

# 論文 割裂破壊時の局部付着応力一すべり関係に関する実験的研究

長友 克寛<sup>\*1</sup>・角 徹三<sup>\*2</sup>・藤井 栄<sup>\*3</sup>・松原 三郎<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、著者等が試作した簡易型試験体を用い、サイドスプリット型付着破壊時における異形鉄筋の局部付着特性について検討したものである。主な実験変数は、鉄筋径、定着長、コンクリート強度、および横補強筋比の4つである。

実験結果より、まず、簡易型試験体から得られる付着特性がカンティレバー型試験体等の従来型の試験体から得られるものとほぼ同等であることを確認した。次に、サイドスプリット型付着破壊時においても、載荷端近傍での付着劣化域を除けば、場所に無関係な局部付着応力一すべり関係モデルが構築可能であることを示した。

**キーワード**：付着割裂破壊、付着応力、すべり、異形鉄筋、付着試験体

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）部材の脆性的な破壊形式の一つに付着割裂破壊がある。近年、この破壊形式に対して数多くの研究が実施され、付着割裂強度の算定式<sup>1), 2)</sup>、さらにはその算定式に基づくRC部材の終局強度設計法や韌性設計法が提案されるに至っている。

しかし、付着割裂強度には多くの影響因子が複雑に関与し合うため、未だ評価の不十分な因子も多い。その定量化には多くのパラメータ試験を実施する必要があるが、従来のはり型試験体やカンティレバー型試験体を用いた場合、その実施には多大な労力を要する。そこで、著者等<sup>3)</sup>は、この解決策としてSchmidt - Thrö<sup>4)</sup>等の試験体を横補強筋の効果が取り扱えるように改良した簡易型付着試験体を提案し、その適用性について考察してきた。

本研究の第1の目的は、鉄筋径、定着長、コンクリート強度、および横補強筋比の主要影響因子が変化した場合について、この簡易型試験体の適用性をさらに検証することにある。

一方、現時点では使用されている付着割裂強度

算定式は高い評価精度をもってはいるが、実際の破壊メカニズムに忠実に基づいているものであるとはいえない。この状況を開拓するための一つの方策として、従来のように鉄筋の定着域における平均的な付着挙動を対象とするのではなく、局部的な付着特性を重ね合わせることにより全体挙動を再現する方法が考えられる。

これまでに局部的な付着特性を取り上げた研究は数多く報告されているが、その大半は鉄筋周囲のコンクリートの拘束が大きい場合を対象としたものである。付着割裂破壊を取り扱った研究も幾つかあるが、予めひび割れ形式を明確に想定したものはその数が限定される<sup>1), 5), 6)</sup>。

本研究の第2の目的は、サイドスプリット型の付着破壊時における局部付着応力一すべり関係を実験的に求めると共に、そのモデル化の可能性を探ることにある。もしこの関係がモデル化できれば、例えばせん断引張破壊を生ずるRCはりの挙動解析等への適用も期待される。

## 2. 実験概要

表-1は、実験概要を示す。実験変数は、鉄

\*1 高松工業高等専門学校 建設環境工学科

博士（工学）（正会員）

\*2 豊橋技術科学大学 工学部 建設工学系

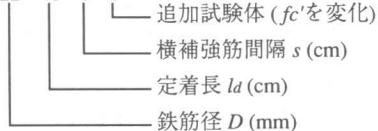
工博（正会員）

\*3 京都大学大学院 環境地球工学専攻 博士（工学）（正会員）

\*4 高松工業高等専門学校 建設環境工学科

表-1 実験概要

No.	試験体名 <sup>*1</sup>	主鉄筋	横補強筋間隔 <i>s</i> (mm) (横補強筋比 <i>p<sub>w</sub></i> (%))	試験体幅 <i>b</i> (mm) ( <i>b<sub>i</sub></i> ) <sup>*2</sup>	定着長 <i>l<sub>d</sub></i> (mm) ( <i>l<sub>d</sub>/d<sub>b</sub></i> )	コンクリート強度 (MPa)		平均付着割裂強度 (MPa)	強度比 $\frac{\tau_{uexp.}}{\tau_{ucal.}}$
						圧縮 <i>f<sub>c'</sub></i>	引張 <i>f<sub>t</sub></i>		
1	S22-40-0	2-D22	0 (0)	180 (3.05)	400 (18.0)	31.7	3.35	2.039	2.249
2	S22-40-10		100 (0.352)					2.887	2.875
3	S22-40-5		50 (0.703)					3.342	3.501
4	S22-40-0-1		0 (0)			37.9	3.41	2.973	2.456
5	S19-25-0	2-D19	0 (0)	160 (3.19)	250 (13.1) 350 (18.3) 450 (23.6) 120 (0.330) 60 (0.659)	30.9	2.60	2.403	2.226
6	S19-35-0							2.207	2.266
7	S19-45-0							2.022	2.266
8	S19-35-12							2.525	2.865
9	S19-35-6							2.833	3.464
10	S25-45-0	2-D25	0 (0) 90 (0.352) 45 (0.703)	200 (2.94)	450 (17.7)	35.5	2.61	2.578	2.334
11	S25-45-9							2.707	2.978
12	S25-45-4.5							3.769	3.622

<sup>\*1</sup> S22-40-0-1

$$*2 b_i = \frac{b}{2 \cdot d_b} - I^{1)}$$

<sup>1)</sup> 藤井式を使用

筋径 *d<sub>b</sub>* (D19, D22, D25), 定着長 *l<sub>d</sub>* (基本とした定着長=約 18 *d<sub>b</sub>*), 横補強筋比 *p<sub>w</sub>* (0%, 約 0.35%, 約 0.70%), およびコンクリート圧縮強度 *f<sub>c'</sub>* の 4 つである。

図-1 は、試験体の形状・寸法の一例を示す。この試験体は、主鉄筋が 2 本配置でき、横補強筋の効果が検討出来るものとして、既往の研究において著者等<sup>3)</sup>が提案したものである。試験体の中央部には長さ 50 mm のスリットを設け、かつ載荷端側の供試筋の付着はパイプを用いて断っている。これにより、引抜力の反力はスリットを迂回して供試筋に伝達され、RC はり定着部に似た応力の流れが実現できる。試験体側面には、供試筋軸に沿って深さ 6 mm のノッチを入れ、水平な割裂ひび割れを誘導した。

なお、試験体の寸法に関して、表-1 中の試

表-2 使用鉄筋の性質

鋼材	鉄筋径 <i>d<sub>b</sub></i> (mm)	弾性係数 <i>E<sub>s</sub></i> (GPa)	降伏強度 <i>f<sub>y</sub></i> (MPa)
主鉄筋	19.1	185	382
	22.2	182	369
	25.4	192	379
横補強筋	6.35	189	404

験体 No.1~3 については高さを 250 mm とし、その実験結果に基づき、残りの試験体 No.4~12 では供試筋下側のコンクリート部分を長くし、図-1 に示したように高さを 300 mm とした。

供試筋には市販の直角横筋鉄筋を用いた。その 2 本の縦リブ位置には幅 6 mm, 深さ 5 mm の溝を切削し、載荷端近傍域では 25 mm, それよりも内部では 50 mm 間隔で歪ゲージを貼付した。表-2 は、使用鉄筋の材料特性を示す。

載荷は、中空油圧ジャッキを用いて行い、試験体が破壊するまで単調に荷重を増加させた。

### 3. 試験体の全体挙動

#### 3.1 破壊性状

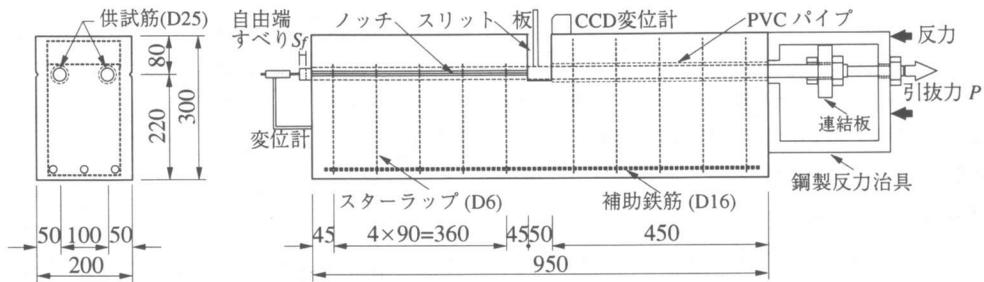


図-1 試験体の形状・寸法の一例 (単位mm)  
(試験体 S25 - 45 - 9 の場合)

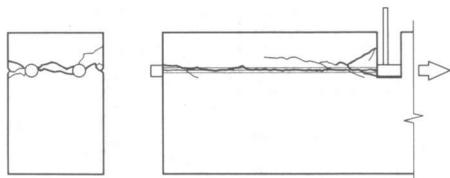


図-2 破壊時のひび割れ状況の一例  
(試験体 S25 - 45 - 9 の場合)

図-2は、試験体の破壊時におけるひび割れ状況の一例を示す。全ての試験体において想定通り供試筋を貫通するサイドスプリット型の付着破壊を生じた。載荷端（スリット位置）近傍においては、V字型ひび割れも観察された。

### 3.2 付着割裂強度

図-3は、平均付着割裂強度の実験値  $\tau_{uexp.}$  と藤井式<sup>1)</sup>による算定値  $\tau_{ucal.}$  との比較を示す。両者の比  $\tau_{uexp.} / \tau_{ucal.}$  は、平均値が  $m = 0.98$ 、標準偏差が  $\sigma = 0.11$  であり、良い一致をみている。このことは、付着割裂強度の評価に関して簡易型試験体がカンティレバー型試験体等の代わりに使用可能であることを示している。

### 3.3 供試筋引張応力 $\sigma_s$ 分布

引抜力  $P$  の増加に伴う部材軸  $x$  に沿った供試筋の引張応力  $\sigma_s$  の分布は、横補強筋比  $p_w = 0\%$  の場合、やや下に凸の曲線をしており、これはカンティレバー型試験体等で観察されるものと同様のものであった。また、載荷端近傍では、局部的に曲線が上に凸になっており、付着劣化の傾向がみられた。これは、図-2に示したV字型ひび割れの発生・成長とも関係している。一方、 $p_w$  が大きくなると、局部的付着破壊に伴う  $\tau$  の低下が抑えられるため、 $P$  の増加に

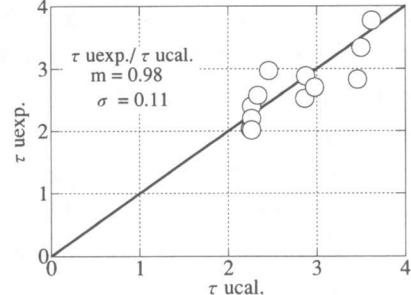


図-3 付着割裂強度の実験値と算定値  
(藤井式<sup>1)</sup>) との比較

伴い分布形状は下に凸からほぼ直線へ、そして上に凸の曲線へと移行していった。

### 3.4 付着応力 $\tau$ 分布

図-4は、 $p_w = 0\%$ 、径  $db = 19.1\text{ mm}$ 、定着長  $ld = 250, 450\text{ mm}$  の2つの試験体について、付着応力  $\tau$  の分布の推移を示す。なお、以下における  $\tau$  は、まず隣接する3点の歪ゲージの読みより2つの歪勾配を計算し、さらにその平均勾配を用い、中央の歪ゲージ位置での値として評価したものである。引抜力  $P$  の増加に伴い、分布形状はほぼ一様分布に近付いており、 $ld$  が短い場合に特にその傾向の強いことが分かる。載荷端近傍では  $\tau$  は低下しており、上述した付着劣化が明確に現れている。

図-5は、 $p_w = 0.659\%$  (横補強筋間隔  $s = 60\text{ mm}$ )、 $db = 19.1\text{ mm}$ 、 $ld = 350\text{ mm}$  の試験体について、 $\tau$  分布の推移を示している。横補強筋の拘束効果により、図-4に示した試験体よりもさらに高い  $P$  までの負荷が可能となり、これに伴って  $\tau$  の再分配はさらに進み、自由端側の  $\tau$  の方が中央付近の  $\tau$  よりも若干大きくなる傾向にある。

以上の傾向は、カンティレバー型試験体等で観察される結果と定性的に良く似たものであった。そして、同様の傾向は、 $db = 19.1 \text{ mm}$  以外の径の供試筋を用いた場合にも観察された。

### 3.5 すべり $S$ 分布

図-6は、試験体 S19-35-0について、供試筋すべり  $S$  の分布の推移を示す。なお、以下における  $S$  は、自由端すべり  $S_f$  に計算点までの鉄筋歪み  $\epsilon_s$  の分布を積分したものを加えることによって求めたものである。すべり  $S$  分布は下に凸の曲線をしており、自由端から載荷端へと向かうにつれて増大する。この増加割合は、 $P$  の増加に伴って非常に大きくなる。

以上の傾向も、カンティレバー型試験体等で観察される結果と定性的に良く似たものであった。そして、同様の傾向は、他の全ての試験体においても観察された。

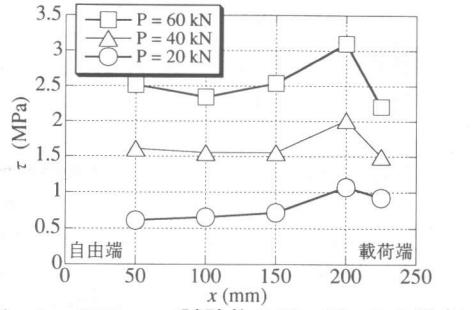
## 4. 局部付着特性

### 4.1 局部付着応力 $\tau$ - すべり $S$ 曲線

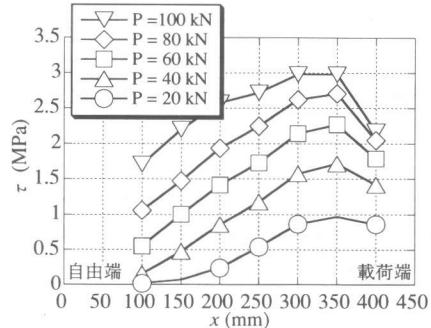
図-7は、 $p_w = 0\%$ 、 $db = 19.1 \text{ mm}$ 、 $ld = 250$ , 450 mm の2つの試験体について、座標  $x$  の変化に伴う局部付着応力  $\tau$  - すべり  $S$  曲線の推移を示す。ここに、 $x$  は自由端から計算点までの距離を表す。定着長  $ld$  の如何に関わらず、載荷端 ( $x = ld$ ) 近傍の付着劣化域を除外すれば、自由端に近付く ( $x$  の減少) に伴って  $\tau$  -  $S$  関係はほぼ一つの曲線に収束する傾向にある。

図-8は、 $p_w = 0.330\%$  (横補強筋間隔  $s = 120 \text{ mm}$ )、 $db = 19.1 \text{ mm}$ 、 $ld = 350 \text{ mm}$  の試験体について、 $\tau$  -  $S$  曲線の推移を示す。 $\tau$  -  $S$  曲線は非常に韌性的であり、 $\tau$  は局部付着強度に到達しても急には低下しない。これは、横補強筋の拘束効果によるものであり、図-7の曲線と対照的である。また、これらの曲線に関しては、巨視的には自由端に近付くに伴ってほぼ一つの曲線に収束する傾向にあるとみなしてもよいと考えられる。

以上のこととは、 $p_w$ 、 $db$ 、 $ld$ 、 $f_{c'}$  が与えられれば、サイドスプリット型破壊時における  $\tau$  -  $S$



(a)  $ld = 250 \text{ mm}$  (試験体 S19-25-0の場合)



(b)  $ld = 450 \text{ mm}$  (試験体 S19-45-0の場合)

図-4 付着応力  $\tau$  分布の推移

( $p_w = 0\%$ 、 $db = 19.1 \text{ mm}$ )

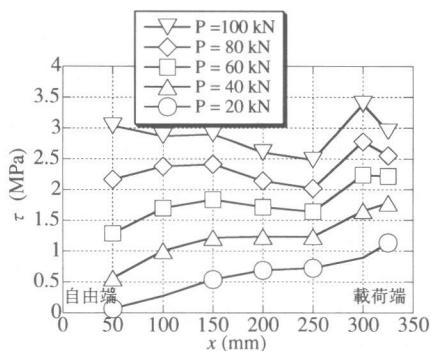


図-5 付着応力  $\tau$  分布の推移

(試験体 S19-35-6の場合)

( $p_w = 0.659\%$ 、 $db = 19.1 \text{ mm}$ 、 $ld = 350 \text{ mm}$ )

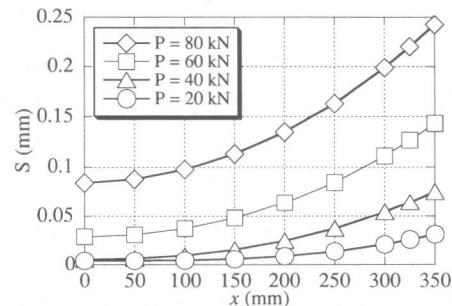
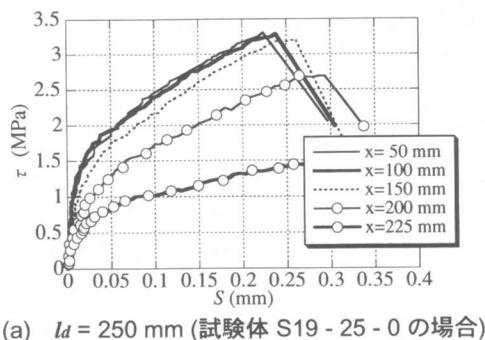


図-6 すべり  $S$  分布の推移  
(試験体 S19-35-0の場合)  
( $p_w = 0\%$ 、 $db = 19.1 \text{ mm}$ 、 $ld = 350 \text{ mm}$ )

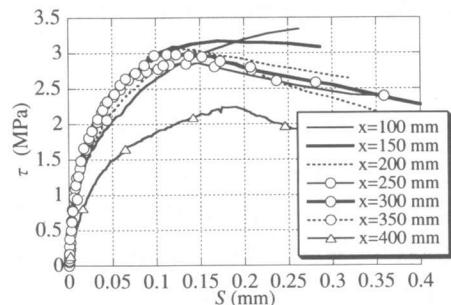
曲線が  $x$  に依存しない形でモデルできる可能性を示すものである。ただし、当然のことながら主ひび割れ面に相当する載荷端近傍については付着劣化域として別の取扱いが必要である。

#### 4.2 初期付着剛性 $k_b$

図-9は、 $db = 19.1 \text{ mm}$  の試験体について、初期付着剛性  $k_b$  と座標  $x$  との関係を示す。ここに  $k_b$  は、各局部  $\tau - S$  曲線について、局部付着強度の  $1/3$  の付着応力点と原点との間のデータを最小自乗法を用いて直線近似することによって求めた。同図(a)より、 $p_w = 0\%$ の場合、各



(a)  $ld = 250 \text{ mm}$  (試験体 S19-25-0 の場合)



(b)  $ld = 450 \text{ mm}$  (試験体 S19-45-0 の場合)  
図-7 局部付着応力  $\tau$  - すべり  $S$  関係  
( $p_w = 0\%$ ,  $db = 19.1 \text{ mm}$ )

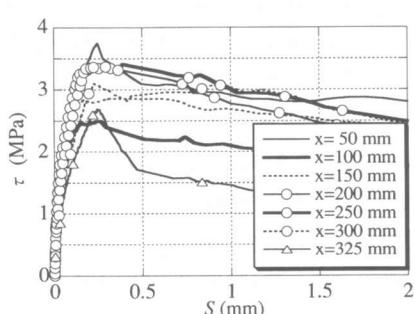
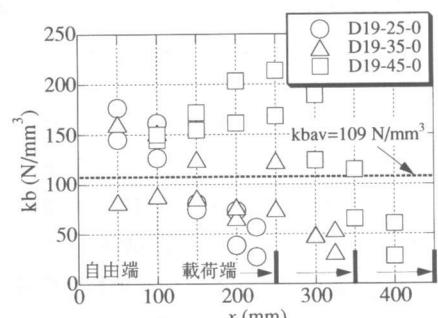


図-8 局部付着応力  $\tau$  - すべり  $S$  関係  
(試験体 S19-45-12 の場合)

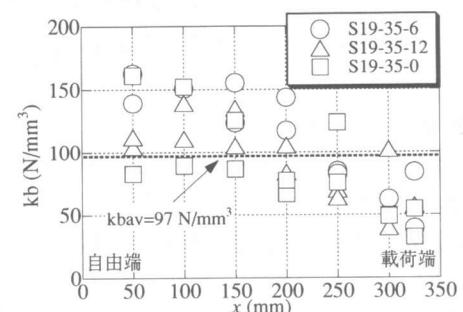
$ld$  とも載荷端から自由端へと近づく ( $x$  の減少) につれて  $k_b$  は変化するが、その変化率は次第に小さくなる傾向にあることが分かる。同図中の全データの平均値は  $k_{bav} = 109 \text{ N/mm}^3$  であり、藤井モデル<sup>11)</sup>における提案値  $98.1 \text{ N/mm}^3$  に近いものとなった。また、同図(b)より、 $ld$  が同一 (= 350 mm) の場合、 $p_w$  の増加 ( $s$  の減少) に伴って  $k_b$  は幾分増加する傾向にあることが分かる。なお、 $db$  の  $k_{bav}$  への影響は小さく、一方、 $f_c'$  が大きくなると  $k_{bav}$  も大きくなつた。

#### 4.3 付着降伏時すべり $S_y$

図-10は、 $db = 19.1 \text{ mm}$  の試験体について、付着降伏時すべり  $S_y$  と座標  $x$  との関係を示す。ここに  $S_y$  は、各局部  $\tau - S$  曲線のピーク付着応力点（局部付着強度）あるいはすべりが大きく増加し始めると考えられる点でのすべりの値と定義した。同図(a)より、 $S_y$  は  $ld$  が長いほどやや小さい傾向にあるが、自由端に近づくにつれて、 $ld$  による  $S_y$  の違いは小さくなる傾向にあることが分かる。同図中の全データの平均値は、 $S_y = 0.22 \text{ mm}$  となった。また、同図(b)より、



(a) 定着長  $ld$  の影響



(b) 横補強筋比  $p_w$  (間隔  $s$ ) の影響  
図-9 初期付着剛性  $k_b$  - 座標  $x$  関係

$p_w$  の増加 ( $s$  の減少) に伴って  $S_y$  も増加傾向にあることが分かる。なお、 $db$  および  $f'_c$  が大きくなると  $S_y$  も増加した。

通常、 $\tau - S$  曲線のモデル化に際しては、 $\tau$  と  $S$  を無次元化して表現することが多い。今回の結果は、縦軸には  $\tau$  を何らかの強度パラメータで除したものを、横軸には  $S/db$  または  $S/S_y$  を採用する必要のあることを示唆している。

なお、局部付着強度については、平均付着強度に対する比の平均値が 1.21 となり、藤井モデル<sup>1)</sup>における提案値 1.30 に近いものとなった。この強度比への各実験変数の影響は、 $ld = 450$  mm の試験体で強度比が 1.03 と小さかった以外はそれほど明確ではなかった。

## 5. 結論

本研究では、簡易型試験体を試作し、サイドスプリット型破壊時における局部付着特性について検討した。主な実験変数としては、鉄筋径、定着長、コンクリート強度、横補強筋比を採用した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 簡易型試験体は、サイドスプリット型破壊時の局部付着特性を検討することに使用可能である。
- (2) 局部付着強度は、載荷端近傍では低い引抜力で劣化し始める。しかし、局部付着応力-すべり曲線は、載荷端から離れるにつれて一つの曲線にはぼ収束する。
- (3) 局部付着応力-すべり曲線の初期剛性、局部付着強度、局部付着強度点あるいはすべりが大きく増加し始める点でのすべりの値等について定量化を試みた。

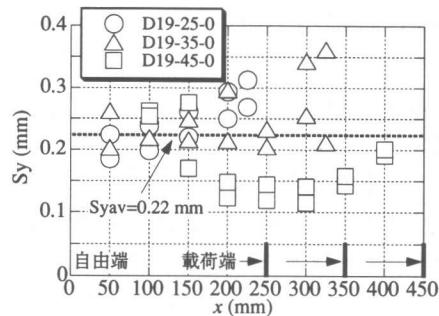
## 謝辞

本研究の一部は、財団法人南海育英会教育研究助成金の援助を得て実施したものである。

ここに、関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤井 栄：鉄筋コンクリートにおける付着



(a) 定着長  $ld$  の影響

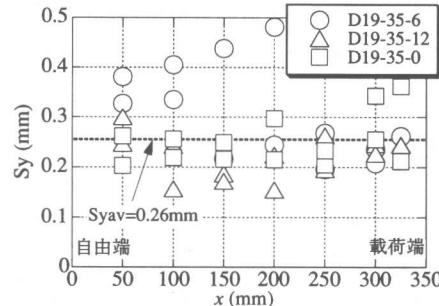


図-10 付着降伏時すべり  $S_y$ -座標  $x$  関係

- ・定着特性とその部材性能に及ぼす影響に関する研究, 京都大学学位論文, 1992. 1
- 2) 角 徹三ほか：高強度コンクリートレベルをも包含する R C 部材の付着割裂強度算定期式の提案, コンクリート工学論文集, 第 3 卷, 第 1 号, pp.97 - 108, 1996. 1
- 3) 長友克寛ほか：簡易型試験体の付着割裂破壊試験への適用性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp.355 - 360, 1999
- 4) Schmidt-Thrö G., Stockl S. und Kupfer H.: Einfluß einer einachsigen Querpressung und der Verankerungslänge auf das Verbundverhalten von Rippenstählen im Beton, Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 389, pp. 99 - 174, 1988
- 5) 金久保利之ほか：補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第492号, pp.99 - 106, 1997.2
- 6) CEB-FIP : Model Code 1990, 1990