

令和 6 年 5 月 19 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04219

研究課題名（和文）炭素繊維を用いたプレストレストコンクリート構造の付着定着性能の改善による合理化

研究課題名（英文）Improvement on bond and anchorage properties of carbon fiber plastic rods in prestressed concrete structures

研究代表者

田中 泰司（TANAKA, YASUSHI）

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：40377221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではFRPロッドをコンクリート用緊張材として使用する際に必要となる機械式定着具の研究開発を行った。ロッドの表面にケイ砂を接着して摩擦力を補強した上でプラスチック製のくさび式定着具を直列に連結することによって、引張強度の約半分の定着力を確保できることを引抜き試験により確認した。また、金属製のくさび式定着具においても、ロッド表面を硬質接着剤で強化することによって定着具のサイズを小さくしながらもプラスチック製と同程度の定着力が確保できることが明らかとなった。ただし、定着部の外側で早期破断が生じる傾向が見られたことから実用にはさらなる改善が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の化学的定着具では定着作業に1週間を要するが、これが工期が遅れる原因となるので、これまでFRPロッドはプレストレスト・コンクリートに使用されてこなかった。本研究の成果を踏まえて改善をはかり、機械式定着具を開発できれば、定着作業の時間が数分に短縮される。これによって新材料であるFRPが社会インフラにも広く使用できるようになり、高耐久で軽量の構造物を製作可能となる。これまで長寿命化が難しかった海洋構造物などへの適用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research and development of mechanical anchorage devices that are necessary when FRP rods are used as concrete tensioning materials. By bonding silica sand to the rod surface to reinforce the frictional force and connecting plastic wedge-type anchors in series, it was confirmed through pull-out tests that the anchorage force could be approximately half of the tensile strength of the rods. It was also found that the metal wedge-type anchors has the same level of anchorage strength as the plastic ones by strengthening the rod surface with a hard adhesive even though the size of the anchors was much smaller. However, further improvement is needed for practical use, since premature rupture tends to occur outside the anchorage area.

Translated with DeepL.com (free version)

研究分野：コンクリート工学

キーワード：FRP プレストレスト・コンクリート 定着 FEM

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

橋梁、トンネルをはじめとする社会インフラの老朽化が世界的に深刻化しており、その対策が課題となっている。社会インフラの更新には膨大な費用がかかるだけでなく、社会的な影響も生じる。コンクリート構造物や鋼構造物で生じる劣化で最も問題となるのは鋼材の腐食である。従来は緻密なコンクリートや何重もの塗装によって鉄を守ることで劣化を防いできた。特に、海水や凍結防止剤による塩害を受ける環境では、100年オーダーの耐久性を確保するために、多額のコストがかかっている。コンクリート構造物では、かぶりが大きくなることで重量が増え、耐震性確保のためにさらにコストが増える状況にある。

鋼材腐食の問題を根本的に解決する方法として、腐食しない材料を鋼材の代替に使う方法が考えられる。炭素繊維やアラミド繊維といったFRP（Fiber Reinforced Plastic）をプレストレストコンクリート（PC）用の緊張材に使用する方法が1990年代に提案され、精力的な研究が行われた。しかしFRPは鋼材に比べて高コストであったことや実用上の課題がいくつかあったことから、広く普及するには至らなかった。しかし近年、製造プロセスの進化によってFRPのコストが下がり、強度比でPC鋼材と同等レベルにまで達している。そこで本研究では、FRPを緊張材に使用したPC構造に着目し、実用上の課題の解決をはかる。

2. 研究の目的

本研究では、炭素繊維（Carbon Fiber Reinforced Plastic; CFRP）によるプレストレストコンクリート（Prestressed Concrete; PC）部材の社会実装に真に必要な設計・製造方法を開発することを目的とする。高張力鋼をCFRPに置き換えると大きく分けて3つの問題が生じる。すなわち、1. CFRPとコンクリートとの付着・定着が悪く、構造体として成り立たなくなる場合があること、2. 定着作業に数日レベルの時間がかかること、3. 施工中に破断が生じやすく、安全性が確保し難いこと、である。これらの問題に対して本研究ではそれぞれ、1. コンクリートとの付着改善のためのCFRP表面処理法の検討、2. 定着作業を大幅に短縮できる定着システムの開発、3. 施工中の安全性確保のための設計方法の構築、によって解決をはかる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、①CFRP材料の開発、②定着システムの開発、③設計方法の構築の3つの課題に取り組んだ。それらの成果の集約としてPC桁試験体による確認実験を行った。各課題の実施内容を以下に記す。

①CFRP材料の開発：CFRPの付着性能を強化するために、最適な表面処理法を開発することとした。ガラスコーティング、または珪砂を混和した樹脂を主体として複数の試作品を製作して付着・定着試験を実施した。

②定着システムの開発：現状、数日を要している定着作業を数分に短縮することを目標として、FRP専用の機械式定着具を開発した。定着具自体の腐食を避けるためプラスチック製の定着具を3Dプリンターで試作し、定着力確認試験を行って、最適な定着具を探索した。また、腐食耐性の強い金属材料による定着具の可能性を検討するために、その前段階として鋼製定着具による定着力確認試験を実施した。

③設計方法の構築：CFRP材料の性能向上に迅速に対応できる設計方法を構築することを目的として信頼性設計をベースとしてそのための材料試験方法と設計に使用する材料特性の決定方法を検討した。また、各試験の必要試験体数を検討した。

④設計・施工性能の確認・評価：③提案する設計方法に準じて中規模なPC桁試験体を設計し、①②で開発する定着具およびCFRP材料を使用して試験体を製作する。制作時の施工性の確認を行ったうえで、コンクリートおよびCFRPの長期ひずみ計測を行い、設計の想定通りの挙動をするか確認した。また、載荷試験を行って、所定の性能が発揮されることを確認した。

4. 研究成果

4. 1 定着システムの開発

4. 1. 1 プラスチック製定着具の開発

（1）定着具の開発手順

定着具自体の腐食を避けて高耐久な構造を実現するために、プラスチック製のくさび式定着具の開発を試みた。その際にFRPロッドの付着についても合わせて検討を行った。定着具の開発を迅速で安価に行うために3Dプリンターを使用した。まず3D CAD (Fusion 360) を用いて定着具の3Dモデルを作成した。次に、そのモデルを3Dプリンターを用いて印刷した。作製した定着具の例を図-1に示す。

（2）定着具の性能評価と改良

定着具の性能を確認するために、熱可塑性CFRTPロッドに印刷した定着具を装着し引抜き試験を行った。試験結果を評価、分析して定着具の改良を行った。引抜き試験に使用した熱可塑性

CFRTP ロッドはφ9.3の7本より線であり最大引張荷重が約100kNであることから、この値を定着力の目標値として改善をはかった。

最初に、鋼制定着具とまったく同じ寸法および形状の定着具を PLA 樹脂で製作して引抜き試験を行ったところ、定着力は 1.2kN と極端に小さな結果となった。摩擦抵抗力が不足していることが原因であると考えられたため、ロッド表面にケイ砂を付着させ摩擦力の向上を図ることとした。またウェッジに凹凸をつけることで噛み合い効果を期待した。その結果、定着力は 4.9kN と約 5 倍まで向上させることができた。しかし、目標値の 100kN からは大きな乖離があるため、改善策として定着具を大型化することとした。また、ケイ砂の接着に使用する接着剤をより強力なものに変更したうえで、ケイ砂の大きさの影響を評価した。その結果、ケイ砂の大きさとしては今回の FRP ロッドに対しては 4 号が最適であることが確認できた。

以上の検討結果より、1 個のくさび式定着具で目標値である 100kN に到達するのは難しいと考えた。そこで定着具どうしをスペーサーを介して連結する方法を考案した。連結数を最大 4 個まで増やして引抜き試験を行い回帰直線を求めたところ、6 連結以上とすることで目標値である 100kN に到達できると推定された。しかし、連結数が多くなると、定着体の寸法が大きくなり、実用的ではなくなるので、連結数を低減する方法を考案する必要があることがわかった。

(3) 定着具の構造解析

定着具の更なる改良を行うために、adobe Fusion 360 を用いて構造解析を行い、応力分布を求めた。その結果、ウェッジの先端部と底面部に応力が集中することが分かった。そのため定着具を大きくするほど応力が大きくなり、早期の破壊やすべりが生じやすくなると考えられた。

4. 1. 2 金属製定着具の開発

プラスチック製定着具による定着方法では、定着具のサイズが大きくなりすぎることが明らかとなったことから、非腐食性の金属による定着具の可能性を検討することとした。本研究ではその前段階として、一般の鋼製くさび式定着具を使用した場合の定着力を評価することとした。

まず、ケイ砂を FRP ロッド表面に接着することによる効果を確認した。検討の結果、4 号珪砂が最適であると判断された。図-2 に示すよう

に定着具の連結による効果を確認したが 3 連結以上では効果が低減し、連結数に限界があることが明らかとなった。上限はあるものの 3 連結までであれば、プラスチック製に比べて短い長さで同様の定着力が確保されているので、金属製とするメリットは大きいと考えられた。また、金属シムを挟むことによってウェッジ材質の影響を確認したところ、アルミが最適であり、柔らかすぎても硬すぎても強度低下が生じる結果となった。

前述の実験ではケイ砂の接着にゴム系接着剤を使用したのが、これをシアノアクリレート系の瞬間接着剤に変えて再度実験を行った。定着具 1 個での最大荷重は約 2 倍の 21.9kN に向上した。さらにケイ砂を接着することによって、4 号珪砂で 54.6kN、5 号珪砂で 46.0kN まで向上した。連結による最大荷重の増加が得られなかったことや定着部の外側で早期破断が生じたことから素線ごとのひずみ分布を計測したところ、40%近いひずみのばらつきが生じていることが明らかとなった。そのため、均等に荷重が作用するための工夫が今後、必要である。

4. 2 設計方法の構築

4. 2. 1 設計の基本

FRP ロッドを緊張材として使用した PC 部材の設計方法は一般の PC 鋼材を用いた場合の設計方法を準用すればよい。FRP ロッドを用いた PC 部材の力学挙動が一般の PC 鋼材を用いた場合と同様であることを確認することによってこの考え方の妥当性が証明される。ただし、FRP は鋼材と異なる点があるので、一部で特別な配慮が必要となる。本節では設計時に必要となる材料特性と



図-1 作製したプラスチック製定着具の例

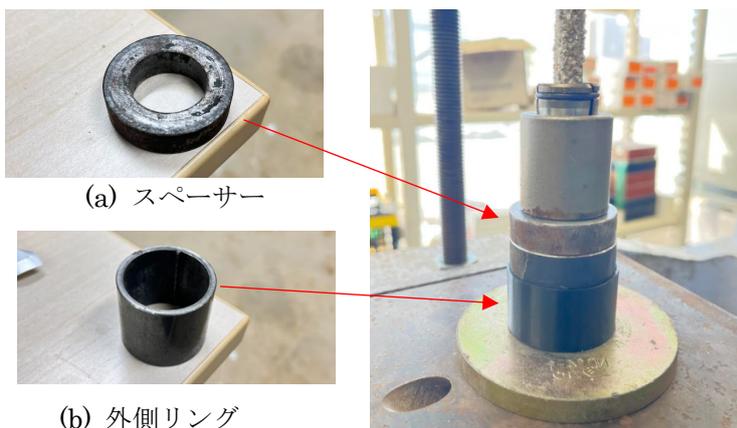


図-2 鋼製くさび式定着具の連結状況

して、引張強度、プレストレス力および定着長の設定方法について検討を行った結果を述べる。

4. 2. 2 引張強度およびプレストレス力の設定方法

一般の PC 鋼材では引張強度の特性値の 80%程度の緊張力でプレストレスが導入される。また引張強度の特性値は 5%超過確率を考慮して設定されることが多い。しかし今回使用した FRP ロッドの場合、引張強度のばらつきが PC 鋼材よりも大きく、同様の考え方が適用できないと考えられた。そこで緊張力の大きさを破壊確率から定めることとした。17 本の CFRTP より線に対して引張試験を行い、ワイブルプロットを用いて応力と破壊確率の関係を求めた。リスクとコストのバランスに配慮しながら今回は破壊確率の設計値を 0.01%と定めた。このときの応力は引張強度の平均値の 54%となった。この値の妥当性は今後の検討課題ではあるが、FRP のような材料は改良のサイクルが短いので、比較的少ない試験本数から材料特性値や設計値を定めるこのような手法は効果的であるといえる。

4. 2. 3 定着長の設定方法

FRP ロッドの付着力は表面処理等によって大きく異なるために、材料ごとに定着長を定める必要がある。そこで本研究ではコンクリート角柱試験体の引抜き試験による定着長の決定方法を提案した。長さ 900mm のコンクリート角柱試験体に $\phi 4.5$ のバサルトロッド 6 本束を配置して引抜き試験を行った。バサルトロッドにはひずみゲージを等間隔で貼り付けて荷重とひずみ分布を計測した。ひずみが発現し始めた荷重がその位置までの定着力であると解釈できるので、各位置の定着力をプロットして回帰直線を求めた。FRP ロッドの定着長は、破断荷重と回帰直線が交わる点となる。このような試験を行うことによって少ない試験体数で定着長を評価することが可能となる。また、ひずみ分布の計測値より付着-すべり関係を導くことができる。

4. 3 設計・施工性能の確認・評価

4. 3. 1 ポストテンション式 PC はりの曲げ載荷試験

(1) 供試体作製

FRP ロッドを緊張材に用いた PC 構造の実現に向けて、コンクリート内部での FRP ロッドの挙動を確認するために CFRTP ロッドを緊張材とした PC 梁部材をポストテンション方式で作製した。供試体の寸法は $300 \times 200 \times 1800$ mm である。健全な CFRTP ロッドに加え、劣化を模擬して素線を 1 本破断させたケースと比較用として PC 鋼より線を使用したケースの計 3 種類の供試体を作製した。緊張材とコンクリートの付着特性が顕著に観察できるように、緊張材とコンクリートの断面積比は 0.08%程度と小さな値に設定して、載荷時に曲げひび割れが複数入らないようにした。

(2) ポストテンション方式によるプレストレスの導入

シース内部に CFRTP ロッドまたは、通常の PC 鋼より線を挿入し、ポストテンション方式によりプレストレスを導入した。すべての供試体において、プレストレス力は 4.2 節の検討より CFRTP ロッドの引張強度の半分の値である 50kN とした。プレストレス力の導入後、シース内部に PC グラウトの充填を行った。

プレストレス導入時と解放時にコンクリートひずみ分布を計測したところ、緊張力の解放時に、定着具のセットロスによってコンクリートのひずみが 1/5 から 1/3 程度に減少した。ひずみの積分から算出したセットロスはくさび式定着具で 8.3 mm、CFRTP 用の定着具で 6.2mm であった。鋼管定着具であっても位置調整用の治具を追加することで既存の定着方法よりもセットロスを抑えることができた。

(3) 載荷試験

プレストレス導入から 28 日後に載荷試験を行った。載荷方法は中央 1 点集中載荷とし、支間は 1500mm とした。本実験では緊張材の断面積が供試体断面に対して小さかったため、曲げひび割れ発生後、いったん荷重が低下し、付着によって緊張材に張力が導入されてから、再び徐々に荷重が漸増して破壊に至った。破壊時の荷重は曲げひび割れ発生荷重に比べてやや小さく、曲げひび割れはいずれの供試体においても載荷点付近に 1 本のみ発生した。

ポストテンション式 PC 梁の載荷試験においては、ひび割れ発生荷重、ひび割れにより低下した荷重の最小値、ひび割れ後の荷重 - 変位関係の傾きにおいて、CFRTP より線の方が通常の PC 鋼材よりも大きくなるという結果となった。FEM による感度解析の結果、その原因は残存プレストレス力の差とコンクリートとの付着の差に起因するものと推測された。また、載荷試験と付着強度の感度解析を総合的に考えると、CFRTP より線の梁部材中での付着強度は $3 \sim 6 \text{N/mm}^2$ の範囲にあると考えられる。付着特性が一般の PC 鋼材よりも優れているために、剛性や緊張材の応力の算出方法は一般の PC 鋼材と同様に扱えることが確認された。破壊については CFRTP より線では破断で破壊が生じた。一方、PC 鋼より線の場合には圧縮側のコンクリートが圧壊して終局に至った。今回の供試体では、ひび割れが局所的に開口したが、応力集中等によるより線の早期破断は生じなかった。そのため、破断荷重は FEM による計算値とほぼ同程度、破断変位は FEM の計算値よりもやや大きくなる結果となった。

4. 3. 3 プレテンション式 PC はりの曲げ載荷試験

(1) 供試体作製

偏心量 $e=0$ になるように断面の中心に緊張材を配置して、プレテンション式 PC はり試験体を製作した。緊張材には $\phi 9.3$ CFRTP 7 本より線を使用した。一般の PC 鋼材の場合には定着長は

65φ以上必要であるが、試験機等の都合上、60φの540mmとして単純支持中央一点集中荷重の条件で荷重試験を行った。圧縮強度の特性値 f'_{ck} が40N/mm²以上になるようにコンクリート配合を行った。セメントは早強コンクリートを使用し、水セメント比は40%とした。

試験体の周囲に鋼製フレームを組み立て、鋼管に静的破砕剤を充填してCFRTPより線を定着し、油圧ジャッキにて緊張力を与えた。その後、木製型枠内にコンクリートを打設した。圧縮強度が40N/mm²であることを確認してから緊張力の開放および脱型をした。脱型後、14日間屋外に静置した。緊張力を開放した際のコンクリート圧縮強度は54.0N/mm²、荷重時の圧縮強度は63.6N/mm²であった。

CFRTP ロッドにはひずみゲージを貼り付け、ひずみ分布を計測した。緊張力開放前後のひずみ分布より、今回の緊張力に対する定着長としては50φが妥当であったと判断された。

(2) 荷重試験

図-3に示すようにはりの荷重試験を行ったところ最大荷重は33.2kNだった。RCはり理論による計算値は31.4kNであり、実験値と理論値は整合する結果となった。曲げひび割れ荷重の実験値は16.1kNだった。RCはり理論による計算値は15.4kNであり、実験値と理論値は整合した。このことから、最大荷重や曲げひび割れ発生荷重は一般的なRCはり理論が準用できると考えられる。

CFRTPより線は塑性がなく、急激に破断に至るため、CFRTPを緊張材に用いたPC部材は緊張材が破断して破壊に至ると予測された。しかし、今回の荷重試験では緊張材が破断する前に圧縮側コンクリートが圧壊して破壊に至った。

(3) FEM解析

3次元非線形FEM解析により構造実験の再現解析を行った。図-4は荷重中央変位関係において実験値と解析値を比較したものである。ひび割れ発生荷重およびひび割れ後の剛性は解析値が実験値をよく再現できていることがわかる。ひび割れ発生位置とひび割れ進展状況についても、解析と実験は整合していた。FEMでは緊張材の塑性を考慮しないこと以外は普通PC鋼材と同様である。解析と実験が一致したことは、CFRTPより線は普通PC鋼材と同様に扱えることを示している。



図-3 荷重試験全景

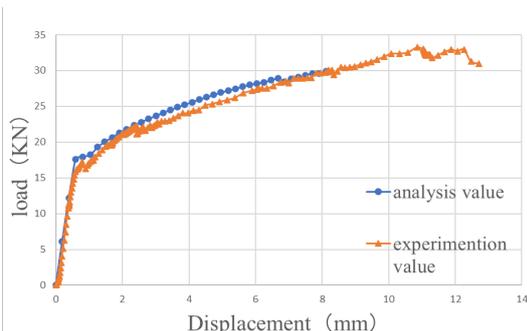


図-4 荷重-中央変位関係における実験値と解析値の比較

4. 4 まとめ

FRPを緊張材に使用したPC部材は、適切に施工されていれば、普通PC鋼材と同様のものと考えて設計計算できることが確認された。ひび割れが局所的に開口する場合においても、早期破断は生じないことも確認された。ポストテンション式のPC部材の製作に必要な機械式定着具については、早期破断を避けるための改善が今後必要である。

参考文献

- 1) L. CERVENKA、 J. CERVENKA、 ATENA Theory manual、 Cervenka Consulting、 2010
- 2) CEB-FIP Model code、 CEB-FIP、 1990
- 3) 石村隆敏 丸山挙史 細田暁 岸利治 「膨張コンクリートのテンションスティフニング効果に関する実験的研究」 コンクリート工学年次論文集 p583-584 2001
- 4) 高岩裕也 保倉篤 鶴澤潔 宮里心一、炭素繊維複合材料より線の緊張力がコンクリートとの付着性状に及ぼす影響、構造工学論文集、Vol. 66、pp. 543-548、2020
- 5) K. MAEKAWA A. PIMANMAS H. OKAMURA、NONLINER MECHANICS OF REINFORCED CONCRETE、Spon Press、2004

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉越大賀, 田中泰司	4. 巻 61
2. 論文標題 熱可塑性CFRP緊張材のくさび式定着具の開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集	6. 最初と最後の頁 V-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中泰司, 長田光司, 野島昭二	4. 巻 30
2. 論文標題 電気化学的に腐食させたPC鋼材の機械的性質に関する実験的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プレストレストコンクリート工学会第30回シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 117-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉越大賀
2. 発表標題 熱可塑性CFRP緊張材のくさび式定着具の開発
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉越大賀
2. 発表標題 バサルトロッドの接合方法に関する基礎的試験
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------