

# 2022年3月16日福島県沖の地震の 余震観測に基づく福島県相馬市付近の 地盤震動特性の評価

江口 拓生<sup>1</sup>・後藤 浩之<sup>2</sup>・栗間 淳<sup>3</sup>・Anirban Chakraborty<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目 3-20)

E-mail: eguchihr@newjec.co.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学防災研究所准教授 地震防災研究部門 耐震基礎研究分野

(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学防災研究所 地震防災研究部門 耐震基礎研究分野

(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: kurima@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 法政大学 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: anirban.chakraborty.43@hosei.ac.jp

2022年3月16日に発生した福島県沖の地震により、相馬市付近では相馬港や松川浦北側の地域を中心として被害が生じた。本稿では、被害が生じた地域の地盤震動特性を調査することを目的として、得られた余震観測記録を基に、サイト増幅特性が既知の強震観測点の余震観測記録との比を取ることによって、相馬市付近の複数地点のサイト増幅特性を評価した。その結果、相馬市付近では広く、サイト増幅特性のピーク周波数が0.6Hz付近に存在することが確認された。また、地点ごとにピーク振幅が異なり、被害が大きかった地域ではピーク振幅が大きいことも確認された。ピーク振幅の値は、表層地盤のS波インピーダンスに大きく依存している可能性が示唆された。

**Key Words:** *Aftershock Observation, Site Amplifications, S-wave Impedance*

## 1. はじめに

2022年3月16日に、福島県沖を震源とするマグニチュード7.4(気象庁暫定値)の地震が発生した<sup>注1)</sup>。この地震により、宮城県と福島県で震度6強の地震動が観測され、広範囲にわたって構造物に被害もたらされた<sup>注2)</sup>。特に、福島県相馬市や新地町にまたがる相馬港では、液状化現象による噴砂等が確認された地点も多く、大きな被害が生じたことが確認されている<sup>注3)</sup>。また、相馬港の南側に位置する松川浦北側の地域では、一般家屋の被害が多く確認されている<sup>注4)</sup>。しかし、相馬市付近のその他の地域では、相馬市役所の被害などは報告されているものの、大きな被害はほとんど報告されていない。

相馬市付近では、2021年2月13日に発生した福島県沖を震源とするマグニチュード7.3(気象庁暫定値)の地震においても、強い揺れを受けた<sup>注5)</sup>。2021年の地震

では2022年の地震と同様に、相馬港と松川浦北側では被害が生じているものの、その他の地域では大きな被害が報告されていない。

このように、相馬市付近では、地域によって地震による被害の状況が異なっていることがわかる。本稿は、相馬市付近の地域ごとの被害の差異を生んだ原因について、評価・考察を行うことを目的とする。

今回の事例のようにあまり広くない範囲で、地震による被害の発生状況が異なることは、これまでに多くの事例で確認されている。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の際、宮城県大崎市古川地区の地区内において、地震による被害が異なっていたことが確認されている<sup>注6)</sup>。

Goto et al.(2012)<sup>注7)</sup>は、その後の余震観測で30以上の地震計を設置し、狭い範囲で地点ごとに余震記録が異なることを確認し、地盤の増幅特性が影響していると考察している<sup>注8)</sup>。また、2000年鳥取県西部地震の際、鳥取県境港市

において、地震による被害が異なっていたことが確認されており、地震の被害と微動アレイ観測により推定された地盤の平均S波速度に比較的明瞭な対応が見られることが確認された<sup>4)</sup>。

地表で観測される地震動の特性は、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性の3つに分けられる。あまり広い範囲では、震源特性と伝播経路特性はほとんど同じであると考えられ、サイト増幅特性の違いが地点ごとの地震動の差異に大きく影響していると考えられることができる。このことは、上記2地震のように、被害状況と地盤の関係に対応が見られることと整合する。

以上の経緯を踏まえ、本稿では、相馬市内の複数地点でサイト増幅特性を評価し、地点ごとの地震による被害の差異を考察する。そのために、まず、2022年3月16日の地震発生の後に実施された余震観測記録を用い、常設の強震観測点との同時記録を基に、余震観測点のサイト増幅特性を評価する。次に、地点ごとにサイト増幅特性が異なる理由について、S波インピーダンスの観点から評価を行い、被害の差異を生んだ原因について考察を行う。

## 2. 余震観測とサイト増幅特性

### (1) 余震観測の実施

相馬市付近の常設の強震観測点と、本稿で京都大学防災研究所により実施された余震観測点(01, 02, 03)の一覧を図-1に示す。また、本稿では、港湾空港技術研究所より提供いただいた余震観測記録を用いている<sup>注9)</sup>。図-1には、これらの観測点(1号ふ頭、3号ふ頭、5号ふ頭)も併せて示す。また、図-1には、顕著な被害が認められたエリアも併せて示している。

相馬市周辺の常設の強震観測点としては、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET の観測点である FKS001 (K-NET 相馬)<sup>注6)</sup>、国土交通省の港湾地域強震観測網の観測点である相馬-O (地表 GL0m)、相馬-OB (地中 G.L.-16.15m)<sup>注7)</sup>、また、気象庁および自治体の震度計がある。本稿では、FKS001 と相馬-O の2つの地表の観測点を対象とする。

なお、本稿で実施した余震観測は、2022年3月22日の1日間のみ実施している。地震計には、加速度計である Nanometrics 製の Titan を用いた。常設の強震観測点と同時記録が得られた余震観測記録の一覧を、表-1に示す。表-1には、港湾空港技術研究所より提供いただいた余震観測記録の一覧も併せて示す。

表-1 余震観測記録の一覧

No	地震		常設 相馬-O	京多大			港空研		
	発震日時	M		01	02	03	1号	3号	5号
a	2022/3/23 11:11	4.1	○	○	○	○			
b	2022/3/23 13:09	4.5	○	○	○	○			
1	2022/4/10 17:30	4.8	○				○	○	
2	2022/4/15 01:24	4.0	○				○	○	
3	2022/4/18 04:50	4.1	○				○	○	
4	2022/4/19 08:16	5.4	○				○	○	
5	2022/4/29 02:43	3.8	○				○	○	
6	2022/5/1 14:41	4.1	○				○	○	
7	2022/5/5 14:55	3.9	○				○	○	
8	2022/5/5 18:42	4.8	○				○	○	

※△：データの精度が十分でないため、スペクトル比算定時に除外した。



図-1 相馬市付近の強震観測点(赤▲)と余震観測点(黒▲)

### (2) サイト増幅特性の算定

FKS001 と相馬-O では、野津ら(2005)<sup>3)</sup>によって、スペクトルインバージョンに基づきサイト増幅特性が算定されている。ただし、相馬-O は、2011年まで設置されていた相馬-G の観測記録に基づいて、サイト増幅特性が評価されたものである。相馬-O と相馬-G は同じ敷地内であるものの、若干設置位置が異なる。しかし、相馬-O と相馬-G は数10mしか離れておらず、地盤条件も大きく変わらないことが確認されているため<sup>注7)</sup>、本稿では、相馬-O のサイト増幅特性が相馬-G のサイト増幅特性と同一であると仮定して評価を行う。

余震観測点のサイト増幅特性の算定方法について説明する。まず、全ての地点の余震観測記録の東西・南北の

水平 2成分についてデータを抽出して、フーリエ・スペクトルを求める。続いて、バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウで平滑化したスペクトルを、東西・南北の 2成分それぞれについて、相馬-O の同時記録のフーリエ・スペクトルを分母としたスペクトル比を算定する。最後に、地点ごとに全地震動の東西・南北の 2成分の幾何平均を取り、平均したスペクトル比を常設の強震観測点の既知のサイト増幅特性と掛け合わせ、余震観測点のサイト増幅特性として算定する。

なお、特に余震観測点においては、データの精度について注意する必要がある。交通ノイズや地震計のノイズの影響で、低周波数側で精度が得られない場合がある。相馬-O と余震観測地点の 6 地点では、概ね 0.2~0.4Hz より低周波数側で精度がない場合もあると考えられたため、0.4Hz より高周波数側のデータのみで議論を行う。ただし、5号ふ頭の EQ02 は 0.4Hz より高周波数側でも精度がないと判断され、スペクトル比算定時に除外した。また、地震によっては、他のデータと比べてスペクトル比が大きく異なる場合がある。今回は、02 の地点では 2 つの地震動の平均を採用しているが、ばらつきが大きいことも確認されているため、推定精度に注意して今後の議論を行う必要がある。

算定されたサイト増幅特性の一覧を図-2 (京都大学防災研究所)、図-3 (港湾空港技術研究所) に示す。相馬-O (相馬-G)、1号ふ頭を除き、すべての地点で 0.5-0.6Hz 付近にピークがあることが確認された。また、地点ごとにピーク振幅が異なることが確認された。

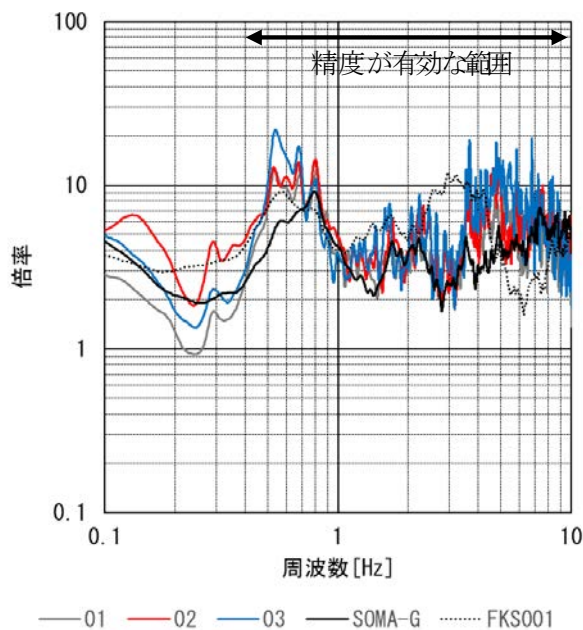


図-2 サイト増幅特性の算定結果 (京都大学防災研究所)

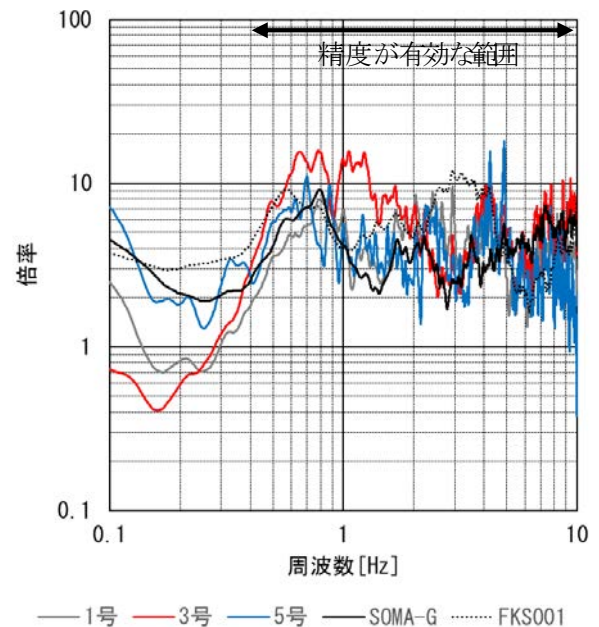


図-3 サイト増幅特性の算定結果 (港湾空港技術研究所)

相馬港の 3号ふ頭と松川浦北側 (02, 03) では、ピーク振幅が特に大きくなっている。3号ふ頭は相馬港の他のふ頭と比べて液状化による噴砂の頻度が高く、また、松川浦北側では他の地域と比べて被害が大きかったため、ピーク振幅と地震動が大きかった地点はおおむね一致していると考えられる。

### 3. 地盤物性値との比較

#### (1) 地盤物性値の設定

得られたサイト増幅特性と地盤物性値の比較を行う。常設の強震観測点および余震観測点付近のボーリングにおける、最表層の地盤物性値の一覧を表-2 に示す。

表-2 観測点の最表層の地盤物性の一覧

	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	S 波速 度 [m/s]	出典	備考
FKS001	1.87	179	防災科研 HP 注 6)	11m の平均
相馬-O	1.90※	208	国交省 HP <sup>注 7)</sup>	6m の平均
01	1.90※	208	相馬-O	6m の平均
02	1.40※	113※	地盤工学会 HP 注 8)	10.7m の平均
03	—	—	—	—
1号ふ頭	1.94	197	国総研 HP <sup>注 9)</sup>	5m の平均
3号ふ頭	1.83	130	国総研 HP <sup>注 9)</sup>	7m の平均
5号ふ頭	—	—	—	—

ただし、密度・S波速度の結果が得られない地点のデータは、中央防災会議「東海地震に関する専門調査会（第10回）」の資料<sup>注10</sup>を基に、以下の通り推定した。これらの推定精度は高くないと考えられるため、今後、追加のボーリング調査や微動アレイ観測により、S波速度構造等を推定することが望ましい。

- ・相馬Oの密度は、最も近いボーリングの表層の沖積砂質土の平均N値が28であるため、密度1.9[g/cm<sup>3</sup>]として設定した。

- ・02は、最も近いボーリングの表層の沖積粘性土（シルト質砂含む）の平均N値が1であるため、密度1.4[g/cm<sup>3</sup>]、S波速度113[m/s]として設定した。

## (2) S波インピーダンスとの比較

水平成層が2層系の場合、伝達関数のピーク振幅の値は、表層と基盤のS波インピーダンスの比（ $=\rho V_s_{\text{基盤}} / \rho V_s_{\text{表層}}$ ）と一致することが知られている<sup>9)</sup>。ここでは、基盤の物性値は不明であるため、地震発生層の基盤として多く用いられる、密度2.7[g/cm<sup>3</sup>]、S波速度3.5[km/s]として<sup>注11)</sup>、表2に示す最表層との間のS波インピーダンス比を算定した。その後、サイト増幅特性の0.6Hz付近に存在するピークの振幅と比較した。

S波インピーダンス比とピーク振幅の対応を図-4に示す。ピーク振幅はS波インピーダンス比を大きく下回っている。これは、最表層と基盤の間にある層の影響で、単純な2層系となっていないことが大きな原因であると思われる。ただし、相関係数は0.71となり、PS検層によらない02の観測点を除くと、相関係数は0.82となるため、ピーク振幅とS波インピーダンスは大きく関係していることが分かる。

また、Goto et al.(2011)<sup>7)</sup>では、伝達関数の振幅の周波数平均は、多層系の最表層と基盤のS波インピーダンス比の平方根と一致することを示している。この関係は、最表層と基盤の間の中間層の物性値に関わらず成立する。ここでは、精度が確保できる0.4Hzから工学的に興味がある10Hzまでのサイト増幅特性の倍率の周波数平均を対象とする。

S波インピーダンス比の平方根と振幅の周波数平均の対応を図-5に示す。両者の値は概ね一致し、Goto et al.(2011)の関係が、相馬市付近のサイト増幅特性において成立している可能性が確認された。また、相関係数は0.77となり、PS検層によらない02の観測点を除くと、相関係数は0.93となるため、ピーク振幅とS波インピーダンスは大きく関係していることが分かる。

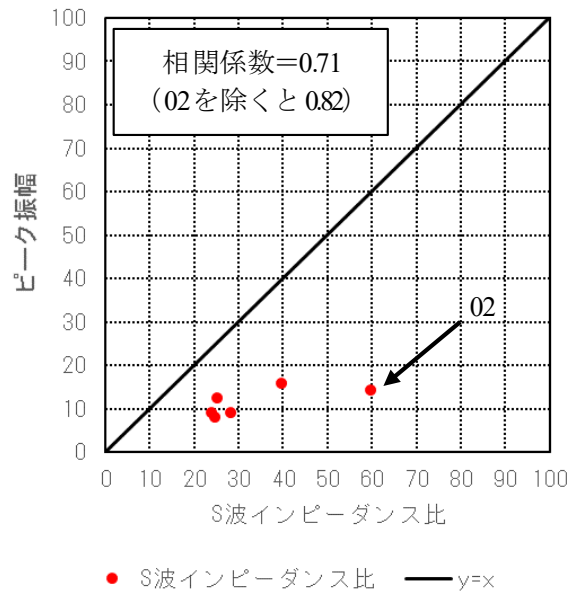


図-4 S波インピーダンス比とピーク振幅の比較

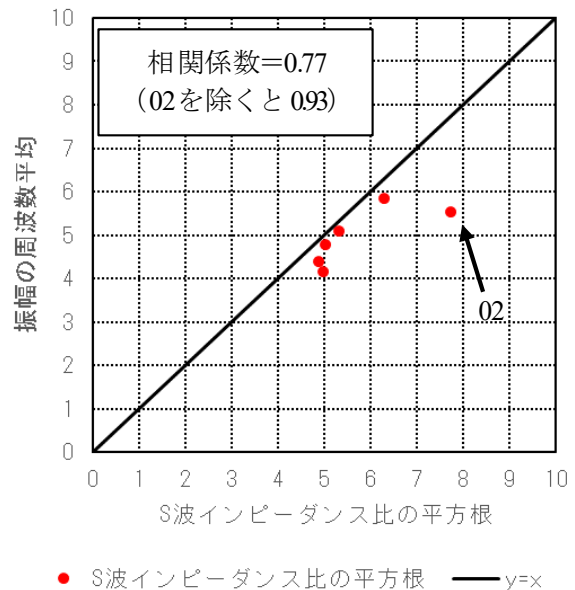


図-5 S波インピーダンス比の平方根と振幅の周波数平均の比較

ただし、現時点では対象とする周波数区間の設定が恣意的であり、その設定が結果に影響する。例えば、周波数区間を0.4-20Hzとすれば、相関係数は0.33（観測点02を除くと0.44）となるなど、結果が大きく異なる。そのため、Goto et al.(2011)の関係の適用性については、今後十分な議論が必要である。

また、以上の比較により、サイト増幅特性の大きさ、すなわち地震動の大きさは、S波インピーダンスの大きさに大きく依存することが確認された。そのため、地震動の大きさ、すなわち地震被害程度の大きさの予測には、十分に地盤情報の調査を行うことが望ましい。

## 4. 結論

本検討では、余震記録を基に、サイト増幅特性が既知の強震観測点の余震記録との比を取ることによって、相馬市付近の複数地点のサイト増幅特性を評価した。その結果、相馬市付近では広く、サイト増幅特性のピーク周波数が 0.6Hz 付近に存在することが確認された。また、地点ごとにピーク振幅が異なり、被害が大きかった地域では振幅が大きくなったことも確認された。さらに、ピーク振幅の値は、表層地盤の S 波インピーダンスに大きく依存している可能性が示唆された。

今後の課題は大きく 3 点が考えられる。まず、相馬市付近において、0.6Hz 付近で震動しているかどうかについて十分な検証がされていない。そのため、相馬市付近において、単点の常時微動観測を実施し、H/V スペクトルのピーク周波数を確認することで検証することが望ましい。次に、0.6Hz 付近の震動がどのような構造により生じているか、現時点では解明できていない。そのため、更に調査を進め、必要に応じて数値解析を併用することにより、現象を解明していくことが望ましい。最後に、S 波インピーダンス比の平方根とサイト増幅特性の振幅の周波数平均の関係を論じる際の、周波数の範囲について十分な議論がされていない。今後、全国の既知のサイト増幅特性を基に検討することが望ましい。

**謝辞：**本稿では、港湾空港技術研究所 地震防災研究領域の野津厚領域長、長坂陽介主任研究官より、相馬街における余震観測記録と写真データを提供いただきました。また、国土交通省の港湾地域強震観測網に公開されている強震観測記録を用いております。ここに感謝申し上げます。

## 付録

本稿における余震観測の状況を図-6～図-8 に示す。また、港湾空港技術研究所による余震観測の状況を図-9～図-14 に示す（提供データ）。



図-6 01（京都大学防災研究所）の地震計設置状況



図-7 02（京都大学防災研究所）の余震観測状況



図-8 03（京都大学防災研究所）の余震観測状況



図-9 1号ふ頭（港湾空港技術研究所）の余震観測場所



図-12 3号ふ頭（港湾空港技術研究所）の余震観測状況



図-10 1号ふ頭（港湾空港技術研究所）の余震観測状況



図-13 5号ふ頭（港湾空港技術研究所）の余震観測場所



図-11 3号ふ頭（港湾空港技術研究所）の余震観測場所



図-14 5号ふ頭（港湾空港技術研究所）の余震観測状況

余震観測点と相馬-Oのスペクトル比の一覧を図-15～  
図-20に示す。

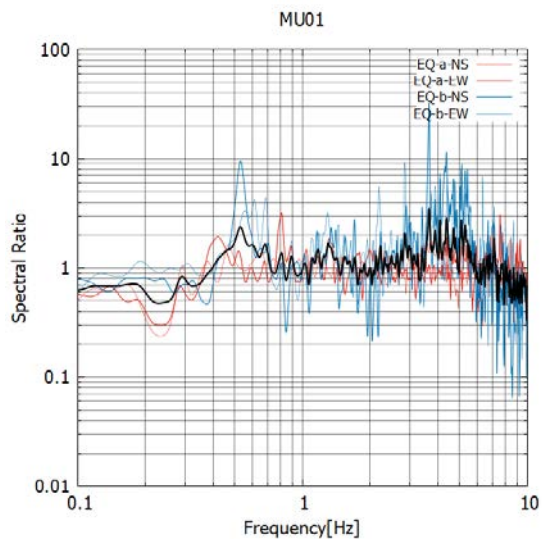


図-15 01 (京都大学防災研究所) のスペクトル比

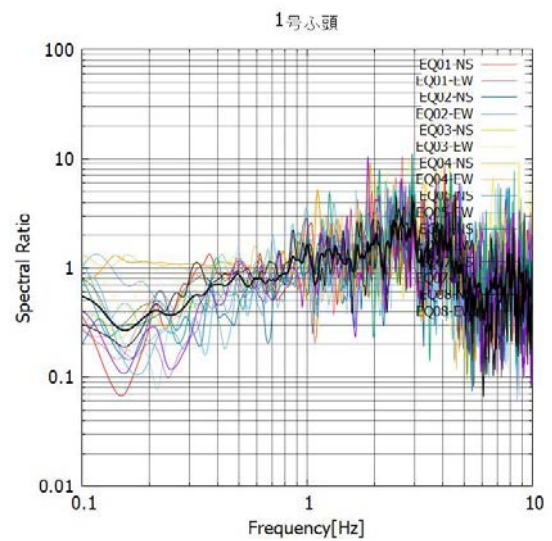


図-18 1号ふ頭 (港湾空港技術研究所) のスペクトル比

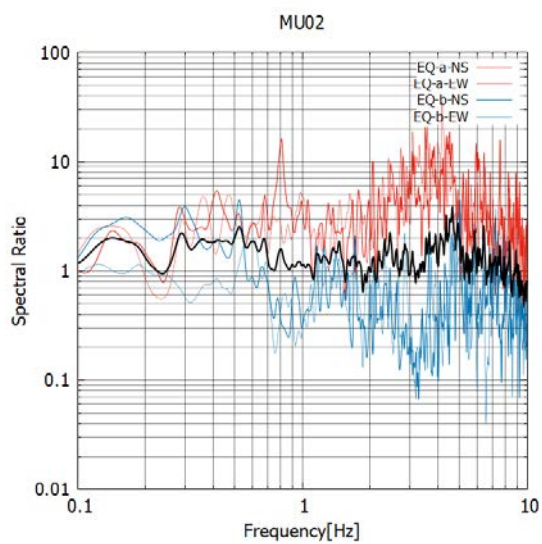


図-16 02 (京都大学防災研究所) のスペクトル比

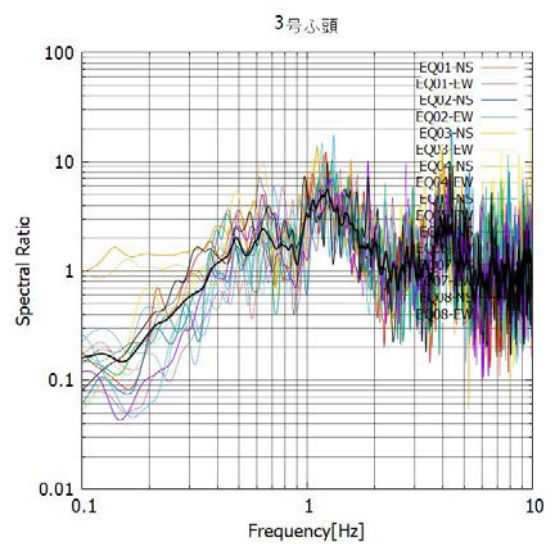


図-19 3号ふ頭 (港湾空港技術研究所) のスペクトル比

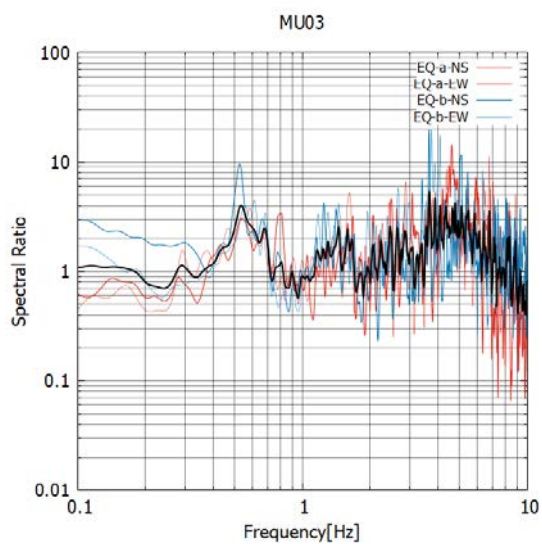


図-17 03 (京都大学防災研究所) のスペクトル比

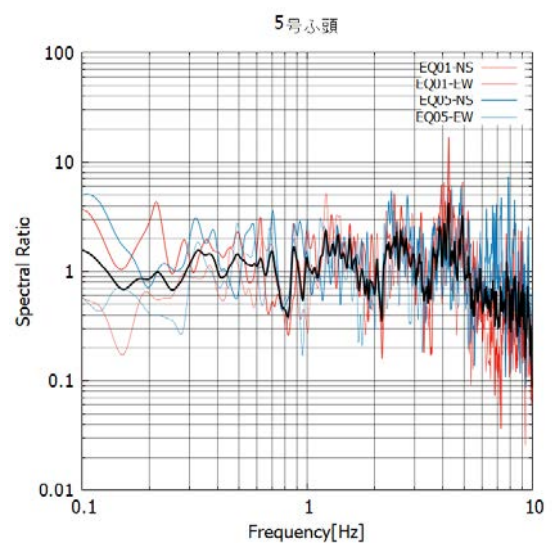


図-20 5号ふ頭 (港湾空港技術研究所) のスペクトル比

## NOTES

- 注1) 気象庁：震度データベース検索  
<https://www.data.jma.go.jp/eqdb/data/shindo/index.html>  
(2022年9月5日閲覧)
- 注2) 内閣府：福島県沖を震源とする地震に係る被害状況等について  
[https://www.bousai.go.jp/updates/r4fukushima\\_eq\\_0317/index.html](https://www.bousai.go.jp/updates/r4fukushima_eq_0317/index.html) (2022年9月5日閲覧)
- 注3) 国土交通省東北地方整備局：相馬港の被災状況とその対応について  
<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/s001/010/2022032401/20220324150724.html> (2022年9月5日閲覧)
- 注4) 後藤浩之, 栗間淳, Anirban Chakraborty：2022年3月に発生した福島県沖の地震に関する現地調査  
<http://www.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/~goto/eq/20220316/report.pdf> (2022年9月5日閲覧)
- 注5) 本稿とは別にサイト増幅特性の評価を行い, 国土技術政策総合技術研究所ホームページのレベル1地震動等に反映されている。
- 注6) 防災科学技術研究所. 強震観測網 (K-NET, KiK-net)  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2022年9月5日閲覧)
- 注7) 国土交通省：港湾地域強震観測網  
<https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/> (2022年9月5日閲覧)
- 注8) 国土交通省国土技術政策総合研究所港湾施設研究室：レベル1地震動  
<https://www.ysk.nimlim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html> (2022年9月5日閲覧)
- 注9) 地盤工学会東北支部：みちのく GIDAS  
<https://www.michinoku-gidas.jp/> (2022年9月5日閲覧)
- 注10) 中央防災会議 (内閣府)：東海地震に関する専門調査会 (第10回)  
<https://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/10/index.html> (2022年9月5日閲覧)

注11) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.392, 平成30年5月。

## REFERENCES

- 1) Goto, H. and Morikawa, H.: Ground motion characteristics during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, 52(5), 769-779, 2012.
- 2) Goto, H., Morikawa, H., Inatani, M., Ogura, Y., Tokue, S., Zhang, X., R., Iwasaki, M., Araki, M., Sawada, S. and Zerva, A.: Very Dense Seismic Array Observations in Furukawa District, Japan, *Seismological Research Letters*, 83(5), 765-774, 2012.
- 3) 稲谷昌之, 後藤浩之, 盛川仁, 小倉祐美子, 徳江聡, Xin-ruì ZHANG, 岩崎政浩, 荒木正之, 澤田純男, ZERVA Aspasia: 大崎市古川高密度地震観測を利用した表層地盤構造の推定, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 69(4), I\_758-I\_766, 2013.
- 4) 長尾毅, 西守男雄, 宮田正史, 小濱英司, 海老原健介: 境港における常時微動観測による表層地盤構造と鳥取県西部地震被害の関係, 地震工学研究発表会講演論文集, 26巻, p. 325-32, 2001.
- 5) 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.
- 6) Schnabel, Per B.: SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC Report 72-12, University of California, Berkeley*, 1972.
- 7) Goto, H., Sawada, S., and Hirai, T.: Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case—Normalized Energy Density, *Wave Motion*, 48(7), 603-613, 2011.

## EVALUATION OF SITE AMPLIFICATIONS AT SOMA CITY USING SMALL EARTHQUAKE RECORDS AFTER OFF COAST FUKUSHIMA EARTHQUAKE IN MARCH 16, 2022

Hiroki EGUCHI, Hiroyuki GOTO, Jun KURIMA and Anirban CHAKRABORTY

During an earthquake occurred at off coast Fukushima in March 16, 2022, damages have occurred especially in Soma port and north area of Matsukawaura. We observe aftershock motions at several sites in Soma city in order to evaluate site amplifications where damages have occurred. It is observed that almost all the sites show peak frequencies around 0.6 Hz and that the damaged sites show large peak amplitudes. It is also shown that peak amplitude values have good relations with S-wave impedance values of the uppermost surface layer.