

FEM解析と常時微動観測に基づく 鉄道高架橋－隣接建物間の動的相互作用の基本特性

和田 一範¹・室野 剛隆²・寶地 雄大¹・小野寺 周¹・齊藤 正人³

¹正会員 （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 博士（工学） 埼玉大学 理工学研究科 （〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久255）

1. はじめに

大都市圏内では、大型建物が鉄道高架橋に隣接して建設されるケースが多々見られる。大型建物は鉄道高架橋に比べて、質量が数倍～数十倍あるため、隣接建物が地震時に振動することによる揺すり戻しが周辺地盤を介して、鉄道高架橋に与える影響は無視できない可能性がある。

隣接建物の影響に関しては、Lucoらの2次元SH波動場の半円球基礎を対象とした理論的検討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としては、境界要素法を用いた検討^{2)~4)}、薄層法と容積法を組合せた検討^{5)~6)}、薄層法・容積法・有限要素法を組合せた検討⁷⁾などが行われている。また、杭基礎を対象とした研究としては、文献7)の関連検討⁸⁾、境界要素法と有限要素法を組合せた3連～5連の杭基礎建物の配置や高さ、地震動の入射角度などをパラメータにした検討^{9)~11)}などが行われている。さらに、実測に基づく研究としては、地震観測や強制加振実験、常時微動観測などの事例^{12)~13)}がある。これらはいずれも建物同士の動的相互作用を検討したものである。

一方で、隣接建物が土木構造物に及ぼす影響については、これまで検討事例が皆無である。鉄道構造物の耐震設計基準¹⁴⁾においても、鉄道構造物間の連成効果は構造計画で配慮するとしているが、周囲の建物の影響に関しては明記されていない。そのため、隣接建物が鉄道高架橋へ及ぼす影響は無視できない可能性があるものの、高架橋の応答の増減程度、その発生メカニズムなどに関しては、十分な知見が無

いのが現状である。

そこで、本稿では建物と鉄道高架橋との動的相互作用の有無やそのメカニズム把握を目的に、FEM解析と常時微動観測を実施する。FEM解析では、建物－地盤－鉄道高架橋の一体の3次元モデルを構築し、建物の諸元や地盤条件を変えた周波数応答解析を実施し、鉄道高架橋への有効入力動の大小について入力の相互作用および慣性の相互作用の観点から分析する。また、観測では、鉄道高架橋に類する連絡橋と建物について同時に常時微動観測を実施し、FEM解析で分析した傾向の妥当性を実測の観点から確認する。

2. FEM解析の概要

図-1に3次元FEMモデルの概要を示し、鉄道高架橋および建物の諸元を表-1に示す。10階建ての建物と鉄道高架橋がフーチング中心の離隔15mで位置するモデルを設定した。いずれの構造物も杭基礎形式であり、建物の諸元（後述する基本ケース）は文献15)、高架橋の諸元は文献16)を基に設定している。地盤について、深さ40mまでは表層地盤（一層）とし、せん断弾性波速度 V_s は50m/s、100m/s、200m/sと解析ケースごとに変化させた。一方で、深さ40～45m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。また、鉄道高架橋の有効入力動を評価するため、高架橋の質量は零とし地上部分はモデル化していない。なお、本稿は基本的な挙動把握が目的のため、全要素を線形で

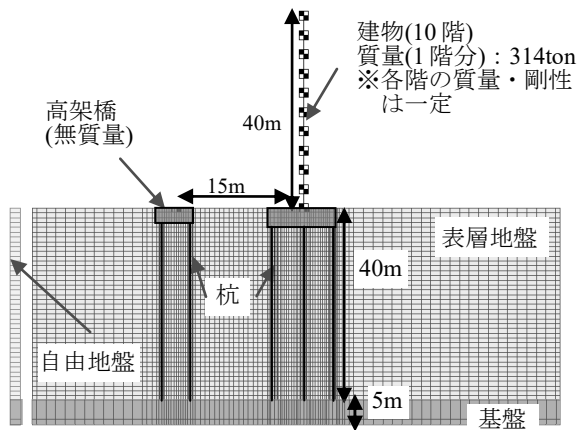


図-1 解析モデルの概要

表-1 構造物の諸元一覧

(a) 鉄道高架橋

	断面積(m ²)	断面 2 次モーメント(m ⁴)
柱	5.90	1.49
杭	0.785	0.049

(b) 建物

	断面積(m ²)	断面 2 次モーメント(m ⁴)
柱	0.020	2.37×10^5
杭	1.77	0.249

表-2 解析ケース

ケース	α_m	α_k	V_s (m/s)	備考
Case0	0	0	100	建物無
Case1	0	1	100	建物無質量
Case2	1	1	100	基本ケース
Case3	10	1	100	
Case4	10	10	100	
Case5	10	10	50	
Case6	10	10	200	

モデル化し、地盤と構造物は剛な梁要素で接続し、杭と地盤との剥離現象は考慮していない。

解析ケースを表-2に示す。ここで、係数 α_m 、 α_k は建物の質量および地上部の剛性に関して基本ケース（Case2）の設定値からの倍率を示す。なお、隣接建物が存在しないケースも比較対象とするため、Case0を設定している。解析手法は、基盤入力条件に対する周波数応答解析とし、振動数の刻みは0.05Hzで、基盤位置に対する各位置の周波数応答関数を算出した。ここで、減衰は各要素一律で5%とした。なお、使用した解析ソフトはFINAS/STAR（伊藤忠テクノソリューションズ株）である。

3. 解析結果に基づく動的相互作用の影響分析

(1) 入力の相互作用の影響

図-2にCase0、1について、自由地盤地表面位置に

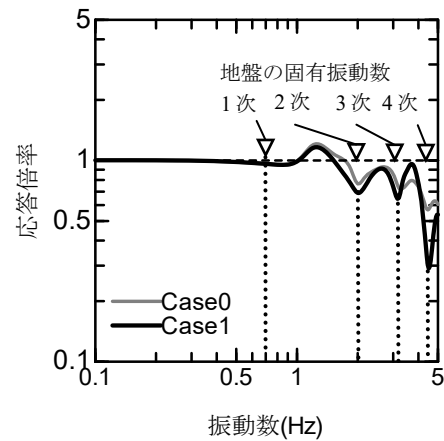


図-2 建物基礎の剛性による高架橋の有効入力動の違い

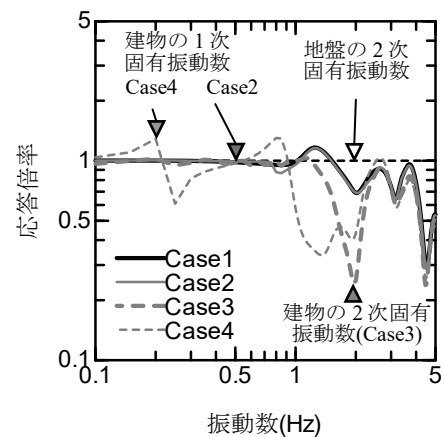


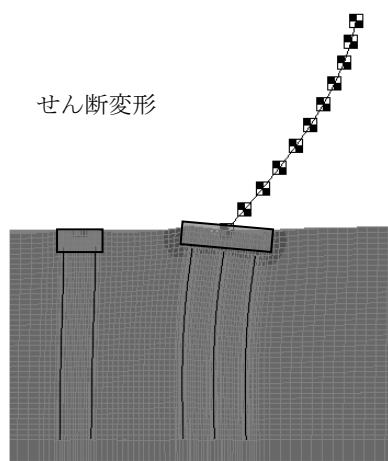
図-3 建物質量による高架橋の有効入力動の違い

対する高架橋フーチング位置の応答倍率を示す。建物が無いCase0は、自由地盤の2次モード以降で高架橋基礎の入力損失効果のみが現れる。一方で、無質量の建物を有するCase1は、振動数2～5Hzあたりの自由地盤の2～4次モードでは、Case0に比べて高架橋フーチング位置での応答がより低減することがわかる。これは、建物基礎の剛性の効果により、地盤変形が拘束される影響であると考えられる。このことから、建物基礎の剛性による高架橋への有効入力動の低減効果が確認された。

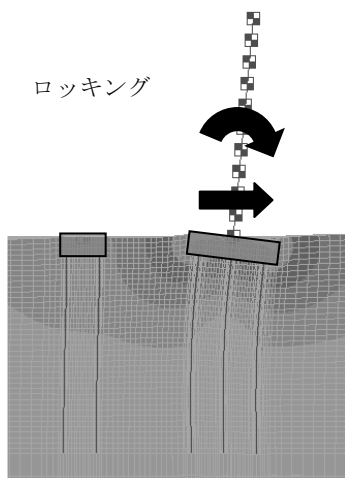
(2) 慣性の相互作用の影響

図-3にCase1～4について、自由地盤地表面位置に対する高架橋フーチング位置での応答倍率を示す。Case2は建物の1次モード（振動数約0.5Hz）を含めて、無質量のCase1とほぼ違いがないことがわかる。一方で、建物の質量のみが大きいCase3では地盤の2次モード（振動数約2Hz）の応答が減少し、建物の質量と剛性が大きいCase4では、地盤の2次モードでの応答減少に加え、建物の1次モード（振動数約0.18Hz）で応答が増大していることがわかる。

次に、Case2、4の建物の1次モードでの傾向を分



(a) Case2



(b) Case4

図-4 建物の1次固有振動数における振動モード形状

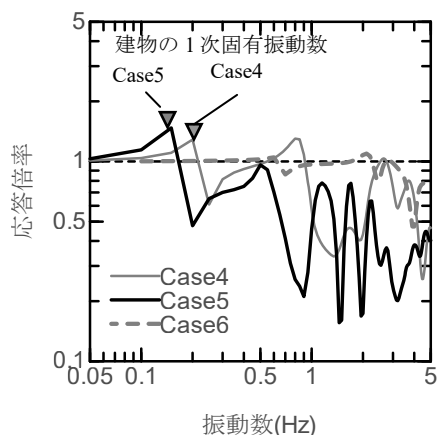
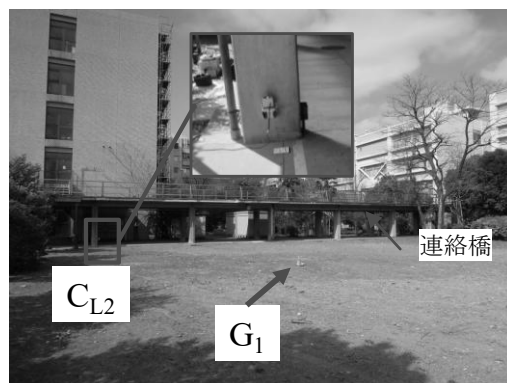
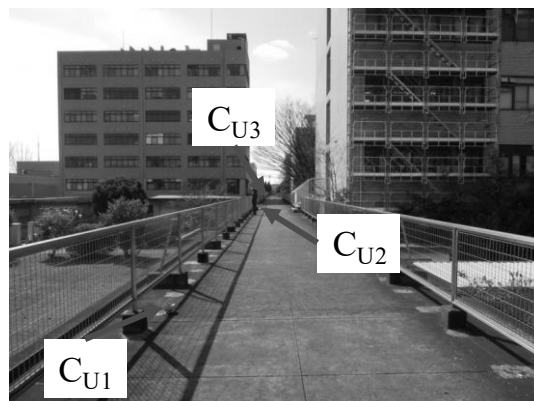


図-5 地盤剛性による高架橋への有効入力動の違い

析するために、図-4にCase2, 4それぞれの建物の1次固有振動数でのモード形状を示す。Case2では建物のせん断変形モードが卓越し（図-4(a)）、周辺地盤へ振動が伝わりにくいため、高架橋へ与える影響が小さいと考えられる。一方、Case4では、建物のロッキングモードが卓越し（図-4(b)）、周辺地盤へ建物振動が伝わるため、それが高架橋への付加的な入力動となり応答を増加させると考えられる。



(a) 地上からの外観



(b) 連絡橋上からの外観

図-6 常時微動観測を実施した現地の状況

また、Case3, 4の地盤の2次モードでの応答の減少傾向は、3. (1)で述べた建物基礎の剛性による地盤変形の拘束効果の影響に加えて、Case3については、建物の2次モードも同程度の振動数帯で発現されることから、建物自体が周辺地盤の振動に対して、マスダンパのような働きをする効果が付加されている可能性がある。

(3) 地盤の剛性による効果

地盤の剛性による高架橋の有効入力動への影響を見るために図-5にCase4, 5, 6での高架橋フーチング位置での応答倍率を示す。その結果、地盤が比較的軟らかい条件 ($V_s=50\text{m/s}$, 100m/s) では、3. (1), (2)で述べた建物が存在することによる入力の相互作用および慣性の相互作用の影響が、顕著に現れているが、地盤が硬い条件 ($V_s=200\text{m/s}$) では明瞭には現れていないことがわかる。このことから、地盤の剛性が小さいほど、建物の存在によって高架橋の有効入力動が影響を受けやすいことがわかる。

4. 常時微動観測の概要

建物が存在することによる動的相互作用の影響を実測の観点から確認するため、埼玉大学構内で常時

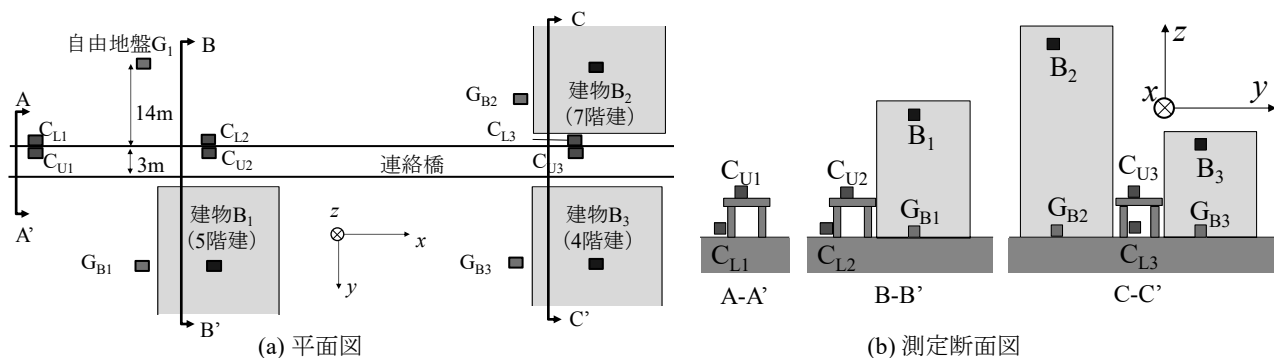


図-7 微動計の設置位置

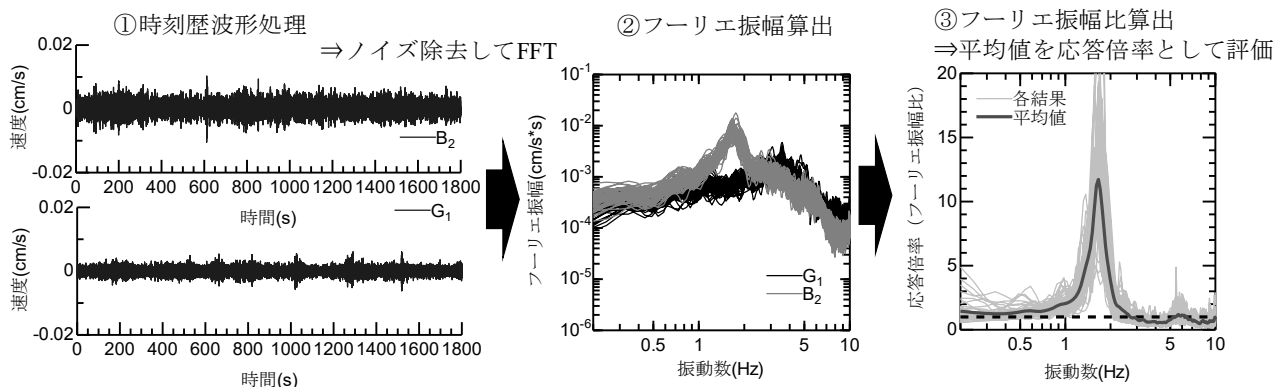


図-8 微動観測結果の整理方法

微動観測を実施した。図-6 に示すように、建物の 2 階位置から建物間を接続している連絡橋を鉄道ラーメン高架橋に見立てた。微動計（株式会社 ANET の CR4.5-2S）の設置位置を図-7 に示す。隣接建物の無い条件、片側に隣接建物が有る条件、並びに両側に隣接建物が有る条件のそれぞれで応答を評価するため、連絡橋天端（ $C_{U1} \sim C_{U3}$ ）、柱下端（ $C_{L1} \sim C_{L3}$ ）に微動計を設置した。また、隣接建物の応答特性を把握するために、各建物の最上階（ $B_1 \sim B_3$ ）と直近地盤（ $G_{B1} \sim G_{B3}$ ）に設置した。さらに、各センサから十分な離隔をとった自由地盤（ G_1 ）も併せて計測した。

観測・整理方法を図-8に示す。サンプリング周波数 200Hz で 30 分計測した。計測結果の時刻歴データを 20.48 秒（4096 個）のデータごとに分割し、それぞれのフーリエ振幅スペクトルを算出した。その際、人の通行などのノイズ成分を除いて、スペクトルを算出している。また、得られたスペクトル群の平均値を用いて 5. で示す各種応答倍率を評価した。

5. 観測結果に基づく動的相互作用の影響分析

(1) 入力相互作用の影響

図-9 に自由地盤 G_1 に対する連絡橋柱下端の水平方向（図-7(a) の y 方向）の応答倍率を示す。隣接建物がない地点 C_{L1} は、応答倍率がほぼ 1 であることがわかる。このことから、連絡橋そのものの入力損失効

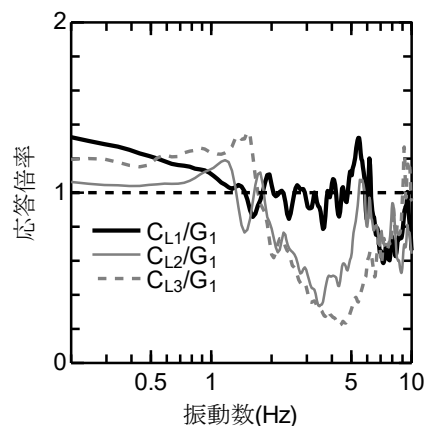


図-9 自由地盤に対する連絡橋柱下端の水平応答倍率

果は小さいと考えられる。一方、建物 B_1 が隣接している地点 C_{L2} では 2～5Hz あたりで応答倍率が低下し、建物 B_2 、 B_3 が隣接している地点 C_{L3} では、2Hz～7Hz あたりで応答倍率が低下している。これは、隣接建物による地盤変形の拘束効果が現れていると考えられる。また、 C_{L3}/G_1 の方が C_{L2}/G_1 に比べて、より応答倍率が低下している。このことから、隣接建物が多いほど、地盤変形の拘束効果がより大きく、応答倍率低減の影響が現れていると考えられる。

(2) 慣性の相互作用の影響

図-10 に自由地盤 G_1 に対する連絡橋天端の水平方向（図-7(a) の y 方向）の応答倍率を示す。隣接建物がない地点 C_{U1} と建物 B_1 が有る地点 C_{U2} はほぼ同様の挙動を示し、地点 C_{U2} では建物 B_1 による入力損失効

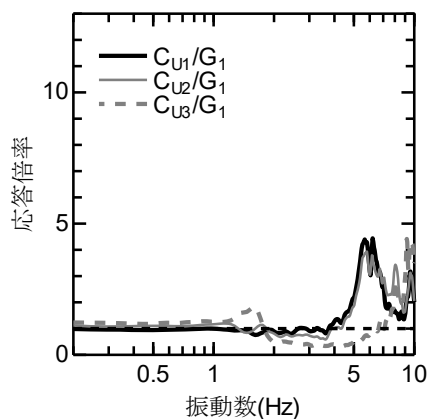


図-10 自由地盤に対する連絡橋天端の水平応答倍率

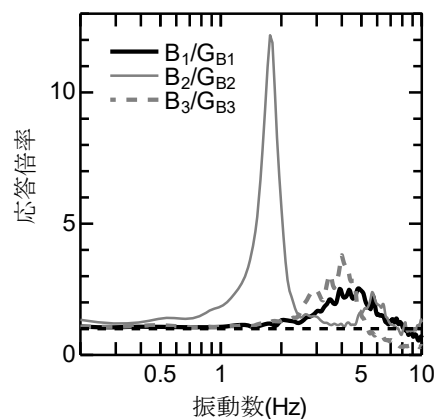


図-11 建物直近地盤に対する建物最上階の水平応答倍率

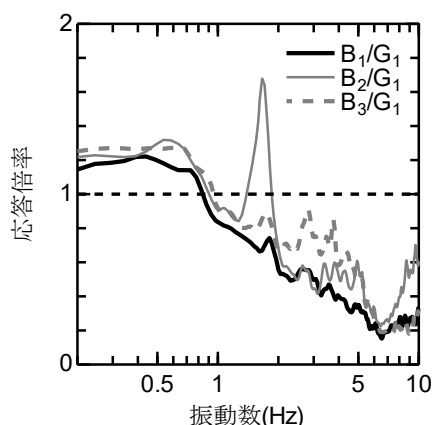


図-12 自由地盤に対する建物最上階の鉛直応答倍率

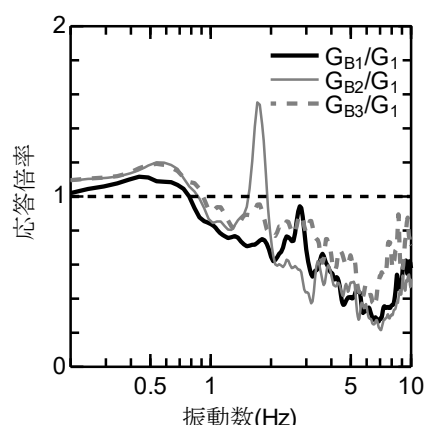


図-13 自由地盤に対する建物直近地盤の鉛直応答倍率

果があるものの、天端の応答への影響は小さい。また、両者の卓越振動数は約6Hzであり、これが連絡橋の橋軸直角方向の1次固有振動数と考えられる。それに対して、建物B₂、B₃と隣接する地点C_{U3}は、地点C_{U1}、C_{U2}と異なる傾向を示すことがわかる。具体的には、①地点C_{U1}、C_{U2}で見られた6Hzあたりのピークが見られない一方で、②約1.7Hzで応答倍率の増加が見られる。①は図-9で示したように地点C_{L3}での入力損失効果が4～6Hz付近で特に大きいことから、連絡橋の卓越振動数（6Hz）成分の入力動が小さいためと考えられる。なお、地点C_{L2}でも入力損失効果が確認されている（図-9）が、連絡橋の卓越振動数（6Hz）では応答倍率がほぼ1になっていることから、地点C_{U2}には連絡橋の明瞭なピークが見られる。

続いて、②の傾向を分析するため、各建物直近地盤（G_{B1}～G_{B3}）からの各建物（B₁～B₃）の水平方向（図-7(a)のy方向）の応答倍率を図-11に示す。本図より約1.7Hzは建物B₂の1次固有振動数に対応することがわかる。また、自由地盤G₁に対する各建物（B₁～B₃）の鉛直方向（図-7(a)のz方向）の応答倍率を図-12、図-13に示す。これらの図より建物B₂の約1.7Hzの成分は鉛直成分にも含まれていることが

分かる。一方で、建物B₁、B₃の水平方向の固有振動数（4Hz～5Hz程度）の成分は、鉛直成分には確認できない。これらの結果から、建物B₂はロッキング挙動を示すことで、連絡橋の振動へ影響を及ぼしていると考えられる。これは、3. で述べた解析的検討から得た建物のロッキング挙動と鉄道高架橋への影響と調和的な傾向であると言える。

6. おわりに

本稿では、隣接建物が鉄道高架橋に与える影響の有無やそのメカニズムを把握するため、建物諸元や地盤条件の違いと鉄道高架橋の有効入力動の大小関係を周波数応答解析により分析した。また、鉄道高架橋に類する連絡橋と建物について常時微動を同時観測した。

得られた結果を以下に示す。

- ・ 建物が存在すると、建物基礎の剛性によって、高架橋への有効入力動が低減する。この効果は、FEM解析だけでなく、常時微動観測においても連絡橋への入力動がより低減されることで確認された。
- ・ 建物の剛性や質量が大きい場合、建物のロッキ

ングモードが卓越し、慣性の相互作用の影響が大きいため、建物の固有振動数帯について高架橋の有効入力動が増大する。この効果は、FEM解析だけでなく、常時微動観測においても、建物がロッキング挙動を示す場合、その振動が周辺地盤を介して、連絡橋へ入力され、天端の応答が増大することで確認されている。

- ・建物の剛性や質量が小さい場合、また、地盤の剛性が高い場合、建物のせん断変形モードが卓越し、慣性の相互作用の影響が小さいため、高架橋の有効入力動への影響は小さい。

本検討では、隣接建物が鉄道高架橋へ及ぼす影響に関する定性的な特性を把握した。今後は、建物諸元や地盤条件から鉄道高架橋の応答の増減を定量的に評価する手法の開発を目指す。

参考文献

- 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) 岩本賢治, 兵頭陽, 喜多村英司, 宮本裕司, 大塚康弘: 複数隣接建屋の動的相互作用解析(その1) 埋込みがない場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.385-386, 1995.
- 6) 岩本賢治, 兵頭陽, 喜多村英司, 宮本裕司, 大塚康弘: 複数隣接建屋の動的相互作用解析(その2) 埋込みがある場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.387-388, 1995.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 河本悠歩, 譲雅史, 福和伸夫, 飛田潤: 地震観測記録に及ぼす隣接建物の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2008.
- 13) 松山智恵, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・強制振動実験・常時微動計測に基づく隣接する中低層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp.87-94, 2001.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.