

論文 横拘束力が補強コンクリートの局所付着割裂性状に及ぼす影響

金久保利之\*1・酒井貴洋\*2・米丸啓介\*3・福山 洋\*4

要旨：実部材中での横拘束力を受ける主筋の局所付着性状を得ることを念頭に置き、横拘束力を一定とした場合の主筋引抜実験を行った。実験因子は、コンクリート強度、横拘束力、主筋種類およびかぶり厚である。実験結果から、付着応力-すべり関係を、コンクリート強度、横拘束力、主筋の節形状で定まるパイリニア型でモデル化した。また、横拘束力やコンクリート強度が増大しても付着応力-すべり曲線の形状はさほど影響を受けない、ひび割れ幅が変化しても最大付着応力時のすべり量に大きな差は見られない、等の知見が得られた。

キーワード：付着割裂, 付着応力, すべり量, 拘束, 節形状

1. はじめに

筆者らは、主筋周辺のコンクリートが割裂によって破壊する付着割裂性状に着目し、付着長のごく短い試験体を用いた主筋引抜実験を通して、補強コンクリート部材の付着性状に関する検討を行っている。現在までに、横補強のない場合（図-1試験体1）<sup>1)</sup>と横補強のある場合（図-1試験体2）<sup>2)</sup>について検討を行い、主筋の付着応力（ $\tau_b$ ）-すべり（ $s$ ）関係をモデル化している。文献2)では、横補強による付着増分を、試験体2より得られた  $\tau_b-s$  関係から、試験体1より得られた  $\tau_b-s$  関係を差し引くことにより求めたが、付着増分における横拘束力の影響に関する検討は十分ではなかった。本報では、試験体3に示すように主筋に横拘束力を直接作用させ、横拘束力が  $\tau_b-s$  関係に与える影響を考察することを目的としている。

異形鉄筋に作用する付着力と横拘束力すなわち割裂力の関係に着目した研究は、文献3)や4)に代表されるように多く見られる。また、周辺コンクリートをス

パイラル筋や鋼管で補強した付着実験も、横拘束下の付着性状を把握しようとする実験と見ることができる。これらの研究の多くでは横拘束力がかかなり大きく、異形鉄筋の付着能力が十分発揮される場合の性状を表すものと思われる。しかし実部材では、横拘束力は周辺コンクリートや横補強筋の強度以上には大きくならないと考えられるし、また通常、かぶりコンクリートの変形拘束は大きくない。本実験では横拘束力を加力中一定に制御し、周辺コンクリートの面外変形を過度に拘束しないよう加力を行った。

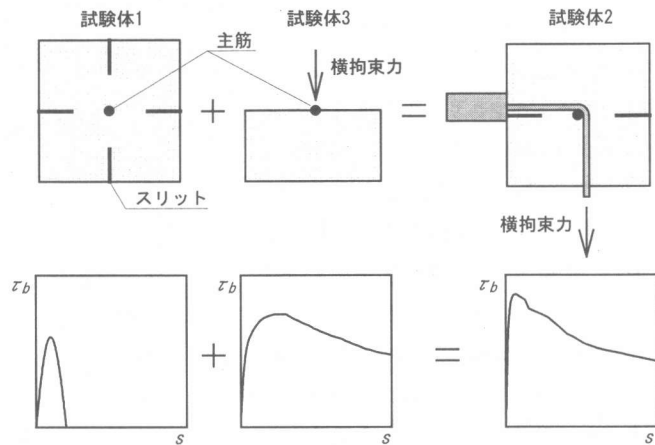


図-1 試験体の断面形状と付着応力-すべり関係

\*1 筑波大学講師 機能工学系 博士(工学) (正会員)

\*2 筑波大学大学院

\*3 清水建設(株) 技術研究所特別プロジェクト部研究員 工修

\*4 建設省建築研究所国際地震工学部主任研究員 工博(正会員)

## 2. 実験計画

試験体および加力・計測方法の概略を図-2に示す。試験体は、中心に主筋(主筋径  $d_b$ )を1本配した  $14d_b \times 14d_b \times 7d_b$  の直方体で、断面中央部に鉄板とウレタンフォームでスリットを設け、図中左右のコンクリートブロックは完全に分離している。試験区間の付着長は  $4d_b$  で、荷重端および自由端の  $1.5d_b$  の区間はビニルパイプにより付着を絶縁した。主筋周辺のコンクリートの面内および面外変形を拘束しないように孔を設けた加力板の上にテフロンシートを介して試験体を設置し、主筋を単調に引抜くことにより加力を行った。本試験体ではかぶりコンクリートに相当する部分はないが、図-1の試験体1および2におけるかぶり厚 ( $C$ : 主筋からスリットまでの距離)は、周辺コンクリートの面内変形拘束という観点から加力板の孔の大きさが対応しており、孔の直径が  $2C+d_b$  にあたる。横拘束力は2個のオイルジャッキによりコンクリートブロックに直接作用させ、加力中、目標値を一定に保つように制御した。計測項目は主筋引張力、横拘束力、自由端主筋すべり量およびひび割れ幅(スリット間変位)である。実験因子は、コンクリート強度(目標圧縮強度 30, 60MPa)、横拘束力(2~12kN)、主筋種類(竹節, ねじ節)およびかぶり厚 ( $C/d_b=1.5, 2.5, 3.5$ )である(表-2参照)。試験体は同一実験因子で3体ずつ作製した。試験体の名称と実験因子の関係を図-3に示す。また、T6025-6試験体では、荷重-変形関係で特徴ある5段階(A~E)で加力を終了して試験体を取り外し、破壊過程の主筋周辺のコンクリートの様子を目視で観察した。試験体数は全62体である。

使用材料の力学的性質を表-1に示す。主筋に

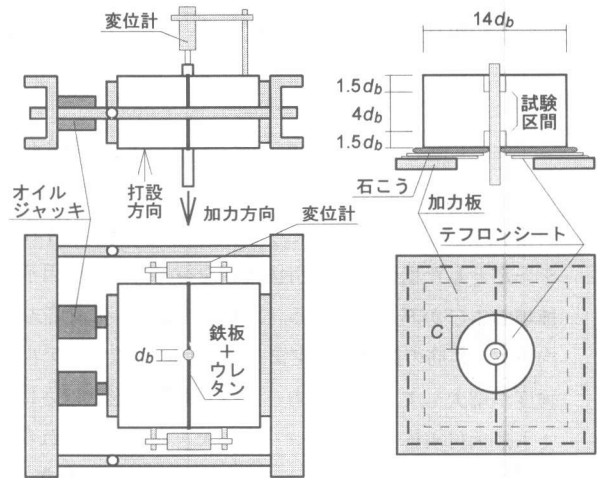


図-2 試験体および加力・計測方法概略

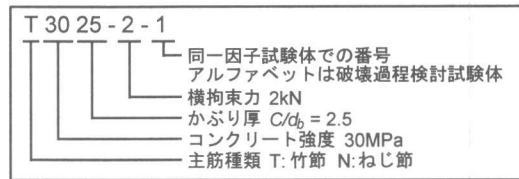


図-3 試験体名称

表-1 材料の力学的性質

コンクリート	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
普通 30MPa	32.9	2.75	23.1
普通 60MPa	62.8	3.60	28.2
主筋 D16 (径, 周長 mm)	降伏強度 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)
竹節 (15.6, 49.0)	399	563	197
ねじ節 (15.7, 49.2)	376	541	197

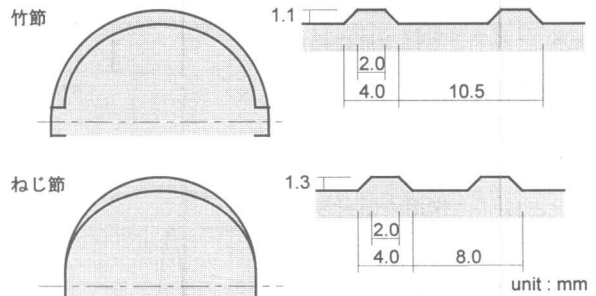


図-4 鉄筋の節形状

は異形鉄筋 D16 を、コンクリートには、粗骨材に最大径 20mm の砕石を用いた、設計強度 30 および 60MPa の普通コンクリートを使用した。なお、

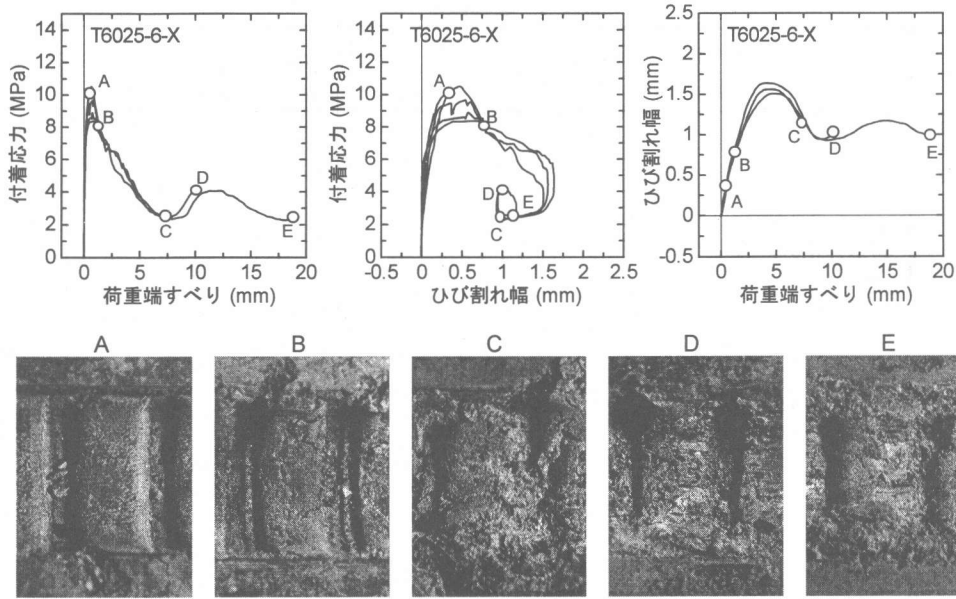


図-5 破壊過程検討試験体の付着応力-変形関係と破壊状況

鉄筋の断面寸法は、試験片の体積を実測し、断面が真円であるとして導出した。また、鉄筋の節の概寸を図-4に示す。鉄筋は、竹節筋における縦リブ位置、ねじ節筋における節なし位置がスリット位置になるように試験体に設置した。

### 3. 実験結果と検討

#### 3.1 破壊過程

60MPaクラスのコンクリートと竹節鉄筋を用いたT6025-6試験体では、荷重-変形関係で特徴ある5段階(A~E)で加力を終了して試験体を取り外し、破壊過程の主筋周辺のコンクリートの様子を観察した。T6025-6試験体の付着応力-荷重端すべり関係、付着応力-ひび割れ幅関係、ひび割れ幅-荷重端すべり関係および主筋周辺コンクリートの破壊状況を、図-5に示す。なお、付着応力は引張荷重を主筋付着全表面積で除した平均付着応力とし、荷重端すべり量は、コンクリートの変形を無視し、試験区間の付着応力を一定と仮定して主筋の伸び量を算出し、自由端すべり量に加えることにより求めた。

本試験体の場合、荷重-変形関係で特徴ある5段階とは、A:最大荷重時、B:最大荷重後急激に

荷重が減少した時、C:その後なだらかに荷重が低下し、荷重が低下しきった時、D:再び荷重が増大し始め、極大値に達した時、E:その後荷重が低下した時、である。それぞれの段階で各変形量と周辺コンクリートの破壊状況を見ると、Aではすべり、ひび割れ幅とも小さく、節間コンクリートの損傷もほとんど見られない。Bではひび割れ幅が増大し、節に当たるコンクリートの前部が粉体化している。Cではすべり量が7mm程度に達し、節間コンクリートのほとんどが損傷を受けて削り取られている。Dではすべり量が10mm程度であることから節の位置が1個分移動した状態であり、前の節とコンクリートの凸部が噛み合い若干荷重が増大していると考えられる。Eでは節が1個分移動した状態でのCと同様の状態と思われる。B~Dにかけてひび割れ幅が1mm以上あることから、節間コンクリートがすべて削り取られるわけではなく、0.数mm程度の厚さは残されている(ひび割れ幅は主筋からのコンクリートの浮きの2倍)。荷重が大きく減少していくA~Cの範囲では、節間コンクリートのせん断力に抵抗する面積(主筋軸方向の抵抗コンクリートの長さ)がすべり量に対して線形に減少していき、付着応力

表-2 実験結果一覧

試験体名	コンクリート強度	主筋種類 断面積	付着長 (mm)	かぶり厚 $C/d_b$	横拘束		最大荷重時				
					横拘束力 (kN)	拘束応力 (MPa)	荷重 (kN)	付着応力 (MPa)	すべり量 (mm)		
									荷重端	自由端	
T3015-2	圧縮 32.9MPa 割裂 2.75MPa	竹節 191mm <sup>2</sup>	64	1.5	2.0	2.00	13.45	4.29	0.609	0.597	
T3015-6					6.0	6.01	24.82	7.92	0.421	0.400	
T3025-2				ねじ節 193mm <sup>2</sup>	2.5	2.0	2.00	12.29	3.92	0.678	0.667
T3025-4						4.0	4.01	20.09	6.41	0.555	0.538
T3025-6					6.0	6.01	21.58	6.88	0.762	0.743	
T3025-8					8.0	8.02	24.98	7.96	0.824	0.803	
T3025-10		10.0			10.02	29.09	9.28	0.533	0.509		
T3025-12		12.0			12.02	30.22	9.64	0.784	0.758		
T3035-6		竹節 191mm <sup>2</sup>		3.5	6.0	6.01	20.53	6.55	0.658	0.641	
T3035-10					10.0	10.02	27.46	8.75	0.848	0.825	
N3025-2				2.5	2.0	1.99	15.71	4.99	0.396	0.383	
N3025-6					6.0	5.98	24.16	7.67	0.398	0.378	
N3025-10	10.0		9.97		30.70	9.75	0.407	0.381			
T6025-2	圧縮 62.8MPa 割裂 3.60MPa		竹節 191mm <sup>2</sup>	2.5	2.0	2.00	22.15	7.06	0.538	0.519	
T6025-4		4.0			4.01	28.36	9.04	0.691	0.667		
T6025-6		6.0			6.01	32.71	10.43	0.655	0.627		
T6025-8		8.0			8.02	38.03	12.13	0.467	0.435		
T6025-10		10.0			10.02	40.12	12.79	0.582	0.548		
T6025-12		12.0			12.02	43.26	13.79	0.437	0.401		
T6025-6-X	2.5	6.0	6.01	29.78	9.50	0.707	0.682				

すべり関係も直線的に減少する関係を持つものと考えられる。ひび割れ幅は、節が節間コンクリートのちょうど半分ほどの位置まで移動したときに最大になると推測される。

3.2 最大付着応力

実験結果の概要を表-2に示す。それぞれの実験値は、同一因子各3体の試験体の平均値である (T6025-6-X 試験体は A~E の5体の試験体の平均値)。なお、拘束応力  $\sigma_l$  は以下の式により算出した。

$$\sigma_l = \frac{P_l}{d_b \cdot l_b} \quad (1)$$

ここで、 $P_l$  : 横拘束力  
 $d_b$  : 主筋径  
 $l_b$  : 付着長

最大付着応力と拘束応力の関係を、図-6に示す。また、最大付着応力をコンクリート割裂強度で無次元化した付着応力比と拘束応力の関係を、図-7に示す。いずれのシリーズの試験体においても、拘束応力が大きくなると最大付着応力は増大する。かぶり厚が小さいほど、また竹節よりはねじ節試験体の方が若干最大付着応力が大きい、大きく影響している因子はコンクリート強度である。最大付着応力をコンクリート割裂強度で

無次元化すると、30MPaクラスのコンクリートと60MPaクラスのコンクリートの影響がほぼ同様に評価できると思われる。全試験体について最小二乗法による回帰計算を行い、図中に示す結果を得た。したがって、最大付着応力を次式で予測

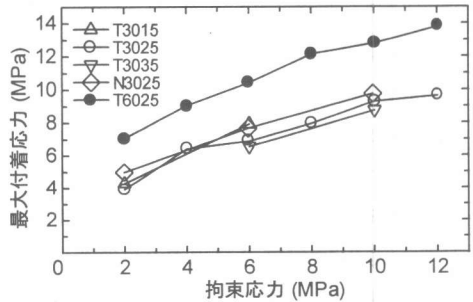


図-6 最大付着応力と横拘束力の関係

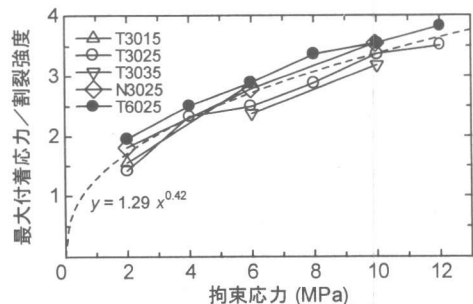


図-7 最大付着応力比と横拘束力の関係

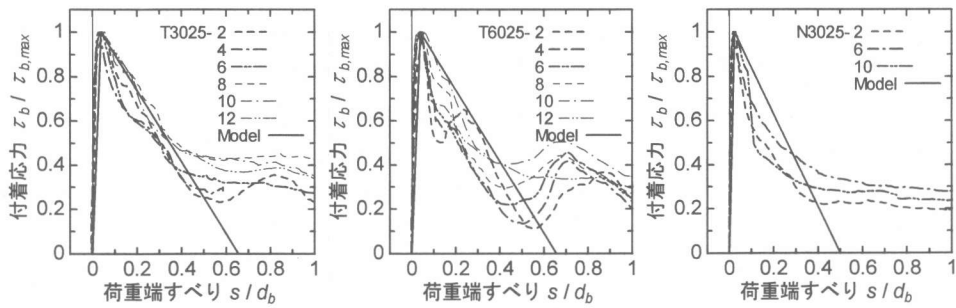


図-8 基準化付着応力-荷重端すべり関係

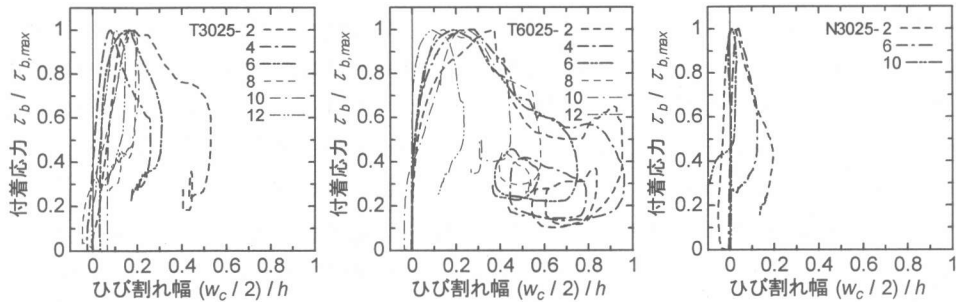


図-9 基準化付着応力-ひび割れ幅関係

するものとする。ただし、拘束応力の適用範囲は 2~12MPa とする。

$$\frac{\tau_{b,max}}{\sigma_t} = 1.29 \sigma_l^{0.42} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{b,max}$  : 最大付着応力

$\sigma_t$  : コンクリート割裂強度

$\sigma_l$  : 拘束応力 (MPa)

### 3.3 付着応力-すべり関係

各試験体の付着応力-荷重端すべり関係を図-8に示す。なお、各試験体は、同一因子試験体3体の内の平均的な1体の結果を示しており、付着応力はその試験体の最大付着応力で、すべり量は主筋径 (16mm) で基準化している。同図より、横拘束力やコンクリート強度が変化して最大付着応力が増減しても、曲線の形状自体にさほど大きな変化は見られず、いずれも最大付着応力以降すべり量に対して応力が直線的に減少する負勾配を持つ区間が見られる。ただし、ねじ筋は竹節筋と比較して負勾配が大きい傾向がある。本報では、すべり量が主筋径程度の値より大きい区間は無視し、付着応力-すべり関係を最大応力までの正勾配を持つ直線と最大応力以降の負勾配を

持つ直線のバイリニア型でモデル化することとした。

まず、第一直線について考察する。最大付着応力は前節で得られたので、最大応力時のすべり量を定めればよい。各試験体の基準化した付着応力とひび割れ幅の関係を図-9に、最大荷重時の荷重端すべり量と拘束応力の関係を図-10に示す。図-9に示す各試験体は図-8に示す試験体とそれぞれ対応しており、ひび割れ幅 ( $w_c$ ) はコンクリート界面の主筋からの浮き量を示す意味で2で除し、さらに主筋の節高さ ( $h$ ) で基準化している。ひび割れ幅はおおむね拘束応力が小さい

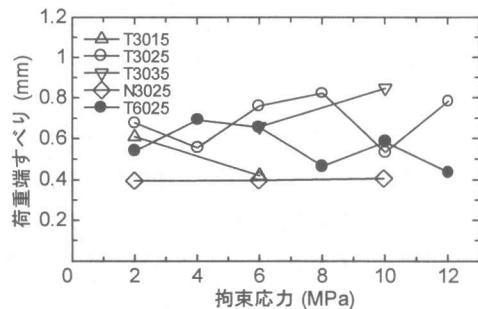


図-10 最大荷重時の荷重端すべり量

ほど、また、コンクリート強度が大きいほど増大しており、逆にねじ節筋の場合は小さい。一方で図-10より、最大荷重時の荷重端すべり量は、ねじ節筋の場合は竹節筋より小さい傾向が見られるが、拘束応力やコンクリート強度に大きな影響は受けていない。

主筋節形状の違いを考えると、幾何学的にも節前面の傾斜角が大きいほど同一ひび割れ幅に対してすべり量は小さくなる。しかし、拘束応力やコンクリート強度が増大すると、三軸圧縮応力状態にある節前面コンクリートの剛性や支圧強度も増大し、最大付着応力時にひび割れ幅は増大するもののすべり量はあまり変わらず、同様なすべり量の時に最大付着応力に達すると考えられる。本報では2種類の鉄筋のみしか実験を行っておらず、節形状と最大付着応力時のすべり量の関係に関して十分な考察を行えない。バイリニア型モデルの最大応力時のすべり量として、それぞれの鉄筋を用いた試験体の平均値である、竹節筋：0.63mm、ねじ節筋：0.40mmとする。

次に、第二直線について考察する。3.1節で述べたように、付着応力減少区間では主筋のすべり量に対して節間コンクリートのせん断力に抵抗する面積(主筋軸方向の抵抗コンクリートの長さ)が線形に減少していき、付着応力-すべり関係も直線的に減少する関係を持つものと考えられる。このような破壊過程を考慮して、第二直線は、すべり量が主筋の節間隔と等しくなったとき(節の位置が1個分移動したとき)に付着応力が0になるよう定める。

以上の考察によるバイリニア型モデルを、図-8に実線で示した。モデルは実験結果をおおむね表現できている。

#### 4. まとめ

横拘束力を一定とした主筋の付着実験を行い、実験結果から付着応力-すべり関係を、コンクリート強度、横拘束力、主筋の節形状で定まるバイリニア型でモデル化した。また考察を通して以下の知見が得られた。

(1) 横拘束力、コンクリート強度が増大すれば最

大付着応力も増大する。

- (2) 横拘束力やコンクリート強度が増大しても、付着応力-すべり曲線の形状はさほど影響を受けない。
- (3) 横拘束力の減少やコンクリート強度の増大にともなってひび割れ幅は大きくなるが、最大付着応力時のすべり量に大きな差はない。

#### 参考文献

- 1) 金久保利之, 米丸啓介, 福山 洋: 補強コンクリートの局所付着割裂性状に関する研究(その1:横補強のない場合の局所付着割裂性状), 日本建築学会構造系論文集, 第492号, pp.99~106, 1997.2
- 2) 酒井貴洋, 金久保利之, 米丸啓介, 福山 洋: 横補強筋をもつコンクリート部材の局所付着割裂性状に関する研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.497~498, 1999.9
- 3) P. G. Gambarova, G. P. Rosati and B. Zasso: Steel-to-Concrete Bond after Concrete Splitting: Test Results, RILEM Materials and Structures, No.22, pp.35~47, 1989
- 4) 赤司二郎, 藤井 栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着力と割裂力の関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.69~74, 1992