

ライフサイクルコストを考慮した護岸被覆材の最適設計

高山知司¹・辻尾大樹²・安田誠宏³

本研究は、コスト削減の観点から、護岸被覆材（特に消波ブロック）のライフサイクルコスト（以下、LCC と略す）を最小化する最適設計手法を提案するものである。本手法では、LCC として初期建設費用および耐用年数間の補修費用のみを対象とし、補修費用については高橋ら（1998）が提案した被災度の経験式を用いて算出している。本手法による検討結果では、要修復基準である要補修被災度を大きくすると最適重量は軽くなった。また、水深が浅い場合には、ハドソン公式で求めた重量よりも重いブロックが最適重量となるが、水深が深い場合には、ハドソン公式で求めた重量とほぼ同程度のものが最適重量となった。

1. はじめに

近年、土木構造物において、コスト削減の観点から構造物のライフサイクルコスト（以下、LCC と略す）を最小化する設計手法やアセットマネジメント手法等が検討されている。

維持補修計画等で先行している道路や橋梁分野等の土木構造物とは異なり、海岸・港湾構造物においては、構造物の劣化の他に、ほぼ毎年発生する異常波浪による被災を考慮する必要がある、むしろ、構造物の劣化よりも異常外力による被災の方が卓越するケースが多い。

また、耐用年数間にその構造物が保持しなければならない性能を規定して、それを満足するように設計する性能設計が採用される方向にある。このような性能設計においては、単にコストを削減するだけでなく、設計条件を上回る異常波浪が来襲した際の構造物の被災の程度やその構造物の被災による人や資産への影響など、総合的に性能を照査することが重要となる。

これまで、防波堤を対象にした最適設計法については、いくつか検討されたものがある（たとえば、合田ら、1999；吉岡・長尾，2004）。防波堤の LCC 算出法は、耐用年数間における被災から修復費を含んだ期待総費用を求める手法である。しかしながら、護岸の被覆材について検討している例は少ない。本研究は、護岸の被覆材（特に消波ブロック）に着目し、耐用年数間における補修費用を算出し、LCC を最小にする最適設計手法を提案するものである。

2. 最適設計手法

(1) 検討対象

本手法では、護岸の被覆材（消波ブロックや被覆ブロッ

ク、被覆石等）を対象として最適設計手法の適応を試みた。被災の程度を精度よく算定できる高橋ら（1998）の式を用いて、被覆材の被災度を算定した。本研究では、消波ブロックとしてテトラポッドを例として採用している。

(2) LCC の計算に用いた費用

LCC として計上する費用には、初期建設費用、補修費用、維持管理費用、撤去費用等、供用期間中に発生する全ての費用を計上する必要があるが、本研究では、護岸被覆材を対象としているため、初期建設費用と被災に伴う補修費用のみを計上することにした。上記を式で表すと以下ようになる。

$$LCC = C_i + \overline{C}_R \dots \dots \dots (1)$$

ここに、LCC：ライフサイクルコスト、 C_i ：初期建設費用、 $\overline{C}_R$ ：期待補修費用（耐用年数間の補修費用の平均値）である。

また、初期建設費用と補修費用については、一般に積算する工事価格として、図-1（港湾土木請負工事積算基準より）に示す各種費用を用いている。直接工事費は、工事の目的物を施工するにあたり直接消費される費用であり、間接工事費は、直接工事の対象物に施工されるものでなく、各工事種目に対し共通して使用されるものの費用である。

供用期間中の総補修費用を検討対象とする場合、補修

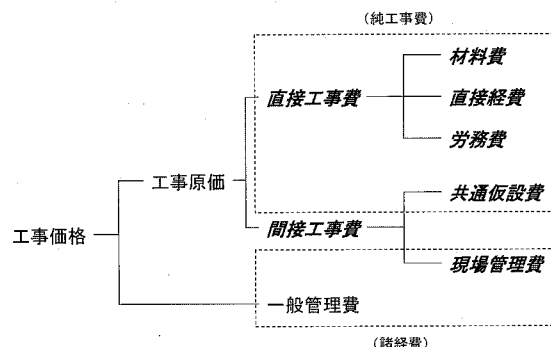


図-1 積算価格の構成

1 フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所
2 正 会 員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社
3 正 会 員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

を行う時期が重要となる。軽微な被災で幾度も補修を繰返すのか、破壊限界ぎりぎりになって補修するのかによって、当然、補修費は変わるはずである。しかし、直接工事費のみを補修費用として計上すると、補修規模（ブロック数）のみに依存することになるので、補修費用としては補修回数に関係しなくなる。補修回数によっても工事費を変化させるには、間接工事費を考慮する必要がある。

間接工事費の共通仮設費、現場管理費については、純工事費等の対象費用に応じて割合が変化する。具体的には小規模な工事（600万円以下等）では間接工事費の率が高く、大規模な工事（20億円以上等）では、その率が低くなっており、小規模な工事を何回も繰返すよりも、大規模工事を1回する方が経済的になる。たとえば、直接工事費で5億円の工事を1回実施した場合では、1,000万円の工事を50回実施した場合よりも、約4,500万円程度安くなる。したがって、本研究では、間接工事費を含めて、図-1の斜体字の費用を計上の対象とする。

(3) 消波ブロックの被災規模の算定

初期建設費用については、ブロックの重量（トン型）に対して護岸被覆断面を決定し、ブロック単価に1m幅あたりの数量（ブロック数）を乗じて算出する。ブロック単価には、製作、横持ち、運搬据付費を含んでいる。

また、補修費用については、高橋ら（1998）が提案している消波ブロックの安定数算定式を用いて、被災規模を設定し、耐用年数中の期待補修費用を算出する。なお、高橋らの式は以下の通りである。

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = C_H \cdot \{a(N_0/N^{0.5})^c + b\} \dots (2)$$

ここに、 N_s ：安定数、 $H_{1/3}$ ：有義波高、 D_n ：ブロックの代表径、 N_0 ： D_n 幅の断面内におけるブロックの移動個数、 S_r ：ブロックの海水に対する比重、 N ：波数、 C_H ：碎波効果係数、 a 、 b 、 c ：消波ブロックの形状や斜面勾配ごとに決まる定数であり、本研究では例としてテトラポッドを対象としているため、 $a=2.32$ 、 $b=1.33$ 、 $c=0.2$ を用いている。ブロックの代表径については、体積の3乗根とし、 $D_n = \sqrt[3]{W/\rho}$ （ W ：ブロックの重量、 ρ ：ブロックの密度）で表すことができる。

年1回の異常波浪に対する被災度 N_0 は、式(2)において異常波浪時の間に来襲した波浪の有義波高 $H_{1/3}$ 、波数 N 、対象ブロックの代表径 D_n から算出することができる。また、高橋らと同様に被害の履歴を考慮できるように累積被災度を次のように算出している。

該当年における入射波高 $H_{1/3}(i)$ 、前年までの累積被災度 $N_0(i-1)$ とし、式(2)を変形した次式、

$$N = \left(\frac{H_{1/3}/(S_r - 1)D_n - 1.33}{2.32} \right)^{10} N_0^2 \dots (3)$$

において $H_{1/3} = H_{1/3}(i)$ 、 $N_0 = N_0(i-1)$ として相当波数 $N = N'$ を求め、該当年の波数 $N(i)$ に加えた $N = N' + N(i)$ と $H_{1/3}(i)$ によって式(2)で該当年までの累積被災度を求める。

補修時期に関しては、耐用期間中にブロックが受けた被災面積の全被覆面積に対する割合から決定する。上記のように求めた累積被災度がある修復基準の被災度（これを要補修被災度と呼ぶ）に達すると修復するよう設定している。

補修費用の算出にあたっては、被災箇所へ新規製作ブロックを補充し、原形復旧するものとして、補修にかかる単価は初期建設費用に用いた単価を用いている。

(4) 最適設計のフロー

最適設計のフローは、図-2に示す通りであり、c) 期待補修費用の算出については詳細なフローを図-3に示している。また、計算時に用いた計算条件は表-1に示している。

a) 被覆材の設定

被覆材の代表径や密度、間隙率等の被覆材の諸元を設定する。重量の小さい被覆材から大きなものまで代表径で設定し、1つを抽出して検討に入る。今回の検討では、2t～80t型の16種類を対象にしている。

b) 初期建設費用の算出

抽出した代表径（トン型）に対して単価を設定し、代表径に応じた天端幅を求め、天端高、水深から初期断面を決定する。本論文では、天端2個並び、全断面被覆として初期断面を設定している。初期断面から被覆材の数量（単位幅あたりの個数）を算出し、被覆材の単価と数量を乗じて初期建設費用を算出する。

c) 期待補修費用の算出

耐用年数間の期待補修費用の算出方法は、以下の通りである。

- i) 表-1に示すような沖波発生頻度分布から、乱数を用いて1回の異常波浪時の沖波波高を抽出する。
- ii) 抽出した沖波波高から波浪変形計算を行い、対象地点直前での波浪諸元を算出する。波浪変形計算による算定誤差を考慮して、乱数から新しい波高を抽出する。
- iii) 1回の異常波浪の作用時間（2～3時間）中における有義波高と波数から式(2)によって被災度を算出する。この時、式(3)を用いて相当波数を算出した後、累積被災度を算出する。
- iv) 累積被災度が要補修被災度を上回ると補修し、補修費用を算出する。
- v) i)～iv)を耐用年数間繰返し、耐用年数間の総補修費用を算出する。
- vi) i)～v)を期待値の変動が小さくなるように繰返

し(本研究では1,000回とした), 総補修費用の期待値(平均値), すなわち期待補修費用を算出する。

d) LCCの算出

b) で算出した初期建設費用と c) で算出した期待補修費用を足し合わせて LCC を算出する。

e) 最適重量の決定

a) ~ d) を各重量の被覆材について繰返す。繰返し計算によって算出した被覆材の各重量別 LCC の中で最

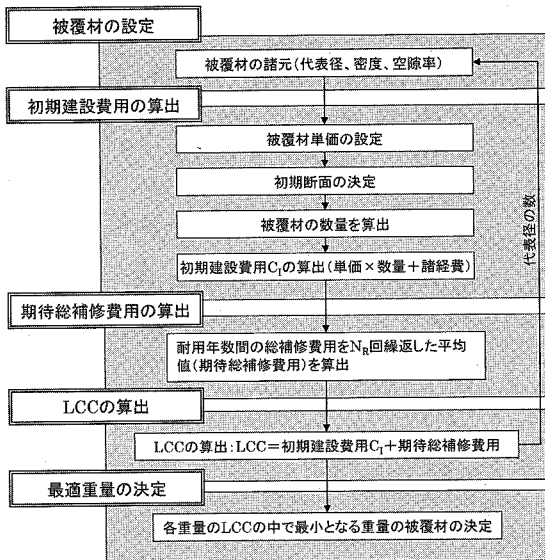


図-2 最適設計のフロー

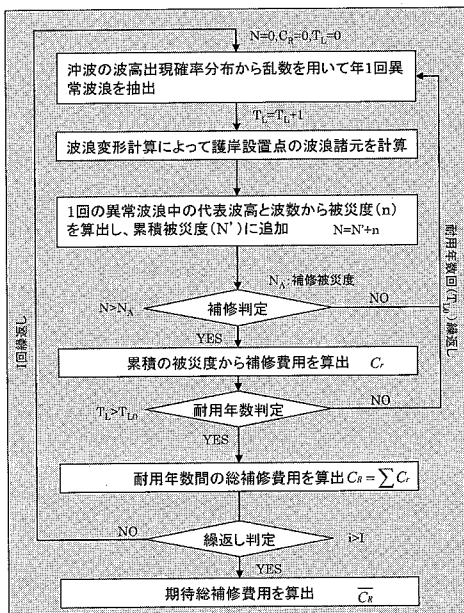


図-3 期待総費用算出の詳細フロー

表-1 計算条件

項目	値
50年確率沖波波高	5.0/7.0/9.0 m
沖波発生頻度分布	Weibull 分布 ($k=1.0$) $h=5.0: A=0.8, B=1.87$ $h=7.0: A=1.3, B=1.91$ $h=9.0: A=1.7, B=2.35$
水深	1 m~10 m
天端幅	天端 2 個並び
天端高	2.5~9.2 m (水面から)
法面勾配	1:4/3
マウンド層	なし
トン型	2 t~80 t 型
kd 値	8.3
要補修被災度	被災度 1%~50 %
耐用年数	50 年
繰返し回数	1,000 回

小となる最適重量を決定する。

3. 計算結果

(1) 初期建設費用と LCC の比較

計算例として, 50 年確率沖波波高 9 m, 水深 5 m, 天端高 (水面から) 5.7 m, 要補修被災度 5 %, その他の条件は表-1 の通りとして 1,000 回の繰返し計算を実施した期待値を図-4 に示す。初期建設費用のみで考えると, 10 t 型 (代表径: 1.59 m) の 979 千円 / m (初期建設費用のみ) が最も安い, 補修費用を含めて LCC を考えると, 初期建設費用で最も安い 10 t 型 (代表径: 1.59 m, LCC: 981 千円 / m) よりも, 12.5 t 型 (代表径: 1.71 m, LCC: 980 千円 / m) の方が安くなり, これが最適重量となる。また, 従来のハドソン公式で求まる必要重量は 8 t 型 (代表径: 1.47 m, LCC: 1,005 千円 / m) であるが, LCC を考えた場合, 12.5 t 型が最適となる。

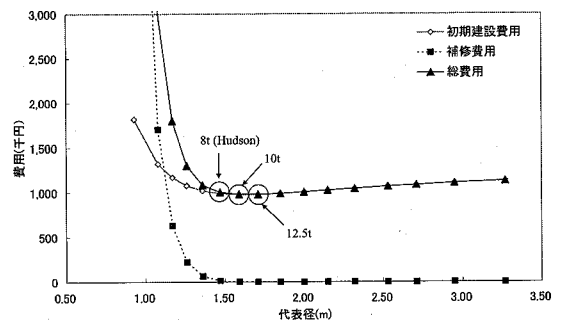


図-4 1,000 回繰返し計算の期待値 (水深 5m, 沖波波高 9m, 要補修被災度 5%)

(2) 要補修被災度による影響

次に, 補修する時期を決定する要補修被災度の変化に

伴う LCC への影響を検討するために、要補修被災度を 1%～50% の 5 段階に分けて LCC を算出した。要補修被災度と補修するブロック数の目安を表-2 に示している。水深 5m の護岸を例に、2t 型と 10t 型について、1%～100% の各要補修被災度で補修した場合の最小のブロック数を示したものである。10t 型で見ると、初期断面で 1m 当り 7.25 個のブロックを設置しているが、要補修被災度 1% では 0.07 個/m (延長 1km では 70 個)、要補修被災度 5% では、0.36 個/m (延長 1km では 360 個)、要補修被災度 50% では、3.63 個/m (延長 1km では 3,630 個) となっている。

表-2 要補修被災度に対する補修ブロック数の目安

要補修被災度	2t 型 (個/m)	10t 型 (個/m)
1%	0.30	0.07
5%	1.48	0.36
10%	2.96	0.73
30%	8.88	2.18
50%	14.81	3.63
100%	29.61	7.25

*水深 5m に対するブロック数

水深 5m, 50 年確率沖波波高 9m で計算を行った計算結果を図-5 に示す。要補修被災度を大きくすると、各代表径の補修費用は小さくなり、全体的に LCC は安くなる傾向にある。これは、2. (2) で述べたように、小規模な工事を幾度も繰返すよりも、大規模な工事を 1 回する場合の工事費が安くなるからである。

また、表-3 に示した LCC が最小となる最適重量について着目すると、要補修被災度 1%, 5% では 12.5t 型

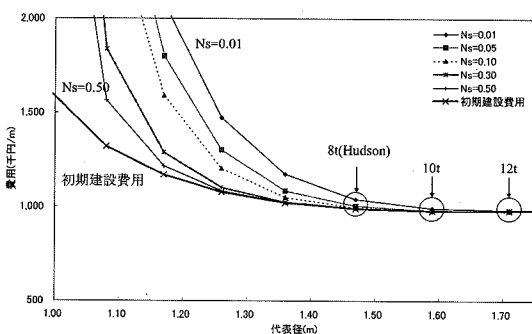


図-5 要補修被災度による LCC への影響 (水深 5m)

表-3 要補修被災度による LCC の変化

	要補修被災度				
	1%	5%	10%	30%	50%
LCC (千円/m)	983.1	980.4	979.4	978.7	978.7
最適重量	10t	10t	12.5t	12.5t	12.5t

が最適であるが、要補修被災度 10%, 30%, 50% では 10t 型が最適となっており、要補修被災度を大きく設定すれば、ブロックの最適重量が軽くなる。また、最適重量の LCC については、要補修被災度を大きく設定すれば安くすることが出来るが、許容越波流量等の背後の安全性について検討が必要であることに注意しなければならない。

(3) 水深による影響

護岸設置水深の変化に伴う LCC への影響を検討するために、護岸設置水深を 1m～10m に変化させて各水深に対する LCC の算出を行い、最適重量を選定した。この時、要補修被災度は 5% で固定して算出している。50 年確率沖波波高を 7m と設定した場合の LCC 算出結果を図-6 に示す。図中の○は各水深における LCC の最小値、●は各水深別にハドソン式で算出した必要重量ブロックの LCC である。ただし、○と●が一致している場合は○のみを表示している。

水深が深い(ここでは水深 8m 以上)場合、LCC による最適重量は、ハドソン式で算出した必要重量と一致またはほぼ一致する。本設計手法を用いることにより、従来の設計法によって決定したブロック重量が妥当であることが分かった。一方で、水深の浅い(ここでは水深 7m 以下)場合には、ハドソン式で求めた必要重量と LCC による最適重量は一致せず、ハドソン式で算出した重量よりも重いブロックの方が最適重量となる。したがって、水深の浅い場合にハドソン式で算出した重量のブロックを用いると、LCC を考慮すれば高くなり、さらに、ハドソン式で求めた重量の方が軽いことから、LCC での最適重量のブロックに比べて安定性も低くなる。

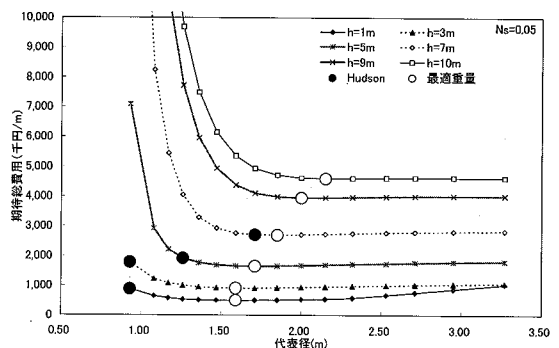


図-6 水深の違いによる LCC の変化(要補修被災度 5%)

(4) 50 年確率沖波波高による影響

来襲波浪の変化に伴う LCC への影響を検討するために、50 年確率沖波波高 $H_{1/3}$ を 5m, 7m, 9m の 3 段階に変化させて LCC の算出を行った。水深 7m, 要補修被災度 5% での計算結果を図-7 に示す。図中の○と●

は(3)と同様である。図-7では、 $H_{1/3}=5\text{ m}$ および 7 m の場合には、ハドソン公式で求まる重量はLCCを考慮すると最適ではないが、 $H_{1/3}=9\text{ m}$ の場合には、ハドソン公式で求まる重量が最適となる。したがって、ハドソン公式で求まる重量が最適であるかどうかは、(3)で述べた護岸設置水深との関係に加えて、対象とする来襲波浪(50年確率沖波波高)によって決まることが分かった。

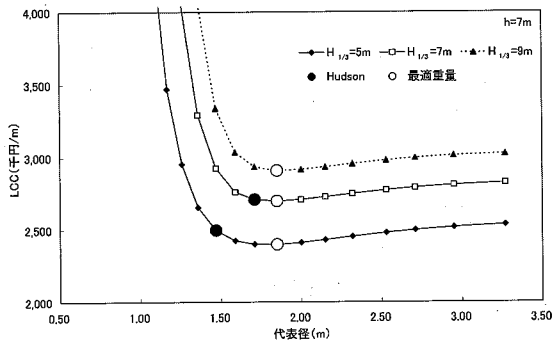


図-7 50年確率沖波波高の違いによるLCCの変化
(水深7m, 要補修被災度5%)

4. おわりに

本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- ・護岸の被覆材(特に消波ブロック)を対象に、耐用年数間のLCCを算出して最適断面を決定する、最適設計手法を提案した。
- ・補修費用を算出する際には、直接工事費に加えて間接工事費を考慮する必要がある。
- ・補修時期を決定する要補修被災度を大きくとればLCC最適ブロックの重量は軽くなり、さらにLCCについても安くなる。

- ・水深が深い場合には、本モデルによるLCCの最適重量はハドソン公式による必要重量とほぼ一致するため、従来のハドソン公式によるブロックの重量設定方法は妥当であることがわかった。
- ・水深が浅い場合には、ハドソン公式で求まる重量よりも重いブロックがLCCから判断して最適重量となる。このため、従来の設計法によるブロックを用いた場合には、本手法による最適重量のブロックを用いるよりもLCCが高くなり、さらに安定性も低くなる。
- ・ハドソン公式で求まる重量が最適重量であるかどうかは、護岸設置水深に加えて来襲波浪にも関係している。今後は、波浪の出現確率分布によるLCCへの影響を明らかにすることが重要である。また、異なった種類の被覆材を同様に検討できるように改良する予定である。現在曖昧な要修復基準について、背後への越波流量等の指標を用いて要修復基準を明確化する必要がある。

謝辞: 本研究を行うにあたり、株式会社テトラの半沢様、豊田様には御社製品についての情報をご提供頂き、また、貴重なご意見を賜りました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内 潔・高山知司・谷本勝利(1998): 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量, 港研報告, 第37巻, 第1号, pp. 3-32.
- 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, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 921-925.
- 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.
- 国土交通省港湾局監修(2004): 港湾土木請負工事積算基準, (社)日本港湾協会, 平成16年度改訂版。
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Proc. ASCE, Vol.85, WW3, pp. 93-121.