

北海道の港湾における設計地震動の検討について — 港湾構造物設計に用いる照査用震度の検討 —

山岡 広幸¹・時田 恵生²・伊藤 卓也³

¹北海道開発局 室蘭開発建設部 浦河港湾事務所 工事課 (〒057-0024 北海道浦河郡浦河町築地1-4-23)

²北海道開発局 港湾空港部 港湾建設課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8-2)

³北海道開発局 函館開発建設部 函館港湾事務所 第3工事課 (〒040-0061 北海道函館市海岸町25-7)

港湾の施設の技術上の基準の改訂により、耐震性能照査において考慮すべき地震動による作用を求める際には、従来の地域別震度に基づく設計震度を用いた考え方に代えて、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与え、表層地盤や構造物の特性を考慮した地震動による作用を算定する方法を用いることとなった。

本論文では、各港湾の地形及び地質特性、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の上、港湾構造物設計の基礎資料として必要となる照査用震度の簡易算定法の導入について検討したものである。

地震動, レベル1地震動, 照査用震度, 周波数特性, 継続時間

1. レベル1地震動による照査用震度の算定法

レベル1地震動は、主として経済性の観点から耐震性が合理的な水準であることを簡易的に検討するための地震動であり、一般に、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性（地震基盤～工学的基盤）を考慮した確率論的地震危険度解析により設定される。

レベル1地震動に関する変動状態の性能照査に用いる照査用震度は、地震動の周波数特性や継続時間の影響等を考慮して、当該施設の変形量に対応した適切な震度とする必要がある。

照査用震度の算定方法の概要の1例（重力式の場合）を、図-1-1に示す。まず、工学的基盤におけるレベル1地震動を設定し、これを入力地震動として一次元地震応答解析により、背後地盤における地表面の加速度時刻歴を算定する。得られた加速度時刻歴をフーリエ変換（FFT）し、地表面における加速度スペクトルを求め、これに対して構造形式毎の変形に対応した周波数特性を勘案したフィルター処理を行う。次に、フィルター処理後の加速度時刻歴より加速度最大値 a_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時最大値 a_c を算出する。この補正加速度最大値 a_c と係船岸の天端において許容される変形量 D_0 を用いて照査用震度の特性値を算出する。

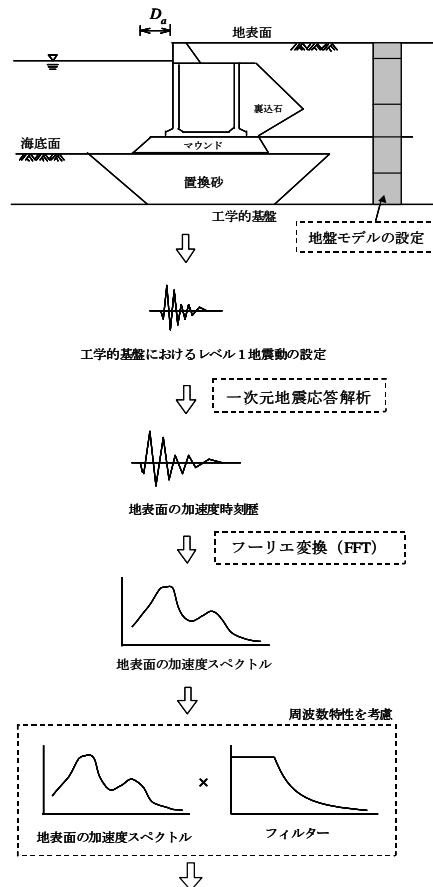


図-1-1a 照査用震度の算定過程

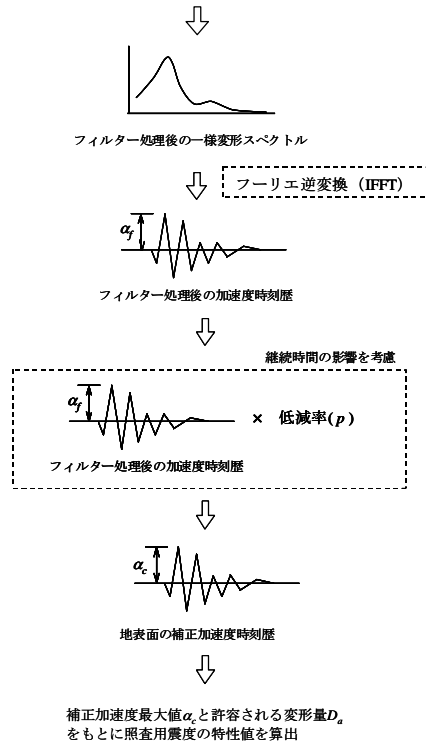


図-1-1b 照査用震度の算定過程

(1) 周波数特性を勘案したフィルターの設定

重力式係船岸の照査に用いる地震動の周波数特性を勘案したフィルターは、式(1a)、式(1b)を用いることができる。このフィルターは、岸壁の天端の水平残留変位が目標値となるような自由地盤地表面における加速度最大値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。これによれば、大きい周波数帯では、変形しやすく、小さい周波数帯では、変形しにくくなる。

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

$$\quad \quad \quad (1b)$$

$$b = 1.05 \frac{H}{H_R} - 0.88 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96 \frac{T_u}{T_{uR}} - 0.23$$

$$0.04H + 0.08 \leq b \leq 0.04H + 0.44 \quad , \quad \text{ただし、} b \geq 0.28$$

固有周期の算定に当たっては、図-1-2 に示す位置における工学的基盤上の各土層の層厚とせん断波速度を用いて、式(1c)により算定する。

$$T_g = 4 \sum_i \frac{H_i}{V_{si}} \quad (1c)$$

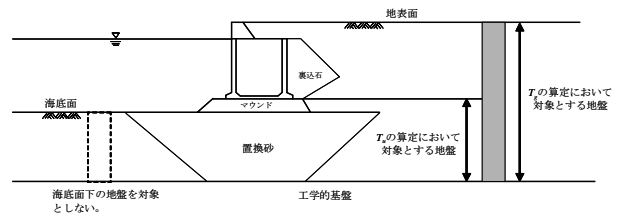


図-2.2.6 固有周期の算定において対象とする地盤

(2) 低減率の設定

地震動の加速度最大値が同じであっても地震動の継続時間によって施設に与える影響が異なる。地震動の継続時間の影響を考慮する低減率 p は、フィルター処理を行った地表面の加速度時刻歴の二乗和平方根 S 式 (1e) 及び加速度最大値 α_f を用いて、式(1d)より設定する。

$$p = 0.36 \ln(S / \alpha_f) - 0.29 \quad (\text{重力式}) \quad (1e)$$

$$S = \sqrt{\sum acc^2} \quad (1d)$$

(3) 補正加速度最大値の算定

補正加速度最大値 α_c は、式(1f)により算定する。

$$\alpha_c = p \alpha_f \quad (1f)$$

(4) 照査用震度の特性値の算定

重力式係船岸の性能照査に用いる照査用震度の特性値 k_{hk} は、(3)において設定される補正加速度最大値 α_c 及び係船岸天端の許容される変形量 D_a を用いて、式(1g)により算定する。

$$k_{hk} = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r} \right)^{-0.55} \frac{\alpha_c}{g} + 0.04 \quad (1g)$$

なお、施設に許容される変形量については、重力式係船岸のレベル1地震動に対する標準的な変形量の許容値は、 $D_a=10\text{cm}$ として与えることができる。

また、本手法は液状化が発生する場合や岩盤上に直接建設されるような岸壁については適用性について検討する必要がある。

2.照査用震度の簡易算定法の検討

(1) 簡易算定法の導入目的

新たに改訂された港湾基準におけるレベル1地震動の照査用震度の算定は、上述したように、工学的基盤におけるレベル1地震動を設定し、これを入力地震動として1次元地震応答解析 (FLIP) により、背後地盤における地表面の加速度時刻歴を算定する等、土質工学や地震工学の学術的な判断を要することとなる。

このため、設計者によって算出結果が異なることとな

いよう、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に照査用震度を算定することが必要であり、且つ設計実務における計算負荷の軽減を図る観点から、北海道の各港湾における照査用震度の簡易算定法の導入について検討を行った。

(2) 照査用震度の簡易算定手順

北海道の各港湾における照査用震度の簡易算定は、**図-2-1**に示すフローに従い実施した。各ボーリング点に対して、各構造形式における照査用震度を算出し、簡易算定式に用いるパラメータの適合性について検討を行った。照査用震度の算出は、地震動の周波数特性や継続時間による影響が考慮されており、簡易算定式のパラメータとして最も依存性が高い周波数特性について着目した。

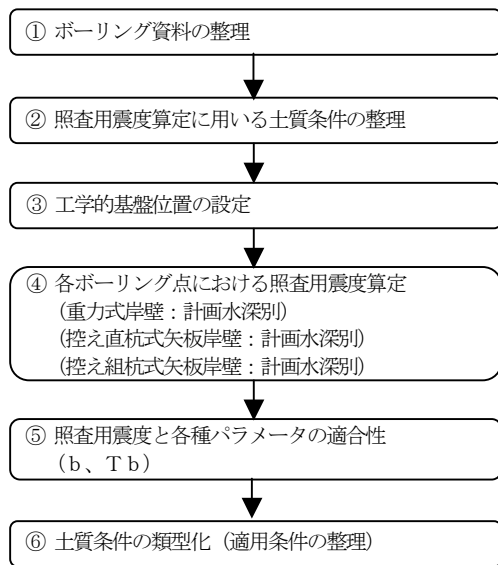


図-2-1 照査用震度の簡易算定手順

周波数特性の影響は、地震動を構成する各周波数成分に対して、地盤や構造物による固有振動が共振すると振動が増幅し照査用震度が大きくなる。このため、背後地盤の1次固有周期 T_b 、あるいは b 値(1Hz以下のbase)を簡易算定式のパラメータとしての適用性を検討した。尚、検討対象とした港湾を**図-2-2**に示し、本報文では、釧路港と十勝港における検討結果について報告する。



図-2-2 簡易算定法の検討対象とした港湾

(3) 釧路港における簡易算定式の算定結果

- 釧路港東港における壁高 H と b 値の関係を**図-3-1**に示す。釧路港東港においては b 値が上限値または下限値で決定する場合、中間値となる場合の3ケースがある。副港地区においては b 値が上限値で決定するケースが多く見られ、工学的基盤が深く地盤の1次固有周期 T_b が大きくなる傾向にある。一方、下限値で決定するケースが多い釧路川地区は、工学的基盤が比較的浅く地盤の1次固有周期 T_b が小さくなる傾向にある。 b 値が中間値(算定値)となる場合は、工学的基盤が中位な位置に存在する場合に現れる。
- 釧路港西港の b 値は、**図-3-2**に示すように全て上限値で決定され、工学的基盤が深く地盤の1次固有周期 T_b が大きくなる傾向にある。
- 釧路港では、地盤特性(層序、工学的基盤の特性と深さ)、 b 値を決定する算式、地盤の1次固有周期から、東港(副港地区)、東港(釧路川地区)、西港(第1~第4埠頭)の3ブロックに類型化された。
- 背後地盤の1次固有周期 T_b と照査用震度 $k_{地}$ の関係を**図-3-3~図-3-5**に示す。照査用震度は、 b 値が上限値および下限値で決定される場合において、壁高 H (計画水深)毎に1次回帰式として整理することができた。
- 中間値で算定されるケースでは、 T_b による簡易的な照査用震度算定は適用できないため、個別に港湾基準に従って定める必要がある。

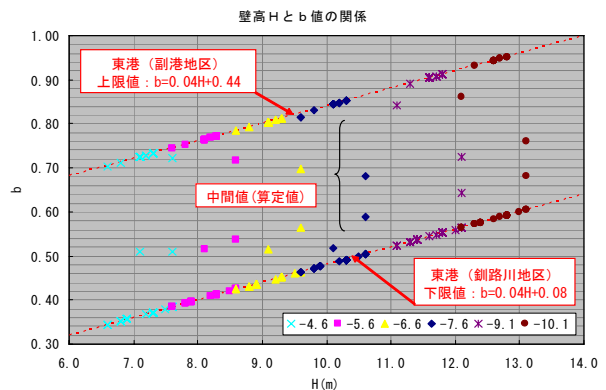


図-3-1 釧路港東港：重力式

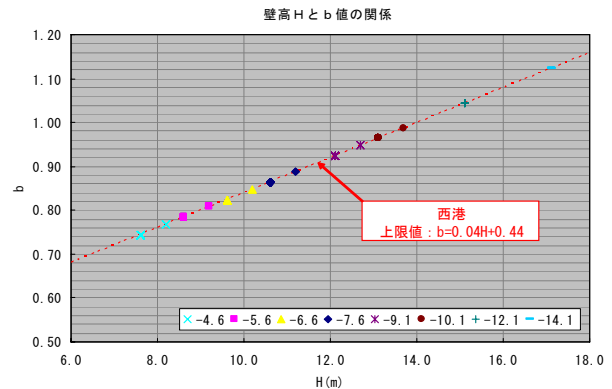


図-3-2 釧路港西港：重力式

表-3-1 簡易算定式の適用条件

	東港地区の釧路川地区	東港地区の副港地区	西港地区 (第1埠頭, 第2埠頭, 第3埠頭, 第4埠頭)
地層構成	埋立土: 砂質土 沖積層 上部細礫層: As1, Ag1 中部泥層: Ac1をはさむことがある 下部礫層: As2, Ag	埋立土: 砂質土 沖積層 上部細礫層: As1, As2, Ag1, 中部泥層: Ac 下部礫層: As3, Ag2	埋立土: 砂質土 沖積層 上部細礫層: As1, As2, Ag1, As3 中部泥層: Ac, 下部礫層: 余り発達せず砂・粘性土の互層Ascが発達。一部礫を混入する。 基盤 砂, 砂礫, 固結粘性土の互層。 洪積層見られずに基盤となる場合がある。 基盤
適用除外ケース	1) 埋立土が特殊な土質である場合。 2) 中間に粘性土層を挟む場合。適用に注意する。 3) 標準地層と異なる地層が介在する場合。	1) 埋立土が特殊な土質である場合。 2) 周辺と特に異なる地層の存在, あるいは層構成を呈する場合。	1) 埋立土が特殊な土質である場合。 2) 周辺と特に異なる地層の存在, あるいは層構成を呈する場合。
Tbの範囲(sec)	重力式: 0.15~0.60 矢板式 控え直杭: 0.15~0.60 控え組杭: 0.15~0.60	重力式: 0.89~1.13 矢板式 控え直杭: 0.89~1.13 控え組杭: 0.89~1.13	重力式: 0.70~1.33 矢板式 控え直杭: 0.70~1.33 控え組杭: 0.70~1.33
工学的基盤	・前新石器代/白亜紀の砂岩または泥岩層(浦幌層/根室層)。釧路川河口方向, 西方向に向かって傾斜する。 ・標高-17m以浅を対象。これより深い場合は k_{hk} 個別算定。	・固結した洪積砂層, N>50 ・標高-56m付近	・洪積砂礫層Ds _g , N>50 ・標高-67m付近
適用するb値決定パターン	・重力式: 下限値で決定されるケース。 ・矢板(控え直杭式): 下限値で決定されるケース。 ・矢板(控え組杭式): 下限値で決定されるケース。	・重力式: 上限値で決定されるケース。 ・矢板(控え直杭式): 上限値で決定されるケース。 ・矢板(控え組杭式): 上限値で決定されるケース。	・重力式: 上限値で決定されるケース。 ・矢板(控え直杭式): 上限値で決定されるケース。 ・矢板(控え組杭式): 上限値で決定されるケース。
適用除外ケース	・b値が中間値で決定されるケース	・b値が中間値で決定されるケース	・b値が中間値で決定されるケース(注)

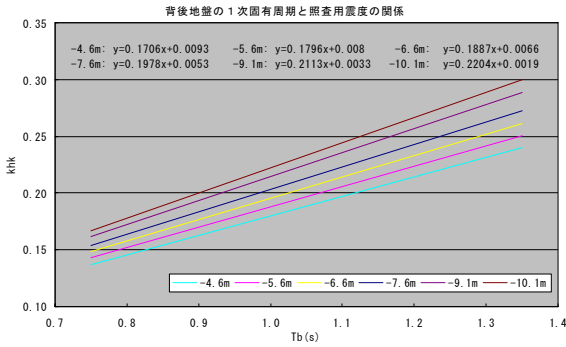


図-3-3 釧路港東港(副港地区) 重力式 (b値が上限値で決まる場合)

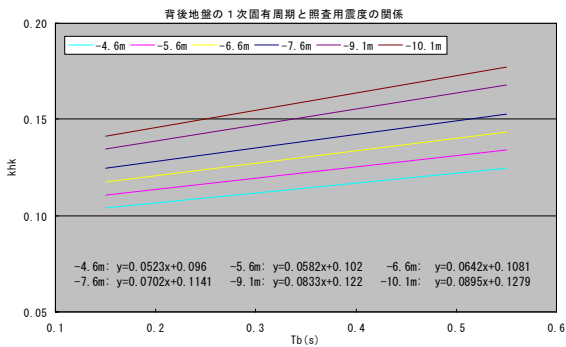


図-3-4 釧路港東港(釧路川地区) 重力式 (b値が下限値で決まる場合)

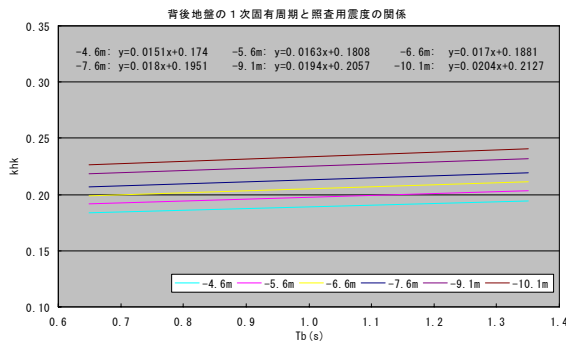


図-3-5 釧路港西港 重力式 (b値が上限値で決まる場合)

f) 適用条件の整理

地層構成、背後地盤の初期固有周期 T_b の範囲などから適用範囲を整理した。その結果を表-3-1に示す。

- ・ b値が中間値で決定される場合や地層構成が著しく異なる場合などは、適用除外。
- ・ b値が中間値で決定される場合でも、上限値に近い領域では、上限値で決定されたケースに対する簡易式を適用できる場合がある。しかし安全のため、適用除外する。

(4) 十勝港における簡易算定式の算定結果

- b値は、図-3-6に示すように全て下限値で決定され、工学的基盤が浅く地盤の1次固有周期 T_u が小さくなる傾向にある。
- 十勝港では、地盤特性(層序、工学的基盤の特性と深さ)、b値を決定する算式、地盤の1次固有周期から港全体を1ブロックして扱うことができる。
- 図-3-7にb値と照査用震度 k_{hk} の関係を示す。照査用震度 k_{hk} は、壁高 H (計画水深) による変動幅が0.01程度と小さいことから、簡易算定式は、b値をパラメータとして一律な1次回帰式として扱うことができる。なお、1次回帰式は、構造物にとって最も危険側となるよう変動幅の上限値に設定した。

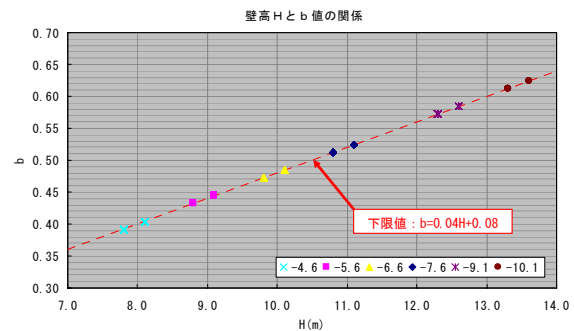


図-3-6 十勝港: 重力式

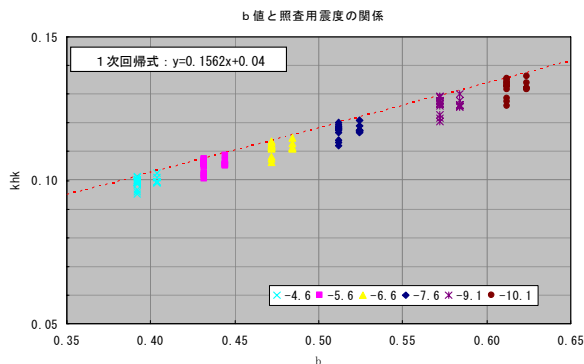


図-3-7 十勝港：重力式
(b 値が下限値で決まる場合)

4. あとがき

- (1) 今回、検討した 11 港湾におけるレベル 1 地震動の照査用震度による簡易算定方法は、 b 値が上限値および下限値で決定される条件下において、背後地盤の 1 次固有周期 T_b あるいは b 値をパラメータとして 1 次回帰式で整理することができた。
- (2) 震度法による設計震度と新基準による照査用震度を比較すると、照査用震度が大きな値に設定される場合がある。このような場合において、過去に受けた地震履歴による既存施設の被災状況を勘案し、新たに得られた照査用震度を適用して良いか、今後検討を行う必要がある。
- (3) 簡易算定方法では、各パラメータに対する照査用震度の 1 次回帰式にて照査用震度を得る。この際、地層特性（層序、工学的基盤の特性と深さ）、 b 値、地盤の 1 次固有周期、算定された照査用震度の範囲について、適用条件を定め、これを外れる場合には、個別に港湾基準にしたがって照査用震度を定めることが必要である。

(4) 地盤特性による b 値の決定法により照査用震度の簡易算定法の適用性が異なることが判明した。 b 値が上限値や下限値で決定される場合には、簡易算定法の適用が可能であるが、中間値（算定値）で決まる場合には、個別に照査用震度を算定する必要がある。今回、検討した港湾においては、釧路港のように工学的基盤が深く堆積層がある程度厚い場合には、 b 値が 3 ケースとなり、簡易算定法の適用が可能な場合と適用できない場合が存在する。一方、十勝港のように工学的基盤が浅い場合には、下限値で決定され、かつ壁高 H による照査用震度の変動幅が小さいことから、一律な簡易算定式として扱うことも可能であった。これらの検討結果を踏まえ、今後も検討が予定されている各港湾における特性を整理し、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に港湾構造物設計の基礎資料として必要となる照査用震度の簡易算定法について整理する予定である。

謝辞：京都大学防災研究所井合教授をはじめ本検討に際し多大な御協力頂いた関係各位に対し深甚なる感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所資料 2006, June：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
- 2) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 19 年 7 月
- 3) 国土技術政策総合研究所ホームページ
<http://www.nilim.go.jp/engineer/index.html>

