# 論文 非閉鎖型補強筋による付着割裂強度の改善効果に関する研究

長友 克寛\*1・佐藤 裕一\*2・松原 三郎\*3・高橋 恵子\*4

要旨:本研究では, 横補強筋としてあばら筋と非閉鎖型補強筋とを併用した場合における付 着割裂強度の定量化を目的として, R C はりの対称曲げせん断試験を実施した。対象とした 破壊形式はサイドスプリット型破壊である。主な実験変数は,割裂線長さ比, 横補強筋比, 主筋本数に対する横補強筋脚数比,および非閉鎖型補強筋形状である。実験結果より,非閉 鎖型補強筋は付着割裂補強に有効であることを明らかにすると共に,著者等が既往の研究で 提案している付着割裂強度算定式を修正し,その適用性について検証した。 キーワード:非閉鎖型補強筋,付着割裂破壊,付着割裂強度, R C はり

#### 1. はじめに

RC骨組の柱・はり部材において過密配筋を回 避するために横補強筋を高強度化した場合,横 補強筋比の減少によって部材の付着割裂耐力が 低下する<sup>1)</sup>場合がある。著者等<sup>2)</sup>は,この問題を 解決するため,付着割裂破壊防止専用の付加的 横補強筋として」型およびU型の非閉鎖型補強 筋(以後,フックと表記)を試作し,これらを 超高強度スパイラル筋と併用して補強した RC はりおよび柱部材の破壊試験を行い,その補強 効果について検討してきた。そして,実験の結 果,フックは付着割裂強度の十分な改善効果を もつこと,超高強度スパイラル筋とフックの併 用によって過密配筋を回避しても靭性の低下を もたらすことはないこと,等を明らかにした。

しかし,これらの実験に使用した試験体にお いては付着割裂ひび割れの発生した領域の長さ が明確ではなく,付着割裂強度がかなり平均的 な評価となってしまった。しかも,試験体数の 制約から,配筋が非常に標準的なものに限定さ れ,横補強筋比や配筋計画のパラメトリックな 検討も不十分であった。

本論文は、フックの付着割裂補強効果を調べ

る研究の一環として,RCはりのせん断スパン にフックとあばら筋とを併用した場合を対象と し、フックの間隔や脚数の違いに伴う補強効果 の差異について実験的に検討したものである。

# 2. 実験概要

# 2.1 使用材料

表 - 1 に使用した鋼材の力学的特性を示す。 引張主筋(以後,主筋と表記)には,鉄筋径D19, 材質SD390の直角横節鉄筋を用いた。せん断補 強筋(フックおよびあばら筋)には,鉄筋径D6, 材質SD295Aの普通強度鉄筋を使用した。

試験体の作製およびその載荷試験は2回に分けて行った。破壊試験時の試験体の材齢は28~ 31日,コンクリートの圧縮強度の全平均値は, 前半実験が29.0MPa,後半実験が24.8MPaで

表-1 使用鋼材の力学的性質

	主筋	非閉鎖型補強筋 あばら筋
鉄筋径 (mm)	19.1	6.35
降伏強度fy (MPa)	431.4	390.5
引張強度fu (MPa)	640.5	589.4
弾性係数Es (GPa)	192.1	202.0

- \*1 高松工業高等専門学校 建設環境工学科教授 博士(工学)(正会員)
- \*2 京都大学大学院 都市環境工学専攻助手 博士(工学)(正会員)
- \*3 高松工業高等専門学校 建設環境工学科助手
- \*4 高松工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻学生(正会員)



図-1 試験体形状・寸法および載荷・測定方法(単位mm)

あった。

# 2.2 試験体

図-1に試験体の形状・寸法を示す。主な実 験変数は、はり幅(200,250mm),主筋本数 (3,4,5本)、あばら筋間隔(100,150mm。 以後、Swと表記)、フック間隔(50,100, 150mm。以後、Sbと表記)、およびフックの形 状(\_\_,U)である。

試験体は,高さ350mm,長さ2000mmの対称2点載荷を受ける単純ばりである。断面上部 に圧縮鉄筋 (D19, SD345)を2または3本,断 面下部に引張主筋 (D19, SD390)を試験体 No.2,6では3本,試験体No.1,3~5では4 本,試験体No.7~10では5本配置し,周囲を あばら筋 (D6, SD295A)を用いて間隔Swで せん断補強した。試験体No.10は,あばら筋お よび中子筋(断面中央に1本配置)と,フック との併用時の強度を検討するためのものであ る。試験体の断面寸法および横補強筋量は,サ イドスプリット型の付着破壊を想定して決定し た。せん断耐力を大きくして付着割裂破壊を先 行させるため,定着区間のあばら筋の間に,さ らに補助横補強筋(D6,SD295A)を配置した。

主筋は、支点近傍部(以後、自由端側と表記) にステンレス製パイプをかぶせ、せん断力一定 区間の中央付近に切り欠き部(以後、載荷端側 と表記)を設けることにより、定着長を400mm に限定した。この長さは、「鉄筋径の20倍以上 の定着長があればその付着割裂強度への影響は 小さい」という既往の研究<sup>11</sup>を参考に決定した。

フックの直線部の長さについては,既往の実 験で観察された付着割裂ひび割れ進展領域の幅





(a) 試験体 No.2

最終ひび割れ状況の一例

および鉄筋の曲げ加工規定(直線部の長さは径の12倍以上)等を考慮して80mmとした。

写真-1

使用したコンクリートは、スランプ18cm、粗 骨材最大寸法20mmのAEコンクリートであり、 図-1の断面図の上方向より打設した。従っ て、主筋は全て下端筋となる。

実験では,油圧サーボ載荷装置による変位制 御により単調に荷重を負荷した。どちらか一方 の定着区間が大きく損傷した時点で,一度除荷 し,その部分を厚さ20mmの鋼板とPC鋼棒に よって締め付け,他方が破壊に到るまで再載荷 を行った。なお,試験体No.9,10については, 載荷装置の能力の制限から破壊しなかったため, 荷重P=300kNでの5回の繰返し載荷による劣化 状況を観察した後,一旦除荷し,別の油圧ジャッ キに付け替えて再度載荷試験を行った。

主な計測事項は、荷重P,中央たわみδ,補強 筋歪および主筋の自由端すべりである。図-1 の断面図において黒塗りで示した主筋には、歪 ゲージを100mm間隔で表裏1枚ずつ貼付する とともに、自由端側に変位計を設置した。定着 区間内の全ての位置のあばら筋およびフックに も表裏に歪ゲージを貼付した。

# 3. 既往の付着割裂強度算定式

# 3.1 日本建築学会靭性保証型耐震設計指針(案)

同指針(案)<sup>3</sup>に規定されたサイドスプリット型 付着破壊に対する強度式(以後,指針式と表 記)のうち,横補強筋の負担分kst は次式で表さ れる。

 ksr=(56+47·Nw/N1)(bsi+1)·pw
 (1)

 上式中, bsi は割裂線長さ比, pw は横補強筋

 (ここではあばら筋)の補強筋比であり,

$$b_{si} = (b - N_1 \cdot d_b) / (N_1 \cdot d_b) \tag{2}$$

$$b_w = a_w / (b_e \cdot s_w) \tag{3}$$

ここに、 $d_b$ :主筋径、b:はり幅、 $b_e$ :はり有 効幅、 $N_1$ :主筋本数、 $N_w$ :あばら筋1組の脚 数、 $a_w$ :あばら筋1組の断面積、 $s_w$ :あばら筋 間隔である。

#### 3.2 著者等の提案式

著者等<sup>2),4)</sup>は,式(1)をフックを併用した場合 に拡張するため,次式のように修正を加えること を提案し,RCの柱およびはり試験体の破壊試験 を通してその適用性を確認している。

$$k_{st} = \{56 + 47 \cdot (N_w + N_b) / N_1\}$$
  
 
$$\cdot (b_{si} + 1) \cdot (p_w + p_b)$$
(4)

上式中, pbはフックの補強筋比であり,

$$p_b = a_b / (b_e \cdot s_b) \tag{5}$$

ここに,  $N_b$ :フック1組の脚数,  $a_b$ :フック1 組の断面積,  $s_b$ :フック間隔である。

著者等が実施したこれら既往の実験では、1組 のフックの脚数が2~8本と広い範囲を対象とし たため、その有効度に限界があることを考慮し て、Nbの代りに次の有効脚数Nbeを導入した。

$$N_{be} = \min[N_b, b_e / (15 \cdot d_{bb})] \tag{6}$$

これは、フックの脚1本の負担領域がその径 *dbb* の15倍であるとの仮定に基づいたものである。

しかし,実用上はフック脚数は4本程度以下で あろうことを念頭において,以下では,取りあえ ずフックの実脚数 *N*<sub>b</sub>を用いて議論を行う。

## 4. 実験結果およびその考察

#### 4.1 破壊性状

写真-1(a),(b)に破壊例として試験体No.2お よび10の最終ひび割れ状況をそれぞれ示す。 最も付着割裂補強筋量の多い試験体 No.8 で は、せん断ひび割れが大きく成長した。しかし、 破壊に至る前に試験機の載荷能力に到達したた め、その時点で試験を終了した。

他の全ての試験体では,まず中央2箇所の載 荷点の間に曲げひび割れ,次に切り欠き部から 斜めひび割れ,さらに定着区間にせん断ひび割 れが生じた。そして,そのせん断ひび割れから付 着割裂ひび割れが順次発生,成長し,連結するこ とで最大荷重に至った。

4.2 付着割裂強度の実験値

表-2に各試験体における実験変数の値およ び付着割裂強度の一覧を示す。同表中の右から 3列目には,最大荷重時における平均付着応力 の平均値 τ uexpを記載してある。ここに,平均付 着応力は,切り欠き部位置における主筋引張力 を定着区間の主筋表面積で除して計算したもの である。以下では,この値を付着割裂強度の実 験値 τ uexp として議論を進めていく。

図-2~4に $\tau$ uexpをコンクリート圧縮強度fc'の平方根で除した $\tau$ uexp/ $\sqrt{fc'}$ と付着割裂強度算定式(4)に含まれる3つの変数との関係を示している。

図-2に $\tau$ uexp/ $\sqrt{fc'}$ と $b_{si}$ との関係を示す。 3種類の $p_w + p_b$ の何れに対しても $b_{si}$ の増加に 伴って $\tau$ uexp/ $\sqrt{fc'}$ は増加している。同じ $b_{si}$ に対 する $\tau$ uexp/ $\sqrt{fc'}$ と $p_w + p_b$ との関係は、同図で は明確ではない。

2、 こ 天気を見ていて、 「大気」で、 「しょう」で、 「しょう」」、 「しょう」」												
試験体No.	コンクリート 圧縮強度 fc' (MPa)	付着割裂 パラメータ bsi	あばら筋 間隔 Sw (mm)	あばら筋 1 組の脚数 Nw	フック間隔 Sb (mm)	フック 1 組の脚数 Nb	あばら筋の 補強筋比 pw(%)	フックの 補強筋比 pb(%)	最大荷重時 平均付着応力 τuexp(MPa)	計算付着強度 τucal (MPa)	$\frac{\tau \text{ uexp}}{\tau \text{ ucal}}$	
1	24.8	1.618	100	2	無し	0	0.360	0.000	2.72	1.99	1.37	
2	29.0	2.490	100	2	100	2	0.360	0.360	4.65	4.73	0.98	
3	29.0	1.618	100	2	100	2	0.360	0.360	3.79	3.28	1.15	
4	24.8	1.618	150	2	150	2	0.240	0.240	3.23	2.54	1.27	
5	24.8	2.272	100	2	150	2	0.280	0.187	3.90	3.10	1.26	
6	29.0	3.363	100	2	100	2	0.280	0.280	5.36	5.05	1.06	
7	29.0	1.618	100	2	100	2	0.280	0.280	2.92	2.72	1.07	
8	29.0	1.618	100	2	50	2	0.280	0.561	2.75	3.40	0.81	
9	24.8	1.618	100	2	100	4	0.280	0.561	4.36	3.72	1.17	
10	24.8	1.618	150	3	100	2	0.280	0.280	3.88	2.75	1.41	

表-2 実験変数および実験結果の概要

注1) τ uexp は、ゲージを貼付した主筋全てについて、最大荷重時における定着区間での平均付着応力を計算し、 さらにその平均値をとったものである。

(τ uexp = Ps/(π・db・ld), Ps:最大荷重時における切り欠き部位置での主筋引張力, ld:定着区間長) 注2)フック1組の脚数 Nb には、実数を用いている。

注3) 試験体 No.8 はせん断破壊が先行したが、参考のため最大荷重時の τ uexp を記載してある。





図-3に $\tau$ uexp/ $\sqrt{fc'} E(N_w + N_b)/N_1$ との関係 を示す。3種類の $p_w + p_b$ の何れについても  $(N_w + N_b)/N_1$ の増加に伴って $\tau$ uexp/ $\sqrt{fc'}$ はほぼ 直線的に増加しており,式(4)に含まれる  $(N_w + N_b)/N_1$ の項の表現と符合している。

図-4に $\tau$  uexp/ $\sqrt{fc'} \geq p_w + p_b \geq o$ 関係を示 す。せん断破壊を生じたNo.8試験体を除外すれ ば、 $p_w + p_b$ の増加に伴って $\tau$  uexp/ $\sqrt{fc'}$ は増加 している。同じ $p_w + p_b$ に対する $\tau$  uexp/ $\sqrt{fc'}$ は ( $N_w + N_b$ )/ $N_1$ の大きい試験体の方が大きい。

#### 4.3 付着強度算定式の検証

図-5 に付着割裂強度の実験値 *t* uexp と式(4) に基づく付着割裂強度の計算値 T ucal との比を示 す(表-1の右端の欄参照)。式(4)が付着信頼 強度式(1)をもとにしたものであることを考える と、式(4)の適用性は良好であると判断できる。 せん断破壊を起こした試験体No.8を除外すれ ば、試験体はNo.2とNo.6の安全性が低い。この 一原因としては、両試験体共にU字型フックを使 用していること、すなわち1本の主筋に2本の フック脚が掛かっていることが考えられる。し かし、試験体No.9の中央の主筋にも2本のフッ ク脚が掛かっているが τ uexp/√fc' は小さくなっ ていないこと、試験体No.10の  $\tau$  uexp/ $\sqrt{fc'}$  はか なり大きくなっており中子筋のU字型フックの脚 が拘束効果を発揮している可能性のあること等 を考えると、これが原因であると結論付けるに

はデータが不足している。一方で,閉鎖型補強 筋とフックの脚とが重なっている場合,付着割 裂補強効果は小さいという既往の研究結果4もあ り,このように横補強筋の脚が接近している場 合の取扱いについては今後の検討課題である。

参考までに、付着割裂算定式の簡略化を念頭 に置き、式(4)に含まれるフック1組の脚数 Nbに ついて暫定的に以下の仮定を設けてみる。

Nb:同一断面内においてあばら筋の脚と重な

るフック,およびU字型フックについて は脚数を1本とカウントする。

この仮定の適用対象である試験体No.2, 6, 9の 実験値と計算値との比を再計算してみると,そ れぞれ1.26, 1.33, 1.39となり,当然のことな がら安全側でかつ良好なものに改善された。

# 4.4 フック応力 σ b

図-6に一例として試験体No.5におけるフッ ク応力σb分布の推移を示す。荷重が小さい段階 ではσbは載荷端側で大きいが、荷重増加による 割裂ひび割れの発生・進展に伴い次第に自由端 側でも大きくなる。応力σbの最大値は250MPa 程度であり、普通強度鉄筋の使用で十分である と考えられる。ただし、フックには曲げ引張が作 用し、一部には曲げ降伏しているものもあった。 4.5 あばら筋応力σw

図-7に一例として試験体No.5におけるあば ら筋応力σw分布の推移を示す。割裂ひび割れの





発生・進展に伴いσwは急激に増加し,フックを 併用していない試験体No.1を含めて,全試験体 10体中6体の試験体で降伏が生じた。今回の実 験では,あばら筋の中間に補助横補強筋を配置 したが,実際にはこのような補強筋は配置され ないことをことを考慮すると,フックとの併用 に際しては高強度鉄筋の使用が望ましい。

#### 5. 結論

本研究は、あばら筋と非閉鎖型補強筋(フッ ク)を併用したRCはりを対象とし、その破壊 試験を通して定着区間におけるフックの付着割 裂補強効果を検討したものである。以下に、得 られた結果を要約する。

- (1) フックは付着割裂補強に有効であり、付着割裂強度に及ぼす割裂線長さ比、横補強筋比、および主筋本数に対する横補強筋の脚数比の影響は、通常の閉鎖型横補強筋の場合のそれと同様の傾向を示した。
- (2) 割裂線長さ比が大きい断面をU字型フックで 補強したRCはりの付着割裂強度は,他の場 合と比較して若干小さい。
- (3)著者等が既往の研究において提案しているあ ばら筋とフックとを併用した場合の付着割裂 強度算定式を修正し、その適用性について検 証した結果、良好であることを確認した。
- (4)あばら筋とフックとを併用する場合,前者には高強度鉄筋,後者には普通強度鉄筋を用いることが望ましい。

#### 謝辞

本研究は(株)高周波熱錬の助成を得て実施した ものであり、中村佳史氏をはじめとする関係各 位に謝意を表します。

# 参考文献

- 藤井 栄:鉄筋コンクリートにおける付着・定着特性とその部材性能に及ぼす影響 に関する研究,京都大学学位論文,1992.1
- 2) Sato, Y., Nagatomo, K. andNakamura,



Y.: Bond-Strengthening Hooks for RC Members with 1300 MPa-Class Shear-Reinforcing Spirals, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.2, No.2, pp.7–14, Nov. 2003

- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の 靭性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 1999
- 4)田中麻里ほか:非閉鎖型補強筋と超高強度 スパイラル筋とを併用したRCはりのせん断 スパンにおける力学的挙動、コンクリート 工学年次論文集、第26巻、第2号、pp.829-834、2004