

(59) HEMを用いたCFRPケーブル大容量(2,500kN級)定着具の開発

東京製綱(株) エンジニアリング部 ○ 中村 俊明
 東京製綱(株) エンジニアリング部 木村 浩
 東京製綱(株) エンジニアリング部 正会員 榎本 剛
 長崎大学 工学部構造工学科 正会員 原田 哲夫

1. はじめに

斜張橋のステーケーブル、PC 構造物の外ケーブル等、高耐久性が要求される構造用ケーブル分野においては、軽量、高強度、高疲労性等の特性を有する連続繊維緊張材を用いた大容量ケーブルの要求は、今後ますます高まっていくものと思われる。しかし、CFRP等の連続繊維緊張材は、一般に一方方向強化材料であって、局所的な支圧やせん断に対して弱いため、通常のPC定着具が使用できず、特に、大容量ケーブルの開発においてはその定着具の開発が重要課題となる。

これまでの研究によれば、定着用膨脹材(Highly Expansive Material 以下 HEMと略す)による定着法は、連続繊維緊張材に有効な定着法で、シングルケーブルの定着のみならず、マルチケーブルの定着にも応用でき、例えば、CFRP ストランドφ12.5の6本マルチケーブル(6-φ12.5)を用いたテンドングリップは、グラウンドアンカーとして実用化されている[1]~[4]。

将来的には HEM を用いた 5,000kN 級の大容量ケーブルの開発を目指しており、本研究では、その第一段階として、CFRP ストランドφ15.2φの12本マルチケーブル(12-φ15.2)とした2,500kN級の定着具の開発を目的とした。

開発にあたり、定着具内の同一断面内と軸方向膨脹圧分布を検討するとともに、10回繰り返し載荷試験による定着挙動の解析および破断試験を実施して、実用化への目処をつけた。

2. 大容量定着具の概要

CFRP 大容量ケーブルにおいては、一般に太径シングルケーブル方式とマルチケーブル方式が考えられる。マルチケーブル方式の方が緊張荷重の大きさに柔軟に対応した定着具とすることができるとともに、太径シングルケーブル方式よりも高い緊張荷重のケーブルの製作が容易である。

そこで、設計荷重を基本に検討した結果、

CFRPより線φ15.2の12本マルチケーブルの定着具とした。大容量定着具においては、定着具をできるだけコンパクトにすることが重要である。ここでは、図-1のように、一つの鋼製スリーブ(外径:125mm、内径:86mm)にCFRPマルチケーブルを配置した。定着用の充填材料には、これまでエポキシ樹脂が使われてきたが、定着具としての疲労性能、加工性能およびグラウンドアンカーでの実用実績も踏まえてHEMを用いることを基本としている。表-1にCFRPストランドの特性を示す。

供試体の設計荷重(=推定破断荷重)は2,500kNである。これは式(1)により求めた。

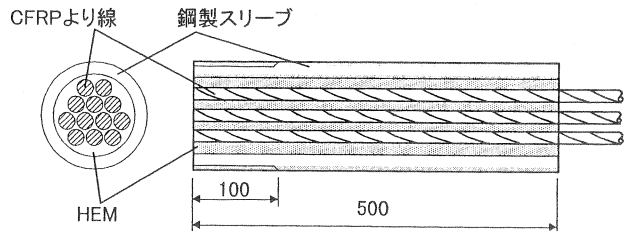


図-1 定着具の概要図

表-1 CFRPのストランドの特性

ストランド	線径	有効断面積 mm ²	保証荷重 kN	破断荷重 kN	弾性係数 kN/mm ²	単位重量 g/m
CFRPより線1×7	15.2mm	113.6	199	238	137	221

$$W = A \times B \times C = 238 \text{ [kN]} \times 12 \text{ [本]} \times 90\% = \text{約} 2,500 \text{ kN} \quad (1)$$

W : 設計荷重 [kN] B : 束ねたCFRPより線の数量 [本]

A : CFRPより線単体の破断荷重 [kN] C : 強度寄与率 [%]

※強度寄与率は、加工の長さ誤差やケーブル強度のばらつき等を考慮し、マルチケーブルの強度低下を10%程度想定した値である。

3. 膨張圧の挙動

3.1 実験概要

HEM定着法においては、膨張圧の挙動を把握しておくことが最も重要である。マルチケーブル定着具においては、(1)同一断面内の膨張圧分布、(2)定着具の軸方向の膨張圧分布を把握することが重要であり、以下のような実験を行った。実験では、CFRPより線を鋼製スリーブ内にセットしたあとにHEMを充填し、約20℃で10時間、さらに50℃で53時間養生した。まず、鋼製スリーブ端より70mm深さにおける膨張圧分布を把握するために、図-2に示す鋼製スリーブ(外径125mm, 内径86mm, 長さ500mm)内の中心側と外側の緊張材位置に埋め込みゲージを配置し、スリーブ表面にひずみゲージ、スリーブ側面にダイヤモンド型ゲージを取り付け、それぞれの位置での膨張圧を測定した。なお、緊張材どうしの最小間隔は、2mmである。

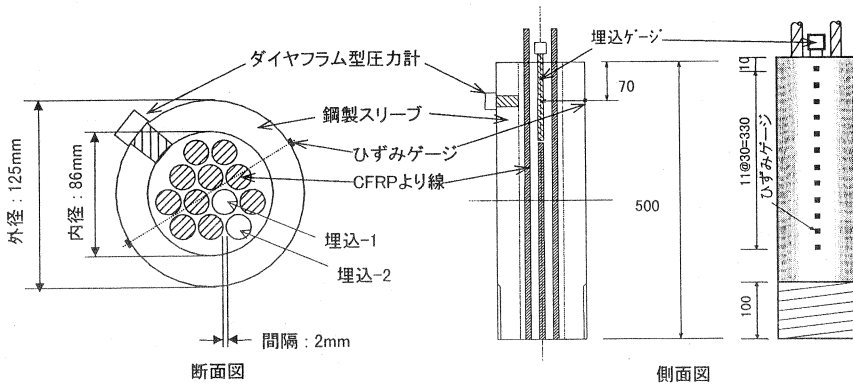


図-2 膨張圧分布実験供試体概要

次に、軸方向の膨張圧分布を把握するため、図-2のように鋼製スリーブ表面に直交ひずみゲージを貼付し、そのひずみ値より、厚肉円筒理論を用いて、膨張圧を算出した。

3.2 同一断面内の膨張圧の挙動

埋め込みゲージの位置は図-2の通りで、CFRPより線を12本平行に束ねた集合体のスリーブ中心側を"埋込-1"、外側を"埋込-2"とした。図-3より、埋込-1と埋込-2はほぼ同じ傾向を示していることがわかる。60時間における膨張圧の差はわずかに6MPaであり、ほぼ同じ膨張圧である。また、スリーブ表面のひずみゲージの値は、埋込-1と埋込-2の中間の値を示した。したがって、以降はスリーブ表面のひずみゲージの値をスリーブ内膨張圧の代表値として取り扱えることになる。今回の実験結果から以下のようなことがいえる。

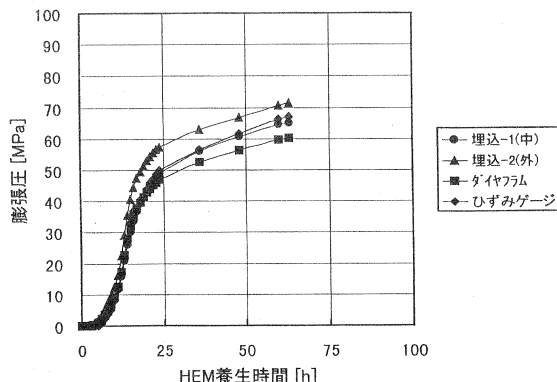


図-3 同一断面内の膨張圧分布 (荷重端から70mm)

- ①同一断面における膨張圧分布はほぼ均一である。
- ②同一断面内において、緊張材に作用する膨張圧は、ひずみゲージの値で求めた膨張圧を代表値として考えることができる。

3.3 軸方向の膨張圧分布

図-4 にスリーブの軸方向の膨張圧分布を、経過時間をパラメータとして示した。経過時間とともに膨張圧が高くなっており、端部からの距離が大きくなるとともに、膨張圧が高くなる傾向が見られる。しかしながら、端部から中央部に近づくにつれ、膨張圧は一定値に近づくようである。175 時間において、端部から 280mm, 310mm, 340mm の膨張圧はほぼ同じであり、その大きさは 90MPa であった。端部に近い 10mm の位置においても最終的に約 40MPa の膨張圧が得られており、全体的に高い膨張圧が発生している。

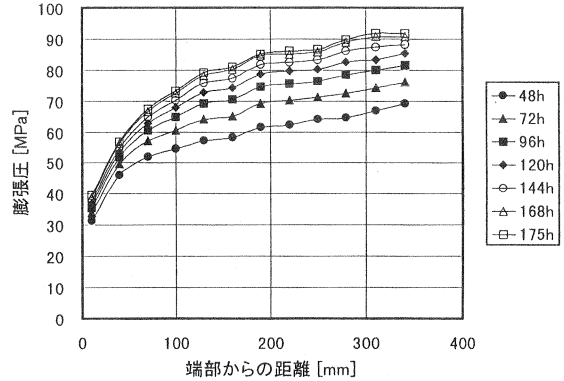


図-4 軸方向の膨張圧分布

また、3.2 で述べたように、端部から 70mm の位置において、埋込-1 と埋込-2 がほぼ等しいことから、膨張圧がより高い位置(端部からの距離が大きな位置)においても、同様の傾向を示すものと思われる。

4. 引張試験

4.1 引張試験概要

供試体は、CFRP より線 $\phi 15.2$ を 12 本平行に束ね、両端に定着具を取り付けたナット定着型のケーブル体である。図-5 に引張試験装置と供試体の概要を示す。引張試験は、横型 10MN 引張試験機に供試体を図-5 のようにセットし、0kN~2,000kN を 10 回繰り返し荷重試験を行い、10 回目荷重では 2,000kN 後も荷重を加え、ケーブルが破断するまで荷重した。各繰り返し荷重段階での荷重時において、200kN 毎にスリーブ表面のひずみ値を測定した。ひずみゲージは、鋼製スリーブ表面の相対する面に貼付した。

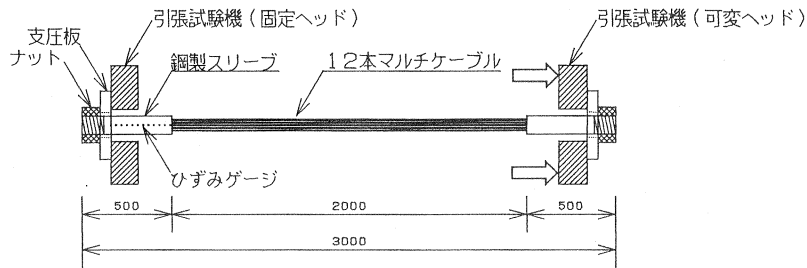


図-5 引張試験供試体概要図

定着具は、鋼製スリーブ(外径:125mm、内径:86mm、長さ 500mm)を用い、図-2 に示したように CFRP より線 $\phi 15.2$ を 12 本平行に束ねて挿入し、その隙間に HEM を充填した。膨張圧の管理はスリーブ表面に貼付したひずみゲージで行い、スリーブ中央部の膨張圧が 60MPa 以上の膨張圧に達した段階で、引張試験を実施した。

4.2 破断荷重

繰り返し荷重後、10 回目の荷重時には、緊張材が破断するまで荷重した。供試体 N=2 について破断試験を行った。破断荷重はそれぞれ、2,570kN, 2,540kN で、ともに設計荷重を越えた。表-2 に引張試験の結果を示す。破断状況は、No.1, 2 ともに CFRP がスリーブ口元近くで破断し(No.1 が 1 本破断、No.2 が 3 本破断)、CFRP が定着具から抜

け出した形跡は見られなかった。マルチケーブルの引張試験による破断は、緊張材長の誤差も影響し、12本のうちのいずれかの緊張材が破断した時点が破断荷重となる。4.3以降の考察は、No.2についてのデータに基づく。

表-2 引張試験結果

No.	破断荷重	設計荷重	効率(破断荷重/設計荷重)	破断状況
1	2,570kN	2,500kN	103%	CFRPより線の破断
2	2,540kN	2,500kN	102%	CFRPより線の破断

4.3 単位長さあたりのせん断力 q の分布

スリーブ表面ひずみの値より、単位長さあたりのせん断力 q の分布を求め、図-6、図-7 および図-8 に示した。

図-6は、1回目載荷の q 分布である。荷重端から60mm以降においては、60mm位置を q のピークとし、荷重の増大とともに q のピーク値は増大するとともに、荷重端から離れるに従って、 q の値はなだらかに減少している。1,200kNを超えた段階から、荷重が大きくなるに従って q のピーク値が後方に移動している。荷重が大きくなって、すでにピーク値に達した時点では、 q の値は徐々に低下している。 q のピーク値より荷重端側は、せん断伝達層としてのHEMの軟化領域と考えられる。

荷重端より60mm以内では、 q の値があまり大きくないのは、図-4で示したような膨張圧の漸増区間であり、膨張圧が小さいためだと考えられる。なお q 分布により囲まれる面積は、引張荷重に等しい。

図-7は、2回目載荷における分布を示した。 q の値は荷重が低い段階(0kN から 1,000kN)で、荷重端から10~160mmにおいて負の値を示す。また、荷重端から250mm付近にピークが見られる。最大荷重時では、荷重端から190mm付近に q のピークが見られ、ピーク値より後方では、緩やかに減少している。この q のピーク位置と大きさは、1回目載荷と同じである。

図-8は10回目載荷における分布である。荷重2,000kNまでは2回目載荷とほぼ同じ結果を示した。2,000kN以上の荷重、すなわち2,200kNから2,500kNにおいては、 q のピーク値が後方に移動するとともに、その値はわずかに大きくなっている。図-7と図-8を比較することによって、荷重範囲0~2,000kNにおいては、繰り返し載荷による、HEMの軟化領域の進行はみられないことが分る。

4.4 緊張力 T_p の分布

図-9、図-10 および図-11 に、 T_p 分布を示す。

T_p の値は、スリーブ内のCFRPより線に作用する緊張力の大きさである。 T_p は定着具の任意断面において、CFRPより線に作用する力 T_p と鋼製スリーブに作用する力 T_s の和は、荷重 P と釣り合わなければならないという条件から式(2)より求められる。

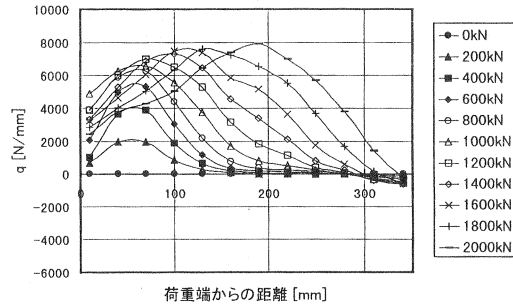


図-6 q 分布 1回目載荷

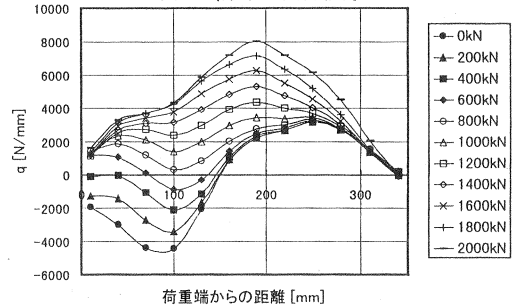


図-7 q 分布 2回目載荷

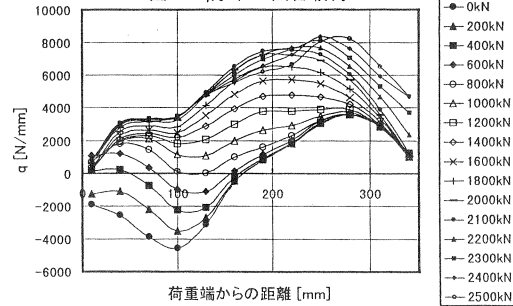


図-8 q 分布 10回目載荷

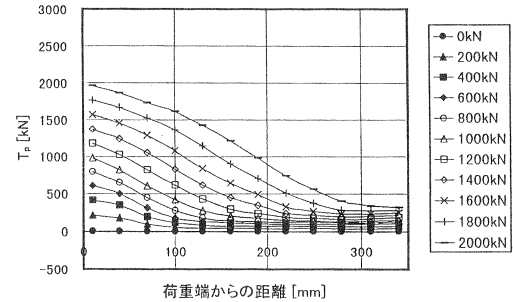


図-9 T_p 分布 1回目載荷

$$T_p = P - E_s A_s \epsilon_s \quad (2)$$

ここに、 E_s 、 A_s 、 ϵ_s は、それぞれ鋼製スリーブの弾性係数、断面積、ひずみ値である。

図-9に示すように、1回目载荷では、荷重端からの距離が大きくなるにつれて T_p の値は緩やかに減少している。図-10は2回目载荷であり、荷重が800kNに達するあたりまで、荷重端から160mmの位置に T_p のピークが存在し、緊張力の残存が見られる。図-7に示したように、荷重が800kN程度までで、荷重端から160mmの位置は、 q の値が負から正に変化する位置と対応している。 q と T_p の間に

は、 $q = \frac{dT_p}{dx}$ なる関係があるからである。

図-11は10回目载荷であり、荷重2,000kNまでは2回目载荷とほぼ同じ分布である。ちなみに、3回目载荷から9回目载荷も2回目载荷と同様の結果であった。

以上の q 分布、 T_p 分布のデータから、定性的には HEM を用いたシングル定着具の挙動と同様であるといえる[5]。

4.5 単位長さあたりのせん断力 q とせん断変位角 γ の関係

図-12に示すように、マルチケーブルを構成する12本のCFRPより線の集合体が一体となって変位すると仮定し、式(3)から相対せん断ひずみ γ を算出した。 h は HEM の厚さ、 W_s 、 W_p はそれぞれスリーブとCFRPより線の軸方向変位である。 h は最外層のCFRPより線とスリーブ内面との距離8mmとし、任意の位置での W_s は鋼製スリーブ表面の測定ひずみ値を固定側から変位を求める位置までのひずみを積分して求めた。 W_p は式(2)で求められた T_p からCFRPより線は弾性であると仮定してそのひずみ値を算出し、 W_s の場合と同様にそれを固定側から積分することで求めた。 q - γ 関係は、せん断伝達層である HEM をせん断バネと考えた場合のせん断バネ特性を表すものである。

図-13、図-14および図-15に、荷重端から70mm、130mm、250mmの位置における q - γ 関係を示した。

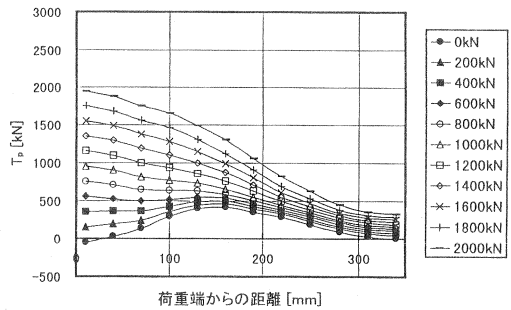


図-10 T_p 分布 2回目载荷

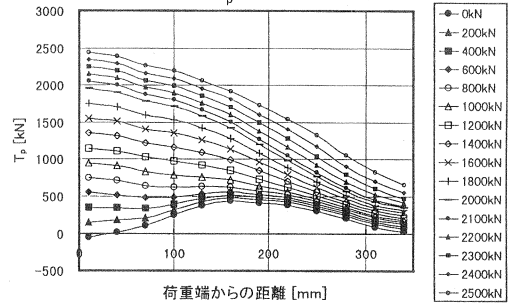


図-11 T_p 分布 10回目载荷

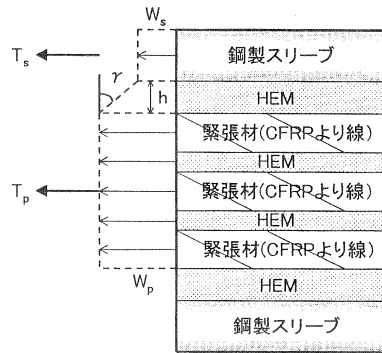


図-12 定着具の変形状態

$$\gamma = \frac{W_s - W_p}{h} \quad (3)$$

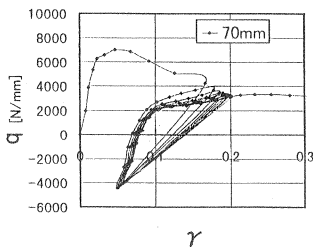


図-13 q - γ 関係 荷重端から70mm

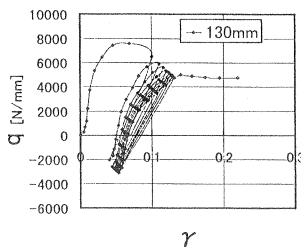


図-14 q - γ 関係 荷重端から130mm

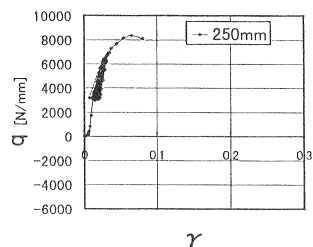


図-15 q - γ 関係 荷重端から250mm

いずれも0~2,000kNの繰り返し载荷過程と、10回目载荷でのケーブル破断までの挙動を示し、 q の値が小さい段

階では、ほぼ直線的に増加しており、次第にその勾配が緩やかになってピークに達している。図-13、図-14 では、 q の値がピークに達した後の包絡線は、徐々に減少しており、いわゆる軟化現象が見られる。軟化領域においては、包絡線はほぼ同じ $q-\gamma$ 関係を示しているといえよう。初期における $q-\gamma$ 関係の直線勾配は、いずれの位置においてもほぼ同じである。しかしながら、 q のピーク値は、荷重端から 70mm、130mm、250mm の順にわずかずつ増加しており、これは膨張圧の大きさに依存しているためと考えられる。図-13、図-14 において、軟化領域で除荷した後の再載荷時の勾配は、初期の直線勾配よりわずかに小さくなっている程度であり、繰り返しに伴う勾配の減少 (HEM のせんばね定数の減少) は見られない。一方、図-15 に示すように、250mm 位置では 10 回の繰り返し載荷での $q-\gamma$ 関係のヒステリシスはほとんど見られず、この位置ではせん断バネとしての HEM はほぼ弾性領域であって、軟化領域になっていないことを示している。

軟化領域を考慮した $q-\gamma$ 関係を定式化することによって、定着機構が解析的に追跡できるが、今後の検討課題としたい。

5. 結論

本研究で明らかになったことを以下に要約する。

- (1) 同一断面内において、鋼製スリーブ、各緊張材へは、膨張圧はほぼ等しく均等に作用する。この場合、膨張圧の管理は、鋼管表面に貼付したひずみゲージの値から算出した膨張圧で行える。
- (2) 膨張圧は、端部からスリーブ軸方向に沿って増加するが、スリーブ中央に近づくにつれほぼ一定値となる。端部に近い 10mm 位置で約 40MPa、スリーブ中央部では 90MPa であり、全体的に高い膨張圧が得られた。
- (3) 12 本マルチケーブル ($N=2$) の破断荷重は、2,570kN、2,540kN であり、いずれも目標の 2,500kN 以上となった。また、CFRP の定着具からの抜け出しは見られなかった。
- (4) 荷重の増加にともなって、荷重端からせん断伝達層としての HEM の軟化領域がスリーブ後方へ進行していくが、荷重範囲 0~2,000kN の 10 回繰り返し載荷にともなう軟化領域の進行は見られなかった。
- (5) HEM は、せん断バネとして挙動しているとみなすことができ、そのバネ特性は、 $q-\gamma$ 関係を描くことによって、定量的に評価できる。

今回は、端部付近の膨張圧のロス等を考慮して、設計スリーブ長は 500mm とし、緊張が破断に至るまでの引張試験によって、その安全性を確認した。しかしながら、 $q-\gamma$ 関係等の実験結果は、緊張材 1 本の場合の挙動と定性的には同じであり、今回実験で得られた $q-\gamma$ 関係の定量化を行うことによって、FEM 解析を用いて解析的に設計スリーブ長の評価等が行えるようになる。今後の検討課題はいくつかあるものの、以上より、実用的な 2,500kN 級定着具としての目処がついたと思われる。

参考文献

- 1) 原田、ミヨーキン、樋野、徳光：定着用膨張材を用いた連続繊維緊張材マルチケーブルの定着法、第 3 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.285-290、1992 年 11 月
- 2) Harada T. et al. : "Behavior of Anchorage for FRP Tendons Using Highly Expansive Material Under Cyclic Loading", Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the third international Symposium (FRPRCS-4), Vol.2, pp.719-726, Japan Concrete Institute, Oct. 1997
- 3) 山崎、吉田：定着用膨張材による炭素繊維より線緊張材の定着に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.473-474、1994 年 9 月
- 4) (株) 銭高組、(株) 興和、東京製綱(株)、積水化学工業(株)：土木系材料技術・公募型技術審査証明「NM グラウンドアンカー」、財団法人 土木研究センター、1999 年 3 月
- 5) 小川、木村、榎本、原田：CFRPより線 ($\phi 15.2$) の HEM を用いた定着具に関する基礎研究、第 10 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、2000 年 10 月 (投稿中)