# 論文 異形鉄筋の付着割裂破壊に関する二次元応力解析

#### 金山病士",林桅",市之瀬敏勝"3

要旨:異形鉄筋で生じる付着割裂破壊のメカニズムは非常に複雑である。本研究では,有 限要素解析手法を用い,鉄筋周辺コンクリート要素の二次元応力分布を調べることにより, 付着割裂破壊をもたらす鉄筋とコンクリートとの関係を考える。解析対象は,引抜試験体, 重ね継手試験体断面とした。解析の結果,両試験体では主筋周辺コンクリートの応力分布 に差が見られた。また,解析方法として荷重制御(主筋部の内圧一様分布)と変位制御(主 筋とコンクリート間に一様な隙間を与える)を試みたが,実験結果との比較により変位制 御の妥当性が見いだされた。

キーワード:付着割裂破壊、異形鉄筋、寸法効果、有限要素法、放射応力

1. はじめに

異形鉄筋の付着割裂破壊は,主に鉄筋表面の 節と周辺コンクリートとの機械的な相互作用に より起こるものであるが、そのメカニズムは非 常に複雑であると考えられている。昨年行った 実験[1]では、円筒状の鉄筋の引抜試験体と単 純ばりの重ね継手試験体とで付着強度に差がみ られ、両試験体の付着割裂破壊のメカニズムに 違いがあると思われる。一方、Tepfersの研究 [2]では、両試験体の鉄筋周辺の応力状態を同 等のものとして扱っている。そこで本研究で は、有限要素解析手法を用い、鉄筋周辺コンク リート要素の二次元応力分布を調べることによ り、付着割裂破壊をもたらす鉄筋とコンクリー トとの関係を考える。また、Tepfersは鉄筋の放 射状作用を一様分布と考えているが、その是非 についても検討する。さらに、主筋径やコンク リートのかぶり厚さの違いが付着割裂破壊に及 ほす影響について考え, 解析結果と実験結果と を比較する。

使用する。材料モデルは,非線形破壊力学に基 づく引張破壊,圧縮域でのひずみ軟化を含む非 線形挙動などのコンクリート特性を考慮する。 引張軟化曲線は図-1のモデルを用いる。二軸応 力下での構成則は,Kupferの破壊基準[4]によ るもので,具体的には一軸強度圧縮時に引張強 度の20%を負担するものとし,途中は直線補間 とする。また,応力-ひずみ関係は等価一軸則 とする。ひび割れ発生は,任意の要素における 引張応力がコンクリートの引張強度に達した時 と定義する。ひび割れ発生後は,その要素内の ひび割れ方向が固定されるモデルを使用し,ひ び割れコンクリートのせん断剛性はKolmar 則 [5]により低減されるものとする。解析には昨 年の実験[1](G,測定実験,鉄筋の引抜実験,は



解析には、コンクリート構造解析専用の2次 元(平面応力)有限要素解析コードSBETA[3]を

2. 解析方法



\*1名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻(正会員) \*2名古屋工業大学 工学部社会開発工学科 研究員(正会員) \*3名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント工学科 工博(正会員)

-1207-

りの重ね継手実験)で使用した試験体断面を用 いる。

### 3. 破壊エネルギー

破壊エネルギー G<sub>r</sub>を測定するために行った G<sub>r</sub> 測定実験の試験体断面(図-2)を解析対象とし, モデル化する。G<sub>r</sub>測定実験とは安定した荷重-変位関係を得やすくするため,はりの半分まで ひび割れ誘発スリットを入れた3点曲げ実験で あり,実験は6体行った。解析ではスリット周 辺を密にし,全部で727の要素に分割する。解 析に用いるコンクリートの材料特性は表-1に 示す。これは実験より得られた値である。図-3 に解析と実験より得られた荷重 - 変位関係を示 す。解析結果と実験結果は近い値を示した。こ のことより,表-1のコンクリートの材料特性値 が妥当であることが確認できる。



図-2 G,試験体断面





- 4. 解析モデル
- 4.1 引抜試験体モデル

鉄筋の引抜実験で使用した試験体断面(図-4 (a))を解析対象とし、モデル化する 主筋部分 は開口部とし、そこに一様な内圧をかけ荷重制 御を行う。これによりコンクリートに対する主 筋の放射状作用を模擬する。主筋径  $(d_b=18 \text{ mm}, 36 \text{ mm}, 54 \text{ nm})$ の3種類, コンクリート のかぶり厚さ  $(C=1.17d_b, 2.28d_b)$ の2種類を パラメーターとし, モデルは計6種類とする。か ぶり厚さはスリットを用いて調節し, 試験体の 形状寸法は $d_b$ に対応する。要素分割の大きさも  $d_b$ に対応させ, 要素は破壊が集中する主筋周辺 を密に, 外側を粗になるようにする。図-4(b)に 引抜試験体要素分割を示す。コンクリートの材 料特性は**表**-1を用いる。





### 4.2 重ね継手試験体モデル(荷重制御)

はりの重ね継手実験で使用した試験体の重ね 継手部分の断面 (図-5(a))を解析対象とし,モ デル化する。上項目 4.1 と同様の方法で,解析 は主筋部分を開口部とし,そこに一様な内圧を かける荷重制御で行う。パラメーターは主筋径 ( $d_b$ =18mm,36mm,54mm)のみとし,モデルは計3 種類とする。図 -5(b)に重ね継手試験体要素分 割を示す。要素分割の大きさは $d_b$ に対応させ,要



-1208 -

要素は破壊が集中する主筋周辺を密に、上部が 粗になるようにする。コンクリートの材料特性 は同じく表 – 1を用いる。

4.3 重ね継手試験体モデル(変位制御)

重ね継手試験体モデルにおいて,主筋部分の コンクリートに対する放射状作用を主筋とコン クリート間に一様な隙間を与える変位制御で行 うため,主筋部分に堅い弾性リングを配置し,上

項目4.2と同じ解析を行う。弾性リン グは、図-6(a)に示すようにリングに 内圧をかけることにより主筋の放射状 作用を模擬するものである。弾性リン グの剛性はコンクリートの50倍とす る。リング表面の放射応力は場所に よって異なるが、その平均値を $\sigma$ と し、図-6(b)に示すようにして求める。 まず、重ね継手断面の解析でのリング の内圧 $p_a$ とリング外周の平均変位 $u_a$ を 求める。次にリングのみでの解析を し、平均変位 $u_a$ 時の内圧 $p_b$ を求める。 そして、図中の式より算出する。



5. 解析結果

5.1 放射応力と主筋径に対する隙間の関係

図 -7 に引抜試験体解析結果から 得られた放射応力と主筋径に対する 隙間の関係を示す。ただし、 ピーク 時以降は解が不安定になったため省 略した。隙間とは、開口部(主筋)上 下の平均変位とする。d<sub>b</sub>が18mmから 36mm, 36mmから54mmに増加すると 最大放射応力はそれぞれ平均して 14.0%, 14.8%減少した。次に、コン クリートのかぶり厚さが1.17d<sub>b</sub>か ら2.28d<sub>b</sub>に増加すると、最大放射応力は平均し て1.34倍となった。また、最大放射応力時の隙 間も増加した。グラフ上の●はひび割れ発生時 を示し、主筋径やかぶり厚さによる影響はな かった。参考までにスリットを設けず、かぶり 厚さをCとした円形断面をモデル化し解析を行 うと、スリットがある場合と比較して最大放射 応力は平均して7%程度減少した。



図-8に重ね継手試験体解析結果から得られた 放射応力と主筋径に対する隙間の関係を示す。 荷重制御ではピーク時まで,変位制御ではピー ク後の挙動も示す。隙間は,荷重制御では開口 部(主筋)上下部の平均変位,変位制御では開 口部(主筋)上下左右部の平均変位とする。荷 重制御の場合, *d*<sub>b</sub>が18から36,36から54mmに 増加すると最大放射応力はそれぞれ7.6%,6.9% 減少した。一方,変位制御の場合,*d*<sub>b</sub>が18から 36,36から54mmに増加すると最大放射応力は それぞれ7.4%,20.1%減少した。次に,荷重,



図 –8 重ね継手試験体放射応力と主筋径に対する隙間の関係

-1209 -

変位制御の違いによる解析結果への影響を見る と、変位制御は荷重制御に比べ最大放射応力が 平均して3.1倍となった。また、最大放射応力 時の隙間に関してはあまり差がなかった。グラ フ上の●は同じくひび割れ発生時を示しており、 主筋径による影響はあまり見られなかったが、 制御の違いにより大きな差が見られた。

同じかぶり厚さ(*C*=1.17*d*<sub>b</sub>)をもつ引抜試験 体と重ね継手試験体(図-7(a)と図-8)を比較 すると,重ね継手試験体において変位制御での 解析結果は放射応力,隙間ともに引抜試験体解 析結果に近い値を示した。

5.2 最大放射応力と付着強度の関係

図-9に解析値(最大放射応力)と実験値(付 着強度)との関係を示す。引抜・重ね継手試験体 とも解析値と実験値の寸法による強度低下率は, ほぼ同程度のものであった。また,付着強度は 主筋軸方向に一様に分布し作用すると考え,付 着強度と最大放射応力との関係より,付着主応



図-9 放射応力と付着強度の関係

力の方向と主筋軸とのなす角αを求めた。平均 で引抜試験体の場合αは71度,重ね継手試験体 (変位制御)の場合58度となった。

#### 5.3 弾性リングの影響

重ね継手試験体解析を荷重制御と変位制御で 行ったが、その影響について考える。図-10には d<sub>b</sub>が18mmの試験体での最大放射応力時の主筋部 分の変形状態を示す。変位制御の場合、主筋部分 はほぼ円形状態を保って均等に膨らんだが、荷 重制御の場合、主筋部分は水平方向に比べ上下 方向に8倍も大きく変形していた。このため、制 御の違いにより放射応力に差が現れたと推測で きる。また、引抜試験体解析では変位制御を行わ なかったが、荷重制御でも主筋部分はほぼ円形 状態を保って均等に膨らんでおり、制御の違い による解析結果の差はないと言える。



#### 5.4 ひび割れ状態

図-11(a)(b)にd<sub>b</sub>が54mmの重ね継手試験体の 解析で得られたひび割れ状態を示す。これは,隙 間が最大放射応力時の3倍時のものである。ひ び割れとは,引張応力が引張強度に達した状態







図-11 重ね継手試験体断面ひび割れ状態 (d<sub>b</sub>=54mm)

である。また、図-11(c)には d<sub>b</sub>が54mmの重ね 継手試験体の実験より得られた破壊後のひび割 れ状態を示す。荷重、変位制御でひび割れ状態を 比べると、荷重制御では水平方向にのみ少しひ び割れが伸びていたのに対し、変位制御では放 射方向全体にひび割れは伸展していた。この違 いは図-10から伺えるように、変位制御では主 筋部分が放射状に均等に膨らんでいたのに対し、

荷重制御では主筋部分が上下方向 のみに大きく変形したためと考え られる。また,変位制御による解 析結果は,主筋部分から放射状に ひび割れが見られた実験結果に近 いといえる。このことより,変位 制御の妥当性が示唆され,内圧一 様分布の考えを用いた Tepfers の解析には疑問が残る。

5.5 主筋周辺の

コンクリート応力分布 図-12に引抜試験体解析におけ



る, ひび割れ発生時と最大放射応力時での応力 分布(円周方向)を示す。かぶり厚さに関係なく, ひび割れ発生時,主筋表面で円周方向応力はコ ンクリートの引張強度4.0MPaに達し,主筋から 離れるにつれて低下した。次に,最大放射応力時 は両結果とも寸法の影響が大きかった。円周方 向応力は主筋径の大きいもの (*d<sub>b</sub>*=36nm,54nm) は主筋近くで,主筋径の小さいもの (*d<sub>b</sub>*=18nm)



図 – 13 重ね継手試験体応力分布

-1211 ---

はかぶりの中央付近でのみそれぞれ最大値を示 し、主筋から離れるにつれて低下した。しかし、 スリット付近では応力が集中し、再び高い値を 示した。また、コンクリートのかぶり厚さが 1.17*d*<sub>b</sub>から2.28*d*<sub>b</sub>に増加すると全体的に円周 方向応力は減少した。

図-13に重ね継手試験体の変位制御解析にお ける、ひび割れ発生時と最大放射応力時での応 力分布(円周方向)を示す。図中の荷重制御に ついては、3つの主筋径に関する結果の平均値 を示す。ひび割れは隣接する主筋間より入り, そのためひび割れ発生時、主筋表面でもコンク リートの引張強度4.0MPaに達していない所が みられた。また、すべての主筋部分において主 筋表面から離れるにつれて円周方向応力は徐々 に低下した。次に最大放射応力時,中央部分(図 13(d)) において d, が小さいほど円周方向応力 が大きく寸法の影響は見られたが、それ以外で はさほど顕著ではなかった。また、主筋の上部 (図13(b),(c)) では主筋から離れるにつれて 円周方向応力は低下したが、主筋の下部(図13 (e),(f)) では主筋から離れるにつれて円周方 向応力は徐々に上昇した。内側、外側主筋での 応力分布にはあまり差はなかった。

一方,荷重制御においては,水平方向(図13
(a),(d))の主筋近くでのみ円周方向応力は高く,主筋の上下部(図13(b),(c),(e),(f))では極端に小さい。これも図-10から伺えるように,主筋部分が上下方向のみに大きく変形したためと考えられる。

同じかぶり厚さのコンクリート部分(図12 (a)と図13(a),(e),(f))を比較すると,引抜 試験体では円周方向応力は主筋近くで最大とな るのに対し,重ね継手試験体(変位制御)では かぶり部分全体で高い数値を示し,両試験体の 応力分布に差が見られた。

## 6. 結論

(1)最大放射応力は $d_b$ が18mmから36mm, 36mm から54mmに増加すると引抜試験体では平均して それぞれ14.0%, 14.8%, 重ね継手試験体(変位 制御) ではそれぞれ7.4%, 20.1% 減少し, 寸法 効果は顕著であった。

(2)引抜・重ね継手試験体とも解析値と実験値 の寸法による強度低下率は、ほぼ同程度のもの であった。

(3)重ね継手試験体解析において,実験結果との比較により変位制御(主筋とコンクリート間に一様な隙間を与える)の妥当性が示唆された。 内圧一様分布の考えを用いたTepfersの解析に は疑問が残る。

(4) コンクリート応力分布について,最大放射 応力時,円周方向応力は引抜試験体では主筋近 くで最大となるのに対し,重ね継手試験体では かぶり部分全体で高い値を示し,両試験体で応 力分布に差が見られた。Tepfersの両試験体の 鉄筋周辺の応力状態が同等であるという仮定と 一致しない。

## 【謝辞】

本研究を行うにあたり、カリフォルニア大学のJ.Bolander、Jr博士の御協力に心から感謝いたします。

## 【参考文献】

 林稔、市之瀬敏勝:横補強筋のない重ね継
手における節形状と重ね長さの影響 日本建築
学会大会学術講演梗概集,pp.783-784.1998.9
Tepfers, R. :A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars, Publication 73:2, Division of Concrete Structures, 1973

[3](株)計算力学研究センター:RC非線形解析 専用プログラム SBETA Revision 1999

[4] Kupfer, H. :Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal ACI, Proc. Vol.66, No.8, pp.656-666, 1969.8.

[5] Kolmar, W. Beschreibung der Kraftuebertragung uber Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T.H. Darmstadt, P.94, 1986.