論文　定着長を変化させたフックのひずみ分布と三次元解析による検討

林　大輔[*1]・井上　友[*2]・長井　宏平[*3]

要旨：端部にフックを有する定着長を変化させた鉄筋の静的定着性能を検討する一軸引張試験を行った。その結果，フックの平均ひずみ分布は定着長に関わらず，フック曲げ開始点のひずみレベルにより決まることが確認された。またモルタル試験体を用いて，破壊モードの再現を目的に RBSM により 3 次元解析を実施し，フックによるコンクリート内部の割裂ひび割れを再現することができた。解析から横方向筋の存在がフック外側のひずみ進展に影響を与えることが示された。

キーワード：フック，定着，ひずみ分布，剛体ばねモデル，内部ひび割れ

1. はじめに

土木学会制定のコンクリート標準示方書 [1)]では，コンクリート中の鉄筋の強さを降伏強度まで発揮させるために，鉄筋端部がコンクリートから抜け出さないよう十分な定着長をとるか，フックまたは定着具を用いてコンクリート中に確実に定着すると規定している。現在最も一般的に用いられているフックによる鉄筋の定着は，最初にコンクリート標準示方書が制定された昭和 6 年版から規定が存在し長年にわたり使用されている実績がある。一方，現行の示方書で規定されている鉄筋フックを 10φの定着長と等価と置き換えうると規定したのは昭和 61 年版からで，10φという値も当時の各国の値を参考とした使用規定的なものである。そのため，フックの定着性能は未だその根拠が不明瞭であり，改定を行う際の大きな妨げとなっている。

また近年，耐震性能への要求の高まりに伴い，鉄筋量が増加する傾向にあり，施工不良により鉄筋端部のコンクリートへの定着が十分にされない問題が起きている。この問題を解決するためには，要求される定着性能とフックの定着性能を明らかにし，鉄筋定着性能を力学的根拠に基づいて規定する合理的な設計指針が必要である。近年では，福重ら [2)]によりフック部の付着特性について研究がなされた。

そこで本研究では，定着部フックの力学挙動の把握を目的とし，実験と解析の両側面から検証を行った。実験では，部材中の引張鉄筋を想定して，定着長を変化させた端部にフック有する鉄筋の静的引張試験を行い，鉄筋のひずみ分布からフックの定着性能を検証した。また，実験で対象とした試験体をモデルに剛体ばねモデル(RBSM)も用いて 3 次元解析を行い，鉄筋のひずみ分布と試験体の内部ひび割れの再現を行った。加えて，材料特性による解析結果の違いを検討するため，モルタル試験体で実験を行い，コンクリート試験体との違いが表現可能かの確認を行った。

2. 実験概要

2.1 実験条件

本研究では，端部に半円形フックを有する鉄筋を埋め込んだコンクリート試験体に対し，鉄筋の一軸引抜き試験を行い定着部の静的耐力について検討した。

試験体の実験条件を**表－1** に示す。実験のパラメータは鉄筋の定着長である。

土木学会コンクリート標準示方書で定められている定着長の算定式から求めた基本定着長を有する鉄筋の端部に定着具を設けることで定着長を低減することができる。そこで，コンクリートの圧縮強度を 30N/mm^2，鉄筋の降伏強度を 330N/mm^2 と仮定して算出した定着長 18.3φ（φ：鉄筋直径）に対して，半円形フックの定着性能を現行の示方書で定められている 10φの定着長と等価とみなした試験体，フックの定着性能を 15φの定着長とみなした試験体，フックのみで定着させた試験体の 3 体作成した。加えて，解析モデルの検証のために，モルタルを材料にフックのみを定着させた試験体を 1 体作成した。

2.2 試験体概要

(1) 試験体の形状寸法

試験体の形状を**図－1** に示す。試験体の寸法はすべて

表－1　実験条件

試験体	定着長	材料(圧縮強度)
C-200	200mm(10φ)	コンクリート(42.9N/mm^2)
C-75	75mm(15φ)	コンクリート(42.9N/mm^2)
C-0	0mm	コンクリート(42.9N/mm^2)
M-0	0mm	モルタル(57.8N/mm^2)

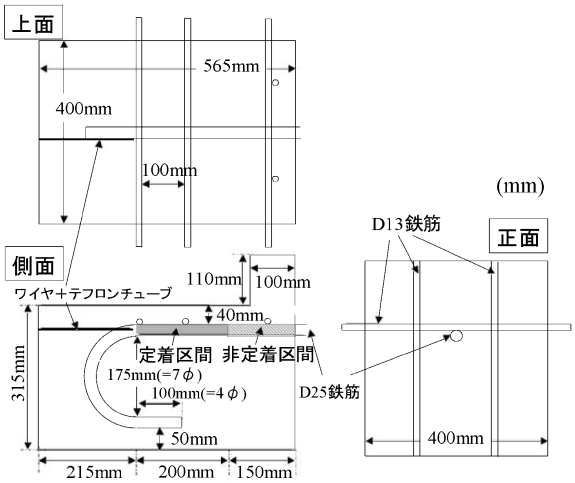
*1 東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻　(正会員)
*2 東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻　(正会員)
*3 東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻　博士(工学)　(正会員)

400×565×315mm である。一軸引張試験に直径 25(D25)のねじ節鉄筋を用い，かぶりは 40mm とした。フック曲げ開始点から 100mm 間隔で横方向筋(D13)を 2 本配置した。試験体の偏心を防ぎ安定的に引張試験が行えるよう，載荷端側上部に幅 100mm，高さ 110mm の突起部を設けた。

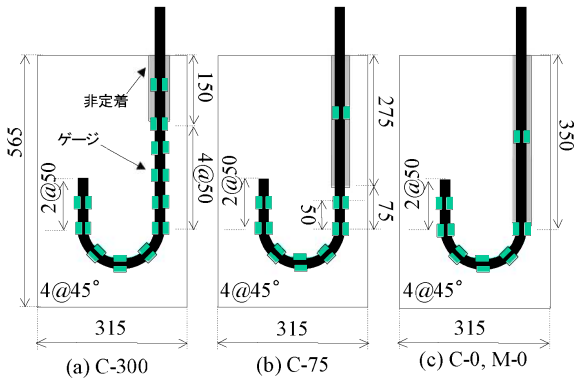
載荷端側に C-200 試験体で非定着区間を 150mm 設け，引き抜き試験時にコンクリート部が受ける反力の影響を計測区間に伝えないようにした。試験体ごとの定着長は非定着長を変化させることで調節し，埋め込み鉄筋長が同じになるようにした。非定着区間は，鉄筋を粘土で覆い，機械的な付着と化学的な付着を除去することで設けた。

(2) 計測事項

ひずみ分布を計測するために，鉄筋軸に沿って**図－2** に示すようにひずみゲージを貼り付けた。フック部において，鉄筋内外でひずみに差がでることから，同じ軸距離で曲げ内外面 2 箇所にひずみゲージを貼り付けた。また，鉄筋の付着に影響を与えないようねじ節鉄筋の節のない面にゲージを貼り付けた。ひずみゲージの間隔は，直線の定着部分で 50mm，フック部分で 45° ごとに貼り付けた。加えて，フック曲げ終了点先の直線中央部にひずみゲージを貼り付けた。鉄筋の抜け出し量をはかるために，**図－1** に示すように，テフロンチューブに通すことでコンクリートと付着をきったワイヤをフック曲げ開始点付近に固定し，ワイヤの抜け出し量を変位計で計測した。**図－3** に示すように変位計を設置しているため，加圧面からコンクリートに発生する反力が変位計設置位置に作用するが，本実験ではその影響は無いものと仮定した。



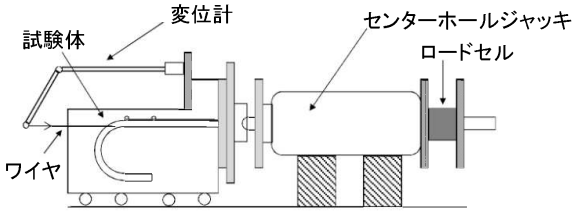
図－1　試験体形状（C-200）



図－2　ひずみゲージ貼り付け位置

2.3 載荷方法

静的一軸引張試験を**図－3** に示すように行った。試験体から出ている鉄筋にセンターホール型油圧ジャッキを通し，約 10kN/min の速度で載荷を行った。載荷は鉄筋が降伏し荷重が増加しなくなった時点で終了とした。



図－3　載荷装置

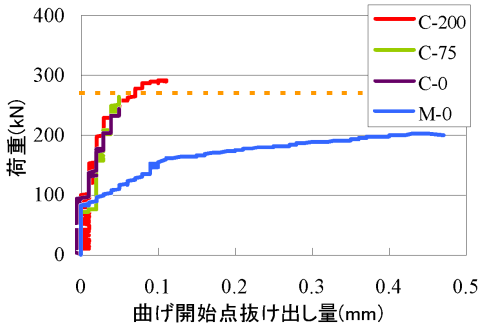
3. 実験結果

3.1 全体挙動

図－4 に各試験体の荷重－抜け出し量関係のグラフを示す。ここで，抜け出し量はフック曲げ開始点での鉄筋抜け出し量であり，図中の破線は鉄筋の降伏荷重である。

M-0 試験体は，ピーク荷重付近でひび割れの発生が目視で確認できピーク荷重で割裂破壊を起こした。そのため他の試験体と比べ挙動が異なる。C-200，C-75 試験体は目視でひび割れは確認できず，試験体が破壊する前に鉄筋が降伏し荷重が増加しなくなった。ただし，C-0 試験体は 240kN 付近で，載荷側端の鉄板に局所的に力がかかることで，鉄筋に曲げが発生したため安全のため載荷を中止した。

定着長を変化させた C-200，C-75，C-0 の挙動は，実験での荷重－抜出関係に違いがみられなかった。一方，M-0 では抜け出し量が増加していくが，これはフック部の鉄



図－4　荷重－抜け出し量関係

筋が滑ることで抜け出すよりは，フック内側のモルタルが支圧で破壊され鉄筋が抜け出ていくものと考えられる。これについては，フック部のひずみ分布から検証する。

3.2 ひずみ分布

引き抜き試験で得られた各荷重レベルにおけるひずみ分布図を**図－5～図－8** に示す。フックの内側と外側でひずみが大きく異なるため，それぞれの試験体について 2 種類のひずみ分布を算出した（in：内側，out：外側）。また，各試験体で全定着長が異なっていることに注意が必要である。

すべての試験体のフック曲げ始め点で，内側の鉄筋ひずみが引張方向に大きく増加しているのに対して，外側のひずみは増加しない。もしくは圧縮方向に変化する傾向が確認できる。

しかし，フック 45° 点ではフックの曲げ内と外でひずみの傾向が逆転し，内側で引張ひずみは小さく，外側でひずみが大きくなる。元のフック形状からさらに曲げ内側に向かって鉄筋が変形する結果である。これらの傾向は，定着長が短くなるほど顕著に確認できる。これは，定着力を負担する区間が減少することで，曲げ開始点の応力レベルが高くなるためである。

また，いずれの試験体でも曲げ 135° 点から余長部ではひずみはあまり進展せず，破壊に至った M-0 試験体でも曲げ終了点以降でのひずみ進展が確認できない。したがって，フック端部の鉄筋にひずみが進展する前に，フック内側のモルタルが支圧により破壊され鉄筋が抜け出していったと考えられる。よって本実験では，フック部鉄筋はフック内側のコンクリートまたはモルタルを破壊することで抜け出ていったと考えられる。

4. 実験結果の考察

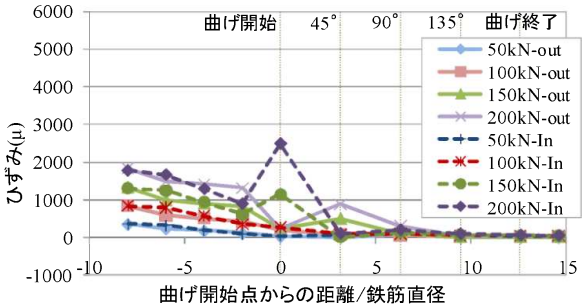
フック曲げ開始点の内側，外側のひずみの平均が 1300，3300μ における，試験体ごとのひずみ分布を比較した。**図－9** 及び**図－10** は，鉄筋内側と外側のひずみの平均を比較したグラフ，**図－11** および**図－12** は，内外それぞれのひずみについて比較したグラフを示す。ひずみを平均化した結果から，曲げ開始点の平均ひずみが等しいとき，フックのひずみ分布がほぼ一致していることがわかる。一方，フック内側と外側のひずみを別々に比較すると，定着長のある C-200，C-75 はそれぞれのひずみがほぼ一致している。しかし C-0 試験体 はフック曲げ開始点において，ひずみが引張，圧縮方向ともに大きくなっている。これは，C-0 は定着長がないため曲げ開始点において応力が集中し，局所的な曲げが発生していることが考えられる。この原因については次の解析で検討を行い，横方向筋の影響である可能性が示される。

しかし，平均ひずみによる結果から，定着部におけるフックは，定着長に影響されないある一定の定着性能を有していることが確認された。よって，端部における鉄筋の定着力はフックの定着性能に定着長部分の定着力を加えることで算出可能であることが考えられる。

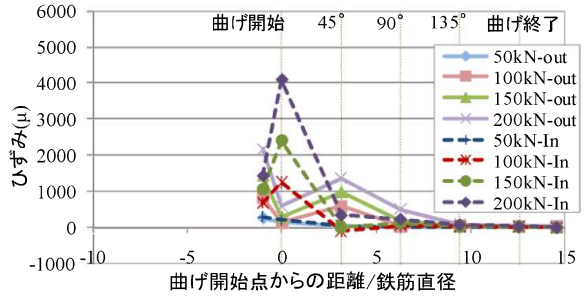
5. 解析

5.1 解析手法

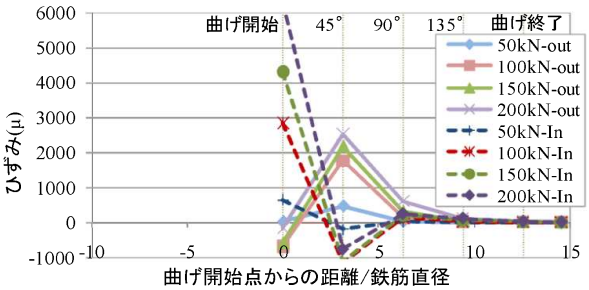
本解析には，川井 [3]によって開発された剛体ばねモデル(RBSM)を用いる。RBSM は離散化された要素間に設定したバネにより応力を伝える手法であり，ひび割れの進展および応力の伝達を再現することに適している。長井らはこの手法を用いコンクリートの微視的破壊メカニズムを数値的に再現した [4]。



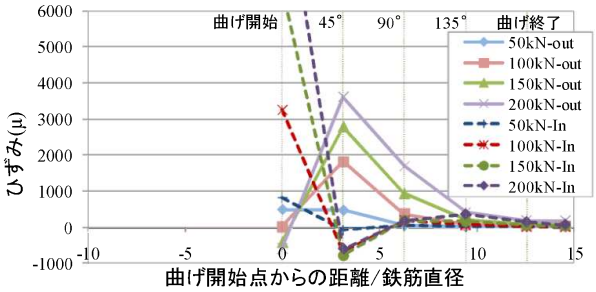
図－5　C-200 試験体ひずみ分布



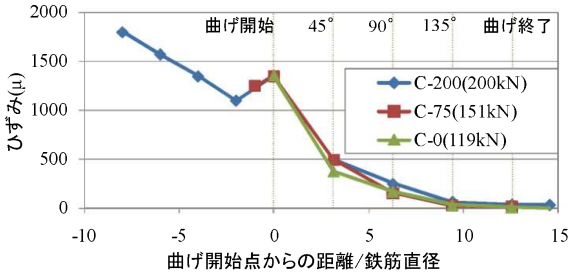
図－6　C-75 試験体ひずみ分布



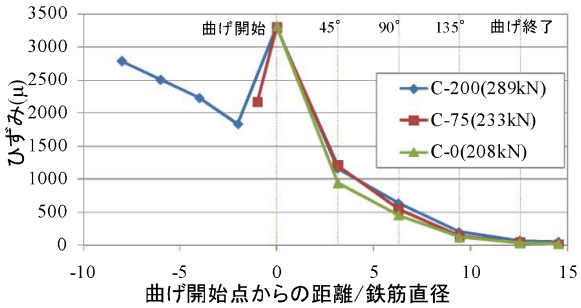
図－7　C-0 試験体ひずみ分布



図－8　M-0 試験体ひずみ分布



図－9　曲げ開始点が 1300μ の時の平均ひずみ分布



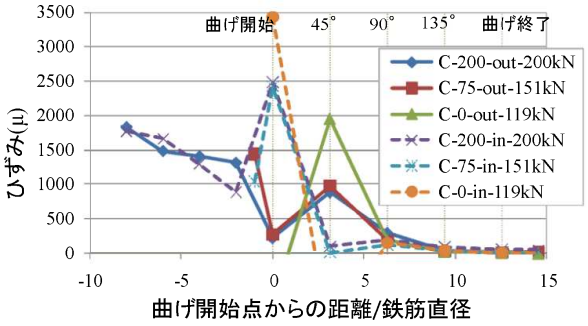
図－10　曲げ開始点が 3300μ の時の平均ひずみ分布

コンクリートの垂直ばねおよびせん断ばねの構成則は大胡ら [5]の研究を参考にし，鉄筋はひび割れの進展の再現を目的に，解析では降伏しないものとした。構成則の定量的な妥当性は検証されていないが，破壊プロセスを追跡には有用と判断し，採用している。

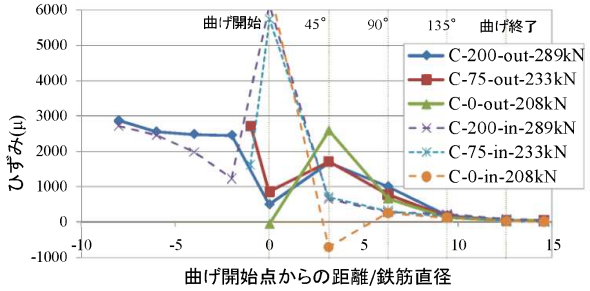
5.2 解析概要

本解析のケースを**表－2** に示す。大胡ら [5]によって行われた研究を参考に，材料試験から求められた値を加えて材料特性値を決定し，w_{max} の値を調節することでコンクリートとモルタルの引張軟化特性の違いを仮定した。ここで，w_{max} は要素間で応力伝達ができる最大の要素間距離である。実際のコンクリートは，骨材とモルタルの異なる材料特性から成る非均質材料であるが，本解析ではそれらを平均化した要素を仮定し，その特性の違いを w_{max} の値に代表させた。本来ならば骨材の影響を考慮すべきだが，本実験では計算コストの都合上，簡略化した。また，実験ではすべての試験体に横方向筋が設置されているが，フックへの横方向筋の影響を検証するために，解析ではフックのみで定着させた試験体で横方向筋を設置しない AC-WO もケースに加えた。

解析モデルは**図－13** に示すように，Voronoi 分割によりランダムに要素を分割したコンクリート要素と鉄筋の要素から構成される。拡大図にモデル中の鉄筋形状を



図－11　曲げ開始点が 1300μ の時のひずみ分布



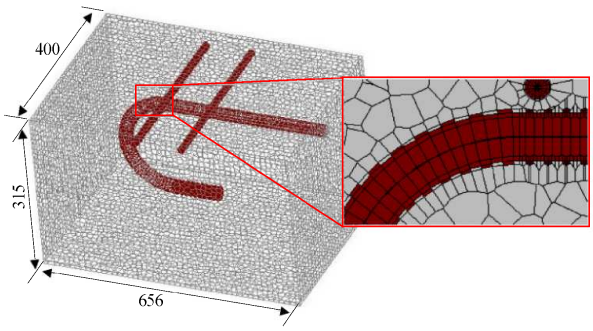
図－12　曲げ開始点が 3300μ の時のひずみ分布

示す。茶色部が鉄筋であり，モデルの要素設定の都合上，鉄筋直線部分と曲げ部分では節の形状が異なる。実験パラメータであった非定着区間は，鉄筋の節をなくすことで表現した。コンクリート・モルタル要素のサイズは最大で 3.5cm^3 程度である。

5.3 解析結果

(1) 破壊パターン

実験で割裂破壊を起こした M-0 試験体の破壊パターンを解析で表現した。**図－14**（左）は解析ピーク荷重時の AM-0 のひび割れ性状を示したものである。フック断面で発生した割裂ひび割れが，フックの後方に発生しているひび割れ幅に比べ，フック内部やかぶりの小さい側面のひび割れ幅の方が大きいことがわかる。**図－14**（右）



図－13 解析モデルと鉄筋形状

表－2　解析ケース

解析ケース	定着長(mm)	f_t (N/mm^2)	w_{max} (mm)	Ec (kN/mm^2)	Es (kN/mm^2)	要素数
AC-200	200	3.2	0.10	25	190	46,139
AC-75	75	3.2	0.10	25	190	44,215
AC-0	0	3.2	0.10	25	190	42,410
AC-WO	0(横方向筋無)	3.2	0.10	25	190	26,429
AM-0	0	2.2	0.03	25	190	42,409

は試験終了時の M-0 試験体のひび割れ図である。実験で観察されたフック断面に発生するひび割れが解析でも再現でき，3 次元数値解析がコンクリートの内部状態の把握に有用な手段であることが示された。

(2) ひずみ分布

解析結果より得られた引抜荷重と鉄筋曲げ開始点の抜け出し量の関係を**図－15** に実験結果と比較して示す。ただし，解析では鉄筋を降伏しないものとしているため荷重が増加し続けた。よって荷重が 300kN，抜け出し量が 0.4mm 付近までの値を示しており，**図－15** 中の解析結果は最大荷重を示していない。

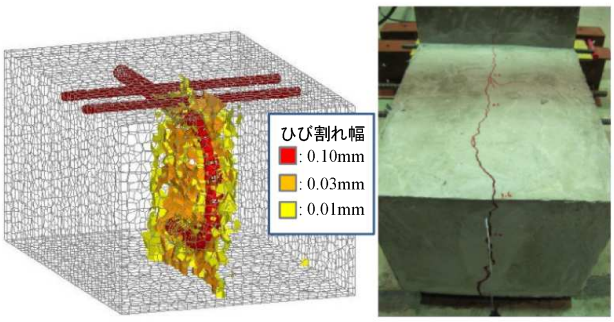
実験での荷重－曲げ開始点抜け出し量関係が定着長により変化しないのに対し，解析での抜け出し量は，定着長が減少するにしたがって大きくなっている。この原因をひずみ分布より考察する。

AC-0 のひずみ分布を**図－16** に示す。実験で確認されたフック内側のひずみは圧縮方向へ，フック外側のひずみは引方向へ進展する傾向は示せているものの，その値は大きく異なっている。**図－7** では，フック曲げ開始点のひずみが特に大きくなり曲げ終了点付近までひずみがあまり進展していない。しかし解析結果では，フック曲げ終了点までひずみが進展し，特に 135°付近でひずみが大きくなっている。このことから，フック曲げ開始点の鉄筋が十分に伸びるより早く，フック部にひび割れが進展していると考えられる。

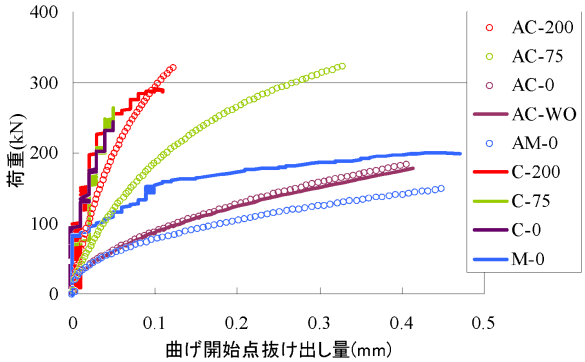
定着長を有する AC-200 のひずみ分布を**図－17** に，解析での内部ひび割れ図を**図－18**(a)，(b)，(c)に示す。**図－5** と比較すると，解析結果は曲げ開始点のひずみ増加が実験に比べて遅れていることが分かる。荷重が 200kN の時，実験ではフック曲げ始めでひずみが増加しているが，**図－18**(a)に示すように，解析では鉄筋直線部のみにひび割れが発生してフック部までひずみが進展していない。フック部のひずみが増加し始めるのは，**図－18**(b)のように鉄筋周辺からかぶり方向へ，横方向筋に対し垂直に進展したひび割れが，フック周辺まで到達した後であり，400kN でひずみ分布が大きく変化することからも確認できる。そして最終的に，**図－18**(c)のようにフック曲げ内面にひび割れ面が発生する。このことから，直線部では逆にひび割れの進展が遅く，解析での抜出し量の違いの原因であると考えられる。また，初期に発生したひび割れが，荷重の増大とともに進展していくことが確認できる。

解析結果をより現象に近づけるためには，材料構成則だけではなく，適切な鉄筋－コンクリート境界周辺の要素形状を設定する必要があると考えられる。

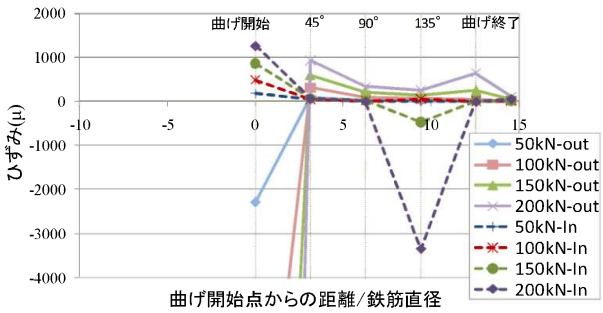
(3) 横方向筋の影響



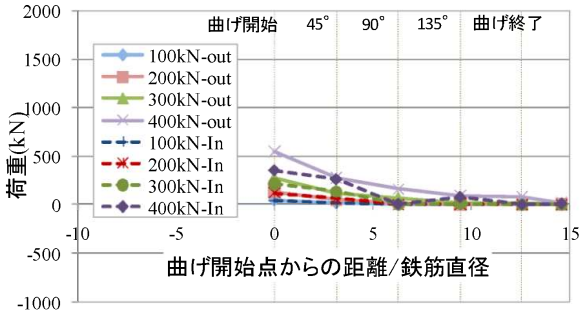
図－14 内部ひび割れ図(AM-0)**とひび割れ図**(M-0)



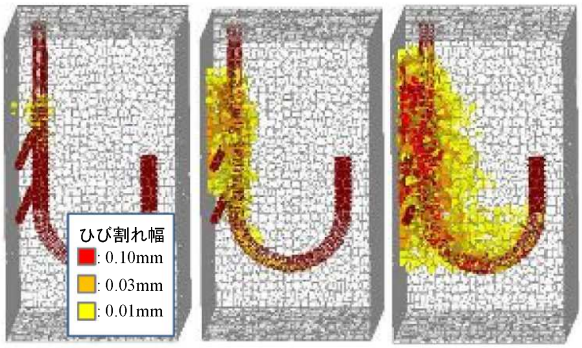
図－15 荷重－曲げ開始点抜け出し量



図－16 AC-0 ひずみ分布



図－17 AC-200 ひずみ分布



(a) 200kN (b) 400kN (c) 500kN

図－18 AC-200 **内部ひび割れ図**

図－19 に AC-WO のひずみ分布を，**図－20**(a)，(b)に AC-0 と AC-WO の荷重 200kN 時の内部ひび割れ図を示す。

横方向筋の有無による解析ケースを，**図－15** から比較した場合違いは見られないが，ひずみ分布から比較すると，AC-WO は，曲げ始め点で鉄筋外側のひずみが引張方向に大きな値になっている。この原因として，AC-0 では横方向筋－鉄筋間のコンクリートが鉄筋抜出しに強く抵抗し，局所的な圧縮応力がコンクリートに発生すると考えられる。このコンクリートの影響で，フック外側の鉄筋にも圧縮ひずみが発生すると考えられる。それに対し，AC-WO では，横方向筋がないためフック外側のひずみが進展しやすく，引張方向に大きく変形したと考えられる。

内部ひび割れ図に注目すると，**図－20**(b)の横方向筋がない場合には，フック外側のひび割れ進展が**図－20**(a)のある場合に比べて進んでおり，またフック断面で発生するフック内側の割裂ひび割れも進展している。このことよりフック曲げ始め付近の横方向筋が，フックの抜け出しに対して抵抗する働きがあることが解析より示された。

以上の解析結果から，全体挙動は一致しても局所的なひずみで比較した場合，横方向筋の影響が存在する可能性が示された。ただし，ひび割れは要素の形状に大きく依存し，また鉄筋間の小さなスペースに対してコンクリート・モルタル要素が十分に細かくないので，適切な要素分割による更なる検討が必要だと考えられる。

6. 結論

定着長を変化させたフックのひずみ分布を静的引張試験と三次元 RBSM 解析により検討し，また解析により内部ひび割れ性状の再現を試みた本研究より得られた知見を以下に纏める。

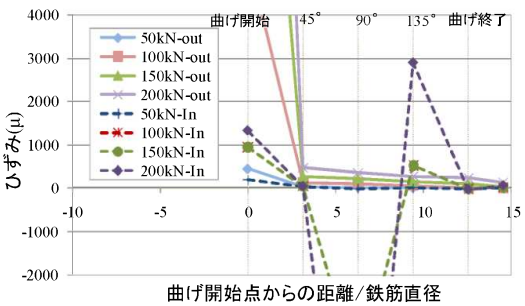
(1) 定着長を変化させたフックの静的引張試験から，フック曲げ開始点でのひずみレベルが等しければ，フック部での平均ひずみ分布は一致することが確認された。

(2) 定着長がない場合の実験より，平均ひずみ分布は定着長がある場合と一致するにも関わらず，曲げ開始点に応力が集中するためひずみが大きくなることが示された。

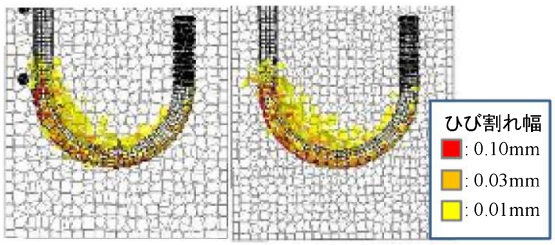
(3) RBSM の三次元解析手法を用い，フック定着のひずみ進展の傾向を再現することができた。しかし，定量的な評価を行うにはフック部のひび割れ進展を実験と同様に再現できる要素の設定を行う必要があると考えられる。

(4) RBSM 解析より，モルタル試験体の破壊パターンを再現することができた。これより，コンクリートの三次元的な内部ひび割れ性状を推定するのに数値解析が有用であることを示した。

(5) フック曲げ開始点に横方向筋があることで，鉄筋間のコンクリートに圧縮応力が発生し鉄筋の抜け出しに強く抵抗することで，フック外側の鉄筋に局所的な圧縮ひずみが発生することを実験と解析から示した。



図－19　AC-WO ひずみ分布



(a) AC-0　　(b)AC-WO

図－20　荷重 200kN 時の内部ひび割れ図

謝辞

本実験に使用した鉄筋は，東京鉄鋼（株）より提供頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編【2007 年制定】，2007

2) 福重悟，島弘：異形鉄筋のフック定着部における鉄筋軸方向に沿った付着特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.673-678, 2008

3) Kawai, T. : New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structure, Nuclear Engineering Design, 48, pp.207-229, 1978

4) Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T. : Mesoscopic Simulation of Failure of Mortal and Concrete by Failure of Mortal and Concrete by 3D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.3, pp.385-420, 2005

5) 大胡賢一，長井宏平：機械式定着具からの応力伝達に着目した破壊形態及び定着体の検討，コンクリート工学会年次論文集，Vol.32, No.2, pp.607-612, 2010