

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02231

研究課題名(和文) 高架橋上塔状付属物の耐震性評価と補強対象抽出の為に遠隔画像による振動計測法の開発

研究課題名(英文) Seismic capacity of tower-like secondary structures standing on elevated viaducts and vision-based measurement of vibration characteristics of viaduct-tower structure systems

研究代表者

藤野 陽三 (FUJINO, YOZO)

横浜国立大学・先端科学高等研究院・名誉教授

研究者番号：20111560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：1995年1月17日兵庫県南部地震では都市内高架橋上の照明柱に多大の被害があったが、地震安全性の評価法、対策が全く未着手である。そこで 1) 照明柱の終局耐震性能を実験により明らかにし、2) 都市内高速高架橋 - 照明柱の地震時連成解析を実施し、3) 1) において判明された耐震性能を踏まえ、耐震補強が必要になる照明柱の条件を明らかにするが、高架橋との共振が、低い減衰の付属物を損傷倒壊させることに鑑み、補強が必要な照明柱を高架橋の固有振動数から決定する手法を開発し、4) 遠隔非接触計測による動画解析から高架橋の固有振動数を同定できる手法を確立させ、5) 塔状付属物の合理的かつ効率的な耐震補強指針を作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高架橋上の照明柱のうちレベル2 地震動により照明柱躯体の断面に生じる曲げモーメントが全塑性曲げモーメントを超えると予想される直線型ポールを対象とし、動的解析により地震応答特性を把握した。また、実物の照明柱を用いた単調載荷実験および正負交番載荷により照明柱の変形能および終局挙動を把握した。実験より得られた照明柱の非線形挙動と地震後の緊急輸送道路としての機能確保を考慮し、照明柱の限界状態と機能限界量から、限界状態を表す工学的指標を定め、高架橋上の照明柱の実用的な耐震照査法を提案した。併せて、高架橋上の既存の照明柱の固有振動数、減衰をビデオ画像から明らかにする非接触計測法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Many light poles on elevated highway bridge suffered from damage during 1995 Kobe earthquake, but their aseismic performance has not been studied systematically so far. In this research, first typical two types of light poles used in Tokyo Metro. Exp. Highway were tested under static cyclic loading and the ultimate performance of the light poles in the nonlinear range was captured. Based on the testing results, seismic performance of the light poles on typical elevated highway bridges under various levels of seismic design ground motion was numerically studied and their 3D behaviors were clarified. In order to apply this procedure to existing light poles, the natural frequency and damping of each light poles have to be known. A vision-based non-contact vibration measurement of the light poles on elevated highway bridges using motion magnification and dynamic mode decomposition methods is proposed and its high accuracy was proved.

研究分野：構造工学

キーワード：構造工学 地震工学

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震においては高架橋の被害が目立った中で、阪神高速高架橋部の2000本にも及ぶ照明柱や標識柱にも大きな被害が出ていたことが、最近の研究代表者による調査で初めて明らかにされた。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震においては、東北新幹線の高架橋部の被害は軽微であったが、高架橋上の1100本もの電化柱の傾斜損傷し、そのために再開が大幅に遅れた。首都高速道路でも照明柱や付属物に軽微ではあるが、被害が発生した。九段会館の天井板の落下による死者など、付属物の耐震性への関心が高まった。

都市内高架橋上の照明柱や標識柱などの塔状付属物が地震により倒壊すれば、車両への危害に加えて、路面上への転倒により車両走行が不可能になり、その結果、多くの車両が地震後放置され、都市内高架橋が駐車場化するという交通機能不全に繋がる可能性が高い。東京の首都高速道路ネットワークはその8割以上が高架橋であり、2万本を越す照明柱、数百本の標識柱が高架橋上に置かれている。これらの付属物が大きな地震を受けた時に、過去の事例が示すように交通不全などの二次的な影響が出るのが予想されるが、対策のための学術的検討がこれまで一切なく、道筋が全く確立していないこともあり、未着手の課題となっており、本研究を開始する背景である。

2. 研究の目的

高架橋上の付属物が高架橋の共振域に存在すると付属物の振動が共振により増幅し損傷倒壊の可能性が高まる。高架橋-付属物系の固有振動数が一致する共振状態ではゆわに10倍以上の揺れが発生することがわかる。高架橋の3倍以上の揺れが発生すれば、倒壊の危険性が出てくる。構造減衰の影響は小さい。高架橋の固有振動数は変えられないので、固有振動数比が0.8 - 1.3程度の範囲に入る高架橋上の照明柱はすべて補強が必要ということになる。そのため、既存の付属物の耐震性能を正確に把握した上で、耐震性能の向上策と、高架橋-付属物系の固有振動数の関係をはじめ動特性をいかに正確に把握する技術が塔状付属物の効率的な耐震対策の鍵となる。

都市内高架橋上の照明柱や標識柱などの塔状付属物が地震により倒壊すれば、車両への危害に加えて、路面上への転倒により車両走行が不可能になり、その結果、多くの車両が地震後放置され、都市内高架橋が駐車場化するという交通機能不全に繋がる可能性が高い。東京の首都高速道路ネットワークはその8割以上が高架橋であり、2万本を越す照明柱、数百本の標識柱が高架橋上に置かれている。これらの付属物が大きな地震を受けた時に、過去の事例が示すように大きな損傷が出るのが予想されるが、対策のための学術的検討がこれまで一切なく、道筋が全く確立していないこともあり、未着手の課題となっている。

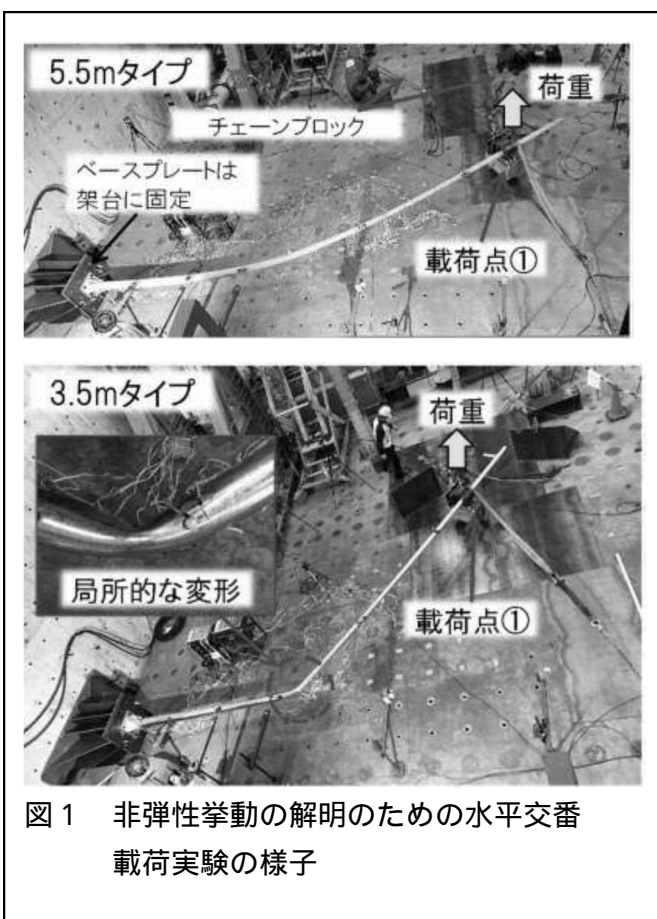
高架橋上の付属物が高架橋の共振域に存在すると付属物の振動が共振により増幅し損傷倒壊の可能性が高まる。高架橋-付属物系の固有振動数が一致する共振状態ではゆがに10倍以上の揺れが発生する。照明柱は風圧で構造が決まり、地震には相対的に強いが、試算によれば高架橋の3倍以上の揺れが発生すれば、倒壊の危険性が出てくる。構造減衰の影響は小さいこともわかる。高架橋の固有振動数は変えられないので、固有振動数比が0.8 - 1.3程度の範囲に入る高架橋上の照明柱はすべて補強が必要ということになる。そのため、既存の付属物の耐震性能を正確に把握した上で、耐震性能の向上策と、高架橋-付属物系の固有振動数の関係をはじめ動特性をいかに正確に把握する技術が搭状付属物の効率的な耐震対策の鍵となる。

3. 研究の方法

3.1 照明柱の耐震性能に関する実験的把握

首都高速道路に設置されている照明柱の中で、代表的なものSTB 9.1(高さ9.1m)の中で基部からのテーパ-高さが3.5mのタイプと5.5mの2体を対象に交番載荷のもとで、非弾性挙動を把握した。テーパ-部付近に降伏域が集中することが明らかとなった。照明柱を対象にした、このような実験は日本では勿論、世界でも初めてである。(図1)

そこで得られた非弾性ヒステリシスをモデル化した、ジャンクション部の高架橋上に照明柱10本あまりを置いた連成系の3次元モデルの地震応答解析をL1からL2レベルの、数種類の地震動を入力として非弾性地震応答解析を実施した。その結果、照明柱のが降伏し、固有振動数が変化し、非弾性ヒステリシスによる減衰効果もあり、照明柱の変形はさほど大きくなり、高速道路の建築限界内に達する例はなかった。高架橋と照明柱を一体とした動的解析結果から、高架橋上の照明柱に生じる地震応答が限界状態を超えるかどうかを照査するための実用的な耐震照査法を提案した。また、一例として実在する高架橋上の照明柱の耐震性を照査した。



3.2 ビデオ画像による照明柱の固有振動数の把握

高架橋の照明柱には、標識版などが貼ってあったり、図面上の構造とは異なる場合が極めて多い。実際の地震応答を推定するには、極端に言えば、既設の照明柱一本一本の動特性を把握したい。加速度計の設置は、交通規制が必要となり、現実には不可能であり、非接触による計測法が望まれる。最近、進展の著しいレーザーによる計測は一案であるが、一本一本にレーザーを照準させるのは事実上、不可能である、そこでビデオ画像から振動する物体（照明柱、高架橋）の動きを抽出する方法が有望な方法となる（図2）。米国のMITで医学用に開発されたphase-based video motion magnification (PVMM)法に着目した。赤ん坊のビデオ画像から心臓の鼓動数を把握することが出来る。本研究では、ビデオ画像から複数の照明柱の存在を同定し、着目部位の振動波形を抽出し、固有振動数を同定する、世界初の自動化プログラムを完成させた。誤差は1%以内であることも、室内実験や高架橋でのフィールドテストから明らかにした。

なお、このPVMM法を斜張橋のケーブルの固有振動数の同定にも使えることを示した。斜張橋のケーブルの張力管理は、ケーブルの固有振動数から推定するのが通例で、そのために定期的に固有振動を計測しているが、それは一本一本に加速度計を設置している。今回開発したビデオ画像によるPVMM法を使えば、遠方から多数のケーブルの振動をビデオカメラでとらえ、それを処理すれば、一本一本のケーブルの高次モードまでの固有振動数、すなわちケーブルの張力の推定は精度よく行えることになる。多々羅大橋ほかで、計測し、その精度の高いことも示すことができた。

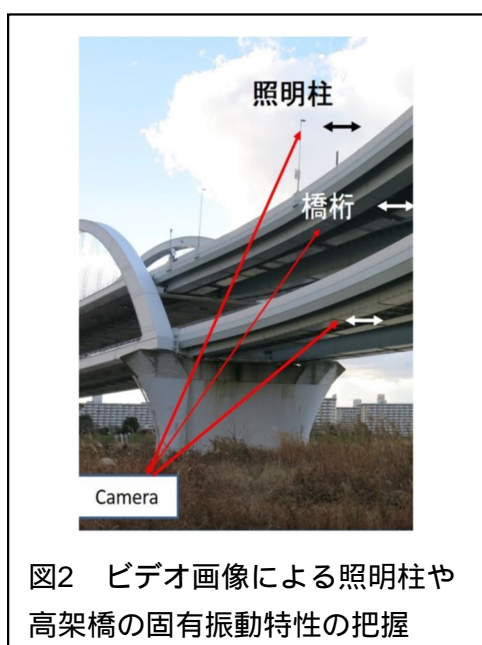


図2 ビデオ画像による照明柱や高架橋の固有振動特性の把握

4. 研究成果

本研究では、高架橋上にある照明柱を対象に、その非弾性挙動を実験的に明らかにし、それを踏まえ、照明柱 高架橋の連成地震応答解析から、例示的に照明柱の耐震性能を明らかにするとともに、照明柱の耐震性能照査法を提案した。また、既設照明柱の耐震性能評価において重要なパラメータである固有振動数を、ビデオ画像を使った非接触な方法で精度よく把握する手法を提案できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Siringoringo Dionysius M., Fujino Yozo, Nagasaki Ayami, Matsubara Takuro	4. 巻 17
2. 論文標題 Seismic performance evaluation of existing light poles on elevated highway bridges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 649 ~ 663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2020.1760894	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 右高裕二・松原拓朗・細井雄介・藤野陽三・田村洋・Dionysius Siringoringo・高橋竜太	4. 巻 75th
2. 論文標題 高架橋上に設置された照明柱の耐震性評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 ROMBUNNO.1-293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 松原 拓朗, 細井 雄介, 久保田 成是, 和田 新, 藤野 陽三, 矢部 正明	4. 巻 77
2. 論文標題 SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTIC AND SIMPLIFIED ESTIMATION METHODS OF TRAFFIC SIGN STRUCTURES ON ELEVATED HIGHWAY BRIDGES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 455 ~ 474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.77.3_455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Wangchuk Samten, Siringoringo Dionysius M., Fujino Yozo	4. 巻 29
2. 論文標題 Modal analysis and tension estimation of stay cables using noncontact vision based motion magnification method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/stc.2957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Siringoringo Dionysius M., Wangchuk Samten, Fujino Yozo	4. 巻 244
2. 論文標題 Noncontact operational modal analysis of light poles by vision-based motion-magnification method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 112728 ~ 112728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2021.112728	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Thiyagarajan, J. S., Siringoringo, D. M., Wangchuk, S., & Fujino, Y	4. 巻 27(2)
2. 論文標題 Implementation of video motion magnification technique for non-contact operational modal analysis of light poles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SMART STRUCTURES AND SYSTEMS	6. 最初と最後の頁 227-239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12989/sss.2021.27.2.227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 右高裕二・松原拓朗・細井雄介・藤野陽三・田村洋・Dionysius Siringoringo・高橋竜太	4. 巻 -
2. 論文標題 高架橋上に設置された照明柱の耐震性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	田村 洋	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授	
	(HIROSHI TAMURA)		
	(10636434)	(12701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊山 潤 (IYAMA JUN) (30282495)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関