

## 論文 定着法の違いが CFRP より線の疲労性状に及ぼす影響について

久保田 慶太\*1・原田 哲夫\*2・添田 政司\*3・木村 浩\*4

**要旨** : CFRP より線のような連続繊維緊張材の定着には、定着用膨張材を用いる定着法 (HEM 定着法) やエポキシ樹脂定着法が開発され用いられている。HEM 定着とエポキシ樹脂定着とでは、CFRP より線の静的引張強度には定着法による差はみられない。しかし引張疲労試験を行った結果、CFRP より線の疲労特性は、HEM 定着の方が格段に向上することが分かった。本研究ではこの理由について、定着体内部の応力状態と温度上昇の観点から検討を行った。

**キーワード** : 疲労, CFRP より線, HEM 定着法

## 1. はじめに

CFRP より線のような連続繊維緊張材を定着するには、定着法に工夫を要する。それは、CFRP より線は一方方向性材料であって局所的な支圧やせん断に対して弱いため、従来の PC 鋼材に用いられる定着法では、定着することが困難なためである。そこで、エポキシ樹脂定着法や HEM 定着法が開発され使用されている。HEM 定着法は、鋼管スリーブ(外径 45mm 内径 25mm 肉厚 10mm)と CFRP より線の間 HEM スラリーを充填後、HEM の硬化膨張によって発生する 50MPa 以上の高膨張圧と液圧の圧力伝播特性によってソフトタッチに定着できる定着法である。これまでの研究では、CFRP より線の静的引張強度には、エポキシ樹脂定着法と HEM 定着法による差は見られなかった。しかしながら、CFRP より線 ( $\phi 12.5$ ) の引張疲労試験結果では HEM 定着の方がエポキシ樹脂定着に比べ、CFRP より線の疲労特性が格段に向上することが分かっている。<sup>1), 2)</sup>

本研究では、まず CFRP より線 ( $\phi 15.2$ ) の場合にも上記と同様に、定着法の違いによって疲労特性に違いがでてくるのかを検討した。次

に定着法の違いによって疲労特性が異なってくる理由について、定着部内の応力状態と摩擦熱による温度上昇の観点から考察を行った。

## 2. 実験方法

本研究では、静的繰返し試験と、引張疲労試験を行った。静的繰返し試験は、定着体を 2000kN 万能試験機にセットし、CFRP より線の引張強度の 80%、5%の間で 20 回の静的繰返し試験を行った。また、各荷重段階において、定着体鋼管スリーブ表面に 20mm 間隔で添付したひずみゲージよりひずみ値を測定した。

引張疲労試験は、各定着体をより戻り防止器具のついた 500kN 油圧サーボ制御引張疲労試験機にセットして行った。引張疲労試験を行う前に、静的に 10 回の繰返し载荷を行っている。引張疲労試験の载荷条件は、平均応力を CFRP より線の破断荷重の 60%~80%、応力範囲を破断荷重の 10%~40%に設定した。繰返し速度は、1.5Hz~2.5Hz、繰返し回数は 200 万回を上限とした。また、所定のサイクルで試験機を止め、上限設定荷重まで静的に载荷し、静的引張試験と同様にひずみ値を測定した。

- 
- |                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| *1 長崎大学大学院 生産科学研究科 博士後期課程       | (正会員) |
| *2 長崎大学 工学部構造工学科 教授 工学博士        | (正会員) |
| *3 福岡大学 工学部資源環境・循環グループ 助教授 工学博士 | (正会員) |
| *4 東京製綱株式会社 研究所 担当課長 工学博士       | (非会員) |

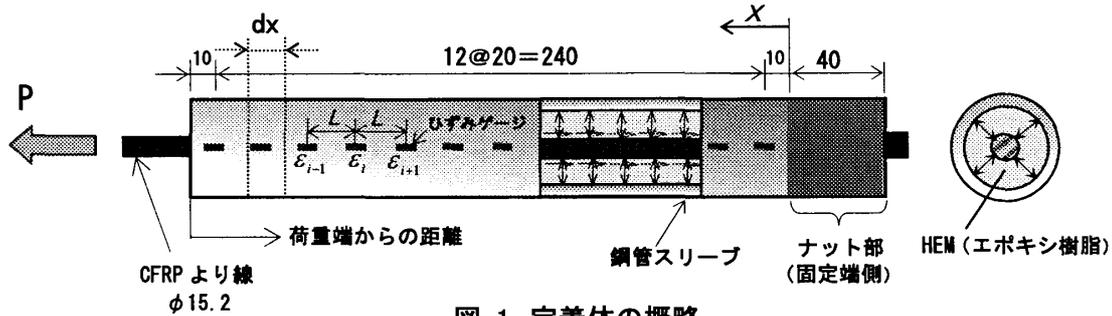


図-1 定着体の概略

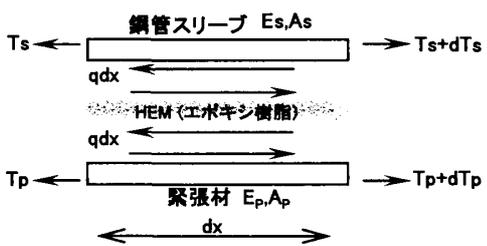


図-2 dx部分の微小要素モデル

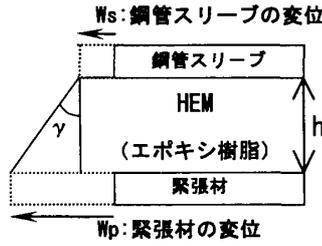


図-3 定着体の変形状態

- $E_s$  ; 鋼管スリーブのヤング係数
- $A_s$  ; 鋼管スリーブの断面積
- $E_p$  ; CFRPより線のヤング係数
- $A_p$  ; CFRPより線の断面積
- $L$  ; ゲージ測定間隔 (20mm)
- $h$  ; HEM, エポキシ樹脂の厚さ
- $\varepsilon_{si}$  ; 荷重端から  $i$  番目のひずみ値 ( $i=0 \sim N$ )

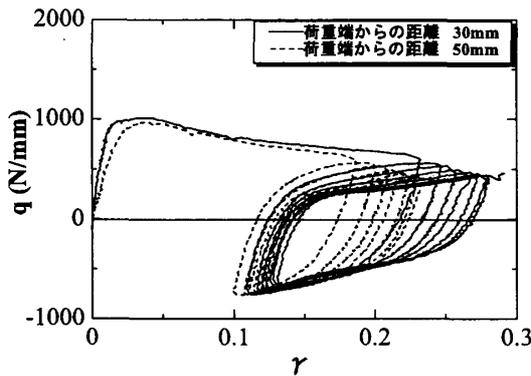


図-4 HEM 定着 q~γ 曲線

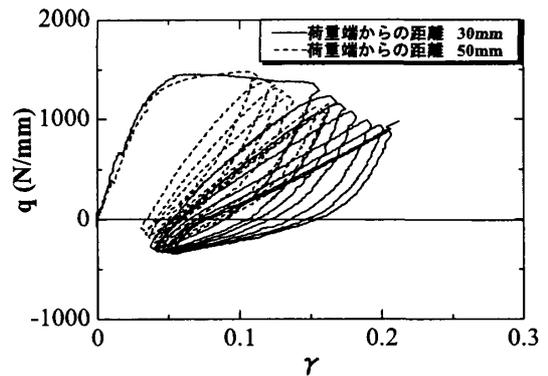


図-5 エポキシ樹脂定着 q~γ 曲線

### 3. 静的繰返し試験

#### 3.1 定着体内部の力の伝達機構

HEM 定着の概略を図-1 に示す。CFRP より線に引張力が作用した場合、微小部分  $dx$  における鋼管スリーブ、HEM、CFRP より線間に働く力は図-2 のように示される。HEM はせん断伝達バネと考え、

$$q = \frac{-\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i+1}}{2L} E_s A_s \quad (1)$$

$$w_{s(p)} = \int_0^x \varepsilon_{s(p)} dx \quad (2)$$

$$T_{pi} = P - E_s A_s \varepsilon_{si} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{w_p - w_s}{h} \quad (4)$$

単位長さ当たりのせん断力  $q$  によって CFRP より線に作用する引張力が鋼管スリーブに伝達される。このときの変形状態は、図-3 のような状態を仮定している。 $q$  の値はスリーブ表面の測定されたひずみ値  $\varepsilon_{si}$  ( $i$  番目) を用いて式(1) (中心差分の公式) より算出できる。 $w_s$  は鋼管スリーブ表面のひずみ  $\varepsilon_s$  を固定端側から積分し、式(2)より求められる。また  $w_p$  は式(3)の力のつり合い式より  $\varepsilon_p$  を求め、式(2)と同様に計算できる。せん断変形角  $\gamma$  は式(4)より定義した。

エポキシ樹脂定着法では、エポキシ樹脂がきちんと充填できるように、CFRP より線の先端部分をほどこいた状態で定着している。しかし、CFRP より線全体の形状は棒状とみなしてよく、データ整理は HEM 定着法と同様に行った。

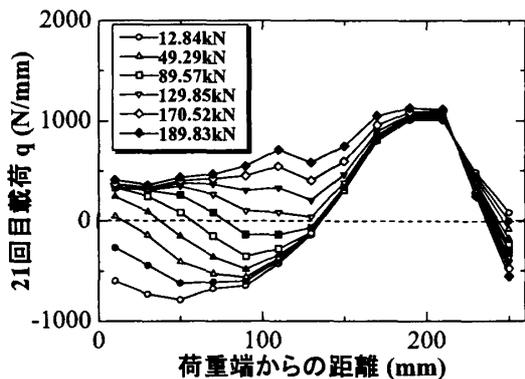


図-6 HEM 定着 q 分布(21 回目載荷)

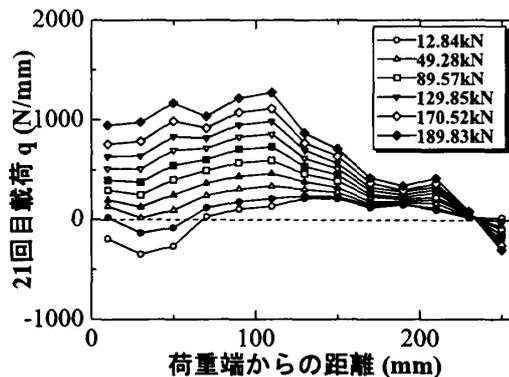


図-7 エポキシ樹脂定着 q 分布(21 回目載荷)

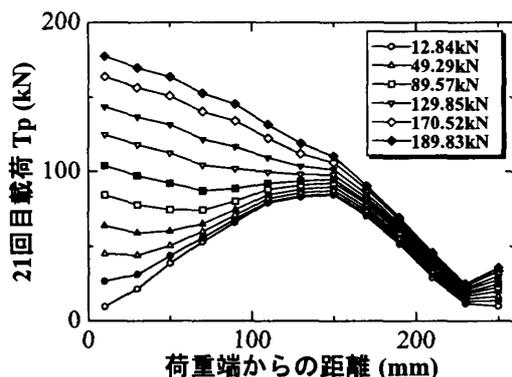


図-8 HEM 定着 Tp 分布(21 回目載荷)

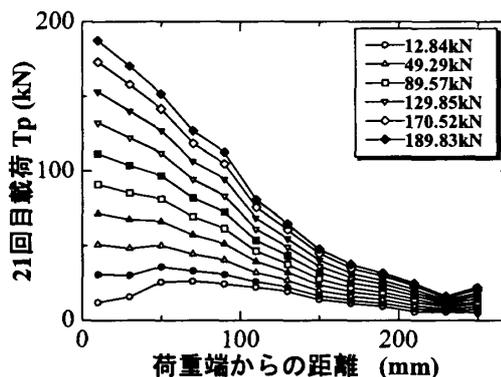


図-9 エポキシ樹脂定着 Tp 分布(21 回目載荷)

### 3.2 実験結果と考察

#### (1) $q \sim \gamma$ 関係

HEM 定着, エポキシ樹脂定着の場合の  $q \sim \gamma$  関係をそれぞれ図-4, 図-5 に示す。HEM 定着の場合の  $q \sim \gamma$  曲線ではヒステリシスループの形状がほぼ一定であるのに対して, エポキシ樹脂定着では, 繰返し回数が増加するごとに  $q \sim \gamma$  曲線の載荷時の傾きが小さくなっていることが分かる。これは, HEM 定着では膨張圧が継続的に作用しているために, 繰返しにともなう HEM のせん断伝達バネとしての剛性低下が起こりにくくなっているからと考えられる。一方のエポキシ樹脂定着の場合には, 膨張圧の作用はなく, 繰返しにともなってせん断伝達バネとしてのエポキシ樹脂層の剛性が低下しているからと考えられる。

#### (2) $q$ 分布および $T_p$ 分布

図-6, 図-7 にはそれぞれ HEM 定着, エポキシ樹脂定着の場合の 21 回目載荷時の  $q$  分布を示した。HEM 定着では, 低荷重時に荷重端か

ら約 130mm の位置までは負の領域が現われているが, エポキシ樹脂定着の場合は顕著には現われていない。

図-8, 図-9 には定着体内部の CFRP より線に作用する引張力  $T_p$  の分布を示した。 $T_p$  の値は式(3)より求めた。図-8 では,  $T_p$  のピークが 130mm あたりにあることが分かる。 $T_p$  のピーク位置は, 図-6 の  $q=0$  の位置とほぼ一致している。これは, 図-2 から分かるとおり,  $q = -dT_p/dx$  の関係があるからである。一方, エポキシ樹脂定着の場合には, このような顕著なピークは観察されない。HEM 定着に見られる上記の特徴は, 次のように考えられる。すなわち, 引張荷重が作用しても膨張圧の低下がないため, 荷重端側へ引き抜けた変位が, 除荷過程において元に戻ろうとする際に, 膨張圧によって拘束されるために, CFRP より線表面には, 逆のずれ抵抗すなわち負の摩擦力が作用するからと考えられる。繰返し載荷によって負の摩擦力が定着体内部に残存することが HEM 定着の大きな特徴である。

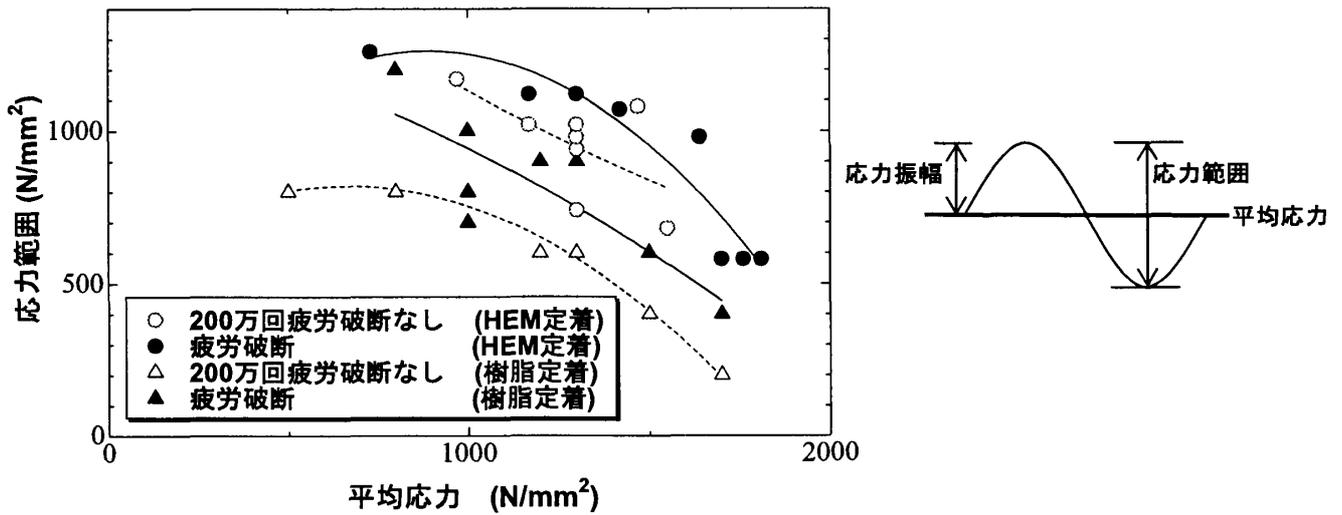


図-10 引張疲労試験結果

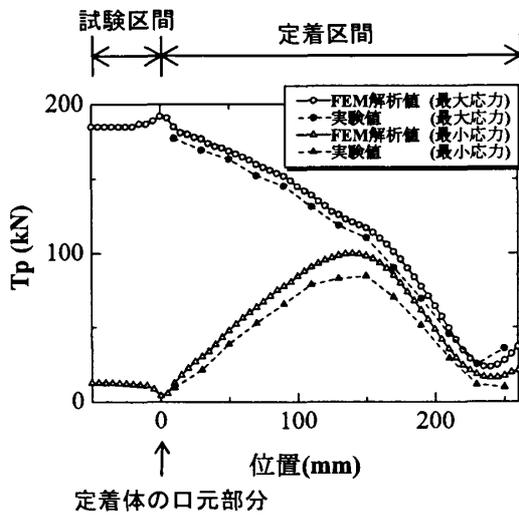


図-11 HEM 定着 Tp 分布 (実験値と解析値の比較)

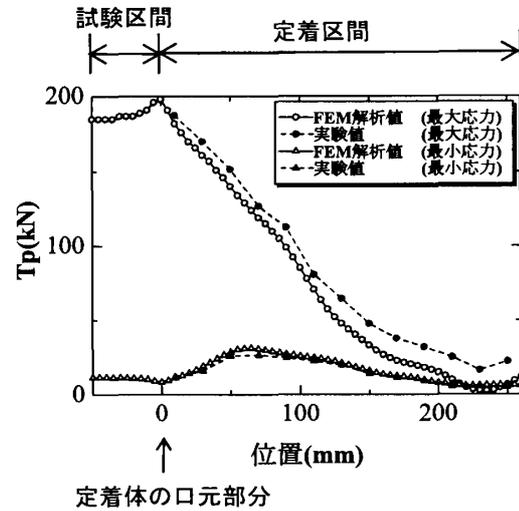


図-12 エポキシ樹脂定着 Tp 分布 (実験値と解析値の比較)

#### 4. 引張疲労試験結果

図-10 には、CFRP より線 (φ15.2) を HEM 定着およびエポキシ樹脂定着した場合の引張疲労試験結果を、平均応力と応力範囲の関係で示す。平均応力  $1300\text{N/mm}^2$  のとき、HEM 定着の方がエポキシ樹脂定着よりも 200 万回で疲労破断しないための応力範囲はおよそ  $400\text{N/mm}^2$  高いことが分かる。このことは、φ12.5 の CFRP より線の場合と同様であった。<sup>1)</sup>この試験結果からも定着法の違いによって、CFRP より線の疲労特性が異なってくることが確認できた。この理由については 5 章で考察する。

なお、斜張橋などの実構造物に用いられる PC 鋼より線の安全係数を見込んだ許容応力範囲

は、 $200\text{N/mm}^2 \sim 400\text{N/mm}^2$  とされている。図-10 より、疲労破断しない応力範囲は、平均応力  $1300\text{N/mm}^2$  のとき HEM 定着の場合  $1000\text{N/mm}^2$  であり、CFRP より線を HEM 定着し実構造物に適用した場合には、疲労設計上の問題はないものと思われる。

#### 5. 定着法の違いが CFRP より線の疲労特性に及ぼす影響に関する考察

##### 5.1 CFRP より線の応力

静的繰返し試験では、HEM 定着とエポキシ樹脂定着とでは定着体内部の応力状態が異なることが分かった。このような定着体内部の応力状態の違いが、定着区間以外の CFRP より線

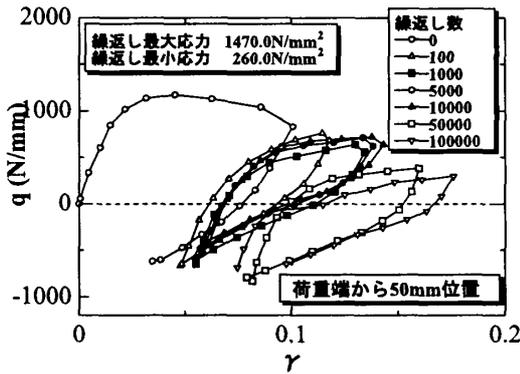


図-13 HEM 定着 q~γ 曲線

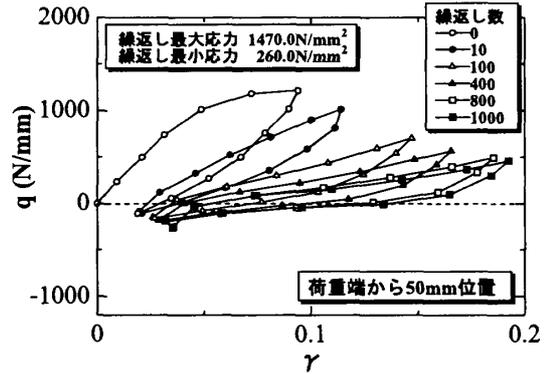


図-14 エポキシ樹脂定着 q~γ 曲線

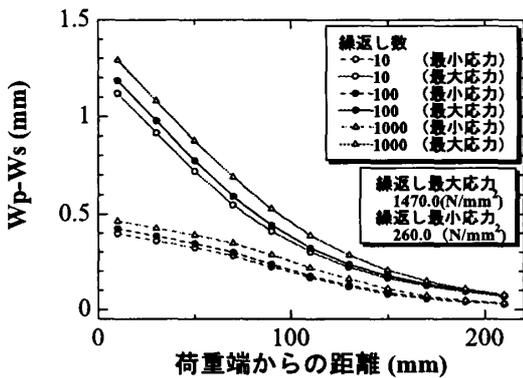


図-15 HEM 定着 相対変位分布

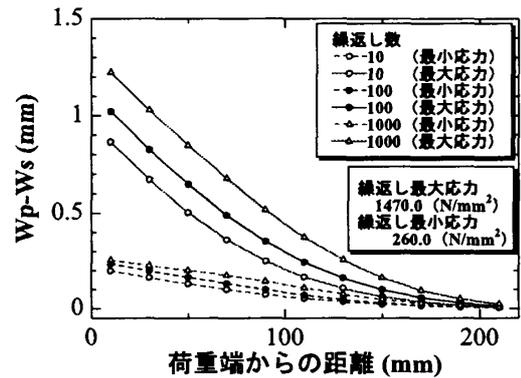


図-16 エポキシ樹脂定着 相対変位分布

(試験区間)に何らかの影響を与え、疲労特性に影響を及ぼしているかどうかを検討するために構造解析汎用ソフトを用いて FEM 解析を行った。ここでは、3次元弾性体としての応力解析を行った。

荷重状態は、HEM 定着の場合に、膨張圧と上限荷重時および下限荷重時の実験結果から得られた q 分布をせん断応力として定着体内部の CFRP より線表面部に作用させ、ロッド部の先端には上限荷重時および下限荷重時の軸方向応力を作用させた。一方、エポキシ樹脂定着の場合の作用荷重は、膨張圧を作用させない以外は HEM 定着の場合と同様である。この場合、CFRP より線は一方向性材と仮定している。図-11、図-12 には、FEM 解析によって求められた Tp 分布を示す。解析結果は、実験で求めた定着体内部の Tp 分布とよく合致していることが分かる。しかし、いずれの場合も、CFRP より線の定着体の口元部分でわずかな応力集中が見られるものの、このことが疲労特性に影響を及ぼす要因としては考えにくい。

## 5.2 定着体の温度上昇の影響

図-13、図-14 に疲労試験から得られた q~γ 曲線を示す。エポキシ樹脂定着の場合、静的繰返し試験と同様に、繰返し回数の増加に伴って、q~γ 曲線の傾きが変化しており、定着体内部のせん断伝達バネとしてのエポキシ樹脂の特性が変化していることが考えられる。

HEM 定着の場合、ヒステリシスループの形状は、繰返し回数が増加してもあまり変化していないことが分かる。エポキシ樹脂の場合には、図-14 に示すようにせん断伝達バネの剛性が低下することにより、定着体内部の相対変位も大きくなり、定着体内部で繰返し载荷による摩擦熱が発生することが推察される。

図-15、図-16 に HEM 定着、エポキシ樹脂定着の場合の定着体内の上限荷重時、下限荷重時の相対変位分布を示す。繰返し回数が増加するにつれて相対変位幅は、エポキシ樹脂定着の場合の方が HEM 定着に比べてしだいに大きくなっていることが分かる。摩擦熱の発生は当然のことながら相対変位幅が大きい方が大きい。こ

ここでは、荷重速度による温度上昇の影響を極力取り除くために、荷重速度は 2.0Hz とした。

次に定着体の各部分における温度測定結果をそれぞれ図-17, 図-18 に示す。図-19 には、CFRP より線、鋼管スリーブ表面の温度測定位置を示した。ここでの相対温度とは、試験体の測定温度から室温を差し引いた値とした。図-17, 図-18 から、エポキシ樹脂定着の場合、繰返し回数 1000 回目において CFRP より線の口元部分で 80°C に達している。一方、HEM 定着では高々 36°C でこのような高温にはなっていない。

上記のように応力範囲が  $1210\text{N/mm}^2$  では、エポキシ樹脂定着の場合、温度上昇が HEM 定着の場合より著しいことが確かめられた。このような著しい温度上昇が、CFRP より線のマトリックス樹脂の特性を変化させ、結果的に CFRP より線の疲労特性に悪影響を及ぼしていると考えられる。平均応力が高い領域では応力範囲が小さいために定着体の相対変位幅が小さく、摩擦熱の発生も小さく抑えられるために定着法の違いによる差は小さくなると考えられる。

## 6. 結論

- (1) CFRP より線  $\phi 12.5$ ,  $\phi 15.2$  の引張疲労試験の結果、平均応力が  $1300\text{N/mm}^2$  以下では、定着法の違いが顕著に現れる。
- (2) HEM 定着の場合、膨張圧が継続的に作用しているため、せん断伝達バネの剛性低下がなく、また、繰返し荷重に伴って負の摩擦力が残留し、相対変位幅が小さく抑えられる。一方、エポキシ樹脂定着では、せん断伝達バネの剛性が低下することで、相対変位幅が大きくなる。
- (3) エポキシ樹脂定着の場合、相対変位幅が大きくなることによって、口元部分では温度上昇は 80°C に達する。このことが CFRP のマトリックス樹脂の特性を変化させ、CFRP より線の疲労特性に悪影響を及ぼしていると考えられる。

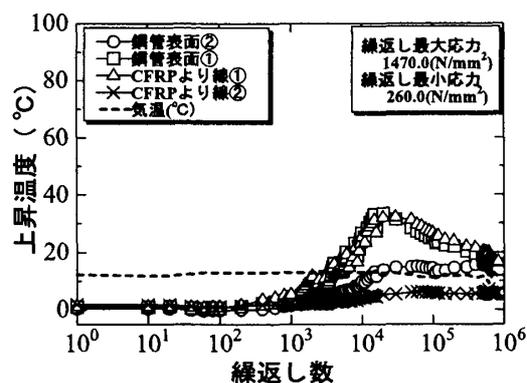


図-17 HEM 定着体の上昇温度

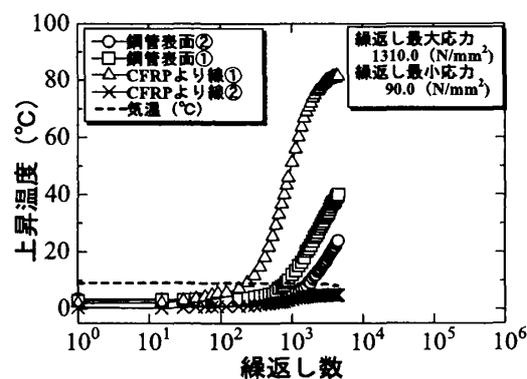


図-18 エポキシ樹脂定着体の上昇温度

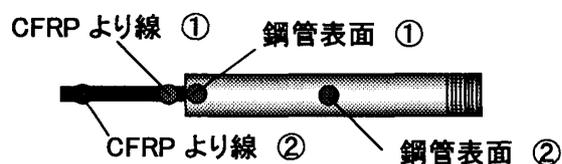


図-19 定着体の温度測定位置

## 参考文献

- 1) T. Harada, M. Soeda, T. Enomoto, S. Tokumitsu, Myo Khin, T. 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, 719-726, Oct.1997
- 2) T. Harada, N. Sakaue, H. Kimura, Myo Khin, T. Enomoto, M. Soeda : Development of HEM Anchorage System for Cable Stayed Bridge Using Multiple CFRP Strands, Proceedings of the first fib congress, Vol.6, pp.283-290, Oct.2002