

# 橋梁付属物のライフサイクルコスト低減に関する研究

研究代表者 研究員 平野 廣和 (中央大学総合政策学部)

## 1 はじめに

ライフサイクルコスト低減への関心などにより、構造物は建設費の見地から所定の機能を果たせる寿命(可使用)や維持管理コストを考慮した総合的な評価に変化している。新規に設置する付属構造物の設計に関しては、最新のコンピュータ技術や構造解析技術を取り入れることにより、静的な照査による設計から動的な照査を含めた構造設計手法へと改善されつつある[1]。これに対して既設の付属構造物の耐久性や寿命を延ばすことに関しては、供用下での現場施工を前提とすることから、色々な制約条件下において設計段階から照査をする必要がある。例えば常時の交通振動を考慮すること、大幅な構造変更を伴わないこと、大規模な補強や部材交換ではなく局部的な補修や構造改善により対応できる材料の選択などである。さらに、これらの条件を加味した上でコストパフォーマンスに優れた材料と施工方法を選択することが必要である。このため、既存の標識柱や照明柱の補強手法が各分野で検討されはじめている。例えば、新しい素材であるカーボン系繊維やアラミド系繊維などの繊維強化プラスチック(FRP)を巻き付けてこれを樹脂で固める方法[2],[3]などが最近提案されている。これらの材料を用いた補強・補修方法は、汎用性、強度、耐食性などの長所によって土木構造物としての用途が注目されつつある。しかし、現場施工を行う場合、現場配合時の臭気、硬化所要時間の長さ、振動下での作業性と品質確保に課題があるなど、供用下の橋梁で施工するには解決すべき問題点が多く残されている。これらを解決すべく、紫外線で硬化する弱臭気性の樹脂シートである紫外線硬化樹脂を用いて短時間で補強・補修ができる施工方法[4],[5]を既に提案している。

そこで本報では、その補強・補修効果を確認するために、複数の供試体を用いて疲労試験を行い、鋼構造の疲労設計指針[6]で示されている疲労等級の分類を考慮し、計測したデータと重ね合わせる。これにより補強することで、き裂が進展して供試体が破壊に至るまでの繰り返し回数を延ばす延命効果が得られるかを検証する。

## 2 疲労試験概要

紫外線硬化型樹脂(以下、UV-FRPと称す)による補強効果を確認するために、実大モデルによる疲労試験を行

う。実物大モデルにおいて疲労試験を行うには、本来は図1に示すF型標識柱を直接荷重して疲労試験を行うことが望ましいが、き裂の急激な進展による倒壊等の事故防止のために、高さ1,500mmの基部のみの部材を必要数製作し、全体モデル加振実験で得られた基部応力発生状態を再現させて試験を行う。

### 2.1 供試体

疲労試験に用いる供試体は、図1に示す標識柱の基部1,500mmとする。試験荷重装置の概念図を図2に示す。図1に示す標識柱の基部から高さ1,500mmのところを上下に分離し、図2に示すように基部のみの供試体に250kN動的アクチュエータを用いて一定推力の往復運動を与える。ところで、F型標識柱全体の振動特性を考えると、横に張

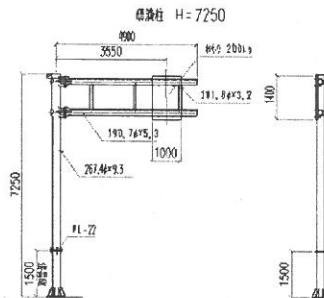
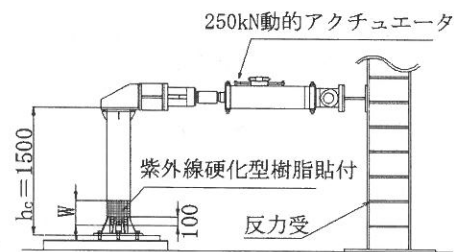
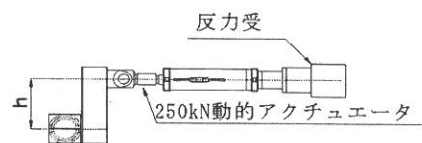


図1 F型標準標識柱モデル



(a) 側面図



(b) 平面図

図2 疲労試験荷重装置

表 1 供試体諸元

基部供試体高さ：h (mm)	1500
鋼管の外径：D (mm)	267.4
鋼管の板厚：t (mm)	9.3
基部のリブ高さ：hs (mm)	200
基部のリブ幅：Ws (mm)	100
単位質量：kg/mm <sup>3</sup>	8.02×10 <sup>-10</sup>
弾性率：GPa	210
ポアソン比	0.3

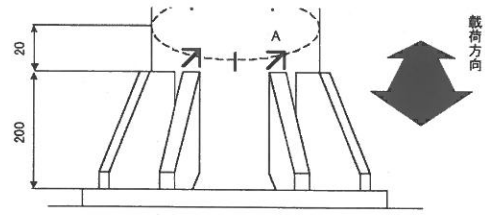


図 3 ひずみゲージ位置

表 2 紫外線硬化型樹脂 (UV-FRP) の材料特性

シートの厚さ (mm)	1.5
単位重量 (kg/m <sup>2</sup> )	2
ガラス含有量 (wt%)	25
ヤング率 (Gpa)	7.3
ポアソン比	0.1
引長強度 (Mpa)	75.8
引長伸び率 (%)	21
アイゾット衝撃値 (kJ/m <sup>2</sup> )	53

表 3 加振条件と供試体数

荷重レベル	想定ひずみレベル	無補強供試体	FRP 補強供試体
±33kN	±600μ	4 本	3 本
±42kN	±800μ	4 本	3 本
±52kN	±1000μ	4 本	3 本

り出している標識部分の影響は実測値からもあきらかなように無視できないことから、1,500mm サイズの供試体において応力状態を再現するために図 2(b) に示すように供試体上部に偏心载荷する。実験手順としてまず、無補強供試体について疲労試験を行う。次に、UV-FRP で補強した供試体で疲労試験を行い、比較、検討を行う。UV-FRP による貼付補強は、既往研究 [4] で最も効果が得られたリブ上端より上 200mm、下 100mm の合計 300mm の 2 重巻きを用いた。試験供試体の諸元を表 1 に、UV-FRP の材料特性を表 2 に示す。

## 2.2 偏心量

疲労試験に用いる偏心量は、既往研究 [7] である標識柱全体モデルの加振実験における自由振動による特性試験で得られた、曲げとねじりの応力状態を供試体で再現させることを目的として設定する。具体的には図 3 に示す供試体のひずみゲージの曲げとねじりの値が、図 1 の全体モデルである標識柱のひずみゲージにおけるそれぞれの値と同じ発生比率となるように偏心量を調整した。調整の結果、図 2(b) に示すように 250kN 動的アクチュエータの载荷点偏心量 h=590mm を設定した。

## 2.3 加振条件

疲労試験供試体の降伏ひずみを求め、疲労試験に用いる振幅と荷重を決定する。まず静的な状態における特性試験として無補強の供試体を用いて水平力载荷試験を行い、疲

労試験供試体の降伏ひずみを求め、疲労試験に用いる荷重と加振振幅を決定する。試験装置は疲労試験で用いる図 2 の装置を利用した。ところで疲労試験に用いる荷重は、補強による疲労耐久性の向上を調べるために、供試体に対して過大な影響を与えない荷重にしなければならない。そのため降伏荷重の約 1/3 の 30kN ~ 50kN とその時の片振幅約 8mm ~ 12mm、2Hz の一定振動を両振りで与えることを疲労試験の条件とする。加振装置の制御方式が変位一定方式である場合、き裂が発生した瞬間に荷重低下を招き実際の挙動と異なったものになるため、本試験では荷重一定方式を採用した。

## 2.4 実験計測方法

荷重は表 3 に示す繰り返し荷重 ±33kN、繰り返し荷重 ±42kN、繰り返し荷重 ±52kN の 3 種類を想定し実験を行う。データとしては供試体基部周辺 (鋼管内側表面と鋼管外側表面) に取り付けられたひずみゲージからひずみ量を測定し、アクチュエータから変位および荷重を読み取る。ところで、本実験で使用するひずみデータは、UV-FRP 貼付補強を行う補強実験においては供試体の外側にひずみゲージを貼り付けられないため、無補強、補強供試体ともに供試体の内側にゲージを貼り付けて、これを主としてこの値を読み取り比較することにする。疲労試験のデータは、基本的に 20 分間隔で荷重とひずみを自動計測し、き裂発生回数近傍ではひずみの挙動を細かく把握するため 10 分間隔で自動計測した。データは加振しているときに最もひずみの量が大きい値に着目した。

## 3 実験結果と考察

本実験では、供試体基部には 8 枚のリブが付いているため、リブ上端部の応力分布がそれぞれ異なり、一定の応力を把握することが難しい。そのため、疲労曲線の縦軸を応力レベルではなく荷重レベルで表記することにする。

疲労曲線を図 4 に示す。縦軸に荷重、横軸に繰り返し回数を取り、片対数のグラフにしたものである。この図より、無補強と補強の疲労曲線を近似直線で求めると、

$$\text{無補強} \quad Y = -10.004 \log 10X + 151.59$$

補強  $Y = -9.552 \log 10X + 149.35$

となる。これより、近似直線が無補強と比べ補強は、右へ平行移動し、疲労寿命が改善されている。この結果、供試体の応力集中部であるリブの周辺に UV-FRP を巻くことで、繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  では 1.5 倍、繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  では 1.6 倍程度の疲労寿命の延命効果が期待できることがわかる。ただし、繰り返し荷重  $\pm 52\text{kN}$  では、水平力載荷試験で得られた降伏荷重の 1/3 を超えていることから、補強効果を十分に確認することができなかった。

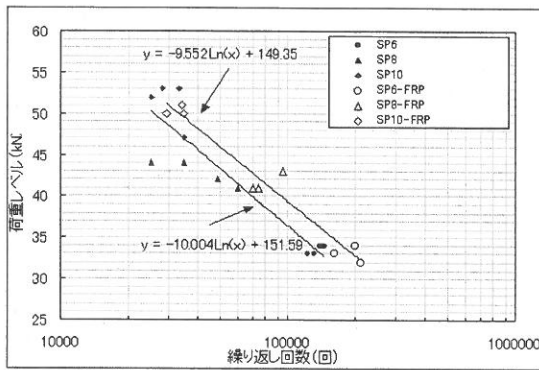


図4 疲労曲線

一方、本疲労試験の補強材料として使用している UV-FRP の弾性係数は表 2 に示す通り、鉄である供試体の弾性係数のおよそ 1/30 程度であることから、UV-FRP が供試体に作用する応力を直接低減したとは考えにくい。しかしながら、図 4 に示すように明らかに疲労寿命は向上している。そこで、この疲労寿命の延命効果を実験で得られたデータを基に検証する。実験により UV-FRP の補強効果の認められた繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  と繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  についての無補強、補強の荷重-変位のリサージュ図を描き、その傾きである剛性  $k$  の低下速度の違いにより UV-FRP の補強効果を評価する。

繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  載荷時の無補強の変位-荷重の関係を図 5 に、繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  載荷時の UV-FRP 補強の変位-荷重の関係を図 6 に示す。これらの図より、疲労試験開始時の剛性  $k$  は無補強が  $k=3.902$ 、補強が  $k=3.918$  と大きな違いは見られない。しかし、無補強の破壊回数付近の 150,000 回と比較すると剛性  $k$  は無補強が 3.509 と 10%低下しているのに対し、補強は 3.866 と 1%の低下にとどまっており、UV-FRP 補強の効果が剛性の面より確かめることができた。同様に繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  載荷時の無補強の変位-荷重の関係を図 7 に、繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$

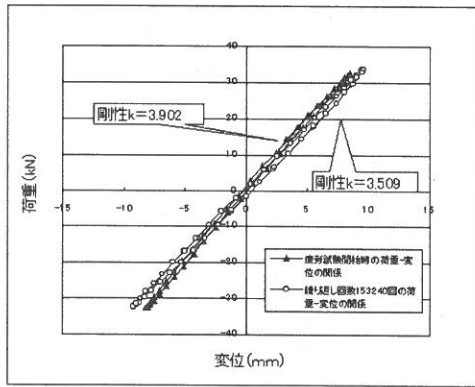


図5 無補強リサージュ図 ( $\pm 33\text{kN}$ )

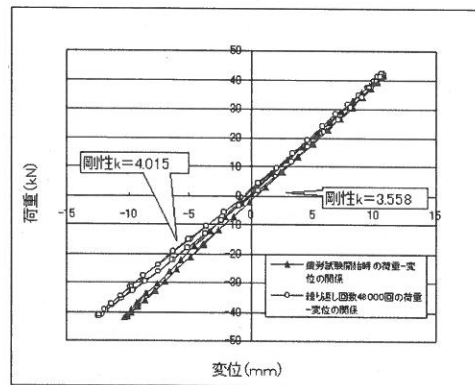


図7 無補強リサージュ図 ( $\pm 42\text{kN}$ )

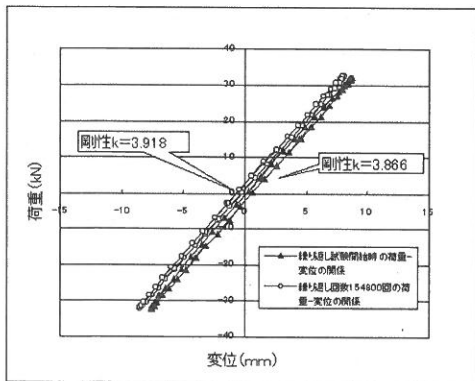


図6 補強リサージュ図 ( $\pm 33\text{kN}$ )

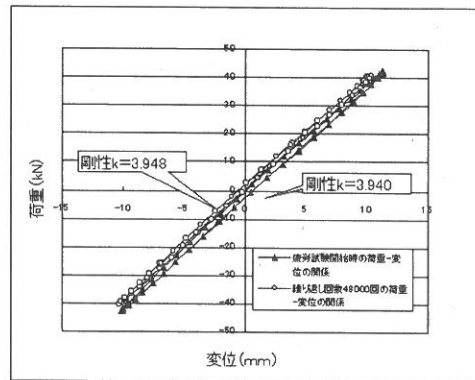


図8 補強リサージュ図 ( $\pm 42\text{kN}$ )

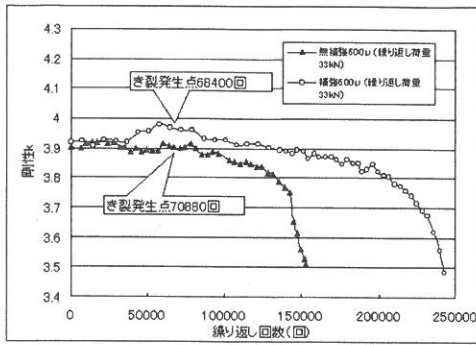


図9 剛性  $k$ —繰り返し回数の関数 ( $\pm 33\text{kN}$ )

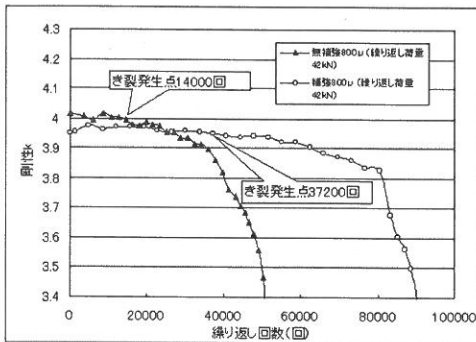


図10 剛性  $k$ —繰り返し回数の関数 ( $\pm 42\text{kN}$ )

載荷時の UV-FRP 補強の変位-荷重の関係を図8に示す。これらの図より、疲労試験開始時の剛性値  $k$  は無補強が  $k=3.558$ 、補強が  $k=3.948$  と初期剛性に違いがあるものの無補強の破壊回数付近である 50,000 回付近では無補強の剛性  $k=4.015$  と 11%低下し、補強  $=3.940$  は低下せずという結果が得られた。これらの結果より繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  と繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  では、供試体の応力集中部であるリブ周辺に UV-FRP を巻くことにより剛性の低下を防ぐことができることがわかる。これは、UV-FRP が疲労き裂の進展または発生を抑制し、そのことにより供試体の破壊までの繰り返し回数を延ばしたと考えられる。

次に繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  の無補強と補強の剛性と繰り返し回数の関係を図9に、繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  の無補強と補強の剛性と繰り返し回数の関係を図10に示す。図9より繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  の場合、無補強、補強ともにき裂の発生する回数にほとんど差はないが、補強を行った場合はき裂が発生した後も剛性が急激に低下することなく、150,000 回までは初期剛性を保っている。これは無補強の 75,000 回の約 2 倍である。最終的にき裂が全体に広がり剛性が急激に低下し始める回数は、無補強が 140,000 回、補強が 210,000 回と約 1.5 倍以上の結果が得られた。一方、図10より繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  の場合、無補強と比較して補強は、疲労き裂の入る回数は無補強が 14,000 回で補強

が 37,000 回と約 2.6 倍、き裂が発生した後剛性が低下し始める回数も無補強が 40,000 回、補強が 80,000 回と約 2 倍となる結果を得た。これらの結果より、UV-FRP で供試体を補強することにより繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  の場合はき裂の発生自体を抑制したと思われる結果を得ることができた。これに対し、繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  では、き裂の発生回数が無補強、補強ともに近いことから、き裂の発生抑制に効果が認められなかった。また繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$ 、繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  ともにき裂が入った後、剛性が急激に下がるまでの繰り返し回数は大幅に増加していることから、UV-FRP で補強することによりき裂が進展し供試体が破壊に至るまでの繰り返し回数を延ばす延命効果があることがわかる。

#### 4 おわりに

現場施工を前提とした UV-FRP を用いての補強を提案し、疲労試験によって耐久性の差異を実負荷を与えて比較検証した。これらの一連の手法により、既存付属構造物の延命効果が期待できることがわかった。以下に本論にて得られた結論をまとめる。

- (1) 疲労試験においては、UV-FRP 補強を行うことにより無補強時と比べ、破壊点に至るまでに、繰り返し荷重  $\pm 33\text{kN}$  では 1.5 倍、繰り返し荷重  $\pm 42\text{kN}$  では 1.6 倍程度の疲労寿命の延命効果が期待できる。
- (2) 基部のリブ上端部に紫外線硬化型樹脂補強を行うことによりき裂発生後、剛性が急激に低下するまでの繰り返し回数が  $\pm 33\text{kN}$ 、 $\pm 42\text{kN}$  ともに約 2 倍延びていることが確認できた。疲労寿命の延命効果の原因として、供試体の剛性の低下速度を抑制する効果、疲労き裂の進展を抑制する効果があることが確認された。

#### 参考文献

- [1] (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.
- [2] 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松上泰三，祝賢治：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と剥離せん断応力，土木学会論文集 No.689/I-57，pp.239-249，2001.10.
- [3] 松村政秀，北田俊行，徳林宗孝，池田啓士，岡田崇：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集 No.766/I-68，pp.17-31，2004.7.
- [4] 連重俊，平野廣和，青木徹彦，井田剛史，野中眞一，丸田光政：紫外線硬化樹脂を用いた長柱構造応力低減と実

- 大モデルの疲労実験, 土木学会論文集 No.735/VI-59,  
pp.185-195, 2003.6.
- [5] 野中眞一, 井田剛史, 丸田光政, 連重俊, 平野廣和, 佐藤武司: 橋梁付属物の補強・補修に用いる紫外線硬化樹脂の材料特性, 橋梁と基礎, Vol.37, No.3, pp39-44, 2003.3.
- [6] 鋼構造の疲労設計指針・同解説: 日本鋼構造協会編, 技報堂出版, 1993.
- [7] 佐藤武司, 平野廣和, 連重俊, 青木徹彦: 紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の構造特性, 土木学会第 57 回年次学術講演会, I-297, 2002.9.