

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1082

September 2019

## 常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的 検討

菅原法城・竹信正寛・宮田正史・福永勇介・野津厚・長坂陽介

Fundamental Study on Method of Measuring the Natural Period of Open Type Wharves Depending on  
Microtremor Observation

Noriki SUGAHARA, Masahiro TAKENOBU, Masafumi MIYATA, Yusuke FUKUNAGA  
, Atsushi NOZU, Yosuke NAGASAKA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan



## 常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討

菅原法城\*・竹信正寛\*\*・宮田正史\*\*\*・福永勇介\*\*\*\*・野津厚\*\*\*\*\*長坂陽介\*\*\*\*\*

### 要 旨

栈橋の固有周期は耐震設計の重要なパラメータである。近年、既存施設の改良事例が増加しており、実栈橋で常時微動観測を行い、固有周期設定の際の参考とする取り組みもある。しかし、常時微動観測を用いて固有周期を推定する際、周辺海域の波浪や潮位条件、渡版の拘束条件等が推定結果に及ぼす影響について実測に基づく検証がなされておらず、栈橋の振動モードや観測点配置の影響についても不明点が多い。

本検討では、常時微動観測により実栈橋の固有周期を精度良く推定するための基礎的検討として、全国3地点（小名浜港、川崎港、神戸港）の実栈橋において常時微動及び栈橋前面水位の連続観測を行った。観測結果より、波浪や潮位条件が推定結果に及ぼす影響を評価した。また、渡版有無の条件の異なる隣接ブロックで観測を行い、推定結果に及ぼす渡版有無の影響を評価した。さらに、新たな試みとして、常時微動観測記録（加速度時刻歴データ）を変位時刻歴データに変換することにより、栈橋ブロックの固有周期付近における多数の観測点位置の変位軌跡を確認し、どのような振動モードで栈橋ブロックが挙動しているか確認した。最後に、微動観測により実栈橋の固有周期の推定を行う際の留意点や最低限必要な微動計の配置についても整理した。

今回の結果、少なくとも本検討の対象栈橋では、波浪や潮位条件については固有周期の推定に対する影響は小さいことが分かった。栈橋ブロックの振動としては、並進運動が卓越する場合と、水平面内におけるねじり振動もしくはせん断振動と推定される振動が卓越する場合があることがわかった。このような振動モードの違いに対しては渡版による拘束性が影響を及ぼしている可能性がある。今回、振動モードに関する詳細検討はできなかったが、設計では想定していない振動モードの発生可能性を考慮する必要性を示唆するものであった。今後は、栈橋ブロックの振動モードと構造条件の関係を明らかにすること、地震時の栈橋ブロックの振動モードを明らかにすることが重要である。

キーワード：栈橋，固有周期，常時微動観測，H/H スペクトル比，変位軌跡，波浪観測，ねじり振動，せん断振動

---

\*港湾研究部港湾施設研究室 研究官  
\*\*港湾局技術企画課 課長補佐（前港湾研究部港湾施設研究室主任研究官）  
\*\*\*港湾研究部港湾施設研究室長  
\*\*\*\*港湾研究部港湾施設研究室 主任研究官  
\*\*\*\*\*港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ 研究官  
〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所  
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

## **Fundamental Study on Method of Measuring the Natural Period of Piers by Microtremor Observation**

**Noriki SUGAHARA\***  
**Masahiro TAKENOBU\*\***  
**Masafumi MIYATA\*\*\***  
**Yusuke FUKUNAGA\*\*\*\***  
**Atsushi NOZU\*\*\*\*\***  
**Yosuke NAGASAKA\*\*\*\*\***

### **Synopsis**

The natural period of a pier is an important parameter in seismic design. Recently, the number of cases of improvement of existing facilities has been increasing. There are cases in which microtremor observation of an existing pier is conducted and used as a reference when setting the natural period. However, when estimating the natural period using microtremor observation, no verification study based on actual measurements has been conducted with regard to the effects of waves and tidal level conditions in the surrounding waters or the existence of an access bridge. There are also many unclear points regarding the vibration mode of piers and the effect of the location where a seismometer is set.

In this study, continuous microtremor measurement and observation of the water level in front of piers at 3 ports (Onahama Port, Kawasaki Port, and Kobe Port) in Japan were conducted as a fundamental study to more accurately estimate the natural period of actual piers. From the observation results, we evaluated the effects of waves and tidal level on the results of estimations. Furthermore, we conducted comparative measurement between pier blocks with and without access bridges, and evaluated the effect of the existence of an access bridge. As a new approach, by converting the microtremor observed data (acceleration time history data) to displacement time history data, we confirmed the displacement trajectories of many observation points in the vicinity of the natural period of a pier block, and confirmed what kind of mode of vibration was applicable to the behavior of the pier block. Finally, we described important points in estimating the natural period of a pier by microtremor observation and the minimum required deployment of seismometers.

As a result, it became clear that the effects of waves and tidal levels on the estimation of the natural period are small, at least for the piers considered in this study. It also became clear that the vibration mode of a pier block is different depending on the structural characteristics. Cases were found in which the translational vibration mode is dominant, or torsional vibration or shear vibration is dominant. It is possible that an access bridge has an effect on the vibration mode. In the present study, we were not able to conduct detailed investigation of the vibration mode, but this result indicates the necessity of considering the occurrence of a vibration mode that was not assumed in the design. As a next step, we need to clarify the relationship between the vibration mode of the pier block and the structural characteristics, as well as the vibration mode under earthquake motion.

**Key Words:** Pier, natural period, microtremor observation, H/H spectrum ratio, displacement trajectory, wave observation, torsional vibration, shear vibration

---

\*Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM  
\*\*Deputy Head, Engineering Administration Office, Engineering Planning Division, MLIT  
\*\*\*Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM  
\*\*\*\*Senior Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM  
\*\*\*\*\*Director, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, PARI  
\*\*\*\*\*Researcher, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention  
Engineering Department, PARI  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 本研究の全体構成	1
2. 常時微動観測による固有周期の推定方法と既往研究のレビュー	2
2.1 本章の概要	2
2.2 現行の耐震設計における固有周期の位置づけと課題	2
2.3 常時微動観測による固有周期の推定手法	3
3. 微動観測等の実施内容及びその観測結果の整理	5
3.1 本章の概要	5
3.2 観測機器類の設置方法と結果の処理方法に関する概要	5
3.3 小名浜港栈橋の事例	8
3.4 川崎港栈橋の事例	15
3.5 神戸港栈橋の事例	20
4. 観測結果から得られた知見	25
4.1 本章の概要	25
4.2 潮位変化の影響	25
4.3 波浪の影響	25
4.4 渡版の影響	25
4.5 振動源の影響	25
4.6 常時微動計の平面配置	26
4.7 ねじり振動もしくはせん断振動の発生について	26
5. まとめ	27
謝辞	28
参考文献	28
付録A. 小名浜港の栈橋に関する詳細資料	29
付録B. 川崎港の栈橋に関する詳細資料	44
付録C. 神戸港のドルフィンに関する詳細資料	58
付録D. 計測機器の詳細資料	71

# 1. はじめに

## 1.1 本研究の目的

栈橋の耐震設計を行う際に用いる照査用震度は、現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>において、栈橋の固有周期に対する加速度応答スペクトル上の応答値をベースとして算定する手法が提示されており、栈橋の固有周期はその耐震設計における重要なパラメータの一つであると言える。設計段階での当該固有周期の推定にあたっては、栈橋上部工重量や横方向地盤反力係数( $k_{ch}$ )を仮定して得られる栈橋の全体剛性を用いて、栈橋構造を質点系として捉えて推定する方法が用いられる事が多い。

近年では既存施設の改良事例が増加しており、栈橋の改良設計においても、上記の手法に依らず、既設の栈橋(以下、実栈橋とする。)上で微動観測を行い、その結果を固有周期の設定の際の検討材料とする取り組みもある。しかしながら、微動観測結果を用いて固有周期を推定する際には、周辺海域の波浪や潮位条件、あるいは栈橋背後の渡版の有無等がその推定結果に及ぼす影響は少なくないとする既存研究<sup>2)</sup>も存在し、それらの影響に関して実観測データに基づく検証がなされていないのが現状である。

以上のことから、本検討では、微動観測を用いて実栈橋の固有周期を精度良く推定するための基礎的検討として、全国3地点の実栈橋において常時微動及び栈橋前面水位の連続観測を行う。観測結果より、波浪や潮位変化が、常時微動観測による栈橋固有周期の推定結果に及ぼす影響について検討した。また、1地点では、全10ブロック(1ブロック:法線方向延長約37m)からなり、そのうち離れた3つのブロックのみに渡版(15.2m×14.7m, 8.5m×14.6m, 11.6m×14.7m)が設置されている栈橋の場合において、渡版有無の条件の異なる隣接ブロックにて観測を行い、固有周期の推定結果に及ぼす渡版有無の影響を評価する。また、新しい試みとして、常時微動観測記録(加速度時刻歴データ)を変位時刻歴データに変換することにより、栈橋ブロックの固有周期付近における多数の観測点位置における変位軌跡を確認し、どのような振動モードで栈橋ブロックが挙動しているかも確認する。最後に、今回得られた観測結果に基づき、微動観測により実栈橋の固有周期の推定を行う際の留意点、最低限必要な微動計の配置場所についても整理を行う。

## 1.2 本研究の全体構成

本研究の全体フローを図-1.1に示す。

まず、第2章において、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>における栈橋の耐震設計法での固有周期の位置づけと課題を簡単に紹介し、その上で常時微動観測を用いた実栈橋の固有周期の推定手法の詳細について説明する。さらに、常時微動観測を用いた実栈橋の固有周期の推定に関連する既往文献をレビューし、これまでに得られている知見について整理した結果を示す。

第3章では、第2章の整理結果を踏まえた実栈橋上での微動観測方法と、そのデータ処理方法を説明する。構造上の特徴が異なる3地点の直杭式栈橋(小名浜港、川崎港、神戸港)上での常時微動観測結果を、微動観測結果に影響を及ぼすと考えられる要因(波浪、潮位、渡版、周辺の振動源)の各観点から整理し、観測結果から得られた各栈橋の固有周期の推定結果を示す。

第4章では、今回の常時微動観測結果から新たに得られた知見として、常時微動観測により実栈橋の固有周期を適切に推定するための留意点を示す。

最後に5章では、本研究で得られた知見について要点をまとめるとともに、研究成果の今後の活用方法についても示す。

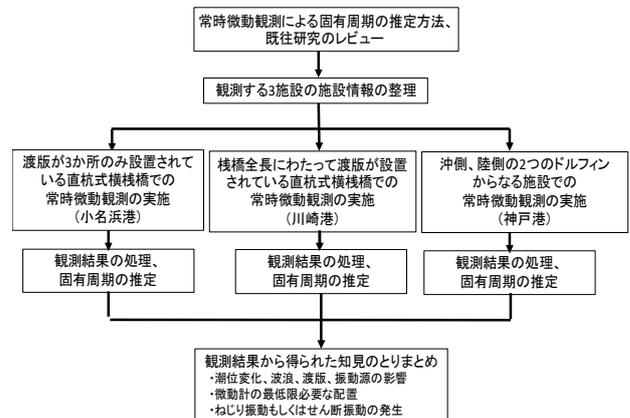


図-1.1 本研究のフロー

## 2. 常時微動観測による固有周期の推定方法と既往研究のレビュー

### 2.1 本章の概要

本章は、本研究の位置づけを明確にするための基礎的な情報を提示することを目的としている。はじめに、現行の耐震設計における橋梁固有周期の位置づけ、重要性について説明する(2.2)。次に、常時微動の概要と、本研究で適用する常時微動観測による橋梁の固有周期の一般的な推定手法の原理、および実橋の固有周期の推定手法に関する既往の研究事例について、課題と共に整理した結果を示す(2.3)。

### 2.2 現行の耐震設計における固有周期の位置づけと課題

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>における橋梁の照査用震度の設定手順を図-2.1に示し、その内容を概説する。

まず、橋梁杭が土中部のある高さで固定されていると仮定(仮想地表面から $1/\beta$ 下方に下がった仮想固定点。 $\beta$ は杭の特性値)し、橋梁全体を1質点系のバネモデルとして捉え、仮想固定点における地震動の加速度時刻歴(水平成分)を用いて加速度応答スペクトルを設定する。

橋梁の固有周期はその非減衰自由振動の理論解として得られる式(2.1)が用いられる。式(2.1)におけるバネ定数 $K$ は、橋梁および地盤をモデル化した骨組み解析を用いて、橋梁上部工に微小な水平荷重を作用させ、その荷重と水平変位の関係から得られる。橋梁全体のバネ定数 $K$ を決める際には、橋梁杭周辺の横方向地盤反力係数( $k_{ch}$ )を設定することが必要であるが、 $k_{ch}=1500N$ ( $N$ は地盤の $1/\beta$ までの平均 $N$ 値)で設定するのが一般的である。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{M}{gK}} \quad (2.1)$$

$T_s$ : 橋梁の固有周期 (s)

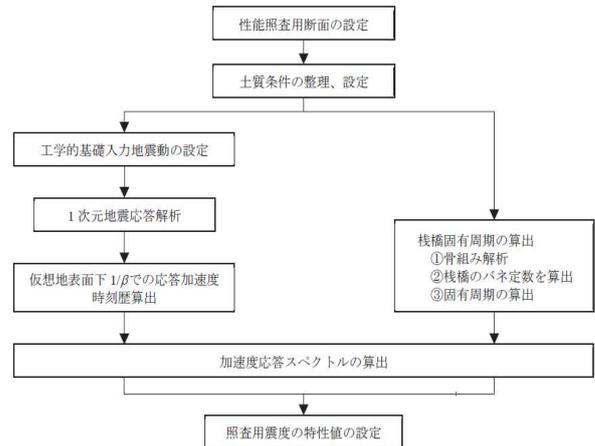
$M$ : 杭一列あたりの自重及び地震時の載荷重 (kN)

$g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ )

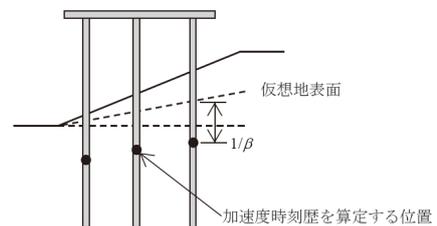
$K$ : 橋梁のバネ定数 (kN/m)

橋梁の照査用震度は、先に算出した加速度応答スペクトルを利用し、式(2.1)で設定した橋梁の固有周期に対応する応答加速度を読み取り、その値を重力加速度で除することによって得ることができる。

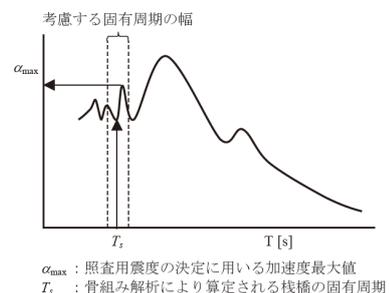
なお、図-2.1(c)からわかるように、加速度応答スペクトルの形状によっては、固有周期のわずかな変化が橋梁の照査用震度の算定結果に大きく影響する可能性がある。このため、橋梁の固有周期の設定は、現行の橋梁の耐震設計の枠組みにおいて重要な位置づけにあると言える。



(a) 照査用震度の一般的な設定手法



(b) 仮想地表面と仮想固定点



(c) 加速度応答スペクトルを用いた最大加速度の設定

図-2.1 現行の耐震設計における橋梁の照査用震度の設定手順<sup>1)</sup>

## 2.3 常時微動観測による固有周期の推定手法

### 2.3.1 常時微動観測を用いた栈橋固有周期の一般的な推定手法

上記 2.2 に示した設計段階での栈橋の固有周期の推定方法に対し、実栈橋においては式(2.1)を用いることなくその固有周期を直接的に評価する方法も存在する。代表的な方法としては、強震観測記録を用いる方法、起振機等を利用した強制加振による方法、および常時微動観測記録を用いる方法があげられる。これらの方法のうち、常時微動観測記録を用いる方法が、最も安価かつ容易に観測を行うことができる。以下、本項では、常時微動および常時微動観測による栈橋の固有周期の推定手法の概要を紹介する。

常時微動とは、遠方の交通機関や工場機械等の人工的振動源、風・潮汐・波浪・火山活動などによる自然振動源から伝播した波動の集合体である。その卓越周期は 0.1 秒から 2.0 秒程度（振動数が 0.5Hz から 10Hz 程度）の比較的安定して現れる波である。常時微動は、測定地点の地盤の振動特性である卓越振動数や増幅特性の推定・評価に際して有用である<sup>1)</sup>。港湾分野では、常時微動観測は各港湾におけるサイト増幅特性（地震基盤から地表面までの地震動の周波数毎の増幅特性）の評価などに用いられている。

次に、常時微動観測による栈橋固有周期の一般的な推定方法について紹介する。なお、ここで紹介する推定手法は、高原ら<sup>3)</sup>、長尾ら<sup>4)</sup>の研究に基づく推定手法であり、本研究でも適用した方法である。栈橋における常時微動観測に用いられる機器の一例を図-2.2 に、常時微動の観測位置に関するイメージ図を図-2.3 に示す。また、栈橋の伝達特性の求め方のイメージを図-2.4 に示す。

通常、栈橋固有周期を常時微動観測から推定する場合は、図のように栈橋上（図-2.3 中の観測点 1）と栈橋の背後地盤（図-2.3 中の観測点 2）の少なくとも 2 地点に微動計を設置する。これは、栈橋上での観測データが栈橋の振動伝達特性だけでなく、地盤の振動伝達特性を含んでいるため、その影響を除去する必要があるためである。

この時、まず、「栈橋の固定点位置（地盤の振動が栈橋に伝達される仮想的な固定点）の微動の波形」と、「背後地盤上で観測される微動の波形（振動源の特性や地盤特性の情報を含む波形）」が同等であると仮定する。その上で、得られた微動観測記録のデータをフーリエ変換し、振幅と位相の情報から成る「周波数領域」において各周波数における振幅を算出しフーリエ振幅スペクトルを得る。各周波数における振幅について、背後地盤上（観

測点 2）に対する栈橋上（観測点 1）の比をとることで、栈橋の伝達特性のみを取り出して把握することができる。なお、上述の処理を行う際は、「水平方向 2 方向」の観測データを用いる。

上記処理で得られた栈橋の振動伝達特性（栈橋と背後地盤の H/H スペクトル比として求めた伝達特性）のピーク値を確認することで、栈橋の固有周期の値を推定することができる。

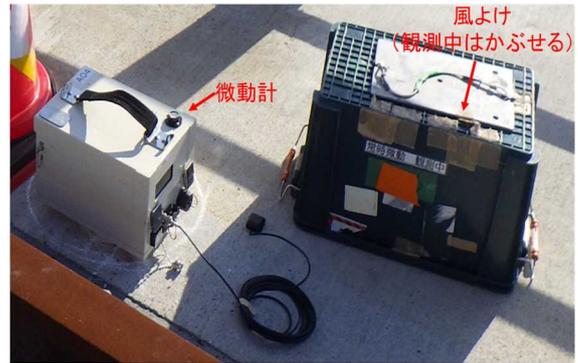


図-2.2 常時微動観測に用いられる機器の一例

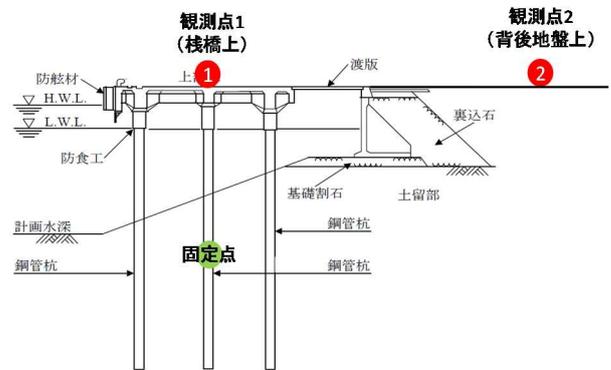


図-2.3 栈橋での微動観測位置のイメージ

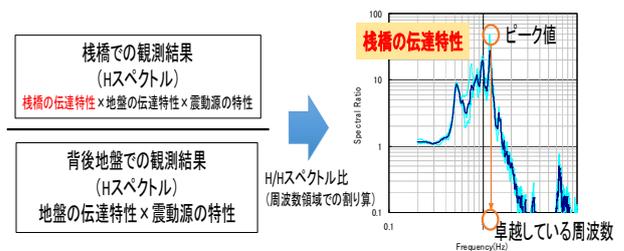


図-2.4 栈橋の伝達特性の求め方のイメージ

## 2.3.2 既往研究のレビューと本検討の位置づけ

### (1) 既往研究のレビュー

常時微動観測を用いた栈橋固有周期の推定手法に関する研究事例として、高原ら<sup>3)</sup>は、常時微動観測の港湾構造物周辺への適用可能性について検討を行い、常時微動観測による固有周期の推定結果が、二次元有限要素解析の結果と整合したことをもって、常時微動観測は港湾構造物へ適用できると結論づけている。

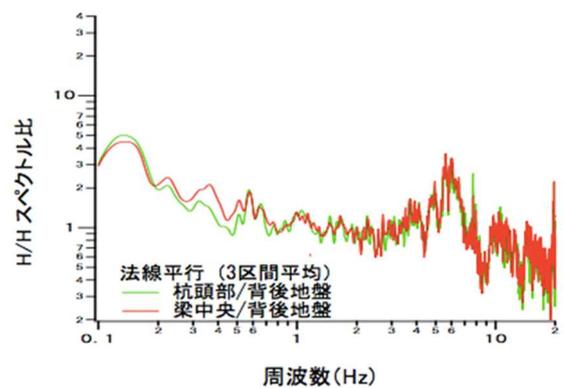
また、長尾ら<sup>4)</sup>も、常時微動観測による栈橋固有周期の推定方法の適用可能性について検討を行った。長尾ら<sup>4)</sup>は、川崎港、横浜港の栈橋における実際の強震観測記録と常時微動観測から推定された固有周期を比較した。結論として、常時微動観測による固有周期の推定結果が強震記録に基づく推定結果と整合していたことをもって、栈橋の固有周期は常時微動より推定できるとした。

一方で、佐藤ら<sup>2)</sup>の研究によると、上述した観測方法に基づく栈橋の伝達特性のピーク値の算定方法のみでは、固有周期を明瞭に評価することが出来ない場合もあることが示唆されている。佐藤ら<sup>2)</sup>は、佐伯港の水深-10mの直杭式横栈橋の1号バース、2号バースについて微動観測を実施した（両バース共に改良を検討していたため、両バースにおいて観測を実施している。両バースの比較を行う目的ではない）。観測結果として得られた栈橋と背後地盤の法線平行方向と法線直角方向のH/Hスペクトル比を図-2.5に示す。

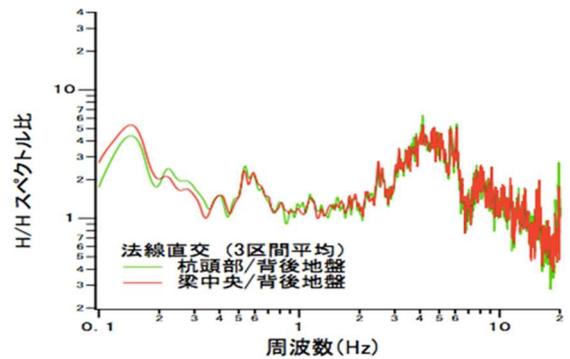
図のように、0.2Hz以下、0.6Hz付近、4~5Hz付近の3カ所にピークが両バースに共通して出現しているが、0.2Hz以下および4~5Hz付近のピークについて、固有周期の対象から除外している。佐藤ら<sup>2)</sup>は4~5Hzのピークは渡版（グレーチング）により上部工が固定されていることで生じた高次振動モードのピーク周波数、0.2Hz以下のピークは波浪の影響により生じたピークであるとそれぞれ推察し、0.6Hz付近のピークを栈橋の固有振動数に対応するピークと結論づけている。ただし、これらの推察を検証するための観測や分析までは実施されておらず、図-2.3に示した位置での一般的な観測方法のみでの検討であり、実栈橋の固有振動数が十分高精度に推定可能かどうかについては議論されていない。

### (2) 本検討の位置づけ

このため本研究では、実栈橋の固有周期（固有振動数）を微動観測結果により高精度に推定するための基礎的検討として、次の章に示す3つの実栈橋において、様々な要因下での微動観測を行い、実栈橋の固有周期を推定する場合の留意点ならびに観測手法について検討を行うこととした。なお、本研究における「様々な要因」とは、上述の既往研究等を参考として、1) 波浪、2) 潮汐変化、3) 栈橋背後の渡版の有無、4) 振動源の影響を代表要因として取り扱うこととした。



(a) 法線平行方向の結果



(b) 法線直角方向の結果

図-2.5 佐藤ら<sup>2)</sup>の研究における栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比【佐伯港1号バース】

### 3. 微動観測等の実施内容及びその観測結果の整理

#### 3.1 本章の概要

本研究における観測対象施設は3地点（小名浜港，川崎港，神戸港）の直杭式栈橋である．3.2では，観測機器類の設置方法と，観測から得られる結果の代表的な処理方法について説明し，各施設における観測実施状況や具体的な観測結果は3.3以降に記載する．

#### 3.2 観測機器類の設置方法と結果の処理方法に関する概要

##### 3.2.1 常時微動計の設置と観測手法

観測に使用した常時微動計を図-3.1に，またその配置の考え方を図-3.2にそれぞれ示す．図-3.2に示すとおり，栈橋上の各位置での振動の違いの有無，構造全体の振動モードを把握するため，栈橋上部工1ブロックに対して微動計を複数配置した．配置の基本的な考え方は，栈橋上部工の水平面内における並進運動と回転運動を同時に把握するために，栈橋ブロックの中心（1箇所）と四隅（4箇所）の合計5か所に微動計を配置するものである．なお，隣接ブロックとの違いを確認するため，観測対象とした栈橋ブロックに接している二隅（2箇所）についても微動計を設置した（図-3.2参照）．

また，渡版の存在が栈橋の振動に及ぼす影響を把握するため，栈橋背後に土留護岸が存在する場合は，土留め護岸上に護岸法線から0.5m～3m程度離れた位置に微動計を設置した．

更に，栈橋上部工の観測結果から地盤の伝達特性を取り除き，栈橋の伝達特性のみを抽出する目的で，背後地盤上にも，土留め法線から30m陸側に微動計を1つ設置した．この設置位置は，鈴木らの報告<sup>5)</sup>を参考に，土留部の護岸構造物（ケーソン等）の常時微動観測記録への影響が小さくなる位置として設定したものである．

常時微動観測の実施に際しては，栈橋の法線平行方向および法線直角方向の水平2成分，および鉛直1成分の合計3成分に対し，サンプリング周波数100Hzでデータを取得した．観測に用いた全ての微動計はGPSを用いて時刻の同期を行った．

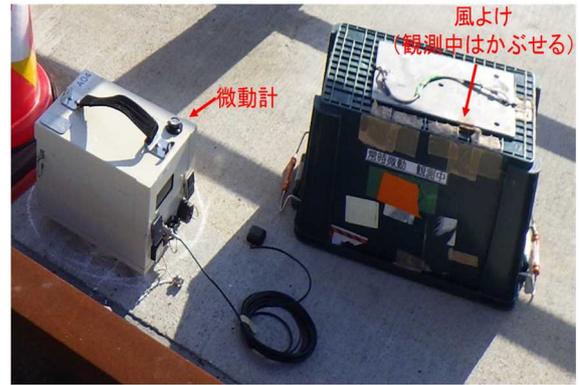


図-3.1 微動計（再掲）

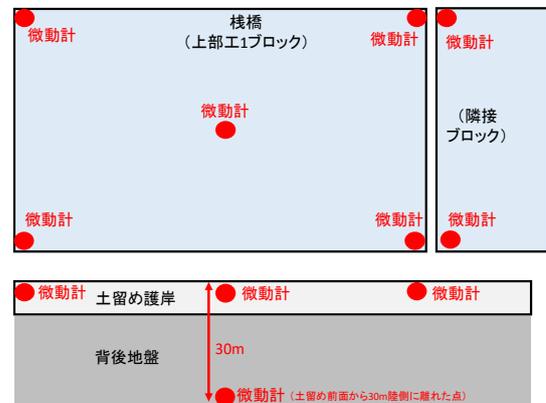


図-3.2 栈橋上での微動計の配置位置

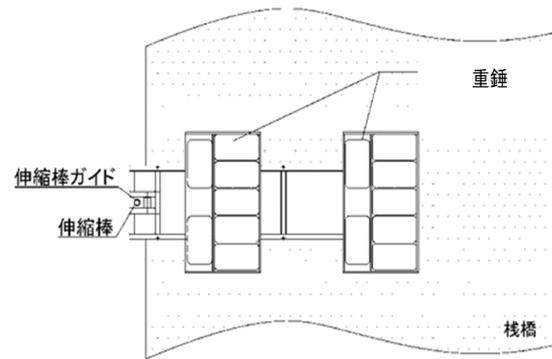
### 3.2.2 水圧式波高計の設置と観測手法

2.3.2 に示した佐藤らの研究<sup>2)</sup>において指摘されていた、波浪が微動観測結果に与える影響を確認するため、観測地点の近隣において水圧式波高計を設置し、常時微動観測の実施と同時に海面変動のデータを取得した。これにより、栈橋上及び背後地盤上の微動観測結果を解析して得られる H/H スペクトル比のピーク周波数が水圧の変動周期（周波数）と合致するか否かを確認することができる。

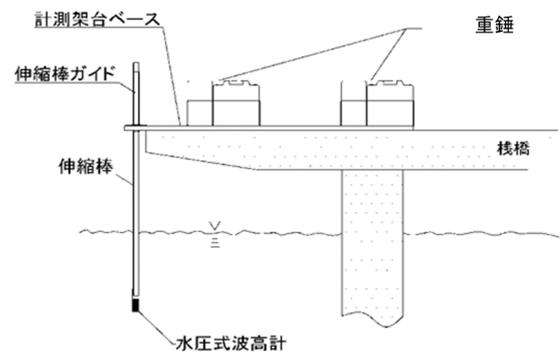
水圧式波高計は微動観測位置に極力近い位置に、栈橋法線から海側に突き出す形で図-3.3 のように設置した。図-3.4 は、水圧式波高計を設置する際に用いた治具の模式図である。治具の栈橋法線直角方向の長さは概ね 2.25m であり、波高計設置の際のバランスをとるため、250kg 程度の重錘を治具上に設置した。なお、治具部の詳細な寸法については付録 D に示す。今回観測においては、設置上の制約が存在する場合があったため、各観測箇所の詳細設置地点に関しては以下の 3.3 以降に個別に記述する。水圧式波高計による観測時のサンプリング周波数は 10Hz とした。



図-3.3 本研究で実施した波浪観測の様子



(a)平面方向



(b)断面方向

図-3.4 波浪観測装置の設置治具の模式図

### 3.2.3 観測記録の処理

#### (1) フーリエスペクトルの算定

微動観測計および水圧式波高計によって得られた時刻歴波形から卓越周波数を把握するため、フーリエ振幅スペクトルの算定を行った。

微動観測結果から求める場合は、加速度記録から交通ノイズなどの影響の少ないと考えられる区間（163.84秒間）を3区間抽出し高速フーリエ変換を行った。微動観測記録に関しては3成分の記録が取得されているため、成分毎に算定した。

水圧式波高計の場合は、3区間（ノイズの少ない区間）を抽出した高速フーリエ変換は行わず、20分毎のデータそのものに対してフーリエ変換を行っている。

#### (2) 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比の算定

栈橋上に設置された微動計の観測結果には、地盤の伝達特性の影響が含まれる。このため、栈橋本体の振動特性を把握する目的で、高原ら<sup>3)</sup>および長尾ら<sup>4)</sup>の方法に準じて、以下の処理を行いH/Hスペクトル比を算出した。

まず、上記(1)で得られた水平2成分（法線平行方向、法線直角方向）のフーリエスペクトルを成分毎にバンド幅0.05HzのParzenウィンドウで平滑化した。その後、栈橋上の記録に関する水平成分のフーリエスペクトルを、背後地盤上（土留め法線から30m陸側に離れた地点）の水平成分のフーリエスペクトルで除することにより、H/Hスペクトル比を算出した。この結果は、法線平行方向および法線直角方向の2成分に対して得られる。栈橋本体の卓越振動数（周期）は、各成分に対し、H/Hスペクトル比のピークに対応する周波数（周期）として評価することができる。

この際、3つの時間区間に対するH/Hスペクトル比を算定し、結果の安定性を確認した後、3つの時間区間のデータのH/Hスペクトル比を平均処理（相加平均）することによって、当該栈橋におけるH/Hスペクトル比とした。

また、地盤の伝達特性は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>の方法に基づき、栈橋の背後地盤上の微動観測結果を用いて、H/Vスペクトル（水平2成分のフーリエスペクトルの2乗平均の平方根を、鉛直成分のフーリエスペクトルで除したもの）によって評価した。

#### (3) 変位軌跡の算出

上記(2)のH/Hスペクトル比によって栈橋の固有振動数（固有周期）が同定されたと仮定する。栈橋と背後地盤の応答特性が異なり、かつ、同定された栈橋の固有振動数が実際の固有振動数に近い場合、当該周波数付近の

成分のみを有する時刻歴波形を微動観測結果から抽出し、栈橋と背後地盤の結果を比較すると、栈橋のみが大きく振動していると考えられる。このことを確認するため、以下の要領で特定の周波数帯に対応する栈橋上部工の平面的な変位軌跡を抽出した。

まず微動観測によって得られた加速度時刻歴波形をフーリエ変換し、周波数領域で2回積分を行なったのち、抽出したい周波数帯をとりだすようなバンドパスフィルタをかける（本研究では4次のバターワースフィルタを使用した。4次のバターワースフィルタの周波数応答 $G(\omega)$ は式(3.1)の形で表される。）。そのデータに対して逆フーリエ変換を施すことによって、特定周波数付近の成分のみを含む時刻歴変位波形を求めることができる。この処理を法線平行方向、法線直角方向の各成分に施すことにより、栈橋上部工の平面的な変位軌跡を抽出した。なお、周波数応答 $G(\omega)$ が式(3.1)の形で表されるバターワースフィルタについてはハイカットフィルタであるが、 $(\omega/\omega_c)$ について逆数をとった形 $(\omega_c/\omega)$ で使用することで、ローカットフィルタとして使用することができる。本研究では $n$ を4として、4次のバターワースフィルタとして使用した。

この変位軌跡の抽出によって、H/Hスペクトル比に基づく栈橋の固有振動数の同定結果の妥当性を評価することに加え、栈橋上部工に配置された複数の微動計記録に基づく変位軌跡を確認することで、栈橋上部工の振動モードや、渡版の有無による背後地盤との挙動の一体性についても考察することができる。

$$G^2(\omega) = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (3.1)$$

$G(\omega)$ ：バターワースフィルタの周波数応答

$\omega$ ：周波数

$\omega_c$ ：遮断周波数

$G_0$ ：利得

$n$ ：フィルタの次数

### 3.3 小名浜港栈橋の事例

#### 3.3.1 対象施設の構造と観測条件

小名浜港においては、小名浜港東港地区に存在する設計水深：D.L. -20.6mの栈橋（耐震）で観測を行った。当該栈橋の位置を図-3.5に示す。当該施設の構造形式は、上部工がPC構造である直杭式横栈橋であり、本栈橋の平面図の概略を図-3.6に示す。図に示すように、栈橋本体と背後地盤には約15mの距離があり、3つの栈橋ブロックには幅8.5m、11.6mの渡版が栈橋と背後地盤の間に渡されている。当該施設は、観測を行った2018年10月現在で施工途中の構造物であり、栈橋本体及び渡版については既に施工が終了していたが、石炭バルクを輸送するためのアンローダーの基礎部およびベルコン部が施工中の状態であった。なお、観測当日は主たる施工作业は実施されていなかった。対象施設の断面図や構造の詳細図については付録Aに示す。

栈橋1ブロックの大きさは、法線平行方向に37m、同直角方向に29.8mである。法線方向に隣接するブロックの間は縁が切れている構造で、ブロック間には10mmの目地材（ケンタイト）が詰められていた。

この構造における渡版の有無による栈橋の微動観測結果の違いを把握するため、図-3.6に示す「第6ブロック（渡版あり）」と「第7ブロック（渡版なし）」の2地点について、微動計を3.2に示した要領により、図-3.7及び図-3.8のように配置した。栈橋前面の水面変動を観測するための水圧式波高計は、当該観測ブロックの近隣に設置することが望ましいと考えられるが、現地の施工の妨げとなると判断したため、本観測対象施設においては、図-3.6に示すように栈橋の一番沖側となる第10ブロックに設置した。観測時の栈橋の状況を図-3.9、図-3.10、図-3.11に示す。このうち図-3.11には渡版部の状況を示しているが、渡版はゴムマット（STパット）を介して護岸と接しており、後述の川崎港の栈橋に比べ渡版による栈橋上部工の拘束効果は小さいと考えられる。

なお、通常の常時微動観測は15分程度の観測時間をとる場合が多いが、本研究では栈橋前面の潮位が異なる場合の微動観測記録への影響を把握するため、9時～16時を観測時間と設定した。この時間は、観測日当日の潮位情報を事前に気象庁のデータで確認した上、満潮時と干潮時で観測可能のように設定したものである。また、当該施設は施工途中であったことから、入構時間上の制約も考慮している。水圧式波高計は観測時間中継続して記録を取得し続け、微動計については、その数が限られていたことから、「第6ブロック（渡版あり）」と「第7ブロック（渡版なし）」を交互に移動しながら計測を行な

った。各ブロックでの常時微動観測の実施時間については、図-3.12に示すとおり5つの時間帯（9時40分～、10時12分～、13時56分～、14時48分～、15時40分～）で各20分間程度行った。



図-3.5 栈橋の位置図

（港湾計画図は福島県ホームページ<sup>6)</sup>より引用）

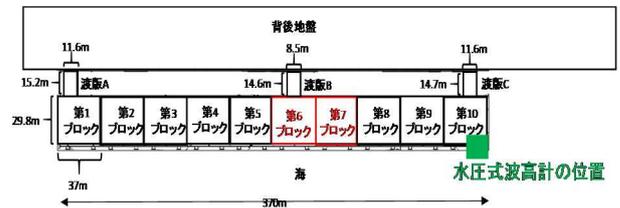


図-3.6 栈橋の平面図

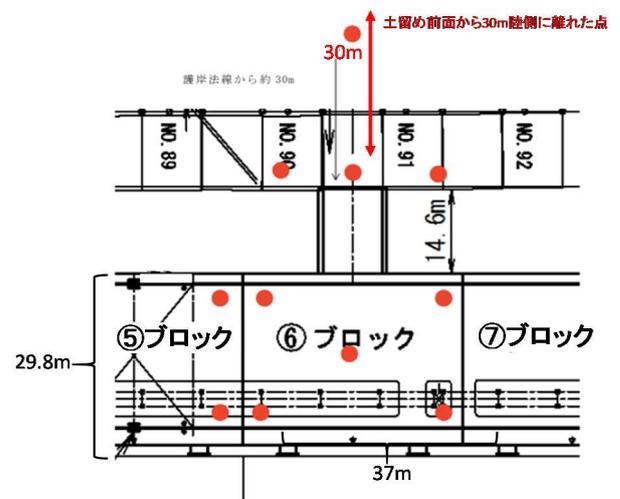


図-3.7 第6ブロック（渡版あり）の計器の設置場所（図面の下方向が海側、赤丸が微動計の設置位置）

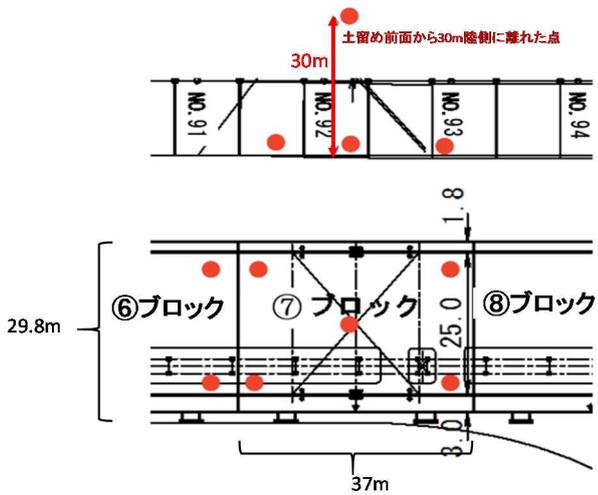


図-3.8 第7ブロック（渡版なし）の計器の設置場所  
（図面の下方向が海側，赤丸が微動計の設置位置）



図-3.11 観測時の渡版の状況（護岸側）



図-3.9 観測時の栈橋の状況（第6ブロック全景）

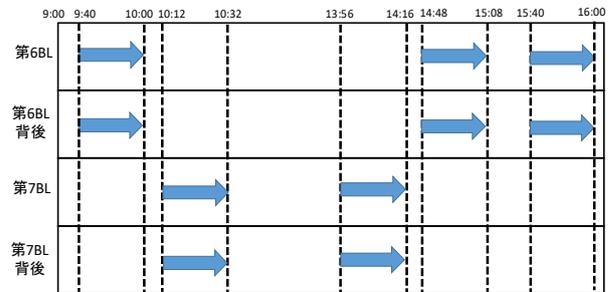


図-3.12 各ブロックでの常時微動観測の実施時間



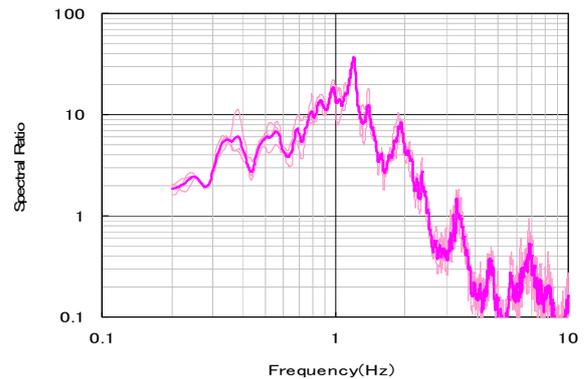
図-3.10 観測時の栈橋の状況（目地部）

### 3.3.2 観測結果および栈橋固有振動数の推定結果

#### (1) 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比

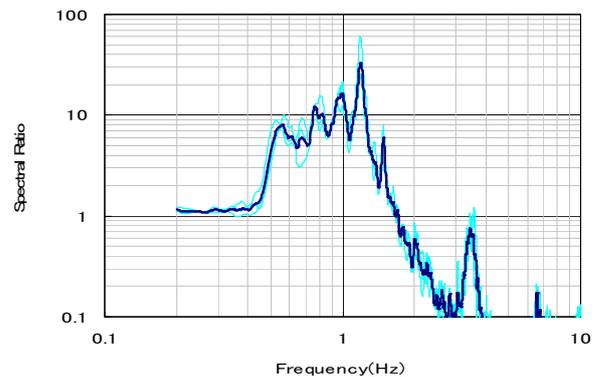
微動観測結果から得られた栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比について示す。H/Hスペクトル比を算出するにあたっては、栈橋上観測対象ブロックの中心の観測点のデータを使用する。以下特に断りのない場合は、H/Hスペクトル比の算出には栈橋上観測対象ブロックの中心の観測点のデータを使用する。図-3.13は渡版が存在する第6ブロック、図-3.14は渡版が存在しない第7ブロックのある時間帯(20分間)のH/Hスペクトル比の算出結果である。図(a)には栈橋の法線方向、図(b)には法線直角方向のH/Hスペクトル比の結果を示す。本研究では、3.2.3で示したように3つの時間区間のデータのH/Hスペクトル比を平均処理(相加平均)することによって、当該栈橋におけるH/Hスペクトル比としている。図中では、3つの時間区間のデータを細線、それらを平均処理(相加平均)した結果を太線で示している。これは、以後掲載する同様の図についても同じである。なお、第6ブロックは9:40~10:00、第7ブロックは10:12~10:32を代表としてここでは掲載しているが、全時間にわたってH/Hスペクトル比の全体形状及び主要なピーク位置の周波数に変化はなかった。今回観測したすべての時間における結果は付録Aにて示す。

この結果のみで判断した場合、当該栈橋構造の固有振動数は栈橋法線平行方向、直角方向ともに1.2Hz程度であると推定され、かつ、本事例では渡版の存在によるピーク周波数の違いもほとんどないと判断される。以下、この固有振動数の推定結果に関する考察を進めるため、各種要因に着目して推定結果の妥当性評価を行う。

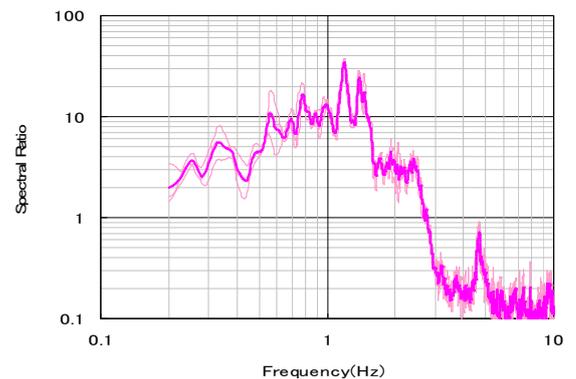


(b)法線直角方向 (9:40~10:00の記録)

図-3.13 第6ブロックと背後地盤のH/Hスペクトル比

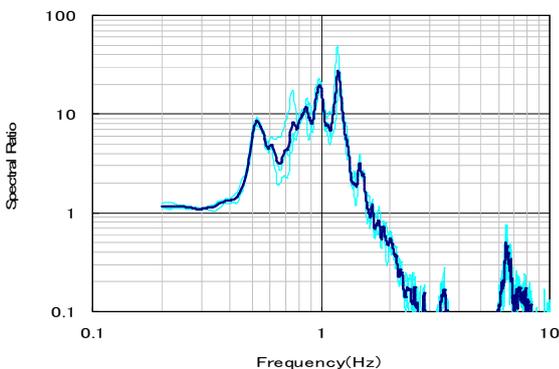


(a)法線平行方向 (10:12~10:32の記録)



(b)法線直角方向 (10:12~10:32の記録)

図-3.14 第7ブロックと背後地盤のH/Hスペクトル比



(a)法線平行方向 (9:40~10:00の記録)

(2) H/Hスペクトル比の算定結果に影響を及ぼすと考えられる要因と栈橋固有振動数の推定結果への影響

(a) 背後地盤の影響

図-3.15に渡版が存在する第6ブロックの背後地盤のH/Vスペクトル比、図-3.16に渡版が存在しない第7ブロックの背後地盤のH/Vスペクトル比を示す。

背後地盤は、両者の H/V スペクトル比の比較により、共に 1.4~1.6Hz 付近の周波数が卓越している。なお、図-3.15、図-3.16 に示した時間 (9:40-10:00, 10:12-10:32) 以後も計測は行ったが、背後地盤の H/V スペクトル比の主要なピーク位置はほとんど変わらなかった。

同図より、背後地盤の H/V スペクトル比のピークは 1.4~1.6Hz となっており、図-3.13、図-3.14 の H/H スペクトル比にはこのピークは際だって出現していない。このことから、H/H スペクトル比をとることで地盤の振動特性はほぼ除去できていると考えられる。

(b) 波浪の影響

波浪のフーリエスペクトルの代表例を図-3.17 に示す。0.1Hz 付近に顕著なピークが見られ、これが観測期間中の波浪の卓越振動数であると考えられる。図-3.17 に示した時間 (9:40-10:00) 以後も計測を継続したが、波浪のフーリエスペクトルのピークの位置はほとんど変化しなかった (9:40-10:00 以後の結果については、付録 A に示す)。なお、1.6Hz 付近に小さなピークが見られるが、これは潮位が高い時間帯に顕著に表れており、また、栈橋と背後地盤の V/V スペクトル比 (付録 A に記載) のピークと一致していることから、波が栈橋上部工を打ちつけることによる上部工の鉛直振動が、上部工に固定された波高計による観測結果に表れたものであると判断した。

このため、当該観測地点における栈橋前面の波浪は、栈橋の固有振動数の推定結果に特段の影響をもたらさないと判断した。

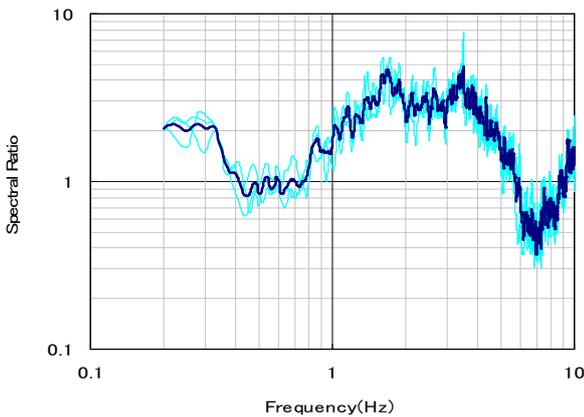


図-3.15 第6ブロックの背後地盤のH/Vスペクトル比 (9:40-10:00の記録)

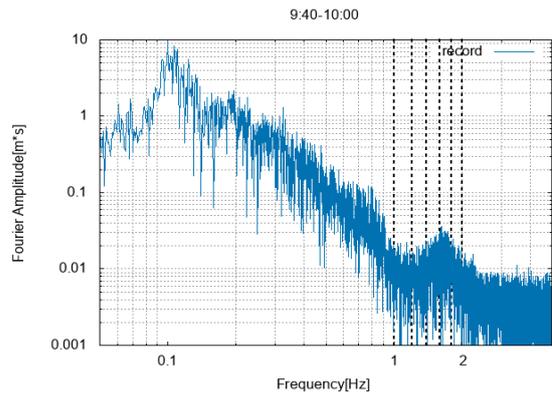


図-3.17 波浪のフーリエスペクトル (9:40~10:00の記録)

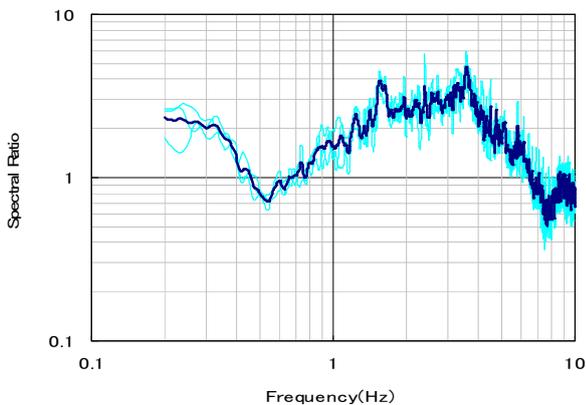


図-3.16 第7ブロックの背後地盤のH/Vスペクトル比 (10:12-10:32の記録)

(c) 潮位の影響

図-3.18 には水圧式波高計を用いて栈橋前面における潮位変動を測定した結果を示す。図-3.18 の上の青線は、観測で得られた潮位変動を示しており、下の赤線は2分毎の移動平均で基線補正した結果を示している。また図から潮位差は0.75m程度、有義波高は0.5m程度であると考えられる。

潮位の違いがH/Hスペクトル比にもたらす影響を確認するため、同図から判断された潮位の最も低い時間(10:00頃)と最も高い時間(16:00頃)を含む観測時間帯における、6ブロックの法線平行のH/Hスペクトル比の比較を図-3.19 に示す。図より、両者のピーク位置(1.2Hz程度)はほとんど変化しておらず、観測時の潮位変化は栈橋固有振動数の推定結果にほとんど影響を及ぼさない結果であった。法線直角方向についても同様の結果であった。

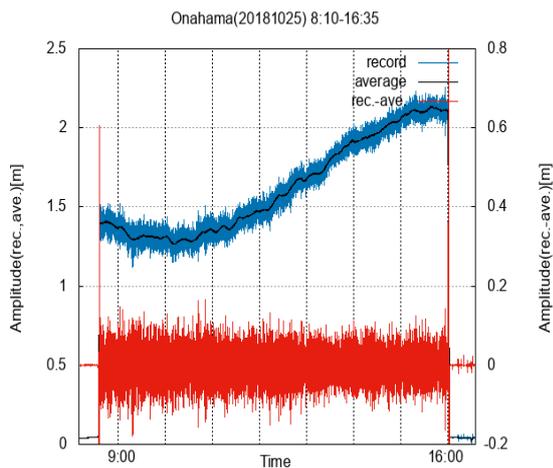
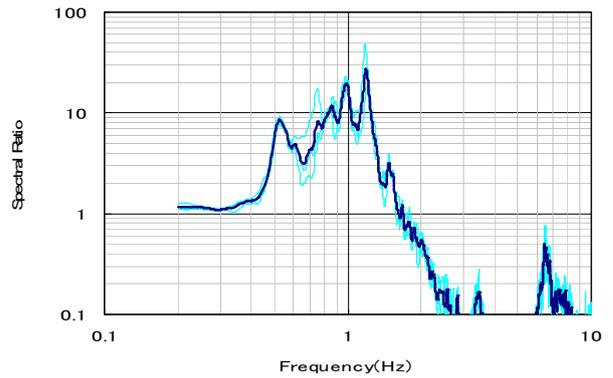
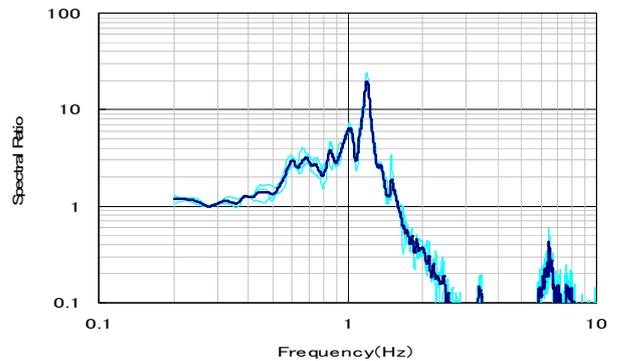


図-3.18 水圧式波高計で得られた水面変位



(a) 第6ブロックと背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 9:40~10:00 の記録)  
【潮位が低い時間帯】 (再掲)



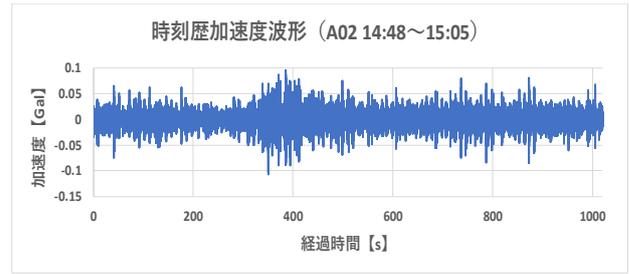
(b) 第6ブロックと背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 15:40~16:00 の記録)  
【潮位が高い時間帯】

図-3.19 潮位の高い時間と低い時間でのH/Hスペクトル比のグラフの比較

(d) 振動源の影響

当該観測地点は施工中の現場であり、観測日の9:00～14:00頃、図-3.20の平面図に示す位置（微動観測場所から約300m離れた地点）付近でバイプロハンマー（電動バイプロ/ZERO-320IIMR）を用いた栈橋鋼管杭（杭径：1500mm）の打設が行われていた。鋼管杭打設時と打設終了後の加速度時刻歴波形の比較を図-3.21に示す。

次に、鋼管杭打設時と打設終了後のH/Hスペクトル比の代表例を図-3.22に示す。図から、本栈橋の固有振動数と考えられるピークの位置（1.2Hz程度）に大きな違いがみられないことから、今回の条件下では、杭打設に伴う振動は、栈橋の固有振動数の推定結果には影響を及ぼさないことが分かった。

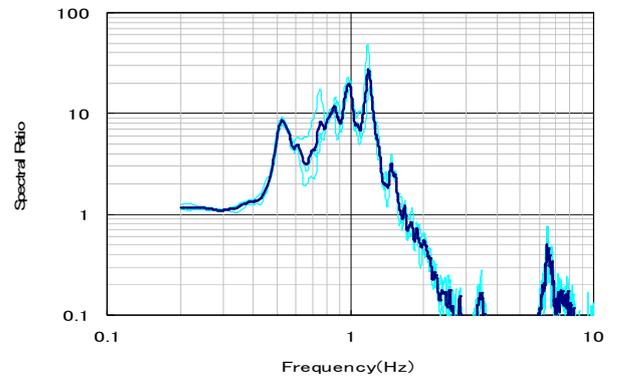


(b) 杭打設後の加速度時刻歴波形  
(14:48～15:05の記録)

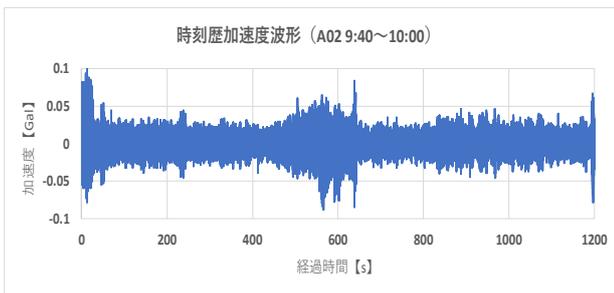
図-3.21 鋼管杭打設時と打設終了後の  
加速度時刻歴波形の比較



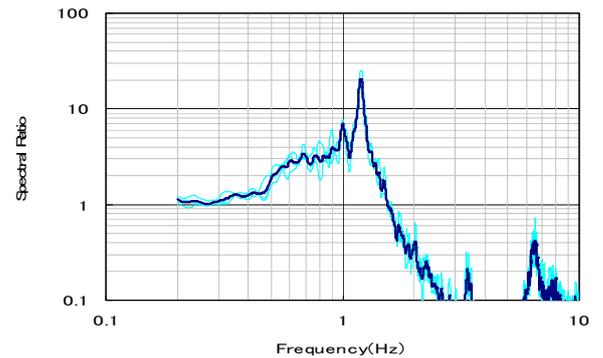
図-3.20 バイプロハンマーでの栈橋杭の打設位置  
の平面図



(a) 第6ブロックと背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向9:40～10:00の記録) 【杭打設中】  
(再掲)



(a) 杭打設時の加速度時刻歴波形  
(9:40～10:00の記録)



(b) 第6ブロックと背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向14:48～15:05の記録)  
【杭打設終了後】

図-3.22 バイプロハンマーでの栈橋杭の打設中と打設  
終了後でのH/Hスペクトル比のグラフの比較

### (3) 変位軌跡の確認

上記(2)での結果より、当該栈橋の固有振動数は栈橋の法線平行方向・直角方向ともに1.2Hz付近であると推定される。この周波数帯における栈橋上部工の振動の特徴を更に確認するため変位軌跡の確認を行う。

図-3.23に、第6ブロックの変位軌跡の結果を示す。変位軌跡の抽出にあたっては、1.2Hzを中心とした1.0-1.5Hzの帯域を、帯域通過フィルタを使用して切り出した。帯域通過フィルタとしてバターワースフィルタ(4次)を使用し、1.0Hzを遮断周波数( $\omega_c$ )とするローカットフィルタ、1.5Hzを遮断周波数( $\omega_c$ )とするハイカットフィルタとして作用させ、目的の帯域を抽出した。また、図示するにあたっては、加速度時刻歴波形(単位:gal)を積分して得られた変位時刻歴波形(単位:cm)を、変位の最大値が10になるように規格化して描いている(図中の目盛り線で囲まれた1マスの辺の長さが10)。本研究では、各観測点の相対的な差異を把握する目的で変位軌跡を描いたため、特に正確な変位を確認するような図示ではなく、上記のような図示を行った。後述の川崎港、神戸港の結果においても同様である。

なお、この変位軌跡は推定した固有振動数付近の波のほぼ1周期分(=1/1.2秒)の時間を抽出して描いたものであり、図で抽出している時間は約1秒分である。時刻歴変位波形から抽出する約1秒分のデータについて、図では「9.1秒~10.1秒(9:40:00を0秒とした時)」を例として示している。

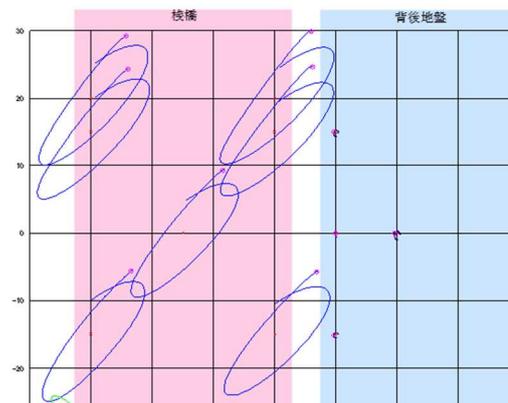
図-3.23に示すとおり、抽出した固有振動数付近では背後地盤の変位量は栈橋上のそれと比較して極めて小さく、この周波数帯域では栈橋が背後地盤と明確に異なる独自の挙動を示していることがわかる。また、栈橋上の複数地点での変位軌跡はいずれも似通っており、並進運動が卓越していることがわかる。この点は、後述の川崎港栈橋と大きく異なっている。これらの特徴は図に示していない時間帯についても概ね同様であった。

渡版が存在しない第7ブロックの変位軌跡を図-3.24に示す。渡版が存在する第6ブロックの結果とほぼ同様の傾向であり、渡版が存在することによる変位振幅の明らかな違いも見られなかった。このことから、小名浜港栈橋において、栈橋上部工の挙動に対し、渡版は大きな影響を及ぼしていないと考えられる。これは、3.3.1で述べたように、渡版がゴムマット(STパット)を介して護岸と接しており、渡版による栈橋上部工の拘束効果が小さいためと考えられる。

なお、栈橋上の微動計設置位置の変位軌跡を見ると、渡版の有無に関わらず、栈橋法線平行方向と直角方向の

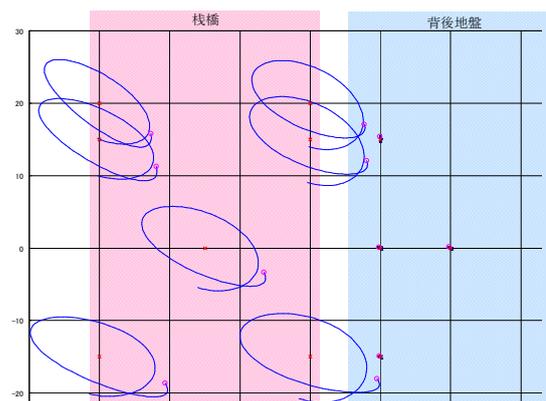
どちらかに偏って動くわけではなく、両成分の変位が同時に生じていることがわかる。すなわち、栈橋上部工は、法線平行方向または直角方向に単純に振動する訳ではなく、両方向の中間方向に並進運動をしている。

また、各ブロックはほぼ一体として動いていること、渡版の有無にかかわらず栈橋の固有振動数は同じであることから、栈橋上の最小限の微動計配置を考える際は、小名浜港の当該栈橋上では対象地点付近の1地点で栈橋の常時微動を代表できると考えられる。



9.1~10.1秒の変位軌跡 (1.0~1.5Hzの帯域)  
(9:40~10:00の記録)

図-3.23 第6ブロックの変位軌跡



9.1~10.1秒の変位軌跡 (1.0-1.5Hzの帯域)  
(10:12~10:32の記録)

図-3.24 第7ブロックの変位軌跡

### 3.4 川崎港棧橋の事例

#### 3.4.1 対象施設の構造と観測条件

川崎港においては、千鳥町地区に存在する設計水深 D.L. -10m の棧橋で観測を行った。当該棧橋の位置を図-3.25 に示す。当該施設の構造形式は、上部工が RC 構造である直杭式横棧橋であり、本棧橋の平面図の概略を図-3.26 に示す。図に示すように、棧橋本体と背後地盤（護岸法線）との離隔は 6m であり、棧橋全長にわたって渡版が棧橋と背後地盤の間に設置されている。棧橋 1 ブロックの大きさは、法線平行方向に 18m、同直角方向に 19m 程度である。また、法線方向に隣接するブロックの間は縁が切れている構造であった。なお、対象施設の断面図や構造の詳細図については付録 B に示す。

本棧橋においては微動計を 3.2 に示した要領により図-3.26 のように配置した。棧橋前面の水面変動を観測するための水圧式波高計は、観測ブロックの近隣に設置することが望ましいと考えられるが、微動観測実施場所の前面（海側）には車止めがあり水圧式波高計の設置が困難であったため、本観測対象施設においては、図-3.26 に示すように観測ブロックから 100m 程度離れた場所に設置した。

図-3.27 に観測した棧橋の観測時の状況を示す。また、観測日とは別の日の昼間に撮影した渡版と棧橋の状況を図-3.28 に示す。渡版の断面図は付録 B に示している。渡版の下部と護岸がどのような状態で接しているか（ゴムマットを介しているか）など、不明な点はあるが、本施設においては渡版が全長にわたり設置されており、経年的な変化もあるので、小名浜港棧橋に比べ、渡版による棧橋上部工の拘束効果は大きいものと推察される。

なお、本棧橋では、日中は荷役が行われているため、夜間での観測を行った。常時微動観測の実施時間は図-3.29 に示すとおり、19時～19時20分（満潮時の時間帯）と3時～3時20分（干潮時の時間帯）で行った。なお、これらの時間は、観測日当日の潮位情報を事前に気象庁のデータで確認した上、満潮時と干潮時で観測可能となるように設定したものである。

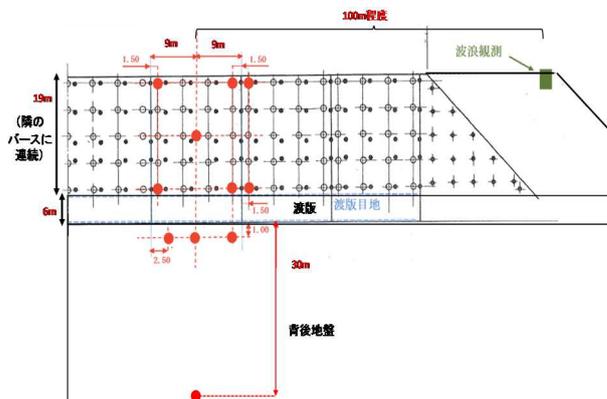


図-3.26 棧橋の平面図（赤丸が微動計の設置位置）



図-3.27 棧橋の状況（観測時全景）



図-3.25 棧橋の位置図

(港湾計画図は川崎市ホームページ<sup>7)</sup> より引用)



図-3.28 観測対象とした棧橋の状況（渡版部）

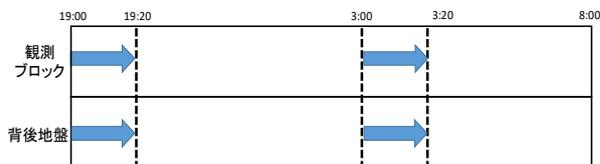


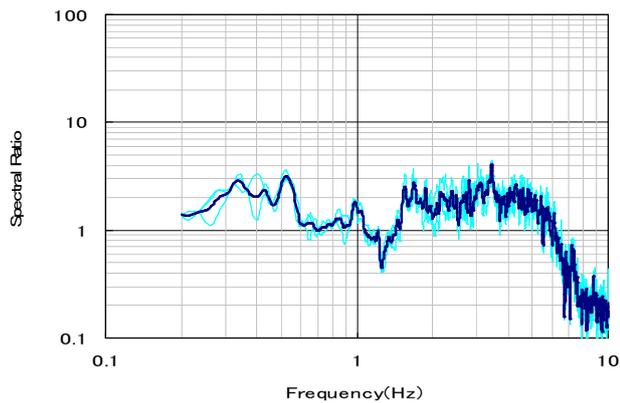
図-3.29 各ブロックでの常時微動観測の実施時間

### 3.4.2 観測結果および橋固有振動数の推定結果

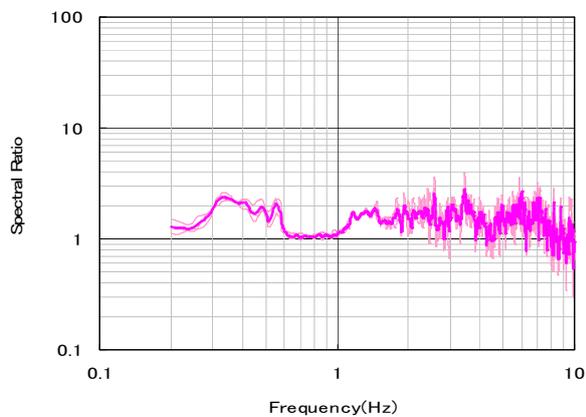
#### (1) 橋と背後地盤のH/Hスペクトル比

微動観測結果から得られた橋と背後地盤のH/Hスペクトル比(法線平行方向, 法線直角方向)について図-3.30に示す。図では今回観測を行った19:00~19:20および3:00~3:20のH/Hスペクトル比をともに掲載しているが, どちらの時間帯においても, H/Hスペクトル比のピークが小名浜港橋(3.3)や後述の神戸港橋(3.5)と比較して不明瞭であった。

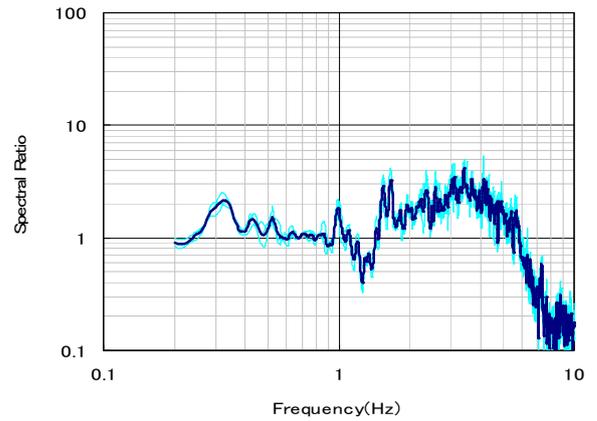
本橋においては, 法線直角方向のH/Hスペクトル比のピーク値は不明瞭であったが, 法線平行方向のH/Hスペクトル比には1.5Hz付近および3.0Hz付近にややピークが見られ, これらが橋の固有周期数に対応する可能性があるかと推定した。以下, この推定結果に関する考察を進めるため, 各種要因に着目して推定結果の妥当性評価を行う。



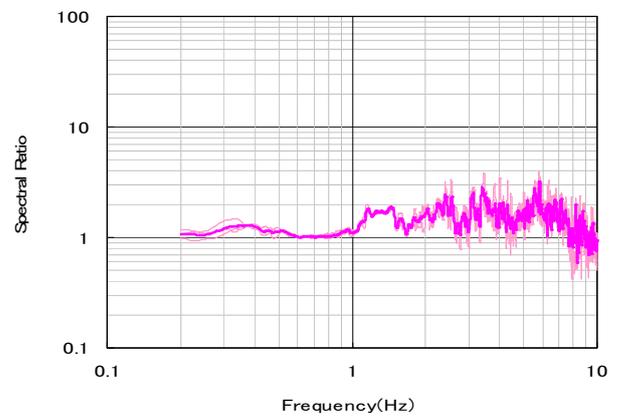
(a)法線平行方向 (19:00~19:20の記録)



(b)法線直角方向 (19:00~19:20の記録)



(c)法線平行方向 (3:00~3:20の記録)



(d)法線直角方向 (3:00~3:20の記録)

図-3.30 橋と背後地盤のH/Hスペクトル比

(2) H/Hスペクトル比の算定結果に影響を及ぼすと考えられる要因と栈橋固有振動数の推定結果への影響

(a) 背後地盤の影響

背後地盤のH/Vスペクトル比を図-3.31に示す。本図より、背後地盤では1.0Hz付近の周波数が卓越していることがわかる。なお、図に示した時間(19:00-19:20)以後も計測は行ったが、背後地盤のH/Vスペクトル比のピークはほとんど変わらなかった。一方で、図-3.30に示したH/Hスペクトル比にはこのピーク(1Hz付近)はほとんど出現していない。このことから、H/Hスペクトル比をとることで地盤の振動特性はほぼ除去できていると考えられる。

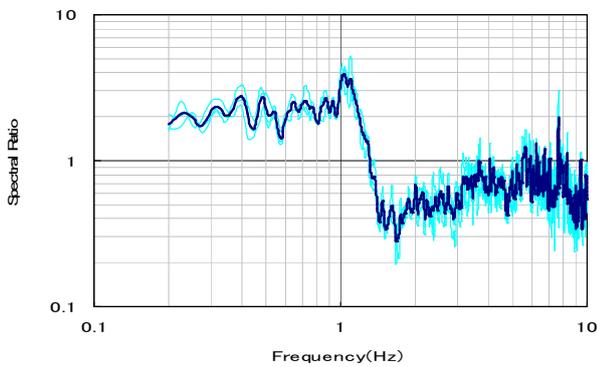


図-3.31 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(19:00-19:20の記録)

(b) 波浪の影響

波浪のフーリエスペクトルの代表例を図-3.32に示す。0.3Hz付近に顕著なピークが見られ、これが観測期間中の波浪の卓越振動数であると考えられる。図-3.32に示した時間(19:10-19:30)以後も計測を継続したが、波浪のフーリエスペクトルのピークの位置はほとんど変化しなかった(19:10-19:30以後の結果については付録Bに示す)。図-3.30に示したH/Hスペクトル比においても、0.3Hz付近にピークが見られるものがあり、波浪の影響により表れたピークであると考えられる。

このため、当該観測地点における栈橋前面の波浪は、H/Hスペクトル比に影響を及ぼしているものと考えられる。ただし、波浪により生じるピークは、栈橋の固有振動数が一般的に存在する帯域である1.4~2.5Hz(0.4~0.7s)程度<sup>8)</sup>よりもかなり低周波数側(長周期側)に存在しているため、栈橋の固有振動数(周期)の推定には影響しないと考えられる。

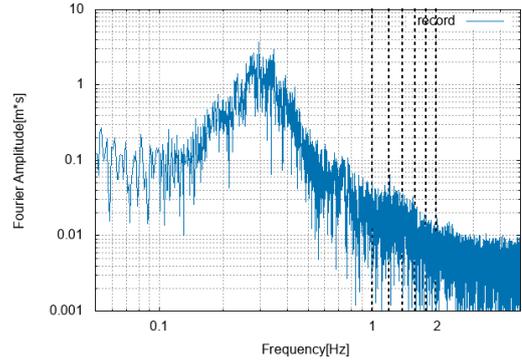


図-3.32 波浪のフーリエスペクトル  
(19:10~19:30の記録)

(c) 潮位の影響

図-3.33には水圧式波高計を用いて栈橋前面における潮位変動を測定した結果を示す。図-3.33の上の青線は、観測で得られた潮位変動を示しており、下の赤線は、2分毎の移動平均で基線補正した結果を示している。また図から潮位差は0.75m程度、有義波高は0.2m程度であると考えられる。

潮位の違いがH/Hスペクトル比にもたらす影響を確認するため、同図から判断された潮位の最も低い時間(2:30頃)と最も高い時間(20:00頃)を含む観測時間帯における、法線平行方向のH/Hスペクトル比の比較を図-3.34に示す。本図より、両者の主要なピークの位置はほとんど変化しておらず、観測時の潮位変化は栈橋固有振動数の推定にほとんど影響を及ぼさない結果であった。法線直角方向についても同様の結果であった。

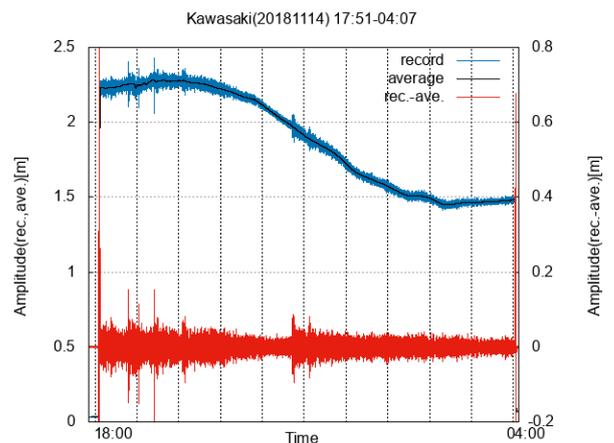
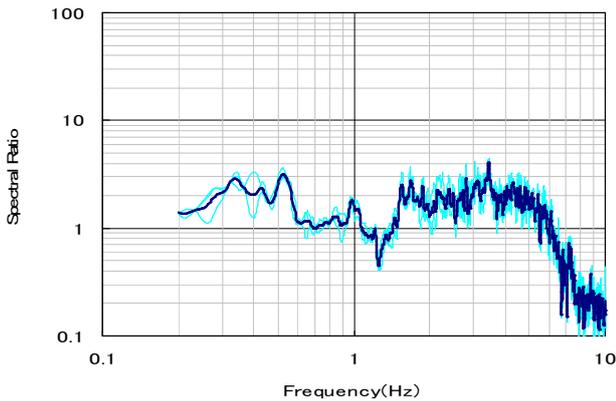
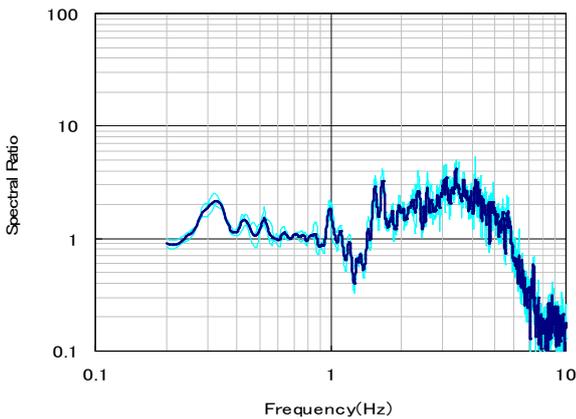


図-3.33 水圧式波高計で得られた水面変位



(a) 栈橋と背後地盤の H/H スペクトル比  
(法線平行方向 19:00~19:00 の記録)  
【潮位の高い時間帯】  
(再掲)



(b) 栈橋と背後地盤の H/H スペクトル比  
(法線平行方向 3:00~3:20 の記録)  
【潮位の低い時間帯】 (再掲)

図-3.34 潮位の高い時間と低い時間での H/H スペクトル比のグラフの比較

### (3) 変位軌跡の確認

上記(1)での考察で、法線平行方向の H/H スペクトル比に見られる 1.5Hz 付近および 3.0Hz 付近のゆるやかなピークが栈橋の固有周波数に対応する可能性があるかと推察された。この周波数帯における栈橋上部工の振動の特徴を更に確認するため変位軌跡の確認を行う。

図-3.35 に本栈橋 (川崎港) の変位軌跡の結果を示す。変位軌跡は 3.2.3(3) で述べた方法により求めた。まず 1.5Hz 付近のピークに着目し、1.45-1.95Hz の帯域

を帯域通過フィルタで切り出した。法線直角方向は 1.7Hz 付近にもややピークがみられたことから、切り出す帯域は 1.5Hz を挟んで少し高周波数側に寄せることとした。帯域通過フィルタとしてバターワースフィルタ (4次) を使用し、小名浜港の場合と同様にして目的の帯域を抽出した (1.45Hz を遮断周波数 ( $\omega_c$ ) とするローカットフィルタ、1.95Hz を遮断周波数 ( $\omega_c$ ) とするハイカットフィルタ)。次に 3.0Hz 付近のピークに着目して 2.55-3.05Hz の帯域を帯域通過フィルタで切り出した。法線直角方向には 2.6Hz 付近にもややピークがみられたことから、切り出す帯域は 3.0Hz を挟んで少し低周波数側に寄せることとした (2.55Hz を遮断周波数 ( $\omega_c$ ) とするローカットフィルタ、3.05Hz を遮断周波数 ( $\omega_c$ ) とするハイカットフィルタ)。

なお、この変位軌跡は推定した固有振動数付近の波の約 1 周期分となるような時間分だけ抽出して描いたものである。図-3.35(a) で抽出している時間は約 1 秒分 (1.5Hz 付近の帯域)、同図(b) では約 0.5 秒分 (3.0Hz 付近の帯域) である。時刻歴変位波形から抽出するデータについて、図では 1.45-1.95Hz の帯域については「12.0 秒~13.0 秒 (19:00:00 を 0 秒とした時)」、2.55-3.05Hz の帯域については「12.3 秒~12.8 秒 (19:00:00 を 0 秒とした時)」を例として示している。

図より、1.45-1.95Hz の帯域では、栈橋と背後地盤が同程度の振幅と似たような軌跡の形状であるのに対して、2.55-3.05Hz の帯域では、栈橋と背後地盤の振幅の違いに加えて軌跡の形状の違いが顕著である。この傾向は他の時間帯についても同様であった (付録 B 参照)。このことから、本研究では 2.55-3.05Hz の帯域が栈橋の固有振動数に相当する可能性が高いと推察した。

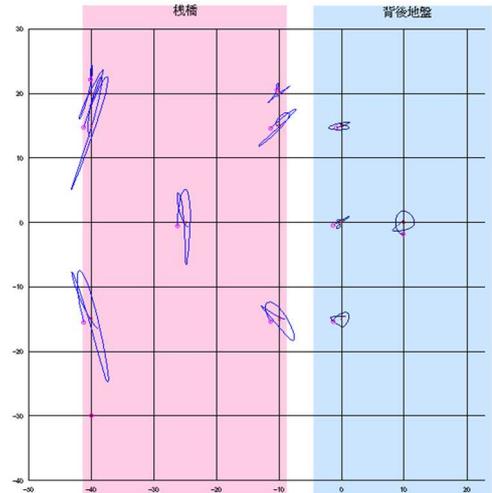
また、2.55-3.05Hz の変位軌跡をみると、栈橋上の「海側」と「陸側」で振幅が異なっており、「海側」が「陸側」に比べ大きく変位している。そして「海側」においては法線平行方向の変位がより大きい傾向にある。この傾向は他の時間帯についても同様であった (付録 B 参照)。この点で川崎港栈橋の挙動は小名浜港栈橋と大きく異なっている。

このような特徴的な観測結果が生じるためには二つの可能性が考えられる。一つは本栈橋において「せん断振動」が生じている可能性、もう一つは「ねじり振動」が生じている可能性である。ここで言う「せん断振動」とは、上部工の陸側が拘束された状態で上部工にせん断変形が生じるモードである。一方、「ねじり振動」とは、上部工に剛体的な回転が生じるモードである。前者のモードが生じるためには上部工にせん断変形が生じること

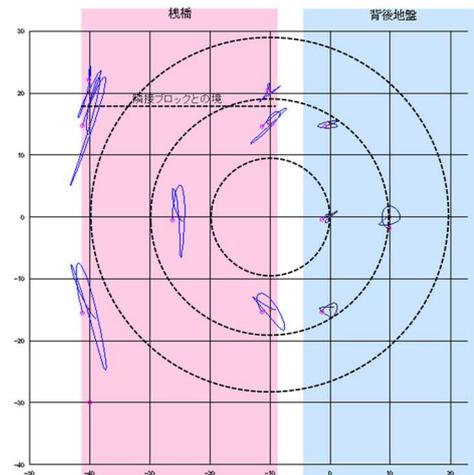
が必要であり、一方、後者のモードが生じるためには、上部工と背後地盤の間に伸縮が生じる必要がある。

実際にはこれら二つのモードが重畳している可能性もある。いずれにせよ、陸側の変位が海側の変位より小さい原因として渡版による拘束の影響が考えられる。本資料でここまで示した結果だけでは、川崎港栈橋において実際に生じている振動がせん断振動とねじり振動のいずれであるか、あるいはそれらの重畳したものであるか、正確な判断はつかず、今後追加的な分析や検討が必要である。また、同様の振動モードが地震時にも生じているかについてはさらなる検討が必要である。しかしながら、川崎港栈橋における常時の振動モードが、小名浜港栈橋のような並進運動の卓越したものでないことは明らかである。参考までに、図-3.35(b')には、栈橋ブロック陸側中央部を中心とするねじり振動が仮に生じたとした場合に上部工の各部分で生じると想定される振動の向きを同心円で示している。この結果は、実際に観測されている振動の向きと比較的整合的であり、ねじり振動の卓越を示唆しているようにも見える。ただし、振動の向きが整合していない観測点もあることから、今後さらに、ねじりの中心が異なる可能性や、ねじりと他の振動モードが重畳している可能性についても検討する必要がある。

なお、「ねじり振動もしくはせん断振動」の発生を確認するには、栈橋上で少なくとも海側と陸側の2点で観測を行うことが必要となる。



(b) 12.3～12.8秒の変位軌跡 (2.55-3.05Hzの帯域)  
(19:00～19:20の記録)



(b') 12.3～12.8秒の変位軌跡 (2.55-3.05Hzの帯域)  
(19:00～19:20の記録)  
(「観測ブロック栈橋陸側中央部を中心とした同心円」と、「隣接ブロックとの境」を(b)に追記した図)



(a) 12.0～13.0秒の変位軌跡 (1.45-1.95Hzの帯域)  
(19:00～19:20の記録)

図-3.35 変位軌跡 (川崎港)

### 3.5 神戸港栈橋の事例

#### 3.5.1 対象施設の構造と観測条件

神戸港においては、神戸空港地区に存在する設計水深 D.L. -8.0m のドルフィンで観測を行った。当該栈橋の位置を図-3.36 に示す。当該施設の構造形式は、上部工が RC 構造である直杭式ドルフィンであり、本栈橋の平面図の概略を図-3.37 に示す。当該施設は観測を行った 2018 年 12 月現在ではドルフィン本体は完成していたが、背後地では上屋の工事が行われていた。

ドルフィンの上部工の大きさ（水平方向）は沖側・陸側ともに 6m×6m である。ドルフィンの間には幅 1.95m、長さ 15.6m のグレーチングの渡橋①（重さ 9.7t）が架けられている。また、背後地盤と陸側ドルフィンの間には、幅 1.96m、長さ 12m の渡橋②（重さ 7.8t）と幅 1.96m、長さ 14.2m の渡橋③（重さ 8.9t）が間に橋脚を介して架けられている。各渡橋は片側がアンカーボルトで固定され、反対側は可動状態となっている。渡橋①と沖側ドルフィンの間、渡橋②と陸側ドルフィンの間、渡橋③と陸地の間が固定側である。なお、対象施設の断面図や構造の詳細図については付録 C に示す。

本ドルフィンにおいては、微動計を 3.2 に示した要領に準じて図-3.37 のように配置した。ドルフィン上の微動計は、図のようにそれぞれ四角形のドルフィンの端から 1.2m、または 3.0m 離れた位置に 3 点配置した。3 点のうち海側の 2 点は杭上に配置したが、1 点は渡橋の接合部分が杭上にあつたため、ドルフィン上部工上であるが杭上でない位置に配置した。また、陸側ドルフィンについてはその中心（杭上ではないドルフィン上部工上）にも微動計を配置した。また、ドルフィンの中のグレーチングの渡橋についても、その中心に微動計を設置した。また、栈橋前面の水面変動を観測するための水圧式波高計は、図に示したように沖側ドルフィンの海側の端の中心部に設置した。観測した栈橋の観測時の状況について図-3.38、図-3.39 に示す。

本施設における常時微動観測の実施時間を図-3.40 に



図-3.36 栈橋の位置図

(港湾計画図は神戸市ホームページ<sup>9)</sup>より引用)

示す。本研究では、栈橋前面の潮位が異なる場合の微動観測記録への影響を把握するため、10時～16時を観測時間と設定した。この時間は、観測日当日の潮位情報を事前に気象庁のデータで確認した上、満潮時と干潮時に近い時間帯で観測可能なように設定したものである。

なお、実際の常時微動観測は、図-3.40に示すとおり、4つの時間帯（11時～、13時55分～、14時48分～、15時40分～）で各20分間行った。

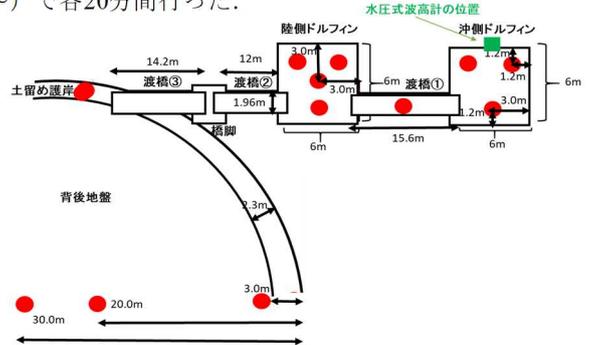


図-3.37 栈橋の平面図（神戸港）  
(赤丸が微動計の設置位置)



図-3.38 観測時の様子（全景）（神戸港）



図-3.39 沖側ドルフィンの観測時の様子

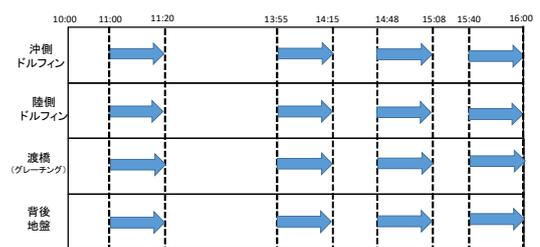


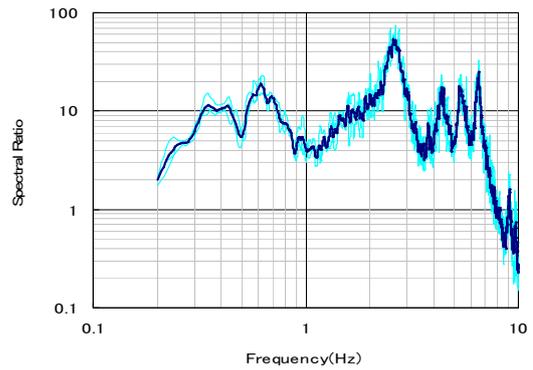
図-3.40 各ブロックでの常時微動観測の実施時間

### 3.5.2 観測結果および栈橋固有振動数の推定結果

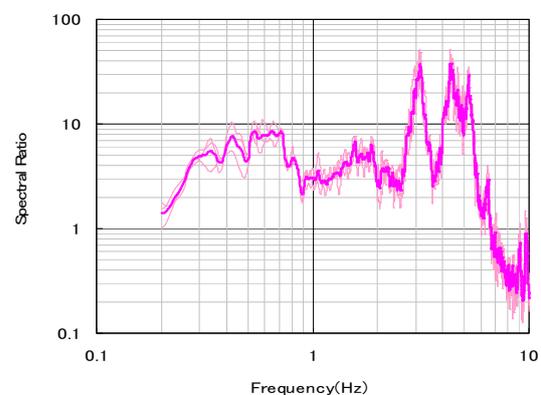
#### (1) 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比

神戸港のドルフィンにおいてH/Hスペクトル比を算出するにあたっては、各ドルフィン上において三角形に配置した観測点のうち、沖側ドルフィン上では最も沖側の観測点のデータ、陸側ドルフィン上では最も陸側の観測点のデータを使用する。微動観測結果から得られた栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比（法線平行方向、法線直角方向）について、沖側ドルフィンの結果を図-3.41に、陸側ドルフィンの結果を図-3.42に示す。図中には、11:00～11:20の時間帯における結果を代表として示しているが、その他の時間帯での観測結果においても、スペクトル形状やピーク位置の周波数に変化はなかった。今回観測したすべての時間における結果は付録Cにて示す。

この結果より、沖側ドルフィンの固有振動数は、法線平行方向では2.3Hz付近、直角方向では3.1Hz付近であると推定される。また、陸側ドルフィンの固有振動数は、法線平行方向では2.5Hz付近、直角方向では3.1Hz付近であると推定された。以下、この推定結果に関する考察を進めるため、各種要因に着目して妥当性評価を行う。

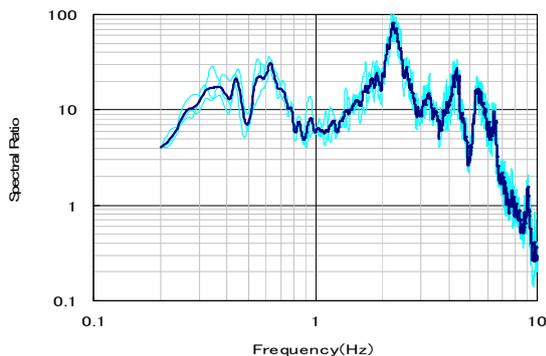


(a)法線平行方向（11:00～11:20の記録）

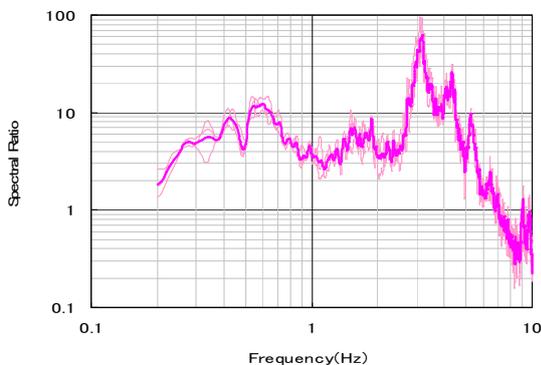


(b)法線直角方向（11:00～11:20の記録）

図-3.42 陸側ドルフィンと背後地盤のH/Hスペクトル比



(a)法線平行方向（11:00～11:20の記録）



(b)法線直角方向（11:00～11:20の記録）

図-3.41 沖側ドルフィンと背後地盤のH/Hスペクトル比

(2) H/Hスペクトル比の算定結果に影響を及ぼすと考えられる要因と栈橋固有振動数の推定結果への影響

(a) 背後地盤の影響

背後地盤のH/Vスペクトル比を図-3.43に示す。

図より、背後地盤のH/Vスペクトル比のピークは0.4～0.5Hzと0.2Hzより低周波数側にあると考えられる。なお、図-3.43に示した時間(11:00-11:20)以後も計測は行なったが、背後地盤のH/Vスペクトル比のピークはほとんど変わらなかった。図-3.41、図-3.42のH/Hスペクトル比にはH/Vスペクトル比に見られる低周波側のピークは見られるものの値が小さい。このことから、H/Hスペクトル比をとることで地盤の振動特性はほぼ除去できていると考えられる。

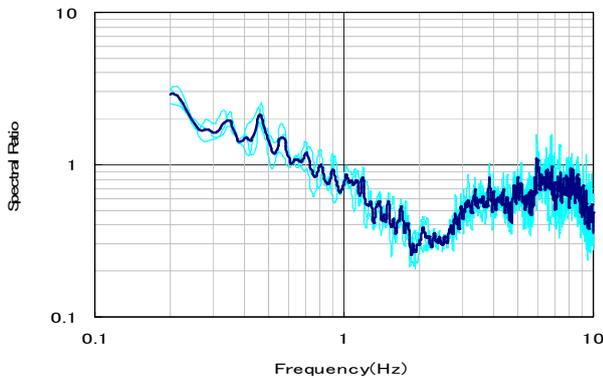


図-3.43 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(11:00-11:20の記録)

(b) 波浪の影響

波浪のフーリエスペクトルの代表例を図-3.44に示す。0.3Hz付近に顕著なピークが見られ、これが観測期間中の波浪の卓越振動数であると考えられる。図-3.44に示した時間(10:20-10:40)以後も計測を継続したが、波浪のフーリエスペクトルのピーク的位置はほとんど変化しなかった(10:20-10:40以後の結果については付録Cに示す)。なお、図-3.41及び図-3.42に示したH/Hスペクトル比においても、0.3Hz付近にピークが見られるものがあり、波浪の影響により表れたピークであると考えられる。

このため、当該観測地点における栈橋前面の波浪は、H/Hスペクトル比に若干の影響を及ぼしているものと考えられる。ただし、波浪により生じるピークは、栈橋の固有振動数が一般的に存在する帯域である1.4～2.5Hz(0.4～0.7s)程度<sup>8)</sup>よりもかなり低周波数側(長周期側)に存在しているため、栈橋の固有振動数(周期)の推定には影響しないと考えられる。

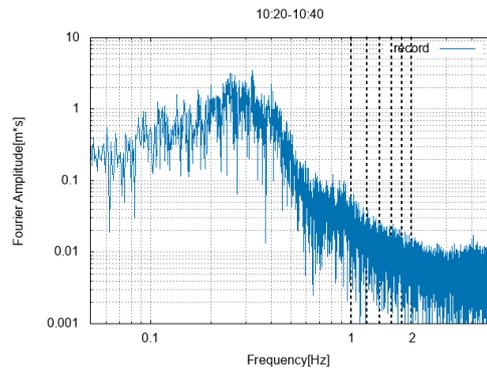


図-3.44 波浪のフーリエスペクトル  
(10:20～10:40の記録)

(c) 潮位の影響

図-3.45 には水圧式波高計を用いて沖側ドルフィン前面における潮位変動を測定した結果を示す。図の上の青線は、観測で得られた潮位変動を示しており、下の赤線は2分毎の移動平均で基線補正した結果を示している。また図から潮位差は0.4m程度、有義波高は0.3m程度であると考えられる。

潮位の違いがH/Hスペクトル比にもたらす影響を確認するため、潮位の最も低い時間(11:00過ぎ頃)と最も高い時間(16:00過ぎ頃)に近い観測時間帯(11:00~11:20, 15:40~16:00)におけるH/Hスペクトル比(法線平行方向)の結果を図-3.46(沖側ドルフィンの結果)及び図-3.47(陸側ドルフィンの結果)に示す。図より、潮位の低い時間帯と高い時間帯でH/Hスペクトル比はほとんど変化しておらず、観測時の潮位は栈橋固有振動数の推定結果にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。法線直角方向についても同様の結果であった。

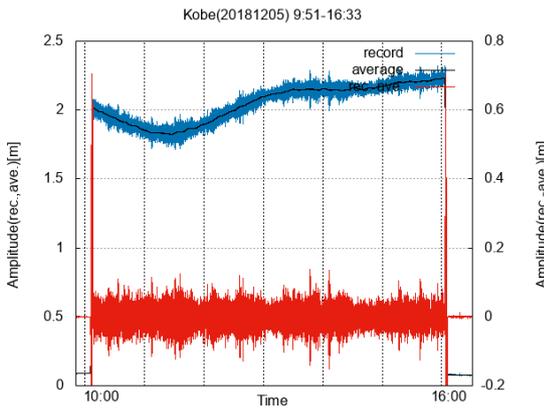
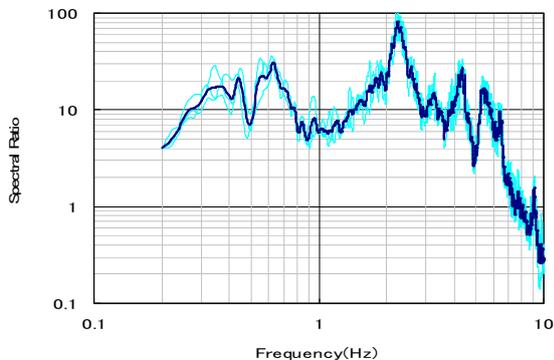
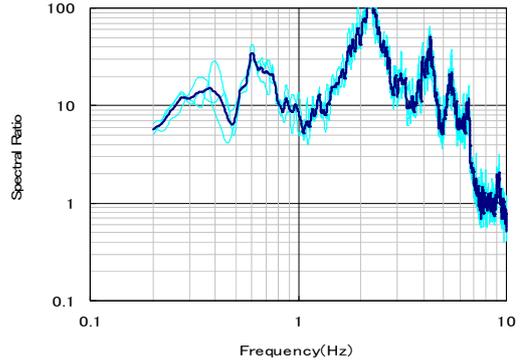


図-3.45 水圧式波高計で得られた水面変位

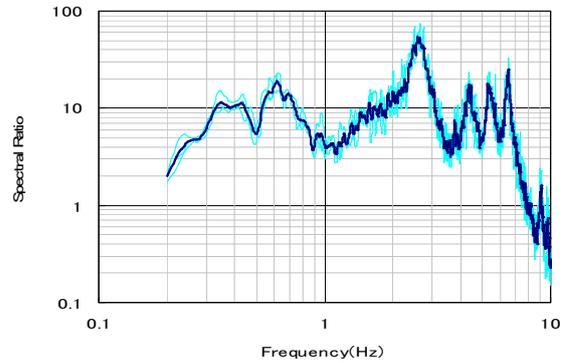


(a) 沖側ドルフィンと背後地盤の H/H スペクトル比  
(法線平行方向 11:00~11:20 の記録)  
【潮位が低い時間帯】 (再掲)

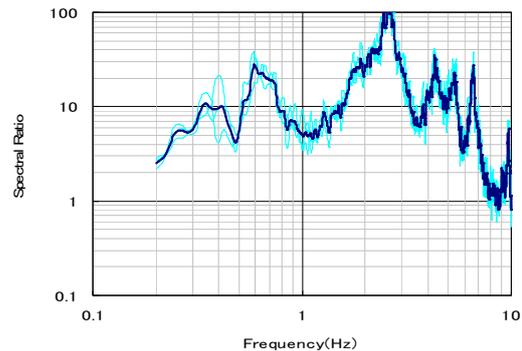


(b) 沖側ドルフィンと背後地盤の H/H スペクトル比  
(法線平行方向 15:40~16:00 の記録)  
【潮位が高い時間帯】

図-3.46 沖側ドルフィンの潮位の高い時間と低い時間でのH/Hスペクトル比のグラフの比較(神戸港)



(a) 陸側ドルフィンと背後地盤の H/H スペクトル比  
(法線平行方向 11:00~11:20 の記録)  
【潮位が低い時間帯】 (再掲)



(b) 陸側ドルフィンと背後地盤の H/H スペクトル比  
(法線平行方向 15:40~16:00 の記録)  
【潮位が高い時間帯】

図-3.47 陸側ドルフィンの潮位の高い時間と低い時間でのH/Hスペクトル比のグラフの比較(神戸港)

### (3) 変位軌跡の確認

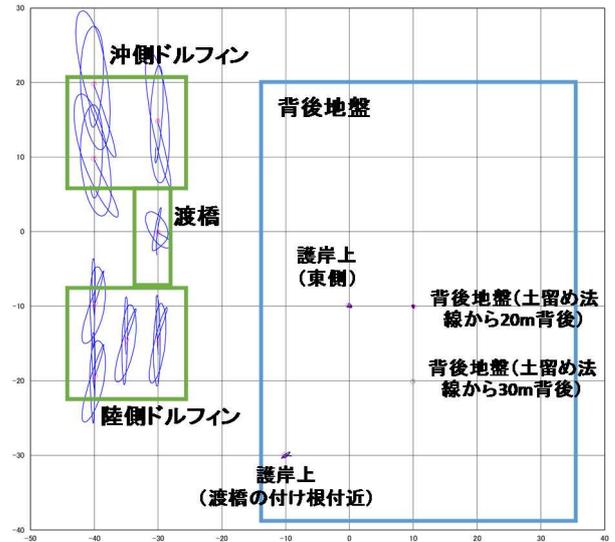
上記(2)の結果より、沖側ドルフィン固有振動数は、法線平行方向は2.3Hz付近、直角方向は3.1Hz付近であると推定された。また、陸側ドルフィンの固有振動数は、法線平行方向は2.5Hz付近、直角方向は3.1Hz付近であると推定された。この周波数帯におけるドルフィンの振動の特徴を更に確認するため変位軌跡の確認を行う。

図-3.48に、微動計設置位置における変位軌跡を示す。変位軌跡は3.2.3(3)で述べた方法により求めた。変位軌跡の抽出にあたっては、まず法線平行方向でみられた2.3Hz、2.5Hz付近のピークに着目し、2.15-2.65Hzの帯域を帯域通過フィルタを使用して切り出した。帯域通過フィルタとしてバターワースフィルタ(4次)を使用し、小名浜港及び川崎港と同様の方法で、目的の帯域を抽出した(2.15Hzを遮断周波数( $\omega_c$ )とするローカットフィルタ、2.65Hzを遮断周波数( $\omega_c$ )とするハイカットフィルタ)。次に法線直角方向でみられた3.1Hz付近のピークに着目し、2.85-3.35Hzの帯域を帯域通過フィルタを使用して切り出した。帯域通過フィルタとしてバターワースフィルタ(4次)を使用し、小名浜港及び川崎港と同様の方法で、目的の帯域を抽出した(2.85Hzを遮断周波数( $\omega_c$ )とするローカットフィルタ、3.35Hzを遮断周波数( $\omega_c$ )とするハイカットフィルタ)。

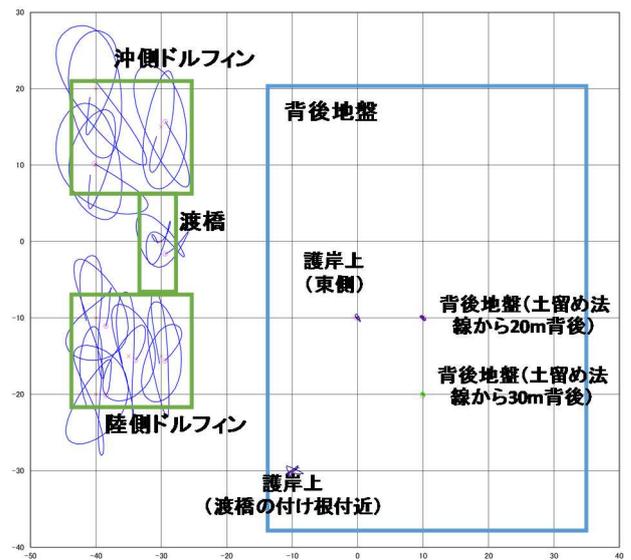
なお、この変位軌跡は推定した固有振動数付近の波を抽出して描いたものであり、図で抽出している時間は約1秒分である。時刻歴変位波形から抽出する約1秒分のデータについて、図では「2.0秒～3.0秒(11:00:00を0秒とした時)」を例として示している。

図-3.48より、抽出した帯域では背後地盤の変位量はドルフィン上のそれと比較して極めて小さいことがわかる。

また、同一ドルフィン上では観測点の違いによる軌跡の違いは小さい。しかし、ドルフィンによって固有振動数が異なることから、類似の構造のドルフィンで今後観測する場合は、各ドルフィン上で少なくとも1点ずつ観測することが必要である。さらに、方位によって固有振動数が異なる場合もあることに留意する必要がある。



(a)2.0～3.0秒の変位軌跡 (2.15～2.65Hzの帯域)  
(11:00～11:20の記録)



(b)2.0～3.0秒の変位軌跡 (2.85-3.35Hzの帯域)  
(11:00～11:20の記録)

図-3.48 変位軌跡 (神戸港)

## 4. 観測結果から得られた知見

### 4.1 本章の概要

本研究では、実栈橋の固有周期を微動観測結果から推定する手法の確立に向けた取り組みの端緒として、3地点の実栈橋で、さまざまな要因下で微動観測を行い、栈橋の固有周期の推定に及ぼす各種要因の影響等について検討した。本章では、3.で述べた施設毎の結果に基づき、波浪や潮位変化の影響、栈橋背後の渡版の有無の影響等、本研究で得られた新たな知見についてまとめる。

### 4.2 潮位変化の影響

潮位変化の影響については、3施設にて、潮位が高い時間帯と低い時間帯にてH/Hスペクトル比の比較を行った(図-3.19, 図-3.34, 図-3.46, 図-3.47)。各施設(小名浜港, 川崎港, 神戸港)における高潮位と低潮位の差は、それぞれ0.75m(小名浜港), 0.75m(川崎港), 0.4m程度(神戸港)であったが、今回の条件下では、潮位変化によるH/Hスペクトル比の全体形状及び複数存在するピーク周波数の変化は、いずれの施設でも確認できなかった。

以上の結果から、今回の観測条件下では、潮位変化は栈橋の固有振動数(周期)の推定結果には影響を及ぼさないことがわかった。

### 4.3 波浪の影響

波浪の影響については、3施設(小名浜港, 川崎港, 神戸港)にて、波浪の連続観測を行い、各施設における波浪のスペクトル(図-3.17, 図-3.32, 図-3.44)より卓越周波数を評価し、波浪の卓越周波数が各施設のH/Hスペクトル比に及ぼす影響の有無を確認した。観測結果から得られた各施設の前面の有義波高は、小名浜港で0.5m程度、川崎港で0.2m程度、神戸港で0.3m程度であった。

外洋に面した小名浜港では、波浪の卓越周波数は0.1Hz付近(図-3.17)であったが、H/Hスペクトル比には波浪の影響は認められなかった。一方、内湾に面している川崎港, 神戸港では、波浪の卓越周波数は0.3Hz付近(図-3.32, 図-3.44)であり、H/Hスペクトル比においても0.3Hz付近に波浪の影響と思われるピークが見られたが、当該ピークは栈橋の固有振動数が一般的に存在する帯域である1.4~2.5Hz(0.4~0.7s)程度<sup>8)</sup>よりもかなり低周波数側(長周期側)に存在しているため、栈橋の固有振動数(周期)の推定には影響しないと考えられる。

### 4.4 渡版の影響

渡版の影響については、小名浜港栈橋と川崎港栈橋の結果に著しい違いが見られたため、これらを比較しながら述べる。

小名浜港栈橋は図-4.1に示すように、370m×29.8mの栈橋本体に渡版が3箇所(15.2m×14.7m, 8.5m×14.6m, 11.6m×14.7m)かけられた栈橋であり、さらに、図-3.11に渡版部の状況を示すように、渡版はゴムマット(STパット)を介して護岸と接しており、渡版による栈橋上部工の拘束性は小さいと考えられた。実際、観測結果を見ると、渡版(8.5m×14.6m)の存在する第6ブロックと渡版の存在しない第7ブロックでH/Hスペクトルは類似しており、変位振幅の明らかな違いも見られなかった。また、栈橋上の複数地点での変位軌跡はいずれも類似しており、並進運動が卓越していた。

一方、川崎港栈橋は、渡版が全長にわたり設置されており、渡版の下部と護岸がどのような状態で接しているか(ゴムマットを介しているか)など不明な点はあるものの、小名浜港栈橋に比べ、渡版による栈橋上部工の拘束性は大きいものと考えられる。川崎港栈橋での観測結果においては、栈橋上部工の海側と陸側で振幅の大幅に異なる変位軌跡が得られた。川崎港の場合は、栈橋全長にわたり渡版が設置されていたため、渡版の有無による比較はできなかったが、渡版による拘束性が栈橋の振動モードに影響を及ぼしている可能性が考えられる。よって、渡版の影響としては、少なくとも栈橋が背後地盤にあまり拘束されていない小名浜港の栈橋(370m×29.8mの栈橋本体に、8.5m×14.5m(3つの渡版のうち1つの寸法)の渡版が設けられた栈橋)のような場合には生じないが、栈橋が渡版を介して背後地盤に強く拘束されている川崎港の栈橋のような場合は、生じる可能性があると考えられる。本栈橋において海側で大きな変位が生じている原因として「せん断振動」が生じている可能性と「ねじり振動」が生じている可能性が考えられるが、この点については後述する。

### 4.5 振動源の影響

振動源の影響については、小名浜港の観測結果において、観測地点から300mほど離れた場所においてパイロハンマー(電動パイロ/ZERO-320IIMR)を用いた栈橋鋼管杭(杭径:1500mm)の打設作業が行われている時間帯と行われていない時間帯の比較を行ったが、H/Hスペクトル比および固有振動数の推定結果への影響は見られなかった。

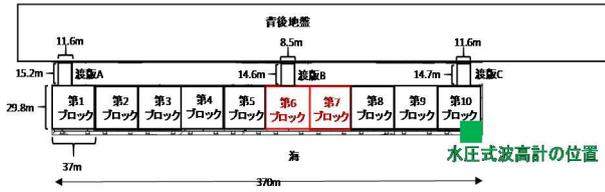


図-4.1 小名浜港の観測対象栈橋の平面図（再掲）

#### 4.6 常時微動計の平面配置

今回、栈橋上の観測においては、図-4.2に示すような微動計配置を行なった。

観測結果のうちH/Hスペクトル比については栈橋上の7点における結果に大きな違いは生じなかった。一方、今回川崎港栈橋で見られたような「ねじり振動もしくはせん断振動」の発生を確認するには、栈橋上で少なくとも海側と陸側の2点で観測を行うことが必要となる。なお、土留め護岸上の3点の結果についても特に大きな違いは無かったため、土留め護岸上の計測についても、「ねじり振動もしくはせん断振動」の発生を確認する目的の1点の計測で十分であると思われる。よって、「ねじり振動もしくはせん断振動」の発生可能性が否定できない場合の固有周期の推定を目的とする栈橋微動観測においては、最低限として、図-4.3に示すように配置を行えばよいと考えられる。

なお、「ねじり振動もしくはせん断振動」が発生する可能性が想定されない場合は、栈橋上1点、背後地盤上1点で十分と考えられる。また、神戸港の対象施設のように複数のドルフィンが連結された構造ではドルフィンごとに固有振動数が異なる可能性があることに留意して観測を行う必要がある。

また、4.3において今回実施した観測では波浪の影響は無視できると記述したが、本研究で実施したように、常時微動観測点付近で波高計による観測を行うことで、波

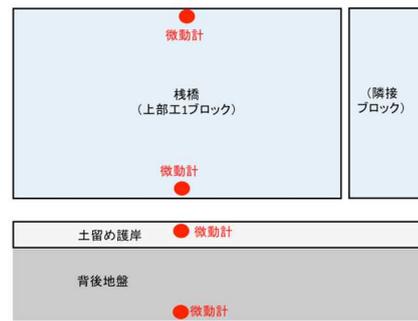


図-4.3 微動計の最低限必要となる配置

浪の卓越周期を特定した上で、波浪の影響によると考えられるH/Hスペクトル比のピークを固有振動数(周期)の候補から外すことが望ましい。

#### 4.7 ねじり振動もしくはせん断振動の発生について

本研究では、渡版による栈橋上部工の拘束性が大きいと考えられる川崎港の観測結果において、栈橋上部工の海側と陸側で振幅の大幅に異なる変位軌跡が得られた。海側の変位は陸側の変位よりも大きく、また、海側では法線平行方向の変位が法線直角方向よりも大きかった。このような観測結果は「せん断振動」もしくは「ねじり振動」の特徴を示すものであった。ここで言う「せん断振動」とは、上部工の陸側が拘束された状態で上部工にせん断変形が生じるモードである。一方、「ねじり振動」とは、上部工に剛体的な回転が生じるモードである。実際にはこれら二つのモードが重畳している可能性もある。

川崎港栈橋において実際に生じている振動がせん断振動もしくはねじり振動のいずれであるか、あるいはそれらの重畳したものであるか、今回の検討だけでは特定できず、今後追加的な分析や検討が必要である。ただし、いずれにしても、設計時に一般的に考慮されている並進運動とは異なるという点が重要である。渡版による拘束効果の大きい栈橋は全国的に数多く存在していると考えられ、せん断振動もしくはねじり振動の卓越は広範に見られる現象である可能性がある。このことは栈橋の地震応答特性や耐震設計を考える上でも重要である。今後は川崎港栈橋で同様の振動モードが地震時にも生じているかについてさらに検討することが必要である。また、渡版による拘束効果の大きい他の栈橋の挙動についても調べる必要がある。それらの検討を通じて栈橋の振動性状に関する研究を進めることにより、栈橋の耐震設計法の高度化にも結びつく可能性がある。

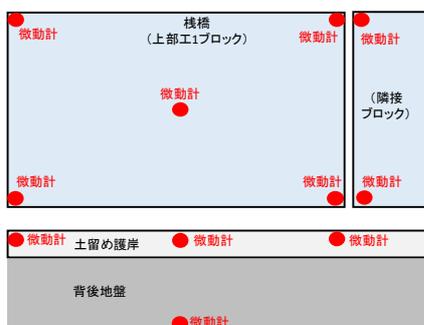


図-4.2 微動計の配置（再掲）

## 5. まとめ

本研究では、常時微動観測による実栈橋の固有周期の推定において、波浪や潮位、渡版による拘束条件など、観測時の諸条件が推定結果に及ぼす影響について、実際の観測を通して明らかにした。また、変位軌跡を用いることで、固有周期付近での栈橋の振動モードについて検討を加えた。さらに、微動観測により栈橋構造の固有周期の推定を行う際、最低限必要な微動計の配置場所についても整理した。本研究で得られた主な知見については、以下に示す。

- ・各施設（小名浜港、川崎港、神戸港）における高潮位と低潮位の差は、それぞれ0.75m（小名浜港）、0.75m（川崎港）、0.4m程度（神戸港）であったが、今回の条件下では、潮位変化によるH/Hスペクトル（微動観測記録のデータをフーリエ変換し、各周波数における振幅について、背後地盤上に対する栈橋上の比をとったもの）の全体形状及び複数存在するピーク周波数の変化は、いずれの施設でも確認されなかった。
- ・外洋に面した小名浜港では、波浪の卓越周波数は0.1Hz付近であったが、H/Hスペクトル比には波浪の影響は認められなかった。一方、内湾に面している川崎港、神戸港では、波浪の卓越周波数は0.3Hz付近であり、H/Hスペクトル比においても0.3Hz付近に波浪の影響と思われるピークが見られたが、当該ピークは栈橋の固有振動数が一般的に存在する帯域である1.4～2.5Hz（0.4～0.7s）程度よりもかなり低周波数側（長周期側）に存在しているため、栈橋の固有振動数（周期）の推定には影響しないと考えられた。
- ・渡版の影響については、小名浜港（渡版による栈橋上部工の拘束性は小さいケース）の結果では、渡版の存在するブロックと渡版の存在しないブロックでH/Hスペクトル比は類似しており、変位振幅の明らかな違いも見られなかった。一方、川崎港（渡版による栈橋上部工の拘束効果が大きいケース）の結果では、渡版の有無による比較はできなかったが、栈橋上部工の海側と陸側で振幅の大幅に異なる変位軌跡が得られ、渡版による拘束性が栈橋の振動モードに影響を及ぼしている可能性が考えられた。
- ・振動源の影響については、小名浜港の観測結果において、観測地点から300mほど離れた場所においてパイロハンマー（電動パイブロ/ZERO-320IIMR）を用いた栈橋鋼管杭（杭径：1500mm）の打設作業が行われている時間帯と行われていない時間帯の比較を行ったが、H/Hスペクトル比および固有振動数の推定結果への影

響は見られなかった。

- ・渡版による栈橋上部工の拘束効果が大きいと考えられる川崎港の観測結果において、栈橋上部工の海側の変位は陸側の変位よりも大きく、また、海側では法線平行方向の変位が法線直角方向よりも大きい結果が得られた。このような特徴的な観測結果は「せん断振動」または「ねじり振動」の特徴を示すものであった。
- ・「ねじり振動もしくはせん断振動」の発生を確認するには、栈橋上で少なくとも海側と陸側の2点で観測を行うことが必要となる。そのため、「ねじり振動もしくはせん断振動」の発生可能性が否定できない場合の固有周期の推定を目的とする栈橋微動観測においては、最低限として、図-5.1に示すように配置を行えばよいことが分かった。なお、「ねじり振動もしくはせん断振動」が発生する可能性が想定されない場合は、栈橋上1点、背後地盤上1点の配置で十分と考えられる。



図-5.1 微動計の最低限必要となる配置（再掲）

本研究の検討結果を踏まえることで、現場におけるより効果的で正確な観測実施・固有周期の推定につながることを期待される。

また、常時微動観測の結果から得られた渡版の影響を含む既存実栈橋の1次固有振動数は、今後、渡版の拘束性が強い場合などでも常時と地震時の栈橋の振動モードの対応関係を解明することにより、改良設計における照査用震度の設定時にそのまま利用できる可能性がある。さらに、新設時においても、建設後に常時微動観測による固有周期の推定を行うことで、建設後の栈橋が設計で想定した固有周期になっているかの確認に活用できる可能性があり、その場合、推定した固有周期は、維持管理の段階や改良設計の際の一つの目安として使用できる。

上記の活用に向けて、今後、様々な拘束条件下での実栈橋の微動観測データを集め、特に渡版の影響を含む場合において、常時微動観測により地震時の固有振動数と振動モードを正確に推定できるかを検証することが必要で

ある。常時微動観測による固有周期の推定は、新たに強震計を設置することや、起振機等を利用した強制加振を行うことに比べ安価で容易に実施できる。建設時において、栈橋と背後の護岸との間に渡版を設置する前に栈橋本体の常時微動観測を実施し、さらに渡版設置直後にも同様の観測を実施してデータをとっておくことは、その施設にとって将来的に有効なデータを得ることになると考える。また、このようなデータを全国で蓄積することは、横方向地盤反力係数の設定法の高度化など、設計法の次の見直しにもつながると考えられ、現場において積極的に実施されることを期待する。

(2019年8月27日受付)

Vol.64,No7,pp.28-31,2016.

6) 福島県ホームページ (港湾計画図)

(<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/210620.pdf>)

2019年7月29日アクセス

7) 川崎市ホームページ (港湾計画図)

(<http://www.city.kawasaki.jp/580/cmsfiles/contents/0000063/63390/kouwankeikakuzu.pdf>)

2019年7月29日アクセス

8) 横田弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 高橋邦夫, 川端規之: 鋼管杭式栈橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察, 港湾空港技術研究所報告, Vol.37, No2, 1998.

9) 神戸市ホームページ (港湾計画図)

(<http://www.city.kobe.lg.jp/information/project/port/portimg/20180404173101-5.pdf>)

2019年7月29日アクセス

## 謝辞

栈橋における常時微動観測を実施するにあたっては、川崎市港湾局 (江藤喜則氏, 齋藤達雄氏, 木村正子氏, 大瀬寛氏), 神戸市みなと総局 (藤元功氏, 柏陽介氏, 竹田直弥氏), 東北地方整備局小名浜港湾事務所 (佐々木均氏, 小岩利弘氏, 阿部伸也氏, 鍋谷泰紀氏), 関東地方整備局京浜港湾事務所 (化生順一郎氏), 近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所にご協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 社団法人 日本港湾協会, 2018.
- 2) 佐藤昌宏, 久保田崇仁, 山内浩, 柴下達哉, 服部俊朗, 鬼童孝, 川端稔教, 野津厚: 既設の直杭式横栈橋における常時微動観測による固有周期の算定について, 沿岸技術研究センター論文集 No.17 2018.
- 3) 高原裕一, 岸良安治, 井福周介, 一井康二, 神薫: 常時微動観測による既設栈橋の振動特性の検討 (観測編), 土木学会第54回年次学術講演会, 1999.
- 4) 長尾毅, 田代聡一: 栈橋式岸壁の耐震性照査手法に関する解析的研究, 国土技術政策総合研究所資料 第61号 2003.
- 5) 鈴木晴彦, 眞鍋俊平, 永田伸也, 山田能弘, 長坂陽介, 野津厚: 岸壁の存在が常時微動観測結果に及ぼす影響に関する一検討 焼津漁港の事例, 地盤工学会誌,

付録A. 小名浜港の棧橋に関する詳細資料

付録A1 背後地盤のH/Vスペクトル比

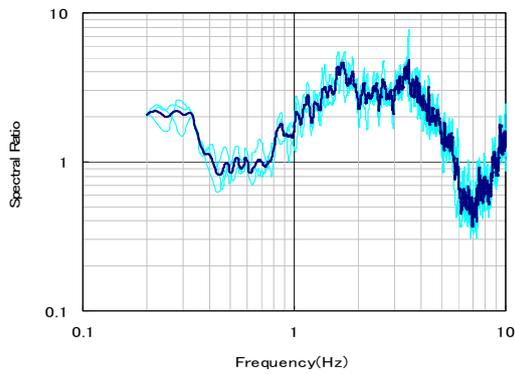


図-A1.1 第6ブロックの背後地盤のH/V  
スペクトル比 (A01 9:40~10:00)

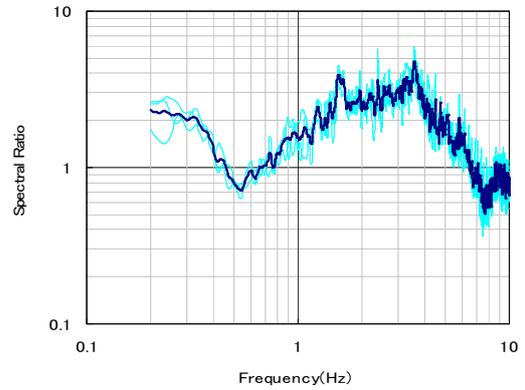


図-A1.4 第7ブロックの背後地盤のH/V  
スペクトル比 (A01 10:12~10:32)

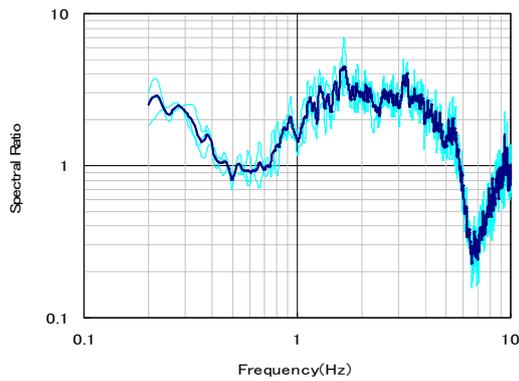


図-A1.2 第6ブロックの背後地盤のH/V  
スペクトル比 (A01 14:48~15:05)

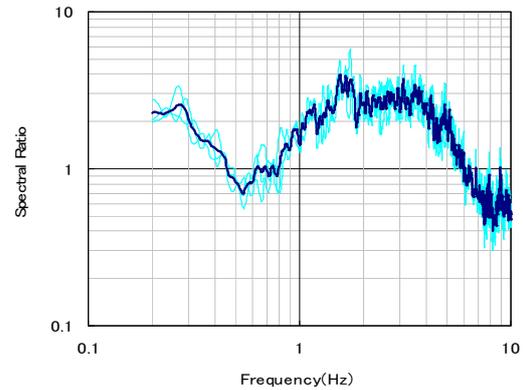


図-A1.5 第7ブロックの背後地盤のH/V  
スペクトル比 (A01 13:56~14:16)

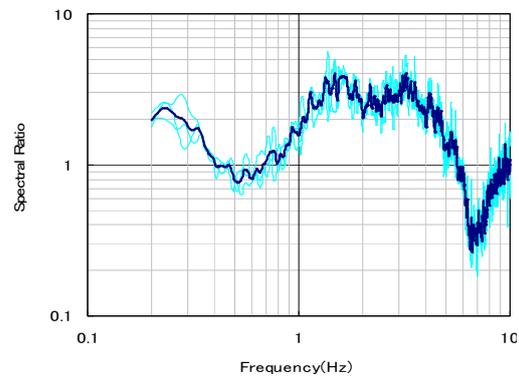


図-A1.3 第6ブロックの背後地盤のH/V  
スペクトル比 (A01 15:40~16:00)

付録A2 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比

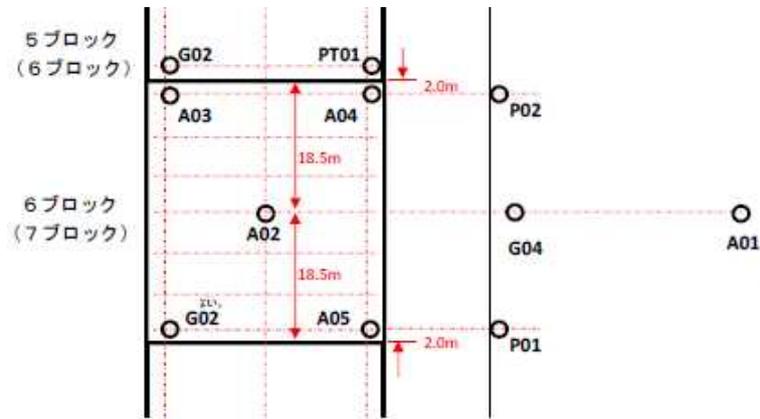
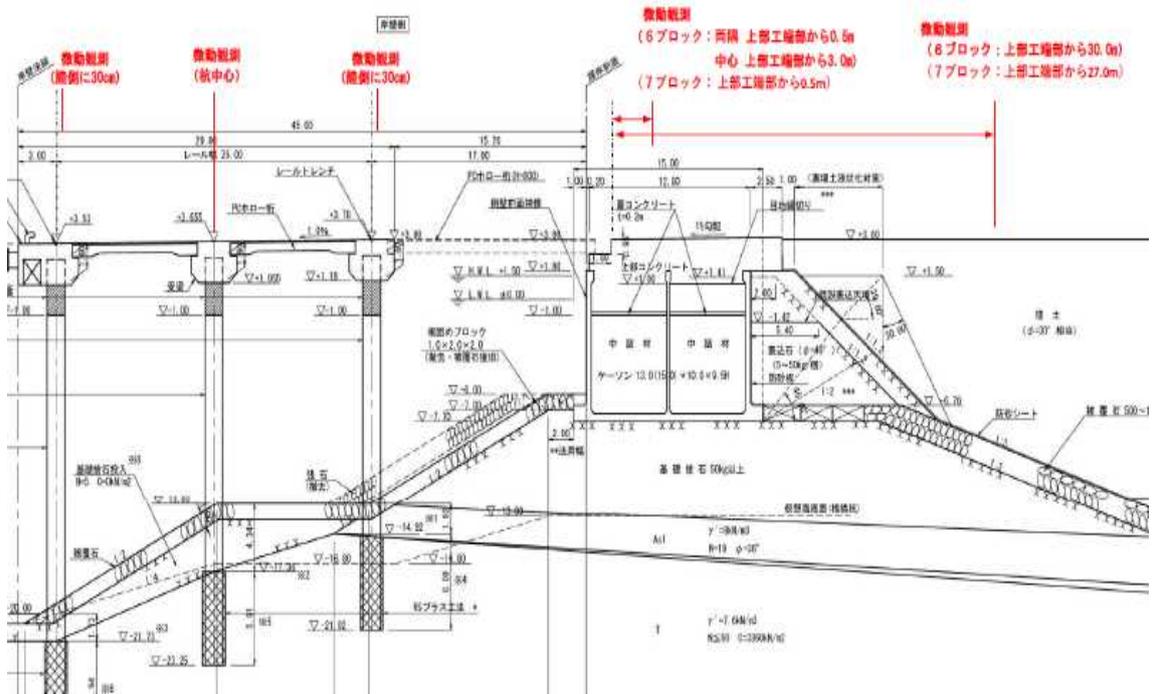


図-A2.1 計器の配置図 (平面図)

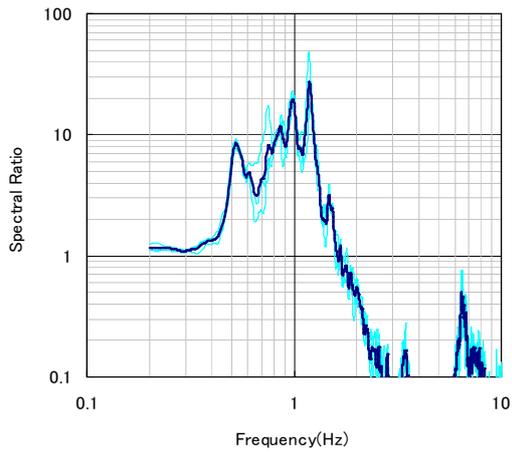


図-A2.2 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

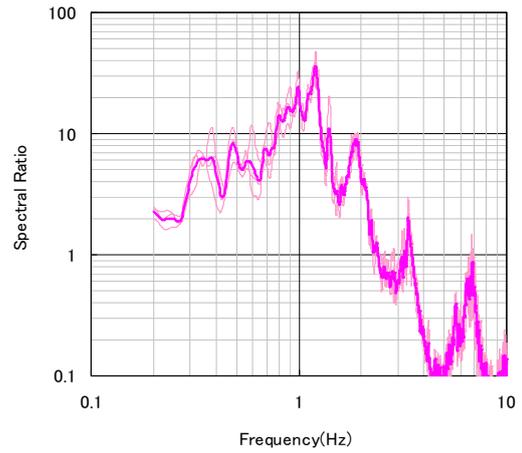


図-A2.5 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A03-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

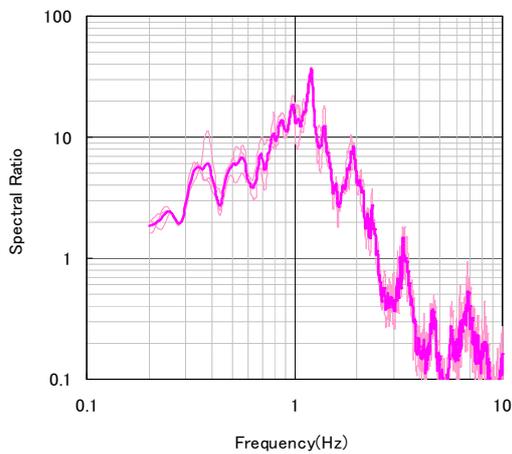


図-A2.3 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

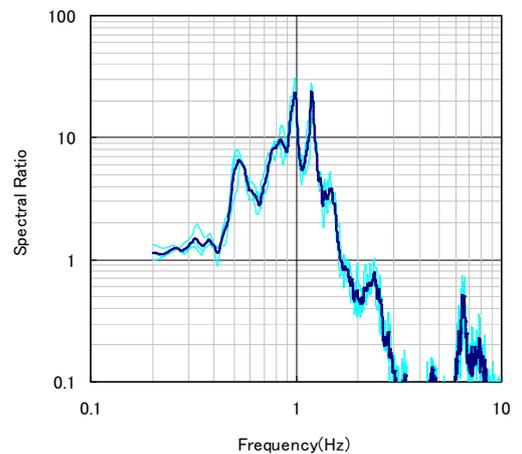


図-A2.6 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A04-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

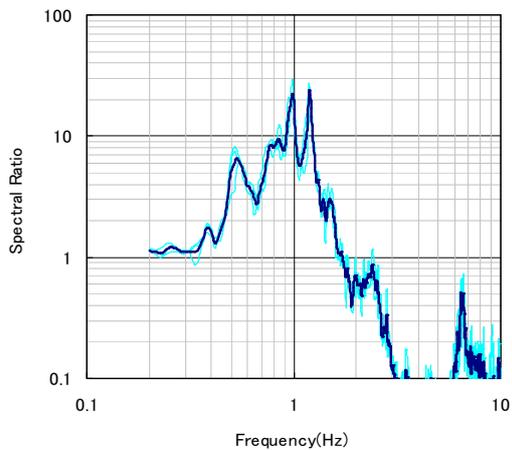


図-A2.4 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A03-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

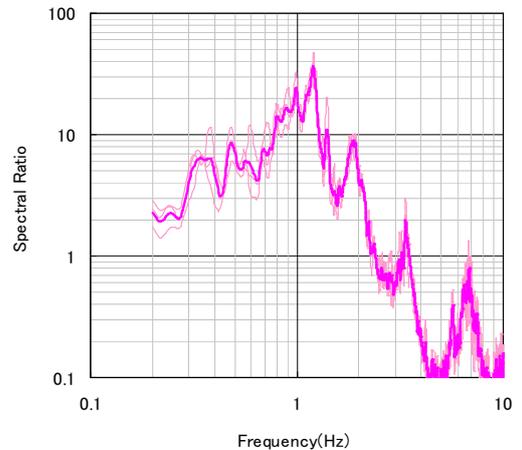


図-A2.7 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A04-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

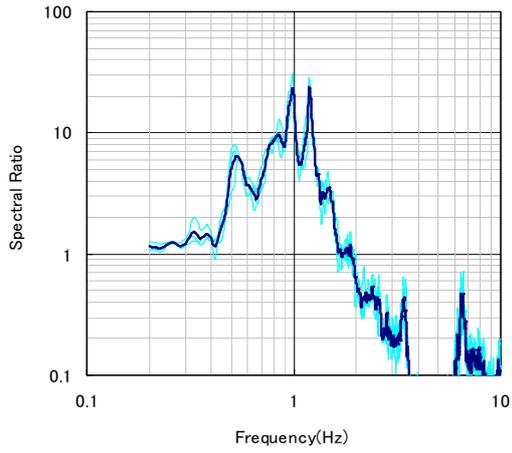


図-A2.8 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A05-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

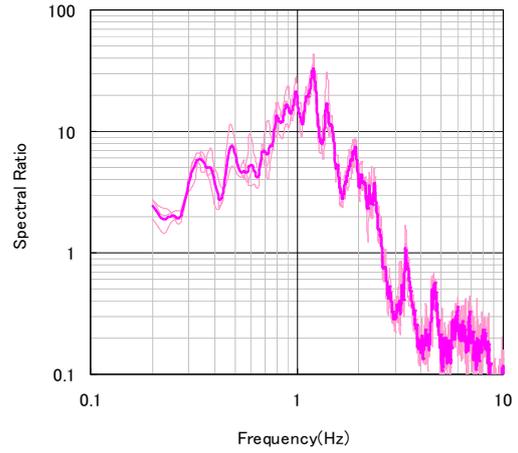


図-A2.11 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A06-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

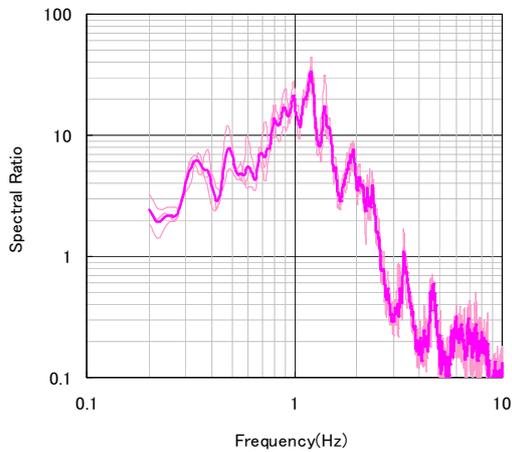


図-A2.9 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A05-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

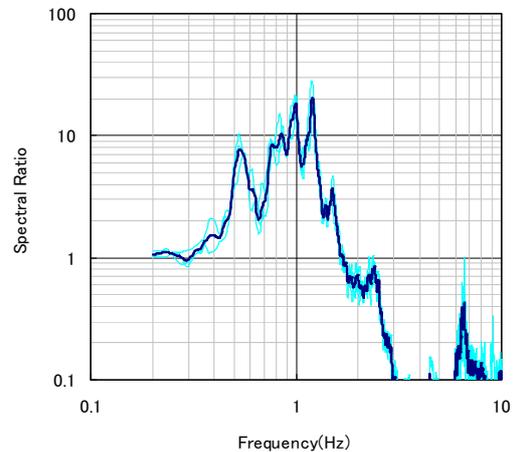


図-A2.12 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(G02-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

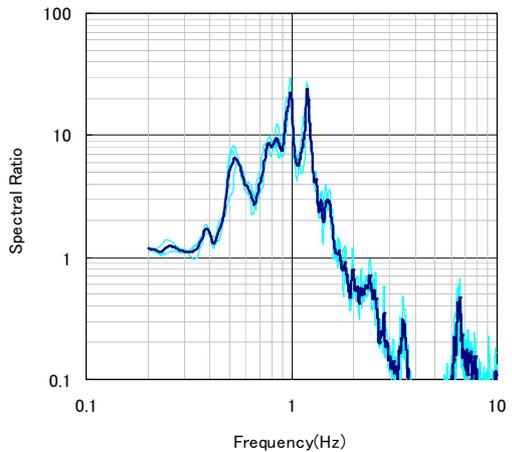


図-A2.10 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A06-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

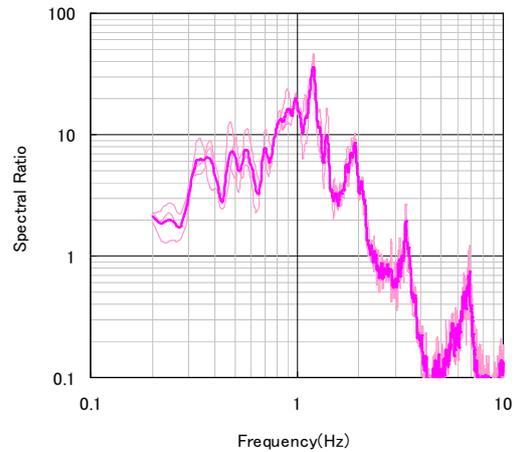


図-A2.13 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(G02-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

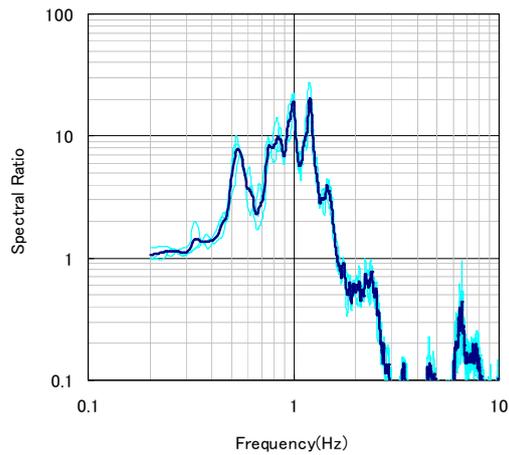


図-A2.14 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(PT1-A01 法線平行方向 9:40~10:00)

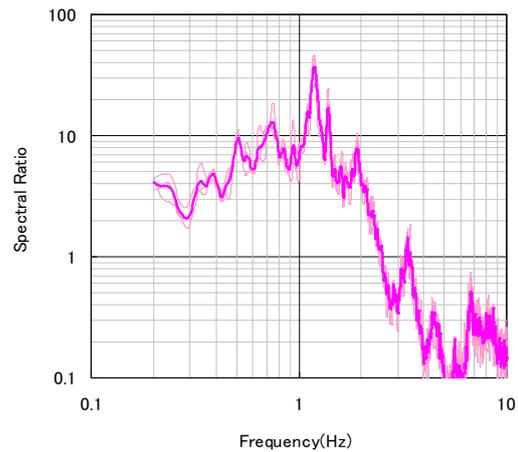


図-A2.17 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01法線直角方向 14:48~15:08)

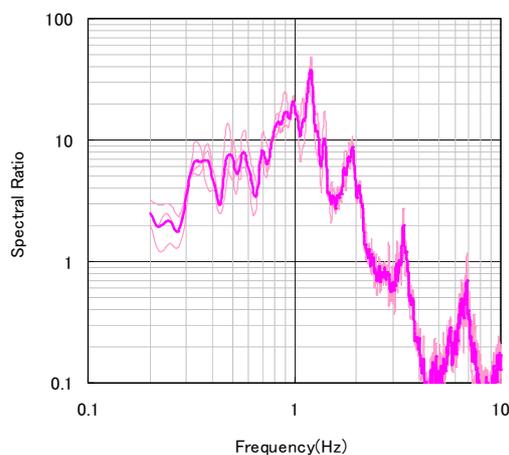


図-A2.15 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(PT1-A01 法線直角方向 9:40~10:00)

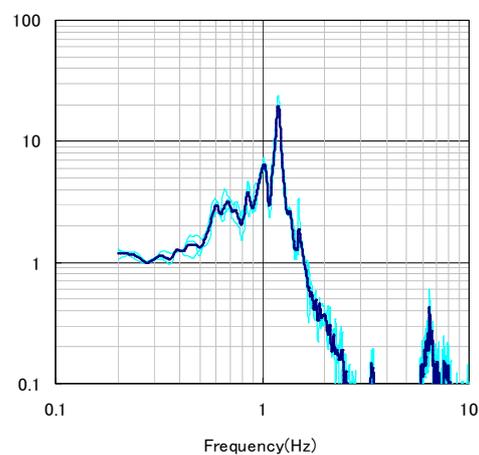


図-A2.18 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

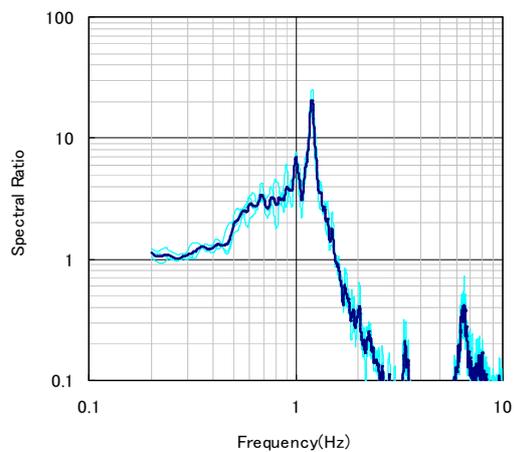


図-A2.16 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線平行方向 14:48~15:08)

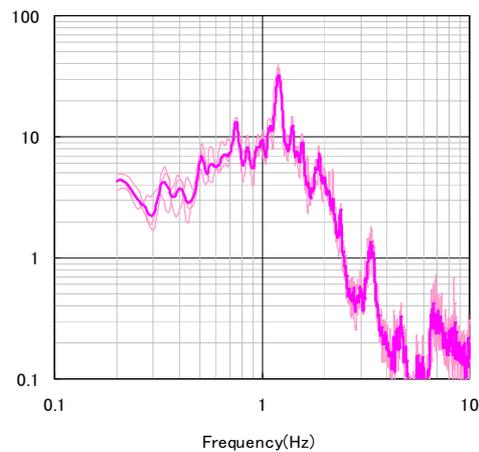


図-A2.19 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

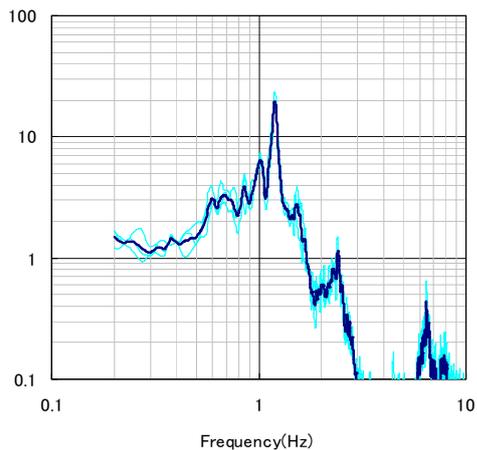


図-A2.20 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A03-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

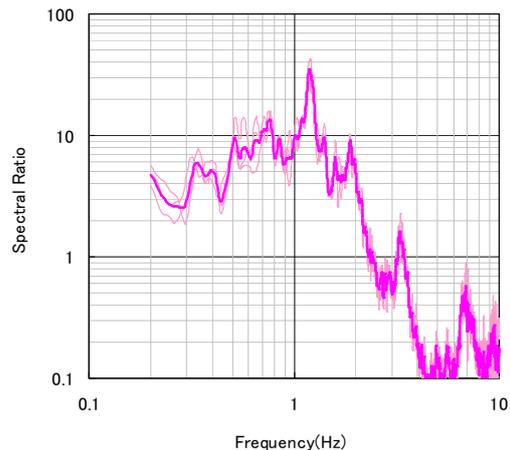


図-A2.23 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A04-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

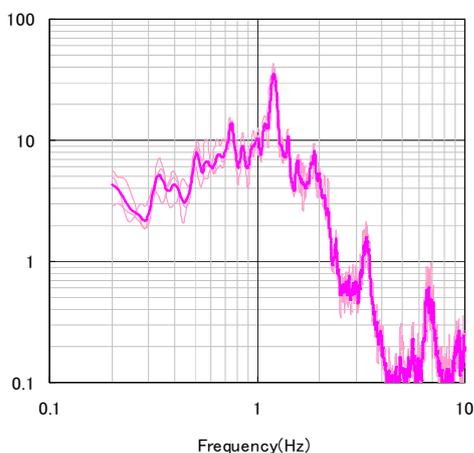


図-A2.21 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A03-A01法線直角方向 15:40~16:00)

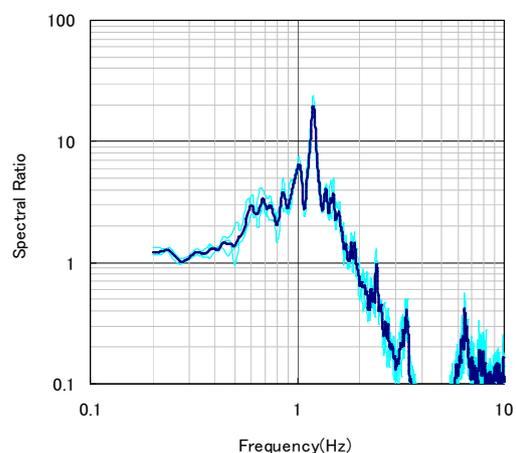


図-A2.24 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A05-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

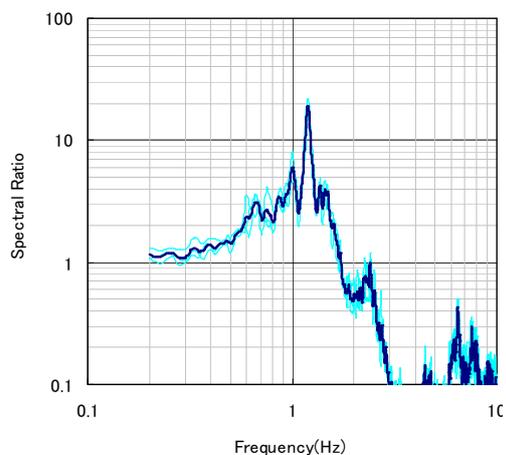


図-A2.22 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A04-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

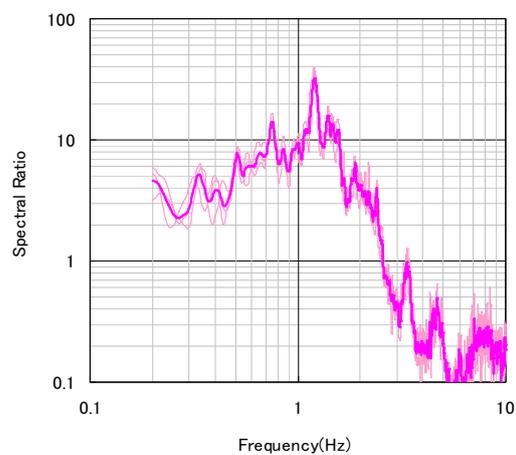


図-A2.25 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A05-A01法線直角方向 15:40~16:00)

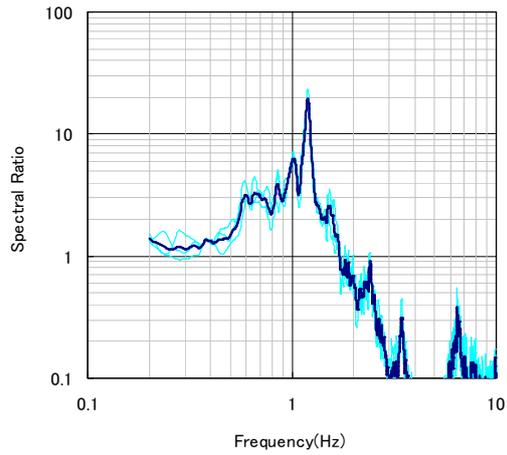


図-A2. 26 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A06-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

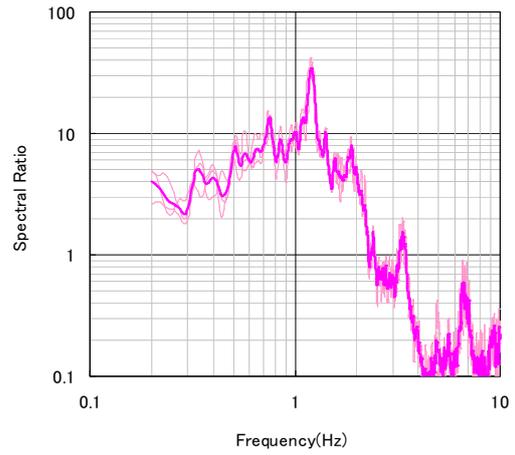


図-A2. 29 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(G02-A01法線直角方向 15:40~16:00)

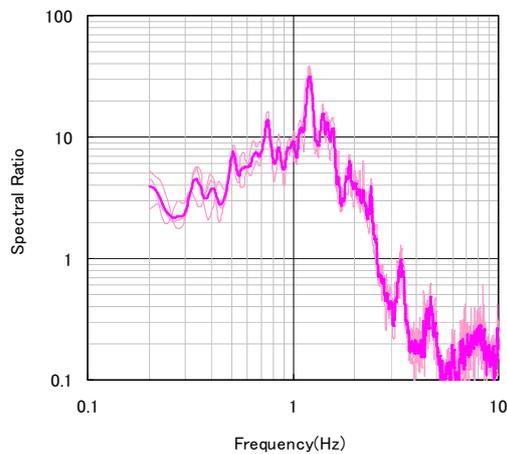


図-A2. 27 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A06-A01法線直角方向 15:40~16:00)

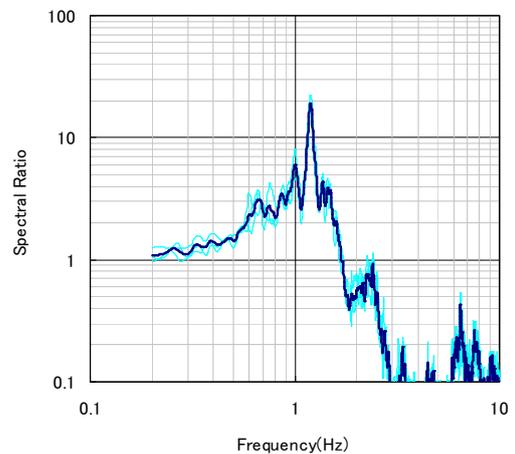


図-A2. 30 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(PT1-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

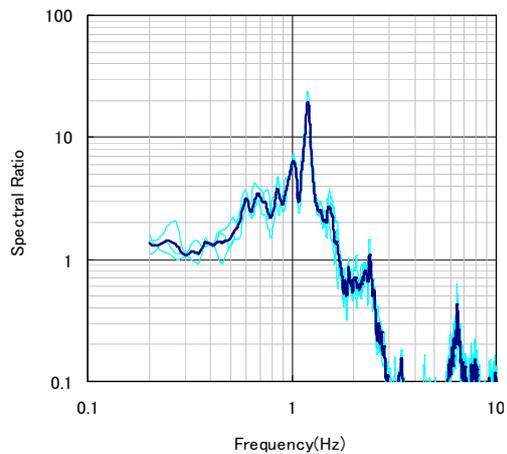


図-A2. 28 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(G02-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

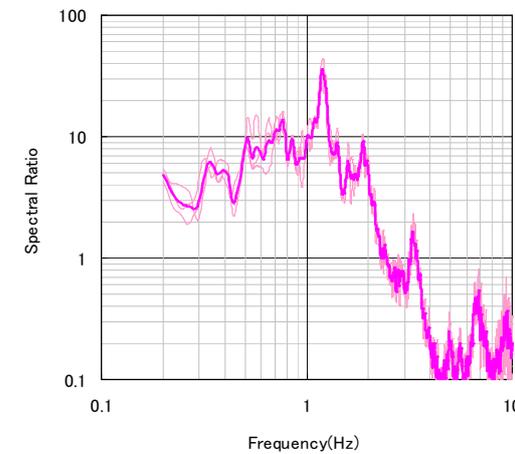


図-A2. 31 第6ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(PT1-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

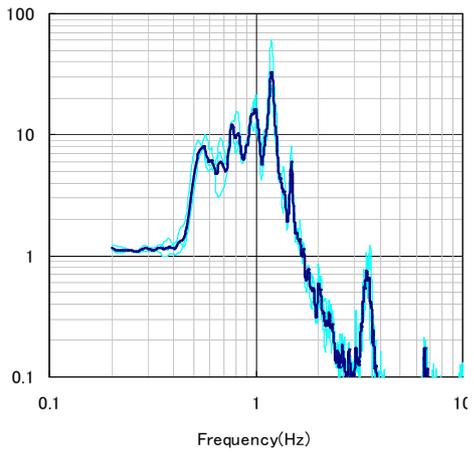


図-A2. 32 第7ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線平行方向 10:12~10:32)

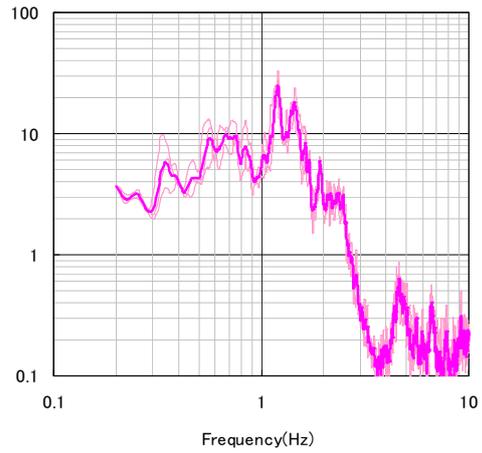


図-A2. 35 第7ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線直角方向 13:56~14:16)

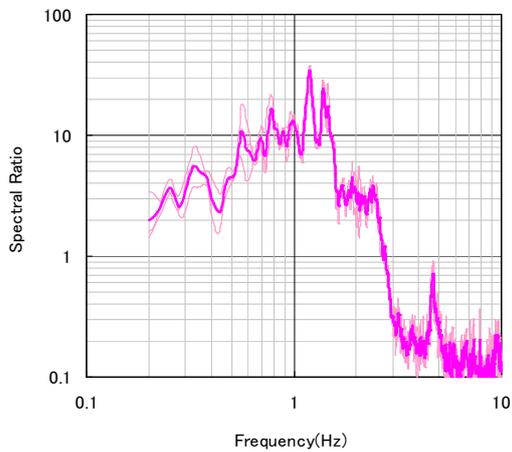


図-A2. 33 第7ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線直角方向 10:12~10:32)

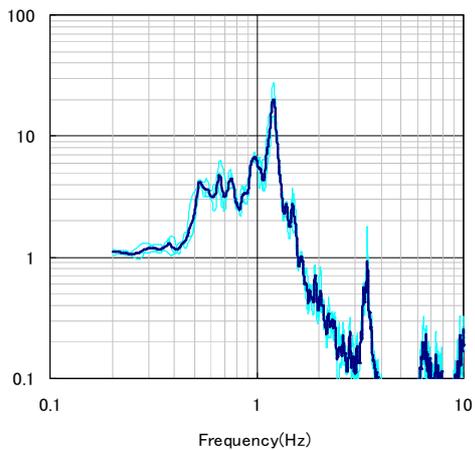


図-A2. 34 第7ブロックと背後地盤のH/H  
スペクトル比  
(A02-A01 法線平行方向 13:56~14:16)

付録A3 変位軌跡

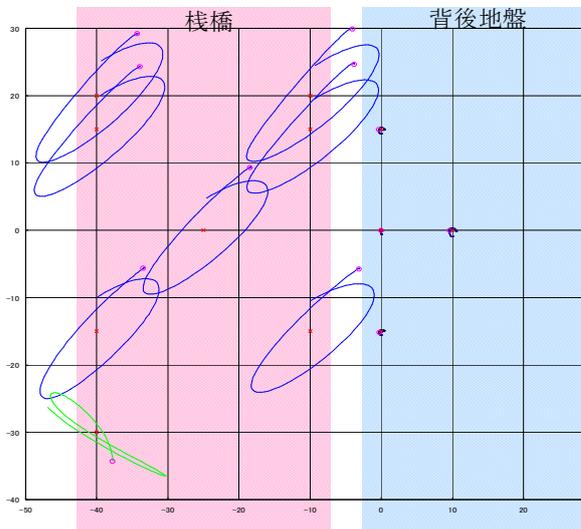


図-A3.1 9.1~10.1秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第6ブロック 9:40~10:00)

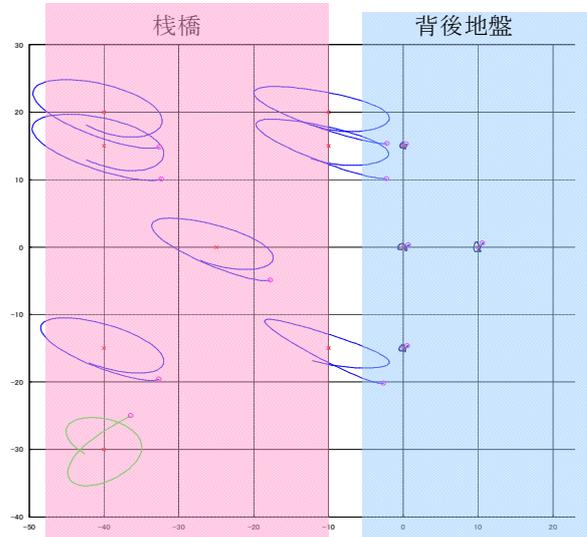


図-A3.3 10.0~11.0秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第6ブロック 14:48~15:08)

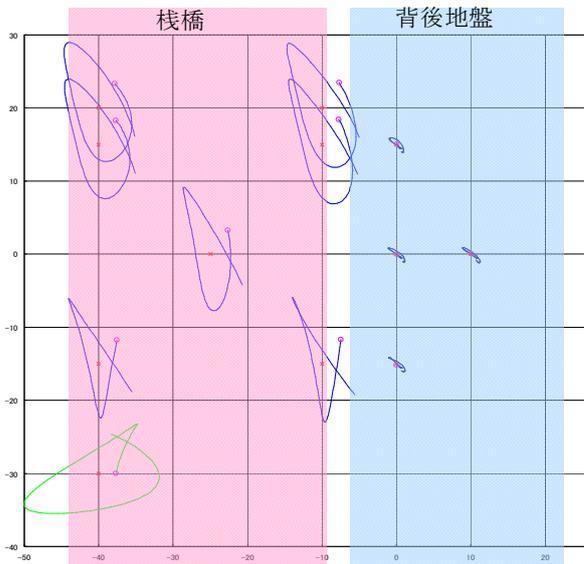


図-A3.2 61.0~62.0秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第6ブロック 9:40~10:00)

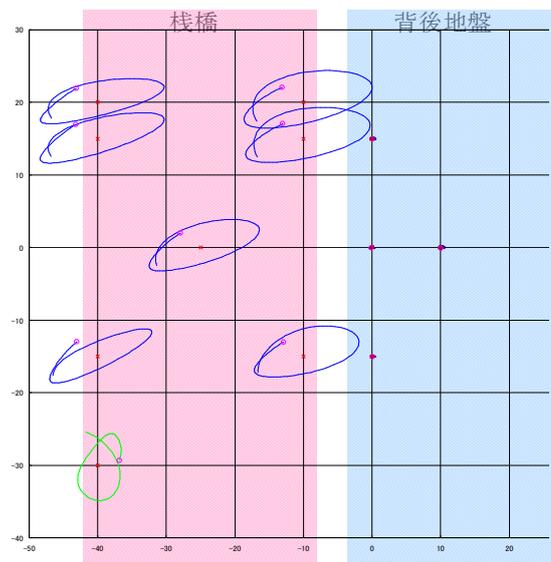


図-A3.4 61.0~62.0秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第6ブロック 14:48~15:08)

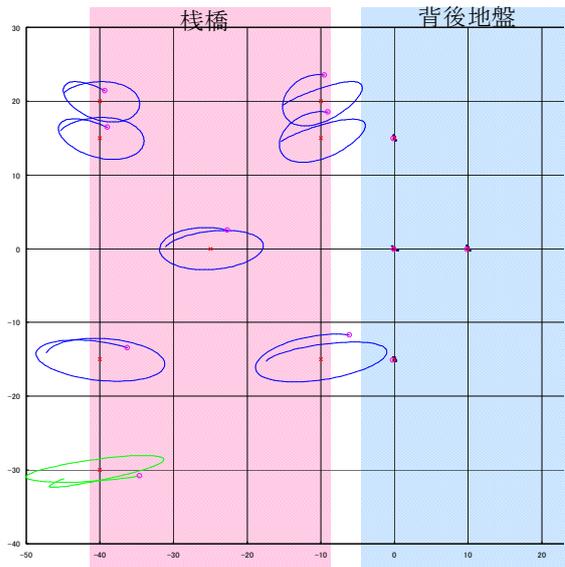


図-A3.5 11.0~12.0秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第6ブロック 15:40~16:00)

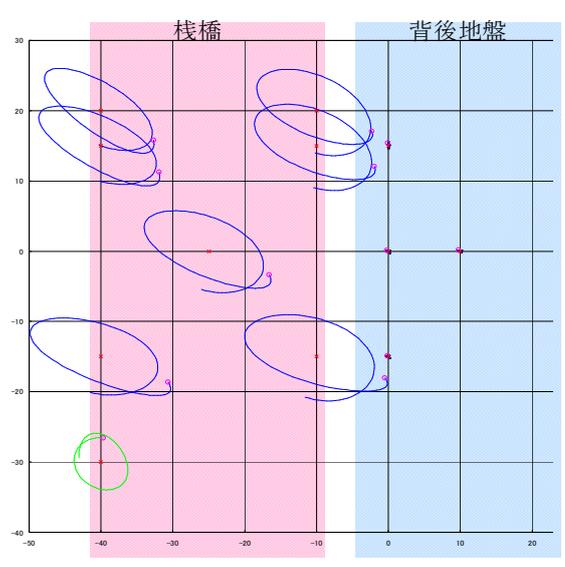


図-A3.7 9.1~10.10秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第7ブロック 10:12~10:32)

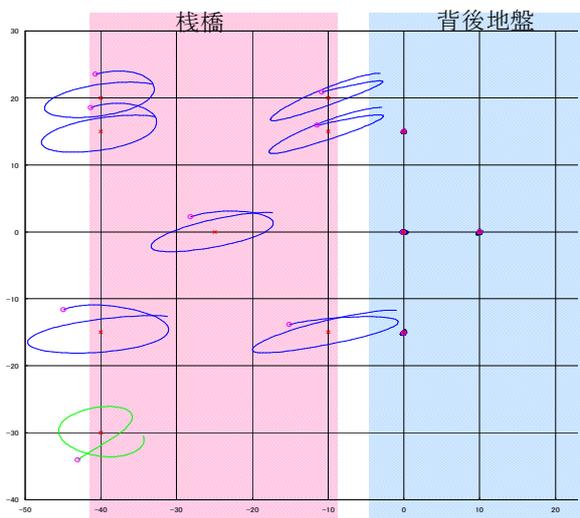


図-A3.6 63.0~64.0秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第6ブロック 15:40~16:00)

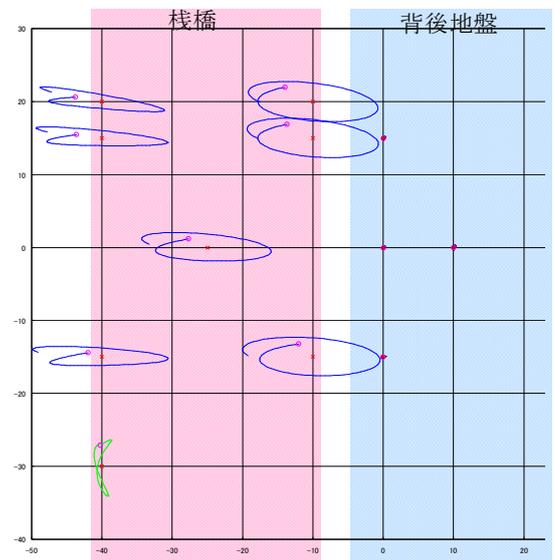


図-A3.8 61.0~62.0秒の変位軌跡 (1.2Hz)  
(第7ブロック 10:12~10:32)

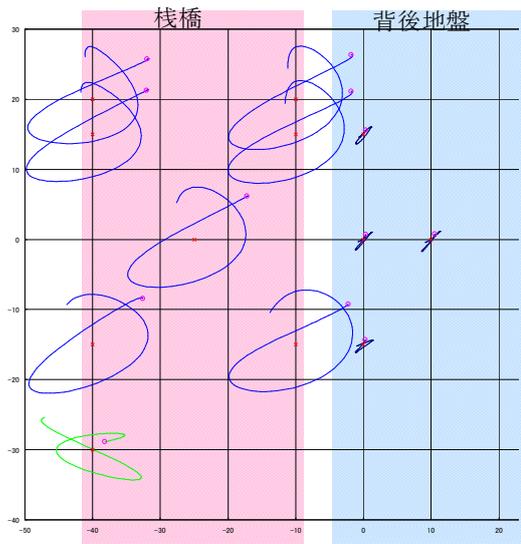


図-A3.9 15.0~16.0秒の変位軌跡 (1.2Hz付近)  
(第7ブロック 13:56~14:16)

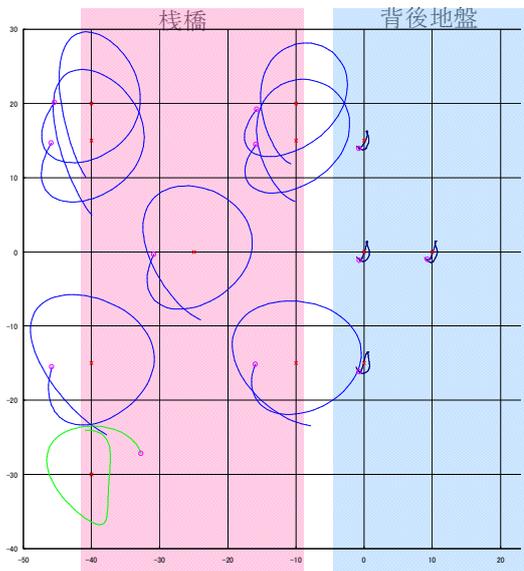


図-A3.10 61.0~62.0秒の変位軌跡 (1.2Hz付近)  
(第7ブロック 13:56~14:16)

#### 付録A4 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比

「栈橋上の観測点」と「背後地盤上の観測点」の鉛直方向の振幅スペクトルの比をとり、V/Vスペクトル比として算出した。波浪のフーリエスペクトルにおいて1.6Hz付近にピークが見られ、波による上部工の打ちあげによるものではないかと予想したが、それとの関連性を示す上で参考的に算出を行った。結果として、潮位の高い時間において、V/Vスペクトル比でも1.6Hz付近にピークがみられ、波が栈橋上部工を打ちつけることによる上部工の鉛直振動が、上部工に固定された波高計による観測結果に表れたものであると判断した。

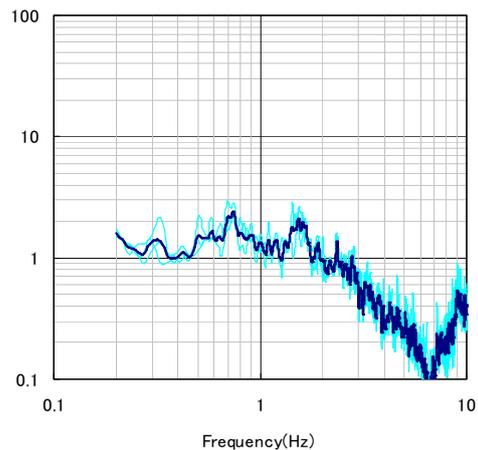


図-A4.3 第6ブロックと背後地盤の  
V/Vスペクトル比  
(A02-A01 15:40~16:00)

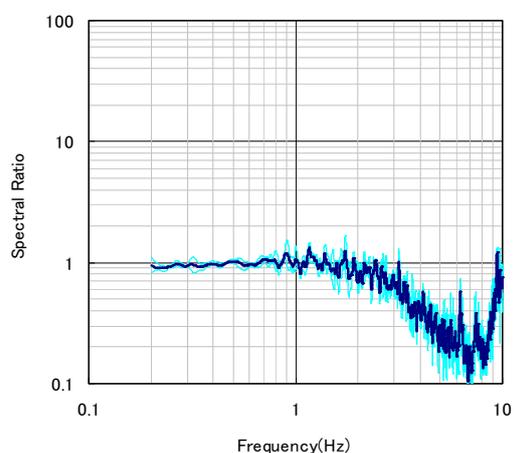


図-A4.1 第6ブロック背後地盤の  
V/Vスペクトル比  
(A02-A01 9:40~10:00)

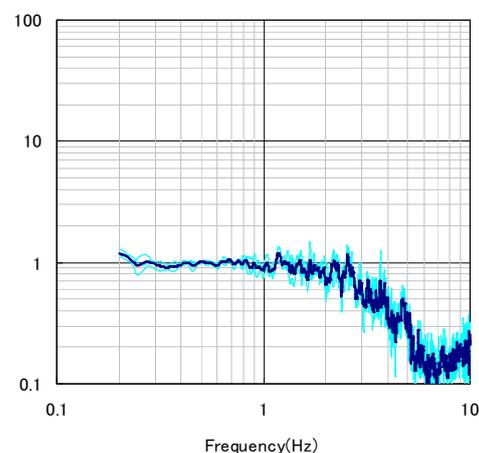


図-A4.4 第7ブロックと背後地盤の  
V/Vスペクトル比  
(A02-A01 10:12~10:32)

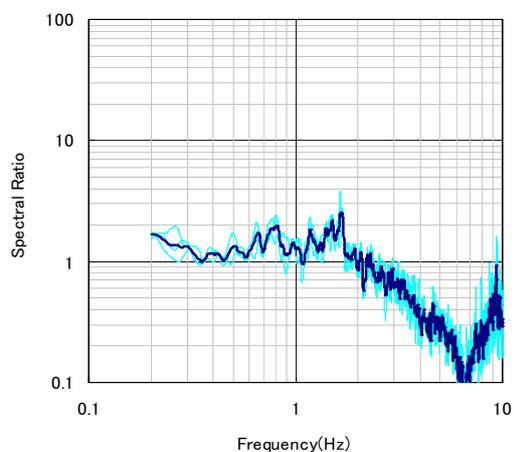


図-A4.2 第6ブロックと背後地盤の  
V/Vスペクトル比  
(A02-A01 14:48~15:08)

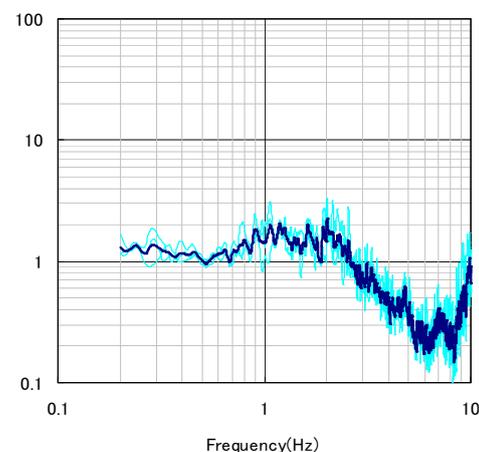


図-A4.5 第7ブロックと背後地盤の  
V/Vスペクトル比  
(A02-A01 13:56~14:16)

付録A5 波浪のフーリエスペクトル

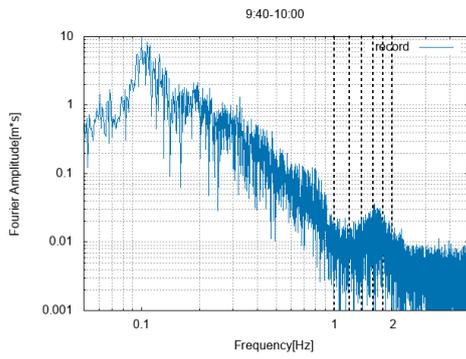


図-A5.1 波浪のフーリエスペクトル  
(9:40~10:00)

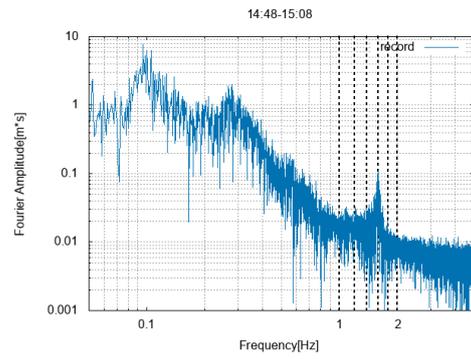


図-A5.4 波浪のフーリエスペクトル  
(14:46~15:06)

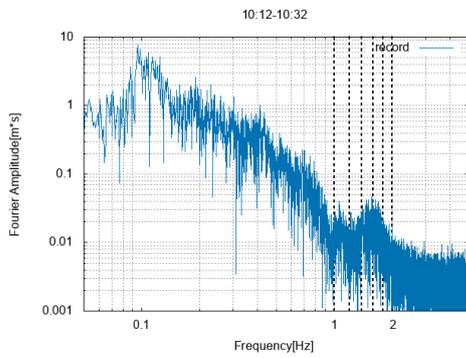


図-A5.2 波浪のフーリエスペクトル  
(10:12~10 : 32)

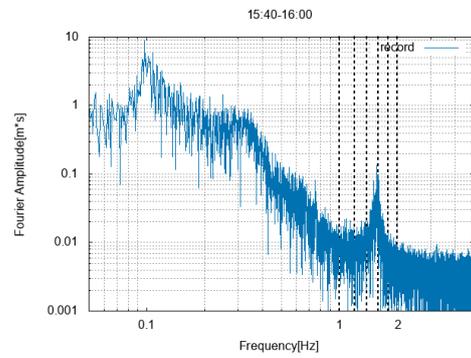


図-A5.5 波浪のフーリエスペクトル  
(15:40~16:00)

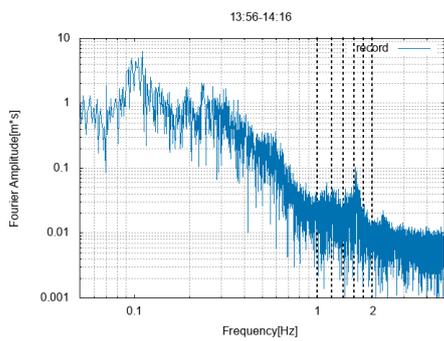


図-A5.3 波浪のフーリエスペクトル  
(13:56~14:16)

岸壁(-20.0m)標準断面図 S=1/150  
 (A-2工区⑥ブロック)(渡橋あり)(ケーソン上面D.L.+1.80m)  
 RSプラスチック工法

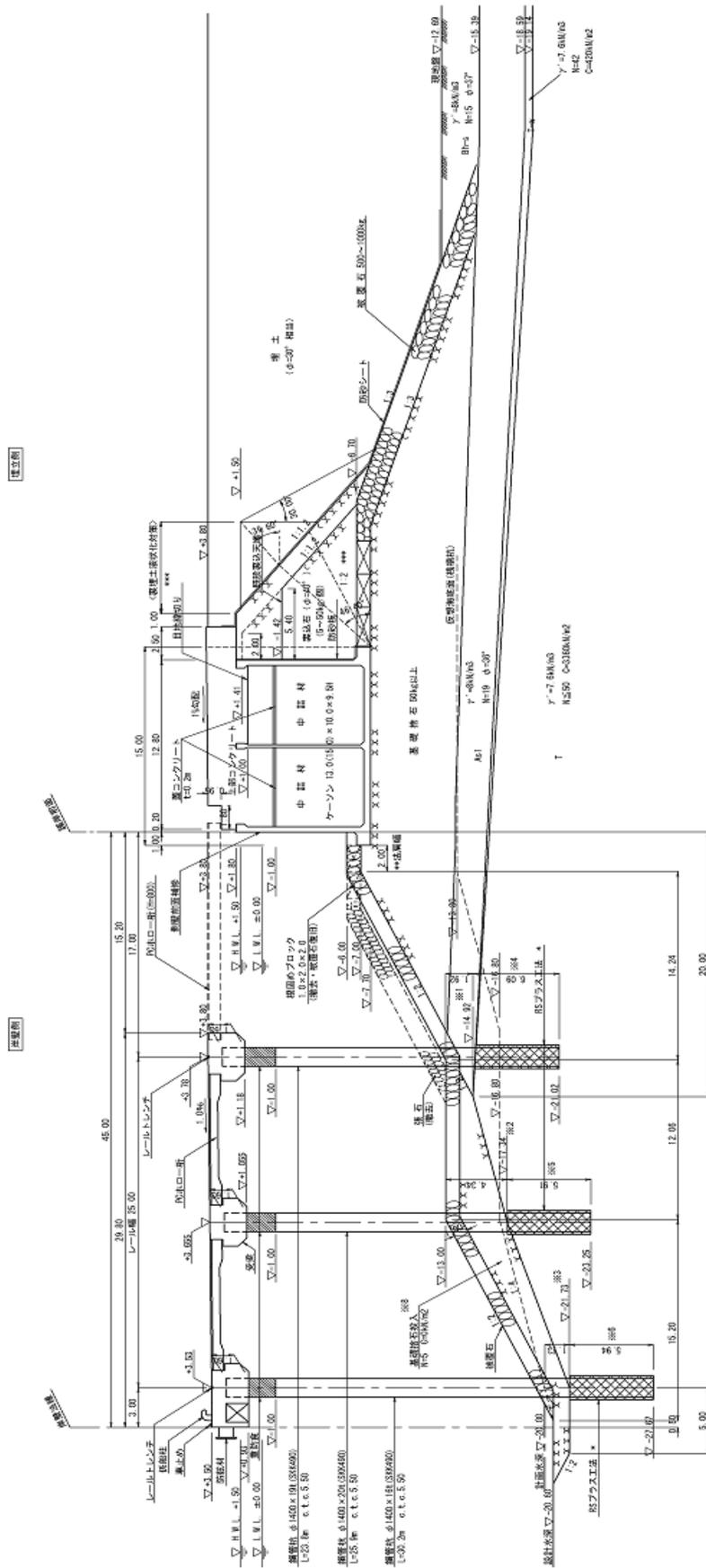


図-A6.1 小名浜港の棧橋の断面図 (第6ブロック：渡版あり)



付録B. 川崎港の棧橋に関する詳細資料

付録B1 背後地盤のH/Vスペクトル比

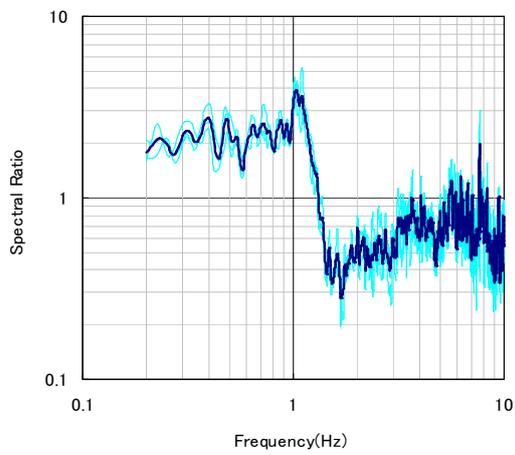


図-B1.1 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(A01 11月14日 19:00～19:20)

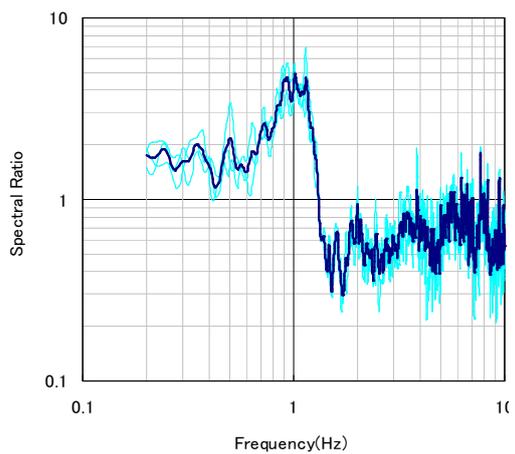


図-B1.2 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(A01 11月15日 3:00～3:20)

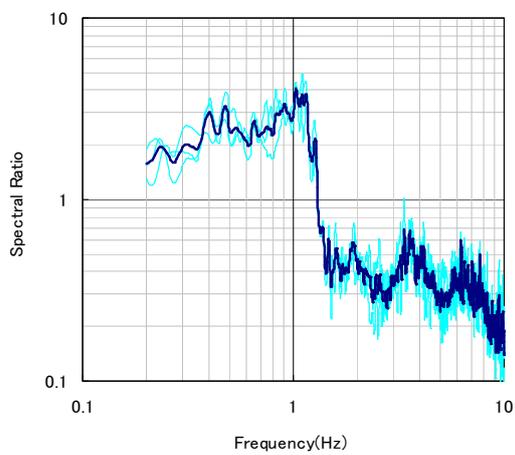


図-B1.3 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(A01 11月15日 7:18～7:38)



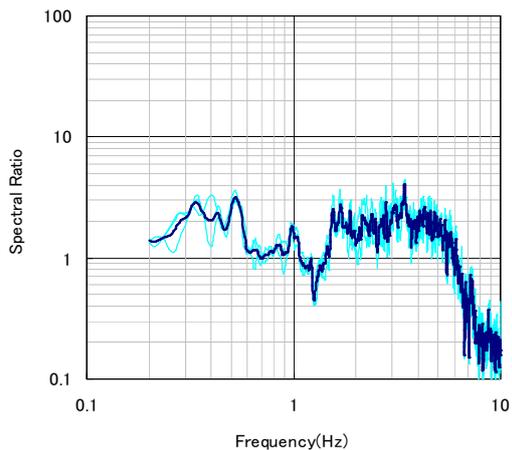


図-B2.2 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月14日)  
(A02-A01 19:00~19:20)

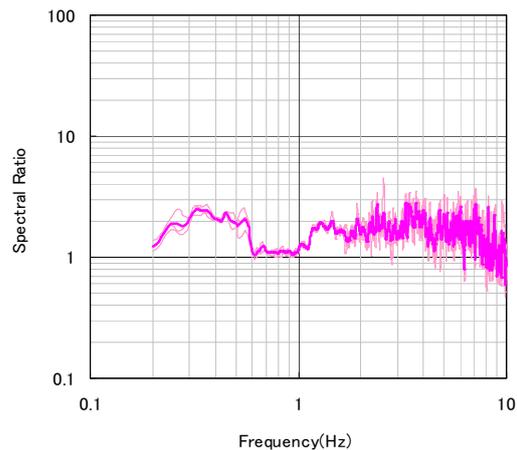


図-B2.5 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(A03-A01 19:00~19:20)

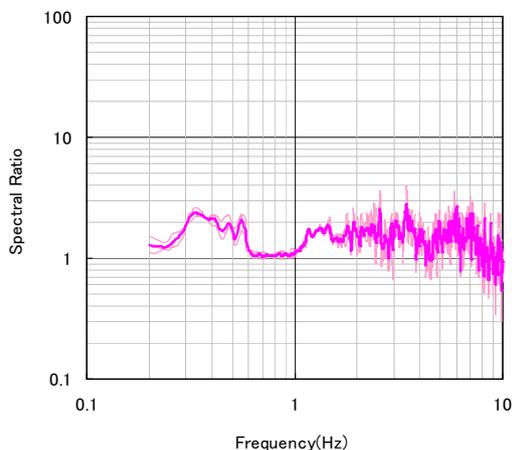


図-B2.3 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(A02-A01 19:00~19:20)

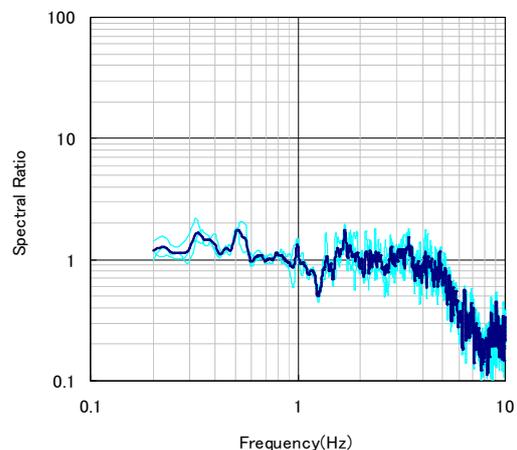


図-B2.6 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月14日)  
(A04-A01 19:00~19:20)

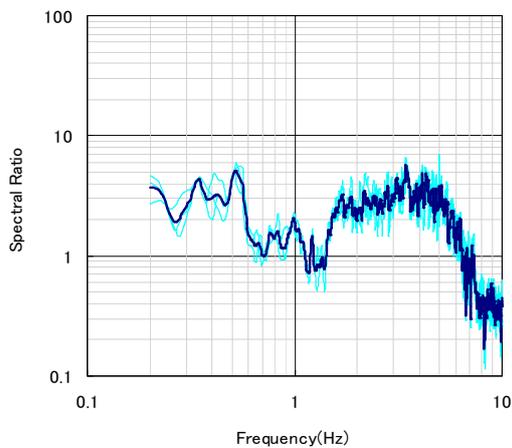


図-B2.4 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月14日)  
(A03-A01 19:00~19:20)

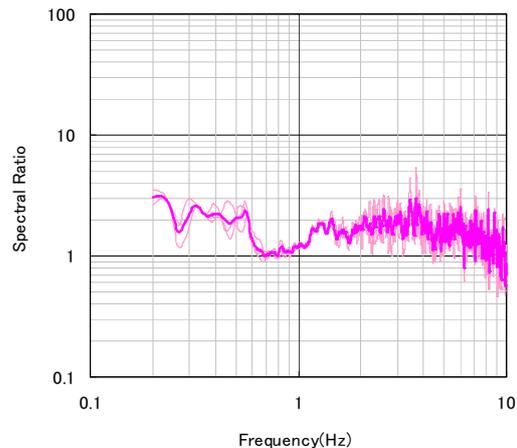


図-B2.7 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(A04-A01 19:00~19:20)

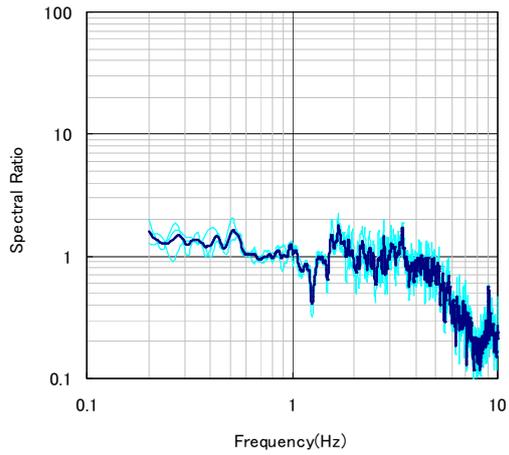


図-B2.8 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月14日)  
(A05-A01 19:00~19:20)

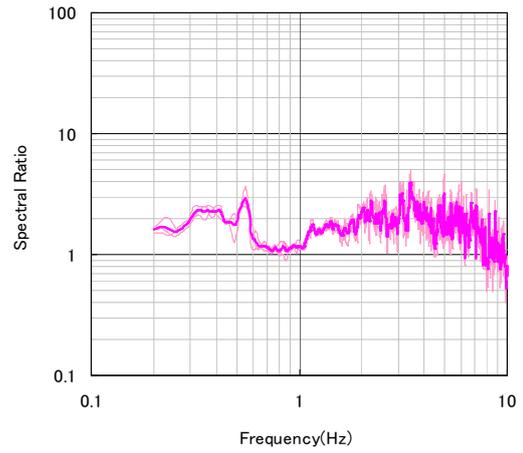


図-B2.11 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(A06-A01 19:00~19:20)

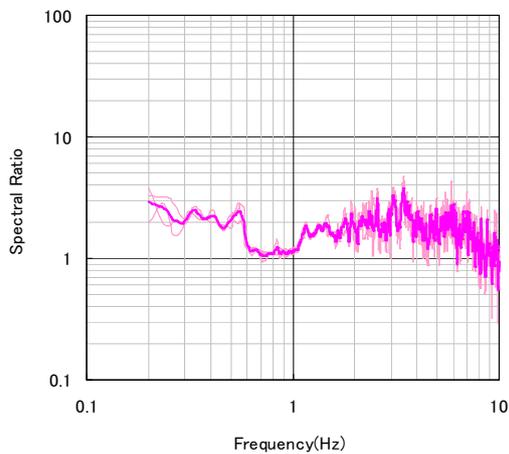


図-B2.9 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(A05-A01 19:00~19:20)

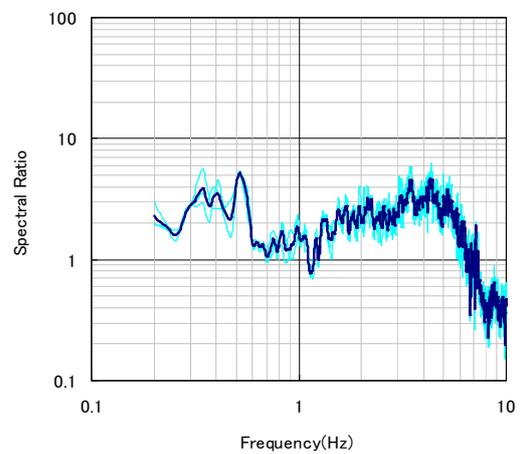


図-B2.12 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(G02-A01 19:00~19:20)

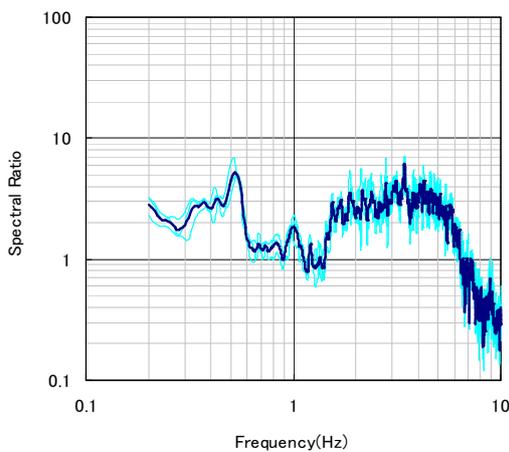


図-B2.10 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月14日)  
(A06-A01 19:00~19:20)

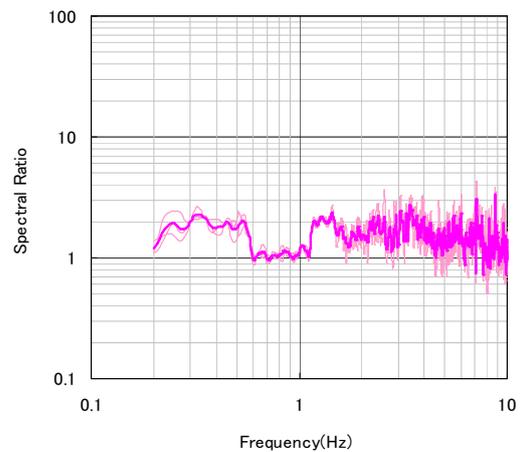


図-B2.13 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(G02-A01 19:00~19:20)

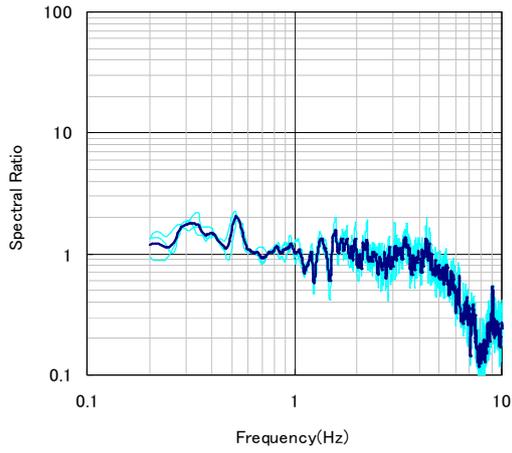


図-B2.14 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(PT1-A01 19:00~19:20)

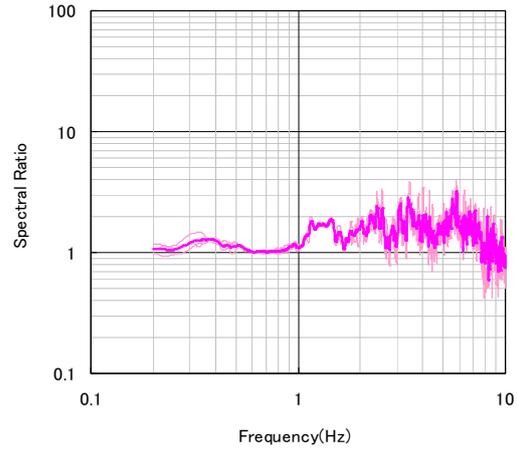


図-B2.17 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(A02-A01 3:00~3:20)

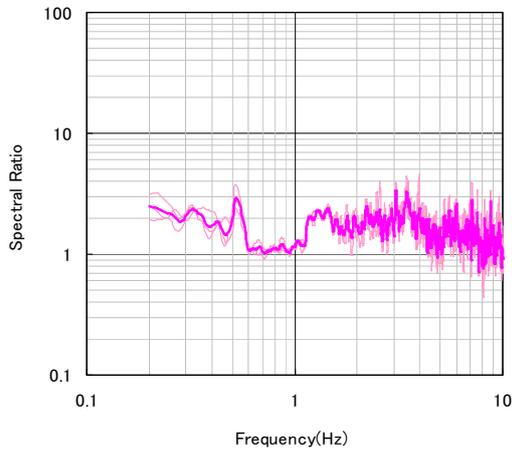


図-B2.15 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月14日)  
(PT1-A01 19:00~19:20)

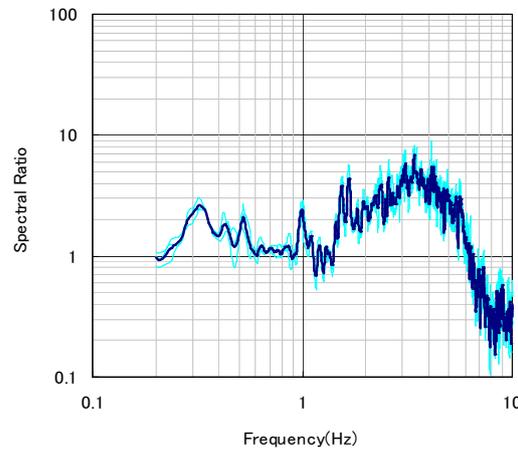


図-B2.18 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(A03-A01 3:00~3:20)

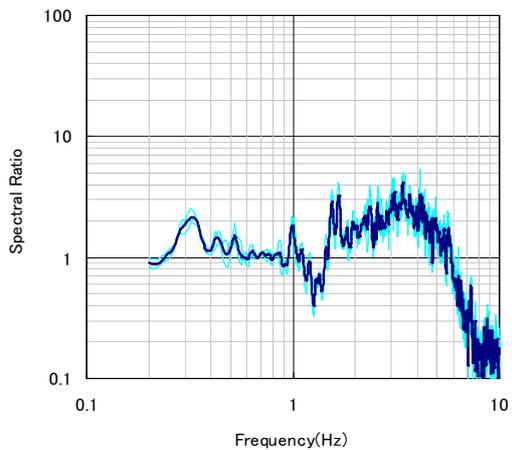


図-B2.16 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(A02-A01 3:00~3:20)

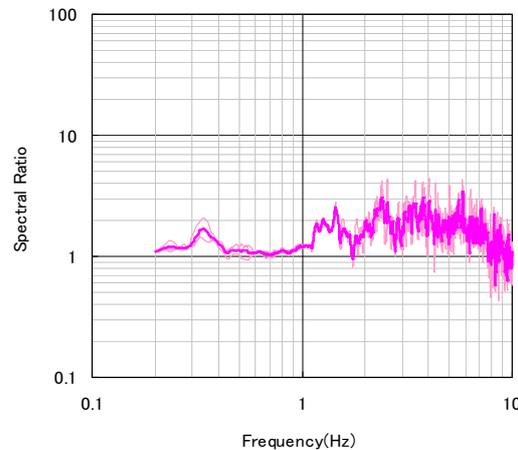


図-B2.19 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(A03-A01 3:00~3:20)

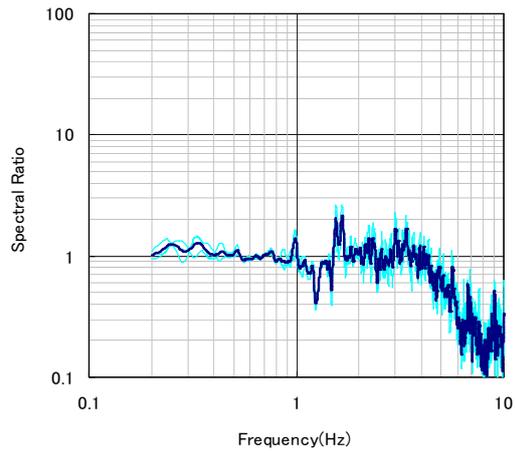


図-B2.20 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(A04-A01 3:00~3:20)

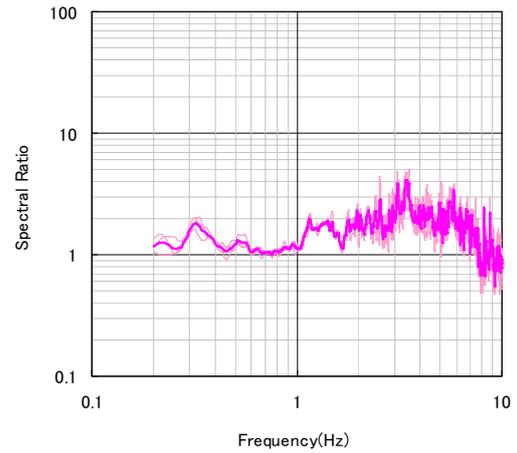


図-B2.23 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(A05-A01 3:00~3:20)

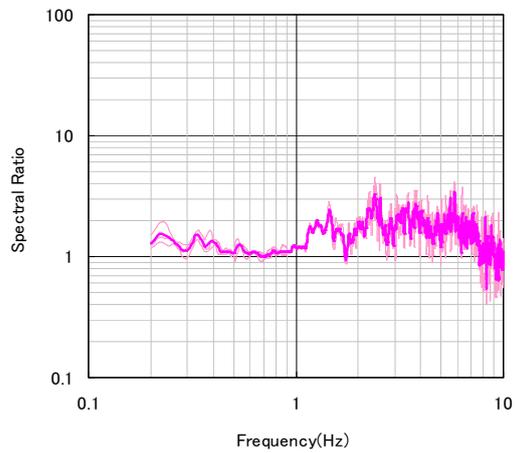


図-B2.21 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(A04-A01 3:00~3:20)

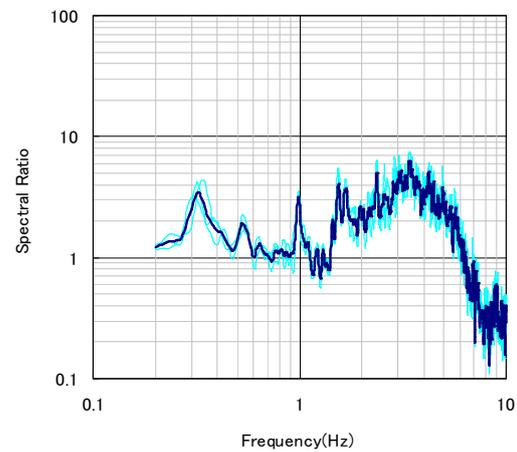


図-B2.24 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(A06-A01 3:00~3:20)

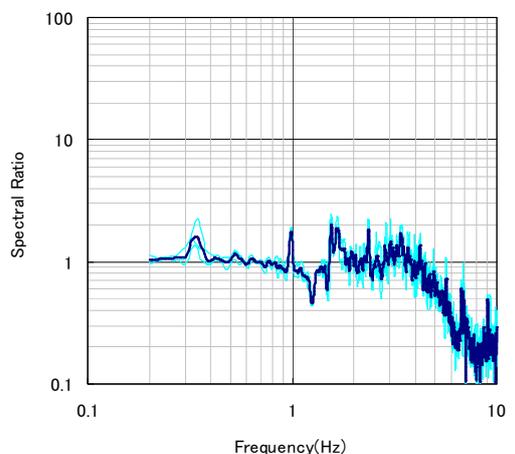


図-B2.22 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(A05-A01 3:00~3:20)

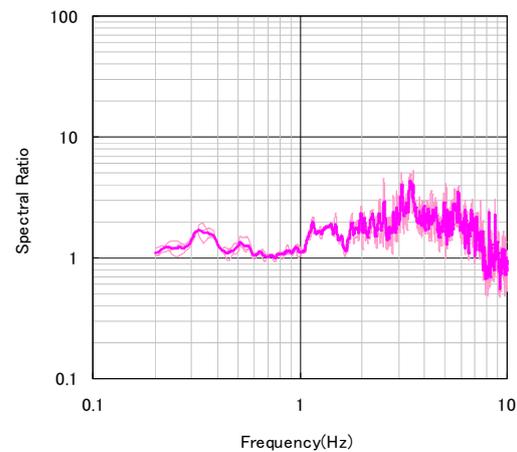


図-B2.25 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(A06-A01 3:00~3:20)

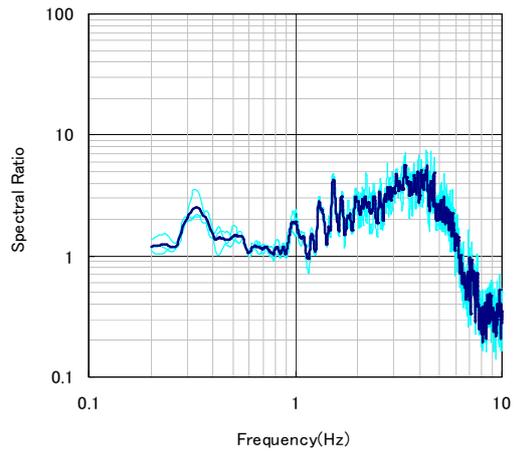


図-B2. 26 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(G02-A01 3:00~3:20)

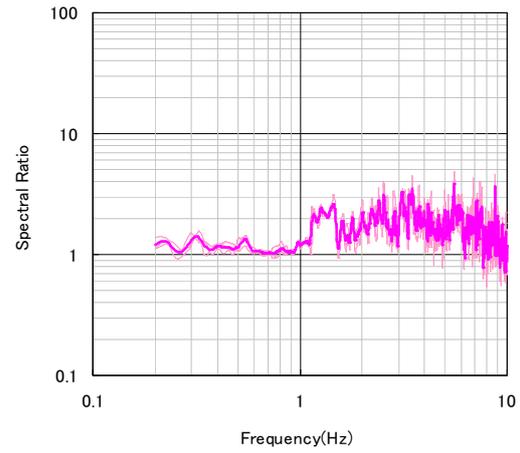


図-B2. 29 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(PT1-A01 3:00~3:20)

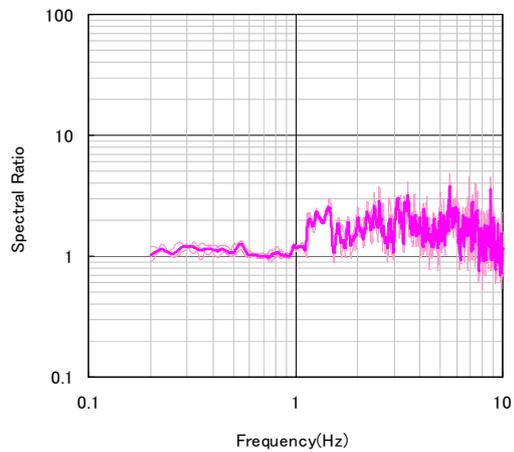


図-B2. 27 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線直角方向 11月15日)  
(G02-A01 3:00~3:20)

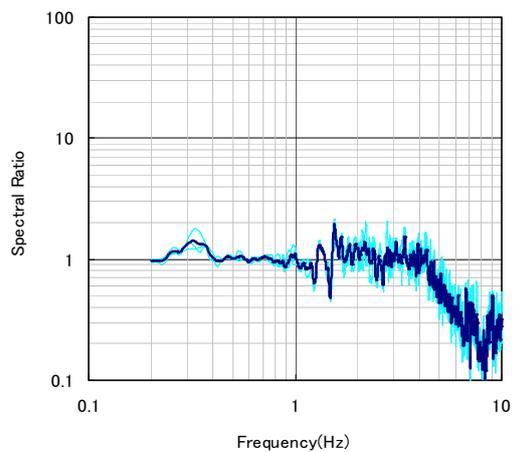


図-B2. 28 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(法線平行方向 11月15日)  
(PT1-A01 3:00~3:20)

付録B3 変位軌跡

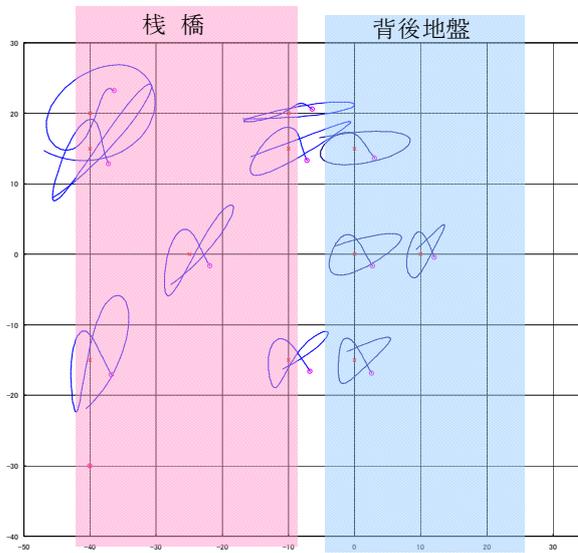


図-B3.1 12.0~13.0秒の変位軌跡  
(1.45-1.95Hz) (11月14日 19:00~19:20)

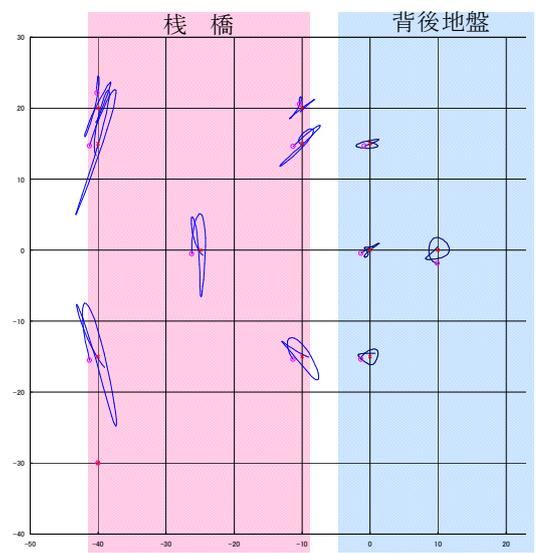


図-B3.3 12.30~12.80秒の変位軌跡  
(2.55-3.05Hz) (11月14日 19:00~19:20)

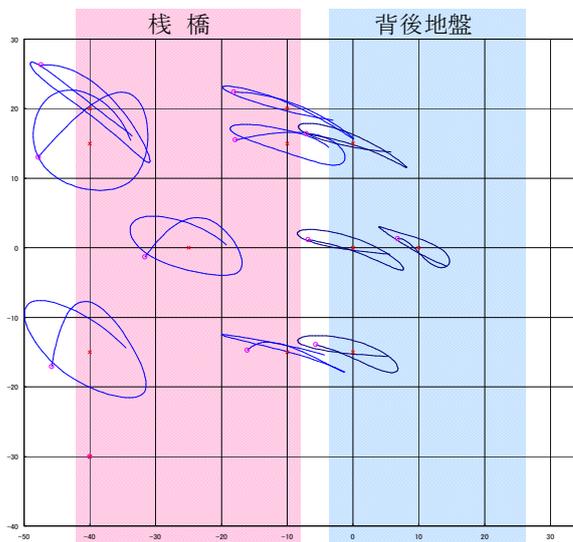


図-B3.2 55.0~56.0秒の変位軌跡  
(1.45-1.95Hz) (11月14日 19:00~19:20)

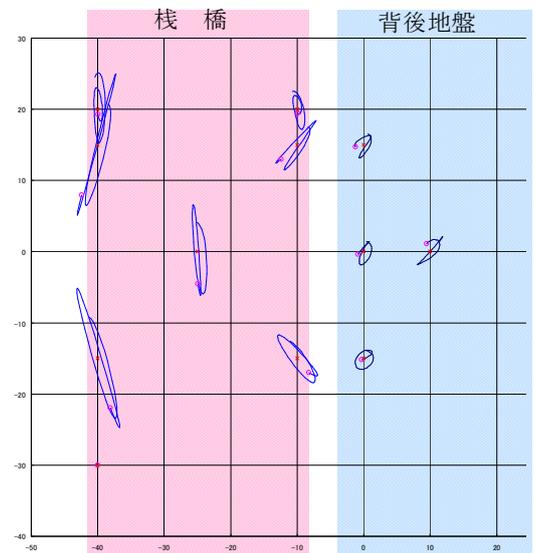


図-B3.4 55.0~55.5秒の変位軌跡  
(2.55-3.05Hz) (11月14日 19:00~19:20)

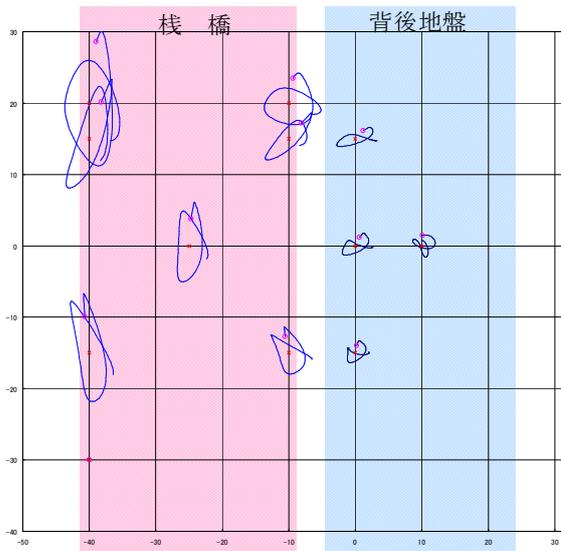


図-B3.5 16.0~17.0秒の変位軌跡  
(1.45-1.95Hz) (11月15日 3:00~3:20)

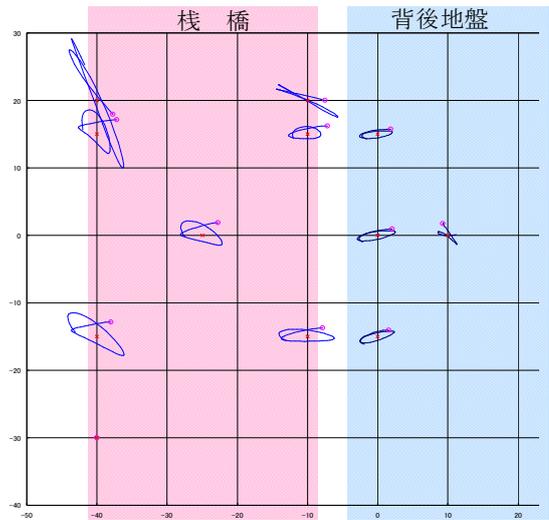


図-B3.7 16.0~16.5秒の変位軌跡  
(2.55-3.05Hz) (11月15日 3:00~3:20)

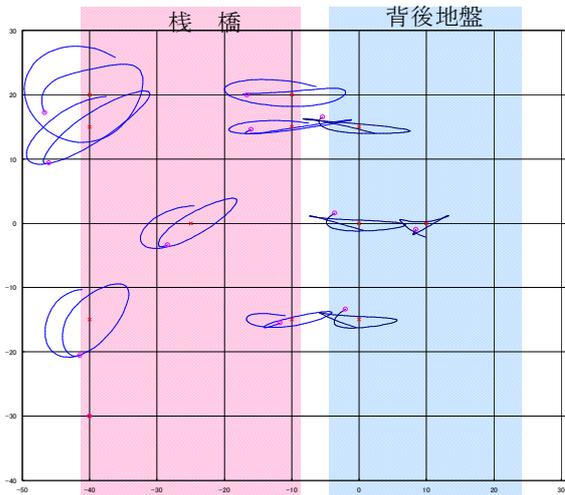


図-B3.6 50.0~51.0秒の変位軌跡  
(1.45-1.95Hz) (11月15日 3:00~3:20)

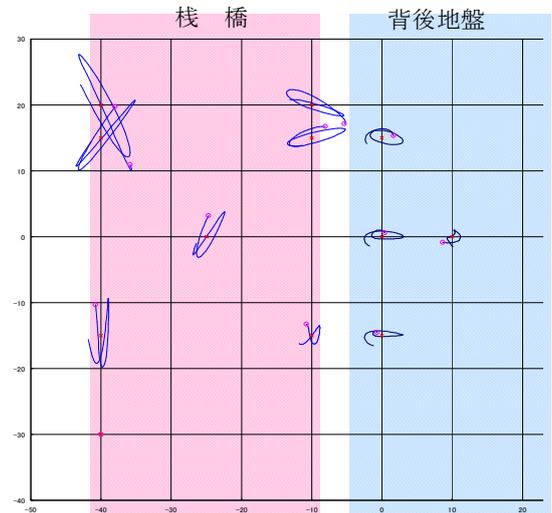


図-B3.8 50.2~50.7秒の変位軌跡  
(2.55-3.05Hz) (11月15日 3:00~3:20)

付録B4 棧橋と背後地盤のV/Vスペクトル比

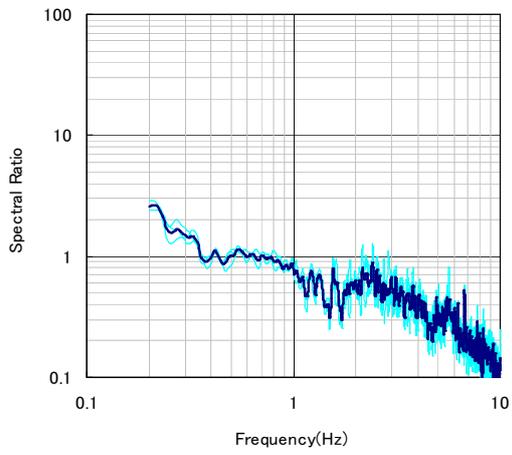


図-B4.1 棧橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(A02-A01 11月14日 19:00~19:20)

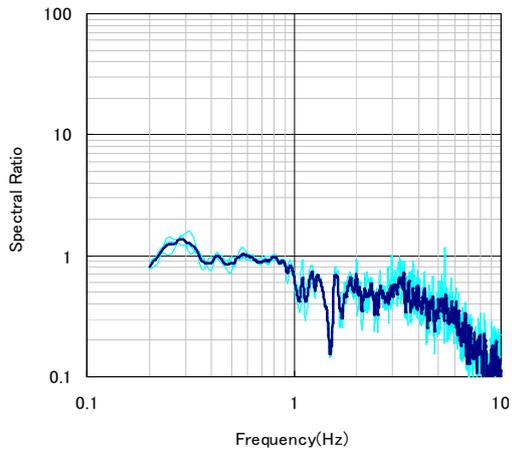


図-B4.2 棧橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(A02-A01 11月15日 3:00~3:20)

付録B5 波浪のフーリエスペクトル

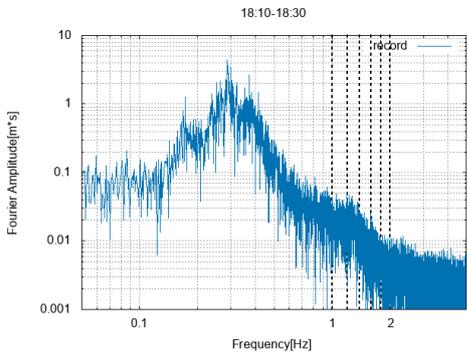


図-B5.1 波浪のフーリエスペクトル  
(11月14日 18:10~18:30)

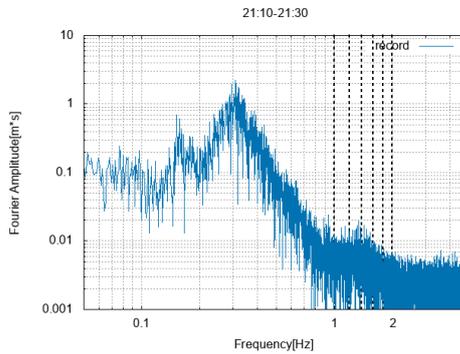


図-B5.4 波浪のフーリエスペクトル  
(11月14日 21:10~21:30)

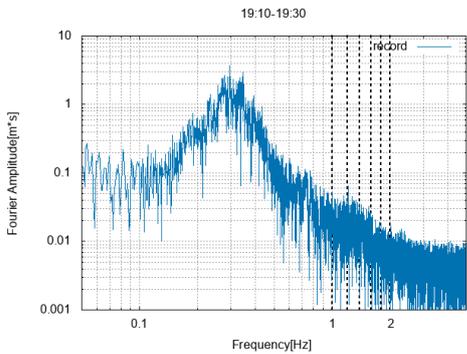


図-B5.2 波浪のフーリエスペクトル  
(11月14日 19:10~19:30)

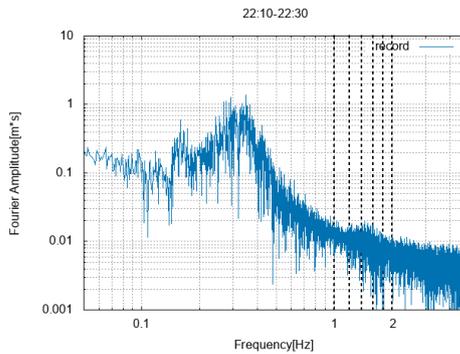


図-B5.5 波浪のフーリエスペクトル  
(11月14日 22:10~22:30)

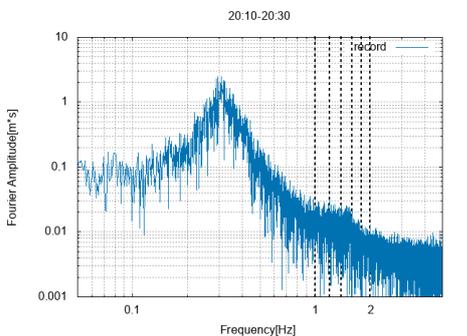


図-B5.3 波浪のフーリエスペクトル  
(11月14日 20:10~20:30)

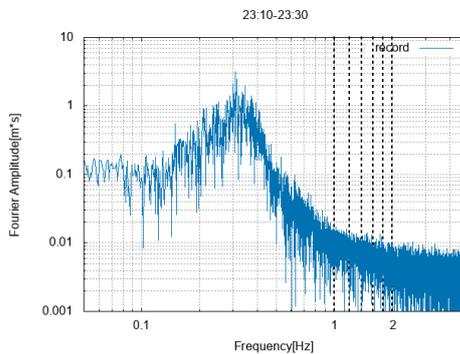


図-B5.6 波浪のフーリエスペクトル  
(11月14日 23:10~23:30)

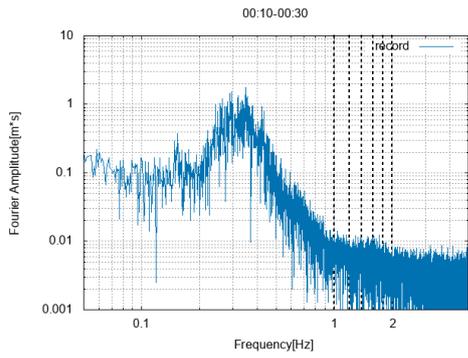


図-B5.7 波浪のフーリエスペクトル  
(11月15日 00:10~00:30)

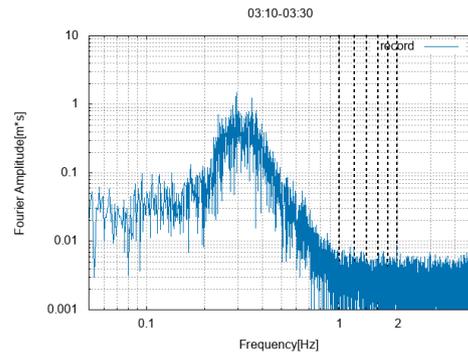


図-B5.10 波浪のフーリエスペクトル  
(11月15日 03:10~03:30)

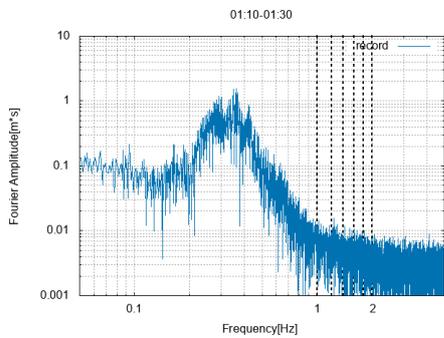


図-B5.8 波浪のフーリエスペクトル  
(11月15日 01:10~01:30)

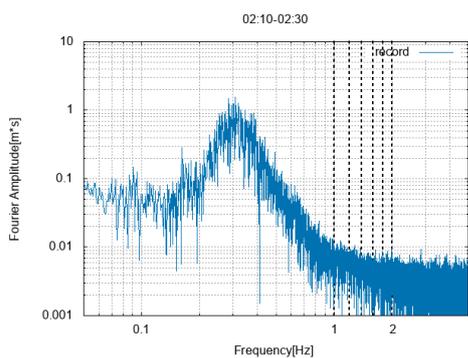


図-B5.9 波浪のフーリエスペクトル  
(11月15日 02:10~02:30)

付録B6 構造詳細

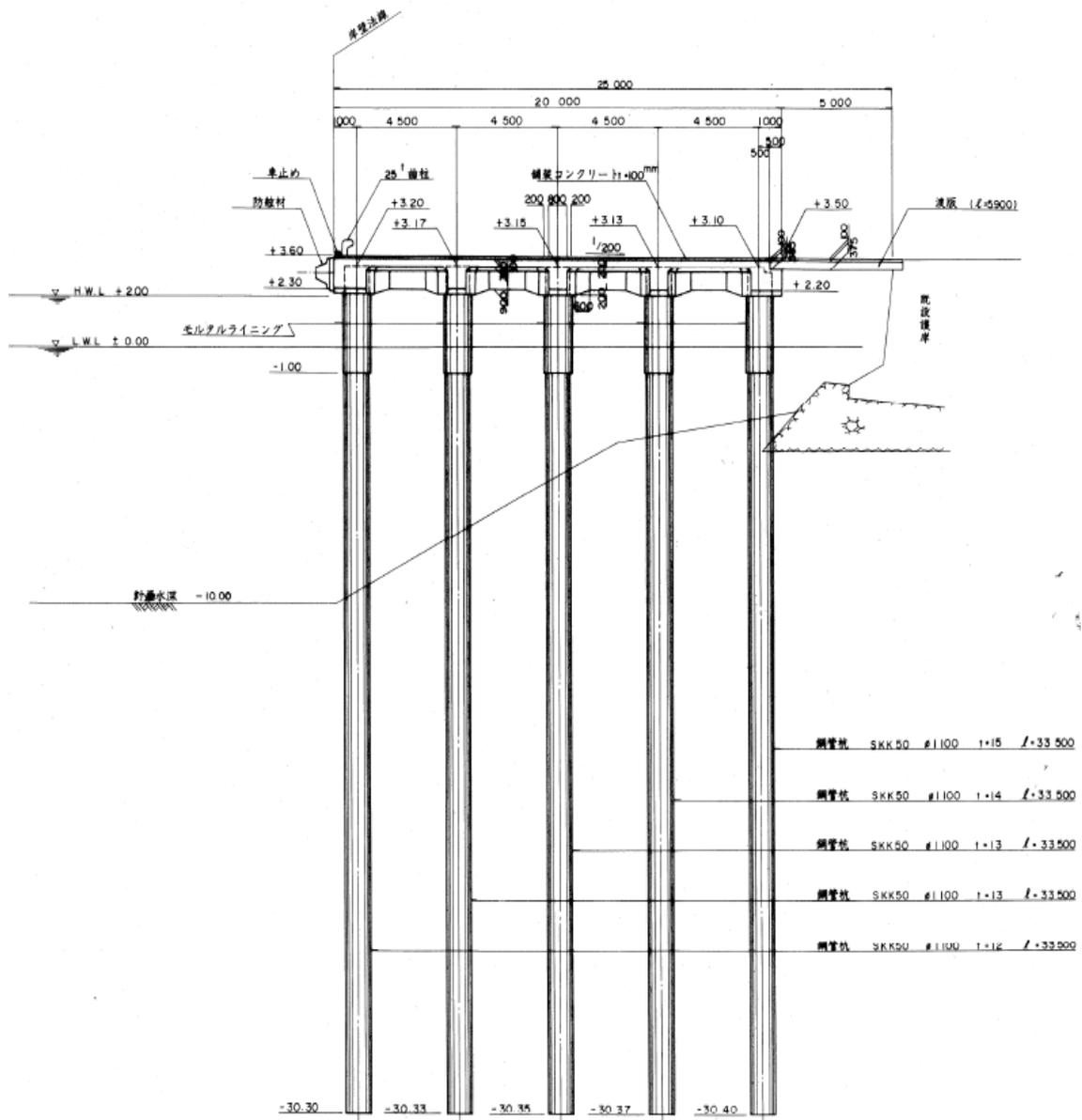


図-B6.1 川崎港の棧橋の断面図

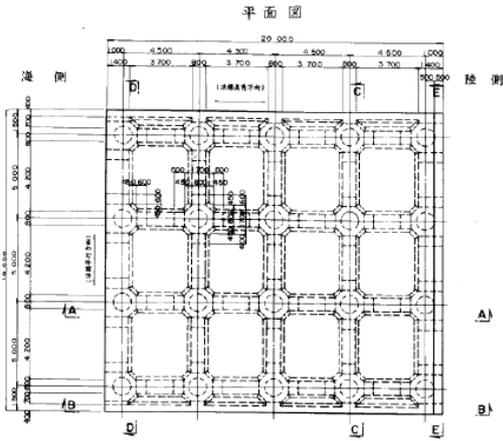


図-B6.2 平面図

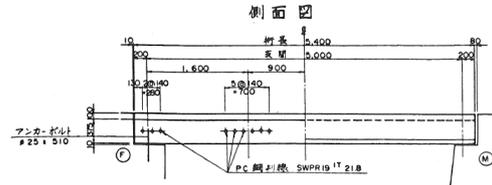


図-B6.5 渡版の断面図

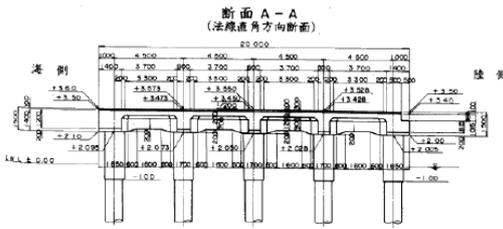


図-B6.3 法線直角方向断面

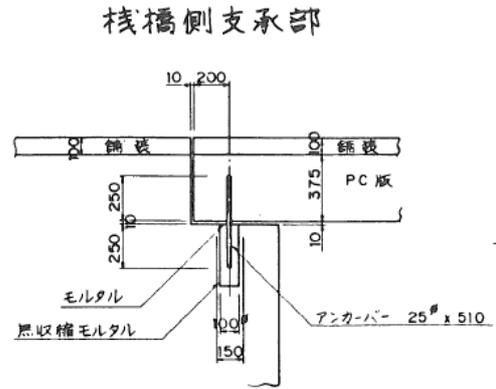


図-B6.6 渡版の栈橋側支承部

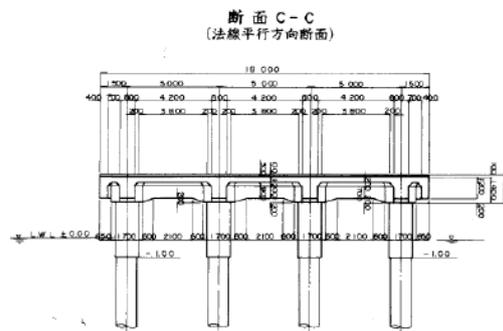


図-B6.4 法線平行方向断面

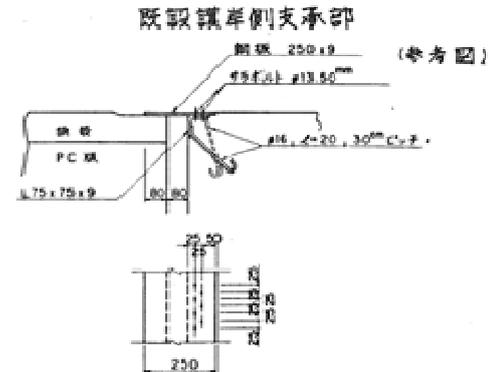


図-B6.7 渡版の護岸側支承部

付録C. 神戸港のドルフィンに関する詳細資料  
付録C1 背後地盤のH/Vスペクトル比

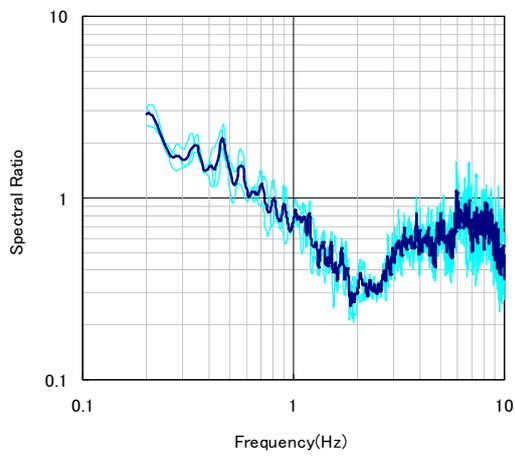


図-C1.1 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(A01 11:00~12:20)

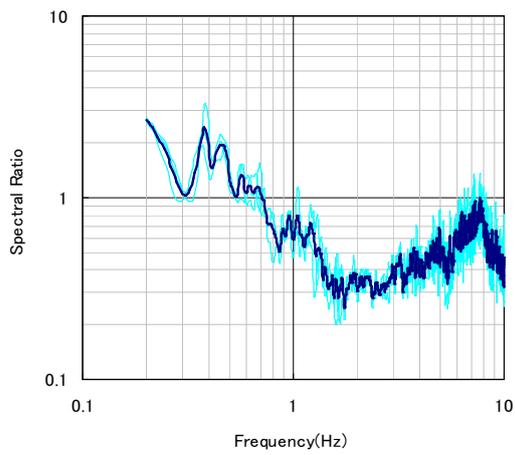


図-C1.2 背後地盤のH/Vスペクトル比  
(A01 15:40~16:00)

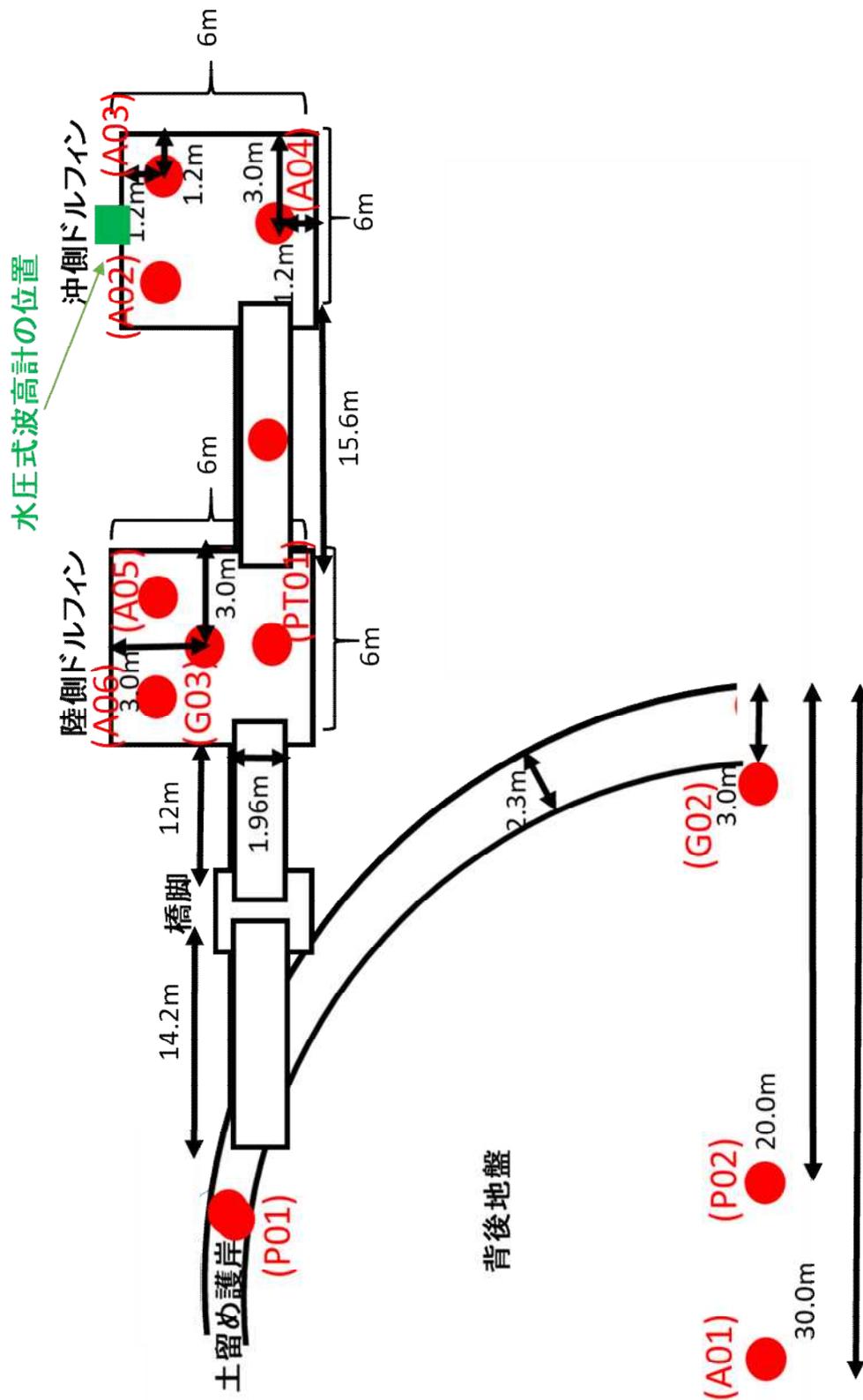


図. C2.1 計器の配置図 (平面図)

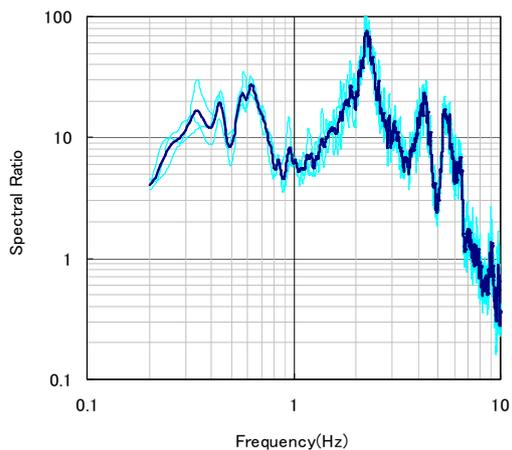


図-C2.2 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A02-A01 法線平行方向 11:00~11:20)

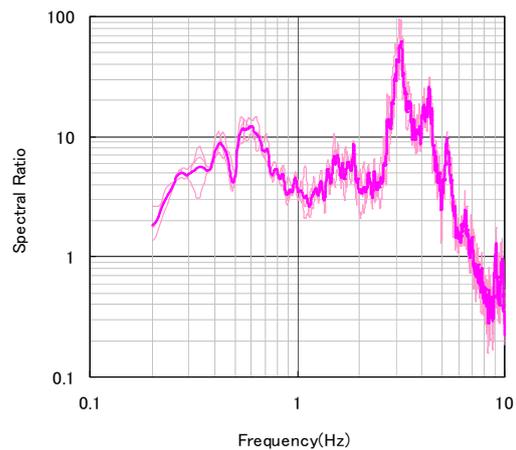


図-C2.5 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A03-A01 法線直角方向 11:00~11:20)

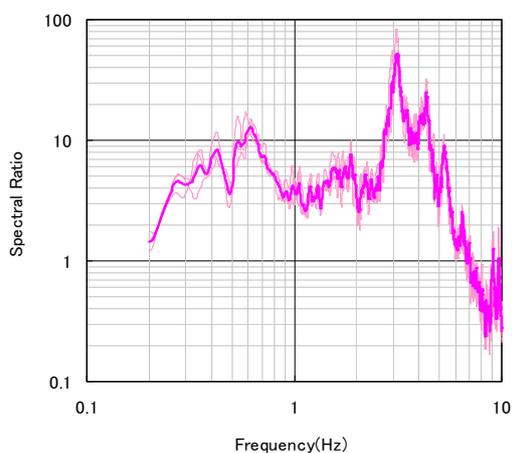


図-C2.3 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A02-A01 法線直角方向 11:00~11:20)

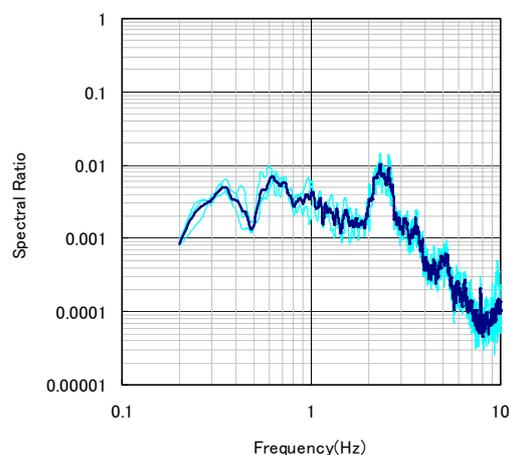


図-C2.6 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A04-A01法線平行方向 11:00~11:20)

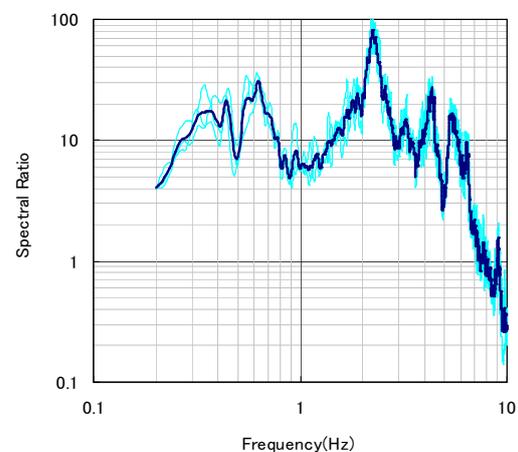


図-C2.4 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A03-A01 法線平行方向 11:00~11:20)

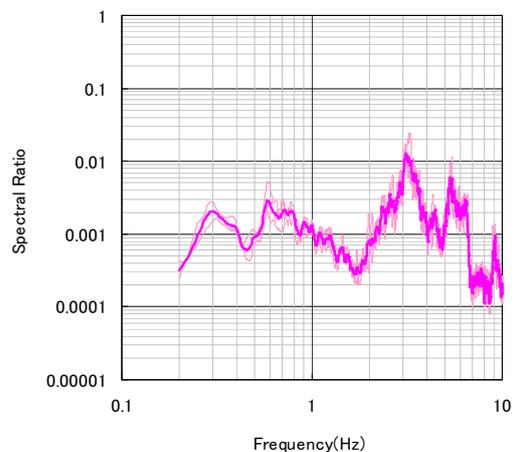


図-C2.7 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A04-A01 法線直角方向 11:00~11:20)

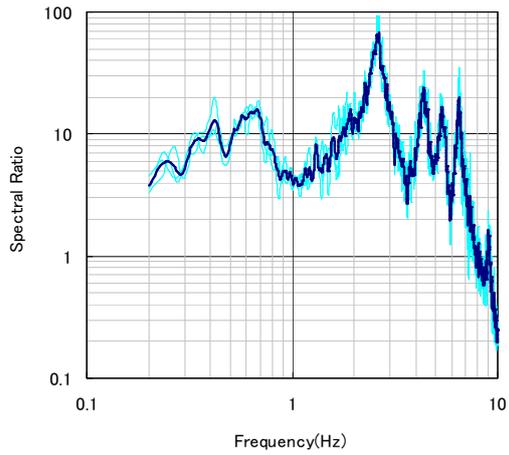


図-C2.8 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 A05-A01 法線平行方向 11:00~11:20)

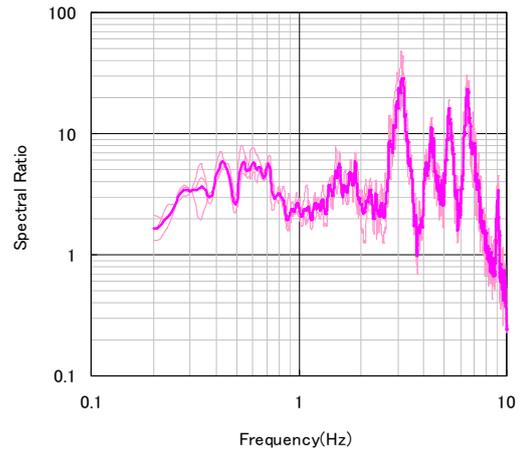


図-C2.11 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 PT1-A01 法線直角方向 11:00~11:20)

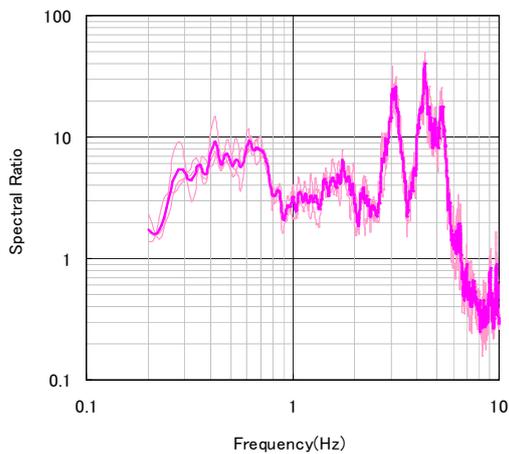


図-C2.9 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 A05-A01 法線直角方向 11:00~11:20)

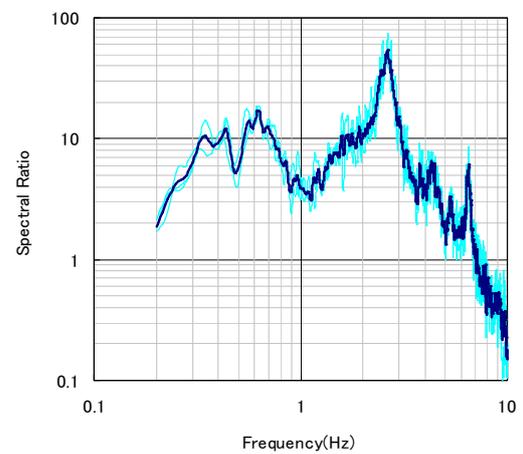


図-C2.12 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 G03-A01 法線平行方向 11:00~11:20)

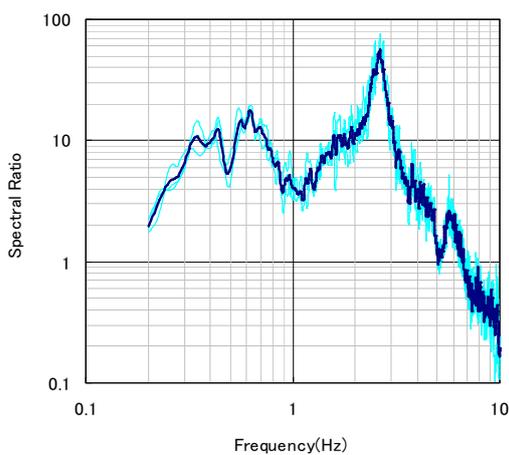


図-C2.10 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 PT1-A01 法線平行方向 11:00~11:20)

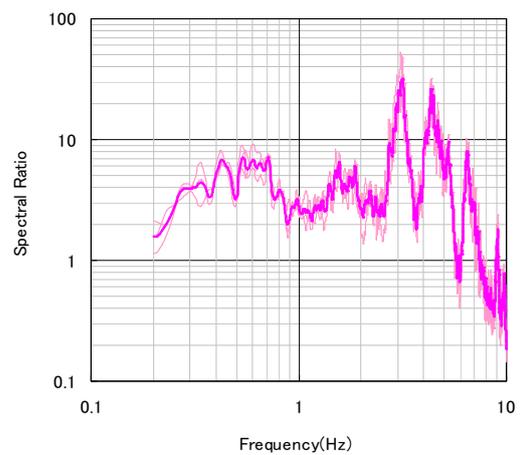


図-C2.13 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 G03-A01 法線直角方向 11:00~11:20)

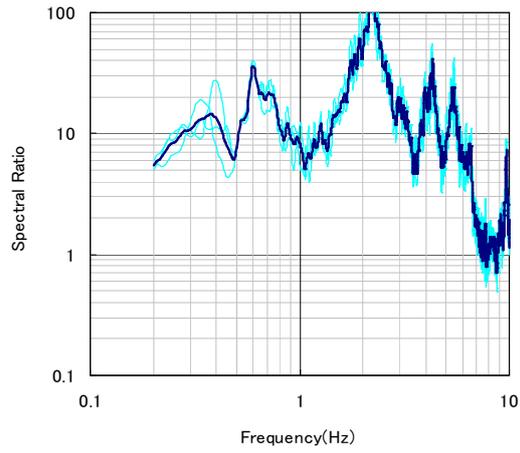


図-C2.14 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A02-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

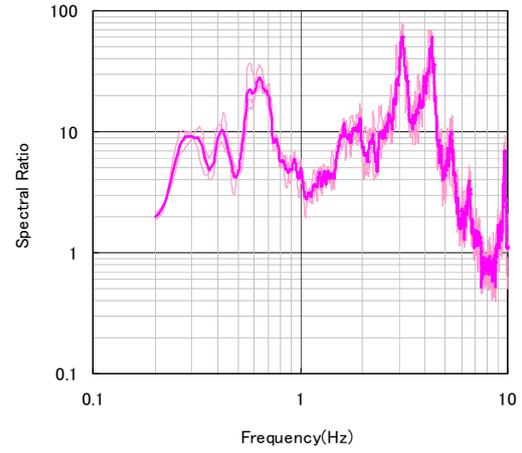


図-C2.17 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A03-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

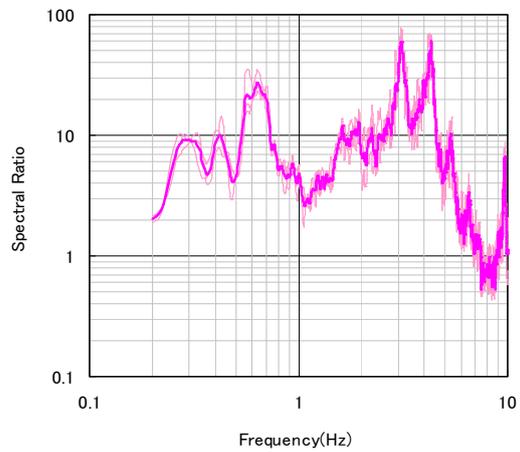


図-C2.15 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A02-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

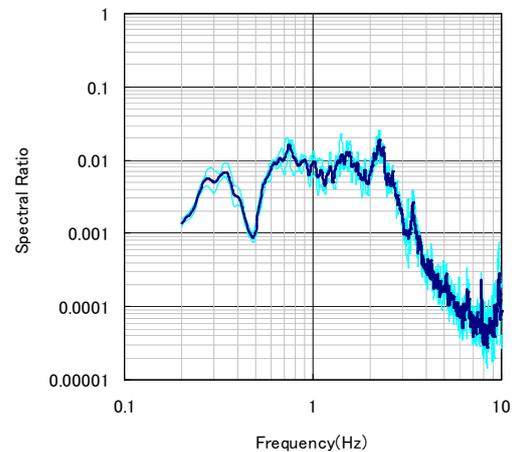


図-C2.18 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A04-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

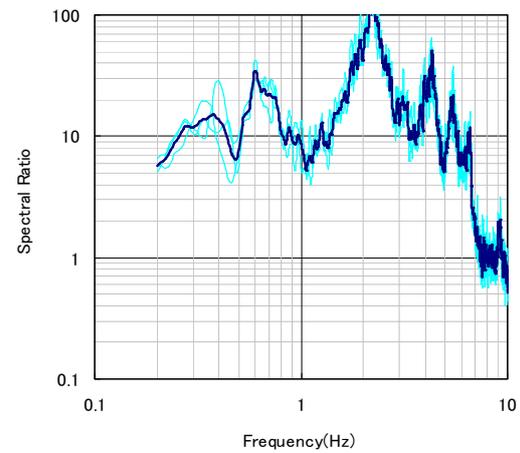


図-C2.16 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A03-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

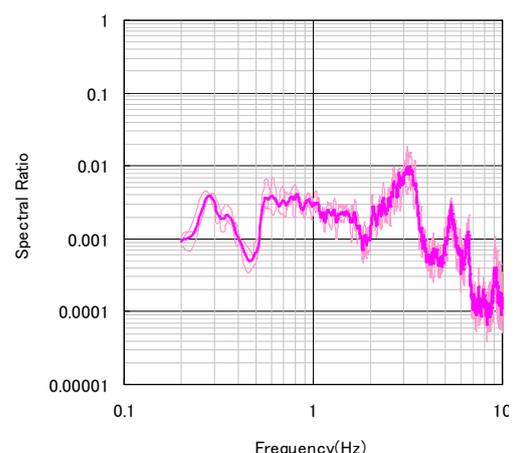


図-C2.19 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(沖 A04-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

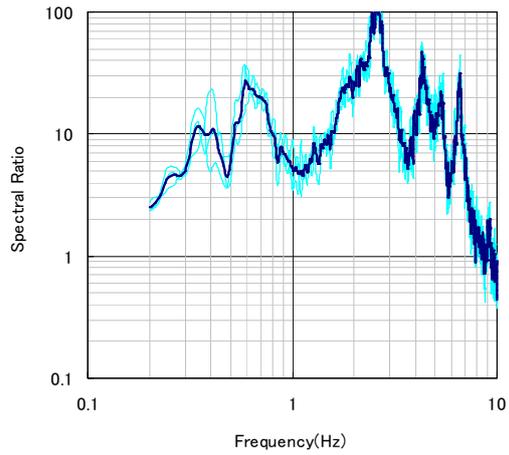


図-C2.20 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 A05-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

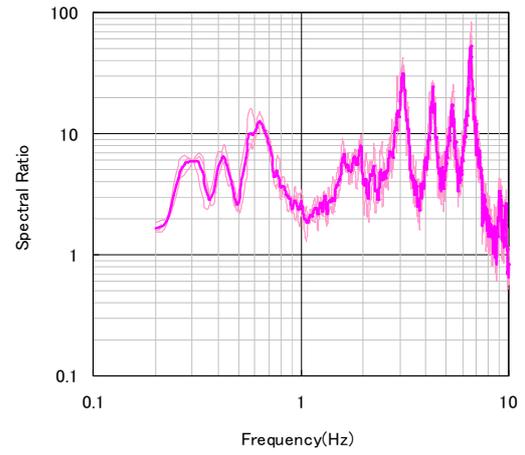


図-C2.23 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 PT1-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

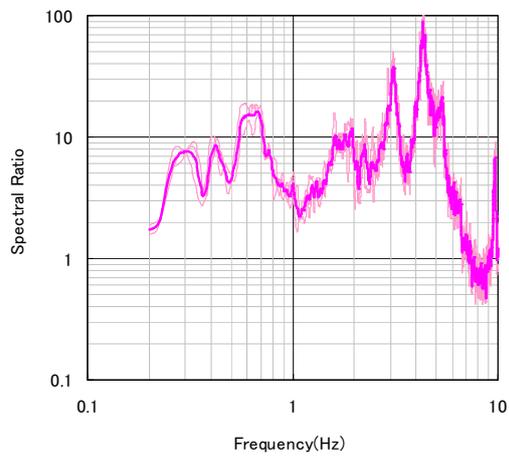


図-C2.21 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 A05-A01 法線直角方向 15:40~16:00)

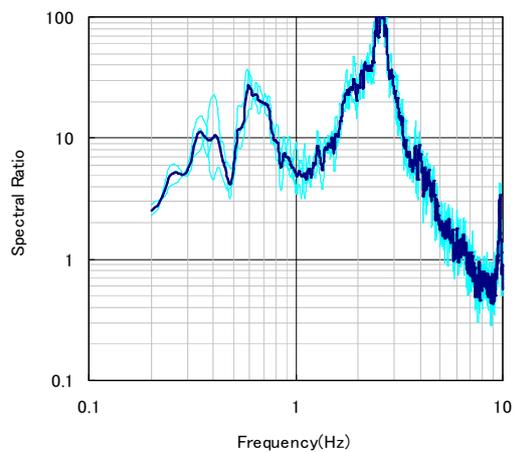


図-C2.22 栈橋と背後地盤のH/Hスペクトル比  
(陸 PT1-A01 法線平行方向 15:40~16:00)

付録C3 変位軌跡

※各軌跡に対応する観測点の位置については、  
本文中の図-3.48を参照

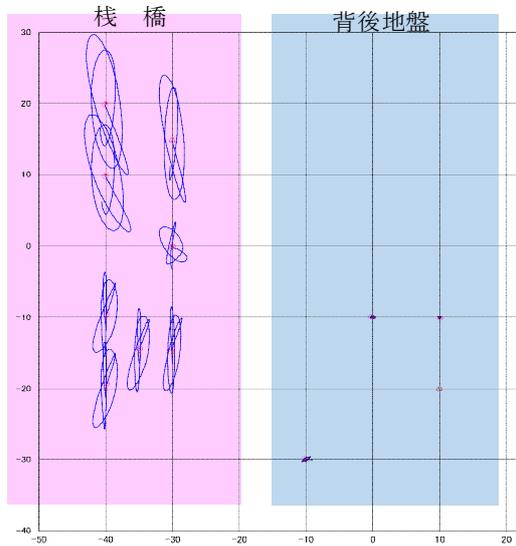


図-C3.1 2.0~3.0秒の変位軌跡  
(2.15~2.65Hz) (11:10~11:20)

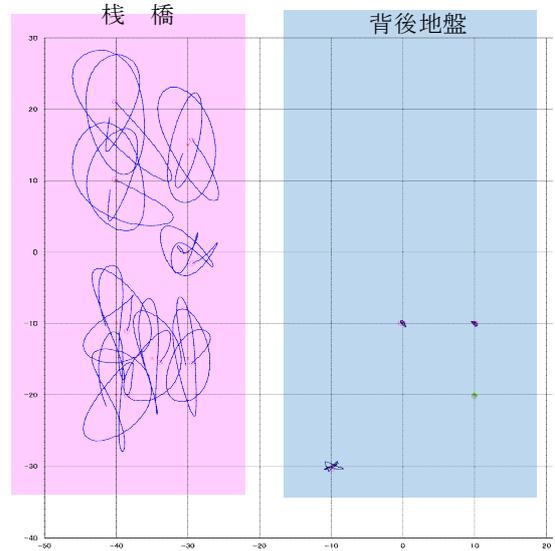


図-C3.3 2.0~3.0秒の変位軌跡  
(2.85~3.35Hz) (11:10~11:20)

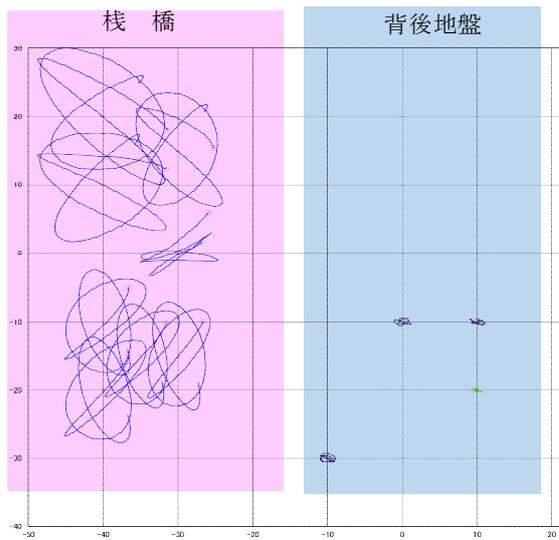


図-C3.2 5.0~6.0秒の変位軌跡  
(2.15~2.65Hz) (11:10~11:20)

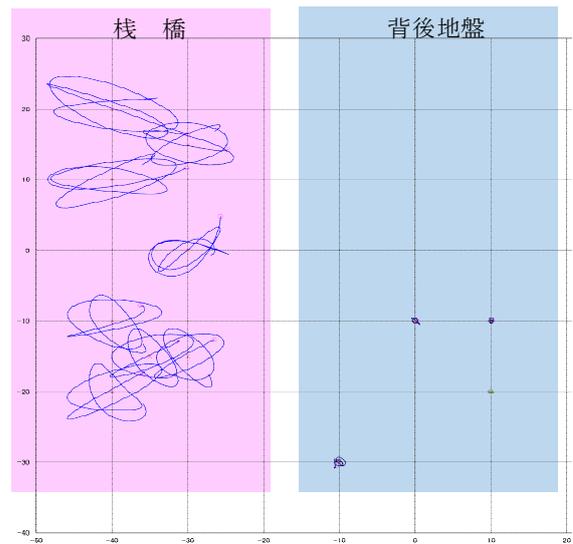


図-C3.4 5.0~6.0秒の変位軌跡  
(2.85~3.35Hz) (11:10~11:20)

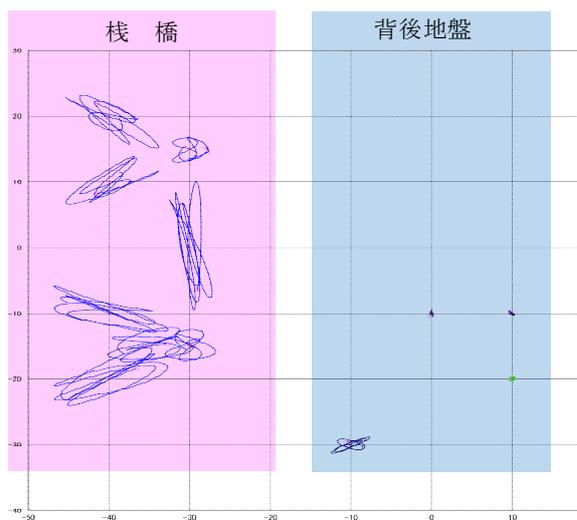


図-C3.5 2.0~3.0秒の変位軌跡  
(3.95~4.45Hz) (11:10~11:20)

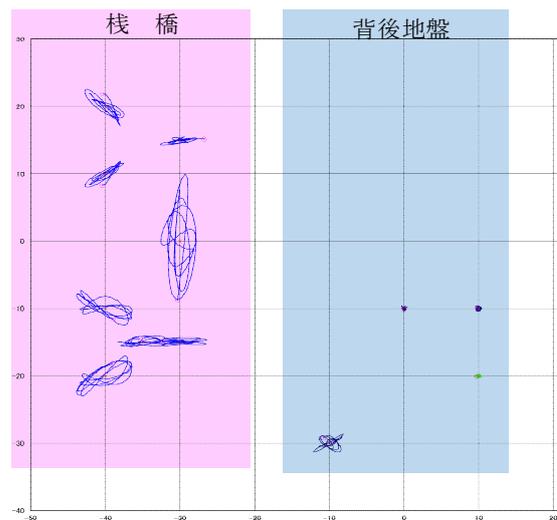


図-C3.7 2.0~3.0秒の変位軌跡  
(5.25~5.75Hz) (11:10~11:20)

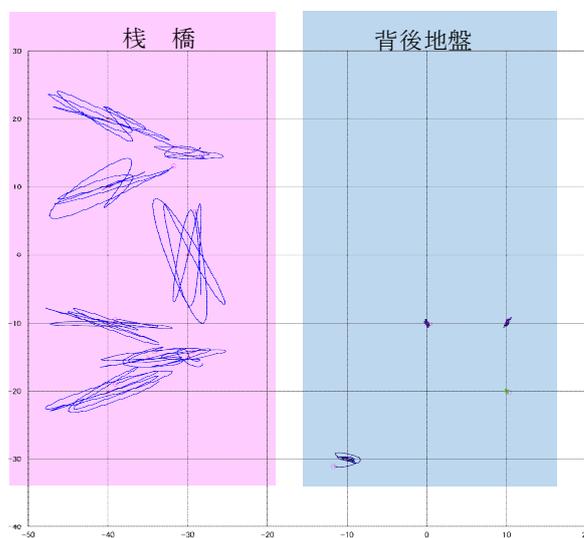


図-C3.6 5.0~6.0秒の変位軌跡  
(3.95~4.45Hz) (11:10~11:20)

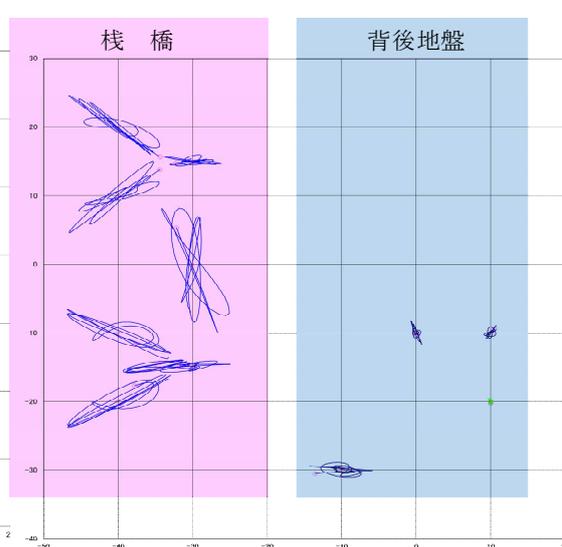


図-C3.8 5.0~6.0秒の変位軌跡  
(5.25~5.75Hz) (11:10~11:20)

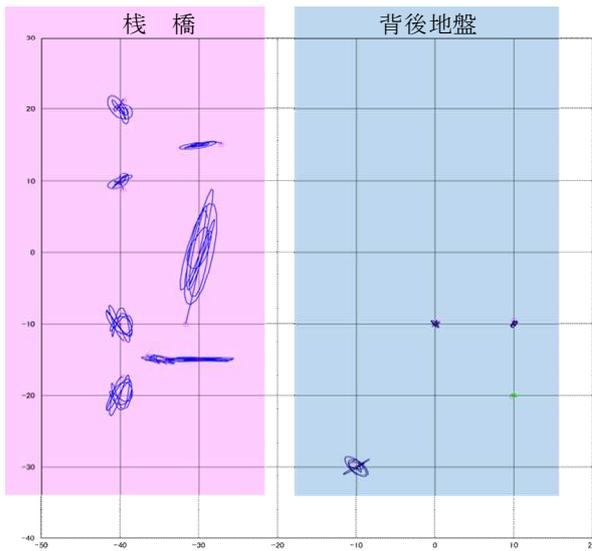


図-C3.9 2.0~3.0秒の変位軌跡  
(6.25~6.75Hz) (11:10~11:20)

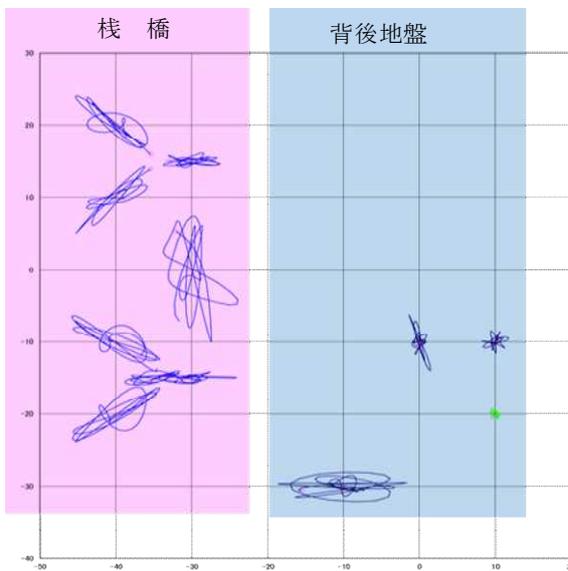


図-C3.10 5.0~6.0秒の変位軌跡  
(6.25~6.75Hz) (11:10~11:20)

付録C4 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比

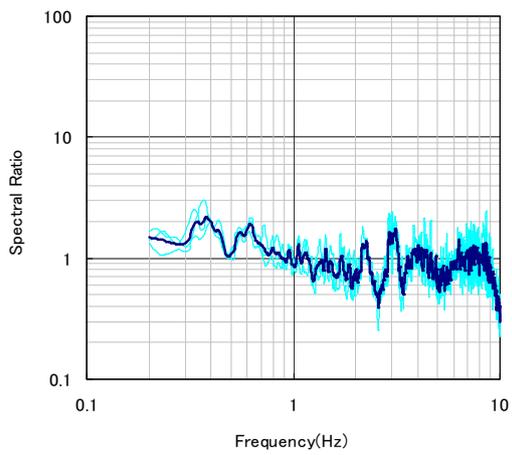


図-C4.1 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(沖 A03-A01 11:00~11:20)

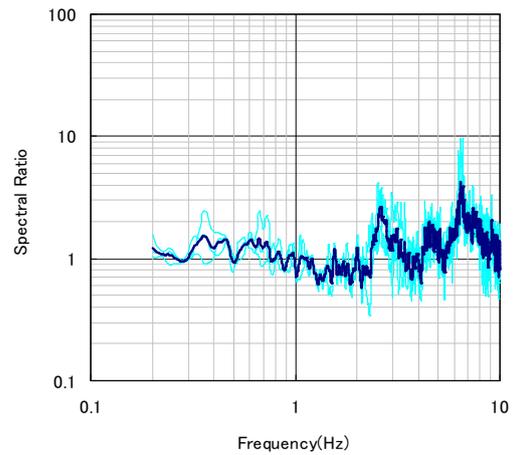


図-C4.4 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(陸 A06-A01 13:55~14:15)

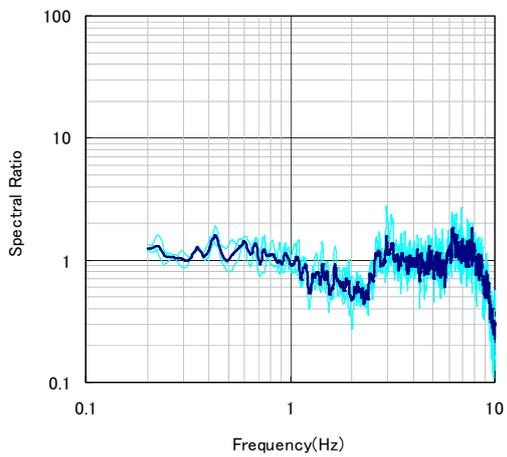


図-C4.2 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(陸 A06-A01 11:00~11:20)

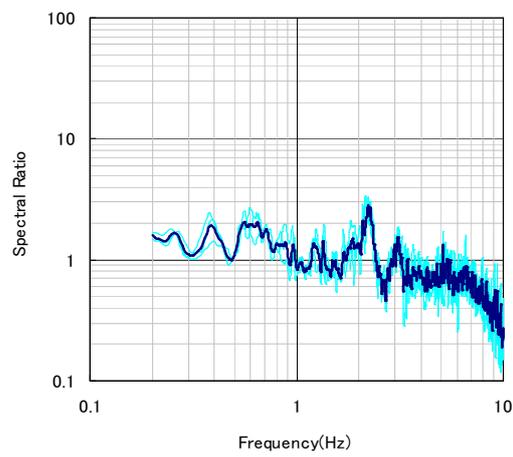


図-C4.5 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(沖 A03-A01 15:40~16:00)

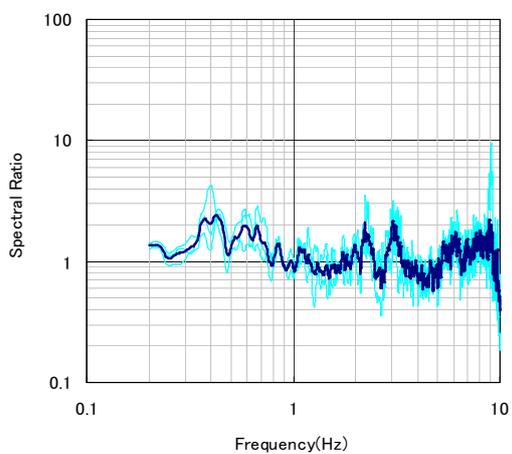


図-C4.3 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(沖 A03-A01 13:55~14:15)

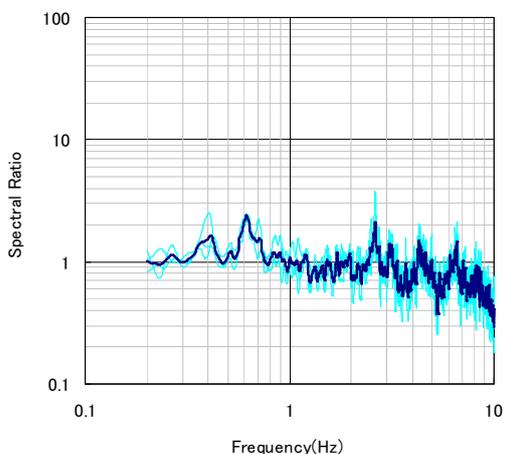


図-C4.6 栈橋と背後地盤のV/Vスペクトル比  
(陸 A06-A01 15:40~16:00)

付録C5 波浪のフーリエスペクトル

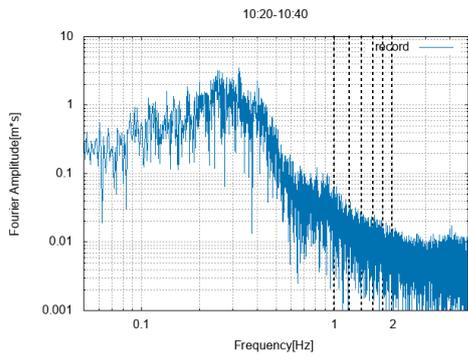


図-C5.1 波浪のフーリエスペクトル  
(10:20~10:40)

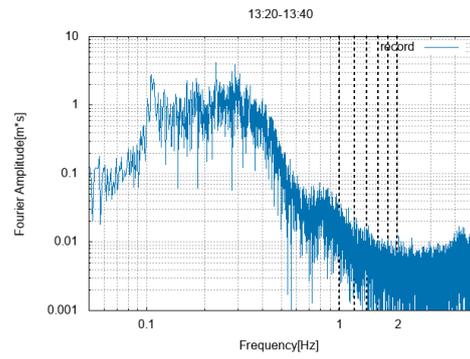


図-C5.4 波浪のフーリエスペクトル  
(13:20~13:40)

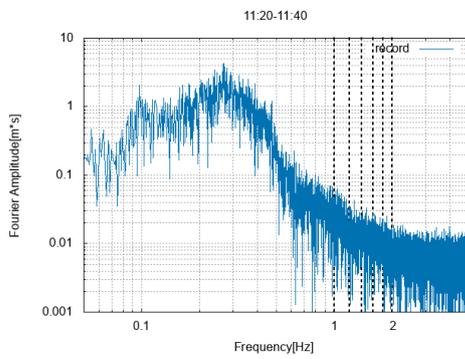


図-C5.2 波浪のフーリエスペクトル  
(11:20~11:40)

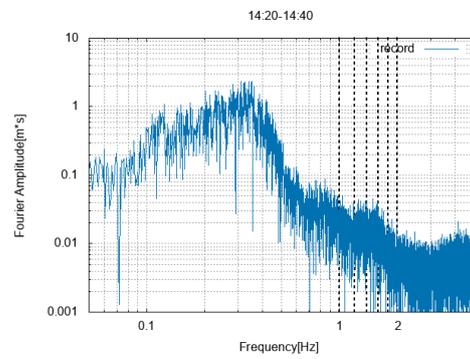


図-C5.5 波浪のフーリエスペクトル  
(14:20~14:40)

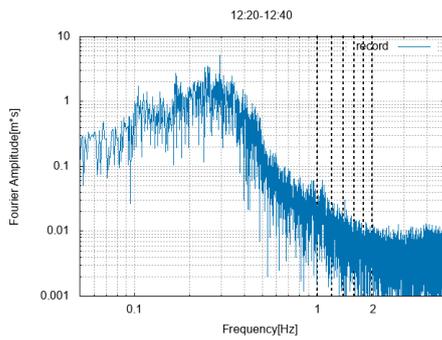


図-C5.3 波浪のフーリエスペクトル  
(12:20~12:40)

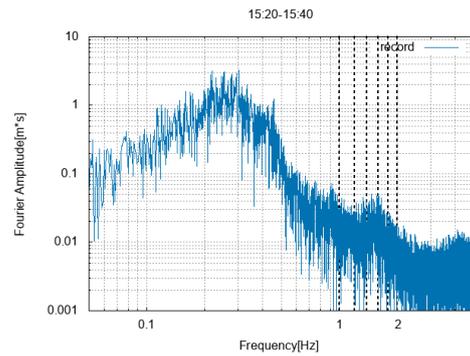


図-C5.6 波浪のフーリエスペクトル  
(15:20~15:40)





図-C6.2 ドルフィン間の渡橋の様子



図-C6.3 ドルフィン及び渡橋の様子

付録 D. 計測機器の詳細資料

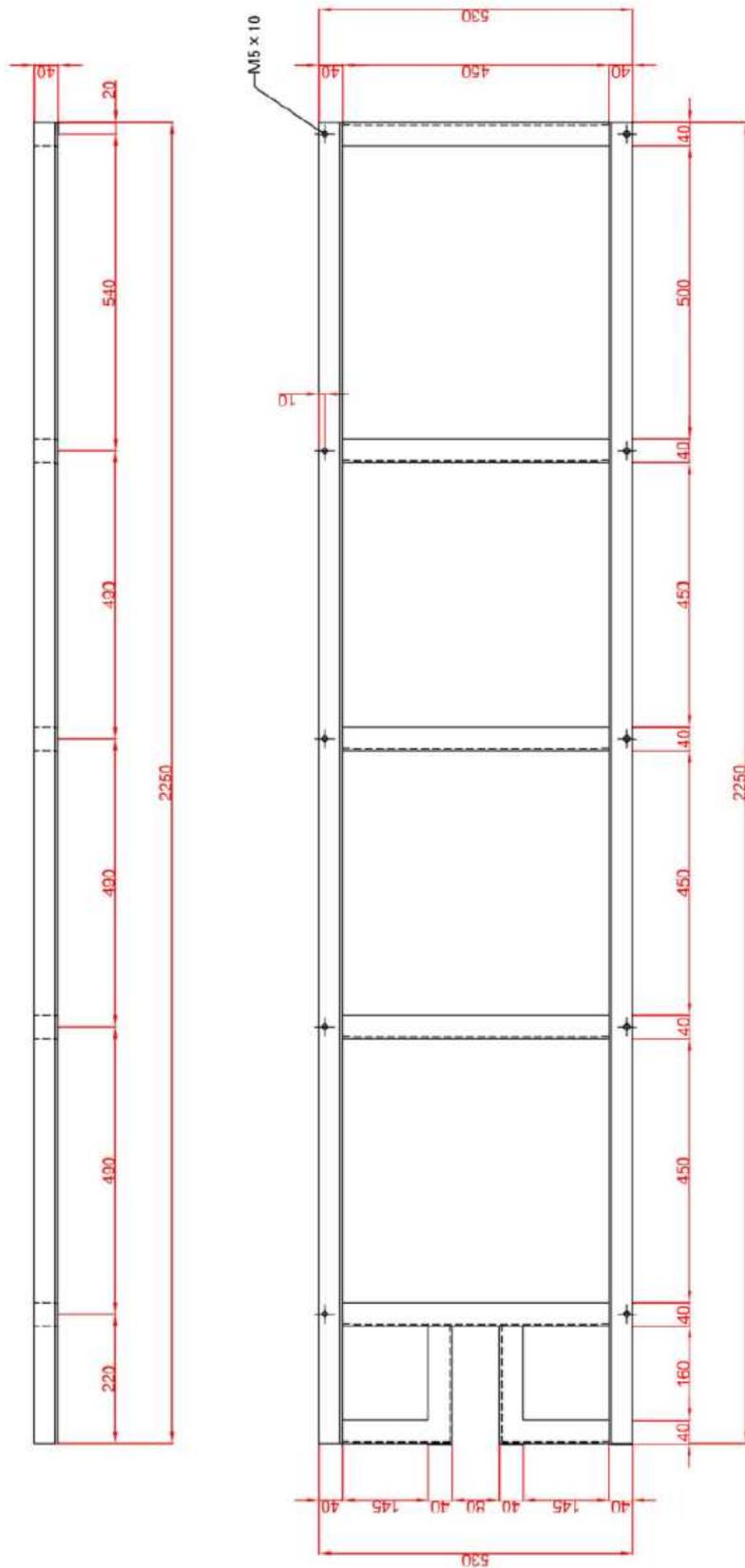


図-D.1 波浪観測機器の治具の詳細図 (計測架台ベース)



---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1082            September 2019

編集・発行   ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写のお問い合わせは  
〔 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1  
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019 〕  
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp



国土技術政策総合研究所資料

No.1082

常時微動観測による実栈橋固有周期の推定手法に関する基礎的検討

September 2019