

論文 鉄筋とコンクリートの付着強度に関する有限要素解析

小椋紀行^{*1}・兪 兆彊^{*2}・付 長徳^{*3}・市之瀬敏勝^{*4}

要旨: 付着破壊が先行する引抜試験体および重ね継手のRC梁を対象として材軸に直交する断面の2次元有限要素解析を行った。付着破壊の進行過程および主筋周辺の応力状態に対する横補強筋の影響, 通し配筋と重ね継手の相違点を検討した。付着割裂ひび割れ発生後のコンクリートの応力分布は, 主筋のごく近傍では圧縮強度にほぼ等しいほどの大きさになるが, 主筋の表面から離れるにつれて急速に減少する点等を指摘した。

キーワード: 付着破壊, 有限要素法, 異形鉄筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造部材の破壊形式の一つに, 主筋が滑ることにより生ずるとされる付着割裂破壊がある。付着割裂破壊は, コンクリート・主筋およびせん断補強筋の材料特性, 主筋・せん断補強筋の配筋方法等のさまざまな作用因子の影響を受ける。現在までに, 付着強度に関して数多くの重ね継手実験と引抜き型実験が行われ, これに基づいて実験式^{1)~6)}も提案されてきた。しかしながら, 部材内部で生ずる破壊であるため, 上記の作用因子がどのように付着破壊に影響を与えるかについては, 未だ不明な点が多く存在する。

著者らは本研究に先立ち, 異形鉄筋の重ね継手における付着割裂破壊を対象とした2次元有限要素解析を行い, 作用因子が付着割裂破壊に及ぼす影響について考察を行った⁷⁾。その結果, 主筋からコンクリートに加わる圧縮応力と主筋軸とのなす見かけ上の角度が一定であること, 付着割裂強度の横補強筋寄与分 s_t がコンクリート強度に大きく依存する理由として, 局所的な放射状応力がコンクリートの破壊条件に匹敵するほど大きいことを指摘した。

本研究では, 付着破壊が先行する引抜試験体および重ね継手のRC梁を対象とする。既往の実験³⁾と同一の試験体を対象として材軸に直交する

断面の2次元有限要素解析を行う。解析結果および既往の実験結果をもとに, 付着破壊の進行過程および横補強筋の影響を明確化することを目的とする。

2. 解析方法

材軸に対して直交する断面を対象として, 2次元有限要素解析コード ATENA(version 2.0.2)⁸⁾を用いて平面応力解析を行う。

2.1 コンクリートのモデル化

ひび割れ発生後のコンクリートの引張軟化は, 図1に示すような式(1)の指数関数型ひび割れ開口則⁹⁾でモデル化した。

$$\frac{\sigma}{R_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (1)$$

$$w_c = 5.14 \frac{G_F}{R_t} \quad (2)$$

ここで, w はひび割れ開口変位, σ は引張応力度, w_c は応力が完全に開放された時のひび割れ開口変位, R_t は引張強度, G_F は応力のないひび割れの単位面積を作り出すのに必要な破壊エネルギーである。また, 式中の $c_1=3$, $c_2=6.93$ である。

破壊条件としては, Kupferの破壊基準¹⁰⁾を用いた。また圧縮応力がピークに達するまではCEB-FIPコード90に従い, ピーク後は直線的に低下するものとした。二軸応力下の非線形挙動は等

*1 愛知産業大学講師 造形学部建築学科 工博 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院生 社会開発工学専攻

*3 名古屋工業大学大学院生 社会開発工学専攻 工修 (正会員)

*4 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)

価1軸則(歪方向に関連するヤング率を用いてポアソン比を除去した形の構成則)に従うものとした。解析結果のメッシュ依存性を低減するため、Bazant¹¹⁾が提案したひび割れ帯モデルを設定した。ひび割れ帯は、コンクリートの破壊進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、その要素のひび割れ方向投影長さをひずみ算定に用いた。なお、ひび割れ発生は、任意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し、ひび割れ発生後は、その要素内のひび割れ方向を固定し、ひび割れコンクリートのせん断剛性はKolmar則¹²⁾により低減されるものとした。

2.2 横補強筋のモデル化

横補強筋は完全弾塑性の図2に示すように線材要素(2節点1次元要素)とした。両端節点は図3の付着特性を有する付着要素を介してコンクリート要素の境界線と結合している。尚、図中の s_3 は節の間隔である。

2.3 加力方法

図4に示すように主筋が滑ると、付着作用で主筋の節が周囲のコンクリートを一様に押し出す。本解析では、図5に示すように主筋位置にドーナツ型の弾性要素(以下、リング要素と称する)を用い、各主筋位置の中心から放射状に等分

布荷重を加えることとした。これにより各リング要素が一様に広がり、上記の現象が再現可能となる。リング要素のヤング係数はコンクリートの3倍とした。さらに、主筋表面とコンクリートの界面の状態を再現するため、リング要素とコンクリート要素の境界面には、リング半径方向の引張強度をコンクリートの1/10、摩擦係数を0.5とした境界要素(2節点1次元要素)を配置した。

3. 解析結果

3.1 解析対象

図6に示す断面を有する藤井らの実験³⁾と同一形状の試験体を対象とした。せん断補強筋比 P_w は0.15%、0.34%、0.42%、0.68%の4パターンとした。材料特性は実験と同じくコンクリート強度 σ_c を27.4MPa、引張強度 R_t を2.42MPa、 G_F を60.5N/m、横補強筋の降伏強度を327MPa、ヤング率を2.1GPaとした。要素の大きさは主筋径をもとに最小寸法を定め、分割の影響がほとんど出ないように試行錯誤の結果をもとに図7に示す要素分割とした。

3.2 引抜試験体

図8は補強筋比 $P_w=0.68\%$ の試験体での各主筋位置でコンクリートに加わる応力(以下、本論

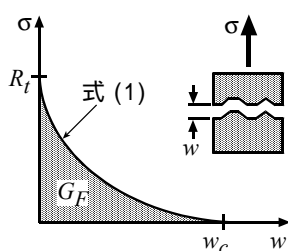


図1 引張軟化曲線

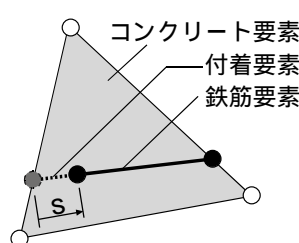


図2 鉄筋・付着要素

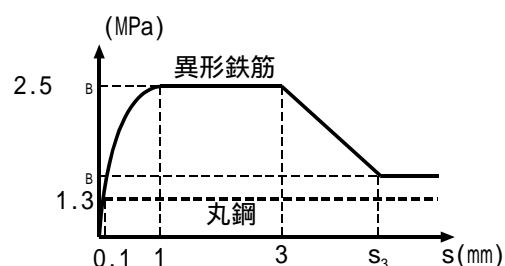


図3 横補強筋の付着特性

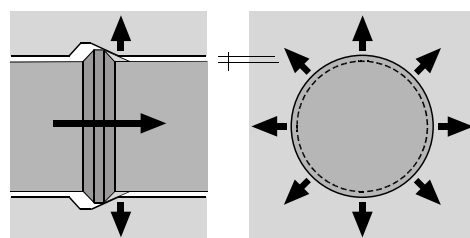


図4 付着作用時の主筋周辺状況

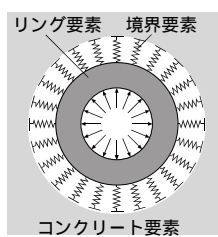


図5 加力方法

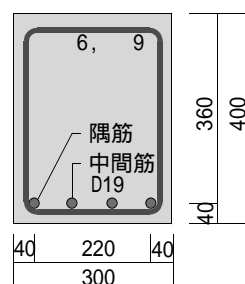


図6 断面形状(mm)

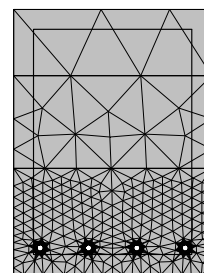
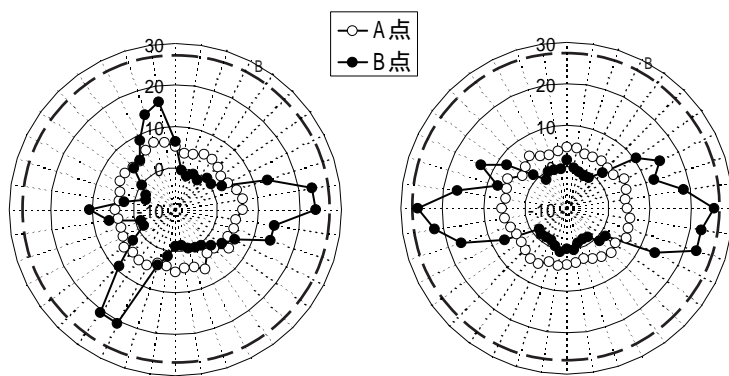


図7 要素分割

文では放射状応力 と称する。)の分布である。図のように放射状応力は位置により異なっている。さらに、各主筋ごとの放射状応力の平均値とリング要素外周の法線方向変形(図4の に相当)の関係を図9に示す。本解析では、全ての主筋の平均値を σ_n で、 σ_n の最大値を最大応力 $\sigma_{n \max}$ と表し、最大応力時B点が付着割裂強度 σ_{cr} 時に対応すると考える。

図9のように放射状応力の平均値は隅筋・中間筋ともにA点まで緩やかに剛性を低下させつつほぼ同一の挙動をとる。A点では、図8のように放射状応力は何れの方角も約5MPa程度である。これは、Tepfers¹³⁾の理論値(3.5~7.0MPa)に対応している。また、図10(a)に示すように主筋中心から放射状にひび割れが生じている。こ

の時、主筋周辺の応力状態は、図11(a)のように主筋を中心としてほぼ同心円状に引張主応力が生じている。その大きさは、主筋付近で引張強度程度となっている。その後、法線方向変形の増加に伴い、図10(b)のように断面横方向のひび割れ幅が拡大し、放射状応力の平均値は隅筋・中間筋ともに減少する。さらに法線方向変形が増大し、最大応力(図9のB点)に達すると、放射状応力は図8のように著しく不均一になる。ひび割れは図10(c)のように上部へ進展する。このときの主応力分布は、図11(b)に示すように隅筋位置では左上方向に、中間筋位置では横方向に圧縮主応力が分布する。また、その大きさは主筋表面位置では圧縮強度に匹敵するほどであるが、主筋から離れるに従い急速に減少している。



(a) 隅筋 (b) 中間筋
図8 Pw=0.68%の各主筋の放射状応力 (MPa)

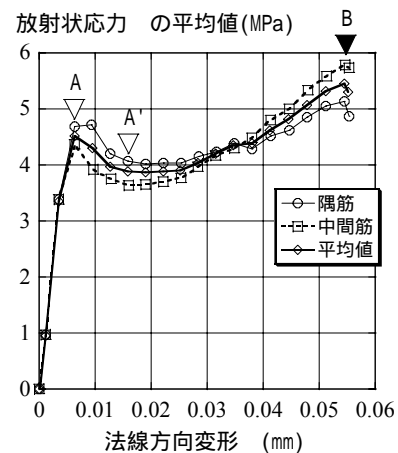
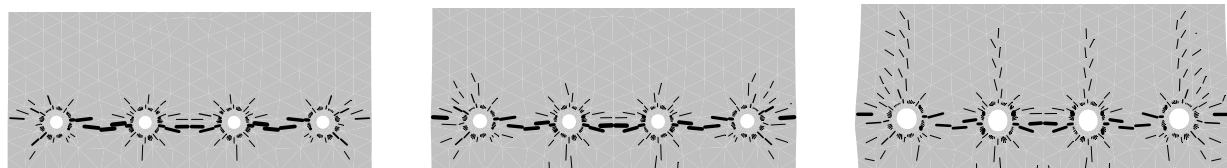
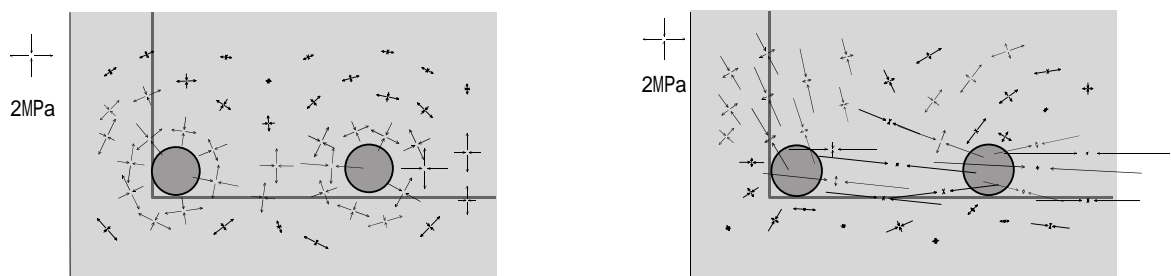


図9 の平均値 - 関係(Pw = 0.68%)



(a) A点 (b) A'点 (c) B点(最大応力時)
図10 変形を50倍したひび割れ図(Pw = 0.68%)



(a) A点 (b) B点(最大応力時)
図11 主筋周辺の主応力分布(Pw = 0.68%)

本論文に先立ち行った重ね継手を対象とした研究⁷⁾では、主筋からコンクリートに加わる圧縮応力と主筋軸とのなす角度が一定となり、本解析により付着割裂強度を算定することが可能であるという結論を得ている。図12に本論文で対象とした引抜試験体の全試験体の解析値 n_{max} と実験値 u の関係を示す。図のように、付着割裂強度 u と解析値は比例関係にあることから、引抜試験体でも同様に $\theta = 61.2^\circ$ とすれば、付着強度を算定することが可能であるといえる。

3.3 横補強筋の影響

図13に横補強筋の歪と荷重（藤井らの実験値をおよび解析値）の関係を示す。ここで、実験の荷重とは主筋引張力の合計であり、解析値の荷重は $\theta = 61.2^\circ$ として算定したものである。実験では横補強筋の数だけ歪が測定されているが、解析は二次元のため一本の曲線で表される。図のように少なくともA点までの挙動および最大応

力時の歪は、実験値と良い対応を示している。ここで、図14(a)のように主筋位置での横方向の釣合を考える。横補強筋の断面積を a 、間隔を s 、応力を σ_s とすると、部材長さあたりの横補強筋の引張力は $a \sigma_s$ である。この引張力が、直径 d_b の主筋に横方向圧縮応力 σ_h を与えるものと考えれば、 $\sigma_h = a \sigma_s / (s d_b)$ となる。同様に縦方向の釣合より $\sigma_v = a \sigma_s / (2s d_b)$ となる。これらの平均値 $\sigma_n = (\sigma_h + \sigma_v) / 2$ を横補強筋による放射状応力寄与分と考え、図15に n とともにプロットした。Pw=0.34%、0.68%の試験体とも、 σ_n がある値で突然止まってしまうのは、中間筋側面でのコンクリートが圧縮破壊するためである。Pw=0.34%の試験体では、 σ_n が小さいため、B点の最終強度がA点の値とほとんど同一となる。つまり、Pw = 0.34%程度の横補強筋は靱性を高めるが強度にはほとんど寄与しない。藤井らの実

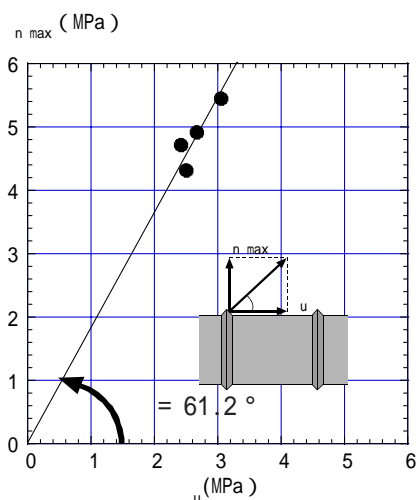
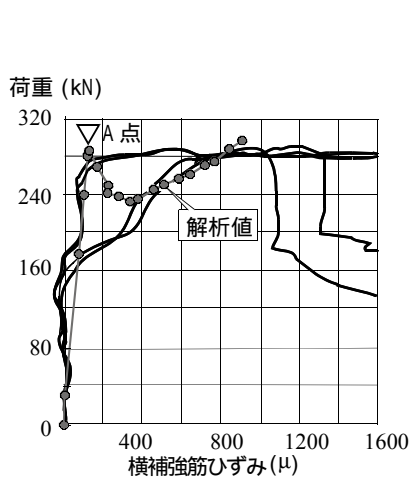
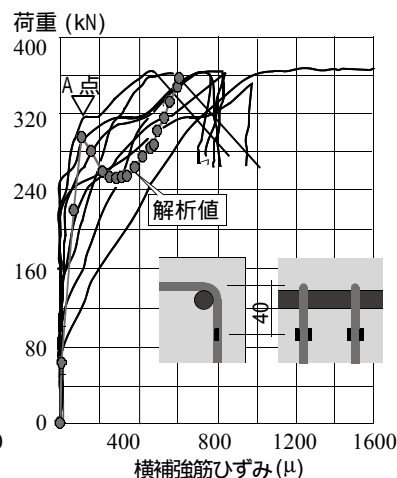


図12 n_{max} - u の比較



(a) Pw=0.34%



(b) Pw=0.68%

図13 横補強筋歪 - 荷重関係

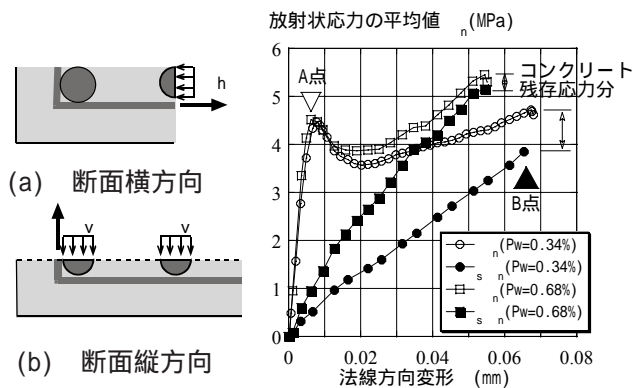


図14 釣合条件

図15 n - ϵ_n 関係

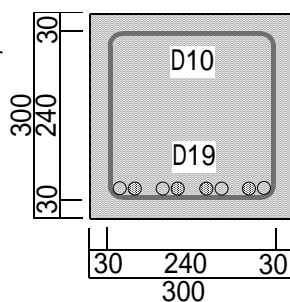


図16 断面形状(mm)
(重ね継手)

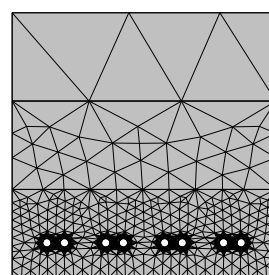


図17 要素分割
(重ね継手)

験でも同様の結果が得られている。なお、 σ_n と σ_s の差はコンクリート残存引張応力度の寄与分と言える。

3.4 重ね継手試験体の解析結果

図16に示す断面を有する桜田らの実験¹⁾と同一形状の重ね継手試験体を対象とし、図17のように分割した。材料特性は、実験と同じくコンクリート強度 f_c を26.2MPa、引張強度を2.4MPa、 G_f を53.6N/m、横補強筋の降伏強度を351MPa、弾性係数を199GPaとした。

図18に $P_w=1.2\%$ での各主筋の放射状応力の平均値と法線方向変形 ϵ_n の関係を、図19にA点およびB点の主筋1と主筋3の放射状応力の分布

を、図20に各点での変形を50倍したひび割れ図を、図21にB点での主筋周辺の主応力分布を示す。重ね継手の場合でも、図8～11の引抜試験体の場合と同様にA点においては主筋の周りでもコンクリートの引張応力が大きな値を取る。ただし、放射状応力は引抜試験体のように一様ではなく、隣り合う主筋間で大きな値となる。その後、法線方向変形 ϵ_n が増加しても主筋間をつなぐ断面横方向の割裂ひび割れが拡大せず、継手主筋(主筋1と2、3と4)の上下方向にひび割れが拡大しつつ、放射状応力が上昇してゆく。このとき図19のように主筋1では左下、左上および右側で、その他の主筋では左右側の放射状応

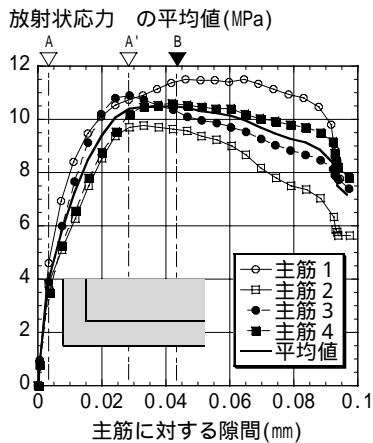
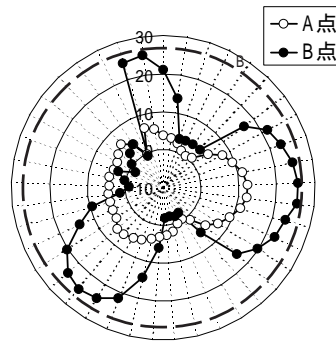
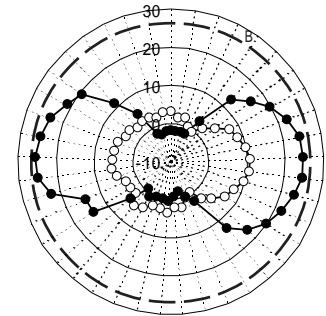


図18 ϵ_n の平均値 - ϵ_n の関係 ($P_w = 1.2\%$)

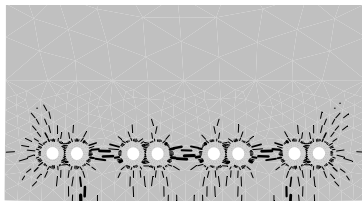


(a) 主筋1

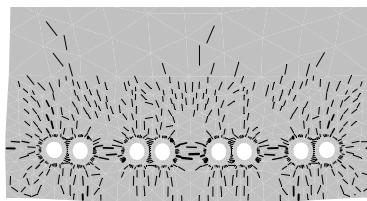


(b) 主筋3

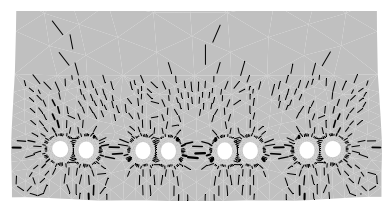
図19 $P_w=1.2\%$ の各主筋の放射状応力 (MPa)



(a) A点



(b) A'点



(c) B点(最大応力時)

図20 変形を50倍したひび割れ図 ($P_w = 1.2\%$)

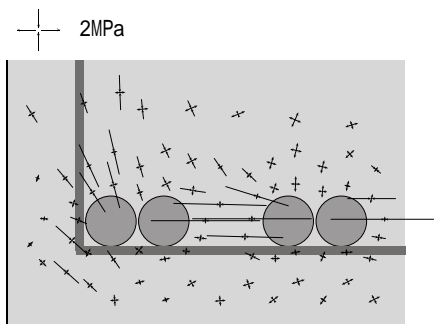
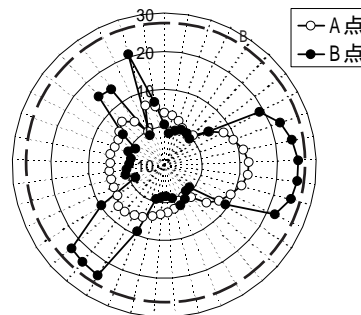
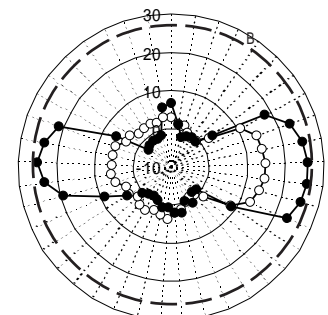


図21 B点の主筋周辺の主応力分布 ($P_w = 1.2\%$)



(a) 主筋1



(b) 主筋3

図22 $P_w=0.2\%$ の各主筋の放射状応力 (MPa)

力がコンクリートの圧縮強度に達している。図8の引抜試験体と比較すると、より広い領域で放射状応力が圧縮強度に達している。これは $P_w=1.2\%$ の補強筋量の効果ともいえるが、ひび割れ状況からみて、引抜試験体よりも広い領域でコンクリートが抵抗していると考えられる。

図22は $P_w=0.2\%$ の場合の各主筋放射状応力の分布である。図19の $P_w=1.2\%$ の場合と同様にB点(最大応力時)において、主筋1では左下、左上および右側で、その他の主筋では左右側の放射状応力がコンクリートの圧縮強度に達しているが、その領域が小さくなっている。

図23に $P_w=0.2\%$, 1.2% の放射状応力の平均値 σ_n および横補強筋の寄与分 σ_s と法線方向変形 ϵ の関係を示す。法線方向変形 $\epsilon = 0.038\text{mm}$ ($P_w=1.2\%$ のB点)までの σ_n を比較すると、補強筋比 P_w が6倍となっても、 σ_n の増分は3倍程度であり、 P_w に比例しないことがわかる。

4. まとめ

(1) 引抜試験体・重ね継手ともに主筋からコンクリートに加わる圧縮応力と主筋軸とのなす角度は一定であり、本解析法により付着強度を算定することが可能である。

(2) 横補強筋を有する梁の場合、主筋からコンクリートに加わる圧縮応力の分布は、付着割裂ひび割れ以前はほぼ一様であるが、ひび割れの拡大に伴いびつな形状になる。特に、中間主筋

においては、横方向への圧縮力が大きくなり、上下方向への応力はほとんどゼロになる。横方向への圧縮力は、横補強筋の引張力によるだけでなく、梁上部のコンクリートの残存引張応力によって生じるものである。

(3) 付着割裂ひび割れ発生後のコンクリートの応力分布は、主筋のごく近傍では圧縮強度にほぼ等しいほどの大きさになるが、主筋の表面から離れるにつれて急速に減少する。

[参考文献]

- 1) 桜田智之, 師橋憲貴, 田中礼治: 重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋及び中子筋の効果に関する実験的研究 日本建築学会構造系論文集 第465号, pp.119 - 128, 1994年11月
- 2) 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
- 3) 藤井 栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.324, pp.45-52, 1983.2
- 4) 角陸純一: 高強度鉄筋コンクリート部材中の重ね継手の性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.123-130, 1993.11
- 5) 神野靖夫, 藤井 栄, 森田司郎: 割裂を伴う付着特性の寸法効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.747-748, 1986
- 6) D.Darwin, M.L.Tholen, E.K.Idun, and J.Zuo: Splice Strength of High Relative Area Reinforcing Bar, ACI Structural Journal, Vol.93, No.1, pp.95-107, Jan.-Feb, 1996
- 7) 小椋紀行, 付 長徳, 市之瀬敏勝: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する解析的考察, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 49B, 2003(掲載予定)
- 8) (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 2.0.1)
- 9) Shah S. P. et.al.: Fracture Mechanics of Concrete, 552 pp., John Wiley and Sons, Inc., 1995
- 10) Kupfer, H. : Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal ACI, Proc. Vol.66, No.8, pp.656-666, 1969.8.
- 11) 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
- 12) Kolmar, W.: Beschreibung der Kraftuebertragung ueber Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen Von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T. H. Darmstadt, p. 94, 1986
- 13) Tepfers: Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, Vol.31, No.106, 1979

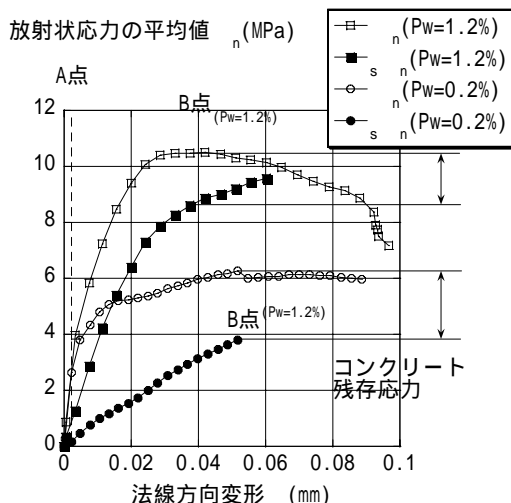


図23 重ね継手の σ_n - 関係