

# 港湾技術基準及び設計法の変遷と展望

山本修司  
SHUJI Yamamoto

(財) 沿岸技術研究センター理事 国際沿岸技術研究所長

Design code writers in various countries have been discussing and working on revising technical standards, including those for ports structures, to switch over to performance-based design based on the reliability of structures. This paper describes the changes of design methods for port structures in Japan and subjects in case of changing the technical standards, furthermore refers to the research activities of Institute for International Coastal Technology established June 2004.

## 1. はじめに

今、設計コードに関係している人々の間で、性能設計型の技術基準への移行が議論されています。直接的には、ISO2394 General principal on reliability for structures や Eurocode 0 Basis of structural design の影響が大きいのですが、その背景には以下に挙げるような社会的要請が存在します。

- ・施設や建築物が、安全性や機能に関して、どの程度の性能を持っているかについて社会的に説明・表示し、信頼感を得る必要があること。
- ・適切な安全性水準の設定とそれを達成する設計の自由度を提供することにより、生産性の向上に貢献する必要性があること。
- ・建設資材の流通の国際化や建設マネジメント手法等のボーダレス化といった、技術のグローバル化に対応する必要性があること。

国土交通省は、所管する道路、河川、港湾等の技術基準の改正にあたって、「土木・建築にかかる設計の基本」を公表するとともに、各技術基準の改正作業を進めています。この「土木・建築にかかる設計の基本」では、性能設計の枠組みを採用し、構造物の安全性は信頼性設計法に基づき照査することを基本としています。今回の基準改正は、明治以来慣れ親しんできた設計の概念を大きく変えるものとなります。

本稿では、港湾構造物の設計法の集大成ともいえるべき港湾技術基準の変遷をたどりながら、典型的な設計法を例にとって、新しい設計法に移行する際の課題について触れたいと思います。また、沿岸技術研究センター内に設立した国際沿岸技術研究所が取り組もうとしている設計関係の研究テーマについても述べたいと思います。

## 2. 港湾技術基準及び設計法の変遷

港湾技術基準の変遷を年表形式で要約すると表-1 のようになります<sup>1)~4)</sup>。

表-1 港湾技術基準の変遷

昭和25年	港湾工事設計示方要覧
34	港湾工事設計要覧
42	港湾構造物設計基準
54	港湾の施設の技術上の基準・同解説
55	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (超大型石油ターミナル施設・海上貯油基地施設)
平成 元年	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版)
6	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (マリーナ等一部改正)
11	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版)

### (1) 技術基準等のない時代 (昭和24年以前)

この時代には、法的位置付けのある技術基準や各種団体が策定する任意規格は存在していません。そのような状況で、広井勇博士の「築港 (前・後)」(明治31年初版、改訂数版)と鈴木雅次博士の「港工学」(昭和7年)は、技術者にとってバイブルであったと思われます。技師広井勇は、小樽港の防波堤建設において、バネ式の最大値記録型の波圧計により波力観測を行い、1919年に $p=1.5wH$ の波圧式を公表しました。「港工学」には、円形すべりの計算法も紹介されており、このころから床掘置換工法による軟弱地盤対策が理論的に検討されていたと思われます。

### (2) 港湾工事設計示方要覧 (昭和25年~昭和33年)

「示方要覧」は、係船岸設計示方書、浚渫埋立計画および施工標準、防波堤設計示方書の3編(115ページ)から構成され、施設の構造形式ごとに設計の基本的な考え方がまとめられており、次のような記述があります。

- ①バースの標準寸法
- ②常時及び地震時の土圧
- ③耐震設計で、水平震度0.05~0.3
- ④摩擦係数、コンクリート同士で0.5、コンクリートと

捨石で0.6

- ⑤重力式係船岸の滑動及び転倒に対する安全率, それぞれ1.2以上, 1.5以上
- ⑦風波の発達, 波の回折などに関する経験式
- ⑩重複波圧のサンフルー式, 砕波圧の広井式

### (3) 港湾工事設計要覧 (昭和34年~昭和41年)

第二次大戦をはさんで急速に発展した土質工学及び海岸工学の新しい理論並びに新材料や新工法の開発による技術進歩を港湾建設に取り入れた港湾工事設計要覧 (以下, 設計要覧) が昭和34年1月に刊行されており, 次のような記述があります。

- ①SMB法による波浪推算. 浅海域における波の屈折・回折計算法
- ②部分砕波圧の式, ミニキンの衝撃砕波圧の式, 捨石重量を算定するイリバレン・ハドソン式
- ③漂砂に関する考え方及び調査法
- ④水平震度算定のための地区区分
- ⑤地盤, ウェル及び杭の支持力, 軟弱地盤対策
- ⑥円形すべりの安全率, 常時1.5, 地震時1.2
- ⑦矢板式係船岸及びセル式係船岸の計算法
- ⑧工事中基準面として基本水準面を用いること
- ⑨船舶衝撃力の算定法, ゴム防舷材

### (4) 港湾構造物設計基準 (昭和42年~昭和53年)

昭和37年4月に港湾技術研究所が設立され, 昭和38年には設計基準課という組織ができたのを契機に, わかりやすい設計の手引書を作成することとなった. 港湾局, 港湾建設局, 港湾技術研究所の100名近い執筆者が各自の専門分野について執筆し, 調査標準作成委員会における2年以上の審議を経て, 港湾構造物設計基準 (以下, 設計基準) が作成された. 総ページ数は, 約990ページという大部なものでした. 「設計基準」には基準という字句がありますが法律的裏付けはなく, 設計にあたって参考とすべき指針的な性格のものであり, 次のような記述があります。

- ①対象船舶の船長を単位とした水域施設の諸元 (船舶諸元のデータベースはその後最新情報に更新されるとともに, 船種ごとに船長, 型幅, 喫水等の統計分布が明らかにされ, 世界的にもユニークなものとなっている.)
- ②防波堤堤体の期待滑動量の算定法 (伊藤喜行博士は1966年に, 不規則波による模型混成堤実験により堤体の滑動限界を算定する波圧式を, さらに, 不規則波の波高分布に関する統計的特性を考慮に入れ, 堤体の総滑動量を推定する期待滑動量の算定法を発表した.)
- ③設計震度 = 地域別震度 × 地盤種別係数 × 重要度係数

④液状化の概念

- ⑤波浪推算の図式解法, 新しい回折図表, ハドソン式, 異形消波ブロック
- ⑥栈橋, 浮き栈橋の設計法

### (5) 港湾の施設の技術上の基準 - 1

(昭和54年~平成10年)

これまでの「示方要覧」, 「設計要覧」, 「設計基準」は, 設計にあたって参考とすべき指針的な性格のものであって, 法律上の裏付けはなされていませんでした. 昭和48年の港湾法の改正に際して, 法第56条の2に「港湾の施設に関する技術上の基準 (以下, 基準省令)」に関する条項が追加され, 港湾の施設は, 基準省令に適合するように, 建設し, 改良し, 又は維持しなければならないことが明記されました。

昭和49年7月に制定された基準省令は16条からなる簡単なもので, 具体的な個々の技術項目についてはあまり述べられていません. しかし, 外郭施設や係留施設の条文を見ると, それらの施設が十分に機能を発揮すること及び安全であることが記述されています. 当時の担当者が意識していたかどうかは定かではありませんが, ここで話題にしています性能設計でいうところの「目的」, 「機能」, 「要求性能」, 「照査方法」のうち上位に位置する概念が盛り込まれています。

昭和53年10月に基準省令の解釈と運用が適切に行われるための港湾局長通達が出されました. このころから, 基準省令と港湾局長通達をあわせて「技術基準」と呼ぶようになりました. さらに昭和54年4月には, この港湾局長通達を本文とし, その解釈や技術情報 (解説) から構成される「港湾の施設の技術上の基準・同解説」が刊行され, 次のような記述があります。

- ①不規則波の概念, 波浪スペクトル
- ②合田の波圧式
- ③港研方式による杭の横抵抗の計算

平成元年には, 次の事項が一部改正されました。

- ①偏心傾斜荷重に対する支持力の算定方法
- ②防舷材の新しい設計法
- ③杭の軸方向支持力の算定方法
- ④スペクトル法による波浪推算, 液状化判定法, 各種の地盤改良工法

### (6) 港湾の施設の技術上の基準 - 2

(平成11年~平成16年)

技術の進歩, 経済社会情勢や国民意識の変化, それを受けての港湾整備政策の変更及び平成9年の運輸技術審議会答申第22号を受けて, 「技術基準」が平成11年4月に現行のものに改正されました. 同時に, 全文で136条からなる「港湾の施設の技術上の基準の細目」が新たに告示されました. 改正された「港湾の施設の技術上の基

準・同解説（上，下）」には次のような記述があります。

- ①レベル2地震動の設定と耐震強化施設の設計法
- ②新しい地域別震度（5段階）と重要度係数
- ③限界状態設計法によるRC 構造物の部材設計
- ④期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法
- ⑤栈橋の設計に用いる設計震度と保有水平耐力法による耐震性能照査
- ⑥SI 単位系

### 3. 新しい技術基準への移行における課題と展望

#### (1) 構造物の性能

過去の港湾技術基準を振り返って見ますと、計算手法と安全率（または、許容応力度）は明確に示されていますが、港湾構造物が本来持つべき性能については記述がありません。ただし、これまでの設計で先人達が構造物の性能ということを全く考えないでいたわけではありません。国民経済にとって重要な係留施設では大きな重要度係数（耐震設計）を採用しますし、海上石油貯油基地施設の防波堤では再現期間 100 年の波を設計波とすることで、構造物の重要度を考慮してきました。しかし、一般人には重要度係数が 1.5 の構造物といっても、その構造物の性能はわかりません。また、再現期間 100 年の波に耐えるといっても、それを越える大波が来たときに、その防波堤がどのような挙動を示すのかは不明です。冒頭で述べたような社会的な状況の変化も考慮して、図-1 の右側に示すような性能設計の体系、すなわち、構造物の目標とする性能を明確に定めて、それを信頼のおける設計手法で照査するという設計体系へ移行することが求められています。

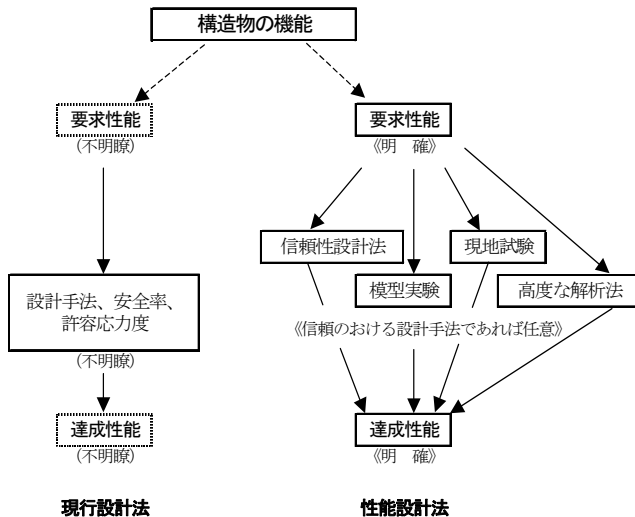


図-1 設計法の対比

#### (2) 信頼性設計法

構造物に作用する力とそれに抵抗する力に関する諸現

象の解明、実構造物の挙動の観測及び施工上の経験や被災事例の分析等により、設計に用いる計算式はより厳密なものとなってきました。しかし、計算式がいくら厳密になっても現実の現象を完全にカバーすることは不可能です。また、そもそも計算に使用する設計変数にバラツキがあるので、適切な安全の余裕（マージン）を見込まなくてはなりません。それが安全率です。この安全率は一般に抵抗力と外力の比で定義されますが、外力と抵抗力のそれぞれの不確実性を区別したものではありません。従って、例えば安全率 2.0 の構造物といっても、設計で想定した外力の 2 倍まで安全なのか、抵抗力が 1/2 に落ちても安全なのか不明瞭です。このような不満を解消する設計法の一つが信頼性設計法です。レベル1の信頼性設計法である部分安全係数法では、個々の設計変数のバラツキや計算法自体が持つ精度を考慮したうえで、目標とする安全性能（例えば、破壊確率）を満足するように部分安全係数が決められます。従って、構造物が持つべき安全性能の制御が合理的に行えるようになります。

#### (3) 新しい設計体系への移行について

##### （耐波設計）

合田良實博士は 1973 年に、設計波として最高波高を用いる新しい波圧算定式を提案しました。この波圧式は、重複波圧及び碎波圧を区別することなく、統一的に扱えるとともに、波の周期、マウンドの高さ、海底勾配の影響を取り入れたものです。あわせて、不規則波の屈折、回折、浅水・碎波変形等に関する計算法も整備されたので、世界でも先進的な耐波設計体系が構築されました。同博士は、設計波に近い、あるいはそれを上回ると思われる高波を受けて滑動した防波堤と滑動しなかった防波堤の事例を調査し、各事例について各種<sup>5)</sup>の波圧式を適用したときの滑動の安全率を計算しました。（図-2 参照）。

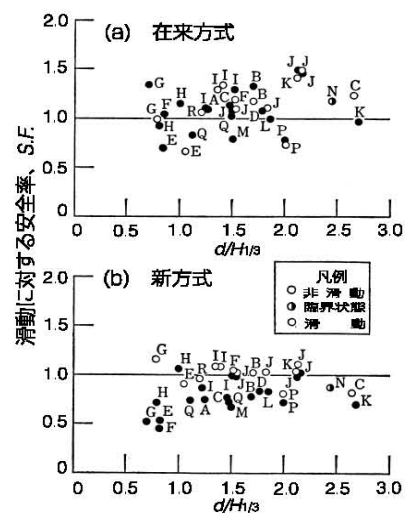


図-2 滑動の安全率

この図から、新しい波圧算定式は実際の防波堤の波浪に対する安定性をかなりの確に判定できることが理解できます。また、滑動例と非滑動例の境界が安全率0.8~1.1にあることから、若干の余裕をみて設計に用いる安全率を1.2としたようです。先に述べました部分安全係数法へ移行するにあたって、この例のような整理を行うと、破壊確率や安全性指標といった指標と現実の被災の関係が分かって、設計実務者も信頼性設計法を受け入れ易くなるのではないのでしょうか。

### (斜面の安定計算)

地盤の安定性の検討について、「示方要覧」では「滑出し面は円弧滑り面を仮定して計算する」という記述があります。「設計要覧」には現行基準を簡略化した計算式と永久構造物の安全率（常時1.5，地震時1.2）という記述があります。「設計基準」には現行基準と同じ計算式と安全率1.3という記述、さらに、定常的な浸透がある場合の浸透水圧の処理方法の記述があります。わが港湾の分野では、円弧滑りの計算に修正フェレニウス法を用いることが一般的です。これは、中瀬明男博士らが軟弱地盤上に建設された構造物の破壊事例を解析した結果、この計算法が斜面破壊の実情をよく説明することがわかっているからです。軟弱地盤上の盛土の破壊事例を逆解析した結果<sup>6)</sup>によると、この円形滑り計算法は、安全率の値で±0.1の精度を持つといわれています（余談ですが、この安全率について同博士から次のような話を聞いたことがあります。昭和20~30年代に安全率1.2で設計していたころ、軟弱地盤上の堤防や岸壁が円弧滑り破壊を起こした事例が数多くあったそうです。そこで安全率を1.3に引き上げたところ、円弧滑り破壊がびたりとなくなったということです）。なお、この円形滑り計算の精度は、日本の固定式サンプラーを用いて試料をサンプリングし、一軸圧縮強度 $qu$ の平均値の1/2を非排水せん断強度とすることが前提となっています。

一方、国際規格の有力な候補の一つである Eurocode-7では、土圧、地盤の支持力及び斜面の安定等を部分安全係数法で計算するための部分安全係数（例えば、 $\tan \phi$ に関して1.25、 $C_u$ に関して1.4など）が提案されています。粘性土の粘着力に関する部分係数1.4は、わが国の経験からすると若干大きめな感じがしますが、これは各国が独自に部分係数を決めれば解決します。問題はどんな計算手法を用いた場合の部分係数なのかがはっきりしないことです。Trevor Orr 等<sup>7)</sup>によれば、分割片の鉛直面に作用するせん断と水平力を考慮したビショップ法が推奨されるといっています。しかし、図-3の例<sup>8)</sup>からわかるとおり地盤の構成条件によって、安全率は修正フェレニウス法と簡易ビショップ法とで大きく異なる場合があります。使用する計算式と部分係数はセットで示される必要があると考えます。また前述のとおり、土のサンプリングの方法、試験法、特性値の決め方を規定

しなければ、新しい計算手法を用いても意味がないことになります。

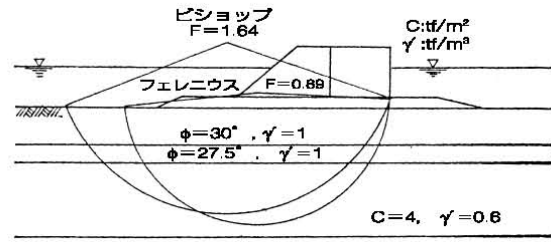


図-3 修正フェレニウス法と簡易ビショップ法による安全率<sup>8)</sup>

### (荷重指針)

図-4のようなラーメン構造を設計する場合を考えてみましょう。現行の許容応力度法では、鉛直力 $V$ のみが作用する場合、水平力 $H$ のみが作用する場合そして $V$ と $H$ が同時に作用する場合の3ケースの応力及び変位を計算し、それらが許容値以下であることを確認します。一方、限界状態設計法では、終局限界状態（構造物が壊れるかどうかの限界）について、 $V$ と $H$ のいずれかまたは両方に部分安全係数及び組み合わせ係数を考慮して照査するとともに、使用限界状態（通常、部分安全係数を考えなくてよい）の照査をすることになります。

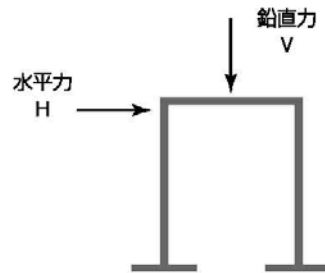


図-4 ラーメン構造に作用する外力

直杭式栈橋の設計に必要な部分安全係数を決定する場合を考えて見ます。

鉛直荷重には自重、上載荷重（作業時、地震時）、クレーンの鉛直輪荷重（作業時、地震時）等が、水平荷重には船舶衝撃力、地震時慣性力（上載荷重、自重）、クレーン水平輪荷重があります。これらの荷重の組み合わせを考慮して、杭の支持力や杭頭モーメントの照査に使用する部分安全係数が決定されます。このような部分安全係数は、重力式岸壁や矢板式岸壁など構造形式ごとに決められるので、設計者にとっては、設計が非常に煩雑なものとなります。また、技術基準としても美しくないように思えます。係留施設の設計に共通して使用できる荷重指針（荷重に関する部分安全係数と特性値を定めたもの）ができないものでしょうか。

## 4. おわりに

当センターは1999年から国の委託事業を受けて、ISO規格やEurocodesについて、翻訳、問題点整理、比較設計等を行うとともに、次の港湾技術基準のあり方についても検討してきました。急速な国際化の流れ・変化に適切かつタイムリーに対応していくためには、専門の組織が必要と考えて、本年6月に国際沿岸技術研究所を設立しました。この研究所では、ISO(国際標準化機構)やCEN(欧州標準化機構)に関する動向・情報の収集、性能設計法や信頼性設計法に関する研究を行うとともに、港湾・海岸の技術基準に関わる関係者のネットワークづくりに取り組みたいと思います(図-5参照)。

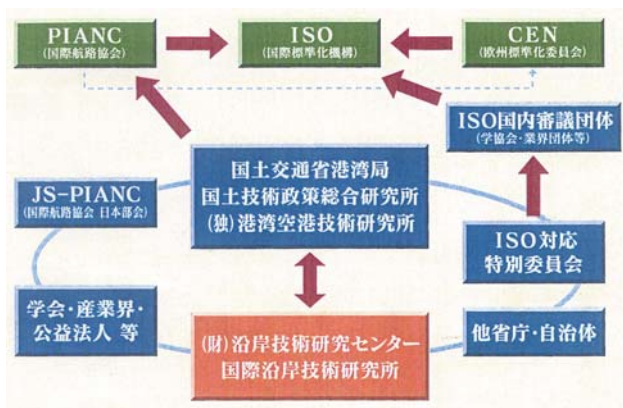


図-5 技術基準に関わる関係者のネットワーク

また、ISOでは、品質管理のためのISO9000を定めており、建設会社やコンサルタントもその認証を受けるところが多くなっています。将来的には、設計成果物の認証制度や設計技術者の資格制度が議論されるのではないかと考えます。このような課題についても勉強していきたいと思います。関係する皆様のご支援、ご指導をよろしく申し上げます。

本稿の執筆にあたっては以下の文献を参考にさせていただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 合田良實：技術基準の変遷とその果たした役割(港湾)，土木学会誌，Vol.68-3，pp.13～16，1983
- 2) 安間 清：港湾技術の変遷と技術基準，港湾，11月号，pp.57～64，1988
- 3) 春日井康夫：技術基準の改正方針，港湾，12月号，pp.6～9，1998
- 4) 合田良實：1900年代の港湾技術の変遷，港湾，12月号，pp.12～17，1999

- 5) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，92p，1977
- 6) 松尾 稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版，1984
- 7) Trevor L.L.Orr& Eric R.Farrel：Geotechnical Design to Eurocode 7，Springer，1999
- 8) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定解析，港湾技術研究所報告，Vol.23，No.1，1984
- 9) 平野吉信・山本修司・西川和廣：土木・建築における技術基準の動向と展望，国土技術政策総合研究所資料，No.58，2002