

# 論文 付着モデルを考慮した拘束型重ね継手の FEM 解析

深澤 佑輔<sup>\*1</sup>・岡野 素之<sup>\*2</sup>・飯塚 豊<sup>\*3</sup>

**要旨:** モルタル、鉄筋、及びスパイラル筋を用いて作られる拘束型重ね継手において、破壊に至る力学的性状を再現することを目的として、3次元 FEM 解析を行った。着目点は、スパイラル筋の拘束効果と、破壊形態である。その結果、継手試験体における  $\tau$ -S 関係を考慮した付着モデルを用いて荷重変位関係が再現出来た。また、モルタル要素における Softening の進展状況は、継手が抜け出し破壊を起こす指標になり得ることがわかった。

**キーワード:** プレキャストコンクリート、重ね継手、継手、3次元 FEM 解析、付着モデル

## 1. はじめに

プレキャストコンクリート部材（以下、PCa 部材と呼ぶ）は様々な製品が実用化され、次第に大型化されつつある。しかしながら PCa 構造の大型化に伴う課題として、鉄筋の接合方法が挙げられる。

PCa 部材を接合する際に用いられる継手に、機械式継手が挙げられるが、カプラーやナットといった部品にコストが掛かり、施工性も悪く改善する必要がある。

これらの欠点を考慮して提案した拘束型重ね継手を図-1に示す。この継手は、突き合わせた2本の鉄筋に平行して添え筋を配置し、周囲をスパイラル筋とモルタルで拘束する構造である。一般の重ね継手は 30Φ 以上の重ね長さが必要であるが、スパイラル筋の拘束効果により、拘束型重ね継手は重ね長さを大幅に短くできる。

施工方法を図-2に示す。PCa ブロックの片方における鉄筋の突出部にスパイラル筋と添え筋からなる鉄筋カゴを挿入し、もう片方の PCa ブロックを設置した後、モルタルを注入する。使用材料・施工に特殊性はなく、安価で施工性に優れている。

既往の研究<sup>1)</sup>では、拘束型重ね継手の力学的性能を検討するために、SD390 を用いて重ね長さの異なる (5Φ~20Φ) の継手試験体を作成し、静的一軸引張試験を実施した。その結果、重ね長さが 10Φ 以上で母材の最大荷重を上回ることがわかった。また、継手の破壊形態は以下の3種類 (図-3) に分類出来た。

- (1) C 型破壊：主鉄筋が降伏する前に主鉄筋とモルタル間の付着力が低下し、主鉄筋が抜け出すもの
  - (2) Yc 型破壊：主鉄筋が降伏した後主鉄筋とモルタル間の付着力が低下し、主鉄筋が破断する前に抜け出すもの
  - (3) Yb 型破壊：主鉄筋が降伏した後、破断するもの
- 本研究では、解析モデルにおいて主鉄筋とモルタル間に付着特性を考慮することで、継手の引張試験から得られ

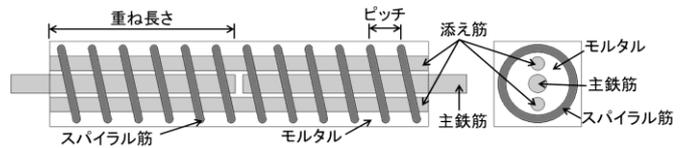


図-1 拘束型重ね継手の概要

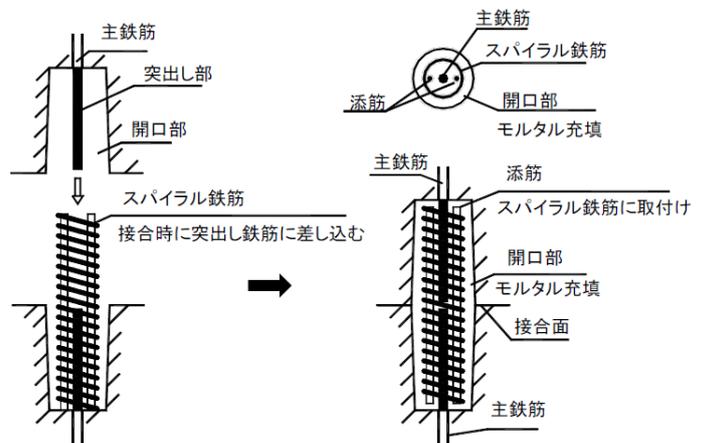
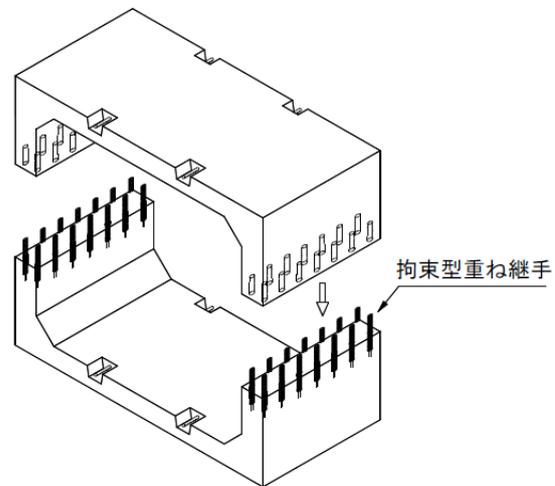


図-2 拘束型重ね継手の施工方法

\*1 前橋工科大学 工学部社会環境工学科 (学生会員)  
 \*2 前橋工科大学 工学部社会環境工学科教授 (正会員)  
 \*3 カイエー共和コンクリート(株) 技術部長 (正会員)

た P- $\delta$  関係を解析で再現することと、解析上における抜け出し破壊 (C 型, Yc 型) の指標を検討することを目的としている。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析モデル

本研究における解析対象は、重ね長さ 5 $\Phi$ 、スパイラル筋ピッチ 20mm、添え筋 2 本の 05202 試験体と、重ね長さ 10 $\Phi$ 、スパイラル筋のピッチ 20mm、添え筋 2 本の 10202 試験体とする。なお、05202 試験体の解析モデルを 5 $\Phi$  モデル、10202 試験体の解析モデルを 10 $\Phi$  モデルと呼ぶ。また、解析モデルを図-4 に示す。解析モデルは原寸とし、継手の対称性を利用して、水平断面の 1/4・鉛直断面の 1/2 を対象とした 1/8 モデルである。モルタル、主鉄筋、及び添え筋をそれぞれ六面体要素でモデル化し、次節に示す付着モデルを考慮するために主鉄筋とモルタル間に、主鉄筋とモルタルの境界面にせん断ばねを考慮できる FILM 要素を設けている。なお、スパイラル筋はモデル化が複雑であるため、断面積の大きさが等しくなるような矩形断面の帯筋として六面体要素でモデル化した。荷重条件は、主鉄筋端部を鉛直上向きに引張荷重を 0.5kN/step で単調増加させた。

本研究における解析ソフトは、FINAL<sup>2</sup>)を用いた。

### 2.2 材料特性

モルタルと鉄筋の構成則を図-5 に示す。モルタルの圧縮側は修正 Ahmad モデル、引張側は出雲らのモデルとし、鉄筋は二次勾配を初期勾配の 1/100 とするバイリニアモデルとした。また、モルタルと各鉄筋の材料定数は表-1 に示したものをを用いた。

### 2.3 付着モデル

既往の研究<sup>1)</sup>における 05202 試験体は、重ね長さが短く、主鉄筋が降伏することなく抜け出したため、付着試験を行ったものと考えた。

本研究で構築した付着モデルを図-6 に示す。最大付着応力に到達するまでの挙動は、05202 試験体における P- $\delta$  関係を元に求めた、主鉄筋とモルタル間における  $\tau$ -S 関係とした。付着応力  $\tau$  は、引張応力 P を主鉄筋とモルタルが接する面積 A で除したものとした。なお面積 A は、主鉄筋の円周にストラット角度  $\theta=45^\circ$  を考慮した有効重ね長さを乗じたものである。ここでの有効重ね長さとは、継手の重ね部分で実際に付着性能を発揮すると考えた長さであり、ストラット角度を  $\theta=45^\circ$  として実際の重ね長さから主鉄筋と添え筋の間隔を差し引くことで求めた。また、すべり S は変位  $\delta$  の 1/2 としているが、試験で得られる変位  $\delta$  はすべり S 以外に、引張荷重による主鉄筋の弾性変位と継手に用いられるモルタル自体の変位を含んでいるため、これらを除く必要がある。そこで、

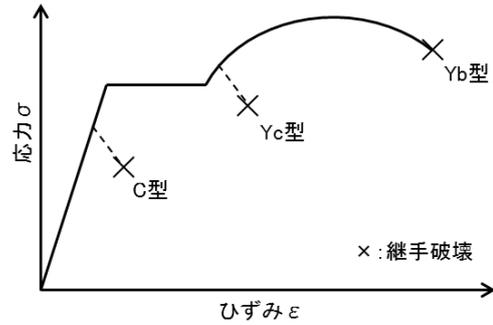


図-3 継手の破壊形態

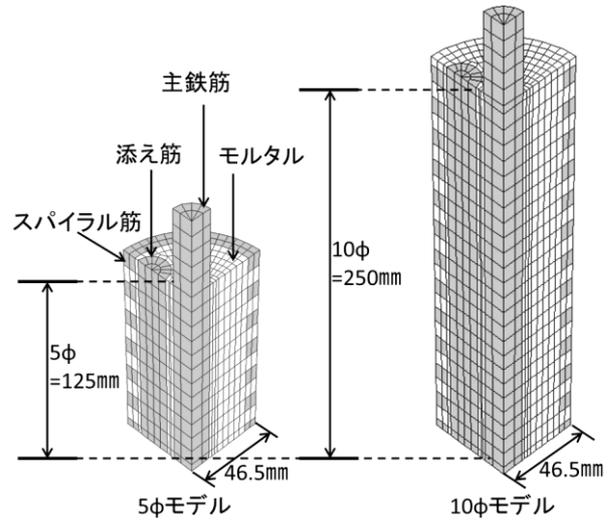


図-4 解析モデル

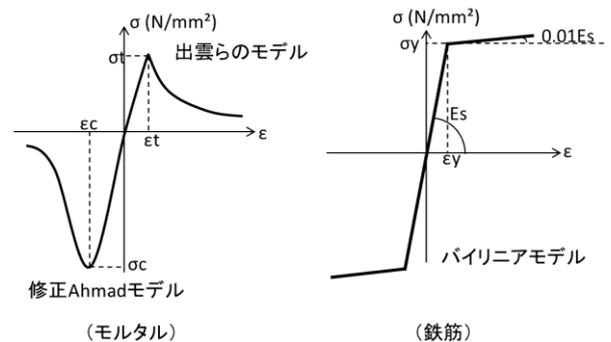


図-5 材料の構成則

表-1 材料の性質

モルタル	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
	47.1	3.56	23009
鉄筋	降伏点	引張強度	ヤング係数
スパイラル筋 D10 (SD295)	292.3	413.6	200000
添え筋 D19 (SD390)	437.3	613.8	200000
主鉄筋 D25 (SD390)	414.4	597.1	200000

(単位: N/mm<sup>2</sup>)

モルタルの変位は剛性的な観点で主鉄筋の弾性変位よりも極小であるため無視して良いものとし、主鉄筋のひずみ分布は三角形分布であると仮定することにより主鉄筋の弾性変位を求め、すべり  $S$  を算出した。最大付着応力に到達した後の挙動は、コンクリートにおける圧縮強度到達後の  $P-\delta$  関係の挙動を簡易的に表したものを模している。これは、鉄筋とモルタル間における付着破壊は、異形鉄筋の節部分に付着しているコンクリートが破壊することで生じるからである。

#### 2.4 端部開放によるスパイラル筋の拘束力低減

試験に用いたスパイラル筋の端部は開放しているため、端部付近の拘束力が低下していることが考えられる。これを解析上で表現するために図-7 のように端部からスパイラル筋(帯筋)のヤング係数を低減させている。しかし実際のスパイラル筋は、端部付近でヤング係数が他の部分より小さくなっていないため、解析上において拘束力低減を表現するスパイラル筋におけるヤング係数の低減方法は存在しない。ゆえに本研究では、ヤング係数を端部から 1Ring, 3Ring, 5Ring と低減させることで付着モデルを考慮した 5Φ モデルの解析結果と試験における  $P-\delta$  関係が整合する弾性係数を模索し、整合する時のスパイラル筋におけるヤング係数を用いることにした。

#### 2.5 主鉄筋とモルタル間における摩擦係数

任意の物体を付着させる時、付着させる面には面に対して垂直に押さえつける力  $\sigma$  による摩擦  $\mu\sigma$  ( $\mu$ : 摩擦係数) が生じ、また付着面は  $\sigma$  の影響を受けない付着特性  $\tau_0$  を有している。ゆえに実際に試験を行い得られる付着特性  $\tau$  は式(1)である。

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma \quad (1)$$

よって、本解析では主鉄筋とモルタル間における摩擦係数も考慮する。

主鉄筋に作用する応力を図-8 に示す。一般にストラット角度は  $\theta=45^\circ$  であり、付着応力  $\tau$  とスパイラル筋の拘束圧  $\sigma$  における比  $\tau/\sigma$  は 1.0 となるので、これを主鉄筋とモルタル間における摩擦係数とした。

### 3. 解析結果

#### 3.1 スパイラル筋のヤング係数の影響

本研究における解析ケースを表-2 に示す。モデル名における 5Φ, 10Φ は重ね長さを示し、アルファベットはモルタルと主鉄筋間の付着モデルの有無を表している。B は付着モデルを入力しているが、F は主鉄筋と接するモルタルを剛接合している。末尾の数字は、スパイラル筋のヤング係数を低減している Ring 数を示している。

5ΦB1, 5ΦB3, 5ΦB5 の解析結果を図-9 示す。変位が 1mm に達するまでの挙動に大きな違いは見られないが、

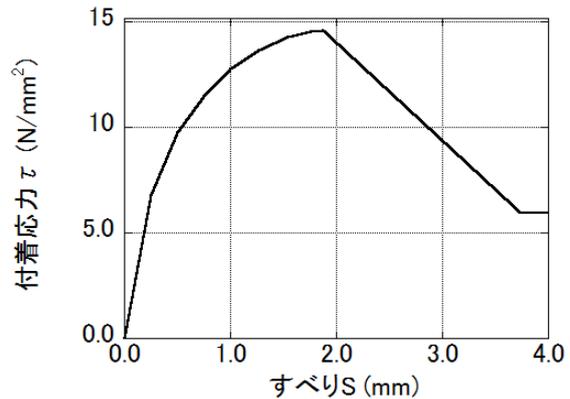


図-6 付着モデル

	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )		
	①1Ring低減	②3Ring低減	③5Ring低減
	6.25E+3	6.25E+3	6.25E+3
	2.00E+5	2.50E+4	1.25E+4
	2.00E+5	1.00E+5	2.50E+4
	2.00E+5	2.00E+5	5.00E+4
	2.00E+5	2.00E+5	1.00E+5
	2.00E+5	2.00E+5	2.00E+5
	2.00E+5	2.00E+5	2.00E+5

図-7 スパイラル筋ヤング係数低減方法

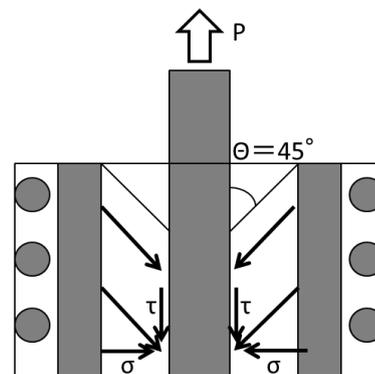


図-8 応力伝達方向

表-2 解析ケース

モデル名	重ね長さ	付着モデルの有無	ヤング係数を低減させた Ring 数
5ΦB1	5Φ	有	1
5ΦB3	5Φ	有	3
5ΦB5	5Φ	有	5
5ΦF5	5Φ	無	5
10ΦB5	10Φ	有	5
10ΦF5	10Φ	無	5

1mm≦δ では、スパイラル筋のヤング係数を 5Ring 低減させた 5ΦB5 が実験結果と近い挙動を示した。

05202 試験体の実験値 P-δ 関係、5ΦB5 の解析値、及び 5ΦF5 の解析値の比較を図-10 に示す。5ΦF5 は主鉄筋と接するモルタルを剛接合としているため、初期剛性を大きく評価していることがわかるが、付着モデルを入力している 5ΦB5 は、初期剛性が 5ΦF5 よりも小さく、実験値 P-δ 関係をより再現していることがわかる。よって、5Ring 分低減させたスパイラル筋のヤング係数モデルを採用し、10Φ モデルの解析に用いる。

10202 試験体の P-δ 関係から、試験体の降伏荷重が 188.2kN (応力度で 371.4N/mm<sup>2</sup>) であり、材料の降伏点 414.4N/mm<sup>2</sup> よりも低い結果であった。鉄筋は軸方向力に加えて直角な拘束力 (図-8) が働いているので、2 軸の Von Mises の降伏条件を考え、式(2)から軸方向の降伏点を算出した。

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2}} \geq Y \quad (2)$$

今回、σ<sub>1</sub> は主鉄筋の引張応力を示し、σ<sub>2</sub> は拘束圧とした。拘束圧は図-8 より、ストラット角度を 45°としているので、付着応力 τ と等しい値になると考えた。これらを踏まえて計算すると、主鉄筋の降伏点は 397.9N/mm<sup>2</sup> (降伏荷重 195.3kN) となった。

主鉄筋降伏点を 397.9N/mm<sup>2</sup> とする時の 10ΦB5、10ΦF5 の解析結果を図-11 に示す。まず初期剛性については、10ΦF5 は実験値より大きく、10ΦB5 は実験値より小さく評価している。次に二次剛性は、10ΦF5 と 10ΦB5 で大差は見られないが、6.0≦δ (mm) の実験値の挙動をより再現しているのは 10ΦB5 である。

以上から 5Φ モデルの解析で用いたパラメータによる 10Φ モデルの解析結果は、初期剛性を試験で得られたものより小さく評価し、主鉄筋降伏後の二次剛性は実験値の挙動へと近づいて行くということがわかった。解析結果における二次剛性が実験値のものへと近づいた理由は、鉄筋降伏後のひずみ硬化域の影響が卓越したためであると考えられる。

### 3.2 主鉄筋のひずみ分布

5ΦB5 において、05202 試験体の主鉄筋が抜け出した荷重 138.9kN (以下、P<sub>max</sub> と呼ぶ) が作用する時の、モルタル内に定着している主鉄筋ひずみ分布を図-12 の左に示す。主鉄筋のひずみは三角形分布となっている。

10ΦB5 において、10202 試験体における P<sub>max</sub> 252.7kN が作用する時の、モルタル内に定着している主鉄筋ひずみ分布を図-12 の右に示す。左に示したモデル図の下端から 5Φ までのひずみ分布が、5ΦB5 と共通していることがわかる。

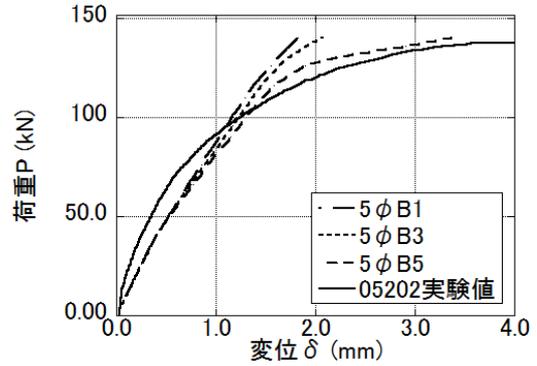


図-9 5Φモデル解析結果比較①

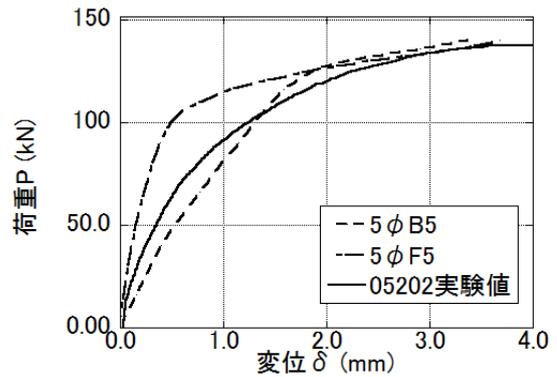


図-10 5Φモデル解析結果比較②

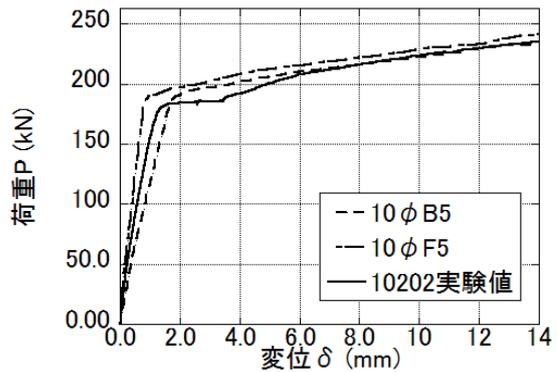


図-11 10Φモデル解析結果比較

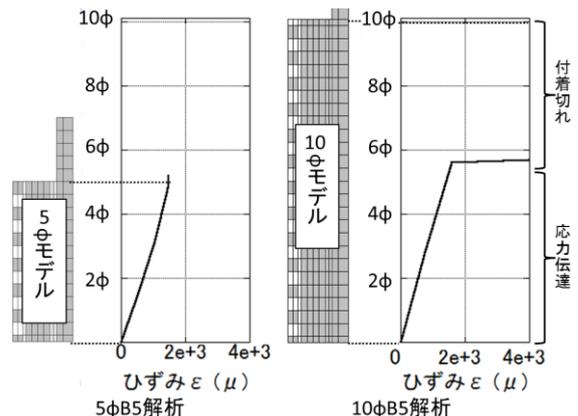


図-12 P<sub>max</sub>時の主鉄筋ひずみ分布比較

図-12 に示したひずみ分布より、解析上では  $P_{max}$  時に、モデル図の下端から 5Φ 程度で応力が伝達され、それより上部分では付着切れをしていると考えられる。

モルタル内に定着された鉄筋を軸方向に引張する時のひずみ分布は、一般に重ね長さが短い時は三角形分布となり、重ね長さが長くなるにつれて鉄筋先端部のひずみ量が小さくなるような分布となる。本解析ではこれを再現出来ているので、検討したパラメータの妥当性を示している可能性がある。

なお、主鉄筋の解析モデルは 8 要素で構成している鉄筋断面方向の層を、鉄筋軸方向に 5Φ モデルは 18 層、10Φ モデルは 31 層重ねることによって出来ており、図-12 の各主鉄筋ひずみ分布の左に示したモデル図の下から鉄筋軸方向に 1, 5, 9, 13 層目のひずみ量をプロットしたものが 5ΦB5 の主鉄筋ひずみ分布であり、1, 8, 15 層目のひずみ量をプロットしたものが 10ΦB5 の主鉄筋ひずみ分布である。また、ひずみ量は鉄筋断面方向の 8 要素におけるひずみ量の平均値とした。

### 3.3 付着応力分布

解析において、荷重を増加させる時のモルタルと主鉄筋間の付着応力分布の変化を、添え筋に最も近い FILM 要素から調べた。

5ΦB5 における付着応力  $\tau$  の変化を図-13 に示す。荷重が 20kN から 120kN に増加する時、0~4Φ の間にかけて  $\tau$  も上昇しているが、 $P_{max}$  時には 1Φ~4Φ の間にかけて  $\tau$  が低下し 0 に近くなり、モデル図の下端と上端のみで  $\tau$  が上昇している。これは主鉄筋がすべり出しているからだと考えられる。

10ΦB5 における  $\tau$  の変化を図-14 に示す。荷重が 40kN から 196kN に増加する時、0~8Φ の間にかけて  $\tau$  も上昇しているが、 $P_{max}$  時には解析上で 196kN の引張荷重が作用する時と比べ、全体的に  $\tau$  が低下している。一部符号が負の分布があるが、これは接しているモルタル要素に Softening が発生していることが影響していると考えられる。

一般的に、主鉄筋のひずみ分布が図-12 の様であれば、付着応力は等分布になると考えられているが、図-13、図-14 で等分布となる荷重 step は無く、3.2 節と相反する結果となった。しかし、図-13、図-14 は主鉄筋と添え筋が最も近い要素における付着性状であるため、他の面における挙動も含めて今後再検討を要する。

### 3.4 継手破壊形態指標の検討

#### (1) Softening による指標の検討

既往の研究により継手の破壊形態は C 型、Yc 型、Yb 型の 3 つに分類される。解析対象としている 05202 試験体は C 型、10202 試験体は Yc 型の破壊を起こしている。

本研究では、図-15 に示した主鉄筋と接するモルタル要

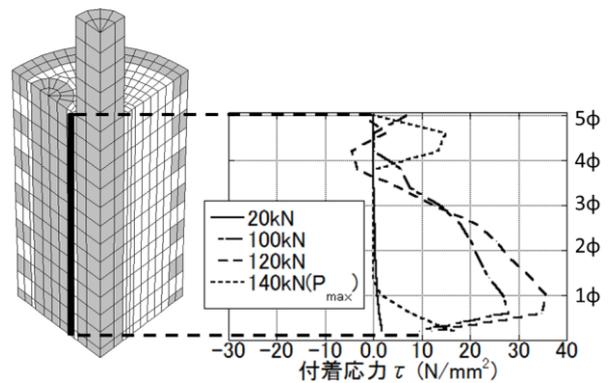


図-13 付着応力分布 (5Φ B5)

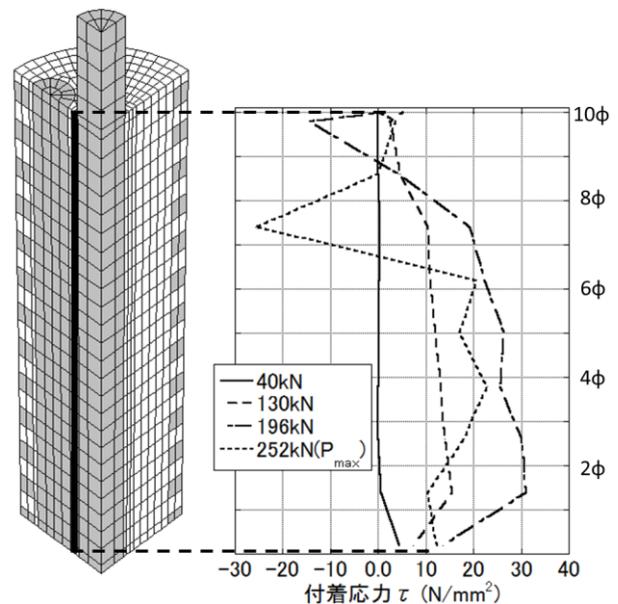


図-14 付着応力分布 (10Φ B5)

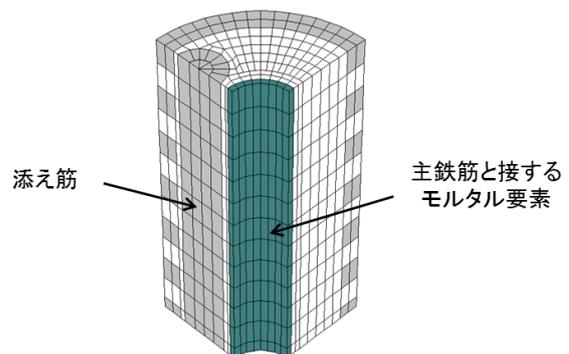


図-15 Softening の進展を調べる要素

素の荷重増加による Softening 進展状況から指標を検討した。なお Softening とは、モルタルが最大圧縮強度に到達後に、ひび割れ幅の拡大により圧縮強度が低下する圧縮軟化のことを示す。

5ΦB5 におけるモルタルの Softening 進展状況を図-16 に示す。添え筋側を中心に Softening を起こし、 $P_{max}$  (138.9kN) と近い値の荷重 (140kN) が解析モデルに作用する時、添え筋側のモルタル要素はほぼ一直線に Softening が発生している。

10ΦB5 モデルにおける Softening 進展状況を図-17 に示す。荷重が増加するにつれて、添え筋側のモルタルの上端と下端から次第に進展していき、 $P_{max}$  (252.7kN) に到達すると 5ΦB5 同様、添え筋側のモルタル要素にほぼ一直線に Softening が発生している。

#### (2)本研究における継手の破壊形態指標

ここで、05202 試験体と 10202 試験体はそれぞれ主鉄筋が抜け出す破壊形態を示していることから、重ね長さが 5Φ~10Φ の間の継手モデルにおいても同様の傾向が見られる時、次のような指標を設けることができる可能性がある。

主鉄筋と接するモルタル要素において、添え筋側の Softening が一直線に連なる時の解析上における荷重が、

- (1) 主鉄筋降伏荷重を下回る：C型破壊
- (2) 主鉄筋降伏荷重を上回り、主鉄筋破断荷重を下回る：Yc型破壊

Yb型破壊は、添え筋側の Softening が一直線に連なる前に主鉄筋の破断荷重に達する場合と考えられるが、本解析では Yb型破壊に至る継手の解析を行っていないため、今後検討する必要がある。また併せて、各破壊形態における試験体を切断観察し、解析結果と比較することで、指標の妥当性についても検討したい。

#### 4. 結論

- (1) 本研究における解析モデルでは、05202 試験体の引張試験結果を元に作成した付着モデルと、ストラット角度から考えた摩擦係数と、スパイラル筋の拘束力低下を表現する端部から 5Ring 分低減させたヤング係数により、5Φモデルの解析値は試験で得られる荷重変位関係と整合した。ただし、重ね長さが長い場合には初期剛性が低めに評価された。
- (2) 主鉄筋のひずみ分布より、モデル図の下端から 5Φにかけて応力伝達していることがわかり、それより上部分は付着切れをしていると考えられる。
- (3) 得られた主鉄筋のひずみ分布より、本来等分布となるはずの付着応力は、主鉄筋と添え筋が最も近い要素の付着性状を調べたため、等分布にならなかった。
- (4) 主鉄筋と接するモルタル要素の Softening の進展状

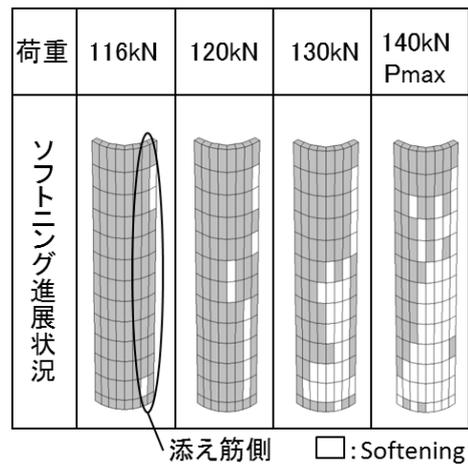


図-16 Softening 進展状況 (5ΦB5)

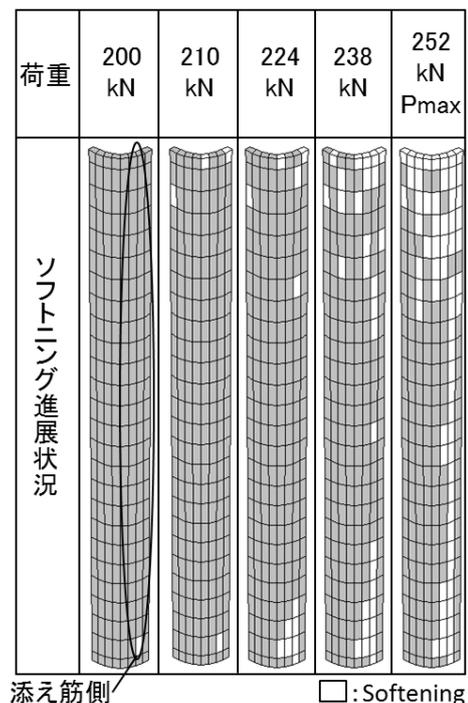


図-17 Softening 進展状況 (10ΦB5)

況が、継手が抜け出し破壊を起こす指標となる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 飯塚 豊, 趙 帥, 岡野 素之, 森田 俊哉: 拘束型重ね継手の引張性能に関する実験的研究, JCI 年次論文集, Vol.38, No.2, pp541-546, 2016
- 2) FINAL HP 参照 <http://www.engineering-eye.com/> (閲覧日: 2017年11月19日)

#### 謝辞

本解析を行うにあたり、前橋工科大学平成27年度卒業生の鈴木達也氏(現、鈴与建設)のデータを参考にしました。ここに深謝します。