

## [70] 割り裂き付着耐力に及ぼす横補強筋の効果

正会員 ○ 藤井 栄 (京都大学工学部)

正会員 森田 司郎 (京都大学工学部)

### 1. まえがき

異形鉄筋による付着破壊は、その付着抵抗がふしによる機械的なかみあいでは必ず、鉄筋の大きな滑動を許す周囲のコンクリートの割り裂きを伴う。この割り裂きによって付着効果が急激に劣化し、横補強筋のない場合は非常に脆性的な破壊をひきおこすことになる。この破壊を支配する要因は複雑で、説明が遅れているが、Ferguson, Jirsaをはじめ各研究者により徐々に問題点が明らかにされてきている。本研究は、その要因のひとつである、横補強筋と鉄筋配置の付着耐力に及ぼす影響について直接的な知見を得る為に行なったもので、計48体の供試体は実部材に近い鉄筋配置であり、その付着応力状態も柱・梁の鉄筋と類似する様に工夫してある。横補強筋は、その径、間隔、降伏点が異なり、かなり広範なデータが得られたので以下に報告し、その効果について検討する。

### 2. 実験概要

○ 付着試験法 …… 図-1に示す、いわゆるカンチレバ一型の引抜試験法を採用し、いずれも一方向単調荷重で破壊に至らせた。供試体断面内の2本もしくは4本の鉄筋は同一抜け出し変位を与えるように同時に荷重される。各鉄筋の分担引張力は荷重初期段階で均等になる様、調整し、以後各鉄筋引張力は、W.S.G. で計測された。

○ 供試体 …… 図-2に供試体の詳細を示す。試験鉄筋は上下にあり、ひとつの供試体について2度試験が行なえる。この結果、上端・下端の影響を直接調べる事ができる。また各供試体は図に示す共通のせん断補強が施されている。断面内の主筋は2本のものとして4本のものがあり、用いた鉄筋はネジコン D 19, D 25 の2種類である。付着長さはいずれも50cm、主筋表面までのかぶり厚さは3cm 共通とした。横補強筋は、普通強度、高強度のφ6, φ9を間隔12.5cm, 10cm, 6.25cm, 5cm と供試体毎に変えて配してある。供試体名称並びにそれらの諸元は、表-1を参照されたい。

○ 使用材料 …… 試験材令でコンクリート圧縮強度は1シリーズ; 273kgf/cm<sup>2</sup>, 2シリーズ; 285kgf/cm<sup>2</sup>, 3シリーズ; 255kgf/cm<sup>2</sup>であり、鉄筋降伏点はD19; 3900kgf/cm<sup>2</sup>, D25; 4100kgf/cm<sup>2</sup>, スターラップ用丸鋼は、φ6; 3270, φ9; 3230kgf/cm<sup>2</sup>で、高強度横補強筋φ6; 11100, φ9; 13800kgf/cm<sup>2</sup>であった。

○ 計測事項 …… 引張荷重並びに各鉄筋分担力の測定のほか、荷重端滑りは供試鉄筋から約20cm下のレベルか

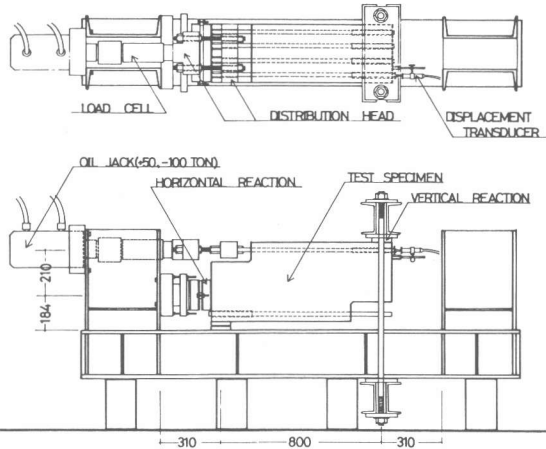


図-1 荷重装置

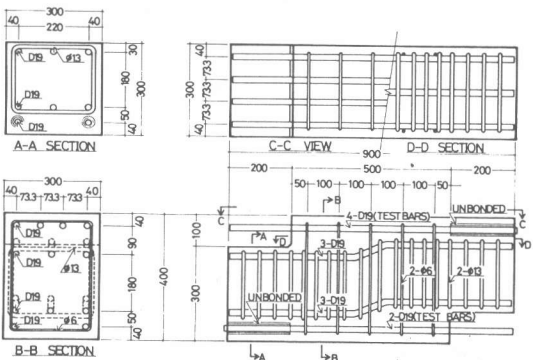


図-2 供試体詳細 (1-2-T(B))

らの相対滑りとしてオプトフォローにより計測し、自由端滑りは供試体端面に設置した変位計で計測した。また横補強筋はそのコーナーから4～5 cm離れた位置にW.S.G. を表裏貼付し、主筋近傍の歪出力を測定した。

### 3. 実験結果概要

全供試体の最大耐力並びに破壊モードを表-1に示す。いずれも鉄筋近傍のコンクリートの割れ裂きによる付着破壊で図-3にその模式図を示す。両隅にのみ主筋が配されたものはいずれもコーナースプリットモードで、断面内4本のものはいずれもサイドスプリットモードで破壊した。図-3は単純化してあるが、実際に見られる表面ひびわれは曲げ、せん断の影響を受けてかなり複雑である。付着抵抗を支配する材軸方向の縦ひびわれは載荷段階に応じて徐々に自由端の方へ移行してゆく。上述の2種の割れ裂きパターンの差異は、その付着抵抗機構の差異であるので、付着割裂を取り扱う上で両者は区別して考えねばならない。以下断面内両隅主筋2本のをコーナースプリット供試体、4本のをサイドスプリット供試体と呼ぶ。

なお表-1に示す様にD19主筋を用いたコーナースプリット供試体はいずれも主筋降伏後、大きい滑りを経験して破壊しており、他のコーナースプリット供試体と同列に扱えない事に注意を要する。

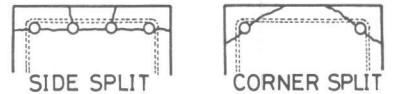


図-3 破壊モード

#### ○ 高強度横補強筋の効果

他の諸元がすべて等しく直接比較のできる供試体が9組ある。最大耐力の普通強度横補強筋使用のものとの比が、平均1.01で明らかに付着耐力が横補強筋の降伏点に依存しない事がわかる。なお破壊後載荷端滑り7 mm時の残存耐力には高強度横補強筋使用による改善がみられたがこれも横補強筋比増大に伴いその効果が少くなる。

#### ○ 横補強筋比と付着強度

主筋本数やその径との関連があるので横補強筋比だけではその効果は論じられないが、サイドスプリット供試体では横補強筋比が0.3%までは付着耐力上の効果はあまり顕著でない。これは事実上、φ6外周スターラップによる横補強では付着耐力の向上があまり期待できない事を示している。

#### ○ 上端・下端について

2シリーズは主に上端・下端の耐力比を直接知る事のできる供試体であり、その耐力比は、平均0.82であった。以下の耐力

表-1 実験結果一覧表

SERIES	SPECIMEN DESIGNATION	TEST BARS	STIRRUPS			ULTIMATE STRENGTH		FAILURE MODE**
			dia. (mm)	spacing (cm)	fy (kgf/cm <sup>2</sup> )	total load (ton)	bond stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	
1	1 1 T	4 D19	6.0	12.5	3269	30.0	25.0	S
	1 1 B	2 D19	6.0	12.5	3269	25.8	43.0	C(Y)***
	1 2 T	4 D19	6.0	10.0	3269	30.0	25.0	S
	1 2 B	2 D19	6.0	10.0	3269	25.3	42.2	C(Y)
	1 3 T	4 D19	6.0	6.25	3269	30.6	25.5	S
	1 3 B	2 D19	6.0	6.25	3269	28.1	46.8	C(Y)
	1 4 T	4 D19	6.0	5.0	3269	33.5	27.9	S
	1 4 B	2 D19	6.0	5.0	3269	29.7	49.5	C(Y)
	1 5 T	4 D19	9.0	12.5	3230	29.0	24.2	S
	1 5 B	2 D19	9.0	12.5	3230	25.8	43.0	C(Y)
	1 6 T	4 D19	9.0	10.0	3230	32.0	26.7	S
	1 6 B	2 D19	9.0	10.0	3230	27.8	46.3	C(Y)
	1 7 T	4 D19	9.0	6.25	3230	36.6	30.5	S
	1 7 B	2 D19	9.0	6.25	3230	—	—	—
	1 8 T	4 D19	9.0	5.0	3230	40.0	33.3	S
	1 8 B	2 D19	9.0	5.0	3230	31.7	52.8	C(Y)
2	2 1 T	4 D19	6.0	12.5	11100	29.0	24.2	S
	2 1 B	2 D25	6.0	12.5	11100	33.2	41.5	C
	2 2 T	4 D19	6.0	10.0	11100	30.0	25.0	S
	2 2 B	2 D25	6.0	10.0	11100	36.6	45.8	C
	2 3 T	4 D19	6.0	6.25	11100	33.9	28.3	S
	2 3 B	2 D25	6.0	6.25	11100	38.0	47.5	C
	2 4 T	4 D19	6.0	5.0	11100	29.5	24.6	S
	2 4 B	2 D25	6.0	5.0	11100	39.2	49.0	C
	2 5 T	4 D19	6.0	12.5	11100	27.0	33.8	C
	2 5 B	2 D25	6.0	12.5	11100	33.5	27.9	S
	2 6 T	4 D19	6.0	10.0	11100	26.0	32.5	C
	2 6 B	2 D25	6.0	10.0	11100	35.0	29.2	S
	2 7 T	4 D19	6.0	6.25	11100	30.0	37.5	C
	2 7 B	2 D25	6.0	6.25	11100	36.0	30.0	S
2 8 T	4 D19	6.0	5.0	11100	33.2	41.5	C	
2 8 B	2 D25	6.0	5.0	11100	39.5	32.9	S	
3	3 1 T	4 D25	6.0	12.5	3269	32.5	20.3	S
	3 1 B	2 D25	6.0	12.5	3269	34.5	43.1	C
	3 2 T	4 D25	6.0	10.0	3269	35.0	21.9	S
	3 2 B	2 D25	6.0	10.0	3269	34.0	42.5	C
	3 3 T	4 D25	6.0	6.25	3269	34.0	21.3	S
	3 3 B	2 D25	6.0	6.25	3269	36.7	45.9	C
	3 4 T	4 D25	6.0	5.0	3269	37.2	23.3	S
	3 4 B	2 D25	6.0	5.0	3269	39.0	48.8	C
	3 5 T	4 D19	9.2	10.0	13800	32.9	27.4	S
	3 5 B	2 D19	9.2	10.0	13800	40.1	33.4	S
	3 6 T	4 D25	9.2	10.0	13800	34.5	21.6	S
	3 6 B	2 D25	9.2	10.0	13800	38.9	48.6	C
	3 7 T	4 D25	9.2	12.5	13800	35.0	21.9	S
	3 7 B	2 D25	9.2	12.5	13800	38.0	47.5	C
3 8 T	4 D25	9.2	6.25	13800	40.0	25.0	S	
3 8 B	2 D25	9.2	6.25	13800	46.0	57.5	C(Y)	

Concrete strength: SERIES 1; 273 kgf/cm<sup>2</sup>, SERIES 2; 285 kgf/cm<sup>2</sup>, SERIES 3; 255 kgf/cm<sup>2</sup>  
Dimension of specimens: Bond length; 50.0cm, Clear cover to test bar; 3.0cm, Width; 30.0cm, Depth; 40.0cm

\* "T"; top cast bars, "B"; bottom cast bars.

\*\* "S"; side split mode, "C"; corner split mode.

\*\*\* (Y); Max. load was attained after yielding.

上の評価は、この比を用いて上端筋強度に揃えて整理したもので行なう。

#### 4. 横補強筋の付着耐力に及ぼす影響

○横補強筋の歪出力推移……………図-4は

(a)がサイドスプリット供試体、(b)がコーナースプリット供試体に於ける横補強筋の歪出力推移を表わしたもので、図中の

数字は横補強筋の位置を示し載荷端側から1, 2, … 10とした。この図より、最大耐力時に発揮される横補強筋の歪は、1200 $\mu$ 程度で、降伏歪に達しているものがほとんどなく、前述の最大耐力が、横補強筋の降伏歪に依存しない事を裏付けている。またサイドスプリット供試体では歪出力推移が明らかに不連続な荷重階がある。この特徴はここに示さない他のサイドスプリット供試体の共通の特徴で、この荷重階は横補強筋量にかかわらず、同一主筋配置であればほぼ等しく、自由端滑りが急増しはじめる荷重階に対応している。すなわち付着長全長にわたってスプリットクラックが発生した事を示しており、ここを境に横補強筋の付着

抵抗への寄与のメカニズムが大きく変わる事が理解できる。横補強量が少ないとこの荷重が最大耐力となり、多ければ歪出力のジャンプする現象が顕著でなくなる。コーナースプリット供試体では、このような現象はみられず最大耐力直前まで連続的な推移を示しており、横補強筋の付着抵抗への寄与が両破壊モードで大きく異なることがわかる。

○主筋配置と横補強効果……………図-5はサイドスプリット供試体の主筋引張力分担の推移を示し、最大耐力以後は点線で表示してある。これより横補強筋が直接かからない中間筋は両隅筋に比して最大耐力時及びそれ以後の分担が低い事がわかる。また図-6はサイドスプリット供試体の中間筋・隅筋別の平均付着応力-載荷端滑り曲線であり、点線が供試体としての平均曲線を示す。この図から両隅筋と中間筋の最大

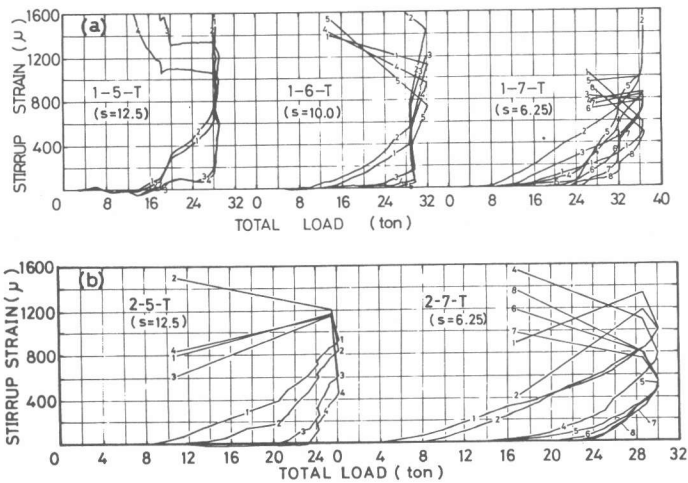


図-4 横補強筋の歪出力推移

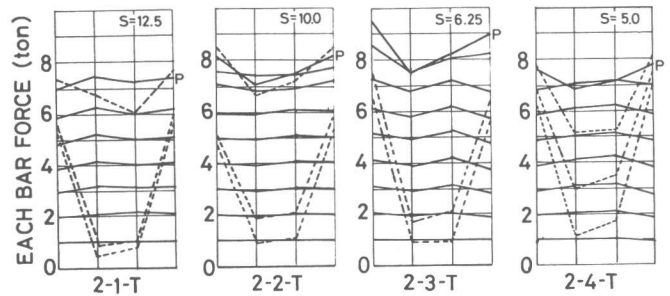


図-5 各鉄筋の引張力分担の推移 (4D19,  $\phi$ 6)

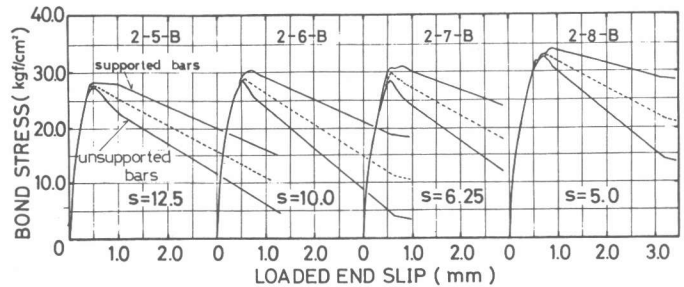


図-6 両隅筋、中間筋の付着応力-載荷端すべり曲線

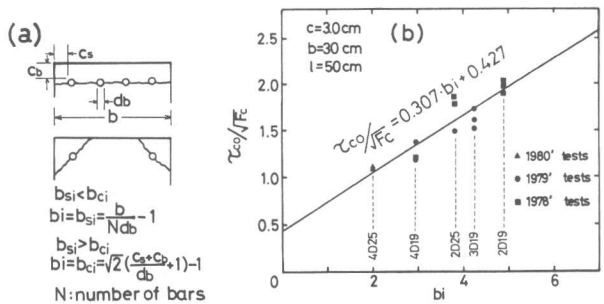


図-7 横補強筋のない場合の付着強度

耐力が同時に発揮されず、供試体としての最大付着強度が実際は両隅筋にその多くを依存している事がわかる。これは直接横補強筋で拘束されない鉄筋が多数並ぶほど横補強効果が低下し、また逆に中間筋を直接拘束することの効果が大きい事を示唆するものである。

○横補強量と最大付着応力……図-7は著者等の行なった既往の実験で横補強筋のない場合の付着強度を、かぶり厚さの効果を表わす係数  $b_i$  (同図(a)参照) について整理したもので、図中の式は線形近似式である。本来横補強筋による耐力上の効果が、横補強筋のない場合に耐力に単純に累加されると考えられないが、その相互関係の推定は困難であるので、本項では同図中の式により横補強筋のない場合の耐力を除き、横補強による耐力増分を便宜上取り扱うことにする。

図-8は前述したサイドスプリット供試体の両隅筋、中間筋の耐力増分を  $A_w/sdb$  ( $A_w$ : 横補強筋断面積,  $s$ : 横補強筋間隔,  $db$ : 主筋径) について整理したもので下端筋は上端筋耐力に換算してある。同図(a)にはコーナースプリット供試体の場合も示す。この図よりサイドスプリット供試体の場合、中間筋と両隅筋の耐力増分に大きなひらきがあり、同一スターラップで囲まれても、その主筋の位置により効果の度合いが異なる事がわかる。またコーナースプリット供試体はサイドスプリットの場合と比較して同じ隅に位置する主筋でもその効果は非常に大きい。ただ、図中の点は、両隅、中間のピーク値を示してあり、サイドスプリット供試体ではその多くが供試体としての付着破壊時に、両隅筋はそのピークに達する前であり、中間筋はピーク以後の耐力であることに注意を要する。

図-9は供試体としての平均付着強度増分と  $k \cdot A_{st}/sNdb$  ( $A_{st}$ : 1組の横補強筋断面積(本実験の場合  $2 \times A_w$ ),  $N$ : 主筋本数) について整理したもので  $k$  は破壊モードを考慮する為の係数でコーナースプリット供試体に対して  $k = \sqrt{2}$ , 他は 1.0 を与える。これは仮定したスプリット面を横切る横補強筋の有効断面積を考えた事になる。図中の式は主筋降伏後破壊したものを除いた回帰式で、かなり相関がある。なお、図-7, 図-9中の回帰直線を用いた耐力推定値の実験値との比は 0.86~1.12 の範囲で平均 1.00 であった。

## 5. 結論

- 横補強筋は付着耐力の向上に寄与するが、付着破壊時に発揮される横補強筋の応力はせいぜい  $2500 \text{ kgf/cm}^2$  程度であり、實際上、割り裂き付着強度は横補強筋の降伏点に依存しないと考えてよい。
- 割り裂き破壊モードによって横補強筋の拘束効果が異なり、付着耐力への寄与が異なる。
- 同一破壊モードでも断面内の主筋位置によって横補強効果は異なり、横補強筋の辺の途中に配置した鉄筋についてはその効果が低下する。

〔付記〕本研究は、技官小松勇次郎氏、小西孝幸君、後藤定己君、吉見和行君との協力により遂行された。

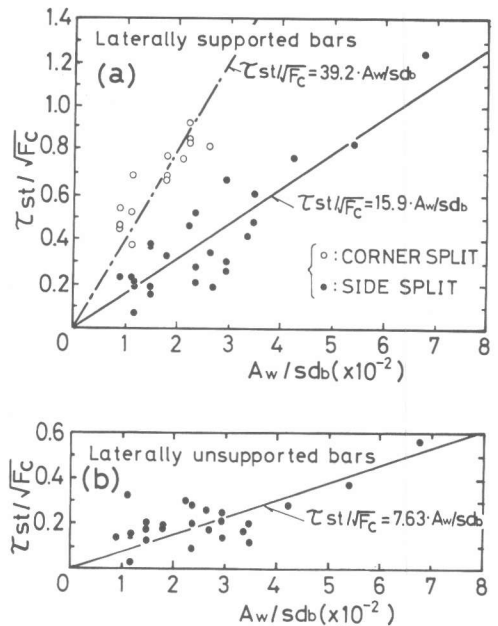


図-8 鉄筋配置と横補強筋の効果

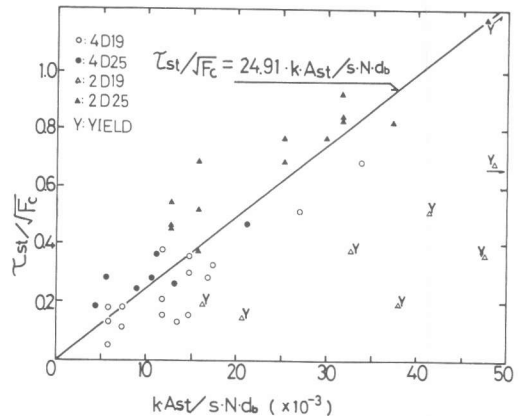


図-9 横補強筋による付着強度への寄与