

地震観測データを用いた対象建築物の固有周期および高さ方向モード形状の評価

Evaluation of Predominant Period and Vertical Mode Shape of Target Building using Earthquake Observation Data

崔 琥*、丸田 誠*

Ho CHOI and Makoto MARUTA

Abstract: The seismometers were installed on each floor of the architecture department building and ground in this university. In this paper, the predominant periods and vertical mode shapes of the architecture department building are estimated using the third measured earthquake data obtained by the installed seismometers. Furthermore, the predominant period of ground level was also calculated. As a result, the predominant periods of NS and EW directions of the building were determined as 0.30 – 0.31 sec. and 0.36 – 0.38 sec., and the predominant period of the ground were estimated as 0.69 sec.

1. はじめに

本学は 2017 年度に建築学科が新設されることとなり、鉄骨造 4 階建ての建築学科棟が 2017 年 3 月に新築された。その後、2017 年 12 月に建築学科棟の各階に地震計が、2019 年 3 月には周辺地盤用の地震計が設置された。

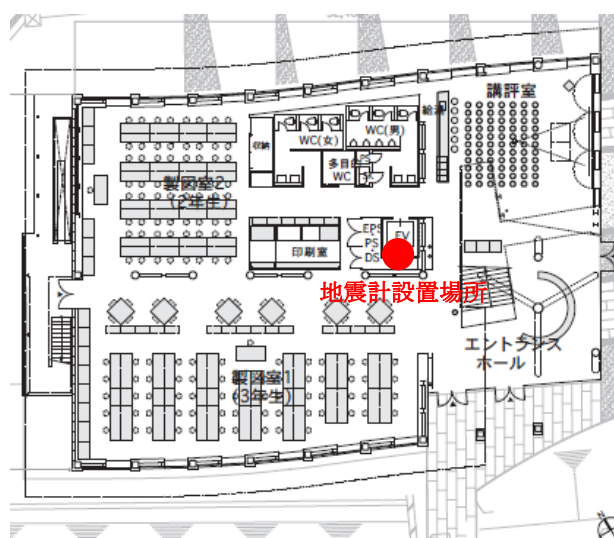
本稿では、本学の建築学科棟に設置された地震計で計測した 3 回の地震観測データを用い、建築学科棟の固有周期および建物の高さ方向のモード分布、地盤の周期について分析した結果を報告する。

2. 建築学科棟および地震計の設置状況

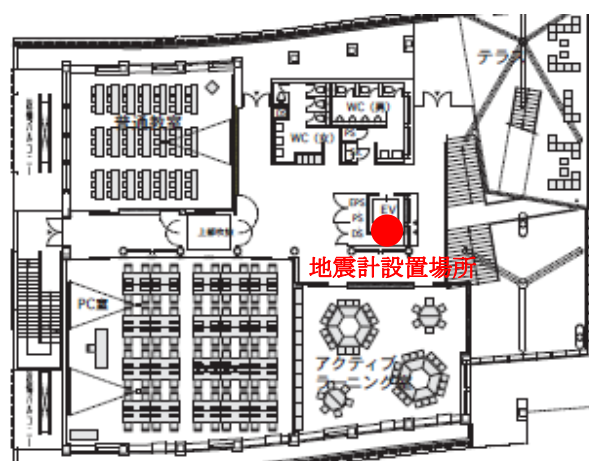
図 1 に建築学科棟の全景を、図 2 に建物の各階の平面図を、図 3 に建物の断面図を、図 4 に建物内の地震計の設置状況を、図 5 に建物周辺地盤の地震計の設置状況を、それぞれ示す。図 1 および図 2 に示すとおり、本建物は 1 階の南東側と 2 階の北東側に吹抜けを有している。図 2 および図 3 に示すように、地震計は建物のほぼ中央部に設置されていることがわかる。



図 1 建築学科棟の全景



(a) 1 階の平面図

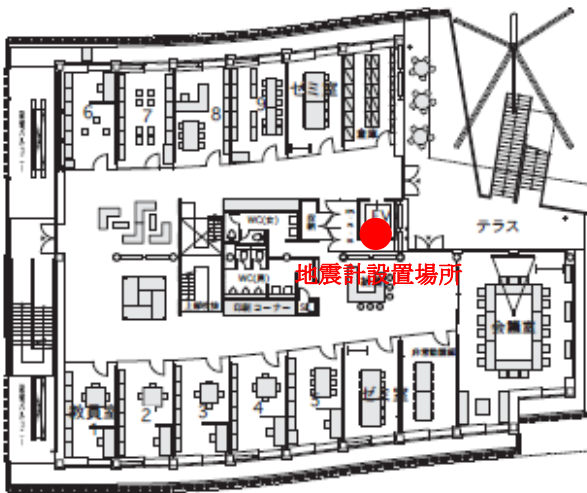


(b) 2 階の平面図

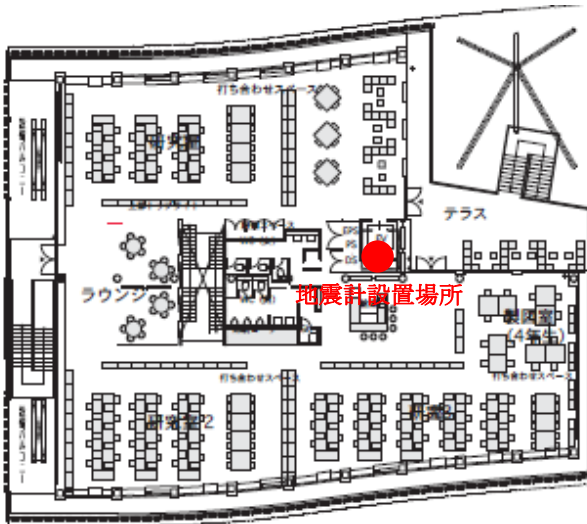
図 2 各階の平面図および地震計設置場所 (続く)

2021 年 5 月 10 日受理

* 理工学部 建築学科



(c) 3階の平面図



(d) 4階の平面図

図2 各階の平面図および地震計設置場所

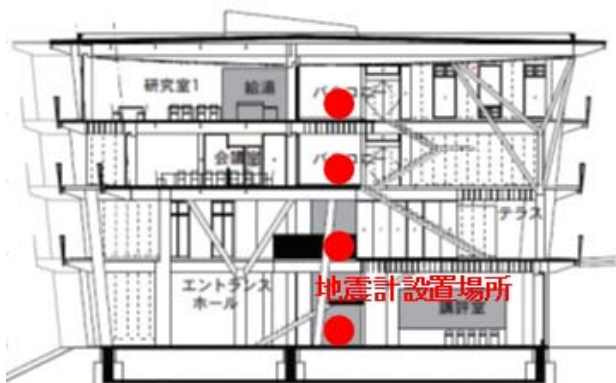


図3 断面図および地震計設置場所



図4 建物内の地震計の設置状況

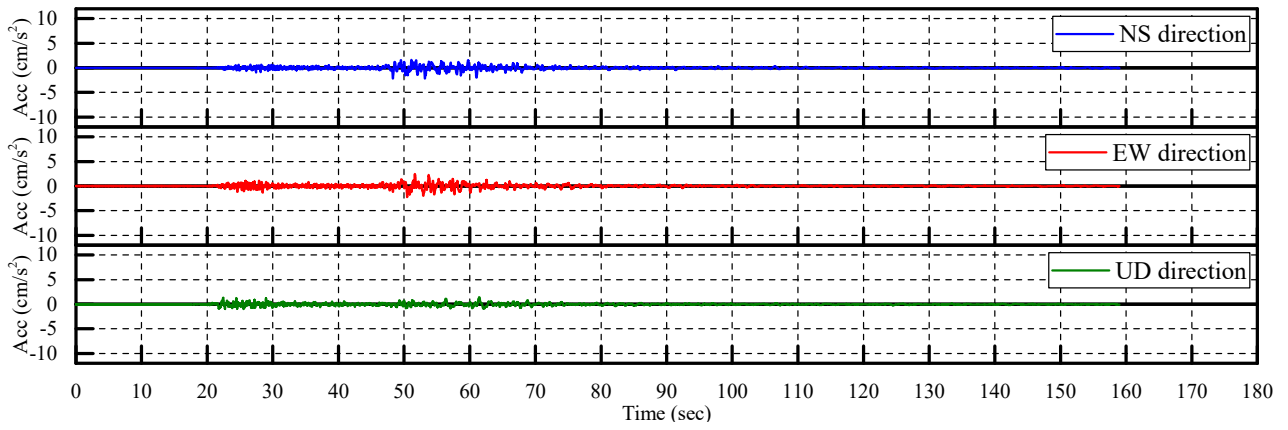


図5 建物周辺地盤の地震計の設置状況

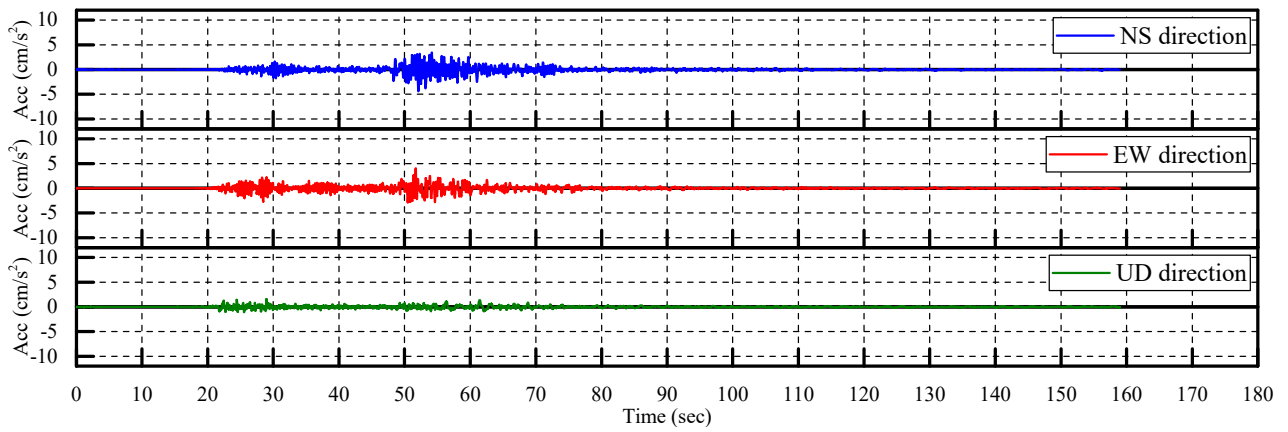
3. 計測された地震観測データ

建築学科棟に設置された地震計は、 $3\text{cm}/\text{sec}^2$ 以上の加速度が入力すると自動的に計測されるようにセッティングしており、これまで、地震発生により計測された地震観測は3回である。第1回目は2018年6月18日に発生した大阪府北部を震源とする地震発生時に、第2回目は2018年10月7日に愛知県東部を震源とする地震発生時に、第3回目は2020年9月27日に静岡県西部を震源とする地震発生時である。建築学科棟の各階で計測された各方向の各地震観測波形を図6～図8に示す。本建物が経験した最大加速度レベルは、図8に示す4階のEW方向で計測された $63.3\text{cm}/\text{s}^2$ と小さく、建物に損傷を与えるような加速度レベルは未だ経験していない。

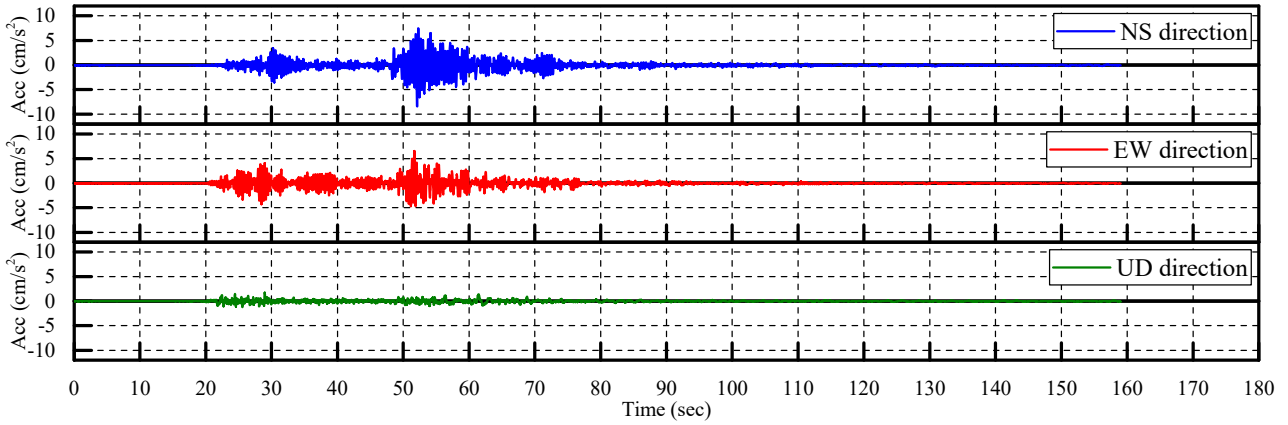
前述したとおり、2019年3月には周辺地盤用の地震計を設置しており、第3回目(2020年9月27日)の計測の際には地盤の観測データも計測された。その波形を図9に示す。



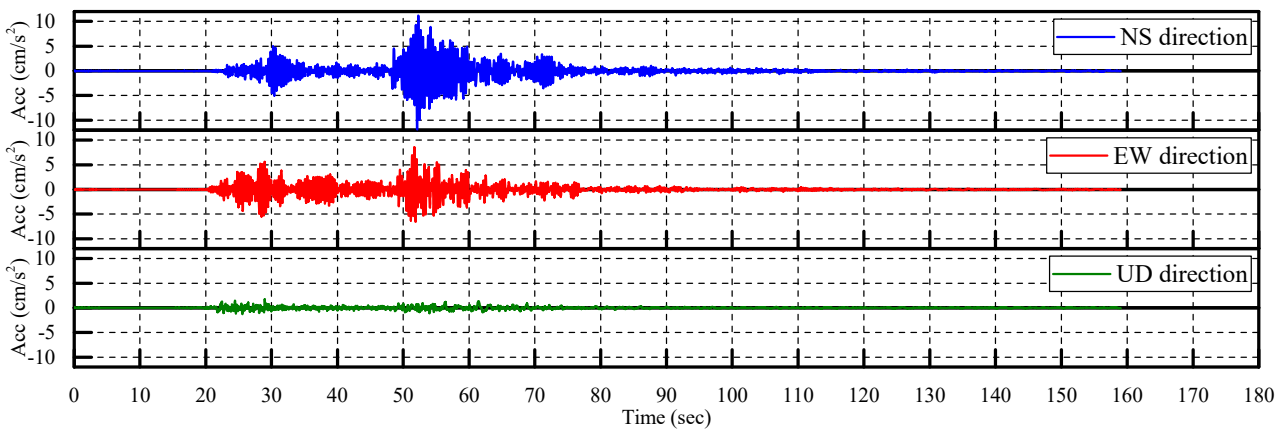
(a) 1階



(b) 2階

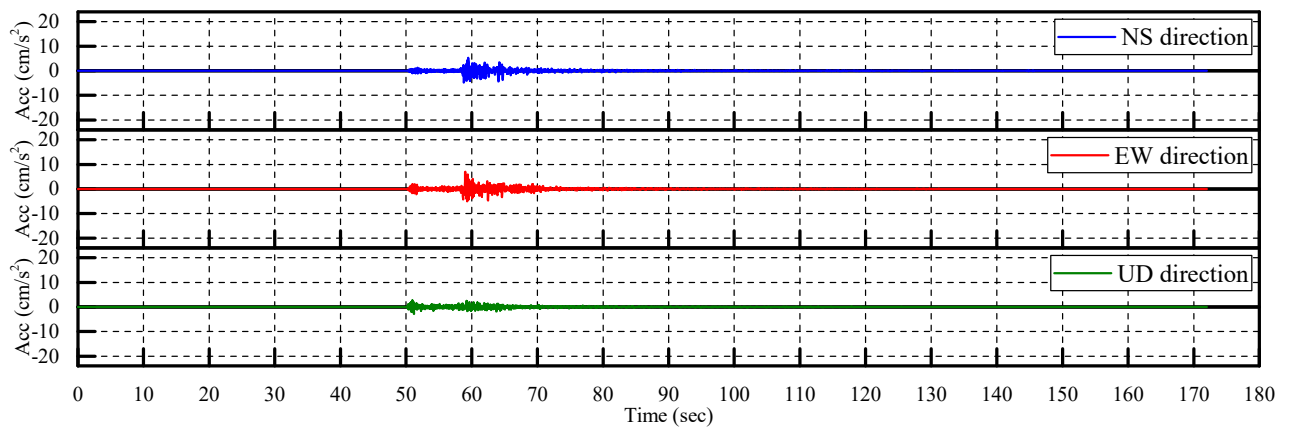


(c) 3階

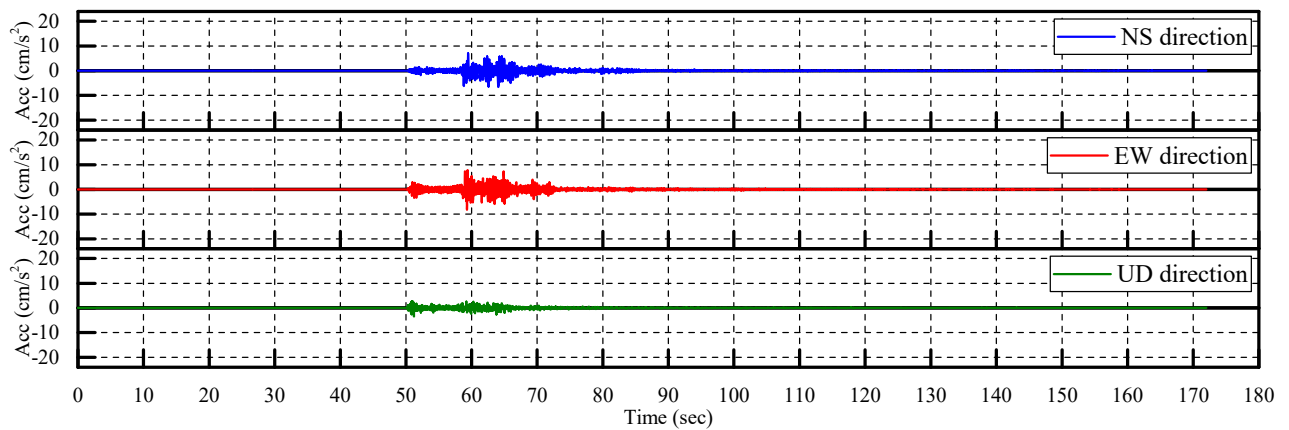


(d) 4階

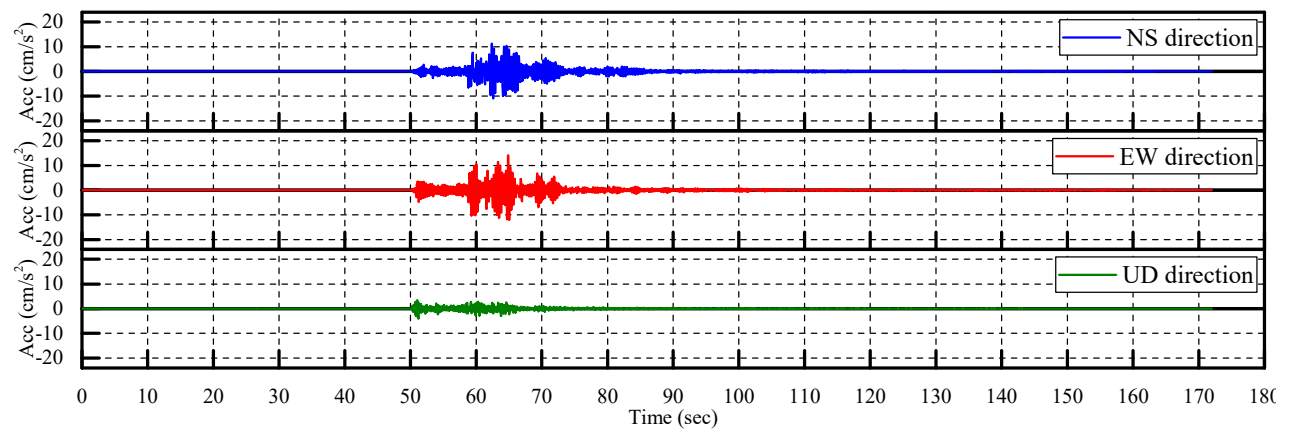
図6 2018年6月18日の地震観測データ



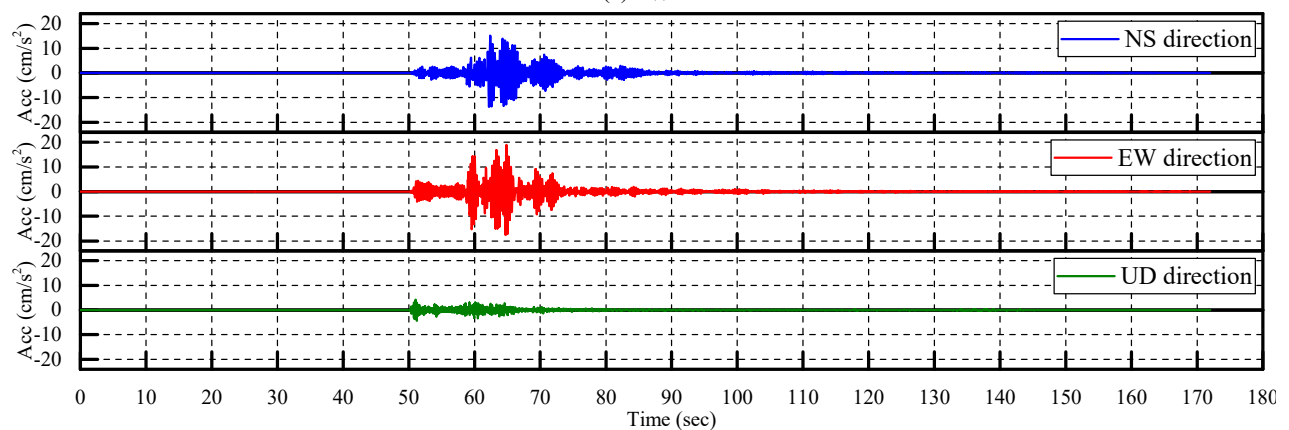
(a) 1階



(b) 2階

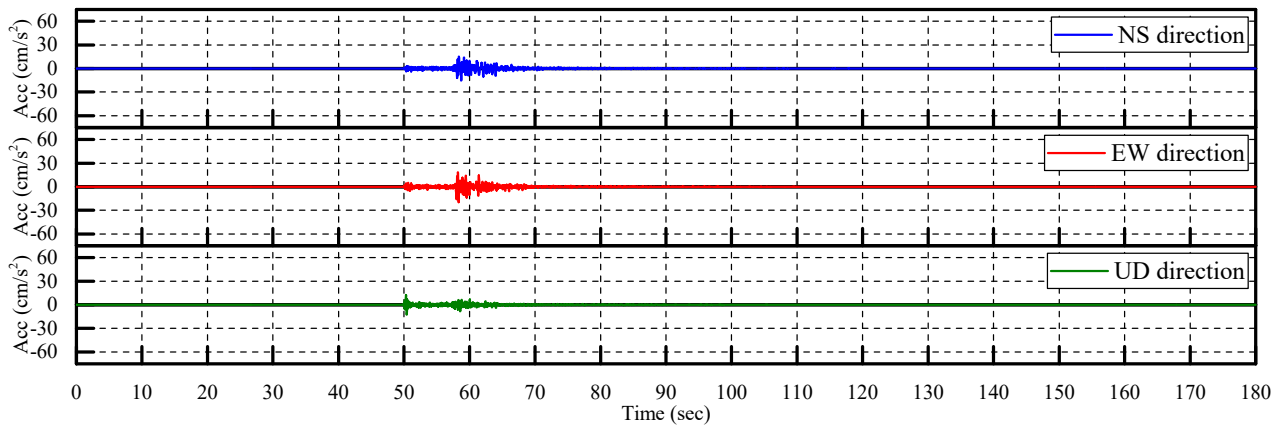


(c) 3階

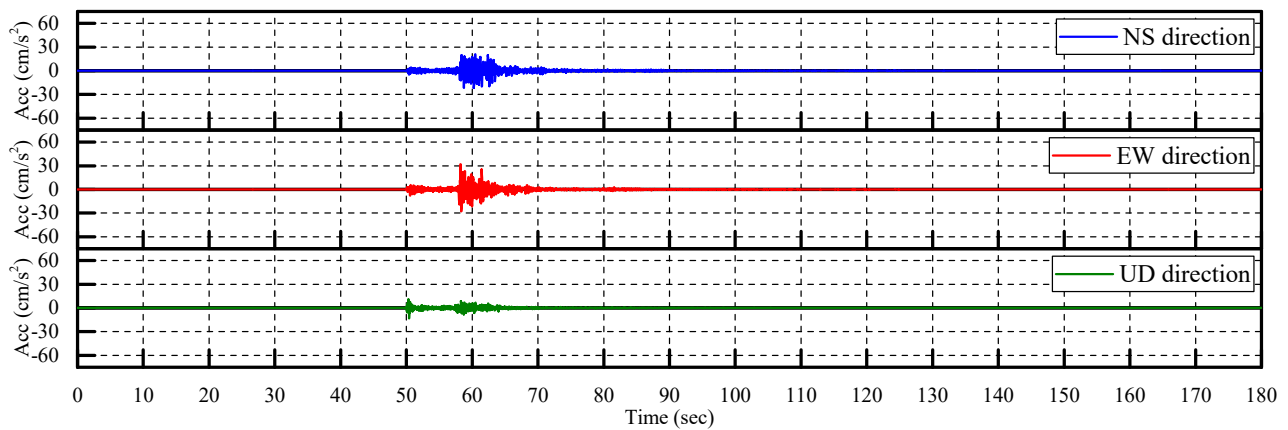


(d) 4階

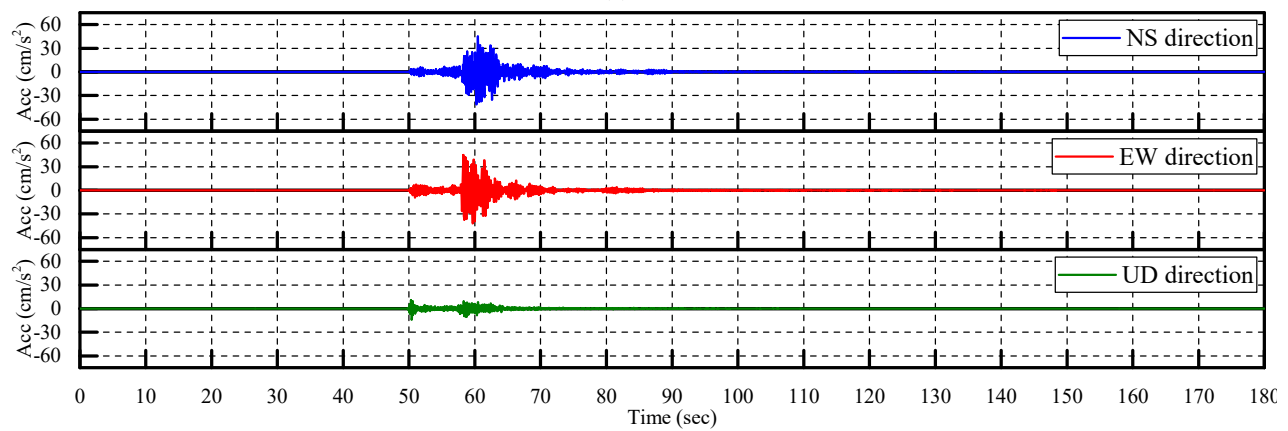
図7 2018年10月17日の地震観測データ



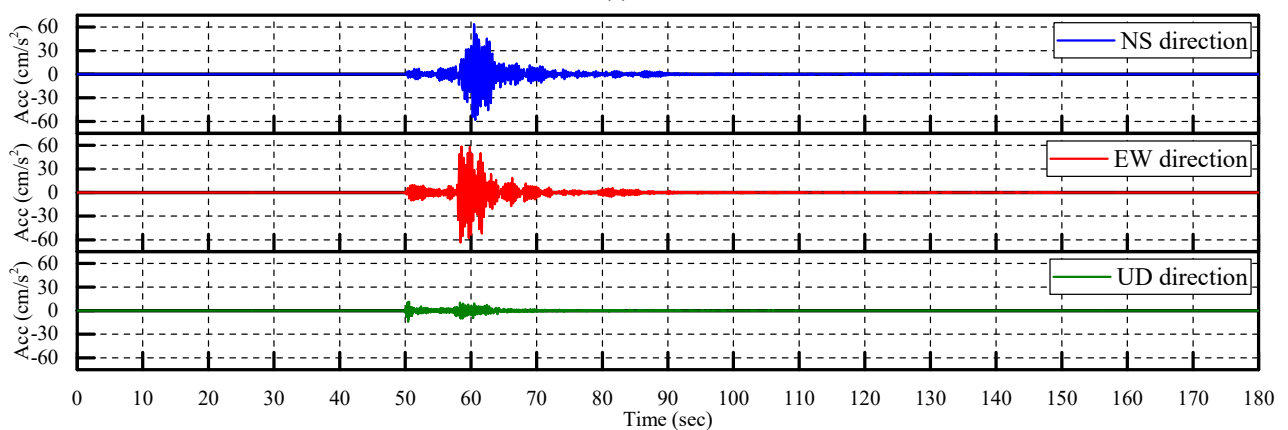
(a) 1階



(b) 2階



(c) 3階



(d) 4階

図8 2020年9月27日の地震観測データ

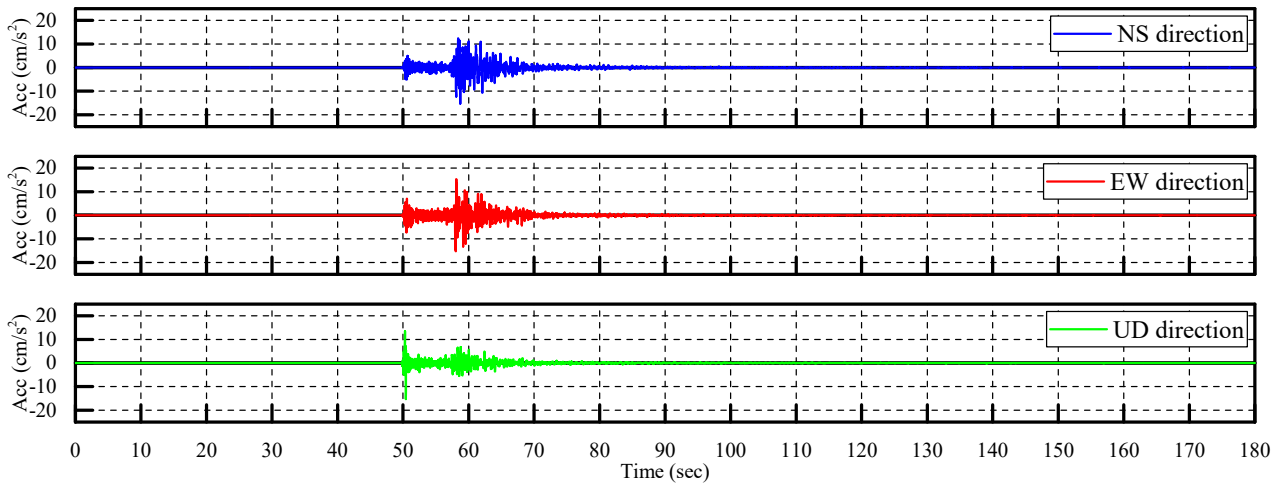


図9 地盤の地震観測データ (2020年9月27日)

4. 対象建物の固有周期および高さ方向のモード形状

4.1 対象建物の固有周期

対象建物の固有周期を把握するため、計測された加速度データを用い、フーリエ解析を行った。図10に1階に対する4階の加速度データの水平成分のフーリエスペクトルの比（伝達関数）を示す。同図に示すとおり、3回の計測とも、NS方向およびEW方向の周期がほぼ同程度で、フーリエスペクトル比波形もほぼ同程度であった。この結果から、本建物の1次固有周期は、NS方向では0.30～0.31sec、EW方向では約0.36～0.38secであると思われる。一方、一般的な鉄骨造建物の1次固有周期は $T=0.02H$ （ H ：建物の全高（m））で簡易的に表されるため、 $H=16.2m$ の

本建物では $T=0.32sec$ となり、図10の結果と概ね一致した。

図10より、2次、3次、4次固有周期は顕著に現れておらず、これは前述したように1階の南東側と2階の北東側に設けた吹抜け等の影響であると推察される（図1および図2参照）。また、NS方向の0.36sec付近とEW方向の0.30sec付近にもスペクトル比が大きくなっており、これは2カ所の吹抜けの設置や補強ブレースの設置によるねじれ挙動に起因するものと推察される。現在、地震計は各階の中央部にのみ設置されているため、ねじれ挙動については評価できていないが、微動計を用いた計測を別途行い、今後ねじれ挙動についても計測および検討を行う予定である。

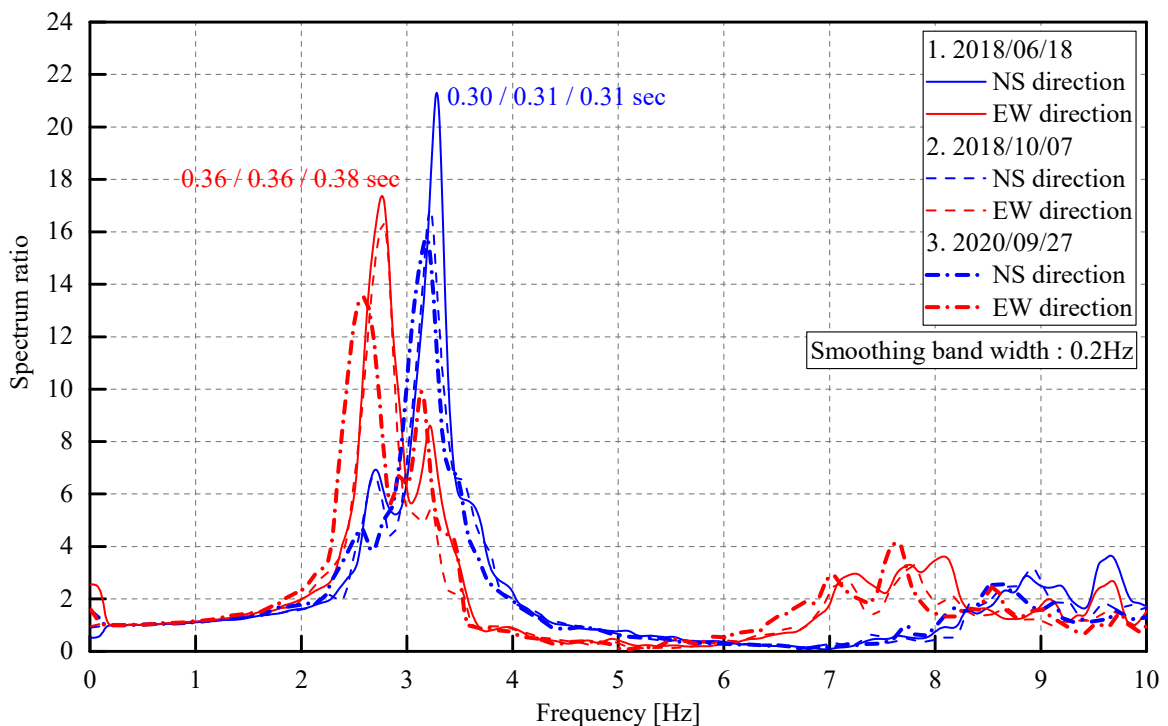


図10 フーリエスペクトル比による建築学科棟の固有周期

4.2 対象建物の高さ方向のモード形状

本稿では、高さ方向のモード形状を以下の方法で推定することとした。

(1) 振幅の評価方法

振幅を評価するにあたり、図 11 に示すようなある同じ振動数をもって振動している 2 つの波があるとする。これらの波は位相差が生じているため、振幅がピークを迎える時刻は同じにならない。すなわち、ある時刻 (t) におけるこれらの波の振幅はピーク値を抽出するだけでは不十分であり、位相差 ($\Delta\theta$) による補正を行う必要がある。従って、片方の波の振幅 (B) がピークの時、もう一方の波の振幅はピーク時の振幅 (A) に位相差 ($\Delta\theta$) の余弦を乗じる ($A\cos\Delta\theta$) ことで求められる。具体的には(2)で詳述する。

(2) 振幅のピークと位相差の関係

N 個のデータ点を通る波形 $x(t)$ は、有限フーリエ近似式より、

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi(N/2)t}{N\Delta t}$$

ここで、N は標本数、 Δt は標本点間隔である。また、

$$f_k = \frac{k}{N\Delta t} \text{とおくと、}$$

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[A_k \cos 2\pi f_k t + B_k \sin 2\pi f_k t \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t$$

上式に含まれる $[A_k \cos 2\pi f_k t + B_k \sin 2\pi f_k t]$ は k 次の振動数を持って振動している波 $x_k(t)$ であり、元の波形の k 次の振動成分となる。

次に、この式を合成すると、

$$x_k(t) = A_k \cos 2\pi f_k t + B_k \sin 2\pi f_k t = X_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k)$$

$$\text{ただし、} X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \phi_k = \tan^{-1} \left(-\frac{B_k}{A_k} \right)$$

上式より、 X_k および ϕ_k が $x_k(t)$ の振幅および位相差に相当することがわかる。

ここで、新たに 2 種類の波形 $x_i(t)$, $x_j(t)$ について、それぞれ k 次の振動数を持って振動している成分を取り出すと、

$$x_{ik}(t) = X_{ik} \cos(2\pi f_k t + \phi_{ik})$$

$$x_{jk}(t) = X_{jk} \cos(2\pi f_k t + \phi_{jk})$$

ここで、 $x_{ik}(t) = X_{ik}$ のとき、

$$\cos(2\pi f_k t + \phi_{ik}) = 1 \Leftrightarrow 2\pi f_k t + \phi_{ik} = 0$$

これにより、

$$x_{jk}(t) = X_{jk} \cos(-\phi_{ik} + \phi_{jk}) = X_{jk} \cos \Delta\theta$$

従って、振幅を評価する際、 $A\cos\Delta\theta$ を用いることは理論上正しいことが証明された。

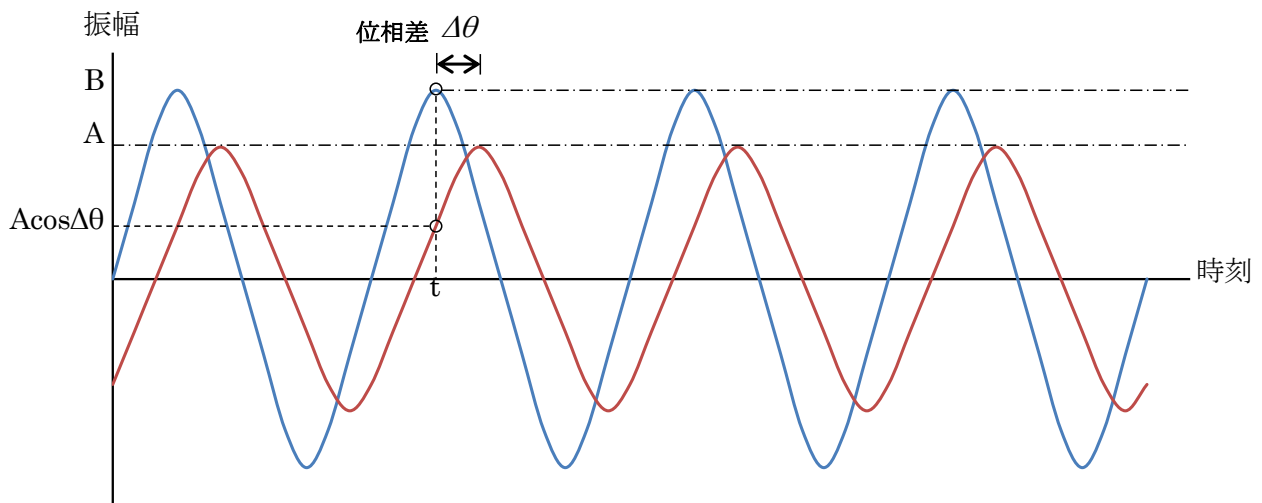


図 11 モード形状推定のための概念図

以上の検討結果を踏まえて、図 10 に示す各方向の 1 次固有周期における本建物の高さ方向の 1 次モード形状は図 12 に示すようになる。3 回の計測とも、また、両方向とも、一般的な 1 次モードのような形状を示していることがわかる。

一方、前述したとおり 2 次、3 次、4 次固有周期が明確に現れていないため、2 次モードから 4 次モードを求めることはできなかった。今後、建物のねじれ挙動を含めた計測を行い、本建物の振動形状を明らかにする予定である。

5. 対象建物周辺地盤の卓越周期

2019 年 3 月に設置された本建物の周辺地盤用の地震計から計測された 2020 年 9 月 27 日の観測データを用い、建物周辺地盤の卓越周期の推定を試みた。水平 2 方向のフーリエ振幅の 2 乗和平方根として得られるフーリエ振幅を鉛直方向のフーリエ振幅で除した H/V スペクトルを算出し、その結果を図 13 に示す。同図に示すように、対象建物周辺地盤の卓越周期は、0.69 秒程度で、やや柔らかい地盤であることが判明した。

6. まとめ

本稿では、本学の建築学科棟に設置された地震計から計測した 3 回の地震観測データを用い、建築学科棟の固有周期および建物の高さ方向のモード分布、地盤の周期について分析した。以下にその結果をまとめる。

- (1) 3 回の計測とも、NS 方向および EW 方向の周期がほぼ同程度で、本建物の 1 次固有周期は、NS 方向では 0.30~0.31sec、EW 方向では約 0.36~0.38sec であった。
- (2) 2 次、3 次、4 次固有周期は顕著に現れておらず、これは吹抜け等の影響であると推察される。
- (3) NS 方向の 0.36sec 付近と EW 方向の 0.30sec 付近にもスペクトル比が大きくなっているが、これは 2 カ所に設けた吹抜けや補強ブレースによるねじれ挙動に起因するものと推察される。
- (4) 各方向の 1 次固有周期における本建物の高さ方向の 1 次モード形状は、3 回の計測とも、また、両方向とも、一般的な 1 次モードのような形状を示した。
- (5) 対象建物周辺地盤の卓越周期は、0.69 秒程度で、やや柔らかい地盤であった。

今後、建物のねじれ挙動を含めた計測を行い、本建物の振動形状を明らかにする予定である。

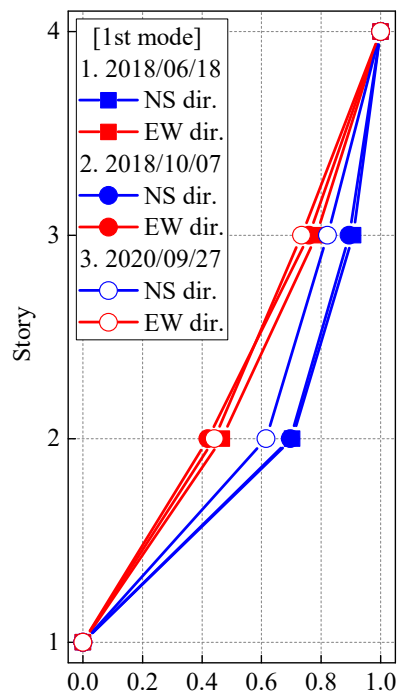


図 12 高さ方向の 1 次モード形状

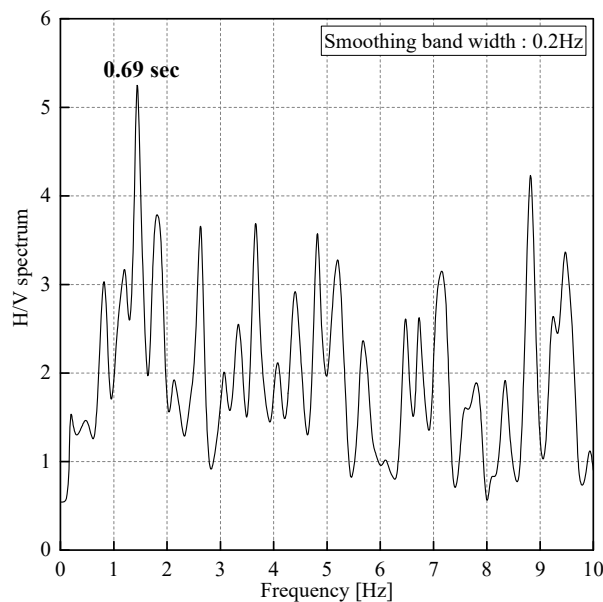


図 13 地盤の H/V スペクトル