

## コーナー部を円弧状とした薄肉鋼箱断面梁のせん断遅れ特性に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR LAG PHENOMENON OF THIN-WALLED STEEL BOX BEAMS WITH ROUNDED CORNERS

中井 博<sup>\*</sup>・北田 俊行<sup>\*\*</sup>・松本 雅治<sup>\*\*\*</sup>・坂口 三代治<sup>\*\*\*\*</sup>

By Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Masaharu MATSUMOTO and Miyoharu SAKAGUCHI

This paper deals with the shear lag phenomenon of thin-walled steel box beams with the rounded corners. Firstly, an experimental study is carried out by using two specimens, which consist of thin-walled steel box beams and are situated as simply supported beams with a concentrated load. From these tests, it is shown that the shear lag phenomenon of steel box sections with the rounded corners are remarkably reduced in comparison with the ordinally square steel box sections. Finally, the method for estimating the maximum normal stress in the thin-walled steel box beams with the rounded corners is analyzed and an approximated formula are proposed herewith.

## 1. まえがき

最近、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<sup>1)</sup>や吊橋などの主塔<sup>2)</sup>が積極的に採用されるようになってきた。断面のコーナー部を円弧状とした断面（以下、R付断面という）では、通常の長方形箱形断面梁に見られるようなせん断遅れの現象が軽減される。たとえば、文献<sup>3)</sup>では長円形断面梁の場合、顕著なせん断遅れの現象が現れないことが実験によって明らかにされている。しかしながら、R付断面梁のせん断遅れの特性は、十分に明らかにされておらず、断面内の最大曲げ応力度の評価方法についても、まだ確立されたものがないのが現状である。

阪神高速道路公団では、大阪湾岸線・南伸部の橋脚柱に、この種の部材を活用するべく、「曲率を有する鋼製橋脚の設計・施工案（昭和63年3月）」<sup>4)</sup>をとりまとめている。ところが、R付断面梁としてのせん断遅れ特性を十分に反映させた橋脚柱の設計基準を制定するまでは、まだ至っていない。

本文は、R付断面梁のせん断遅れ特性を実験的に明らかにし、F.E.M.を用いたR付断面梁のこの種の応力特性に関する数値解析結果の妥当性を確認するとともに、R付断面梁の限界状態設計法を模索する際に役立たせることができる断面内の最大曲げ応力度の推定方法について検討することを目的として、研究を行ったものである。

|         |          |     |          |                         |
|---------|----------|-----|----------|-------------------------|
| * 工博    | 大阪市立大学   | 教授  | 工学部土木工学科 | (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138) |
| ** 工博   | 大阪市立大学   | 助教授 | 工学部土木工学科 | (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138) |
| ***     | 阪神高速道路公団 | 課長  | 大阪第一建設部  | (〒542 大阪市中央区西心斎橋 1-2-4) |
| **** 工修 | 大阪市立大学   | 研究生 | (鋼構造技研)  | (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138) |

2. 実験供試体、および実験概要

(1) 実験供試体

実橋のR付断面橋脚柱<sup>1)</sup>の断面諸元を参考にし、F.E.M.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、あるいはR/Dに着目して、図-1に示す2体のR付断面の供試体を製作した。表-1には、実橋<sup>1)</sup>と供試体との断面寸法の比較、ならびに供試体の断面諸定数を示す。供試体は、橋脚柱の基部断面に着目して単純梁とし、図-1中に示したように、支間中央に集中荷重を受ける場合を対象として設計した。また、断面の弱軸回り、および強軸回りの曲げ実験ができるように、両側面には、支持具を取り付けた。以下には、実験供試体の製作方針を示す。

- ①実験時のスパン・フランジ幅比L/B、あるいはL/Dは、せん断遅れ特性が顕著に現われるように、 $L/B=2$  (弱軸回り)、または $L/D=2.7$  (強軸回り) と小さくした。
- ②フランジプレートは、実験時の測定精度を確保するために、板厚が8mmの無補剛板とした。
- ③その際、実験時の作用応力レベルで、圧縮フランジが弾性座屈を起こさないように配慮した。
- ④コーナー部の曲率半径Rと板厚tとの比R/tを、最低でも10程度を確保するようにした<sup>4)</sup>。

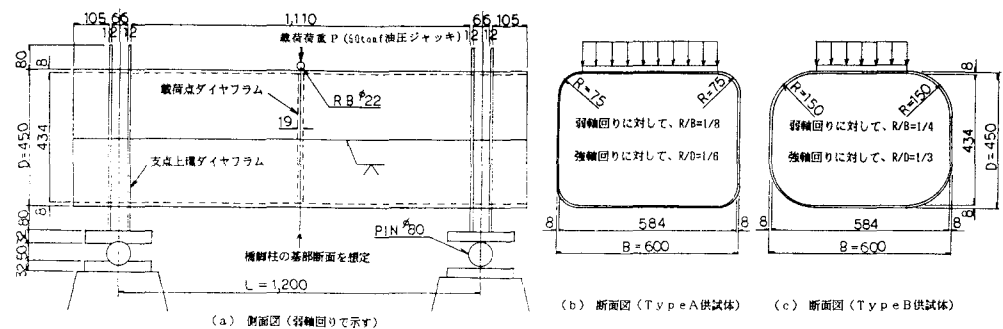


図-1 実験供試体 (寸法単位: mm)

表-1 実橋と実験供試体の断面寸法の比較、ならびに実験供試体の断面性能 (寸法単位: mm)

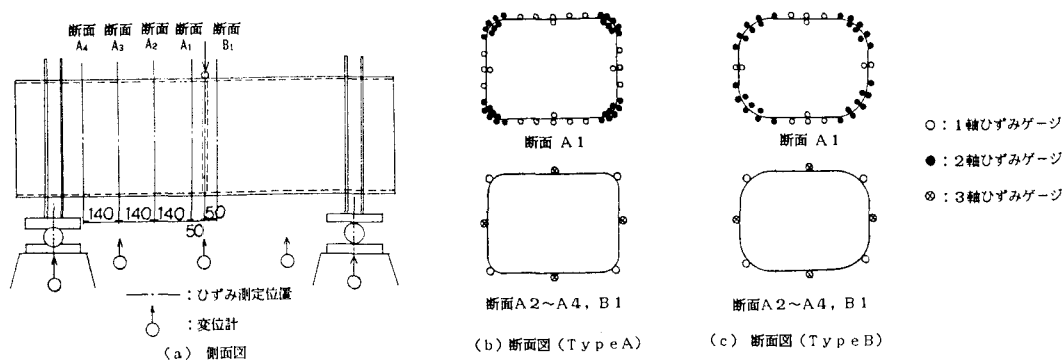
| 断面寸法の比較 |       |      |      | 供試体の断面性能                 |                        |                        | <div>記号の説明</div> |
|---------|-------|------|------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 寸法      | 実橋    | 供試体A | 供試体B | 断面定数                     | 供試体A                   | 供試体B                   |                  |
| B       | 3,500 | 600  | 600  | 断面積 A                    | 155.7 cm <sup>2</sup>  | 145.4 cm <sup>2</sup>  |                  |
| D       | 3,000 | 450  | 450  | 断面2次モーメント I <sub>y</sub> | 52,705 cm <sup>4</sup> | 47,557 cm <sup>4</sup> |                  |
| R       | 500   | 75   | 150  | 断面2次モーメント I <sub>z</sub> | 80,602 cm <sup>4</sup> | 70,907 cm <sup>4</sup> |                  |
| R/t     | 15~20 | 9.4  | 18.8 | 弱軸回りのスパン・フランジ幅比          | 2.0                    | 2.0                    |                  |
| R/B     | 1/7   | 1/8  | 1/4  | 強軸回りのスパン・フランジ幅比          | 2.7                    | 2.7                    |                  |
| R/D     | 1/6   | 1/6  | 1/3  |                          |                        |                        |                  |

(2) 実験概要

図-1に示したType A、およびType Bの供試体で、それぞれ弱軸回り、および強軸回りに4ケースの曲げ载荷実験を行った。表-2には、各実験ケースと载荷荷重を示す。もちろん、実験を行う前に予備载荷を行い、荷重-変位、および荷重-ひずみの線形関係を確認した。図-2には、ひずみと変位との測定位置を示す。とくに、コーナー部に対しては、板外面と板内面とに対して2軸ひずみゲージを貼り、細部のひずみの測定につとめた。

表-2 実験ケースと载荷荷重

| 実験ケース | 供試体            | 载荷荷重                                                                            |
|-------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| A W   | Type Aの弱軸回りに载荷 | 15 <sup>tonf</sup> , 30 <sup>tonf</sup> , 45 <sup>tonf</sup> と3段階で3回の载荷、除荷を行った。 |
| B W   | Type Bの弱軸回りに载荷 | 12 <sup>tonf</sup> , 24 <sup>tonf</sup> , 36 <sup>tonf</sup> と3段階で3回の载荷、除荷を行った。 |
| A N   | Type Aの強軸回りに载荷 | 15 <sup>tonf</sup> , 30 <sup>tonf</sup> , 45 <sup>tonf</sup> と3段階で3回の载荷、除荷を行った。 |
| B N   | Type Bの強軸回りに载荷 | 12 <sup>tonf</sup> , 24 <sup>tonf</sup> , 36 <sup>tonf</sup> と3段階で3回の载荷、除荷を行った。 |



### (3) 鋼材の機械的性質と供試体寸法の実測

#### a) 鋼材の機械的性質

供試体の製作に用いた鋼板(SS400)の機械的性質を調べるため、引張試験を行った。引張試験片は、母材の鋼板(平坦部)より5本、曲げ加工を施した後の曲率を有する部分よりType A ( $R=75\text{mm}$ )、およびType B ( $R=150\text{mm}$ )に対して、それぞれ3本を切り出した。平坦部から切り出した試験片、および曲率部から切り出した試験片とも、ヤング係数、ポアソン比、および降伏点に有意な差異は認められなかった。表-3には、各々3本の引張試験結果の平均値を示す。

表-3 鋼材の機械的性質

| 試験片                     | 鋼板厚<br>(mm) | ヤング係数<br>$E$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数<br>$G$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | ポアソン比<br>$\mu$ | 降伏点<br>$\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>$\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 平坦部                     | 8.06        | $2.15 \times 10^5$                  | $8.31 \times 10^5$                    | 0.29           | 2,899                                    | 4,279                                     |
| 曲率部 $R=75^{\text{mm}}$  | 8.08        | $2.16 \times 10^5$                  | $8.16 \times 10^5$                    | 0.33           | 2,857                                    | 4,454                                     |
| 曲率部 $R=150^{\text{mm}}$ | 8.06        | $2.14 \times 10^5$                  | $8.18 \times 10^5$                    | 0.31           | 2,670                                    | 4,396                                     |

注:  $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$

#### b) 供試体寸法の実測

供試体Type A、およびType Bの実測寸法を、表-4に示す。測定は、断面の数ヶ所において行い、その平均値を採用した。表-4より、供試体は製作値に対して高精度で製作されており、実験結果と比較するための解析値の算出にあたっては、製作値をそのまま採用することにした。

表-4 実験供試体の実測寸法 (寸法単位: mm)

| 供試体   | B   | D   | t   | $R_{\max}$ | $R_{\min}$ | $\delta_1$ | $\delta_2$ | $L_1$ | $L_2$ | L     |
|-------|-----|-----|-----|------------|------------|------------|------------|-------|-------|-------|
| TYPEA | 600 | 449 | 8.1 | 76         | 73         | 0.5        | 0          | 600   | 600   | 1,200 |
| TYPEB | 598 | 449 | 8.1 | 149        | 149        | 0.5        | 0          | 600   | 600   | 1,200 |
| 製作値   | 600 | 450 | 8.0 | 75 (150)   |            | 0          | 0          | 600   | 600   | 1,200 |

### 3. 実験結果とその考察

実験結果は、表-2に示した各荷重段階に応じて重みをつけた平均値で整理した。すなわち、実験ケースA W、およびANの場合は載荷荷重が15tf当たり、また実験ケースBW、およびBNの場合は載荷荷重が12tf当たりのデータを実験結果とした。図-3～図-6には、各実験ケースの測定断面A<sub>1</sub>（図-2参照）における垂直応力度の分布を示す。これらの図は、梁理論による応力度で無次元化している。また、断面のコーナー部では、若干、曲げによる断面変形に伴う板曲げ応力が発生したので、実験値は板厚中央面上の応力度で整理した。図中には、F.E.M.を用い、シェル構造として解析した値も示してある。ここで、圧縮フランジ側は荷重集中点の影響を受け、実験値とF.E.M.解析値とはそれほど一致していない。しかし、引張フランジ側は、実験値とF.E.M.解析値とは良好な一致を示している。なお、実測されたたわみは、F.E.M.解析値、ならびに、せん断たわみを考慮した梁理論値とよく一致している。

これらの図より、以下のことがわかる。

- ① R付断面梁のせん断遅れ現象は、文献1)でも明らかにされているように、曲率半径板幅比 $R/B$ 、あるいは $R/D$ の影響を受け、通常の箱形断面梁に比べて、 $R/B$ （あるいは $R/D$ ）が大きくなると、大幅に軽減される。
- ② R付断面梁のせん断遅れ現象は、円弧の始まる部分から徐々に生じはじめる。そして、梁理論による応力度からの増加量は、今回実験を行った範囲 $R/B \leq 1/4$ 、あるいは $R/D \leq 1/3$ では、円弧部と平坦部との境界線の近傍で最大となる。また、その点において最大垂直応力度が生じている。すなわち、梁理論の最大垂直応力度発生点とは、わずかではあるが一致していない。しかしながら、実用上は、フランジが平坦となる部分で最大垂直応力度が発生するとみなしてもよい。
- ③ スパン・フランジ幅比 $L/B$ 、あるいは $L/D$ が同じであれば、曲率半径板幅比 $R/B$ 、あるいは $R/D$ にかかわらず、フランジの中央部におけるせん断遅れ現象による応力度の梁理論による応力度からの低下量は、ほぼ一定である。
- ④  $L/B$ 、あるいは $L/D$ が3程度で、 $R/B$ 、あるいは $R/D$ 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。つぎに、ウェブの平均せん断応力度に関する実験結果を、表-5に示す。ここで、表中の挿入図のように、ウェブの断面積 $A_w$ をとり、せん断応力度を計算すれば、実験値とF.E.M.解析値とに、よく一致する。

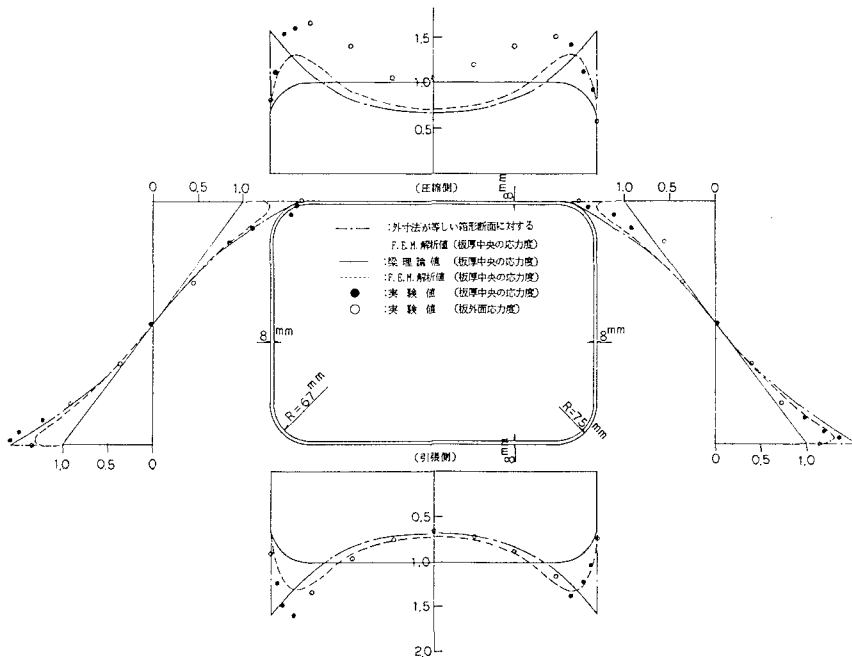


図-3 AW載荷の実験結果（断面A<sub>1</sub>における垂直応力度分布： $R/B=1/8$ 、および $L/B=2.0$ ）

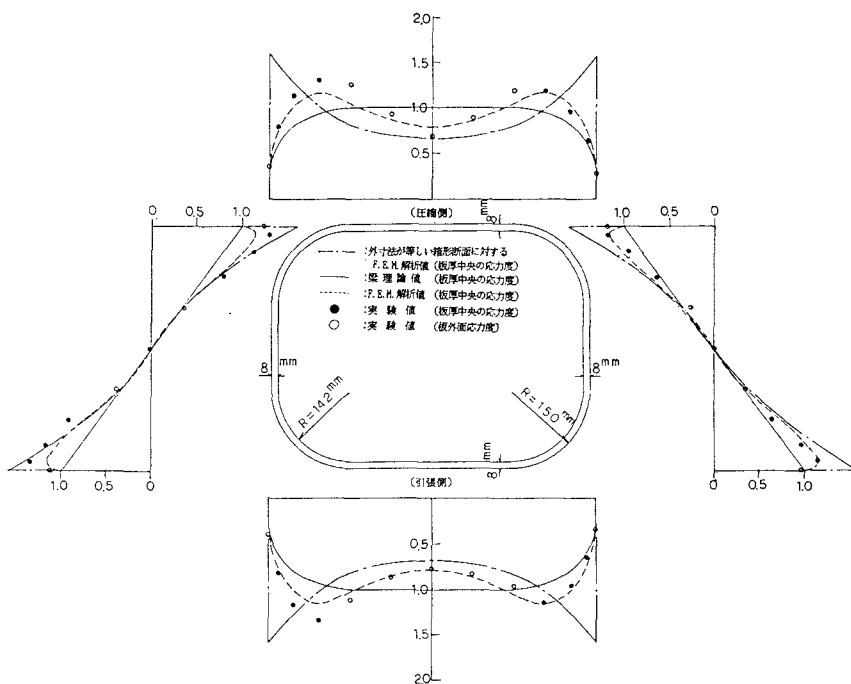


図-4 BW荷荷の実験結果 (断面A1における垂直応力度分布:  $R/B=1/4$ , および  $L/B=2.0$ )

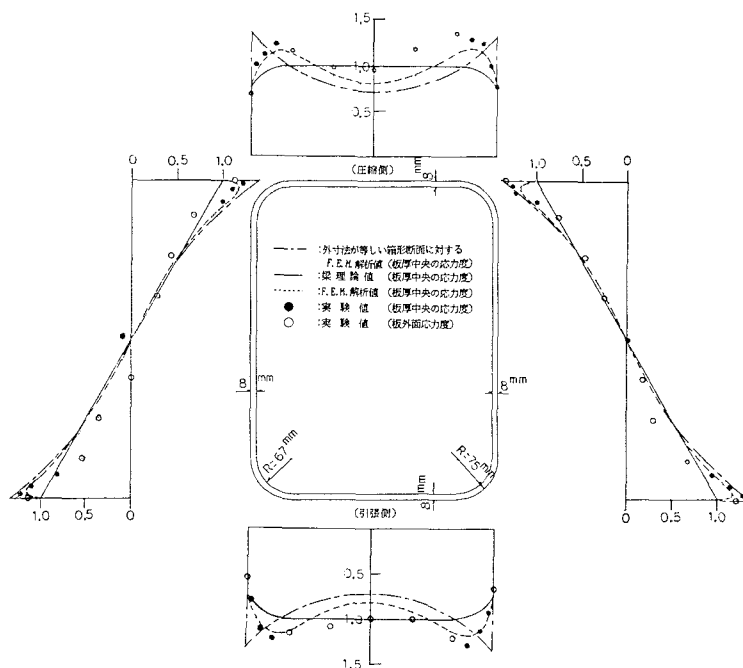


図-5 AN荷荷の実験結果 (断面A1における垂直応力度分布:  $R/D=1/6$ , および  $L/D=2.7$ )

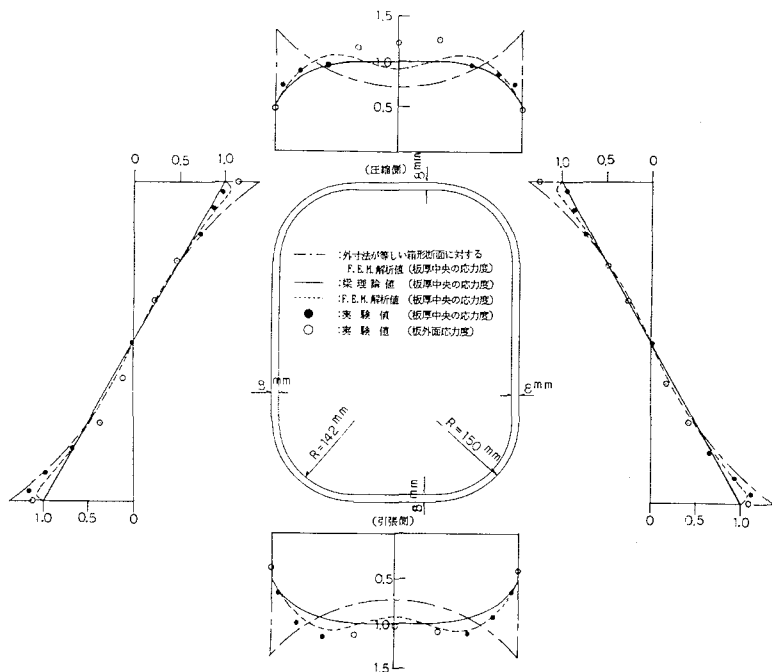


図-6 BN载荷の実験結果 (断面A1における垂直応力度分布:  $R/D=1/3$ , および  $L/D=2.7$ )

図-7は、次式に示すパラメータ $\Phi$ を用いて、外寸法B、あるいはDが等しい箱形断面梁と比較したR付断面梁のせん断遅れ現象の緩和率を示したものである。

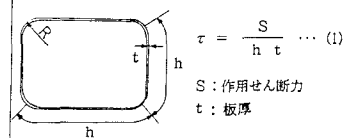
$$\Phi = \frac{\sigma_{r, \max} / \sigma_{re, \max}}{\sigma_{b, \max} / \sigma_{be, \max}} \quad \dots (2)$$

ここに、

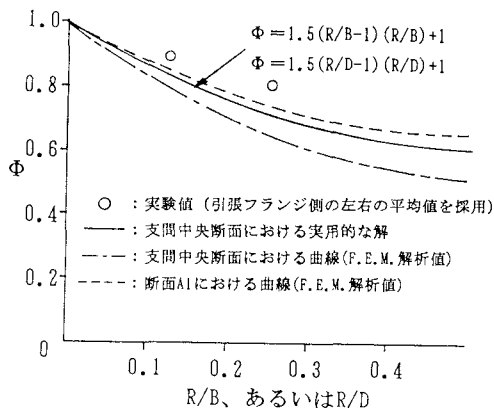
- $\sigma_{r, \max}$  : R付断面の最大垂直応力度
- $\sigma_{re, \max}$  : 梁理論によるR付断面の最大垂直応力度
- $\sigma_{b, \max}$  : 箱形断面の最大垂直応力度 (F.E.M. 解析値)
- $\sigma_{be, \max}$  : 梁理論による箱形断面の最大垂直応力度

表-5 平均せん断応力度に関する実験結果

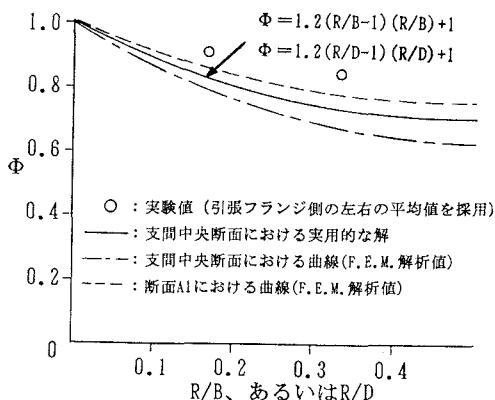
| 実験ケース | 実験値 | F.E.M. 解析値 | 計算式 (1) |
|-------|-----|------------|---------|
| AW    | 118 | 124        | 114     |
| BW    | 102 | 102        | 99      |
| AN    | 92  | 93         | 83      |
| BN    | 77  | 76         | 71      |



(単位:  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ,  $1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 0.098 \text{ Mpa}$ )



(a)  $L/B$ , あるいは  $L/D$  が2の時



(b)  $L/B$ , あるいは  $L/D$  が2.7の時

図-7  $R/B$ , あるいは  $R/D$  と  $\Phi$  との関係

この図中には、実験値と破線でプロットしたF.E.M.による解析値とが示してある。ここで、箱形断面の最大垂直応力度は、F.E.M.解析値に基づいているため、実験値の緩和率にはその影響が現われ、実験値のほうが、F.E.M.による解析値よりやや大きめの値を与えている。これらを補正して、図中には、L/B、あるいはL/Dが2と2.7のときの支間中央断面における緩和率 $\Phi$ の実用的な解を実線で示した。

すなわち、それは、次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= 1.5(R/B-1)(R/B)+1 \\ \Phi &= 1.5(R/D-1)(R/D)+1 \end{aligned} \right\} \quad L/B、\text{あるいは}L/D\text{が2のとき}$$

…(3)<sub>1,2,3,4</sub>

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= 1.2(R/B-1)(R/B)+1 \\ \Phi &= 1.2(R/D-1)(R/D)+1 \end{aligned} \right\} \quad L/B、\text{あるいは}L/D\text{が2.7のとき}$$

#### 4. R付断面梁の最大垂直応力度の推定法

R付断面部材を設計するうえで、解決しておかなければならない事項を大別すると、次の3つがあげられる。

- ①使用限界状態における応力照査をする際、せん断遅れ現象に伴う最大垂直応力度を知っておくことが不可欠となる。
- ②それによって、また円弧状のコーナー部分の板パネルとしての局部座屈強度を照査する必要がある。
- ③さらに、コーナー部を円弧状としたフランジの圧縮補剛板全体としての耐荷力を把握するために、応力分布を知っておく必要もある。

ここでは、主として上記①の問題に着目し、通常の長方形箱形断面梁のせん断遅れを考慮するための有効幅を用い、それをR付断面梁にも準用して、その最大垂直応力度を推定する方法について考察する。

まず、通常の長方形箱形断面梁の場合は、せん断遅れによって図-8(a)に示す応力分布を呈し、その値は有効幅 $b_m$ を用いて算定できることが明らかにされている<sup>5)</sup>。

つぎに、R付断面梁の場合は、図-8(b)の実線のように、破線の長方形箱形断面梁よりも、若干、せん断遅れ現象が緩和される。そのため、実線で示すように、中央部分の応力が增大することが、F.E.M.解析や実験で明かとなった。

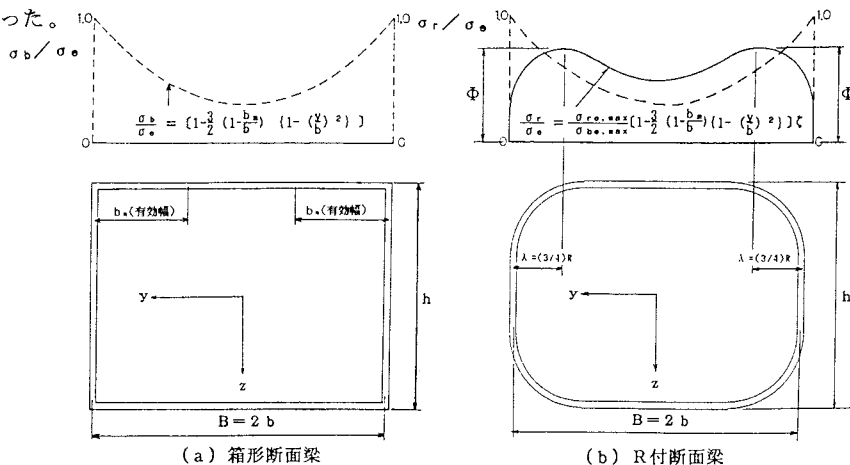


図-8 箱形断面梁とR付断面梁のせん断遅れによる応力分布の比較

そこで、R付断面梁のせん断遅れが卓越する部分の応力分布を長方形箱形断面梁と相似であるとみなせば、その応力分布は、補正係数 $\zeta$ を乗じて修正することが可能である。

すなわち、図-8(a)中に示す垂直応力分布曲線を修正した次式が有効であるものとする。

$$\sigma_r / \sigma_{re, max} = \sigma_e / \sigma_{be, max} \left[ 1 - 3/2 (1 - b_m/b) \left\{ 1 - (y/b)^2 \right\} \right] \zeta \left\{ z/(h/2) \right\}^2 \quad \dots(4)$$

ここに、

- $\sigma_r$  : R付断面のフランジ任意点における応力度
- $\sigma_{re, max}$  : 梁理論によるR付断面の最大垂直応力度
- $\sigma_{be, max}$  : 梁理論による長方形箱形断面の最大垂直応力度
- $b_m/b$  : 総幅2bの2重対称な箱形断面梁として算出される無次元有効幅<sup>6)</sup>
- $b_a$  : 長方形箱形断面梁として算出されるフランジの片側有効幅
- $\sigma_e$  : 有効幅を用い梁理論で求めた総幅2bの長方形箱形断面梁の最大垂直応力度<sup>6)</sup>
- y : 図-8に示す水平方向の座標軸
- z : 図-8に示す鉛直方向の座標軸
- $\zeta$  : 箱形断面の応力分布をR付断面の応力分布と合わせるための補正係数

図-9には、 $\zeta=1.28$ とした場合の計算結果の一例を示している。この図から、実際の寸法の範囲であるR/B、あるいはR/Dが1/8~1/4では、式(4)による応力分布は、実験値をよく推定するものであることがわかる。これらのことから、総幅2bの箱形断面梁としての有効幅を用い、次式によって支間中央部の最大垂直応力度を、精度よく推定することができる。

$$\sigma_{r, max} = \sigma_e (I_B / I_R) \Phi C \quad (1/8 \leq R/B, \text{あるいは} R/D \leq 1/4) \quad \dots (5)$$

ここに、

$$\sigma_{r, max} : R付断面の最大垂直応力度$$

$$\sigma_e = (M / I_{eff}) h / 2 \quad \dots (6)$$

$\Phi$  : 式(3)に示されたせん断遅れ現象の緩和率を表す係数

$$C = 1.10 \quad \dots (7)$$

:  $\sigma_e$  値をF.E.M. 解析値に補正するための係数

$I_{eff}$  : 有効幅を考慮した箱形断面としての断面2次モーメント

$I_R$  : 全断面有効としたR付断面としての断面2次モーメント

$I_B$  : 全断面有効とした箱形断面としての断面2次モーメント

式(5)を用いて計算したA<sub>1</sub>断面の最大垂直応力度の推定値も、図-9中に示されている。これらの推定値は、実験結果とよく一致している。

### 5. まとめ

本研究は、単純梁が集中荷重を受ける場合に對するR付断面梁のせん断遅れ特性を実験的に明らかにし、断面内の最大曲げ応力度の推定方法について検討したものである。本研究で得られた主な結論は、以下のようにまとめられる。

- i) 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、通常の箱形断面梁に比べて大幅に軽減されることがわかった。今回、実験を行ったスパン・フランジ幅比L/B、あるいはL/Dが2と2.7とに対して、曲率半径板幅比R/B、あるいはR/Dをパラメータにせん断遅れ現象の緩和率を提案できた。

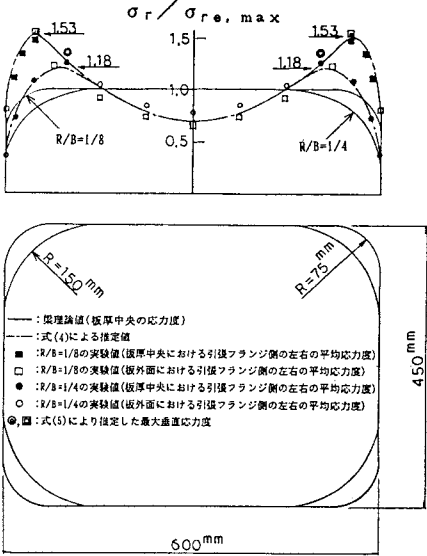


図-9 A1断面における応力分布と最大垂直応力度の推定 (L/B、あるいはL/Dが2のとき)

- ii) R付断面梁の最大垂直応力度は、円弧部のフランジが平坦となる部分に生じることがわかった。
- iii) 円弧の半分までを、梁のウェブとして有効であるとみなして平均せん断応力度を計算すると、実験値とよい一致をみた。
- iv)  $L/B$ 、あるいは $L/D$ が3程度で、 $R/B$ 、あるいは $R/D$ が $1/3$ 程度になると顕著なせん断遅れ現象が現れないことがわかった。
- v) 通常の長方形の箱形断面梁に対する有効幅を用い、応力分布を合わせるための補正係数 $\xi$ を導入すれば、R付断面梁のフランジの応力分布を推定できることがわかった。
- vi) せん断遅れ現象の緩和率を表す係数 $\Phi$ を用いれば、R付断面梁の最大垂直応力度を精度よく推定できることを示した。

本研究を行うにあたり、阪神高速道路公団・大阪第一建設部 福岡悟次長には、種々な御支援を頂いた。また、実験には、大阪市立大学・工学部・土木工学科学生 亀山彰久君、および同大学・院生 米澤利之君の協力を得た。ここに、記して深謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 中井博・宮村重範・山内幸裕・田中実雄・松浦健二：半径500mmの曲面を持つ鋼製橋脚の設計・施工、橋梁と基礎、Vol.21、No.2、1987年2月、pp.17-22
- 2) 横田弘・丸山隆英・大里睦男・増田勝人：東京国際空港エアサイド連絡橋の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.25、No.4、1991年4月、pp.9-16
- 3) 中井博・北田俊行・袴田文雄・山本竜太郎：長円形断面を有する薄肉部材の耐荷力に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.35A、土木学会、1989年3月、pp.135-144
- 4) 阪神高速道路公団：曲面を有する鋼製橋脚の設計・施工基準(案)、昭和63年4月
- 5) H.Nakai and C.H.Yoo: Analysis and Design of Curved Steel Bridges, McGraw-Hill, 1988
- 6) 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と耐荷力とに関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.33A、土木学会、1987年3月、pp.193-206

(1991年9月30日受付)