

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

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。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著しい低下などの事例が発見されている。例えば、1999年に標識柱の基部補強リブ上端に疲労亀裂が発生、高架下の平面街路に落下した事例がある¹⁾。また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²⁾。

ところで、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基部の板圧を増やすことなどが行われているが、既設の標識柱や照明柱などは、発生頻度と施工性の困難さから通常点検による損傷の早期発見を主力として新たな補強策が施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が提案されている⁴⁾。これらは、汎用性、強度、耐食性などの長所によって土木構造材料としての用途が注目されつつある。しかし、構造物の補強・補修に用いる場合は、現場配合と臭気、硬化所要時間が長く振動下での作業性と品質確保に課題があるなど、供用下で施工するには解決すべき問題点が多く残されている。

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⁵⁾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。これら得られた結果に基づき、新たな補強対策として紫外線硬化樹脂による補強工法を提案する。これを疲労破壊が起こり易い長柱基部 (応力集中部分) へ施すことによって応力分散によるひずみ低減が確認されたので報告する。また関連して、全体系としての長寿化を果たす手法のための現実的補強手法と長寿命化への一提案を述べる。

2 補強材料および補強方法の検討

2.1 補強施工条件

供用開始後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、次のようになる。

- 一般交通への影響
(所要時間, 作業時間帯, 規制車線幅)
- 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)
- 耐用年数, 経年変化
(温度依存性, 維持効果, 点検メンテナンス)

これらを満足すれば必然的に補強施工中の交通負担を最小限度にすることが可能であり、作業時間の短縮化により施工にかかるトータルコストの大幅な削減が期待できる。そこで、紫外線硬化樹脂による繊維強化プラスチック (FRP) を提案する。

2.2 紫外線硬化樹脂の材料特性

紫外線硬化樹脂は、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。特徴としては、以下に示すことが挙げられる。

- ブレックス (現場配合不要)
- 早期硬化 (自然光硬化)
- 現場裁断 (シート状製品)
- 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物質や臭気、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大きいなどの原因によって、現場施工上の品質安定が難しいなどの問題点がある。これに対し本材料は、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大きく好転させている。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、 $3.1\text{N}/\text{mm}^2$ であり、かつ硬化時の線収縮率は1~2%、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。

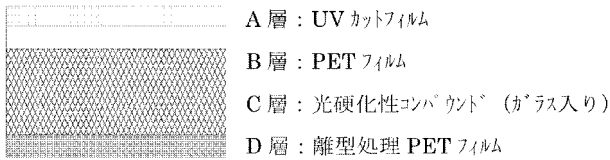


図1 紫外線硬化樹脂構成図

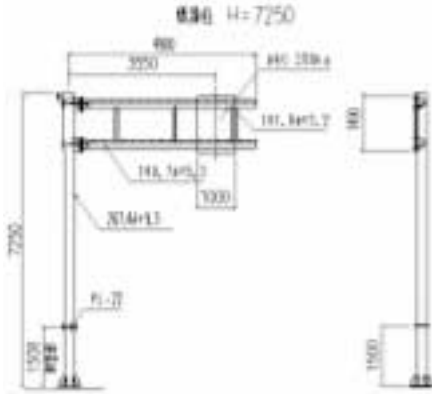


図2 F型標準標識柱モデル

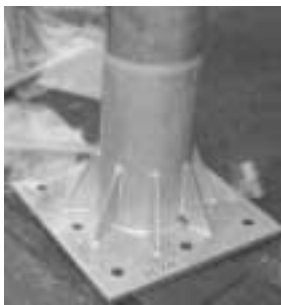


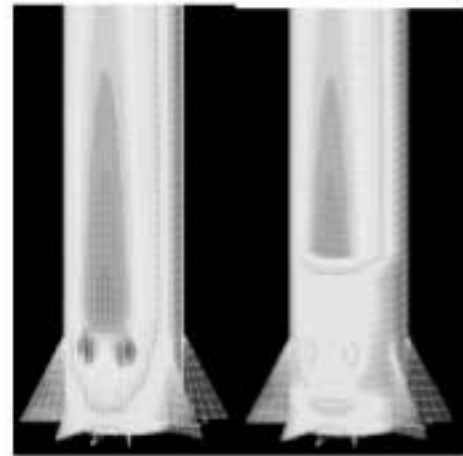
図3 紫外線硬化樹脂補強材貼付後

3 構造解析による補強効果の確認

実大モデルによる構造解析を実施する。基部断面変化点近傍は、応力集中の場であることからここに紫外線硬化のFRP樹脂を巻き付けることにより、疲労耐久性向上に対して評価する。モデルは、図2に示すF型標準標識柱とする。応力分散の方法としては図3の様に紫外線硬化樹脂を巻き付けて補強し、構造解析により応力発生状態を把握して補強効果の予測を行う。

3.1 解析条件

構造解析には、汎用構造解析用ソフトCOSMOS/Mを用いる。応力集中する基部周辺に、補強材を巻き付けた場合の静的解析を行う。補強材として紫外線硬化樹脂（FRP）を用い、幅、厚みをパラメータとした。幅は200mm, 300mm, 400mm, 厚みとして300mmを2枚張り合わせた計4ケースとした。なお、リブ上端の溶接部が熱応力の影響もあり、き裂破壊が生じやすいことを考慮して、リブ上端部より下へは、100mmの位置にFRPシート下端が来るよ



無補強タイプ 紫外線硬化型樹脂補強タイプ
(FRP貼付幅300mm1枚貼付)

図4 応力分布図

うに巻き付ける。強制変位として、塔頂部へボールの直径の約1/3の100mmを与えた。

3.2 構造解析結果

無補強タイプとリブ上端から300mm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4に示す。両者の比較から、FRPを貼り付けた位置での明かな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180N/mm²まで10%程度まで低減されており、許容引張応力レベルまで低減している。

さらにどの補強パターンについても、これらの傾向は全体的に同じである。また300mm幅で補強層数を変化させたが、厚さの影響は断面応力には顕著に表れなかった。これは、基部周辺の有効断面積が補強により変化し、その結果応力が低減したこと、応力集中部の引張耐力が増加した影響と考えられる。

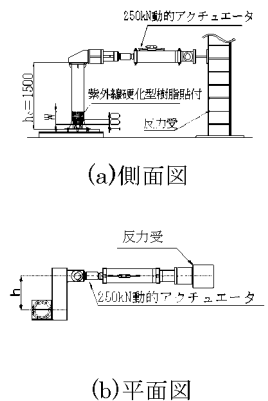


図5 疲労試験載荷装置

構造解析の結果から紫外線硬化樹脂による補強は十分効果があると予測される。

4 実大モデルによる疲労試験

4.1 実験概要

疲労試験に用いる供試体は図2に示す標識柱取替部のみとする。実物大実験の供試体基部と同じ応力状態が、紫外線硬化樹脂 FRP 貼付補強した供試体に発生するように載荷する。試験載荷装置の概念図を図5に示す。F型標準標識柱全体の振動特性を考慮すると、横に張り出している標識部分の影響によるねじりが支配的であり無視できないことから、1500mm 供試体による試験においても応力状態を再現するため図5(b)に示すように供試体上部を偏心載荷する。実大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載荷点偏心量 h を決定した。ここでは、偏心量 $h=590\text{mm}$ を採用する

疲労試験は、構造解析の4種類に加え貼付層数2枚、プライマー塗装の有無を考慮して6種類とした。

加振条件は、疲労試験供試体の降伏ひずみを求め、疲労試験に用いる加振振幅と加振荷重を決定した。供試体の降伏ひずみは、水平力を偏心載荷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6に示す。降伏荷重は約140kN、降伏ひずみは約2800 μ であることがわかる。疲労試験に用いる荷重は、紫外線硬化樹脂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。そのため弾性域の最大荷重の約1/3の40kNとその時の片振幅約10mmを疲労試験の基本となる加振荷重と加振振幅とする。疲労試験では、250kN 動的アクチュエータを用いて、2.0Hzの一定振動を与える。加振装置操作上の現実的問題として疲労き裂部では荷重の変動低下が発生するので本実験では荷重を一定に保ちながら振幅を調整する。

4.2 実験結果

ひずみゲージの計測結果および繰り返し振動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7, 8に示す。縦軸は最大ひずみから最小ひずみを引いた絶対値を示す。図7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8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は徐々に変化して、ある回数を超えると急激に変化の度合いが大きくなり、その後で差が小さくなることからわかる。この現象と実験中の目視によりき裂発生が確認できた振動回数がほぼ一致している

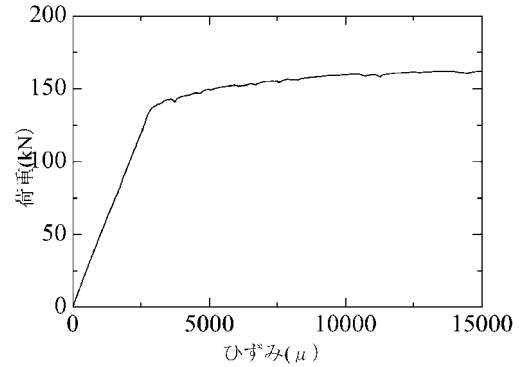


図6 荷重 - ひずみ曲線

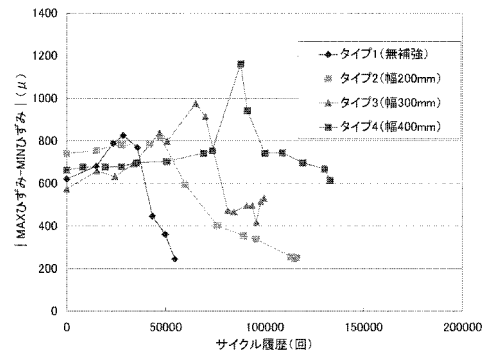


図7 ひずみとサイクル履歴 (タイプ 1,2,3,4)

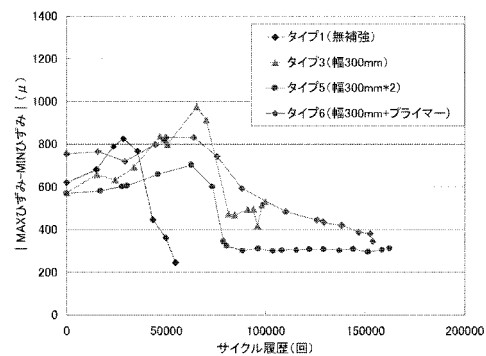


図8 ひずみとサイクル履歴 (タイプ 1,3,5,6)

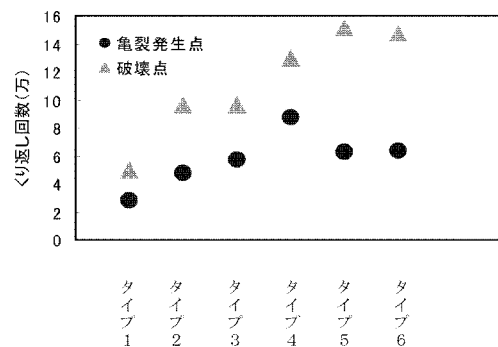


図9 き裂発生回数と破壊に至る回数

ことがわかった。ここに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。なお、シートを貼り付けていることから一般に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考えられるころから、鋼材とシートの間なき裂内側から空気が入り込んでシートが白濁するので、これで確認は可能である。また硬化後の打撃音検査でも確認が可能である。

図9に各供試体のき裂発生回数と破壊点回数を示す。き裂発生点に関して、補強シートの幅を増していけばほぼ線形的に繰り返し回数が伸びていくことがわかる。き裂発生点の繰り返し回数が伸びるということは、疲労強度が上がっていると考えられるので、補強幅を増やすことの影響が確認できる。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、強化プライマーを塗布することは、繰り返し回数にあまり変化が見られないため、き裂発生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いる。この破壊点に至ると標識柱が倒壊するという事例が発生するので、き裂が入るといっても破壊までの許容繰り返し回数が増えれば良いと考えるべきである。その観点から考察すると幅が300mmの場合、1枚巻いた時の繰り返し回数が9.5万回であったのに比べ、同じ補強幅でも、巻き数を2枚に増やすことや強化プライマーを塗布することにより、繰り返し回数が約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も補強により進展状況に変化があることが判断できる。

5 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よる倒壊の可能性に着目して、それらの中での代表例として最も複雑な挙動を示し重心の高いF型標準標識柱を選定した。疲労破壊の起こりやすい長柱基部最大応力部を構造解析による数値計算と実大モデル試験による荷重と歪み計測の両面からそ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実部材に再現して主応力レベルとその応力分布を把握できた。そのうえで、現場施工を前提にした新素材の紫外線硬化樹脂を用いた具体的な補強対策を提案、これを構造解析に反映、疲労試験によって補強手法による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数値解析と

実験の両面から実応力の分散効果による発生応力の低減、その応力差による疲労強度差から長寿命化補強を可能とした。

参 考 文 献

- [1] 小塩達也他：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，2001.3
- [2] 山田健太郎他：鋼管柱基部の疲労強度，構造工学論文集，Vol.38A，1992.3
- [3] 池田憲二他：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] 大倉一郎他：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，2001.11
- [5] 佐藤武司他：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