

北海道の港湾における設計地震動の検討について

—北海道における照査用震度の検証—

港湾空港部 港湾建設課 ○水口 陽介
時田 恵生

「港湾の施設の技術上の基準」が平成 19 年 4 月より抜本的に改訂され、港湾構造物の耐震設計法が、工学的基盤における地震動時刻歴波形を用いて、工学的基盤から表層地盤までの地盤特性や構造物の特性を考慮した地震動の作用を外力として設定する方法となった。

これまで北海道の各港湾における地形及び地質特性、北海道全体としての整合性を踏まえた統一的な方針の下、適切な地域分類と工学的基盤から地表面までの地盤特性等を設定し、照査用震度の簡便的設定方法の検討を行ってきた。

本報文は、これまで検討を行ってきた地域毎の照査用震度特性を踏まえ、各港湾における照査用震度の簡易算定指標についてとりまとめを行ったものである。

キーワード：L1地震動、照査用震度

1.はじめに

平成 18 年より 3 ヶ年にわたって北海道の港湾全体としての整合性を踏まえた統一的な方針のもと、適切な地域分類と工学的基盤から地表面までの地盤特性等を設定の上、港湾構造物設計の基礎資料として必要となる L1 地震動に対する照査用震度の簡易算定方法の導入について検討を行ってきた。

本報文は、この 3 ヶ年の検討で明らかとなった各港湾における地盤特性と地震動に対する地盤の応答特性から照査用震度算定のパラメータ特性を踏まえ、簡易算定式の適用性について検討を行い、北海道の港湾全体としてとりまとめた結果について報告するものである。

L1 地震動に対する照査用震度の簡易算定式の算定は、**図-1.1** に示す道内 32 港湾を対象に実施した。

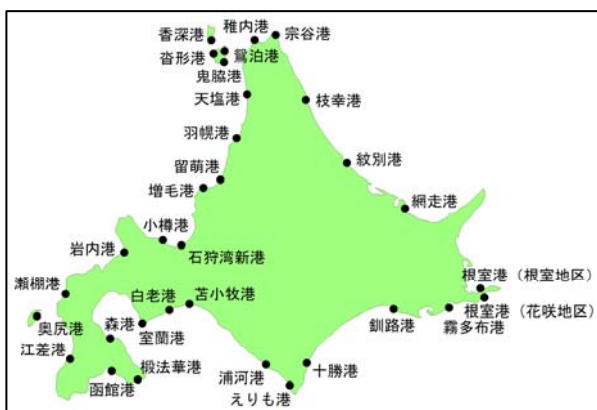


図-1.1 検討対象とした港湾の位置図

2.照査用震度のパラメータ特性

これまでに算出してきた各港湾における照査用震度(khk)算定に用いる各パラメータの特性から、フィルター係数 b 値が上限値・算定値・下限値で決定される場合に依って照査用震度(khk)の簡易算定式の適用が異なることがわかっている。

この b 値の算出については式 (1) に示すように、施設の壁高(H)及び地盤の初期固有周期(T_u)、施設の背後地盤の初期固有周期(T_b)により算定され、算定値に対しては式 (2) に示す上限・下限値が設定されている。

$$b = 1.05 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.23 \quad \text{式(1)}$$

$$\begin{array}{c} \text{下限値} \qquad \qquad \qquad \text{上限値} \\ \hline 0.04H + 0.08 \leq b \leq 0.04H + 0.44 \quad \text{式(2)} \\ \text{ただし、} b \geq 0.28 \end{array}$$

式(2)に示すように、b 値が上限値や下限値で決定される場合、b 値は壁高(H)の一次関数で算出されることから、照査用震度の簡易算定式は壁高(H)と照査用震度(khk)による相関式を適用することが可能となる。しかし、これまでの検討により、照査用震度(khk)は工学的基盤の深さや地盤特性により地震応答特性が異なり、同じ港湾内においても施設規模により照査用震度(khk)にバラツキを有することが判明した。

図-2.1 に全 32 港における地震動の応答特性を表す応

答倍率と背後地盤の初期固有周期(T_b)の関係について整理した結果を示す。

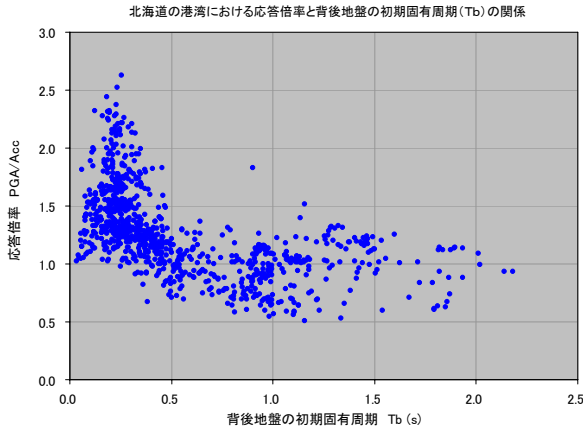


図-2.1 地震動の応答倍率と初期固有周期(T_b)の関係図

図-2.1 から、 $T_b=0.1\sim 0.4\text{sec}$ の範囲においては応答倍率のバラツキが大きく、 $T_b=0.4\sim 0.7\text{sec}$ の範囲においては $0.7\sim 1.5$ 倍程度、 $T_b=0.7\sim 2.2\text{sec}$ の範囲においては $0.5\sim 1.4$ 倍程度の応答倍率になっており、地盤の固有周期(T_b)により地震動の応答特性が異なることがわかる。

また、照査用震度(khk)を算出する際には、この地震動の応答倍率の変動特性を式 (3) によって表されるフィルター $a(f)$ により補正する必要がある。

このフィルター $a(f)$ は、あらゆる周波数帯を持つ地震波波形(地表面加速度:PGA)に対して、岸壁天端の水平残留変位が目標値となるように自由地盤地表面における加速度最大値(αf)を求めたものであり、地震動を構成する各周波数成分の波の岸壁の変形への寄与を評価したものである。

$$a(f) = \begin{cases} b & 0 < f \leq 1.0 \\ \frac{b}{1 - \left(\frac{f-1.0}{1/0.34}\right)^2 + 6.8 \left(\frac{f-1.0}{1/0.34}\right)^4} & 1.0 \leq f \end{cases} \quad \text{式(3)}$$

フィルター $a(f)$ は図-2.2 に示すように地震動の周波数 1.0Hz を境界にして長周期側($0.1\sim 1.0\text{Hz}$)は一定値(b 値)となり、短周期側($1.0\sim 10\text{Hz}$)はフィルター $a(f)$ による低減効果が大きくなることわかっている。

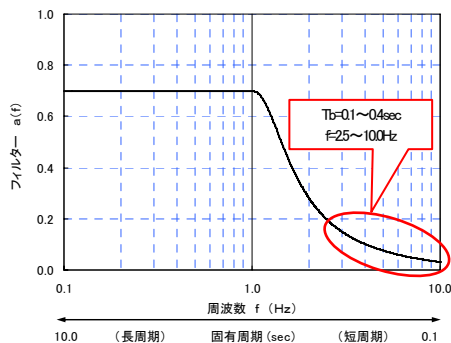


図-2.2 周波数とフィルター $a(f)$ の関係図 (例)

以上より、照査用震度(khk)の算定には地盤の特性により地震動の応答特性が異なるため、施設の許容される残留変位に寄与するフィルター $a(f)$ の特性を把握することが重要となる。

3.照査用震度の簡易算定式の適用性

(1) b 値が上限値で決定される場合

工学的基盤が深く、地盤の固有周期(T_b)が長い条件において b 値は上限値で決定される。その際、 b 値は壁高(H)の一次関数で表されるため、照査用震度 (khk) の簡易算定式は、図-3.1 に示す壁高(H)と照査用震度(khk)の相関式で整理することが可能と考えられる。

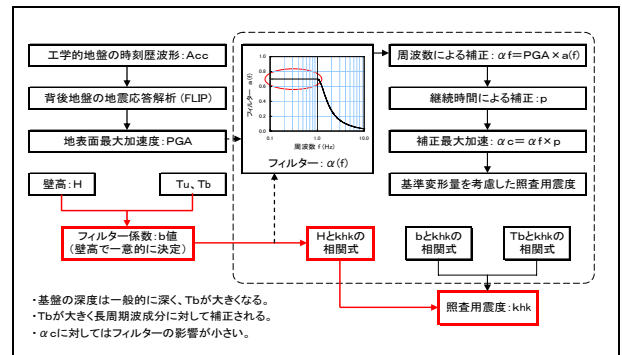


図-3.1 照査用震度の簡易算定式の設定フロー (上限値)

その実例として、白老港(図-3.2)と石狩湾新港(図-3.3)の壁高(H)と b 値及び照査用震度(khk)の相関図をみると、 b 値が上限により決定している両港においていずれの壁高(H)においても照査用震度(khk)の変動幅が 0.02 程度と小さいことがわかる。このため両港における照査用震度(khk)は壁高(H)との相関式を用いて求めることができる。

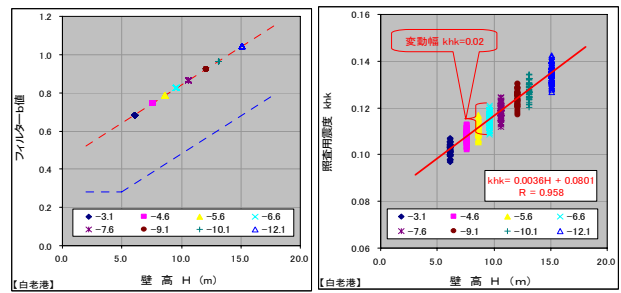


図-3.2 白老港における各パラメーターの相関図

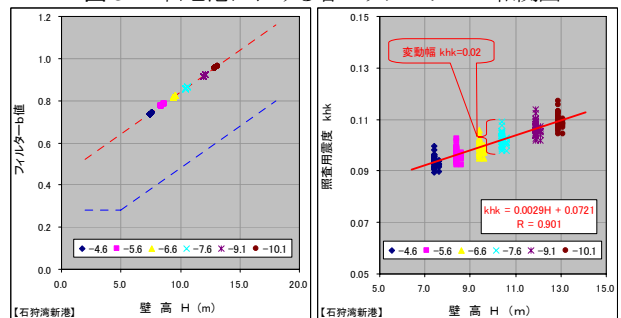


図-3.3 石狩湾新港における各パラメーターの相関図

一方、 b 値が上限値で決定するが壁高(H)により照査用震度の変動幅が大きい港も存在することがわかった。

その実例として、函館港(豊川・若松地区) (図-3.4)と釧路港(西港区) (図-3.5)における壁高(H)と照査用震度(khk)の相関図をみると照査用震度(khk)の変動幅が0.04程度と大きくなることがわかる。

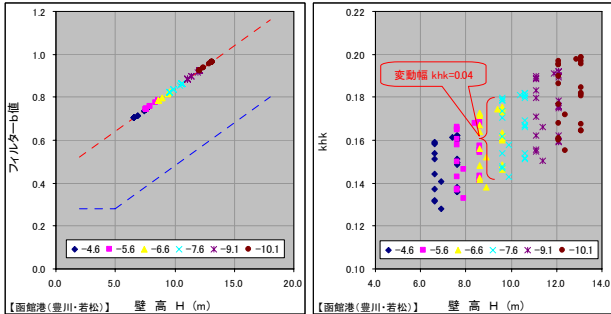


図-3.4 函館港における各パラメーターの相関図

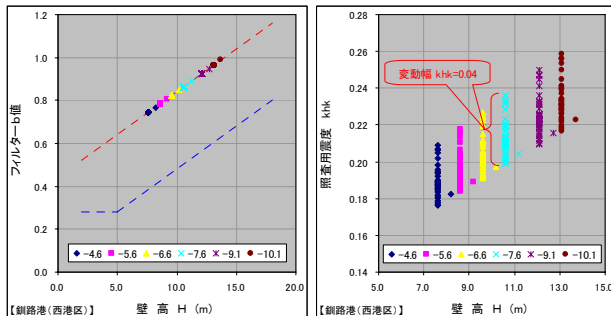


図-3.5 釧路港における各パラメーターの相関図

b 値が同じ上限値で決定される場合において照査用震度(khk)の変動幅が大きくなる要因としては地震応答計算時における応答特性及び周波数成分を補正するフィルター $a(f)$ の低減効果によることが考えられる。そこで、白老港と函館港(豊川・若松地区)の地震の応答特性とフィルター $a(f)$ による低減率について比較を行った。

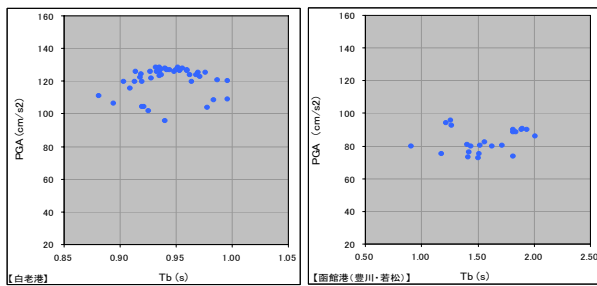


図-3.6(1) 白老港と函館港における地震応答特性

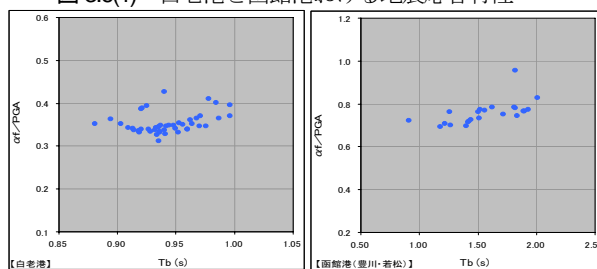


図-3.6(2) 白老港と函館港におけるフィルター低減率

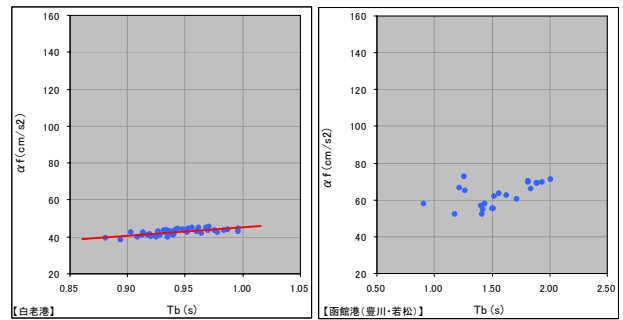


図-3.6(3) 白老港と函館港における補正加速度最大値 αf

図-3.6(2)より両港の地表面加速度(PGA)の周波数成分を補正するフィルター $a(f)$ による低減率が異なることがわかる。これは図-3.7に示すように周波数 1.0Hz を境界にしてフィルター $a(f)$ の低減効果が異なるためである。

白老港の固有周期(T_b)は 1.0sec 以下であることからフィルター $a(f)$ による低減効果が大きく、図-3.6(1)に示す地表面加速度(PGA)のバラツキが補正され図-3.6(3)に示すように補正後の加速度最大値(αf)が概ね一定の値となっている。

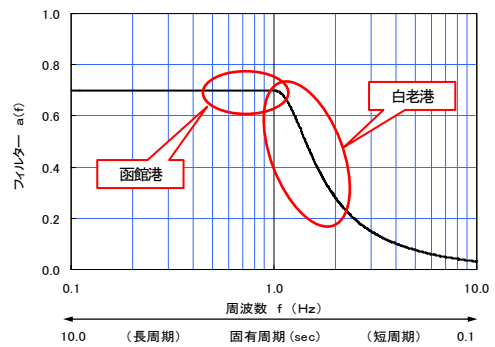


図-3.7 周波数 f とフィルター $a(f)$ の関係図

一方、函館港(豊川・若松地区)の固有周期(T_b)は 1.0~2.0sec の範囲にあり、補正後の加速度最大値(αf)に対するフィルター $a(f)$ の低減率は一定値 (b 値) となるため、図-3.6(3)に示すように補正後においても地表面加速度(PGA)のバラツキに対する低減効果が大きく、加速度最大値(αf)が一定値となっていない。

上記より、 b 値が上限値で決定される港湾において、固有周期(T_b)が 1.0Hz 以上の周波数帯領域となる場合、フィルター $a(f)$ による低減効果が大きいため、壁高(H)と照査用震度(khk)の一次回帰式を簡易算定式として適用可能となる。しかし、固有周期(T_b)が 1.0Hz 以下の周波数帯領域となる港湾は地震応答特性による地表面加速度(PGA)のバラツキが補正されず照査用震度(khk)の変動幅となって表れることから、壁高(H)による簡易算定式の値には誤差が生じることが考えられる。そのため、 b 値または固有周期(T_b)による相関式を簡易算定式として適用することが必要となる。

(2) b 値が算定値で決定される場合

b 値が算定値で決定される場合、b 値は壁高(H)及び初期固有周期(T_b)による総合的なフィルター係数となる。

この場合、地震応答特性や各パラメーターも地盤特性に応じて変化することになるため、照査用震度(khk)の簡易算定式は、**図-3.8** に示すように b 値や初期固有周期(T_b)を用いた相関性の高いパラメーターを適用する必要がある。

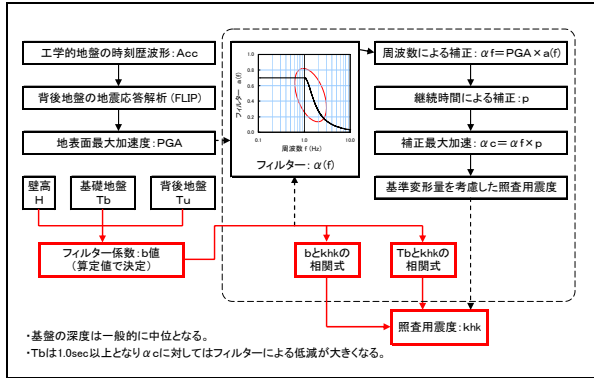


図-3.8 照査用震度の簡易算定式の設定フロー (算定値)

その実例として、**図-3.9**に小樽港の相関図を示す。

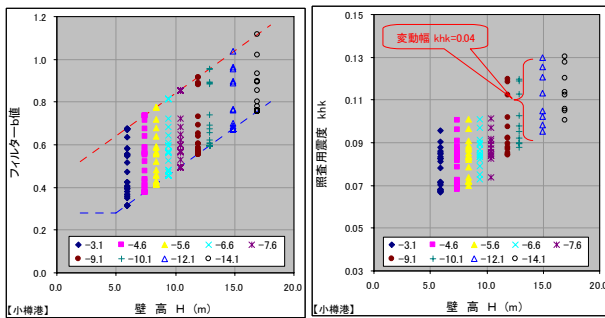


図-3.9(1) 小樽港における壁高(H)による相関図

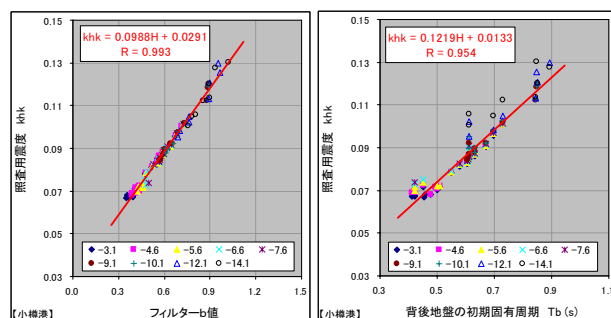


図-3.9(2) 小樽港における照査用震度とパラメータの相関図

図-3.9(1)に示すように、壁高(H)をパラメータとした場合、照査用震度(khk)の変動幅が0.04と大きくなる。これは、**図-3.10**に示すように、固有周期(T_b)の増加に伴い地震応答特性を表す地表面加速度(PGA)が小さくなる傾向にあるが、固有周期(T_b)が1s以下と短いためフィルター $a(f)$ による低減効果が大きく、地震応答特性によるバラツキは少なくなるものの、フィルター $a(f)$ の低減

率に変動幅があるため、補正後の加速度最大値(αf)は固有周期(T_b)の増大に伴い増加傾向となり、照査用震度(khk)に変動幅が生じるためである。

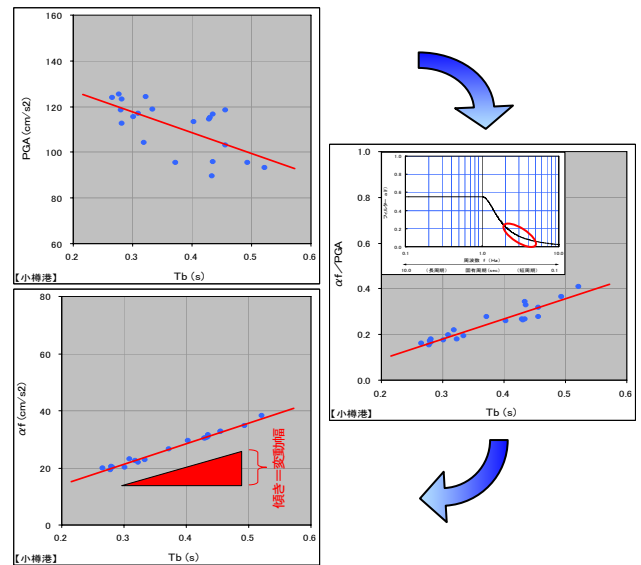


図-3.10 小樽港：応答特性とフィルター補正低減率

一方、**図-3.9(2)**に示すように簡易算定式のパラメーターとして照査用震度(khk)とb値及び固有周期(T_b)との関係を見ると共に相関性が得られるが、b値を用いた場合に比べ、固有周期(T_b)を用いると照査用震度(khk)にバラツキが見られる。そのため小樽港における照査用震度(khk)の簡易算定式としては、精度が高いと考えられるb値と照査用震度(khk)による相関式を適用することとした。

(3) b 値が下限値で決定される場合

b 値が下限値で決定される場合、工学的基盤は浅い位置にあり、固有周期(T_b)は短くなる。この場合、b 値は壁高(H)の一次関数で表されるが、周期が短いためフィルター $a(f)$ による低減効果が大きくなり、地震応答特性によるバラツキが補正される。そのため照査用震度(khk)の簡易算定式は**図-3.11**に示す壁高(H)と照査用震度(khk)の相関式で整理することが可能となる

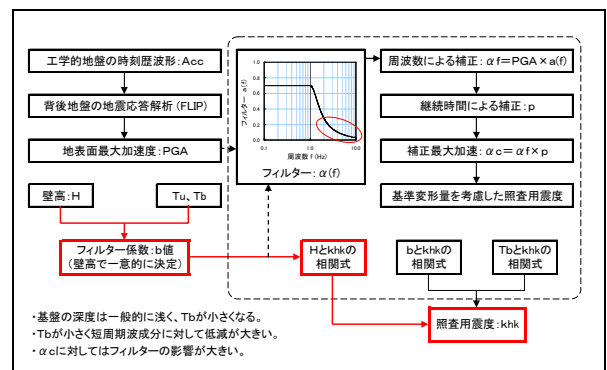


図-3.11 照査用震度の簡易算定式の設定フロー (下限値)

その実例として、十勝港(図-3.12)の壁高(H)と照査用震度(khk)の相関図を示す。

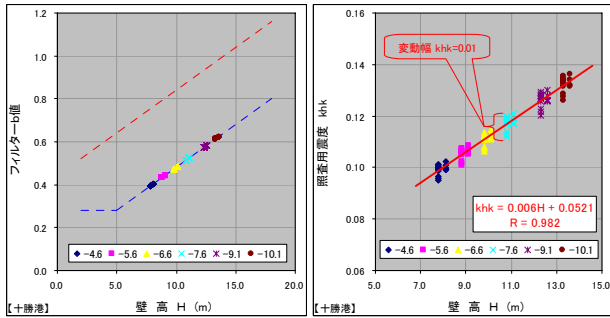


図-3.12 十勝港における壁高(H)と照査用震度の相関図

十勝港の壁高(H)と照査用震度(khk)の関係をみると照査用震度(khk)の変動幅が0.01と小さくなっている。

これは図-3.13に示すように、地震応答特性による地表面加速度(PGA)にバラツキを有しているが、十勝港の固有周期(T_b)が短いためフィルターa(f)による低減効果が大きくなり、補正後の加速度最大値(αf)が概ね一定の値となっているためである。このため、照査用震度(khk)の簡易算定式は壁高(H)と照査用震度(khk)の相関式を適用することができると考えられる。

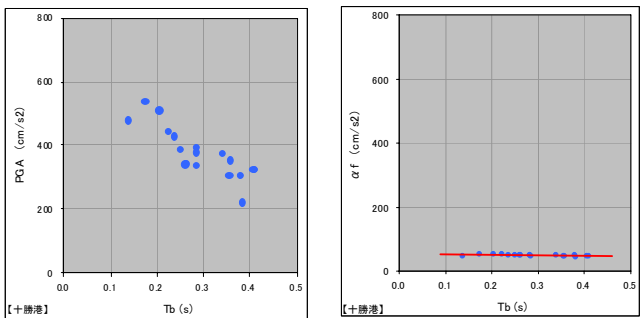


図-3.13 十勝港における地震応答特性と補正加速度最大値 αf

4.各港湾における簡易算定式の適用分類

これまでの検討より、照査用震度(khk)の簡易算定式としてのパラメーターには、壁高(H)及びb値、固有周期(T_b)があり、それぞれの相関性により簡易算定式の適用の可否が判断され、適用についてはb値の決定範囲(上限値・算定値・下限値)によることがわかった。

また、上限値や下限値のようにb値が壁高(H)の一次関数で算出される場合には、壁高(H)と照査用震度(khk)による相関式を適用することが可能となるが、地震動の応答特性とそのバラツキを補正する周波数の補正フィルターa(f)の効果により相関式の適用の是非が分かれることとなる。

以上の内容を踏まえ、北海道の各港湾における地震動の応答特性と地盤の固有周期(T_b)の関係について、b値の決定範囲により、図-4.1に示すようなI~Vの5つの区分に分類を行った。

また、5つの分類毎に各港湾の簡易算定式の適用について表-4.1にとりまとめた。

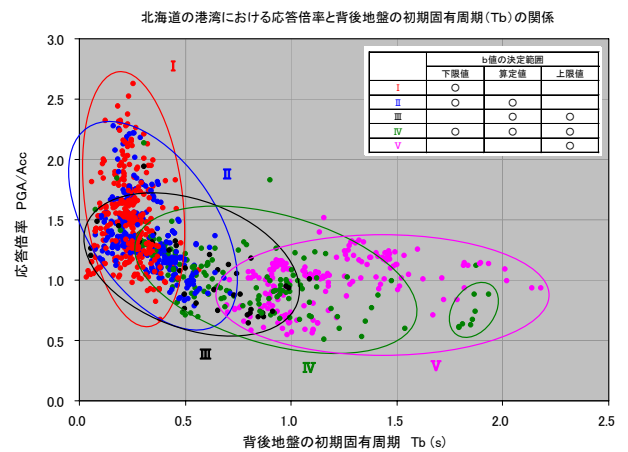


図-4.1 北海道の各港湾に対する分類

表-4.1 北海道の各港湾における照査用震度の簡易算定式適用分類

区分	フィルターb値の決定区分			港数	該当港湾・地区
	下限値	算定値	上限値		
I	-1	H-khk	—	12	えりも港、霧多布港(琵琶瀬地区)、江差港、樺法華港、網走港、増毛港、羽幌港、稚内港、宗谷港、鬼脇港、十勝港、浦河港、紋別港、香深港
	-2	Tb-khk	—	3	
II	H-khk b-khk Tb-khk	H-khk b-khk Tb-khk	—	8	岩内港、根室港(根室地区)、根室港(花咲地区)、江差港、瀬棚港、奥尻港、天塩港、沓形港、鷺泊港
III	—	b-khk Tb-khk	H-khk	4	室蘭港(崎守地区)、函館港(弁天地区、西埠頭、大町地区)、森港、枝幸港
IV	H-khk b-khk Tb-khk	b-khk Tb-khk	H-khk b-khk Tb-khk	7	苫小牧港(東港区)、室蘭港(祝津地区、絵鞆地区、築地地区、入江地区)、小樽港、釧路港(東港)、霧多布港(浜中地区)、函館港(海岸町、中央埠頭、万代埠頭)、留萌港
V	-1	—	—	2	白老港、石狩湾新港 苫小牧港(西港)、釧路港(西港区)、函館港(北埠頭、港町埠頭)、函館港(豊川埠頭、若松地区)
	-2	—	適用外	4	

※1. b値の決定区分に対して、適用式が数種存在するのは、該当港湾により適用が異なるためである。

※2. I-2, V-2における適用式は、H-khkの相関において変動幅が大きいためTb-khkを適用する。

※3. V-2における適用式は、照査用震度の変動幅が大きくゾーニング等により算定精度を向上させることが必要である

5. 照査用震度の簡易算定式

表-4.1 の分類をもとに、L1 地震動に対する照査用震度(khk)の簡易算定式について、全港湾において各構造形式毎にとりまとめを行った。その結果例として表-5.1 に室蘭港（祝津、絵鞆、築地、入江地区）における簡易算定式の一覧を示す。

表-5.1 室蘭港（祝津、絵鞆、築地、入江地区）における照査用震度の簡易算定式一覧

構造形式	b 値の決定区分			算定精度 適用条件
	上限値	算定値	下限値	
重力式	0.0048H+0.093	0.1106b+0.0476	0.0051H+0.0509	±0.01
控え直杭	0.0126H+0.0038	0.0835b+0.0347	0.067 (-3.1m~-6.5m) 0.0113H+0.0444 (-7.5m~-14.0m)	±0.01
控え組杭	0.0084H+0.039	0.0558b+0.0538	0.075 (-3.1m~-6.5m) 0.0095H+0.0242 (-7.5m~-14.0m)	±0.01

表-5.1 に示すような簡易算定式を用いることにより実設計レベルに対応した高い精度の照査用震度(khk)を算定することができると考えられる。

しかし、表-4.1 において I-1 及び V-1 の区分に分類される港は b 値の決定範囲が上限値または下限値で決まることから、壁高(H)を用いて簡易的に照査用震度(khk)を算出できるが、その他の区分に分類される港は、地震動の応答特性が異なるため、b 値もしくは初期固有周期(T_b)を別途算出する必要がある。

そこで、照査用震度(khk)の値に変動幅があることを念頭におき、各港湾毎に壁高(H)と照査用震度(khk)の相関式を簡易算定式(概略式)として取りまとめた。その結果例として表-5.2 に室蘭港（祝津、絵鞆、築地、入江地区）の簡易算定式(概略式)を示す。

表-5.1 に示す簡易算定式に比べると精度が劣るため実設計レベルにおける照査用震度(khk)として用いることは難しい。しかし、壁高(H)のみにより概略値ではあるが施設の照査用震度(khk)を算出することができるため、各港の照査用震度の傾向の把握や施設の概略検討の際に活用することができると考えられる。

表-5.1 室蘭港（祝津、絵鞆、築地、入江地区）における照査用震度の簡易算定式(概略式)一覧

構造形式	施設規模	照査用震度	簡易算定式	算定精度
重力式	-4.5m以下	0.08~0.13	0.0038H+0.0744	±0.02
	-4.5m~-7.5m	0.09~0.14		
	-7.5m以上	0.10~0.18		
控え直杭式 鋼矢板	-4.5m以下	0.06~0.10	0.0084H+0.0056	±0.03
	-4.5m~-7.5m	0.06~0.12		
	-7.5m以上	0.07~0.21		
控え組杭式 鋼矢板	-4.5m以下	0.07~0.11	0.0055H+0.0426	±0.03
	-4.5m~-7.5m	0.07~0.12		
	-7.5m以上	0.08~0.18		

6. おわりに

これまで3ヶ年にわたり、北海道の港湾における照査用震度(khk)の簡易算定法の導入について検討を行い、各港湾における検討結果から以下の知見を得ることができた。

- (1) フィルター係数 b 値は工学的基盤の深さと地盤特性に応じた固有周期(T_b)の範囲に応じ、上限値、下限値、算定値の3つに分布され、固有周期(T_b)長い場合には「上限値」、短い場合には「下限値」として算出される傾向にある。
- (2) 地震動の応答特性により地表面加速度(PGA)にバラツキがある場合、地盤の初期固有周期(T_b)が短いとフィルター a(f)による低減効果が大きく、照査用震度(khk)の変動幅も小さくなる。しかし、固有周期(T_b)が長い場合にはフィルター a(f)による低減効果が小さいため、地表面加速度(PGA)のバラツキが照査用震度(khk)の変動幅として残存する場合がある。
- (3) 照査用震度(khk)を算定するための簡易算定式の適用として、b 値が上限値や下限値で決定される場合、壁高(H)と照査用震度(khk)の関係で照査用震度(khk)の変動幅が小さい場合には、壁高(H)と照査用震度(khk)の相関式を適用することが可能であるが、変動幅が大きい場合は、壁高(H)との相関式による照査用震度(khk)の算定精度が劣ることから、その他のパラメータである b 値や固有周期(T_b)による相関式を適用することが妥当と考えられる。
- (4) 表-4.1 において V-2 の区分に分類された港については、いずれのパラメータを用いた相関式においても照査用震度(khk)の変動幅が大きくなり、簡易算定式の適用が困難と考えられる。そのため、港内におけるゾーニング等を行うことにより、簡易算定式の算定精度を向上させる必要があると考えられる。

謝辞：本検討に際し多大な御協力頂いた各開発建設部築港課及び港湾事務所の担当者の方々に対し深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成 19 年 7 月、(社)港湾日本港湾協会
- 2) 土木構造物の耐震設計ガイドライン(案) -耐震基準作成のための手引き-2001 年 9 月、Sep、2001、土木学会地震工学委員会、耐震基準小委員会
- 3) レベル 1 地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法、2006、June、国土技術政策総合研究所資料
- 4) 国土技術政策総合研究所HP、<http://www.nilim.go.jp/engineer/index.html>