

# 論文 コンクリート中に長期間埋設した連続ガラス繊維補強材の諸物性について

林耕四郎<sup>\*1</sup>・関島謙蔵<sup>\*2</sup>・大塚 靖<sup>\*3</sup>・金野智広<sup>\*4</sup>

**要旨:**本研究では、ガラス繊維を用いた格子状連続繊維補強材を緊張材としたプレテンション方式のPCはりを多数製作し、屋外に長期間放置した後に、補強材を取り出して、引張試験および走査型電子顕微鏡による断面の観察を行って、実際のコンクリート中における諸物性の変化について検討した。その結果、最大引張荷重および引張剛性の保持率の低下は小さく、ガラス繊維自体もほとんど劣化していないことが明らかになった。

**キーワード:**ガラス繊維、PCはり、引張試験、保持率、SEM

## 1. はじめに

ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)は安価なため、FRPの分野では最も多く使用されている。しかし、炭素繊維やアラミド繊維に比べてガラス繊維自体の耐アルカリ性が劣るため、コンクリート補強用に連続ガラス繊維補強材を使用することに対して懸念する意見も多い。連続ガラス繊維補強材の耐アルカリ性に対する研究は、勝木・魚本らによって精力的に行われているが、これらの研究は、水酸化ナトリウムなどのアルカリ溶液に浸漬した促進試験である<sup>1)</sup>。また、土木学会で作成された「連続繊維補強材の耐アルカリ試験方法(案)」も、試験の簡便さを考慮して、コンクリート中に含まれる細孔溶液の組成に相当するアルカリ溶液を用いるものとしている<sup>2)</sup>。

そこで、筆者らは、アルカリ溶液ではなく、実際のコンクリート中における連続ガラス繊維補強材の諸物性の変化について検討することにした<sup>3)</sup>。すなわち、ガラス繊維を用いた格子状連続繊維補強材を緊張材としたプレテンション方式のプレストレストコンクリート(PC)はりを多数製作し、屋外に長期間放置した後に、補強材を取り出した。最初に、引張試験を行っ

て、最大引張荷重や引張剛性などの力学的特性について検討した。次に、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて補強材の断面を観察し、ガラス繊維自体の劣化の有無についても検討した。

## 2. 使用材料およびPCはりの製作

### 2.1 使用材料

#### (1) 連続繊維補強材

使用した連続繊維補強材は、Eガラス繊維をビニルエステル樹脂に含浸させてピン・ワインディング法により格子状に成形したもので、格子間隔は100mmとした<sup>4)</sup>。5本の補強材の引張試験結果の平均値を表-1に示す。

#### (2) コンクリート

コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の最大寸法は25mmとした。配合を表-2に示す。コンクリートの打設は3シリーズに分けて行ったが、材令7日の圧縮強度は34.1~40.1N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は26.5~27.3kN/mm<sup>2</sup>の範囲にあった。

### 2.2 PCはりの製作

PCはりは、補強材を上下2段に対称に配置したものであり、その形状・寸法を図-1に示す。製作に当たっては、補強材の格子交差部の

\*1 旭硝子マテックス(株)生産技術グループ主任技師(正会員)

\*2 清水建設(株)技術研究所先端技術開発部新素材グループ主任研究員 工修(正会員)

\*3 清水建設(株)技術研究所先端技術開発部新素材グループ

\*4 旭硝子マテックス(株)技術部開発グループ

表-1 連続ガラス繊維補強材の特性

筋番	繊維体積混入率 V <sub>f</sub> (%)	公断面積 A (mm <sup>2</sup> )	称積 F <sub>u</sub> (kN)	最大引張荷重 F <sub>u</sub> (kN)	終局ひずみ ε <sub>u</sub> (%)	引張剛性* E A (kN)	引張強度 f <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数* E (kN/mm <sup>2</sup> )
G10	40	78.7	52.9	2.12	2,558	673	32.5	

\* 最大引張荷重の20%と60%の時の荷重とひずみを用いて計算した。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤* A
25	5.7~8.9	34.5	4	36.2	157	455	619	1,113	1.593

\* AE減水剤、セメント量の0.35%添加。

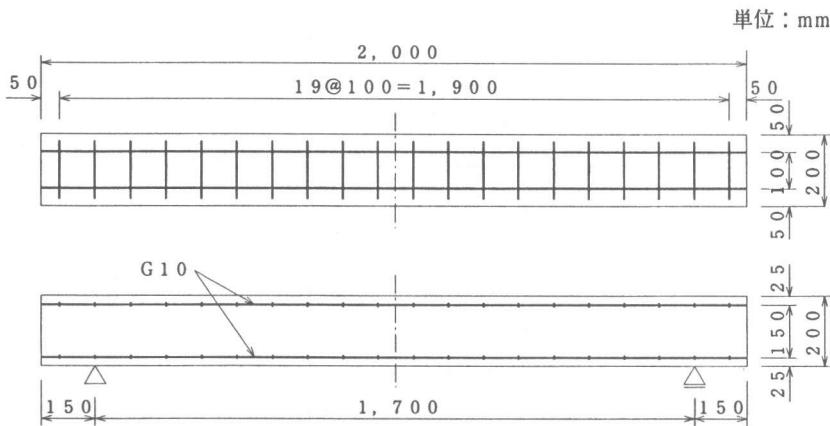


図-1 PCはりの形状・寸法

強度が高い特長を利用して緊張方法を用いた<sup>5)</sup>。

以下に手順を説明する。

① 図-1に示すPCはりよりも両端に長い補強材を成形し、最初に両端部にコンクリートを打設した。

② 両端部のコンクリートブロックが所要の強度に達したら、ロードセルおよび鋼材を介し、2台のジャッキを用いて同時に加力し、コンクリートブロックを押し広げ、補強材を緊張して所定の引張力を与えた（写真-1参照）。

③ 補強材を緊張したまま型枠内にコンクリートを打設し、コンクリートが所要の強度に達したら脱型し、ジャッキを緩めて除荷し、コンクリートにプレストレスを導入した。

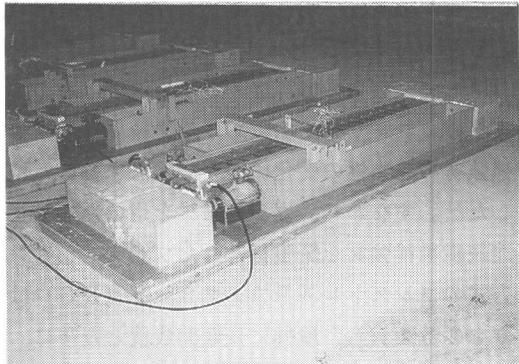


写真-1 PCはりの製作状況

④ 両端部のコンクリートブロックとの間に露出している補強材を切断し、PCはりを製作した。

なお、補強材を緊張してからコンクリートにプレストレスを導入するまでの間、ジャッキの反力および補強材のひずみの経時変化を測定した。

試験の対象としたPCはりの一覧を表-3に示す。これらのPCはりを、スパン1,700mmとする単純支持の条件のもとで、屋外に長期間放置した（写真-2参照）。

表-3 試験の対象としたPCはりの一覧

PCはり	初期状態			プレストレス導入直前*		
	ジャッキの全反力 R <sub>i</sub> (kN)	補強材の緊張力 F <sub>i</sub> (kN)	$\frac{F_i}{F_u} (%)$	ジャッキの全反力 R <sub>p</sub> (kN)	補強材の緊張力 F <sub>p</sub> (kN)	$\frac{F_p}{F_i} (%)$
No. 1	0	0	0	0	0	—
No. 4	96.0	24.0	45.4	83.2	20.8	86.6
No. 9	74.3	18.6	35.1	69.4	17.4	93.4
No. 10	84.9	21.2	40.1	79.9	20.0	94.1
No. 14	53.1	13.3	25.1	52.6	13.1	99.1
No. 15	101.2	25.3	47.8	94.8	23.7	93.7
No. 16	111.0	27.8	52.5	102.9	25.7	92.7

\* 補強材を緊張した後、コンクリートを打設してから、約7日後にプレストレスを導入した。

### 3. 引張試験

#### 3.1 補強材

材令7年7ヶ月～8年1ヶ月に、7体のPCはりのコンクリートをはつて補強材を取り出した。ビニルエステル樹脂は初期の状態よりも若干赤く変色していたが、それ以外の変状は見られなかった（写真-3参照）。

#### 3.2 供試体および試験方法

各PCはりごとに、表面にはつり作業による傷がないものを5本ずつ選び、両端に長さ200mmの鋼管を挿入した後、定着用膨張材を充填して供試体を製作した<sup>6)</sup>。なお、供試体の全長は使用する試験機の大きさの都合によって600mmとした。試験部の中央付近で交差部以外の所に、ひずみゲージを1枚ずつ軸方向に貼り付けた。

引張試験は、膨張材の充填完了後、3～5日後に行った。試験機は、98kN万能試験機を使用した。供試体の両端の鋼管を受け具の中にセットし、鋼管の端面に支圧力を作用させることによって供試体に引張力を与えた。試験においては、供試体が破断するまで荷重を連続的に増加させ、荷重とひずみを測定した。

#### 3.3 試験結果および考察

引張試験結果のまとめ（5体の供試体の平均値）を表-4に示す。

##### (1) 破断状況

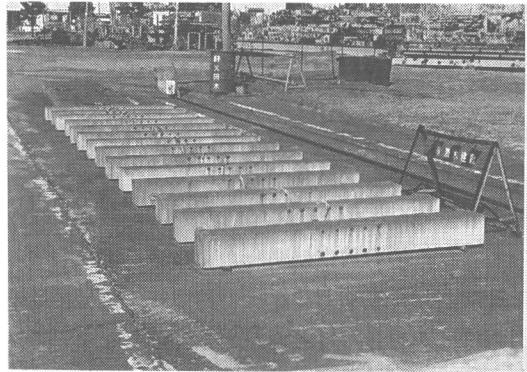


写真-2 PCはりの屋外放置状況

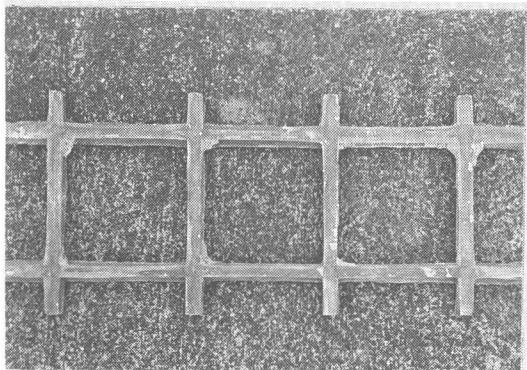


写真-3 取り出した補強材の外観 (No. 1)

破断状況はどの供試体も似ており、試験部がバラバラになって竹ぼうき状を呈した（写真-4参照）。

表-4 引張試験結果のまとめ

PCはり	$F_i$ $F_u$ (%)	最大引張荷重 $F_{ru}$ (kN)	終局ひずみ $\epsilon_{ru}$ (%)	引張剛性* $E_r A$ (kN)	引張強度 $f_{ru}$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数* $E_r$ (kN/mm <sup>2</sup> )	最大引張荷重の保持率 $F_{ru}/F_u$ (%)	引張剛性の保持率 $E_r A/E A$ (%)
No. 1	0	41.6	1.58	2,445	528	31.1	78.6	95.6
No. 4	45.4	51.7	2.09	2,737	657	34.8	97.8	107
No. 9	35.1	50.9	1.93	2,694	646	34.2	96.1	105
No. 10	40.1	50.3	1.99	2,713	639	34.5	95.1	106
No. 14	25.1	49.4	1.90	2,620	627	33.3	93.3	102
No. 15	47.8	48.5	1.82	2,519	616	32.0	91.7	98.5
No. 16	52.5	52.9	2.02	2,713	672	34.5	99.9	106

\* 最大引張荷重の20%と60%の時の荷重とひずみを用いて計算した。

## (2) 最大引張荷重

補強材の初期緊張力と最大引張荷重の比  $F_i/F_u$  と最大引張荷重の保持率  $F_{ru}/F_u$  との関係を、図-2 に示す。初期緊張力が0の供試体No. 1 の保持率が平均で約80%であり、むしろ初期緊張力を与えた他の供試体の方が保持率が高く、それぞれ平均で90%を超えていた。しかし、現在のところ、この理由は明らかでない。実際の構造物は、死荷重などによって補強材に持続的な引張応力が生じる可能性が大きいことを考慮すると、これらの結果はむしろ好ましいと言える。

## (3) 荷重とひずみの関係

No. 1 およびNo. 15の5体ずつの供試体の内で、それぞれの最大引張荷重が5体の平均値に最も近い供試体の荷重とひずみの関係を、図-3 および図-4 に示す。両供試体ともに、試験部にひずみゲージを1枚のみ貼り付けたので、試験部がわずかに湾曲している影響が現れていて、載荷荷重が極めて低い段階で、ひずみが負の方向に傾く現象が見られた。しかし、程なく正常な状態に復帰し、その後は、補強材の破断が生じるまではほぼ直線であった。なお、勝木・魚本らが指摘しているような載荷荷重の低い段階で一旦荷重の低下が生じるような現象は起こらなかった<sup>1)</sup>。

補強材の引張剛性およびヤング係数は、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法（案）」

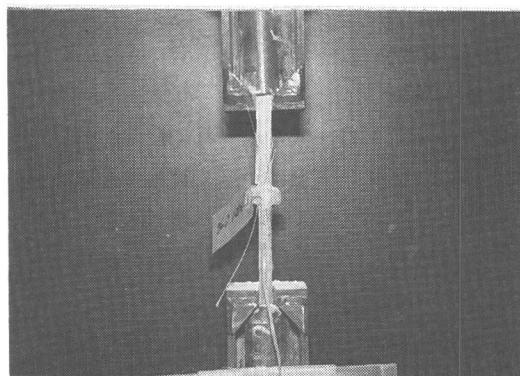


写真-4 供試体の破断状況 (No. 1)

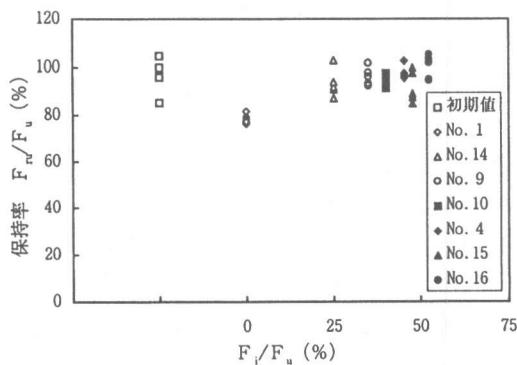


図-2 最大引張荷重の保持率

に従って、最大引張荷重の20%と60%の時の荷重とひずみを用いて計算したので、載荷荷重が極めて低い段階の現象は除去されている<sup>2)</sup>。補強材の初期緊張力と最大引張荷重の比  $F_i/F_u$  と引張剛性の保持率  $E_r A/E A$  との関係を、図-

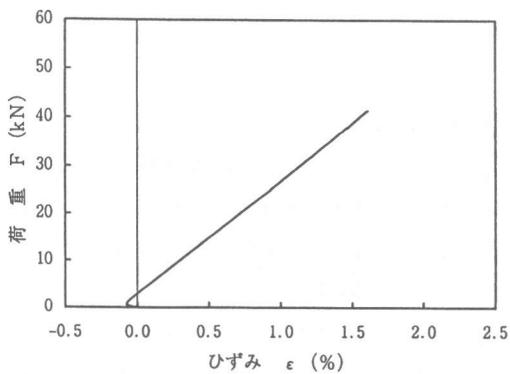


図-3 荷重-ひずみ関係 (No. 1)

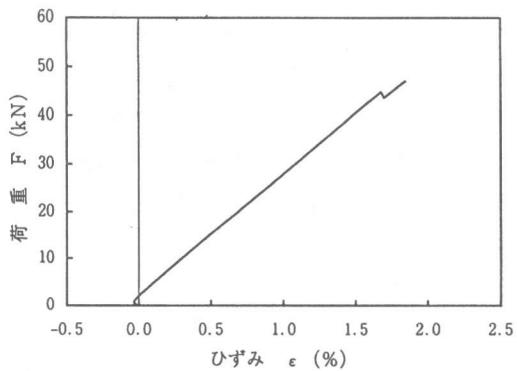


図-4 荷重-ひずみ関係 (No. 15)

5に示す。最大引張荷重の保持率と同様に、No. 1の保持率が若干低くなつた。他の供試体ではばらつきが大きいけれども、保持率の平均値はほぼ100%であった。従つて、補強材の引張剛性に対するコンクリートのアルカリの影響は極めて少ないと考えられる。

#### 4. SEMによる観察

写真-5および写真-6は、供試体No. 1の補強材の切断面をSEMによって撮影した結果を示したものである。外部から浸透したアルカリによる劣化を検討するために、特に補強材とコンクリートとの境界付近を観察した。各写真的左側部分のガラス繊維の形状がくずれているのは、補強材の外縁にあつたために断面を研磨する際に破損が生じたことによる。しかし、すぐ内側のガラス繊維はきれいな円形であり、アルカリによって浸食されていないことが認められ

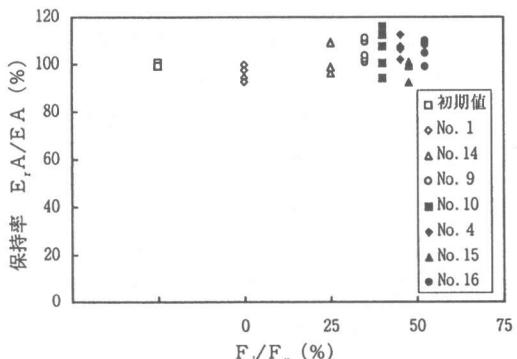


図-5 引張剛性の保持率

た。

勝木・魚本らが使用した引抜き成形のGFRPロッドは繊維体積混入率が高く、表面の樹脂層およびロッド内部の繊維間の樹脂厚が非常に薄かつたために、アルカリ溶液（液体接触）に対しても完全な保護材の役割を果たすことができなかつたと述べている<sup>1)</sup>。

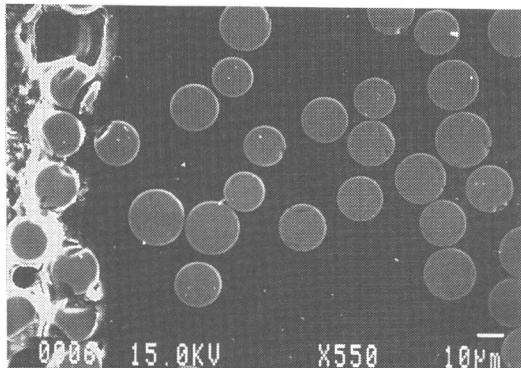


写真-5 SEM像 (No. 1)

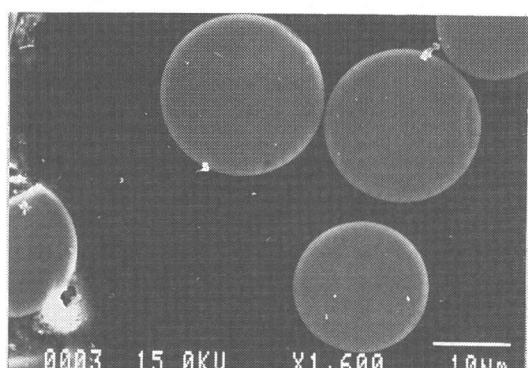


写真-6 SEM像 (No. 1)

一方、筆者らが使用したピン・ワインディング法により成形した補強材は繊維体積混入率が低くて樹脂リッチであり、しかもアルカリとして実際のコンクリート（固体接触）を用いたので、結果が大きく異なったと考えられる。

## 5.まとめ

(1) 補強材の外観については、ビニルエスチル樹脂が初期の状態よりも若干赤く変色していた。

(2) 最大引張荷重の保持率は、初期緊張力が0の供試体は約80%であり、その他の供試体は平均で90%を超えていた。

(3) 引張剛性の保持率は、初期緊張力が0の供試体が若干低いけれども、他の供試体では平均値はほぼ100%であり、引張剛性に対するコンクリートのアルカリの影響は極めて少なかった。

(4) 荷重とひずみの関係は、破断に至るまでほぼ直線であった。

(5) ガラス繊維の断面はきれいな円形であり、アルカリによって浸食されていないことが認められた。

## 謝 辞

本研究の発端は、東京大学工学部土木工学科岡村 甫教授の御助言によるものであり、ここに感謝します。

また、P Cはりの製作に当たっては、清水建設(株)貫上卓哉氏ならびに旭硝子マテックス(株)本間智幸氏に御協力いただきました。改めて感

謝します。

## 参考文献

- 1) 勝木 太・魚本健人：アルカリ環境下におけるガラス繊維強化プラスチックロッドの耐久性評価，土木学会論文集，No. 544/V-32, pp. 101-107, 1996. 8
- 2) 連続繊維補強材の耐アルカリ試験方法（案），コンクリート・ライブラリー第88号，土木学会, pp. 111-113, 1996. 9
- 3) 金野智広・関島謙蔵・大塚 靖・林耕四郎：コンクリート中に埋設した連続ガラス繊維補強材の耐久性，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第5部, pp. 1024-1025, 1997. 9
- 4) 平賀寿雄：新しいコンクリート補強材 タフティワインド・ニューファイバーメッシュ（NFM），強化プラスチックス，Vol. 32, No. 10, pp. 23-28, 1986. 10
- 5) 関島謙蔵・二川 稔・岡村 甫：格子状FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリートの開発研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 10, No. 2, pp. 689-694, 1988. 7
- 6) 定着用膨張材を用いた引張試験方法，コンクリート・ライブラリー第88号，土木学会, pp. 337-341, 1996. 9
- 7) 連続繊維補強材の引張試験方法（案），コンクリート・ライブラリー第88号，土木学会, pp. 92-94, 1996. 9