

レベル1地震動の評価におけるサイト特性の影響に関する研究

STUDY ON THE EFFECT OF THE SITE AMPLIFICATION FACTOR ON THE EVALUATION OF LEVEL-ONE EARTHQUAKE GROUND MOTION

長尾 毅¹・森下倫明²・野津 厚³

Takashi NAGAO, Noriaki MORISHITA 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非会員 国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³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 level-one earthquake ground motion is going to be presented as time histories by the seismic hazard analysis considering source, path and site amplification effects. Site amplification factor is calculated by the spectral inversion of the strong motion record. However, it should be noted that strong motion record is not obtained at all the port areas nationwide. In such cases, site amplification factor applied at port areas is obtained by the modification of that at inland sites. This study aims at discussing the effect of the modification of the site amplification factor on the evaluation of the level-one earthquake ground motion from the viewpoint of the deformation of quay walls.

Key Words: Site amplification factor, level-one earthquake ground motion, quay wall

1. はじめに

港湾構造物に対するレベル1地震動として、確率的地震ハザード解析¹⁻²⁾により、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して工学的基盤における時刻歴波形を算定する手法が提案されている。ここで、サイト特性とは、地震基盤から工学的基盤にいたる地震動の増幅特性を示すものであるため、通常のボーリングデータなどからこれを評価することは不可能である。このため既往の研究¹⁻³⁾では、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サイト特性を評価している。その際、港湾地域において強震観測が実施されていない場合、近隣のK-NET⁴⁾(強震ネットワーク, 防災科学技術研究所)やKiK-net⁵⁾(基盤強震観測網, 防災科学技術研究所)等の強震観測地点の記録をもとにサイト特性が評価されることとなるが、港湾地域では臨海部盆地構造に起因して長周期側でしばしば大きな増幅が見られるのに対して、内陸部のK-NETなどの観測サイトではこの現象が見られないことが多いため、内陸部のサイト特性を港湾にそのまま適用することは危険側の評価となる場合がある。この点を考慮して、統計解析結果を用いて内陸部のサイト特性を補正することにより臨海部の特性を評価する簡易補正法が提案されている³⁾。これは、K-NET等のサイト特性を、その振幅に応じて周波数毎に統計結果を用いて

補正するもので、1Hz以下の振幅が大きく補正される傾向にある。このサイト特性の補正による影響を確認しておくことが重要であると考えられるため、本研究では、この補正が岸壁天端残留水平変形量に及ぼす影響について地震応答解析により検討した。

2. サイト特性

(1) 検討内容

港湾において強震観測によるサイト特性が求められているが、仮に近隣のK-NET等から補正により求めた場合との比較、港湾において強震観測が行われておらず、近隣のK-NET等の特性を用いるが、そのまま用いる場合とこれを補正して用いる場合の比較、の2条件について検討した。それぞれについて6港を抽出した。表-1に検討対象地点名を示す。補正を行う目安としては三河港の結果⁶⁾等を踏まえて概ね2kmとみなしているが、これは目安であり、例えば高松港においては、常時微動観測結果から距離1kmにもかかわらず補正を行う必要があると考えられた⁷⁾ことに注意が必要である。図-1に各地点の工学的基盤におけるサイト特性を示す。

(2) 港湾で強震観測が行われている場合

上記の条件のうち八戸港については、八戸-Gと

KiK-net八戸の2地点でサイト特性が求められている。両地点は4km程度離れている。2Hz以上の周波数帯域においては両者の違いはあまり大きなものではないが、岸壁の変形に大きな影響を及ぼす0.3~0.8HzにおいてはKiK-net八戸の振幅の方が大きい。KiK-net八戸のサイト特性を補正すると、0.3-1.3Hzの振幅が抑えられる結果となる。KiK-net八戸のサイト特性は長周期側が増加するという臨海部に多い特性を示しているため、補正を行っても元の特性と形状としては大きな変化は示さないものの、振幅は0.7Hzで0.6倍程度に低下している。相馬港についても、相馬-GとK-NET相馬の特性は似通っている。ただし長周期側のピークが相馬-Gでは0.8Hzであるのに対してK-NET相馬では0.55Hzであり、少しの差がある。K-NET相馬の特性を補正すると、3Hz以下の成分が増加し、相馬-Gと比較すると1次のピーク周波数以外は過大な評価となる。横浜港についてはほぼ八戸港と同様な傾向である。三河港は相馬港と同様で、K-NET豊橋と三河-Gは1次のピーク周波数の違いに起因する差があるものの、傾向としては両者は似通っている。これに対して補正された特性は0.7Hz以下で増幅率を過大に評価し、両特性の差を拡大する方向になる。名古屋については、K-NET知多と名古屋見-Gの特性が1-3Hzの周波数帯域を除いてはほぼ同様であるが、補正した結果は補正前のK-NET知多とほぼ同様で、補正による変化は少ない。

以上は港湾背後の観測点と港湾の観測点でサイト特性に大きな差は無い地点であったが、境港はKiK-net美保関と境港-Gで特性が非常に異なっている。両地点は距離5km程度の差であるが、KiK-net美保関は岩盤に近いサイトであるのに対して境港-Gは堆積層の影響が強く、0.6Hz付近に27程度の大きな振幅を示している。補正されたサイト特性は境港-Gに近付いているものの、0.2-0.9Hzの周波数帯域で依然として過小評価となっている。

(3) 港湾で強震観測が行われていない場合

上記の条件のうち船川港、木更津港については港湾背後のK-NETのサイト特性が長周期側が増幅している臨海部に多い特徴を示しているため、補正によっても形状として大きな変化は示さない。ただし、船川港で0.5-1.5Hzの周波数帯域では補正により振幅が低下し、その低下程度は最大で0.7倍程度である。木更津港についても、0.3-1.6Hzの周波数帯域で最大0.7倍に振幅が低下する。

石巻港は、1Hzに鋭いピークを持つサイト特性となっている。これは堆積層のインピーダンスコントラストが強いためであり、従ってこの近傍の地点においても、ピーク周波数及び最大振幅の違いがあるにしても、基本的に明瞭なピークを有するサイト特性となっていることが想定される。これに対して、補正されると平均的な形状となることから、ピークの振幅が抑えられ、明瞭なピークを有さないサイト特性となる。1Hzの振幅は44から10にまで低下する。このほか、横須賀港は明瞭なピークを有さない特性

であり、これは当該地点が岩盤に近いことを示している。ただし、増幅率は長周期側で4-5倍程度であり、地震基盤が浅いわけではないと考えられる。この補正結果は長周期側で6-8倍程度の増幅率となり、他の地点の補正結果に近いものとなる。舞鶴港はK-NET舞鶴のサイトが岩盤であるため、全周波数帯において振幅の小さなサイト特性である。これを補正すると1Hzを中心に最大9程度まで増幅される。また、博多港では、K-NET福岡は2Hz付近に27程度の振幅があるが、これが補正により低下する。逆に0.7-0.9Hzの振幅は増加する。

表-1 検討対象港湾

タイプ	港湾名	観測地点	
		補正前	補正後
	八戸港	八戸-G	KiK-net 八戸
	相馬港	相馬-G	K-NET 相馬
	横浜港	山下-F	K-NET 横浜
	三河港	三河-G	K-NET 豊橋
	名古屋港	名古屋見-G	K-NET 知多
	境港	境港-G	KiK-net 美保関
	船川港	K-NET 男鹿	
	石巻港	K-NET 石巻	
	木更津港	K-NET 木更津	
	横須賀港	K-NET 横須賀	
	舞鶴港	K-NET 舞鶴	
	博多港	K-NET 福岡	

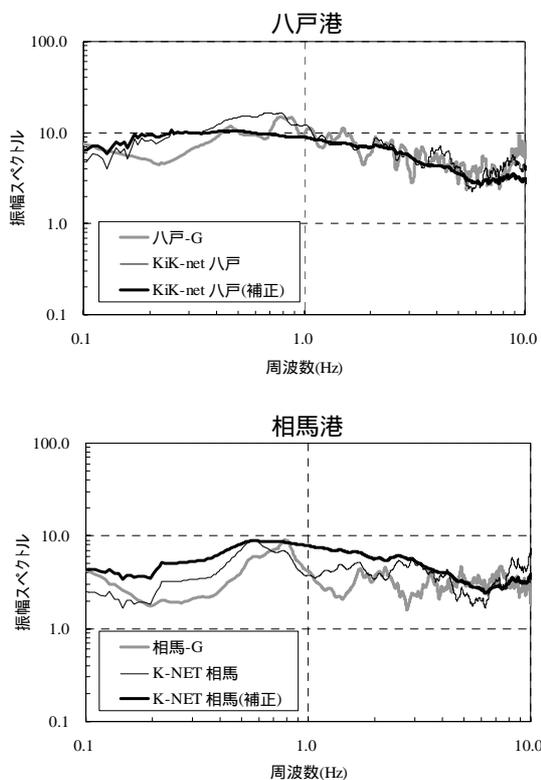


図-1(a) サイト特性

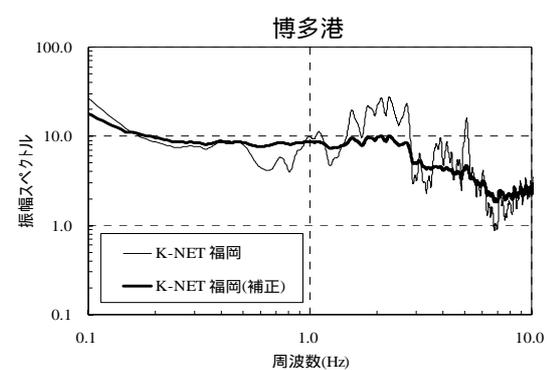
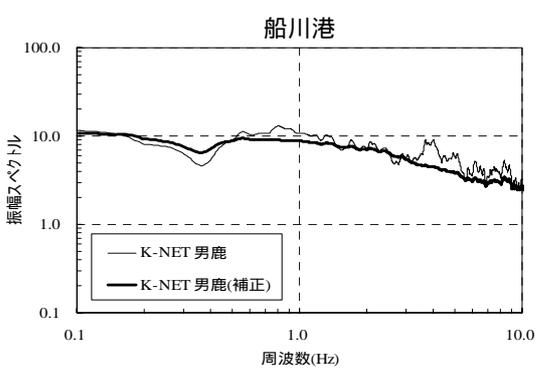
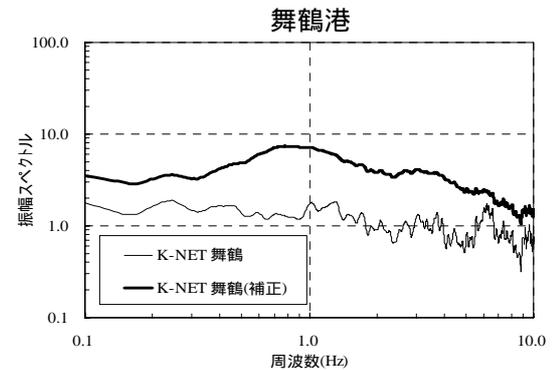
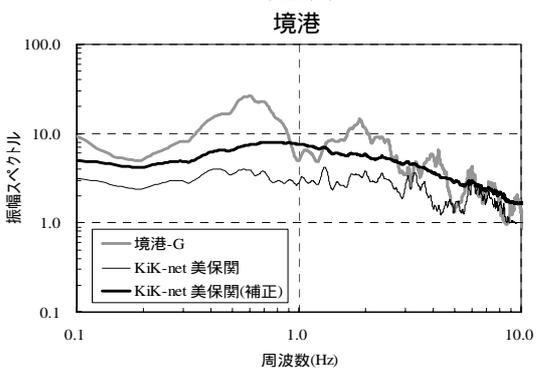
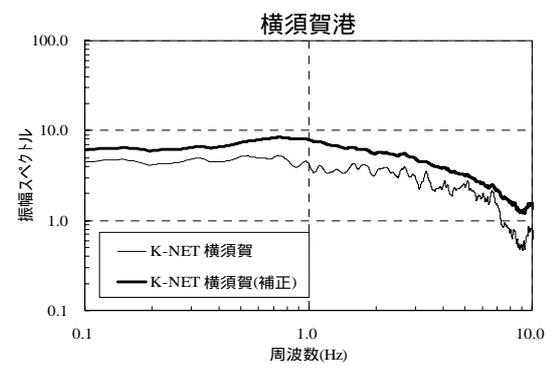
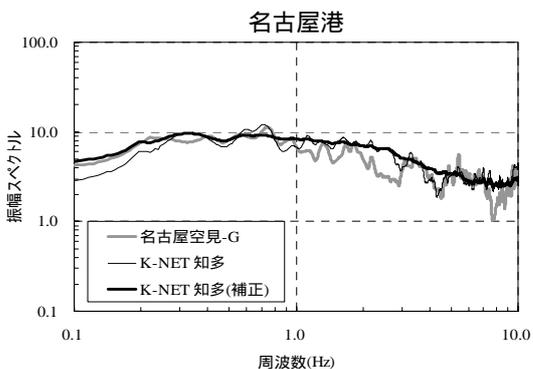
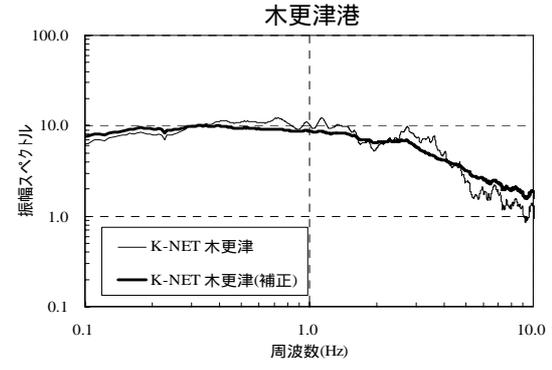
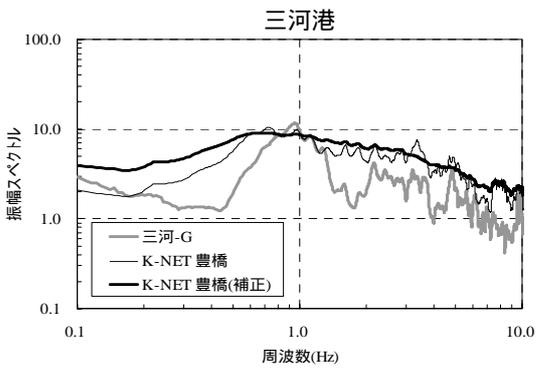
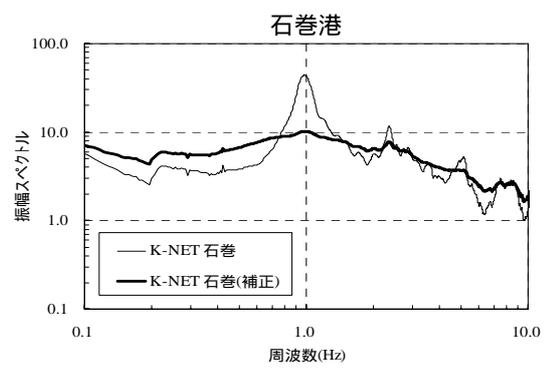
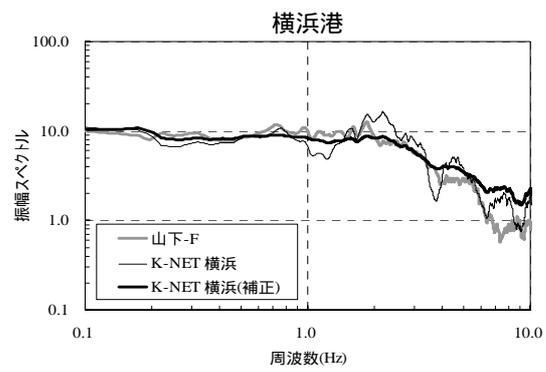


図-1(b) サイト特性

3. サイト特性の補正の影響

(1) レベル1地震動に対する影響

サイト特性の補正のレベル1地震動に対する影響を表-2に示す。工学的基盤における加速度最大値は補正を行うことにより0.58～3.73倍に変化する。最も加速度最大値が大きく補正されたのは舞鶴港波であり、これは上述のように岩盤の特性を臨海部の平均的な特性に補正した結果による。舞鶴波に次いで大きく補正されるのは三河港波であり、これは明瞭なピークを有するサイト特性が長周期側で平均的に増幅された結果であるといえる。その他、明瞭なピークを有するサイト特性が補正された結果として加速度最大値が減少したサイトとして石巻港波があげられ、加速度最大値は補正前の0.58倍にまで減少する結果となった。

卓越周波数については、条件 1 の場合は大きな変化は示さないが、条件 2 では相馬港波、三河港波、名古屋港波のようにかなり変化する場合がある。

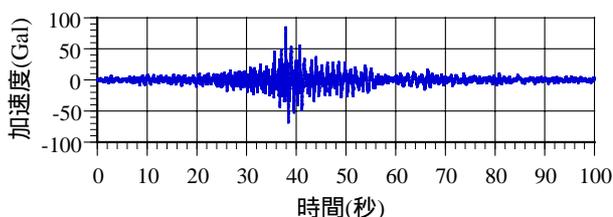
補正によりかなり変化が生じる波形の例として、三河港波、境港波、石巻港波の時刻歴を図-2に比較して示す。

表-2 レベル1地震動に対する影響

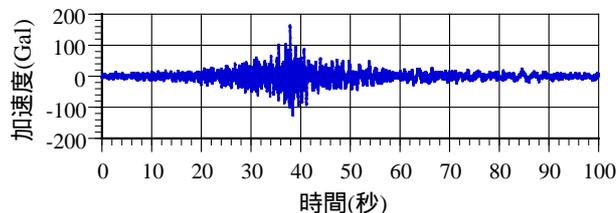
タイプ	港湾名	工学的基盤における加速度最大値(cm/s ²)		卓越周波数(Hz)	
		補正前	補正後	補正前	補正後
A	八戸港	167.1	125.9	0.9	1.2
	相馬港	131.8	152.5	0.8	0.5
	横浜港	155.7	181.1	1.9	2.2
	三河港	84.3	163.4	1.0	1.5
	名古屋港	87.9	88.7	0.8	2.2
	境港	142.2	118.6	0.6	0.8
	船川港	193.5	135.1	0.8	0.8
B	石巻港	382.1	220.1	1.0	1.0
	木更津港	175.9	189.6	1.1	1.1
	横須賀港	115.0	161.4	0.8	0.9
	舞鶴港	20.9	78.0	1.8	1.8
	博多港	92.9	53.9	2.1	2.1

(2) 岸壁の耐震性評価に及ぼす影響

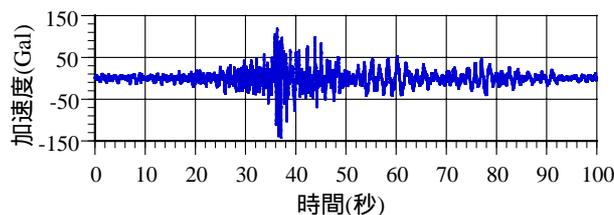
サイト特性の補正が岸壁の耐震性の評価に及ぼす影響について検討する。地震応答解析コードFLIP[®]を用いて重力式、矢板式岸壁（控え直杭式および控え組杭式）の変形量を検討した。レベル1地震動を対象とする場合、岸壁は引き続き供用できることが求められるため、変形量の許容値は30cm以下の小さな値となると考えられる。矢板式岸壁については変形量のほかに断面力の問題があるが、供用性が満足されるような変形量の範囲にある場合は、断面力は降伏値に対して余裕があることが直杭式⁹⁾および組杭式¹⁰⁾のそれぞれについて確認されている。なお変形量は供用性の観点から問題となる天端の残留水平変形量とし、壁体の傾斜については取り扱わない。



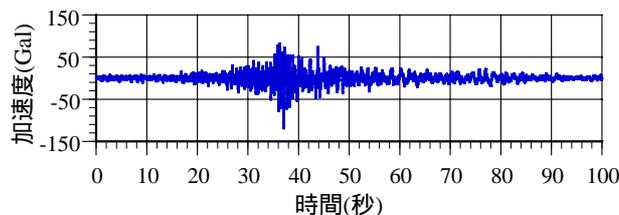
(a) 補正前の三河港波



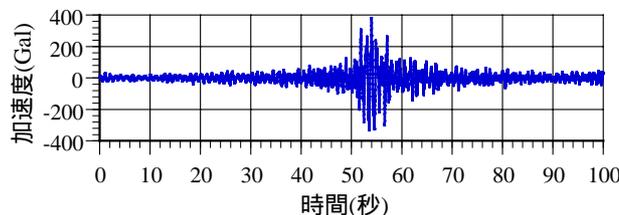
(b) 補正後の三河港波



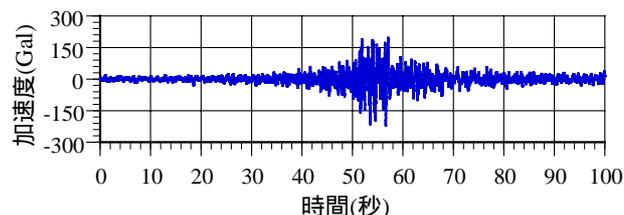
(c) 補正前の境港波



(d) 補正後の境港波



(e) 補正前の石巻港波



(f) 補正後の石巻港波

図-2 三河港、境港、石巻港の時刻歴波形

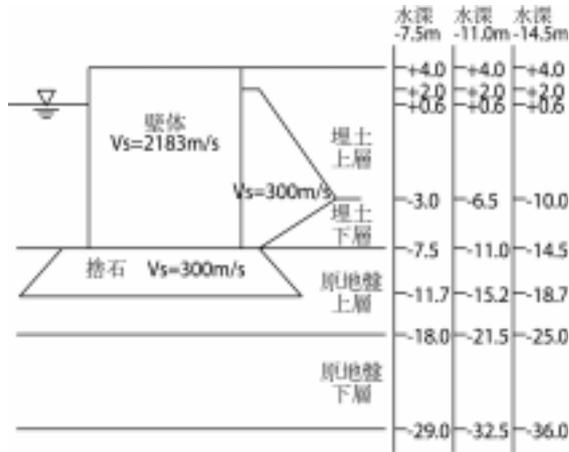
各構造形式について岸壁水深を3種類変化させて合計で3種類の断面について上記 1 のそれぞれについて地震応答計算を実施した。実施した地震応答解析は合計216ケースである。表-3に検討条件を、図-3に検討断面図を示す。検討結果を表-4に示す。

水平変形量比（補正後の水平変形量 / 補正前の水平変形量）は、条件 1 では重力式岸壁で0.4～2.0、控え直杭式矢板岸壁で0.2～2.3、控え組杭式矢板岸

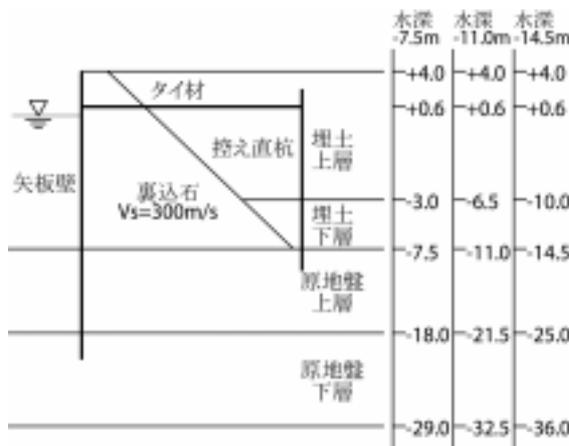
表-3 検討条件

水深 震度	-7.5m	-11.0m	-14.5m
0.15			
0.20			

注：地盤ケースは 種地盤とする



(a) 重力式岸壁



(b) 矢板式岸壁
図-3 検討断面図

壁で0.4～1.8である。また、条件 1 では重力式岸壁で0.4～6.4、控え直杭式矢板岸壁で0.5～5.4、控え組杭式矢板岸壁で0.4～4.5である。このように、サイト特性の補正は変形量に及ぼす影響が非常に強いことが明らかとなった。この影響は、名古屋港のように変形量が小さい場合には大きな問題ではない可能性があるものの、石巻港波などのように大きな変形量が算出される場合には無視し得ないものであるといえる。

なお、本論の趣旨からは離れる議論となるが、参考のために、条件 1 について港湾背後の強震観測地点におけるサイト特性をそのまま用いた波形とこれを補正した波形による変形量の比較も行った（以下）。

表-4 検討結果

(a) 重力式岸壁の水平変形量比

タイプ	港湾名	水平変形量比		
		-7.5m	-11.0m	-14.5m
	八戸港	0.7(12.8)	0.7(15.9)	0.8(13.3)
	相馬港	2.0(4.3)	1.8(6.0)	1.7(5.8)
	横浜港	0.8(11.6)	0.8(15.2)	0.8(13.4)
	三河港	1.3(3.8)	1.3(4.7)	1.3(4.2)
	名古屋港	1.2(4.3)	1.2(5.9)	1.1(5.4)
	境港	0.5(8.4)	0.4(12.3)	0.4(12.0)
	平均		1.0(8.9)	
	船川港	0.7(11.5)	0.7(14.3)	0.8(12.0)
	石巻港	0.4(56.8)	0.4(58.9)	0.4(47.4)
	木更津港	0.8(15.2)	0.8(19.0)	0.8(16.4)
	横須賀港	2.2(4.4)	2.2(5.5)	2.1(5.1)
	舞鶴港	5.7(0.7)	6.1(0.8)	6.4(0.7)
	博多港	0.6(3.1)	0.6(3.4)	0.7(3.0)
	平均		1.8(15.5)	

(b) 矢板式岸壁(控え直杭式)の水平変形量比

タイプ	港湾名	水平変形量比		
		-7.5m	-11.0m	-14.5m
	八戸港	0.6(27.2)	0.7(29.7)	0.8(28.6)
	相馬港	2.3(7.5)	1.8(11.6)	1.6(13.5)
	横浜港	0.7(23.2)	0.8(30.6)	0.8(31.8)
	三河港	1.3(6.8)	1.3(9.0)	1.3(9.6)
	名古屋港	1.2(7.4)	1.1(10.9)	1.1(12.5)
	境港	0.5(13.4)	0.3(30.4)	0.2(41.8)
	平均		1.0(19.2)	
	船川港	0.6(20.2)	0.7(25.2)	0.7(25.2)
	石巻港	0.5(55.3)	0.6(65.0)	0.6(61.4)
	木更津港	0.8(24.9)	0.7(33.9)	0.7(37.2)
	横須賀港	2.4(7.4)	2.3(10.0)	2.0(11.4)
	舞鶴港	5.0(1.3)	5.3(1.6)	5.4(1.8)
	博多港	0.7(4.8)	0.8(5.6)	0.8(6.1)
	平均		1.7(22.1)	

(c) 矢板式岸壁(控え組杭式)の水平変形量比

タイプ	港湾名	水平変形量比		
		-7.5m	-11.0m	-14.5m
	八戸港	0.8(14.0)	0.8(17.6)	0.8(19.2)
	相馬港	1.8(6.2)	1.7(8.2)	1.6(9.8)
	横浜港	0.9(12.8)	0.8(16.9)	0.9(19.9)
	三河港	1.3(5.2)	1.3(6.3)	1.3(7.2)
	名古屋港	1.2(6.0)	1.1(7.7)	1.1(9.0)
	境港	0.6(9.7)	0.5(14.0)	0.4(20.4)
	平均		1.0(11.7)	
	船川港	0.7(12.8)	0.8(15.9)	0.8(17.3)
	石巻港	0.4(44.4)	0.5(42.5)	0.5(44.0)
	木更津港	0.8(16.0)	0.8(19.5)	0.8(22.3)
	横須賀港	1.9(6.0)	1.8(7.5)	1.8(11.4)
	舞鶴港	4.3(1.3)	4.5(1.5)	4.5(1.7)
	博多港	0.7(4.2)	0.7(4.8)	0.8(5.5)
	平均		1.5(15.5)	

注1：水平変形量比= 補正後の水平変形量/補正前の水平変形量

注2：()内は補正前の水平変形量を表す(単位:cm)

表-5 タイプ の検討結果
(a) 重力式岸壁の水平変形量比

タイプ	港湾名	水平変形量比		
		-7.5m	-11.0m	-14.5m
	八戸港	0.6(15.5)	0.6(20.8)	0.6(17.4)
	相馬港	1.9(4.5)	1.8(6.1)	1.7(6.0)
	横浜港	0.9(10.6)	0.9(13.2)	0.9(12.2)
	三河港	1.1(4.5)	1.1(5.5)	1.0(5.1)
	名古屋港	1.1(4.9)	1.1(6.4)	1.0(5.8)
	境港	2.5(1.6)	2.5(2.0)	2.5(1.8)
	平均	1.3(8.0)		

(b) 矢板式岸壁(控え直杭式)の水平変形量比

タイプ	港湾名	水平変形量比		
		-7.5m	-11.0m	-14.5m
	八戸港	0.5(34.5)	0.5(44.0)	0.6(41.4)
	相馬港	2.1(8.1)	1.8(11.5)	1.6(13.6)
	横浜港	1.0(17.0)	0.9(25.8)	0.9(27.2)
	三河港	1.1(8.1)	1.1(10.6)	1.0(12.1)
	名古屋港	1.1(8.3)	1.1(11.6)	1.0(13.5)
	境港	2.3(2.9)	2.4(3.6)	2.4(4.1)
	平均	1.3(16.6)		

(c) 矢板式岸壁(控え組杭式)の水平変形量比

タイプ	港湾名	水平変形量比		
		-7.5m	-11.0m	-14.5m
	八戸港	0.7(16.0)	0.6(21.6)	0.6(26.2)
	相馬港	1.6(6.8)	1.6(8.6)	1.5(10.3)
	横浜港	1.0(11.9)	0.9(15.3)	0.9(18.0)
	三河港	1.1(6.1)	1.0(7.5)	1.0(8.9)
	名古屋港	1.1(6.6)	1.0(8.3)	1.0(9.7)
	境港	2.1(2.7)	2.1(3.2)	2.1(3.7)
	平均	1.2(10.6)		

注1：水平変形量比= 補正後の水平変形量/補正前の水平変形量

注2：()内は補正前の水平変形量を表す(単位:cm)

タイプ とする)。その結果、表-5に示すように、水平変形量比は、重力式岸壁で0.56～2.52、控え直杭式矢板岸壁で0.49～2.41、控え組杭式矢板岸壁で0.60～2.11となり、これも補正前と比較して大きな変化を示すことが明らかとなった

サイト特性の補正は数多くのデータをもとに統計的に得られた方法であるため、条件によっては良い近似が得られる場合があるが、本研究で示したように、サイトによっては誤差が非常に大きく出ることがあり、その適用には十分な注意が必要であるといえる。精度良い地震動評価のためには港湾における強震観測をもとにしたサイト特性の評価が基本的には必要であると考えられる。また、構造物の設計にあたり強震観測による記録の取得の時間的余裕がない場合は、次善の方策として常時微動観測によりサイト特性補正の必要性等を総合的に判断することが必要である。

4. まとめ

本研究では、強震記録が得られていない港湾において、港湾近傍の強震観測地点のサイト特性を用いた補正を行わざるを得ない場合について、サイト特性の補正がレベル1地震動および岸壁の耐震性評価に及ぼす影響について検討した。

本研究の主要な結論として、港湾と距離の離れた強震観測地点と港湾ではサイト特性が大きく異なる場合があり、補正されたサイト特性は誤差を多く含む可能性がある。このため本研究の検討範囲では、レベル1地震動では工学的基盤で加速度最大値が0.6～3.7倍(補正後/前)、卓越周波数は0.7～2.8倍(補正後/前)の差が生じる。また変形量では0.2～6.4倍(補正後/前)の差が生じる。従って、近傍の強震観測地点が港湾と距離があり、補正によって大きな変形量が算定される場合、精度良い地震動評価のためには港湾における強震観測をもとにしたサイト特性の評価が基本的には必要であると考えられる。また、構造物の設計にあたり強震観測による記録の取得の時間的余裕がない場合は、次善の方策として常時微動観測によりサイト特性補正の必要性等を総合的に判断し、必要に応じて補正する方法⁷⁾もある。

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, -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) 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
- 4) <http://www.k-net.bousai.go.jp/k-net>
- 5) <http://www.kik.bousai.go.jp/kik>
- 6) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: 深層地盤構造を考慮した臨海部のゾーニング手法に関する研究, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.951-956, 2005
- 7) 長尾 毅, 平松和也, 平井俊之, 野津 厚: 高松港における被害地震の震度再現に関する研究, 海洋開発論文集, 第22巻
- 8) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990
- 9) 長尾 毅, 尾崎竜三: 控え直杭式矢板岸壁のレベル1地震動に対する性能規定化に関する研究, 地震工学論文集, CD-ROM, 2005
- 10) 長尾 毅・藤村公宜・佐藤秀政・森下倫明: レベル1地震動に対する重力式および矢板式岸壁の許容変形量に関する研究, 海洋開発論文集, 第22巻