



# ライフサイクルコスト最小化による防波堤の目標整備水準の検討

長尾, 毅  
辻尾, 大樹  
熊谷, 健蔵

---

## (Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 69(2):I\_951-I\_955

## (Issue Date)

2013

## (Resource Type)

journal article

## (Version)

Version of Record

## (Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002806>



# ライフサイクルコスト最小化による防波堤の目標整備水準の検討

## A Study on Target Safety Level of Breakwaters in View of Life Cycle Cost

長尾 毅<sup>1</sup>・辻尾大樹<sup>2</sup>・熊谷健蔵<sup>3</sup>

Takashi NAGAO, Daiki TSUJIO and Kenzou KUMAGAI

This study discusses the evaluation method of target safety level of composite breakwaters and breakwaters covered with wave dissipating concrete blocks in view of minimum life cycle cost. Authors evaluated target safety levels of breakwaters under various conditions on waves and disaster loss costs. As the results, it was found that effect of disaster loss cost is smaller than that of wave conditions on target safety level. Target safety level was found to be strongly dependent on wave breaking conditions.

### 1. はじめに

近年、ライフサイクルコスト（以下、LCC）最小化を考慮した設計法は、土木構造物を新設する際の設計法としてのみならず、既設構造物の維持管理計画を立案する際にも合理的な手法として適用が期待されている。道路や橋梁等の土木構造物あるいは栈橋等の係留施設に対しては、構造物の劣化予測から維持補修費を計算し、LCCを求める手法が提案されている。しかし、本研究で対象としている防波堤に関しては、上記の構造物とは異なり、毎年のように来襲する高波浪に伴う被害に対する補修の方が構造物の劣化よりも卓越する場合が多い。

こうした背景のもと、防波堤の波浪作用による破壊を考慮したLCC最小化の検討が進められている（例えば、吉岡・長尾, 2004）。防波堤のLCC算出法は、モンテカルロシミュレーション（以下、MCS）に基づいた滑動量解析から滑動量に応じた被害額を算出し、これに初期建設費を加えたLCCが最小となる断面を検討するものである。また、高山ら（2009）は、防波堤や護岸の被覆材に着目し、設計供用期間中のブロック補修費を考慮して、初期建設費からLCCを算出する方法を提案している。さらに、宮田ら（2009）は、既存の消波ブロック被覆堤を対象として、高山らのブロック補修費に加えて、過去の被災事例から大規模な被害に対する復旧費をモデル化し、ブロック補修費を加えた維持管理費が最小となるブロック補修基準を検討している。また、長尾ら（2010）は、宮田らの復旧費モデルの改良に加え、防波堤の平面的な被災を考慮して、直接被害額を計上し、維持管理費が最小となるブロック補修水準を検討している。LCCの算出に関して、長尾ら（2011）は、直接被害額に大規模な被災に伴う間接被害費用を計上し、異なる耐波安定性を有する防

波堤断面に対して、LCCを最小にする耐波安定性水準を検討している。

しかし、防波堤に関する既往のLCC検討事例では、設計条件や現地の条件等によってLCC最小となる耐力作用比が異なることが指摘されている。

そこで本研究は、防波堤のLCC最小の耐力作用比（以下、目標整備水準）の評価手法を確立するための基礎的な検討として、混成堤と消波ブロック被覆堤（以下、消波堤）に対して、様々な波浪条件、設計条件、被害額条件を設定し、それらと目標整備水準の関係を検討するものである。

### 2. 計算条件と解析手法

#### (1) 計算条件

検討条件は、長尾ら（2013）で検討した断面を対象として、50年確率沖波波高を5.0mと7.5m、設置水深を10mと15mに設定し、それらの組合せで4caseとした。本検討では、4caseで混成堤と消波堤を検討対象としており、設計条件を表-1に示す（混成堤：case1～4、消波堤：case1s～4s）。各caseに対して、同一天端高で堤体幅を変えた耐力作用比（R/S）で0.6～1.4となる5断面を設定し、case1とcase1sのR/S=1.0を例に図-1に示す。また、設定した防波堤の諸元は表-2に示す。

なお、消波堤前面に設置する消波ブロックの質量はハドソン式で求める必要質量を満足する最小のブロックを採用した。

#### (2) 解析手法

滑動量解析手法として、混成堤には下迫・高橋（1998）の滑動量解析モデルを用い、消波堤には下迫ら（2006）のモデルを用いた。計算手法としては、長尾ら（2012a）と同様に1年間の防波堤の滑動量を、重点サンプリング法を用いて算出し（MCS1）、MCS1で得られた1年間の滑動量の確率分布関数から50回サンプリングして50年間の累積滑動量を算出した（MCS2）。MCS2では、滑動が発生した

1 正会員 工博 神戸大学教授 都市安全センター  
2 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株)  
3 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株)

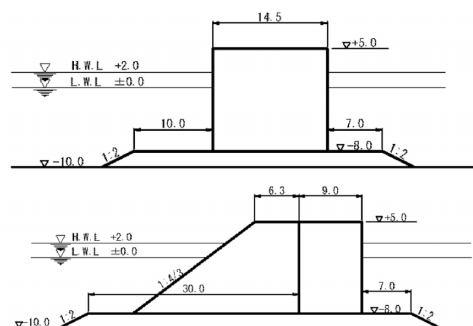


図-1 防波堤の対象断面図例 (R/S=1.0, 上:混成堤case1, 下:消波堤case1s)

ものの補修基準に達しておらず、補修しないとした場合に、翌年以降の滑動量の増大傾向を考慮することとした。既往の研究により、マウンド肩幅が防波堤の滑動抵抗に大きく影響し、マウンド肩幅が狭くなるにつれて同じ波浪作用に対して滑動量が増加することが明らかとなっている（長尾・橋本，2012）。このため、防波堤に滑動が生じたもののそのまま放置する場合は、初期状態と比較してマウンド肩幅が減少するため滑動が生じやすくなるといえる。滑動発生による滑動抵抗の減少割合の正確な評価を行うにはデータが不足しているため、本研究では便宜的に次のような手法を適用した。ある年に滑動量  $SLD$  が発生した場合、別途計算しておいた耐力作用比 0.5～1.4 の滑動量の確率分布関数を用いて、次式で求める平均滑動量となるように、滑動発生後の確率分布関数を求め、翌年以降の滑動量をサンプリングする。この手法の妥当性は今後さらに検討する必要がある。

$$\mu' = \{BM_r / (BM_r - SLD)\}^2 \cdot \mu \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $\mu'$ : 滑動後に適用する確率分布関数の平均滑動量、 $\mu$ : 滑動前の確率分布関数の平均滑動量、 $BM_r$ : 港内側のマウンド肩幅、 $SLD$ : 滑動量である。

次に、設計供用期間中の滑動被災に伴う被害額として、直接被害額は、長尾ら（2012a）の滑動量と被害額の関係をモデル化した既往モデルに復旧方法のバラツキを考慮したモデルで算出した。間接被害額は、基本的に長尾ら（2012a）の算出法を用いているが、設計供用期間中に、一度でも防波堤が被災し、復旧せずに残置した場合にも、復旧した場合と同様に間接被害額が毎年発生しているとして、間接被害額を計上するように既往モデルを改良して算出した。また、間接被害額は、補修水準への影響を把握するため、耐力作用比 1.0 の初期建設費に対する年間最大間接被害額の比率（以下、間接被害額比、IDC）を設定し、IDC1) 0.33, IDC2) 0.67, IDC3) 1.0 の 3 種類とした。復旧水準は、混成堤、消波堤ともに滑動量を指標として、0.1～10m と設定した。また、波浪条件として、沖波極値

分布の影響は想定されるが、本検討では、沖波極値分布を Weibull 分布、形状母数  $k=1.4$  と設定し、裾長さパラメータ  $\gamma_{50}$  が 1.2 程度となるようにその他の係数を設定した。その他の MCS における計算条件は表-3 に示す通りである。

表-1 設計条件

項目	値			
case	1	2	3	4
設計波	波浪1	波浪2	波浪1	波浪2
波高	5.0m	7.5m	5.0m	7.5m
周期	10.3s	12.7s	10.3s	12.7s
設計潮位	H.W.L. (+2.0m)			
設置水深	-10m	-10m	-15m	-15m
マウンド厚	2m	2m	4m	4m
マウンド前幅	混成堤: 10m, 消波堤 30m			

表-2 防波堤諸元

項目	値				
case1					
耐力作用比	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
天端高 (m)	5.0				
混成堤堤体幅 (m)	9.0	11.5	14.5	17.5	20.5
消波堤堤体幅 (m)	5.5	7.5	9.0	11.0	13.0
case2					
耐力作用比	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
天端高 (m)	6.1				
混成堤堤体幅 (m)	10.0	13.0	16.0	19.5	23.0
消波堤堤体幅 (m)	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
case3					
耐力作用比	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
天端高 (m)	4.8				
混成堤堤体幅 (m)	7.5	9.5	12.5	14.5	17.0
消波堤堤体幅 (m)	5.0	7.0	9.0	10.5	12.0
case4					
耐力作用比	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
天端高 (m)	6.5				
混成堤堤体幅 (m)	12.0	16.0	20.0	24.0	28.0
消波堤堤体幅 (m)	7.5	10.0	12.5	15.0	17.0

表-3 MCS の計算条件

項目	値
沖波確率分布	Weibull 分布
波浪1 ( $\gamma_{50}$ )	$k=1.4, A=1.33, B=2.00 (\gamma_{50}=1.23)$
沖波確率分布	Weibull 分布
波浪2 ( $\gamma_{50}$ )	$k=1.4, A=1.70, B=3.00 (\gamma_{50}=1.23)$
潮位	0.0m～2.0m
継続時間	2時間
供用期間	50年間
復旧水準 (滑動量, m)	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0
繰返し回数	MCS1: 8,000,000回 MCS2: 50,000回

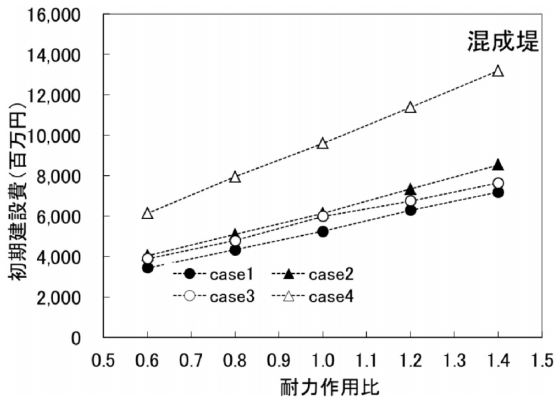


図-2 耐力作用比 (R/S) に対する初期建設費 (混成堤)

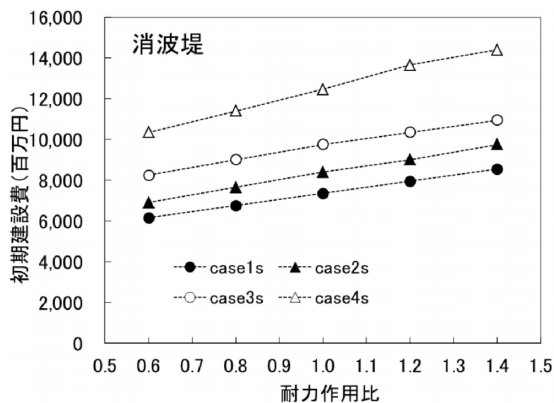


図-3 耐力作用比 (R/S) に対する初期建設費 (消波堤)

### 3. LCCの算出

#### (1) 初期建設費

まず、各caseの防波堤に関して、初期建設費を算出した。なお、初期建設費の算出には、ケーソン製作据付：15,000円/㎡、捨石マウンド4,000円/㎡等の単価を用いた。初期建設費の算出結果について、耐力作用比との関係を混成堤、消波堤について、それぞれ図-2、図-3に示す。以降、費用は全て延長1,500mあたりである。case毎の費用の差は設計波や設置水深によるものであり、消波堤の方が混成堤よりも耐力作用比に対する初期費用の増大傾向の勾配が緩やかである。これは、全ての耐力作用比で同一の消波ブロックを用いており、その費用は耐力作用比によって変わらないためである。

#### (2) 期待補修費とLCCの算出

次に、長尾ら(2013)が求めたように、各ケースの防波堤に対して、設定した復旧開始水準に基づいて、50年間の期待被害額をMCSによって算出した。初期建設費に50年間の期待被害額を加えて、各ケースの防波堤のLCCを算出した。消波堤case1s、耐力作用比R/S = 1.0を例に復旧開始水準とLCCの関係を図-4に示す。図中のLCC1, 2,

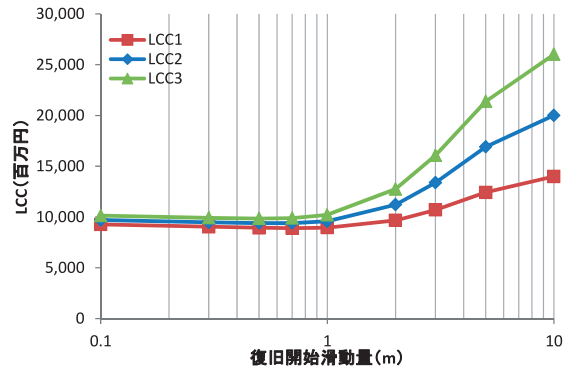


図-4 復旧開始滑動量とLCCの関係 (case1s, R/S=1.0)

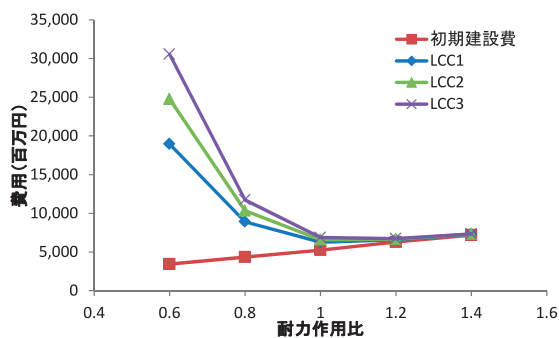
表-4 最適な復旧開始滑動量の例 (case1とcase1s)

case	R/S	間接被害額比：IDC		
		1	2	3
混成堤 case1	0.6	0.5	0.3	0.3
	0.8	0.7	0.7	0.5
	1.0	1.0	0.7	0.7
	1.2	1.0	0.7	0.7
	1.4	1.0	1.0	1.0
消波堤 case1s	0.6	0.3	0.3	0.3
	0.8	0.7	0.5	0.3
	1.0	0.7	0.5	0.5
	1.2	0.7	0.7	0.7
	1.4	1.0	0.7	0.7

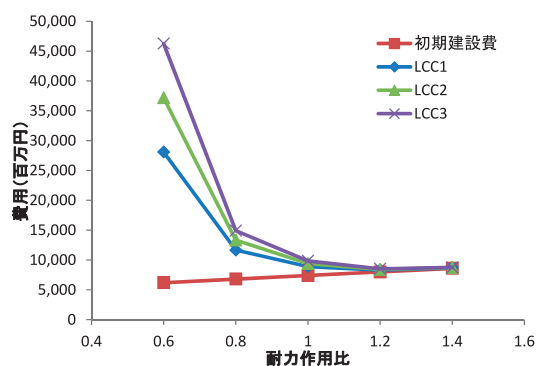
3はIDC1, 2, 3の間接被害額比を用いた場合に対応するLCCである。本ケースでは、LCC1, 2, 3のそれぞれに対して、復旧開始滑動量が0.7m, 0.5m, 0.5mの時、LCCが最も小さくなった。長尾ら(2013)が指摘しているように、間接被害額比が異なる環境においては、LCCを最小にする復旧開始水準が異なることが分かる。また、混成堤case1および消波堤case1sを例として、LCCが最小となる復旧開始滑動量を表-4に示す。混成堤case1の場合、間接被害額比1～3に対して、耐力作用比0.6～1.4の時、LCCが最小となる復旧開始滑動量は0.3m～1.0mであった。また、消波堤case1sの場合も混成堤と同様にLCCが最小となる復旧開始滑動量は0.3m～1.0mであったが全体的に復旧開始滑動量が混成堤よりも小さいことが分かる。

#### (3) LCC最小となる耐力作用比

各caseの防波堤に対して、算出したLCCが最小となる耐力作用比(目標整備水準)を求める。混成堤case1および消波堤case1sを例として、耐力作用比とLCCの関係を図-5に示す。混成堤case1の場合、間接被害額比1～3に対して、耐力作用比がそれぞれ1.0, 1.0, 1.2の時にLCCが最小となった。また、消波堤case1sの場合、間接被害額比1～3に関わらず、耐力作用比1.2がLCC最小値となった。

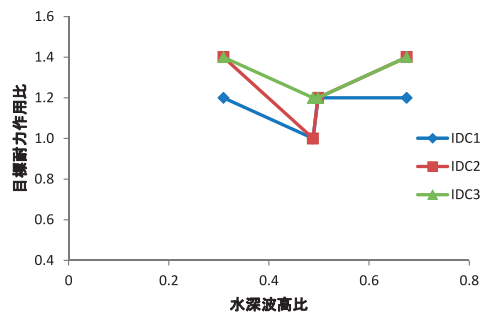


(a) 混成堤, case1

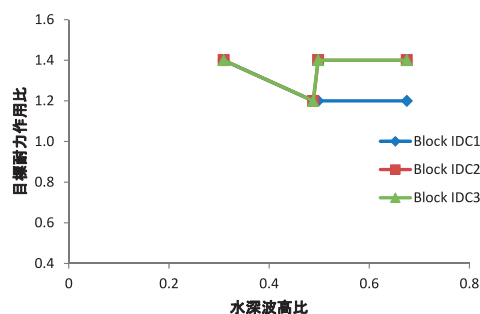


(b) 消波堤, cases

図-5 耐力作用比とLCCの関係



(a) 混成堤



(b) 消波堤

図-6 水深波高比と目標整備水準の関係

表-5 目標整備水準 (R/S) の結果

case		間接被害額比: IDC		
		1	2	3
混成堤	case1	1.0	1.0	1.2
	case2	1.2	1.4	1.4
	case3	1.2	1.4	1.4
	case4	1.2	1.2	1.2
消波堤	case1s	1.2	1.2	1.2
	case2s	1.2	1.4	1.4
	case3s	1.4	1.4	1.4
	case4s	1.2	1.4	1.4

全てのcaseの目標整備水準は表-5に示す通りである。混成堤では1.0～1.4, 消波堤では1.2～1.4の間でばらついていることが分かり, 海象条件や間接被害額条件によってLCCを最小にする目標整備水準が大きく異なることが分かる。

#### 4. 考察

##### (1) 目標整備水準と波浪条件

LCC最小となる目標整備水準に関して, まず, 波浪条件との関係を調べた。波浪条件としては, 長尾ら (2012a) が指摘しているように碎波条件と耐波安定性の関係が強いことから, 碎波条件の指標として, 水深波高比 (設計

有義波/設置水深) と目標整備水準との関係を調べ, 図-6に示す。各caseによって, バラツキはあるが, 水深波高比0.5付近で目標整備水準がやや小さくなる傾向があった。これは, 水深波高比が0.5程度で有義波高の碎波限界付近となり, 設計条件が水深波高比0.5程度の場合は設計波を上回る波高が発生する確率がかなり小さいためであると考えられる。この傾向は, 混成堤の方が消波堤よりも顕著に見受けられる。また, 長尾ら (2013) においても期待滑動量と水深波高比の関係も同様に水深波高比0.5程度で極小値をとることを報告している。

##### (2) 目標整備水準と間接被害額条件

次に, 目標整備水準と間接被害額条件との関係を調べた。間接被害額条件として, 間接被害額比IDCとの関係を調べ, 図-7に示す。全体的な傾向として, 間接被害額が大きくなると目標整備水準が大きくなるというやや右肩上がりの傾向は見受けられる。これは, 年間の最大間接被害額が大きい港湾を対象とする場合には被害額が大きくなるため, 目標整備水準を大きくする必要があることを示している。この傾向は消波堤よりも混成堤の方が大きい, その影響は少ない。目標整備水準に関して, 防波堤の耐波安定性が沖波極値分布, 波形勾配, 海底勾配, 設置条件等と複雑に関係しているため, 目標整備水準を



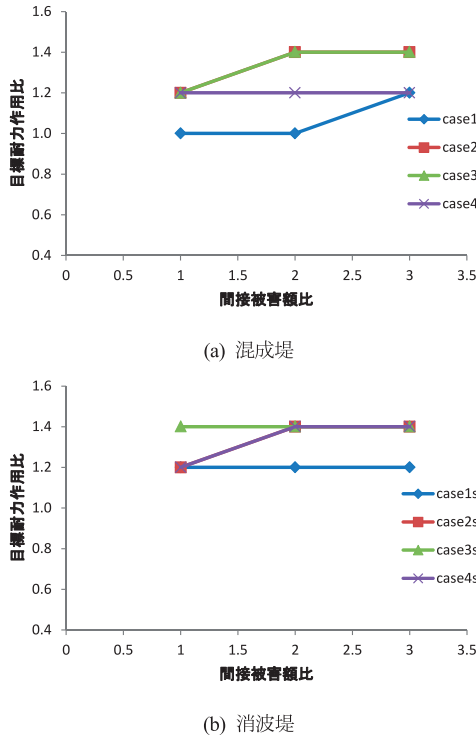


図-7 水深波高比と目標整備水準の関係

設計条件のみから簡易に推定することは困難であると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、防波堤のLCCを最小とする目標整備水準の評価手法を確立するために、混成堤と消波堤を対象として、様々な設定した条件と目標整備水準の関係を検討した。主要な知見は以下の通りである。

- 1) 混成堤と消波ブロック被覆堤を対象として、LCC最小となる目標整備水準を求める検討手法を様々な条件下で適用した。
- 2) 目標整備水準は波浪条件や間接被害額条件に依存する傾向があり、この傾向は消波堤よりも混成堤の方が大きい。
- 3) 間接被害額条件の目標整備水準への影響は比較的小さく、波浪条件（碎波の影響）を比較的强大く受けることが分かった。

本研究では、碎波の影響としての波浪条件が目標整備水準に比較的强大く影響することは分かったが、防波堤の耐波安定性が様々な要因と複雑に関係していることから、目標整備水準を設計条件から簡易に推定することは困難と考える。そのため、現時点では、対象とする防波堤の個々の検討条件に対して、本手法を適用することで目標整備水準を求め、このような検討事例を積み重ねることで検討手法の適用性を高め、実務に適用していきたい。

## 参考文献

- 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.3-30.
- 下迫健一郎・大寄葉々子・中野史丈 (2006)：滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法，港湾空港技術研究所報告，第45巻，第3号，pp. 1-20.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2007)：消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討，海岸工学論文集，第54巻，pp.906-910.
- 高山知司・安田誠宏・辻尾大樹・井上順一 (2009)：ライフサイクルコストの最小化による沿岸構造物被覆材の最適設計，土木学会論文集B，Vol. 65，No. 1，pp.15-30.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2010)：平面的な被災を考慮した消波ブロック被覆堤の維持管理手法の検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66，No. 1，pp.836-840.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2011)：防波堤の目標耐波安定性水準の検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.I\_781-I\_785.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵・石河雅典 (2012a)：ライフサイクルコストの観点による混成堤の目標耐力作用比に関する基礎的検討，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 68，No. 2，pp.I\_294-I\_299.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2012b)：防波堤の目標耐力作用比に関する簡易推定手法の検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68，No. 2，pp.I\_876-I\_880.
- 長尾 毅・橋本 淳 (2012)：地盤ばねモデルを用いた防波堤の支持力性能照査法に関する一考察，土木学会論文集B2（海岸工学），第68巻，pp.846-850.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2013)：ライフサイクルコスト最小化の観点による既設防波堤の最適な復旧水準に関する研究，土木学会論文集B3（海洋開発）（印刷中）.
- 宮田正史・熊谷健蔵・辻尾大樹・大久保 陽介 (2009)：消波ブロック被覆堤の期待補修費を考慮した維持管理手法に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 65，No. 1，pp.911-915.
- 吉岡 健・長尾 毅 (2004)：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，海岸工学論文集，第51巻，pp.871-875.