

地震動の入力レベルが高架橋と電車線柱の 共振現象に与える影響評価

室野 剛隆¹・加藤 尚²・豊岡 亮洋³

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

² (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:tkato@rtri.or.jp

³ (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:akitoyo@rtri.or.jp

高架橋は、L2地震に対しては、高架橋の有する塑性後のじん性にて安全性を確保するような設計体系であり、電車線柱もL2地震に対する高架橋の応答値を与条件として設計されている。しかしながら、高架橋が塑性化しないような中小規模の地震では、振動周期も長周期化しないため、電車線柱と共振しやすく、L2地震よりも厳しい状態になり得ることが想定される。そこで本研究では、地震動の特性や入力レベルが高架橋と電車線柱の振動特性にどのような影響を与えるか検討を行った。その結果、高架橋に大規模な損傷が発生しない様な中小規模の地震においても、電車線柱と高架橋の振動周期が近いと共振するため、電車線柱の応答が大きくなる事が明らかになった。

Key Words : *earthquake response, pole response, resonance of pole and structure*

1. はじめに

地震による高架橋上の電車線柱の被害が着目されたのは、1978年の宮城県沖地震であった。その後も、千葉県東方沖地震や北海道南西沖地震、兵庫県南部地震など、電車線柱の被害は小規模であるが報告をされている。これらの電車線柱の被害は、地震動の大きさに依存するのはもちろんであるが、電車線柱を支持する高架橋の地震応答特性に大きく影響を受けることが、これまでの被害解析からも分かっている。

そこで、著者らは、これまでに、高架橋上に建植された電車線柱を対象に、高架橋～電車線柱の動的相互作用の基本的な特性を把握するために、一連の研究を実施してきた¹⁾。これらの中で、著者らは、1)構造物と電車線柱の周期比によって、電車線柱の応答が大きく変化し、特に両者の周期が一致すると共振して、応答が著しく大きくなること、2)高架橋の水平加速度により電車線柱が大きく振動させられるため以外に、高架橋がロックングすることにより、電車線柱が想定以上に振動すること、を指摘している。1)の特性について、特に、電車線柱はその減衰定数が小さいことから、電車線柱の伝達関数は共振周期付近で鋭く立ち上る形状となり、高架橋と電車

線柱の周期比でその応答が支配される。この現象については、現行の電車線柱の設計指針にも取り入れられている²⁾。ただし、2)については、現行の電車線柱の設計指針では考慮されていない。

ところで、地震動の入力レベルが大きくなると高架橋は塑性化するため、その振動周期も徐々に長周期化する。土木構造物のようにL2地震に対して安全性を確保していれば、それよりも小さな地震に対しては、基本的には安全性が保障されるが、上記のような特性に鑑みると、L2地震のような大地震ではなく、高架橋が塑性化しない様な中小規模の地震の方が、電車線柱にとって厳しい状態になり得ることも想定される。

そこで、本研究では、地震動の特性や入力レベルを変化させた場合、高架橋と電車線柱の振動特性がどのように変化するか定量的に把握した。

なお、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、非常に多くの電車線柱が折損や傾斜をした³⁾。本論文に関する検討は、この地震が発生する以前から実施されていた内容であり、今回の地震の被害原因に言及したものではないことに注意して頂きたい。今回の地震に対する電車線柱の被害原因に関しては、別途、今後の検討が待たれるところである。

2. 解析モデル

本検討では、高架橋の地震応答特性が電車線柱へ及ぼす影響について把握するため、電車線柱の耐震設計²⁾と同様の手法にて解析を行った。すなわち、**図-1**に示すような地震時における高架橋天端の水平応答加速度を算出し、その加速度を電車線柱下端に入力する解析手法である。今村ら¹⁾は、前述したように、高架橋上の電車線柱の解析の際、電柱のロッキング運動等について報告しているが、本検討では、高架橋と電車線柱の基本的な振動特性を把握することを目的としているため、これらの現象は考慮しないものとする。

以上の事を鑑み、本検討における高架橋および電車線柱のモデルについては、ともに1自由度系にてモデル化を行った。また、高架橋に用いる骨格曲線には、高架橋の損傷状態を簡易に評価するため**図-2**に示すような非線形性を考慮したクラフモデルを、電車線柱には線形モデルを用いた。

電車線柱の耐震設計において、設計条件として用いられているのは、高架橋の等価固有周期 T_{eq} 、および高架橋の応答塑性率 μ であるが、本検討では、高架橋が有している耐震特性を把握しやすいよう、応答塑性率 μ の代わりに高架橋の降伏震度 K_{hy} をパラメータとして解析を行った。**表-1**に、その解析ケース一覧を示す。ここで、等価固有周期 T_{eq} とは、**図-2**に示すような高架橋の骨格曲線において、原点と降伏点(Y点)とを直線で結ぶ割線剛性から求められる高架橋の固有周期であり、降伏震度 K_{hy} と降伏変位 δ_y とを用いて、式(1)で表される⁴⁾。

$$T_{eq} \cong 2.0 \sqrt{\delta_y / K_{hy}} \quad (1)$$

減衰については、高架橋に5%、電車線柱に2%の減衰定数を与えた。

3. 解析結果

(1) 電車線柱と高架橋の基本振動特性

まず、高架橋の振動特性が電車線柱に与える影響について簡易に把握するため、**表-1**に示した解析ケースに、**図-3**に示すような性質の異なる4つの地震動(a)～(d)を高架橋への入力地震動として解析を行った。その解析結果を**図-4**に示す。ここで、各図は4つの地震動(a)～(d)に対する各解析ケースの電車線柱の応答結果であり、X軸には電車線柱の周期 T_p を、Y軸にその周期における最大加速度応答の値を示している。また、各地震動結果の左図は高架橋の等価固有周期 T_{eq} が0.5sec (CASE1～CASE3)、中図は0.7sec (CASE4～CASE6)、右図は T_{eq} が1.0sec (CASE7～CASE9)の解析結果である。凡例には、高架橋の応答塑性率 μ の値を示し、塑性化の程度を表すものとする。

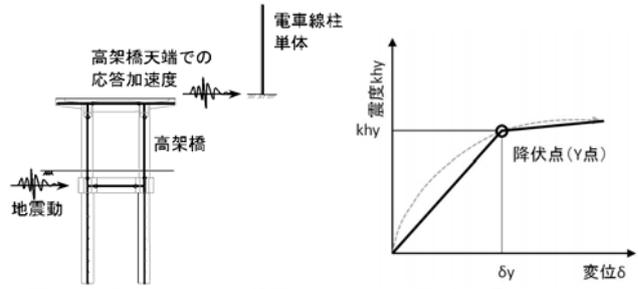
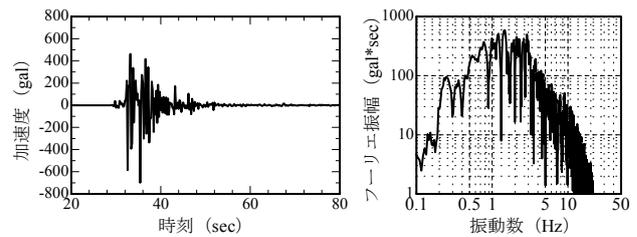


図-1 解析モデルの概要

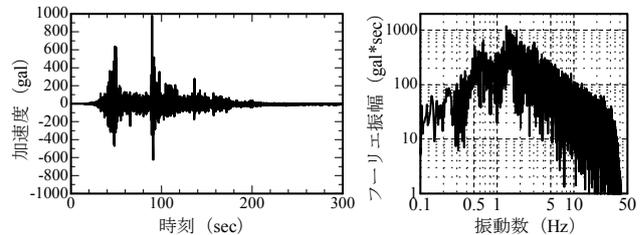
図-2 骨格曲線

表-1 解析ケース一覧

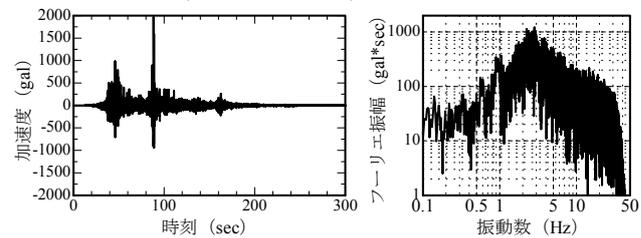
| CASE | 等価固有周期 T_{eq} (sec) | 降伏震度 K_{hy} | 電車線柱の 周期 T_p (sec) |
|-------|--------------------------|---------------|-------------------------|
| CASE1 | 0.5 | 0.3 | 0.2 ～1.0 |
| CASE2 | | 0.5 | |
| CASE3 | | 0.8 | |
| CASE4 | 0.7 | 0.3 | |
| CASE5 | | 0.5 | |
| CASE6 | | 0.8 | |
| CASE7 | 1.0 | 0.3 | |
| CASE8 | | 0.5 | |
| CASE9 | | 0.8 | |



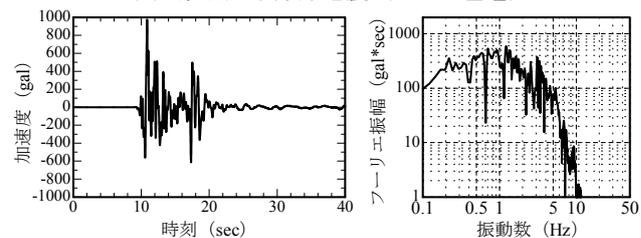
(a) 兵庫県南部地震



(b) 東北太平洋沖地震 (K-net 仙台)



(c) 東北太平洋沖地震 (K-net 塩竈)



(d) 耐震標準 L2 地震動スペクトルⅡ適合波 (G3 地盤)

図-3 入力地震動

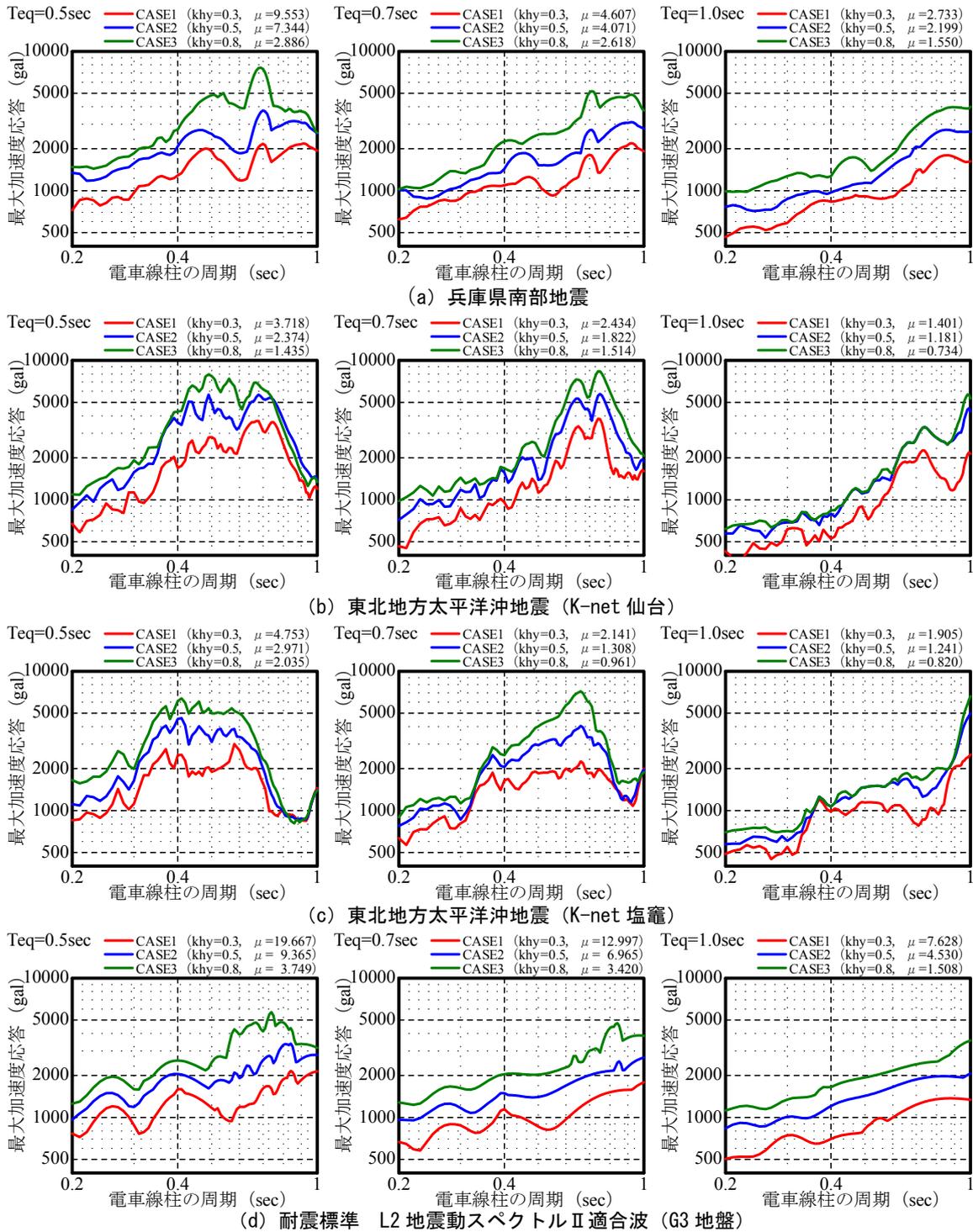


図-4 電車線柱の最大加速度応答スペクトル

これらの図から、どの解析ケースにおいても、同じ等価固有周期 T_{eq} を有する高架橋において、降伏震度 K_{hy} が大きいほど電車線柱の最大加速度応答の値が大きくなることが確認できる。つまり、高架橋が降伏すると、それ以上の加速度を電車線柱に伝えられなくなるため、降伏震度が大きいほど、電車線柱の応答が大きくなる事を確認できた。

また、電車線柱の固有周期 T_p と高架橋の等価固有周期 T_{eq} が近い値であると、高架橋と電車線柱が共振し、加速度応答が大きくなることも明らかである。ただし、正確には、電車線柱の応答が最大となるのは、電車線柱の周期 T_p が高架橋の等価固有周

期 T_{eq} よりも大きいケースである。この傾向は、高架橋の応答塑性率 μ が大きいほど顕著である。これは、ある大きさ以上の地震動を高架橋へ入力すると、高架橋が一気に塑性化・長周期化してしまい、結果、その長周期化した高架橋の周期と電車線柱の周期 T_p が、等価固有周期 T_{eq} より長い周期帯で共振したことが原因である。

以上の事から、入力地震動の特性によらず、降伏震度 K_{hy} が大きい、つまり、高架橋が壊れにくいほど、電車線柱への入力地震動が大きくなり、結果、電車線柱の加速度応答も大きくなるという懸念が生じる結果となった。

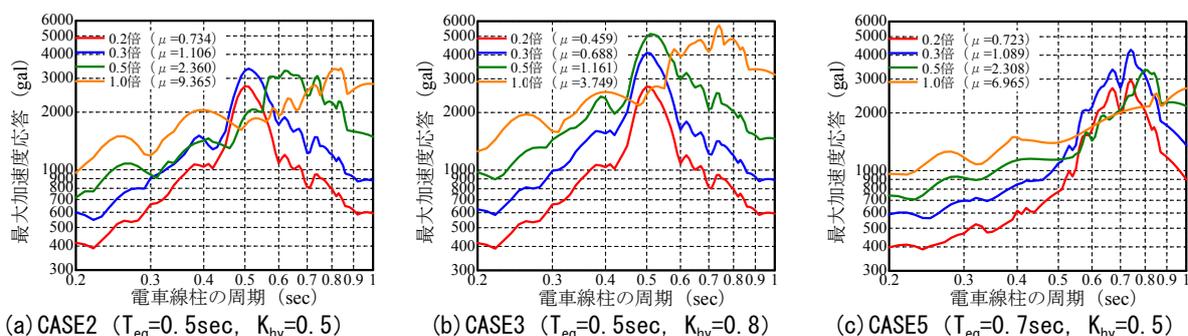


図-5 入力地震動の大きさによる電車線柱の加速度応答スペクトル比較

(2) 高架橋の応答塑性率と電車線柱応答の関連性

前章において、地震動の特性に限らず、電車線柱と高架橋が共振すると、その応答が大きくなること、そしてその特性は構造物の塑性化の程度に依存する事がわかった。

そこで、高架橋の損傷状態が電車線柱へ及ぼす影響について把握するため、同一地震動において、加速度の入力レベルを0.2倍、0.3倍、0.5倍、1.0倍と変えて解析を行った。入力する地震動は、前章で用いた地震動(d)の耐震標準のL2地震動スペクトルII適合波(G3地盤)とした。ここで、地震動の入力レベルによって、高架橋の応答塑性率 μ が1未満(弾性域)から1以上(塑性域)に及ぶ解析結果が得られたCASE2, CASE3, 及びCASE5を抜粋し、その結果を図-5に示す。

まず、CASE2の解析結果に着目すると、加速度の入力レベルが0.2倍、0.3倍の場合、高架橋の応答塑性率 μ が1以下、あるいは1を若干超える値であり、これは高架橋の損傷がほとんどない事を示している。よって、電車線柱も高架橋の等価固有周期 T_{eq} に近い周期で共振している事が確認できる。一方、加速度の入力レベルが0.5倍、1.0倍の場合、高架橋の応答塑性率 μ が比較的大きな値を示しており、高架橋はかなり塑性化していると推測できる。よって、高架橋の固有周期は長周期化しており、共振する電車線柱の周期 T_p の周期帯も長周期化している。しかし、電車線柱の最大加速度応答の値に着目すると、入力地震動のレベルが0.3倍、0.5倍、1.0倍の場合、ほぼ同じである事が確認できる。これは、高架橋を伝達して電車線柱に伝わる高架橋天端の加速度は、高架橋が塑性化するとそれ以上加速度は増幅しないため、降伏震度 K_{hy} よりも大きな加速度は電車線柱に伝達されない事が原因だと考えられる。

CASE3, CASE5の解析ケースの結果においてもCASE2と同様の結果が得られた。ただし、CASE3において、高架橋の応答塑性率 μ が1未満であった地震動の入力レベル0.2倍、0.3倍の解析結果に着目すると、共振する周期帯は高架橋の等価固有周期 T_{eq} であるものの、地震動の入力レベルが0.3倍の方が、大きな加速度応答を示している。これは、高架橋の応答が弾性域内に収まるような地震動レベルであれば、入力地震動の大きさに電車線柱の加速度応答も追従する事がわかる。

これらの結果から、電車線柱の周期 T_p が高架橋

の等価固有周期 T_{eq} と共振するような周期ならば、高架橋が弾性域にとどまるような小さな地震動レベルの方が、大きな地震動よりも電車線柱の加速度応答が大きくなり、また、その値は、高架橋の応答塑性率 μ が1程度を示すような地震動レベルにおいて、最も大きな値を示す事が明らかになった。

また、電車線柱の加速度応答の値に着目すると、高架橋の降伏震度 K_{hy} が0.5であるCASE2, CASE5よりも0.8であるCASE3の方が大きな値を示している事が確認できる。この事から、電車線柱の加速度応答の大きさは、高架橋の降伏震度 K_{hy} に依存していると判断できる。

4. まとめ

本研究において、地震動の特性や入力レベルが高架橋や電車線柱の振動特性に与える影響について検討した。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 高架橋が塑性化して固有周期が長周期化すると、電車線柱と共振する周期帯も長周期化する。
- (2) 電車線柱と高架橋が共振するような周期帯では、入力地震動が高架橋の弾性域にとどまるような小さなレベルの方が、電車線柱にとっては厳しくなる可能性がある。
- (3) 電車線柱の最大加速度応答の大きさは、高架橋の降伏震度 K_{hy} に依存する。

今後は、本検討で明らかになった現象を踏まえて、電車線柱の耐震設計手法の改良を目指し、検討を行いたいと考えている。

謝辞: 本研究では、(独)防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を利用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 今村, 室野, 坂井, 佐藤: 電車線 - 高架橋連成系の地震応答特性, 土木学会地震工学論文集, pp.1182-1190, 2007.
- 2) 電力線路耐震性調査研究委員会: 電車線路設備耐震設計指針(案)・同解説及びその適用例, 1997.
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社: 東北新幹線の地上設備の主な被害と復旧状況(2011年4月17日現在), 2011.
- 4) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.