

論文 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

筏井文隆*1・島原明*2・小李克巳*3

要旨：スリーブ継手を有するPCa部材のスリーブ端部に集約せん断補強を行った場合について、その集約せん断補強筋のせん断力伝達における役割を有限要素法解析によって検討した。その結果、スリーブ端部の集約せん断補強筋の剛性が大きいことが、主筋のダボ変位を拘束して付着劣化を防止し、せん断耐力の向上につながることを、すなわち集約せん断補強筋の強度に加えて剛性を確保する必要があることを明らかにした。

キーワード：プレキャスト、スリーブ継手、集約せん断補強、せん断力伝達、有限要素法

1. はじめに

架構式プレキャスト工法においてスリーブ継手を用いた場合、スリーブ位置に必要なせん断補強筋を継手スリーブの両端に集約して配置することができれば工法上多くの利点があることから、著者らは集約せん断補強法を提案し基礎実験を行ってきた（文献[1,2,3]）。

図-1に示すスリーブ継手の両端にひび割れが集中すると、スリーブが大きな剛性をもっているため、部材に変位が生じると主筋のダボ作用で部材端部の斜めひび割れは主筋に沿って進展する。その結果、付着劣化が起こりせん断ひび割れは大きく開口し、せん断補強筋が降伏して耐力に達する。ここで集約せん断補強筋が大きな引張力を負担しても、大きな軸方向剛性を持ち、伸びが小さければ、主筋のダボ変位を拘束しせん断ひび割れの開口と主筋に沿うひび割れの進展を防ぐことができる。結果として主筋の付着抵抗は劣化しないため、トラス作用によって大きなせん断力が伝達されると期待される。本論は集約せん断補強したPCa部材のせん断力伝達における、集約せん断補強筋の果たす役割を検討するために行った解析結果である。

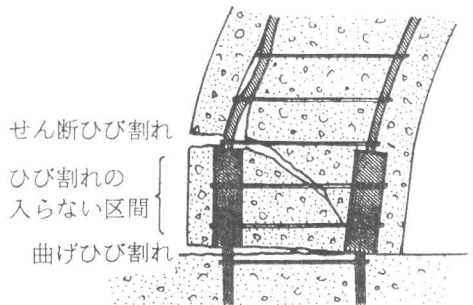


図-1 スリーブ継手を有するPCa部材のひび割れパターン

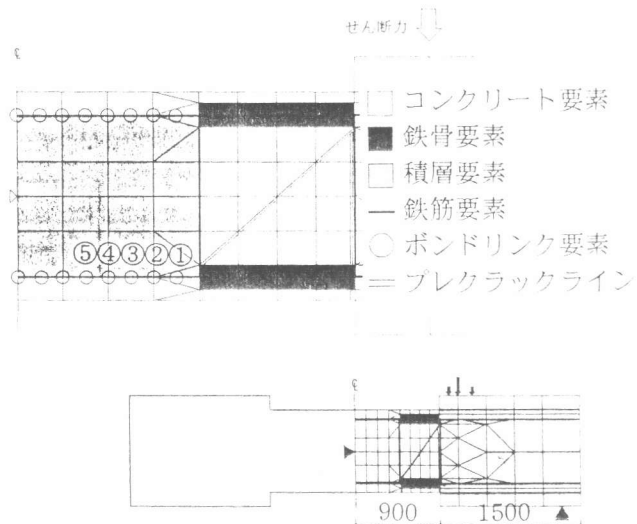


図-2 解析モデル

*1 福井大学 工学部環境設計工学科（正会員）

*2 福井大学 工学部環境設計工学科

*3 福井大学教授 工学部環境設計工学科、工博（正会員）

2. 解析概要

2. 1 解析方法と解析モデル

解析モデルを図-2に示す。文献[3]の集約せん断補強したはり試験体を解析モデルに選び、2次元有限要素法解析を行った。対称性を考え、試験体の右半分をモデル化した。スリーブには鉄骨要素、主筋と集約せん断補強筋には線材要素を用いた。スリーブ継手区間を除く部材中央部のせん断補強筋は均一に分布しているものと仮定して、補強筋とコンクリートを重ね合せた積層要素で表わした。部材中央部のせん断補強筋量はD10@75mm ($p_w=0.64\%$)である。コンクリート要素は、最大圧縮応力度に到達後ひずみ軟化域に入るが、最終的にコンクリート強度の20%程度の応力を負担するものとしている。せん断スパン比は2.0、断面は30cm×45cmである。主筋は上端筋、下端筋ともに3-D25であるが、曲げ耐力を大きくするために解析上降伏強度を大きくした。スリーブと主筋およびスリーブとコンクリート間は完全付着とし、主筋とコンクリートとの付着は、ポンドリンク要素を用いて表現した。部材端部の曲げひび割れとスリーブ端から曲げ圧縮域に向かう斜めひび割れに関しては、あらかじめクラックラインを設定しておき、その開閉はクラックリンク要素を用いて表現した。

主筋と集約せん断補強筋を除く材料強度は文献[3]による値を用いた。なお、加力は単調載荷とし、計算上つり合いがとれなくなるまで載荷した。コンクリート、スリーブ（鉄骨）、鉄筋、ポンドリンク、クラックリンクの各要素の入力データを表-1～表-7に示す。

| 表-1 コンクリート | | 表-2 スリーブ | | 表-3 主筋 | |
|------------|--|----------|--|--------|--|
| 圧縮強度 | 350 (kgf/cm ²) | 降伏強度 | 10000 (kgf/cm ²) | 降伏強度 | 10000 (kgf/cm ²) |
| 弾性係数 | 2.5×10^5 (kgf/cm ²) | 弾性係数 | 2.1×10^6 (kgf/cm ²) | 弾性係数 | 2.1×10^6 (kgf/cm ²) |
| 割裂引張強度 | 35 (kgf/cm ²) | | | 断面積 | 15.21 (cm ²) |

| 表-4 せん断補強筋（積層要素） | | 表-5 集約せん断補強筋 | | 表-6 ポンドリンク | |
|------------------|---|--------------|-----------------------------|------------|--|
| 降伏強度 | 3500 (kgf/cm ²) | 降伏強度 | 7000 (kgf/cm ²) | 初期付着剛性 | 8.0×10^3 (kgf/cm ³) |
| 弾性係数 | 2.10×10^6 (kgf/cm ²) | 弾性係数 | パラメータごとに変化 | 第2付着剛性 | 4.0×10^2 (kgf/cm ³) |
| せん断補強筋比 | 0.64 (%) | 断面積 | 5.08 (cm ²) | 折れ曲がり点付着応力 | 20.0 (kgf/cm ²) |
| | | | | 最大付着応力 | 40.0 (kgf/cm ²) |

| 表-7 クラックリンク | |
|-------------|----------------------------|
| 剛性（ひび割れ閉） | 1.0×10^8 (kgf/cm) |
| 剛性（ひび割れ開） | 1.0 (kgf/cm) |

2. 2 解析に用いるパラメータ

前述のように集約せん断補強筋の効果は、主筋のダボ変位の拘束とその結果としての主筋の付着劣化の防止と考えられることから、集約せん断補強筋の軸方向剛性と主筋の付着性状をパラメータとした。

集約せん断補強筋の負担しうる引張力の大きさが変わってしまうと、せん断終局強度に対するせん断補強筋量の影響が入ってしまうため、集約せん断補強筋の断面積と降伏強度の積（負担しうる引張力）を一定にして図-3のようにヤング係数を変化させ軸方向剛性をパラメータとした。なお断面積と降伏強度の積はせん断終局時に降伏が起らないように十分大きな値とした。

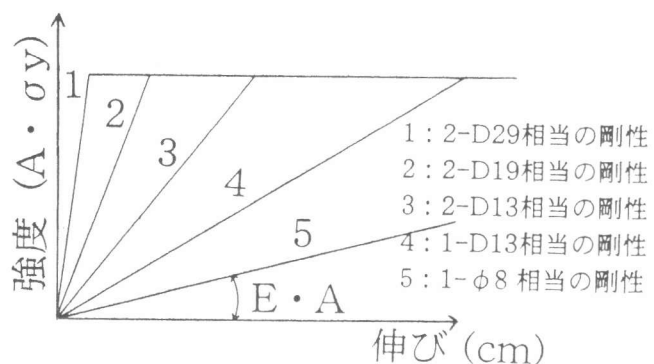


図-3 集約せん断補強筋軸方向剛性パラメータ

主筋が引張力とダボせん断力を同時にうけた時、主筋に沿うひび割れが発生するとその時点で主筋の付着劣化が生じ、付着応力度・すべり関係は図-4の点線のようなことになることがわかっている（文献[4,5]）。また、その影響範囲はせん断補強筋間隔の2~3倍の範囲であることがわかっている（文献[4,5]）。付着劣化の状態は一義的に定まらず、主筋に沿うひび割れの発生を判定して徐々に付着劣化させていくような解析方法をとるのが望ましいが、本解析では計算を簡略化するため、付着劣化が生じた後の状態を表現することをねらって図-4の実線のような付着応力度・すべり関係を仮定した。また、その主筋に沿う分布も一義的には定まらず、過去の実験結果（文献[4,5]）を参考としながら図-2の①~⑤の位置のボンドリック要素の付着特性を極端な場合も含んで、表-8のa~eの5つの場合に仮定した。集約せん断補強筋の軸方向剛性が大きい程aの付着状態に近づき、小さい程eの状態に近づくと考えている。

図-3の集約せん断補強筋の剛性（1~5）と表-8の主筋の付着状態（a~e）の組合せで表-9に○印で示す13ケースの解析を行った。例えば3cのケースは2-D13相当の集約せん断補強筋がある時、ボンドリック要素①~⑤の付着応力・すべり関係を図-5のように仮定していることになる。1a、2b、3c、4d、5e（シリーズ1）は集約せん断補強筋の剛性に対応した付着劣化の状態を模擬している。1a、1b、1c、1d、1e（シリーズ2）は集約せん断補強筋の剛性が十分大きな時に、主筋の付着劣化の状態がせん断力伝達にどう影響するかを検討するためのものである。5a、5b、5c、5d、5e（シリーズ3）は集約せん断補強筋が殆どない時に、主筋の付着劣化の状態がせん断力伝達にどう影響するかを検討するためのものである。

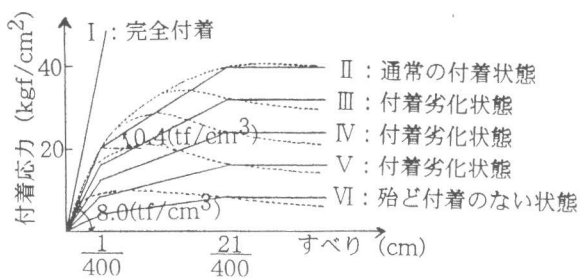


図-4 付着応力度・すべり関係

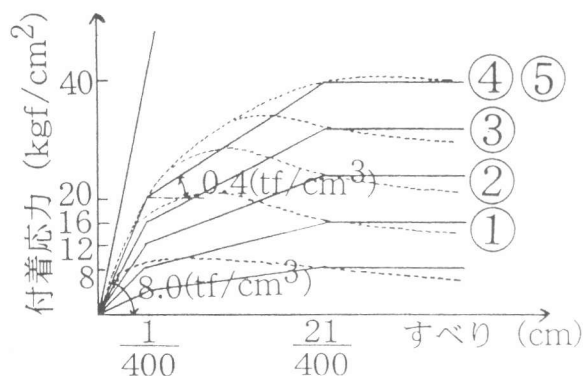


図-5 仮定した $\tau \cdot s$ 関係の例 (3c)

表-8 主筋の付着性状

| | | ボンドリック要素番号 | | | | |
|---------|---|------------|----|-----|----|-----|
| | | ⑤ | ④ | ③ | ② | ① |
| 主筋の付着性状 | a | I | I | I | I | I |
| | b | II | II | II | II | III |
| | c | II | II | III | IV | V |
| | d | III | IV | V | V | VI |
| | e | V | VI | VI | VI | VI |

表-9 パラメータの組合せ

| | | 主筋の付着性状 | | | | |
|-------------|---|---------|----|----|----|----|
| | | a | b | c | d | e |
| 集約せん断補強筋の剛性 | 1 | ①a | ①b | ①c | ①d | ①e |
| | 2 | | ②b | | | |
| | 3 | | | ③c | | |
| | 4 | | | | ④d | |
| | 5 | ⑤a | ⑤b | ⑤c | ⑤d | ⑤e |

3. 解析結果および考察

3. 1 せん断耐力について

圧縮側スリーブ付近（プレクラックライン端部付近）のコンクリートが圧壊し、計算上つり合いがとれなくなった時のせん断力を表-10に示す。荒川式に代表されるせん断耐力評価式によって求められる値に比べやや小さめであるが、ほぼ予想されるコンクリート要素が圧壊しているのここをせん断耐力と考えることにした。要素分割その他の影響でせん断耐力を有限要素法解析で求めることの困難さはあるが、以後同じ条件で計算した結果を相互に比較して考察することにする。各シリーズのせん断力・変位曲線を図-6～図-8に示す。

シリーズ1では、集約せん断補強筋の軸方向剛性が小さくなり、それに伴って主筋の付着性状が劣化することによってせん断耐力が最大5.0tf低下した。主筋の付着劣化が大きい時、集約せん断補強筋の軸方向剛性が大きく異なる1eと5eあるいは1dと5dを比較するとせん断耐力の差は2.0tfしかなく、シリーズ1における最大5.0tfのせん断力の差には集約せん断補強筋の軸方向剛性の他に、主筋の付着性状が影響していることがわかる。

次に主筋の付着性状がせん断耐力におよぼす影響について考察する。集約せん断補強筋の軸方向剛性が極めて小さいシリーズ3では付着劣化の程度によりせん断耐力に最大4.2tfの差が生じている。しかし集約せん断補強筋の軸方向剛性が大きなシリーズ2ではせん断耐力の差は最大3.0tfであり、集約せん断補強筋の軸方向剛性が小さい場合に比べてせん断耐力の差が小さい。したがって、集約せん断補強筋の軸方向剛性がある程度大きければ主筋の付着力が小さくても部材中央部のせん断補強筋のトラス作用に代わるせん断力伝達が行われていることになり、集約せん断補強筋がなんらかのせん断力伝達機構を形成していると推測される。1aと5aのせん断耐力の差はわずか0.8tfであることから主筋の付着が完全であれば、集約せん断補強筋の軸方向剛性が小さくても部材中央部のせん断補強筋のトラス作用によって十分せん断力伝達が行われるという結果になったが、現実には集約せん断補強筋の剛性が小さくなった場合には主筋の付着劣化がおこると考えられ、その時には当然せん断耐力は低下すると予想される。

集約せん断補強したPCa部材のせん断実験（文献[2.6]）では、集約せん断補強量が多くなればせん断耐力が上昇することが認められている。文献[2]には集約せん断補強筋の負担しうる引張力がほぼ同じで、軸方向剛性が約2倍異なる試験体が含まれているが、軸方向剛性の大きい場合の方が大きなせん断耐力が得られている。終局時に集約せん断補強筋は降伏していないため、負担している引張力は当然軸方向剛性の大きいものの方が大きく、軸方向剛性を大きくすることによって集約せん断補強筋はより有効に働くと考えられる。

表-10 各解析ケースのせん断耐力 (tf)

| | | 主筋の付着性状 | | | | |
|-------------|---|---------|------|------|------|------|
| | | a | b | c | d | e |
| 集約せん断補強筋の剛性 | 1 | 18.0 | 17.0 | 16.2 | 16.0 | 15.0 |
| | 2 | | 16.0 | | | |
| | 3 | | | 15.6 | | |
| | 4 | | | | 14.8 | |
| | 5 | 17.2 | 16.0 | 15.0 | 14.0 | 13.0 |

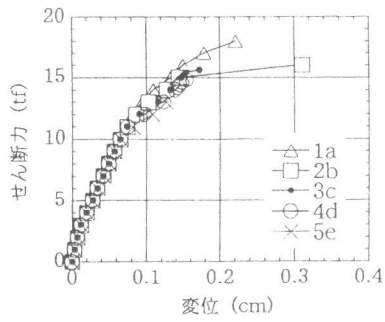


図-6 せん断力・変位曲線 (シリーズ1)

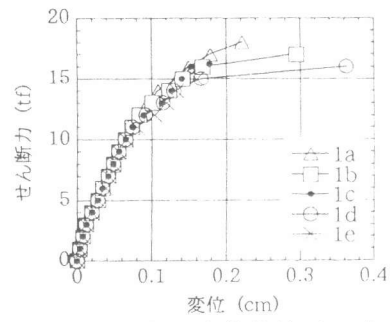


図-7 せん断力・変位曲線 (シリーズ2)

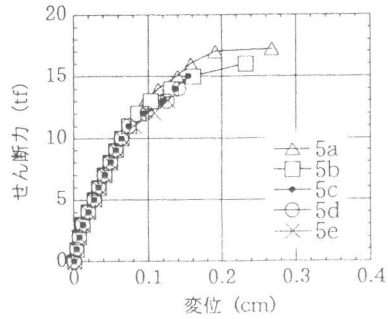


図-8 せん断力・変位曲線 (シリーズ3)

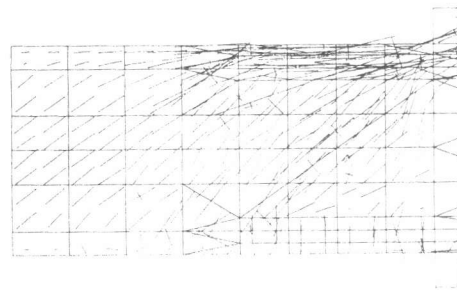


図-9 主応力図 (1a)

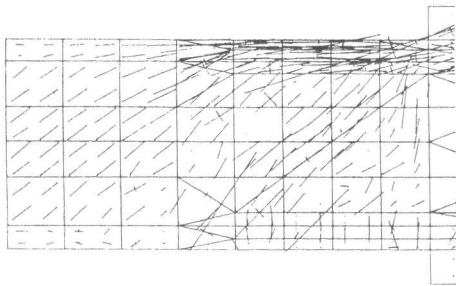


図-10 主応力図 (2b)

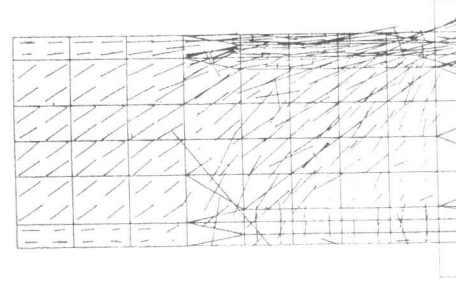


図-11 主応力図 (3c)

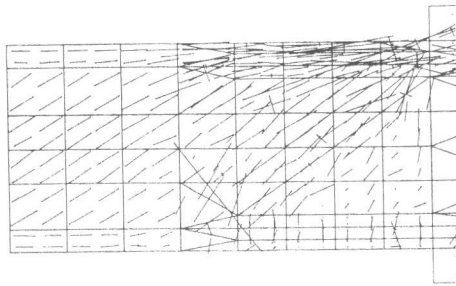


図-12 主応力図 (4d)

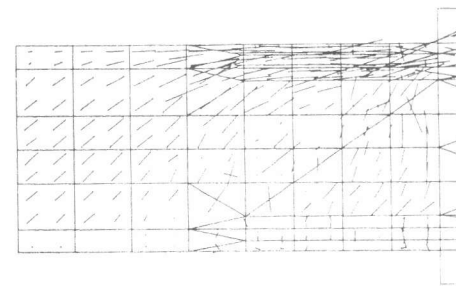


図-13 主応力図 (5e)

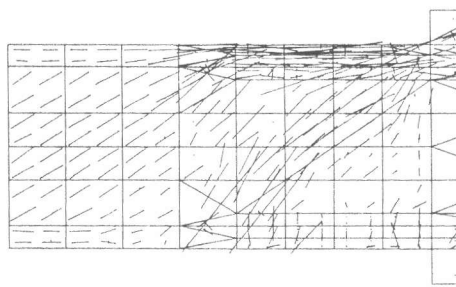


図-14 主応力図 (1e)

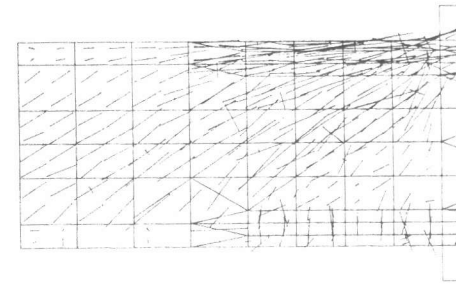


図-15 主応力図 (5a)

3. 2 せん断力伝達機構

せん断耐力にいたる直前の主応力分布図を図-9～図-15に示す。シリーズ1の各ケースの主応力分布図を比較すると集約せん断補筋の軸方向剛性が小さくなり主筋の付着劣化が大きくなるにつれ、スリーブ継手区間に存在する斜め方向の一樣な圧縮主応力が消え、圧縮側スリーブ付近に圧縮応力が集中していくことがわかる。一方スリーブ端部付近の主筋の付着が完全で集約せん断補強筋の軸方向剛性だけが異なる、1aと5aの主応力分布の差異は殆ど見られない。しかし主筋の付着劣化が大きく、かつ集約せん断補強筋の軸方向剛性だけが異なる1eと5eの主応力分布図を比較すると、1eではスリーブ継手区間に斜め方向の圧縮主応力が分布しているのに対し、5eではその圧縮主応力がみられず両者のせん断力伝達機構に大きな違いがあることがわかる。このことから主筋の付着状態に加え、集約せん断補強筋の軸方向剛性が応力伝達のメカニズムに大きく関係していることがわかる。したがって集約せん断補強筋の軸方向剛性が大きければ主筋の付着力が小さい場合であっても、集約せん断補強筋の引張力につり合うコンクリートの斜め圧縮束がスリーブ継手区間に形成され、十分なせん断力が伝達されるものと考えられる。

4. まとめ

有限要素法解析を行い集約せん断補強筋のせん断力伝達における役割を検討した。集約せん断補強筋の軸方向剛性が大きければ、スリーブと集約せん断補強筋に囲まれた部材端にコンクリートの斜め圧縮束が形成され、集約せん断補強筋の引張力がこれとつり合ってトラス機構を形成し、せん断耐力が向上すると考えられる。すなわち、集約せん断補強筋には強度に加えて軸方向剛性を確保して伸びを小さくする必要があることが確かめられた。今後主筋に沿ってひび割れが進展した時に、ひび割れの状況に応じて徐々に付着性状を劣化させるような、より現実に近い解析モデルを用いて、必要な集約せん断補強筋量を定量的に把握する必要がある。

参考文献

- [1]小李克巳、狩野芳一、吉野次彦、阿瀬正明：プレキャスト鉄筋コンクリート柱の力学的挙動に関する研究（その2 継手部の集約せん断補強の可能性）、日本建築学会大会学術講演梗概集、vol. C、pp. 973-974、1992. 8
- [2]小李克巳、狩野芳一、野田宗生、阿瀬正明：端部にモルタル充填式継手を有するPCa部材の集約せん断補強に関する基礎実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、vol. C、pp. 663-664、1993. 9
- [3]笹谷輝勝、吉野次彦、小李克巳、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. 533-534、1994. 6
- [4]小李克巳、福田萬、竹内雅人：RC部材における主筋のダボ作用を考慮した付着特性に関する基礎実験、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 10、No. 3、pp. 179-182、1988. 6
- [5]小李克巳ほか：コンクリートと異形鉄筋の付着作用とダボ作用の相関に関する基礎実験（その1～その4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、vol. C、1987～1990
- [6]小山明男、高木仁之、狩野芳一：スリーブ継手を有するPCa部材のせん断補強方法に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、vol. C-2、pp. 19-20、1995. 8