

論文 有限要素法を用いた付着強度の寸法効果に関する解析的考察

付 長徳^{*1}・井上 芳樹^{*2}・市之瀬 敏勝^{*3}

要旨：引抜試験体および重ね継手試験体の付着応力に関する寸法効果について，横補強筋の有無をパラメータとした2次元非線形有限要素解析を行った。横補強筋のある試験体は、横補強筋が無い場合に比べ、全体的に寸法の影響が小さかった。ただし、重ね継手試験体では、横補強筋がある場合でも大きな寸法効果が観察された。これは、重ね継手試験体において、付着強度時に割裂ひび割れ幅が小さく、コンクリートが引張応力を負担しているためであることが分かった。

キーワード： 異形鉄筋， 有限要素法， 寸法効果， 放射状応力， 変位制御

1. はじめに

コンクリートに埋め込まれた異形鉄筋を引き抜いた時，鉄筋の節からコンクリートへ斜め方向に作用する力は図-1のような状態が考えられる。主筋周囲のコンクリートに十分な拘束力を与える場合，主筋節表面におけるコンクリートが直接せん断破壊する。鋼管コンクリート中の異形鉄筋の引抜実験はこのような破壊パターンが見える。

主筋と直交する方向の拘束が不十分な場合、かぶりコンクリートが割り裂かれて破壊してしまう。RC部材の付着割裂強度に関する既往の研究¹⁾で、かぶり厚さが同一であれば、重ね継手試験体の付着強度は円筒状の引抜試験体よりも高くなることが指摘された。また、文献²⁾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た。結果として、最大放射状応力時、円周方向応力は引抜試験体では主筋近くで最大になるのに対し、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。さらに、実験と解析共に大きな寸法効果を示した。しかし、これらの研究は補強筋がない場合の考察であり、補強筋がある場合に關

する研究の余地が残された。

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ひずみ分布を調べ、コンクリートの破壊性状を考察する。横補強筋がある円筒状引抜試験体と重ね継手試験体の付着強度の寸法効果を考察し、横補強筋の効果を検討する。また、ひずみ分布や応力分布を検討するとともに既往の実験結果^{1,3)}と比較することより寸法効果の原因について考察する。

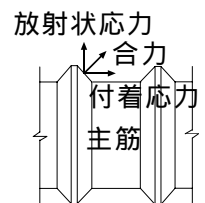


図-1 異形鉄筋の応力状況

2. 解析方法

平面応力解析には、鉄筋コンクリート構造解析専用の2次元有限要素解析コードATENA (version 1.2.2)⁴⁾を使用する。コンクリートの引張軟化曲線は図-2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⁵⁾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歪モデルとする。解析結果のメッシュ依存性を低減するため、Bazant⁶⁾が提案したひび割れ帯モデルを設定した。コンクリートの破壊進

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 工修 (正会員)

*2 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)

*3 名古屋工業大学教授 システムマネジメント工学科 工博 (正会員)

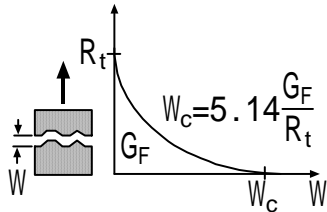


図 - 2 コンクリートの引張軟化曲線モデル

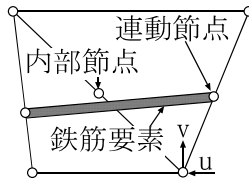


図 - 3 四角要素に埋め込んだ鉄筋要素

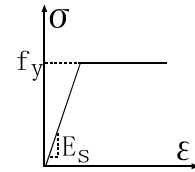


図 - 4 鉄筋関係

行領域に対応する有限要素の内部で消散される破壊エネルギーを一定とした。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。ひび割れコンクリートのせん断剛性はKolmar 則⁷⁾により低減されるものとする。横補強筋は線材要素(2 節点1次元要素)で表現した。線材要素はコンクリート要素に埋め込み、変位は要素境界線と一致する(図-3)。応力-ひずみ関係は材料試験(表-2³⁾)をもとにBilinearモデルで表現した(図-4)、解析モデルには文献^{1,3)}の実験(G_f 測定実験,引抜実験,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試験体³⁾を解析対象とし、図-5のようにモデル化した。解析に用いるコンクリートの材料特性を表-1に示す。これは実験より得られた値である。解析と実験より得られた荷重-変位関係を図-6に示す。図中の実験値は同一寸法・材料の試験体4体から得られた実験値であり、表-1中の破壊エネルギー G_f はその平均値である。解析結果と実験結果は近い値を示したことより、表-1のコンクリート材料特性値が妥当であることが確認できる。

4. 解析モデル

4.1 引抜試験体モデル

異形鉄筋引抜実験^{1,3)}で使用した試験体断面(図-7)を解析対象として、モデル化する。図-1の状況を模擬するには、(a)主筋まわりに一様な割裂応力が発生する、(b)主筋とコンクリートの間に一様な隙間が生じる、という2種類の仮定があり得る。文献³⁾の解析によれば、(a)

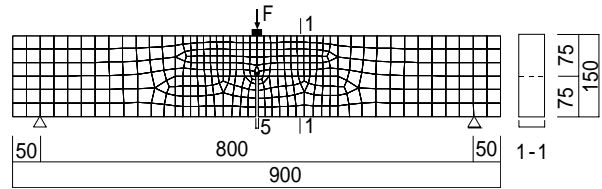


図 - 5 G_f 解析モデル

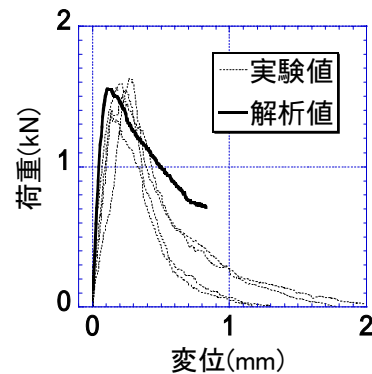


図 - 6 G_f 試験体の荷重-変位関係

表 - 1 コンクリートの材料特性

圧縮強度	引張強度	弾性係数	G_f
(MPa)			(MN/m)
37.4	2.76	2.21×10^4	1.08×10^{-4}

表 - 2 横補強筋材料特性

鉄筋直径	降伏強度	引張強度	弾性係数
	(MPa)		
Φ4	496.7	551	2.04×10^5
Φ8	436.7	493	2.13×10^5
Φ12	353.3	476	2.16×10^5

の仮定は実験で観測されたひび割れ状態と矛盾する結果となることがわかっている。そこで、主筋とコンクリート間に一様な隙間を与えるため、図-7(b)のように主筋部分に堅い弾性リングを配置する。弾性リングは鉄筋がすべる時、節からコンクリートを押し広げるような作用を模擬し、一様な内圧をかけ変位制御で解析を行う。弾性リングの剛性はコンクリートの50倍とする。リング表面放射状応力の平均値を とし、図-7(c)に示すようにして

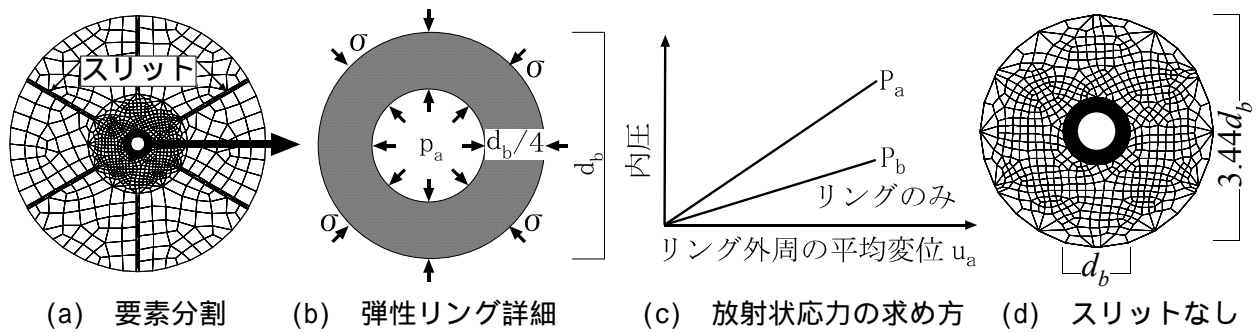


図-7 引抜試験体モデル

求める。まず、試験体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。次にリングのみの解析をし、平均変位 u_a 時の内圧 P_b を求める。そして、 $P = (P_a - P_b) / 2$ より算出する。

解析パラメータは主筋直径 $d_b = 17.4\text{mm}$ 、 34.8mm 、 52.2mm および横補強筋の有無によって計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。なお、スリットの有無の影響を調べるため、図-7(d)のような解析も行った。

4.2 重ね継手試験体モデル

はりの重ね継手実験^{1,3)}の断面(図-8)を解析対象とし、モデル化する。前項4.1と同様の方法で、解析は主筋部分に弾性リングを配置し、コンクリートに対する主筋節の放射状作用を模擬する。重ね継手試験体の主筋が引張られる時、4本の主筋はすべて同じ距離だけすべり、節周辺のコンクリートの変位は一樣であるため、四個リングにおける内圧は一樣にした。また、横補強筋は完全付着と考えている。パラメータも主筋直径 $d_b = 17.4\text{mm}$ 、 34.8mm 、 52.2mm および横補強筋の有無によって計6種類とする。

4.3 2次元モデルの妥当性

異形鉄筋の節からコンクリートに対する放射状作用は斜め方向であるため、実験結果と2次元の解析結果とは、多少の誤差があると思われる。しかし、実験から得られたひび割れ状況や横補強筋ひずみ分布などは、解析結

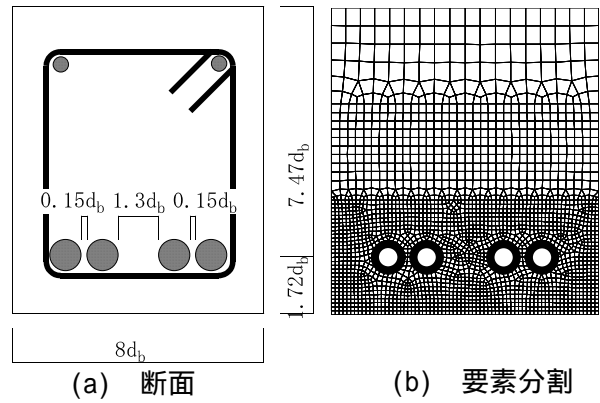


図-8 重ね継手試験体モデル

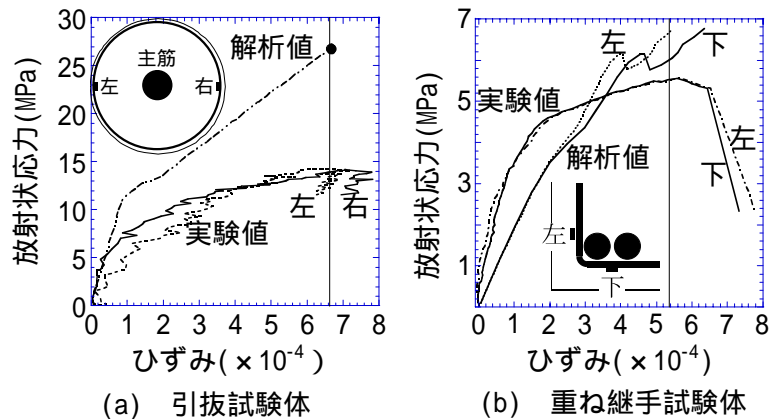


図-9 横補強筋ひずみの比較 ($d_b = 52.2\text{mm}$)

果とほぼ一致することから、今回の解析が実験に近い現象を再現したと言える。

5. 解析結果

5.1 横補強筋のひずみ

横補強筋ひずみの解析値と実験値の比較を図-9に示す。ただし、実験値の場合、縦軸は付着応力である。引抜試験体の解析値は左右位置のひずみが同じであるから、二点鎖線1本で表示した。また、図中の垂直線は、実験で付着強度時に観察された横補強筋のひずみを表わす。引抜試験体の破壊モードは直接せん断破壊であったので、解析は横補強筋のひず

みが垂直線に達する時点で打ち切った。重ね継手試験体は垂直線を超えた直後に解が不安定になった。したがって、これが解析上の強度であると考えられる。

5.2 放射応力と主筋に対する隙間の関係

引抜試験体解析結果から得られた放射状応力と主筋に対する隙間の関係を図-10に示す。隙間とは、弾性リング外周の平均変位である。図-10(a)により、主筋直径 d_b が17.4mmから34.8mm、52.2mmに増加すると最大放射状応力がそれぞれ17%、16%減少した。図-10(a)のマークはスリットなし(図-7(d))で解析した場合の最大放射状応力である。この値はスリットがある場合の値と比べて、2-3%高い値を示したが、最大耐力に関するスリットの有無による影響は小さいと言える。

補強筋がある場合の解析結果を図-10(b)に示す。図中のマークは解析により得られた横補強筋のひずみが文献⁷⁾の最大耐力時横補強筋の平均ひずみと相当する値である。3種類の主筋直径モデルの解析結果はほぼ同様な傾向が現れ、寸法効果は非常に小さなものである。また、図-10(a)(b)を比較すると、横補強筋の拘束効果よりマークでの放射状応力は3倍程度、主筋に対する隙間は4倍程度に増加した。

重ね継手試験体解析結果から得られた放射状応力と主筋径に対する隙間の関係を図-11に示す。無補強の場合、 d_b が17.4mmから34.8mm、さらに52.2mmに増加すると最大放射状応力はそれぞれ12%、7%減少した。引抜試験体とは

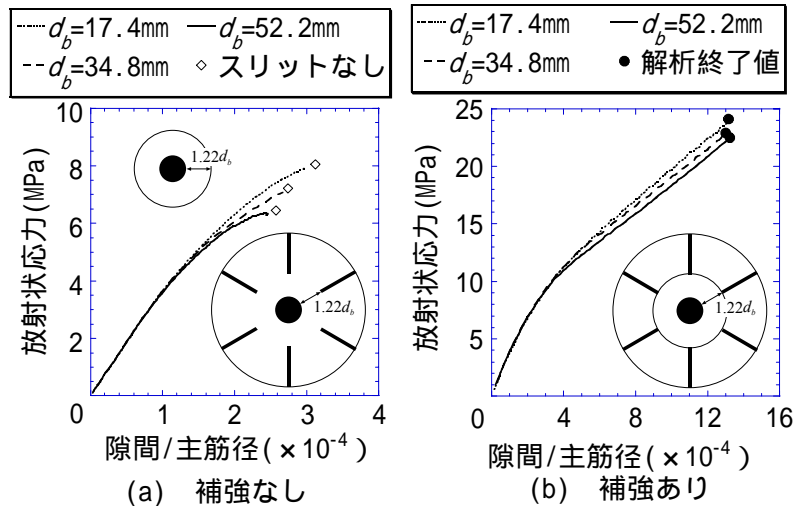


図-10 引抜試験体放射状応力と主筋に対する隙間の関係

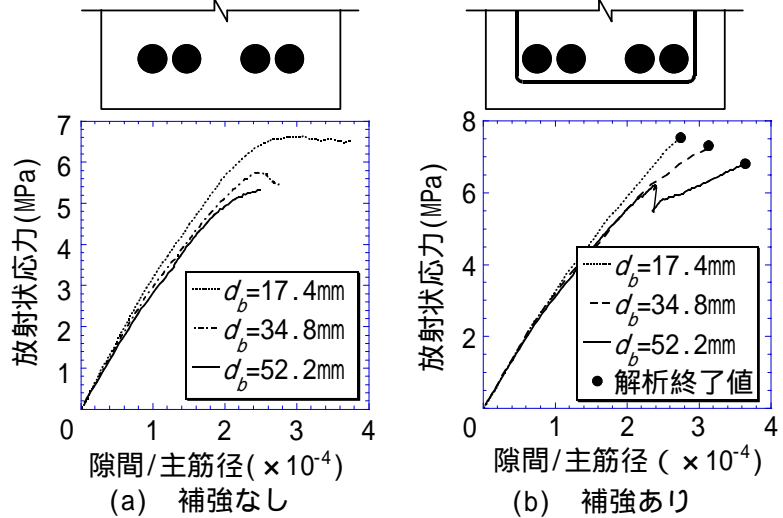


図-11 重ね継手試験体放射状応力と主筋に対する隙間の関係

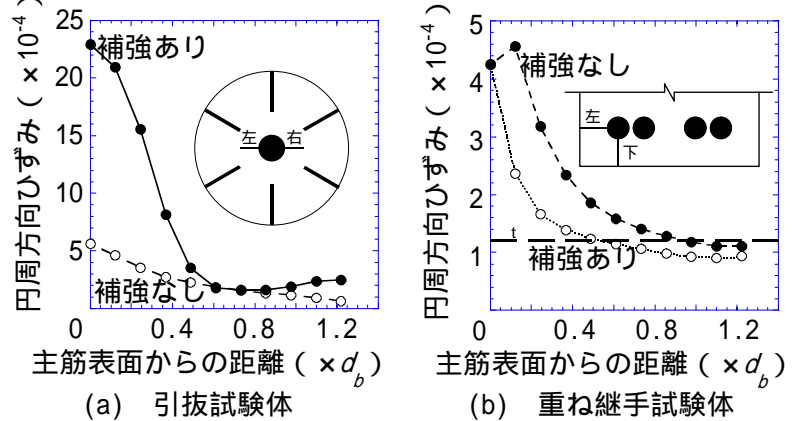


図-12 主筋周辺のひずみ分布 ($d_b=17.4\text{mm}$)

違って、補強筋がある場合でも主筋径の違いによる寸法効果が見られた。また、引抜試験体の最大放射状応力が無補強の場合より3倍程度増加したのに対して、重ね継手試験体は1.4倍程度しか増加しなかった。

5.3 コンクリートのひずみ分布

最大荷重時、主筋周辺コンクリートのひずみ分布(円周方向)を図-12に示す。引抜試験体の値は左右の平均値であるが、重ね継手試験体では図-12(b)に示す左下の平均値である。図-12(b)の破線はコンクリートの引張強度時におけるひずみである。引抜試験体は横補強筋がある場合、主筋付近で大きなひずみが見られる。重ね継手試験体では横補強筋の有無によるひずみ分布の大きな差がなかった。

5.4 コンクリートの応力分布
引抜試験体解析における、解析終了時での応力分布(円周方向)を図-14(a)に示す。図中の縦軸は図-13と同様、応力値を平均したものである。破線はコンクリートの引張強度 f_t である。無補強の場合、主筋表面から $0.8d_b$ の距離まで円周方向応力はコンクリートの引張応力が大きく、 $0.8d_b$ から低下した。横補強筋がある場合、主筋表面で応力が低下したが、主筋から離れるほど応力が上昇する傾向がある。それに対して図-14(b)に示すように、重ね継手試験体の方は横補強筋の有無に関係なく、全体としてコンクリートの応力は高かった。変動幅は 0.5MPa 程度であった。

5.4 実験値と解析値の関係

解析値(放射状応力)と実験値(付着強度)との関係を図-15に示す。横軸は文献^{2,4)}の実験データを引用し、縦軸は解析より得られた放射状応力である。この放射状応力は最大実験値時の横補強筋平均ひずみに対応する解析値を使用してプロットしたものである。また、横補強筋無しと横補強筋有りの実験で使用した試験体の打設は別々の年に行われ、コンクリートの強度が異なる。この問題を避けるた

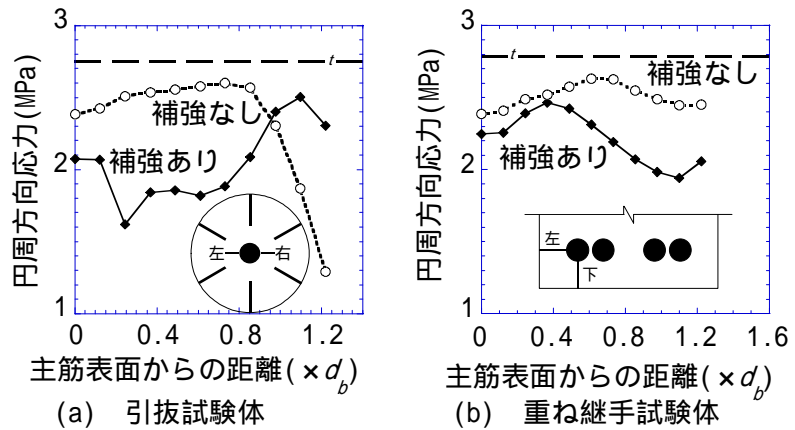


図-14 主筋周辺の応力分布 ($d_b=17.4\text{mm}$)

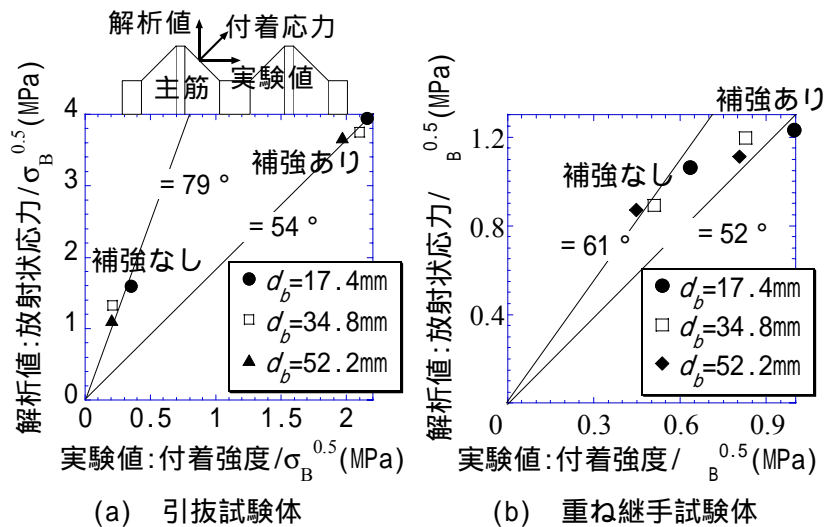
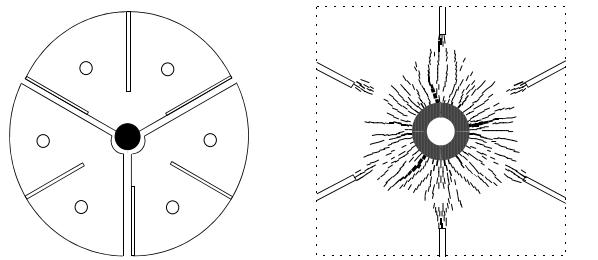


図-15 実験値と解析値の比較

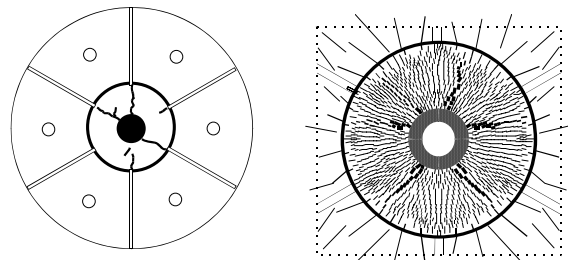
め、図-15のグラフでは各実験で使用したコンクリート圧縮強度の $1/2$ 乗($\sigma_B^{0.5}$)で除し、基準化した。補強がある試験体の解析値と実験値は横補強筋による耐力増加率がほぼ一致する。また、付着強度と最大放射状応力との関係より、付着主応力と主筋軸方向とのなす角を求めた。横補強筋がある引抜試験体の場合は 54 度、無補強の場合、 79 度となった。横補強筋がある重ね継手試験体の場合は 52 度、無補強の場合、 61 度となった。

5.5 ひび割れ状態

主筋径 d_b が 17.4mm の引抜試験体の解析から得られた主筋周辺のひび割れ状態を図-16(b)(d)に示す。これらは最大放射状応力時のものである。ひび割れとは、引張応力が引張強度に達した状態である。また、文献^{2,4)}の引抜実験より得られた破壊後のひび割れ状態を図-16



(a) 実験（補強なし） (b) 解析（補強なし）



(c) 実験（補強あり） (d) 解析（補強あり）

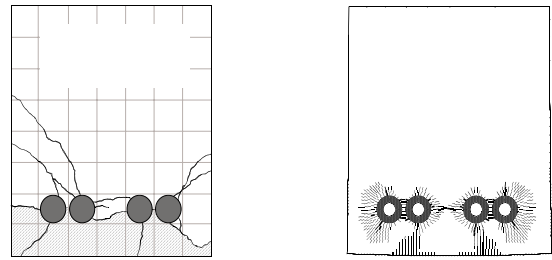
図-16 引抜試験体断面のひび割れ状態

(a)(c)に示す。(a)と(b)を比べると、試験体は3つに分割されたが、解析の方も概ね3つの太いひび割れが現れた。補強筋がない試験体に比べ、補強筋がある試験体はひび割れの範囲が広く、大きな変形能力を示している。

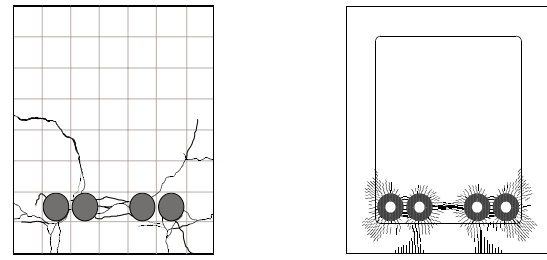
主筋径 d_b が17.4mmの重ね継手試験体のひび割れ状態を図-17に示す。(a)の斜線部分はピーク後剥離したコンクリートである。(b)より(d)のひび割れ範囲が広く、横補強筋に沿って上に伸展するような傾向が見られる。

6. まとめ

- (1) 横補強筋がある引抜・重ね継手試験体の放射状応力は主筋直径(d_b)の増加によって減少する。ただし、その減少は無補強試験体に比べて小さかった。
- (2) 横補強筋がある引抜試験体の放射状応力は無補強の引抜試験体より3倍増加したが、重ね継手試験体は1.4倍のみの増加であった。同じ横補強筋量を配置した両タイプ試験体の最大放射状応力の増加率は一致しない。
- (3) 付着強度時のコンクリートは、横補強筋がある場合でも、主筋の円周方向にかなりの引張応力が残存する。この傾向は、重ね継手試験体で特に顕著であり、無補強



(a) 実験（補強なし） (b) 解析（補強なし）



(c) 実験（補強あり） (d) 解析（補強あり）

図-17 重ね継手試験体断面のひび割れ状態

の場合とほとんど同程度の引張応力が観察された。無補強試験体との差は最大でも0.5MPa程度であった。これが寸法効果の主因と思われる。

参考文献

- 1) 林キ、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) 金山祐二、林キ、市之瀬敏勝：異形鉄筋の付着割裂破壊に関する二次元応力解析, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3 pp.1207-1212, 2000
- 3) 井上芳樹, 金山祐二, 市之瀬敏勝, 池田智彦：異形鉄筋の付着割裂強度における寸法効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23 No.3 pp.841-846, 2001
- 4) (株)計算力学研究センター：RC非線形解析専用プログラムATENA(version 1.2.2)
- 5) Kupfer, H. :Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal ACI, Proc. Vol.66, No.8, pp.656-666, 1969.8.
- 6) Bazant, Z.P., and Oh, B.H. :Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials et Constructions, Vol. 16, No. 93 pp.155-177, 1983.5/6
- 7) Kolmar, W. :Beschreibung der Kraftuebertragung ueber Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen Von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T.H.Darmstadt, p.94, 1986