

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。

2. 高架橋－電車線柱の相互作用の現象の解明

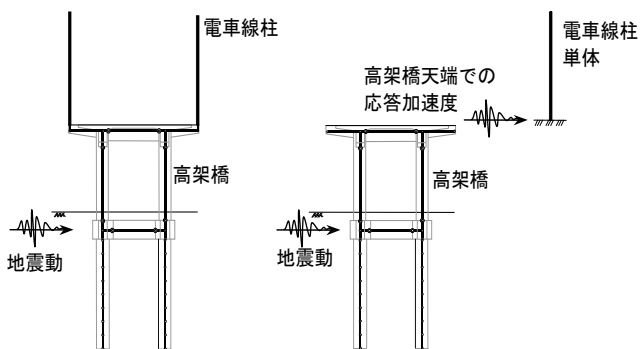
電車線柱と高架橋の動的相互作用が、電車線柱や高架橋の地震応答に与える影響を把握することを目的として、一体モデルと分離モデルのそれぞれを用いて地震応答解析を実施する（図1）。

(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

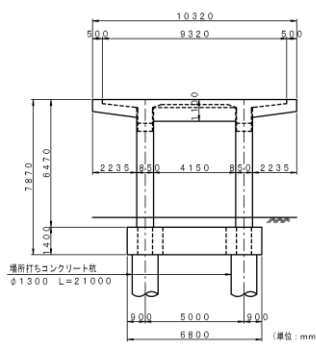


図2 対象とした高架橋の一般図

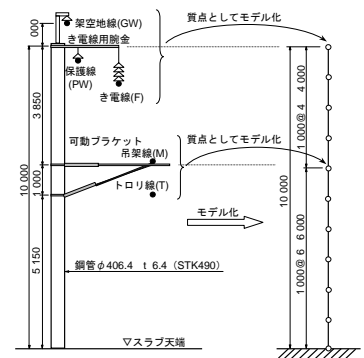


図3 電車線柱のモデル化

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大きくなっている。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. 高架橋の回転振動による影響を考慮した電車線柱の応答値算定法の提案

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。そのため、高架橋のロッ

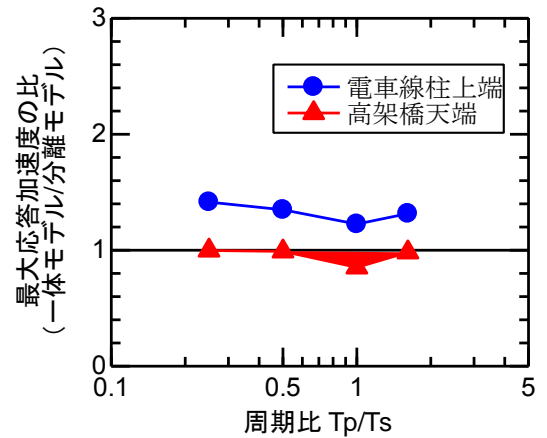


図 4 最大応答加速度の比

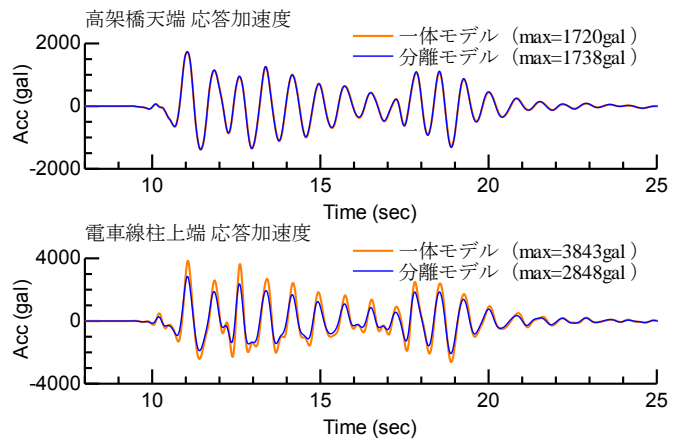


図 5 一体モデルー分離モデルの比較

($T_p/T_s=0.5$ 、線形解析)

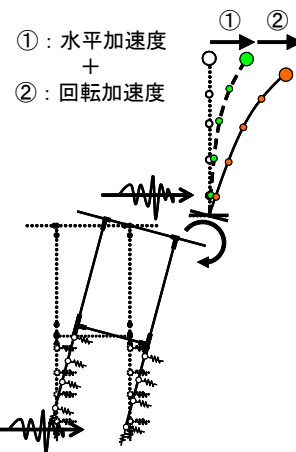


図 6 高架橋ー電車線柱の相互作用

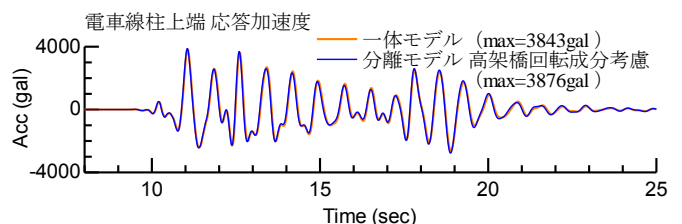


図 7 一体モデルー分離モデル（回転成分考慮）の比較

キング振動が電車線柱に与える影響を考慮するには、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う必要がある。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在の耐震設計法を踏襲し、既に整理されている電車線柱の地震応答スペクトルを用いるが、これに高架橋のロッキング振動の影響を考慮するための補正係数を乗じる改良手法を提案する。具体的には、以下の手順によってロッキング振動の影響を考慮する（図8）。

- ①高架橋のプッシュ・オーバー解析を行い、構造物全体系の荷重-変位関係、各損傷状態に至る点を把握する。
- ②上記①の結果から、高架橋が降伏したときの電車線柱下端の降伏変位 δ_y (m)、回転角（以下、降伏回転角） θ_y (rad)を算定する。
- ③降伏変位 δ_y (m)、降伏回転角 θ_y (rad)を用いて、ロッキング振動による影響を考慮した補正係数 k_θ を次式により算定する。

$$k_\theta = \theta_y / \delta_y \quad (1)$$

- ④高架橋の水平振動のみを考慮した電車線柱の応答震度 Ah から、次式を用いて高架橋の水平振動とロッキング振動を考慮した電車線柱の応答震度 Ah' を算定する。

$$Ah' = Ah \times (1 + k_\theta \times H) \quad (2)$$

ここで、 k_θ は式(1)より算定される補正係数、 H は電車線柱の高さ(m)である。

4. 提案手法の妥当性の確認

本章では、提案手法の妥当性を確認するために、表1に示す5種類の構造物を対象に提案手法を用いた電車線柱の応答値を算定し、従来法、一体モデルとの比較を行う。各構造物のプッシュ・オーバー解析により算定される土木構造物の降伏震度 khy 、降伏変位 δ_y 、降伏回転角 θ_y を表2に示す。さらに提案法より算定される補正係数 k_θ と電車線柱の高さ H （ここでは10m）を考慮したロッキング率 R （提案法では $R = 1 + k_\theta \times H$ ）を算定し、2章で検討したように一体モデルと分離モデルにおける応答震度の比率と比較する。また図9には、分離モデルにおいて従来法による電

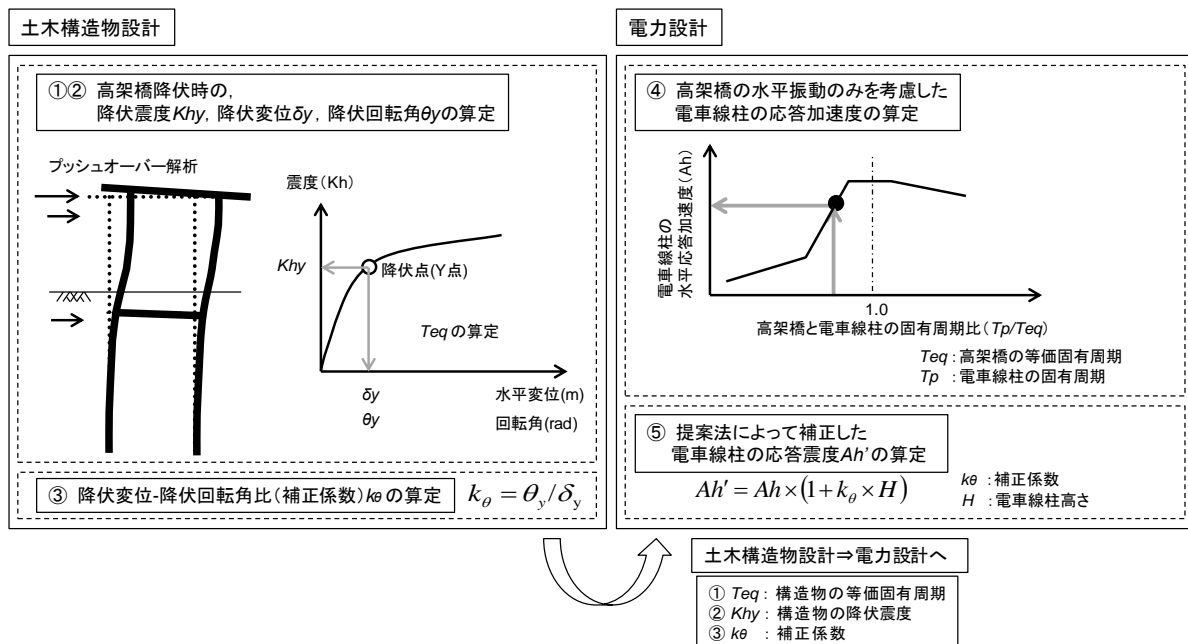


図8 提案する電車線柱の応答値算定法（高架橋の回転成分考慮）

車線柱の応答震度と提案法による電車線柱の応答震度を、一体モデルの電車線柱の応答震度と比較した結果を示す。

これらの結果より、多少のバラツキはあるものの、従来法と比較して提案手法を用いることで一体モデルの応答に近い結果を与えていることが分かる。提案手法は、設計に要する手間も従来法とほとんど変わらないため、土木構造物の回転振動の影響を簡易に取り込む手法として有効であると考えられる。

5. まとめ

本報告では、高架橋上の電車線柱の地震時挙動を明らかにするための検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 高架橋上の電車線柱の地震時挙動は、高架橋天端に発生している水平振動のほか、ロッキング振動により電車線柱の応答値が増幅する。そのため、分離モデルを用いて高架橋上の電車線柱の応答値を算定する場合は、水平振動およびロッキング振動を電車線柱基部へ入力する必要がある。
- (2) 現在の設計体系を考慮し、これまでの電車線柱の応答値算定法を大きく変えることなく、高架橋天端のロッキング振動による影響を考慮可能な電車線柱応答値の簡易算定法を提案した。
- (3) 提案手法を用いて電車線柱の応答値を算定し、その妥当性を確認した。

今後はこの成果に基づいて、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。

表1 構造物の解析ケース

ケース No.	構造物種類	高さ(m)	基礎形式
1	1層ラーメン	7.1	1柱1杭
2	1層ラーメン	8.6	細径群杭
3	2層ラーメン	16.9	細径群杭
4	橋脚（上部工先行降伏）	8.0	太径群杭
5	橋脚（基礎先行降伏）	8.0	太径群杭

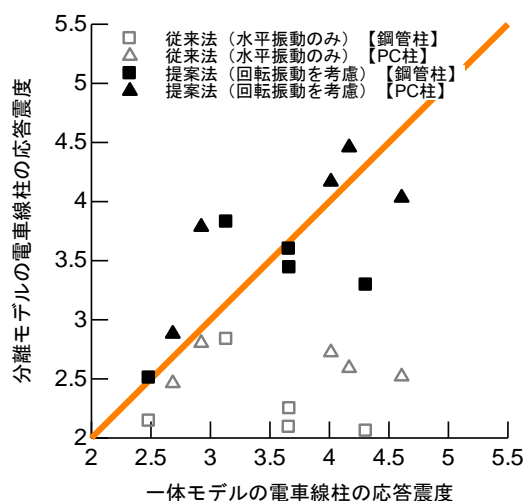


図9 電車線柱の応答震度（従来法と提案法）の比較

表2 提案手法と一体モデルの動的解析により算定されるロッキング率の比較

ケース No.	降伏震度 khy	降伏変位 $\delta y(m)$	降伏回転角 $\theta y(rad)$	提案手法より算定		一体モデル/分離モデル（2章）	
				補正係数 $k_{\theta}(=\theta y/\delta y)$	ロッキング率 $(1+k_{\theta} \times H)$	鋼管柱	PC柱
1	0.611	0.068	0.00357	0.0528	1.53	1.63	1.47
2	0.419	0.024	0.00084	0.0354	1.35	1.10	1.04
3	0.427	0.064	0.00106	0.0166	1.17	1.16	1.09
4	0.717	0.183	0.01318	0.0719	1.72	1.75	1.61
5	0.571	0.165	0.00991	0.0602	1.60	2.09	1.83