

ケーソン式混成堤における部分係数の 滑動量を考慮した設定方法に関する研究

吉岡 健*・長尾 毅**・森屋陽一***

本研究では、ケーソン式混成堤の滑動安全性照査に用いる部分係数を、確率的滑動量（設計供用年数50年間の30 cm 超過確率 P_{f30cm} ）の観点から設定する方法を提案する。 P_{f30cm} の目標値は、全国33ケースの建設事例に対する平均安全性水準とした。まず、力の釣合いに基づく信頼性指標と設計波高1波当たりの滑動量との関係を調べ、碎波圧成分と重複波圧成分が滑動量に及ぼす影響を明らかにした。さらに、水深波高比の異なる12ケースについて裾長さパラメータと P_{f30cm} の関係を調べ、波浪の極値分布形が滑動量に及ぼす影響を明らかにした。以上の検討により、 P_{f30cm} を制御対象とするための、部分係数の計算に用いる目標信頼性指標の算定式を提案するとともに、その合理性を示した。

1. はじめに

ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）を契機とし、土木および建築構造物の標準設計法としてレベル1信頼性設計法（部分係数法）を導入することが期待されている（国土交通省, 2002）。レベル1設計法を構築するためには、目標安全性水準の適切な設定が必要となるが、その最も有力な方法の1つがコードキャリブレーションである。これは、現行設計法が担保する平均安全性水準を統計的に定め、これを目標値として部分係数のキャリブレーションを行う方法である。

ここでケーソン式混成堤の外的安定問題に着目すると、先に著者ら（2005a）は、多数の建設事例に基づく信頼性解析によって、滑動、転倒、支持力安全性照査に関する部分係数のコードキャリブレーションを実施している（以下、レベル1設計法と称す）。しかしながらこれは、ある設計波高（一般的には、50年確率波高）のみを対象とした力の釣合いに基づく信頼性設計法であるから、変形量、特に下迫・高橋（1998）が提案する確率的滑動量の観点からは、合理的ではない可能性がある。特に、下迫・高橋（1998）や Goda（2001）は、碎波、重複波の条件や、波浪の極値分布形によって滑動量が変化することを指摘している。

そこで本研究では、滑動安全性照査に用いる部分係数を滑動量の観点から設定する方法を提案する。なお本研究では、確率的滑動量として、設計供用年数50年間に滑動量が30 cm を超過する確率 P_{f30cm} を用いる。さらにその目標値を P_{fT30cm} と定義し、レベル1設計法の滑動安全性照査に用いる目標信頼性指標 β_{SLT} とは区別する。

2. レベル1設計法の概要

まず、著者ら（2005a）が構築したレベル1設計法について概説する。レベル1設計法における滑動安全性照査式を書き下すと式（1）、（2）となる。

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \cdots \cdots (1)$$

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{wl} w_{lk} + h) B_c \cdots \cdots (2)$$

ここに、 f : 摩擦係数、 W_i : 堤体を構成する材料の重量（鉄筋コンクリート W_{RC} 、無筋コンクリート W_{NC} 、中詰砂 W_{SAND} ）（kN/m）、 P_B : 浮力（kN/m）、 P_U : 揚圧力（kN/m）、 P_H : 水平波力（kN/m）、 ρ_w : 海水の密度（t/m³）、 g : 重力加速度（m/s²）、 w_l : 潮位（m）、 h : 堤前水深（m）、 B_c : 堤体幅（m）、 γ : 添字の設計因子に対する部分係数である。式中の添字 k, d は、それぞれ特性値および設計用値を表し、また、式（2）はケーソンがフーチングを有しない場合の算定式である。

設計因子 X の部分係数 γ_X は次式により決定される。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_{SLT} V_X) B_X \cdots \cdots (3)$$

ここで、 α_X 、 V_X 、 B_X はそれぞれ設計因子 X の感度係数、変動係数および平均値の偏り（平均値と特性値の比）である。

各設計因子の従う確率分布（ V , B ）は、長尾（2001）がまとめた値を用いた。式（3）に用いる目標信頼性指標と感度係数は、全国のケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の建設事例を対象として、一次信頼性理論（FORM: First-Order Reliability Method）により評価した。まず、安全率に基づく現行設計断面について、滑動、転倒、支持力破壊モードの和事象で定義されるシステム信頼性指標を評価し、その平均値（2.38）を目標安全性水準とした。 β_{SLT} については、目標システム信頼性指標をちょうど満足する断面における各モードの信頼性指標の最小値を、全事例について平均して算出した。この方法による β_{SLT} は2.40となった。感度係数 α について

* 正会員 工修 電源開発(株) エンジニアリング事業部

** 正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所

*** 正会員 工博 五洋建設(株) 技術研究所

表-1 コードキャリブレーション結果 (著者ら, 2005a)

β_{SLT}	2.40			
設計因子	α	V	B	γ
P_H, P_U^{*1}	-0.704	0.239	0.740	1.04
w_l^{*2}	-0.059	0.400	1.000	1.06
f	0.689	0.150	1.060	0.79
W_{RC}	0.030	0.020	0.980	0.98
W_{NC}	0.025	0.020	1.020	1.02
W_{SAND}	0.150	0.040	1.020	1.01

※1) 水深変化が1/30未満の場合

※2) 既往最高潮位 H.H.W.L./さく望平均満潮位 H.W.L. ≥ 2.0 の場合表-2 P_{f30cm} , ESD の統計 (33ケース, 現行設計断面)

	範囲	平均	標準偏差
30cm 超過確率 $P_{f30cm}(\%)$	0.5~11.7	2.6*	2.9
期待滑動量 $ESD(cm)$	0.7~42.5	8.7	9.4

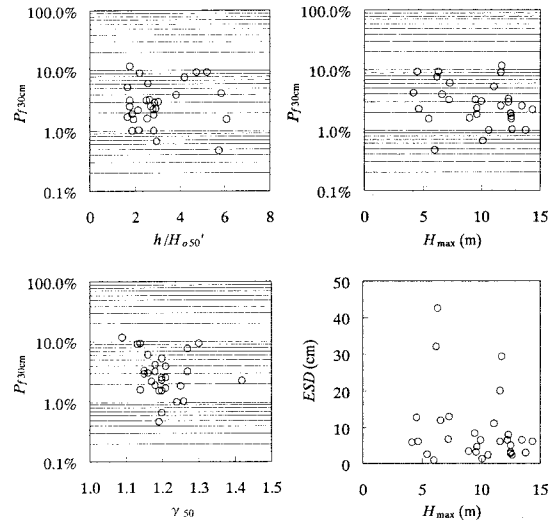
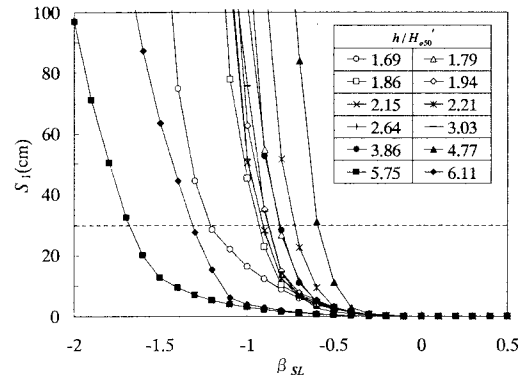
※) 超過確率を信頼性指標に換算した上で平均し, 再度, 確率に変換した値

は, β_{SLT} をちょうど満足する断面における値を全事例について平均して算出した. 以上の方法によって得られたコードキャリブレーション結果を表-1 に示す. さらに, 表-1 に示した部分係数が, 目標安全性水準に対する分散最小化の観点からの最適案であることを確認している.

3. 滑動量に基づく目標安全性水準

検討対象は, 全国のケーソン式混成堤の設計資料から設計条件の偏りがないように収集した33ケースとした. まず, 許容滑動安全率1.2による現行設計を行い, 得られた断面に対し, 下迫・高橋 (1998) が提案するモンテカルロ法を用いた信頼性設計法 (以下, これをレベル3設計法と称す) によって, P_{f30cm} を評価した. 計算方法は, 総じて下迫・高橋 (1998) に従っているが, 設計因子の従う確率分布については, 前章で用いた値を採用している. また, 波圧の時系列モデルとしては, 三角パルス波形に正弦波形を組み合わせたモデル (谷本ら, 1996) を用いている.

算出した P_{f30cm} の分布を図-1 に示す. 横軸には, レベル1設計に用いる設計 (最高) 波高 H_{max} , 砕波影響の有無を表す水深波高比 $h/H_{0.50}$ ($H_{0.50}$: 50年確率換算沖波高), 極値分布形の尺度母数を表す裾長さパラメータ γ_{50} (50年確率波高 $H_{0.50}$ に対する10年確率波高 $H_{0.10}$ の比, 合田, 2002) をとり, それぞれとの相関を見た. 併せて, 設計供用年数50年間の期待滑動量 ESD として評価した場合についても示し, 表-2 にそれらの統計結果を示す. P_{f30cm} は, 0.5% から 11.7% まで広く分布しており, このことは力の釣合いに基づく従来設計では, 滑動量の観点からは合理的でないことを意味している. これら33ケースの平均は2.6%であり, これを滑動量に基づく目標安全性水準 P_{f30cm} とする. Goda (2001) は, P_{f30cm} の許容値として10%を提案しているが, 本研究の対象範囲に

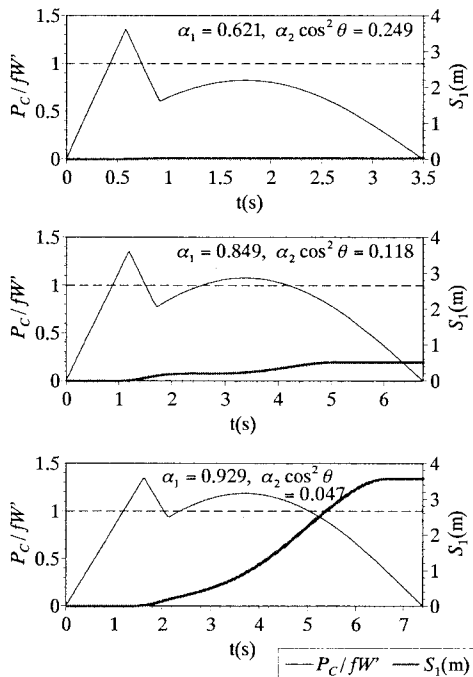
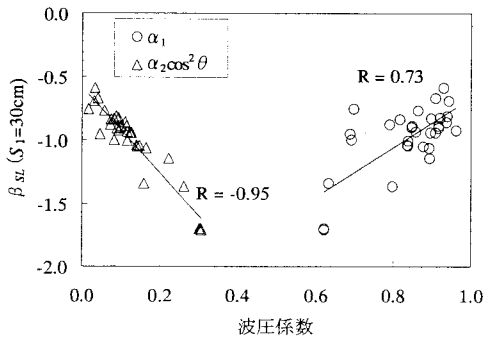
図-1 現行設計断面に対する P_{f30cm} , ESD の分布図-2 β_{SL} と S_1 の関係

において, これは上限に近い値となっている. また, 期待滑動量として評価した場合についてもその平均は8.7 cm となっており, 下迫・高橋 (1998) が提案する30 cm よりも全体的に低い値となっている. また, P_{f30cm} との相関性については, 設計波高, 水深波高比, 裾長さパラメータのいずれの設計条件に対しても相関は低く, 単一のパラメータでこれを制御することは困難であることがわかる.

4. 滑動量に及ぼす影響評価

(1) 砕波圧, 重複波圧成分の影響

本項では, 合田式により算出される水平波圧の砕波圧成分と重複波圧成分が, 設計波高1波当たりの滑動量に及ぼす影響について検討する. 図-2 は, 水深波高比の異なる12ケースについて, 設計波高を変化させた場合の信頼性指標 β_{SL} と1波滑動量 S_1 の関係を比較したものである. β_{SL} の低下に伴って, S_1 は急激に増加していることがわかる. しかしながら, その増加傾向はケース毎


 図-3 P_c と S_1 の時刻歴

 図-4 $S_1=30$ cm となる β_{SL} と波圧係数との相関

に異なっており、 S_1 が 30 cm となるところでの β_{SL} には大きな差が見られる。

図-3 は、合田式におけるパラメータ α_1 (重複波圧係数と称す) および $\alpha_2 \cos^2 \theta$ (α_2 : 衝撃碎波が作用する場合は高橋ら (1992) の提案する α^* , θ : 波の入射角, 以下, $\alpha_2 \cos^2 \theta$ を碎波圧係数と称す) の異なる 3 ケースについて、 $\beta_{SL} = -1.0$ となる条件での滑動合成波力 P_c ($=P_H + fP_U$) と 1 波滑動量 S_1 の時刻歴を見たものである。滑動合成波力 P_c は、滑動限界波力 fW' (W' : 有効重量) によって無次元化している。重複波圧成分を規定する α_1 は図中の正弦波の振幅を、碎波圧成分を規定する $\alpha_2 \cos^2 \theta$ は三角パルス波と正弦波の振幅の差を表している。また、力の釣合いに基づく信頼性指標 β_{SL} は、三角パルス波の頂点の値が 1.0 を上回る確率と等価であ

る。図より、三角パルス成分が滑動限界波力を大きく上回っても、その継続時間が短いために滑動量は僅かであり、正弦波成分がこれを上回った時に、継続時間が長いために大きな滑動量が生じていることがわかる。つまり、碎波圧成分よりも重複波圧成分が卓越するケースほど S_1 が増加しており、 α_1 が大きいほど S_1 は大きく、逆に $\alpha_2 \cos^2 \theta$ が小さいほど S_1 が大きくなる傾向が見られる。

そこで、図-2 に示した S_1 が 30 cm となる β_{SL} の値を全ケースについて抽出し、 α_1 および $\alpha_2 \cos^2 \theta$ との相関を調べた (図-4)。図には、各波圧係数と β_{SL} との相関係数 R を付記している。やはり、 α_1 に対しては正の相関が、 $\alpha_2 \cos^2 \theta$ に対しては負の相関があり、特に $\alpha_2 \cos^2 \theta$ との相関性が高い。このように、1 波当たりの滑動量には碎波圧成分と重複波圧成分の比率が大きく影響しており、両者の和、すなわち三角パルス波の頂点の値でのみ安全性を評価する β_{SL} では、これを考慮できない。このことが、図-2 に示した S_1 が 30 cm となるところでの β_{SL} に、ケース毎の大きな相違が見られた主要因であると言える。

(2) 極値分布形の影響

本項では、波浪の極値分布形が設計供用期間中の累積滑動量に及ぼす影響について検討する。本研究では、極値分布形の影響を合田 (2002) が提案する裾長さパラメータ γ_{50} によって整理することを試みた。図-2 に示した水深波高比 $h/H_{0.50'}$ の異なる 12 ケースについて、 γ_{50} を $H_{0.50'}$ = 一定の条件で変化させた場合の、 γ_{50} と $P_{f30\text{cm}}$ の関係を調べた。ここで、堤体は次章に示すレベル 3 設計断面とした。

図-5 は、そのうちの 2 ケースについて、裾長さパラメータに対する堤前位置での最高波高の極値分布を比較したものである。両ケースとも沖波はワイブル分布に従い、モンテカルロ法によって 10 万波を生成している。図の点線は換算沖波波高の分布を表している。波高分布の算出において、そのばらつきは考慮しておらず、さらに換算沖波波高には計算の都合上、下限値を設けている。 $h/H_{0.50'} = 1.69$ のケースでは、 γ_{50} が小さいほど $P_{f30\text{cm}}$ が大きくなっている。これは、最高波高の上限が碎波によって規定されているために、その上限値近傍に多くの波高が出現する条件、すなわち γ_{50} の小さい方が累積滑動量は増幅するからと考えられる。逆に、 $h/H_{0.50'} = 4.77$ のケースでは、 γ_{50} が大きいほど $P_{f30\text{cm}}$ は大きくなっている。これは、最高波高の上限が規定されないために、より高い波高が出現する条件、すなわち γ_{50} の大きい方が累積滑動量は増幅するからと考えられる。

図-6 に 12 ケースについて算出した γ_{50} と $P_{f30\text{cm}}$ の関係を示す。 $\gamma_{50} \leq 1.2$ の条件では、いずれのケースも γ_{50} と $P_{f30\text{cm}}$ に負の相関が見られている。一方、 $\gamma_{50} \geq 1.2$ の条件の場合、水深波高比の大きい ($h/H_{0.50'} > 3.0$) のケースでは γ_{50} と $P_{f30\text{cm}}$ に正の相関があるのに対し、水深波

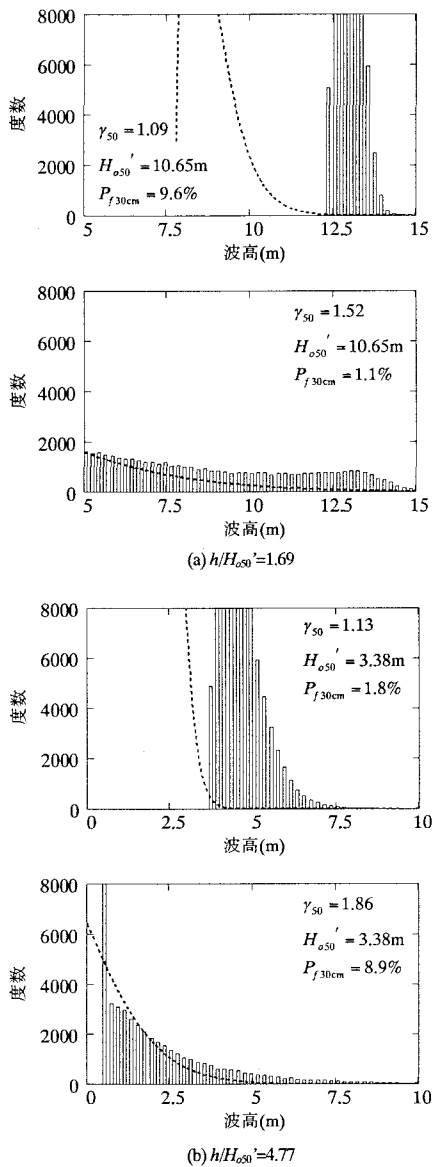


図-5 γ_{50} に対する最高波高の極値分布

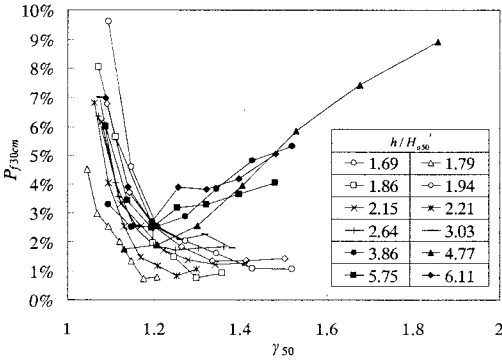


図-6 γ_{50} と P_{f30cm} の関係

高比の小さい ($h/H_{o50}' \leq 3.0$) のケースでは P_{f30cm} がほぼ一定となっている。前者については、図-5に見たように、毎年同程度の波浪が来襲する方が、設計供用期間中の累積滑動量は増加するからである。後者については、砕波領域では波高の上限が規定されるために、仮に沖合で高波浪が来襲しても累積滑動量は増幅しないからである。このように、極値分布形が設計供用期間中の累積滑動量に及ぼす影響は、極大値の裾の広がり具合によって一意的に決まるのではなく、砕波、非砕波の条件によって複雑に変化することがわかった。

5. 部分係数設定方法の提案

以上の結果をもとに、式(3)の部分係数の計算に用いる目標信頼性指標 β_{SLT} を、波圧係数 α_1 , $\alpha_2 \cos^2 \theta$, 裾長さパラメータ γ_{50} および水深波高比 h/H_{o50}' を説明変数として設定する方法を検討する。

まず、33ケースについて目標安全性水準 P_{fT30cm} を2.6%としたレベル3設計を実施した。得られた断面に対し、FORMによって力の釣合いに基づく信頼性指標 β_{SL} を評価した。評価した値が部分係数の計算に用いるべき β_{SLT} となる。次に、2.で用いた $\beta_{SLT} = 2.40$ との比の値を目的変数とした線形重回帰分析を行い、 β_{SLT} の推定式として次式を得た。

$$\beta_{SLT} = 2.40 \max(0.6, 2.7 + 0.2\alpha_1, -1.0\alpha_2 \cos^2 \theta - 1.6\kappa)$$

$$\kappa = \begin{cases} \gamma_{50} & : \gamma_{50} \leq 1.2 \\ 1.2 & : \gamma_{50} > 1.2, \frac{h}{H_{o50}'} \leq 3.0 \\ \max(1.0, -\gamma_{50} + 2.4) & : \gamma_{50} > 1.2, \frac{h}{H_{o50}'} > 3.0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)による β_{SLT} の推定値とレベル3設計による計算値の重相関係数は0.90であり、上記4指標によって十分精度良く推定可能であることがわかった。また、式中には β_{SLT} の過度の低下を防ぐため、33ケースの β_{SLT} の最小値により下限値を設けている。式(3), (4) およ

表-3 部分係数の計算例

計算条件	ケース1		ケース2	
	h/H_{o50}'		1.69	
	γ_{50}		1.21	
	α_1		0.89	
部分係数	$\alpha_2 \cos^2 \theta$		0.19	
	β_{SLT}		1.86	
	P_H, P_U		0.97	
	wl		1.04	
	f		0.85	
	W_{RC}		0.98	
	W_{NC}		1.02	
部分係数	W_{SAND}		1.01	
			1.00	

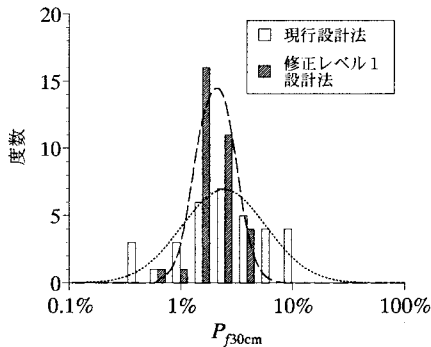
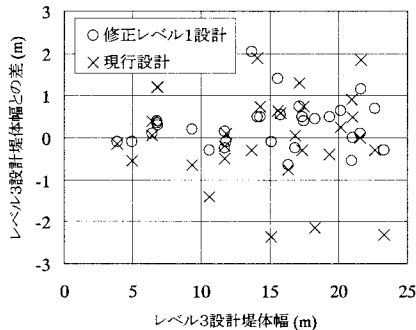
図-7 P_{f30cm} のばらつき

図-8 堤体幅の比較

び表-1に示す値を用いた部分係数の計算例を表-3に示す。この方法によって部分係数を算定する場合、厳密に言えば、 β_{SLT} の値によって感度係数を再評価する必要がある。しかしながら、感度係数を再評価しない簡易な方法によってもレベル1設計の合理性は維持される(著者ら, 2005b)ことから、表-1に示す値をそのまま用いてよいこととした。図-7は、今回提案する部分係数法(以下、修正レベル1設計法と称す)と現行設計法によって得られた設計断面に対し、それらが保有する P_{f30cm} のばらつきを見たものである。修正レベル1設計によって、 P_{f30cm} の標準偏差は1/3程度に低減されるとともに、その平均値は目標値にほぼ一致している。図-8は、レベル3設計法により決定した堤体幅に対する誤差を比較したものである。これにより、修正レベル1設計の方が現行設計よりも堤体幅の誤差が小さくなっていることがわかる。

以上により、今回提案する方法が、力の釣合いにに基づく簡易な部分係数法でありながら、設計供用期間中の累積滑動量の許容値超過確率を制御対象とした、信頼性の高い設計法であることを確認した。

6. ま と め

ケーソン式混成堤の滑動安全性照査に用いる部分係数を、確率的滑動量(設計供用年数50年間の30 cm 超過確率 P_{f30cm})の観点から設定する方法を検討した。

得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- ①全国の建設事例33ケースを対称に、現行設計法(許容滑動安全率1.2)による設計断面が保有している P_{f30cm} を、レベル3設計法により評価した。その結果、 P_{f30cm} は0.5%から11.7%まで広く分布しており、その平均値は2.6%であった。これは、Goda (2001)の提案する P_{f30cm} の許容値10%よりも、若干低い値である。
- ②合田式により算出される水平波圧の碎波圧成分と重複波圧成分が、設計波高1波当たりの滑動量 S_1 に及ぼす影響について検討した。両波圧の継続時間の違いから、碎波圧成分よりも重複波圧成分が卓越するケースほど S_1 が増加しており、重複波圧係数 α_1 に対しては正の相関、碎波圧係数 $\alpha_2 \cos^2 \theta$ に対しては負の相関を有することがわかった。
- ③波浪の極値分布形を表す代表指標として、合田(2002)の提案する裾長さパラメータ γ_{50} を用い、 γ_{50} と P_{f30cm} の関係を検討した。 γ_{50} が小さい場合には、全ケースについて γ_{50} と P_{f30cm} に負の相関が見られており、すなわち、毎年同程度の波浪が来襲する方が設計供用期間中の累積滑動量が増加する。一方、 γ_{50} が大きい場合、水深波高比の大きいケースについては γ_{50} と P_{f30cm} に正の相関が見られるのに対し、水深波高比の小さいケースについては P_{f30cm} がほぼ一定であった。このことは、波高の上限が水深によって規定される碎波領域においては、累積滑動量が増幅しないことを表している。
- ④部分係数の計算に用いる目標信頼性指標 β_{SLT} を、波圧係数、裾長さパラメータおよび水深波高比を説明変数として設定する方法を提案した。提案した修正レベル1設計法により、簡易な部分係数法の枠組みの中で、 P_{f30cm} が良好に制御されていることを示した。

参 考 文 献

- 合田良実(2002): 設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義, 海工論文集, 第49巻, pp. 171-175.
- 国土交通省(2002): 土木・建築にかかる設計の基本, 31p.
- 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, 港研報告, Vol. 37, No. 3, pp. 3-30.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三(1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海工論文集, 第39巻, pp. 676-680.
- 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, 海工論文集, 第43巻, pp. 846-850.
- 長尾 毅(2001): ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 土木学会論文集, No. 689, I-57, pp. 173-182.
- 吉岡 健・長尾 毅(2005a): 重力式防波堤の外的安定に関するレベル1信頼性設計法の提案, 国総研報告, No.20, 38p.
- 吉岡 健・長尾 毅(2005b): 信頼性の変化に対応した部分安全係数の設定方法, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 401-412.
- Goda Y.(2001): Performance-based design of caisson breakwaters with new approach to extreme wave statistics, Coastal Engineering J. JSCE, Vol. 43, No.4, pp. 289-316.