

静岡県裾野市役所 常時微動測定報告書

目次

1. 調査概要

2. 常時微動測定
 - 2.1 建物概要
 - 2.2 測定方法および測定位置
 - 2.3 測定結果
 - 2.4 減衰特性

3. まとめ

1. 調査概要

本報告は、2008年11月8日に実施した静岡県裾野市市役所庁舎（昭和50年建設、地下1階、地上5階建ての鉄筋コンクリート造建物）の常時微動測定の結果をまとめたものである。調査の日程および調査メンバーは以下のとおりである。

■調査メンバー

中埜良昭（東京大学生産技術研究所 教授）
高橋典之（東京大学生産技術研究所 助教）
崔 琥（東京大学生産技術研究所 助教）
桑原里紗（東京大学生産技術研究所 大学院生）
権 淳日（東京大学生産技術研究所 研究生）

調査協力：

静岡県
裾野市
中山幹康（㈱中山建築設計事務所）
佐塚昌之（㈱HIテック）

■調査日程（2008年11月7日～11月8日）

2008年11月7日／晴れ時々曇り
14:50 東京大学生産技術研究所 出発（高橋・崔・桑原・権）
16:30 静岡県裾野市 到着
16:40 裾野市役所 外観調査
21:00 中埜教授 合流
23:00 裾野ステーションホテル泊

2008年11月8日／雨

8:30 裾野ステーションホテル発
8:40 裾野市役所着／調査計画打ち合わせ@裾野市役所4階会議室
9:00 ピックアップ設置予定箇所（地下1階、1階、5階）の視察
9:50 ピット内、風穴の視察
10:40 測定装置の準備および動作確認、作業手順の確認
11:40 計測ケース1の計測準備／計測
12:40 昼食
13:15 計測ケース2の計測準備／計測
15:15 計測ケース3の計測準備／計測
15:35 計測ケース4の計測準備／計測

16:10 計測ケース 5 の計測準備／計測
16:40 計測ケース 6 の計測準備／計測
17:40 計測ケース 7 の計測準備／計測
18:10 計測ケース 8 の計測準備／計測
18:40 測定装置撤収作業
19:10 裾野市役所 出発
20:30 東京大学生産技術研究所 到着

2. 常時微動測定

2.1 建物概要

静岡県裾野市庁舎は、地下1階、地上5階建ての鉄筋コンクリート造建物で、高さ24.95m、地下1階は張間方向が4スパン(27.8m)／桁行方向が10スパン(56.6m)、1階は張間方向が3スパン(27.8m)／桁行方向が10スパン(56.6m)、2階～5階は張間方向が2スパン(16.8m)／桁行方向が8スパン(44.6m)である。建物基礎下に風穴(裾野風穴第一・第二)が通る特異な地盤に建っている。図2-1に1階伏図、図2-2に5階伏図、図2-3に軸組図、写真2-1～2-2に市庁舎全景を示す。

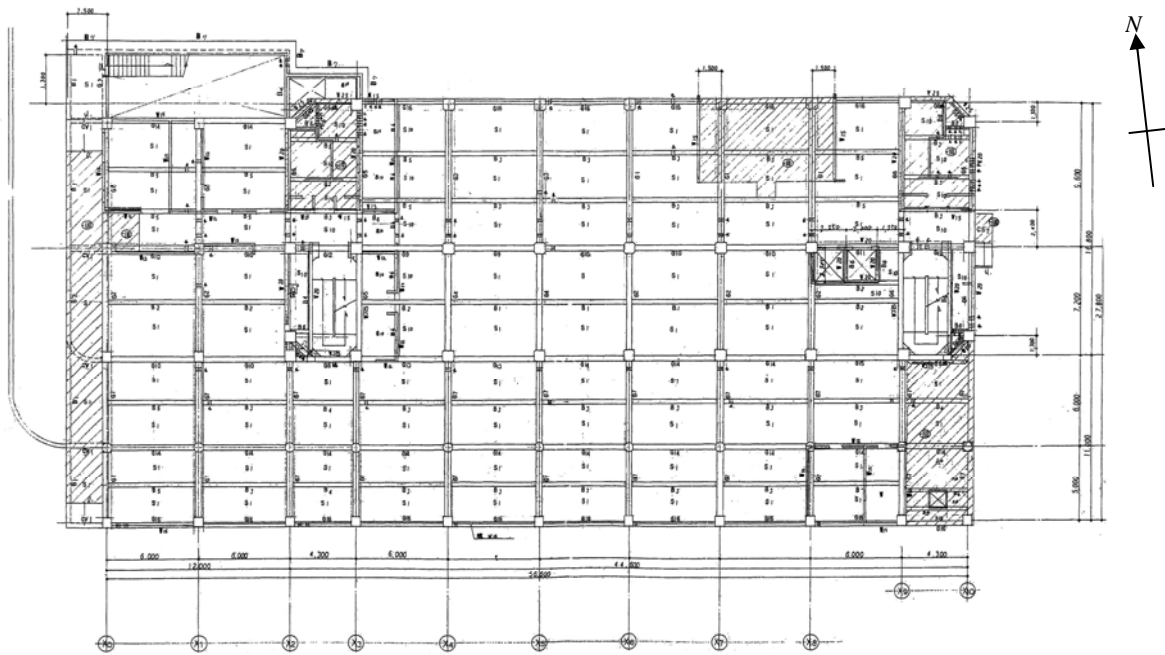


図2-1 1階伏図

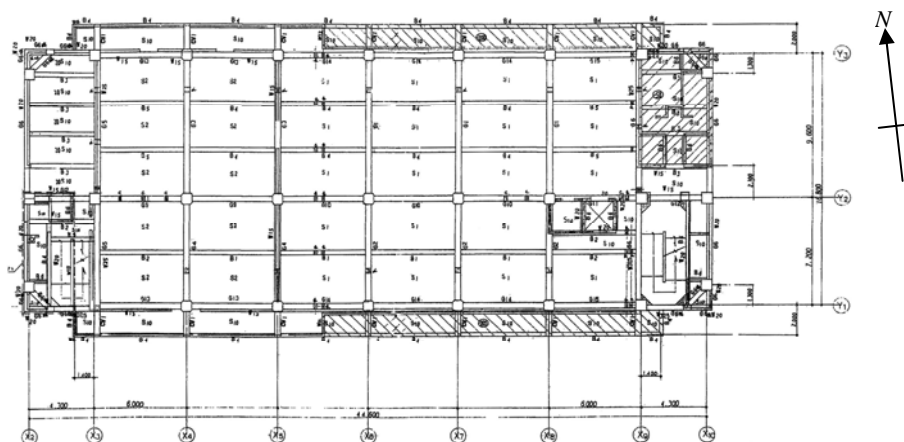


図2-2 5階伏図

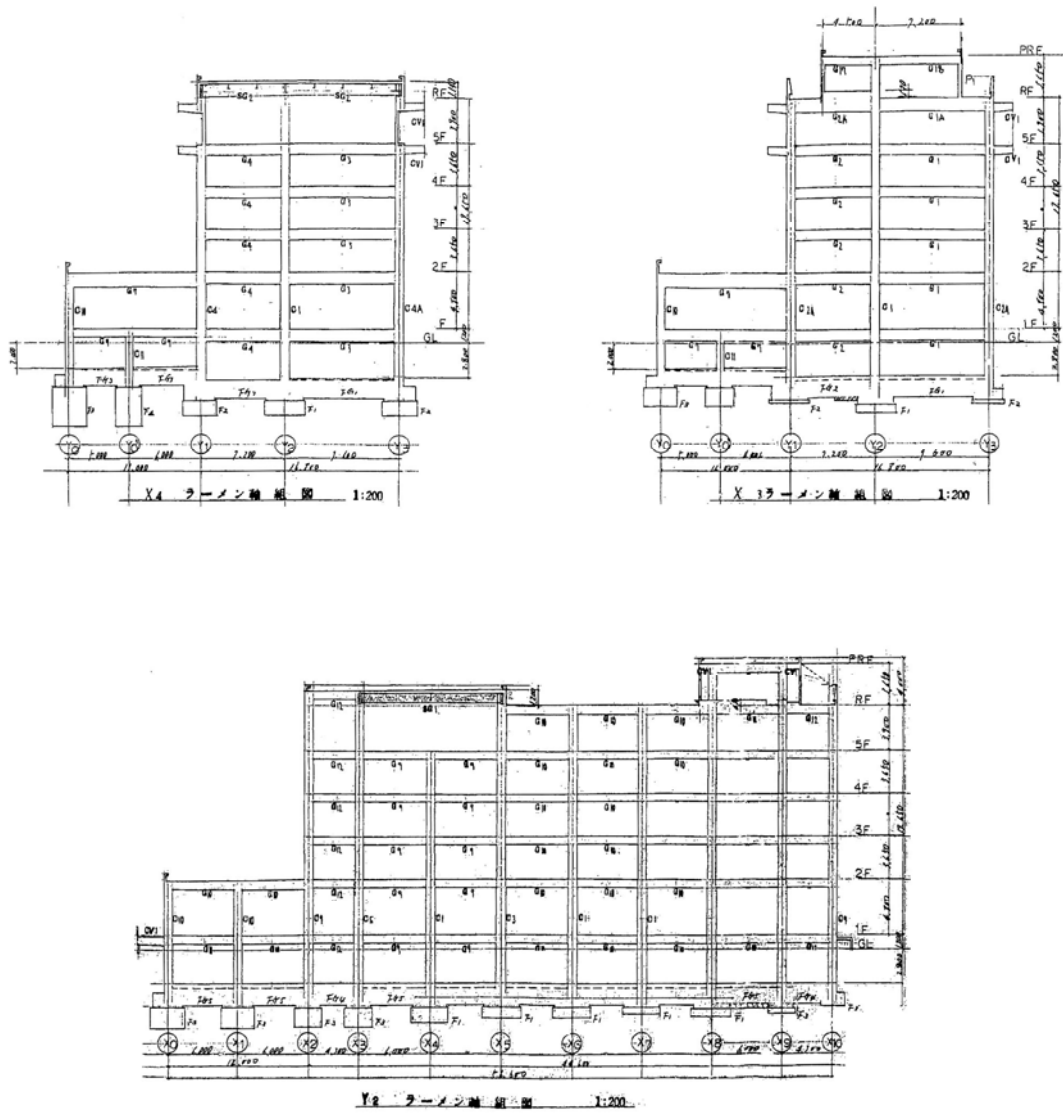


図 2-3 軸組図



写真 2-1 市庁舎全景（北西面）



写真 2-2 市庁舎全景（北面）

2.2 測定方法および測定位置

測定方法は，測定機器に収録器（物探サービス株式会社製 GEODAS-10-24DS）およびピックアップ（物探サービス株式会社製 ムービングコイル型速度計 CR4.5-2 型）を使用し，サンプリング周波数を 100Hz，収録時間を 300 秒間とした。

測定位置は図 2-4～2-11 に示す全 8 ケースとし，各計測ケースについて多点同時計測を実施した．測定時の様子を写真 2-3～2-4 に示す．

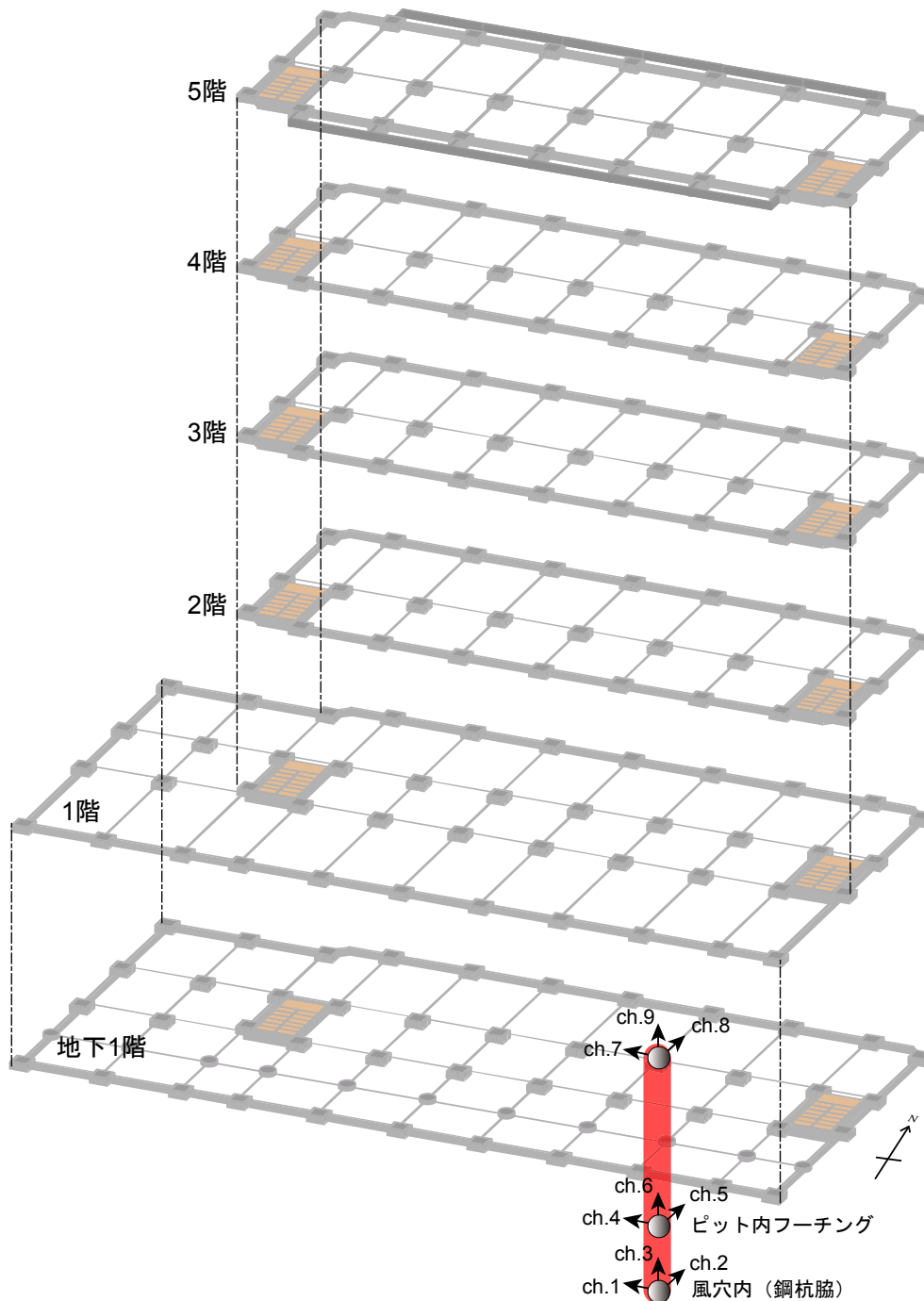


図 2-4 測定位置（計測ケース 1）

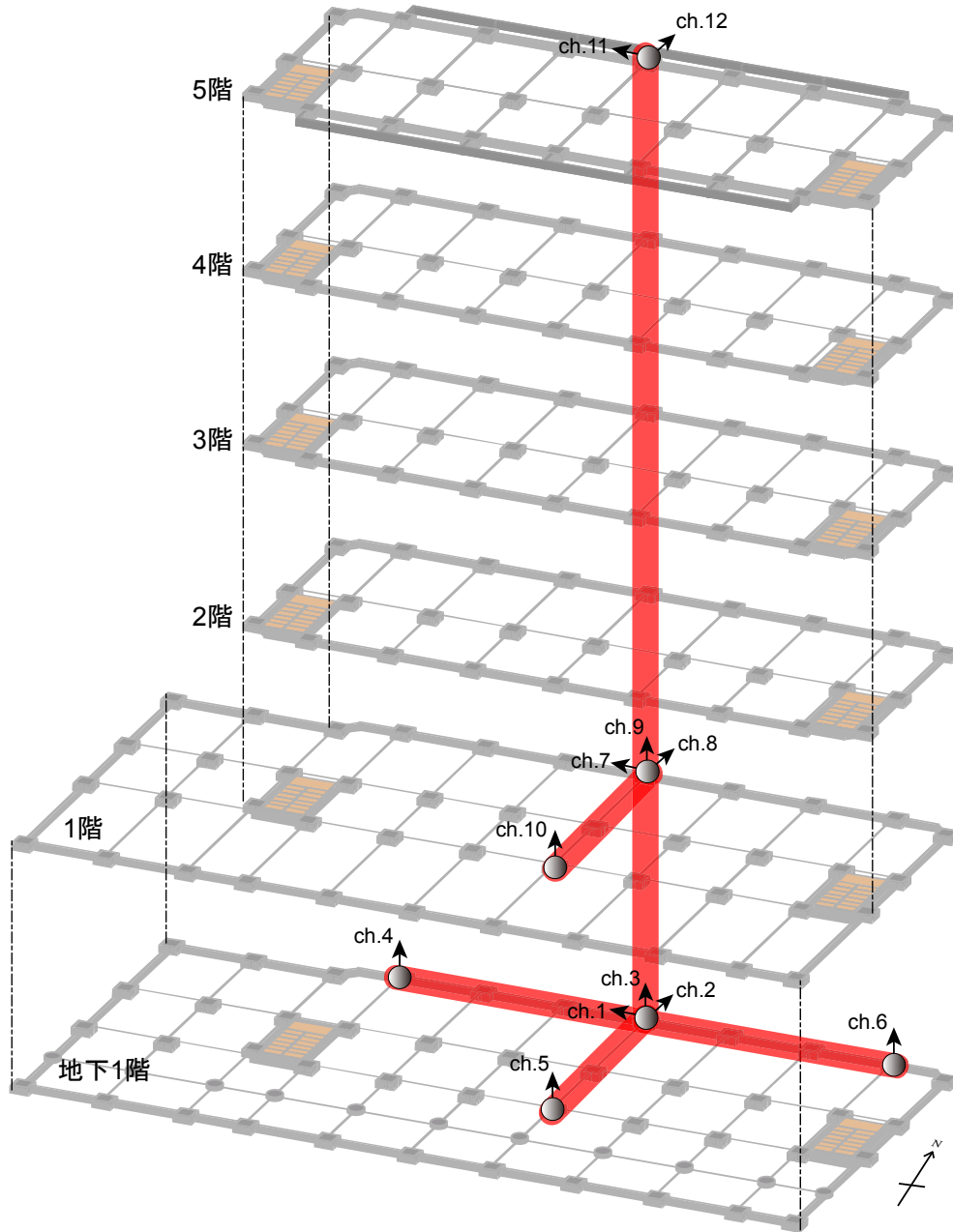


図 2-5 測定位置 (計測ケース 2)

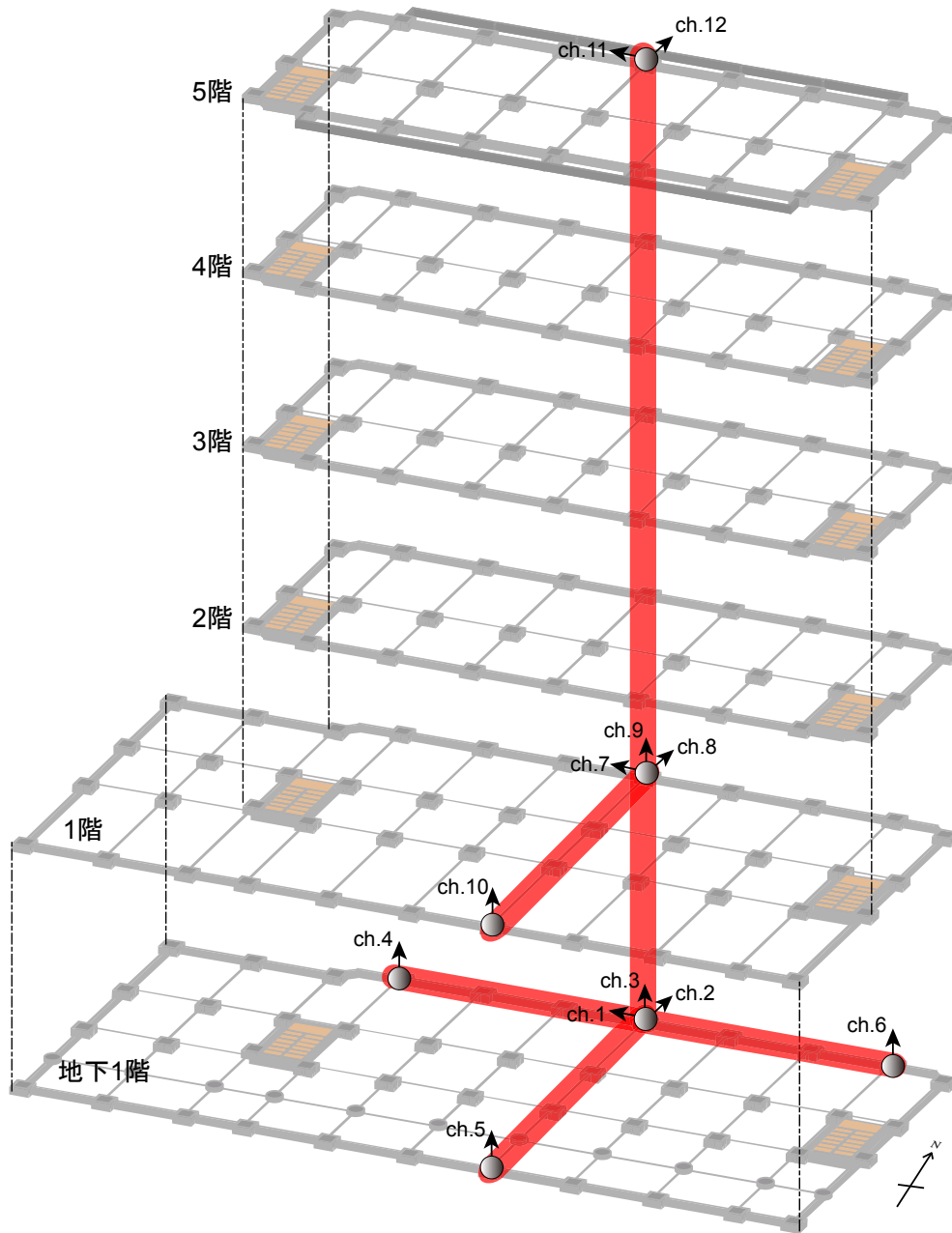


図 2-6 測定位置 (計測ケース 3)

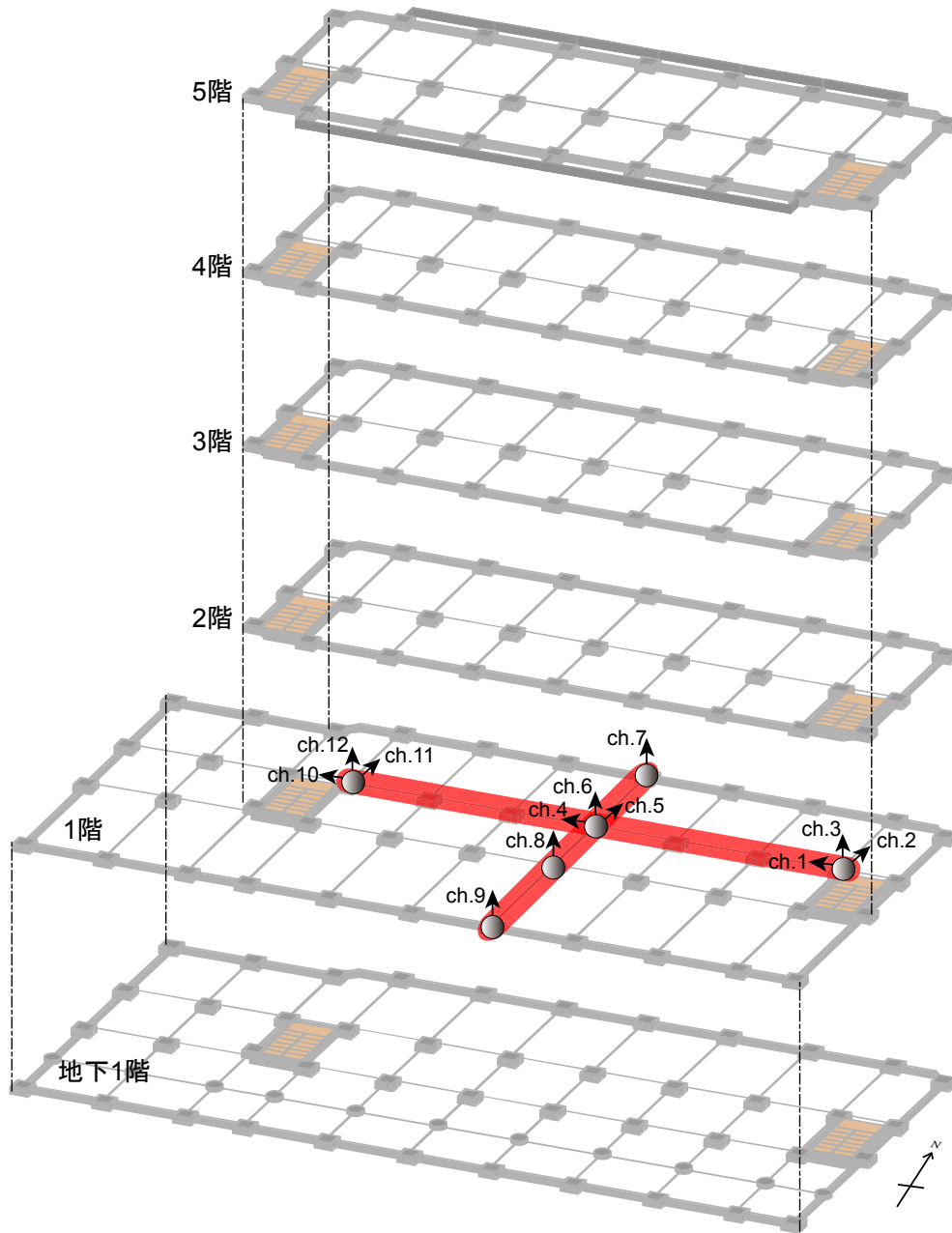


図 2-7 測定位置 (計測ケース 4)

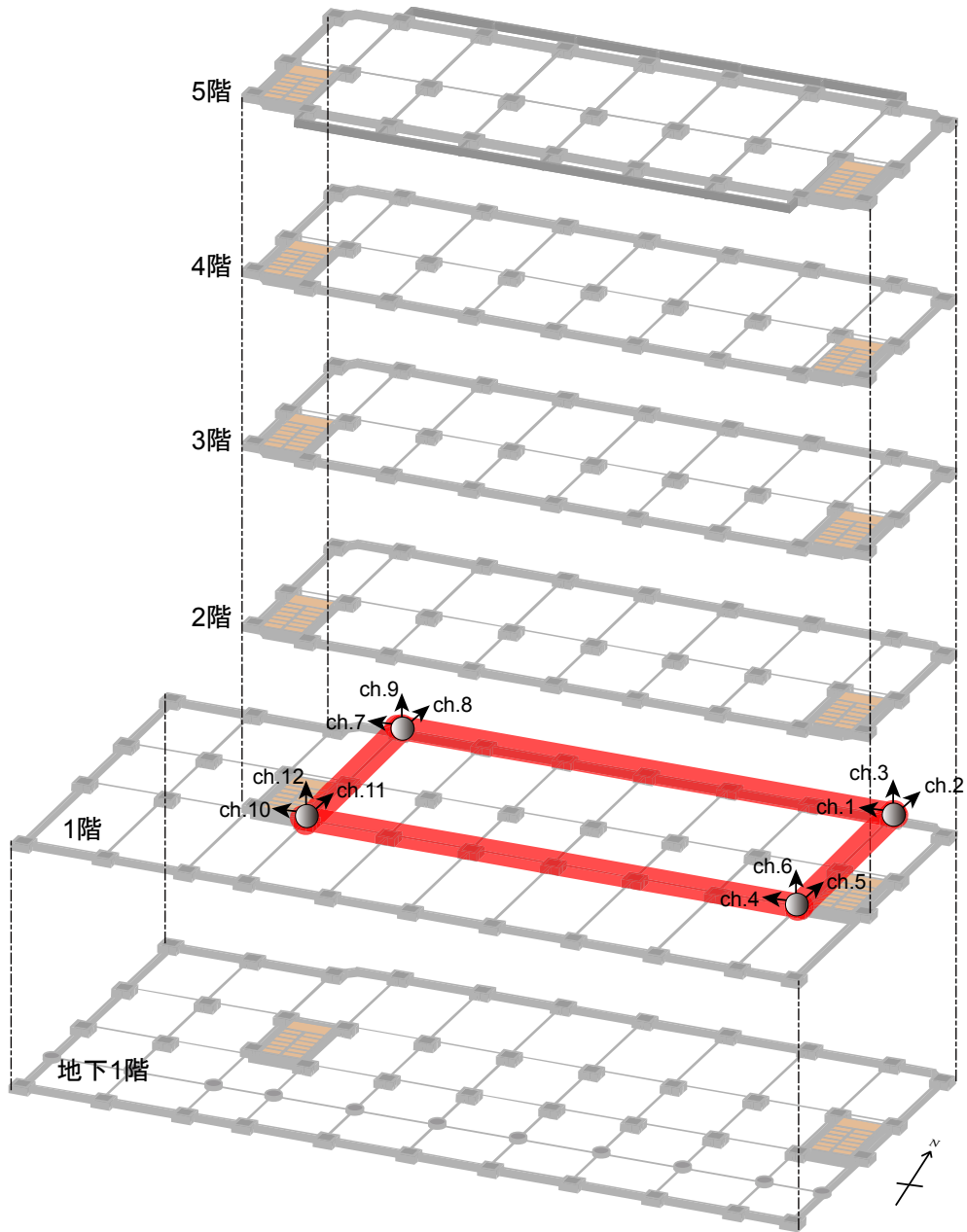


図 2-8 測定位置 (計測ケース 5)

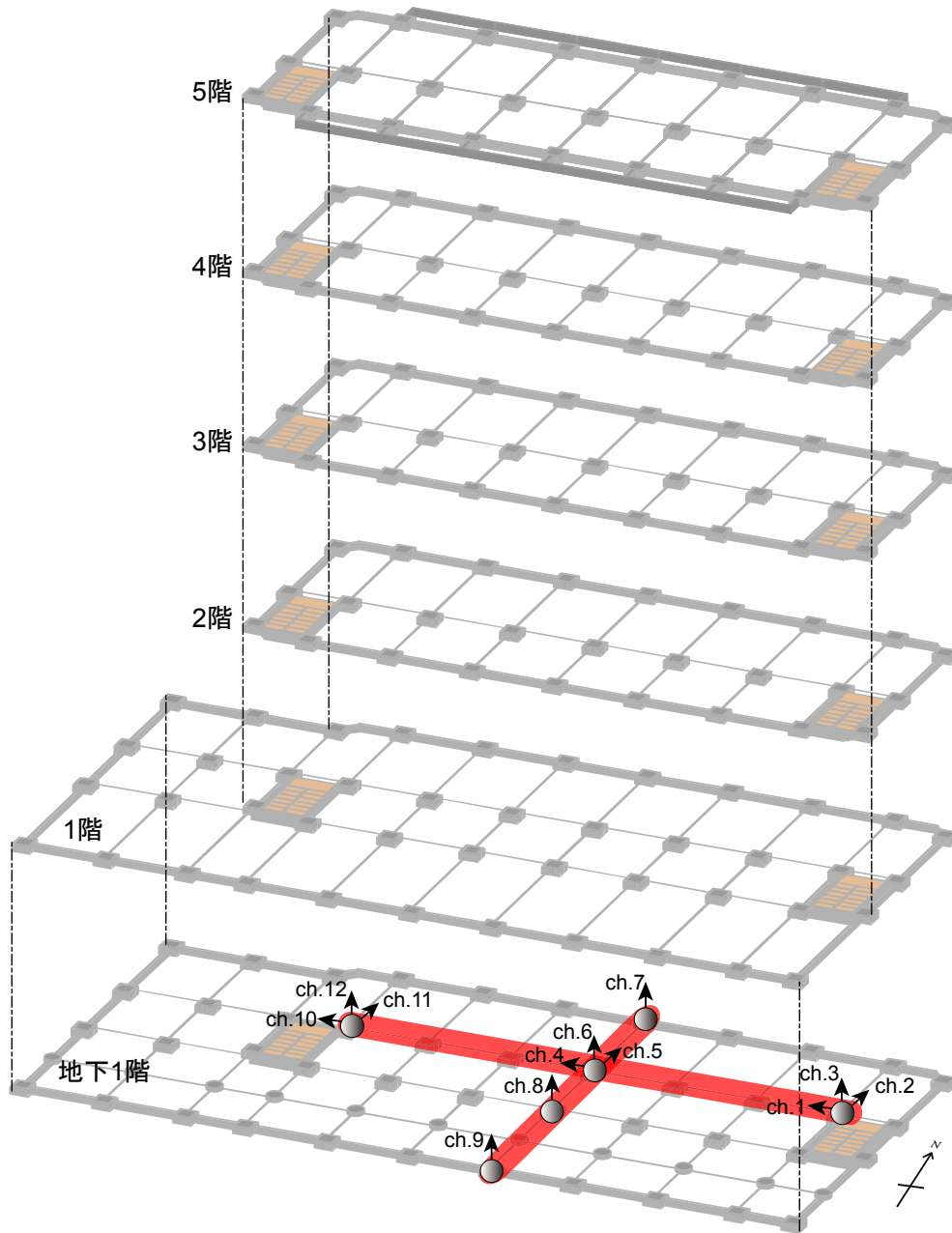


図 2-9 測定位置 (計測ケース 6)

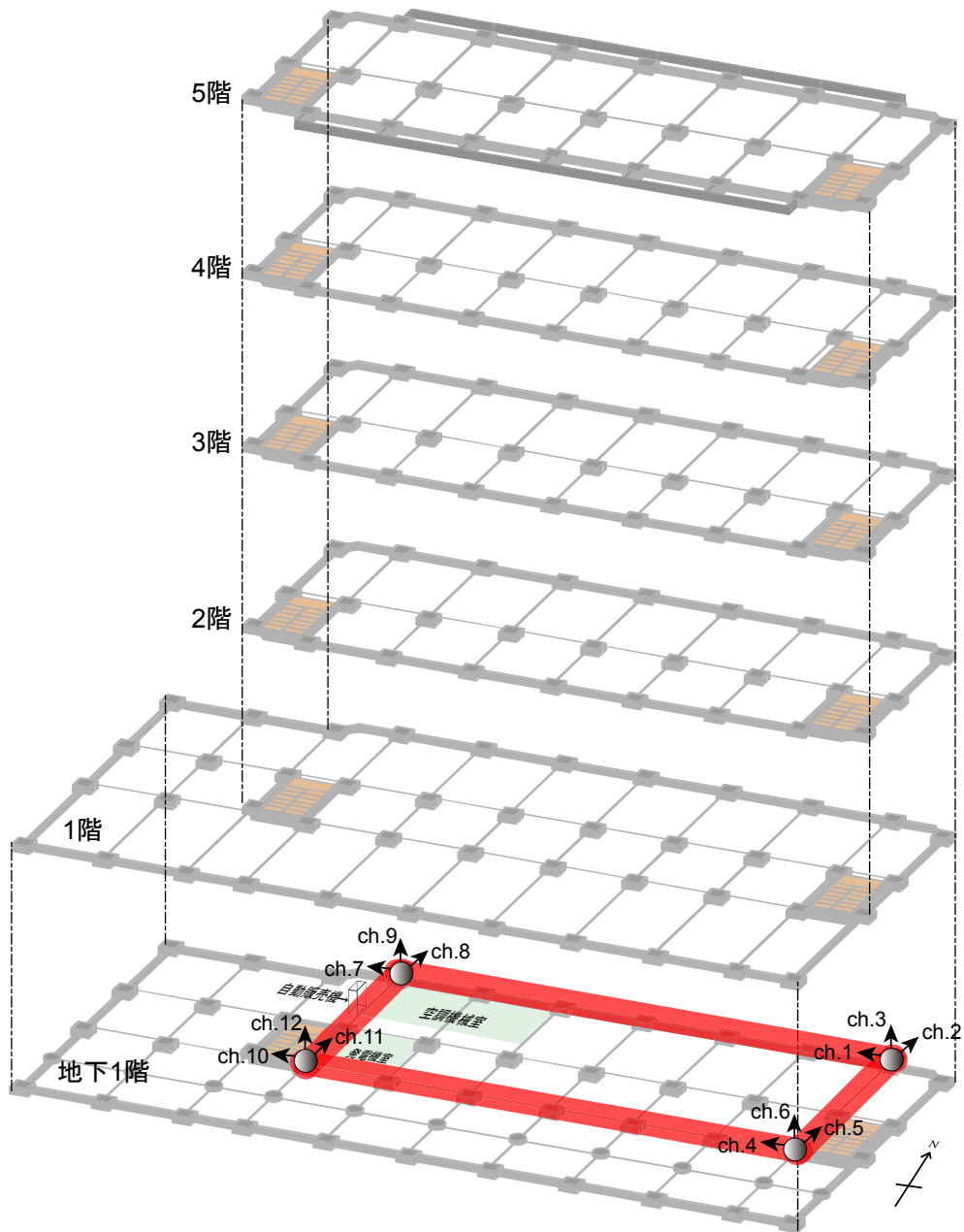


図 2-10 測定位置（計測ケース 7）

※土曜日に計測したため、空調室・機械室の設備機器はほぼ停止していた。
ただし、自動販売機は冷却のために常時稼動していた。

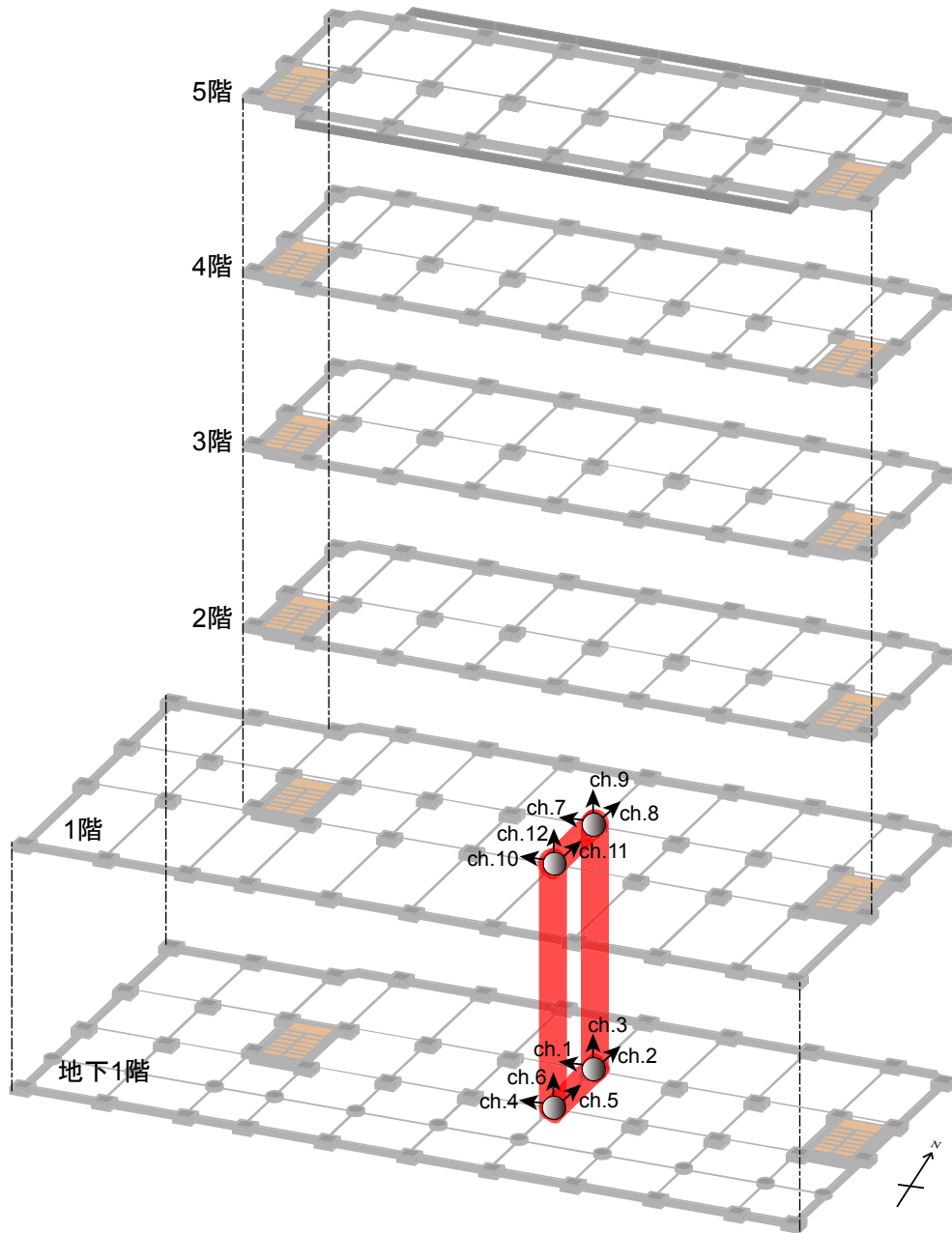


図 2-11 測定位置 (計測ケース 8)



写真 2-3 測定時の様子



写真 2-4 ピックアップ設置の様子

2.3 測定結果

(1) 計測ケース 1

計測ケース 1 (図 2-4) では、建物基礎下の風穴内 (鋼管杭脇)、ピット内 (フーチング上)、市庁舎地下 1 階床面の鉛直線上 3 点について、振動性状の変化を調べる目的で計測を行った。

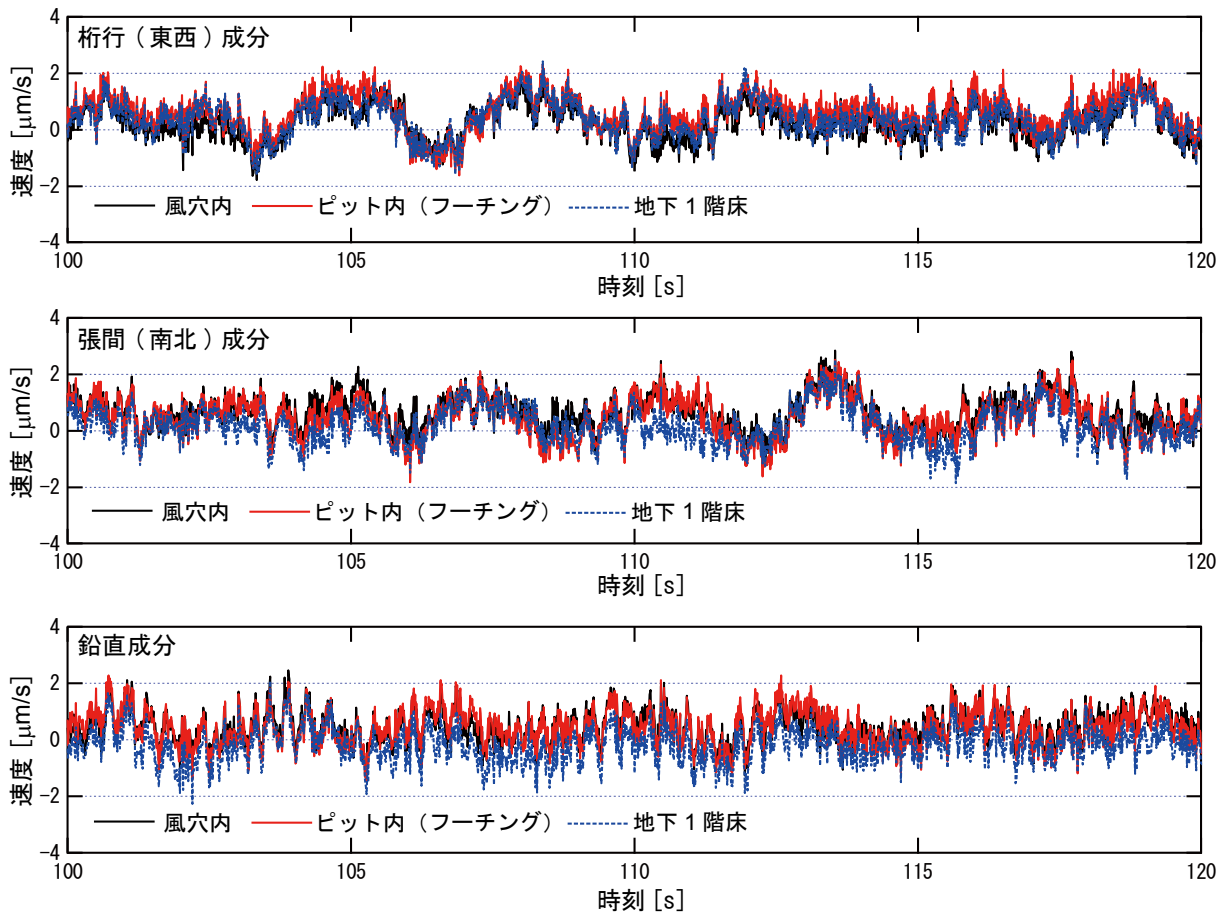


図 2-12 計測ケース 1 の微動波形

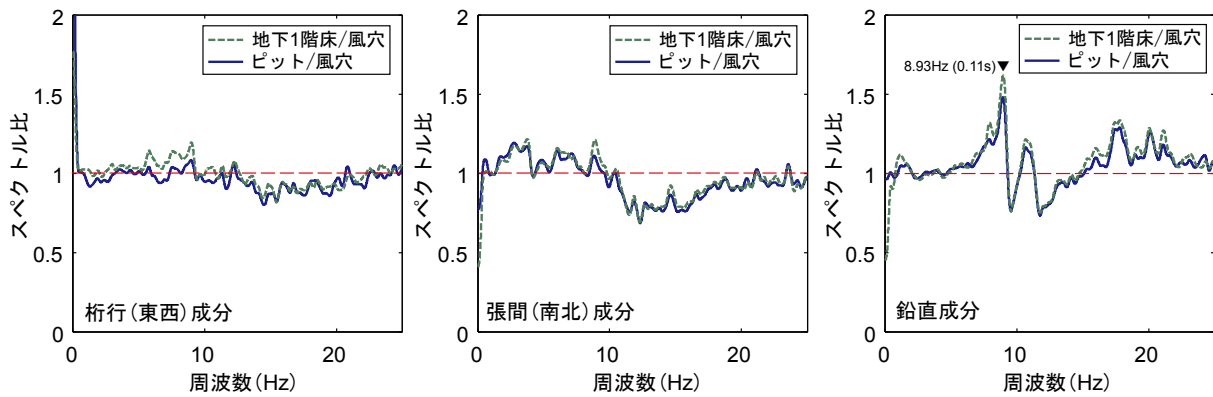


図 2-13 伝達関数（成分別のスペクトル比）

図 2-12 に比較的定常的な振動を示した計測時間 100～120 秒区間の微動波形を示す. 図 2-12 より, 波形のうねりを含めた振幅および位相が, 風穴内, ピット内 (フーチング上), 地下 1 階床面ではほぼ同じであったことがわかる. また, 風穴内 (鋼管杭脇) での常時微動波形のフーリエスペクトルに対する, ピット内 (フーチング上) のフーリエスペクトルの比および市庁舎地下 1 階床面のフーリエスペクトルの比を, バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いて平滑化し (以下, 全てのフーリエスペクトルを同様に平滑化して示す), これを伝達関数として図 2-13 に示す. 図 2-13 より, 水平 2 成分については風穴内 (鋼管杭脇), ピット内 (フーチング上), 市庁舎地下 1 階床面の各レベルで, スペクトル比が周波数によらずほぼ 1 となっており基礎による振動の増幅は見られなかった. 鉛直成分については, ピット内 (フーチング) のスペクトル比と地下 1 階床面のスペクトル比がほぼ等しく, 8.93Hz 付近にスペクトル比で 1.5 程度のピークを有しているものの, その他の周波数帯ではスペクトル比が概ね 1 前後で推移していることから, 基礎による振動の増幅は殆どないと考えられる.

(2) 計測ケース 2

計測ケース 2 (図 2-5) は, 建物上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である. 図 2-14 に地下 1 階および 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する 5 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す. 桁行 (東西) 方向については, 5 階/地下 1 階の伝達関数では 3.03Hz (0.33s), 5 階/1 階の伝達関数では 3.06Hz (0.33s) にピークが見られ, 地下 1 階あるいは 1 階のどちらを基底としても同じ卓越周波数が求められた. 一方, 張間 (南北) 方向については, 5 階/地下 1 階の伝達関数では 3.98Hz (0.25s), 5 階/1 階の伝達関数では 4.28Hz (0.23s) にピークが見られ, 卓越周波数が僅かに異なっている. ここで, 比較的定常的な振動を示した区間について, 5 階の微動波形に対してスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形の振幅を比較した例を, 桁行方向については図 2-15 に, 張間方向については図 2-16 に示す. 図 2-15, 図 2-16 より, ロッキング成分については, 桁行方向, 張間方向ともに, 固有周期および位相が 5 階の微動波形と対応せず, 振幅も小さいため, ロッキング率の算定は出来なかった. 一方, スウェイ成分については, 桁

行方向については振幅が極めて小さいためスウェイ率の算定は出来なかったが、張間方向については、5階の微動波形に対して地下1階のスウェイ成分となる微動波形の振幅比をスウェイ率 S として求めることができ、

$$S_{\text{張間方向}} = 14.2\%$$

となる。このとき5階/地下1階の伝達関数から求められた固有周期 $T_{\text{FIX+S (+R)}}$ からスウェイ成分を取り除いた固有周期 $T_{\text{FIX (+R)}}$ を求めると、

$$T_{\text{FIX (+R)}} = T_{\text{FIX+S (+R)}} \times \sqrt{(100 - S)/100} = 0.23\text{s (4.30Hz)}$$

と推定され、5階/1階の伝達関数による卓越周期 0.23s (4.28Hz) とほぼ同じ結果となる。

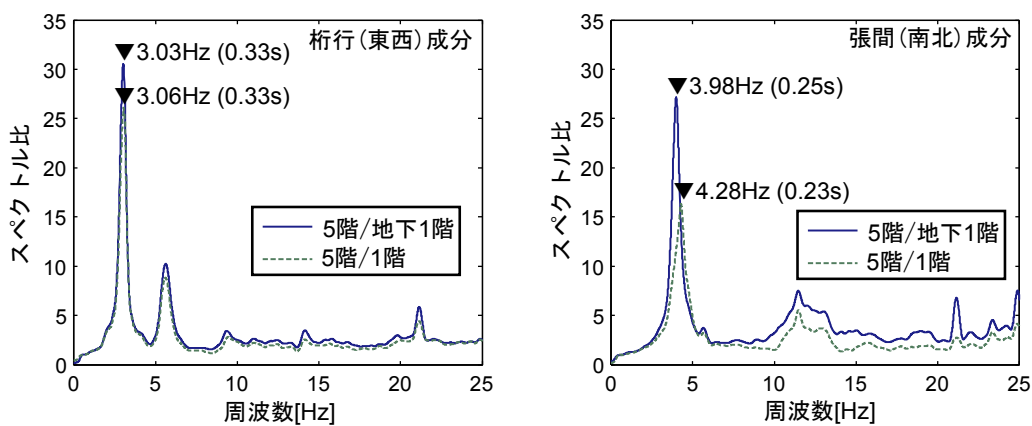


図 2-14 伝達関数 (H/H スペクトル比)

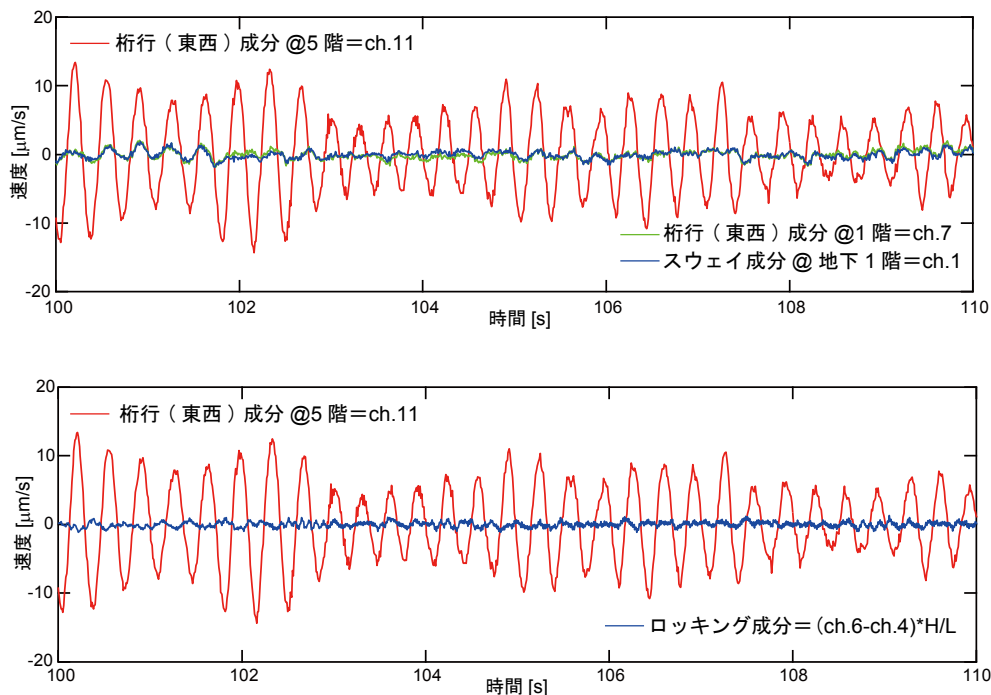


図 2-15 桁行方向のスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形の振幅

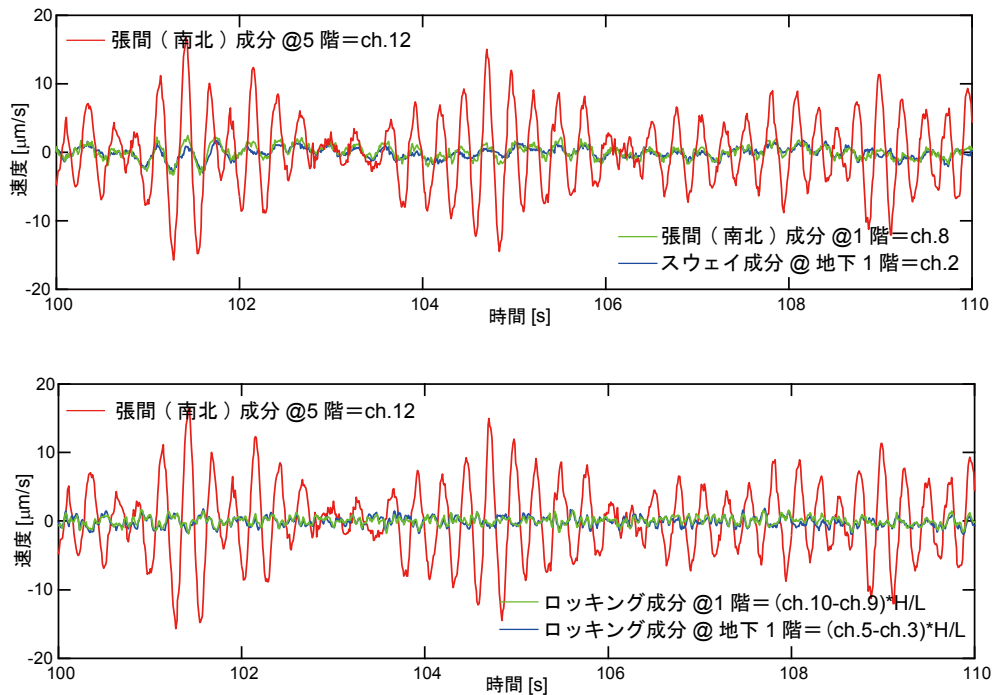


図 2-16 張間方向のスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形の振幅

(3) 計測ケース 3

計測ケース 3 (図 2-6) も、計測ケース 2 同様、建物上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。図 2-17 に地下 1 階および 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する 5 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。計測ケース 2 の場合と同様、桁行 (東西) 方向については、5 階/地下 1 階の伝達関数では 3.03Hz (0.33s)、5 階/1 階の伝達関数では 3.06Hz (0.33s) にピークが見られた。一方、張間 (南北) 方向については、5 階/地下 1 階の伝達関数では 4.00Hz (0.25s)、5 階/1 階の伝達関数では 4.20Hz (0.24s) にピークが見られ、卓越周波数が僅かに異なっている。ここで、比較的定常的な振動を示した区間 (105~115 秒) について、5 階の微動波形に対してスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形の振幅を比較した例を、桁行方向については図 2-18 に、張間方向については図 2-19 に示す。図 2-18, 図 2-19 より、ロッキング成分については、桁行方向、張間方向ともに、固有周期および位相が 5 階の微動波形と対応せず、振幅も小さいため、ロッキング率の算定は出来なかった。スウェイ成分については、桁行方向については振幅が極めて小さいためスウェイ率の算定が出来ず、張間方向についてもスウェイ成分の判別が困難な区間が多かったが、5 階の微動波形と地下 1 階のスウェイ成分となる微動波形の位相が対応する区間について、その振幅比をスウェイ率 S として求めると、

$$S_{\text{張間方向}} = 13.2\%$$

となる。このとき 5 階/地下 1 階の伝達関数から求められた固有周期 $T_{\text{FIX}+S (+R)}$ からスウェイ成分を取り除いた固有周期 $T_{\text{FIX} (+R)}$ を求めると、

$$T_{FIX(+R)} = T_{FIX+S(+R)} \times \sqrt{(100 - S)/100} = 0.23\text{s} (4.29\text{Hz})$$

と推定され、5階/1階の伝達関数による卓越周期 0.24s (4.20Hz) に近い値となる。ただし、計測ケース 3 では明瞭にスウェイ成分を抽出できているわけではなく、あくまでも参考までに示した固有周期 $T_{FIX(+R)}$ の推定結果であることに留意されたい。

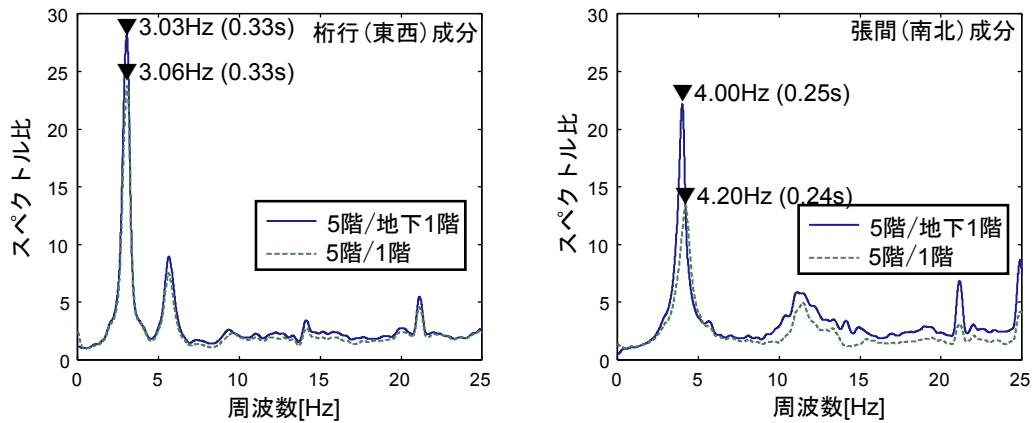


図 2-17 伝達関数 (H/H スペクトル比)

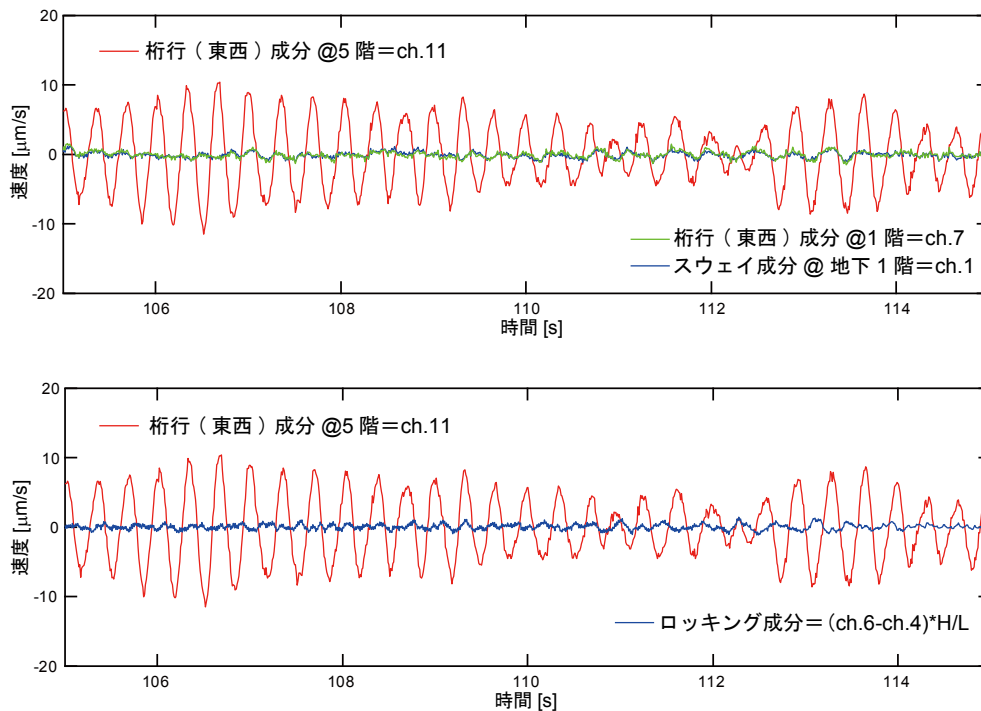


図 2-18 桁行方向のスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形の振幅

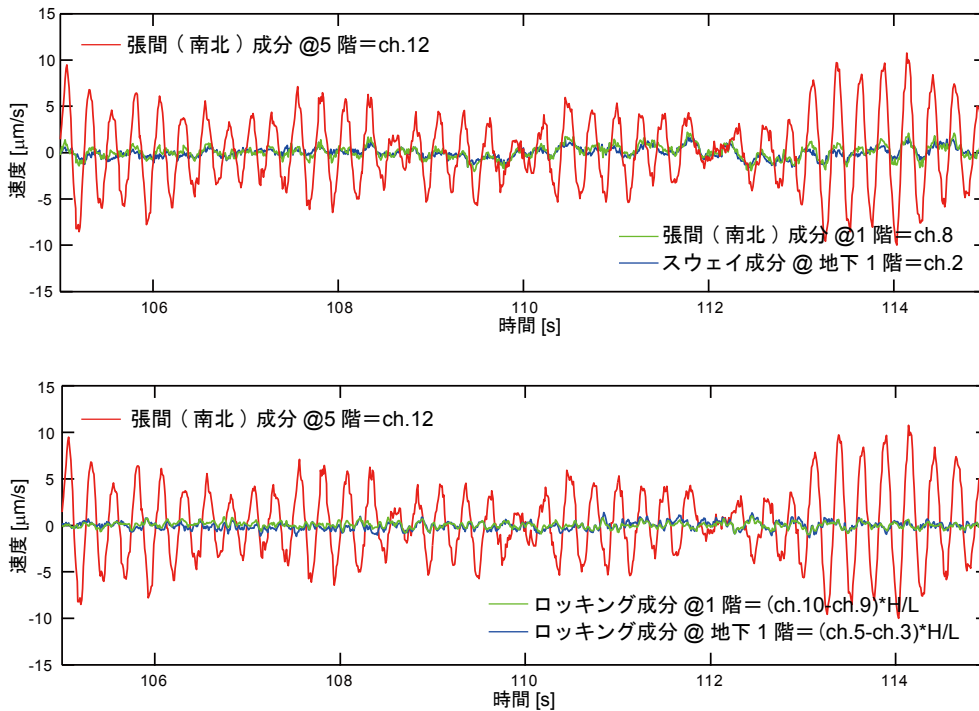


図 2-19 張間方向のスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形の振幅

(4) 計測ケース 4

計測ケース 4 (図 2-7) は、1 階床面の中折れ状態が卓越するかを調べる目的で実施した計測である。比較的定常的な振動を示した区間 (165~175 秒) について桁行方向軸線上および張間方向軸線上に並べたピックアップの微動波形 (鉛直成分) を図 2-20 に示す。図 2-20 より、いずれの波形も振幅・位相が概ね一致しており、1 階床面は中折れ状態が卓越することはないと考えられる。

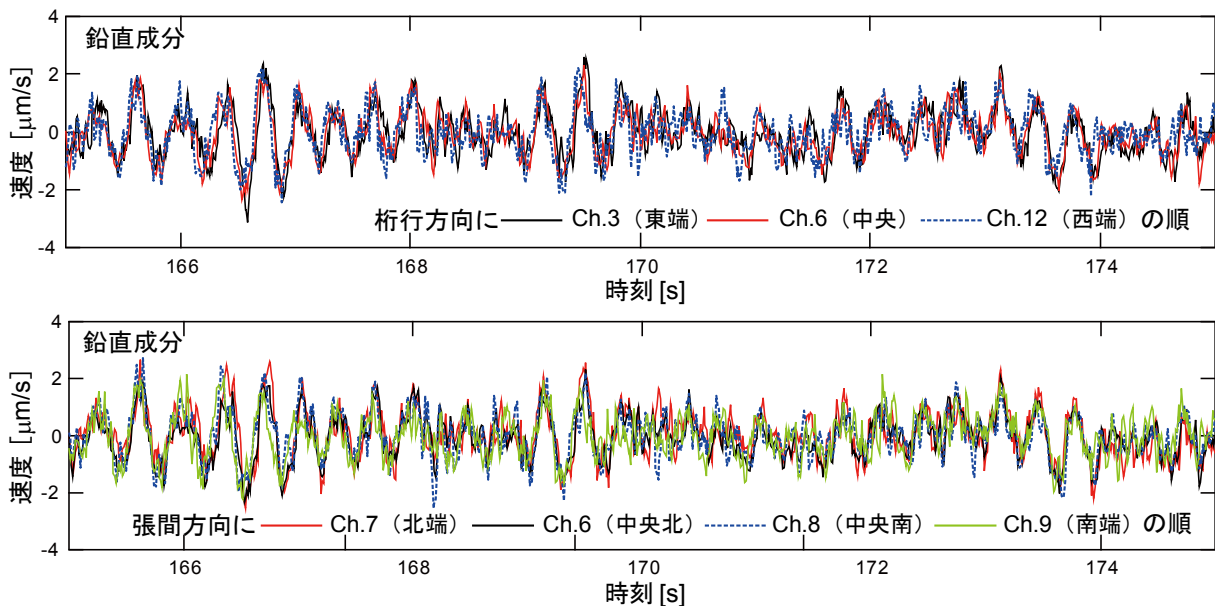


図 2-20 計測ケース 4 の各ピックアップ微動波形 (鉛直成分)

(5) 計測ケース 5

計測ケース 5 (図 2-8) は、1 階床面のねじれ挙動の有無を調べる目的で実施した計測である。比較的定常的な振動を示した区間 (60~70 秒) の微動波形を図 2-21 に示す。図 2-21 より、水平成分では各波形の振幅・位相が概ね一致しているが、鉛直成分では各波形の位相が一致する時間としない時間とが混在している。図 2-22 に各成分別のフーリエスペクトルを示すと、水平成分では卓越周期が概ね一致していたのに対し、鉛直成分では卓越周期がピックアップ設置点によって異なっている。以上より、建物 1 階床面は水平方向には一体となって並進するのにに対し、鉛直方向には床面がバタついてねじれ挙動を示す場合があると考えられる。

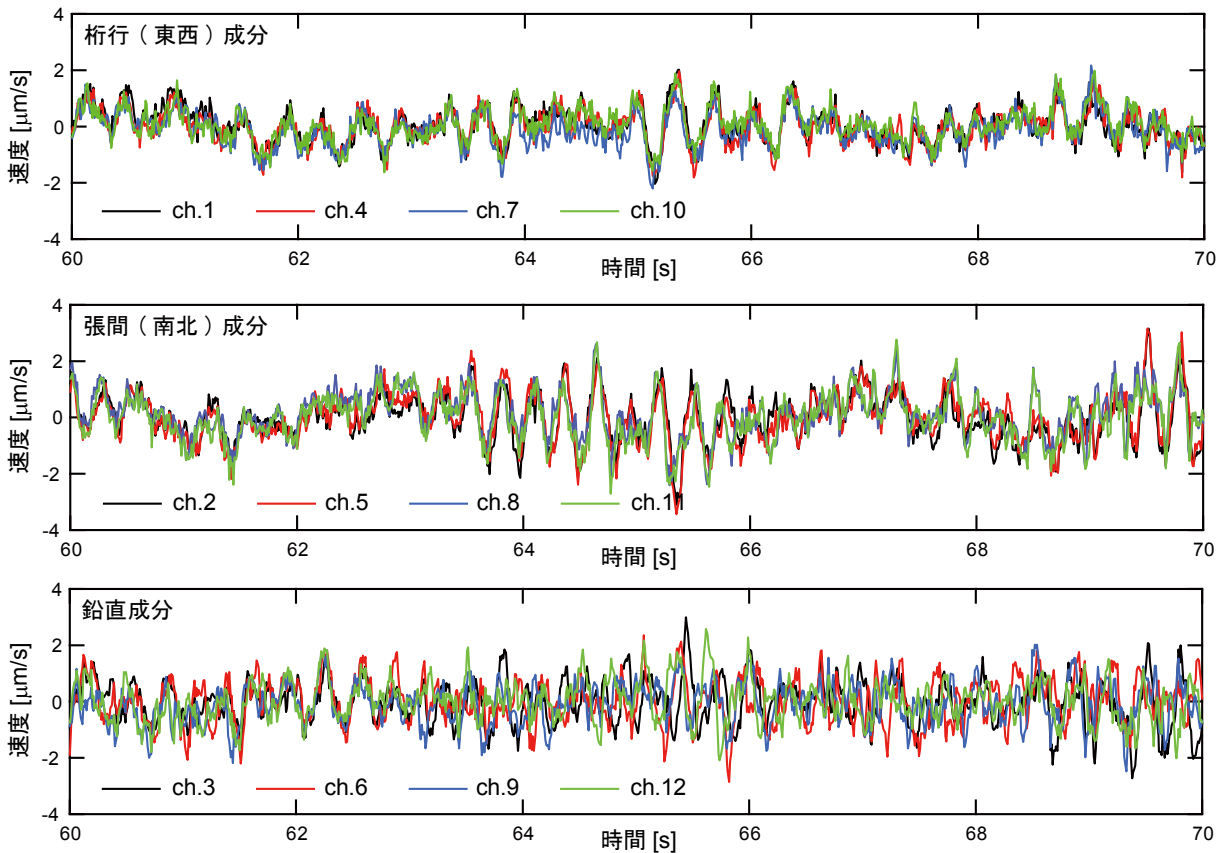


図 2-21 計測ケース 5 の微動波形

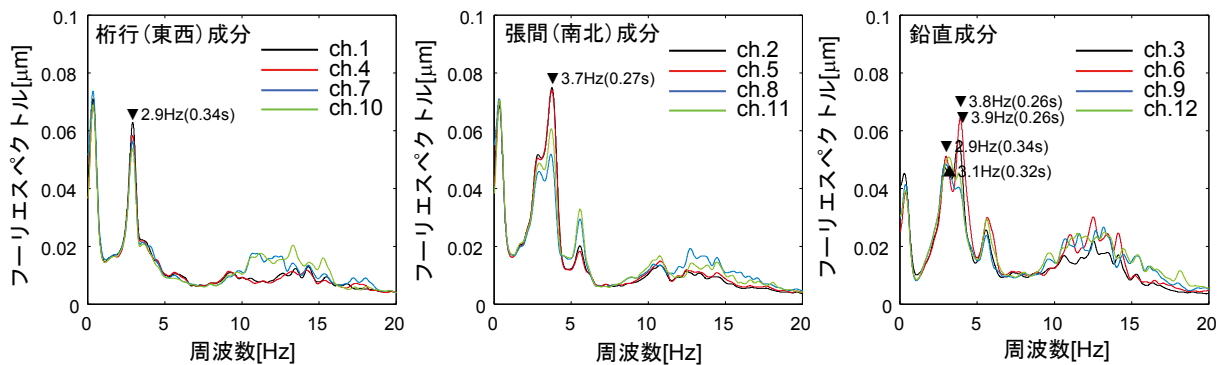


図 2-22 成分別のフーリエスペクトル

(6) 計測ケース 6

計測ケース 6 (図 2-9) は、地下 1 階床面の中折れ状態が卓越するかを調べる目的で実施した計測である。比較的定常的な振動を示した区間 (230~240 秒) について桁行方向軸線上および張間方向軸線上に並べたピックアップの微動波形 (鉛直成分) を図 2-23 に示す。図 2-23 より、いずれの波形も振幅・位相が概ね一致しており、地下 1 階床面は中折れ状態が卓越することはないと考えられる。

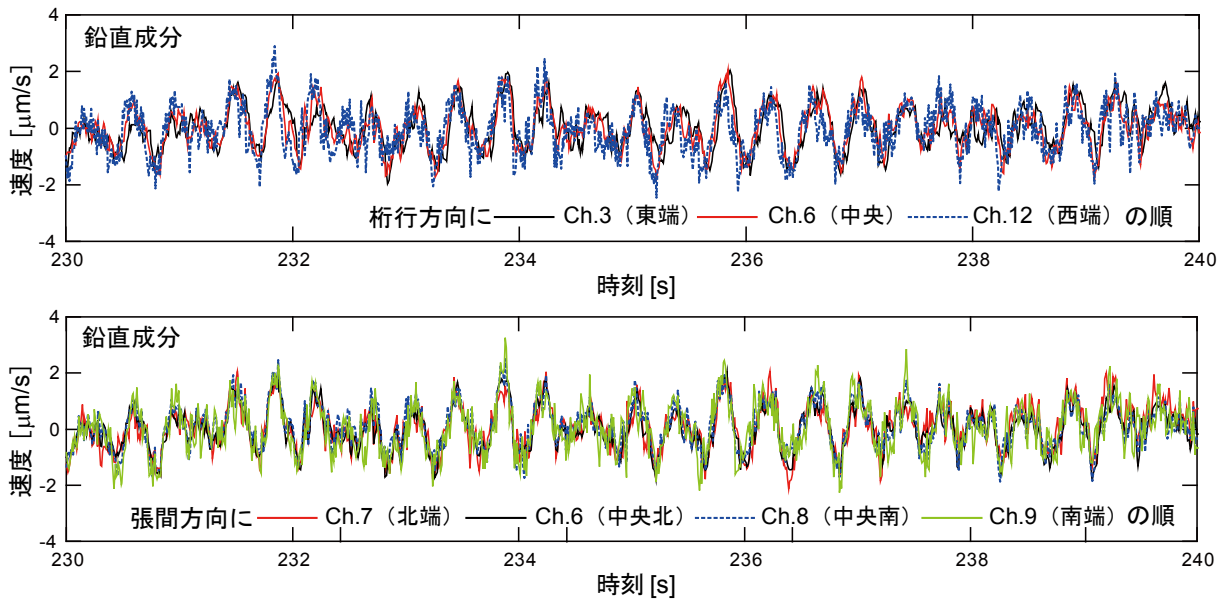


図 2-23 計測ケース 6 の各ピックアップ微動波形 (鉛直成分)

(7) 計測ケース 7

計測ケース 7 (図 2-10) は、地下 1 階床面のねじれ挙動の有無を調べる目的で実施した計測である。比較的定常的な振動を示した区間 (204~214 秒) の微動波形を図 2-24 に示す。自動販売機および機械室で稼動中の設備機器の振動が影響し ch.7~ch.12 の波形があまり安定していないが、図 2-24 より、水平成分では各波形の振幅・位相が概ね一致しているのに対し、鉛直成分では各波形の位相があまり一致していないことが分かる。図 2-25 に各成分別のフーリエスペクトルを示すと、水平成分では卓越周期が概ね一致しているのに対し、鉛直成分では卓越周期 (特に高次の卓越周期) がピックアップ設置点によって異なっている。以上より、建物地下 1 階床面は水平方向には一体となって並進するのに対し、鉛直方向には床面がバタついてねじれ挙動を示す場合があると考えられる。

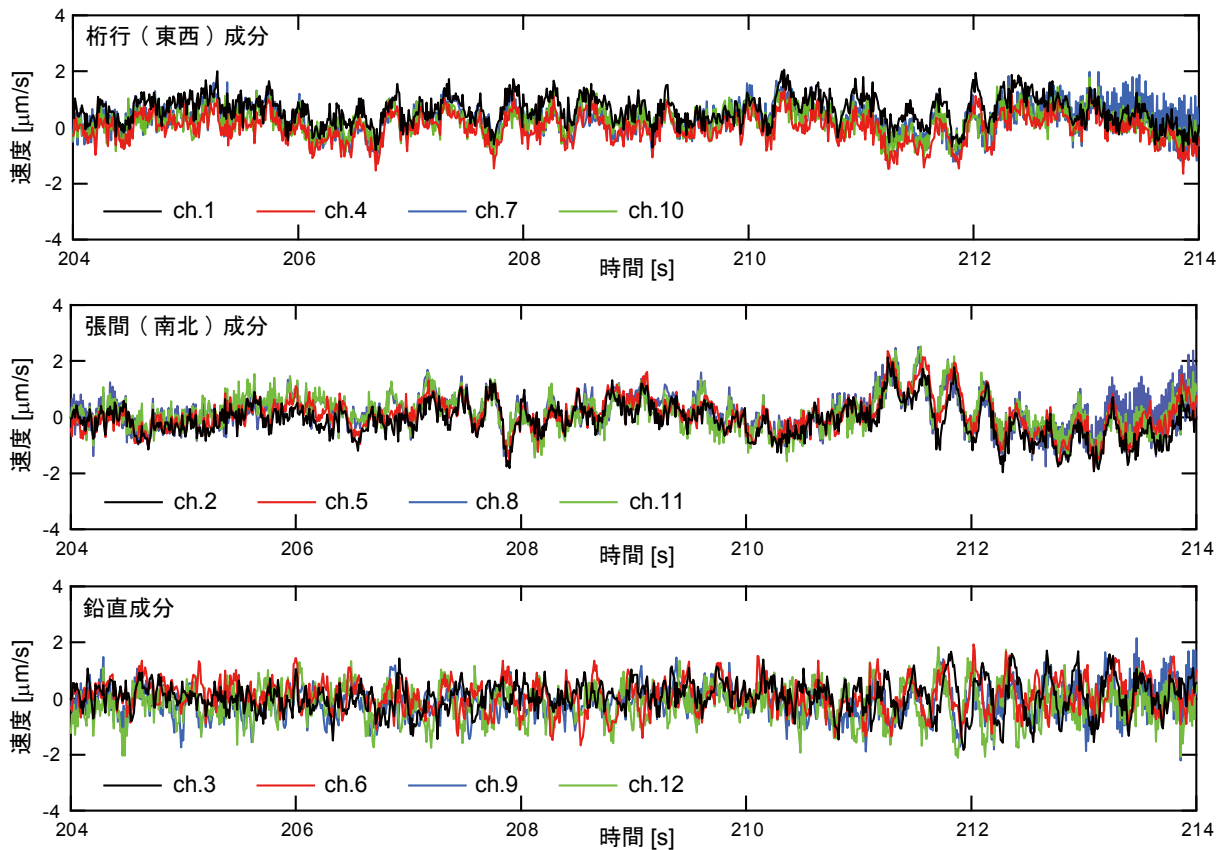


図 2-24 計測ケース 7 の微動波形

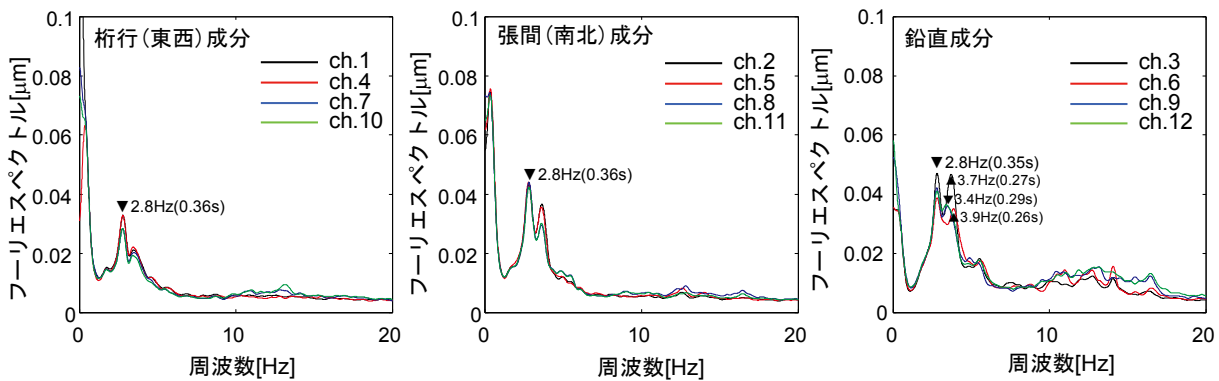


図 2-25 成分別のフーリエスペクトル

(8) 計測ケース 8

計測ケース 8 (図 2-11) は、地下 1 階床面 (G.L. -2.8m) と 1 階床面 (G.L. +1.2m) との振動性状の変化を調べる目的で計測を行った。図 2-26 に比較的定常的な振動を示した計測時間 (10~20 秒) の微動波形を示す。図 2-26 より、成分別の波形の振幅および位相が、地下 1 階床レベルと 1 階床レベルとで概ね一致していることが分かる。また、地下 1 階床面のフーリエスペクトルに対する 1 階床面のフーリエスペクトルの比を伝達関数として図 2-27 に示す。桁行 (東西) 方向成分では全周波数帯域においてスペクトル比がおよそ 1 程度であった。張

間（南北）方向成分では幾つかのピーク周波数でスペクトル比が 2 前後になっているが、それ以外の周波数帯域ではスペクトル比がおよそ 1 程度であった。鉛直成分ではスペクトル比が 2 以下のピーク周波数が見られた以外は、殆どの周波数帯域でスペクトル比がおよそ 1 程度であった。以上より、地下 1 階から 1 階にかけて、桁行方向には振動の増幅が殆ど生じず、張間方向および鉛直方向には主に 10Hz 以上の高周波数（短周期）領域において振動が増幅しているものと考えられる。

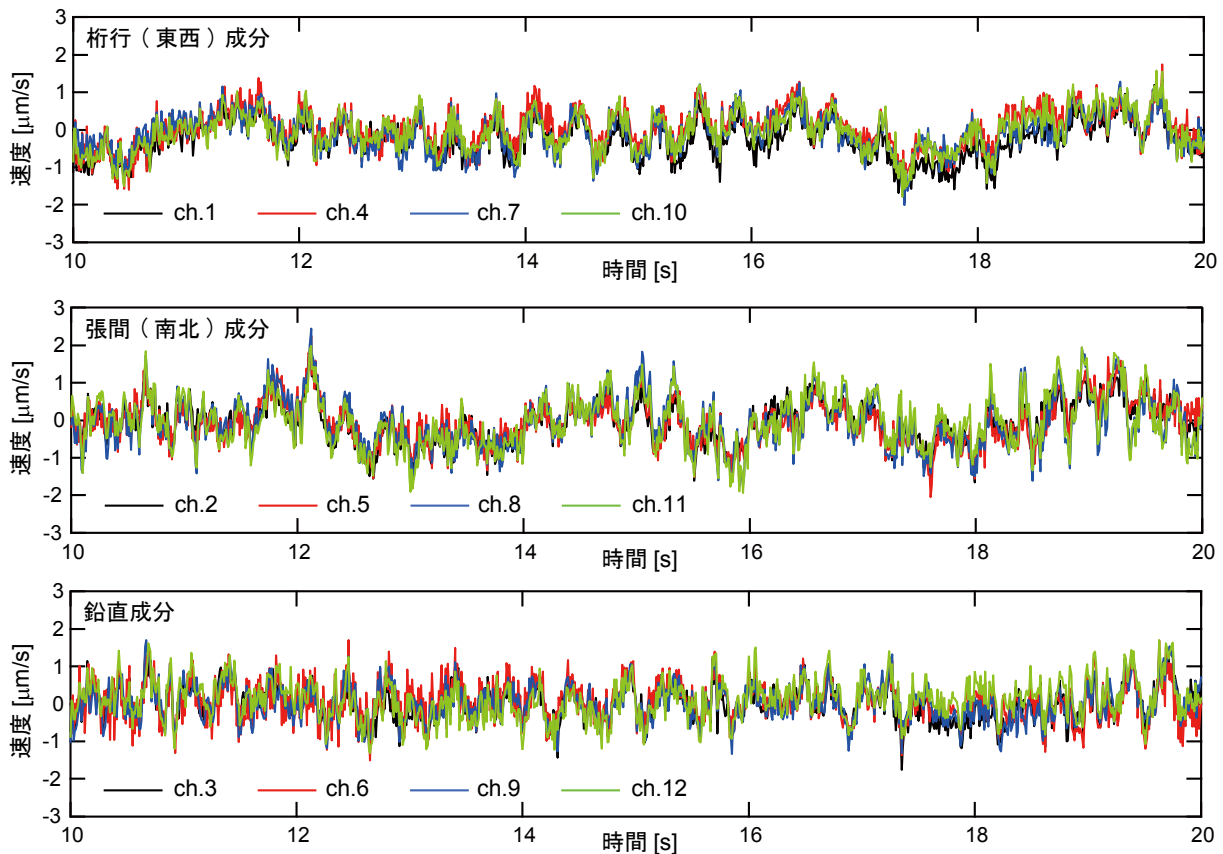


図 2-26 計測ケース 8 の微動波形

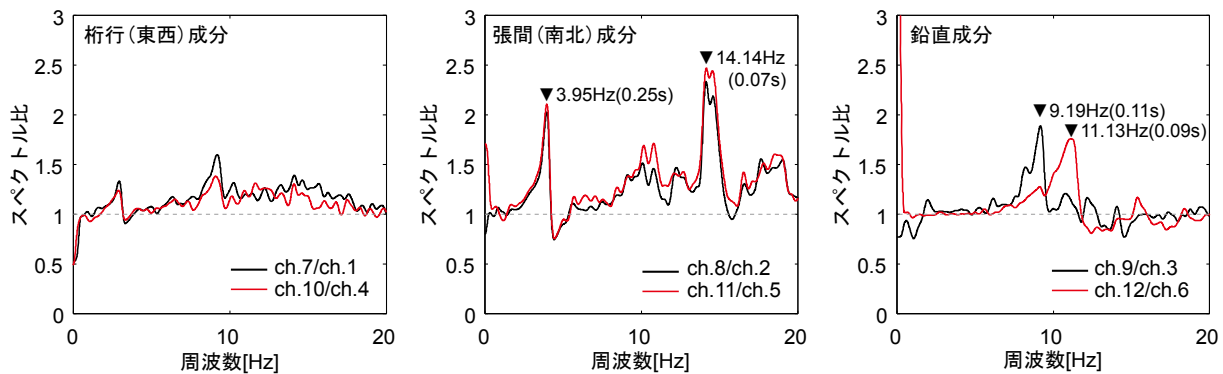


図 2-27 伝達関数（成分別のスペクトル比）

2.4 減衰特性

前述のケース 2 および 3 の計測データを利用して、対象建物の減衰定数を RD 法(Random Decrement Technique)^{[1], [2]}により評価を試みた結果を以下に示す。

(1) RD 法の原理

外力 $f(t)$ が作用する 1 質点系の運動方程式は一般に(1)式で表される。

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_0\dot{u} + \omega_0^2u = f(t) \quad (1)$$

ξ : 減衰定数, ω_0 : 固有円振動数, u : 系の変位

ここで外力 $f(t)$ を期待値 0 のランダム確率過程とすると, (1)式の解 u は, 以下に示す自由振動解 $D(t)$ と外力定常振動解 $R(t)$ の和として表される。

$$u = D(t) + R(t) \quad (2)$$

$$D(t) = A \exp\left\{\left(-\xi + i\sqrt{1-\xi^2}\right)\omega_0 t\right\} \quad (3)$$

$$R(t) = \int_0^t f(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

A : 初期条件によって定まる定数, $h(t)$: 単位衝撃応答関数

次に, (5)式で表されるような(2)式の両辺の期待値を考えると, $f(t)$ が期待値 0 のランダム確率過程であることから, (6)式が得られ, したがって(7)式が導かれる。

$$E[u] = E[D(t)] + E[R(t)] \quad (5)$$

$$E[R(t)] = \int_0^t E[f(\tau)]h(t-\tau)d\tau = 0 \quad (\because E[f(\tau)] = 0) \quad (6)$$

$$E[u] = E[D(t)] \quad (7)$$

一方, 図 2-28 に示すように, ある応答 u の空間サンプルが多数得られたとすると, これらの波形を図示の通り $t=0$ で極大値 (ピーク値) をとるように並べ, これらを重ね合わせる (足し合わせる) と Σu は(7)式より $\Sigma D(t)$ に収束し, 自由振動の項のみが残ることとなる。ここで定常エルゴード過程を仮定すれば, アンサンブル平均が時間平均で近似できるため, ある地点におけるサンプルの極大値 (ピーク値) をずらしながら (すなわち波のスタート時間をずらしながら) 抽出・作成した波形に対して上記の作業を行えば, 自由振動波形を近似した波形が得られ (図 2-28 の最下段), これに基づき通常の減衰自由振動時と同様の手順で減衰を求めることができる。

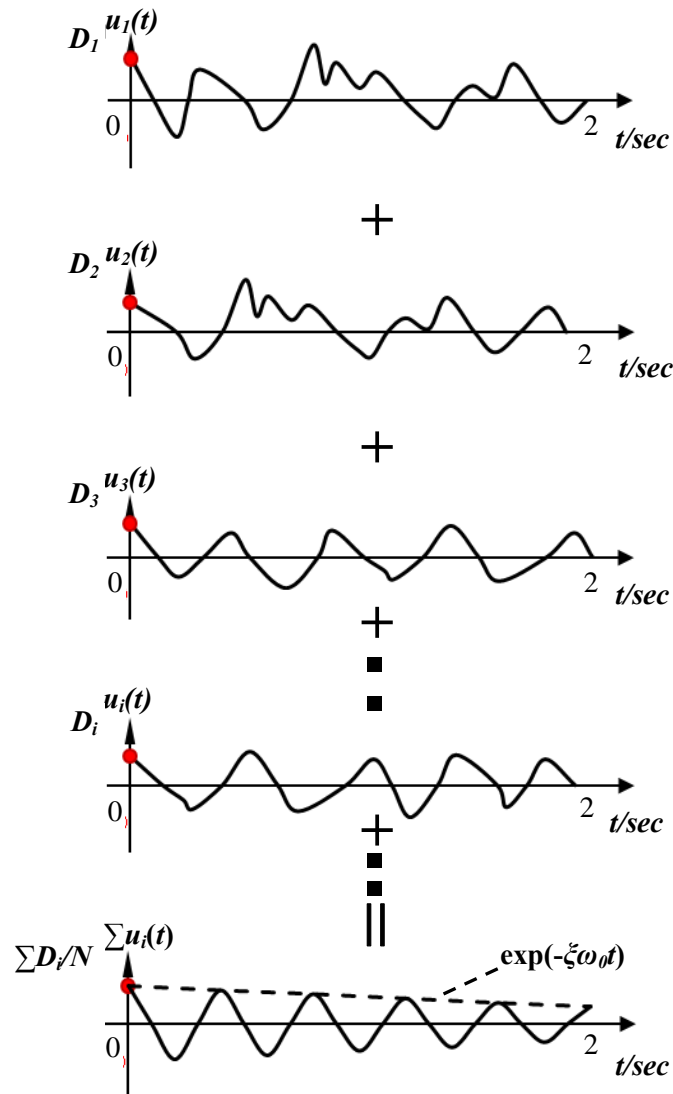


図2-28 波形重ね合わせによる近似自由振動波形の作成手法の概念図

(2) 算定手順

減衰評価は、ケース 2 および 3 いずれにおいても、桁行方向は Ch. 11 を、張間方向は Ch. 12 をそれぞれ用いた。波形はまずその第 1 番目の正側の極大値（ピーク値）を $t=0$ として後続の 2 秒間の波形を抽出し、次に第 2 番目の正側極大値（ピーク値）を同じく $t=0$ として 2 秒間の波形を抽出する、という作業を繰り返し行い、多数の重ね合わせ用のサンプル波形を作成した。波形抽出のための継続時間は、微動計測から得られた系の固有周期が 0.33 秒および 0.23 秒程度であったことからこの継続時間内に数周期分の波形が含まれることを意図して、ここでは 2 秒間と設定した。なお、極大値を機械的に選択すると、図 2-29 に示すように局地的ピーク値を選択することが生じる。これを避けるために、ピーク値の候補がこれの前後それぞれ 5 データ（図 2-29 のピーク検証用データ）よりも大きい場合にのみ $t=0$ におけるピーク

ク値として採用することとした。

減衰定数 ζ は図 2-30 に示す P_0, P_2, P_4, P_6 を用いて算定される 3 セットの減衰定数の平均値として(8)式および(9)式で定義した。

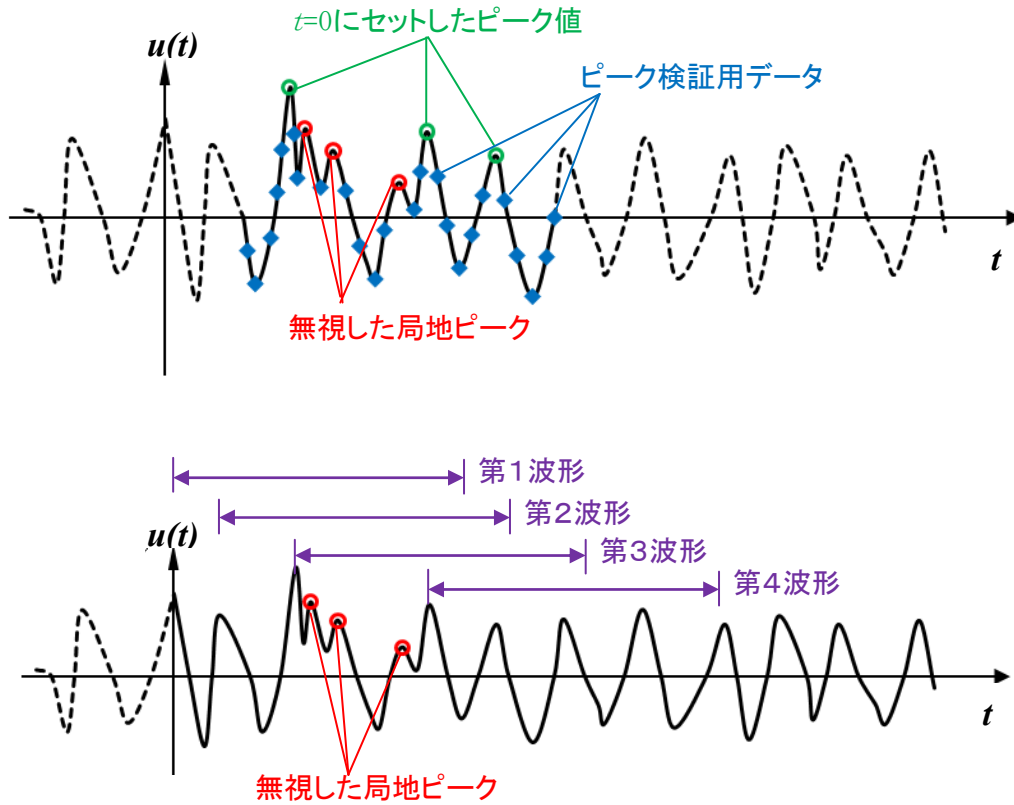


図2-29 減衰評価用波形の抽出概念図（上図：ピークの抽出／下図：重ね合わせ波形の抽出）

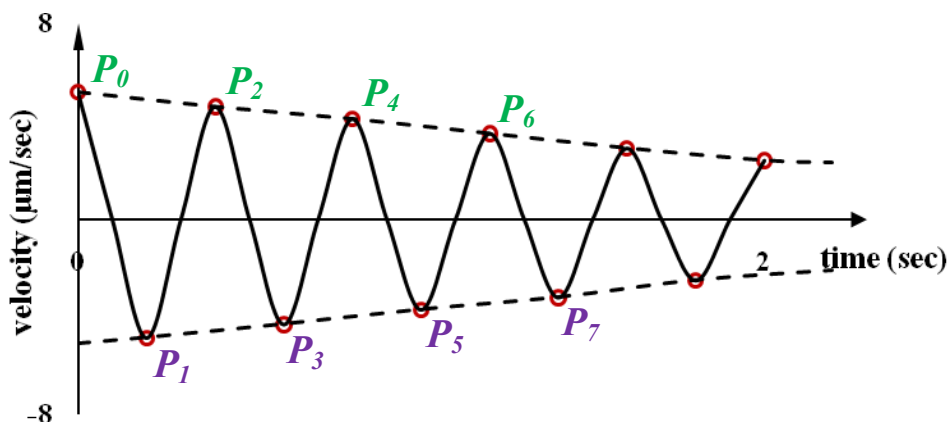


図 2-30 重ね合わせ後の波形と減衰算定用ピーク値抽出の概念図

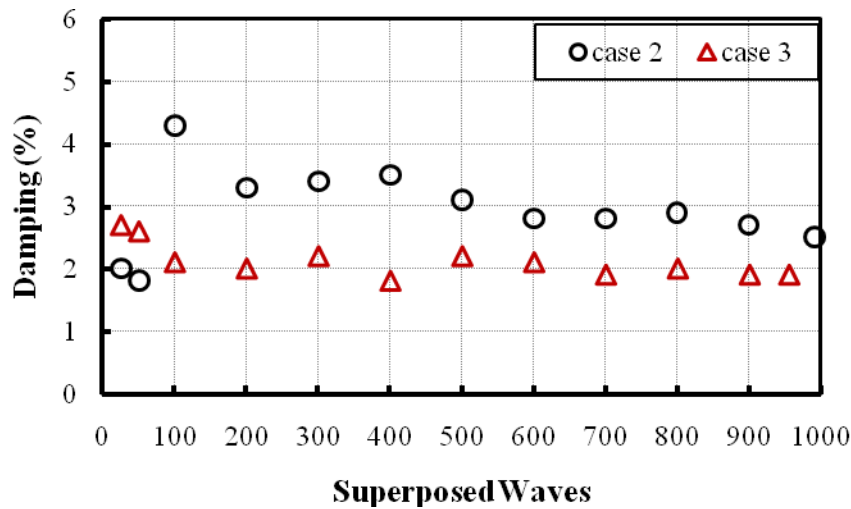
$$\xi_1 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{P_0}{P_2} \quad \xi_2 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{P_2}{P_4} \quad \xi_3 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{P_4}{P_6} \quad (8)$$

$$\xi = \xi_{average} = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3}{3} \quad (9)$$

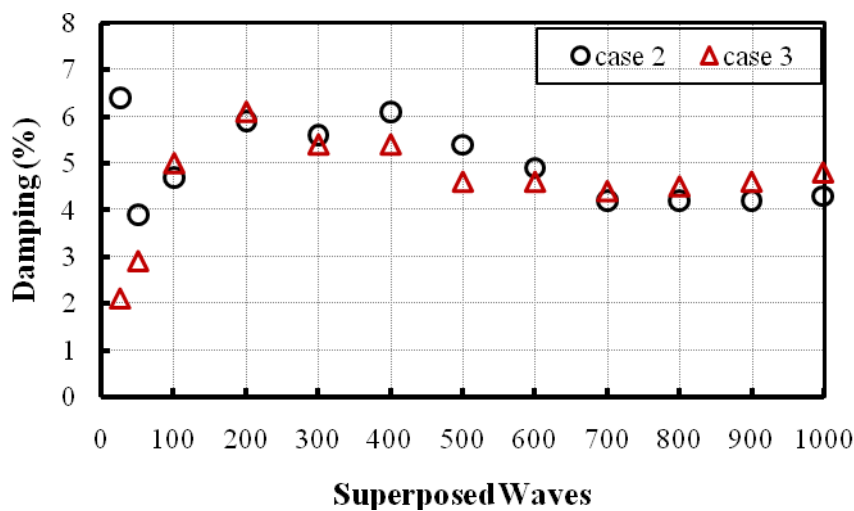
(3) 算定結果

桁行方向 (Ch.11 のデータ使用) および張間方向 (Ch.12 のデータ使用) の減衰定数の算定結果を波形の重ね合わせ数と比較して図 2-31 に示す. なお, ここでの評価結果は, ロッキングやスウェイの影響を除去していないため, これらの影響を含んだ算定結果であることに留意されたい.

いずれのケースにおいても, 波形の重ね合わせ数が 500 程度を超えると結果が安定する傾



(a) 桁行方向 (Ch. 11使用)



(b) 張間方向 (Ch. 12使用)

図 2-31 減衰定数の評価結果

向が見られる。なお測定ケースによる差異は桁行方向の方が張間方向に比べてやや大きいですが、この理由は特定できていない。

計測結果による減衰定数の推定値は、それぞれ桁行方向で2～3%程度、張間方向で4～5%程度であった。張間方向の減衰定数が桁行方向よりも若干大きい理由としては、張間方向で報告されているスウェイ振動成分の影響の可能性が考えられる。

《参考文献》

- [1] 日本建築学会：建築物の減衰，2000年10月
- [2] 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会論文報告集 第454号，pp.29-38，1993年12月

3. まとめ

静岡県裾野市市役所の常時微動測定を行い市庁舎建物の振動特性を調査した。調査結果を以下にまとめる。

- (1) 計測ケース 1 より，風穴内，ピット内（フーチング上），地下 1 階床面での振動性状はほぼ等しく，基礎による振動の増幅は殆ど無いと考えられる。
- (2) 計測ケース 2 および計測ケース 3 より，上部構造の振動性状において明瞭なロッキング成分は確認できず，スウェイ成分についても張間方向においてかろうじて確認できる（13.2% または 14.2%）程度であり，桁行方向の卓越周期は 0.33s，（スウェイ成分を除いた）張間方向の卓越周期は 0.23s であった。
- (3) 計測ケース 4 および計測ケース 5 より，1 階床面は中折れ挙動は示さず，水平方向に並進運動をしているが，鉛直方向には床面がバタついてねじれ挙動を示す場合があると考えられる。
- (4) 計測ケース 6 および計測ケース 7 より，地下 1 階床面は中折れ挙動は示さず，水平方向に並進運動をしているが，鉛直方向には床面がバタついてねじれ挙動を示す場合があると考えられる。
- (5) 計測ケース 8 より，地下 1 階床レベルから 1 階床レベルにかけて，桁行方向には振動の増幅が殆ど生じず，張間方向および鉛直方向には主に 10Hz 以上の高周波数（短周期）領域において振動が増幅しているものと考えられる。
- (6) RD 法を用いて地盤の影響を含む建物の減衰評価を試みたところ，桁行方向で 2～3% 程度，張間方向で 4～5% 程度の減衰定数を得た。評価方向による差異は，張間方向で若干のスウェイ振動成分が含まれていることによる影響の可能性が考えられる。

2009 年 3 月 16 日