

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1報） —

農業水産部 水産課 ○ 西多 道祐
林 誉命

漁港施設の設計手法について、性能設計体系の導入に向けた検討が進められており、このうち耐震性能の照査手法は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に基づく手法を含めた検討が行われている。

しかし、漁港構造物は、港湾構造物に比べ小規模なものが多く、周波数特性や許容変形量等の特性が異なると考えられるため、耐震性能照査において考慮すべき特性が反映されていない可能性がある。

このことから、本報では、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の照査用震度算定手法を漁港の小規模係船岸に適用することの妥当性について検討を行ったものである。

キーワード：照査用震度、周波数特性、レベル1地震動、第I種地盤

1. はじめに

「漁港・漁場の施設の設計の手引き」（以下「設計の手引き」という。）におけるレベル1地震動における耐震性能照査は、地域別震度、地盤種別係数、重要度係数を乗じて得られる設計震度により行われている。

しかし、地震動は、震源特性、伝播経路特性、対象地点周辺の地盤特性（サイト特性）に依存し、また、施設の地震応答は入力地震動の振幅の大小だけでなく、地震動、地盤及び構造物の周波数特性に依存するため、性能照査に用いる入力地震動はこれらの諸特性を適切に考慮する必要がある。

このため、設計の手引きの改定では、施設の耐震性能照査において考慮する地震動の作用を従来の震度法による考え方に加えて、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して得られる工学的基盤における地震動の時刻歴波形をもとに、表層地盤や構造物の特性を考慮して照査用震度を算出する「港湾の施設の技術上の基準」（以下「港湾基準」という。）による方法の適用を含めた検討が行われている。

港湾基準のレベル1地震動における照査用震度は図-1に示す考え方で算出されるが、周波数特性を考慮するフィルターは壁高が11.5～20.0mの範囲をモデルに構築されていることから、漁港構造物のように小規模で壁高が小さい場合の岸壁の変形量に影響を及ぼす地震動の周波数特性が十分に考慮されていない可能性がある。

本報は、北海道開発局が整備を行う第3種、第4種漁港に多い重力式係船岸を対象に、①小規模係船岸に大き

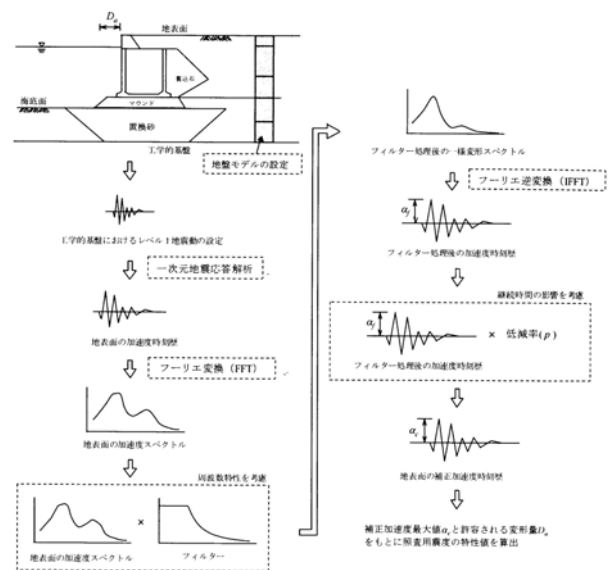


図-1 照査用震度の算定方法の概要
(港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年より抜粋)

な影響を与える周波数の検討、②影響の大きい周波数を考慮したフィルターの設定及び照査用震度の算出、③設計によるフィルターと許容変形量の評価を行い、港湾基準の照査用震度算定法の小規模係船岸への適用について検討を行ったものである。

2. 周波数特性を勘案したフィルターの検討

(1) 検討方法

本検討は、港湾基準の根拠となる国土技術政策総合研

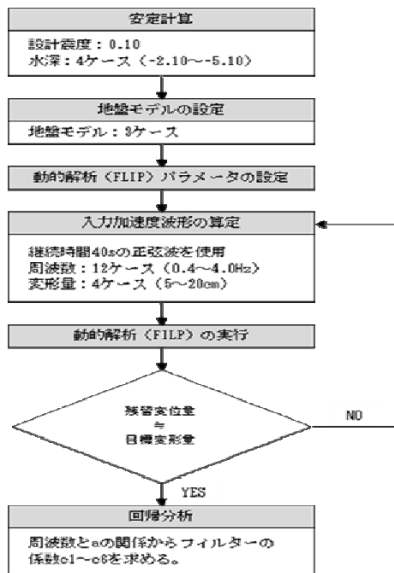


図-2 フィルター設定の検討フロー

研究所資料No.310 (以下「国総研資料」という。)を参考とした。周波数の特性と岸壁変形量の相関を調べるため、モデル断面に対し正弦波を入力波とした2次元の地震応答解析を行い、岸壁天端の残留変形量が目標変形量になる入力波の加速度振幅を求めた。得られた加速度振幅から応答値 a を求め、応答値と周波数の関係からフィルターの設定を行った。図-2にフィルター設定の検討フローを示す。

なお、2次元の地震応答解析は、マルチスプリング要素を採用した解析コードFLIPを用いた。本検討においては、液状化パラメータは考慮していない。

(2) 検討条件

検討に用いる基本断面は、壁高が11.5mより小さくなるよう設計水深4ケース (-2.1、-3.1、-4.1、-5.1m) とし、設計震度0.10として安定計算を行い設定した。

地盤条件は、道内の第3種、第4種漁港に良質な地盤が多く見られることから、第I種地盤相当の固有周期0.6秒以下となる3ケース (0.6、0.5、0.4秒) とした。

図-3及び表-1に基本断面及び地盤条件の一例を示す。

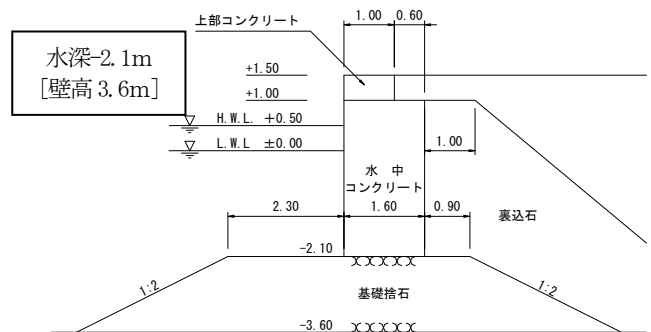
2次元の地震応答解析の入力波は、継続時間が40秒、主要動継続時間が5秒となるコサイン状のテーパをかけた波形とし、検討周波数及び目標変位量はそれぞれ0.4~4Hz (12ケース) 及び5、10、15、20cm (4ケース) とした。

(3) 地震応答解析の結果

図-4.1~4.4は、変形時における周波数と地表面加速度最大値 (PGA) との関係を表したものである。

図から、周波数が大きい領域では壁体に変形を生じさせるためには非常に大きな入力地震動が必要になること、壁高が低いほど同じ変形量に対し大きな入力地震動が必要となることがわかる。これは、国総研資料の壁高が11.5~20.0mの場合と同様の傾向である¹⁾。しかし、変

形量20cmに対し地表面加速度最大値が最小となる周波数は、壁高が11.5~20.0mの場合 (壁高が大きい場合) が1.0Hzとなる¹⁾のに対し、壁高が3.6~7.1mの場合 (壁高が小さい場合) においては1.2Hz付近になっており、両者に違いが見られる。これは、壁高の大小により堤体の固有周波数が異なり、この付近の周波数を持つ地震動に対して最も応答しやすいことを表している。



	常時		地震時	
	上載荷重無し	上載荷重有り	上載荷重無し	上載荷重有り
滑動	1.976 > 1.2	2.295 > 1.2	1.220 > 1.0	1.297 > 1.0
転倒	1.952 > 1.2	2.249 > 1.2	1.209 > 1.1	1.249 > 1.1
端支圧	159.310 < 500	164.060 < 500	448.050 < 500	424.080 < 500
Bishop	1.631 > 1.2	1.605 > 1.2	1.260 > 1.0	1.237 > 1.0

図-3 基本断面の算定結果

表-1 地盤モデルの設定
([地盤固有周期 0.6s]、水深-2.1mの場合)

高さ	土質	分類	γ_t (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	N	c (kN/m ²)	Vs (m/s)	σ'_v (kN/m ²)	Vsi (m/s)	H/Vsi
+1.50	土質									
+0.17	埋土	砂質土	18.0	20.0		0.0	180	11.970	180.00	0.0074
-3.00	埋土	砂質土	18.0	20.0		0.0	180	42.790	180.00	0.0209
-18.00	原地盤	砂質土	18.0	20.0		0.0	190	133.640	190.00	0.0758
-29.00	原地盤	砂質土	18.0	20.0		0.0	250	260.640	250.00	0.0440
									$\Sigma H_i/V_{si} =$	0.1481
									$4 \Sigma H_i/V_{si} =$	0.592

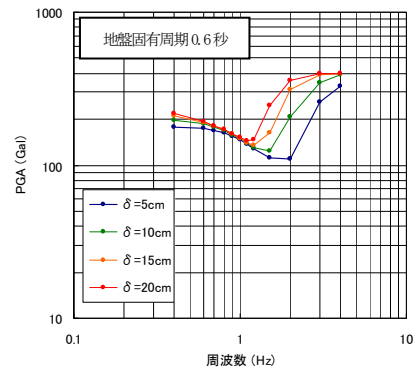


図-4.1 変動時の周波数とPGAの関係(水深-2.1m [壁高3.6m])

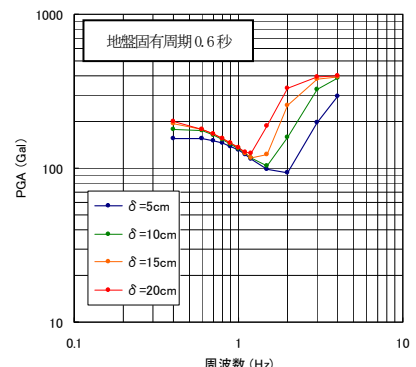


図-4.2 変動時の周波数とPGAの関係(水深-3.1m [壁高4.6m])

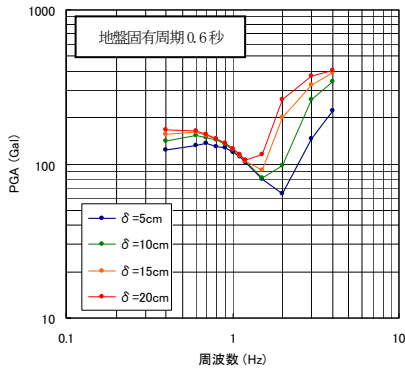


図-4.3 変動時の周波数とPGAの関係(水深-4.1m[壁高6.1m])

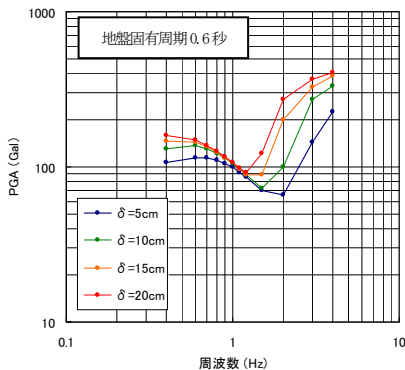


図-4.4 変動時の周波数とPGAの関係(水深-5.1m[壁高7.1m])

(4) フィルターの設定

フィルターは地震動にตอบสนองしやすい1.2Hzを境界にして、1.2Hz以下をフラット、1.2Hz以上を急激に減衰する形状とした。

また、設計震度0.1の条件における結果であることを考慮して、フィルター処理後の加速度最大値が100Galになるようなフィルターを作成する。

ここで、加速度最大値が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を逆算すると、 $0.1 \times 980 \div 100 \text{Gal}$ となるためである。

2次元の地震応答解析で得られた加速度振幅 α から式(1)により応答値 a を求め、周波数と a の関係をプロットする。その結果を図-5に示す。

$$a = 100 / \alpha \quad (1)$$

図-5の周波数と応答値の関係を近似するフィルター $a(f)$ (赤線) を求めるため、港湾基準と同じフィルター関数形の式(2)~(4)を用いて関数に含まれる係数 $c_1 \sim c_6$ 及び境界周波数 f_b を求める。

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

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

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

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)

係数 $c_1 \sim c_6$ の算出は、まず境界周波数 f_b を前節の結果から1.2Hz (港湾基準では1.0Hz) とし、それ以下は壁高 H 、背後地盤の固有周期 T_b 及び壁体下の固有周期 T_u の3つのパラメータから式(4)を使用して線形重回帰分析により $c_2 \sim c_5$ を求め、フラットな部分の値 b に対する回帰式を求める。1.2Hz以上は、式(2)を用いて最小二乗法から c_1 を求める。 c_6 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。

以上の方法により設定した小規模係船岸用フィルター $a(f)$ の係数 $c_1 \sim c_6$ は、表-2の(1)のようになる。(2)は港湾基準フィルターの係数である。

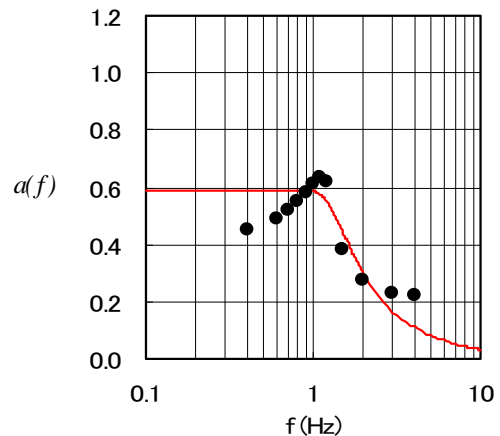


図-5 周波数と応答値の関係およびこの関係を近似したフィルター

表-2 変形量 20 cm に対するフィルターの定数

(1) 小規模係船岸用フィルター

係数	値
C1	14.783
C2	0.768
C3	0.977
C4	-0.424
C5	0.207
C6	0.13

(2) (参考) 港湾基準フィルター

係数	値
C1	6.800
C2	1.050
C3	-0.880
C4	0.960
C5	-0.230
C6	0.34

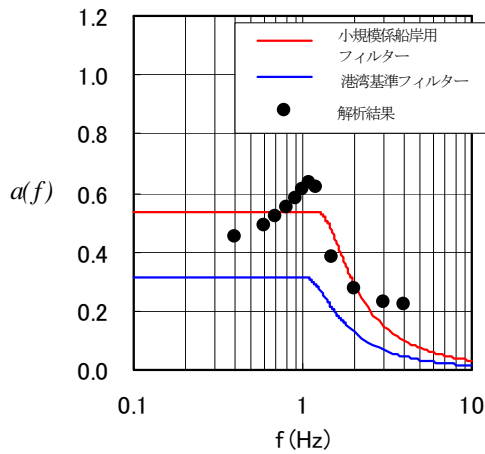


図-6 設定した小規模係船岸用フィルターと港湾基準フィルター

港湾基準フィルターの係数と比較すると、 T_b 及び T_u にかかる係数 c_3 と c_4 及び c_5 の符号が逆になっているが、これは回帰分析によるものであり、符号の違いについては物理的な根拠はない。

図-6に設定した小規模係船岸用フィルターと港湾基準フィルターを示す。

小規模係船岸用フィルターの応答値は港湾基準フィルターよりも大きくなる傾向にある。これは、壁高や対象地盤の固有周期の検討条件が港湾基準と異なっていることが影響しているものと考えられる。

3. フィルターの検証

(1) 継続時間の影響評価

照査用震度の算定には、図-1に示すとおり周波数特性の他に岸壁の変形に影響を及ぼす要素として地震動の継続時間の影響がある。

国総研資料では、この影響について周波数特性に偏りが無いように、港湾等における代表的な観測波形等9波形について1次元の地震応答解析を実施し、加速度二乗和平方根 S と加速度最大値 α_f の比との相関から低減率 p （式(5)）を設定している¹⁾。低減率 p は地盤条件による違いが無いことが報告されている。

$$p = 0.36 \ln(S/\alpha_f) - 0.29 \quad (5)$$

ここに

p ：低減率 ($p \leq 1.0$)

S ：フィルター処理後の加速度時刻歴の二乗平方根 (cm/s^2)

α_f ：フィルター処理後の加速度最大値 (cm/s^2)

そこで本検討においては、式(5)に示す低減率算定式

が小規模係船岸についても適用可能であるか確認を行った。確認には、地震波の卓越周波数の違いを考慮するため、表-3に示す6波形を用いた。なお、表中の「遠別漁港レベル1地震波」は国総研HPで公開されている羽幌港の波形を補正して算出したものである。

これらの波形を用いて、残留変形量 $\delta = 20\text{cm}$ となる加速度振幅をトライアル計算する。設計震度0.10、水深-5.1m、固有周期0.6sの条件における自由地盤部の応答解析結果から地表面における加速度時刻歴を求め、小規模係船岸用フィルターで処理した加速度最大値 α_f を算出する。さらに、低減率 p を用いて周数特性と継続時間の影響を考慮した式(6)により得られる補正加速度最大値 α_c を算出し、その結果を図-7に示す。

$$\alpha_c = p\alpha_f \quad (6)$$

ここに

α_c ：補正加速度最大値 (Gal)

低減率 p は設計震度0.10相当の100Galに対応させるために設定した値であることを考えると、補正加速度最大値 α_c は100Galになるように設定する必要がある。

検討の結果では、補正加速度最大値 α_c が100Gal前後の値になっているので、港湾基準の継続時間補正方法は小規模係船岸にも適用可能であると判断される。

表-3 検討地震波形

	地震名	継続時間	備考
1	遠別漁港レベル1地震波	163.84秒	
2	留萌港レベル1地震波	163.84秒	日本海側
3	釧路港レベル1地震波	163.84秒	太平洋側
4	神戸波	20.00秒	内陸直下型地震
5	八戸波 (十勝沖地震八戸波地震動)	20.00秒	海溝型地震
6	大船渡波 (宮城県沖地震大船渡波)	20.00秒	海溝型地震

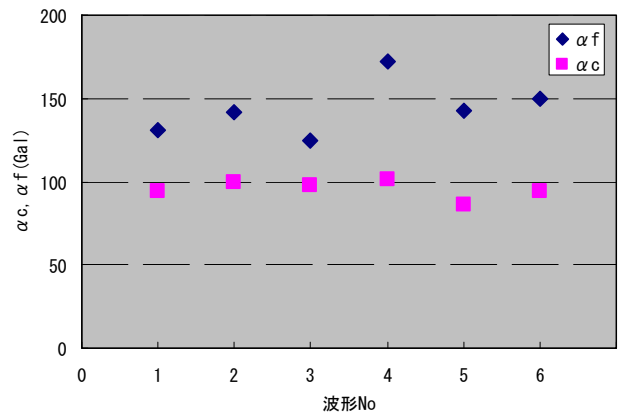


図-7 加速度最大値の比較

(2) 照査用震度算定式の評価

港湾基準においては、式(7)により照査用震度が与えられる。

$$k_{hk} = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.55} \frac{\alpha_c}{g} + 0.04 \quad (7)$$

ここに

- k_{hk} : 照査用震度の特性値
- α_c : 補正加速度最大値 (cm/s²)
- g : 重力加速度 (=980cm/s²)
- D_a : 許容される係船岸天端における変形量 (=10cm)
- D_r : 基準変形量 (=10cm)

式(7)に示す照査用震度算定式が小規模係船岸についても適用可能を確認するため、表-3に示した地震波形(6波形)を用いて照査用震度の算定を行った。

図-8は、重力式、変形量20cmの条件において式(7)により求められる照査用震度と従来港湾構造物において用いられてきた震度との比較を行ったものである¹⁾。この図のうち設計震度が0.10の場合では、照査用震度が0.12~0.185の範囲でばらつきが見られる。

表-4は、6波形から得られた照査用震度の算定結果である。照査用震度は0.147~0.165の範囲であり、図-8のばらつきの範囲内にあるので、式(7)に示す港湾基準の照査用震度算定式は小規模係船岸にも適用可能であると考えられる。

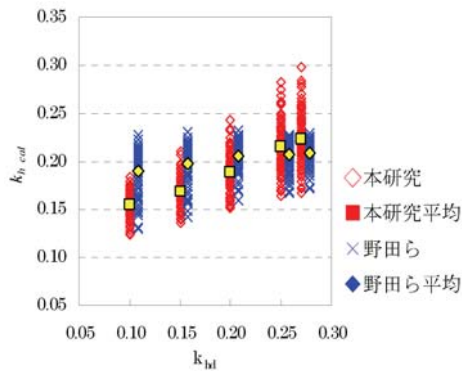


図-8 算出震度の比較 (重力式、20cm変形時)
国土技術政策総合研究所資料 No. 310 より抜粋

表-4 照査用震度算定結果

		αf (Gal)	αc (Gal)	kh $D_a=20$
1	遠別	130.8537	94.2408	0.157
2	留萌	141.6663	99.7068	0.164
3	釧路	124.9530	98.0804	0.162
4	神戸	172.1900	100.9530	0.165
5	八戸	142.3657	86.1233	0.147
6	大船渡	149.6891	94.2143	0.157

(4) フィルターと許容変形量の妥当性評価

設定した小規模係船岸用フィルターを用いて照査用震度を算出・試算を行い、得られた重力式係船岸の断面を基に二次元地震応答解析を実施して、フィルターと許容変形量の妥当性を評価する。

試設計に使用する照査用震度の算定にあたっては、港湾基準のフィルターb値に式(8)による上限下限値が設定されているため、この限界値を超えない検討条件を設定する必要がある。

$$0.04H + 0.08 \leq b \leq 0.04H + 0.44 \quad b \geq 0.28 \quad (8)$$

表-5は、北海道の港湾におけるb値を算定し、b値が限界値内にある港湾の地盤条件等を示したものである。

図-9は、表-5に示す港湾のレベル1地震動により照査用震度を算出した結果を示す。この結果から、試設計に使用するレベル1地震動は、現行の震度法による設計震度と同程度となる室蘭港レベル1地震動とした。

室蘭港レベル1地震動における照査用震度を表-6に示す。

表-5 抽出した港湾の地盤条件等の諸元

港名	最大加速度 (gal)	工学的基礎深度	地盤種別	L1照査用震度 (-4.5m以下)
小樽港	102.05	-9.1m ~-34.8m	第1種 ~第3種	0.06~0.11
瀬棚港	142.84	-0.7 ~-25.8m	第1種 ~第2種	0.06~0.09
奥尻港	92.76	-4.0 ~-20.5m	第1種 ~第2種	0.09~0.15
室蘭港	219.31	-10.3m ~-45.2m	第1種 ~第3種	0.08~0.13
釧路港東港	136.97	-5.2m ~-56.7m	第1種 ~第3種	0.10~0.23
霧多布港(浜中)	135.69	-14.3m ~-26.9m	第1種 ~第2種	0.10~0.17
花咲港	107.66	-3.0m ~-20.0m	第1種 ~第2種	0.06~0.10

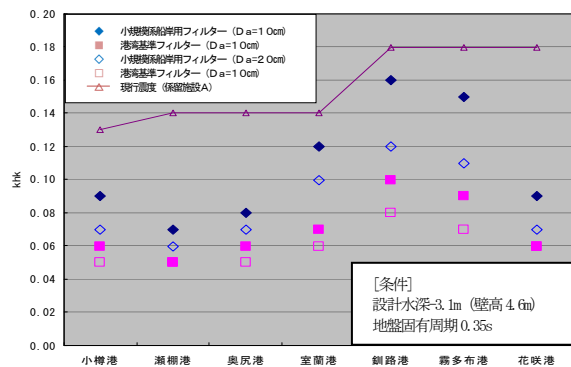


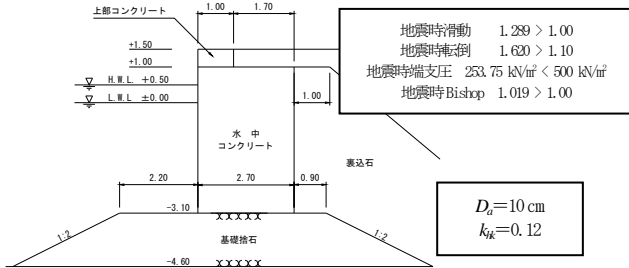
図-9 照査用震度の比較

表-6 照査用震度 (室蘭港レベル1地震動)

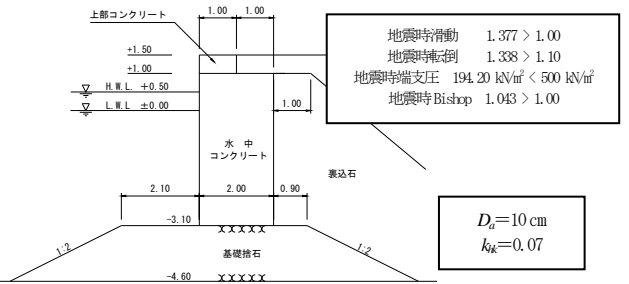
	小規模係船岸	港湾基準	備考
H	4.6	4.6	+1.5m~-3.1m
T _b	0.354	0.354	
T _u	0.252	0.252	
b	0.608	0.307	
b _{max}	0.624	0.624	0.04H+0.44
b _{min}	0.264	0.264	0.04H+0.08
α_c	46.6552	19.0117	(Gal)
k _{hk1}	0.12	0.07	※D _a =10cm
k _{hk2}	0.10	0.06	※D _a =20cm

試設計は、表-6に示す照査用震度 k_k により実施した。
 図-10は、これにより得られた $D_a=10\text{cm}$ の場合の試設計の計算結果（断面）である。

また、試設計による断面を用いて2次元の地震応答解析を実施し、残留変形量を求めた。図-11は $D_a=10\text{cm}$ の場合の2次元の地震応答解析の結果であり、表-7は各条件の残留変形量である。

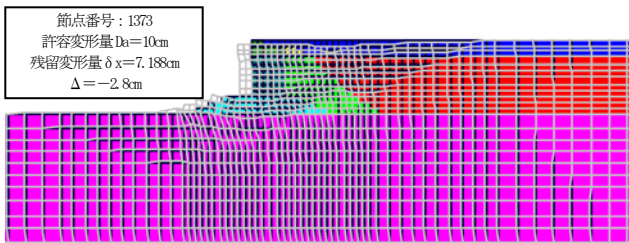


(a) 小規模係船岸用フィルターによる断面

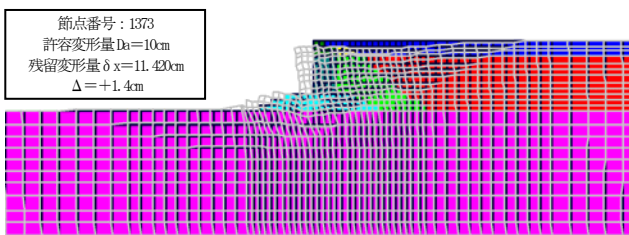


(b) 港湾基準フィルターによる断面

図-10 試設計の安定計算結果



(a) 小規模係船岸用フィルターによる断面



(b) 港湾基準フィルターによる断面

図-11 2次元地震応答解析結果

表-7 残留変形量

	kh		残留変形量 δ (cm)	
	$D_a=20$	$D_a=10$	$D_a=20$	$D_a=10$
小規模係船岸用フィルター	0.10	0.12	9.998	7.188
港湾基準フィルター	0.06	0.07	11.350	11.420

この結果から、許容変形量 $D_a=10\text{cm}$ の場合には、港湾基準フィルターの残留変形量が 10cm を超えている。これは、照査用震度を小さく評価する可能性があることを示している。一方で、小規模係船岸用フィルターの残留変形量は許容変形量以下となる。これは、残留変位量が許容変形量以内になっているため、妥当な震度を与えていると評価できる。また、許容変形量が $D_a=20\text{cm}$ の場合には、港湾基準フィルター及び小規模係船岸用フィルターの残留変形量が許容変形量を大きく下回る結果であり、断面の余裕が大きい安全側の設計となる。

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 構造物の変形に対し影響の大きい周波数成分は、港湾基準（壁高 $11.5\text{m}\sim 20.0\text{m}$ ）が 1.0Hz 程度に対し、小規模係船岸（壁高 $3.6\text{m}\sim 7.1\text{m}$ ）が 1.2Hz で高周波側になった。
- ② 小規模係船岸の変形に対し影響の大きい周波数成分を考慮した結果、フィルター形状が港湾基準と異なる結果となった。
- ③ 小規模係船岸の変形に対し影響の大きい周波数成分を考慮したフィルターを設定して照査用震度を算定した結果、港湾基準による照査用震度より大きくなった。
- ④ 今回設定したフィルターを用いた照査用震度による断面と港湾基準の照査用震度による断面について2次元地震応答解析を実施した結果、許容変形量 D_a を 10cm とした場合の港湾基準による照査用震度の断面において残留変位量が許容変位量を超えた。

本報では、第I種地盤を対象にレベル1地震動が時刻歴波形により与えられる重力式の小規模係船岸の照査用震度算定法について検討した。しかし、今回の検討は限られた地盤条件で行われたものであり、実際の地盤条件が取り得る範囲での検討が必要である。

今後は、第II種及び第III種地盤の条件を加えて港湾基準の適用の妥当性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 長尾毅、岩田直樹、藤村公宜、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