

[2053] せん断スパン比の小さい RC はりのせん断補強効果について

正会員 石橋忠良 (JR東日本)

正会員 斎藤啓一 (鉄道総合技術研究所)

正会員 ○寺田年夫 (鉄道総合技術研究所)

1. まえがき

鉄筋コンクリートはり (以下はりという) のせん断耐力の算定手法について、せん断補強鉄筋を用いない場合で、せん断スパン比 (以下 a/d という) が 3 以上では、岡村らの研究により、精度の良い耐力算定式がすでに提案されている [1]。また、 a/d が 3 以下の場合においても、二羽および国鉄の研究があり、それぞれ算定式が提案されている [2][3]。一方、せん断補強鉄筋を用いたはりのせん断耐力算定については、現在トラス理論を基本とした手法によるのが一般的である。しかし、Paiva や Kongらの研究があり、耐力算定手法も提案されている [4][5]。

筆者らも、 a/d の小さい領域 (以下 a/d が 2.5 程度以下を指して、 a/d の小さい領域という) のはりのせん断補強の一つの方法として、はりの腹部の中段に軸方向鉄筋を多段に配置した模型供試体の載荷実験により、これらの軸方向鉄筋がせん断耐力におよぼす影響について調査を行った。そして、また、軸方向鉄筋よりもせん断補強には効果的と思われる折曲げ鉄筋を配置した場合の実験を併せて行った。

本報告は、 a/d の小さい領域のはりの効果的なせん断補強方法を明らかにすることを目的として、実験的研究により腹部の中段に軸方向鉄筋を多段に配置した場合ならびに折曲げ鉄筋を配置した場合の、はりの破壊性状およびせん断耐力算定手法について明らかになった事項を以下に述べるものである。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

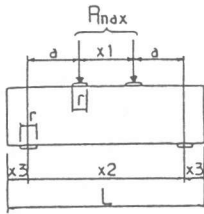
供試体は、タイプ A : 腹部に軸方向鉄筋を多段に配置した供試体、タイプ B : 折曲げ鉄筋を配置した供試体の二つのタイプに分かれている。供試体形状寸法および配筋状況を図-1 に示す。

(1) タイプ A について タイプ A は、以下に述べる二つのシリーズに分かれている。

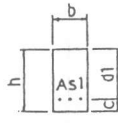
シリーズ I : はりの腹部の中段に軸方向鉄筋を一段のみ配置し、腹部の中段に配置された軸方向鉄筋からはりの下縁までの距離 (以下かぶり部分という) が、せん断耐力におよぼす影響について着目したものである。

シリーズ II : はりの下縁付近に軸方向鉄筋を一段配置し、さらに腹部の中段に軸方向鉄筋を多段に配置した場合で、腹部の中段に配置された軸方向鉄筋がせん断耐力におよぼす影響について着目したものである。

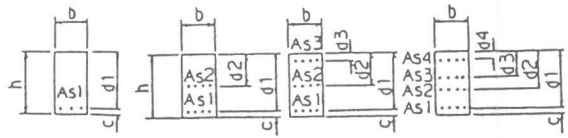
(2) タイプ B について 折曲げ鉄筋を配置した供試体は、はりの中央部分に突起を設けた逆 T 型の形状のはりとしている。突起側面とはりの上面との交点と支承板端部を結ぶ斜めの面に対して、折曲げ鉄筋を 90° に配置した供試体が 3 体 (D-2, D-3, D-4)、約 65° に配置した供試体が 1 体 (D-5) の合計 4 体である。また、タイプ B ではせん断スパン a を $20 \sim 37.5\text{cm}$ 、折曲げ鉄筋の部材軸方向に対する折曲げ角度を $25^\circ \sim 50^\circ$ 、折曲げ鉄筋の断面積を $2.724, 5.448\text{cm}^2$ としたはりの破壊性状およびせん断耐力におよぼす影響について着目したものである。



シリーズ I



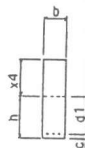
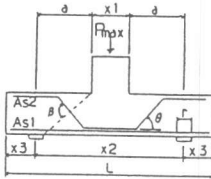
シリーズ II



| シリーズ | 名 称 | 供試体数 | L (cm) | a (cm) | x1 (cm) | x2 (cm) | x3 (cm) | b (cm) | h (cm) | As1 | As2 | As3 | As4 | d1 (cm) | d2 (cm) | d3 (cm) | d4 (cm) | c (cm) | r (cm) | | |
|------|--------|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|----|----|
| I | 40-1.0 | 3 | 160 | 40 | 40 | 120 | 20 | 15 | 43 | D25*3 | - | - | - | 40-32 | - | - | - | - | 3-11 | 10 | |
| | 40-0.5 | 5 | 120 | 20 | 40 | 80 | 20 | 15 | 43 | D25*3 | - | - | - | 40-24 | - | - | - | - | 3-19 | 10 | |
| II | 40-2.5 | 1 | 280 | 100 | 40 | 240 | 20 | 15 | 43 | D32*3 | - | - | - | 40 | - | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 8 | 280 | 100 | 40 | 240 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D25*3 | - | - | 40 | 36-5 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | 40-1.0 | 1 | 160 | 40 | 40 | 120 | 20 | 15 | 43 | D32*3 | - | - | - | 40 | - | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 5 | 160 | 40 | 40 | 120 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D13*3 | - | - | 40 | 36-20 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 5 | 160 | 40 | 40 | 120 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D19*3 | - | - | 40 | 36-20 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 8 | 160 | 40 | 40 | 120 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D25*3 | - | - | 40 | 36-5 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | 40-0.5 | 5 | 120 | 20 | 40 | 80 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D13*3 | - | - | 40 | 36-20 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 4 | 120 | 20 | 40 | 80 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D19*3 | - | - | 40 | 36-20 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 8 | 120 | 20 | 40 | 80 | 20 | 15 | 43 | D19*3 | D25*3 | - | - | 40 | 36-5 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | 20-2.5 | 1 | 160 | 50 | 20 | 120 | 20 | 15 | 43 | D22*3 | - | - | - | 20 | - | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | 5 | 160 | 50 | 20 | 120 | 20 | 15 | 43 | D13*3 | D16*3 | - | - | 20 | 18-10 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | | S1~S5, G1 | 6 | 260 | 92.5 | 35 | 220 | 20 | 20 | 40 | D22*4 | D22*4 | - | - | 37 | 34-3 | - | - | - | 3 | 10 |
| | | S6 | 1 | 260 | 92.5 | 35 | 220 | 20 | 20 | 40 | D22*4 | D22*4 | D22*4 | - | 37 | 20 | 3 | - | - | 3 | 10 |
| | | S7 | 1 | 260 | 92.5 | 35 | 220 | 20 | 20 | 40 | D22*4 | D22*4 | D22*4 | D22*4 | 37 | 23 | 17 | 3 | - | 3 | 10 |
| | | A-10 | 1 | 180 | 40 | 40 | 120 | 30 | 15 | 43 | D25*3 | D16*3 | - | - | 40 | 20 | - | - | - | 3 | 10 |
| | A-11 | 1 | 100 | 10 | 20 | 40 | 30 | 15 | 23 | D19*3 | D13*3 | - | - | 20 | 10 | - | - | - | 3 | 10 | |
| | A-12 | 1 | 120 | 20 | 20 | 60 | 30 | 15 | 23 | D19*3 | D13*3 | - | - | 20 | 10 | - | - | - | 3 | 10 | |

注) As1~As4は、軸方向鉄筋の種類と配置本数を示す。

タイプ A (腹部の中段に軸方向鉄筋を配置した場合)



| 名 称 | L (cm) | a (cm) | x1 (cm) | x2 (cm) | x3 (cm) | b (cm) | h (cm) | As1 | As2 | d1 (cm) | c (cm) | β 度 | θ 度 | r (cm) |
|-----|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|-------|---------|--------|-----|------|--------|
| D-2 | 115 | 25 | 25 | 75 | 20 | 15 | 28 | D22*3 | D19*2 | 25 | 3 | 90 | 35.5 | 10 |
| D-3 | 140 | 37.5 | 25 | 100 | 20 | 15 | 28 | D22*3 | D19*1 | 25 | 3 | 90 | 49.3 | 10 |
| D-4 | 120 | 20 | 20 | 60 | 30 | 15 | 23 | D19*3 | D19*1 | 20 | 3 | 90 | 33.1 | 10 |
| D-5 | 140 | 37.5 | 25 | 100 | 20 | 15 | 28 | D22*3 | D19*2 | 25 | 3 | 65 | 25 | 10 |

注) As1およびAs2は鉄筋の種類と配置本数を示す。

タイプ B (折曲げ鉄筋を配置した場合)

図-1 供試体形状寸法および配筋状況

2.2 使用材料

コンクリートの配合は、目標強度 270kg/cm²、骨材の最大寸法13mm (タイプAのシリーズIIの供試体S1~S7, G1では20mm) とした。鉄筋は熱間圧延異形棒鋼 (SD35) を用いている。

2.3 実験装置および荷重方法

荷重の荷重は、門型フレーム内に設置した油圧ジャッキにより行った。また、タイプAの供試体では分配桁を介した2点対称の集中荷重とし、タイプBの供試体では突起部の上面から1点集中荷重として、それぞれ静的一方向の荷重とした。また、支点には、横方向の拘束が生じないように、ローラーを挿入している。

3. 実験結果および考察

3.1 ひびわれ性状ならびに破壊性状

代表的な供試体のひびわれ発生状況を図-2に示す。

(1) タイプAについて シリーズIの供試体では、腹部の中段に一段のみ軸方向鉄筋を配置しているため、はりの下縁付近に軸方向鉄筋を配置した場合のひびわれ発生状況とは若干異なることが認められた。特に、軸方向鉄筋をはりの高さの1/2付近に配置したはりでは、スパン中央付近に最初に発生した曲げひびわれは、腹部に配置した軸方向鉄筋位置まで伸展するが、その後

ひびわれは腹部に配置した軸方向鉄筋に沿ったほぼ水平なひびわれとなって、支点方向に伸展していく。また、荷重の増加に伴い新たな曲げひびわれははりの下縁からは発生せず、腹部に配置した軸方向鉄筋位置から発生し、はりの圧縮縁に向かって伸びていくことが認められた。しかし、これらの曲げひびわれははりの破壊に対しては支配的とはならず、荷重点と支点とを結ぶ方向の斜めひびわれが新たに発生し、この斜めひびわれが支配的となりはりはせん断破壊に至ることが認められた。

シリーズIIの供試体では、腹部の中段に軸方向鉄筋を配置した場合には、腹部に配置した軸方向鉄筋により、曲げひびわれのはりの圧縮縁への伸展が幾分抑制される傾向にあることが認められた。また、腹部に配置した軸方向鉄筋に沿ったほぼ水平なひびわれの発生が認められた供試体もあった。しかし、これらのひびわれははりの破壊に対しては支配的とはならず、シリーズIと同様に、荷重点と支点とを結ぶ方向の斜めひびわれが支配的となりはりは破壊に至るようであった。

(2) タイプBについて 折曲げ鉄筋を配置した供試体では、最初スパン中央付近あるいは支点直下のはりの引張部付近に曲げひびわれが発生し、その後、荷重の増加に伴い斜めひびわれが支点と突起側面とはりの上面との交点とを結ぶ方向に発生することが認められた。供試体が4体と少ないが、いずれの場合においても、支承板端部と突起側面とはりの上面との交点とを結ぶ面が破壊面となっていた。なお、本供試体の a/d は1.0～1.5の範囲、部材軸と折曲げ鉄筋とのなす角度は $25^\circ \sim 50^\circ$ の範囲となっているが、これらのパラメータの違いによるひびわれ発生状況ならびに破壊性状の顕著な違いは認められないようであった。また、折曲げ鉄筋のひずみについては測定していないが、実験の観察結果からは、せん断破壊面における折曲げ鉄筋は明らかに折れ曲がり認められたことより、折曲げ鉄筋は降伏しているものと思われた。

3.2 せん断耐力算定手法について

3.2.1 タイプA（腹部の中段に軸方向鉄筋を配置したはり）のせん断耐力算定手法について

タイプAのせん断耐力についても、通常のRCはりと同様に、既往のせん断耐力算定式を適用することを考えた。基本としたせん断耐力算定式を式(1)に示す[6]。

$$V_c = \alpha \cdot f_c' \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot b \cdot d \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \alpha &= 3.58 (a/d)^{-1.166} & \text{ただし、} 2.5 \geq a/d \geq 1.0 \\ &= 12 / \{1 + 2.35 (a/d)^{1.2}\} & 1.0 > a/d \geq 0 \end{aligned}$$

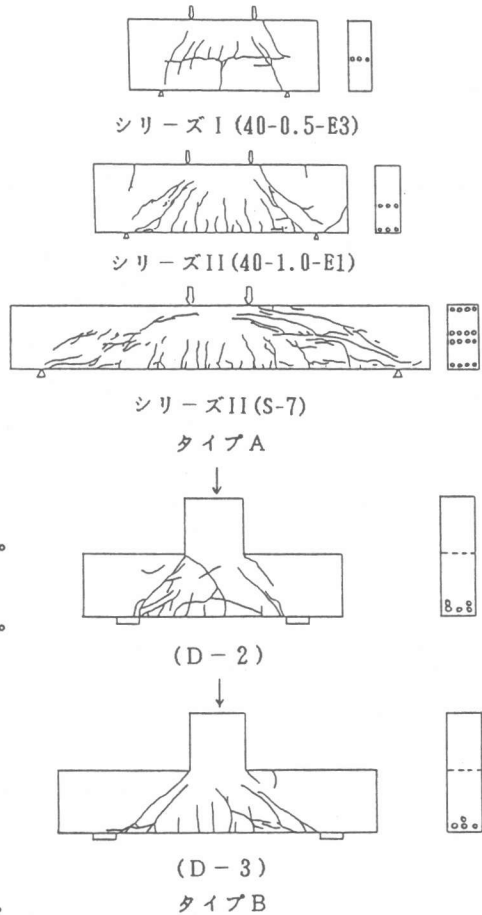


図-2 ひびわれ発生状況

$$\beta_p = (100 \cdot p_w)^{1/3}, \quad \beta_d = (100/d)^{1/4}, \quad p_w = A_s/(b \cdot d)$$

Vc : はりのせん断耐力 (kg) , fc' : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²)

a : せん断スパン (cm) , b : はりの幅 (cm)

d : はりの有効高さ (cm) , A_s : 軸方向鉄筋の断面積 (cm²)

式(1)が、タイプAにおけるシリーズIの供試体のように、腹部の中段に軸方向鉄筋を一段のみ配置しかぶり部分が大きくなった場合にも適用可能となるように、式(1)中のパラメーターについて以下に示す検討を行った。

検討の結果、各パラメーターをア)～エ)とすると実験値との適用が良いことがわかった。

ア) aについては、載荷板端部と支承板端部の距離(a1)とする。

イ) dについては、dにかえてはりの高さ(h)とする。

ウ) A_sについては、軸方向鉄筋の断面積(A_s1)を軸方向鉄筋の圧縮縁からの距離(d1)とはりの高さ(h)の比(d1/h)で減し式(2)で求める。

$$A_s = A_{s1} \times d1/h \quad (2)$$

エ) α については、イ)の式(1)中のdにかえてはりの高さhを用いるため、そのまま式(1)によることはできないので、ここではd=0.9hとして式(1)と同じ値となるよう係数 α を求め、式(3)とした。

$$\alpha = 3.17 (a1/h)^{-1.166} \quad \text{ただし, } 2.25 \geq a1/h \geq 0.90 \quad (3)$$

$$= 12 / \{1 + 2.67(a1/h)^{1.2}\} \quad 0.90 > a1/h \geq 0$$

以上、式(1)中のパラメーターについて、ア)～エ)とした手法を用いたせん断耐力の計算値(Pcal=2·Vc)と実験値(Pmax)との比(Pmax/Pcal)の平均値と変動係数は、供試体8体で、1.09, 10.8%となった。また、腹部の中段に配置した軸方向鉄筋のかぶり部分の厚さ(c)とはりの高さ(h)との比(c/h)とPmax/Pcalの関係を図-3に示す。これより、a/dの小さい領域で、腹部の中段に軸方向鉄筋を一段のみ配置したはりについても、これらの手法によればせん断耐力をほぼ算出できると思われる結果が得られた。

次にタイプAにおけるシリーズIIのように、はりの下縁付近と腹部の中段にそれぞれ一段ずつ軸方向鉄筋を配置した場合、さらに腹部に配置した軸方向鉄筋が多段になった場合については、式(2)にかえて式(4)として求めることを考えた。

$$A_s = A_{s1} \times d1/h + A_{s2} \times d2/h + \dots + A_{si} \times di/h \quad (4)$$

ただし、軸方向鉄筋が圧縮鉄筋となる場合には考慮しない。

本手法を用いた場合の、本実験結果とKongらの実験結果とを含めて適用性の検討を行った[7]。その結果、供試体数79体で、Pmax/Pcalの平均値と変動係数は、1.10, 12.6%であった。図-4にa1/hとPmax/Pcalとの関係を示す。これより、はりの腹部に軸方向鉄筋を多段に配置した場合においても、本手法によれば、せん断耐力をほぼ算出できると思われる結果が得られた。

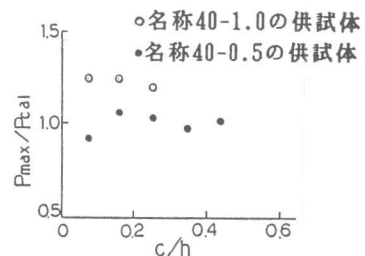


図-3 シリーズIの供試体における Pmax/Pcal ~ c/h の関係

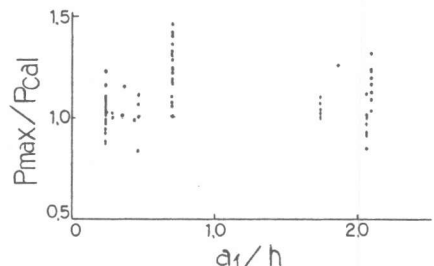


図-4 シリーズIIの供試体における Pmax/Pcal ~ a1/h の関係

3.2.2 タイプB（折曲げ鉄筋を配置したはり）のせん断耐力算定手法について

タイプBのせん断耐力算定についても、3.2.1 に述べたタイプAの場合のせん断耐力算定手法を、そのまま適用できるよう検討を行った。

折曲げ鉄筋のはりのせん断耐力に寄与する成分を、部材軸方向の成分と鉛直方向の成分に分けて考えることとした。部材軸方向の成分は、3.2.1 で述べたタイプAの場合の耐力算定手法により求めることとする。この場合、折曲げ鉄筋の断面積を部材軸方向となす配置角度（ θ ）で式(6)により補正を行い、式(1)における軸方向鉄筋の断面積に換算することとした。また、鉛直成分については、式(7)によることとする。折曲げ鉄筋を配置したはりのせん断耐力 V_u は、

$$V_u = V_c + V_s \quad (5)$$

ここで、 V_c : コンクリートの負担するせん断耐力で、3.2.1 の手法により求める。

ただし、 A_s については式(6) によることとする。

$$A_s = A_{s1} \times d_1/h + A_{s2} \times (d_2/h) \times \cos \theta \quad (6)$$

V_s : 折曲げ鉄筋の鉛直成分で式(7) によることとする。

$$V_s = A_{s2} \cdot f_y \cdot \sin \theta \quad (7)$$

A_{s2} : 折曲げ鉄筋の断面積 (cm²)

f_y : 折曲げ鉄筋の降伏強度 (kg/cm²)

θ : 折曲げ鉄筋の部材軸となす角度

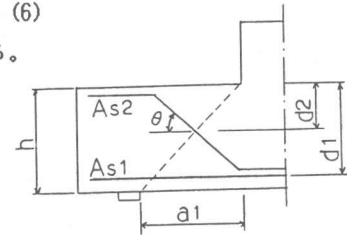


図-5 供試体タイプBの記号の説明

式(5)～式(7) で求めたせん断耐力の計算値 ($P_{cal} = 2 \cdot V_u$) と実験値との比 (P_{max}/P_{cal}) を表-1 に示す。また、本実験結果について、Kongらの提案式を用いた場合およびACI 基準による算

表-1 実験値 P_{max} と計算値 P_{cal} との比較

| 名称 | $f'c$ (kg/cm ²) | P_{max} (t) | 式(5)の場合 | | Kongらの提案式 | | ACI 基準の算定式 | |
|-----|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | | P_{cal} (t) | P_{max}/P_{cal} | P_{cal} (t) | P_{max}/P_{cal} | P_{cal} (t) | P_{max}/P_{cal} |
| D-2 | 256 | 66.4 | 69.7 | 0.953 | 74.4 | 0.893 | 19.4 | 3.42 |
| D-3 | 256 | 40.3 | 42.9 | 0.938 | 48.5 | 0.833 | 18.1 | 2.23 |
| D-4 | 256 | 49.6 | 48.1 | 1.032 | 54.3 | 0.914 | 15.3 | 3.24 |
| D-5 | 267 | 45.8 | 46.3 | 0.989 | 53.9 | 0.849 | 18.4 | 2.48 |
| 平均値 | | | | 0.978 | | 0.872 | | 2.84 |

定式を用いた場合の検討結果も表-1 に示している[5][8]。

これより、供試体数が4体と少ないが式(5)を用いた場合では P_{max}/P_{cal} の平均値は0.978 となった。これに対して、Kongらの提案式を用いた場合では計算値を高く評価しすぎるようであること、また、ACI 基準の算定式を用いた場合では計算値が低く評価されることが判断できる。また、折曲げ鉄筋の配置角度と P_{max}/P_{cal} の関係および折曲げ鉄筋の断面積 (A_{s2}) と P_{max}/P_{cal} の関係を図-6 と図-7 に示す。これより、 P_{max}/P_{cal} と折曲げ鉄筋の配置角度および断面積の間にも特に傾向は認められないことがわかる。

以上により、式(5)を用いる手法によれば、 a/d の小さい領域のみにせん断補強として折曲げ鉄筋を用いた場合のせん断耐力について、軸方向鉄筋を多段に配置した場合の耐力算定手法に若干の修正を加えるだけで、ほぼ求める

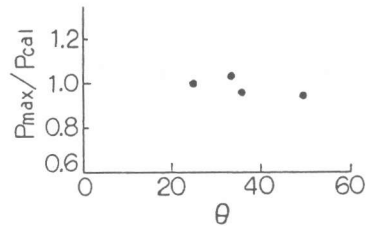


図-6 $P_{max}/P_{cal} \sim \theta$ の関係

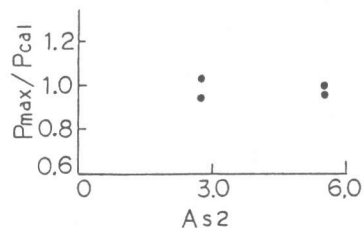


図-7 $P_{max}/P_{cal} \sim A_{s2}$ の関係

ことができると思われるような結果が得られた。

4. まとめ

a/d の小さい領域のはりのせん断補強として、腹部の中段に軸方向鉄筋を配置した場合および折曲げ鉄筋を配置した場合はりのせん断破壊性状およびせん断耐力算定手法について得られた主な結果を以下に示す。

(1) せん断破壊性状について

タイプAで腹部の中段に軸方向鉄筋を一段のみ配置したかぶり部分が大きいはりでは、はりの下縁付近に軸方向鉄筋を配置した通常のはりの場合のひびわれ発生状況とは異なるようである。しかし、せん断破壊はりの下縁付近に軸方向鉄筋を配置した場合と同様に、支点と載荷点とを結ぶ面で生じているようである。

タイプBでははりの中央部に突起を設けた逆T型のはりの形状としているが、本実験でのこのようなはりにせん断補強として折曲げ鉄筋を配置した場合には、いずれの供試体も支承板端部と突起側面とはりの上面との交点とを結ぶ面が破壊面となるようである。

(2) せん断耐力算定手法について

i) 腹部の中段に軸方向鉄筋を一段のみ配置した場合およびはりの下縁付近と腹部の中段に軸方向鉄筋を多段に配置した場合のせん断耐力は式(1)によるが、その適用については式(1)中の各パラメータについて、3.2.1のア)～エ)とすることで求められるようである。

ii) 折曲げ鉄筋を配置した場合はりのせん断耐力は式(5)によるが、その適用にあたっては、折曲げ鉄筋のせん断補強効果を部材軸方向成分については式(6)により、鉛直成分については式(7)によることで求められるようであると思われる。

最後に本実験を行うにあたり前国鉄東京第一工務局伏見照夫氏、オリエンタルコンクリート(株)今井昌文氏に、お世話になったことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] H.Okamura, T.Higai; Proc. of JSCE, No.300, Aug. 1980
- [2] 二羽, 前田, 岡村; ディープビーム的なRC部材の設計方法に関する提案, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983
- [3] 石橋, 松田, 斎藤; 少数本のくいをを用いたフーチングのせん断設計について, 土木学会論文報告集第337号, 1983年9月
- [4] de Paiva, H.A. Rawdon, Sies, C.P.; "Strength and Behavior Deep Beams in Shear", Journal ST., Proc. ASCE, Oct. 1965
- [5] Kong, F.K., Robins, P.J., et al; "Shear Analysis and Design of Reinforced Concrete Deep Beams", The Structural Engineer Vol. 50. No.10, Oct. 1972
- [6] 石橋, 斎藤, 丸山; 多点荷重を受けるはりのせん断耐力に関する一考察, 第7回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1985
- [7] F.K.Kong, P.J.Robins and D.F.Cole; Web reinforcement effects on deep beams, ACI Proceedings, Vol.67, No.12, pp.1010-1017, December(1970)
- [8] Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)