

半没水上部斜面ケーソン式防波堤への 性能設計の適用について

STUDY ABOUT APPLICATION OF PERFORMANCE-BASED DESIGN TO HALF-SUBMERGED SLOPING TOP CAISSON BREAKWATER

興野俊也¹・安田勝則¹・赤石沢総光²・
長船徹³・阿部光信³

Toshiya KYONO, Katsunori YASUDA, Nobuhiko AKAISIZAWA,
Toru OSAFUNE and Mitsunobu ABE

¹正会員 東京電力株式会社電力技術研究所土木グループ (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

²正会員 修(工) 東京電力株式会社電力技術研究所土木グループ (同上)

³正会員 東電設計株式会社第二土木本部港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野三丁目3-3)

The Performance-Based Design can be used as a method of rationally determining the section of a breakwater. We have already proposed the designing method of the breakwater for two failure modes of sliding and settlement as well as its safety evaluation method. In this paper, the above methods are applied to a half-submerged sloping top caisson breakwater and the stability against wave action is studied, considering the applicability of safety indexes and the difference of the structural type. As a result, it is shown that there is the difference between each section designed by the amount of expected deformation, function loss probability, and life-cycle cost, for a half-submerged sloping top caisson breakwater. This result is different from that for a vertical caisson breakwater. Also, it is found that it is important to control the function loss probability, which is here defined as the occurrence probability of the breakwater's fatal damage.

Key Words : *performance-based design, reliability design method, sliding distance, settlement rate, function loss probability, half-submerged sloping top caisson breakwater*

1. まえがき

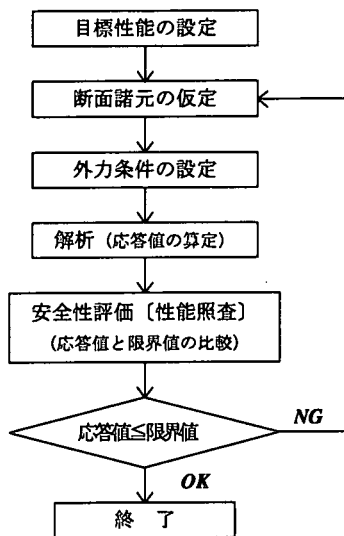
近年の土木設備のコスト縮減と安全に対する信頼性確保の観点から「性能設計」が注目されている。これは、構造物の必要性能に基づいて目標とする要求性能を明確にし、構造断面の保有性能がその要求性能を満足することを直接照査する設計体系である。港湾施設としての防波堤に必要な機能は、利用する船舶が安全に航行、係留、荷役できる水域を確保することであり、その機能が維持できれば防波堤の滑動、沈下などの変形はある程度許容でき、防波堤の性能に応じた合理的な断面設計が可能となる。

防波堤の変形を考慮した設計法については、下迫・高橋¹⁾が期待滑動量を用いる信頼性設計法を提案し、堤体の滑動変形に対して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であることを示した。また、土田・湯²⁾は、防波堤の支持力

安定性に着目して堤体の沈下量を推定するモデルを提案している。一方、著者ら³⁾は、防波堤の性能設計活用による設計合理化の一環として、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、試設計を通じてその安全性評価方法の適用性を明らかにした。しかし、これらの研究はいずれも直立ケーソン堤を対象としており、その他の構造様式に対する適用性や構造様式による安定性の相違については検討されていない。

そこで、本論文では、経済的な大水深部防波堤である半没水上部斜面ケーソン堤を対象として、著者ら³⁾が提案した堤体の滑動と沈下を考慮した設計法とその変形に基づく安全性評価方法の適用性を検討した。さらに、直立ケーソン堤との比較により半没水上部斜面ケーソン堤の変形特性、耐波安定性について評価した。

2. 性能設計の半没水上部斜面ケーソン堤への適用方法



図－1 防波堤の性能設計の手順

(1) 性能設計の手順と目標性能の設定

防波堤の性能設計は図－1 の手順で行う。まず、港湾の利用状況、制約条件等に基づいて港湾および港湾施設に必要とされる性能を明確にして防波堤の目標性能（必要とされる性能を満たすために設計で実現しようとする性能）を設定する。そして、設計対象地点の気象・海象条件、地形・地盤条件、材料条件や外力条件などを設定し、防波堤の性能の照査項目である堤体の滑動・沈下量とその発生確率分布を各種設計条件の推定誤差、ばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションにより算定する。求めた堤体の滑動・沈下量、発生確率分布などの応答値は目標性能に基づいて設定した限界値（許容値）との比較により、保有性能を直接照査する。

表－1 は防波堤の目標性能と各性能レベルに対する滑動量と沈下量の限界値の案をまとめたものである。ここで、耐波性能2の限界値は既往の研究^{1), 3)}を参考に防波堤の機能が維持できる変形量として、耐波性能3の限界値は防波堤が壊滅的な被害を受ける変形量として設定した。

合理的な設計を行うためには、適切な安全性評価指標と許容値を設定する必要がある。著者ら³⁾は、滑動・沈下量の確率分布に基づく変形量（期待滑動量、期待沈下量）による評価、防波堤としての機能損失の確率による評価、ライフサイクルコスト（LCC）による評価の3つの安全性評価指標を示すとともに、変形量による評価では耐波性能2の限界値を許容値とし、機能損失確率による評価では耐波性能3を越える変形量の発生確率を日本の防波堤の許容破壊確率以下（ 1×10^{-2} 以下）⁴⁾とすることを提案した。

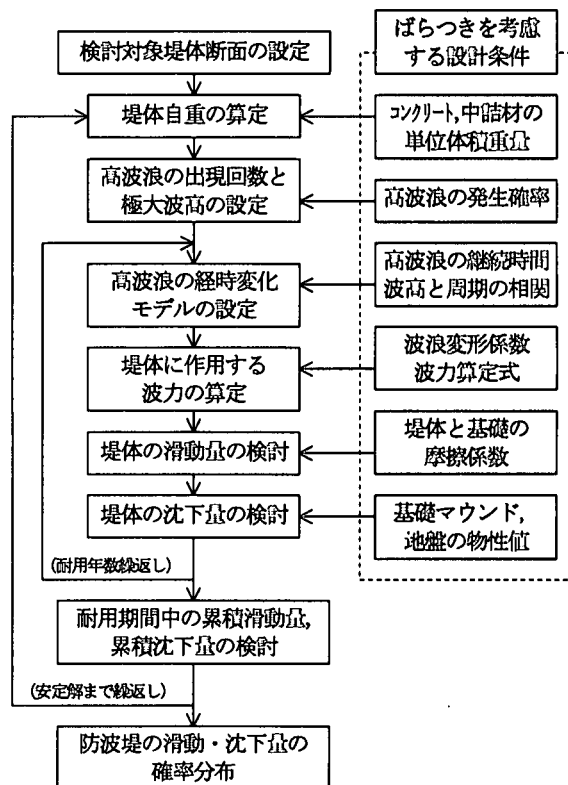
(2) 半没水上部斜面ケーソン堤の

滑動・沈下量の算定方法

図－2 は防波堤の滑動・沈下量の確率分布の算定フローである。この方法は、耐用期間中の高波浪の来襲頻度

表－1 防波堤の目標性能と性能レベルに対する限界値

性能分類	要求性能	目標性能	限界値	
			滑動量	沈下量
耐波性能1 (健全)	港湾内の諸作業、設備に全く影響ない	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	0.0～0.1m	0.0～0.3m
耐波性能2 (機能保持)	港湾内の諸作業、設備への影響は軽微で運用上問題ない	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	0.1～0.3m	0.3～0.5m
耐波性能3 (長期機能喪失回避)	港湾内の諸作業に長期的な影響を生じない	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	0.3～10.0m	0.5～2.0m



図－2 滑動・沈下量の確率分布の算定フロー

を仮定し、1 回の高波浪（時化）による滑動量・沈下量の計算を来襲波浪回数分繰り返して、耐用期間中の総滑動量・総沈下量を求めるものである。堤体に作用する高波浪などの設計条件については、その推定誤差やばらつきをモンテカルロシミュレーションによって考慮する。

半没水上部斜面ケーソン堤では波力の評価方法が特徴的である。図－3 は細山田ら⁵⁾が提案した半没水上部斜面ケーソン堤の波力算定式の模式図である。堤体に作用する波力は、斜面壁の効果によって、水平波力が合田式に比べて小さくなるとともに、斜面壁部は鉛直方向に堤体を押さえ込む鉛直波力が作用する。半没水上部斜面ケーソン堤の滑動量、沈下量の算定にあたっては、このような効果を考慮する必要がある。

1 波あたりの滑動量算定モデルについては、谷本ら⁷⁾の堤体滑動時の運動方程式に基づくモデルを用いた。すなわち、(1)式に示す堤体の加速度 $\ddot{x}_0$ を 2 回数値積分することにより堤体の変形量を求めるものである。

$$P_{SH} + P_{VH} = \lambda_{SL}' P_1 \sin^2 \alpha + \lambda_v P_2$$

$$-P_{SV} + P_U = -\lambda_{SL}' P_1 \sin \alpha \cos \alpha + 0.5 P_U B$$

λ_{SL}' : 斜面壁部に作用する波力の補正係数
 λ_v : 直立壁部に作用する波力の補正係数

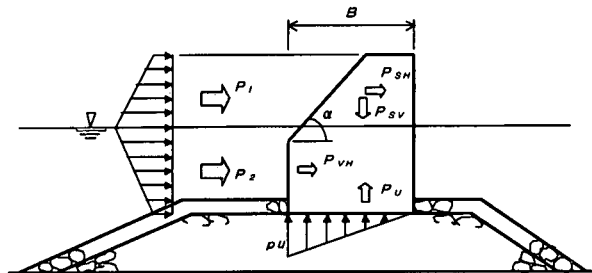


図-3 半没水上部斜面ケーソン堤の波力算定法

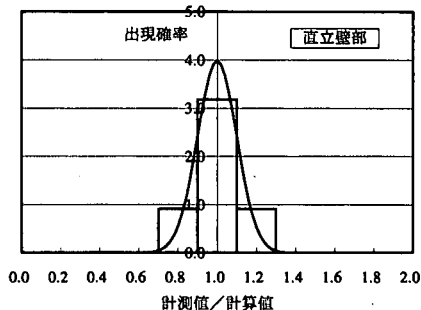
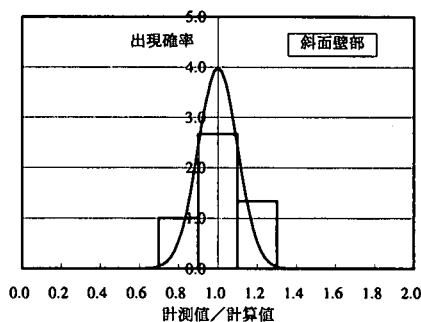


図-4 波力算定式の推定精度

式⁵⁾による計算値の比、縦軸に実験での計測頻度を示している。図中の曲線は合田式による波力の推定誤差として下迫・高橋¹⁾が提案した平均的偏りが $\alpha = 0.00$ 、変動係数が $\gamma = 0.10$ の正規分布である。これによれば、半没水上部斜面ケーソン堤の波力の推定誤差は、斜面壁部と直立壁部のいずれにおいてもほぼ正規分布で近似でき、その平均的偏り、変動係数は合田式に対する値でよいものと推察された。

3. 半没水上部斜面ケーソン堤の滑動・沈下量の試算

以上の半没水上部斜面ケーソン堤の性能設計の適用方法を用いて、モデル防波堤に対する滑動量、沈下量の試算を行った。検討対象防波堤断面は図-5に示すとおりで、設置水深は-20.0m、-16.0mの2タイプ、堤体幅は表-2に示す全9ケースとした。設計沖波は、いずれの断面も $(H_{1/3})_o = 8.2m$ 、 $(T_{1/3})_o = 14.0s$ で、高波浪の極値統計分布はWeibull分布($k = 2.00$)、高波浪の出現回

検討対象断面諸元

設置水深(h)	20.0m	16.0m
マウンド水深(d)	18.0m	14.0m
斜面下端までの高さ(dc)	2.5m	2.5m
天端までの高さ(hc)	7.8m	7.6m

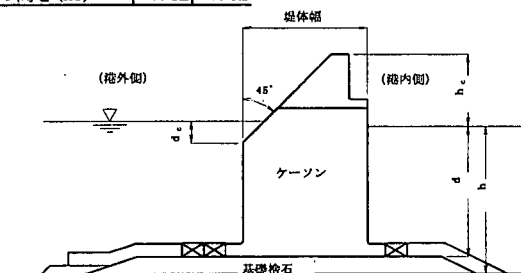


図-5 検討対象断面

$(W/g + M_a)\ddot{x}_G = P - F_R - F_D$ (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、 P は水平波力、 F_R は摩擦抵抗力、 F_D は流体抵抗力である。半没水上部斜面ケーソン堤の場合、水平波力 P と摩擦抵抗力 F_R がそれぞれ次式ようになる。

$$P = P_{SH} + P_{VH} \quad (2)$$

$$F_R = \mu(W + P_{SV} - P_U) \quad (3)$$

ここで、 P_{SH} 、 P_{VH} はそれぞれ斜面壁部と直立壁部の水平波力、 P_{SV} は斜面壁部の鉛直波力、 P_U は揚圧力、 μ は堤体と基礎の摩擦係数である。

1波あたりの沈下量算定モデルは、土田・湯²⁾の円弧すべり解析法に基づくモデルを用いた。すなわち、(4)式に示す円弧すべりの回転角加速度 $\ddot{\theta}$ を2回数値積分することにより回転角度 $\Delta\theta$ を求め、(5)式にて鉛直移動量、すなわち沈下量を求めるものである。

$$I\ddot{\theta} = Mg \quad (4)$$

$$S = \Delta\theta \cdot R \cdot \sin \theta \quad (5)$$

ここで、 I は堤体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 M_D と抵抗モーメント M_R の差分、 g は重力加速度、 R は円弧すべり体の半径、 S が沈下量である。半没水上部斜面ケーソン堤の場合、円弧すべりの起動モーメント M_D の算定において、その作用外力に水平波力の低減と鉛直波力を考慮する。

なお、以上の滑動量、沈下量の算定方法はいずれも1波あたりの変形量を対象としており、これを有義波諸元で代表される1回の波群に展開するためには、波高階級ごとの出現波数をレーリー分布に基づいて求めることとした。また、波群の連続によって表され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⁷⁾を用いた。

図-4は、細山田ら⁵⁾が実施した半没水上部斜面ケーソン堤の波力実験による水平波力の推定誤差の出現頻度分布である。図の上段が斜面壁部、下段が直立壁部で、それぞれ横軸に実験で得られた波力の計測値と波力算定

表-2 検討ケース (堤体幅と従来設計法での安全率)

設置水深 -20m				設置水深 -16m			
ケース	堤体幅	安全率		ケース	堤体幅	安全率	
		沿 動	支持力			沿 動	支持力
S20-1	15.3m	1.35	1.00	S16-1	15.4m	1.20	1.00
S20-2	15.0m	1.33	0.95	S16-2	15.0m	1.18	0.96
S20-3	14.5m	1.29	0.86	S16-3	14.5m	1.15	0.92
S20-4	14.0m	1.26	0.77	S16-4	14.0m	1.12	0.86
				S16-5	13.5m	1.10	0.82

数は50回(耐用期間50年, 1回/年)とした。モンテカルロシミュレーションで考慮する設計条件のばらつき, 推定誤差の分布は著者ら³⁾に従い, 試行回数は滑動量および沈下量の累積平均値がほぼ一定となる2000回とした。

図-6および図-7は, それぞれ設置水深-20.0mと-16.0mの断面に対する耐用期間中の滑動量および沈下量の超過出現率である。

滑動量については, 設置水深の相違による超過出現率の違いが明瞭に表れ, 設置水深-16.0mの断面の方が出現率が高くなっている。これは, 表-2を見れば明らかのように, 設置水深-20.0mでは滑動安全率が1.26~1.35と許容安全率を大きく上回っているのに対して, 設置水深-16.0mでは1.2以下と許容値を下回っており, 安全裕度が異なっているためである。一方, 沈下量については, 設置水深-20.0mの断面の方がやや出現率が高くなっている。従来設計法で用いる支持力安全率では差がないにも係わらず沈下量の出現率に差が見られることは, 設置水深が深い方が堤体の安定性に対して厳しい条件であることを示している。

図-8は滑動と沈下の被災レベルと耐波性能の関係を示したものである。

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, ここでは, 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, 滑動は基礎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。

図-9および図-10は, 設置水深-20.0mと-16.0mの断面に対する滑動と沈下の性能レベルに応じた複合出現

滑動被災 沈下被災	被災レベル			
	レベル1 0.0~0.1m	レベル2 0.1~0.3m	レベル3 0.3~10.0m	レベル4 10.0m以上
レベル1 0.0~0.3m	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-8 被災レベルと耐波性能との関係

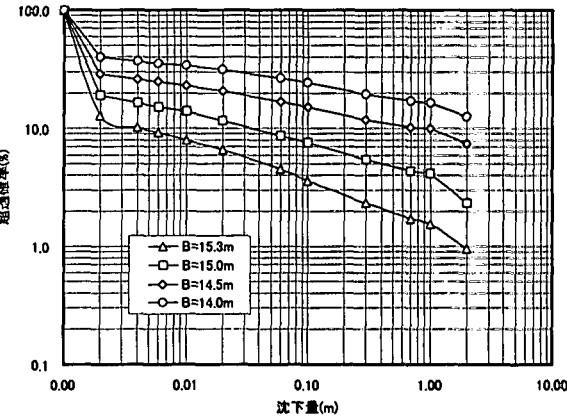
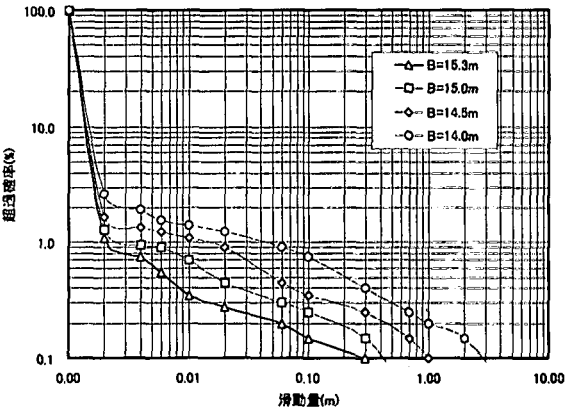


図-6 滑動量と沈下量の超過出現率 (設置水深-20.0m)

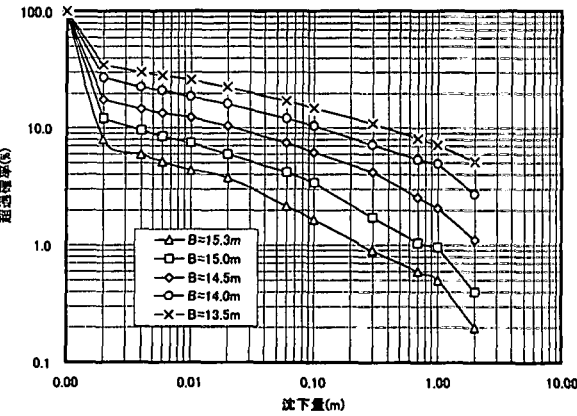
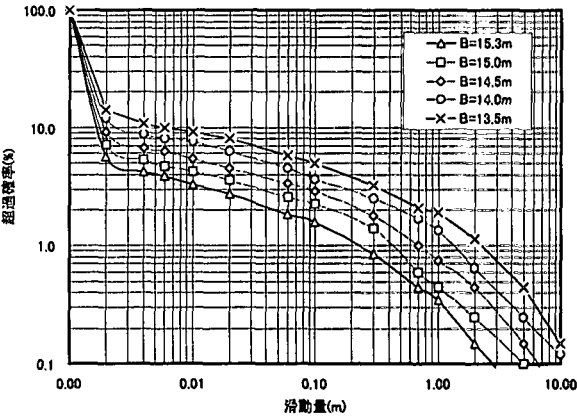


図-7 滑動量と沈下量の超過出現率 (設置水深-16.0m)

表-3 各安全性評価指標での評価結果

【半没水上部斜面ケーソン堤／設置水深：-16.0m】

ケース	期待滑動量	期待沈下量	機能損失確率	LCC(千円)
S16-1	1.3cm	1.5cm	2.00×10^{-3}	13,370
S16-2	2.1cm	2.9cm	4.00×10^{-3}	13,320
S16-3	3.3cm	6.5cm	1.10×10^{-2}	13,380
S16-4	5.8cm	13.7cm	2.70×10^{-2}	13,670
S16-5	9.0cm	23.8cm	5.10×10^{-2}	14,130

【半没水上部斜面ケーソン堤／設置水深：-20.0m】

ケース	期待滑動量	期待沈下量	機能損失確率	LCC(千円)
S20-1	0.1cm	4.1cm	9.50×10^{-3}	12,700
S20-2	0.1cm	9.7cm	2.35×10^{-2}	12,960
S20-3	0.3cm	23.5cm	7.55×10^{-2}	14,050
S20-4	0.8cm	39.5cm	1.25×10^{-1}	15,080

【直立ケーソン堤／設置水深：-20.0m】

ケース	期待滑動量	期待沈下量	機能損失確率	LCC(千円)
V20-1	3.2cm	0.8cm	5.00×10^{-4}	15,150
V20-2	7.6cm	4.9cm	3.50×10^{-3}	15,000
V20-3	12.6cm	12.9cm	7.10×10^{-3}	14,930
V20-4	21.4cm	36.5cm	1.19×10^{-2}	14,970
V20-5	34.8cm	49.5cm	2.53×10^{-1}	15,190

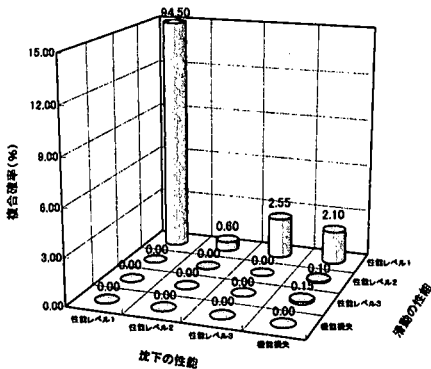


図-9 滑動と沈下の複合出現頻度分布の一例
(設置水深-20.0m, ケース S20-2)

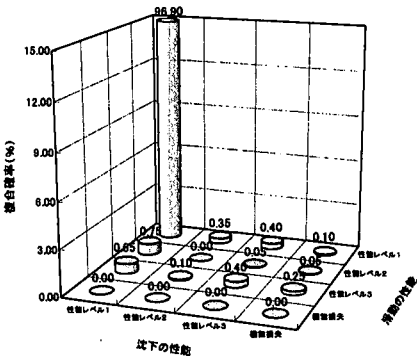


図-10 滑動と沈下の複合出現頻度分布の一例
(設置水深-16.0m, ケース S16-2)

頻度分布の一例である。ここで、滑動と沈下の性能レベルは図-8を適用した。また、例示したケースは、設置水深は違うものの従来設計法での支持力安全率はほぼ同じ断面である。

これによれば、いずれのケースも滑動と沈下ともに性能レベル1となるレベルの出現確率が約95%以上と高い。また、設置水深-20.0mのケースでは沈下の性能レベル3、機能損失レベルの出現頻度が、設置水深-16.0mのケースでは滑動の性能レベル2、3の出現頻度がやや高くなっており、設置水深によって堤体の変形特性が異なっていることがわかる。

4. 直立ケーソン堤との比較による

半没水上部斜面ケーソン堤の安全性の評価

先に述べた防波堤の3つの安全性評価指標を適用して、前項で試算を行った半没水上部斜面ケーソン堤の安全性を評価し、既に著者ら³⁾が検討した同条件(設置水深は-20.0m)での直立ケーソン堤の安全性評価結果との比較を行った。

表-3は半没水上部斜面ケーソン堤2タイプ、直立ケーソン堤1タイプ、合計14ケースの断面に対する各安全性評価指標での評価結果である。表中の網掛けは、各評価指標で許容値を満たすケース(ライフサイクルコストについては最経済断面)を示している。ここで、ライフ

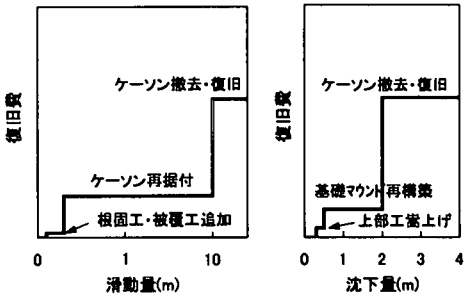


図-11 被災レベルと復旧費の関係

サイクルコストの検討では、各被災レベルと復旧費の関係を図-11のようにした。図-12は各ケースのライフサイクルコストにおける総工事費、初期建設費、災害復旧費を示したものである。

既に検討した直立ケーソン堤では、いずれの評価方法を用いても、最適断面としてほぼ同程度の堤体幅が与えられる。しかしながら、半没水上部斜面ケーソン堤では、評価方法によって最適断面が異なる傾向が見られる。詳細に分析すると、設置水深-20.0mでは、機能損失確率による評価とライフサイクルコストによる評価ではS20-1のケースが最適断面とされるが、期待滑動・沈下量による評価ではS20-4のケースでも許容値を大きく下回り十分な安全裕度がある評価となっている。設置水深-16.0mでも同様の傾向を示し、機能損失確率による評価とライフサイクルコストによる評価ではS16-2のケースが最適断面とされるが、期待滑動・沈下量による評価ではS16-5のケースでも十分な安全裕度がある評価となっている。

機能損失確率による評価とライフサイクルコストによる評価が最適断面として同じ断面を与えるのは、ライ

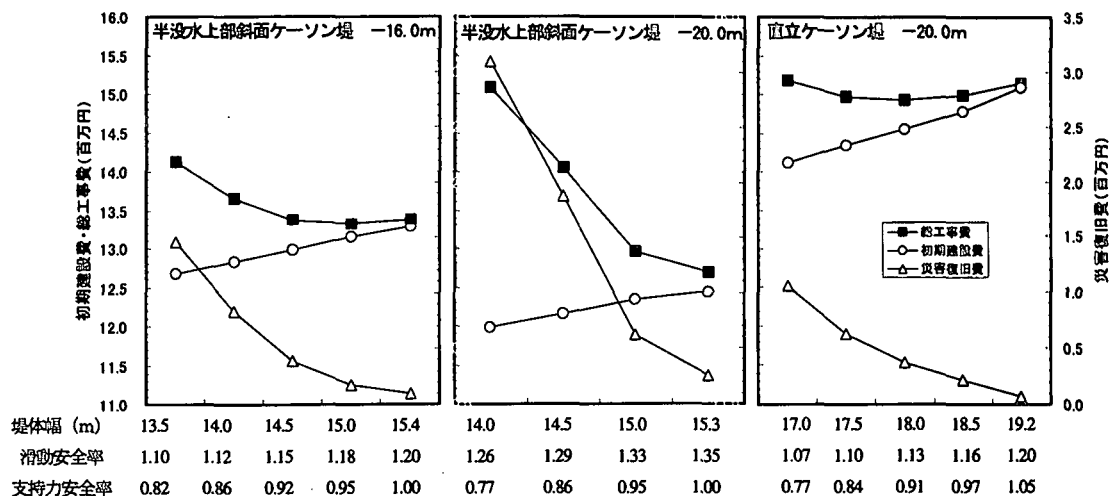


図-12 各検討ケースのライフサイクルコスト曲線

フサイクルコストにおける災害復旧費に占める機能損失レベルの復旧費が大きいものであり、防波堤の壊滅的な被害の発生確率をある程度抑制することがトータルコストの低減につながるものと考えられる。一方、期待滑動・沈下量による評価では、提案した許容値を用いると大幅な断面縮小が図れるが、ライフサイクルコストでは現行設計法による断面よりも不経済となる。また、直立ケーソン堤と比較すると、半没水上部斜面ケーソン堤の期待滑動量、沈下量は非常に小さく、耐波性能 1, 2 に対しては機能的に優れていると考えられる。

以上のように、半没水上部斜面ケーソン堤では、直立ケーソン堤と異なり、3 つの評価方法によって与えられる最適断面が異なる傾向が見られ、変形量による評価よりもむしろ機能損失確率による評価やライフサイクルコストによる評価が重要であると考えられる。

5. まとめ

本論文は、防波堤の性能設計活用による設計合理化の一環として、経済的な防波堤である半没水上部斜面ケーソン堤への適用について検討したものである。

これより以下の結果が得られた。

- ① 既に提案した直立ケーソン堤に対する滑動・沈下量算定方法を拡張して、半没水上部斜面ケーソン堤の滑動・沈下量の算定方法を提案した。
- ② 半没水上部斜面ケーソン堤の滑動量、沈下量は、設置水深によって変形量の出現特性が異なり、設置水深 -20.0m では沈下が、-16.0m では滑動が支配的となる。
- ③ 防波堤の 3 つの安全性評価指標を適用すると、半没水上部斜面ケーソン堤では、期待変形量による評価結果と機能損失確率による評価結果ならびにライフサイクルコストによる評価結果とで、与えられる最適断面が異なる傾向が見られた。
- ④ 半没水上部斜面ケーソン堤は、直立ケーソン堤に比べると期待滑動・沈下量は小さく、耐波性能 1, 2 に対しては機能的に優れている。

- 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作用や構造様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となった。

- ⑥ 防波堤の経済性評価を重要視するならば、防波堤の壊滅的な被害の発生確率である機能損失確率をある程度抑制することが必要である。

今後は、本研究成果の実務への適用を図るとともに、より簡便に断面設定ができる簡易設計法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

- 1) 下迫健一郎・高橋重雄：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.3-30，1998。
- 2) 土田孝・湯怡新：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.117-145，1996。
- 3) 興野俊也・赤石沢総光・阿部光信・長舩徹：性能設計活用による防波堤の設計合理化について，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.816-820，2000。
- 4) 長尾毅：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.15-36，1999。
- 5) 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利：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.706-710，1994。
- 6) 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭：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.846-850，1996。
- 7) 阿部光信・興野俊也・長舩徹・貝沼憲男：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.916-920，1999。