

論文 群効果が機械式鉄筋定着工法の定着性能に与える影響の検証

山本 悠人*1・畑 明仁*2・村田 裕志*2・大宮 正弘*3

要旨：高強度の機械式鉄筋定着工法の定着性能を検討するため、かぶりの有無や群効果の影響を考慮した引抜試験を実施した。3本の鉄筋を埋め込んだ引抜試験においては、群効果の影響で抜け出し量が大きくなることが確認されたが、その上昇量は半円形フックにより定着された試験体に比べ小さいことが示された。またかぶりの有無においても良好な定着性能を示した。これらの試験を対象とした有限要素法による再現解析では、遷移帯を考慮した解析により良好に実験結果の再現が可能であることを示した。また群効果の影響による抜け出し変位の増加は早期にコーン状ひび割れが進展することが原因であることを示した。

キーワード：機械式鉄筋定着工法, 引抜試験, 高強度鉄筋, 抜け出し変位, 群効果, メゾスケール解析

1. はじめに

阪神大震災を契機とする想定地震動の変化や耐震設計の強化により、鉄筋コンクリート構造物における必要鉄筋量が多くなっている。その影響で柱梁接合部やボックスカルバートの隅角部などでは高密度配筋となり配筋作業が複雑化している。そこで高強度鉄筋の利用による鉄筋量の減少や、配筋作業の生産性向上を目的に、従来のフックによる定着に代わり、機械式鉄筋定着工法を採用するケースが多くみられるようになってきた。平成29年制定道路橋示方書 V 耐震設計編¹⁾ (以下、道路橋示方書) ではコンクリート強度 30N/mm^2 以上等の構造細目を満たすことを条件に、軸方向鉄筋に SD390, 490 といった高強度鉄筋の利用が認められている。また平成28年に国土交通省より発刊された「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン²⁾」では、機械式鉄筋定着工法のせん断補強鉄筋への積極的な利用を促進している。同工法の軸方向鉄筋への適用は、2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編]³⁾ (以下、コンクリート標準示方書) に規定されているが、要求性能に関する具体的な記載はない。必要な性能としては土木学会発刊「鉄筋定着・継手指針[2007年版]⁴⁾ (以下、定着指針)」に示される、高応力繰返しの抜き出し試験により性能を確認するように規定されており、マッシュなコンクリートに埋め込まれた1本の鉄筋に対しての性能評価基準が記されている。実際の配筋として想定される、高強度の軸方向鉄筋が密に配置された状態で抜き出し荷重が作用すると、群効果により隣り合う鉄筋が一体となり挙動し定着部からコーン状破壊することで、単一の鉄筋で考慮していた定着性能に比べ実際の定着性能が低下する可能性がある。例えば尾坂ら⁵⁾は群効果によるコンクリートに埋め込まれた直筋の付着性能の低下を、幸良ら⁶⁾は機械式定着鉄筋と母材鉄筋の付着との関係性に着目した複数鉄筋の引抜試験を実施している。一

方で母材鉄筋の付着を除いた定着具の支圧効果のみの群効果に着目した研究は見当たらない。

そこで本研究ではマッシュなブロックに高強度鉄筋の機械式定着鉄筋を1本または3本埋め込んだ試験体にて引抜試験を実施し、従来の半円形フックによる定着との定着性能を比較、および各試験体条件が定着性能に与える影響を考察した。また定着具の幾何形状の影響を精密に表現するために数 mm~100mm 程度の要素サイズのメッシュを用いた非線形有限要素法による再現解析 (以下、メゾスケール解析と称す) で破壊性状を再現・考察した。なお本論文内においては定着指針に基づき「定着具:機械式定着において引張力を伝達するための板」、「定着部:定着される鉄筋端部とその周辺の定着性能に寄与するコンクリートを含める箇所」と用語を定義する。

2. 機械式定着工法の抜き出し実験

2.1 実験の目的と概要

本研究にて実施とした試験ケースを表-1に示す。なお、比較用とした試験ケース (case-1,1S シリーズ) は既に報告⁷⁾されているものが含まれている。鉄筋はすべて SD490 であり、鉄筋径は軸方向鉄筋として実際に適用頻度が高いと想定される太径から D32 を選択した。定着具は円形プレートが摩擦圧接されたものを用いた。定着具の写真を図-1に示す。形状は表-1に併せて示す。コンクリート強度は各試験体の抜き出しを顕著にするために、道路橋示方書にて SD490 を使用する際に必要な強度である、実強度 30N/mm^2 程度 (想定引張強度 2.3N/mm^2) となるように設計した。定着指針に基づき、埋め込み長は case-1,3 シリーズで 12ϕ となる 384mm 、case-1S シリーズで 500mm とし、フック部を除く埋め込み部の鉄筋の付着は除去した。case-1S ではせん断補強鉄筋への適用性の確認を目的とした実験であり、かぶりコンクリート (定着

*1 大成建設 (株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 修 (工) (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 博 (工) (正会員)

*3 ブイ・エス・エル・ジャパン (株)

表-1 試験諸元

試験ケース	鉄筋種	降伏強度 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	定着具		f'_c [N/mm ²]	鉄筋本数	加力方式	備考
				方法	形状 ^註				
case-3M	D32	521	704	機械式	t26-80	36.4	3	30回繰返し	比較用既発表ケース
case-3H				フック	3.5φ-4φ	33.0			
case-1M		522	710	機械式	t26-80	32.7	1	1回繰返し	
case-1H				フック	3.5φ-4φ				
case-1SM		529	714	機械式	t26-65	33.2	1	1回繰返し	
case-1SH				フック	3.0φ-8φ	31.4			

注意：定着具の形状は、機械式定着：厚さ-プレート直径[mm]，フック：曲げ内半径-定着長

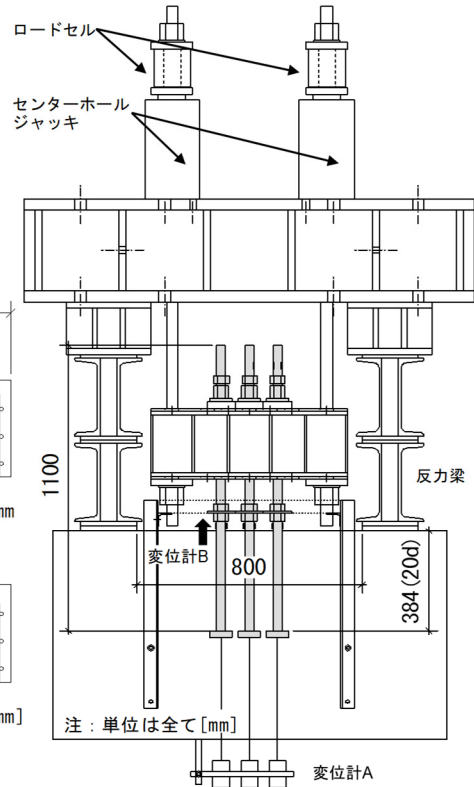
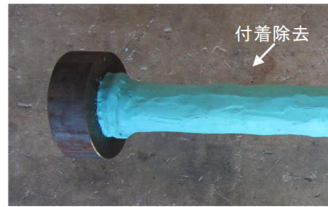
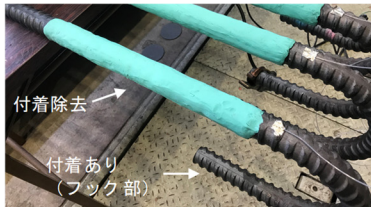


図-1 試験体定着具（左：従来フック，右：機械式鉄筋定着工法）

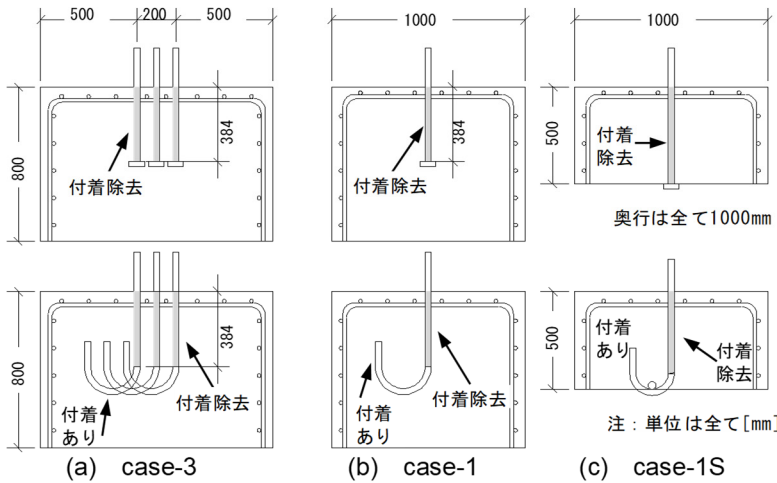


図-2 各試験体配筋図

図-3 加力図 (case-3M)

具の背面のコンクリート)を取り除いた試験体において規格降伏強度の95%で載荷後、一度除荷し、その後は規格引張強さまで単調に載荷する引抜試験を実施した。その他のケースは軸方向鉄筋への適用を目的とした試験であり、定着具の背面を含めマッシュパなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の引抜試験を実施している。加力は下限を規格降伏強度の2%以下、上限を規格降伏強度の95%とした応力で静的に30回の繰返し載荷を実施する高応力繰返し載荷を実施した。また高応力繰返し載荷の後に、規格引張強さに相当する応力まで単調載荷し、実験を終了している。半円形フックと機械式定着工法との定着性能の比較のみでなく、case-1SMと1Mの比較により適用した定着部の周辺コンクリート条件が定着性能に与える影響の考察すること、またcase-1Mと3Mの比較により隣接する鉄筋の群効果が定着性能に与える影響を考察することを目的とした。各試験体の図面を図-2に示す。またcase-3における加力図を図-3に示す。反力梁の間隔は、

case-1S および case-1シリーズでは埋め込み長と等しく (case-1S : 500mm, case-1 : 384mm), case-3シリーズではコーン状破壊を再現するために埋め込み長の2倍以上となる800mmとした。加力は、case-1,1Sシリーズではセンターホールジャッキを用いて鉄筋を直接加力した。case-3T,Hに関しては、埋め込まれた3本の鉄筋に均等に荷重がかかるように剛性の高い加力梁を用いた。またひずみゲージをブロック上端から20mmの箇所の鉄筋に貼付け、各鉄筋に発生するひずみの値が等しくなるように左右のジャッキを調整した。荷重の計測は左右のロードセルを用いた。繰返し載荷の基準となる応力は、ロードセルの合計荷重を鉄筋の公称断面積で除した値とした。拔出し変位量は定着具にインバー線を溶接し、シース管を通してブロックから取り出し、基部に取り付けた変位計Aにより計測した。またブロック上面から100mmの箇所において、定着部の拔出しと鉄筋の変形の合計となる伸び出し変位を図-3に示す変位計Bにより計測した。

2.2 実験結果

(1) 荷重-変位関係と拔出し変位

既報の case-1S および case-1 シリーズでは、各条件ともに従来のフックと比較し機械式定着が同等以上の定着性能を有することが確認されている。ここでは case-3 シリーズにおける定着具の拔出し変位量と鉄筋に発生する相当応力の関係を図-4 に示す。なお応力は前節で示した方法により算出している。case-3H では繰返し载荷の1 サイクル目より一定量の伸び出しが確認され、サイクル数が増えるごとに伸び出し量が漸増した。30 回の繰返し载荷の後に規格引張強さ相当の応力まで加力したところ、3 本間において多少の伸び出し量のばらつきは発生したものの、すべての定着具が損傷することなく良好な定着を示した。case-3M においても拔出しに関しては同様の傾向を示した。しかし case-3H と比較すると拔出し変位は相対的に小さい。表-2 に各ケースの 1 サイクル目と 30 サイクル目の拔出し変位（それぞれ δ_1, δ_{30} ）および

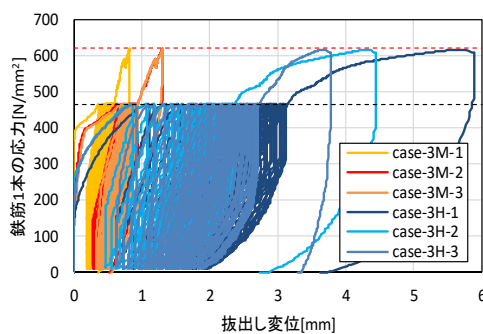


図-4 鉄筋応力-拔出し変位関係 (case-3)

表-2 拔出し変位結果 (単位は[mm])

ケース	δ_1	δ_{30}	$\delta_{30}-\delta_1$	δt
case-3M	0.668	0.944	0.310	1.312
(最大/小)	0.356	0.588	0.232	0.816
case-3H	1.068	3.116	2.048	5.672
(最大/小)	0.830	2.334	1.504	3.647
case-1M	0.224	0.454	0.230	0.652
case-1H	1.114	1.664	0.55	2.636
case-1SM	1.840	-	-	5.000
case-1SH	2.970	-	-	6.450

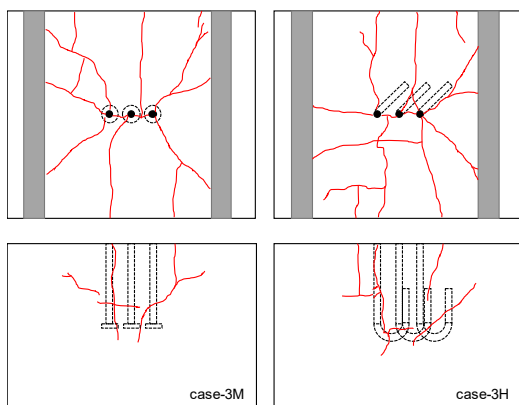


図-5 試験終了時ひび割れ図

び繰返し载荷による拔出し変位の進展量、引張強さ時の拔出し変位 (δ_t) を示す。定着指針に定められている規定として、①鉄筋の規格引張強さ以上の荷重に対して定着具が破壊しない②規格降伏強度の 95% 応力での繰返し载荷 30 回目のすべり量が標準フックの場合の値以下③繰返し 30 回目と 1 回目の拔出し変位の差が標準フックの場合の値以下と示されている。case-3 シリーズに対してこれらの基準を照査すると、対象とした機械式定着工法はすべての基準を満足していることが示された。

载荷試験終了後のひび割れ図を図-5 に示す。両ケースにて高応力繰返し载荷において鉄筋の並び方向のひび割れ、ブロック中央の割裂ひび割れが順に確認された。ひび割れの進展性・分散性についても定着具による大きな違いがないことが示された。

(2) かぶりコンクリートの有無による定着性能

case-1SM と case-1M の定着具の拔出し変位量と応力の関係比較を図-6 に示す。これらの試験体では定着具背面のコンクリートの有無が異なり、定着部のコンクリートの条件が拔出し変位量に与える影響を確認することができる。どちらの試験ケースも定着具の支圧効果が適切に作用することで従来の半円形フックによる定着に比べ小さい拔出し変位量となっているが、背面のかぶりコンクリートを有さない case-1SM は case-1M に比べ、1 サイクル目および規格引張強さにおける拔出し変位量で約 8 倍程度の拔出し変位量となり、この傾向は半円形フックによる定着においても同様である。定着具形状の違いから支圧効果によるコンクリートの変形に伴う拔出し変位が増大したことも、また背面のコンクリートにより支圧効果を受けるコンクリートの変形が抑制され、剛性が高くなるためと考えられる。また半円形フックに関しては、かぶりコンクリートがないことから、底面に近い定着具の付着性能が低下したことが影響していると考えられる。

(3) 群効果による定着性能への影響

case-3M と case-1M の定着具の拔出し変位量と応力の関係比較を図-7 に示す。また各主要载荷サイクルにおける拔出し変位量および繰返し载荷による拔出し変位の進展を表-2 に併せて示す。初期载荷においてはほぼ同

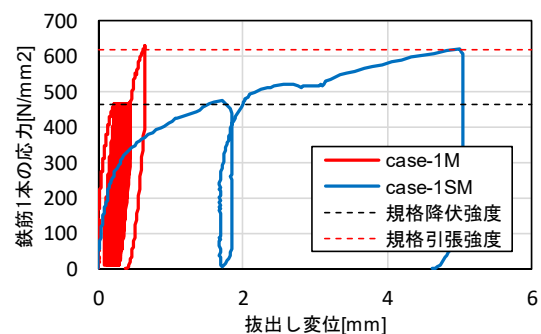


図-6 鉄筋応力-拔出し変位関係比較

様の挙動を示しているが、応力にて $390\text{N}/\text{mm}^2$ を超えた荷重において case-3M の拔出し変位が増加している。鉄筋本数が増えたことにより case-3M における周辺コンクリートに掛かる荷重は増加している。この時点で試験体表面ひび割れの発生が観測されており、内部のひび割れ状況は未確認であるものの、コーン状ひび割れの発生により拔出し変位が増加した可能性がある。その後の高応力繰返し载荷における拔出しの進展量はほぼ同じであり、繰返し载荷ではさらなるひび割れの過度な進展は進んでいないと判断することができる。規格引張強さまでの载荷では、case-3M の方が拔出し変位の増加率は高く、case-1M と比較し約 0.5mm 程度大きい拔出し変位を示した。

一方で case-3H と 1H の比較を図-8 に示す。対象の比較ケースでは 1 サイクル目の拔出し変位はほぼ同様であったのに対し、case-3H では繰返し载荷において拔出し変位が大きく進展し、またその後の規格引張強さまでの载荷においても拔出し変位は case-1H に比べ大きく進展した。case-3H では半円形フックの鉄筋芯間隔が 2ϕ となるように配筋されており、密な配置となっている。異形鋼棒の内部ひび割れは通常 $45\sim 60$ 度でコーン状に発生するのに対し、密に配置されている場合には内部ひび割れは鉄筋の間で水平につながるように発生し、鉄筋の付着力に果たす役割が小さくなることが知られている⁹⁾。今回の試験においても付着が除去されていない半円形フック部の節から発生する内部ひび割れがそのような挙動を示し、繰返し载荷以降の加力において内部ひび割れの進展に伴う付着破壊が 1 本のケースに比べより増加したものだと考えられる。今回の試験結果から、機械式定着工法

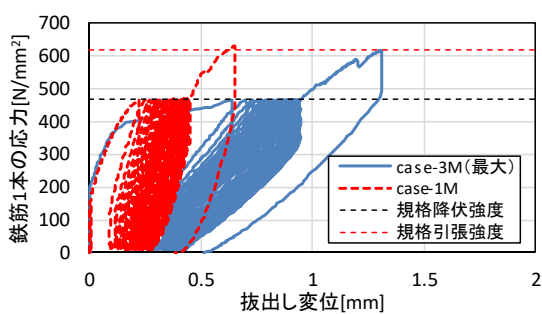


図-7 結果比較 (case-3M, 1M)

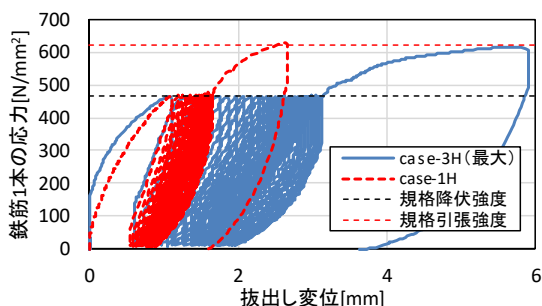


図-8 結果比較 (case-3H, 1H)

および従来の半円形フックによる定着の両方のケースにおいて、密に配筋された鉄筋の群効果による拔出し変位の増加が確認された。その増加量は両ケースにおいて同等か、機械式定着工法のほうが小さい傾向にあった。

3. 非線形有限要素法による再現解析

本章では破壊性状の検証のため、非線形有限要素法を用いた各試験の再現解析を実施する。対象は、機械式定着工法を用いた case-1SM と case-3M とした。なお本章で示す解析はすべて汎用の有限要素解析プログラムである DIANA ver10.3 を用いたものである。

3.1 case-1SM の再現解析

単一の鉄筋が埋め込まれた試験体であることから、対称性を利用し、1/4領域のモデル化を実施した。メッシュ図を図-9に示す。要素は6面体2次要素を用い、鉄筋周辺の要素の代表長さは 15mm 、コンクリートブロック外側のメッシュ代表長さは 40mm とし、メッシュサイズを遷移させる区間においては4面体または5面体2次要素を用いている。鉄筋についてもソリッド要素でモデル化し、ひずみ硬化を考慮した Von-Mises モデルを用いた。コンクリートは分散ひび割れモデルの一つである固定ひび割れモデルを用いた。引張破壊エネルギーはコンクリート標準示方書を、圧縮破壊エネルギーは Nakamura ら⁸⁾が提案している式を用いた。せん断挙動はせん断伝達関数を 0.2 と一定とするモデルとした。また Selby ら⁹⁾が提案する拘束効果を考慮した。材料諸元を表-3に示す。コンクリートと鉄筋との境界には、打設・養生時の水分移動や骨材の影響により弱部となる遷移帯が存在している。この影響を有限要素解析において再現する手法がいくつか提案されており、Salem & Mackawa¹⁰⁾は鉄筋表面より $1D$ (D : 鉄筋径) の区間の弾性係数を $1/2$ に設定しており、磯部ら¹¹⁾は約 $1/6D$ となる領域の強度を $1/4$ にすることで再現している。どちらの結果においても遷移帯を考慮することで付着すべり挙動やひび割れの分散の再現性が改善している。本解析ではモデル化の単純化のため、遷移帯をプレート上部の 16.5mm (約 $1/2D$) の領域(図-9)とし、その領域の剛性を半分とするモデル化を実施した。

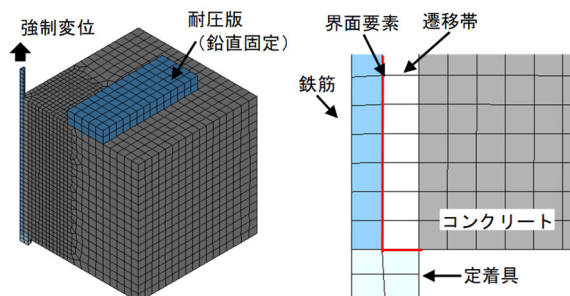


図-9 FEモデルメッシュ図 (case-1SM)

表-3 入力材料諸元

コンクリート		鉄筋	
ヤング率	34 GPa	ヤング率	205 GPa
ポアソン比	0.21	ポアソン比	0.3
引張強度	2.2 N/mm ²	降伏強度	520 N/mm ²
引張破壊E	0.10 N/mm	引張強度	710 N/mm ²
圧縮強度	33 N/mm ²	硬化ひずみ	10000 μ
圧縮破壊E	52 N/mm	破断ひずみ	24000 μ

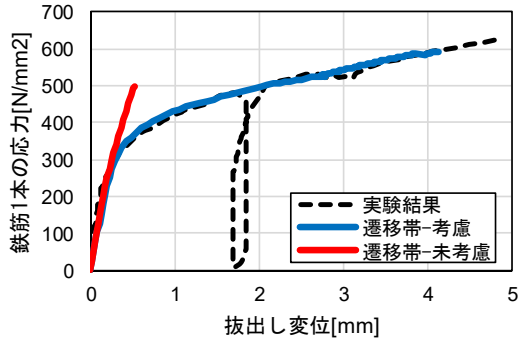
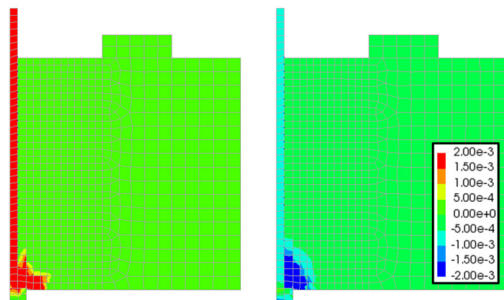


図-10 解析結果比較 (case-1SM)



(a) 最大主ひずみ (b) 最小主ひずみ
図-11 ひずみ分布

また遷移帯を考慮しない解析を併せて実行し、結果を比較した。鉄筋と遷移帯間は界面要素を用い、引張時は無抵抗、圧縮時には高い剛性を有するモデル、せん断方向には抵抗を持たないモデルにて界面の剥離とせん断方向のすべりを表した。加力は鉄筋上端部の節点に強制変位を与えることで荷重をモデル化し、単調荷重とした。解析結果の応力-拔出し変位関係を図-10に、規格降伏荷重時のひずみ分布を図-11に示す。遷移帯を考慮していないケースでは、応力が340N/mm²を超えた付近より拔出し変位を過小評価しているが、遷移帯を考慮した解析では規格引張強さまでにおいて良好に定着具の拔出し結果を再現することが示された。変形モードとしては、定着具からのコーン状破壊は確認されず、支圧効果により周辺コンクリートが圧縮破壊することで変形が進行していることが確認された。遷移帯を考慮したことで鉄筋周辺の要素の変形量が大きくなり、定着具周辺のコンクリートの圧縮破壊に伴う拔出し変形を適切に再現することが示された。

3.2 case-3M の再現解析

対称性を利用し、1/2 領域のモデル化を実施した。用いた要素、代表長さは前節と等しく、材料諸元、遷移帯の

考慮、加力方式についても同様の手法を用いた。作成したモデルは節点数が 158,057 点、要素数が 46,126 要素となった。メッシュ図を図-12 に示す。得られた解析結果のうち、応力-拔出し変位関係を図-13 に示す。鉄筋応力が規格引張強さになるまでの拔出しの再現を試みたが、図に示す点において解が発散したため解析を中止した。実験と同様に鉄筋応力が 400N/mm² 付近となる時点から伸びだしが急伸していることが確認される。急伸する前後 (図中ステップ 16,17) におけるひずみ分布を図-14 に示す。このステップにおいて定着具からのコーン状破壊が大きく発生し、またブロック表面にも複数のひび割れが生じていることが確認される。これより、2.2 にて想定していた通り、拔出し変位の急激な進展は群効果によるコーン状ひび割れによるものと確認することができる。

解析が発散した時点におけるブロックの上面・側面を含む鳥瞰図の最大主ひずみ分布を図-15 に示す。また実験における規格降伏強度でのマーカーを上書きしたひび割れ写真を合わせて示す。両者はほぼ等しい荷重条件である。2.2 で示した通り、試験時においても規格降伏強度までの荷重においてブロック上面に複数のひび割れが確認されており、中央鉄筋から伸びるひび割れは側面まで達している。解析結果における最大主ひずみ分布はひび割れを良好に再現していることが示された。解析の発散時には、定着具の上部に存在する複数の遷移帯要素において圧縮破壊が生じたため、それらの要素においてつり合い計算が収束しなかった。マッシュ的なコンクリート内部での実際の現象では、ペースト部の圧壊後も骨材の存在により支圧効果による圧縮応力が伝達することで定着性

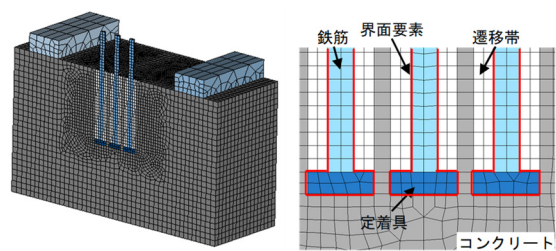


図-12 FEモデルメッシュ図 (case-3M)

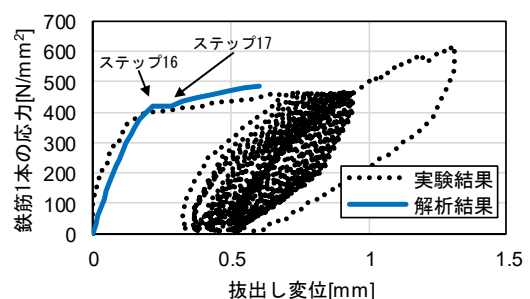


図-13 解析結果比較 (case-3M)

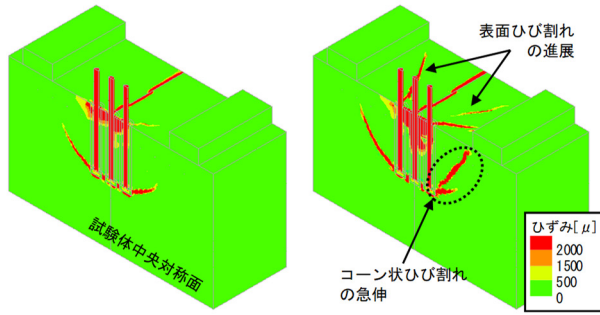


図-14 ひずみ分布 (左:ステップ16, 右:ステップ17)

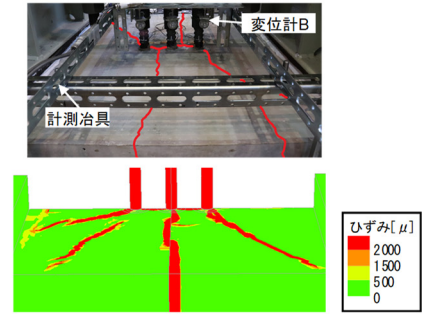


図-15 規格降伏時ひび割れ状況比較

能が保たれていると考えられる。多軸拘束時に圧縮強度が増大するモデル⁹⁾を用いていたが、本手法のモデル化ではこの耐荷機構の再現が難しいことが示された。規格引張強さまでの解析のためには、定着具周辺の遷移帯・コンクリート要素の圧縮挙動を、マッシュなコンクリート内部の挙動の再現として大変形時においても適切な応力伝達が可能なモデルとする必要がある。

4. まとめ

本研究で示された、高強度鉄筋を用いた機械式鉄筋定着工法の引抜試験およびその再現解析によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 機械式定着と従来のフックによる定着を有する鉄筋にて複数本の鉄筋を埋め込んだ引抜試験を実施したところ、機械式定着による鉄筋は群効果の影響下においても従来のフックによる定着と比べ同様以上の定着性能を示した
- (2) 定着具の背面のかぶりコンクリートが定着性能に与える影響を確認する試験では、かぶりコンクリートを除いた試験体は拔出し量が5~8倍程度になることが示された。従来のフックによる定着においても同等またはそれ以上の増加が確認された。
- (3) 1本および3本の鉄筋が埋め込まれた試験における拔出し量の比較では、従来のフックによる定着および機械式定着とともに、群効果の影響で拔出し量の増加が確認された。その増加量は機械式定着の方が小さい結果となった。
- (4) 有限要素法によりかぶりコンクリートを除いた試験体の引抜試験を再現したところ、遷移帯を考慮することで試験結果を良好に再現することができ。また拔出し量は定着具の支圧効果によりコンクリートが圧縮破壊することで増加していることが示された。
- (5) 3本の鉄筋が埋め込まれた試験の有限要素法による再現解析では、遷移帯を考慮することで実験にて確認された拔出し変位の増加を再現した。ひずみ分布を確認すると、その増加はコーン状破壊の進展によるものだと示された。一方で規格引張強さまでの解

析のためには、材料構成則を改良する必要があることが示された。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.3
- 2) 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
- 3) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2018.3
- 4) 土木学会：鉄筋定着・継手指針[2007年制定]，2007.3
- 5) 尾坂芳夫，大塚浩司，満木泰郎，小林茂敏：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着破壊性状と群効果に関する研究，土木学会論文集第420号，p.153-161，1990.8
- 6) 幸良淳志，中田裕喜，草野浩之，田所敏弥：高架橋接合部における機械式定着鉄筋の静的引張特性と定着性能向上に関する検討，コンクリート工学年次論文集，40-2，505-510，2018
- 7) (一財)土木研究センター：建設技術審査証明書プレート定着型せん断補強鉄筋「Head-bar」，2019.9
- 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) Selby, R. G., Vecchio, F. : Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech.Rep.93-02, Univ. Toronto, dept.CivilEng.,Toronto,Canada,1993
- 10) 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
- 11) 磯部岳，竹山忠臣，佐々木亘，内田裕市：繊維補強コンクリート部材のひび割れ性状に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，41-2，1159-1164，2019