

表-2.2.1 主な作用の分類

	作用
永続作用	自重, 土圧, 温度応力・腐食・凍結融解等の環境作用 等
変動作用	波浪, 風, 水位(潮位), 貨物・車両等による載荷重, 船舶の接岸・牽引による作用, レベル1地震動 等
偶発作用	接岸以外の船舶等の衝突, 火災, 津波, レベル2地震動, 偶発作用の波浪 等

## 2. 2. 2 設計状態

性能照査に当たっては、設計状態を設定する。設計状態とは、照査において考慮する作用の組合せのことであり、以下のような永続状態、変動状態（変動作用が主たる作用の状態）及び偶発状態（偶発作用が主たる作用の状態）として設定する。各設計状態の定義は、以下の通りである。

- ①永続状態：1つまたは複数の永続作用の組合せおよび永続作用と変動作用を組み合わせる状態で、主たる作用が永続作用の状態
- ②変動状態：1つまたは複数の変動作用、永続作用と変動作用を組み合わせる状態で、主たる作用が変動作用の状態
- ③偶発状態：偶発作用および偶発作用と永続作用を組み合わせる状態

作用の組合せを考慮する際に、一般に複数の作用は主たる作用と従たる作用に分類されるが、主たる作用と従たる作用の同時生起性が低い場合は、従たる作用の特性値は年超過確率の比較的大きな設計供用期間中にしばしば起こりうる程度の値とすることができる。これは同時生起性の低い作用の特性値をすべて年超過確率の小さな値に設定して組み合わせることは、合理的ではないと考えられるためである。このような作用の組合せに関する一般原則は Turkstra 則と呼ばれる。

しかしながら、相関を有する作用の組み合わせを考慮する必要がある場合には Turkstra 則は適用しにくい可能性がある。例えば、今後の展開が想定される洋上風力発電設備などでは、波浪作用と風作用が主要な作用であり、両者には相関性が高い。このため、同時生起性の高さを考慮すると Turkstra 則の適用は危険側と考えられる。逆に、両者の極大値を組み合わせることは過大設計となる恐れがある。

このような場合は、作用効果の特性値について、組み合わせた合計値が妥当であるとともに、組み合わせた状態が生じる可能性が最も高い条件に設定しておくことが望ましいと考えられる。具体的な方法が文献4-1)に示されているので参考にできる。また、第1章3 信頼性設計法 (9) 相関の高い作用の特性値の設定方法にその基本的な考え方の例を示す。

港湾の施設の性能照査に当たっては、一つの設計状態において主たる作用が異なる複数の状態がありえる。このため本書では、主たる作用を明確にするために「○○（主たる作用）に関する○○状態」として示している。例えば、主たる作用が変動波浪の場合には、波浪に関する変動状態と表記している。

## 2. 3 要求性能

要求性能は、目的を達成するために施設が保有しなければならない性能であり、施設の構造的な応答に関する性能、構造的な諸元等に関する性能、施工性、維持管理性等がある。施設の構造的な応答に関する性能は、許容される損傷の程度に応じて①使用性、②修復性、③安全性に分類される。なお、ここでいう安全性、修復性、使用性の定義は、以下の通りである。

- ①使用性：使用上の不都合を生じずに使用できる性能のことであり、想定される作用に対して損傷が生じないか、又は損傷の程度がわずかな修復により速やかに所要の機能が発揮できる範囲に留まること。
- ②修復性：技術的に可能で経済的に妥当な範囲の修繕で継続的に使用できる性能のことであり、想定される作用に対して損傷の程度が、軽微な修復により短期間のうちに所要の機能が発揮できる範囲に留まること。
- ③安全性：人命の安全等を確保できる性能のことであり、想定される作用に対してある程度の損傷が発生するものの、損傷の程度が施設として致命的とならず、人命の安全確保に重大な影響が生じないこと。

い範囲に留まること。

すなわち、許容される損傷の程度の関係は、③安全性>②修復性>①使用性となる。港湾の施設の構造的な応答に関する要求性能は、**図-2.3.1**のように表すことができる<sup>5)</sup>。**図-2.3.1**の縦軸は作用の年超過確率、横軸は損傷の程度、図中の曲線は施設の性能を表している。一般に、作用は永続作用を除いて、年超過確率に応じてその特性値の大きさが異なり、作用の大きさが異なると、施設に生じる損傷の程度が異なると考えることができる。年超過確率のある程度大きな変動作用や永続作用によって施設に大きな損傷が生じること

表-2.5.3 施設及び構造形式毎の照査用震度の算定方法

照査用震度の算定方法が提示される施設		照査用震度	照査用震度算定方法が準用できる施設
混成堤 (ケーソン式)		変形を考慮した照査用震度	混成堤 (ブロック、セルラーブロック)、直立堤、傾斜堤、消波ブロック被覆堤、重力式特殊防波堤、ケーソン式ドルフィン (土圧を受けない場合)、セル式ドルフィン (土圧を受けない場合)
軟弱地盤着底式防波堤		作用震度 (= 最大加速度/重力加速度)	—
重力式係船岸 (ケーソン式)		変形を考慮した照査用震度	重力式係船岸 (L型ブロック、ブロック、セルラーブロック)、直立消波式係船岸、根入れを有するセル式係船岸、置きセル式係船岸、棚式係船岸、ケーソン式ドルフィン (土圧を受ける場合)、セル式ドルフィン (土圧を受ける場合)、重力式護岸、根入れを有するセル式護岸、置きセル式護岸、捨石式護岸
矢板式係船岸	控え直杭式	変形を考慮した照査用震度	矢板式係船岸 (控え矢板式、控え版式)、自立矢板式係船岸、斜め控え杭矢板式係船岸、二重矢板式係船岸
	控え組杭式	変形を考慮した照査用震度	—
直杭式横棧橋	棧橋	応答スペクトルを用いた照査用震度	斜め組杭式横棧橋、ジャケット式棧橋、ストラット式棧橋、デタッチドピア、杭式ドルフィン、杭式防波堤、前方斜め支え杭矢板壁を有する係船岸、係船くい
	土留部	変形を考慮した照査用震度	—
改良地盤	深層混合処理工法	変形を考慮した照査用震度	—
	SCP 工法	変形を考慮した照査用震度	—

※防砂堤、導流堤、突堤、堤防、胸壁、防潮堤、閘門、水門、物揚場及び船揚場については、構造形式及び地震動作用時の施設の応答特性を勘案して、上記の照査用震度の算定方法を準用することができる。

〔参考文献〕

- 1) ISO2394 : General principles on reliability for structures, 1998
- 2) 国土交通省 : 土木・建築にかかる設計の基本, 2002.10
- 3) 土木学会 : 包括設計コード (案) (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 第一版), 2003.3
- 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, 2006.3
- 4-1) 長尾毅 : 相関を有する波浪・風作用の組み合わせ方法に関する研究, 国土技術政策総合研究所報告 No. 48, 2011
- 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, 土木学会第 60 回年次学術講演会

表-3.2 主要な施設の目標信頼性指標・部分係数の設定方法

施設	設計状態	破壊モード	目標信頼性指標、部分係数の設定方法
重力式 防波堤	永続状態	基礎地盤の円弧すべり	期待総費用最小化に基づく方法
	波浪に関する変動状態	堤体の滑動 堤体の転倒 基礎地盤の支持力	過去の設計法の平均的な安全性水準に基づく方法
重力式 係船岸	永続状態	壁体の滑動 壁体の転倒 基礎地盤の支持力 基礎地盤の円弧すべり	期待総費用最小化に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	壁体の滑動 壁体の転倒 基礎地盤の支持力	過去の設計法における設定に基づく方法
矢板式 係船岸	永続状態	矢板の根入れ長 矢板の応力 タイ材の応力 基礎地盤の円弧すべり	期待総費用最小化に基づく方法
		控え工の応力（支持力）	過去の設計法における設定に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	矢板の根入れ長	過去の設計法における設定に基づく方法
		矢板の応力 タイ材の応力 控え工の応力（支持力）	過去の設計法における設定に基づく方法
セル式 係船岸	永続状態	せん断変形 滑動	過去の設計法における設定に基づく方法
		セル殻の応力 アークの応力	過去の設計法の平均的な安全性水準に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	滑動	過去の設計法における設定に基づく方法
直杭式 横棧橋	船舶による作用等に関する変動状態	杭の応力（杭頭の縁部降伏）	期待総費用最小化に基づく方法
		杭の支持力	過去の設計法における設定に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	杭の応力（杭頭の縁部降伏）	過去の設計法の平均的な安全性水準に基づく方法
		杭の支持力	過去の設計法における設定に基づく方法

(9) 相関の高い作用の特性値の設定方法<sup>39)</sup>

性能照査法として信頼性設計法、特に部分係数法を採用する場合、作用効果や耐力の特性値に部分係数が乗じられ、得られた耐力の設計用値が作用効果の設計用値を上回ることが照査項目となる。この設計用値は前述したように設計点（design point）に対応した値であり、設計点とは限界状態曲面（性能関数がゼロとなる曲面）において同時確率密度が最も高い点である。換言すれば限界状態曲面の中で最も生じる可能性の高い状態である。

ここで、仮に作用効果の特性値の合計値が妥当な値であったとしても、各々の作用効果の値の組み合わせが生じる可能性が非常に低い状態に各特性値を設定してしまうと、設計用値を設計点に設定するためには部分係数を非常に大きい値と非常に小さな値に設定する必要があるほか、例えば主たる作用に対する部分係数が1.0以下の値になる可能性があるなど、不自然な設計体系となってしまう恐れがある。従って、特性値の段階においても、組み合わせた合計値が妥当であるとともに、組み合わせた状態が生じる可能性が最も高い条件に設定しておくことが望ましいと考えられる。

文献39)では、相関の高い作用の組み合わせ方法として、組み合わせた作用効果の値が所要の年超過確

率となる条件で、かつ各作用の組み合わせの同時確率密度が最大となる波浪作用と風作用の組み合わせ方法を提案している。組み合わせた作用効果の再現期間が50年の条件については、各変数を標準正規確率変数に変数変換した後の作用効果の組み合わせ値 $Z$ の推定値 $E_Z$ は式(3.41)のとおりとなる。

$$E_Z = 2.904 + 1.203\rho' \quad (3.41)$$

ここで、 $\rho'$ は各確率変数を標準正規確率変数へ変数変換した時の相関係数の修正値であり、任意の確率分布に従う確率変数の相関係数 $\rho$ をもとに式(3.42)、式(3.43)により得られる<sup>40)</sup>。

$$R = \frac{\rho'}{\rho} \quad (3.42)$$

$$R = a + bV_i + cV_i^2 + d\rho + e\rho^2 + f\rho V_i + gV_j + hV_j^2 + k\rho V_j + lV_i V_j \quad (3.43)$$

ここに、 $V$ は添字に関する変動係数である。また、 $a \sim l$ は係数であり、波浪作用と風作用の従う確率分布がワイブル分布であるとき、各係数は以下の通りである。 $a=1.063$ 、 $b=-0.200$ 、 $c=0.337$ 、 $d=-0.004$ 、 $e=-0.001$ 、 $f=0.007$ 、 $g=-0.200$ 、 $h=0.337$ 、 $k=0.007$ 、 $l=-0.007$

最終的に、必要となる確率変数への変換は、式(3.44)に示す確率分布関数の逆演算によればよい。

$$x = F_X^{-1} \left( \Phi \left( \frac{E_Z}{2} \right) \right), \quad y = F_Y^{-1} \left( \Phi \left( \frac{E_Z}{2} \right) \right) \quad (3.44)$$

ここに、 $F_X(X)$ ：確率変数 $X$ の確率分布関数、 $\Phi$ ：標準正規確率分布関数である。この方法による作用の組み合わせは、DNVの方法<sup>41)</sup>と比較して、相関係数が高い場合には適用性が高いことが確認されている。

#### 4 国際単位系の使用

本書では、計量法（平成4年法律第51号）により国際単位系を使用する。なお、これに定めのない、「年」の単位については「y」を用いるものとする。

[参考文献]

- 1) 星谷 勝, 石井 清：構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986
- 2) 長 尚：基礎知識としての構造信頼性設計, 山海堂, 1995
- 3) Melchers, R. E. : Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley & Sons, Inc., 1999
- 4) Haldar, A. and Mahadevan, S. : Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000
- 5) Box, G. E. P. and Muller, M. E. : A note on the generation of normal deviates, Ann. Math. Stat., 29, pp.610

- 32)松本敏克, 澤田純男, 大鳥靖樹, 坂田 勉, 渡邊英一: 非線形挙動の著しい地中構造物の地震時損傷確率評価, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1159~1168, 2006
- 33)長尾 毅: 岸壁の残留変形量に関する地震時信頼性指標の簡易評価法, 構造工学論文集, 2007
- 34)長尾 毅, 佐藤秀政, 宮島正悟: 破壊確率を考慮した既存栈橋の補修方法選択法に関する一考察, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1051~1060, 2006
- 35)吉岡 健, 長尾 毅: ケーソン式防波堤におけるレベル1信頼性設計法の合理的な適用方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.856~860, 2004
- 36)長尾 毅, 門脇陽治, 寺内 潔: 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性(第1報)~滑動安全性に関する検討, 港湾技術研究所報告, Vol.34, No.1, 1995
- 37)長尾 毅, 柴崎隆一, 尾崎竜三: 経済損失を考慮した期待総費用最小化のための岸壁の常時のレベル1信頼性設計法, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.389~400, 2005
- 38)尾崎竜三, 長尾 毅: 防波堤を対象とした円弧すべりに関する信頼性設計法の適用, 海洋開発論文集 第21巻, pp.963~968, 2005
- 39)長尾 毅: 相関を有する波浪・風作用の組み合わせ方法に関する研究, 国土技術政策総合研究所報告 No. 48, 2011
- 40)Liu, P. -L. and Der Kiureghian, A. : Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances, Prob. Engineering Mechanics, 1 (2) pp.105-112, 1986
- 41)Det Norske Veritas : Design of offshore wind turbine Structures, DNV-OS-J101, 2007