

紫外線硬化樹脂を用いた長柱構造応力低減と 実大モデル疲労試験

連 重俊¹・平野廣和²・青木徹彦³・井田剛史⁴・野中眞一⁵・丸田光政⁶

¹正会員 三井造船(株) 鉄構・物流事業本部 (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町1-11-7)

²正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野742-1)

³正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八草1247)

⁴正会員 (株)十川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市上之516番地)

⁵正会員 工修 大日本インキ化学工業(株) 技術研究所 (〒592-0001 大阪府高石市高砂1-3)

⁶正会員 中井商工(株) 設計部 (〒537-0025 大阪府大阪市東成区中道3-15-16)

橋梁上に設置されている標識柱や照明柱などの長柱構造物は、直接埋設部分とは異なり交通荷重による様々な振動の影響を常時受けている。これにより基部にき裂が生じるなどの損傷も報告されている。

本研究では、標識柱のモデル化による構造解析、実大モデルによる振動特性と基部応力発生状況の把握試験、さらに疲労試験を行い疲労によるき裂や耐久性の差異を検討する実験を行った。これらの結果をもとに、標識柱を紫外線硬化樹脂によって複合的に補修する方法が、既設構造物における簡易な延命手法であることが確認されたので、一連の成果を報告する。

Key Words : UV-Curable-FRP-Sheet, longevity lifecycle, analysis for existing tubular structures, fullsize model tests, 3-D FEM analysis

1. はじめに

橋梁上に設置されている付属構造物、特に標識柱・照明柱・遮音壁などは、地上設置部とは異なり交通荷重による様々な振動の影響を絶えず受けている。さらに阪神大震災以降は耐震性向上のために設計基準が改訂され、金属支承からゴム支承への取り替えや新たなゴム支承採用などからの理由により、振動減衰変化等橋梁全体からの二次的な影響をも受けるようになってきている¹⁾。この振動に関する構造系の変化のため、疲労によるき裂の早期発生や耐用年数の低下などの事例が発見されている。

標識柱・照明柱の損傷事例としては、1999年に標識柱の基部補強リブ上端に疲労き裂が発生、高架下の平面街路に落下した事例がある²⁾。このような落下事故には至っていないが、き裂が確認されている標識柱があるとの報告もある³⁾。

この種の構造物は静的な荷重状態のみで構造設計されており、動的繰返し荷重は照査対象外となっていることが疲労き裂発生の原因の一つとして注目されつつある。

新規設計の標識柱や照明柱に対する損傷発生への対応策³⁾として、補強リブ構造を変えることや長柱

の板厚を増やすことなどが行われている。既設の標識柱や照明柱などは、通常点検による損傷の早期発見を行うことが主力であり、補強策は確立されていないのが現状である。

一方、既存の標識柱や照明柱の補強対策として、カーボン系繊維やアラミド系繊維などを巻き付けて、これを樹脂で固める方法が提案されている^{4)~6)}。これらは、入手の容易性、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⁹⁾。しかし、構造物の補強・補修に用いる場合は、現場配合での臭気発生、硬化所要時間の長時間化、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残されている。

そこで本研究では、実大モデルの標識柱(高さ7.25m、横幅4.90m F型標準標識柱)の構造解析および振動特性と基部応力状況の把握のための自由振動実大試験¹⁰⁾をまず実施する。次に基部試験体疲労試験を行い、き裂や耐久性の改善の程度を把握する。荷重に関しては、降伏点荷重の約30%を最大値として与える。

これらで得られた結果に基づき、既存の標識柱・照明柱の補強対策としての問題点を解決するために、

工場で作れる限り加工を施し、現場では貼付の施工のみとした紫外線硬化樹脂による補修工法を提案する。これに関しては同様な構造解析と疲労実験を行い、補強の効果についても評価できるように各種のタイプを準備した。

これらから、標識柱・照明柱などの付属構造物において疲労破壊が起こり易い長柱基部（応力集中部分）へ対策を施すことによって、延命効果が期待できるので報告する。

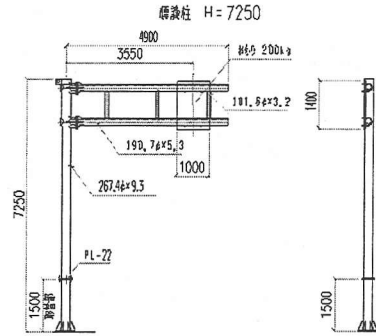


図-1 F型標準標識柱モデル

2. 標識柱の挙動

本研究では各種の標識柱や照明柱の構造対策手法の立案を視野に入れ、一般的な形式の中では、門型標識柱よりもねじれの挙動を含むと考えられるF型標識柱を選定した。まずこの挙動を知るために構造解析により固有振動数を算出し、さらに振動モードと発生応力の分布の状態を確認する。次に大型振動試験機を用いた実験により、実大モデル標識柱の挙動を求める。実験は愛知工業大学耐震実験センターで実施し、図-1、写真-1に示す様な高さ7.25m、横幅4.90mで、柱部は単柱式の鋼管(STK400、外径：D=267.4mm、板厚：t=9.3mm)で、上部に長さ4.9mの標識を取り付ける腕がボルト結合されている。なお、基部から1500mmは交換可能な様に一部改造を施している。これに面内方向・面外方向に変位計・加速度計を設置し自由振動させて標識柱の固有振動数、軌跡を解析結果と重ね合わせて評価した。

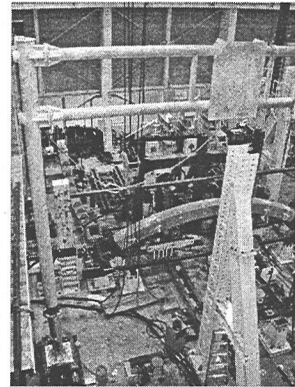


写真-1 実験風景

表-1 解析パラメータ

標識柱サイズ	ポール高さ	7250mm
	断面構成	267.4φ*9.3mm
	標識部の幅	4900mm
	リブの高さ	200mm
Steel材料特性	単位重量	$7.70 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$
	弾性率	$2.06 \times 10^6 \text{N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3

(1) 構造解析

加振実験を実施する前に、3次元FEM汎用構造解析ソフトCOSMOS/Mを用いて全体系の固有値を解析する。

解析に用いた構造諸元を、表-1に示す。1次モードは1.729Hzで標識取付部の先端が面外方向に動く形状、2次モードは2.107Hzで全体が面内に回転する形状、さらに3次モードは5.160Hzで全体が面外方向に揺れる形状である。

次に標識柱頂部に強制変位を与えて、線形静的モデルの解析を行い基部周辺の発生応力を求めた。頂部の変位は、静的曲げ許容応力での変形量と文献¹⁰⁾での実測値から、柱直径の約1/3の100mmを設定した。柱基部から1500mm区間の柱鉛直断面方向の応力分布解析結果を図-2に示す。基部補強リブ上端で一般構造用鋼材(SS400)の降伏応力付近の値である 200N/mm^2 の応力が局部的に生じていることが

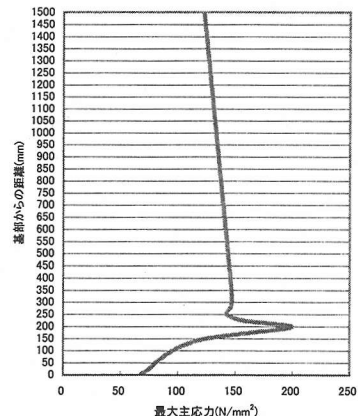


図-2 補剛材リブ先端断面での応力分布
(柱基部から1500mm区間)

確認でき、ここがき裂を発生させる位置と考えられる。

(2) 実大モデル加振実験

a) 実験の概要

加振実験は、解析で得られた振動モードを参考とし、1次モードの旗振り振動を生じる加振タイプをF1(先端部面外加振)、2次モードの面内振動タイプをF2(先端部面内加振)、3次モードの面外振動タイプをF3(柱部面外加振)とし、それぞれ方向へロープにより繰り返し振動を与えながら所定の振幅まで加振した後に自由振動をさせる自由振動試験を行った。ところで、本実験では構造解析と同様に片振幅100mmを想定したが、ロープによる手動加振でもあり安全面から片振幅20mmを目標とし、片振幅10mmを測定開始点とした。

変位計の種類別取り付け位置を図-3および表-2に示す。表-2のL, A, Bはそれぞれ、L:レーザ変位計、A:加速度計、B:箱型変位計を表している。なお、変位計取り付け位置⑤は基部固定端である。ひずみゲージの貼り付け位置を図-4に示す。ひずみゲージは、一般にリブ溶接直上に疲労き裂が発生しやすいと言われているので、き裂による応力変化を感知するために、応力集中部のリブ上端位置(以下、図-4に示す様にリブ上端から上側20mmとする)にゲージを貼り付けた。また、構造解析結果から最も応力が発生すると推測されるリブ上端位置に三軸ゲージ、リブとリブの間に二軸ゲージ、その他のリブ上端位置へは一軸ゲージをそれぞれ貼り付けた。

三軸ひずみゲージからの応力の算定には式(1)¹²⁾を用いた。

$$\sigma = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1-\nu} + \frac{1}{1+\nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2\}} \right) \quad (1)$$

ここで、Eはヤング率、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ はX軸、Y軸、Z軸におけるひずみ、 ν はポアソン比である。

b) 固有値の特性

構造解析ならびに実大モデル加振実験から求められた固有振動数の値を表-3に示す。

図-5に加振状態F1におけるポール部(図-3①)のレーザ変位計と標識部(図-3⑥)のレーザ変位計変位の軌跡を示す。

標識柱の変位軌跡に関しては、ポール部より標識部の面外方向変位が大きくなっている。これより、F型標識柱は、1次モードの旗振りの影響を受けな

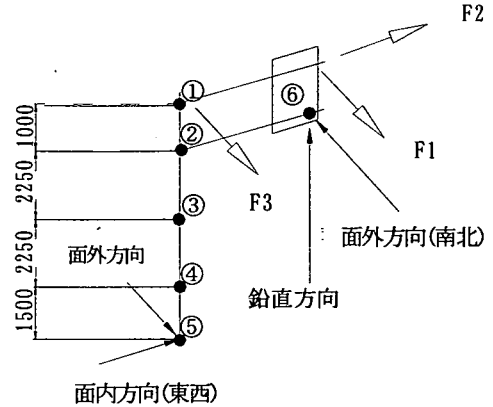


図-3 荷重方法および変位計取り付け位置

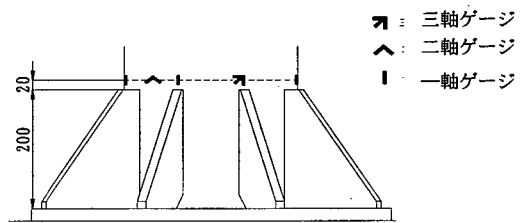


図-4 ひずみゲージ貼り付け位置

表-2 変位計種類別取り付け位置

No.	面外方向			面内方向		
	L	A	B	L	A	B
①	○	○	○	○	○	○
②	×	○	○	×	○	○
③	×	○	○	×	○	○
④	×	○	○	×	○	○
⑤	×	○	○	×	○	○
⑥	面外方向			鉛直方向		
	○	×	×	○	×	×

(L:レーザ変位計 A:加速度計 B:箱型変位計)

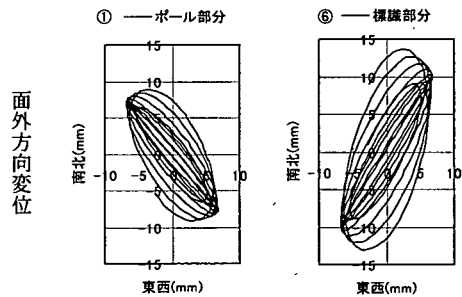


図-5 F1(旗振り)加振による標識柱の変位軌跡

表-3 固有振動数の解析および実験結果

解析値		実験値		
1次	1.729	1次	1.685	旗振り
2次	2.107	2次	1.758	面内振動
3次	5.160	3次	3.369	面外振動

表-4 標識柱基部に生じる主応力

荷重条件	実験ケース	ϵ_1 (μ)	ϵ_2 (μ)	ϵ_3 (μ)	主応力 (N/mm ²)
F1	1	94	17	73	23.0
	2	104	21	79	25.5
	3	87	14	69	21.3
F2	1	54	16	37	13.3
	2	46	15	31	11.4
F3	1	101	20	76	24.7
	2	103	20	78	25.2
	3	103	20	78	25.2

F1: 先端部面外加振 F2: 先端部面内加振

F3: 柱頂部面外加振

がら前後左右に動く軌跡を描いていることがわかる。

c) 基部の応力状態

式(1)を用いて、三軸ひずみゲージで計測された標識柱基部のひずみ値から算出した片振幅 10mm での主応力結果を表-4 に示す。加振条件 F1, F3 では、21~25N/mm² の応力が、F2 では 11~13N/mm² の応力が生じている。これらの違いは、ねじれの影響と考えられる。

自由振動実験の片振幅 10mm での主応力値を解析の基準に用いた片振幅 100mm に換算すると、面内振動でほぼ許容応力値に、面外方向では降伏点応力値に近づくことがわかる。許容応力で設計されている構造物では、設計条件の範囲内であっても局部的に降伏点付近の応力が発生しており、き裂を生じる可能性が高いことがわかる。つまり、標識柱などの付属構造物が交通供用下で常時強制振動を受ける場合、リブ付近から疲労に伴うき裂が早期に発生することが予想される。このようなことから既存構造物の基部を部分的に対策することが有効であることがわかる。

3. 補強材料および補強方法の検討

(1) 補強施工条件

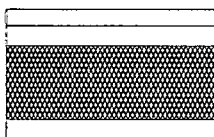
供用中の道路橋上の標識柱や照明柱などの補強工法としての要求性能は、次のように考えられる。

① 一般交通への影響

(所要時間、作業時間帯、規制車線幅)

表-5 UVCFRP の硬化特性

光源	照射条件	紫外線強度 (380~400nm)	硬化時間 (参考)	
太陽光	晴天時	4~9月	3.0~10.0mW/cm ²	10~40分
	ANS~PM4	10~3月	1.0~5.0mW/cm ²	20~50分
	屋外日陰		0.5~1.5mW/cm ²	60~80分
	曇天時		0.4~1.0mW/cm ²	90~120分



- A層: UVカットフィルム
- B層: PETフィルム
- C層: UVCFRP コンパウンド
(ガラス繊維入り)
- D層: 離型処理PETフィルム

図-6 紫外線硬化樹脂構成図

- ② 環境影響, 品質, 機能保証
(補強効果, 施工誤差, 周辺環境親和性)
- ③ 耐用年数, 経年変化
(温度依存性, 持続効果, メンテナンス)

これらを満足すれば補強施工時の交通負担を最少限度にすることができ、同時に施工に係わるトータルコストの削減が期待できる。ここに一般的な鋼材による構造補強ではなく、新材料を用いた安価な対策工法の可能性を検討する。

FRP(繊維強化プラスチック)は、各種の長所から注目されつつある素材であるが、本研究のような小規模な構造物の補強・補修の材料としてはいくつかの問題が残されている。例えば、過酸化物による臭気、かぶれなど人体に影響のあるエポキシ硬化剤を現場で配合しなくてはならない等、作業環境上の問題がある。また、小ロットでの作業による煩雑化や配合ミス、あるいは硬化が遅く温度依存性が大きいことから、現場施工上の品質管理が難しいなどの問題点もある。

ところで、樹脂材料の持つ上記の問題が解決されるならば、有効な補強材料となる可能性がある。そこで、現場配合が不要かつ品質が安定している紫外線硬化樹脂に着目して、新たな補強方法を提案する。

(2) 紫外線硬化樹脂の材料特性

紫外線硬化樹脂(以下、UVCFRP と称す)は、硬化防止のために図-6 に示すような積層構造となっている。ここで A層は UV カットフィルム、B, D層は形状保持のための PET(Poly Ethylene Terephthalate)フィルムで、主材料の C層をサンドイッチ状に挟み込んでいる。この C層がガラス繊維入りの光硬化性コンパウンドであり、熱硬化型樹脂に紫外線硬化剤を溶解した樹脂とガラス繊維によって構成されている。

また、本材料は表-5 に示すように自然光によって容易に安定硬化する特性を有しており、樹脂の現

場施工性を好転させている。また、鋼材との一体化の面からは次の数値を各種試験データから確認している。UVCFRP の鋼材に対するせん断接着力は、 3.1N/mm^2 、硬化時の線収縮率は1~2%、硬化後の引張伸び率は約 2%である。よって、硬化途中でも鋼材の挙動に充分追従できる密着性能を有している。

(3) 硬化性（温度依存と紫外線照射条件）

現場施工時には標識柱などの鋼材表面温度は夏期で60℃、冬季で-10℃となるが、UVCFRP は基本的には紫外線の照射のみにより硬化するため、温度条件による硬化時間や材料特性への影響は少ないと考えられる¹³⁾。表-5 に示すように年間の硬化時間の差は紫外線強度に比例しており温度依存性は少なく、夏期・冬季いずれの場合でも直射日光が当たれば約 50 分で硬化することがわかる。一方、既存橋梁上での施工の場合、自然光強度が貼付面全体に均等に当たるとは限らなく、不均一硬化の可能性も考えられる。そこで、実施工においては、人工光源であるケミカルランプの照射距離を 10cm 以内にすることで 1.0mW/cm^2 程度の紫外線量の確保が可能となり、人為的に約 60 分程度で安定硬化が得られる照射環境を確保できることになる。

(4) 現場での施工性

本材料は、現場配合を行うことなく任意形状にはさみやカッターで容易に切断でき、貼り付け面の保護フィルムを剥がし、基材面の泡を抜きながら貼り付け、その後、紫外線照射装置を用いて短時間で硬化させるという特徴を有している。つまり、平易かつ安価な工法を提供することができる。また、材料の密閉性から現場での臭気をほとんど出すことなく施工することができる。

この材料の特徴を以下にまとめる。

- ① プレミックス（現場配合不要）
- ② 自然光硬化（早期硬化可能）
- ③ シート状製品（現場裁断可能）
- ④ 密閉型（弱臭気）

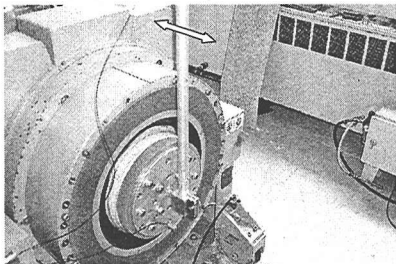


写真-2 簡易モデル実験状況

表-6 UVCFRP 仕様

単位質量	$1.96 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$
弾性率	$7.4 \times 10^3 \text{N/mm}^2$

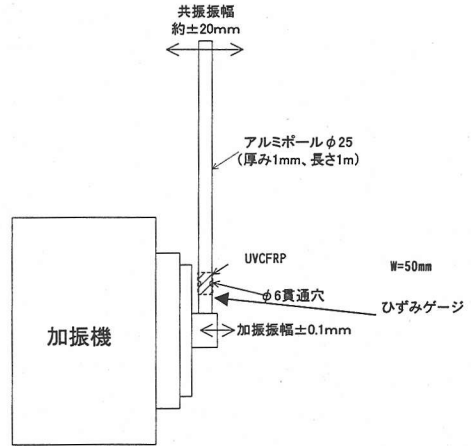


図-7 疲労モデル実験

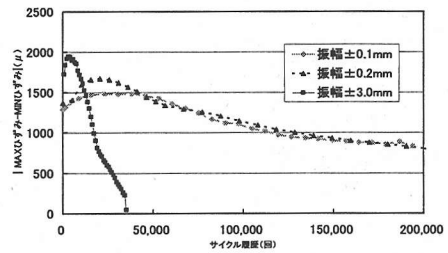


図-8 無補強アルミポールの最大ひずみと最小ひずみの差とサイクル履歴の関係（加振周波数：25Hz）

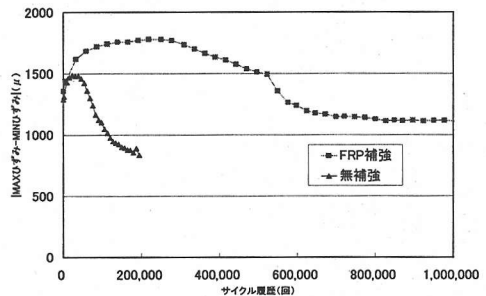


図-9 アルミポール最大ひずみと最小ひずみの差とサイクル履歴の関係（加振周波数：20Hz）
～UVCFRP 補強有無の比較～

表-7 アルミポール疲労試験結果

補強	き裂発生回数	破壊形態
無し	約 10 万回	φ6 穴部よりき裂発生し破断
有り	約 55 万回	固定部よりき裂発生し破断

4. 簡易モデルによる機能確認実験

開発初期段階から実スケールで疲労試験を行うには、設備や評価方法などの選択肢が多く、問題があると考えられる。実現性確認のため、簡易モデルによって補強効果とその傾向を確認する。

(1) 実験概要

モデル実験として、写真-2 に示すような加振機を用いて長柱（アルミポール）基部に繰返し振動を与えた。供試体は、φ25、長さ 1m のアルミポールに予めφ6 貫通穴とスリットを付加した断面欠損部を設け、表-6 に示す UVCFRP を巻き付け補強したものと無補強のものを比較した。補強箇所は、図-7 のように断面欠損部を中心に幅 50mm 厚み 1mm である。

まず、アルミポール上部に加速度ピックアップを取り付け、手動により自由振動させて固有振動数を測定した。その後、求められた固有振動数付近である 25Hz でポールを片振幅 0.1mm、0.2mm、3.0mm の 3 種類の振幅で一定加振させ、その時のひずみをポールの基部にひずみゲージを貼付けて測定した。

図-8 に示されるように、縦軸の最大ひずみと最小ひずみの差に変化が生じた。ここでは減少傾向に移った時にき裂が生じ始めている。片振幅 3.0mm では最初からアルミの許容ひずみを超え、加振後すぐにポールの断面欠損部にき裂が生じ始めたと考えられる。片振幅 0.2mm で約 3 万回加振、同 0.1mm で約 5 万回加振で最大ひずみと最小ひずみの差に変化が表れている。これらから、約 5 万回程度まではき裂が生じない片振幅 0.1mm にて疲労試験を行うこととし、その特性について補強有無での相違を確認した。

(2) 実験結果

アルミポールの疲労試験結果の概要を表-7 に示す。また補強後の固有振動数に合わせた加振振動数 20Hz の最大ひずみと最小ひずみの差と加振回数との関係を図-9 に示す。

アルミポールによる予備試験では UVCFRP による補強でき裂発生までの繰返し回数が 5 倍以上になることが確認できた。ここでの結果では、断面欠損部を設けた部材を断面性能向上により補強したものか、集中している応力を分散させて緩和したものかは判断することができない。補強を施した時にき裂発生したのは、ポールを固定している所であり、静的な最大応力発生部、つまり断面性能向上の結果と考えることができる。これは UVCFRP 補強部分には損傷

無かったことでも判断できる。しかし、アルミポールと同じ 1mm 厚の樹脂が完全に断面欠損部を健全な状態まで補強しているとは材質的に考えられない。き裂発生箇所が補強前と後では異なるから、この矛盾した現象を定量的に解明するためには、同じ樹脂材料で断面性能の相対的に異なる実物大構造物での繰返し荷重試験を実施すれば良いとの結論に達した。

5. 構造解析による補強効果の確認

簡易モデルによる試験では補強効果を定量的に確認できたが、定量的に把握するには至らなかった。そこで、実機による繰返し荷重試験を実施することとなり、並行して実大モデル構造解析を実施する。

表-8 UVCFRP の解析条件

FRP 添付範囲	リップ上端より下	100mm
	リップ上端より上	100~300mm
	厚さ	1.0mm
FRP シート 材料特性	単位質量	$1.96 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$
	弾性率	$7.4 \times 10^3 \text{N/mm}^2$
	ポアソン比	0.1

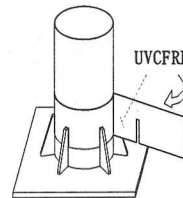


図-10 UVCFRP の巻き付け方法

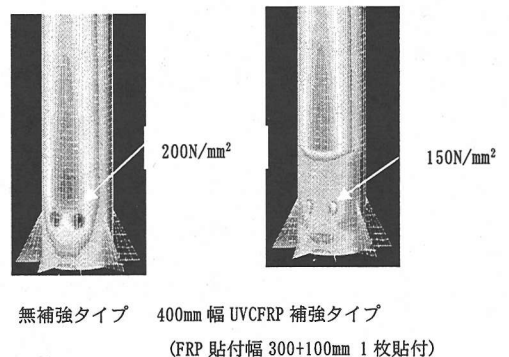


図-11 応力分布図

基部断面変化点近傍に図-10 に示す様に UVCFRP を巻き付けることにより補強効果の把握を行う。モデルは、第 2 章と同様の図-1 に示す F 型標識柱とする。応力分散の方法とし、3 次元 FEM 構造解析により応力状態を把握し、補強効果の期待値予測を行った。

(1) 解析条件

構造解析には、第 2 章と同様に汎用構造解析用ソフト COSMOS/M を用いて、補強材を巻き付けた場合の静的解析を行う。補強材は UVCFRP を用い、貼付位置はリブ上端から上に幅 300mm、下に幅 100mm の合計幅 400mm を数値解析の設定条件とした。

UVCFRP の解析条件として表-8 の値を用いた。強制変位として、第 2 章と同様に塔頂部へボールの直径の約 1/3 の 100mm を与えた。

(2) 構造解析結果

無補強タイプと 400mm 幅（リブ上端から上 300mm + 下 100mm）の位置までに FRP を 1 枚貼り付けた時の応力分布の鳥瞰図を図-11 に示す。両者の比較から、FRP を貼り付けた位置での応力低減効果を確認することができる。

最大応力が生じた基部補強リブの上端部分の応力が、FRP を貼り付けることにより約 200N/mm² の応力が約 150N/mm² の 75%程度まで変化しており、許容引張応力レベルまで低減している。

構造解析の結果から UVCFRP による補強は効果があると予測される。

6. 実大モデルによる疲労試験

UVCFRP 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。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、基部でのき裂の急激な進展による倒壊等の事故を防止するために、高さ 1500mm の基部のみの部材を必要数製作し、第 2 章の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相似則を保ちながら各タイプ一本での疲労試験を行う。疲労実験は愛知工業大学耐震実験センターで実施した。

(1) 実験概要

a) 供試体

疲労試験に用いる供試体は図-1 に示す標識柱の

表-9 疲労試験供試体の補強タイプ

タイプ	幅 W (mm) (リブ上端上側+下側)	巻き回数	プライマー塗布の有無
1	—	—	—
2	200(100+100)	1	無
3	300(200+100)	1	無
4	400(300+100)	1	無
5	300(200+100)	2	無
6	300(200+100)	1	有

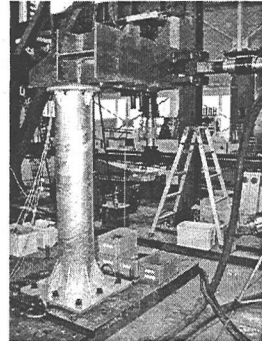


写真-3 振動疲労実験状況

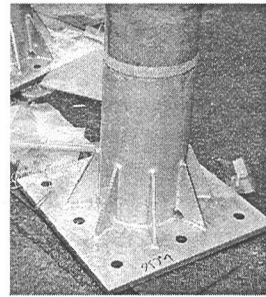


写真-4 UVCFRP 補強材貼付後

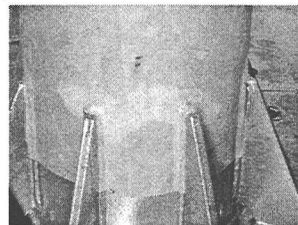


写真-5 き裂発生後のシートの白濁状態

基部のみとする。実物大実験の基部と同じ応力配分が、UVCFRP 貼付補強した供試体に発生するように荷重する。試験荷重装置の概念図を図-12、実際の実験状況を写真-3 にそれぞれ示す。F 型標識全体の振動特性を考えると、横に張り出している標識部分の影響は実測値からも無視できないことから、1500mm サイズの供試体において応力状態を再現す

るために図-12(b)に示すように供試体上部に偏心荷重する。

UVCFRP 補強タイプを表-9 に示す。供試体タイプは無補強をタイプ 1 とし、シートの幅(W)、貼付層数、プライマー塗布の有無を考慮して 6 種類のタイプとした。補強を行った供試体を写真-4 に示す。

b) 偏心量

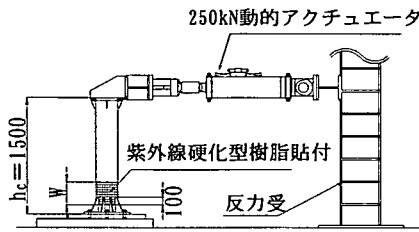
疲労試験に用いる偏心量は第 2 章で述べた全体モデル加振実験により得られた基部の三軸ひずみゲージにおける曲げとねじりとのひずみ比率が同じ値と

なるように、250kN 動的アクチュエータの荷重点偏心量 $h=590\text{mm}$ を決定した。

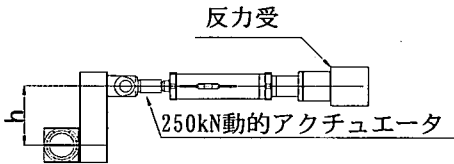
c) 加振条件

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。供試体の降伏ひずみは、水平力を偏心荷重して供試体が降伏域に達したときの三軸ひずみゲージひずみを測定する。荷重-ひずみ曲線を図-13 に示す。降伏荷重は約 140kN、降伏ひずみは約 2800μ であることがわかる。

疲労試験に用いる荷重は、UVCFRP 補強による疲



(a) 側面図



(b) 平面図

図-12 疲労試験荷重装置

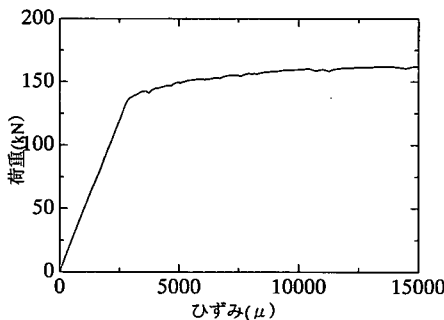


図-13 荷重-ひずみ曲線

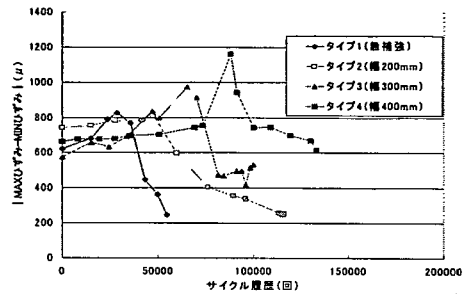


図-14 ひずみとサイクル履歴(タイプ 1, 2, 3, 4)

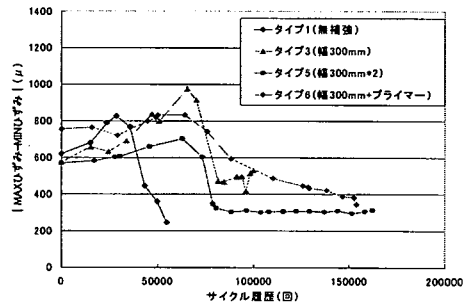


図-15 ひずみとサイクル履歴(タイプ 1, 3, 5, 6)

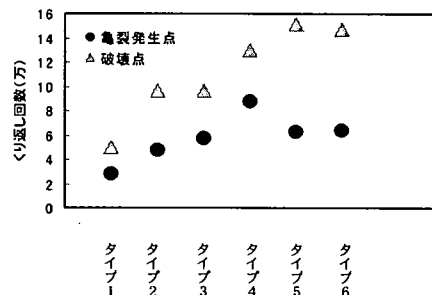


図-16 き裂発生回数と破壊に至る回数

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 40kN とその時の片振幅約 10mm, 2Hz の一定振動を両振りを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と、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) 実験結果

ひずみゲージの計測結果および繰り返し回数より供試体の疲労強度を調べる。ひずみ、サイクル履歴との関係を図-14, 15 に示す。縦軸は最大ひずみから最小ひずみを引いた値であり、ひずみ振幅範囲を示す。図-14 には、無補強のタイプ 1 と貼付幅を 200mm, 300mm, 400mm と変化させたタイプ 2, 3, 4 を示す。図-15 には、無補強のタイプ 1 と貼付幅を 300mm とし 2 枚貼付のタイプ 5, プライマー塗布仕上げのタイプ 6 を示す。

繰り返し振動を与えるとひずみ範囲は徐々に拡大して、ある回数を超えると急激に変化の度合いが大きくなり、その後小さくなるのがわかる。この現象と実験中の目視によるき裂発生回数がほぼ一致していることから、ひずみとサイクル履歴のグラフにおいて、ひずみが急激に変化したところを本実験ではき裂の発生と考えることにする。ところで補強していることからクラックの確認は目視では困難と考えられるが、き裂が生じ始めたところから、鋼材と樹脂の間のき裂内側から空気が入り込んで写真-5 に示す通りシートが白濁することで確認は可能である。また補修部への直接打撃音にても部分的な空気層の存在、つまり間接的なクラック発生の確認も可能である。

図-16 に各供試体のき裂発生点回数と破壊点回数を示す。図-14 と同様にき裂発生点回数は、補強幅と比例的な傾向が見られる。き裂発生点回数の伸びは、疲労強度の上昇が考えられるので、補強幅を増やすことにより効果が期待できることになる。さらに幅が 300mm の場合について検討すると、巻き数を増やすことや、プライマー塗布をすることは、図-15 からも繰り返し回数にあまり変化が見られないため、き裂発生点に関してはあまり効果がないと考えられる。

本研究ではき裂とき裂がつながるところを破壊点として定義する。この破壊点に至ると標識柱が倒壊するので、き裂が入る回数よりも破壊までの許容繰

り返し回数の多い方が点検などの時に発見される可能性が高いので実用的であると考えられる。その観点から考察すると幅が 300mm の場合、1 巻の回数が 9.5 万回であったのに対し、巻き数を 2 巻きに増やすことやプライマー塗布をすることにより、回数が約 15 万回になった。同じ補強幅でも繰り返し回数が約 1.5 倍に増えていることがわかる。これを先ほどのき裂発生点と重ね合わせて考えてみると、き裂が生じ始める点は変わらないが、破壊点に至るまでの繰り返し回数は伸びている。このことはき裂が発生してからの進展速度に変化があることが判断できる。これは、異常の発生から対策時間が現実的に稼げるという施工面でのメリットを有していると考えられる。

7. おわりに

本研究では、標識柱・照明柱などの橋梁付属物の疲労損傷に着目し、それらの中での代表例として複雑な挙動を示しかつ重心の高い F 型標識柱を選定した。疲労破壊の起こりやすい長柱基部について、3 次元 FEM 構造解析と実大モデル試験によりひずみの分布状況を解明し、応力集中箇所、変位の方向性、さらにねじれの影響までを明らかにすることができた。また、現場施工を前提にした UVCFRP を用いての補強を提案し、これを構造解析に反映、さらに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策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) 本研究で用いた 267.4φ×9.3 の標識柱の直径の約 1/3 の強制変位を標識柱頂部に与えると、基部リブ直上の極めて狭い部分で降伏点に近い応力が集中的に発生する。よって、この部分が局部疲労により早い時期に進行性き裂を生じて倒壊に至る可能性がある。ゆえに、現在の点検マニュアルに振幅計測と構造形式ごとの規格値を規定する糸口が掴めた。さらに規格値を超える変位発生箇所には、基部付近に事故を未然に防止する対策を講じることになる。
- (2) 新素材の UVCFRP の採用により、平易かつ短時間の現場作業が可能となりコスト低減と一般交通への影響の少ない工法が考えられる。また、材料の密閉性から現場での樹脂特有の臭気をほとんど出すことなく施工可能となる。
- (3) 疲労試験においては、樹脂補強を行うことによ

り補強リブ上部部にき裂が発生するまでに 2 倍以上、破壊点に至るまでに 3 倍以上の繰り返し回数を要し、延命効果が期待できる。

今後、さらなる詳細な特性の把握のために、試験施工を重ねてデータの蓄積を行い、信頼性確保、鋼管板厚の影響などパラメータの解明を行うつもりである。また加振源の検討として、大型車両通過走行頻度は一つの大きな加振要因と思われるが、これ以外にも建柱している橋梁の振動特性、建柱位置などいろいろな周辺要因との関係を考える必要がある。さらにそれらの中で、個々の耐用年数の把握や推定に影響する割合の大きなものなどの解明できれば、ライフサイクルが系統的に数値化できることになると思われる。

最後に、本研究は中央大学理工学研究所、愛知工業大学耐震実験センター、三井造船鉄構工事(株)、(株)十川ゴム、大日本インキ化学工業(株)、中井商工(株)の異業種間産学共同研究の一環であることを付記する。

謝辞： 本研究を行うに際し、中央大学大学院理工学研究所 佐藤武司氏、元中央大学理工学部土木工学科 大佐嘉彦氏（現：(株)協和コンサルタンツ）、愛知工業大学大学院理工学研究所 保高篤司氏を初め多くの学生諸君の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小塩達也, 李相勲, 山田健太郎, 森成頭, 森下宣明: 交通荷重による標識柱の振動と疲労耐久性, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1009-1017, 2001. 3.
- 2) 山田健太郎, 近藤明雅, 小林且典, 宮本伸治, 荒木準一: 鋼管柱基部の疲労強度, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1045-1054, 1992. 3.
- 3) 池田憲二, 藤野戸宏樹, 毛利一成, 後藤雪雄: 橋梁照明柱の基部モデル改良に関する実験について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, I -B332, 2001. 9.

- 4) 中村圭吾, 福井唯夫, 大倉一郎, 松上泰三, 祝賢治: 炭素繊維シートが鋼板疲労亀裂の伝播を抑制する効果, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I -A306, 2000. 9.
- 5) 永崎央輔, 遠藤勇一, 鈴木博之, 池田圭一: 炭素繊維強化樹脂板で補強されたき裂を有する部材の引張試験, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I -A307, 2000. 9.
- 6) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三, 祝賢治: 炭素繊維シートの鋼板疲労亀裂補修への適用, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp. 689-696, 2000. 11.
- 7) 鈴木博之, 茶野木晶, 宮崎栄市: ガラス繊維強化プラスチックの鋼構造物への適用に関する基礎的研究, 土木学会関東支部第 28 回技術研究発表会, I -55, 2001. 3.
- 8) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と剝離せん断応力, 土木学会論文集 No. 689/ I -57, pp. 239-249, 2001. 10.
- 9) (財)鉄道総合研究所: 既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 (FRP 吹付け補強編), 1996. 11.
- 10) 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.
- 11) 井舎英生, 宮脇潔, 乙黒幸年, 北田俊行, 山口隆司: 道路橋の標識柱・照明柱の損傷発見のための振動測定・解析・評価システムの開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会, I -A154, 2001. 9.
- 12) 株式会社東京測器研究所: ひずみゲージ入門 (改訂) 第三版, 1990. 4.
- 13) 野中眞一, 井田剛史, 連重俊, 平野廣和: 紫外線硬化型樹脂の材料特性を生かした補修・補強対策, 土木学会第 57 回年次学術講演会, I -298, 2002. 9.

(2002. 8. 26 受付)

EXPERIMENTS IN LONGEVITY MATERIALS WITH "UV-CURABLE FRP-SHEET" ON PILLAR STRUCTURES

Shigetoshi MURAJI, Hirokazu HIRANO, Tetsuhiko AOKI,
Tsuyoshi IDA, Shinichi NONAKA and Masamitsu MARUTA

Recently collapse due to fatigue of steel sign poles on the highway bridges with rubber bearings becomes social issues. So we had a discussion meeting with different field's engineers, where reinforcing steel tubes with ultra-violet-curable resin sheets was proposed. In order to confirm the effectiveness of this material on the fatigue life, the static 3-D FEM analysis and full-size model tests with and without the sheets were conducted. As a results, a usefulness is recognized from both the analysis and the fatigue tests.