

波浪の極値分布を考慮したケーソン式混成堤の滑動量に基づく レベル 1 信頼性設計法に関する研究

吉 岡 健*・佐 貫 哲 朗**・長 尾 毅***・森 屋 陽 一****

本研究では、全国のケーソン式混成堤の設計資料より収集した 33 ケースを用い、森屋ら (2003) の提案する設計波 (50 年確率波) 1 波による滑動量に基づく破壊確率と、下迫・高橋 (1998) の提案する設計供用期間中の来襲波群による累積滑動量に基づく破壊確率との比較を行った。その結果、設計供用期間中の滑動安全性に対する波浪の極値分布形の影響は大きく、前者を制御しても後者としては危険な設計になることがわかった。次に波浪の極値分布形等の設計条件によって前者の目標値を修正し、森屋ら (2003) によるレベル 1 信頼性設計法に適用する手法を提案し、簡易なレベル 1 設計法でありながら、設計供用期間中の滑動安全性を制御対象とした設計が可能となることを示した。

1. はじめに

ISO2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) を契機として、土木および建築構造物への信頼性設計法の適用に関する研究が各方面で進められている。中でも、レベル 1 信頼性設計法 (部分安全係数法) は、汎用性、利便性の観点から標準的な設計法としてその導入が期待されている (国土交通省, 2002)。

ここでケーソン式混成堤の外的安定問題に着目すると、長尾 (2001) により力の釣合いに基づく信頼性設計法が、また、下迫・高橋 (1998) により滑動量に基づく信頼性設計法が提案されている。前者は、滑動、転倒、支持力破壊を対象とし、従来の設計手法の利便性を維持しながらもその合理性を高めた設計手法であるが、僅かでも荷重が耐力を上回れば破壊と判定するために高い経済性を期待できないという課題がある。後者は、滑動に関する運動方程式を数値積分して 1 波毎の滑動量を算定し、これを繰返して設計供用期間中の来襲波群による累積滑動量とし、さらにモンテカルロ法による期待滑動量として性能を評価する方法である。本設計法は、港内の静穏度を確保するという防波堤の要求性能を満足する上ではより高度な設計手法ではあるが、計算にやや時間を要することや、滑動以外の破壊モードを考慮したシステムとしての議論が困難であるなどの問題がある。

そこで森屋ら (2003) は、精度の良い簡易滑動量算定モデルを提案し、それをケーソン式混成堤に適用してレベル 1 信頼性設計法を構築した (以下、レベル 1 設計法と称す)。これは、簡易モデルによる滑動量 S が、許容滑動量 S_a を超過する確率を破壊確率 P_{f1} と定義し、これを目標破壊確率 P_{f1T} 以下に制御する方法である。しかしながら、森屋ら (2003) の研究では設計波 (50 年確率波)

1 波での滑動量を対象としていることから、設計供用期間中の累積滑動量が S_a を超過する確率 (以下、これを破壊確率 P_{f50} と定義する) は、波浪の極値分布形により大きく変化するものと考えられる。

以上の背景のもと、本研究ではレベル 1 設計断面における設計供用期間中の破壊確率 P_{f50} と、波浪の極値分布形との相関関係を明らかにするとともに、 P_{f50} を制御対象とするためのレベル 1 設計法における目標値 P_{f1T} の修正方法を提案する。

2. 滑動量に基づくレベル 1 設計法の概要

(1) 簡易滑動量算定モデルの概要

森屋ら (2003) が提案した簡易滑動量算定モデルとは、波力の時系列モデルとして谷本ら (1996) による三角パルス波形に正弦波形を組み合わせたモデルを考え、ケーソンの滑動に関する運動方程式を解析的に 2 回積分して構築したものである。同モデルは、衝撃砕波力および砕波力成分に対するモデル A と、重複波力成分の影響も考慮したモデル B で構成され、式 (1)~(4) によって表される。

(モデル A)

$$S = -\frac{3+2\sqrt{2}}{W/g+M_a} \frac{\tau_0^2}{4} \times \left\{ \frac{P_{2\max} + \mu U_{\max}}{3} - \mu W' + \frac{(\mu W')^2}{P_{2\max} + \mu U_{\max}} - \frac{(\mu W')^3}{3(P_{2\max} + \mu U_{\max})^2} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに、 S : 滑動量 (m), τ_0 : 波力の作用時間 (s), W : 堤体の空中重量 (kN/m), g : 重力加速度 (m/s²), M_a : 付加質量 (kg) ($=1.0855\rho_0 h^2$, ρ_0 : 海水の密度 (kg/m³), h : ケーソン設置水深 (m)), $P_{2\max}$: 合田式において波圧係数 α^* を考慮した水平波力 (kN/m), $U_{\max}$: 合田式における揚圧力 (kN/m), μ : 摩擦係数, W' : 堤体の水中重量 (kN/m) である。

(モデル B)

$$S = -\frac{3+2\sqrt{2}}{W/g+M_a} \frac{\tau_0^2}{4} \times \left\{ \frac{P_{1\max} + \mu U'_{\max}}{3} - \mu W' + \frac{(\mu W')^2}{P_{1\max} + \mu U'_{\max}} - \frac{(\mu W')^3}{3(P_{1\max} + \mu U'_{\max})^2} \right\} \dots\dots (2)$$

* 正会員 修(工) 電源開発(株) エンジニアリング事業部 建設技術グループ

** 正会員 復建調査設計(株) 水工技術部 沿岸技術課

*** 正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長

**** 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所 海岸海洋チーム

$$P_{1\max} = \frac{4}{3} P_{1\max} \times \tanh\left\{\frac{P_{1\max}}{\mu(W - U_{\max})}\right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$U_{\max} = \frac{4}{3} U_{\max} \times \tanh\left\{\frac{P_{1\max}}{\mu(W - U_{\max})}\right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 t_{0F} ：有限振幅波理論において水位が正となる時間(s)， $P_{1\max}$ ：合田式において波圧係数 α_1 のみ考慮した時の水平波力 (kN/m) であり，その他の記号は式 (1) と同じである。

(2) レベル1設計法の概要

森屋ら (2003) が提案する滑動量に基づく性能関数 Z は，式 (1) または式 (2) で評価した滑動量 S および許容滑動量 S_a を用い，式 (5) によって定義される。

$$Z = S_a - S \dots\dots\dots (5)$$

性能関数 Z において確率変数として扱う設計因子は，波力作用時間 τ (モデル A の t_0 ，モデル B の t_{0F})，水平波力 P (モデル A の $P_{2\max}$ ，モデル B の $P_{1\max}$)，揚圧力 U (モデル A およびモデル B の $U_{\max}$)，摩擦係数 μ ，堤体自重 W ，潮位 WL である。レベル1設計における安全性照査の際には，これら設計因子の特性値 (現行設計法で用いる値) に，部分安全係数を乗じた設計用値を用いる。また，重複波力成分が滑動に寄与するかどうかを判定する次式によって，モデル A，B の使い分けを行う。

$$\frac{P_{1\max}}{\mu(W - U_{\max})} < 1.2 \dots\dots\dots (6)$$

モデル A によるレベル1設計断面が式 (6) を満足する場合は，モデル A の適用範囲として設計終了とし，これを満足しない場合は，モデル B によってレベル1設計を実施する。

部分安全係数は，各設計因子の特性値に乘じることによって，設計点を目標とする破壊点に一致させるための係数であり，確率変数 X の部分安全係数 γ_X は次式によって算出される。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_{1T} V_X) B_X \dots\dots\dots (7)$$

ここに， β_{1T} はレベル1設計に用いる目標安全性指標， V_X ， B_X はそれぞれ確率変数 X の変動係数と平均値の偏り (平均値と特性値の比) である。

森屋ら (2003) は，許容滑動量 S_a を 30 cm とし，式 (7) における目標安全性指標 β_{1T} を 2.4 とし，多数のケーソン式混成堤の建設事例に基づく部分安全係数のキャリブレーションを実施した。ここで，目標安全性指標は長尾 (2001) が行った現行設計による平均安全性水準の検討結果に基づいている。

吉岡ら (2004a) は，部分安全係数のキャリブレーションにおいて，(7) 式における感度係数の評価方法を変え，ことにより，さらに合理的な設計が可能となることを示した。吉岡ら (2004a) が得た各設計因子の確率分布と感度係数を，それぞれ表-1，表-2 に示す。ここで，表-

表-1 設計因子の従う確率分布

設計因子	平均値の偏り B		変動係数 V	
	モデル A	モデル B	モデル A	モデル B
波力 (P, U)				
水深変化緩	0.741	0.760	0.262	0.247
水深変化急	0.828	0.834	0.276	0.256
波力作用時間 τ				
水深変化緩	1.091	1.027	0.071	0.021
水深変化急	1.064	1.018	0.109	0.034
潮位 (WL)				
$r_{wt}=1.5$	1.000		0.200	
$r_{wt}=2.0, 2.5$	1.000		0.400	
摩擦係数 (μ)	1.060		0.150	
単位体積重量 (W)				
堤体	1.000		0.030	

注) r_{wt} ：既往最高潮位とさく望平均満潮位の比
水深変化緩/急：1/30 未満/以上

表-2 感度係数

設計因子	モデル A	モデル B
P, U	-0.749	-0.726
τ	0.422	0.442
WL	-0.061	-0.054
μ	0.621	0.652
W	0.204	0.209

2 の感度係数は，式 (5) に示す性能関数 Z に基づく安全性指標 β_1 が，ちょうど 2.4 となる断面における感度係数を，全事例について平均して算出したものである。

3. 波浪の極値分布形の影響

本章では，設計波1波による破壊確率 P_R を制御対象として設計した場合に，設計供用期間中の来襲波群による破壊確率 P_{T50} がどの程度変化するかを検討し，波浪の極値分布形の影響を議論する。また，以下の検討では，破壊を定義する許容滑動量 S_a を森屋ら (2003) と同様に 30 cm とし，設計供用期間を通常用いられる 50 年とする。

(1) 極値分布形の推定

本研究では，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 ケースを検討対象とした。検討はまず，収集した設計資料には，対象海域における沖波の極値分布形が明記されていないため，既往の研究成果を用いてこれを推定した。まず，高田ら (2003) によってまとめられている全国各地の沖波表から，対象事例に最も近い沖波波高 (再現期間 10 年，30 年，50 年，100 年) を抽出する。次に，最小二乗法によって波浪の極値の最適母分布関数を当てはめる。ここで，母分布関数は合田ら (1998) を参照して全てワイブル分布とし，その形状母数 k を，日本海沿岸で 2.0，東シナ海沿岸で 1.4，太平洋沿岸 (波浮以東) で 1.0，太平洋沿岸 (波浮以西) で 0.75 とした。続いて，同じく高田ら

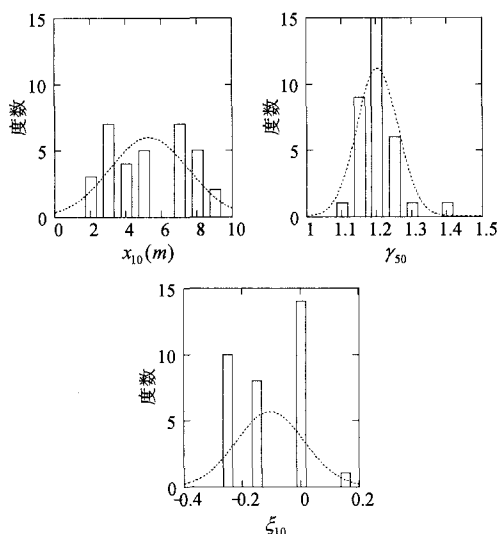


図-1 位置、尺度、形状母数の頻度分布

(2003)によってまとめられている全国各地の沿岸係数表を用い、換算沖波波高としての極値分布形を定めた。本研究ではこれを、母分布関数の違いや形状母数の値に依存しにくい汎用指標(北野, 2003)によって表すこととした。すなわち、位置母数として10年確率波高 x_{10} 、尺度母数として合田(2002)が提案する裾長さパラメータ γ_{50} (50年確率波高 x_{50} に対する10年確率波高 x_{10} の比)、形状母数として次式に示す ξ_{10} を用いた。

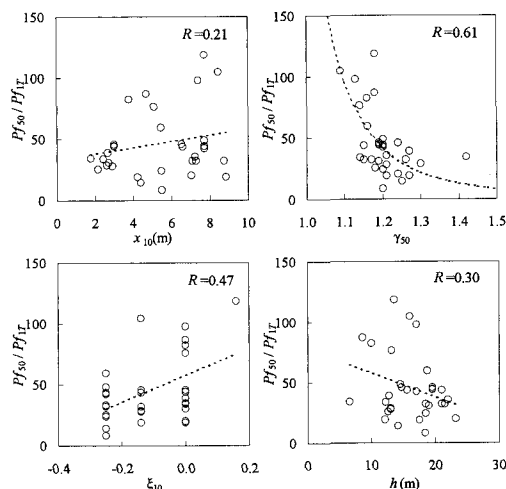
$$\xi_{10} = \log_5 \frac{x_{50} - x_{10}}{x_{10} - x_2} \quad (8)$$

ここに、 x_i は添字 i を再現年数とする確率波高(m)である。

得られた結果の頻度分布を図-1に示す。これら3指標の値は広く分布しており、ケースによって沖波の極値分布形は大きく異なることがわかる。

(2) 滑動量と極値分布形の相関

まず、吉岡ら(2004a)が目標安全性指標 β_{1T} を2.4(破壊確率 P_{1T} 換算で、 8.2×10^{-3})として構築した部分安全係数を用い、レベル1設計を実施した。得られた堤体幅に対し、下迫・高橋(1998)の方法(以下、これをレベル3設計法と称す)により、設計供用期間中の累積滑動量による破壊確率 P_{f50} を算出した。図-2に、 P_{f50} と P_{f1T} の比の値と、極値分布形を表す3指標および堤前水深 h (m)との相関を示す。図中の R は、破線で示した線形関数もしくは指数関数によって近似した場合の相関係数を表す。これを見ると、 P_{f50}/P_{f1T} の値はケースによって大きく変化しており、最大で120にまで達している。このことは、 P_{f1} を制御しても、 P_{f50} の観点からは危険な設計になることを意味している。各指標との相関性を見ると、


 図-2 P_{f50} と P_{f1T} の相関

特に γ_{50} に対して負の相関が見られる。これは γ_{50} が小さい、すなわち日本海側のように毎年高波浪が来襲する海域では P_{f50} が高くなることを意味している。しかしながら、 γ_{50} のみでは P_{f50}/P_{f1T} を精度良く推定することは困難であるため、 P_{f50} を制御対象とするための P_{f1T} の修正式には、複数の指標を用いる必要がある。

4. 波浪の極値分布を考慮したレベル1設計法

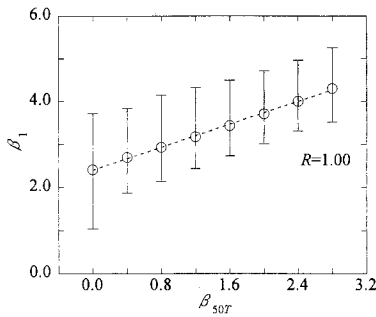
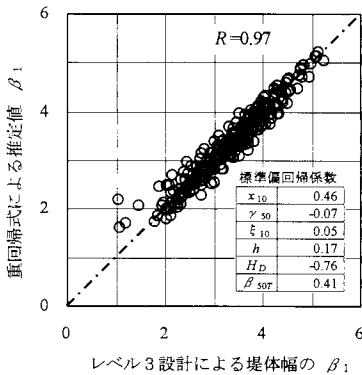
本章では、 P_{f50} を制御対象とするためのレベル1設計法における目標値 P_{f1T} の修正方法について検討する。式(7)に示したように、部分安全係数を計算する際には、破壊確率ではなく安全性指標が用いられるため、以下では、破壊確率を次式によって安全性指標に変換し、 β_{50} および β_1 として議論する。

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (9)$$

ここに、 Φ は標準正規確率分布関数である。

(1) 極値分布を考慮した目標安全性の修正

検討はまず、目標安全性指標 β_{50T} を0.0~2.8まで0.4刻みで変化させ、レベル3設計法によって対応する破壊確率をちょうど満足する堤体幅を決定した。次に、得られた堤体幅に対し、式(5)に示した性能関数に基づく1次信頼性解析(FORM: First-Order Reliability Method)を実施し、その保有安全性指標 β_1 を算出した。得られた β_{50T} と β_1 の相関を図-3に示す。図中の○印は33ケースの平均値を、一印は最大値、最小値を表す。図より、 β_{50} を制御した場合の β_1 は、ケースによって大きく変化することがわかる。しかしながら、 β_{50} と β_1 の正の相関は明確に見受けられ、平均値で見た場合の相関係数は1となっている。このことから、 β_{1T} の修正方法は、 β_{1T} を β_{50T} の線形関数で近似し、さらに極値分布形等の設計条件によって補正すればよいと考えられる。

図-3 β_{50T} と β_1 の相関図-4 β_1 の重回帰分析結果

そこで、 β_{50T} および極値分布形を表す3指標に、その他の設計条件を説明変数として加えた線形重回帰分析を実施した。分析の結果、堤前水深 h (m)、設計波高 H_D (m) を加えた6指標を説明変数とした場合に、最も相関が高いことがわかり、 β_{1T} の回帰式として式(10)を得た。

$$\beta_{1T} = 0.67\beta_{50T} + 0.31x_{10} - 1.72\gamma_{50} + 0.64\xi_{10} + 0.06h - 0.37H_D + 5.45 \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)による β_{1T} の推定結果を図-4に示す。得られた回帰式による重相関係数は0.97と極めて高く、これら6指標を用いることにより、 β_{1T} を精度良く推定可能であることがわかる。また、図中には各指標の標準偏回帰係数を併記している。これにより、 β_{50T} に加え、設計波高 H_D や10年確率沖波波高 x_{10} が β_{1T} に高い影響を及ぼしている一方、裾長さパラメータ γ_{50} の影響度合は小さいことがわかる。これは、 β_{1T} の回帰における10年、50年確率波高の影響が、 x_{10} や H_D によって表現されているため、 γ_{50} としての影響が小さくなったものと考えられる。

(2) 修正レベル1設計法の手順

式(10)により推定した β_{1T} に基づくレベル1設計法(以下、修正レベル1設計法と称す)の手順を示す。

- ① 設計供用期間中の累積滑動量に基づく破壊確率 P_{f50T} の目標値 P_{f50T} を設定し、式(9)により、目標安全性指標 β_{50T} に変換する。

表-3 部分安全係数の計算例

計算条件	目標安全性	$P_{f50T} = 8.2 \times 10^{-3}$, $\beta_{50T} = 2.40$	
	極値分布形	$x_{10} = 8.7$ (m), $\gamma_{50} = 1.17$, $\xi_{10} = -0.14$	
	堤前水深 h (m)	21.5	
	設計波高 H_D (m)	14.4	
	海底勾配 S	1/100	
	γ_{wt}	2.5	
部分安全係数	設計因子	モデル A	モデル B
	P, U	1.27	1.25
	τ	0.97	0.99
	WL	1.09	1.08
	μ	0.70	0.69
	W	0.98	0.98

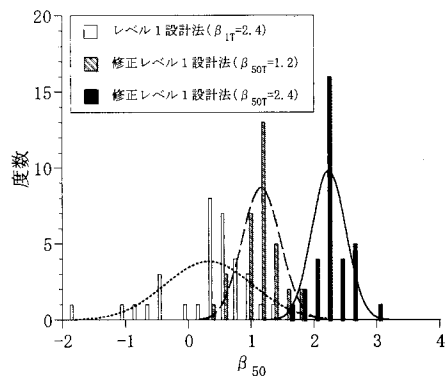
- ② 得られた β_{50T} および設計条件をもとに、式(10)によって β_{1T} を推定する。
- ③ 得られた β_{1T} および、表-1、表-2に示した各設計因子の確率分布と感度係数をもとに、式(7)によって部分安全係数を算定する。
- ④ 得られた部分安全係数を用い、レベル1設計を実施し、必要堤体幅を決定する。

上記の方法による部分安全係数の計算例を表-3に示す。この方法によって部分安全係数を算定する場合、厳密に言えば、 β_{1T} 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(吉岡・長尾, 2004b)ことから、本研究では表-2に示す値をそのまま用いることとした。ただし、得られた β_{1T} が2.4に比べて大きな差がある場合には、感度係数の再評価が必要であるので注意を要する。

また、手順①に示した P_{f50T} の設定方法については、別途検討が必要であるが、ライフサイクルコストを考慮した設定方法が有力であると考えられる。

(3) 修正レベル1設計法の信頼度

今回提案する修正レベル1設計法の信頼度について検討する。図-5は、 β_{50T} を1.2および2.4(破壊確率換算

図-5 β_{50} のばらつき

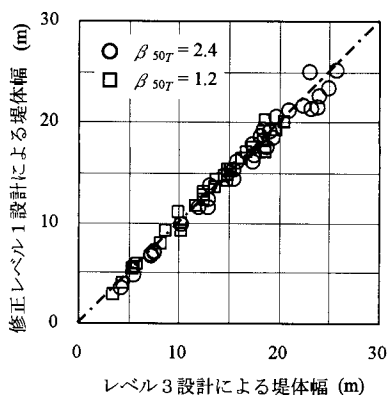


図-6 堤体幅の比較

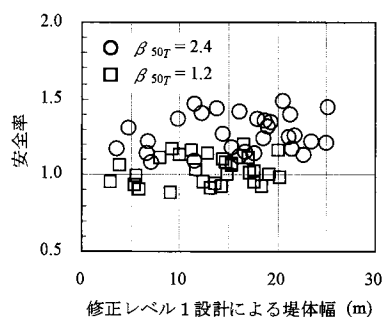


図-7 修正レベル1設計法と滑動安全率の関係

で、 1.2×10^{-1} および 8.2×10^{-3} とした場合の修正レベル1設計法による設計断面と、 β_{1T} を2.4とした場合のレベル1設計法による設計断面について、その保有安全性指標 β_{50} のばらつきを評価したものである。修正レベル1設計によって、 β_{50} のばらつきは低減されるとともに、その平均値はほぼ目標値に一致している。図-6は、修正レベル1設計によって決定した堤体幅と、レベル3設計法により決定した堤体幅を比較したものである。これにより、両者の堤体幅は概ね一致していることがわかる。また、参考として、修正レベル1設計による堤体幅と、その際の現行設計法における滑動安全率の関係を図-7に示す。これを見ると、滑動安全率のばらつきは大きく、現行の安全率によっては安全性を制御できないことがわかる。

以上のことから、今回提案する手法が、設計供用期間中の累積滑動量に基づく安全性を制御対象とした、信頼

性の高い設計法であることを確認した。

5. ま と め

本研究ではまず、森屋ら(2003)による設計波1波による滑動量に基づく破壊確率 P_{f1} と、下迫・高橋(1998)による設計供用期間中の来襲波群による累積滑動量に基づく破壊確率 P_{f50} との比較を行い、 P_{f50} と P_{f1} の比に対する波浪の極値分布形の影響を明らかにした。その結果、設計供用期間中の滑動安全性に対する波浪の極値分布形の影響は大きく、 P_{f1} を制御しても P_{f50} としては大きく変化し、危険な設計になることがわかった。

次に P_{f50} を制御対象とするために、北野(2003)が提案する波浪の極値分布形を表す汎用指標やその他の設計条件を用い、レベル1設計法における目標安全性指標 β_{1T} を修正する手法を提案した。さらに、今回提案する手法により、簡易なレベル1設計法でありながら、下迫・高橋(1998)のレベル3設計法とほぼ同程度の信頼度を有する設計が可能となることを示した。

参 考 文 献

- 北野利一(2003): 極値波高分布の形状特性に対する汎用指標の提案, 海工論文集, 第50巻, pp. 211-215.
- 合田良実・小長谷 修・永井紀彦(1998): 極値波浪統計の母分布関数に関する実証的研究, 海工論文集, 第45巻, pp. 211-215.
- 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, 31 p.
- 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.
- 高田悦子, 諸星一信, 平石哲也, 永井紀彦, 竹村慎治(2003): 我が国沿岸の波浪外力の分布(海象外力検討調査), 国総研資料 No. 88, 132 p.
- 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.
- 森屋陽一, 鷲尾朝昭, 長尾 毅(2003): ケーソン式混成堤の滑動量に基づくレベル1信頼性設計法, 海工論文集, 第50巻, pp. 901-905.
- 吉岡 健・長尾 毅・森屋陽一(2004a): 消波ブロック被覆堤の滑動量に基づくレベル1信頼性設計法, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 191-196.
- 吉岡 健, 長尾 毅(2004b): ケーソン式防波堤におけるレベル1信頼性設計法の合理的な適用方法に関する研究, 海工論文集, 第51巻, pp. 856-860.