

ケーソン式防波堤のライフサイクルコスト最小化法 に関する一考察

吉 岡 健*・長 尾 毅**

本研究では、ケーソン式防波堤の滑動破壊を対象とし、力の釣合いに基づく破壊確率と確率の変形量という制御対象の違いが、ライフサイクルコスト最小化設計法に及ぼす影響について明らかにした。設計条件の異なるケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の各 3 事例を検討対象とし、力の釣合いに基づく破壊確率については 1 次信頼性理論 (FORM) によって、確率の変形量については下迫・高橋 (1997, 1998) が提案するモンテカルロ法によって、それぞれライフサイクルコストを算出、比較した。その結果、復旧費を間接的被害まで含めて十分に評価すれば、力の釣合いに基づく簡易なライフサイクルコスト最小化法によっても、変形量による方法よりも安全側であるものの、現行法よりも経済的な設計が可能となることを示した。

1. はじめに

土木および建築構造物の標準設計法として今後の導入が期待されている信頼性設計法 (国土交通省, 2002) においては、各設計因子の不確定要因に基づく構造物の破壊可能性、言い換えれば安全性の定量評価に加え、その許容値をどの程度にするかという目標安全性水準の設定が必要となる。その際の最も有力な方法は、現行の設計法が担保する安全性の平均値をもって目標安全性水準とする方法であり、これによって過度に安全もしくは危険な設計の割合が減少し、合理的な設計が可能となる。一方、建設コスト縮減の観点から、目標安全性水準の設定方法の代替案として、初期建設費に、設計供用期間中の期待復旧費を加えた費用により定義されるライフサイクルコストが最小となる安全性水準を目標水準とする考え方があり (以下、LCC 最小化法と称す)。

ここでケーソン式防波堤の外的安定問題に着目すると、これまで力の釣合いによる破壊確率に基づく信頼性設計法 (例えば、高山ら, 1994; 長尾, 2001) と、確率の変形量に基づく方法 (例えば、下迫・高橋, 1997, 1998; 湯・土田, 1998) が提案されている。前者は、外的安定問題である滑動・転倒・支持力破壊の全ての破壊モードを対象とすることが可能であり、さらに従来の設計手法の利便性を維持し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、破壊の程度を評価できないという問題がある。後者は、モンテカルロ法 (以下、MCS と称す) によって設計供用期間中の確率の変形量を算出し、これによって性能を評価する方法であるが、計算にやや時間を要することや、精度の良い変形量評価手法は現在のところ滑動破壊モードに限られており、複数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こと等の問題がある。

このような設計に対する制御対象の違いに伴い、LCC

最小化法に関する研究もそれぞれ個別の検討がなされてきた。力の釣合いによる破壊確率に基づく方法については、滑動・転倒破壊を対象とした高山ら (1994)、河合ら (1997) の研究や、支持力破壊を含めた長尾 (2000) の研究があげられる。確率の変形量による方法については、滑動量のみを対象とした合田・高木 (1999)、三鼓ら (2000) の研究や、滑動量および沈下量を対象とした興野ら (2000) の研究がある。これらは制御対象が異なるため、同様の設計条件であってもその設計結果は異なる可能性がある。

以上の背景のもと、本研究ではケーソン式防波堤の滑動破壊モードを対象とし、制御対象の異なる LCC 最小化法が設計結果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 検討方法

(1) 力の釣合いに基づく LCC 算出法

力の釣合いによる破壊確率 P_f は、長尾 (2001) が用いた設計因子の従う確率分布をもとに、1 次信頼性解析 (FORM: First-Order Reliability Method) により性能関数の破壊点周りの線形化近似に基づく安全性指標 β を算出し、これを次式によって破壊確率に換算する。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Φ は標準正規確率分布関数である。

性能関数は、「港湾の施設の技術上の基準 (運輸省港湾局監修, 1999)」に従い、水平方向の力の釣合いによって定義する。また、計算において、水平波力と揚圧力は同様の確率分布に従うことから完全相関を仮定する。

ライフサイクルコストの算出においては、建設費、維持管理費、廃棄に要する費用などの設計供用期間中に発生する全ての費用を見積もる必要がある。しかしながら、本研究において対象とする防波堤は基本的にメンテナンスフリーであり、供用期間を過ぎても撤去されるものではないため、ライフサイクルコストを構成する要素は、初期建設費および被災時の復旧費のみと考えられる。こ

* 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 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

表-1 想定被災程度と対策工

	中規模被災	大規模被災
被災程度	マウンド上での滑動	マウンドからの滑落
対策工	①撤去工(上部工, 中詰砂, 根固・被覆ブロック, 消波ブロック), ②ケーソン浮揚, ③基礎工(基礎捨石本均し, 荒均し), ④本体工, ⑤根固・被覆工, ⑥上部工, ⑦消波工	①撤去工(同左, 水中作業), ②ケーソン浮揚(大型起重機船使用), ③基礎工(基礎捨石投入, 本均し, 荒均し), ④本体工, ⑤根固・被覆工, ⑥上部工, ⑦消波工

注) 下線部は消波ブロック被覆堤の場合のみ

のとき, ライフサイクルコストは次式で定義される.

$$ELC = C_i + EC_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, ELC : ライフサイクルコストの期待値, C_i : 初期建設費, EC_f : 期待復旧費である.

力の釣合いに基づく期待復旧費は, 長尾・森屋 (2004) に従い, 次式によって計算する. すなわち, 被災時の復旧費に, 複数の荷重作用における期待被災回数乗じて算出し, さらにポアソン過程に基づく社会的割引率によって現在価値換算する.

$$EC_f = \sum_{j=1}^m E_{fj} C_{fj} \frac{R}{T} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$R = \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+i)^k} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, m : 対象とする荷重ランク数, T : 設計供用期間, E_{fj} : 対象とする荷重による期待被災回数, C_{fj} : 被災時の復旧費, i : 社会的割引率である.

対象とする荷重作用による期待被災回数は, 荷重作用がポアソン過程に従うと仮定すると, 結局次式によって計算できる.

$$E_{fj} = \nu_j TP_{fj} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに, P_{fj} : 対象とする荷重の作用による破壊確率, ν_j : 対象とする荷重の年平均発生率 ($=1/r$), r : 対象とする荷重の再現期間である. 式 (5) によってあるランクの荷重作用による期待被災回数を算出する場合, その荷重作用による破壊確率には, 対象とするランク以上の荷重作用による破壊確率が含まれているので注意を要する. 詳細は, 長尾・森屋 (2004) を参照されたい.

被災時の復旧費の算出にあたっては, 表-1 に示す中規模被災と大規模被災を想定し, 原型復旧に要するそれぞれの対策費を積算する. しかしながら, 力の釣合いに基づく破壊確率では被災規模の判定は不可能であるため, 中規模被災と大規模被災の平均復旧費を用いる.

(2) 変形量に基づく LCC 算出法

確率の変形量は, 下迫・高橋 (1997, 1998) が提案す

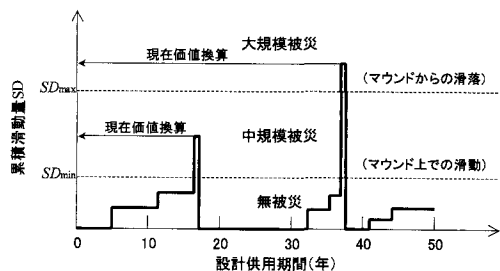


図-1 滑動量に基づく復旧費算定モデル

表-2 変形量に基づく期待復旧費算出方法の比較

論文	合田・高木 (1999)	興野ら (2000)	三鼓ら (2000)	本研究
復旧費算出に 用いる変数	供用期間中の 総滑動量	破壊確率 (許容値超 過確率)	供用期間中の 総滑動量	毎年の累積 滑動量
変形量と復旧 費の関係	連続的 に増加	段階的 に増加	段階的 に増加	段階的 に増加
供用期間中の 被災回数 E_f	SD_T/SD_{max}	未考慮	1回	図-1
期待値算出法	試行回数分 の平均	破壊確率× 復旧費	試行回数分 の平均	試行回数分 の平均
経済効果	未考慮	未考慮	未考慮	考慮

注) SD_T : 供用期間中の総滑動量, SD_{max} : マウンドからの滑落限界

る MCS を用いた計算法により, 設計供用期間中の試行別累積滑動量を算出する. ここで, 設計因子の従う確率分布は力の釣合いによる方法と同様とし, 波力の時系列モデルは谷本ら (1996) が提案する三角パルス波形に正弦波を組み合わせるモデルを用いる.

本研究で提案する復旧費算定モデルおよび期待復旧費算出方法の既往文献との比較を, それぞれ図-1, 表-2 に示す. 興野ら (2000) の方法は, 復旧費算出に用いる説明変数として MCS による破壊確率を用いており, 設計供用期間中の被災回数を考慮していない点に問題がある. また, 合田・高木 (1999) は, 設計供用期間中の試行別総滑動量を説明変数とし, 設計供用期間中の被災回数を, 総滑動量とマウンドからの滑落限界滑動量との比によって考慮している. しかしながら, この被災回数の評価法は, 図-1 からわかるように, 滑動量の値によっては適切ではない場合がある. 三鼓ら (2000) は, 試行別総滑動量を説明変数としている点では合田・高木 (1999) と同様であるが, 被災回数を 1 回としている点に問題がある. また, いずれの方法も社会的割引率による経済効果を導入したものではない.

そこで本研究では, 復旧費算定に用いる説明変数として, 図-1 に示すように毎年の累積滑動量を用いる. ここで, 被災および被災規模の判定は, 三鼓ら (2000) と同

表-3 計算条件

構造形式	ケーソン式混成堤			消波ブロック被覆堤		
ケース名	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3
h	10.0	15.6	21.0	11.5	17.2	19.0
h'	7.5	12.0	16.0	8.5	12.5	13.0
B_M	5.5	10.4	14.0	7.0	11.3	7.5
S	1/300	1/100	1/130	1/100	1/100	1/500
$H_{\max 50}$	7.1	11.7	12.8	8.0	10.7	11.1
T_{50}	13.0	14.0	13.5	12.0	16.5	13.0
γ_{50}	1.16	1.20	1.15	1.26	1.23	1.26

注) h : ケーソン前面水深(m), h' : ケーソン設置水深(m), B_M : 港内側マウンド肩幅(m), S : 海底勾配, $H_{\max 50}$: 50年確率最高波高(m), T_{50} : 50年確率有義波周期(s), γ_{50} : 裾長さパラメータ

様に, $SD_{\min}$ 未満を無被災, $SD_{\min}$ 以上かつ $SD_{\max}$ 未満を中規模被災, $SD_{\max}$ 以上を大規模被災と定義する. 次に, 設計供用期間に至るまでの累積滑動量 SD が $SD_{\min}$ を超過した時点で被災と判定し, $SD_{\max}$ との大小によって被災規模を評価する. 続いて, 力の釣合いによる方法と同様に表-1に従って復旧費を算出し, さらに被災年に応じて現在価値換算する. 被災後は直ちに原型復旧されるものと想定して被災年の累積滑動量をゼロとし, 以後同様の方法によって設計供用期間中の累積復旧費を算出する. これをMCSの試行回数分繰返し, その算術平均によって期待復旧費とする. 今回提案する方法によれば, ポアソン過程に基づく被災時期や設計供用期間中の被災回数を, より直接的に考慮した復旧費の算出が可能となるとともに, 被災時期に応じた復旧費の現在価値を適切に評価できる.

(3) 計算条件

全国のケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の設計資料から, 設計条件の異なる3事例を選定し, 計6事例について検討を行った. 計算条件を表-3に示す. ここに, γ_{50} は合田(2002)が提案する裾長さパラメータ(50年確率波高に対する10年確率波高の比)であり, 沖波の極値分布形の裾の広がり具合を表す指標である.

設計供用期間は通常用いられる50年とし, 社会的割引率は土木事業における一般的な値である4%を用いた. また, 力の釣合いに基づくLCC算出法において, 考慮する荷重すなわち波高の再現期間は, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 500, 1000, 5000年の9段階とし, 極値統計解析によってそれぞれ算定した. 変形量に基づくLCC算出法において, MCSの試行回数は5000回とし, 被災を定義する滑動量 $SD_{\min}$ は一般的な値である30cm, 被災規模を判断する滑落限界滑動量 $SD_{\max}$ は表-3に示す港内側のマウンド肩幅 B_M とした. また, 初期建設費および被災時の復旧費は, 直接工事費とし, 「港湾土木請負工事積算基準(国土交通省港湾局監修, 2002)」を参考に算出した.

被災時の復旧費には, 直接的な被害費用(物理的な復

旧に要する費用)に加えて, 社会経済面における間接的な被害費用を考慮する必要があるが, これは背後圏の状況によって複雑に変化するため算定困難である. したがって本研究では, これを考慮するため, 前述した復旧費を α 倍 ($\alpha=1, 3, 10$) した場合の感度分析を行った. ここで, 港湾構造物に対する間接被害費用の研究例として, 柴崎ら(2003)が行った重力式岸壁の地震災害に対する検討によると, その間接被害費用は直接被害費用の1~8倍程度である. 対象構造物が異なるため, 一概に比較はできないが, $\alpha=3$ とすれば, 間接被害費用としては十分であり, $\alpha=10$ はその上限に値すると考えられる.

以上の解析を, ケーソン堤幅を10cm刻みで変化させて実施し, ライフサイクルコストを比較した.

3. 検討結果

図-2に, 極値統計解析および浅水変形, 碎波変形計算によって算出した再現期間別の最高波高を示す. 再現期間に対する最高波高の増加程度は, ケース毎に大きく異なっており, 特にC-3やD-2, D-3の大水深域では, 再現期間の増加に伴い, 重複波領域から碎波領域に遷移している. また, 最高波高には浅水変形, 碎波変形の影響も加味されるため, 再現期間に対する最高波高の増加程

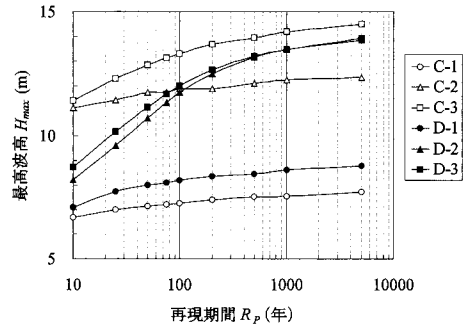


図-2 再現期間別の最高波高

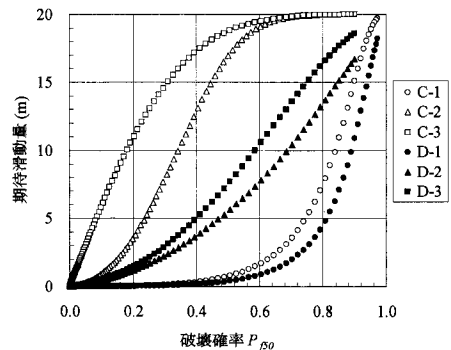


図-3 50年確率波による条件付き破壊確率と期待滑動量の関係

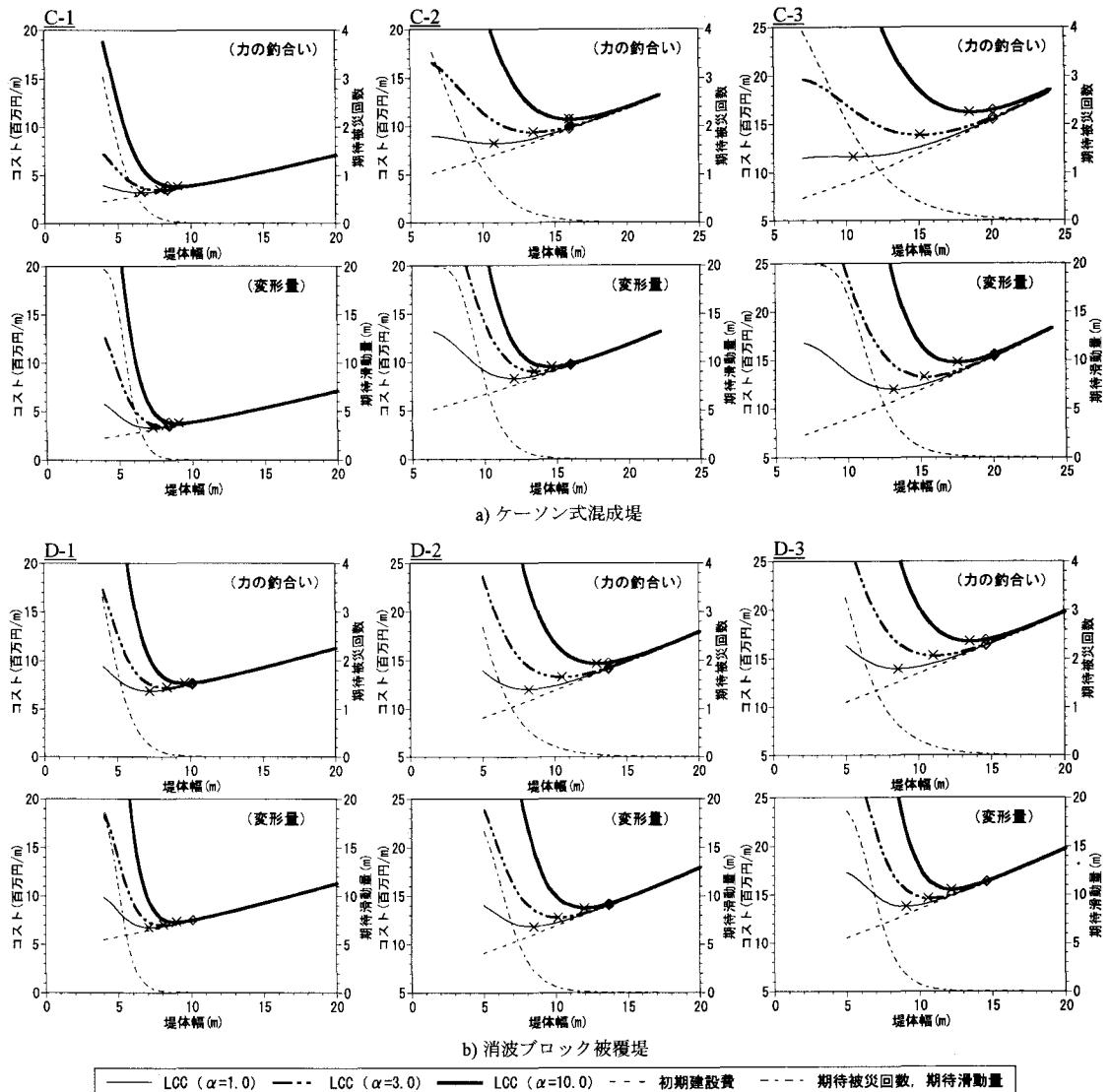


図-4 ライフサイクルコスト

度と裾長さパラメータとの相関性は明瞭ではない。

図-3は、力の釣合いに基づく破壊確率(50年確率波による条件付き破壊確率)と期待滑動量の関係を示したものである。期待滑動量の算出においては、設計供用期間中の総滑動量の上限を20mとしている。図-2と同様、破壊確率に対する期待滑動量の増加程度は、ケース毎に大きく異なっており、いずれのケースも破壊確率と期待滑動量には高い正の相関がある。このような力の釣合いに基づく破壊確率と変形量との相関性については、鷲尾ら(2003)に詳しい。

図-4にライフサイクルコストの算出結果を示す。図中×印はライフサイクルコストが最小となる堤体幅を表し、◇印は現行設計法(許容滑動安全率1.2)によって決

定した断面を表す。さらに、図-4の×印に示したLCC最小化法による設計断面を、力の釣合いに基づく方法と変形量に基づく方法と比較したものを図-5に示す。これらを見ると、直接的被害のみを考慮した $\alpha=1.0$ の場合では、D-1を除く全てのケースで、力の釣合いに基づく方法の方が変形量に基づく方法よりも堤体幅は小さく、危険側の設計となっている。これに対し、間接的被害も想定した $\alpha=3.0$ の場合では、消波ブロック被覆堤の3ケースについて、力の釣合いに基づく方法の方が堤体幅は大きく、安全側の設計となっている。間接的被害を最大限に考慮して $\alpha=10.0$ とした場合では、C-1以外の全ケースにおいて力の釣合いに基づく方法の方が安全側の設計となっている。また、 $\alpha=10.0$ とした場合であって

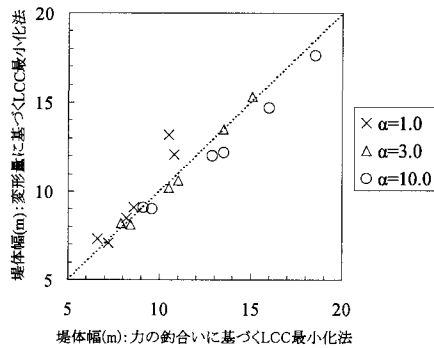


図-5 設計断面の比較

も、現行設計法よりも経済的な堤体幅が決定されるケースが多い。これは、現行設計法による断面では力の釣合いに基づく期待被災回数や期待滑動量がほぼゼロであるために、ライフサイクルコストに占める期待復旧費の割合が微小だからである。このことは、LCC 最小化法の導入意義をさらに高めるものである。

図中に併記した期待被災回数および期待滑動量を見ると、いずれも堤体幅の縮減に伴って指数関数的に増加しているが、前者はその増加傾向が緩やかでかつ堤体幅の大きい段階から増加が生じている。一方、後者は増加傾向が急激でかつ堤体幅がある程度小さくなるまで増加が生じていない。これは、力の釣合いに基づく期待被災回数は、僅かでも荷重が耐力を上回れば破壊と判定するためであると考えられ、このことが上記の設計結果の違いを生じさせる要因となっている。

以上のことから、復旧費を間接的被害まで含めて十分に評価すれば、力の釣合いに基づく簡易な LCC 最小化法によっても、変形量による方法よりも安全側であるが、現行法よりも経済的な設計が可能となる。

4. ま と め

本研究では、ケーソン式防波堤の滑動破壊を対象とし、力の釣合いに基づく破壊確率と確率の変形量という制御対象の違いが、LCC 最小化設計法に及ぼす影響について検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- ① モンテカルロ法による設計供用期間中の試行別累積滑動量に基づき、社会的割引率による経済効果を適切に考慮可能な期待復旧費の算出方法を提案した。
- ② ケーソン式防波堤の場合、復旧費を間接的被害まで含めて十分に考慮しても、LCC 最小化法による設計

断面は、現行設計よりも経済的な断面となることが多い。このことは、LCC 最小化法の導入意義をさらに高めるものである。

- ③ 復旧費を間接的被害まで含めて十分に評価すれば、力の釣合いに基づく簡易な LCC 最小化法によっても、変形量による方法よりも安全側であるが、現行法よりも経済的な設計が可能となる。

参 考 文 献

- 運輸省港湾局監修 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1181 p.
- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也 (1997): 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港研報告, Vol. 36, No. 4, pp. 3-41.
- 興野俊也・赤石沢総光・阿部光信・長松 徹 (2000): 性能設計活用による防波堤の設計合理化について, 海工論文集, 第 47 巻, pp. 816-820.
- 合田良実・高木泰士 (1999): 信頼性設計法におけるケーソン防波堤設計波高の再現期間の選定, 海工論文集, 第 46 巻, pp. 921-925.
- 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.
- 国土交通省港湾局監修 (2002): 港湾土木請負工事積算基準, (社)日本港湾協会, 平成 14 年度改訂版.
- 柴崎隆一・森屋陽一・渡部富博・安間 清 (2003): 貨物輸送費用も考慮した港湾施設の耐震設計における経済評価手法の構築, 国総研資料, No. 125, 27 p.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1997): モンテカルロ法を用いた混成防波堤の期待滑動量の計算, 海工論文集, 第 44 巻, pp. 831-835.
- 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.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可 (1994): 防波堤の信頼性設計に向けて, 港研資料, No. 785, 36 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 (2000): 破壊確率を考慮した防波堤の期待費用最小化に関する研究, JCROSSAR 2000 論文集, pp. 441-448.
- 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.
- 長尾 毅・森屋陽一 (2004): 港湾構造物の目標安全性水準に関する研究, 構造工学論文集, 第 50 巻 A, pp. 187-197.
- 三鼓 晃・勝田栄作・榊原 弘・殿最浩司・佐藤広章 (2000): 沖波特性や各種不確定要因の推定精度が異なる地点での期待滑動量と期待総費用について, 海工論文集, 第 47 巻, pp. 826-830.
- 湯 怡新・土田 孝 (1998): 波圧作用時における防波堤基礎の支持力不足に伴う沈下量の計算法, 土木学会論文集, No. 645, III-50, pp. 91-102.
- 鷲尾朝昭・森屋陽一・長尾 毅 (2003): ケーソン式防波堤の滑動破壊における信頼性設計の制御対象に関する研究, 海工論文集, 第 50 巻, pp. 906-910.