

論文 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

長友 克寛*1・角 徹三*2・春本 繁*3・松原 三郎*4

要旨：本研究は、割裂破壊時における異形鉄筋の付着特性を検討する際に利用可能な簡易型試験体の提案を目的とした。試験体の大きな特徴は、中空油圧ジャッキによる载荷が可能であること、横補強筋の効果が考察できることの2点である。検討の結果、提案した試験体は、既往の研究結果とほぼ同等の実験結果の得られることを確認した。

実験では、D22 鉄筋を対象として提案した高い付着割裂強度を示す横ふし形状・寸法の条件について合わせて検証し、さらにその条件と鉄筋径との関係についても考察を加えた。

キーワード：付着割裂破壊, 付着強度, 異形鉄筋, 引抜試験体, 付着応力-すべり関係

1. はじめに

RC部材においては、かぶり、あき、横補強筋量等が不適切な場合、主鉄筋定着部での鉄筋に沿う割り裂きひび割れの発生・成長が引き金となって全体の急激な破壊に至ることがある。これを付着割裂破壊と呼ぶ。この破壊の原因は、鉄筋横ふし前面が傾斜しているために、周囲のコンクリートとの力の伝達の際に鉄筋がくさびと同様な挙動を取り、すべりに伴って周囲のコンクリートを押し上げることにある。

著者等¹⁾は、このくさび作用を低減するために横ふし前面の角度を90°にした鉄筋を試作し、付着割裂破壊の生じ難い表面形状について検討を加えてきた。

しかし、その際に利用した引抜試験体に関して、供試筋周囲のコンクリートの応力状態がどの程度実部材のそれに近いものであるのか、および横補強筋の効果をどのように評価するのか、という2つの事項が課題として残された。

一方、既往の付着割裂試験^{2), 3)}では大型の試験体を使用することが通例であるが、付着割裂強度には影響因子が多いため、パラメータ試験に多大な労力を要するのが実状である。

出来得る限り実部材の応力状態に近い簡易型試験体を利用できれば、付着強度を議論する際の強力な武器となり、今後の研究の更なる展開が期待できる。

本研究では、まず Schmidt - Thrö⁴⁾等により考案された試験体を参考にして、横補強筋の効果が調べられるよう拡張した試験体を提案した。この試験体については、従来型の引抜試験体を用いた試験および既往の研究結果との比較を通してその適用性について検討を加えた。次に、この新しい試験体を用いて、異形鉄筋表面形状の付着割裂強度への効果に及ぼす鉄筋径および横補強筋の影響について考察した。なお、本研究では、サイドスプリット型の付着割裂破壊のみを対象とした。

また、付着割裂破壊の原因としては、主ひび割れ面近傍域での鉄筋横ふしから発生するコーン状の内部ひび割れの進展に伴って鉄筋からコンクリートへの応力伝達が斜め方向に行われることも、その一つとして指摘されている。しかし、この内部ひび割れの進展が顕著になるのは、かなり鉄筋応力が高いレベルになってからであり、今回の研究では対象としなかった。

*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 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 工修

*4 高松工業高等専門学校 建設環境工学科

表-1 実験概要

シリーズ	試験体名*1	供試筋		横補強筋	コンクリート強度		平均 付着強度 τu (MPa)	正規化 付着強度 $\tau u/\sqrt{fc'}$	
		種類*2	本数		fc'(MPa)	ft (MPa)			
A	P22-0	市販	No.0	1	無し	27.1	2.35	4.97	0.953
	P22-1	試作 鉄筋	No.1			28.5	2.70	9.18	1.72
	P22-2		No.2			6.93	1.30		
	P22-3		No.3			7.39	1.38		
	P22-4		No.4			9.86	1.85		
	P22-5		No.5			7.38	1.38		
	P22-6		No.6			6.11	1.14		
	P22-7		No.7			8.51	1.59		
	S22-0	市販	No.0	1	無し	23.3	2.02	2.77	0.573
	S22-1	試作 鉄筋	No.1			4.03	0.834		
	S22-2		No.2			2.85	0.590		
	S22-3		No.3			4.21	0.873		
	S22-4		No.4			4.53	0.938		
	S22-5		No.5			3.84	0.796		
S22-6	No.6		3.85			0.796			
S22-7	No.7	4.34	0.899						
B	S22-1-C	市販	No.0	1	無し	23.3	2.02	2.77	0.573
	S22-2-C		2	無し	30.9	2.69	3.77	0.679	
	S22-2-C-R			2-D6	23.8	2.12	3.06	0.626	
	S32-2-C	市販	No.8	無し	30.9	2.69	2.37	0.427	
	S32-2-C-R		2-D6	23.8	2.12	2.32	0.477		
C	S22-2-M	試作 鉄筋	No.9	2	無し	30.9	2.69	4.74	0.854
	S22-2-M-R		2-D6		23.8	2.12	4.06	0.833	
	S32-2-MS		No.10		無し	30.9	2.69	3.81	0.687
	S32-2-MS-R		2-D6		23.8	2.12	3.36	0.689	
	S32-2-ML		No.11		無し	30.9	2.69	3.56	0.641
	S32-2-ML-R		2-D6		23.8	2.12	3.35	0.689	

*1 P22-5
 └─ 供試筋 No. (表-2 参照)
 └─ 鉄筋公称径
 └─ P: 改良引抜型
 └─ S: Schmidt 型

S32-2-MS-R
 └─ 横補強筋有り
 └─ C: 市販鉄筋, M: 試作鉄筋
 └─ 横ふし寸法 S: 小, L: 大
 └─ 鉄筋本数
 └─ 鉄筋公称径 22: D22, 32: D32
 └─ S: Schmidt 型

*2 図-1, 表-2 参照

2. 実験概要

表-1 に実験概要を示す。表-2 には供試筋の寸法諸元を示す。本研究は、A, B, C の3つのシリーズからなる。

シリーズAでは、従来型ものを若干改良した引抜試験体(以下P型)とSchmidt型の試験体(以下S型)との実験結果を比較し、両者の特徴について検討を加えた。その際、供試筋には表-2に示すD22の市販鉄筋及び試作鉄筋を用い、

鉄筋表面形状の改善に伴う付着割裂強度の増大効果についても合わせて検討を加えた。図-1に試作鉄筋の表面形状を示す。図-2, 3にはP型およびS型試験体の形状・寸法を示す。

P型試験体は、サイドスプリット型の割裂破壊が生ずるように腹部の幅を狭めたものである。引抜力の反力は、供試筋周囲のコンクリートの面外変形を拘束しないよう、供試筋から離れた幅の広いコンクリート部分に作用させた。

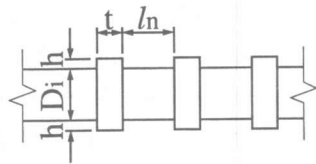


図-1 試作鉄筋の表面形状

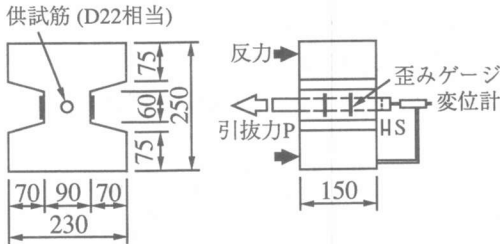


図-2 改良引抜試験体 (P型) (単位: mm)

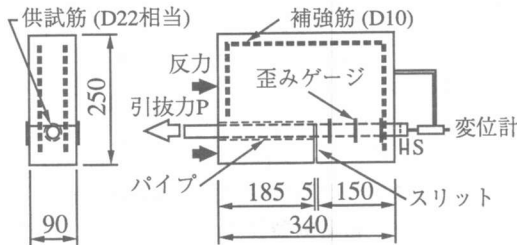


図-3 Schmidt型試験体 (S型) (単位: mm)

S型試験体は、中央部にスリットを設け、載荷端側の供試筋の付着をパイプを用いて断ったものである。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はり定着部に似た圧縮応力の流れが実現できる。

シリーズBでは、シリーズAにおけるS型試験体の実験結果を受け、これを主鉄筋が2本配置でき、横補強筋の効果が検出出来るように拡張した簡易型試験体を提案し、既往の研究との比較をもとに、その適用性について検討した。なお、最近、S型試験体を簡易型試験体と呼んでいる報告もあるが、本研究ではシリーズBにおけるものを簡易型試験体と呼ぶことにした。

シリーズCでは、シリーズAの結果をもとに、付着割裂強度が大きいと考えられる表面形状をもつD22およびD32相当の鉄筋を試作し、その割裂強度について、シリーズBで新たに提案した簡易型試験体を用いて検討を加えた。

表-2 供試筋の寸法

鉄筋 No.	内径 \$D_i\$ (mm)	ふし高さ \$h\$ (mm)	ふし純間隔 \$l_n\$ (mm)	ふし頂部幅 \$t\$ (mm)
0	市販 D22	1.58	12.08	1.60
1	21.76	1.60	10.00	1.50
2	21.93	0.80	7.50	1.50
3	21.64	1.60	7.50	1.50
4	21.33	2.40	7.50	1.50
5	20.95	1.60	7.50	4.50
6	20.54	1.60	7.50	7.50
7	21.42	1.60	5.00	1.50
8	市販 D32	1.77	19.2	2.00
9	20.48	2.40	8.00	4.00
10	30.12	2.40	8.00	4.00
11	29.37	3.40	11.50	5.75

表-3 実験値 (市販鉄筋) と藤井モデルとの付着特性値の比較

試験体	\$\tau_{uexp.}\$ (MPa)	\$\tau_{ucal.}\$ (MPa)	\$\tau_{uexp.}\$ (mm)	\$S_{uexp.}\$ (mm)*	\$S_{ucal.}\$ (mm)*	\$S_{uexp.}\$ (mm)
			\$\tau_{ucal.}\$			\$S_{ucal.}\$
P22-0	4.97	2.58	1.92	0.625	0.093	6.72
S22-0	2.77	2.32	1.19	0.271	0.095	2.85

* 藤井モデル⁵⁾における\$S_B\$を表示

3. 実験結果およびその考察

3.1 シリーズA

本シリーズでは、P型、S型を問わず、全て試験体の破壊は、想定通り供試筋に沿う割裂及び割れの発生によって引き起こされた。

表-3は、市販鉄筋を用いた試験体P22-0とS22-0の付着強度 \$\tau_{uexp.}\$ および付着強度時のすべり \$S_{uexp.}\$ と、藤井等⁵⁾によって提案された付着モデルにおけるそれらの計算値 \$\tau_{ucal.}\$ および \$S_{ucal.}\$ との比較を示したものである。ここに、すべり \$S\$ としては、鉄筋自由端側の鉄筋とコンクリートとの相対変位を採用した。藤井モデルによる付着強度の計算に際しては、供試筋が上端筋か下端筋かによって補正係数 (=1.22) を選択しなければならない。今回のS型試験体では、図-3の下方方向からコンクリート打設を行っておりその判断が難しい。そこで、ACI 318の規定⁶⁾を参考にして、供試筋より下のコンクリート高さが300mm以上の場合を上端筋とし、一方、下端筋の場合の最小底面かぶりを50mmとし、その中間を直線近似することにした。すな

わち、上端筋としての強度の計算値に次式で表される係数 k' を乗ずることとした。

$$k' = 1.00 + \frac{0.22 \cdot (300 - C_b)}{250} \quad (1)$$

ここに、 C_b は底面かぶり (単位mm) である。

表-3より、S型試験体はP型試験体よりも藤井モデルとの適合性が高く、一つの簡易型付着割裂試験体として使用可能であると考えられる。ただし、すべり Su_{exp} は Su_{cal} よりも大きく現れている。これは、今回の試験体で生じた自由端すべりが藤井等の試験体におけるものと比較してかなり大きかったと考えられること、今回用いた市販鉄筋は藤井モデルの構築に用いたネジふし鉄筋よりも横ふし前面の角度が緩やかであったこと、等が原因と考えられる。

図-4は、付着割裂強度を改善する目的で作した鉄筋 (表-2のNo.1~7) の τu について、P型試験体とS型試験体との実験値を比較したものである。ここに、 τu はコンクリート圧縮強度 fc' の平方根 $\sqrt{fc'}$ で正規化してある。同図より、供試筋表面形状の違いに関わらず、2つの試験体間で $\tau u/\sqrt{fc'}$ はほぼ直線関係にあることが分かる。従って、この関係を実験的に見いだせば、P型試験体も付着割裂強度の定量的な評価に使用可能であると考えられる。

さらに、図-4より、試作鉄筋の中で付着割裂強度が大きいのはNo.1, 4, 7であることが分かる。その中でも最も強度の大きな鉄筋 No.4は、市販鉄筋 No.0 に比べてS型試験体で1.64倍の強度を示している。

著者等々は、D22鉄筋に関して、大きな付着割裂強度をもつ横ふし形状・寸法の条件を報告しているが、この条件は、今回の実験結果においても成立するものであった。

図-5 (a), (b)は、それぞれP型およびS型試験体側面の鉄筋軸に直交する方向のコンクリート歪み ϵ_c 分布の推移を示している。P型試験体では曲げの影響が現れ、比較的高い正規化付着応力 $\tau/\sqrt{fc'}$ レベルまで自由端近傍での歪みが圧縮になっているのに対して、S型試験

体ではこのような圧縮歪みは生じていない。P型試験体の $\tau u/\sqrt{fc'}$ および Su/D が大きく現れた原因の一つは、自由端側供試筋へのこの圧縮拘束によるものである。また、最も付着強度の高い試作鉄筋を用いた試験体 P22-4 および S22-4は、市販鉄筋を用いた試験体 P22-0 および S22-0に比べて同じ $\tau/\sqrt{fc'}$ レベルでの ϵ_c すなわちリングテンションが小さくなっており、これが付着強度の改善となって現れたと考えられる。

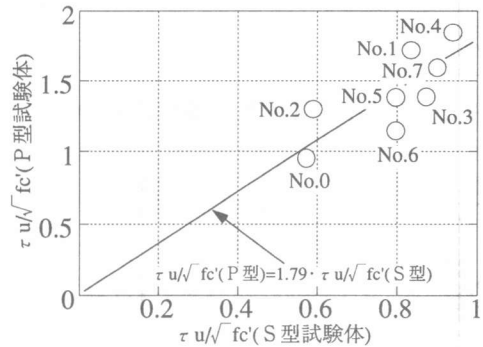
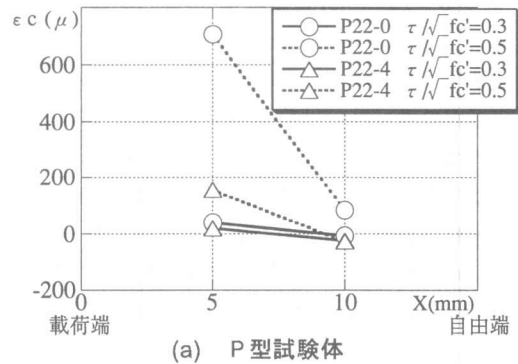
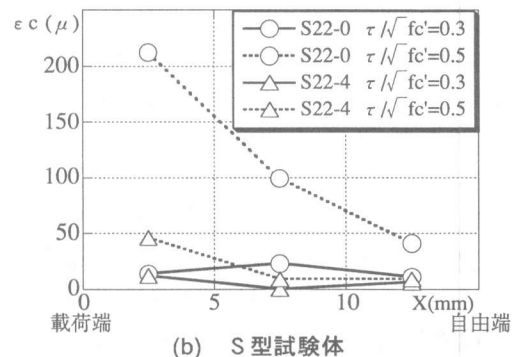


図-4 P型試験体とS型試験体との付着割裂強度の比較



(a) P型試験体



(b) S型試験体

図-5 コンクリート側面の歪み分布

3. 2 シリーズB

シリーズBでは、図-6の簡易型試験体を試作し、市販鉄筋D22およびD32の付着特性について検討した。試験体は、無補強のもの、閉鎖型の

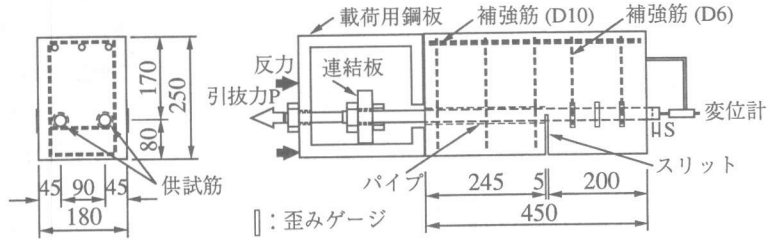


図-6 本研究で提案した簡易型付着試験体 (単位: mm)

D6スターラップを100mm間隔で2本配置したものをそれぞれ一体ずつ作製した。

図-7は、試験体 S22-2-C の破壊状況を示している。全ての試験体において、想定通り同図の様なサイドスプリット型破壊が観察された。

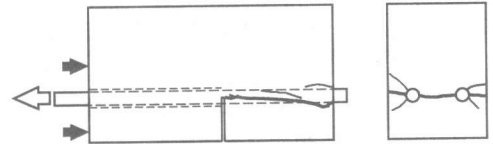


図-7 代表的な破壊状況 (試験体 S22-2-C)

図-8は、藤井式²⁾および角式³⁾による付着強度の計算値 τ_{ucal} に対する、各試験体の付着強度の実験値 τ_{uexp} の比を示している。 τ_{ucal} には式(1)による補正を行ったものを用いた。付着強度比は0.66~1.41の範囲にあり、全平均は0.95であった。参考までに、今回の供試筋を上端筋と評価すれば、付着強度比の全平均は1.07となり、安全側の評価が得られる。評価のばらつきは大きい、幾つかの強度式を併用するならば、本簡易型試験体は実用に耐え得るものと考えられる。ただし、今後定着長およびスターラップ量を変化させた試験体についての実験データを蓄積し、さらに検討していく必要がある。

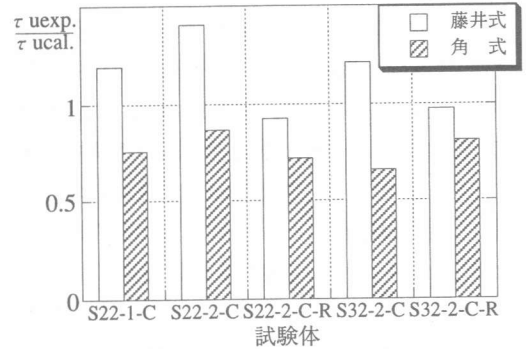


図-8 既往の強度式による計算値に対する実験値の付着強度比

図-9は、試験体 S32-2-C-R の付着応力 τ - すべり S 関係について、実験曲線 (実線) を藤井モデル⁵⁾ (破線) および CEB-FIP モデル⁷⁾ (一点鎖線) と比較したものである。藤井モデルと実験曲線とは比較的一致しており、本簡易型試験体が付着特性全般の評価に利用できる可能性のあることを示している。ただし、ここでも実験値のすべりが大きめに現れている。この原因としては、3.1と同様に、藤井モデルの構築に用いた試験体よりも今回の試験体の方が自由端すべりが生じ易かったと考えられること、今回の供試筋の方が横ふし前面の傾斜が緩やかであったこと、および今回は実験条件を単純にする意味からスターラップが供試筋の横ふしにかからない様に配慮したこと等が考えられる。

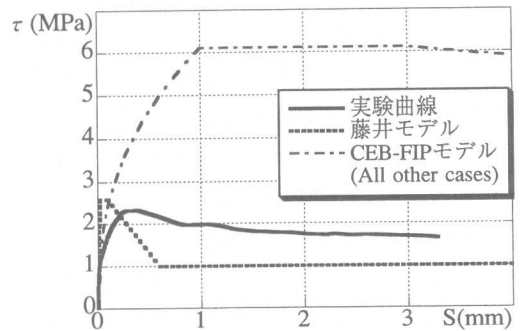


図-9 既往のモデルと実験結果との付着応力-すべり関係の比較 (試験体 S32-2-C-R の場合)

一方、CEB-FIP モデルはテンションステイニング効果の評価用に提案されたのものであるが、付着性能を高く表現し過ぎており、付着割裂に耐力が支配される部材への利用は不適であると考えられる。

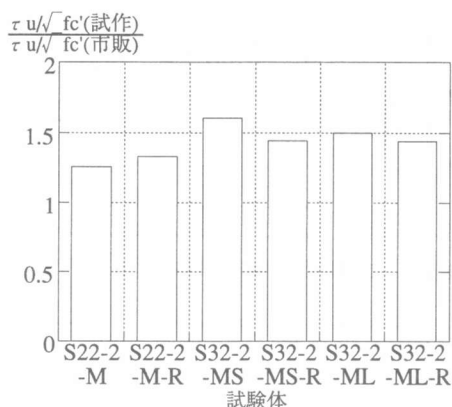


図-10 市販鉄筋に対する試作鉄筋の正規化付着強度比

3.3 シリーズC

図-10は、市販鉄筋に対する、今回新たに試作した鉄筋(表-2参照)の正規化付着強度比を示している。ここに、鉄筋No.9は、既往の研究¹⁾および3.1の実験結果に基づき新たに試作したものであり、鉄筋No.10(記号MS)およびNo.11(記号ML)は、No.9と同じ寸法の横ふしおよびNo.9の横ふし寸法をほぼ鉄筋公称径Dに比例させて大きくした横ふし、をそれぞれもたせたD32相当の鉄筋である。試験体には、シリーズBで提案した簡易型試験体を用いた。

同図より、市販鉄筋に対して試作鉄筋の付着強度はD22鉄筋で約30%、D32鉄筋で約50%の増加を示しており、今回の目的はある程度達成できている。D22鉄筋の方がD32鉄筋よりも強度の増加率は小さいが、破壊時でのD22鉄筋の引張応力は最大で170MPaを超えており、定着という意味からは十分機能を果たしている。

鉄筋No.10とNo.11の付着強度を比較すると、両者にはほとんど差違が無い。横ふし寸法を鉄筋径に比例させることについては、付着割裂強度の面からはさらに検討が必要である。

4. 結論

本研究では、異形鉄筋の付着割裂試験用の簡易型試験体の提案を行った。その際、付着割裂強度と鉄筋表面形状との関係についても考察を加えた。以下に、得られた結果を要約する。

- (1) 通常の引抜試験体およびSchmidt等によって提案された試験体は、付着割裂強度の評価に利用可能である。ただし、前者は後者にある補正係数を乗ずる必要がある。
- (2) Schmidt等の試験体を供試筋が2本配置でき、スターラップの効果が検討できるよう拡張した試験体を試作し、それが付着割裂破壊試験に適用できることを確認した。
- (3) 付着割裂強度の改善を目的とした異形鉄筋を試作し、その性能を確認した。
- (4) 横ふし寸法を鉄筋径に比例させることは、付着割裂強度の面からはさらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 長友克寛・角 徹三・松原三郎：異形鉄筋の表面形状の改善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. 18，No. 2，pp.509-514，1996
- 2) 藤井 栄，森田司郎：異形鉄筋の付着割裂破壊強度に関する研究（第1報），日本建築学会論文報告集，第319号，pp.47-55，1982.9
- 3) 角 徹三ほか：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，第3巻，第1号，pp.97-108，1996.1
- 4) Schmidt-Thrö G., Stockl S. and 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) 藤井 栄，宮内 孝，森田司郎：割裂付着破壊時の局部付着応力-すべり曲線，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1793-1794，1980.9
- 6) ACI Committee 318: Building Requirements for Reinforced Concrete, 1983
- 7) CEB-FIP: Model Code 1990, 1990