

論文

[2101] 小数本のくいを用いたフーチングのせん断補強に関する実験的研究

正会員 石橋 忠良 (J R東日本)  
 正会員 斎藤 啓一 (鉄道総合技術研究所)  
 正会員 〇寺田 年夫 (鉄道総合技術研究所)

1. まえがき

筆者らは、小数本のくいを用いたフーチング（以下、フーチングという）のせん断設計手法を、実験的研究により既に提案している<sup>1)</sup>。これは、 $a/d$  の小さいくい基礎のフーチングにせん断補強鉄筋として鉛直U形スターラップを用いるとせん断耐力が逆に低下するという実験結果をふまえ、フーチングにせん断補強鉄筋を用いない場合の設計手法であり、さらに経済的なフーチングの設計手法を解明するためには、効果的なせん断補強方法を明らかにする必要があった。

一方、筆者らの実験により、スターラップを用いないRCはりの腹部の中段に水平な軸方向鉄筋を配置すると、RCはりのせん断耐力が増大することや、この場合のせん断耐力算定手法を既に明らかにした<sup>2)</sup>。これらRCはりの実験結果より、フーチングのせん断補強の方法として、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置すれば、RCはりの場合と同様にフーチングのせん断耐力が増大する可能性があることが考えられた。

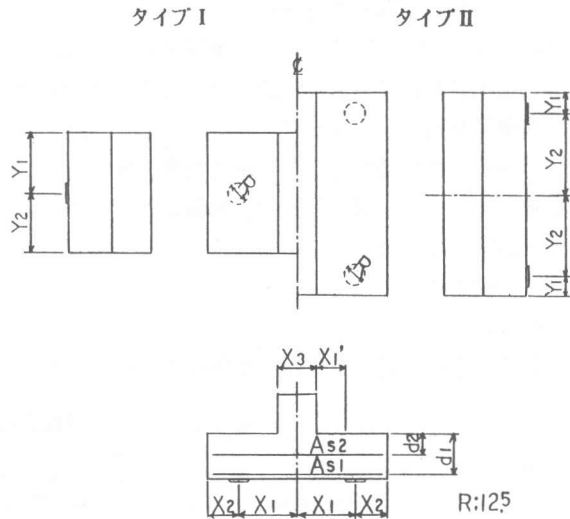
本報告は、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合のフーチングのせん断補強効果について、実験的に研究を行った結果を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 供試体形状

実験を行った供試体の形状寸法及び配筋状況を図-1及び表-1に示す。供試体は、タイプI (NO.1~10) 10体とタイプII (NO.11~16) 6体の計16体である。なお、橋脚く体の形状はタイプI、IIとも壁式としている。タイプI、IIの主な着目点を以下に示す。

タイプI：くいは片側1本とし、主な着目点は、フーチングの中段に橋脚く体の壁と垂直な方向に配置した水平な軸方



フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の配筋状況

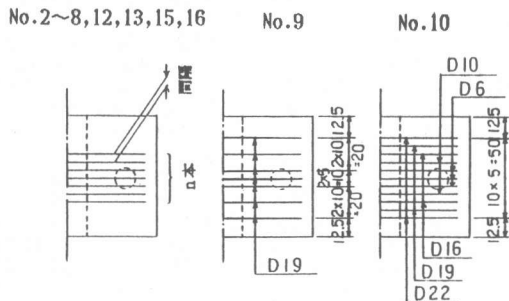


図-1 供試体形状及び配筋状況 単位(cm)

向鉄筋(以下、フーチングの中段に配置した水平な軸方向鉄筋という)の数量(径、配置本数)及び配置範囲である。供試体No.1~6 はせん断耐力に及ぼすフーチングの中段に配置した軸方向鉄筋の量の影響を見るために、配置した鉄筋の径と間隔をD19、5cmとして配置本数のみを0~11本の範囲で変化させている。供試体No.7~10はせん断耐力に及ぼすフーチングの中段に配置した軸方向鉄筋の配置範囲の影響を見るために、鉄筋の径と配置範囲(10cm~50cm)を変化させている。

タイプⅡ：くいは片側2本とし、主な着目点は、くいの橋脚側外縁から橋脚く体前面までの距離( $X_1'$ )と、フーチングの中段に配置した軸方向鉄筋の量(径)である。 $X_1'$ はNo.11~13では6.25cm、No.14~16では18.75cmとした。また、No.11、14ではフーチングの中段に軸方向鉄筋を配置していないが、No.12、15ではD16、No.13、16ではD22を10cm間隔でそれぞれフーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置している。

## 2.2 使用材料

コンクリートの配合は、目標強度 270kg/cm<sup>2</sup>とし、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。骨材の最大寸法は、供試体と実構造物の縮尺を考慮して、13mmとした。

鉄筋は熱間圧延異形棒鋼(SD35)を用いた。

## 2.3 荷重方法及び実験方法

供試体への荷重は、フーチング下面のくい側(図-1の破線の丸の位置)からとし、互いに連動した2台または4台の油圧ジャッキにより荷重した。

主な測定項目を以下に示す。

- ①フーチング破壊時のくい1本当たりの最大荷重( $P_{max}$ :せん断耐力)、②ひびわれ発生状況、③破壊部をはつり、破壊面の位置の測定

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 破壊性状

#### (1) 最大荷重

実験で得られた最大荷重 $P_{max}$ を表-1に示す。なお、比較を容易にするために最大荷重はコン

表-1 供試体形状及び実験結果

| No | NAME  | $X_1$<br>(cm) | $X_2$<br>(cm) | $X_3$<br>(cm) | $Y_1$<br>(cm) | $Y_2$<br>(cm) | $d_1$<br>(cm) | $d_2$<br>(cm) | $As_1$<br>径-間隔<br>(cm) | $As_2$<br>径-間隔-本数<br>(cm) | $f_c'$<br>( $\frac{kg}{cm^2}$ ) | $P_{max}$<br>(t) | $P_{max}$<br>(t) | $P_{cal}$<br>(t) | $\frac{P_{max}}{P_{cal}}$ |
|----|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| 1  | 61B01 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | -             | D16- 5.0               | -                         | 303                             | 34.6             | 34.5             | 51.1             | 0.676                     |
| 2  | 61B02 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D19- 5.0- 3               | 303                             | 47.0             | 46.8             | 54.2             | 0.867                     |
| 3  | 61B03 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D19- 5.0- 5               | 291                             | 50.1             | 50.6             | 55.3             | 0.906                     |
| 4  | 61B04 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D19- 5.0- 7               | 282                             | 55.7             | 56.9             | 56.6             | 0.985                     |
| 5  | 61B05 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D19- 5.0- 9               | 282                             | 61.3             | 62.6             | 57.9             | 1.059                     |
| 6  | 61B06 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D19- 5.0-11               | 290                             | 64.7             | 65.4             | 59.2             | 1.093                     |
| 7  | 61B07 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D29- 5.0- 3               | 290                             | 50.7             | 51.3             | 56.2             | 0.901                     |
| 8  | 61B08 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | D29-12.5- 3               | 297                             | 59.6             | 59.8             | 57.2             | 1.043                     |
| 9  | 61B09 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | 図-1参照                     | 297                             | 63.1             | 63.3             | 57.0             | 1.107                     |
| 10 | 61B10 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 37.5          | 37.5          | 25.0          | 12.5          | D16- 5.0               | 図-1参照                     | 297                             | 55.0             | 55.2             | 55.4             | 0.992                     |
| 11 | 60A01 | 25.0          | 20.0          | 25.0          | 12.5          | 50.0          | 25.0          | -             | D10- 9.5               | -                         | 326                             | 37.0             | 36.0             | 29.5             | 1.252                     |
| 12 | 60A02 | 25.0          | 20.0          | 25.0          | 12.5          | 50.0          | 25.0          | 12.5          | D10- 9.5               | D16-10.0-12               | 326                             | 47.8             | 46.5             | 38.2             | 1.251                     |
| 13 | 60A03 | 25.0          | 20.0          | 25.0          | 12.5          | 50.0          | 25.0          | 12.5          | D10- 9.5               | D22-10.0-12               | 328                             | 47.3             | 45.9             | 43.9             | 1.077                     |
| 14 | 60A04 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 12.5          | 50.0          | 25.0          | -             | D19-11.0               | -                         | 323                             | 32.0             | 31.2             | 35.6             | 0.900                     |
| 15 | 60A05 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 12.5          | 50.0          | 25.0          | 12.5          | D19-11.0               | D16-10.0-12               | 324                             | 35.4             | 34.5             | 39.1             | 0.906                     |
| 16 | 60A06 | 37.5          | 20.0          | 25.0          | 12.5          | 50.0          | 25.0          | 12.5          | D19-11.0               | D22-10.0-12               | 324                             | 39.4             | 38.4             | 41.9             | 0.940                     |

注1)  $d_2$ 、 $As_2$ 欄の-は鉄筋が配置されていないことを示す。

注2) 使用した鉄筋の断面積の実測値は、供試体No.1~10の場合  $D10=0.68cm^2$ 、 $D16=1.92cm^2$ 、 $D19=2.76cm^2$ 、 $D22=3.72cm^2$ 、 $D29=6.22cm^2$ 、供試体No.11~16の場合  $D10=0.67cm^2$ 、 $D16=1.91cm^2$ 、 $D19=2.79cm^2$ 、 $D22=3.72cm^2$ 。

クリートの圧縮強度 $fc'$ の1/3乗に比例するとし、 $fc'=300\text{kg/cm}^2$ に換算した値を $P_{max}'$ として載せてある。

### (2) ひびわれ性状

代表的な供試体のひびわれ発生状況を図-2に示す。フーチング下面のひびわれ発生状況は、タイプI及びタイプIIとも、橋脚く体下面にフーチングの下縁付近に配置した軸方向鉄筋（以下、主鉄筋という）と直角方向に曲げひびわれが初期の荷重段階で発生するが、このひびわれは破壊に対して支的とはならなかった。その後の荷重の増加により、くいの近傍に同心円状のひびわれが発生・伸展し、最終的にはくいの橋脚側外縁と橋脚く体前面とを結ぶ円錐状のひびわれが発生し、この破壊面が支的となり破壊に至ることが観察された。

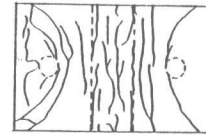
また、せん断補強を行った場合でもせん断補強を行っていないフーチングの破壊性状とほぼ同様な破壊面を形成するが、せん断補強を行っていない場合には比較的ぜい性的な破壊を示すのに対し、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合には、ひびわれ面が形成された後においても、荷重の増大に耐えていることが観察された。

フーチング上面では、タイプIの場合、くいの上面に主鉄筋方向のひびわれの発生が認められたが、タイプIIではこのひびわれの発生は認められなかった。

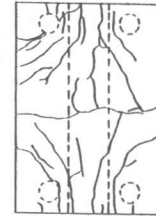
### (3) せん断破壊面

図-3の実線は代表的な供試体において、供試体の破壊面上の位置がその点での有効高さの1/2と一致した点を結んだ線（以下、破壊面の中心線という）を示している。また、破線はフーチングの平面上で橋脚く体前面からの垂線とくい外縁からの垂線との距離が等しい位置に破壊面の中心があると仮定した点を結んだ線（以下、仮想破壊線という）を示している。これより、実験で得られた破壊面の中心線と、仮想破壊線とは比較的良く一致していることがわかる。

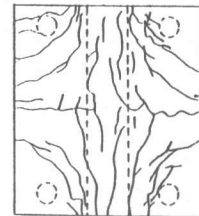
また、本実験の供試体のようにフーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合においても破壊面の中心線の形状は、文献1)で行ったせん断補強を行っていない場合の実験結果とほぼ同様であることが観察された。



タイプI No.4(61B04)

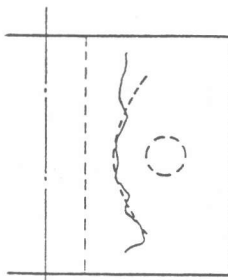


タイプII No.12(60A02)

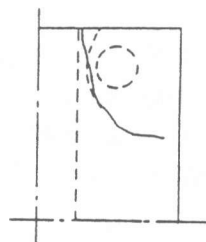


タイプII No.16(60A06)

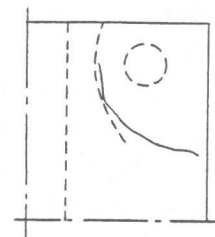
図-2 ひびわれ発生状況



タイプI No.8(61B08)



タイプII No.12(60A02)



タイプII No.15(60A05)

図-3 せん断破壊面

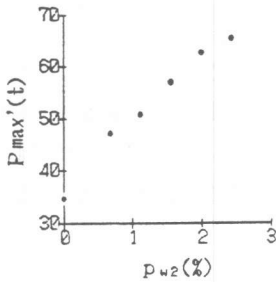


図-4  $P_{max}' \sim p_{w2}$

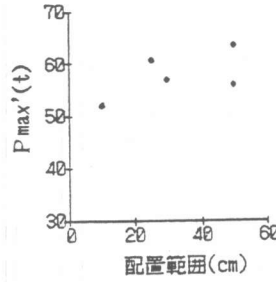


図-5  $P_{max}' \sim$  配置範囲

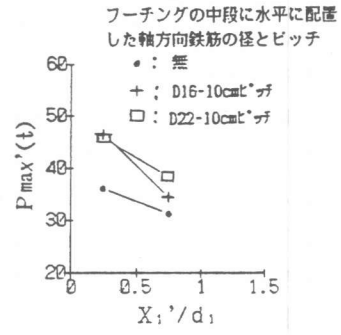


図-6  $P_{max}' \sim X_1'/d_1$

(4) フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋のせん断耐力に及ぼす影響

a) フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋比 ( $p_{w2}$ )

供試体No.1~6 は形状寸法及び主鉄筋の数量を一定とし、フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋にD19 を用い、配置間隔を5cm として、配置本数のみを变化させた供試体である。図-4 にフーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋比 ( $p_{w2} = A_{s2} / b \cdot d_1$ , ここで  $A_{s2}$ : フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の断面積,  $b$ : 有効幅<sup>1)</sup>  $2(X_1 - X_3/2)$ ,  $d_1$ : 主鉄筋のフーチング上面からの距離) と  $P_{max}'$  との関係を示す。これより、本実験範囲内 ( $p_{w2} \leq 2.5\%$ ) ではあるが、 $p_{w2}$  が増大すれば  $P_{max}'$  も増大することが認められる。

b) フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の配置範囲

供試体No.4,7~10の5体は、供試体の形状寸法及び主鉄筋量は一定とし、フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の径と配置本数及び配置範囲を变化させたものである。フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の配置範囲と  $P_{max}'$  との関係を図-5 に示す。なお、この場合の  $P_{max}'$  からフーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋比の違いによる影響を取り除くために、せん断耐力は主鉄筋のせん断耐力に及ぼす効果と同様であると考え  $p_{w2}$  の1/3乗に比例するとして、供試体No.4の  $p_{w2}$  (:1.55%) を基準に、コンクリート強度の場合と同様に補正を行っている。これより、鉄筋の径と配置本数及び配置範囲の变化にかかわらず各供試体の  $P_{max}'$  は多少ばらつきはあるものの、ほぼ等しい値となった。

c) くい橋脚側外縁と橋脚く体前面の距離

図-6 にくいの橋脚側外縁から橋脚く体前面までの距離 ( $X_1'$ ) と主鉄筋のフーチング上面からの距離 ( $d_1$ ) との比 ( $X_1'/d_1$ ) と  $P_{max}'$  との関係を示す。これより、 $X_1'/d_1$  が大きくなると  $P_{max}'$  は小さくなるようである。

3.2 せん断耐力算定手法について

本実験の供試体のようにフーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合の破壊面の中心線の形状は、文献1)で行った実験結果とほぼ同様であることが観察されたので、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合のせん断耐力の算定についても、文献1)と同様に仮想破壊線に沿って微小区間  $\Delta l$  のせん断耐力を積分し、くい1本当りのせん断耐力を算定することとした。せん断耐力算定式を式(1)<sup>1)</sup>、(2)<sup>3)</sup> に示す。

$$V_u = 3.58(a/d)^{-1.166} (f_c' \cdot p_w)^{1/3} \beta_d \cdot b_w \cdot d \quad \text{ただし、} 1.0 < a/d \leq 2.5 \quad (1)$$

$$= 12 / \{1 + 2.35(a/d)^{1.2}\} \cdot (f_c' \cdot p_w)^{1/3} \beta_d \cdot b_w \cdot d \quad 0 \leq a/d \leq 1.0 \quad (2)$$

ここで、 $V_u$ : 微小区間のせん断耐力

a:せん断スパン (図-7において、N点のせん断スパンは $\overline{CNB}$ となる)

d:有効高さ

$f_c'$ :コンクリートの圧縮強度

$p_w$ :鉄筋比  $=A_s/b_w \cdot d$  (%)

$A_s$ :軸方向鉄筋の断面積

$b_w$ :微小区間のはりの幅 ( $\Delta l$ )

$\beta_d:(100/d)^{1/4}$

上式の適用において、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合の $p_w$ については、式(3)とした。

$$p_w = p_{w1} + p_{w2} \cdot d_2/d_1 \quad (3)$$

ここで、 $p_{w1} = A_{sx1}/b_x \cdot d_1$ 、 $p_{w2} = A_{sx2}/b_x \cdot d_1$

$p_{w1}$ :主鉄筋比 (%)

$p_{w2}$ :フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋比 (%)

$A_{sx1}$ :主鉄筋 1 本当りりの断面積

$A_{sx2}$ :フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋 1 本当りりの断面積

$b_x$ :フーチングに配置した各軸方向鉄筋 1 本当りりの有効範囲で、隣接した軸方向鉄筋までの中心間距離の和とした。

(図-8において②番目の鉄筋 $A_{sx2}$

の有効範囲は $b_x = (s_1 + s_2)/2$ となる)

$d_1$ :主鉄筋のフーチング上面からの距離

$d_2$ :フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋のフーチング上面からの距離

また、式(1)、(2)中の $d$ については $d_1$ とした。

以上により求めたせん断耐力の計算値 $P_{cal}$ を、表-1に示す。

### 3.3 せん断耐力の計算値と実験値との比較

3.2により求めた計算値 $P_{cal}$ と実験値 $P_{max}$ との比 $P_{max}/P_{cal}$ を表-1に示す。

本実験で着目した主な点と $P_{max}/P_{cal}$ の値の関係について以下に示す。

図-9に全供試体におけるフーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋比 $p_{w2}$ と $P_{max}/P_{cal}$

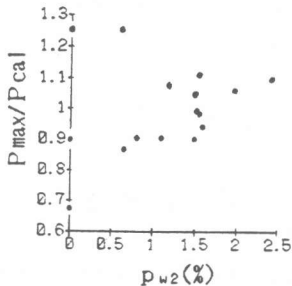


図-9  $P_{max}/P_{cal} \sim p_{w2}$

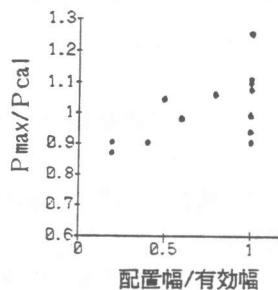


図-10  $P_{max}/P_{cal} \sim$  配置幅/有効幅

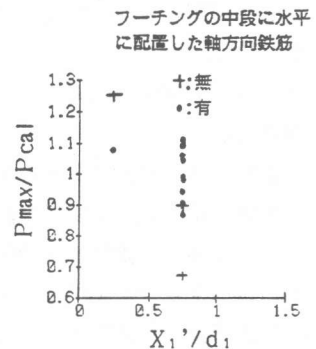


図-11  $P_{max}/P_{cal} \sim X_1'/d_1$

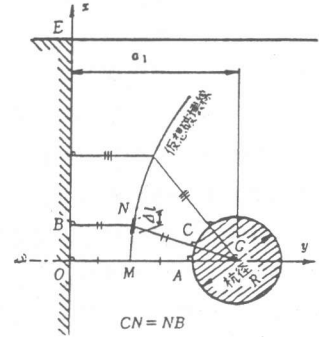


図-7 破壊面の平面形状

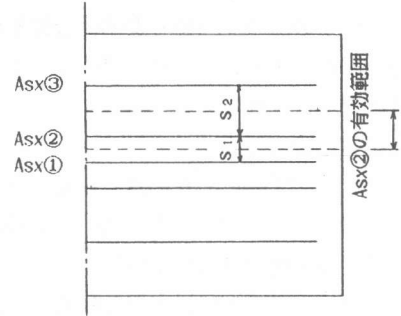


図-8 フーチングに配置した軸方向鉄筋の有効範囲の考え方

の関係を示している。これより、 $p_{w2}$ が0~2.5%の範囲内において、 $P_{max}/P_{cal}$ の値は1.0付近に分布していることが分かる。

図-10は供試体No.1,11,14を除く全供試体におけるフーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の配置幅と有効幅との比(配置幅/有効幅)と $P_{max}/P_{cal}$ の関係を示したものである。これより、配置幅の変化にかかわらず、ほぼ $P_{max}/P_{cal}$ の値は1.0付近にばらついており、フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の有効範囲は配置幅/有効幅が0.2~1.0の範囲内においては有効であると思われる。

図-11に全供試体におけるくの橋脚側外縁から橋脚く体前面までの距離 $X_1'$ と主鉄筋のフーチング上面からの距離 $d_1$ との比 $X_1'/d_1$ と $P_{max}/P_{cal}$ の値を示す。これより、 $X_1'/d_1$ が0.25の場合は0.75の場合より若干大きくなっているとも思われるが安全側でもあり、ほぼ本手法により、 $X_1'/d_1$ が0.25付近までのフーチングについても、せん断耐力を算定できるものと思われる。

本実験のフーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置し、せん断補強を行った供試体13体の $P_{max}/P_{cal}$ の値の平均値と変動係数はそれぞれ1.01、10.4%となり、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合のフーチングのせん断耐力について、本手法により算定できると思われる結果が得られた。

#### 4. まとめ

フーチングのせん断補強として、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合の、フーチングのせん断破壊性状及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

フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合でも、せん断破壊面の中心線の形状は、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置しない場合とほぼ同様であり、せん断破壊面の中心線の形状は図-3に示す仮想破壊線と比較的良く一致しているようである。

また、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置した場合のひびわれ発生状況及び破壊性状については、せん断補強を行っていない場合とほぼ同様な破壊面を形成するが、せん断補強を行っていない場合には比較的せいの性的な破壊を示すのに対し、フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置している場合には、ひびわれ面が形成された後においても、さらに荷重の増大に耐えているようである。

##### (2) せん断耐力算定手法について

フーチングの中段に水平な軸方向鉄筋を配置し、せん断補強を行った場合のせん断耐力については、3.2で示した手法により、フーチングの中段に水平に配置した軸方向鉄筋の補強効果を(3)式で評価することにより算定できると思われる。

最後に本実験を行うにあたりお世話になった旧国鉄東京第一工事局及びオリエンタルコンクリート(株)の関係者の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 石橋忠良・松田好史・斉藤啓一：小数本のくのを用いたフーチングのせん断設計について、土木学会論文集 第337号 p.p.197~204、1983.9
- 2) 石橋忠良・斉藤啓一・寺田年夫：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、コンクリート工学年次講演会論文集 9-2 p.p.311~316、1987.6
- 3) 石橋忠良・斉藤啓一・丸山久一：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論文集 p.p.517~520、1985