#### 1. はじめに

令和3年(2021年)2月13日23時7分ごろ福島県沖 を震源とするマグニチュード7.3の地震(以降,「2021年 2月の地震」)が発生し,福島県相馬市等では震度6強が 観測された.更に翌年の令和4年(2022年)3月16日23 時36分ごろには,同じく福島県沖を震源とするマグニチ ュード7.4の地震(以降,「2022年3月の地震」)が発生 し,福島県相馬市等では再び震度6強が観測された.

これらの地震に対し,国土技術政策総合研究所と港湾 空港技術研究所は,港湾施設の被災状況を把握するとと もに,現地の担当部局に対して必要な技術的支援を行う ため,東北地方整備局の支援・協力の下,それぞれの地震 被害に関する合同調査団を派遣した.2021年2月の地震 では,令和3年(2021年)2月15日に相馬港を中心に,2022 年3月の地震では令和4年(2022年)3月17日~18日に相 馬港,同3月22日~23日に仙台塩釜港石巻港区を中心と した調査を行った.

本資料は、合同調査団による現地調査の結果を中心に、 各地震による港湾施設の被害状況を取りまとめたもので ある.被害についての理解を深めるため、合同調査団によ る調査結果以外にも、港湾における強震・微動観測記録に 基づく地震動の特徴に関する情報や、東北地方整備局な らびに福島県・宮城県等から提供された各種測量結果や 潜水調査結果などの情報を加えた.なお、両地震に対する 被害状況の違いについても整理した.

また,将来の参考情報とするため,2022年3月の地震 における相馬港の耐震強化岸壁の暫定復旧方法や,船舶 の各バースへの接岸状況に関する情報も掲載した.

本資料の構成は以下のとおりである.まず,第2章に地 震の概要を,第3章に港湾の強震記録と推定地震動につ いて整理した.続く第4章では,両地震に対する相馬港の 被害,第5章に仙台塩釜港石巻港区の被害について記載 した.更に,2022年3月の福島県沖の地震後における相 馬港に関する情報として,第6章に相馬港の耐震強化岸 壁に関する暫定復旧方法を,第7章に船舶の接岸実績に ついて整理し,第8章にGNSSを活用した矢板式係船岸 の残存耐力評価方法についても言及した.

合同調査団等のメンバーおよび本稿の執筆分担を以下 の表1.1に示す.

合同調査団		丘友	武屋 ※	本稿の執筆箇所			
調査対象地震	調査箇所	調査日程	一 戊名		(主要箇所)		
2021年2月の 福島県沖の地震	相馬港	令和3年 2月15日	宮田 正史	国総研	全体調整		
			小濱 英司	港空研	第4章		
			佐々 真志	港空研	第4章		
			朝比 翔太	港空研	第4章		
			工代 健太	港空研	第4章		
2022年3月の 福島県沖の地震	相馬港	令和4年 3月17日-18日	竹信 正寬	国総研	全体調整,第1章,第6章,第7章		
			野津 厚	港空研	全体調整,第2章,第3章,第8章		
			森川 嘉之	港空研	第4章, 第5章		
			高野 大樹	港空研	第4章		
			近藤 明彦	港空研	第4章		
	仙台塩釜港 (石巻港区)	令和4年 3月22日-23日	菅原 法城	国総研	第5章		
			百海 郁弥	国総研	第5章		
			森川 嘉之	港空研	第4章,第5章(再揭)		
			大矢 陽介	港空研	第5章		
合同調査団以外の本稿執筆者			長坂 陽介	港空研	第2章, 第3章		
			呉 双蘭	港空研	第2章, 第3章		
			佐々木 誠	東北地方整備局	各種資料提供		

表1.1 合同調査団等のメンバーおよび本稿の執筆分担

※ 合同調査団の所属は調査当時。

# 2. 地震の概要

## 2.1 2021年2月13日福島県沖の地震(M7.3)

2021 年 2 月 13 日 23 時 7 分に福島県沖で M7.3 の地震 が発生し,福島県と宮城県の一部で最大震度 6 強の揺れ が観測された.この地震は沈み込む太平洋プレート内で 発生した逆断層型のスラブ内地震とされる<sup>1)</sup>.震源に関す る諸元は表-2.1 に示す通りである.また,本地震の震源 位置,24 時間以内の余震分布,メカニズム解を図-2.1 に 示す.余震分布をふまえると 2 つのメカニズム解のうち 走向 25°,傾斜 32°の東落ちの面で主にすべりが生じた と考えられる.余震は震源の南西側で多く発生している.

	2021 年 2 月の地震	2022 年3月の地震
発震時刻	2021/02/13 23:07	2022/03/16 23:36
緯度	32.7288	37.6967
経度	141.6985	141.6230
深さ	55.38	56.61
MJ	7.3	7.4
走向	25; 183	15; 191
傾斜	32; 60	43; 47
すべり角	109; 79	93; 87
Mw	7.1	7.4

表-2.1 福島県沖の地震諸元

発震時刻,緯度,経度,深さ,M」は気象庁リスト<sup>2)</sup>より, メカニズム解は F-net<sup>3)</sup>より.

#### 2.2 2022年3月16日福島県沖の地震 (M7.4)

2022年3月16日23時36分に福島県沖でM7.4の地震 が発生し、福島県と宮城県の一部で最大震度6強の揺れ が観測された.本地震は2021年2月の地震(M7.3)と震 源が近く、太平洋プレート内で発生した逆断層型のスラ ブ内地震とされる<sup>4)</sup>.震源に関する諸元は表-2.1に示す 通りである.また、本地震の震源位置、24時間以内の余 震分布、メカニズム解を図-2.1に示す.余震分布をふま えると2つのメカニズム解のうち走向15°、傾斜43°の 東落ちの面で主にすべりが生じたと考えられる.余震分 布は震源から北に広がっている.

本地震による港湾以外の被害としては、東北新幹線高 架橋にて梁のコンクリートの剥落と鉄筋の露出、未補強 の柱部のせん断破壊等が確認されている<sup>5)</sup>.また、相馬市 内では歩道橋の落橋が発生した.ライフラインについて も断水や停電が発生した<sup>6)</sup>.特に停電については発電所の 停止も影響し、東北だけでなく関東や静岡、山梨でも発生 した.

## 3. 港湾における強震記録と推定地震動

## 3.1 港湾における強震記録

2021 年 2 月の地震(M7.3)により港湾地域強震観測の 相馬-O, 仙台-O, 小名浜事-O で観測された地震動を示す

(各港の位置を図-2.1に示す).図-3.1に加速度波形を,図-3.2に0.2-2 Hzのバンドパスフィルターをかけた速度 波形を,図-3.3に水平合成加速度フーリエスペクトルを それぞれ示す.これらはすべて地表での記録を示している.

加速度波形は相馬-O が最も大きいが,震源から近い影響が表れていると考えられる.一方,速度波形は相馬-O と 仙台-O は同程度の大きさとなっている.フーリエスペク トルを見ると,1-3 Hz では仙台-O の方が相馬-O より大き く,3 Hz 以上では相馬-O の方が仙台-O より大きい.この 傾向は各地点のサイト増幅特性<sup>7/8)</sup>の傾向と一致している. 加速度波形は高周波数成分の影響が大きいため相馬-O で 大きく見えると考えられる.小名浜事-O は距離の影響と サイト増幅特性の影響もあり仙台-O や相馬-O と比べると 全体的に小さい揺れであった.

2022 年 3 月の地震 (M7.4) により港湾地域強震観測の 仙台-O, 相馬-O, 小名浜事-O で観測された地震動を示す (各港の位置を図-2.1に示す).図-3.4に加速度波形を, 図-3.5に0.2-2 Hz のバンドパスフィルターをかけた速度 波形を,図-3.6に水平合成加速度フーリエスペクトルを それぞれ示す.これらはすべて地表での記録を示してい る.

2021年2月の地震と同様に,加速度波形は相馬-Oが最 も大きく,速度波形では仙台-Oも相馬-Oと同程度の大き さとなっている.全地点とも全体的に2021年2月の地震 より大きい揺れであった.

# 3.2 相馬港における過去地震の地震動およびレベル1 地震動との比較

特に被害の大きかった相馬港に関して,2021年2月の地 震(M7.3)および2022年3月の地震(M7.4)による強震計 位置(相馬-O)での地震動と,2011年東北地方太平洋沖地 震(M9.0)による同じ位置での地震動,および同じ位置で のレベル1地震動<sup>9)</sup>との比較を行った.レベル1地震動は工 学的基盤における2E波として定義されているため,これ らの比較はすべて工学的基盤における2E波同士で行うこ ととした.そのために,先ず,観測地震動を工学的基盤の 2E波に変換する方法について検討を行った.

港湾地域強震観測では多くの港湾で地表と地中(工学 的基盤等)の同時観測を実施している.地表と地中の同時



図-2.1 2021年2月と2022年3月の福島県沖の地震の震源位置,メカニズム解および24時間以内の余震分布.余震の情報は気 象庁震源リスト<sup>2)</sup>より取得















図-3.7 相馬港の強震記録から求めたフーリエスペクトル比(地表/地中)(赤線).フーリエスペクトルは水平2成分の合成(バンド幅0.05 HzのParzenウインドウを適用).背後の灰色の線は弱震時のスペクトル比.

観測記録は、表層地盤における地盤震動特性の検討に用いることができる.地表と地中の同時観測は「鉛直アレー 観測」と呼ばれる.相馬港でも鉛直アレー観測を行っているので、地表(相馬-O)と地中(相馬-OB)のスペクトル 比に基づいて地盤震動特性の変化を調べることができる. 地表:地中のスペクトル比のピークの周波数fpは、地盤の せん断波速度Vsと関係があり、地表と地中の強震計で挟ま れた地盤の厚さをHとすれば、理論上

$$f_p = V_S / (4H) \tag{1}$$

なる関係がある.大地震の際,表層地盤に非線形挙動が生じれば,地盤の剛性が低下し,それに伴い地盤のせん断波速度が低下する.その場合, $f_p$ が低周波側に移動するので, $f_p$ の移動の有無を見ることによって,地盤の非線形挙動の有無を調べることができる.

図-3.7は2021年2月13日福島県沖の地震(M7.3),2021年 3月20日宮城県沖の地震(M6.9),2022年3月16日福島県沖



図-3.8 相馬港の強震記録から求めたフーリエスペクトル比(地表/地中)と等価線形解析による理論伝達関数の比較

の地震(M7.4)の強震記録から求めたスペクトル比(地表 /地中)を弱震時のスペクトル比と比較したものである. 地表での最大加速度はそれぞれ486.7Gal,253.9Gal, 683.3Galである.2021年2月の地震では強い非線形性が表 れ,ピーク周波数の低周波側への移動が明確に認められ る.2021年3月の地震では非線形性は弱いが,2022年3月の 地震では再び強い非線形性が表れ,今度はピークが大き く低下し不明瞭となっている.なお,地盤の最大せん断ひ ずみは,後述の時間領域の解析によれば,それぞれの地震 に対し1.7×10-3, 1.6×10-3, 4.8×10-3であった.

これまで相馬港では観測地震動の工学的基盤2E波への 変換(はぎとり解析)に等価線形解析<sup>10)</sup>を用いており,2021 年の2つの地震に対しては、ピーク周波数の低周波側への 移動が正確に再現されるなど、良好な結果が得られてい た(図-3.8)<sup>11)</sup>.しかしながら、2022年3月の地震に対し ては、スペクトル比のピークが不明瞭となる観測結果が 再現されなかった(図-3.8).等価線形解析では、地震動 継続時間中の地盤剛性は一定であると仮定するため、そ の一定値に対応した固有周波数が生じることは避けられ ず,観測との乖離は等価線形解析の限界によるものと推 察された.

そこで,次に時間領域におけるはぎとり解析<sup>12)</sup>を適用した.時間領域におけるはぎとり解析では,地中地震計の存在を前提とし,地中地震計より上方の地盤の応答を時間 領域の解析で求め,その結果に粘性境界の式

$$2\ddot{e}(t) = \ddot{u}(t) - \dot{t}(t)/(\rho\beta)$$
(2)

を適用して入射波を推定する.ここに2ë(t)は地中地震計 深度での2E波, ü(t)は地中地震計深度でのE+F波(観測結 果), τ(t)は地中地震計深度でのせん断応力(解析結果), oと $\beta$ は地中地震計深度での密度とS波速度である、この方 法によれば、これまで順方向の解析に用いられてきた時 間領域の地震応答解析プログラムをそのままはぎとり解 析に適用できる. 地表でも観測波形が得られていれば, 地 震応答解析により得られた地表での応答波形を観測波形 と比較し、必要に応じて地盤定数のキャリブレーション を行うことで解析の信頼性向上を図ることができる.以 下の検討では地震応答解析プログラムとしてはFLIP<sup>13)14)</sup> を用いた.「相馬-O」におけるボーリング調査結果とPS検 層結果<sup>15)</sup>に基づき、地中地震計(GL-16m)より上方の地 盤モデルを作成した、地表~GL-6mはマルチスプリング 要素, GL-6m~GL-16mは線形平面要素でモデル化した. 線形平面要素のせん断剛性はPS検層結果から設定した. マルチスプリング要素の初期せん断剛性は、初期値をPS 検層結果から設定したが、インパルス加振(1Gal)を行っ たところモデルの固有周波数が弱震時の観測スペクトル 比のピーク周波数と合わなかったため、マルチスプリン グ要素の初期せん断剛性を1.5倍とした(基準有効拘束圧 98kPaに対し地表~GL-3mは216600kPa, GL-3m~GL-6mは 220608kPaとした). 修正後の地盤モデルに対してインパ ルス加振 (1Gal) を行った際のスペクトル比を弱震時の観 測スペクトル比と比較して図-3.9に示す. せん断抵抗角 は1D-MAKER操作マニュアル<sup>16)</sup>の式(5.2.1)~(5.2.7)に基づ き地表~GL-6mに対し44°とした.過剰間隙水圧の上昇 を考慮するケースと考慮しないケースを実施したところ, 後者の方が結果が良好であったため、以下には後者の結 果を示す. 図-3.10はスペクトル比の再現性を示したもの で,2022年3月16日の地震に対しては図-3.8に比べ結果が 改善されている. このように, ここで行っているFLIP解析 は十分な信頼性を有すると考えられる. そこで, 2022年3 月の地震に対しては、FLIP解析の結果を用い、式(2)によ り工学的基盤での2E波を推定した.2021年2月の地震に対

しては等価線形解析<sup>10)11)</sup>により工学的基盤での2E波を推 定した.



図-3.9 修正後の地盤モデルに対してインパルス加振 (1Gal)を行った際のスペクトル比と弱震時の 観測スペクトル比の比較

2021年2月の地震および2022年3月の地震による相馬港 強震計位置(相馬-O)での地震動と,2011年東北地方太平 洋沖地震(M9.0)による同じ位置での地震動,および同じ 位置でのレベル1地震動との比較を図-3.11に示す(工学 的基盤2E波のフーリエスペクトルの比較).2011年東北地 方太平洋沖地震の地震動は近隣の観測点の記録を元にし た推定結果<sup>17)</sup>である.レベル1地震動は国総研ホームペー ジ<sup>18)</sup>の9120番の地震動である.ハッチングは港湾構造物に 対して特に影響の大きい周波数帯域(0.3-1Hz)を示す. 各プロットに付与されている数字はPSI値である.

図-3.11より、2021年2月の地震と2022年3月の地震による相馬港の地震動はともにレベル1地震動を上回っており、港湾構造物に被害をもたらすのに十分な大きさであったことが分かる、2021年2月の地震による地震動と2022年3月の地震による地震動を比較すると、後者の方が1.4倍~1.8倍程度大きかったと考えられる.東北地方太平洋沖地震による地震動は東北地方太平洋沖地震による地震動は東北地方太平洋沖地震による地震動はマグニチュードの違いにもかかわらずEW成分については東北地方太平洋沖地震による地震動を上回っていたと推定される.



図-3.10 相馬港の強震記録から求めたフーリエスペクトル比(地表/地中)とFLIP解析によるスペクトル比の比較

#### 3.3 相馬港における余震観測と常時微動観測

(1) 余震観測および常時微動観測の概要

2022 年 3 月の地震により,港湾の中でも相馬港で大きな 被害が見られた.被害の原因究明や復旧設計のためには被 害地点における地震動をなるべく精度よく推定することが 重要である.一方,相馬港における強震観測点「相馬-O」 は港のほぼ南端に位置しており(図-3.12で「2」とされて いる地点),各ふ頭のサイト特性が相馬-O と一致している とは限らない.そこで,相馬港内のサイト特性の分布を把 握し,福島県沖の地震の被害分析および復旧設計に資する ことを目的として,相馬港での余震観測および常時微動観 測を実施した.

余震観測は2022年4月8日から2022年5月9日にかけ て相馬港内の3地点(図-3.12,青丸)で行った.観測を行 ったふ頭の番号から,それぞれ1号ふ頭,3号ふ頭,5号ふ 頭の観測点と呼ぶこととする.1号ふ頭は県営倉庫内,3号 ふ頭は消火ポンプ室建屋内,5号ふ頭は波浪観測装置建屋 内でそれぞれ各関係者協力の下で観測を行った.3地点は



図-3.11 2021年2月の地震(M7.3)および2022年3月の地震(M7.4)による相馬港強震計位置(相馬-O)での地震動と, 2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)による同じ位置での地震動,および同じ位置でのL1地震動との比較.工 学的基盤2E波のフーリエスペクトル(バンド幅0.05 HzのParzenウインドウを適用).各プロットに付与されてい る数字はPSI値.2021年2月と2022年3月の地震動は観測結果を工学的基盤に引き戻したもの.2011年東北地方太 平洋沖地震の地震動は近隣の観測点の記録を元にした推定結果<sup>17)</sup>.レベル1地震動は国総研ホームページ<sup>18)</sup>の 9120番の地震動.ハッチングは港湾構造物に対して特に影響の大きい周波数帯域(0.3-1Hz)を示す.

いずれも電源が確保でき,屋根のある建屋または倉庫内 である.常時微動観測は2022年5月9日および5月10 日に相馬港内の27地点(図-3.12,赤丸)で行い,1地点 あたり約15分間の観測を行った.機器は余震観測,常時 微動観測とも白山工業製のJU210を使用した.余震観測 および常時微動観測の様子を図-3.13に示す.観測結果を もとに余震観測点でのサイト増幅特性の推定と相馬港の ゾーニング,地震動の推定を行った.

(2) 余震観測点でのサイト増幅特性

余震観測により表-3.1に示す8地震による記録が得ら れた.なお,この中には余震以外の地震も含まれている. 5号ふ頭では観測期間中に地盤の陥没の影響で停電が発 生したため一部の記録が得られていない.相馬-Oでは8地 震すべての記録が得られている.

余震観測により得られた地震記録の例として2022年4

月10日17:30の地震(M<sub>1</sub>4.7)による加速度波形と加速度フ ーリエスペクトルをそれぞれ図-3.14,図-3.15に示す.こ こでは加速度フーリエスペクトルは水平2成分の自乗和 平方根にバンド幅0.05 HzのParzenウインドウをかけたも のを示している.3号ふ頭のみ1 Hz前後の水平動が他地点 より大きいことが分かる.

次に,得られた地震記録に基づいて余震観測点におけ るサイト増幅特性の推定を行う.相馬-Oにおけるサイト 増幅特性は野津・長尾<sup>7</sup>により求められていることから, 相馬-Oと各余震観測点の同時記録のフーリエスペクトル 比を用いることにより補正を行う.厳密には野津・長尾<sup>7</sup> では相馬-Oの前身である相馬-Gが対象であるが,観測点 位置は同一事務所の敷地内であり,サイト増幅特性は同 じと仮定する.相馬-Oと余震観測点の水平成分のフーリ エスペクトル比の幾何平均を求め,これを相馬-Gにおけ



図-3.12 余震観測点および常時微動観測点.青:余震観測点,赤:常時微動観測点.赤の2は相馬-Oでの観測.地図は OpenStreetMapより.



(b)

(c)



(d)

(a)

(e)

(f)

 図-3.13 余震観測および常時微動観測の様子.(a)1号ふ頭余震観測点,(b)3号ふ頭余震観測点,(c)5号ふ頭余震観測点,(d) 常時微動観測点No.5,(e)常時微動観測点No.11,(f)常時微動観測点No.25.

date	緯度	経度	MJ	region	1号	3号	5号
2022/4/10 17:30	37.303	141.817	4.7	福島県沖	0	0	0
2022/4/15 1:24	37.717	141.570	4.0	福島県沖	0	0	0
2022/4/18 4:50	37.717	141.568	4.2	福島県沖	0	0	$\times$
2022/4/19 8:16	36.877	140.347	5.3	福島県中通り	$\bigcirc$	0	$\times$
2022/4/29 2:43	37.680	141.557	3.8	福島県沖	$\bigcirc$	0	0
2022/5/1 14:42	37.763	141.572	4.1	福島県沖	0	0	$\times$
2022/5/5 14:55	37.717	141.542	4.1	福島県沖	0	0	$\times$
2022/5/5 18:42	36.140	139.843	4.8	茨城県南部	0	0	×

表-3.1 余震観測により記録が得られた地震







図-3.15 相馬-Oおよび余震観測点における加速度フーリエスペクトル(2022年4月10日17:30の地震, Mi4.7)



図-3.16 余震観測点と相馬-Oの観測フーリエスペクトル比





表-3.2 3号ふ頭での地盤調査結果に基づく地盤モデル

層厚 (m)	S 波速度 (m/s)	密度 (g/cm³)
7	130	1.60
5	230	1.60
17	270	1.60
4	190	1.60
_	660	1.90

るサイト増幅特性に掛けることで余震観測点のサイト増幅 特性を求める.野津・長尾<sup>7)</sup>では後続波の影響を含めたサイ ト増幅特性を求めているため、本検討でも後続波を含めた フーリエスペクトルの比を用いる.また、各余震観測点と 相馬-Oは各震源から見てほぼ同方向、同距離であるため伝 播経路の補正は行わず、観測フーリエスペクトル比がその





図-3.20 相馬港で観測した常時微動H/Vスペクトル一覧

ままサイト増幅特性の比であるとする.

相馬-Oと余震観測点の観測フーリエスペクトル比を図-3.16に示す.3号ふ頭では1~2 Hzで相馬-Oを大きく超えるピ ークが見られる.この特徴はすべての地震で見られること から,3号ふ頭のサイト増幅特性を表したものであると考え られる.一方,1号ふ頭,5号ふ頭は特に高周波数帯では幅 があるもののフーリエスペクトル比はおおむね1であるこ とが分かる.以上より,サイト増幅特性は3号ふ頭のみ相馬 -Oと異なり,1号ふ頭,5号ふ頭の余震観測点は相馬-Oと同 程度のサイト増幅特性をもつものとみなす.3号ふ頭のサイ ト増幅特性の推定にあたっては,フーリエスペクトル比が 低周波数帯で1を下回るのはノイズによる影響であると考 え,低周波数で1となるように補正を行った平均フーリエス ペクトル比(図-3.16中央,赤線)を用いてサイト増幅特



図-3.21 余震観測と常時微動観測に基づく相馬港のゾーニング



図-3.22 相馬港のゾーン毎の常時微動H/Vスペクトル

性を補正した.補正により得られたサイト増幅特性と野 津・長尾<sup>7</sup>による相馬-Gにおけるサイト増幅特性を図-3.17に示す.これより、3号ふ頭では1Hz前後の広い周波 数帯で相馬-O(=相馬-G)より大きな地震動となることが 分かった.

## (3)3号ふ頭における推定地震動

余震観測により相馬港3号ふ頭でのサイト増幅特性が 強震観測点「相馬-O」よりも広い周波数帯にわたって大き いことが分かった.これは3号ふ頭では相馬-Oより大きな 地震動が作用したことを意味しており,被害の分析や復旧にあたってはこの点を考慮する必要がある.そこで, 2022年3月の地震による3号ふ頭の工学的基盤における地 震動を推定した.

推定の全体フローを図-3.18に示す.3.2で述べたよう に、相馬-Oの工学的基盤2E波が時間領域におけるはぎと り解析で求められている.相馬-Oと相馬-Gは同一敷地内 にあるため、地表面の揺れは同一であると仮定する.しか しながら、相馬-Oの地盤モデルと相馬-Gの地盤モデルで は、工学的基盤の深度とS波速度が異なっている<sup>15)</sup>.した がって、いずれの地盤モデルで地震波を引き戻すかによ り、工学的基盤での地震波は異なってくる可能性がある. そこで、まず、相馬-Oの地盤モデルにより、線形の条件で 地震波を地表まで引き上げ、次に相馬-Gの地盤モデルに より、線形の条件で地震波を工学的基盤まで引き戻した.

次に,以下の式より3号ふ頭の工学的基盤での地震動を 求めた.(3号ふ頭の工学的基盤での地震動)=(相馬-Gの 工学的基盤での地震動)÷(相馬-Gの工学的基盤でのサイ ト増幅特性)×(3号ふ頭の工学的基盤でのサイト増幅特 性).その際,位相はそのままとした.相馬-Gの工学的基 盤でのサイト増幅特性は野津・長尾<sup>7</sup>による地表でのサイ ト増幅特性を相馬-Gの地盤モデルから計算される伝達関 数で除したものである.3号埠頭の工学的基盤でのサイト 増幅特性は3.2で求めた地表でのサイト増幅特性を**表**-3.2に示す地盤モデルから計算される伝達関数で除した ものである. 推定された3号ふ頭工学的基盤2E波の加速度波形を図-3.19に示す.ここでの補正は、3号ふ頭の工学的基盤より 深い部分で地盤の非線形挙動が生じていないことを仮定 した補正となっている.

(4) 相馬港のゾーニング

余震観測により,3号ふ頭の余震観測点では,相馬-Oや 1号ふ頭,5号ふ頭の余震観測点より大きな地震動となる ことが分かった.また,3号ふ頭の余震観測点では2022 年3月の地震について推定地震動を求めることができた. しかし,サイト特性の空間的な変動や,3号ふ頭の地震動 がどの程度の範囲まで適用できるかについては余震観測 だけでは分からない.そこで,余震観測を補完し,サイト 増幅特性のゾーニングを行うことを目的として常時微動 観測を行った.常時微動観測は2022年5月9日および5 月10日に図-3.12に示す計27地点で行った.地点2は相 馬-Oの建屋内である.観測は1地点あたり約15分間行っ た.

得られた常時微動データから求めた H/V スペクトルの 一覧を図-3.20に示す.1区間を163.84秒とし、安定して 記録が得られている 3 区間とその幾何平均を示した.た だし、地点22はノイズの影響が大きい時間帯が長く見ら れたため2区間とした. 図-3.20より, ほぼすべての地点 で 0.6~1 Hz にピークを持つことが分かる. これは図-3.17 に示したサイト増幅特性のピーク周波数と一致している. 1号ふ頭の常時微動 H/V スペクトルは 0.6~1 Hz にかけて 幅の広いゆるやかなピークを示し、ピーク倍率は4倍程 度である.3号ふ頭でのピーク周波数は0.6~0.7 Hz, ピー ク倍率は約6倍であり、1号ふ頭に比べるとピーク倍率が わずかに大きい.5号ふ頭でのピーク周波数は0.6~0.7 Hz であり3号ふ頭とほぼ同じであるが、ピーク倍率は1号 ふ頭に近く,3号ふ頭に比べると小さい.このように,H/V スペクトルの傾向は空間的にゆるやかに変化しており, 図-3.17 に見られるようなサイト増幅特性の変化をはっ きりと示すような境界は見当たらない.

常時微動観測結果には余震観測結果に見られるサイト 増幅特性の違いをはっきりと示すような境界はないが, 今後のためにも相馬港全体でサイト増幅特性のゾーニン グを行っておくことが望ましい.余震観測の結果から,3 号ふ頭の余震観測点で相馬-O や他の余震観測点よりサイ ト増幅特性が大きく,相馬-O や他の余震観測点のサイト 増幅特性は同程度であることが分かっている.このこと から,3号ふ頭余震観測点と相馬-O (=相馬-G) をそれぞ れ代表点とする2 つのゾーンに分けることが合理的と考 えられる.境界については,常時微動 H/V スペクトルの ピーク周波数とピーク倍率の変化は緩やかであるため判 断が難しいものの、常時微動観測点の 09, 10, 15~21 を 3 号ふ頭余震観測点のゾーン、それ以外を相馬-G のゾーン とすることとした.これを地図に示すと図-3. 21 のように なる.また、ゾーン毎の常時微動 H/V スペクトル(区間 平均後)をまとめると図-3. 22 のようになる.