

論文 機械式鉄筋定着の性能評価試験

竹山 忠臣*1・田中 美帆*2・田中 章*3・内田 裕市*4

要旨：機械式定着の付着長や埋め込み深さを变化させた静的耐力試験を行い、定着性能に及ぼす定着長の影響を検討した。また、高応力繰返し試験を行い、フック定着においてフックに掛ける鉄筋の影響について検討した。その結果、鉄筋の付着を除去した供試体の場合、フック定着に比べ、機械式定着は抜け出し変位が格段に小さいことが明らかとなった。さらに静的耐力試験の3次元非線形有限要素解析を行った結果、鉄筋応力-抜け出し変位の関係は、実験と解析は完全には一致しなかったが定性的な傾向は一致した。

キーワード：機械式定着、静的引抜き試験、高応力繰返し試験、付着、3次元非線形有限要素解析

1. はじめに

これまで鉄筋の定着に使われてきたフックによる定着は、特に耐震部材などでは過密配筋になってしまい、配筋作業やコンクリートの打設が困難となる場合が少なくない。これに対する解決方法の一つとして、機械式定着が用いられるようになり、2007年に土木学会から「鉄筋継手・定着指針」¹⁾が発刊され、機械式定着の設計施工ならびに性能評価試験に関する指針が示された(以下、指針と呼ぶ)。そこで、本研究では同指針で示された定着体の性能評価試験法に準じて、機械式定着の静的耐力試験と高応力繰返し試験を実施した。また、静的耐力試験では、付着長ならびに埋め込み深さを变化させ、それらの影響について検討した。高応力繰返し試験においては、機械式定着の性能を評価する場合の比較対象となるフック定着について、フックに引掛ける鉄筋の有無の影響について検討した。さらに、簡便な付着モデルを用いた3次元非線形有限要素解析により、機械式定着の静的引抜き挙動のシミュレーションを行った。

合には曲げ加工部と余長部分のみで定着される性能を評価するものである。

本研究では、静的耐力試験で規定されている上記供試体の他に、鉄筋の付着ならびに埋め込み深さの影響を調べることを目的として、埋め込み深さを12φとして付着長を12φ, 9φ, 6φ, 0φ(0φは静的耐力試験で規定されている供試体に相当する)とした供試体(図-2(a)参照)と、埋め込み深さを12φ, 9φ, 6φとして付着を除去していない供試体(図-2(b)参照)を作製した。また、比較対象となるフック定着については、埋め込み深さを12φとし、付着長を12φ, 6φ, 0φとした供試体(図-3)を作製し



写真-1 機械式定着

2. 静的耐力試験

2.1 試験概要

機械式定着として写真-1に示すように鉄筋の端部に直径2.5φ(φ:鉄筋径)、厚さ12mmのプレート(SM90)を摩擦圧接したものを試験の対象とした²⁾。試験は指針の軸方向鉄筋の静的耐力試験に準じて実施した。静的耐力試験は、図-1に示すように埋め込み深さを12φとして、節間を粘土で充填した上でビニールテープを巻くことで鉄筋の付着を除去した状態で設置した機械式定着とフック定着について引抜き試験を行い、両者の耐力ならびに定着具の抜け出し変位を比較して性能を評価するものである。すなわち、指針の静的耐力試験は、機械式定着の場合には端部のプレートのみ、フック定着の場

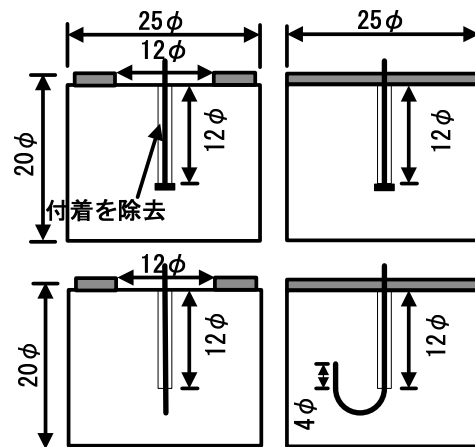


図-1 静的耐力試験用供試体
(上:機械式定着, 下:フック定着)

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

*3 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社

*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博 (正会員)

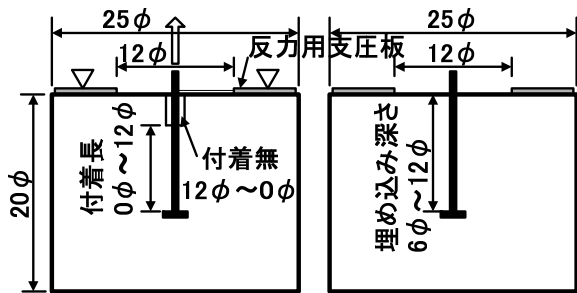


図-2 機械式定着の供試体

図-2 機械式定着の供試体

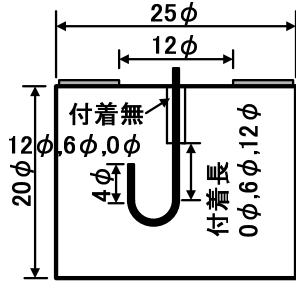


図-3 フック定着の供試体

表-1 試験体一覧

静的耐力試験	試験体	定着方法	埋め込み深さ	付着長
	No.1	機械式	12φ	12φ
	No.2	機械式	9φ	9φ
	No.3	機械式	6φ	6φ
	No.4	機械式	12φ	9φ
	No.5	機械式	12φ	6φ
	No.6	機械式	12φ	無
	No.7	フック	12φ	12φ
	No.8	フック	12φ	6φ
	No.9	フック	12φ	無
返高し応力試験繰	試験体	定着方法	軸方向鉄筋	付着長
	No.10	機械式	無	無
	No.11	フック	無	無
	No.12	フック	有	無

た。表-1 に試験体の一覧を示す。なお、使用した鉄筋はすべてSD490、D16である。また、フックは曲げ内半径を2.5φ、余長を4φとした半円形フックとした。コンクリートは最大骨材寸法25mmのレディミクストコンクリートであり、打設時のスランプは5.5cm、空気量は4.5%であった。供試体の打設方向は、すべて上面より行った。載荷試験時の圧縮強度は33.7N/mm²、ヤング係数は26.2kN/mm²であった。供試体数は指針では1条件3体であるが、本試験では都合により2体とした。

載荷は図-4 および写真-2 に示す通り手動のセンターホール型油圧ジャッキにより行い、引抜き荷重とプレートあるいはフックの折り曲げ開始点位置の抜け出し変位を供試体底面で計測した。なお、抜け出し変位の計測はプレート底面あるいはフックの折り曲げ開始位置にM3のネジ鋼棒を溶接し、これをコンクリートとの付着を切った状態で供試体底面まで引き出し、鋼棒の先端

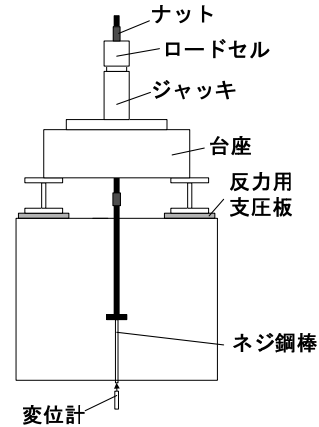


図-4 載荷と抜け出し変位の計測



写真-2 載荷と抜け出し変位の計測

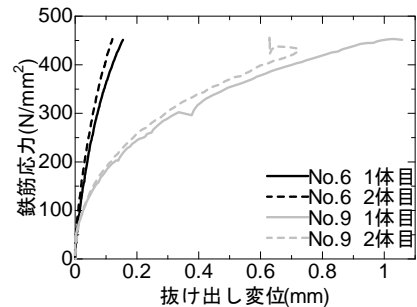


図-5 静的耐力試験結果

の変位を供試体底面に固定した変位計で計測するようにした。また、付着長を12φとした供試体については鉄筋にひずみゲージを貼り、鉄筋のひずみ分布を計測した。

2.2 試験結果

載荷は鉄筋が降伏しないように鉄筋応力が450N/mm²に達した時点で終了とした。図-5 に埋め込み深さ12φで鉄筋の付着がない場合(指針で規定されている供試体)の試験結果を示す。同図より、フック定着に比べ機械式定着は抜け出し変位が格段に小さく、普通強度の鉄筋の降伏応力である345N/mm²のときには、フック定着に比べ機械式定着は抜け出し変位がほぼ1/5になっている。また、同一条件2体の供試体間の差は小さく、機械式定着とフック定着の性能を比較するうえではほとんど無視できる程度である。なお、フック定着の2本目は試験終了直前に抜け出し変位が減少しているが、これは

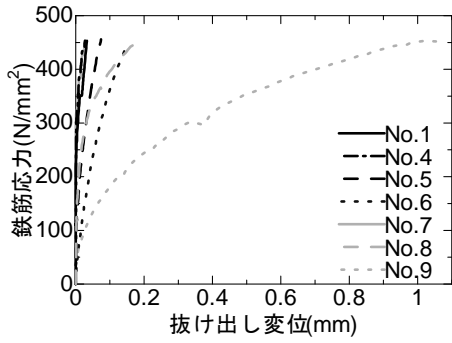


図-6 付着長を変化させた試験結果

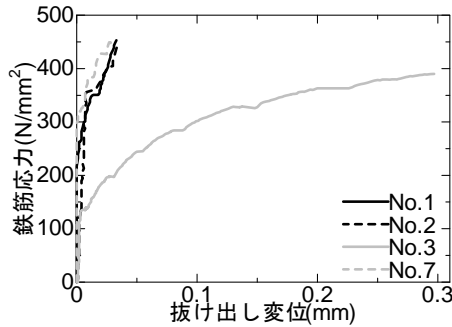


図-7 埋め込み深さを变化させた試験結果

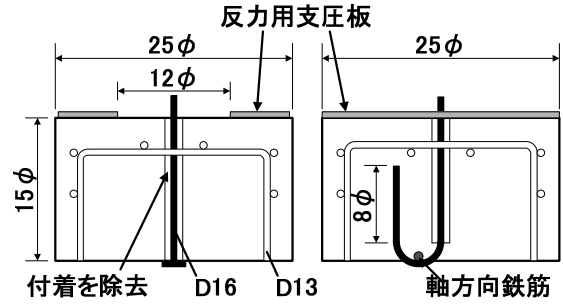


図-9 高応力繰返し試験に用いた供試体

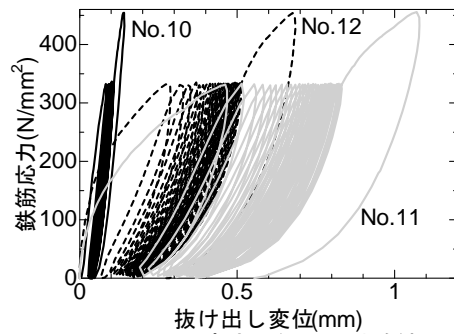


図-10 高応力繰返し試験結果

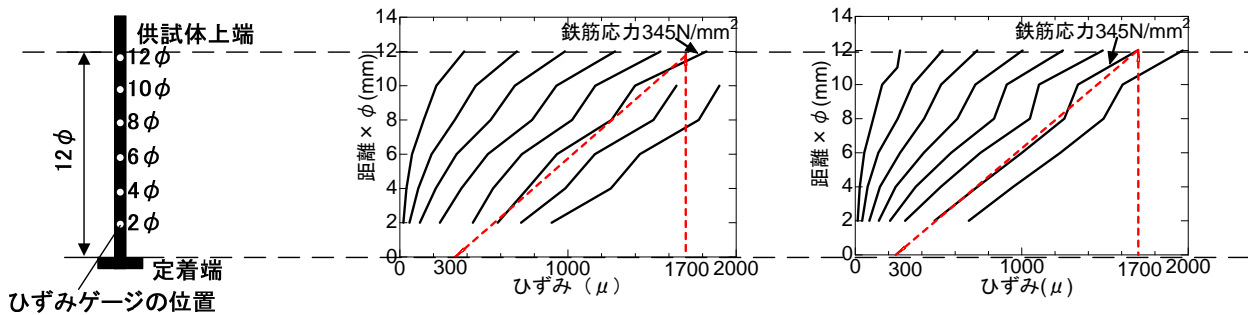


図-8 鉄筋のひずみ分布 (左：機械式定着, 右：フック定着)

鉄筋に取り付けた抜け出し変位計測用の鋼棒が脱落したためである。

図-6 に鉄筋の付着がある場合の結果を示す。なお、図-5 の結果と同様、この場合も同一条件の2体の供試体で結果にほとんど差がなかったため、図を見易くするため図-6 では1条件につき1体の結果のみを示している。機械式定着では、6φの付着長を設けると付着がない場合に比べ抜け出し変位がほぼ1/2になっている。さらに9φ、12φの付着を設けると抜け出し変位はさらに小さくなり、鉄筋応力345N/mm²のときには抜け出し変位は0.01mm以下になっている。一方、フック定着では、6φの付着長を設けると、抜け出し変位は付着がない場合のほぼ1/5になっている。さらに12φの付着を設けると、抜け出し変位は0.01mm以下になっている。以上のことから、付着長が6φ以下の場合には、機械式定着とフック定着では抜け出し変位に差が生じるが、10φ程度の付着長を設けると両者に差が見られなくなることがわかった。

図-7 に鉄筋の付着を除去せずに埋め込み深さを变化させた機械式定着の結果を示す。機械式定着で埋め込み深さ(=付着長)を9φ、12φとした場合の抜け出し変位は、フック定着で埋め込み深さ(=付着長)を12φとした場合とほぼ同じである。一方、機械式定着で埋め込み深さを6φとした場合には、鉄筋応力130N/mm²あたりで急激に抜け出してきただけでなく、その後、荷重を続けると鉄筋応力400N/mm²手前で機械式定着のプレート上面と反力用支圧板を結ぶかたちでコーン破壊を生じた。

図-8 に付着を除去せずに埋め込み深さを12φ(=付着長)とした場合の機械式定着とフック定着の鉄筋のひずみの分布を示す。同図より、両定着法で鉄筋ひずみ分布にはほとんど差がないこと、ならびに定着端側(プレート、あるいはフック側)でも鉄筋にひずみが発生していることがわかる。ちなみに、引抜き応力が345N/mm²程度(ひずみで1700μ)のとき、定着端から2φの位置の鉄筋のひずみは500μ(応力で100N/mm²)程度であり、このひずみ分布をプレート位置あるいはフックの折り曲

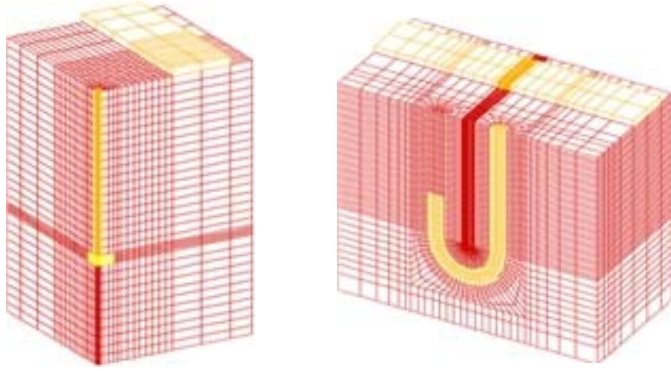


図-11 機械式定着の解析モデル 図-12 フック定着の解析モデル

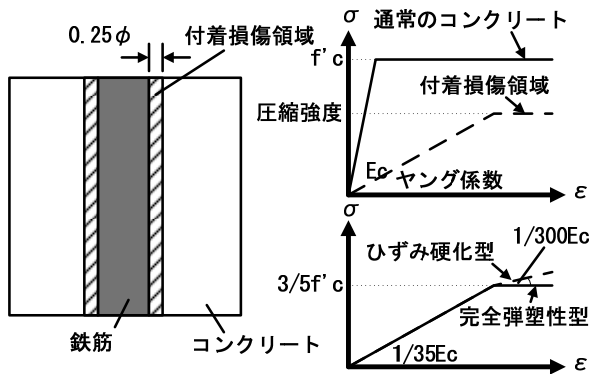


図-13 付着損傷領域のモデル化

げ位置まで外挿すると 300μ 程度となり、付着長が 12ϕ の場合、プレートあるいはフックが定着力(引き抜き力)の20%程度を分担していることになる。

3. 高応力繰返し試験

3.1 試験概要

試験は指針の横方向鉄筋の高応力繰返し性能試験に準じて実施した。対象とした機械式定着は前節と同様、D16で端部に直径 2.5ϕ のプレートを摩擦圧接したものである。供試体の寸法緒元は指針に準じ図-9に示す通りとし、鉄筋の付着は除去し、埋め込み深さを 15ϕ とした。比較の対象となるフック定着は曲げ内半径が 2ϕ 、余長が 8ϕ の半円形フックである。フック定着については、指針案に従い軸方向鉄筋(フックを引掛ける鉄筋であり、ここではD22)を配置したものと、軸方向筋の効果をみるために軸方向筋を配置しないものについても試験を実施した。また、試験体の曲げを防止するために指針案に準じて、D13鉄筋を曲げ補強筋として配置した。なお、供試体数は指針では1条件3体であるが、本試験では都合により2体とした。荷重は、下限を鉄筋の規格降伏強度の2%以下、上限を95%とした応力で静的に30回の繰返し荷重を行い、静的耐力試験と同様、荷重と抜け出し変位を計測した。なお、実際に使用した鉄筋はSD490であるが、規格降伏強度を 345N/mm^2 として高応力繰返し荷重を行った。

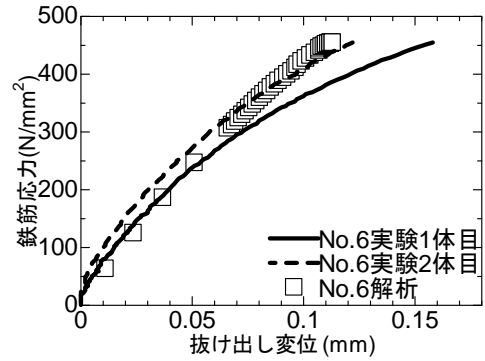


図-14 機械式定着の付着なしの解析結果

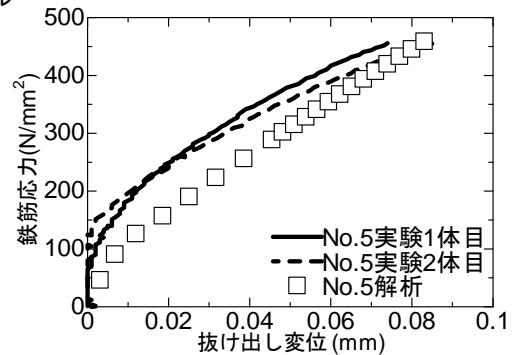


図-15 機械式定着の6φ付着有りの解析結果

3.2 試験結果

試験結果を図-10に示す。30回繰返し荷重時の抜け出し変位は、機械式定着、軸方向鉄筋のあるフック定着、軸方向鉄筋のないフック定着の順に小さくなっている。機械式定着の30回繰返し荷重時の抜け出し変位は、軸方向鉄筋のあるフック定着に比べ1/5程度になっている。また、フック定着において、軸方向鉄筋を配置することの影響については、軸方向鉄筋がある場合のフック定着の30回繰返し荷重時の抜け出し変位は、軸方向鉄筋がない場合の約6割になっている。また、フック定着においては、繰返し荷重中、とくに除荷時に顕著な非線形性を示すことがわかる。

4. 静的引抜き挙動の有限要素解析

4.1 解析概要

ここでは、2.1で述べた供試体を対象とし非線形有限要素解析プログラム(DIANA)を用いて3次元非線形有限要素解析を行った。

それぞれの解析モデルは対称性を考慮して図-11、12に示す要素分割とした。境界条件は、支圧板と対称面を拘束し、鉄筋の上端に強制変位を与えた。コンクリートは全ひずみ理論に基づくモデルとし、ひび割れは破壊エネルギーを考慮した回転ひび割れモデル、圧縮側は単純なbi-linear型とし、横拘束の効果を考慮できるモデルとした。引張側は、引張強度まで線形弾性とし引張強度以

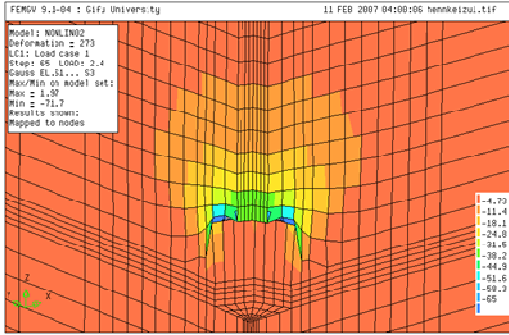


図-16 機械式定着の付着なしの破壊状況

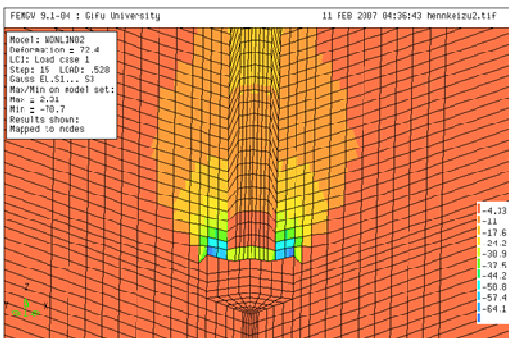


図-17 機械式定着の6φ付着有りの破壊状況

降については曲線型の引張軟化曲線を用いた。また、鉄筋とコンクリートの付着については、過去に実施した鉄筋の付着試験とその解析から同定したモデルを用いた。具体的には鉄筋とコンクリートを完全付着とし、図-13に示すように鉄筋表面から0.25φの領域を付着損傷領域としてコンクリートのヤング率を一般部のコンクリートの1/35、圧縮強度を3/5としたモデルとした³⁾。

4.2 解析結果

図-14に付着長がない機械式定着の供試体の鉄筋応力-抜け出し変位の関係を示す。実験に比べ解析の方が若干抜け出し変位が小さいが、両者はほぼ一致している。また、図-15に示す付着長を6φとした機械式定着の供試体では、鉄筋応力が低い段階では実験値に比べ解析値の方が抜け出し変位が大きくなっているが、鉄筋応力が高くなると両者の差が小さくなっている。これは、本解で用いた付着モデルの剛性が低いためである。

図-16に付着長がない機械式定着の鉄筋応力が450N/mm²のときのプレート近傍のコンクリートの変形と最小主応力を示す。同図によればプレート上面のコンクリートの要素は完全に潰れ、プレートが大きく抜け出している。一方、図-17に示すように付着長を6φとした場合にはプレート上面のコンクリートの要素は潰れていない。

図-18に付着長がないフック定着の鉄筋応力-抜け

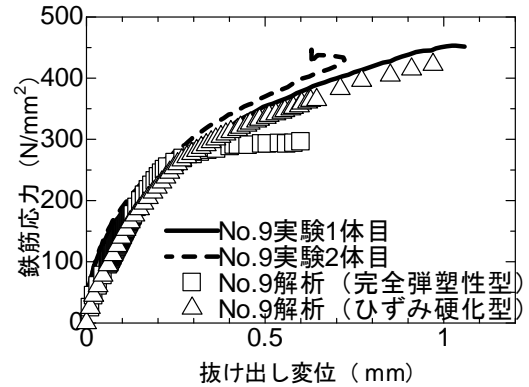


図-18 フック定着の付着なしの解析結果

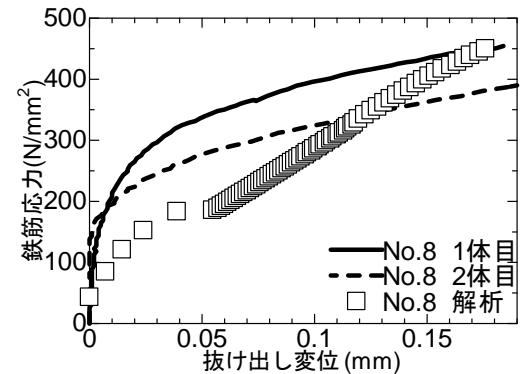


図-19 フック定着の6φ付着有りの解析結果

出し変位の関係を示す。同図より、付着損傷領域の圧縮モデルを完全弾塑性型にした場合には、鉄筋応力が250N/mm²以降は応力の増加がなくなっており、実験結果と一致していない。これは今回用いた完全弾塑性型のモデルでは、付着面に直応力が作用した場合のモデル化がなされていないため、フックの内側に作用する支圧の効果を表現できていないためであると考えられる。一方、付着損傷領域の圧縮モデルをひずみ硬化型にすると、鉄筋応力が250N/mm²以降も応力が増加し実験結果に近くなった。また、図-19に示す付着長6φのフック定着では、機械式定着の場合と同様、鉄筋応力が低い段階では解析値の方が抜け出し変位が大きくなっているが、鉄筋応力が400N/mm²付近で両者の差は小さくなっている。これは、今回用いた付着モデルでは鉄筋の直線部の付着挙動が十分に表現できておらず、鉄筋応力が高くなり直線部の付着が切れると、フック部分の挙動が支配的になるためであると考えられる。

図-20に付着長がないフック定着のモデルにおける鉄筋応力が300N/mm²のときのフック近傍の変形と最小主応力を示す。同図によれば鉄筋折り曲げ開始位置付近のコンクリートに非常に大きな圧縮力が発生しているのに対して、図-21に示すように付着長を6φとした場合には付着区間にも応力が分散され分布が滑らかになっていることがわかる。

図-22に埋め込み深さを9φ、12φとした機械式定着の

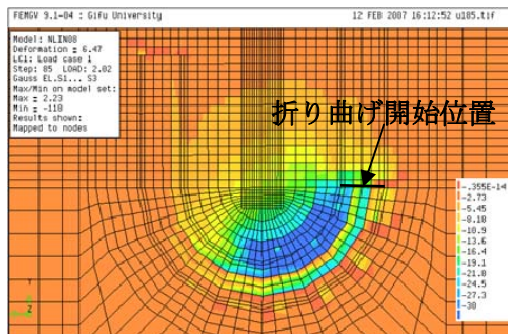


図-20 フック定着の付着なしの破壊状況

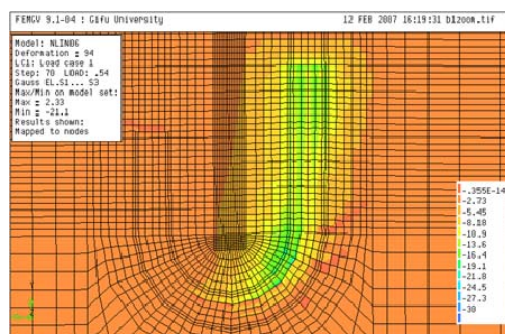


図-21 フック定着の6φ付着有りの破壊状況

鉄筋応力-抜け出し変位の関係を示す。同図によれば付着長9φおよび12φの解析では鉄筋応力が低い段階では実験との差が大きくなっている。しかし応力レベルが高くなり、実験において抜け出し変位が現れ始めると、解析結果は実験値に近づいてくる。これは、本解析に用いた付着モデルは剛性が低くしてあるため応力レベルが低い段階でも抜け出し変位が現れるためである。

5. まとめ

「鉄筋定着・継手指針」(土木学会)に準じて、機械式定着の静的耐力および高応力繰返し試験と引抜き挙動の有限要素解析を行った。主な結果は以下の通りである。

- (1)静的耐力および高応力繰返し試験において、機械式定着の抜け出し変位はフック定着に比較して格段に小さいことがわかった。
- (2)静的耐力試験において10φ程度の付着長を設けると、機械式定着、フック定着ともにSD345鉄筋の降伏応力レベルでの抜け出し変位は0.01mm程度以下となり、両者の差がなくなった。
- (3)静的耐力試験において12φの付着長を設けた場合、SD345鉄筋の降伏応力レベルの引抜き力に対して、プレートとフックともに20%程度の力を分担していた。
- (4)埋め込み深さが6φ以下の機械式定着は、コーン破壊を生じた。
- (5)プレートのみで定着した機械式定着の鉄筋応力-抜け出し変位関係は非線形有限要素解析によりほぼ解析できた。
- (6)フック定着および付着長を設けた機械式定着の鉄筋

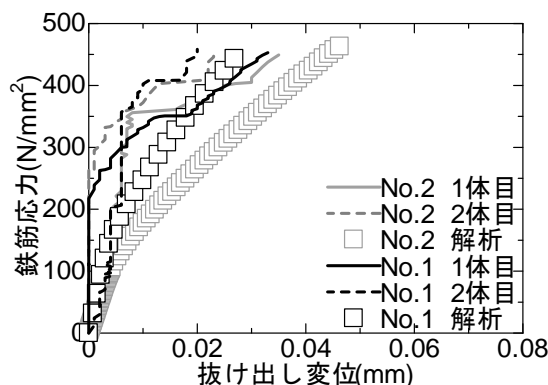


図-22 機械式定着の埋め込み深さ9φ、12φの解析結果

応力-抜け出し変位関係は、付着損傷領域を考慮した付着モデルを用いることで、低応力レベルでは解析値と実験値で差が生じたが、応力が高くなるにつれて解析値は実験値に漸近した。

謝辞

実験にあたり、大成建設技術研究所より材料の提供をしていただきました。ここに記して感謝の意を表します。
参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会編：鉄筋定着・継手指針 2007年版，丸善，2007
- 2) 三桶達夫，福浦尚之，加納 宏一：プレート付鉄筋を主鉄筋に利用した構造部材の基礎実験，土木学会第60回年次学術講演会，5-565，2005.9
- 3) 田中美帆，岩佐克之，内田裕市：機械式定着の静的耐力評価試験，土木学会第62回年次学術講演会，5-265，2007