

論文 鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上に関する実験的研究

松林 卓^{*1}・竹内 秀聡^{*2}・原 夏生^{*3}・三島 徹也^{*4}

要旨：鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上効果を定量的に把握するために、短繊維が影響すると考えられる要因をパラメータとした鉄筋の引抜試験を行った。そして、その実験結果から、鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物に示されている鉄筋の基本定着長算定式に短繊維補強効果を加えた新しい基本定着長算定式の提案を行った。

キーワード：鉄道 RC ラーメン高架橋，接合部，鋼繊維補強コンクリート，基本定着長

1. はじめに

鉄道 RC ラーメン高架橋の柱・地中梁・杭の各部材が交差する接合部においては、各部材の鉄筋が輻輳することから、鉄筋の配筋作業が煩雑になるとともに、コンクリートの充填性についても注意が必要となるなど、所定の品質を確保するための課題が生じている。既往の研究¹⁾では、接合部のコンクリートを鋼繊維補強コンクリートとすることによって配筋を簡略化できることを実験的に確認しているが、実構造物の設計に反映するには至っていない。そこで、短繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上効果を定量的に把握するために、短繊維が影響すると考えられる要因をパラメータとした鉄筋の引抜試験を行った。

本論文では、鉄筋の引き抜き実験結果を示し、その結果から、鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物²⁾に示されている鉄筋の基本定着長算定式に短繊維補強効果を加えた新しい基本定着長算定式の提案を行っている。

2. 鉄筋の引き抜き実験

2.1 実験概要

実験は、複数鉄筋からなる柱部材の定着性能

を評価することを考慮し、鉄筋コンクリート部材に埋め込まれた 4 本の鉄筋を同時に引き抜く実験を行うこととした。なお、試験体形状および載荷方法については藤井らにより行われている方法³⁾を参考とした。図-1 に試験体および計測位置を、図-2 に載荷装置を示す。

2.2 実験パラメータ

鉄道構造物等設計標準・同解説¹⁾に基づく鉄筋の基本定着長の算定式を式(1)に示す。

$$l_d = \alpha_b \cdot \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \quad (1)$$

ここに、 l_d : 鉄筋の基本定着長

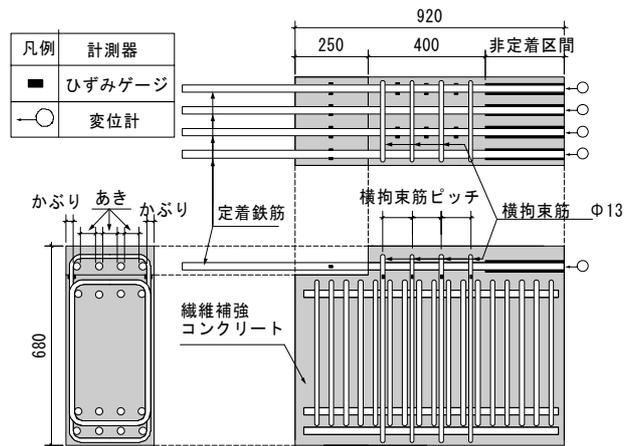


図-1 試験体および計測位置

*1 前田建設工業 (株) 技術本部 技術研究所 (正会員)
 *2 前田建設工業 (株) 技術本部 技術研究所 工修 (正会員)
 *3 前田建設工業 (株) 技術本部 技術研究所 博(工) (正会員)
 *4 前田建設工業 (株) 技術本部 技術研究所 工博 (正会員)

し、混入する試験体については鋼繊維を混入することによるスランプロスを考慮し、18cm±2.5cm 又は 21cm±2.5cm とした。また、鋼繊維の混入方法は、現地に到着したトラックアジテータに鋼繊維を投入後、所定の時間ドラムを回転させる、すなわち一般的に現場で行われている混入方法と同様とした。

2.4 実験結果

(1) 実験結果一覧

実験の結果得られた、ひび割れ発生荷重および最大荷重、また、これらの値から算出した平均付着応力の一覧を表-4 に示す。ひび割れ発生時の判定方法は 4.2 で述べる。

(2) コンクリート強度の影響

前述した文献 1)によれば、コンクリートの付着強度は圧縮強度の 2/3 乗に比例することが示されている。鋼繊維補強コンクリートについても同様なことが成り立つことを確認するために、鋼繊維の体積混入率を 0.5% で一定とし、コンクリート強度をパラメータとした試験体 No.1, 4, 5 について、最大平均付着応力 τ_u とコンクリート強度の 2/3 乗の関係を図-3 に示す。これによれば、 τ_u とコンクリート強度の 2/3 乗の間には強い相関関係が見られ、両者は比例関係にあることが確認できる。この結果を踏まえ、以下の検討においてはコンクリート強度の差異による影響を考慮するため、平均付着応力 τ を f_{bok} ($=0.28f'_c{}^{2/3}$) で除して無次元化した値で整理を行うこととする。

(3) 平均付着応力－鉄筋端部変位関係

τ/f_{bok} と鉄筋端部変位関係の代表的なものを図-4 に示す。No.0 は鋼繊維を混入していないもの、No.1 は鋼繊維を体積混入率で 0.5% 混入したもの、No.3 は同じく鋼繊維を 1.0% 混入したものである。これによれば、鋼繊維の混入率の増加とともに平均付着応力が増加する傾向にあることが確認できる。

表-3 鉄筋の機械的性質

材質	鉄筋径(mm)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	使用箇所
SD345	13	374	175734	横方向鉄筋
USD685	25	711	183573	定着鉄筋
	32	792	185999	

表-4 実験結果一覧

No.	載荷試験結果				備考
	ひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	最大荷重 P_u (kN)	ひび割れ発生時付着応力 τ_{cr} (N/mm ²)	最大付着応力 τ_u (N/mm ²)	
0	299.46	434.00	2.38	3.45	繊維混入率による影響
1	379.66	559.50	3.02	4.45	
2	350.55	531.70	2.79	4.23	
3	351.20	560.10	2.79	4.46	
4	460.51	725.05	3.66	5.77	f'_c による影響
5	640.32	902.92	5.10	7.19	
6	599.58	743.20	4.77	5.91	α_b 下限値
7	592.46	818.20	4.71	6.51	
8	470.22	579.50	2.92	3.60	鉄筋径による影響
9	481.86	699.20	3.00	4.35	
10	460.51	649.40	2.86	4.04	
11	341.50	593.80	2.72	4.73	あき・かぶりによる影響
12	441.11	628.70	3.51	5.00	
13	490.92	591.80	3.91	4.71	

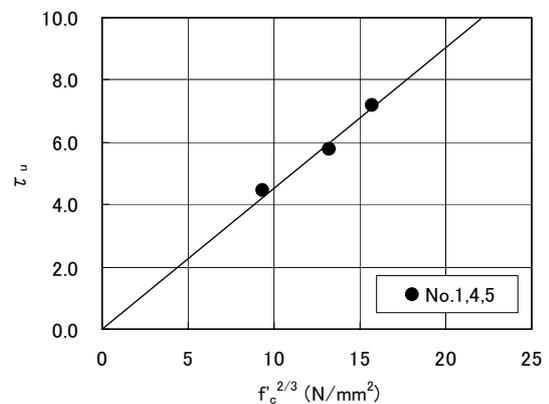


図-3 τ_u と $f'_c{}^{2/3}$ の関係

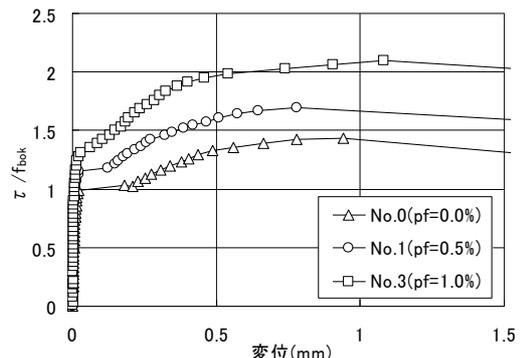


図-4 τ_u/f_{bok} と鉄筋端部変位の関係

(4) 鋼繊維体積混入率の影響

鋼繊維の体積混入率 p_f をパラメータとした試験体について、最大平均付着応力 τ_u を f_{bok} で除した値 τ_u/f_{bok} と鋼繊維の体積混入率 p_f の関係を図-5 に示す。これによれば、 p_f の増加に伴い τ_u/f_{bok} も増加する傾向にあることがわかる。なお、図中の点線は、4.4 の式(6)による計算値を示したものであり、これは本研究で提案している短繊維補強効果を考慮した付着強度算定式である。

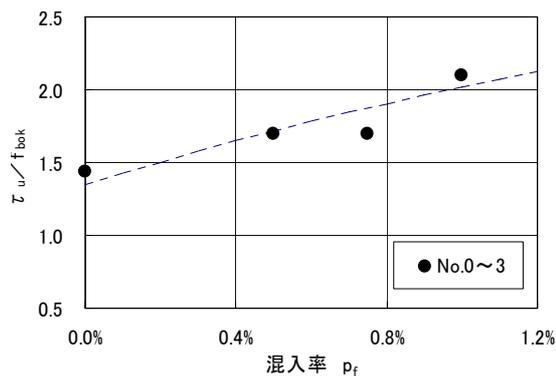


図-5 τ_u/f_{bok} と p_f の関係

(5) かぶりの影響

鋼繊維を混入しない一般的なコンクリートにおいては、付着強度に対する鉄筋のかぶりやあきの影響は式(2)の中で c_b/ϕ の形で考慮されている。そこで、鋼繊維を体積混入率で0.5%混入した場合において、 c_b/ϕ をパラメータとした試験体 No.1,11,12,13 について、 τ_u/f_{bok} と c_b/ϕ の関係を図-6 に示す。これによれば、 c_b/ϕ の増加に伴い、緩やかではあるが、 τ_u/f_{bok} は増加する傾向にある。なお、図中の点線は、図-5 同様、4.4 の式(6)による計算値を示したものである。

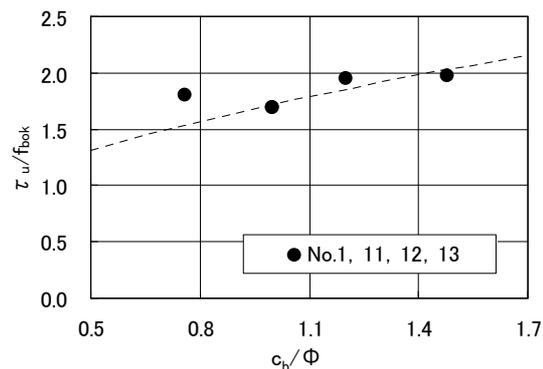


図-6 τ_u/f_{bok} と c_b/ϕ の関係

(6) 横方向鉄筋の影響

短繊維を混入していない一般的なコンクリートにおいては、付着強度に対する横方向鉄筋の影響を式(2)の中で $15A_t/s\phi$ の形で考慮している。また、短繊維が鉄筋の付着性能を向上させる効果は、定着鉄筋だけでなく、横方向鉄筋についても作用すると考えられる。そこで、 $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ と τ_u/f_{bok} の関係を図-7 に示す。これによれば、 $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ が増加するにつれて τ_u/f_{bok} も増加する傾向があることが確認できる。

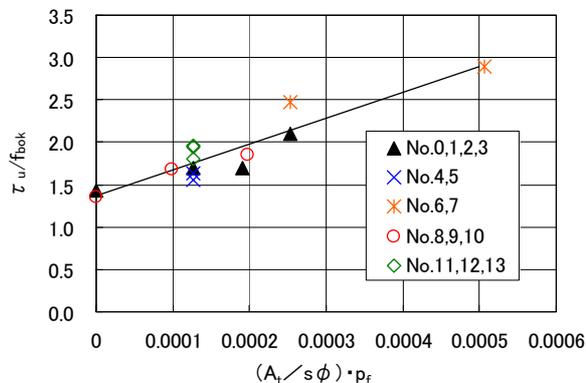


図-7 τ_u/f_{bok} と $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ の関係

3. 短繊維による補強メカニズムの検討

短繊維による補強メカニズムを検討した。繊維を混入していない試験体 No.0 と鋼繊維を1.0%混入した No.3 について、 τ/f_{bok} と鉄筋端部変位の関係を図-8 に示す。

No.0 では、荷重初期段階 (O 点~A 点) においては τ/f_{bok} と鉄筋端部変位は直線的な関係を

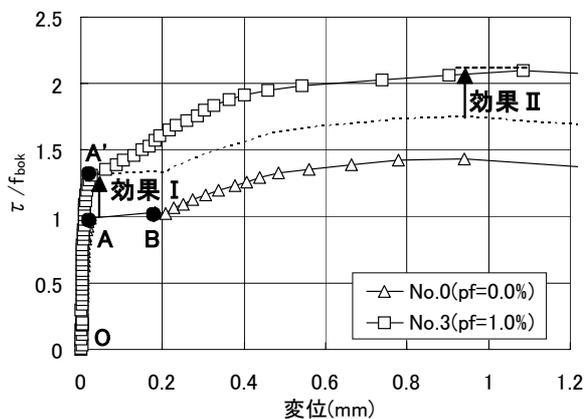


図-8 τ/f_{bok} と鉄筋端部変位の関係

示すが、図中の A 点においてコンクリートにひび割れが発生し、変位が急激に増加する。その後 B 点を境に付着応力も増加し、終局に至る。B 点においては横方向鉄筋が抵抗し始めると考えられる。一方、繊維を混入した No.3 の場合は、No.0 に対して A 点の付着強度が増加する (A' 点)。この増加分を効果 I とする。この増加分だけ No.0 の A 点以降の曲線を平行移動させたものを図中に点線で示すと、No.3 の曲線はこの点線をさらに上回っていることがわかる。この増加分を効果 II とする。ここでは、効果 I の増加分は繊維自体が割裂ひび割れの形成を抑制する、すなわち架橋効果による付着強度増加分であると考えられる。また、効果 II の増加分は、繊維が横方向鉄筋の付着を向上させることによる付着強度増加分であると考えられる。

4. 短繊維による補強効果の定式化の検討

4.1 補強効果を考慮した式の設定

基本定着長の算定式の中でコンクリートの付着強度は、コンクリートのかぶりや横方向鉄筋などによる影響を考慮して式 (2) のように表すことができることを先に述べた。本研究では、式 (2) に 3 で述べた短繊維による 2 つの付着強度向上効果を盛り込むと、 $1/\alpha_b$ は式 (3) のような形で表すことができると考えた。

$$\frac{1}{\alpha_b} = \left\{ \left[\frac{1}{\frac{0.75}{\frac{c_b}{\phi} + \frac{15A_t}{s \cdot \phi} (1+k_2 p_f)} + 0.2} \right] + k_1 \frac{c_b}{\phi} p_f \right\} \quad (3)$$

ここで、係数 k_1 が含まれる項は、先に述べた架橋効果 (効果 I) による付着強度増加分を表しており、図-5 および図-6 において、 c_b/ϕ と p_f が付着強度の増加に関係していることが確認されたことからこのように設定した。また、係数 k_2 が含まれる項は、短繊維が横方向鉄筋の付着を向上させることによる付着強度増加分 (効果 II) を表しており、図-7 において、付着強度と $(A_t/s\phi) \cdot p_f$ の間に相関関係が見られたことからこのように設定した。

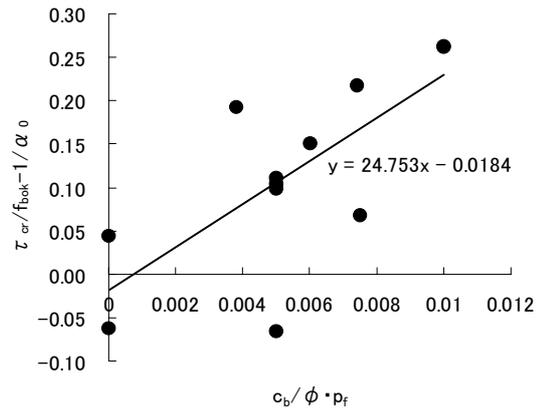


図-9 $\tau_{cr}/f_{bok} - 1/\alpha_0$ と $c_b/\phi \cdot p_f$ の関係

4.2 架橋効果による付着強度増加分の検討

架橋効果 (効果 I) による付着強度増加分を検討するため、試験体にひび割れが発生した時の平均付着応力 τ_{cr} を用いた。ここで試験体にひび割れが発生した時の平均付着応力の決定方法は、ひび割れが発生することにより鉄筋端部変位が急激に増加することを利用し、その直前の値、すなわち図-8 の A 点や A' 点をひび割れ発生応力と定めた。横方向鉄筋が無い場合の α_b を α_0 とすれば、図-8 における効果 I の増分 $\Delta \tau/f_{bok}$ は、式 (4) で表される。

$$\Delta \frac{\tau}{f_{bok}} = \frac{\tau_{cr}}{f_{bok}} - \frac{1}{\alpha_0} \quad (4)$$

ここで、式 (4) で表される付着強度の増加分と $c_b/\phi \cdot p_f$ との関係を図-9 に示す。ひび割れ発生には、鋼繊維の有無に関わらず、例えば、乾燥収縮の影響など種々の要因が影響することが知られており、図-9 もばらつきを持った結果となっている。しかしながら、 $c_b/\phi \cdot p_f$ が大きくなる程 $\Delta \tau/f_{bok}$ も増加する傾向を示し、線形近似させると原点付近を通る直線になることがわかる。従って式 (3) 中の係数 k_1 を本回帰式の傾きである 24.75 と設定した。

4.3 横拘束筋の付着が向上することによる付着強度増加分の検討

前項の k_1 を考慮し、式(3)による付着強度の計算値 τ_{cal} と実験で得られた最大付着応力 τ_u の差が最も小さくなるように k_2 を求めると、 $k_2=174$

となる。これにより求めた式(3)による τ_{cal} と実験値 τ_u との関係を図-10に示す。

4.4 新しい基本定着長算定式の提案

式(3)を鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾の基本定着長算定式の形式(式(2)の形式)に合わせて近似して変形すると、付着強度の特性値は式(5)の形で表すことができる。

$$\tau_{cal} = f_{bok} \times \left(\frac{1}{\frac{0.75}{\frac{c_b}{\phi}(1+k_3 p_f) + \frac{15A_t}{s \cdot \phi}(1+174 p_f)} + 0.2} \right) \quad (5)$$

式(5)から求まる付着強度 τ_{cal} と実験で得られた最大付着応力 τ_u の差が最も小さくなるように k_3 を定めると、 $k_3=50$ となる。本式による $\tau_{cal}-\tau_u$ 関係を図-11に示す。従って、繊維混入効果を考慮した基本定着長は、実験で確認された範囲内において、現行の式の K_c を式(6)に置き換えることで算定できるものと考えた。

$$K_c = \frac{c_b}{\phi}(1+50 p_f) + \frac{15A_t}{s \cdot \phi}(1+174 p_f) \quad (6)$$

設計において用いる設計付着強度は $f_{bod} = f_{bok}/\gamma_c$ (γ_c :コンクリートの材料係数 1.3)であるため、これを用いて算出した τ_{cal} と τ_u の関係を図-11中に点線で示した。これより、実験で得られた値はすべて安全側にあることが確認できる。

5. まとめと今後の課題

鋼繊維補強コンクリートを用いた鉄筋の引き抜き実験を行った。その結果、鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上効果として、鋼繊維自体が割裂ひび割れの形成を抑制する効果と、繊維が横方向鉄筋の付着を向上させる効果があることが確認された。さらに、これらの効果を定式化し、鉄道構造物等設計標準・同解説「コンクリート構造物」¹⁾に示されている鉄筋の基本定着長算定式に短繊維補強効果を加えた新しい基本定着長算定式の提案を行った。ただし、式の適用にあたっては、対象構造物を想定した部材実験による提案式の妥当性の検証や適用

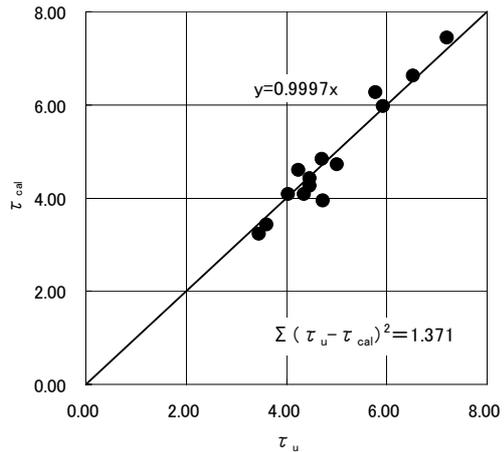


図-10 τ_{cal} と τ_u の関係(式(4)による)

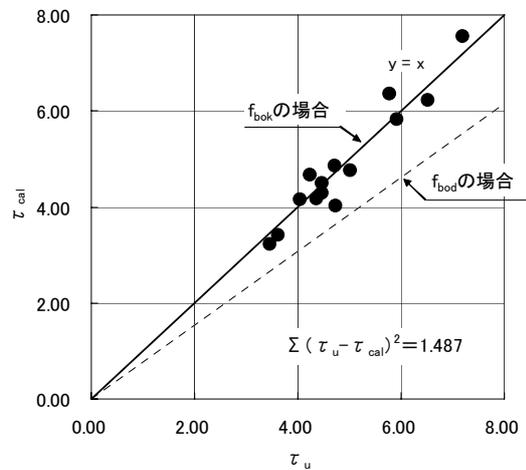


図-11 τ_{cal} と τ_u の関係(式(5)による)

範囲の設定を行う必要があると考えており、今後の課題である。

参考文献

- 1) 山田尚義, 近藤眞生, 柏原茂, 谷村幸裕: 鋼繊維補強コンクリートを用いたラーメン高架橋部材接合部の主筋定着方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.853-858, 2001
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説「コンクリート構造物」, pp.239-242, 2004.4
- 3) 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, 1982