

# 論文 コンクリート応力場と打設方向が異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響

壹岐直之\*<sup>1</sup>・清宮 理\*<sup>2</sup>・山田昌郎\*<sup>3</sup>

**要旨：**コンクリートに埋込まれた異形鉄筋の付着特性に影響を及ぼす要因とその影響の程度を確認するために、載荷実験を行った。実験要因は、コンクリートの応力場、コンクリート打設時の鉄筋の向きである。実験での鉄筋ひずみ分布から付着応力 $\tau$ とすべり関係を近似し、最大付着応力を推定した。その結果、コンクリートが引張応力場での最大付着応力は圧縮応力場での70%程度となり、鉄筋軸を水平にしてコンクリートを打設した場合での最大付着応力は鉛直にして打設した場合での80%程度となることが判明した。  
**キーワード：**付着応力、すべり、載荷実験、コンクリート応力場、打設方向

## 1. まえがき

コンクリート構造物に発生したひびわれの幅は、耐久性や機能性の観点から重要な因子であり、設計において精度の良いひびわれ幅の予測方法が必要である。各種基準<sup>1)</sup>でのひびわれ幅算定式は、ひびわれ間隔と鉄筋の平均ひずみの積で表され、ひびわれの定常状態を対象としている。さらに精度の良いひびわれ幅、および定常状態に達するまでのひびわれ幅の予測を行うためには、鉄筋ひずみの分布を把握しなければならない。

鉄筋ひずみの分布を把握するには、付着応力分布を推定する必要がある。一般に、付着応力 $\tau$ はすべり $S$ の関数として表され、これまでに多くの付着応力とすべりとの関係<sup>2) 3)</sup>\* (以下、 $\tau$ - $S$ 関係と称する)が提案されている。これらの式の多くは、鉄筋を鉛直にしてコンクリートを打設した試験体での引抜試験を基にしている。この場合、コンクリートは圧縮応力場であり、鉄筋近傍の内部ひびわれの発生は抑えられる。一方、コンクリートが引張応力場では内部ひびわれは発生しやすい状況下にある。ひびわれの発生した部材では、コンクリートは引張応力場にあり、ひびわれ幅の算定に用いる $\tau$ - $S$ 関係は、コンクリートが引張応力場にある実験結果を基とすべきである。このためには、コンクリートの応力場が付着特性に及ぼす影響を確認する必要がある。また、一般に鉄筋を水平にしてコンクリートを打設するとコンクリート硬化時の沈降やブリーディング等によって付着性能の低下が考えられる。コンクリート打設時の鉄筋の向きの違いが、付着特性に及ぼす影響を確認する必要がある。

## 2. 実験概要

### 2. 1 実験要因および載荷方法

試験体は9体で、各々の試験体の実験要因を表-1に示す。載荷方法はコンクリートの応力状態および境界条件の違いによって3種類とし、コンクリート打設時の鉄筋の向きは水平および鉛直の2種類とした。

載荷方法を図-1に示す。両側引張試験は、試験体を載荷用治具内に水平に配置し、センタホー

\*1 若築建設(株) 土木本部設計部設計第4課 (元港湾技研研修生)、 (正会員)

\*2 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長、 工博、 (正会員)

\*3 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室、 工修、 (正会員)

ルジャッキで鉄筋に軸引張力を載荷し、その抗力は外部にとった。このため、コンクリートは鉄筋から伝達される力によって引張の応力場となる。一方、両側引抜試験は、水平に置いた試験体の左右にセンターホールジャッキを配置し、鉄筋に軸引張力を載荷し、その抗力はコンクリートに圧縮力として載荷した。このため、コンクリートは載荷軸方向に拘束力を受け、コンクリートの応力場は圧縮となる。また、片側引抜試験は、水平に置いた試験体の左側にセンターホールジャッキを配置し、鉄筋に軸引張力を載荷した。鉄筋軸引張力の抗力はコンクリートに圧縮力として載荷し、その抗力はコンクリートに圧縮力として載荷した。このため、コンクリートは鉄筋から伝達される力によって圧縮の応力場となる。

鉄筋を鉛直にして打設した試験体では、左側が打設時の上面である。片側引抜試験では、鉄筋の引抜方向はコンクリート打設方向の逆である。

### 2. 3 試験体および計測方法

試験体のコンクリートの断面は30\*30cm および45\*45cm の正方形であり、断面の中央に引張鉄筋を埋め込んだ。図-2に45\*45cmの断面の試験体の形状寸法を示す。引張鉄筋はネジ節鉄筋 D19 SD2 95A を使用した。引張鉄筋の直径D=1.91cm、弾性係数Es=181MPa、降伏強度fy=358MPaであった。引張鉄筋とコンクリートの定着長は76.4cm (40・D) とした。両側引抜試験および片側引抜試験では、 $\tau$ -S 関係に及ぼす載荷端の影響を取り除くために、 $\phi 23$ cmのシース管を用いて19.1cm (10・D) の非付着区間を設けた。コンクリートの配合および強度を表-2に示す。ここで、 $f_c'$  はコンクリート圧縮強度である。コンクリートの配合は試験体すべて同一のものであるが、実験が材令25日から55日と長期にわたったため、時間の経過に伴い試験時の圧縮強度が増加した。各試験体のコンクリート圧縮強度は、実験開始日と実験終了日に行った試験の結果と時間の関係を直線で補間した。

引張鉄筋のひずみは、図-1に示す箇所に貼り付けたひずみゲージで計測した。ひずみゲージの間

表-1 実験要因の組合せと試験体記号

記号	載荷方法	コンクリート打設時の鉄筋の向き	コンクリートの断面形状
TH-30	両側引張	水平	30*30cm
TH-45			45*45cm
TV-45		鉛直	45*45cm
BH-30	両側引抜	水平	30*30cm
BH-45			45*45cm
BV-45		鉛直	45*45cm
PH-30	片側引張	水平	30*30cm
PH-45			45*45cm
PV-45		鉛直	45*45cm

表-2 コンクリートの配合

W/C [%]	S/A [%]	単位置 [kgf/m <sup>3</sup> ]				$f_c'$ [MPa] 開始時~終了時
		W	C	S	G	
60.0	47.0	165	275	871	993	29.41 ~ 33.04

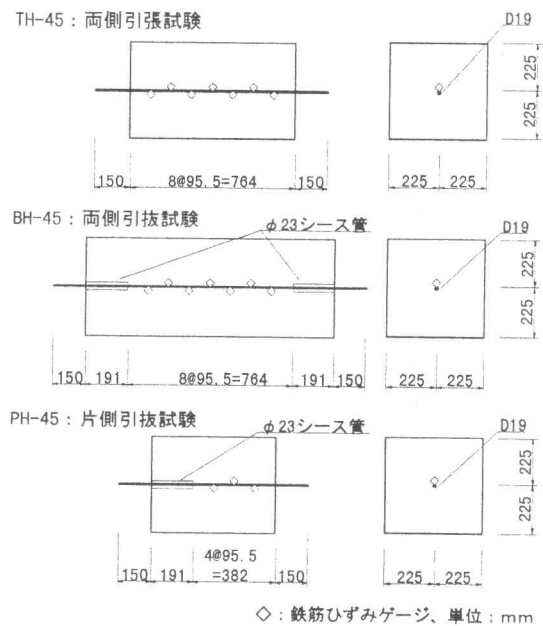


図-1 試験体および鉄筋ひずみ計測位置

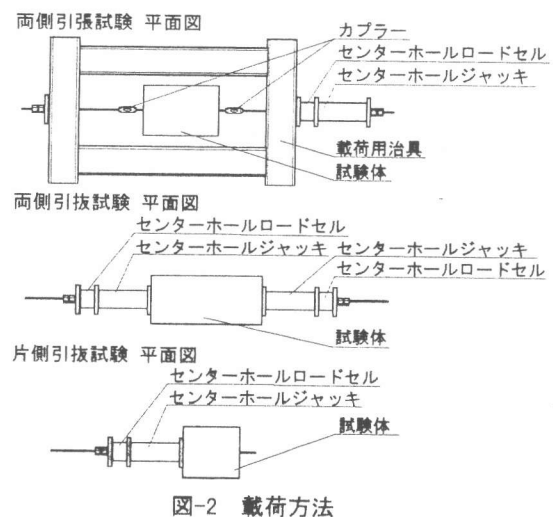


図-2 載荷方法

隔は9.55cm (5・D) とし、載荷中に鉄筋の偏心がないことを確認するために千鳥状に貼り付けた。ひずみゲージの貼り付けには、山尾・周らの方法<sup>4)</sup>を参考にした。載荷荷重はセンターホールロードセルで計測した。各試験体ともに、最大荷重は鉄筋降伏荷重以下の 100kN (10.2tf) とし、5kNごとに鉄筋ひずみを計測した。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみ  $\varepsilon$  の分布の実験結果を図-3に示す。載荷端(20・D)でのひずみは、載荷荷重を鉄筋の断面積および弾性係数で除した値を用いた。ひずみ分布曲線の決定方法は、既往の研究とほぼ同じである。ひずみ分布曲線は、着目する計測点を含む近傍の3点を通る放物線で補間した。補間した放物線の範囲は、着目する計測点から左右に計測点間の距離の半分の区間とした。このため、ひずみ分布曲線が測点間の中央で不連続となったが、この曲線は $\tau$ -S関係を決定するためのものであり、 $\tau$ およびSを算定する上ではひずみ分布曲線が不連続であることは問題とはならない。

両側引張試験でのひずみ分布は、両側引抜試験および片側引抜試験のひずみ分布と比較して傾きは緩かった。また、80kNでの5・Dの位置の鉄筋ひずみは、両側引張試験では 200  $\mu$ 程度であったが、両側引抜試験および片側引抜試験では PH-45を除くとほぼ0であった。

#### 3. 2 $\tau$ -S関係

付着応力 $\tau$ は、前述の鉄筋ひずみ分布の傾きから求め、すべりSはひずみ分布曲線を積分して求めた。ここで、積分の基点、すなわちS=0となる位置は鉄筋ひずみが最小となる位置とした。 $\tau$ -S関係の実験結果を図-4に示す。これらの図に示した $\tau$ およびSは、境界条件S=0かつ $\varepsilon=0$ を満たすとみなせる80kN以下のものである。

解析による $\tau$ -S関係を図-4(図中では、解析 $\alpha=1.0$ )に示す。 $\tau$ -S関係の解析には島・周らの提案する式(1)<sup>3)</sup>を用いた。この $\tau$ -S関係式の適用には、境界条件S=0かつ $\varepsilon=0$ を満足する必要がある。

$$\tau = 0.9 \cdot f_c' \cdot \left( \frac{S}{D} \right)^{2/3} \cdot [1 - \exp\{-40 \cdot (S/D)^{0.6}\}] \quad (1)$$

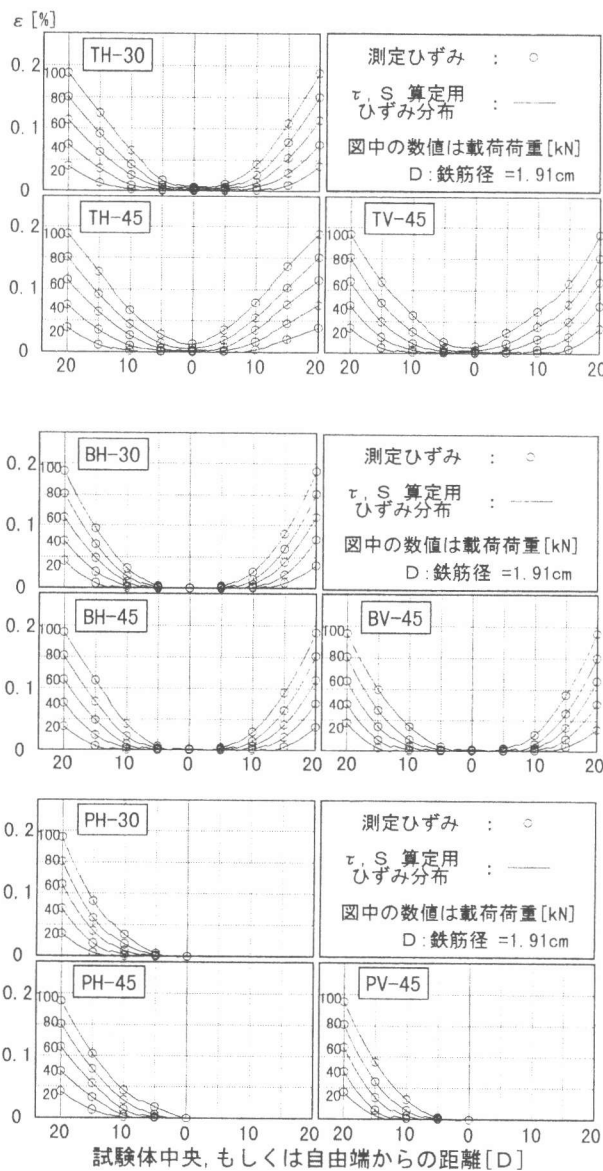


図-3 鉄筋ひずみ分布

PV-45 は、島・周らの実験条件とほぼ同じである。PV-45 の $\tau$ - $S$ 関係は、島・周らの提案式を用いた解析結果とほぼ一致し、さらに、荷重80kNでの $\tau/fc'$ および $S/D$ もほぼ一致した。しかし、両側引張試験での $\tau$ - $S$ 関係は解析結果と異なり、同一の $S/D$ における $\tau/fc'$ はかなり小さい値であった。また、PH-45 の $\tau$ - $S$ 関係も、同一の $S/D$ における $\tau/fc'$ はかなり小さい値であった。

### 3.3 最大付着応力

実験での $\tau$ - $S$ 関係を定量的に評価するため、最小自乗法により各試験体の $\tau$ - $S$ 関係を近似し、最大付着応力 $\tau_{max}$ を推定した。ここで、実験での $\tau$ - $S$ 関係は式(1)の右辺に係数 $\alpha$ を乗じた式(2)に従うとした。すなわち、実験条件にかかわらず、実験での付着応力 $\tau$ は式(1)を用いてすべり $S$ から算定される値を定数倍( $\alpha$ 倍)した値であると仮定して $\tau$ - $S$ 関係を近似した。近似には、荷重80kN以下での、試験体中央もしくは自由端から $10 \cdot D$ と $15 \cdot D$ の位置の $\tau$ および $S$ を用いた。

近似により決定した $\alpha$ を式(2)に代入して $\tau$ - $S$ 関係を解析した結果を図-4(図中では、解析 $\alpha$ :近似)に示す。近似による $\alpha$ を用いた解析結果は、式(1)を $\tau/fc'$ の軸に関して定数倍したものであるから、実験による $\tau$ - $S$ 関係とほぼ一致したことは当然である。さらに、解析による80kNでの $\tau/fc'$ および $S/D$ の値も実験結果とほぼ一致した。

$$\tau = \alpha \cdot \tau_0 \cdot [1 - \exp\{-40 \cdot (S/D)^{0.6}\}] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \alpha &= \tau_{max} / \tau_0 \\ \tau_0 &= 0.9 \cdot fc'^{2/3} \end{aligned}$$

最大付着応力 $\tau_{max}$ とコンクリート圧縮強度 $fc'$ との関係を図-5に示す。BH-30, BV-45, PH-30, およびPV-45 での $\tau_{max}$ は、9.0~10.3MPaであった。これは、式(1)での最大付着応力に相当する $0.9 \cdot fc'^{2/3}$ とほぼ一致した。しかし、両側引張試験TH

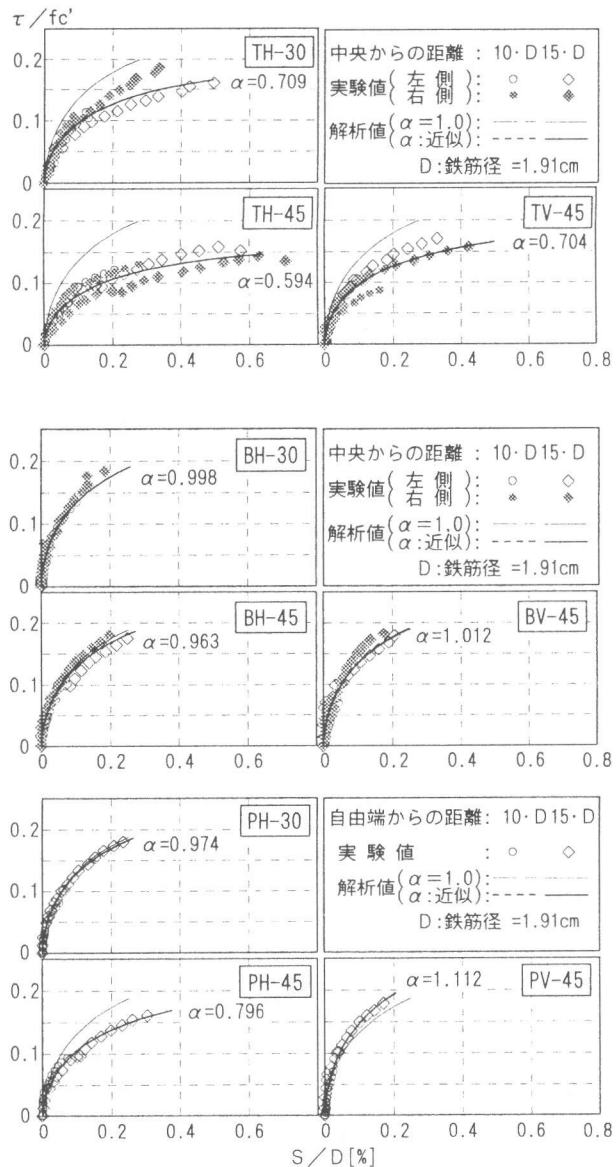


図-4 両側引張試験での付着応力-すべり関係

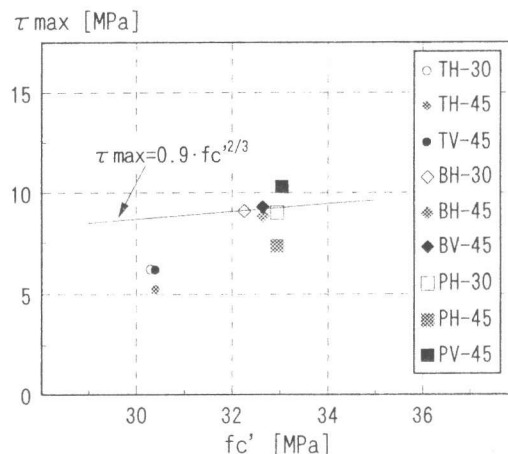


図-5 最大付着応力とコンクリート強度の関係

-30 およびTV-45 での  $\tau_{max}$  は6.2MPa程度であり、 $\tau_{max}=0.9 \cdot f_c^{2/3}$  の算定値よりもかなり小さい値であった。また、45\*45cm の断面で鉄筋を水平にして打設した試験体TH-45, BH-45およびPH-45の  $\tau_{max}$  は、おなじ载荷方法での試験体と比較して小さい値であった。図-6での  $\tau_{max}$  のばらつきは、コンクリート強度の影響ではなく、本実験での実験要因が鉄筋の付着特性に影響を及ぼしたためであると考える。

#### 4. 実験要因が $\tau-S$ 関係に及ぼす影響

##### 4. 1 コンクリート応力場の影響

$\alpha$  と载荷方法の関係を図-6に示す。 $\alpha$  について、両側引張試験と両側引抜試験とは異なり、両側引抜試験と片側引抜試験とはほぼ同じであった。

両側引張試験と両側引抜試験の違いは、コンクリートの応力場の違いである。コンクリートが圧縮応力場の場合では、鉄筋軸に直角方向の内部ひびわれの発生が抑制され、内部ひびわれの発生しやすい引張応力場の場合に比べて、付着特性が良くなる。本実験で、引張応力場での  $\alpha$  は圧縮応力場での  $\alpha$  の61~75% であった。引張応力場でのひびわれ幅を算定する上で、引抜試験を基にした既往の  $\tau-S$  関係式を用いる場合には、すべりから算定される付着応力を低減する必要がある。本研究では、 $\tau-S$  曲線の近似範囲を境界条件  $S=0$  かつ  $\varepsilon=0$  を満足する荷重に限定したため、両側引抜試験と片側引抜試験との  $\tau-S$  関係には違いを生じなかった。

##### 4. 2 打設時の鉄筋の向きの影響

$\alpha$  と打設時の鉄筋の向きとの関係を図-7に示す。鉄筋軸を水平にして打設した試験体での  $\alpha$  の、鉄筋軸を鉛直にして打設した試験体での  $\alpha$  に対する比率は、両側引張試験では 84%、両側引抜試験では 95%、片側引抜試験では 72%であった。鉄筋を水平にして打設した場合は、鉛直にして打設した場合と比較して  $\tau_{max}$  は低下した。

しかし、45\*45cm の断面を持つ鉛直打設の試験体と水平打設で 30\*30cmの試験体とを比較すると、比率は89~100%であり、ほとんど差はない。一般的に打設高さが高いほどブリージングやコンクリートの硬化にともなう沈降によって、付着性能が低下する。関・赤塚の研究<sup>5)</sup>では、鉄筋より下側のコンクリートの厚さを 7.5cmから22.5cmにすることで、付着強度は 70%程度になるとしている。

したがって、45\*45cm の断面を持つ試験体では、水平打設の試験体では前述の打設高さの影響が大きいため、打設方向が  $\tau-S$  関係に影響を及ぼすと考える。また、比較的打設高さの低い試

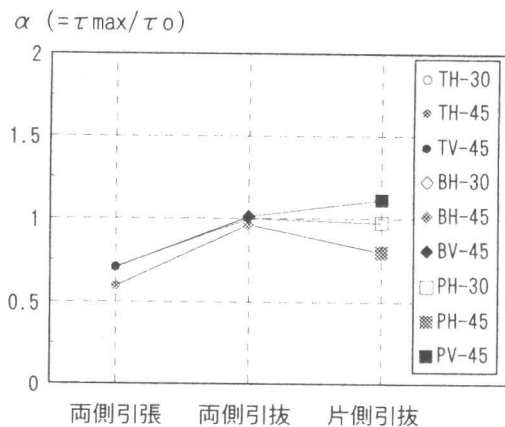


図-6  $\alpha$  と载荷方法の関係

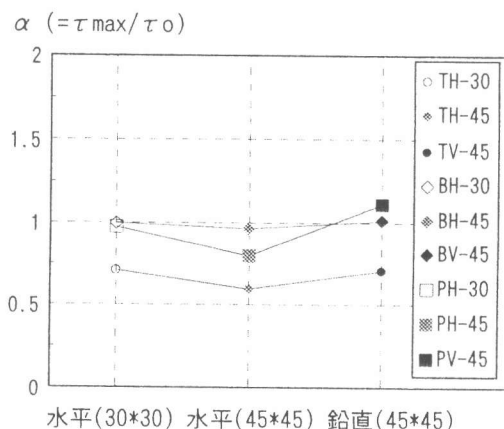


図-7  $\alpha$  と打設時の鉄筋の向きとの関係

験体（本実験では 30\*30cmの断面）では、水平打設での打設高さの影響が小さいため、打設方向は $\tau$ -S 関係に影響を及ぼさないと考える。

## 5. 結論

$\tau$ -S 関係に影響を及ぼす要因とその影響の程度を確認するため、コンクリートの応力場およびコンクリート打設時の鉄筋の向きを要因とした載荷実験を行った。実験結果の定量的な評価を行ったところ、本実験の範囲内において以下に示す結論を得た。

①コンクリートの応力場は $\tau$ -S 関係に大きな影響を及ぼす。コンクリートが圧縮応力場での $\tau$ -S 関係は島・周らの提案式とほぼ一致するが、引張応力場での付着応力は同一のすべりにおいて圧縮応力場での付着応力よりかなり小さい。本実験では、引張応力場での付着応力は圧縮応力場での値の 61~75%であった。

②打設時の鉄筋の向きは、引張鉄筋を水平にして打設したときに打設高さが高い場合には、 $\tau$ -S 関係に影響を及ぼす。打設高さが高い場合、鉄筋を水平にした場合では、鉄筋を鉛直にして場合と比較して、同一のすべりに対する付着応力は 72~95% であった。一方、打設高さが低い場合には、コンクリートの打設方向は $\tau$ -S 関係にほとんど影響を及ぼさない

## 参考文献

- [1] 例えば、コンクリート標準示方書，平成3年版，設計編，pp.85~88，土木学会
- [2] 六車 熙，森田司朗，富田幸次郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，No.131，pp.1~8，1967.1
- [3] 島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシュパなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165~174，1987.2
- [4] 山尾芳秀，周 礼良，二羽淳一郎：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.343，pp.219~228，1984.3
- [5] 関 博，赤塚雄三：コンクリート柱に水平に埋め込んだ異形鉄筋の付着強度，土木学会論文報告集，No.164，pp.45~51，1969.5
- [6] 森田司朗：鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究，京都大学学位論文，1968.4
- [7] 山本康弘，中島 亨：鉄筋コンクリートの減力時における付着応力と復元特性に関する研究，コンクリート・ジャーナル，Vol.12，No.11，pp.89~99，1974.11
- [8] 後藤幸正，大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.294，pp.85~100，1980.2
- [9] 島 弘，周 礼良，岡村 甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.213~220，1987.2
- [10] 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，第1版，技報堂出版株式会社，pp.159~182，1991.5
- [11] 前田匡樹，小谷俊介，青山博之：異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着強度算定式，構造工学論文集，Vol.40B，pp.277~284，1994.3
- [12] 壹岐直之，清宮 理，山田昌郎：ポストテンション導入による初期ひびわれの低減に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，第16巻1号，pp.1043~1048，1994.6
- [13] 清宮 理，山田昌郎，壹岐直之：コンクリート部材のひびわれ幅算定方法とひびわれ対策の効果，港湾技術研究所報告，Vol.33，No.4，1994.12