

## 2. 連続繊維ロープの性能評価

○関東学院大学工学総合研究所

関島 謙蔵

関東学院大学工学部社会環境システム学科 出雲 淳一

### 1. はじめに

連続繊維ロープはアラミド繊維やビニロン繊維などの高性能連続繊維を使用したロープ状のコンクリート用補強材である。連続繊維ロープは軽量で引張強度が高く、耐久性に優れ、腐食しない。また、可搬性に優れ、容易に曲げ加工できるため、作業性が大幅に向上するなどの特長を有する。

本研究は、連続繊維ロープの力学的特性を把握するために各種の試験を行い、これらの試験方法の妥当性について検討することを目的としている。

### 2. 連続繊維ロープの用途

連続繊維ロープを新設のコンクリート部材のせん断補強筋として使用する場合は、組み立てた鉄筋の周囲に巻き付けて用いる(図1)。また、既設のコンクリート部材の耐震補強に使用する場合には、部材の周囲にらせん状に巻き付けることによりせん断補強筋として利用できる(図2)。



図1 せん断補強(新設構造物)

### 3. 連続繊維ロープの課題

連続繊維を用いた既往の補強材としては、樹脂で固めて棒状や格子状に成形した連続繊維補強材があり、鉄筋やPC鋼材の代替品として使用されている。連続



図2 耐震補強(既設構造物)

繊維補強材は、塩害地区などのコンクリート構造物の耐久性が議論されだした1980年代の初めから本格的な研究が始められ、官・学・産の協力体制での意欲的な研究開発後、世界に先駆けて我が国で実用化された<sup>1)</sup>。また、一方向配列の連続繊維シートを樹脂を用いて既設のコンクリート部材の表面に貼り付けて補強する連続繊維シート工法がある。重量の増加を伴わずに高い補強効果を発揮するので、橋脚耐震補強やトンネル、煙突、その他のコンクリート構造物の補強や剥落防止にも対応できる<sup>2)</sup>。

連続繊維補強材と連続繊維シートは土木学会や日本コンクリート工学協会から設計・施工指針が作成され、材料の評価方法も確立されている<sup>3), 4)</sup>。しかし、連続繊維ロープは土木構造物への適用例がなく、材料の力学的特性の評価方法も未だ定まっていない。そこで新たに試験方法を提案し、実施することにした。

### 4. 連続繊維ロープの引張試験

#### 4. 1 目的

最初に、連続繊維ロープの力学的特性の中で最も基本的な引張特性を把握するための試験方法について検討することにした。樹脂で固めた連続繊維補強材の引張試験方法に関しては、土木学会の「連続繊維を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」の中で「定着用膨張材を用いた引張試験方法」<sup>3)</sup>が提案されているので、これを参考にして供試体を製作することにした。

## 4. 2 使用材料

### (1) 連続繊維ロープ

本実験で使用する連続繊維ロープは、T社製アラミド繊維、K社製ビニロン繊維およびY社製ビニロン繊維を用いた3つよりのより線状ロープである。これらの繊維をより線状によった後、表面をウレタン樹脂で被覆し、連続繊維ロープを成形した。ウレタン樹脂を被覆することによって、繊維のばらけが防止され、連続繊維ロープが若干硬くなり、取り扱いも容易になる。

連続繊維ロープの物性を表1に示す。なお、数値は表面のウレタン樹脂を除いた繊維自体の値である。

表1 連続繊維ロープの物性

| 繊維の種類        | 断面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 単位質量<br>(g/m) |
|--------------|---------------------------|---------------|
| アラミド繊維 (T社製) | 11.5                      | 16.0          |
| ビニロン繊維 (K社製) | 12.5                      | 16.2          |
| ビニロン繊維 (Y社製) | 12.3                      | 16.0          |

### (2) エポキシ樹脂

エポキシ樹脂は、連続繊維シート補強用の高強度エポキシ樹脂を使用した。連続繊維シートへの含浸に優れ、構造補強用途に使用されており、高強度に加え、適正なチクソトロピー性も有している<sup>5)</sup>。

### (3) 鋼管

鋼管は、JIS G 3455に規定されている高圧配管用炭素鋼鋼管のSTS370を使用した。その機械的性質は、引張強さ 370N/mm<sup>2</sup>以上、降伏点 215N/mm<sup>2</sup>以上である。鋼管の外径は 27.2mm、厚さは 5.5mm、単位質量は 2.94kg/m である<sup>6)</sup>。

### (4) 定着用膨張材

練混ぜ前の定着用膨張材は、生石灰および特殊な珪酸塩を主成分としたセメント状の粉体で、適当な水膨

張材比 (27.5%) で練混ぜることによって、高い流動性と材料分離抵抗性をもったスラリーとなる。

定着用膨張材は 48 時間後に 40N/mm<sup>2</sup> 以上の高膨張圧が発生できる材料であり、従来からの静的破砕剤や通常の膨張材とは異なる。最終的な膨張圧は 100N/mm<sup>2</sup> にも達する能力を有する<sup>7)</sup>。

## 4. 3 供試体の概要

供試体の寸法を図3に示す。全長は 950mm で、両端部 260mm の区間はエポキシ樹脂を含浸して硬化した。その後、長さ 250mm の鋼管を挿入し、定着用膨張材を充填した。供試体は繊維の種類ごとに 5 体ずつ、合計 15 体製作した。

定着用膨張材の膨張圧が作用した場合、エポキシ樹脂を含浸していない連続繊維ロープでは、膨張圧が吸収・消失する恐れがある。そこで、鋼管内で定着用膨張材が充填される部分のみエポキシ樹脂を含浸し、連続繊維ロープを連続繊維補強材とした。従って、土木学会の「定着用膨張材を用いた引張試験方法」を適用することが可能となった。

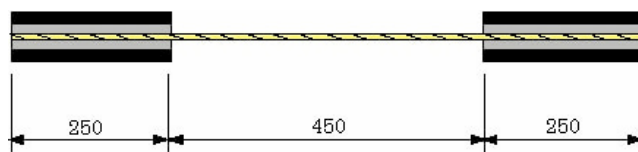


図3 引張試験用供試体の寸法

## 4. 4 供試体の製作

(1) 連続繊維ロープを切断する部分の両端をばらけ防止のために粘着テープで巻いて、専用のハサミで切断した。連続繊維ロープの長さは 1,500mm とした。

(2) エポキシ樹脂を主剤と硬化剤の重量比が 2 : 1 の配合で計量した。次に、主剤に硬化剤を流し込んで、ヘラを用いて十分に練り混ぜた。

(3) 連続繊維ロープにエポキシ樹脂を含浸する際、最初はヘラを用いたところ、エポキシ樹脂を十分に含浸することができなかった。そこでゴム製の手袋を着用した手で直接エポキシ樹脂を含浸することにした。連続繊維ロープの両端から 275mm～535mm (長さ 260mm) の部分にエポキシ樹脂を含浸した後、連続繊維ロープが直線状になるように固定した状態で硬化させた。



図4 エポキシ樹脂の含浸作業状況

(4) 供試体をセットするため、木製合板に寸法線をマーキングし、木製およびスポンジテープ製のスペーサーを取り付けた。

(5) 連続繊維ロープに中心に孔を開けた4枚の厚さ5mmのスポンジ板と2本の鋼管を交互に挿入した。

(6) 図5に示すように連続繊維ロープにわずかな張力を与えた状態で連続繊維ロープと鋼管を釘で木製合板に固定した。鋼管の両端に配置したスポンジ板は、連続繊維ロープを鋼管の中心に固定するためのセンタライザーであり、かつ定着用膨張材の漏れを防ぐ役割を果たす。

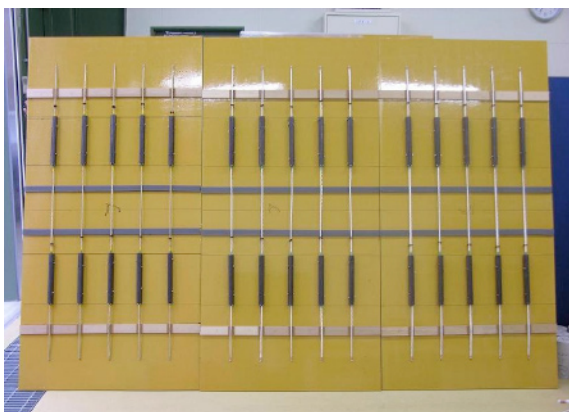


図5 供試体の製作状況

(7) 水と定着用膨張材の重量比が27.5%の配合で定着用膨張材を練り混ぜた後、図6に示すように鋼管の上側から定着用膨張材を充填した。定着用膨張材は材料分離しやすいので、1本の鋼管に充填した後に再び練り混ぜてから次の鋼管に充填した。定着用膨張材を充填した後、鋼管の上側をスポンジ板でふさいだ。



図6 定着用膨張材の充填状況

(8) 定着用膨張材の充填後、7日間養生した。その後、供試体を木製合板から取り出し、鋼管の両端から突き出している連続繊維ロープを切断して供試体を完成させた。

#### 4. 5 試験方法

供試体の両端の鋼管を引張試験機のチャックで直接つかんで引張力を与えた。この時、土木学会の「連続繊維を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」に示されている「連続繊維補強材の引張試験方法(案)」<sup>3)</sup>に従って引張試験を行った。なお、連続繊維ロープにひずみゲージを直接貼り付けてひずみを測定しても、精度良い測定が行えないので、ひずみの測定は行わなかった。



図7 引張試験状況

#### 4. 6 試験結果

連続繊維ロープの破断箇所は上部または下部の鋼管の付け根で、試験部の範囲内であり、鋼管内での破断



は生じなかった。なお、定着部としての鋼管から連続繊維ロープの抜け出しはなかった。

連続繊維ロープが破断すると、残った試験部の連続繊維ロープが反対側の鋼管に向かって急激に戻るために丸まってしまう現象が生じた。これは、従来の樹脂で固めた連続繊維補強材が破断する際には見られなかった現象である。

各供試体の最大荷重を整理した結果を図8に示す。アラミド繊維ロープ、K社製ビニロン繊維ロープおよびY社製ビニロン繊維ロープの最大荷重の平均値は、それぞれ27.64 kN、7.68 kNおよび10.93 kNとなった。また最大荷重の標準偏差は、それぞれ0.54kN、0.80 kNおよび0.74 kNとなった。従って、最大荷重のばらつきは僅かであった。

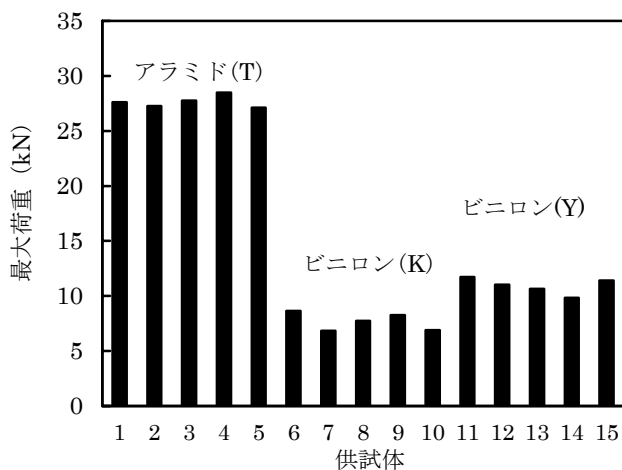


図8 引張試験結果

## 5. 連続繊維ロープの接続部の引張試験

### 5. 1 目的

連続繊維ロープの施工においては、ロープ同士を接続することが必要になる。そこでロープワークの結び方を参考にし、本研究ではサージャンズ・ノット（外科結び）とダブル・フィッシャーマンズ・ノット（二重テグス結び）を採用して、接続部の引張試験を行った。

### 5. 2 ロープワークの結び方

#### (1) サージャンズ・ノット

スクエア・ノット（本結び）はロープ同士を繋ぎ合わせる時の基本となる結び方である。この結び方は、一

度強く締めると固く締まる特徴がある。

サージャンズ・ノットはスクエア・ノットの最初のからみを二度にした結び方であり、からみを多くすることで強度がより増加する。外科手術の縫合用として用いられていたことから命名された。滑りやすいロープでもきっちり結べる特徴がある<sup>8)</sup>。

#### (2) ダブル・フィッシャーマンズ・ノット

フィッシャーマンズ・ノット（テグス結び）は、太さの異なる釣り糸のように細くて滑りやすい合成繊維ロープなどを繋ぎ合わせる時に用いられる結び方である。強度は非常に高く、結び方も簡単である。

ダブル・フィッシャーマンズ・ノットは、フィッシャーマンズ・ノットの強度をさらに高めた結び方である。結び目が太くなるので、あまり太いロープには向いていない<sup>8)</sup>。

### 5. 3 使用材料

引張試験と同様に、本実験で使用する連続繊維ロープは、T社製アラミド繊維、K社製ビニロン繊維およびY社製ビニロン繊維を用いた3つよりのより線状ロープである。また、エポキシ樹脂、鋼管、定着用膨張材も連続繊維ロープの引張試験に用いた材料と同じものを使用した。

### 5. 4 供試体の概要

引張試験用の供試体は全長950mmであったが、接続部の引張試験用供試体は全長約850mmとした。この理由は、試験中に接続部から連続繊維ロープが抜け出し、供試体の全長が長くなる恐れがあったからである。供試体の例を図9に示す。

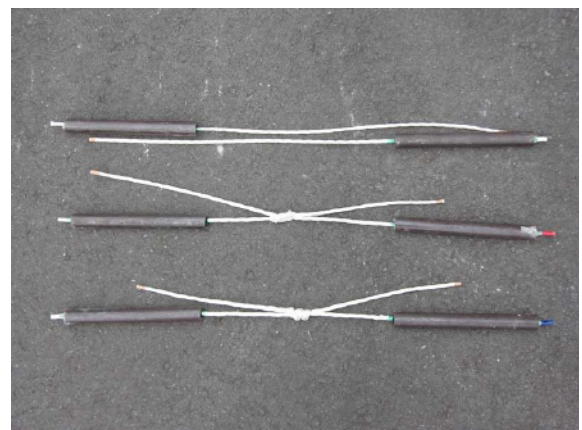


図9 接続部の引張試験用供試体

### 5. 5 供試体の種類

供試体は連続繊維ロープの繊維の種類ごとに、また接続部の結び方ごとに3体ずつ、合計18体製作した。

1 体目はエポキシ樹脂を含浸せず、連続繊維ロープ同士を結んだ。2 体目は連続繊維ロープ同士を結んだ後、接続部の両側約100mmをK社製ビニロン繊維の細い紐を巻き付け、さらにその部分にエポキシ樹脂を含浸して硬化させた。3 体目は連続繊維ロープ同士を結んだ後、同種類の3つよりの連続繊維ロープをほどいた太い紐を接続部の両側約100mmに巻き付け、さらにその部分にエポキシ樹脂を含浸して硬化させた。

### 5. 6 供試体の製作

引張試験とほぼ同様な手順で供試体を製作した。連続繊維ロープを1,100mmの長さに切断し、エポキシ樹脂を含浸して硬化させ、2枚のスポンジ板と鋼管を交互に通して木製合板にセットした後、定着用膨脹材を充填した。

### 5. 7 試験方法

引張試験と同様に、「連続繊維補強材の引張試験方法(案)」に従って接続部の引張試験を行った。



図10 接続部の引張試験状況

### 5. 8 試験結果

供試体の破壊状況の例を図11に、また各供試体の最大荷重を整理した結果を図12～図14に示す。

連続繊維ロープ同士を結んだアラミド繊維ロープの場合、サージャンズ・ノットは下側のロープが接続部から抜け出し破断しなかったが、ダブル・フィッシャーマンズ・ノットでは接続部の下側で破断した。またK社製ビニロン繊維ロープ、Y社製ビニロン繊維ロープも共に完全な破断には至らず、この時の接続効率(接続部の最大荷重/引張耐力)はアラミド繊維ロープで20%未満、K社製ビニロン繊維ロープで50%未満、Y社製ビニロン繊維ロープで40%未満となった。

接続部の両側にK社製ビニロン繊維ロープの細い紐を巻き付け、エポキシ樹脂を含浸し、硬化させたアラミド繊維ロープは破断しなかった。K社製ビニロン繊維ロープの場合、サージャンズ・ノットでは接続効率60%を超えたが破断せず、ダブル・フィッシャーマンズ・ノットは上側の鋼管の付け根でロープが破断し、接続効率は約80%となった。Y社製ビニロン繊維ロープの場合は樹脂含浸部の外側で破断したが、接続効率は50%前後となった。

接続部の両側に同種類の3つよりの連続繊維ロープをほどいた紐を巻き付け、エポキシ樹脂を含浸し、硬化させたアラミド繊維ロープは、サージャンズ・ノットで最大荷重が11kNを超え、接続効率は樹脂を含浸しない場合の3.5倍となった。しかし、ダブル・フィッシャーマンズ・ノットではこれよりも最大荷重が大幅に低下した。K社製ビニロン繊維ロープのダブル・フィッシャーマンズ・ノットでは、細い紐を巻き付けた場合よりも最大荷重が低下した。一方、Y社製ビニロン繊維ロープは細い紐を巻き付けた場合よりも最大荷重が増加し、接続効率は60%前後となった。従って、この接続方法では、必ずしもダブル・フィッシャーマンズ・ノットの方が接続効率が高くはならなかった。

なお、アラミド繊維ロープの最大荷重はビニロン繊維ロープの場合よりも大きいですが、接続効率は50%未

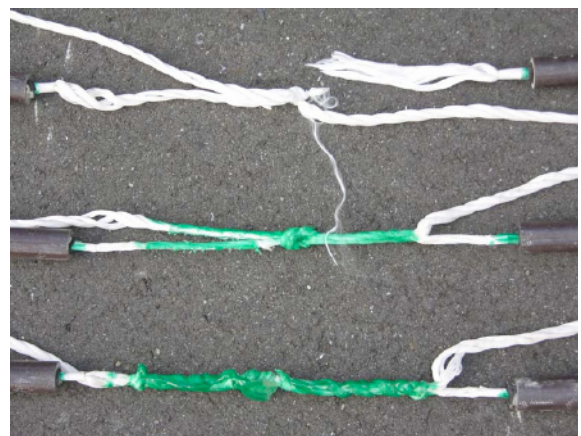


図11 K社製ビニロン繊維ロープの破壊状況  
(サージャンズ・ノット)

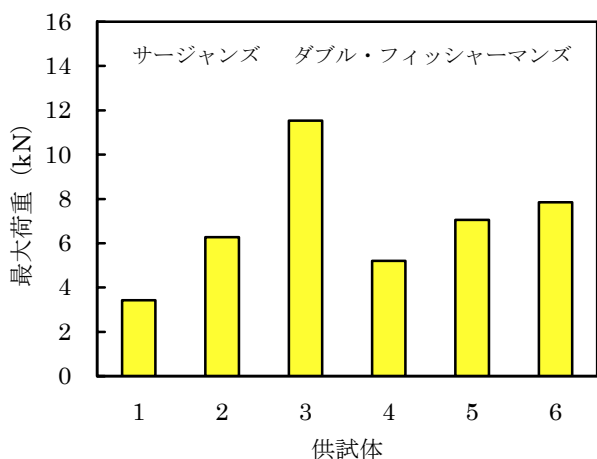


図 12 アラミド繊維ロープの試験結果

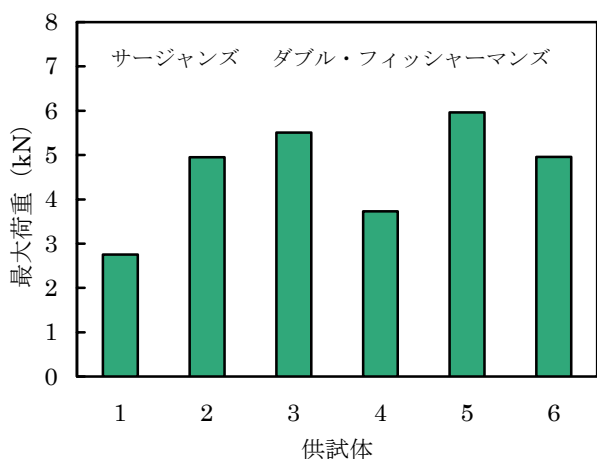


図 13 K社製ビニロン繊維ロープの試験結果

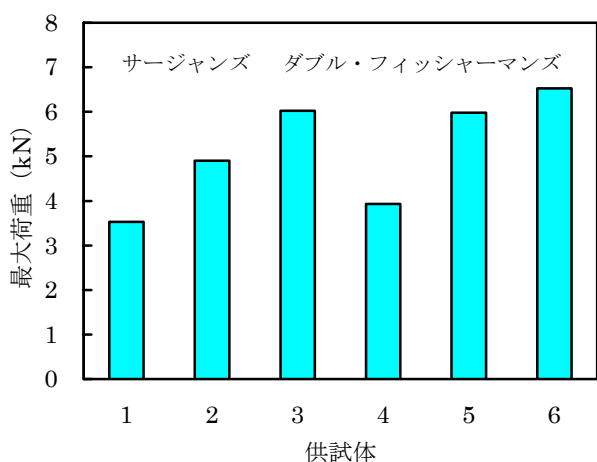


図 14 Y社製ビニロン繊維ロープの試験結果

満であり、接続方法をさらに改良する必要がある。

## 6. まとめ

今回提案した鋼管内で定着用膨張材が充填される部分のみ連続繊維ロープにエポキシ樹脂を含浸して連続繊維補強材とし、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(案)」を適用する引張試験方法および接続部の引張試験方法の妥当性が確認された。

今後、接続方法の改良ならびにコンクリートとの付着特性、曲げ引張特性を把握する試験を引き続き実施する予定である。

## 謝辞

連続繊維ロープの引張試験方法に関しては、倉測建設コンサルタント株式会社の田坂雄治氏から貴重なご助言をいただきました。実験に当っては、関東学院大学工学部土木工学科の小菅拓朗氏ならびに関直哉氏、工学研究科機械工学専攻の鈴木純氏ならびに大塚英夫氏の温かいご協力をいただきました。

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業(平成16年度～平成20年度)の一環として行われたことを付記します。

## 参考文献

- 1) ACC 製品施工実績集、pp.36、ACC 倶楽部、2002 年 10 月
- 2) FORCA トウシート工法、日鉄コンポジット
- 3) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー88、土木学会、1996 年 9 月
- 4) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、コンクリートライブラリー101、土木学会、2000 年 7 月
- 5) 連続繊維シート補強用高強度エポキシ樹脂 ボンド E2500、コニシ
- 6) JIS G 3455 高圧配管用炭素鋼鋼管、1988 年
- 7) 定着用膨張材 エクスグリッパー、膨張材による定着法研究会
- 8) 小暮幹雄：ひもとロープの結び方、pp.20-23、日本文芸社、2000 年 4 月