

高架橋との連成挙動を考慮した高架上家の簡易な変位応答予測手法

構造物技術研究部 建築研究室

副主任研究員 清水 克将

1. はじめに

高架橋の上部に付随する旅客上家（以下、高架上家（図 1 参照））は、高架橋と連成した振動性状を示し、高架上家の重量が高架橋と比較して軽いことから、特に高架橋と高架上家が共振する場合には大きな応答となる。高架上家を含む旅客上家は、建築基準法上の建築物から除外されているが、鉄道に関する技術上の基準を定める省令（以下、鉄道技術基準省令）では建築物に該当している。ここでは、予想される荷重に対する安全性の確保が求められており、鉄道技術基準省令の解釈基準はないものの、建築基準法等を準用することが解説中に記載されている。

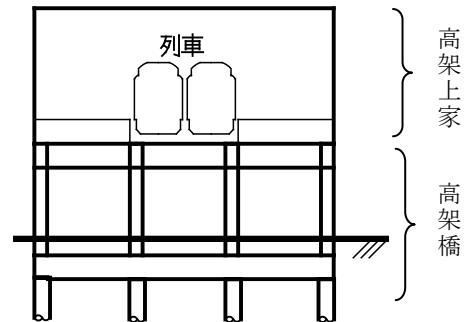


図 1 高架上家の例

一方、平成 24 年版鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（以下、耐震標準）¹⁾では、鉄道構造物に付随する施設で相互作用による影響が大きいものは、その相互作用を考慮した設計応答値算出の必要性が記載されている。

ここで、地震動が入力した場合の構造物に付随する施設の応答値の算定法として、電車線柱の応答量算出方法が示されており、この考え方は高架上家にも適用可能とされている。さらに、電車線路設備耐震設計指針・同解説²⁾には、高架橋上の電車線柱に作用する応答絶対加速度を簡易に算出する加速度応答スペクトルが示されているが、高架上家と電車線柱では質量が異なり高架橋との連成程度が異なること、全覆型の高架上家のようなラーメン構造を対象とした検討ではないこと、非線形性を考慮されていないことなどから、電車線柱用スペクトルをそのまま高架上家に適用することは適当でないと考えられる。

そこで本報告では、耐震標準に定める最大級の強さをもつ地震動として L2 地震動スペクトル II（以下、鉄道土木地震動 L2sp II）が入力した場合における高架上家の簡易な変位応答予測手法を構築することを目的として、実高架駅を模擬した質点モデルに対するパラメトリックスタディによる共振の影響や、高架橋の回転変形（ロッキング）が高架上家に与える影響を整理し、高架上家の地震時安全性の評価法を提案したので紹介する。

2. 高架橋との共振による影響

鉄道土木地震動 L2sp II 入力時には、高架上家も高架橋も塑性域に入っている可能性が高い。そのため、パラメトリックスタディなどの検討を行う際には、高架上家と高架橋の非線形特性をそれぞれ考慮したモデルによって、応答性状を検証することが望ましい。しかしながら、解析条件（例えば、降伏震度や固有周期など）によって応答性状が大きく異なり、応答に与える条件を整理しにくい。そこで本章では、まず高架上家（弾性）－高架橋（弾塑性）の解析モデルに対してパラメトリックスタディを行い、高架上家の塑性化を後に述べる方法によって補正することにより、高架上家および高架橋の両方の塑性化を考慮した結果を得ることとした。

高架上家の最大応答変位に寄与する物理量について、文献 3)を参考に調和外力入力時の高架上

家は弾性で高架橋が降伏する 2 質点モデル（高架
上家：弾性，高架橋：完全弾塑性）の運動方程式
により整理すると，最大応答変位の比（高架上家
／高架橋）は，①高架橋応答塑性率，②質量比（高
架上家／高架橋），③固有周期比（高架上家／高架
橋），④固有周期比（高架橋等価固有周期／入力地
震動周期）の 4 変数の関数として表される。そこ
で，上記の 4 変数を用いて，実際の高架駅で想定
される範囲をパラメータとしてパラメトリックス
タディを行うことで，最大応答変位を合理的に推
定することが可能である。パラメトリックスタ
ディで用いた解析モデルを図 2 に，解析パラメ
ータを表 1 に示す。

高架上家の変位応答の全ての解析結果をプロ
ットしたものを図 3 に示す。全体的には固有周期比
が大きくなるにつれて応答値が大きくなる傾向
が確認できるものの，高架橋の特性によって結果
が大きく異なり，固有周期比が同じであっても結
果のばらつきが大きいことがわかる。そこで，解
析パラメータ毎に整理したもののうち，質量比
0.05，高架橋等価固有周期 0.8s の場合を例として

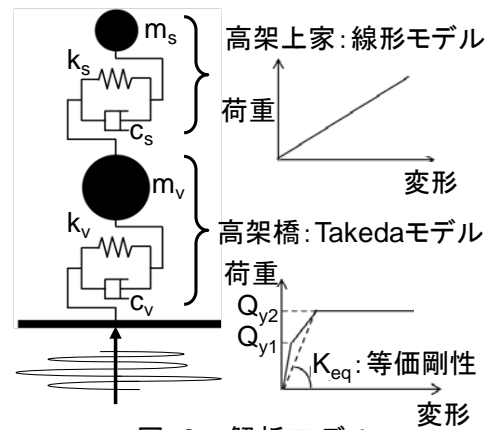


図 2 解析モデル

表 1 解析パラメータ

高架 上家	復元力特性	線形
	質量比 (上家／高架橋)	0.03, 0.05, 0.10
固有周期比 (上家／高架橋)	0.1 ~ 1.2 0.1 刻み	
	粘性減衰	2%
高架橋	復元力特性	Takeda モデル
	質量	691[t]
	等価固有周期	0.6, 0.7, 0.8, 0.9 秒
	粘性減衰	10%
	降伏耐力	L2sp II 入力時 $\mu_v \div 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ になるように設定

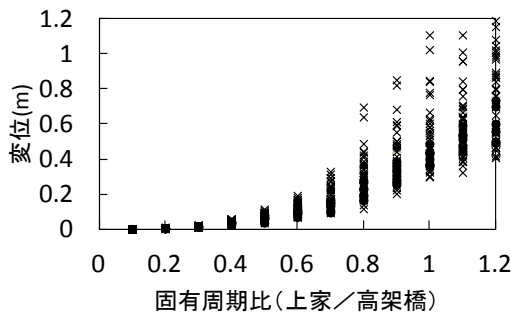


図 3 高架上家を弾性とした場合の
応答変位スペクトル（全ての解析結果）

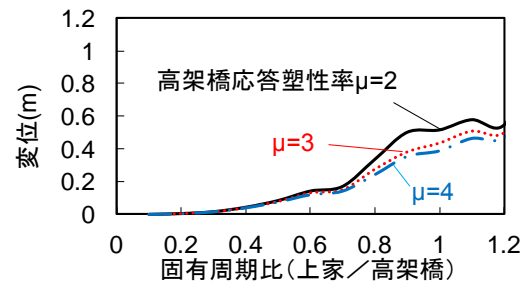


図 4 高架橋及び高架上家の特性毎に整理
した応答変位スペクトルの例
(質量比 0.05、高架橋等価固有周期 0.8s)

図 4 に示す。高架橋および高架上家の特性で応
答変位スペクトルを整理することで，合理的に
応答変位を導出することが可能である。

次に高架上家の塑性化の影響について，限界
耐力計算告示（平成 12 年建設省告示 1457 号）
によるエネルギー一定則および既往の研究によ
る塑性化に伴う固有周期の伸長⁴⁾に基づき，高
架上家の弾性応答から弾塑性応答を推定するこ
ととした。高架上家の塑性化の影響を考慮した

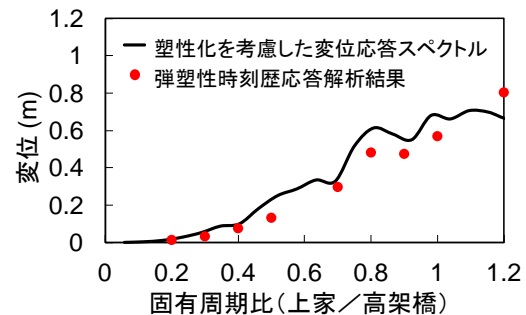


図 5 弾塑性応答に対する精度検証

変位応答スペクトル（質量比 0.05，高架橋等価固有周期 0.8s，高架橋応答塑性率 3 の場合）と弾塑性時刻歴応答解析結果との比較を図 5 に示す。塑性化の影響を精度よく評価できていることがわかる。

3. 高架橋のロッキングによる影響

高架桥上には、地震時に高架橋のロッキングに伴う変形が高架桥上に累加されることになる。耐震標準には、高架橋のロッキングの影響を考慮した電車線柱の水平応答震度の算定法が示されている。ただし、高架桥上の構造形式は片持ち梁形式の電車線柱とは異なり全覆型や半覆型などのラーメン構造があるため、高架橋のロッキングが高架桥上の層間変形角にそのまま累加されるとは限らないと考えられる。また、駅部の高架橋は、線路直交方向の柱スパンが複数存在するため、ロッキングが生じにくいことも考えられる。そこで、ここでは、駅部高架橋のロッキングの程度を静的増分解析により把握する。

まず、複数スパン高架橋における回転変形の影響について、図 6 に示す高架桥上の無い、耐震標準に準拠した高架橋のみの解析モデルによる静的増分解析を行った。高架橋の降伏点での高架橋頂部の回転角 θ_v の水平変形 δ_v に対する比 k_θ （ロッキングを考慮した補正係数）は、0.028 (1/m) であった。これを用いて、耐震標準付属資料に示されている水平応答震度の割増係数（ $=1+k_\theta \times H_v$ ）（ H_v ：高架橋高さ）を求めると 1.2 程度となることから、駅部の高架橋においてもロッキングの影響を考慮する必要があると考えられる。

次に、高架桥上の構造形式による影響について、高架桥上の形状および高架桥上柱脚の固定条件の違いによるロッキングと高架桥上応答の関係について、高架橋のみに水平力を作用させた高架桥上—高架橋の連成モデルに対する静的増分解析により検討した（図 7 参照）。いずれの解析結果においても上家回転変形角 θ_s の高架橋回転変形角 θ_v に対する比が 1 以下となり、高架橋のロッキングに対して高架桥上の層間変形角が小さいことがわかる。以上より、高架桥上形状や柱脚固定条件を適切に考慮することで、高架橋のロッキングが高架桥上の層間変形角に与える影響を、より合理的に評価できることがわかる。ただし、この検討では、高架橋を含めた全体をモデル化する必要があるため、これらの作業を省略する場合においては、図 7 の最大値である 0.83 を k_θ に乗じた値を新たなロッキングを考慮した補正係数とすることで、ラーメン構造タイプの高架桥上の応答性状を安全側に評価できると考えられる。

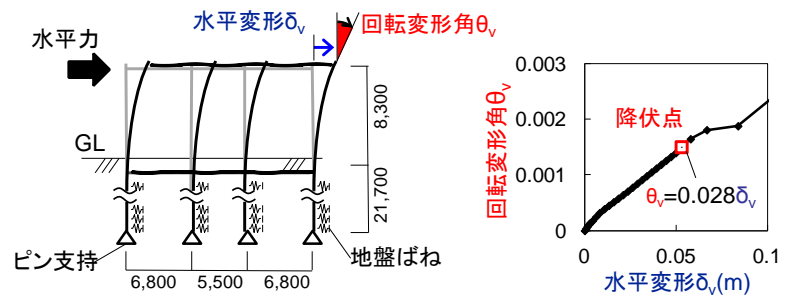


図 6 複数スパン高架橋の回転変形の影響

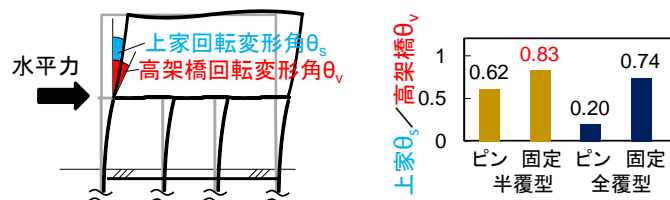


図 7 高架桥上の構造形式の影響

高架橋のロッキングに対して高架桥上の層間変形角が小さいことがわかる。以上より、高架桥上形状や柱脚固定条件を適切に考慮することで、高架橋のロッキングが高架桥上の層間変形角に与える影響を、より合理的に評価できることがわかる。ただし、この検討では、高架橋を含めた全体をモデル化する必要があるため、これらの作業を省略する場合においては、図 7 の最大値である 0.83 を k_θ に乗じた値を新たなロッキングを考慮した補正係数とすることで、ラーメン構造タイプの高架桥上の応答性状を安全側に評価できると考えられる。

4. 応答スペクトルの作成とその検証

2 章および 3 章で述べた方法により、鉄道土木地震動 L2sp II が作用した場合の高架橋および高

架上家の非線形性を考慮した変位応答スペクトルを作成した。作成した応答変位スペクトルと高架上家－高架橋一体非線形骨組モデルによる応答解析結果を比較（図 8 参照）すると、高架上家の応答を精度よく予測できていることがわかる。

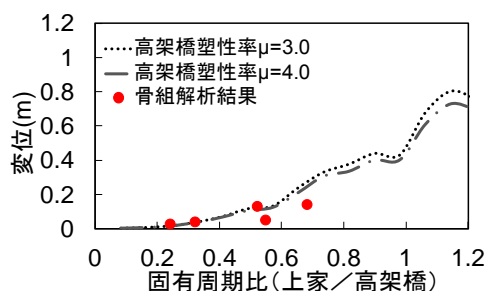


図 8 骨組モデルとの精度検証

5. 鉄道土木地震動 L2sp II 入力時の高架上家の安全性照査方法の提案

以上の検討結果などに基づき、鉄道土木地震動 L2sp II が作用する時の高架上家の応答推定法と安全性照査法を図 9 に示すフローのように提案した。まず、与条件として構造物に関する情報を取得する。次に、これらの情報と本報告で示した変位応答スペクトルを用いることで、高架上家の応答変形量 δ_r を算定する。一方の高架上家の保有変形量 δ_u は、既往の鉄骨柱の保有変形量算定式 (5)(6) を高架上家用に軸力比を修正した算定式により算出し、応答変形量と比較する。なお、本方法の適用範囲は、鉄道高架橋の上部に鉄骨造の高架上家のみが設置されている場合とする。例えば、高架上家の屋上を駐車場に利用する場合や、高架上家の上部に別構造物を設置する場合など、高架上家の挙動が一般的な高架上家とは異なることが予想される場合は適用範囲外とする。

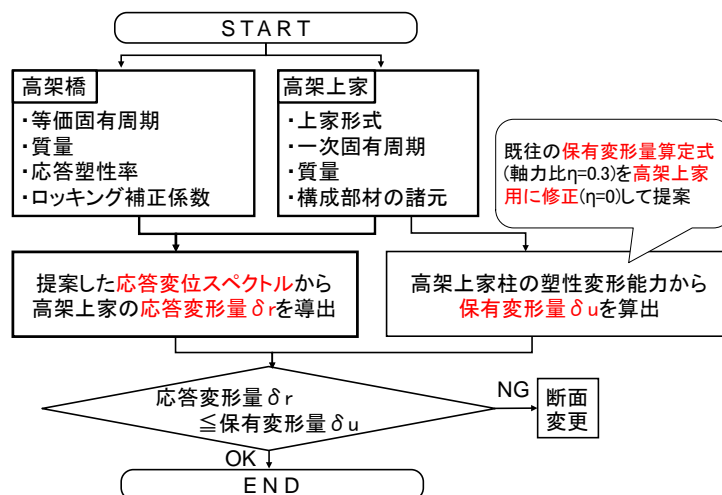


図 9 高架上家の安全性照査法の提案

6. おわりに

鉄道土木地震動 L2sp II 入力時の高架上家の耐震安全性を簡便に照査する方法を策定することを目的に解析的な検討を行い、以下の知見を得た。

- 地震入力時の高架上家の応答変形量への影響因子について理論的に考察し、鉄道土木地震動 L2sp II 入力時の応答変形量を推定するスペクトルをパラメトリックスタディにより導出した。
- ラーメン構造となる旅客上家では、高架橋のロッキングの影響が電線車線柱に比べて小さくなることを確認し、その際のロッキングの補正係数に対する低減値を提案した。
- 柱部材の保有変形量の算出式を導出し、上記で算定した応答変形量と比較することによる耐震安全性の照査法を提案した。

参考文献

- 1) 公益財団法人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）、2012
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：電車線路設備耐震設計指針、2013
- 3) 田治見宏：建築振動学、コロナ社、1984
- 4) 柴田明德：最新耐震構造解析、森北出版、1981
- 5) 加藤勉、中尾雅躬：局部座屈に支配される H 形断面鋼部材の耐力と変形能力、日本建築学会構造系論文集、No.458、pp.127-136、1994.4
- 6) 加藤勉：閉断面部材の局部座屈と変形能力、日本建築学会構造系論文集、No.378、pp.27-36、1987.8