

(16) CFRPより線 (φ15.2) のHEMを用いた定着具に関する基礎研究

東京製綱㈱ エンジニアリング部 ○ 小川 委広
 東京製綱㈱ エンジニアリング部 木村 浩
 東京製綱㈱ 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

定着用膨張材 (HEM : Highly Expansive Material) は、50MPa 以上の高膨張圧を発生し、膨張圧が液圧的に伝播するという性質を有するため、連続繊維緊張材の断面形状が異形状であっても均等な締付け力が作用し、応力集中の少ない確実な定着が可能である^{1), 2)}

本研究では、HEM を用いて CFRP より線φ15.2を定着するための基礎的なデータを得ることを目的に、実験的な検討を行った。これは、CFRP より線φ15.2を複数本束ねたマルチケーブルを橋梁等のケーブル材として実用化したいためである。定着用膨張材を用いたこれまでの基礎研究では、CFRP より線φ12.5が使用されており^{1), 2)}、φ15.2に関するデータは皆無である。したがって、定着具の設計に必要なφ15.2の場合の基礎データを蓄積しながら、φ12.5の場合に得られている定着具の設計に関する考え方の適用性についても検討する必要がある。

そこでまず、CFRP より線φ15.2を HEM により定着する場合、緊張時の CFRP より線φ15.2が定着体から抜け出さないために必要な膨張圧、スリーブ長の関係を調べるため、引き抜き試験を実施した。また、最大引張荷重を CFRP より線φ15.2の破断荷重の80%に設定した繰り返し載荷試験を実施し、q分布 (単位長さ当たりのせん断力分布) 等を調べることにより、スリーブと CFRP より線のせん断伝達機構に関する検討を行った。このとき、HEM の充填間隔が引き抜け荷重に及ぼす影響についても検討した。

2. HEM を用いた定着具の概要

HEM を用いた定着具は、図-1のように鋼管スリーブの中央に CFRP より線φ15.2を挿入し、その隙間に HEM を充填する。数時間後には、HEM は固体化するとともに膨張圧を発生して、CFRP より線と鋼管スリーブは一体化する。

CFRP より線が破断するまでスリーブから抜け出さないための必要膨張圧として、例えば、50MPa 以上の膨張圧が発生した段階で緊張作業を行うことができ、緊張後、鋼管スリーブ自体はナットで定着する。

本研究に使用した、CFRP より線φ15.2 (7本より線) の特性値を表-1に示す。

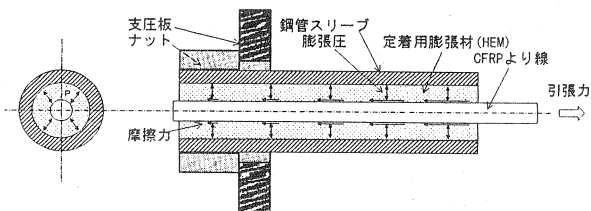


図-1 HEMを用いた緊張定着システム

表-1 CFRPより線φ15.2の特性

直径 (mm)	15.2
有効断面積 (mm ²)	113.6
破断荷重 (kN)	230
弾性係数 (N/mm ²)	137
伸び (%)	1.6

3. 引き抜き試験

3.1 試験概要

CFRP より線φ15.2の定着に必要な膨張圧とスリーブ長の関係を求めるために、膨張圧、スリーブ長をパラメータとして引き抜き試験を行った。膨張圧は、鋼管スリ

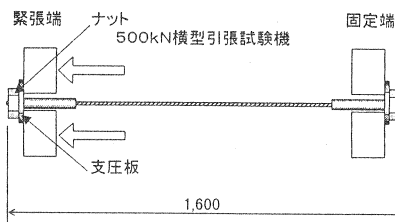


図-2 500kN横型引張試験機

ープ中央に貼付けた直交ひずみゲージのひずみ値を用いて厚肉円筒理論により算出した。

引き抜き試験は、図-2のように500kN横型引張試験機にスリーブ後部をナットで定着してセットし、実施した。

定着具供試体の膨張圧は、10MPa、30MPa、50MPaを設定膨張圧とし、鋼管スリーブ(外径39.0mm、内径23.7mm)のスリーブ長は100mm、165mm、300mmとした。

3. 2 試験結果及び考察

引き抜き荷重TをCFRPより線の有効周長Uとスリーブ長Lで除した値T/UL(いわゆる平均付着強度)と膨張圧pとの関係を図-3に示した。

これらの関係は、Lをパラメータとして直線で近似できる。したがって、この実験結果は、式(1)のように表すことができる。

$$T/UL = \tau + \mu p \quad (1)$$

U: 周長 (63.67 mm)

τ : 付着応力

μ : CFRPより線とHEMとの摩擦係数

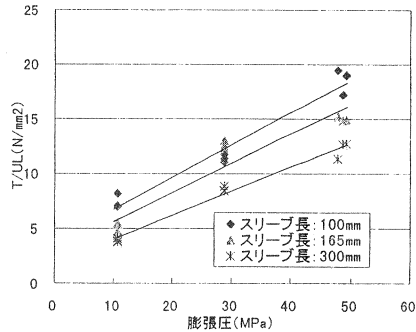


図-3 T/ULと膨張圧の関係

表-2 τ , μ の計算値

L (mm)	τ (N/mm ²)	μ
100	3.767	0.297
165	2.914	0.269
300	1.771	0.221

図-3では、スリーブ長が長い場合と短い場合で直線が異なっており、スリーブ長が長くなるにつれ直線が下方にシフトしている。これは、 $\phi 12.5$ の場合と同様に、スリーブ長が異なれば引き抜け時の機構も異なってくるため、スリーブ長で割って平均付着強度として同一に評価しているからと考えられる¹⁾。各々のスリーブ長Lに対して、 τ , μ を最小二乗法で求めると、表-2のようになる。

この場合、CFRPより線 $\phi 15.2$ の破断荷重230kNに対して、定着に必要な膨張圧を式(1)と表-2を使って求めると、L=165mmの場合71MPa、L=300mmの場合47MPaとなる。これらの結果に基づき、以後の実験では、スリーブ長は300mmとし、膨張圧は50MPaを基本とした。

4. 繰り返し載荷試験

4. 1 試験概要

引き抜き試験の実験結果を基に、スリーブ長さを300mmとし、膨張圧の大きさ、鋼管スリーブとCFRPより線との隙間(クリアランス)が定着機構に及ぼす影響を検討することを目的に、繰り返し載荷試験を実施した。

スリーブのひずみは図-4

に示すようにスリーブ表面に20mm間隔でひずみゲージを貼付け、各荷重段階でのひずみ値を計測した。

供試体は、設定膨張圧を50MPa、100MPaとし、クリアランスが2.8mm、4.3mmとなるように調整した(スリーブの内径はそれぞれ20.7mm、23.7mm、外径はいずれも39.0mm)4種類の供試体を作製した。表-3に供試体の一覧を示す。

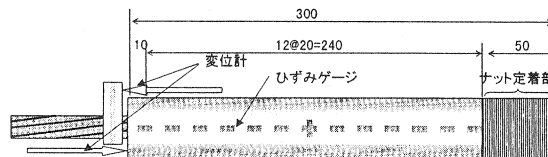


図-4 供試体概略図

表-3 供試体および引張結果一覧

供試体名	クリアランス (mm)	膨張圧 (MPa)		21回目載荷時での破断試験結果
		設定	実際	
CF50-2.8	2.8	50	51.8	236.0kNで引き抜け
CF50-4.3	4.3	50	44.5	240.0で破断
CF100-2.8	2.8	100	90.7	250.0kNで破断
CF100-4.3	4.3	100	86.3	249.5kNで破断

繰り返し載荷試験は、載荷荷重の上限を CFRP より線φ15.2の破断荷重(230kN)の80%とし、載荷および除荷を20回繰り返し、21回目で緊張材の破断または引き抜けるまで載荷した。

4. 2 試験結果及び考察

各供試体の試験時膨張圧と21回目載荷時の破断荷重を表-3に示す。

(1) q分布

スリーブ表面のひずみ測定結果をもとに、スリーブ各点における軸方向の単位長さ当たりのせん断力 q の値を式(2)により求めた。 q は、緊張材に引張荷重を作用させることにより、HEMとCFRPより線との間およびHEMとスリーブ内面との間に、互いに逆方向に等しい大きさで作用することになる。この場合、HEMは緊張材に作用する引張力をスリーブに伝達するためのせん断伝達層と考えている。

$$q_0 = \frac{-3\varepsilon_0 + 4\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2L} E_S A_S$$

$$q_i = \frac{-\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i+1}}{2L} E_S A_S \quad (2)$$

$$q_N = \frac{\varepsilon_{N-2} - 4\varepsilon_{N-1} + 3\varepsilon_N}{2L} E_S A_S$$

- ε_0 : 最も荷重端側のひずみ
- ε_N : 最もナット側のひずみ
- q_0 : 最も荷重端側の q
- q_N : 最もナット側の q
- L : 測定間隔
- E_S : 鋼管スリーブの弾性係数
- A_S : 鋼管スリーブの断面積

図-5、図-6、図-7および図-8は、1回目載荷時の各荷重段階におけるスリーブ長手方向の q 分布である。

本来、膨張圧がスリーブ全長にわたって均一であり、荷重が小さい段階(HEMが弾性的な挙動をする範囲)では、 q のピーク値は荷重端に現れて、荷重端から離れるに従って q の値は急激に減少する。図-5、図-6のように、膨張圧が50MPaの場合には70kN程度まで、図-7、図-8のように膨張圧が100MPaの場合には90kN程度までは、荷重端から50mmの位置において q のピーク値が存在し、荷重端から離れるに従って q の値は急激に減少している。また、50mmの位置で、荷重の増加とともに、 q のピーク値が増加していることがわかる。 q のピーク値が荷重端ではなく、荷重端から50mmの位置に存在するのは、この区間では膨張圧が小さく、0から一定値へ漸増する区間であるからだと考えられる。

載荷荷重がさらに大きくなると、荷重の増加とともに q のピーク値は、ほぼ一定値を保ちながら、後方(定着端側)にシフトしていくことがわかる。 q のピーク位置より荷重端側において、 q の値は徐々に減少しているが、これはHEMが軟化現象を起こしているためと考えられる。 q のピーク値より荷重端側は、いわゆる軟化領域である。

膨張圧が100MPaの場合、 q のピーク値は、50MPaの場合の約1.5倍であり、 q のピーク位置は、荷重端から150mm以内にとどまっており、軟化領域は、50MPaの場合より

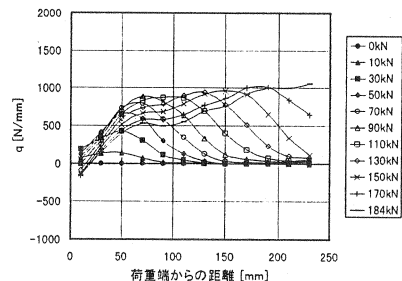


図-5 CF50-2.8の q 分布(1回目)

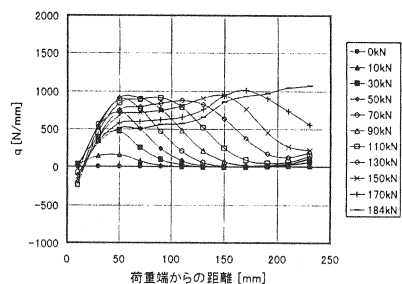


図-6 CF50-4.3の q 分布(1回目)

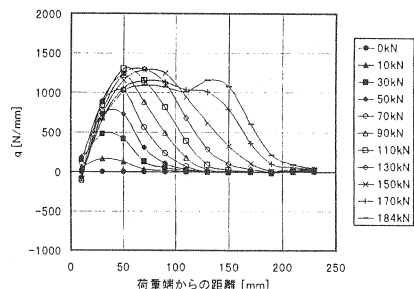


図-7 CF100-2.8の q 分布(1回目)

小さいことがわかる。

クリアランスの影響については、膨張圧が 100MPa の場合、50MPa の場合とともに、 q 分布の形状はほぼ同じであって、クリアランスの違いによる影響は見られない。

以上の結果から、クリアランスの影響よりも、膨張圧の影響が卓越しているといえる。

次に、繰り返し载荷の影響について検討した。図-9、図-10はそれぞれ CF100-2.8 の3回目、21回目载荷時の q 分布である。

繰り返し载荷の場合には、図-9、図-10に示すように、荷重端から 110mm まで、荷重が 0kN から 50kN で q は負の値を示す特徴がある。これは1回目の载荷によって生じた軟化領域はほぼ 110mm まで生じており、この区間において、一旦引き抜け変位を生じた緊張材が、除荷時に元に戻ろうとする変形を膨張圧によって拘束されることによって、载荷時とは逆方向(負)の摩擦抵抗となって残存するためと考えられる。この負の摩擦抵抗は一種のプレストレスと考えられ、“せん断プレストレス”と呼んでいる。

図-9と図-10を比較すると、170kN までの繰り返し载荷では、両者ともに各荷重段階で、ほぼ同じ q 分布の形状を示していることがわかる。この程度の繰り返し载荷では、繰り返し载荷に伴う劣化現象は生じないといえる。

以上の結果は、定性的には $\phi 12.5$ の場合と同様であった。

(2) T_p 分布

CF100-2.8 の場合について、1回目载荷時、3回目载荷時、21回目载荷時のスリーブ内 CFRP より線に作用する緊張力分布 T_p をそれぞれ、図-11、図-12および図-13に示す。

いま、定着具の任意断面において、CFRP より線に作用する力 T_p と鋼管スリーブに作用する力 T_s ($=E_s A_s \epsilon_s$) の和は、荷重 P と釣り合うという条件から、 T_p は式(3)により求められる。

$$T_p = P - E_s A_s \epsilon_s \quad (3)$$

ϵ_s : 鋼管スリーブのひずみ

A_s : 鋼管スリーブの断面積

E_s : 鋼管スリーブの弾性係数

図-11のように、1回目载荷時の T_p は、荷重端側に T_p の最大値があり、緊張力は荷重端から離れるにしたがって急激に減少していく分布性状を示す。当然のことながら、荷重端の T_p は引張荷重に

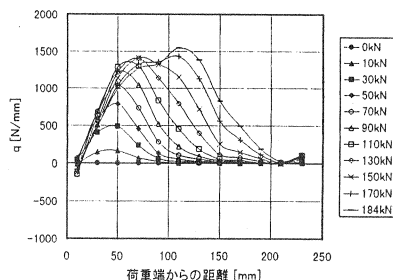


図-8 CF100-4.3の q 分布 (1回目)

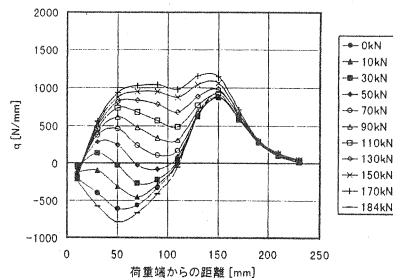


図-9 CF100-2.8の q 分布 (3回目)

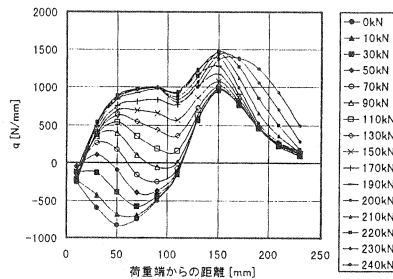


図-10 CF100-2.8の q 分布 (21回目)

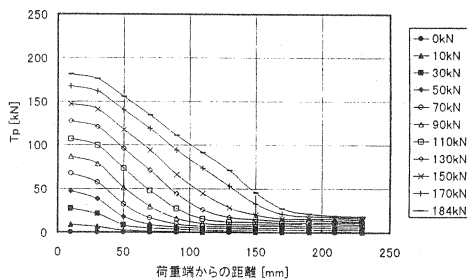


図-11 CF100-2.8の T_p 分布 (1回目)

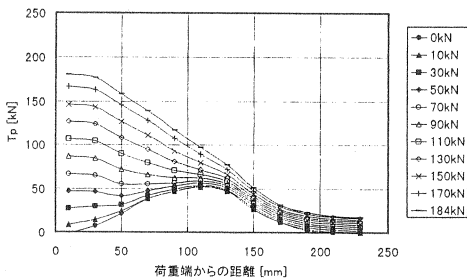


図-12 CF100-2.8の T_p 分布 (3回目)

一致する。

しかしながら、図-12と図-13に示すように、繰り返し载荷によって、50kN~70kN までは荷重端から110mmの位置に T_p のピークが見られる。 T_p のピーク位置は、図-9と図-10で示したように、 q の値が負から正に変化するところと一致する。これは、 T_p の微分が q に等しくなる関係があることから、容易に説明がつく。 q 分布の節で説明したせん断プレストレスは、このように残存緊張力として作用することになるが、ほぼ残存緊張力の大きさ(約60kN)に相当する以上の引張荷重が作用した段階で、 T_p のピークは見られなくなる。

(3) $q-\gamma$ 関係

単位長さあたりのせん断力 q によって、HEMはせん断変形を生じる。このせん断変形量をせん断ひずみ γ として表した。図-14に示すように、 γ はスリーブとCFRPより線の相対せん断ひずみであり、式(4)によって求められる。

$$\gamma = \frac{W_s - W_p}{h} \quad (4)$$

ここに、 W_s および W_p はそれぞれ鋼管スリーブおよびCFRPより線の変位で、 h は定着用膨脹材の厚さである。 W_s は鋼管スリーブ表面のひずみを固定端から積分し、 W_p については式(3)により算出された T_p からCFRPより線のひずみを算定し、同様に積分することで得られる。

$q-\gamma$ 関係は、HEMをせん断伝達層と考えたときのせん断ばね特性を表す。 $q-\gamma$ 関係が、スリーブの各位置においてどのような挙動を示すかを検討した。

図-15、図-16および図-17は、CF100-2.8のそれぞれ荷重端から30mm、70mmおよび150mmの位置における $q-\gamma$ 関係を示した。いずれも0kNから184kNの载荷-除荷の20回繰り返すと、21回目でのケーブル破断までの载荷過程における $q-\gamma$ 関係である。

図-15、図-16において、荷重端から30mm、70mmでは、 q がピークに達するまでは、 $q-\gamma$ 関係は、ほぼ線形的に挙動している。 q のピークに達するあたりから勾配が緩やかになり、ピークに達した後は、 q が徐々に低下しながら γ も大きく増加している。この領域が軟化領域である。軟化領域で除荷後、再

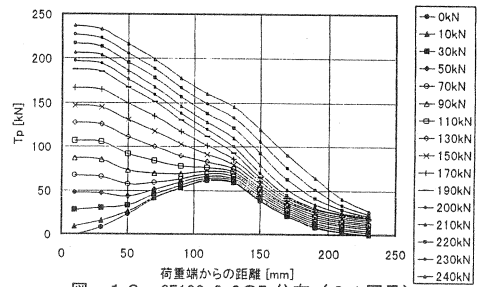


図-13 CF100-2.8の T_p 分布 (21回目)

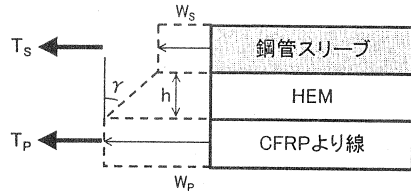


図-14 定着具の変形状態

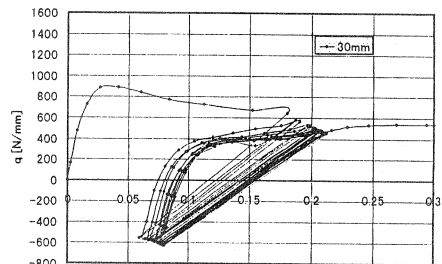


図-15 CF100-2.8の $q-\gamma$ 関係 (30mm)

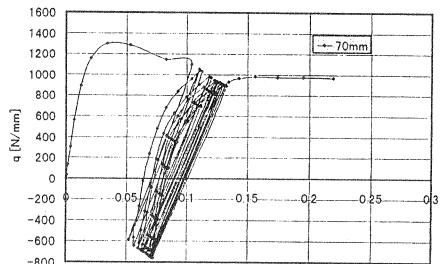


図-16 CF100-2.8の $q-\gamma$ 関係 (70mm)

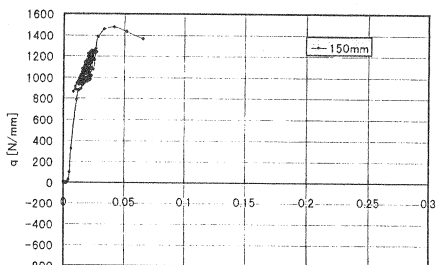


図-17 CF100-2.8の $q-\gamma$ 関係 (150mm)

載荷時の $q-\gamma$ 関係は、ほぼ線形的に立ち上がり、その勾配は、処女載荷時の勾配とほぼ同じである。この場合、繰り返しにもなる載荷時の勾配に変化は見られない。図-17に示すように、荷重端側から150mm位置においては軟化領域が見られず、繰り返し載荷時には、弾性的な挙動を示している。この直線勾配も、図-15、図-16における q の値が小さい段階での $q-\gamma$ 関係の直線勾配とほぼ同じである。しかしながら、 q のピーク値は、荷重端に近いほど小さくなっている。これは、膨張圧の大きさに関係していると考えられる。基本的に、膨張圧が同じであれば、 $q-\gamma$ 関係で表される HEM のせん断バネ特性は位置によらず同じ特性を示すものと考えられる。したがって、膨張圧の大きさに対応する $q-\gamma$ 関係を求めれば、解析的に引き抜き荷重等のシミュレーションが可能となる。

5. 結論

HEMを用いてCFRPより線φ15.2を定着した定着具に関する基礎実験より、得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 引き抜き試験により、平均付着応力 T/UL と膨張圧 p は、CFRPより線φ12.5の場合と同様に比例関係であり、 $T/UL = \tau + \mu p$ で表される。
- (2) CFRPより線φ15.2の破断荷重を230kNとした場合、破断までに抜け出さないための必要膨張圧は、スリーブ長165mm、300mmに対し、それぞれ71MPa、47MPaとなる。これより、スリーブ長300mm、膨張圧50MPaを標準とした。
- (3) スリーブ内に作用する単位長さあたりのせん断力 q 分布や緊張力 T_p 分布を調べることによって、定着機構を検討できた。
- (4) 膨張圧が高い方が、軟化領域も小さくより安定した定着ができる。この場合、膨張材の充填隙間(クリアランス)が、2.8mmと4.3mmでは、定着機構に及ぼす影響は見られなかった。
- (5) 繰り返し載荷によって、スリーブ内部に“せん断プレストレス”(残存緊張力)が生じる。これは、膨張圧の作用によるものである。
- (6) HEMは、緊張材に作用する引張力を鋼管スリーブに伝達するためのせん断伝達層として働き、そのせん断バネ特性は、 $q-\gamma$ 関係によって表すことができる。
- (7) 以上の実験的な検討から、基本的にはφ12.5と同様な挙動であり、φ12.5の場合の定着具の設計に関する考え方を適用できることがわかった。

参考文献

- 1) 原田哲夫・出光隆・Myo Khin・副田孝一・渡辺明：定着用膨張材による連続繊維緊張材の定着に関する研究，土木学会論文集 No.627/V-44, 77-90, 1999.8
- 2) 福田修二・原田哲夫・永藤政敏：定着用膨張材によるPC緊張材の定着と継手に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol21, No.3, 379-384, 1999