

論文 異形鉄筋の付着割裂破壊に関する二次元応力解析

金山祐士*1・林 梶*2・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ぼす影響について考え、解析結果と実験結果とを比較する。

2. 解析方法

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

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_f 測定実験, 鉄筋の引抜実験, は

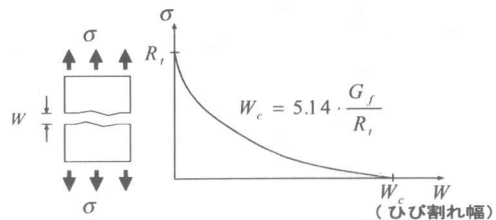


図-1 コンクリートの引張軟化曲線モデル

*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)

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_f を測定するために行った G_f 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_f 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。

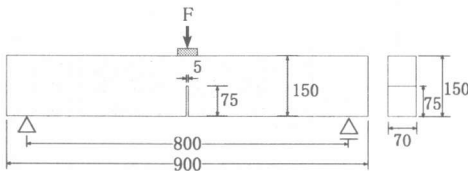


図-2 G_f 試験体断面

表-1 コンクリート材料特性

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	G_f (N/mm)
54.0	4.0	2.69×10^4	9.44×10^4

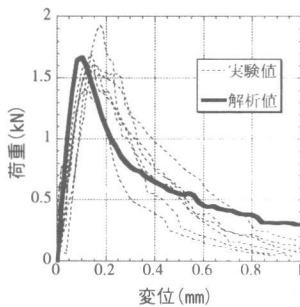


図-3 G_f 試験体 荷重-変位関係

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 ($d_b=18\text{mm}, 36\text{mm}, 54\text{mm}$) 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。

$C=1.17d_b, 2.28d_b$

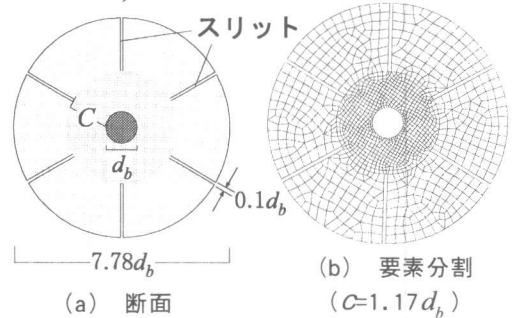


図-4 引抜試験体

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 ($d_b=18\text{mm}, 36\text{mm}, 54\text{mm}$) 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

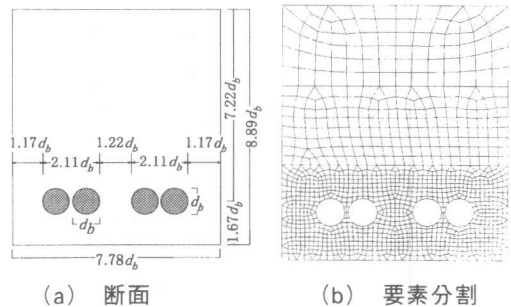
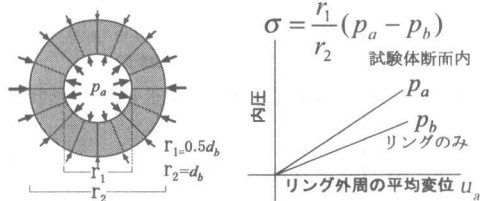


図-5 重ね継手試験体

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 σ 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。



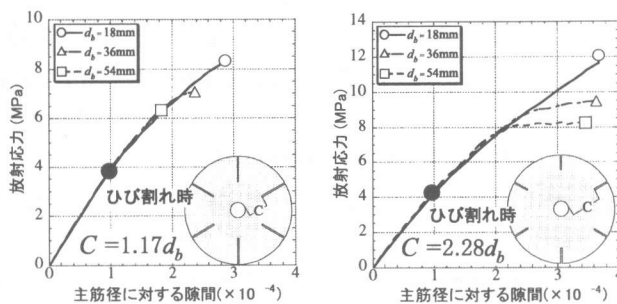
(a) 弾性リング (b) 放射応力の求め方
図-6 変位制御の理屈

5. 解析結果

5.1 放射応力と主筋径に対する隙間の関係

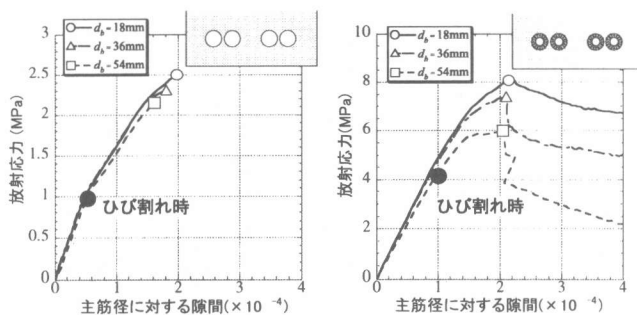
図-7に引抜試験体解析結果から得られた放射応力と主筋径に対する隙間の関係を示す。ただし、ピーク時以降は解が不安定になったため省略した。隙間とは、開口部(主筋)上下の平均変位とする。 d_b が18mmから36mm, 36mmから54mmに増加すると最大放射応力はそれぞれ平均して14.0%, 14.8%減少した。次に、コンクリートのかぶり厚さが $1.17d_b$ か

ら $2.28d_b$ 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。



(a) $C=1.17d_b$ (b) $C=2.28d_b$
図-7 引抜試験体放射応力と主筋径に対する隙間の関係

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_b 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_b 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、



(a) 荷重制御 (b) 変位制御

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

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 ($C = 1.17d_b$) 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

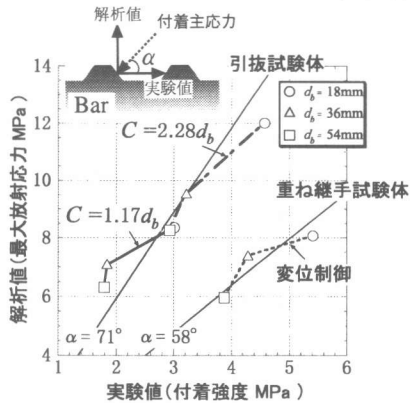


図-9 放射応力と付着強度の関係

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_b 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。

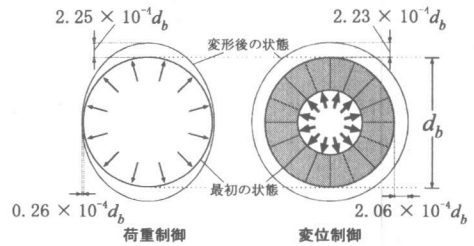


図-10 重ね継手試験体主筋部分の変形状態

5.4 ひび割れ状態

図-11(a)(b)に d_b 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

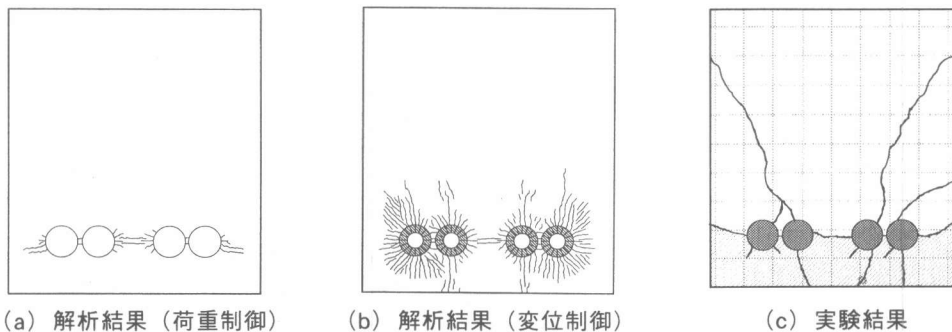


図-11 重ね継手試験体断面ひび割れ状態 ($d_b = 54\text{mm}$)

である。また、図-11(c)には d_b 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($d_b=36\text{mm}, 54\text{mm}$)は主筋近くで、主筋径の小さいもの($d_b=18\text{mm}$)

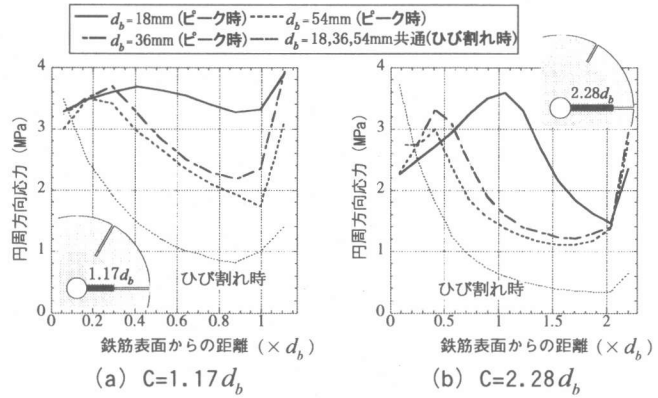


図-12 引抜試験体応力分布

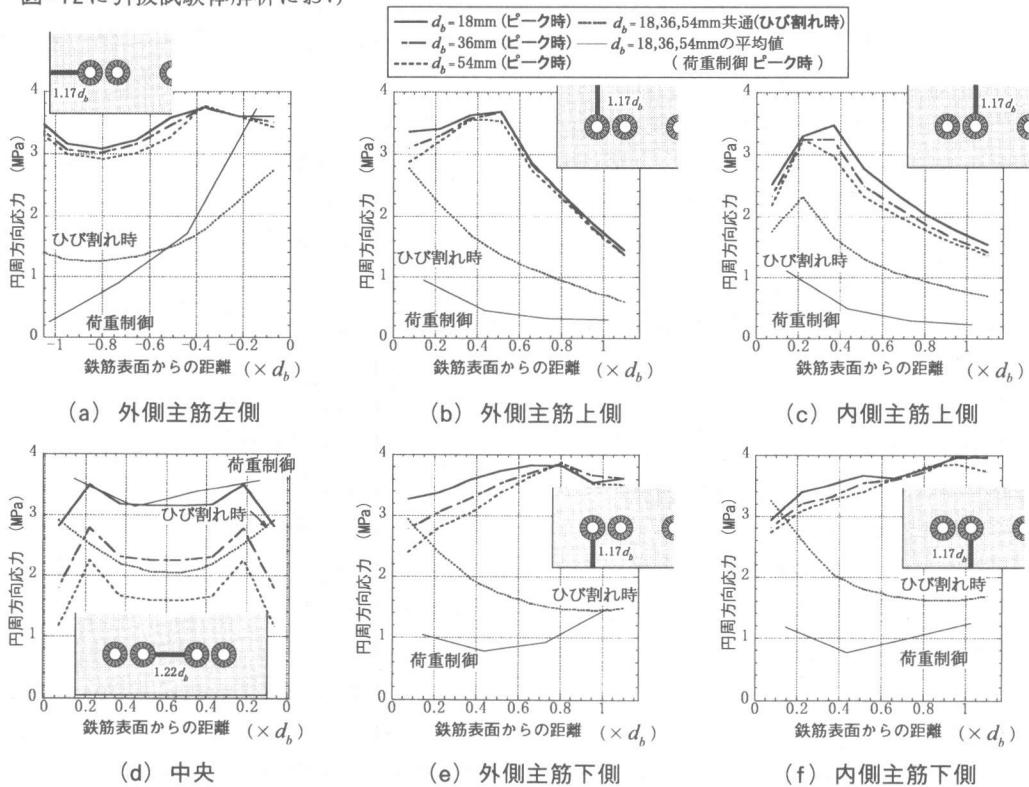


図-13 重ね継手試験体応力分布

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 $1.17d_b$ から $2.28d_b$ 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_b 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】

- [1] 林 梳、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
- [2] 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 ueber Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T.H. Darmstadt, P.94, 1986.