



# 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

長尾, 毅  
辻尾, 大樹  
熊谷, 健蔵

---

## (Citation)

土木学会論文集B3 (海洋開発) , 69(2):I\_185-I\_190

## (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/20.500.14094/90002803>



# 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

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

<sup>1</sup>正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 大阪国際ビル)

E-mail: daiki.tsujio@pacific.co.jp

<sup>3</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13 大阪国際ビル)

E-mail: kenzou.kumagai@pacific.co.jp

本研究は、ライフサイクルコスト最小化の観点から、既設の混成堤と消波ブロック被覆堤を対象として、最適な復旧水準を一般化するための基礎的な検討として、異なる波浪条件、被害額条件を設定し、それらの条件が最適な復旧水準に与える影響を検討するものである。混成堤、消波堤ともに、期待滑動量は水深波高比と強い関係があり、本研究の対象条件の範囲では水深波高比0.5程度で極小値をとり、同じ耐力作用比であっても耐波安定性が異なることがわかった。防波堤の最適な復旧開始水準は、耐力作用比、波浪条件、間接被害額条件によって異なるが、耐力作用比に最も強く影響を受けることがわかった。本研究を通じて、既設防波堤の各条件に適用でき、復旧開始水準を定量的に評価できる解析手法を提案し、モデル防波堤によってその妥当性を確認した。

**Key Words :** *expected sliding distance, expected repairing cost, optimum maintenace level, breakwater*

## 1. はじめに

近年、ライフサイクルコスト（以下、LCCと略す）最小化の観点から、新設、既設を問わず、土木構造物のLCCを考慮した設計手法が検討されている。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。

こうした背景の下、防波堤に関するLCC最小化の検討が進められている<sup>1) 2)</sup>。防波堤のLCC算出法は、滑動量解析から滑動量に応じた被害額を算出し、初期建設費に加えて、LCCが最小となる断面を検討するものである。また、高山ら<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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<sup>6)</sup>は、直接被害額に加えて、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。

維持管理を主題とした既往の検討事例は、宮田らの消波ブロック被覆堤（以下、消波堤）で、限られた条件によるものである。また、ケーソン式混成堤を含めた事例やさまざまな条件に対する検討事例によって、最適な復旧水準を一般化するまでの情報は得られていない。

そこで本研究は、既設の混成堤と消波堤を対象とし、最適な復旧水準を一般化するための基礎的な検討として、異なる波浪条件、被害額条件を設定し、それらの条件が最適な復旧水準に与える影響を検討するものである。

## 2. 計算条件と解析方法

## (1) 計算条件

本検討では、モデル防波堤を設定して滑動量解析および期待補修費の計算を実施している。長尾ら<sup>7)</sup>では碎波条件の影響が滑動量解析に大きく影響すると指摘していることから、設計波高と設置水深をばらつかせて、それらの影響を把握することとした。50年確率沖波波高を5.0mと7.5mの2種類、設置水深を10mと15mの2種類に設定し、それぞれの組合せで計4ケースとした。本検討では、混成堤と消波堤のそれぞれ4ケースを検討対象としており、それらの設計条件を表-1に示す。

耐波安定性の違いによる復旧水準を検討するため、同一天端高で堤体幅を変えて、耐力作用比R/Sが0.6~1.4となるように各ケース5断面ずつ、設定した。それぞれの防波堤諸元を表-2に示す。設定した防波堤の断面図として、case1の耐力作用比1.0の混成堤と消波堤を例に、図-1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ま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

解析手法は、混成堤に下迫・高橋<sup>8)</sup>、消波堤に下迫ら<sup>9)</sup>の滑動量解析手法を用い、長尾ら<sup>6)</sup>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、滑動が発生した後、補修基準に達しておらず、補修しないとした場合の滑動量の増大傾向を考慮するために、次のような手法を適用している。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の確率分布関数を用いて、次式で求まる平均滑動量となるように、確率分布関数を求め、その関数から翌年以降の滑動量をサンプリングする。

$$\mu' = \left( \frac{BM_r}{BM_r - SLD} \right)^2 \cdot \mu \quad (1)$$

$\mu'$  : 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<sup>7)</sup>のモデルに復旧方法のばらつきを考慮したモデルで算出した。また、間接被害額に関して、基本的には長尾ら<sup>7)</sup>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

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

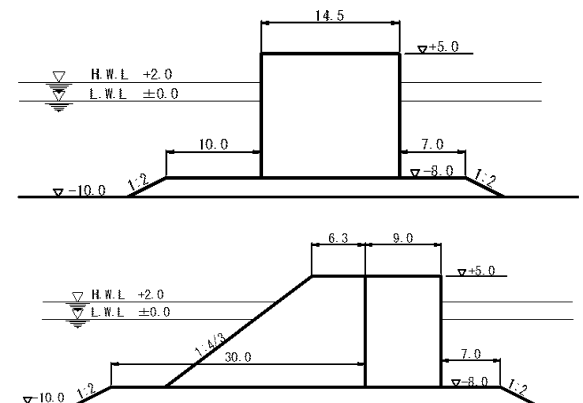


図-1 防波堤の断面図の例 (case1, 上: 混成堤, 下: 消波堤)

表-3 MCS計算条件

項目	値
沖波確率分布	Weibull 分布
波浪 1 ( $y_{50}$ )	$k=1.4, A=1.33, B=2.00 (y_{50}=1.23)$
沖波確率分布	Weibull 分布
波浪 2 ( $y_{50}$ )	$k=1.4, A=1.70, B=3.00 (y_{50}=1.23)$
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

期建設費に対する年間の最大間接被害額を比率（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。混成堤、消波堤とも、堤体が滑動した際の復旧水準に累積滑動量を指標とし、滑動量0.1~10mと設定した。その他の計算条件を表-3に示す。

### 3. 滑動破壊確率と期待滑動量

#### (1) 滑動破壊確率

混成堤、消波堤の各4ケース、5耐力作用比の防波堤断面に対して、MCS1として、1年間の滑動量解析を実施した。耐力作用比0.6が滑動した際に、式(1)で新たに確率分布関数を求める必要があるため、期待補修費は算出しないが、耐力作用比0.5の滑動量解析も併せて実施した。混成堤に関して、各ケースの滑動量に対する非超過確率を図-2に示す。case1を例として、滑動量0.1mに対する非超過確率は、耐力作用比0.6~1.4に対して、それぞれ0.877, 0.962, 0.991, 0.997, 0.999であった。各ケースの耐力作用比1.0の滑動量0.1mの非超過確率を比べると、case1:0.991, case2:0.963, case3:0.979, case4:0.985, であり、耐力作用比が同一であっても、耐波安定性は異なることがわかる。

#### (2) 期待滑動量

混成堤、消波堤の各4ケースに対して、1年間の滑動量解析の平均値としての期待滑動量を算出し、耐力作用比との関係を混成堤、消波堤、それぞれ、図-3、図-4に示す。当然であるが、耐力作用比が大きくなるにつれて、期待滑動量が小さくなる。しかし、例えば耐力作用比1.0であっても0.02~0.09mまで変化し、同じ耐力作用比であっても期待滑動量が異なることがわかった。そこで、耐力作用比毎の期待滑動量と水深波高比（設計有義波／設置水深）の関係を調べ、混成堤、消波堤それぞれ、図-5、図-6に示す。混成堤、消波堤とも、水深波高比が0.5

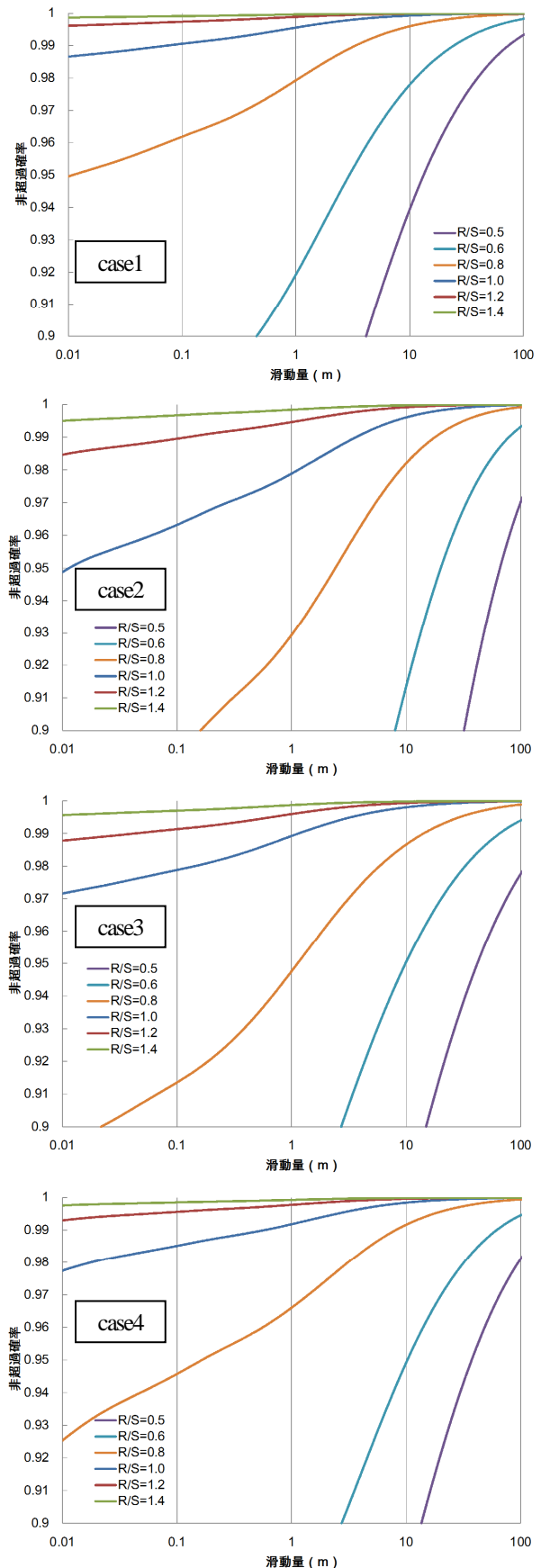


図-2 滑動量の非超過確率（混成堤，case1~4）

程度で期待滑動量が極小値をとるように変化することがわかった。これは、水深波高比が0.5程度で碎波限界波

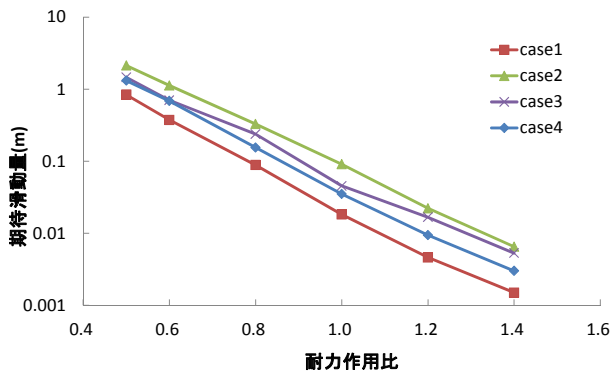


図-3 耐力作用比と期待滑動量の関係 (混成堤)

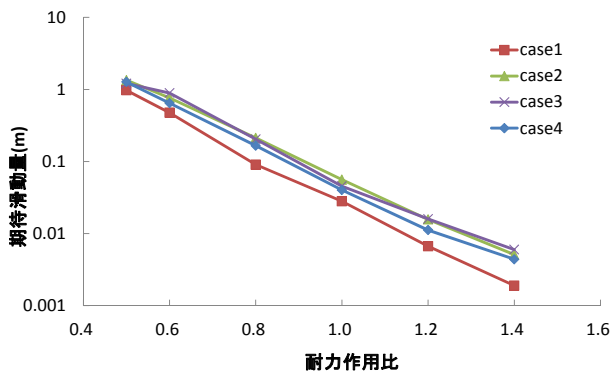


図-4 耐力作用比と期待滑動量の関係 (消波堤)

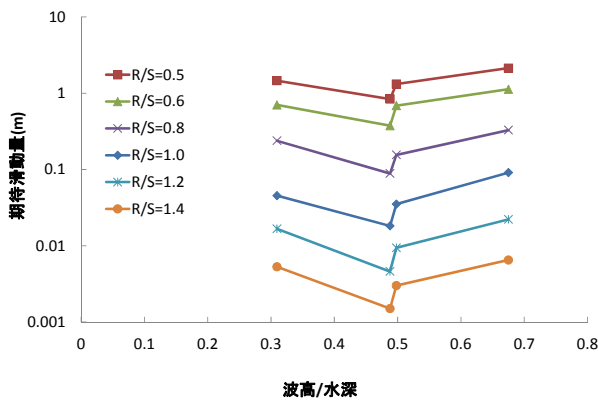


図-5 水深波高比と期待滑動量の関係 (混成堤)

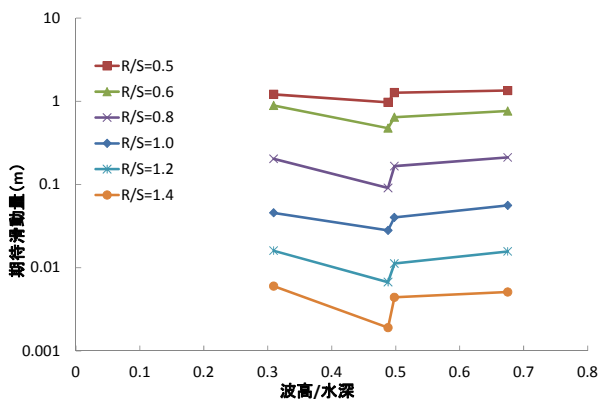


図-6 水深波高比と期待滑動量の関係 (消波堤)

高となり、設計波高がその設置水深での最大の波高となるため、他の条件よりも滑動量が小さくなる。水深波高比が0.5よりも大きいか小さくなると、設計波が設置水深での最大波高ではないため、設計波を上回る場合があり、期待滑動量が大きくなると考えられる。

#### 4. 期待被害額の算出

##### (1) 期待被害額の算出

MCS2の計算として、各ケースの混成堤、消波堤に対して、3つの間接被害額比IDCと設定した復旧水準毎に期待被害額を算出した。case1を例として、混成堤の耐力作用比 $R/S=0.6\sim 1.4$ に対する期待被害額を図-7に示す。混成堤の $R/S=1.0$ では、間接被害額比IDC1, 2, 3に対して、それぞれ復旧水準（復旧開始滑動量）が1.0m, 0.7m, 0.7mの場合に期待被害額が最小となった。これは、間接被害額が大きい場合には、早期に復旧する必要があることを示している。また、混成堤の $R/S=0.8$ の場合、IDC1, 2, 3に対して、復旧開始滑動量が0.7m, 0.5m, 0.5mの時に最小となった。耐力作用比が異なると期待被害額が最小となる復旧水準が異なることがわかる。一方、図に示さないが、消波堤に対しては、 $R/S=1.0$ では、間接被害額比IDC1, 2, 3に対して、復旧開始滑動量がそれぞれ0.7m, 0.5m, 0.5mの場合に期待被害額が最小となり、同じ耐力作用比の混成堤の場合よりも早期に復旧する必要があることがわかった。

##### (2) 最適な復旧水準

期待補修費が最小となる復旧水準（最適復旧水準）と耐力作用比の関係を調べ、混成堤と消波堤をそれぞれ図-8, 図-9に示す。 $R/S=0.6$ 程度では、復旧水準を0.1~0.3m程度にする必要があり、 $R/S=1.4$ では、復旧水準を1.0m程度まで放置することで補修費を低減させることができる。全体として、耐力作用比と最適復旧水準は正相関が高く、耐力作用比が小さい場合には早期に復旧する必要があることがわかった。

次に、期待滑動量と相関傾向があった水深波高比と最適復旧水準との関係を調べ、 $R/S=0.8, 1.0, 1.2$ の混成堤と消波堤の結果をそれぞれ図-10, 図-11に示す。しかし、混成堤、消波堤とも相関は見られなかった。最後に、最適復旧水準と間接被害額比IDCの関係を調べ、 $R/S=0.8, 1.0, 1.2$ の混成堤と消波堤の結果をそれぞれ図-12, 図-13に示す。混成堤、消波堤とも、間接被害額比IDC1であれば、0.7m~1.0m程度と最適な復旧水準は比較的大きいが、IDC3であれば、0.3~0.7m程度と最適な復旧水準は小さくなる。また、混成堤と消波堤ではやや消波堤の方が復旧水準は小さい。全体としては、間接被害額比が大

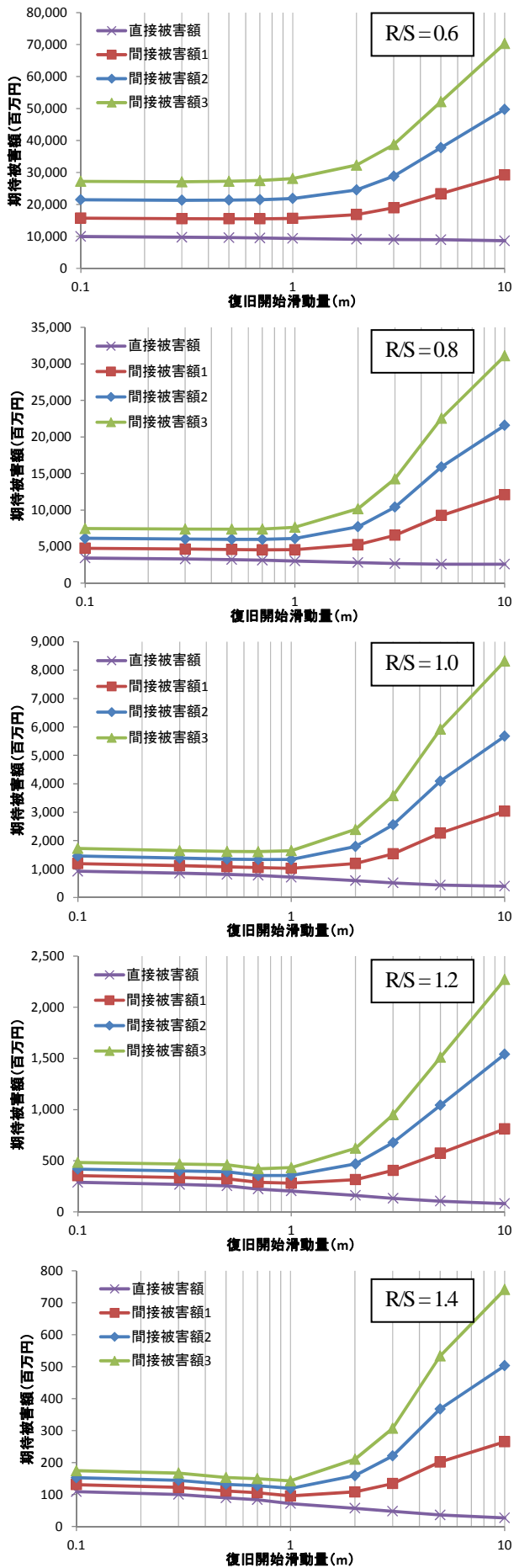


図-7 復旧開始滑動量と期待被害額の例 (case1, 混成堤)

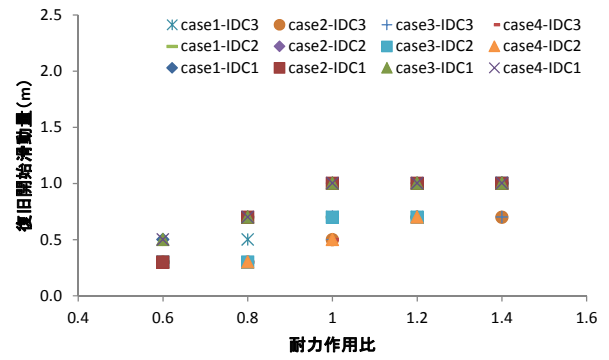


図-8 耐力作用比と最適な復旧水準の関係 (混成堤)

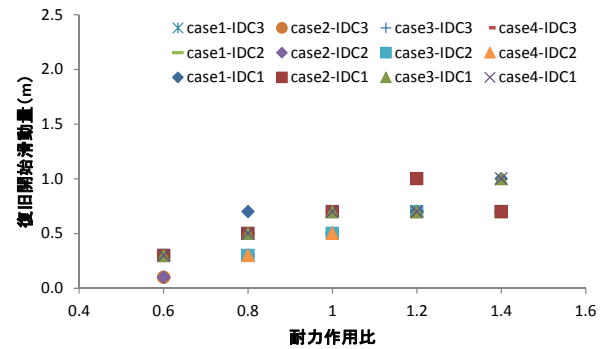


図-9 耐力作用比と最適な復旧水準の関係 (消波堤)

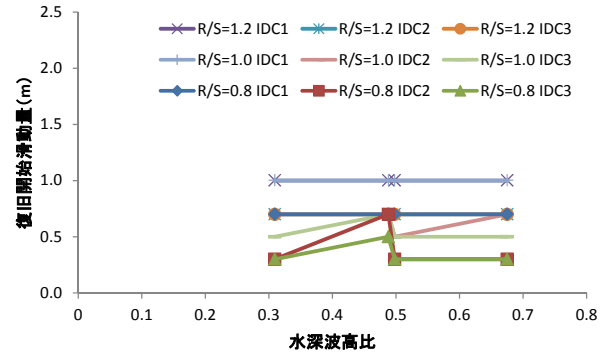


図-10 水深波高比と最適な復旧水準の関係 (混成堤)

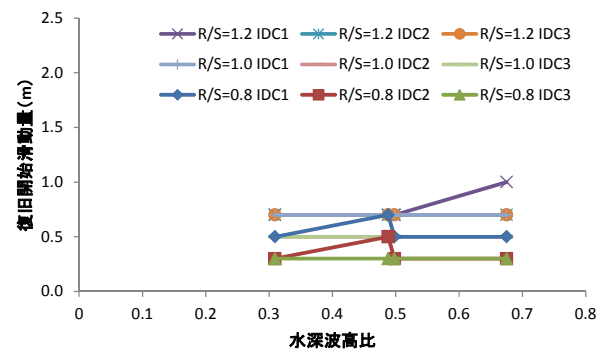


図-11 水深波高比と最適な復旧水準の関係 (消波堤)

きくなれば、最適復旧水準が小さくなり、間接被害額が大きい港を対象とする場合には早期に復旧する必要があることがわかった。



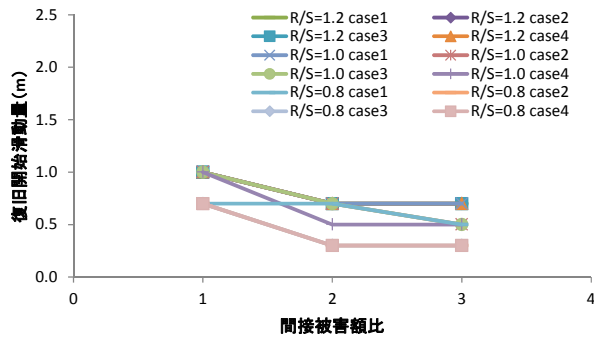


図-12 間接被害額比と最適な復旧水準の関係（混成堤）

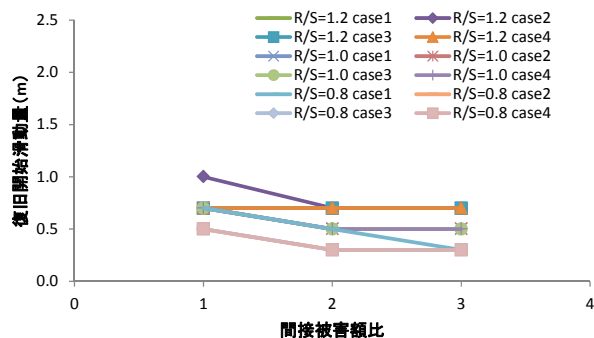


図-13 間接被害額比と最適な復旧水準の関係（消波堤）

## 5. おわりに

本研究では、混成堤と消波ブロック被覆堤を対象として、モデル防波堤によって耐力作用比が異なる断面を設定し、滑動量解析および最適な復旧水準を検討した。主要な知見は以下の通りである。

- 1) 混成堤、消波堤ともに、期待滑動量は水深波高比と強い関係があり、本研究の対象条件の範囲では水深波高比0.5程度で極小値をとり、同じ耐力作用比であっても耐波安定性が異なる。
- 2) 最適復旧開始水準は、耐力作用比、波浪条件、間接被害額条件によって異なるが、耐力作用比が最も強く影響する。

- 3) 既設防波堤の各条件に適用でき、復旧開始水準を定量的に評価できる解析手法を提案した。

本モデルを用いた結果、蓋然性の高い結論が導かれているため、モデル自体も健全なものと思われるが、期待滑動量と水深波高比や波浪条件（特に沖波極値分布）、その他の条件との関係等、不明な点が多い。今後は、実際の港湾への適用を目標として、これらの課題に取り組む必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 合田良実, 高木泰士: 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, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.921-925, 1999.
- 2) 吉岡 健, 長尾 毅: 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, 2004.
- 3) 高山知司, 安田誠宏, 辻尾大樹, 井上順一: 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, 2009.
- 4) 宮田正史, 熊谷健蔵, 辻尾大樹, 大久保 陽介: 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, 2009.
- 5) 長尾 毅, 辻尾大樹, 熊谷健蔵: 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, 2010.
- 6) 長尾 毅, 辻尾大樹, 熊谷健蔵: 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, 2011.
- 7) 長尾 毅, 辻尾大樹, 熊谷健蔵: 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, 2012.
- 8) 下迫健一郎, 高橋茂雄: 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.
- 9) 下迫健一郎, 大寄菜々子, 中野史丈: 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, 2006.

## A STUDY ON OPTIMUM MAINTENANCE LEVEL CONSIDERING MINIMUM LIFE CYCLE COSTS OF BREAKWATERS

Takashi NAGAO, Daiki TSUJIO and Kenzou KUMAGAI

This study discusses the influence of various conditions on the optimum maintenance level of composite breakwaters and breakwaters covered with wave dissipating concrete blocks in view of minimum life cycle cost. As the results, it was found that optimum maintenance level depends on wave stability of breakwater, rather than wave condition and loss cost condition. This method can be effectively used for planning maintenance strategy to estimate expected repairing costs of breakwaters.