

論文

[2028] 鉄筋コンクリートはりの付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果

正会員 角 徹三 (豊橋技術科学大学建設工学系)

正会員 山田 守 (豊橋技術科学大学大学院)

合衆将三 (豊橋技術科学大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造部材の靱性を確保するには、曲げ耐力・せん断耐力以下で付着割裂破壊が生じないよう、適切な対策を講じなければならない。その一方策として、横補強筋を断面の外周部だけでなく、中間主筋にもいわゆる中子筋を掛けることが有効であることが知られている。主筋・横補強筋の高強度化に伴い、このような配筋方法は今後ますます多く用いられる趨勢にある。したがって、中子筋の効果を含め、横補強筋の配筋が部材の付着割裂強度に及ぼす影響を十分把握しなければならない。本研究ではこのような横補強筋の量とかかり方に注目し、これらを定量的に評価することを目的として実験を行った。また、実験結果から付着割裂強度、耐力の推定式を導き既往の研究との比較を行った。なお本研究で言及する範囲は、単調荷重かつ主筋降伏以前に限るものとする。

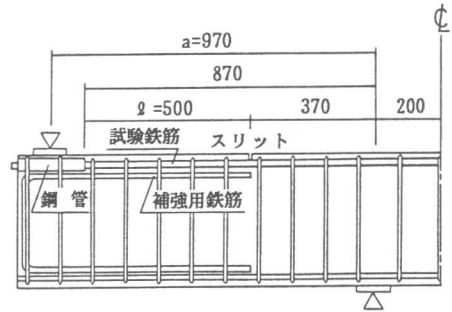
2. 実験概要

実験方法として単純はり形式の付着実験を採用した。この方法の長所としては、荷重装置が比較的簡単なこと、引き抜き試験に比べ試験体の応力状態が実際の部材に近いことが挙げられる。荷重装置・測定装置の詳細は文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

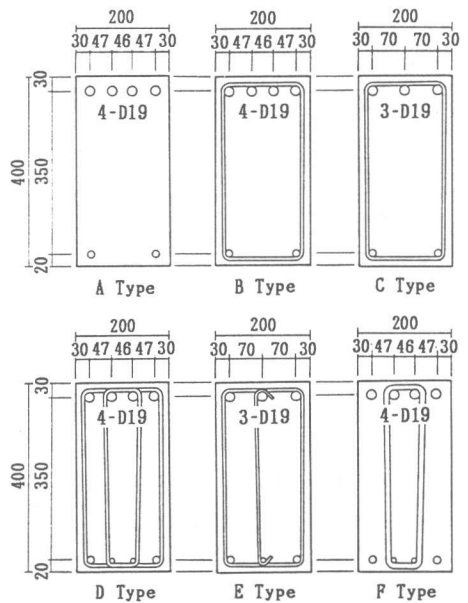
2-1. 試験体

試験体の詳細を図1に示す。試験体両端から20cmの区間は鋼管で主筋とコンクリートの付着を完全に断ち、支点反力によって主筋が拘束されるのを防いだ。また、荷重点から  $d (= 37\text{cm})$  だけ離れた引張側コンクリートには、せん断ひびわれを誘発させるため深さ 2cmのスリットを設け、この位置から外側の付着長さを試験区間とした。試験体は計27体で、主筋本数・横補強筋の形状で図1(b)の6つのタイプに分けられる。

- ・Aタイプ：主筋4-D19 横補強筋無し
  - ・Bタイプ：主筋4-D19 外周部だけに閉鎖型横補強筋
  - ・Cタイプ：主筋3-D19 外周部だけに閉鎖型横補強筋
  - ・Dタイプ：主筋4-D19 閉鎖型の中子筋
  - ・Eタイプ：主筋3-D19 135°折曲げフックの中子筋
  - ・Fタイプ：主筋4-D19 中間筋だけに閉鎖型横補強筋
- 各タイプでは横補強筋の径と降伏強度 ( $\phi 6: \sigma_y = 5070 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi 9: \sigma_y = 3100 \text{ kgf/cm}^2$ )・間隔(5~10cm)のみを実験変数とし、主筋の径(D19:  $\sigma_y = 6130 \text{ kgf/cm}^2$ )・かぶり、 $f_c'$ (約 $200 \text{ kgf/cm}^2$ )は一定にした。A・B・Dタイプには  $\rho = 50, 25\text{cm}$ の2種類がある(表1参照)。



(a) 側面図



(b) 断面図

図1 試験体詳細

表1 実験結果一覧

Type	名称*	横補強筋	P <sub>w</sub> (%)	P <sub>w</sub> ·wσ <sub>y</sub> ( $\frac{kgf}{cm^2}$ )	f <sub>c</sub> ' ( $\frac{kgf}{cm^2}$ )	Q <sub>u</sub> ·exp (tonf)	付着強度			** 破壊 モード
							$\frac{\tau_{max}}{\sqrt{f_c'}}$		$\frac{\tau_{uexp}}{\sqrt{f_c'}}$	
							①	②		
A	50-0	—	0	0	238	10.26	1.16	1.19	1.17	B
	25-0	—	0	0	225	8.75	1.37	1.39	1.38	S
	25-0-R	—	0	0	225	9.50	1.74	1.66	1.70	S
B	50-6-10	2φ6@10	0.28	14.20	181	10.98	1.29	1.51	1.40	B
	50-6-10R	2φ6@10	0.28	14.20	181	10.48	1.61	1.29	1.45	B
	50-6-5	2φ6@5	0.56	28.39	182	13.41	2.04	1.47	1.70	B
	50-6-5R	2φ6@5	0.56	28.39	182	14.10	2.37	1.47	1.78	B
	50-9-10	2φ9@10	0.64	19.84	227	14.38	2.12	1.77	1.86	B
	50-9-5	2φ9@5	1.27	39.37	199	20.76	3.41	2.50	2.75	B
	25-6-10	2φ6@10	0.28	14.20	209	7.75	1.18	0.95	1.07	B
	25-6-10R	2φ6@10	0.28	14.20	209	8.76	1.44	1.47	1.45	B
	25-6-5	2φ6@5	0.56	28.39	192	10.68	2.40	1.21	1.66	B
	25-6-5R	2φ6@5	0.56	28.39	192	11.21	2.10	1.32	1.65	B
	25-9-10	2φ9@10	0.64	19.84	229	9.70	1.75	1.23	1.45	B
	25-9-10R	2φ9@10	0.64	19.84	229	9.50	2.36	1.37	1.86	B
	25-9-5	2φ9@5	1.27	39.37	218	15.35	2.88	1.87	2.31	B
25-9-5R	2φ9@5	1.27	39.37	218	16.00	3.09	1.85	2.46	B	
C	50-6-6.7	2φ6@6.7	0.42	21.29	227	13.40	2.49	1.96	2.04	B
	50-6-6.7R	2φ6@6.7	0.42	21.29	227	13.50	2.42	2.00	2.16	B
D	50-6-10	4φ6@10	0.56	28.39	208	18.70	2.08	2.54	2.24	B
	50-9-10	4φ9@10	1.27	39.37	193	23.90	3.23	3.35	3.29	F
	25-6-10	4φ6@10	0.56	28.39	231	13.25	1.84	2.14	1.99	B
	25-6-10R	4φ6@10	0.56	28.39	231	13.46	2.16	2.18	2.15	B
E	50-6-10	3φ6@10	0.42	21.29	200	13.50	2.31	2.27	2.28	B
	50-6-10R	3φ6@10	0.42	21.29	200	14.00	2.32	2.37	2.35	B
F	50-9-10	2φ9@10	0.64	19.84	194	11.66	1.51	2.96	1.69	B
	50-9-5	2φ9@5	1.27	39.37	201	14.20	1.95	3.56	2.02	B→F

\* 付着長(cm) 横補強筋径(mm) 横補強筋間隔(cm)   
 縮め付け補強後の試験<sup>1)</sup>

\*\* B:付着割裂破壊  
 S:せん断破壊  
 F:曲げ破壊

2-2. 実験結果

実験結果の一覧を表1に示す。付着強度は、試験区間の平均付着応力を $\sqrt{f_c'}$ で無次元化したもので評価する。 $\tau_{max}$ は実験で得られた鉄筋別の付着応力の最大値で、①は断面の外側、②は断面の内側の主筋を表す。 $\tau_{uexp}$ は最大耐力 $Q_{uexp}$ 時の部材としての平均付着応力、すなわち付着割裂強度である。ほとんどの試験体が横補強筋・主筋が降伏する前にside-split型の付着割裂破壊で耐力を失ったが、Aタイプで $\ell = 25cm$ の2体がせん断破壊、Dタイプで $\phi 9$ を使用した1体が曲げ破壊を生じた。F-50-9-5は、横補強筋の掛かっている外側の主筋がcorner-split型の割裂ひびわれによって付着を喪失した後、内側の2本の主筋が引張降伏した。

2-2-1.  $\tau$ -Q関係

図2は各タイプの代表的なものについて、試験区間の平均付着応力 $\tau$ とせん断力Qの関係を鉄筋別に示したものである。破線は、試験区間の横補強筋に貼付したF.S.G.の出力から算出した横補強筋のつり上げ効果による付着応力 $\tau_{st}$ とQの関係である(図3参照)。いずれのタイプもスリット位置にせん

断ひびわれが発生した直後  $\tau-Q$  の勾配が急増した。B・C・Fタイプは断面内の主筋が同時に最大強度を発揮するのではなく、横補強筋で直接支持されていない主筋（B・Cタイプでは②、Fタイプでは①）の付着応力は最大耐力  $Q_u \cdot \exp$  に達する前に下り勾配になっている。その影響で横補強筋に支持された主筋の付着応力が急増し、付着割裂破壊が発生する。特にFタイプはその傾向が顕著である。中間筋に中子筋が掛けてあるD・Eタイプは①②の主筋が同時にピークに達し、B・C・Fタイプに比べ破壊時の付着強度が高くなった。特に中間筋にも閉鎖型の横補強筋を掛けたDタイプはその効果が大きい。

### 2-2-2. $\tau-S$ 関係

図4は図2と同じ試験体について、 $\tau$ とスリット位置でのすべり  $S$  の関係を示したものである。例に示したB・D・Fタイプはほぼ  $p_w$  が同じであるが、主筋と横補強筋のかかり方で付着性状にそれぞれ特徴があるのがわかる。C・Eタイプについても同様である。このような横補強筋の配筋方法の違いから生じる付着性状の差が、部材の付着割裂強度、耐力に影響を及ぼすのである。 $s_{\tau st}$  はすべり量が検知されると同時に増加し始め、 $\tau-S$  のピーク後も減少せず一定となっている。すなわち、付着長さ域の横補強筋は主筋の急激な抜け出しを防ぐとともに、付着割裂破壊後の耐力保持にも有効であると言える。

### 3. 付着割裂強度、耐力の推定

2章で述べたように、同じ断面内にある主筋でも横補強筋との相対的な位置関係によって付着性状が異なり、同じ  $p_w$  でも配筋方法によって付着割裂強度・耐力に差が生じる。これらを反映する計算式を導くには、横補強筋が付着割裂破壊を抑制するメカニズムを考察し、 $\tau-S$ 、 $\tau-Q$  関係をモデル化する必要がある。

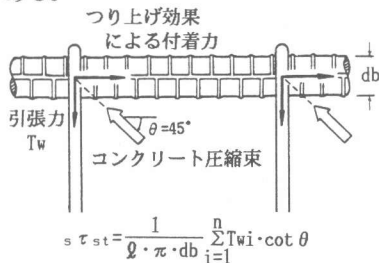


図3 横補強筋のつり上げ効果

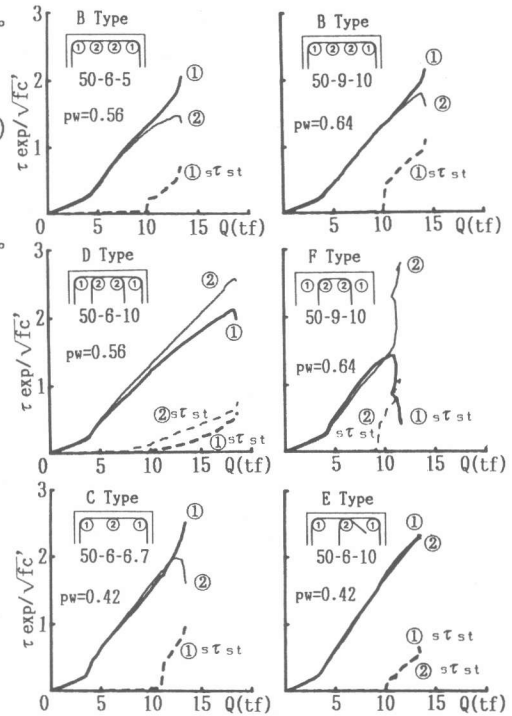


図2  $\tau-Q$  関係

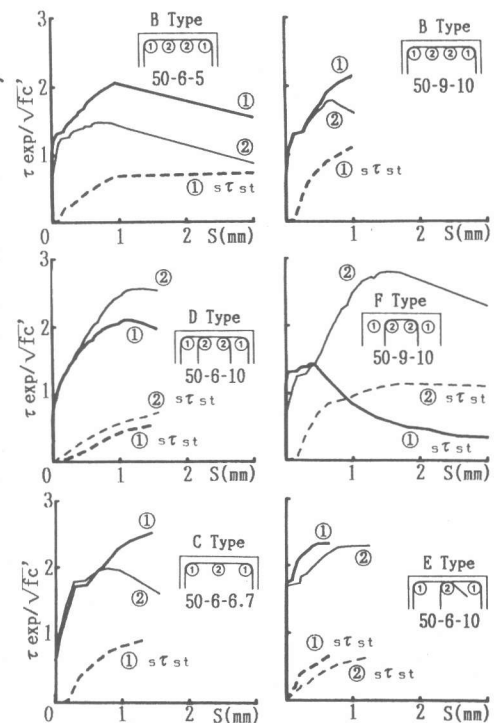


図4  $\tau-S$  関係

### 3-1. 横補強筋が付着割裂破壊を抑制するメカニズム

付着長さ領域に配置された横補強筋が主筋の付着割裂強度を向上させるのは、主に次の3つの作用によるものと考えられる。

I) 横補強筋の引張力と腹部コンクリート圧縮束がトラスを形成することによって付着力を受け持つ作用 (以後、つり上げ効果 $\tau_{st}$ と呼ぶ)

II) 横補強筋の引張力によって主筋まわりのコンクリートが拘束され、付着強度が向上する作用 (以後、拘束効果 $\tau_{co}$ と呼ぶ)

III) 横補強筋と主筋の交差部での機械的な摩擦抵抗による作用 ( $\tau_{st}$ )

このうちIII)は不確定であるが、现阶段ではI)・II)に比べて十分小さいと考え、部材の付着割裂強度は

$$\tau_u = \tau_{st} + \tau_{co} = s\tau_{st} + c\tau_{st} + \tau_{co} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\tau_u$ :部材の付着割裂強度、 $\tau_{co}$ :かぶりコンクリートの負担分、 $\tau_{st}$ :横補強筋の負担分、

$s\tau_{st}$ : $\tau_{st}$ の内I)の負担分、 $c\tau_{st}$ : $\tau_{st}$ の内II)の負担分、を表す。

つり上げ効果 $\tau_{st}$ は横補強筋または中子筋が直接掛かっている主筋のみに作用し、横補強筋の辺上にある主筋には作用しないと考える。拘束効果 $\tau_{co}$ は、横補強筋で囲まれた主筋には等量作用すると考える。すなわち横補強筋が直接掛かっている主筋一本の付着割裂強度は

$$\tau_{cu} = s\tau_{st} + c\tau_{st} + \tau_{co} \dots\dots\dots (2)$$

横補強筋の辺上にある主筋一本の付着割裂強度は

$$\tau_{iu} = c\tau_{st} + \tau_{co} \dots\dots\dots (3)$$

となる。部材全体としての付着割裂強度は(2)・(3)式の重み付き平均となり、断面の外周部だけに横補強筋がある場合 (例えばB・Cタイプ) は次式で表せる。

$$\tau_u = \tau_{cu} * 2/Nt + \tau_{iu} * (Nt-2)/Nt \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $Nt$ :主筋本数

#### 3-1-1. つり上げ効果 $\tau_{st}$

横補強筋の引張力とコンクリート圧縮束のトラス作用による付着応力は次式で求められる (図3)。

$$s\tau_{st} = \frac{1}{l \cdot \pi \cdot db} \sum_{i=1}^n T w_i \cdot \cot 45^\circ \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $n$ : $l$ 区間内の横補強筋の組数

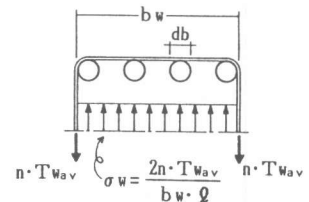
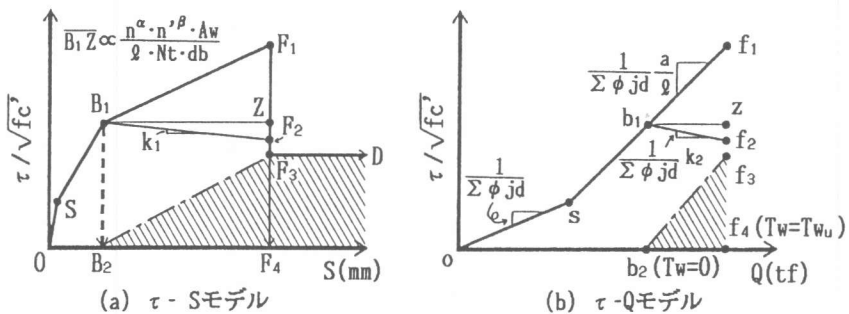


図5 横補強筋の拘束効果



	$\tau$ -S	$\tau$ -Q
横補強筋がない場合	0→S→B <sub>1</sub> →B <sub>2</sub>	0→s→b <sub>1</sub>
横補強筋のある場合	0→S→B <sub>1</sub> →F <sub>1</sub> →F <sub>3</sub> →D	0→s→b <sub>1</sub> →f <sub>1</sub>
・コンクリートの負担分	0→S→B <sub>1</sub> →F <sub>2</sub> →F <sub>4</sub>	0→s→b <sub>1</sub> →f <sub>2</sub>
・横補強筋の負担分	0→B <sub>2</sub> →F <sub>3</sub> →D	0→b <sub>2</sub> →f <sub>3</sub>

S, s:せん断ひびわれ発生  
 B<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>:付着ひびわれ発生  
 F<sub>1</sub>, f<sub>1</sub>:付着割裂破壊  
 k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>:定数

図6  $\tau$ -Q、 $\tau$ -S関係のモデル化

$$\sum_{i=1}^n T_{wi} = n \cdot T_{wav} \dots\dots\dots (6)$$

とすると(5)式は

$$s \tau_{st} = \frac{n \cdot T_{wav}}{l \cdot \pi \cdot db} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (7)$$

### 3-1-2. 拘束効果 $c \tau_{st}$

図5に示すように、横補強筋の引張力によって幅bw、付着長さlのコンクリート断面に生じる応力は

$$\sigma_w = \frac{2n \cdot T_{wav}}{bw \cdot l} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (8)$$

である。横補強筋で囲まれている主筋一本当たりには

$$C_w = \sigma_w \cdot l \cdot db = \frac{2n \cdot T_{wav}}{bw \cdot l} \cdot l \cdot db \text{ (kgf)} \dots\dots (9)$$

の拘束力が作用する。拘束力Cwは主筋とコンクリート間の摩擦係数Fによって付着抵抗に換算される。

$$c \tau_{st} = F \cdot C_w \frac{1}{l \cdot db \cdot \pi} = F \cdot \frac{2n \cdot T_{wav}}{bw \cdot l} \cdot l \cdot db \frac{1}{l \cdot db \cdot \pi} = F \cdot \frac{2n \cdot T_{wav}}{l \cdot bw \cdot \pi} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (10)$$

### 3-2. $\tau$ -S、 $\tau$ -Qのモデル化

2章の考察を基に、横補強筋のない場合とある場合について、図6に示すように $\tau$ -S関係と $\tau$ -Q関係をモデル化した。ハッチ部は横補強筋の負担分を示している。図6(a)中の $\overline{b_1 z}$ は横補強筋によって改善される付着靱性で、森田等の研究<sup>2)</sup>

$$Sb' = 20.7 \frac{n \cdot n' \cdot A_w}{l \cdot Nt \cdot db} + 0.53 \dots\dots\dots (11)$$

を参考(原論文では $Sb' = 20.7qst + 0.53$ )にして次のように考えた。

$$\overline{b_1 z} \propto \frac{n^\alpha \cdot n'^\beta \cdot A_w}{l \cdot Nt \cdot db} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $n'$ :一組の横補強筋の足数、 $A_w$ :横補強筋断面積

### 3-3. 付着割裂強度式







(7),(10)式の $T_{wav}$ は図6(b)に示すように付着ひびわれ発生後に生じ始め、とりうる最大値は $T_{wmax} = A_w \cdot \sigma_y$ である。しかし、付着割裂破壊は $T_{wav}$ (あるいは $s \tau_{st}$ 、 $c \tau_{st}$ )がある限界値に達したら引き起こされるといものではなく、付着ひびわれの発生→コンクリートが負担する付着応力の急激な減少という状況で発生する。すなわち、図6(b)の $\overline{b_1 z}$ の大きさに応じて付着割裂破壊時の横補強筋引張力 $T_w$ が決まり、破壊時に横補強筋が負担する付着応力は、(7),(10)式の $T_{wav}$ に $T_w$ を代入すれば求まる。

図6(a)より

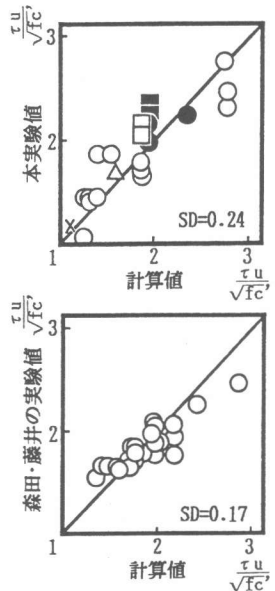
$$\overline{zF_2} = k_1 \cdot \overline{b_1 z} \propto k_1 \cdot \frac{n^\alpha \cdot n'^\beta \cdot A_w}{l \cdot Nt \cdot db} \dots\dots\dots (13)$$

図6(b)より

表2 各タイプの計算法

Type	主筋別の付着強度
A 	① $\tau_u = \tau_{co}$
	② $\tau_u = \tau_{co}$
B 	① $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
	② $\tau_u = c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
C 	① $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
	② $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + c \tau_{st} (bw') + \tau_{co}$
D 	① $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
	② $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
E 	① $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
	② $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$
F 	① $\tau_u = \tau_{co}$
	② $\tau_u = s \tau_{st} + c \tau_{st} (bw) + \tau_{co}$

$\tau_{co}$ は森田・藤井式で計算する。



×:A Type ●:D Type  
○:B Type ■:E Type  
□:C Type △:F Type

図7  $\tau_u$ の計算値と実験値の比較

$$\overline{zf_2} = \frac{1}{\sum \phi \cdot jd} k_2 \cdot \overline{b_1 z} \dots\dots\dots(14)$$

$\overline{ZF_2} = \overline{zf_2}$  であるので(13),(14)より

$$\overline{b_1 z} \propto \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{n^\alpha \cdot n'^\beta \cdot A_w}{\rho \cdot Nt \cdot db} \cdot Nt \cdot db \cdot \pi \cdot jd$$

$$\propto \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{n^\alpha \cdot n'^\beta \cdot A_w \cdot \pi \cdot jd}{\rho} \dots\dots(15)$$

付着割裂破壊時の横補筋引張力 $T_{w_u}$ は  $\overline{b_1 z}$ の大きさに比例するので

$$T_{w_u} \propto \frac{n^\alpha \cdot n'^\beta \cdot A_w \cdot jd}{\rho} \dots\dots\dots(16)$$

と書ける。(7)、(10)式の $T_{w_u}$ に(16)式を代入し、定数を整理すれば以下の式を得る。

$$s \tau_{st} = x_1 \frac{n^{1+\alpha} \cdot n'^\beta \cdot A_w \cdot jd}{\rho^2 \cdot db} \quad , \quad c \tau_{st} = x_2 \frac{n^{1+\alpha} \cdot n'^\beta \cdot A_w \cdot jd}{\rho^2 \cdot bw} \dots\dots\dots(17)$$

(17)式と $\tau_{co}$ を組み合わせるにより、横補筋と主筋のかかり方による付着割裂強度の差を表現する。その例を表2に示す。なお著者等の実験結果は森田・藤井式<sup>3)</sup>による $\tau_{co}$ に良く一致したので<sup>4)</sup>、これを用いることにした。(17)式中の未知数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ はB・Dタイプの実験結果から非線形最小二乗法により以下のように求まった。

$$\alpha=0.97, \beta=1.65, x_1=0.85, x_2=7.4 \dots\dots\dots(18)$$

(18)の値を(17)式に代入して次式が得られる。

$$s \tau_{st} = 0.85 \frac{n^{1.97} \cdot n'^{1.65} \cdot A_w \cdot jd}{\rho^2 \cdot db} \quad , \quad c \tau_{st} = 7.4 \frac{n^{1.97} \cdot n'^{1.65} \cdot A_w \cdot jd}{\rho^2 \cdot bw} \dots\dots\dots(19)$$

以上に述べた計算法と本実験・森田等<sup>3)</sup>の実験との比較を、図7に示す。本計算法は森田等の実験値にも良く適合し、しかも横補筋の配筋方法の差が表せるのが特長である。

### 3-4. 付着割裂耐力式

付着割裂破壊を生じた試験体のせん断力 $Q$ と試験区間の平均付着応力 $\tau$ の関係は、図6(b)に示すようなBi-linearになる。同図より、付着割裂耐力 $Q_u$ は次式で求められる。

$$Q_u = (\tau_u - Q_s / \sum \phi \cdot jd) \sum \phi \cdot jd \cdot (l/a) + Q_s \dots\dots\dots(20)$$

ここで、 $\tau_u$ ：付着割裂強度、 $Q_s$ ：せん断ひびわれ荷重、 $a$ ：せん断スパン長さ

図8に(20)式で求めた $Q_u$ の計算値と実験値の比較を示す。計算値1では $\tau_u$ 、 $Q_s$ の両方とも実験で得られた値を用いた。計算値2では $\tau_u$ は表2の方法による計算値を、 $Q_s$ は実験で得られた値を用いた。

### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 同じ横補筋量でも横補筋の配筋方法によって主筋の付着性状に差が生じ、それが部材の付着割裂強度、耐力に大きく影響を及ぼす。
- (2) 中子筋は付着割裂破壊に対して有効である。特に、中間筋にも閉鎖型の横補筋を掛けることが効果的であった。
- (3) 横補筋が付着割裂破壊を抑制するメカニズムを考察し、実験結果より中子筋がある場合にも適用できる付着割裂強度及び耐力の推定式を導いた。

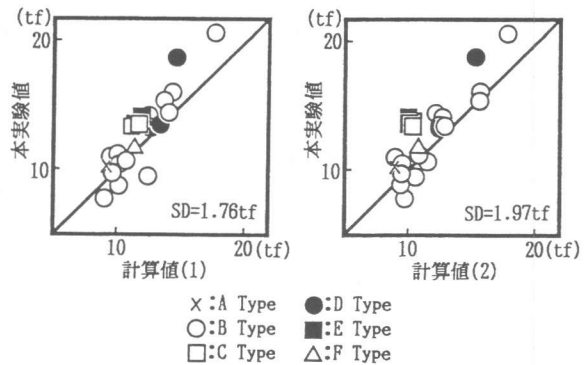


図8  $Q_u$ の計算値と実験値の比較

#### 【参考文献】

- 1)角 他:RC部材の付着割裂強度に関する実験的研究、JCI年次論文報告集、Vol.10、No.3、1988、pp173~178
- 2)森田、藤井 他:割り裂き付着破壊モードに与える横補筋の影響(1)、建築学会近畿支部研究報告集、1981、pp197~200
- 3)森田、藤井:異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第一報-、日本建築学会論文報告集、第319号、1982、pp47~55
- 4)角 他:RC部材の付着割裂強度に関する実験的研究-横補筋の効果について-、建築学会東海支部研究報告集、1989、pp133~136