

隣接建物の存在による高架橋の 地震応答特性への影響評価

和田 一範* 月岡 桂吾* 山田 聖治*
室野 剛隆**

Evaluation of the Effect on Seismic Response Characteristic of a Viaduct by an Adjacent Building

Kazunori WADA Keigo TSUKIOKA Seiji YAMADA
Yoshitaka MURONO

In the large metropolitan areas, there are many cases where large buildings are built adjacent to a railway viaduct. These buildings are quite massive compared to the size and weight of a railway viaduct. In an event of an earthquake, response of such buildings may have a significant effect on the railway viaducts; such effect is too serious to be ignored. In this paper, we executed FEM analysis for investigating kinematic and inertial interaction among a railway viaduct, soil and an adjacent building. The results of analysis indicate that the effective input motion to the viaduct is reduced considerably due to the presence of an adjacent building.

キーワード：隣接建物，高架橋，幾何学的相互作用，慣性相互作用

1. はじめに

都市部においては鉄道高架橋に大型建物が隣接する場
合が多々ある。大型建物が隣接することで、周辺地盤を
介して鉄道高架橋と隣接建物が連成系として相互作用し
あい、高架橋の地震応答特性が変化する可能性がある。

建物同士の相互作用に関しては、Luco らが行った理論
的検討¹⁾を端緒に、地表面基礎や埋め込み基礎を対象と
した研究^(例えば2)～5)、杭基礎を対象とした研究^(例えば6)～9)
などが行われている。一方で、建物と土木構造物の相互
作用に関しては、検討事例が皆無である。「鉄道構造物等
設計標準・同解説 耐震設計」¹⁰⁾では、鉄道構造物間の
連成効果は構造計画で配慮することとしているが、周囲
の建物の影響に関しては明記されていない。つまり、鉄
道高架橋-隣接建物連成系の相互作用は発現の可能性が
あるものの、その発生メカニズムや高架橋の応答の増減
程度などに関しては、十分な知見が無いのが現状である。

地震時の鉄道高架橋-隣接建物連成系の相互作用は、
図1に示す「慣性相互作用」と「幾何学的相互作用」に
分けられる。前者は建物や高架橋の振動が周辺地盤を介
して伝播すること、後者は建物や高架橋の基礎が周辺地
盤の変形を拘束すること、に起因して高架橋と建物が相
互に影響しあう効果である。

本稿では、上記相互作用において、隣接建物が鉄道高
架橋の地震応答特性へ及ぼす影響(図1の“未知(実線)”)

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** 鉄道地震工学研究センター

と記載の相互作用)に焦点を当てて分析する。具体的
には、鉄道高架橋-隣接建物連成系の2次元FEMモデルに
よる時刻歴応答解析を実施し、隣接建物の高架橋への影
響メカニズムを分析した後に、建物諸元や離隔、地盤剛
性等を変えたパラメータスタディを行い、隣接建物が高
架橋へ与える影響程度を両相互作用の観点から評価する。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

鉄道高架橋-隣接建物連成系の2次元FEMモデルを
図2に示す。10階建ての建物(杭基礎形式)と鉄道高

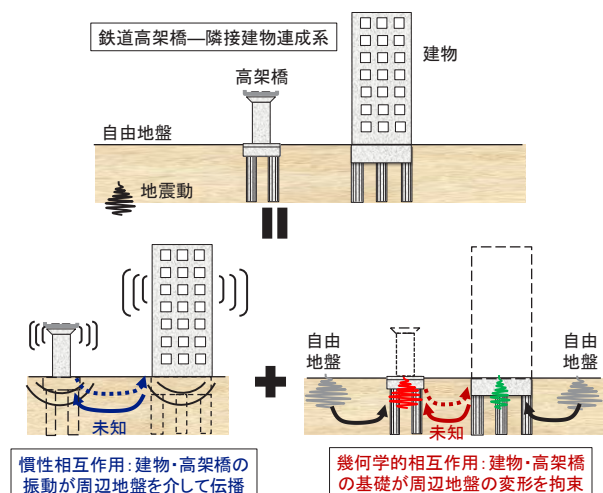


図1 鉄道高架橋 - 隣接建物連成系の相互作用

特集：地震対策技術

架橋（杭基礎形式）が隣接するモデルとした。基本となる隣接建物の諸元は文献 11)，高架橋の諸元は文献 12) を基に設定した。地盤については、深さ 20m までは表層地盤（一層）とし、せん断弾性波速度 V_s を解析ケースごとに変化させた。また、深さ 20～25m は基盤層として、全ケースでせん断弾性波速度 V_s を 400m/s とした。モデル化方法として、構造物は梁要素、地盤はソリッド要素とした。ここで、2次元モデルで表現するにあたり、杭は奥行きの本数（高架橋は 3 本、建物は 5 本）を考慮して、断面剛性を設定している。また、地盤については平面ひずみを仮定するとともに、十分大きな奥行き幅として 100m を設定した。

隣接建物の有無による高架橋への入力地震動（有効入力動）の変化に着目して評価するため、本解析では高架橋の質量をゼロとし地上部分はモデル化しない。なお、大型建物の総質量は高架橋の数倍～数十倍あるため、高架橋の振動が隣接建物の挙動へ与える慣性相互作用（図 1 の青点線矢印）は無視できると考えられる。また、基本的な挙動把握を行うため、全要素を線形でモデル化し、杭と地盤との剥離現象は考慮していない。

2.2 検討パラメータおよび入力波

本稿では、隣接建物の影響を建物諸元（各層剛性、各階質量）、地盤剛性、離隔（高架橋と隣接建物の離れ）の 3 つの観点から分析する。検討する建物諸元、地盤諸元、離隔を表 1 に示す。ここで、 α_m 、 α_{kb} 、 α_{kf} は隣接建物の各階質量および各層剛性、杭基礎剛性の基本諸元設定値からの倍率を示す。これらの倍率は、各階や各層、杭全体に渡って一律で掛けている。また、隣接建物の存在が高架橋へ与える影響のメカニズム分析を行う観点からパラメータを設定しており、表 1 の全ケースに見合った実建物が存在するとは限らない。例えば、各階質量や各層剛性が、本稿で対象とした大型建物の諸元として一般的に想定される値よりも大きな値まで網羅し、また建物の杭基礎の剛性による効果（幾何学的相互作用）のみに注目するため、各階質量がゼロのケースも設定している。地盤剛性については、表層地盤のせん断弾性波速度 V_s として 100m/s と 200m/s の 2 ケースを設定した。離隔については、高架橋と隣接建物のフーチング端部間の離れが 1m、5m、10m、15m の 4 ケースを設定した。

入力波は図 3 に示すように、0.4-10Hz まで同等のフーリエ振幅を有する正弦スイープ波とし、基盤位置に入力して時刻歴応答解析を実施した。時間刻みは 0.01 秒とし、減衰特性は隣接建物および地盤の主要な振動が概ねカバーできる振動数である 0.5Hz と 5Hz で 3% の減衰比となる Rayleigh 減衰とした。

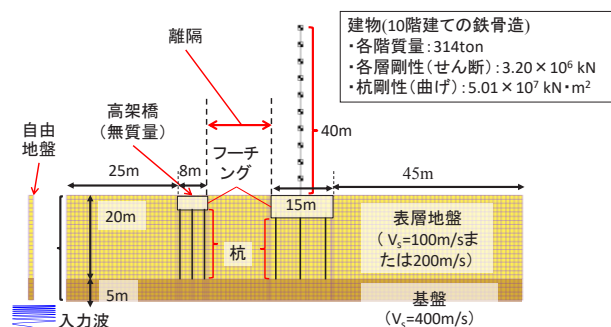


図 2 解析モデルの概要

表 1 解析パラメータ一覧

(a) 建物諸元のパラメータ		
各階質量倍率 α_m	各層剛性倍率 α_{kb}	杭剛性倍率 α_{kf}
0,1,2,5,8,10	1,2,5,8,10	1,2
(b) 地盤条件・離隔		
せん断弾性波速度 V_s (m/s)	離隔 (m)	
100,200	1,5,10,15	

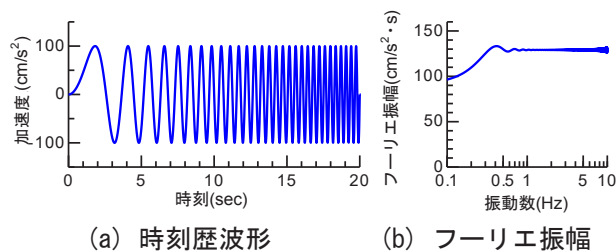


図 3 入力波

3. 隣接建物からの幾何学的相互作用の影響

本章では建物振動の影響が含まれないように、建物の各階質量はゼロとし、幾何学的相互作用により発揮される入力損失効果に着目して分析を行う。具体的には、自由地盤地表面のフーリエ振幅に対する構造物（建物もしくは高架橋）のフーチング位置のフーリエ振幅の比（以下、有効入力係数と記す）で評価する。

3.1 建物自体の入力損失効果

図 4 に建物のみ（高架橋がない）のモデルにおいて、杭剛性を 1 倍、2 倍にしたケースについて、建物フーチング位置での有効入力係数を示す。図 4 より自由地盤の 1～3 次などの固有振動数において有効入力係数が低下していること、その低下度合いは 2 次、3 次のような高次の振動数の方が大きいことがわかる。地盤の剛性の影響については、せん断弾性波速度 $V_s=100m/s$ の場合の方が、有効入力係数の低下程度が大きい。杭剛性の影響については、振動数により多少異なるが、大きな違いはない。なお、入力損失に関する既往研究¹³⁾においても地

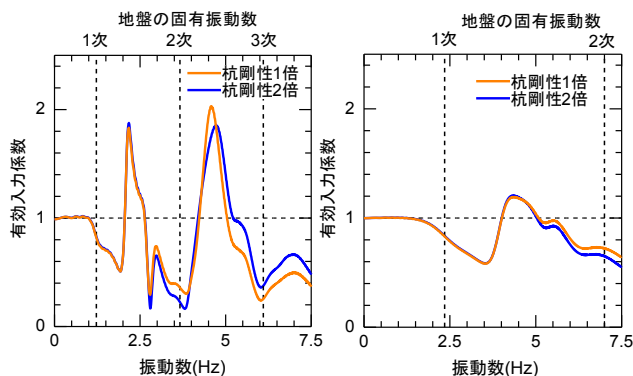


図4 建物の有効入力係数（高架橋無）

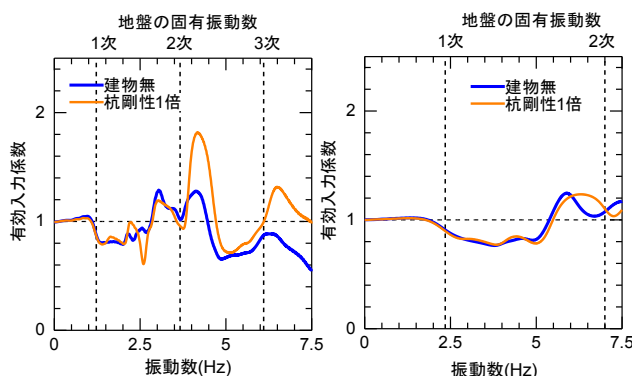


図6 高架橋の有効入力係数（離隔 15m）

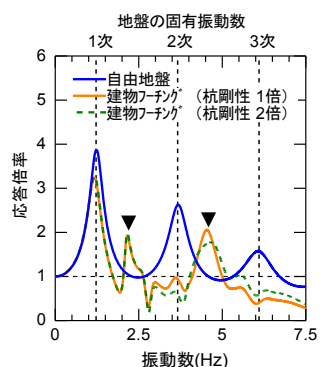


図5 入力波に対する応答倍率 ($V_s=100\text{m/s}$)

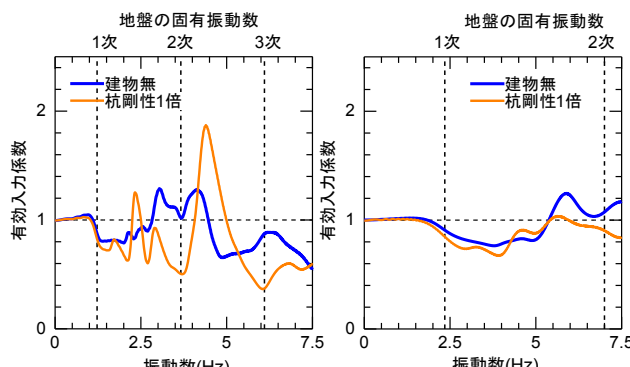


図7 高架橋の有効入力係数（離隔 1m）

盤の剛性が杭剛性に比べて相対的に小さいほど、また、高次の固有振動数ほど、発現する入力損失効果が大きい傾向にある。

また、自由地盤の各次固有振動数の間で、有効入力係数が1を上回っている帯域がある。これは、図5に示すように、自由地盤の固有振動数よりやや高振動数帯で建物フーチング位置の応答倍率が増加するためである（図5の▼印）。なお、このピークは建物杭基礎の変形モードもしくは建物杭基礎によって建物近傍地盤の剛性が上がることによる近傍地盤の変形モードと考えられる。

3.2 建物の入力損失効果による高架橋への影響

図6に建物と高架橋の離隔が15m、建物の杭剛性を1倍としたケースにおける高架橋フーチング位置での有効入力係数を示す。このとき高架橋の入力損失は「高架橋の影響+隣接建物の影響」で評価される。ただし、この「+」は厳密な和を意味するのではなく、概念的に影響が付加されることを意味する。図中には、比較対象として建物自体が存在しないケース（高架橋の影響のみ）も示した。自由地盤の1～3次固有振動数付近に着目すると、建物自体が存在しないケースと建物が存在するケースの有効入力係数の差は小さく、15mの離隔がある場合には、隣接建物が高架橋の有効入力動へ与える影響は小さい。すなわち、主に高架橋自体の入力損失効果が発揮

されているといえる。

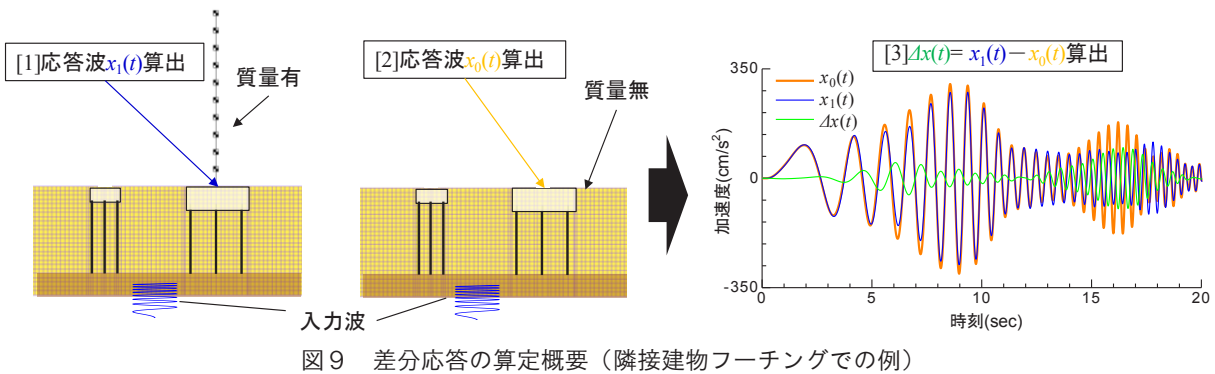
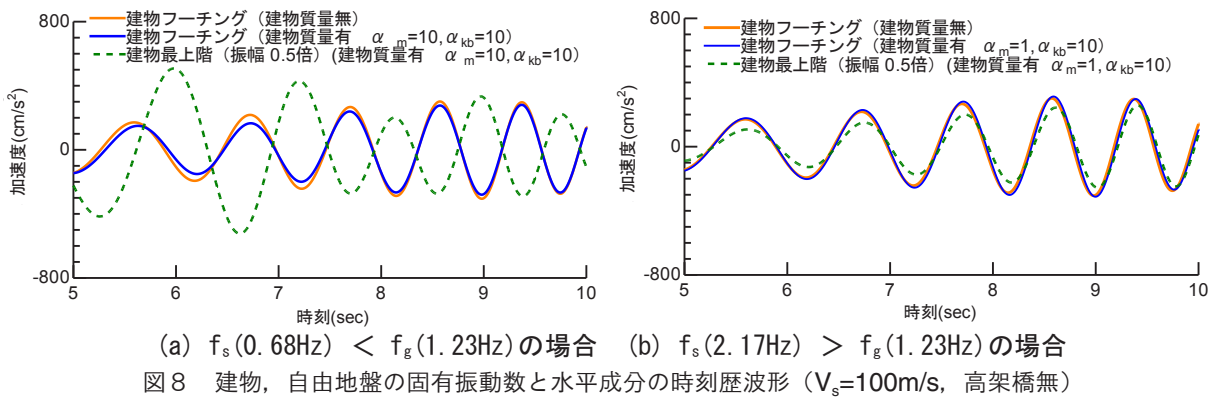
次に、図7に建物と高架橋の離隔が1m、建物の杭剛性を1倍としたケースにおける高架橋フーチング位置での有効入力係数を示す。本図より建物自体が存在しないケースに比べて、建物の杭基礎が存在することで、自由地盤の2次、3次の固有振動数の高架橋の有効入力係数が低下することがわかる。また、低下の程度は離隔が15mの時よりも大きい。これは、建物の杭基礎が高架橋の直近に存在することで、建物自体の入力損失効果が周辺地盤を介して、高架橋の有効入力動低減にも寄与していることを表す。

以上をまとめると、高架橋に建物が隣接することで建物自体の入力損失効果が周辺地盤を介して高架橋に影響を与え、自由地盤の高次固有振動数帯において、高架橋への有効入力動が低減される。低減程度は地盤が軟らかいほど、建物と高架橋の離隔が小さいほど大きい。

4. 隣接建物からの慣性相互作用の影響

隣接建物が質量を持つ場合の応答は、建物が存在しない場合に対して、慣性相互作用と幾何学的相互作用の両効果が含まれたものとなる。そこで、質量を有する隣接建物のケースと、隣接建物の質量がゼロのケースの結果

特集：地震対策技術



を同じ離隔・地盤条件において比較することとした。このことで両者の差異は隣接建物からの慣性相互作用のみとなり、慣性相互作用に限定した分析が可能となる。

4.1 建物と地盤の固有振動数と慣性相互作用の特徴

高架橋が存在しないケースにおいて、建物の1次固有振動数 f_s と自由地盤の1次固有振動数 f_g の大小関係が異なる2ケースの建物フーチング中心位置での時刻歴応答波形(水平成分)を図8に示す。建物の1次固有振動数は、建物のフーチングと最上階での応答倍率の卓越振動数で評価している。なお、建物が質量を有するケースについては、建物の最上階の応答波形も併せて示している。図8(a)より、建物の固有振動数 f_s が自由地盤の固有振動数 f_g よりも小さい場合は、建物フーチング(地盤)と建物最上階の応答波形の位相差が大きいことがわかる。その結果、建物振動による慣性力と地盤振動が相殺されるため、建物の質量がゼロのケースに比べて建物の質量が有るケースの建物フーチング位置での応答が減少する。一方で、図8(b)に示すように建物の固有振動数 f_s が自由地盤の固有振動数 f_g よりも大きい場合は、建物フーチング(地盤)と建物最上階の応答の位相差が小さく、本条件では、建物の応答が僅かに増加している。そして、これらの応答の変化は、建物質量の大きい図8(a)では大きく、建物質量の小さい図8(b)では小さい。

4.2 慣性相互作用の周辺地盤・高架橋への影響

本節では、慣性相互作用の影響が比較的大きい建物質

量有 ($\alpha_m=10, \alpha_{kb}=10$) について着目する。また、慣性相互作用の寄与分のみを抜き出すために、式(1)で定義する差分応答 $\Delta x(t)$ を用いて分析する(図9)。

$$\Delta x(t) = x_1(t) - x_0(t) \quad (1)$$

ここで、 $x_1(t)$ は評価したい隣接建物(質量を有するケース)の時刻歴応答波形、 $x_0(t)$ は隣接建物の質量がゼロのケースの時刻歴応答波形である。

まず、建物と高架橋の離隔が15mのケースにおいて、建物フーチング端部から距離2.5m(地点A)、7.5m(地点B)、12.5m(地点C)の地表面における差分応答の時刻歴波形(水平成分)を図10に示す。地点A、B、Cと建物から離れるほど、差分応答の振幅が低減していることがわかる。また、波形の到達時間については、各地点でほぼ同時である。これより、前述した建物の地上階と地盤の振動の位相差によって建物振動の慣性力が地盤振動を相殺する効果が、建物位置から離れるほど小さくなっていると考えられる(図11)。

次に、上述した建物諸元で高架橋との離隔を1~15mで変えたケースについて、高架橋フーチング中心位置での差分応答のフーリエ振幅(水平成分)を図12に示す。その結果、離隔が大きくなるほど、差分応答のフーリエ振幅値は減少し、建物の慣性相互作用が高架橋へ与える影響が、徐々に小さくなることわかる。

以上をまとめると、慣性の相互作用としては、自由地盤の固有振動数 f_g と建物の固有振動数 f_s の大小関係で傾向が異なり、 $f_g > f_s$ の場合は、建物振動と地盤振動の位相差で応答が低減、 $f_g < f_s$ の場合は、建物と地盤の位

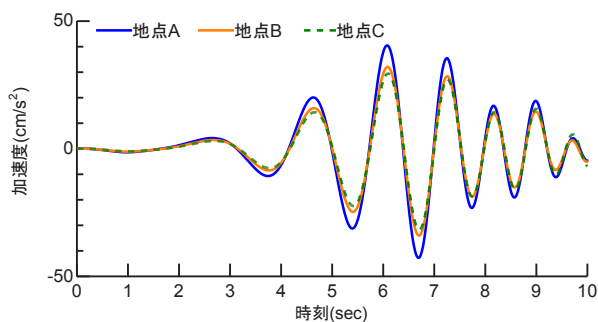


図10 建物質量有 ($\alpha_m=10$, $\alpha_{kb}=10$) の差分応答の時刻歴波形の伝播 (離隔 15m, $V_s=100$ m/s)

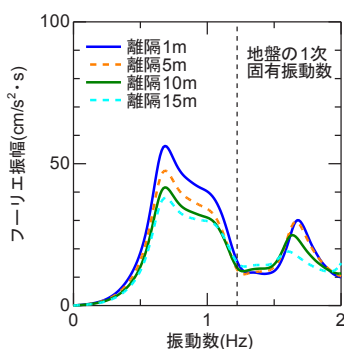


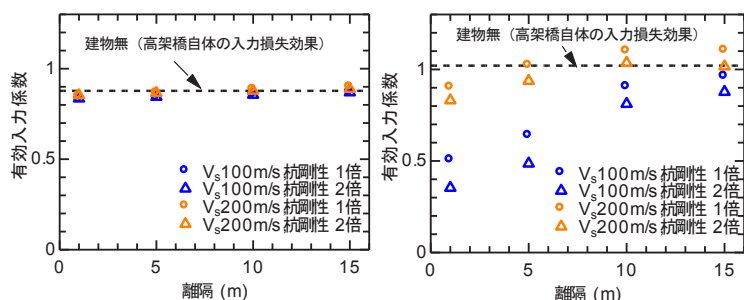
図12 建物質量有 ($\alpha_m=10$, $\alpha_{kb}=10$) の高架橋フーチング位置での差分応答のフーリエ振幅 ($V_s=100$ m/s)

相差が小さく、僅かに応答が増加する傾向となる。応答の変化の程度は、建物の各階質量が大きいく方が大きく、周辺地盤を介して、鉄道高架橋へ影響を与えるものの、その影響は離隔が大きいくほど、小さくなる。

5. 隣接建物が鉄道高架橋へ与える影響評価

5.1 幾何学的相互作用の影響程度

図13に離隔、杭剛性、表層せん断弾性波速度を変えた各ケースについて、自由地盤の1次固有振動数と2次固有振動数における高架橋フーチング位置での有効入力係数を示す。まず、自由地盤の1次固有振動数帯では、



(a) 地盤の1次固有振動数 (b) 地盤の2次固有振動数
図13 幾何学的相互作用による高架橋有効入力動の低減

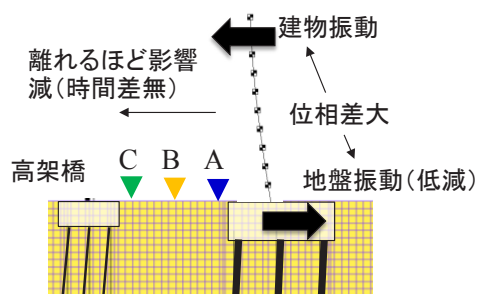


図11 建物振動による周辺地盤・高架橋への影響のイメージ

離隔や杭剛性、地盤剛性に依らず、有効入力係数が建物無のケースと同程度であり、隣接建物が鉄道高架橋へほとんど影響していない(図13(a))。一方で、自由地盤の2次固有振動数帯では建物無のケースに比べて主として有効入力係数が低下する傾向にある(図13(b))。その傾向は、離隔が小さいほど、表層地盤のせん断弾性波速度が小さいほど顕著である。これは、3章でも述べたように地盤の剛性が相対的に小さいほど入力損失効果が発現されることと、その影響が周辺地盤に伝わることから、離隔が小さいほど高架橋に影響しやすいことを意味する。影響程度としては、自由地盤の2次固有振動数帯に着目すると、地盤が軟らかい場合には、隣接建物によって鉄道高架橋への有効入力動が数十%低減される。

5.2 慣性相互作用の影響程度

図14に自由地盤の1次固有振動数 f_g に対する建物の1次固有振動数 f_s の比 f_s/f_g と高架橋の有効入力動の変化率との関係を示す。ここで、有効入力動の変化率とは、質量無の建物が隣接するケースに対する質量有の建物が隣接するケースの変化率を示す。検討したパラメータは、離隔、建物の各階質量、各層剛性、表層せん断弾性波速度である。この図より、建物と自由地盤の1次の固有振動数比 f_s/f_g が1に近い領域ほど、高架橋の有効入力動の変化率が小さくなる。4章では自由地盤と建物の固有振動数の大小関係と両者に生じる位相差に着目して、高架橋への入力動低減効果について考察した。

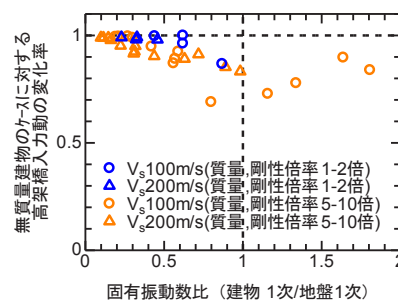


図14 慣性相互作用による高架橋有効入力動の変化 (離隔 1m)

特集：地震対策技術

本図の結果を基に、慣性相互作用の影響をより一般的に考察すると、自由地盤と建物の固有振動数が近接している場合、地盤振動と建物振動の位相差が大きいことに加え、建物振動が自由地盤の振動数帯で励起され易い（共振する）ため、低減効果が大きくなると解釈できる。なお、実在する大型建物の諸元では建物の固有振動数が地盤の固有振動数よりも十分低い条件が大半であるため、慣性相互作用の影響は小さいといえる。また、本図は離隔 1m の場合を示すが、離隔 5 ~ 15m の結果は同程度であり、離隔による違いは大きくないことを別途確認している。

6. おわりに

都市部においては鉄道高架橋に大型建物が隣接する場合が多々ある。大型建物が隣接することで、周辺地盤を介して鉄道高架橋-隣接建物連成系として相互作用しあい、高架橋の地震応答特性が変化することがある。本稿では、隣接建物の存在が鉄道高架橋へ与える影響に焦点を当て、そのメカニズムや程度を把握した。主な成果を以下に示す。

- (1) 鉄道高架橋-隣接建物連成系の FEM 解析を行ったところ、隣接建物が高架橋へ与える影響として、建物の振動に起因した慣性相互作用と、建物の杭基礎の剛性に起因した幾何学的相互作用があり、それらが地盤を介して影響しあう。
- (2) 幾何学的相互作用の影響は、建物の杭基礎によって地盤変形が抑制される入力損失効果が建物基礎近傍のみならず周辺地盤にまで及ぶことで発現され、主に高架橋の有効入力動を低減する方向に働く。この影響は建物と高架橋の離隔の依存性が大きく、離隔 5m 程度までは影響が大きい。
- (3) 慣性相互作用の影響は、地盤と建物の振動の位相差が大きい場合に建物振動の慣性力と周囲の地盤振動が相殺されることで発現され、高架橋の有効入力動低減に働く。この影響は、離隔よりも建物と地盤の固有振動数比への依存性が大きく、固有振動数比が 1 に近いほど影響が大きくなる。ただし、実在する大型建物の諸元では建物の固有振動数が地盤の固有振動数よりも十分低い条件が大半であるため、(2) に比べて影響程度は小さい。

以上の成果を踏まえると、鉄道事業者は隣接建物諸元を通常制御できないが、隣接建物の存在は主に高架橋の有効入力動低減に働き、想定外の応答増加等が生じないため、従来通りの耐震設計を行って問題ない。また、建物諸元を制御できる場合は、その効果を耐震裕度として

評価することができる。

文献

- 1) Luco J.E. and Contesse L.: Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction, Bull. Seis. Soc. America, Vol.63, pp.1289-1303, 1975.
- 2) 中井正一, 福和伸夫: 埋め込み剛基礎の動特性に基づく動的擬似 3 次元効果の考察, 境界要素法による動的擬似 3 次元効果に関する研究 (その 2), 日本建築学会構造系論文集, No.380, pp.56-66, 1987
- 3) 川瀬博, 吉田一博, 佐藤俊明: 境界要素法による地表面上剛基礎の相互連成解析, 清水建設研究報告, 第 38 号, pp.11-21, 1984
- 4) 吉田一博, 川瀬博: 埋設された剛構造物相互の連成振動, 第 7 回日本地震工学シンポジウム, pp.1045-1050, 1986
- 5) 文学章, 福和伸夫: 隣接建物の存在が直接基礎の動的相互作用特性に与える影響に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 600 号, pp.97-105, 2006
- 6) 文学章, 福和伸夫: 隣接建物の存在が杭基礎の動的相互作用特性に与える影響に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.147-154, 2006
- 7) Padron L.A., Aznarez J.J., Maeso O.: Dynamic structure-soil-structure interaction between nearby piled buildings under seismic excitation by BEM-FEM model, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.29, pp.1084-1096, 2009.
- 8) Padron L.A., Aznarez J.J., Maeso O.: 3-D boundary element-finite element method for the dynamic analysis of piled buildings, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.35, pp.465-477, 2011.
- 9) Guillermo M.A., Lusi A.P., Juan J.A., Orlando M.: Structure-soil-structure interaction effects on the dynamic response of piled structures under obliquely incident seismic shear waves, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.78, pp.142-153, 2015.
- 10) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012
- 11) 日本建築学会関東支部編: 建築構造物の動的性状と解析, 2014
- 12) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 設計計算例 鉄筋コンクリート橋脚 (杭基礎), 2001
- 13) 實地雄大, 室野剛隆: 杭基礎による入力損失効果の実務的評価手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 73, No. 2, pp.473-482, 2017