

論文 補強コンクリートの局所付着割裂性状

金久保利之^{*1}・米丸啓介^{*2}・福山 洋^{*3}

要旨：主筋の径、ヤング係数、かぶり厚さ、コンクリート種類が補強コンクリートの付着割裂性状に及ぼす影響を把握するために、付着長のごく短い、割裂が誘発されるような試験体への加力実験を行った。局所の付着割裂強度は、主筋の性質に関係なくコンクリートの性質にのみ支配され、その強度は主筋中心からスリットまでの距離と主筋径の比 (r_u/d_b) およびコンクリート割裂強度 (σ_t) で評価でき、最大荷重時の主筋の荷重端すべり量も、 r_u/d_b の増加にともない大きくなる傾向があることが明らかになった。

キーワード：付着割裂、局所性状、すべり量、かぶり厚、主筋径、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は、主筋のふしの形、高さ、間隔等の表面形状をはじめ、主筋の配置位置、本数、コンクリートの性質、さらには横補強筋の量、配筋方法、降伏強度等の様々な構造因子が影響している。付着割裂性状を論ずるにあたっては、横補強がない場合の局所の付着応力、割裂応力とすべりの性状が最も重要であると考えられ、これに焦点をあてた研究も数多く挙げられる[1]。本研究では、局所の付着割裂のメカニズムの解明に資するよう、さらに主筋やコンクリートの種類をも検討因子としたデータの蓄積を行うことを目的とし、付着長の短い、割裂が誘発されるような新たに設計された試験体を用いて、付着割裂実験を行った。

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、 $14d_b \times 14d_b \times 7d_b$ の直方体で、各辺に1枚ずつスリットを設け、付着割裂破壊を誘発するように設計した。試験区間の付着長は $4d_b$ で、上下 $1.5d_b$ 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

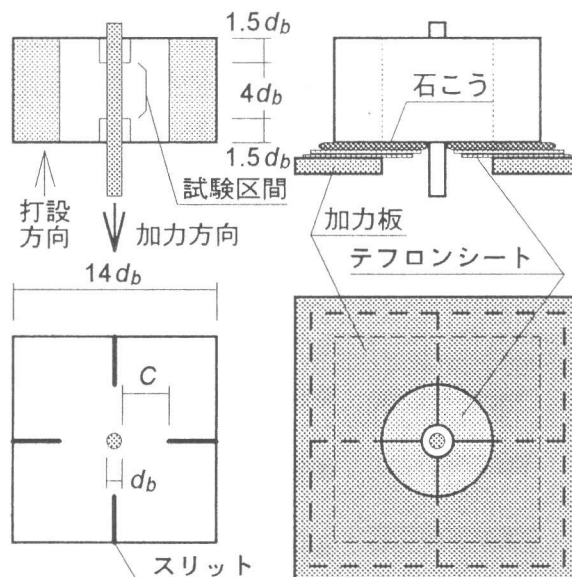


図-1 試験体および加力方法概略

N - SD13 - 35 (1)	
主筋名称	同一因子試験体間の No
コンクリート種類	かぶり厚 $C/d_b=3.5$
N=普通 L1=軽量1種 L2=軽量2種	

図-2 試験体名称

*1 筑波大学講師 構造工学系、工博（正会員）

*2 清水建設（株）技術研究所未来技術研究部研究員、工修

*3 建設省建築研究所第三研究部主任研究員、工博（正会員）

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。実験因子は、主筋種類（後述）、コンクリート種類（普通、軽量1種および2種）およびコンクリートかぶり厚（ $C/d_b = 1.5 \sim 5.5$ の5段階）とした。これらの因子の組み合わせで32通りの試験体を計画し（表-3参照）、同一試験体を各々3体ずつ製作、計96体の加力を行った。試験体の名称と各因子の関係を図-2に示す。計測項目は、引張荷重および自由端の主筋すべり量である。

主筋には、異形鉄筋D13、D16、D19、D25、公称径16mmの螺旋巻きカーボンおよびガラス繊維筋、組紐状アラミド繊維筋を用いた。カーボン繊維筋においては、螺旋部分に同種のカーボンまたはガラス繊維を巻き付けた2種類の補強筋を使用した。本実験に用いた補強筋を写真-1に、力学的性質を表-1に示す。コンクリートには、最大径20mmの碎石および人工軽量骨材（アサノライト）を用い、設計強度は 360 kgf/cm^2 とした。コンクリートの力学的性質を表-2に示す。

表-1 補強筋の力学的性質

種類	名称	断面積 a_b^{*1} (cm^2)	平均径 d_b^{*2} (cm)	周長 ϕ_b^{*2} (cm)	ふし間 隔比 s/d_b (%)	ふし高 さ比 h/d_b^{*3} (%)	引張強さ σ_b (kgf/cm^2)	ヤング係数 $E_b \times 10^6$ (kgf/cm^2)
異形鉄筋	SD13	1.231	1.25	3.93	67.7	6.6	7480	1.86
	SD16	1.920	1.56	4.91	68.3	8.6	7260	1.89
	SD19	2.772	1.88	5.90	67.8	7.3	5850	1.92
	SD25	4.996	2.52	7.92	67.2	7.7	5700	2.01
螺旋巻カーボン (ガラス巻)	CS16	2.659	1.84	5.78	50.1	10.6	8440	0.892
	CS16G	2.663	1.84	5.78	54.6	12.9	10600	0.768
螺旋巻ガラス	GS16	2.842	1.90	5.98	56.0	11.4	6370	0.310
組紐状アラミド	AB16	1.786	1.51	4.74	—	11.3	14290	0.657

*1：試験片の体積を実測し、長さで除して求めた。*2：断面を円と仮定し、 a_b より求めた。
*3：径の最小値と最大値を実測し、その差の1/2を h とした。

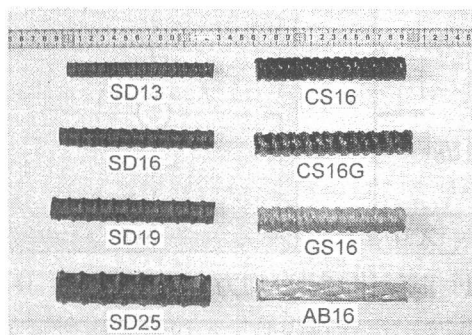


写真-1 使用した補強筋

表-2 コンクリートの力学的性質

種類	圧縮強度 σ_B (kgf/cm^2)	割裂強度 σ_t (kgf/cm^2)	ヤング係数 $E_c \times 10^5$ (kgf/cm^2)
普通 (SD13, 繊維)	371	28.9	2.45
普通 (SD16, 19, 25)	350	24.1	2.51
軽量1種	423	28.2	1.83
軽量2種	398	27.6	1.45

3. 実験結果の概要

試験体 N-CS16G-35(3)を除くすべての試験体は、スリットを通る位置でコンクリートの割裂を呈し、2つから4つに試験体が分割され破壊した。破壊後試験体を観察すると、主筋との境界面のコンクリートはほとんど損傷を受けておらず、コンクリートの割裂のみによって破壊が決定されたと考えられる。

表- 3に、各試験体の最大付着応力、最大荷重時の自由端および荷重端の主筋すべり量の実験値を示す。なお、各値は同一因子を持つ3体の試験体の平均値であり、()内の数字が変動係数(%)を示している。また、付着応力は引張荷重を試験区間の主筋表面積で除した値とし、荷重端のすべり量は、試験区間における付着応力の分布を一定と仮定してこの区間での主筋の伸び量を計算し、自由端位置でのすべり量実測値に伸び量を足し合わせた値とした。図- 3に、付着応力(τ)と主筋の荷重端位置でのすべり量(s)の関係の例を示す。各曲線は、3体の試験体の内、

表- 3 実験結果一覧

試験体	最大荷重時（変動係数：％）			試験体	最大荷重時（変動係数：％）		
	付着応力 (kgf/cm ²)	主筋すべり量 (mm)			付着応力 (kgf/cm ²)	主筋すべり量 (mm)	
		自由端	荷重端			自由端	荷重端
N-SD13-25	85.6 (8)	0.087 (23)	0.106 (20)	N-CS16-25	60.2 (11)	0.134 (53)	0.190 (18)
35	111.3 (8)	0.174 (23)	0.200 (21)	35	85.4 (21)	0.109 (62)	0.152 (50)
45	129.2 (6)	0.289 (32)	0.319 (29)	45	93.5 (15)	0.159 (26)	0.206 (23)
N-SD16-15	59.8 (8)	0.146 (16)	0.163 (15)	N-GS16-25	66.8 (9)	0.077 (69)	0.169 (35)
25	68.5 (6)	0.086 (59)	0.105 (49)	35	91.8 (8)	0.045 (84)	0.172 (26)
35	87.4 (15)	0.084 (52)	0.108 (43)	45	89.4 (4)	0.034 (72)	0.159 (17)
45	94.9 (6)	0.094 (33)	0.120 (27)	L1-SD16-15	38.6 (21)	0.099 (28)	0.109 (26)
55	119.2 (3)	0.304 (19)	0.337 (18)	25	54.8 (19)	0.067 (28)	0.082 (26)
N-SD19-25	76.2 (18)	0.080 (51)	0.104 (44)	35	64.9 (24)	0.090 (55)	0.108 (50)
35	86.6 (17)	0.168 (23)	0.196 (22)	45	86.7 (13)	0.068 (15)	0.092 (8)
45	97.0 (12)	0.119 (29)	0.150 (26)	55	110.5 (6)	0.145 (14)	0.175 (12)
N-SD25-25	64.2 (12)	0.132 (45)	0.157 (38)	L2-SD16-15	44.1 (19)	0.158 (20)	0.170 (19)
35	71.9 (17)	0.154 (53)	0.182 (48)	25	55.9 (17)	0.031 (31)	0.046 (24)
45	80.3 (7)	0.134 (82)	0.166 (66)	35	81.5 (6)	0.057 (4)	0.080 (2)
N-CS16G-35	78.9 (22)	0.093 (8)	0.139 (8)	45	81.3 (3)	0.092 (17)	0.114 (14)
N-AB16-35	85.8 (4)	1.342 (5)	1.411 (5)	55	85.0 (4)	0.110 (25)	0.133 (21)

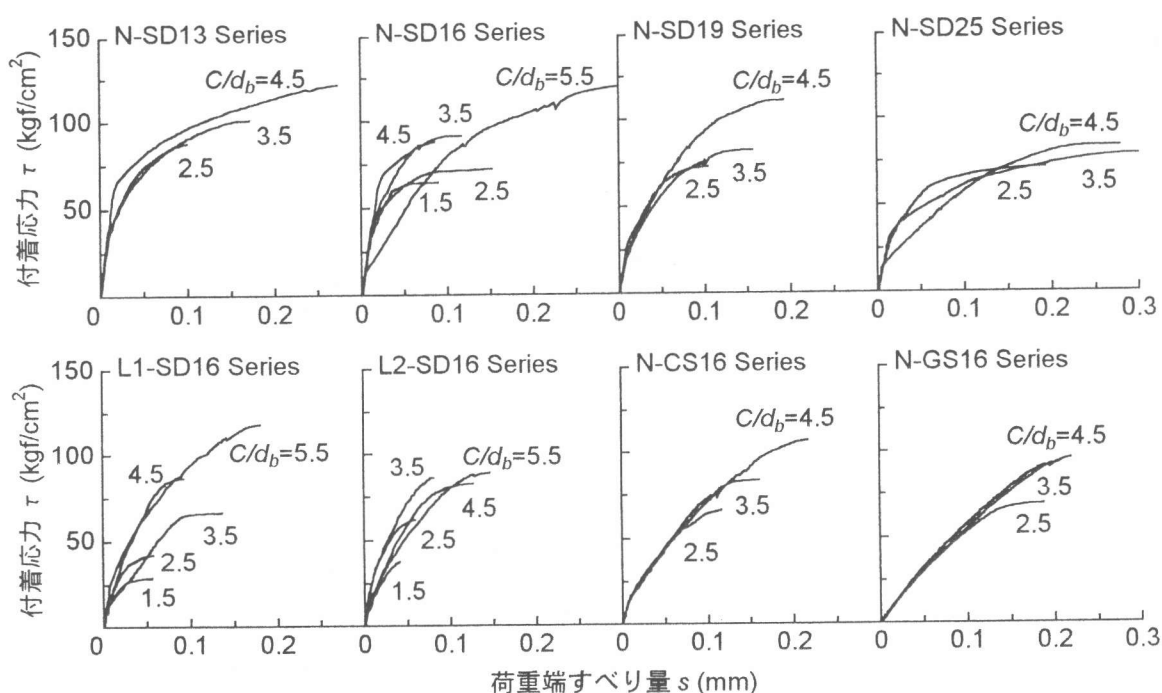


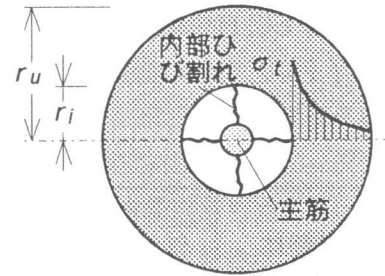
図- 3 付着応力(τ) - 主筋すべり量(s)関係

最大付着応力が平均値に近い 1 体を示している。同図より、かぶり厚が大きくなるほど付着強度および主筋すべり量が大きくなることが伺えるが、曲線の形状自体には各試験体間で大きな差はないと考えられる。

4. 実験結果の検討

4.1 付着割裂強度の検討

Tepfers [2]は、主筋周囲のコンクリートに生じる応力状態を、図－4のように内圧を受ける中空厚肉シリンダーにモデル化し、円周方向の応力がコンクリートの割裂強度に達したときに内部の割裂ひび割れが発生すると考え、その最大の割裂応力が生じるときの付着応力として次式を得ている。



図－4 割裂時の応力状態

$$\tau_{bu} = (\sqrt{5} - 1) \cdot \sqrt{\sqrt{5} - 2} \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha = 0.6006 \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha \quad (1)$$

ここで、 τ_{bu} : 付着割裂強度

σ_t : コンクリート割裂強度

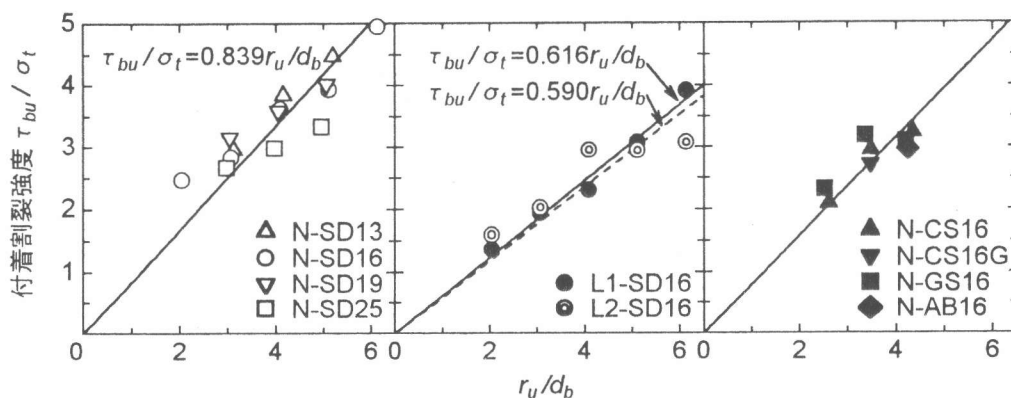
r_u : シリンダーの外半径

d_b : 主筋径

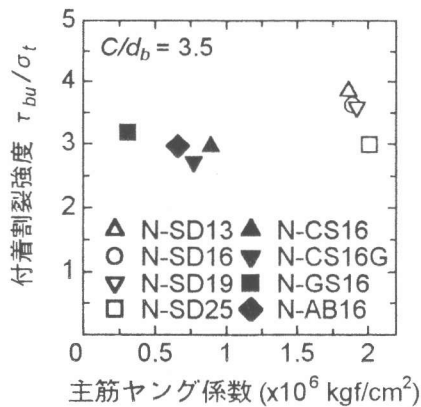
α : 主筋が周辺コンクリートに与える力と主筋軸方向のなす角度

本研究で用いた試験体では、シリンダーの外半径 r_u は主筋中心からスリットまでの距離 ($= C + d_b/2$) に相当すると考えられる。

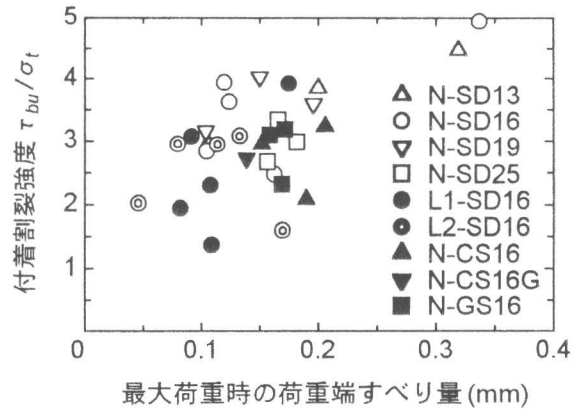
図－5に、本実験で得られた付着割裂強度 (τ_{bu}) と r_u の関係を示す。なお、 τ_{bu} はコンクリート割裂強度 σ_t で、 r_u は主筋径 d_b で無次元化している。また、各々のデータは各3体ずつの試験体の平均値である。同図より、付着割裂強度は、主筋径、主筋素材、コンクリート種類に関係なく、(1)式で表せられるように r_u/d_b に比例すると考えられる。ただし、軽量コンクリート試験体の強度は同一因子を持つ普通コンクリート試験体 (N-SD16 シリーズ) と比較して、軽量1種で0.73倍、2種で0.70倍となっている。図－6に、普通コンクリートを用い、 C/d_b が3.5の試験体の付着割裂強度と主筋のヤング係数の関係を示す。主筋に用いた補強筋の主な違いはヤング係数である



図－5 付着割裂強度と r_u の関係



図－ 6 主筋ヤング係数と強度の関係

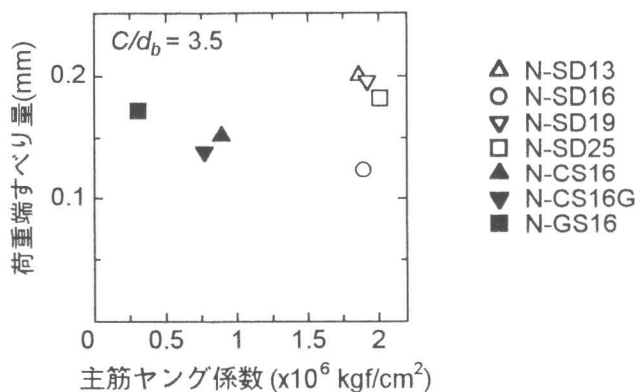


図－ 7 付着割裂強度とすべり量の関係

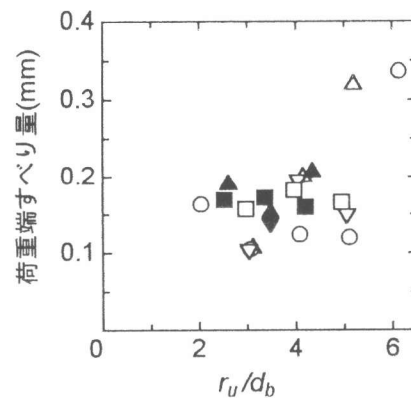
が、ヤング係数と付着割裂強度には明確な関係が認められない。以上より局所の付着割裂強度は、主筋の表面形状が一般的な範囲であれば主筋の性質に関係なくコンクリートの性質にのみ支配され、その強度は r_u/d_b で評価できると考えられる。

4.2 最大荷重時の主筋すべり量の検討

本実験の試験体で得られた付着割裂強度 (τ_{bu}) と最大荷重時 (付着割裂強度時) の主筋の荷重端すべり量の関係を、図-7に示す。なお、 τ_{bu} はコンクリート割裂強度 σ_t で無次元化しており、各々のデータは各3体ずつの試験体の平均値である。また、荷重端すべり量は図-3と同様に算出している。なお、N-AB16 試験体 (普通コンクリートで組紐状アラミド繊維筋を用いた試験体) の最大荷重時のすべり量は 1.411mm (表-3参照) で、付着抵抗のメカニズムが他の補強筋とは大きく異なることが考えられ、本節の検討では除くこととする。ばらつきは大きいものの、概して最大荷重 (付着割裂強度) が大きいほどそのときの主筋すべり量も大きく、主筋種類の違いによる差は見られない。図-8に、普通コンクリートを用い、 C/d_b が 3.5 の試験体の最大荷重時の荷重端主筋すべり量と主筋のヤング係数の関係を示す。同図より、荷重端すべり量は 0.1~0.2mm で、ヤング係数とに明確な相関は見られない。したがって、前節の検討とあわせて、最大荷重時の主筋すべり量も主筋ヤング係数に関係なく、 r_u/d_b で評価が可能であることが予想される。図-9に、最大荷重時の荷重端主筋すべり量と r_u/d_b の関係を示す。同図より、最大荷重時のすべり量は主筋



図－ 8 すべり量とヤング係数の関係



図－ 9 すべり量と r_u/d_b の関係

径に関係なく、 r_u/d_b が大きくなると同程度に増加する傾向を示すことがわかる。このことは、付着割裂時の主筋すべりは、割裂線の長さや主筋の絶対寸法に関係なく、唯一定まる量であることを示唆している。

5. 結論

- 1) 本実験で使用した試験体および加力方法によって、局所の付着割裂性状を把握することが可能である。
- 2) 局所の付着割裂強度は、主筋の表面形状が一般的な範囲であれば、主筋の性質に関係なくコンクリートの性質にのみ支配され、その強度は主筋中心からスリットまでの距離と主筋径の比 (r_u/d_b) およびコンクリート割裂強度 (σ_t) で評価できる。なお、軽量コンクリート1種および2種の付着割裂強度は、普通コンクリートのそれぞれ0.73倍、0.70倍であった。
- 3) 最大荷重時の主筋の荷重端すべり量は、主筋のヤング係数および主筋径に関係なく、 r_u/d_b が大きくなると増加する傾向を示す。

謝辞

アラミド繊維筋は三井建設(株)からご提供を受け、試験体の製作には人工軽量骨材協会にご協力をいただきました。また、実験の実施にあたっては筑波大学卒論生小島浩一君に協力いただきました。なお、本研究は文部省科学研究補助金(奨励研究(A)課題番号 07750651) および平成7年度筑波大学学内プロジェクト(コンクリート補強筋の局所付着割裂性状)によっています。

参考文献

- [1] 例えば、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、C 構造Ⅱ、pp.747～748、1986.8
- [2] R. Tepfers : Lapped Tensile Reinforcement Splices, ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 108, No. ST1, pp.283～301, Jan. 1982