

紫外線硬化型樹脂による補強対策での疲労寿命延命効果の検討

Study of Fatigue Strength Improvement by "UV-Curable-FRP-SHEET-Reinforcement"

井田剛史*・平野廣和**・松井謙典***・連 重俊****

Tsuyoshi IDA, Hirokazu Hirano, Kensuke MATSUI and Shigetoshi MURAJI

*正会員 ㈱十川ゴム 研究開発部 (中央大学大学院理工学研究科博士後期課程) (〒599-8244 大阪府堺市中区上之 516 番地)

**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)

***正会員 工修 YKKAP(株) 商品開発部 (研究当時: 中央大学大学院理工学研究科) (〒936-0804 富山県滑川市杉本 3003)

****正会員 工博 中井商工(株) 常務取締役 (〒537-0023 大阪府大阪市東成区玉津 2-1-5)

In recent years, the fatigue damage of sign pillars on highway bridges used rubber bearings becomes a problem. So we, the authors conformed the reinforcing effect of the UV-Curable-FRP-Sheet Reinforcement for pillars by vibration tests. And them to confirm the effect of the fatigue strength improvement by this reinforcing method, we verified the reduction of the crack progress speed on a flat panel model with FEM. As a result, this reinforcing method was proved able to reduce the crack progress speed of this model by half.

Key Words: UV-Curable -FRP-Sheet, fatigue tests, reinforcement, life extension

1. はじめに

橋梁上に設置されている橋梁付属構造物, 特に標識柱・照明柱などの柱状構造物や遮音壁などは, 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。既存の標識柱や照明柱などは, 一般に 2~4Hz 程度の固有周波数を持つため, 高架橋本体の固有周波数と近いことになり, 場合によっては共振を起こす可能性が増大している^{1), 2)}。橋梁付属構造物がその揺れを受けて振動し, 疲労によるき裂の発生や耐用年数の低下などの事例が各方面で発見されている。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することにより強度が低下し高架下の平面街路に落下している³⁾。このような落下事故には至っていないが, 疲労によるき裂が確認されている標識柱があるとの報告もなされている⁴⁾。

ところで, 柱状構造物の設計方法は, 許容応力度法に基づいており, 橋梁付属物の代表である照明柱や標識柱は, 従来からの設計基準によると静的な荷重のみを取り入れて構造決定されている。許容応力度法は, 材料の保証降伏点強度を判定基準としており, 短期許容応力度(例

えば, 大型標識柱の場合, 風速 50m/s の風荷重)と長期許容応力度(活荷重・死荷重)の算定を行う。通常的大型標識柱の場合, 長期許容応力度の算定結果は小さいとして省略されており, 短期許容応力度の算定のみで設計されている。つまり, 大きな荷重が 1 回作用した際の外力想定のみであり, 絶えず振動により繰り返し発生する外力想定は考慮されていないのが現状である。

これらのことから, 著者らは F 型標識柱(基部鋼管 ϕ 267.4)の応力集中部である基部に紫外線硬化型樹脂(以後, UV-C-FRP とする)による長柱補強工法を用いた実物大疲労実験を実施してきた^{5)~7)}。そして, これらの結果を基に, 鋼構造の疲労設計指針で示されている疲労等級の分類を行い, UV-C-FRP による補強効果を確認することができた。しかしながら, 疲労実験からは溶接部が複雑な形状であるなどの理由から UV-C-FRP の補強効果に関する力学的挙動は, 解明するには至らなかった。さらに, UV-C-FRP の弾性係数が供試体である鋼の弾性係数のおよそ 1/30 程度であることから, き裂の発生自体を抑制する効果はないものと一般に考えられている。しかし, 鋼構造の疲労設計指針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とで, 補強された供試体のき裂が進展して破壊に至るまで

表-1 紫外線硬化樹脂の硬化特性

光源	照射条件	硬化時間 (参考)	紫外線強度 (380~400nm)
太陽光	晴天時	4~9月	10~40分
	AM9~PM4	10~3月	20~50分
	屋外日陰		60~80分
	曇天時		90~120分
			0.4~1.0mW/cm ²

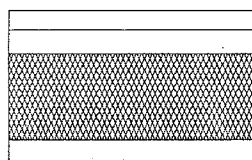


図-1 紫外線硬化型樹脂構成図

の繰り返し回数を延ばす効果が得られることがわかった。同様な効果の実験的検討としては、リブ十字溶接継手の補強で鈴木らの研究グループ^{8)・10)}が、き裂発生前の部位における疲労強度向上に同種類の樹脂材料であるGFRP (ガラス繊維樹脂) の貼り付けが有効であることを示している。一方、著者らの研究⁹⁾によると、F型標識柱供試体をモデリングして3次元FEM構造解析を行った結果、UV-C-FRPシートは、供試体にかかる応力自体を低減させるには至っていないことがわかっている。これらの従来の研究により、UV-C-FRPを貼り付けることで、き裂が進展して破壊へ至るまでの繰り返し回数を延ばす延命効果はあることがつかめているが、この延命効果の要因はつかめないのが現状である。

そこで本論文では、UV-C-FRPシートを貼り付けることで、延命効果があることを解析面から確認すること第一の目的とする。具体的には、応力拡大係数 K の厳密解が得られている無限板中の貫通き裂を有する平板供試体を選択し、これに対するき裂補強効果を3次元FEM構造解析により検証する。この結果より、無補強時とUV-C-FRP補強時のき裂先端近傍の応力を比較し、き裂に対する補強効果を検証するとともに、延命効果の要因を検証する。

以上の検討からUV-C-FRPがき裂発生後から破断までの進展速度を1/2以下にまで抑える効果があることが疲労実験のみならず構造解析の面からも確認されたのでこれを報告する。

2. 紫外線硬化型樹脂 (UV-C-FRP) の材料特性

紫外線硬化型樹脂は、保管時の硬化防止のために図-1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フィルムで主材料のFRPをサンドイッチ状に挟み込んでいる。C層がガラス繊維入りの光硬化型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

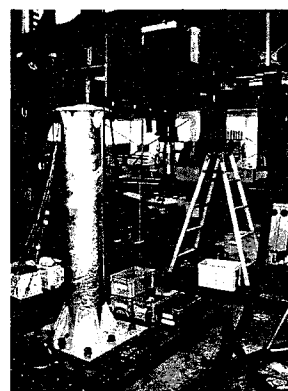


写真-1 疲労実験状況

表-2 供試体の諸元と材料特性

標識柱諸元	基部供試体高さ(mm)	1500
	鋼管の材質	SS400
	鋼管の外径(mm)	267.4
	鋼管の板厚(mm)	9.3
	基部リブの材質	SS400
	基部リブ高さ(mm)	200
	基部リブ幅(mm)	100
	基部リブ板厚(mm)	9.0
Steel材料特性	リブ溶接	隅肉
	単位質量(N/mm ³)	7.70×10^{-5}
	弾性率(GPa)	210
	ポアソン比	0.3
FRP材料特性	シート厚さ(mm)	1.5
	単位質量(N/mm ³)	1.96×10^{-5}
	ヤング率(GPa)	7.3
	ポアソン比	0.1
	引長強度(MPa)	200

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
±33 kN	±600 μ	4本	3本
±42 kN	±800 μ	2本	3本
±52 kN	±1000 μ	2本	3本

ス繊維によって構成されている。特徴としては、以下に示すことが挙げられる。

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

一般的に補強工事等に用いられるエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂をローラやスプレーなどで積層する場合、保存性の悪い過酸化合物や臭気、かぶれなど人体に悪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々、作業環境上の問題がある。また、作業の煩雑化や配合ミス、あるいは硬化が遅く温度依存性が高いなどの原因によって、現場施工上の品質管理が難しいなどの問題点がある。これに対し本材料は、表-1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、鋼材との一体作用の面からは各種試験データとして次の数値を確認している。紫外線硬化樹脂の鋼材に対するせん断接着力

は 3.1N/mm^2 であり、かつ硬化時の線収縮率は $1\sim 2\%$ 、硬化後の引張伸び率は約 2% 、つまり、硬化時にも鋼材の伸縮に充分追従でき密着性を確保する性能を有している。

3. 疲労実験の結果

著者らは、写真-1 及び表-2 に示す実物大の F 型標識柱（基部鋼管 $\phi 267.4$ ）の長柱基部より 1.5m の高さまでを使って、表-3 に示す条件で疲労実験⁶⁾ を行ってきた。基部を無補強の供試体と図-2 に示すように鋼管のリブ上端から上側 200mm 、下側 100mm の間に UV-C-FRP を貼り付けて補強した供試体を用いて、き裂・破壊等の発生までの繰り返し回数を求める疲労実験である。これらの疲労実験⁶⁾ から得られた結果をまとめると以下の様に示すことができる。

- (1) 疲労試験においては、UV-C-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。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 $1/3$ を超えており補強効果が確認できなかった。
- (2) 無補強供試体と UV-C-FRP 補強供試体を比較した結果、基部のリブ上端部に UV-C-FRP を巻き付けて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 $\pm 33\text{kN}$ では 1.5 倍、 $\pm 42\text{kN}$ では 2 倍程度延びていることが確認できた。

一方、著者らの既存の疲労実験結果⁶⁾ を整理し、F 型標識柱の疲労強度を鋼構造の疲労設計指針¹⁰⁾ により設定するために、縦軸を繰り返し応力範囲に直す必要がある。そこで、図-3 に示す三軸ひずみゲージ A の値より応力をもとめ、疲労設計曲線にプロットしたものを図-4 に示す。この図から、繰り返し荷重 $\pm 33\text{kN}$ 、 $\pm 42\text{kN}$ の無補強時では疲労等級 E 等級付近であるのに対し、UV-C-FRP 補強時ではほぼ D 等級に上昇している。

これらの結果から疲労寿命の延命効果は、き裂が発生した後、UV-C-FRP がき裂の進展速度を抑えたことに起因していると考えられる。

4. 疲労き裂先端近傍応力の解析

ここでは、貫通き裂を有する平板供試体に着目し、そのき裂を含めた領域でモデリングを行い、無補強時と UV-C-FRP 補強時のき裂先端近傍の応力を比較してき裂に対する補強効果を構造解析により検証する。構造解

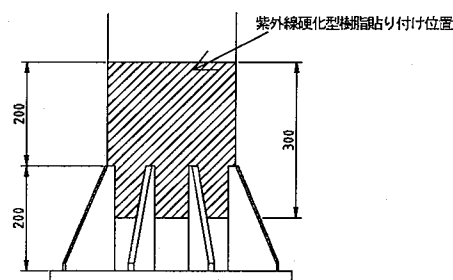


図-2 紫外線硬化樹脂貼付け位置

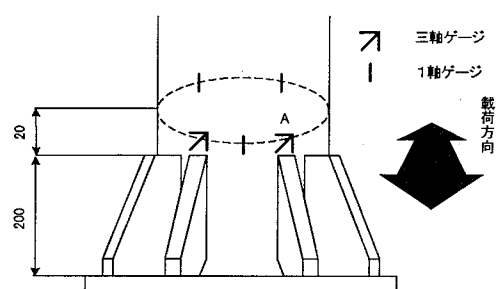


図-3 ひずみゲージ位置

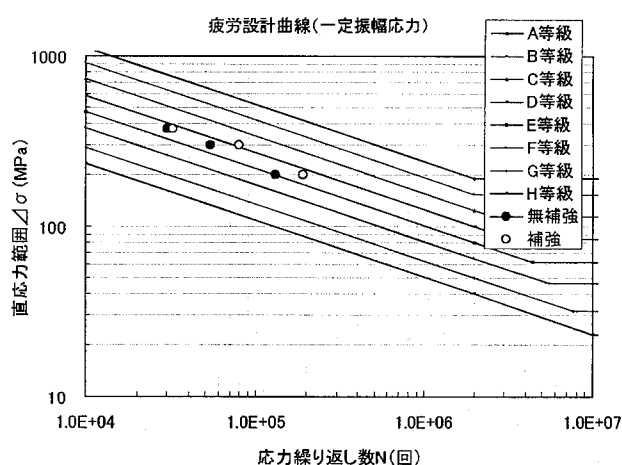


図-4 疲労設計曲線

表-4 供試体の構造解析条件

項目	単位	
供試体諸元	板幅(X)	mm 100
	板奥行き(Y)	mm 200
	板厚(Z)	mm 5
	き裂長さ	mm 20
	き裂幅	mm 1
FRP貼り付け箇所	幅	mm 100
	奥行き	mm 200
	シート厚さ	mm 1

項目	分割数	間隔(mm)
供試体メッシュ	板幅方向	36 5
	板奥行き方向	400 0.25
	板厚方向	5 1
き裂近傍のメッシュ	板幅方向	20 0.5
	板奥行き方向	400 0.25
	板厚方向	5 1

析に用いた3次元FEM構造解析ソフトは、SRAC社製COSMOSである。

4.1 解析モデル

解析モデルとしては、応力拡大係数 K の厳密解が得られている無限板中の貫通き裂を有する平板供試体を選択する。供試体は表-4 に示す様に、100×200×5mm の板にき裂幅 1mm、き裂長さ 20mm があり、この板全面に厚さ 1mm の UV-C-FRP を貼り付けるものとする。接着部分は、全ての要素がせん断バネで結合されているとする。メッシュ分割は図-5 に示すように 3D シェル要素を用いて要素分割する。

ところで、疲労実験よりリブ上端部に引張り荷重が作用し、貫通き裂が生じることがわかっている。そこで、この疲労実験結果に基づき表-4 に示す解析条件で貫通き裂を有する平板供試体のモデリングを行う。き裂から十分遠方で Z 軸の引張り方向に 100MPa の一様応力を発生させる 50kN の等分布荷重を載荷する。これは、実験 7 で行った繰り返し荷重 ±33kN 時の公称応力値 100MPa を想定している。また、解析に用いるメッシュ分割数は表-4 に示すようにき裂先端近傍の応力をより詳細に検証するため、き裂進展方向に 0.25mm 間隔で分割し、板厚方向の応力低減効果も検証するため、板厚方向には 1.0mm 間隔で要素分割する。

なお、UV-C-FRP シートは、き裂を覆うように平板供試体全体に貼り付けることとし、補強解析パターンとして、実験で用いた片面貼り付けのほかにも両面貼り付けの 2 つのケースを行う。

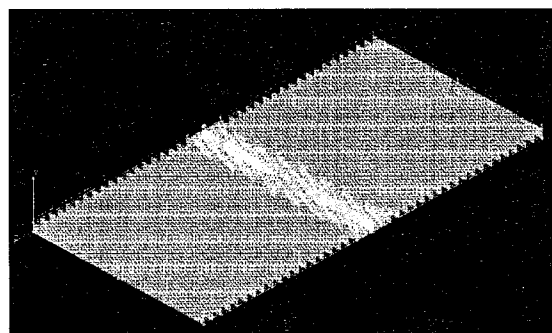


図-5 貫通き裂を有する平板供試体の要素分割

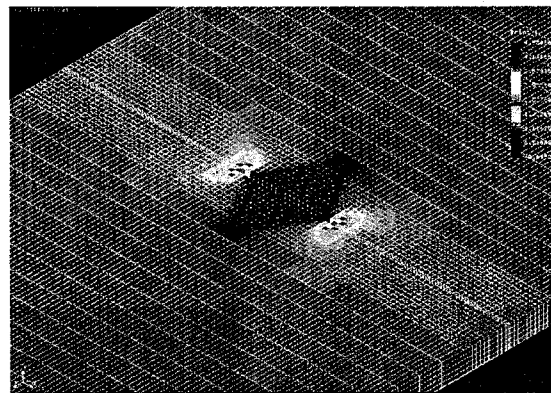


図-6 無補強解析結果（き裂全体）

4.2 き裂先端近傍の解析結果

(1) 無補強応力結果

無補強時の応力分布図を図-6 に示す。これより、き裂先端部分に応力集中が発生していることがわかる。しかし、き裂から離れるに従い応力は低減し、き裂先端から 10mm 程度離れることにより公称応力値である 100MPa へとになっている。

次に厳密解を式 (1) により求め、縦軸に最大主応力、横軸にき裂先端から X 軸方向の距離を取り、構造解析結果と比較した結果を図-7 に示す。これより、厳密解と構造解析結果とはほぼ同様の応力分布を示しており、構造解析のモデル化の妥当性が確認された。

$$\frac{(\sigma_y)_{y=0}}{\sigma} = \frac{a+r}{\sqrt{r(2a+r)}} \quad (1)$$

r : 亀裂先端からの距離, σ : 十分遠方での一様応力

(2) UV-C-FRP シート片面貼り付け

UV-C-FRP シート片面貼り付け側の応力分布図を図-8 に、シートが貼り付けられていない裏側の応力分布図を図-9 にそれぞれ示す。これらは無補強時と同様にき裂先端で応力集中が発生している。ただし、ここでは無補強時の 75% まで応力低減がなされている。これは、UV-C-FRP がき裂開口部に貼り付けられることにより、

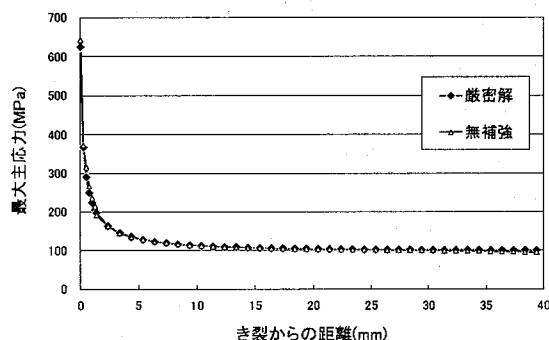


図-7 厳密解と解析解の比較

き裂開口部にかかる応力を分担していると考えられる。しかし、シートを貼り付けていない裏側では応力低減効果は見られず、無補強時のおよそ 1.06 倍の応力が発生している。これは、UV-C-FRP シート貼り付け側で、き裂開口部の応力を分担したのに対し、裏面のシートが貼り付けられていない面に最大応力発生の集中箇所が移動したものと考えられる。

(3) UV-C-FRP シート両面貼り付け

UV-C-FRP シート両面貼り付けの応力分布図を図-10 に示す。この結果においても、き裂から 0.125mm の位置において表、裏側どちらも同程度の応力集中が発生している。ここでは、無補強時の 78% まで応力低減がなされている。

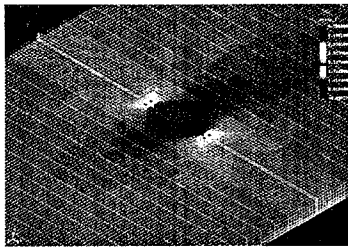


図-8 片面貼り付け(貼り付側)

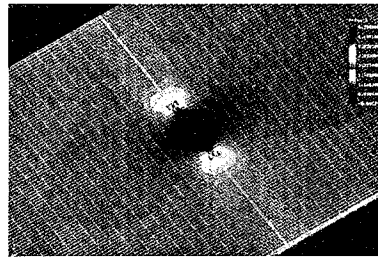


図-9 片面貼り付け(裏側)

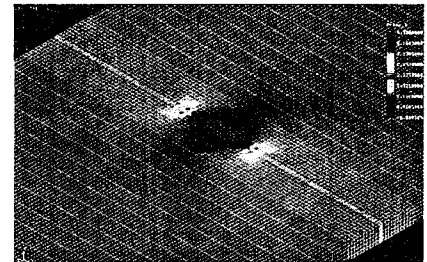


図-10 両面貼り付け

(4) 補強効果とき裂からの距離

図-11 には、横軸にき裂先端からX軸方向の距離、縦軸に最大主応力を取り、無補強時、UV-C-FRP シート片面貼り付け側、UV-C-FRP シート片面貼り付け裏側、UV-C-FRP シート両面貼り付けのそれぞれの発生応力を示す。

ここで、無補強時、UV-C-FRP シート片面貼り付け側を比較すると、き裂先端から 0.125mm の発生応力は、シート片面貼り付け側が無補強時の 75% まで低減している。しかし、き裂から離れるに従い応力低減効果は減少し、き裂から十分遠方では約 8% 程度の応力低減となっている。このことから、UV-C-FRP を供試体に貼り付けることにより、供試体にかかる応力自体を低減させるには至らないが、UV-C-FRP き裂開口部に貼り付けられれば、き裂開口部にかかる応力を分担し、これによりき裂開口部で応力低減効果が得られると考えられる。これに対して、無補強時と UV-C-FRP シート貼り付け裏側の発生応力を比較すると、前述のように応力集中箇所がシート貼付けの表面からシートが貼付けられていない裏面への移動することにより、無補強時より約 5% 応力が上昇することになった。

次に、UV-C-FRP シート両面貼り付けと UV-C-FRP シート片面貼り付け側を比較する。図-12 に供試体の板厚方向の補強効果を示す。両者ともに表側で発生する応力は近い値となっているが、シート片面貼り付けの方がシート両面貼り付けより若干高い補強効果が得られている。これは、シート片面貼り付け側は、き裂開口部を補強することにより応力がき裂の裏側へと移動するのに対し、シート両面貼り付けでは、両側のき裂開口部を拘束しているために応力集中箇所の移動ができず、シート片面貼り付け側よりも補強効果が若干減少したものと考えられる。しかし、シート片面貼り付け裏側と比べると、シート両面貼り付けでは表、裏側ともに一様に応力低減効果があるため、安定した補強効果が得られている。

4.3 応力拡大係数とき裂進展速度の評価

(1) 応力拡大係数 K の評価

前節より得られたき裂先端応力から式 (2) を用い、無補強時、UV-C-FRP シート補強時の応力拡大係数 K の評価を行う。この結果を図-13 に示す。図-13 より、厳

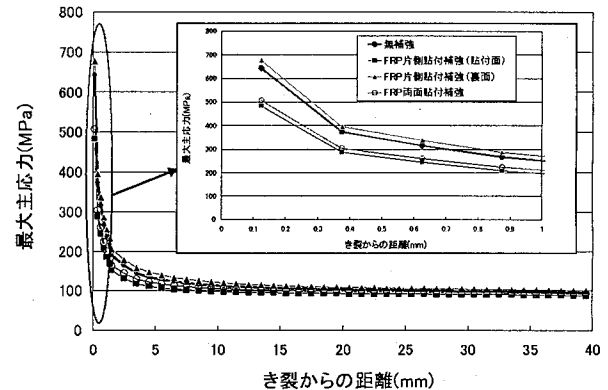


図-11 補強効果とき裂からの距離の関係

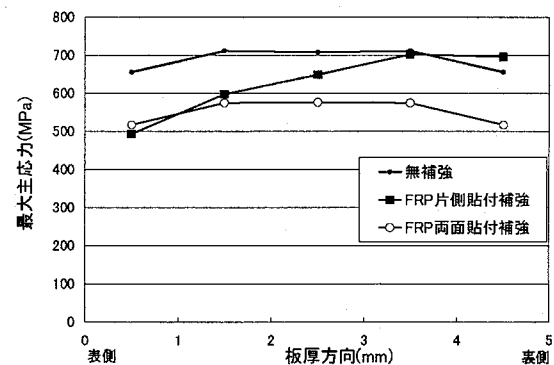


図-12 板厚方向の補強効果

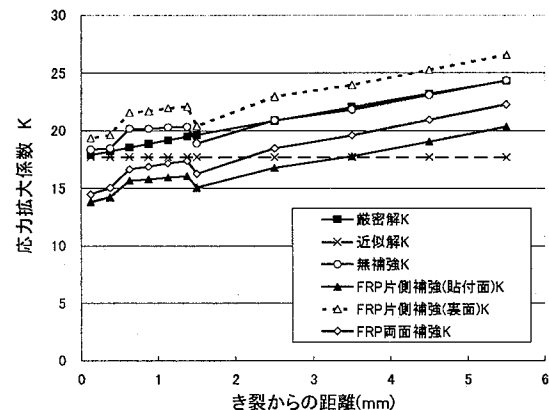


図-13 応力拡大係数 K の評価

密解 K 値と無補強 K 値は良い一致を示している。一方、通常、式 (3) で得られる無限板中の貫通き裂 K 値として与えられている近似解 K 値は、き裂先端近傍では厳密解と良い一致を示している。

$$(\sigma_y)_{y=0} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2)$$

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

r : 亀裂先端からの距離, σ : 十分遠方での一様応力,
 a : き裂寸法

(2) き裂進展速度の評価

前項より得られた応力拡大係数 K より Paris 則を用い式(4)から疲労き裂進展速度の評価⁹⁾を行う。

$$da/dN = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (4)$$

C, n : 定数, ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲

ここで, $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ では, $da/dN = 0$ である。

平均的な疲労寿命または疲労強度を求める場合には、平均設計曲線を用いるため、定数 C, n および下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は、 $C=1.5 \times 10^{-11}$, $n=2.75$, $\Delta K_{th}=2.9$ の値を用い疲労き裂進展速度を求める。

まず表-5 に示す繰り返し荷重 $\pm 33\text{kN}$ 時の公称応力値である 100MPa に着目する。無補強時と UV-C-FRP シート片面貼り付け側 (表) を比較すると、き裂進展速度を $1/2$ 以下に減少している。しかし、シートを貼り付けていない裏側では、無補強時と比較し若干進展速度が上昇している。また、シート両面貼り付け時は無補強時と比較すると、き裂進展速度を $1/2$ 程度まで減少していることがわかる。

次に同様に繰り返し荷重 $\pm 42\text{kN}$ 時、繰り返し荷重 $\pm 52\text{kN}$ 時の公称応力値である 150MPa , 200MPa における解析を行う。なお、 200MPa は、UV-C-FRP シートの引張強度ではあるが、ここまでは破断しないと仮定している。一方、Paris 則の性質から応力拡大係数範囲 ΔK が下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} に近いほど補強効果が現れると思われるので、公称応力値 25MPa においても解析を行い、き裂進展速度を求める。この結果を表-5 に示す。ここで、求めた疲労き裂進展速度を縦軸に疲労き裂進展速度を、横軸に応力拡大係数範囲をとり平均設計曲線上にプロットしたものを図-14 に示す。

これらの結果より、公称応力 100MPa , 150MPa , 200MPa すべての場合において UV-C-FRP シートでき裂開口部を覆うことによりき裂進展速度を無補強時の $1/2$ 程度まで減少させることができる。また、応力拡大係数範囲が下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} に近い公称応力 25MPa の場合においては、無補強時の $1/4$ 程度まで減少できる。これは、例えばき裂発生原因が低い繰り返し

表-5 各荷重における疲労き裂進展速度の評価

	公称応力値(Mpa)	σ	K	da/dN
厳密解	25	159.6	4.47	6.43×10^{-10}
	100	638.4	17.89	4.15×10^{-8}
	150	957.6	26.84	1.27×10^{-7}
	200	1276.7	35.79	2.81×10^{-7}
	公称応力値(Mpa)	σ	K	da/dN
無補強	25	169.3	4.59	7.12×10^{-10}
	100	655.6	18.37	4.46×10^{-8}
	150	983.4	27.56	1.37×10^{-7}
	200	1311.2	36.75	3.02×10^{-7}
	公称応力値(Mpa)	σ	K	da/dN
FRP補強 片面補強 (表)	25	123.3	3.46	1.73×10^{-10}
	100	493.2	13.82	2.03×10^{-8}
	150	739.8	20.73	6.23×10^{-8}
	200	986.4	27.64	1.38×10^{-7}
	公称応力値(Mpa)	σ	K	da/dN
FRP補強 片面補強 (裏)	25	172.7	4.84	8.66×10^{-10}
	100	690.9	19.36	5.16×10^{-8}
	150	1036.3	29.04	1.58×10^{-7}
	200	1381.8	38.72	3.49×10^{-7}
	公称応力値(Mpa)	σ	K	da/dN
FRP補強 両側補強	25	129.2	3.62	2.36×10^{-10}
	100	516.7	14.48	2.31×10^{-8}
	150	775.1	21.72	7.09×10^{-8}
	200	1033.4	28.96	1.57×10^{-7}

し荷重下で溶接欠損などによる場合においては、高い補強効果を得ることができることと等価である。

5. おわりに

本研究では、まず著者らの既存の疲労実験を整理することによって、F 型標識柱の応力集中部であるリブ上部部に UV-C-FRP シートを貼り付けて補強することで、繰り返し荷重 $\pm 33\text{kN}$, $\pm 42\text{kN}$ において、疲労等級が E 等級からほぼ D 等級程度まで上昇することがわかった。

次に構造解析において、UV-C-FRP シートで貫通き裂を有する供試体のき裂開口部を覆うことにより、き裂進展速度を無補強時の $1/2$ 程度まで減少させることが確認できた。また、応力拡大係数の下限界応力拡大係数範囲付近においては、き裂進展速度を無補強時の $1/4$ 程度まで減少させることも確認できた。

このような結果から、UV-C-FRP シートによる補強は、供試体にかかる応力自体を低減しているのではなく、き裂開口部の応力のみを分担して低減していることがわかる。一般に、弾性係数の低い材料で鋼に代表される弾性係数が高い材料を補強しても、補強効果はあまり認められないとされている。しかし、き裂を有する場合においては、弾性係数が低い材料でも補強効果が十分に期待できることを本研究により確認できた。これにより、紫外線硬化型樹脂の補強対策により、疲労寿命延命効果が期待できることがわかった。特に、小さな繰り返し荷重により生じる溶接部の欠損などには、効果が期待できると

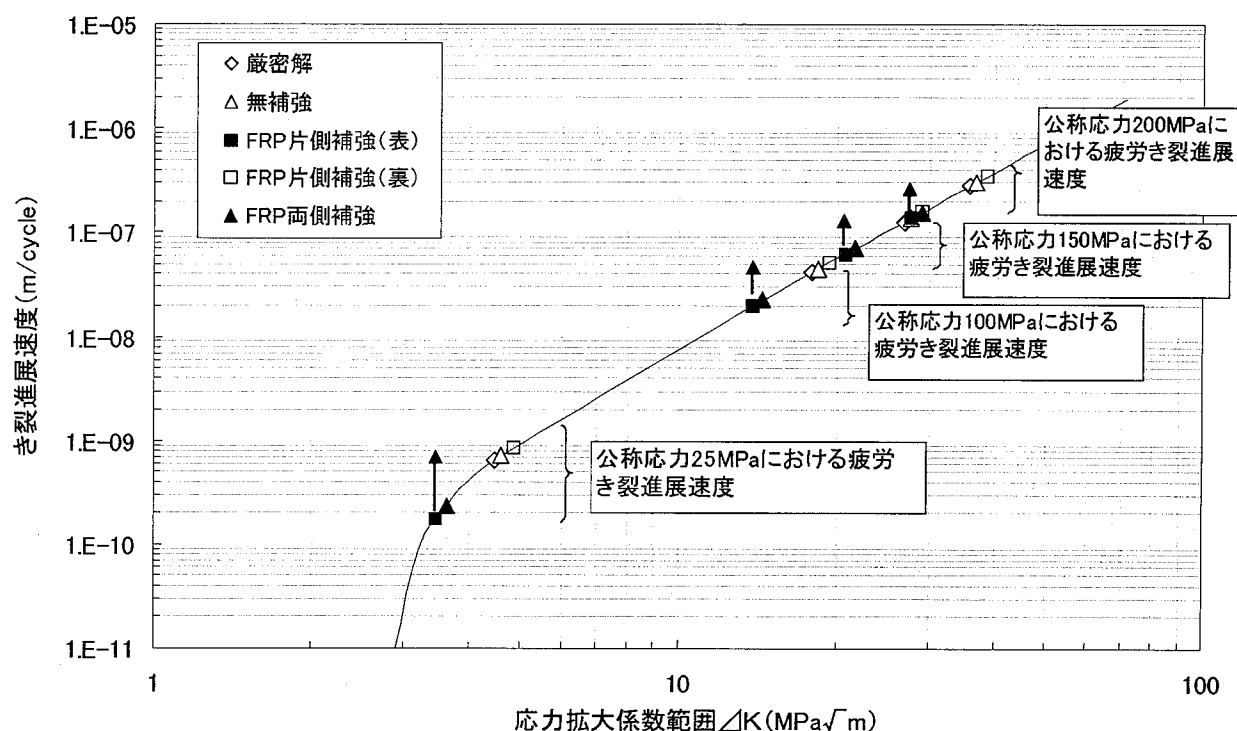


図-14 各荷重におけるき裂進展速度の評価

思われる。

今後の展開としては、ここでの研究を基に実際の橋梁上に取り付けられているF型標識柱のひずみ、加速度計測を行い、応力頻度解析から耐用年数を算出し、UV-C-FRP補強による延命効果を確認していく必要があると考える。次にき裂解析においては、本研究では初期のき裂長さ20mm、幅1mmの貫通き裂を有する供試体モデルにより解析を行ってきたが、これは今までの疲労実験において最初に目視で確認できるき裂長さが1mm～2mm程度であった経験則から得られたものである。そのため、この初期き裂長を変化させることにより補強効果の違いを検討し、どの段階において補強することにより補強効果を得ることができるかを検討していかなければならないと考える。併せて本解析モデルで用いた供試体での実験を行うことも必要である。さらに、ここでの結果では、UV-C-FRPシートを部分的にリブ回りのみに貼り付ければ効果が得られるのか、または全体に巻き付ける必要があるのかの判断に到っていないので、この点の確認も必要である。

謝 辞

本研究を行うに際し、疲労実験には愛知工業大学耐震実験センター（センター長：青木徹彦教授）を利用させて頂き、さらに同センターのスタッフの皆様から協力を得た。また、樹脂材料の面から大日本インキ化学工業株

野中眞一氏から助言と素材の提供を受けた。ここに記して感謝の意を表す。最後に、本研究の一部は、(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C)の研究助成ならびに中央大学理工学研究所共同研究費の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 井舎英生, 北田俊行, 山口良弘, 徳増健: 道路橋における照明柱・標識柱の振動特性に関する基礎的研究, 日本鋼構造協会 鋼構造論文集, 第11巻 第43号, pp.147-158, 2004.
- 2) 井舎英生, 北田俊行, 西岡敬治, 徳増健: 道路橋の門型標識柱の振動要因に関する研究, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.43-50, 2005.3.
- 3) 小塩達也, 李相勲, 山田健太郎, 森成顕, 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.1009-1071, 2001.3.
- 4) 山田健太郎, 近藤明雅, 小林且典, 宮本信治, 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.
- 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, pp.39-44, 2003.3.
- 6) 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.

- 7) 連重俊, 平野廣和, 青木徹彦, 井田剛史, 袁涌, 松井謙典:
紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の疲労実
験, 土木学会論文集 No.784/VI-66, pp.99-107, 2005.3.
- 8) 鈴木博之, 茶野木品, 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.
- 9) 山内隆, 中村一史, 前田研一, 鈴木博之: CFRP 板により
補修された鋼部材の疲労試験, 土木学会第57回年次学術
講演会, I-670, 2002.9.
- 10) 稲葉尚文, 富田芳男, 柴桃孝一郎, 鈴木博之, 岡本陽介:
GFRP シート貼付によるリブ十字溶接継手の補強に関す
る一提案, 土木学会論文集 No.788/VI-68, pp.89-99,
2005.9.
- 11) (社)日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.

(2006. 4. 13 受付)