

小規模係船岸の耐震性能照査について

— 周波数特性を考慮した照査用震度の算定 (第2報) —

農業水産部 水産課

○船橋 雄大
小松 勝久
西多 道祐

漁港施設の設計手法については、性能規定化に向けた検討が進められている。このうち、重力式係船岸の耐震性能照査方法は、従来の震度法に加えて、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（以下、「港湾基準」という。）に基づく手法を含めた検討が行われているが、漁港構造物は、港湾構造物に比べ小規模なものが多く、周波数特性等が異なると考えられるため、これらの特性を適切に反映させる必要がある。

本報告は、漁港の小規模な重力式係船岸を対象として、港湾基準による照査用震度算定方法の適用性について検討を行ったものである。

キーワード：耐震性能照査、照査用震度、周波数特性、レベル1地震動

1. はじめに

漁港施設をより効率的・効果的に整備するため、耐震性能照査方法を含め、設計手法の性能規定化に向けた検討が行われている。

現行の「漁港・漁場の施設の設計の手引き」においては、地域特性、地盤特性及び構造物の重要度等に応じた、設計震度を設定する震度法によって地震力を算定し、耐震性に対する安定性の確認を行っている。

一方、性能規定化された港湾基準においては、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮した地震動を設定し、その地震動の周波数特性を考慮して施設の許容変形量に応じた照査用震度を算定することで、耐震性能照査を行っている。図-1-1に港湾基準における震源特性、伝播経路特性及びサイト特性の概要、図-1-2に港湾基準における照査用震度の算定方法の概要を示す。

本検討の第1報では、小規模係船岸（重力式）に対する港湾基準の照査用震度算定方法の適用性について、第I種地盤を地盤条件として検討を行った。この結果、小規模係船岸（重力式）に対して、設計水深7.5m～16.0m（壁高11.5m～20.0m）の範囲をモデルとした、港湾基準における耐震性能照査の考え方を適用する場合には、周波数特性や許容変形量等の違いを適切に反映させる必要があることが確認された。

本報では、地盤条件に第II種及び第III種地盤を加え、周波数特性の違いを考慮したフィルターを新たに設定し、許容変形量に応じた照査用震度の試算を行うことにより、小規模係船岸（重力式）に対する港湾基準の照査用震度算定方法の適用性について、検討を行ったものである。

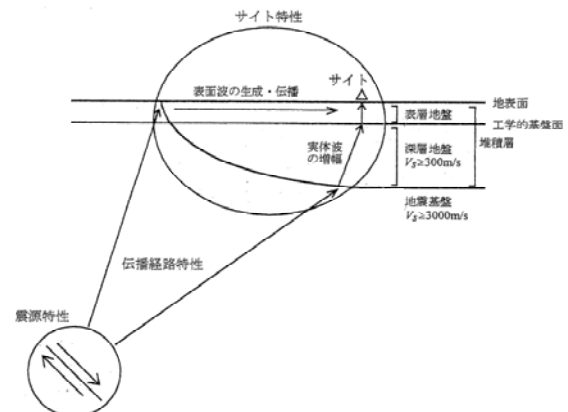


図-1-1 震源特性、伝播経路特性及びサイト特性の概要
(港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年より抜粋)

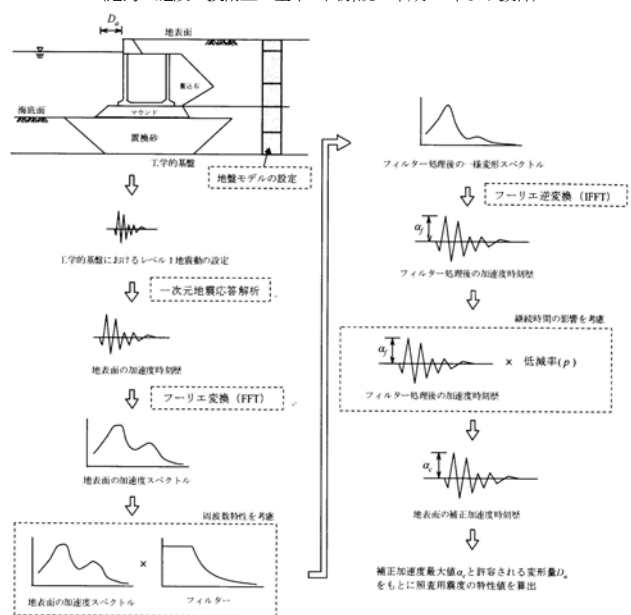


図-1-2 照査用震度の算定方法の概要
(港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年より抜粋)

2. 周波数特性を考慮したフィルターの検討

(1) 検討方法

図-2-1に、小規模係船岸（重力式）における周波数特性を考慮したフィルターの設定フロー図を示す。港湾基準の根拠となる国土技術政策総合研究所資料No.310（以下「国総研資料」という。）を参考として、第1報において検討した第Ⅰ種地盤（固有周期 $T=0.4\sim 0.6s$ の締まった地盤）に加えて、第Ⅱ種地盤（固有周期 $T=0.8s$ の第Ⅰ種地盤と第Ⅲ種地盤の中間の地盤）及び第Ⅲ種地盤（固有周期 $T=1.2s$ の緩い地盤）の地盤モデルを設定し、地震動の周波数特性と堤体天端の残留変形量の関係を調べ、影響の大きい周波数を考慮したフィルターを検討した。解析ツールとしては、再現計算の結果、小規模係船岸（重力式）においても再現性が確認された、二次元動的変形解析(FLIP)を用いた。なお、液状化パラメータは、考慮しないこととした。

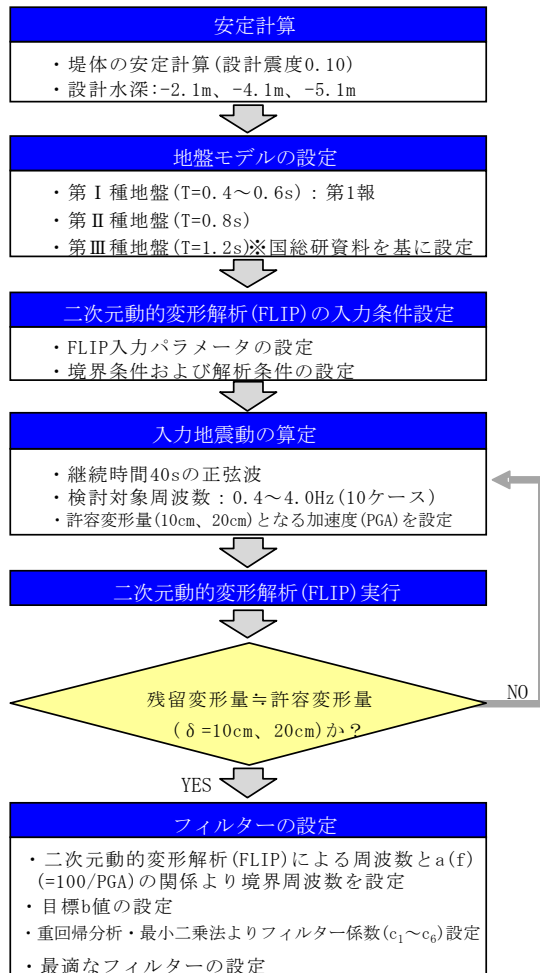


図-2-1 周波数特性を考慮したフィルターの設定フロー図

(2) 検討条件

検討ケースは、港湾基準における設計水深-7.5m（壁高11.5m）よりも小さい範囲で、標準的な小規模係船岸の設計水深から-2.1m（壁高3.6m）、-4.1m（壁高6.1m）、

-5.1m（壁高7.1m）の3種類について検討を行った（表-2-1）。

検討断面は、第1報と同様の条件とするため、設計震度が0.10となるように、現行における漁港構造物の設計手法を用いて設計した。ただし、本報の地盤条件は、第Ⅱ種及び第Ⅲ種地盤であることを考慮し、偏心傾斜に対する安定性の照査では、基礎地盤のせん断抵抗角 ϕ_d を第Ⅱ種地盤で 45° 、第Ⅲ種地盤で 40° として検討した。図-2-2に検討断面の一例、表-2-2に、地盤モデルの一例を示す。

また、構造物に対する影響が大きい周波数帯を求めるために、検討する周波数は、0.4~4.0Hzの範囲で10ケースに変化させた。これらの周波数における入力地震動は、継続時間40秒、主要動継続時間5秒で、主要動の前後にコサイン状のテーパーをかけた正弦波として二次元動的変形解析(FLIP)を行い、堤体天端の残留変形量 δ が10cm、20cmとなる地表面加速度最大値PGAを求めた。

表-2-1 検討ケース

設計水深 (m)	壁高 (m)	第Ⅰ種地盤			第Ⅱ種地盤	第Ⅲ種地盤
		(T=0.4s)	(T=0.4~0.6s)	(T=0.6s)	(T=0.8s)	(T=1.2s)
-2.1	3.6	●	●	●	●	●
-3.1	5.1	●	●	●	-	-
-4.1	6.1	●	●	●	●	●
-5.1	7.1	●	●	●	●	●
-7.5	11.5	●	●	●	●	●
-11.0	15.0	●	●	●	●	●
-14.5	18.5	●	●	●	●	●

●: 国総研資料の検討ケース
●: 水産庁の検討ケース
●: 第1報の検討ケース
●: 第2報の検討ケース

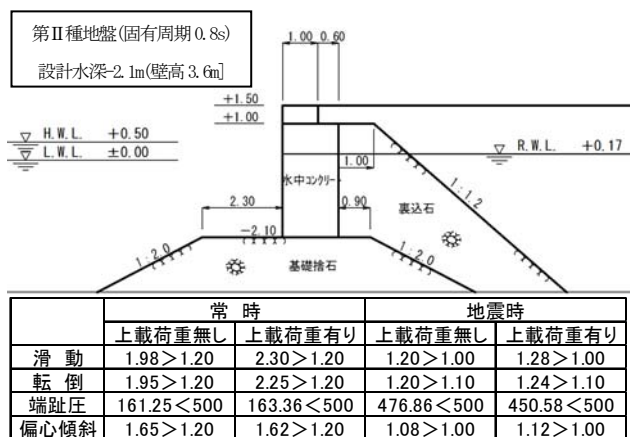


図-2-2 検討断面の一例

表-2-2 地盤モデルの一例(第Ⅱ種地盤 設計水深:-2.1m)

土質	分類	層厚H (m)	湿潤単位 体積重量 γ_t (kN/m ³)	飽和単位 体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	層中央の 有効上載圧 σ'_v (kN/m ²)	S波速度 V_{si} (m/s)	H/V _{si}
+1.50	埋土	1.33	18.00	20.00	0	11.97	180	0.007
+0.17	砂質土	3.77			0	42.79		0.021
-3.60	原地盤	14.40	18.00	20.00	0	133.64	190	0.076
-18.00	砂質土	24.00			0	325.64	250	0.096
-42.00	基礎							
							$\Sigma H_i/V_{si} =$	0.200
							$4 \Sigma H_i/V_{si} =$	0.800

(3) 二次元動的変形解析 (FLIP) 結果

図-2-3～図-2-5に、二次元動的変形解析(FLIP)によって得られた各地盤条件における設計水深別の地表面加速度最大値PGAと周波数の関係を示す。

国総研資料の結果と同様に、①堤体天端に変形を生じさせるために、低周波よりも高周波の方が大きな入力地震動が必要、②堤体が小さい方が変形を生じさせるために、大きな入力地震動が必要である傾向が見られた。ただし、国総研資料では1.0Hz付近に極値が生じるのに対して、小規模係船岸（重力式）においては、 $\delta=10\text{cm}$ では1.5Hz、 $\delta=20\text{cm}$ では1.2Hz付近に極値が生じる結果となった。

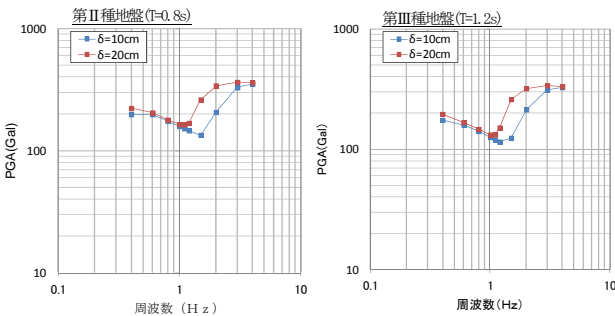


図-2-3 地表面加速度最大値PGAの周波数特性
(設計水深：-2.1m)

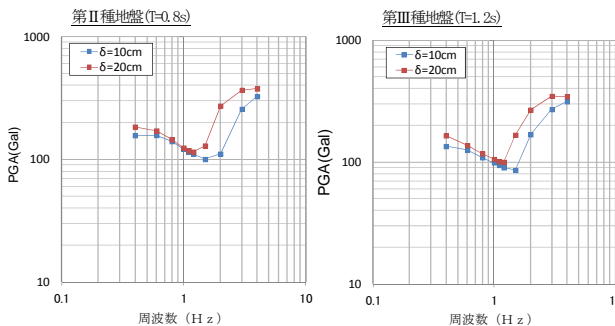


図-2-4 地表面加速度最大値PGAの周波数特性
(設計水深：-4.1m)

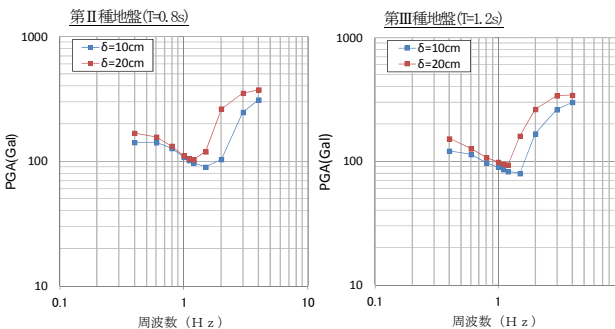


図-2-5 地表面加速度最大値PGAの周波数特性
(設計水深：-5.1m)

(4) フィルターの設定方法

本検討は、設計震度0.10の条件によって求めた断面に対して解析を行っていることから、式(1)によって二次元動的変形解析(FLIP)結果から得られる地表面加速度最大値PGAが、フィルター処理後に100Galとなるような応

答値 $a(f)$ を求め、周波数との関係をプロットした。結果の一例を図-2-6に示す。

ここで、地表面加速度最大値PGAが100Galになるようにフィルターを設定する理由は、理論上、地表面加速度最大値PGAを重力加速度(=980Gal)で除した値が作用震度(設計震度)であることから、設計震度0.10となる地表面加速度最大値PGAを逆算すると、 $0.1 \times 980 = 100\text{Gal}$ となるためである。

$$a(f) = 100 / \text{PGA} \quad (1)$$

ここに、

PGA：地表面加速度最大値 (Gal)

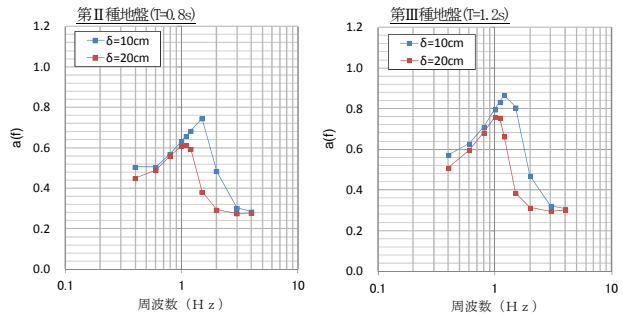


図-2-6 $a(f)$ の周波数特性の一例(設計水深：-2.1m)

本検討のフィルターは、港湾基準におけるフィルターの設定方法と同様に式(2)～式(4)の関数形について、6つの係数 $c_1 \sim c_6$ を求めることにより設定する。港湾基準においては、図-2-7に示すように、1.0Hz(境界周波数 f_b)以下の低周波数帯における大きさ $a(f)$ (=b値)のフラットな領域と、1.0Hz以上の高周波数帯における $a(f)$ が急激に減衰する領域により構成される。

$$a(f) = \begin{cases} b & (f \leq f_b) \\ \frac{b}{1 - \{g(f)\}^2 + c_1 g(f)i} & (f > f_b) \end{cases} \quad (2)$$

$$g(f) = c_6 (f - f_b) \quad (3)$$

$$b = c_2 \frac{H}{H_R} + c_3 \frac{T_b}{T_{bR}} + c_4 \frac{T_u}{T_{uR}} + c_5 \quad (4)$$

ここに、

f : 周波数 (Hz)

f_b : 境界周波数 (Hz)

i : 虚数単位

H : 壁高 (m)

H_R : 基準壁高 (=15.0m)

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 : 壁体下地盤の初期固有周期 (s)

T_{uR} : 壁体下地盤の基準初期固有周期 (=0.4s)

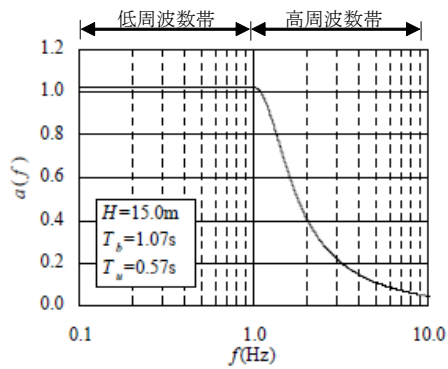


図-2-7 港湾基準におけるフィルター

表-2-3に二次元動的変形解析(FLIP)結果より得られた周波数と応答値 $a(f)$ の関係から求めたピーク周波数(境界周波数 f_b)を各地盤条件の設計水深別に示す。

ピーク周波数については、残留変形量 δ が10cm、20cmにおいて概ね1.0~1.5Hz付近に見られることから、境界周波数 f_b を1.0Hz(港湾基準の手法)、1.2Hz、1.5Hzの3ケースで検討することとした。

境界周波数 f_b 以下の低周波数帯では、異なる地盤条件 H 、 T_b 、 T_u に対して、0.4Hzから境界周波数 f_b までにおける応答値(b値)を計算し、そのb値を目的変数、 H/H_R 、 T_b/T_{bR} 、 T_u/T_{uR} を説明変数として、式(4)を用いて重回帰分析を行うことにより係数 $c_2 \sim c_5$ を求めた。表-2-4に $\delta = 20\text{cm}$ の場合における目的変数b値の検討ケースを示す。

境界周波数 f_b 以上の高周波数帯では、各地盤条件における設計水深(全9ケース)に対し、境界周波数 f_b から右側の周波数と応答値 $a(f)$ の関係を示す近似線の誤差が最も小さくなる係数を、式(2)から最小二乗法により求め、得られた全9ケース分の係数を平均して係数 c_1 の値とした。 c_6 については、それ自体を変化させて、フィルターの近似精度を向上させる値とした。

表-2-3 ピーク周波数(境界周波数 f_b)の一覧表

設計水深	壁高	第I種地盤(T=0.4)		第II種地盤(T=0.8)		第III種地盤(T=1.2)	
		$\delta = 10\text{cm}$	$\delta = 20\text{cm}$	$\delta = 10\text{cm}$	$\delta = 20\text{cm}$	$\delta = 10\text{cm}$	$\delta = 20\text{cm}$
-2.1m	3.6m	1.5	1.1	1.5	1.1	1.2	1.0
-4.1m	6.1m	1.5	1.2	1.5	1.2	1.5	1.2
-5.1m	7.1m	1.5	1.2	1.5	1.2	1.5	1.2

表-2-4 b値の設定ケース一覧($\delta = 20\text{cm}$ の例)

ケース名	目的変数b値	境界周波数 f_b (Hz)	備考
ケース①	0.8Hzの $a(f)$	1.0Hz	港湾基準の手法
ケース②	1.2Hzより小さい $a(f)$ の平均値	1.2Hz	-
ケース③	1.5Hzより小さい $a(f)$ の平均値	1.5Hz	-
ケース④	-	-	港湾基準におけるフィルター
ケース⑤	-	-	第I報で設定したフィルター

(5) フィルターの設定結果

$\delta = 10\text{cm}$ 及び $\delta = 20\text{cm}$ における $a(f)$ ($=100\text{PGA}$) による解析結果について、フィルターの設定を検討した。図-2-8に $\delta = 20\text{cm}$ の場合のケース①~⑤におけるフィルターの比較図の一例を示す。フィルターの偏差より求めた分散(=偏差の平方和÷データ数)が小さいほど、設定した

フィルターが、各地盤条件の設計水深別に得られた各解析結果と良く近似できているといえることから、表-2-5で分散が最小となるケース②のフィルターを、小規模係船岸用フィルターとして検討することとした。表-2-6に小規模係船岸用フィルターの係数 $c_1 \sim c_6$ を示す。

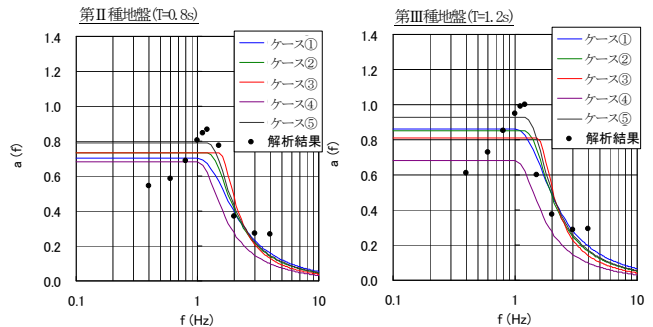


図-2-8 フィルターの検討結果の一例($\delta = 20\text{cm}$ 、水深4.1m)

表-2-5 各検討ケースにおける分散値($\delta = 20\text{cm}$ の例)

水深(m)	地盤種別	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④	ケース⑤
-2.1	第I種	0.004	0.005	0.007	0.053	0.005
-4.1	第I種	0.012	0.009	0.009	0.094	0.009
-5.1	第I種	0.015	0.010	0.012	0.107	0.010
-2.1	第II種	0.006	0.008	0.010	0.010	0.010
-4.1	第II種	0.017	0.013	0.013	0.030	0.015
-5.1	第II種	0.023	0.017	0.018	0.040	0.019
-2.1	第III種	0.014	0.013	0.018	0.018	0.016
-4.1	第III種	0.017	0.018	0.023	0.045	0.023
-5.1	第III種	0.020	0.021	0.028	0.053	0.030
合計値		0.125	0.114	0.139	0.450	0.137

表-2-6 小規模係船岸用フィルター係数

係数	小規模係船岸用フィルター	【参考】 港湾基準における フィルター
C_1	18.532	6.800
C_2	0.434	1.050
C_3	1.327	-0.880
C_4	-0.655	0.960
C_5	0.318	-0.230
C_6	0.099	0.340

3. フィルターの検証と照査用震度の試算

(1) フィルターのb値下限値の検証

港湾基準におけるフィルターのb値については、式(5)に示すように上下限値が設けられている。この考え方と同様に、小規模係船岸用フィルターによるb値の下限値の検証を行った。なお、上限値については、安全側に配慮し設定しないこととした。

$$0.04H + 0.08 \leq b \leq 0.04H + 0.44 \quad b \geq 0.28 \quad (5)$$

境界周波数 f_b 以下の低周波数帯における加速度が極力大きい入力地震動で、b値が極力小さい(変形が発生しにくい)モデルにより検証を行うため、遠別漁港レベル1地震動および十勝沖地震八戸波地震動を選定した。

照査用震度が0.10となるフィルターのb値は、図-3-1に示すとおり0.25~0.30程度の値となり、港湾基準にお

るフィルターの壁高5m以下のb値の下限值0.28と同程度の値となり、本報の小規模係船岸用フィルターにおいて**もb値0.28を下限値として問題ないと考えられる。**

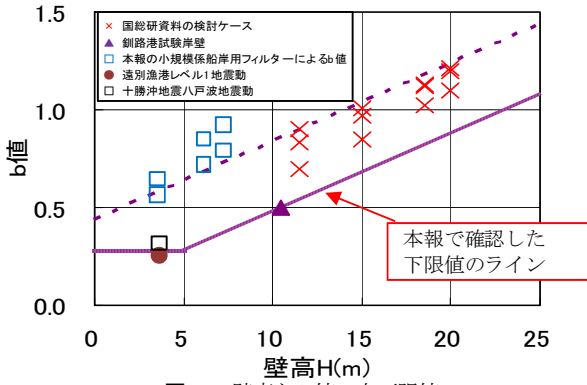


図-3-1 壁高とb値の上下限値

(2) $a(f)$ の解析結果の平均化による影響についての検証

図-3-2に示すように、 $a(f)$ (=100PGA)の解析結果では、プロット分布が山なり形状を示しているのに対して、小規模係船岸用フィルターの設定値は、境界周波数 f_b 以下の低周波数帯をb値として平均化している。

平均化による影響を検証するため、境界周波数 f_b 以下の低周波数帯において、 $a(f)$ (=100PGA)が最大あるいは最小となる周波数に対応した入力地震動を、繰返し計算により求め、その際に生じる堤体天端の残留変形量の違いを確認した。

検証は、フィルター設定時において、境界周波数 f_b 以下の低周波数帯における $a(f)$ (=100PGA)の最小値と最大値の差が大きいモデルを選定して行った（第II種地盤：設計水深-5.1m（壁高7.1m）、第III種地盤：設計水深-4.1m（壁高6.1m））。

結果、設計震度0.10で許容変形量20cmとして設計された構造物に対して、卓越する周波数が1.2Hz付近にある場合で29cm程度、0.4Hz付近にある場合には7cm程度の変形が発生し、ある程度の範囲で誤差が生じるものを平滑化していることが確認された。

しかしながら、 $a(f)$ (=100PGA)が大きくなる1.2Hz付近にb値をフラットとして設定すると非常に過大な設計になると考えられ、また、実際の地震動には種々の周波数が複雑に含まれていることを考えると、小規模係船岸用フィルターも港湾基準におけるフィルターのように、プロット分布の山なり形状をフラットなb値に設定するために、平均化する手法が妥当であるものと考えられる。

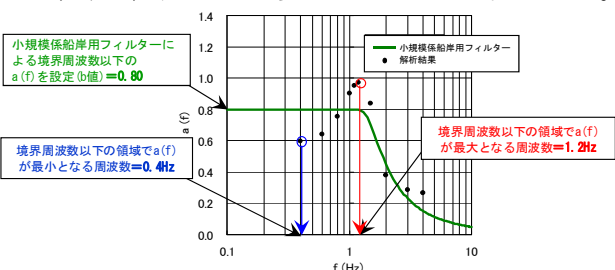


図-3-2 $a(f)$ の周波数特性と小規模係船岸用フィルター設定値

(3) 地震動の継続時間の影響に対する検証

港湾基準では、フィルター処理後の地表面加速度時刻歴の二乗和平方根 S とフィルター処理後の地表面加速度最大値 α_f の比率により低減率 p を式(6)によって設定し、式(7)により補正後の地表面加速度最大値 α_c を求めることで、地震動の継続時間の影響を考慮している。港湾基準における地震動の継続時間の影響を考慮した補正方法について、小規模係船岸（重力式）への適用が可能であるかを検証した。

図-3-3に示す6種類の地震動に対して、残留変形量が20cmとなる入力地震動を繰返し計算により求め、入力地震動に対応した地表面加速度時刻歴を求めた。その地震動に対して、小規模係船岸用フィルター処理後の地表面加速度最大値 α_f および低減率 p による補正後の地表面加速度最大値 α_c を求めた。

$$p = 0.36 \ln(S / \alpha_f) - 0.29 \quad (6)$$

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

ここに

p : 低減率 ($p \leq 1.0$)

S : フィルター処理後の地表面加速度時刻歴の二乗和平方根 (Gal)

α_f : フィルター処理後の地表面加速度最大値 (Gal)

α_c : 補正後の地表面加速度最大値 (Gal)

図-3-4に、各地震動に対して算出された補正後の地表面加速度最大値 α_c を示す。若干のばらつきはあるものの概ね100Gal程度となっており、港湾基準の継続時間補正方法は、小規模係船岸（重力式）に対しても適用可能であるといえる。

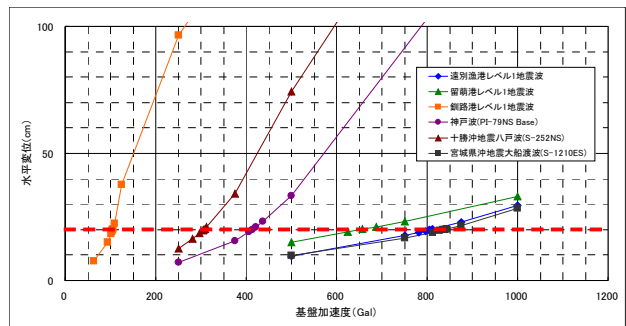


図-3-3 各地震動の入力加速度最大値と残留変形量の関係

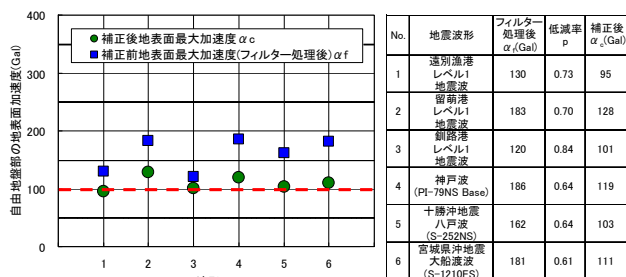


図-3-4 各地震動における補正前後の地表面加速度最大値

(4) 残留変形量の比較

新たに設定した小規模係船岸用フィルターを用いて決定した断面と、港湾基準におけるフィルターを用いて決定した断面で二次元動的変形解析(FLIP)を実施し、両者の残留変形量を比較検討することにより、フィルターの妥当性について評価した。レベル1地震動における照査用震度は、港湾基準の考え方と同様に式(8)により算定した。一例として、地盤条件は第Ⅱ種地盤、設計水深は4.1m (壁高6.1m) とする。

$$k_{hk} = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.55} \frac{\alpha_c}{g} + 0.04 \quad (8)$$

ここに

- k_{hk} : 照査用震度の特性値
- α_c : 補正後の地表面加速度最大値 (Gal)
- g : 重力加速度 (=980Gal)
- D_a : 係船岸天端における許容変形量 (cm)
- D_r : 基準変形量 (=10cm)

照査用震度の算定結果より設計水深4.1m (壁高6.1m) において、現行震度との開度が小さい室蘭港と現行震度を上回る釧路港のレベル1地震動を用いて、小規模係船岸用フィルターの評価をすることとした。表-3-1に照査用震度と残留変形量を示す。また図-3-5に室蘭港および釧路港におけるレベル1地震動のフーリエスペクトル図を示す。

表-3-1 照査用震度および残留変形量 (第Ⅱ種地盤、設計水深4.1m)

港湾名	基盤最大加速度 (Gal)	照査用震度 k_{hk} (許容変形量 $D_a=10$ cm)		照査用震度 k_{hk} (許容変形量 $D_a=20$ cm)		現行震度 (保留A)	
		小規模係船岸用フィルター	港湾基準におけるフィルター	小規模係船岸用フィルター	港湾基準におけるフィルター		
室蘭	219.3	0.17	0.11	0.13	0.09	0.14	
釧路	137.0	0.26	0.17	0.19	0.13	0.18	
地震動	照査用震度 k_{hk}	残留変形量 (法線出入り)					
		小規模係船岸用フィルター		港湾基準におけるフィルター			
室蘭港	0.09	Da=10cm	Da=20cm	Da=10cm	Da=20cm		
		-	-	-	7.6cm		
		0.11	-	-	6.8cm		-
		0.13	-	6.3cm	-		-
釧路港	0.26	Da=10cm	Da=20cm	Da=10cm	Da=20cm		
		12.6cm	-	-	-		

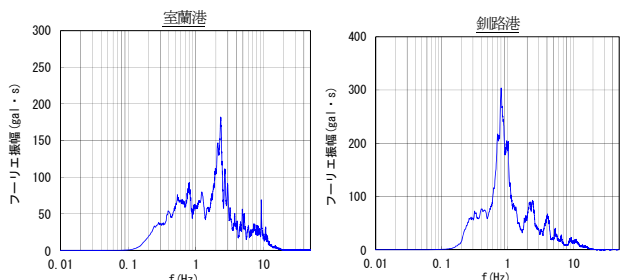


図-3-5 各港におけるレベル1地震動のフーリエスペクトル図

室蘭港のレベル1地震動については、小規模係船岸用フィルターおよび港湾基準におけるフィルターともに残留変形量が許容変形量を下回る結果となり、安全側の設計となった。

これに対して釧路港のレベル1地震動については、港湾基準におけるフィルターでは、残留変形量が許容変形量を上回る結果となり、照査用震度が小さく評価される結果となった。一方、小規模係船岸用フィルターでは残留変形量が許容変形量をわずかに上回ったが、ほぼ許容変形量と同程度の変形量となったことから、妥当な照査用震度を与えているものと考えられる。これは、釧路港のレベル1地震動が0.8Hz付近の低周波数帯で卓越しているため、2~3Hz付近の高周波数帯が卓越する室蘭港のレベル1地震動に比べて、変形量が大きくなったためと考えられる。

港湾基準におけるフィルターをそのまま小規模係船岸に用いると危険側の設計をしてしまう場合もあることから、構造物の規模に応じた周波数特性を考慮するなど、その適用範囲に十分留意して検討する必要があることが確認された。

4. おわりに

本報における主要な結論は、以下のとおりである。

- ①小規模係船岸では、変形に対して影響の大きいピーク周波数が港湾基準と比較して高周波数帯となることを確認した。
- ②港湾基準とは異なる周波数特性を考慮し、小規模係船岸に適用するためのフィルターを新たに設定した場合においても、b値の下限値や継続時間の影響については、港湾基準の考え方が適用できることを確認した。
- ③照査用震度の適用にあたっては、構造物の規模に応じて周波数特性や残留変形量に違いが生じることを踏まえ、その適用範囲に十分留意する必要がある。

小規模係船岸に対する港湾基準の照査用震度算定方法の適用性について検討を行った結果、重力式の構造形式においては、周波数特性や許容変形量等の異なる特性を適切に設計に反映する必要があることを確認した。

矢板式や栈橋式等の小規模係船岸においても、周波数特性等が異なる可能性があることから、今後についてはこれらの構造形式に対し、港湾基準の照査用震度算定方法の適用性について検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 長尾毅、岩田直樹、藤村公宣、森下倫明、佐藤秀政、尾崎竜三：レベル1地震動に対する重力式及び矢板式係船岸の耐震性能照査用震度の設定手法、国土技術政策総合研究所資料、第310号、2006