

# コンクリートと補強材の付着定着挙動と構成則の利用研究委員会

## 第2回 全体委員会議事録

日 時：2009年8月5日（水）17:30～20:30

場 所：JCI会議室

出席者：島委員長，金久保幹事，飯塚，内田，角，柏崎，斉藤，佐藤，谷村，中村，牧，  
渡辺（健），渡辺（忠），八十島の各委員

資料

2-0：第2回全体委員会議事次第

2-1：第1回全体委員会議事録（案）

2-2：日本建築学会「コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用」の一部

2-3-1：RC柱部材におけるせん断抵抗機構と主筋付着作用との関係

2-3-2：分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測（その1：解析手法）

2-3-3：分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測（その6：正負繰り返し載荷への拡張）

2-3-4：蚊取線香のひび割れ解析の計画

2-4-1：2段配筋を有する鉄筋コンクリート梁の付着性状

2-4-2：2段配筋を有する鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度（その1）

2-4-3：2段配筋を有する鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度（その2）

2-5：異形鉄筋の付着性状に関する実験・解析による研究

議事に先立ち，本委員会に初めて参加した金委員会，谷村委員，牧委員，内田委員から自己紹介が行われた。これまでの研究内容や興味ある内容などの紹介があった。

議事

### 1. 前回議事録の確認（資料2-1）

前回議事録の確認が行われ，4. (1)「鉄筋軸の鉛直方向成分」を「鉄筋軸の垂直方向成分」に修正し，了承された。

### 2. 委員会ホームページの確認

委員会ホームページの確認が行われ，トップページの画像を確認した。今後はスケジュール，活動内容などを随時更新を行う。委員会資料の公開について，JCI年次論文やアーカイブされている資料はリンクを張って公開する。まだ変更できる部分が多いので，各委員に写真の提供をお願いした。

### 3. 話題提供

(1) 中村委員から，異形鉄筋の節形状までモデル化したRBSM（剛体バネモデル）によるメゾスケール解析の研究が紹介された。以下に要約する。

- ・メゾスケール解析にあたって，要素寸法と材料モデルの検討を行い，幾何学モデルは節高さ

以下の寸法を用いるべきであり、材料モデルはマクロモデルを適用可能である。

- ひび割れ進展挙動の評価、節間隔、節高さ、節角度を変動させた解析を行い、ひび割れ進展挙動とテンションスティフニングの実験結果を再現可能である。
- 鉄筋とコンクリートの間において、界面モデル、完全付着、摩擦なしの条件を検討し、界面モデルを用いることで内部メカニズムを表現可能である。
- 節間隔、節高さ、節角度の違いによる影響は、解析結果と実験結果がほぼ一致し、節角度の影響は45度以上で一定となる。これは節前面が高圧縮状態になるためである。
- マッシュな引抜き試験の解析を行い、 $\tau$ - $s$  関係および $\tau$ - $s$ - $\varepsilon$  関係は実験結果と一致した。弾性係数を変動させた解析では、弾性係数が鉄筋よりも低い場合はひずみが小さくなり、ひずみの進展領域が小さくなり、付着応力が小さくなる傾向であった。また、 $\tau$ - $s$ - $\varepsilon$  関係は弾性係数が異なっても全て同じであった。
- かぶりの影響を検討した三次元の解析も行ったが、結果的には実験結果と整合せず解析できなかった。界面せん断バネの構成モデルや材料モデルが課題である。なお、三次元解析を行うには1週間程度の時間を要する。
- 研究の詳細は以下の論文で発表済み。

武藤, 中村, 田辺, SRISOROS, LEE : メゾスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着解析, 応用力学論文集, Vol.7, No.2, pp.767~774, 2004.8

#### 【中村委員の提供した話題に関するディスカッション】

- 節周辺ではひずみが異なることが考えられるため、3次元でモデル化された鉄筋の引張試験を行っても面白いかもしれない。
- 要素を小さくすると、圧縮側のひずみが100%以上にならないために、変形に関して実験結果と合わないことがある。要素を細かくすることは、必ずしも適切なモデル化とはいえないのではないか。
- 解析では、内部ひび割れが現れるが、実験ではほとんど見えないのは何故なのか。
- 付着特性をFEMやRBSMなどで解析するための条件、解析の現状、レビューをまとめる必要があるのではないか。
- 解析研究を行っている日本大学の田嶋先生に連絡をとり、委員会への参加をお願いする。

(2) 飯塚委員から、かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着性状に関する実験および解析の研究が紹介された(資料2-5)。以下に要約する。

- かぶり厚が小さい場合の $\tau$ - $s$  関係をモデル化することを目的として、かぶり厚、コンクリート強度、鉄筋径を変動させた両引き試験を行った。
- 付着強度はコンクリート強度の平方根に比例し、かぶり厚が大きくなると付着強度とその時のすべり量が増大する傾向にある。
- $\tau$ - $s$  関係は、CEB式を参考にしてモデル化し、ポストピークまで検討した。
- $\tau$ - $s$ - $\varepsilon$  関係をモデル化するために、ひずみの影響を表す関数を検討した。かぶり厚が大きくなるとひずみ関数の勾配が緩やかになり、ピークまでは線形的で、ピーク後は非線形であった。
- $\tau$ - $s$ - $\varepsilon$  関係は、最大までは既存の島式とよい対応を示し、ポストピークは大きく乖離した。
- 提案したモデルを用いた引抜き試験の解析を行った結果、実験結果を再現できることを確認。

- ・ 研究の詳細は以下の論文で発表済み。

飯塚，檜貝，斉藤，高橋：かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着性状に関する実験的研究，JCI 年次論文集，Vol.30，No.3，pp.655～660，2008.7

【飯塚委員の提供した話題に関するディスカッション】

- ・  $\tau$ - $s$ - $\varepsilon$  関係を用いた解析では，未知数の数より条件の数の方が多くなるために解が出てこないのではないか。
- ・ 解析におけるひずみの扱いは，鉄筋からのひずみをボンドリンクに入れて， $\tau$ - $s$ - $\varepsilon$  関係を変化させることで解析している。
- ・ 解析における  $\tau$ - $s$  モデルの適用性について検討すべきである。節 1 つからなるモデルなのか，ある程度の付着長さを持ったモデルなのか。
- ・ そもそも付着応力  $\tau$ ，すべり量  $s$  はどの値なのか。
- ・ 建築分野では  $\tau$ - $s$  関係を前提として，部材性状がどうなるかを問題にしていることが多い。
- ・ 割裂した場合の  $\tau$ - $s$  関係は，既存のモデル（島式）と比較できないため，異なる  $\tau$ - $s$  モデルを作るべきであろう。

(3) 柏崎委員から，RC 柱梁接合部選定試験体の共通解析例，鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱部材の FEM 解析，付着割裂破壊する RC 部材の FEM 解析に関する研究が紹介された（資料 2-2）。以下に要約する。

- ・ 梁主筋の付着特性は接合部の地震時挙動に大きく影響するので，付着性状が接合部の耐震性能に与える影響を非線形 FEM により検討した。
- ・ 付着特性（絶縁，付着要素あり，完全付着）を変動させて解析を行い，付着すべりを考慮したほうが実験結果とよく対応した。完全付着であると剛性が高くなってしまう傾向にある。
- ・ 付着性状の劣化によりアーチ機構が卓越し，付着すべりを考慮すると耐力が低下する。
- ・ 鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの引張特性として，軟化型モデルではなく，ひび割れ後に応力上昇する硬化型モデルを用いると部材性状との対応がよくなる。
- ・ 引張応力状態を考慮したストレスブロック法により鋼繊維を混入した部材耐力を概ね評価できる。
- ・ 付着割裂する部材の非線形 FEM 解析には，ボンドリンクの付着特性として藤井・森田式の強度を用い，モデル曲線は森田・角式を用いた。また，テンションスティフニングの効果も同時に入れている。
- ・ 付着割裂の破壊性状を再現でき，梁部材に適用させても荷重－変形関係や割裂によるひび割れの拡大などを概ね評価できた。
- ・ 研究の詳細は以下の書籍・論文で発表済み。
  - 1) 日本建築学会：コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用，pp.221～234，2008.3
  - 2) 吉澤，柏崎，野口，高津：鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱部材に関する解析的研究，JCI 年次論文集，Vol.31，No.2，pp.199～204，2009.7
  - 3) 郭，柏崎，野口：異形鉄筋の楔作用による付着割裂破壊に関する非線形有限要素解析，AIJ 大会学術講演梗概集，C-2 構造Ⅳ，pp.57～58，2002.8

【柏崎委員の提供した話題に関するディスカッション】

- ・  $\tau$ - $s$  モデルのスケールは、数センチから数十センチ程度である。
- ・ 付着がないときは圧縮ストラットで耐力が決まっており、部材耐力が上昇する場合もある。
- ・ 建築分野でよく用いられる森田・角式のすべり量とは、鉄筋とコンクリートの境界の変形ではなく、鉄筋から少し離れたコンクリート（動かないコンクリート）と鉄筋の相対変位としている。
- ・ ボンドリンクとテンションステイフィング効果を両方を入れているので、ダブルカウントではないか。なんらかの要素が不足しているために、両方入れないと解析と実験の整合性がとれないのではないか。

(4) 佐藤委員から、鉄筋の引張状態と圧縮状態における付着応力の違いについて、ひび割れ型 FEM を用いた梁部材の解析例、蚊取線香のひび割れ解析計画が紹介された（資料 2-3-1～2-3-4）。以下に要約する。

- ・ 付着長さが短い場合、鉄筋が引張応力状態のときは藤井・森田式による付着強度と近似するが、鉄筋が圧縮応力状態のときは藤井・森田式による付着強度の 2 倍以上の強度を発揮する。
- ・ 付着すべりによるコンクリート応力の再配分を考慮した FEM 解析を、正負繰返し荷重を受ける RC 梁に適用した。解析結果は、ひび割れ性状やひび割れ幅の増大傾向は概ね再現できたが、荷重-変形関係やひび割れの精度において課題が残っている。
- ・ 付着挙動算定法を利用し、蚊取線香の燃焼後に体積収縮ひずみが台座に拘束されて、灰がひび割れるシミュレーションを行う予定である。
- ・ 研究の詳細は以下の論文で発表済み。

1) 金, 佐藤, 藤井: RC 柱部材におけるせん断抵抗機構と主筋付着作用との関係, AIJ 構造系 論文集, 第 559 号, pp.181~188, 2002.9

2) 佐藤, 長沼: ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測, AIJ 大会講演梗概集, C-2 構造IV, pp.341~342, 2005.9

#### 【佐藤委員の提供した話題に関するディスカッション】

- ・ FEM 解析の要素寸法は 7cm 程度である。
- ・ 東大の前川先生のことばは、せん断のときのひび割れ間隔（ひび割れ幅）は付着の影響をあまり受けないという意味だろう。
- ・ ダボ作用のときの付着特性にも、既往の  $\tau$ - $s$  モデル（島式）が適合したということを目にする。条件が全く異なるため、偶然の一致であると思われる。既往の  $\tau$ - $s$  モデルの適用条件や使用範囲などをもっと明確にすべきである。
- ・ 蚊取線香の灰のひび割れは、2, 3cm 間隔くらいだろう。
- ・ 付着が直接的に起因した被害というものは実際はほとんどないのではないか。実験レベルでは付着割裂破壊という現象が表れているが、現在の設計体系に基づいた実構造物では付着が支配的になった被害はあまり見られない。

#### 4. 次回委員会

次回の話題提供者：渡辺（健）委員，金久保幹事，八十島委員

次回委員会は、9/28 の週か 10/5 の週で日程調整，メールにて決定する。