

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、RC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、RC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¹⁾場合がある。著者等²⁾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L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靱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

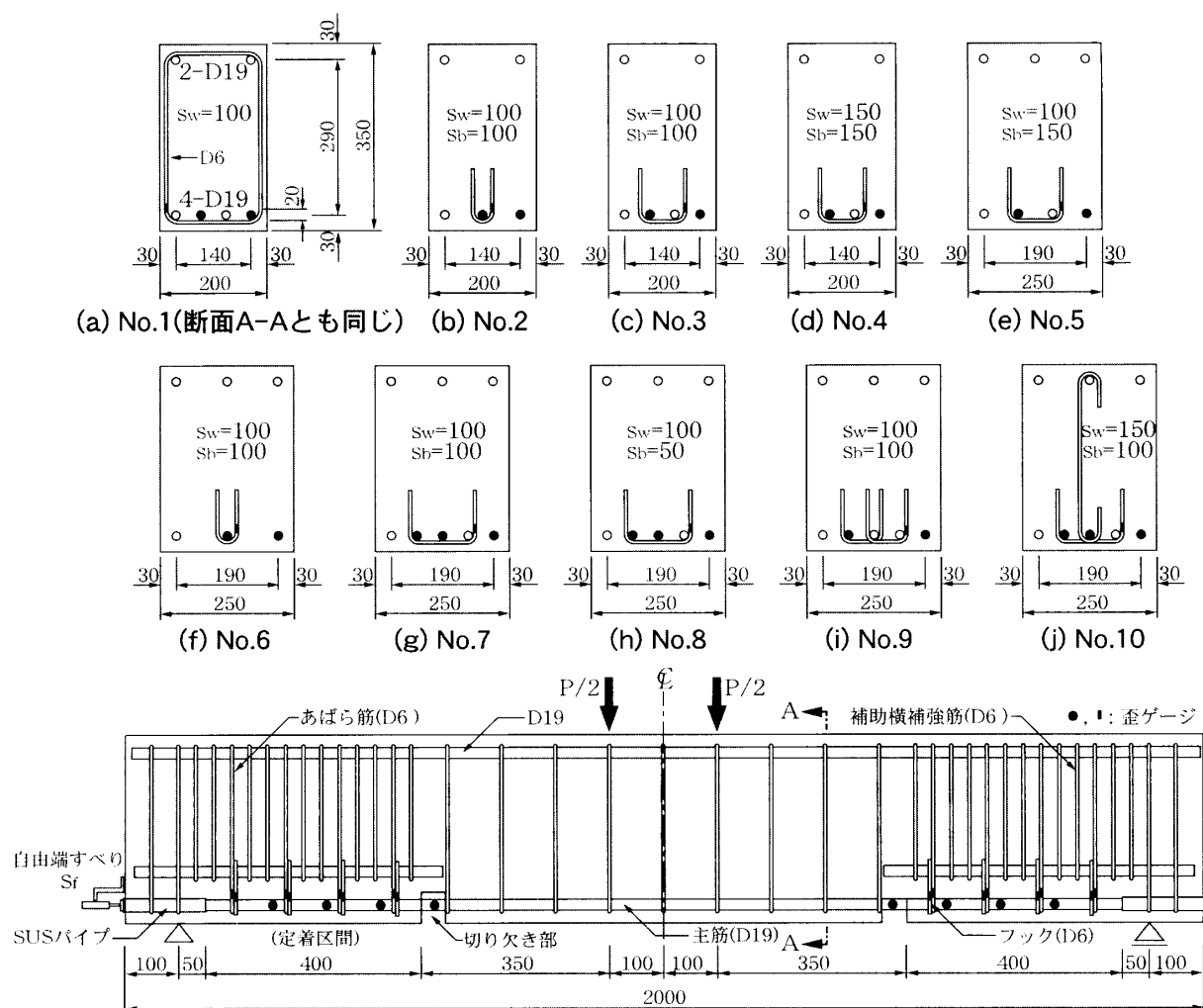
	主筋	非閉鎖型補強筋 あばら筋
鉄筋径 (mm)	19.1	6.35
降伏強度 f_y (MPa)	431.4	390.5
引張強度 f_u (MPa)	640.5	589.4
弾性係数 E_s (GPa)	192.1	202.0

*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・寸法および荷重・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、 S_w と表記）、フック間隔（50, 100, 150mm。以後、 S_b と表記）、およびフックの形状（ $\sqcup$, U ）である。

試験体は、高さ350mm、長さ2000mmの対称2点荷重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 S_w でせん断補強した。試験体No.10は、あばら筋お

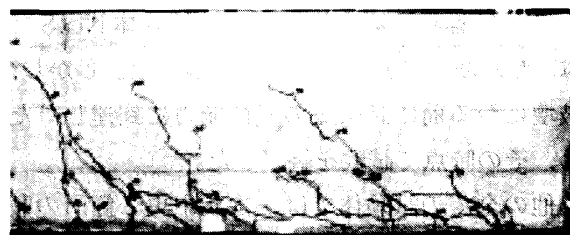
よび中子筋（断面中央に1本配置）と、フックとの併用時の強度を検討するためのものである。試験体の断面寸法および横補強筋量は、サイドスプリット型の付着破壊を想定して決定した。せん断耐力を大きくして付着割裂破壊を先行させるため、定着区間のあばら筋の間に、さらに補助横補強筋（D6, SD295A）を配置した。

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、荷重端側と表記）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



(b) 試験体 No.10

写真-1 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。

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 $P=300\text{kN}$ 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 日本建築学会靱性保証型耐震設計指針(案)

同指針(案)³⁾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 k_{st} は次式で表される。

$$k_{st} = (56 + 47N_w / N_1) [b_{si} + 1] p_w \quad (1)$$

上式中、 b_{si} は割裂線長さ比、 p_w は横補強筋（ここではあばら筋）の補強筋比であり、

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

$$p_w = a_w / (b_e s_w) \quad (3)$$

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^{2), 4)}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。

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

上式中、 p_b はフックの補強筋比であり、

$$p_b = a_b / (b_e s_b) \quad (5)$$

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、 N_b の代りに次の有効脚数 N_{be} を導入した。

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

これは、フックの脚1本の負担領域がその径 d_{bb} 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_b 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 τ_{uexp} をコンクリート圧縮強度 f_c' の平方根で除した $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ 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 $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ 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 $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ は増加している。同じ b_{si} に対する $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ と $p_w + p_b$ との関係は、同図では明確ではない。

表 2 実験変数および実験結果の概要

試験体No.	コンクリート 圧縮強度 f_c' (MPa)	付着割裂 パラメータ b_{si}	あばら筋 間隔 S_w (mm)	あばら筋 1 組の脚数 N_w	フック間隔 S_b (mm)	フック 1 組の脚数 N_b	あばら筋の 補強筋比 $p_w(\%)$	フックの 補強筋比 $p_b(\%)$	最大荷重時 平均付着応力 τ_{uexp} (MPa)	計算付着強度 τ_{ucal} (MPa)	τ_{uexp} τ_{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

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。

($\tau_{uexp} = P_s / (\pi \cdot d_b \cdot l_d)$)、 P_s : 最大荷重時における切り欠き部位置での主筋引張力、 l_d : 定着区間長

注 2) フック 1 組の脚数 N_b 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。

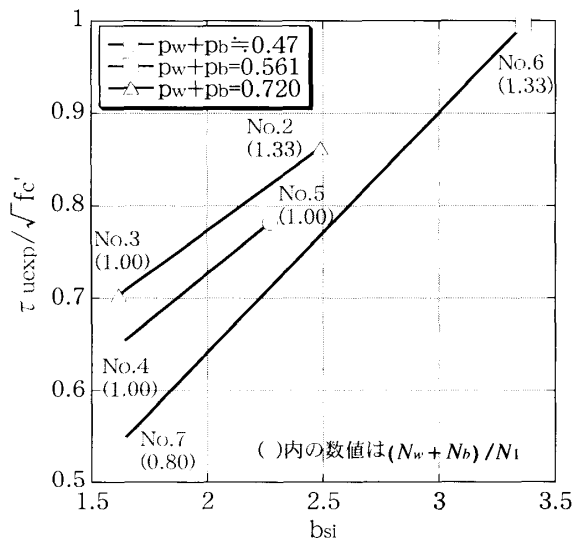


図 2 付着強度への割裂線長さ比の影響

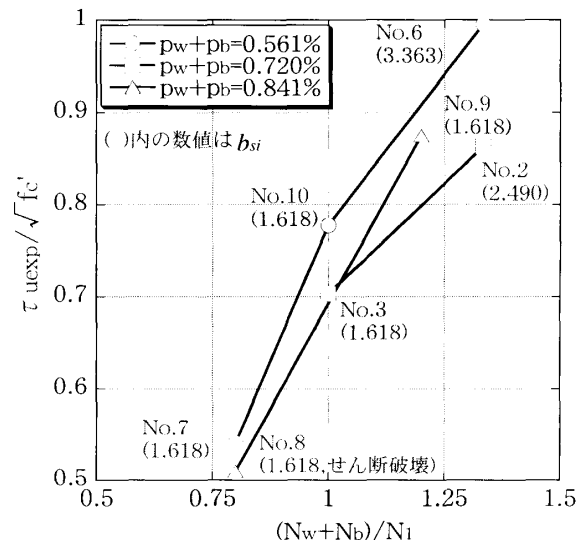


図 3 付着強度への横補強筋脚数－主筋本数比の影響

図-3に $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ と $(N_w+N_b)/N_1$ 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 $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ 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 $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ と p_w+p_b との関係を示す。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 $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ は増加している。同じ p_w+p_b に対する $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ 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 τ_{uexp} と式(4)に基づく付着割裂強度の計算値 τ_{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 $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ は小さくなっていないこと、試験体No.10の $\tau_{uexp}/\sqrt{f_c'}$ 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⁹⁾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 N_b について暫定的に以下の仮定を設けてみる。

N_b : 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 σ_b 分布の推移を示す。荷重が小さい段階では σ_b は荷重端側で大きい、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 σ_b 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 σ_w

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

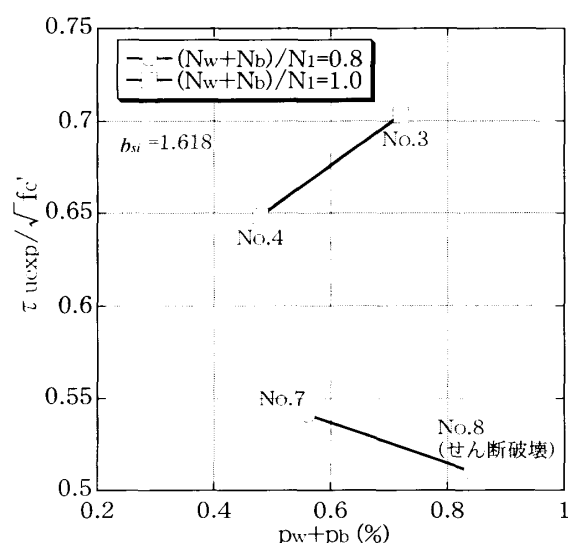


図-4 付着強度への横補強筋比の影響

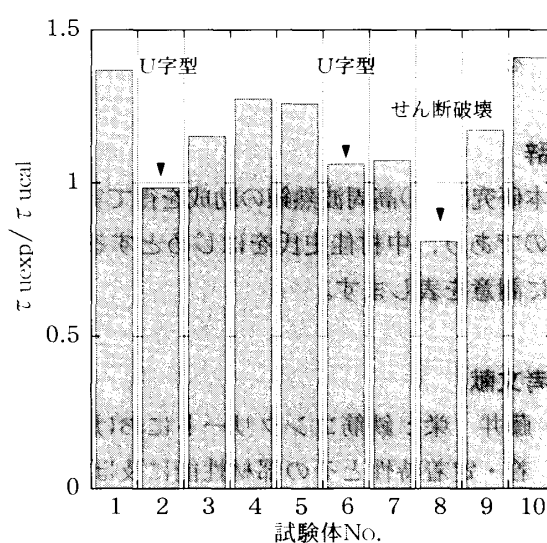


図-5 付着強度の実験値と算定値との比較

発生・進展に伴い σ_w 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

- 1) 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. and Nakamura,

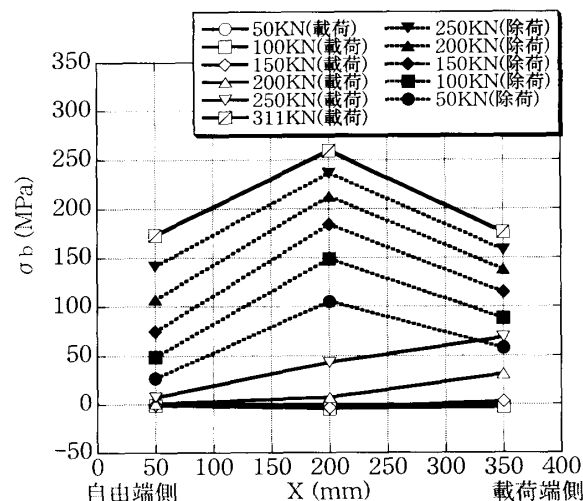


図-6 フック応力 σ_b 分布の一例
(試験体 No.5)

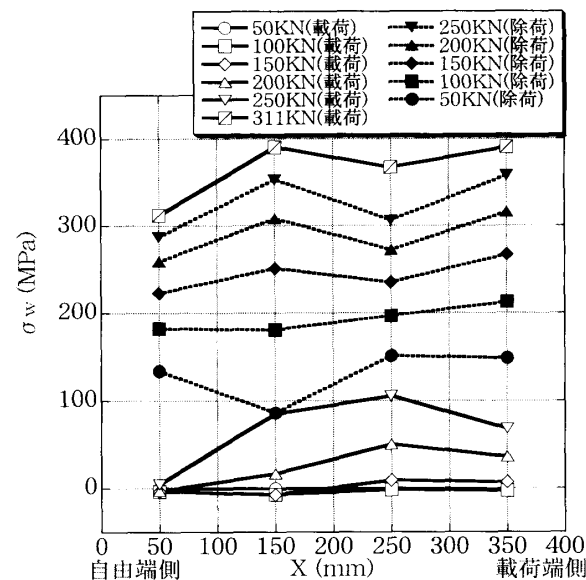


図-7 あばら筋応力 σ_w 分布の一例
(試験体 No.5)

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

- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造物の靱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