

わが国における防波堤の現行設計法について

Present design standard for breakwaters in Japan

高山知司

TAKAYAMA Tomotsuka

(財) 沿岸技術研究センター 理事

The design standard for port and harbor facilities in Japan changed the fundamental design concept from the prescriptive specification based design to the performance based design in April, 2007. The present paper mainly describes the newly introduced design procedures for composite breakwaters. The reliability design of level 1 of partial factor assessment to level 3 of expected sliding distance of a caisson has been employed in the new design procedures. In the reliability design the large deformation of a caisson must be evaluated because all waves which are possible to occur should be taken into account. The computation of the caisson behavior is newly developed by employing the discrete element method and the results of the computation are confirmed by the comparison with experiments.

Key Words : Design standard, Breakwater, Reliability design, Partial facto, Expected sliding distance, Discrete element method

1. まえがき

わが国における港湾構造物の設計基準は2007年4月から従来の仕様設計から性能設計へと設計概念の変更があった。性能設計では設計する構造物の要求性能を規定し、設計に用いる数式や材料を規定したものではないために、性能設計を基本とする新しい設計基準の採用は設計の自由度を促進するものになる。

仕様設計を基本とする古い設計基準における防波堤設計の流れは図-1のようになっている。まず、30ヶ年以上の長期間にわたる異常波浪の値から波浪の出現極値分布を設定し、その極値分布から設計沖波を求める。設計沖波として、わが国では、通常、その波高以上の波が出現する確率が平均50年に1回となる波浪を採用してきた。防波堤建設地点における設計波を求めるために、屈折や回折、反射、砕波といった現象に対する波浪変形計算を実施し、設計波として最高波や有義波を求めてきた。次に、波浪変形計算で求めた設計波を用いて、防波堤に作用する波力を求めることになる。波力を計算するための実験公式として合田式を標準式として採用していた。この式で求めた波力に対して防波堤が滑動と転倒、基礎地盤の破壊といった3つの破壊モードに対して安全であるように設計した。滑動に対してはケーソンと捨石マウンドの間の摩擦係数を0.6として、摩擦抵抗力と水平波力との比である安全率が1.2以上になるように設定された。また、転倒に対してはケーソンの後端趾を中心とする転倒波力モーメントに対する安全率が1.2以上になるように設定し、基礎地盤の破壊についてはビンショップ法で求めた円弧すべりの安全率が1.0以上になるように設定し

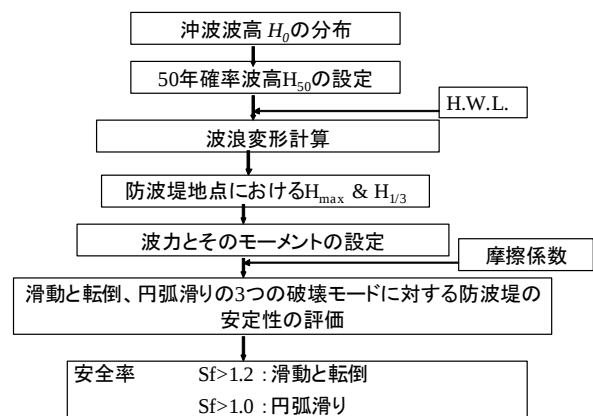


図-1 仕様設計における防波堤設計の流れ

ていた。このような堤体の安定性を考慮して、もっとも小さい堤体が採用された。

新たに採用された性能設計では、構造物が満足すべき性能が規定され、それを満足するように設計することになる。しかしながら、設計の流れとしては仕様設計の場合とほとんど変わらない。ただし、安全率的な考えはなくなり、性能照査には信頼（確率）設計といった概念の導入が必要となる。このような性能設計では、要求性能を満足していることが照査できればどのような設計法を用いてもよく、それだけ設計の自由度が大きくなる設計法である。

本論文では、信頼性理論を基本にして新たに採用された性能設計法について述べている。信頼性設計法は、設

計の中に現れる不確定要素についてその出現確率を考慮した設計法で、レベル1から3の3段階に分類される。本論文では、混成防波堤に関して不確定要素の部分係数を用いたレベル1や設計する防波堤の変形量を性能規定として取り入れたレベル3の信頼性設計法について概説している。信頼性設計法では、起きる可能性のある外力のすべてに対して検討しておくことが必要である。防波堤の大変形の計算法として、捨石マウンド上のケーソンの変形を個別要素法によって算定する手法についても述べている。

2. 性能設計法への歴史

性能設計法はこれまでの仕様設計法にとって替わるものとして2007年4月に採用された。しかしながら、このような設計基準の概念の変更が行われるまでには、特に信頼設計を代表とする新たな設計法が研究・開発されてきた。性能設計法は、構造物の性能を規定し、その性能を満足するように設計するものであるために、規定した性能が満足されているかどうか照査しなければならない。その照査法として信頼性設計の概念が導入されるためには、信頼設計法の研究開発が重要となっていた。

図-2は、信頼性設計法の開発の歴史を示している。図-2に示されているように、1990年代に入ってケーソン壁の限界状態設計や混成防波堤の滑動破壊確率に関する研究が行われるようになってきた。防波堤の滑動破壊としては波浪による水平外力が摩擦抵抗力を超えたときと定義して、滑動破壊確率が計算された。滑動破壊確率の計算では、波浪外力の算定式として用いられている合田式の信頼性やケーソンと捨石マウンドとの間の摩擦係数のばらつきも検討された¹⁾。

1990年代にはコンクリートのケーソン壁の設計にレベル1の信頼性設計法を適用するために、波浪外力の荷重係数を算定している²⁾。2000年近くになって、レベル3の信頼性設計法として下迫ら³⁾によってコンクリートケ

ーソンの期待滑動量の計算法が提案された。滑動量の計算精度の向上が図られ、現在のモデルは実際の設計に応用できる程度まで改良され、いくつかの防波堤はこの手法によって設計されている。このモデルは滑動破壊だけを対象にしているが、転倒や地盤の破壊といった他の破壊モードに係わる破壊も実際の防波堤の被災事例の調査解析によると30%程度生じることが明らかになってきている⁴⁾。近年、円弧滑りによる地盤破壊に対するレベル3モデルが研究開発されようとしている。

従来の仕様規定による設計基準から性能規定による新しい基準に変更するに当たって、レベル3の信頼性設計法ではあらゆる港湾施設の設計に対応できるような段階にはないことに配慮して、部分係数を基本とするレベル1の信頼設計法が標準の手法として採用された。混成防波堤の設計に当たって必要な部分係数の値が整備された⁵⁾。部分係数の値では混成防波堤の実際の被災確率に合うように調整された。すべての準備が整って基準の改定が行われた。

図-3は上記の信頼性設計法に用いられた合田の波圧公式の信頼性を示したものである。この図の横軸は合田公式で算定された波力(P_C)に対する実験から求まる波力(P_E)との比、つまり波力比を示しており、縦軸は正規化した波力比の出現分布をヒストグラム(棒グラフ)で示している。図中の実線は、ヒストグラムから求まる波力比の平均値と標準偏差を用いて設定した正規分布を示している。正規分布はヒストグラムとよく一致しており、波力比が正規分布で表わすことができることを示している。波力比の平均値は0.91となって、合田公式から推定される波力は平均的に約10%大きめに推定していることがわかる。また、合田公式から算定される波力以上にな

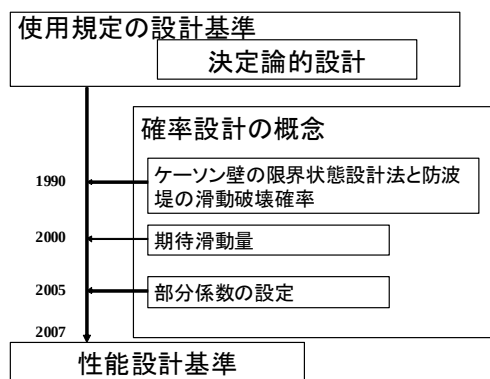


図-2 わが国における防波堤の信頼性設計法の開発の歴史

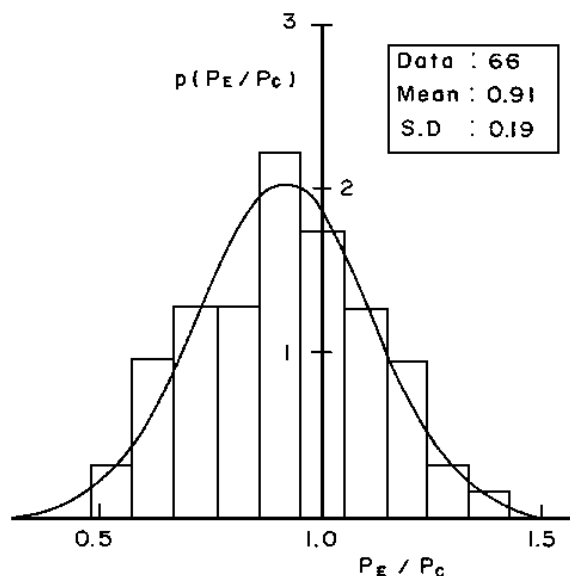


図-3 合田波圧公式の信頼性

る確率も 30% 程度あることがわかる。

また、図-4 はケーソンと捨石マウンドとの間の摩擦係数の分布を示したものである。この図の横軸は、実物大模型を用いた模型実験から得られた摩擦係数を設計で用いられてきた値を用いて正規化した値である。模型実験から得られた摩擦係数の分布をヒストグラムで示し、摩擦係数の平均値と標準偏差から求まる正規分布を実線で示している。摩擦係数の分布は正規分布で表現できることがわかる。正規化した摩擦係数の平均値は 1.06 となっており、設計で用いている値より 6% 大きい。標準偏差が 0.16 になるために、30% 程度の摩擦係数は設計に用いる値より小さくなる。しかしながら、実験では摩擦係数が 0.45 より小さな値のものは得られていない。

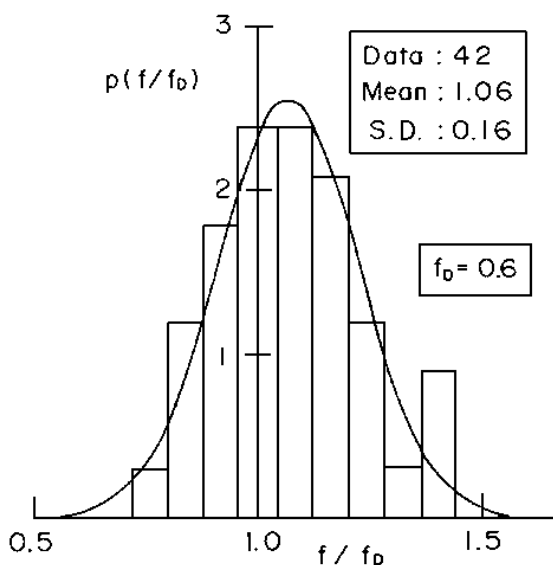


図-4 ケーソンと捨石マウンドの間における摩擦係数のばらつき

3. 新しい設計基準

3.1 部分係数を用いたレベル1モデル

(1) 部分係数

性能関数（破壊関数）は滑動や転倒、円弧滑りといった破壊モードに関して次式のように表すことができる。

$$Z_i = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

ここに、 Z_i は i 番目の破壊モードに対する性能関数 g_i の値であり、 x_j は破壊モードに係わる変数である。 Z_i の値が 0 より小さいときに、破壊が起き、破壊確率は次式で与えられる。

$$P_f(Z_i \leq 0) = \int_{-\infty}^0 p_f(Z_i) dZ_i \quad (2)$$

ここに、 $p_f(Z_i)$ は破壊確率密度関数である。

この確率密度関数が正規分布になると仮定すると、破壊確率は図-5 に示すように式 (4) で定義される安全性指標の関数として次式で表すことができる。

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \quad (3)$$

ここに、 β は安全性指標であり、 Z_i の平均値と標準偏差との比として次式で表される。

$$\beta = \bar{Z}_i / \sigma_{Z_i} \quad (4)$$

ここに、 $\bar{Z}_i$ と σ_{Z_i} は Z_i の平均値と標準偏差である。

混成防波堤の平均破壊確率を被災防波堤の統計解析から求めるなら、現状の破壊確率を維持するとしてこの確率を防波堤の被災の許容確率として採用することができる。わが国においては既存の防波堤の破壊確率の平均値として 8.7×10^{-3} が統計解析から求められている。この破壊確率を安全性指標の値に直すと、2.40 となり、これが許容安全性指標となる。設計中の防波堤の安全性指標がこの許容値を超えていることが確認できれば、この防波堤は既存の防波堤と同程度以上の安全度で設計されていることになる。

破壊関数を破壊点の周りで線形展開すると次式のようにになる。

$$Z_i = \sum_j (x_j - x_j^*) \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right)_{x_j^*} \quad (5)$$

ここで、 x_j^* は破壊点における値であるために次式を満足する。

$$Z_i^* = g_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (6)$$

Z_i の平均値と標準偏差は式 (5) から次式のように求まる。

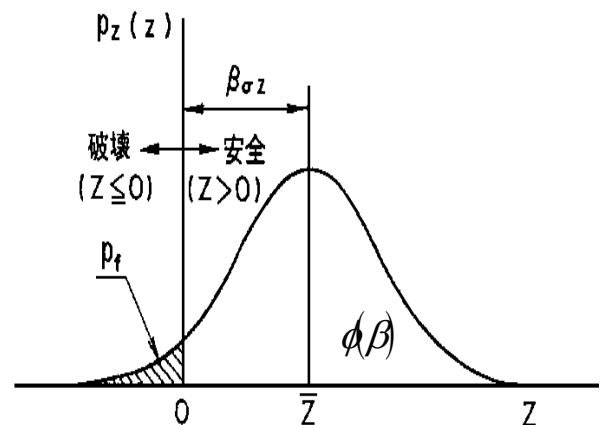


図-5 性能（破壊）関数と破壊確率

$$\bar{Z}_i = \sum_j \left(\bar{x}_j - x_j^* \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{Z_i} = \left[\sum_j \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*}^2 \sigma_{x_j}^2 \right]^{1/2} = \sum_{x_j} \alpha_j \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*} \sigma_{x_j} \quad (8)$$

ここに、 α_j は次式で与えられ、感度係数と呼ばれ、この値が大きいほど標準偏差に大きな影響を与える。

$$\alpha_j = \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*} \sigma_{x_j} / \left[\sum_j \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*}^2 \sigma_{x_j}^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

また、 α_j の自乗和が 1 になるように正規化された形になっている。

設計している防波堤の性能関数の平均値と標準偏差が求まると、安全性指標が計算でき、この値は許容値より大きくならなくてはならない。この条件から、次式のような関係式が求まる。

$$\sum_j \left\{ \bar{x}_j - \alpha_j \beta_a \sigma_{x_j} - x_j^* \right\} \left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*} \geq 0 \quad (10)$$

式 (10) が各変数に対して満足すればよい。しかし、 $\left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*}$ の値は、耐力になるか外力になるかによって正負が変化する。そこで、耐力側と外力側に分けて説明する。

1) 耐力側：構造物の強度や抵抗力に係わる変数

このような変数はその値が大きくなると、耐力は増加し、安全度は増す。その結果、 $\left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*} > 0$ となって、式 (10) は次式のようになる。

$$x_j^* \leq \left[(1 - \alpha \beta_a V_j) \frac{\bar{x}_j}{x_{dj}} \right] x_{dj} \quad (11)$$

式 (9) からわかるように α の値は正になり、() 内は 1 より小さくなる。設計に用いる値 x_{dj} (設計用値) が安全のために平均値より小さければ $\bar{x}_j / x_{dj}$ の値は 1.0 より大きくなる。

2) 外力側：構造物を壊そうとする変数

このような変数は、その値が大きくなると、耐力は減少し、安全度は小さくなり、破壊しやすくなる。その結果、 $\left\{ \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right\}_{x_j^*} \leq 0$ となって、式(10)は次式のようになる。

$$x_j^* \geq \left[(1 - \alpha \beta_a V_j) \frac{\bar{x}_j}{x_{dj}} \right] x_{dj} \quad (12)$$

式 (9) からわかるように α の値は負になり、() 内は 1 より大きくなる。設計に用いる値 x_{dj} (設計用値) が安全のために平均値より大きく偏った値を用いていると、

$\bar{x}_j / x_{dj}$ の値は 1.0 より小さくなる。合田の波圧式では既に述べたように、 $\bar{x}_j / x_{dj}$ の値は 0.91 となる。

以上のことから、設計で用いる耐力や外力に式(11)や(12)の[]内の値を乗じた耐力や外力を用いたとき、性能関数(破壊関数)が破壊点(性能関数=0)になるようになっていけばよいことになる。この[]内の値をレベル 1 モデルにおける部分係数 γ_j と呼んでおり、次式で与えられることになる。

$$\gamma_j = (1 - \alpha \beta_a V_j) \frac{\bar{x}_j}{x_{dj}} \quad (13)$$

以上のことから、部分係数を用いて計算した性能関数が次式を満足すればよいことになる。

$$Z_i^* = g_i(\gamma_1 x_{d1}, \gamma_2 x_{d2}, \dots, \gamma_n x_{dn}) \geq 0 \quad (14)$$

(2) 混成防波堤の設計

混成防波堤の一般的な形状は、図-6 のようになっている。そして、混成防波堤の天端高については、必要な港内静穏度を保つように設定されることが基本であるが、わが国では一般に以下のような基準になっている。

$$h_c = \begin{cases} 0.6H_{1/3} & \text{通常の静穏度} \\ 1.25H_{1/3} & \text{高い静穏度} \end{cases}$$

また、捨石マウンドの高さについては、防波堤からの荷重を基礎地盤に安定して分配するように以下のような基準が一般的になっている。

$$h_m \geq 1.5m$$

通常は 1.5m の高さのものをを用いることが多い。防波堤を建設する水深が与えられ、天端高や捨石マウンドの高さが設定されると、防波堤の幅を堤体が安定するように決めることが重要となる。防波堤の幅としては、滑動や転倒、基礎地盤の円弧滑りといった 3 つの破壊モードに対して安定となる最小の防波堤幅が建設費の観点から採用される。

通常の防波堤では 3 つの破壊モードの中で最も決定的

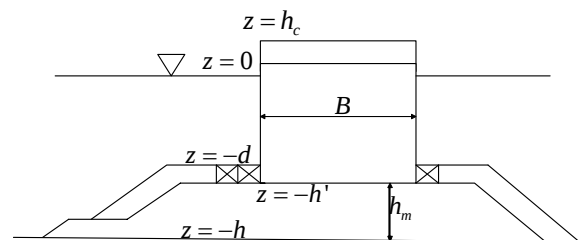


図-6 混成防波堤の一般的な形状

な要素となる滑動破壊モードから防波堤幅を設定する手法について例として述べる。滑動破壊モード解析において必要な部分係数は表-1 に示されている⁶⁾。このような表が他の2つの破壊モードについても示されている。

ケーソンの滑動が生じない安定条件は次式の方程式で表すことができる。

$$f_d(M_d - U_{wd}) - P_{wd} \geq 0 \quad (15)$$

ここに、 M_d と f_d はそれぞれケーソンの単位長さ当たりの水中重量とケーソンと捨石マウンドとの間の摩擦係数を示しており、 U_{wd} と P_{wd} は揚圧力と水平波力を示している。下付き添字 d は設計用値である。式(14)の左辺第1と2項は、それぞれ摩擦抵抗力と波浪水平外力を表している。

式(14)におけるそれぞれの記号は表-1 の部分係数を用いて次式のように表すことができる。

$$M_d = \bar{\omega}_0 B(h' + h_c) - \gamma_{wl} \omega_w B h' \quad (16)$$

$$f_d = \gamma_f f \quad (17)$$

$$P_{wd} = \gamma_P P_w \quad (18)$$

$$U_{wd} = \gamma_U U_w \quad (19)$$

ここに、

$\bar{\omega}_0$: 空気中におけるケーソンの平均単位堆積重量

f : 摩擦係数の特性値

P_w と U_w : 水平波力と揚圧力の特性値

である。

式(16)から(19)を式(15)に代入して、式(15)を満足する最小の堤幅が堤体幅となる。ただし、一般に堤体幅は0.5m 毎に丸めた数値で与えられる。

3.2 混成防波堤の変形設計法

滑動破壊は混成防波堤の設計における主要な要素である。ケーソンが防波堤の耐用年数の間に少し滑動したと

しても、少しの滑動は堤体の安定性や防波堤の機能へ影響を及ぼさない。そこで、ケーソンの少しの移動を許容することができるなら、防波堤の設計はより合理的になると考えられる。この設計法ではケーソンの許容滑動量を設定しなくてはならない。

ケーソンの滑動に対する運動方程式は次式のようになる。

$$M \frac{d^2 x_G}{dt^2} = P_w - f(Mg - U_B - U_w) \quad (20)$$

ここで、

M : ケーソンの質量

x_G : ケーソンの重心位置の水平移動量

t : 時間

g : 重力加速度

U_B : 浮力

ケーソンの滑動量を式(20)によって計算するためには、波浪による水平力や揚圧力の時系列変化を与えるなくてはならない。水平波力については、谷本ら⁷⁾が提案した、図-7 に示したような時系列波形を用いている。波が防波堤ケーソンに衝突したときに衝撃波力が発生し、その後水位の上昇に伴う重複波力が発生するとしたものである。揚圧力についても、図-7 と類似の波形を用いているが、衝撃波力と重複波力のピーク値がいずれも合田の波力公式で求める揚圧力を超えないように設定している。

図-7 に示した波圧の時系列は1波の波に対するものであるが、実際の海の波は不規則波であり、波高の異なる波が何波も来襲してくる。波群の特性を示す有義波の波高が与えられると、波高の出現確率分布はレーリー分布で表すことができるが、ある波高の後にどんな波高の波が来るかは、この確率分布に従ってランダムに現れると考えることができる。さらに、異常時における有義波波高もその海域の特性に合った極値分布に従って現れる。例えば、年最大有義波高も極値分布に従って現れるだけで、次の年にどのような年最大有義波高が起きるのか不明である。このように確率分布に従って出現する量の時系列を求める方法として乱数を用いたモンテカルロ法がある。また、波の諸元が与えられて波力を算定する場合でも、波力公式は図-3 に示したような信頼度を示す。さ

表-1 混成防波堤の設計における部分係数

要素	条件	部分係数
ケーソンと捨石マウンドの間の摩擦係数		$\gamma_f = 0.79$
水平波力と揚圧力	緩傾斜海底	$\gamma_P = \gamma_U = 1.04$
	急傾斜海底	$\gamma_P = \gamma_U = 1.17$
水位	$r_{wl} = 1.5$	$\gamma_{wl} = 1.03$
	$r_{wl} = 2.025$	$\gamma_{wl} = 1.06$
	H.H.W.L.	$\gamma_{wl} = 1$
材料の単位体積重量	鉄筋コンクリート $w_{rc} = 2.54 \text{ tf/m}^3$	$\gamma_{rc} = 0.98$
	コンクリート $w_{nc} = 2.3 \text{ tf/m}^3$	$\gamma_{nc} = 1.02$
	中詰め砂 $w_f = 2.0 \text{ tf/m}^3$	$\gamma_f = 1.01$

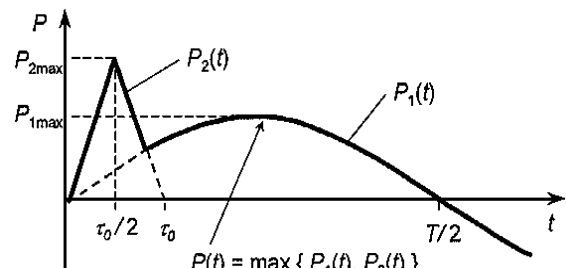


図-7 防波堤に作用する水平波力の時系列変化

らに、摩擦係数も図-4 のようなばらつきを示す。これらに対してもモンテカルロ法で乱数を用いて推定しなければならない。

図-8 はモンテカルロ法を用いて計算した耐用年数 50 年間における防波堤の滑動量を示したものである⁸⁾。図-8 の一番上の図は年最大値の沖波を特定の極値分布からモンテカルロ法によって求めた時系列を示している。そして、この沖波が防波堤建設地点に到達するまでの波浪変形を計算し、この計算値の算定精度も考慮して、防波堤に作用する波高を求めたものが真中の図である。計算値の算定精度を考慮するときにもモンテカルロ法が使われている。このように求めた波高は不規則波の有義値であり、不規則波の波高分布を考慮して 1 波 1 波を求め、その不規則波の波群による滑動量の和を求めたのが下の図である。この図でわかるように、波高の大きな場合しか滑動しないことがわかる。このようにして求めたのは一つの事例に過ぎない。期待滑動量を出すためには、このような事例を数多く行って平均的な滑動量を求めなくてはならない。通常は、このような事例を 5,000 から 10,000 回行って期待滑動量を算出している。

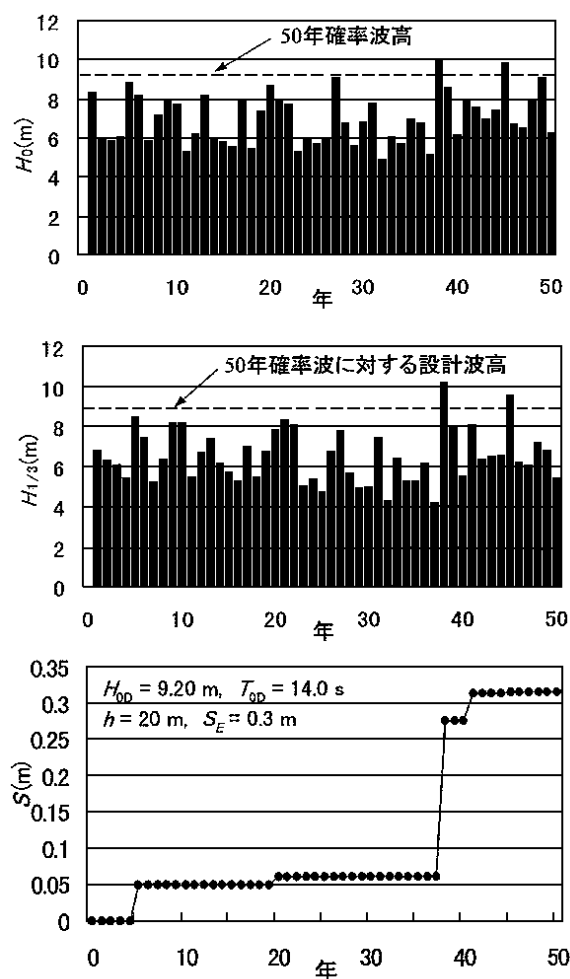


図-8 耐用年数 50 年間における異常波浪の発生とそれによる堤体の滑動量

堤体の期待滑動量を用いて設計する場合、滑動量の許容値を設定する必要がある。しかしながら、沖波の極値分布の形状等によって滑動量の確率分布が異なるため、表-2 に示すように設定した滑動量を超える確率で許容値を与えている。また、滑動量についても 1 つではなく、0.1m と 0.3m, 1.0m の 3 つの量に対して許容超過確率を定め、これらのすべてを満足する条件にしている⁹⁾。また、許容超過確率にしても、防波堤の重要度によって許容超過確率の値を定めている。

表-2 防波堤の重要度に対する期待滑動量の許容値

防波堤の重要度	ケーソンの期待滑動量		
	1.0m以上	0.3以上	0.1以上
低	10%	20%	50%
中	5%	10%	30%
高	2.50%	5%	10%

4. 個別要素法を用いることによる捨石マウンド上のケーソンの挙動計算

4.1 個別要素法

変形を考慮した防波堤の設計では、主要な要素となるケーソンの滑動破壊だけを考慮している。防波堤の被災について統計解析した結果では、滑動破壊が全体の約 70% を占め、主要な被災であるが、残りの 30% は転倒や捨石マウンドの変形、2 つ以上の破壊要素が交じり合った複合破壊であることが明らかになっている¹⁰⁾。実際の防波堤の被災状況を再現するためには、捨石マウンド上のケーソンの挙動を高精度でシミュレートすることである。ケーソンの大変形を伴う挙動をシミュレートする方法として、捨石マウンドの変形が考慮できる個別要素法の適用を試みている^{11), 12)}。個別要素法は、構造物を構成している個々の要素に作用する外力を算定して、その要素の運動方程式を解いて、各要素の変位を求める方法である。防波堤の変形の計算では、防波堤を一つの矩形要素と考え、マウンドの捨石は楕円形状の要素と考えた。このように設定した要素は、次式のような関数形で表すことができる。

$$f_i(x_i, y_i) = \left(\frac{|x_i|}{a_i} \right)^n + \left(\frac{|y_i|}{b_i} \right)^n - 1 = 0 \quad (21)$$

ここで、 $f_i(x, y)$ は i 番目の要素の座標であることを示している。 $n = 2$ なら楕円形を示し、長軸と短軸が等しくなれば円形要素となる。また、指数 n の値が大きくなると、形状は矩形となる。通常は、計算の容易さから円形要素が用いられることが多いが、捨石のような形状の

要素を円形要素で表現すると、要素の回転運動が起き易く、そのために、捨石マウンドの変形が大きく出る。そこで、このような問題を除くために、捨石の形状は楕円形とし、さらに、長軸と短軸の値がそれぞれの要素によって異なるように捨石の形状や重量の変化も考慮できるようにしている。

座標 (x, y) で表わされる点 P は次のように分類できる。

- i) $f_i(x, y) > 0$ のとき、点 P は i 要素の外側
- ii) $f_i(x, y) < 0$ のとき、点 P は i 要素の内側
- iii) $f_i(x, y) = 0$ のとき、点 P は i 要素の表面

このことから、 j 要素上の点 P を i 要素の座標で表すときに、 j 要素上のどの点においてもi)あるいはiii)の条件を満足していれば、 i と j 要素は接触していないか丁度接触している状態になり、両要素は相互に力を及ぼさない。しかしながら、ii)の条件を満足する点があると、その点は相互に相手の内側にめり込んで存在することになり、相互に作用力を及ぼすことになる。作用力としては、もっとも深くめり込んでいる点を求め、その点において法線方向と接線方向に力が作用すると考える。法線方向についてはめり込み量に比例する弾性力とめり込む速度に比例するダッシュポット力に分けて作用させている。また、接線方向についても接線方向の変移に比例するせん断力と変移速度に比例するダッシュポット力が作用するとしている。

i 要素に作用する力としては、 i 要素の周りに存在するすべての要素に関して、ii)の条件を満足する要素を抽出し、それらの要素から上述した法線方向と接線方向の力を受けるとともに、水からも流圧力を受けると考えた。しかしながら、捨石のような要素では流圧力の計算が確立していないことやその力は他の要素から受ける力より小さいと仮定して無視した。ケーソン要素のように要素諸元が大きく、流圧力が無視できない要素については、流圧力を計算して与えている。これらの力に基づいて要素の運動方程式を立て、時系列的に計算を行っている。

4.2 捨石マウンドの形成

捨石マウンドは均一な石で形成されているわけではないので、重量の分布を仮定してそれに合わせて、楕円の形状を変化させたが、楕円の長軸と短軸の比も変化させ、相似な形状の楕円が生じないようにした。捨石マウンドは、厚さを考慮しながら、図-9の最上図に示すように何層かにわたって捨石を配置し、下の層から自然落下させて形成した。落とした石が安定してから次の層の石を落下させることにしている。

単に、何層にわたって自然落下させただけでは、図-9の上から2番目の図が示すように、捨石マウンドの上面が大きな不陸を起こす。このような状態でケーソンを設置すると、ケーソンが不安定になることもあって、マウ

ンド上面の平滑化を図った。平滑化にあたっては、実際の捨石マウンドの形成で潜水夫が行っているように、凸の部分から石を取りそれを凹の部分に置くことにした。ただし、計算では図-9の上から3番目の図が示すように凹部分の上から自然落下させた。

このようにして上面を平滑化した捨石マウンドを図-9の一番下の図が示している。このようにして数値的に形成された捨石マウンドにケーソンを自然落下で設置した。所定の重量のケーソンを落下させると計算が不安定になるために、最初に重量の軽いケーソンを設置し、ケーソンの運動が静止したところで重量を徐々に増やしてゆく方法を取った。

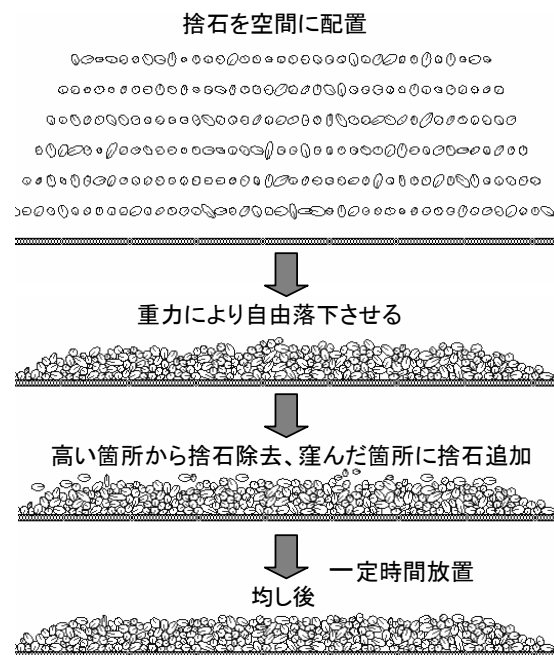


図-9 数値シミュレーションによる捨石マウンドの形成

4.3 ケーソンの挙動計算の精度

作用波力によるコンクリートケーソンの挙動の数値シミュレーションの計算精度を調べるために、実験値との比較を行った。4.2で述べたように、数値シミュレーションによって目標とする捨石マウンドを形成し、その上に実験に用いたと同じ形状のケーソンを設置した。マウンドの捨石は、実験に用いた碎石の重量分布に等しくなるように長軸と短軸の比を変化させた楕円形とした。

ケーソンには、合田の波圧公式で求まる波圧分布をケーソン前面と底面に作用させた。そして、この波圧分布の時間的な変化形状としては図-7に示した時間波形を用いた。ただし、図-7には、負の波圧の時間変化が示されていないが、負の波圧は正の波圧の重複波圧と対称な形状とした。このような波圧によるケーソンの挙動を計算した

が、ケーソンの挙動による波圧分布形状への影響は無視している。また、上述したようにマウンドの捨石には、波力は作用せず、ケーソンを通して力が作用し、それによってマウンドが変形し、ケーソンが運動するとして計算した。

ケーソンの矩形形状を円形要素の集合体として表す場合とひとつの矩形要素として表す場合の二つについて検討した。円形要素の集合体の場合は、個々の円形要素がその運動方程式に従って移動し、移動した円形要素の分布から重心位置と回転角を計算し、重心の移動と同じようにケーソンは変形し、求まった回転角のように回転運動を起こすとして、ケーソンの運動を求め、ケーソンが剛体として円形要素を再配置するように調整して、次のステップに進ませている。ケーソンを一つの要素とする場合には、式(21)の指数を $n = 20$ とした形状で近似している。

滑動水平変位に関する計算値と実験値の比較を図-10に示す。図中の薄墨の点線はケーソンを円形要素の集合体で表した場合であり、太い実線は単一要素でケーソンを表した場合、細い実線で細かい振動状態を示しているのが実験値である。ケーソンを円形要素の集合体で表した場合、計算値の水平変位の振幅は実験値よりかなり大きいけれども、残留変位そのものは実験値とほぼ一致している。一方、一つの要素としてケーソンを取り扱った場合、波の作用によってケーソンがわずかに岸側に移動し、その後ゆっくりと元の位置に向けて返るが、元の位置までは返らず、残留変位が残る。これによって1波毎に残留変位が蓄積してゆく。このような計算の傾向は実験におけるケーソンの運動と同じであり、その運動変位量もよく一致している。しかし、図には示していないが、ケーソンの回転運動については実験ではほとんど現れていないのに対して、計算値でははっきりと現れている。このように、回転運動に関する計算は実験をうまく再現していない。今後、計算法の改良が必要である。

5. あとがき

本論文では、わが国における仕様設計基準から性能設

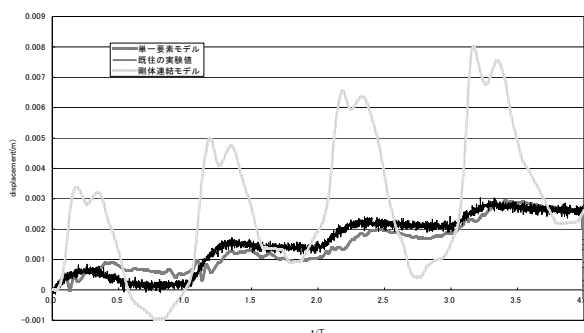


図-10 ケーソンの挙動に関する数値シミュレーションと実験値の比較

計基準に向けての歴史を示すとともに、わが国の性能設計基準についてその概要を示した。わが国の新たな設計基準は部分係数を用いたレベル1の設計法が基本であるが、変形を基本とする設計法もできるようになっている。変形を基本とする設計法では主要な破壊モードであるケーソンの滑動破壊だけを取り入れているが、他に転倒と地盤破壊の2つのモードがある。これら2つの破壊モードについては十分な検討がなされていない。今後、これらの破壊モードに対する変形を考慮した設計法の開発を行わなければならない。

ケーソンの大変形の計算法について個別要素法を用いた方法を紹介したが、ケーソンの回転運動に対する計算精度がまだ十分ではない。計算法の改良が今後の課題である。

最後に、本論文はスペインのヒホンで開催された国際シンポジウムにおいて発表したものを一部修正し、日本語に翻訳したものであることを付記しておく。

参考文献

- 1) 高山知司・池田直太：現行設計法における防波堤の滑動安定性，海岸工学論文集，第38巻，pp.641～645，1991.
- 2) 高山知司・池田直太・立石義博：防波堤の限界状態設計における波浪外力の荷重係数，海岸工学論文集，第38巻，pp.636～640，1991.
- 3) 下迫健一郎・高橋重雄：混成防波堤の期待滑動量の計算法，海岸工学論文集，第41巻，pp.756～760，1994.
- 4) 高山知司・東良宏次郎：防波堤の被災特性に関する統計解析，海洋開発論文集，Vol.18，pp.263-268，2002.
- 5) 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.
- 6) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，p.835，2007.
- 7) 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭：混成防波堤の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル，海岸工学論文集，第43巻，pp.846～850，1996.
- 8) 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利：変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案 一期期待滑動量を用いた信頼性設計法一，海岸工学論文集，第45巻，pp.801～805，1998.
- 9) 下迫健一郎・多田清富：混成堤の性能照査型設計法における許容値設定に関する検討，海岸工学論文集，2005.
- 10) 高山知司・東良宏次郎：防波堤の被災特性に関する統計解析，海洋開発論文集，Vol.18，pp.263-268，2002.
- 11) 高山知司・東良宏二郎・金 泰民：個別要素法を用いた混成堤の挙動計算，海岸工学論文集，第51巻，pp.756-760，2004.
- 12) 高山知司・高橋通夫：ケーソンを単一要素とした個別要素法による混成堤の挙動計算，海岸工学論文集，第53巻，pp.841-845，2006.