

漁港施設における設計地震動について

—第1報—

農業水産部 水産課 ○山口 圭太
林 誉命

漁港構造物の設計における地震力の算定は、従来より震度法で行われてきた。しかし設計手法が安全率法から性能照査に移行しつつある昨今においては、地震動の時刻歴波形や個々の漁港における周波数特性等を考慮した新たな照査方法が必要となる。

そこで本報文では、性能照査へ移行した港湾構造物における耐震性能照査法を参考に、その手法の漁港構造物への導入に向けた検討を行い、港湾構造物に準拠した場合の課題やその適用性について報告するものである。

キーワード：レベル1地震動、サイト増幅特性、時刻歴波形、照査用震度

1. はじめに

これまで漁港構造物の検討にあたっては、安全率法を主として行われてきた。しかし、設計の自由度を広める観点から構造物の性能のみを規定し、性能を満足するための設計法は自由とする信頼性設計法に移行するという国際的な動きの中、港湾構造物の設計法が平成19年に信頼性設計法に移行した。この一連の動きに伴い、漁港構造物についても現在信頼性設計法への移行へ向けた検討を行っている状況にある。

本報文ではこのうち地震時における安定照査について検討を行うものであり、港湾構造物で行われている性能照査手法を参考に漁港構造物への適用性やその課題について報告するものである。

2. 従来の地震動の考え方

現在、漁港構造物における地震時の安定照査は、震度法により行われている。この震度法とは、全国を5つの地域に分類し、その施設箇所における地盤種別及び施設の重要度に応じて次の式により算出するものである。

$$\text{設計震度} = \text{地域別震度} \times \text{地盤種別係数} \times \text{重要度係数}$$

しかし、過去の被災事例をみると、同一の港湾内で地震を受けたにも関わらず、その被害に大きな差が見られたケースもあった。このようなことから、構造物や地盤毎に揺れやすい地震の周期があり、地震の評価を行う場合には、地震動の振幅の大小だけではなく地盤及び構造物の周波数特性を適切に評価する必要があると考えられる。

3. サイト特性を考慮した設計地震動の算定法

(1) サイト特性の影響

前述のとおり、構造物及び地盤にはそれぞれ揺れやすい地震の周期が存在し、このうち地盤の揺れやすさを考慮することでより精度が高く効率的な設計が可能になると考えられる。この地震基盤上の堆積層の揺れやすさがサイト特性である。このサイト特性の影響をよく示した観測結果として図-1¹⁾を示す。これは、八戸港と関西国際空港で観測された強震記録のフーリエスペクトルを示したものである。八戸港では1968年の十勝沖地震及び1994年の三陸はるか沖地震のフーリエスペクトルを比較しているが、どちらの地震においても共通して周期2.5秒の成分でピークが見られる。一方で、関西国際空港では1995年の兵庫県南部地震と2000年鳥取県西部地震のいずれにおいても周期5秒の成分でピークが見られる。このように、特定の周期の地震動が卓越しやすいのは、サイト特性による影響である。

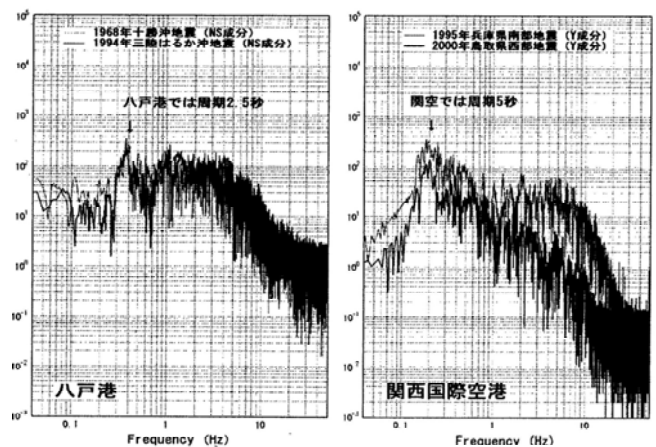


図-1 強震記録のフーリエスペクトル

(2) サイト増幅特性の基本的な考え方

地震動の性質は、震源特性、震源からの地震基盤までの伝播経路特性、地震基盤上の堆積層の影響であるサイト特性の三者を乗じる形として表現される。

$$O(f) = S(f)P(f)G(f) \quad (1)$$

ここで $O(f)$: 加速度フーリエ振幅スペクトル

$S(f)$: 震源特性

$P(f)$: 伝播経路特性

$G(f)$: サイト特性

このうちサイト特性は、その施設が設置されている箇所における地震基盤上の堆積層による影響が大きく、地震動に与える影響も大きいことから、港湾構造物では特にこのサイト特性に重点をおいている。

港湾におけるサイト増幅特性の評価手法についてその概念図を図-2¹⁾に示す。なお、本報文では港湾の技術上の基準の表現と合わせ地震動の振幅に及ぼす影響を「サイト増幅特性」とし、地震動に及ぼす影響全般を「サイト特性」とする。

港湾観測点の近傍に表層付近の平均S波速度が400m/s以上の観測点（岩盤観測点）がある港湾を対象に基本的な考え方を説明する。同一の地震がこの2観測点に作用した場合を考えると、この岩盤観測点におけるフーリエスペクトル $O_2(f)$ は(2)式により表現される。

$$O_2(f) = S_2(f)P_2(f)G_2(f) \quad (2)$$

また、港湾観測点におけるフーリエスペクトル $O_1(f)$ も(3)式により表現される。

$$O_1(f) = S_1(f)P_1(f)G_1(f) \quad (3)$$

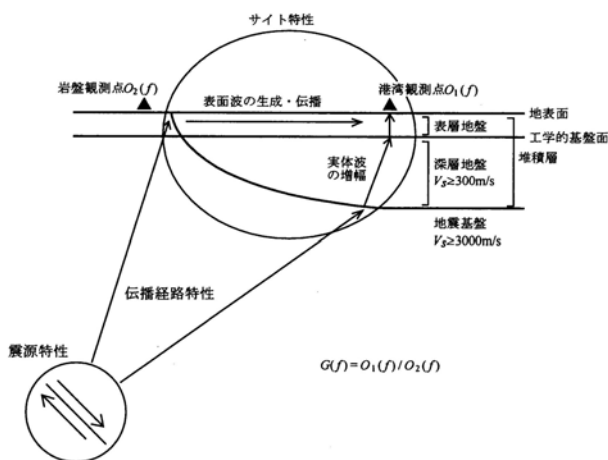


図-2 港湾におけるサイト増幅特性の評価の基本的な考え方

この時、岩盤観測点におけるサイト増幅特性は、地震基盤上でのフーリエスペクトルであるため地震基盤上の堆積層による影響はほとんどないこととなり、1と考えることができる。また、港湾観測点におけるサイト増幅特性については、岩盤観測点と港湾観測点における震源特性は同一であり、伝播経路特性もこの2観測点が近傍であるため同一と考えると、(4)式により表現される。つまり、強震観測により得られた時刻歴波形をフーリエ変換し、2地点のフーリエスペクトルを比較することでサイト増幅特性が得られるということとなる。

$$G_1(f) = O_1(f)/O_2(f) \quad (4)$$

(3) サイト増幅特性の評価

しかしながら、全ての港において、その近傍の表層付近に平均S波速度が400m/sの岩盤観測点があるわけではない。そこで、近傍に岩盤観測点がない港湾では、評価済みの観測点のサイト増幅特性を基に評価する必要がある。その評価手法は、表-1に示すように松、竹、梅の3つの手法がある。「松」は、対象港内の地震観測点における評価済みのサイト増幅特性をその港湾におけるサイト増幅特性とする方法であり、最も精度が高い手法である。「竹」は、近隣の地震観測点（基準観測点）における評価済みサイト増幅特性を補正し、対象港におけるサイト増幅特性とする方法である。「梅」は、経験的関係式を用いて補正を行うもので最も精度が落ちる手法である。

表-1 サイト増幅特性の評価手法

評価手法	
松	港湾内にある評価済み観測点のサイト増幅特性をそのまま使用する
竹	港湾内に観測点がない場合、近隣の評価済み観測点のサイト増幅特性を常時微動観測に基づき補正し、使用する
梅	港湾内に観測点がない場合、近隣の評価済み観測点のサイト増幅特性を経験的な関係式により補正し、使用する

(4) レベル1地震動の時刻歴波形の算出方法

この様にして評価されたサイト増幅特性を地震動の時刻歴波形に反映させる必要がある。レベル1地震動の時刻歴波形を算出する方法には、確率論的ハザード解析による方法と近傍の港湾で設定されたレベル1地震動を補正することにより求める方法がある。前者は主に重要港湾、後者は地方港湾の時刻歴波形の算出に用いられた方法である。本報文では後者により検討を行っており、以下にその考え方を示す。

まず近傍の港湾において設定された地震動の時刻歴波形をフーリエ変換により、フーリエ振幅とフーリエ位相に分解する。フーリエ振幅とは周波数毎の振幅の大小を示しており、フーリエ位相は周波数毎の波形の位相のズレを示したものである。このフーリエ振幅に近傍の港湾におけるサイト増幅特性と対象港におけるサイト増幅特

性の比を乗じることで、対象港におけるフーリエ振幅が得られる。また、フーリエ位相に対しては、位相特性がその地点特有のものであるため、対象港での中規模の地震動の時刻歴波形をフーリエ変換することにより得られるフーリエ位相に置き換えることで、対象港における位相特性を反映させることができる。この様にして得られた対象港のフーリエ振幅とフーリエ位相を用いてフーリエ逆変換を行うことで、各港湾毎のサイト増幅特性及びレベル1地震動の時刻歴波形が設定できる。

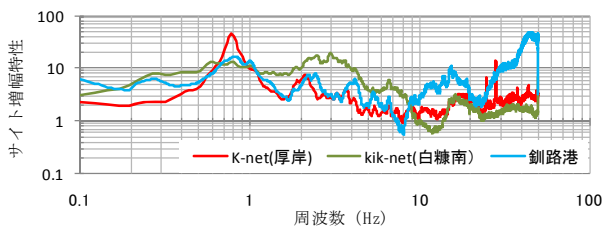
4. 照査用震度の算定

(1) 常時微動観測

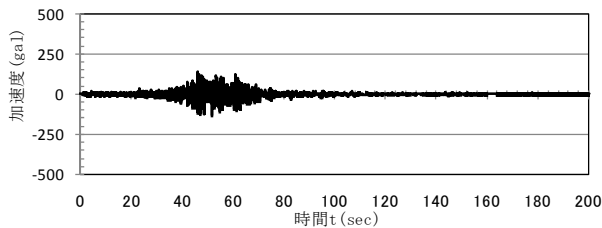
サイト増幅特性の補正に必要な情報として、現地においてどの周波数が最も揺れやすいかを把握するため、基準観測点（K-net、KiK-net）と漁港内の観測点における常時微動観測を行う必要がある。これは、両者を比較し揺れやすい周期をサイト増幅特性に反映させることが重要となるためである。また、観測結果として得られるのはX成分、Y成分、Z成分であるが、これらでは地盤特性を判断することは出来ない。そのため地盤特性をわかりやすく表現するために、各成分の加速度の時刻歴波形をフーリエ変換し、水平成分を鉛直成分で除したH/Vで示している。この場合に注目すべきは、土木構造物の固



図-3 位置図



サイト増幅特性



釧路港のレベル1地震動の時刻歴波形

図-4 評価済みサイト増幅特性と地震動の時刻歴波形

有周波数である10Hz以下の卓越周波数である。

検討対象漁港は、漁港内若しくは漁港近傍にサイト増幅特性が評価済みである基準観測点及びサイト増幅特性と地震動の時刻歴波形が設定済みである港湾が必要となるため、本報文ではこれらの条件を満たす福島漁港、及び厚岸漁港とした。ここでは、主に厚岸漁港における結果について報告する。図-3に対象漁港と基準観測点及び港湾との位置関係を、図-4に基本となる基準観測点のサイト増幅特性及び地震動等が設定済みの港湾である釧路港におけるサイト増幅特性と地震動の時刻歴波形を示す。

(2) 観測結果

厚岸漁港における基準観測点の観測結果を図-5に、漁港内の観測点の観測結果を図-6に示す。それぞれの卓越周波数に着目すると、漁港内の観測地点では湖南地区で1.9Hz、湖北地区では0.78Hzとなっており、同じ漁港内でも異なることがわかる。一方で、基準観測点では最近傍となるK-net（厚岸）では0.78Hz、KiK-net（白糠南）では2.9Hzとなった。

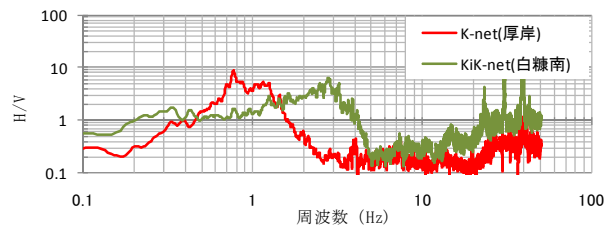


図-5 基準観測点の常時微動観測結果

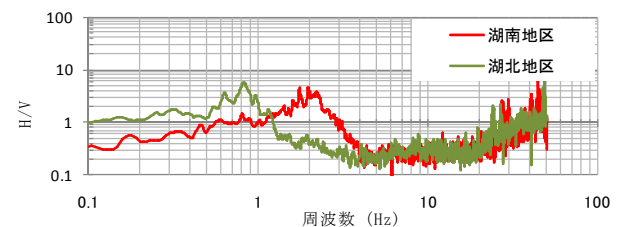


図-6 漁港内観測点の常時微動観測結果

(3) サイト増幅特性の評価結果

前述のサイト増幅特性の3種類の設定方法により、これらの基準観測点の観測結果を使って厚岸漁港のサイト増幅特性を評価した。

湖北地区における補正結果を図-7及び図-8に示す。「松」ではK-net（厚岸）におけるサイト増幅特性をそ

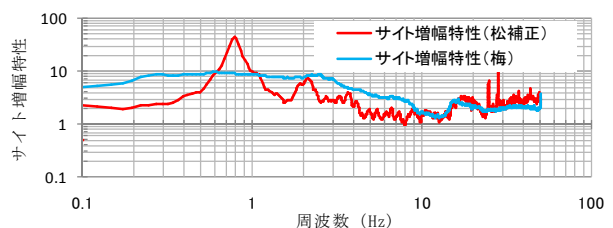
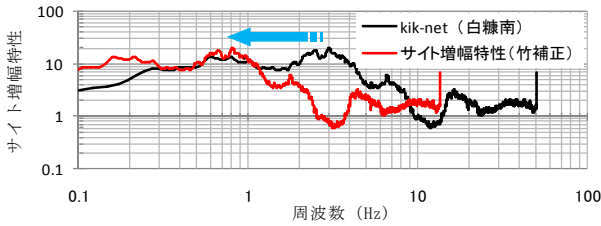


図-7 補正後のサイト増幅特性（松及び梅）

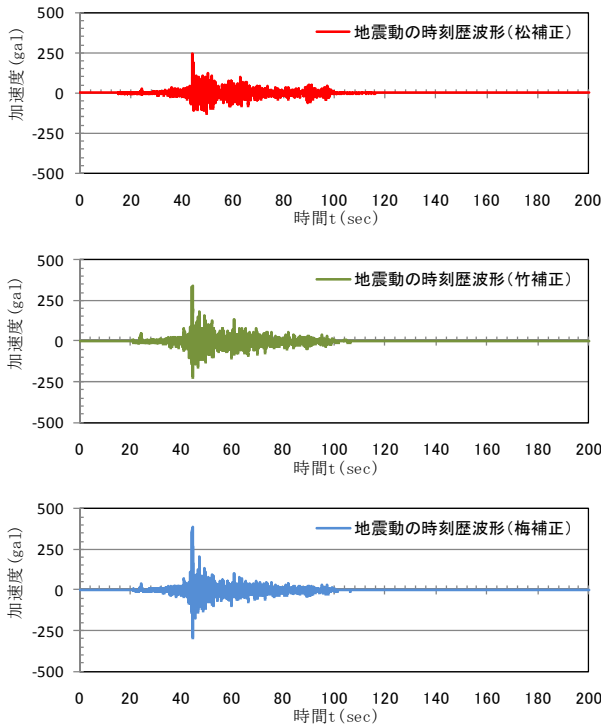
のまま使用し、「竹」ではKiK-net（白糠南）のサイト増幅特性を卓越周波数が0.78Hzとなるよう対数グラフ上でスライドさせることで補正を行った。また、「梅」は、経験的關係式により算出した。



図－8 補正後のサイト増幅特性（竹）

(4) レベル1地震動の時刻歴波形の算出

近傍の港湾の地震動を基に地震動の時刻歴波形を算出する場合に必要なのが、その地点における位相特性である。位相特性は前述のとおりその地点特有のものであり、過去の中小規模地震記録から設定することが出来る。対象とした中小地震動の時刻歴波形をフーリエ変換により、フーリエ振幅とフーリエ位相に分解する。このフーリエ位相と設定したサイト増幅特性を基に地震動の時刻歴波形を算出する。この波形は地表面のものとなっているため、工学的基盤における波形に引戻す必要がある。厚岸漁港における算出結果が図－9である。



図－9 厚岸漁港(湖北地区)の地震動時刻歴波形

(5) 照査用震度の算定

設計計算に用いる照査用震度は、前節で算出した厚岸漁港湖北地区の地震動の時刻歴波形を基に算出する。対象施設は-5.0m岸壁とする。まず地震動の加速度最大値が周波数に関係なく一定の変形量として対応させるため、

フィルター処理を行う。フィルターは、施設の構造が控え直杭式矢板構造であるため、(5)式で表現される。

$$a(f) = \begin{cases} b & 0 < f \leq 1.0 \\ \frac{b}{1 - (g(f))^2 + 11.0g(f)i} & 1.0 < f \end{cases} \quad (5)$$

$$g(f) = 0.34(f - 1.0)$$

$$b = 2.25 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.96$$

ここで H : 壁高(m)

H_R : 基準壁高(15m)

T_b : 背後地盤の初期固有周期(s)

T_{bR} : 背後地盤の基準初期固有周期(0.8s)

T_u : 海底面下の地盤の初期固有周期(s)

T_{uR} : 海底面下の地盤の基準初期固有周期(0.4s)

なお、 b の値は、壁高を用いて(6)に設定する範囲となる。

$$0.12H - 0.78 \leq b \leq 0.12H - 0.24 \quad (6)$$

ただし $b \geq 0.41$

次にフィルター処理後の加速度時刻歴から加速度最大値 α_f を求め、地震動の継続時間を勘案した低減率 p を乗じ、地表面における補正加速度最大値 α_c を(7)より算出する。

$$\alpha_c = p\alpha_f \quad (7)$$

$$p = 0.35 \ln(S/\alpha_f) - 0.20$$

ここで、 p : 低減率

S : フィルター処理後の加速度時刻歴の二乗和平方根(cm/s^2)

α_f : フィルター処理後の加速度値(cm/s^2)

この補正加速度最大値と係船岸の天端において許容される変形量 D_a を用いて照査用震度を算出する。

$$k_h = 1.91 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.69} \frac{\alpha_c}{g} + 0.03 \quad (8)$$

ここで、 k_h : 照査用震度

D_a : 許容される係船岸天端における変形量(15cm)

D_r : 基準変形量(10cm)

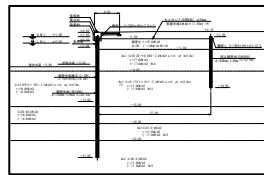
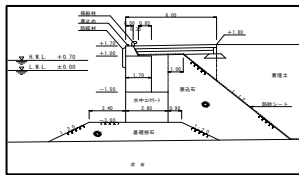
(6) 照査用震度の算定結果の検討

(8)式により算出した厚岸漁港の照査用震度を表－2に示す。また、比較検討を行うため同様に算出した福島

漁港の照査用震度と算出した照査用震度を基に試設計を行った結果も合わせて示す。図-10及び図-11は比較に使用した施設の現行基準における標準断面図とその地盤条件である。福島漁港では、現行基準に比べてどの補正方法においても5割程度照査用震度となった。厚岸漁港では「松」で2割程度照査用震度が大きくなり、「竹」及び「梅」では現行基準と同程度となった。また建設コストでは、福島漁港では現行基準と比べ5%程度の縮減がみられ、厚岸漁港では同程度か若しくはそれ以上となる結果となった。

表-2 照査用震度

	現行基準	松	竹	梅
福島漁港				
照査用震度	kh=0.12	kh=0.06	kh=0.05	kh=0.05
堤体幅	B=2.8m	B=2.3m	B=2.2m	B=2.2m
コスト	-	-5.9%	-7.0%	-7.0%
厚岸漁港				
照査用震度	kh=0.15	kh=0.18	kh=0.15	kh=0.14
矢板規格 (下段：掘)	φ700, t=9(L=28.5) φ600, t=9(L=12)	φ800, t=9(L=31) φ700, t=10(L=13)	φ700, t=9(L=28.5) φ600, t=9(L=12.0)	φ700, t=9(L=28) φ600, t=9(L=11.5)
コスト	-	+9.0%	0.0%	-1.7%



福島漁港

厚岸漁港

図-10 標準断面図(現行基準)

標高	福島漁港				厚岸漁港(湖北地区)					
	柱状図	土質分類	N値	Vs(m/s)	備考	柱状図	土質分類	N値	Vs(m/s)	備考
3										
2										
1										
0										
-1		埋土	9	190			埋土	3	160	
-2										
-3										
-4					工学的基盤					
-5		泥岩	-	310			粘性土	3	110	
-6										
-7										
-10							粘性土	3	120	
-20							粘性土	5	130	
-30							粘性土	6	130	
-40							粘性土	7	150	
-50							砂質土	30	240	
-55							砂質土	23	240	
-60							粘性土	15	180	
-65							粘性土	19	200	
-70							泥岩	125	300	工学的基盤

図-11 地盤条件

比較的工学的基盤が浅い福島漁港では、サイト増幅特性の補正方法による照査用震度の違いが小さくなった。一方で、工学的基盤が深く、さらに堆積層が厚く比較的軟弱な厚岸漁港では、補正方法による照査用震度の違いが顕著となった。また、建設コストについても同様の傾向がみられた。これらのことから、サイト増幅特性の補正方法の選定にあたっては、軟弱地盤等の地盤条件を十分考慮する必要があるといえる。

(5) 課題の抽出

前節において、地盤条件が軟弱な箇所ではサイト増幅

特性の補正方法による照査用震度の違いが顕著となることが示されたが、これは厚岸漁港1ケースのみの検討であるため、さらなるデータの蓄積が必要である。このほか、港湾構造物の照査方法を漁港構造物に適用するにあたって、いくつかの課題がある。1つは照査用震度算出の際に用いるフィルターが港湾構造物のように壁高が高いものを想定していることから、漁港施設のように壁高が小さい構造物に対して妥当性を確認する必要がある。なお、港湾基準では壁高の小さい岸壁や物揚場を想定し下限値を設定している。2つ目は照査用震度を算出する際に許容変形量を設定する必要があるが、港湾構造物ではこれまで設計してきた既存の構造物の地震時の変形量の平均として重力式で10cm、矢板式で15cmと設定しているのに対し、漁港構造物では対象漁船も小さく利用面を考慮すると、より小さな許容変形量を設定する検討が必要であるものと考えられる。また、港湾構造物では、施設の重要度に合わせた照査用震度を与えるよう壁高に応じた評価手法としているが、漁港構造物では施設の重要度が壁高に拠らないため、許容変形量に応じた形にするなど、さらなる検討が必要と考えられる。

5. まとめ

地震時の安定照査方法として、港湾構造物における手法を漁港構造物に適用した場合について、どのような課題があるか検討を行った。以下に本検討で得られた結論を示す。

- ① サイト増幅特性の補正方法については、その箇所における地盤条件が良好な場合は比較的容易にできる経験的な関係式を用いた「梅」により設定できる可能性がある。
- ② 工学的基盤上の堆積層が厚く軟弱な場合には、「松」や「竹」といった比較的精度の高い補正方法を採用すべきと考えられる。
- ③ 港湾における安定照査法を漁港施設のように壁高が小さい構造物に適用した場合の妥当性について、検討が必要であると考えられる。
- ④ 構造物の設計断面に与える影響が大きいことが想定されるため、構造物の重要度に応じた許容変形量を設定するなどの検討も必要と考えられる。

今後は、上記の課題の解決のため、検討ケースの蓄積や過去の被災事例の再現、壁高の小さい構造物に対して動的解析を行い、その妥当性について検証を重ねていく予定である。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説