

超高強度コンクリートと PC 鋼材の付着特性に関する研究

高津 比呂人*1・木村 秀樹*2

鋼繊維を混入した超高強度コンクリート角柱に PC 鋼材（ ϕ 15.2 mm PC 鋼より線、 ϕ 15.2 mm インデント付き PC 鋼より線、 ϕ 9 mm 異形 PC 鋼線）を埋込み、鋼材の引抜試験を行った。その結果、 ϕ 15.2 mm の PC 鋼より線に比べ、 ϕ 15.2 mm のインデント付き PC 鋼より線では最大付着応力度が大きく上昇することがわかった。また、鋼繊維の混入により最大付着応力度が上昇することも確認された。さらに、試験体中の付着応力度分布から、プレテンション PC 部材の緊張材に ϕ 15.2 mm のインデント付き PC 鋼より線を用いることによって、インデントの無いより線を用いる場合と比較して、伝達長を半分程度にできる可能性があることを確認した。

キーワード：超高強度コンクリート、PC 鋼材、付着、鋼繊維

1. はじめに

筆者らが開発を進めている^{例え(1-3)}鋼繊維を混入した超高強度コンクリートを建築部材に用いる場合、高強度鉄筋との組合せで使用することが考えられる。この超高強度コンクリートと高強度鉄筋を梁部材に対して利用すれば、曲げ強度を大きくすることが可能であるが、長期荷重時の変形や降伏変形は大きくなってしまふ。高層建物では、通常大地震時においても層間変形角を 1/100 以下に抑えるように設計されているので、高強度鉄筋を用いた梁部材は曲げ強度を発揮する以前に限界変形に達してしまう可能性もある。これに対して、PC 鋼材を用いてプレストレスを導入すれば、長期荷重時から曲げ強度時までの変形量を小さくすることができ、高強度鉄筋を用いた場合と比較して、降伏変形を小さくすることが可能となる。さらに、プレストレス力の存在により、ひび割れ発生荷重が大きくなるといったメリットもある⁴⁾。また、プレストレスコンクリート（以下、PC）構造では、鉄筋コンクリート構造よりも、長スパン化が可能となり、大空間の形成や柱が少なくなることによる躯体重量の軽減が図れると考えられる。

PC 構造にプレストレス力を与える方法としては大きくポストテンション方式とプレテンション方式があるが、ポストテンション方式の場合、シース管や定着具の配置の制約により超高強度コンクリートの利点を十分に活かした薄肉部材の実現は難しいことが考えられる。そこで本稿では、薄肉部材が実現可能なプレテンション PC 部材を開発するにあたって把握しておくことが必要な、PC 鋼材と超高強度コンクリートの付着特性について検討するために実施した引抜実験結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体一覧を表 - 1 に、試験体を図 - 1 に示す。実験パラメーターは PC 鋼材の径・表面形状・SF 混入の有無とした。PC 鋼材には、 ϕ 15.2 mm 7 本より線（規格降伏点強度 222 kN (1 600 N/mm²)), ϕ 15.2 mm インデント付き 7 本より線、 ϕ 9 mm 異形 PC 鋼線（規格降伏点強度 78 kN (1 226 N/mm²)) の 3 種類を用いた。鋼繊維は公称長さ 30 mm・公称径 0.6 mm・両端フック付きのものを用い、混入量は体積比 1%とした。試験体は全部で 6 体であり、各 PC 鋼材に対して、鋼繊維混入したものと無混入のものを用意した。

表 - 1 試験体一覧

試験体名	PC 鋼材	鋼繊維
15.2 N-SF0	ϕ 15.2 7 本より線	なし
15.2 N-SF1		1% vol.
15.2 D-SF0	ϕ 15.2 7 本より線 (インデント付き)	なし
15.2 D-SF1		1% vol.
9 D-SF0	ϕ 9 異形 PC 鋼線	なし
9 D-SF1		1% vol.

試験体形状は断面 100 × 100 mm、長さ 2 000 mm とし、断面の中心に PC 鋼材を配置した。PC 鋼材には標準径の 10 倍間隔でひずみゲージを貼付け、鋼材ひずみの計測を行った。なお、鋼材にはプレストレスを導入しておらず、せん断補強筋や割れ補強筋も配置しなかった。

2.2 材料特性

コンクリートにはシリカフェュームセメントを用い、水結合材比は 14.0%とした。鋼繊維を混入していないもの、鋼繊維を体積比 1%混入したもののスランプフローはそれ

*1 Hiroto TAKATSU : (株) 竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 研究員

*2 Hideki KIMURA : (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 マネージャー 工 (博)

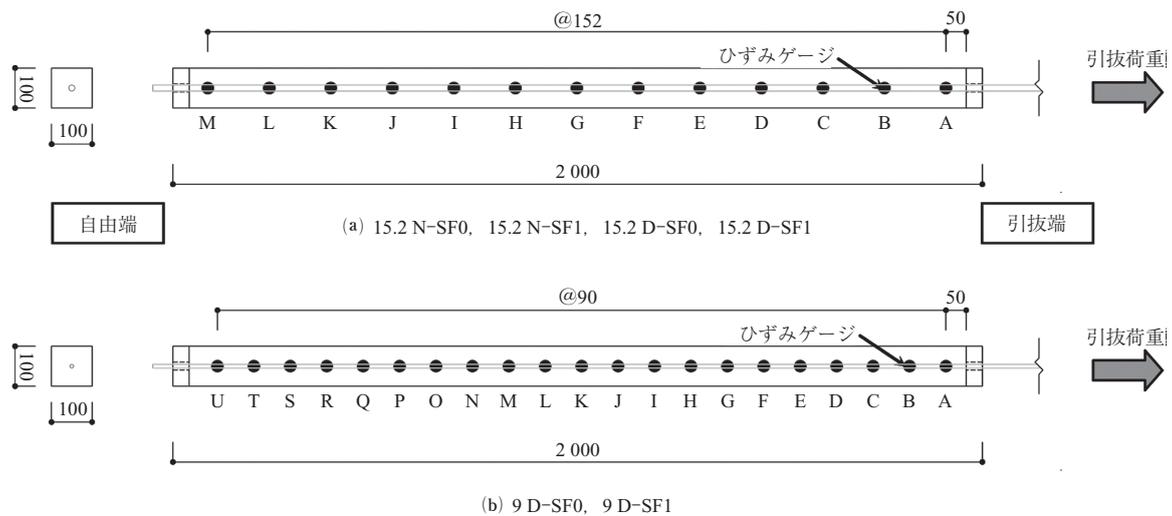


図 - 1 試験体図 (単位 : mm)

ぞれ 605 × 595 mm, 560 × 555 mm であった。コンクリート打設後、型枠をスタイロフォームで覆うことで、簡易な断熱養生を行った。実験時のコンクリート材料特性を表 - 2 に、PC 鋼材の材料特性を表 - 3 に示す。

表 - 2 コンクリート材料特性

	σ_B [N/mm ²]	$E_c (\times 10^4)$ [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]	ν
鋼繊維なし	162.8	4.243	5.29	0.242
鋼繊維 1 % vol.	175.5	4.532	-	0.232

σ_B : シリンダー ($\phi 100 \times 200$ mm) 圧縮強度, E_c : 静弾性係数, σ_t : 割裂引張強度, ν : ポアソン比

表 - 3 PC 鋼材材料特性

	σ_y [N/mm ²]	$E_s (\times 10^5)$ [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]
$\phi 15.2$	1 860.5	2.303	1 951.6
$\phi 15.2$ (インデント)	1 839.9	2.142	1 920.7
$\phi 9$	1 413.5	2.083	1 578.6

σ_y : 降伏強度 (0.2 % オフセット値), E_s : 静弾性係数, σ_u : 引張強度

2.3 加力・計測

加力は、350 kN センターホールジャッキで行った。加力状況を図 - 2 に示す。引抜端側のくさびのくい込みを考慮して、0.05 P_u · 0.1 P_u · 0.2 P_u (P_u : 規格引張荷重) を載荷後に単調引抜荷重を実施する計画とした (図 - 3)。

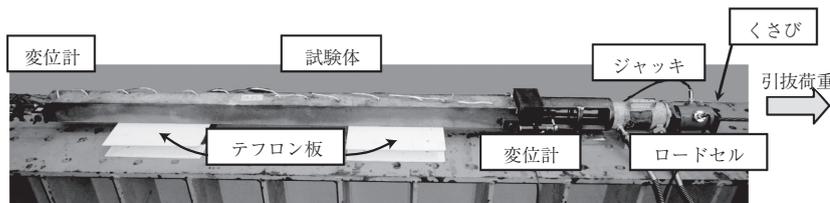


図 - 2 加力状況

また、自由端および引抜端の鋼材のすべり量を変位計により計測した。

3. 実験結果

3.1 PC 鋼材ひずみ分布

実験で得られた PC 鋼材のひずみ分布を図 - 4 に示す。図の縦軸は PC 鋼材のひずみを、横軸はひずみの計測位置を示している。

$\phi 15.2$ mm PC より線, $\phi 15.2$ mm インデント付き PC 鋼より線を用いた試験体では、引抜荷重 50 ~ 250 kN (規格降伏点強度の 1.13 倍) まで 50 kN 毎のひずみ分布を、 $\phi 9$ mm の PC 鋼線を用いた試験体では、引抜荷重 15 ~ 90 kN (規格降伏点強度の 1.15 倍) まで 15 kN 毎のひずみ分布を示した。ただし、15.2 D-SF0 試験体については、荷重が 250 kN に達する前に、PC 鋼材に沿った割裂ひび割れが試験体に発生して耐力が低下したため、最大荷重 (238 kN) 時のひずみ分布を示した。

$\phi 15.2$ mm PC より線を用いた 15.2 N-SF0 (鋼繊維なし) と 15.2 N-SF1 (鋼繊維 1 % vol.) では、荷重の増加にしたがって引抜端から自由端に向かってひずみが伝達し、引抜荷重 250 kN (規格降伏点強度の 1.13 倍) 時には、図中 H 位置 (引抜端から 1 114 mm, 鋼材径の 70 倍 + 50 mm) までひずみが発生している様子が計測された。

一方、 $\phi 15.2$ mm インデント付き PC より線を用いた 15.2 D-SF0 (鋼繊維なし) と 15.2 D-SF1 (鋼繊維 1 % vol.) では、荷重が増加しても引抜端から自由端側へのひ

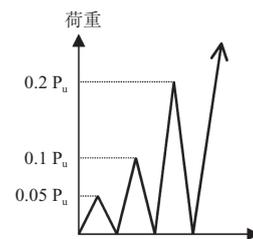


図 - 3 加力サイクル

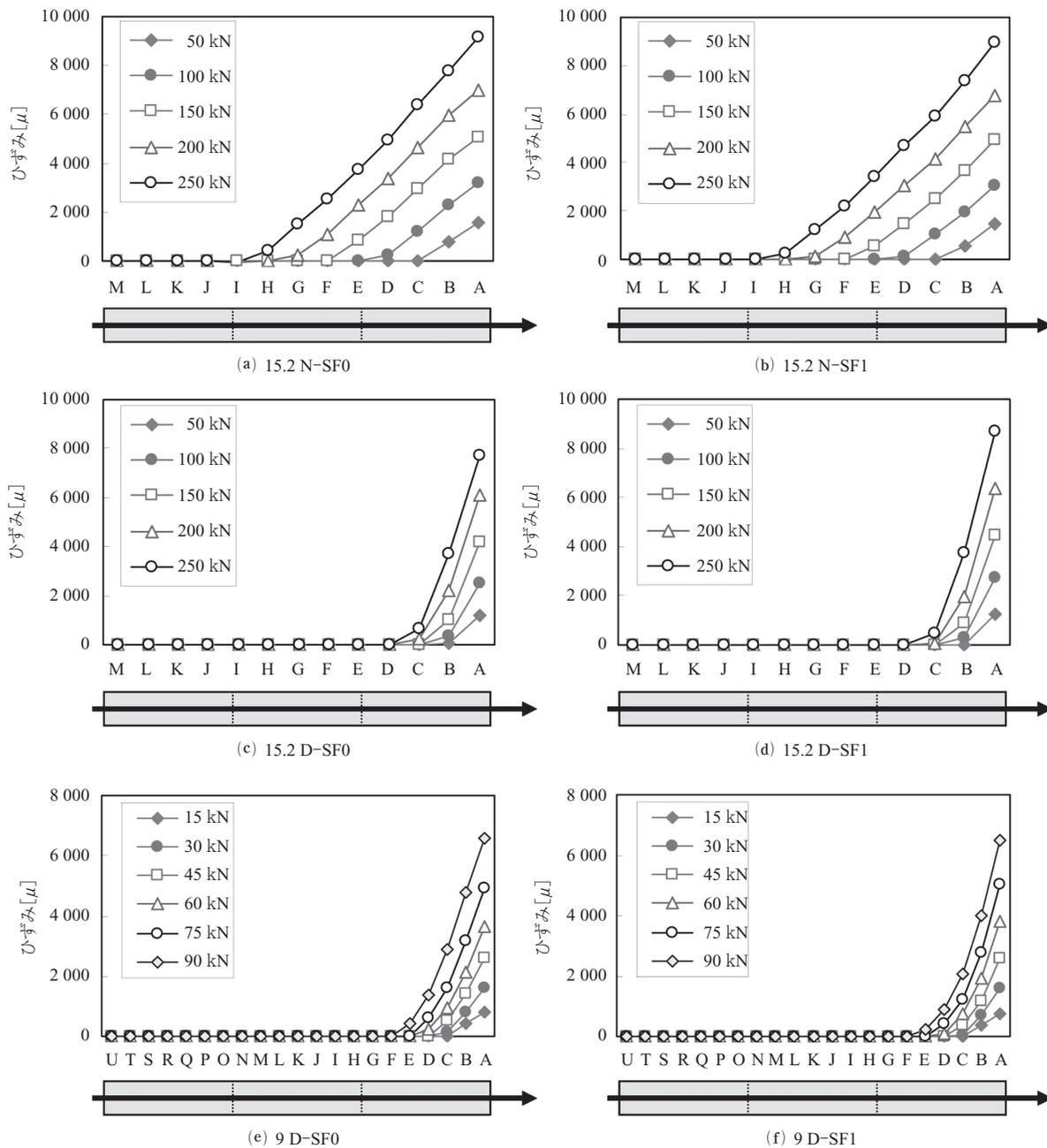


図 - 4 PC 鋼材ひずみ分布

ずみの伝達はほとんど見られず、引抜荷重 250 kN（規格降伏点強度の 1.13 倍）時でも、ひずみが計測されたのは図中 C 位置（引抜端から 354 mm，鋼材径の 20 倍 + 50 mm）までであった。

ひずみ分布の勾配をインデントの無い 15.2 N-SF0 や 15.2 N-SF1 と比較すると、インデント付き PC 鋼より線を用いたものの傾きが大きいことから、インデントの存在により付着耐力が大きくなっていたことが推察される。

φ 9 mm 異形 PC 鋼線を用いた 9 D-SF0（鋼繊維なし）と 9 D-SF1（鋼繊維 1 % vol.）でも、荷重が増加しても自由端側へのひずみの伝達はほとんど見られず、引抜荷重 90 kN（規格降伏点強度の 1.15 倍）時で、図中 E 位置（引抜端から 410 mm，鋼材径の 40 倍 + 50 mm）までのひず

みのみが計測された。

いずれの試験体においても、ひずみ分布性状に鋼繊維有無の差は明確には現れなかった。

3.2 付着応力度 - すべり量関係

ここでは、PC 鋼材の計測ひずみから各測定区間の平均付着応力度 - すべり関係を求めた。

引抜端から i 番目と j 番目の計測区間の平均付着応力度 τ_{ij} は (1) 式により算出した。

$$\tau_{ij} = A_p \cdot (\sigma_i - \sigma_j) / (\pi \cdot \phi \cdot \Delta x) \quad (1)$$

σ_i, σ_j : i 位置, j 位置での PC 鋼材の応力度

A_p : PC 鋼材の断面積 (= $\pi \cdot \phi^2 / 4$)

ϕ : PC 鋼材の標準径

Δx : i 番目と j 番目のゲージ間隔 (= 10ϕ)

ここで、 σ_i 、 σ_j はi番目、j番目のひずみの測定値から材料試験結果を近似したMenegotto-Pinto式⁵⁾(図-5)により計算した。また、PC鋼材の断面は直径 ϕ の円筒断面と仮定した⁶⁾。

一方、i-j区間のすべり量 S_{ij} については、区間の中央のひずみをi番目、j番目の計測ひずみから線形補間により求め、i-j区間中央までのひずみを積分することによって求めた(図-6)。

以上の方法で求めた平均付着応力度とすべり量の関係を図-7に示す。図には、区間A-B、B-C、C-D(図-1参照)の3区間のみを示した。図より、以下のことがわかる。

- 最大付着応力度は、 ϕ 15.2のPC鋼より線、 ϕ 9mmの異形PC鋼線、 ϕ 15.2mmのインデント付きPC鋼より線の順に大きくなる。
- 既往のPC鋼より線の実験で見られる、付着降伏(大きくすべり量が増加する点)後に一旦付着応力度が低下する現象⁷⁾は見られなかった。
- ϕ 15.2mmのインデント付きPC鋼より線の試験体では、区間B-Cおよび区間C-Dで、その他の試験体でも区間C-Dで最大付着応力度に達する前に実験が終了した。
- 鋼繊維の混入により、最大付着応力度が上昇する。

表-4に区間A-Bと区間B-Cの最大付着応力度と最大付着応力度時のすべり量、最大付着応力度をシリンダー圧縮強度の平方根で基準化した最大付着強度の値、鋼繊維を混入した基準化最大付着強度を鋼繊維無しのもので割った値の一覧を示す。表より、鋼繊維混入により最大付着応力度がおおむね上昇していたことが確認された。

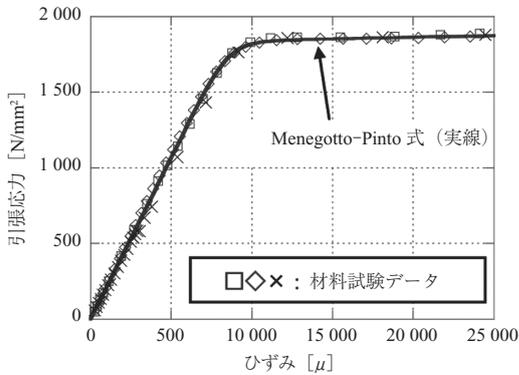


図-5 PC鋼材の応力-ひずみ関係(ϕ 15.2インデント付きの例)

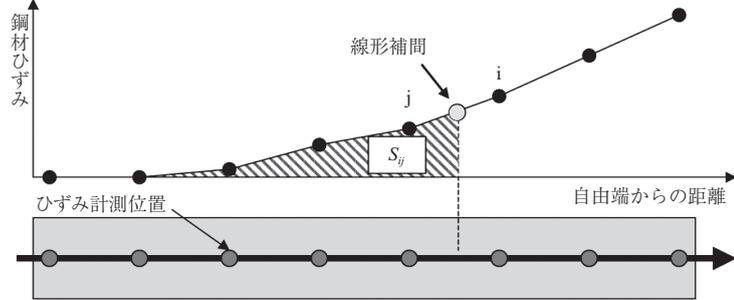


図-6 すべり量算定の概念図

表-4 実験結果一覧

試験体	区間 A-B				区間 B-C				τ_{max} : 最大付着 応力度 $S_{\tau max}$: 最大付着 応力度時 すべり量
	τ_{max} [N/mm ²]	$S_{\tau max}$ [mm]	$\tau_{max}/\sigma_B^{1/2}$	鋼繊維1% 鋼繊維なし	τ_{max} [N/mm ²]	$S_{\tau max}$ [mm]	$\tau_{max}/\sigma_B^{1/2}$	鋼繊維1% 鋼繊維なし	
15.2 N-SF0	5.67	2.30	0.44	1.26	8.21	2.05	0.64	0.93	
15.2 N-SF1	7.44	2.12	0.56		7.89	2.33	0.60		
15.2 D-SF0	21.80	0.58	1.71	1.10	-	-	-	-	
15.2 D-SF1	24.85	0.58	1.88		-	-	-		
9 D-SF0	9.92	0.58	0.78	1.21	10.79	0.56	0.85	1.08	
9 D-SF1	12.49	0.53	0.94		12.09	0.60	0.91		

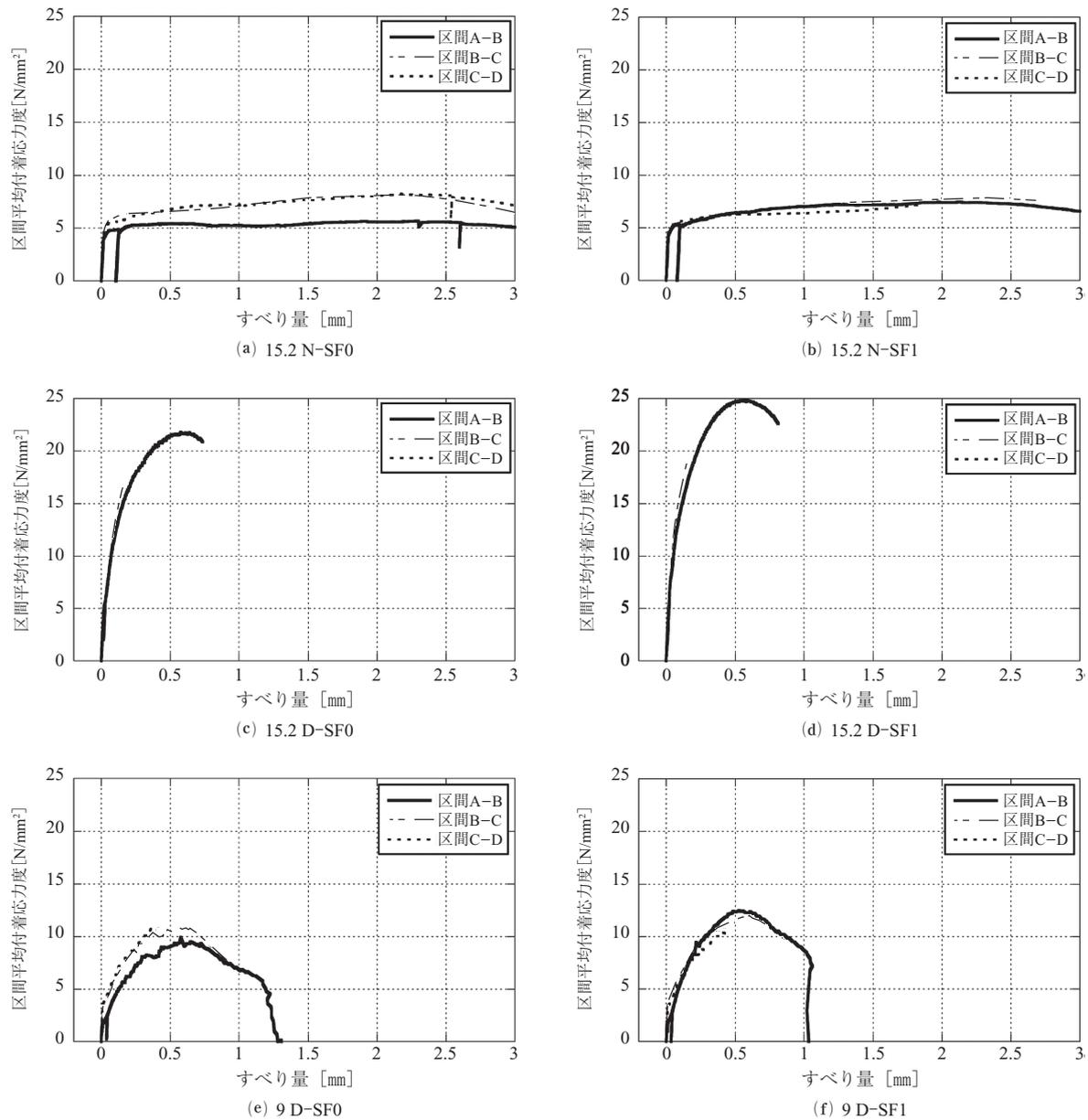


図 - 7 平均付着応力度 - すべり量関係

達長を半分以下にできる可能性があるということが確認された。

φ 9 mm の異形 PC 鋼線を用いた 9 D-SF0 (鋼繊維なし) と 9 D-SF1 (鋼繊維 1 % vol.) についても、引抜端側から自由端側への付着応力度発生領域の広がりほとんど見られなかった。付着応力度発生領域の引抜端からの距離は、インデント付き PC 鋼より線とほぼ等しく、プレテンション PC 部材に用いる場合、伝達長を同等にすることができるものと推察される。

4. おわりに

超高強度コンクリートを用いた角柱に、PC 鋼材を埋め込んで鋼材の引抜試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- 付着強度は、φ 15.2 mm PC 鋼より線、φ 9 mm 異形 PC

鋼線、φ 15.2 mm インデント付き PC 鋼より線の順に大きくなった。PC 鋼より線において、表面にインデントを設けることによって付着強度が大きく上昇する。

- 超高強度コンクリートに鋼繊維を 1 % 混入することによって、最大付着応力度が上昇する。その上昇率は、本実験においては最大で 26 % であった。
- 付着応力度分布の分析結果から、超高強度コンクリートをプレテンション PC 部材に用いる場合、緊張材に φ 15.2 mm PC 鋼より線を用いる場合に比べ、φ 15.2 mm インデント付き PC 鋼より線を用いた場合、その伝達長を半分程度にできる可能性がある。

(本報告は、渡邊史夫退官記念シンポジウム (2008.10.24-10.25) 論文集に掲載された論文を一部加筆修正したものである。)

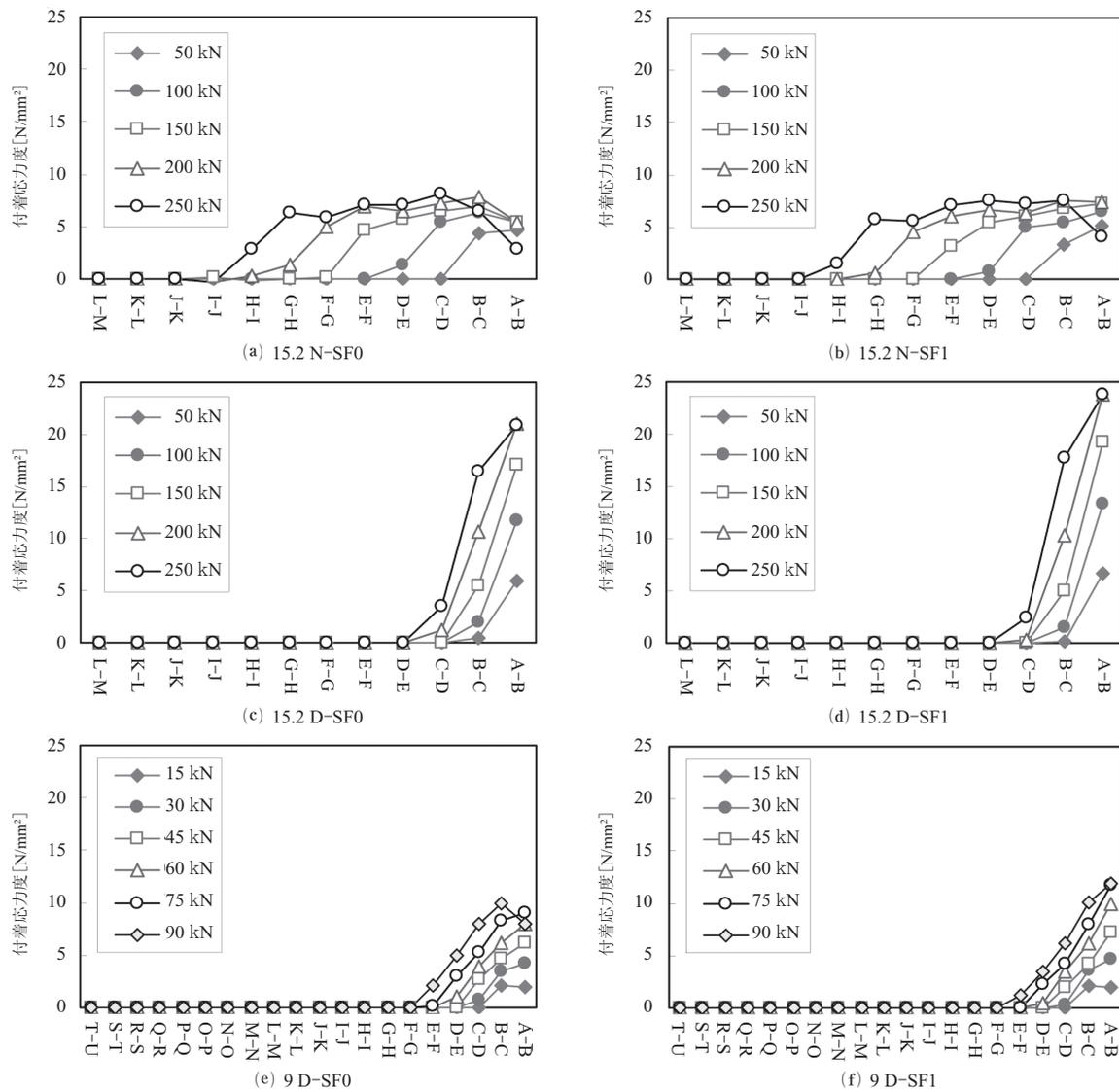


図 - 8 平均付着応力度分布

参考文献

- 1) 高津比呂人, 太田義弘, 木村秀樹, 石川裕次: 超高強度コンクリートを用いたPC鋼材定着部に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.803-804, 2005.9
- 2) Takatsu, H., Kimura, H., Kambayashi, A. and Ishikawa, Y.: Experimental Study on Steel Fiber-reinforced Ultra High-strength Concrete Columns, Proceedings of The 2nd fib Congress, ID8-17, 2006.6
- 3) 高津比呂人, 木村秀樹, 石川裕次: Fc200 コンクリートを用いたRC角柱の中心圧縮試験, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.339-340, 2006.9

- 4) PC技術の新たな発展-第36回PC技術講習会-, プレストレストコンクリート技術協会, 2008.2
- 5) Menegotto, M. and Pinto, P.E.: Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, IABSE Reports, Vol.13, pp.15-22, 1973
- 6) 是永健好, 渡辺英義, 小林淳: プレキャストPC造柱・梁接合部内におけるPC鋼材の付着性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.333-338, 1995.6
- 7) 足立将人, 高津比呂人, 西山峰広: PC鋼より線とグラウト材間の付着特性のモデル化, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.1 009-1 012, 2000.9

[2011年3月4日受付]