

## 論文の内容の要旨

論文題目 アラミド繊維強化プラスチックを緊張材に用いる  
ための基礎研究とその適用に関する研究

氏 名 水 谷 淳

1980年代後半より、コンクリート中の鋼材の塩分腐食によるコンクリート構造物の劣化が社会問題となった。この問題を根本的に解決する方法として腐食しない補強材料の研究開発が各方面で進められた。

本論文はこの問題を解決する一つの方法として、耐食性に優れたアラミド繊維強化プラスチック (Aramid Fiber Reinforced Plastic : 以下AFRPという) をプレストレストコンクリート等の緊張材に用いることを目的として行ったものである。論文の内容は、緊張材としての異形ロッドの開発、定着体の開発、材料の基本的特性の把握、AFRPを緊張材に用いたプレストレストコンクリート部材の検討などの基礎研究とAFRPを緊張材に用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計施工などの応用研究について述べたものである。その他、AFRPの特徴を活かしたアラミドFRPグラウンドアンカーの研究開発や軟弱地盤に施工される構造物への適用など、プレストレストコンクリート以外の分野への適用に関する研究についても述べた。

AFRPはPC鋼材と同等以上の高張力特性を有しており、プレストレストコンクリート等の緊張材として用いられる条件を十分に備えている。しかし、緊張材として用いるためには、コンクリートとの付着特性が十分で定着方法が確立されなくては実用化には至らない。

AFRPは連続引抜成形法によって作られる一方向に連続な棒状(ロッド状)

の材料であり、引抜成形後はその表面は平滑でコンクリートとの付着は期待できない。そこで、写真1および図1に示すような、引抜成形後の母材にワインディング繊維を巻き付けてロッド表面を異形化したAFRP異形ロッドを開発した。これにより、コンクリートとの付着が著しく改善され、併せて定着体（付着定着体）の開発も可能となった。こうした異形ロッドを開発して始めてAFRPは緊張材としての機能が発揮されるようになった。

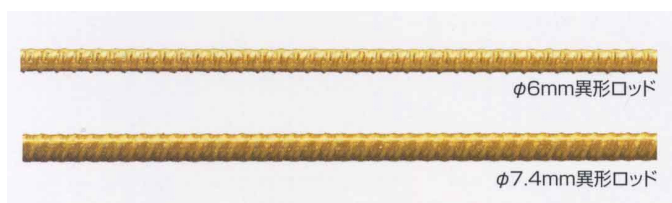


写真1 AFRP異形ロッド

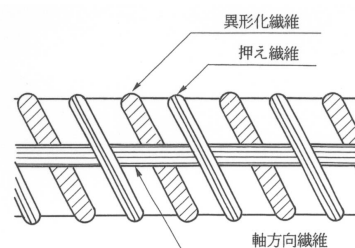


図1 AFRP異形ロッドの構造

定着体としては、AFRP異形ロッドに適応した付着定着体を開発した。付着定着体は鋼製の外筒管に異形ロッドを挿入し無収縮モルタルを充填して一体化し、異形ロッドの張力をモルタルを介して外筒管に伝達し、外筒管にネジ切削を施してナットで定着させるものである。緊張方法は付着定着体にテンションロッドを装着し、テンションロッドをセンターホールジャッキで引っ張ることにより行う。

クサビによる定着も施工面での利点が多く有力な方法である。クサビ定着についてはAFRPロッドを傷つけない材料としてビニルエステル樹脂およびFRPによるものについて検討した。しかしながら、クサビ定着体については長期的な安定性に関する課題が解決されておらず、本設構造物の緊張用定着体としての使用は現段階においては無理があると判断された。ただし、短期間の仮設的な使用であれば十分に対応は可能である。その他、腐食しない定着体としてFRP製の付着定着体も開発した。

AFRP異形ロッドの引張強度は定着方法により異なり、付着定着体を用いた場合の規格引張荷重は約 $1,800\text{N}/\text{mm}^2$ である。試験より、AFRPロッドの引張強度はロッドの長さや引張り速度に影響されないことがわかった。

AFRPロッドは直線材料であるため、ロッドの曲げが引張り強度に影響を与える。曲げ直径(D)と引張強度の関係を試験した結果、ロッドの公称径(d)の150倍以下の曲率に曲げると引張強度は低下した。公称径の150倍以上の曲率を保った曲げに関しては引張強度には影響しない。

AFRPは鋼材に比べて応力緩和率大きい。このことは、プレストレストコンクリートの緊張材として用いる場合には不利な条件となるが、弾性係数が

P C 鋼材の 1/4 と小さいためコンクリートの乾燥収縮やクリープによる応力損失が少ないため全体としての応力損失は、P C 鋼材を用いた場合とほぼ同等となる。

A F R P は高分子材料であるため緊張・定着作業においては荷重と伸びの関係が複雑となる。応力緩和の試験により、A F R P の応力緩和率がひずみのみによって推定できることを示した。このことは緊張管理においても“ひずみ”（伸び量）のみに着目して管理すればよいことを示すもので、実用上の面において緊張管理の問題を簡略化することができた。

付着定着体を用いた A F R P 異形ロッドのクリープ試験より、クリープ破壊応力度は 100 年後においても許容応力度を上回ることを示した。

付着定着体を用いた疲労試験の S - N 線図より 200 万回における A F R P ロッドの疲労強度は上限応力が  $1,062\text{N/mm}^2$  の場合で  $500\text{N/mm}^2$  である。P C 鋼線の場合は上限応力が  $1,000\text{N/mm}^2$  程度で疲労強度は  $200\sim 300\text{N/mm}^2$  であることから、付着定着体を用いた A F R P ロッドの疲労特性は P C 鋼線と同等以上と考えられる。

これらの基礎研究を踏まえて、A F R P 異形ロッドを用いたプレストレストコンクリート部材について試験し、さらに P C 道路橋および P C 栈橋の施工を行いその実用性を確認した。

プレテンション部材の緊張材として用いる場合、緊張材とコンクリートとの付着により、プレストレスが確実に導入されるかどうかの問題となる。試験の結果、 $\phi 6\text{mm}$  異形ロッドの伝達長は導入緊張力  $0.7P_u$  で約  $350\text{mm}$  程度であり、良好なプレストレス導入が確認された。静的載荷試験では、破壊曲げモーメントは計算値を  $10\sim 20\%$  上回り破壊時のたわみ量は計算値の  $60\sim 80\%$  であった。使用状態を想定した曲げ疲労試験では、400 万回の載荷回数経過後においてもたわみ量は弾性理論による計算値と一致し、A F R P 異形ロッドを用いたプレテンション桁の健全性が示された。

ポストテンション部材についての試験では、まず始めに異形ロッドとダクトの摩擦係数を試験した。摩擦試験より、A F R P 異形ロッドの摩擦係数は硬質ポリエチレンシーすを用いた場合、従来の P C 鋼より線と鋼製ワインディングシーすと同じ約  $0.2$  同程であり、A F R P 異形ロッドに対するダクトの材質は硬質ポリエチレンが望ましいと考えられる。

続いて、異形ロッド  $19\phi 6\text{mm}$  を配置した桁高  $600\text{mm}$ 、桁幅  $250\text{mm}$ 、桁長  $10,500\text{mm}$  の大型供試体を作製し静的載荷試験、曲げ疲労試験を実施した。静的載荷試験では、曲げモーメントーたわみ曲線は計算値とよく整合した。このことより、A F R P 異形ロッドを緊張材に用いたプレストレストコンクリート部材の設計も従来の設計手法を踏襲することができるものと考えられる。曲げ

疲労試験では、載荷曲げモーメントがひび割れモーメントに相当する載荷範囲（ $0.25M_u \Leftrightarrow 0.45M_u$ ）においても200万回載荷で破壊せず、その後の静的載荷で $0.89M_u$ でコンクリートが圧縮破壊した。これらのことから、設計モーメント（ $0.35M_u$ ）のレベルでは疲労によるAFRP桁の耐荷能力の低下はないと考えられる。

AFRPロッドを緊張材に用いたPC道路橋の施工は、世界でも初めての試みであり、実施工に入る前に、溶接火花による耐熱試験、コンクリート打設試験、ロッドの耐衝撃試験等、施工現場での過酷な条件を想定してAFRP異形ロッドの施工上の取り扱いに関する試験を行った。その結果、通常の現場での取り扱いをしている限り、極端にその取り扱いに関して神経質になる必要はないと判断された。

AFRPロッドを緊張材に用いたPC道路橋はプレテンション合成床版橋（ $L=12.5m$ ）とポストテンション箱桁橋（ $L=25.0m$ ）の二種類で、上下2車線をそれぞれプレテンション橋とポストテンション橋で独立して並列に建設した。PC道路橋の設計は道路橋示方書に準拠して行い、終局荷重時の検討においては、AFRPロッドが塑性域を持たないことから、十分な安全率を取った上で緊張材破断により終局状態に至るとして設計した。AFRPロッドは完全弾性体であるが、弾性係数が小さいためプレストレストコンクリート部材とした場合、比較的高い靱性を示し、終局時に緊張材破断形態を採用しても使用状態以降のひび割れ性状等から破壊に対する危険性を予知することは可能であると考えられる。完成後の実橋載荷試験においても計測結果は計算値と良く整合し、AFRPロッドを緊張材に用いたPC道路橋はほぼ設計どおりの耐荷性能が発揮されていることが示された。

この他、完成したAFRP異形ロッドの需要拡大を目的として、AFRPロッドの弾性係数がPC鋼材に比べて小さいという特徴（伸びに対する応力変化が少なく、変形に対する追随性が高い）を活かして、グラウンドアンカーへの適用に関する研究開発および軟弱地盤に施工される構造物（柔構造樋管・柔構造水路）の緊張連結材として用いるための研究開発を行った。グラウンドアンカーへの適用では、AFRPロッドが腐食しない材料であることから永久アンカーに対しても二重防錆処置の必要がなく、そのため削孔径を小さくできることなど多くの利点がある。柔構造樋管・柔構造水路への適用に関しては、軟弱地盤における圧密沈下に対する各構造物の設計条件に対応できることを確認した。