

論文

[2024] 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりの付着割裂強度

正会員○角 徹三 (豊橋技術科学大学建設工学系)  
 張 建東 (豊橋技術科学大学大学院)  
 熊谷信太郎 (豊橋技術科学大学大学院)  
 飯塚信一 (西松建設技術研究所)

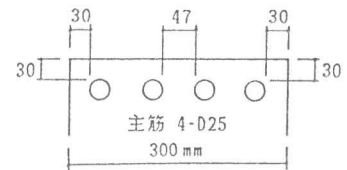
1. はじめに

鉄筋コンクリート建物の高層化にともないコンクリートも高強度化の傾向にあり、従来からの普通強度(180~300kgf/cm<sup>2</sup>)を対象とした諸設計式の見直しが必要となってきた。本研究では、鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度に焦点を絞り、主たる実験変数をコンクリート圧縮強度(400~1000kgf/cm<sup>2</sup>の高強度レベル域)、横補強筋量および付着長さ設定した鉄筋コンクリートはりの付着試験を行い、既存の付着割裂強度式との比較を試みた[1,2]。また、中子筋の付着割裂強度増大効果にも注目し、これを確認するための試験も行なうこととした。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体総数は18体で、全試験体とも、はり断面30x40cm、主筋4-D25使用とし、その配置を図-1に示す。側面・頂面のかぶり厚は30mm(1.5d<sub>b</sub>)とした。森田・藤井式によるかぶりコンクリート効果係数は $b_i = b_{s,i} = 2.0$ となりサイドスプリット型の付着割裂破壊を指向している[1]。荷重方法は単純はり3分点荷重とし、せん断スパン域で付着破壊が生じるような配筋とした。典型的な配筋例(タイプA, B)を図-2に示す。荷重点(スパン中央より20cm)から、はり成40cmだけ離れた曲げ引張側コンクリート上面に、せん断ひびわれを誘発させるためのスリット(深さ20mm、幅2mm)を設け、この位置から試験体端部までの距離を付着長さ $l_b$ とした。荷重点から77.5cmの位置のはり成中央部に鋼管(内径82mm,肉厚3mm)を埋め込み鋼製シャフト(φ80mm)を貫通させ、これにより支点反力をとることで試験鉄筋の横拘束の影響を除いた。鋼管の周囲は大きな応力集中が予想されるためD10のスパイラルで二重に補強した。さらに、付着試験域のせん断破壊防止のための用心鉄筋として、軸方向主筋4-D19、筋筋2-D10@80を上下試験主筋間に配した。



$$b_{si} = \frac{b}{Nd_b} - 1 = 2.0$$

$$b_{ci} = 2 \left( \frac{C_s + C_b}{d_b} + 1 \right) - 1 = 3.8$$

$$b_i = b_{si} = 2.0 < b_{ci}$$

図-1 はり主筋の基本配置

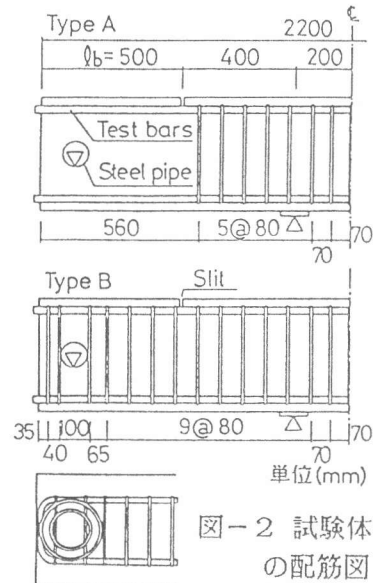


図-2 試験体の配筋図

2.2 実験変数

本実験で取上げた実験変数を表-1に、横補強筋の仕様を図-3に示す。付着割裂強度におよぼすコンクリート強度および付着長さの影響を明らかにする試

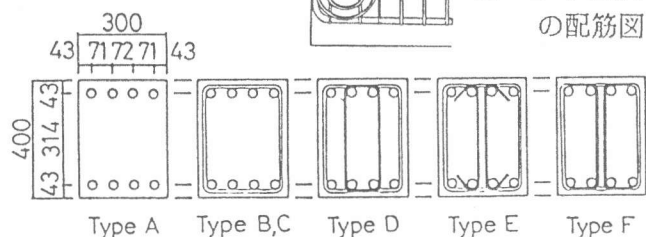


図-3 横補強筋の仕様 単位(mm)

験は、横補強筋無し( $p_w=0$ 、タイプA)と横補強筋有り( $p_w=0.6\%$ )の2通りについて行なった。横補強筋の量および中子筋の効果を調べる試験(タイプD~F)では、他の条件を同じにするため目標コンクリート強度を  $1000\text{kgf/cm}^2$ 、付着長さを  $\ell_b=20d_b$  (50cm)と一定にした。コンクリート打設時の上端主筋の付着強度を対象とすることを原則としたが、可能なものについては、付着破壊後の損傷部分を高張力ボルト(12- $\phi$ 12)と鋼板を用いて締め付け、付着を復元させ、反対スパン対角位置の下端主筋の付着試験も行ない、上端・下端主筋の付着強度の差異についても考察した。

### 2. 3 使用材料

表-2に目標強度別のコンクリートの配合を示す。目標強度 $1000\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートにのみシリカヒュームを用いた。表-3に使用した鉄筋の機械的性質を示す。付着割裂破壊以前に曲げ破壊やせん断破壊が先行することのないよう、主筋および横補強筋には高強度筋を用いた。

### 2. 4 測定事項

スリット位置での主筋ひずみ、横補強筋のひずみ分布、スパン中央および荷重点位置のたわみ、せん断力を測定した。さらに、スリット位置での主筋の滑り量も測定した。

表-1 実験変数

実験変数		共通仕様	
目標コンクリート強度 $\sigma_B$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	$p_w=0$ : 400 No.2, 600 No.3, 800 No.4, 1000 No.5 $p_w=0.6\%$ : No.8, No.9, No.10, No.11	$\ell_b/d_b=20$ 中子筋無し	
付着長さ $\ell_b/d_b$	$p_w=0$ : 15 No.1, 20 No.5, 40 No.6 $p_w=0.6\%$ : No.7, No.11, No.13	$\sigma_B=1000\text{kgf/cm}^2$ 中子筋無し	
横補強筋量と中子筋の有無	$p_w=0$ : No.5 $p_w=0.6\%$ : No.11(無), No.16(有) $p_w=1.2\%$ : No.12,14(無), No.15(有)	$\sigma_B=1000\text{kgf/cm}^2$ $\ell_b/d_b=20$ 中子筋: 溶接閉鎖	
中子筋の定着仕様	溶接閉鎖 No.16, 135°フック No.17, 90°フック No.18	$\sigma_B=1000\text{kgf/cm}^2$ , $\ell_b/d_b=20$ , $p_w=0.6\%$	

### 3. 実験結果と考察

表-4に実験結果の概要を示す。試験体 No.7,15のみについては片側スパンの上端筋の試験の後、もう一方のスパンの同じく上端筋の試験を行っている。No.13-BおよびNo.15-2は曲げ破壊、No.15-1は支点部破壊となったが、他はすべて付着割裂破壊を生じた。付着応力度( $\tau$ )の値は、付着域での主筋応力が直線分布する(試験体端部でゼロ)としてスリット位置での主筋の応力より求めた平均

表-2 コンクリート配合表

目標強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	水比 (%)	細骨材率 (%)	単位数 ( $\text{kg/m}^3$ )					
			水	砂	粗骨材	細骨材	混和剤	シリカヒューム
400	39.0	41.7	170	436	708	1007	-	-
600	28.5	36.8	170	597	575	1007	-	-
800	27.0	40.4	156	578	699	1034	9.25	-
1000	30.0	42.0	168	536	1008	713	10.66	25.51

\* 混和剤は高性能減水剤を使用

表-3 使用鉄筋の機械的性質

試験体番号	径	NO. 2,4,8,9,10		NO.1,6,7,12,15-1		NO.3,5,11,13,14,15-2,16,17,18	
		降伏強度	最大強度	降伏強度	最大強度	降伏強度	最大強度
主筋	D25	10,560	11,680	10,400	11,600	10,100	11,200
横補強筋	D10	9,530	10,280	8,030	10,000	8,870	11,000
	D13	降伏強度: 9,130		最大強度: 10,600		(試験体 NO.14)	
補助用主筋	D19	降伏強度: 6,130		最大強度: 7,840			
中子筋	D10	降伏強度: 3,800		最大強度: 5,490			

付着応力である。 $\tau_{max}$ は隅角筋・中間筋の個々についての最大付着応力であり、 $\tau_{uexp}$ は最大耐力 $Q_{uexp}$ 時の隅角筋・中間筋の付着応力度の平均値を意味し、以下では、これを試験体の付着強度と定義して議論を進めることにする。

### 3. 1 主筋・横補強筋の応力分布とひびわれ・破壊状況

主筋の外周部にのみ横補強筋を有する標準試験体ともいべきNo. 11試験体( $\sigma_B=990\text{kgf/cm}^2$ ,  $p_w=0.6\%$ ,  $l_b/d_b=20$ )については、せん断スパン域での主筋および横補強筋の応力分布を詳細に測定した。図-4にその結果をひびわれ状況とともに示す。ま

ず曲げスパン域での曲げひびわれ、つづいてスリット位置からスパン中央へ向かうせん断斜めひびわれが発生した後、スリット位置から試験体端部の試験区間の主筋位置に沿って付着作用特有の斜めひびわれが発生する。最終的にはこれらの斜めひびわれが連なりかぶりコンクリートが剥落して耐力を失う。主筋の応力分布をみると、スリット位置を境にその勾配が変化しておりスリット位置から試験体端部までの区間を付着域と定義したことの妥当性がうかがえる。主筋のうち横補強筋の辺上にある中間筋の応力分布と横補強筋の折り曲げ部にある隅角筋のそれとを比較すると、最初は一致しているが、高荷重レベルでは様相が異なり、隅角筋の方がスリット位置で高い応力を負担する。横補強筋の応力分布はひびわれ図との相関を示し、スリット位置からスパン中央へ向かうせん断斜めひびわれを横切る横補強筋の応力が最も大きな値を示す。最大荷重時には付着試験域でも $3000\text{kgf/cm}^2$ レベルを超えており普通強度クラス(例えばSD30)の横補強筋を使っていたら別の破壊モードを呈したことが予想される。

### 3. 2 付着強度とコンクリート強度の関係

図-5は付着強度 $\tau_{uexp}$ とコンクリート強度 $\sigma_B$ の関係を横補強筋量 $p_w$ をパラメーターにとつて示したものである。比較のため、付着強度が $\sqrt{\sigma_B}$ に比例するとして森田・藤井式[1]による計算値も併記した。 $p_w=0$ では森田・藤井式とよく一致し、 $\sqrt{\sigma_B}$ との比例関係が高強度域まで保た

表-4 実験結果一覧

* 試験体	Type	$\sigma_B$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	横補強筋	PW (%)	付着長	$Q_{uexp}$ (tonf)	$\tau_{uexp}$	付着強度	
								隅角筋	中間筋
1	A	1043	なし	0	15db	31.5	38.7	41.1	36.1
2		373		0	20db	13.5	17.7	13.0	22.3
2-B		373		0	20db	16.8	21.9	22.4	21.4
3		571		0	20db	22.4	24.9	23.5	26.3
3-B		571		0	20db	27.5	29.1	28.6	29.7
4		849		0	20db	23.4	27.8	28.0	28.2
4-B	849	0	20db	25.0	30.1	29.6	30.6		
5	957	0	20db	26.5	32.5	31.1	33.8		
5-B	957	0	20db	27.5	32.4	32.5	32.3		
6	1051	0	40db	23.4	24.2	23.8	24.5		
7-1	B	1017	2-D10@80	0.6	15db	49.0	61.4	73.9	50.1
7-2		1017	2-D10@80	0.6	15db	49.0	63.6	74.6	54.1
8		381	2-D10@80	0.6	20db	30.3	37.4	41.9	32.8
8-B		381	2-D10@80	0.6	20db	35.2	44.5	45.1	43.9
9		490	2-D10@80	0.6	20db	36.6	46.2	56.3	36.7
9-B		490	2-D10@80	0.6	20db	40.3	48.1	55.7	40.9
10		816	2-D10@80	0.6	20db	46.0	56.3	68.3	46.4
11		990	2-D10@80	0.6	20db	44.8	57.9	72.8	46.8
11-B		990	2-D10@80	0.6	20db	55.5	66.3	75.1	57.5
12		1007	2-D10@40	1.2	20db	65.2	73.3	82.8	66.7
13		985	2-D10@80	0.6	40db	51.5	55.7	68.1	51.4
13-B		985	2-D10@80	0.6	40db	55.6	61.4	63.2	61.7
14		C	966	2-D13@70	1.2	20db	66.4	79.3	95.5
14-B	966		2-D13@70	1.2	20db	70.3	81.0	94.8	72.1
15-1	D	1056	4-D10@80	1.2	20db	78.9	91.3	91.1	91.5
15-2		1016	4-D10@80	1.2	20db	89.5	103.9	103.1	104.9
16		896	4-D10@150	0.6	20db	74.4	90.6	87.6	94.0
17	E	896	4-D10@150	0.6	20db	65.0	82.1	85.2	79.1
18	F	917	4-D10@150	0.6	20db	61.0	69.4	69.2	69.6

\* □-B: 下端筋実験, 他はすべて上端筋実験 db: 主筋径 25mm

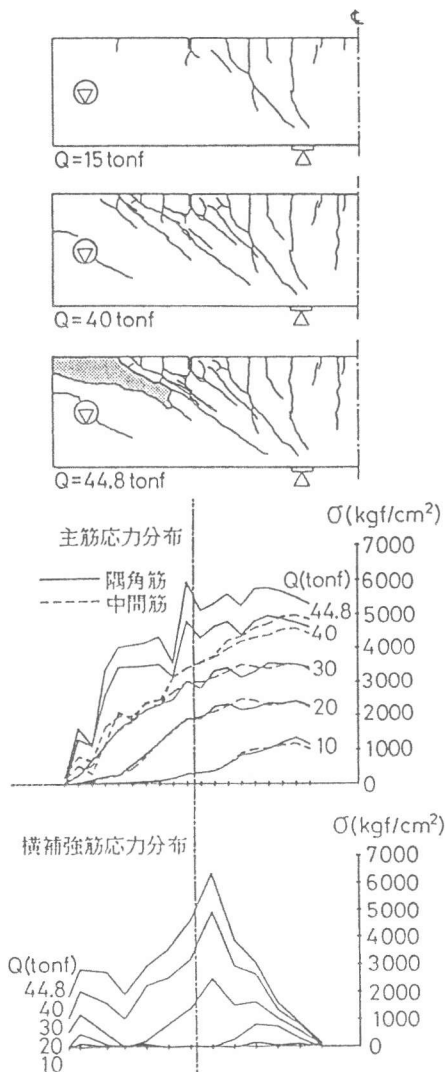


図-4 ひびわれ状況および鉄筋の応力分布 (No. 11)

れているといえる。 $p_w=0.6\%$ では全体に森田・藤井式よりかなり大きい値となるが、 $\sqrt{\sigma_B}$ との比例関係は維持されている。 $p_w=1.2\%$ の試験体は2体のみ( $\sigma_B=1000\text{kgf/cm}^2$ )であるが、やはり森田・藤井式よりかなり大きい値となっている。

### 3. 3 上端筋と上端筋の付着強度比

図-6に下端筋の付着強度を上端筋のそれで除した値とコンクリート強度 $\sigma_B$ の関係を示す。森田・藤井はこの比を1.22としている。本実験結果では、 $\sigma_B$ の増大につれてこの比が1.0に近づく傾向にある。特に、 $p_w=0$ の場合に明瞭である。コンクリート強度が増大するほどブリージングが減少することと対応しているものと思われる。

### 3. 4 付着強度と付着長さの関係

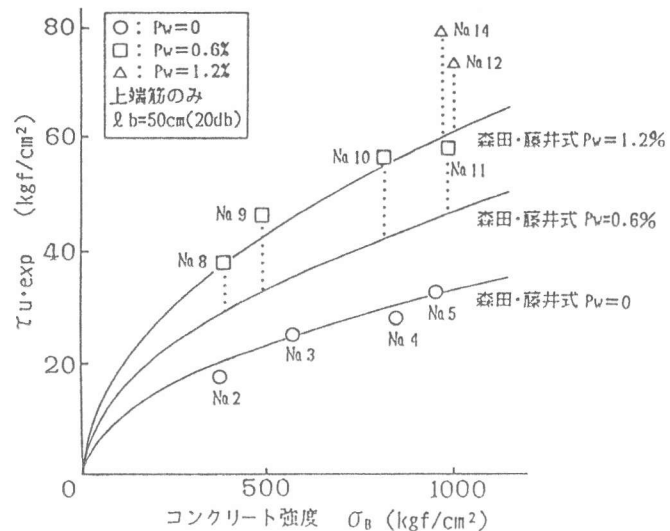


図-5 付着強度とコンクリート強度の関係

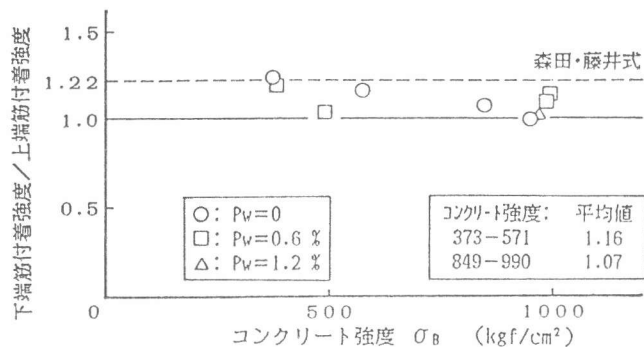


図-6 下端筋と上端筋の付着強度比

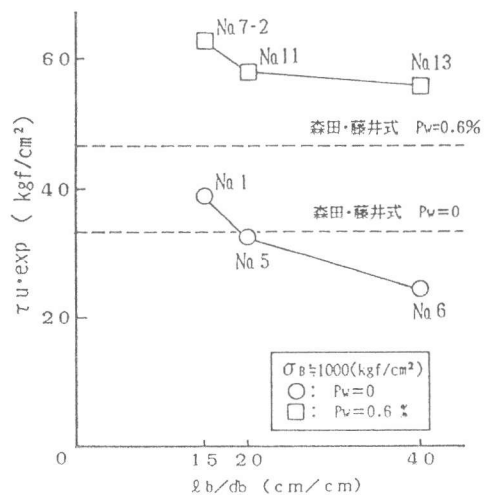


図-7 付着強度と付着長さの関係

図-7に付着強度  $\tau_{u \cdot exp}$  と付着長さ  $l_b/d_b$  の関係を示す。横補強筋無し ( $p_w=0$ ) では  $l_b/d_b$  の増大とともに付着強度が減少しており Jirsa式にある逆比例関係に対応している[3]。しかし  $p_w=0.6\%$  ではこの逆比例関係も幾分鈍くなっており、付着長さに依存しないとした森田・藤井式の値よりいずれも大きな値となっている。

### 3. 5 中子筋の付着強度増大効果

図-8は横補強筋の量とその仕様が付着強度に与える影響をみるために、コンクリート強度 ( $\sigma_B \doteq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ), 付着長さ ( $l_b/d_b=20$ ) を共通にした試験体の付着強度と横補強筋量の関係を示したものである。まず、中子筋無しで主筋の外周にのみ横補強筋を配した試験体では、横補強筋量の増大とともに付着強度も増大する。しかも森田・藤井式による値よりかなり大きな値である。 $p_w=1.2\%$  を共通とし横補強筋の径と間隔のみを変えた No.12(2-D10@40) と No.14(2-D13@70) を比較すると No.14の方がやや大きな値となっているが問題にするほどの差異ではないと判断される。次に、中子筋有りの試験体に注目すると、付着強度がさらに飛躍的に増大している。 $p_w=1.2\%$  の2体は支点部破壊と曲げ破壊で耐力が決まっているが、これらに対する補強が十分であったなら付着強度はさらに上昇したものであると思われる。 $p_w=0.6\%$  では中子筋の定着の仕様を変えて比較したが、予想どおり溶接定着が最も強く、以下、135°フック、90°フックの順となった。90°フックでも外周のみの横補強筋より付着強度増大効果があることが認められた。

図-9は主筋のうち横補強筋の辺上にある中間筋の最大付着応力度  $\tau_{max}$  と横補強筋の折り曲げ部にある隅角筋のそれとの比を示したものである。外周にのみ横補強筋のある試験体ではかなりのバラツキはあってもこの比が1.0以下となるが、中子筋有りの試験体では、ほぼ1.0を保ち、主筋すべてが同等に付着抵抗を発揮している事がわかる。中子筋の付着強度増大効果の一因でもあろう。

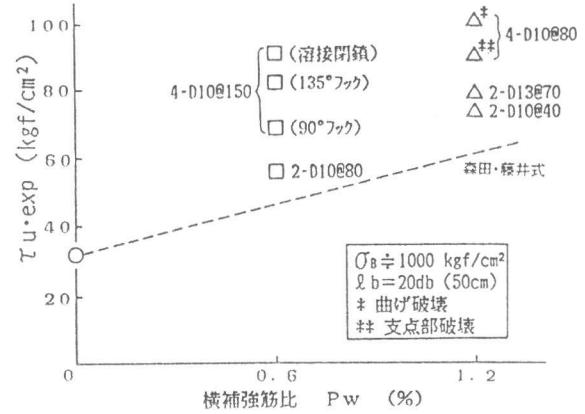


図-8 付着強度と横補強筋比の関係

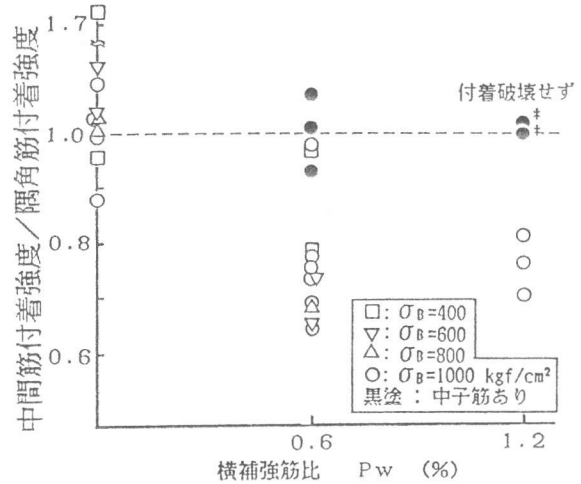


図-9 中間筋と隅角筋の付着強度比

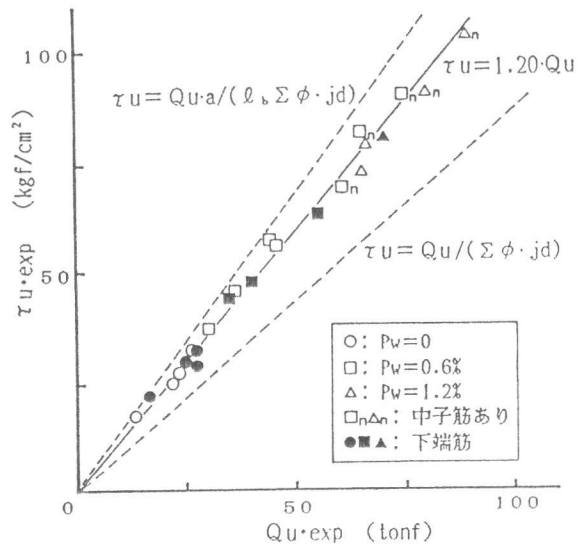


図-10 付着強度と最大せん断力の関係

### 3. 6 付着強度と最大耐力の関係

図-10は本実験で得られた付着強度  $\tau_{u,exp}$  と最大耐力  $Q_{u,exp}$  の関係を付着長さ  $l_b/d_b=20$  の試験体について示したものである。実験結果はほぼ

$\tau_{u,exp}=1.20 \cdot Q_{u,exp}$  線上に分布している。付着応力度とせん断力の関係を与える慣用式

$\tau = Q/(\sum \phi \cdot jd) = 0.88 \cdot Q$ 、および曲げスパン域での引張主筋応力が本実験で設定したスリット位置まで不変であるとして求めた付着応力度とせん断力の関係  $\tau = Q \cdot a / (l_b \sum \phi \cdot jd) = 1.36 \cdot Q$  も同図に付記してある。実験結果は両者の中間の値となっている。

### 4. 既往の強度式・実験結果との比較

図-11は森田・藤井式による計算値  $\tau_{u,cal}$  と本実験値  $\tau_{u,exp}$  全体を比較したものである。実験結果は、横補強筋無しでは計算値と一致しているが、横補強筋有りでは全体に高い値となっている。特に中子筋有りについては別途の評価式が必要である。図-12は中子筋の強度増大効果を考慮した角・山田式[2] (横補強筋無しでは森田・藤井式とまったく同じ) による計算値  $\tau_{u,cal}'$  と本実験結果を比較したものである。中子筋無しでは森田・藤井式とほぼ同様の傾向にあり、中子筋有りでは幾分改善されているとはいえず、再考の余地がある。

### 5. まとめ

本実験より得られた知見をまとめると以下の通りである。(1)横補強筋無しの部材の付着強度は高強度レベルでも  $\sqrt{\sigma_B}$  に比例するとしてよい。(2)横補強筋有りでは既存の強度式[1,2]より高い値となった。(3)特に、中子筋を使用すると、主筋すべてが同等に付着抵抗を発揮し、付着強度も飛躍的に上昇する。なお、本研究は建設省 New RC プロジェクトの一環として行なわれたものであり、かつ、文部省科学研究費(一般A、課題番号01420037、研究代表者・京都大学森田司郎教授)の援助を受けたことを付記する。

### 参考文献

- 1) 藤井栄、森田司郎：異形鉄筋の付着割裂に関する研究-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集、第319号、pp.47-55、1982.9
- 2) 角徹三、山田守、合樂将三：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報告集、第414号、pp.23-34、1990.8
- 3) Orangun, C. O., Jirsa, J. O. and Breen, J. E.: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Journal, Proc. Vol. 74, pp114-122, Mar. 1977

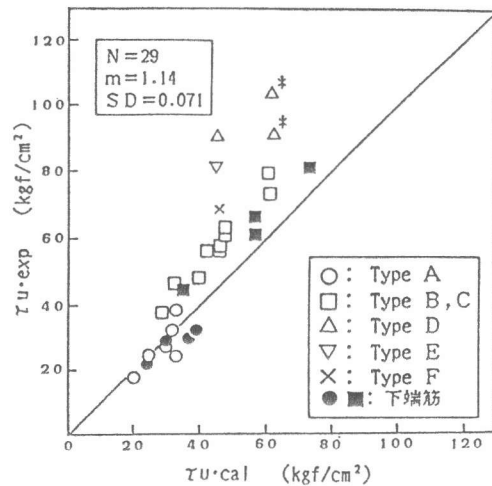


図-11 実験値と森田・藤井式の比較

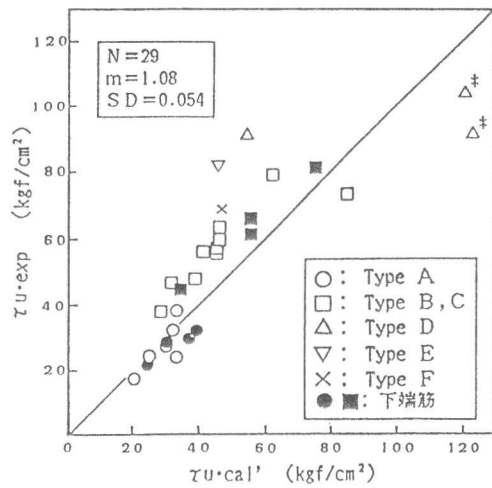


図-12 実験値と角・山田式の比較