

論文 Article

**CFRP ケーブルを補強筋としたコンクリート部材の
曲げ強度特性に関する実験研究**

原稿受付 2022年8月30日

ものづくり大学紀要 第12号 (2022) 13~18

後藤七海^{*1}, 廣野皓大^{*1}, 大垣賀津雄^{*2}, 幸田英司^{*3}^{*1} ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科 学生^{*2} ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科^{*3} 東京製綱インターナショナル(株)

概要 CFRP ケーブルを補強筋として用いたコンクリート梁部材を対象に、曲げ荷重を繰返ししながら荷重を増加させ、コンクリート梁上面ひずみ、CFRP ケーブルに発生するひずみ、鉛直変位、ひび割れ状況、終局破壊状況等を調査した。本研究により、設計で想定される断面力が繰返して作用する際の諸性能を検証した。

キーワード : CFRP, ケーブル, RC, 曲げ強度, ひび割れ

Experimental study on bending strength characteristics of concrete members reinforced with Carbon Fiber Composite CablesNanami GOTOU^{*1}, Koudai HIRONO^{*1}, Kazuo OHGAKI^{*2}, and Eiji KOUDA^{*3}^{*1} Student, Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*2} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*3} Tokyo Rope International Inc.

Abstract For concrete beam members using CFRP cables as reinforcing bars, the bending load was increased while repeating. We investigated the strain on the upper surface of the concrete beam, the strain on the CFRP cable, the vertical displacement, the cracking condition, and the ultimate fracture condition. Through this research, we verified various performances assumed in the design.

Key Words : CFRP, Cable, RC, Bending strength, Cracks**1. はじめに**

近年、塩害の想定される沿岸部や融雪剤散布地域、火山性土壌などの高腐食環境下におけるコンクリート構造物において、従来よりエポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋などが使用されている。これらは錆びにくい性状を有しているものの、厳しい環境下では発錆、膨潤した事例もある。このような環境における対策の一つとして、炭素繊維複合材ケーブル（以下 CFRP ケーブルと呼ぶ）を

補強筋として用いたコンクリート部材が注目されている¹⁾⁴⁾。CFRP ケーブルは炭素繊維と熱硬化性樹脂を複合化し、より合わせて成形した炭素繊維強化ポリマーである。炭素繊維の優れた素材特性を最大限に生かしているため、高強度、高弾性、軽量、高耐食性、非磁性、低線膨張など従来のケーブルの常識を超えた特長を発揮する。また、より線状であることからコイル巻が可能であり、長尺ケーブルへの対応も可能である。CFRP ケーブルはもともと錆びない材料であり、メンテナンス

フリーの構造物実現に資する材料といえる。また、鉄筋のような腐食がないので、塩害地域においても通常地域のコンクリートかぶり厚が適用できる。その結果、構造物の断面積が小さくなり、コンクリートの使用量が少なくなる。本研究では、CFRP ケーブルを補強材としたコンクリート梁を製作し、繰返し曲げ載荷実験を行い、設計で想定される断面力が繰返して作用する際の曲げ性能、ひび割れ性状、主筋として用いた CFRP ケーブルの発生ひずみ分布、終局破壊状態などを検証した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験供試体の形状と寸法諸元を Fig.1 に、適用した CFRP ケーブルの材料諸元を Table 1 に示す。Fig.1 に示すように、主筋として用いた CFRP ケーブルの数箇所にひずみゲージを貼付け、試験体上面から、数箇所にまとめて配線を引き出した状態で、コンクリートを施工した。供試体の梁高さは 300mm、幅は 625mm、および長さは載荷装置への

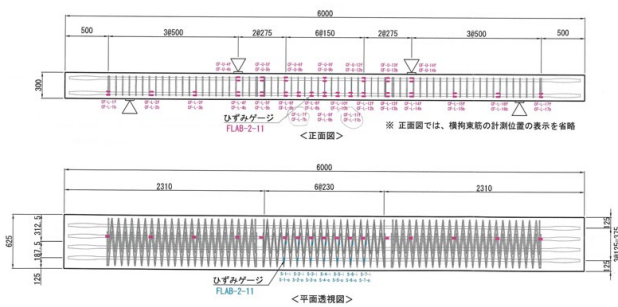


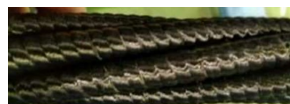
Fig.1 Specimen shape and dimensions

Table 1 Specifications of CFRP cable

呼び径 φ mm	有効断面積 mm ²	破断荷重 kN	引張強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²
9.2	41.7	73.9	1774	1.5 × 10 ⁵
13.0	83.3	147.8		
29.1	416.7	739.1		



(a) Normal shape

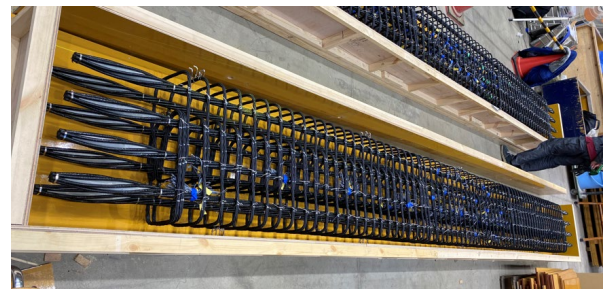


(b) Improved adhesion

Fig.2 Specimen shape and dimensions

設置が可能な 6,000 mmとした。供試体の補強筋として、Fig.2 に示すような表面に凹凸を設けた付着改良型の CFRP ケーブルを用いた。主筋にはφ 29.1mm を 125 mmの間隔で配置しており、重ね継手は設けていない。また、せん断補強のための横拘束筋はφ 9.2mm を 77mm 間隔で連続的にスパイラル状に配筋している。

供試体の型枠と配筋状況およびコンクリート打設状況を Fig.3 に示す。供試体は実験結果の安定性を検証するため、同一形状諸元のものをも 2 体製作している。供試体は早強コンクリートを用いており、その諸元は Table 2 に示すとおりである。本載荷実験は、コンクリート材齢 13 日で実施している。



(a) Formwork and reinforcement



(b) Concrete casting

Fig. 3 Construction of the specimen

Table 2 Compressive strength of concrete

材齢	圧縮強度 kN			
	平均	試験体 1	試験体 2	試験体 3
3 日	32.4	32.3	32.5	32.5
7 日	39.5	35.2	41.2	42.0
21 日	45.9	45.0	45.1	47.6

2.2 載荷・計測方法

主要計測ステップを Table 3 と Fig.4 に示す. 主筋の CFRP ケーブルに発生する引張応力が設計計算における常時, L1 地震時, L2 地震時を想定した載荷荷重, および目標曲げ耐力と想定した 700N/mm^2 に相当する荷重において, それぞれ 3 回ずつ繰返し載荷を行う. 載荷 1 回目は Table 3 に示す目標荷重まで荷重制御で載荷する. 2 回目, 3 回目も同様に目標荷重までの載荷を繰返すこととする. 繰返し載荷が終了した後, 供試体の耐力が低下するまで単調載荷を実施する.

また, ひび割れ状況の観察は, 常時, L1 地震時, L2 地震時の各ステップ 3 回目の載荷終了後, 10kN 除荷したのちに実施している.

3. 実験結果

3.1 最大荷重

曲げ載荷実験の結果, 支間中央部の鉛直変位は Fig.5 に示す通りであった. 最大荷重は 590.6kN であり, 目標曲げ耐力と想定した CFRP ケーブル応力 700N/mm^2 に相当する荷重 379.2kN の 1.56 倍であった.

3.2 CFRP ケーブルのひずみとひび割れ性状

CFRP ケーブルに発生した引張応力を Fig.6 に示

Table 3 Timing of measurement

計測ステップ	繰返し載荷 1 回目	
	応力 N/mm^2	目標荷重 kN
常時	135.7	76.8
L1 時	209.8	118.2
L2 時	422.3	235.5
700N/mm^2 時	700.0	379.2

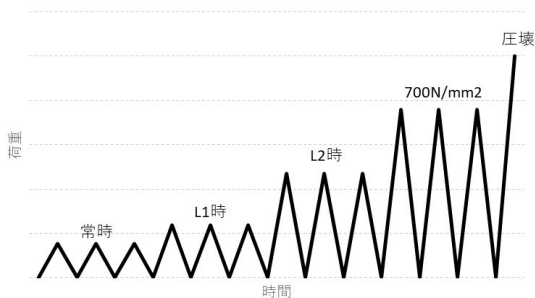


Fig.4 Cyclic loading method

す. 同図において, Fig.2 で説明した CFRP ケーブルの表面形状を改良した本実験の結果と, 通常型の結果を比較している. 本結果から改良型 CFRP ケーブルのひずみは通常型に比べて減少していることがわかる. また, 通常型の場合のひずみ分布は平準化されているが, 改良型ではひずみ値に小幅であるが部材軸方向に変動があることがわかる. これは, CFRP ケーブルとコンクリートの間が付着が存在しており, ひび割れ付近の CFRP ケーブルのひずみが大きくなり, その他の位置のひずみが小さくなることが理由と考えられる.

このように付着が存在することにより, Fig.7 に示す通りひび割れが分散して, ひび割れ幅が小さくなる性状が確認できた.

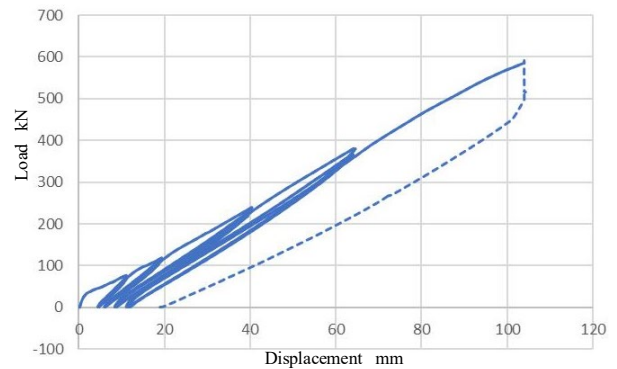


Fig.5 Vertical displacement at center of span

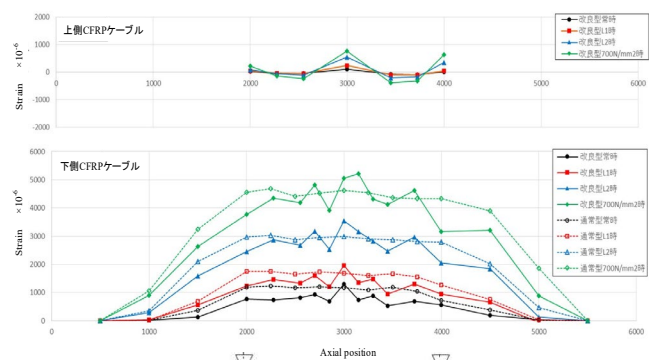


Fig.6 Strain distribution of CFRP cable

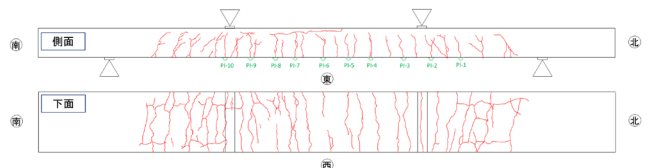


Fig.7 Sketch of cracks

3.3 コンクリートのひずみ

実験供試体上面のひずみを Fig.8 に示す. 同図において, ひずみゲージ C-1~C-9 は載荷点間の等曲げ区間に位置しており, 圧縮破壊部付近の C-5 では最大ひずみが 3800×10^{-6} に達している. これは一般に言われているコンクリートの限界ひずみ 3500×10^{-6} を若干超える値であった. 破壊状況は Fig.9 に示す通りであり, 曲げによる終局段階において, コンクリート上面が圧壊していることがわかる.

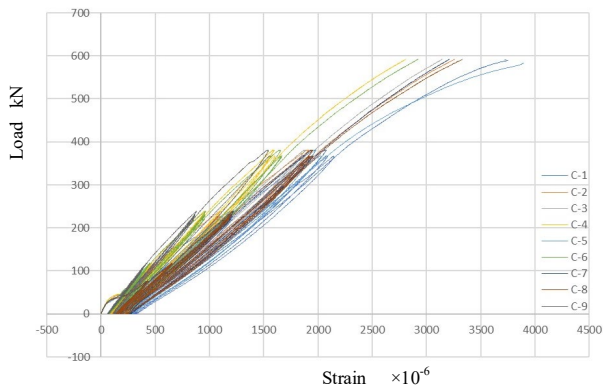


Fig.8 Strain on top of concrete



(a)Side (b)Top surface
Fig.9 Crushing of concrete

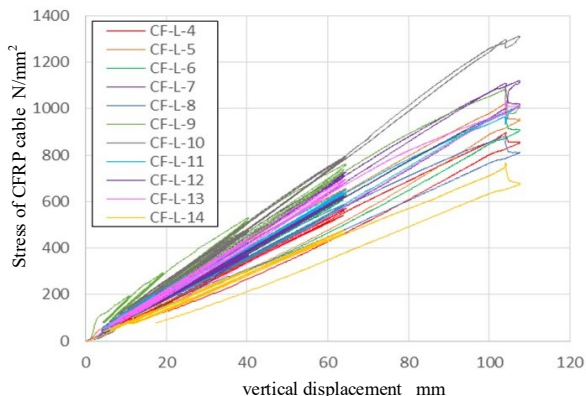


Fig.10 Stress of CFRP cable and vertical displacement

3.4 CFRP ケーブルの応力と変形挙動

CFRP ケーブルの応力度と実験供試体中央の鉛直変位の関係を Fig.10 に示す. 同図より, 支間中央付近の CFRP ケーブルの最大応力は 1300 N/mm^2 生じているが, Table 1 に示す引張応力 1774 N/mm^2 の 73% であった. 荷重を除荷すると CFRP の応力がほとんどゼロ点近くに戻り, 残留ひずみが残らないことがわかった.

実験供試体の支間中央部の等曲げ区間のひび割れ幅を π 型変位計で計測した. その際のひび割れ幅と CFRP ケーブル応力の関係を Fig.11 に示す. 同図より, CFRP ケーブル応力 800 N/mm^2 においてもひび割れ幅は 1 mm 以下であり, 異形鉄筋や丸鋼のひび割れ幅計算値の半分程度の小さい値であった. これは Fig.7 で示したように多数の細かいひび割れが分散発生することにより, ひび割れ幅が大きくなるということが考えられる. また, 別途実施した通常型 CFRP ケーブルを用いた同様のコンクリート梁におけるひび割れ幅は最大 1.5 mm 程度に達しており, 異形鉄筋のひび割れ幅計算値と同様の挙動を示していた. 以上のことから, 改良型 CFRP ケーブルによる高いひび割れ分散性能が確認できたといえる.

3.5 実験後の CFRP ケーブル被覆状態

繰返し曲げ載荷実験で, 付着改良型 CFRP ケーブルの被覆材凹凸に変状がないかについて調査した. 実験後に実験供試体を解体し, もっとも発生応力が高い支間中央付近の CFRP ケーブルを複数採取した. 本実験後に採取した CFRP ケーブルおよび未使用の CFRP ケーブルに対して, 外側素線

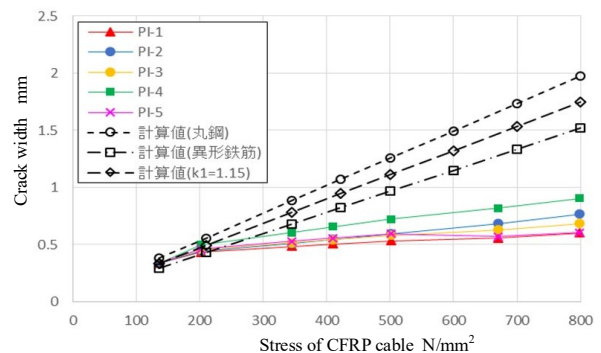


Fig.11 Stress of CFRP cable and crack width

6 本分の被覆材凹凸の間隔と高さをマイクロSCOPEで計測した. 計測は素線 1 本あたり 10 箇所を計測した. 被覆材凹凸の計測方法は Fig.12 を参考に, 以下の①~④の手順で行った.

- ① 1x7 構造の CFRP ケーブルの同一範囲約 7cm を取り出す.
- ② 外側の素線 1~6(心 1 本以外)の計測を行う.
- ③ 素線 1 本ごとに樹脂包埋を行い, 単線の中心断面になるよう研磨をして観察面とする.
- ④ 1 本の単線に対し連続した 10 箇所測定する.

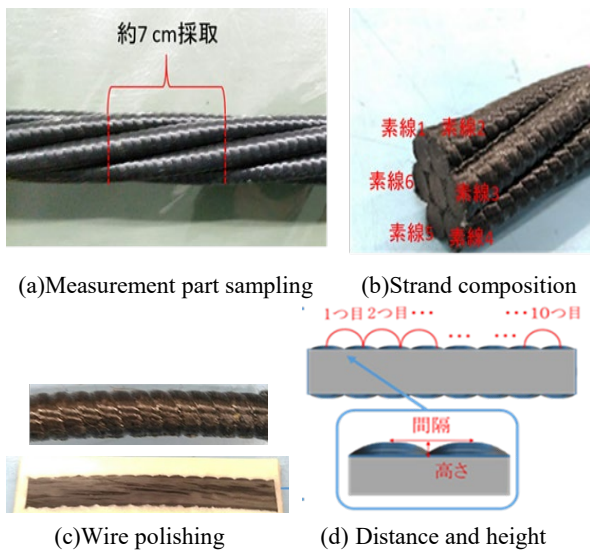


Fig.12 Measurement procedure

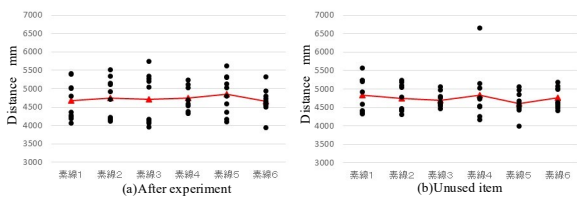


Fig.13 Distance measurement result

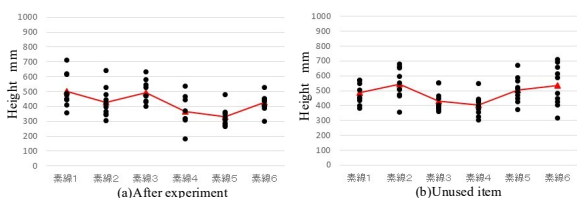


Fig.14 Height measurement result

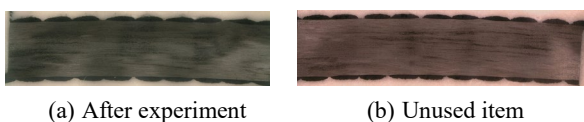


Fig.15 Photograph of wire coating

Fig.14 に示す. 同図から, 本実験後の CFRP ケーブルは未使用品と比較して, 被覆材の凹凸の間隔と高さに有意な差は見られなかった.

また, CFRP ケーブル素線の縦切断写真を Fig.15 に示す. 本実験で取り出した素線は実験供試体のコンクリート内から CFRP ケーブルを採取する際に, 界面の接着により, 被覆材が若干毛羽立った箇所も見られたが, 計測の際に影響するようなものではなかった.

以上のことから, 繰返し曲げ載荷実験で終局状態後も主筋として用いた CFRP ケーブルの被覆材凹凸に変状がないことが確認できた.

3.6 破壊後の残留変形

CFRP ケーブルは上述の Fig.10 で示したように引張強度の 73%の応力に留まっており, 鉄筋のような降伏による残留ひずみがなく, 復元性に期待できる. そのことは, Fig.5 の支間中央の鉛直変位からもわかる通り, 最大荷重 590.6kN 後の破壊時の鉛直変位 103mm に対して, 荷重除荷後の鉛直変位は 20mm であり, 残留変形が極端に小さく CFRP ケーブルによる復元性が明らかになった.

Fig.16 は実験供試体の破壊時の変形と載荷荷重除荷後の変形状態を示す写真である. この写真か



(a)At ultimate bending failure



(b)After unloading

Fig.16 Deformation of specimen

らもわかる通り、残留変形はほとんど残らず、復元性が確認できる。以上のことから、地震時などで過大な荷重が作用して部分的に曲げ破壊が生じても変形は残らないと思われる。このような場合には、圧壊したコンクリート部分を研って、ポリマーセメントモルタル等で補修することにより復旧性があることを示唆している。

4. まとめ

CFRP ケーブルを補強材としたコンクリート梁を製作し、繰り返し曲げ載荷実験を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 最大荷重は 590.6kN であり、目標曲げ耐力に相当する荷重 379.2kN の 1.56 倍であった。
- (2) 改良型 CFRP ケーブルのひずみは通常型に比べて減少しており、ひび割れの分散効果がある。
- (3) コンクリート上面最大ひずみが 3800×10^{-6} に達しており、曲げ終局はコンクリートの圧縮破壊であった。一方、支間中央付近の CFRP ケーブルの最大応力は 1300 N/mm^2 生じているが、引張強度の 73%であった。
- (4) CFRP ケーブル応力 800 N/mm^2 においてもひび割れ幅は 1mm 以下であり、異形鉄筋や丸鋼のひび割れ幅計算値の半分程度であった。
- (5) 繰り返し曲げ載荷実験で終局状態後も主筋として用いた CFRP ケーブルの被覆材凹凸に変状がないことが確認できた。
- (6) 最大荷重 590.6kN 後の破壊時の鉛直変位 103mm に対して、荷重除荷後の鉛直変位は

20mm であり、残留変形が極端に小さく、復旧性があることが示された。

謝 辞

本実験に際し、西日本高速道路株式会社、鹿島建設株式会社、NEXCO 西日本コンサルタンツ株式会社の多くの方々に多大な協力を賜りましたこと感謝いたします。

文 献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：繊維強化ポリマー (FRP) のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針，令和 2 年 9 月
- 2) Nabil F. Grace, M.ASCE, Soubhagya K. Rout, Kenichi Ushijima, Mena Bebawy : Performance of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Stirrups in Prestressed-Decked Bulb T-Beams, Journal of Composites for Construction, Vol. 19, Issue 3, ASCE, 2015.6
- 3) Takeshi Oshiro, Makoto Nakamura, Michiaki Sakate, Tadahiro Yoshida: Planning and Design of a Two-story Arch Bridge with Solid-spandrel Upper Arches Built with CFRP Reinforced Concrete, IABSE Symposium, Tomorrow's Megastructures, 2018.1
- 4) 山崎大介, 福田泰樹, 伊藤康輔, 土田僚, 足立健, 関口豪賢, 中村香央里：新名神高速道路天神川橋（仮称）の設計－RC7 径間連続二層アーチ橋の基本構造－，土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，V-382，2022.9