

# 定着用膨張材による連続繊維緊張材の 定着法に関する研究

原田哲夫<sup>1</sup>・出光 隆<sup>2</sup>・Myo Khin<sup>3</sup>・副田孝一<sup>4</sup>・渡辺 明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 長崎大学教授 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

<sup>2</sup>フェロー 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 第一工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒899-4395 国分市中央1-10-2)

<sup>4</sup>正会員 博士(工学) 太平洋セメント株式会社 佐倉研究所 (〒285-8655 佐倉市大作2-4-2)

<sup>5</sup>フェロー 工博 九州共立大学教授 工学部開発学科 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

連続繊維補強材を緊張材として用いる場合、あるいは引張試験を実施する場合には、その定着方法が最も重要である。筆者らは、膨張圧が50MPa以上の高膨張圧を発生し、しかも圧力伝播が液圧的である定着用膨張材を用いる定着方法を開発した。必要定着長と膨張圧の関係、ポストテンション方式の定着具として必要な長期安定性や疲労特性等を実験的に検討するとともに、マルチケーブルとしての特長についても言及した。

*Key Words* : FRP tendon, highly expansive material, anchoring system, prestressed concrete

## 1. まえがき

カーボン繊維、アラミド繊維などの連続繊維からなる連続繊維補強材をコンクリート構造物へ適用する研究が盛んに行われてきており、すでに土木学会から「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」が出版されている<sup>1)</sup>。

連続繊維補強材をPC緊張材として用いる場合に、最も重要なのは定着方法をどのように行うかである。連続繊維緊張材は一般に一方方向性材で、局部的な支圧やせん断に対して弱いため、PC鋼材と同様の定着が困難であって、種々の工夫を施したいくつかの定着方法が開発されている。しかしながら、定着効率、現場施工性、コスト面のすべてに満足のいく方法は見あたらないように思われる。そこで、筆者らは静的破砕剤の50MPa以上に達する高膨張圧、しかも膨張圧は液圧的に作用するという性質を利用した、より簡便な連続繊維緊張材用の定着方法を開発した<sup>2)</sup>。

本論では、静的破砕剤と静的破砕剤をベースに充填性、材料分離抵抗性および膨張圧の発現時間の観点から定着用に改良されたいわゆる「定着用膨張材」(Highly Expansive Material (HEM))を用いて行った定着法としての基礎的な研究について述べるものである。すなわち、

主として本定着法をポストテンション工法、外ケーブル工法の定着法として用いる場合に必ず解決しておかなければならない問題であるところの必要定着長と膨張圧の関係、長期の安定性、そして疲労特性等の基礎的な事項についての検討を行った。さらに、本定着法を用いたマルチケーブル定着法についても言及した。

上記の各項目については、これまで講演論文、国際会議やシンポジウムの概要集等に部分的に公表してきてはいるが<sup>3) 4) 5)</sup>、本論文では、さらにその後の新たな研究成果を追加し、本定着法開発の経緯から実用化・適用に至る各過程での理論的実験的検討結果を総合的にかつ系統的に示している。また、本定着法は連続繊維緊張材を用いた「グラウンドアンカー工法」へも適用され、実用化が図られているが<sup>6)</sup>、第4章に示す7年以上に渡る長期実験の結果は、永久アンカー工法の成否を占う上で極めて有用であると考えられる。

なお、定着用膨張材に関してはさらに広範多岐な応用が期待されるので、本論文では、今後の可能性や付随する問題点などにも触れており、それらも含めたこれまでの基礎的研究成果が、各方面でのさらなる研究展開のために資することを切に願いたい。

ちなみに、本定着法は通常のPC鋼材を緊張状態のまま途中定着する、いわゆる「中間定着工法」への適

表-1 化学組成

	化学成分 (mass%)									フレン比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
	Ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	計	f-CaO	
定着用膨張材A	1.5	8.0	1.9	0.9	83.5	0.6	3.4	99.8	56.1	3040
定着用膨張材B	1.6	8.8	2.3	1.3	81.5	0.4	3.8	99.7	52.2	2010
静的破砕剤	1.2	8.5	2.3	1.0	82.5	0.7	3.5	99.7	55.0	2380

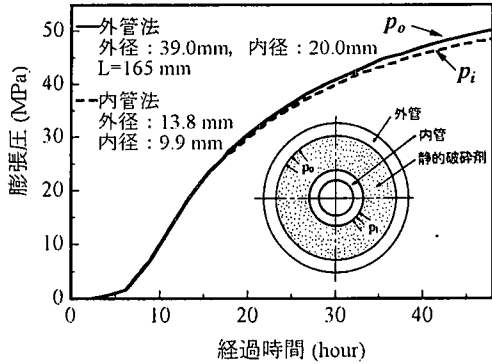


図-1 二重管試験における膨張圧の経時変化

用も図られ、実用化されている<sup>7)</sup>。さらに、連続繊維補強材の引張試験用の定着法としても利用でき、文献1)中の連続繊維補強材の試験方法(案)の資料編に、「1. 定着用膨張材を用いた引張試験方法」として掲載されている。

## 2. 定着法の発想と定着法の概要

### (1) 定着法の発想

筆者らは、静的破砕剤を用いたコンクリートの破砕に関する研究を行っている過程で、ボーリング孔中の膨張圧を直接測定する方法として内管法<sup>8)</sup>を考案した。この方法は内周面に直交ひずみゲージを貼付した鋼管(内管)を充填孔中に挿入し、それに生じるひずみ値より厚肉円筒理論式を用いて膨張圧を算定する方法である。内管法についての検証、すなわち、被破砕体に作用している膨張圧をどの程度の精度で検出できるかを確認する目的で、鋼管(外管)の中に内管を挿入して二重管とし、その間に静的破砕剤のスラリーを充填して、外管に作用する膨張圧  $p_o$  と内管に作用する膨張圧  $p_i$  とを比較するいわゆる二重管試験を実施した。その結果、図-1に示すように経時変化にともなう  $p_o$  と  $p_i$  は、ほぼ等しく作用することがわかった。このことは、内管に相当する圧力計の形状が扁平であっても同様であった<sup>8), 9)</sup>。また、外管と内管に作用する軸方向力の和が、膨張圧と静的破砕剤断面積の積 ( $p_i \cdot A_{in}$ ) に等しくなることより、軸方向へも半径方向と等しい膨張圧が作用していることを確認した。以上のことよ

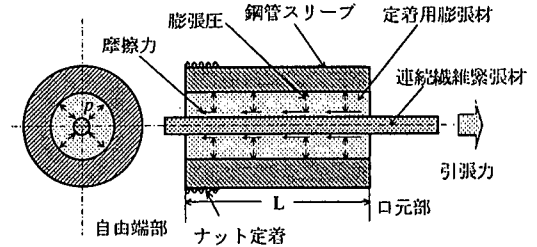


図-2 定着用膨張材を用いた定着体の概要

り、膨張圧の伝播は液圧的であると見なすことができる。

ところが、実験を終了して内管を取り出そうとしたときに、静的破砕剤の硬化体を少々除去したくらいでは内管は取り出せなかったのである。通常、鋼管に充填された静的破砕剤を除去するには、ドリルやコアカッターでくりぬかなければならず、極めて困難な作業となる。静的破砕剤は固体化し、さらに高膨張圧が作用しているため当然の結果である。

さて、液圧的な圧力伝播と高膨張圧の発生、しかも取り出し困難な固体となる一連の現象を、直ちに連続繊維緊張材の定着に利用しようと図ったわけではなかった。鉄筋継手への応用が、当初まず思い浮んだ発想であったが、その後、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関する研究が各方面で進む中、その定着方法が最大の難関であるとの話題に触発され、特にせん断に弱い緊張材の定着には、液圧的膨張特性を持つ静的破砕剤の逆利用こそ最適と直感し、二重管試験における内管を連続繊維緊張材に置き換える発想へ移っていったのであった。本来「コンクリートを壊す」目的で始めた研究に端を発して、「緊張材を定着する」研究へ推移していった経緯は、このようにごく自然な成り行きであった。

### (2) 定着法の概要

図-2に示すように、長さ200mm程度の膨張圧拘束用スリーブ(鋼管、FRP管等)の断面中央部に連続繊維緊張材を挿入、セットする。スリーブと連続繊維緊張材との隙間に静的破砕剤または定着用膨張材を水で練り混ぜたスラリーを充填する。スラリー状態から数時間後には硬化し、常温では48時間後には40MPa

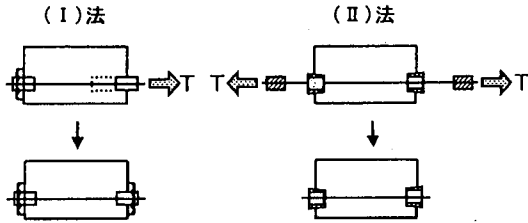


図-3 緊張・定着方法

以上の高膨張圧が発生するため、スリーブと連続繊維緊張材が一体となった定着体が得られる。以後、定着用膨張材を介し、スリーブと連続繊維緊張材が一体となったものを「定着体」と呼ぶ。なお、スリーブ長さ方向の膨張圧は、スリーブ両端部近傍を除いて一様に作用することを確認している。

ここで、定着用膨張材と静的破砕剤の化学組成を比較して表-1に示す。両者とも膨張の主役はCaOで、膨張圧の大きさや液圧伝播特性はほとんど同じである。

定着の基本原理は以下のものである。この定着体自体をナット等で固定し、連続繊維緊張材に引張力を作用させた場合、高膨張圧によって緊張材と固化した定着用膨張材の接触面は、大きな付着強度を有するために引張力に抵抗できる。また、緊張材の断面形状が異型状であっても膨張圧は液圧的に周囲から作用するため、応力集中が少なく確実な定着が可能となる。したがって、本定着法はスリーブの大きさを適当に選びさえすれば、ロッド、より線、板状など、その形状、寸法、繊維の種類にかかわらず適用できる利点を有している。

定着方法には、図-3に示す2通りの方法が考えられ、便宜的に(I)法、(II)法と呼ぶことにする。

(I)法： 一方の定着体をナットで固定し、もう一方の定着体はカプラーに接続して緊張した後に、ナットで定着する方法である。

(II)法： 定着体とするスリーブを定着予定箇所に予めセットし固定しておく。連続繊維緊張材を挿入して緊張し、仮定着を行う。その後、定着用膨張材スラリーを定着予定箇所に予めセットしたスリーブに充填する。所定の膨張圧に達した段階で緊張端の仮定着をゆるめ、予めセットしておいた定着体に反力をとらせて固定する方法である。この方法の特徴は、連続繊維緊張材が緊張された状態で膨張圧が作用することにある。本定着法の応用の一つに「中間定着工法」がある。

一般に、連続繊維緊張材は鋼材に比べて伸びが大きくなり、(I)法では現場施工において、定着体自体に十分な伸びしろをとる場合には定着体の長さが長くなりすぎるために、その解決方法の一つとして(II)法を考案した。

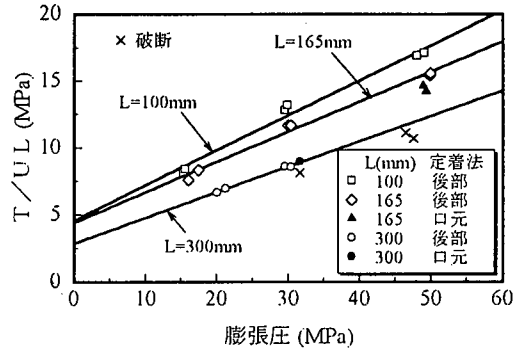


図-4 引き抜き試験結果

### 3. 引き抜き試験

定着体は図-2に示す構造であるため、連続繊維緊張材の破断荷重以下で、抜け出しや口元部分での緊張材の破断等が生じないかを調べておく必要がある。

ここでは、定着体から抜け出さないための必要な膨張圧、定着長(スリーブ長)の関係を調べるために引き抜き試験を実施した。

#### (1) 実験概要

連続繊維緊張材の両端に定着体を設け、ナット定着でアムスラー試験機にセットして、引張試験の要領で引き抜き試験を実施した。スリーブには、高膨張圧によって有害な変形を起こさない肉厚を有する鋼管を使用した。外径 39mm、内径 20mm で、内部には M22 ピッチ 2 のネジを全長にわたって切り、溝部を設けている。これは、スリーブ内面と定着用膨張材の一体性をより確実にするためのものである。

両端の定着体のうち、試験側では、スリーブ長を 100mm、165mm、300mm とし、膨張圧は 15MPa、30MPa、50MPa を目安にそれぞれ変化させた場合について検討した。膨張圧の管理は、鋼管スリーブ表面に直交方向に貼付したひずみゲージの値より、式(1)を用いて膨張圧  $p$  を求める方法によった。当然のことながら、もう一方の定着体からの引き抜けが先行しないように、スリーブ長を 300mm とし、試験時には膨張圧が 60MPa 以上になるようにした。

$$p = \frac{E_s(k^2 - 1)}{2(1 - \nu^2)} (\epsilon_\theta + \nu\epsilon_z) \quad (1)$$

ここに、 $E_s$  : 鋼管スリーブの弾性係数

$k$  : 外内径比 (外径 / 内径)

$\nu$  : 鋼管スリーブのポアソン比

$\epsilon_\theta$  : 円周方向ひずみ,  $\epsilon_z$  : 軸方向ひずみ

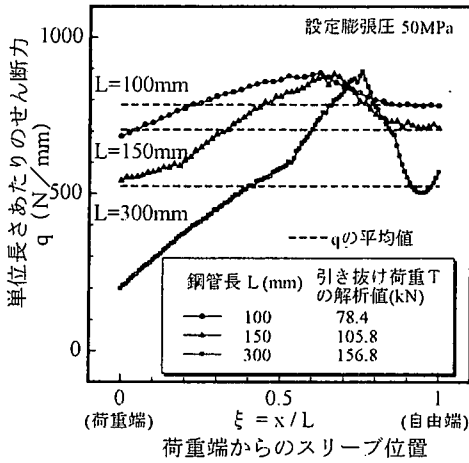


図-5 引き抜け荷重時の単位長さ当たりのせん断力分布

連続繊維緊張材には、CFRP より線 (φ12.5) を使用した。アムスラー試験機のクリアランスの関係から、連続繊維緊張材の全長は、鋼管スリーブ長さによらず 1.2m とした。本実験では、引き抜け荷重まで漸増載荷しながら、荷重はロードセルで、定着体荷重端側 (以後、口元部と呼ぶ) における鋼管スリーブと CFRP より線との相対変位を 1/500 mm 精度のクリップ型変位計によって、自由端変位は 1/1000mm の変位計で測定した。

## (2) 実験結果と考察

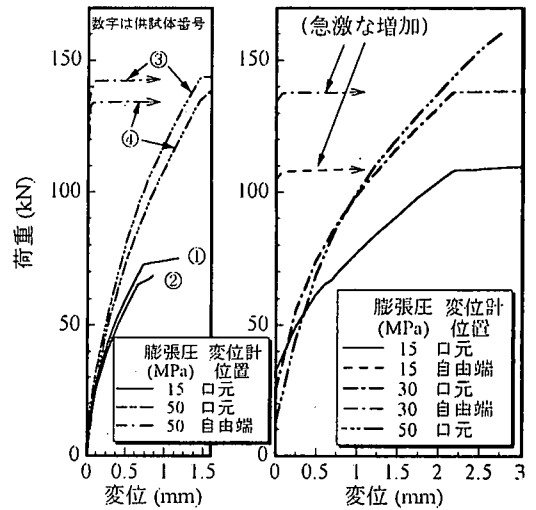
図-4に、引き抜け荷重 (T) を鋼管スリーブ長 (定着用膨張材充填長 L)、CFRP より線 (φ12.5) の有効周長 (U) で除した値  $T/UL$  と膨張圧 (p) との関係を示した。両者の関係は、L をパラメータとして、ほぼ直線で近似できる。従って実験結果は、式 (2) のような関係式で表すことができる。

$$T = UL(\tau_0 + \mu p) \quad (2)$$

ここに、 $\tau_0$  : 付着強度

$\mu$  : 連続繊維緊張材と定着用膨張材との摩擦係数

図-4中の定着法の「後部」および「口元」とは、ナットの定着位置による呼び方の略称である。すなわち、試験機に定着する時のナットの位置が、図-2に示した定着体の自由端部であるものを「後部ナット定着」と呼び、定着体口元部を直接アンカプレートにあてて反力をとらせるか、または口元部分でナット定着する場合を「口元定着」と呼んでいる。図-4では、定着位置の違いが、引き抜け荷重に及ぼす影響は見られない。また同図では、L=165mm の直線は L=100mm



(a) L=165mm の場合 (b) L=300mm の場合

図-6 口元と自由端変位の挙動

の直線よりやや下方に位置している程度であるが、L=300mm ではかなり下方に位置している。L が長くなるにつれて、直線は下方にシフトしており、この理由は以下のように考えられる。

図-5は、鋼管スリーブと CFRP より線はともに弾性要素とし、定着用膨張材を水平力を伝達する弾塑性せん断ばね要素として連結させた有限要素モデル<sup>10)</sup>を用い、引き抜け解析を行った結果の一例で、引き抜け荷重時の単位長さ当たりのせん断力 q の分布を示している。q はスリーブ長さ方向の単位長さ当たりのせん断力であるので、スリーブ口元部分から自由端までの q の積分値は口元部に作用する引張荷重に等しくなる。解析では、荷重増分法により、この q の積分値が最大になる時点の荷重を引き抜け荷重 T とし、L をパラメータとして示した。この T をスリーブ長 L で割った  $T/L$  は q の平均値を表し、図-5の破線に相当する。さらに緊張材の周長 U で割った  $T/UL$  は、スリーブ長さ方向の平均付着応力を表すが、スリーブ長さ方向の平均化という意味では、q の平均値と同様である。従って、実験結果は図-4のように  $T/UL$  で処理しているが、ここでは、q 分布ならびに q の平均値を用いて考察を進めていくことにする。この解析における設定膨張圧は 50MPa である。

図-5の横軸はスリーブ長さで割って無次元化した荷重端からのスリーブ位置を示している。スリーブ長が 100mm のように短い場合の q 分布は、引き抜け時にはなだらかな分布で、平均値 (破線) を表す一様分布に置き換えが可能である。すなわち、スリーブ長が短い場合には、緊張材に作用する付着応力の平均値が、

表-2 長期載荷供試体水準

供試体	膨張材の種類	鋼管スリーブ長 (mm) (有効長)	最大緊張荷重 (kN) (仮緊張開放前)	定着直後 (kN) (Ⅱ法定着時)	定着方法	
A	静的破砕剤 B-100 W/B=25%	220(210)	113.0	110.0	Ⅰ	
B			112.4 (109.4)	111.5 (96.2)		Ⅱ
C			300(290)	113.6	112.1	
D	定着用膨張材 A W/B=30%	220(210)	116.6	83.7	Ⅱ	
E			117.4 (112.9)	115.4 (101.0)		Ⅰ
F			300(290)	117.8	114.7	
G			220(210)	83.6	77.5	Ⅱ
H	300(290)	116.3 (112.6)	112.0 (106.4)			

全体的にある付着応力の限界値に達した段階で引き抜けるものと考えられる。一方、 $L=300\text{mm}$  の  $q$  分布は、全体的になだらかな分布ではなく、ピーク値が荷重端からある位置に生じた状態で引き抜けると考えられる。 $L$  が長い場合には、引き抜け機構が異なってくるのである。このように  $L$  が長くなると  $q$  の分布は一様でなくなり、 $q$  の平均値は小さくなっていく。上記は設定膨張圧が  $50\text{MPa}$  の場合であるが、設定膨張圧が低い場合には、それに対応して  $q$  の値全体が低下するので、スリーブ長  $L$  をパラメータとして膨張圧に比例した直線が得られる。以上から、スリーブ長が長くなると、図-4のように直線は下方にシフトするものと考えられる。今回の解析は、図-4に示した実験値の定量的評価を目的としたものではない。しかしながら、例えば  $L=100\text{mm}$  の場合、 $q$  の平均値は約  $800\text{N/mm}$  で、これを平均付着応力( $T/UL$ )に換算すると  $15.3\text{MPa}$  となっており、解析値は実験値よりやや低めではあるが、よい対応を示している。

ところで、CFRPより線 ( $\phi 12.5$ ) の破断荷重  $165\text{kN}$  に対して、定着に必要な膨張圧あるいは鋼管スリーブ長を決定する方法は、以下のものである。式(2)は、あらかじめ鋼管スリーブ長が決められた場合の  $T$  と  $p$  の関係式であるので、式(2)に破断荷重  $T=165\text{kN}$  を与えれば、定着に必要な膨張圧  $p$  はただちに決定できる。例えば、 $L=165\text{mm}$  の場合には、図-4の実験結果を最小自乗法により求め、 $\mu=0.23$ 、 $\tau_0=4.4\text{MPa}$  を得る。これを式(2)に代入して、必要膨張圧は  $p=64\text{MPa}$  を得る。 $L=300\text{mm}$  の実験結果からは、 $\mu=0.19$ 、 $\tau_0=2.8\text{MPa}$  となり、同様にして  $p=41\text{MPa}$  を得る。当然のことながら、スリーブ長が短い場合には、高い膨張圧が設定されなければならない。

式(2)を他の種類あるいは径を有する連続繊維緊張材へ適用する場合には、実験的に  $\mu$ 、 $\tau_0$  の値を決める必要がある。例えば、アラミド組紐ロッド ( $\phi 12.0$ ) の場合、 $L=400\text{mm}$  で  $\mu=0.13$ 、 $\tau_0=3.5\text{MPa}$  であった。連続繊維緊張材を固めている樹脂量によっても表面の

付着性状に影響して  $\mu$ 、 $\tau_0$  の値は変動することが予想されるので、各種連続繊維緊張材ごとに、種々の鋼管スリーブ長  $L$  に対する  $\mu$ 、 $\tau_0$  の値を実験的に求めておけば、式(2)により定着に必要な膨張圧を決定することができる。

図-6(a)、(b)にそれぞれ、 $L=165\text{mm}$ 、 $L=300\text{mm}$  の場合の引き抜けに至るまでの荷重と変位の関係の一例を示した。変位は、口元部での鋼管スリーブと CFRP より線との相対変位(口元変位)と自由端変位である。口元変位は、設定膨張圧が小さい方が、荷重の小さい段階から大きく出て引き抜けに至っている。一方、自由端変位は、引き抜ける直前までほとんど変化していない。実際、引き抜け時には轟音とともに、一気に引き抜けた。ただし、自由端部での CFRP より線の滑り込み量は  $15\text{mm}$  程度であった。

CFRPより線が破断に至る場合でも、破断荷重の70%程度の荷重での口元変位は  $1\sim 2\text{mm}$  となっている。口元変位が生じることで、口元部での応力集中の緩和が図られていると考えられる。

#### 4. 長期特性

本定着法では、前述のように破断まで定着が良好な場合でも、破断荷重の70%程度の荷重での口元変位は  $1\sim 2\text{mm}$  であった。しかしながら、長期にはさらにその値が増大して、緊張力の低下を引き起こすことが懸念されるため、長期載荷実験を実施し、ポストテンション工法の永久アンカーとしての長期特性について調べることが目的としている。

##### (1) 供試体と実験方法

実験水準として、膨張材の種類、定着方法の違い、鋼管スリーブ長、緊張力の大きさを取り上げ、表-2に示すA~Hの8供試体とした。定着方法は、第2章(2)で述べた(Ⅰ)法、(Ⅱ)法である。

(Ⅰ)法供試体は、両定着体の膨張圧が  $50\text{MPa}$  以

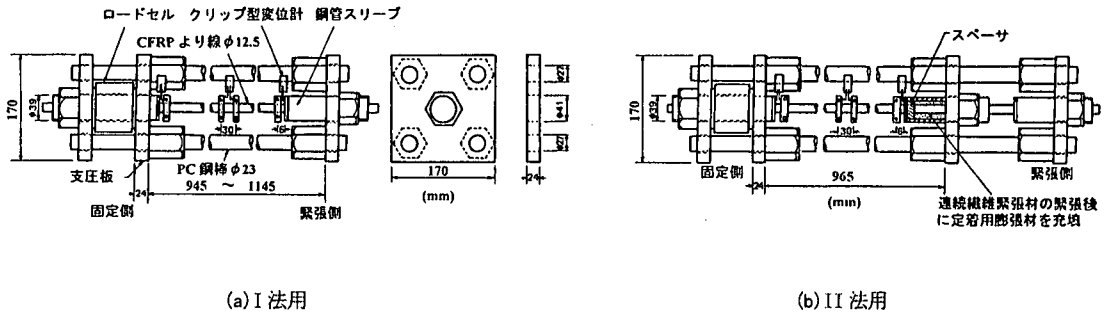


図-7 長期載荷用反力装置

上になった段階で、図-7 (a) のような装置にセットし、定着予定の荷重まで緊張、除荷を2回繰り返す、3回目の緊張で緊張側の定着体をナット定着した。この緊張作業での、最大緊張荷重とナット定着した直後の荷重をそれぞれ「最大緊張荷重」、「定着直後」として表-2に示した。

(II) 法供試体は、図-7 (b) のようにロードセル側を固定端として、緊張側の定着体を定着予定の荷重まで緊張後、ナットで仮定着する。その後、内側にセットした鋼管スリーブに定着用膨張材を充填して、その膨張圧が 50MPa に達した時点で、緊張側の仮定着を徐々にゆるめ、内側にセットした鋼管スリーブに反力をとらせることによって定着が完了する。

いずれの場合も定着完了直後からの緊張力と口元変位の経時変化を計測した。口元変位は、第3章で述べたと同様、クリップ型変位計を用いて鋼管スリーブとCFRP より線に取り付けたアタッチメントとの相対変位量を測定した。ただし、アタッチメント位置までのCFRP より線の変形量をCFRP より線中央部での測定値を用いて補正した。鋼管スリーブ長は、第3章(2)の結果に基づき、両端部のスペーサの取り付け長を考慮した 220mm を基準とした。また、両端部のスペーサ分を除いて、定着用膨張材が完全に充填される長さを「有効長」として、表-2のカッコ内に表示した。緊張荷重は、破断荷重 165kN の 70%、50%とした。両定着体の口元間距離は、いずれも 800mm である。実験は、25°Cの恒温室で行った。

## (2) 緊張力の経時変化

(II) 法では、上記のように2段階の作業を行っている。まず最初の仮緊張段階は(Ⅰ)法と同じであるので、「最大緊張荷重」と「定着直後」の荷重が計測される。次に、中間の定着体に充填された定着用膨張材が 50MPa に達するまでに 48 時間程度要し、その間「定着直後」の荷重は、表-2に示した「仮緊張解放前」の荷重までやや低下する。さらに緊張側の仮定着

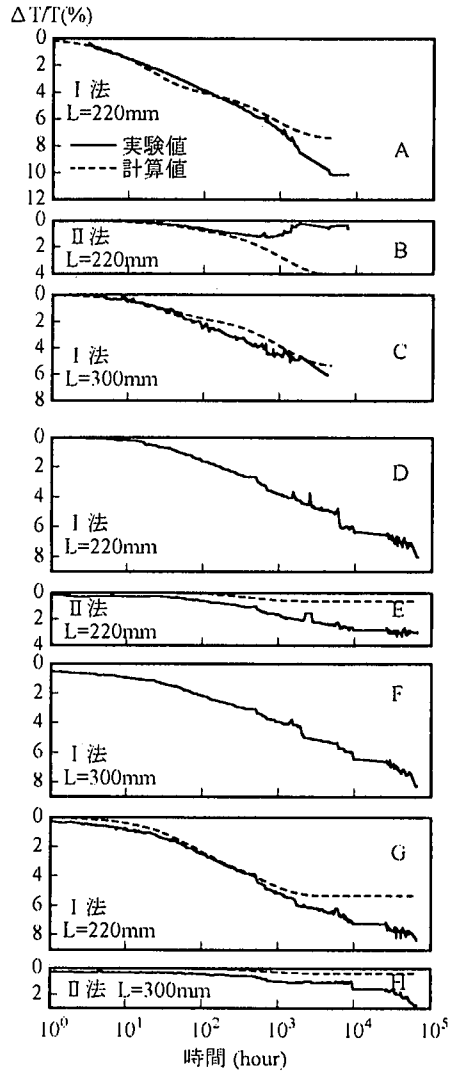


図-8 緊張力低下の経時変化

を徐々にゆるめ、最終的に中間の定着体に反力をとらせて定着が完了する時点までに(Ⅱ)法定着時)、6~13kNの緊張力のロスがみられる。これは、反力プ

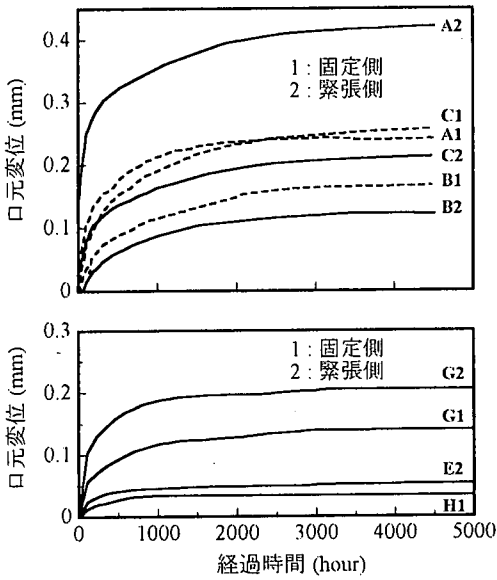


図-9 口元変位の経時変化

レート、ナット間のなじみや弾性変形に起因するものであり、試験区間が短いために、わずかの变形でも緊張力のロスになったと考えられる。

図-8は、緊張荷重低下率の定着完了直後からの経時変化である。A~C供試体では、4500時間までの結果を、D~Hについては65000時間(約7.4年)までの結果を示した。(I)法ではL=220mmの場合で6~11%、L=300mmの場合で6~8%と鋼管スリーブ長による顕著な差は見られない。(I)法に比べ、(II)法による定着を行った供試体B、E、Hでは、さらに小さくなっており、Hでは3%である。これは、緊張した状態で膨張圧が作用しているため、仮定着解放時のCFRPより線のポアソン効果が加わって、より強固な定着になっているためと考えられる。

### (3) 緊張力の減少と口元変位の関係

ここでは、緊張力の低下が生じる主たる要因は口元変位であると考え、以下のような検討を行った。口元変位の長期における経時変化の代表的な例を図-9に示す。

口元変位  $u$  の経時変化は、式(3)で近似できる。

$$u(t) = \beta_1(1 - \exp(-t/k_1)) + \beta_2(1 - \exp(-t/k_2)) \quad (3)$$

ここに、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  は最小自乗法によって決まる実験定数

いま、口元変位を一種のクリープ変形とみなして、

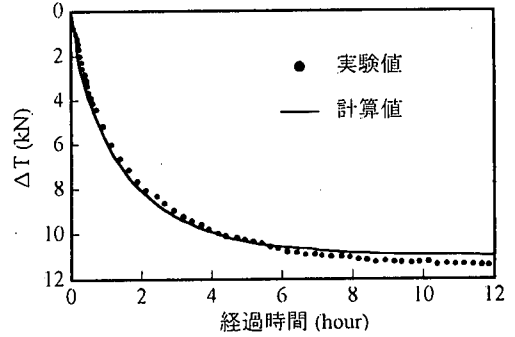


図-10(a) D供試体の緊張力低下の経時変化

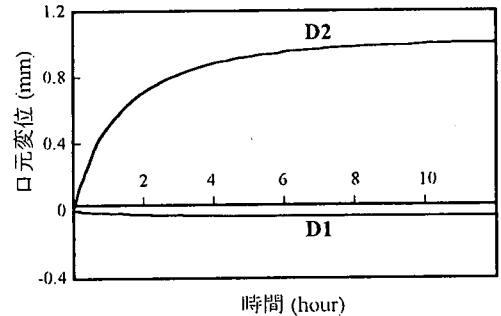


図-10(b) D供試体の口元変位の経時変化

時刻  $t$  から  $(t+dt)$  までの微小時間内に生じる変形について考える。dt 時間に反力フレームと緊張材は同一変形を行うという適合条件と力のつりあいより、緊張力のロス量  $\Delta T$  に関して次のような微分方程式を得る。

$$\frac{d\Delta T}{d\phi} + \alpha\Delta T - \alpha T_0 = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\phi(t) = (u_1(t) + u_2(t)) (T_0 L / E_p A_p)$

$u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ : 固定側、緊張側の口元変位

$T_0$ : 定着直後の初期緊張力

L: 緊張材の長さ

$E_p A_p$ : 緊張材の引張剛性

$\alpha$ : 反力フレームと緊張材の換算断面積比

初期条件として  $t=0$  で、 $\Delta T=0$ 、 $\phi=0$  とおいて、式(4)の解を求めると次式を得る。

$$\Delta T / T_0 = 1 - \exp(-\alpha\phi) \quad (5)$$

D供試体は3回目の緊張時、定着直前の119kNで緊張側から抜け出しが生じたので、直ちに定着を行って、緊張力と口元変位の経時変化を計測した。定着直後から12時間までの緊張力と口元変位の経時変化を図-10(a)、(b)に示す。12時間までの口元変位の経時変化を式(3)で近似し、式(5)に代入して計

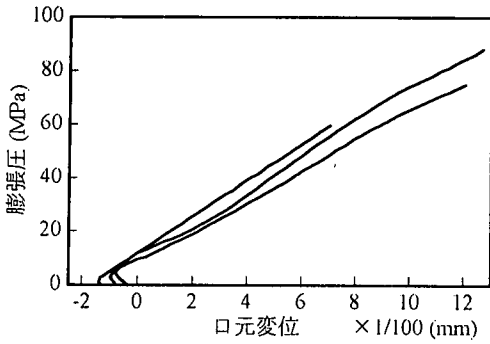


図-1 1 膨張圧と口元変位の関係

算した緊張力の経時変化曲線は、実験結果とよく合致していることがわかる。この例からも口元変位の挙動と緊張力の減少の挙動が対応していることがわかる。なお、図-8に示した長期の緊張力の変化は、12時間後に緊張力が84kNでほぼ安定した時点初期緊張力としている。

同様に、長期における緊張力の低下も主として口元変位に起因して生じると考えられる。ここでは、図-9に示した4800時間までの口元変位の実測値を式(3)で近似し、式(5)を用いて緊張力の減少の経時変化を計算した結果を図-8に破線で示した。口元変位の計測が行われた時点までの緊張力の変化は、計算結果と実験結果は比較的良好に合致している。式(3)は、時間が十分に経過すれば、ある値に収束する関数であるので、緊張力低下の計算値も十分に時間が経過した時点で収束している。緊張力の低下の要因として、口元変位の影響が支配的と考えられるが、緊張材自体のリラクセーションの影響も考慮すれば、より実際の緊張力の低下曲線に合致するものと考えられる。なお、D供試体とF供試体については、長期計測途中での変位測定の不具合により、計算結果は割愛した。

#### (4) 緊張力の低下に及ぼす膨張圧の影響

上記から緊張力の減少は、主に口元変位の進行が影響していることがわかった。この口元変位を進行させる要因の一つに、CFRPより線の軸方向に作用する膨張圧の影響が考えられる。

図-11には220mmの鋼管の中央にCFRPより線を立てた状態で、定着用膨張材を充填して、膨張圧と口元変位の関係を示した。膨張圧が発生する前のスラリー状態時、CFRPより線の自重による沈下で負の方向へ変位しているが、緊張力の作用していない状態でも膨張圧の増加に伴って口元変位が増加していることがわかる。このことより、膨張圧が増加する限り口元変位は進み、緊張力が低下することになる。逆に、膨張圧の増加が減少すれば、緊張力は安定すると思われる。

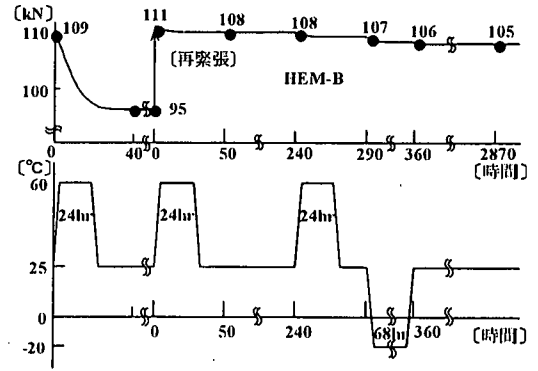


図-1 2 (a) 60°Cにおける緊張力の経時変化

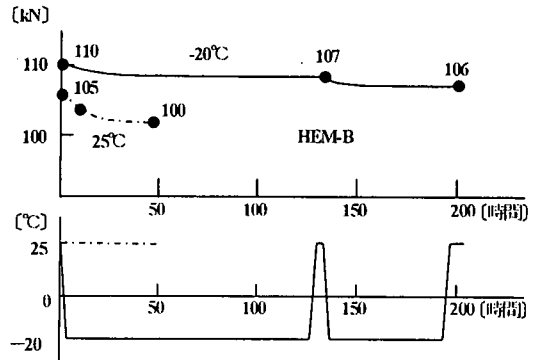


図-1 2 (b) -20°Cにおける緊張力の経時変化

れる。

膨張圧の発生は、水和反応によるもので、温度が高くなれば反応が活性化して膨張圧が大きく出る。また、定着用膨張材自身その高膨張圧を受けており、緊張力が作用した状態では軸方向へのクリープ変形も大きく、緊張力に影響を及ぼすものと推察される。そこで、水和反応の程度が極端な2つの場合を設定した実験を行った。実験装置は、図-7(a)と同様で、口元変位の影響が大きく出るようにCFRPより線の試験区間を300mmと短くし、115kNの緊張力で定着した。緊張力の測定は、25°Cの状態で行った。図-12(a)、(b)は、緊張力変化と温度変化を対応させて示した。同図より、以下のことがいえる。

○図-12(a)では、緊張定着後直ちに60°Cの環境下に置き、24時間後の緊張力の低下率は12.7%となった。60°CにおけるCFRPより線のリラクセーション率2.5%<sup>11)</sup>を引けば、10.2%となる。以後、60°C 24時間の状態を2回履歴させ、完全水和に近い状態での緊張力の低下率は2.4%、0.6%とほとんどなくなっている。初期に緊張力の低下率が大きいのは、60°Cの環境下で膨張圧が急激に増加したためであり、2回目以降は膨張圧の増加がほとんど起こらないため低下率が小さいと考えられる。



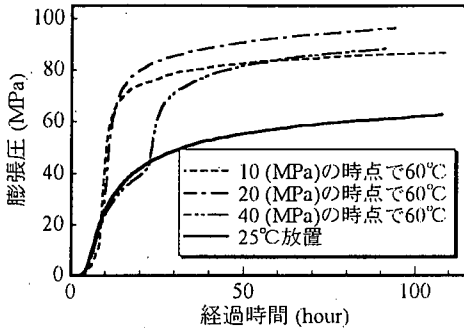


図-1 3 60°Cの環境設定時期と膨張圧の挙動

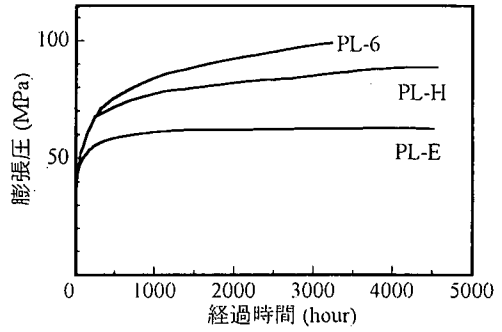


図-1 4 4500時間までの膨張圧の経時変化

○緊張定着後直ちに-20°Cの環境下に置き、水和反応を遅らせた場合の低下率は、25°Cの場合より小さく、2%以下であった。

以上の結果は、水和反応の進行状態と緊張力の低下とは、密接な関係があることを裏付けている。膨張圧の増加がなくなって一定値になれば、緊張力も安定するといえよう。なお、緊張力の変化と膨張圧の変化の直接的な関係でなく、上記のような間接的な評価とせざるを得なかった理由は、緊張状態にあり、しかも温度変化を伴う場合の供試体自体の膨張圧計測は、ひずみゲージその他の方法でも困難であるからである。

図-1 3には、図-1 2 (a)に関連して、膨張圧の温度変化による特性の一例を示す。すべての供試体をまず25°Cの恒温室で充填し、それぞれ10MPa、20MPa、40MPaの膨張圧に達した時点で、60°Cの環境下に置いた場合の膨張圧の経時変化である。いずれも60°Cの環境下に置いた時点から膨張圧は増加するが、水和反応がある程度進んだ40MPaの場合は伸びがあまり大きくない。20MPaの場合が最も膨張圧が最も大きく出ている。10MPaの場合は、初期の増加率は極めて大きい、長期における増加率が小さい。これより、膨張圧を大きく効果的に出すための適当な時期があるということがわかる。

さて、上記のように試験区間が300mm、800mmと短い場合で、緊張力の低下が大きいものでも10%程度であった。例えば、初期緊張力を上記実験と同じ110kN、緊張定着後の経時変化にともなう口元変位を両端部合わせて3mmと大きめに仮定し、緊張材長が10mとして式(5)によって計算した場合、緊張力の低下は2.8%となる。実用上は、緊張材長がさらに長くなることを考慮すれば、無視しうる大きさといえよう。

#### (5) 長期膨張圧と定着用膨張材の耐久性

永久アンカーとして、膨張圧が長期において低下することはないが、また定着用膨張材の化学的な劣化は、問題ないのかという点が重要である。図-8のように、

表-3 長期膨張圧

供試体	膨張圧 (MPa)	充填後経過日数
B-100	95.4	800
B-150	110.7	1050
HEM-B-1	90.8	1174
HEM-B-2	91.8	1174

載荷開始から約7.4年が経過していても緊張力の低下が数%という結果からは、長期には問題ないといえそうであるが、ここでは、長期における膨張圧の特性とスリーブ端部からの中性化の影響について述べる。

図-1 4は、長期載荷試験に使用したのと同様の鋼管スリーブに充填した定着用膨張材の4500時間までの膨張圧の経時変化の一例である。膨張圧は徐々に増加するかあるいは安定しており、低下はみられない。

また、表-3は鋼管スリーブに充填した定着用膨張材をコアカッターでくり抜き、鋼管表面のひずみ値から作用膨張圧を算定する、いわゆる応力解放法により求めた結果である。充填後およそ1000日での膨張圧は90~100MPaである。ここで、使用した定着用膨張材と膨張主成分量がほぼ同じである静的破砕剤の膨張圧 $p$ (MPa)と水和率 $h$ (%)の関係は、式(6)のように近似できることが筆者らの研究でわかっている<sup>9)</sup>。

$$p = 129(h/100 - 0.14)^{1.68} \quad (6)$$

この式より、水和率100%での膨張圧を推定すると100MPaとなって、表-3の結果は、完全水和に近い状態と考えられる。定着用膨張材はセメント硬化体組織と同様の組織を有する固体であって、膨張成分が完全に水和するまで膨張は継続すると考えられる。定着用膨張材自身その高膨張圧を鋼管スリーブから常時反力として受けており、それに抵抗しながら徐々に膨張することによって膨張圧をさらに増加させ、より緻密な硬化体組織になっていくものと推察される<sup>9),12)</sup>。定着用膨張材の水和反応は、セメントと同様に長期に継続しており、鋼管スリーブの拘束状態が変化しない限

表-4 疲労試験結果一覧

記号	膨張材の種類	設定膨張圧 (MPa)	上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	繰り返し回数 (回)	疲労試験後 破断荷重(kN)		
B-F1	静的破砕剤 W/B=25%	50	117.7	88.3	200×10 <sup>4</sup>	154.0		
B-F2			132.4	98.1	200×10 <sup>4</sup>	162.8		
HEM-A-F1	定着用膨張材 HEM-A W/B=30%		132.4	98.1	200×10 <sup>4</sup>	162.8		
HEM-A-F2			141.2	127.5	205×10 <sup>4</sup>	疲労破断		
HEM-A-F3			132.4	117.7	500×10 <sup>4</sup>	141.2		
HEM-B-F1	定着用膨張材 HEM-B W/B=27.5 (%)		100	132.4	98.1	210×10 <sup>4</sup>	168.7	
HEM-B-F2				142.2	122.6	210×10 <sup>4</sup>	162.8	
HEM-B-F3				117.7	78.5	150×10 <sup>4</sup>	疲労破断	
HEM-B-F4				50	142.2	121.6	200×10 <sup>4</sup>	166.7
HEM-B-F5					133.4	85.3	200×10 <sup>4</sup>	163.8

り、これまで膨張して緻密になった硬化体組織は保持されると考えられる。この状態で、自らの膨張圧によって生じるクリープ変形は極めて小さく、したがって、長期における膨張圧の低下は起きないと考えている。

次に、定着用膨張材の耐久性のうち、中性化について実験的に検証した代表的な結果について述べる。これは、定着用膨張材の反応は、CaO が水和し Ca(OH)<sub>2</sub> が生成する反応であるため、コンクリートと同様に中性化することが考えられ、無拘束状態に近く外気にさらされるスリーブ両端部分においては、組織の脆弱化と中性化による膨張圧の低下が長期的には懸念されるからである。ここでは、両端部からの内径 20mm、長さ 200mm の鋼管に定着用膨張材 (W/B=27%) を充填し、20℃ 空气中に 1 週間放置後、両端部での定着用膨張材の自由膨張による脆弱部を除去したままの供試体と、除去部にパテ状エポキシ接着剤でシーリングした供試体を、中性化促進試験装置に入れ、CO<sub>2</sub> 濃度 5%、温度 20±1℃、湿度 60% にて暴露を行った。シーリングなしの場合で、12ヶ月後の中性化深さは平均 2.2mm とわずかであった。エポキシ樹脂でシーリングした場合の中性化深さは 0mm であった。このことより、エポキシ樹脂等で端部のシーリングを施せば、中性化は生じないものと思われる。

## 5. 疲労特性

### (1) 実験方法

ここでは、引張疲労試験により定着具の疲労性状について検討する。鋼管スリーブ長は、すべて 220mm (有効充填長 210mm) とした。緊張材には CFRP より線 (φ12.5) を用い、両端の定着長を含めた全長は 720mm である。供試体 HEM-B-4、HEM-B-5 の 2 体のみ CFRP より線の試験区間長が 1000mm である。

繰り返し速度は 2.5Hz~4Hz とした。下限荷重は、保証破断荷重 142kN の 60% 以上とし、荷重振幅は、榎本と白鳥によって報告されている疲労耐久線図<sup>13)</sup>をもとに、CFRP より線が疲労破壊せずにかつ定着体に

できるだけ負荷のかかるよう設定した。より線の場合、引張荷重の増加にともなって、よりが戻る方向にねじりモーメントが発生し、それが疲労試験機のアクチュエータの回転を起こさせ、早期に破断することがある。本疲労試験においては、疲労試験機のアクチュエータの回転を防止するために、より戻り防止治具を取り付けた。

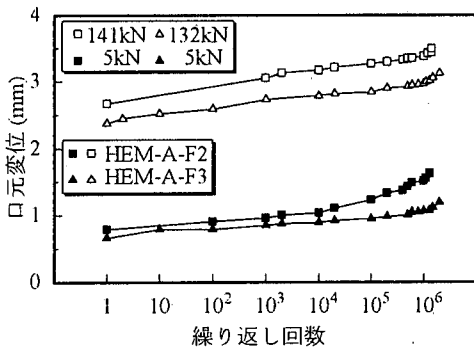
所定の繰り返し回数毎に試験機を止め、4.9kN から上限荷重まで静的に載荷し、上下定着体口元間の変位量 (δ) を計測した。4.9kN は初期設定荷重である。疲労試験の開始は、膨張圧が 50MPa 以上に達した時点を標準に、100MPa の場合も設定した。これは膨張圧が最終的には 100MPa 程度に達し、高膨張圧なるが故に、口元部での材料の破断が懸念されるからである。

### (2) 実験結果と考察

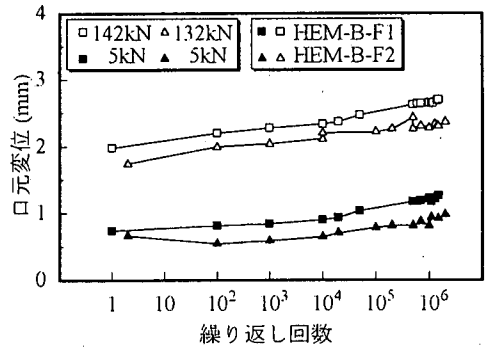
供試体と実験結果一覧を表-4 に示す。一体は 205 万回で、他の一体は 200 万回に達する以前に CFRP より線の疲労破断を起こしたが、定着部口元部分からの破断ではなかった。CFRP より線が破断すれば、バラバラになって破断箇所の特長は難しいが、引張破断した箇所は繊維がほうき状になることで破断箇所を推定している。

図-15 (a)、(b) には、上限荷重時、下限荷重時における上下定着体の口元間における変位量 (両端部からの抜け出し量の総和) それぞれについて、各繰り返し回数ごとの変化を示した。上限荷重が大きい方が口元変位量も大きくなっている。繰り返し回数とともに口元変位は徐々に増加しているが、図-15 (a) において上限荷重 141kN の場合で、200 万回後の変位の増量量は 0.8mm とわずかであった。また、設定膨張圧が 100MPa のほうが、50MPa の場合より、口元変位は小さめにできていることがわかる。

HEM-A-F3 は、定着用膨張材の耐候性の検討も目的として、60℃(46 時間) ⇒ 110℃(24 時間) ⇒ 炉内除冷 (96 時間) ⇒ -20℃(160 時間) ⇒ 110℃(48 時間) ⇒ 炉内除冷(18 時間) と過酷な環境下においた後に疲労試



(a) 設定膨張圧 50MPa の場合



(b) 設定膨張圧 100MPa の場合

図-15 各繰り返し回数毎の口元変位の変化

験を実施した。上記のような温度環境条件の設定を行ったのは、定着用膨張材の耐久性に温度変化が最も厳しい影響を与えると考えたからで、現実の温度履歴よりも厳しい条件を設定した。500万回繰り返し後においても、口元部分からの CFRP より線の異常な抜け出しや、定着体自体の異常は見られなかった。疲労試験後の静的引張試験において、過酷な環境条件下に放置後 500 万回繰り返した HEM-A-F3 では、破断荷重が 141kN とやや低めの保証破断荷重程度となっているが、他の供試体では、疲労試験前の引張強度との有意な差は見られない。破断箇所はいずれも定着体口元部以外であった。

図-16 は表-4 の疲労試験結果に基づき、応力振幅と平均応力との関係をプロットしたものである。実構造物、例えば外ケーブル方式やアンボンド方式の定着具として使用する場合には、通常、緊張応力は保証破断荷重の 60% (約 1100N/mm<sup>2</sup>)、活荷重による変動応力は高々 25N/mm<sup>2</sup> 程度と見積られるので、今回の疲労試験で設定した平均応力、応力振幅の組み合わせほどの大きな繰り返し荷重は作用しないことになる。したがって、定着用膨張材を用いた定着法 (HEM 定着法) による定着部の疲労は実用上、問題にならないと思われる。

ここでは、外ケーブル方式やアンボンド方式の定着具として使用するための疲労安全性の検討を主目的としていたが、上記の結果から、むしろ HEM 定着法を連続繊維補強材の引張疲労試験の定着具として積極的に活用することが考えられる。HEM 定着法による CFRP より線 (φ12.5) の引張疲労試験のデータは、現在、いくつかの研究機関で蓄積されつつある。

一方、メーカーは CFRP より線の定着部分となる端部のよりをほどこき、鋼管スリーブに挿入してエポキシ樹脂で固定した定着法 (樹脂定着) で、引張疲労試験を実施している。図-16 に示した実線は、樹脂定着

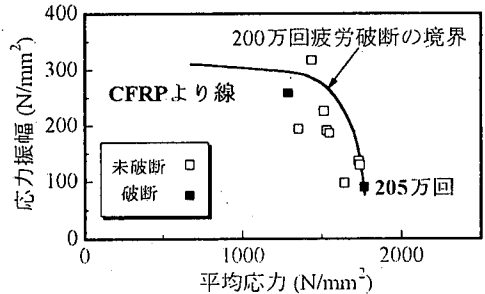
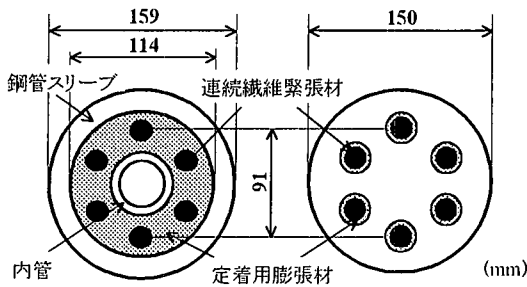


図-16 応力振幅-平均応力で表した疲労試験結果

による CFRP より線 (φ12.5) の疲労耐久線図<sup>13)</sup>である。すなわち、実線より上の領域では繰り返し回数 200 万回以内で疲労破断が生じることを意味している。樹脂定着法と HEM 定着法それぞれによる疲労試験結果を図-16 に示す応力振幅-平均応力関係と比較したところ、静的引張試験では、定着法の違いによる破断荷重に差がほとんどないにもかかわらず、HEM 定着法の方が、CFRP より線 (φ12.5) の疲労特性が明らかに向上するという結果が得られている<sup>10)</sup>。樹脂定着の場合には、200 万回以前に、ほぼ確実に疲労破断を起こす平均応力と応力振幅の組み合わせにおいても、HEM 定着では CFRP より線は疲労破断しないのである。すなわち、図-16 の実線が上方にシフトするのである。このことは、CFRP より線 (φ12.5) 以外の連続繊維補強材ではまだ確認していないが、定着方法の違いが連続繊維補強材の疲労特性に及ぼす影響については、たいへん興味ある内容であり、今後追究していきたいと考えている。

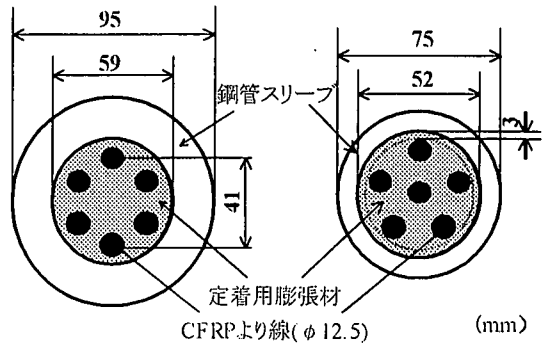
## 6. マルチケーブル用定着体

斜張橋のケーブルのように緊張力の大きな場合やグラウンドアンカー工法、通常の PC 工法においてもマルチケーブル方式は多用されている。定着用膨張材に



(a) ドーナツホールタイプ (b) マルチホールタイプ

図-17 マルチケーブル配置 (Aタイプ)



(a) コンパクトタイプI (b) コンパクトタイプII

図-18 マルチケーブル配置 (Bタイプ)

よる定着法のメリットの一つは、このマルチケーブル配置が容易にできる点である。ここでは、CFRPより線(φ12.5)6本を用いる場合(緊張容量600kNクラス)を対象とし、検討した結果について述べる。

### (1) マルチケーブル配置

緊張材の配置は、図-17(a)、(b)と図-18(a)、(b)のようなものが考えられる。図-17(a)では、中央の中空部分は、テンションバーを通すスペースであると同時に、定着用膨張材の断面積が大きくなることにともなう水和熱の急激な温度上昇を抑制する目的のために設けた。図-17(b)は、シングル配置を基本として構成され、緊張材1本毎に定着用膨張材の充填スペースが確保されている。いずれも実施工を考慮して、横向きに置いた状態で定着用膨張材の充填が行える実用性の高い充填方法を考案し、またその充填作業性のよいことも確認している。

図-18(a)、(b)は、緊張材をコンパクトにまとめるという観点での配置形である。図-18(b)の配置は、現在、グラウンドアンカー工法<sup>9)</sup>の定着体として使用されている。

一般に、定着用膨張材を用いるマルチケーブルの定着体スリーブは、定着用膨張材が十分に充填できるだけのスペース、すなわち緊張材相互の間隔、スリーブと緊張材のあき間隔が確保された断面を有し、緊張材が1本の場合と同じ定着長のスリーブでよいと考えている。これまでの経験から、相互のあき間隔は3mm程度確保されれば、充填性、定着ともに十分であると思われる。ただし、緊張材の周長の合計よりスリーブ内面の周長の方が小さい場合には、スリーブ内面と定着用膨張材の界面でのすべりが起きる可能性があるため、スリーブ内面に凹凸の溝を設ける等の対策が必要である。コンパクトタイプIIでは、スリーブ内面に凹凸の溝を設ける対策を施している。スリーブ自体、緊張荷重と膨張圧に対して、有害となる変形や破損を起

表-5 マルチタイプの破断荷重

供試体	破断荷重 (kN)	マルチケーブル配置状態	スリーブ長(有効長) (mm)
A-1	939	A-(a)	300(250)
A-2	916	A-(a)	300(250)
B-1	905	B-(a)	350
B-2	908	B-(a)	250
NM-1	900	B-(b)	400
NM-2	953	B-(b)	400
NM-3	952	B-(b)	400

こさない断面、材質のものを使用しなければならないのは当然のことである。

### (2) 引張試験結果と考察

表-5に、CFRPより線(φ12.5)6本マルチの場合の静的破断荷重を示す。表中のマルチケーブルの配置状態を表す記号A-(a)は図-17(a)に、B-(a)とB-(b)はそれぞれ図-18(a)、(b)に相当する。供試体の全長は定着体部分の長さを含めて、A供試体とB供試体で2m、NM供試体で2.5mである。破断荷重は、CFRPより線(φ12.5)1本の破断荷重162kNの6倍の972kNよりやや低いものの、ほぼマルチ本数倍の破断荷重で破断したとみることができ。通常、マルチケーブルでは、各々のケーブル長さの違いが各ケーブル間の緊張力差をもたらし、最も緊張力の高いケーブルが先に破断してしまい、破断荷重が1本の破断荷重のマルチ本数倍をかなり下回ることがあり、緊張材が短いとそれが特に顕著となる。定着用膨張材による定着の場合、ほぼマルチ本数倍の破断荷重で破断しているのは、各ケーブルの緊張力差が生じにくいためと考えられる。

図-19は、A-2供試体における各ケーブルの荷重分担率と実引張荷重の関係を示した。この供試体のケーブル全長は、両端の定着体を含めて2mと比較的に短いために、各緊張材長のアンバランスは、荷重分担率に顕著に現れると考えられる。ここでの荷重分担率は、各ケーブルに貼付したひずみゲージのひずみ値から計算した緊張力をその時点の載荷荷重で除した値と

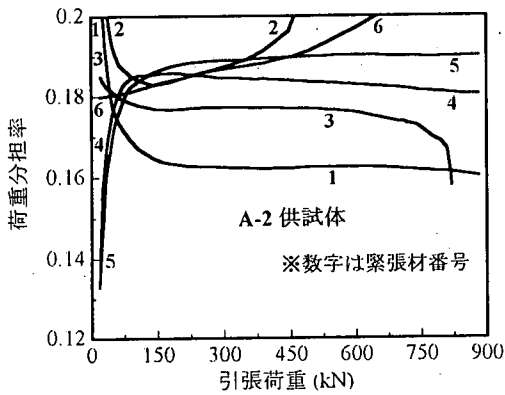


図-19 各緊張材の荷重分担率

した。これは他のケーブルのひずみ値に関係なく、各ケーブル単独で荷重分担率が算定できるからである。ただし、この手法ではひずみの測定精度に依存するため、荷重分担率の総和が必ずしも1にならない場合もあるが、各緊張材の荷重分担率の相対比較という観点からは、十分に評価できるものと考えている。同図から、載荷荷重の増大にともなって、各ケーブルの荷重分担率が互いに近づき、均等化するような挙動をしていることがわかる。

図-6で示したように、破断荷重の70%程度で1~2mmの口元からの抜け出しがあることがわかる。すなわち、マルチの場合、荷重負担の大きなケーブルでは口元部分からの抜け出しがおこり、これによってケーブル長の初期不整は、ある程度吸収され得るものと考えられる。したがって、各ケーブルの荷重分担率は均等になり、ほぼマルチ本数倍の破断荷重で破断するものと考えられる。

口元部分からの抜け出しは、スリーブ全体におよぶものでないことは、図-20から明らかである。口元から75mm位置の鋼管スリーブひずみは、直線から次第にそれており、引張荷重700kNあたりでピーク値を示している。これは、CFRPより線と定着用膨張材との界面ですべりが起こりはじめ、CFRPより線からスリーブへのせん断伝達が多に行われなくなったためと考えられる。これに対し、他の位置では破断までひずみがほぼ直線的に挙動しているのは、これらの位置ではCFRPより線と定着用膨張材との付着が十分に保たれているために、CFRPより線に作用する荷重は、定着用膨張材によって十分にせん断伝達され、鋼管スリーブが負担しているからだと考えられる。

なお、図-20に示した鋼管スリーブのひずみ挙動は、緊張材が1本の場合と同様の挙動<sup>10)</sup>で、あたかもマルチケーブル全体がまとまって、シングルケーブルのように挙動しているように思われる。これは前述の

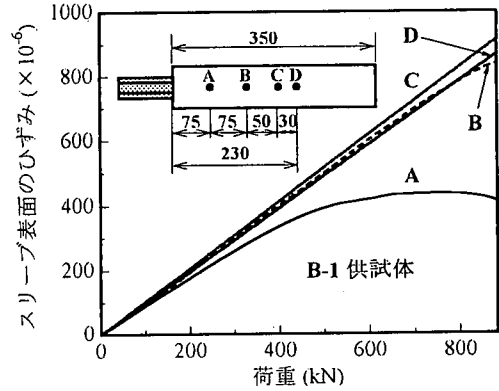


図-20 鋼管スリーブ表面各点のひずみ変化

各ケーブルの荷重分担が、より均等化する挙動とも符合する。

## 7. 結論

連続繊維緊張材の新たな定着方法として、定着用膨張材を用いる方法を開発し、主としてCFRPより線を用いたポストテンション工法の永久定着法として用いるための基礎的な検討を行った。本研究の範囲で得られた結果を列挙する。

- (1) 引き抜き試験の結果、引き抜き荷重、膨張圧と鋼管スリーブ長の関係は、 $T=UL(\tau_0 + \mu p)$ なる関係式が得られた。これにより、定着に必要な膨張圧、鋼管スリーブ長を算定できる。
- (2) 定着方法には(1)法、(2)法があるが、緊張した状態で定着する(2)法では、長期の緊張力のロスが、(1)法に比べて少ない。
- (3) 緊張力のロス、口元変位の挙動と対応しており、口元変位は膨張圧の挙動と関係していることがわかった。膨張圧の増加を安定させれば、緊張力のロスも小さくなる。
- (4) 65000時間の長期載荷実験の結果、3~11%の緊張力のロスが見られるが、試験区間が80cmと短い場合である。口元変位量が同じとして、緊張材長が10mと長くなれば、緊張力のロスは、実用上は無視できる大きさとなる。
- (5) 鋼管スリーブのように拘束が確保されておけば、長期膨張圧の減少はなく、100MPa程度の膨張圧となる。また、両端部をエポキシ樹脂等でシーリングすれば、中性化は起こらない。
- (6) 実用上問題となるよりはるかに大きな応力振幅-平均応力での疲労試験を実施したが、定着部には異常は見られなかった。むしろ、各種連続繊維補強材の疲労試験用定着具としての活用を

推奨したい。

- (7) マルチケーブル配置は、大きな自由度をもって設定でき、引張試験の結果、破断荷重は CFRP より線 1 本のマルチ本数倍に近い値であった。これは緊張力の均等化が、口元変位が生じることで自動的に行われているためと考えられる。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費（一般研究（C）課題番号：05650437、基盤研究（C）（2）課題番号：10650452）の一部により行ったものである。ここに、付記して感謝の意を表します。

また、材料の提供等でご協力をいただいた（株）小野田、東京製綱（株）に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー第 88 号，1996。
- 2) 原田哲夫，出光隆，渡辺明，高山俊一：静的破砕剤を用いた FRP 緊張材の定着法，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.251-256，1990。
- 3) 原田哲夫，山崎竹博，出光隆：定着用膨張材を用いた FRP 緊張材アンカーの長期および疲労特性，連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集，コンクリート技術シリーズ 1，pp.223-228，1992。
- 4) Tetsuo Harada, Takashi Idemitsu, Akira Watanabe, Myo Khin and Koichi Soeda: New FRP Tendon Anchorage System Using Highly Expansive Material for Anchoring, *Proceedings of FIP Symposium '93, Kyoto*, Vol. II, pp.711-718, 1993.
- 5) 原田哲夫，ミヨーキン，樋野勝巳，徳光 卓：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。
- 6) (財)土木研究センター：土木系材料技術・公募型技術審査証明 報告書 NMグラウンドアンカー，1994。
- 7) 渡辺泰行，菊地秀二，長橋弘和，中島規道：中間定着工法の開発とその施工，プレストレストコンクリート，Vol.40, No.3, pp.26-30, 1998。
- 8) 原田哲夫，出光 隆，渡辺 明：静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 360 号，V-3, pp.61-70, 1985。
- 9) 原田哲夫，副田孝一，出光 隆，渡辺 明：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質，土木学会論文集，第 478 号，V-21, pp.91-100, 1993。
- 10) Tetsuo Harada, Masashi Soeda, Tsuyoshi Enomoto, Suguru Tokumitsu, Myo Khin and Takashi Idemitsu: 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, JCI*, Vol.2, pp.719-726, Oct., 1997.
- 11) 伊藤幸雄，丸山武彦，白鳥信令，榎本 剛：より線型 CFRP ロッドのリラクゼーション特性，土木学会第 45 回年次講演会講演概要集，第 5 部，pp.322-323, 1990。
- 12) 副田孝一，原田哲夫：静的破砕剤の膨張圧発生機構に関する一考察，土木学会論文集，第 466 号，V-19, pp.89-96, 1993。
- 13) 榎本 剛，白鳥信令：炭素繊維複合材料ケーブル(CFCC)の引張疲労特性，土木学会第 45 回年次講演会講演概要集，第 5 部，pp.324-325, 1990。

(1998. 8. 28 受付)

## A STUDY ON ANCHORAGE METHOD FOR CONTINUOUS FIBER REINFORCING MATERIALS (FRP) USING HIGHLY EXPANSIVE MATERIAL

Tetsuo HARADA, Takashi IDEMITSU, Myo Khin, Koichi SOEDA  
and Akira WATANABE

It is of utmost importance to hold the FRP rods/strands when they are to be used as prestressing tendon or in tension tests. The authors have developed a new anchoring method, using Highly Expansive Material (HEM) in which the expansive pressure can be attained up to more than 50MPa and the pressure is transmitted in a manner similar to that of the fluid pressure. In this paper, the relationship between the anchorage length and the expansive pressure for post-tensioning type anchors, along with long term stability and fatigue characteristics and some others are investigated. Also supplemented with experimental studies on performance of multi-cable type anchorage.