

論文 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

田中 麻里*1・長友 克寛*2・佐藤 裕一*3・角 徹三*4

要旨：本研究では、横補強筋として超高強度スパイラル筋と非閉鎖型補強筋とを併用した場合におけるせん断スパン域での主筋の定着挙動を調べることを目的とし、RCはりの対称曲げせん断試験を実施した。実験では、全ての主筋に横補強筋を掛け、その掛かり方の影響等について検討した。実験結果より、2種類の横補強筋の併用は付着特性の改善に効果があること、非閉鎖型補強筋を配置した場合における局部付着応力-すべり関係は通常の閉鎖型補強筋を用いた場合のものとはほぼ同じであること等を明らかにした。

キーワード：超高強度スパイラル筋, 非閉鎖型補強筋, 付着割裂破壊, RCはり

1. はじめに

著者等¹⁾は、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（以下、フックと略記）を試作し、これらを超高強度スパイラル筋と併用した場合における補強効果を実験的に検討した。そして、RCはりおよび柱部材を対象とした実験の結果、フックは付着割裂強度の十分な増大効果をもつこと、主筋に超高強度スパイラル筋あるいはフックの何れかを直接掛けることによって、良好な付着拘束効果の得られること、両者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。

本論文は、フックの効果を調べる研究の一環として、主筋に超高強度スパイラル筋あるいはフックの一方あるいは両者を直接掛けた場合を対象とし、その掛かり方の違いによる補強効果の差異について実験的に検討したものである。

主筋には、D16の直角横節鉄筋を用い、その2本の縦節部分には歪分布計測のため幅5mm、深さ5mmの溝を切削した。さらに、降伏を避けるため焼入れを施した。せん断補強筋としてφ6の1300MPa級超高強度スパイラル筋を使用し、これに付加して用いる割裂防止専用のフックにはD6、SD295Aの普通強度鉄筋を使用した。載荷試験は材齢28~31日で実施し、使用したコンクリートの圧縮強度の全平均値は22.8MPaであった。

2.2 試験体

図-1に試験体の形状・寸法を示す。実験変数は、フック間隔(75, 150mm。以下、Shと表記)、割裂補強筋の種類(L, U)および主筋本数である。同図中の断面図から分かるように、全ての主筋はスパイラル筋とフックの一方または両方で拘束しており、この条件下でのフック

表-1 使用鋼材の力学的性質

補強筋名	降伏強度 fy (MPa)	破断強度 fu (MPa)	弾性係数 Es (GPa)
高強度主筋(D16)	837	916	183
スパイラル筋(φ6)	1378	1391	181
非閉鎖型補強筋(D6)	305	452	185

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。

*1 広島大学 工学部第四類学生 (正会員)

*2 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)

*3 京都大学大学院 都市環境工学専攻助手 博士(工学) (正会員)

*4 豊橋技術科学大学 建設工学系教授 工博(正会員)

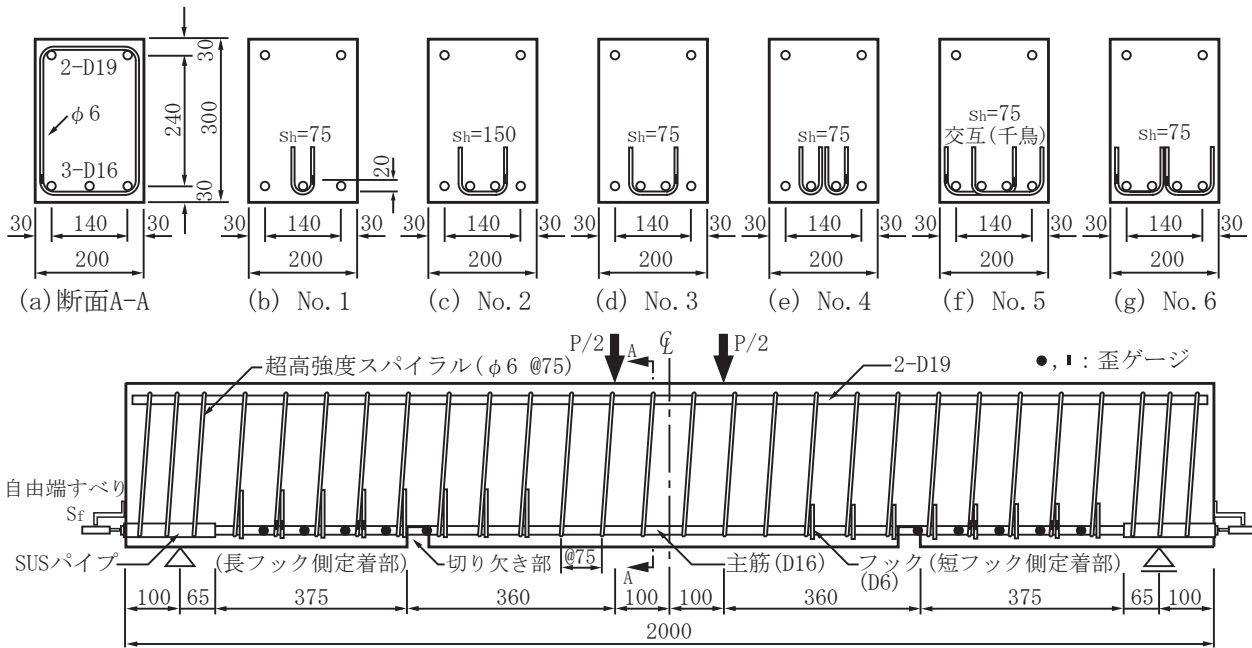


図-1 試験体形状・寸法および荷重・測定方法 (単位mm)

補強量 (脚数) の定着挙動への影響を調べた。

試験体は対称2点荷重を受ける単純ばりであり、寸法は幅200mm、高さ300mm、長さ2000mmである。断面上部に普通強度圧縮鉄筋D19を2本、断面下部に高強度引張鉄筋D16を試験体No.1では3本、試験体No.2~6では4本配置し、周囲をピッチ75mmの超高強度スパイラル筋でせん断補強した。引張主筋は、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、せん断スパン中央部付近に切り欠き部 (以後、荷重端側と表記) を設けることにより、定着長を375mmに限定した。

フックについては、試験体左右にそれぞれ脚の長いもの (曲げ半径15mm、直線部の長さ65mm。以後、長フックと表記) と短いもの (同15mm、35mm。以後、短フックと表記) とを配置した。前者の脚における直線部の長さは、別途実施した試験で観察された付着割裂ひび割れ進展領域の幅を参考にした。試験区間内でのフックの配置間隔は $Sh = 150$ または75mm、それに対応して配置個数は3個または5個である。

実験では、油圧サーボ荷重装置による変位制御により荷重を負荷した。どちらか一方の定着域が大きく損傷した時点で、一度除荷し、その部分を幅200mm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荷重を行った。

主な計測事項は、荷重 P 、中央たわみ δ 、主筋・スパイラル筋・フックの各歪、主筋荷重端・自由端すべりである。スパイラル筋とフック筋の歪は、切り欠き部から2個目と4個目の補強筋におけるものである ($Sh = 150$ mmの試験体No.2のみ1個目と2個目)。

3. 実験結果およびその考察

3.1 破壊性状

図-2 (a), (b), (c) に試験体No.2, 5, 6の最終ひび割れ状況をそれぞれ示す。No.2は $Sh = 150$ mmの試験体、No.5は $Sh = 75$ mmであるが千鳥配置のため各主筋には150mm間隔でフックの隅角部が掛かる試験体、No.6は $Sh = 75$ mmの試験体である。ここに第1~4主筋とは、図-1の試験体断面図における主筋を左から数えたものである。

全ての試験体において、まず曲げスパン内に曲げひび割れが生じ、次に切り欠き部から斜めひび割れ、さらに定着部にせん断および付着割裂ひび割れが順次発生・成長していった。

図-2 (a), (b) に示した試験体では、定着域の自由端側1/2 (長さ200mm程度) の区間において付着割裂破壊を生じた。ただし、この2つの

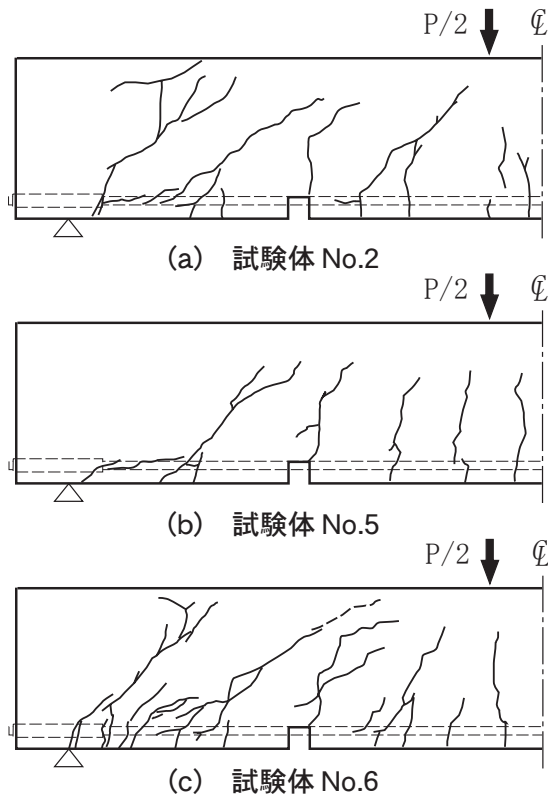


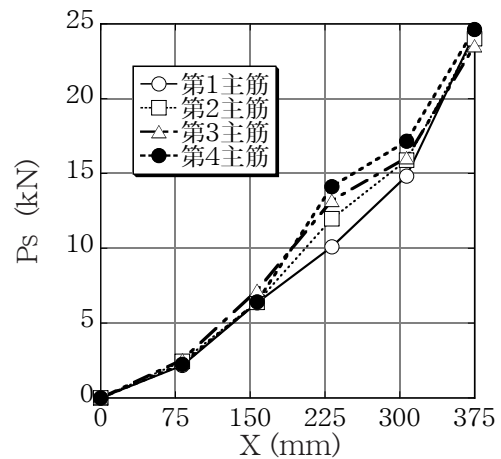
図-2 最終ひび割れ状況の一例

試験体では、フックの間隔と付着割裂領域の長さに大きな差が無かったため、フックの脚の長さの違いの影響は明確ではなかった。

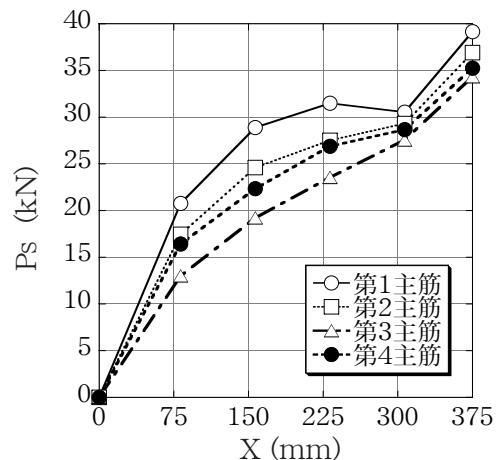
図-2(c)に示した試験体では、若干の割裂ひび割れは生じたものの、最終的にはせん断ひび割れの大きな成長によって破壊に到った。同じ $Sh=75\text{mm}$ の他の試験体 No.1, 3, 4 においても同様の破壊を示した。これらの試験体では付着割裂破壊を生じなかったため、フック補強量と付着割裂強度との関係は明らかにはならなかったが、主筋すべり量等から判断すると、フックの脚数の増加に伴い、当然すべりに対する拘束効果は大きくなったものと考えられる。

3.2 主筋引張力 P_s 分布

図-3(a), (b)に試験体 No.6 の荷重 $P=100\text{kN}$ および 150kN 時における、長フック側の主筋引張力 P_s の分布をそれぞれ示す。ここに、同図の横軸 X は、自由端からの距離を示す。同図(a)のように荷重が $P=100\text{kN}$ と小さい段階では、 P_s 分布はほぼ直線となった。一方、同図(b)のように荷重が $P=150\text{kN}$ と大きくなった場合、 P_s 分布は上に凸の曲線へと移行した。これは、



(a) $P=100\text{kN}$ 時



(b) $P=150\text{kN}$ 時

図-3 主筋引張力 P_s 分布
(試験体 No.6, 長フック側)

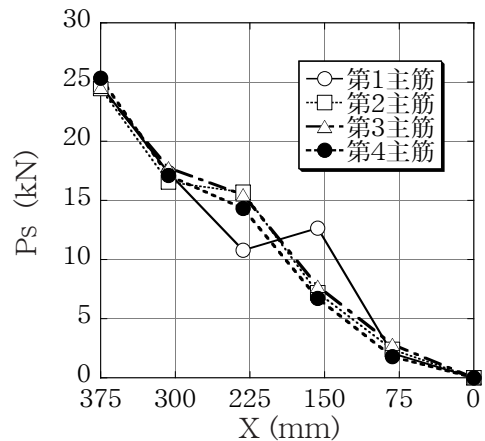
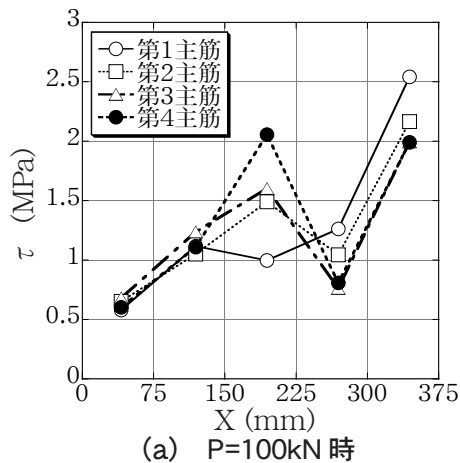


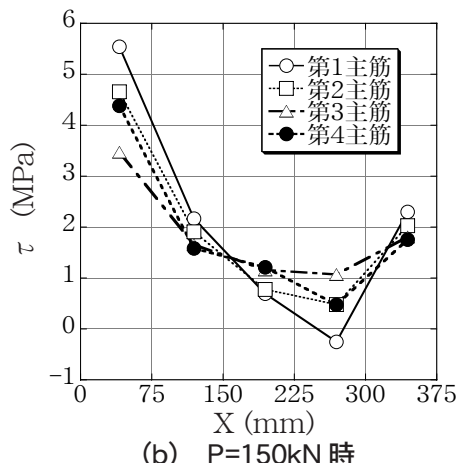
図-4 主筋引張力 P_s 分布
(試験体 No.2, $P=100\text{kN}$ 時, 短フック側)

定着域での斜めひびわれの発生・成長とその本数の増加、およびひびわれ面近傍でのコンクリートと主筋間の付着劣化によるものである。このことは、設計に用いる曲げモーメントの支点側へのシフトの必要性を裏付けるものである。

図-4に試験体 No.2 の荷重 $P=100\text{kN}$ 時にお



(a) P=100kN時



(b) P=150kN時

図-5 主筋付着応力 τ 分布
(試験体 No.6, 長フック側)

る短フック側での主筋引張力 P_s の分布を示す。付着割裂破壊した試験体の場合、同図のように短フック側では長フック側に比較して P_s 分布に若干の乱れがみられた。しかし、付着割裂破壊しなかった試験体では、定着域での斜めひび割れの発生状況の違いによる影響はあるものの、全ての主筋に横補強筋が掛かっていたためか、各主筋の P_s 分布はほぼ同じであり、かつフック補強量の P_s 分布形状への影響は小さかった。

3.3 主筋付着応力 τ 分布

図-5(a), (b)に試験体No.6の荷重 $P=100\text{kN}$ および 150kN 時における、長フック側での主筋付着応力 τ の分布をそれぞれ示す。同図より、 P の増加に伴い、 τ のピークが X の小さい自由端側へと移行していることが分かる。

図-6に試験体No.2の荷重 $P=100\text{kN}$ 時における、短フック側での主筋付着応力 τ の分布を示す。割裂ひび割れの発生により、第1主筋の

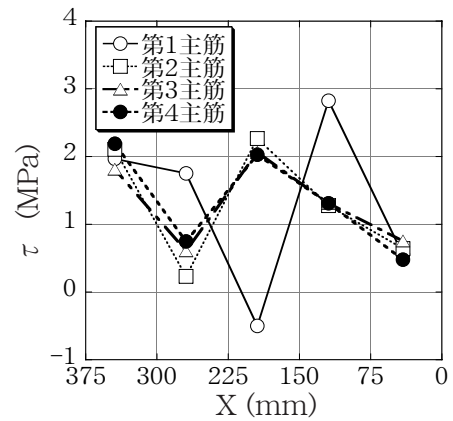


図-6 主筋付着応力 τ 分布
(試験体 No.2, P=100kN時, 短フック側)

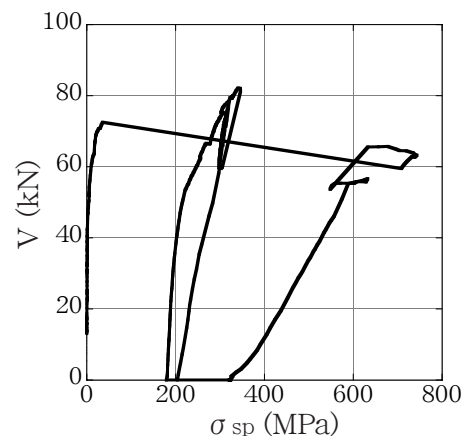


図-7 せん断力 V -スパイラル筋応力 σ_{sp} 関係
(試験体 No.2, 長フック, 荷端より2番目)

τ 分布が乱れている。なお、今回の実験では、長フックか短フックかの違いが τ 分布に及ぼす影響は明確では無かった。しかし、付着割裂耐力に対するせん断耐力の比を更に大きくした場合、および正負繰返し荷重によりひび割れ進展状況が過酷になった場合等には、大きな差の生じることが予想され、今後の検討課題である。

試験体No.2の割裂ひび割れ発生域における平均付着割裂強度は全主筋の平均値で $\tau_{uexp}=3.4\text{MPa}$ であった。著者等¹⁾は、フックの脚の定着に関わるコンクリートの有効領域を考慮に入れた付着割裂強度式を提案している。その式によれば、付着割裂強度計算値は $\tau_{ucal}=3.5\text{MPa}$ となった。提案式による計算値は実験値とほぼ一致しており、その有効性が確認できた。

3.4 超高強度スパイラル筋応力 σ_{sp}

図-7にせん断力 V -超高強度スパイラル筋応力 σ_{sp} 関係の一例を示す。同図は、試験体No.2

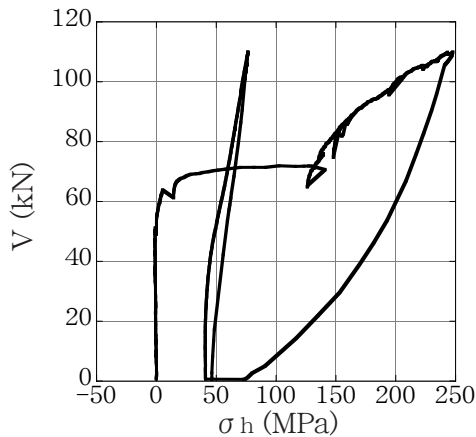


図-8 せん断力V-フック応力 σ_h 関係
(試験体 No.6, 短フック, 載荷端より2番目)

の長フック側の載荷端から2番目の位置におけるものである。図中の σ_{sp} の値は、曲げ加工終了点位置に貼付した2枚の歪ゲージの読みの平均値に弾性係数を乗じて求めた。応力度 σ_{sp} の値は700MPaを超えており、超高強度スパイラル筋とフックの併用の有効性が読み取れる。なお、スパイラル筋にはせん断ひび割れの発生に伴ってかなりの曲げが加わる。そのため、場所によっては、曲げ降伏を生じたり、歪の平均値が圧縮になる場合も見られた。

3.5 フック応力 σ_h

図-8に試験体No.6における載荷端より2番目の短フックのせん断力V-フック応力 σ_h 関係を示す。ここでも、 σ_h の値は、曲げ加工終了点位置に貼付した2枚の歪ゲージの読みの平均値に弾性係数を乗じて求めた。応力度 σ_h の値は約250MPaに到達しており、フックがせん断ひび割れの拘束にもかなり寄与する場合のあることを示している。なお、試験体No.6は、同一断面内に2個のフックを配置しているが、 σ_h の値は内側の第3主筋に掛かった脚よりも外側の第1主筋に掛かった脚の方が大きかった。

また、全ての試験体において、 σ_h の値は降伏強度より低く、普通強度鉄筋を使用することの妥当性がうかがえた。

3.6 局部付着応力 τ -すべりS 関係

図-9に試験体No.2の長フック側における局部付着応力 τ -すべりS 関係の一例を示す。以下におけるすべりSは、図-1中に示した主筋の

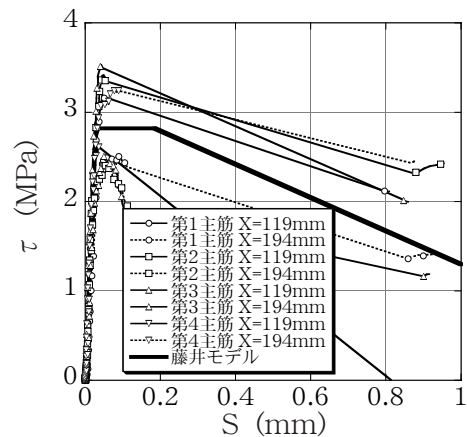


図-9 局部付着応力 τ -すべりS 関係
(試験体No.2, 長フック側)

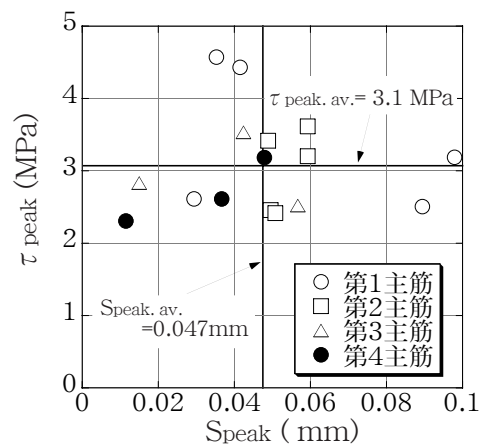


図-10 付着応力 τ_{peak} -すべり S_{peak} 関係
(ピーク時, 試験体 No.2)

自由端すべり S_f に当該点までの歪の計測値の積分値を加算して求めたものである。図中には、藤井²⁾の提案した付着割裂破壊時の τ -Sモデルも併せて図示してある。同図より、両者の曲線は比較的一致していることが分かる。

図-10に試験体No.2におけるピーク時の付着応力 τ_{peak} およびすべり S_{peak} の関係を示す。プロットしたデータは、付着割裂ひび割れの発生した自由端近傍域における3箇所の歪ゲージより求めたものである。 τ_{peak} の平均値は3.1MPa、 S_{peak} の平均値は0.047mmであり、藤井モデル²⁾の値2.8MPaおよび0.031mmとオーダー的にはほぼ一致した。

図-11に試験体No.2における τ_{peak} と初期すべり剛性 k_b との関係を示す。ここに、剛性 k_b は、局部 τ -S関係のほぼ直線と見なせる部分を最小自乗法によって直線近似した場合の勾配である。また、プロットしたデータは、図-10

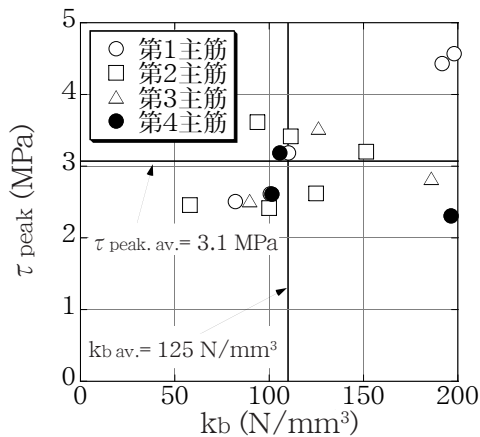


図-11 ピーク時付着応力 τ_{peak} - 初期剛性 k_b 関係 (試験体 No.2)

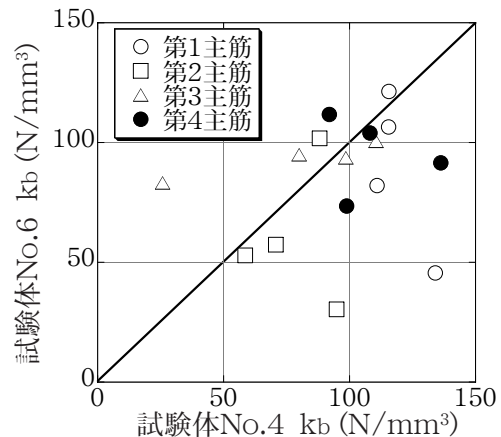


図-12 試験体 No.4 と No.6 との初期剛性 k_b の比較

のデータに対応している。剛性 k_b はほぼ 50 ~ 200 N/mm^3 の範囲にあり、平均値は 125 N/mm^3 となった。藤井モデルでは、 k_b として 98.1 N/mm^3 を提案しており、オーダー的にはほぼ一致した。今回の実験より、主筋とそれに沿う位置によってばらつきはあるものの、大局的にみればフックを用いた場合にも、閉鎖型補強筋を用いた場合と同様に 1 つの τ -S モデルが構築できる可能性があると考えられる。

図-12 に試験体 No.4 と No.6 とを対象とし、主筋番号と評価位置とが同一の点における初期すべり剛性 k_b の関係を示す。データが割裂ひび割れ発生前のものであることもあり、各主筋にフックが掛かっている場合、フック形状の違いが k_b に及ぼす影響は明確では無く、データは図中に示した 45 度の直線の近傍に分布している。なお、試験体 No.4 と No.6 とについて、ひび割れ状況、主筋引張力分布、スパイラル筋応力、フック応力、局部 τ -S 関係等を比較すると、ほとんど差が見られなかった。一方、スパイラル筋と非閉鎖型補強筋の脚が重なる試験体 No.5 と、そうでない試験体 No.2 の付着耐力には大きな差が見られなかった。これらのことから、試験体 No.6 の第 1, 第 4 主筋のようにスパイラル筋とフックが同時に主筋に掛かる補強方法は得策ではないと考えられ、今後の検討課題である。

4. 結論

本研究は、超高強度スパイラル筋と普通強度

非閉鎖型補強筋を併用した RC はりの定着域における付着性状を実験的に検討したものである。以下に、得られた結果を要約する。

- (1) 非閉鎖型補強筋が同一の間隔で全ての主筋に掛かっている場合、定着域の主筋引張力分布に大きな差異は見られない。
- (2) 主筋本数 4 本の試験体について、非閉鎖型補強筋を 75mm 間隔で千鳥状に配置した場合と、150mm 間隔で一列に配置した場合との間には補強効果に大きな差異は見られない。
- (3) 非閉鎖型補強筋を配置した場合における局部付着応力-すべり関係は、通常閉鎖型補強筋を用いた場合のものと同様である。

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) Sato, Y., Nagatomo, K. and Nakamura, 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
- 2) 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