

補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究

その4 横補強のある場合の局所付着割裂性状

STUDY ON BOND SPLITTING BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Part 4 Local bond behavior with confinement of lateral reinforcement

八十島 章*, 金久保 利之**

Akira YASOJIMA and Toshiyuki KANAKUBO

To obtain the local bond stress versus slippage relationship with confinement of lateral reinforcement, pull-out test is conducted. The test results show that maximum bond stress has an increment as lateral confinement stress also increases, and the slippage at maximum bond stress is influenced by splitting crack width and shape of main reinforcement. A new relationship between bond stress and slippage in case of confinement of lateral reinforcement is proposed using these results and effect of lateral confinement. A numerical analysis is performed to confirm the model with experimental results. The analytical results show a good agreement in bond splitting strength with experimental results of previous studies.

Keywords : bond splitting, local behavior, lateral confinement, shape of main reinforcement, bond stress, crack width

付着割裂, 局所性状, 横拘束, 主筋節形状, 付着応力, ひび割れ幅

1. はじめに

横補強筋を有する補強コンクリート部材の付着割裂強度評価および局所付着応力-すべり量関係に関する研究は、現在までに数多く行われている。実部材の付着割裂挙動を主筋径の20倍程度以上の付着長を持つ試験体で再現し、コンクリート強度、横補強筋の量、付着長、コンクリートのかぶり厚さ等を変動因子とした実験結果について、横補強のない付着割裂強度（コンクリート負担分： τ_{co} ）に横補強筋による付着強度増分（横補強筋による増分： τ_{sr} ）を累加させる形式により回帰分析した実験式として、種々の付着割裂強度算定式が提案されている¹⁻³⁾。

一方、付着長が主筋径の数倍程度の試験体を用い、局所の付着力と横拘束力すなわち割裂力の関係に着目し、ひび割れ幅や主筋の節形状を変動させて横拘束下の付着性状を把握しようとする研究も行われている^{4,5)}。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実験も同様の研究と見ることができる⁶⁾。

本来、補強コンクリート部材の付着割裂性状における局所的な性状と付着長が大きい部材の平均的な性状は、横補強筋の有無に関わらず、同一の破壊メカニズムによるものであると考えられる。しかしながら、これまでにこの両者の関係を定量的に検討し、局所性状と部材性状の関連に基づいた強度および変形能の評価はあまり進んでいない。この理由として、付着割裂破壊のメカニズムに焦点をあ

て、それに立脚した強度式の力学的構築を行おうとする研究があまり進んでいないこと、付着長がある程度大きい場合に起こる荷重端側からの連鎖的な割裂破壊に関して不明瞭な点が多いことが挙げられる。

筆者らは、横補強のない場合を対象として、主筋の種類、かぶり厚などを変動因子とした付着長のごく短い付着割裂実験を行い、横補強のない場合の局所付着応力-すべり量関係を定量化した⁷⁾。また、この関係式と主筋すべり量に関する付着基礎微分方程式を利用した数値解析により、付着長が大きい部材の荷重端側からの連鎖的な割裂破壊性状および付着割裂強度に関して、実験結果と解析結果が比較的良好に対応することを示し、付着長などの構造因子が付着性状に与える影響を確認した⁸⁾。さらに、局所付着応力-すべり量関係と等価な面積を有する付着ストレスブロックを用いた力学的手法により横補強のない場合の付着割裂強度算定式を構築し、既往の付着実験の結果を十分な精度で評価できることを報告した⁹⁾。

本報では、横拘束力が局所付着性状に与える影響の実験的検討および横補強筋による拘束効果に基づき、横補強のある場合の局所付着応力-すべり量関係の構築を行う。さらに、この関係と主筋すべり量に関する付着基礎微分方程式を用いて、付着長が大きい場合の平均的な性状を数値解析により求め、過去に行われた付着割裂実験の結果との対応を検証する。

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科
大学院生・修士(工学)

** 筑波大学大学院システム情報工学研究科
助教授・博士(工学)

Graduate Student, Doctoral Course, University of Tsukuba, M. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Dr. Eng.

2. 横拘束下の局所付着実験

2.1 実験計画

実部材中での横拘束力を受ける局所付着性状を得ることを念頭に置き、筆者らは横拘束力をオイルジャッキにより直接作用させた主筋引抜き形式による付着実験を行っている¹⁰⁾。本試験体は、中心に主筋（主筋径 d_b ）を1本配した $14d_b \times 14d_b \times 7d_b$ の直方体であり、割裂ひび割れ後に主筋が横補強筋により拘束される応力状態を表現するために、断面中央に鉄板とウレタンフォームでスリットを設け、コンクリートブロックは完全に分離されている。試験区間の付着長は主筋径の4倍（ $4d_b$ ）で、荷重端および自由端の $1.5d_b$ の区間は塩ビパイプにより付着を絶縁している。主筋周辺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が行われている。横拘束力は2個のオイルジャッキで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ている。この実験方法では、コンクリートブロックはウレタンフォームを介して完全に分離しているため、横拘束力は直接主筋のみに作用し、主筋の割裂力と同値であると考えられる。試験体形状および加力方法の詳細、実験時の計測項目等は文献 10)を参照されたい。

本報ではさらに、主筋の径が局所付着性状に及ぼす影響を把握するために、主筋に D25 を用いた追加実験を計画した（文献 10)では、D16 を使用）。文献 10)と同様に、竹節とねじ節の両鉄筋について加力実験を行った。また、付着割裂破壊における横補強筋の役割は、割裂ひび割れ発生後にひび割れの開口を拘束し、主筋に拘束力を作作用させ、主筋の節前面における噛み合い効果を十分に発揮させることである。したがって、横拘束下の付着性状は、主筋表面に設けられた節における機械的な噛み合い作用による応力伝達機構が支配的になるため、主筋表面の節形状が強度や変形能などに影響を及ぼすことが考えられる。そこで、丸鋼を切削加工した D16 相当の鉄筋を使用し、節高さ、節間隔、節角度を変動させた試験体を作製し、加力実験を行った。以降、文献 10)による実験シリーズと D25 を用いた実験シリーズを「シリーズⅠ」、切削加工鉄筋を使用した実験シリーズを「シリーズⅡ」と称し、本報では、シリーズⅠおよびシリーズⅡによる加力実験結果を合わせて報告、検討する。なお、シリーズⅠの試験体は同一因子試験体で3体ずつ加力が行われており、実験結果にはそれらの試験体の平均値を用いて検討する。

2.2 使用材料

コンクリートには、粗骨材に最大寸法 20mm の砕石を用いた目標圧縮強度 24~60MPa の普通コンクリートが使用された。コンクリートの力学特性を表 1 に示す。なお、材料試験用のテストピースは試験体と同様に気中養生とし、加力前後に行った各々3本ずつの平均値を材料強度とした。

主筋には、シリーズⅠでは竹節およびねじ節の異形鉄筋 D16、D25 が、シリーズⅡでは丸鋼を切削加工して作製した5種類の D16 相当の鉄筋が使用された。補強筋の力学特性を表 2 に、切削加工した鉄筋の節形状を図 1 に示す。切削加工した鉄筋において、最外径 18mm および節頂部の幅 2mm を共通項とし、節高さは 1.20、2.40mm の2種類、節間隔は 9.60、16.0、24.0mm の3種類、節角度は 45、90 度の2種類を設定した。

2.3 変動因子

試験体の一覧を、シリーズⅠは表 3 に、シリーズⅡは表 4 に示す。シリーズⅠの実験因子は、主筋種類、コンクリート強度、横拘束力、かぶり厚（主筋の公称径に対する加力板の孔の大きさ¹⁰⁾）であり、試験体名は主筋種類の記号、その後の数字がコンクリート強度（目標強度 30、60、24、48MPa）、かぶり厚（1.5~3.5）、横拘束力（2~12.5kN）を示している。シリーズⅡの実験因子は、節角度、節高さ、節間隔、横拘束力であり、試験体名は主筋名称、横拘束力（2、6、10kN）の順に表している。

表 1 コンクリートの力学特性

シリーズ	目標強度	圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_t (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)
Ⅰ	30MPa	32.9	2.75	23.1
	60MPa	62.8	3.60	28.2
	24MPa	23.6	2.01	22.6
	48MPa	55.5	3.79	29.2
Ⅱ	36MPa	32.9	2.72	23.8

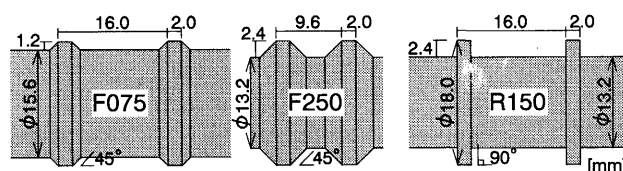


図 1 切削加工した鉄筋の節形状

表 2 補強筋の力学特性

シリーズ	補強筋	断面積 a_b^{*1} (mm ²)	主筋径 d_b^{*2} (mm)	周長 ϕ_b^{*2} (mm)	節高さ h (mm)	節間隔 l_n (mm)	節角度 θ (°)	節高さ 間隔比 h/l_n	降伏強度 $s\sigma_y$ (MPa)	引張強度 $s\sigma_u$ (MPa)	ヤング係数 E_b (GPa)
Ⅰ	T (D16 竹節)	191	15.6	49.0	1.03	10.60	36	0.097	399	563	197
	N (D16 ねじ節)	193	15.7	49.2	1.25	8.38	41	0.149	376	541	197
	LT (D25 竹節)	485	24.8	78.1	2.02	17.81	34	0.113	403	595	199
	LN (D25 ねじ節)	492	25.0	78.6	1.73	9.96	39	0.174	393	595	197
Ⅱ	F050	201	16.0	50.2	1.20	24.0	45	0.050	568	628	206
	F075	204	16.1	50.6	1.20	16.0	45	0.075			
	F150	168	14.6	46.0	2.40	16.0	45	0.150			
	F250	194	15.7	49.4	2.40	9.6	45	0.250			
	R150	152	13.9	43.6	2.40	16.0	90	0.150			

*1: シリーズⅠでは試験片の体積を実測し、長さで除して算出した。シリーズⅡでは節形状の設計値から体積を計算し、長さで除して算出した。

*2: 断面を円と仮定し、断面積から算出した。

2.4 実験結果

実験結果の概要を表3および表4に示す。付着応力は引張荷重を周長と付着長の積による主筋表面積で除した平均付着応力度とし、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。また、拘束応力は横拘束力を主筋径と付着長で除して算出し、ひび割れ幅はコンクリート界面の主筋からの浮き量を示す意味でスリット間変位の半分とした。シリーズⅠの実験値は、それぞれの変動因子に対して3体ずつ作製した試験体の平均値であり、シリーズⅡの実験値は各変動因子1体のみの結果である。

(1) 最大付着応力

最大付着応力と拘束応力の関係を図2に示す。(図中の式は後述)なお、コンクリート強度の違いによる影響を除去するために圧縮強度で最大付着応力および拘束応力を無次元化している。主筋径、かぶり厚、節高さ、節間隔、節角度の違いによる影響はほとんど見られず、いずれのシリーズにおいても、拘束応力が大きくなると最大付着応力が線形的に増大することが確認できる。また、拘束応力のほとんどない状態においても付着応力が発揮されているが、この原因としては、主筋とコンクリートの間の膠着作用および摩擦作用の影響によるものと考えられる。

表3 試験体一覧と実験結果概要(シリーズⅠ)

試験体名	主筋		コンクリート強度	付着長(mm)	かぶり厚*	横拘束		最大荷重時				
	名称 節形状	節高さ 間隔比				横拘束力(kN)	拘束応力(MPa)	荷重(kN)	付着応力(MPa)	すべり量(mm)		ひび割れ幅(mm)
T3015-2 T3015-6	T 竹節	0.097	圧縮 32.9MPa 割裂 2.75MPa	64	1.5	2.0 6.0	2.00 6.01	13.45 24.82	4.29 7.92	0.609 0.421	0.597 0.400	0.220 0.101
T3025-2 T3025-4 T3025-6 T3025-8 T3025-10 T3025-12					2.5	2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0	2.00 4.01 6.01 8.02 10.02 12.02	12.29 20.09 21.58 24.98 29.09 30.22	3.92 6.41 6.88 7.96 9.28 9.64	0.678 0.555 0.762 0.824 0.533 0.784	0.667 0.538 0.743 0.803 0.509 0.758	0.275 0.146 0.117 0.071 0.088 0.110
T3035-6 T3035-10					3.5	6.0 10.0	6.01 10.02	20.53 27.46	6.55 8.75	0.658 0.848	0.641 0.825	0.101 0.059
N3025-2 N3025-6 N3025-10	N ねじ節	0.149			2.5	2.0 6.0 10.0	1.99 5.98 9.97	15.71 24.16 30.70	4.99 7.67 9.75	0.396 0.398 0.407	0.383 0.378 0.381	0.121 0.121 0.042
T6025-2 T6025-4 T6025-6 T6025-8 T6025-10 T6025-12	T 竹節	0.097	圧縮 62.8MPa 割裂 3.60MPa		2.5	2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0	2.00 4.01 6.01 8.02 10.02 12.02	22.15 28.36 32.71 38.03 40.12 43.26	7.06 9.04 10.43 12.13 12.79 13.79	0.538 0.691 0.655 0.467 0.582 0.437	0.519 0.667 0.627 0.435 0.548 0.401	0.412 0.287 0.210 0.136 0.124 0.102
LT2425-12.5 LN2425-12.5	LT 竹節 LN ねじ節	0.113 0.174	圧縮 23.6MPa 割裂 2.01MPa	100	2.5	12.5	5.03	52.28	6.70	0.812	0.785	0.179
LT4825-12.5 LN4825-12.5	LT 竹節 LN ねじ節	0.113 0.174	圧縮 55.5MPa 割裂 3.79MPa			12.5	4.99	45.03	5.73	0.677	0.651	0.083
						12.5	5.03	62.16	7.96	1.253	1.221	0.506
						12.5	4.99	69.30	8.81	0.655	0.619	0.337

* 主筋の公称径に対する加力板の孔の大きさ¹⁰⁾

表4 試験体一覧と実験結果概要(シリーズⅡ)

試験体名	主筋		コンクリート強度	付着長(mm)	かぶり厚*	横拘束		最大荷重時				
	節角度 主筋径	節高さ 間隔比				横拘束力(kN)	拘束応力(MPa)	荷重(kN)	付着応力(MPa)	すべり量(mm)		ひび割れ幅(mm)
F050-2 F050-6 F050-10	45° 16.0mm	0.050	圧縮 32.9MPa 割裂 2.72MPa	64	2.5	2.0 6.0 10.0	1.96 5.87 9.78	10.09 21.18 27.68	3.14 6.59 8.62	1.422 1.012 1.359	1.414 0.996 1.338	0.297 0.172 0.156
F075-2 F075-6 F075-10	45° 16.1mm	0.075				2.0 6.0 10.0	1.94 5.82 9.70	16.40 26.72 31.48	5.06 8.25 9.72	0.782 0.624 0.888	0.769 0.604 0.864	0.310 0.213 0.193
F150-2 F150-6 F150-10	45° 14.6mm	0.150				2.0 6.0 10.0	2.13 6.40 10.67	15.30 25.44 36.87	5.20 8.64 12.53	0.466 0.716 0.612	0.452 0.692 0.578	0.241 0.268 0.206
F250-2 F250-6 F250-10	45° 15.7mm	0.250				2.0 6.0 10.0	1.99 5.96 9.94	15.19 23.87 34.21	4.80 7.55 10.82	0.368 0.481 0.369	0.356 0.442 0.342	0.245 0.177 0.075
R150-2 R150-6 R150-10	90° 13.9mm	0.150				2.0 6.0 10.0	2.25 6.75 11.25	14.82 27.38 34.67	5.31 9.80 12.41	0.439 0.506 0.684	0.424 0.478 0.648	0.222 0.202 0.207

* 主筋の公称径に対する加力板の孔の大きさ¹⁰⁾

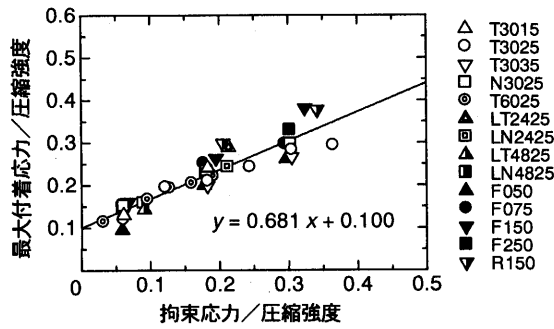


図2 最大付着応力と拘束応力の関係

(2) 主筋すべり量

最大応力時の荷重端すべり量と主筋の節形状の関係を図3に示す。左図は主筋すべり量と節高さの関係を、右図は主筋すべり量と節間隔の関係を示している。最大応力時のすべり量は、節高さが大きくなると若干減少する傾向が見られ、節間隔が大きくなると比例的に増大することが確認できる。また、異形鉄筋D25を使用した試験体(LT)を見ると、コンクリート強度の増大によりすべり量が大きくなる傾向が顕著に見て取れる。横拘束力の拘束効果により三軸圧縮状態にある節前面のコンクリートの強度も、最大応力時の主筋すべり量に影響していると考えられる。

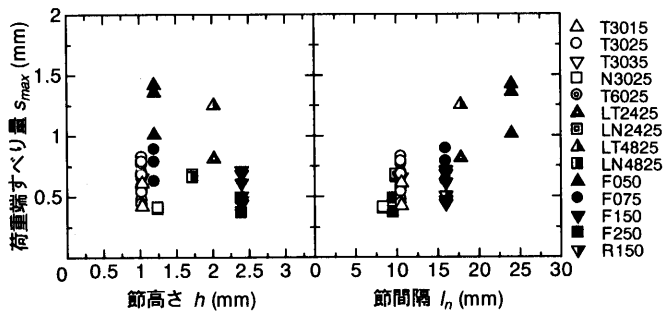


図3 荷重端すべり量と節高さおよび節間隔の関係

(3) ひび割れ幅

最大応力時のひび割れ幅とコンクリート圧縮強度および節高さの関係を図4に示す。最大応力時の割裂ひび割れ幅は、コンクリート圧縮強度および節高さの増大に伴って大きくなっており、コンクリート強度および節高さに大きな影響を受けることが確認できる。つまり、ひび割れ幅は、節前面コンクリートの剛性および支圧強度、横拘束力による拘束効果と密接に関係していることが考えられる。

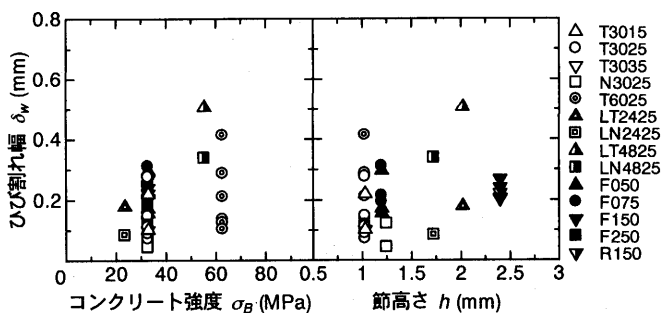


図4 ひび割れ幅とコンクリート強度および節高さの関係

2.5 付着応力-すべり量関係のモデル化

割裂ひび割れの進展により主筋とコンクリートの噛み合い作用が支配的になり、節前面コンクリートに支圧応力が生じる場合、主筋すべり量の進行に伴うひび割れ幅の大きさと噛み合い具合に応じて、主筋の拘束効果に変化し、支圧強度は周辺コンクリートの拘束状態に大きく影響されることが考えられる。そこで、節前面コンクリートに作用する支圧強度、最大付着応力、主筋すべり量および横拘束効果と割裂ひび割れ幅の関連性に着目し、節前面コンクリートの応力状態および破壊メカニズムに基づいて局所付着応力-すべり量関係をモデル化する。

(1) 最大付着応力

実部材中における割裂ひび割れ発生以後の横拘束下の付着性状は、主筋とコンクリートの接着面での膠着作用がほとんど残存せず、主筋の節前面に支圧応力が作用する機械的な噛み合い作用が支配的と考えられる。そのため、付着応力と割裂応力(拘束応力)の関係は(1)式で表現可能であり、本実験においても膠着作用を無視すると、付着応力と拘束応力に比例関係が認められる。図2に示される最小二乗法で回帰した直線より、主筋の周辺コンクリートを押し広げようとする力と主筋方向のなす角は $\theta = 56^\circ$ が得られる。赤司らの研究⁹⁾によれば、加力条件が異なるものの、付着応力と割裂応力との合力が向かう角度は 60° 程度であり、本実験の結果はこれらの結果と適合している。

$$\tau_{bs,max} = \sigma_l \cdot \cot \theta \quad (1)$$

ここで、 $\tau_{bs,max}$: 最大付着応力、 σ_l : 拘束応力

θ : 主筋の周辺コンクリートを押し広げる力の主筋方向とのなす角 $=56^\circ$

(2) 横拘束効果

支圧強度係数 f_{bear} を(2)式で定義し、最大荷重時に節前面の全面積に見かけ上作用する支圧応力のコンクリート強度に対する比を表す。最大応力時の支圧強度係数とひび割れ幅の関係を図5に示す。節前面コンクリートの支圧強度は、コンクリート圧縮強度の1~3倍程度の大きさであり、ひび割れ幅が大きくなると支圧強度係数が低下していることが確認できる。実際のコンクリートの支圧強度が変化しなくとも、ひび割れ幅の増大に伴い節とコンクリートの噛み合い面積が減少し、支圧強度係数が見かけ上小さくなっていると考えられる。また、最大付着応力と拘束応力の関係が(1)式で表現できることを考慮すると、最大付着応力、節前面に作用する支圧強度および節とコンクリートの噛み合い作用は、拘束応力とひび割れ幅の関係により表現可能である。

$$f_{bear} = \frac{P_{bear,max}}{\phi_b \cdot h} \cdot \frac{l_n}{l_b} / \sigma_B \quad (2)$$

$$P_{bear,max} = \sqrt{P_{b,max}^2 + P_l^2} \quad (3)$$

$$P_{b,max} = \tau_{bs,max} \cdot \phi_b \cdot l_b \quad (4)$$

$$P_l = \sigma_l \cdot d_b \cdot l_b \quad (5)$$

ここで、 $P_{bear,max}$: 最大支圧力、 $P_{b,max}$: 最大付着力

P_l : 横拘束力(割裂力)、 $\tau_{bs,max}$: 最大付着応力

σ_B : コンクリート圧縮強度、 ϕ_b : 主筋の周長

σ_l : 拘束応力, h : 節高さ, l_n : 節間隔
 d_b : 主筋径, l_b : 付着長

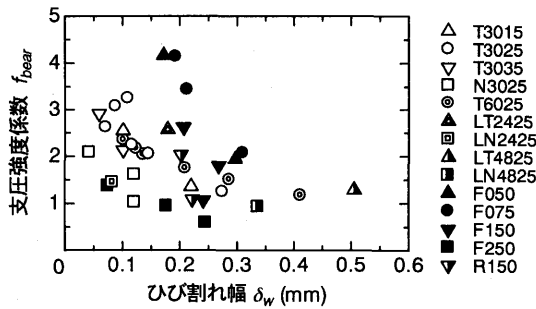


図5 支圧強度係数とひび割れ幅の関係

拘束応力とひび割れ幅の関係を図6に示す。コンクリート強度および主筋種類の違いを除去するために、拘束応力をコンクリート圧縮強度で、ひび割れ幅を節高さで無次元化している。拘束応力が大きいほど主筋の拘束効果が高まるため、ひび割れ幅が小さくなっている。また、若干ばらつきはあるものの、明確な相関関係が認められ、実験因子の異なる全試験体を同様に評価することができる。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、(6)式の関係により、節前面コンクリートに作用する支圧強度および支圧強度で決定される主筋の拘束効果の上限をひび割れ幅の関数として表現することができる。

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_B} = k \cdot \frac{h}{\delta_w} \quad (6)$$

ここで、 δ_w : ひび割れ幅

k : 支圧強度で決まる拘束応力とひび割れ幅の関係を表す定数 = 0.018

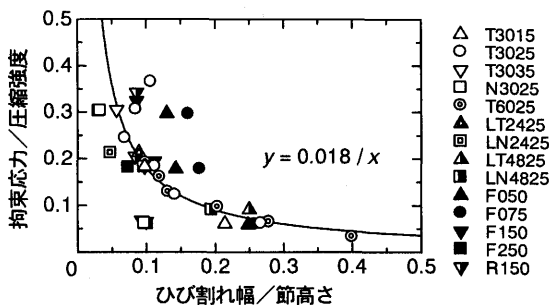


図6 拘束応力とひび割れ幅の関係

(3) 最大応力時のすべり量

主筋すべり量は、実験結果の検討において、節間隔および主筋の拘束状態に影響されることが確認される。節形状の影響および拘束効果を考慮した最大応力時のすべり量とひび割れ幅の関係を図7に示す。ひび割れ幅が大きくなると主筋すべり量が增大する傾向が見られ、ばらつきはあるものの、実験因子の異なる全試験体をひび割れ幅により評価可能である。したがって、最小二乗法による回帰を行った結果、最大応力時のすべり量は(7)式で表現できる。

$$\frac{s_{max}}{l_n} = \gamma \cdot \frac{\delta_w}{h} \quad (7)$$

ここで、 s_{max} : 最大応力時のすべり量

γ : 主筋すべり量とひび割れ幅の関係を表す定数 = 0.447

(7)式は、最大応力時のすべり量が最大応力時のひび割れ幅と比例関係にあること、節間隔が大きくなるとすべり量も増大し、節高さが大きくなると同一のすべり量に対してひび割れ幅も増大することを表現している。

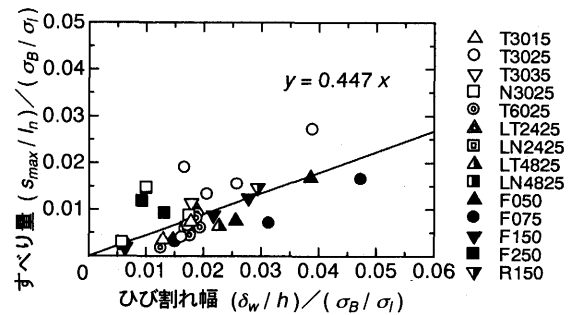


図7 主筋すべり量とひび割れ幅の関係

(4) 付着応力-すべり量曲線

代表的な付着応力-荷重端すべり量関係を図8に示す。なお、付着応力はその試験体の最大付着応力で基準化している。実験因子が変動しても曲線の形状自体にさほど大きな変化は見られず、いずれの試験体でも最大付着応力以降のすべり量に対して付着応力が直線的に減少する傾向が見られる。実部材中の付着割裂性状において、すべり量が主筋径より大きくなることはないと考え、本論では、すべり量が節間隔より大きい区間は検討対象から除外し、付着応力-すべり量関係を最大付着応力までの応力上昇域と、最大応力以降の下降域に区別してモデル化を行う。

主筋とコンクリートの噛み合い作用による支圧応力と横拘束力による拘束効果により節前面コンクリートは三軸圧縮状態にあり、最大応力時には節前面コンクリートが圧縮破壊に至ることが考えられる。また、文献10)の破壊過程の検討によれば、最大荷重時に節前面コンクリートが損傷し、ピーク後の急激な荷重低下時において節の頂部を結ぶ部分にひび割れが進展し、すべり量が節間隔程度に達すると、節間コンクリートがほとんど損傷を受けて削り取られることが報告されている。これらの応力状態および破壊メカニズムを考慮し、応力上昇区間は節前面コンクリートの圧縮応力状態および実験結果の検討から2次曲線で表現し、応力減少区間は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）が線形に減少することから、すべり量が節間隔と等しくなったときに付着応力が0になる直線で表現する。

以上の検討による付着応力-すべり量関係のモデルを図8に実線で示す。モデルは、応力上昇域と下降域の両区間において、実験結果をおおむね表現できている。

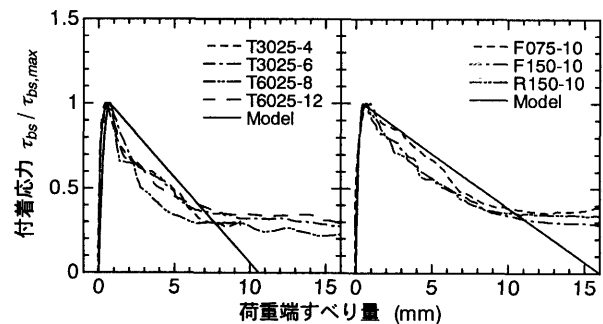


図8 基準化付着応力-荷重端すべり量

3. 横補強のある場合の付着割裂性状

3.1 横補強筋による拘束応力

実部材中の横拘束応力は、ひび割れの開口を抑制する横補強筋によって発揮され、ひび割れ幅に対応する伸び量による横補強筋の応力によって作用すると考えられる。また、既往の付着実験における局所性状検討では、横補強筋の応力は最大応力時まで主筋すべり量と比例関係にあり、コンクリート強度に影響されることが確認されている¹⁾。したがって、最大付着応力時に横補強筋の付着力が横補強筋の付着有効長さ全域において一様に分布すると仮定すると、ひび割れ幅に比例する横補強筋の応力による横拘束応力は、(8)式で表現できる。なお、(8)式は1列に並んだ主筋群にサイドスプリット型のひび割れが発生して、ひび割れ面と直交方向(梁せい方向)に一樣な拘束力が発揮される場合の横拘束応力を示している。実部材中の横拘束応力は主筋群に対して一樣ではなく、特に隅筋と中筋への拘束力は異なるものとされる。隅筋と中筋の拘束応力の差異については、後述4.1節で検討する。

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_B} = \frac{b \cdot p_w \cdot \delta_w}{N \cdot d_b \cdot l_{we}} \cdot \frac{E_{st}}{\sigma_B} \quad (8)$$

ここで、

b : 部材幅, p_w : 横補強筋比
 E_{st} : 横補強筋の弾性係数, N : 主筋本数
 l_{we} : 横補強筋の付着有効長さ

しかしながら、横拘束応力には、図9に示されるように、支圧強度で決定される拘束効果の上限が存在するため、(6)式と(8)式の交点によって、最大応力時の拘束応力が(9)式で与えられる。ただし、横補強筋の応力は降伏強度以下である条件から、(9)式による横補強筋応力が降伏強度より大きい場合は(10)式となる。

$$\sigma_{l,max} = \sqrt{k \cdot \frac{b \cdot p_w \cdot h}{N \cdot d_b \cdot l_{we}} \cdot E_{st} \cdot \sigma_B} \quad (9)$$

$$\sigma_{ly} = \frac{b \cdot p_w \cdot \sigma_{wy}}{N \cdot d_b} \quad (10)$$

ここで、 σ_{wy} : 横補強筋の降伏強度

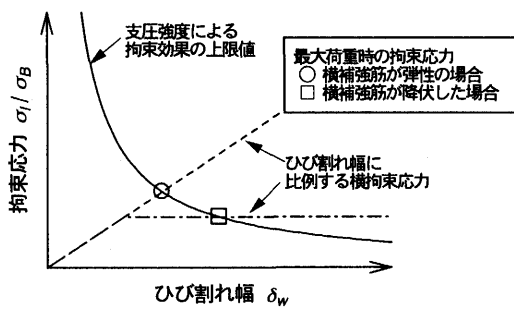


図9 横拘束応力とひび割れ幅の関係

3.2 局所付着応力-すべり量関係

横補強筋を有する場合の局所付着性状は、横補強のない場合の局所付着応力-すべり量関係に横補強筋による付着増分としての付着応力-すべり量関係を付加させることで表現できると考えられる。したがって、筆者らが前報その¹⁾で定量化した横補強のない場合の付着応力 τ_{bc} に、本実験から得られた付着応力 τ_{bs} を加えた横補強のある場合の局所付着応力-すべり量関係は次式となる。なお、横補強筋のない場合の局所付着応力-すべり量関係を特性づける係数 α

および β は、既報その¹⁾の値をそのまま用いている。横拘束のある場合には、(1)式で示したようにコンクリートを押し広げる力と主筋方向とのなす角度は 56° で、赤司らの研究³⁾に示されるように応力およびすべり量が增大すると、この角度が 20° から 60° 程度に大きくなることと対応する結果となっている。

局所付着応力-すべり量関係の例を図10に示す。モデルの各因子は図中に示す通りであり、コンクリート強度が大きい場合、小さい場合それぞれについて、横補強筋比の大小を比較して示した。なお、横補強筋の付着有効長さは横補強筋の径の9倍とした。

$$\tau_b = \tau_{bc} + \tau_{bs} \quad (11)$$

$$\tau_{bc} = 2 \cdot \sigma_t \cdot \beta \cdot s \cdot \frac{(r_u/d_b)^2 - (\beta \cdot s)^2}{(r_u/d_b)^2 + (\beta \cdot s)^2} \cdot \cot \alpha \quad (12)$$

$$\tau_{bs} = \tau_{bs,max} \cdot (s/s_{max}) \cdot (2 - s/s_{max}) \quad (s \leq s_{max}) \quad (13)$$

$$\tau_{bs} = -\frac{\tau_{bs,max}}{l_n - s_{max}} \cdot (s - l_n) \quad (s > s_{max}) \quad (14)$$

$$\tau_{bs,max} = \sigma_{l,max} \cdot \cot \theta \quad (15)$$

$$s_{max} = \gamma \cdot l_n \cdot \frac{k \cdot \sigma_B}{\sigma_{l,max}} \quad (16)$$

$$\sigma_{l,max} = \sqrt{k \cdot \frac{b \cdot p_w \cdot h}{N \cdot d_b \cdot l_{we}} \cdot E_{st} \cdot \sigma_B} \quad (17)$$

$$\text{ただし、} \sigma_{l,max} \leq \sigma_{ly} = \frac{b \cdot p_w \cdot \sigma_{wy}}{N \cdot d_b} \quad (18)$$

ここで、 s : すべり量, α : コンクリート割裂強度

r_u : コンクリートかぶり厚さに主筋半径を加えた値

β : 横補強のない場合の内部ひび割れの大きさとすべり量の関係を表す定数 = 10.2 (1/mm)

α : 横補強のない場合の主筋がコンクリートを押し広げる力の主筋方向とのなす角 = 34°

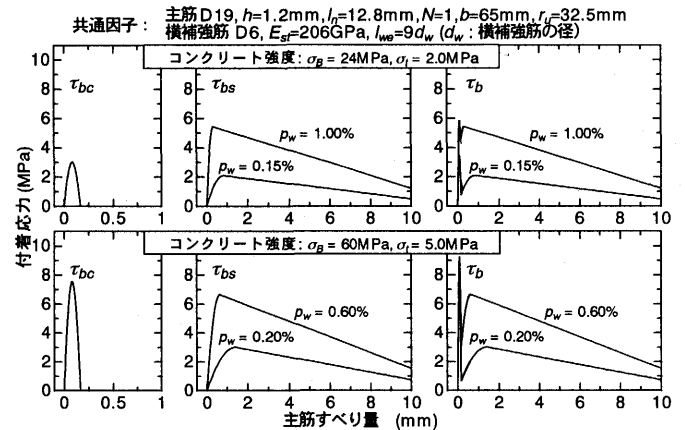


図10 局所付着応力-すべり量関係

3.3 平均付着応力-荷重端すべり量関係

以上より定量化した局所の付着応力-すべり量関係と文献⁸⁾に示される解析方法を用いて、付着長が大きい場合の引抜試験(主筋1本)を想定した数値解析の結果を図11に示す。なお、解析対象とした試験体の因子は図10に示すモデルの因子と同一であり、付着長は400mm(主筋径の約20倍)とした。

本報でモデル化した局所付着応力-すべり量関係は、横補強のない場合の局所付着応力-すべり量関係に横補強のある場合の局所付

着応力-すべり量関係を足し合わせて構築しており、割裂ひび割れが貫通する前と、横補強筋による拘束が増大して節前面コンクリートが圧縮強度に達する時の2ヶ所に極値を持つ。平均付着応力-荷重端すべり量関係においても、概ねその2ヶ所に対応した曲線が描かれる。したがって、平均付着応力の最大値のみに着目すると、コンクリートの割裂によって決定される場合と、横拘束によって決定される場合がある。すなわち、横補強筋比が小さい場合は、コンクリート強度によらず、コンクリートの割裂により決定される部分が支配的になっている。コンクリート強度が小さく横補強筋比が大きい場合は、横補強筋による負担分がほぼ全てを占めている。これらの結果は、横補強のない場合の付着割裂強度に横補強筋による付着強度増分を累加させる、従来の平均付着強度算定式の考え方とは大きく異なるものである。

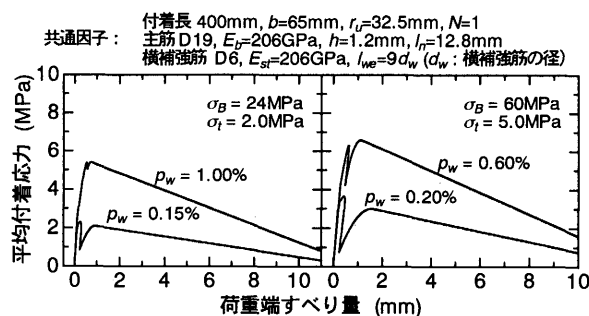


図 11 平均付着応力-荷重端すべり量関係

4. 局所付着応力-すべり量関係の適合性

4.1 横補強筋の拘束負担率

既往の付着実験の結果によれば、横補強筋が直接掛かっている隅筋と掛かっていない中筋の付着割裂強度には差異があることが確認されている¹⁻³⁾。隅筋と中筋の強度の違いは、横補強筋の量および横補強筋の拘束効果が密接に関係しているため、既往の実験結果を使用し、隅筋と中筋の強度比と横補強筋比の関係から横補強筋の拘束負担率を設定する。しかしながら、隅筋と中筋を有する既往の部材形式による実験結果は、当然付着長がある程度長い場合の平均的な付着性状を表したものであり、それらの結果をすべて用いて隅筋と中筋の強度比を設定すると、前節の解析結果で示したように、コンクリートの割裂により決定される部分が支配的になってしまうケースがあると考えられる。そこで、様々なパラメータにおいて前節の解析を試行錯誤的に行い、平均付着応力の最大値が横補強筋による負担分ではほぼ決定される場合を検討した。その結果、コンクリート圧縮強度が 30MPa 以下および横補強筋比 0.5% 以上の試験体では、おおむね横補強筋の応力負担が支配的と想定された。

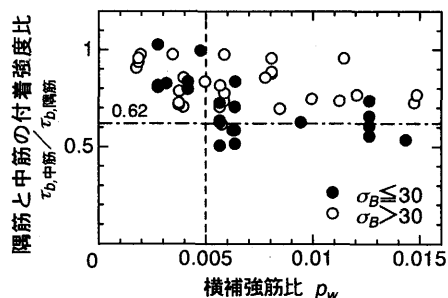


図 12 隅筋と中筋の強度比と横補強筋比の関係

既往の実験結果において、隅筋と中筋の付着割裂強度が記載されている試験体^{2), 3), 12-18)}の、隅筋と中筋の強度比と横補強筋比の関係を図 12 に示す。コンクリート圧縮強度が 30MPa 以下および横補強筋比 0.5% 以上の試験体では、隅筋と中筋の強度比が 0.62 となっており、この比が横補強筋比による拘束応力の隅筋と中筋の負担率に対応すると考える。

4.2 付着割裂強度

既往の付着割裂実験の結果を使用し、定量化した局所付着応力-すべり量関係による付着割裂強度解析値の適合性の検証を行う。しかしながら、前節までの検討において、まだ横補強筋の付着有効長さを決定していない。付着割裂性状における横拘束の役割という観点から、横補強筋の付着有効長さは横補強筋の径の数倍程度と考えられるが、本報では、本節で述べる適合性の検証を通して、解析値と実験値がもっとも合致する数値を採用するという立場をとることとした。その結果、横補強筋の付着有効長さは横補強筋径の 9 倍とすることとした。なお、この横補強筋の付着有効長さは、横補強筋の伸びと横補強筋の拘束力を関連づける変数ととらえることもできる。前述したように横補強筋の応力と主筋すべり量は比例関係にあり、主筋すべり量とひび割れ幅を比例関係に置くことは、横補強筋の付着応力分布を一樣としたときに付着有効長さをある係数とすることに外ならない。また、コーナー割裂に関しては、横拘束の作用が異なることから、直接適合させることは困難である。

検証に用いたデータは、藤井ら¹⁾、角ら^{2), 12), 19)}、前田ら³⁾、鈴木ら¹³⁾、田中ら¹⁴⁾、遠藤ら¹⁵⁾、笠原ら¹⁶⁾、市之瀬ら^{20), 21)}、竹内ら²²⁾、船崎ら²³⁾、中田ら²⁴⁾、黒木ら²⁵⁾、松野ら²⁶⁾、吉田ら²⁷⁾、飯星ら²⁸⁾、筆者ら^{17), 18)}の研究で加力実験された普通コンクリートの試験体であり、補強筋に鉄筋および連続繊維筋が使用され、サイドスプリット型で破壊した下端筋の試験体 166 体（鉄筋 132 体、連続繊維筋 34 体）である。なお、主筋形状はほぼ全ての文献に記載されていなかったため、JIS G3112 を参照して表 5 に示される値とした。解析にあたって、断面内主筋位置が等間隔であるとして割裂線長さおよびコンクリートかぶり厚を求め、文献中に記載のないコンクリート割裂強度は文献 29) を参照して算出している。また、部材の付着割裂強度は、隅筋および中筋の本数の比率に応じて、両者の平均付着応力-荷重端すべり量関係を付加させた最大値として求めている。

付着割裂強度の解析値と実験値の比較を図 13 に示す。左上図は全試験体の比較を示し、右上図および下段図は鉄筋を使用した試験

表 5 主筋の節形状

呼び名	節高さ h (mm)	節間隔 l_n (mm)	節高さ 間隔比 h/l_n	節高さ比 h/d_b	節間隔比 l_n/d_b
D13	0.90	8.5	0.106	0.071	0.669
D16	1.00	10.6	0.094	0.063	0.667
D19	1.20	12.8	0.094	0.063	0.670
D25	2.00	17.8	0.112	0.090	0.802
D35	2.55	24.0	0.106	0.102	0.964
D38	2.85	26.5	0.108	0.075	0.696
D41	3.15	28.8	0.109	0.076	0.697
CFRP ϕ 13	0.70	10.0	0.070	0.053	0.752
C128S	0.94	9.03	0.104	0.077	0.740
GFRP ϕ 13	0.77	10.0	0.077	0.057	0.741
K128S	1.18	12.5	0.095	0.103	1.087

体について、プロット点を横補強筋の降伏条件で区別し、コンクリート強度別に示している。連続繊維筋を使用した試験体は解析値が実験値を若干過小評価する傾向にあるが、解析値は実験値を十分な精度で評価しており、全試験体の比較値の平均値は 1.07、変動係数は 19% である。また、いずれのコンクリート強度に対しても、平均値および変動係数にばらつきはなく、比較的良好に評価できている。

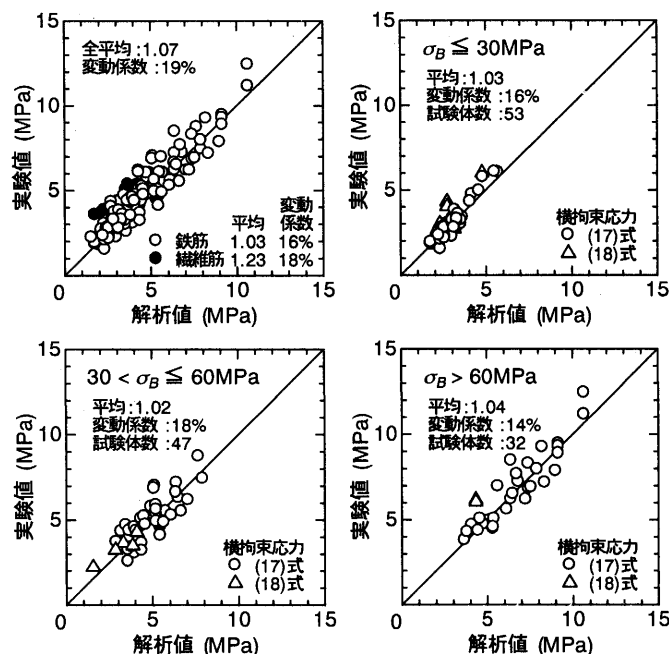


図 13 付着割裂強度の解析値と実験値の比較

5. まとめ

横拘束力が局所付着性状に与える影響を検討する付着実験を行い、横補強のある場合の局所付着応力-すべり量関係を、拘束効果と割裂ひび割れ幅の関連性に着目してモデル化した。また、モデル化した局所付着応力-すべり量関係を用いて、既往の付着実験による付着割裂強度を数値計算により求めた結果、解析値は実験値を良好に表せることを示した。

次報以降では、本報と同様の解析手法により、付着長、コンクリート強度、横補強筋比等の構造因子が平均的な付着割裂性状および付着割裂強度に与える影響を検討するとともに、前報その 3 で報告した手法と同様な考え方を用いて、横補強のある場合の付着割裂強度算定式を構築する予定である。

参考文献

- 1) 藤井 栄, 森田 司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第 1 報 付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果-, 日本建築学会論文報告書, 第 319 号, pp.47~54, 1982.9
- 2) 角 徹三, 張 建東, 飯塚 信一, 山田 守: 高強度コンクリートレベルをも包含する RC 部材の付着割裂強度算定式の提案, コンクリート工学論文集, 第 3 巻, 第 1 号, pp.97~108, 1992.1
- 3) 前田 匡樹, 小谷 俊介, 青山 博之: 鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度式の提案, 構造工学論文集, Vol.38B, pp.293~306, 1992.3
- 4) Gambarova P. G. and Barbarozasso G.: Steel-to-concrete Bond after Concrete Splitting: Test results, RILEM, Materials and Structures, pp.35~47, 1989
- 5) 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, 1992.6
- 6) 井上 芳樹, 金山 祐士, 市之瀬 敏勝: 異形鉄筋の付着割裂強度における寸

- 7) 金久保 利之, 米丸 啓介, 福山 洋: 補強コンクリート部材の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, No.492, pp.99~106, 1997.2
- 8) 金久保 利之, 小島 浩一, 米丸 啓介, 福山 洋: 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究, その 2 横補強のない場合の性状に与える構造因子の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.506, pp.163~168, 1998.4
- 9) 八十島 章, 金久保 利之: 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究, その 3 横補強のない場合の付着割裂強度算定式, 日本建築学会構造系論文集, No.567, pp.117~123, 2003.5
- 10) 金久保 利之, 酒井 貴洋, 米丸 啓介, 福山 洋: 横拘束力が補強コンクリートの局所付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1201~1206, 2000.6
- 11) 八十島 章, 金久保 利之, 石川 嘉崇: フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた片持梁型試験体による付着割裂性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.961~966, 2003.7
- 12) 角 徹三, 山田 守, 合案 将三: 鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度算定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.414, pp.23~33, 1990.8
- 13) 鈴木 英之, 西原 寛, 田畑 卓: 鋼板補強された鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.835~840, 2001.7
- 14) 田中 久也, 上田 秀樹ほか: 高強度材料を用いた RC 部材の付着性能に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.369~370, 1991.9
- 15) 遠藤 英之, 中澤 淳, 南 宏一: 高強度材料を組合せた鉄筋コンクリート部材における付着割裂破壊性状 (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp.623~624, 2000.9
- 16) 笠原 美幸, 中野 克彦, 松崎 育弘: 高靱性セメント材料が異形鉄筋の付着割裂性状に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp.129~130, 2001.9
- 17) 米丸 啓介, 金久保 利之, 福山 洋, 園部 泰寿: 連続繊維補強コンクリート部材の付着割裂強度, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.101~109, 1993.7
- 18) 園部 泰寿, 藤沢 正視, 金久保 利之, 米丸 啓介: 連続繊維による補強コンクリート部材の付着性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.625~630, 1992.6
- 19) 角 徹三, 張 建東, 福田 拓也: 高強度コンクリートを用いた実大 RC 部材の付着割裂強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.919~920, 1992.8
- 20) 市之瀬 敏勝, 横尾 慎一, 南 宏一: 付着割裂強度に及ぼす主筋本数と横補強筋の効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.157~162, 1991
- 21) 市之瀬 敏勝, 横尾 慎一: 高強度コンクリートを用いた RC 部材の付着割裂実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.75~80, 1992.6
- 22) 竹内 匡和, 村田 達雄ほか: 高強度鉄筋・高強度コンクリートを用いた RC 部材の付着性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.353~356, 1989.10
- 23) 船崎 憲介, 遠藤 英之, 中澤 淳, 南 宏一: 高強度材料を組合せた鉄筋コンクリート部材における付着割裂破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp.503~506, 1999.9
- 24) 中田 幸造, 吉村 浩二ほか: 炭素繊維シート補強 RC 柱における異形鉄筋の付着割裂性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp.631~634, 2000.9
- 25) 黒木 正幸, 吉村 浩二ほか: 炭素繊維シート補強 RC 柱における異形鉄筋の付着割裂性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp.135~138, 2001.9
- 26) 松野 一成, 河野 進, 角 徹三: 連続繊維シートによる RC 部材の付着割裂強度増大効果, 日本建築学会構造系論文集, No.548, pp.95~100, 2001.10
- 27) 吉田 藍子, 松本 至ほか: 高性能コンクリートの付着性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.835~840, 2002.6
- 28) 飯星 力, 藤井 栄, 角 徹三: 連続繊維で補強したコンクリート部材の付着割裂強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp.577~578, 2003.9
- 29) 野口 貴文, 友澤 史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.11~16, 1995.6

(2005年11月9日原稿受理, 2006年6月1日採用決定)