

論文 高密度メッシュモデルを用いた有限要素法による機械式鉄筋定着工法の検証解析

山本 悠人*1・畑 明仁*2・村田 裕志*2・杉山 智昭*2

要旨：異形鉄筋の幾何形状を節までモデル化した高密度メッシュを用いた有限要素解析により、機械式鉄筋定着工法の定着挙動の検討を行った。まずマッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の両引き／引抜き試験を対象とした解析を行い、島らによる既往の付着に関する提案式と良好に一致することを確認した後、小円形板を有する機械式鉄筋定着工法の引抜き試験を対象とした解析を行った。機械式鉄筋定着工法の解析では、定着板の有無と定着長の違いによる付着・定着挙動の違いを表現できる可能性を示した。

キーワード：付着、内部ひび割れ、機械式定着鉄筋、メソスケール解析

1. はじめに

コンクリートにおける生産性向上に向けた取り組みとして、2016年7月に国土交通省・機械式鉄筋定着工法技術検討委員会にて「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン¹⁾」が発刊され、土木分野においても同工法の積極的な適用が推進されている。これまで機械式鉄筋定着工法は主に実験的検討により各種工法の付着・定着性能や適用範囲が検討されてきた。今後、機械式鉄筋定着工法がより合理的に設計されていくためには実験的検討のみでなく、力学的メカニズムを明らかにし、数値解析を含めて普遍的に付着・定着性能を評価していくことが望まれる。

一方で、近年では計算機の発展もあり、メソスケール (mm 単位) の数値解析を行うことでひび割れの進展や付着挙動を解明する研究が進められている。アプローチとして有限要素法 (以下 FEM) と剛体バネモデル (以下 RBSM) の2つがある。FEM では車谷ら²⁾は一連の研究にて、3次元 FEM により鉄筋引抜き時に鉄筋節周辺に発生する Goto crack の進展を再現している。また Salem & Maekawa³⁾は軸対称モデルでの FEM によりマッシブなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着挙動の再現に成功している。一方、RBSM では武藤ら⁴⁾がマッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着挙動評価解析を行っており、島ら⁵⁾によって提案されている付着応力-すべり-ひずみ関係式と比較し、概ね一致する付着挙動を再現している。

機械式定着鉄筋工法を対象としたメソスケール解析としては、林ら⁶⁾は RBSM で機械式定着鉄筋を用いた各配筋条件での引抜き試験の再現を行っており、FEM では竹山ら⁷⁾が3次元の有限要素解析により、機械式定着鉄筋と半円形フックの定着性能の評価を目的とした解析を行っている例がある。しかし竹山らの FEM 解析では鉄

筋-コンクリート間に付着損傷領域を設けることで付着損傷を再現しているため、鉄筋節周りの内部ひび割れの再現がされていない。

そこで本研究では異形鉄筋の節までを再現した高密度メッシュを用いた FEM により機械式定着鉄筋の付着挙動の再現解析を行い、その評価精度を検討したので、その結果を報告する。以下、2章では通常の鉄筋の引抜き試験に対する FEM の再現性を確認し、3章では機械式定着鉄筋の引抜き試験の解析結果を示す。

2. マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着性能評価解析

2.1 解析モデル

付着モデルの構築のために島ら⁵⁾が行った複数の実験のうち、Salem & Maekawa³⁾は D25 のねじ節鉄筋を対象とし、定着長が 10d, 40d の両引き／引抜き試験の計4ケースの再現解析を行っている。本研究ではその中から定着長が比較的短い 10d の2ケースを解析対象とした。解析対象の試験条件を表-1に示す。

定着長 10d の解析モデル、メッシュ図と鉄筋の形状をそれぞれ図-1～図-3、表-2に示す。節の幾何形状は台形とし三角形要素でメッシュ分割した。メッシュ代表長さは節高さと同程度の 2mm とし非構造メッシュを用いた。Salem & Maekawa³⁾はメッシュサイズ・界面要素の有無等について検討を行っている。その結果によると、メッシュサイズの影響は小さいこと、鉄筋-コンクリート間界面は剛結合でよいこと、鉄筋近傍には一定区間の遷移帯と呼ばれる剛性低下領域を設けることが良いことが示されている。そこで本検討では遷移帯と鉄筋-コンクリート界面の影響について確認するために引抜き試験解析において遷移帯を有するモデルと有さないモデルを作成し、また遷移帯を有するモデルで界面要素を有する

*1 大成建設 (株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 工修 (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 工博 (正会員)

モデルと有さないモデルを作成し比較を行った。

解析は汎用有限要素解析プログラム DIANA(ver10.1)を用いて軸対称モデルにより静的非線形解析を行った。コンクリートは全ひずみ理論に基づく固定ひび割れモデルを使用した。圧縮側構成則は圧縮側破壊エネルギーを考慮した放物線型モデルとし、圧縮破壊エネルギーについては Nakamura ら⁸⁾が提案する式

$$G_{FC} = 8.8\sqrt{f_c} \quad (1)$$

を用いた。ここで f_c : コンクリート強度である。引張側は引張強度までを線形とし、引張強度以後の引張軟化曲線はコンクリート標準示方書⁹⁾に示される2直線型の1/4モデルとした。せん断伝達モデルは、文献¹⁰⁾を参考としせん断剛性低下率をクラックひずみによらず0.2の一定値とした。また多軸拘束効果と横方向ひび割れによる圧縮強度の低下を考慮するモデルとした。遷移帯についてはヤング率と引張強度を半分とし、圧縮強度はコンクリートと同じとしたモデルを用いた。鉄筋は bi-linear の弾塑性体とした。本解析で用いた材料定数を表-3に示す。

軸対称要素はせん断ロックにより剛性を過度に評価することを避けるため三角形2次要素を用いた。界面要素はせん断・引張方向には力を伝えず、圧縮方向のみ力を伝えるモデルとした。

境界条件は、実験の加力を模擬し、引抜き試験についてはコンクリート・遷移帯要素上面の軸方向を固定した。両引き試験についてはモデル底面を軸方向に固定した(図-1)。両ケースとも鉄筋天端面を変位制御で加力した。遷移帯は鉄筋の骨材配置やブリージングの影響を考慮し、鉄筋表面から1d区間設ける手法に従った。

2.2 解析結果

ケース1 定着長10dにおける引抜き試験の解析で得られた降伏前、鉄筋応力45N/mm²時の鉄筋の軸方向ひずみの分布を図-4に示す。同時に島らの提案する付着応力-すべり-ひずみ関係から求めたひずみ分布を示す。なお島らの提案式は以下のように表される。

$$\tau / f'_c = 0.73 \{ \ln(1 + 5s) \}^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (2)$$

ここで τ : 付着応力, f'_c : コンクリート強度, S : すべり量, D : 鉄筋径, ε : ひずみ, $s = 1000S/D$ である。遷移帯を設けていないモデルの結果と島らによる提案式を比較すると、解析結果のひずみ分布は5~10d区間のひずみ分布の勾配が大きくなっており、付着を過大に表現していることが確認される。一方で遷移帯を1d区間設けることで、鉄筋近傍の要素が変形しやすくなり、解析で得られたひずみ分布と島らによる提案式とが良好に一致する。界面要素の有無による鉄筋ひずみ分布結果の比較を図-5に示す。引抜き荷重が小さい範囲(鉄筋応力45N/mm²時)

では界面要素の有無によらず良好に一致するのに対し、引抜き荷重が大きい(鉄筋応力200N/mm²時)と界面要素を用いたほうがより精度良く島モデルを再現すること

表-1 解析対象の試験条件

	荷重方法	定着長
ケース1	引抜き	10d
ケース2	両引き	10d

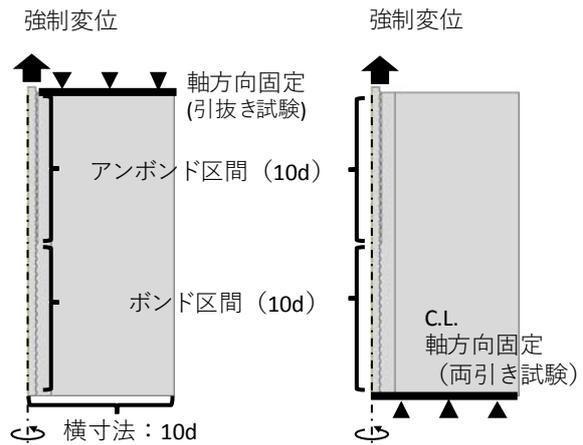


図-1 解析モデル (左: 引抜き試験, 右: 両引き試験)

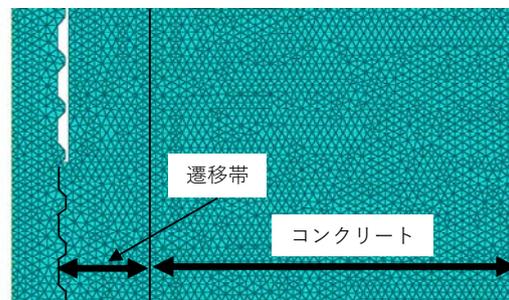


図-2 ボンド/アンボンド区間近傍のメッシュ図

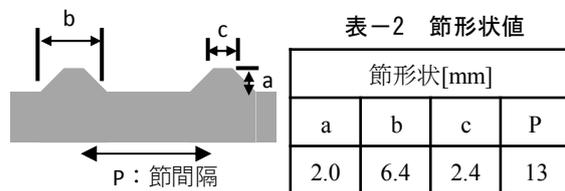


図-3 鉄筋節形状図

表-3 材料諸元

コンクリート		鉄筋	
ヤング率	25.0 GPa	ヤング率	200.0 GPa
ポアソン比	0.21	ポアソン比	0.3
圧縮強度	30.0 N/mm ²	降伏強度	400 N/mm ²
引張強度	3.0 N/mm ²		

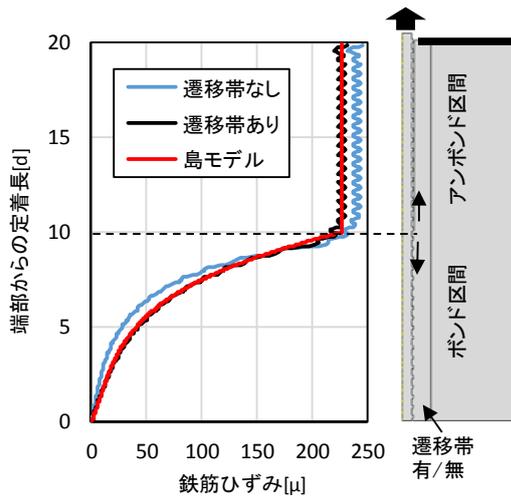


図-4 鉄筋のひずみ分布（遷移体の有無比較）

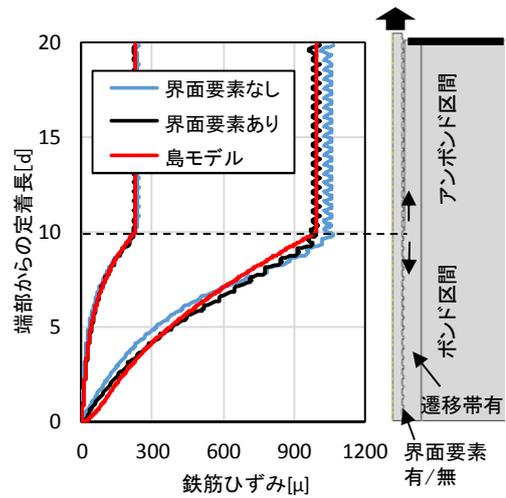


図-5 鉄筋のひずみ分布（界面要素の有無比較）

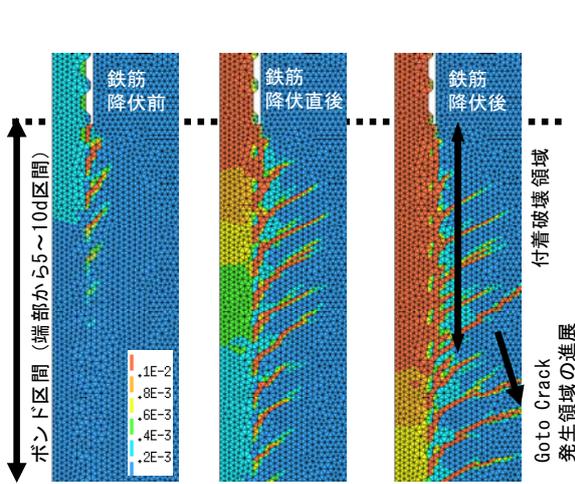


図-6 ボンド区間の鉄筋と遷移帯の主ひずみ分布

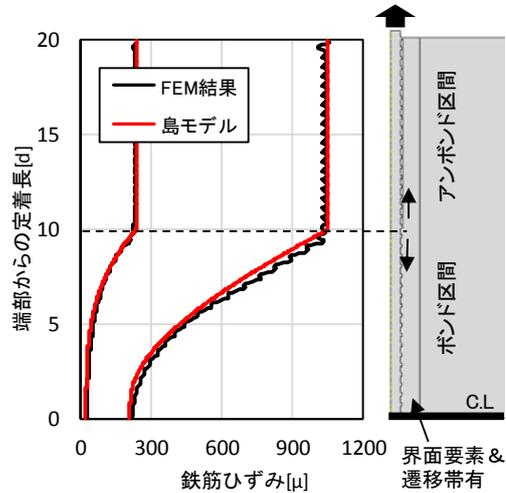


図-7 両引き（ケース 2）解析結果と島式の比較

ができる。また鉄筋降伏前後の主ひずみ分布を図-6に示す。各ステップにおいて異形鉄筋の節周辺に内部ひび割れが発生していることが確認される。また鉄筋降伏後は節に起因する斜めひび割れがボンド区間深部に進行すると共に遷移帯要素のひずみが大きくなり、付着破壊が進行していく様子が確認される。

遷移帯・界面要素を考慮した両引き試験の解析ケースの結果と島らによる付着提案式との比較図を図-7に示す。このケースにおいてもケース1の引抜き試験と同程度の荷重（鉄筋応力 45~200N/mm²時）では良好に一致する結果を確認した。これらより、汎用有限要素プログラムを用いた本条件による解析にて異形鉄筋の付着性能を高い精度で評価・再現することができることを確認した。

3. 小円形板を有する後施工型定着工法の引抜き試験

3章では小円形板を有する後挿入型の機械式鉄筋定着工法の引抜き試験を対象とした解析を述べる。対象工法は既設コンクリート躯体を削孔し特殊モルタルを充填し

た後、端部に小円形の定着板を有する鉄筋を挿入する工法である。

3.1 実験概要

解析対象の実験¹¹⁾は、D32の定着鉄筋（SD490）にて定着長の違い（14d、20d）と定着板の有無を変えて、合計4ケース実施された結果である。加力は定着鉄筋の破断または抜け出しが発生するまで続けられた。実験結果では、荷重-変位関係は試験条件による大きな差異はなく、破壊モードは定着板を有する試験体が鉄筋破断、定着板を有さない試験体が付着破壊による抜け出しが発生する結果が得られている。表-4、図-8に試験体条件・実験結果一覧と試験体形状を示す。

3.2 解析モデル

前章と同様、軸対称モデルにて静的非線形解析を行った。解析に用いたモデルの例として、ケース2：定着長14d、定着板有のモデル図と定着板周辺のメッシュ図を図-9、10に示す。またねじ節鉄筋D32の節形状を同時に示す。定着板と削孔径は実験と同様にそれぞれ板径50mm、

厚さ 22mm と削孔径 55mm である。

要素は三角形軸対称要素、メッシュの代表長さは、定着鉄筋近傍では節高さと同程度とするため 3-5mm, 反力支持点付近では計算コストの低減を図り 5-15mm 程度とした。また前章と同様に非構造メッシュを用いた。

今回の解析では定着鉄筋の破断・抜け出し挙動の表現を企図し幾何学的非線形性と鉄筋のひずみ硬化を考慮した。その他は前章同様に三角形 2 次要素と圧縮を伝達する界面要素を用いたモデル化を行った。なおモルタル・コンクリート要素間には界面要素を設けていない。これは対象の実験においてはこの層間での付着破壊・すべりが確認されていないためである。

コンクリート要素についても前章同様のモデルを用いた。またモルタル要素についてもコンクリート要素と同様の構成則を用いた。各材料諸元を表-5 に示す。鉄筋・定着板の要素は土木学会複合構造標準示方書¹²⁾に示されるひずみ硬化までを表現した鋼材モデルを採用した。解析にて使用した鉄筋の材料諸元と応力-ひずみ関係の骨格曲線をそれぞれ表-6、図-11 に示す。境界条件は、コンクリート要素上面の対称軸から 450-550mm の区間の軸方向を固定し、定着鉄筋天端部を変位制御で加力した。また後挿入の定着鉄筋周辺はモルタルにより充填されているため、鉄筋周辺部にはコンクリートの遷移体は

設けず、均質なモルタル要素としてモデル化している。

3.3 解析結果

荷重-変位関係を図-12、主ひずみ分布を図-13、定

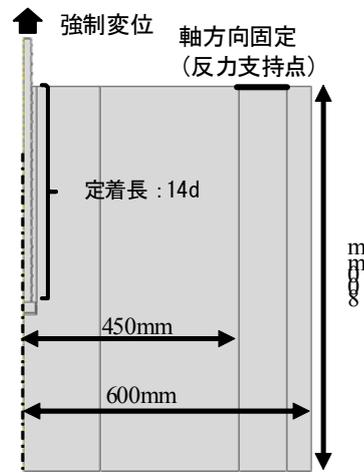


図-9 解析モデル例 (ケース 2, 定着長 14d)

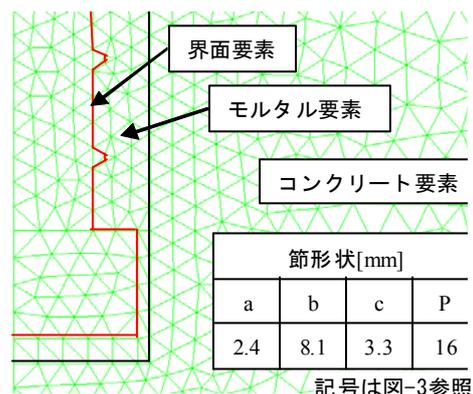


図-10 定着板周辺のメッシュ図

表-4 各ケース試験条件と試験結果

ケース No.	試験条件				実験結果		
	鉄筋径	定着板	定着長 [mm]		最大耐力		破壊モード
					荷重 [kN]	変形 [mm]	
1	D32	無	14d	448	461	9.63	付着破壊
2		有			500	35.5	鉄筋破断
3		無	20d	640	498	24.52	付着破壊
4		有			500	13.63	鉄筋破断

表-5 コンクリート・モルタル材料諸元

	コンクリート	モルタル
ヤング率	30.1 GPa	25.2 GPa
ポアソン比	0.21	0.21
圧縮強度	27.5 N/mm ²	56.2 N/mm ²
引張強度	2.70 N/mm ²	4.41 N/mm ²
圧縮破壊 E	46.2 N/mm	40.0 N/mm
引張破壊 E	0.10 N/mm	0.05 N/mm

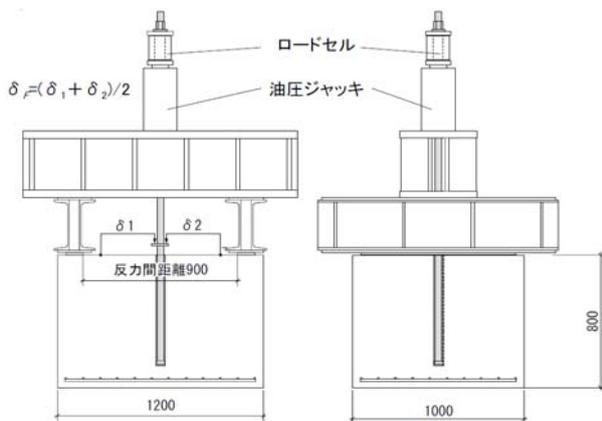


図-8 試験体形状と加力図

表-6 鉄筋材料諸元

ヤング率	200 MPa
ポアソン比	0.3
降伏強度	528 N/mm ²
引張強度	713 N/mm ²
硬化ひずみ	10000μ

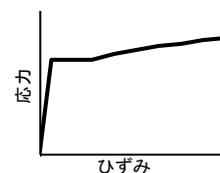


図-11 鋼材骨格曲線

着鉄筋のひずみ分布をそれぞれ図-14, 15 に示す。なお図-12, 14, 15 には実験結果も併せて示す。全てのケースでひずみ硬化開始後、実験での最大耐力に到達する前、変位 4mm 程度のところで解が発散し計算が終了した。

荷重変位関係は、解析では耐力を過大に評価しているがこれは実験では鉄筋のひずみゲージ貼付け位置に切り欠きを設けているため 7%の断面欠損が生じていることが要因と考えられる。仮に 7%の断面欠損を考慮して引張荷重を計算すると解析上の降伏荷重は 398kN となり妥当な耐力を示す。一方、変形は解析結果が小さくなっているが、これは実験で生じた何らかのすべりを解析が表現できていないことによる可能性がある。要因特定は今後の課題である。

図-13 では荷重が進むにつれ内部ひび割れが引張端側から定着端側へ進行していく様子が確認される。ケース 1 においては、荷重低下と共に付着破壊が進行し引張端側の内部ひび割れが消失すると共に定着端側のひび割れが増大し、鉄筋の軸方向ひずみが増大しており、付着破壊が進行していることが確認された。本解析はこの時

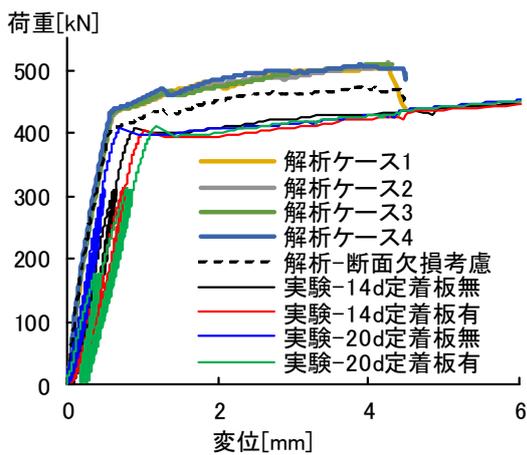


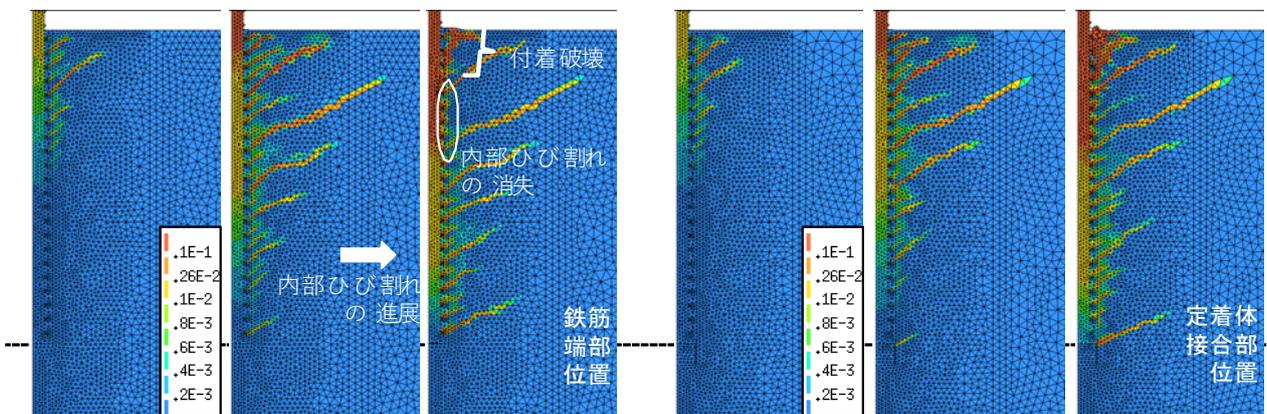
図-12 荷重—変形関係

点で終了したものの、このケースは付着破壊型の破壊モードが見られた実験と整合している。

荷重 175kN, 310kN 時の解析により得られたひずみ分布と実験にて得られた結果を図-14 に示す。解析結果は定着端付近ではひずみが発生せず、途中から天端に向かうにつれ急激に増加している分布が確認される。これより今回の解析では鉄筋-セメント要素間の付着力を過大に評価していることがわかる。またこの現象は前章におけるコンクリート遷移体を設けていない解析結果に似ており、鉄筋の節によりモルタル要素に伝わる応力による変形が実験に比べ過少であることを意味している。

定着板の有無による影響として、ケース 2 では降伏後において付着と同時に定着板による支圧効果が作用していることが図-15 の鉄筋降伏後のひずみ分布から確認される。すなわち定着板を有さないケース 1 においては定着鉄筋端部にひずみは発生しないが、定着板を有するケース 2 においては降伏後に定着板近傍の定着鉄筋のひずみが加力とともに大きくなることが確認された。この傾向は実験結果と整合しており、機械式定着鉄筋の定着板の支圧効果による定着により発生するものと考えられる。また実験結果（各ケース荷重 450kN 時）のひずみ分布を同時に示す。10000 μ 以上のひずみを示す硬化領域は良好に一致しているが、拡大図に示す通り支圧効果による定着板近傍のひずみ分布はやや小さくなっている。またこの支圧効果は図-14 にも示している通り、実験においては鉄筋の降伏前から生じている。これらはやはり鉄筋周辺の変形性能を高くモデル化している影響であると考えられる。なお定着長の長いケース 3, 4 では解析の範囲内において付着破壊が定着部まで進行しなかったため、定着板の有無による影響を確認することができなかった。

今回の検討対象では鉄筋の周辺はモルタルで充填されているため、遷移体は設けないこととしていた。解析においてはコンクリート-モルタル要素間の付着が課題に



(a). ケース 1 : 定着長 14d, 定着板無

(b). ケース 2 : 定着長 14d, 定着板有

図-13 定着鉄筋近傍の主ひずみ分布 (各ケース左から荷重 175kN 時, 変形 1mm 時, 最終ステップ時)

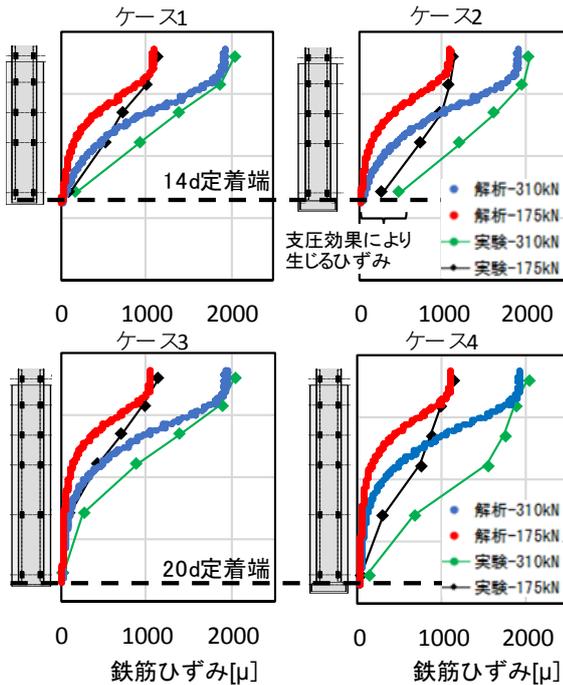


図-14 鉄筋降伏前の軸方向ひずみ分布の比較

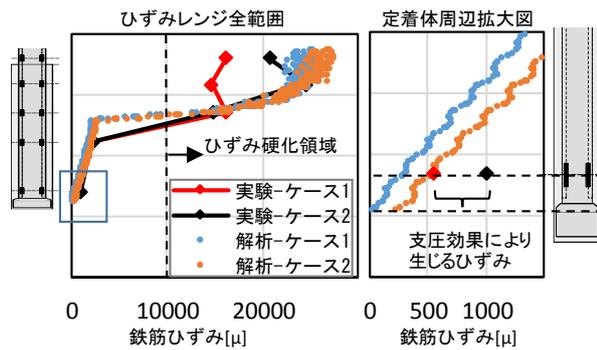


図-15 鉄筋降伏後の鉄筋ひずみ分布 (定着長 14d)

評価されていたため、鉄筋のひずみ分布の推定精度向上のためには鉄筋周辺、特にモルタル要素のモデリングの考え方を再検討する必要がある。具体的には、付着性状をより正確にモデル化するために、モルタルの応力ひずみ関係の骨格曲線や破壊エネルギーなどの構成則・材料諸元、また遷移帯とする区間の幅を詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

異形鉄筋の節までの幾何形状を再現した高詳細メッシュを用いた各再現解析により得られた知見を以下に述べる。

- (1) マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の引抜き解析では、遷移帯を考慮し、適切な材料構成則を定義することで島らによって提案されている付着応力-すべり-ひずみ関係を良好に再現する事が可能である。

- (2) 機械式鉄筋定着工法の引抜き解析では、付着破壊の進行や、定着板による支圧効果の影響を解析により表現することができる可能性が示された。しかし鉄筋軸方向の付着応力分布や抜け出し挙動には精度向上の余地が有り、今後の課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省：機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン，2016.7
- 2) 車谷麻緒，根本優輝，岡崎慎一郎，廣瀬壮一：異形鉄筋周辺のコンクリートに形成する内部ひび割れモードの再現シミュレーション，日本計算工学会論文集，Vol.2014，p.20140008，2014
- 3) Hamed M. Salem, Koichi Maekawa：Pre- and Postyield Finite Element Method Simulation of Bond of Ribbed Reinforcing Bars, Journal of Structural Engineering, ASCE, 130, pp.671-680, 2004
- 4) 武藤信太郎，Worapong Srisoros, 中村光，国枝稔：メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.763-768, 2005
- 5) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第 378 号/V-6, pp.165-174.1987
- 6) 林大輔，長井宏平：三次元離散解析手法による多方向配筋時の RC 定着性能の微細構造解析，土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, 241-257, 2013
- 7) 竹山忠臣，田中美帆，田中章，内田裕市：機械式定着鉄筋の性能評価試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, 2008
- 8) Nakamura, H. and Higai, T.：Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 9) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2012.12
- 10) 三橋博三，六郷恵哲，国枝稔編：コンクリートのひび割れと破壊の力学，技報堂出版，pp.112-119, 2010.7
- 11) 杉山智昭，高木憲三郎，小野英雄，渡辺英義：小円形板を有する後挿入型定着工法の定着性能 その 2 長い定着長の引張実験と付着強度の考察，日本建築学会大会学術講演概要集，構造IV, pp.41-44, 2015
- 12) 土木学会：2014 年制定 複合構造標準示方書 原則編・設計編，2015.5