

官民研究開発化投資拡大プログラム

PRISM

革新的建設・インフラ維持管理技術／革新的

防災・減災技術

官民データ連携による応急対応促進

(災害時における建物の保守・点検員の派遣の

効率化のニーズに基づく研究開発)

平成31年3月

株式会社小堀鐸二研究所

## 内容

1 平成 30 年度成果報告 .....	1
1.1. 建物観測データと MeSO-net データを融合した入力地震動推定手法の開発 .....	1
1.1.a 利用可能な建物観測データの整理 .....	2
1.1.b MeSO-net による観測データの選別と整理 .....	3
1.1.c 建物および地震観測点の関連情報の検討と整備 .....	3
1.1.d 建物入力地震動の評価法の技術開発 .....	4
1.2. 建物入力地震動の評価方法に関する検討会 .....	8
2 結論及び今後の課題 .....	9
2.1. 結論 .....	9
2.2. 今後の課題 .....	9
3 引用文献 .....	10

# 1 平成 30 年度成果報告

## 1.1. 建物観測データと MeSO-net データを融合した入力地震動推定手法の開発

首都直下地震等の大地震が発生した後、社会活動を再開するためには膨大な数の被災建物の安全確認を行う必要がある。建物の安全確認は建設会社等が担うが、技術者の数は限られている。そのため、速やかに安全確認を完了するためには、個々の建物被害を早期に精度よく推定し、目視での安全確認を要する建物に対して適切に技術者を派遣する必要がある。

建物被害の推定精度向上のためには、建物に入力した地震動を精度よく推定することが有効である。本研究では、建物入力地震動の推定精度向上のため、首都圏で高密度な地震観測を行っている首都圏地震観測網（MeSO-net）の地震観測記録を用いて、建物入力地震動の推定を行う手法の開発を目的とする。

本研究により開発を目指す建物入力地震動の推定手法の概要を図 1-1 に示す。大規模地震の発災前に建物入力地震動に相当する建物最下層の地震観測記録と近傍の MeSO-net で得られた観測記録について、応答スペクトル比などの指標によりその統計的関係性を把握する。発災後には事前に得られた統計的関係性と推定対象とする建物の属性情報を基に、当該地震の MeSO-net 観測記録から地震観測を行っていない任意の建物に入力した地震動を推定する。

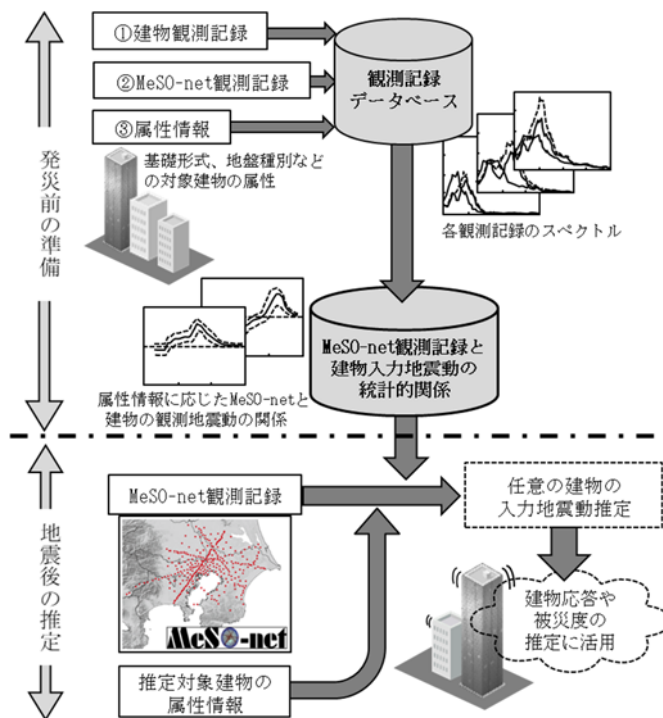


図 1-1 観測記録を用いた建物入力地震動の推定手法の概要

## 1.1.a 利用可能な建物観測データの整理

### a.1 対象とする観測建物

対象建物は MeSO-net 設置地域内に所在する非木造建物全 81 棟とする。建物の用途は主として事務所であり、一部に商業施設などが含まれる。各建物には、地震時損傷評価を目的として建物内の数箇所に 3 軸加速度計が設置されている。建物所在地を図 1-2 に示す。

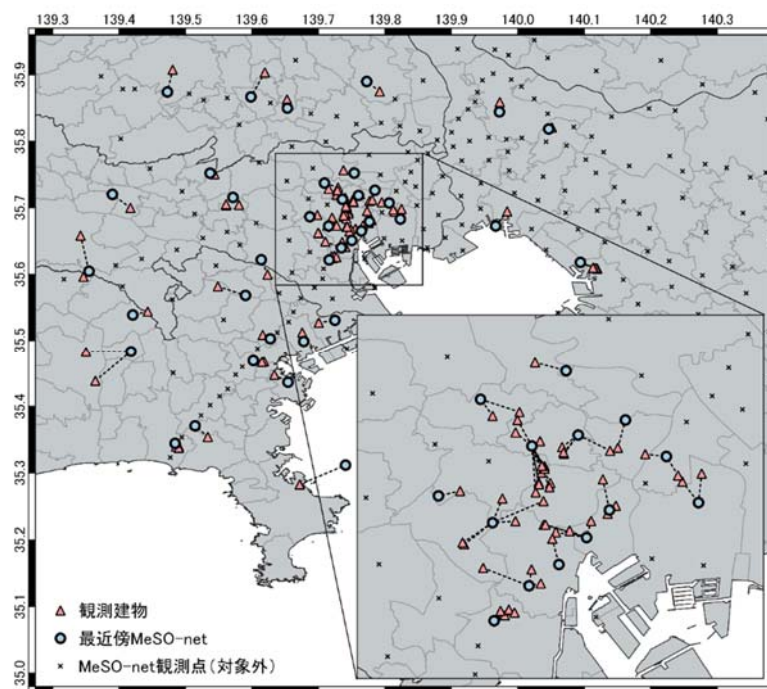


図 1-2 観測建物と最近傍 MeSO-net 観測点の位置

### a.2 建物地震観測記録の抽出

本研究では 2015 年 4 月から 2018 年 3 月に発生した地震観測記録を対象とする。81 棟の観測建物で、対象期間内に観測された地震は全 138 地震であった。観測地震の震央分布図を図 1-3 に示す。観測地震の諸元は気象庁震度データベース<sup>[1]</sup>から取得した。

対象観測建物における延べ地震観測数は 2,549 である。本研究では、建物入力地震動を示す建物観測記録として、観測建物内に設置された地震計のうち最下層（1 階もしくは地下階）の水平 2 方向の記録を収集した。

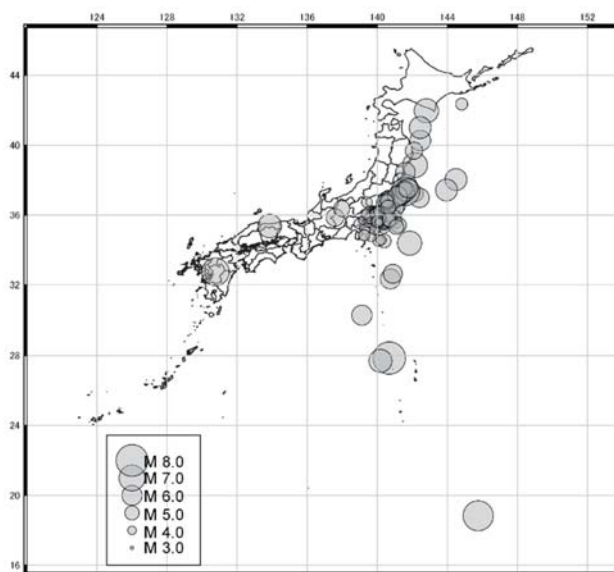


図 1-3 観測地震の震央分布図

### 1.1.b MeSO-net による観測データの選別と整理

建物観測記録と対応する MeSO-net 観測記録として、対象建物の最近傍の MeSO-net 観測点における水平 2 方向の加速度波形を、建物観測記録の記録時間を包絡するように切り出して収集する。MeSO-net 観測記録の切り出しに際しては、2017 年 3 月 31 日以前の記録は防災科学技術研究所及び東京大学地震研究所の協力のもと、データを提供いただいた。また、2017 年 4 月 1 日以降の記録は防災科学技術研究所の連続波形データダウンロードページ<sup>2)</sup>より入手した。複数の観測建物が同一の MeSO-net 観測点に近接することがあるため、建物数より少ない全 39 地点で、延べ 1,600 波×2 方向の加速度波形を収集した。

1.1.a で収集した建物観測記録と、対応する MeSO-net 観測記録を照合したところ、MeSO-net 観測記録との比較対象となる建物観測記録数は延べ 2,549 地震中 2,487 地震であった。

### 1.1.c 建物および地震観測点の関連情報の検討と整備

1.1.a および 1.1.b で収集した観測データの比較・分析に用いるため、各建物および MeSO-net 観測点に関する各種属性情報を設計図書や耐震診断報告書、その他公表情報から収集した。収集した属性情報の項目例を表 1-1 に、収集した観測建物の関連情報のうち、図 1-4 に地上階数別の棟数分布を、図 1-5 に基礎形式別の棟数分布を示す。

表 1-1 収集する関連情報の項目

建物	建物概要	竣工年、延床面積、構造種別、地上階数 地下階数、建物高さ、設計 1 次固有周期
	基礎概要	基礎形式、基礎底深さ、基礎外周長 基礎面積、杭種、杭径、杭長、杭本数
	地盤情報	微地形区分・AVS30 (J-SHIS <sup>3)</sup> ) 地盤種別、柱状図の有無
MeSO-net		微地形区分・AVS30 (J-SHIS <sup>3)</sup> )

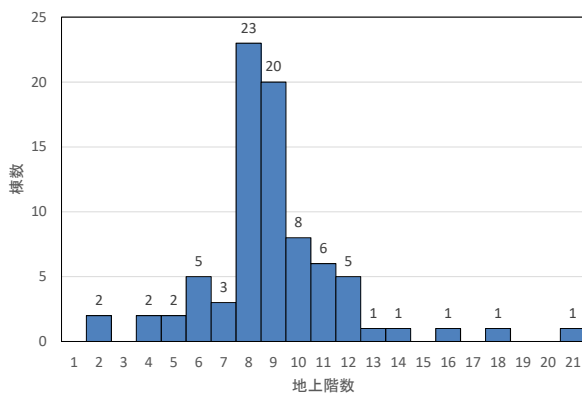


図 1-4 地上階数別の棟数分布

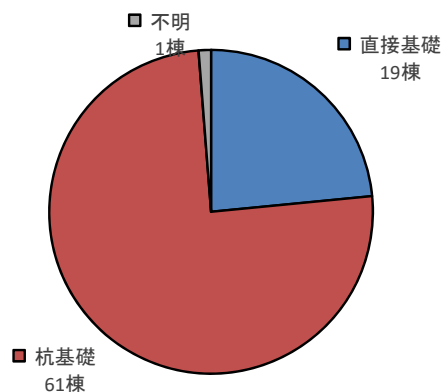


図 1-5 基礎形式別の棟数分布

## 1.1.d 建物入力地震動の評価法の技術開発

### d.1 加速度応答スペクトル比の算出

建物観測記録は建物の主軸方向 (X/Y 方向) の記録であり MeSO-net 観測記録 (NS/EW 方向) と方位が異なる。そのため、観測建物の主軸方向の方位を基準とし、対応する MeSO-net 観測記録を回転変換する。MeSO-net 地震計の設置方位は加納ら (2015) [4] を参照した。

方位変換の後、建物観測記録と MeSO-net 観測記録の加速度応答スペクトル ( $h=0.05$ ) を算出した。また、算出した加速度応答スペクトルに対し、同一地震による近接 MeSO-net 観測記録に対する建物観測記録の加速度応答スペクトルの比率である加速度応答スペクトル比を算出した。

### d.2 各観測建物の加速度応答スペクトル比

#### 1) 建物毎の対数平均・対数標準偏差

各観測建物で得られた加速度応答スペクトル比から、加速度応答スペクトル比の対数平均と対数標準偏差を算出する。まず、各主軸方向 (X/Y 方向) について対数平均、対数標準偏差を算出したが、多くの建物で方向に因る差異は小さいことが確認できた。そのため、方向を区分せず、2 方向の記録を独立な個別の記録として扱い、対数平均  $\mu_i(T)$ 、対数標準偏差  $\sigma_i(T)$  を算出した。

各観測建物の加速度応答スペクトル比の対数平均  $\mu_i(T)$ 、対数標準偏差  $\sigma_i(T)$  の例を図 1-7 に示す。

#### 2) MeSO-net 観測点と建物間距離によるばらつき

1) で算出した各観測建物の加速度応答スペクトル比は、同一の観測建物であっても観測地震間でばらつきがあり、そのばらつきの程度は対数標準偏差  $\sigma_i(T)$  により表される。

観測点間距離 (観測建物と MeSO-net 観測点間の距離) と  $\sigma_i(T = 1.0s)$  の関係を図 1-6 に示す。観測点間距離が大きくなるにつれ、各周期での加速度応答スペクトル比のばらつきが大きくなっていることが読み取れる。

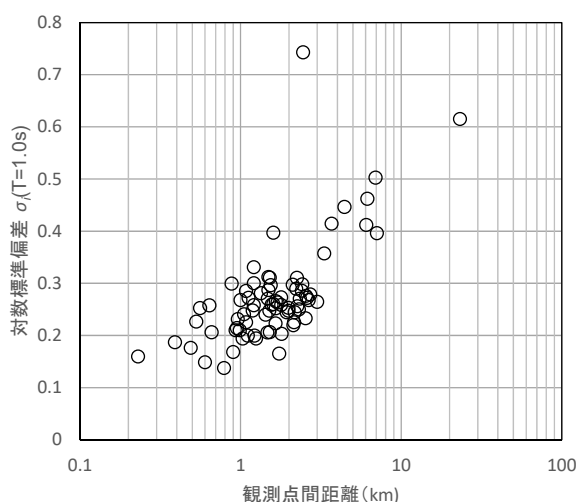
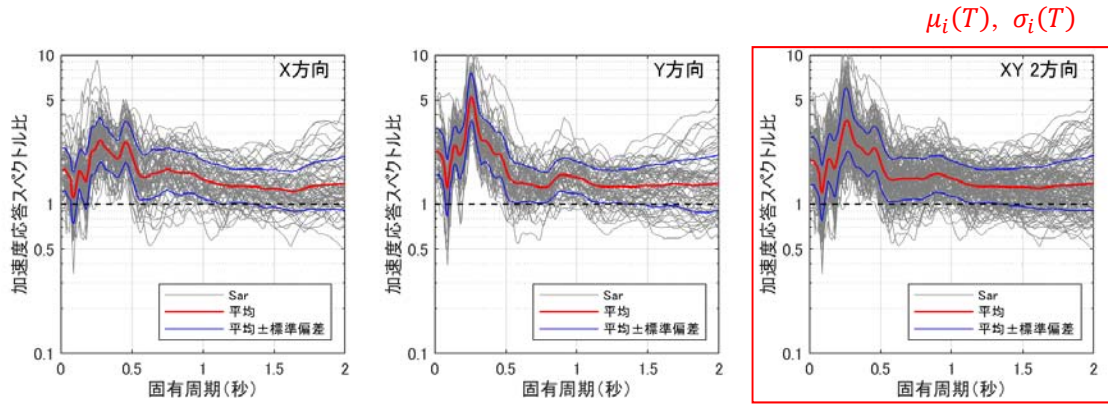
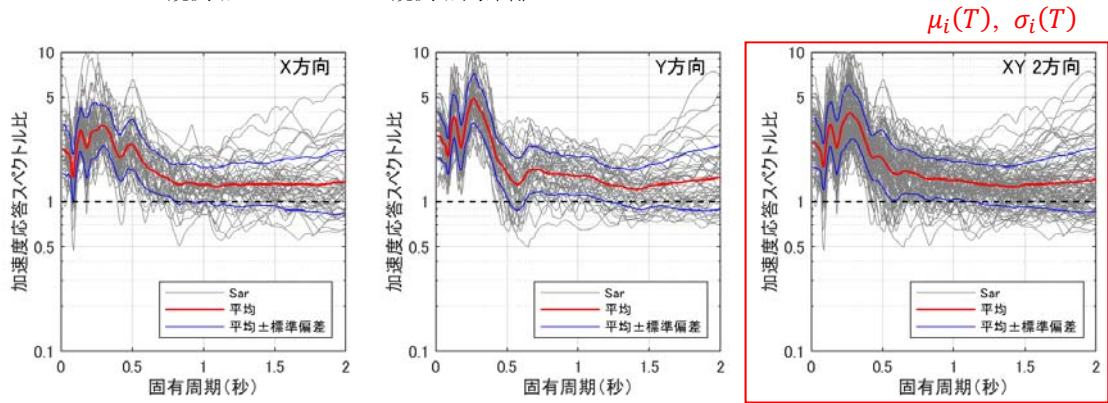


図 1-6 建物毎の観測点間距離と対数標準偏差 (T=1.0s)

a) 構造形式：SRC造 階数：地上11階、地下1階 (観測地震数：70)  
 基礎形式：杭基礎 観測階：地上1階  
 MeSO-net 観測点：E.KHDM 観測点間距離：2.34 km



b) 構造形式：SRC造 階数：地上8階、地下1階 (観測地震数：50)  
 基礎形式：杭基礎 観測階：地上1階  
 MeSO-net 観測点：E.KHDM 観測点間距離：2.41 km



c) 構造形式：S造 階数：地上11階、地下5階 (観測地震数：8)  
 基礎形式：杭基礎 観測階：地上1階  
 MeSO-net 観測点：E.YKKM 観測点間距離：1.21 km

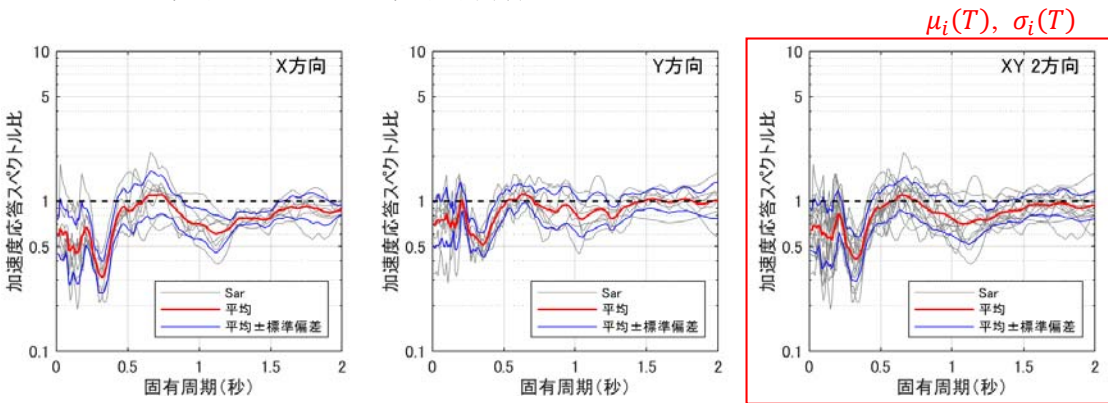


図 1-7 各建物の加速度応答スペクトル比の例

### d.3 加速度応答スペクトル比のクラスター分析

各観測建物で得られた平均加速度応答スペクトル比 $\mu_i(T)$ の決定要因を探索するため、 $\mu_i(T)$  ( $0.2s \leq T \leq 1.5s$ )を対数刻みで10点抽出し、距離計量をユークリッド距離とするウォード法<sup>5)</sup>による階層クラスタリングを用いた。

81 建物の $\mu_i(T)$ を4つのクラスターに分類した結果を図 1-8 に示す。各クラスターに属する建物群について、1.1.c で収集した関連情報ごとの棟数分布を確認した結果、同一の MeSO-net 観測点を参照する建物群は同一のクラスターに属する傾向がみられた。MeSO-net 観測点の特性が支配的であると考えられるため、MeSO-net 観測記録に含まれる地盤増幅や反射波の影響について、今後の検討を要する。

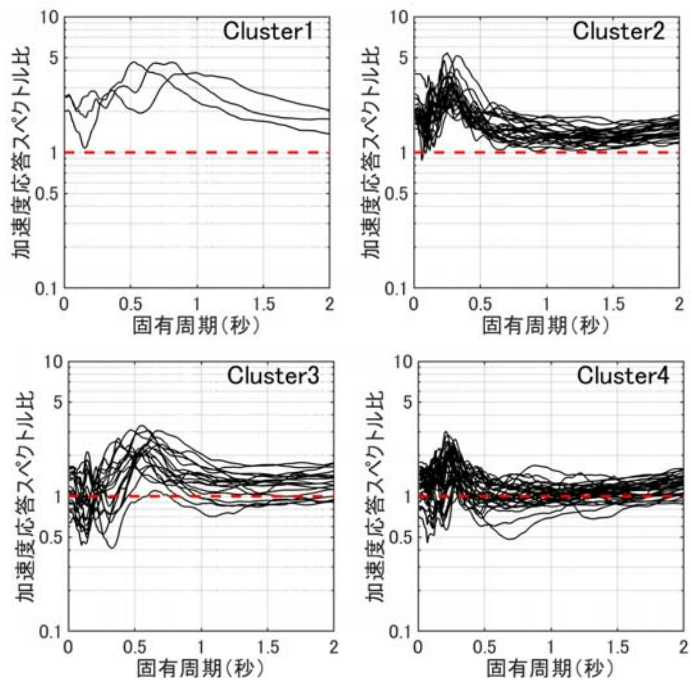


図 1-8 各クラスターに属する平均加速度応答スペクトル比

### d.4 MeSO-net 観測点ごとの平均加速度応答スペクトル比

同一の MeSO-net を参照する建物群の加速度応答スペクトル比に着目し、統計処理することで特定の MeSO-net 周辺に所在する建物群の加速度応答スペクトル比の特性を把握することを目的とする。対象とする MeSO-net 観測点は、地震観測回数5回以上の観測建物が距離 5km 以内に複数存在する観測点とする。条件に当てはまる MeSO-net 観測点は、本研究で対象とした 39 地点中 14 地点となる。

上記条件に該当する MeSO-net 観測点 $j$ を参照する  $n$  棟の建物群を対象とし、建物 $i$  ( $1 \leq i \leq n$ )の平均加速度応答スペクトル比 $\mu_i(T)$ 、標準偏差 $\sigma_i(T)$ から MeSO-net 観測点 $j$ における平均加速度応答スペクトル比 $\bar{\mu}_j(T)$ 、標準偏差 $\bar{\sigma}_j(T)$ を(1.1)式により算出する。

$$\begin{cases} \bar{\mu}_j(T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i(T) \\ \bar{\sigma}_j^2(T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2(T) + \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mu_i(T) - \bar{\mu}_j(T))^2 \\ \quad = \bar{\sigma}_{E,j}^2(T) + \bar{\sigma}_{B,j}^2(T) \end{cases} \quad (1.1)$$



ここで、MeSO-net 観測点における平均加速度応答スペクトル比のばらつきを表す $\bar{\sigma}_j(T)$ は、第1項である $\overline{\sigma_{E_j}^2}(T)$ と、第2項である $\overline{\sigma_{B_j}^2}(T)$ により決定される。第1項の $\overline{\sigma_{E_j}^2}(T)$ は、各建物*i*の加速度応答スペクトル比が観測地震間で持つばらつきの平均値を示している。また、第2項の $\overline{\sigma_{B_j}^2}(T)$ は、各建物*i*の平均加速度応答スペクトル比 $\mu_i(T)$ が異なることによるばらつきを示している。

図 1-9、図 1-10 に MeSO-net 観測点の平均加速度応答スペクトル比 $\bar{\mu}_j(T)$ の例を示す。

各図左側には、各建物の平均加速度応答スペクトル比 $\mu_i(T)$  (灰線)、対象 MeSO-net を参照する建物群の平均加速度応答スペクトル比 $\bar{\mu}_j(T)$  (赤線)、ばらつきの範囲 $\bar{\mu}_j(T) \pm \bar{\sigma}_j(T)$  (青線)、観測地震間のばらつきによる範囲 $\bar{\mu}_j(T) \pm \overline{\sigma_{E_j}}(T)$  (青破線)を示す。

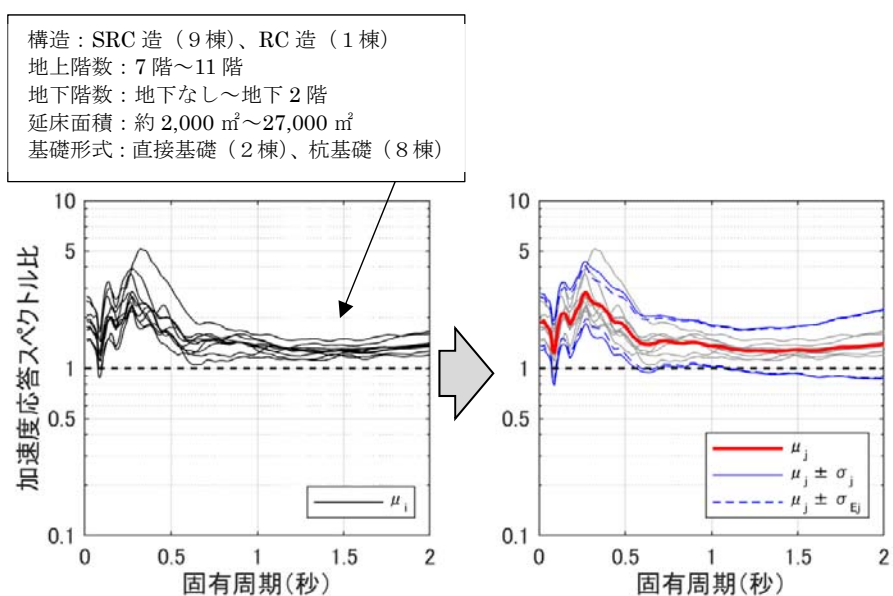


図 1-9 MeSO-net 近傍建物群の加速度応答スペクトル比 (観測点：E.KHDM)

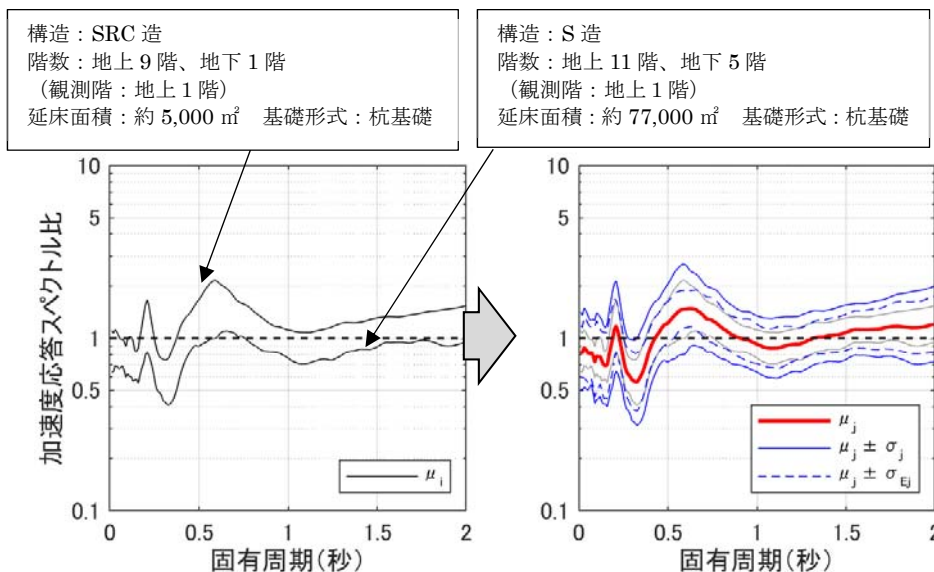


図 1-10 MeSO-net 近傍建物群の加速度応答スペクトル比 (観測点：E.YKKM)

各 MeSO-net における平均加速度応答スペクトルは、前述のとおり観測地震間で持つばらつきの平均値 $\overline{\sigma_{E_j}^2}(T)$ と、各建物の平均加速度応答スペクトル比のばらつき $\overline{\sigma_{B_j}^2}(T)$ に起因するばらつき $\overline{\sigma_j}(T)$ を持つ。このうち、各建物の平均加速度応答スペクトル比 $\mu_i(T)$ は、観測地震間で持つばらつきによって予測される誤差の範囲 $\overline{\mu_j}(T) \pm \overline{\sigma_{E_j}}(T)$ に概ね収まっていることが読み取れる。このことから、同一の MeSO-net 観測点を参照する建物群では、建物間の $\mu_i(T)$ の差異は地震ごとの違いに起因するばらつきに比して相対的に小さいと考えられる。そのため、本研究で行ったように同一 MeSO-net 観測点を参照する建物群の加速度応答スペクトル比から、各 MeSO-net 観測点を代表する加速度応答スペクトル比を作成することについては、一定の有用性があると考えられる。

しかしながら、このことは、地盤や上部構造、基礎構造などの建物ごとの個別性が建物入力地震動に影響を与えない、もしくは与える影響が十分に小さいことを意味するわけではなく、MeSO-net 観測点から 5km 以内にある建物群という地勢的な条件、また本研究で用いた建物群が非木造中高層建物を中心とする特性が背景にあると考えられる。

一方、例えば E.YKKM (図 1-10) では、建物 2 棟の平均加速度応答スペクトル $\mu_i(T)$ は $\overline{\mu_j}(T) \pm \overline{\sigma_{E_j}}(T)$ の範囲に概ね収まっているものの、明確に異なる振動特性を有すると考えられる。この 2 棟では、地下階数や建物規模が大きく異なり、建物への入力地震動に差があるためと考えられる。今後建物入力地震動の推定精度向上には建物の特性を考慮する必要性が示唆される。

## 1.2. 建物入力地震動の評価方法に関する検討会

1.1 の検討にあたり、構造工学における学術・技術上の観点、成果利用の観点から助言を受け、研究計画に沿った業務の総合的推進を図るため、2019 年 2 月 14 日に建築構造モニタリング等を専門とする学識経験者を加えた検討会を開催した。

## 2 結論及び今後の課題

### 2.1. 結論

- ・ 建物に入力する地震動の推定手法を開発するため、首都圏で地震観測を行っている建物 81 棟の観測最下層の地震観測記録と、首都圏地震観測網 (MeSO-net) の地震観測記録を収集、比較した。
- ・ 建物地震観測記録と MeSO-net 観測記録を加速度応答スペクトル比により比較した。各建物の加速度応答スペクトル比が観測地震間でもつばらつきは、建物と MeSO-net 観測点間の距離が増すに応じて大きくなることが確認された。
- ・ 各建物の平均加速度応答スペクトル比は、建物の立地する地盤条件、建物や地盤との相互作用を含む振動特性、MeSO-net 観測点の振動特性の影響を受けていると推測される。
- ・ 特に、本研究の対象とした建物群では、同一 MeSO-net 周辺に所在する建物群の地盤や振動特性に類似性があることが影響し、同一 MeSO-net 観測点を参照する建物群では、類似した加速度応答スペクトル比が得られた。
- ・ 同一の MeSO-net 観測点を参照する建物群に対し、建物群の平均加速度応答スペクトル比とそのばらつきを評価した。同一 MeSO-net 観測点を参照する建物群では、観測地震間で生じるばらつきの範囲に、各建物の平均加速度応答スペクトル比が含まれていることから、各建物の違いは相対的に小さいものと判断した。これは、建物群の類似性が多分に影響しているものと考えられる。
- ・ 建物観測記録を用い、14 地点の MeSO-net 観測点において、MeSO-net 観測記録と入力地震動の関係を構築した。これらの MeSO-net 観測点周辺の建物について、地震発生後には、この関係性を用いて建物入力地震動を推定することが可能となった。

### 2.2. 今後の課題

- ・ 近傍に十分な観測建物のない MeSO-net 観測点に適用可能な入力地震動推定手法を開発することが望ましい。
- ・ MeSO-net 観測点と建物の距離に応じ、加速度応答スペクトル比のばらつきが大きくなる。今後は、ばらつきの程度を観測点間距離などのパラメータから評価する手法を開発し、推定結果の信頼性を評価できることが望ましい。

### 3 引用文献

- [1] 気象庁震度データベース (<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>)
- [2] 防災科学技術研究所 Hi-net ([http://www.hinet.bosai.go.jp/about\\_data/?LANG=ja](http://www.hinet.bosai.go.jp/about_data/?LANG=ja))
- [3] J-SHIS 地震ハザードステーション 表層地盤データ V3 (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/download.html?lang=jp>)

<参考文献>

- (1) 若松加寿江・松岡昌志(2013) : 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 地震工学会誌 No.18, pp.35-38.
  - (2) Wakamatsu, K. and Matsuoka, M. (2013): " Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and Vs30 Zoning", Journal of Disaster Research Vol.8 No.5, pp.904-911.
  - (3) 松岡昌志・若松加寿江(2008) : 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号 H20PRO-936.
  - (4) 藤本一雄・翠川三郎(2006) : 近接観測点ペアの強震観測記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22.
- [4] 加納ら : 首都圏地震観測網 (MeSO-net) 地震計の設置方位の検証、日本地震学会 地震 2、68、31-44、2015
  - [5] Ward JH: Hierarchical grouping to optimize an objective function, J Amer Statist Assoc, 1963

以上