

補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究

その2 横補強のない場合の性状に与える構造因子の影響

STUDY ON BOND SPLITTING BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Part 2 Influence of structural factors on the average behavior without lateral reinforcement

金久保 利之*, 小島 浩一**, 米丸 啓介***, 福山 洋****

Toshiyuki KANAKUBO, Kouichi OJIMA, Keisuke YONEMARU
and Hiroshi FUKUYAMA

To investigate the correlation between local bond splitting behaviors and average ones in reinforced concrete members, local bond stress (τ_b) versus slippage of reinforcement (s) relationship was proposed in the preceding study (Part 1). This study presents the results of analysis performed to investigate the adaptability of the proposed $\tau_b - s$ relationship to average bond behaviors. Analyzed bond splitting strengths show a good correlation with experimental values observed in previous studies. Influence of structural factors, such as bond length, Young's modulus of reinforcement, concrete strength, concrete thickness and specimens' scale are also analyzed and discussed in consideration of the experimental results.

Keywords : bond splitting, local behavior, bond strength, thickness of cover concrete, bond length, Young's modulus

付着割裂, 局所性状, 付着強度, かぶり厚, 付着長, ヤング係数

1. はじめに

補強コンクリート部材の付着割裂性状における局所的な性状と部材中の平均的な性状は、同一のメカニズムによるものであると考えられる。しかしながら、現在まで、この両者の関係を定量的に表そうとした検討はあまり進んでいない。この理由として、付着割裂破壊のメカニズムに焦点をあて、それに立脚した強度式を求めようとする研究があまり進んでいないこと、付着割裂実験における付着長の取り方、および付着長がある程度長い場合に起こる荷重端側からの連鎖的な割裂破壊に関して不明瞭な点が多いこと等が挙げられる。

筆者らは、両者の性状を実験的および解析的に関連づけることを主目的として、主筋の種類（径や素材）、かぶり厚等を実験因子とした付着割裂実験を行い、前報：その1で横補強のない場合の局所の付着応力-主筋すべり関係を定量化した¹⁾。この関係式と主筋すべり量に関する付着基礎式を解くことにより、任意の条件下における主筋すべり量、歪、付着応力の分布を知ることができる。本報では、これらの局所性状を表した関係式を用いて、付着長が長い場合の平均的な性状を解析により求め、過去に行われた付着割裂実験や筆者らの付着長に着目した実験の結果との対応を検証する。さらに、横補強のない場合の付着

割裂性状に及ぼす種々の構造因子の影響を解析的に検討した結果を報告する。

2. 局所の付着応力-主筋すべり量関係¹⁾

前報：その1で定量化した、局所の付着応力-主筋すべり量関係を以下に再掲する。また、この関係により定まる付着応力-主筋すべり量曲線の例を、図1に示す。なお、 $s_x > r_u / (\beta d_b)$ の範囲では、 $\tau_{bx} = 0$ とする。

$$\tau_{bx} = 2 \cdot \sigma_t \cdot \beta \cdot s_x \cdot \frac{(r_u/d_b)^2 - (\beta \cdot s_x)^2}{(r_u/d_b)^2 + (\beta \cdot s_x)^2} \cdot \cot \alpha \quad (1)$$

ここで、

τ_{bx} : 付着応力

σ_t : コンクリート割裂強度

β : 内部ひび割れの大きさとすべり量の関係を表す定数 = 10.2 (1/mm)

s_x : 主筋すべり量

r_u : コンクリートかぶり厚さに主筋半径を加えた値

d_b : 主筋径

α : 主筋がコンクリートを押し広げる力の主筋方向とのなす角 = 34°

* 筑波大学構造工学系 講師・博士(工学)

** 筑波大学大学院博士課程工学研究科

*** 清水建設技術研究所未来技術研究部 研究員・工修

**** 建設省建築研究所国際地震工学部 主任研究員・工博

Assistant Prof., Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, Dr. Eng.

Graduate Student, Doctoral Course, University of Tsukuba

Research Engineer, Frontier Technology Dept., Institute of Technology, Shimizu Co., M. Eng.

Senior Research Engineer, IISEE, Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.

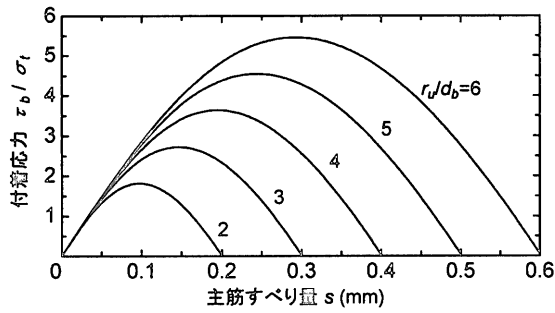


図 1 局所付着応力－主筋すべり量曲線の例

この関係は、前報において、付着長が主筋径の 4 倍、圧縮強度が 360kgf/cm² クラスのコンクリートである試験体を用いた付着割裂実験の結果により定量化されている。さらに、筆者らのその後の実験研究²⁾により、付着長が主筋径の 50 倍、圧縮強度が 300 および 600kgf/cm² クラスのコンクリートを用いた試験体でも適合性が検討されており、局所付着応力の最大値（付着割裂強度）および最大応力以前の曲線の形状はおおむね良好に対応していることが報告されている。なお、この関係で表される付着応力－主筋すべり量関係は最大応力以降も表現できることに特徴を有しているが、この区間の性状を求めることは実験技術上難しく、その適合性には不明な点がある。本報においては、局所の関係を用いて解析的に求めた平均的な性状が、既往の実験結果と対応することを示すことにより、間接的に最大応力以降の関係もおおむね妥当なものであることが検証されるという立場をとることとした。

3. 解析方法と解析例

3.1 解析方法

(1)式とともに、付着応力と主筋すべり量には前報で述べたように次の関係が成り立つ。

$$\frac{d^2 s_x}{dx^2} = \frac{\phi_b}{E_b \cdot a_b} \cdot \tau_{bx} \quad (2)$$

ここで、

ϕ_b : 主筋の周長

E_b : 主筋のヤング係数

a_b : 主筋の断面積

(1)式を(2)式に代入し、次式を得る。

$$\frac{d^2 s_x}{dx^2} = \frac{2 \cdot \phi_b \cdot \sigma_t \cdot \beta}{E_b \cdot a_b} \cdot s_x \cdot \frac{(r_u/d_b)^2 - (\beta \cdot s_x)^2}{(r_u/d_b)^2 + (\beta \cdot s_x)^2} \cot \alpha \quad (3)$$

(3)式が基礎となる関係式であり、主筋すべり量に関する 2 階微分方程式になる。(3)式を 1 階積分することにより主筋引張力（歪）の、さらに 1 階積分することによりすべり量的主筋軸方向に関する分布を求めることができる。しかしながら、(3)式は数学的に解けないので、数値計算に頼ることになる。本報では本来の力学的意味を損なわないように、以下に示す方法で逐次計算を行うこととする（図 2 参照）。

① 主筋の任意の位置において、 i 番目の微小区間 Δx を考え、その片側に任意のすべり量 s_{i-1} および任意の主筋引張力 P_{i-1} を与える。

② この区間での付着応力を(1)式により求める。

③ Δx が十分小さければその区間では付着応力は一定であるとみなせるので、その区間での主筋引張力の変化量 ΔP_i および主筋の伸び量 Δs_i を次式により求める。

$$\Delta P_i = \tau_{bi} \cdot \phi_b \cdot \Delta x \quad (4)$$

$$\Delta s_i = \frac{\Delta x}{E_b \cdot a_b} \left(\sum_{k=0}^{i-1} \Delta P_k + \frac{\Delta P_i}{2} \right) \quad (5)$$

④ その区間終端でのすべり量 s_i および主筋引張力 P_i を次式で求める。

$$s_i = s_{i-1} + \Delta s_i \quad (6)$$

$$P_i = \sum_{k=0}^i \Delta P_k \quad (7)$$

⑤ 次の区間について②に戻り同様の計算を行う。

通常的主筋引抜実験に適用するためには、自由端での主筋引張力を $P_0 = 0$ 、すべり量を任意の値 $s_0 = s_f$ （自由端主筋すべり量）とし、自由端から荷重端までの各区間において順次計算を行えばよい。また、付着応力－すべり量曲線は、 s_f を十分小さな値から任意の間隔で増加させ、繰返し計算を行うことにより得られる。平均付着応力は荷重端で得られた P_i を主筋の周長と全付着長で除すことで求められる。

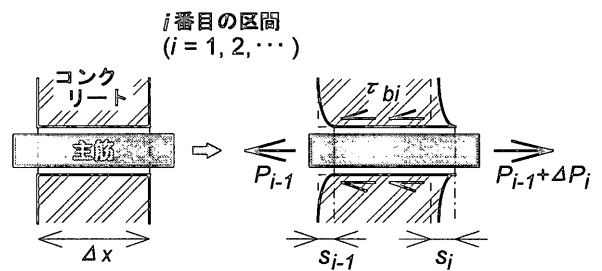


図 2 微小区間の釣合い

3.2 解析例

前節で示した方法により解析を行った例を本節で示す。解析の対象とした試験体は図 3 に示される“簡易型”試験体³⁾（N65－SD シリーズ）で、解析に用いたデータは以下の通りである。

コンクリート割裂強度：25.4kgf/cm²

主筋径：1.23cm（異形鉄筋 D13）

主筋断面積：1.25cm²

主筋周長：3.94cm

主筋ヤング係数：1.98 × 10⁶ kgf/cm²

コンクリートかぶり厚さ（ r_u ）：3.25cm

付着長：6, 12, 18, 24, 30cm の 5 種類

解析幅（ Δx ）：0.615cm

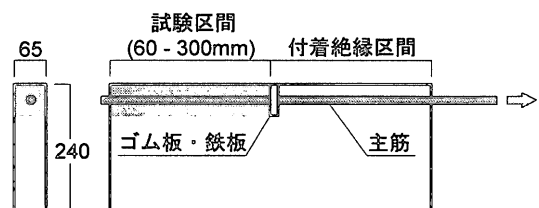


図 3 解析例の試験体

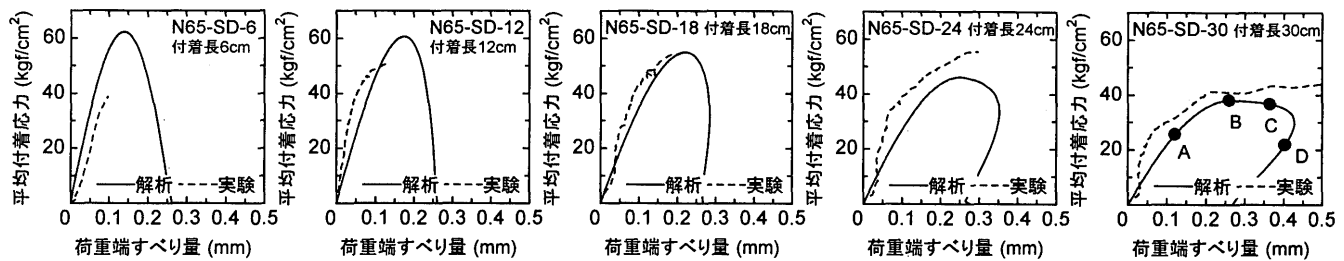


図 4 平均付着応力ー主筋すべり量関係の解析例

解析により得られた平均付着応力ー荷重端すべり量関係を図 4 に示す。破線は同文献の実験結果を示しており¹⁾、平均付着応力の実験値は主筋引張荷重を付着区間主筋表面積で除した値である。なお、試験体 N65-SD-6 および N65-SD-18 は最終的に付着割裂以外の形式で破壊している。自由端すべり量を増加させることにより解析を行っているので、付着長が大きい場合、解析結果に荷重端すべり量の減少する区間が示されているが、通常この区間の実験結果を得ることはできない。付着長が小さい場合、局所の性状を求めた前報の試験体とほぼ同様の条件下であると考えられるので、解析結果と実験結果はよい対応を示す(試験体 N65-SD-6 の場合は、実験結果が得られている範囲)。付着長が大きい試験体においても、解析結果は実験結果を良好に表していると考えられる。

図 4 の試験体 N65-SD-30 の曲線上の A~D 点における局所付着応力 τ_{bx} と主筋引張力 P_x の主筋方向 (x 方向) の分布を図 5 に示す。図 4 の A~D 点に対応して、図 5 では τ_{bx} のピーク値 (59.7kgf/cm²) が荷重端側から自由端側へと推移していく様子がうかがえる。解析上、A 点では自由端からの距離が 20cm 程度の位置で内部ひび割れが発生しはじめ、荷重端位置でほぼ τ_{bx} が最大値(極値)を取っている。B 点では自由端からの距離が 10cm 程度の位置で内部ひび割れが発生しはじめ、荷重端では内部ひび割れが断面をほぼ貫通している。C 点ではほぼ全域で内部ひび割れが発生していると考えられる²⁾。

以上の方法により、提案された局所の付着応力ー主筋すべり量関係から付着長が長い場合の平均的な性状を解析的に求めることが可能で、これは荷重端側からの連鎖的な割裂破壊をよく表現していると言えよう。次節では、付着割裂強度(付着応力最大値)に着目して、既往の実験結果との適合性を検証する。

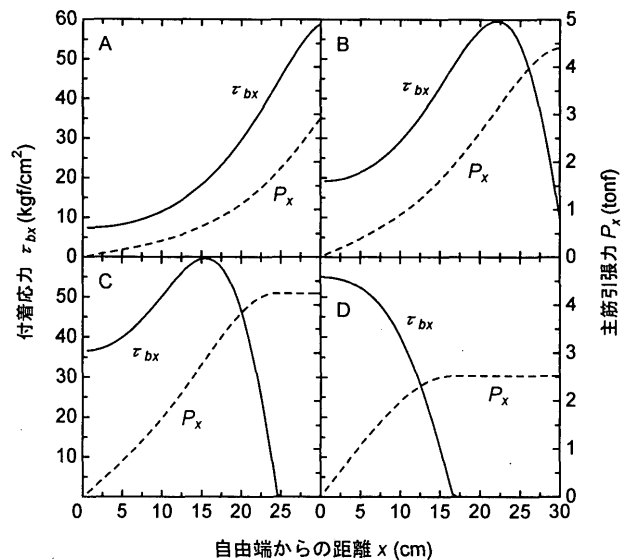


図 5 付着応力および主筋引張力分布の解析例

4. 付着割裂強度に関する本解析法の適合性

本節では、付着割裂強度に関して既往の付着割裂実験の結果を使用し、本解析法による付着割裂強度解析値の適合性の検証を行う。検証に用いたデータは、角ら⁴⁾、藤井ら⁵⁾、田中ら⁶⁾、竹内ら⁷⁾の研究で加力実験された試験体の内、横補強のないサイドスプリット型で破壊した試験体、および筆者らの文献 3) の試験体で普通コンクリートを使用した試験体である。検証のために用いた試験体の概要を表 1 に示す。文献 5)、6)、7) の試験体は片持梁型、文献 4) の試験体は単純梁型、文献 3) の試験体は“簡易型”である。なお、文献 8) において、簡易型試験体と片持梁

表 1 本解析法の検証に用いたデータ

文献	加力方法	データ数*1	断面幅 (cm)	主筋		コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	付着長 (cm)
				配筋	ヤング係数*2 (10 ⁶ kgf/cm ²)		
角ら ⁴⁾	単純梁	10	30	4-D25	2.1	373~1051	37.5, 50, 100
藤井ら ⁵⁾	片持梁	8	30	4-D19, 3-D19 4-D25	2.1	227~277	50
田中ら ⁶⁾	〃	4	65	4-D41	1.73	391	50, 100
竹内ら ⁷⁾	〃	8	20	3-D13, 4-D13	1.94	582, 934	30
筆者ら ³⁾	簡易型	6	4.5, 6.5	1-SD13*3	1.98	365, 374	6, 12, 18, 24, 30
		24		1-CS5, 10, 15*3	1.02~1.30		
		24		1-GS5, 10, 15*3	0.322~0.441		

*1: 上端筋、下端筋は別に数えている。また、サイドスプリット型以外で破壊した試験体は含んでいない。 *2: 文献に記載のないものは $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とした。 *3: SD=異形鉄筋(D13) CS=カーボン繊維筋(公称径 12mm) GS=ガラス繊維筋(公称径 12mm) (繊維筋の表面形状は螺旋巻)

型試験体の付着割裂強度の実験結果は同等であることが報告されている。文献 4)、5)、6)、7)の試験体は主筋径（断面寸法）、コンクリート強度および割裂線長さの構造因子が多岐に渡っており、また、文献 3)の実験では付着長および主筋ヤング係数がパラメーターになっている。解析にあたっては、断面内主筋位置は等間隔であるとして r_u/d_b の値は(8)式によった。また、文献中にコンクリート割裂強度の記載のないものは文献 9)を参考に(10)式により算出した。

$$\frac{r_u}{d_b} = \frac{b_{si}}{2} + 0.5 \quad (8)$$

$$b_{si} = \frac{b - \sum d_b}{\sum d_b} \quad (9)$$

ここで、

b_{si} : 主筋 1 本あたりの割裂線長さ

b : 部材幅

$$\sigma_t = 1.07 \cdot \sigma_B^{0.566} \quad (10)$$

ここで、

σ_t : コンクリート割裂強度 (kgf/cm²)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)

付着割裂強度の解析値と実験値の比較を、図 6 および図 7 に示す。図 6 は単純梁型および片持梁型試験体を、図 7 は簡易型試験体の比較を示している。なお、上端筋の実験値は、その文献中に示される上端筋と下端筋の実験値の比率にしたがって下端筋に換算した。両図とも解析値が実験値を若干過小評価す

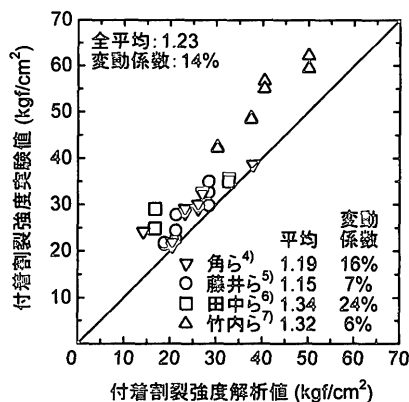


図 6 付着割裂強度の解析値と実験値の比較（単純・片持梁型）

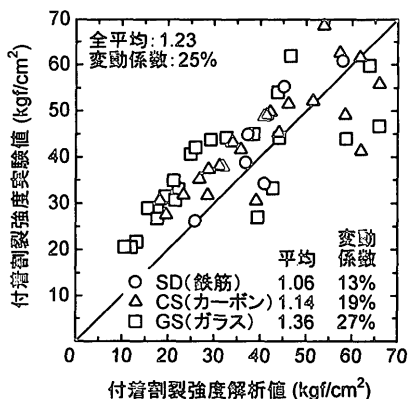


図 7 付着割裂強度の解析値と実験値の比較（簡易型）

る傾向があり、比較値の平均値はいずれも 1.23 である。比較値のばらつきは、図 6 の場合、変動係数が 14% である。文献 4)によれば、藤井・森田式で 15%、同文献の角式で 11% であり、既存の実験式と比較して遜色ない結果を示している。図 7 では、鉄筋、カーボン、ガラス繊維筋と、ヤング係数が小さくなるにしたがいばらつきが大きくなる傾向にある。しかしながら、主筋径、コンクリート強度、割裂線長さ等の構造因子に加え、付着長および主筋ヤング係数までもを含んだ評価法は他に例はなく、コンクリートの割裂というばらつきの大きい性状に起因する付着割裂強度を、十分な精度で評価できていると考えられる。なお、主筋のヤング係数によりばらつきが異なる原因は、後述 5.2 節で若干検討する。

5. 種々の構造因子が平均的な付着割裂性状に及ぼす影響

本節では、付着長、主筋ヤング係数、コンクリート割裂強度、かぶり厚、試験体の相似比の各構造因子が平均的な付着割裂性状に与える影響を、パラメトリックな解析により把握し、付着割裂強度に関して解析結果と実験値との対応を述べる。

5.1 付着長の影響

付着割裂強度を、主筋引張荷重を付着全表面積で除した平均応力で論ずる場合、通常、付着長が小さくなるにしたがい強度は増加する。既往の付着割裂強度算定式¹⁰⁾には経験的にその効果が取り入れられてきたが、それを付着長がごく小さい場合等に拡張することはできない。

文献 4) および 3) の実験において、付着長を変動因子とした試験体のデータをもとにし、付着長を種々変化させて解析を行った。文献 4) の試験体は単純梁形式で、横補強のない試験体を解析の対象とした。コンクリート圧縮強度は 957~1051 kgf/cm²、主筋は異形鉄筋 D25 で、付着長は主筋径の 15、20 および 40 倍である。なお、解析にあたっては、断面内主筋位置は等間隔であるとして r_u/d_b の値は(8)式に、コンクリート割裂強度は(10)式によった。文献 3) の試験体は“簡易型”試験体で、主筋にカーボンおよびガラス繊維筋を使用した試験体を解析の対象とした。コンクリート割裂強度は 26.3 kgf/cm²、主筋の公称径は 12mm で、付着長は主筋径のおよそ 5~25 倍（5 レベル）である。また $r_u = 3.25$ cm である。

付着長 (l_b) と平均付着応力の最大値 ($\tau_{b,ave}$: 付着割裂強度) の関係を表した解析例を、図 8 および図 9 に示す。実線が解析結果を表し、横軸は主筋径 (d_b) で無次元化している。図中の破線は、横軸が $l_b/d_b = 30$ の時の値を基準として、付着長に反比例する曲線を表している。

解析結果は、付着長がごく短い場合は局所の付着応力の最大値（極値）をとり、付着長が主筋径の 5 倍程度までは一定値をとる様子を示している。付着長が大きくなるにしたがい強度が減少し、ある程度より大きくなると付着長に反比例する曲線に漸近する。その時の付着長は図 8 および図 9 上図で主筋径の 15~20 倍程度、図 9 下図で 10 倍程度であると考えられる。また、解析結果はおおむね実験結果の傾向を捉えている。これらの結果は、荷重端側からの連鎖的な破壊により、付着長が大きくなるにしたがい平均応力が減少する性状を表していると言える。

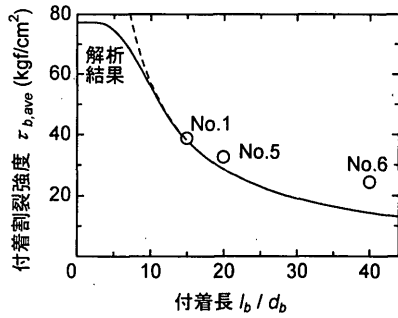


図 8 付着長と付着割裂強度の関係（角らの実験）

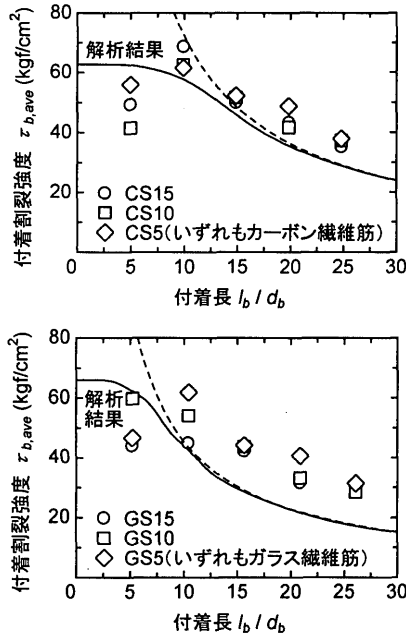


図 9 付着長と付着割裂強度の関係（筆者らの実験）

5.2 主筋ヤング係数の影響

図 9 の上下図の差異は、主筋のヤング係数の違いによる（その他の因子はほぼ等しい）。ヤング係数が小さいほど、同一の付着応力を担う区間の主筋の伸びが大きくなり、局所的なすべりが大きくなる。すなわち、ヤング係数が小さいほど連鎖的な破壊が助長される。

3.2 解析例の節で示したデータ（付着長 30cm）を使用して、主筋ヤング係数のみを変えて解析を行った結果を、図 5 と同様に図 10 に示す。両図とも最大平均付着応力時の分布を表しており、左図はヤング係数を $1.98 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ （鉄筋）、右図は $0.387 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ （ガラス繊維筋）とした場合である。最大平均付着応力（付着割裂強度）はそれぞれ 37.1、16.9 kgf/cm^2 である。ヤング係数が小さい場合（右図）、付着応力が発生している区間は短く、それにともない荷重端位置での主筋引張力も小さい。同右図の場合、左図と同様に応力を担っている区間は荷重端側 10cm 程度であり、鉄筋の場合と比較して付着応力が短い区間に分布する状態になっている。図 11 は、同データにより主筋ヤング係数を種々変化させて解析を行った例を示している。解析結果は付着長により分けてある。付着長が 2～5cm とごく短い場合（主筋径の 4 倍程度まで）ヤング係数の影響はないが、10～20cm

（同 16 倍程度まで）になると影響が顕著に現れる。部材中の挙動を模した付着割裂実験¹¹⁾では、通常、付着長は主筋径の 20～25 倍程度の値が採用されるが、付着割裂強度に関してこれと等価な付着長は、ヤング係数が $0.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合主筋径の 12 倍程度、 $1.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合 18 倍程度である。

したがって、例えば文献 3) のように主筋のヤング係数のみが異なり、付着長が同様に変動している試験体の場合、付着応力の分布という観点からみると、ヤング係数が小さいほど等価な付着長に関して広範囲なデータを扱っていることになり、付着割裂強度のばらつきが大きくなる一因となると思われる。

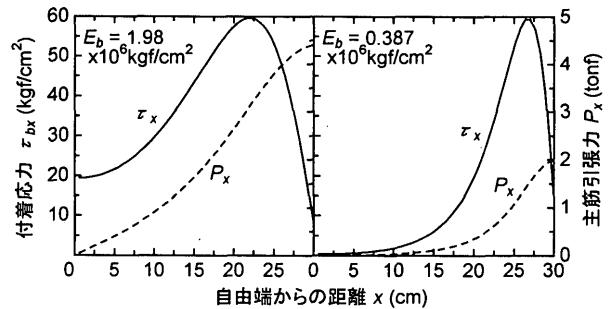


図 10 ヤング係数による付着応力・引張力分布の違い

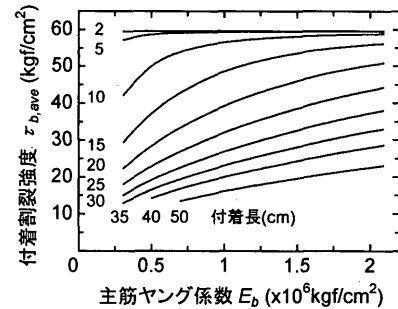


図 11 主筋ヤング係数と付着割裂強度の関係

5.3 コンクリート割裂強度の影響

既往の付着割裂強度算定式では、コンクリート強度の影響を圧縮強度を用いて表し、圧縮強度のべき乗、特に平方根の比例式で与えられているものが多い¹¹⁾。これは、経験的にはコンクリート割裂強度の比例式で表されているものと考えられる。

文献 4) の横補強のない試験体を解析した例を、図 12 に示す。横軸はコンクリート割裂強度 (σ_t) で、実線が解析結果を示

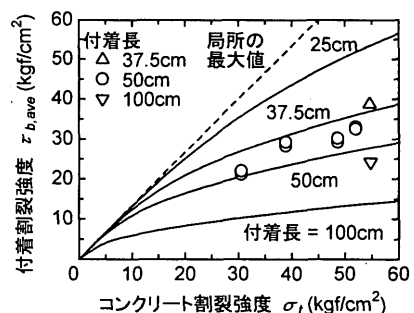


図 12 コンクリート割裂強度と付着割裂強度の関係

している。実験結果は付着長ごとに記号を変えてプロットしてある。なお、各試験体の割裂強度は(10)式によった。また、上端筋で得られた結果は同文献の補正式で下端筋に換算している。グラフ中の破線は、局所の付着応力の最大値（極値）を示しており、前報：その1で示されるようにコンクリート割裂強度に比例する。

コンクリート割裂強度が増加するにしたがって解析結果は破線から離れ減少し、その程度は付着長により異なっている。同一付着長で考えると、コンクリート割裂強度が大きいほど局所で負担する付着応力が大きくなり、局所区間の主筋引張力は増大する。したがって主筋すべり量も大きくなるため、軸方向の付着応力分布がコンクリート割裂強度が小さい場合と比べて短い区間に分布する状態になる。その結果、平均付着応力は局所付着応力の増加分ほどは大きくならない。この現象は付着長が大きくなるほど、また主筋のヤング係数が小さくなるほど顕著に現れる。

5.4 コンクリートかぶり厚（ r_u ）の影響

既往の付着割裂強度算定式の多くは、コンクリートのかぶり厚や割裂線の長さの1次式で強度を与えている¹¹⁾。本解析法ではこれを r_u で表現しており、局所の付着応力の最大値（極値）は r_u の比例式で与えられる。

文献5)の試験体の内、横補強がなくサイドスプリットで破壊した試験体の実験結果と解析結果を比較して、図13に示す。解析の対象とした試験体のコンクリート圧縮強度は227～277kgf/cm²で、主筋には異形鉄筋D19およびD25が使用されている。付着長は50cmで、D19の場合主筋径の26倍、D25の場合20倍である。なお、上端筋から得られた結果は同文献に基づき1.22倍している。グラフ横軸はサイドスプリット破壊の際の割裂線長さ b_{si} で、解析にあたっては(8)式を適用した。また、コンクリート割裂強度は(10)式によった。図中には破線で同文献の算定式（藤井・森田式）を示した（コンクリート圧縮強度は277kgf/cm²とし、結果は1.22倍している）。

解析結果も割裂線長さ b_{si} に対して1次式で表され、その勾配は実験結果および藤井・森田式とよく対応している。D19の解析結果がD25の解析結果より下回るのは、D19を用いた試験体の付着長の主筋径に対する比が、D25を用いた試験体より大きいためである。

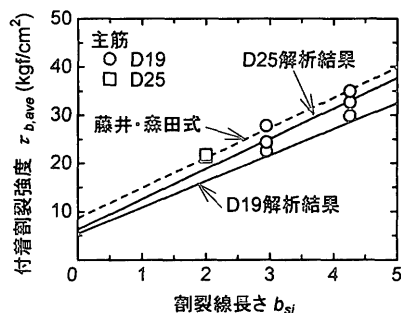


図13 割裂線長さと付着割裂強度の関係

5.5 試験体の相似比の影響

(1)式で与えられる局所の付着応力ー主筋すべり量関係は、断面が相似であれば(r_u/d_b が等しければ)全く同一のすべり量を与える。したがって主筋軸方向にも相似な試験体では、付着長の絶対値が大きい試験体ほどすべり量も大きくなる。結果として、付着応力の分布は付着長が長いほど相対的に短い区間に分布する状態になり、平均付着応力は小さくなることになる。

前節の検討で用いた文献5)の試験体の内、主筋にD25を用いた試験体、および文献8)の“簡易型”試験体の内、主筋に鉄筋を用いた試験体のデータを基に主筋径を種々変化させて解析を行った結果を図14に示す。左図が文献5)のデータで、 r_u は主筋径の1.5倍、付着長は20倍と一定にしてある。また、右図が文献8)のデータで、 r_u は主筋径の2.5倍、付着長は23倍である。破線は藤井・森田式(1.22倍)を示している。相似比を変動因子とした実験結果がないので解析結果を検証することはできないが、解析結果は主筋径（部材寸法）の影響を表しており、付着割裂強度における寸法効果が存在する可能性があることを示している。

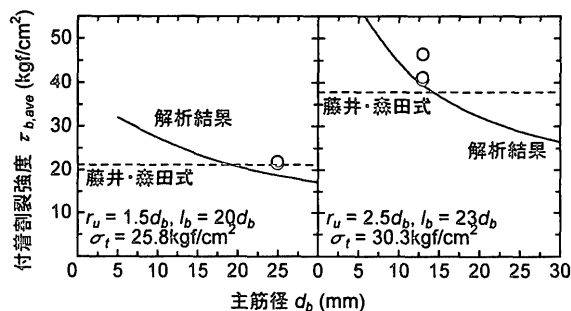


図14 相似な試験体の寸法と付着割裂強度の関係

6. まとめ

前報で定量化した局所の付着応力ー主筋すべり量関係を用いて、付着長が大きい場合の平均的な付着割裂性状を解析的に求めた。この方法により、付着長が大きい場合の荷重端側からの連鎖的な割裂破壊を表現することができる。また、付着割裂強度に関して、既往の実験データで本解析法を検証した結果、若干過小評価する傾向があるものの、比較的良好に実験値を表せることを示した。

さらに、付着長、主筋ヤング係数、コンクリート割裂強度、かぶり厚、試験体の相似比の各構造因子が平均的な付着割裂性状に与える影響を、パラメトリックな解析により把握した。これらを要約すると次のようである。

- 1) 付着長が主筋径の5倍程度までは、付着割裂強度は局所付着応力の最大値（極値）をとり、付着長が大きくなるにしたがい付着割裂強度は減少する。
- 2) 主筋ヤング係数が平均的な付着割裂性状に与える影響は大きい。ヤング係数が小さいと付着応力を担う区間の長さが小さくなり、付着割裂強度は減少する。
- 3) コンクリート割裂強度が大きくなれば付着割裂強度も増大するが、その関係は比例関係ではなく、また、付着長によりそ

の度合いは異なる。

- 4) コンクリートかぶり厚の影響は、割裂線の長さの1次式で表現できる。
- 5) 付着割裂強度に寸法効果が存在し、相似な試験体の場合、断面の絶対寸法が大きくなるほど強度が低下する可能性がある。
- 今後、前報および本報で示した考え方を横補強のある場合にも拡張し、横補強のある場合の局所付着割裂性状と平均的な性状の関連を検討していく予定である。

参考文献

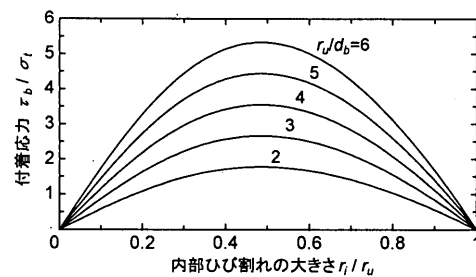
- 1) 金久保利之, 米丸啓介, 福山 洋: 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究, その1: 横補強のない場合の局所付着割裂性状, 日本建築学会構造系論文集, No. 492, pp. 99~106, 1997. 2
- 2) 金久保利之, 小島浩一, 米丸啓介, 福山 洋: 補強コンクリートの付着割裂性状における付着応力の伝播, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 597~602, 1997. 6
- 3) 米丸啓介, 金久保利之, 福山 洋: 簡易型試験体による連続繊維補強コンクリート部材の付着割裂強度の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp. 845~849, 1995. 8
- 4) 角 徹三, 張 建東, 飯塚信一, 山田 守: 高強度コンクリートレベルをも包含するRC部材の付着割裂強度算定式の提案, コンクリート工学論文集, Vol. 3, No. 1, pp. 97~108, 1992. 1
- 5) 藤井 栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第1報 付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果-, 日本建築学会論文報告集, 第319号, pp. 47~54, 1982. 9
- 6) 田中久也, 上田秀樹ほか: 高強度材料を用いたRC部材の付着性能に関する基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造II, pp. 369~370, 1991. 9
- 7) 竹内匡和, 村田達雄ほか: 高強度鉄筋・高強度コンクリートを用いたRC部材の付着性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造

II, pp. 353~356, 1989. 10

- 8) 米丸啓介, 金久保利之, 福山 洋, 園部泰寿: 連続繊維補強コンクリート部材の付着割裂強度, コンクリート工学論文集, Vol. 4, No. 2, pp. 101~109, 1993. 7
- 9) 友沢史紀, 野口貴文, 小野山貫造: 高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査, 日本建築学会大会学術講演梗概, A 材料・施工, pp. 497~498, 1990. 10
- 10) 例えば, Orangun C. O., Jirsa J. O. and Breen J. E.: A Revaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Journal, Vol. 74, pp. 114~122, 1977. 3
- 11) 例えば, 藤井 栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究-第2報 付着割裂強度算定式の提案-, 日本建築学会論文報告集, 第324号, pp. 45~52, 1983. 2

注

- 注1) 文献3)では、主筋荷重端すべり量に付着絶縁区間の主筋の伸びも含まれているため、本報では、実験結果からその値を差し引き、試験区間荷重端位置での主筋すべり量とした。
- 注2) 内部ひび割れの大きさ r_i と付着応力 τ_b の関係の例を下図に示す。詳細は前報: その1を参照。



付図1 内部ひび割れの大きさと付着応力の関係

(1997年5月1日原稿受理, 1997年11月5日採用決定)