

V-5 横方向補強を有する異形鉄筋の付着強度について

北海道大学 正員 角田与史雄

北海道大学 正員 古内 仁

北海道大学 木村 勉

1. まえがき

鉄筋とコンクリートとの間の付着作用は、鉄筋コンクリートが構造用材料として成立するための基本であることから、過去に多くの研究が行われている。しかし、付着作用は非常に複雑な現象であるため、今後解明すべき点が多く残されている。

異形鉄筋の付着破壊は様々な形態で起こり得るが、比較的かぶりの小さい場合にはかぶりコンクリートの割裂破壊によるのが普通である。このような場合、割裂ひびわれを横切るように横方向鉄筋が配置されていれば、付着強度を増加させたり、あるいは破壊時の変形能力を高めることができることが知られている。しかし、横方向鉄筋によるこの種の働きについては、不明確な点が多いのが現状である。

従来一般に、横方向鉄筋があるときの付着強度は、横方向鉄筋がないときの付着強度に横方向鉄筋の効果が加算されるという一種の累加強度の考え方が用いられている。しかし著者らはさきに、鉄筋コンクリート（以下ではRCと記す）はりの主鉄筋の重ね継手の付着作用を例にとり、横方向鉄筋の効果について実験的に調べたが、そこでは横方向鉄筋がある量よりも少ない時は効果が現れず、必ずしも累加強度の概念が広く適用できるとは限らない結果が示された。

本研究は、上記の性質についてさらに検討を加えるため、主鉄筋の重ね継手の部分のかぶりコンクリートを無くしたはり供試体を製作し、付着破壊実験を行ったものである。

2. 実験方法

本研究に用いた供試体は、図-1に示すように、幅20cm、高さ20cm、有効高さ16cmの長方形断面をもつRCはりで、主鉄筋は2D19であるが、スパン中央部に重ね継手を設けてある。重ね合せ長さ l は変数で10、20、および30cmの3種とした。この部分のはりには一様な曲げモーメントが作用するよう対称2点荷重とし、せん断スパンにはスターラップを配置してせん断破壊を防いだ。また、重ね継手の部分にも横方向鉄筋としてスターラップを配置したが、その本数 n は変数とし、表-1のように選んだ。その部分におけるスターラップの位置は、重ね合せ長さ l を n で除した各長さの中央位置とした。スターラップにはD10を用いている。また、重ね合せ長さとその両側5cmずつを加えた区間では、底面かぶりコンクリートを取り除いてある。それは、型枠の当該部分に予めスタイロフォームを入れておき、コンクリート硬化後にそれを除去することによった。圧縮鉄筋は供試体No. 1 では2D13、その他では2D25を用いている。鉄筋はいずれも横フシ型の異形棒鋼SD35であるが、No. 8以降の供試体に用いた主鉄筋は、予め引張塑性ひずみを与えて降伏点を無くしてある。

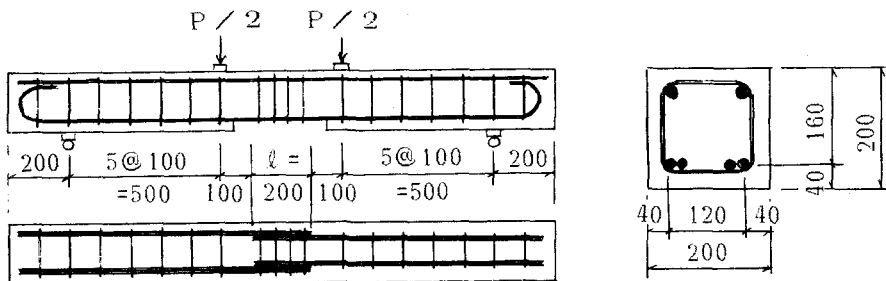


図-1 供試体 No. 4

コンクリートは単位水量 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比52～54%で、早強ポルトランドセメント、川砂および川砂利を用いている。

実験は静的载荷としたが、重ね継手の両側の鉄筋の相対変位（すべり） δ を間接的に知る方法として、重ね継手の両側のコンクリート側面の相対変位を測定した。また、大部分の供試体で重ね継手の部分の主鉄筋およびスターラップのひずみを測定した。図-2にひずみゲージの貼付位置を示す。

3. 実験結果および考察

供試体No. 6 は主鉄筋の降伏後、典型的な曲げ破壊を示した。No. 6および7でも主鉄筋が降伏したが、鉄筋の塑性ひずみがすべりを促進したためか、通常の曲げ破壊よりも過早な曲げ破壊が生じた。前述のように供試体No. 8以後の実験では予め降伏させて降伏点を取り除いた鉄筋を主鉄筋に用いたのは曲げ破壊を防ぐためであり、それにより上記以外の供試体では主鉄筋の重ね継手の付着破壊により耐力が定まった。各供試体の最大荷重 P_u およびコンクリート圧縮強度 f_c' の値を表-1に示す。

主鉄筋のひずみの測定結果の一例を図-3に示す。この図に見られる傾向は他の供試体でも同様であったが、4本の主鉄筋のひずみの差は比較的小さく、各鉄筋にほぼ様な引張力が作用したことが分かった。また、図には慣用の応力理論（状態Ⅱの理論）による計算値も示してあるが、実測値は計算値と良い一致を示している。一般に主鉄筋のひずみは曲げひびわれ発生後、全断面有効とする理論値から慣用理論値への過渡状態を強く示すが、本実験の場合には底面かぶりコンクリートを取り除いてあるので、低い荷重段階から実測値は慣用理論値に近い値をとっている。以上の結果より、重ね継手に作用した主鉄筋の引張力としては慣用の応力理論で計算される値を用いることにした。このとき、最大荷重 P_u から計算した付着強度 f_a の測定値は表-1に示す通りである。

重ね継手部のスターラップのひずみの測定結果の例を図-4に示す。ここに示した3本の供試体はいずれも重ね合せ長さ $l=20\text{cm}$ と一定で、スターラップの本数 n のみが異なっている。図中のひずみ ε は n 本の主鉄筋のひずみの平均値を表す。3本の供試体ではいずれも $P=5\text{tf}$ 前後からスターラップのひずみの増加が目立つようになっており、スターラップの量にほとんど影響されず、ほぼ同時にその効果が現れることがわかる。しかし、その後の荷重の増加に伴う性状は、スターラップ量により大きな相違が見られ、 $n=2$ のNo. 5では $P=6\text{tf}$ 頃にひずみの急激な増加が起こり、それが付着破壊へ直結している。それに対して n の大きいNo. 3と4ではスターラップのひずみの増加は緩やかであり、スターラップによる拘束効果により $P=10\text{tf}$ 以上まで付着破壊が防止されている。図に示されているのは平均ひずみであり、個々のスターラップのひずみには相違があるので断定はできないが、大略的に言えば、 $n=4$ のNo. 4ではスターラップの降伏が、 $n=6$ のNo. 3では主鉄筋の降伏が終局耐力を支配したようである。

表-1 供試体および実験結果

供試体 No.	l (cm)	n	f_c'	P_u (tf)	f_a
1	10	4	396	7.2	108.0
2	10	2	359	5.8	88.8
3	20	6	434	11.3*	85.6
4	20	4	432	10.2	77.3
5	20	2	361	7.7	58.7
6	30	6	407	12.8*	64.8
7	30	3	306	10.9*	55.6
8	10	4	313	7.8	119.7
9	10	2	296	6.0	91.9
10	20	6	315	12.9	97.8
11	20	4	333	9.8	74.3
12	20	8	341	12.9	97.7

f_c' (kg/cm^2), f_a (kg/cm^2), * 曲げ破壊

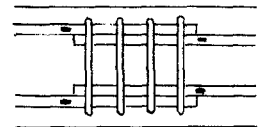


図-2 ゲージ位置

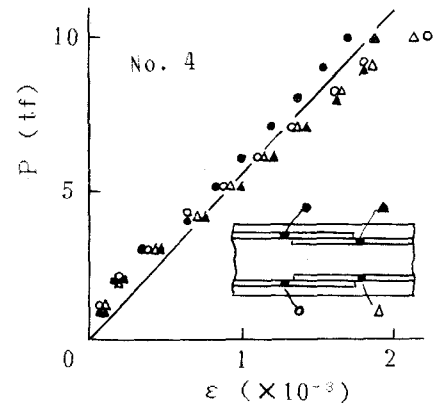


図-3 主鉄筋のひずみ

図-5は、上述の3本の供試体の重ね継手における主鉄筋の相対変位 δ の測定結果を示したものである。もしも主鉄筋が弾性的に挙動すれば δ は線形性状を示すはずであるから、 δ の非線形性状は主として主鉄筋の付着による滑りが生じたことを意味している。従ってこの図と前の図-4との比較より、主鉄筋が滑り始めたときからスターラップの応力増加が起り、スターラップによる拘束作用が始まることがわかる。また、供試体No. 5に見られるように、スターラップ量が過少な場合には早期にスターラップが降

伏してしまうため有効な拘束効果が発揮されずに終ることがわかる。それに対してスターラップがある程度より多く配置されていれば、スターラップによる横方向変位の拘束のため主鉄筋の滑りが妨げられ、見かけ上付着強度が増加することになる。本実験の場合、一般にスターラップの降伏が主鉄筋の滑りの急増をもたらし、従って付着破壊をもたらしていたが、鉄筋の表面形状やコンクリートの品質によってはスターラップの降伏前に付着破壊が生じる可能性もあると考えられる。

図-6は、個々のスターラップのひずみを示したものである。この図に見られるように、一般に重ね継手の外側に近いスターラップが内側のものより大きなひずみを受ける傾向が観測された。これは重ね合わされた2本の鉄筋の間の相対変位が重ね継手の外側ほど大きいことから容易に理解される性質である。しかし、相対変位が大きくなり、滑りが重ね合せ長さの全体にわたって生じれば、スターラップ全体が拘束作用に加担することになる。

本実験ははりの底面かぶりコンクリートを取り除いているが、実際のはりではかぶりコンクリートに割裂ひびわれが発生し、横方向変位が生じて初めてスターラップは応力を受ける。割裂ひびわれは重ね合せ長さの全長にわたって同時に生じるのではなく、従って現象は本実験の場合より複雑である。しかし、異形鉄筋の付着作用に対して横方向鉄筋が寄与する原理は同じものと考えられる。

次に、横方向補強率 $A_t/s\phi$ と付着強度 f_a との関係を図-7~9に示す。ここに A_t はスターラップの一本当りの断面積、 s はスターラップ間隔、 ϕ は主鉄筋の直径を表す。また、 f_a は各供試体におけるコンクリート強度 f_c' のバラつきを除去するため、付着強度 f_a が $\sqrt{f_c'}$ に比例すると仮定して、次式よりコンクリート強度 300kgf/cm^2 に対する付着強度に換算したものである。

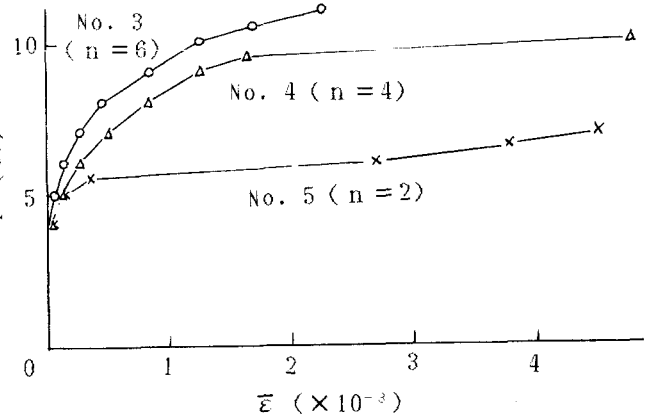


図-4 スターラップのひずみ

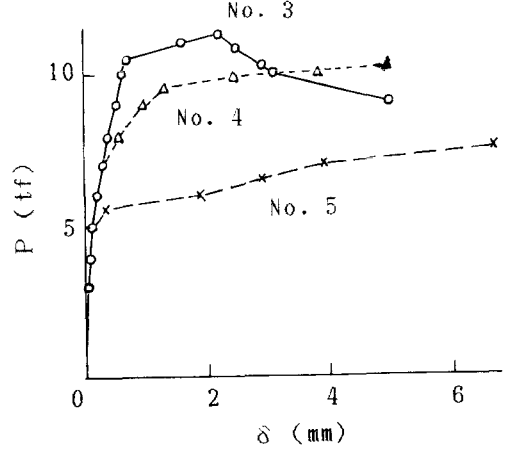


図-5 主鉄筋の相対変位

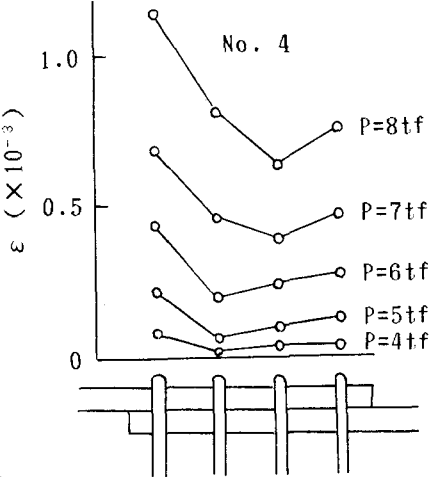


図-6 スターラップのひずみ

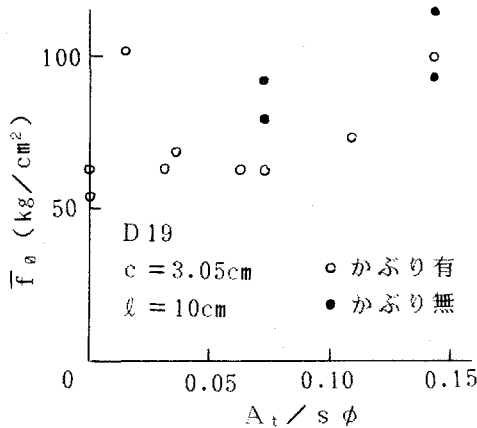


図-7 横方向補強率と付着強度

$$f_a = f_{a0} \sqrt{300 / f_{c'}}.$$

初めの二つの図はそれぞれ $\ell = 10\text{cm}$ および 20cm の場合の結果を示しているが、比較のため過去に著者らが行った底面かぶりコンクリートがある場合の実験結果も合わせて示してある。これによれば、本実験はかぶりコンクリートがないにもかかわらず、かぶりコンクリートがある場合と同程度の付着強度を示していることがわかる。一般に、横方向鉄筋があるときの付着強度は、横方向鉄筋がないときの付着強度に、横方向鉄筋の効果が加算されるという一種の累加強度の考え方が用いられているが、上記の結果はこれに反するものと言える。すなわち、かぶりコンクリートの有無に関係なく同程度の付着強度が得られている場合には、かぶりコンクリートが有っても割裂ひびわれが発達してすでにかぶりコンクリートの付着作用への寄与がかなり低下しているため、かぶりコンクリートが初めから無いのに等しいと考えられるからである。図-9は本実験の結果を一枚の図に集めたものである。データ数が不十分のため明確なことはわからないが、横方向鉄筋が有効に働くときの付着強度は、横方向鉄筋がなく、かぶりコンクリートの割裂破壊に支配されるときよりも、重ね合せ長さ ℓ による影響は小さいように思われる。

4. 結論

本研究は、異形鉄筋の付着強度に対する横方向補強鉄筋の寄与についての基本的な性状を知る目的から、はりの主鉄筋の重ね継手の部分に横方向鉄筋としてのスターラップを配置する代わりに、かぶりコンクリートを無くした供試体を用いて主鉄筋の付着破壊を行ったものである。本研究より得られた主な結果をまとめれば、次のようである。

- 1) 横方向鉄筋量が過少な場合には横方向鉄筋が早期に降伏するため、その効果が小さい。
- 2) かぶりコンクリート無くても、横方向鉄筋を適切に配置することにより、十分な付着強度を得ることができる。
- 3) 横方向鉄筋が有効に働くような場合には、かぶりコンクリートの寄与はほとんど失われていると考えられる。

謝辞 本研究は尾郷 健氏および高原 享氏の多大な助力によって行われた。ここに両氏に対し、深く感謝の意を表する。

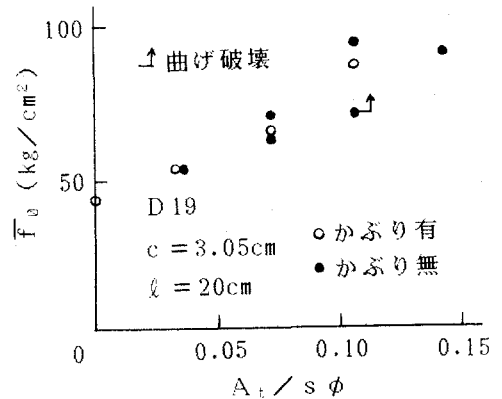


図-8 横方向補強率と付着強度

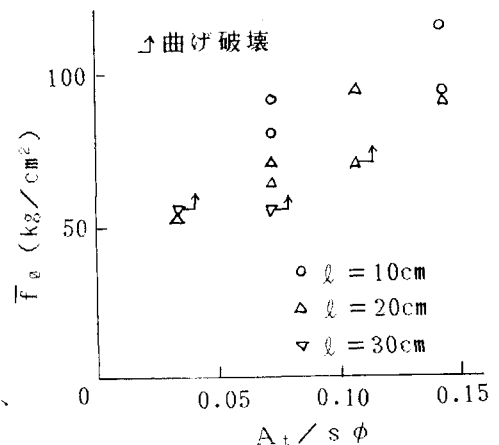


図-9 横方向補強率と付着強度