

炭素繊維系緊張材を用いたポストテンション定着工法

川本 幸広*1

1. はじめに

近年来より、PC 構造物、RC 構造物を問わず、コンクリート構造物の劣化損傷が問題視されてきている。コンクリート構造物の劣化を引き起こす要因は、道路橋などに見られる重車輛の出現や交通量の増加に伴うオーバーロードによる損傷および風雨・波浪のような自然気象条件による風化摩耗などの外的力学要因と、アルカリ骨材反応に代表されるコンクリートの劣化や塩害のような内的化学要因に分けられる。特に、要因にかかわらずコンクリート表面にクラックが発生した場合は、構造物内部に雨水の浸入が容易になり、内部の鋼材の損傷を引き起こし、さらに構造物を劣化させることになる。

一方、最近のウォーターフロントの開発推進の傾向に伴い、海岸部におけるコンクリート構造物が急速に増加してきている。また、景観および生活空間の有効利用などの観点から部材の軽量化やスレンダーで長スパンの構造物に対する要求も増加してきている。しかし、このような要求が、コンクリート構造物中の鋼材量の増加に伴うカブリの減少や、鋼材の外ケーブル的な使用方法を余儀なくするため、鋼材の腐食に対する危険性をさらに増進させる結果となっている。

現時点では、事前に鋼材等の腐食が予想される場所に建設される構造物については、エポキシ樹脂塗布による防錆処理を施した鋼材等を使用するのが主流となっているが、一方では、FRP 系新素材に代表される、耐食性、耐候性を有する鋼材代替材料の開発が注目を集めている。

現在開発されている FRP 系新素材は、高張力を有する長繊維を多数体集合させ、その各々を適切なプラスチック材料（樹脂）を用いて一体成形したもので、その形状は、ロッド状・より線状または組紐状等、いろいろなタイプのものが考案されている。これらの材料は引張強度に富み耐食性にも優れているのみでなく、軽量であるので施工性も良く、コンクリート構造物の鋼材代替材料として多くの期待がかけられている。

FRP 系新素材に使用される長繊維の種類として、炭

素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維等が用いられており、それぞれ特異な性質を有している。特に本文で述べる炭素繊維系新素材については、素材特性から、実使用を想定した供試体等による種々の実験データや試験報告が発表されており、数例の施工実績も有している。

炭素繊維系新素材をコンクリート中の鋼材代替品として使用する場合、鉄筋の代わりに用いる場合と PC 構造物の緊張材として用いる場合とがあるが、PC 緊張材の代替品として用いる場合には、その定着方法に対して従来の PC 鋼材とは異なった問題点がある。

既存の PC 鋼材用定着体を炭素繊維系緊張材に用いる場合、その定着体内部において緊張材に作用する圧縮力に伴うせん断力より材料が持つ本来の能力より小さな力で緊張材の破断を引き起こすこととなり、充分な定着効率や緊張力を得ることが困難となる。また、新素材の製造工程上の理由と、せん断力に対する抵抗力が鋼材よりも劣っていることを考えると、PC 鋼棒のようにネジ加工することは有効な方法ではない。

したがって、ポストテンション方式による PC 構造物に炭素繊維系新素材を使用する場合には、その特性に見合った特殊な定着体を開発する必要がある。

本文では、ポストテンション方式に適用するための 2 種類（ロッドタイプ〈以下 CFRP ロッドと記す〉、より線タイプ〈以下 CFRP より線と記す〉）の炭素繊維系新素材の定着具について、開発の現状を記すものである。

2. CFRP ロッドのポストテンション定着工法

2.1 緊張材

CFRP ロッドは、棒状の炭素繊維系プラスチック材料で、表面のなめらかな円形断面である（写真-1 上段）。

CFRP ロッドの製造方法は、多数のボビンから一定の張力で引き出した炭素繊維に熱硬化性樹脂を含浸させ、それらを規定のロッド径のダイスを通させると同

*1 Yukihiro KAWAMOTO : ピー・エス・コンクリート(株)本社第二技術部

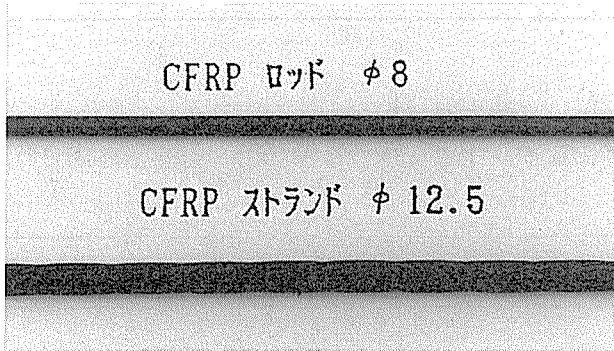


写真-1 炭素繊維系新素材

時に加熱することによって樹脂を硬化させ、CFRP ロッドを成形する。このような方式をプルトルージョン製法と言う。この製法の特徴として、各繊維に均等な張力が与えられているため、静的疲労のない均質の複合材料を連続してつくり出すことができる反面、連続成形であるため、緊張材の製造過程において部分的に加工を変化させなければならないような末端加工を必要とする定着方法への対応は非常に困難である。また、前述したように、CFRP ロッドは円形断面の棒材であり、表面がなめらかなため、表面形状による付着効果あまり期待できず、緊張材の両端に樹脂末端を取り付けるなどの加工も行いにくい。一方、クサビ方式の定着体については、定着効率の高い形式のものを開発すれば、CFRP ロッドのどの部分でも定着でき、ポステンション工法に非常に有効である。

2.2 定着体

現在、CFRP ロッド定着用のクサビとして、CFRP ロッドの直径にあわせた金属性のものが数種類開発されており、特に、 $\phi 8$ 用クサビ型定着体は実構造物でも使用されている。

クサビの形状は、図-1 に示すとおりであり、その各部寸法や角度等は、種々の試験や実験を積み重ねた結果決められたものである。このクサビの特徴の1つに、クサビ内面、つまり CFRP ロッドをつかむ部分の加工形状があげられる。

従来の PC 鋼材用のクサビは、その内面にノコギリ状の波形が施されており、緊張時に PC 鋼線にくい込み、そのせん断作用で緊張力を伝達する。これに対し、CFRP ロッド用のクサビでは、内面をなめらかな研磨仕上げと

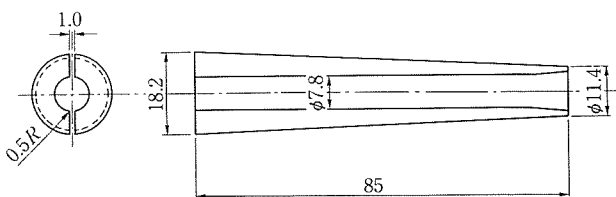


図-1 $\phi 8$ 用クサビ

し、内面全体でロッドを包み、CFRP ロッド表面とクサビ内面との摩擦力のみで緊張力を定着体に伝達する機構となっている。また、CFRP ロッドを傷つけたり、局部的な圧縮力やせん断力によるクサビ内部での CFRP ロッドの破壊を極力防止する加工となっている。しかし、これらの改良にもかかわらず、2本クサビを用いた CFRP ロッドの引張試験の結果によると、大半がクサビ内部での破断状況を呈することが多く、現在のところ、ロッド自身の引張強度に対して約 80% 程度の破断荷重となっている。したがって、現状では実際の緊張材自身の持つ破断強度ではなく、その定着体内部（クサビ内部）での破断強度を実用強度（仮称）とし、緊張定着力を決定する目安としている。

現在、定着体はシングルタイプ（ロッド1本用）とマルチタイプ（ロッド多本数用）のものが開発されているが、シングルタイプには、写真-2 に示す $\phi 8$ 用のものと $\phi 17$ 用のものがある。また、前述のような耐食性を考えた FRP 製定着体も試作されており、スリーブ（外とう管）とウェッジ（クサビ）の両方とも FRP でつくられている。この FRP 製定着体には、炭素繊維系 FRP を使用しており、金属性と同様、 $\phi 8$ 用と $\phi 17$ 用の 2 種類が試作されている（写真-3）。

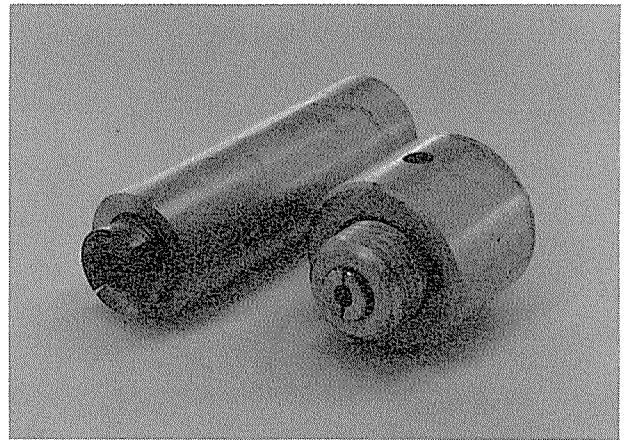


写真-2 金属性シングルタイプ定着体

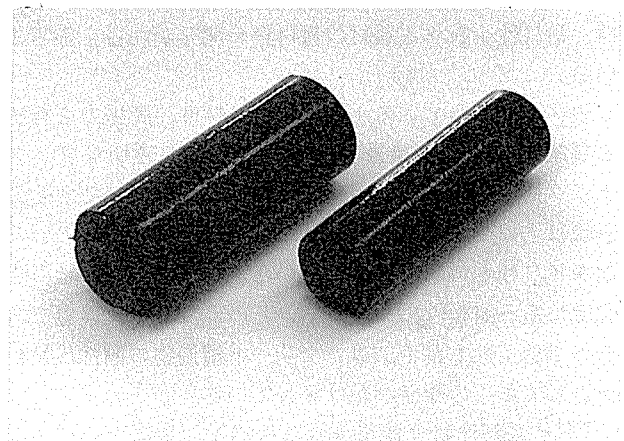


写真-3 FRP 製シングルタイプ定着体

2.3 シングルタイプの定着体試験

定着体のFRP化における問題点の1つに定着体の寸法形状がある。つまり、緊張時に定着体内部に発生するフープテンション力に対する耐荷力を確保するためにスリーブの直径が大きくなりがちで、特に、CFRP ロッドφ17のように大容量の緊張力を導入する定着体については、その傾向が著しい。

以下に、CFRP φ17用各種定着体の耐荷力試験の結果を示す(図-2, 図-3)。

この試験に用いた定着体は3種類(金属性1種類, CFRP製2種類)であり、最終荷重時(CFRP ロッドの破断荷重時、もしくは定着体破壊荷重時)における各々の状況を表-1に示す。

金属製定着体では、最終荷重時においてクサビ内部におけるCFRP ロッドの破断で終了しているのに対し、CFRP 製定着体では2種類とも、スリーブの破壊を引き起こしている。また、最終荷重は、CFRP 製定着体の方が金属製に比べて小さな値となっており、スリーブの直径が小さくなるほどその傾向が顕著である。

図-4は、最終荷重付近における定着体(スリーブ)外側のフープテンション力による各断面ひずみ分布の平均値(定着体長手方向)を示したものであるが、これに

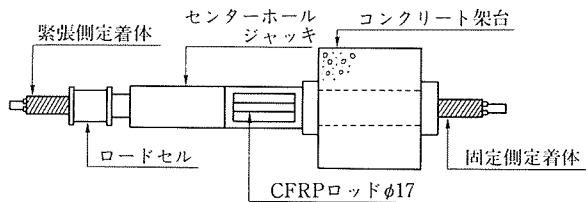


図-2 定着体耐荷力試験状況

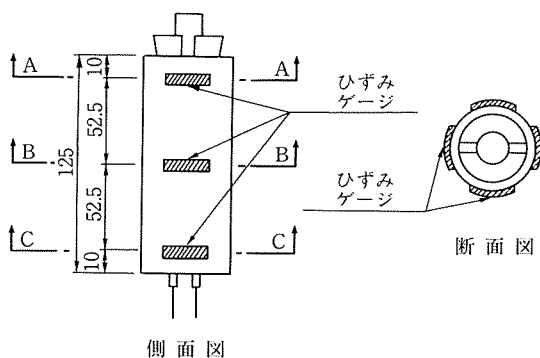


図-3 定着体ひずみ測定位置

表-1 破断状況

定着体	最終荷重 (t)	破断状況
金属製	26.4	クサビ内部におけるCFRP ロッドの破断
CFRP 製 φ50	12.5	フープテンションによるスリーブの破断
CFRP 製 φ55	15.7	"

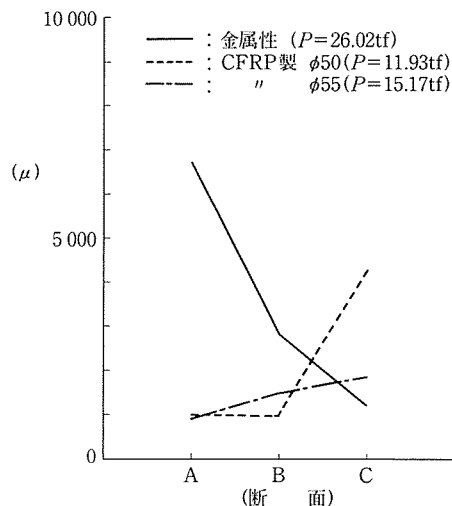


図-4 各断面ひずみ分布平均値

よると金属性定着体では、そのひずみの変化状況が比較的安定しているのに対し、CFRP 製定着体ではひずみの変化がやや不安定となっている。

これは、図-5に示すように、各定着体の同一断面内のひずみ分布を比較してみると、金属製定着体では断面全体に応力が均等に作用しているのに対し、CFRP 製定着体では特定の断面内において局所的な応力の集中が生じることが原因と推察される。

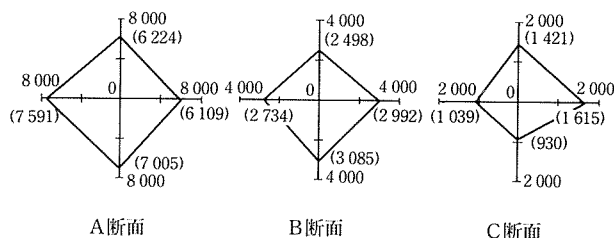


図-5(a) 金属製定着体各断面分布図 (P=26.02 tf)

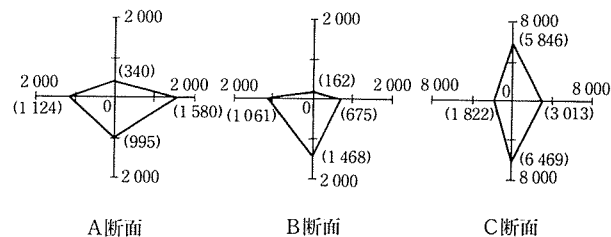


図-5(b) CFRP 製φ50 定着体各断面ひずみ分布図 (P=11.93 tf)

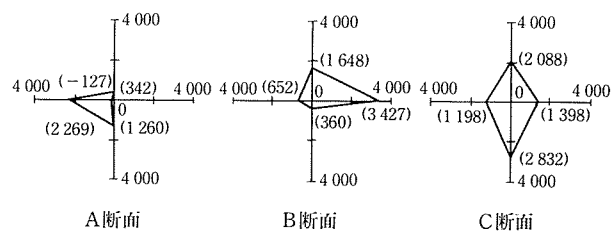


図-5(c) CFRP 製φ55 定着体各断面ひずみ分布図 (P=15.17 tf)

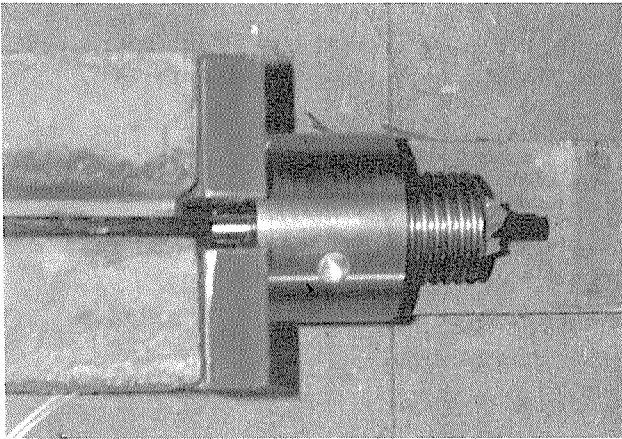


写真-4 ロックナット締込み

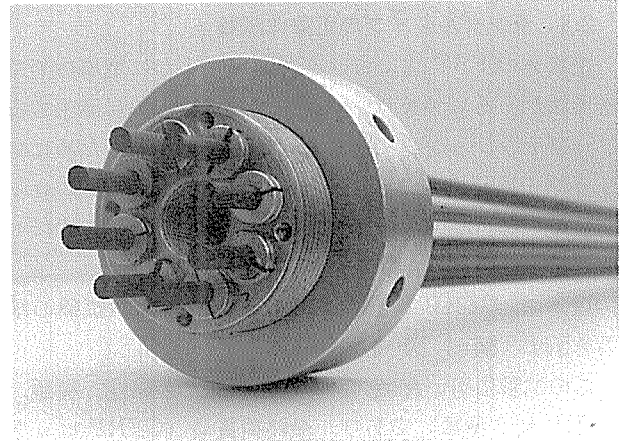


写真-6 8本マルチ定着体

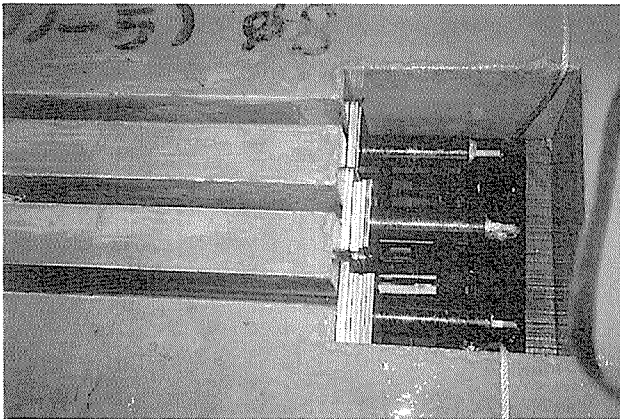


写真-5 シムによる定着



写真-7 リテーナプレートによるクサビの押込み

CFRP 製定着体のもう一つの問題点として、定着方法に関する検討がある。金属製定着体の場合はロックナットによる定着が可能であるが（写真-4）、CFRP 製定着体はその材質上、ネジ加工を施してロックナットで締め付けることは困難である。

したがって、写真-5 に示すように、シムプレートによる定着を実施しているがシム量が増加するとセットロスが増加する傾向にある。

このように、CFRP 製定着体に関しては、まだ多数の研究開発課題を残しているものの、耐蝕性の緊張材と定着体という一体のシステムとしての実用化を考える場合、非常に魅力のある研究と言えよう。

2.4 マルチタイプの定着体

次に、マルチタイプ定着体について述べる。

マルチ定着体に使用される CFRP ロッドは、 $\phi 8$ の径のものが使われており、ロッド本数が3本、4本、8本の3種類がつくられているが、いずれも金属製であり、特に、8本マルチ定着体については実構造物への適用も行われている（写真-6）。

その施工実績を以下に示す。

- 1) 昭和 62 年 多角形浮遊構造物 (H.M.S)
- 2) 昭和 63 年 建築構造物

- 3) 昭和 63 年 多角形浮遊構造物 (H.M.S)

- 4) 平成元年 道路橋

マルチ定着体の特徴は、大容量の緊張力を与えることが可能で、この8本マルチ定着体の場合、1ユニット当たり 30 t~40 t の緊張力を導入することができる。

このマルチシステムは、8本の CFRP ロッドの各々を、クサビを用いてアンカーヘッドに取り付け、リテーナプレート（写真-7）により8組のクサビを均等に押し込みクサビを保持する形式となっている。

緊張作業は、アンカーヘッド中央にあげられたネジ孔にテンションロッドをセットし、センターホールジャッキにより行う。所定の緊張力が導入された後にロックナットを押し込んで定着作業を完了する。

FRP 系新素材は、降伏点を持たない材料であるので、従来の PC 鋼材と比べてマルチケーブルの各 CFRP ロッドの緊張ひずみのバラツキが、ケーブルの破断原因に結び付き易い。したがって、マルチ定着体を使用するについては、各 CFRP ロッドの長さの測定に十分注意し、正確な位置にクサビの取付けを行うことが大切である。

しかし、ロッド長の測定誤差や各クサビの加工精度の違いによるなじみ差等によって、多少の長さのバラツキ

が生じるため、マルチケーブルにおけるCFRP ロッド 1本当たりの破断荷重は、シングルタイプの時の値より小さくなるのが通常である。したがってCFRP ロッドに対する実用強度の取扱いにおいては、使用する定着体ごとに規定するのが妥当であると思われる。

3. CFRP より線のポストテンション 定着工法

3.1 緊張材

CFRP より線は、炭素繊維に樹脂を含浸させてプリプレグとし、それらを複数本より合わせてストランドプリプレグを製造し、これに表面加工を施して線状としたものを複数本より合わせ、同時に加熱硬化させることによってつくられる。またその形状は、より線タイプ特有の異形となっている（写真-1 下段）。

3.2 定着体

CFRP より線の定着性は大きく以下の3種類に分けられる。

(1) 樹脂充填方式（写真-8）

樹脂充填方式は、外とう管（金属製、FRP製）の中にCFRP より線の末端部を挿入し、その中に特殊な樹脂を注入し、硬化させることによってつくられる。

本方法では、CFRP より線の引張強度に対して100%の定着効率を有する反面、外とう管の直径が比較的大きくなり、定着部の寸法がコンパクトにできにくい。また、定着体の加工は、CFRP より線の製造工場において行われるため、現場搬入時にはCFRP より線と定着体が一体となっており、現場施工における融通性に欠けることなどが掲げられる。しかし、施工性等に多少の問題を残しているものの、定着の効率性等を考えると非常に有効な方法の1つであるといえる。

(2) クサビ方式

この方式は、CFRP より線の定着位置に銅線を巻き付け（または、特殊な樹脂を塗布して）、それを緩衝材として特殊なクサビを用いてCFRP より線をつかむものである。この方式に用いられるクサビの内面は、CFRP ロッドのクサビと同じく、なめらかに仕上げられている。このクサビ方式は、現場において任意の位置で緊張定着作業が行われるのが大きな利点であるが、銅線の巻付けや樹脂の塗布にある程度の熟練が必要であることや、現場での作業が複雑になるなどの問題もある。

現在、開発されているCFRP より線のクサビ方式はCFRP より線φ12.5用のシングルタイプとマルチタイプ（6本マルチ）のものがある（写真-9）。

(3) ダイカスト付きクサビ方式

ダイカスト付きクサビ方式は、先に記した樹脂充填方式とクサビ方式の中間にあたるものである。この方式

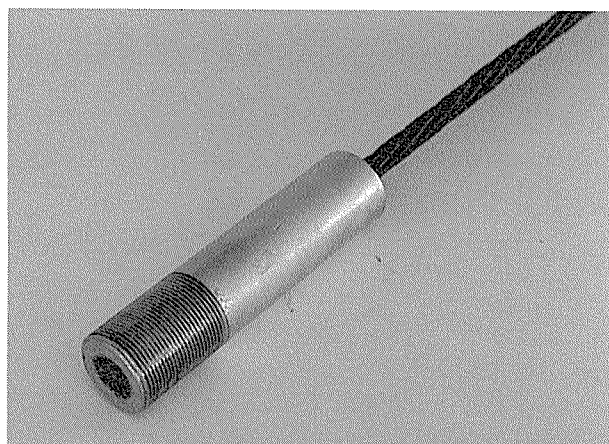


写真-8 樹脂充填方式

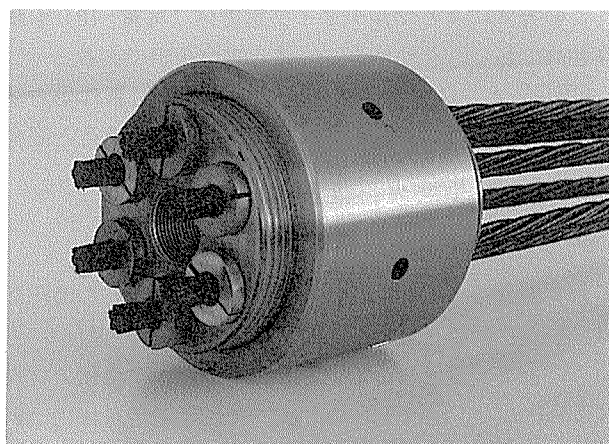


写真-9 クサビ方式マルチタイプ

は、CFRP より線に特殊合金を金型成形し、それに鋼管を挿入して、プレスをしたもので、その端末加工部（ダイカスト部）に既存のPC鋼より線用クサビを用いて緊張定着するものである。

図-6に示すとおり、φ12.5のCFRP より線に対し、ダイカスト直径はφ21.6であり、樹脂充填方式よりも小径にすることができる。また、クサビも既存のものが使用できるため非常に手軽であり、ダイカスト部の250mmの区間ならどこでも定着可能であり、多少の施工誤差については対処が可能である。また、定着効率もCFRP より線引張強度に対して100%の期待ができる。

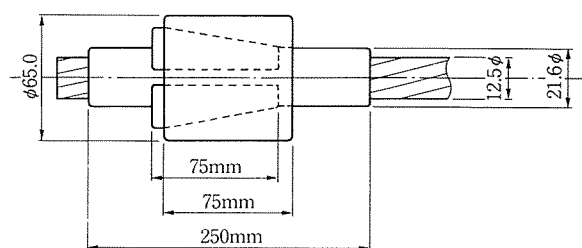


図-6 ダイカスト付きクサビ方式

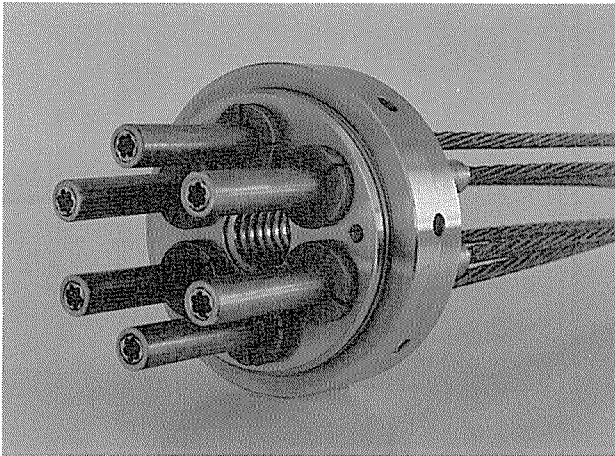


写真-10 ダイカスト方式マルチタイプ定着体

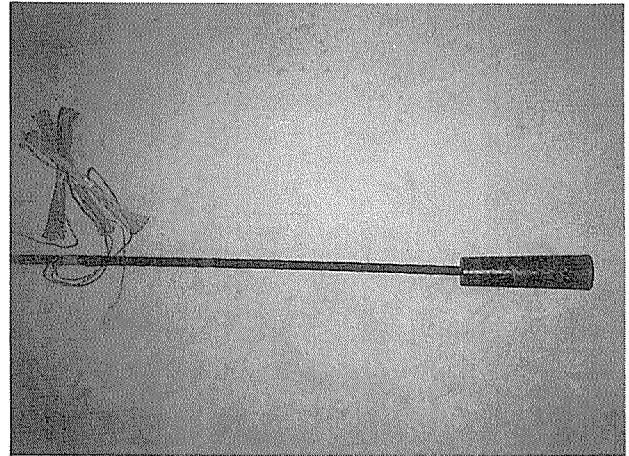


写真-11 FRP製樹脂充填方式

この方式によるマルチタイプ定着体（写真-10）も試作されており、クサビ方式同様6本マルチである。

CFRPより線のマルチタイプ定着体の緊張作業方法および実用強度の取扱いもCFRPロッドの場合と同様である。

4. おわりに

炭素繊維系緊張材を用いた定着装置を考える場合には、いかに緊張材に負担をかけず効率良くつかむか、ということが問題となっている。本文では、2種類の材料（CFRPロッド、CFRPより線）における定着体について現在までの研究開発状況をまとめてみた。

それぞれの材料についていろいろなタイプの定着装置が考案され、そのいくつかは既に実用化に至っている。しかし、その多くは、まだ十分なものとは言えず、今後各種の実験および改良・改善の必要があることも事実である。

最後に、今後の炭素繊維系緊張材用定着体の開発を進めるに当たり、研究ポイントを明確にする目的で、各々の緊張材用定着体の長所・短所をまとめると以下のとおりである。

（1）CFRPロッド用定着体

【長所】

- 1) 緊張材を直接クサビ定着できるので、現場における施工が簡便である。
- 2) FRP製クサビ定着体（シングル）もすでに試作されている。

【短所】

- 1) クサビ定着方式においては、緊張材の破断荷重以下で、クサビ内部で緊張材破断を起こす。
- 2) FRP製定着体は、金属製のものよりも耐力が小さい。また、定着体寸法も大きくなる。
- 3) クサビ定着体が主流で現時点では他の定着体はあまりない。

（2）CFRPより線定着体

【長所】

- 1) マルチ、シングルを問わず、すでに多種類の定着体がある。
- 2) 緊張材の破断荷重に対する定着効率が100%期待できる。
- 3) 樹脂充填方式では、FRP製の定着体もできており、十分な定着効率も有している（写真-11）。

【短所】

- 1) 基本的に、緊張材を直接クサビでつかめる定着体は現時点では開発されていない。

以上のことを考慮し、今後、それぞれの長所を生かし、また、短所を改善した定着体が開発されて、より一層、炭素繊維系緊張材を用いたポストテンション工法によるPC構造物が発展することを期待するものである。

参 考 文 献

- 1) 三菱化成(株)：炭素繊維（ピッチ系）線材，プレストレストコンクリート，Vol. 30, No. 5, 1988, pp. 77
- 2) エー・エム・エンジニアリング株式会社：CFCC技術資料，平成2年3月