

# 連続繊維ロープを用いた RC 梁の性能改善効果

出雲 淳一\*1・関島 謙蔵\*2・佐藤 雅俊\*3

連続繊維ロープは、アラミド繊維やビニロン繊維をロープ状に加工した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、在来工法に比べ作業効率が大きく改善され、作業時間も大幅に短縮できると考えられる。このような特徴を有している連続繊維ロープを RC 構造物に適用することにより、構造性能を向上させることができると考えられる。本研究では、せん断補強筋を有していない RC 梁に連続繊維ロープをせん断区間に巻き付けて載荷試験を行い、その補強効果について検討を行った。さらに、地震などによる損傷を想定して、あらかじめせん断破壊をした RC 梁を準備し、その RC 梁に連続繊維ロープをせん断区間に巻き付けた場合の性能改善効果についても検討を行った。本研究から、せん断補強筋を有していない RC 梁の性能を改善させることができると、および一度せん断破壊した RC 梁に連続繊維ロープを巻き付けることにより、せん断破壊を曲げ破壊に移行させ、耐力および変形性能を改善させることができることが確認された。

キーワード：連続繊維ロープ，せん断補強，性能改善効果

## 1. はじめに

日本は世界でも有数の地震国であり、これまでも兵庫県南部地震（1995年1月17日）、中越沖地震（2007年7月16日）、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）などの大地震が発生しており、甚大な被害を受けている。今後も巨大地震の発生が想定されており、大地震に対して、耐力が不足する RC 構造物の補強技術、ならびに震災により損傷した構造物の復旧技術の開発が求められている。これまでも RC 構造物の補強・補修に関する数多くの技術が実用化されているが、このような大地震に対応するためには、広範囲におよぶ被害を最小限に抑えるために、安価で施工時間も短い工法の開発も必要と考えられる。

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 1980 年代の初めから本格的な研究が始められ、官・学・産の協力体制で世界に先駆けてわが国で実用化された。その他の既往の補強材として、連続繊維シート（連続繊維を平面上の 1 方向あるいは 2 方向に配列してシート状あるいは織物状にしたもの）がある。連続繊維シートは、重量の増加を伴わずに高い補強効果を発揮するので、既設の橋脚やトンネル、煙突、その他のコンクリート部材表面に貼付けて構造物の補強や落防止などに利用されている。連続繊維補強材および連続繊維シートは、土木学会や日本建築学会から設計・施工指針が刊行され、材料の評価方法も確立されている<sup>1, 2, 3)</sup>。

一方、連続繊維ロープは高性能連続繊維を加工し、表面のみウレタン樹脂で被覆したロープ状のコンクリート用補強材である。連続繊維ロープにはアラミド繊維を用いたものと、ビニロン繊維を用いたものがある。連続繊維ロープの外観を写真 - 1 に示している。写真上段はアラミド繊維ロープで、写真中段、下段はビニロン繊維ロープを示している。

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、在来工法に比べ作業効率が大きく改善され、

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、在来工法に比べ作業効率が大きく改善され、



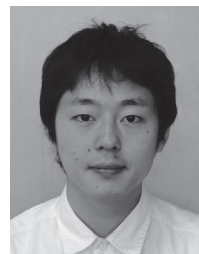
\*1 Junichi IZUMO

関東学院大学  
理工学部 教授



\*2 Kenzo SEKIJIMA

関東学院大学  
工学総合研究所



\*3 Masatoshi SATO

関東学院大学大学院  
工学研究科

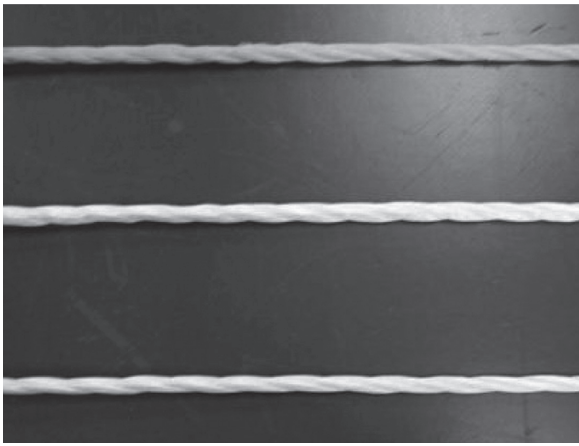


写真 - 1 連続繊維ロープ

作業時間も大幅に短縮できると考えられる。しかし、連続繊維ロープに関しては、材料の力学的特性が明らかにされていなかったために、著者らは連続繊維ロープの引張試験を行い、連続繊維ロープの材料特性を明らかにしている<sup>4,5)</sup>。その後、連続繊維ロープを橋脚に適用した研究なども行われるようになった<sup>6,7)</sup>。しかし、連続繊維ロープを既設の梁を対象として、せん断補強材として利用した研究は少ない。このような背景を踏まえて、連続繊維ロープを鉄筋コンクリート梁部材に適用した場合のせん断挙動について検討することにした。

連続繊維ロープは、軽量で鉄筋以上の引張強度を有し、腐食せず、容易に構造物の周囲に巻き付けることができる。しかも、連続繊維シートのように接着剤で貼る必要がないので、構造物を補強する際の施工性も優れていると考えられる。連続繊維ロープの施工性における利点を活かすために、今回の研究においても、連続繊維ロープに接着剤を用いなくて、コンクリート供試体に巻き付けて補強する方法を検討することにした。

## 2. 研究の目的

本研究は、連続繊維ロープを RC 梁のせん断補強に用いて、その構造性能を改善させることを目的としている。今回は、次の2つの目的に焦点をあてて、実験を実施することにした。

- (I) せん断耐力が不足する場合の RC 梁に連続繊維ロープを適用する。
- (II) 一度せん断破壊した RC 梁に連続繊維ロープを適用して、その機能改善効果を確認する。

この目的を達成するために、2つのシリーズの実験（以後、実験シリーズ I および実験シリーズ II と呼ぶ）を行うことにした。実験シリーズ I では、せん断補強筋を有していない RC 梁に連続繊維ロープをせん断区間に巻き付けて載荷試験を行い、その補強効果について検討を行った。

実験シリーズ II では、震災などによる損傷を想定して、あらかじめせん断破壊した RC 梁に連続繊維ロープをせん断区間に巻き付けた場合の性能回復効果について検討を行った。この2つの実験シリーズにより、連続繊維ロープの

RC 部材に対する機能改善効果を検討することにした。

## 3. 実験の概要

### 3.1 供試体

供試体の寸法は、 $150 \times 200 \times 1500$  mm の複鉄筋矩形断面である。供試体の引張鉄筋、圧縮鉄筋には D 13 を使用し、組立筋は D 10 の閉合型を使用した。せん断区間には、せん断補強筋を配置していない。供試体の寸法・形状および鉄筋の配筋状況を図 - 1 に示す。せん断スパン比  $a/d$  は、すべて 2.3 とした。

連続繊維ロープを梁供試体に巻き付ける際に、供試体側面の隅角部でロープが損傷することを防止するために、供試体の隅角部は面取りを行った。面取りは、型枠の4辺に面木を取り付け、脱型後4隅をグラインダーで削り、バリをとった。

連続繊維ロープのせん断補強効果を調べるために実験シリーズ I では、供試体を4体準備した。そのうち、2体の供試体は、せん断区間を補強しない供試体であり（以後、No.1 および No.2 と呼ぶ）、残り2体はビニロン繊維ロープをおよびアラミド繊維ロープをせん断区間に巻付けた供試体（以後、No.3 および No.4 と呼ぶ）を製作した（図 - 1 および図 - 2）。連続繊維ロープの巻付けに際しては、支点と載荷点より 50 mm ずつ内側の長さ 300 mm のせん断区間に連続繊維ロープを 25 mm 間隔で巻き付けることにした。

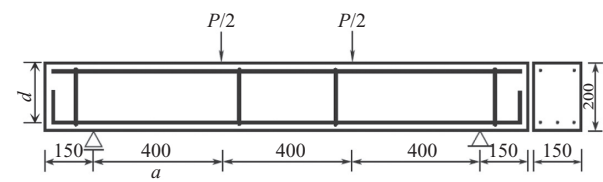


図 - 1 供試体の形状・寸法 (No.1, No.2)

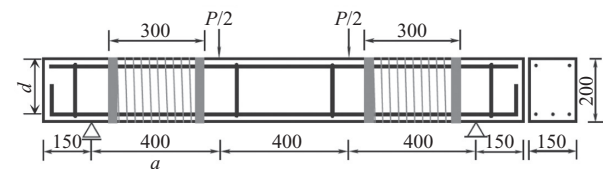


図 - 2 供試体の形状・寸法 (No.3, No.4)

表 - 1 供試体の種類

供試体	せん断補強	巻付け間隔	備考
No.1	なし		
No.2	なし		
No.3	ビニロン繊維	25 mm	
No.4	アラミド繊維	25 mm	
No.5	ビニロン繊維	25 mm	No.1 に巻付け
No.6	アラミド繊維	25 mm	No.2 に巻付け

一度せん断破壊した梁のせん断耐力の改善効果を調べるために実験シリーズ II では、実験シリーズ I の実験終了後、実験シリーズ I によりせん断破壊した供試体 No.1 と

No.2 にビニロン繊維ロープおよびアラミド繊維ロープを巻付けた供試体 (No.5 および No.6) を製作した。ロープの巻付け位置および間隔は実験シリーズ I の場合と同様とした。

ロープの巻始めは 3 周巻き付けた後、供試体の上面のロープ 3 本を焼きなまし鉄線で緊結した。緊結箇所は 3 箇所とした。巻終わりは巻始めと同様にロープが緩まないように、焼きなまし鉄線で緊結して固定した (写真 - 2)。連続繊維ロープの巻付けは、ロープが弛まないように人力で引張りながら行った。



写真 - 2 連続繊維ロープの緊結状況

### 3.2 使用材料

主鉄筋 D 13 は SD 295A を使用し、引張試験を行った結果、降伏点強度の平均値は 349 N/mm<sup>2</sup> であった。供試体の製作には、かぶりが小さいこともあり、粗骨材が供試体のすみずみに行き渡らないことも考えて、生モルタルを使用することにした。モルタルの配合を表 - 2 に示している。モルタルの強度試験は、φ50 のシリンダー供試体を作製して、端面を切削して平坦にした後、梁の荷重試験日に行った。

表 - 2 モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
	水 W	セメント C	細骨材 S
60	270	450	1 508

圧縮強度および引張強度は、それぞれ 43.2 N/mm<sup>2</sup> ~ 48.3 N/mm<sup>2</sup>、および 3.3 N/mm<sup>2</sup> ~ 3.6 N/mm<sup>2</sup> であった。使用した 2 種類の連続繊維ロープの物性値<sup>4)</sup> を表 - 3 に示している。アラミド繊維ロープは、ビニロン繊維ロープに

表 - 3 連続繊維ロープの力学的特性

繊維の種類	直径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
ビニロン繊維	6.0	12.3	851	19.3
アラミド繊維	6.0	11.5	2 414	45.7

比べて、引張強度はおよそ 3 倍、ヤング係数はおよそ 2 倍の性能を有している。

### 3.3 試験方法

荷重方法は、2 000 kN 万能試験機を用いて、梁の 2 点对称曲げ荷重とした (写真 - 3)。荷重試験において、スパン中央と両支点の変位を変位計で測定し、ロードセルにより荷重を測定した。荷重試験は、荷重を 5 kN ずつ増加させ、供試体のひび割れ発生状況を観察しながら実施した。また、曲げひび割れが発生した後に一度除荷することにした。これは、初期の曲げひび割れは、目視からのみでは確認することが難しいために、荷重除荷による残留変位で確認するためである。除荷後は、破壊に至るまで単調荷重を行った。

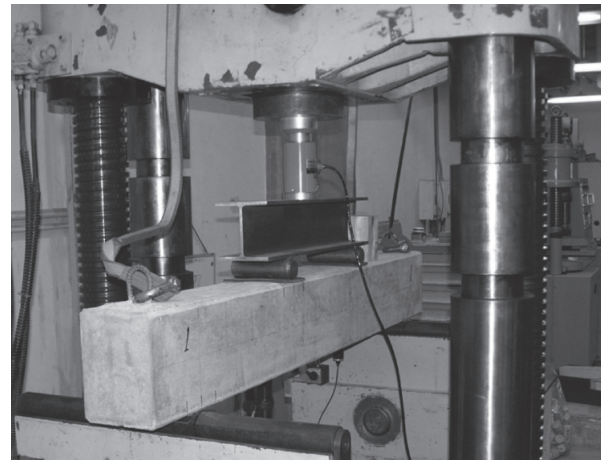


写真 - 3 荷重試験の様子

## 4. 実験結果

### 4.1 実験シリーズ I

図 - 3 および図 - 4 は、荷重試験より得られた供試体 No.1 および No.2 の荷重 - たわみ曲線を示している。供試体 No.1 および No.2 は、荷重が 20 ~ 30 kN において曲げひび割れが発生し、その後 49.9 ~ 55.2 kN で斜めひび割れがせん断区間に発生したのが確認されたので荷重を終了した。せん断補強筋を配置していない供試体 No.1 および No.2 の場合は、主鉄筋が降伏する前に斜めひび割れが発

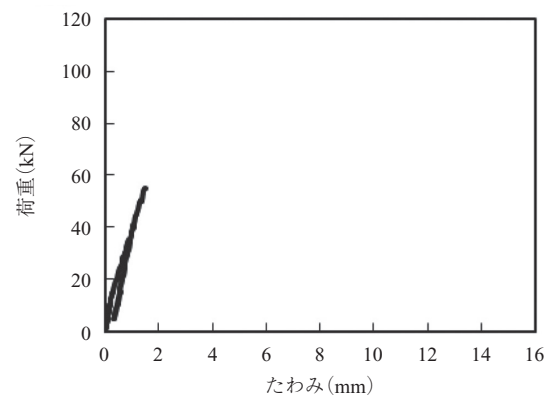


図 - 3 荷重 - たわみ曲線 (No.1)

○ 研究報告 ○

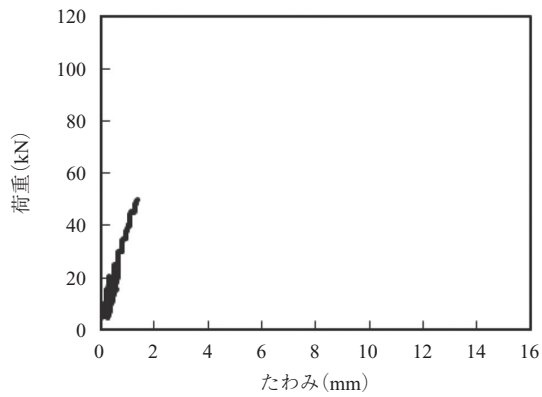


図 - 4 荷重 - たわみ曲線 (No.2)

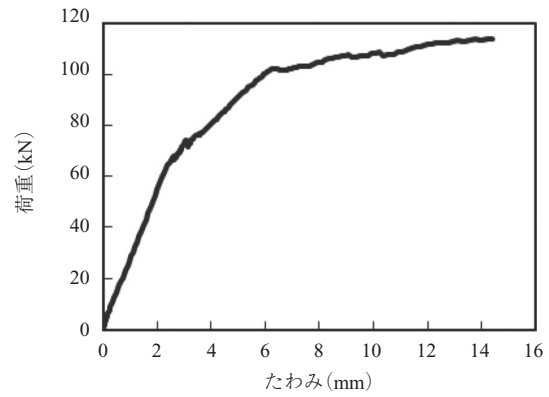


図 - 5 荷重 - たわみ曲線 (No.3)

生ずるせん断破壊となり、スパン中央のたわみも 2 mm 以下と小さい。写真 - 4 は、No.1 の斜めひび割れ発生状況を示している。供試体 No.1 の場合、斜めひび割れの発生は、供試体に向かって右側のせん断区間のみであった。また、供試体 No.2 の場合、斜めひび割れは両側のせん断区間で確認された。

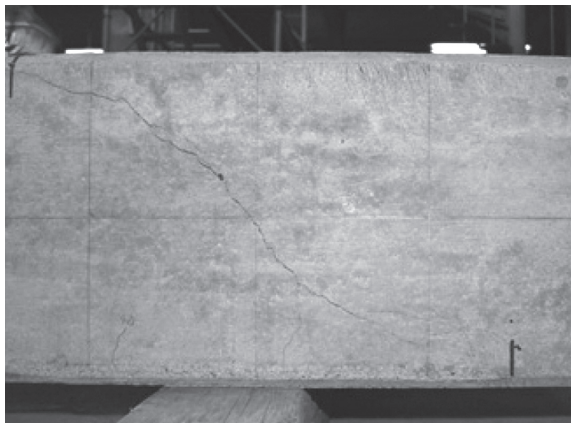


写真 - 4 斜めひび割れ状況 (No.1)

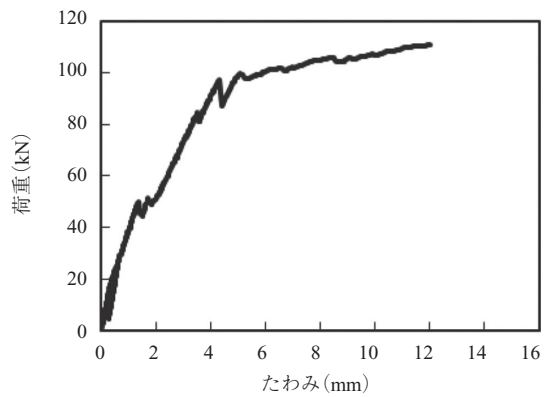


図 - 6 荷重 - たわみ曲線 (No.4)

実験シリーズ I において、斜めひび割れは荷重が 45 ～ 55 kN で発生した。せん断補強筋のない No.1 および No.2 と連続繊維ロープで補強した No.3 および No.4 とではほとんど差が認められない。また、ビニロン繊維ロープで補強した No.3 とアラミド繊維ロープで補強した No.4 との差も認められず、連続繊維ロープは斜めひび割れの発生にあまり影響を及ぼしていないと考えられる。

図 - 5 および図 - 6 は、供試体 No.3 および No.4 の荷重 - たわみ曲線を示している。ビニロン繊維ロープを巻付けた供試体 No.3 は、荷重が 55 kN において両せん断区間に斜めひび割れが発生した後も荷重は増加し、引張鉄筋が降伏した後に曲げ破壊した。ビニロン繊維ロープは、載荷時において巻付け位置からずれることなく引張られ続け、曲げ破壊に至るまで破断しなかった。写真 - 5 は、実験終了後の供試体 No.3 の斜めひび割れの様子を示している。

アラミド繊維ロープを巻付けた供試体 No.4 は、荷重が 49 kN において、供試体に向かって右側のせん断区間に斜

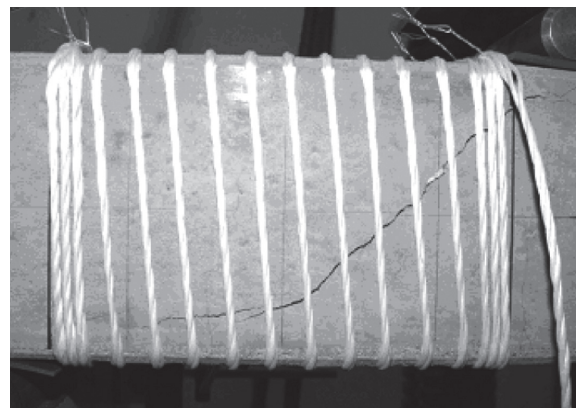


写真 - 5 斜めひび割れ状況 (No.3)

めひび割れが発生した。その後、左側のせん断区間にも斜めひび割れが発生した後も荷重は増加して、引張鉄筋が降伏した後に曲げ破壊した。供試体 No.4 の場合も、曲げ破壊に至るまでロープは巻付け位置からずれることなく、破断も生じなかった。写真 - 6 は、実験終了後の供試体 No.4 の斜めひび割れの様子を示している。ビニロン繊維ロープを巻付けた供試体 No.3、およびアラミド繊維ロープを巻付けた供試体 No.4 は、せん断破壊せずに曲げ破壊となったため、荷重は No.1 および No.2 のせん断ひび割れ発生時の載荷荷重のおよそ 2 倍まで増加し、スパン中央の

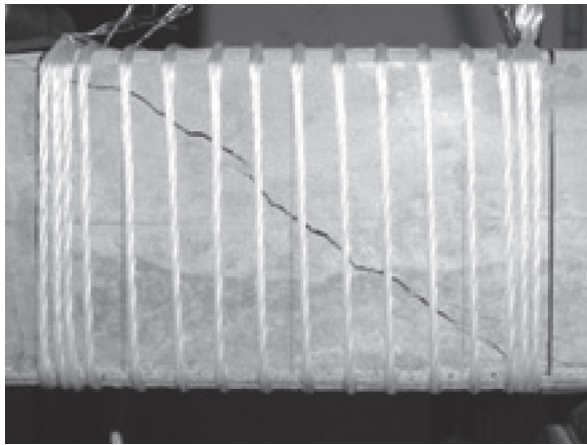


写真 - 6 斜めひび割れ状況 (No.4)

最終たわみもおよそ6～7倍増加する結果となった。供試体 No.3 と供試体 No.4 の場合、いずれも曲げ破壊したために、終局時までの変形性能および耐荷力はほぼ同じと結果となり、連続繊維ロープの違いによる影響は認められなかった。

#### 4.2 実験シリーズⅡ

図 - 7 および図 - 8 は、載荷試験より得られた供試体 No.5 および No.6 の荷重 - たわみ曲線を示している。実験シリーズⅠで使用した供試体 No.1 にピニロン繊維ロープを巻付けた供試体 No.5 の場合、荷重が45 kNの時に新たに供試体に向かって左側のせん断区間に斜めひび割れが発生した。その後も載荷を継続すると、引張鉄筋が降伏した後には曲げ破壊した。ロープは載荷中、巻付け位置からずれることなく引張られ続け、曲げ破壊に至るまで破断しなかった。実験終了後のひび割れ状況を写真 - 7 に示している。

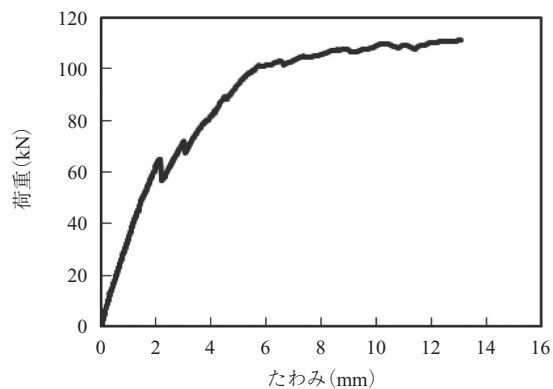


図 - 7 荷重 - たわみ曲線 (No.5)

供試体 No.2 にアラミド繊維ロープを巻付けた供試体 No.6 場合、荷重が50 kNのときに実験シリーズⅠにおいて供試体に向かって右側のせん断区間に発生していた斜めひび割れがさらに支点近くまで進展した。しかし、荷重はその後増加し、引張鉄筋が降伏した後、曲げ破壊した。供試体の実験終了後のひび割れ状況を写真 - 8 に示している。

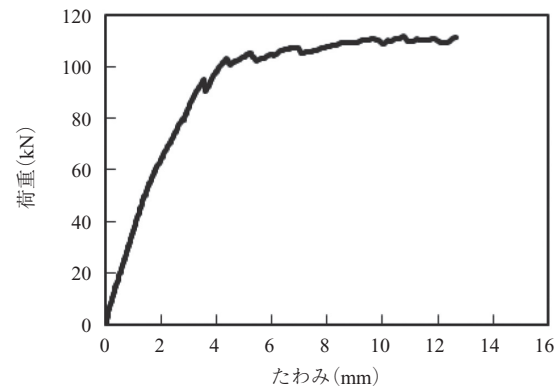


図 - 8 荷重 - たわみ曲線 (No.6)

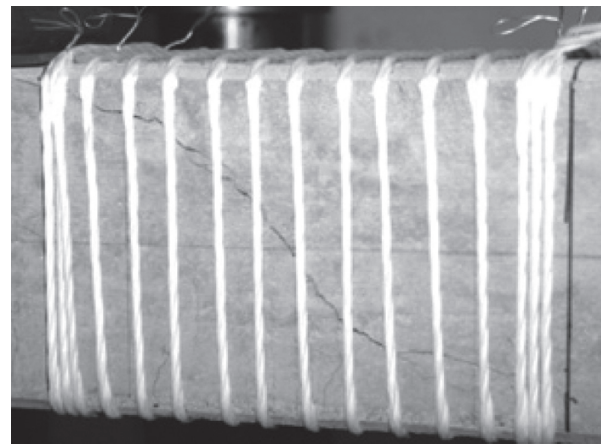


写真 - 7 斜めひび割れ状況 (No.5)

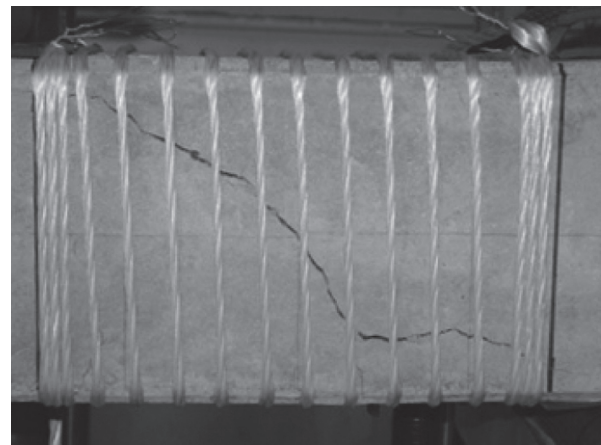


写真 - 8 斜めひび割れ状況 (No.6)

実験シリーズⅡから、一度斜めひび割れが発生して、その後の耐荷力の増加が見込めない梁においても、新たに連続繊維ロープで補強することで、せん断力をロープで負担させることができ、せん断破壊を回避して曲げ破壊させることができることが確認された。

供試体 No.5 および No.6 の荷重 - たわみ関係も、最終的に曲げ破壊であったために、実験シリーズⅠの供試体 No.3 および No.4 の場合と同じ傾向を示している。また、

## ○ 研究報告 ○

供試体 No.5 および No.6 の荷重-たわみ関係において、連続繊維ロープの違いによる影響は認められなかった。

### 4.3 耐 荷 力

実験結果を表 - 4 に示している。表中の実験値は、実験により得られた最大荷重を示している。供試体 No.1 および No.2 の場合、斜めひび割れ発生荷重を最大荷重とした。また、計算値は二羽式<sup>8)</sup> から算定されたせん断耐力より求めている。表中の計算値は圧縮鉄筋の影響を無視して引張鉄筋が降伏したと仮定して、曲げ理論より算定された終局耐力から求めている。供試体 No.1 および No.2 の場合の曲げ耐力から求めた計算値は、供試体 No.3 および No.4 と同様に 108.0 kN となる。また、せん断耐力より求めた計算値は 82.2 kN となり、せん断補強筋を有していないので、せん断破壊が予想される供試体である。

表 - 4 実験結果

供試体	降伏荷重 (kN)	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値 / 計算値	破壊形式
No.1	-	55.2	82.2	0.67	せん断破壊
No.2	-	49.9	82.2	0.61	せん断破壊
No.3	101.5	114.0	108.0	1.06	曲げ破壊
No.4	96.4	110.9	108.0	1.03	曲げ破壊
No.5	100.7	111.2	107.0	1.04	曲げ破壊
No.6	101.7	111.7	107.0	1.04	曲げ破壊

このタイプの供試体に連続繊維ロープを巻き付けた供試体 No.3 および No.4 は、せん断破壊せずに、引張鉄筋が降伏した後に曲げ破壊する結果となった。

斜めひび割れが発生するレベルの荷重履歴を受けた供試体 No.1 および No.2 に連続繊維ロープを巻き付けて再載荷を行った供試体 No.5 および No.6 の場合においても、せん断破壊せずに、引張鉄筋が降伏した後に曲げ破壊した。

曲げ破壊した場合の供試体の実験値と計算値の比は 1.03 ~ 1.06 となり、実験値と計算値はほぼ一致する結果となっている。

今回の実験において、連続繊維ロープの巻付け間隔を 25 mm を採用した場合、曲げ破壊に至るまでロープが破断することはなかった。また、載荷中にロープが移動することもなく、焼きなまし鉄線によるロープの緊結方法で十分にロープを定着することができたと考えられる。また、ロープに作用する張力に対して、ロープの両端部での焼きなまし鉄線の緊結のみならず、梁 4 隅における拘束効果が影響しているものと考えられる。

今回の実験では、連続繊維ロープの補強効果を確認する

ことができたが、補強量として十分であったが、最適であったかということは今後の課題である。したがって、巻付け間隔を実験パラメータにした実験も必要と考えている。また、通常はせん断補強筋が梁に配置されており、連続繊維ロープとせん断補強筋の併用による補強効果についても検討する必要があると思われる。

## 5. 結 論

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) せん断補強筋を有していない RC 梁に連続繊維ロープをせん断区間に巻き付けることにより、せん断耐力は向上し、破壊形態がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行することが確認された。
- 2) 一度せん断破壊した梁に連続繊維ロープを巻き付けることにより、せん断耐力が向上し、耐力および変形性能を改善させることができることが確認された。
- 3) ビニロン繊維ロープとアラミド繊維ロープで補強した場合、耐力および変形性能はほぼ同等で、両者の補強効果の違いは認められなかった。

今後の課題として、連続繊維ロープの巻付け間隔の影響、せん断補強筋を有する梁に適用した際の補強効果、 $a/d$  の影響について検討を行う予定である。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、三宅 紀氏 (ユニチカ 株) からはビニロン繊維ロープを提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 日本建築学会, 2002 年 3 月
- 4) 関島謙蔵, 川上清隆, 田丸 武, 出雲淳一: 連続繊維ロープの力学的特性の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.8, 日本材料学会, pp.419-426, 2008 年 10 月
- 5) 川上清隆, 関島謙蔵, 出雲淳一: 太径の連続繊維ロープの力学的特性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 日本材料学会, Vol.9, pp.425-430, 2009 年 10 月
- 6) 三田村浩, 本間淳史, 下村 匠, 丸山久一: アラミドロープを用いた RC 橋脚の鉄筋段落部のじん性補強に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1267-1272, 2008 年 7 月
- 7) 塩畑英俊, 三田村浩, 渡邊忠朋, 下村 匠, 丸山久一: アラミドロープを用いた既設コンクリート橋脚の耐震補強に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.56A, 2010 年 3 月
- 8) 二羽淳一郎: コンクリート構造の基礎, 数理工学社, 2006 年

【2013 年 6 月 27 日受付】