

鳥取大学大学院 学生会員 ○熊井崇人

林テレンプ(株) 鈴木健太

鳥取大学大学院 正会員 太田隆夫・松見吉晴

1. はじめに

社会基盤施設には、設計時に設定された性能を供用期間にわたって保持することが求められる。しかし、経年変化や外力の作用による被災（損傷）で性能の劣化が生じることから、適切な維持管理を行う必要がある。また、多数の社会基盤施設の老朽化に対する補修・更新費用の増大が予想されており、その観点からも効率的な維持管理計画が重要となる。このような状況下で、社会基盤施設の新規整備の要求に応えつつ、既存のものを継続運用していくためには、それらの維持管理に必要な経費を可能な限り正確に予測する必要がある。最近では、防波堤などの港湾・海岸構造物を対象として、ライフサイクルコスト（以下、LCCと表記）の評価に関する研究が行われてきている（たとえば、三鼓ら¹⁾、高山ら^{2),3)}）。しかし、信頼性解析のモンテカルロシミュレーションにおいて、高波の発生回数を年1回に限定していることから、その発生回数がLCCに及ぼす影響は明らかにされていない。本研究では、消波ブロック被覆堤を対象として、消波工のLCC算定における高波発生回数の影響について検討する。まず波浪観測資料より高波発生回数の統計的特性を検証し、その結果を用いて消波工のLCC算定を行い、高波発生回数が及ぼす影響を明らかにする。

2. LCC算定方法

本研究では、高山ら^{2),3)}によるLCC算定手法を用い、消波材として消波ブロックの1つであるシーロックを対象に検討を行う。シーロックは、代表径0.76~3.51m（質量1~100t型）の19種類である。以下にLCC算定方法の概要を示す。

LCCとして計上する費用には、初期建設費、補修費、維持管理費、撤去費等、構造物の供用期間中に発生するすべての費用が挙げられるが、本研究では消波工の初期建設費と被災に伴う補修費のみを計上することとし、LCCを式(1)のように与える。

$$LCC = C_I + \overline{C}_R \quad (1)$$

ここに、LCC：ライフサイクルコスト、 C_I ：初期建設費、 \overline{C}_R ：期待補修費（供用期間での補修費の平均値）である。また、初期建設費と補修費については、直接工事費に加えて共通仮設費と現場管理費の間接工事費を含める。これにより、補修費については規模のみでなく補修回数による費用の変化を考慮する。期待補修費の算定においては、式(2)で表される高橋ら⁴⁾の安定数算定式を用いて消波ブロックの被災度を求める。

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

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（被災度）、 S_r ：ブロックの海水に対する比重、 N ：作用波数、 C_H ：碎波の効果を表す係数、 a 、 b 、 c ：定数である。本研究で対象としているシーロックについては、法面勾配1:1.5の場合で $a=2.32$ 、 $b=1.56$ が用いられており、 c は高橋ら⁴⁾と同様に0.2とする。LCC算定の手順は以下のようである。

- 計算対象とする消波ブロックの諸元（代表径、密度、空隙率）を設定する。
- 設定したブロック諸元に対応して消波工の初期断面を決め、初期建設費を算定する。
- 設定した波高の極値分布関数と一様乱数を用いて、1回の高波における沖波波高を与える。周期については、設定した沖波波形勾配により求める。高波発生回数については、年1回とする場合と3. で述べる統計的特性を考慮する場合の2通りとする。

- d) 消波工法先水深は潮位を考慮して与える。潮位の出現確率分布を三角形分布とし、一様乱数によって潮位を与える。
- e) 波浪変形計算により消波工法先位置での波浪諸元を求める。
- f) 1回の高波の作用時間（本研究では2時間とした）における作用波数と有義波高から、式(2)を用いて累積被災度を算出する。
- g) 累積被災度が補修基準の被災度（以下、要補修被災度と表記）を超える場合は補修費を求める。
- h) c) ~g) を各年の高波発生回数分および供用期間の年数分繰り返し、供用期間中の総補修費を算出する。
- i) 期待値の変動を小さくするためにc) ~h) を繰り返し、総補修費の平均値として期待補修費を算出する。
- b) の初期建設費と期待補修費を合わせてLCCを算定する。
- j) 19種類のシーロックに対してb) ~i) を行い、代表径ごとのLCCを算定する。

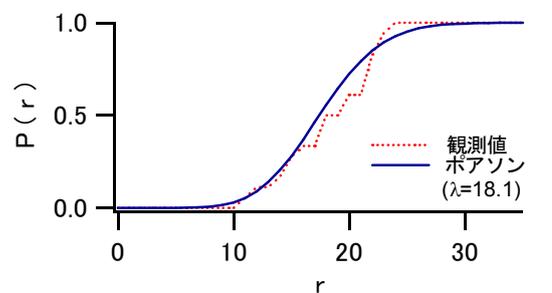
本研究では、LCC算定の対象地点として、工事費用の資料があり沖波の波浪特性が異なると考えられる4地点（茨城、大阪、鳥取、高知）を設定した。

3. 高波発生回数の統計的特性

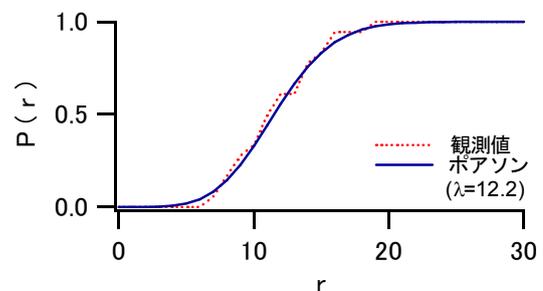
高波発生回数の統計的特性については、合田⁵⁾が酒田港と Kodiak 島の高波データを用いて年間の発生回数の非超過確率を求め、これがポアソン分布で近似できることを示している。本研究では、上述の対象4地点に関して、全国港湾海洋波浪情報網による波浪データのうち、港湾空港技術研究所資料の全国港湾海洋波浪観測年報として公開されている、月別平均および最大有義波の表と高波一覧表を用いて、高波発生回数の統計的特性について検討した。波浪データは、茨城が鹿島港、鳥取が鳥取港、高知が室津港で得られたものであり、大阪については大阪港での観測が行われていないため、代わりに神戸港のデータを用いることとした。上記年報のうち港湾空港技術研究所のホームページで公開されている NOWPHAS 1991~2010⁶⁾を使用した。

高波発生回数の解析としては、まず各地・各年の高波一覧表で有義波高の閾値を超えるものの個数を数えた。有義波高の閾値は、鹿島港および室津港で 2.5m、鳥取港で 3.0m、神戸港で 1.0m とした。つぎに、ある発生回数となる年数（度数）を数え、これにより累積相対度数（非超過確率）を求めた。ただし、欠測によりデータ測得率が低く高波発生回数が少ない年のデータを省いている。20年間のデータのうち発生回数のデータに用いた年数とデータ数は、鹿島港：16年、305個、神戸港：18年、245個、鳥取港：17年、311個、室津港：18年、216個である。図-1の点線はこのようにして求めた高波発生回数の累積相対度数である。

本研究では、合田⁵⁾と同様にポアソン分布による近似についても検討を行った。ポアソン分布の平均値となる平均発生回数 λ は、高波の合計回数を観測期間（年数）で除することで求められるが、欠測期間が長い場合には、これを除外した有効統計年数を用いる必要がある。本研究では、合田⁷⁾の方法により高波発生頻度の季節的特性を考慮して有効統計年数を求めた。各地の観測データの有効統計年数は、鹿島港：15.3年、神戸港：16.9年、鳥取港：17.2年、室津港：17.8年であり、高波の累積相対度数を求めたときの年数と結果的に近い値となっている。累積相対度数の計算に用いたデータ数を有効統計年数で除して λ を与え、ポアソン分布の非超過確率を求めた。



(a)鳥取港



(b)室津港

図-1 高波発生回数の累積相対度数とポアソン分布

表-1 極値分布関数に関する条件および高波の平均発生回数

地点	分布関数	H_{50} (m)	γ_{50}	A	B	λ'
茨城(鹿島港)	ワイブル[1.0]	9.1	1.20	0.94	2.48	22.6
大阪(神戸港)	ワイブル[1.0]	4.1	1.23	0.48	0.96	14.7
鳥取(鳥取港)	ワイブル[1.4]	7.9	1.13	1.33	2.61	20.7
高知(室津港)	極値 I 型	10.9	1.25	1.35	2.68	8.8

図-1 の実線はその結果を示しており、累積相対度数と多少の相違はあるものの、全体的には高波の発生回数をポアソン分布で近似可能であると考えられる。

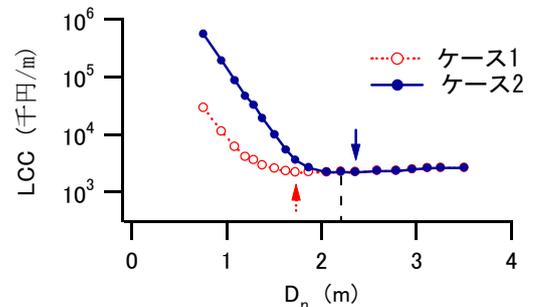
4. LCC 算定とその結果

(1)計算条件：初期建設費および補修費の計算に用いるシーロック（19 種類）の単価は、対象地点ごとに製作費、横持費および据付費を計上して設定した。また、防波堤の基礎マウンドは設定せず、消波工はシーロックの 2 層整積とした。潮位変動を含めない消波工法先水深を 10.0m、天端高を 5.5m（大阪のみ 2.5m）、法面勾配を 1:1.5、海底は 1/30 の一様勾配、要補修被災度を 5%、供用期間を 50 年とした。大阪を除く各地点における波高の極値分布関数には合田⁸⁾が示した地域共通分布関数を用い、各地点に設定されている 50 年確率波高 H_{50} と裾長さ γ_{50} により尺度母数 A と位置母数 B を与えた。大阪での極値分布関数については適当と思われる資料が得られなかったため、3. に示した神戸港の高波データ（データ数 247、有効統計年数 16.9 年）に対して最小 2 乗法を用いた極値分布関数の推定⁸⁾を行い、最適の分布関数とその母数、 H_{50} および γ_{50} を求めた。表-1 に各地点に対する極値分布関数（[] 内は形状母数）、 H_{50} 、 γ_{50} 、 A および B を示す。

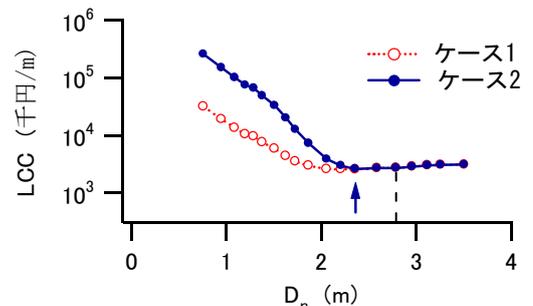
高波発生回数については、2. の手順 c) で述べたように年 1 回とする場合と、3. で適用性が示されたポアソン分布を用いて与える場合の計算を行う。LCC 算定においては、合田⁸⁾が各地の波高の極値分布関数などと合わせて示している平均発生率をポアソン分布の平均値に用い、一様乱数からポアソン乱数を発生させて各年の高波発生回数を与える。ただし、大阪については、上述の神戸港のデータにおける平均発生回数を用いる。表-1 に示した λ' は LCC 算定に用いた平均発生回数である。

2. の手順 i) で述べた供用期間（50 年）の繰り返し回数については、高橋ら⁴⁾が行った式(2)にもとづく期待被災度の計算において、50 年の繰り返し回数が 2000 回程度で統計的に安定な結果が得られたとしていることから、本研究でも高波の発生を年 1 回とする場合の 2000 回（したがって高波の合計回数は 10 万回）を基準とした（以下、この計算をケース 1 と表記）。ポアソン乱数で各年の発生回数を与える場合も、高波の合計回数が約 10 万回となるように繰り返し回数を設定した（以下、ケース 2）。なお、 λ' の値が大きい茨城や鳥取の場合は、繰り返し回数が 100 回以下となることから、繰り返し回数の影響の有無を確認するために、ポアソン乱数で発生回数を与える場合についても、繰り返し回数を 2000 回とした計算（以下、ケース 3）を行った。

(2)計算結果：図-2 に LCC 算定結果を示す。図中の破線



(a)鳥取



(b)高知

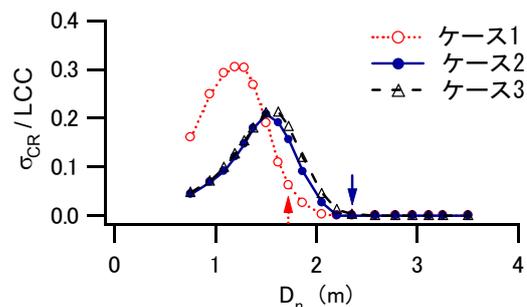
図-2 消波ブロックの代表径と LCC との関係

は、それが示す D_n 以上の消波ブロックで両ケースの期待補修費がゼロとなったことを表している。 D_n が小さいブロックではケース 1 と 2 の差は大きいですが、 D_n が大きくなるにつれて両ケースで期待補修費が急減し、両者の差は小さくなっていく。図中の矢印は LCC の最小点を示しており、LCC を評価基準とした場合には、その D_n が最適なブロック径であると判定される。また、鳥取の結果においては、ケース 1 での LCC 最小点を点線の矢印で示しているが、ケース 2 での最適径と異なっている。この主な原因は期待補修費の違いにあるが、鳥取のみでこのような結果になった理由は明らかでない。ただし、両者の LCC の差異は最小の LCC に対して約 1% と小さい。

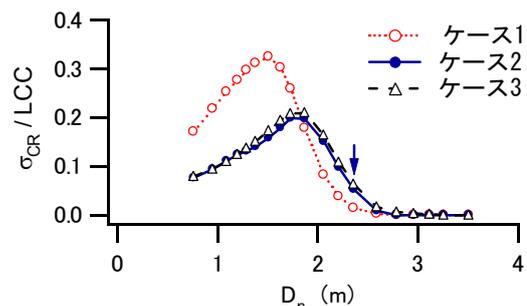
図-3 は、2. の手順 h) で述べた供用期間中の総補修費の標準偏差 σ_{CR} と LCC の比を示したものである。図にはケース 3 の値も示しているが、ケース 2 との差はわずかである。図-2 に示したように、 D_n が小さいブロックでケース 1 の LCC がケース 2, 3 よりもかなり小さいため、ケース 1 での比が大きくなっているが、 D_n の増加につれてケース 2, 3 での比が上回る。また、図中の矢印は、図-2 の矢印と同様に LCC の最小点を示すものである。鳥取を除く 3 地点で最適径はケース 1 から 3 で同一であったが、総補修費の変動の LCC に対する割合には差がある。すなわち、高波発生回数の考慮の有無にかかわらず最適径が同じでその LCC の差が小さくても、補修費の変動性（度合い）は異なる場合がある。このことから、たとえば消波工の設計段階で LCC を見積もる場合に、補修費の変動性と高波発生回数が変動性に及ぼす影響を勘案する必要があると考えられる。

【参考文献】

- 1) 三鼓 晃, 勝田栄作, 榊原 弘, 殿最浩司, 佐藤広章: 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, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.826-830, 2000.
- 2) 高山知司, 辻尾大樹, 安田誠宏: 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, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.856-860, 2006.
- 3) 高山知司, 安田誠宏, 辻尾大樹, 井上純一: 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) 高橋重雄, 半沢 稔, 佐藤和弘, 五明美智男, 下迫健一郎, 寺内 潔, 高山知司, 谷本勝利: 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻, 第 1 号, pp.3-32, 1998.
- 5) 合田良実: 年最大値の極値統計量に及ぼす標本サイズの影響に関する数値実験, ECOH/YG 技術論文, No.14, pp.1-20, 2010.
- 6) (独) 港湾空港技術研究所: NOWPHAS 1991~2010, <http://www.pari.go.jp/unit/kaisy/nwphas/annuareport/>
- 7) 合田良実: 波浪統計に関する二, 三の考察, 港湾技術研究所資料, No.39, pp.239-255, 1967.
- 8) 合田良実: 耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計—, 430p., 鹿島出版会, 2008.



(a)鳥取



(b)高知

図-3 総補修費の標準偏差と LCC との比