

## 弾塑性性状を示す CFRP の基礎的検討

清水建設(株) フェロー 前田 敏也  
 日本毛織(株) 上杉 昭二  
 (株)ゴーセン 衣笠 純

## 1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維は、高強度、高耐久、軽量などの優れた性能を有し、各種コンクリート構造物や鋼構造物の補修、補強等に多数使用されている。しかし、鋼材のように塑性化しないため、破断までの伸びが小さく、破壊が脆性的になるという課題がある。このため、設計では破断に対する安全率を大きく設定する必要がある、高強度という特性が十分に活かされていないのが現状である。

このような課題を解決するため、連続繊維に鋼材のような弾塑性性状を付与することによって変形性能を高め、脆性的な破壊を防ぐことができる炭素繊維強化プラスチック（以下、弾塑性 CFRP と称する）について基礎的な検討を行った。

## 2. 弾塑性 CFRP の概要

図-1 に弾塑性 CFRP の概念を示す。繊維は、初期の弾性域において剛性および強度に寄与する芯糸を中心とし、その周りを、芯糸に対して組角度を持った皮糸で複数層囲んで組紐状にしたものである。組紐に引張力が作用すると、初期には芯糸が引っ張られて弾性性状を示しながら荷重に抵抗し、芯糸が破断すると、組角度が小さい皮糸が荷重に抵抗し、その皮糸が破断すると、次に組角度が小さい皮糸から順次荷重に抵抗・破断しながら塑性性状を示すというものである。

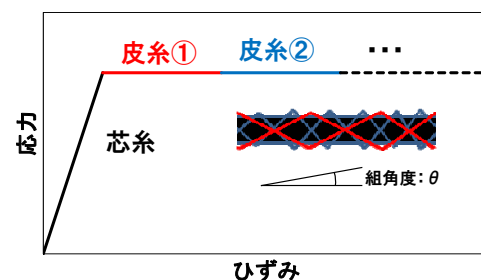


図-1 弾塑性 CFRP の概念

## 3. 組紐の検討

図-2 に芯糸（12K）、皮糸（1K）および芯糸（12K×3 本）と皮糸（1K×8 本）とを組み合わせた場合の引張試験結果を示す。ここで、1K とは断面積  $0.036\text{mm}^2$  の炭素繊維で、炭素繊維の強度は  $3,530\text{MPa}$ 、弾性係数は  $230\text{GPa}$ 、破断ひずみは  $1.5\%$  である。これらの結果から、芯糸と皮糸とを組み合わせた場合、芯糸単体での最大荷重である  $600\sim 700\text{N}$  の約 3 倍に相当する  $2,000\sim 2,200\text{N}$  までは芯糸が荷重に抵抗し、最大荷重時に芯糸が破断して荷重が急激に低下した後、皮糸単体での最大荷重である  $35\text{N}$  の 8 倍に相当する  $280\text{N}$  よりも高めの  $600\text{N}$  まで皮糸が荷重に抵抗し、その後皮糸が破断に至っていることがわかる。

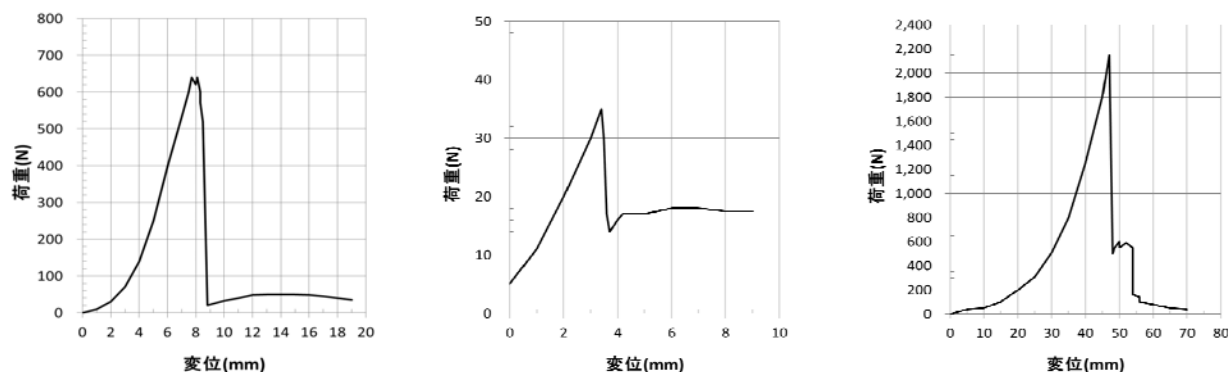


図-2 引張試験結果（左から、芯糸、皮糸、芯糸+皮糸）

キーワード 組紐, CFRP, 柔軟性樹脂, 弾塑性, 連続繊維

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設(株)土木技術本部 TEL 03-3561-3915

次に、芯糸と皮糸の量や組角度を表-1 のように変化させた場合の引張試験結果を図-3 に示す。これらの結果から、繊維の量と組角度の組合せによって組紐の挙動に変化が現れることがわかる。すなわち、芯糸に関しては、繊維の総断面積は 24K で同じであるが、組角度が  $10^\circ$  の No.1 の最大荷重は、組角度が  $0^\circ$  (直線状) の No.2 に比べて低くなっており、繊維を組紐状に編むことによって繊維の動きが交差する繊維に拘束され、応力集中が生じて破断しやすい状況になるものと考えられる。また、初期の勾配は No.2 に比べて小さくなっていることから、芯糸の組角度を大きくすると、最大荷重および剛性が低くなるものと考えられる。一方、皮糸に関しては、最大組角度が  $42^\circ$  の No.1 の方が、組角度が小さい No.2 に比べて剛性が低いために変位が大きくなっており、組角度を大きくすると、最大荷重後の変位が大きくなるものと考えられる。

表-1 組紐の構成

| 試験体  | 芯糸                              | 皮糸①                              | 皮糸②                          |
|------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| No.1 | 1K×3 本×8 本<br>(組角度 $10^\circ$ ) | 1K×3 本×16 本<br>(組角度 $42^\circ$ ) | 1K×8 本<br>(組角度 $21^\circ$ )  |
| No.2 | 12K×2 本<br>(組角度 $0^\circ$ )     | 3K×8 本<br>(組角度 $20^\circ$ )      | 3K×16 本<br>(組角度 $31^\circ$ ) |

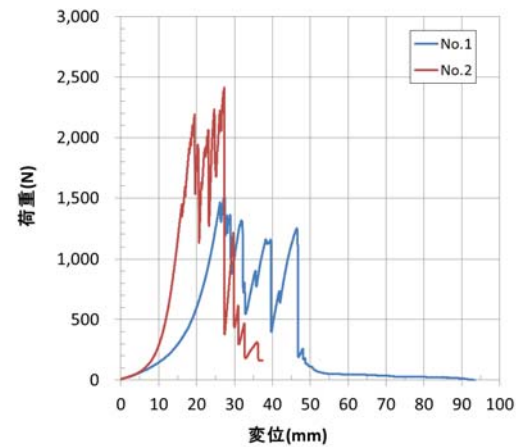


図-3 組紐の引張試験結果

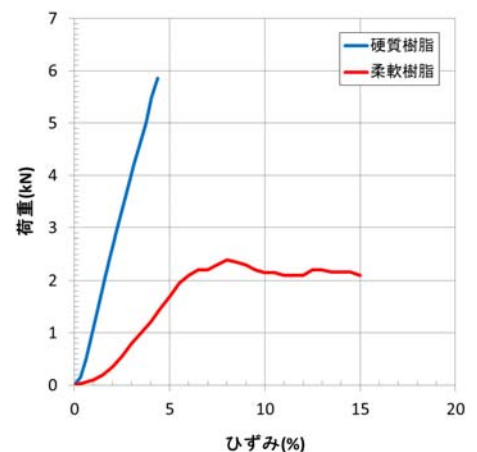


図-4 CFRP の引張試験結果

#### 4. CFRP の検討

前述の No.2 試験体に樹脂を含浸させ、CFRP として引張試験を行った。使用した樹脂は、市販の硬質および柔軟性のエポキシ樹脂で、樹脂槽に組紐を浸漬して減圧脱気浸透させた後、硬質樹脂については  $150^\circ\text{C}$  で 2 時間、柔軟性樹脂については  $50^\circ\text{C}$  で 1 時間の後  $100^\circ\text{C}$  で 1 時間の条件で樹脂を硬化させた。硬化後、CFRP を室温で自然養生し、載荷速度 1mm/min. で引張試験を行った。試験結果を図-4 に示す。これらの結果から、硬質樹脂を含浸させた場合は、最大荷重まで弾性性状を示した後、脆性的に破断して破壊したのに対し、柔軟性樹脂を含浸させた場合は、最大荷重は低いものの、最大荷重後は脆性的に破断せずに塑性性状を示していることがわかる。ここで、硬質樹脂については、芯糸の破断ひずみである 1.5% で勾配が若干緩くなっており、芯糸が破断した後も皮糸が樹脂に変形を拘束され、一体となって抵抗しているものと考えられる。これに対し、柔軟性樹脂の場合は、1.5% で勾配が緩くなる現象は見られないが、5.5% 程度で勾配が緩くなり、皮糸①の初期ひずみである 6.4% 以降、荷重が上昇していることから、5.5% 程度で芯糸が破断して 6.4% 以降皮糸①が荷重に抵抗したのと考えられる。さらに、皮糸①の初期ひずみ 6.4% に破断ひずみ 1.5% を加えた 7.9% で荷重が低下していることから、7.9% で皮糸①が破断して皮糸②が荷重に抵抗したのと考えられる。皮糸②の初期ひずみは 16.7% であるので、破断ひずみ 1.5% を加えた 18.2% で最終破断すると推定されるが、試験はひずみ 15% で終了したため破断には至らなかった。ここで、皮糸の初期ひずみは、組角度から幾何学的に、 $(1/\cos \theta - 1)$  で計算できる。ここに、 $\theta$  は組角度 ( $^\circ$ ) である。

#### 5. おわりに

炭素繊維を組紐状にして柔軟性樹脂を含浸させることにより、弾塑性 CFRP が実現可能であることがわかった。今後は、繊維の量や組み方、樹脂の組成や含浸・硬化方法等について、さらに検討を進める予定である。

#### 謝辞

本検討を行うにあたり、地方独立行政法人大阪市工業研究所の木村肇博士のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。