

橋梁上に設置した柱状付属構造物の耐荷力評価に関する 共振影響検討

田中 将登¹・青木 康素²・伊佐 政晃³・宇野津 哲哉⁴
杉山 直也⁴・松本 崇志⁵・奥田 貴矢⁵

¹非会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室（〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島3-2-4）

²正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室（〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島3-2-4）

³正会員 阪神高速道路株式会社 管理本部 大阪保全部保全事業課（〒552-0023 大阪府大阪市港区港晴
1-11-12）

⁴正会員 （一財）阪神高速先進技術研究所 調査研究部（〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町4-5-7）

⁵正会員 株式会社建設技術研究所 大阪本社 構造部（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、図-1に示すように橋梁上の柱状付属構造物（本稿では、照明柱およびTV支柱の総称とする。以下、柱状付属物と記す。）が倒壊や傾斜が生じた影響により災害後に緊急走行輸送路としての道路機能を確保できなかった教訓がある¹⁾。また、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、新幹線の高架橋上のコンクリート製の電柱が折損や傾斜等の被害が発生し、運行再開に向けて大きな障害となった^{2,3)}。

橋梁上に設置された柱状付属物が倒壊あるいは損傷した要因は様々であるが、その一つの要因として、橋梁と柱状付属物の振動が共振し、設計で想定している以上の慣性力が柱状付属物に作用した可能性が

考えられる。そのため、当該構造物の耐震性を評価することが重要であることが改めて認識されてる^{4,5)}。

本検討では、先ず橋梁を幾何学的非線形を考慮した1質点1自由度系でモデル化し、その橋梁モデルに対して地震動を入力した。次に、上部構造の慣性力作用位置に相当する位置の加速度を、柱状付属物をモデル化した1質点1自由度系モデルに入力することで、橋梁と柱状付属物の共振影響を考慮した加速度応答スペクトル（以下、共振加速度応答スペクトルと称する）を検討した。なお、柱状付属物の基部付近を忠実に再現した実験供試体による正負交番載荷実験から柱状付属物の幾何学的非線形特性⁶⁾を考慮している。

また、本検討では柱状付属物に要求する性能とそれら进行评估する限界状態を設定したうえで、共振影響評価を行った。

さらに、作成した共振加速度スペクトルに対する検証を、橋梁の3次元立体骨組モデルを用いた動的解析によって評価した。



図-1 1995年兵庫県南部地震の被害状況

2. 橋梁との共振を考慮した柱状付属物の共振 加速度応答スペクトル

(1) 共振加速度応答スペクトル

a) 共振加速度応答スペクトルの作成方法

レベル2地震動⁷⁾のような直下型や海溝型の大規模地震に対しては、橋脚の塑性化を考慮した耐震設計を可能とする設計体系であることを踏まえ、橋脚と

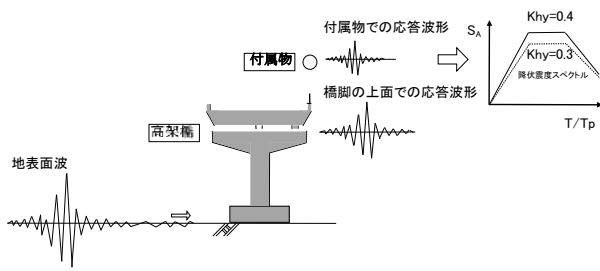


図-2 共振加速度応答スペクトル作成の概念図

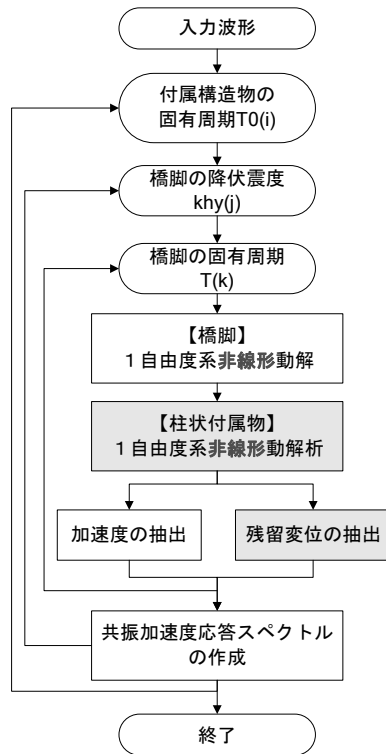


図-3 共振加速度応答スペクトルの作成手順

柱状付属物の塑性化を考慮して共振影響スペクトルを作成している。

共振加速度応答スペクトルは、図-2に示す概念図および図-3に示す手順にて作成した。

- ①固有周期 $T(k)$ と降伏震度 $k_{hy}(j)$ を有する橋脚の1質点1自由度系モデルで非線形時刻歴応答解析を行い、質点位置の応答加速度波形を抽出
- ②抽出した橋脚の応答加速度波形を、1質点1自由度系の幾何学的非線形特性を考慮した柱状付属物の解析モデルに入力し、時刻歴応答解析を行い質点位置の最大応答加速度を抽出
- ③柱状付属物と橋脚の固有周期比から柱状付属物の最大応答加速度との関係が得られ、橋脚の固有周期を変えて解析を行うことで、柱状付属物と橋脚の固有周期比に対応した、共振加速度スペクトルを作成

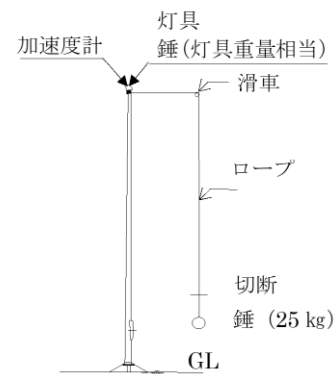


図-4 自由振動実験の概要図

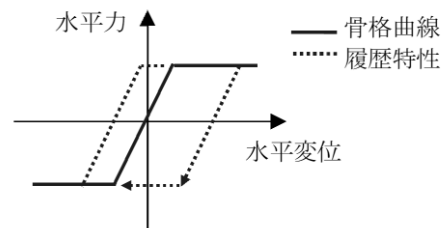


図-5 橋脚の非線形特性

b) 解析方法

1自由度振動系の時刻歴応答解析における運動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + P(x) = -ma' \quad (1)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰定数、 $l, \dot{x}$ は橋脚あるいは柱状付属物の復元力、 a は入力加速度である。

減衰項の c は、質量比例型の $2h\sqrt{mk}$ と仮定し、構造物減衰定数 h を橋脚および柱状付属物で、それぞれ2.0%および0.42%とした。柱状付属物の構造物減衰定数は、著者らが過去に実施した実物大の照明柱の自由振動実験（以下、自由振動実験と称する）より得た自由振動波形をヒルベルト変換により設定した値である。自由振動実験の概要を図-4に示すが、アンカーボルトで基礎コンクリートに接合した実際の照明柱の頭部に錘(25kg)を取付け、ロープを切断することで自由振動させた。

橋脚の降伏震度スペクトルを算出するうえでの固有周期 T と降伏震度 k_{hy} の関係は式(2)で与えられるため、任意の固有周期 $T(k)$ と降伏震度 $k_{hy}(j)$ を与えれば橋脚の降伏変位 δ_y が求まり、降伏震度に応じた加速度応答スペクトルが作成される。橋脚は図-5に示す降伏点 P_y 以降の二次勾配を零としたバイリニア型の非線形特性を与えた。

$$T = 2.01 \sqrt{m \cdot \delta_y / P_y} \quad k_h = P_y / m \quad (2)$$

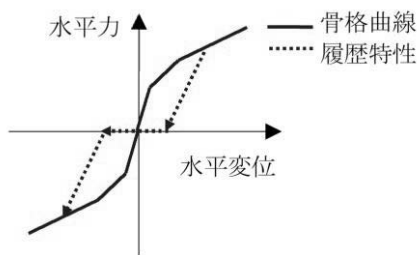


図-6 柱状付属物の非線形特性

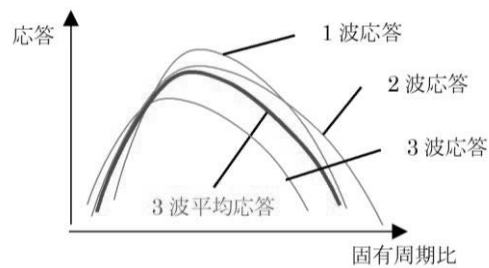


図-8 3波平均した共振加速度応答スペクトル

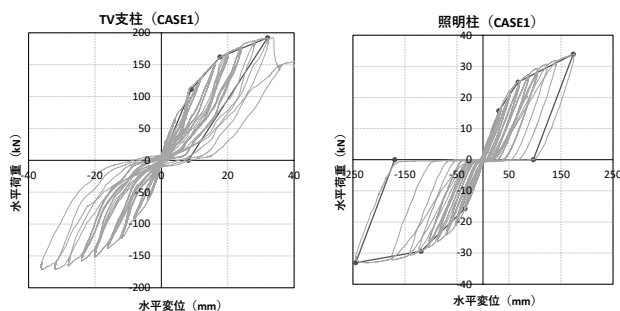


図-7 柱状付属物の繰り返し実験に対するモデル化

時刻歴応答解析は直接積分法とし、Newmark- β 法を採用し、 β は1/6とした。

c) 柱状付属物の非線形特性

柱状付属物の骨格曲線は、文献⁹⁾から得られた静的繰返し載荷実験による荷重と変位関係を包絡した図-6に示すトリリニア型とした。骨格曲線の第一折れ点は、アンカーボルトが降伏ひずみに達した時、最大荷重点はアンカーボルトの破断あるいは実験における最大荷重とし、第二折れ点は載荷実験の荷重と変位関係を包絡するように設定した。

履歴特性は繰返し載荷実験からスリップ型とし、除荷勾配は初期剛性とした。静的繰返し載荷実験による荷重と変位関係に対して解析で設定した骨格曲線を図-7に示す。

d) 対象とした地震動

共振加速度応答スペクトルの作成に用いた地震動は、H29年道路橋示方書・同解説V編⁷⁾に示されるレベル2地震動のうち、東日本大震災のような長周期で長時間の海溝型であるタイプI地震動と、兵庫県南部地震のような都市直下型のタイプII地震動とし、それぞれI～III種地盤を対称とした。

各地盤種別で加速度応答スペクトルが道路橋示方書で示されているため、共振加速度応答スペクトルは図-8に示すように、各加速度応答スペクトルによる最大加速度の平均値を共振加速度応答スペクトルとした。これにより、柱状付属物が設置される地盤種別に応じてタイプI地震動とタイプII地震動に対する共振加速度応答スペクトルを作成した。

e) 共振加速度応答スペクトル

阪神高速が保有する橋脚の降伏震度については、過年度に整理された結果を踏まえて橋脚の降伏震度 k_{hy} を0.3、0.4、0.5と仮定し、その場合の照明柱およびTV支柱の共振加速度応答スペクトルを、それぞれ図-9および図-10に示し、 T が橋梁、 T_p が柱状付属物の固有周期である。そのため、 T/T_p が1.0付近が橋梁と柱状付属物が共振する周期帯である。ここで、照明柱の T_p は自由振動実験から得られた0.66秒を用い、TV支柱の T_p は実験結果がなかったことから鋼製支柱の剛性と昇降足場等を含めた質量からなる骨組み解析の固有値解析から得られた0.44秒とした。

照明柱とTV支柱による共振加速度応答スペクトルでは、いずれの橋脚の降伏震度 k_{hy} においても、 T/T_p が1.0付近で最大となることが確認された。

照明柱の共振加速度応答スペクトルのうち、I種地盤のタイプII地震動で橋脚の降伏震度 k_{hy} が0.4の場合に着目すると、 $T/T_p=1.0$ の応答加速度は7,900gal程度と、8Gもの地震加速度が作用する結果となった。

TV支柱も同様に、I種地盤のタイプII地震動で橋脚の降伏震度 k_{hy} が0.4の場合に着目すると、 $T/T_p=1.0$ の応答加速度は5,500gal程度であった。ここで、阪神高速道路で取組んでいる路線全体をモデル化した大規模解析⁹⁾から算出された橋梁の固有周期の平均値は0.69秒であることから $T/T_p=1.57$ となり、応答加速度は2,900gal程度と、橋梁と柱状付属物が共振すると加速度が1.9倍も増幅する。 T/T_p が1.0および1.57の場合におけるTV支柱の応答加速度および水平荷重と水平変位の関係を図-11に示すが、条件によってはTV支柱が橋梁と共振することで、大きく塑性化する可能性がある。

(2) 柱状付属物の要求性能と限界状態

ここでは、柱状付属物に地震動が作用した時の耐荷性能と限界状態を設定するとともに、地震によって柱状付属物が損傷しても道路機能を確保できることを見据え、柱状付属物のその他機能面から要求される性能を設定した。これらを踏まえて、文献6)の

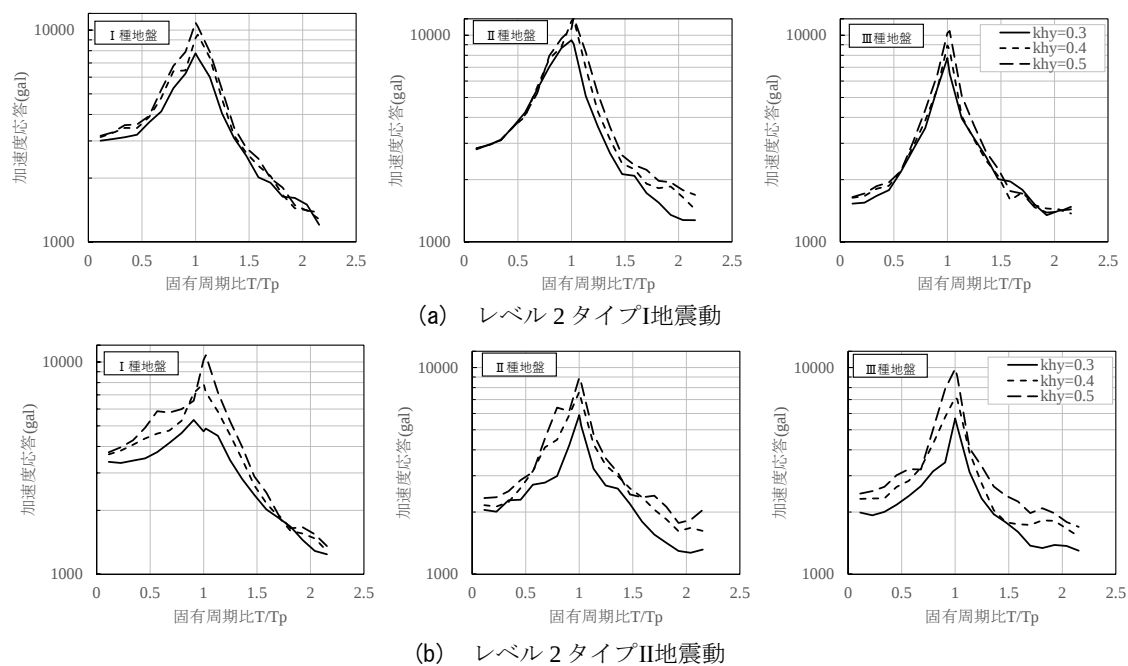


図-9 照明柱の共振加速度応答スペクトル

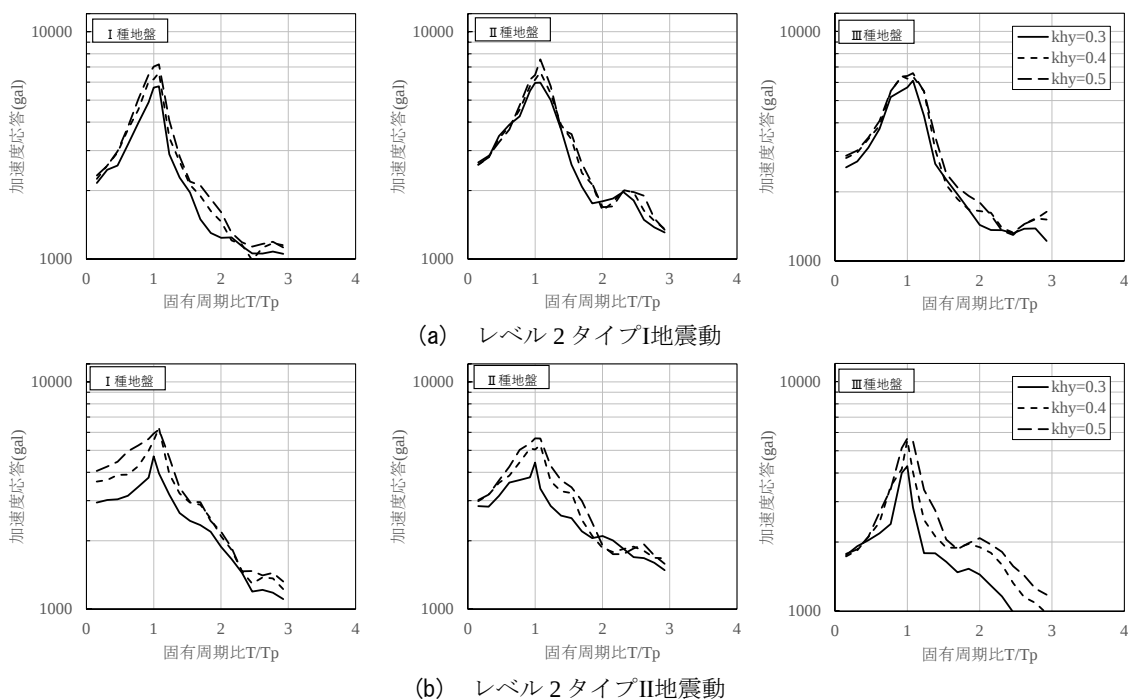


図-10 TV 支柱の共振加速度応答スペクトル

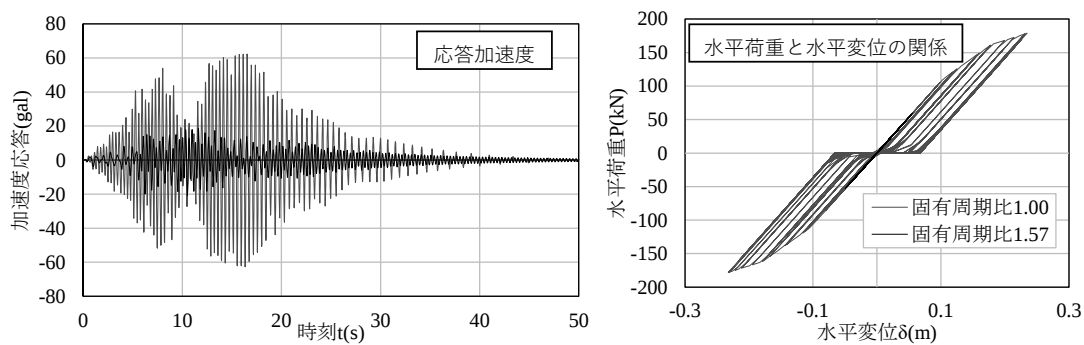


図-11 TV 支柱の共振加速度応答スペクトル

表-1 柱状付属物の耐荷性能

	主として円滑な道路交通を確保できる付属物の状態		構造安全面からの付属物の状態
	支柱が自立する能力が損なわれていない状態	部分的に支柱が自立する能力が損なわれているが、自立する想定範囲である状態	倒壊しない状態
永続作用や変動作用が支配的な状況	限界状態1を超えないことの実現性		限界状態3を超えないことの実現性
偶発作用が支配的な状況			限界状態3を超えないことの実現性

表-2 柱状付属物の各部材の限界状態

限界状態	支柱	接合部			基部	
		アンカーボルト	ベースプレート	リブプレート	基礎コンクリートタイプ	ブラケットタイプ
限界状態1	支柱鋼管の降伏	アンカーボルトの降伏	ベースプレートの降伏	リブプレートの降伏	・支柱破壊 ・コーン破壊 ・アンカーボルトの付着	鋼材の降伏
限界状態3	・支柱鋼管の全体座屈 ・局部座屈	アンカーボルトの破断	・ベースプレートの座屈 ・溶接部の破断（支柱との溶接箇所）	・リブプレートの座屈 ・溶接部の破断	・支柱破壊 ・コーン破壊	コーン破壊または圧壊（アンカー一定着）

照明柱およびTV支柱の静的正負繰返し载荷実験で得られた柱状付属構造物の幾何学的非線形性を用いて共振影響評価を行った。

a) 耐荷性能と限界状態の設定

柱状付属物と橋梁との共振影響評価にあたり、柱状付属物が構造面で安全であるための耐荷性能を表-1のように設定した。主として円滑な道路交通を確保できる付属物の状態として、支柱が自立する能力が損なわれていない状態を限界状態1とし、構造安全面からの柱状付属物の状態として、倒壊しない状態を限界状態3とした。永続作用や変動作用が支配的な状況においては、限界状態1および限界状態3を超えないことを求めることとした。偶発作用が支配的な状況においては、限界状態3を超えないことを求めることとした。

柱状付属物の各部材における限界状態を表-2のように設定した。限界状態1は、各部材が弾性域での挙動となる限界の状態とし、限界状態3は、各部材の破断や座屈が発生しない限界の状態とした。

b) その他機能面から要求される性能の設定

兵庫県南部地震では、柱状付属物倒壊や傾斜が生じた影響により災害後に緊急走行輸送路としての道路機能を確保できなかった教訓から、その他機能面から要求される性能として、被災後において照明柱が現道交通の支障とならない損傷レベルに留めることを設定した。なお、照明柱の点灯機能については、被災後の要求性能に含まないものとする。この要求性能を満足するには、壁高欄上に設置された柱本体が座屈、アンカーボルトの抜け出しや壁高欄のひびわれ、圧壊等により残留変位が生じ建築限界を侵さない必要がある。よって、その他の性能については、

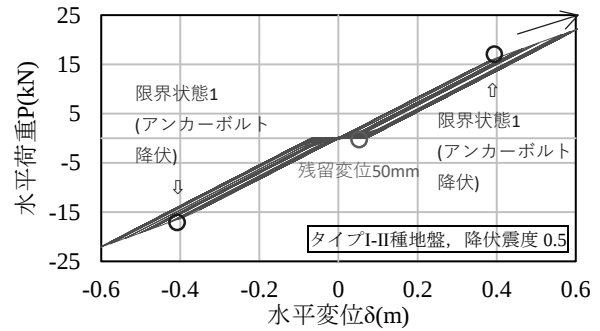


図-12 共振時の荷重-変位関係（照明柱）

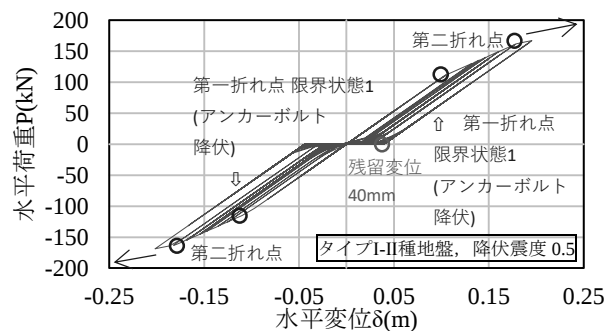


図-13 共振時の荷重-変位関係（TV支柱）

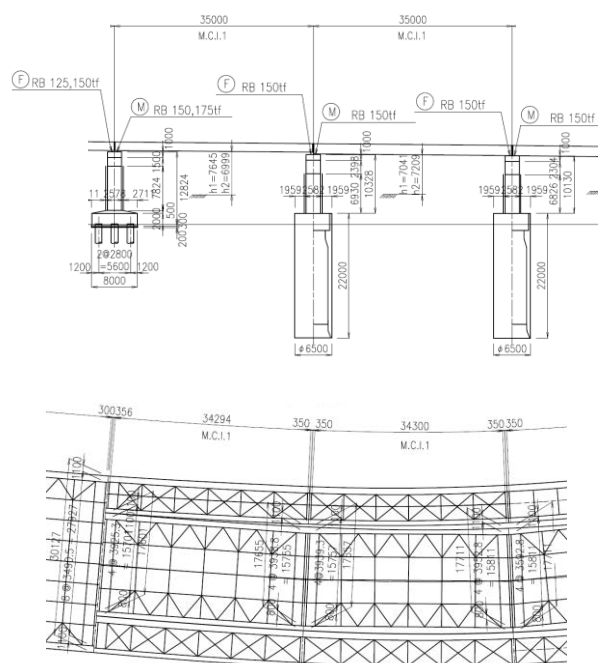


図-14 解析対象橋梁

建築限界を超えないように照明柱天端残留変位100mmの制限値を設けた。

一方、TV支柱については被災後において応急復旧対応等現道交通の状況を把握する必要があるため、

撮影に支障とならない損傷レベルに留めることとした。この要求性能を満足するには、橋脚上に設置された柱本体が座屈、アンカーボルトの抜け出し等により残留変位が生じ撮影に支障をきたさない必要がある。使用限界については、TVの仕様によって異なることが考えられるが、ここでは仮にTV支柱天端残留変位50mmの制限値を設けた。

c) 共振影響評価

照明柱およびTV支柱の静的正負繰返し载荷実験⁶⁾で得られた幾何学的非線形履歴特性を用いて、1質点1自由度系モデルによる柱状付属物と橋梁との共振影響評価を実施し、柱状付属物の耐荷性能を評価した。

図-12には照明柱の最大応答となる条件(タイプ1-II種地盤、降伏震度0.5)の水平荷重と水平変位を示しているが、第一折れ点の限界状態1(アンカーボルト降伏)を少し上回る程度の応答に留まっており、残留変位も50mmに留まる。

一方、図-13にはTV支柱の最大応答となる条件(タイプ1-II種地盤、降伏震度0.5)の水平荷重と水平変位を示している。TV支柱についても、第一折れ点の限界状態1(アンカーボルト降伏)を上回るも

の、残留変位は40mmに留まる。

以上より、橋梁に対して照明柱とTV支柱がそれぞれ共振した場合、限界状態1(アンカーボルト降伏)を上回るものの、柱の倒壊や交通を阻害するような残留変位は生じない状態に留まると推定した。

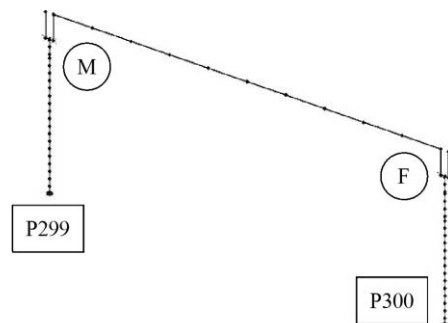


図-15 解析モデル図

表-3 3次元モデルの固有値解析結果

次数	固有周期 (秒)	有効質量比 (%)		
		橋軸	直角	鉛直
1	0.928	24	0	0
2	0.567	0	89	0
3	0.481	44	0	0
4	0.345	24	0	0

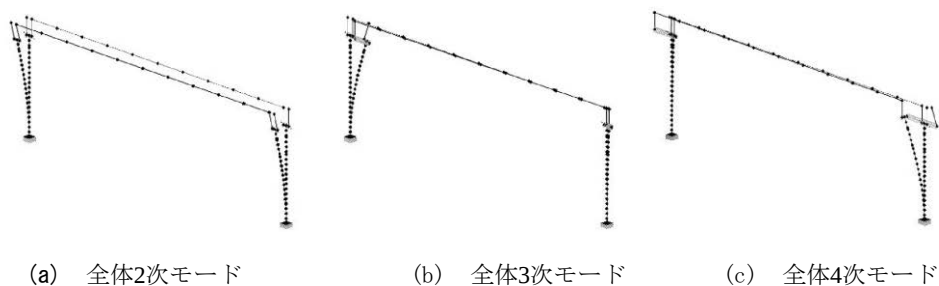


図-16 振動モード図

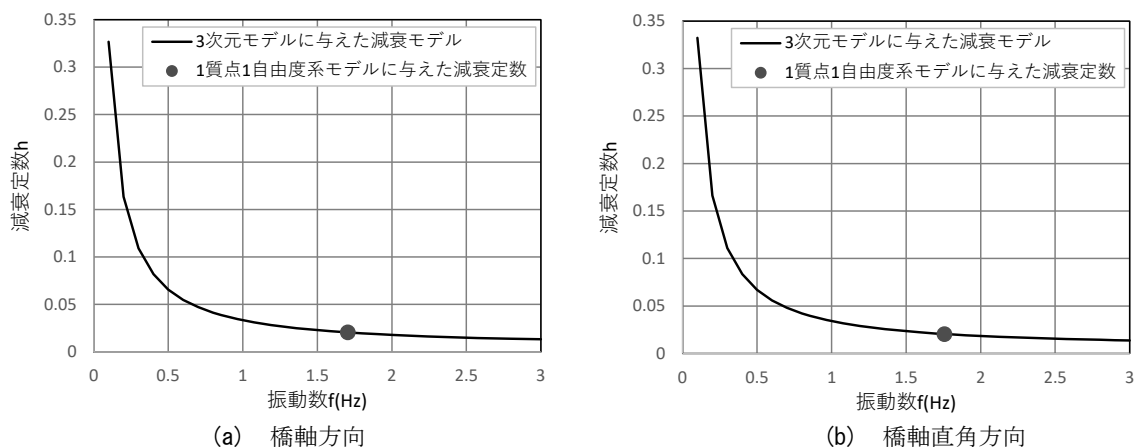


図-17 振動モード図

3. 共振加速度応答スペクトルの検証

本章では、多質点多自由度系とした3次元立体骨組み橋梁モデルによる応答加速度を柱状付属物モデルに入力し、得られた質点位置の応答加速度と、前述した共振加速度応答スペクトルを比較することで、橋梁および柱状付属物を1質点1自由度系で表現することの妥当性を確認する。

(1) 解析対象橋梁

解析対象は図-14に示す、照明柱とTV支柱の固有周期 T_p と同等である阪神高速道路12号守口線のP299～P300橋脚とした。

本橋は固定支承と可動支承で支持された鋼単純合成鈑桁橋であり、5主桁、スパン長35m、幅員約16m、車線数4である。また、本橋のRC橋脚は全て兵庫県南部地震以降に鋼板巻立て工法により補強されている。

(2) 解析モデルと固有値解析

RC橋脚の基部にバイリニア型の非線形特性を与え、基部以外と上部構造は線形はり梁要素とした。支承の橋軸直角方向の回転は自由とし、可動支承の橋軸方向の水平移動は自由とした。支点は完全固定とした。解析モデルを図-15に示し、以下これを3次元モデルと称する。

固有値解析の結果を表-3、照明柱およびTV支柱の固有周期に近い振動モード図を図-16に示すが、橋軸方向は全体4次モードで0.345秒とTV柱の T_p (0.44秒)、橋軸直角方向は全体2次モードで0.567秒と照明柱の T_p (0.66秒)に近い値である。3次元モデルに与える減衰は図-17に示す質量比例型とした。

(3) 検証結果

3次元モデルの橋脚天端あるいは上部構造位置の応答加速度を、柱状付属物を1質点1自由度系とした非線形解析モデルに入力し、柱状付属物の加速度応答を検証した。

a) 橋脚上に設置されたTV支柱

橋脚の梁天端に設置されたTV支柱を想定し、橋軸方向に加振した時の結果を図-18に示す。橋梁を3次元モデルとしたときの橋脚梁天端の応答加速度をTV支柱の1質点1自由度系モデルに入力し、その最大加速度応答を加速度応答スペクトルと比較する。このときの橋梁の固有周期は、橋軸方向の固有周期0.345秒である。

橋梁を3次元モデルとした場合の最大加速度応答

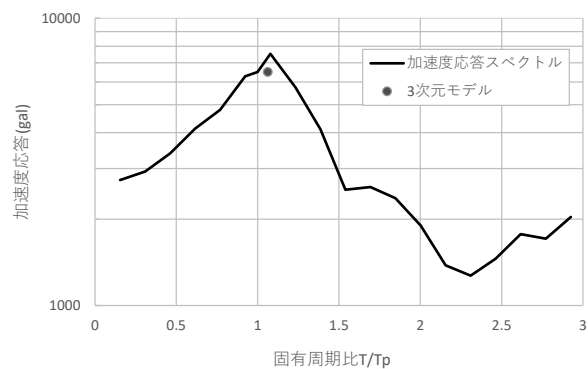


図-18 橋脚上のTV支柱の加速度応答

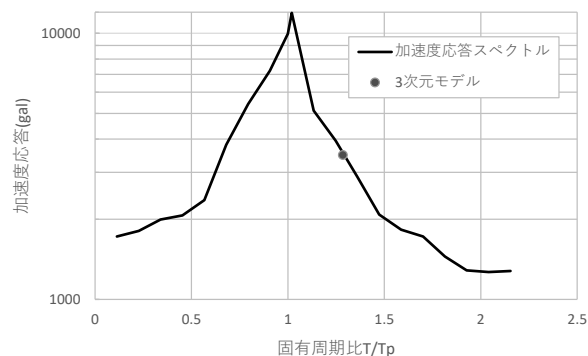


図-19 上部構造の固定端上の加速度応答

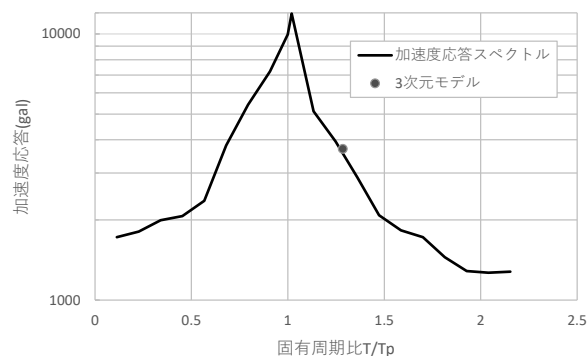


図-20 上部構造の支間中央上の加速度応答

は6,513galであり、橋梁の固有周期における加速度応答スペクトルの値7,327galを下回る結果となった。

b) 橋梁上に設置された照明柱

上部構造の固定端に設置された照明柱を想定し、橋軸直角方向に加振した時の結果を図-19に示す。柱状付属物の最大応答加速度は3,486galであり、橋梁の固有周期における加速度応答スペクトルの値3,588galとほぼ一致することが確認された。柱状付属物の最大応答加速度は3,486galであり、橋梁の固有周期における加速度応答スペクトルの値3,588galとほぼ一致することが確認された。

上部構造の支間中央に設置された照明柱を想定し、橋軸直角方向に加振した時の結果を図-20に示す。照明柱の最大加速度応答は3,699galであり、固定端上に設置された照明柱の応答と比較して6%上昇している。これは上部工が直角方向に弦状に変形する影響を受けた可能性がある。加速度応答スペクトルとの差は3%であり、支間中央に設置された照明柱の応答を1質点1自由度系での加速度応答スペクトルを用いて十分評価できると考える。

4. まとめ

本検討では、橋梁上に設置されたテレビ支柱と照明柱の載荷実験に基づいた幾何学的非線形特性を用いて、橋脚の幾何学的非線形性を考慮した1質点1自由度系にて共振影響を考慮した共振加速度応答スペクトルを作成した。さらに、作成した共振加速度応答スペクトルの妥当性を、3次元立体骨組モデルによる動的解析を実施し評価した。本検討から得られた知見を以下に示す。

- 1) 橋梁と柱状付属物が共振する場合には、柱状付属物に作用する加速度が大幅に増幅し、I種地盤のタイプII地震動において最大で照明柱の場合には8G、TV支柱の場合には5.5G程度となる可能性がある。
- 2) 共振影響評価の結果、検討した範囲では最大応答加速度作用時には限界状態1を若干超過するものの、限界状態3を超過せず、その他機能面から要求される性能も超過しないことが確認された。
- 3) 橋梁を1質点1自由度系とした共振加速度応答スペクトルに対し、橋梁を3次元モデルとした場

合の共振加速度応答スペクトルを比較した結果、同等の応答を示しており、安全側の評価となる。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌一，1997.
- 2) 草野英明，野澤伸一郎，岩田道敏：東北地方太平洋沖地震による高架橋上電化柱の損傷に及ぼす土構造物や地盤等の影響，土木学会第 67 回年次学術講演会，I-253，2012.
- 3) 佐々木崇人，野澤伸一郎，築嶋大輔，金子顕：新幹線用コンクリート製電柱の地震被害とその対策，コンクリート工学，テクニカルレポート，53巻7号，pp.622-628，2015.
- 4) Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino, Ayami Nagasaki, Takuro Matsubara: Seismic performance evaluation of existing light poles on elevated highway bridges, Structure and Infrastructure Engineering , 2020.
- 5) 水谷司，飯島怜，池田智信，築嶋大輔：佐々木崇人新幹線高架橋上の電車線柱の連成系地震応答解析およびTMDによる震動制御，土木学会論文集A1，72巻4号，pp.I_604-I_618，2016.
- 6) 伊佐政晃，篠原聖二，青木康素，宇野津哲哉，松本崇志，小野寺周：橋梁上に設置した柱状付属構造物の耐荷力評価に関する実験的検討，第39回地震工学研究発表会，A-23_1480，2019.
- 7) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説V編，2017.
- 8) 服部匡洋,大石秀雄,中村真貴,馬越一也,篠原聖二：広域道路ネットワークを対象とした地震被害シミュレーションの精度検証と被災度評価，土木学会論文集A1，76巻4号，pp.I_516-I_528，2020.