

# 橋梁－電車線柱連成系の地震応答特性の解明と評価方法

構造物技術研究部 耐震構造研究室

研究員 坂井 公俊

## 1. はじめに

現在の電車線柱の耐震設計では、地震時の土木構造物天端における水平応答加速度を算出し、それが電車線柱下端に入力されることを評価する解析手法が採用されている。しかしながら、電車線柱と高架橋を分離してモデル化（以下、分離モデル）しているために、電車線柱と高架橋の動的相互作用を表現できていない可能性がある。そこで本報告では、高架橋と電車線柱の相互作用について検討を行う。まず電車線柱と高架橋を一体としてモデル化した「一体モデル」と「分離モデル」に対して地震応答解析を実施する。得られた結果から相互作用の現象を解明するとともに、相互作用の影響を簡便に取り入れた耐震評価法の提案を行う。最後に提案手法の妥当性を確認するために、実際の地震被害が発生した箇所に提案手法を適用する。

## 2. 高架橋－電車線柱の相互作用の現象の解明

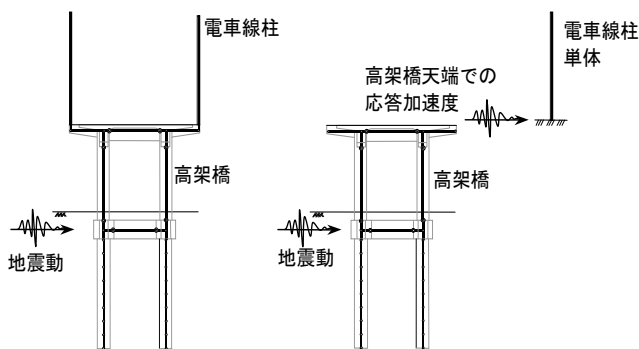
電車線柱と高架橋の動的相互作用が、電車線柱や高架橋の地震応答に与える影響を把握することを目的として、一体モデルと分離モデルのそれぞれを用いて地震応答解析を実施する（図1）。

### (1)解析条件

検討対象とした高架橋を図2に、電車線柱を図3に示す。高架橋はRC ラーメン高架橋を対象とし、電車線柱は長さ10mの鋼管柱とした。なお電車線柱の架線等の影響は集中質量として取り扱うこととした。上記モデルをプロトタイプとして、電車線柱の1次固有周期 $T_p$ と構造物の1次固有周期 $T_s$ の比 $T_p/T_s$ が0.25, 0.50, 1.00, 1.60になるようにラーメン高架橋の柱高さを調整したケースについて検討を行う。地震応答解析の際の入力地震動としては、L2地震動スペクトルII（G3地盤）を用いた。各解析ケースにおいて電車線柱、高架橋を全て線形とした場合、非線形とした場合について解析を実施しているが、本報告では線形解析の結果を示す。

### (2)一体モデル－分離モデルの比較

電車線柱と高架橋の固有周期の比 $T_p/T_s$ を変化させた場合の、一体モデルと分離モデルの最大応答加速度の比を図4に示す。まず高架橋天端の応答は、 $T_p/T_s = 1.0$ のケースを除き、一体モデ



(a) 一体モデル (b) 分離モデル

図1 解析モデルの概要

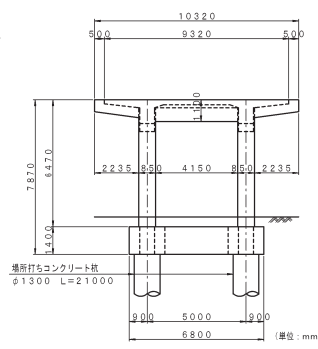


図2 対象とした高架橋の一般図

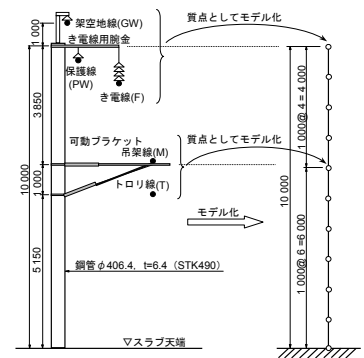


図3 電車線柱のモデル化

ルと分離モデルの応答にほとんど差が見られない。これに対して  $T_p/T_s=1.0$  の場合は、一体モデルの応答は分離モデルの応答と比較して 10%程度低減されていることが分かる。これは電車線柱が高架橋と同じ周期で振動することで、電車線柱が TMD と同じような効果を発揮したためであると考えられる。

次に、電車線柱の応答を見ると、 $T_p/T_s$  の値に関わらず、一体モデルの応答が分離モデルよりも常になくなっていく。上記の結果のうち、 $T_p/T_s=0.5$  の場合の高架橋天端、電車線柱上端の応答加速度を図 5 に示す。既に述べたとおり、高架橋天端の応答加速度は、一体モデルと分離モデルにおいてほぼ等しいことが分かる。これに対し、電車線柱上端の地震応答は、一体モデルの方が分離モデルより 50%程度大きくなっている。

こうした現象が生じた原因として、分離モデルでは、高架橋天端の応答加速度の水平成分だけをを入力して電車線柱の地震応答を算出しているが、一体モデルでは高架橋による回転方向の振動（ロッキング）が電車線柱に自動的に入力されることになるので、この影響により、一体モデルでの応答が分離モデルでの応答よりも大きくなるのではないかと考えることができる（図 6）。

この妥当性を検証するために、高架橋の水平成分だけでなくロッキング成分も併せて電車線柱単体モデルに入力した。解析結果の一例として、図 5 の分離モデルにおいて高架橋のロッキング成分を加味して解析を行った場合の電車線柱上端での応答加速度を図 7 に示す。この結果は、一体モデルの解析結果とほぼ一致していることが分かる。つまり高架橋のロッキング方向の振動が電車線柱の応答を増大させていることが明らかになった。

3. 高架橋－電車線柱の相互作用の大きさ  
前節の検討から、高架橋のロッキング成分の影響で、電車線柱上端での応答が大きくなることが分かった。つまり分離モデルによる場合は、高架橋天端におけるロッキング成分

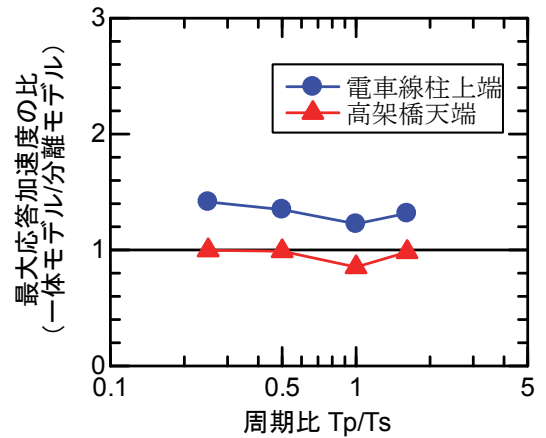


図 4 最大応答加速度の比

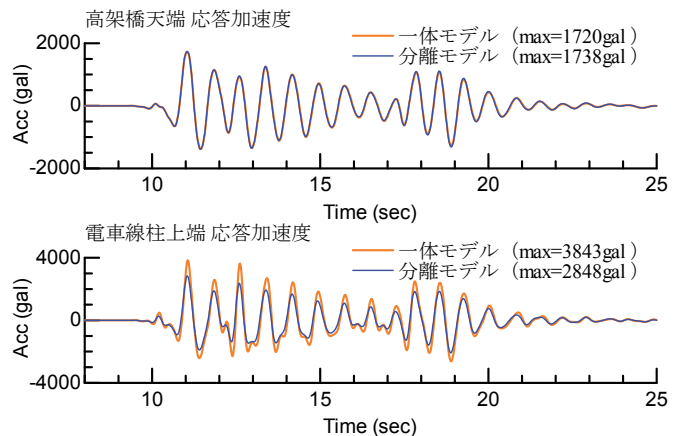


図 5 一体モデル－分離モデルの比較

( $T_p/T_s=0.5$ 、線形解析)

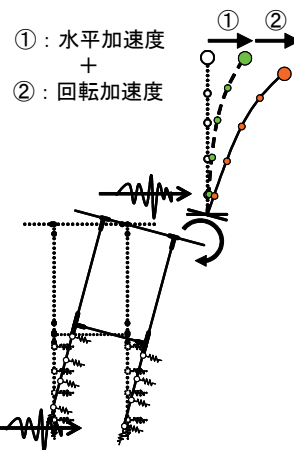


図 6 高架橋－電車線柱の相互作用

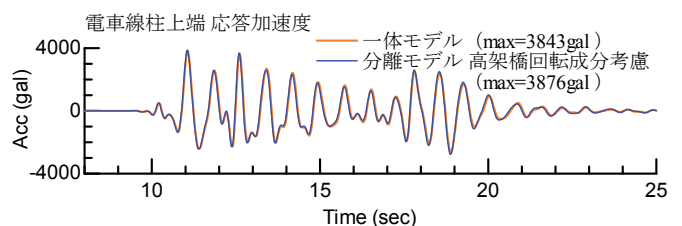


図 7 一体モデル－分離モデル（回転成分考慮）の比較

の大きさを考慮して電車線柱の応答を求める必要がある。しかしながら、このロッキング成分が高架橋の設計パラメータ（高架橋形式、電柱形式、高架橋高さ、降伏震度、地盤種別）や入力地震動の違いによってどのように変化するかは不明である。そこで本章では種々の高架橋の設計パラメータに対して地震応答解析を実施し、電車線柱の一体モデルと分離モデルの応答の比率を算出する。解析ケースの一覧を表1に、解析の結果をまとめて図8に示す。なお本結果は電車線柱、高架橋を全て非線形とした場合である。

### (1) 高架橋高さ、地盤種別、入力地震動の影響

構造形式が同一である Case1～Case3 の解析結果に着目する。Case1（高架橋高さ 6m）と Case2（同 10m）を比較すると、両者にほとんど差が見られない。これより高架橋高さがロッキング成分に与える影響は小さいことが確認できる。Case1（普通地盤）と Case3（軟弱地盤）を比較すると、地盤が軟弱なほどロッキング成分が卓越していることが分かる。また、Case1～Case3 のいずれのケースにおいても複数の入力地震動に対するプロットが重なっており、ロッキング成分への入力依存性はないことが分かる。

### (2) 構造形式の影響

全ケースの結果を眺めると、上記の Case1～Case3 といった地盤種別や構造高さによる影響は相対的に小さく、構造形式による影響が最も大きいことが分かる。構造形式毎にロッキング成分の大きさを比較すると、橋脚が最もロッキング成分が大きく、多本数の杭基礎ラーメン高架橋が最も小さい。この理由は2つ考えられる。まず上部構造の形式に着目すると、ラーメン高架橋のように柱が細い構造では、曲げ変形が生じて水平方向の応答が卓越しやすいのに対して、橋脚のように剛性の高い構造では、剛体運動が生じてロッキング方向の応答が卓越しやすいことが原因として考えられる。もうひとつの理由としては、基礎構造の形式であり、杭本数が多くなると相対的にロッキング方向の剛性が大きくなるために、杭本数が1本の Case1~3 に対して杭本数の多い Case4, 5 では一体モデルの応答がそれほど大きくならなかったものと考えられる。

また、全ケースに共通することであるが、電車線柱の形式によってロッキング成分の大きさが異なっていることも分かる。これは、鋼管柱とコンクリート柱の固有振動数の違いであると考えられる（鋼管柱の1次固有振動数は約 3Hz、コンクリート柱は 2Hz）。つまり固有振動数の高い電車線柱の方がよりロッキング成分の影響が大きくなっていると言える。

表1 解析ケースまとめ

| ケース | 形式                    | 高架橋高さ | 地盤種別  | 入力地震動 |
|-----|-----------------------|-------|-------|-------|
| 1   | 1層ラーメン高架橋<br>1本杭基礎    | 6m    | G3 地盤 | 3波    |
| 2   |                       | 10m   | G3 地盤 | 3波    |
| 3   |                       | 6m    | G5 地盤 | 3波    |
| 4   | 1層ラーメン高架橋<br>多本杭基礎    | 7.9m  | —     | 1波    |
| 5   | 2層ラーメン高架橋<br>多本杭基礎    | 16.2m | —     | 1波    |
| 6   | 橋脚 多本杭基礎<br>(上部工先行降伏) | 8m    | —     | 1波    |
| 7   | 橋脚 多本杭基礎<br>(基礎先行降伏)  | 8m    | —     | 1波    |

※全ケースとも電車線柱形式として鋼管柱、コンクリート柱を検討

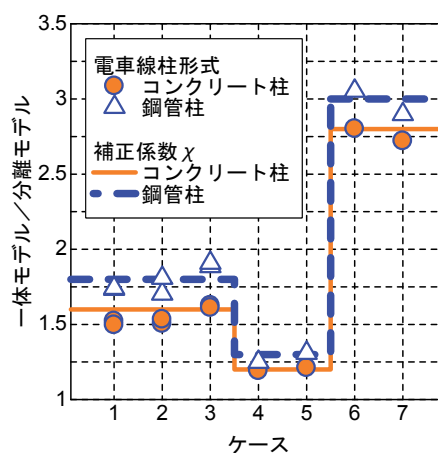


図8 一体モデルー分離モデルによる電車線柱上端での最大応答の比較

#### 4. 相互作用を考慮した耐震評価法

高架橋のロッキング振動が電車線柱に与える影響を評価するには、高架橋と電車線柱を一体系でモデル化した地震応答解析を行えばよい。しかしながら、高架橋と電車線柱の設計担当部署が異なることを考えると、設計実務では作業が煩雑になると考えられる。そこで、分離モデルを基本とした現行の耐震設計法を踏襲する。ただし既に整理されている電車線柱の地震応答スペクトルに一体振動の影響を考慮するための補正係数を乗じることで、ロッキング振動の影響を評価する改良手法を提案する。前節の検討を踏まえ、ロッキングの影響を考慮する補正係数は、高架橋、電車線柱の構造形式によって変化させるものとする。具体的な補正係数 $\chi$ の導入手順を図9に、補正係数 $\chi$ を表2に示す。本手法は現在設計の際に求めている電車線柱の地震荷重に補正係数 $\chi$ をかけることで、設計者にとって負担を増加させることなくロッキング成分を考慮できるものと考えられる。なお表2の補正係数については、今後さらに精査する予定である。

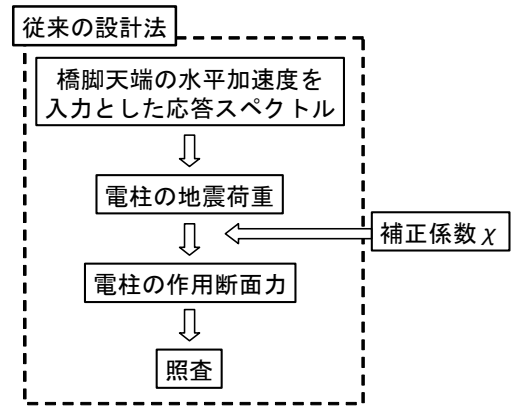


図9 提案法による照査フロー

表2 相互作用考慮のための補正係数 $\chi$

| 補正係数 $\chi$    | コンクリート柱 | 鋼管柱 |
|----------------|---------|-----|
| ラーメン<br>(杭本数多) | 1.2     | 1.3 |
| ラーメン<br>(杭本数少) | 1.6     | 1.8 |
| 橋脚             | 2.8     | 3.0 |

#### 5. 評価法の妥当性の確認

提案手法の妥当性を検証するため、実際に地震被害が生じた電車線柱を対象に本手法を適用する。1987年12月17日発生の子葉県東方沖地震(M6.7)の際に、高架橋に建植された電車線柱(コンクリート柱)が折損する被害が発生した。折損被害を受けた高架橋には2本の電車線柱が建植されているが(図10参照)、そのうち一方(電柱A、固有周期2.83Hz)のみが折損し、他方(電柱B、固有周期2.66Hz)は無被害であった。この電車線柱に対して提案手法を適用した結果得られた電車線柱基部のモーメントを図11に示す。同図より、従来の水平成分のみを考慮した手法では、両者ともに破壊モーメントには至っていない。これに対し提案手法では、電柱Aは破壊モーメントを上回り、電柱Bでは制限内に収まっており、実被害と調和的な結果が得られた。つまり本手法により、高架橋と電車線柱の相互作用を考慮した評価を簡便に行えることが確認できた。

#### 6. おわりに

本検討では高架橋-高架橋の地震時動的相互作用について検討を行った。その結果、高架橋のロッキング成分が電車線柱の応答を増大させることが明らかになった。今後はこの結果をより一般化するとともに、高架橋、電車線柱の耐震設計基準へ反映を行う予定である。

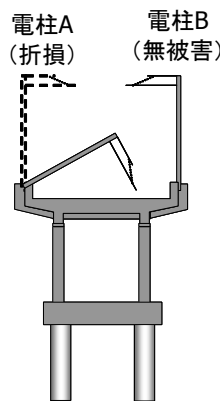


図10 被害を受けた高架橋

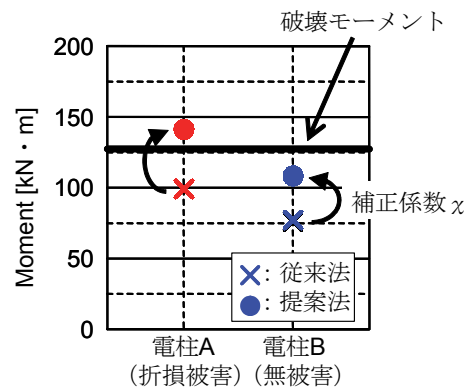


図11 従来法と提案法の比較