

せん断破壊したRC梁のビニロン繊維ロープによる機能回復効果

関東学院大学大学院工学研究科 ○井本 祐司
関東学院大学工学総合研究所 正会員 博(工) 関島 謙蔵
関東学院大学理工学部 正会員 工博 出雲 淳一

Abstract : Vinylon fiber rope has been developed to apply for the reinforcement of concrete members. It is characterized by a lightweight, a high tensile strength and an excellent durability compared with reinforcing steel bar. It has also good transportability and it is flexible to be easily arranged at a construction site. The authors reported that Vinylon fiber rope showed the good shear performance for the RC beams pre-damaged in shear. In that report, to clarify the shear reinforcing effect of Vinylon fiber rope, the test specimens had no shear reinforcement. However, the ordinary RC beams have shear reinforcement. In this study, the RC beams with shear reinforcement were prepared and loaded up to a shear failure. After the shear spans were wound with Vinylon fiber rope, the RC beam was reloaded. Through the tests, it was confirmed that the shear failed beam wound with Vinylon fiber rope eventually failed in flexure not shear.

Key words : Vinylon fiber rope, Shear, Pre-damaged beam, Rehabilitation

1. はじめに

日本は世界でも有数の地震国であり、今後もM7以上の直下型の地震が想定されている。大地震により構造物が被災することも考えられ、損傷した構造物を早急に復旧し、2次災害を防止するための技術開発は必要と考えられる。

著者らは、これまでせん断補強筋を有していない鉄筋コンクリート (RC) 梁に予めせん断ひび割れを発生させ、その後連続繊維ロープを巻き付けてせん断区間を補強したRC梁の載荷試験を行っている。これまでの研究では、せん断ひび割れが発生した後も連続繊維ロープを巻き付けることにより、せん断破壊を防止して、曲げ破壊に移行させることができることを実験により検証している^{1,2)}。しかし、RC部材には、通常せん断補強筋が配置されているので、連続繊維ロープの効果がせん断補強筋が配置されている場合にも有効であるか検証する必要があると考えられる。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が、本研究では、アラミド繊維よりも安価なビニロン繊維ロープに着目して、せん断補強筋を有しているRC梁を一度せん断破壊させたのち、ビニロン繊維ロープを巻き付けて再載荷を行い、その効果について検証することを目的としている。

2. 供試体

2. 1 供試体の概要

供試体は寸法が 150×260×1800mm の複鉄筋矩形断面とした。圧縮鉄筋および引張鉄筋にはそれぞれ、D13 および D19 を使用し、D10 による組立て筋を支点外側および曲げ区間内に計 4 箇所配置し、せん断補強筋として中子筋を用いて鉄筋を組み立てた。供試体の製作において、せん断補強筋にひずみゲージを貼り付けることから、D6 鉄筋ではなく D10 鉄筋をせん断補強として用いることにした。しかし、D10 鉄筋をせん断補強筋として用いる場合、供試体の製作上、せん断破壊

しない可能性があるため、せん断補強筋として中子筋を用いることにした。供試体の寸法・形状を図-1に、中子筋を配置した位置での断面図および組立て筋を配置した位置での断面図を図-2に示している。供試体は全部で2体製作した。供試体 No.1 はせん断区間に中子筋 2本を 300mm ピッチで配置した。供試体 No.2 はせん断区間に中子筋 3本を 200mm ピッチで配置した。供試体 No.1 および No.2 の配筋図をそれぞれ図-3 および図-4 に示している。供試体の側面の四隅は、ビニロン繊維ロープを供試体に巻き付ける際にビニロン繊維ロープが損傷することを防止するために、供試体の隅角部を 7mm 程度切り取り、面取りを行った。供試体のせん断スパン比 a/d は 2.6 である。

中子筋のひずみゲージの貼り付け位置は、図-3 および図-4 に示すように載荷点から支点に向かう直線と中子筋とが交差する位置付近に貼り付けることにした。これは、斜めせん断ひび割れが発生することが想定される位置での中子筋のひずみを測定するためである。また、引張鉄筋には、スパン中央位置の真ん中の 1 本の上下面にひずみゲージを貼り付けた。

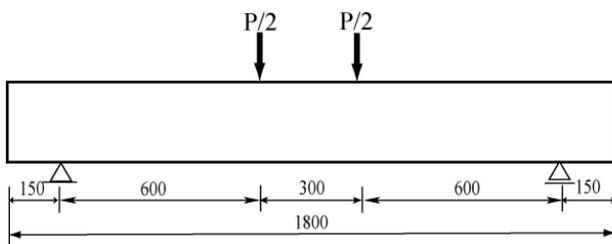
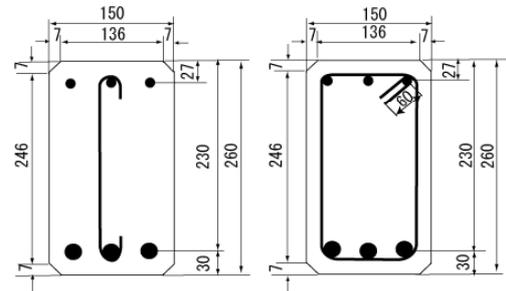


図-1 供試体寸法



中子筋 組立て筋

図-2 供試体断面図

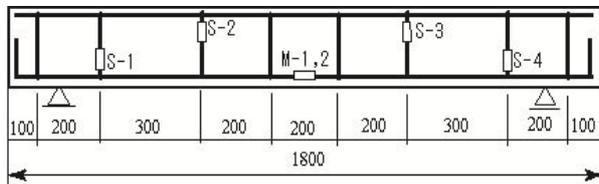


図-3 配筋図 (供試体 No. 1)

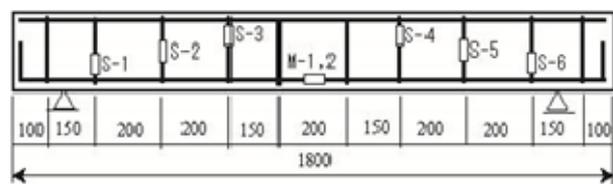


図-4 配筋図 (供試体 No. 2)

2. 2 使用材料

供試体の引張鉄筋にはD19 (SD345) , 圧縮鉄筋にはD13 (SD295A) , 中子筋にはD10 (SD295A) を使用した。降伏点強度はそれぞれ, D19 (388N/mm²) , D13 (392 N/mm²) , D10 (392 N/mm²) である。また, 載荷試験時のコンクリート強度は34.2N/mm²であった。ビニロン繊維ロープの物性値を表-1に示している。

表-1 ビニロン繊維ロープの物性値³⁾

繊維の種類	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
ビニロン繊維	6.0	12.3	851	19.3

3. 載荷試験

3. 1 初期載荷試験

(1) 載荷方法

載荷方法は2対称曲げ載荷とし, 単調載荷試験を行った。載荷試験において, スパン中央と両

支点位置で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。また、ひび割れ幅をクラックゲージで目視により測定した。

(2) 試験結果

供試体 No.1 の場合、荷重が 99.5kN に達した時左側のせん断区間に約 0.06mm 幅の斜めひび割れが発生した。その後荷重が 103.7kN に達した時、右側のせん断区間にも約 0.2mm 幅の斜めひび割れが発生し、荷重が 99.9kN まで低下したがその後も荷重は増加し続け、荷重が 157.0kN に達した時右側のせん断区間で中子筋が降伏した。その後 176.0kN に達した時にせん断破壊し、荷重が低下し始めたので載荷を終了した。引張鉄筋に貼り付けたひずみゲージからは主筋の降伏は確認されなかった。

供試体 No.2 の場合、荷重が 115.2kN に達すると左右のせん断区間にそれぞれ約 0.04mm 幅の斜めひび割れが発生した。荷重が 120.1kN に達した時、左側のせん断区間に発生したひび割れが伸展し、荷重が 113.9kN まで低下したがその後は荷重が増加し、荷重が 190.9kN に達した時左側のせん断区間においてせん断破壊した。その後荷重が低下し始めたので載荷を終了した。No.2 の場合も、No.1 と同様に引張鉄筋に貼り付けたひずみゲージからは主筋の降伏は確認されなかった。また、中子筋のひずみの値からは、明確な降伏は判断できなかった。これは、斜めひび割れが中子筋を横切らなかったためと考えられる。しかし、斜めひび割れは載荷点まで達し、荷重の低下も認められたのでせん断破壊と判断した。図-5 および図-6 は試験終了後のひび割れ図を示している。ひび割れ図は供試体に予めメッシュを描き入れてスケッチを行い、図化したものである。写真-1 および写真-2 は供試体 No.1 および No.2 の試験終了時のせん断破壊状況を示しており、図-7 および図-8 は実験から得られた荷重とスパン中央位置でのたわみの関係を示している。最大荷重の差はあるもののほぼ同じような傾向を示している。

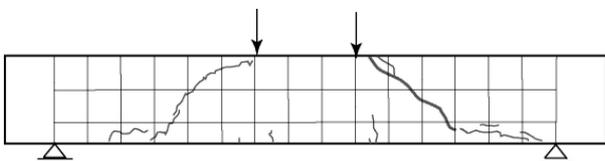


図-5 ひび割れ図 (供試体 No. 1)

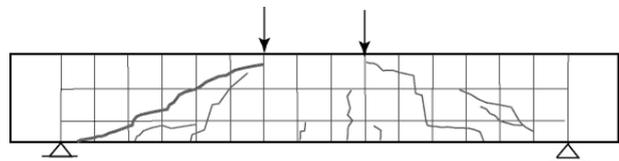


図-6 ひび割れ図 (供試体 No. 2)

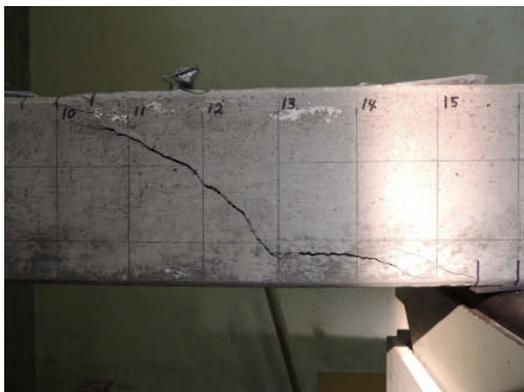


写真-1 斜めひび割れ状況 (No. 1)

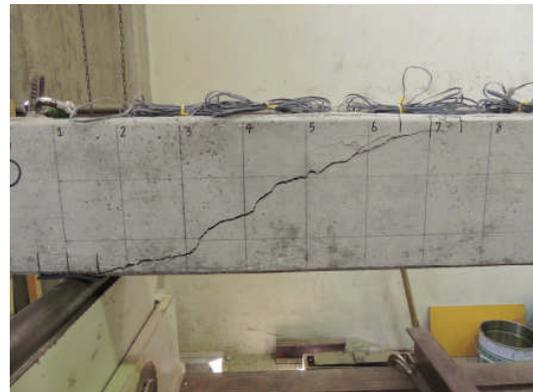


写真-2 斜めひび割れ状況 (No. 2)

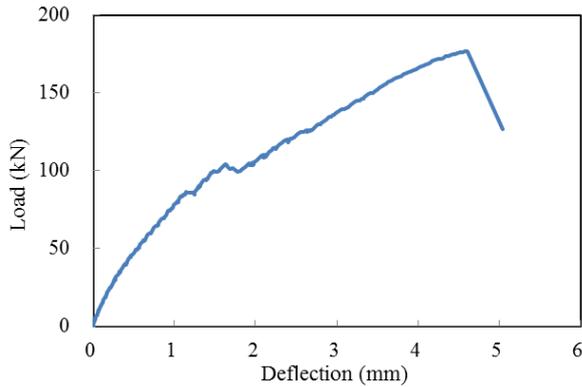


図-7 荷重-たわみ曲線 (No. 1)

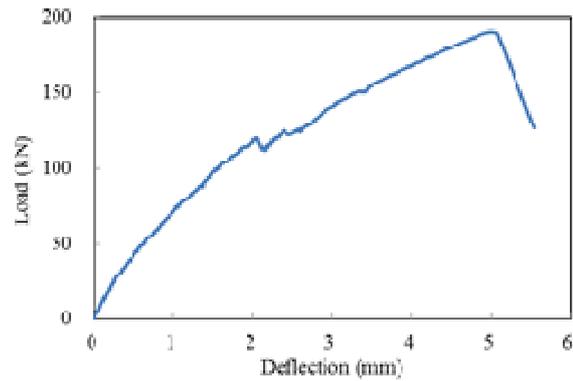


図-8 荷重-たわみ曲線 (No. 2)

3. 3 再載荷試験

(1) ビニロン繊維ロープの巻付け

初期載荷を行った供試体No. 1およびNo. 2にビニロン繊維ロープを巻き付けた供試体をそれぞれ、No. 3およびNo. 4と呼ぶことにする。ロープの巻き付けピッチは、著者らがこれまで行ってきた実験結果を参考にして、載荷中にロープが破断しないと考えられる巻き付けピッチとして25mmを採用した。支点と載荷点より50mmずつ内側の長さ500mmの区間にビニロン繊維ロープを25mmピッチで巻き付けてせん断補強を補うことにした。巻始めは連続繊維ロープを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を用いて3ヶ所で固定した。巻終わりは巻始めと同様の処理を行った。

供試体にロープを巻き付ける作業は人力で行った。人力による巻き付け時のロープの引張力を推定するために、予め巻き付けを行う作業者の巻き付ける引張力をばねばかりで測定することにした。作業者の巻き付け時の引張力の平均値は288.8Nであった。

(2) 載荷方法

再載荷を行う前にひずみゲージを確認したところ、中子筋に貼り付けたひずみゲージの内1点が再測定ができない状態であったが、主筋に貼り付けたひずみゲージはすべて測定が可能であることを確認した。再載荷試験においては、初期載荷においてせん断破壊したと考えられる荷重近傍で3回繰り返し載荷を行ったのち、荷重を単調に増加させて破壊するまで載荷を行うことにした。供試体No.3の場合、170.0kNまで3回繰り返し載荷を行ったのち、単調載荷により破壊まで載荷を行った。また、供試体No.4の場合、190.0kNまで3回繰り返し載荷を行ったのち、破壊に至るまで載荷を行った。

(3) 試験結果

載荷試験から得られた供試体No.3およびNo.4の荷重とたわみの関係を図-9および図-10に示している。また、参考のために初期載荷で得られた荷重-たわみ曲線も重ねて表示している。供試体No.1の場合、176.0kNでせん断破壊したと考えられるが、No.3の載荷試験において170.0kNまでの繰り返し載荷においても、変形が著しく進行することもなかった。その後の単調載荷においても荷重は増加し、主筋の降伏が確認されたのち曲げ破壊に至った。最大荷重は254.4kNであった。

供試体No.2の場合、190.9kNでせん断破壊している。No.4の載荷試験において190.0kNまでの繰り返し載荷においても、変形が著しく進行することもなく、その後の単調載荷において主筋の降伏が確認されたのち曲げ破壊に至った。最大荷重は241.0kNであった。

No.3およびNo.4のいずれの供試体もビニロン繊維ロープは終局まで破断せず、曲げによる破壊

であったと考えられる。写真-3および写真-4は、No.3およびNo.4の荷重終了後の破壊状態を示しており、曲げ区間でコンクリートの圧壊が認められる。

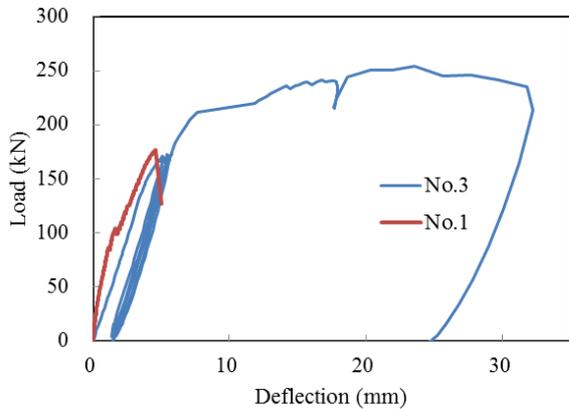


図-9 荷重-たわみ曲線 (No. 3)

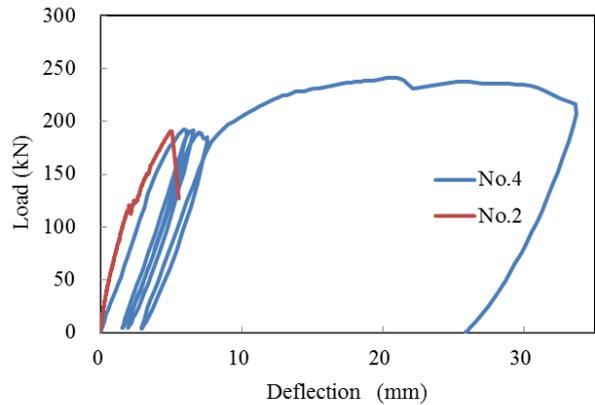


図-10 荷重-たわみ曲線 (No. 4)

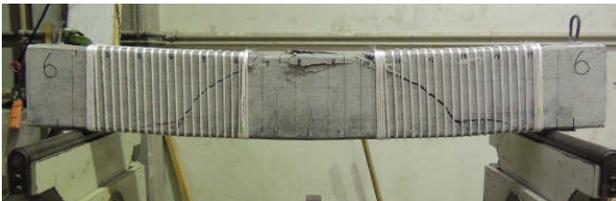


写真-3 破壊状況 (No. 3)

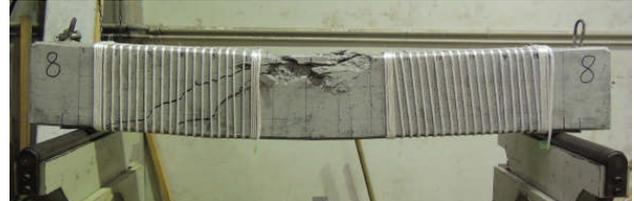


写真-4 破壊状況 (No. 4)

4. 評価

供試体No.1~No.4の試験結果を評価するために、最大荷重を既往の理論より求めることにした。No.1およびNo.2の場合、せん断破壊と考えられることから、式(1)~式(3)より、せん断耐力 V_u を求めて最大荷重を算出した。式(2)における V_c の算定には、二羽式⁴⁾を用いている。また、No.3およびNo.4の場合は曲げ引張破壊と考えられることから、圧縮鉄筋および引張鉄筋の降伏とコンクリートの終局状態の応力分布に等価応力ブロックを仮定することにより、終局曲げモーメントを算定して最大荷重を求めた。表-2に各供試体の試験結果および計算結果を示している。

$$V_u = V_c + V_s \tag{1}$$

$$V_c = 0.20f'_c \frac{1}{3} \left(100 \frac{A_s}{bd} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{10^3}{d} \right)^{\frac{1}{4}} \left(0.75 + \frac{1.4d}{a} \right) bd \tag{2}$$

$$V_s = A_w f_{wy} \frac{z}{s} \tag{3}$$

ここに、 f'_c はコンクリートの圧縮強度、 A_s は引張鉄筋の断面積、 b は梁幅、 d は梁断面の有効高さ、 a は支点から荷重載荷点までの距離、 A_w は中子筋の断面積、 f_{wy} は中子筋の降伏点強度、 s は中子筋のピッチ、 z はアーム長さである。アーム長さ z は $z=d/1.14$ より算出した。

表-2 試験結果および計算結果

供試体	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値/計算値	破壊形式
No.1	176.0	150.3	1.17	せん断破壊
No.2	190.9	169.1	1.13	せん断破壊
No.3	254.4	229.3	1.11	曲げ引張破壊
No.4	241.0	229.3	1.05	曲げ引張破壊

供試体No.1およびNo.2の場合、実験値は計算値をやや上回る結果となっている。また、No.1の場合、中子筋のひずみの値から、荷重が157.0kNに達した時中子筋が降伏している。この荷重の値は計算結果とほぼ一致しており、中子筋はせん断補強筋として機能していると考えられる。供試体No.1およびNo.2の場合、計算結果からもせん断破壊と考えられる。一方、供試体No.3およびNo.4の場合、実験値は計算値とほぼ一致しており、計算結果からも曲げ引張破壊と考えられる。

今回行った実験では、せん断補強筋を有するRC梁がせん断破壊したのちも、ビニロン繊維ロープを用いて補強することにより、ビニロン繊維ロープがせん断補強筋の降伏後もせん断力を負担し、せん断破壊せずに曲げ引張破壊に至ったことが確認された。

5. 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) せん断補強筋を有するRC梁がせん断破壊したのちも、ビニロン繊維ロープを巻き付けてせん断補強することにより、せん断耐力を向上させ、破壊形態をせん断破壊型から曲げ破壊型に移行させることができることが確認された。
- 2) せん断破壊したRC梁をビニロン繊維ロープで補強することにより、せん断破壊荷重近傍での繰り返し載荷を受けても、耐力の低下は認められず、ビニロン繊維ロープが降伏したせん断補強筋の代替えの役割を果たすことが確認された。

謝辞

本研究の実施に当たり、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頂きました。紙面を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 出雲淳一，関島謙蔵，佐藤雅俊：連続繊維ロープを用いた RC 梁の性能改善効果，プレストレストコンクリート，Vol.55，No.5，pp.41-46，2013年9-10月
- 2) Kenzo Sekijima, Masatoshi Satoh, Junichi Izumo: Shear Reinforcing Effect of Continuous Fiber Rope on Reinforced Concrete Beams, Sustainable Construction Materials and Structures 3rd (SCMT3), CD-ROM, 2013 Aug.
- 3) 関島謙蔵，川上清陸，田丸 武，出雲淳一：連続繊維ロープの性能評価（第2報），関東学院大学工学総合研究所報 第36号，pp.11-20，2008年3月
- 4) 二羽淳一郎：コンクリート構造の基礎，数理工学社，2006年