

# 強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究

## A STUDY ON INPUT LOSS EFFECT OF LOW AND MEDIUM-RISE BUILDINGS BASED ON SEISMIC OBSERVATION AND MICROTREMOR MEASUREMENT

小島宏章\*, 福和伸夫\*\*, 飛田潤\*\*\*

Hiroaki KOJIMA, Nobuo FUKUWA and Jun TOBITA

This paper discusses input loss effect of 9 low and medium-rise buildings systematically using large amount of small to medium level seismic records and microtremor records. The following results are obtained. (1) Predominant frequency of input earthquake motion can be estimated by equivalent predominant frequency expressed as  $PGA/PGV/2\pi$  or  $PGV/PGD/2\pi$ . PGA, PGV and PGD mean peak ground acceleration, velocity and displacement respectively. (2) Input loss effect can be evaluated in the unified form for acceleration and velocity using nondimensional frequency calculated from equivalent predominant frequency of input earthquake motion, foundation width and average shear-wave velocity of ground. As nondimensional frequency become high, input loss effect become larger. Embedded buildings have larger input loss effect than other buildings. (3) Using Fourier spectrum ratio of foundation and ground, input loss effect of seismic and microtremor records show same characteristic depending on frequency for large scale and embedded buildings, however, they are much different for other buildings. This is caused by the difference of input mechanism of earthquake motion and microtremor, because spatial vibration of earthquake is coherent and that of microtremor is incoherent.

**Keywords:** Soil-Structure Interaction, Input Loss Effect, Low and Medium-Rise Building, Seismic Observation, Microtremor Measurement

建物と地盤との動的相互作用, 入力損失効果, 中低層建物, 強震観測, 常時微動計測

### 1. はじめに

建物と地盤との動的相互作用に起因する入力損失効果<sup>1), 2)</sup>の適切な評価は, 構造物に作用する地震力を推定する上で極めて重要である。入力損失効果は大規模構造物において顕著となる<sup>3)</sup>が, 軟弱地盤上に立地する一般中低層建物の場合も, 地盤に比べ建物の剛性が大きいこと, 動的相互作用の影響が大きい。しかし, 強震観測に基づく一般中低層建物の動的相互作用に着目した研究事例は多くなく<sup>例えば 4), 5)</sup>, 特に入力損失効果に着目した研究例は少ない<sup>6~8)</sup>。この原因として, 原子力関連施設や超高層建物・免震建物などの特殊構造物に比べ, 一般中低層建物の強震観測事例そのものが少ない上, 相互作用を検討するためには基礎と地盤での多点同時観測が必要となるため, さらにコストが割高となることが挙げられる。

安井ら<sup>6)</sup>は, 兵庫県南部地震において, 地盤と建物基礎とで同時観測された5棟の記録と, 激震地区の建物で得られた地下階での記録を元に, 激震地区での自由地表面地動の逆算を行い, 入力損失効果を検討している。その結果, 基礎応答の最大値は地表に比べ, 最大加速度で7割, 最大速度で9割程度に低減されると指摘している。

井口ら<sup>7)</sup>は, 大型振動台基礎とその周辺で得られた中小地震の地震記録を用いて, 入力地震動の周波数特性を考慮して, 基礎と地表の最大加速度・速度の関係を検討している。また, 実測記録を元に

入射波を求め, 基礎有効入力動を数値解析により算出している。

Stewart<sup>8)</sup>は7棟の建物で得られた15個の強震記録を用いて, 最大加速度, 最大速度, 建物条件と入力損失効果の関係を検討している。

既往の検討結果の多くは, 建物規模や根入れの大きな建物を対象としているため, 建物種類や地震記録数は十分ではなく, 定量的な評価には至っていない。様々な条件下での一般中低層建物を対象にして, 多数の地震記録や常時微動計測により, 入力損失効果を体系的に分析した研究例はない。

本論文は, 名古屋大学東山キャンパス内に存在する様々な高さ, 基礎幅や根入れ深さ, 規模を有する9棟の中低層建物を対象に, 多数の中小地震記録と常時微動記録を用いて, 入力損失効果を総合的に明らかにしようとするものである。

### 2. 対象建物と強震観測・常時微動計測概要

#### 2.1 対象建物の概要

対象建物は名古屋大学東山キャンパス内に立地する建物規模, 階数, 構造種別などの異なる9棟の中低層建物である<sup>9), 10)</sup>。建物概要を表1に, 平面図・断面図を強震計配置と共に図1に示す。根入れ深さは, 地表から基礎底面までの深さとした。平均  $V_s$  はPS検層結果またはN値から推定した値を, 基礎底面より下の深さ10mまでを

\* 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生・修士(工学)  
日本学術振興会特別研究員

\*\* 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博  
\*\*\* 名古屋大学大学院環境学研究科 助教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.  
Research Fellow of Japan Society for Promotion of Science  
Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.  
Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

層厚で重み付け平均した値である。地盤 - 建物連成系の固有振動数は、常時微動記録より推定した値である。但し、建物 には明瞭な固有振動数を認められなかったため、表 1 には示していない。図 1 (a) のハッチ部分は、一部に地下階が存在し、その部分だけ根入れが深いことを意味する。建物 の点線部は平面増築が行われたことを意味するが、別の検討により、増築前後<sup>11)</sup>で入力損失特性に顕著な差が認められなかったため、本論文中では増築後の建物諸元を用いている。また、建物 と は、Expansion Joint を介して桁行方向に隣接しており、隣接建物間相互作用に関する詳細な検討が行われている<sup>12)</sup>。建物 に示す斜線部は、敷地が傾斜しているため、一階部分の約半分が地盤に接していることを意味する。

対象建物の基礎幅に対する高さ、根入れ深さ、杭長の比を図 2 に示す。但し、根入れ深さが場所により異なる場合は、面積で重み付

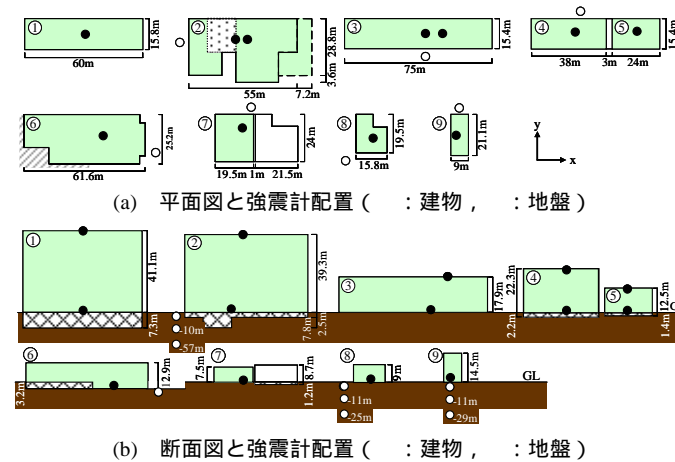


図 1 対象建物の平面図・断面図と強震計配置

け平均した値を用いている。例えば x 方向に着目すると、建物 1, 2, 3 は基礎幅に対する高さ比がほぼ等しいことから、根入れと隣接建物の影響が検討可能である。同様に、建物 4, 5 は根入れの対称性の影響を、建物 6, 7 は杭の有無の影響を検討可能である。

図 3 に地盤 - 建物連成系の固有振動数から求めた無次元振動数  $a_{0bx}$ ,  $a_{0by}$  を示す。 $a_{0bx}$ ,  $a_{0by}$  は、表 1 の平均  $V_s$ , 基礎幅  $B_x$ ,  $B_y$ , 常時微動記録より推定した地盤 - 建物連成系の固有振動数  $f_{bx}$ ,  $f_{by}$  を用いて、 $a_{0bx}=2\pi f_{bx}B_x/2V_s$ ,  $a_{0by}=2\pi f_{by}B_y/2V_s$  と定義している。図 3 に示した  $a_{0bx}$ ,  $a_{0by}$  は、0.3 から 2.5 程度まで広く分布しており、連成系の無次元固有振動数が入力損失効果に及ぼす影響の分析が可能であることが分かる。

## 2.2 強震観測・常時微動計測の概要

強震観測は、建物 1 ~ 9 では、建物の応答性状も検討できるように地表、建物 1 階床（以下、基礎と示す）、建物屋上で同時観測を行っている。建物 1 ~ 9 では、地表と基礎で同時観測を行っている。また、建物 1, 2, 3 の周辺では、地盤の増幅特性も検討できるように鉛直方向に 3 点で同時観測を行っている。データは全て 100Hz サンプリングで収録している。本論文中での分析は、1996 年 10 月から 2003 年 7 月までにそれぞれの建物で得られた地震記録から、不完全なデータや明らかにデータが不良なものを除いた全ての地震記録を用いる。分析に使用したデータ数を表 1 に、観測地震の震央位置を図 4 に、震央距離とマグニチュードの関係を図 5 に示す。図 4, 図 5 から、地震記録の大部分は東海地域を震源とするマグニチュードの小さなものであることが分かる。また、震央距離が離れるとマグニチュードの大きな地震しか記録が得られていないことが分かる。

常時微動計測は、建物 1, 2, 3, 4, 5 で高密度同時観測を行

表 1 対象建物の概要

| 建物 No. | 構造 種別           | 階数 | 軒高 (m) | 基礎     |        |                         | 建築面積 (m <sup>2</sup> ) | 平均 $V_s$ (m/s) <sup>*3</sup> |           | 地震 記録数 | 常時微動記録     |       | 連成系固有振動数  |           |
|--------|-----------------|----|--------|--------|--------|-------------------------|------------------------|------------------------------|-----------|--------|------------|-------|-----------|-----------|
|        |                 |    |        | 基礎・杭種別 | 杭長 (m) | 根入れ (m)                 |                        | N 値 による                      | PS 換層 による |        | 収録時間 (sec) | サンプル数 | x 方向 (Hz) | y 方向 (Hz) |
| 1      | S               | 10 | 41.1   | 場所打ち杭  | 41.7   | 7.3                     | 987                    | 243                          | 250       | 28     | 1800       | 25    | 1.0       | 1.0       |
| 2      | SRC             | 10 | 39.3   | PHC杭   | 45-48  | 2.5 (7.8) <sup>*2</sup> | 1841                   | 254                          | 220       | 47     | 660        | 32    | 1.8       | 1.7       |
| 3      | RC              | 4  | 17.9   | RC杭    | 6      | 0                       | 1155                   | 244                          | -         | 49     | 1380       | 67    | 4.2       | 4.4       |
| 4      | SRC             | 6  | 22.3   | PC杭    | 10, 12 | 2.2                     | 604                    | 302                          | -         | 57     | 600        | 29    | 3.5       | 3.6       |
| 5      | RC              | 3  | 12.5   | 直接     | -      | 1.4                     | 374                    | 335                          | -         | 29     | 600        | 29    | 5.9       | 4.9, 8.3  |
| 6      | RC              | 3  | 12.9   | RC杭    | 4, 5   | 0 (3.2) <sup>*2</sup>   | 1649                   | (315)                        | -         | 77     | 1800       | 14    | 6.3       | 4.9       |
| 7      | M <sup>*1</sup> | 1  | 7.5    | 直接     | -      | 0                       | 466                    | 291                          | 330       | 77     | 1800       | 87    | -         | -         |
| 8      | RC              | 2  | 9.0    | PC杭    | 10, 12 | 0                       | 263                    | 275                          | 228       | 67     | 1800       | 56    | -         | -         |
| 9      | RC              | 1  | 14.5   | RC杭    | 9      | 0                       | 189                    | 291                          | 269       | 70     | 1800       | 85    | 7.0       | 9.2       |

\*1 Mは柱がRC造、梁がS造を意味する。

\*2 根入れの括弧内は一部深い場所での深さを意味する。

\*3 平均  $V_s$  (N 値) は、N 値から推定した  $V_s$  を基礎底面から深さ 10m まで層厚で重み付け平均して算出。  
平均  $V_s$  (PS 換層) は、板叩き法で推定された  $V_s$  を基礎底面から深さ 10m まで層厚で重み付け平均して算出。  
括弧内の平均  $V_s$  は、建物から約 50m 離れた地点でのボーリングデータから推定したことを意味する。

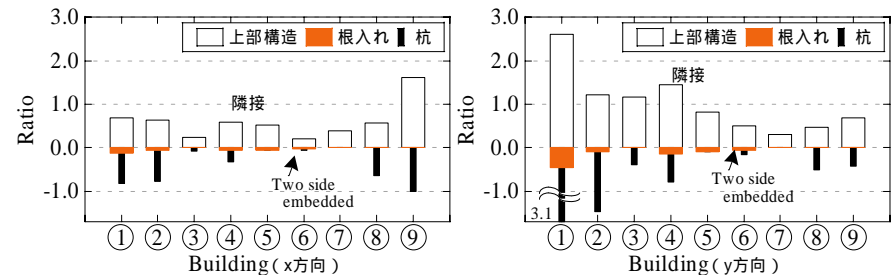


図 2 対象建物の基礎幅に対する高さ・根入れ深さ・杭長の比

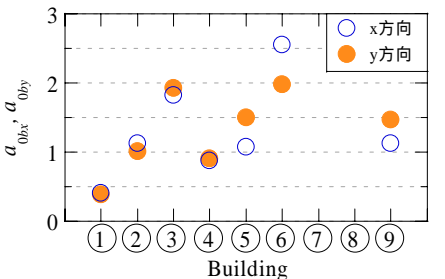


図 3 対象建物の無次元振動数 ( $a_{0bx}$ ,  $a_{0by}$ )

っており、他の建物では地表、基礎、建物屋上の3点での同時観測を行っている。動コイル型の常時微動計により変位を収録し、建物 1 は 100Hz サンプリング、他の建物では 200Hz サンプリングで計測している。収録時間は表 1 に示すとおりである。建物 1 は基礎での微動記録が得られなかったため、本論での検討には用いていない。

3 地震動の最大値に基づく入力損失効果の検討

3.1 地表と基礎の最大加速度、最大速度

入力損失効果を簡易に評価するために、地表と基礎での最大加速度、最大速度を比較する。図 6 に各建物の基礎最大加速度 (PBA) と地表最大加速度 (PGA) の関係、及び原点を通る回帰直線を示す。図 6 には、軸の関係で地表で約 60gal を記録した 1 地震が示されていないが、他の地震と同様の傾向であること確認しており、本論中では地表最大加速度を記録したデータも用いて全ての検討を行っている。

建築面積が大きな建物 1, 2, 3 では基礎の最大加速度が地盤よりも小さくなっており、入力損失効果が明瞭に認められる。それに対し、建築面積が小さな建物 4, 5 では、入力損失効果はほとんど認められず、基礎の方が大きな値を示している場合も多い。相互に隣接する建物 6 では、やや相関が低くなっている。建物 7 の x, y 方向で傾向が異なるのは、建物 7 は 1 階の片側側面のみが地盤と接していることが影響していると考えられる。建物 8 で、x 方向の入力損失効果が y 方向に比べ小さくなっているのは、基礎幅の差が影響していると考えられる。

図 7 に基礎最大速度 (PBV) と地表最大速度 (PGV) の関係を示す。最大加速度の場合と同様に、建築面積の大きな建物 1, 2 において基礎の方が地表より最大速度が小さくなっている。しかし最大加速度に比べ、最大値の低減度合いは小さい。この傾向は兵庫県南部地震の観測記録を分析した結果<sup>8)</sup>と対応している。

最大加速度と最大速度の地表に対する基礎の比率を、原点を通る直線で最小二乗近似した回帰式の傾きと相関係数を表 2 に示す。但し、図 6 の建物 1 と図 7 の建物 7 の pulse と示した地震記録は、地表での最大値が極めてパルス的な部分で決まっており、同じ地震の他地点の記録と明らかに傾向が異なることから、回帰直線を求める際には用いていない。回

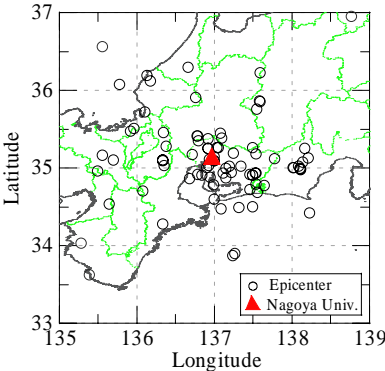


図 4 震央位置

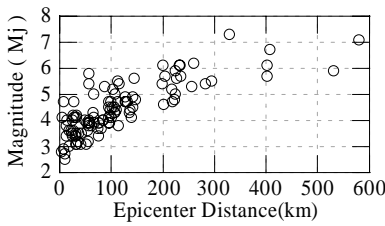


図 5 震央距離とマグニチュード

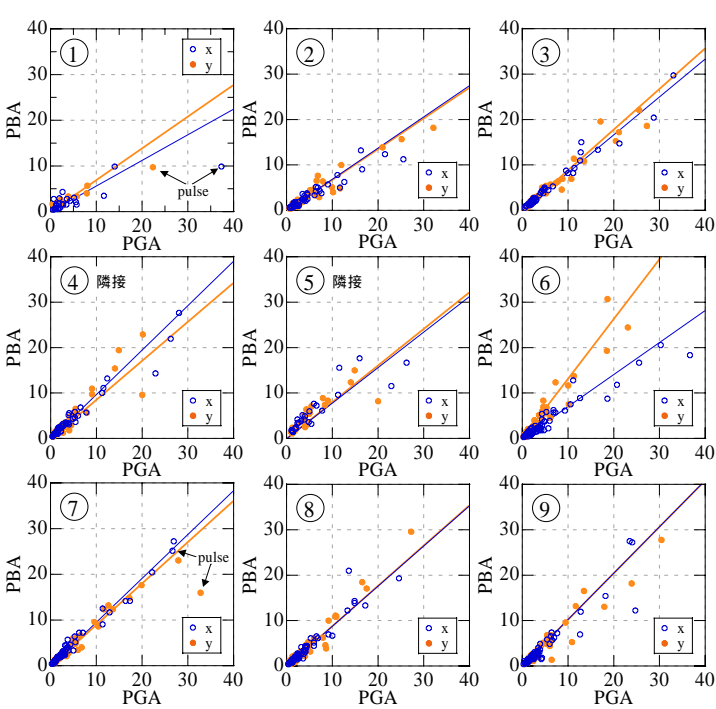


図 6 地表最大加速度 (PGA) と基礎最大加速度 (PBA)

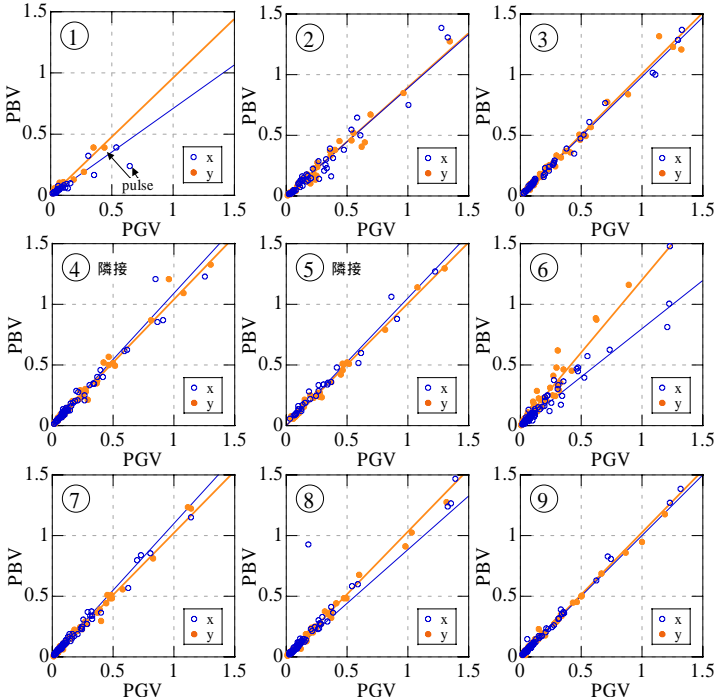


図 7 地表最大速度 (PGV) と基礎最大速度 (PBV)

表 2 回帰式の傾きと相関係数

| No. | 加速度 (x方向) |      | 加速度 (y方向) |      | 速度 (x方向) |      | 速度 (y方向) |      |
|-----|-----------|------|-----------|------|----------|------|----------|------|
|     | 傾き        | 相関係数 | 傾き        | 相関係数 | 傾き       | 相関係数 | 傾き       | 相関係数 |
| 1   | 0.56      | 0.76 | 0.69      | 0.91 | 0.71     | 0.94 | 0.96     | 0.95 |
| 2   | 0.69      | 0.99 | 0.68      | 0.99 | 0.89     | 1.00 | 0.90     | 1.00 |
| 3   | 0.83      | 0.99 | 0.90      | 0.99 | 0.99     | 1.00 | 1.01     | 1.00 |
| 4   | 0.98      | 0.99 | 0.86      | 0.97 | 1.09     | 1.00 | 1.04     | 1.00 |
| 5   | 0.78      | 0.89 | 0.81      | 0.95 | 1.05     | 0.99 | 1.01     | 1.00 |
| 6   | 0.70      | 0.97 | 1.32      | 0.97 | 0.80     | 0.99 | 1.19     | 0.99 |
| 7   | 0.96      | 1.00 | 0.90      | 0.99 | 1.10     | 1.00 | 1.02     | 1.00 |
| 8   | 0.88      | 0.99 | 0.89      | 0.99 | 0.89     | 0.98 | 1.03     | 1.00 |
| 9   | 1.03      | 0.98 | 1.02      | 0.98 | 1.00     | 1.00 | 1.02     | 1.00 |

帰直線の傾きは、建築面積が大きく、根入れの有る建物、で小さくなっているが、他の建物では安井らが示した加速度で約 0.7、速度で約 0.9 よりも大きな値を示している。これは安井らが対象とした建物に比べ、本論文で対象としている建物の規模、根入れ深さが小さいことが原因と考えられる。

図 8 に、建物の無次元振動数  $a_{0bx}$ 、 $a_{0by}$  と最大加速度の回帰式の傾きとの関係を示す。建物、及び根入れの深い建物を除き、根入れの有る建物と根入れのない建物それぞれで、 $a_{0bx}$ 、 $a_{0by}$  が大きくなるほど、入力損失効果が大きくなる傾向がある。図 9 に根入れ深さより求めた建物の無次元振動数  $a_{0be}$  と最大加速度の回帰式の傾きとの関係を示す。但し、 $a_{0be}$  は根入れ深さ  $E$ 、表 1 の平均  $V_s$ 、常時微動記録より推定した地盤 - 建物連成系の固有振動数  $f_{bx}$ 、 $f_{by}$  を用いて、 $a_{0be} = 2\pi f_{bx} E / 2V_s$ 、 $2\pi f_{by} E / 2V_s$  と定義している。片側のみが地盤に接しており、振動方向の前後面に側面地盤のない建物  $y$  方向を除き、根入れの有る建物は、根入れのない建物に比べ入力損失効果が大きな傾向がある。また、無次元振動数  $a_{0be}$  が大きな建物ほど、入力損失効果が大きくなる傾向のあることが分かる。

### 3.2 地震動の等価卓越振動数

地震動の卓越振動数を表す簡易的な指標として、地表最大加速度と地表最大速度の比から算出した等価卓越振動数 ( $\text{PGA}/\text{PGV}/2\pi$ ) と、地表最大速度と地表最大変位の比から算出した等価卓越振動数 ( $\text{PGV}/\text{PGD}/2\pi$ ) を用いる。等価卓越振動数を算出する際に用いる最大値は、 $\text{PGA}/\text{PGV}/2\pi$  の場合は  $\text{PGA}$  発生時刻とその前後 2 秒以内で発生する  $\text{PGV}$  を用い、 $\text{PGV}/\text{PGD}/2\pi$  の場合は  $\text{PGV}$  発生時刻とその前後 2 秒以内で発生する  $\text{PGD}$  を用いる。地震動の最大値のみから算出される等価卓越振動数と、フーリエスペクト

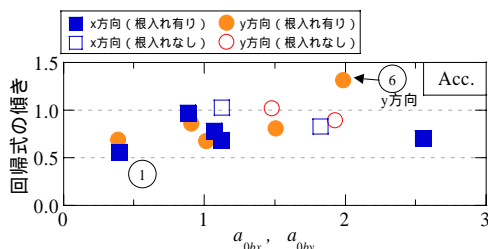


図 8 建物の無次元振動数 ( $a_{0bx}$ ,  $a_{0by}$ ) と回帰式の傾き

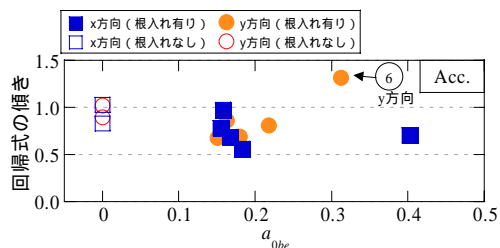


図 9 建物の無次元振動数 ( $a_{0be}$ ) と回帰式の傾き

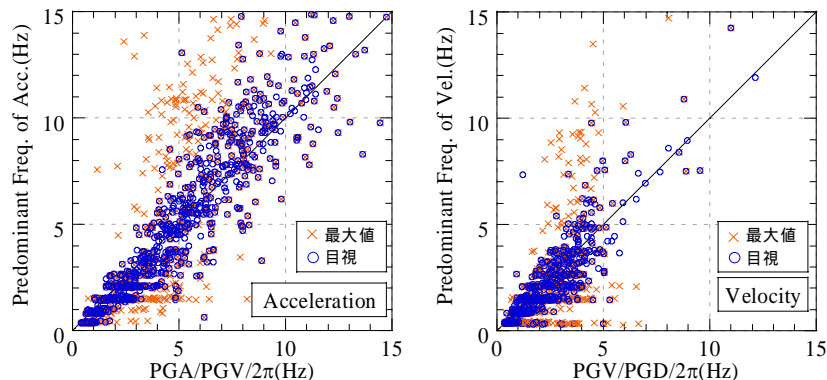


図 10 地震動の等価卓越振動数とフーリエスペクトルの卓越振動数の比較

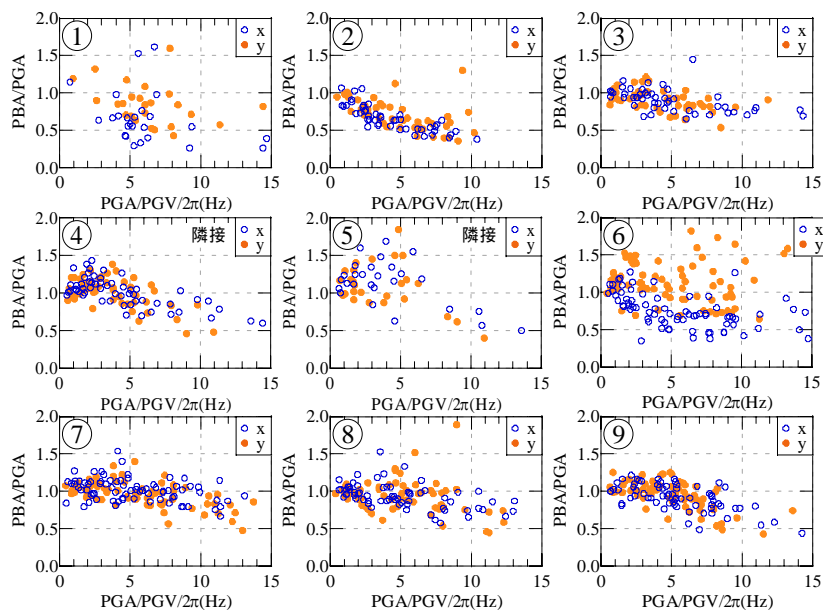


図 11 地震動の等価卓越振動数 ( $\text{PGA}/\text{PGV}/2\pi$ ) と基礎と地表の最大加速度比 ( $\text{PBA}/\text{PGA}$ )

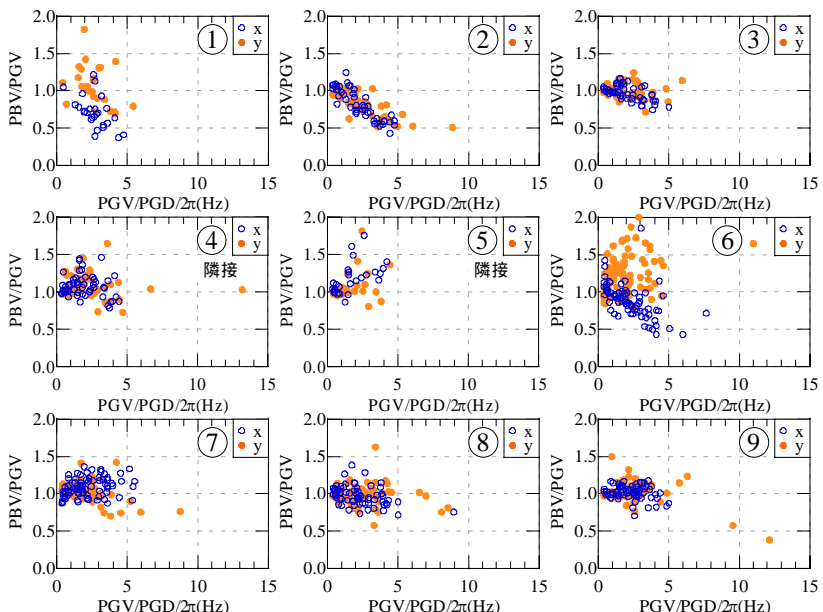


図 12 地震動の等価卓越振動数 ( $\text{PGV}/\text{PGD}/2\pi$ ) と基礎と地表の最大速度比 ( $\text{PBV}/\text{PGV}$ )



ルから求めた卓越振動数との関係を図 10 に示す。但し、フーリエスペクトルの卓越振動数は、機械的にフーリエスペクトルが最大値を示す振動数を採用する方法と、目視により卓越振動数を読みとる方法の 2 種を用いた。目視による方法は、フーリエスペクトルが最大のピークでなくても、スペクトルの形状から卓越ピークと見なせる振動数を抽出するためである。図 10 より、加速度、速度ともに高振動数になるとばらつきが大きくなるものの、PGA/PGV/2 $\pi$ は加速度の卓越振動数、PGV/PGD/2 $\pi$ は速度の卓越振動数を概ね評価できるといえる。

### 3.3 地震動の等価卓越振動数と最大加速度比・速度比

図 11 に PGA/PGV/2 $\pi$ と最大加速度比 (PBA/PGA)、図 12 に PGV/PGD/2 $\pi$ と最大速度比 (PBV/PGV) の関係を示す。両図において、全体的傾向として加速度比・速度比ともに等価卓越振動数が高くなるほど、入力損失効果が大きくなっている。等価卓越振動数が地震毎に異なっているのは、図 5 と図 13 より、マグニチュードの小さな地震は対象建物の近傍で発生したものに限られるため、高振動数成分が卓越する場合が多いのに対し、マグニチュードが大きくなると遠方の地震が主となり、低振動数成分が卓越するためである。

図 11、図 12 において、基礎幅に対する高さの比がほぼ等しい建物、及び x 方向の高さ比がほぼ等しい建物と比較すると、根入れを有し、建築面積の大きな建物で入力損失効果が顕著である。それに対し、建物ではばらつきが大きく、低振動数側では地盤よりも基礎応答の方が大きくなる場合が多くなっている。これは隣接する建物、が互いに影響を及ぼしあっていることが原因であり<sup>12)</sup>、隣接建物間相互作用が顕著な場合に、安易に入力損失効果を見込むことの危険性を示している。

根入れの状況が異なる建物、を比較すると、根入れが非対称な建物で、x 方向と y 方向の入力損失効果に顕著な差が認められる。建物、を比較すると、杭の有無による水平方向の入力損失効果には、差がほとんど認められない。

### 3.4 地震動の無次元振動数と最大加速度比・速度比

基礎幅と入力地震動の波長が入力損失効果に及ぼす影響を検討するために、前節の結果に入力地震動の無次元振動数  $a_{0in}$  を導入する。 $a_{0in}$  は、表 1 の平均 S 波速度  $V_s$ 、基礎幅  $B_x$ 、 $B_y$ 、入力地震動の等価卓越振動数  $f_{in}$  を用いて、 $a_{0in}=2\pi f_{in}B_x/2V_s$ 、 $2\pi f_{in}B_y/2V_s$  と定義する。但し  $f_{in}$  には、加速度の検討では PGA/PGV/2 $\pi$ 、速度の検討では PGV/PGD/2 $\pi$ を用いる。

水平 2 方向の全記録から求めた  $a_{0in}$  と PBA/PGA と PBV/PGV の関係、及び回帰曲線と相関係数 R を図 14

に根入れの有無別に示す。但し、隣接建物間相互作用の影響が大きな建物、及び根入れが非対称な建物 は除いてある。回帰曲線には、基礎底面に作用する調和振動を基礎幅で平均して得られる関数  $\sin(k_b a_{0in})/k_b a_{0in}$  を用いている。ここに、 $k_b$  は回帰係数である。根入れの影響を検討する場合、基礎側面に作用する調和振動を根入れ深さで平均すると、前述と同様の関数が得られるため、基礎底面項と根入れ項の積として  $\sin(k_b a_{0in})/k_b a_{0in} \times \sin(k_e a_{0in})/k_e a_{0in}$  を用いている。ここに、 $k_b$ 、 $k_e$  は回帰係数である。

無次元振動数を加速度と速度で別々に定義することにより、加速度・速度の入力損失効果が無次元振動数との関係で統一的に評価で

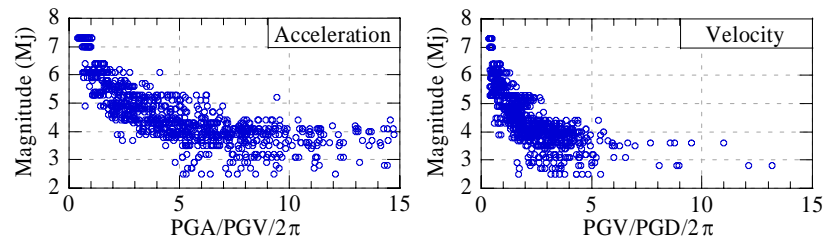
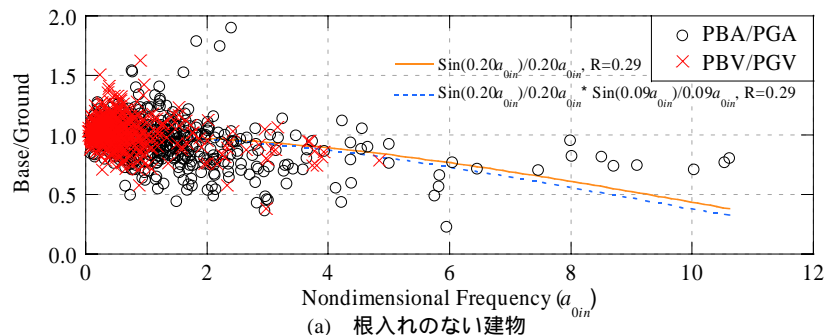
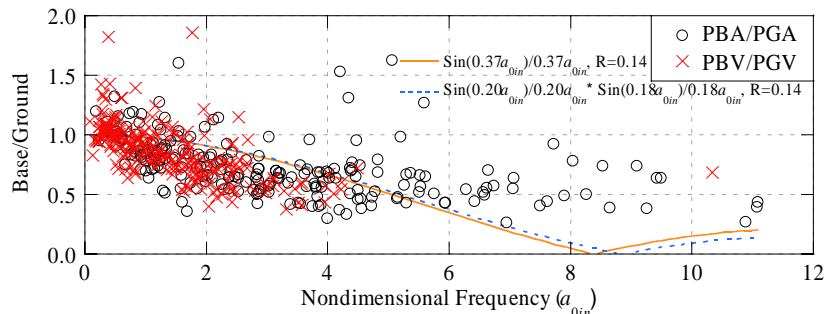


図 13 地震動の等価卓越振動数とマグニチュード



(a) 根入れのない建物



(b) 根入れの有る建物

図 14 地震動の無次元振動数と基礎と地表の最大加速度比・速度比

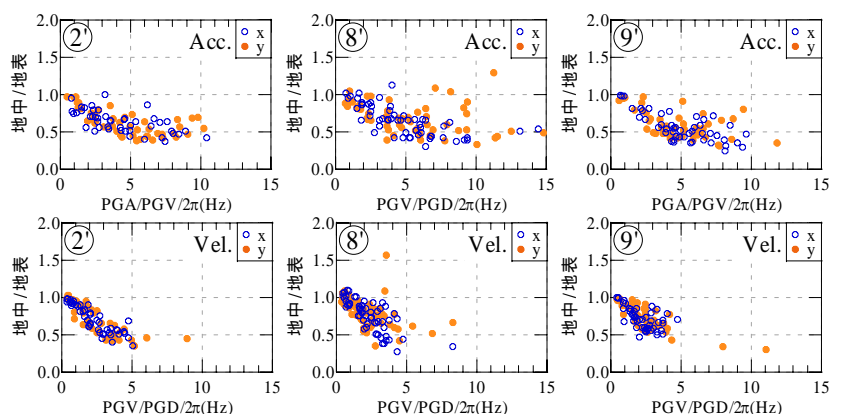


図 15 地震動の等価卓越振動数と地中と地表の最大値比

きていることが分かる。

根入れの影響を検討するために、一つの項で回帰させた場合の係数を見ると、根入れの有無により係数が大きく異なっている。次に、二つの項の積で回帰させた場合の係数を見ると、根入れの有る建物において根入れ項の係数が大きめの値となっている。これは根入れにより、下方より入射する地震動の表層での増幅分が低減されていることを示唆している。

### 3.5 根入れと入力損失効果

根入れによる入力損失効果が、根入れ深さに相当するごく表層部分の地盤増幅と相関が認められるかを、建物①、②、③の近傍地盤の記録①、②、③を用いて検討する。本来この検討は、根入れ深さと同一深度で得られた地中地震記録を用いるか、数値計算によって当該深度での地震動を推定して検討すべきだが、ここでは簡便のため、地下11m(建物①では地下10m)の記録を用いている。

図15にPGA/PGV/2 $\pi$ と地中と地表の最大加速度比と、PGV/PGD/2 $\pi$ と地中と地表の最大速度比を示す。根入れの有る建物①では図11、図12と図15の形状が非常に良く対応している。それに対し、根入れの無い建物②、③では対応が悪い。この結果からも、根入れの存在による深さ方向の応答低減は、入力損失効果と関連しているものと考えられる。

## 4 振動数領域における入力損失効果

### 4.1 平均フーリエスペクトル比と最大加速度比、最大速度比の比較

地震動の最大値に着目した検討の有用性を検証するために、振動数領域における検討と比較する。図16、図17に各建物の地表/基礎の平均フーリエスペクトル比と、地震動の等価卓越振動数と基礎・地表の最大加速度比・速度比のプロットを重ね合わせて示す。また、常時微動記録より推定した地盤-建物連成系の1次固有振動数を示す。但し、建物③は地盤-建物連成系の固有振動数を特定できなかったため、は示していない。平均フーリエスペクトル比は、個々の地震記録でフーリエスペクトル比を求めた後、アンサンブル平均して求めている。

高振動数になるにつれて入力損失効果が大きくなる傾向は、最大加速度比・速度比と平均フーリエスペクトル比で非常に良く対応している。しかし、平均フーリエスペクトル比に現れている上部構造物の慣性力に起因するピーク位置では、最大加速度比・速度比のプロットは入力損失効果を過大評価している。

### 4.2 地震記録と常時微動記録の比較

建物に入力する振動は、地震動の主要動部分では実

体波が優勢で、常時微動では表面波が優勢と考えられる。そこで地震動と常時微動の記録を比較することで、入力機構の異なる振動が、入力損失効果に及ぼす影響を検討する。図18、図19に各建物の地震記録と常時微動記録から求めた地表に対する基礎の平均フーリエスペクトル比と、常時微動記録より推定した地盤-建物連成系の1次固有振動数を示す。地震記録の平均フーリエスペクトル比は、4.1節での算出方法と同様にして求め、平均値と平均値 $\pm$ 標準偏差を合わせて示している。常時微動記録の平均フーリエスペクトル比は、収録データから交通振動などのノイズ部分を除いて1サンプル

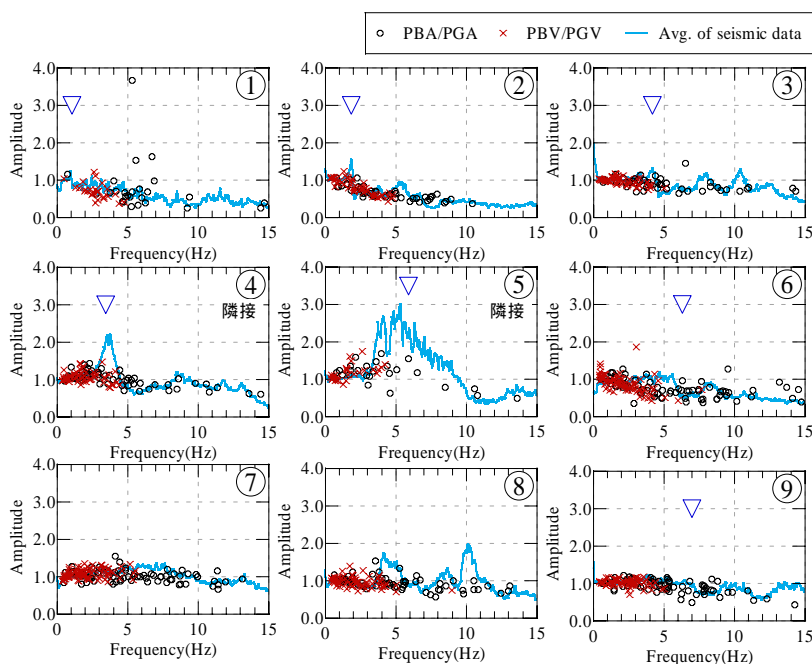


図16 基礎/地表の平均フーリエスペクトル比と地震動の等価卓越振動数と基礎・地盤の最大加速度比・最大速度比(x方向)

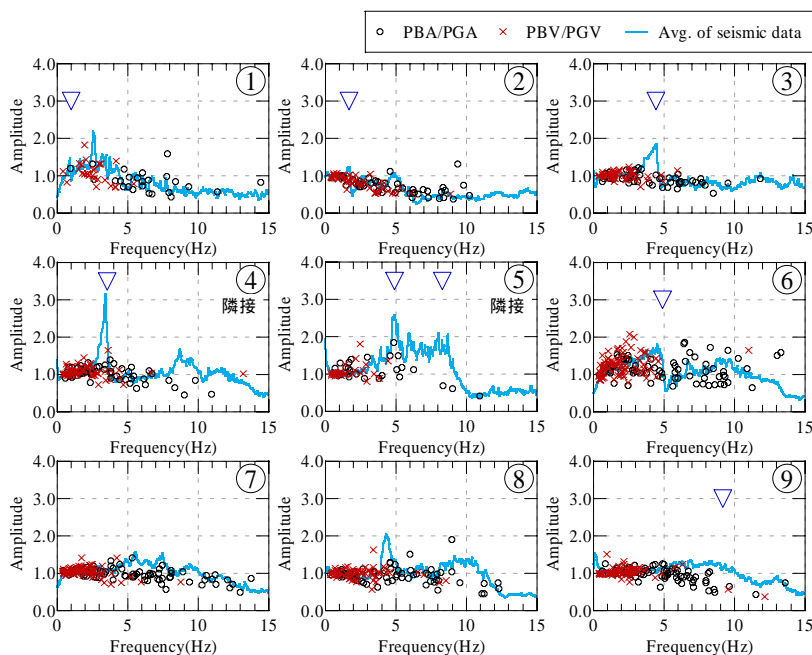


図17 基礎/地表の平均フーリエスペクトル比と地震動の等価卓越振動数と基礎・地盤の最大加速度比・最大速度比(y方向)

20.48 秒のサンプル群に分割し、アンサンブル平均して求めている。アンサンブル平均に用いたデータ数は表 1 に示すとおりである。

単独建物で根入れが対称な建物 ①, ② では、地震記録と常時微動記録は良く対応している。また、地盤 - 建物連成系の 1 次固有振動数において、軽量の S 造の建物 ③ では上部構造物の慣性力の影響がごく狭帯域にしか現れていないのに対し、建物規模が大きく、地盤 - 建物連成系の減衰が大きな SRC 造の建物 ④ では、上部構造物の影響がやや広い振動数帯域に現れている様子も、地震記録と常時微動記録で対応している。

しかし、隣接する建物 ⑤, ⑥ と、非対称な根入れを持つ建物 ⑦ では、地震記録のばらつきが大きく、常時微動記録との差も大きい。建物 ⑧ は論文 12 において、地震のタイプにより振動の入力機構が異なり、隣接建物間相互作用の影響度合いが変化することが詳細に分析されている。建物 ⑨ では、方位特性を持つ地震において、入力損失効果が異なることを確認しているが、紙面の都合上、図示はしていない。

根入れのない建物 ①, ② では、微動記録にはないピークが地震記録に現れている。一方、建物 ③ では、微動記録に現れているピークが地震記録に現れていない。また、この 3 棟の建物では、地震記録にばらつきが認められる。

## 5 地震記録の空間変動

地震記録は個々の地震においても時間的・空間的変動が大きい。そこで本節では、ほぼ直線上に位置する 5 つの地表観測点で得られた地震記録のコヒーレンスの経時変化に着目する。地表観測点は、建物 ①, 建物 ②, 建物 ③ から約 50m 離れた地点 ①', 建物 ④, 建物 ⑤ から約 14m 離れた地点 ②' で、これらの観測点間距離は、約 14m, 50m, 180m, 270m, 440m である。

図 20 に 1997 年 3 月 16 日に愛知県東部で発生した地震 (Mj 5.6, 震源深さ 40km, 震央距離 57km) の記録を用いて、実体波成分が優勢な P 波部を 5 秒間、S 波部を 10 秒間と、表面波成分が優勢な Coda 部を 10 秒間切り出して求めた地表観測点間の x 方向のコヒーレンスを示す。図 20 には、2 地点間の距離  $r$  より算出した無次元振動数が  $\pi$  となる振動数、即ち、 $r$  と地震動の波長が等しくなる振動数を  $f_{\pi}$  で示した。但し、約 14m しか離れていない Case1 については、無次元振動数が  $\pi/2$  となる振動数を  $f_{\pi/2}$  で示している。また、y 方向のコヒーレンスは、x 方向とほぼ同じ形状であることを確認している。

実体波が優勢な P 波部、S 波部では、Case5 においても 0~3Hz 付近と 7~10Hz 付近でコヒーレンスが高い。これに対し Coda 波部は、Case1 においてもより高振動数側でコヒーレンスが低く、空間変動が大きくなっている。

根入れのない建物 ①, ②, ③ の建物規模と無次元振動数は図 20 の Case1 と Case2 に相当する。根入れのない建物の場合、空間変動の影響が現れ易いため、図 18, 図 19 に示した地震記録と常時微動記録に差が生じていると考えられる。

## 6 まとめ

建物条件、地盤条件、基礎条件が異なる 9 棟の中低層建物を対象に、多数の中小地震記録と常時微動記録を用いて、相互作用による入力損失効果を体系的に考察した。得られた結果を以下に示す。

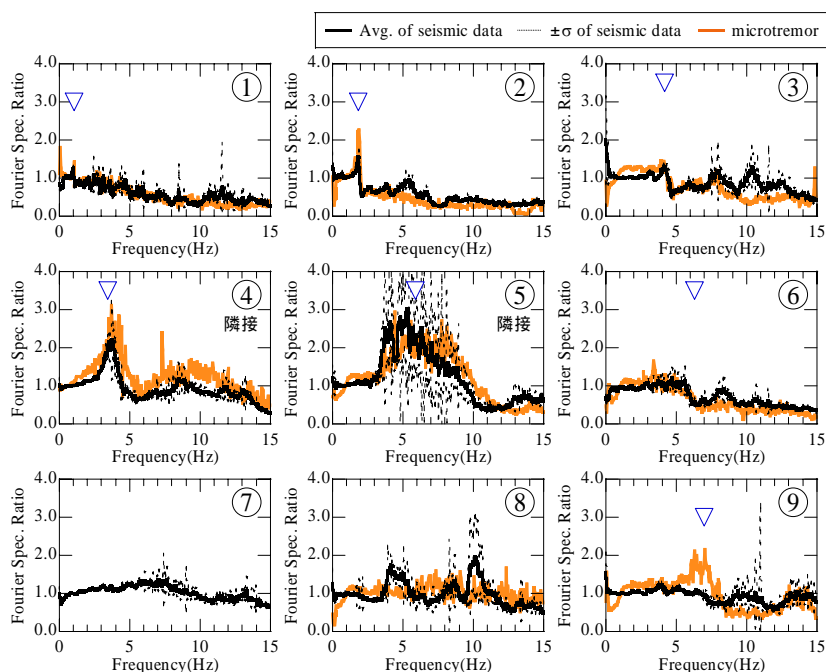


図 18 地震記録と常時微動記録の地表に対する基礎の平均フーリエスペクトル比の比較 (x 方向)

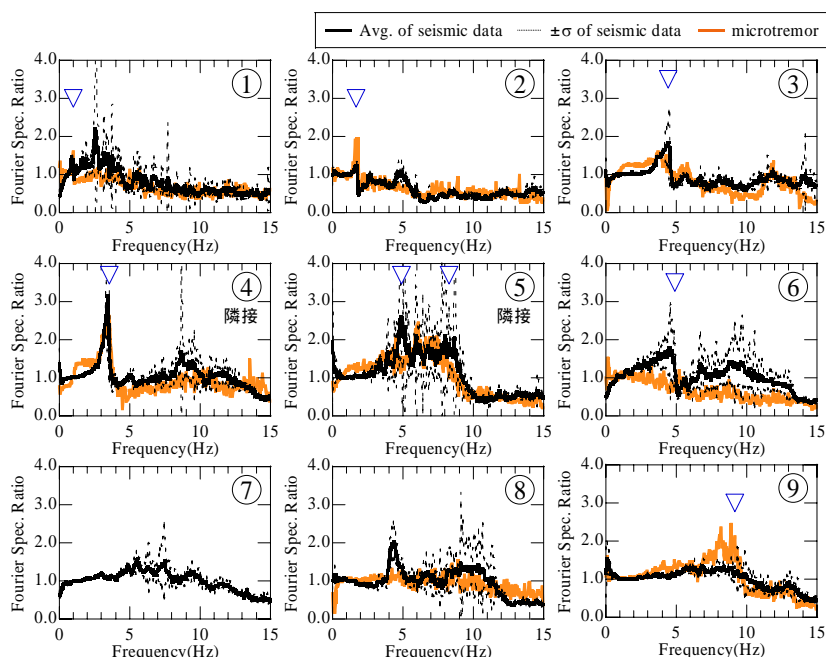


図 19 地震記録と常時微動記録の地表に対する基礎の平均フーリエスペクトル比の比較 (y 方向)



- (1) 多数の地震記録を用いて簡易的に振動数領域での分析を行うために、地震動の卓越振動数として地表最大加速度、最大速度、最大変位から求めた等価卓越振動数 ( $PGA/PGV/2\pi$ ,  $PGV/PGD/2\pi$ ) を導入した。等価卓越振動数は加速度、速度ともに高振動数でばつぎが大きくなるものの、 $PGA/PGV/2\pi$  は加速度の卓越振動数、 $PGV/PGD/2\pi$  は速度の卓越振動数を概ね評価できることを示した。
- (2) 地震動の等価卓越振動数を用いて求めた無次元振動数を用いることにより、最大加速度と最大速度における入力損失効果と無次元振動数の関係を統一的に評価することが可能となった。その結果、入力損失効果は無次元振動数が高くなるほど大きくなり、入力地震動の波長が基礎幅よりも短い場合は、根入れの有無によらず入力損失効果が現れていた。また、根入れの有る建物は、根入れのない建物に比べ入力損失効果が大きいことを確認した。
- (3) 地震記録と常時微動記録を比較した結果、単独建物で根入れが対象な建物では両者は良い対応を示したが、根入れのない建物では両者に差が認められた。地震動の空間変動を検討した結果、P波部・S波部では地表2地点間のコヒーレンスが高いのに対し、Coda波部ではコヒーレンスが低いことから、Coda波部で空間変動が大きいことが明らかとなった。常時微動は表面波が優勢で空間変動が大きいと考えられることから、地震記録と常時微動記録の入力損失効果に生じた差は、振動の建物への入力機構が異なることが原因と考えられる。
- (4) 隣接建物がある場合、隣接建物同士が互いに影響を及ぼし合うため、入力損失効果が明確でない場合や、逆に地表よりも基礎の揺れが大きくなる場合もあることが明らかとなった。また、根入れが非対称な場合も、入力損失効果が明確でない場合があることも明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 山原浩：地震時の地動と地震波の入力損失（第1報），日本建築学会論文報告集，No.165，pp.61-66，1969.11
- 2) 山原浩：地震時の地動と地震波の入力損失（第2報），日本建築学会論文報告集，No.167，pp.25-30，1970.1
- 3) 石井清，山原浩：大型地下タンクの実測記録による地震波の入力損失の検討，日本建築学会論文報告集，No.312，pp.54-62，1982.2
- 4) Nobuo FUKUWA and Jun TOBITA：SSI Effect on Dynamic Characteristics of Low & Medium-Rise Buildings Based on Simplified Analysis and Observation，Proceedings of the Second U.S.-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction，pp.175-184，2001
- 5) 八木茂治，福和伸夫，飛田潤：常時微動計測に基づく低層RC造建物の伝達関数推定にレーリー波による回転入力を与える影響，日本建築学会構造系論文集，No.552，pp.77-84，2002.2
- 6) 安井譲，井口道雄，赤木久真，林康裕，中村充：1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No.512，pp.111-118，1998.10
- 7) 井口道雄，宇波桃子，安井譲，箕輪親宏：大型振動台基礎とその周辺地盤の同時地震観測に基づく基礎有効入力動，日本建築学会構造系論文集，No.537，pp.61-68，2000.11
- 8) Stewart, J. P.：Variations between Foundation-Level and Free-Field Earthquake Ground Motions，Earthquake Spectra，Vol. 16，No. 2，pp.511-532，2000.5
- 9) 福和伸夫，山田耕司，石田栄介，森保宏，辻本誠，松井徹哉：オンライン強震観測・地震被害想定・振動実験システムの構築，日本建築学会技術報告集，第3号，pp.41-46，1996.12
- 10) 福和伸夫，飛田潤，西阪理永：学内LANの利用による環境振動モニタリングシステム，日本建築学会技術報告集，第5号，pp.158-162，1997.12
- 11) 岡田純一，福和伸夫，飛田潤：観測記録に基づくSRC造10階建物の平面増築による振動特性変化，構造工学論文集，Vol.48B，pp.437-444，2002.3
- 12) 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，No.545，pp.87-94，2001.7

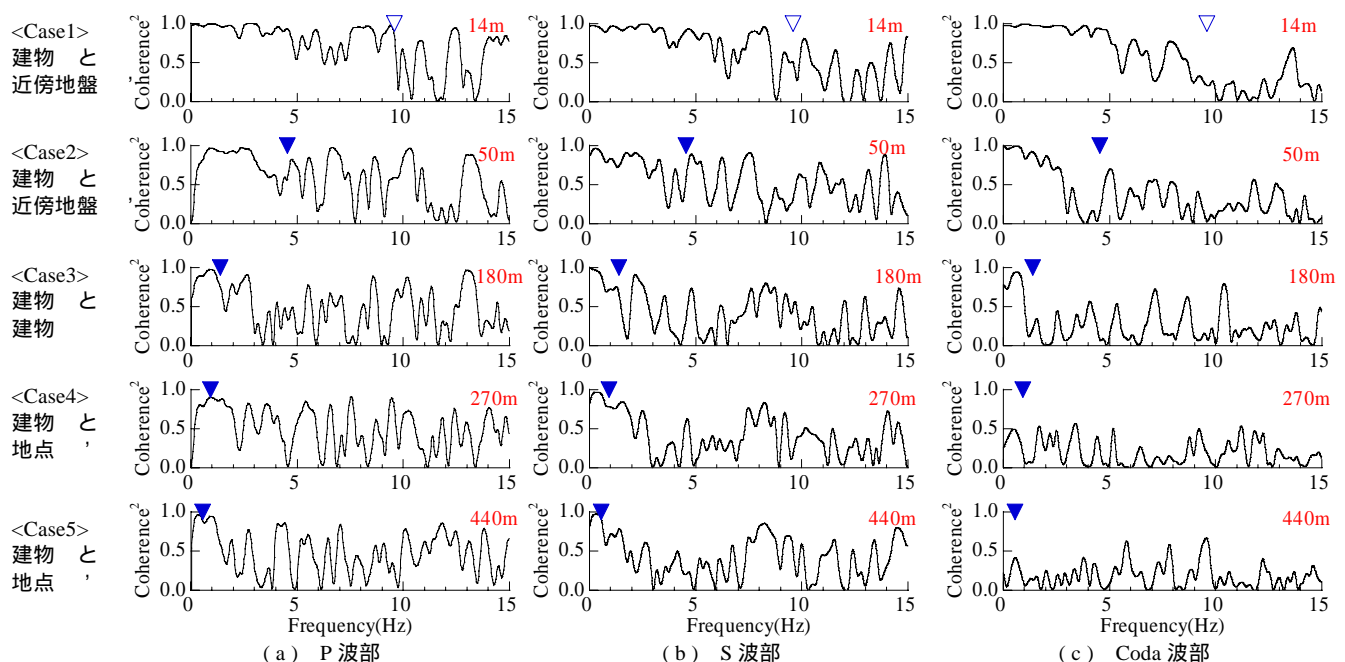


図 20 地表観測点の時間区間毎のコヒーレンス (x 方向)