

## 港湾におけるレベル1地震動の補正手法に関する包括的整理

錦織勇人\*・福永勇介\*\*・野津厚\*\*\*・宮田正史\*\*\*\*

### 要 旨

港湾施設の耐震設計では、設計対象地点の工学的基盤におけるレベル1地震動（時刻歴波形）を設定する必要がある。当該地点のレベル1地震動の設定精度を向上させるためには、地震動に及ぼす影響が大きいサイト増幅特性を適切に評価する必要がある。サイト増幅特性は、当該地点において長期間にわたる地震動の観測記録が得られている場合、スペクトルインバージョンに基づき精度良く評価することができる。一方で、そのような地震観測記録の蓄積がない地点については、臨時的な地震観測や常時微動観測の結果に基づきサイト増幅特性を推定する必要がある。また、推定されたサイト増幅特性を用いて、対象地点のレベル1地震動を補正し、設計入力地震動として設定する必要がある。

しかしながら、これらのサイト増幅特性の推定手法や推定結果に基づくレベル1地震動の補正手法については、詳細な解説資料がない。よって、設計実務者がレベル1地震動の補正手法やその留意点についてより理解を深め、港湾施設を対象としたより良い耐震設計を行うことができる環境整備を図ることを目的として、サイト増幅特性を評価する複数の手法及びそれらの評価手法に基づくレベル1地震動の補正手法について、例題となる計算事例を示しつつ、体系的な整理を行った。

キーワード：レベル1地震動，補正手法，サイト増幅特性，常時微動観測

---

\* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員  
\*\* 港湾研究部 主任研究官  
\*\*\* 港湾空港技術研究所 地震研究防災領域長  
\*\*\*\* 港湾研究部 港湾施設研究室 室長  
〒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：0468-44-5028 Fax：0468-44-5028 e-mail: [y.sk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp](mailto:y.sk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp)

## Comprehensive Report for Correction Method of Level-1 Earthquake Ground Motion

**Yuto NISHIKIORI\***  
**Yusuke FUKUNAGA\*\***  
**Atsushi NOZU\*\*\***  
**Masafumi MIYATA\*\*\*\***

### Synopsis

In an earthquake resistant design of port and harbor facilities, it is necessary to set the Level-1 earthquake ground motion in the engineering bedrock at the site of construction. To improve the precision of the Level-1 earthquake motions at respective sites, site amplification factors, which have significant influence on the earthquake motions, should be evaluated adequately. The site amplification factors can be evaluated accurately based on a generalized inversion analysis if a sufficient number of weak motion records are available at the site based on long term earthquake observation at the site. If such a set of records is not available at the site, the site amplification factors have to be evaluated based on the results of temporary earthquake observations or microtremor measurements at the site. Then, the existing Level-1 earthquake motion should be corrected in accordance with the newly evaluated site amplification factors before the earthquake motion is used for the design. The purpose of this study is to provide design practitioners with comprehensive explanations of the evaluation method for the site amplification factors and the correction method for the Level-1 earthquake motions. The contents of the report including a number of example calculations are intended to help design practitioners further understand the issues related to Level-1 earthquake motions towards better design of port and harbor facilities.

**Key Words** : Level 1 earthquake ground motion, Correction method, Site amplification factor, Microtremor measurement

---

\* Exchange Researcher, Port and Harbor Department, NILIM  
\*\* Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM  
\*\*\* Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Department, PARI  
\*\*\*\* Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM  
National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-468-44-5028 Fax : +81-468-44-5028 e-mail: [ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp](mailto:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp)

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 本資料の位置付け	1
1.2 背景と目的	1
2. レベル1地震動の補正の概要	2
2.1 全体概要	2
2.2 震源特性・伝播経路特性・サイト特性	2
2.3 レベル1地震動の補正手順	3
3. サイト増幅特性の評価手法	3
3.1 概要	3
3.2 地震観測に基づく評価	6
3.3 常時微動観測に基づく評価	10
3.4 地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価	19
4. サイト位相特性の評価手法	20
4.1 地震観測に基づいて評価する場合	20
4.2 常時微動観測に基づいて評価する場合	21
5. レベル1地震動の補正方法及び試算	22
5.1 概要	22
5.2 補正方法及び試算	22
6. まとめ	33
謝辞	33
参考文献	33
付録A 常時微動の観測手法及びデータ処理手法	35
付録B サイト増幅特性の評価事例	36
付録C 式の導出	45
付録D レベル1地震動の補正の詳細	48
付録E 構造設計に及ぼす影響の試行的な評価	52
付録F 用語集	54





## 1. はじめに

### 1.1 本資料の位置付け

港湾施設の耐震設計に用いられるレベル1地震動（時刻歴波形）については、当所が港湾空港技術研究所とも連携して評価・補正を行っている。しかしながら、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>（以下、「基準・同解説」という。）においては、レベル1地震動の補正手法に関する記述は概要のみの記述にとどまっているため、レベル1地震動の補正に係る技術は一部の技術者のみが知り得る技術となっている可能性があり、設計実務者間で理解が浸透していないことが懸念される。本資料は、レベル1地震動の補正を行う設計実務者に向けた、基準・同解説の解説資料として取りまとめたものである。

本資料においては、表-1に示すとおり、サイト増幅特性の評価やレベル1地震動の補正などテーマ毎に章を分けているので、設計実務者の利用目的に応じて、該当する章を参照していただければ幸いである。

表-1 本資料の構成

求める情報	該当箇所
レベル1地震動の補正に関する全体概要	1章, 2章
サイト増幅特性の評価手法	3章
サイト位相特性の評価手法	4章
レベル1地震動の補正	5章

### 1.2 背景と目的

港湾施設の耐震設計では、工学的基盤面におけるレベル1地震動を、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性（図-1）を考慮した確率論的地震危険度解析<sup>2)</sup>により設定する必要がある。各特性に関する説明は後述するが、震源特性は震源断層の破壊過程の影響を、伝播経路特性は震源から地震基盤面に至る地震動の伝播に伴う減衰等の影響を、サイト特性は地震基盤面（せん断波速度  $V_s$  が 3000m/s 以上）から地表面までに存在する堆積層による地震動の振幅と位相への影響を表現している。これらの特性のなかでもサイト特性は地震動に及ぼす影響が大きいことが知られており、地震による構造物への影響を適切に評価するためには、対象地点におけるサイト特性を適切に評価することが重要で

ある。なお、サイト特性のうち、地震動の周波数毎の振幅の増幅倍率を「サイト増幅特性」と呼んでいる。一般的にサイト増幅特性の用語は2とおりの意味で使用されることがあるため、注意を要する。1つは地震基盤面から地表面までの区間、もう1つは地震基盤面から工学的基盤面までの区間における地震動の周波数毎の振幅の増幅倍率である。本資料では、読者の混乱を避けるため、いずれの区間のものも指しているのか分かるように、サイト増幅特性の用語の直後に括弧書きでその区間を示し、2つの区間を区別する必要がない場合は、サイト増幅特性とだけ記述する。

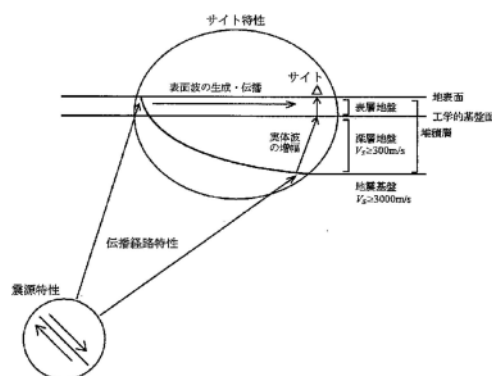


図-1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

サイト増幅特性の評価手法のうち、長期間にわたる多数の地震動の観測記録に基づきスペクトルインバージョンにより評価を行う手法に関しては、同様の技術解説資料<sup>3)</sup>が既に発刊されている。

一方、地震動の観測記録が得られていない地点の場合、1年～数年程度の臨時的な地震観測や、短時間（10分程度）の常時微動観測による記録を用いてサイト増幅特性を推定する必要がある。しかしながら、これらのサイト増幅特性の推定手法や推定結果に基づくレベル1地震動の補正手法については、詳細な技術解説資料がない。

このような背景を踏まえ、本資料は、サイト増幅特性を評価する複数の手法及びそれらの評価手法に基づくレベル1地震動の補正手法について、例題となる計算事例を示しつつ、体系的な整理を行い、設計実務者がレベル1地震動の補正手法やその留意点についてより理解を深め、港湾施設を対象としたより良い耐震設計を行うことができる環境整備を図ることを目的とした。

## 2. レベル1地震動の補正の概要

### 2.1 全体概要

レベル1地震動の補正とは、当所のホームページ<sup>4)</sup>(以下、国総研ホームページという)における既存のレベル1地震動のサイト増幅特性が相対的に信頼性の低い手法(3.4)により評価されている場合、もしくは信頼性の高い手法により評価されていても設計対象地点(以下、対象地点という)におけるサイト増幅特性とは異なると判断される場合に、対象地点におけるサイト増幅特性を新たに評価し、これに基づきレベル1地震動を設定し直すことをいう。対象地点におけるサイト増幅特性を評価する際には、その近傍で十分に信頼性の高いサイト増幅特性が得られている地点(以下、参照地点という)に着目し、参照地点と対象地点の2地点において地震動の同時観測記録または常時微動観測記録を取得し、その結果に基づいて対象地点におけるサイト増幅特性を評価する。図-2に参照地点と対象地点の概念図を示す。



図-2 参照地点と対象地点の概念図

(例：下関港のある地区)

ここで、常時微動とは、常時の人間活動及び自然現象によって発生する通常では人が感じることでないレベルの微小な振動であり、その観測記録から算出される常時微動 H/V スペクトル(3.3及び付録 A に詳細を述べる)は、サイト増幅特性を評価するにあたり有効な指標となる。

### 2.2 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

地表面で観測される時刻歴波形としての地震動(加速度)は、式(1)に示すように、フーリエ変換により振幅スペクトル(周波数毎の加速度振幅)と位相スペクトル(周波数毎

の位相)に変換できる。この時、観測地点における振幅スペクトル及び位相スペクトルは、震源特性(震源断層の破壊過程の影響)、伝播経路特性(震源から地震基盤面に至る伝播経路の影響)及びサイト特性(地震基盤面から地表面までに存在する堆積層の影響)により、式(2a)及び式(2b)として表現される。

$$\mathcal{F}[x(t)] = X(f) = |X(f)| e^{i\angle X(f)} \quad (1)$$

ここで

$\mathcal{F}[\cdot]$  :  $(\cdot)$  のフーリエ変換

$x(t)$  : 時刻  $t$  の関数として表した加速度 ( $\in \mathbb{R}$ )

$X(f)$  : 周波数  $f$  の関数として表示した  $x(t)$  のフーリエ変換 ( $\in \mathbb{C}$ )

$|\cdot|$  :  $(\cdot)$  の絶対値

$|X(f)|$  :  $x(t)$  のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$\angle X(f)$  :  $x(t)$  のフーリエ位相スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$i$  : 虚数単位

$\mathbb{R}$  : 実数全体の集合

$\mathbb{C}$  : 複素数全体の集合

$$|O(f)| = |S(f)| |P(f)| |G(f)| \quad (2a)$$

$$e^{i\angle O(f)} = e^{i(\angle S(f) + \angle P(f) + \angle G(f))} \quad (2b)$$

ここで

$|O(f)|$  : 地表面における地震観測記録のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$|S(f)|$  : 震源特性 [震源における加速度時刻歴のフーリエ振幅スペクトル] ( $\in \mathbb{R}$ )

$|P(f)|$  : 伝播経路特性 [伝播経路における周波数応答の振幅] ( $\in \mathbb{R}$ )

$|G(f)|$  : サイト増幅特性 [サイト特性における周波数応答の振幅] ( $\in \mathbb{R}$ )

$\angle O(f)$  : 地表面における地震観測記録のフーリエ位相スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$\angle S(f)$  : 震源における加速度時刻歴のフーリエ位相スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$\angle P(f)$  : 伝播経路特性に対応する周波数応答の位相 ( $\in \mathbb{R}$ )

$\angle G(f)$  : サイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) に対応する周波数応答の位相 ( $\in \mathbb{R}$ )

式(2a)は、地表面で観測される地震観測記録の振幅スペクトル  $|O(f)|$  が震源特性  $|S(f)|$ 、伝播経路特性  $|P(f)|$ 、サイト増幅特性  $|G(f)|$  の積で表現できることを示している<sup>5)</sup>。一方、式(2b)は地表面で観測される地震動のフーリエ位相スペクトル  $\angle O(f)$  が震源における加速度時刻歴のフーリエ位相スペクトル  $\angle S(f)$ 、伝播経路特性に対応する周波数応答の位相  $\angle P(f)$ 、サイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) に対応する周波数応答の位相  $\angle G(f)$  の和で表現できることを示している<sup>6)</sup>。

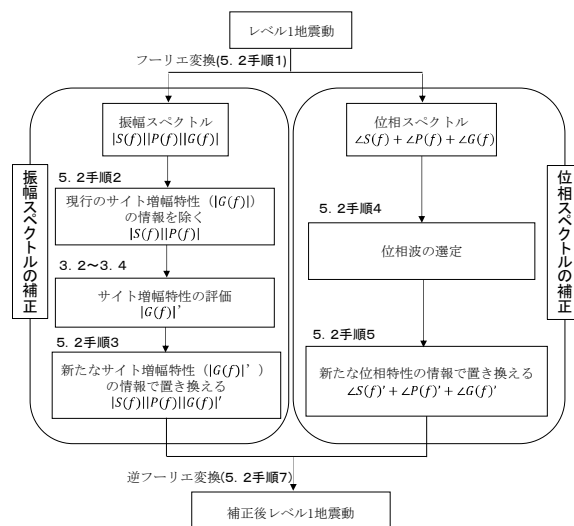


図-3 レベル1地震動の補正概念図

### 2.3 レベル1地震動の補正手順

図-3に、レベル1地震動の補正手順をフロー図として整理したものを示す。なお、フロー中には、3.2以降に詳細な説明をしている事項も記載している。

レベル1地震動の補正は、図-3中に示すとおり、大きく2つの手順(左側: 振幅スペクトルの補正, 右側: 位相スペクトルの補正)から構成される。

基準・同解説(p.384)では、レベル1地震動の補正における振幅と位相の補正手順について簡単に記載している。その中で述べられているように、対象地点におけるサイト増幅特性を地震観測に基づいて評価した場合は、位相スペクトルの評価も対象地点で得られた地震観測記録に基づいて評価することが一般的である。しかし、対象地点におけるサイト増幅特性を常時微動観測に基づいて評価した場合は、補正前の工学的基盤でのレベル1地震動の位相スペクトルをそのまま用いることが多い。詳細については後述する。

### 3. サイト増幅特性の評価手法

#### 3.1 概要

##### (1) 全体概要

サイト増幅特性の評価手法に関しては、基準・同解説と国総研ホームページで異なる名称を用いて記述しているので注意が必要である(後者では通称を用いて記述)。国総研ホームページ及び基準・同解説におけるサイト増幅特性評価手法の対応関係を表-2に示し、各評価手法の適用フロー図を図-4に示す。

サイト増幅特性の評価手法は、現行の基準・同解説においては、「地震観測に基づく評価」、「常時微動観測に基づく評価」、「地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価」の3項目に大別されている。一方、国総研ホームページ上では、評価に用いるデータ及び計算式により細分化されており、「松」、「竹 ver1」、「竹 ver2」、「竹 ver3」、「梅」の5種類の通称で記載されている。

本節では、以下の(2)から(7)において、サイト増幅特性の各種評価手法の概要を述べる。なお、評価手法の詳細については3.2から3.4に示す。その際、特に断らない限り、サイト増幅特性の各種評価手法を通じ、全て図-2に示した「参照地点: YMG011」、「対象地点: 下関港のある地区」の組合せを例とし、評価に用いる各種観測記録は各観測地点の地表面における記録とする。また、3.2から3.4に示す事例の諸条件は付録Bに示す。

表-2 サイト増幅特性評価手法の対応表

評価手法	サイト増幅特性評価手法の分類		評価に用いるデータまたは計算方法	説明	評価事例	対応資料
	基準・同解説の表記	国総研HPの表記				
1	地震観測に基づく評価	松	既存地震観測地点での地震観測記録	既存地震観測地点での地震観測記録から得られるサイト増幅特性を利用	-	港湾空港技術研究所資料 No.1112 基準・同解説 P.374
2			臨時の地震観測記録	対象地点において臨時の地震観測を行い、参照地点と対象地点の同時地震観測記録に基づきサイト増幅特性を評価	本資料3.2	基準・同解説 P.375, 1779
3	常時微動観測に基づく評価	竹ver1	常時微動観測記録	参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動H/Vスペクトルに基づきサイト増幅特性を評価 (周波数の修正)	本資料3.3	基準・同解説 P.1783
4		竹ver2		参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動H/Vスペクトルに基づきサイト増幅特性を評価 (周波数, 増幅倍率の修正)	本資料3.3	-
5		竹ver3		参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動H/Vスペクトルに基づきサイト増幅特性を評価 (周波数, 増幅倍率の修正, 増幅倍率の制限)	本資料3.3	基準・同解説 P.1784
6	地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価	梅	経験式	経験式よりサイト増幅特性を評価	本資料3.4	基準・同解説 P.377

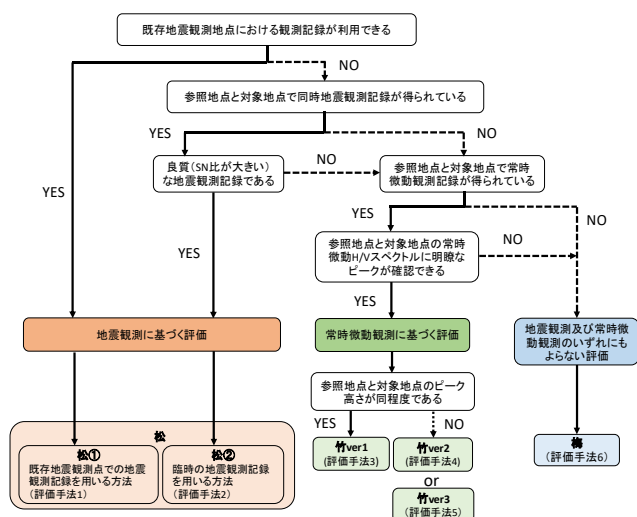


図-4 評価手法の適用フロー図

(2) 評価手法1 (通称: 松 既存地震観測地点における観測記録の利用)

我が国では、港湾地域強震観測<sup>7)</sup>、K-NET<sup>8)</sup>、KiK-net<sup>8)</sup>などの強震観測網が存在しており地震観測記録の蓄積が進められている。そこで、まずは対象地点の近隣に位置するこれらの強震観測地点のサイト増幅特性を補正することなくそのまま対象地点のものとして準用できないか検討する。参照地点と対象地点において常時微動観測をそれぞれ行い、それを基に算出される双方の常時微動 H/V スペクトルの特性が近似している場合、互いのサイト増幅特性も近似していることが既往研究よりわかっている<sup>1)</sup>。ここで「双方の常時微動 H/V スペクトルの特性が近似している」とは、双方の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数、ピーク高さ

及び全体の分布形状が似通っていることを意味する。よって、このような場合は、対象地点において改めてサイト増幅特性の評価を行うことなく、参照地点のサイト増幅特性を対象地点のサイト増幅特性として準用することができる。

参照地点におけるサイト増幅特性は、スペクトルインバージョン<sup>5)</sup>などの方法によりすでに評価されている場合はそれを用いることができる。スペクトルインバージョンについては参考文献 3)に取りまとめられているため、同文献を参考にされたい。参照地点におけるサイト増幅特性がまだ評価されない場合は、評価手法 2 と同様のスペクトル比を用いる手法により評価することができる (基準・同解説 p.1777)。また、参照地点のサイト増幅特性を対象地点のサイト増幅特性として準用する場合、参照地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) を対象地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) として準用するのではなく、サイト増幅特性 (地震基盤面から工学的基盤面) を対象地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から工学的基盤面) として準用することが一般的である。

既存地震観測地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルの特性が異なる場合、双方のサイト増幅特性にも相違があることが想定されるため、参照地点のサイト増幅特性を対象地点のサイト増幅特性として準用することができず、新たなデータに基づいて対象地点におけるサイト増幅特性を評価することが必要となる。これについては(3)以降に述べる。

(3) 評価手法 2 (通称: 松 臨時の地震観測記録の利用)

対象地点におけるサイト増幅特性を新たなデータに基づいて評価する場合、最も信頼性の高い評価手法は、対象地点において臨時の地震観測を行い、参照地点と対象地点の同時地震観測記録に基づきサイト増幅特性(地震基盤面から地表面)を評価する方法である。これを本稿では評価手法 2 (松) としている。この方法に用いる地震観測記録は、双方の観測地点で、評価の対象とする周波数帯においてフーリエ振幅スペクトルの質が良好な記録、すなわち十分な SN 比を有する記録でなければならない(評価手法の詳細は 3.2 に述べる)。

(4) 評価手法 3 (通称: 竹 ver1)

対象地点におけるサイト増幅特性を新たなデータに基づいて評価する場合、対象地点において臨時の地震観測を行うことが望ましいが、種々の事情によりそれが不可能な場合のために、参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動 H/V スペクトルに基づきサイト増幅特性(地震基盤面から地表面)を評価する手法が提案されている。

図-5 は対象地点: 釧路 G と参照地点: HKD077 の常時微動 H/V スペクトルのグラフである。図-5 の例のように、参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さに大きな差が見られない場合に適用できる手法として提案されているのが評価手法 3 (通称: 竹 ver1) <sup>9)</sup> である。これは、参照地点のサイト増幅特性のピーク周波数を対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に合わせるように、参照地点のサイト増幅特性を両対数軸上で横軸方向に平行移動する手法である(評価手法の詳細は 3.3 に述べる)。

(5) 評価手法 4 (通称: 竹 ver2 または新竹)

図-6 は対象地点: MYGH01 と参照地点: MYG013 の常時微動 H/V スペクトルのグラフである。図-6 の例のように、参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さに数倍程度の差が見られ、かつ、対象地点の方がピーク高さが高い場合、竹 ver1 による評価では対象地点のサイト増幅特性(地震基盤面から地表面)を危険側に評価してしまう可能性がある。そこで、このような場合のために、竹 ver1 と同様のピーク周波数の補正に加え、参照地点と対象地点

の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの比を利用して、サイト増幅特性の増幅倍率にも補正を加える方法が提案された。これが評価手法 4 (通称: 竹 ver2 または新竹) である。この方法は基準・同解説が 2012 年に部分改訂されてから 2018 年に改訂されるまで基準・同解説に記載されていた(評価手法の詳細は 3.3 に述べる)。

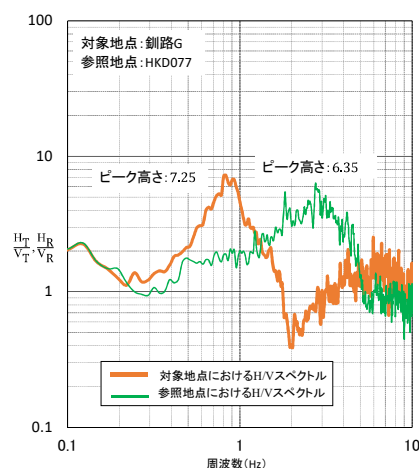


図-5 釧路 G, HKD077 における常時微動 H/V スペクトル

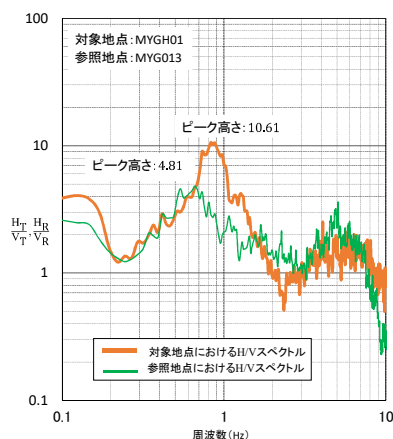


図-6 MYGH01, MYG013 における常時微動 H/V スペクトル

(6) 評価手法 5 (通称: 竹 ver3)

図-7 は対象地点: 下関港 (のある地区) と参照地点: YMG011 の常時微動 H/V スペクトルを表した図である。図-7 の例のように、参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さに非常に大きな差が見られる場合、竹 ver2 による評価ではサイト増幅特性のピーク高さを過大に補正してしまう可能性がある。このため、対象地点の常時

微動 H/V スペクトルのピーク高さに応じてサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さを制限する方法が提案された。これが評価手法 5（通称：竹 ver3）である。この方法は基準・同解説が 2018 年に改訂された際に新たに掲載された<sup>1)</sup>（評価手法の詳細は 3.3 に述べる）。

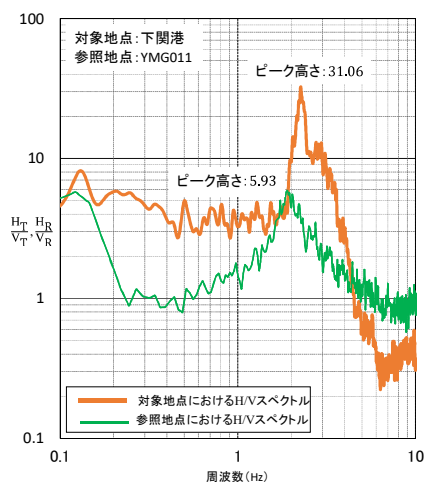


図-7 下関港（のある地区）と YMG011 における常時微動 H/V スペクトル

### (7) 評価手法 6（通称：梅）

対象地点の近隣に位置する既存地震観測地点のサイト増幅特性を準用することができず、かつ、種々の事情により、対象地点で新たに地震観測および常時微動観測のいずれも実施することが困難な場合、それらの記録によることなく対象地点でのサイト増幅特性を評価するための経験的手法が提案されている。これが評価手法 6（通称：梅）である。（評価手法の詳細は 3.4 に述べる）

## 3.2 地震観測に基づく評価

### (1) 概要

地震観測に基づくサイト増幅特性の評価手法である松は、参照地点と対象地点で地表面における地震観測記録が得られている場合に用いる評価手法である。

この方法を適用するためには、港湾施設の耐震性に影響を与える周波数帯である 0.2 から 2.0 Hz 程度の低周波数帯の加速度のフーリエ振幅スペクトルの質が良い、つまり SN 比が大きい記録が得られていることが前提である。一般に

マグニチュードの小さい地震の記録は、その加速度フーリエ振幅スペクトルの値が低周波側で小さく、SN 比が小さい可能性が高いため、評価に用いる記録として採用するには注意が必要である。観測記録の低周波数帯の質について確認を行う場合には、文献 10) または基準・同解説 (p.1780, 1781) を参考にされたい。記録の数については、評価の信頼性を確保するために、3 個以上の同時記録を利用できることが望ましい。ただし、同時記録の数が 3 個未満でも、後述の常時微動観測による方法と比較すれば、結果の信頼性は高いと考えられる。

前述した式(2a)及び(2b)において、参照地点と対象地点を区別するために、本節以降では、加速度フーリエ振幅スペクトル  $|O(f)|$ ，震源特性  $|S(f)|$ ，伝播経路特性  $|P(f)|$ ，サイト増幅特性（地震基盤面から地表面） $|G(f)|$  の関係を式(3)と再定義する。

$$|O_{\alpha}(f)| = |S_{\alpha}(f)| |P_{\alpha}(f)| |G_{\alpha}(f)| \quad (3)$$

ここで

$|O_{\alpha}(f)|$  :  $\alpha (\in \{\mathbb{R} (\text{参照地点}), T (\text{対象地点})\})$  地表面における強震計で得られた加速度記録のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$|S_{\alpha}(f)|$  :  $\alpha (\in \{\mathbb{R} (\text{参照地点}), T (\text{対象地点})\})$  の震源特性 ( $\in \mathbb{R}$ )

$|P_{\alpha}(f)|$  :  $\alpha (\in \{\mathbb{R} (\text{参照地点}), T (\text{対象地点})\})$  の伝播経路特性 ( $\in \mathbb{R}$ )

$|G_{\alpha}(f)|$  :  $\alpha (\in \{\mathbb{R} (\text{参照地点}), T (\text{対象地点})\})$  のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面） ( $\in \mathbb{R}$ )

$f$  : 周波数 [Hz]

### (2) 対象地震の震源が十分に遠方にある場合

#### (2.1) 評価手法

対象地震の震源が十分に遠方にある場合（対象地点から震源までの距離が対象地点から参照地点までの距離のおおよそ 10 倍以上ある場合）、参照地点と対象地点では震源特性、伝播経路特性を共有していると考えことができ、以下の式(4)と表せる。



$$\begin{cases} |S_R(f)| = |S_T(f)| \\ |P_R(f)| = |P_T(f)| \end{cases} \quad (4)$$

よって、参照地点と対象地点における強震観測記録のフーリエ振幅スペクトルの違いは、サイト増幅特性の違いであると言え、式(5)に示すように、2地点の強震観測記録のフーリエ振幅スペクトルの比  $\frac{|O_T(f)|}{|O_R(f)|}$  を参照地点の既知であるサイト増幅特性に乗じることにより、対象地点のサイト増幅特性が得られる。

$$|G_T(f)| = \frac{|O_T(f)|}{|O_R(f)|} |G_R(f)| \quad (5)$$

(2.2) 評価手法の適用事例 (松)

以下に参照地点：YMG011，対象地点：下関港（のある地区）とした評価事例を示す。

手順 1：観測フーリエ振幅スペクトルの比較

対象地点及び参照地点でそれぞれ観測された複数の地震動の加速度の同時記録のうち、NS、EW 成分それぞれに対してフーリエ振幅スペクトルを求める。次に、同時記録毎、また同じ方向の成分毎に、参照地点のフーリエ振幅スペクトルに対する対象地点のフーリエ振幅スペクトルの比  $\frac{|O_T(f)|}{|O_R(f)|}$  を全周波数に対して求める。

図-8 は、参照地点と対象地点の地表面で得られた各地震観測記録のフーリエ振幅スペクトル(a)、(b)とその比(c)を示したグラフである。図-8 に示す算出例では、3個の地震動の同時記録を用いており、1つの地震観測記録についてNS、EW 方向の2成分があるため、全6個(3個の同時地震観測記録×2成分=6個の時系列データ)の時系列データがプロットされている。

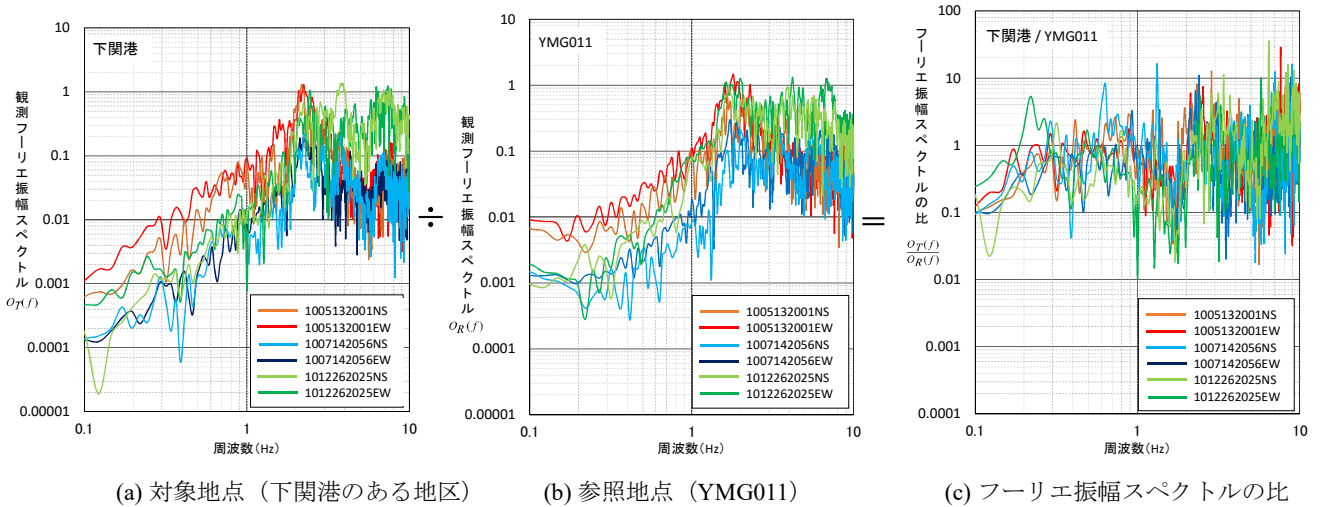


図-8 参照地点 (YMG011) と対象地点 (下関港のある地区) における地表面の加速度記録のフーリエ振幅スペクトルの比

手順2：観測フーリエ振幅スペクトルの比を平均化

手順1で求めた6個の時系列データの観測フーリエ振幅スペクトルの比について、周波数毎に幾何平均を取る。幾何平均を取ることは、縦軸に対数軸を用いたグラフでは、そのグラフにおける縦軸の値について算術平均を取ることに相当し、以下の式(6)と表すことができる。

図-9に示す黒線が、6個のデータの観測フーリエ振幅スペクトルの比について、周波数毎に幾何平均を取った結果である。

$$\left( \prod_{n=1}^N \left| \frac{O_T^{(n)}(f)}{O_R^{(n)}(f)} \right| \right)^{\frac{1}{N}} \quad (6)$$

ここで

$N$  : 参照地点, 対象地点の地表面で得られた地震観測記録の水平成分の全データ数 (本例では  $N=6$ )

$|o_\alpha^{(n)}(f)|$  :  $\alpha (\in \{R (\text{参照地点}), T (\text{対象地点})\})$  における  $n$  番目の地震動の成分のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

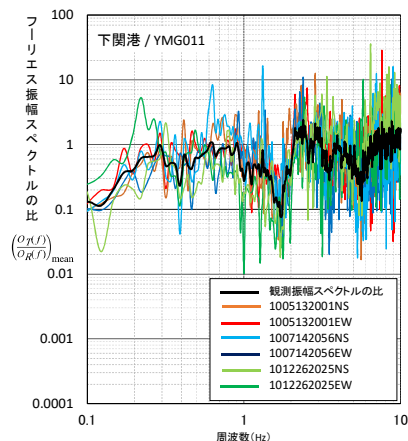


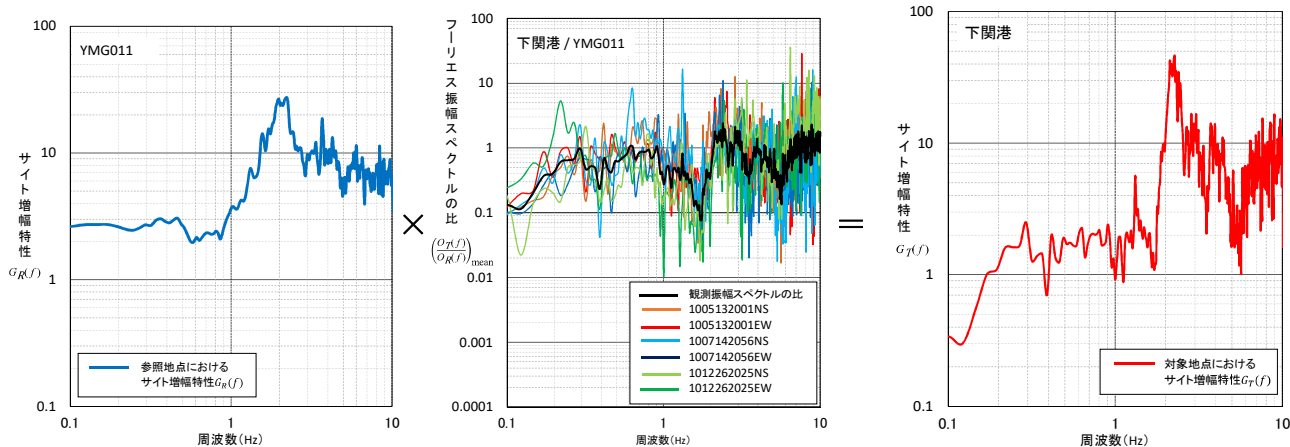
図-9 参照地点 (YMG011) と対象地点 (下関港のある地区) における地表面の加速度記録のフーリエ振幅スペクトルの比の幾何平均

手順3：対象地点におけるサイト増幅特性の算出

図-10は、手順2で求めた2地点間の観測フーリエ振幅スペクトルの比を既知である参照地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) に乗じることにより、式(7)に従い、対象地点のサイト増幅特性を求めることを概念的に表した図である。

なお、式(7)の導出は付録Cに示す。

$$|G_T(f)| = \left( \prod_{n=1}^N \left| \frac{O_T^{(n)}(f)}{O_R^{(n)}(f)} \right| \right)^{\frac{1}{N}} |G_R(f)| \quad (7)$$



(a) 参照地点のサイト増幅特性 (b) フーリエ振幅スペクトルの比の幾何平均 (c) 対象地点のサイト増幅特性

図-10 対象地点 (下関港のある地区) におけるサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面)



(3) 対象地震の震源が十分に遠方ではない場合

(3.1) 伝播経路特性の評価

対象地震の震源が十分に遠方ではなく、参照地点と対象地点では、伝播経路特性が異なると考えられる場合（対象地点から震源までの距離が対象地点から参照地点までの距離のおおよそ 10 倍未満）、以下の手法により評価を行う。

伝播経路特性は、基準・同解説 (p.367) によると、以下の式(8)として表すことができる。

$$|P(f)| := \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi f r}{QV_s}} \quad (8)$$

ここで

- $|P(f)|$  : 伝播経路特性
- $r$  : 震源距離
- $V_s$  : 伝播経路における平均的な S 波速度
- $Q$  : 伝播経路における  $Q$  値

$Q$  値とは地震波の伝播経路における散乱や熱への転化に起因する非弾性減衰の大きさを表す量であり、例えば参考文献 11)~13)において求められている。全国の  $Q$  値が参考文献 2)p.22 に取りまとめられているため、参考にされたい。また、 $V_s$  は図-1 に示したように、地震基盤面以下の地盤では 3000m/s 以上であり、基準・同解説 (p.392) には、「活断層で発生する地震を対象とする場合、 $V_s = 3.5 \text{ km/s}$  とすることができる」とされている。

震源距離は、震源位置と観測点座標から得られる情報であり、伝播経路特性を構成する  $r$ 、 $V_s$ 、 $Q$  値が全て既知の情報となるため、伝播経路特性は式(8)より求めることができる。

式(8)より求めた伝播経路特性を用いて、サイト増幅特性の評価を行う。

(3.2) サイト増幅特性の評価

ここでは、話を簡単にするために、1つの地震動の1つの成分を対象にして、伝播経路特性が参照地点と対象地点とで異なる場合を考える。この場合、両地点（参照地点、対象地点）の震源特性  $|S_a(f)|$  は、式(3)より、伝播経路特性  $|P_a(f)|$ 、サイト増幅特性（地震基盤面から地表面） $|G_a(f)|$  の2つの既知の量を用いて、式(9)でそれぞれ表される。

$$\begin{cases} |S_R(f)| = \frac{|O_R(f)|}{|P_R(f)||G_R(f)|} \\ |S_T(f)| = \frac{|O_T(f)|}{|P_T(f)||G_T(f)|} \end{cases} \quad (9)$$

対象地震の震源が十分に遠方ではない場合であっても、震源と各観測地点の方位が大きく異なる場合は  $|S_R(f)| = |S_T(f)|$  と仮定して解析をすすめる。この関係を式(9)に適用すれば、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面） $|G_T(f)|$  は式(10)のように表される。

$$|G_T(f)| = \frac{|O_T(f)|}{|O_R(f)|} \frac{|P_R(f)|}{|P_T(f)|} |G_R(f)| \quad (10)$$

式(10)は、1つの地震動の1つの成分のみを用いた、伝播経路特性が参照地点と対象地点とで異なる場合の松による評価手法である。

次に、これを複数の地震動の2成分による幾何平均を用いた場合に拡張すると式(11)が得られる。

なお、式(11)の導出は、付録 C に示す。

$$|G_T(f)| = \left[ \prod_{n=1}^N \left( \frac{|O_T^{(n)}(f)|}{|O_R^{(n)}(f)|} \frac{|P_R^{(n)}(f)|}{|P_T^{(n)}(f)|} \right) \right]^{\frac{1}{N}} |G_R(f)| \quad (11)$$

なお、参照地点と対象地点が震源から見て大きく異なる方位に位置する場合には、震源から異なる方位に放射される地震波の違いによる影響で評価の精度が低下する可能性があることに注意が必要である。このような場合は、基準・同解説 (p.1781) にあるように、対象地震の震源モデルを作成し、対象地点周辺の複数の既存地震観測地点における観測スペクトルを再現できることを確認した上で、そのときの震源モデルを用いて対象地点におけるサイト増幅特性を評価するのが良い。

#### (4) 地震観測記録の個数が不足している場合

評価の信頼性を確保するために、原則として、参照地点と対象地点で3つ以上の同時記録が得られていることが望ましいが、十分な数の記録が得られなかった場合には以下のような方法も用いられる。すなわち、当初の参照地点以外の周囲の強震観測点を新たな参照地点として加え、新たな参照地点と対象地点で得られた同時記録も合わせてサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の再評価を行う。この場合、全ての参照地点と対象地点で同時記録が得られている必要はなく、1つ目の参照地点と対象地点、2つ目の参照地点と対象地点というように、複数の参照地点の何れかと対象地点とで同時記録が得られ、それらの合計が3組以上あることが望ましい。但し、この手法は、対象地点での記録数は3個未満であるため、1つの参照地点と対象地点とで3つ以上の同時記録を用いてサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）を再評価する通常の松による評価に比べ、その推定精度が落ちる可能性が高い。

複数の異なる強震観測点における同時記録を用いる場合には、対象地点と複数の観測地点の各ペアで「(2)対象地震の震源が十分に遠方にある場合」または「(3)対象地震の震源が十分に遠方ではない場合」の評価を行う。各ペアで得られた対象地点におけるサイト増幅特性（地震観測に基づく評価）の幾何平均をもって対象地点におけるサイト増幅特性とする。

なお、上記の場合における式の導出を付録Cに示す。

### 3.3 常時微動観測に基づく評価

#### (1) 概要

常時微動観測記録に基づく評価は、対象地点の近隣に位置する既存地震観測地点のサイト増幅特性を準用することができず、かつ、対象地点で新たに地震観測を実施することが困難な場合に用いる評価手法である。

過去の多くの研究により、常時微動観測記録に基づく鉛直方向に対する水平方向の振幅スペクトルの比<sup>14)</sup>(以降、常時微動 H/V スペクトルという)は、サイト増幅特性と関係を有することが明らかにされている。

なお、常時微動観測記録に基づく評価は、サイト増幅特性および常時微動 H/V スペクトルに明瞭なピークが確認さ

れなければ適用できず、対象地点で常時微動観測を実施した場合でも、地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価(3.4)を適用せざるを得ない場合もあることに注意が必要である。ただし、3.1(2)で言及した既存地震観測地点における観測記録の利用可否に関する判断は、常時微動 H/V スペクトルに明瞭なピークが存在しない場合でも行うことができる。

#### (2) 竹 ver1

##### (2.1) 評価手法

常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数とサイト増幅特性のピーク周波数に相関があることは過去の多くの研究で確認されている。図-11<sup>15)</sup>はそのような研究結果の一つである。したがって、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク周波数は、対象地点において観測された常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数と近似できると考えることができる。

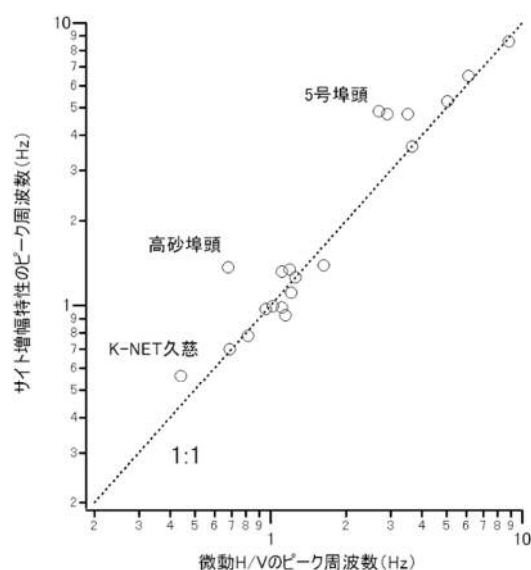


図-11 サイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク周波数と常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の対応関係<sup>15)</sup>

このことに着目し、既知の参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）を両対数軸上に表示し、その形状を維持したまま、参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の差（両軸が算術目盛のグラフ上では

比) の分だけ横軸方向に平行移動させることにより, 対象地点のサイト増幅特性を評価する方法が提案された. これが竹 ver1 である.

両対数グラフのように横軸に対数目盛を取ったグラフにおける横軸方向へのグラフの平行移動は, 横軸に算術目盛を取ったグラフにおいて, 式(12)に示すとおり, 横軸方向へのグラフの伸縮に相当する.

$$\begin{cases} |G_T^{\text{bam}}(f)| := \left| G_R \left( \frac{f}{\Delta f} \right) \right| \\ \Delta f := \frac{f_T^{\text{peak}}}{f_R^{\text{peak}}} \end{cases} \quad (12)$$

ここで

$|G_T^{\text{bam}}(f)|$  : 竹 ver1 により再評価された対象地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面)

$f_\alpha^{\text{peak}}$  :  $\alpha (\in \{R (\text{参照地点}), T (\text{対象地点})\})$  の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数

但し, 参照地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) と常時微動 H/V スペクトルにおいて, ピーク周波数が異なる場合には, 以下の式(13)に示すように, 参照地点のピーク周波数は, サイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) のものを真値とする.

$$f_R^{\text{peak}} := \begin{cases} f_R^{\text{peakHV}} & (f_R^{\text{peakHV}} \approx f_R^{\text{peakG}}) \\ f_R^{\text{peakG}} & (f_R^{\text{peakHV}} \neq f_R^{\text{peakG}}) \end{cases} \quad (13)$$

ここで

$f_R^{\text{peakG}}$  : 参照地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から地表面) のピーク周波数

$f_R^{\text{peakHV}}$  : 参照地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数

(2.2) 評価手法の適用事例 (竹 ver1)

以下に, 参照地点: YMG011, 対象地点: 下関港 (のある地区) とした評価事例を示す.

手順 1: 常時微動 H/V スペクトルの算出

参照地点及び対象地点において常時微動観測で得られた 3 成分 (NS, EW, UD 成分) のフーリエ振幅スペクトルに対してバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化を行う. 平滑化を行ったフーリエ振幅スペクトルに対し, 式(14)により, 常時微動 H/V スペクトルを求める.

図-12 に, 参照地点及び対象地点における常時微動 H/V スペクトルの図を示す.

$$HV(f) := \frac{\sqrt{\frac{|F_1(f)|^2 + |F_2(f)|^2}{2}}}{|F_3(f)|} \quad (14)$$

ここで

$HV(f)$  : 常時微動 H/V スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$|F_\alpha(f)|$  : 常時微動観測記録の

$\alpha (\in \{1(\text{NS}), 2(\text{EW}), 3(\text{UD})\})$  成分のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

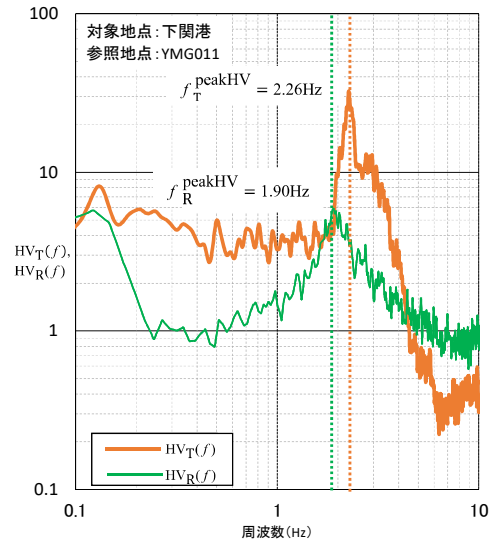


図-12 参照地点 (YMG011), 対象地点 (下関港のある地区) における常時微動 H/V スペクトルとそのピーク周波数

なお, 図-12 における下関港の常時微動 H/V スペクトルは, 低周波領域において連続して高い値を示している. このようなデータは, 良好な観測データではない可能性が高

いため、留意が必要であるが、本稿では補正手法の体系的整理を目的としているため、同データを用いて評価を行う。

手順2：サイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク周波数の平行移動量の設定

図-13 は参照地点におけるサイト増幅特性の図である。図-13 に示すとおり、本例においては、参照地点におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピークが、同程度の周波数（1.98Hz, 2.22Hz）で2点確認される。

本例のように参照地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数が 0.2 から 2.0 Hz にあって、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の2つのピーク高さが同程度で似通った周波数に位置し、参照地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数よりも参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク周波数が高周波数側にある場合には、2点のピークのうち高周波数側のピーク（ $f_R^{\text{peak}G2} = 2.22 \text{ Hz}$ ）をサイト増幅特性のピーク周波数とみなす。これは、0.2 から 2.0 Hz の低周波数帯の地震動の成分が港湾構造物の変形に大きく寄与することがわかっており、0.2 から 2.0 Hz の間に平行移動後のグラフのピーク周波数が属し、ピーク周波数周辺のスペクトルがこの区間に可能な限り含まれるようにするためである。

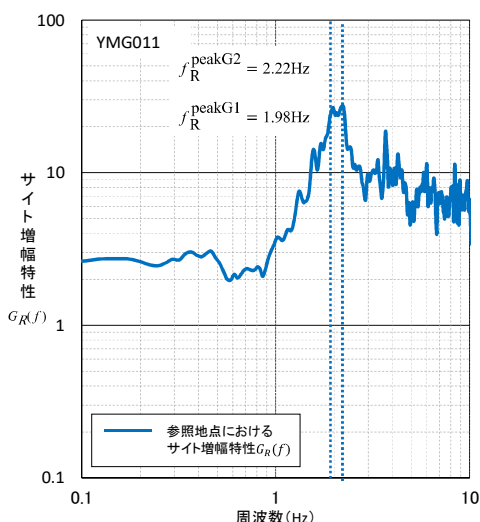


図-13 参照地点（YMG011）におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）とそのピーク周波数

手順3：対象地点のサイト増幅特性の算出

図-14 に示すように、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のグラフのピーク周波数（ $f_R^{\text{peak}G2} = 2.22 \text{ Hz}$ ）が対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数（ $f_T^{\text{peak}HV} = 2.26 \text{ Hz}$ ）に両対数グラフ上で重なるように、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のグラフを横軸方向に平行移動し、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）として設定する。ただしこの場合、移動量は極めて小さなものに留まっている。実務上は、参照地点と対象地点のピーク周波数がこのように近い場合、積極的に補正を行わない場合が多い。

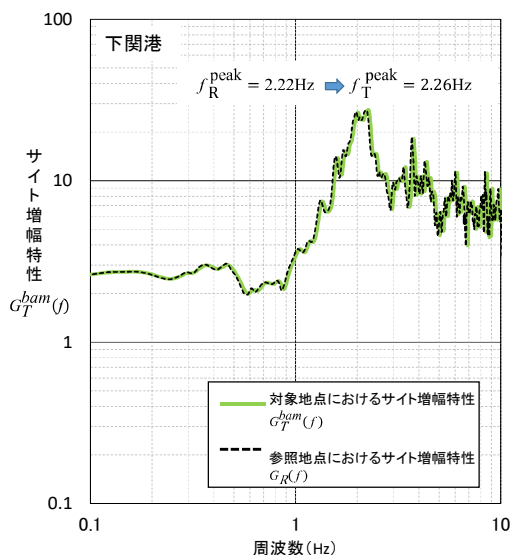


図-14 対象地点（下関港のある地区）におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）とそのピーク周波数

(3) 竹 ver2

(3.1) 評価手法

竹 ver1 による評価は、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数とサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク周波数の相関に着目し、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のグラフに対し、ピーク周波数に関する補正のみを行うものである。一方、常時微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さに相関があるかについては既往研究の評価は一定していない。しかし、図-15 に示すように、常時微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さにもある程度の相関があると報告している既往研究<sup>15)</sup>もあり、参照地点に比べ対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さが明らかに高い場合は、ピーク周波数の補正のみでは対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）を危険側に評価してしまう可能性がある。そこで、このような場合のために、ピーク周波数の補正に加え、参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの比を利用して、サイト増幅特性の増幅倍率にも補正を加える方法が提案された。これが竹 ver2（新竹）である。

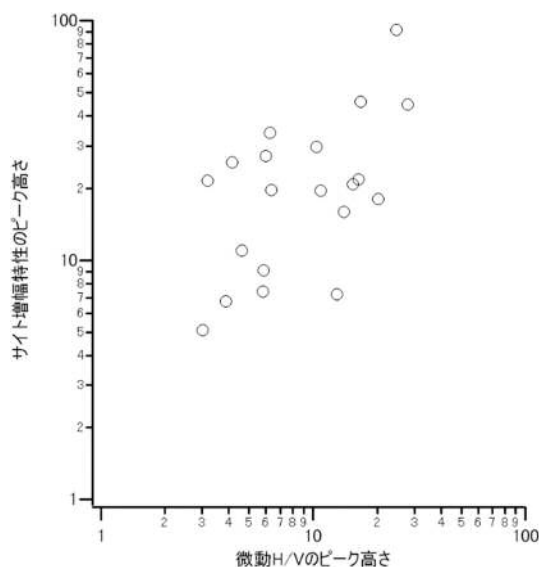


図-15 サイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さと常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの対応関係<sup>15)</sup>

なお、既往の補正事例では、対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さが参照地点のそれよりも数倍程度大きい場合に竹 ver2 による評価が採用された例が多い。

竹 ver2 による評価では、竹 ver1 による評価後のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $|G_T^{bam}(f)|$ ）に対して式(15)のように区分関数を乗じることで対象地点におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $|G_T^{nb}(f)|$ ）を求める。

$$|G_T^{nb}(f)| := \begin{cases} |G_T^{bam}(f)| \frac{HV_T(f)}{HV_R\left(\frac{f}{\Delta f}\right)} & (\text{if } f < f_T^{peak}) \\ |G_T^{bam}(f)| \frac{HV_T(f_T^{peak})}{HV_R\left(\frac{f_T^{peak}}{\Delta f}\right)} & (\text{if } f \geq f_T^{peak}) \end{cases} \quad (15)$$

ここで、

$|G_T^{nb}(f)|$  : 竹 ver2 により再評価された対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）

$HV_T(f)$  : 対象地点の常時微動 H/V スペクトル

$HV_R\left(\frac{f}{\Delta f}\right)$  : ピーク周波数を対象地点のピーク周波数まで平

行移動した、参照地点の常時微動 H/V スペクトル

仮に、式(15)の右辺第1式にある  $\frac{HV_T(f)}{HV_R\left(\frac{f}{\Delta f}\right)}$  を対象地点

の竹 ver1 による評価後のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $|G_T^{bam}(f)|$ ）に対し全周波数にわたって乗じた場合、ピーク周波数より高周波側の周波数帯では、サイト増幅特性（地震基盤面から地表面）が非常に小さな倍率を示すことがある。例えば図-12 の例では対象地点の常時微動 H/V スペクトルが 6Hz 付近に谷を有しているため、サイト増幅特性（地震基盤面から地表面）は 6Hz 付近で非常に小さな倍率を示すことになる。この問題を回避するため、竹 ver2 による評価では、ピーク周波数より高周波数帯では、常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの比を竹 ver1 による評価後のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $|G_T^{bam}(f)|$ ）に乗じる。

(3.2) 評価手法の適用事例 (竹 ver2)

以下に参照地点：YMG011，対象地点：下関港（のある地区）とした評価事例を示す。

① ピーク周波数より低周波数帯における操作

手順 1：参照地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の修正

参照地点のピーク周波数  $f_R^{\text{peak}}$  (式(13)に準じる) が対象地点の常時微動 H/V スペクトルのグラフのピーク周波数  $f_T^{\text{peak}}$  (図-16)に重なるように、参照地点の常時微動 H/V スペクトルのグラフを両対数軸グラフ上で横軸方向に平行移動する (図-17)。

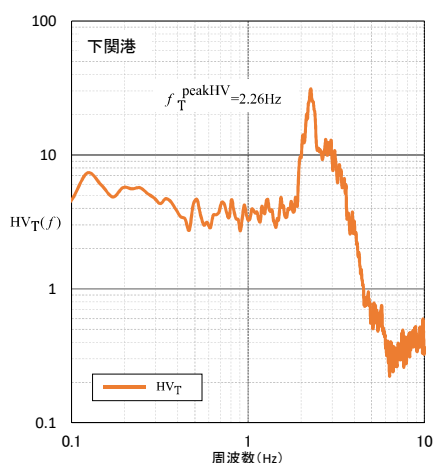


図-16 対象地点（下関港のある地区）の常時微動 H/V スペクトル

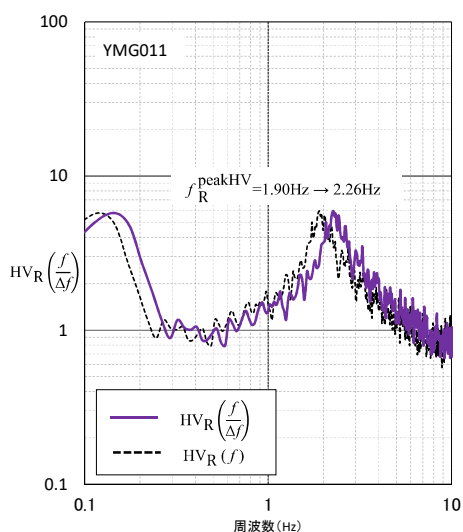


図-17 平行移動後の参照地点 (YMG011) の常時微動 H/V スペクトル

手順 2：参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルの比較

手順 1 により平行移動した参照地点の常時微動 H/V スペクトルを用いて、対象地点の常時微動 H/V スペクトルを除することにより、2 地点間の常時微動 H/V スペクトルの比  $\frac{HV_T(f)}{HV_R\left(\frac{f}{\Delta f}\right)}$  を算出する。

図-18 に示される黒線が、参照地点と対象地点の 2 地点間における常時微動 H/V スペクトルの比である。

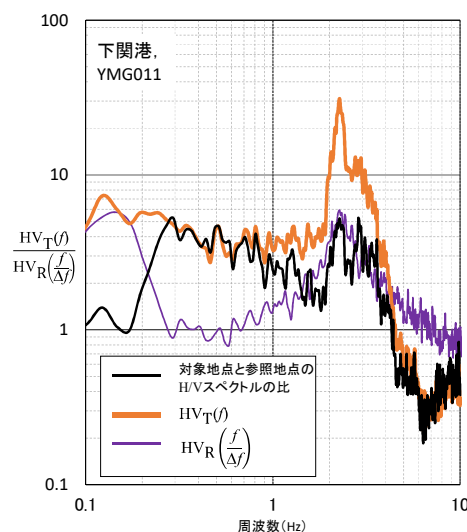


図-18 2 地点における常時微動 H/V スペクトルの比

手順 3：サイト増幅特性の算出 ( $f < f_T^{\text{peak}}$ )

図-19 に概念的に示すように、手順 2 より求めた 2 地点の常時微動 H/V スペクトルの比  $\frac{HV_T(f)}{HV_R\left(\frac{f}{\Delta f}\right)}$  を、竹 ver1

による評価済みの対象地点におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $|G_T^{\text{bam}}(f)|$ ）に乗じることにより対象地点におけるサイト増幅特性を求める。

以上の手順 1 から手順 3 の操作によって、対象地点におけるピーク周波数より低周波数帯側のサイト増幅特性が評価される。

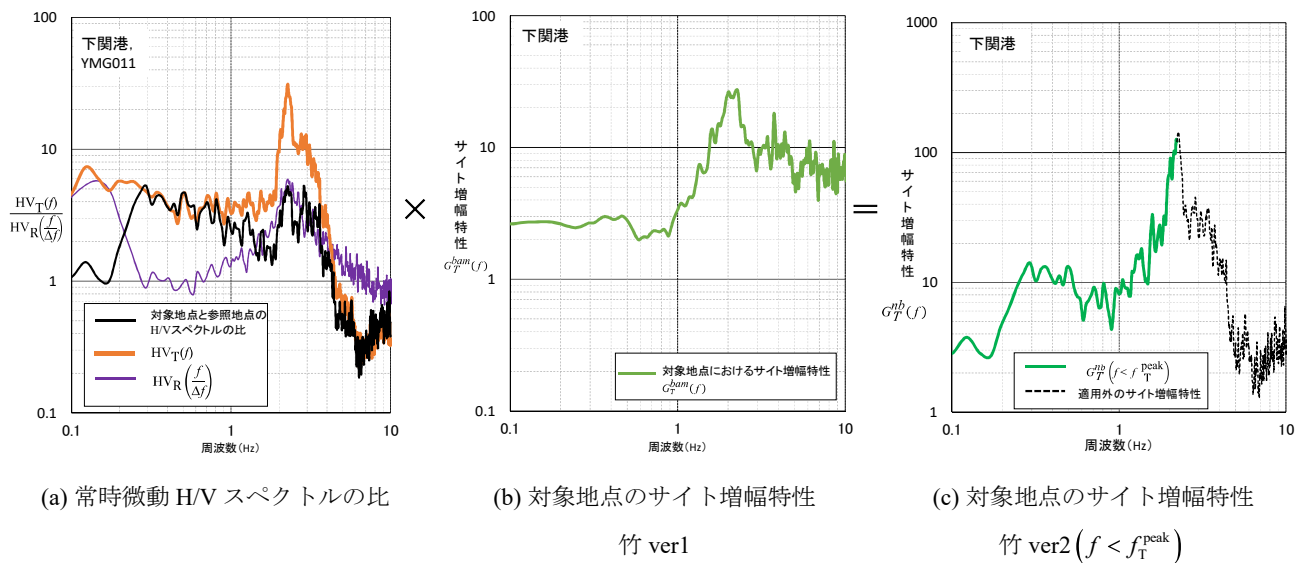


図-19 対象地点（下関港のある地区）のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）（ $f < f_T^{\text{peak}}$ ）

②ピーク周波数より高周波数帯における操作

手順4：ピーク高さの比較

対象地点の竹 ver1 による評価済みのサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $|G_T^{\text{bam}}(f)|$ ）に乘じる関数として2地点間の常時微動 H/V スペクトルの比  $\frac{HV_T(f)}{HV_R(f)}$  を

$$\frac{HV_T(f_T^{\text{peak}})}{HV_R(f_R^{\text{peak}})} = \frac{31.06}{5.93} = 5.24 \quad (16)$$

求めたが、ピーク周波数より高周波数帯では、ピーク高さの比  $\frac{HV_T(f_T^{\text{peak}})}{HV_R(f_R^{\text{peak}})} (= \text{const.})$  を求める。図-20 は、対象地点と参照地点における常時微動 H/V スペクトルのピーク

高さとその比を求めていることを概念的に表した図である。

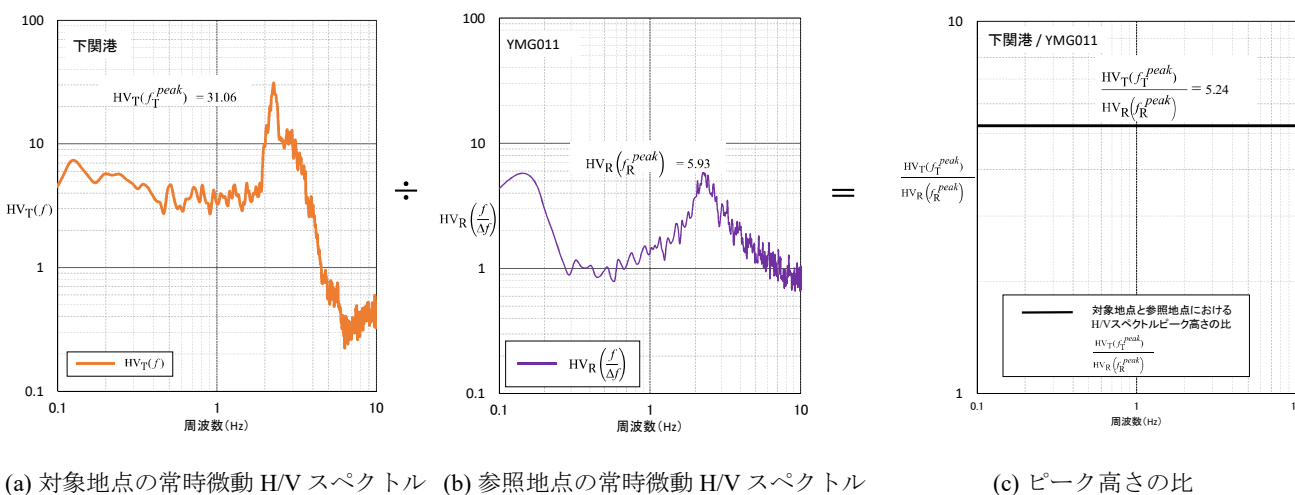


図-20 2地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの比



手順5: サイト増幅特性の算出 ( $f \geq f_T^{\text{peak}}$ )

図-21に示すように、手順4より求めた参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの比

$$\frac{HV_T(f_T^{\text{peak}})}{HV_R(f_R^{\text{peak}})}$$

(地震基盤面から地表面:  $G_T^{\text{bam}}(f)$ ) に乗じることにより、対象地点におけるサイト増幅特性(地震基盤面から地表面)を求める。

以上の手順4から手順5の操作によって、対象地点におけるピーク周波数より高周波数帯側のサイト増幅特性が評価される。

③ サイト増幅特性の統合

手順6: サイト増幅特性(地震基盤面から地表面)の算出(全周波数帯)

手順1から5の操作により求めた①ピーク周波数より低周波数帯と②ピーク周波数より高周波数帯を両対数グラフ上で繋ぎ合わせることで、対象地点におけるサイト増幅特性(地震基盤面から地表面)とする。

図-22は、全周波数における竹 ver2 のサイト増幅特性を表す図である。

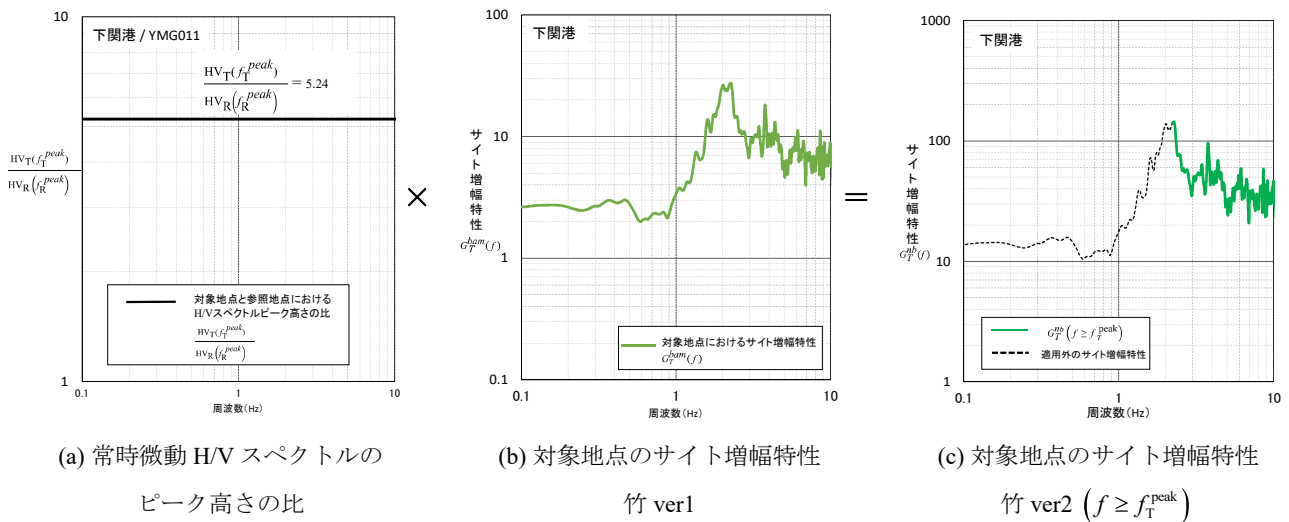


図-21 対象地点(下関港のある地区)におけるサイト増幅特性(地震基盤面から地表面) ( $f \geq f_T^{\text{peak}}$ )

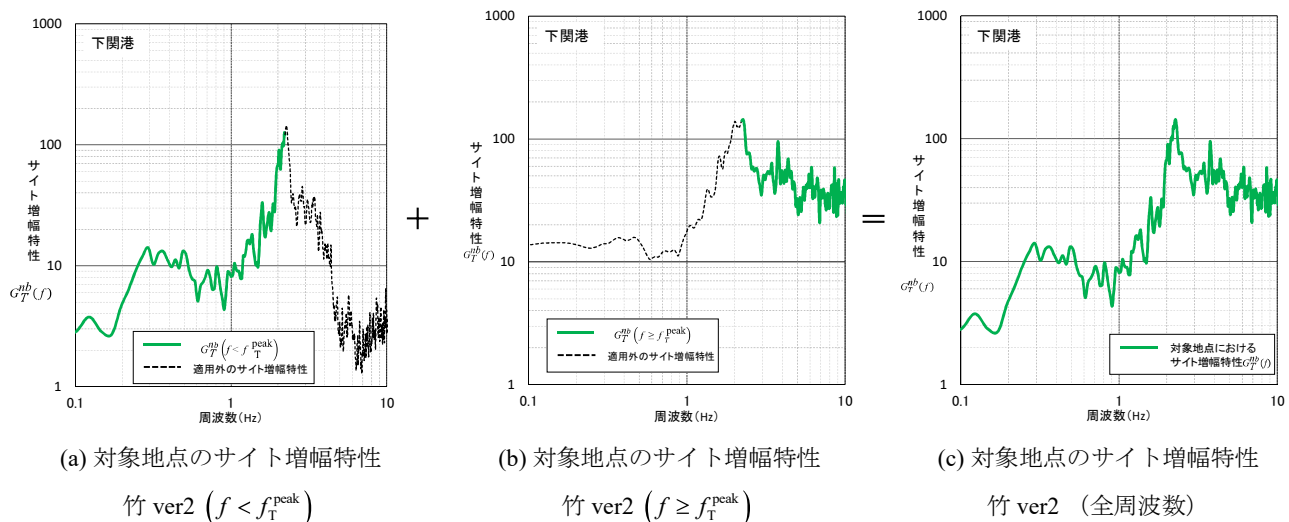


図-22 対象地点(下関港のある地区)におけるサイト増幅特性(地震基盤面から地表面) (竹 ver2)



(4) 竹 ver3

(4.1) 評価手法

竹 ver2 による評価は、参照地点と対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの比を利用するものであるため、参照地点において常時微動 H/V スペクトルのピーク高さが極めて小さく、かつ対象地点において常時微動 H/V スペクトルのピーク高さが極めて大きい場合に、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）を極端に大きく評価してしまう傾向があった。そこでこの問題を解消するために、新たな関数（以下、キャップ関数という）を用いる評価手法<sup>16)</sup>が提案された。これが竹 ver3 による評価である。なお、キャップ関数の設定過程の詳細は文献 16) を参照されたい。

竹 ver3 による評価において、竹 ver1 による評価後の対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）に対し、ピーク周波数を含む全周波数帯において修正を行うための関係式を式(17)<sup>1)</sup>、(18)<sup>1)</sup>に、ピーク高さの修正を行うためのキャップ関数を図-23、式(19)<sup>1)</sup>に示す。参考文献 16) では 3 種類の関数が比較検討されているが、基準・同解説(p.1785)に掲載されているキャップ関数は、図-23 において破線で表される関数である。

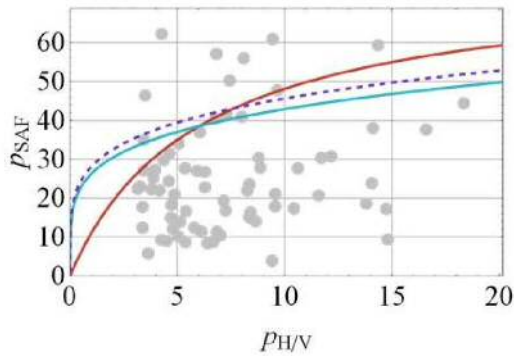


図-23 同じ地点におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さ  $p_{SAF}$  と常時微動 H/V スペクトルのピーク高さ  $p_{H/V}$  の関係<sup>16)</sup>（破線が式(19)の関係）

$$|G_T^{cb}(f)| = |G_T^{bam}(f)| r(f) \tag{17}$$

$$r(f) := \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi f}{2f_0}\right) + R^2 \sin^2\left(\frac{\pi f}{2f_0}\right)}} & (\text{if } f \leq f_0) \\ 1 & (\text{if } f > f_0) \end{cases} \tag{18}$$

ここで

- $|G_T^{cb}(f)|$  : 竹 ver3 により再評価された対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面） ( $\in \mathbb{R}$ )
- $f_0$  : 対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数
- $R$  :  $p_1/p_2$
- $p_1$  : 参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さ
- $p_2$  : キャップ関数により推定される、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）のピーク高さ

$$p_2 = 26.1 p_m^{0.21} \tag{19}$$

ここで

- $p_m$  : 対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク高さ

(4.2) 評価手法の適用事例 (竹 ver3)

以下に参照地点：YMG011，対象地点：下関港（のある地区）とした評価事例を示す。

手順 1：竹 ver1 による評価済みのサイト増幅特性に乗じる倍率の算出

参照地点におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）と対象地点における常時微動 H/V スペクトルより，式(18)を用い，全周波数に対する倍率の算出を行う。以下に示す図-24 に，下関港（のある地区）を例として算出した倍率  $r(f)$  を示す。

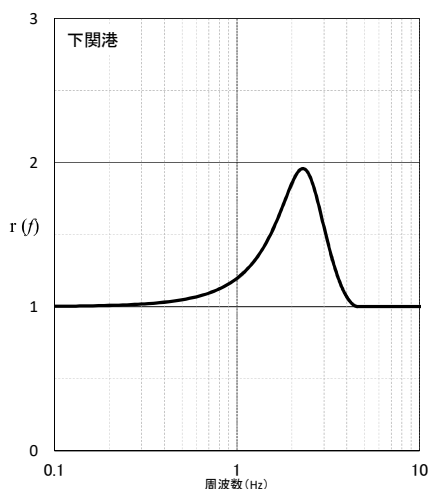
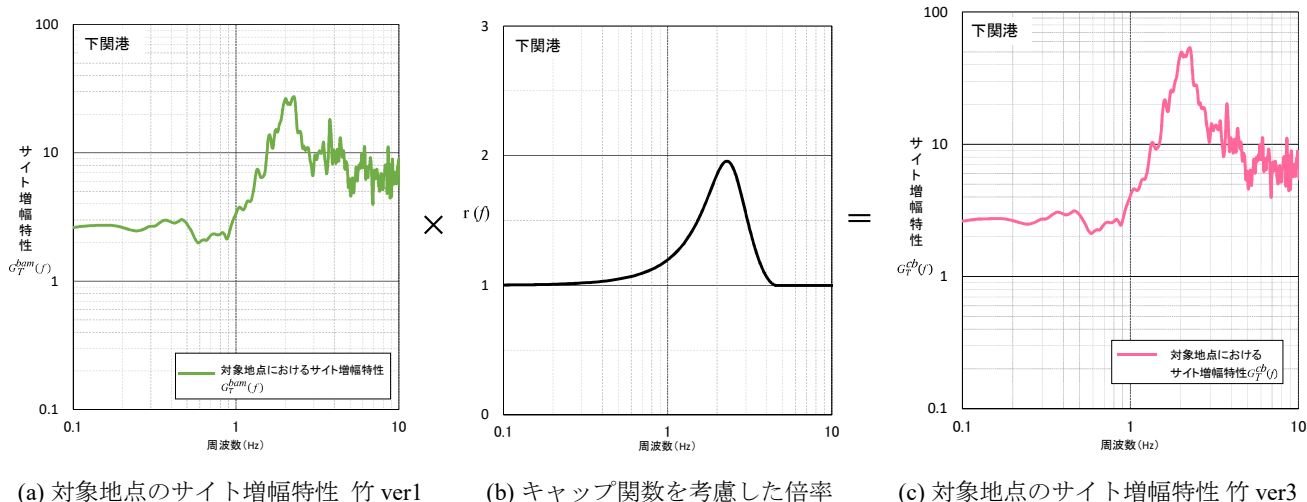


図-24 キャップ関数を考慮した倍率

手順 2：サイト増幅特性の算出

図-25 に概念的に示すように，手順 1 より求めた全周波数に対する倍率  $r(f)$  を竹 ver1 による再評価済みのサイト増幅特性（地震基盤面から地表面： $G_T^{bam}(f)$ ）に乗じることにより，対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）を求める。



(a) 対象地点のサイト増幅特性\_竹 ver1      (b) キャップ関数を考慮した倍率      (c) 対象地点のサイト増幅特性 竹 ver3

図-25 対象地点（下関港のある地区）のサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）（竹 ver3）

### 3.4 地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価

#### (1) 概要

地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価は、梅と呼ばれ、対象地点における観測記録を使用せず、参考文献 3)の研究で求められた経験的關係を利用し、式(20)<sup>1)</sup>により対象地点のサイト増幅特性を求める最も簡易的な評価手法である。

ただし、同評価に用いる経験的關係は、全国の港湾及びその周辺の K-NET(KiK-net)<sup>8)</sup>の観測点におけるサイト増幅特性の一般傾向を考慮して定めたものであり、松による評価と比較して、信頼性が大きく低下することに注意が必要である。

図-26、27 に示す係数が、経験的關係より求められた回帰係数<sup>3)</sup>であり、回帰係数のデータは、港湾空港技術研究所のホームページ<sup>17)</sup>よりダウンロード可能である。

なお、文献 3) に示される参照地点のサイト増幅特性のデータは地震基盤面から地表面までのサイト増幅特性であるが、式(20)は地震基盤面から工学的基盤面までのサイト増幅特性を対象として定められている。よって、文献 3) のサイト増幅特性を用いて式(20)による評価を行う場合には、文献 3) のサイト増幅特性に対して重複反射理論等の計算を適用し、地震基盤面から工学的基盤面までのサイト増幅特性に変換してから式(20)を適用する必要がある。

$$\begin{cases} y = A + Bx \\ y = \log \frac{|\tilde{G}_T^{plum}(f)|}{|\tilde{G}_R(f)|} \\ x = \log |\tilde{G}_R(f)| \end{cases} \quad (20)$$

ここで

$|\tilde{G}_T^{plum}(f)|$  : 梅により評価された対象地点のサイト増幅特性  
(地震基盤面から工学的基盤面) ( $\in \mathbb{R}$ )

$|\tilde{G}_R(f)|$  : 参照地点のサイト増幅特性 (地震基盤面から工学的基盤面) ( $\in \mathbb{R}$ )

$\log(\cdot)$  :  $(\cdot)$  の常用対数

#### (2) 評価手法の適用事例 (梅)

図-28 に参照地点 : YMG011, 対象地点 : 下関港 (のある地区) としての評価事例を示す。

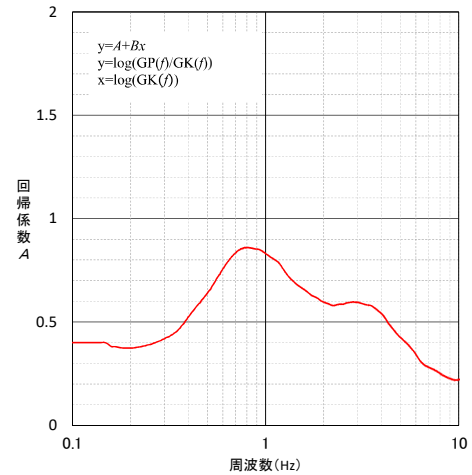


図-26 回帰係数 A

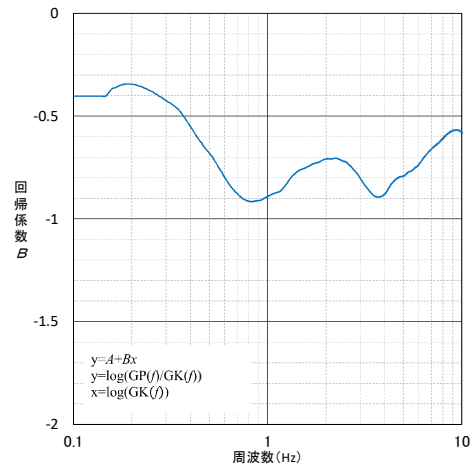


図-27 回帰係数 B

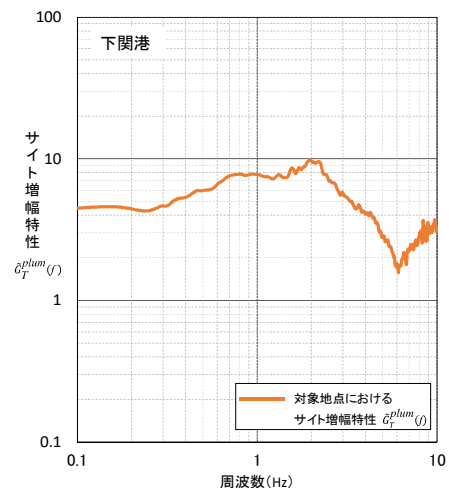


図-28 対象地点 (下関港のある地区) のサイト増幅特性 (地震基盤面から工学的基盤面) (梅)

#### 4. サイト位相特性の評価手法

##### 4.1 地震観測に基づいて評価する場合

###### (1) 概要

レベル1地震動のサイト位相特性を決めるためには、地震観測記録を用いる必要がある。ここでは、地震動の位相特性のうち伝播経路特性に対応する周波数応答の位相とサイト増幅特性に対応する周波数応答の位相の和（すなわち  $\angle P(f) + \angle G(f)$ ）を「サイト位相特性」と定義している。

これは、位相特性の評価に用いられる中小地震記録の中に伝播経路とサイトの影響が含まれており、実務上はそれらを分離することなく一体として扱うことが一般的だからである。

また、サイト位相特性を決めるための地震観測記録を位相波と定義する。位相波は、対象地点のサイト位相特性を適切に考慮するため、対象地点の地表面において観測された地震観測記録を用いることが望ましい。

サイト増幅特性を地震観測に基づいて評価する場合には、**図-29**に示すように、対象地点の地表面では（臨時の）地震観測が行われ地震観測記録が得られているはずであるから、これを位相波として用い、対象地点のサイト位相特性の評価を行う。



図-29 地震計の設置位置（地震観測に基づく評価の場合）

位相波の選定における注意事項として、一般に M4.5 未満の小規模な地震の観測記録では低周波数帯の SN 比が不十分な場合が多く、逆に M6.0 を超える比較的大規模な地震の観測記録では観測波の位相特性が震源断層の破壊過程の影響を強く受けている場合があるため、位相波の選定にあたっては M4.5 以上、M6.0 以下の地震観測記録を対象とし、信頼性の観点から、原則として3つ以上の地震動の NS, EW 成分の地震観測記録を使用することが望ましい。

位相波の選定には、地震観測記録の NS, EW 成分それぞれの群遅延を算出する必要がある。群遅延とは、周波数に対する位相の変化の割合であり式(21)により定義される。

$$\tau_{gd}(\Omega) := \frac{d}{d\Omega}(-\theta(\Omega)) = -\frac{\text{Re}(F(\Omega)) \frac{d}{d\Omega} \text{Im}(F(\Omega)) - \text{Im}(F(\Omega)) \frac{d}{d\Omega} \text{Re}(F(\Omega))}{|F(\Omega)|^2} \quad (21)$$

ここで

$\tau_{gd}(\Omega)$  : 群遅延

$\theta(\Omega)$  : 位相スペクトル

$F(\Omega)$  : 地震観測記録のフーリエ変換

$\text{Re}(\cdot)$  :  $(\cdot)$  の実部

$\text{Im}(\cdot)$  :  $(\cdot)$  の虚部

$\Omega$  : 角周波数 [Hz]

なお、式(21)の導出については、参考文献 18)~21)を参照されたい。

3つの地震観測記録を用いる場合は、3つの地震動の NS, EW 成分それぞれの群遅延を算出し、計6個のデータの群遅延について各周波数における算術平均をとり、各データの群遅延の平均値からのずれを各周波数において算出し、その2乗和が最小となるデータを位相波として選定する。

###### (2) 位相波の選定事例

位相波の選定事例として、強震観測地点 HKD077 における10個の観測記録の NS, EW 成分の計20データ（表-3）から位相波を選定した事例を以下に示す。

表-3 位相波の選定条件

位相波選定元	位相波の候補とした強震観測記録	選定した位相波
HKD077	201001092301 NS,EW	201205101501 EW
	20100728086 NS,EW	
	201202261605 NS,EW	
	201203111733 NS,EW	
	201205101501 NS,EW	
	201311051506 NS,EW	
	201512200235 NS,EW	
	201601240057 NS,EW	
	201604270739 NS,EW	
	201610090336 NS,EW	

手順1：観測記録の群遅延の算出

各観測記録をフーリエ変換し、フーリエ位相スペクトルを求める。図-30は、201205101501EW成分（2012年05月15時01分の観測記録のEW成分をこのように記載する）のフーリエ位相スペクトルのグラフである。ここではフーリエ位相が $-\pi$ から $\pi$ の値をとるように表示している。

観測記録は地表面で得られた記録であるため、図-30に示されるフーリエ位相スペクトルのグラフは震源特性・伝播経路特性・サイト特性の全ての特性の影響を受けている。

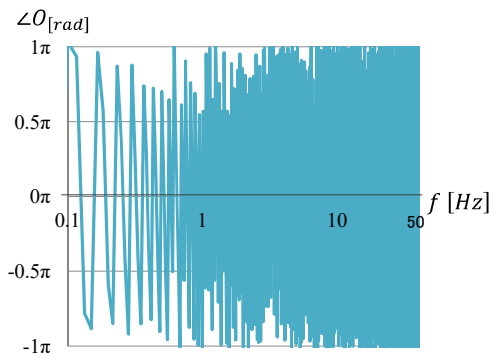


図-30 201205101501EW成分のフーリエ位相スペクトル

図-31は式(21)を用いて得られた201205101501EW成分の群遅延のグラフである。

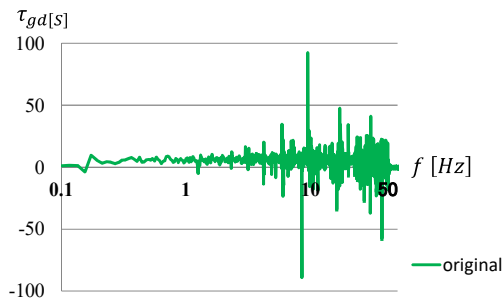


図-31 201205101501EW成分の群遅延

手順2：各周波数における算術平均の算出

手順1を全ての成分（表-3に示す20データ）に適用して群遅延を求め、各周波数における算術平均を取る。図-32は表-3に示した20データの群遅延の各周波数における算術平均のグラフである。

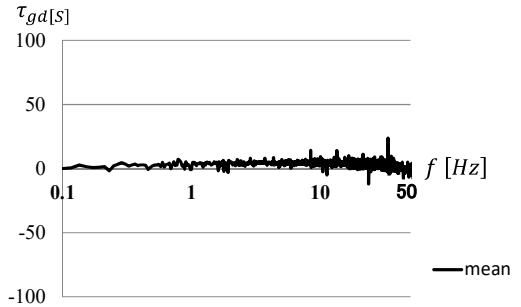


図-32 表-3に示す20データの群遅延の算術平均

手順3：位相波の選定

各データの群遅延の平均値からのずれを、港湾構造物への影響が大きい0.2から2.0Hzの周波数において算出し、その2乗和が最小となるデータを位相波として選定する。

図-33は採用となった201205101501EW成分の0.2から2.0Hzにおける群遅延のグラフである。

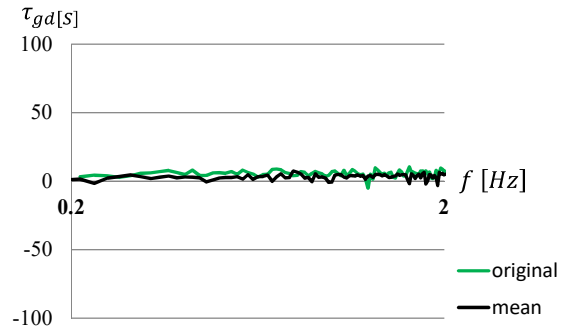


図-33 選定された群遅延

4.2 常時微動観測に基づいて評価する場合

4.1ではサイト増幅特性の評価手法として「地震観測に基づく評価」を採用した場合のサイト位相特性の評価手法について述べた。ここではサイト増幅特性の評価手法として「常時微動観測に基づく評価」を採用した場合のサイト位相特性の評価手法について述べる。

この場合は図-34に示すように対象地点では地震観測が行われておらず対象地点における地震観測記録から位相波を選定できない状況である。この場合、実務上は、補正前の工学的基盤でのレベル1地震動の位相特性をそのまま用いることが多い。しかし、第5章の例のようにレベル1地震動の位相特性を新たに設定し直す場合は、参照地点において観測された地震観測記録から位相波の選定を行えば良い。この場合、位相波を選定する地点が異なることを



除けば、位相波の選定手法は4.1と同様であるため、4.1を参照されたい。



図-34 地震計の設置位置  
(常時微動観測に基づく評価の場合)

## 5. レベル1地震動の補正方法及び試算

### 5.1 概要

レベル1地震動の補正とは、2.3で述べたように、国総研ホームページで設定されている既存のレベル1地震動について、算出時に適用されたサイト増幅特性及びサイト位相特性を、新たに評価したサイト増幅特性及びサイト位相特性に置き換えることにより、レベル1地震動を設定し直すことを意味する。

図-35は国総研ホームページで公開されている工学的基盤面における既存のレベル1地震動の設定位置に関する概念図である。

なお、特に断らない限り、図-35に示すように、地表面：gs面，工学的基盤面：eb面，地震基盤面：sb面と表記する。

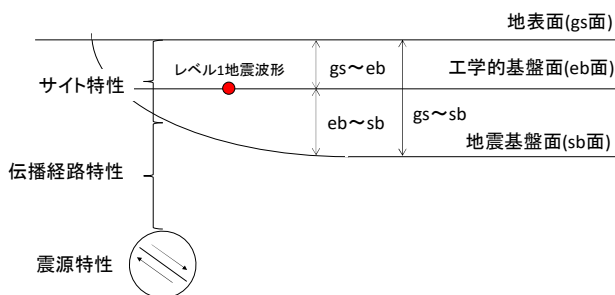


図-35 レベル1地震動の設定位置に関する概念図

### 5.2 補正方法及び試算

#### (1) 検討対象及び処理手順の概要

本資料では、表-4に示す4ケースに対し、3.2~3.4の各評価手法を適用した場合に得られるレベル1地震動の違いについて検討を行う。各ケースの詳細は付録Dに記載する。これらのケースでは、対象地点における既存のレベル

1地震動は「地震観測に基づく評価」により評価されている。したがってここでは「常時微動観測に基づく評価」および「地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価」により対象地点のレベル1地震動を補正し、各種補正手法によるレベル1地震動の相違を確認する。したがって、サイト特性の評価手法をより信頼性の高い手法からより信頼性の低い手法に置き換えていることになる。これは実務とは逆の流れであるという点に留意されたい。また先に述べたように実務では「常時微動観測に基づく評価」によりサイト増幅特性を評価する場合は補正前の工学的基盤面でのレベル1地震動の位相特性をそのまま用いることが多い。しかし、表-4に示す4ケースでは補正前のレベル1地震動の位相特性は対象地点の地震観測記録に基づいて評価されており、これをそのまま用いると位相特性の評価手法の違いを確認できないことになるので、ここではレベル1地震動の位相特性は参照地点の地震観測記録に基づいて評価する。また、比較のため「地震観測及び常時微動観測のいずれにもよらない評価」によるレベル1地震動も算出するが、この場合の位相特性も参照地点の地震観測記録に基づいて評価する。

表-4 補正ケース

	対象地点	参照地点
case1	釧路G	HKD077
case2	相馬G	FKS001
case3	高知G	KOC007
case4	松山G	EHM008

レベル1地震動のフーリエ振幅スペクトルの補正とフーリエ位相スペクトルの補正では、地盤のどの位置におけるデータを使用するかなどが異なっているため、それぞれに対する補正を分離して説明する。以下に示す各手順がレベル1地震動のフーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルのいずれの補正に関わるものであるかを表-5に示す。

表-5 レベル1地震動における処理対象

	処理対象
手順1	フーリエ振幅スペクトル フーリエ位相スペクトル
手順2	フーリエ振幅スペクトル
手順3	フーリエ振幅スペクトル
手順4, 5	フーリエ位相スペクトル
手順6, 7	フーリエ振幅スペクトル フーリエ位相スペクトル

(2) 処理手順の詳細

手順 1 : フーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルの分離

レベル 1 地震動の補正では、まず、工学的基盤面における既存のレベル 1 地震動の時刻歴波形をフーリエ変換し、フーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルに分離する。

図-36 はレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルへの分離のイメージ図である。

$$\mathcal{F}[11^{cb}(t)] = L1^{cb}(f) = |L1^{cb}(f)| e^{i\angle L1^{cb}(f)} \quad (22)$$

ここで

$11^{cb}(t)$  : 工学的基盤面におけるレベル 1 地震動の時刻歴 ( $\in \mathbb{R}$ )

$L1^{cb}(f)$  : 工学的基盤面におけるレベル 1 地震動のフーリエ変換 ( $\in \mathbb{C}$ )

$|L1^{cb}(f)|$  : 工学的基盤面におけるレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$\angle L1^{cb}(f)$  : 工学的基盤面におけるレベル 1 地震動のフーリエ位相スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

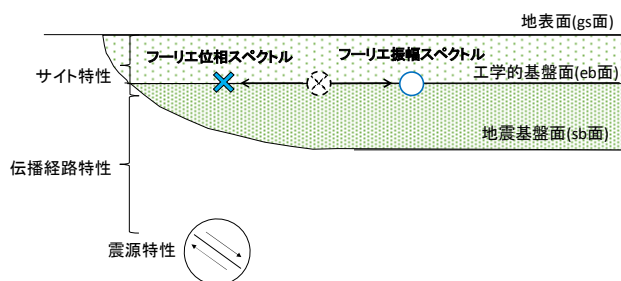


図-36 レベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルへの分離のイメージ図

手順 2 : 既存のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）の除去

工学的基盤面においてに設定されている既存のレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルから、既存のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）の影響を取り除く必要がある。

既存のレベル 1 地震動を算出した際のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）は国総研ホームページで公開されているため、これを利用し、式(23)に示すように、工学的基盤面における既存のレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルを、サイト増幅特性（地震基盤面

から工学的基盤面）で除することにより、地震基盤面におけるフーリエ振幅スペクトルを求めることができる。

以上の操作は、工学的基盤面において設定されていたレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルを地震基盤面まで引き戻したことに相当する。

図-37 は、フーリエ振幅スペクトルからの既存のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）の除去のイメージ図である。

$$|L1^{sb}(f)| = |L1^{cb}(f)| \frac{1}{|\tilde{G}(f)|} \quad (23)$$

ここで

$|L1^{cb}(f)|$  : 地震基盤面におけるレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$|\tilde{G}(f)|$  : サイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面） ( $\in \mathbb{R}$ )

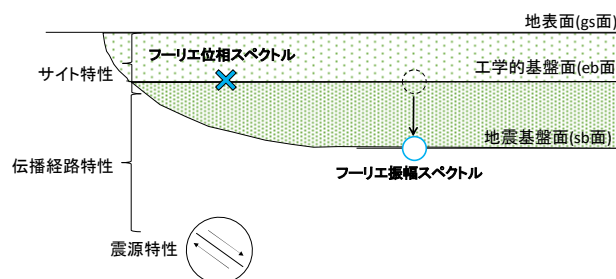


図-37 既存のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）の除去のイメージ図

手順 3 : 新たに評価したサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の導入

手順 2 によりフーリエ振幅スペクトルは補正前のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）の影響が除かれている状態であり、新たに評価したサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）をこれに乗じることにより、地表面における新たなレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルを求めることができる。

以上の操作は、手順 2 で地震基盤面まで引き戻しを行ったフーリエ振幅スペクトルを、新たなサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）で地表面まで引き上げたことに相当する。

手順 2 と手順 3 の処理により、補正前のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）を除去し、新たなサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）を導入した地表面における新たなレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトルが得られる。

図-38は、既存のサイト増幅特性（地震基盤面から工学的基盤面）を取り除いたフーリエ振幅スペクトルに対する新たなサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の導入のイメージ図である。

$$|L1^{cb'}(f)| = |L1^{sb}(f)| |G'(f)| \quad (24)$$

ここで

$|L1^{cb'}(f)|$  : 補正後のレベル1地震動のフーリエ振幅スペクトル（地表面）（ $\in \mathbb{R}$ ）

$|G'(f)|$  : 新たに評価したサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）（ $\in \mathbb{R}$ ）

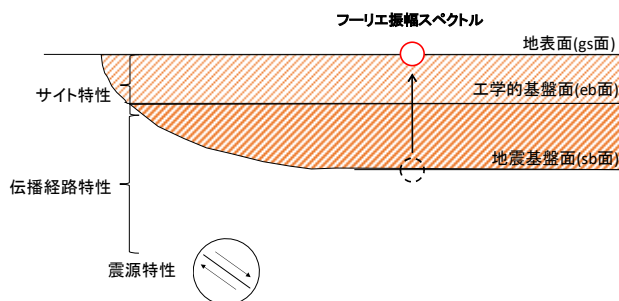


図-38 新たに評価したサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の導入のイメージ図

手順4：位相波の選定

以上の手順によりレベル1地震動のフーリエ振幅スペクトルが評価できたので、次にフーリエ位相スペクトルを評価する必要がある。

新たな位相波の選定は、対象地点で地震観測記録が得られている場合、対象地点の地震観測記録を用いる。しかし、ここでは既に述べたように対象地点で地震観測記録が得られていない状況を想定しているので、参照地点における地震観測記録から位相波を選定する。

既に述べたように、この場合に対象とする地震観測記録は一般にはM4.5以上、M6.0以下の地震観測記録とし、異常値やノイズの影響を緩和するため、最低3つ以上の地震動のNS、EW成分（合計6個以上のデータ）を用いることが望ましい。すべてのデータに対して群遅延を計算し、各周波数において算術平均をとり、最も平均値に近い群遅延をもつデータを位相波として選定する。なお、各データの群遅延と平均値との近似性は、各周波数で残差の2乗を算出し、その総和（すなわち、角周波数における個々のデータと平均値との残差2乗和）をとることにより判断する。

本検討では、位相波の選定には10個の地震動の記録のNS、EW成分の計20データを用いた。全4ケースにおいて位相波の候補として用いた強震観測記録を表-6~9に示し、位相波の選定過程はcase1を例に以下に記載する。

図-39はcase1で位相波の選定に用いた全20データの群遅延を示している。全てのデータに対する群遅延の算術平均が黒線であり、緑線が各データの群遅延である。case1では、各データの群遅延の平均値からのずれを各周波数において算出し、その2乗和が最小となる201205101501\_EW波を位相波として選定した。

表-6 HKD077 選定位相波

case	位相波選定元	位相波の候補とした強震観測記録	選定した位相波
case1	HKD077	201001092301 NS,EW	201205101501 EW
		20100728086 NS,EW	
		201202261605 NS,EW	
		201203111733 NS,EW	
		201205101501 NS,EW	
		201311051506 NS,EW	
		201512200235 NS,EW	
		201601240057 NS,EW	
		201604270739 NS,EW	
		201610090336 NS,EW	



表-7 FKS001 選定位相波

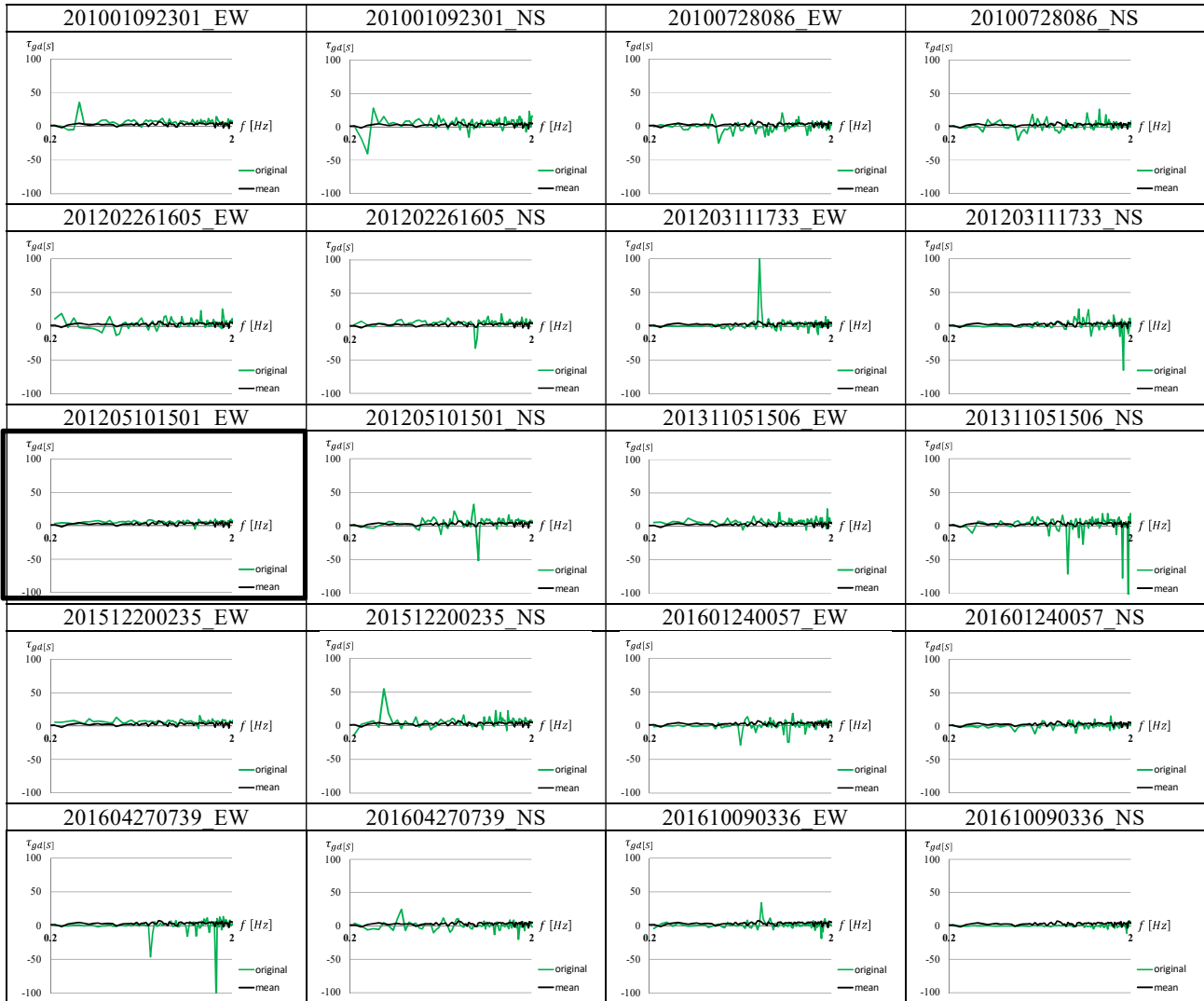
case	位相波 選定元	位相波の候補とし た強震観測記録	選定した 位相波
case2	FKS001	201105171003 NS,EW	201105171003 NS
		201109052114 NS,EW	
		201204260545 NS,EW	
		201211111416 NS,EW	
		201305251111 NS,EW	
		201311220458 NS,EW	
		201601262037 NS,EW	
		201702191502 NS,EW	
		201807260246 NS,EW	
		201809110427 NS,EW	

表-9 EHM008 選定位相波

case	位相波 選定元	位相波の候補とし た強震観測記録	選定した 位相波
case4	EHM008	201007231425 NS,EW	201502031407 EW
		201210270444 NS,EW	
		201212221515 NS,EW	
		201410160439 NS,EW	
		201502031407 NS,EW	
		201504080851 NS,EW	
		201706141927 NS,EW	
		201709011630 NS,EW	
		201709111630 NS,EW	
		201801090552 NS,EW	

表-8 KOC007 選定位相波

case	位相波 選定元	位相波の候補とし た強震観測記録	選定した 位相波
case3	KOC007	201007231425 NS,EW	201706141924 EW
		201008030304 NS,EW	
		201010061351 NS,EW	
		201101162033 NS,EW	
		201209081041 NS,EW	
		201210270444 NS,EW	
		201303270622 NS,EW	
		201701280502 NS,EW	
		201705030001 NS,EW	
		201706141924 NS,EW	



※太線で囲まれたケースは、位相波として選定されたもの

図-39 case1 における位相波の選定に用いた各データの群遅延

手順5：新たなフーリエ位相スペクトルの導入

手順4により新たに選定した位相波のフーリエ位相スペクトルを導入することにより、地表面におけるレベル1地震動のフーリエ位相スペクトルを求める。

図-40は新たなサイト位相特性の導入のイメージ図である。

$$\angle L1^{es'}(f) = \angle O'(f) \quad (25)$$

ここで

$\angle L1^{es'}(f)$ ：新たな位相波を導入した後のレベル1地震動（地表面）のフーリエ位相スペクトル（ $\in \mathbb{R}$ ）

$\angle O'(f)$ ：新たな位相波のフーリエ位相スペクトル（ $\in \mathbb{R}$ ）

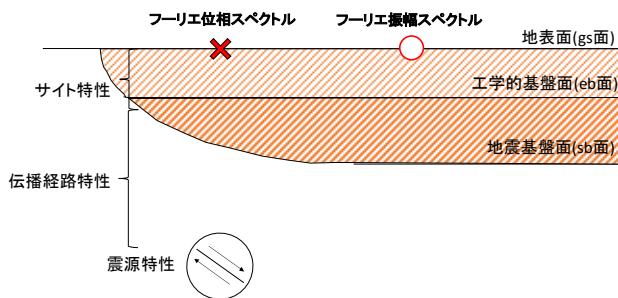


図-40 新たなサイト位相特性の導入のイメージ図

手順6：工学的基盤面への引き戻し

レベル1地震動は基準・同解説(p.363)に「レベル1地震動及びレベル2地震動の時刻歴波形を設定する深度を工学的基盤面とすることを標準とする」とされているため、手順5までの作業により地表面で求めたレベル1地震動のフーリエ振幅スペクトルおよびフーリエ位相スペクトルに対し工学的基盤面への引き戻しを行う。なお、工学的基盤面まで引き戻しを行う際の地盤条件としては、フーリエ振幅スペクトルの引き戻しにはサイト増幅特性が評価された地点での地盤条件を用いること、また、フーリエ位相スペクトルの引き戻しには当該位相波が得られた地点での地盤条件を用いることが原則である。

なお、フーリエ振幅スペクトル及びフーリエ位相スペクトルの引き戻しはいずれも重複反射理論により行うこ

とができる。

図-41は地表面におけるフーリエ振幅スペクトル及びフーリエ位相スペクトルの工学的基盤面への引き戻しのイメージ図である。

$$|L1^{cb'}(f)| = \frac{|L1^{es'}(f)|}{|T_\alpha(f)|} \quad (26)$$

ここで

$|L1^{cb'}(f)|$ ：補正後のレベル1地震動（工学的基盤面）のフーリエ振幅スペクトル（ $\in \mathbb{R}$ ）

$|T_\alpha(f)|$ ：対象地点の伝達関数の振幅（ $\in \mathbb{R}$ ）

$$\angle L1^{cb'}(f) = \angle L1^{es'}(f) - \angle T_\alpha(f) \quad (27)$$

ここで

$\angle L1^{cb'}(f)$ ：補正後のレベル1地震動（工学的基盤面）のフーリエ位相スペクトル（ $\in \mathbb{R}$ ）

$\angle T_\alpha(f)$ ：位相波が得られた地点  $\alpha$  における伝達関数の位相（ $\in \mathbb{R}$ ）

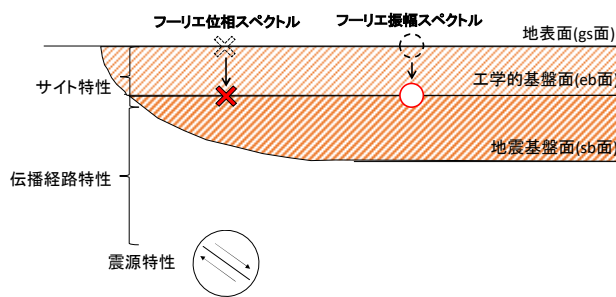


図-41 工学的基盤面への引き戻しのイメージ図

手順7：補正後レベル1地震動の算出

手順6により工学的基盤面に引き下げられた振幅スペクトル及び位相スペクトルを組み合わせフーリエ逆変換することにより、新たな振幅スペクトル及び位相スペクトルの情報を有する補正後の工学的基盤面におけるレベル1地震動の時刻歴波形を求めることができる。

図-42は、工学的基盤面に引き戻したフーリエ振幅スペクトル及びフーリエ位相スペクトルへの逆フーリエ変換

の適用による工学的基盤におけるレベル1地震動の算出  
 のイメージ図である。

$$\begin{aligned} \eta^{cb'}(t) &= \mathcal{F}^{-1} \left[ L1^{cb'}(f) \right] \\ &= \mathcal{F}^{-1} \left[ L1^{cb'}(f) e^{i\angle L1^{cb'}(f)} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

ここで

$|L1^{cb'}(f)|$  : 補正後のレベル1地震動（工学的基盤面）のフーリエ振幅スペクトル ( $\in \mathbb{R}$ )

$\eta^{cb'}(t)$  : 補正後のレベル1地震動（工学的基盤面）の時刻歴 ( $\in \mathbb{R}$ )

$L1^{cb'}(f)$  : 補正後のレベル1地震動（工学的基盤面）のフーリエ変換 ( $\in \mathbb{C}$ )

$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$  :  $(\cdot)$  の逆フーリエ変換

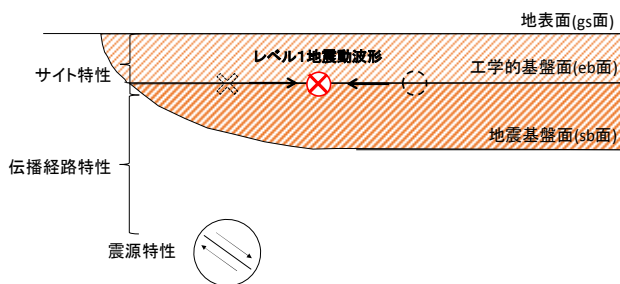


図-42 補正後のレベル1地震動の算出のイメージ図

全ケースに対し各評価手法により求められたレベル1地震動（地表面）の時刻歴波形とフーリエスペクトル図を表-10～表-13に示す。表中の左段が補正毎の時刻歴波形を表し、右段が補正毎のフーリエスペクトルと松補正によるフーリエスペクトルの比較図である。

表-10 釧路G レベル1地震動

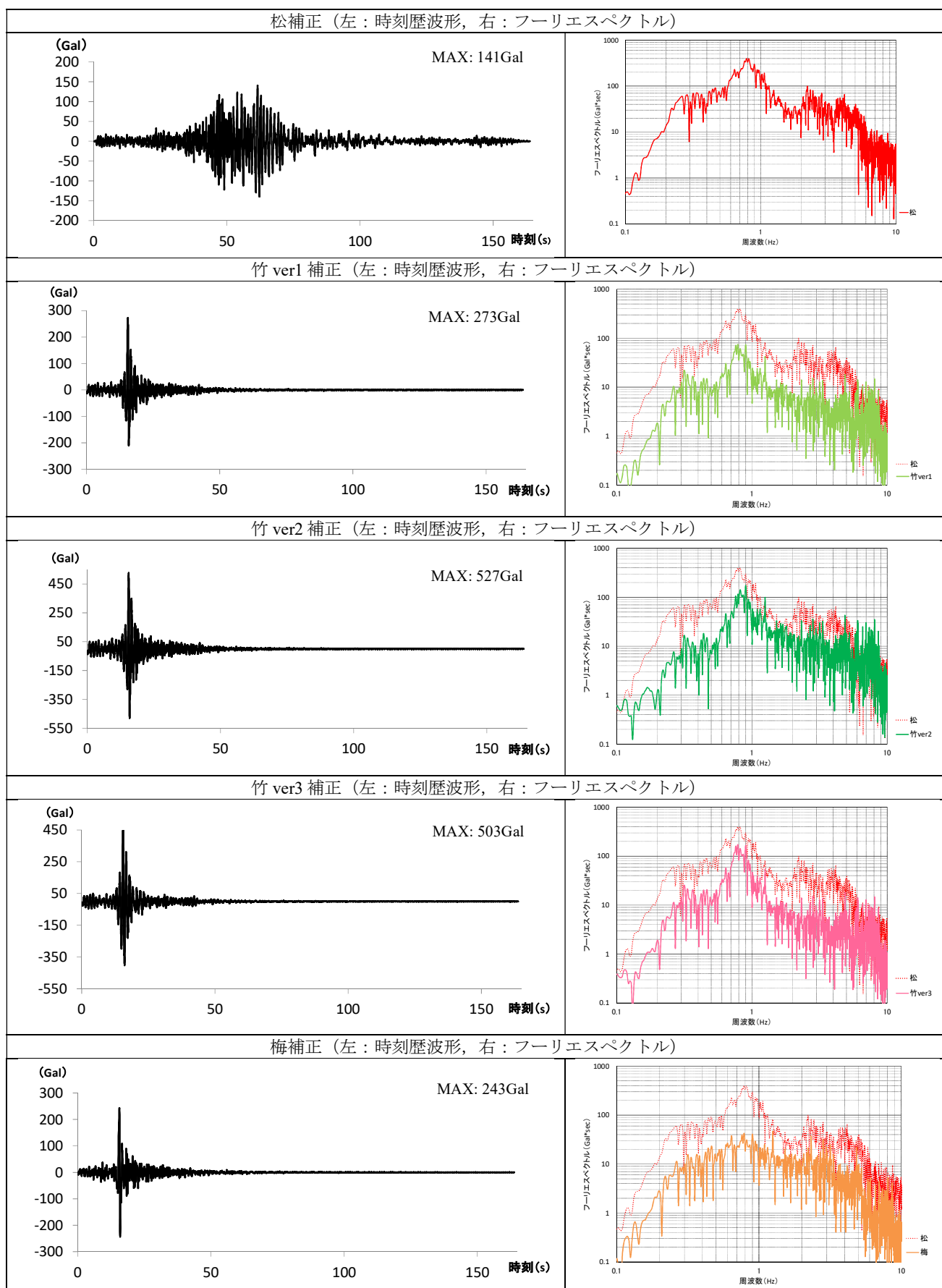


表-11 相馬G レベル1地震動

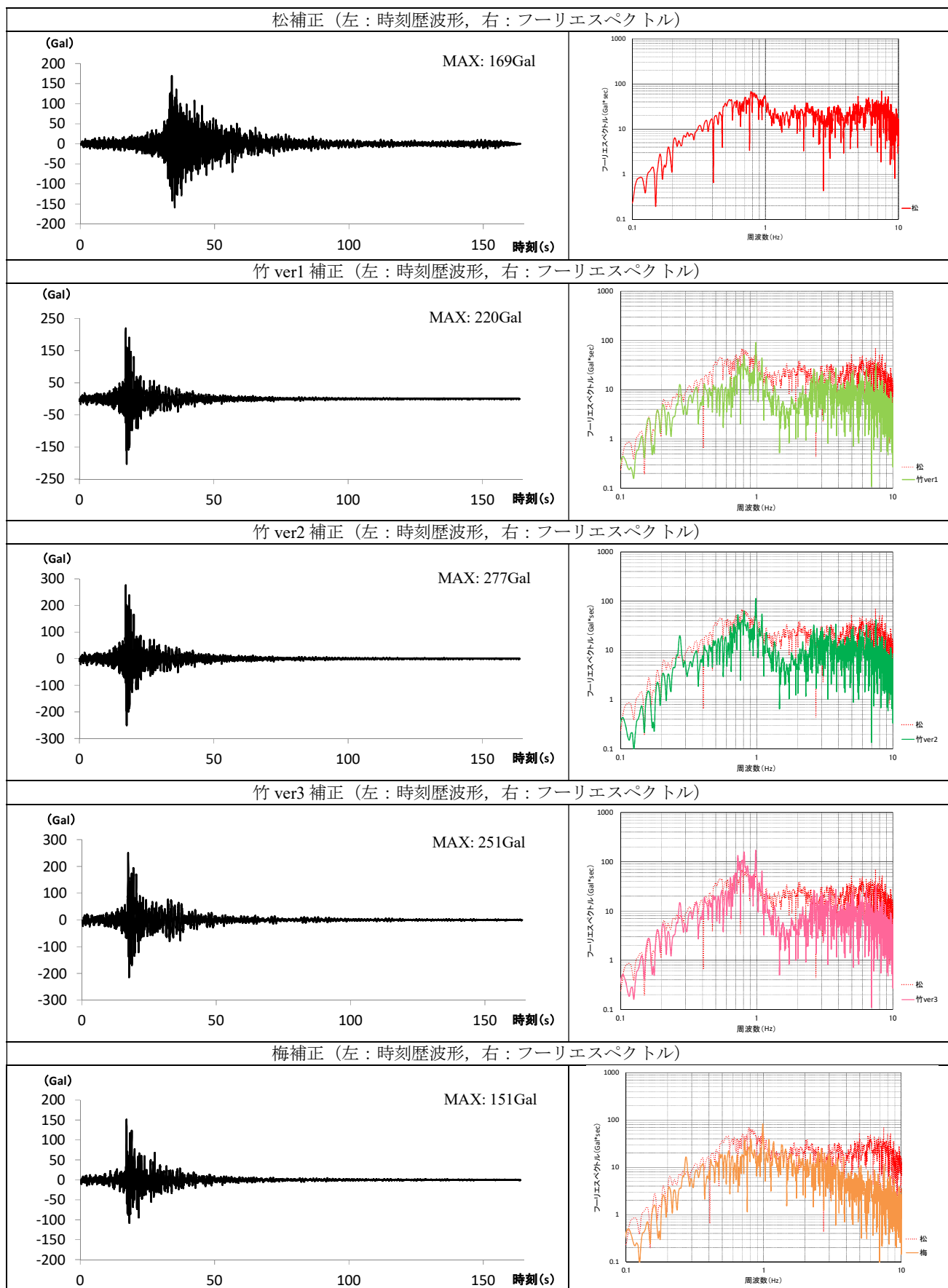


表-12 高知G レベル1地震動

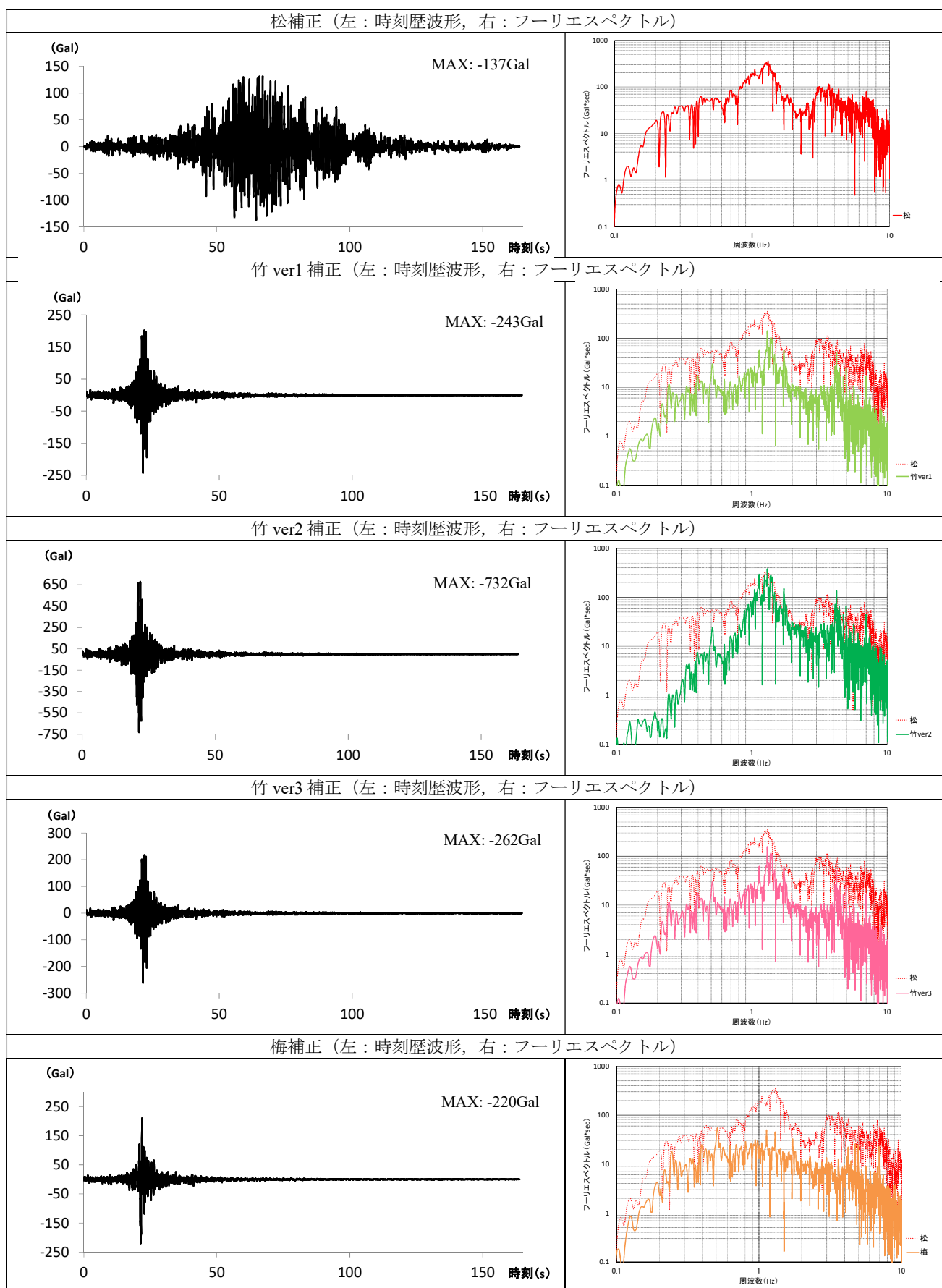
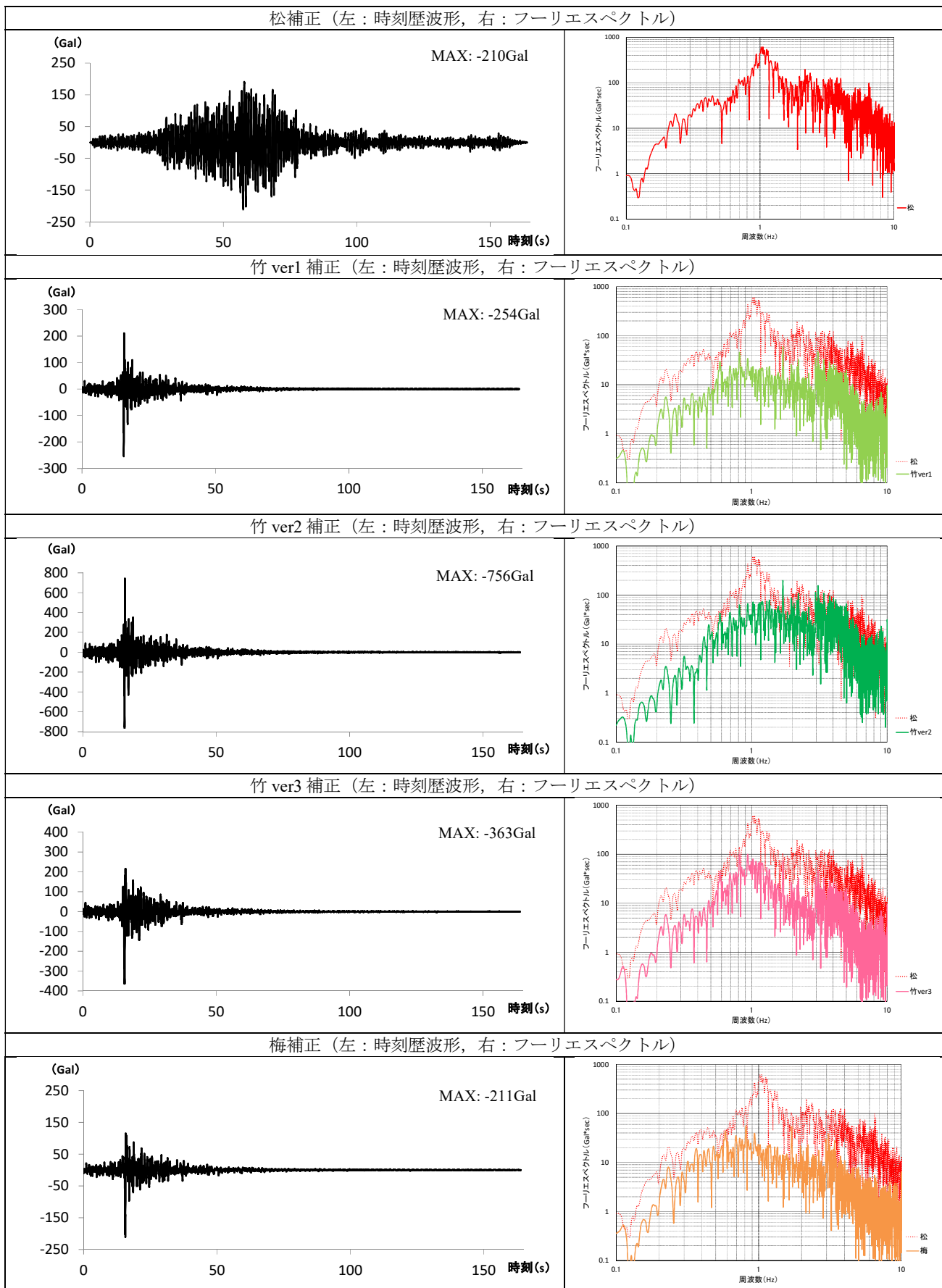


表-13 松山G レベル1地震動





## 6. まとめ

本資料は、サイト増幅特性を評価する複数の手法及びそれらの評価手法に基づくレベル 1 地震動の補正手法について、例題となる計算事例を示しつつ、今まで不足していた体系的な技術解説資料として取りまとめたものである。本資料の作成において目標としたことは、設計実務者がレベル 1 地震動の補正手法やその留意点についてより理解を深め、港湾施設を対象としたより良い耐震設計を行うことができるよう環境整備を行うことである。現時点では信頼性の低いサイト増幅特性の評価手法に基づいてレベル 1 地震動が設定されている港湾はまだ数多く存在する。これをより信頼性の高いレベル 1 地震動に置き換えていくことが港湾構造物のより合理的な設計のために必要であり、それに向けて本資料の成果が役立つことを期待したい。

## 謝辞

本検討では防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測記録を利用しており、関係機関の皆様に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 30 年 5 月
- 2) 竹信正寛，野津厚，宮田正史，佐藤裕司，浅井茂樹：確率論的時刻歴波形として規定される港湾におけるレベル 1 地震動の設定に関する包括的整理，国土技術政策総合研究所資料 No. 812
- 3) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料 No.1112，2005
- 4) 国土技術政策総合研究所ホームページ（最終観覧日 2019.3）  
<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>
- 5) 岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性，伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震 2，Vol.39，pp.579-593，1986
- 6) 澤田純男，盛川仁，土岐憲三，横山圭樹：強震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.915-920，1998.
- 7) 国土交通省港湾局 港湾地域強震観測  
<https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/>
- 8) 防災科学技術研究所 強震観測網 (K-NET.KiK-net)（最終観覧日 2019.3）  
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 9) 長尾毅，平松和也，平井俊之，野津厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集 第 22 巻，2006
- 10) Aki, K. : Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol.72, pp.1217-1231, 1967
- 11) 加藤研一：K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価，日本建築学会構造系論文集，第 543 号，pp.61-68，2001
- 12) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第 556 号，pp.15-24，2002
- 13) Petukhin, A., K. Irikura, S. Ohmi and T. Kagawa: Estimation of Q-values in the seismogenic and aseismogenic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, pp.1498-1515, 2003
- 14) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2, No.4, pp.18-27,1988
- 15) 野津厚，若井淳：東日本大震災で被災した港湾における地震動特性：港湾空港技術研究所資料 No.1244，2005
- 16) 福永勇介，野津厚，山田雅行，長坂陽介：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の統計的な推定法の提案，土木学会第 72 回年次学術講演会，2017
- 17) 港湾空港技術研究所のホームページ（最終観覧日 2019.3）  
[https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/siteamplification\\_jpn.html](https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/siteamplification_jpn.html)
- 18) 佐藤忠信：地震動位相差分の確率特性とその数理的解釈，土木学会論文集 A1, Vol.70, No.2, pp.295-305, 2014
- 19) 佐藤忠信，吉田郁政，大島義信：地震動位相のモデル化について，土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I\_273-I\_284, 2014

- 20) 佐藤忠信：確率過程として見た地震動位相の不可解性，  
第35回地震工学研究発表会，土木学会，2015
- 21) 野津厚：地震動位相の微分可能性に関する考察と群遅  
延時間の数値計算法の改良，土木学会論文集 A1，  
Vol.73, No.1, pp.187-194, 2017

付録 A 常時微動の観測手法及びデータ処理手法

1. はじめに

常時微動とは、常時の人間活動及び自然現象によって発生する通常では人が感じることのできないレベルの微小な振動である。

常時微動観測にはアレー観測と単点観測がある。このうち単点観測は、水平 2 成分と鉛直 1 成分の合計 3 成分を 1 地点において同時に観測するものであり、水平方向と鉛直方向のスペクトル比(H/V スペクトル)をとることにより、サイト増幅特性に関する情報を得ることができる。

本付録では、観測及び H/V スペクトル算出の手順と留意点について以下に簡潔に述べる。なお、以下の記述のほか、技術基準 p.1783~1784 の記述も参考になる。

2. 観測手法

手順 1

観測地点で微動計の方位を合わせる。NS 方向に合わせる場合と護岸法線方向に合わせる場合がある。NS 方向に合わせる場合で、微動計天板に N 方向を示す矢印が記載されている場合は、矢印を方位磁石が示す北方向に揃える。

手順 2

微動計脚部につまみがある場合にはこれを回し、水準器を用いて微動計の水平を確保する。

手順 3

観測状況を記録するための写真撮影を行い、ハンディ GPS 等により観測位置情報の取得を行う。

手順 4

11 分~15 分間の観測を実施し、観測開始及び終了時刻を記録する。

3. 常時微動 H/V スペクトルの算出

手順 1

観測地点 1 か所について 11~15 分間の観測記録からノイズの影響が少ないと判断される 163.84 秒の区間を 3 区間抽出する。

手順 2

手順 1 により抽出した各区間について 3 成分(微動計を NS 方向に合わせた場合は NS, EW, UD 成分)のフーリエ振幅スペクトルを計算しバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化を行う。

手順 3

平滑化を行ったフーリエ振幅スペクトルに対し、以下の式により、常時微動 H/V スペクトルを求める。

$$HV(f) := \sqrt{\frac{F_1(f)^2 + F_2(f)^2}{2 F_3(f)}}$$

ここで HV(f) : 常時微動 H/V スペクトル

$F_\alpha(f)$  : 常時微動観測記録の

$\alpha \in \{1(NS), 2(EW), 3(UD)\}$

成分のフーリエ振幅スペクトル

4. 留意点

- ・常時微動観測は通常では感じない非常に微細な振動を観測する手法であるため、観測地点周辺で重機などの強いノイズがある場合は時間帯を変えるなどして観測を行う。
- ・ここでの常時微動観測は地盤の特性を捉えることが目的であるため、栈橋上や堤体上など建造物の影響を受ける場所は避ける。同じ理由により、地下に空洞や埋設物が存在する場合は避ける。
- ・護岸の近傍で観測を行う場合、特に法線直交成分が水面変動の影響を受けることがあるため、水深の 3 倍程度陸側で観測することが望ましい。また、これに加えて、H/V スペクトルの算定に法線平行成分のみを用いると地盤特性を反映した H/V スペクトルが求まる場合がある(技術基準 p.1784)。
- ・極端に振動源が少ない場合も正確な観測記録が得られないため、常時の人間活動の少ない地域では夜間の観測を避けることが望ましい。
- ・観測器はアスファルトやコンクリートの上に置いて観測を行うことが望ましいが、やむを得ず未舗装の場所で観測を行う場合には、地面を踏み固め平らにならして観測を行うか、鉄板を敷いてその上で観測を行う。
- ・機器によっては 1 分間に 1 回程度の割合でデータをメモリに記録するタイプのものがある。その場合、記録中に機器の電源を切るとは避ける。メモリにアクセス中であることをランプの点滅によってユーザーに知らせる機能を有している機器もある。

付録B サイト増幅特性の評価事例

付表B-1 下関港のある地区におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名	地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	下関港	15.6km	10/05/13/20:01, 10/07/14/20:56, 10/12/26/20:25
参照地点	YMG011		

<p>対象地点</p> <p>参照地点</p> <p>評価地点位置図</p>	<p>下関港 サイト増幅特性（松）</p>	<p>YMG011 サイト増幅特性</p>
	<p>下関港 H/V スペクトル</p>	<p>YMG011 H/V スペクトル</p>

評価結果

竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、竹 ver1～竹 ver3 による結果のうち、本対象地点では竹 ver3 による結果が松による結果に最も近い値を与えている。


評価一覧

<p>下関港</p> <p>サイト増幅特性 <math>G_t(f)</math></p> <p>周波数 (Hz)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>G_t^{pine}(f)</math></li> <li><math>G_t^{ham}(f)</math></li> <li><math>G_t^{neo-ham}(f)</math></li> <li><math>G_t^{C,B}(f)</math></li> <li><math>G_t^{plum}(f)</math></li> </ul>	<p>下関港 サイト増幅特性（竹 ver1）</p>	<p>下関港 サイト増幅特性（竹 ver2）</p>
	<p>下関港 サイト増幅特性（竹 ver3）</p>	<p>下関港 サイト増幅特性（梅）</p>

付表 B-2 AIC014 におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名		地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	AIC014	34,8263N 137,2200E	11.3km	参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	AICH12	33,5655N 130,5535E		

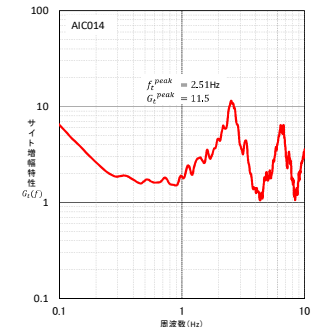
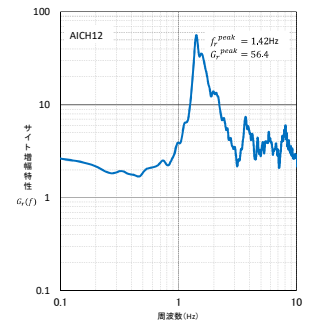
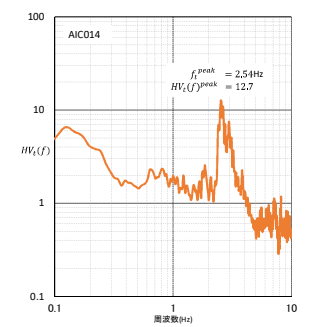
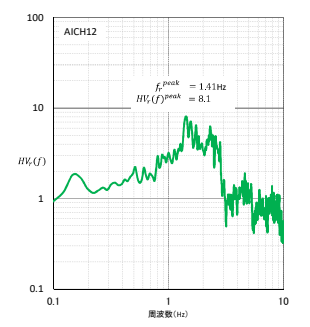
  



対象地点

参照地点

評価地点位置図

<p>AIC014 サイト増幅特性（松）</p> 	<p>AICH12 サイト増幅特性</p> 
<p>AIC014 H/V スペクトル</p> 	<p>AICH12 H/V スペクトル</p> 

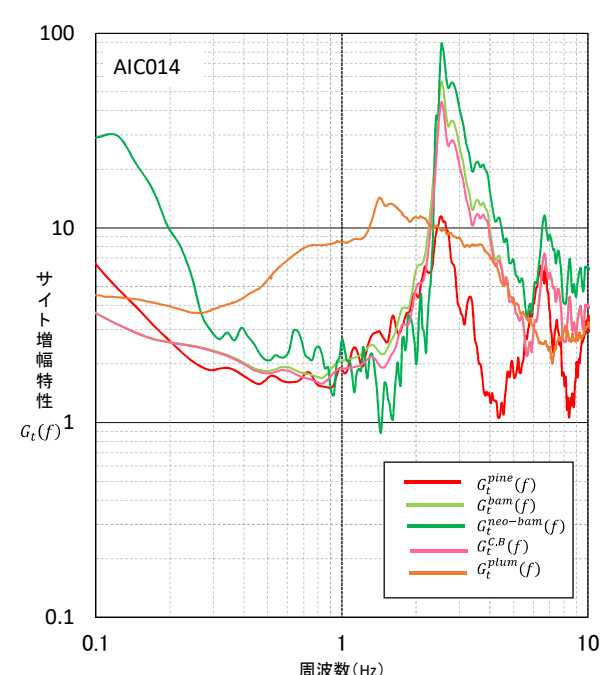
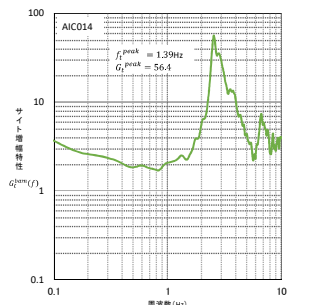
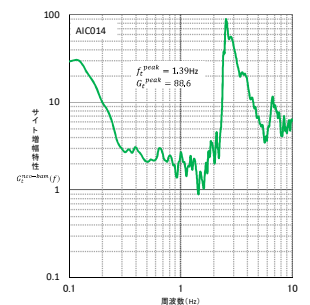
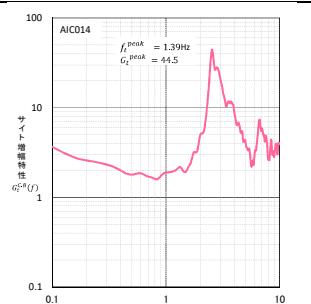
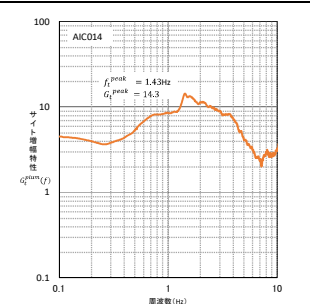
  

**評価結果**

竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、本対象地点では竹 ver1～竹 ver3 による結果はいずれも松による結果に対して過大評価となっているが、別な見方をすれば安全側の結果を与えているとも言える。


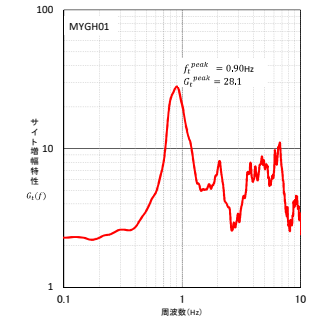
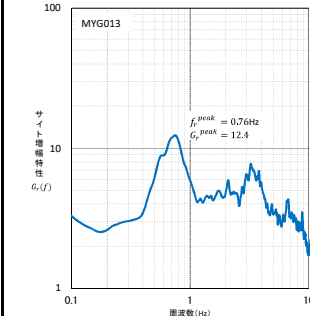
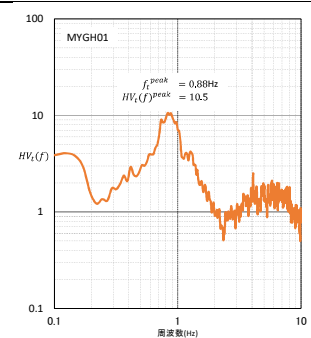
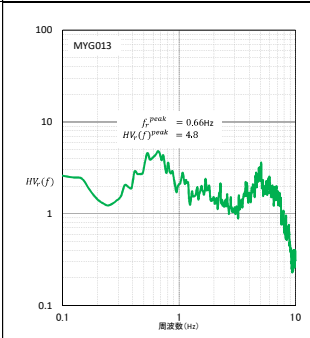
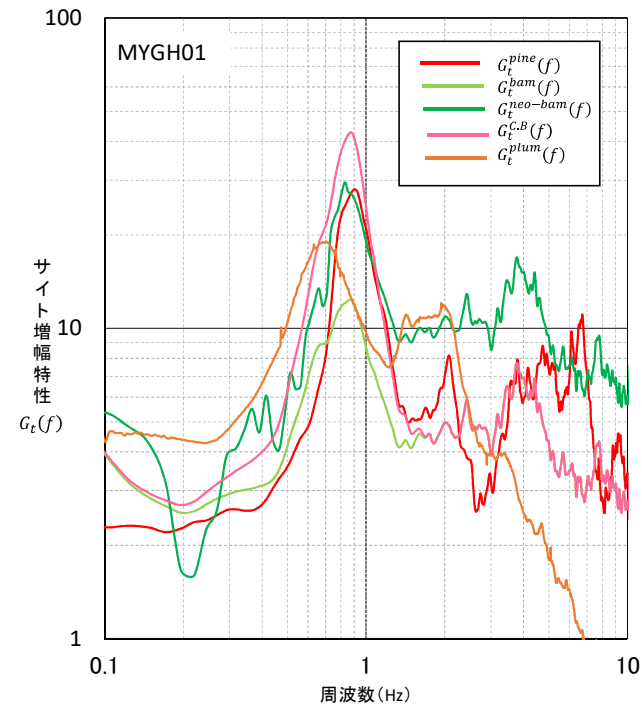
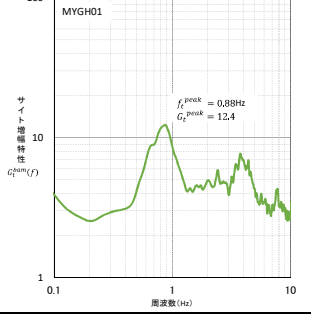
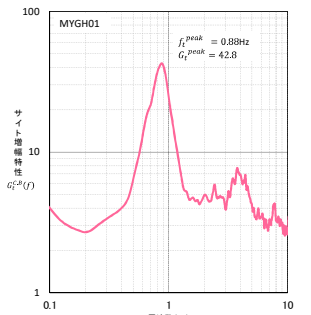
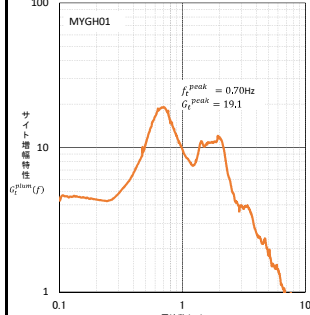
**評価一覧**

	<p>AIC014 サイト増幅特性（竹 ver1）</p>	
	<p>AIC014 サイト増幅特性（竹 ver2）</p>	
	<p>AIC014 サイト増幅特性（竹 ver3）</p>	
	<p>AIC014 サイト増幅特性（梅）</p>	

付表 B-3 MYGH01 におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名		地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	MYGH01	38,2453N 141,0004E	6.6km	参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	MYG013	38,2663N 140,9293E		

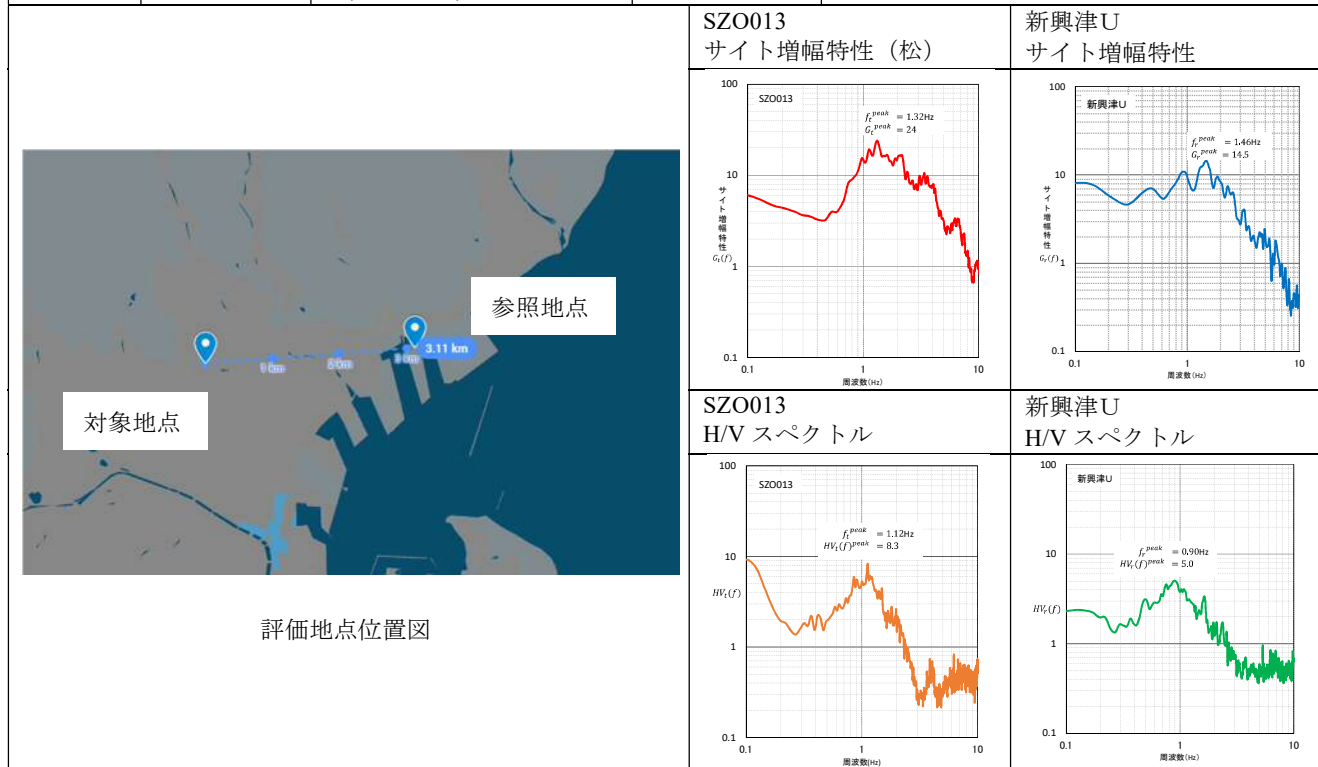
  

 <p>評価地点位置図</p>	<p>MYGH01 サイト増幅特性（松）</p> 	<p>MYG013 サイト増幅特性</p> 
	<p>MYGH01 H/V スペクトル</p> 	<p>MYG013 H/V スペクトル</p> 
	<p>評価結果</p> <p>竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、竹 ver1～竹 ver3 による結果のうち、本対象地点では竹 ver2 による結果が松による結果に最も近い値を与えている。</p>	
	<p>評価一覧</p> 	<p>MYGH01 サイト増幅特性（竹 ver1）</p> 
	<p>MYGH01 サイト増幅特性（竹 ver3）</p> 	<p>MYGH01 サイト増幅特性（梅）</p> 



付表B-4 SZO013におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

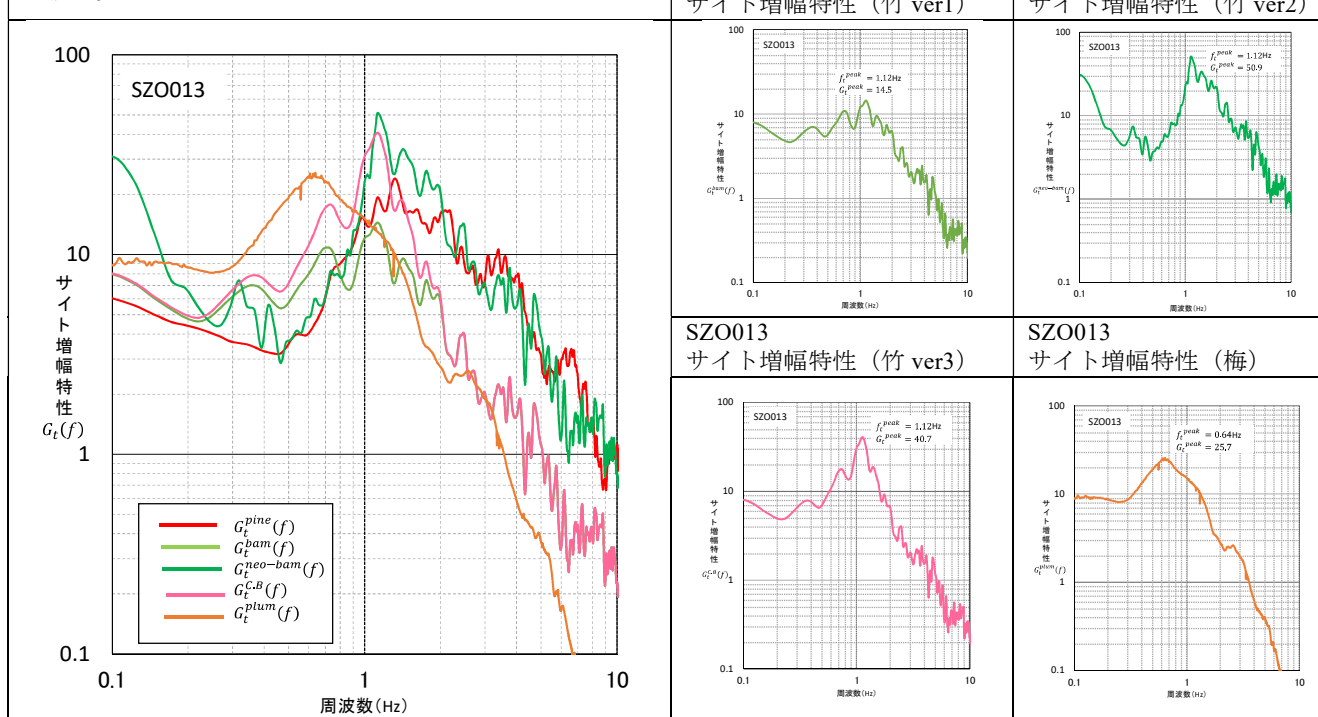
地点名	地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	SZO013	35,0410N 138,4760E	参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	新興津U	35,043N 138,510E	



評価結果

竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果に近いものとなっている。ピーク高さに関しては、本対象地点では竹 ver1 による結果は松による結果に対して過小評価、竹 ver2, 竹 ver3 による結果は松による結果に対して過大評価となっている。

評価一覧





付表 B-5 WKY001 におけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名		地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	WKY001	34,2288N 135,1694E	2.6 km	参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	和歌山G	34,217N 135,145E		

<p>対象地点</p> <p>和歌山市</p> <p>2.6 km</p> <p>2.4 km</p> <p>1 km</p> <p>参照地点</p> <p>愛宕山</p> <p>桜山</p> <p>評価地点位置図</p>	<p>WKY001 サイト増幅特性（松）</p>	<p>和歌山G サイト増幅特性</p>	
	<p>WKY001 H/V スペクトル</p>	<p>和歌山G H/V スペクトル</p>	
	<p>評価結果</p> <p>竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、本対象地点では竹 ver1～竹 ver3 による結果はいずれも松による結果に対して過大評価となっているが、別な見方をすれば安全側の結果を与えているとも言える。</p>		
	<p>評価一覧</p>		


  

<p>WKY001 サイト増幅特性（竹 ver1）</p>	<p>WKY001 サイト増幅特性（竹 ver2）</p>
<p>WKY001 サイト増幅特性（竹 ver3）</p>	<p>WKY001 サイト増幅特性（梅）</p>

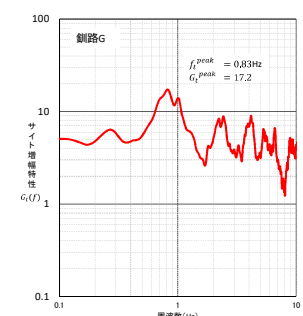
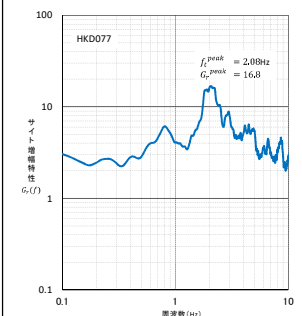
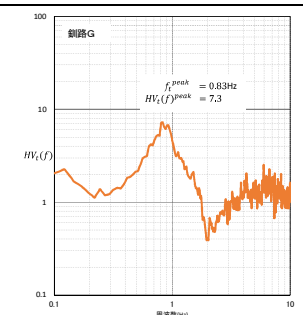
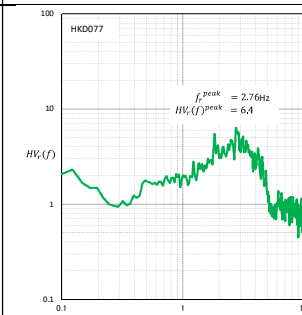
付表B-6 釧路Gにおけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名		地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	釧路G	42,999N 144,355E	2.6 km	参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	HKD077	42,9845N 144,3824E		



評価地点位置図

<p>釧路G サイト増幅特性（松）</p> 	<p>HKD077 サイト増幅特性</p> 
<p>釧路G H/V スペクトル</p> 	<p>HKD077 H/V スペクトル</p> 

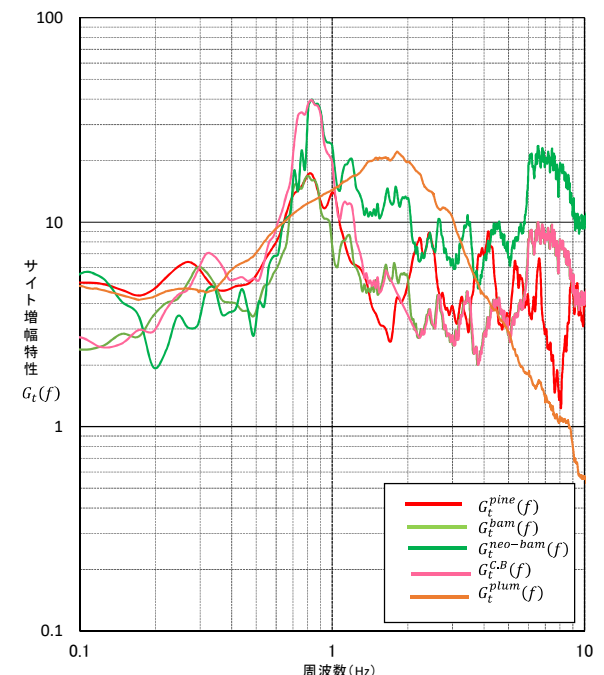
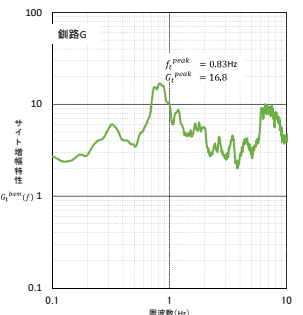
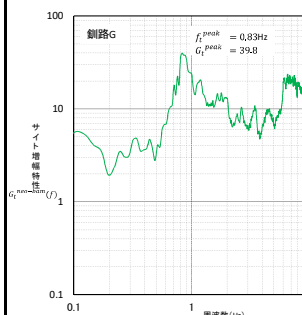
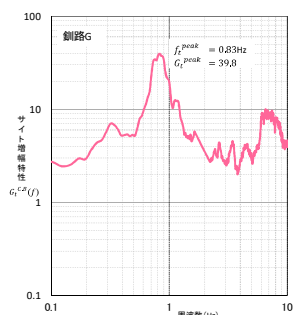
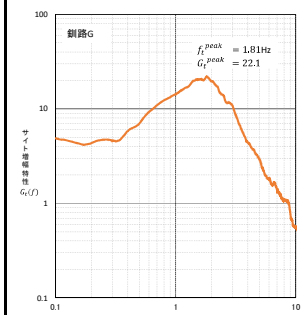
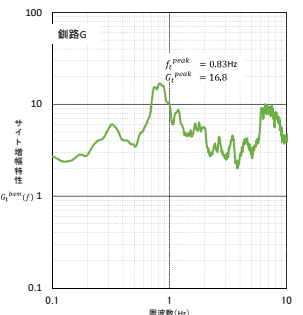
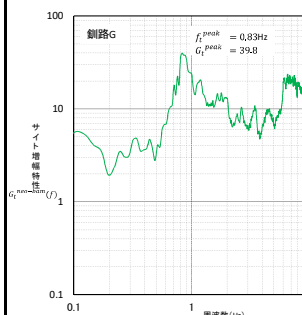
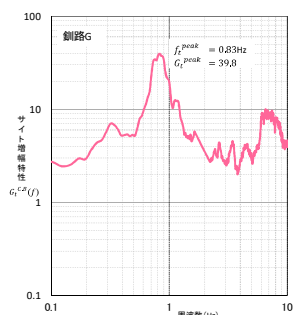
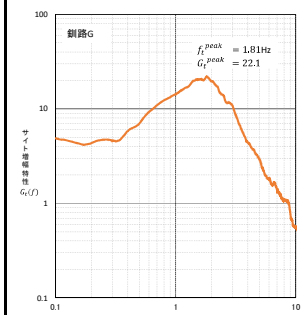
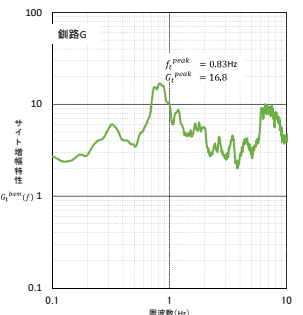
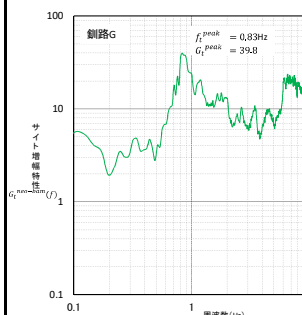
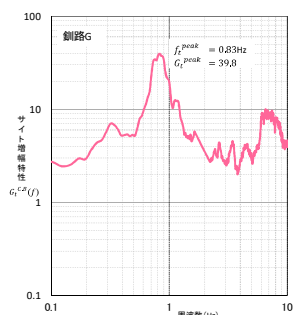
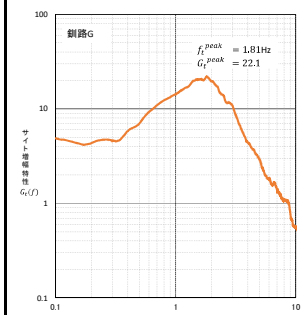
  

**評価結果**

竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、竹 ver1～竹 ver3 による結果のうち、本対象地点では竹 ver1 による結果が松による結果に最も近い値を与えている。

**評価一覧**

	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td> <p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver1）</p>  </td> <td> <p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver2）</p>  </td> </tr> <tr> <td> <p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver3）</p>  </td> <td> <p>釧路G サイト増幅特性（梅）</p>  </td> </tr> </table>	<p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver1）</p> 	<p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver2）</p> 	<p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver3）</p> 	<p>釧路G サイト増幅特性（梅）</p> 
<p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver1）</p> 	<p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver2）</p> 				
<p>釧路G サイト増幅特性（竹 ver3）</p> 	<p>釧路G サイト増幅特性（梅）</p> 				

付表B-7 相馬Gにおけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名		地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	相馬G	37,831N 140,960E	5.4 km	参考文献4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	FKS001	37,7949N 140,9196E		

<p>対象地点</p> <p>参照地点</p> <p>評価地点位置図</p>	<p>相馬G サイト増幅特性（松）</p>	<p>FKS001 サイト増幅特性</p>		
	<p>相馬G H/V スペクトル</p>	<p>FKS001 H/V スペクトル</p>		
	<p>評価結果</p> <p>竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、竹 ver1～竹 ver3 による結果のうち、本対象地点では竹 ver1 による結果が松による結果に最も近い値を与えている。</p>			
	<p>評価一覧</p>	<p>相馬G サイト増幅特性（竹 ver1）</p>	<p>相馬G サイト増幅特性（竹 ver2）</p>	
	<p>相馬G サイト増幅特性（竹 ver3）</p>	<p>相馬G サイト増幅特性（梅）</p>		

付表B-8 高知Gにおけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名		地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	高知G	33,508N 133,567E	7.0 km	参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	KOC007	33,5611N 133,5271E		

評価地点位置図

<p>高知G サイト増幅特性（松）</p>	<p>KOC007 サイト増幅特性</p>
<p>高知G H/V スペクトル</p>	<p>KOC007 H/V スペクトル</p>

評価結果

竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、竹 ver1～竹 ver3 による結果のうち、本対象地点では竹 ver1 と竹 ver3 による結果が松による結果に極めて近い値を与えている。


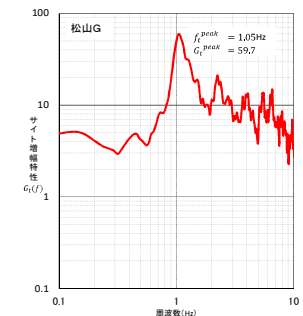
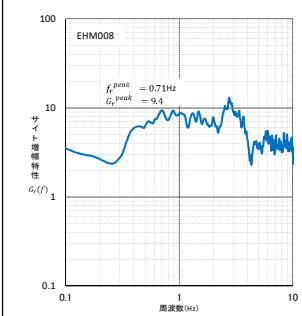
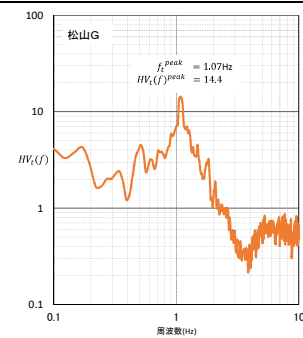
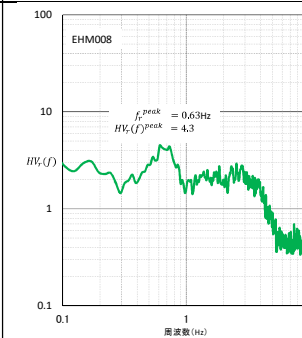
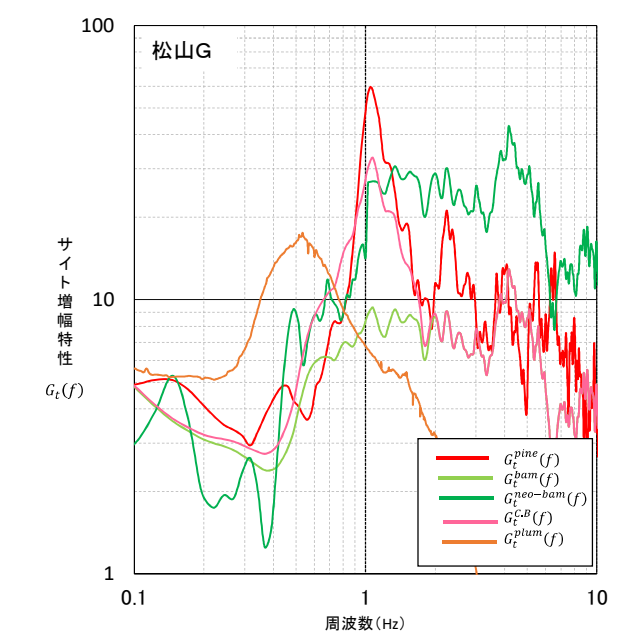
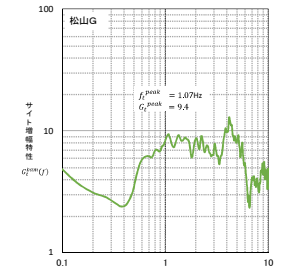
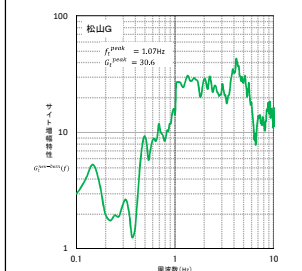
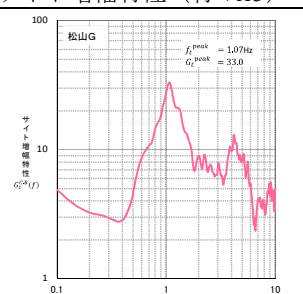
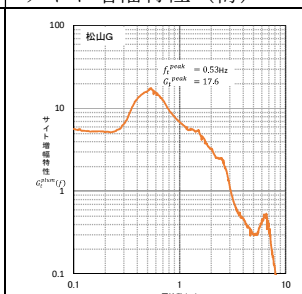
評価一覧	高知G サイト増幅特性（竹 ver1）	高知G サイト増幅特性（竹 ver2）
<p>高知G</p>	<p>高知G サイト増幅特性（竹 ver1）</p>	<p>高知G サイト増幅特性（竹 ver2）</p>
	<p>高知G サイト増幅特性（竹 ver3）</p>	<p>高知G サイト増幅特性（梅）</p>



付表B-9 松山Gにおけるサイト増幅特性（地震基盤面から地表面）の評価結果

地点名	地点座標	地点間距離	松評価に用いた観測記録
対象地点	松山G	33,858N 132,712E	4.5 km 参考文献 4)より評価済であるため、松評価に用いた観測記録無し
参照地点	EHM008	33,8198N 132,7282E	

 <p>対象地点</p> <p>参照地点</p> <p>4.5 km</p> <p>評価地点位置図</p>	<p>松山G サイト増幅特性（松）</p> 	<p>EHM008 サイト増幅特性</p> 	
	<p>松山G H/V スペクトル</p> 	<p>EHM008 H/V スペクトル</p> 	
	<p>評価結果</p> <p>竹 ver1～竹 ver3 による評価結果はピーク周波数という点で松による評価結果とよく整合している。ピーク高さに関しては、竹 ver1～竹 ver3 による結果のうち、本対象地点では竹 ver3 による結果が松による結果に極めて近い値を与えている。</p>		
	<p>評価一覧</p> 	<p>松山G サイト増幅特性（竹 ver1）</p> 	<p>松山G サイト増幅特性（竹 ver2）</p> 
	<p>松山G サイト増幅特性（竹 ver3）</p> 	<p>松山G サイト増幅特性（梅）</p> 	

付録 C 式の導出

スペクトルインバージョンのモデル式は、地震観測記録毎に適用した場合次のように表される。但し、式(1)中の4つの記号は全て周波数の関数であるが、簡単のため独立変数の周波数を省略して表記している。

$$\left|S_{\alpha}^{(n)}\right| \left|P_{\alpha}^{(n)}\right| \left|G_{\alpha}^{(n)}\right| = \left|O_{\alpha}^{(n)}\right| \quad (1)$$

ここに

$n$ : 地震観測記録に付した番号 ( $\in \{1, \dots, N\}$ )

$\left|S_{\alpha}^{(n)}\right|$ : 地点  $\alpha$  ( $\in \{R(\text{参照地点}), T(\text{対象地点})\}$ ) における  $n$  番目の地震観測記録に関する震源特性

$\left|P_{\alpha}^{(n)}\right|$ : 地点  $\alpha$  ( $\in \{R(\text{参照地点}), T(\text{対象地点})\}$ ) における  $n$  番目の地震観測記録に関する伝播経路特性

$\left|G_{\alpha}^{(n)}\right|$ : 地点  $\alpha$  ( $\in \{R(\text{参照地点}), T(\text{対象地点})\}$ ) における  $n$  番目の地震観測記録に関するサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面)

$\left|O_{\alpha}^{(n)}\right|$ : 地点  $\alpha$  ( $\in \{R(\text{参照地点}), T(\text{対象地点})\}$ ) における  $n$  番目の地震観測記録 (地表面) のフーリエ振幅スペクトル  
なお、式(1)は汎用的な表現としており、一般には異なる  $n$  に対し参照地点は異なる地点である場合がある。一方、対象地点は  $n$  によらず同一である。

ここで、式(1)で用いている記号について補足しておく。

$\left|S_{\alpha}^{(n)}\right|$  は地点  $\alpha$  で観測された  $n$  番目の地震観測記録の基となった地震の震源特性を意味する。地震が異なれば震源特性は異なるので、震源特性は地震観測記録毎に異なる。

$\left|P_{\alpha}^{(n)}\right|$  は地点  $\alpha$  で観測された  $n$  番目の地震観測記録の基となった地震波が震源から地震基盤面まで伝播する際に通過した媒質に関する伝播経路特性を意味する。地震観測地点が同一でも震源が異なれば地震動の伝播経路が異なるので、伝播経路特性は地震観測記録毎に異なる。 $\left|G_{\alpha}^{(n)}\right|$  は地点  $\alpha$  で観測された  $n$  番目の地震観測記録の基となった地震波が伝播する際に通過した堆積層 (地震基盤面から地表面までの区間の地盤) に関するサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面) を意味する。震源が同一であっても地震観測地点が異なれば地震波が通過する堆積層は異なるので、サイ

ト増幅特性 (地震基盤面～地表面) は異なる。一方、震源が異なり地震観測地点が同一である場合、一般には堆積層への地震波の入射角の違い等によりサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面) が違ってくることはあり得るものの、既往の解析では地震観測地点が同じであればサイト増幅特性は同じとしている場合が多い。以下においてもこの例に倣い地震観測地点が同じであればサイト増幅特性は同じと仮定する。対象地点は  $n$  によらず同一であることを想定しているため、対象地点のサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面) は地震観測記録によらず同一と考える。

(1) 参照地点が単一であり、かつ、全ての地震観測記録に対し震源特性と伝播経路特性が参照地点と対象地点で共通とみなせる場合 (本文式(7)の導出)

これは以下3つの条件を仮定した場合が該当する。

(仮定1) 単一の参照地点を想定しているため、参照地点のサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面) は地震観測記録によらず同一となる。

$$\forall n \left( \left|G_R^{(n)}\right| = \left|G_R\right| \right) \quad (2)$$

ここに

$\left|G_R\right|$ : 単一の参照地点におけるサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面)

(仮定2) 震源から見て両地震観測点 (参照地点と対象地点) が同一方向にあるため、震源特性が地震観測記録毎に両地震観測点で共通とみなせる。

$$\forall n \left( \left|S_R^{(n)}\right| = \left|S_T^{(n)}\right| \right) \quad (3)$$

(仮定3) 震源が両地震観測点 (参照地点と対象地点) から十分遠方にあるため、伝播経路特性が地震観測記録毎に両地震観測点で共通とみなせる。

$$\forall n \left( \left|P_R^{(n)}\right| = \left|P_T^{(n)}\right| \right) \quad (4)$$

これらの仮定を基に、対象地点のサイト増幅特性 (地震基盤面～地表面) を式(1)から導出すると以下のようになる。



$$\begin{aligned}
 & \frac{|S_T^{(n)}| |P_T^{(n)}| |G_T|}{|S_R^{(n)}| |P_R^{(n)}| |G_R|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \\
 & \Leftrightarrow \frac{|G_T|}{|G_R|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \quad (\because \text{式(2)~(4)}) \\
 & \Leftrightarrow \left( \prod_{n=1}^N \frac{|G_T|}{|G_R|} \right)^{\frac{1}{N}} = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (5) \\
 & \Leftrightarrow |G_T| = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} |G_R|
 \end{aligned}$$

(2) 参照地点が単一であり、かつ、全ての地震観測記録に対し震源特性が参照地点と対象地点で共通とみなせるが、一部の地震観測記録に対し伝播経路特性が参照地点と対象地点で共通とみなせない場合（本文式(11)の導出）

これは以下3つの条件を仮定した場合が該当する。

（仮定1）単一の参照地点を想定しているため、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面～地表面）は地震観測記録によらず同一となる（式(2)）。

（仮定2）震源から見て両地震観測点（参照地点と対象地点）が同一方向にあるため、震源特性が地震観測記録毎に両地震観測点で共通とみなせる（式(3)）。

（仮定3）一部の地震観測記録に対し震源が両地震観測点（参照地点と対象地点）の何れかから十分遠方でないため、伝播経路特性が両地震観測点で異なる。

$$\exists n \left( |P_R^{(n)}| \neq |P_T^{(n)}| \right) \quad (6)$$

これらの仮定を基に、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面～地表面）を式(1)から導出すると以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{|S_T^{(n)}| |P_T^{(n)}| |G_T|}{|S_R^{(n)}| |P_R^{(n)}| |G_R|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \\
 & \Leftrightarrow \frac{|P_T^{(n)}| |G_T|}{|P_R^{(n)}| |G_R|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \quad (\because \text{式(2), (3), (6)}) \\
 & \Leftrightarrow \left( \prod_{n=1}^N \frac{|G_T|}{|G_R|} \right)^{\frac{1}{N}} = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \frac{|P_R^{(n)}|}{|P_T^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (7) \\
 & \Leftrightarrow |G_T| = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \frac{|P_R^{(n)}|}{|P_T^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} |G_R|
 \end{aligned}$$

(3) 複数の参照地点が混在し、かつ、全ての地震観測記録に対し震源特性と伝播経路特性が参照地点と対象地点で共通とみなせる場合

これは以下3つの条件を仮定した場合が該当する。

（仮定1）単一の参照地点と対象地点における同時観測記録の個数が不十分で、複数の参照地点を想定しているため、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面～地表面）は地震観測記録によらず同一とはみなせない。

$$\begin{aligned}
 & \exists m, n \left[ \left( |G_R^{(m)}| \neq |G_R^{(n)}| \right) \wedge (m \neq n) \right] \\
 & \text{(where } m, n \in \{1, \dots, N\} \text{)} \quad (8)
 \end{aligned}$$

（仮定2）震源から見て両地震観測点（それぞれのペアにおける参照地点と対象地点）が同一方向にあるため、震源特性が地震観測記録毎に両地震観測点で共通とみなせる（式(3)）。

（仮定3）震源が両地震観測点（それぞれのペアにおける参照地点と対象地点）から十分遠方にあるため、伝播経路特性が地震観測記録毎に両地震観測点で共通とみなせる（式(4)）。

これらの仮定を基に、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面～地表面）を式(1)から導出すると以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{|S_T^{(n)}| |P_T^{(n)}| |G_T|}{|S_R^{(n)}| |P_R^{(n)}| |G_R|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \\
 & \Leftrightarrow \frac{|G_T|}{|G_R|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \quad (\because \text{式(3), (4), (8)}) \\
 & \Leftrightarrow \left( \prod_{n=1}^N \frac{|G_T|}{|G_R|} \right)^{\frac{1}{N}} = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (9) \\
 & \Leftrightarrow |G_T| = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} |G_R|
 \end{aligned}$$

(4) 複数の参照地点が混在し、かつ、全ての地震観測記録に対し震源特性が参照地点と対象地点で共通とみなせるが、一部の地震観測記録に対し伝播経路特性が参照地点と対象地点で共通とみなせない場合

これは以下3つの条件を仮定した場合が該当する。

（仮定1）単一の参照地点と対象地点における同時観測記録の個数が不十分で、複数の参照地点を想定しているため、参照地点のサイト増幅特性（地震基盤面～地表面）は地震観測記録によらず同一とはみなせない（式(8)）。

(仮定 2) 震源から見て両地震観測点（それぞれのペアにおける参照地点と対象地点）が同一方向にあるため、震源特性が地震観測記録毎に両地震観測点で共通とみなせる（式(3)）。

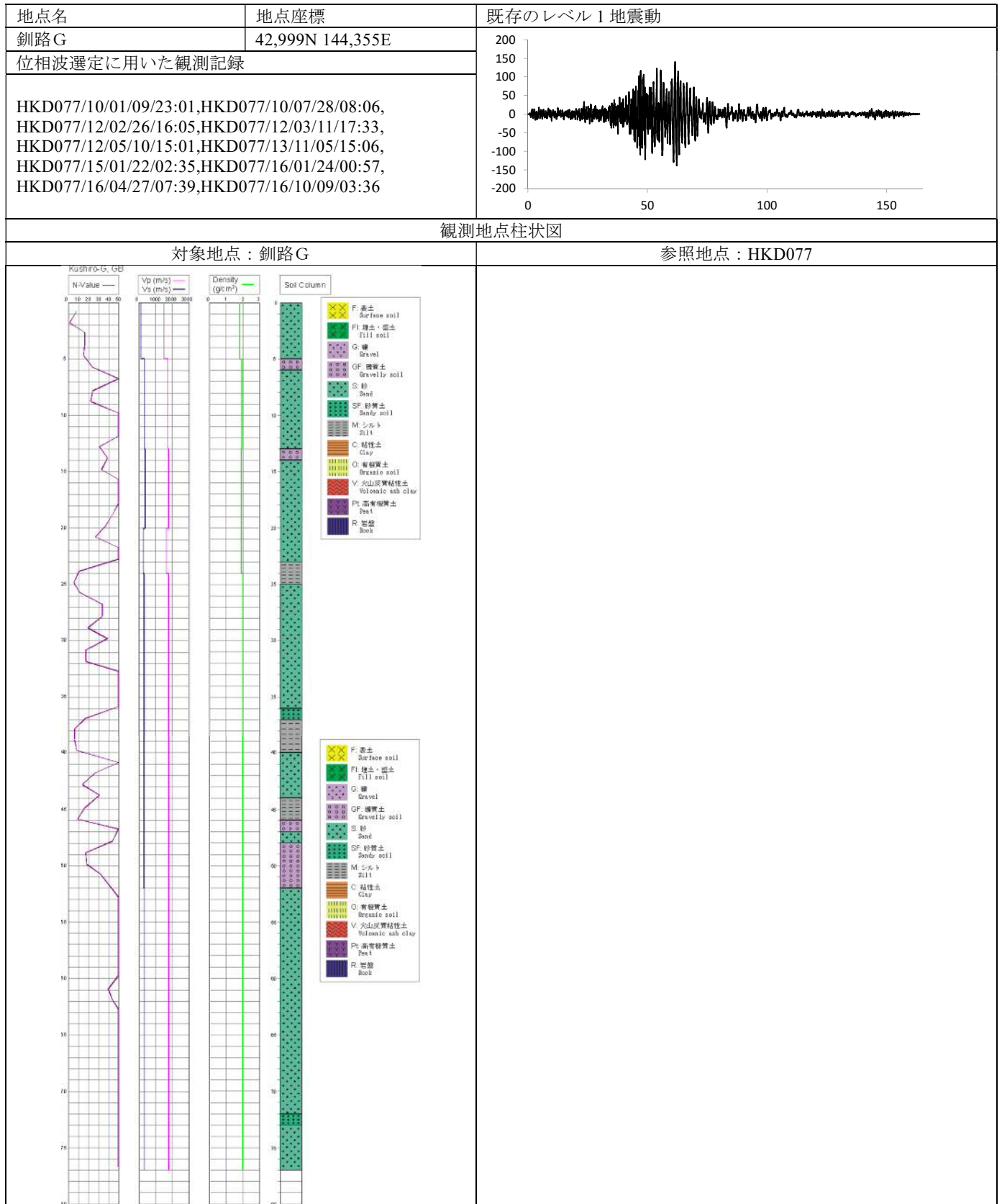
(仮定 3) 一部の地震観測記録に対し震源が両地震観測点（参照地点と対象地点）の何れかから十分遠方にならないため、伝播経路特性が両地震観測点で異なる（式(6)）。

これらの仮定を基に、対象地点のサイト増幅特性（地震基盤面～地表面）を式(1)から導出すると以下ようになる。

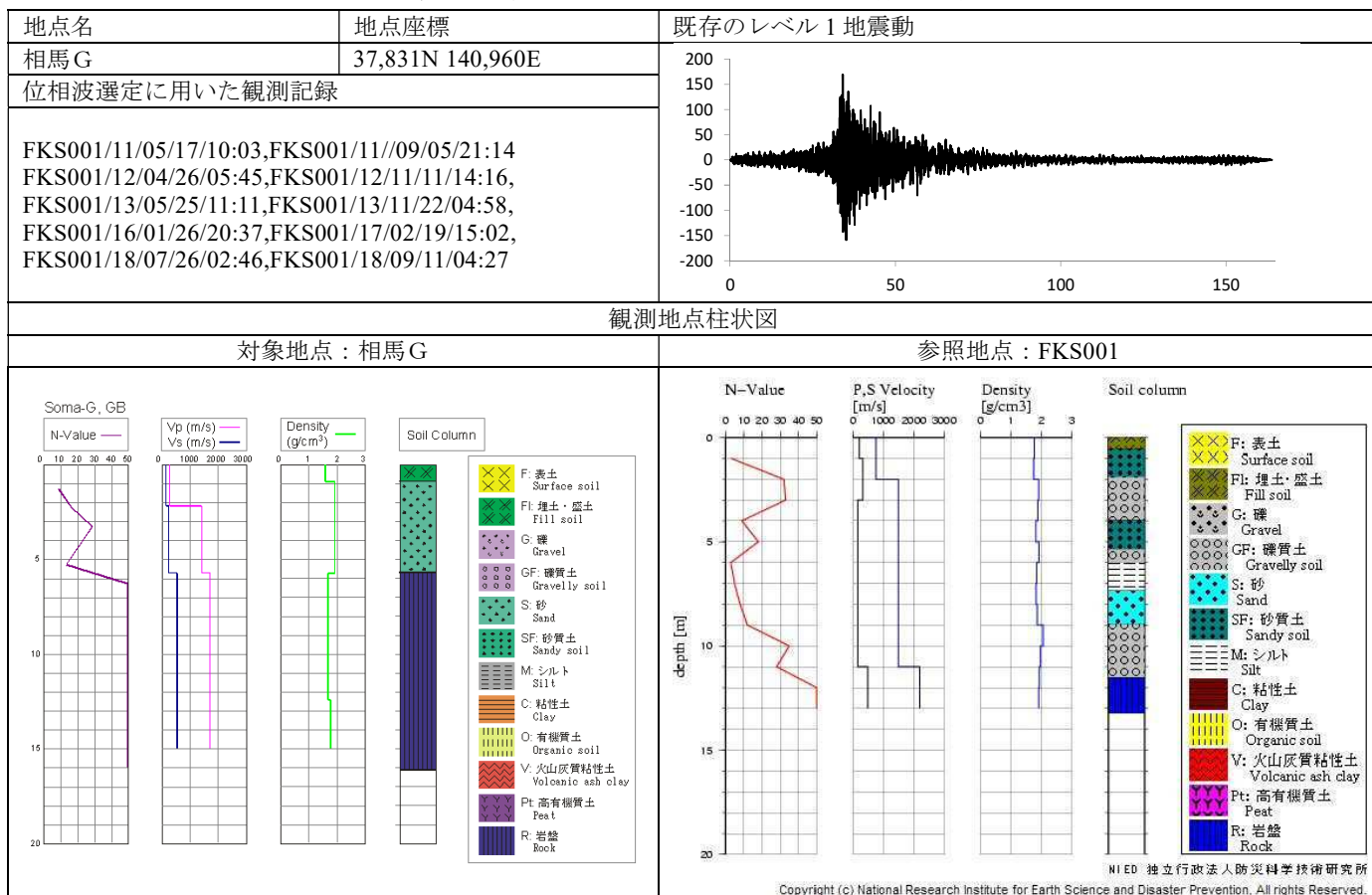
$$\begin{aligned}
 & \frac{|S_T^{(n)}| |P_T^{(n)}| |G_T|}{|S_R^{(n)}| |P_R^{(n)}| |G_R^{(n)}|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \\
 & \Leftrightarrow \frac{|P_T^{(n)}| |G_T|}{|P_R^{(n)}| |G_R^{(n)}|} = \frac{|O_T^{(n)}|}{|O_R^{(n)}|} \quad (\because \text{式(3), (6), (8)}) \\
 & \Leftrightarrow \left( \prod_{n=1}^N \frac{|G_T|}{|G_R^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}| |P_R^{(n)}|}{|O_R^{(n)}| |P_T^{(n)}|} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (10) \\
 & \Leftrightarrow |G_T| = \left( \prod_{n=1}^N \frac{|O_T^{(n)}| |P_R^{(n)}|}{|O_R^{(n)}| |P_T^{(n)}|} |G_R^{(n)}| \right)^{\frac{1}{N}}
 \end{aligned}$$

付録D レベル1地震動の補正の詳細

付表D-1 釧路Gにおけるレベル1地震動の補正の詳細

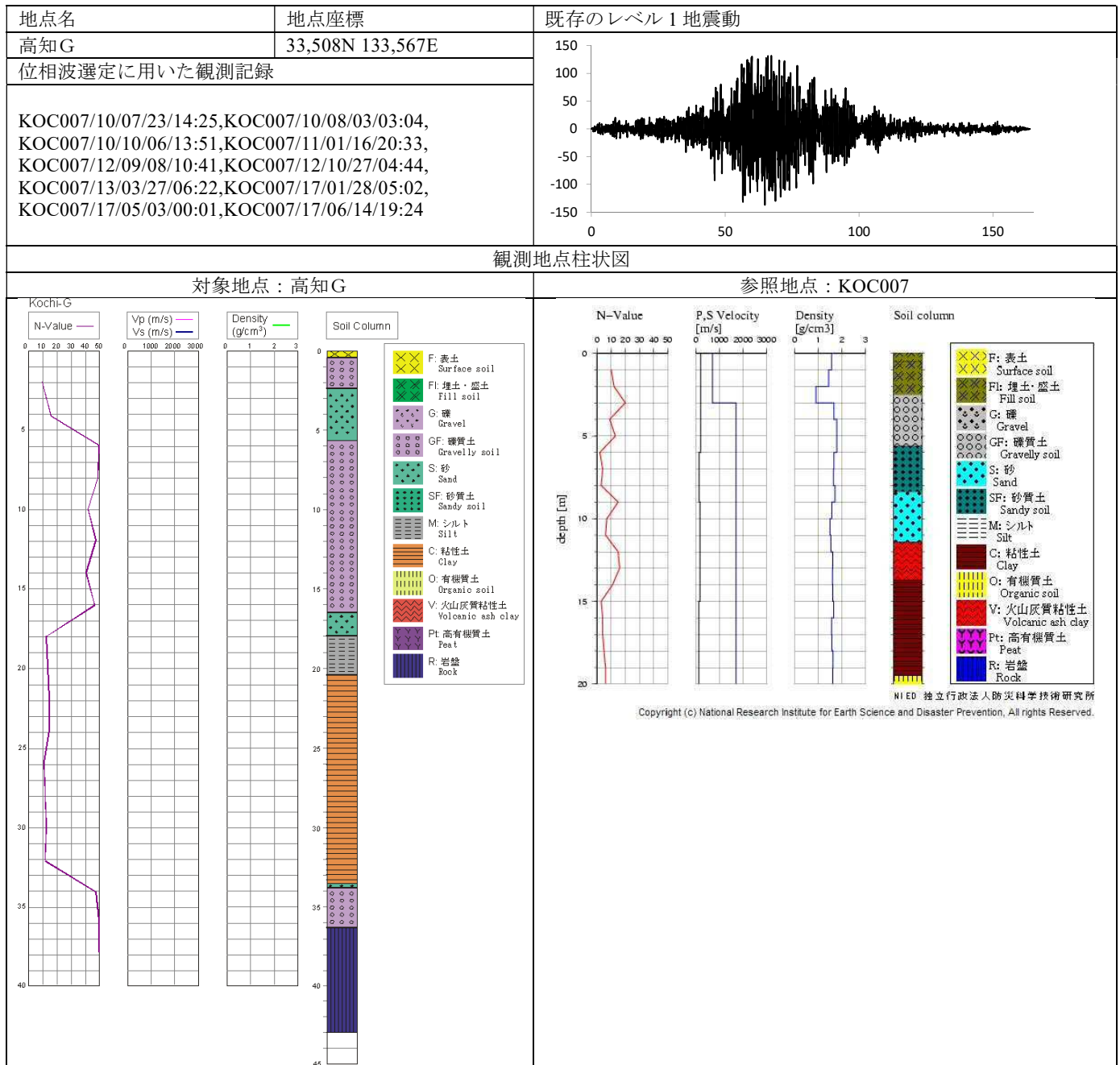


付表 D-2 相馬 G におけるレベル 1 地震動の補正の詳細



NI ED 独立行政法人防災科学技術研究所  
 Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, All rights Reserved.

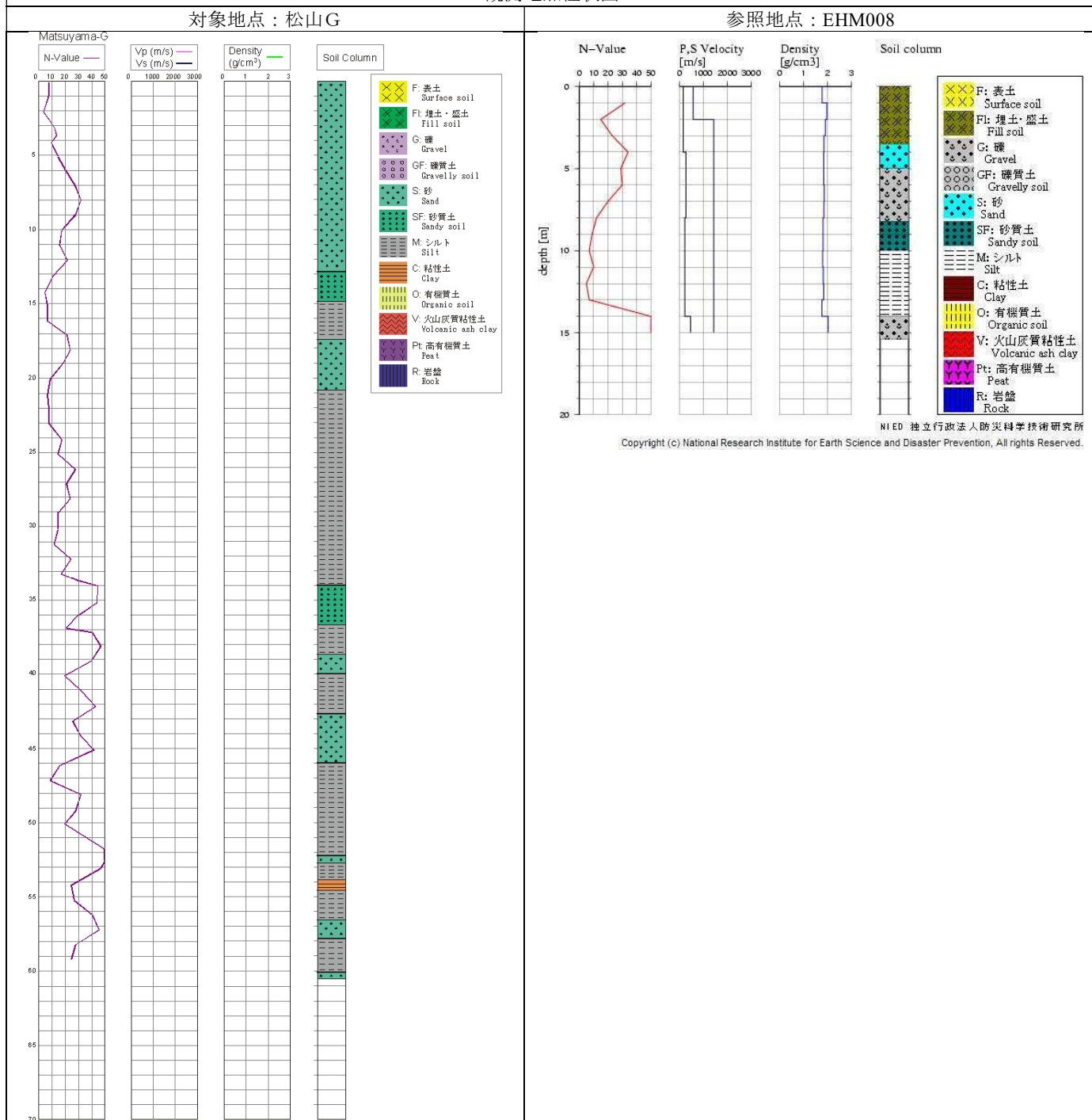
付表 D-3 高知Gにおけるレベル1地震動の補正の詳細



付表 D-4 松山 G におけるレベル 1 地震動の補正の詳細

地点名	地点座標	既存のレベル 1 地震動
松山 G	33,858N 132,712E	
位相波選定に用いた観測記録		
EHM008/10/07/23/14:25,EHM008/12/10/27/04:44, EHM008/12/12/22/15:15,EHM008/14/10/16/04:39, EHM008/15/02/03/14:07,EHM008/15/04/08/08:51, EHM008/17/06/14/19:24,EHM008/17/09/01/16:30, EHM008/17/09/11/16:30,EHM008/18/01/09/05:52		

観測地点柱状図





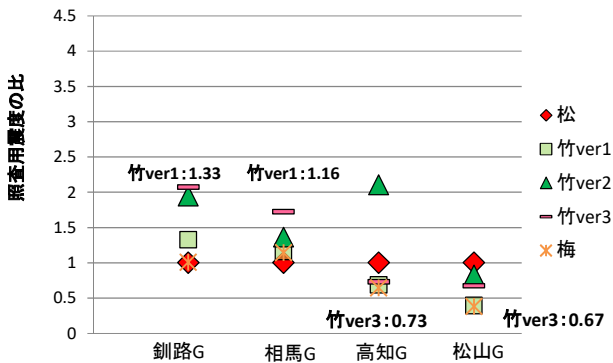
付録 E 構造設計に及ぼす影響の試行的な評価

5章に示したように、補正手法の相違により異なるレベル1地震動が算出される。5章において求めた4地点のレベル1地震動について、レベル1地震動の補正手法の相違が構造設計に及ぼす影響について、照査用震度及びPSI値を用いて試行的に評価を行う。

(1) 照査用震度による評価

レベル1地震動に対する耐震設計では照査用震度が最も重要な指標であるため、サイト増幅特性の各種評価手法による照査用震度の比較を行い、レベル1地震動の補正手法の相違が構造設計に及ぼす影響を試行的に評価する。照査用震度の比較は重力式係船岸で水深-7.5mの場合について行った。

付図E-1に各補正による照査用震度の相違を示す。補正手法による相違を表す「照査用震度の比」とは、各補正手法による照査用震度を真値である松補正の照査用震度で除した値である。この比が1以下であることは、照査用震度を過小評価しており危険側の設計となることを意味する。また、図中には松補正が適用できない場合に一般的に採用されると考えられる竹補正の名称と真値との比をケース毎に示す。(例として「竹 ver1 : 0.90」は一般的には竹 ver1 が採用されるケースであり、その場合の照査用震度の真値に対する比は0.90であることを意味する)

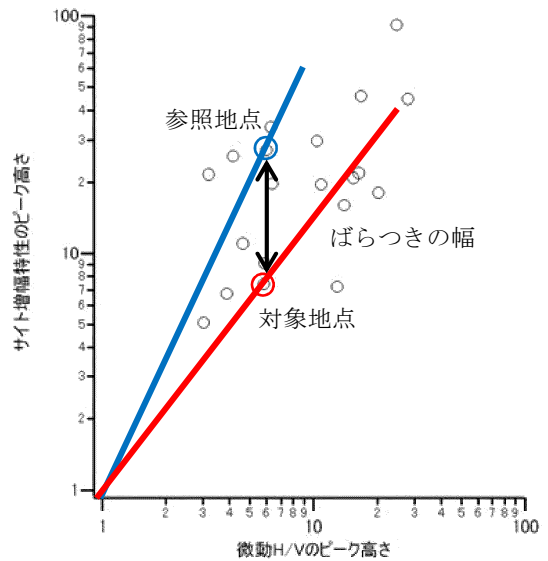


付図 E-1 照査用震度値の比 (重力式係船岸:水深-7.5m)

全4ケースの比較結果より、松以外の評価手法による照査用震度の値は、真値である松補正の照査用震度に対し、概ね0.6~1.5倍の範囲にあることがわかった。特に梅補正は各種補正手法の中で照査用震度を過小評価してしまうケースが最も多かった。また、竹 ver1 補正~竹 ver3 補正においては、サイト増幅特性のピーク高さ と H/V スペク

トルのピーク高さの対応関係にばらつき(付図E-2にばらつきのイメージを示す)があるため、ピーク高さの補正(竹 ver2 及び竹 ver3)を行ったとしても過大評価または過小評価する場合があります。とりわけ、松山Gの例のように、松を除く全ての補正手法で過小評価となる場合もあり、補正に伴う不確実性が示唆された。

ただし、今回は限られた4つのデータしか用いていないため、今後もデータを蓄積し詳細に検討を重ねる必要がある。



付図 E-2 サイト増幅特性のピーク高さ と 常時微動 H/V スペクトルのピーク高さの対応関係<sup>14)</sup>:再掲

(2) PSI 値による評価

PSI 値とは、野津らによって定義された<sup>1)</sup>地震動のエネルギーを数値化した値であり、地震時における港湾構造物の被災程度と比較的高い相関を有すると考えられている。PSI 値は以下の式により定義されている。

$$PSI = \sqrt{\int_0^{\infty} \{V(t)\}^2 dt}$$

レベル1地震動に対する耐震設計において照査用震度は最も重要な指標となるが、構造形式によっても算定式が異なるため、レベル1地震動自体の相違を簡便に比較することは困難である。よって本付録ではレベル1地震動のエネルギーを数値化できる PSI 値を用いて、補正手法の相違によるレベル1地震動自体の相違を検討する。

以下の付表 E-1 及び付図 E-3 に全ケースにおける各種補正手法によるレベル1地震動の地表面における PSI 値を示す。

なお、付図 E-5 に示す「PSI 値の比」とは、各補正手法によるレベル1地震動の PSI 値を真値である松補正のレベル1地震動の地表面における PSI 値で除した値である。

PSI 値の比較においても、付図 E-1 に示す照査用震度の比較結果と概ね同様の結果が得られた。照査用震度の比較結果よりは、ばらつきが小さくなったが、ケースにより過小評価とも過大評価ともなり得る結果である。

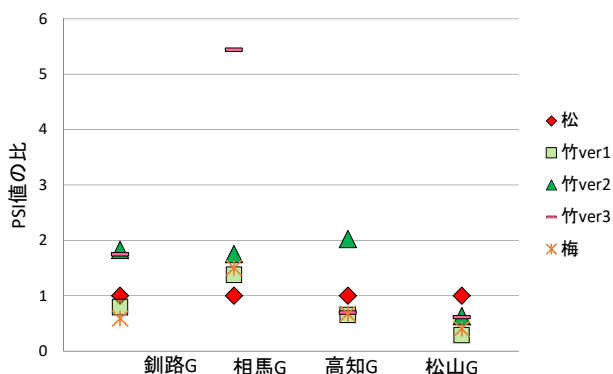
以上の比較結果より、PSI 値の観点からも、松補正の重要性とその他評価手法の不確実性が確認された。

参考文献

- 1) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第 28 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19, 2001

付表 E-1 PSI 値

	釧路G	相馬G	高知G	松山G
松	63	16	43	70
竹 ver1	50	22	20	20
竹 ver2	115	28	87	44
竹 ver3	110	87	30	43
梅	37	24	29	28



付図 E-3 PSI 値の比

## 付録F 用語集

本項で使用される主要用語を以下に示す。なお、本稿の技術解説対象外または一般的な技術用語は割愛する。

### あ

- 位相波 : サイト位相特性を決めるための地震観測記録
- 梅 : 経験式によりサイト増幅特性を評価する手法
- 梅補正 : 梅により評価されたサイト増幅特性を用いてレベル1地震動を求める行為
- H/V スペクトル : 常時微動観測記録に基づく鉛直方向に対する水平方向の振幅スペクトルの比

### か

- キャップ関数 : 竹 ver2 によるサイト増幅特性の過大評価を解消するための関数
- 群遅延 : 周波数に対する位相の変化の割合

### さ

- サイト増幅特性 : サイト特性における、地震動の周波数ごとの振幅の増幅倍率
- サイト特性 : 地震基盤面から地表面までに存在する堆積層による地震動への影響
- 参照地点 : 対象地点のサイト増幅特性を評価する際に参照する地点であり、すでにサイト増幅特性が信頼性の高い手法により評価されている地点
- 常時微動 : 常時の人間活動及び自然現象によって発生する通常では人が感じることでないレベルの微小な振動
- ゾーニング : 同じ港湾内において、似通った地震動の増幅特性を示す地点を一纏めにして1つのゾーンとして分類する行為

### た

- 対象地点 : サイト増幅特性を求める地点
- 竹 ver1 : 参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動 H/V スペクトルに基づきサイト増幅特性を評価する手法  
(周波数の修正)
- 竹 ver1 補正 : 竹 ver1 により評価されたサイト増幅特性を用いてレベル1地震動を求める行為

- 竹 ver2 : 参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動 H/V スペクトルに基づきサイト増幅特性を評価する手法  
(周波数、増幅倍率の修正)
- 竹 ver2 補正 : 竹 ver2 により評価されたサイト増幅特性を用いてレベル1地震動を求める行為
- 竹 ver3 : 参照地点と対象地点において常時微動観測を行い、常時微動 H/V スペクトルに基づきサイト増幅特性を評価する手法  
(周波数、増幅倍率の修正、増幅倍率の制限)
- 竹 ver3 補正 : 竹 ver3 により評価されたサイト増幅特性を用いてレベル1地震動を求める行為

### な

### は

### ま

- 松 : 参照地点と対象地点において観測された地震観測記録に基づきサイト増幅特性を評価する手法
- 松補正 : 松により評価されたサイト増幅特性を用いてレベル1地震動を求める行為

### や

### ら

### わ