

## 連続繊維ロープの引張試験方法の検討

関東学院大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 工学士 ○川上 清隆  
 関東学院大学工学総合研究所 正会員 博(工) 関島 謙蔵  
 関東学院大学工学部社会環境システム学科 正会員 工博 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、容易に曲げ加工ができるため、作業性が大幅に向上するなどの特徴を有する。

連続繊維ロープの用途としては、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る。写真-1のように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<sup>1)</sup>。

連続繊維を用いた既往のコンクリート用補強材としては、樹脂で固めた棒状の連続繊維補強材があり、主に新設構造物に使用されている。また、コンクリート部材の表面に樹脂で接着する連続繊維シートがあり、主に既設構造物に使用されている。これらの補強材は土木学会から指針が作成され、材料の評価方法も確立されている<sup>2),3)</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、材料の評価方法も未だ定まっていない。

本研究では、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。本研究ではまず、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を行った。

### 2. 連続繊維ロープの引張試験

#### 2.1 使用材料

##### (1) 連続繊維ロープ

本研究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つのより線状のロープである。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。ウレタン樹脂で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。表-1は、本研究で使用する連続繊維の密度、断面積および単位質量を示している。3種類のロープの断面積と単位質量は、ほぼ同じである。

##### (2) エポキシ樹脂

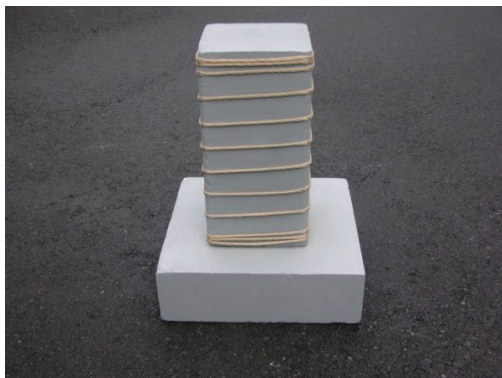


写真-1 耐震補強例 (模型)

表-1 連続繊維ロープの物性

繊維の種類	繊維の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	断面積 (mm <sup>2</sup> )	単位質量 (g/m)
アラミド繊維 (T社製)	1.39	11.5	16.0
ビニロン繊維 (K社製)	1.30	12.5	16.2
ビニロン繊維 (Y社製)	1.30	12.3	16.0

注) 数値は使用する繊維自体の値である。

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、作業に適した粘性も有している。

(3) 鋼管

供試体の定着部には鋼管を用い、鋼管内に連続繊維ロープを膨張材を用いて定着させることにした。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 215 N/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。

(4) 定着用膨張材

鋼管内からの連続繊維ロープの拔出しを防ぐために、定着用膨張材を充填することにした。練混ぜ前の定着用膨張材は、生石灰および特殊なケイ酸塩を主成分としたセメント状の粉体で、水膨張材比 27.5%で練混ぜることにした。

2. 2 供試体の概要

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」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<sup>2)</sup>。

図-1は、試験部にエポキシ樹脂を含浸しない供試体の寸法を示している。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させた。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 3 体ずつ、合計 9 体製作した。さらに、ひずみゲージを張り付ける際に使用する樹脂の影響を調べるために、図-2に示すように試験部も含めて連続繊維ロープの全長にわたってエポキシ樹脂を含浸して硬化させた供試体も製作した。

エポキシ樹脂を含浸してない連続繊維ロープでは、定着用膨張材の膨張圧が作用した場合、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に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。

2. 3 供試体の製作

連続繊維ロープの長さは 1,500mm とし、両端から 275mm～535mm（長さ 260mm）の部分にエポキシ

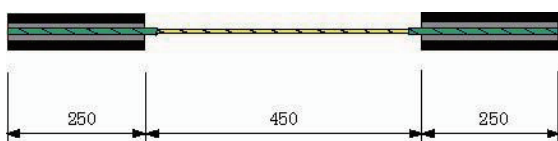


図-1 供試体の寸法（含浸なし）

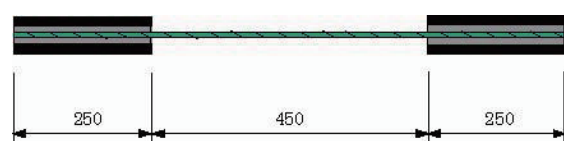


図-2 供試体の寸法（含浸あり）

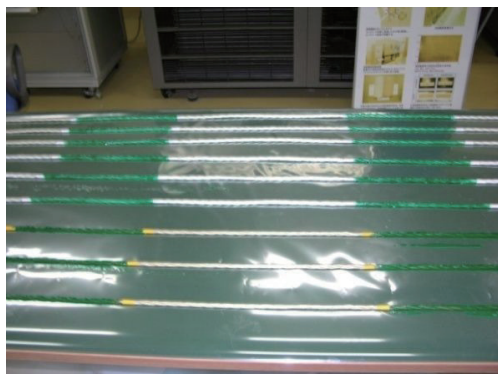


写真-2 エポキシ樹脂の硬化状況



写真-3 供試体の製作状況

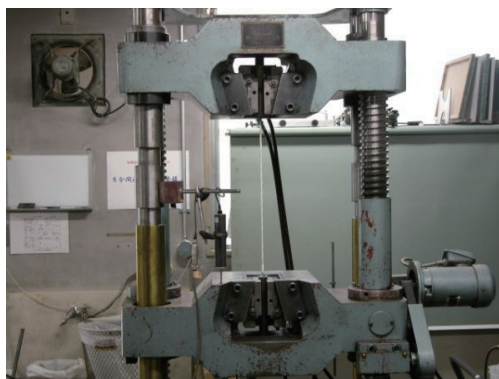


写真-4 引張試験状況

樹脂を含浸し、透明な離型フィルムの上で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（写真-2 参照）。また、試験部にもエポキシ樹脂を含浸する供試体は、連続繊維ロープの両側から 275mm より内側（長さ 950mm）の部分にエポキシ樹脂を含浸し、同様の方法で硬化させた。その後、連続繊維ロープにスポンジ板と鋼管を交互に通し、写真-3 に示すように連続繊維ロープと鋼管を木製合板に固定した。その後、定着用膨張材の充填終了後、木製合板から取外し、鋼管の両側から突き出している連続繊維ロープを切断し、供試体を完成させた。室温は 27°C 前後であった。

#### 2. 4 試験方法

写真-4 に示すように供試体の両端の鋼管を定格 50kN の引張試験機のチャックで直接つかんで供試体に引張力を与えた。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）」に従って引張試験を行った<sup>2)</sup>。変位計を用いてチャック間の変位を測定し、変位を試験部の長さ（450mm）で除することによって求めた値を連続繊維ロープの平均ひずみとした。室温は 25°C 前後であった。

#### 2. 5 試験結果

##### (1) 破断状況

試験部にエポキシ樹脂を含浸しない供試体の破断箇所は、引張载荷時の供試体設置状態において上部、または下部の鋼管の付け根で生じ、試験部の範囲内の破断であり、鋼管内での破断および連続繊維ロープの抜出しは生じなかった。破断箇所より試験部の中央側はエポキシ樹脂を含浸して固めていないので、破断時における損傷範囲が広がった（写真-5 参照）。なお、鋼管からの連続繊維ロープの抜出しがなかったので、定着部として十分に機能していることが確認された。

試験部にもエポキシ樹脂を含浸した供試体の破断箇所はほとんど試験部の中央付近であった。また、破断



写真-5 破断状況（含浸なし）

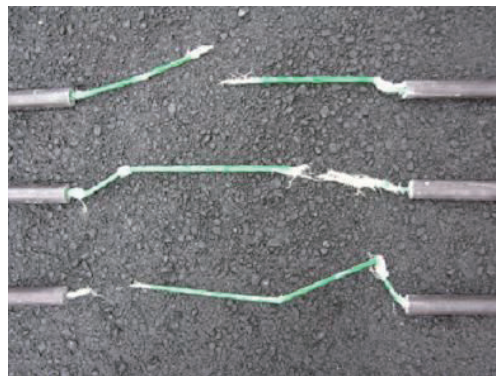


写真-6 破断状況（含浸あり）

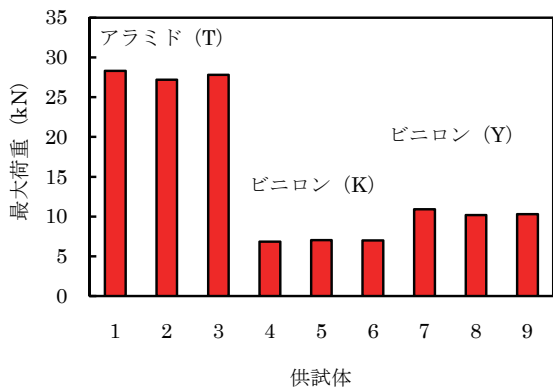


図-3 最大荷重 (エポキシ樹脂含浸なし)

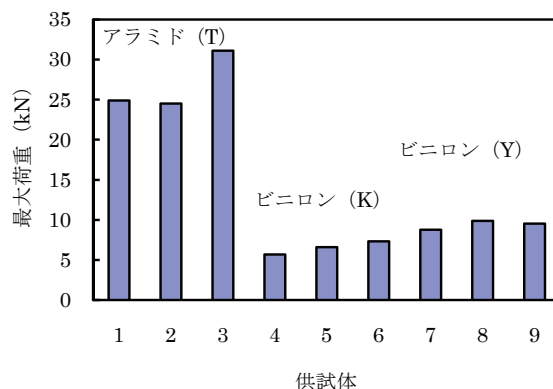


図-4 最大荷重 (エポキシ樹脂含浸あり)

箇所の両側がエポキシ樹脂を含浸して固めているので、破断時における損傷範囲が狭くなった (写真-6 参照)。

(2) 最大荷重

試験部にエポキシ樹脂を含浸しないアラミド繊維ロープ、およびビニロン繊維ロープ (K社製, Y社製) の最大荷重を図-3 に示す。それぞれの平均値は 27.8kN, 6.95kN, および 10.5kN となった。試験部にもエポキシ樹脂を含浸したアラミド繊維ロープ、およびビニロン繊維ロープ (K社製, Y社製) の最大荷重を図-4 に示す。それぞれの平均値は 26.8kN, 6.53kN, および 9.39kN となり、試験部にエポキシ樹脂を含浸しない供試体より若干低下した。

(3) 荷重-ひずみ関係

土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法 (案)」によれば、引張剛性およびヤング係数は、得られた荷重-ひずみ関係から最大荷重の 20%と 60%の値を用いて計算すると規定されている<sup>2)</sup>。しかし、今回の引張試験では、試験部にエポキシ樹脂を含浸しない供試体の荷重が低い段階では連続繊維ロープにたるみがあったために荷重-ひずみ関係の立ち上がり部分が低くなったので、最大荷重の 10%を除いた範囲について直線回帰を行って引張剛性を求めた。それらの例を図-5 に示す。なお、回帰式の数値項が負の値となっている。

試験部にもエポキシ樹脂を含浸した供試体の場合には、このような現象が見られず、荷重-ひずみ関係はほぼ直線であったそれらの例を図-6 に示す。この理由としては、連続繊維ロープをエポキシ樹脂で固めたことによって、初期の段階からすべての繊維が引張力を負担していたと考えられる。また、引張剛性も高くな

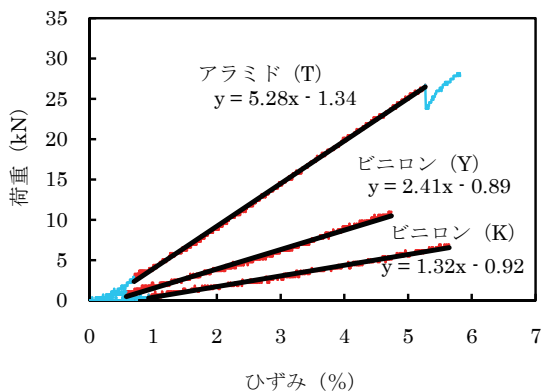


図-5 荷重-ひずみ関係 (含浸なし)

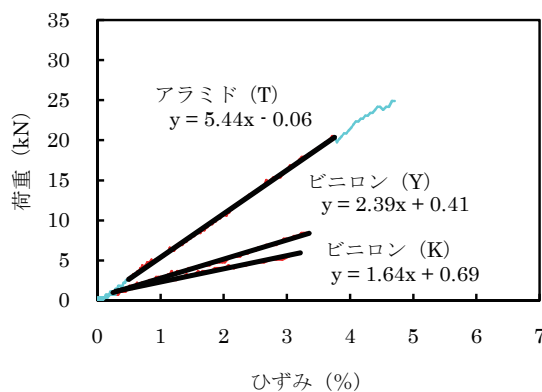


図-6 荷重-ひずみ関係 (含浸あり)

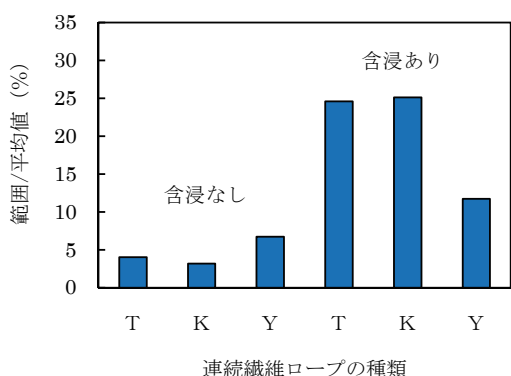


図-7 最大荷重のばらつき

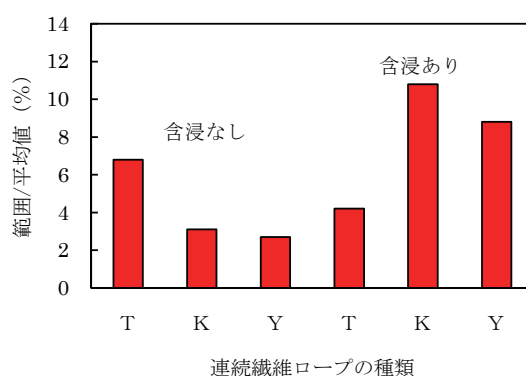


図-8 ヤング係数のばらつき

ったが、破断ひずみは小さくなった。

なお、試験部にエポキシ樹脂を含まない各連続繊維ロープのヤング係数はそれぞれ 45.7kN/mm<sup>2</sup>, 10.8kN/mm<sup>2</sup>, および 19.3kN/mm<sup>2</sup> となり、含浸した各連続繊維ロープのヤング係数はそれぞれ 48.5kN/mm<sup>2</sup>, 13.3kN/mm<sup>2</sup>, および 20.6kN/mm<sup>2</sup> となった。この時、含浸したエポキシ樹脂の断面積は無視して、表-1の値を用いた。

(4) 測定値のばらつきの検討

試験体の本数が3体と少なく、試験結果のばらつきを統計的に処理することが難しいために、各種類の連続繊維ロープの最大荷重の測定値の範囲(最大値と最小値の差)を平均値で除して、試験結果のばらつきを評価することにした。整理した結果を図-7に示す。試験部にエポキシ樹脂を含まない場合は、使用する繊維の種類にかかわらず、ばらつきが3.2%~6.7%と小さかった。試験部にエポキシ樹脂を含まない場合は、ばらつきが12%~25%と大きく、特にアラミド繊維ロープとK社製ビニロン繊維ロープのばらつきが大きかった。これらの理由については、今後検討する必要があると思われる。

各種類の連続繊維ロープのヤング係数について、同様な方法で処理して整理した結果を図-8に示す。試験部にエポキシ樹脂を含まない場合は、アラミド繊維ロープのばらつきは6.8%と大きい、ビニロン繊維ロープ(K社製、Y社製)のばらつきは3.1%, 2.7%と小さかった。試験部にもエポキシ樹脂を含まない場合は、反対にビニロン繊維ロープ(K社製、Y社製)のばらつきが11%, 8.8%と大きくなった。

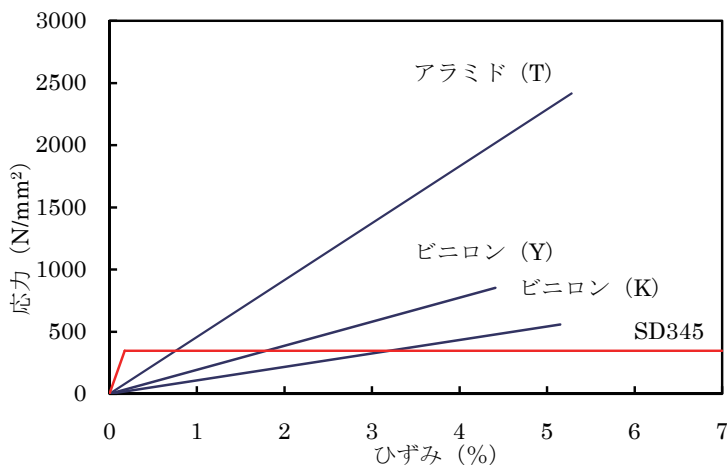


図-9 モデル化された応力-ひずみ関係

### （5）モデル化された応力-ひずみ関係

図-5に示したように、エポキシ樹脂を含浸しない連続繊維ロープの荷重-ひずみ関係（応力-ひずみ関係）は、荷重（応力）の低い段階を除くとほぼ直線である。そこで、各種類の連続繊維ロープの引張強度の平均値とヤング係数の平均値を用いて破断ひずみを求め、モデル化された応力-ひずみ関係を図-9に示す。同図には参考のため異形鉄筋SD345（降伏点 345N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数 200kN/mm<sup>2</sup>、降伏ひずみ 0.173%）の場合の応力-ひずみ関係を示している。この時、ひずみ硬化領域は無視している。

鉄筋の降伏点に比べて、アラミド繊維ロープ、およびビニロン繊維ロープ（K社製、Y社製）の引張強度はそれぞれ 7.0 倍、1.6 倍、および 2.5 倍となった。鉄筋のヤング係数に比べて、アラミド繊維ロープ、およびビニロン繊維ロープ（K社製、Y社製）のヤング係数はそれぞれ 0.23 倍、0.054 倍、および 0.097 倍となった。また、鉄筋の降伏ひずみに比べて、アラミド繊維ロープ、およびビニロン繊維ロープ（K社製、Y社製）の破断ひずみはそれぞれ 32.1 倍、30.5 倍、および 27.4 倍となっており、鉄筋と同程度の降伏強度が求められる場合には鉄筋よりも伸び性能が優れていると考えられる。

### 3. まとめ

今回行った実験から以下のことが結論として得られた。

- （1）今回提案した方法で引張試験を行うことにより、連続繊維ロープの最大荷重や変位性能を評価できることが確認された。
- （2）連続繊維ロープの試験部にエポキシ樹脂を含浸すると、破断状況、最大荷重および荷重-ひずみ関係などの引張特性が変化することが明らかになった。
- （3）連続繊維ロープのひずみを測定する方法としては、樹脂を用いてひずみゲージを貼り付けて測定する方法よりも、変位計を用いて引張試験機のチャック間の変位を測定して、平均ひずみを求める方法が適切である。

### 謝辞

実験に当たっては、関東学院大学工学部土木工学科の小菅拓郎氏ならびに関直哉氏、社会環境システム学科の田丸武氏、八洋コンサルタント株式会社の高田誠氏ならびに水上明氏の協力を得ました。ここに深く感謝の意を表す次第であります。

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) Phong, N. H., et al: Seismic Retrofitting of Reinforced Concrete Columns with Continuous Fiber Rope, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1171-1176, 2006
- 2) 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, 1996.9
- 3) 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, 2000.7