

# 港湾構造物の性能設計

## Performance Based Design of Port and Harbor Structures

長 尾 毅 (ながお たかし)

国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室長

### 1. はじめに

港湾構造物の設計は、「港湾構造物設計基準（昭和42年）」等を経て昭和54年から「港湾の施設の技術上の基準」に従って行われてきた。この基準はその後、平成元年、平成6年、平成11年および平成19年<sup>1)</sup>の4度の改訂が行われてきた。このうち、最新の平成19年版は性能設計体系の本格導入、地震動の扱いの大幅な改訂、破壊確率や変形量を指標とした新たな設計手法の導入という点で、これまでの改訂とは様相を異にする大改訂である。

今回の改訂の背景に、技術基準類を取り巻く状況の変化として以下の2点があった。まず第一に、政府調達協定やTBT協定などを背景に、ISO規格などの国際規格と国内規格の整合性・調和性が強く求められるため、国際標準設計に対応した設計法の整備が早急に必要となったこと、第二には、国内においても、土木・建築にかかる設計の基本<sup>2)</sup>、包括設計コード<sup>3)</sup>、性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則<sup>4)</sup>など、個別の基準類に対する上位規格に対応する指針類が策定されたことである。港湾構造物についても、こうした国内外の性能設計体系と整合した設計体系が新基準において採用されることとなった。

### 2. 新港湾基準における性能設計体系

港湾構造物の性能設計の基本的枠組みとしては、図-1に示すように、基準として要求性能・性能規定等が規定され、性能照査手法の具体的仕様については基準の対象外となる。すなわち、法的な拘束力のかかる規定は、性能規定までであり、具体的な性能照査手法や許容される破壊確率、変形量等の限界値は設計者の判断に委ねられることになる。ただし、基準が設計者に正しく理解されるためには、性能照査方法の標準的な考え方や最低限度の限界値を例示する必要があり、法的な拘束力を有さない解説や付属書といった形式でこれらが示されている。

要求性能は、目的を達成するために構造物が保有しなければならない性能であり、説明責任の観点から規定されるものである。要求性能は、作用に対する施設の構造的な応答（変形、断面力等）に関する性能とし、さらに、施設の重要度や機能に応じて安全性、修復性、使用性に分類される。これらの性能は、損傷の大小に応じたもので、損傷の程度は安全性、修復性、使用性の順に大きい。その他、施設の供用および利便性の観点から必要とされ

### 基準（拘束力あり）

#### ・要求性能（施設が保有すべき性能）

防波堤は、自重、変動波浪、レベル1地震動等の作用による損傷などが、当該防波堤の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと。



#### ・性能規定（必要な照査に関する規定）

重力式防波堤は、主たる作用が変動波浪及びレベル1地震動である変動状態に対して、堤体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力不足による破壊の生じる危険性が限界値以下であること。



### 解説（拘束力なし）

#### [考慮すべき作用・許容される限界値]

- ・変動波浪に関する変動状態の照査において考慮すべき作用は、主たる作用を変動波浪、従たる作用を自重および水圧とする。
- ・主たる作用が変動波浪の変動状態に対する堤体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力不足による破壊の生じる危険性を表す指標を、再現期間50年の波浪の作用に対する力の釣り合いに基づくシステム破壊確率とし、その標準的な限界値を  $P_f = 8.7 \times 10^{-3}$  とする。



### 付属書（拘束力なし）

#### [計算式・係数の例示]

- ・滑動に対する安定の検討には、次式を用いることができる。

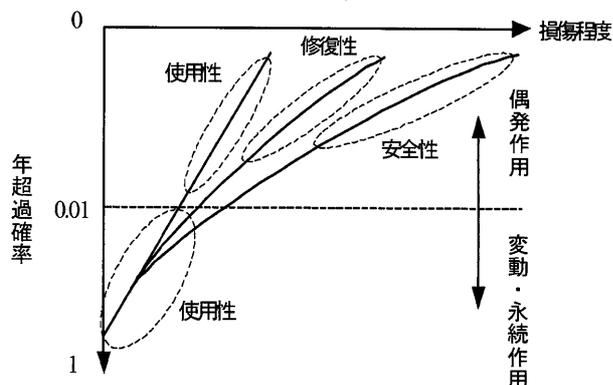
$$\gamma_f f_k \left( \sum_i \gamma_{wi} W_{ik} - P_{bd} - \gamma_{pi} P_{uk} \right) \geq \gamma_{pH} P_{Hk}$$

- ・標準的なシステム破壊確率の限界値に対する部分係数の値は、技術基準の付属書の表の数値を参照することができる。

図-1 新基準における性能設計体系（防波堤の例）

る構造的な諸元等に関する性能も規定されている。

性能規定は、要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定であり、公共の福祉の観点から最低限度満足すべき規定として定められる。照査にあたり考慮すべき作用の組合せに対応する設計状態は、永続状態、変動状態（おおむね年超過確率0.01程度以上の作用が主たる作用の状態）および偶発状態（おおむね年超過確率0.01程度以下の作用が主たる作用の状態）とする。求められる性能としては、基本的に永続状態と変動状態に対しては使用性、偶発状態に対しては、施設の機能や重要度に応じて、安全性、修復性、使用性のいずれか一つの性能が要求される（図-2<sup>5)</sup>参照）。ただし、施設の機能と重要度によっては偶発作用に対する性能が求められないこともありうる。なお、安全性や使用性はあくまで損傷程度に対応するもので、照査に用いる限界状態と対応す



図一 性能の概要

るものではない。例えば使用性に関する照査で終局限界状態の照査を行うことはある。ただしその場合、終局限界状態が生じる可能性（破壊確率の限界値）が十分に低く設定されているということである。

### 3. 性能照査

新基準において許容される性能照査手法としては、信頼性設計法、構造物の残留変形量などの作用応答を適切に評価しうる数値解析手法、模型実験等の手法が考えられる。設計状態ごとの性能照査の標準的な手法については次のとおりである。永続状態または変動波浪等を主たる作用とする変動状態に対する照査については、力の釣合いに基づく信頼性設計法を用いることが標準となる。信頼性設計法では確率の取扱いに応じて幾つかの方法があるが、設計者の便を考慮して、最も平易な部分係数法による場合の部分係数は付属書に参考例示される。例えば、通常の防波堤では再現期間50年程度の波浪に対して使用性が求められるが、この使用性に対する照査は、防波堤が滑動・転倒・支持力不足によって破壊する確率が限界値以下であることを確認することにより行われる。実際には、力の釣合いに基づくシステム破壊確率を1%程度以下の低い値に設定し、これに対応する部分係数等を用いて性能照査することで使用性の確保が図られる。

レベル1地震動を主たる作用とする変動状態については、変動波浪の場合と同様に、使用性の確保が求められる。限界値としては、岸壁の変形量や構造部材の降伏に関する破壊確率などが規定される。

また、偶発状態における照査については、施設の変形量や損傷程度などを適切に評価し得る手法を用いることが標準となる。具体的には、レベル2地震動に関する偶発状態に対しては、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した非線形地震応答解析を実施し、施設の変形量や部材の応力等が限界値以下となることを確認する。なお、この限界値は、施設の機能および求められる性能（安全性、修復性、使用性）毎に異なることになる。

これらの方法は標準的なものであり、例えば構造物のライフサイクルコストや、設計供用期間中の総変形量を考慮し、これらの指標を確率的に制御する方法等についても、性能照査の合理性の観点から推奨されるべきものであり、排除されるものではない。ただしその場合には

求められる性能を設計者が適切に設定して照査することになる。

## 4. 地震動および耐震性能照査

### 4.1 地震動

従来の港湾基準においては、レベル1地震動に対する性能照査において用いる設計震度は、地域別震度・地盤種別係数・重要度係数の積により非常に簡単に設定されていた。また、時刻歴波形を用いた耐震性能照査等を行う際にも、八戸波・神戸波など、構造物建設サイトとは必ずしも一致しない地点で観測された地震波形を用いていた。

土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会が策定した土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）<sup>6)</sup>においては、地震動強度は、震源特性、伝播経路特性、対象地点周辺の地盤特性に依存するとともに、構造物の地震応答は入力地震動の振幅の大小だけでなく周期成分にも依存するため、設計入力地震動はこれら諸特性を適切に反映したものであることが望ましいとしている。

このため、新基準においては、汎用的な設計地震動の表現方法としてレベル1、レベル2のいずれについても震源特性、伝播経路特性、サイトごとの増幅特性を考慮した時刻歴波形とすることとした。このうちレベル1地震動については、いずれの周波数成分においても再現期間が75年となるような一様ハザードスペクトルをもととした波形とすることを標準とした。具体的には、統計的グリーン関数法を採用し、サイト増幅特性については、強震観測記録をもとにしたスペクトルインバージョンを用いている<sup>7)</sup>。ここで、サイト増幅特性は強震観測が実施されている地点の特性であるが、港湾において強震観測は必ずしも十分には行われていない。このため港湾において強震観測が実施されていない場合は、防災科学技術研究所が実施し、公開しているK-NETやKiK-net等の内陸近傍の強震観測地点のサイト増幅特性を求めざるを得ない。しかしながら、内陸のサイト増幅特性は臨海部のサイト増幅特性と比較すると大きな違いがあり、内陸の特性を港湾にそのまま適用すると危険側の評価となる場合が多い。この問題点を踏まえて、新規に港湾構造物を建設する場合に、強震観測や常時微動観測を行って正確な地震動を評価する試みを継続して行っているところである。全国の港湾のレベル1地震動は、国土技術政策総合研究所のホームページよりダウンロード可能である（<http://www.y.sk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu1.html>）。

### 4.2 耐震性能照査法

入力地震動の考え方の変更に従って、耐震性能照査法の検討が行われた。ただし、レベル2地震動に対する耐震性能照査については、既に非線形有効応力解析が標準的な方法として実務においても広く用いられている状況であったため、新基準において主に変更されたのはレベル1地震動に対する性能照査である。

標準的な性能照査フローについて、図一3にレベル1

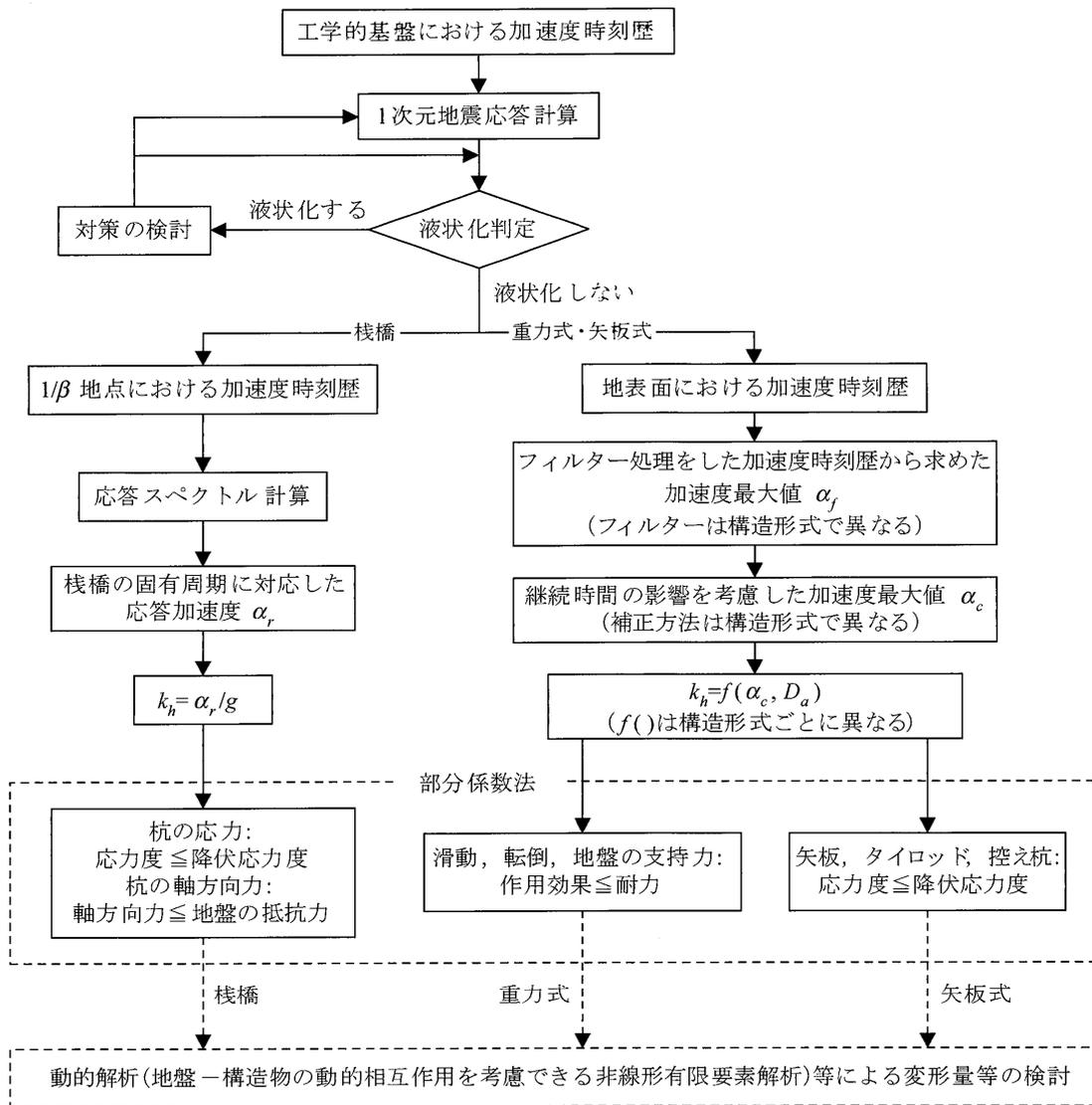


図-3 レベル1地震動に対する性能照査フロー

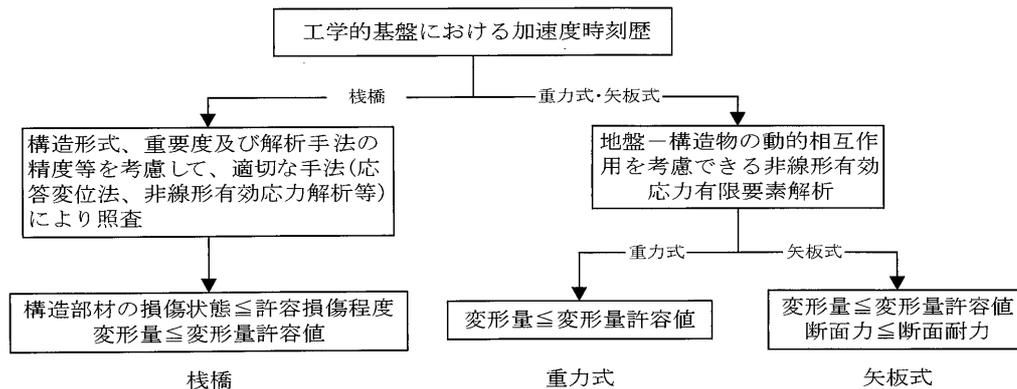


図-4 レベル2地震動に対する性能照査フロー

地震動、図-4 にレベル2地震動に対するものを示す。なお、レベル1地震動に対するフローのうち最下段の項目は必要に応じ実施することが標準である。

岸壁は基本的に抗土圧構造物としての性格を有するため、地震動に対しては変形が支配的なモードとなる。新基準においては、岸壁の残留変形量を考慮した形で照査用震度を算定する方法<sup>8)</sup>が採用された。この方法においては、地震動を構成する各周波数成分の岸壁の変形への

寄与を評価したフィルター処理を行い、地表面の地震応答を一様変形スペクトルに変換することで、周波数に関係なく一定の変形量と対応づけられる加速度最大値を求める。次に地震動の繰返しサイクル数の影響を勘案した低減率を乗じて補正加速度最大値を算出し、これと岸壁の変形量許容値を用いて照査用震度の特性値を算出する。紙幅の関係でこの方法について詳細を示すことは出来ないが、一例として重力式岸壁についてフィルターを示す

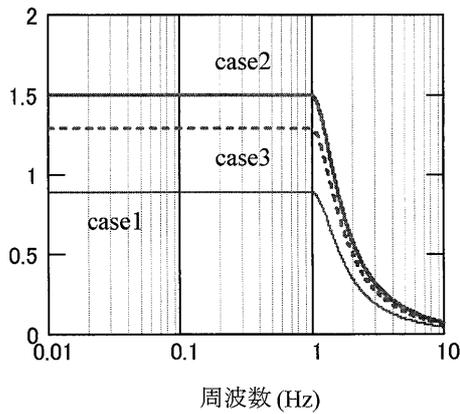


図-5 重力式岸壁のフィルターの例

表-1 フィルター算出条件

	$H$	$T_b$	$T_u$
case1	11.50	0.80	0.40
case2	14.50	1.20	0.75
case3	11.50	1.20	0.75

と図-5のようになる。岸壁は高い周波数成分に対しては変形しにくく、かつ壁高が高く、地盤が軟弱であるほど変形しやすいという特徴を反映した結果となる。表-1の記号は、 $H$ ：壁高 (m)、 $T_b$ ：背後地盤の固有周期 (s)、 $T_u$ ：壁体下地盤の固有周期 (s) である。

## 5. 信頼性設計法

確率論を援用して構造物の破壊 (損傷) する可能性を定量的に制御する方法が信頼性設計法である。信頼性設計法のうち最も用いられる頻度の高いものが部分係数を用いる方法 (レベル1信頼性設計法) である。

部分係数は、目標信頼性指標、感度係数、設計パラメータの確率分布に関する値 (特性値、平均値、標準偏差) 等をもとに算出される。信頼性指標とは破壊の可能性を定量的に示す指標で、値が大きいほど破壊確率が小さいことを示す。信頼性指標の算出には1次信頼性理論 (FORM: First-Order Reliability Method) 等が用いられる。また、感度係数はそのパラメータが性能関数において占める影響度合いを示す指標で、 $-1 \sim +1$  の範囲の値を持つ。絶対値が大きいほど影響度合いが高く、パラメータ間に相関がなければ二乗和は1になるとい

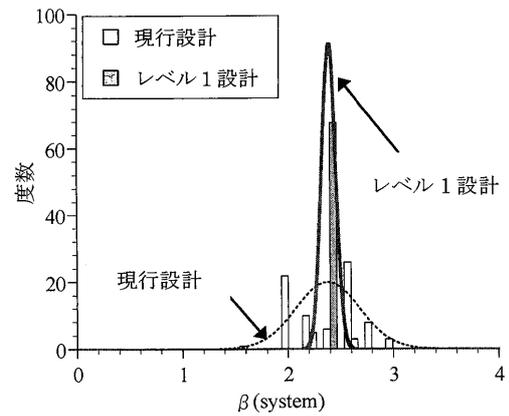


図-6 防波堤のシステム信頼性指標

う特徴がある。

レベル1信頼性設計法により防波堤の外部安定を評価すると、図-6に示すように、信頼性設計法では信頼性指標のばらつきが極めて小さくなるとともに、その平均値は現行設計と同程度になる<sup>9)</sup>。この方法では、平均的に従来と同程度の建設コストで、破壊確率のばらつきを軽減することが可能となる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 2002.
- 3) 本城勇介ほか: 「性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語 (通称「code PLATFORM ver. 1) の開発, JCOSSAR2003, pp. 881~888, 2003.
- 4) 地盤工学会: 性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則, 2004.
- 5) 長尾 毅・川名 太: 港湾構造物の設計法の性能規定化について, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005.
- 6) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会: 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.
- 7) 長尾 毅・山田雅行・野津 厚: フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文誌, No. 801, I-73, pp. 141~158, 2005.
- 8) 長尾 毅・岩田直樹: 重力式及び矢板式岸壁のレベル1地震動に対する耐震性能照査用震度の設定方法, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 339~350, 2007.
- 9) 吉岡 健・長尾 毅: 重力式防波堤の外的安定に関する部分係数のコードキャリブレーション, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 779~784, 2005.

(原稿受理 2008.1.11)