

論文

[2141] 連続繊維緊張材を用いたプレテンションPC薄板の端部定着に関する研究

佐野史佳*¹ 出光隆*² 山崎竹博*² ミヨーキン*³

1. はじめに

近年、多くのコンクリート構造物にプレストレストコンクリートが用られているが、最近それらのPC緊張材として、高強度かつ耐腐食性、非帯磁性に優れたFRP材を使用すべく多くの研究が実施されている。連続繊維緊張材をPC構造物に適用するには破壊形式が脆性的であること、長期安定性が不明であること、力学特性が鋼材ほど明確でないことなど解決しなければならない問題点も多く残っている。本研究は、CFRP, AFRP緊張材を用いてPC薄板を作製する場合の端部定着について検討したものである。まず、各緊張材の引張試験を行い、引張強度、弾性係数等を調べ、次にそれらを用いて、プレテンション方式によって厚さの異なるPC薄板を作製して、部材軸方向のひずみ分布から伝達長やプレストレス量を求める。さらに、縦ひびわれが生じないかぶり厚さ（以下“必要最小かぶり”と呼ぶ）についても検討した。縦ひびわれの発生は緊張材のポアソン効果に起因するが、ポアソン比を直接測定することは不可能である。よってコンクリートの部材端でひずみを測定することにより間接的に連続繊維緊張材のみかけのポアソン比（コンクリート中で発揮されるポアソン効果から得られるもの）を算定する方法も試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した連続繊維緊張材は、より線状のCFRPφ5.0mmおよびφ8.0mm、組紐状のAFRPφ5.2mmおよびφ7.3mmの4種類である。メーカーによって保証破断荷重が与えられているが、より確かな値を得るため各緊張材の力学特性を調べた。緊張材両端に定着用

表-1 引張試験結果

緊張材の種類	膨張圧 (kgf/cm ²)	破断荷重 (kgf)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸び率 (%)
CFRP φ5.0	1131	2248	15200	1.472
メーカーの保証値		1800	14600	1.600
CFRP φ8.0	510	7479	14712	1.692
メーカーの保証値		7000	14300	1.700
AFRP φ5.2	621	4111	7419	2.562
メーカーの保証値		3000	7000	2.000
AFRP φ7.3	602	8292	8085	2.562
メーカーの保証値		6000	7000	2.000

膨張材で鋼管を固定し、膨張圧が引張試験時に500kgf/cm²以上であることを確認して試験を実施した。破断荷重および弾性係数はそれぞれ、ロードセルと伸び計を用いて測定し

表-2 配合設計

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kgf/m ³)					空気量 (%)	スランプ (cm)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤		
10	40	48	170	425	831	950	7.65	7	4.0

た。試験結果およびメーカーの保証値を表-1に示す。破断荷重、弾性係数ともにメーカー保証値を若干上回る値を示している。[1] 使用したコンクリートの配合を表-2に示す。ただし、粗骨材の最大寸法はPC薄板のかぶり部分がかかなり小さいため10mmとした。

- * 1 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (学生会員)
- * 2 九州工業大学 工学部設計生産工学科、工博 (正会員)
- * 3 鹿児島大学 海洋土木工学科、工修 (正会員)

2.2 PC薄板供試体の種類

表-3に供試体の厚さ・幅・長さ、かぶりの目標値を示す。各供試体はかぶり厚さを各緊張材の直径の5倍(5×φ)を基準として、0.5cmずつ上下に変化させて作製した。幅、長さもそれぞれ変化させている。ゲージの貼付位置を図-1に示す。繊維の滑り込みを考慮して端部から20mmの位置に直交ゲージを、端面のかぶり位置には10mmゲージを、他は30mmゲージをそれぞれ貼付した。

2.3 PC薄板の製作

PC薄板の製作は引張試験の場合と同様、定着用膨張材で緊張材両端に鋼管を取り付け、IM枠にセットして行った。各緊張材とも導入時の緊張力が破断荷重の6割となるように緊張した。緊張後3日間でリラクセーション率を調べ、その後、

PC薄板の型枠をセットしてコンクリートを打設した。なお薄板は両面のコンクリートひずみを測定する目的で幅方向が鉛直面になるようにたて打ちした。コンクリートを2日間養生した後、型枠を脱型しゲージを貼付する。コンク

リート強度が目標強度300kgf/cm²に達してから、緊張力を段階的に解放してプレストレスを導入した。

2.4 伝達長、必要最小かぶりおよび見かけのポアソン比の求め方

伝達長は測定した歪み分布図で、両端からプレストレスが一定になるまでの距離を平均値して求めた。プレストレス導入後に目視とゲージの値からひびわれを確認し、ひびわれが入っていないもののうち最も薄いかぶりを必要最小かぶりとした。

ポアソン比は、供試体にプレストレスを導入する際、コンクリート側面の両端部にそれぞれ貼付したゲージによりひずみを測定し、その値を用いて算定した。計算方法を以下に示す。緊張解放時に緊張材とコンクリートとの間に生じる接触圧は、およそ図-2に示す分布となる。接触圧は、厚肉円筒理論により次式で表される。[2]

$$p_i = \Phi - \Psi \cdot F_i / A_s \quad (1)$$

ここに $\Phi = \nu_s \cdot P_e / (A_s \cdot \xi)$

$$\Psi = (\nu_s + n \cdot \nu_c \cdot \kappa) / \xi$$

$$\xi = n \cdot \kappa \{ (1 - \nu_c) + (1 + \nu_c) r_2^2 / r_1^2 \} + (1 - \nu_s)$$

表-3 供試体寸法

緊張材の種類	供試体番号	寸法 (cm)		目標かぶり (cm)
		厚さ	幅・長さ	
CFRP φ5.0	C5.0-1	2.00	5×50	0.75
	-2	2.50	5×50	1.00
	-3	3.00	5×50	1.25
	-4	3.50	5×50	1.50
	-5	4.00	5×50	1.75
CFRP φ8.0	C8.0-1	4.05	5×80	1.65
	-2	4.55	5×80	1.90
	-3	5.05	5×80	2.15
	-4	5.55	7×80	2.40
	-5	6.05	7×80	2.65
AFRP φ5.2	A5.2-1	2.60	5×80	1.05
	-2	3.10	5×80	1.30
	-3	3.60	5×80	1.55
	-4	4.10	5×50	1.80
	-5	4.60	5×50	2.05
AFRP φ7.3	A7.3-1	6.80	10×80	3.03
	-2	7.30	10×80	3.28
	-3	7.80	10×80	3.53
	-4	8.30	10×80	3.79

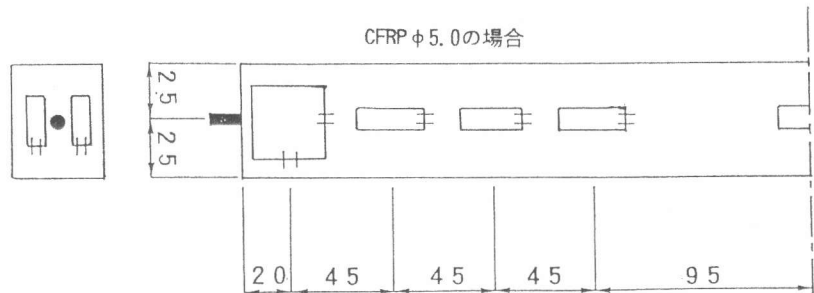


図-1 ゲージ貼付位置

単位は (cm)

$$n = E_s / E_c$$

$$\kappa = r_1^2 / (r_2^2 - r_1^2)$$

p_i : 緊張材とコンクリートとの間に生じる接触圧

P_e : 導入直後のプレストレス力

A_s : 緊張材の公称断面積

ν_s : 緊張材のポアソン比

ν_c : コンクリートのポアソン比

r_1 : 緊張材の公称半径

r_2 : コンクリートの有効半径

E_s : 緊張材の弾性係数

E_c : コンクリートの弾性係数

F_i : 緊張材にかかる軸応力

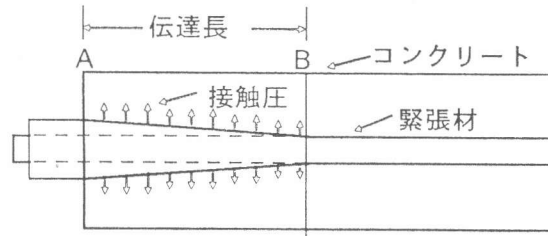


図-2 端部の接触圧

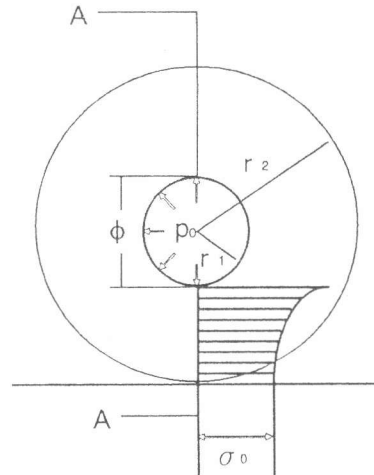


図-3 内圧を受けるコンクリートの厚肉円筒の応力状態

部材端部では $F_i=0$ となるから、接触圧は

$$p_0 = \Phi = \nu_s \cdot P_e / (A_s \cdot \xi) \quad (2)$$

となる。

一方、図-3に示すように、接触圧によってコンクリート表面に生じるフープテンションは

$$\sigma_0 = 2 r_1 p_0 / \{ (1 + \nu_c)^2 (r_2^2 - r_1^2) \} \quad (3)$$

となる。以上の式(1)~(3)をまとめると、

$$\nu_s = A_s \cdot P_0 \cdot \xi' / (P_e + A_s \cdot P_0) \quad (4)$$

$$\text{ここに } \xi' = n \cdot \kappa \{ (1 + \nu_s) + (1 - \nu_s) r_2^2 / r_1^2 \} + 1$$

となる。従って、コンクリート表面に生じる引張ひずみを測定することにより、緊張材のみかけのポアソン比 ν_s を求めることができる。[2]

3. 実験結果および考察

コンクリートの強度および弾性係数、FRPの弾性係数などを表-4に示す。いずれも目標強度に近い値が得られている。各供試体についてかぶりの実測値、緊張材の公称半径および公称断面積、導入時緊張力等を表-5に示す。

表-4 コンクリート強度

供試体番号	コンクリートの 圧縮強度 (kgf/cm ²)	コンクリートの 引張強度 (kgf/cm ²)	コンクリートの 弾性係数 (kgf/cm ²)
CFRP φ5.0	335	30.5	3.10×10 ⁵
φ8.0-1~3	339	30.6	3.11×10 ⁵
-4~5	305	23.8	3.22×10 ⁵
AFRP φ5.2-1~3	314	23.9	3.18×10 ⁵
-4~5	298	22.6	3.44×10 ⁵
AFRP φ7.3	322	33.5	3.08×10 ⁵

3.1 リラクゼーションによる緊張力の減少

緊張力の減少状況の一例を図-4に示す。リラクセーションによる3日後の緊張力へのロス、C5.0では4.3%、C8.0では2.6%、A5.2では8.6%、A7.3では9.2%あった。AFRPは初期のロスが大きく若干大きな値を示しているがそれぞれ初期緊張力の90%以上の緊張力は確保されている。

表-5 測定結果

供試体番号	実際のかぶり(cm)				緊張材の公称半径 r ₁ (cm)	緊張材の公称断面積 (cm ²)	導入時の緊張力 (kgf)	導入直後のプレストレス (kgf/cm ²)
	表		裏					
	加圧側	固定側	加圧側	固定側				
C5.0-1	0.81	0.80	0.75	0.80	0.25	0.101	1331	ひびわれ発生
-2	0.80	1.03	1.18	1.05				ひびわれ発生
-3	1.20	1.20	1.49	1.43				85.6
-4	1.58	1.56	1.50	1.46				73.7
-5	1.80	2.27	1.21	1.75				64.7
C8.0-1	1.55	1.65	1.60	1.64	0.40	0.304	4360	ひびわれ発生
-2	1.81	1.85	1.84	1.87				ひびわれ発生
-3	2.00	2.20	2.10	2.35				ひびわれ発生
-4	2.50	2.45	2.35	2.40				ひびわれ発生
-9	2.73	2.60	2.80	2.75				100.4
A5.2-1	0.94	1.01	1.06	1.04	0.26	0.210	2426	ひびわれ発生
-2	1.24	1.38	1.33	1.21				ひびわれ発生
-3	1.53	1.56	1.57	1.60				ひびわれ発生
-4	1.84	1.91	1.74	1.80				57.8
-5	2.07	2.08	2.05	1.99				51.6
A7.3-1	2.83	2.94	3.03	2.91	0.37	0.420	4876	ひびわれ発生
-2	3.27	3.38	3.32	3.20				ひびわれ発生
-3	3.49	3.58	3.63	3.50				ひびわれ発生
-4	3.55	3.73	3.78	3.73				50.1

3.2 プレストレス分布と伝達長

段階的に緊張解放した時のCFRPのひずみ分布図を図-6(a)、(b)、(c)に、AFRPのひずみ分布図を同図(d)、(e)、(f)にそれぞれ示す。全体的に、CFRPのひずみ分布は部材端から左右対称型でなめらかに増加していくのに対し、AFRPのそれは凹凸があり、非対称型となることが多い。また、CFRPの場合、ひずみ増加部の勾配は導入プレストレスが大きくなっても、あまり増加せずほぼ一定となっているのに対し、AFRPの場合はプレスト

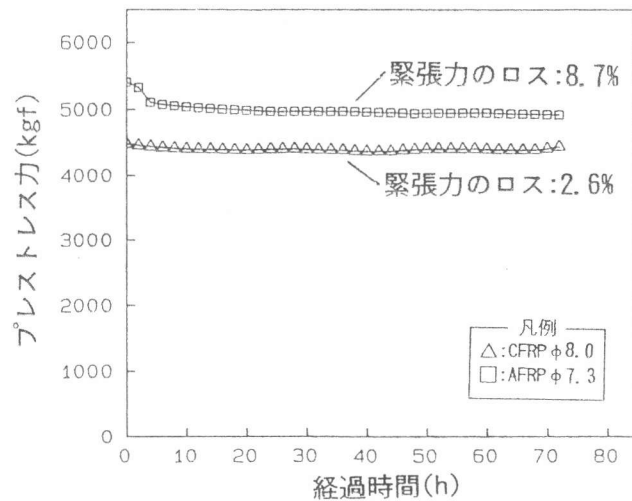


図-4 緊張力の減少状況

レスの増加とともに勾配も漸増している。このことから、CFRPの場合、端部定着は伝達長が長くなることによってなされるのに対し、AFRPの場合は、伝達長の増加と付着力の増大の両方で端部定着がなされるようである。AFRPでひびわれが生じる場合は、部材端近くで急激にひずみが増加している。このことは、部材端付近に付着応力が集中することを意味しており、本実験のように部材厚が薄い場合は、AFRPにはひびわれが入り易い傾向がみられる。また、AFRPでは、かぶりが大きくひびわれが入らない場合でも局部的に付着破壊が生じるためか、必ずしも伝達長は短くならない。以上述べたように、CFRPとAFRPとで端部定着機構に差が生じる原因は、前者の表面が螺旋状の凹凸を有しているため、回転しながら応力集中を緩和できることにあると考えられる。ひびわれが発生しない供試体について緊張解放後の伝達長を求めると、CFRPでは、C5.0のとき14.2cm (28.4φ)、C8.0のとき22.8cm (28.1φ)となり、AFRPは伝達長が長くなりプレストレス一定の部分が生じなかった。

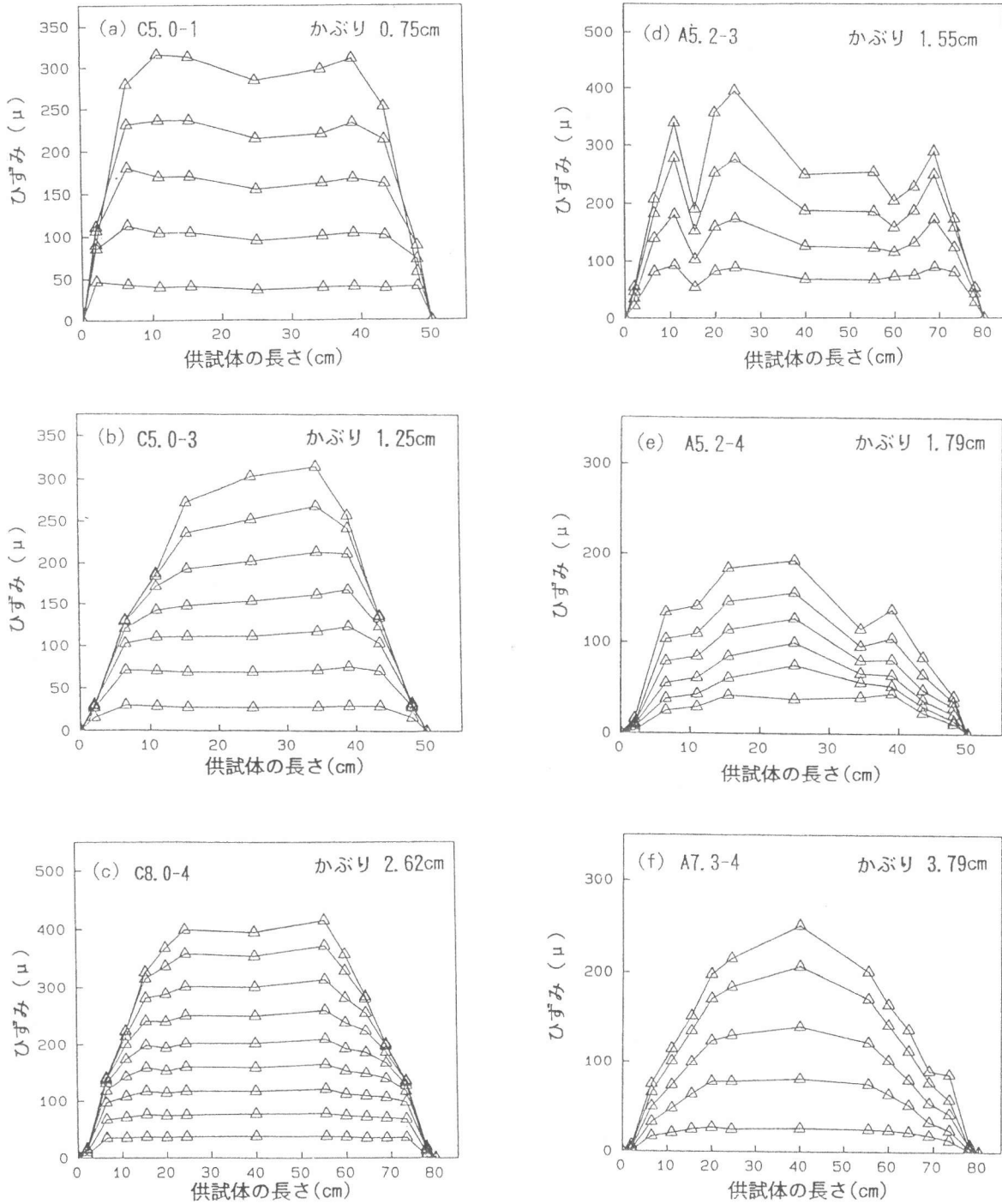


図-5 ひずみ分布

3.3 必要最小かぶり

導入プレストレスと部材端面および部材端の側面に貼付したゲージで測定したひずみとの関係を図-6に示す。端面には圧縮ひずみが、側面にはフープテンションによる引張ひずみが生じ、導入プレストレスが増大するとともに増加する。縦ひびわれの発生は同図に示すようにそれらの値が急変することによって知ることができる。必要最小かぶりはC5.0のとき1.25cm(2.5×φ)、C8.0のとき2.62cm(3.2×φ)、A5.2のとき1.79cm(3.4×φ)、A7.3のとき3.79cm(5.2×φ)となった。AFRPがCFRPより大きくなる原因は、先に述べたように両者の端部定着機構に違いがあるためと考えられる。

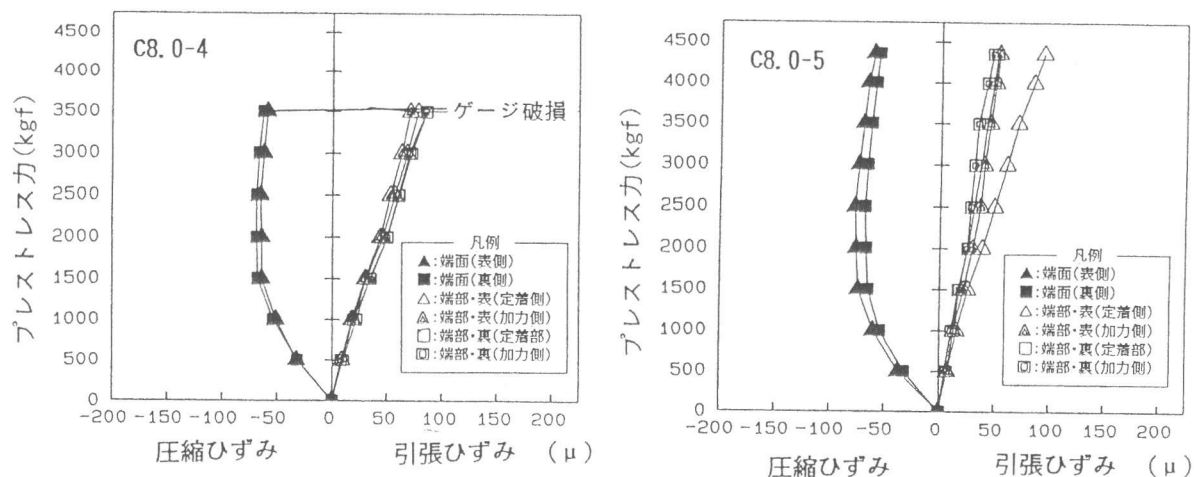


図-6 導入時の部材端ひずみ変化

3.4 みかけのポアソン比の算定

ひびわれを生じた供試体について、部材端部に貼布した直交ゲージのひずみ値から引張応力を求め、その値を式(4)に代入してみかけのポアソン比を求めた。計算結果はC5.0では0.08~0.12、C8.0では0.14~0.27、A5.2では0.05~0.09、A7.3では0.13~0.23となった。それらの値はかなりばらついているが、ひび割れが発生する供試体は上限の値を示し、ひび割れの発生しない供試体は下限に近い値を示している。したがって、必要最小かぶりを求める場合には、それらの上限値を用いれば、安全側の値が得られるものと考えられる。

4 まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次の通りである。

(1) 緊張材の形状がより線状の場合と組紐状の場合とでは端部定着機構が異なる。前者の場合、導入プレストレスが大きくなると、伝達長が長くなることによって端部定着されるのに対し、後者の場合は、伝達長の増加と付着力の増大の両方で端部定着がなされる。そのため、部材端付近に付着応力が集中し、かぶりが薄い場合にはひびわれが入り易い傾向がみられる。

(2) 必要最小かぶりは、CFRPより線では $\phi 5.0\text{mm}$ のとき $1.25\text{cm}(2.5 \times \phi)$ 、 $\phi 8.0\text{mm}$ のとき $2.62\text{cm}(3.2 \times \phi)$ 、AFRP組紐では $\phi 5.2\text{mm}$ のとき $1.79\text{cm}(3.4 \times \phi)$ 、 $\phi 7.3\text{mm}$ のとき $3.79\text{cm}(5.2 \times \phi)$ となった。したがって、薄いPC板用の緊張材には組紐状のものより、より線状のものの方が適しているようである。

(3) 連続繊維緊張材のみかけのポアソン比を求める方法を提案し、概略値を得た。

謝辞：実験に際して昨年度大学院生橘高広一郎氏（現清水建設）、学部生宇根本出氏（現フジタ）および神崎浩二氏（現ハザマ）にご協力頂きました。ここに記して深謝の意を表します

参考文献

- [1] 出光 隆ほか：FRP緊張材の引張試験方法に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、1991年、pp5~8、pp112
- [2] 渡辺 明：ボンド定着プレテンション部材の鋼材定着に関する研究、土木学会論文集、No. 125、1966年、pp21~35