

微動H/Vを用いた 東京港のサイト増幅特性のグルーピング

長尾 毅¹・山田 雅行²・野津 厚³・諸星 一信⁴・小林 哲人⁵・安中 正⁶

¹国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

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

E-mail: yamadams@newjec.co.jp

³独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

⁴横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

E-mail: morohoshi-k@pa.ktr.mlit.go.jp

⁵東京都 港湾局・港湾整備部 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

E-mail: Tetsuhito_Kobayashi@member.metro.tokyo.jp

⁶東電設計株式会社 地震・地震動専門職 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail: annaka@tepsco.co.jp

港湾エリアが広く、サイト増幅特性が複数得られている東京港において、微動H/Vを用いて、設計用地震動作成に用いるサイト増幅特性のグルーピングを試みた。港湾構造物に影響が大きいとされる1Hz付近(0.3~2.0Hz)に着目すると、微動H/Vのピーク周波数はインピーダンス比の大きい層に強く影響を受ける伝達関数のピーク周波数とよく一致することがわかった。したがって、微動H/Vのピーク周波数に着目して、簡便にサイト増幅特性のグルーピングを行うことが可能なことを示した。

Key Words : Design Ground Motion, Site Amplification Factor, Microtremor, Tokyo port, Grouping

1. はじめに

新しい港湾の施設に関する技術上の基準¹⁾では、震源特性・伝播経路特性・深層地盤による地震動増幅特性といった諸特性を考慮して、設計用地震動(レベル1, 2地震動)を作成することとされている。

この深層地盤による地震動増幅特性はスペクトルインヴァージョンによって求められた値²⁾を基本と考えている。しかし、東京港のように、港湾エリアが広い場合や複数のサイト増幅特性が得られている場合には、合理的にグルーピングを行う必要があると考えられる。関東平野においては、ボーリングデータの少ない工学的基盤以深の増幅特性の重要性が既往の研究³⁾において指摘されていることもあり、深層地盤の影響を十分に加味できる手法を用いることが望まれる。

そこで、本稿では、微動H/Vを用いて、東京港の深層地盤による地震動増幅特性を簡便にグルーピングすることを試みた。グルーピングに際して、港湾構造物に

影響が大きいとされる0.3~1.0Hz(1Hz未満の帯域)、1Hz未満の帯域ほどではないが、影響があると考えられている1.0~2.0Hz(1Hz以上の帯域)に着目して、検討を行った。

2. 東京港のサイト増幅特性

(1) 東京港付近の地質構造の概要

東京港付近は、表層から有楽町層、七号地層、埋没段丘礫層と続き、さらに東京層、東京礫層、江戸川層~舎人層と続いている。埋没段丘礫層は、図-1⁴⁾に示すように複雑に分布している。

(2) スペクトルインヴァージョン⁵⁾結果

東京港における深層地盤による地震動増幅特性はスペクトルインヴァージョンによって求めた。

いま、地震観測記録 $A^0(\omega)$ は震源の特性 $A^S(\omega)$ 、伝播



図-1 埋没段丘礫層分布

経路特性 $A^P(\omega)$ と地震観測点の増幅特性(地震基盤～地震観測点) $A^G(\omega)$ の積によって表すことができる(式(1))。すなわち、観測記録 $A^O(\omega)$ の対数値は震源の特性 $A^S(\omega)$ 、伝播経路特性 $A^P(\omega)$ とサイトの地盤の増幅特性 $A^G(\omega)$ のそれぞれの対数値の線形和として表すことができる(式(2))。

$$A^O(\omega) = A^S(\omega) \cdot A^P(\omega) \cdot A^G(\omega) \quad (1)$$

$$\log(A^O(\omega)) = \log(A^S(\omega)) + \log(A^P(\omega)) + \log(A^G(\omega)) \quad (2)$$

ある期間内に m 個の地震が発生し、その地震が n 個の観測点で観測されたとすると、地震観測記録は $m \times n$ 個、上式の右辺の未知数は、 $A^S(\omega)$ が m 個、 $A^P(\omega)$ は 1 個、 $A^G(\omega)$ は n 個で合計 $m+n+1$ 個となる。地震観測記録、すなわち観測方程式の数 $m \times n$ が、 $m+n+1$ より大きければ、上式を最小二乗法を用いて解くと、震源の特性 $A^S(\omega)$ 、伝播経路特性 $A^P(\omega)$ と地震観測点の増幅特性 $A^G(\omega)$ が地震観測記録 $A^O(\omega)$ から分離できることになる。ここでは、表-1に示す条件に従って、スペクトルインバージョンをおこなった。

本検討で用いた地震観測点は地表であるため、スペクトルインバージョンによって得られる地震観測点の増幅特性 $A^G(\omega)$ は地震基盤～地表となる。したがって、地震基盤～工学基盤に対する増幅特性は、地震基盤～地表の $A^G(\omega)$ を、一次元重複反射理論による工学基盤～地表の伝達関数で除することによって求めた。

図-2の地震観測点において求められた深層地盤による

表-1 スペクトルインバージョンの条件

対象とする 地震観測ネット	強震観測網(K-NET)，1996.5～2006.3 基盤強震観測網(KIK-net)(地表)，1997.10～2006.3 港湾地域強震観測，1963.3～2006.3 空港における地震観測，1988.9～2006.12 東京港強震観測，1993.5～2006.2 →対象地震数：394 地震		
	関東地方 (千葉,茨城,群馬,神奈川,埼玉,栃木,東京) 関東地方を取り囲む地域 (福島,長野,新潟,静岡,山梨)		
地震記録 選定 条件	マグニチュード	M<6.0	点震源とみなす
	震央距離	Δ 150km	LG波，モホ面反射波の影響(距離減衰が $1/X$ にならない)を避ける
	震源深さ	D 60km	Q値を一定とみなす
	最大振幅	A_{max} 100Gal	非線形性の影響を避ける
	周波数帯域	M 4.5	0.2Hz以上の周波数帯域でS/N比が確保できる
	同時観測	3地点以上	複数の観測点で同時観測されている

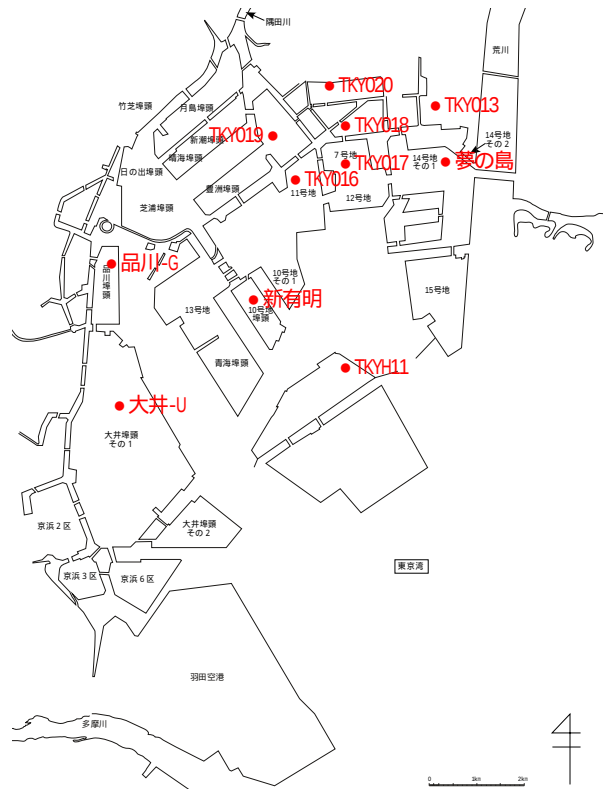


図-2 地震観測点位置

地震動増幅特性(地震基盤～工学基盤)(以下、「サイト増幅特性」と略して呼ぶ)を図-3に示す。なお、工学基盤とは $V_s=300\text{m/s}$ 相当層と考えた。

1Hz付近(0.3～2.0Hz)の増幅倍率に着目すると、10倍を超えない品川-G，大井-Uのグループ，20倍を超えるTKY013，TKY017，TKYH11のグループとそれ以外の3種類に大別できる。しかし，サイト増幅特性が平坦な形状をしており，ピーク周波数が明瞭に区別できない

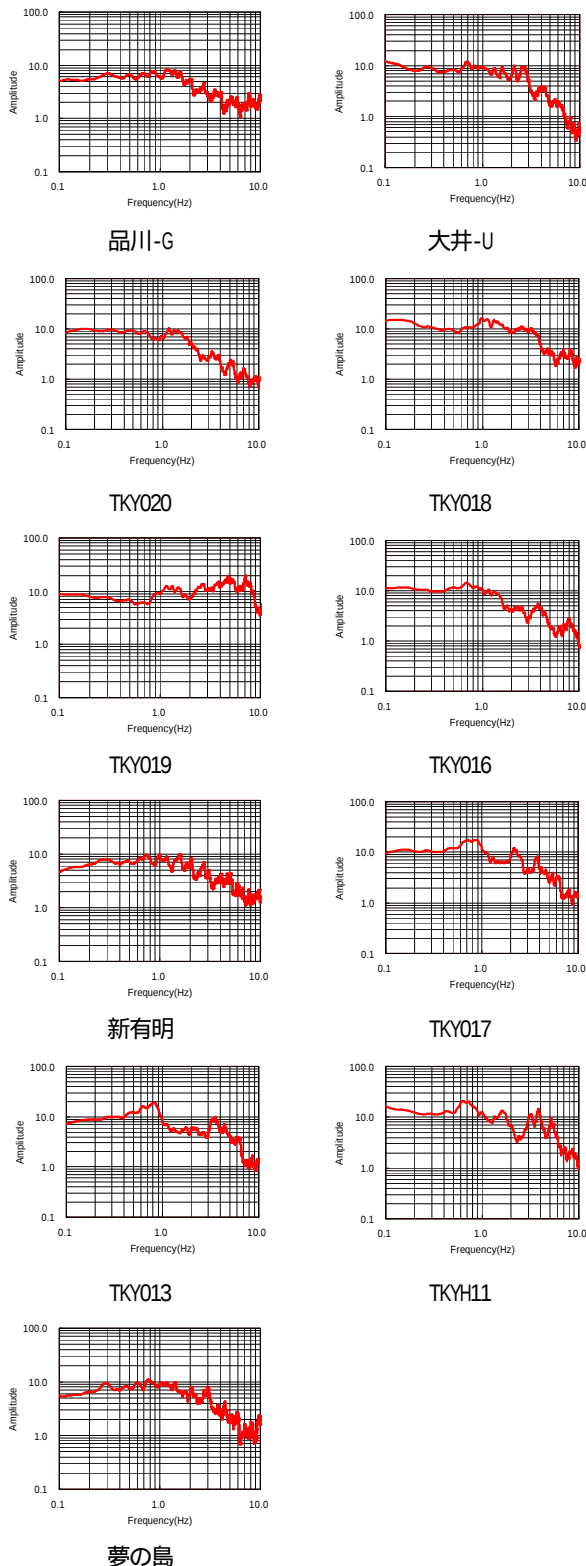


図-3 サイト増幅特性

こともあり、十分に合理的なグルーピングとは言えない。

3. 伝達関数とRayleigh波のH/Vの検討

サイト増幅特性に影響を与える要因を明確化するた

表-2(1) 地盤モデル(品川-G)

層番号	密度[t/m ³]	S波速度[m/s]	層厚[m]	深さ[m]	インピーダンス比
1	160	115.0	20	20	0.91
2	160	105.0	60	80	1.47
3	174	142.0	50	130	1.45
4	183	195.0	20	150	1.35
5	196	245.0	40	190	0.67
6	170	190.0	10	200	2.58
7	190	440.0	20	220	1.28
8	209	510.0	10	230	1.12
9	209	570.0	10	240	0.82
10	209	470.0	10	250	1.07
11	206	510.0	20	270	0.77
12	203	400.0	10	280	0.81
13	203	325.0	20	300	1.63
14	203	530.0	20	320	1.08
15	203	573.3			

表-2(2) 地盤モデル(新有明)

層番号	密度[t/m ³]	S波速度[m/s]	層厚[m]	深さ[m]	インピーダンス比
1	170	208.6	7.3	7.3	0.78
2	150	185.1	6.9	14.1	1.18
3	200	163.9	1.9	16.1	0.86
4	160	176.0	4.7	20.7	1.84
5	190	272.3	4.3	25.0	0.81
6	170	245.5	8.8	33.8	1.19
7	200	248.8	3.1	36.9	1.42
8	210	337.3	21.5	58.4	1.63
9	210	551.3	11.8	70.2	1.21
10	200	700.0			

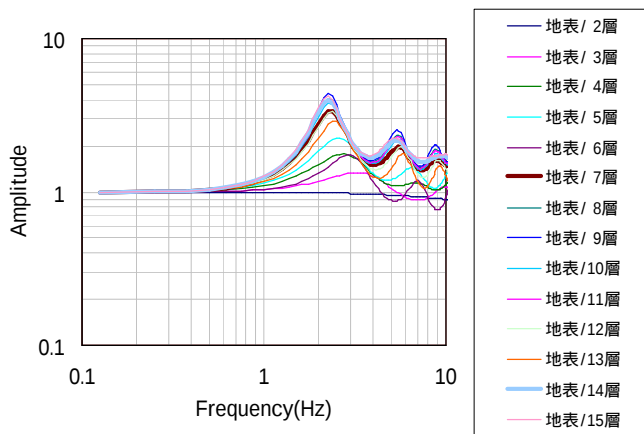
表-2(3) 地盤モデル(夢の島)

層番号	密度[t/m ³]	S波速度[m/s]	層厚[m]	深さ[m]	インピーダンス比
1	181	171.9	11.8	11.8	0.92
2	170	168.9	10.0	21.8	0.77
3	141	158.4	21.0	42.8	1.81
4	186	217.0	3.9	46.7	1.07
5	186	231.7	2.9	49.6	1.04
6	170	264.8	1.6	51.2	1.38
7	189	328.6	1.3	52.5	1.63
8	194	520.8	7.0	59.5	0.59
9	189	314.7	15.0	74.5	1.60
10	183	519.7	9.7	84.2	1.11
11	194	545.5			

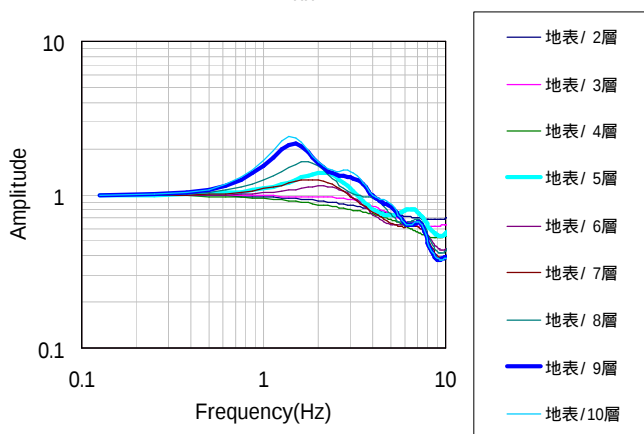
表-2(4) 地盤モデル(TKYH11)^⑥

層番号	密度[t/m ³]	S波速度[m/s]	層厚[m]	深さ[m]	インピーダンス比
1	174	108.0	9.1	9.1	1.06
2	174	115.0	14.0	23.0	1.61
3	174	185.2	32.1	55.2	1.13
4	174	209.2	8.8	64.0	1.86
5	174	390.0	60.0	124.0	1.23
6	174	480.0	180.0	304.0	1.41
7	179	660.0	300.0	604.0	1.24
8	185	790.0	340.0	944.0	1.27
9	191	970.0	420.0	1364.0	1.33
10	200	1230.0	600.0	1964.0	1.34
11	213	1550.0	460.0	2424.0	1.89
12	264	2360.0			

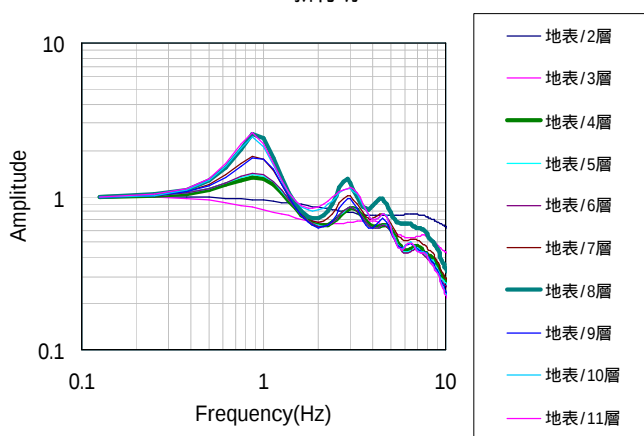
めに、深部まで地盤構造が明らかにされている品川-G、新有明、夢の島、TKYH11において伝達関数とRayleigh波のH/Vについて検討を行った。



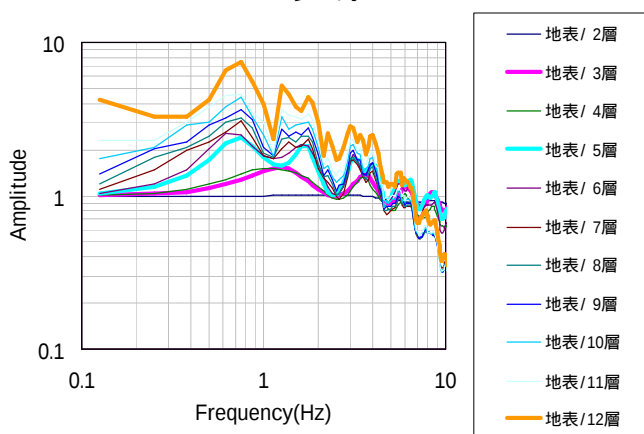
品川-G



新有明



夢の島



TKYH11

図-4 伝達関数

(1) 地盤モデル

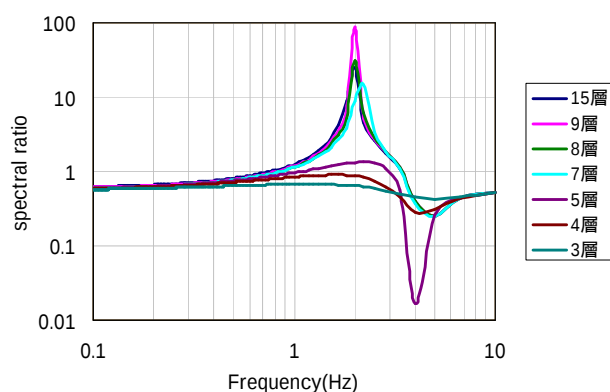
表-2に上述の地震観測点における地盤モデルを示す。インピーダンス比($\rho_i V_i / \rho_{i+1} V_{i+1}$)が1.5を上回る層を黄色で着色した。品川-G, 新有明, 夢の島については, 地表観測記録と地中観測記録のフーリエスペクトル比をターゲットとして, 遺伝的アルゴリズムを用いた同定解析を行った結果として得られた値を示している。なお, 減衰定数は同定解析にしたがって, 品川-G, 新有明, 夢の島, それぞれ3.7, 8.9, 7.9%とした。また, TKYH11地点の表層部のモデル化については付録に示す常時微動アレー観測によって求めた値を示している。TKYH11地点の減衰定数については, 中央防災会議によって作成された地盤モデル⁷⁾を参考に, $V_s \geq 500\text{m/s}$: 0.5%, $V_s < 500\text{m/s}$: 3.0%を用いた。

(2) 伝達関数

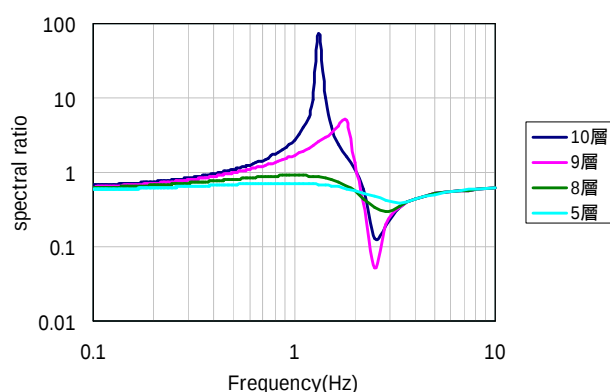
図-4に表-2の地盤モデルに対して一次元重複反射法を用いて求めた各層～地表の伝達関数($2E/2E$)を示した。図中, 前節で示したインピーダンス比が1.5を上回る位置に相当するものを太線で示している。

これをみると, 伝達関数のピーク周波数はインピーダンス比の大きな層に対する値に支配され, それより深部の層は伝達関数の応答倍率に影響するが, ピーク周波数を大きく変えることはないことがわかった。特に図-4のTKYH11地点の結果はこの傾向が明瞭で, 伝達関数の形状(ピーク周波数)は地表5層から変化が少ないが, 応答倍率は2.5倍から7.5倍まで大きくなっている。

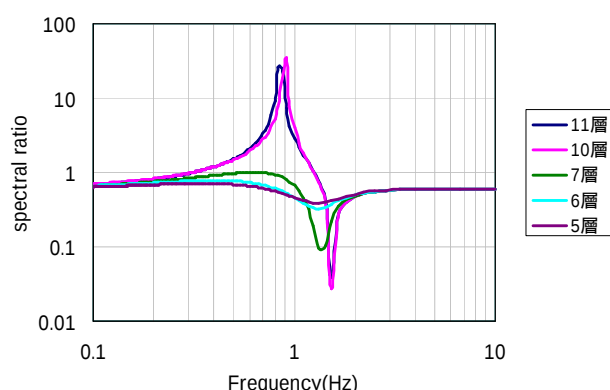
実際には各層ごとに異なるピーク周波数を有しているが, インピーダンス比が小さいためにそれほど明瞭なピークとはならず, 結果として, インピーダンス比の大きい層に対するピーク周波数が選択的に強調されているものと考えられるが, 工学的にサイト増幅特性のグルーピングを考える場合には, この特徴は非常に重要であると考えられる。サイト増幅特性に影響を及ぼすインピーダンス比の大きい層は, それぞれ品川-G: 第7層($V_s=440\text{m/s}$), 新有明: 第9層($V_s=551\text{m/s}$), 夢の島: 第8層($V_s=521\text{m/s}$), TKYH11: 第5層($V_s=390\text{m/s}$)の上面となり, 新有明, 夢の島では通常の工学基盤に比べて深い層がサイト増幅特性に大きな影響を与えていることがわかる。通常, 工学基盤以深はボーリングデータがないため, 簡便にグルーピングを行うには, 地震基盤, 工学基盤といった地盤情報を詳細に検討するよりも, 実際の揺れに着目した検討が有効であることを示唆している。



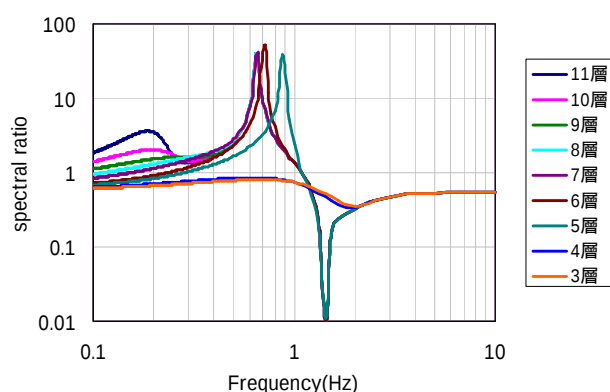
品川-G



新有明



夢の島



TKYH11

図-5 Rayleigh波のH/V

(3) Rayleigh波のH/V

図-5に表-2の地盤モデルに対して求めた各層～地表のRayleigh波のH/Vスペクトル比を示した。ここでRayleigh波のH/Vスペクトル比はすべて基本モードを用いている。

通常、Rayleigh波のH/Vスペクトル比のピーク周波数は伝達関数のピーク周波数と一致する⁸⁾。上述の4ヶ所の結果に関しても、Rayleigh波のH/Vスペクトル比のピーク周波数と伝達関数のピーク周波数はよく一致している。ここで着目すべき点は、ピーク周波数を与えるRayleigh波のH/Vスペクトル比が、インピーダンス比の大きい層に起因するものであること、そして、その層は伝達関数のピークを選択的に強調し、特徴付けている層に相当するということである。Rayleigh波のH/Vスペクトル比のピーク周波数もインピーダンス比の大きな層が支配的で、それより深部の層の影響を受けて、若干低周波に移行する傾向も見られるが、大きく変えることはないことがわかった。

したがって、Rayleigh波のH/Vスペクトル比のピーク周波数を常時微動観測からの確に求めることができれば、実際の揺れに着目したグルーピングに有効であると考えることができる。

4. 東京港における微動H/V

東京港のサイト増幅特性のグルーピングをおこなうためにサイト増幅特性の得られている各地点において常時微動観測を行い、微動H/Vを求めた。

(1) 常時微動観測の概要

図-2に示す地震観測点において常時微動観測を行った。微動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。

(2) 微動H/V

常時微動観測は3成分観測については観測時間11分間、サンプリング周波数100Hzとし、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。微動H/Vの算出結果を図-6に示す。図-6をみると、いずれの地点でも明瞭なピークがみられることがわかる。

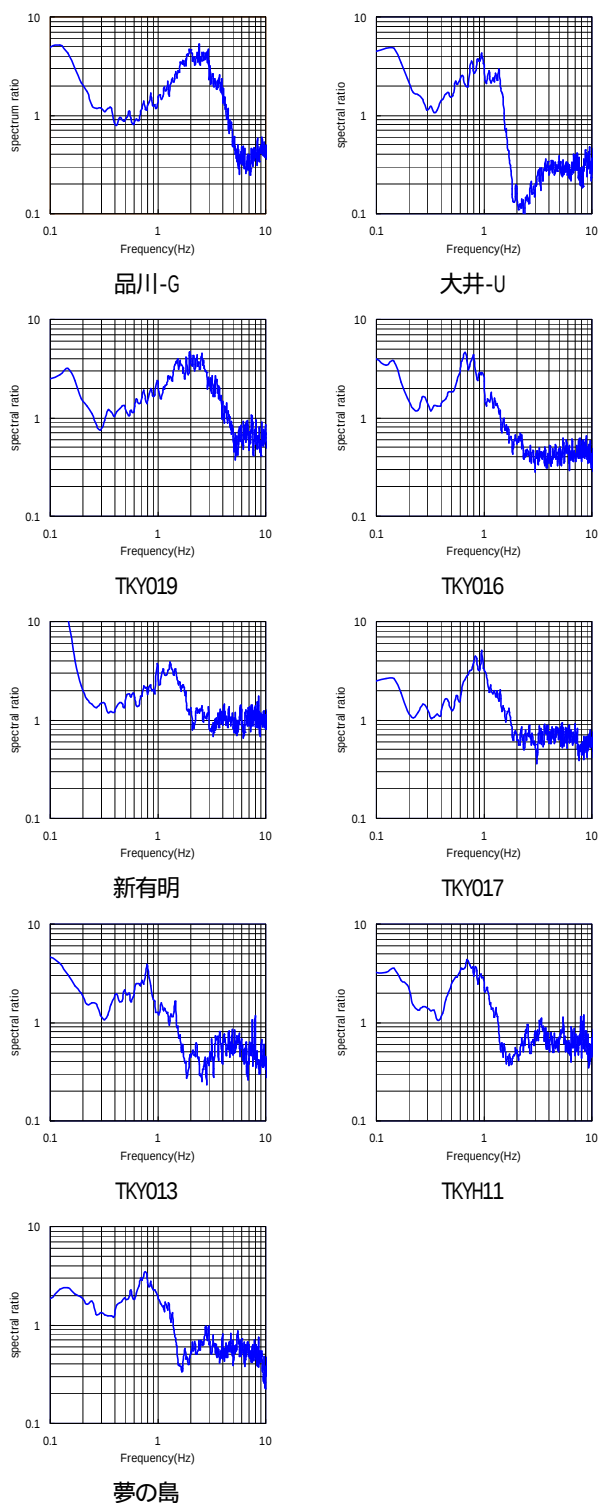


図-6 H/Vスペクトル算出結果

5. 東京港のグルーピング結果

サイト増幅特性の1Hz付近(0.3～2.0Hz)の増幅倍率(10倍以下, 10～20倍, 20倍以上)および微動H/Vのピーク周波数(1Hz未満, 1Hz以上)に着目して, サイト増幅特性のグルーピングを行った。その結果を表-3, 図-7に示す。

中央防災会議により推定された東京湾における深部地

表-3 サイト増幅特性のグルーピング結果一覧

	サイト増幅特性	微動H/V	総合
品川-G	10倍以下	1Hz以上	●
大井-U	10倍以下	1Hz以上	●
TKY020	10～20倍	-	●
TKY018	10～20倍	-	●
TKY019	10～20倍	1Hz以上	●
TKY016	10～20倍	1Hz未満	●
新有明	10～20倍	1Hz以上	●
TKY017	20倍以上	1Hz未満	●
TKY013	20倍以上	1Hz未満	●
TKYH11	20倍以上	1Hz未満	●
夢の島	10～20倍	1Hz未満	●

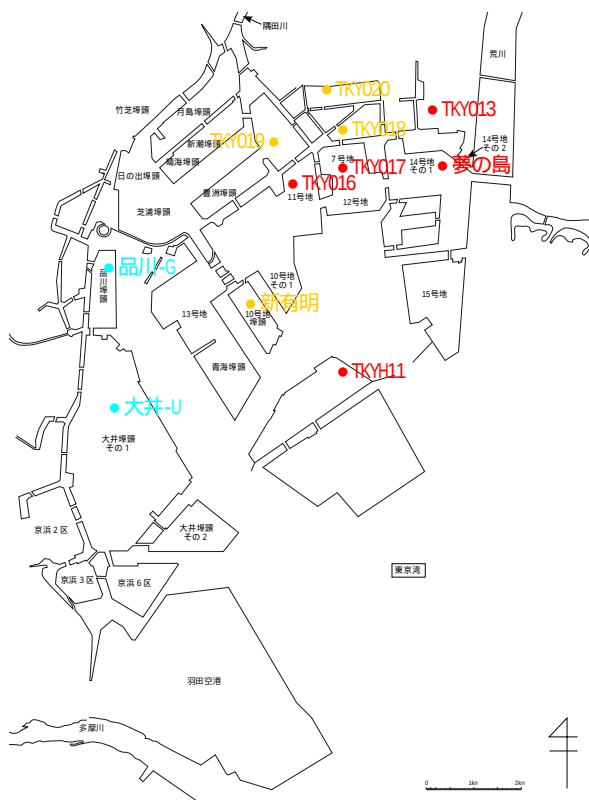


図-7 サイト増幅特性のグルーピング結果

盤モデルが公開⁷⁾されており, 図-8は $V_s=500\text{m/s}$ 層の上面深度分布を示したものである。グルーピング結果の●は■～■, ●は■～■, ●は■～■, ●は■～■というように, 概ね調和的であると考えられる。これは, 工学的基盤以下でインピーダンス比の大きい層が, 品川-G: $V_s=440\text{m/s}$ 層, 新有明: $V_s=551\text{m/s}$ 層, 夢の島: $V_s=521\text{m/s}$ 層, TKYH11: $V_s=390\text{m/s}$ 層となり, $V_s=500\text{m/s}$ に近い層が各地点のサイト増幅特性に影響を及ぼしていることに起因するものと考えられる。

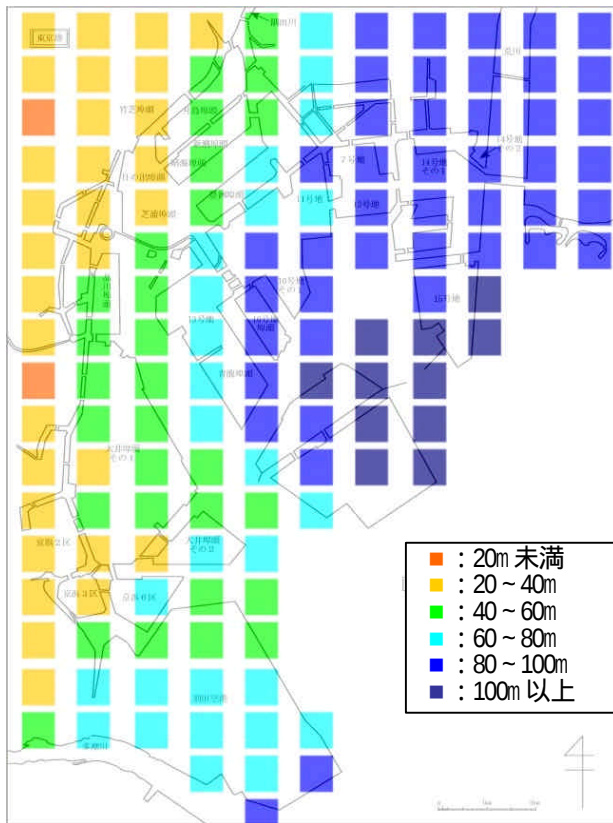


図-8 Vs=500m/sの層の上面深度分布

6. おわりに

新しい港湾の施設に関する技術上の基準において、震源特性・伝播経路特性・深層地盤による地震動増幅特性(サイト増幅特性)といった諸特性を考慮して、設計用地震動(レベル1, 2地震動)を作成することとされている。

港湾エリアが広く、複数得られている東京港において、微動H/Vを用いて、この地震動作成に用いるサイト増幅特性のグルーピングを試みた。なお、グルーピングに際して、港湾構造物に影響が大きいとされる0.3～1.0Hz(1Hz未満の帯域)、1Hz未満の帯域ほどではないが、影響があると考えられている1.0～2.0Hz(1Hz以上の帯域)に着目するものとした。

その結果、以下のことが明らかになった。

深部まで地盤構造が明らかにされている品川-G, 新有明, 夢の島, TKYH11において伝達関数とRayleigh波のH/Vのピーク周波数がよく一致することを示した。伝達関数のピーク周波数はインピーダンス比の大きい層に強く影響を受けることがわかった。

微動H/Vのピーク周波数と伝達関数のピーク周波数がいずれもインピーダンス比の大きい層に強く影響を受けることに着目して、簡便にグルーピングを行うことが可能なことを示した。

港湾構造物に影響が大きいとされる1Hz付近(0.3～2.0Hz)に着目して、東京港におけるサイト増幅特性のグルーピングを行った。その結果、 $V_s=500\text{m/s}$ 層の上面深度分布と調和的であることがわかった。

このように、東京港においてはサイト増幅特性の1Hz付近に着目したグルーピングが、微動H/Vのピーク周波数を用いて簡便に行えることを示した。東京港周辺の基盤構造を考慮すると、本手法は横浜港, 川崎港, 千葉港などの東京湾内の港湾に対しても適用可能であろうと考えられる。しかしながら、他の地域の港湾に適用する場合には、微動H/Vのピーク周波数とそのピークに対応する地盤構造の関係をあらためて検証する必要があり、本手法を多くの地域に汎用的に用いるためにはさらなる検討が必要であると考えられる。

一方、実際に地震動を作成する場合には、さらに防災上の観点や構造物の重要性等を加味して、サイト増幅特性の分類を進めることも重要であると考えられる。

謝辞：本稿を纏めるにあたり、独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの観測記録およびボーリングデータを用いさせていただいた。また、中央防災会議によって公表された東京都における地盤データを用いさせていただいた。ここに記して謝意を表すものである。

付録 TKYH11地点における微動アレー観測

アレー観測については、サンプリング周波数は100Hzとし、表層地盤構造の検討であるためアレー半径として6m, 12m, 28mとし、円周上に正三角形を成すように3点、円中心に1点の計4点にセンサーを配置した。観測時間は6m半径の場合8分、それ以外は11分とした。

観測結果に対して空間自己相関法⁹⁾を適用し、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。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、最下層をPS検層により得られている $V_s=480\text{m/s}$ の層とし、それより上部の層の推定とした。

アレー観測の結果を図-9に示す。図中、6m, 12m, 28mとして示したもの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-10に示す。両者はよく一致してい

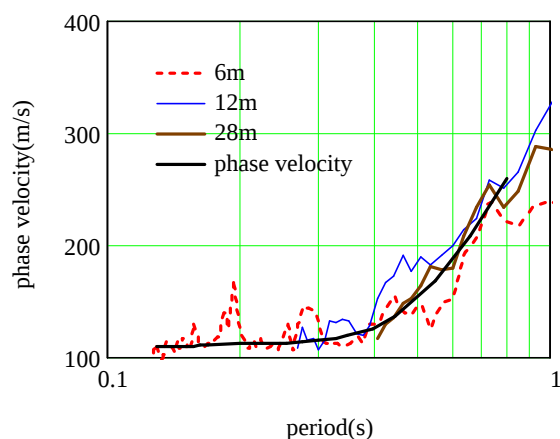


図-9 位相速度算出結果

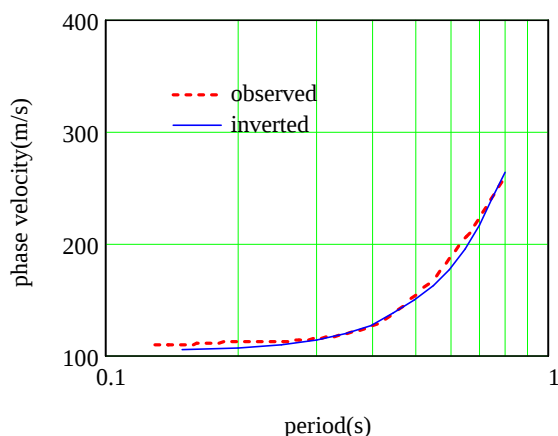


図-10 算出した位相速度 (inverted) と観測位相速度 (observed) の比較

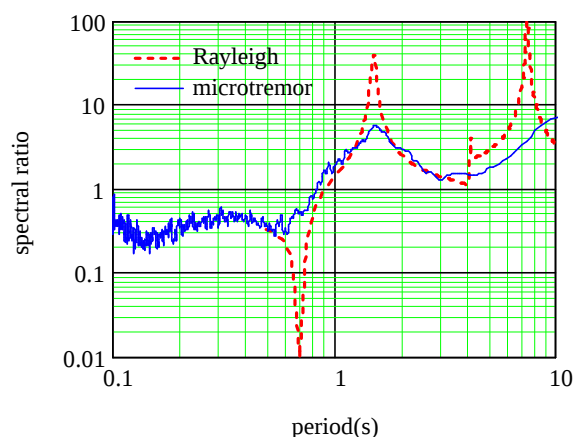


図-11 基本モードレーリー波の H/V スペクトルと常時微動 H/V スペクトルの比較

る。また、逆解析結果による S 波速度構造と、PS 検層による $V_s=480\text{m/s} \sim 2360\text{m/s}$ の層を考慮して評価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-11に示す。1.5 秒付近のピークはよく一致していることから、表層の S 波速度構造の推定は妥当と考えられる。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007. (印刷中)
- 2) 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.
- 3) 増井大輔, 翠川三郎: 工学的基盤での地震動にみられる深い地盤構造による増幅特性, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp.225-232, 2006.
- 4) 東京都港湾局: 新版 東京港地盤図, 2001.
- 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, No.4, pp.579-593, 1986.
- 6) 鈴木宏芳: 江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, 第56号, pp.77-123, 1996.
- 7) 中央防災会議, 東南海, 南海地震等に関する専門調査会, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_nankai.html
- 8) 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, 第489号/ -27, pp.251-260, 1994.
- 9) 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.

(2007.4.6 受付)

GROUPING OF SITE AMPLIFICATION FACTORS IN TOKYO PORT USING H/V SPECTRAL RATIO OF MICROTREMOR

Takashi NAGAO, Masayuki YAMADA, Atsushi NOZU, Kazunobu MOROHOSHI,
Tetsuhito KOBAYASHI and Tadashi ANNAKA

We examined grouping of site amplification factors using the H/V spectral ratio of microtremor to evaluate appropriate design ground motions in Tokyo Port, in which site amplification factors have been evaluated at several strong motion sites using seismograms. In regard to the frequency range from 0.3-2.0 Hz, which affects the seismic performance of port structures, the peak frequency of the H/V ratio shows good coincidence with the peak frequency of the transfer function of the local soil layers which is controlled by the layer boundary with large impedance ratio. A simple scheme is illustrated for the grouping of site amplification factors using the amplitude of site amplification factors and the peak frequency of the H/V ratio of microtremor.