

論文 モルタル充填式継手を用いたPCa部材における集約せん断補強筋の付着割裂耐力向上効果に関する実験研究

筏井 文隆*1・小林 克巳*2・阿瀬 正明*3・虻川 真大*4

要旨：モルタル充填式継手(スリーブ継手)を用いたPCa部材は、主筋をスリーブで覆うため主筋の付着長さが短くなり、付着割裂破壊により部材の変形性能に影響すると懸念されている。本論では、PCa部材の付着割裂耐力向上効果に関して、スリーブ端部に集中的に補強筋を配置する集約せん断補強方法に着目し、集約補強筋量をパラメータとした部材実験を行った。その結果、主筋降伏以前において、集約補強筋量の増加にともない付着割裂耐力が向上することが確認できた。ただし、集約補強筋量が多くなると、断面換算して同じ補強筋量とした均等配筋の部材ほど付着割裂耐力は増加しないことがわかった。

キーワード：モルタル充填式継手，集約せん断補強，PCa，付着割裂耐力，せん断力伝達機構

1. はじめに

架構式プレキャスト(PCa)構法において、部材接合部に使用される鉄筋継手としてモルタル充填式継手(スリーブ継手)がある。スリーブ継手を有するPCa部材の接合部は、部材の製作が容易にでき、施工時の作業性がよくなるため、部材端部にもうけられることが多い。そのため、部材のヒンジゾーンに剛性の大きいスリーブ継手が存在することになり、変形能力が劣るとされ、スリーブ周囲の補強筋量の割り増しが要求されてきた。また、主筋を太径のスリーブで覆ってしまうため、主筋の付着長さが短くなり付着破壊に対して不利になるのではないかと懸念がある。スリーブ継手を有するPCa部材における主筋の付着性状について検討した実験結果より¹⁾、スリーブ継手にも主筋なみの付着応力が存在することが確認されたが、主筋降伏以前では危険断面がスリーブ端部付近になるような挙動が認められた。このことから、スリーブ継手を用いたPCa部材ではスリーブ端部での主筋のダボ変形により、かぶりコンクリートが

割り裂かれるため、主筋の付着劣化が進行し、部材変形性能に影響すると考えられる。

これまで筆者らは、PCa部材の変形性能を向上させる方法として、スリーブの端部に補強筋を集中的に配置する集約補強方法について提案し、その適用性と部材性能に与える影響について検討してきた^{2)~5)}。実際の施工では、スリーブ周囲に補強できる補強筋量には限界があるため、集約補強方法には工法上の利点も期待できる。これまでの既往の研究から、集約補強筋には部材せん断耐力を向上させる効果があることが報告²⁾されている。集約補強筋が主筋のダボ変位を拘束しせん断耐力が向上するのであれば、付着割裂耐力も同様に向上させる効果があるのではないかと予想される。

本論は、付着割裂破壊する部材に対して集約補強筋の効果を明らかにするために、付着破壊する試験体を設計し、集約補強筋量をパラメータとした実験を行うことで、集約補強筋による付着割裂耐力向上効果を確認しようとしたものである。

*1 福井大学大学院 工学研究科システム設計工学専攻 工修(正会員)

*2 福井大学教授 工学部建築建設工学科 工博(正会員)

*3 日本スプライススリーブ(株)エンジニアリング部技術課

*4 日本スプライススリーブ(株)エンジニアリング部技術課(正会員)

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体断面は25cm×30cmとし、主筋は3-D19(SD490)、せん断補強筋はφ9(SR235)、コンクリートは $F_c=24\text{MPa}$ とした。集約補強筋はφ13,16,19,22(SS400)を使用した。せん断スパン比(M/QD)は2.0である。スリーブ継手はD19用の実物大のものを使用した。試験体一覧を表-1に、鉄筋およびコンクリートの材料特性を表-2に示す。実験パラメータとして、均等配筋した一体打ち試験体(RC@100)とPCa試験体(PCa@100, PCa@55)ならびにPCa@100試験体のスリーブ端部に集約補強筋を配置した集約せん断試験体(ISRφ13,16,19,22)の合計7体とした。試験体の配筋形状を図-1に示す。同様の配筋で基準となるRC@100およびPCa@100試験体の設計せん断余裕度は0.99, 設計付着余裕度は0.62とし、集約補強筋の効果を確認するために、付着破壊に不利な設計とした。PCa@55試験体は、ISRφ16の集約筋をφ9相当に断面換算し、スリーブ継手区間も含めて均等配筋したものに相当している。試験体設計に用いた終局せん断耐力(Q_{su})計算値は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針⁶⁾」に示されているA法非ヒンジ式を用いて計算した。付着割裂強度計算値(τ_{bu})は同指針に示す付着強度精算式によるものとした。なお、平均付着応力度(τ)は主筋曲げ降伏時のものであり、有効付着長さとして、部材全長から有効せいを差し引いたものである。曲げ耐力時せん断力(Q_{Mu})はe関数法により求めた。PCa試験体の製作にあたっては、付着割裂に及ぼす継手部の剛性および形状の影響のみに着目し、スリーブ内で主筋を継がず通し鉄筋とし、スリーブに主筋を挿入しモルタルを充填した後、一体打ち試験体と同様に製作しコンクリートを打設した。

2.2 加力方法

加力方法は連続梁形式とし、正負交番繰返し載荷とした。加力制御は部材角で行い、部材角1/100まで0.2/100刻みで一回ずつ、1/100で正

表-1 試験体一覧

| 試験体 | 配筋形状 | 付着余裕度 | | | | せん断余裕度 | | |
|---------|--------|--------------|----------------------|-------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | | P_w (%) | τ_{bu} (MPa) | τ_f (MPa) | τ_{bu} / τ_f | Q_{su} (kN) | Q_{My} (kN) | Q_{su} / Q_{Mu} |
| RC@100 | 9φ@100 | 0.51 | 3.71 | 5.96 | 0.62 | 171 | 173 | 0.99 |
| PCa@100 | | | | | | | | |
| ISRφ13 | | | | | | | | |
| ISRφ16 | | | | | | | | |
| ISRφ19 | | | | | | | | |
| ISRφ22 | | | | | | | | |
| PCa@55 | 9φ@55 | 0.92 | 4.41 | 0.74 | 262 | 1.51 | | |

表-2 材料特性

| 種類 | 降伏強度 (MPa) | 降伏ひずみ (μ) | 引張強度 (MPa) | ヤング係数 (GPa) | 伸び率 (%) |
|-------------|---------------|--------------------|---------------|----------------|------------|
| φ9 (SR235) | 314.6 | 1637 | 434.6 | 193 | 29.9 |
| φ13 (SS400) | 300.1 | 1643 | 441.0 | 204 | 32.2 |
| φ16 (SS400) | 283.5 | 1529 | 430.3 | 218 | 34.4 |
| φ19 (SS400) | 292.7 | 1588 | 436.7 | 208 | 32.7 |
| φ22 (SS400) | 296.2 | 1586 | 446.8 | 204 | 32.0 |
| D19 (SD490) | 602.2 | 3135 | 788.1 | 203 | 17.2 |

| 種類 | 圧縮強度 (MPa) | 圧縮強度時 ひずみ(μ) | 引張強度 (MPa) | ヤング係数 (GPa) |
|--------|---------------|-----------------------|---------------|----------------|
| コンクリート | 24.1 | 2458 | 1.81 | 18.7 |
| SSモルタル | 69.7 | - | - | - |

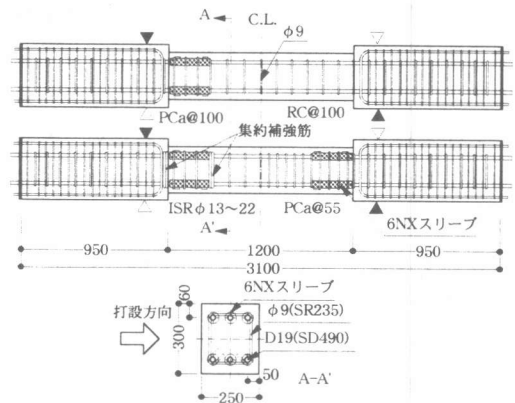


図-1 試験体配筋形状

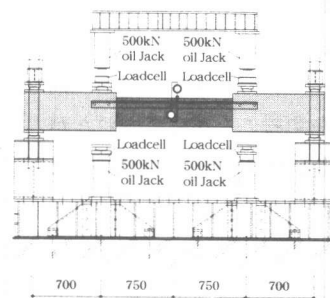


図-2 加力装置

負3回、以降3/100まで0.5/100ごとに正負2回、3,4,5/100まで正負一回ずつとした。加力装置を図-2に示す。

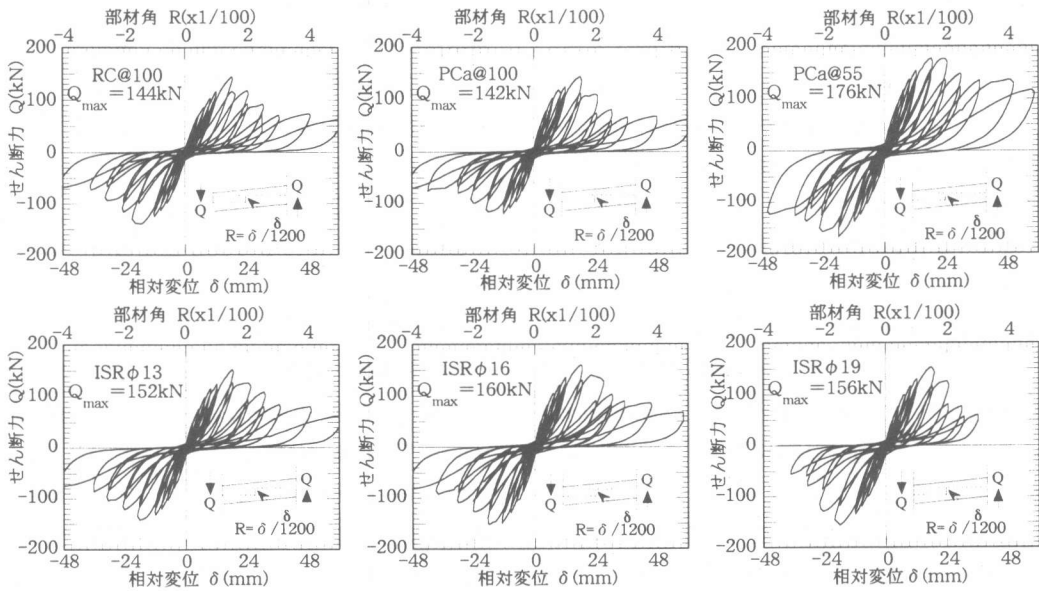


図-3 せん断力・相対変位関係

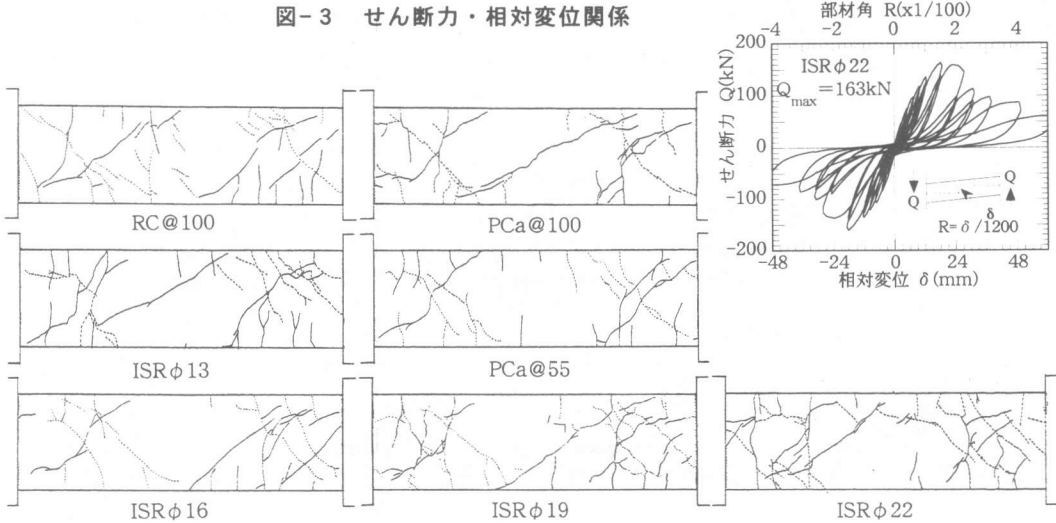


図-4 ひび割れ発生状況(R=1/100)

2.3 測定方法

主筋と補強筋のひずみはひずみゲージを用いて測定した。部材の相対変位は、両側の試験体側面加力点位置に固定したゲージホルダー間の変位を変位計を用いて測定し、相対変位(δ)とした。荷重は500kNロードセルにより測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体のせん断力・相対変位関係を図-3に示す。PCa@55試験体を除き、どの試験体も

正荷時の主筋降伏以前(部材角 $R=1.5/100$)に付着割裂破壊(サイドスプリット)した。一体打ち試験体RC@100と同じ配筋であるPCa@100の付着割裂耐力はほぼ同じであったが、PCa@100試験体では負荷時での耐力が早期に減少している。繰返し荷重による付着劣化の影響がPCa試験体のほうが若干大きいことがわかる。集約補強筋サイズが大きくなると、付着割裂耐力も増加する傾向が認められたが、耐力発揮後のせん断力・変位関係の履歴性状は集約補強したものと均等配筋(PCa@100)のものでは変化がみられ

なかった。ISRφ19試験体では付着割裂耐力発揮後の耐力減少が激しかったが、原因は不明である。通常配筋のPCa@55試験体は主筋が降伏するまで耐力が上がったが、その後付着割裂破壊(サイドスプリット)し部材角 $R=2/100$ 以降に耐力が減少した。

3.2 ひび割れ発生状況

各試験体の付着割裂破壊以前(部材角 $R=1/100$)のひび割れ発生状況を図-4に示す。曲げひび割れに関しては、PCa試験体ではスリーブ端部付近にひび割れが集中して発生する傾向がみられた。せん断ひび割れに関しては、同様の配筋であるにもかかわらず、RC@100とPCa@100試験体ではひび割れ発生状況に明らかな違いがみられた。PCa@100試験体はRC@100試験体と異なり、継手区間を除く試験区間圧縮隅角部を結ぶ斜めせん断ひび割れが発生した。

集約補強筋量の少ないISRφ13でもPCa@100と同様のひび割れ性状を示したが、集約補強筋量が多い試験体およびせん断補強量の多いPCa@55試験体ではそのようなひび割れは発生しなかった。これは集約補強筋を配置することで、補強筋を密に配筋したのと同様に主筋のダグ変位を拘束し、一体打ちのような変形モードに移行したためと思われる。

3.3 主筋ひずみ分布

各試験体の部材角 $R=1.5/100$ までの上端主筋ひずみ分布を図-5(a~g)に示す。均等配筋した一体打ち試験体(a)、PCa試験体(b,c)及び集約補強試験体(d~g)とも主筋ひずみ分布の傾きに明確な差異は認められず、スリーブ継手や集約補強筋の有無等による特徴は見られなかった。既往のPCa部材実験では試験区間側のスリーブ端部付近で主筋ひずみが増大する傾向にある

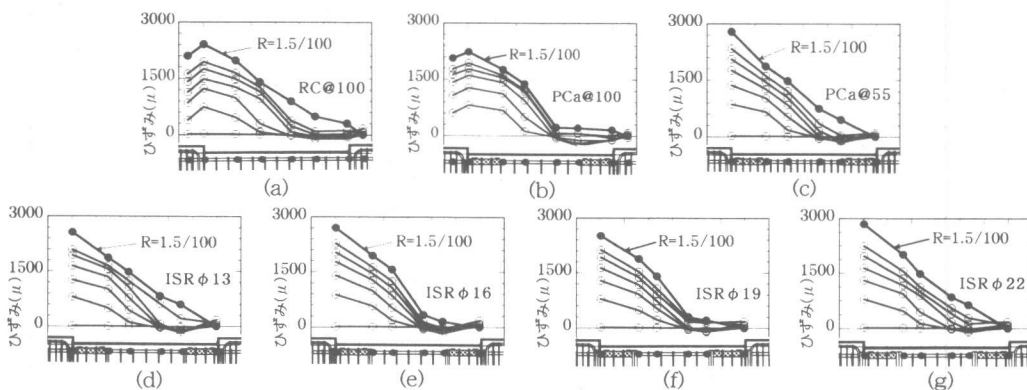


図-5 上端主筋ひずみ分布

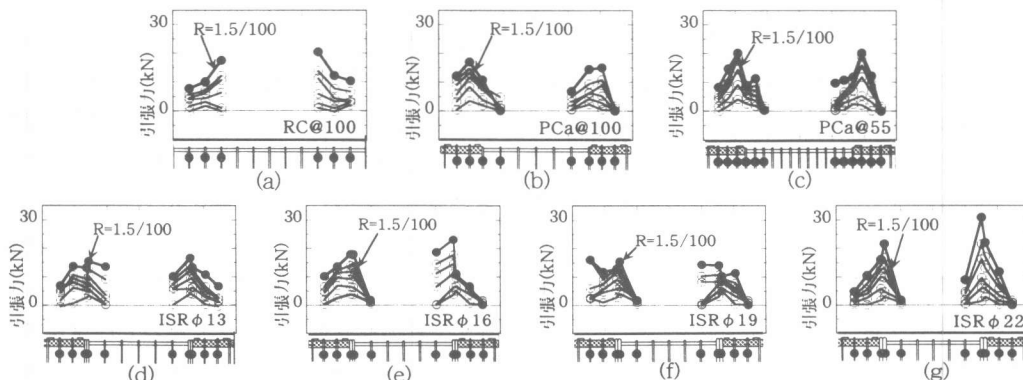


図-6 補強筋引張力分布

が、本実験では主筋を通し鉄筋としているため、そのことが主筋ひずみ分布に影響したとも考えられる。

3.4 補強筋の引張力分布

付着破壊時(部材角 $R=1.5/100$)における各試験体の補強筋引張力分布を図-6(a~g)に示す。PCa試験体(b,c)および集約補強試験体(d~g)では、一体打ち試験体(a)にくらべ、集約補強筋も含めてスリーブ端部付近の補強筋引張力の負担が大きい。特に集約補強試験体(d~g)では、集約補強筋の負担する引張力が最も大きく、集約補強筋が期待した通り主筋のダボ変位を拘束していることがわかる。なお、どの補強筋も降伏ひずみに達していなかった。

4. 集約補強筋の付着割裂向上効果

4.1 付着割裂耐力

各試験体の付着割裂耐力(Q_{max})と集約補強筋(2- ϕ 13,16,19,22)の付着割裂耐力時負担引張力(T_{ISR})の関係を図-7に示す。RC@100およびPCa@100では付着割裂耐力の差は少なく、スリーブ継手による影響はみられなかった。集約補強試験体は全てPCa@100試験体よりも付着割裂耐力が増加していること、また集約補強筋の負担引張力が大きいほど付着割裂耐力が増加していることから、集約補強筋が付着割裂耐力の向上に寄与していることは明らかである。ISR ϕ 19の付着割裂耐力の上昇はやや低いもののISR ϕ 22では上昇に転じており、集約補強筋量に応じて付着割裂耐力が増加することがわかった。継手区間を含めて集約補強筋を断面換算して均等配筋とすればISR ϕ 16とPCa@55が同じ補強筋量になるが、ISR ϕ 16,19,22の3体ともPCa@55の耐力に及ばず、集約補強筋量を多くしても均等配筋したものほど付着割裂耐力は向上しない。

4.2 せん断力伝達機構

モルタル充填式継手を用いたPCa部材のせん断力伝達機構を考え、集約補強筋による付着割裂耐力向上メカニズムについて考察する。PCa@100とRC@100のひびわれ発生状況と補強筋

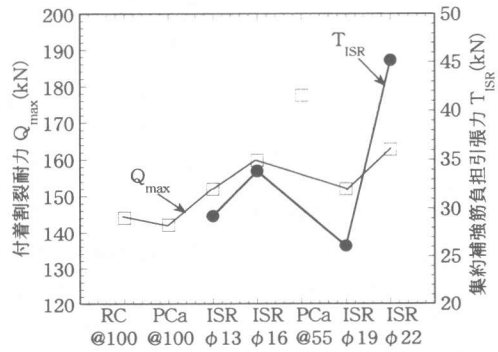


図-7 付着割裂耐力と集約筋引張力の関係

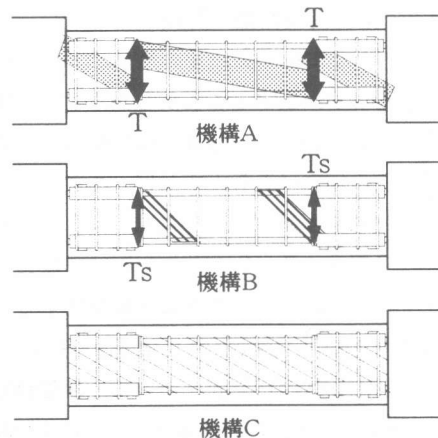


図-8 せん断力伝達機構

の引張力分布より、PCa部材ではスリーブ継手区間及び試験体中央に図-8に示すようなアーチ機構Aを形成するものと考えられる。このような機構が成立するためには、スリーブ継手区間を拘束する引張力Tが必要である。集約補強試験体では、集約補強筋が引張力Tの大部分を負担するが、通常の均等配筋の試験体でもスリーブ端部付近の補強筋が引張力Tの役割を負担しているものと考えられる。アーチ機構Aの発生とともに、主筋のダボ変位を拘束するために引張力Tの一部を用いた引張力Tsによるトラス機構Bが通常の配筋で形成されるトラス機構Cと同時に発生しているものと思われる。トラス・アーチ理論によれば、コンクリート有効圧縮強度からトラス機構で使用されるコンクリート強度を差し引いた分がアーチ機構で使用されるコンクリート強度になるとされている。PCa@100および集約補強筋の少ない試験体では、主筋のダボ変位を

拘束し得る補強筋が少ないため、補強筋の引張力を必要としないアーチ機構Aが卓越し、試験体中央にひび割れを発生させたものと思われる。引張力Tを負担し得る集約補強筋の増加にともない、主筋のダボ変位を拘束する引張力Tsが増加するため、トラス機構Bによるせん断力負担が大きくなる。スリーブ端部ではトラス機構Bの圧縮束と引張力Tsに釣り合う主筋付着力が増加する。このようにして集約補強筋により部材の付着割裂耐力が増加すると考えられる。

4.3 集約補強筋量の評価

図-7より集約補強筋量の増加にともない付着割裂耐力が向上することがわかるが、前述のように付着割裂耐力の増加が集約補強筋によるダボ変位の拘束にあるとすれば、ある一定量の集約補強筋を配置すればそれ以上耐力が向上しないと予想される。しかし、少ない実験資料のなかで一般的に集約補強筋量を定量化することは困難である。本論では終局強度設計指針⁶⁾による付着割裂強度精算式を用いて、付着割裂強度実験値(τ_{exp})から集約補強筋による付着割裂強度向上効果がどの程度均等配筋での補強筋比の増加(ΔP_w)になるのか計算を試みた。集約補強筋による付着強度増加分とスリーブ継手区間も含めて均等配筋と換算した場合の補強筋による付着強度負担分を等価と仮定して補強筋比の増加(ΔP_w)を付着割裂強度実験値(τ_{exp})から逆算して求めた結果が図-9である。 τ_{exp} は式(1)により平均の付着応力として求めた。

$$\tau_{exp} = T / (L \cdot \phi) \quad (1)$$

T：最大耐力時における部材端部の主筋ひずみの差から求めた引張力

ϕ ：鉄筋周長=6cm L：付着長さ=120cm

付着長さ(L)に関しては、主筋降伏以前であるため、試験体区間全長を有効付着長さとして仮定した。集約補強筋による付着割裂強度の向上効果は、集約補強筋の増加に応じて上昇するが、集約補強量が大きくなると、均等配筋に換算したもののほどの効果はないものの、補強筋比で0.20%~0.40%の増加に相当することがわかった。

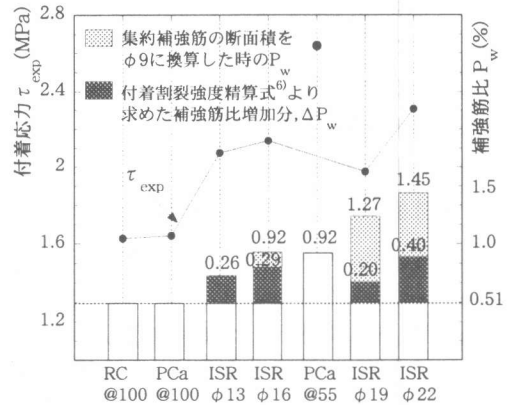


図-9 付着割裂強度実験値と集約補強筋による付着割裂耐力向上効果

5. まとめ

集約補強筋量をパラメーターとした実験を行った結果、主筋降伏以前において、集約補強筋量に応じて付着割裂耐力が増加することがわかった。ただし、集約補強量が多くなると、集約補強筋を断面換算して均等配筋した部材ほど付着割裂耐力は増加しないことがわかった。今後、集約補強筋量の付着割裂増加メカニズムについて明らかにし、その効果を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 筏井文隆, 小林克巳, 阿瀬正明, 虻川真大: モルタル充填式継手を用いたPCa柱主筋の付着性状に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.805-810, 1999.6
- 2) 小林克巳, 伊部創一: RCはりの集約せん断補強効果に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.245-250, 1992.5
- 3) 笹谷輝勝, 吉野次彦, 小林克巳, 野田宗生: 機械式継手を有するRC部材の集約せん断補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.533-538, 1994.6
- 4) 野田宗生, 小林克巳, 吉野次彦, 笹谷輝勝: 集約せん断補強のPCa部材への適用と応力伝達に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.539-544, 1994.6
- 5) 筏井文隆, 島原明, 小林克巳: スリーブ継手を有するPCa部材における集約せん断補強筋の役割, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1241-1246, 1996.6
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990