

# 地震動H/Vスペクトル比を用いた地盤-建物連成系の振動特性把握手法の提案

仲野健一<sup>\*1</sup>・安井 譲<sup>\*2</sup>・境 茂樹<sup>\*1</sup>・前田寿朗<sup>\*2</sup>

被災時の建物損傷状況を把握するため、地震記録から建物の振動特性を評価することがモニタリング分野等で広く行なわれている。既往研究では、地震記録から求められた建物の伝達関数と建物頂部(RF)の微動H/Vスペクトル比が整合する可能性が示されているが、その理論的根拠に乏しいのが現状である。地盤や建物のH/Vスペクトル比は非常に安定していることから、単点測定による構造物の振動特性推定は有用であると考えられる。そこで本研究では、微動よりも信号が明瞭である地震動を対象として、H/Vスペクトル比による地盤-建物連成系の振動特性把握手法を理論的に示した。また、超高層RC建物の地震観測記録を用いて、同手法が成立することを実証した。

キーワード： H/Vスペクトル比, 超高層RC建物, 振動特性, モニタリング

## 1. はじめに

地震時の地震応答挙動によって構造物に被害が生じた際、当該構造物に関わる技術者に対しては、その構造物が受けた損傷の程度を速やかに評価し、総合的な安全性を判断することが求められる。2011年東北地方太平洋沖地震を受けて、東京都では東京都帰宅困難者対策条例(第17条)が施行され、一定規模以上の建築物においては発災後3時間程度内に、建物の安全性や周辺状況を総合的に考慮し、当該建物の滞在可能性を判断/報告しなければならない<sup>1)</sup>。

このような社会的動向にも後押しされ、常時地震観測に基づくモニタリングという概念が一般に広く普及しつつある。モニタリングは、建築構造の専門家以外の人間が、建築物の状態を判断するための材料の一つにすることを目的としている。技術的には、当該構造物の振動モデルを線形システムと仮定することで、地震観測で得られた振動記録の入出力関係から伝達関数を計算し、その伝達関数から振動モデルの振動特性を推定するのが一般的である。また、推定結果を建築物内の防災センターのモニターに表示したり、電子メール等による情報提供を行うことが多い<sup>2)</sup>。

モニタリングでは地震記録を扱うことが一般的であるが、微動記録を用いた構造物の損傷評価に関する研究も昔から広く行われている<sup>(例えば 3), 4)</sup>。地震記録の場合、即時推定が可能であるが、常時地震観測体制が必要である。一方、微動記録の場合、常時地震観測体制は不要ではあるが、臨時測定の必要があるため、即時推定に対応できない。常時観測体制は地震被害推定に有利ではあるが、イニシャルコストとランニングコストに加えて、システム更新や機器の

維持管理等が必要となる。このことから、常設の必要がなく簡便な構造物の損傷評価手法が望まれる。

野路ほか(2008)<sup>5)</sup>では、低層建物で得られた微動記録のフーリエスペクトルから計算した伝達関数と同建物RFで得られた微動記録のH/Vスペクトル比(同一地点の水平動と上下動のフーリエスペクトル比)とが整合する可能性が示された。しかし、野路ほか(2008)<sup>5)</sup>に続く一連の研究<sup>(例えば 6), 7)</sup>では、物理的な根拠や理論的背景等が示されておらず、定性的な確認に留まっている。

本研究では、地震動H/Vスペクトル比を用いた構造物の振動特性評価手法を理論的に提案し、超高層RC建物で観測された地震記録を用いて、この提案手法を検証する。なお、一般に地震記録は微動記録に比べてその振幅レベルが大きく線形システムの同定問題に用いる信号として適切であること、超高層RC建物では地震観測が多く実施されていること等を勘案し、本研究では地震記録を用いる。超高層RC建物では上下動に比べて水平動の固有周期が長く、その伝達関数の振幅値が明瞭であることが多い<sup>8)</sup>ため、明瞭なH/Vスペクトル比を得ることが期待できる。

\*1 建築研究第一部 \*2 早稲田大学

## 2. 地盤－建物連成系の振動モデル

本研究では、建物系だけでなく地盤系での地震観測体制を併せて有する建物を対象として理論を展開する。このことにより、地盤-建物連成系の振動特性を対象とすることができ、必然的に建物系のそれを内包する。想定した振動モデルとしては、図-1に示すような上部構造を1質点系とした2質点地盤-建物連成系モデルを想定し、単純なSRモデルに上下ばねをつけた形を考えた。同図で赤色の三角印は地盤（添え字G）、建物1F（添え字1F）、建物頂部（添え字RF）を示しており、振動計測位置にそれぞれ対応する。記号Hは水平動成分、記号Vは上下動成分である。

本稿では伝達関数として以下を用いる：1) 地盤に対するRFの上下動の伝達関数  $T_V^G$ 、2) 1Fに対するRFの上下動の伝達関数  $T_V^F$ 、3) 地盤に対するRFの水平動の伝達関数（スウェイ・ロッキングを考慮） $T_H^{SR}$ 、4) 1Fに対するRFの水平動の伝達関数（ロッキングが含まれる） $T_H^R$ 。

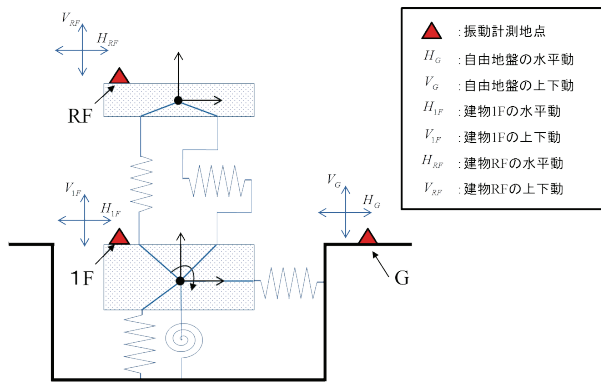


図-1 想定した振動モデル

## 3. HVR と伝達関数の関係式

### 3.1 建物系の場合

ここでの建物系とは、図-1に示した1Fレベルの基礎応答を入力とする線形システムを意味している。以下では、振動特性は伝達関数のスペクトル形状やそこから抽出した固有周期/減衰を包括した言葉として使用し、伝達関数は2点間の振動特性を表す際に使用する。

建物系での1質点せん断ばねモデル（上下ばね付）の振動方程式を考えれば、各計測位置の水平と上下のフーリエスペクトルの比をとれば、両者は水平動と上下動それぞれ

$$\frac{H_{RF}}{V_{RF}} = \frac{T_H^R \cdot H_{1F}}{T_V^F \cdot V_{1F}} \quad (1)$$

の伝達関数で結ばれることは明らかであるから、式(1)で表現することが可能である。また、本研究ではスペクトルを取り扱っているが、簡便のため振動数を省略していることに注意されたい。なお、本研究では水平上下スペクトル比を  $HVR$  と定義しており、 $HVR_\alpha = H_\alpha / V_\alpha$  ( $\alpha = RF, 1F, G$ ) で表現されるものとする。

さて、ここで式(1)の左辺と右辺に着目すると、建物頂部RFの水平動  $H_{RF}$  と上下動  $V_{RF}$  による  $HVR_{RF}$  と、建物1Fでの  $HVR_{1F}$  を用いて、式(2)のように書き直すことができる。 $HVR$  は各計測位置での H/V スペクトル比である。

$$\frac{T_H^R}{T_V^F} = \frac{HVR_{RF}}{HVR_{1F}} \quad (2)$$

ここで式(2)の左辺について考える。もし左辺の分母にある上下動の伝達関数  $T_V^F$  について、式(3)に示すような条件が成立すれば、式(2)は式(4)で表現することができる。

$$T_V^F \approx 1 \quad (3)$$

$$T_H^R = \frac{HVR_{RF}}{HVR_{1F}} \quad (4)$$

式(3)は振動数が省略された表記となっているので、ここでは、上下動の伝達関数  $T_V^F$  が 1 という条件が成立するような振動数範囲が存在するか、が問題となる。なお、式(4)はその条件が成立するという仮定に基づいている。

式(4)によれば、建物系のフーリエスペクトル比で表現される水平動の伝達関数  $T_H^R$  は、各計測位置での H/V スペクトル比の比と等価であることがわかる。さらに、「各計測位置の H/V スペクトル比（及びそれらの比）が安定的な振動特性を示す」と仮定すると、同時測定記録を用いることなく、単独の3成分（もしくは上下動を含む2成分）の振動測定記録から建物系の振動特性を推定可能であることが示唆される。なお、水平動の伝達関数  $T_H^R$  は、建物系での同時測定記録を用いて、式(5)で一般的に推定される。

$$T_H^R = \frac{H_{RF}}{H_{1F}} \quad (5)$$

さて、改めて式(4)に着目する。同式右辺が  $HVR$  の比であることは上述の通りであるが、ここでもし分母の  $HVR_{1F}$  を 1 とみなすことができれば、水平動の伝達関数  $T_H^R$  と  $HVR_{RF}$  が等価ということになる。野路ほか（2008）<sup>5)</sup>は振動測定記録を用いて、定性的ではあるが両者の整合性について指摘した。これまでの議論に基づけば、上述の条件がすべて揃った時に初めて成立するということであり、彼らの主張はそのような特殊な事例であったと考えられる。

### 3.2 地盤-建物連成系の場合

地盤-建物連成系とは、図-1に示した基礎入力動相当の周辺地盤応答を入力とする線形システムを意味している。建物系にスウェイ・ロッキングばねが付加されているが、伝達関数の関係式で考えれば、3.1節で示した建物系と基準が異なるだけであるから、建物系と同様の関係式が成立する。

建物頂部の水平動と上下動の比と地盤でのそれは地盤-建物連成系における伝達関数によって、先と同様に式(6)のように表される。また、式(6)の水平動と上下動の比をH/Vスペクトル比HVRとして記号を整理すれば、式(6)は式(7)と書き直すことができる。

$$\frac{H_{RF}}{V_{RF}} = \frac{T_H^{SR} \cdot H_G}{T_V^G \cdot V_G} \quad (6)$$

$$\frac{T_H^{SR}}{T_V^G} = \frac{HVR_{RF}}{HVR_G} \quad (7)$$

前節と同様に式(8)が成立すれば、式(7)から式(9)が導かれる。

$$T_V^G \approx 1 \quad (8)$$

$$T_H^{SR} = \frac{HVR_{RF}}{HVR_G} \quad (9)$$

従って、先と同様の測定を行うことで式(9)から  $T_H^{SR}$  を求めることができる。 $T_H^{SR}$  は、通常RFと地盤の同時観測記録を用いて式(10)で直接的に計算される。

$$T_H^{SR} = \frac{H_{RF}}{H_G} \quad (10)$$

### 3.3 提案手法の成立条件

通常の伝達関数を計算する場合、同時観測記録を用いるため、時刻同期と併せて振幅基準化が暗黙的に行われている<sup>9)</sup>。これによって、地震によって異なる入力動のスペクトル特性の差異は基本的に無視できる。一方、本手法では先に述べたようにH/Vスペクトル比を用いる利点として、必ずしも同時測定記録に頼る必要がない。なぜなら、単点測定で得られる入力動のフーリエスペクトルの水平上下比をとることで、伝達関数と同様の基準化が行われていると考えられるためである(ただし、表面波が卓越するような波形を含む場合は注意が必要である)。従って、本手法は、1つの計器と1人の計測員で、各位置で単独に計測された振動測定記録に適用できる点に工学的な利点がある。

しかし、本提案手法では以下の仮定において理論を展開

しているため、これらが実建物において成立することを確認しておく必要がある。

- ・ 地震動HVRが安定的な振動特性を示すこと
- ・  $T_V^F \approx 1$  もしくは  $T_V^G \approx 1$  が成立すること

## 4. 地震観測記録による実証

### 4.1 建物および地震観測概要

3.3節で示した本提案手法の成立条件について、地震観測記録を用いて検討する。ここでは、伝達関数において3次モード程度まで固有周期が近接しておらず比較的明瞭なピークを持ち、これまで弾性挙動範囲の地震動しか経験しておらず、地震観測体制が整備され多数の地震記録が得られている神戸臨浜に建つ超高層RC建物(杭基礎)を対象とする。なお同建物が弾性挙動範囲の地震動しか経験していないことは、既往研究から明らかである<sup>8)</sup>。付録に同建物の固有周期の経時変化について示す。

図-2に、地震観測を行っている建物概要を示す。同図左は地震観測位置を、同図右はボーリング柱状図を示す。また、表-1に建物構造概要と地震観測概要を示す。地震観測は赤丸印の建屋内で3点、地盤アレイで2点行っており、地盤アレイは、建物位置から東に約1m、南に約14mの位置で行っている。地盤としては、N値が深度約5mで60程度を示すが、地盤構造が互層になっていることから、複雑な地盤構造であると推察される。

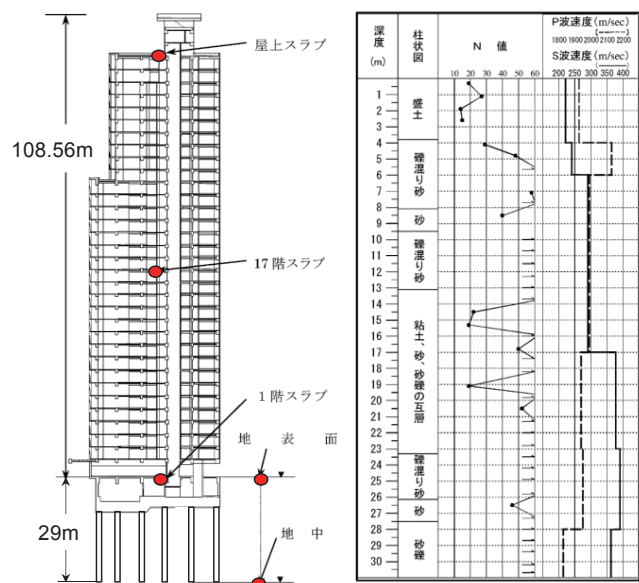


図-2 建物概要 (左:地震観測位置, 右:柱状図)

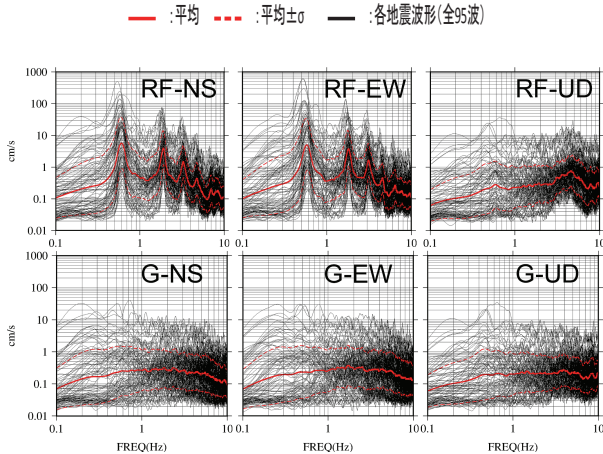


表一 建物および地震観測概要

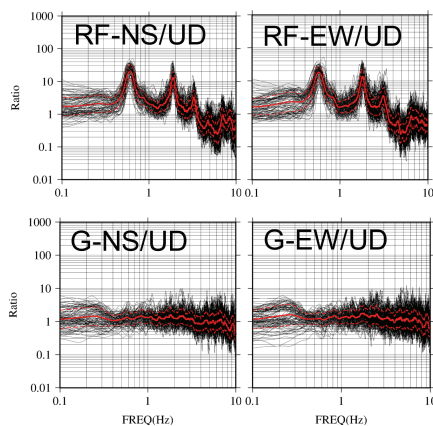
建物構造概要		地震観測概要	
構造種別	RC構造	期間	2000年4月～
階数	地上33階 地下1階 塔屋3階	観測地震数 (2017年3月時点)	117
高さ(軒高)	108.56m(98.46m)	計測機器 (建屋3台)	サーボ型加速度計 SD-203WS
1次固有周期 (基礎固定)	X方向:1.59s Y方向:1.59s	計測機器 (地中2台)	サーボ型加速度計 SD-203B
1次固有周期 (SRモデル)	X方向:1.84s Y方向:1.84s		

### 4.2 地震動 HVR とフーリエスペクトルの比較

図-3(A)に地震観測記録のフーリエスペクトル振幅、図-3(B)にH/Vスペクトルの比較を示す。黒色の実線はイベント毎のスペクトルを、赤色の実線は平均値を、赤色の点線は平均値±σをそれぞれ示す。



(A) フーリエスペクトル振幅



(B) H/V スペクトル

図-3 地震動フーリエスペクトルと HVR の比較

なお、ここでは表一で示した117の地震記録の内、収録状態等により不適切と判断した記録を除いた全 95 の地震記録を用いた。また、各図上段は建物頂部 RF、下段は地盤 (GL) で計測されたスペクトルをそれぞれ示している。この図から明らかのように、地震動によってスペクトルは大きく変動するため、フーリエスペクトル振幅を直接的に利用する場合、同時測定記録のスペクトル比を用いる必要がある。一方で、HVR は小振幅記録を含めて比較的安定しており、振動特性の安定的な推定が期待できる。

### 4.3 地震動 HVR と伝達関数の比較

前節と同様の地震記録を用いて、3.3 節の成立条件について確認する。図-4Aに同時観測された水平動における地盤と建物頂部RFの伝達関数、図-4BにRFでのHVR<sub>RF</sub>、図-4CにRFでのHVR<sub>RF</sub>と1FでのHVR<sub>1F</sub>の比、図-4Dに同時観測された上下動における地盤とRFの伝達関数、図-4Eに地盤でのHVR<sub>G</sub>、図-4FにRFでのHVR<sub>RF</sub>と地盤でのHVR<sub>G</sub>の比を示す。水平動はすべてNS成分である。また、図-5Aは地表に対する1Fの上下動の伝達関数、図-5BはRFの伝達関数である。これらをみれば、各スペクトル特性はよく安定していることがわかり、図-4Dから上下動の伝達関数が約3Hz以下でほぼ1になっていることがわかる。同図中の約0.6Hzの若干の増幅は、図-4Aおよび図-5Bとの比較から、建物の水平の1次モードにおける上部構造の曲げ変形に伴う上下動と考えられる。

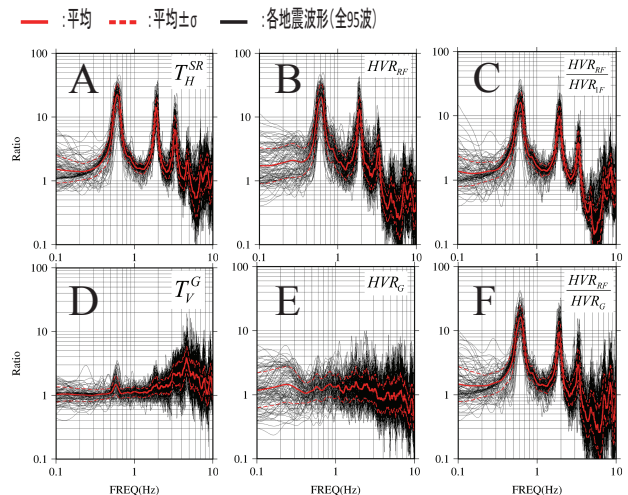


図-4 スペクトル特性の安定性 (NS成分)



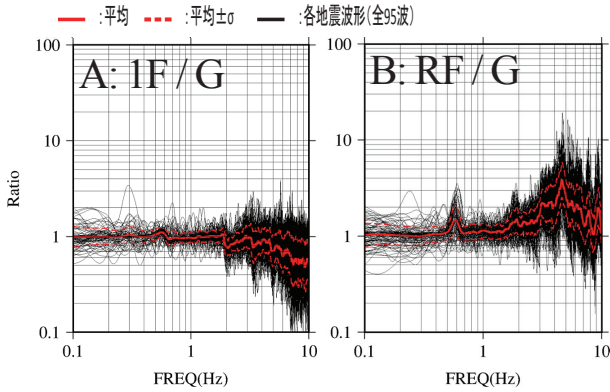


図-5 上下動の伝達関数

図-6に、RFと地盤において同時観測された地震動から計算したフーリエスペクトルの伝達関数  $T_H^{SR}$  (青線)、RFの  $HVR_{RF}$  と地盤の  $HVR_G$  の比 (赤線) を示す。ここでは、図-3(B)および図-4で示した平均値を用いている。図-6(A)はNS方向、図-6(B)はEW方向における比較をそれぞれ示す。図-6は、3.2節(地盤-建物連成系の場合)の式(9)と式(10)を比較していることになるが、振幅値や固有振動数について、3次ピークまで良好な対応を示している。また、NS方向、EW方向とも同様の傾向であることがわかる。なお、 $HVR_{RF}$  を併記しているが(黒線)、このスペクトル特性も良好に対応している。このことは、図-4Eで見られるように地盤における  $HVR_G$  が平均的に1程度とみなされたことにより、 $T_H^{SR} \cong HVR_{RF}$  が擬似的に成立したためと考えられる。

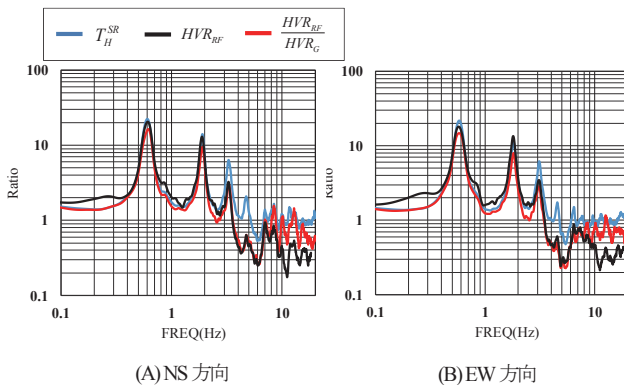


図-6 建物頂部RFでの各種スペクトル特性比較

#### 4.4 変動係数の比較

地震動 HVR の安定性について、他のスペクトルと共通の指標で比較するため、変動係数を用いて考察する。変動係数とは標準偏差を平均値で除したものであり、平均値の異なるデータのばらつきを相対的に評価することができる。図-7に、変動係数を用いた比較を示す。同図AはNS成分、同図BはEW成分である。各図において、Fはフーリエスペクトル(破線)、HVRはH/Vスペクトル比(青

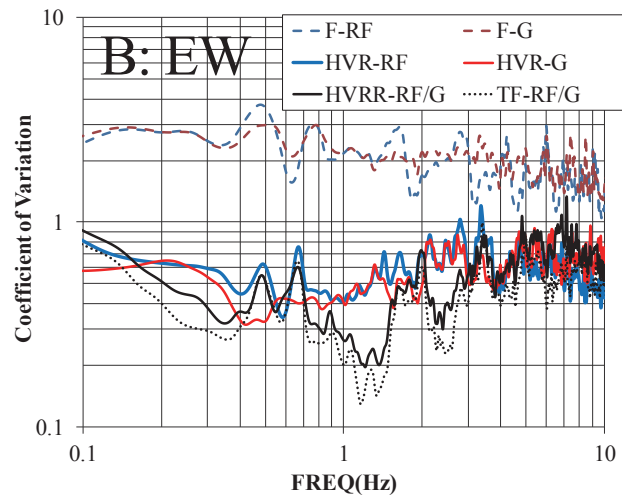
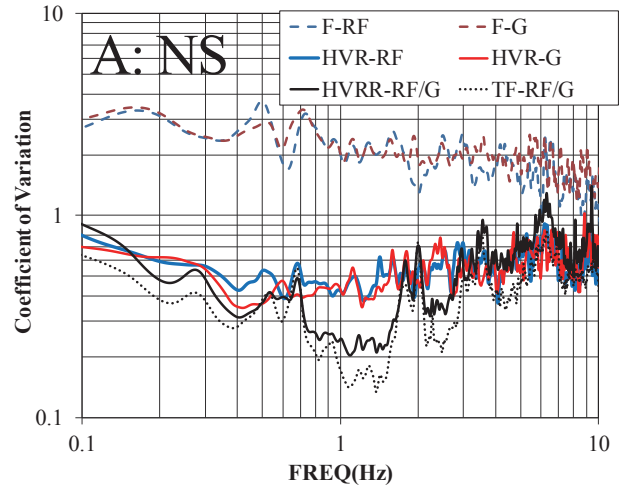


図-7 変動係数の比較 (A: NS成分, B: EW成分)

色実線: RF, 赤色実線: G),  $HVRR$  は  $H/V$  スペクトル比の比(黒色実線: RFとGの比),  $TF$  はフーリエスペクトル比としての伝達関数(黒色点線)を示す。また、 $G$  は地盤上の計測位置を、 $RF$  は建物頂部の計測位置を示す。

これらを見れば、フーリエスペクトルのばらつきは他に比べて非常に大きく、それ単体での利用が困難であることがわかる。また、 $TF$  と  $HVRR$  はほぼ同等のばらつきであることから、 $HVRR$  を用いても安定して振動特性を抽出できることがわかる。これにより、両者が等価であることを実証できたと考えられる。

ここで注目したいのは  $HVR$  についてであるが、 $TF$  や  $HVRR$  と同様に  $HVR_{RF}$  と  $HVR_G$  がそれぞれ安定していることがわかる。このことから、建物頂部  $RF$  と地盤  $G$  で単独に計測された地震記録の  $HVR$  を用いて、安定的に振動特性を評価できる可能性が示唆される。

これらのことから、本手法を用いれば、特定の系を対象にして、収録期間の異なるデータ同士を用いても、その系の振動特性を安定的に推定可能であると考えられる。

### 4.5 本提案手法の活用について

以上のことから、本提案手法は、例えば以下のような場合に活用できると考えられる。

- ・ 建物系と地盤系の両方で地震観測を実施しているケース
- ・ 建物系で地震観測を開始した場合で、近傍サイトの地盤で過去に得られた地震記録を活用するケース
- ・ 地盤で地震観測を開始した場合で、建物系の地震観測で過去に得られた地震記録を活用するケース
- ・ 建物系と地盤系の両方で地震観測を実施していた場合で、どちらかが廃止された(欠測した)ことにより、同時測定記録を使用できないケース

ここで挙げた例は地盤-建物連成系を主に対象にしたものであるが、地盤を1Fに入れ替えて、建物系としても同様の使い方が可能である。また、臨時地震観測と組み合わせることも可能であると考えられることから、常設の地震観測システム導入がコスト/体制的に難しい場合に、最小の資源(3成分振動計測機器と技術者1名)で建物系や連成系の振動特性を把握することが可能であると推察される。

### 5. まとめ

本研究のまとめは以下の通りである。

- ・ 地震動 HVR を用いた地盤-建物連成系(建物系含)の振動特性把握手法を提案し、本研究で対象にした超高層 RC 建物に対して、この提案手法が成立することを確認した。
- ・ 地盤-建物連成系において、 $T_V^G \approx 1$  を満足するようなスペクトル特性を有する建物(周辺地盤含む)に対しては、単独の観測記録からそれぞれ計算される RF の  $HVR_{RF}$  と地盤の  $HVR_G$  を使って、 $T_H^{SR}$  を直接推定することが可能である。
- ・ 紙面の都合で確認経過を割愛したが、 $T_V^f \approx 1$  を満足する建物系に対しても同様に、 $HVR_{RF}$  と 1F の  $HVR_{1F}$  を使って、 $T_H^R$  を直接推定することが可能である。
- ・ 野路ほか(2008)<sup>5)</sup>の主張は、式(4)もしくは式(9)において特殊な条件下で成立したものと推察される。本研究では地震動を用いたが、彼らは微動を用いている点に注意が必要である。しかし、この議論に従えば、本研究で示した理論式が微動にも適用できる可能性を指摘することができる。

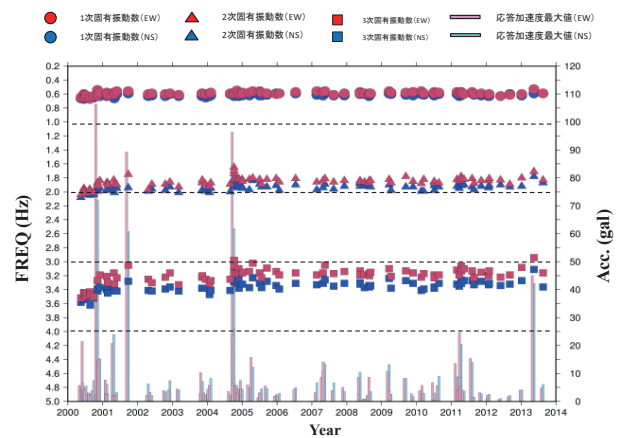
### 謝辞

地震観測記録に関して、共同で観測を行っている都市再生機構の小田聡氏をはじめ関係者の方々には謝意を表す。また一部の図の作成には GMT<sup>10)</sup>を用いた。なお、本稿は仲野ほか(2017)<sup>11)</sup>を基に加筆修正したものがある。

### 付録 超高層 RC 建物の固有周期の経時変動

図一Aに、本研究で対象とした神戸臨浜に建つ超高層 RC 建物で観測された地震記録から推定された1-3次固有振動数(固有周期)の経時変化について示す。丸印が1次固有振動数、三角印が2次固有振動数、四角印が3次固有振動数である。また青色がNS成分、赤色がEW成分を示している。背景に示している棒グラフは建物頂部 RF における最大応答加速度である。なお、これらの値は2000年4月の観測開始から2013年12月までに観測されたイベント毎に推定したものである。また、図一Aは2軸であり、左縦軸は振動数(Hz)、右縦軸は加速度(gal = cm/s<sup>2</sup>)を示している。

この図をみれば明らかなように、1-3次固有振動数は経時的によく安定していることがわかる。また、建物頂部 RF において、最大加速度応答の最大値は110cm/s<sup>2</sup>程度である。この結果から、本建物における地震記録は、本研究における理論を実証するのに最適なものであると推察される。なお、本建物のようにRC構造物の固有振動数が経時的に安定していることは、多くの既往研究と異なる結果である。この差異について現時点で明確な解は持たないが、本建物は1995年兵庫県南部地震以降に竣工したこと、関西圏に建っていることから関東圏等に比べて大地震による地震動を被った経験が少ないことが挙げられる。



図一A 固有周期の経時変動

## 参 考 文 献

- 1) 東京都防災ホームページ：東京都帰宅困難者対策条例，  
[http://www.bousai.metro.tokyo.jp/kitaku\\_portal/1000050/1000536.html](http://www.bousai.metro.tokyo.jp/kitaku_portal/1000050/1000536.html) (閲覧日：2017年10月12日)
- 2) 加藤貴司，境茂樹，仲野健一：地震後における建物の安全性・使用性判定支援のための構造ヘルスマニタリングシステム，日本建築学会大会学術講演会梗概集(近畿)，21050，pp.99-100，2014年9月.
- 3) 中村充，安井譲：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第64巻，第512号，pp.61-68，1999年3月.
- 4) 羽田浩二，堀家正則：微動記録を用いた偏心建物のグリーン関数の推定とその信頼性の検証および特徴 微動から推定したグリーン関数を用いた偏心建物の動的パラメータ同定への応用 その1，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第714号，pp.1239-1249，2015年8月.
- 5) 野路利幸，澤田義博，山岸邦彰：微動 H/V スペクトル比の建築物への適用性，日本建築学会大会学術講演会梗概集(中国)，21076，pp.151-152，2008年9月.
- 6) 野路利幸，山岸邦彰，澤田義博：福井市の中高層学校建築の微動スペクトル特性，日本建築学会大会学術講演会梗概集(北陸)，21013，pp.25-26，2010年9月.
- 7) 野路利幸，山岸邦彰，澤田義博：ラーメン模型による建物の微動スペクトル特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演会梗概集(関東)，21191，pp.381-382，2011年8月.
- 8) 仲野健一，境茂樹，加藤貴司，伊藤隆之，田沼毅彦：超高層 RC 建物の振動特性の経時的変動について，安藤ハザマ研究年報，Vol.2，No.4，2014年.
- 9) 理論地震動研究会：地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994年2月.
- 10) Wessel, P. and W. H. F. Smith. : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 1998, p.579.
- 11) 仲野健一，安井譲，境茂樹，前田寿朗：地震動 H/V スペクトル比を用いた地盤-建物連成系の振動特性把握手法の提案，日本建築学会大会学術講演会梗概集(中国)，21250，pp.499-500，2017年8月.

---



---

Method of Investigating Dynamic Properties of Buildings, Considering Soil-Structure Interactions  
by H/V Spectral Ratios

Kenichi NAKANO, Yuzuru YASUI, Shigeki SAKAI and Toshiro MAEDA

In order to inspect the damage to buildings due to vibrations caused by strong ground motions, we investigated the dynamic properties of buildings during earthquake motion, using the transfer function calculated by ground motion records observed in the building. Previous studies have shown that the H/V spectral ratio calculated by microtremors observed at the top of the building were similar to the transfer functions of the building calculated from the records observed at the top and first floor of the building. However, there are no theoretical approaches in these papers. H/V spectral ratios can be used to estimate the dynamic properties of buildings during ground motion. Therefore, in this study, we propose a method of investigating dynamic properties of buildings during earthquake motion using H/V spectral ratios.