

画像ベースの振動計測技術を活用した、 耐震補強が必要となる 都市内高架橋上の照明柱の同定抽出法に関する研究

横浜国立大学 先端科学高等研究院 上席特別教授 藤野陽三

概要：

1995年の道路橋の耐震設計基準の改定とともに、橋梁自体の耐震性は極めて向上し、被害も目立たなくなってきた。その一方で照明柱などの付属物の被害が目立つ事例が増えてきた。照明柱の倒壊は車両歩行者にとって危険なだけでなく都市内高架橋の機能を著しく低下する可能性が高い。本研究では高架橋と照明柱が共振状態にある時どの程度の揺れが発生するかを調べ、補強が必要となる共振振動数の範囲を求めた。また実際の高架橋並びに照明柱の固有振動数を非接触で地上から計測する画像モニタリングの方法を位相ベースの運動拡大法（2013年MITメディアラボで開発）を適用し、十分高い精度で計測できることを屋内実験、フィールド実験、首都高速高架橋において明らかにした。

キーワード：照明柱、耐震性能、固有振動数、都市内高架橋、画像モニタリング

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以後、道路橋の耐震設計基準が改訂された。既存構造物の補強も進み、橋の耐震性が高まり、最近の地震では橋梁本体の大きな被害は減少している。一方で、構造物本体に被害がなくても、付属構造物である照明柱や標識柱の被災が懸念され、事実、その事例も出てきている。

高架橋上の照明柱は、直接地動を受けるのではなく、高架橋により間接的に加振され、高架橋と固有振動数が一致すると共振現象が起こりうる。

道路側への倒壊等の被害を受けた場合、人的・物的被害の恐れや、交通遮断、物資輸送の阻害に繋がることが予想される。こうしたことから道路橋付属物の耐震性への懸念は高まっているが、死荷重と風荷重を考慮した弾性設計がなされ、地震に対する考慮がされておらず、対策も全く実施されていないのが現状である。首都高速道路は1日に100万台に近い車両が利用しており、都市内の交通網として非常に高い割合を占めている。地震によって付属構造物が道路側へ倒壊すれば、車両通行が不可能になり、交通機能が著しく低下する可能性が高い。

そこで本研究では、首都高上の付属構造物のうち、数の多い照明柱を対象に、地震時に高架橋と共振し、被害が発生する危険性のある照明柱を抽出する方法を検討する。

解析対象は、首都高で平成27年から標準型式とされて

いる図1に示す照明柱である。振動計測実験により、減衰比は橋軸方向0.11%、橋軸直角方向0.16%と非常に低いことが明らかになった。

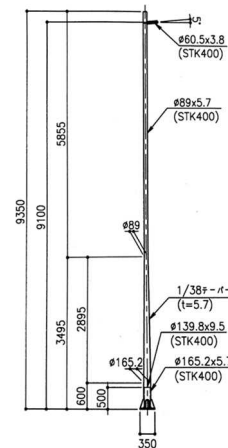


図1 解析対象

2. 地上の照明柱の地震時安全性

有限要素法解析ソフトウェア Abaqus を用いて照明柱をモデル化し、応答解析を行った。基部は完全固定、灯具は集中質量、減衰比は実験結果より0.1%とした。高架橋を1自由度系としてモデル化し、ばね剛性を変化させること

で、固有振動数を変化させた。地震加速度を高架橋モデルに入力し、得られた加速度を照明柱モデルに入力することで、高架橋上の照明柱の応答をシミュレーションした。入力加速度は、耐震設計上の L2 地震動タイプ I 地震動の I 種、II 種、III 種地盤の標準加速度波形である。固有振動数比と最大応力の関係を図 2 に示す。固有振動数比 β =高架橋の固有振動数/照明柱の固有振動数とし、 $\beta=1$ のとき両者は完全に共振する。図 3 より、降伏応力を超える応力が生じる危険性がある固有振動数比の範囲は、0.4~1.3 程度であることが分かる。つまり、固有振動数が 0.5~1.6Hz の高架橋上の照明柱は降伏の危険があると明らかになった。

次に、実際の高架橋モデルを用いて解析を行った。中央環状線モデルに L2 設計地震動を作用させた場合の、高架橋上の照明柱に生じる最大応力を図 4 に示す。これより、どの地震波を入力した場合も降伏応力を超える応力が生じる。中央環状線の 1 次固有振動数は 1.43Hz と、上述の危険な固有振動数範囲に入っており、L2 地震では降伏応力を大きく超えることが実際の高架橋で起こりうることを示された。

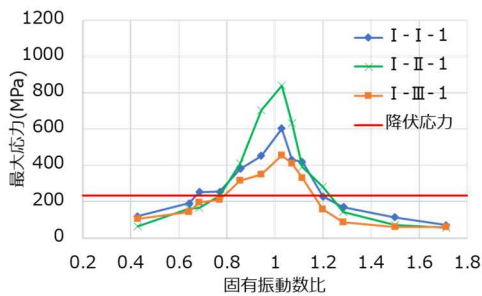


図2 L2 設計地震動入力時高架橋上の照明柱の最大応力

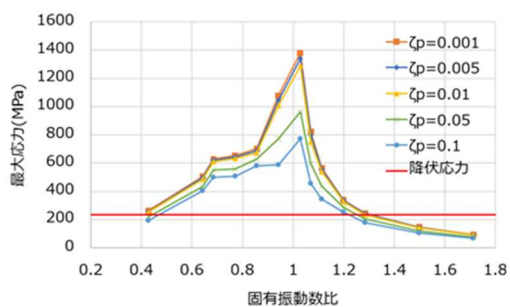


図3 照明柱の減衰比を変化させた場合の最大応力

L2 相当の地震発生時に降伏の危険性がある照明柱は、0.5~1.6Hz の固有振動数の高架橋上のものであると明らかになった。これより、高架橋と照明柱の固有振動数の把握が重要になってくる。この成果は(文献 1) に発表している。

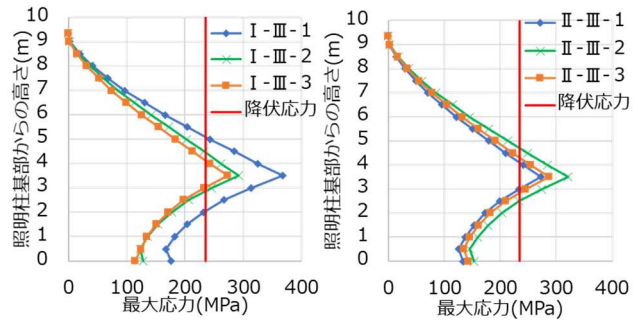


図4 中央環状線上の照明柱に生じる最大応力

3. ビデオ画像からの高架橋—照明柱の動特性の把握

振動計測には加速度計による直接計測が常套手段であるが、高架橋やその上にある照明柱の動特性の把握には加速度計の設置が困難であり、適さない。非接触な方法が望まれ、レーザードブラー振動計 LDV の適用が考えられる。ただ、照明柱のような細い部材にレーザー光を照準させることは実務上、手間がかかる。本研究ではビデオ画像からの情報抽出を考えた。ビデオ画像であれば、数本の照明柱を同時に画像の中に入れることが可能であり、様々な手間を省くことが可能となる。

0.2 mm程度の微小な常時微動を 100 倍程度に拡大して、振動を捕える「位相ベース運動拡大法 (phased-based motion magnification)」を本研究では適用する。「位相ベース運動拡大法 (phased-based motion magnification)」は 2013 年に MIT メディアラボの Freeman 教授が開発した方法であり、ビデオ画像のある局部に着目し、その部分の動きの位相情報を保存しつつ、振幅を拡大し、小さな振幅の動きを捉えようとする方法である。これまで、人間の心拍を計測するというような実験室・屋内レベルでの適用が主で、屋外の構造物への適用例はなかった。

(1) 準備

MIT メディアラボの Freeman 教授らが提案している「位相ベース運動拡大法 (phased-based motion magnification)」のアルゴリズムを Matlab にコード化し、実際に使えるようにした。数か月要する作業である。

(2) 屋内実験

小型振動模型を作成し(図 5)、自由振動のビデオ画像から「位相ベース運動拡大法 (phased-based motion magnification)」により、どのような精度で振動を再現できるのかを検討した。参照値としては、模型に取り付けた

ワイヤレス加速度センサーによるデータを用いた。

- a) 固有振動数付近の振動をバンドパスフィルターで抽出し、100 倍程度に拡大するのが適当
- b) 振幅レベルとしては、ビデオ画像の精度にもよるが 0.2 mm 程度あれば動特性が掴めることが明らかになった。

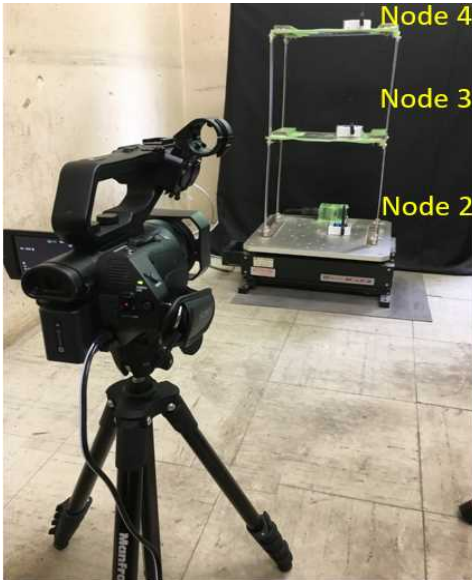


図 5 小型模型による屋内実験



図 7 立体交差橋と照明柱



図 8 照明柱の振動画像 (上: 拡大前, 下: 拡大後)

(3) フィールド計測

横浜国立大学構内の橋梁の桁 (図 6) と、校外ではあるがそばにある立体交差橋上照明柱 (図 7) を対象にビデオ画像をとり、予備的な検討 (図 8) を行った。



図 6 YNU 橋

(4) 金港ジャンクションでの高架橋・照明柱の計測

首都高速道路横浜駅東口前の金港ジャンクション (図 9) において高架橋ならびに照明柱 6 本 (図 10) の自動車走行下での常時微動による動特性の把握をビデオ画像ならびにレーザードプラー振動計によりおこなった。その計測状況を図 11 に示す。得られたビデオ画像から照明柱の頂部の振動を 100 倍に拡大し 1HZ と 1.7HZ のバンドパスフィルターをかけ、常時微動振動波形を作成した。その結果の一例を図 12 に示す。RD 法による減衰比の推定もおこなった。結果をまとめて表 1 に示すが、固有振動数は、参照値であるレーザードプラー振動計 LDV の値との差は 2, 3% であ

り、極めて精度が高いこと、また減衰比が1-2%という極めて低いことが明らかになった。桁の振動については現在処理中である。



図9 金港ジャンクション



図11 ビデオとLDVによる計測



図10 計測対象として照明柱

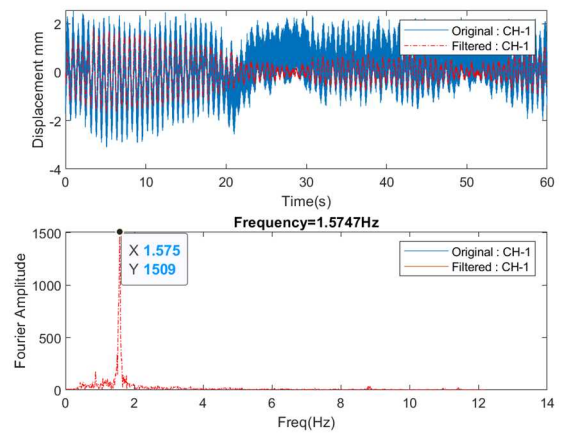


図12 拡大運動からの照明柱の常時微動応答とスペクトル

Registration No.	ID	Pole Type	Attachment	LDV, Frequency (mean)	Vision Based, Frequency	Random Decrement Method				Location
						VISION		LDV		
						ω_0 (Hz)	ζ	ω_0 (Hz)	ζ	
	P0-	STB9.1	Without Sign Board	1.566 Hz	1.575 Hz			1.563	0.144	1
A010300717	P2-PO 82-0128	STB9.1	With Sign Board	1.603 Hz	1.611 Hz			1.611 3	0.141	
A010300718	P3-PO 82-0129	STB9.1	With Sign Board	1.622 Hz	1.619 Hz	1.611	0.133	1.611 3	0.285	
A010300703	P5-PO 82-0114	STB9.1	With Sign Board	1.580 Hz	1.597 Hz	1.582	0.576	1.563	0.21	2
A010300702	P6-PO 82-0113	STB9.1	Without Sign Board	1.636 Hz	1.64 Hz			1.611	0.133	

表1 金港ジャンクションの照明柱の動特性：画像モニタリングとレーザードプラー振動計LDV との比較

4. まとめ

ビデオ画像から対象とする物体の振動を抽出することに成功した。実構造物を対象とした研究としては世界で初めてでありその成果を論文として国際会議に発表し（文献 2）国際雑誌にも現在執筆中である（文献 3）。

また、地上から非接触で容易に高架橋並びに照明柱の動特性を把握できる本方法は、実用的な面でも価値の高いものであると考えている。

1) Seismic performance evaluation of existing light poles on elevated highway bridges

D. M. Siringoringo, Y. Fujino, A. Nagasaki & T. Matsubara, Journal Structure and Infrastructure Engineering 2020

<https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1760894>

2) Saravanan. T.J, Siringoringo. D.M, Fujino. Y & Wangchuk. S (2020), “Operational modal analysis of light pole-viaduct system from video measurements using phase-based motion magnification”, In Proc. 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2020), June 28 - July 2, Hokkaido, Japan. (Paper accepted)

3) Saravanan. T.J, Wangchuk. S, Siringoringo. D.M & Fujino. Y (2020), “Non-contact operational modal analysis of light pole-viaduct system using computer vision phase-based video motion magnification technique”, Smart Structures and System. (to be submitted)