

東日本大震災で被害を受けた港湾における サイト特性の調査

野津 厚¹・若井 淳²

¹ (独) 港湾空港技術研究所地震動研究チームリーダー (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

² (独) 港湾空港技術研究所特別研究員 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: wakai-a@pari.go.jp

東日本大震災で被害を受けた港湾において微動観測および余震観測を実施することにより、サイト特性の面的な把握を行った。具体的には、まず、港湾内で微動観測を面的に実施することにより、港湾全体のサイト特性の概要を把握した。特に、施設背後と既存の強震観測地点における微動特性を比較することにより、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表しているかどうかの判断を行った。強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表していないと判断される場合には、施設の背後において余震観測を行い、当該地点における詳細なサイト特性を明らかにした。さらに、得られた結果を総合して、サイト増幅特性と微動H/Vスペクトルとの対応関係についても調べた。

Key Words : *the Great East Japan Earthquake Disaster, port, strong ground motion, site effect, microtremor*

1. はじめに

大地震の発生により港湾施設が被害を受けた場合、被害原因の究明、復旧方針の策定を行う上で、港湾施設に作用した地震動を把握することは極めて重要である。東日本大震災で被災した港湾の中には、強震記録が得られている港湾も少なくないが¹⁾、最近の知見によると、地震動はサイト特性の影響で狭い範囲でも大きく変化することがあるため^{例えば2)}、強震記録が必ずしも施設に作用した揺れを表しているとは限らない。

サイト特性を解明する上では、地震観測および微動観測が有用である。東日本大震災で被災した港湾においても、地震以前の段階で、これらを活用することにより部分的にはサイト特性の解明が図られてきている。しかしながら、これらの港湾において、今後被害の分析を行っていく上で十分なほど、サイト特性の解明が包括的になされているとは言えない状況である。

そこで、本研究では被災した港湾において微動観測および余震観測を行うことによりサイト特性の把握を行った。具体的には、まず、港湾内で微動観測を面的に実施することにより、港湾全体のサイト特性の概要を把握した。特に、施設背後と既存の強震

観測地点における微動特性を比較することにより、強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表しているかどうかの判断を行った。強震観測地点における揺れが施設に作用した揺れを表していないと判断される場合には、施設の背後において余震観測を行い、当該地点における詳細なサイト特性を明らかにした。これは、今回のような大地震の後には多数の余震が発生するので、通常の時期中に中小地震観測を実施するよりも、短い期間に効率的に記録を取得することができるという点に着目したものである。

なお、微動観測は8つの港湾、余震観測は7つの港湾で実施したが、本稿においては代表例として大船渡港と石巻港における観測について詳しく述べるに止め、他の港湾での観測については結果のみ示す。他の港湾での観測については文献3)で詳細に報告されている。文献3)の付録CDでは、一連の観測で得られた余震観測記録の公開も行っている。

本稿では、既往の研究²⁾と同様、堆積層が地震動に及ぼす影響全般を指す用語として「サイト特性」を、堆積層による(地震基盤から地表までの)地震動フーリエスペクトルの増幅率を指す用語として「サイト増幅特性」を、それぞれ用いる。

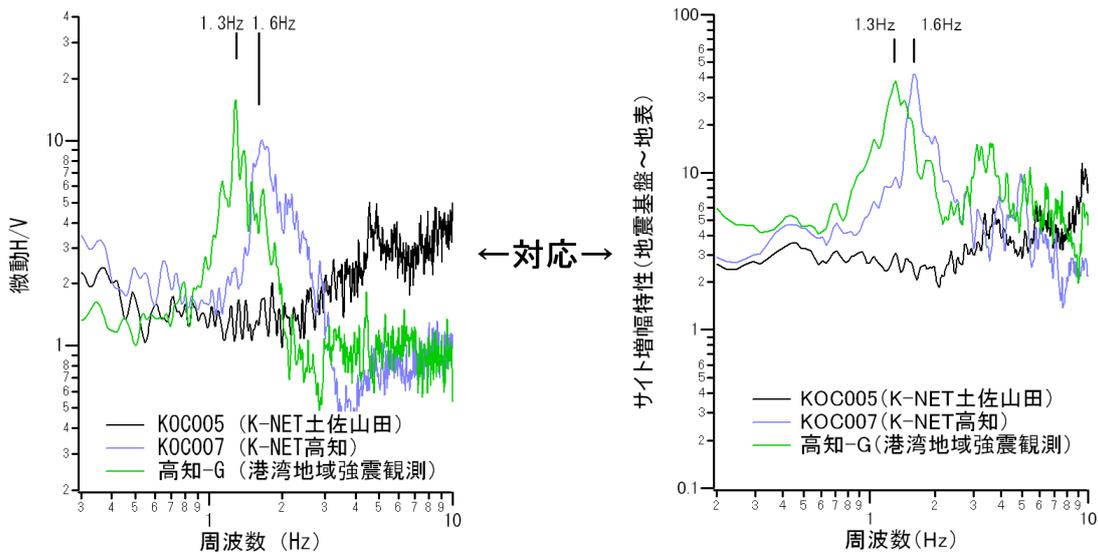


図-1 高知港とその周辺の強震観測地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性²⁾の関係 (ここに示す微動 H/V は 3 区間の平均値)

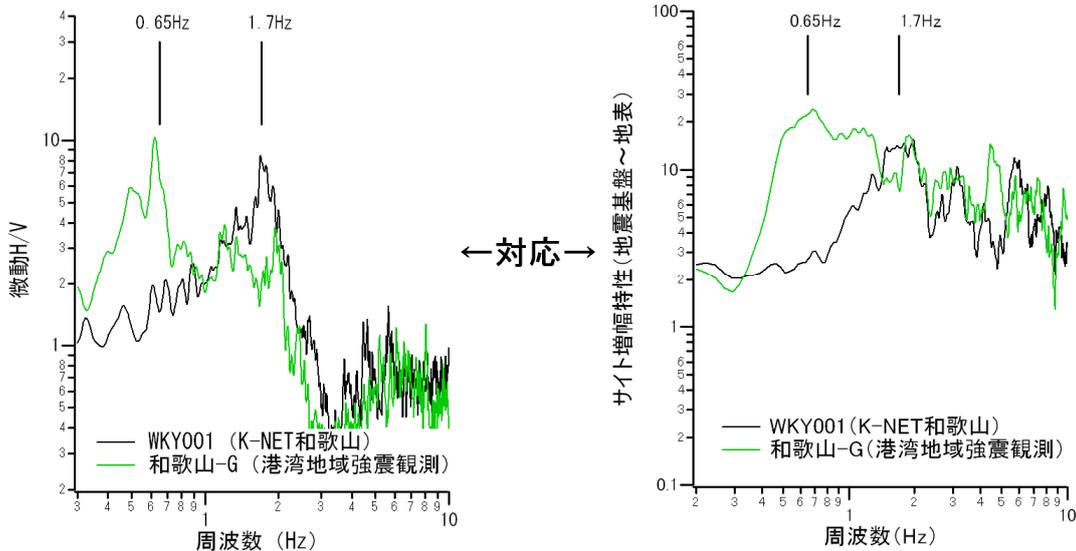


図-2 和歌山港とその周辺の強震観測地点における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性²⁾の関係 (ここに示す微動 H/V は 3 区間の平均値)

2. 本研究における微動H/Vスペクトルの利用方法

対象地点におけるサイト特性を評価する上で最も信頼性の高い方法は地震観測を行う方法であるが、港湾内のあらゆる地点において余震観測を実施することはかなり困難である。そこで、本研究では港湾全体のサイト特性の概要を把握する目的で微動観測を活用する。

微動観測の結果得られる微動H/Vスペクトル⁴⁾は、地震観測から得られるサイト増幅特性との間に一定の対応関係があることが知られている。例えば図-1は高知港とその周辺の強震観測地点において微動観測を実施し、その結果得られた微動H/Vスペクトルを、強震観測記録から評価されたサイト増

幅特性²⁾と比較したものである。ここで微動H/Vスペクトルは文献5)の方法で算定を行っている(本稿に示す以下のすべての微動H/Vスペクトルも同様)。この方法では3区間のデータから微動H/Vスペクトルが算定されるが、図-1ではそれらの平均を示している。高知-Gでは微動H/Vスペクトルが1.3Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET高知では微動H/Vスペクトルが1.6Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET土佐山田では、微動H/Vスペクトルが明瞭なピークを有していないが、サイト増幅特性も同様に明瞭なピークを有していない。このように微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間には一定の対応関係が

認められることは確かである。図-2は和歌山港とその周辺の強震観測地点を対象に同様の検討を実施したものである。ここでもやはり微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間には一定の対応関係が認められる。これらのことから、東日本大震災で被災した港湾においても、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間には一定の対応関係が期待できると考え、港湾全体のサイト特性の概要の把握は微動観測に基づいて行うこととした。ただし、対象地域において微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間に実際に対応関係が認められるかどうかについては、本研究で得られたデータに基づいて検証を行う。

なお、微動H/Vスペクトルからサイト増幅特性を推定することについては、以下に述べるように、いくつかの問題が存在することも事実である。

第一に、ピークの高さの問題がある。図-1、図-2に示すように、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数には良好な対応関係が認められる。このことは、他の地点を対象とした既往の研究でも言及されている⁵⁾。しかしながら、ピーク高さの相関性については様々な議論がある。地域を限定すれば微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク高さに相関性があるとする研究⁵⁾があるものの、図-1に示す高知-GとK-NET高知のようにピーク高さの大小関係が逆転している例も実際に存在する。また、微動H/Vスペクトルがレイリー波の粒子軌跡を示すという現在の標準的な解釈⁶⁾に従う限り、上記のような相関性を理論的には説明できないという問題点も存在する。言い換えれば、もしピーク高さに相関性が存在することが事実なら、それに見合うように、微動H/Vの波動論上の解釈に修正を加えなければならない。

第二に、サイト増幅特性に見られる2次以上の（つまり低周波側から数えて二つ目以上の）ピークが微動H/Vに見られないことが多いという問題がある。上記の例でも、高知-Gのサイト増幅特性に見られる3.3Hz付近のピークと和歌山-Gのサイト増幅特性に見られる1.2Hz付近のピークは微動H/Vには明確には表れていない。

これらの問題が存在することから、本研究では微動H/Vを港湾全体のサイト特性の概略的把握という目的に限定して用いることとし、サイト特性の詳細な把握は余震観測に基づいて行うこととした。なお、上で述べたような事情で、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク高さの相関性の有無を地域毎に調べることはたいへん重要である。そこで、本研究の最後ではこの点についての検討も実施する。

3. 微動観測と余震観測—大船渡港の場合

(1) 微動観測

大船渡港ではこれまで微動観測データの蓄積が

表-1 大船渡港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	K-NET大船渡 (K-NETの強震観測地点)
No.2	大船渡防地-G (港湾の強震観測地点)
No.3	茶屋前地区背後
No.4	茶屋前地区岸壁 (-9m) 背後
No.5	茶屋前地区栈橋 (-6m) 背後
No.6	野々田地区栈橋 (-7.5m) 背後 (今回の余震観測地点)
No.7	野々田地区栈橋 (-13m) 背後
No.8	永浜・山口地区栈橋 (-13m) 背後



写真-1 K-NET大船渡における微動観測状況



写真-2 野々田地区No.6地点における微動観測状況

無いので、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、主要な係留施設と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。観測を実施した場所を図-3および表-1に示す。このうちNo.6は余震観測を実施した地点である。写真-1および写真-2に微動観測の状況を示す。観測に使用した機器は(株)アカシ製のGPL-6A3Pである。

微動観測地点のうち二か所が強震観測地点であるので、それらの地点において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性と微動H/Vスペクトルとの比較を行った。結果を図-4に示す。なお、ここで示した強震観測地点のサイト増幅特性のうち、K-NET大船渡のものは文献2)、大船渡防地-G (港湾地域強震観測の観測点)のものは文献7)によるものである。この図からわかるように、K-NET大船渡、

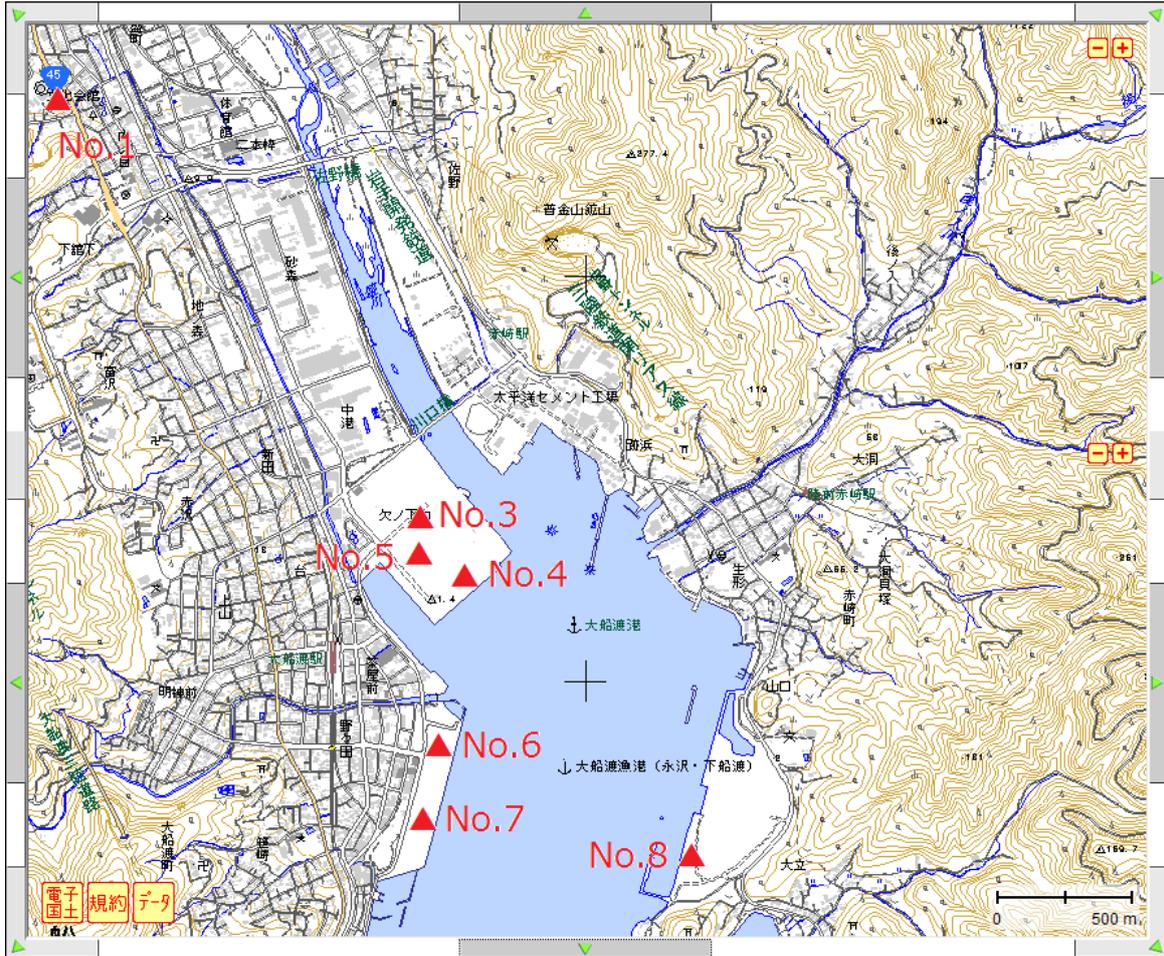


図-3 大船渡港における微動観測地点 (No.2地点は大船渡湾口防波堤の基部にあたり、地図の表示範囲外)

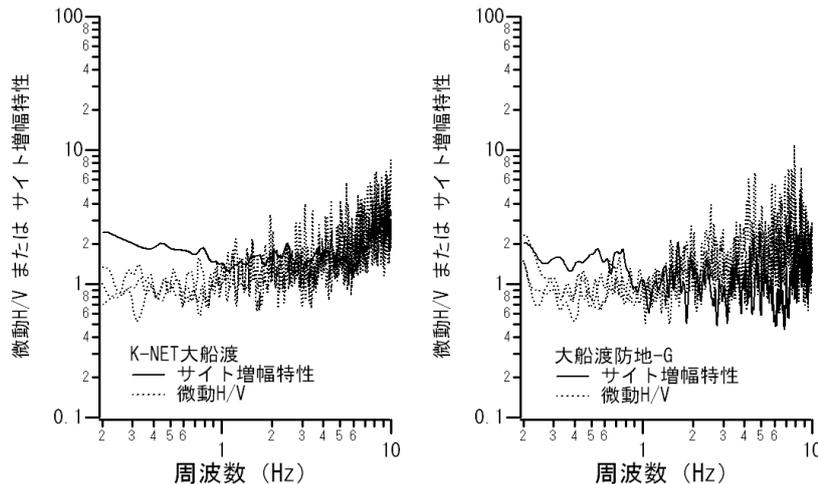


図-4 大船渡港周辺の強震観測地点における微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の関係

大船渡防地-Gとも、微動H/Vスペクトルは明瞭なピークを有しておらず、またサイト増幅特性も同様に明瞭なピークを有していない。いずれも岩盤としての特徴を有する観測点であると考えられる。

これに対し、図-5は、K-NET大船渡と今回の余震観測地点 (No.6) での微動H/Vをリファレンスとして、他の地点における微動H/Vを示したものであ

る。余震観測地点における微動H/Vは1.2Hz付近に明瞭なピークを有しており、既存強震観測地点の微動H/Vとは全く異なる形状となっていることがわかる。茶屋町地区背後 (No.3~No.5) の微動H/Vは余震観測地点とかなり類似した特性を示す。野々田地区棧橋 (-13m) 背後 (No.7) における微動H/Vは余震観測点と比較してやや短周期側にピークが

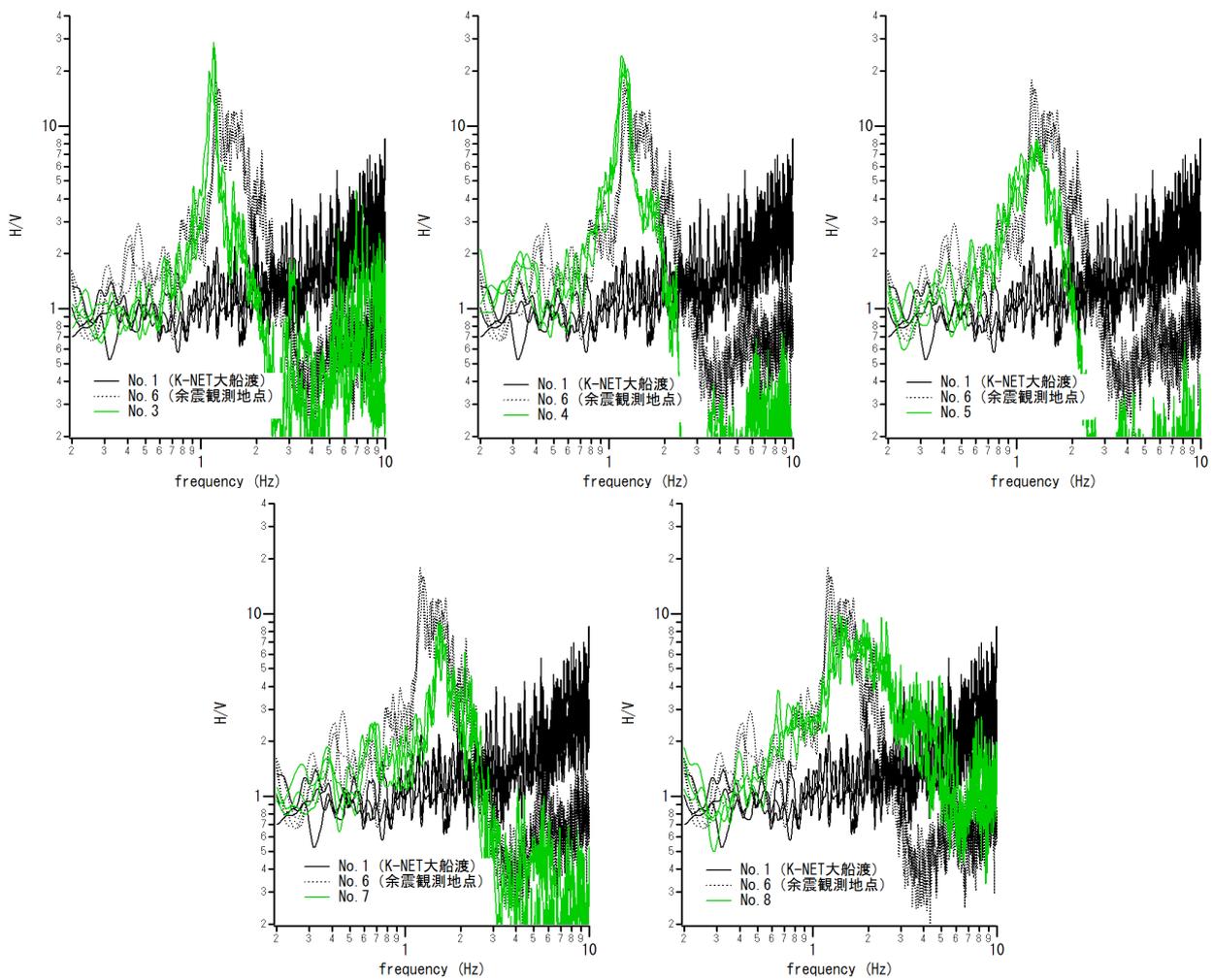


図-5 大船渡港の係留施設の背後で得られた微動H/V (余震観測地点の微動H/Vとの比較)



写真-3 大船渡港で余震観測を実施した場所 (左のテント) と地震計の設置状況

表-2 大船渡港の余震観測において観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード
EQ1	6/18 10:40	宮城県沖	約 50km	4.0
EQ2	6/18 20:31	福島県沖	約 30km	5.9
EQ3	6/20 0:49	宮城県沖	約 40km	4.3

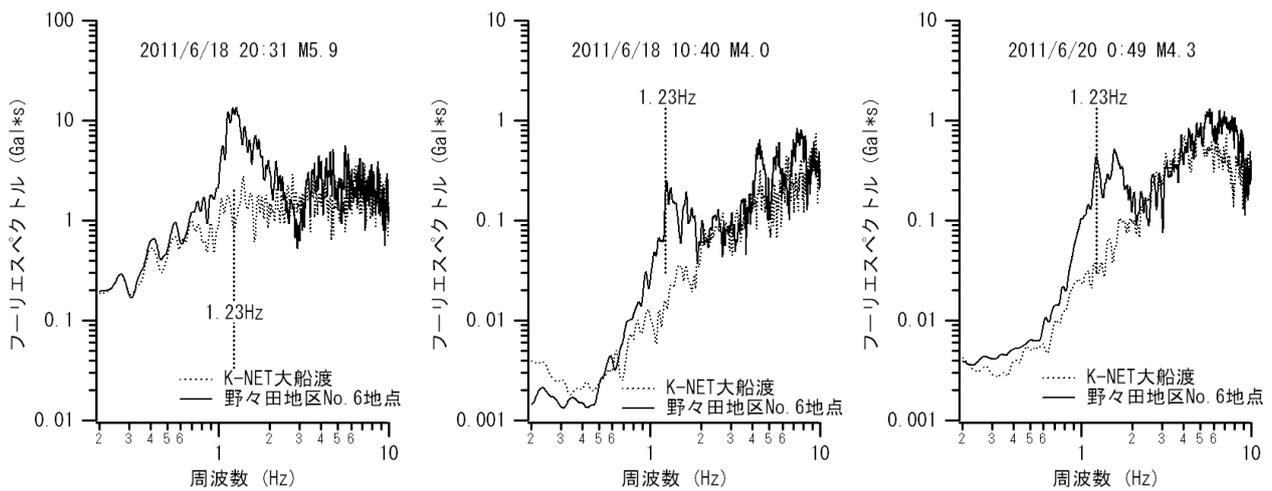


図-6 各地震による K-NET 大船渡と野々田地区 No.6 地点のフーリエスペクトル

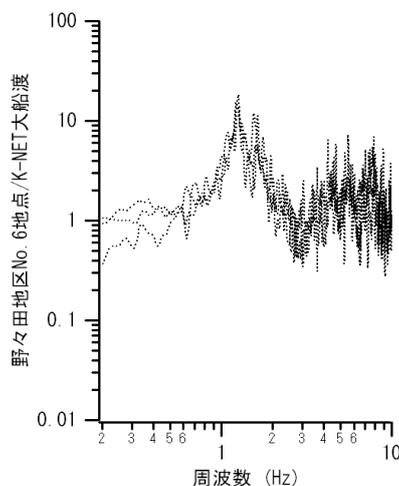


図-7 K-NET 大船渡に対する野々田地区 No.6 地点のフーリエスペクトル比

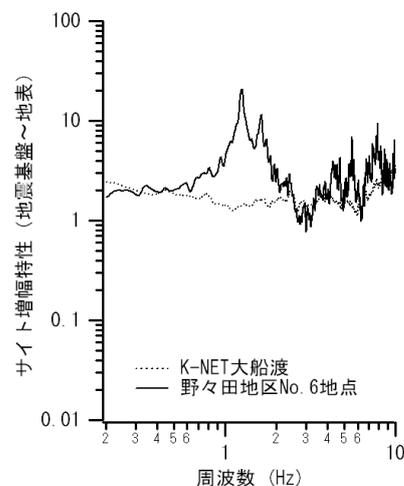


図-8 野々田地区 No.6 地点におけるサイト増幅特性

あるものの大ききは異ならない。永浜・山口地区 栈橋 (-13m) 背後 (No.8) における微動H/Vは余震観測点とかなり類似した特性を示す。以上のことから、大船渡港の主な係留施設におけるサイト特性は比較的一様であると考えられる。また、係留施設の背後における微動H/Vスペクトルはいずれも大船渡防地-Gにおける微動H/Vスペクトルと大きく異なっているので、大船渡防地-Gで得られた東北地方太平洋沖地震の記録¹⁾は、湾口防波堤に作用した地震動として扱うことはできるが、係留施設に作用した地震動としては扱うことはできないと考えられる。

(2) 余震観測

大船渡港における余震観測は野々田地区 栈橋 (-7.5m) 背後のテント下 (図-3のNo.6地点) で実施した。観測は6月16日夕方から6月20日朝にかけて実施した。観測に使用した機器は白山工業 (株) 製のJU-210である。この間、K-NET大船渡 (図-3のNo.1地点) でも観測が行われており、そこでの余震観測記録は防災科学技術研究所のホームページから公開されている。そこで、以下においては

野々田地区No.6地点における余震観測記録とK-NET大船渡での記録を比較する。なお、写真-3に余震観測の状況を示す。

余震観測の結果、K-NETと野々田地区No.6地点における同時観測記録として、表-2に示す3地震の記録が得られた。各地震による各地点のフーリエスペクトル (水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの) を図-6に示す。地震によらず野々田地区No.6地点の記録には1.2Hz付近にピークがあり、K-NETとは地震動特性が異なっていることが伺える。K-NETに対する野々田地区No.6地点のスペクトル比を図-7に示す。地震毎のばらつきは小さいことがわかる。このスペクトル比の対数平均をK-NET大船渡のサイト増幅特性 (図-4) に乗じることにより得られた野々田地区No.6地点のサイト増幅特性を図-8に示す。野々田地区No.6地点におけるサイト増幅特性は、K-NET大船渡におけるサイト増幅特性と大幅に異なり、1.2Hz付近にピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性と同じ地点の微動H/Vスペクトル (図-5) との間には良好な対応関係が認められる。

(3) 大船渡港における観測結果のまとめ

大船渡港における観測結果は次の通りまとめることができる。

- ①大船渡港の主な係留施設の背後で得られた微動H/Vスペクトルは余震観測地点における微動H/Vスペクトルと大きくは異なる。主な係留施設における地震動特性は比較的一様であると考えられる。
- ②野々田地区棧橋 (-7.5m) 背後において余震観測を行いサイト増幅特性の評価を行った。その結果、1.2Hz付近にピークを有するサイト増幅特性が得られた。
- ③大船渡防地-Gで得られた東北地方太平洋沖地震の記録は、湾口防波堤に作用した地震動として扱うことはできるが、係留施設に作用した地震動としては扱うことはできないと考えられる。

4. 微動観測と余震観測－石巻港の場合

(1) 微動観測

石巻港でもこれまで微動観測データの蓄積が無いので、港湾全体のサイト特性の概要を把握するため、公共埠頭と強震観測地点をカバーするように微動観測を実施した。観測に使用した機器は白山工業(株)製のJU-210である。観測を実施した場所を図-9および表-3に示す。このうちNo.9は余震観測を実施した地点である。

まず、K-NET石巻において、強震観測結果に基づくサイト増幅特性²⁾と微動H/Vスペクトルとの比較を行った。結果を図-10に示す。この図からわかるように、K-NET石巻では微動H/Vスペクトルが0.95Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数に明瞭なピークを有しており、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との対応関係は非常に良好である。

図-11は、K-NET石巻における微動H/Vスペクトルをリファレンスとして、他の地点における微動H/Vスペクトルを示したものである。これらの図において、縦の破線は、余震観測点とK-NETでの微動H/Vスペクトルのピークである0.7Hzと0.95Hzを示したものである。これらの図から、まず、中島埠頭、大手埠頭、日和埠頭の微動特性はK-NETの特性に近いことがわかる。潮見埠頭と南浜埠頭の微動特性についても、やはりK-NETに近い。ただし、詳細に見ると潮見埠頭についてはK-NETよりもピーク周波数がやや高周波側となっている。これは潮見埠頭が日和山(図-9)にやや近い位置にあり、堆積層がやや薄いためである可能性がある。雲雀野埠頭岸壁(-10m)は、位置的にはK-NETよりも余震観測点に近いが、その微動H/VスペクトルはK-NETに近い。さらに、雲雀野埠頭岸壁(-13m)背後の3箇所(北、中央、南)における微動H/Vスペクトルを見ると、南側の特性は中央(=余

震観測点)の特性に近いが、北側の特性は中央(=

表-3 石巻港における微動観測地点一覧

番号	観測地点
No.1	K-NET 石巻 (K-NETの強震観測地点)
No.2	中島埠頭
No.3	大手埠頭
No.4	日和埠頭
No.5	潮見埠頭
No.6	南浜埠頭
No.7	雲雀野埠頭岸壁 (-10m)
No.8	雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後 (北)
No.9	雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後 (中央) (今回の余震観測地点)
No.10	雲雀野埠頭岸壁 (-13m) 背後 (南)



写真-4 余震観測を実施した場所と地震計の設置状況

余震観測点)とK-NETの中間的な特性となっていることがわかる。このことは、雲雀野埠頭岸壁(-13m)の北側から中央部にかけて堆積層が厚くなっていることを示唆するものと考えられる。

(2) 余震観測

石巻港における余震観測地点としては、K-NETと特性が異なっており、かつ、復旧事業が予定されている雲雀野埠頭岸壁(-13m)を選定した。観測は5月13日夕方から5月16日朝にかけて実施した。観測地点は図-9のNo.9地点(▲で示す)である。K-NET石巻(図-9のNo.1地点)では余震観測期間中も観測が継続されており、その記録は防災科学

技術研究所のホームページから公開されている。



図-9 石巻港における余震観測地点 (▲) と微動観測地点 (△)
 緑の枠で示すゾーンについては本文参照

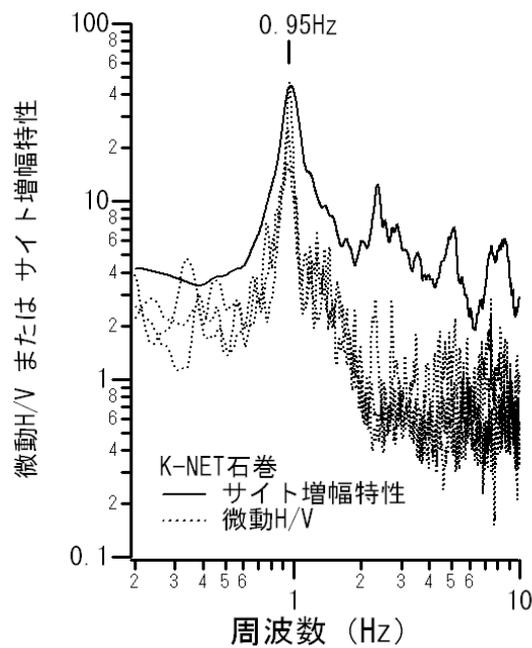


図-10 K-NET 石巻における微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

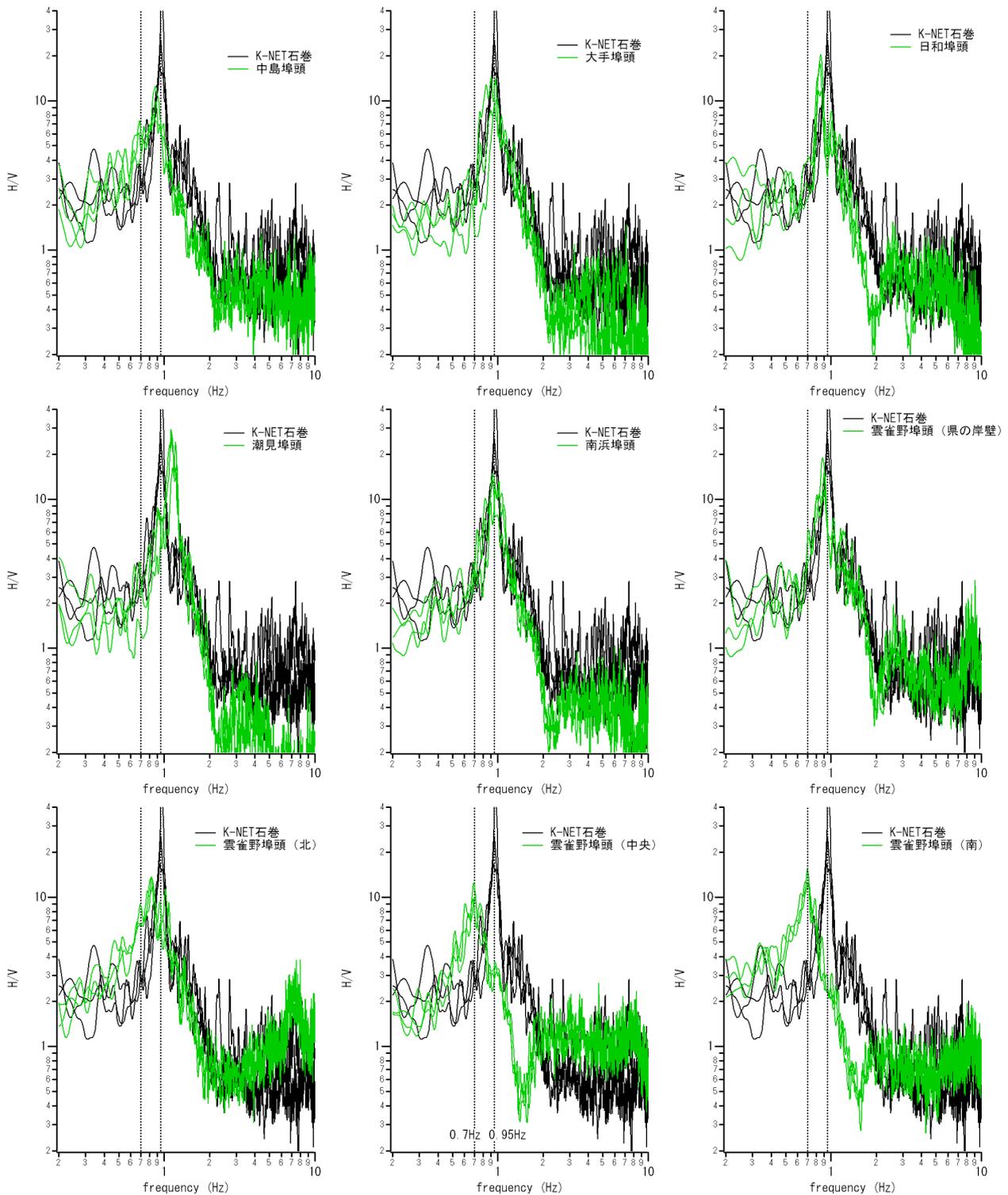


図-11 係留施設の背後で得られた微動H/V (K-NET石巻の微動H/Vとの比較)

そこで以下においては雲雀野埠頭No.9地点における余震観測記録とK-NET石巻での記録を比較する。写真-4に余震観測の状況を示す。観測に使用した機器は白山工業(株)製のJU-210である。

余震観測の結果、K-NETと雲雀野埠頭における同時観測記録として、表-4に示す7地震の記録が得られた。各地震による各地点のフーリエスペクトル(水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したもの)を図-12に示

す。K-NET石巻では常に0.95Hz付近にピークがあるのに対し、雲雀野埠頭No.9地点では常に0.7Hzのところにピークがあり、地震動特性が異なっていることが示唆される。K-NET石巻に対する雲雀野埠頭No.9地点のスペクトル比を図-13に示す。先に示したフーリエスペクトルの特性を反映して、スペクトル比においては、0.7Hz付近に山が、0.95Hz付近に谷が現れており、地震毎のばらつきは非常に少ない。このスペクトル比の対数平均をK-NET

表-4 石巻港の余震観測において観測された地震

地震番号	日時	震央地名	深さ	マグニチュード
EQ1	5/14 5:17	福島県沖	約 40km	4.4
EQ2	5/14 8:36	福島県沖	約 30km	5.7
EQ3	5/15 1:45	宮城県沖	約 40km	4.0
EQ4	5/15 8:51	福島県沖	約 50km	5.0
EQ5	5/15 18:56	宮城県沖	約 50km	4.1
EQ6	5/15 21:14	福島県沖	約 10km	5.4
EQ7	5/16 4:07	宮城県沖	約 50km	4.6

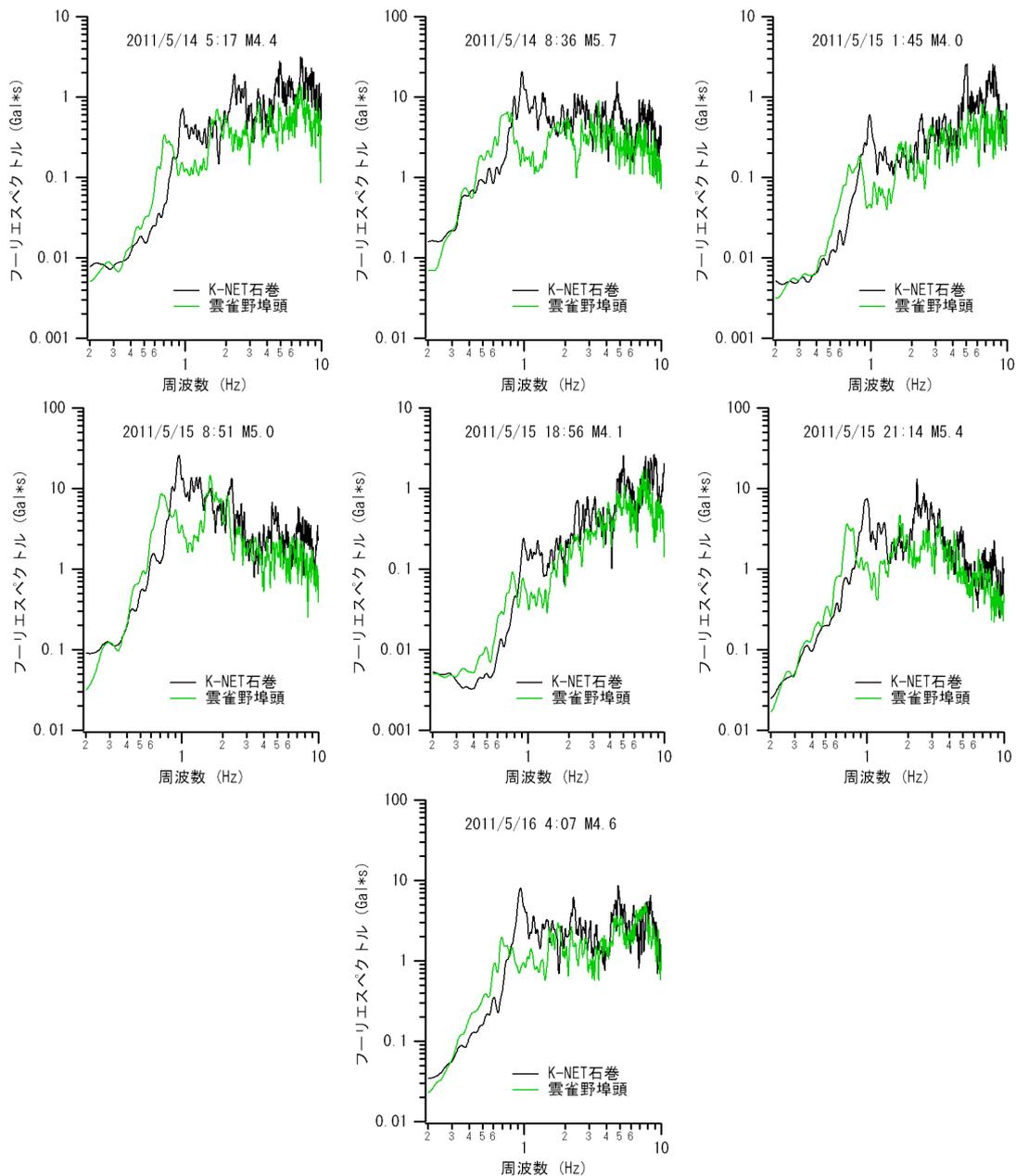


図-12 各地震によるK-NET石巻と雲雀野埠頭No.9地点のフーリエスペクトル

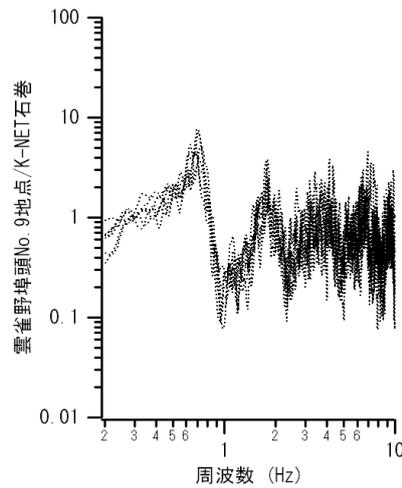


図-13 K-NET石巻に対する雲雀野埠頭 No.9 地点のフーリエスペクトル比

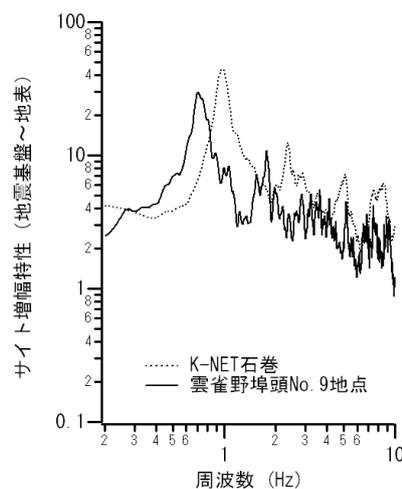


図-14 雲雀野埠頭 No.9 地点におけるサイト増幅特性

石巻のサイト増幅特性²⁾に乗ることにより得られた雲雀野埠頭No.9地点におけるサイト増幅特性を図-14に示す。この結果から、K-NET石巻では0.95Hzにサイト増幅特性のピークがあるのに対し、雲雀野埠頭No.9地点では0.7Hzにピークがあることがわかる。ここで得られたサイト増幅特性は同じ地点における微動H/Vスペクトルと調和的である。なお雲雀野埠頭No.9地点の方がピーク周波数が低周波側となっているのは、K-NETよりも雲雀野埠頭No.9地点の方が地震基盤上に存在する堆積層が厚いためであると考えられる。

(3) 石巻港における観測結果のまとめ

石巻港における観測結果は次の通りまとめることができる。

- ① K-NET石巻ではサイト増幅特性および微動H/Vのピークがともに0.95Hzであるのに対し、雲雀野埠頭岸壁(-13m)ではサイト増幅特性および微動H/Vのピークがともに0.7Hzであり、両者の地震動特性は異なる。
- ② 各埠頭での微動観測結果によれば、雲雀野埠頭岸壁(-13m)を除く各埠頭の微動H/Vスペクトルは、雲雀野埠頭岸壁(-13m)よりもK-NET石巻

に近い。

また、これらの結果を踏まえると、石巻港では地震動の観点からは図-9に緑の枠で示すようなゾーニングが可能であると考えられる。ここに、
 ゾーン1：微動H/VスペクトルがK-NET石巻と類似しているゾーン
 ゾーン2：微動H/Vスペクトルのピーク周波数がK-NET石巻よりも低周波側に存在し、今回得られた雲雀野埠頭No.9地点のサイト増幅特性が利用可能なゾーン

5. 観測結果の整理と考察

ここでは、本稿で紹介しなかった他の港湾における微動観測結果および余震観測結果³⁾を含め整理するとともに、これらのデータに基づき、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との関係、および、サイト増幅特性と被害との関係について考察を行う。

- (1) 微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との関係
 余震観測に基づくサイト増幅特性の評価は、本

表-5 サイト増幅特性と微動H/Vスペクトルの双方が得られている地点の一覧

対象地域	地震観測地点	微動H/Vスペクトル		サイト増幅特性	
		ピーク周波数 (Hz)	ピーク高さ	ピーク周波数 (Hz)	ピーク高さ
久慈港周辺	K-NET久慈	0.44	3.01	0.56	5.11
	久慈港出張所	1.15	13.95	0.92	15.95
宮古港周辺	宮古-G	6.12	5.80	6.49	7.42
	K-NET宮古	1.11	3.88	1.32	6.73
	藤原地区No.6地点	1.11	16.75	0.98	45.90
釜石港周辺	釜石-G	-	-	-	-
	K-NET釜石	3.64	20.28	3.66	18.00
	須賀地区No.3地点	1.21	24.67	1.11	91.49
大船渡港周辺	大船渡防地-G	-	-	-	-
	K-NET大船渡	-	-	-	-
	野々田地区No.6地点	1.25	15.33	1.26	20.79
石巻港周辺	K-NET石巻	0.96	27.94	0.97	44.80
	雲雀野埠頭No.9地点	0.69	10.38	0.70	29.71
仙台塩釜港周辺	仙台-G	8.87	12.92	8.62	7.22
	高松埠頭	1.63	10.84	1.39	19.52
	雷神埠頭	1.19	16.33	1.34	21.74
	高砂埠頭	0.68	6.37	1.37	19.69
相馬港周辺	相馬-G	0.81	5.86	0.78	9.11
小名浜港周辺	小名浜事-G	5.05	4.60	5.27	11.00
	3号埠頭	1.02	5.99	1.00	27.18
	5号埠頭	2.70	3.19	4.86	21.55
	藤原埠頭	2.91	6.27	4.76	34.05
	大剣埠頭	3.51	4.15	4.75	25.65

稿で紹介しなかった港湾も含め、7つの港湾（9地点）において実施した³⁾。この結果、これらの港湾およびその周辺において地震観測記録に基づくサイト増幅特性と微動H/Vスペクトルの双方が得られている地点は表-5に示すとおり合計23地点となった。そこで、これらのデータに基づいて改めて微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の関係について考察する。

各地点における微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性を比較したものが図-15である。この図から、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の間には良好な対応関係があることがわかる。微動H/Vスペクトルにピークがある場合には、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有すること、微動H/Vスペクトルに明瞭なピークがない場合には、サイト増幅特性にも明瞭なピークの無い傾向があること（大船渡防地-G, K-NET大船渡など）などがわかる。

図-15から微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数およびピーク高さを読み取ると表-5のようになる。ここで微動H/Vスペクトルおよびサイト増幅特性が明瞭なピークを示さない地点については読み取りを行っていない。この表をもとにピーク周波数およびピーク高さの対応関係をプロットすると図-16に示すとおりとなる。まず図-16左に示すピーク周波数については、両者の対応

関係は非常に良好である（対数値の相関係数は0.9569）。微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数が良好な対応関係を示すことはすでに既往の研究でも指摘されているが^{例え5)}、本研究でこのことが改めて検証されたと言える。一方、図-16右に示すピーク高さについても、ピーク周波数と比較してばらつきは大きいものの、両者は明らかに相関性を有している（対数値の相関係数は0.5659）。2.で述べたように、長尾他⁵⁾は、ある程度地域を限定した場合、微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性のピーク高さは相関性を示すと述べている。ピーク高さの相関性については現在様々な議論があるが、少なくとも東北の港湾を対象とした本研究の結果は、長尾他⁵⁾の見解を支持するものである。ピーク高さの相関性に関しては、微動H/Vスペクトルがレイリー波の粒子軌跡を示すという現在の標準的な解釈⁶⁾に従う限り、相関性を波動論的に説明することができないという問題点が残されている。波動論の立場から両者の相関性を否定する見解が出されることもあるが、観測事実を軽視すべきではなく、むしろ、相関性があることを前提として、それに見合うように、微動H/Vの波動論上の解釈に修正を加えていく必要があるように思われる。

なお、設計実務上は、微動H/Vスペクトルからサイト増幅特性を推定できるかどうかが重要である。

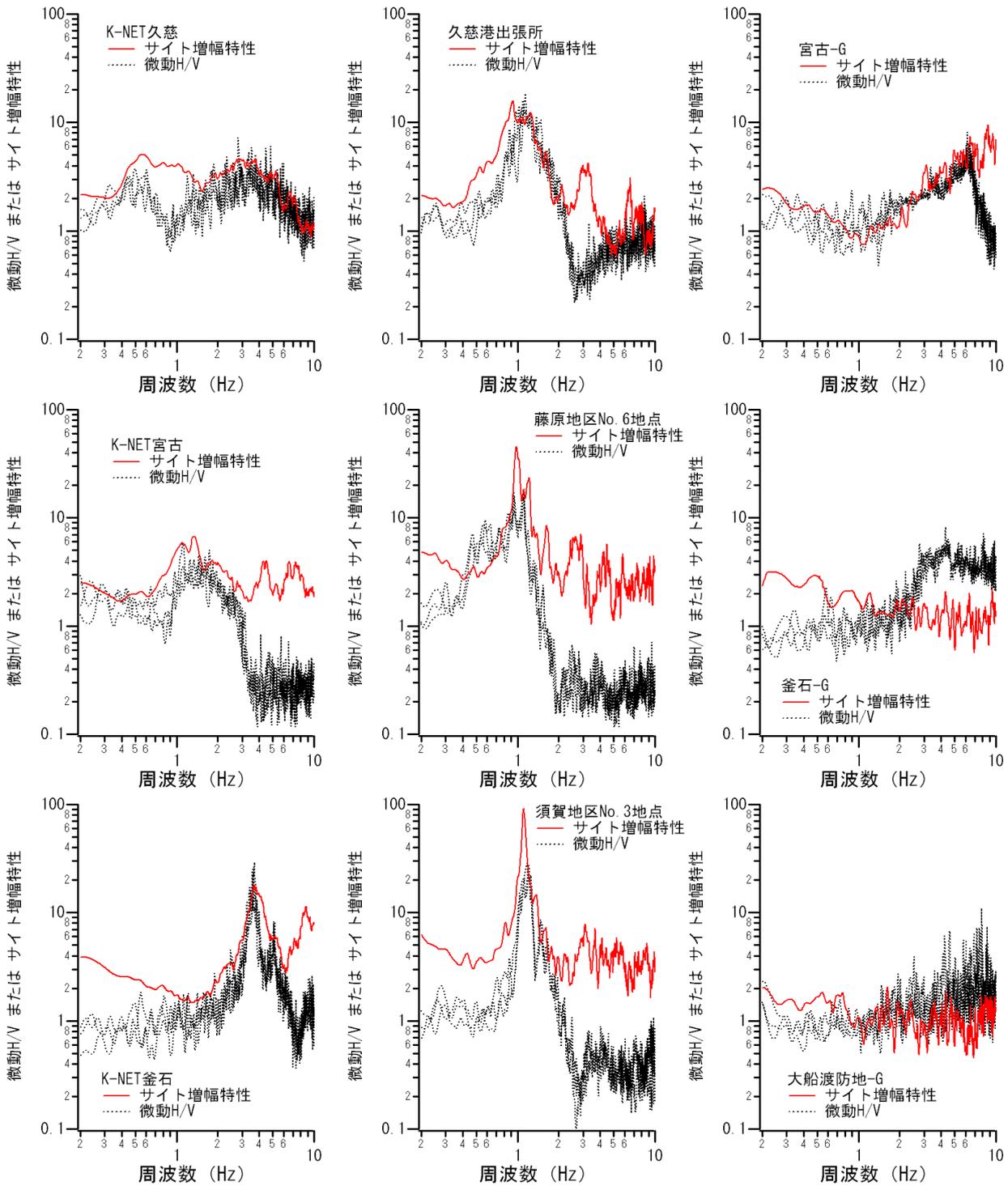


図-15 各地点におけるサイト増幅特性と微動H/Vスペクトルの比較

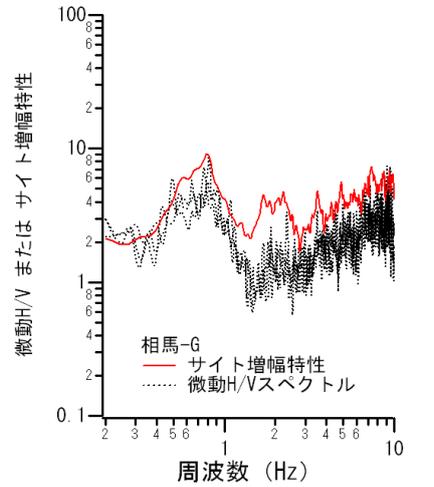
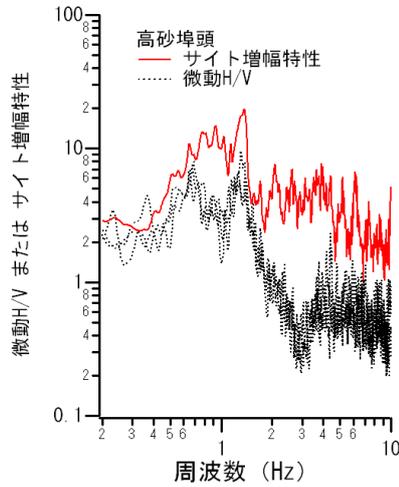
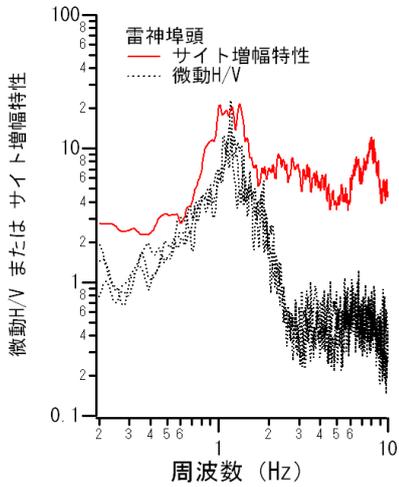
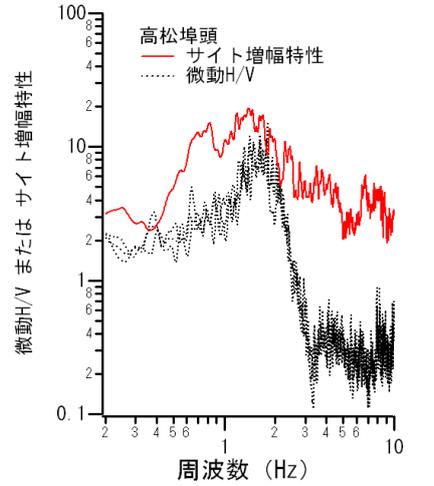
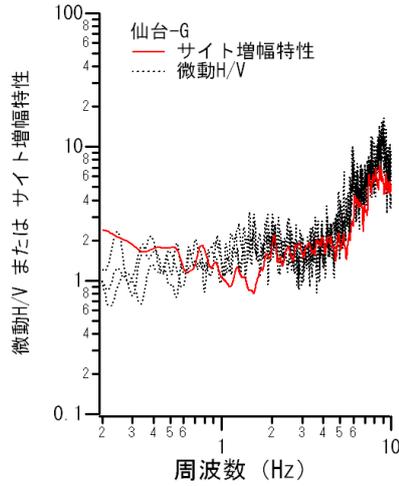
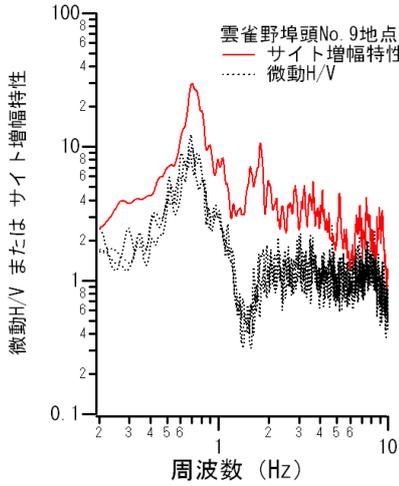
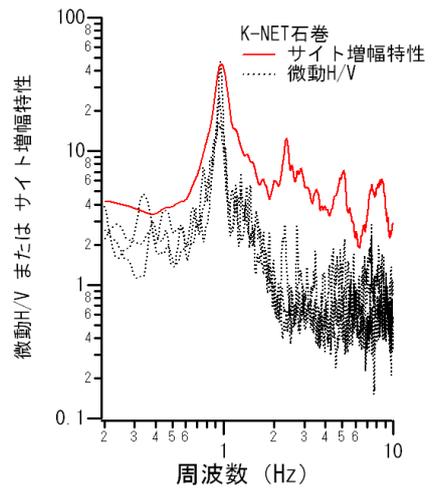
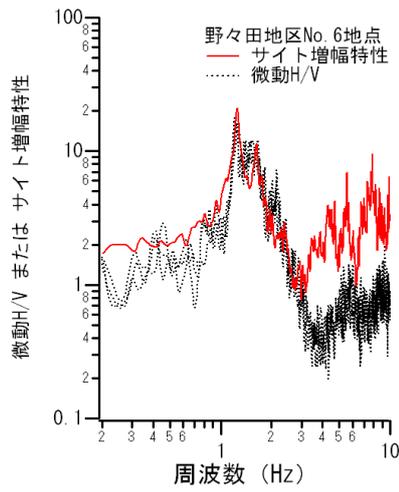
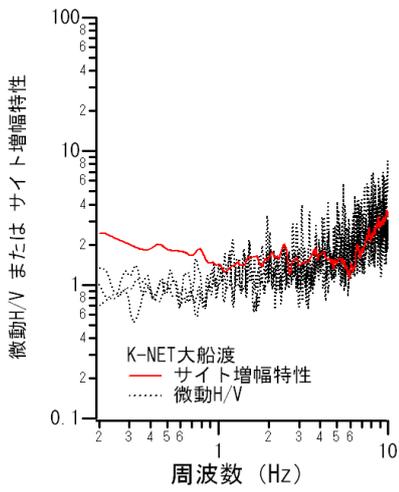


図-15 (つづき)

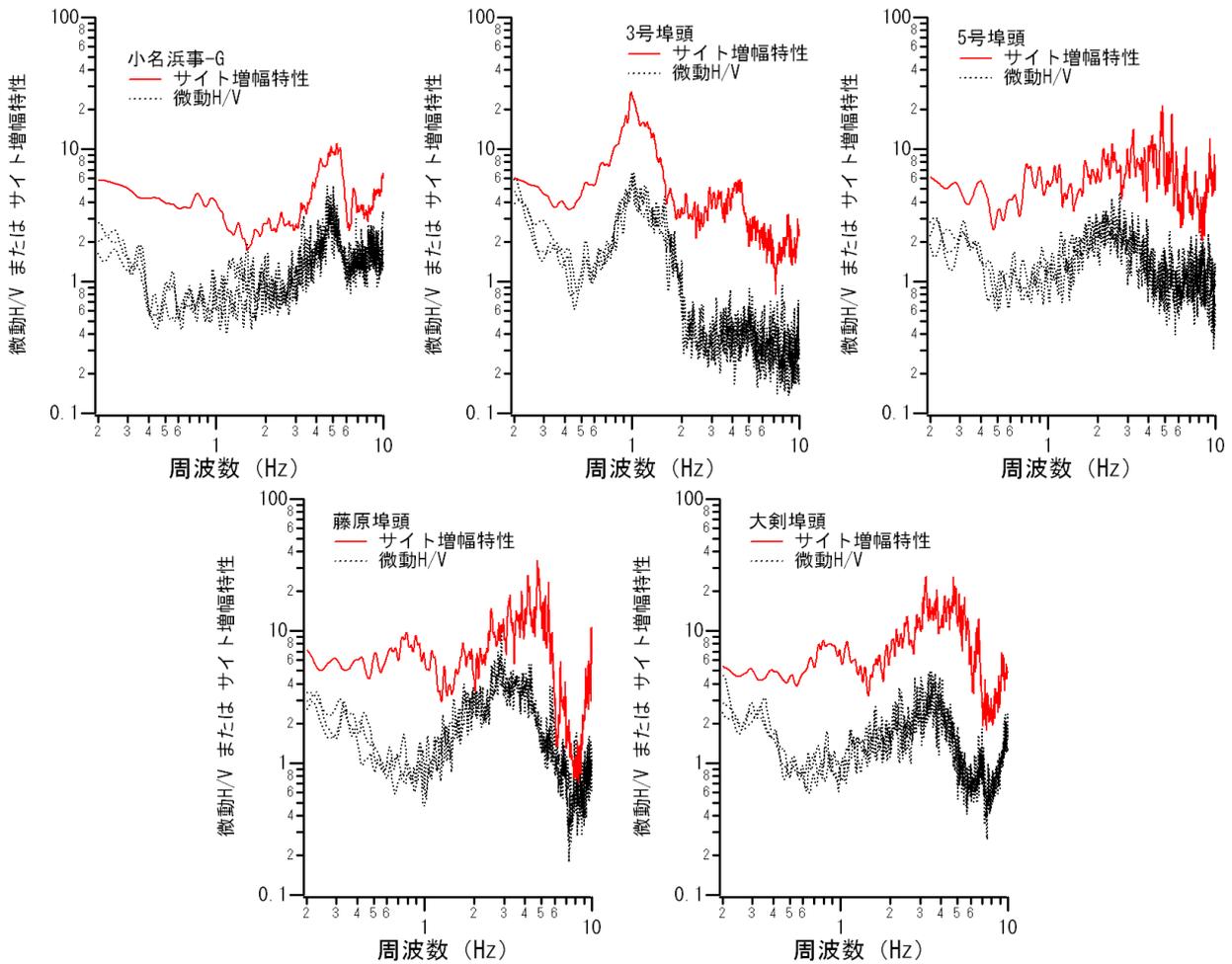


図-15 (つづき)

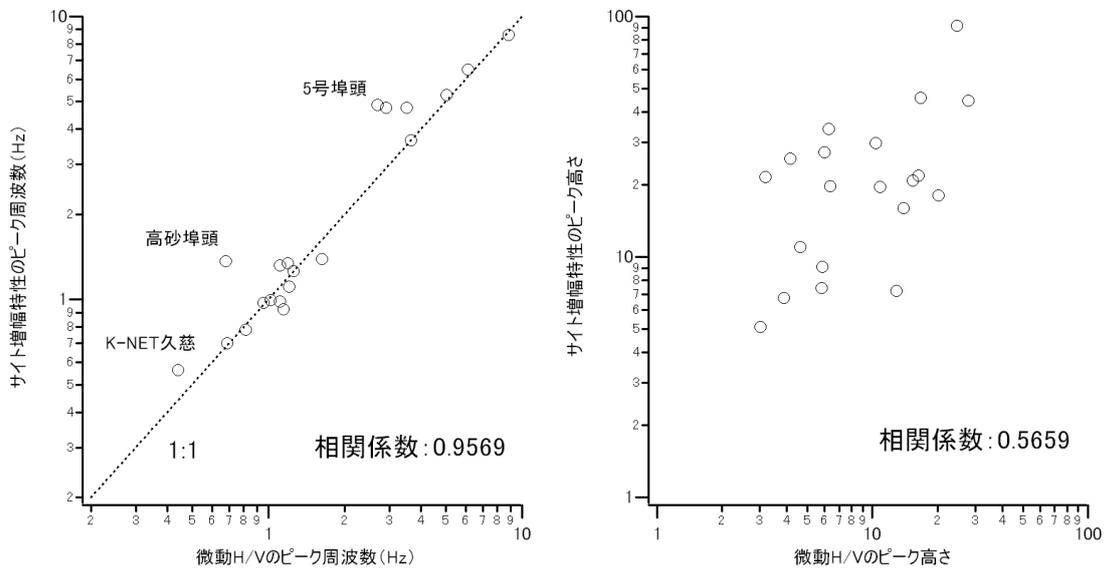


図-16 微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数およびピーク高さの対応関係
(左) ピーク周波数. (右) ピーク高さ.



図-17 石巻港の各埠頭における被害状況

図-16を見る限り、両者のピーク高さは相関性を有するとは言え、かなりのばらつきを伴っている。また、このことに加え、仙台塩釜港（仙台港区）高松埠頭の例に見られるように、サイト増幅特性が二つのピークを有するにも関わらず（0.8Hz付近および1.4Hz付近）、微動H/Vスペクトルには低周波側のピークが表れていないケースも存在する。このようなことから、微動H/Vスペクトルからのサイト増幅特性の推定にはかなりの不確実性が伴うのが現状である。従って、重要構造物の設計のために照査用地震動を設定する場合等には、現地での地震観測に基づいてサイト増幅特性を評価することが望ましい。

(2) サイト増幅特性と被害との関係

本研究で対象とした港湾の中には、係留施設の背後におけるサイト増幅特性が一様ではない港湾も存在している。4. で述べた石巻港はこのような港湾の例である。ここでは石巻港を対象に、サイト増幅特性と被害との関係について考察する。

石巻港は、地震動の観点から、微動H/Vスペクトルが0.95Hzあるいはそれより若干高周波側にピークを有するゾーン1と、微動H/Vスペクトルが0.7Hz付近にピークを有するゾーン2に区分できることは4. で述べた通りである。それに対して、東北地方太平洋沖地震による被害状況を見ると、図-17に示すように、ゾーン2に属する雲雀野埠頭岸壁（-

13m）では岸壁背後に比較的大きい段差が生じているのに対し、ゾーン1に属する各埠頭では、日和埠頭と南浜埠頭で岸壁背後に若干の段差が生じているものの、全体として岸壁背後の段差は小さく、地震動による被害としては軽微な被害にとどまっていると言える。サイト増幅特性と被害との間に対応関係が認められる例であると考えられる。

同様に、小名浜港についても、サイト増幅特性と被害との間に明瞭な対応関係が認められる³⁾。今後、これらについて、数値解析を含むより詳細な検討が行われることが望ましい。

6. まとめ

本研究は東日本大震災で被災した港湾において微動観測および余震観測を行うことによりサイト特性の把握を行ったものである。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- ①本稿で紹介しなかった港湾も含めると、微動観測を実施した8つの港湾において、港湾全体のサイト特性の概要を把握することができた。また、余震観測を実施した7港湾（9地点）では詳細なサイト特性を把握することができた。
- ②本研究で得られたデータに基づいて微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の関係について検討したところ、ピーク周波数のみならず、ピーク高

さについても、一定の相関が認められた。微動H/Vスペクトルに関する今後の研究の方向性を考える上で重要な結果であると考えられる。

③係留施設の背後におけるサイト増幅特性が一様ではない港湾を対象として、サイト増幅特性と被害との対応について検討したところ、両者の間には一定の対応関係があることが示唆された。なお、本研究で評価されたサイト増幅特性を利用して地震動の事後推定³⁾が行われている。また、前述の通り、本研究で得られた余震観測記録は、文献³⁾の付録CDに収録されている。

謝辞：本研究では東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所、釜石港湾事務所、同久慈港出張所、同宮古港出張所、塩釜港湾・空港整備事務所、同石巻港出張所、小名浜港湾事務所、同相馬港出張所の皆様にたいへん御世話になりました。また、本研究では防災科学技術研究所の強震記録、気象庁の震源データを使用しています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 高橋重雄・戸田和彦・菊池喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野

- 甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津厚・岡本修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷺崎誠・泉山拓也・関克己・廉慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，2011。
- 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。
- 3) 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.1244，2011（印刷中）。
- 4) 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。
- 5) 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，pp.324-333，2010。
- 6) 時松孝次・宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集，No.439，pp.81-87，1992。
- 7) 野津厚・菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良，港湾空港技術研究所資料 No.1173，2008。

INVESTIGATION OF SITE EFFECTS AT DAMAGED PORTS DURING THE 2011 GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE DISASTER

Atsushi NOZU and Atsushi WAKAI

After a large earthquake, it is quite important to estimate strong ground motions at the site of damaged port structures to analyze damage mechanism and to determine restoration policy. Although several strong motion records were successfully obtained at damaged ports during the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster (Takahashi *et al.*, 2011), the records do not necessarily represent strong ground motions at the site of structural damage, because, according to recent knowledge, site effects can vary significantly within a relatively small area, even within a port. Thus, in this study, microtremor measurements and aftershock observations were conducted at damaged ports. The results of the study can be summarized as follows:

- 1) Gross distribution of the site effects within the ports were revealed at 8 ports where microtremor observations were conducted. At 7 ports (9 points), detailed site effects were revealed based on aftershock observations.
- 2) According to the results, peak values of microtremor H/V spectra and those of site amplification factors are more or less correlated to each other.
- 3) The distribution of damage to port structures is closely related to the distribution of site effects within the port.