

性能設計活用による防波堤の設計合理化について

興野俊也*・赤石沢総光**・阿部光信***・長船 徹***

1. はじめに

近年, 土木設備のコスト縮減と安全性の確保という二律背反の要求をバランスさせながら設計を行うことが土木技術者の大きな役割の一つとなりつつある。このような社会ニーズに応えるための設計概念として「性能設計」が注目されている。性能設計とは, 目標とする要求性能を明確にし, 仮定した構造諸元により発揮される保有性能がその要求性能を満足することを直接確認する設計体系といえる。従来用いられてきたケーソン式防波堤の設計法は, ケーソンがわずかでも変形した場合に被災と考えている。しかし, ケーソンが変形してもその変形量が小さければ防波堤の性能が損なわれるわけではない。したがって, 港湾および港湾施設の重要度や機能などに基づき, 防波堤の本来必要な性能を明確にし, 耐用期間中の滑動, 沈下などの変形挙動を精度よく評価できれば, 経済性と安全性の確保という二律背反の両立が可能となり, 従来設計に比べ合理的な性能設計体系を確立することができる。

防波堤の設計に対しては, 下迫・高橋 (1998) が「混成堤の期待滑動量を用いる信頼性設計法」を提案し, 防波堤の要求性能に応じた変形量の許容値を設定することにより合理的な堤体断面の設定が可能となった。一方, 防波堤の安定性には滑動の他に地盤支持力も重要な破壊モードであり, 特に大水深部防波堤においては支持力安定性によって断面が決まることも多い。この問題に対しては, 防波堤の支持力不足による沈下量算定モデルが土田・湯 (1996) により提案されている。

本研究では, 防波堤の性能設計活用による設計合理化, 実用化の一環として, 設計上クリティカルとなる滑動と沈下の 2 つの破壊モードを考慮した設計法を提案するとともに, その安全評価方法として, 変形量だけでなく機能損失確率などの確率値やライフサイクルコストなどの経済指標を用いた評価方法の適用性を明らかにした。さらに沈下による破壊モードがクリティカルとなる半没水

上部斜面堤の滑動量, 沈下量の試算を行い, 半没水上部斜面堤の有効性を示した。

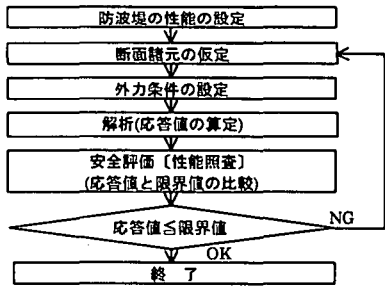
2. 防波堤の性能設計の考え方

(1) 性能設計の手順

図一1に防波堤の性能設計の手順を示す。まず, 設計地点の自然条件や港湾の利用状況, 制約条件等の社会条件等を考慮して防波堤の要求性能を設定し, 気象・海象条件, 地形・地盤条件, 材料特性や外力条件などを明確にする。そして, これらの条件に基づき, 適切な解析手法を用いて応答値を算定し, 応答値と限界値の比較により性能を直接照査する。この解析手法や照査方法には簡便な方法から詳細な方法まで複数の手法があるが, 今回の検討では, モンテカルロ法による信頼性解析手法を用いて防波堤の滑動量, 沈下量の確率分布を算定し, 直接的に安全性を評価する方法を用いた。表一1に従来設計と性能設計の比較を示す。性能設計は従来設計の破壊安全率による確定評価と異なり, 耐用年数間に来襲する波浪に対して滑動量, 沈下量の確率値で評価する方法である。

(2) 防波堤の性能の設定

防波堤の性能設定では, 港湾および港湾施設の機能の分析評価を行い, 施設の重要度に応じた外力に対して防



図一1 防波堤の性能設計の手順

表一1 従来設計と性能設計の比較

項目別	従来設計	性能設計
性能設定	概念的	明示的
限界状態	堤体動かず	堤体動く
解析手法	釣合い式	運動方程式
安全評価	確定評価	確率評価

* 正会員 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ
** 正会員 工修 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ
*** 正会員 工修 東京電力(株)第二土木本部

表-2 要求性能と目標性能の例

性能の分類	耐波性能1 (健全)	耐波性能2 (機能保持)	耐波性能3 〔長期機能〕 〔喪失回避〕
要求性能	港湾内の諸作業、設備に全く影響がない。	港湾内の諸作業、設備への影響は軽微で運用上問題ない。	港湾内の諸作業に長期的な影響を生じない。
目標性能	船舶、荷役などに影響を及ぼす防波堤の変形がほとんどない。	船舶、荷役などに影響を及ぼす防波堤の有害な変形がない。	港内諸施設に重大な影響を及ぼす防波堤の大変形がない。
照査項目	変形量・確率量・経済指標 等		

波堤が保有すべき性能を整理した。港湾の物流、生産機能から展開される防波堤に必要な機能は、船舶の安全な係留と荷役や人の乗降のための水域確保となる。

この防波堤の機能に基づいて整理した要求性能と目標性能の例を表-2に示す。「要求性能」と「目標性能」は、構造物の用途等から所有者が求める性能、要求性能を満たすために設計で実現する性能と定義した。防波堤の性能の区分は、その破壊による人命への影響は小さいと考えられるため、主に復旧難易度と復旧費を考慮して、健全、機能保持、長期機能喪失回避という被災レベルに対応した3段階とした。また、耐波性能3を超える被災レベルは機能損失レベルと考えた。なお、安全評価（性能照査）では、表-2の目標性能の満足度を確認するために、適切に照査項目とその許容値を決めて照査する。

(3) 防波堤の変形量算定方法

防波堤の変形量には、滑動量と沈下量がある。防波堤の滑動量の算定方法は、堤体滑動時の運動方程式に基づく谷本ら（1996）の滑動量算定モデル（1波あたりの滑動量算定モデル）を用いた。すなわち、(1)式に示す堤体の加速度を2回数値積分することにより堤体の変位を求めるものである。

$$(W/g + M_a) \cdot \ddot{x}_c = P - F_R - F_D \quad (1)$$

ここで、 W は堤体の空中重量、 g は重力加速度、 M_a は付加質量、 F_R は摩擦抵抗力、 F_D は流体抵抗力である。

また、 P は水平波力で、その時間変化は碎波力を対象とした三角形近似の波力モデルと重複波圧のような作用時間が長い正弦波近似の波力モデルを組み合わせたモデルを用いた。沈下量の算定方法は、円弧すべり解析法に基づく土田・湯（1996）による沈下量算定モデル（1波あたりの沈下量算定モデル）を用いた。すなわち、(2)式に示す円弧すべりの回転角加速度 $\ddot{\theta}$ を2回数値積分して回転角度 $\Delta\theta$ を求め、(3)式にて鉛直移動量、すなわち沈下量を求めるものである。ただし、1波あたりの波力の時間変化は、滑動量の算定方法と同様に、三角形

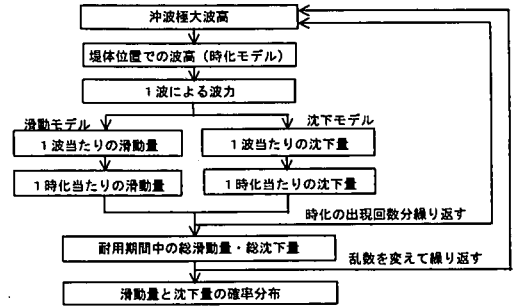


図-2 変形量の確率分布算定フロー

近似と正弦波近似の組み合わせモデルとした。

$$I \cdot \ddot{\theta} = M \cdot g \quad (2)$$

$$S = \Delta\theta \cdot R \cdot \sin \theta \quad (3)$$

ここで、 I はケーソンを含めた円弧すべり原点に関する円弧すべり体の形状二次モーメント、 M は円弧すべりの起動モーメントと抵抗モーメントの差分で水平波力 P の関数、 g は重力加速度、 R は円弧すべり体の半径、 S は沈下量である。

また、防波堤の滑動量、沈下量算定における時化の経時変化については、太平洋岸の代表3地点における波浪観測の高波浪データに基づいて設定した極大波高と時化の継続時間の関係式を用いた（阿部ら，1999）。

本検討では、耐用期間中の防波堤の変形挙動として図-2に示す設計条件の推定誤差やばらつきを考慮したモンテカルロ法（下迫・高橋，1998）を用いて、防波堤の滑動量と沈下量の確率分布の算定を行い、堤体の安全性を評価した。

(4) 安全性評価手法の検討

性能設計体系において設計合理化を実現するためには、従来設計の破壊安全率に替わり要求性能の照査をより直接に行うための安全指標を用いるとともに、その限界値を適切に設定することが重要である。安全性評価にあたっては、算定される滑動量、沈下量の確率分布を用いて変形量により安全性を評価する方法、機能損失確率により安全性を評価する方法、ライフサイクルコストを用いて安全性を評価する方法の3つの手法を用いて評価することとした。

3. 性能設計活用による直立ケーソン堤の試験設計

(1) 計算条件

以上の性能設計の考え方を適用して、直立ケーソン堤の試験設計を行った。検討対象防波堤モデルは図-3に示すとおりである（設置水深：D.L-20.0 m，設計波： $(H_{1/3})_0 = 8.24$ m， $(T_{1/3})_0 = 14.0$ s，滑動許容安全率：1.2，支持力許容安全率：1.0）。検討ケースは堤体幅 B をパラ

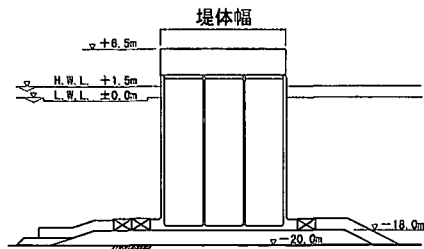


図-3 検討対象防波堤断面

メータ (19.2m~17.0m) とした5ケースで、滑動量、沈下量の計算では耐用期間は50年間、高波浪の出現回数は50回(1回/年)とした。モンテカルロ法で考慮する設計条件のばらつき、推定誤差については、コンクリートと中詰め材の単位体積重量は常陸那珂火力発電所護岸工事の施工実績等による分析結果から確定値とし、潮位は福島第一原子力発電所での潮位観測データより平均潮位を中央値とする正規分布で近似した。沖波極大波高、波浪変形係数、波力算定、摩擦係数の平均値の偏りと変動係数は下迫・高橋 (1998) の提案値を、基礎マウンドと海底地盤の単位体積重量およびその他物性値については長尾ら (1997) の提案値を用いた。確率変数の分布形は正規分布とし、確率変数の上下限値は $\pm 2\sigma$ とした。

(2) 防波堤の安全性評価

以上の計算条件に従って、図-3に示すモデル防波堤の耐用期間中の滑動量と沈下量の確率分布を算定した。安全評価指標としては変形量による評価、確率値による評価、経済指標を用いた評価があるが、いずれに対しても適用にあたっては滑動ならびに沈下の損傷モードに対する被災レベルを設定する必要がある。

図-4に滑動と沈下の被災レベルと耐波性能の関係を、図-5に被災レベルと復旧費の関係を示す。

被災レベルは、被災の実績や解析手法の精度ならびに被災時の挙動評価などにより設定すべきであるが、本検討では、健全、機能保持、長期機能喪失回避の3段階の耐波性能に応じた滑動、沈下の変形量と変形量から決まる各々の復旧費用の違いを考慮して被災レベルを設定した。また、被災レベル4は防波堤の機能損失レベルとし、滑動は捨石マウンドから堤体が転倒する限界として10.0m以上、沈下は沈下による防波堤の転倒の有無や港内静穏度の悪化などを考慮して2.0m以上とした。

表-3に、各検討ケースでのそれぞれの評価指標に対する算定結果を示す。

a) 変形量による安全性評価

この評価方法は、(4)式に示すように、滑動量、沈下量の確率分布から期待滑動量、期待沈下量を求め、これらの値が設定した限界値(許容期待滑動量、許容期待沈

滑動被災	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4
沈下被災	0.0~0.1m	0.1~0.3m	0.3~10.0m	10.0m以上
レベル1	耐波性能1			
レベル2	0.3~0.5m	耐波性能2		
レベル3	0.5~2.0m		耐波性能3	
レベル4	2.0m以上			機能損失

図-4 被災レベルと耐波性能との関係

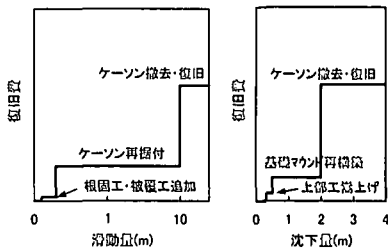


図-5 被災レベルと復旧費の関係

表-3 各評価指標の算定結果

ケース	変形量期待値 (cm)		機能損失確率	ライフサイクルコスト (千円/m)
	滑動量	沈下量		
B=19.2 m	3.2	0.8	5.0×10^{-4}	15,150
B=18.5 m	7.6	4.9	3.5×10^{-3}	15,000
B=18.0 m	12.6	12.9	7.1×10^{-3}	14,930
B=17.5 m	21.4	36.5	1.2×10^{-2}	14,940
B=17.0 m	34.8	49.5	2.5×10^{-2}	15,190

下量) 以下であることを確認する方法である。

$$S_E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \leq S_{Ea} \cap D_E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_i \leq D_{Ea} \dots (4)$$

ここで、 S_E は期待滑動量、 S_{Ea} は許容期待滑動量、 D_E は期待沈下量、 D_{Ea} は許容期待沈下量、 m はシミュレーションの繰り返し回数である。

許容期待滑動量については、耐波性能2に相当する機能維持レベルとして、下迫・高橋 (1998) と同様に、滑動量の推定誤差が小さいこと、ケーソン側壁の破壊を防ぐこと、被災基準と同程度であることを考慮して30cmとした。また、許容期待沈下量については、沈下量50cmが生じた場合の港内波高の増大が2%程度で荷役作業に影響がない程度であると判断して50cmとした。

変形量による評価では、(4)式を満足するのは堤体幅 $B=17.5$ mのケースであり、従来の破壊安全率で決定される堤体幅 $B=19.2$ mよりも1.7mの縮減となる。また、従来設計法で決定された断面では期待滑動量に比べて期待沈下量が小さくなっていたが、このケースでは期待滑動量よりも期待沈下量が大きくなっている。

b) 機能損失確率による安全性評価

この評価方法は、港湾の長期機能喪失の回避という観点から防波堤の機能損失の被災確率を設定し、機能損失確率の許容値との比較により評価する方法で、終局限界

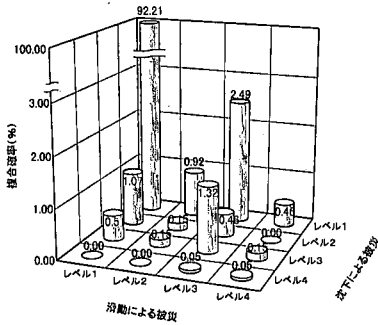


図-6 滑动と沈下の複合頻度分布 (B=18.0 m の場合)

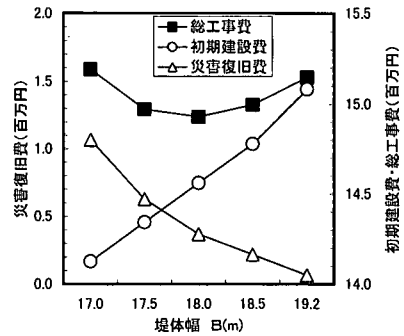


図-7 ライフサイクルコスト曲線

としてのある限界変形量を超過することにより復旧費用が急激に増大するリスクを極力回避したいという考え方に基づいている。安全性評価は(5)式により行った。

$$P_F = \sum_{i < 4} P_{F_{i,j}} + \sum_{j < 4} P_{F_{i,j}} + P_{F_{4,4}} \leq P_{Fa} \quad (5)$$

ここで、 P_F は滑动と沈下の両破壊モードによる機能損失確率、 $P_{F_{i,j}}$ は滑动の被災レベルが*i*で沈下の被災レベルが*j*であるときの確率、 P_{Fa} は機能損失確率の許容値である。滑动と沈下の両事象は解析上個別に扱っているが、モンテカルロ法による1シミュレーションで1組の滑动量と沈下量が求まり、図-6に例示するような複合確率分布が算定できる。機能損失確率の許容値については、長尾(1999)による日本の防波堤の許容破壊確率は約 $5 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-3}$ 程度との報告より、本検討では滑动と沈下の両モードによる許容値を平均的な 10^{-2} と考えた。

機能損失確率による評価では、(5)式を満足するのは堤体幅 $B=18.0$ m もしくは $B=17.5$ m のケースであり、変形量による評価と同程度の堤体幅になる。

c) ライフサイクルコストによる安全性評価

この評価方法は、被災が生じた場合のコスト増分である災害復旧費と初期建設費を考慮するライフサイクルコスト最小化基準により評価するものである。本検討では、荷役停止や資産、人命の損失などの間接被害費用を試算の対象としないこととした。ライフサイクルコストは、図-5の復旧費用と図-6に示す滑动と沈下の複合確率に基づいて(6)式により算定した。

$$LCC = C_i + \sum_{i=1}^{44} C_{F_{i,j}} \cdot P_{F_{i,j}} \quad (6)$$

ここで、 LCC はライフサイクルコスト、 C_i は初期建設費、 $C_{F_{i,j}}$ は滑动の被災レベルが*i*で沈下の被災レベルが*j*であるときの復旧費用を表す。

ライフサイクルコストの算定結果は、図-7に示すとおりで、ライフサイクルコストが最小となるのは堤体幅 $B=18.0$ m のケースで従来よりも1.2 mの縮減となる。ただし、ライフサイクルコストは堤体幅が17.5 m～18.5

mで大きな違いはなく、変形量や機能損失確率で決定される堤体幅と同程度となることが分かった。

以上、3つの安全評価手法による検討結果を示したが、今回提示した許容値による評価法はいずれもほぼ同じ堤体幅(17.5～18.0 m)の断面を与え、安全評価手法としてはどの方法を用いても同じ設計案が得られる可能性が示唆された。このとき、従来設計との比較によるコストダウンは初期建設費で4%程度、ライフサイクルコストで2%程度となる。また、実務設計では、基本となる変形量による設計法に加え、機能損失確率やライフサイクルコスト評価手法も補完的に用いて防波堤の安定性を総合的に評価することが重要であると考えられる。

4. 半没水上部斜面堤の有効性評価

防波堤の性能設計に基づく構造形式の違いによる堤体の耐波安定性の相違を把握するため、図-8に示す半没水上部斜面堤に対する滑动量、沈下量の試算を行った。

半没水上部斜面堤は、防波堤の港外側側壁の静水面付近を斜面壁とした構造で、斜面壁および直立壁に作用する水平波力の低減と斜面壁に作用する鉛直波力により堤体断面の縮小が期待できる新形式防波堤である。

本検討では、直立ケーソン堤と比較するために、従来設計法での滑动安全率、支持力安全率のそれぞれを同じにした2断面を検討した。なお、堤体に作用する波力は細山田ら(1994)の波力算定式を用いた。

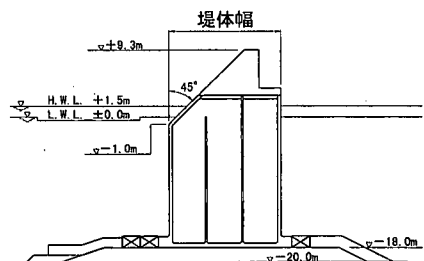


図-8 半没水上部斜面堤

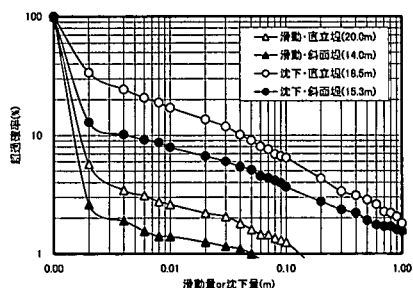


図-9 滑動量, 沈下量の確率分布

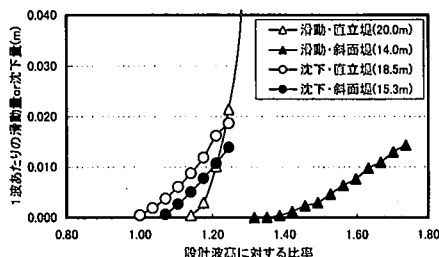


図-10 1波あたりの滑動量, 沈下量

図-9は、半没水上部斜面堤および直立ケーソン堤の滑動量, 沈下量の超過確率を示したもので、△が滑動安全率を同じにした断面の滑動量、○が支持力安全率を同じにした断面の沈下量で、それぞれ白抜きが直立ケーソン堤、黒塗りが半没水上部斜面堤である。これによれば、滑動、沈下いずれの損傷モードでも、変形量の超過確率が直立ケーソン堤に比べて半没水上部斜面堤の方が小さくなっている。これは、半没水上部斜面堤は波力を低減していることならびに斜面の効果により鉛直下向きの荷重が作用しているため滑動量が小さくなっており、沈下量も同様に円弧すべりのモーメントの差分が小さくなっているものと考えられる。

一方、図-10は半没水上部斜面堤と直立ケーソン堤の同一安全率の断面に対する1波あたりの滑動量および沈下量を比較したものである。これによれば、堤体の滑動あるいは沈下が起こる波高値は直立ケーソン堤よりも半没水上部斜面堤の方が高くなっており、また同一波高レベルで比較しても直立ケーソン堤の方が滑動量, 沈下量が大きくなっている。

また、半没水上部斜面堤は波高の増大に伴い滑動量が徐々に大きくなるのに対して、直立ケーソン堤は急激に増大する。沈下量については、波高の増大に伴い両形式とも同様な傾向を示した。

以上のことから、半没水上部斜面堤と直立ケーソン堤とでは、同レベルの安全率、すなわち従来設計法で同程度の安全性を持つ断面であっても堤体の滑動量, 沈下量では差が見られ、半没水上部斜面堤の方が耐波安定性に

優れたねばり強い構造であることが明らかになった。

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- ① 防波堤の機能と要求される性能を明確にし、高波浪来襲時の耐波性能を3段階に区分する考え方を提案した。
- ② 滑動と沈下の両破壊モードに対するモンテカルロ法による安全性評価方法の考え方を提案した。
- ③ 防波堤の要求性能を直接照査するために、変形量による評価、機能損失確率による評価、ライフサイクルコストによる評価手法を提案し、適切に許容値を設定することでどの評価手法を用いてもほぼ同じ設計案が選択されることが分かった。
- ④ 防波堤の設計に性能設計の考え方を採り入れることにより、従来設計と比較し設計合理化が図れることを示した。
- ⑤ 防波堤の変形挙動を考慮した設計法を用いることにより、従来の破壊安全率で評価できなかった滑動と沈下の相互関係や構造形式の違いによる耐波安定性の相違も評価できることが明らかになった。

本研究は、防波堤の変形を許容した設計法の実務への展開の一環として実施したものである。今後、実設計への適用に当たり、より簡易な設計法を構築する必要があるとともに各種評価手法でバランスのとれた評価ができる設計体系を構築していく予定である。また、港湾、海岸施設において最適な防災水準を設定する手法の一つとして適用検討を実施していきたい。

参考文献

- 阿部光信・興野俊也・長船 徹・貝沼遼男 (1999): 防波堤の信頼性設計法における時化のモデル化について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 916-920.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第3号, pp. 1-30.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭 (1996): 混成堤直立部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.
- 土田孝・湯怡新 (1996): 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率, 港湾技術研究所報告, 第35巻, 第1号, pp. 117-145.
- 長尾 毅 (1999): 防波堤の全体系安全性のレベル1, レベル2の信頼性設計, 港湾構造物設計事例集, 第3編, pp. 15-36.
- 長尾 毅・門脇陽治・土田 孝・寺内 潔 (1997): 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性(第2報)～支持力安全性に関する検討～, 港湾技術研究所報告, 第36巻, 第1号, pp. 25-57.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利 (1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 706-710.