

照明柱疲労評価に関する考察

保全施設部 電気通信課 建 部 実
保全施設部 保全技術課 高 田 佳 彦

要 旨

阪神高速道路に設置されている照明柱は、定期的に目視による近接点検を行っている。それらは風、および交通振動等の影響によって常時振動しており、鋼構造物としての疲労損傷が懸念されている。そこで、照明柱の劣化度をより確実かつ効率的に診断し、維持管理の効率化とコスト縮減を図る必要がある。これらを背景に、光ファイバセンサー技術を活用した照明柱モニタリングシステムの構築を目的として、疲労損傷評価に関する研究に取り組んでいる。本稿では平成 11 年度から取り組んでいる研究の経過を報告し考察を行うものである。

キーワード:維持管理効率化, コスト縮減, 疲労強度, 振動計測, 振動解析, モニタリング, 振動要因

1. 照明柱の疲労損傷の評価要素

はじめに

近年、光ファイバセンサー技術やコンピュータネットワーク技術が発展し、さまざまな分野への応用が進んでいる。

これらの技術を活用し、鋼構造物としての疲労による照明柱の劣化度診断をより確実かつ効率的に実施していくため、定期的な目視による近接点検に代えて遠隔地からの広範囲な振動データのモニタリングを行い、必要最小限の場所・時期に限定した近接点検との組合せにより、維持管理の効率化とコスト縮減が期待されるようになった。

この様な背景の下、阪神高速道路公団では平成 11 年度より光ファイバセンサー技術の有効性検証を開始し、モニタリングシステムの構築を目的とした研究に着手している。

本稿では、これまでの検討成果から照明柱の疲労損傷に関する評価方法の検討経過を報告し、計測結果の考察を行うものである。

照明柱の疲労損傷評価に必要な要素には

- (1) 応力集中部位の疲労強度
- (2) 照明柱の振動状態
- (3) 照明柱の応力状態

が挙げられる。これらの要素が明確となれば、照明柱の疲労損傷評価を行うことが可能となる。

1-1 照明柱疲労強度の把握

照明柱の疲労強度は、対象となる照明柱の供試体を用いて疲労試験により把握することができる。また、疲労強度は照明柱の構造形式（継手形状、板厚、基部リブ配置、ハンドホール形状等）により定まるため、その形式により疲労強度が異なると考えられる。

平成 14 年度には照明柱における応力集中部位の一つである、照明柱基部の疲労試験を行った。疲労試験の供試体とした照明柱基部構造および治具取付方法を図-1 に示す。

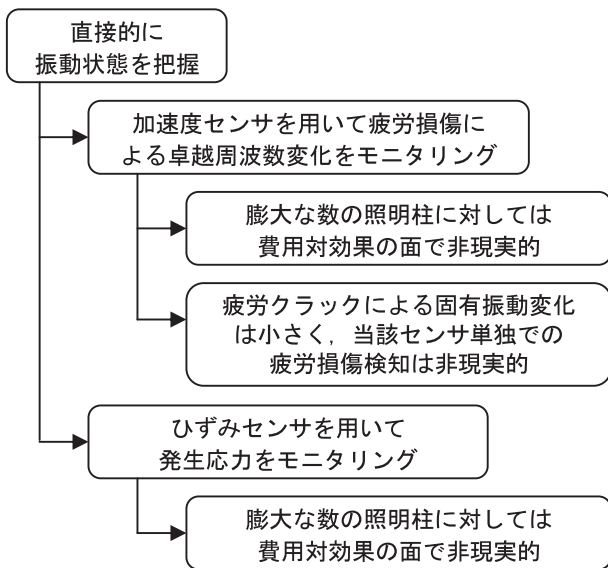


図-3 直接的な手法における問題点

が橋梁や照明柱をモデル化した構造解析による手法や、橋梁の支間長などにより簡易計算する分析手法である。これにはさまざまな構造形式の組み合わせや振動要因の影響を検証する必要がある、実用的な成果を得るためには図-4に示す問題点を解決する必要がある。

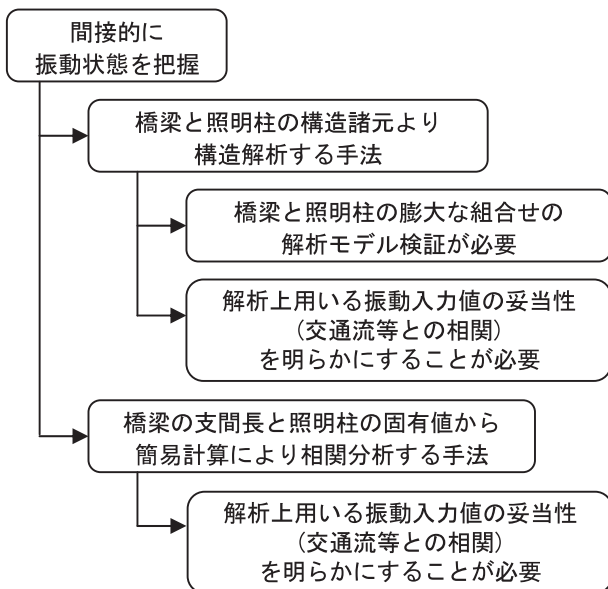


図-4 間接的な手法における問題点

2. 照明柱の疲労損傷の評価方法

2-1 照明柱の疲労損傷の評価方法

照明柱は振動計測結果を用いることによって、

第1章で述べたように疲労寿命を予測することができる。しかし、図-3で示したように全ての照明柱に対して行うことは現実的ではない。

一方、解析的な手法のみでは図-4で示したように実際に発生している全路線の振動状態を定量的に把握することは極めて困難である。

そこで、構造形式や設置条件に応じたグルーピングにより代表点の照明柱および橋梁の振動状態の計測を行い、振動要因との相関性を確認することが必要と考えられる。加速度やひずみなどの計測に用いるセンサ技術としては、精度面、機能面において光ファイバセンサー技術の利用が有効であると考えられる。

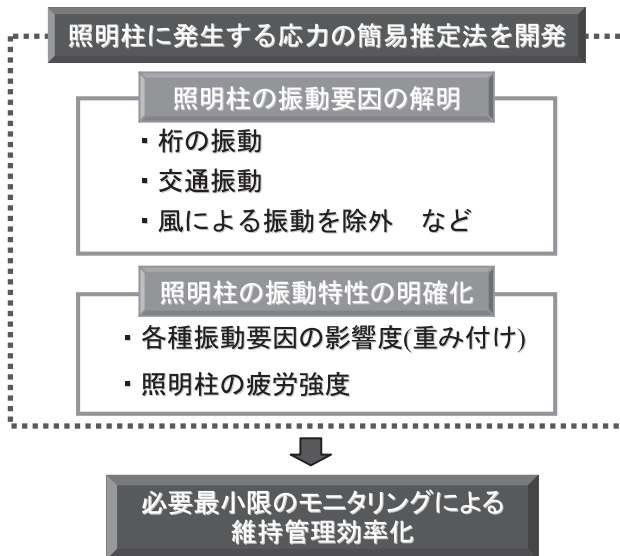
将来的にこれらの計測と振動解析の長所を活かして効果的な組合せを見出すことにより、必要最小限の計測結果を元に路線全体の照明柱の疲労寿命の推定を簡易的に行うことが可能となれば、維持管理の効率化とコスト縮減に有効な照明柱疲労損傷評価システムの構築が期待できる。

そのためには、照明柱に対する振動要因を解明し、その要因ごとの影響度から【必要最小限のモニタリング】の結果を用いた【照明柱に発生する応力の推定(振動要因と計測値の関数化)】が必要である。図-5に照明柱疲労損傷評価システムのイメージを示す。

なお、照明柱に対する振動要因のひとつとして風による振動励起が考えられる。「照明柱の風による挙動と影響に関する検討業務報告書：阪神高速道路公団(平成12年6月)」によれば、風による振動が照明柱に大きく影響するのは、長大橋上などに設置された照明柱と他の構造物(主塔など)の位置関係や風況によって、共振状態を引き起こすカルマン渦が放出される特異な状況が考えられる。よって、風による振動は今回検討する振動要因としては対象外として検討することとした。

2-2 照明柱振動要因のグループ化

照明柱の振動に対する振動要因とその影響度を把握し易くするため、振動要因によるグループ化が有効であると考えられる。照明柱の振動要因に



図－5 照明柱疲労損傷評価システムイメージ

よるグループ化として考えられる指標を表－1に示す。本稿では桁の振動計測データと照明柱振動計測データを比較検討し、表－1の中でも比較的相関性が高いと予想される、桁の固有周期や振動モード等の影響度の把握を試みた。

なお、橋梁形式に応じた支間長と固有振動数との関係式は後述する一般的な計算式のほか、阪神高速湾岸線および大阪港線の実測データ回帰式も参考にして求めることとした。

3. 現地計測

3-1 調査内容

代表点の照明柱および橋梁の振動計測を行い、

種々の相関有無を確認し、照明柱の振動要因の把握を試みた。

調査は、阪神高速道路5号湾岸線（神戸市東灘区）に設置されている照明柱のうち、3径間連続鋼床版箱桁構造の端部径間である海 P192～P193上に設置されている照明柱1基を対象に測定を実施した。なお、当該照明柱は概ね支間中央に位置している。

照明柱の振動計測点としては、基部・中間部・上端部とし、それぞれ3方向成分の計9測点に振動加速度計を設置した。また、疲労評価の着目点として基部にはひずみゲージ（2方向成分、計4測点）を設置した。橋梁の振動計測点としては主桁（鉛直方向のみ6点）と路面上（鉛直方向のみ1点）とし、それぞれ振動加速度計を設置した。振動計測点位置図を図－6に示す。

計測対象とした照明柱は第1章で述べた疲労試験で採用した照明柱形式と同一形状のものである。

3-2 振動モード等の計測結果

振動計測結果は、照明柱振動が大きくなる（1400cm/s²程度以上）ケースのうち代表的な応答波形に着目して卓越周波数や振動モード等の詳細な分析を行った。

主桁および照明柱振動の周波数スペクトル分析結果から卓越周波数を求め、得られた卓越周波数から振動モードを求めている。

各周波数帯における振動モードを表－2に示す。

表－1 照明柱振動要因によるグループ化指標

着目する計測データ	想定される照明柱振動要因	グループ化指標
桁の振動計測データ	桁の固有周期	橋梁の支間長で整理
	桁の振動モード	照明柱の設置位置で整理
	桁の振動の程度 (振動振幅など)	曲線橋または直線橋 大型車交通量で整理
交通流等のデータ	交通量（大型車混入率）	車種ごとの実交通量で整理
	伸縮装置の影響	照明柱と伸縮装置との離隔距離で整理
	路面凹凸	舗装の修復からの年月で整理

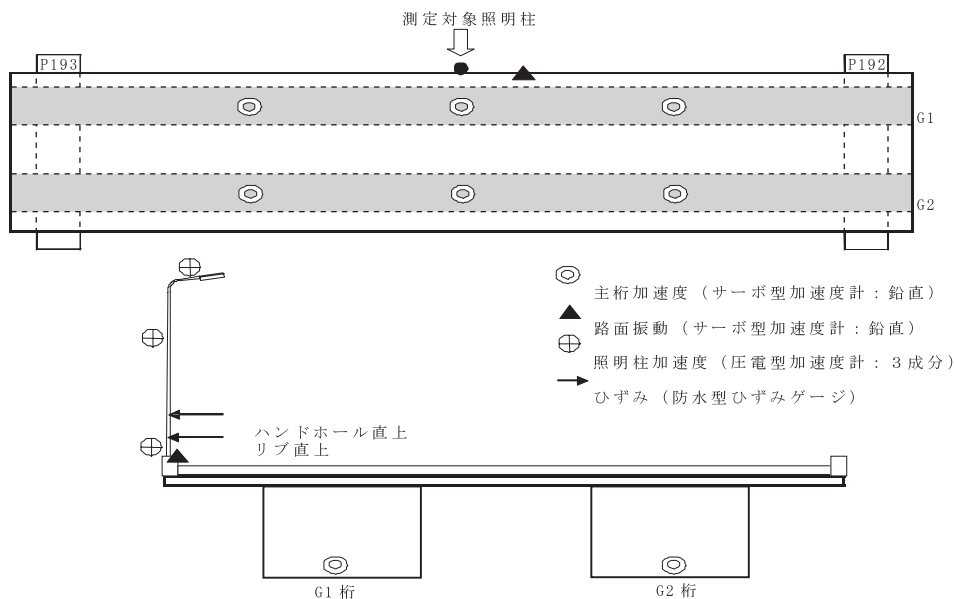


図-6 振動計測点位置

なお、表中に示す加速度振幅は3方向で最大のものとしている。また、照明柱については振動レベルの傾向を把握するためモード別振幅比較を行っている。

表-2より、主桁振動においては3次および4次モードが、また照明柱振動においては3次モードが最も卓越しており、この時照明柱は橋軸直角方向において振幅が卓越していることが分かった。

表-2 各周波数帯における振動モード

主桁振動モード一覧				照明柱振動モード一覧			
モード番号	1	モード番号	5	モード番号	1	モード番号	5
中心周波数	1.4 Hz	中心周波数	7.0 Hz	中心周波数	1.4 Hz	中心周波数	11.2 Hz
加速度振幅	6.5 cm/s ²	加速度振幅	10.5 cm/s ²	加速度振幅	36.5 cm/s ²	加速度振幅	79.7 cm/s ²
モード図		モード図		モード図		モード図	
モード番号	2	モード番号	6	モード番号	2	モード別振幅比較	
中心周波数	1.8 Hz	中心周波数	8.0 Hz	中心周波数	3.0 Hz	橋軸方向	
加速度振幅	17.5 cm/s ²	加速度振幅	7.5 cm/s ²	加速度振幅	220.4 cm/s ²		
モード図		モード図		モード図		橋軸直角方向	
モード番号	3	モード番号	7	モード番号	3		
中心周波数	3.2 Hz	中心周波数	9.2 Hz	中心周波数	4.9 Hz	鉛直方向	
加速度振幅	67.0 cm/s ²	加速度振幅	14.3 cm/s ²	加速度振幅	352.7 cm/s ²		
モード図		モード図		モード図			
モード番号	4	モード番号	8	モード番号	4		
中心周波数	4.9 Hz	中心周波数	10.5 Hz	中心周波数	9.8 Hz		
加速度振幅	34.1 cm/s ²	加速度振幅	13.9 cm/s ²	加速度振幅	167.2 cm/s ²		
モード図		モード図		モード図			

3-3 橋梁固有周期の簡易計算式との比較結果

橋梁の固有周期の簡易計算式としては種々の計算式が提案されている。ここで参考とする計算式はそれぞれ表-3のとおりである。

なお、表-3のうち阪高実験式については20mから500mの支間長に対して示された鋼橋に対する実測データ回帰式である。

これら計算式による固有周期と支間長の関係を図-7に示す。

計測対象の橋梁支間長(63.5m)における固有振動数としては、表-2より曲げ一次モードで $f=1.4\text{Hz}$ 、および 1.8Hz が計測されている。

これは、当該計測区間が3径間連続鋼床版箱桁構造の端部径間であり、連続径間の異なる支間長(P193~194, P194~195)の固有振動が影響した

表-3 固有周期の簡易計算式

計算式	適用形式	出典
$f = 49.1 * L^{-0.779}$	単純桁 連続桁	振動便覧
$f = 100/L$	特に 指定なし	耐風設計 便覧
$f = 89.4 * L^{-1.034}$	連続箱桁	阪高実験式
$f = 161.1 * L^{-1.131}$	全橋梁	阪高実験式

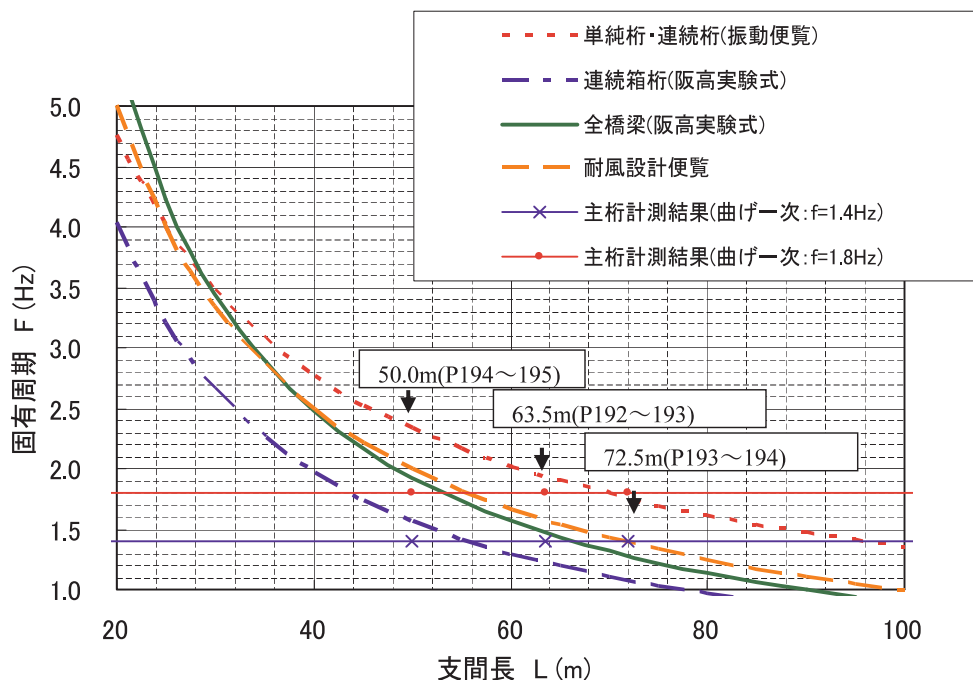


図-7 簡易計算式による固有周期と支間長の関係

ものと考えられ、これらを考慮すると当該計測区間における橋梁の固有振動数の簡易計算式としては、「全橋梁(阪高実験式)」または「耐風設計便覧」が最も近似している。

3-4 主桁と照明柱の卓越周波数の比較結果

照明柱の振動は上段部の鉛直方向および中段部の橋軸直角方向が明らかに大きいため、主としてこの測点のデータについて着目し、主桁と照明柱の卓越周波数を比較した。

主桁振動の影響を評価するため、周波数領域における加速度の比(照明柱/主桁)を求めたのが図-8である。

図-8より、4.9Hzならびに9.8Hzの周波数帯で主桁振動より大幅に増幅される傾向が認められる。また、主桁振動に大きな振幅が見られない1.4Hz付近の周波数帯においても増幅される傾向が認められ、いずれも照明柱の固有周期の影響であると考えられる。

3-5 照明柱振動加速度と応力の比較結果

前節と同一のデータに着目し、照明柱における応力集中部位であるハンドホール直上と基部周辺において各周波数帯の応力を比較した。

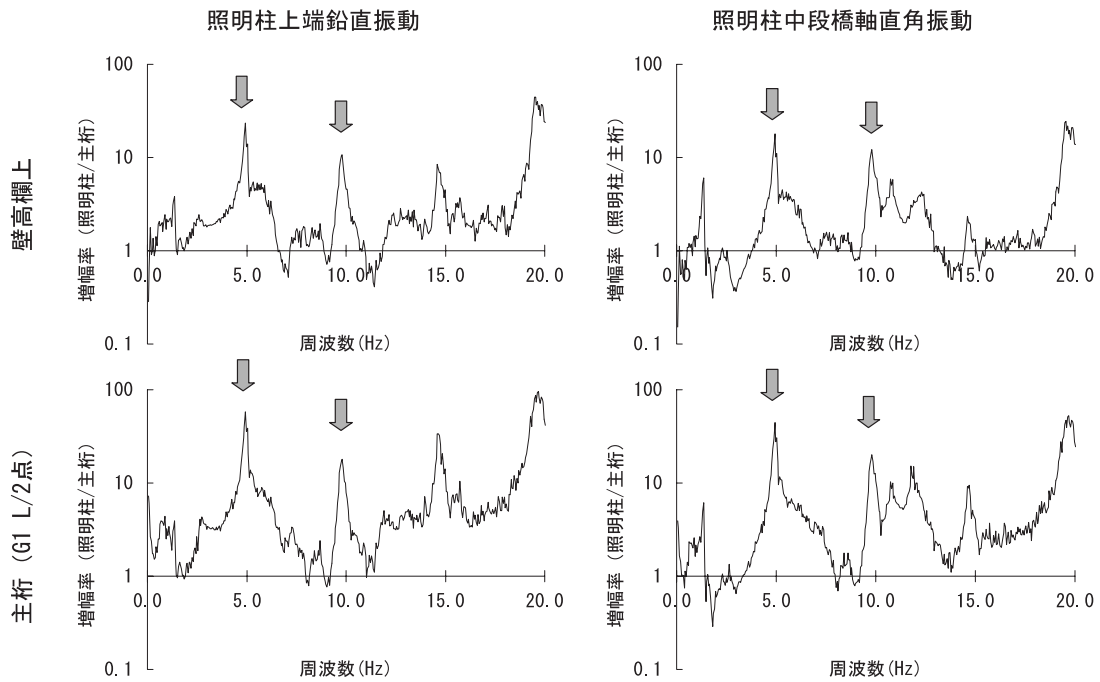


図-8 照明柱と主桁振動における振幅比スペクトル

照明柱応力波形の周波数分析結果を図-9に示す。

図-9より、応力振幅の大きさは表-2や図-8で示した卓越周波数付近で大きくなっており、特に1.4Hz付近の成分は主桁や照明柱の振動加速度としては著しく大きなものではないが、応力振幅としては比較的大きくなる傾向が認められる。

これらはいずれも照明柱の固有周期と振動モードが影響しているものと考えられる。

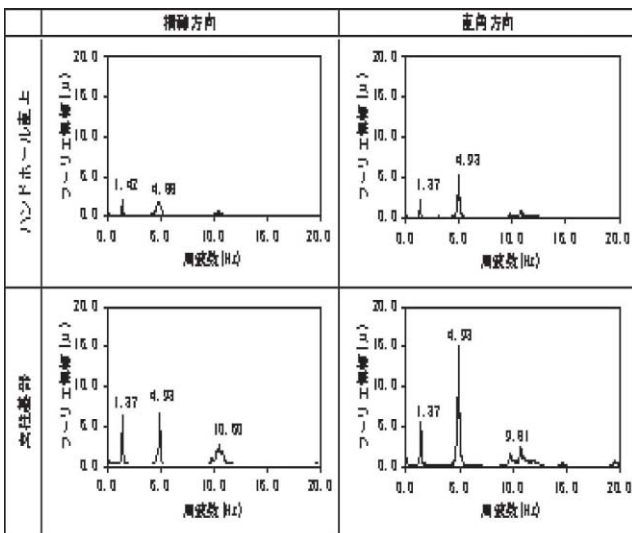


図-9 照明柱応力波形の周波数分析結果

4. 考察

4-1 計測結果による考察

- (1) 橋梁の振動は曲げ3次(3.2Hz)、曲げ4次(4.9Hz)が卓越しているが、他の振動モードも確認された。
- (2) 照明柱の振動は、曲げ1次(1.4Hz)、曲げ3次(4.9Hz)が卓越しているが、他の振動モードも確認された。
- (3) 照明柱の計測結果より、加速度応答に対しては3次モード(4.9Hz)の影響が、またひずみに対しては1次モード(1.4Hz)の影響が大きいことが分かった。
- (4) 橋梁および照明柱の計測結果より、照明柱で卓越が認められる周波数帯では、主桁も卓越していることから、両者に因果関係があると考えられる。特に今回計測地点においては橋梁の曲げ1次だけではなく曲げ3次の振動モードが照明柱の振動に大きく影響している可能性がある。

4-2 振動要因によるグループ化に関する考察

橋梁と照明柱の振動特性には主に固有周期に関連した因果関係があり、グループ化への指標とし

て主桁の固有周期に着目することは有効である。

一方、橋梁の振動モードと照明柱の設置位置の関係によっては、曲げ1次だけでなく高次モードの影響も無視できないことが明らかとなった。

主桁の固有周期については支間長をパラメータとする推定式が存在するが、これらの推定式はいずれも曲げ1次モードのみを対象としており、それ以降の高次モードに対する有効な推定式は存在していないのが現状である。

今後、主桁の固有振動特性が明らかとなれば、【主桁の固有周期】、【照明柱の設置位置】をグループ化への指標とし、【主桁の振動振幅の大きさ】との関係から照明柱の振動振幅の大きさおよび着目点の応力レベルが推定できる可能性がある。

また、【照明柱の固有振動（形式）】の違いによる周波数応答特性も考慮することで、照明柱の振動特性をより正確に把握することが期待できる。

5. 今後の展望

本稿では照明柱疲労損傷の評価システム実現に向けた可能性と課題を示した。

昨年度までには、阪神高速道路の電気通信設備に関する調査検討委員会において光ファイバ振動センサやひずみセンサなどのセンサ方式を検討し、それぞれに要素技術として実用化が可能であるとの検証結果を得た。また、モニタリングに活用する上で必要な光ファイバセンサスペックや今後の課題を整理している。

今後は、さらに主桁や照明柱の特性（振動モード・固有周期・周波数応答・応力分布・疲労等級

など）の解析による把握や交通流を含めたグループ化への指標との関係整理、サンプル計測によるフィードバックを行い、計測と解析の組合せ方法、モニタリングの規模、ならびに費用対効果算出の条件を具体化していく必要がある。

これらの検討および計測の結果から得られた各種の知見は、新設照明柱の最適な構造設計に必要な条件としても有効に活用していく所存である。

謝辞：光ファイバセンサー技術の応用検討をきっかけに、照明柱疲労評価システムの可能性について多大なご指導をいただいた「阪神高速道路の電気通信設備に関する調査検討委員会（委員長：南山大学長谷川利治教授）」の関係各位にはこの場をかりて謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993年
- 2) 阪神高速道路公団：照明柱の風による挙動と影響に関する検討業務報告書，2000年6月
- 3) (社)土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985
- 4) (社)日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991年7月
- 5) 中井 博，吉川 実，佐々木伸幸，原 忠彦，氏原隆澄：阪神高速大阪港線の初期値振動特性実験，第2回橋梁振動に関するコロキウム論文報告集，pp.145-150，1989年8月
- 6) 阪神高速道路公団：阪神高速道路の電気通信設備に関する調査検討業務報告書，2003年3月
- 7) 阪神高速道路公団：阪神高速道路の電気通信設備に関する調査検討業務報告書，2004年3月

STUDY FOR TIREDNESS EVALUATION OF ROAD LIGHTING PILLAR

Minoru Tatebe and Yoshihiko Takada

Road Lighting Pillars on the Hanshin express-way are regularly checked by adjacently watching. Those pillars always vibrate by the influences such as winds and traffic vibrations, so the fatigue of the steel structure is feared. Against the background of these, we are working on the research on the tiredness evaluation to construct The Monitor System of Road Lighting Pillar that uses optical fiber sensor technology.

In this paper, we report and consider the process of research since 1999 fiscal year.