

撫養港における入力地震動の ゾーニングに関する研究

A STUDY ON THE ZONING OF INPUT EARTHQUAKE GROUND MOTION AT MU YA PORT

長尾 毅¹・平松和也²・曾根照人³・野津 厚⁴
Takashi NAGAO, Kazuya HIRAMATSU, Akito SONE and Atsushi NOZU

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017 高松市番町1-6-1)

³(株)ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

⁴正会員 工博 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

The input earthquake ground motion is going to be expressed as time histories considering source, path and site amplification effects especially due to the deep subsurface profile. Strong motion record and surface soil profile to the engineering bedrock is necessary for the evaluation of the site amplification factor. In this paper, we firstly show the method for evaluating the site amplification factor for sites with strong motion record and without surface soil profiles to the engineering bedrock by using microtremors. We next show the modification method of site amplification factor for sites that is a bit far away from the strong motion record site.

Key Words: Site amplification factor, Strong motion, Microtremor

1. はじめに

港湾・海岸構造物のレベル1地震動に対する耐震設計においては、全国を5ブロックに分割して工学的基盤における地震動を地域別震度という形式で考慮してきた。しかしながら、近年の地震工学の進展を踏まえて、2007年度より施行される新港湾基準においては、入力地震動は震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した時刻歴の波形¹⁾²⁾として表現することとなった。ここで、サイト増幅特性とは、地震基盤 ($V_s=3000\text{m/s}$ 相当) から工学的基盤 ($V_s=300\text{m/s}$ 相当) までの地震動の増幅特性を表現するもので、強震記録をもとにしたスペクトルインバージョンにより求めることが標準とされている。従って、耐震性能照査を行う構造物の近傍において強震観測が行われていることが理想的であるが、現実的にはそのような場合は限られている。また、強震観測が行われていたとしても、表層から工学的基盤までの地盤条件が既知であることが必要な条件となる。

本研究では、①強震観測が行われているものの、工学的基盤までの地盤条件が未知の場合、②強震観測地点から対象構造物の距離が比較的近いものの、検討対象エリアが比較的広く、かつ地盤条件の不均質が想定される場合、の2つの場合に対して、常時

微動を用いた対処方法を示すことを目的とする。ここで、①については、例えば、港湾近傍にK-NETの強震観測サイトが存在するものの、工学的基盤が深く、このためK-NET観測地点のルールとして示された表層20mまでのPS検層データでは工学的基盤におけるサイト増幅特性を評価できない場合がこれに該当する。対処方法として、アレー観測を行うことにより位相速度を評価して工学的基盤までのS波速度構造の推定を行う。②については3成分観測を行ってH/Vスペクトルのピーク周波数をもとにゾーニングを行い、必要に応じてサイト増幅特性を補正する。

検討対象は、以上の条件を満たす港湾として、徳島県・撫養港とする。撫養港の近傍ではK-NET鳴門において強震記録が公開³⁾されており、スペクトルインバージョンにより地表面におけるサイト増幅特性が野津ら⁴⁾によって求められている。しかしながら、当該地点において示された表層20mの範囲では最下地点においてもS波速度は170m/s止まりとなっている。このため、これまではサイト増幅特性を工学的基盤において評価することができなかった。さらに、後述するように、検討対象エリアにおいては工学的基盤の深さが標高-20~-70m程度の範囲に急激に変化していることがボーリング調査により分かっている。

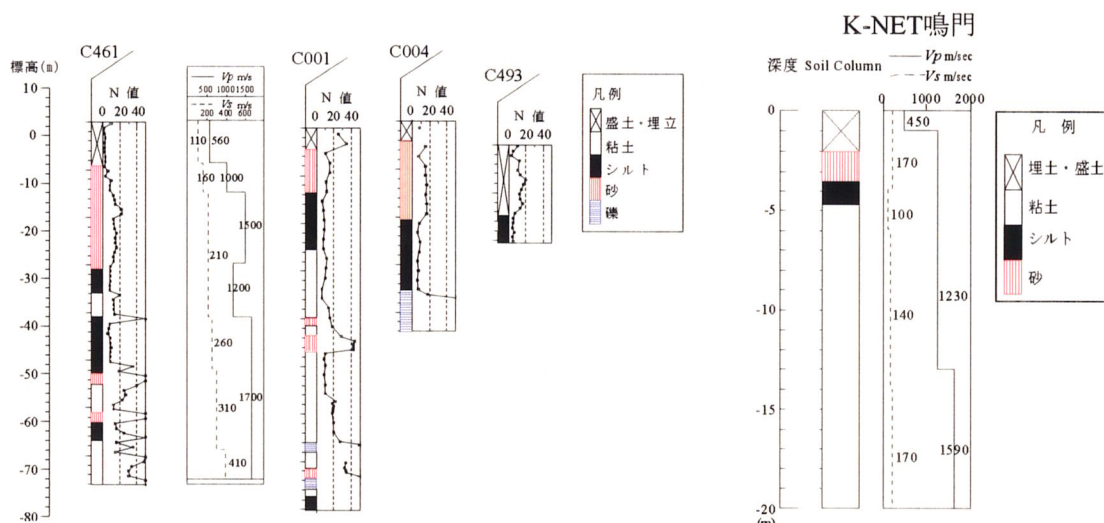
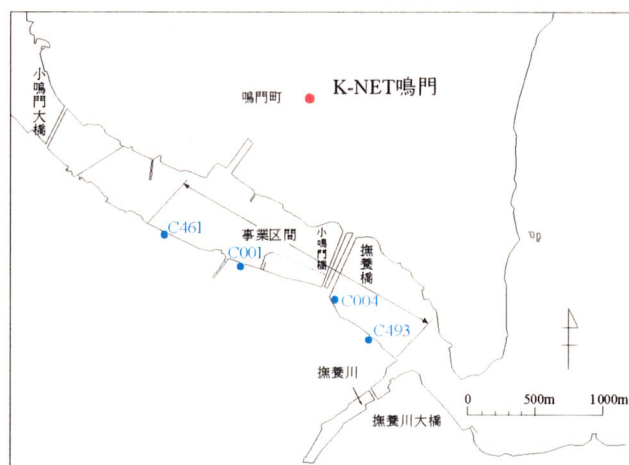


図-1 検討対象エリアの平面図および地盤データ

2. 検討対象サイトの概要

検討対象サイトの平面図、ボーリングデータおよびPS検層結果は図-1に示すとおりである。ここで、C001などの記号のある地点がボーリングデータのある地点であり、このうちC461地点においてはPS検層が実施されている。今回、平面図に示した区間が護岸の検討区間であり、C461～C001区間では工学的基盤が深い位置にあるが、小鳴門橋よりも東の区間では一部で工学的基盤位置が浅い地点があるなど地盤条件の変化が激しい。また、ここには示していないが、C461よりも西のエリアでは工学的基盤の位置が急激に浅くなっていることがわかっている。

3. K-NET鳴門地点における常時微動観測によるS波速度構造推定

まずK-NET鳴門地点における常時微動観測について述べる。観測は水平2成分と鉛直1成分を同時に観測する3成分観測と、鉛直成分を離れた4点で同時に観測するアレー観測の2種類を行っている。観測時間は基本的に11分間、サンプリング周波数100Hzで

ある。観測に用いたセンサーは東京測振製のサーボ型速度計VSE-11,12であり、周期5秒まで振幅・位相特性ともにフラットである。アレー観測については、工学的基盤までのS波速度推定を行う観点からアレー半径を7m～48mの範囲とした。

3成分観測の結果については、交通などによる擾乱の影響の少ないと考えられる163.84秒の区間を3区間抽出し、バンド幅0.05HzのParzenウィンドウで平滑化したのち平均してH/Vスペクトルを算出した。

3成分観測結果より得られる常時微動H/Vスペクトル（水平成分と鉛直成分の比）と、サイト増幅特性の比較を図-2に示す。実線が常時微動H/Vスペクトル、点線がサイト増幅特性である。両者は2Hz弱のピークを有する点で調和的である。なお、常時微動にはレーリー波が卓越していると考えられることから、常時微動H/Vスペクトルはレーリー波のH/Vスペクトルとほぼ見なすことができ、基本モードレーリー波H/Vスペクトルのピーク周波数は、周波数伝達関数の1次のピークとよく一致するといわれている⁵⁾。常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の1次のピークがよく一致するのはこのためと考えられる。なお、本地点のサイト増幅特性には2次、3次の

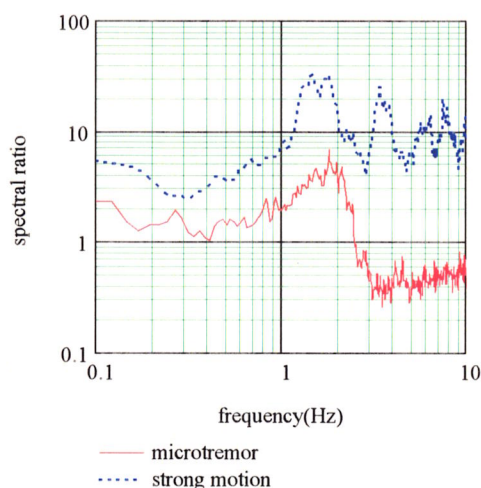


図-2 K-NET鳴門地点における観測結果

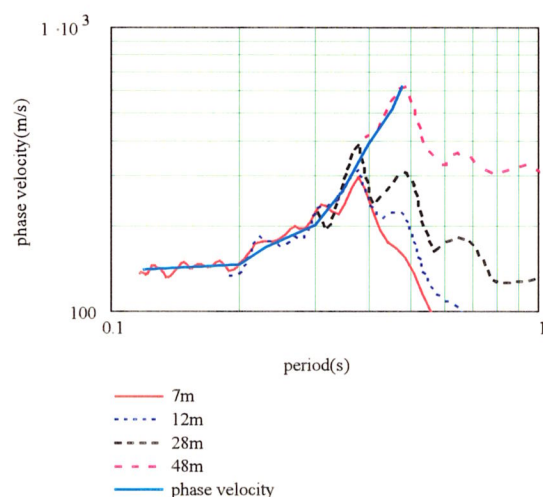


図-3 K-NET鳴門地点における位相速度

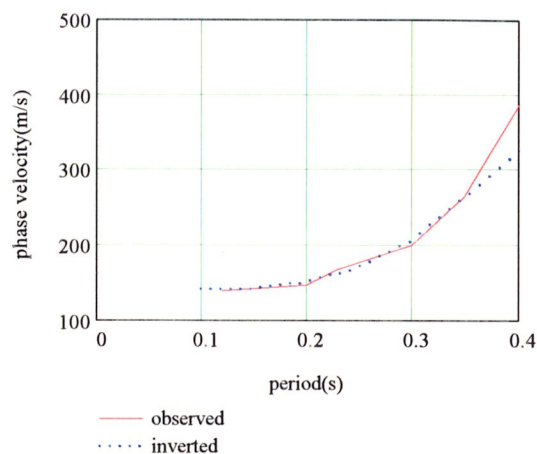


図-4 逆解析結果

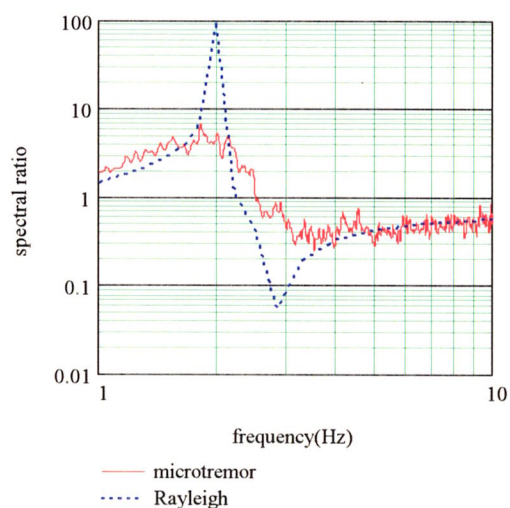


図-5 K-NET鳴門地点におけるH/Vスペクトル比較

表-1 K-NET鳴門地点S波速度構造推定結果

土層区分	層厚(m)	密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	Vs(m/sec)
砂質土	4.00	1.62	178.0
粘性土	2.00	1.64	119.0
粘性土	9.00	1.70	139.0
粘性土	7.07	1.73	195.0
砂質土	3.14	1.90	230.0
砂質土	10.86	1.90	246.0
砂質土	1.90	1.90	288.0
砂質土	-	1.90	443.0

ピークも認められるが、微動H/Vスペクトルは周波数伝達関数ではないためにこの地点ではピークは1つしか認められない。

次にアレー観測結果について述べる。アレー観測結果をもとに空間自己相関法⁶⁾を適用して位相速度を算出した。位相速度の算出にあたってはH/Vスペクトルと同様にバンド幅0.05HzのParzenウィンドウで平滑化した結果を用いている。得られた位相速度を対象として、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析を行い、得られた複数のS波速度構造のうち観測位相速度と残差自乗が最小となるS波速度構造を求めた。その際、表層20mまでの層厚等の諸条件についてはK-NETより公表されている結果を参照したが、S波速度はK-NET公表値から±2割程度の範囲を探索範囲とした。

アレー観測結果を図-3に示す。図中、7m～48mはそれぞれのアレー半径の結果であり、phase velocityとして示したものが最終的に決定した位相速度であ

る。逆解析結果により得られたS波速度構造を用いて算出した位相速度（inverted）と観測位相速度（observed）の比較を図-4に示す。S波速度構造の推定は表層部分のみであり、深い構造は推定していないために0.35秒以上の領域では両者の差は認められるが、表層部分による位相速度についてはよく一致している。逆解析によるS波速度構造を用いて算出した基本モードレーリー波のH/Vスペクトルと常時微動H/Vスペクトルの比較を図-5に示す。両者の

ピーク周波数は2Hzでよく一致しており，ここでのS波速度構造の推定結果には問題がないと判断した．推定されたS波速度構造を表-1に示す．

以上の結果をもとに，これまで地表面における値のみしか得られていなかったサイト増幅特性を，

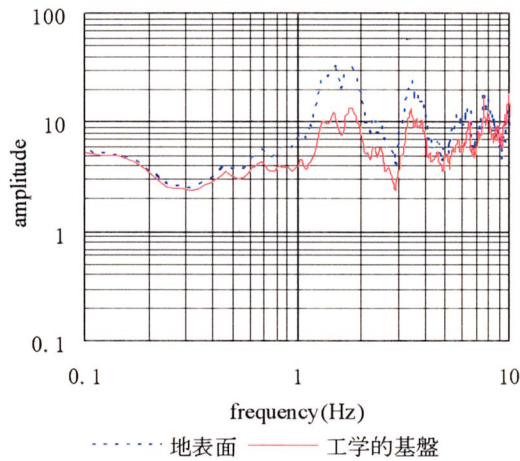


図-6 K-NET鳴門サイト増幅特性

工学的基盤における値として評価することができた．両者の比較を図-6に示す．

4. 撫養港における常時微動による卓越周波数の評価

撫養港における常時微動H/Vスペクトルを図-7に示す．常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数は，最も西のエリアで3Hz以上，その東側で急激に低周波数に移行し，図に実線を示した領域から東側では概ね1Hz付近にピーク周波数がある．なお，H/Vスペクトルと併せて，ボーリングデータのN値の情報をもとに工学的基盤に対する周波数伝達関数を算出した結果を示している．ただし，あくまでもN値から換算したものをを用いているため，誤差が大きい場合も考えられるので注意が必要である．

さて，この撫養港におけるH/VスペクトルとK-NET鳴門のH/Vスペクトルを比較すると，距離が僅かであるにもかかわらず，撫養港の東側のエリアとK-NET鳴門ではピーク周波数に違いがあることがわ

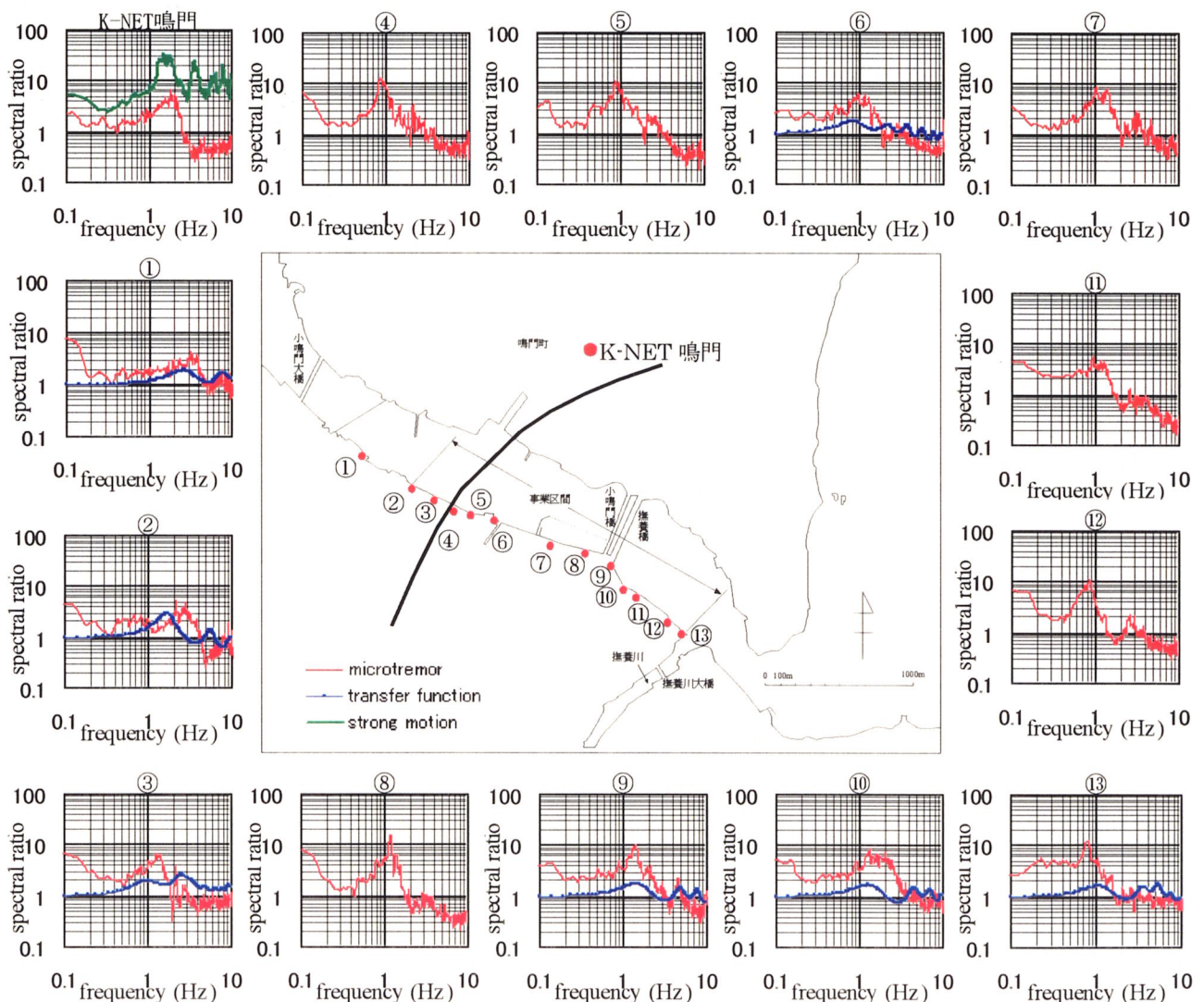


図-7 撫養港常時微動H/Vスペクトル

かる。このため、図-7に示した実線よりも東側の領域でK-NET鳴門のサイト増幅特性をそのまま用いると、港湾構造物の変形に対して大きな影響を持つ1Hz程度の成分を過小評価してしまうといえる。従って、東側のエリアでは1Hz付近にピークを有するように、サイト増幅特性を補正する必要があるといえる。

5. 東側エリアにおけるサイト増幅特性の補正

東側エリアにおけるサイト増幅特性の補正は、常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の1次のピークがよく一致することを利用して、図-8に示す方法で実施した。つまり、K-NET鳴門と東側エリアにおけるH/Vスペクトルのピーク周波数のずれを、サイト増幅特性の卓越周波数のずれに反映し、K-NET鳴門のサイト増幅特性を卓越周波数が f_1 から f_2 になるように形状をそのままにしてシフトすることで、東側エリアにおけるサイト増幅特性を算定したものである。以下に、サイト増幅特性の補正とレベル1地震動の算定結果を示す。

東側エリアのH/Vスペクトルのピーク周波数が概ね1Hz付近にあることより、東側エリアの代表点を図-7に示す⑥地点とした。K-NET鳴門と⑥地点とのH/Vスペクトルの比較を図-9に示す。K-NET鳴門の地表面におけるサイト増幅特性を図-9に示したピーク周波数分だけずらして東側エリアの地表面におけるサイト増幅特性を算定した結果を図-10に示す。図-10に示したサイト増幅特性は、地表面における値であるため、東側エリア内の工学的基盤まで調査されているボーリングデータを用いて工学的基盤における値を求めた。工学的基盤における東・西側エリアのサイト増幅特性の比較を図-11に示す。

図-11に示すサイト増幅特性を用いて算定した工学的基盤におけるレベル1地震動の加速度波形、フーリエスペクトルを図-12に示す。東側エリアの地震動は、港湾構造物の変形に対して大きな影響を持つ1Hz程度の成分が西側エリアに比べて大きくな

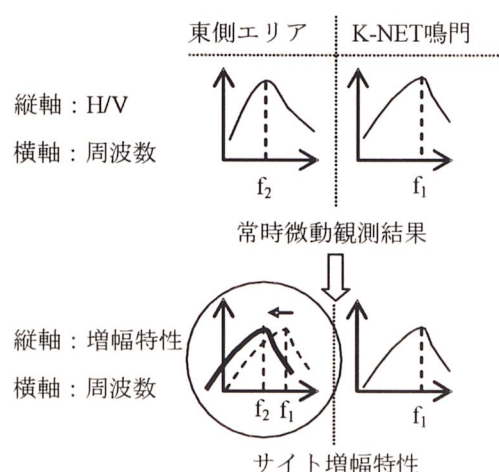


図-8 増幅特性の補正方法

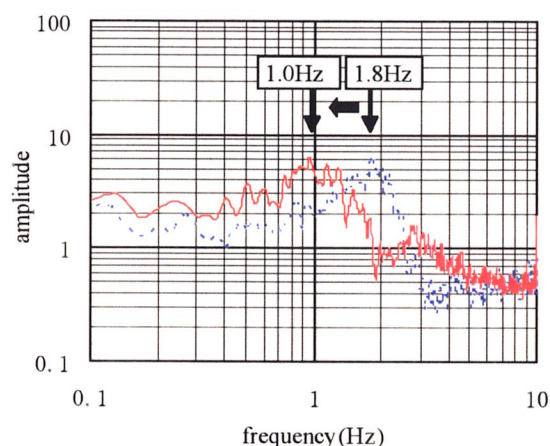


図-9 H/Vスペクトル比の比較

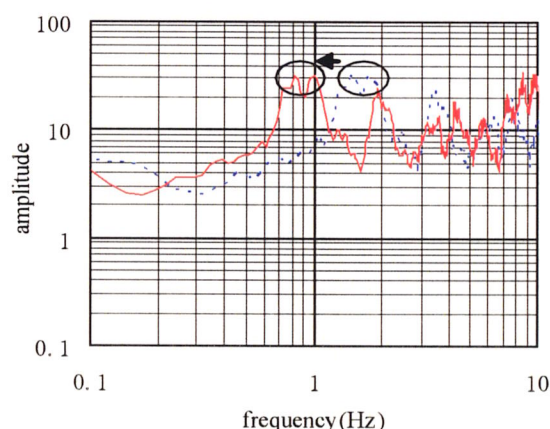


図-10 地表面におけるサイト増幅特性の補正

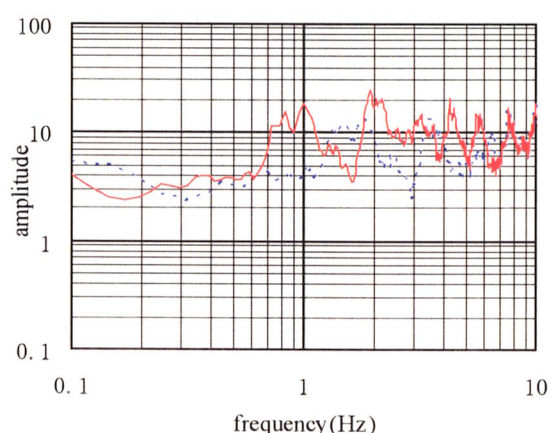
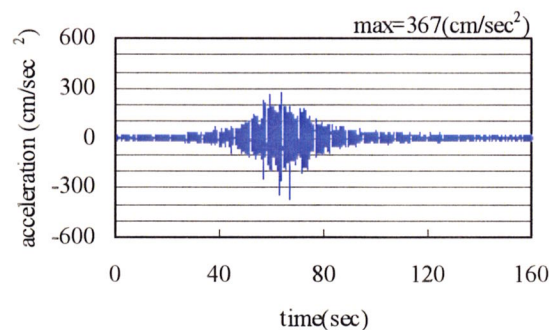
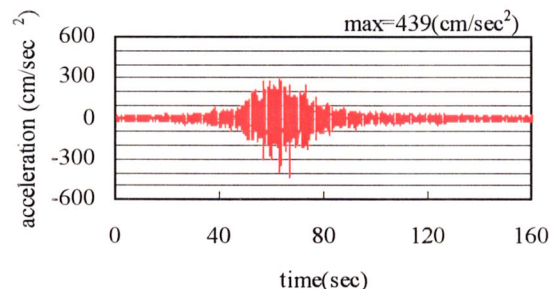


図-11 工学的基盤におけるサイト増幅特性



(a) 西側エリア



(b) 東側エリア

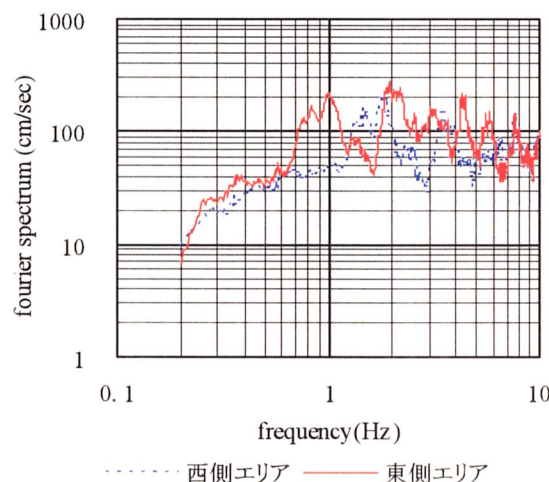


図-12 工学的基盤におけるレベル1地震動

っており、H/Vスペクトルのピーク周波数の違いが考慮されている。この地震動を用いて耐震性能照査を実施することにより、深部の地盤構造を考慮した合理的な設計につながるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、撫養港を対象として、①強震観測が行われているものの、工学的基盤までの地盤条件が未知の場合、②強震観測地点から対象構造物の距離が比較的近いものの、検討対象エリアが比較的広く、かつ地盤条件の不均質が想定される場合、の2つの場合に対するサイト増幅特性の評価方法を示した。

まず①の条件については、強震観測地点で常時微動アレー観測を実施し、得られた位相速度をもとに逆解析を実施することにより当該地点における工学的基盤までのS波速度構造を推定した。これによってK-NET鳴門地点の工学的基盤におけるサイト増幅特性を評価することが可能となった。②の条件については、検討対象とした撫養港のボーリングデータから、工学的基盤の深さが一定ではなく、地点毎に地盤条件が異なることが想定されたため、常時微動3成分観測を密に実施することにより、対象地点のゾーニングを実施した。対象エリアは2区分にゾーニングすべきことが分かった。1区分は近傍のK-NET鳴門のサイト増幅特性を適用できるが、もう1区分についてはK-NET鳴門の特性をそのまま適用することはできないため、常時微動H/Vスペクトルの比較をもとに、サイト増幅特性の補正を行った。最後に、得られた2つのサイト増幅特性を用いて、入力地震動の評価を行った。

参考文献

- 1) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文集, No.801, I-73, pp.141-158, 2005
- 2) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: レベル1設計入力地震動の評価と岸壁の照査例, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.767-772, 2005
- 3) <http://www.k-net.bousai.go.jp/k-net>
- 4) 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
- 5) 例えば, 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489, I-27, pp.251-260, 1994.
- 6) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, *Bulletin, Earthquake Research Institute*, Vol.35, pp.415-456, 1957