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 より線は一方向性材料であって局部的な支圧や 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 より線の間に 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的圧力伝播特性に 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 (φ12.5) 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。^{1), 2)}

本研究では、まず CFRP より線(φ15.2)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回の繰返し載荷を行っている。引 張疲労試験の載荷条件は,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載荷し,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)



-1000

0



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,

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

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

$$T_{pi} = P - E_s A_s \varepsilon_{si} \tag{3}$$

$$\gamma = \frac{w_p - w_s}{h} \tag{4}$$

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

Y

図-5 エポキシ樹脂定着 q~γ曲線

0.2

0.3

0.1

いる。qの値はスリーブ表面の測定されたひずみ 値 ε_{s_i} (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 ε_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 ε_p を求め,式(2)と同様に計算できる。せん断変形 角y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。



3.2 実験結果と考察

q~γ関係

HEM 定着, エポキシ樹脂定着の場合の q~γ 関係をそれぞれ図-4, 図-5 に示す。HEM 定着 の場合の q~γ 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~γ 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 Tp 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



図-7 エポキシ樹脂定着 q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)

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 Tp の分布を示した。Tp の値は 式(3)より求めた。図-8 では、Tp のピークが 130mm あたりにあることが分かる。Tp 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 = -dTp / 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。





(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 1300N/mm²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 400N/mm² 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あった。¹⁾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



図-12 エポキシ樹脂定着 Tp 分布 (実験値と解析値の比較)

は、200N/mm²~400N/mm²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 1300N/mm²のとき HEM 定着の場合 1000N/mm² 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



(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 の定着体のロ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ともな 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載荷による摩擦 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 こでは、載荷速度による温度上昇の影響を極力 取り除くために、載荷速度は 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℃に達している。一方,HEM 定着では 高々36℃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 1210N/mm²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 φ 12.5, φ 15.2 の引張疲労試 験の結果,平均応力が1300N/mm²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,繰返し載荷に伴って負の摩 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℃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-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