

論文 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

金久保利之^{*1}・小島浩一^{*2}・米丸啓介^{*3}・福山 洋^{*4}

要旨：付着長が長い場合の付着割裂破壊における局所の付着性状を把握するために、付着長が主筋径の50倍である付着割裂破壊型の試験体に対して主筋引抜実験を行った。局所の付着応力-主筋すべり量関係および付着応力の最大値を検討した結果、付着長がごく短い場合に提案されている関係式が適用可能であることが明らかになった。したがって、付着長が長い場合にも局所的な破壊が荷重端側から連鎖的に起こり、付着応力が次第に伝播、推移していることが示された。

キーワード：付着割裂、局所性状、付着応力、すべり量、かぶり厚

1. はじめに

補強コンクリート部材の付着割裂性状に着目した研究は、付着長のごく短い試験体を用いて局所の付着性状を把握しようとする研究と、付着長がある程度長い部材を模した試験体を用いて平均的な付着性状を把握しようとする研究に大別される。本来、付着割裂のメカニズムは、両者とも同一のものと考えられるが、両者を体系的に関連づける研究はほとんど行われていないように思われる。この理由として、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、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]。この研究では、コンクリートの割裂によって破壊が決定される場合、局所の付着応力の最大値は、主筋周辺コンクリートを内圧を受ける中空シリンダーに見立てたモデルによって評価が可能であることが示されている。また、そのときに発生する内部ひび割れの大きさと主筋すべり量との関係を定量化することにより、付着応力-主筋すべり量関係を提案している。なお、この関係は、従来提案されてきた主筋表面位置でのボンドリンクを説明するモデルとは異なり、コンクリートが割裂する場合の周辺コンクリートの挙動をも含めたマクロ的なモデルである。

本研究では、付着長が主筋径の50倍である付着割裂型試験体を製作し、その局所の付着割裂性状と提案されている諸関係とを比較し、局所の付着応力の最大値および付着応力-主筋すべり量関係の適合性を検証することを目的としている。

2. 実験計画

試験体および加力方法の概略を図-1に示す。試験体は、中心に主筋（主筋径 d_b ）を1本配した、 $14 d_b \times 14 d_b \times 53 d_b$ の直方体で、断面各4辺にスリットを設け、付着割裂破壊を誘発するよ

*1 筑波大学構造工学系講師、工博（正会員）

*2 筑波大学大学院

*3 清水建設（株）技術研究所未来技術研究部研究員、工修

*4 建設省建築研究所国際地震工学部主任研究員、工博（正会員）

うに設計した。試験区間の付着長は $50d_b$ で、荷重端および自由端の $1.5d_b$ の区間の付着は絶縁した。加力はスリット内部のコンクリートを拘束しないように孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、主筋を単調に引抜くことにより行った。なお、加力板と試験体の間にスリットの位置で4枚に切ったテフロンシートを配し、割裂によるコンクリートの横方向への変位を拘束しないように配慮した。試験体数は6体で、実験因子は、コンクリート強度（設計圧縮強度 300、600kgf/cm²）およびコンクリートかぶり厚 ($C/d_b=1.5、2.5、3.5$) である（表-3参照）。試験体の名称と各因子の関係を図-2に示す。

計測項目は、引張荷重、自由端の主筋すべり量および主筋歪である。特に主筋歪の測定においては、局所の付着性状を正確に得るために、鉄筋の縦リブの位置に深さ3mm、幅4mmの溝を切り、溝内に主筋径の4倍の間隔で歪ゲージを添付し、詳細な測定を行った。

主筋には異形鉄筋 D16 (SD490) を、コンクリートには最大径 20mm の砕石を用いた、設計強度 300 および 600kgf/cm² の普通コンクリートを使用した。材料の力学的性質を表-1に示す。

3. 予備実験

本実験を実施するにあたり、文献 [1] で提案されている付着応力-主筋すべり量関係（詳細は 4.1 節で後述）が、圧縮強度 600kgf/cm² クラスのコンクリートを使用した場合にも適応可能であるかどうか、予備実験を行った。試験体形状、加力方法は文献 [1] と全く同一であり、使用材料（主筋 D16、コンクリート 600kgf/cm²）は表-1に示されているものである。かぶり厚 (C/d_b) が 1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 のそれぞれについて試験体を3体ずつ製作し、計15体について加力を行った。

破壊は、すべての試験体において、スリット位置のコンクリートが分断される付着割裂破壊であった。各試験体の付着応力-荷重端主筋すべり量の関係を図-3に示す。なお、付着応力は主筋引張荷重を主筋付着領域表面積で除した値であり、破線は文献 [1] による計算値（後述(1)式）を

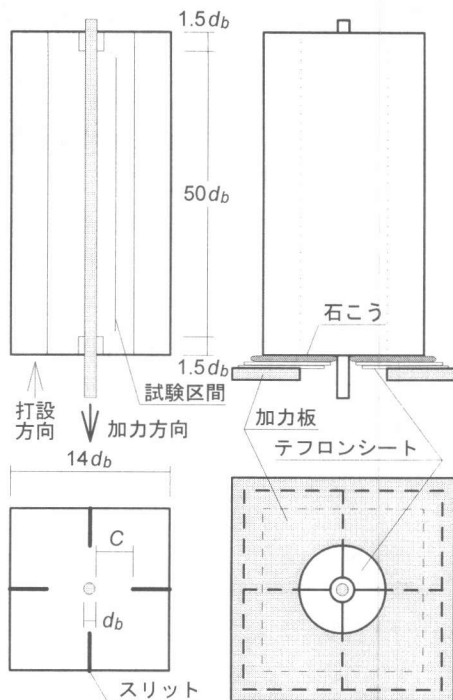


図-1 試験体および加力方法概略

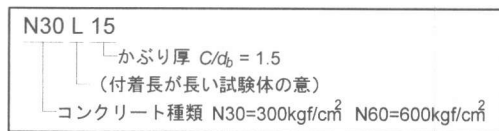


図-2 試験体名称

表-1 材料の力学的性質

コンクリート種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
普通 300kgf/cm ²	289	25.1	2.11×10^5
普通 600kgf/cm ²	572	37.4	2.97×10^5
主筋	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D16 (SD490)	5630	7260	1.94×10^6

示している。各試験体の付着応力の最大値の一覧を表-2に示す。計算値は文献 [1]による最大付着応力(後述(2)式)である。図-3および表-2より、圧縮強度が600kgf/cm²クラスのコンクリートを使用した場合にも、文献[1]で提案されている付着応力-主筋すべり量関係が適応可能であると考えられる。

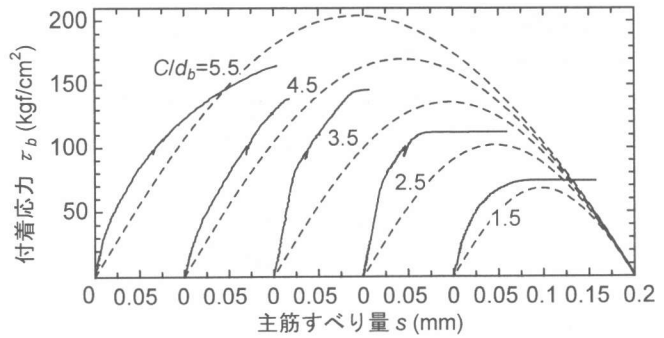


図-3 付着応力-主筋すべり量関係(予備実験)

4. 実験結果の概要

実験結果の概要(最大荷重、破壊経過)を表-3に示す。各試験体とも、順次荷重端側からスリット位置における軸方向のひび割れ、主筋の降伏が観察され、最終的にコンクリートの割裂によりスリット位置で試験体が分断されて破壊に至った。主筋表面に位置したコンクリートは、荷重端近傍ではある程度粉砕化が確認されたが、その他の部分ではほとんど損傷を受けていなかった。

表-2 付着応力最大値(各3体の平均)

C/d_b	実験値 (kgf/cm ²)	計算値 (kgf/cm ²)	実験値 / 計算値
1.5	72.4	68.0	1.06
2.5	119.5	102.0	1.17
3.5	157.0	136.0	1.15
4.5	142.0	170.0	0.84
5.5	169.9	204.1	0.83

表-3 実験結果一覧

試験体	C/d_b	コンクリート	最大荷重 (tonf)	破壊経過	試験体	C/d_b	コンクリート	最大荷重 (tonf)	破壊経過
N30L15	1.5	割裂強度	11.76	主筋降伏後付着割裂	N60L15	1.5	割裂強度	11.49	主筋降伏後付着割裂
N30L25	2.5	25.1	12.07		N60L25	2.5	37.4	13.27	
N30L35	3.5	kgf/cm ²	12.71		N60L35	3.5	kgf/cm ²	12.85	

N30L25 試験体について、測定ステップ20毎の主筋軸方向歪分布を、図-4に示す。横軸はグラフ下の歪ゲージ添付位置と対応しており、左方向が荷重端、右方向が自由端である。主筋歪が荷重端側から次第に増加していく傾向が伺えるが、その勾配は同一ステップ時の分布においても一様ではなく、付着応力を担っている区間が荷重端側から推移していく様子が見られる。

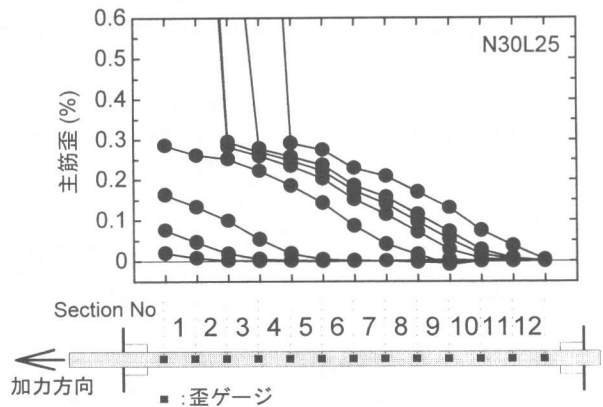


図-4 主筋歪分布例

4. 実験結果の検討

4.1 局所の付着応力-主筋すべり量関係の既提案式

文献 [1]では、付着割裂する場合の局所の付着応力-主筋すべり量関係を表す関係式として、(1)式が提案されている。また、(1)式の最大値は(2)式で与えられる。

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

$$\tau_{bu} = 0.601 \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha \quad (2)$$

- ここで、 τ_b : 付着応力
 τ_{bu} : 付着応力の最大値 (付着割裂強度)
 σ_t : コンクリート割裂強度
 β : すべり量と内部ひび割れの大きさの関係を表す定数 (= 10.2 [1/mm])
 s : 主筋すべり量
 r_u : 主筋中心からスリットまでの距離 (= $c + d_b / 2$)
 d_b : 主筋径
 α : 主筋が周辺コンクリートに与える力と主筋軸方向のなす角度 (= 34°)

4.2 局所の付着応力-主筋すべり量関係

図-4に示される主筋各セクションについて、歪ゲージの値よりその区間の局所付着応力および主筋すべり量を算出した。歪値から主筋応力を算出する際には、鉄筋の応力-歪関係は完全弾塑性を仮定し、主筋すべり量は、自由端すべり量に、自由端から当該区間までの主筋伸び量の和を加えることにより求めた。圧縮強度 300kgf/cm²クラスのコンクリートを用いた N30L シリーズの試験体について、各区間の付着応力-主筋すべり量関係を、図-5に示す。グラフは各4つのセクションずつにまとめて示しており、太線は(1)式による計算値を示している。なお、縦軸はコンクリート割裂強度 σ_t で、横軸は主筋中心からスリットまでの距離 r_u で無次元化している。

同図を見ると、最大応力以降の負勾配が実験ではあまり小さくならない傾向があるが、コンクリートの割裂という極めてばらつきの大きい現象において、実験結果と計算値は比較的对応していると考えられる。最大耐力以降の負勾配に関しては、付着長が長い本実験のような試験体の

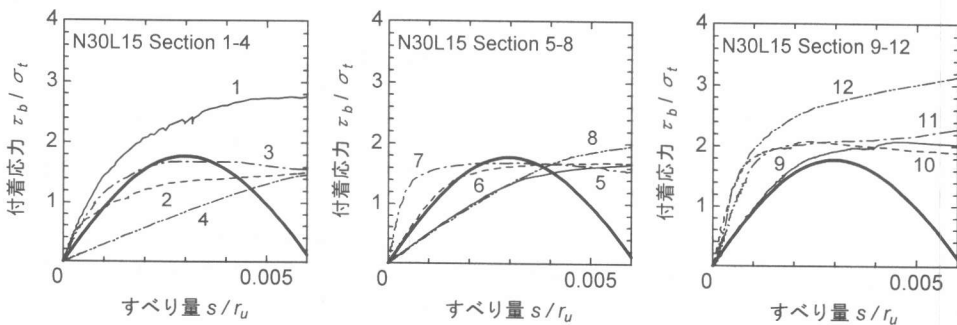
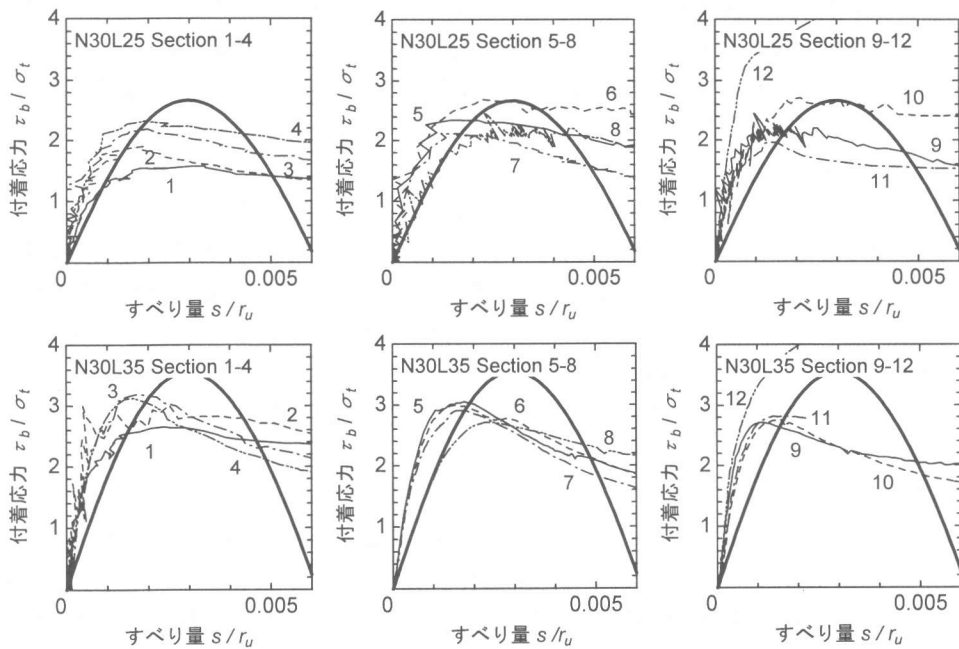


図-5 局所付着応力-主筋すべり量関係



図－5 局所付着応力－主筋すべり量関係（続き）

場合、コンクリートの割裂ひび割れが貫通した後もかぶりコンクリートが剥落せず、主筋節との機械的噛み合いがまだ期待できるため、急激な付着応力の低下につながらないと思われる。しかし、通常の部材（横補強のない場合）では、割裂ひび割れが貫通すればかぶりコンクリートを拘束するものではなく、付着応力の低下をとまなうものと思われる。

4.3 局所の付着割裂強度の検討

図－4で求めた各試験体の局所付着応力の最大値および各試験体の平均値の一覧を、表－4に

表－4 局所付着応力の最大値（単位：kgf/cm²）

Section No.	N30L15	N30L25	N30L35	N60L15	N60L25	N60L35
1	71.7	42.5	66.6	63.7	99.1	140.8
2	41.7	47.6	75.7	71.9	86.5	124.9
3	42.4	55.0	80.2	59.4	89.9	123.7
4	42.4	59.1	78.4	81.0	78.9	283.2
5	42.4	59.0	76.7	47.2	78.9	215.8
6	42.4	67.4	75.2	78.2	67.4	76.4
7	42.4	53.1	73.1	47.6	67.4	76.4
8	52.1	61.5	68.1	44.1	120.9	111.1
9	52.1	61.5	68.1	45.5	121.4	89.3
10	52.1	68.1	69.2	44.6	66.2	89.3
11	64.0	49.4	84.5	55.9	163.9	127.7
12	84.1	110.0	110.2	88.6	27.4*	111.6
平均	52.5	61.2	77.2	60.6	94.6	130.8
計算値	45.6	68.5	91.3	68.0	102.0	136.0
平均/計算値	1.15	0.89	0.85	0.89	0.93	0.96

*：局所付着応力－主筋すべり量関係において、明らかに最大値に達していないデータで、平均値から除いた

示す。同表には(2)式による計算値およびその比較値も示した。なお、この平均値とは、引張荷重を主筋付着表面積で除した平均付着応力とは全く異なるものである。同表を見ると、各区間のばらつきは大きいものの、平均値は計算値とよい対応を示しており、付着長が長い場合も局所の付着割裂強度として(2)式を適用させることができると考えられる。なお、全試験体での比較値の平均値は0.95である。

本節の結果より、付着長が長い場合でもその局所付着割裂性状は付着長のごく短い試験体と同一のものであると思われる。本実験の試験体の、いわゆる平均付着強度（引張荷重を主筋表面積で除した値）は 26kgf/cm^2 （主筋降伏時）で、この値は局所応力の最大値の0.6～0.2倍程度である。すなわち、付着長が長い場合には、局所的な破壊が荷重端側から連鎖的に起こり、付着応力が次第に伝播、推移しているものと考えられる。なお、付着応力ー主筋すべり量関係における最大応力以降の曲線形状に関しては、更なるデータの蓄積が必要であると考えている。

5. 結論

筆者らの提案している、コンクリートが付着割裂する場合の局所の付着応力ー主筋すべり量関係およびその最大値は、付着長が長い試験体に対しても比較的良好に対応した。これは、付着長が長い場合に局所連鎖的な破壊が起こっていることを示しており、局所の付着応力ー主筋すべり量関係を用いて、付着長が長い場合に起こる付着応力の伝播、推移の定量的な評価が可能であることを示唆している。

謝辞

試験体の製作には人工軽量骨材協会、株木建設（株）にご協力をいただきました。

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、第492号、pp.99～106、1997.2