

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

福永 勇介¹・野津 厚²・山田 雅行³・長坂 陽介²

¹正会員 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail:fukunaga-y92y2@mlit.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 株式会社ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)

港湾の施設の設計においては、サイト増幅特性が未知の地点のサイト増幅特性の推定は、その周辺のサイト増幅特性が既知の地点のサイト増幅特性を補正することにより行っている。その手法の一つに常時微動観測記録を用いる方法があり、サイト増幅特性のピーク周波数のみ、サイト増幅特性のピーク周波数かつピーク値を補正する手法が提案されている。後者の方法については、推定されたサイト増幅特性が時に過大評価となり、推定精度が確保できないという問題がある。本研究では、サイト増幅特性が過大評価されてしまう場合について、合理的にサイト増幅特性を推定する方法について提案する。当該手法をサイト増幅特性が既知の地点のサイト増幅特性に適用し、その推定精度について確認した。

Key Words: *site amplification factor, microtremor H/V spectrum*

1. はじめに

港湾の施設の設計においては、サイト増幅特性が未知の地点（以下、対象地点と呼称する）のサイト増幅特性を推定する際、対象地点の周辺に位置するサイト増幅特性が既知の地点（以下、参照地点と呼称する）のサイト増幅特性を補正して適用する方が提案されている。その推定法は、両地点の強震観測記録のフーリエ振幅スペクトルを用いる方法（以下、松補正と呼称する）と、両地点の常時微動 H/V スペクトルを用いる方法に大別され、後者の推定法として、サイト増幅特性のピーク周波数のみを補正する方法（以下、竹補正と呼称する）、サイト増幅特性のピーク周波数とピーク値の何れも補正する方法³⁾（以下、新竹補正と呼称する）の方法などが提案されており、現在、港湾の施設の設計入力地震動の評価の際に用いられている。常時微動観測は強震観測に比して観測に要する時間が概して短く、観測経費も安く抑えられるため、常時微動 H/V スペクトルを用いるサイト増幅特性の推定法は非常に有用であるが、新竹補正により推定された対象地点のサイト増幅特性が時に過大評価となり、推定精度が確保できないという問題がある。

本研究では、新竹補正により対象地点のサイト増幅特

性が過大評価されてしまう場合において、強震観測記録や常時微動観測記録などの新たなデータを用いずに、対象地点のサイト増幅特性を合理的に推定する方法を考案した。また、既に松補正によりサイト増幅特性が算出されており、常時微動 H/V スペクトルが得られている地点に対して、本研究で考案した手法を適用し、その適用性について確認した。

2. 対象地点のサイト増幅特性のピーク値の推定

本研究では、対象地点のサイト増幅特性のピーク値を推定する方法として、統計的なアプローチを取っている。サイト増幅特性と常時微動 H/V スペクトルが既知の地点において、これらのピーク値のデータを用いて、サイト増幅特性のピーク値を被説明変数、常時微動 H/V スペクトルのピーク値を説明変数として、両ピーク値の関係式（以下、キャップ関数と呼称する）を定式化する。なお、本稿においては、サイト増幅特性という用語を、地震基盤～地表のものとして使用する。

(1) キャップ関数の定式化に用いたデータ

キャップ関数の定式化に当たっては、表-1 及び図-1 に示す全 71 組のサイト増幅特性のピーク値 p_{SAF} 、常時微動 H/V スペクトルのピーク値 p_{HV} のデータ対を用いた。サイト増幅特性はスペクトルインバージョンにより、常時微動 H/V スペクトルは現地の観測記録に基づき算出した。このデータ対は、港湾の施設の変形に寄与する 0.3~2.0 [Hz] に常時微動 H/V スペクトルがピーク周波数を有するもの、常時微動 H/V のピーク周波数 $\div 1.2 \sim \times 1.2$ の範囲にサイト増幅特性のピーク周波数があるもの、かつサイト増幅特性をスペクトルインバージョンにて推定した際、その精度の信頼性の観点から、用いた地震動の数が 3 以上のもののみとなっている。

表-1 キャップ関数の定式化に用いた p_{SAF} , p_{HV} のデータ対

ブロック	北海道	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄	合計
使用したデータ数	3	8	16	7	9	4	9	9	5	1	71

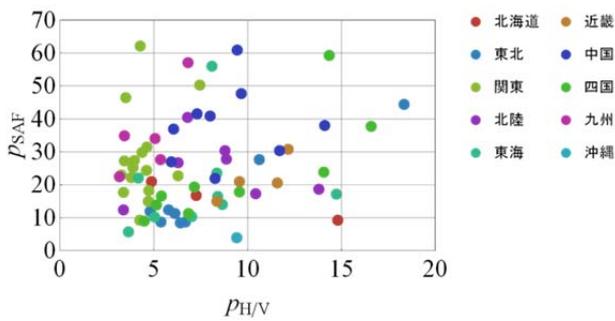


図-1 キャップ関数の定式化に用いたデータ対の p_{SAF} , p_{HV} の関係

(2) キャップ関数の定式化の方法

キャップ関数には、双曲線関数、べき関数の 2 種類を採用した。以下、各関数に対し、キャップ関数の定式化の手順について述べる。なお、71 個のサイト増幅特性のデータが従う確率分布には、双曲線関数による定式化においては対数正規分布の 1 種類を、べき関数による定式化においては対数正規分布、ガンマ分布の 2 種類を仮定した。

a) 双曲線関数による定式化

① サイト増幅特性のピーク値が対数正規分布に従うと仮定し、式(1)のとおり、サイト増幅特性のピーク値の中央値は p_{HV} の双曲線関数に従い、対数変換後のサイト増幅特性のピーク値の分散は中央値によらないと仮定する。

$$\begin{cases} m_{\text{SAF}} = \frac{a p_{\text{HV}}}{1 + x_c^{-1} p_{\text{HV}}} \\ s_{\text{SAF}}^2 = \text{const.} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、

m_{SAF} : サイト増幅特性のピーク値の中央値

a, x_c : パラメータ

s_{SAF} : 対数変換後のサイト増幅特性のピーク値の標準偏差

const. : 定数

② x_c を $\{1, \dots, 30\}$ の自然数の範囲で変化させ、各 x_c に

対して a を最尤推定する。

③ 各 a, x_c の組について、 s_{SAF} を算出する。

④ 各 a, x_c, s_{SAF} の組について、式(1)の第 1 式の a, x_c に

$e^{\ln a + s_{\text{SAF}}}$, x_c の値をそれぞれ代入し、式(1)のグラフの上側の領域に含まれるデータ対の数が最も少なくなる a, x_c の組を探索する。

⑤ 式(1)の第 1 式の a, x_c に④で決定した $e^{\ln a + s_{\text{SAF}}}$, x_c の

値をそれぞれ代入して、それをキャップ関数とする。

以上により、キャップ関数は次式で表される。

$$p_{\text{SAF}} = \frac{12.8 p_{\text{HV}}}{1 + p_{\text{HV}}/6} \quad (2)$$

b) べき関数による定式化

① サイト増幅特性のピーク値は正值であるため、非負値を取り得ないガンマ分布、または対数正規分布に従うと仮定し、式(3)のとおり、サイト増幅特性のピーク値の母平均、母分散（何れも対数変換前の p_{SAF} に対するもの）はそれぞれ p_{HV} のべき関数、母平均の 2 次関数に従うと仮定する。

$$\begin{cases} \mu_{\text{SAF}} = \beta_0 p_{\text{HV}}^{\beta_1} \\ \sigma_{\text{SAF}}^2 = \beta_2 \mu_{\text{HV}}^2 \end{cases} \quad (3)$$

ここに、

μ_{SAF} : サイト増幅特性のピーク値の母平均

σ_{SAF} : サイト増幅特性のピーク値の母標準偏差

β : パラメータ ($\in \{0, 1, 2\}$)

② 最尤推定した β を式(3)に代入して、 $\mu_{\text{SAF}} + \sigma_{\text{SAF}}$ の曲線の方程式を算出し、それをキャップ関数とする。

以上により、キャップ関数は次式で表される。

$$\begin{cases} p_{\text{SAF}} = 26.3 p_{\text{HV}}^{0.213} & (\text{ガンマ分布}) \\ p_{\text{SAF}} = 28.1 p_{\text{HV}}^{0.210} & (\text{対数正規分布}) \end{cases} \quad (4)$$

式(2), (4)で表されるキャップ関数のグラフは図-1 のようになる。双曲線 (対数正規分布) とべき関数 (ガンマ分布, 対数正規分布) によるキャップ関数の違いとして、 p_{HV} が 5 以下の領域において、双曲線関数 (対数正規分布) の方がべき関数 (ガンマ分布, 対数正規分布) よりもその値が小さくなるが、 p_{HV} が 5 を超える領域において、その関係が逆になる。つまり、 p_{HV} が 5 以下の場合には、双曲線関数 (対数正規分布) の方が、 p_{HV} が 5 を超える場合には、べき関数 (ガンマ分布, 対数正規分布) の方が、サイト増幅特性のピークを抑える効果が大きいことになる。

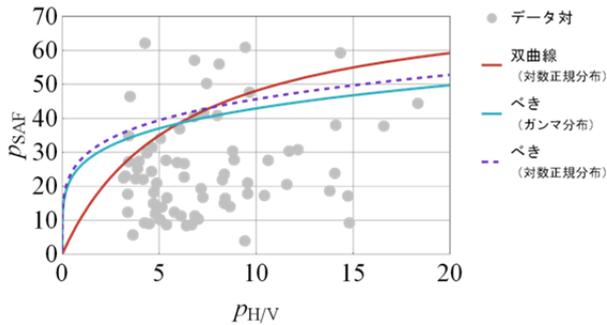


図-2 各種関数と確率分布を仮定したキャップ関数のグラフ

3. 対象地点のサイト増幅特性の推定

第2章では対象地点のサイト増幅特性のピーク周波数における補正方法について述べた。本章では、ピーク周波数を含む全ての周波数における対象地点のサイト増幅特性の補正方法について述べる。

対象地点のサイト増幅特性は、参照地点のサイト増幅特性に竹補正を施した上で、2で推定したサイト増幅特性のピーク値を用いて、2層系地盤の伝達関数を基にした以下の関数による値を乗じて推定する。式(5)で表される関数のグラフは図-3 のようになる。

$$r(f) := \begin{cases} \left(\cos^2 \left(\frac{\pi f}{2f_{\text{tar}}} \right) + R^{-2} \sin^2 \left(\frac{\pi f}{2f_{\text{tar}}} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} & (f \leq 2f_{\text{tar}}) \\ 1 & (f > 2f_{\text{tar}}) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、

f_{tar} : 対象地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク周

波数

R : $p_{\text{tar}}/p_{\text{ref}}$ (参照地点を成層地盤の上層, 対象

地点を下層とみなした場合, 一般的なインピーダンス比の定義⁴⁾の逆数となることに注意すること)

p_{α} : 地点 α のサイト増幅特性のピーク値

($\in \{\text{tar, ref}\}$)

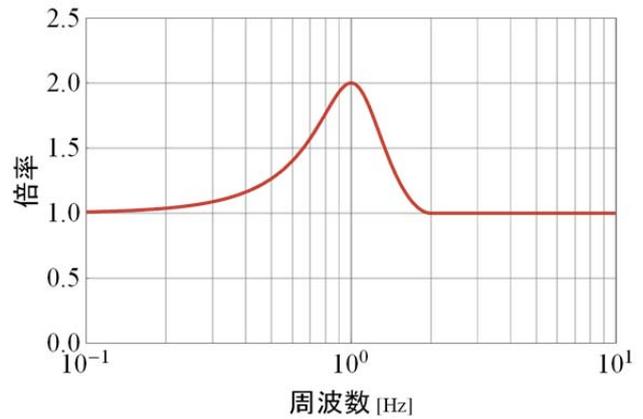


図-3 サイト増幅特性のピーク周波数以外の周波数においてサイト増幅特性を補正する関数のグラフ ($f_{\text{tar}}: 1.0 [\text{Hz}]$, $R: 2.0$ の場合)

4. 提案したサイト増幅特性の推定法の適用例と妥当性の評価

松補正によりサイト増幅特性が既知の地点を対象に、第2, 3章で提案した推定法を適用し、その推定精度について確認した。本章で取った確認の手順は次のとおりである。

- ① 松補正によりサイト増幅特性が既知の地点を T 地点とし、T 地点の周辺に位置し、同じくサイト増幅特性が既知の地点を R 地点とする。
- ② T 地点, R 地点の常時微動 H/V スペクトルを用いて、R 地点のサイト増幅特性に対して本研究の推定法を適用し、T 地点のサイト増幅特性を推定する。
- ③ T 地点について、松補正によるサイト増幅特性を真値とみなし、②で推定したサイト増幅特性と比較し、推定精度を評価する。

検討対象の T 地点と R 地点の組は、K-net の AIC014 と AICH12、港湾地域強震観測の高知-G と K-net の KOC007、下関港と K-net の YMC011 の 3 組である。これらの T 地点の常時微動 H/V スペクトル、R 地点のサイト増幅特性、常時微動 H/V スペクトルを図-4 に示す。

上記 3 組の地点の T 地点に対する、本研究の推定法によるサイト増幅特性 (双曲線 (対数正規分布), べき

(ガンマ分布, 対数正規分布), 松補正及び新竹補正によるサイト増幅特性の比較を図-5に示す. また, 本研究の推定法によるサイト増幅特性のピーク値, 松補正及び新竹補正によるサイト増幅特性のピーク値を表-2に示す. 図-5, 表-2のとおり, 本研究の推定法を適用することにより, 新竹補正により過大評価されていたサイト増幅特性のピーク値が, AIC014についてはそこまで抑えられていないが, 高知-G, 下関港については抑えられており, 正解と仮定した松補正によるサイト増幅特性により近い値となっていることが分かる.

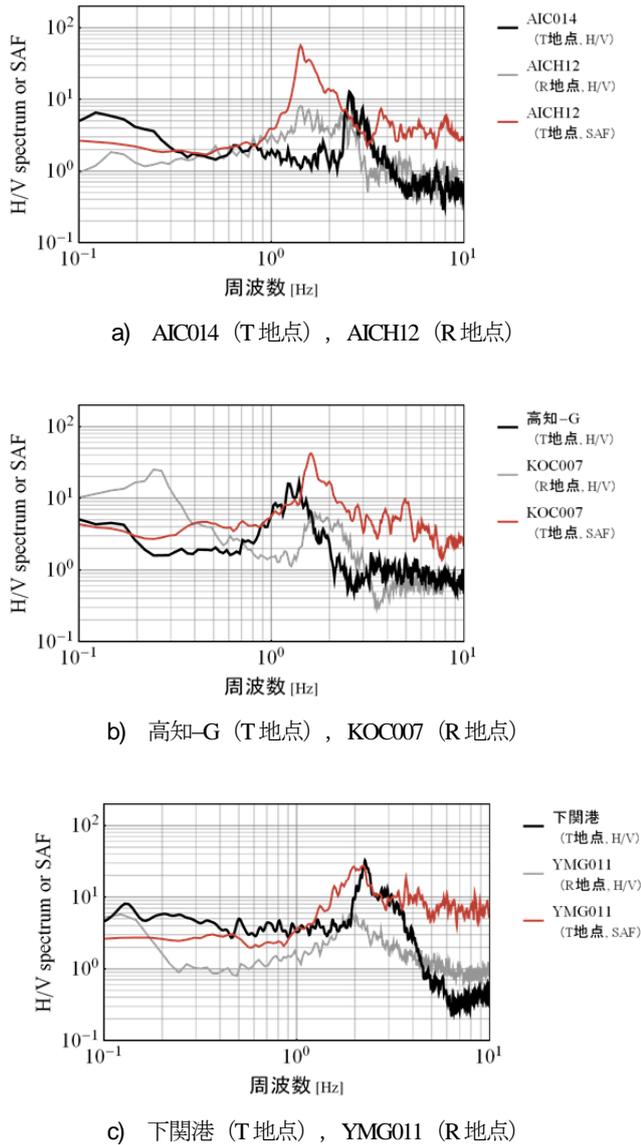


図4 T地点のサイト増幅特性の推定に用いた, T地点の常時微動H/Vスペクトル, R地点のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトル

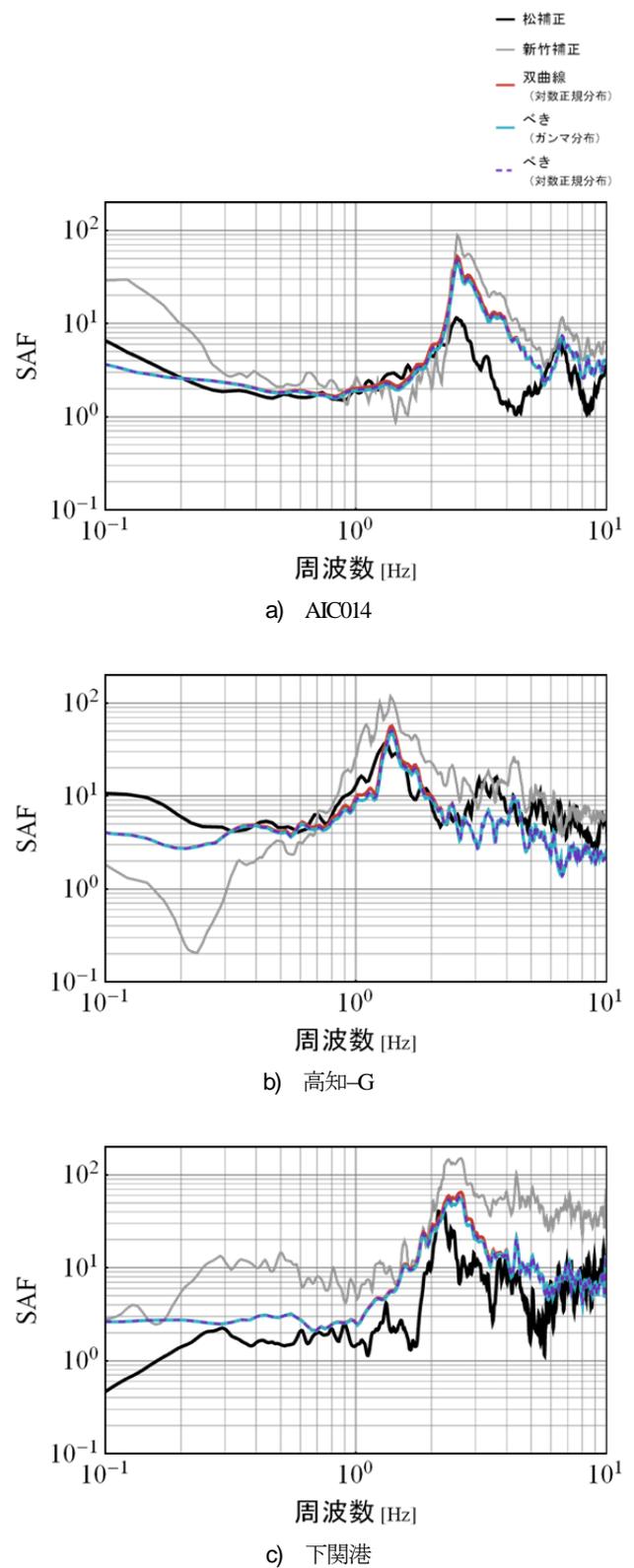


図5 T地点における本研究の推定法, 松補正, 新竹補正によるサイト増幅特性の比較

表-2 T地点における提案法，松補正，新竹補正によるサイト増幅特性のピーク値の比較

T地点名	提案法			松補正	新竹補正
	双曲線関数 (対数正規分布)	べき関数 (ガンマ分布)	べき関数 (対数正規分布)		
AIC014	52.3	45.2	48.0	11.5	88.6
高知-G	56.5	47.8	50.8	38.0	117.8
下関港	65.0	55.2	58.5	40.5	150.3

5. まとめ

新竹補正では新竹補正によりサイト増幅特性が過大評価されてしまう場合を対象に，サイト増幅特性，常時微動H/Vスペクトルのピーク倍率のデータを用いて，両者の関係を統計的手法によりキャップ関数として定式化した。そして，ピーク周波数以外の周波数においても，2層地盤の伝達関数を参考に，サイト増幅特性を修正する関数を提案した。

本研究のサイト増幅特性の推定法の適用事例として，3地点において，本研究の推定法，松補正，新竹補正によるサイト増幅特性の比較を行った。その結果，本研究の推定法による方が新竹補正よりも，真値と仮定した松補正に概ね近いサイト増幅特性が得られた。

参考文献

- 1) 野津 厚，長尾：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.
- 2) 長尾 毅，平松 和也，曾根 照人，野津 厚，撫養港における入力地震動のゾーニングに関する研究，海洋開発論文集 23，pp.805-810，2007.
- 3) 長尾 毅，山田 雅行，野津 厚：常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集 Vol.56A，2010.
- 4) 大崎 順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp.167-198，2002.

STATISTICAL ESTIMATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR BASED ON MIRCROTREMOR H/V SPECTRUM

Yusuke FUKUNAGA, Atsushi NOZU, Masayuki YAMADA
and Yosuke NAGASAKA

In designing port and harbor facilities, at the spot where the site amplification factor is unknown, the site amplification factor is estimated by correcting the known site amplification factor in its nearby site. There're some methods using microtremor observation data as one of estimation method of site amplification method, and the method is classified into two methods: the method based only on the peak frequency of microtremor H/V spectrum, and the method based on both the peak frequency and peak value of microtremor H/V spectrum. In the latter method, there's a problem that the peak value of site amplification factor is sometimes overestimated and not accurate.

To resolve this problem, the new rational estimation method of site amplification factor is proposed without additional data such as seismic observation and microtremor observation. Besides to confirm the applicability of this method some case examples are also shown that this method is applied to the actual sites in which the site amplification factor is already known.