことがわかる。

#### 4-3 まとめ

本実験により、円弧状の板パネルの局部座屈は問題とならないことがわかった。また、縦方向補剛材の配置により、各板パネルの局部座屈強度を高めることができることがわかった。

#### あとがき

土木構造物の景観が重視されつつある近年、特に都市高速道路の構造物の景観設計は、良好な都市景観を形成していく上で重要なことである。

R柱は、湾岸線南伸部2期で積極的に採用されRC橋脚と形状を統一するとともに、全体的にやわらかいイメージを与える等、景観に対するその

評価は高いものであった。

本実験によって得られた結果が、「コーナー部に曲率を付けた鋼製橋脚の設計・施工要領(案)」をより充実したものにするための一助になれば幸いである。

最後に、本実験から解析に至るまで貴重なご指導とご助言をいただいた大阪市立大学工学部の中井博教授ならびに北田俊行助教授、関係各位に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団大阪第一建設部、(財)災害科学研究所：コーナー部を円弧状とした薄肉鋼箱断面の力学的諸挙動に関する研究報告書，平成4年3月。
- 2) 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4月。