

消波工の累積損傷を伴う消波性能評価に基づく
維持管理に関する研究

2013年 7月

平山 隆幸

目 次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	4
1.3 本論文の構成.....	5
<参考文献>	6
第 2 章 数値波動水路における数値解析	7
2.1 緒言.....	7
2.2 数値波動水路の基礎方程式と数値解析モデル.....	7
2.2.1 基礎方程式.....	7
2.2.2 自由表面解析モデル.....	9
2.2.3 造波モデル.....	9
2.2.4 無反射モデル.....	10
2.3 入射波の造波法.....	11
2.3.1 規則波の造波法.....	11
2.3.2 不規則波の造波法.....	12
2.4 数値解析における条件設定.....	15
2.4.1 計算格子間隔の設定.....	15
2.4.2 差分スキームの設定.....	16
2.4.3 ポーラスセルの設定.....	16
2.4.4 空隙率の設定.....	17
2.4.5 抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M の設定.....	19
2.5 結語.....	23
<参考文献>	24
第 3 章 累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性.....	25
3.1 緒言.....	25
3.2 累積損傷断面のモデル化.....	28
3.2.1 天端被災のモデル化.....	28
3.2.2 複合型被災のモデル化.....	28
3.3 数値波動水路における通過波検定.....	30
3.3.1 通過波検定の概要.....	30
3.3.2 規則波の検定.....	30
3.3.3 不規則波の検定.....	34
3.3.4 造波不規則波の特性.....	40
3.4 数値実験における消波工諸元および解析条件.....	43

3.4.1	被覆材に対する設計波高の算出.....	43
3.4.2	入射波を規則波としたケース.....	47
3.4.3	入射波を不規則波としたケース.....	49
3.5	数値実験による消波性能の変動特性.....	51
3.5.1	越波流量の算出法.....	52
3.5.2	規則波作用時の消波性能変動特性.....	53
3.5.3	不規則波作用時の消波性能変動特性.....	57
3.6	結語.....	62
	<参考文献>.....	64
第4章	累積損傷を伴う消波工の消波性能に関する評価システム.....	65
4.1	緒言.....	65
4.2	ニューラルネットワークの概要.....	65
4.2.1	ニューラルネットワークの構成.....	66
4.2.2	ニューラルネットワークの学習法.....	66
4.3	ニューラルネットワークモデル.....	68
4.3.1	教師データの選定.....	69
4.3.2	入力層ユニットにおける入力項目.....	69
4.3.3	中間層ユニットに関する設定.....	70
4.4	消波性能に関する予測値と実験値の比較.....	71
4.4.1	反射率に関する比較.....	71
4.4.2	越波流量に関する比較.....	73
4.5	結語.....	75
	<参考文献>.....	76
第5章	年齢型予防保全を基礎とした消波施設の最適保全方策.....	77
5.1	緒言.....	77
5.2	衝撃型累積損傷モデルを用いた消波施設保全モデル.....	77
5.2.1	衝撃型累積損傷モデルの概要.....	77
5.2.2	限界制御モデル.....	79
5.2.3	無限期間における最適保全方策.....	82
5.3	耐力劣化モデルを用いた消波施設保全モデル.....	89
5.3.1	耐力劣化モデルの概要.....	89
5.3.2	一定水準修復モデル.....	90
5.3.3	現状回復モデル.....	96
5.3.4	現状回復回数制限モデル.....	99
5.4	結語.....	101
	<参考文献>.....	102

第 6 章 ライフサイクルコストを考慮した防波堤消波材の最適設計法.....	103
6.1 緒言	103
6.2 最適設計法の概要	103
6.2.1 最適設計法の考え方	103
6.2.2 費用計算の概要	104
6.2.3 最適設計法のフロー	105
6.3 消波ブロックを対象とした LCC の算定	108
6.3.1 対象とする消波ブロック	108
6.3.2 防波堤に関する諸条件と初期建設費の算出	109
6.3.3 波浪諸元の決定	110
6.3.4 潮位変動の考慮	111
6.3.5 波浪変形計算	111
6.3.6 消波ブロックの被災規模の算定	112
6.3.7 間接工事費の算出	113
6.4 高波発生回数の統計的特性	114
6.5 LCC 算定とその結果	117
6.5.1 計算の諸設定	117
6.5.2 計算結果	117
6.6 結語	121
<参考文献>	122
第 7 章 結論	123
謝 辞	127
付 録	129

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国は、北海道、本州、四国、九州をはじめ、大小さまざまな島で形成された四方を海に囲まれた島国であり、そのため入り組んだ複雑な海岸地形を持つことから、総延長約35,000kmにもおよぶ長い海岸線を有している。そのため、諸外国と比べても、国土面積当たりの海岸線延長は非常に長くなっている¹⁾。一方で、日本の森林率（国土面積に対する森林面積の比率）は約70%²⁾と言われている。言い換えれば、日本の約70%は山地であり、残り約30%が平地と言える。この平地の多くは、我が国の地理的情勢から、海に面する場所に集中している。我々はこのような場所を主要な経済・生活拠点としてきたが、戦後の高度経済成長や人口増加に伴う土地不足から、国土開発施策の一環として埋立による土地の造成が行なわれ、次第に経済・生活拠点となる場所は陸から海へと広がりつつあり、我々の生活圏と海との距離はさらに縮まっている。また、日本は古くから漁業活動が盛んであり、その活動拠点も当然ながら海に面した場所に位置する。さらには、35,000kmにも及ぶ海岸線付近の砂浜や干潟等は、海水浴や潮干狩り、マリンスポーツなどのレクリエーションやレジャーの場として活用されており、我々の生活環境には欠かせない場となっている。このように、我が国において人と海との関係は、切っても切り離せない密接な関係にあると言えるであろう。

一方で、日本は四方を海に囲まれているため、常に台風や高潮、冬季風浪、津波等の異常海象に伴う自然災害の脅威にさらされている。記憶に新しい、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に端を発する巨大津波による甚大な被害は、自然が持つ恐るべき力を我々に改めて認識させた。また、近年は地球温暖化の進行に伴う恒常的な海面上昇や、台風の巨大化も問題となっており、今後の対策が急がれるところである。これらの脅威に対抗するため、我々は防波堤や護岸、堤防、離岸堤、人工リーフ等の海岸保全施設を築造し、安心・安全な経済活動や生活が送れるよう、試行錯誤を繰り返しながら防災対策を行ってきた。しかしながら、我が国の海岸保全施設は、1956年の海岸法の制定や、1959年の伊勢湾台風等による大災害を契機に整備されたものが多く³⁾、現在では老朽化が進行し、本来保持すべき性能が十分に発揮されていない施設や、耐力の低下が著しい施設が増加している。それに加え、地球温暖化による海面上昇や台風の巨大化による外力の増大が予想され、その結果、海岸保全施設の大規模災害につながる恐れがあると考えられる。ひとたび大規模災害が発生すると、復旧にかかる時間および費用は膨大なものとなる。また、複数の施設が同時に大規模災害を受けると、復旧時間や費用がさらに膨大となるだけでなく、多くの人命や財産、経済活動にまで影響が及ぶ危険性がある。

このような状況を踏まえ、国土交通省・農林水産省では、海岸保全施設におけるライフサイクルマネジメント（LCM）の導入を推奨している³⁾。このLCMとは、図1-1に示されるような、「施設の老朽化と性能低下の把握を行い、適時、適切な保全対策を実施することにより、必要な防護機能を維持しつつ、ライフサイクル（供用期間）に生ずる全ての費用を最小化することを目指した維持管理を行うこと」と定義されている。また、近年、海岸・港湾構造物の設計においても、維持管理や補修の合理化を図るために性能設計法が導入され始め、長期間にわたって構造物の要求性能を保持するための予防保全を導入した、戦略的な維持管理への転換が進められているところである。

先に述べた海岸保全施設には色々な施設があるが、その中でも最もポピュラーな構造物の一つとして、消波工が挙げられる。この消波工とは、写真 1-1 に示されるように、越波量や反射率、波力等を低減する目的で、防波堤や護岸の前面に石材やコンクリート製の異形消波ブロックを設置するものである。なお、日本においては巨大な石材の入手が困難であることから、異形消波ブロックが主流となっている。この消波工であるが、古くから日本全国で施工が行なわれており、海岸保全施設の中でも実績の多い構造物の一つだと考えられる。その反面、古くから施工されてきた結果、多くの施設において老朽化に伴う性能低下が懸念される。また、日本全国でのストック量も膨大であると考えれば、今後、早急に LCM の考え方を導入した戦略的な維持管理を進めていく必要があると言える。

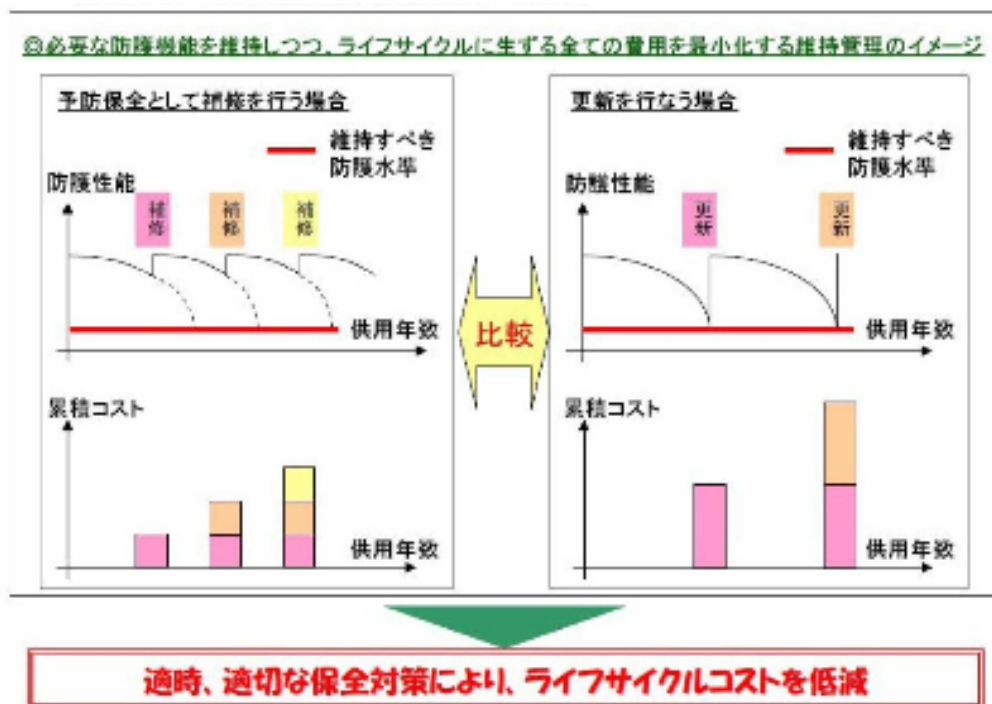


図1-1 ライフサイクルマネジメント（LCM）の説明図³⁾



(護岸消波工)



(防波堤消波工)

写真 1-1 消波工の施工例

この消波工に LCM を導入する際、重要課題となるのが、施設の老朽化と性能低下の把握を精度良く行うことと考えられる。しかしながら、従来の消波工を有する防波堤や護岸は、供用期間中、消波工は動かない（被災を受けない）ものとして設計される。従って、消波工の軽微な被災であっても、設計当初の性能が失われたものとみな

され、早急に復旧を行う必要があると判断される。一方で、消波工が被災した場合、復旧を行うかどうか（災害復旧の対象となるかどうか）の判断について、港湾関係災害事務必携⁴⁾においては、「港湾施設にあつてはブロックの高さの1/3～2/3程度以上、海岸保全施設にあつてはブロックの高さの1/2程度以上」の被災規模であれば復旧を行うようである。言い換えれば、上記の判定基準よりも被災規模が小さければ、復旧はなされないとも考えられる。ここで問題と考えられるのが、消波工が被災を受けた事によって、本来保持すべき要求性能が満足されているかどうかの議論が全くなされていないという点である。例えば、小規模な被災であっても条件によっては、要求性能を満足できないケースもあれば、逆に中規模な被災であっても、要求性能を満足できるケースも出てくると考えられる。しかしながら、このような消波工の変形を許容し、且つその時の越波量や反射率、波圧等がどのように変化するかを研究した事例はほとんど見当たらないのが現状である。そこで、LCMの導入を早急に進めるためにも、消波工の変形を考慮しつつ、消波性能の変動特性を把握することは、特に必要不可欠なことであると考えられる。

1.2 研究の目的

前節では導入が推奨されているLCMについて概説したが、このLCMは次の、①施設の老朽化と性能低下の把握、②適時・適切な保全対策、③ライフサイクル（供用期間）に生ずる全ての費用の最小化、の3つの重要な項目で構成されているものと考えられる。そこで、この3つの項目を消波工に導入する際、現在のこの種の研究分野において以下に示すような問題点が挙げられる。

- ・研究の背景でも述べたが、消波工の変形を許容し、且つその時の越波量や反射率、波圧等がどのように変化するかを研究した事例がほとんど見当たらず、評価する方法についても確立されていない。
- ・消波工の維持管理については、今まで事後保全的な対応しかなされておらず、適時・適切な予防保全を行うための考え方・手法が確立されていない。
- ・消波工はそもそも、動かない（被災を受けない）ものとして設計されるため、ライフサイクル（供用期間）中に計上される費用は初期建設費のみであり、費用最小化は従来から行われている初期建設費のみの最小化となってしまう。また、補修費等を考慮して費用最小化を検討し、実際に採用された事例も見当たらない。

以上の諸問題より、本研究の目的は、上記で述べた問題点に対応しつつ、海岸保全施設の一つである消波工へのLCMの導入検討を行い、消波工の適切な維持管理手法の確立を目指すものである。

1.3 本論文の構成

本論文は、全 7 章で構成されている。各章における概要は以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景を述べ、背景を踏まえた研究の目的を述べた。

第 2 章では、本研究において、累積損傷を伴う消波工の消波性能変動特性を数値実験による実験的検討アプローチを進めるため、まず、断面二次元モデルにより波・流れ・地盤の相互作用について数値シミュレーションを迅速かつ容易に行うことが可能な数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure)^{5),6)}について概説を行う。次に、数値波動水路を用いた数値解析を行うためには適切なパラメータ設定が必要となるため、各パラメータについて概説するとともに、パラメータの設定について検討を行う。なお、この数値波動水路は、後述する第 3 章、第 4 章で活用する。

第 3 章では、累積損傷を伴う消波工の消波性能変動特性の把握を目的とし、先に述べた数値波動水路を用いた数値実験を実施する。本研究で対象とする消波工の被災パターンとしては、久保田ら⁷⁾の研究によれば①法面での被災、②天端での被災、③法面と天端両方での被災の 3 パターンに分類されていることと、実際の被災事例を参照して、②と③の被災パターンを検討対象とする。それぞれの被災パターンに対して累積損傷断面のモデル化を行い、モデル化された断面を数値波動水路内で再現し、数値実験を行う。その数値実験より得られた結果から、累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性の検討を行う。

第 4 章では、第 3 章での累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性に関する検討結果を踏まえつつ、消波工の適切な維持管理手法の確立を目指すにあたって必要不可欠となる、累積損傷を伴う消波工の消波性能変化に関する評価システムの構築を行う。その際、不特定多数の点検実施者が容易に計測でき、且つ点検実施者によるバラつきが小さくなるようなパラメータを入力値として採用すること、また、計測結果を点検現場で入力可能で、その場で評価結果が即座に確認できるような評価システムの構築を目指す。評価システムの構築にあたっては、データ間の因果関係の分析に有効なニューラルネットワークを用いる。なお、ニューラルネットワークを構築する際、ネットワークを調整するために多数の入力と出力データに関する教師データが必要となるが、本研究では、第 3 章で行った数値波動水路を用いた累積被災断面に対する数値実験結果を教師データとして用いる。

第 5 章では、消波施設の保全計画策定には、施設の物理・性能面の劣化過程を把握し、施設破壊への信頼性評価が重要であると考え、消波施設の破壊に至る過程として、①衝撃型累積損傷モデルと、②耐力劣化モデルの 2 つの破壊モデルのもと、年齢型予防保全を基礎とした保全モデルをいくつか提案し、総期待保全費用を最小とする施設保全方策について解析的、および数値実験的な検討を行う。

第6章では、ライフサイクル（供用期間）に生ずる全ての費用（ライフサイクルコスト）の最小化を目的とした、消波工の最適設計法について検討する。なお、本章では、既に建設されている消波工を対象とするのではなく、新規で消波工を設置する場合についての検討を行う。その際、高山ら^{8),9)}の従来の研究を参考とするが、その中で、消波工に被災をもたらす高波の発生回数は年1回に限定されており、その発生回数が最適設計に及ぼす影響は明らかにされていない。本章では、その最適設計における高波発生回数の影響についても検討する。

第7章では、第2章から第6章で得られた主要な結果を要約することで結論とする。

<参考文献>

- 1) 国土交通省：我が国の海岸事業，1p.
http://www.mlit.go.jp/river/trash_box/paper/pdf_japanese/n_137.pdf
- 2) 林野庁：都道府県別森林率・人工林率
http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/sinrin_ritu.html
- 3) 農林水産省・国土交通省：ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～，2008.
- 4) 社団法人日本港湾協会：港湾関係災害事務必携，68p，2007.
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，2001.
- 6) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，2008.
- 7) 久保田真一，山本方人，松本朗，半沢稔：消波ブロック被覆堤における消波工の変形過程に関する実験的検討，海岸工学論文集，第56巻(2)，pp.906-910，2009.
- 8) 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.
- 9) 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.

第 2 章 数値波動水路における数値解析

2.1 緒言

従来、防波堤に作用する波力や、護岸の越波量に関するデータ等は、水理模型実験やそれを基にした設計公式によって算出されてきた。しかし、水理模型実験には多くの費用と時間が必要であり、また、設計公式は条件によって精度が悪くなる問題がある。近年、これらに代わる方法として、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する共同研究会」によって、数値計算プログラムの一つである数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure) が開発された^{1),2)}。この数値波動水路は、断面二次元モデルにより波・流れ・地盤の相互作用について数値シミュレーションを迅速かつ容易に行うことが可能で、海岸・港湾構造物の設計において性能設計を支援する数値計算ツールとして利用されている。また、本研究で対象とする消波構造物への適応も直接実務に用いられており、高度な性能設計を行う際に有力なツールになり得るものである。

本研究において、消波工の損傷程度によって消波性能がどのように変動するかを明らかにすることが重要であるが、そのためには数多くの実験データが必要となる。しかしながら、それらのデータを水理模型実験で得ることは、時間的・費用的に現実的ではない。そこで、本研究では、数値波動水路を用いた数値実験を実施することで、損傷を受けた消波工の消波性能がどのように変動するのかを明らかにする。また、数値実験によって得られたデータを、第 4 章で述べるニューラルネットワーク構築の際に必要な教師データとして利用する。

本章では、数値波動水路についての概説を行う。特に数値波動水路を用いた数値実験を行うためには、適切な計算条件の設定、消波工断面に設定する空隙率、慣性力係数、抵抗係数等といったパラメータが必要となるため、これらのパラメータについても概説するとともに、本研究における適切なパラメータ設定について検討を行う。

2.2 数値波動水路の基礎方程式と数値解析モデル³⁾

2.2.1 基礎方程式

沿岸・海岸域における波浪場の解析では、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須となる。このため、数値波動水路の基礎方程式には、2次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式、および Navier-Stokes 方程式をポーラス

モデルに基づいて拡張した式が採用されている．連続式は質量保存則に基づいた式であり，次式で表される．

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (2.1)$$

ここに， x, z ：波進行方向と鉛直方向の座標， γ_x, γ_z ：水平・鉛直方向の面積透過率， u, w ：流速の水平・鉛直成分， S_p ：造波ソースのためのソース項である．

また，運動方程式は運動量保存則に基づいた式であり，次式で表される．

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad \dots\dots(2.2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \end{aligned} \quad \dots\dots(2.3)$$

ここに， t ：時間， ρ ：密度， p ：圧力， v_e ：分子動粘性係数と渦動粘性係数の和， γ_v ：空隙率， g ：重力加速度， D_x, D_z ：エネルギー減衰帯のための係数， S_u, S_w ：造波ソースのためのソース項である．

式(2.2)，(2.3)の $\lambda_x, \lambda_v, \lambda_z$ は C_M を慣性力係数とすれば次のように表され，右辺第2項が構造物から受ける慣性力の効果となる．

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (2.4)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \quad (2.5)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \quad (2.6)$$

また， C_D を抵抗係数とすれば，多孔質体からの抵抗力 R_x, R_z は，次のように流速の2乗に比例する形でモデル化される．

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.7)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.8)$$

ここに、 $\Delta x, \Delta z$ ：水平、鉛直方向の計算格子間隔である。

2.2.2 自由表面解析モデル

自由表面解析モデルには、汎用性が高く、砕波などの複雑な表面形状を解析可能である VOF (Volume of Fluid) 法が採用されている。VOF 法では、本来ステップ関数となる「流体である・ない」を表す関数を計算セルごとに平均化した VOF 関数 F の移流方程式と、「流体である、気体である、表面である (向きを含む)」というフラグを逐次計算することにより、自由表面の挙動を解析するものである。VOF 関数 F は自由表面をシャープに表現するための関数であり、移流方程式の離散化には表面がぼやけないため、表面の向きにより見かけ上の風上差分と風下差分を使い分けることでぼやけを防ぐ、ドナー・アクセプター法が用いられている。ポーラスモデルに基づく VOF 関数 F の移流方程式は次のように表される。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (2.9)$$

ここに、 S_F ：造波ソースのためのソース項である。

2.2.3 造波モデル

数値波動水路では、造波モデルとして、造波用流速 $U(z, t)$ を流速指定境界条件として設定する造波境界と、指定したセルの中心位置に造波のためのソースを設定する造波ソースの 2 つが用意されている。造波ソースは流速や水位を直接指定する方法ではないため、構造物や斜面等からの反射波を通過させることができ、無反射モデルと組み合わせることで無反射造波が可能である。

式 (2.1), (2.2), (2.3) および、式 (2.9) のソース項は次のように示される。

$$S_p = q(z, t) \quad (2.10)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (2.11)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (2.12)$$

$$S_F = Fq(z, t) \quad (2.13)$$

ここに、 $q(z, t)$ は格子間隔を Δx_s として次式で表される。

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \quad (2.14)$$

数値波動水路では、それぞれの造波モデルで 6 種類の造波関数（規則波用 5 種類、不規則波用 1 種類）が利用できる。造波関数は、規則波の造波関数として、ストークス波第 5 近似解、クノイド波第 3 近似解、流れ関数法 B による数値解、ピストンタイプ、フラップタイプの 5 つに加え、不規則波の生成を目的としたマトリクスデータ（任意波形）の計 6 種類が採用されている。この造波関数のピストンタイプ、フラップタイプは、水理模型実験に近い条件の波の造波を可能とするための造波機能が装備された造波板モデルである。

2.2.4 無反射モデル

不規則波の場合はもちろんのこと、規則波においても構造物からの反射波や浅水変形等が安定に形成されるまでには長時間の解析が必要となる。このとき、人為的に設定せざるを得ない解析領域の両端での反射の影響を極力抑える無反射モデルが必要となる。数値波動水路では、無反射モデルとして以下の 2 つが採用されている。

(1) Sommerfeld の放射境界

境界条件として、以下に示す Sommerfeld の放射条件が設定されている。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (2.15)$$

ここに、 f : 流速等の物理量、 C : 波速である。なお、現状では波速 C に微小振幅波の波速を用いているため、非線形性の強い規則波や不規則波への適用には、さらに工夫する必要がある。

(2) エネルギー減衰帯

エネルギー減衰帯は、水平方向に 1 から 3 波長程度の領域を用いて波のエネルギーを徐々に減少させることで、無反射条件を実現するものである。このため、計算領域を余分に必要とするが、様々な波形に対して適用可能であり、安定した計算結果が得やすいという利点がある。数値波動水路ではエネルギー減衰帯として、式 (2.2)、式 (2.3) の運動方程式に、以下に示す流速に比例する減衰項が付加されている。

• x 方向流速の減衰項： $-D_x u$

$$D_x = \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (2.16)$$

• z 方向流速の減衰項： $-D_z w$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (2.17)$$

ここに、 h ：水深、 l ：エネルギー減衰帯の幅、 x_0 ：エネルギー減衰帯の開始位置、 N ：分布関数の次数、 θ_x, θ_z ：無次元の係数である。

2.3 入射波の造波法

本研究では、規則波および不規則波の両方を検討対象と考えているため、規則波については水理模型実験を行った実験水槽の造波タイプと同じピストンタイプ、不規則波については造波モデルとしてマトリクスデータ（任意波形）を選択している。以下に、それぞれの造波法について述べる。

2.3.1 規則波の造波法⁴⁾

規則波の場合、造波板モデルとしてピストンタイプを選択している。ピストンタイプの造波方法を以下に示す。

1) 水深 h 、周期 T から、次式により波長 L を求める。

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L} h \quad (2.18)$$

2) 微小振幅波の造波理論から求まる造波板の片振幅 e を、次式から求める。

$$\frac{H}{2e} = \frac{4 \sinh^2(2\pi h/L)}{4\pi h/L + \sinh(4\pi h/L)} \quad (2.19)$$

ここに、 H ：波高である。

3) 片振幅 e と周期 T から定まる造波板の速度 u を、境界条件の x 方向流速として与え

る．なお，境界からの水の流入をなくすために， x 方向流速に以下の補正 U を加える．

$$U = \frac{h}{h + \eta} u \quad (2.20)$$

ここに， η ：現在の計算水位， h ：水深である．

2.3.2 不規則波の造波法⁵⁾

不規則波信号作成のためには，周波数スペクトルを決定する必要がある．周波数スペクトルには波浪観測などに基づく様々な提案式があるが，風波の標準的な周波数スペクトルとして，修正 Bretschneider・光易型スペクトルが水理模型実験などで最も多く使用されており，数値波動水路においてもこのスペクトルが採用されている．修正 Bretschneider・光易型スペクトルを次式に示す．

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (2.21)$$

ここに， $H_{1/3}$ ：有義波高， $T_{1/3}$ ：有義波周期， f ：周波数である．

次に，確定した周波数スペクトルのもとでの水位変動，流速の評価方法を示す．不規則波では，波高の大きな波が出現することがあり，この場合，厳密には非線形性が無視できないが，流関数法のような計算方法では多方向不規則波への拡張が困難である．そこで，非線形性を無視し，微小振幅波理論の解の重ね合わせにより不規則波の水位変動と流速を評価することとしている．すなわち，水位変動 η および流速 u, w は以下のように表される．

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.22)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M \left[2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h + z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \alpha \bar{U}_m \right] \quad (2.23)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m (h + z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.24)$$

ただし， α は流速計算の際にストレッチ法を適用するために必要となる Stokes Drift の補正係数である．また， k_m は成分波の周波数 f_m に対応した波数であり，次式で表される．

$$(2\pi f_m)^2 = gk_m \tanh k_m h \quad (2.25)$$

ここに，各周波数に対する初期位相 ε_m はランダムに与えており， \bar{U}_m は Stokes Drift で，次式のように与えられる．

$$\bar{U}_m = \pi f_m k_m a_m^2 \frac{\cosh 2k_m (h+z)}{\sinh^2 k_m h} \quad (2.26)$$

周波数 f_m の成分波の振幅 a_m は，以下に示す 2 式により周波数スペクトルと関係づけられており，どちらかを選択する．

$$a_m^2 = 2S(f_m)\Delta f_m \quad (2.27)$$

または，

$$a_m^2 = S(f_m)\chi_2^2\Delta f_m \quad (2.28)$$

ここに， χ_2^2 ：自由度 2 のカイ自乗分布で，波浪統計量の変動性を再現したいときに考慮する．

実際に式 (2.23)，(2.24)，(2.26) をそのまま使用して水面 $z=\eta$ まで流速を計算すると，高周期波成分が水表面付近で非常に大きな流速値になってしまうため，数値波動水路ではストレッチ法を採用している．ストレッチ法は理論的適用範囲を底面 $z=-h$ から平均水面 $z=0$ までと見なして，この範囲で流速を計算し，水位が正なら流速分布を底面から水面までの範囲に投影して引き延ばして使用する．水位が負なら，線形解を重ね合わせた結果のうち静水面より下 $z=\eta$ までの値をそのまま使用する．

この手法により造波を行い，計算領域内の総水量の変化を調べた結果，Stokes Drift の補正係数として次式を使用すると総水量の変動がよく抑えられることが分かっている．

$$\alpha = 0.62U_r^{0.08} \quad (2.29)$$

ここに， U_r ：アーセル数 ($= H_{1/3}L_{1/3}^2/h^3$) である．しかし，このような補正にも関わらず，計算領域内の総水量が長期的に変動してしまう場合もある．この場合には，CADMAS-SURF に用意されている総水量自動補正機能を利用すると，総水量が初期水量から大きく逸脱しなくなる．

次に，数値波動水路には不規則波信号を作成するにあたり，援用プログラムとし

て計算モジュール `mtbmkG` が用意されている。この `mtbmkG` を使用して不規則波信号を作成するには、有義波高、有義波周期、水深などの計算条件の設定、周波数や振幅の選び方、成分波の数など、計算方法に関するパラメータを指定する必要がある。以下に、それらのパラメータに関する説明と、本研究においての設定値を示す。

(1) 計算時間・時刻歴の点数

波浪統計では、連続 100 波程度の記録からでは波高の出現頻度に偏りが見られることが知られている。したがって、不規則波の造波を行うときは連続 100 波以上の波を造波する必要があり、計算時間はこのことを考慮して設定する必要がある。本研究では、大野・松見ら⁶⁾の研究に倣い約 600 波の造波ができるよう、計算時間を 960s ($T_{1/3} = 1.60$ s) に設定している。

時刻歴の点数については、データ時間間隔が大きいと精度が悪くなるため、データ時間間隔が大きくなり過ぎないように時刻歴の点数を設定する必要がある。例えば、周波数スペクトルで考慮する最も周期の短い成分波に対し、少なくともその山と谷を表現するには、1 周期あたり 4 点ないし 5 点以上は必要であると考えられる。よって、周波数スペクトルをピーク周波数の 3 倍まで考慮する場合、有義波周期の 1/15 程度、6 倍まで考慮する場合には、1/30 程度より細かいデータ時間間隔になるように設定すべきである。本研究では、最低でも有義波周期の 1/15 程度のデータ時間間隔になるように設定している。

(2) 周波数スペクトルの係数

式 (2.21) に示される、修正 Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを使用する。なお、0.205 を 0.257、0.75 を 1.03 に設定すると Bretschneider・光易型の周波数スペクトルとなる。

(3) 周波数 f_m の選び方

周波数の選び方としては、下記①、②の 2 種類がある。

- ① 周波数帯を等間隔に分割し、各区間内で 1 つの周波数を乱数により決定し、振幅はスペクトルに応じて決定する (周波数等分割)。
- ② エネルギー $S(f_m)4f_m$ が等しくなるように周波数幅を決定する。基本的にどの成分波の振幅も等しくなる (エネルギー等分割)。

①の考え方では周波数スペクトルに応じて成分波の振幅を調整し、②の考え方では周波数スペクトルに応じて成分波の周波数を調整する。ただし、②の考え方にしたがって周波数を決定するにはスペクトル関数形が必要であるため、スペクトル形状を修正し、かつ周波数を計算している部分も併せて修正する必要がある。ただし、実際の計算では数値粘性などの影響で高周波成分が減衰してしまうことがあり、その場合に

はあらかじめ高周波成分のエネルギーを大きめに与え、スペクトルの合わせこみを行う必要がある。このような場合に②の考え方は一貫性を欠くことから、特に②を選ぶ積極的な理由がなければ、①を選べば良いことになる。本研究においても①の周波数の選び方を選択している。

(4) 振幅 a_m の選び方

式 (2.27), (2.28) のどちらを使用するかを選択する。本来、成分波の数を十分多くし、式 (2.28) を使用するのが良いが、成分波の少ない場合に式 (2.28) を使用すると目標とするスペクトルと一致しなくなることがあるため、本研究では式 (2.27) を選択する。

(5) 流速計算

数値波動水路では、流速リミッターや流速計算点等を設定することができる。流速計算を行う水位の最上段の位置は、最高水位から自動的に設定する場合と手動入力を行う場合の切り替えができる。手動入力の場合は最高水位を下回らないように注意が必要であるため、本研究では自動設定で計算を行っている。

(6) 乱数発生 of 初期値の変更

計算モジュール mtbmkG のオプションタブでは、乱数発生 of 初期値 (idum1, idum2, idum3) の変更が可能である。idum1 の値は、周波数 f_m の選び方が①の場合に式 (2.22) において、周波数 f_m を設定する際に使用される。idum2 の値は、周波数 f_m の選び方が②の場合に式 (2.28) において、 χ_2^2 を設定する際に使用される。idum3 の値は、式 (2.22) において、水位を計算する際の初期位相 ε_m を設定するために使用される。通常の波群を変える場合には、idum3 の値を変更し、idum1 や idum2 の値は、設定に応じて周波数や波浪統計量の変動性を変更したい場合に使用する。本研究では、周波数 f_m の選び方において①を選択しているため、波浪統計量や波群を変更する際は、idum1 や idum3 の値を変更するものとする。

2.4 数値解析における条件設定

2.4.1 計算格子間隔の設定 ⁷⁾

数値波動水路では、解析領域を長方形のセルで分割して数値解析を行なっている。このセルの格子間隔の設定は比較的自由に行えるが、どのように設定するかによって計算精度や計算時間に影響を及ぼすことが知られている。すなわち、格子比率については極力 $\Delta X : \Delta Z = 1 : 1$ 、もしくは $2 : 1$ 程度に設定するのが良いが、格子間隔を細かくして計算格子数を多くした場合には、多くの計算時間と膨大な計算結果が出力され

るので、格子比率を 5:1 までの範囲で設定するのが良いと指摘されている。また $H/\Delta Z$ については 5 以上に設定するのが望ましいと指摘されている。

そこで、本研究では、予備計算として勾配 1:1.5 の不透過斜面を対象に、水深 0.35m、波高 0.05m、鉛直方向の格子間隔 $\Delta Z=0.01\text{m}$ を固定し、水平方向の格子間隔 ΔX を 0.02, 0.025, 0.03m の 3 種類変化させた計算より、それぞれの波形を比較した。 $\Delta X=0.03\text{m}$ の波高が他の ΔX に比べて若干低くなったものの、3 ケースとも波形はほぼ同様となった。以上の結果より、本研究では最終的に計算時間が短縮できる $\Delta Z=0.01\text{m}$ 、 $\Delta X=0.03\text{m}$ を採用することとした。

2.4.2 差分スキームの設定⁸⁾

計算の安定性や精度は差分スキームにも依存するため、差分スキームとしては VP-DONER で、ドナーパラメータ 0.2 が推奨されている。この VP-DONER は、1 次精度の風上差分と 2 次精度の中心差分とのハイブリッドのスキームであり、ドナーパラメータを 1.0 とすると 1 次精度の風上差分、0.0 とすると 2 次精度の中心差分となる。なお、数値波動水路の不規則波造波機能を用いて作成した不規則波は、数値粘性の影響を受け高周波側のエネルギーが減衰する傾向があり、この傾向を抑制するためにも差分スキームデータのドナースキームパラメータを 0.2 程度に設定するのが効果的であると指摘されている。本研究では、推奨されている差分スキーム VP-DONER、ドナーパラメータ 0.2 を採用する。

2.4.3 ポーラスセルの設定⁹⁾

数値波動水路では構造物をポーラスモデルに基づいたセルで表現することができる。ポーラスモデルに基づく数値波動水路のセルは、(i) 気体または液体で構成される一般セル、(ii) 気体または液体と構造物で構成されるポーラスセル、(iii) 構造物で構成される構造物セルの 3 つに区分される。これらのうち、流速や圧力などが算出されるセル、すなわち計算対象となるセルは一般セルとポーラスセルであり、境界条件は構造物セルの表面および解析領域の上下左右端に設定される。数値波動水路ではセルごとにポーラスセルや構造物セルを設定することができ、これによりモデル堤体断面を再現する。

本研究で対象とする消波工の概略図を図 2-1 に示す。図に示すような被覆層（被覆石、消波ブロック）とコア部の 2 層で構成される堤体断面をセルに分割する際、セルは 5 つのパターンに分類される。その 5 つのパターンとは、①セル内の全てが流体の場合、②セル内に流体と被覆層が混在する場合、③セル内が全て被覆層の場合、④セル内に被覆層とコア部が混在する場合、⑤セル内が全てコア部の場合の 5 パターンである。①、③、⑤の 3 パターンについてはセル中の水の割合の合計値（以下、空隙率と呼ぶ）をそのまま設定すればよい。しかし、②、④の 2 パターンに関しては計算に

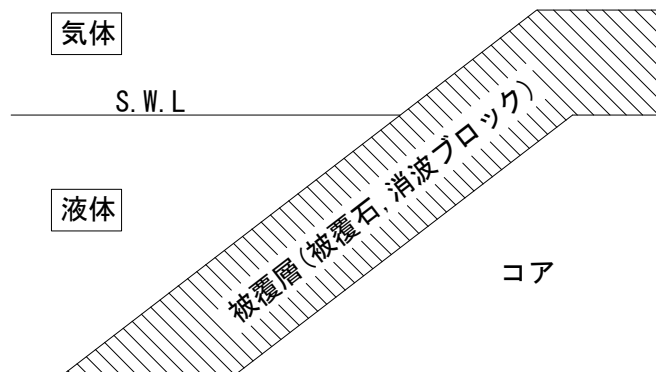


図 2-1 消波工の概略図

より空隙率を求めなければならない。②の場合は、セルに含まれる被覆層の水の割合、被覆層以外の水の割合を求めることにより、セル中の空隙率を求めることができる。同様に、④の場合も被覆層の水の割合、コア部の水の割合を求めることにより、セル中の空隙率を求めることができる。

また、数値波動水路では、3点指定による透過・不透過構造物の設定も可能である。この3点による構造物の設定と、ポーラスモデルに基づいたセルで構造物を設定する場合についてそれぞれ計算を行い、比較した結果、出力に大きな差異は見られなかったため、3点指定による構造物の設定を選択し、計算を行っている。

2.4.4 空隙率の設定¹⁰⁾

数値波動水路で堤体内の流体運動を再現するためには、消波工を構成する被覆層(被覆石、消波ブロック)、およびコアの空隙率を与える必要がある。以下に、空隙率の算出方法と設定された空隙率を示す。

(1) 被覆石およびコアの場合

本研究では、被覆石を碎石、コアを砂利で再現している。碎石および砂利の空隙率は、次式によって算定される。

$$\text{空隙率 (\%)} = 1 - \frac{\text{骨材の単位容積質量 (kg/l)}}{\text{骨材の絶乾状態での密度 (kg/l)}} \times 100 \quad (2.30)$$

いま、碎石と砂利の絶乾状態の密度はそれぞれ 2.76 (kg/l)、2.60 (kg/l) であり、単位容積質量は、以下のように求めることができる。

$$\text{単位容積質量 (kg/\ell)} = \frac{\text{容器中の試料の質量 (kg)}}{\text{容器の容積 (\ell)}} \quad (2.31)$$

式 (2.30)、式 (2.31) を使用するために、碎石と砂利の単位容積質量を求める必要がある。そのために、それぞれの最大寸法に応じた容器を使用して質量を計測する。質量の計測方法は、棒突きによる場合とジッキングによる場合があるが、棒突きによる方法では実験で用いる碎石、砂利が損傷する可能性があることから、本研究ではジッキングによる方法を採用した。また、碎石においては寸法が大きいため、棒つきによる方法が困難であると考えたこともジッキングによる方法を採用した理由である。このジッキングによる方法は、容器をコンクリート床のような強固で水平な床の上に置き、試料をほぼ等しい 3 層に分けて詰め、各層ごとに容器を約 5cm 持ち上げて左右交互に 25 回、全体で 50 回落下させて締め固める。次に、試料の表面を容器の表面にそってならし、突起が容器上面からのへこみと同じくらいになるようにして容器中の試料の質量を計測するという方法である。これにより、碎石、砂利それぞれの容器中の質量が分かり、式 (2.31) によって単位容積質量を求め、さらに、式 (2.30) によって空隙率を求めることができる。

(2) 消波ブロックの場合

本研究では、消波ブロックの 1 つであるシーロックを採用した。本研究で採用したシーロック模型を写真 2-1 に示す。シーロックについては、(1) で述べたようなジッキング法は採用せず、公称値をそのまま用いた。

(3) 空隙率の設定

本研究では、消波工を構成する被覆層として、被覆石（碎石）5 種類、消波ブロック（シーロック）6 種類を採用するものとし、コア（砂利）については 1 種類のみとした。設定された空隙率、およびそれぞれの諸元を表 2-1、表 2-2 に示す。

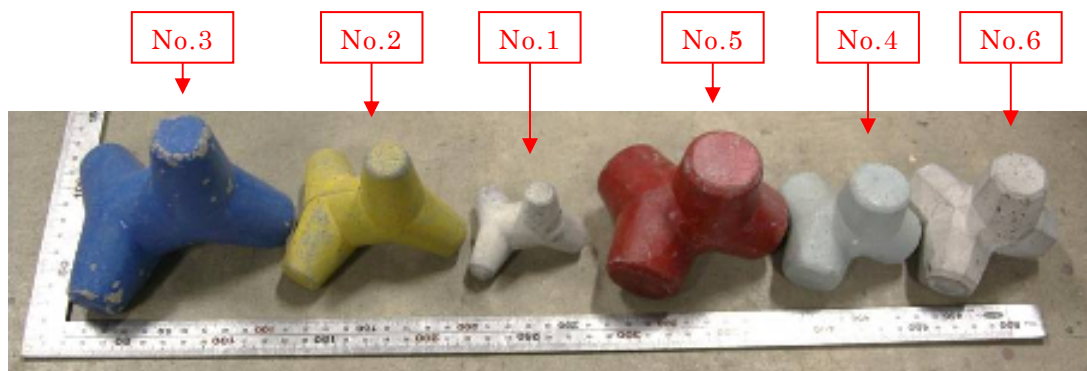


写真 2-1 シーロック模型

表 2-1 被覆石・コアの諸元

	被覆石					コア
	質量の範囲(g)	35-50g	50-70g	70-100g	100-130g	
中央質量(g)	42.5g	60.5g	85.5g	115.5g	140.5g	3.75g
密度(kg/l)	2.76					2.60
空隙率	0.387	0.436	0.437	0.425	0.422	0.368

表 2-2 消波ブロックの諸元

	標準型			B 型		
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
質量(g)	74g	247g	473g	232g	472g	283g
密度(kg/l)	2.30					
空隙率	0.50					

2.4.5 抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M の設定

2.4.4 において、消波工を構成する被覆層（被覆石・消波ブロック）、およびコアの空隙率を設定したが、それ以外にも、式 (2.4) ~ (2.8) で示した被覆層の抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M の設定が必要となる。被覆層およびコアの C_D 、 C_M は、水理模型実験と同様の波浪条件、空隙率、仮定値として C_D 、 C_M を設定し、これらを入力値とする数値解析結果より得られた水位変動データと、水理模型実験における水位変動データを比較することにより設定する。以下に、具体的な設定方法を述べる。

(1) 実験装置

水理模型実験は、長さ 29.0m、幅 0.5m、高さ 0.75m の片面（一部両面）ガラス張りである鋼製二次元造波水槽を使用した。この水槽における造波装置はピストン式で、造波板を前後に同一振幅で往復運動させることによって規則波、および不規則波を発生させる形式のものである。

水位変動データの測定には、容量式波高計（KENEK 製 CHT4-50）を使用した。これは測定された波高値を、容量式波高計の本体（KENEK 製 CH-406）を介して電圧値として出力するものである。まず、実験前の静水状態で波高計に取り付けたポイントゲージを上下に 5cm ずらし、そのときの波高計の変化量と出力電圧の比を求める。これにより波高と電圧の校正関係式を得ることができ、波高計で水位変動を計測することによって出力された電圧から先の校正関係式より水位変動データへ変換する。

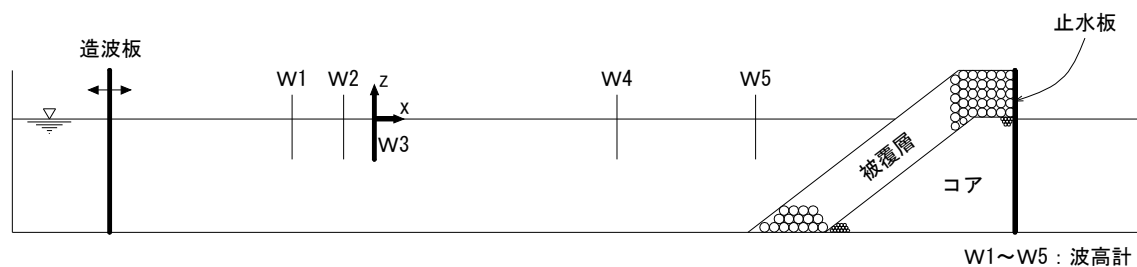


図 2-2 実験水槽の概要図

表 2-3 波高計設置位置

波高計	W1	W2	W3	W4	W5
造波板からの距離(m)	13.23	13.53	13.73	18.24	護岸法先

実験水槽の概要図を図 2-2 に示す。水理模型実験では、波高計を沖側一様水深部に 4 本、護岸法先に 1 本の計 5 本 (W1~W5) を設置し、水位変動を測定した。表 2-3 に、波高計の設置位置 (造波板からの距離) を示す。

(2) 消波工形状および実験条件

水理模型実験を行った消波工形状を図 2-3, 2-4 に示す。本研究で対象とした消波工形状は、図 2-3 に示す被覆石とコアからなる形状と、図 2-4 に示す消波工全体が消波ブロックで構成された形状の 2 種類である。また、被覆層として採用したのは、表 2-1, 表 2-2 に示す被覆石 5 種類、消波ブロック 6 種類である。

実験条件であるが、被覆石を用いた実験の場合は水深 0.35m, 消波ブロックを用いた実験の場合は 0.30m とし、法面勾配は 1 : 1.5 と 1 : 2.0 の 2 種類とした。なお、模型堤体背面には天端高と同じ高さまで止水板を設置した。

(3) 入射波浪条件

入射波は規則波とし、入射波高 0.05m, 周期を 6 種類 (1.0s, 1.2s, 1.4s, 1.6s, 1.8s, 2.0s) と設定した。計測時間は A/D 変換のサンプリング周波数 20Hz により、各波高計で 2000 個の水位変動データを測定した。なお、この規則波実験では、反射率の計測も併せて行っている。

(4) 抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M の設定

抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M は、図 2-2 に示す波高計 W1 での水位変動に関する計測結果と、表 2-4 に示す C_D , C_M のすべての組み合わせでの数値解析結果の比較により設定した。なお、コアについては、既往の研究を参考に $C_D=1.5$, $C_M=2.0$ に固定した 11),12)。

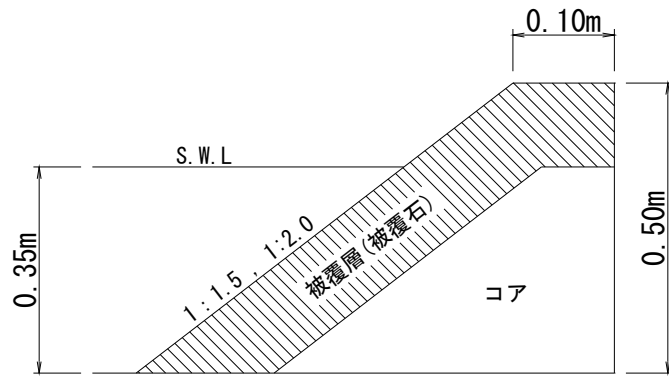


図 2-3 消波工形状（被覆石：コア有）

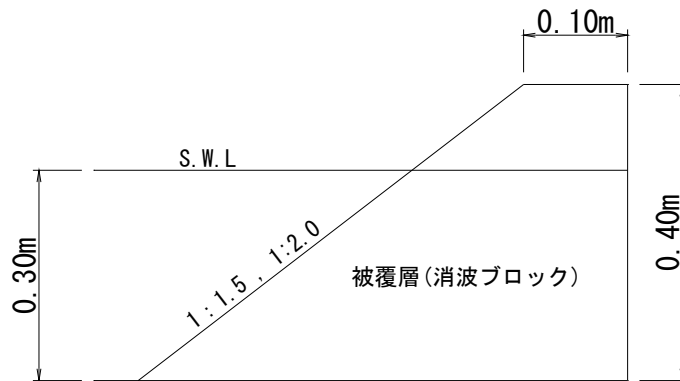


図 2-4 消波工形状（消波ブロック：コア無）

表 2-4 抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M の予備計算値

	被覆層（被覆石，消波ブロック）	コア
C_D	0.5～3.0，0.5 間隔	1.5
C_M	0.5～3.0，0.5 間隔	2.0

表 2-5 抵抗係数 C_D と慣性力係数 C_M の設定値

消波工形式	被覆層		コア	
	C_D	C_M	C_D	C_M
被覆石（コア有）	2.0	2.0	1.5	2.0
消波ブロック（コア無）	1.0	1.2	—	—

波高計 W1 での水位変動に関する計測結果と数値解析結果の比較検討の結果，被覆石については $C_D=2.0$ ， $C_M=2.0$ ，消波ブロックについては $C_D=1.0$ ， $C_M=1.2$ と設定した．以上の値を用いて，一様斜面勾配実験における被覆石と消波ブロックの，それぞれの被覆材に対する反射率の計算結果と実験結果を比較したものを図 2-5 に示す．なお，反射率の算出にあたっては，合田らの入反射波分離推定法¹³⁾に基づいて行っている．

計算結果と実験結果の対応性について，被覆石の場合では入射波周期が長くなると計算結果と実験結果のズレが大きくなる．一方，消波ブロックの場合では入射波周期が短くなると計算結果が小さく算定される結果となる．このことから，反射率の再現性には C_D ， C_M に対して，入射波周期の影響を考慮した値を用いる必要があると考え，周期毎に C_D ， C_M の値を種々変化させて計算した結果，図 2-5 に示す結果とそれほど変わらなかったことを確認している．本研究では，最終的に入射波周期に関係なく表 2-5 に示す C_D ， C_M の設定値を用いることにした．

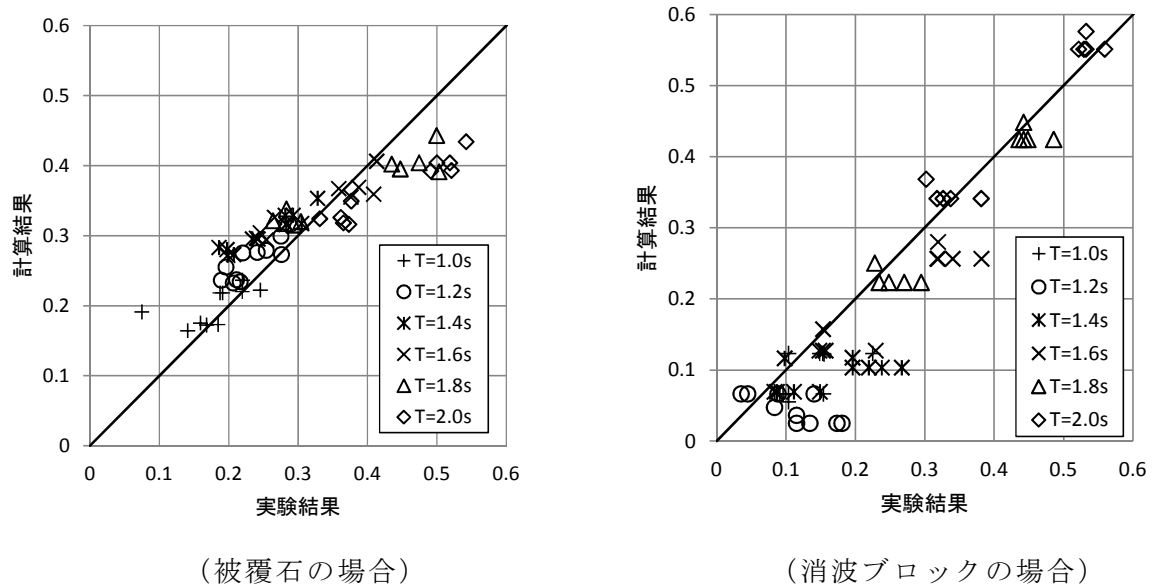


図 2-5 計算結果と実験結果における反射率の比較

2.5 結語

従来，防波堤や護岸等の設計は，水理模型実験や設計公式を基に行われてきたが，水理模型実験は多くの費用・時間が掛かること，また，設計公式は条件によって精度が悪くなる問題がある．これらに代わる方法として，数値計算プログラムの一つである数値波動水路 CADMAS-SURF が開発され，海岸・港湾構造物の設計において性能設計を支援する数値計算ツールとして利用されている．

本章では，第 3 章で検討を行う累積損傷を受けた消波工の消波性能がどのように変動するかの把握と，第 4 章で述べるニューラルネットワーク構築の際に必要な教師データの作成を目的とするため，数値波動水路による数値実験結果を活用するものとし，その概説を行った．また，数値実験を行うために必要となる各パラメータについて予備計算を実施し，適切な数値実験結果が得られるように各パラメータの設定を行った．本章で得られた結果を，以下に要約する．

1. 数値波動水路について概説を行い，本研究における位置づけを行った．
2. 数値実験を行うために必要となる各パラメータの概説を行い，適切なパラメータ設定を行った．

<参考文献>

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，2001.
- 2) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，2008.
- 3) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，pp.10-15，2001.
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，44p，2001.
- 5) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，pp.18-23，2008.
- 6) 大野賢一，松見吉晴，児玉広子，木村晃：被覆材の耐波安定性に関する不規則波実験における造波信号長の影響，海岸工学論文集，第 49 巻（1），pp.746-750，2002.
- 7) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，65p，2001.
- 8) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，9p，2008.
- 9) 財団法人沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，pp.58-59，2001.
- 10) 財団法人日本材料学会：建設材料実験，pp.58-60，2005.
- 11) 松見吉晴，河合直樹，平山隆幸，太田隆夫，大野賢一：護岸被覆工の被災劣化に伴う反射率変化に関する予測診断システムの開発，海洋開発論文集，第 25 巻，pp.169-174，2009.
- 12) 平山隆幸，松見吉晴，藤本啓伸，河合直樹，太田隆夫，大野賢一：護岸被覆工の累積損傷に伴う反射率の評価システムについて，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol66 No.1，pp.826-830，2010.
- 13) 合田良實，鈴木康正，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，1976.

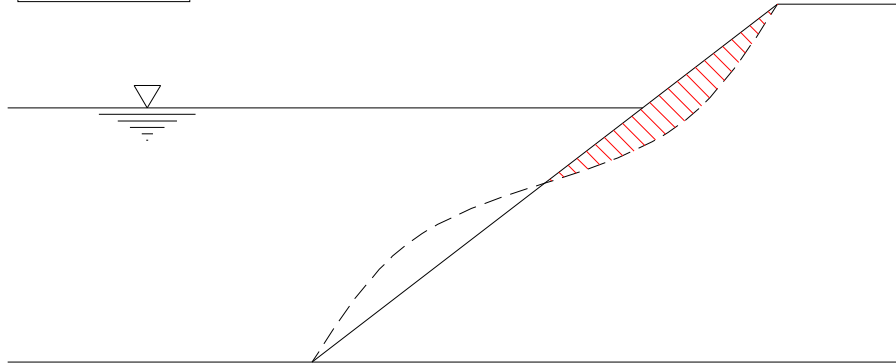
第3章 累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性

3.1 緒言

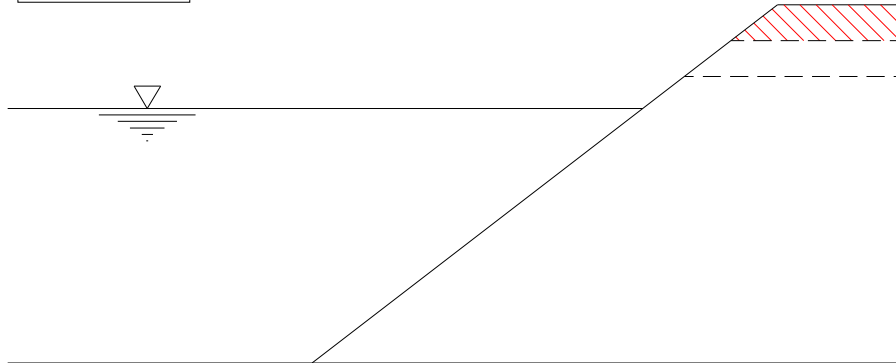
我が国の海岸保全施設は、1956年の海岸法制定や、1959年の伊勢湾台風等による大災害を契機に整備されたものが多いため、施設の老朽化に伴う性能・耐力の著しい低下が懸念されている。このような状況を踏まえ、国土交通省・農林水産省では、海岸保全施設におけるライフサイクルマネジメント（LCM）の導入を推奨している¹⁾。海岸保全施設の一つである消波工にこの LCM の考え方を導入する際、消波工の累積損傷によって生じる消波性能の変動特性について、適切に評価することが必要不可欠である。しかしながら、消波工の変形を許容し、且つその時の消波性能（越波流量や反射率等）がどのように変化するかを検討した事例はほとんど見受けられないのが現状である。一方で、消波工の被災形態についてであるが、久保田ら²⁾は消波ブロックの被災形態を把握することを目的として、消波ブロック被覆堤の被災事例調査、および水理模型実験による検討を行っている。久保田らの研究によると、消波工の被災形態は波浪条件、構造条件により、図 3-1 に示されるような、①法面が被災する場合（法面被災）、②天端付近が被災する場合（天端被災）、③天端および法面が被災する場合（複合型被災）の 3 パターンに大別されている。

本章では、上述した問題点の解決策として、累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性を明らかにすることを目的とする。なお、累積損傷断面としては久保田らの研究成果および被災事例を参考に、②天端被災、③複合型被災の 2 パターンを検討対象とする。ここで、②と③を検討対象とした理由であるが、写真 3-1 に示されるような消波工の沈下に関する被災が日本各地で多く報告されていること、また、消波工天端高と消波性能には密接な関係があると考えたためである。本研究では、この 2 つの累積損傷断面のモデル化を行い、数値波動水路でモデル化された断面を再現し、数値実験を行うことで、累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性を明らかにする。なお、本研究においては、消波工の消波性能指標として、反射率と越波流量を対象とする。

① 法面被災



② 天端被災



③ 複合型被災

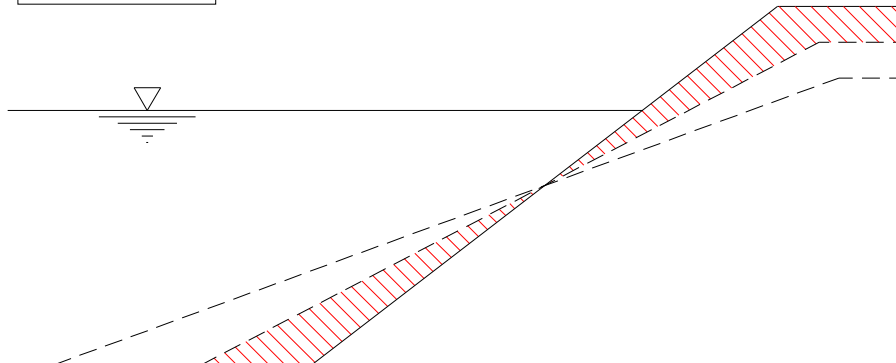
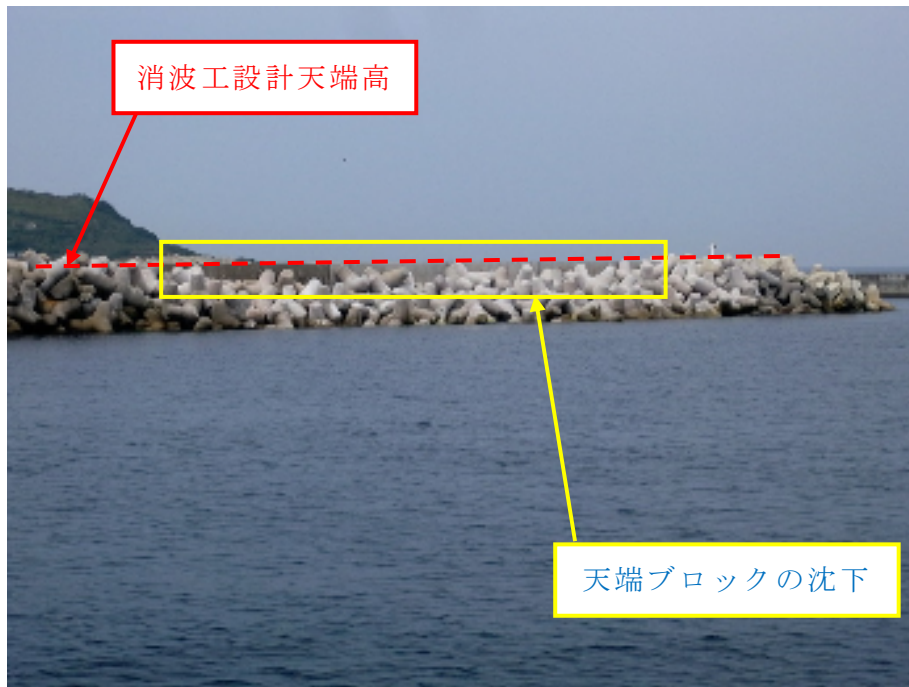


図 3-1 消波工の被災形態説明図



(防波堤消波工の被災例)



(護岸消波工の被災例)

写真 3-1 消波工の被災事例

3.2 累積損傷断面のモデル化

3.2.1 天端被災のモデル化

天端被災断面のモデル化にあたっては，法面勾配の変化はなく，単純に堤体天端の沈下のみを対象としている．図 3-2 にモデル図を示す．初期断面を $DL=0$ （被災レベル 0）とし，被災が 1 段階進行（ $DL=1$ ：被災レベル 1）すると天端高を被覆材 1 個分減少させている．さらに被災が進行すると，堤体天端のみ被覆材を 1 個分ずつ減少させていくモデルである．

3.2.2 複合型被災のモデル化

複合型被災のモデル化は，以下の 2 ケースを対象とする．

(1) 天端幅・天端高ともに被覆材 1 個分ずつ減少させるモデル

図 3-3 にモデル図を示す．初期断面を $DL=0$ （被災レベル 0）とし，被災が 1 段階進行（ $DL=1$ ：被災レベル 1）すると天端幅と天端高を被覆材 1 個分減少させ，堤体法先位置を侵食面積と堆積面積が等しくなるように，つまり，法面勾配を緩くするように法先を前進させている．さらに被災が進行した場合もブロック 1 個分の低下と，その被災断面積分だけ法面の勾配が緩くなっていくモデルである．このモデルを，便宜上，複合型被災モデル-1 とする．

(2) 天端高は被覆材 1 個分，天端幅を天端高沈下率と同じ割合で減少させるモデル

図 3-4 にモデル図を示す．初期断面を $DL=0$ （被災レベル 0）とし，被災が 1 段階進行（ $DL=1$ ：被災レベル 1）すると天端高を被覆材 1 個分，天端幅を天端高の沈下率と同じ割合で減少させ，堤体法先位置を侵食面積と堆積面積が等しくなるように水平方向へ前進させている．被災が進行する毎に，天端高を被覆材 1 個分ずつ減少させ，その被災断面積分だけ法面の勾配が緩くなっていくモデルである．このモデルを，便宜上，複合型被災モデル-2 とする．

以上のようにモデル化した各累積損傷断面を数値波動水路内で再現し，数値実験を行う．

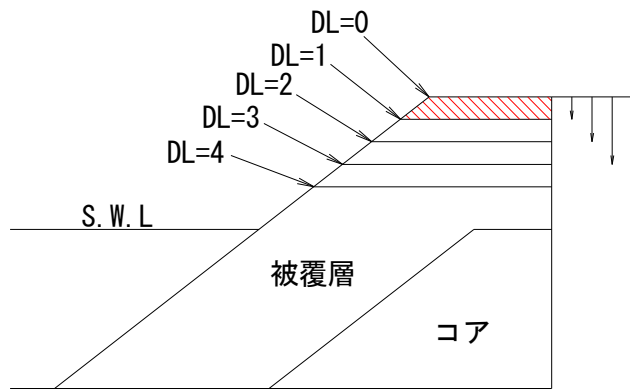


図 3-2 天端被災断面モデル

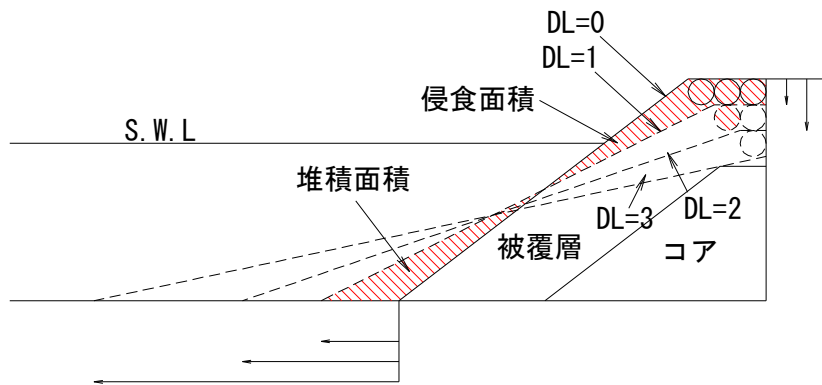


図 3-3 複合型被災断面モデル-1

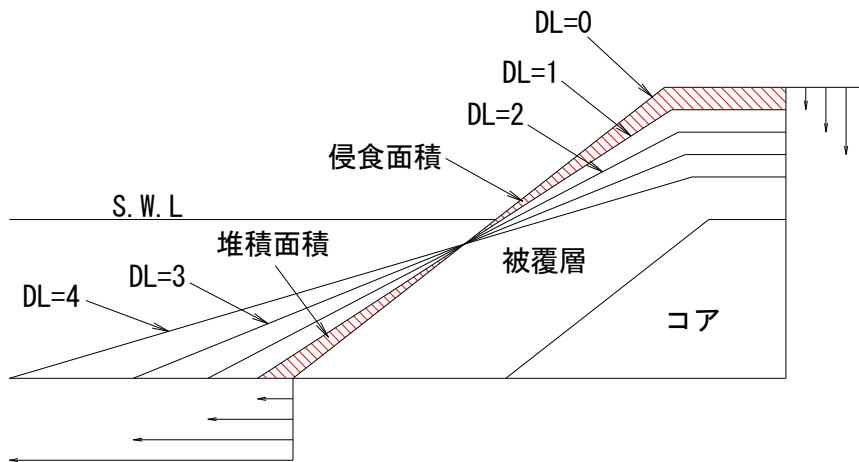


図 3-4 複合型被災断面モデル-2

3.3 数値波動水路における通過波検定

数値波動水路での数値実験においても、水理模型実験を行う場合に通常実施される通過波検定が重要となってくる。本節では、本研究で対象としている規則波と不規則波それぞれの通過波検定について詳細に述べる。

3.3.1 通過波検定の概要³⁾

水理模型実験と同様に、設定した解析領域（格子間隔や水路長、水路高さ、地形モデルなど）や計算条件（造波時間や差分スキーム、境界条件の設定など）の妥当性の検証と、所定の波浪条件を与える入力条件を決定するために、通過波検定を行う必要がある。

現地構造物を対象とした耐波検定を行う場合、造波モデルデータの入力位置で発生した波浪が、適切にモデル化された海底地形上を伝播する過程で浅水変形し、構造物に作用する状況を再現する必要がある。このとき、適切な検定位置で目標とする波高、周期を得るため、造波モデルデータの入力波高（造波指示波高）を変化させながら、検定対象地点（構造物設置位置、非砕波領域）での通過波高の変化を算定し、入力波高と通過波高の関係を把握することにより、造波モデルデータの入力値を決定する。

なお、一様水深での計算を行う場合でも、波浪条件によっては、造波モデルデータの入力位置で発生した波浪と、検定対象地点での波浪が異なる場合があることから、通過波検定は必要である。また、通過波検定では造波モデルデータの入力波高を変化させながら、構造物設置位置周辺の検定対象地点での通過波高を算定するが、入力波高がある値を超えると、検定対象地点に波が到達する前に砕波が生じ、波高が減衰するので留意する必要がある。

3.3.2 規則波の検定

規則波の通過波検定では、解析領域境界からの反射波の影響などを極力排除した状態で実施することが望ましい。そのための対策として、構造物を設置する本計算の解析領域から構造物背後の領域を変更し、境界までの距離を長く設定して反射波の到着時間を遅らせる、あるいは十分な減衰領域を設けて通過波のエネルギーを減衰させるなどの手法が有効である。また、波高などの算定に当たっては、個々の波のばらつきを考慮して、数波の平均値を用いる。

(1) 解析対象波

周期一定の規則波の実験では、造波板で起こした波が模型構造物に達して反射されたあと、造波板の位置まで戻って再反射される。この再反射波が重畳されて波形の歪

んだ入射波が模型に達する前に、所要の測定を行うことが原則となっている。すなわち、有効測定時間を計算し、解析対象となる模型構造物からのみによる反射波が、何波目から何波目に現れているのかを求める必要がある。また、反射率の算出のためには、半波長以上の空間波形が必要である。数値計算では、図 3-5 および表 3-1 に示す水理模型実験での波高計 W1 と同様の位置となるよう、造波板から 13.23m のところから水平方向の計算格子間隔である $\Delta X=0.03\text{m}$ の等間隔で 90 個設定し、周期によって 2 本の波高計位置を変えている。その 2 本の位置で解析対象となる水位変動データを計測する。本研究で解析対象となる有効測定時間は、所定の波高に達した波が構造物法面で反射し、造波板側の波高計に到達してから再度造波板により反射された波が造波板側の波高計に到達するまでの時間である。そこで、この時間区間に対応する波が何波目から何波目までかについて、次のように算定した。

造波板側の波高計から構造物斜面までの距離の 2 倍を波長で除し、所定の波高に達するまでの波数を加えることで、解析開始波を求める。また、造波板から造波板側の波高計までの距離の 2 倍を波長で除したものを解析開始波に加えることで、解析終了波を算出した。解析対象波を表 3-2 に示す。

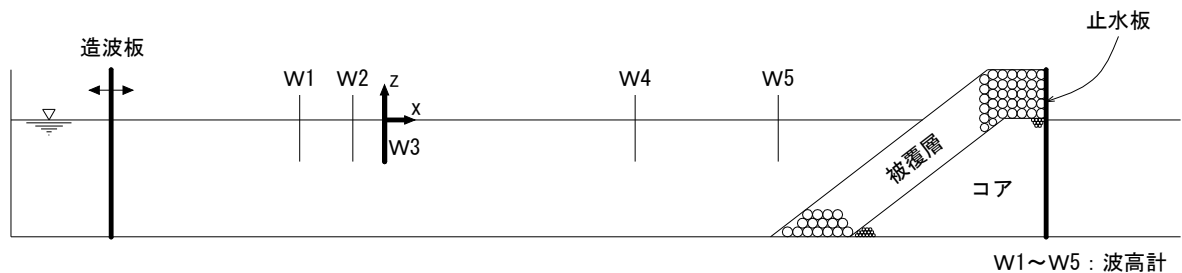


図 3-5 水理模型実験の概要図

表 3-1 波高計設置位置

波高計	W1	W2	W3	W4	W5
造波板からの距離(m)	13.23	13.53	13.73	18.24	護岸法先

表 3-2 各水深・周期における解析対象波

水深 $h(\text{m})$	周期 $T(\text{s})$	波長 $L(\text{m})$	解析対象波	
			開始波	終了波
0.35	1.0	1.42	20	26
	1.2	1.86	15	22
	1.4	2.28	11	16
	1.6	2.69	9	13
	1.8	3.09	8	11
	2.0	3.49	6	10
0.30	1.0	1.37	18	27
	1.2	1.77	13	21
	1.4	2.15	10	17
	1.6	2.53	9	14
	1.8	2.89	7	12
	2.0	3.26	6	11

(2) 入力波高値の設定

適切な検定位置（構造物設置位置あるいはその前面の非砕波領域）で目標とする波高（周期）を得るため、通過波検定により、造波モデルデータとして入力する値を決定する。そのための作業として、造波モデルデータの入力波高値（造波指示波高）を変化させながら、検定対象地点（構造物設置位置あるいはその前面の非砕波領域）での通過波高の変化を算定し、入力波高と通過波高の関係を把握する。

入力波高値の設定に当たり、図 3-5 における波高計 W1 での水位変動を用いて個々の波高を算定し、図 3-6 に示すように、波高が安定した後の波から反射波到達までの波を対象に、4～6 波の波高の平均値（観測波高 H_{ex} ）を求めた。図 3-7 は入力波高 H_{in} と観測波高 H_{ex} の比較を行った検定結果の一例を示したものである（水深 $h=0.30\text{m}$ ，周期 $T=1.0\text{s}$ ）。同図より、 $H_{ex}=0.887H_{in}$ の関係式（入力波高と観測波高の比率：0.887）を得た。同様に、その他の各周期・水深における入力波高 H_{in} と観測波高 H_{ex} の検定結果を表 3-3 に示す。

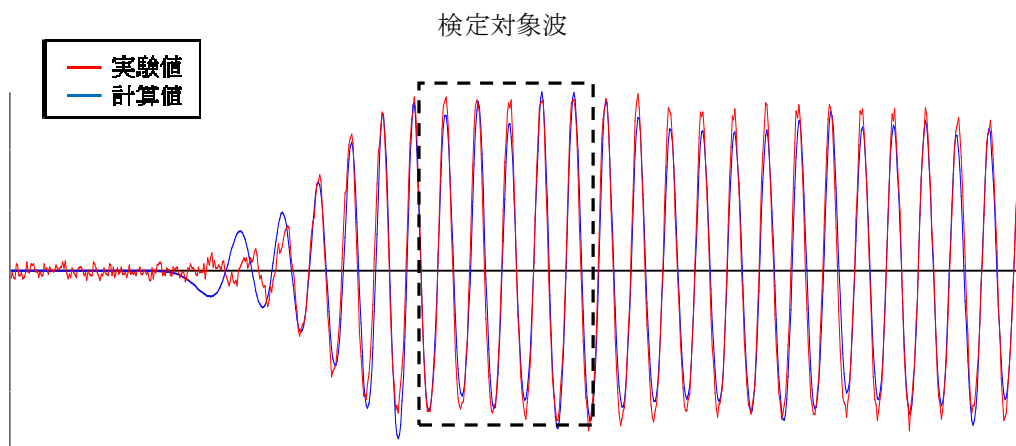


図 3-6 通過波検定対象波

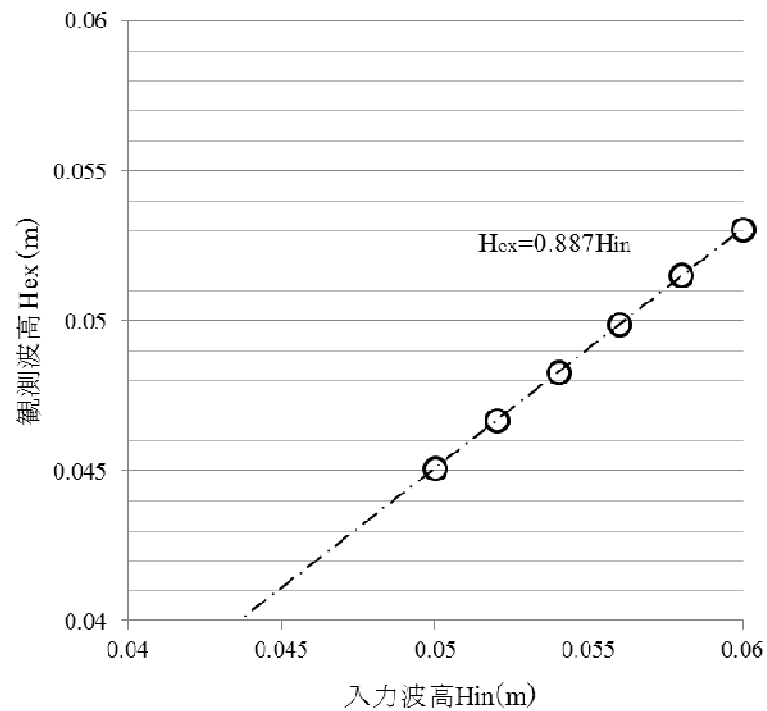


図 3-7 通過波検定結果の例 ($h=0.30\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)

表 3-3 通過波検定結果 (H_{in} と H_{ex} の比率)

水深 h	周期 T					
	1.0s	1.2s	1.4s	1.6s	1.8s	2.0s
0.35m	0.893	0.992	1.013	1.036	0.950	1.014
0.30m	0.887	0.992	1.028	1.089	1.032	0.986

3.3.3 不規則波の検定

不規則波の検定では、目標スペクトルと造波された不規則波の合わせ込み作業が重要となる。数値波動水路の不規則波造波機能を用いて作成した不規則波は、造波地点から離れるに従い、数値粘性の影響を受け、高周波側のエネルギーが減衰する傾向がある。この傾向を抑制するには、第 2 章でも述べたように差分スキームデータの DONOR スキームパラメータを 0.2 程度に設定するのが効果的である。その上で、合わせ込みを 1 回行えば、ほぼ目標とする不規則波を造波させることが可能である。

スペクトルの合わせ込み作業により、計算によるスペクトル形状を目標スペクトル形状に完全に一致させることは極めて困難であるが、実務的には 1 回の合わせ込みで目標とするスペクトル形状を有する不規則波を造波させることが可能と考えられている。このとき、合わせ込みの精度を定量的に評価するため、有義波高や有義波周期（目標とするスペクトル形状によってはピーク周期）を目標値に合わせる方法がある。水理模型実験では、有義波周期に着目した合わせ込みを行うことが多いが、数値波動水路では、数値粘性など数値計算特有の現象による波浪伝播過程でのスペクトル形状の変化を伴うため、通過波検定の作業を通じて、その都度、適切な評価方法を考慮する必要がある。以下にその詳細を記す。

(1) スペクトルの合わせ込み⁴⁾

周波数スペクトルの合わせ込みを行う場合、ある周波数に対する補正值をテーブルデータとして与える。補正值テーブルで与えた周波数間は補正值を線形補完し、補正值を標準スペクトルに乗じた値を式 (2.27)、(2.28) の $S(f)$ として使用する。

具体的には、目標の周波数スペクトルを $S_t(f)$ 、CADMAS-SURF で計算しスペクトル解析した結果を $S_c^{(1)}(f)$ とすると、 $S_t(f)/S_c^{(1)}(f)$ をファイル出力して補正值として使用すればよい。さらに合わせ込みを行う場合は、この補正を施した 2 回目の計算により得られた周波数スペクトルを $S_c^{(2)}(f)$ とし、 $(S_t(f)/S_c^{(1)}(f)) \times (S_t(f)/S_c^{(2)}(f))$ を補正值として与えればよいが、1 回目の補正で効果が得られなかった場合には、計算の格子間隔を変更したり、不規則波信号を作り直した方がよいと指摘されている。

(2) 水路長、水路高さ、造波時間の設定

不規則波の検定における数値波動実験の実験概要図を図 3-8 に、波高計設置位置を表 3-4 に示す。本研究では、水路長を約 30m、解析領域を造波板から約 19m と設定している。また、水槽前後の解析領域端の影響を抑えるために、造波板背後（沖側）1m の位置から幅 5m、解析領域後（岸側）に幅 5m のエネルギー減衰帯を配置し、境界条件を放射境界とすることで無反射モデルとしている。水深は 0.35m、構造物は設置しておらず、構造物に当たる波の打ち上げは考慮する必要が無いいため、水路高さは 0.70m に設定している。造波時間については、計算時間の関係上、200s に設定した。なお、第 4 章で構築する評価システムの検証用データを得るための水理模型実験にお

いては、有義波周期 1.6s の修正 Bretschneider・光易型スペクトルを用いて不規則波を造波し、有義波高は約 10cm である。

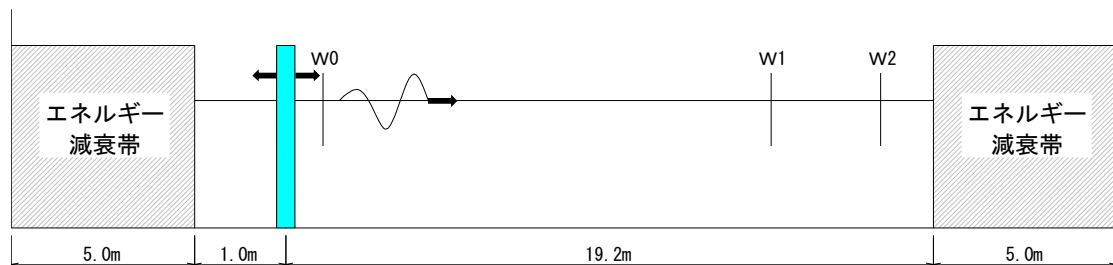


図 3-8 検定用数値波動実験概要図

表 3-4 波高計設置位置

波高計	W0	W1	W2
造波板からの距離(m)	0.30	13.2	18.0

(3) 計算格子間隔，差分スキーム，造波境界条件の設定

第 2 章で設定したデータを採用する。すなわち，計算格子間隔は，水平方向 $\Delta X=0.03\text{m}$ ，鉛直方向 $\Delta Z=0.01\text{m}$ ，差分スキームは推奨されている VP-DONER でドナーパラメータ 0.2，造波モデルは不規則波を造波するため，造波ソースを選択し，造波関数は不規則波を造波するためのマトリックスタイプとする。

(4) スペクトルの合わせ込みの結果

本研究では，上記 (1) に示す設定を行い，造波板付近の波高計 W0 と構造物設置位置付近の波高計 W2 で測定された水位変動を用いて，スペクトルの合わせ込みを行った。図 3-9，3-10 は合わせ込み前，図 3-11，3-12 は造波板付近での合わせ込み後，図 3-13，3-14 は堤体設置位置付近での合わせ込み後の数値波動実験によるスペクトル解析結果である。また，図 3-9，3-11，3-13 は造波板付近でのスペクトル解析結果，図 3-10，3-12，3-14 は堤体設置位置付近でのスペクトル解析結果である。これらの図中で，赤の実線は有義波高 10cm，有義波周期 1.6s とした修正 Bretschneider・光易型スペクトルである。

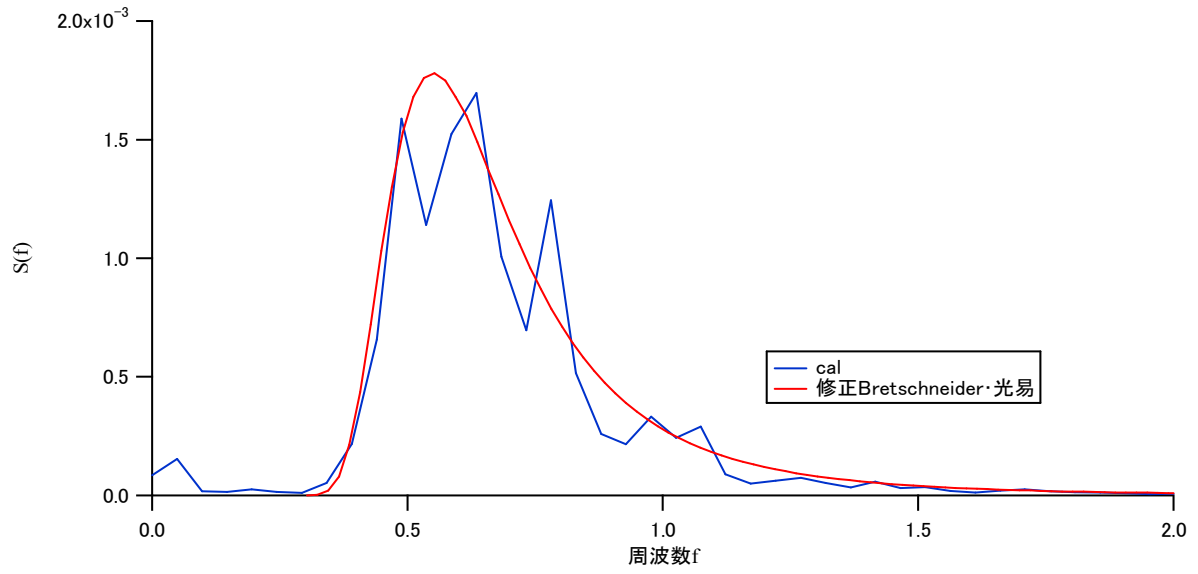


図 3-9 造波板付近でのスペクトル解析結果
(合わせ込み前)

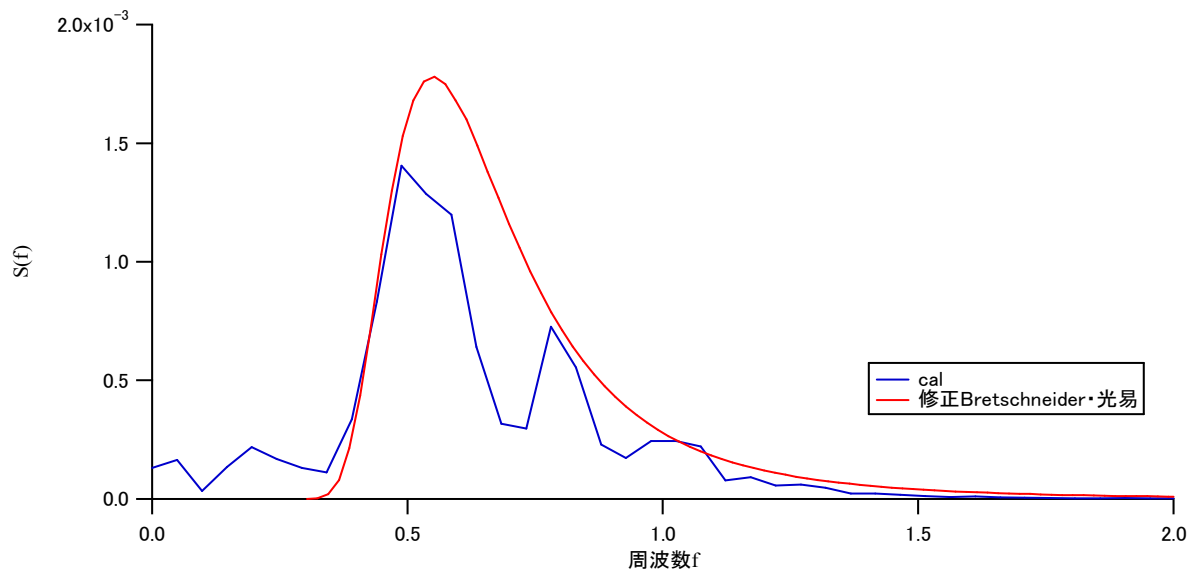


図 3-10 堤体設置位置付近でのスペクトル解析結果
(合わせ込み前)

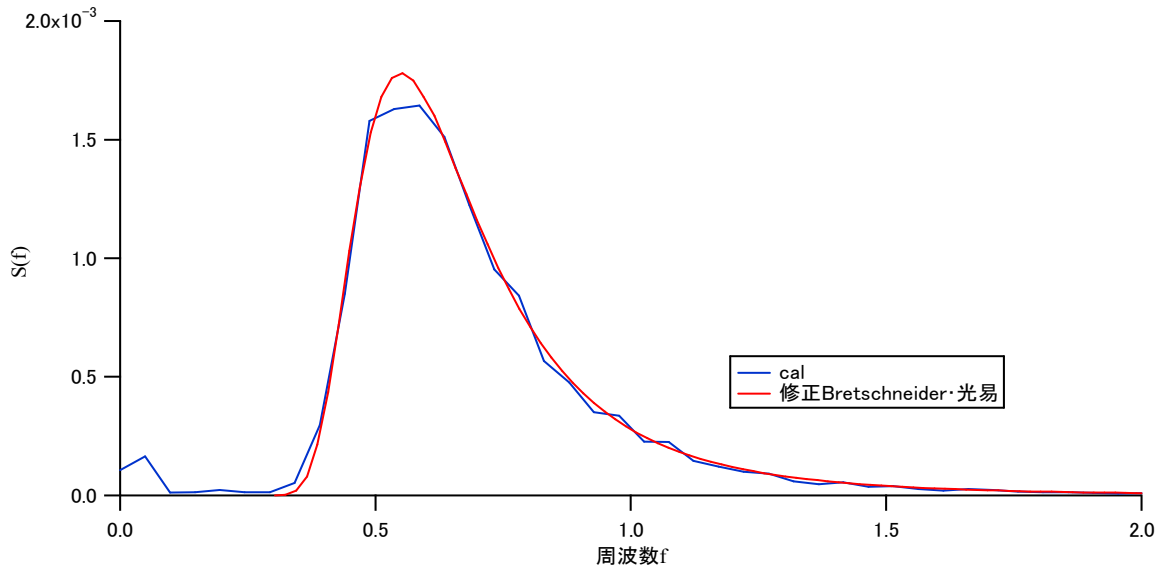


図 3-11 造波板付近でのスペクトル解析結果
(合わせ込み後：造波板付近)

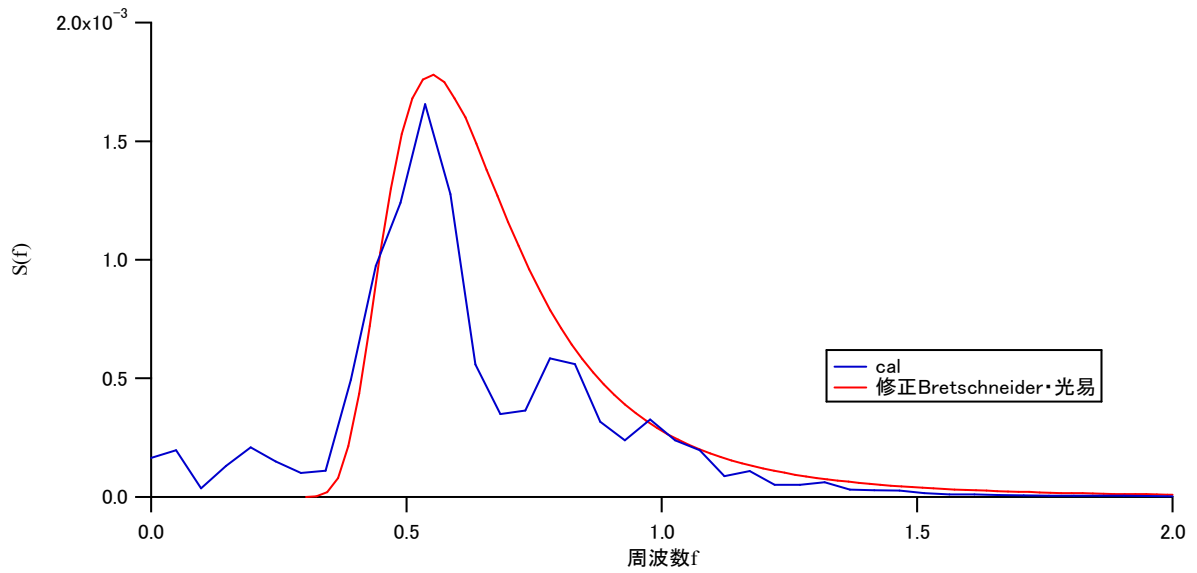


図 3-12 堤体設置位置付近でのスペクトル解析結果
(合わせ込み後：造波板付近)

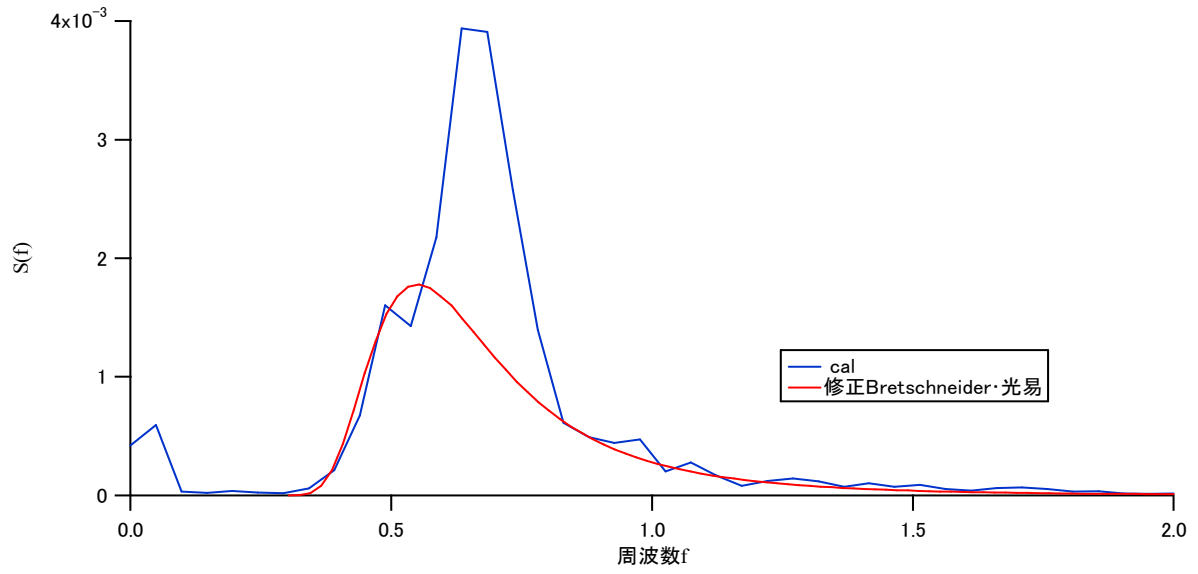


図 3-13 造波板付近でのスペクトル解析結果
(合わせ込み後：堤体設置位置付近)

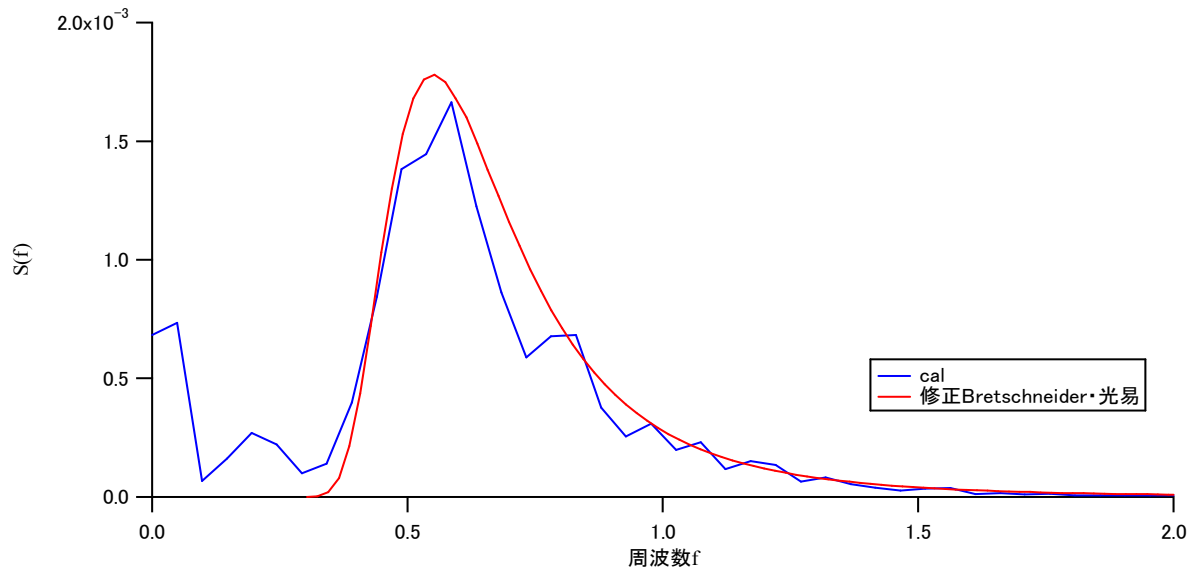


図 3-14 堤体設置位置付近でのスペクトル解析結果
(合わせ込み後：堤体設置位置付近)

図 3-9～3-14 から分かるように、スペクトルの合わせ込みを行った結果、合わせ込みの対象としている位置と同じ位置でのスペクトル解析結果は目標スペクトルに近づいており、スペクトルの合わせ込みの効果は確認できた。しかし、図 3-13, 3-14 より、堤体設置位置付近での合わせ込みを行うと、堤体設置位置でのスペクトルは目標スペクトルに近づいてはいるが、図 3-11, 3-12 による造波板付近での合わせ込み結果と比較すると、造波板付近でのスペクトルが目標スペクトルよりも大きくなりすぎている。以上のことより、本研究では造波板付近での合わせ込みを行った不規則波を採用することにした。

(5) 入力波高値の設定

入力波高値の設定にあたり、図 3-8 に示す波高計 W1（造波板から 13.2m の位置）の水位変動と、波高計 W2（構造物設置位置付近）での水位変動を用いて、ゼロダウソロス法により個々の波高を算定し、有義波高（観測波高）を求めた。本計算に用いる造波時間は 960s であるが、1 ケースの計算時間が長いため、ここでも造波時間を 200s に設定して、通過波検定を行った。なお、有義波周期は (2) で述べた 1.6s である。通過波検定の結果を図 3-15, 表 3-5 に示す。

この通過波検定により、水理模型実験の有義波高は約 10cm のため、入力波高値は約 12cm が妥当だと考えられる。図 3-16 は本計算における数値波動水路の概要図であり（併せて波高計設置位置を表 3-6 に示す）、実際に造波時間を 960s に設定して計算を行ったところ、入力波高値が 12cm 以上の場合、計算途中で水位が下がり計算不可能となった。そのため、出力有義波高が 10cm より若干小さくなるが、入力波高値を 11cm に設定した。計算不可能となった原因としては、不規則波を対象としているため、計算時間の増加に伴い高波が造波され、水深に対して波高が大きくなりすぎて計算が発散したか、解析領域の限界を超過したためと考えられる。

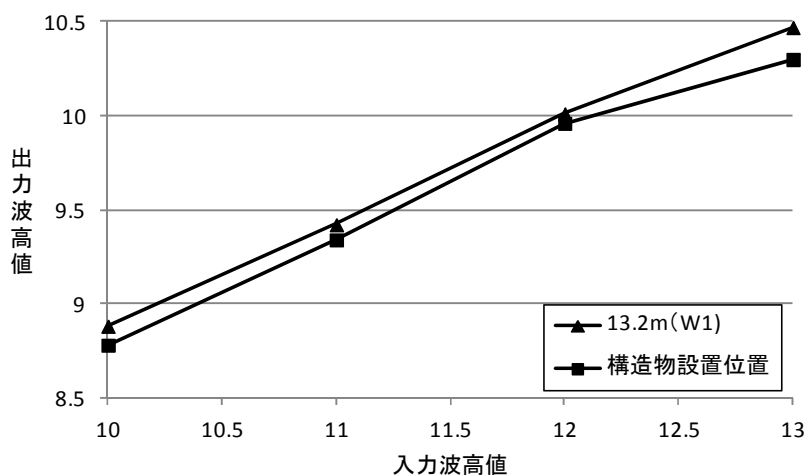


図 3-15 通過波検定結果 (200s)

表 3-5 通過波検定結果

入力波高値(cm)	出力波高値(cm)	
	波高計 W1	波高計 W2
10	8.88	8.78
11	9.42	9.34
12	10.01	9.96
13	10.47	10.30

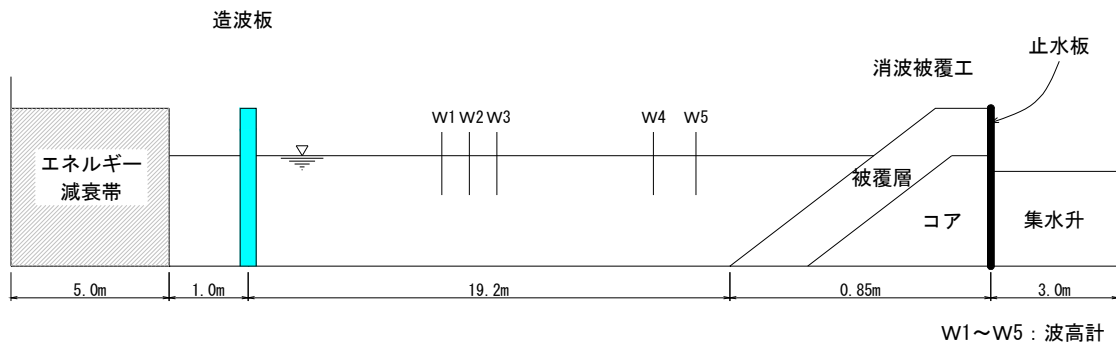


図 3-16 数値波動水路の概要図

表 3-6 波高計設置位置

波高計	W1	W2	W3	W4	W5
造波板からの距離(m)	13.2	13.5	13.7	17.0	18.0

3.3.4 造波不規則波の特性

数値波動水路には、不規則波信号を作成するための計算モジュール `mtbmkG` が用意されており、そのオプションタブでは乱数発生の初期値 (`idum1`, `idum2`, `idum3`) が変更可能であり、波浪統計量や波群の異なる不規則波の造波が可能である。

本研究では、消波工の消波性能指標の一つとして越波流量を取り上げているが、不規則波浪場における越波現象には、不規則波の特徴である前後の波の組合せが重要なパラメータとなりうる。そこで、本研究では波群特性として不規則波の構成波の組合せを変化させ、不規則波浪場における越波流量の変動性について検討を行うものとする。以下に、造波不規則波の特性について述べる。

(1) 波浪条件

周波数スペクトルは修正 Bretschneider・光易型とし，不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ は先に述べたように 11.0cm，有義波周期 $T_{1/3}$ は 1.60s と設定した．

(2) 不規則波の種類

本研究では，オプションパラメータ idum1 と idum3 に対して，表 3-7 の値を設定し，15 種類の不規則波（それらを WAVE1～WAVE15 と称する）を対象とした．

(3) 造波不規則波の特性

表 3-7 に示す 15 種類の不規則波については，3.3.3 で述べたように，スペクトルの合わせ込みより不規則波の造波検定を行っている．15 種類の不規則波の波浪特性は，図 3-8 に示す波高計 W2（構造物設置位置付近）で観測された水位変動の統計解析より，表 3-8 に示す結果となった．平均連長は，設定波高を有義波高にしたときの全ての連長の平均値を示す．また，越波に関しては，波高の大きな波が関係すると考え， $H_{1/3}$ 超過波数も併せて表 3-8 に示している．15 種類の不規則波は，目標有義波高および周期に対して多少の誤差はあるものの，有義波高 9.5cm，有義波周期 1.75s，平均連長 1.1， $H_{1/3}$ 超過波数 31 程度である．図 3-17 は，各造波不規則波のスペクトル解析結果を示したもので，総エネルギーは同等の不規則波となっていることが確認できる．

表 3-7 不規則波 15 種類における idum1, idum3 の組み合わせ

Case No.	idum1	idum3
WAVE1	-69897	-84509
WAVE2	-39897	-44509
WAVE3	-30000	-44509
WAVE4	-19897	-24509
WAVE5	-1000	-84509
WAVE6	-39897	-84509
WAVE7	-90000	-84509
WAVE8	-69897	-1000
WAVE9	-69897	-100000
WAVE10	-69897	-44509
WAVE11	-69897	-24509
WAVE12	-69897	-64509
WAVE13	-19897	-84509
WAVE14	-59897	-84509
WAVE15	-59897	-64509

表 3-8 造波不規則波の波浪特性

Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	平均連長	$H_{1/3}$ 超過波数
WAVE1	9.38	1.73	1.11	30
WAVE2	9.39	1.81	1.08	28
WAVE3	9.55	1.75	1.13	27
WAVE4	9.61	1.75	1.11	30
WAVE5	9.53	1.73	1.03	31
WAVE6	9.62	1.76	1.13	34
WAVE7	9.40	1.75	1.15	31
WAVE8	9.72	1.75	1.21	35
WAVE9	9.41	1.75	1.13	34
WAVE10	9.64	1.72	1.14	33
WAVE11	9.31	1.73	1.08	28
WAVE12	9.47	1.72	1.27	33
WAVE13	9.60	1.71	1.15	39
WAVE14	9.50	1.74	1.07	32
WAVE15	9.49	1.72	1.15	30

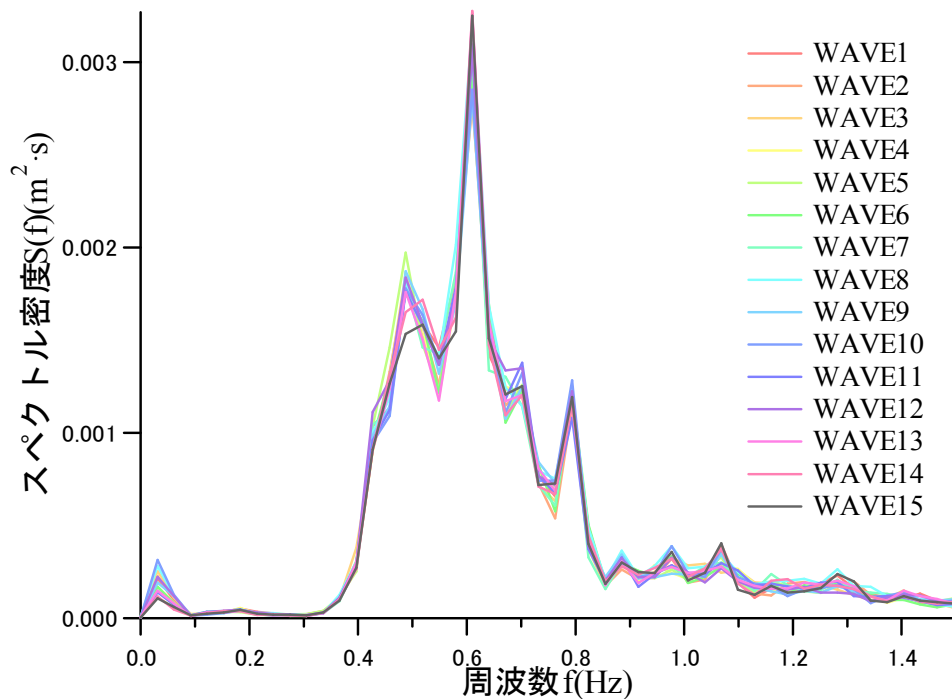


図 3-17 15 種類の不規則波の周波数スペクトル

以上、本研究で対象とする造波不規則波の特性に関する検討より、15種類の不規則波における波群特性には大きな差異がない。ただし、数値波動水路の mtbmkG のオプションパラメータの idum3 を変化させているため、15種類の不規則波における時系列波列を構成する個々の波の組合せは異なっている。したがって、越波現象に関わる波列における前後の波の組合せの影響は、これら 15種類の造波不規則波により検討できることになる。

3.4 数値実験における消波工諸元および解析条件

本節では、数値波動水路を用いた数値実験における消波工諸元、計算条件等の詳細について述べる。また、使用した被覆材（被覆石、消波ブロック）に対する設計波高（安定限界波高）の算出法についても述べる。

3.4.1 被覆材に対する設計波高の算出⁵⁾

本研究で用いている被覆材（被覆石、消波ブロック）に対する設計波高（安定限界波高）に関しては、被覆材の所要質量設計公式のハドソン式とファンデルメーアの安定数を適用し、算定を行う。

基礎マウンドや傾斜堤の被覆材の安定質量 M は、一般に次式のハドソン式で算定される。

$$M = \frac{\rho_r H_D^3}{N_S^3 (S_r - 1)^3} \quad (3.1)$$

ここに、 H_D ：設計波高（安定限界波高）、 N_S ：安定数、 ρ_r ：被覆材の密度、 S_r ：被覆材の密度と海水の密度 ρ_w との比である。

式 (3.1) を設計波高 H_D について展開すると、次式のように表される。

$$H_D = \left\{ \frac{MN_S^3 (S_r - 1)^3}{\rho_r} \right\}^{1/3} \quad (3.2)$$

式 (3.2) の安定数 N_S について、捨石を被覆材として使用する場合には、ファンデルメーアが大型の不規則波実験に基づいて、次のような安定数の公式を提案している。

$$N_S = 6.2C_H S^{0.2} P^{0.18} N^{-0.1} I_{r,m}^{-0.5} \quad (I_{r,m} < I_{r0}) \quad (3.3)$$

$$N_S = 1.0C_H S^{0.2} P^{-0.13} N^{-0.1} (\cot \alpha_s)^{0.5} I_{r,m}^P \quad (I_{r,m} \geq I_{r0}) \quad (3.4)$$

ここに、 $C_H = 1.4/[H_{1/20}/H_{1/3}]$ ：碎波帯内で波高分布が狭まることを考慮した係数、 S ：被覆材の被害度の指数（ $S=2$ が初期被災，8程度以上が大きな被災）， P ：被覆材の下の層の透水性パラメータ（通常の2層積み捨石法面では0.4）， N ：高波が続く間の波数， α_s ：法面の傾斜角， $I_{r,m}$ ：イリバレン数であって，臨界イリバレン数とともに次式で定義される。

$$I_{r,m} = \frac{\tan \alpha_s}{\sqrt{H_{m0}/L_{0,m}}} \quad (3.5)$$

$$I_{r0} = [6.2P^{0.31} (\tan \alpha_s)^{0.5}]^{1/(P+0.5)} \quad (3.6)$$

ここに、 H_{m0} ：スペクトル有義波高， $L_{0,m}$ ：平均周期に対する深海波長（ $=1.56T^2$ ）である。式（3.3），（3.4）より $I_{r,m}, I_{r0}$ の値を比較し， $I_{r,m} < I_{r0}$ ならば巻き波型波浪条件を採用し， $I_{r,m} \geq I_{r0}$ ならば寄せ波型波浪条件を採用する。

本研究では、 C_H は波が碎波減衰を受ける前として1.0， S は被覆材の被害度の指数であって，断面の侵食された面積 A と代表粒径 D_n から $S = A/D_n^2$ で表される。 N_S の算定には $S=1$ を用い， P は0.4， N の値は高波が6時間程度続くと仮定して2000波⁶⁾とした。また，周期 T は1.0，1.2，1.4，1.6，1.8，2.0sの6ケースとした。

マウンド全体を消波ブロックで構築する場合には透水性が高いため，傾斜堤の2層積みブロックよりも安定性が高くなる。これについて高橋ら⁷⁾は，次のような安定数を与えている。

$$N_S = C_H (aN_{0d}^{0.2} N^{-0.1} + b) \quad (3.7)$$

ここに、 N_{0d} ：法面に沿って上下に幅 D_n の部分を切り出したときに，その中で移動したブロックの個数， N ：高波が続く間の波数， a, b ：ブロックの形状や法面勾配などに依存する定数である。本研究では， N_{0d} を0.2， N は上記と同様に2000波とした。なお，本研究で採用しているシーロックにおいては，標準型，B型ともに $\cot \alpha_s = 1.3$ のときに， $a = 2.32$ と $b = 1.45$ ， $\cot \alpha_s = 1.5$ のときには， $a = 2.32$ と $b = 1.56$ の値が得られている。

以上の諸数値により求めた安定数 N_S を式（3.2）に代入し，被覆材に対する設計

波高 H_D を求める。 H_D の算定にあたっては、 H_D の値と初期値として与えたスペクトル有義波高 H_{0m} の値の誤差が 0.01cm 以下になるように繰り返し計算を行うことにより、各周期における設計波高 H_D を決定した。以上の算定結果と、波形勾配 ($H_D/L_{0,m}$) を表 3-9, 3-10 に示す。なお、表中にある CADMAS-SURF 入力値であるが、3.3.2 (2) 入力波高値の設定で検討を行った、入力波高 H_{in} と観測波高 H_{ex} の検定結果から求められる表 3-3 の比率を用いて設定している。

表 3-9 被覆層（被覆石）における設計波高

周期(s)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
被覆層	砕石 35-50g											
勾配	1/1.5						1/2					
設計波高(m)	0.054	0.049	0.052	0.054	0.056	0.058	0.066	0.058	0.053	0.055	0.058	0.060
CADMAS入力値(m)	0.061	0.050	0.051	0.052	0.059	0.058	0.074	0.059	0.052	0.054	0.061	0.059
波形勾配	0.035	0.022	0.017	0.014	0.011	0.009	0.042	0.026	0.017	0.014	0.011	0.010
被覆層	砕石 50-70g											
勾配	1/1.5						1/2					
設計波高(m)	0.064	0.056	0.057	0.060	0.062	0.064	0.077	0.068	0.062	0.061	0.064	0.066
CADMAS入力値(m)	0.071	0.057	0.056	0.058	0.065	0.063	0.086	0.069	0.061	0.059	0.067	0.065
波形勾配	0.041	0.025	0.019	0.015	0.012	0.010	0.049	0.030	0.020	0.015	0.013	0.011
被覆層	砕石 70-100g											
勾配	1/1.5						1/2					
設計波高(m)	0.074	0.066	0.063	0.066	0.068	0.071	0.090	0.080	0.072	0.067	0.070	0.073
CADMAS入力値(m)	0.083	0.066	0.062	0.063	0.072	0.070	0.101	0.080	0.071	0.065	0.074	0.072
波形勾配	0.048	0.029	0.021	0.016	0.014	0.011	0.058	0.035	0.023	0.017	0.014	0.012
被覆層	砕石 100-130g											
勾配	1/1.5						1/2					
設計波高(m)	0.085	0.075	0.068	0.072	0.074	0.077	0.103	0.091	0.082	0.075	0.076	0.079
CADMAS入力値(m)	0.095	0.076	0.068	0.069	0.078	0.076	0.115	0.092	0.081	0.072	0.080	0.078
波形勾配	0.054	0.033	0.022	0.018	0.015	0.012	0.066	0.040	0.027	0.019	0.015	0.013
被覆層	砕石 130-150g											
勾配	1/1.5						1/2					
設計波高(m)	0.093	0.082	0.074	0.076	0.079	0.081	0.112	0.099	0.090	0.082	0.080	0.083
CADMAS入力値(m)	0.104	0.083	0.073	0.073	0.083	0.080	0.125	0.100	0.088	0.079	0.085	0.082
波形勾配	0.059	0.036	0.024	0.019	0.016	0.013	0.072	0.044	0.029	0.021	0.016	0.013

表 3-10 被覆層（消波ブロック）における設計波高

周期(s)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
被覆層	シーロックNo.1(標準型)											
勾配	1/1.3						1/1.5					
設計波高(m)	0.057						0.061					
CADMAS入力値(m)	0.064	0.057	0.056	0.055	0.060	0.056	0.069	0.062	0.060	0.059	0.064	0.060
波形勾配	0.036	0.025	0.019	0.014	0.011	0.009	0.039	0.027	0.020	0.015	0.012	0.010
被覆層	シーロックNo.2(標準型)											
勾配	1/1.3						1/1.5					
設計波高(m)	0.085						0.091					
CADMAS入力値(m)	0.095	0.086	0.084	0.082	0.089	0.084	0.102	0.092	0.090	0.088	0.096	0.090
波形勾配	0.054	0.038	0.028	0.021	0.017	0.014	0.059	0.041	0.030	0.023	0.018	0.015
被覆層	シーロックNo.3(標準型)											
勾配	1/1.3						1/1.5					
設計波高(m)	0.106						0.114					
CADMAS入力値(m)	0.118	0.107	0.104	0.102	0.111	0.104	0.127	0.115	0.112	0.110	0.120	0.112
波形勾配	0.068	0.047	0.035	0.026	0.021	0.017	0.073	0.051	0.037	0.028	0.022	0.018
被覆層	シーロックNo.4(B型)											
勾配	1/1.3						1/1.5					
設計波高(m)	0.083						0.090					
CADMAS入力値(m)	0.093	0.084	0.082	0.080	0.088	0.082	0.100	0.090	0.088	0.086	0.094	0.088
波形勾配	0.053	0.037	0.027	0.021	0.016	0.013	0.057	0.040	0.029	0.022	0.018	0.014
被覆層	シーロックNo.5(B型)											
勾配	1/1.3						1/1.5					
設計波高(m)	0.105						0.113					
CADMAS入力値(m)	0.118	0.106	0.104	0.102	0.111	0.104	0.127	0.114	0.112	0.109	0.119	0.111
波形勾配	0.068	0.047	0.034	0.026	0.021	0.017	0.072	0.050	0.037	0.028	0.022	0.018
被覆層	シーロックNo.6 (B型(八角形))											
勾配	1/1.3						1/1.5					
設計波高(m)	0.089						0.096					
CADMAS入力値(m)	0.100	0.090	0.088	0.086	0.094	0.088	0.107	0.096	0.094	0.092	0.101	0.094
波形勾配	0.057	0.040	0.029	0.022	0.018	0.014	0.061	0.043	0.031	0.024	0.019	0.015

3.4.2 入射波を規則波としたケース

規則波での数値実験においては、以下に示す1つの累積損傷断面のみを検討対象とし、被覆層としては被覆石と消波ブロックを対象とした。図 3-18 に複合型被災モデル-1における断面図、表 3-11、3-12 に消波工諸元および解析条件を示す。

- ① 複合型被災モデル-1(天端幅・天端高ともに被覆材を1個分ずつ減少させるモデル)

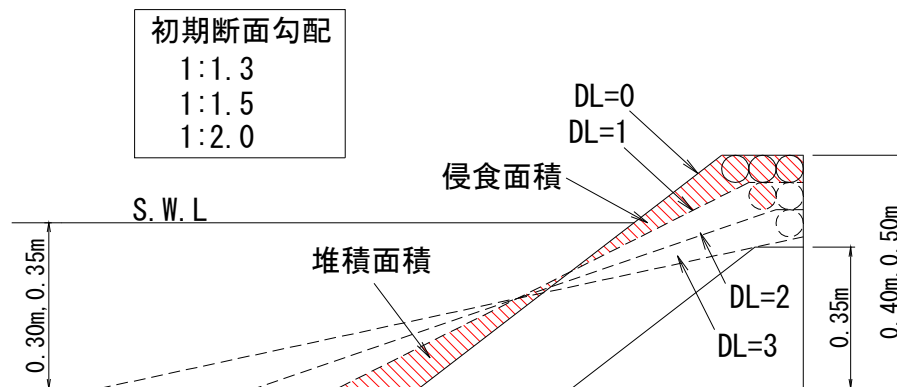


図 3-18 複合型被災モデル-1 断面図

(天端幅・天端高ともに被覆材を1個分ずつ減少させるモデル)

表 3-11 複合型被災モデル-1ー消波工諸元・解析条件 (被覆石)

	被覆石				
	35-50g	50-70g	70-100g	100-130g	130-150g
中央質量(g)	42.5g	60.5g	85.5g	115.5g	140.5g
密度(kg/ℓ)	2.76				
代表粒径 D_n (m)	0.025	0.028	0.031	0.035	0.037
空隙率	0.387	0.436	0.437	0.425	0.422
抵抗係数 C_D	2.0				
慣性力係数 C_M	2.0				
水深(m)	0.35				
コア高(m)	0.35				
堤体高(m)	0.50				
法面勾配	1:1.5, 1:2.0 (2 ケース)				
波高 H (m)	0.05, 表 3-8 に示す設計波高(安定限界波高) (2 ケース)				
周期 T (s)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 (6 ケース)				

表 3-12 複合型被災モデル-1ー消波工諸元・解析条件（消波ブロック）

	消波ブロック					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
質量(g)	74g	247g	473g	232g	472g	283g
密度(kg/ℓ)	2.30					
代表粒径 D_n (m)	0.032	0.048	0.059	0.047	0.059	0.050
空隙率	0.50					
抵抗係数 C_D	1.0					
慣性力係数 C_M	1.2					
水深(m)	0.30					
コア高(m)	0.00					
堤体高(m)	0.40					
法面勾配	1:1.5,1:2.0 (2 ケース)					
波高 H (m)	0.05					
周期 T (s)	1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0 (6 ケース)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.6	
質量(g)	74g	247g	473g	232g	283g	
密度(kg/ℓ)	2.30					
代表粒径 D_n (m)	0.032	0.048	0.059	0.047	0.050	
空隙率	0.50					
抵抗係数 C_D	1.0					
慣性力係数 C_M	1.2					
水深(m)	0.35					
コア高(m)	0.00					
堤体高(m)	0.50					
法面勾配	1:1.3,1:1.5 (2 ケース)					
波高 H (m)	表 3-9 に示す設計波高(安定限界波高)					
周期 T (s)	1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0 (6 ケース)					

3.4.3 入射波を不規則波としたケース

不規則波での数値実験においては、以下に示す 2 つの累積損傷断面を検討対象とし、被覆層としては被覆石のみを対象とした。

- ① 天端被災モデル
- ② 複合型被災モデル-2 (天端高は被覆材 1 個分、天端幅を天端沈下率と同じ割合で減少させるモデル)

以下に、それぞれのモデルにおける消波工諸元、解析条件等について述べる。

(1) 天端被災モデル

図 3-19 に天端被災モデルにおける断面図、表 3-13 に各被災レベル (DL=0~4) における天端高と天端幅の関係を、表 3-14 に消波工諸元および解析条件を示す。

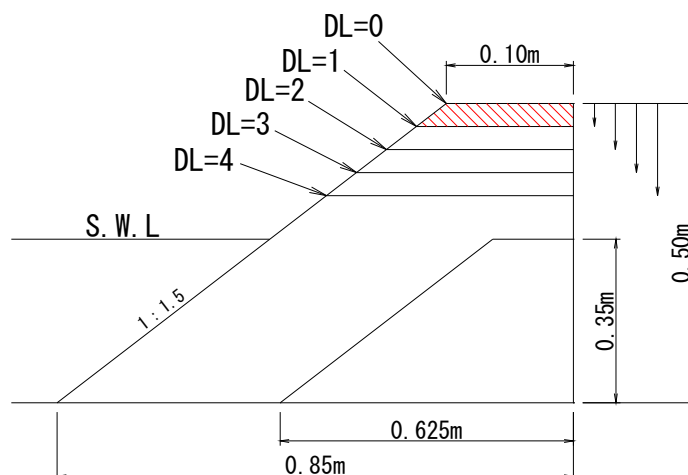


図 3-19 天端被災モデル断面図

表 3-13 各被災レベルにおける天端高と天端幅との関係表
(天端被災モデル)

被災レベル DL	天端高(cm)	天端幅(cm)
0	15.0	10.00
1	12.5	13.75
2	10.0	17.50
3	7.5	21.25
4	5.0	25.00

表 3-14 天端被災モデルー消波工諸元・解析条件（被覆石）

	被覆石
	35-50g
中央質量(g)	42.5g
密度(kg/ℓ)	2.76
代表粒径 D_n (m)	0.025
空隙率	0.387
抵抗係数 C_D	2.0
慣性力係数 C_M	2.0
水深(m)	0.35
コア高(m)	0.35
堤体高(m)	0.50
天端幅(m)	0.10
法面勾配	1:1.5
被災レベル DL	0(初期断面)~4(被覆材 4 個分沈下)
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	0.11
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	1.60
検討不規則波	WAVE1~WAVE10 (10 ケース)

(2) 複合型被災モデル-2（天端高は被覆材 1 個分、天端幅を天端沈下率と同じ割合で減少させるモデル）

図 3-20 に複合型被災モデル-2 における断面図，表 3-15 に各被災レベル（DL=0~4）における天端高と天端幅の関係を，表 3-16 に消波工諸元および解析条件を示す。

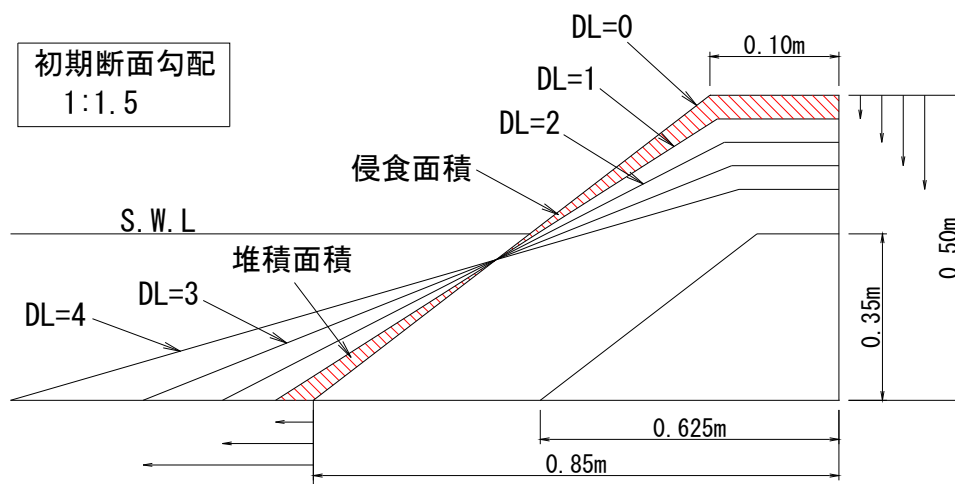


図 3-20 複合型被災モデル-2 断面図

表 3-15 各被災レベルにおける天端高と天端幅との関係表
(複合型被災モデル-2)

被災レベル DL	天端高(cm)	天端幅(cm)
0	15.0	10.00
1	12.5	8.33
2	10.0	6.67
3	7.5	5.00
4	5.0	3.33

表 3-16 複合型被災モデル-2ー消波工諸元・解析条件 (被覆石)

	被覆石
	35-50g
中央質量(g)	42.5g
密度(kg/ℓ)	2.76
代表粒径 D_n (m)	0.025
空隙率	0.387
抵抗係数 C_D	2.0
慣性力係数 C_M	2.0
水深(m)	0.35
コア高(m)	0.35
堤体高(m)	0.50
天端幅(m)	0.10
法面勾配	1:1.5
被災レベル DL	0(初期断面)~4(被覆材 4 個分沈下)
有義波高 $H_{1/3}$ (m)	0.11
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	1.60
検討不規則波	WAVE1~WAVE15 (15 ケース)

3.5 数値実験による消波性能の変動特性

本研究では、消波性能指標として、①反射率、②越波流量の2つを対象とし、累積損傷を伴う消波工の消波性能の変動特性について検討を行う。なお、②越波流量については不規則波のみを対象として検討を行う。また、反射率の算出にあたっては、合田らの入反射波分離推定法⁸⁾に基づいて行っている。数値実験を行った数値波動水路

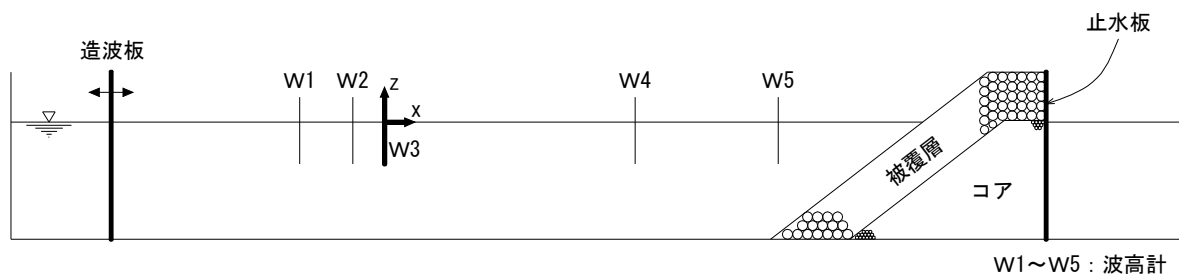


図 3-21 数値波動水路の概要図（規則波）

表 3-17 波高計設置位置（規則波）

波高計	W1	W2	W3	W4	W5
造波板からの距離(m)	13.23	13.53	13.73	18.24	護岸法先

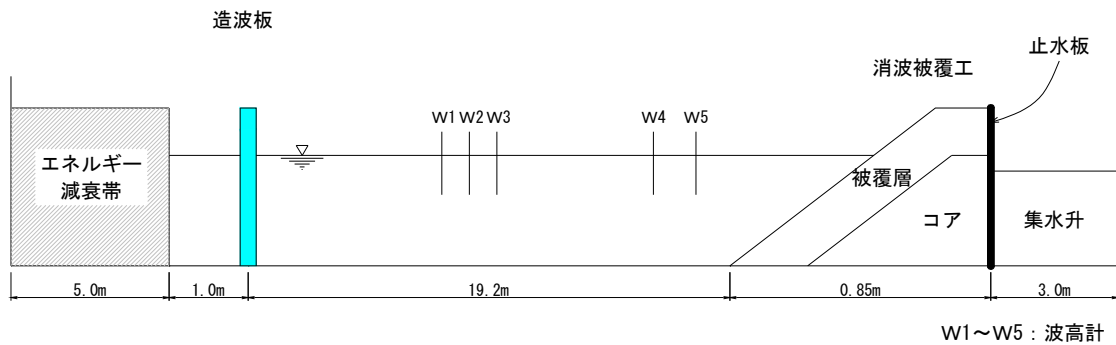


図 3-22 数値波動水路の概要図（不規則波）

表 3-18 波高計設置位置（不規則波）

波高計	W1	W2	W3	W4	W5
造波板からの距離(m)	13.2	13.5	13.7	17.0	18.0

の概要図を図 3-21，図 3-22 に，波高計設置位置を表 3-17，表 3-18 に示す。

3.5.1 越波流量の算出法⁹⁾

越波計算では，越波升を配置することが不可欠である．また，水路長が極端に短い場合には越波するたびに構造物前面部の水量が減少し，越波現象に悪影響を及ぼすた

め、適切な水路長を設定する必要がある。

数値波動水路における越波量の算定方法は、護岸背後に設けた越波升内の VOF 関数 F 値の面積積分を求め、水塊が流入することで生じる F 値の変化から越波量 Q を求めている。

$$Q = \iint F_t dx dz - \iint F_{ini} dx dz \quad (3.8)$$

ここで、 F_t, F_{ini} は、それぞれある時刻および初期状態における VOF 関数 F 値である。次に、越波流量 q は次式を用いて計算される。

$$q = \frac{Q}{T} \quad (3.9)$$

ここに、 T : 越波作用時間である。

越波作用時間については、規則波の場合、波の周期の倍数（3 から 5 波程度）を考えることが多い。不規則波の場合に対しては、規則波と比べて計算時間を要するため、不規則波作用下で越波計算を行う際には、事前に越波量と越波作用時間を検討し、越波升の容量に余裕をもたせる必要がある。

3.5.2 規則波作用時の消波性能変動特性

図 3-23、図 3-24 は、複合型被災モデル-1 における数値波動水路での数値実験から得られた各被災レベルに対する反射率について、波形勾配別に示した一例である。図 3-23 が碎石を対象としたもので、(a) が碎石 35~50g (代表粒径 : 0.025m)、(b) が碎石 130~150g (代表粒径 : 0.037m) の解析結果である。図 3-24 は消波ブロックを対象としたもので、(a) が消波ブロック No.1_74g (代表粒径 : 0.032m)、(b) が消波ブロック No.3_473g (代表粒径 : 0.059m) の解析結果である。図 3-23、図 3-24 ともに、入射波高を $H=0.05\text{m}$ とした結果を示している。

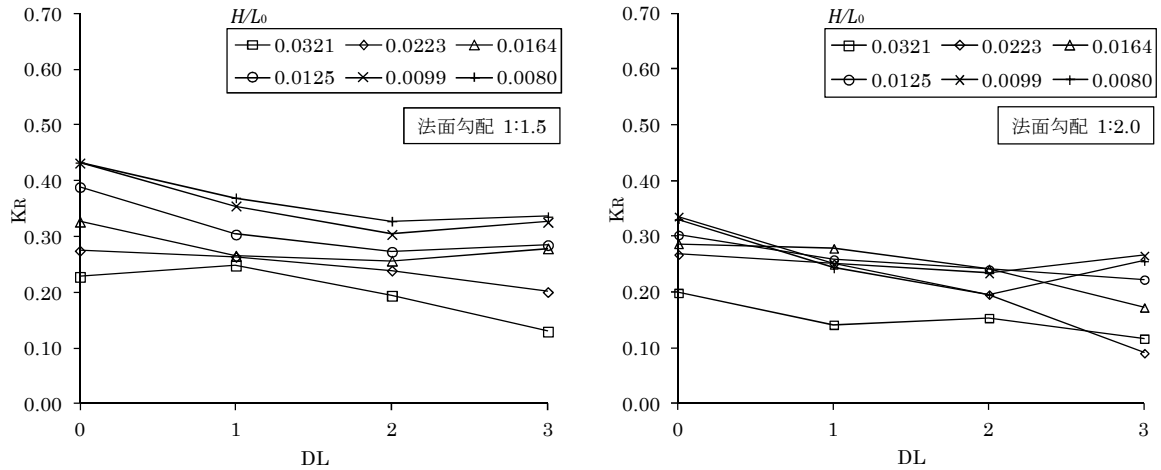
(1) 碎石での解析結果に関する考察

法面勾配および碎石質量の違いによる反射率の変動特性としては、それぞれ以下のように要約できる。

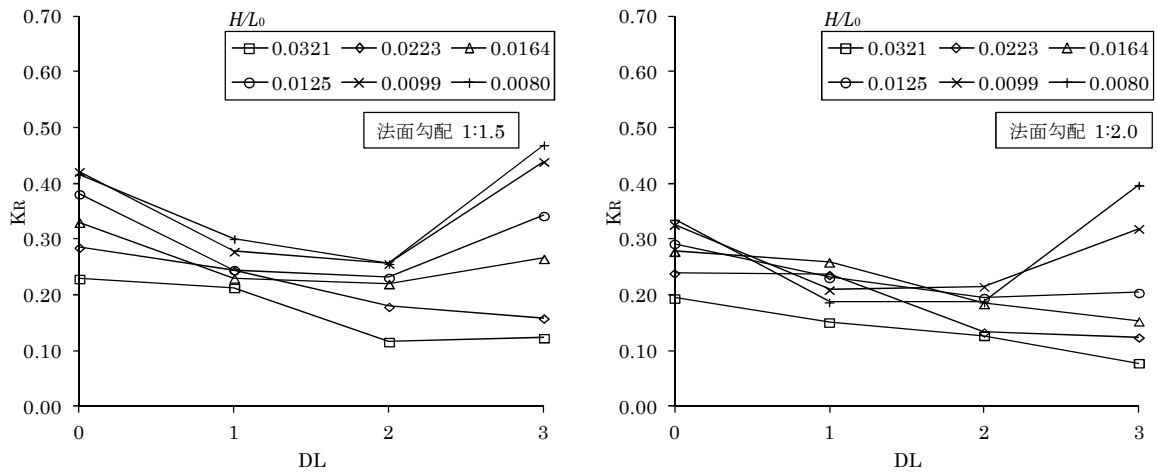
・法面勾配の違いによる反射率の変動特性

図 3-23 の (a)、(b) より、法面勾配の違いによる反射率の変動傾向は、被災レベル $DL=2$ までは減少傾向、 $DL=3$ においては波形勾配によって、減少または増加傾向を概ね示している。しかし、波形勾配によっては被災レベル間で反射率の減少・増加が逆転しているケースも見られ、全てのケースにおいて同じような変動特性を示して

いない。また、被災レベル間における反射率の変動量も波形勾配、法面勾配毎にばらついており、一様性が認められないことが分かる。この傾向は、他の碎石のケースや入射波高が安定限界波高のケースにおいても同様に見られた。なお、法面勾配 1 : 2.0 のケースが 1 : 1.5 のケースよりも反射率が小さい値を示すが、これは一般的に法面勾配が緩やかになると反射率も小さくなるためと考えられる。



(a) 碎石 35~50g (法面勾配 1 : 1.5, 1 : 2.0)



(b) 碎石 130~150g (法面勾配 1 : 1.5, 1 : 2.0)

図 3-23 被災進行に伴う反射率の変動特性 (碎石, $H=0.05\text{m}$)

・ 碎石質量の違いによる反射率の変動特性

図 3-23 の (a), (b) より、碎石質量の違いによる反射率の変動傾向は、被災レベル $DL=2$ までは減少傾向、 $DL=3$ においては波形勾配によって、減少または増加傾向を示している。しかし、反射率の変動量を見てみると、35~50g の碎石よりも 130

～150gの砕石の方が被災レベル間での変動量が大きい傾向にあるが、その変動量に一様性は認められない。また、DL=2 から DL=3 での変動量について見てみると、砕石 35～50g の場合は少しの増加にとどまっており、DL=3 での反射率は初期断面の反射率よりも小さい値となっている。一方、砕石 130～150g の場合は波形勾配によっては大幅な増加となっており、初期断面の反射率よりも大きくなっている。これは、複合型被災モデル-1 においては被災が進行するにつれて天端高の低下が発生するが、その低下量を被覆材 1 個分（代表粒径分）としているため、当然ながら質量が大きい被覆材の方が低下量は大きくなる。その結果、砕石 130～150g の場合は、DL=2 までは法面勾配が緩くなることで反射率が減少傾向を示すが、DL=3 になると著しい天端高低下による堤体背後止水板の露出が顕著となり、その止水板での反射の影響が大きいためと推測される。また、他の砕石のケースにおける解析結果から、DL=2 から 3 における反射率の増加量は、砕石質量が大きくなればなるほど増える傾向にあり、その増加量に一様性は認められないことが分かる。なお、入射波高が安定限界波高のケースにおいても同様な傾向が見られた。

(2) 消波ブロックでの解析結果に関する考察

法面勾配および消波ブロック質量の違いによる反射率の変動特性としては、それぞれ以下のように要約できる。

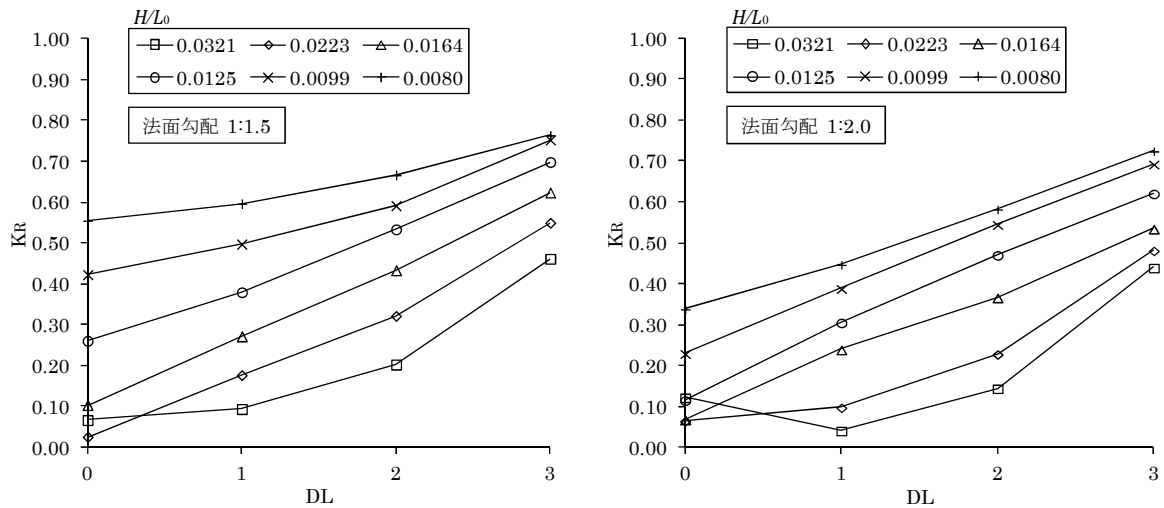
・法面勾配の違いによる反射率の変化特性

図 3-24 の (a), (b) より、法面勾配の違いによる反射率の変動傾向は、波形勾配によっては一部減少傾向を示しているものもあるが、基本的にはほぼ増加傾向で、かつ同じような変動傾向を示している。この傾向は、他の消波ブロックのケースや入射波高が安定限界波高のケースにおいても同様であった。しかし、被災レベル DL=0 (初期断面) での反射率は、法面勾配 1:2.0 のケースの方が小さい値となっているが、DL=3 では多少のバラツキはあるものの、どちらの法面勾配もほぼ同じ反射率となっている。このことから、被災レベル間における変動量に一様性は認められないことが分かる。

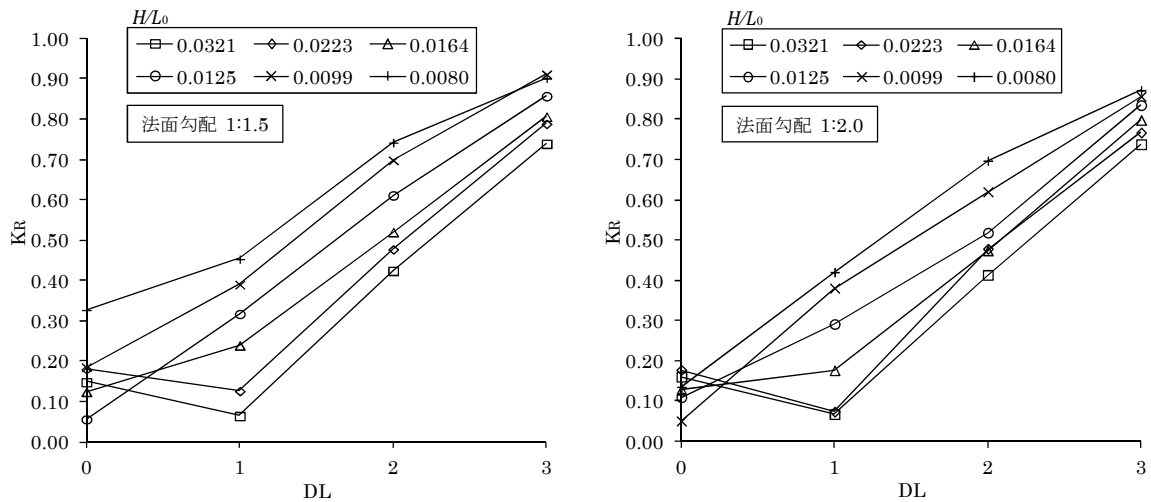
・消波ブロック質量の違いによる反射率の変化特性

図 3-24 の (a), (b) より、消波ブロック質量の違いによる反射率の変動傾向は、波形勾配によっては一部減少傾向を示しているものの、基本的にはほぼ増加傾向を示している。その変動量についてであるが、消波ブロック No.1_74g の場合は緩やかな増加を示しているが、消波ブロック No.3_473g においては急激な増加を見せている。これは先程の砕石のケースと同じで、複合型被災モデル-1 においては被災が進行するにつれて天端高の低下が発生するが、その低下量を被覆材 1 個分（代表粒径分）としているため、当然ながら質量が大きい被覆材の方が低下量は大きくなる。特に、消波ブロック No.3_473g の代表粒径は 0.059m もあり、被災進行に伴う天端低下による堤体背後止水板の露出が顕著となりやすく、その止水板での反射の影響も大きくなると

考えられる。その結果、消波ブロック No.3_473g のケースの方が急激な増加を示すものと推測される。反射率の増加量は消波ブロック質量が大きくなればなるほど増える傾向にあるが、その増加量に一様性は認められないことが分かる。なお、入射波高が安定限界波高のケースにおいても同様な傾向が見られた。



(a) 消波ブロック No.1_74g (法面勾配 1 : 1.5, 1 : 2.0)



(b) 消波ブロック No.3_473g (法面勾配 1 : 1.5, 1 : 2.0)

図 3-24 被災進行に伴う反射率の変動特性 (消波ブロック, $H=0.05\text{m}$)

以上の考察より、反射率の減少・増加傾向や、その変動量については、波形勾配や法面勾配、被覆材の材質や規格等によって、一様性が見られない不規則な変動を示すことが示された。言い換えれば、被災の程度を表すダメージパラメータという単一パ

ラメータのみで反射率の変動特性を算出可能な単純な回帰式の構築は困難であり、ダメージパラメータ以外のパラメータも考慮する必要があると推察される。

3.5.3 不規則波作用時の消波性能変動特性

本研究において対象としている不規則波 15 種類は、同一の周波数スペクトルであり、表 3-8 に示すように有義波高、有義波周期、平均連長等に大きな差がないものである。ただし、数値波動水路のオプションパラメータ idum3 による各周波数成分波の初期位相を変化させているために、不規則波を構成する波列は異なっている。

(1) 天端被災モデルにおける消波性能変動特性

ここでは、不規則波浪場を対象とした天端被災モデルにおける消波性能変動特性について、数値実験結果より、反射率および越波流量の変動特性を考察する。

・反射率 K_R の変動特性

図 3-25 は、15 種類の不規則波の内、WAVE1 から WAVE10 の 10 種類を対象に、被災レベルの増加に伴う反射率の変動特性を示したものである。

まず、図 3-25 より、WAVE1 から WAVE10 の反射率はほぼ同じとなっている。これは、まず、反射率が入射波エネルギーと反射波エネルギーの比によって求められるものであり、入射不規則波のエネルギーが図 3-17 に示されるように、各不規則波でほぼ同じであることから、不規則波の構成波列に関わらず反射率がほぼ同じ値を示す結果になったと推察される。

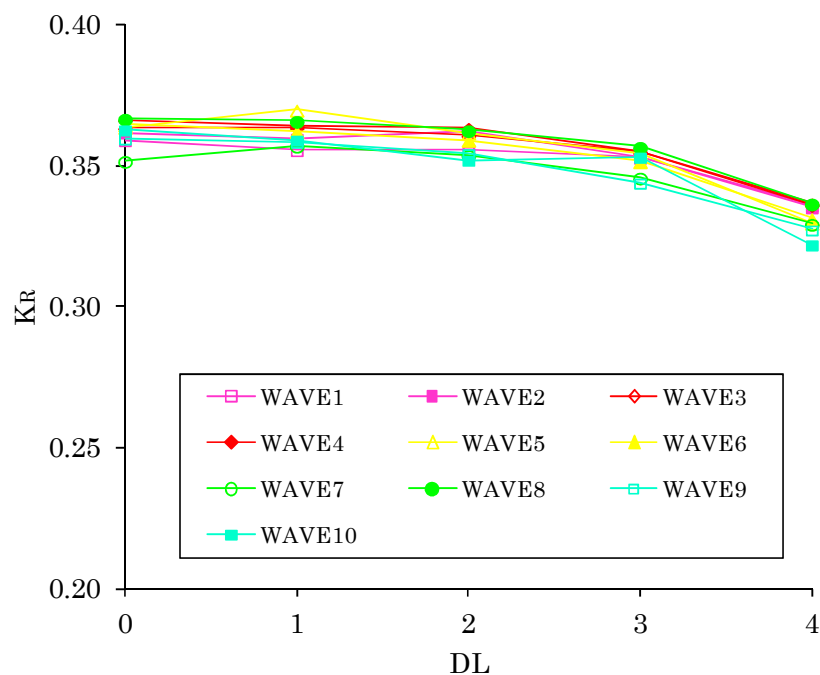


図 3-25 被災進行に伴う反射率 K_R の変動特性（天端被災）

次に、被災進行に伴う反射率の変動傾向であるが、被災レベル DL=3 までは、ほぼ一定もしくは若干の減少傾向にあるが、DL=4 では大きく減少している。この理由としては、天端被災モデルでは法面勾配の変化は考慮せず、天端高低下のみを対象としているため、DL=4 まで被災が進行すると、露出した堤体背後の止水板による反射波の影響よりも、天端幅が DL=0（初期断面）の 2.5 倍まで長くなることによる天端上部でのエネルギーロスが卓越したためと推察される。

・越波流量 q の変動特性

図 3-26 は、15 種類の不規則波の内、WAVE1 から WAVE10 の 10 種類を対象に、被災レベルの増加に伴う越波流量の変動特性を示したものである。

越波流量については反射率とは異なり、各不規則波においてかなりのバラつきが見られる。多くみられる傾向としては、ほぼ一定傾向、増加傾向を示しているが、中には減少傾向を示すものもあり、不規則波の構成波列により、同じ被災形態においても全く異なる傾向を示していることが分かる。なお、一定傾向および減少傾向を示す理由としては、反射率の場合と同様に、被災進行に伴う堤体背後の止水板の露出による影響よりも、天端幅が長くなることによる天端上部でのエネルギーロスが卓越したためと推察される。

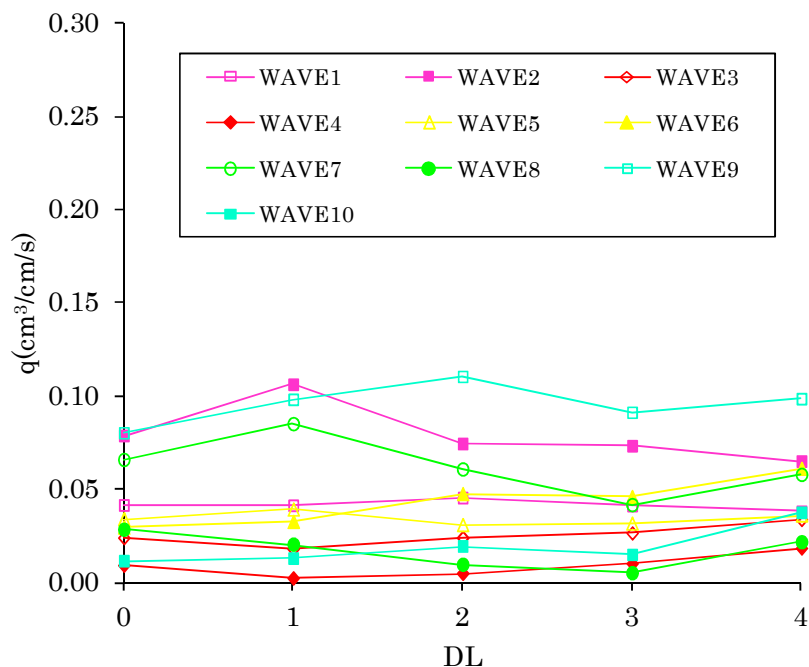


図 3-26 被災進行に伴う越波流量 q の変動特性（天端被災）

(2) 複合型被災モデル-2における消波性能変動特性

ここでは、不規則波浪場を対象とした複合型被災モデル-2における消波性能変動特性について、数値実験結果より、反射率および越波流量の変動特性を考察する。

・反射率 K_R の変動特性

図 3-27 は、15 種類の不規則波を対象に、被災レベルの増加に伴う反射率の変動特性を示したものである。

まず、図 3-27 より、WAVE1 から WAVE15 の反射率はほぼ同じとなっている。これは先に述べた天端被災モデルと同様に、まず、反射率が入射波エネルギーと反射波エネルギーの比によって求められるものであり、入射不規則波のエネルギーが図 3-17 に示されるように、各不規則波でほぼ同じであることから、不規則波の構成波列に関わらず反射率がほぼ同じ値を示す結果になったと推察される。

次に、被災進行に伴う反射率の変動傾向であるが、被災レベル DL=2 まで減少傾向を示すものの、DL=3, 4 では増加し、その増加の割合が DL=2 までの減少割合より大きくなり、DL=4 では DL=0 (初期断面) の反射率以上の値となっている。反射率は一般的に、法面勾配が緩やかになると減少傾向を示すことにより、DL=2 までの変動特性はこの法面勾配の緩勾配化による影響によるものと推察できる。一方、DL=3 以上の場合は、天端高と天端幅の減少に伴って露出した堤体背後の止水板での反射が卓越したことにより、反射率が増加傾向を示したものと推察される。

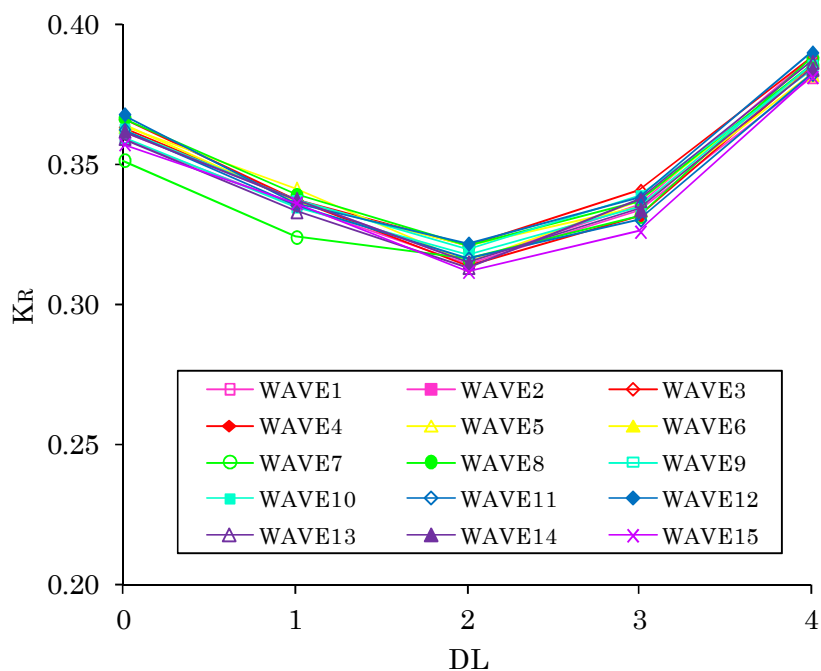


図 3-27 被災進行に伴う反射率 K_R の変動特性 (複合型被災モデル-2)

・越波流量 q の変動特性

図3-28は、15種類の不規則波を対象に、被災レベルの増加に伴う越波流量の変動特性を示したものである。

越波流量については反射率とは異なり、各造波不規則波ともに平均連長、 $H_{1/3}$ 超過波数、周波数スペクトルがほぼ同じにもかかわらず、図 3-28 に示すように造波ケース間に大きなバラつきが認められる。その被災進行に伴う越波流量の変化は、天端被災モデルとは異なり、被災レベルが大きくなると初期断面の場合より増加する傾向にある。この理由としては、被災進行に伴って法面勾配が緩くなることによって、波が斜面上を遡上しやすくなったこと、また、天端高の減少に伴って露出した堤体背後の止水板の影響によるものと推察される。

この越波流量のバラつきについて、越波に影響を及ぼす不規則波列の前後の波の関係より考察を行う。図3-29、図3-30は平均連長、 $H_{1/3}$ 超過波数が同値のWAVE6とWAVE9の堤体法先位置での水位と、越波量の時間変化を示したものである。図3-29において時間487sで発生する越波を引き起こす波とその直前の波（図中①と①'）と、図3-30の473sでの越波を引き起こす波とその直前の波（図中②と②'）の関係を比較すると、水位変動量は前後の波共に①、①'の方が小さいにもかかわらず、両者の越波量はほぼ同等である。すなわち、越波を引き起こす波の直前の波の組み合わせの影響が総越波量のバラつきに現れたものと考えられる。これらの結果から、越波を不規則波実験により検討する場合、構成波列の不規則性に配慮した確率統計的な検討が必要であることが分かる。

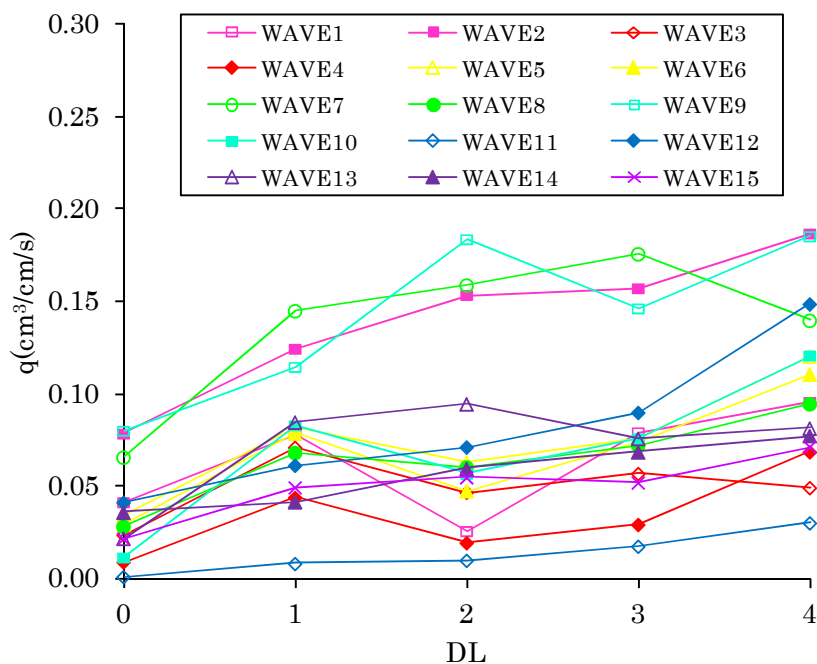


図 3-28 被災進行に伴う越波流量 q の変動特性（複合型被災モデル-2）

以上より、まず、規則波の検討と同様に、被災の程度を表すダメージパラメータという単一パラメータのみで反射率や越波流量の変動特性を算出可能な単純な回帰式の構築は困難であることが示された。また、累積損傷断面として、天端被災モデルと複合型被災モデルを対象に検討を行ったが、損傷断面の違いによっても反射率や越波流量の変動特性に大きな違いが現れることも分かった。よって、規則波の検討における考察でも述べたが、消波性能の変動特性を適切に評価するためには、ダメージパラメータ以外のパラメータも考慮する必要があると推察される。

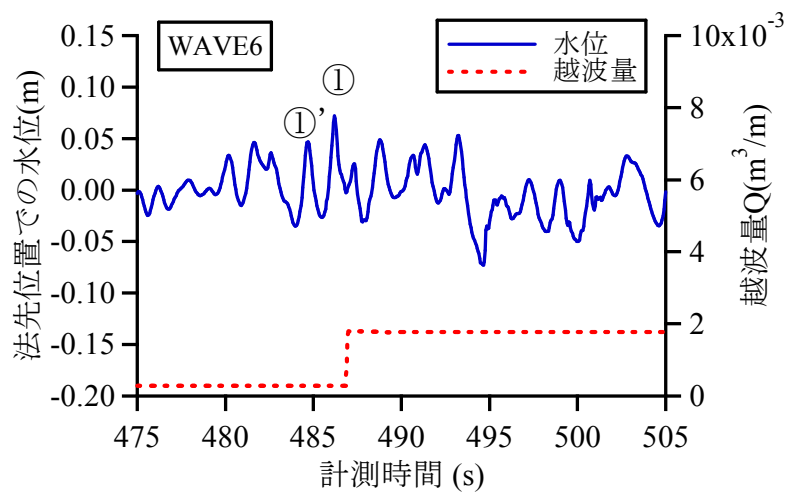


図 3-29 WAVE6 の水面波形と越波量の時間変化（複合型被災モデル-2）

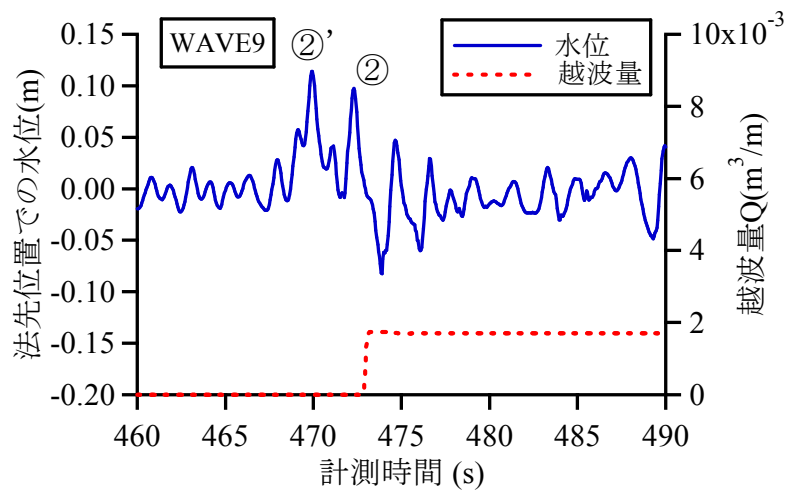


図 3-30 WAVE9 の水面波形と越波量の時間変化（複合型被災モデル-2）

3.6 結語

本章では、海岸保全施設の一つである消波工に、ライフサイクルマネジメント (LCM) の考え方を導入する際、消波工の累積損傷によって生じる消波性能の変動特性について適切に評価することが必要不可欠であると考え、その変動特性を数値波動水路を用いた数値実験より検討した。累積損傷断面としては、既往の研究を参考に、消波工の沈下に関する被災が日本各地で多く報告されていることを踏まえ、①天端被災、②複合型被災の2パターンを検討対象とし、消波性能指標としては反射率と越波流量の2つを対象とした。入射波としては規則波と不規則波を用いた。不規則波については、波列構成の違いによる消波性能への影響を検討するため、15種類の波群特性が異なる不規則波を採用した。それぞれの累積損傷断面のモデル化を行い、数値波動水路でモデル化された断面を再現し、数値実験を行った。本章で得られた結果を、以下に要約する。

1. 複合型被災モデル-1 を対象に、規則波を入射波とした場合の反射率の変動特性を検討した結果、反射率の減少・増加傾向やその変動量については、入射波の波形勾配や堤体の法面勾配、被覆材の材質や規格等によって、一様性が見られない不規則な変動を示すことが分かった。このことから、消波工の累積被災を伴う消波性能の評価式に関して、被災の程度を表すダメージパラメータという単一パラメータのみで反射率の変動特性を算出可能な単純な回帰式の構築は困難であり、ダメージパラメータ以外のパラメータも考慮する必要があることが明らかになった。
2. 天端被災モデルおよび複合型被災モデル-2 を対象に、不規則波を入射波とした場合の反射率の変動特性を検討した結果、不規則波の波群性および構成波列に関わらずそれぞれのモデルにおいて、反射率はほぼ同じ値を示す結果となった。この結果については、反射率そのものが入射波エネルギーと反射波エネルギーの比によって求められるものであり、実験に用いた入射不規則波の総エネルギーがほぼ同等であることから、不規則波の構成波列に関わらず反射率がほぼ同じ値を示す結果になったと考察できる。しかし、2つのモデルにおける反射率の変動特性には一様性が認められないことから、消波工の累積被災を伴う消波性能の評価にあたっては、1.で述べたように累積損傷断面の被災パターンも重要なパラメータになり得ると推察される。
3. 天端被災モデルおよび複合型被災モデル-2 を対象に、不規則波を入射波とした場合の越波流量の変動特性を検討した結果、波浪統計量、スペクトル形状が同等な不規則波であるにも関わらず、越波流量の変動特性には大きなばらつきがあり、一様性が認められなかった。

4. 3. に関して、平均連長、 $H_{1/3}$ 超過波数がほぼ同値の不規則波を用いて、越波量の時間変化を詳細に検討した結果、越波を不規則波により検討する場合、構成波列の不規則性に配慮した確率統計的な考察が必要であることが分かった。

<参考文献>

- 1) 農林水産省・国土交通省：ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～，2008.
- 2) 久保田真一，山本方人，松本朗，半沢稔：消波ブロック被覆堤における消波工の変形過程に関する実験的検討，海岸工学論文集，第56巻（2），pp.906-910，2009.
- 3) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，pp.13-17，2008.
- 4) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，23p，2008.
- 5) 合田良實：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.119-125，2008.
- 6) 合田良實：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－増補改訂，鹿島出版会，pp.111-114，1991.
- 7) 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：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.14-18，1998.
- 8) 合田良實，鈴木康正，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，1976.
- 9) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，pp.28-30，2008.

第 4 章 累積損傷を伴う消波工の消波性能に関する 評価システム

4.1 緒言

第 3 章では、海岸保全施設の一つである消波工に、ライフサイクルマネジメント (LCM) の導入を行う際に必要不可欠となる消波工の累積損傷によって生じる消波性能の変動特性について、2 つの累積損傷断面 (天端被災と複合型被災) を対象に、数値波動水路を用いた数値実験により検討を行った。その結果、消波工の累積損傷と消波性能 (本研究では、反射率と越波流量) との関係について、被災の程度を表すダメージパラメータという単一パラメータだけでの明確な回帰式を見出すまでには至っておらず、ダメージパラメータのみで消波性能の変動特性を直接評価することは困難であることが分かった。また、消波性能の変動特性はダメージパラメータという単一パラメータのみに依存するのではなく、その他のパラメータ (例えば、天端高や被覆材の種類・規格等) にも依存すると考えられるが、数多くあるパラメータの中でどのようなパラメータの影響が強いのか、また、パラメータ間にどのような因果関係があるのかについては分かっていない。

本章では、上述した問題点を解決するため、データ間の因果関係が不明確な情報処理の分析に有効なニューラルネットワークを利用した、累積損傷を伴う消波工の消波性能に関する評価システムの開発を行う。なお、ニューラルネットワークを構築する際、ネットワークを調整するために多数の入力と出力データに関する教師データが必要となるが、本研究では、第 3 章で行った数値波動水路を用いた数値実験結果を教師データとして用いる。

4.2 ニューラルネットワークの概要 ^{1),2)}

ニューラルネットワークとは、脳神経系の情報伝達機構をモデルにした情報処理システムである。あるデータ間の因果関係が不明確で、入出力関係のプログラム化が困難な場合など、ニューラルネットワークではユニットをシナプスで結びつけ、繰り返し学習によりその結合度を調整させ、入出力関係を具現化することが可能である。したがって、ネットワークを形成する過程でプログラム化が内部的に行われるため、因果関係の解析が困難なデータを処理する上で極めて有効であり、多くの工学分野でニューラルネットワークが導入・研究されている。また、生物、環境など自然界におけ

る情報現象にもニューラルネットワークの導入・研究が行われている。海岸工学の分野でニューラルネットワークを応用した研究には、捨石防波堤の安定性評価³⁾、消波ブロック被覆層の変形量評価⁴⁾、緩傾斜護岸の越波流量算定⁵⁾などがあり、海岸工学上の問題におけるニューラルネットワークの有効性が示されている。最近では、学習アルゴリズムやニューラルネットワークのモデル自身の改良が行われている。

本研究では、科学技術計算言語として幅広く利用されている MATLAB[®]の Neural Network toolbox[®]を用いて、消波性能の評価を行うニューラルネットワークの構築を試みる。

4.2.1 ニューラルネットワークの構成

ニューラルネットワークは多数のユニットを結合したもので構成され、その結合の種類により大きく分けて、相互結合型ネットワークと階層型ネットワークの2つに分けられる。

ニューロンのモデルであるユニットとしては、図 4-1 に示すような多入力、1 出力といった簡略化されたモデルが通常用いられる。ユニット間は神経線維にあたるシナプスで結ばれ、信号は一方向に伝わる。ユニットでは、シナプスからの入力信号 x_i は、ある重み（結合荷重） w_i がかけられ加算され、さらに閾値 γ_k が差し引かれた値 p がユニットに入力され、応答関数に応じた出力信号 $y=f(p)$ を伝達する。

ニューラルネットワークにおける応答関数として、よく用いられるのはシグモイド関数である。シグモイド関数には、出力が 0~1 の log 型と出力が -1~1 の tangent 型がある。実際のニューラルネットワークの応用には、図 4-2 のような入力層、中間層、出力層からなる階層型ニューラルネットワークがよく用いられる。入力層ユニットでは信号の処理は行われず、入力データが中間層に伝達される。情報は中間層と出力層のユニットでは、上述のように応答関数にしたがって入力信号を処理し、出力信号が他のユニットに伝達される。そして、出力層からの出力が予測値となる。

4.2.2 ニューラルネットワークの学習法

ニューラルネットワークの学習法には大きく分けて、教師付き学習法と、教師無し学習法の2つがある。本節では、本研究で用いる教師付き学習法について述べる。

教師付き学習法のバックプロパゲーションとよばれる方法では、入力層に与えられる数値データと同時に、学習の指針として望ましい出力値（教師データ）を与え、繰り返し学習でネットワークからの出力データと教師データとの誤差をフィードバックすることにより、教師データに近い値が出るようユニットにかかる結合荷重と閾値を調整し、ネットワークを形成する。学習によって得られた知識は結合荷重と閾値に蓄えられ、一般に、新しい入力を与えられると、訓練中の類似した入力ベクトルを探し、これに対する正しい出力に類似した値を出力する。この一般化という特性により、起

こりうる全ての入力・教師信号の組をネットワークの訓練に与えなくても、結果を得ることができる。

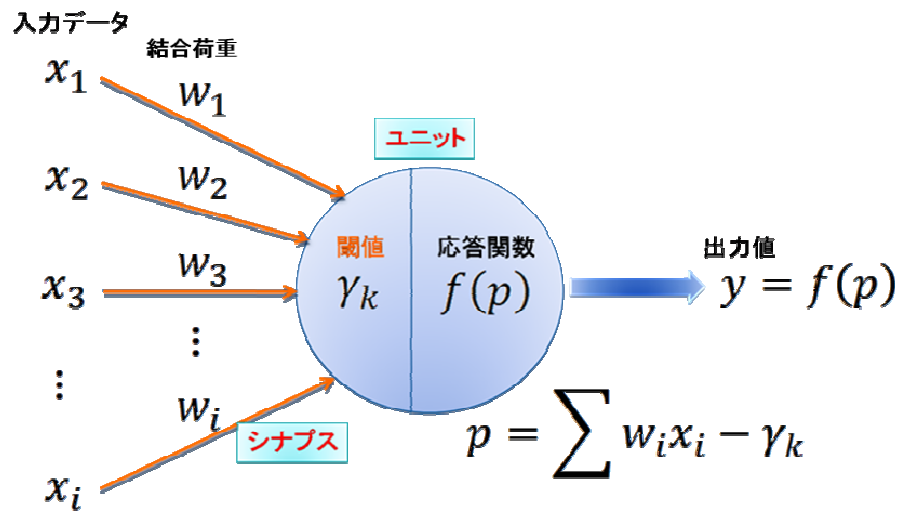


図 4-1 ニューロンモデル

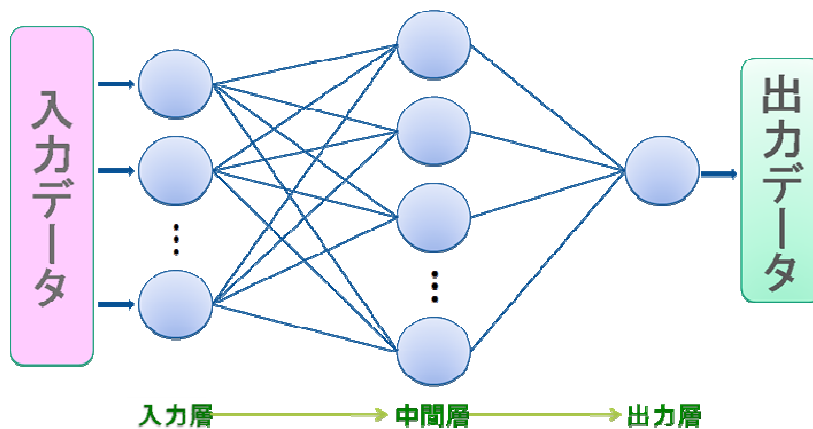


図 4-2 階層型ニューラルネットワークの概要図

ニューラルネットワークの訓練中に起こる問題の一つに、過学習（オーバーフィッティング）が挙げられる。これは、訓練データセットに対する適合度が良くなり過ぎ、新規のデータセットに対してかえって誤差が大きくなる現象である。一般化の改良方法としては、早期停止法と正則化法がある。

早期停止法では、利用可能なデータを訓練データセット、バリデーションデータセ

ット、テストデータセットの 3 つに分割する。バリデーションデータセットに対する誤差は、訓練データセットに対する誤差と同様に訓練の初期フェーズ中に通常減少するが、ネットワークが過学習し始めるとバリデーションデータセットに対する誤差は増加し始めるため、最小になったときに訓練を停止させる。テストデータセットは訓練には用いないが、ネットワークの妥当性を検証するために用いられる。

正則化法においては、ネットワーク誤差の平均二乗和であるパフォーマンス関数に、ネットワークの重みの平均二乗和を加えることによって、一般化の改良を行う。正則化の問題点は、最適なパフォーマンス比パラメータ値の決定が困難なことである。このパラメータを非常に大きくすると過学習され、小さ過ぎると、ネットワークは訓練データを適当に近似しない。そこで、自動的に最適正則化パラメータを決定する学習法として Bayesian 法がある。

バックプロパゲーションアルゴリズムには、パフォーマンス関数が最も早く減少する勾配の負の方向に結合荷重と閾値を更新する勾配降下法や数値最適化手法に基づく高速訓練アルゴリズムである共役勾配法の Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) など多くの種類がある。

本研究では、間瀬ら⁵⁾が行った解析結果を参考に、ニューラルネットワークの訓練アルゴリズムとして、実験データの効率的な利用が可能となる Bayesian 正則化法を付加した LM 法を採用する。

4.3 ニューラルネットワークモデル

本研究では、入力層、中間層、出力層からなる階層型ニューラルネットワークを採用し、累積損傷を伴う消波工の消波性能に関する評価システムの構築を行う。中間層ユニット、出力層ユニットについては、間瀬³⁾、間瀬・酒井⁴⁾および斉藤ら⁶⁾の研究を参考に、応答関数として log 型シグモイド関数を用いる。

階層型ニューラルネットワークを適用するにあたり、選択根拠が不明確なものとして、中間層の層数、中間層のユニット数がある。本研究では、中間層数は 1 層、中間層ユニット数に関してはユニット数を変化させた試行計算を行い、予測値と実験値との相関の違いや誤差を検討して決定した。

先に述べたが、ニューラルネットワークを構築する際、ネットワークを調整するために、多数の入力と出力データに関する教師データが必要となる。本研究では、第 3 章で行った、数値波動水路を用いた累積損傷断面に対する多数の数値解析結果を教師データとして用いるものとする。なお、出力ユニットは対象事象（反射率または越波流量）の 1 項目とした。

4.3.1 教師データの選定

ニューラルネットワークを構築する際、多数の入力と出力データに関する教師データが必要となる。しかしながら、水理模型実験によって多くのデータを得ることは、時間的・費用的に現実的ではない。本研究では、第3章で行った数値波動水路を用いた累積損傷断面に対する数値実験結果を教師データとして用いるものとする。適用した教師データとしては、規則波を対象とした複合型被災モデル-1が表3-11、表3-12、不規則波を対象とした天端被災モデルが表3-14、複合型被災モデル-2が表3-16に示したそれぞれのケースである。

4.3.2 入力層ユニットにおける入力項目

入力層ユニットには、①被災に関する諸量、②堤体諸元、③設計波浪条件に関するパラメータを用いるものとした。表4-1に規則波、表4-2と表4-3に不規則波を対象とした場合の入力項目を示す。

表 4-1 複合型被災モデル-1 における入力項目（規則波）

	入力項目	項目数
被災に関する諸量	天端幅/代表粒径，天端沈下量/代表粒径，被災後の法面勾配	3項目
堤体諸元	法先水深，天端高，コア高，法面勾配，被覆材の代表粒径および空隙率	6項目
設計波浪条件	波高，周期	2項目

表 4-2 天端被災モデルにおける入力項目（不規則波）

	入力項目	項目数
被災に関する諸量	天端幅，天端沈下量/代表粒径，被災後の法面勾配，天端沈下率，水平減少率	5項目
堤体諸元	法先水深，天端高，コア高，法面勾配，被覆材の代表粒径および空隙率	6項目
設計波浪条件	図3-22における波高計W1での有義波高，有義波周期，平均連長	3項目

表 4-3 複合型被災モデル-2 における入力項目（不規則波）

	入力項目	項目数
被災に関する諸量	天端幅，天端沈下量/代表粒径， 被災後の法面勾配， 天端沈下率，水平減少率	5 項目
堤体諸元	法先水深，天端高，コア高，法面勾配， 被覆材の代表粒径および空隙率	6 項目
設計波浪条件	図 3-22 における波高計 W1 での有義波高， 有義波周期，平均連長	3 項目

ここで、被災に関する諸量については、被災現場で容易に計測可能であり、また、その計測結果をパソコンに入力することで、消波性能に関する評価結果をその場で確認できるようなパラメータを採用している。なお、天端沈下率は、(天端沈下量/初期天端高)として、水平減少率は、(静水面における被覆層厚減少量/静水面における初期被覆層厚)として算出される。

不規則波については、第 3 章における越波流量の考察より、不規則波の波列構成を考慮する必要があるが、それを的確に表現できるパラメータがないことから、ここでは便宜的に波の組合せを考慮するため、図 3-22 に示す波高計 W1 で計測された平均連長を導入することとした。

4.3.3 中間層ユニットに関する設定

中間層ユニット数に関しては、ユニット数を変化させた試行計算を行い、予測値と実験値との相関や誤差から設定した。ここで、不規則波を対象としたケースに関して試行計算を行った結果、誤差、精度の観点から、反射率と越波流量の評価システムを 1 つのシステムで構築することが困難と判明したため、複合型被災の反射率予測、越波流量予測、天端被災の反射率予測、越波流量予測の 4 つのパターンにおいてそれぞれシステムの構築を行うことにした。これらのシステムにおける中間層ユニット数は、複合型被災の場合が反射率予測、越波流量予測に対してそれぞれ 16, 25, 天端被災の場合がそれぞれ 24, 13 を試行計算より設定した。

なお、規則波を対象としたケースについても同様に試行計算を行い、中間層ユニット数については 17 と設定した。

4.4 消波性能に関する予測値と実験値の比較

本節では、ニューラルネットワークを用いて構築した消波性能評価システムより算定される予測値と実験値との比較を行い、消波性能評価システムの適合性について考察を行う。なお、評価システム検証用の実験データについては、太田ら⁷⁾、加藤⁸⁾の被覆石を対象とした実験データを用い、消波ブロックに関しては不規則波実験を実施して検証用のデータを得た。

4.4.1 反射率に関する比較

(1) 規則波の場合

図 4-3 は、複合型被災モデル-1 を対象とした水理模型実験より得られた反射率の実験結果と、ニューラルネットワークを用いた評価システムによる反射率の予測結果を比較したものである。この図より、本研究で構築された複合型被災モデル-1 における被覆層の累積損傷に伴う反射率に関する評価システムは、実験結果をほぼ 10% 程度の誤差で予測できることが分かる。なお、消波ブロックの被災レベル DL が、DL=2, 3 と増加する程、実験結果との誤差が大きくなっている。この原因としては、実験において見られた、波が堤体斜面を遡上し、堤体背後の止水板に当たる際の波の打ち上げ、および越波現象に関する教師データの再現性の影響によるものと考えられる。

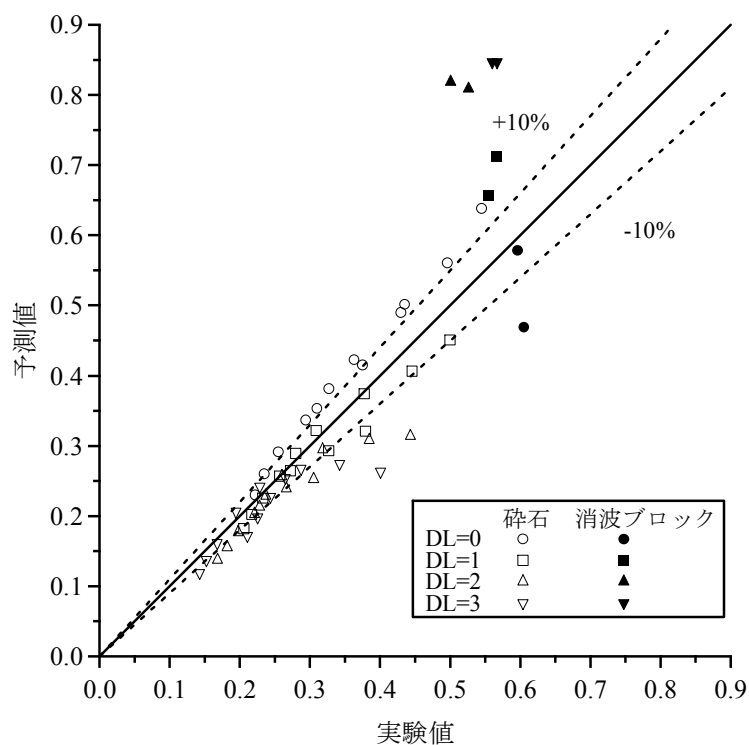


図 4-3 反射率に関する予測値と実験値の比較（規則波：複合型被災モデル-1）

(2) 不規則波の場合

図 4-4, 図 4-5 は, 天端被災および複合型被災モデル-2 を対象とした水理模型実験より得られた反射率の実験結果と, ニューラルネットワークを用いた評価システムによる反射率の予測結果を比較したものである. 図 4-4 が天端被災モデル, 図 4-5 が複合型被災モデル-2 の比較図である. これらの図より, 本研究で構築された天端被災モデルおよび複合型被災モデル-2 における被覆層の累積損傷に伴う反射率に関する評価システムは, 規則波の場合と同様に, 実験結果をほぼ 10% 程度の誤差で予測できることが分かる.

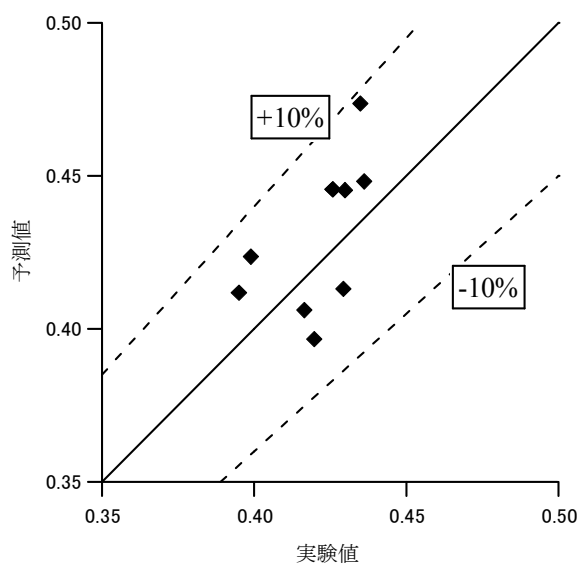


図 4-4 反射率に関する予測値と実験値の比較 (不規則波: 天端被災モデル)

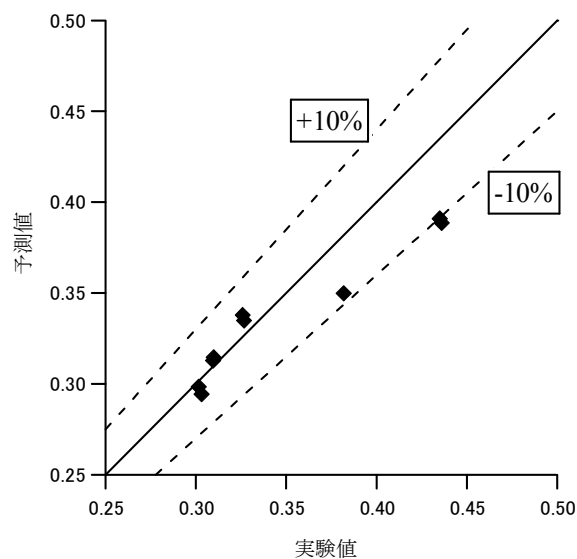


図 4-5 反射率に関する予測値と実験値の比較 (不規則波: 複合型被災モデル-2)

4.4.2 越波流量に関する比較

図 4-6, 図 4-7 は, 天端被災および複合型被災モデル-2 を対象とした水理模型実験より得られた越波流量の実験結果と, ニューラルネットワークを用いた評価システムによる越波流量の予測結果を比較したものである. 図 4-6 が天端被災モデル, 図 4-7 が複合型被災モデル-2 の比較図である. また, 数値実験での越波流量に関する統計量を表 4-4, 表 4-5 に示す. これらの図より, 本研究で構築された天端被災モデルおよび複合型被災モデル-2 における被覆層の累積損傷に伴う越波流量に関する評価システムは, 天端被災モデルの場合は $\pm 50\%$, 複合型被災モデル-2 の場合は $\pm 40\%$ の誤差範囲で予測されており, バラつきがかなり大きいと言える.

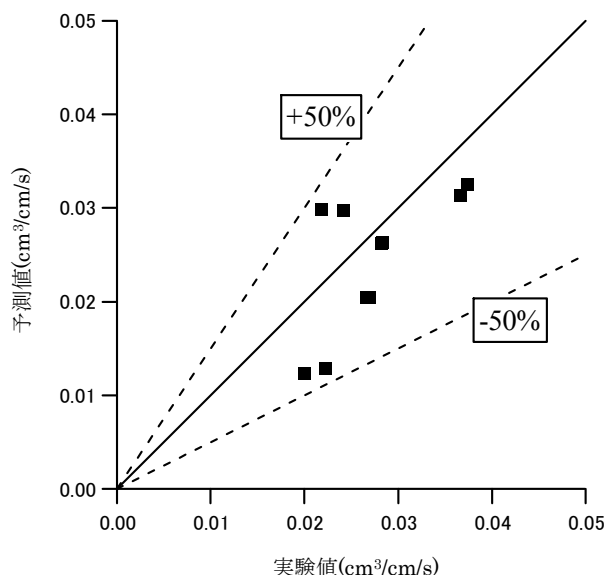


図 4-6 越波流量に関する予測値と実験値の比較 (不規則波: 天端被災モデル)

表 4-4 数値実験での統計量 (不規則波: 天端被災モデル)

DL	越波流量($\text{cm}^3/\text{cm/s}$)		
	数値実験		
	平均値 μ	標準偏差 σ	変動係数 σ/μ
0	0.040	0.025	0.613
1	0.046	0.035	0.777
2	0.043	0.031	0.722
3	0.038	0.026	0.680
4	0.047	0.023	0.488

しかしながら，表 4-4，表 4-5 に示されている数値実験での越波流量に関する統計量を見てみると，変動係数（＝標準偏差/平均値）がそれぞれ，天端被災モデルの場合は 0.488～0.777（平均値：約 0.65），複合型被災モデル-2 の場合は 0.420～0.682（平均値：約 0.55）となっている．この越波流量における実験毎の変動係数値を考慮すると，評価システムにおける予測値がそれぞれ，天端被災モデルの場合が 50%，複合型被災モデル-2 の場合が 40%の誤差範囲にあることは，予測精度としては妥当な結果であると言えよう．

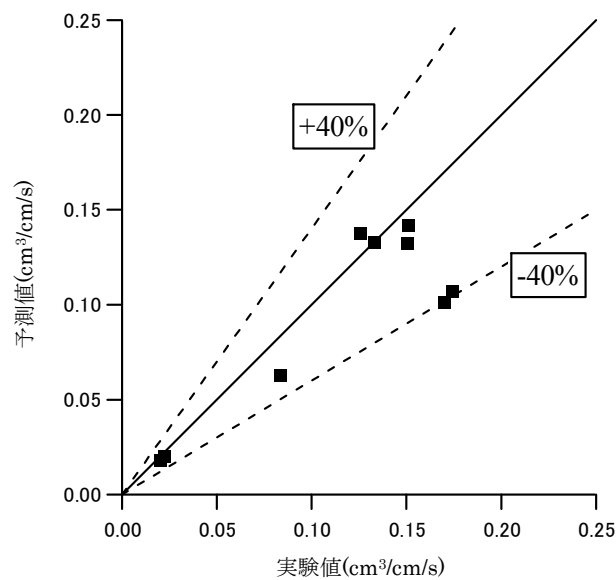


図 4-7 越波流量に関する予測値と実験値の比較（不規則波：複合型被災モデル-2）

表 4-5 数値実験での統計量（不規則波：複合型被災モデル-2）

DL	越波流量(cm ³ /cm/s)		
	数値実験		
	平均値 μ	標準偏差 σ	変動係数 σ/μ
0	0.035	0.023	0.656
1	0.076	0.033	0.439
2	0.074	0.050	0.682
3	0.083	0.043	0.515
4	0.105	0.044	0.420

4.5 結語

本章では、海岸保全施設の一つである消波工に、ライフサイクルマネジメント (LCM) の導入を行う際に必要不可欠となる累積損傷を伴う消波工の消波性能に関する評価システムの開発を行った。評価システムの構築にあたっては、データ間の因果関係が不明確な情報処理の分析に有効なニューラルネットワークを用いた。その際、ネットワークを調整するために多数の入力と出力データに関する教師データが必要となるが、本研究では第3章で行った数値波動水路を用いた数値実験結果を教師データとして用いた。本章で得られた結果を、以下に要約する。

1. 不規則波を対象とした天端被災モデル、および複合型被災モデルの消波性能に関する評価システムの構築にあたっては、単一のシステムで全てを網羅することが困難であったため、天端被災モデルの反射率、越波流量の評価システム、複合型被災モデルの反射率、越波流量の評価システム、計4つの評価システムをそれぞれ構築した。
2. 反射率の評価システムに関する検証として実験値と予測値の比較検討を行った結果、規則波を対象とした複合型被災モデル-1、不規則波を対象とした天端被災モデル、および複合型被災モデル-2において、開発された評価システムは実験値を10%程度の誤差範囲で予測可能であった。
3. 越波流量の評価システムに関する検証として実験値と予測値の比較検討を行った結果、不規則波を対象とした天端被災モデル、および複合型被災モデル-2において、開発された評価システムは天端被災モデルの場合が最大50%程度の誤差、複合型被災モデル-2の場合が最大40%程度の誤差となった。しかし、数値実験での越波流量のバラツキを数量化した変動係数の値として、天端被災モデルの場合が約0.65 (平均値)、複合型被災モデル-2の場合が約0.55 (平均値)であることを考慮すると、本研究で構築した越波流量の評価システムによる予測値は妥当な結果と言えよう。

<参考文献>

- 1) 中野馨 監修：ニューロコンピュータ，技術評論社，1989.
- 2) 吉富康成：ニューラルネットワーク，朝倉書店，2007.
- 3) 間瀬肇：ニューラルネットワークを用いた捨石防波堤の安定性評価，海岸工学論文集，第 41 巻，pp.761-765，1994.
- 4) 間瀬肇，酒井哲郎：ニューラルネットワークを用いた消波ブロック被覆工の変形量評価，海岸工学論文集，第 42 巻，pp.891-895，1995.
- 5) 間瀬肇，永橋俊二，Terry S.HEDGES：緩傾斜護岸の越波流量算定におけるニューラルネットワークの適応性に関する研究，海洋開発論文集，第 21 巻，pp.593-598，2005.
- 6) 斉藤武久，砂原啓人，市川督人，福本正，間瀬肇，石田啓：ニューラルネットワークを用いた人工リーフ周辺の水理特性評価—トラップ式ダブルリーフを対象として—，海岸工学論文集，第 55 巻 (2)，pp.971-975，2008.
- 7) 太田隆夫，松見吉晴，時岡明範，木村晃：傾斜護岸の断面変形のモデル化と性能評価，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66 No.1，pp.721-725，2010.
- 8) 加藤展顕：傾斜護岸の被災断面形状と性能変化の特性に関する研究，鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻，修士論文，2011.

第5章 年齢型予防保全を基礎とした消波施設の 最適保全方策

5.1 緒言

我が国の海岸保全施設は、1956年の海岸法の制定や、1959年の伊勢湾台風等による大災害を契機に整備されたものが多く¹⁾、現在では老朽化が進行し、本来保持すべき性能が十分に発揮されていない施設や、耐力の低下が著しい施設が増加している。施設が保持すべき要求性能の維持のためには保全実施の必要性があるが、無計画な保全や突発的な事後保全は総保全費用増大の要因となる。そこで、国土交通省・農林水産省（2008）により海岸保全施設の維持管理に対し、ライフサイクルマネジメント（LCM）と呼ばれる概念を導入したマニュアル（案）が作成され、適時、適切な保全対策の必要性が訴えられている¹⁾。

ここで、海岸保全施設の一つである消波工に目を向けて見ると、この消波工の今までの保全方法は事後保全型であり、消波工が大規模被災を受ける度に保全を行ってきた。しかしながら、事後保全は総保全費用増大の要因となるだけでなく、多くの人命・財産を危険にさらすことにも繋がるため、今後は適時・適切な予防保全を行う必要があると考えられる。

本章では、消波施設の保全計画策定には、施設の物理・性能面の劣化過程を把握し、施設破壊への信頼性評価が重要であると考え、消波施設の破壊に至る過程として、2種類の確率モデルを採用する。1つは衝撃型累積損傷モデルであり、衝撃により発生し累積された損傷量により、施設の状態を定義するモデルである。もう1つは耐力劣化モデルであり、施設耐力劣化と負荷発生過程を別過程として捉え、耐力と負荷の大小関係により、破壊事象を表現するモデルである。両施設劣化破壊モデルのもと、年齢型予防保全を基礎とした保全モデルをいくつか提案し、総期待保全費用を最小とする施設保全方策について解析的および数値実験的な検討を行う。

5.2 衝撃型累積損傷モデルを用いた消波施設保全モデル

5.2.1 衝撃型累積損傷モデルの概要

消波ブロックは、台風や異常発達した低気圧等によって発生した波によって移動や天端高の沈下等の損傷を被る。このような波をここでは、以後、異常波浪と呼ぶ。損

傷は異常波浪によってのみ発生し、累積されると仮定する。累積した損傷は、何らかの保全を受けない限り減少するところはない。消波ブロックは施設全体に累積された損傷量が K を超えた場合、要求性能を保証できなくなる。すなわち、製品としては故障状態であると見なす。維持管理者は施設の要求性能を満足することを目的に、緊急に事後保全を実施する。一般的に、事後保全は緊急性を要するために費用が掛かる傾向にある。異常波浪襲来に伴う消波施設事後保全実施の概要図を図 5-1 に示す。

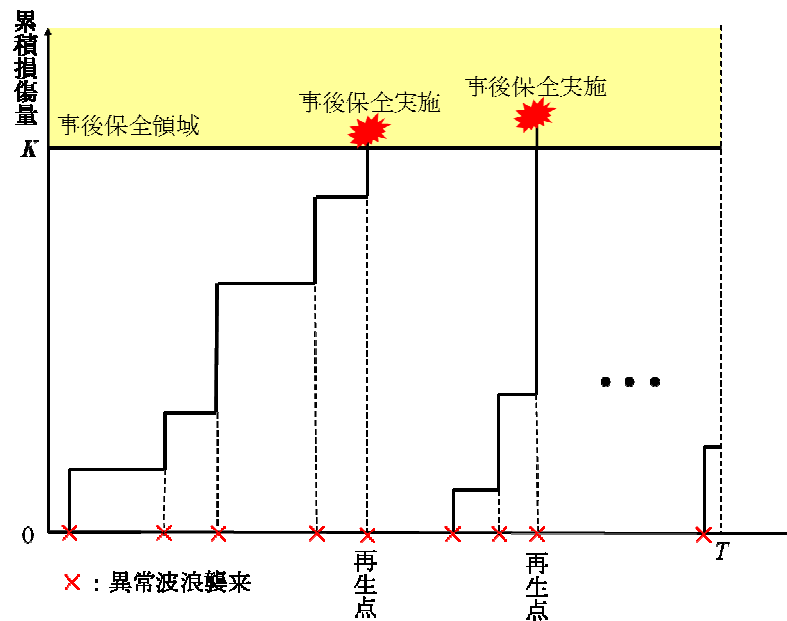


図 5-1 衝撃型累積損傷モデル概要図

異常波浪の襲来は、小和田²⁾より、平均 λ_1 の定常ポアソン過程 (homogeneous Poisson Process) に従うと仮定する。ポアソン過程はランダムに発生する事象を表現するのに適した確率過程である。関数 $N(t)$ を、時刻 t までに発生する異常波浪の回数を表す計数過程とすれば、時刻 t までに j 回の異常波浪が襲来する確率は、次式として表される。

$$\Pr\{N(t) = j\} = F_{1j}(t) = \frac{(\lambda_1 t)^j}{j!} \exp(-\lambda_1 t) \quad (5.1)$$

確率変数 Z_j は、 j 回の異常波浪により累積された損傷量であり、その分布関数は次式で表される。

$$\Pr\{Z_j \leq x\} = G^{(j)}(x) = \int_0^x G(x-y) dG^{(j-1)}(y) \quad (5.2)$$

関数 $G^{(j)}(x)$ は、分布関数 $G(x)$ の j 重畳み込みであり、 j 回の異常波浪により累積される損傷量が x 以下である確率を表している。また、以下を付記する。

$$G^{(0)}(x) \equiv \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (x \geq 0) \end{cases} \quad (5.3)$$

5.2.2 限界制御モデル

累積損傷モデルの概念のもと、消波施設が故障状態になる前に適切な予防保全対策を実施する限界制御モデルを構築する。モデルの概要図を図 5-2 に示す。

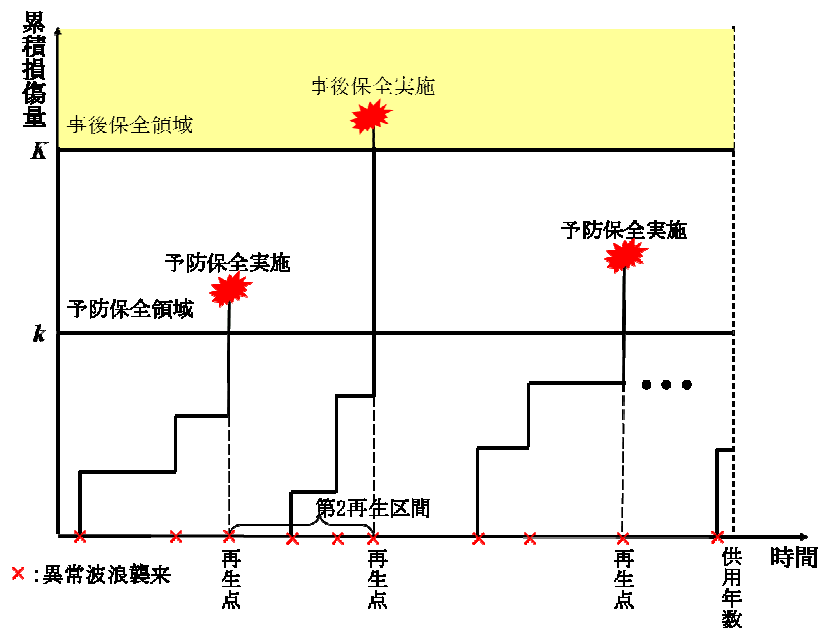


図 5-2 限界制御モデル概要図

予防保全を実施するタイミングとして、累積損傷量が k 以上 K 未満の時点で実施すると設定する。すなわち、異常波浪襲来直後、点検により累積損傷量が K 以上であれば事後保全を実施、 k 以上 K 未満であれば予防保全を実施、 k 未満であれば保全は実施しない。いずれの保全も新設時と同等の状態まで回復すると仮定し、保全が完了する時点を生点 (renewal point) と呼ぶ。また、保全に必要な期間は供用期間に比べ短いと考え、保全期間は無視する。消波施設新設時を第 0 再生点と呼び、以降順次番号付けをする。なお、消波施設の供用年数を T 年とする。第 $j-1$ 再生点と第 j 再生点間の区間を第 j ($j=1, 2, \dots$) 再生区間と呼ぶ。各再生区間において、 j 回目の異常波

浪により発生する損傷量を確率変数 Y_j で表す. 確率変数 Y_j は, j に対し独立かつ同一な確率分布 (independent identically distributed: 以後 i.i.d) であると仮定する.

以上より, j 回の異常波浪により累積された損傷量 $Z_j (= \sum_{i=1}^j Y_i)$ は, 次式として求まる.

$$\Pr\{Z_j \leq x\} = G^{(j)}(x) = \int_0^x G(x-y) dG^{(j-1)}(y) \quad (5.4)$$

関数 $G^{(j)}(x)$ は, 分布関数 $G(x)$ の j 重畳み込みであり, j 回の異常波浪により累積される損傷量が x 以下である確率を表している. また, 以下を付記する.

$$G^{(0)}(x) \equiv \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (x \geq 0) \end{cases} \quad (5.5)$$

供用期間 T における, 総期待保全費用 $C_T(k)$ を導出する. 各再生区間における期待保全費用は, 確率過程の再生性が保たれることから, どの再生区間においても同じ値をとる. 予防保全レベル k をもつ消波施設における第 j 再生区間の保全費用を $V_j(k)$ とする. ただし, $j \neq N_T(k) + 1$ とする. $N_T(k)$ は供用期間 T 中の再生回数を数え上げる計数過程である. その期待保全費用 $E[V_j(k)]$ は, 期待事後保全費用と期待予防保全費用の和として求まる. 期待事後保全費用 $E[V_j^1(k)]$ は, 次式として表される.

$$E[V_j^1(k)] = c_1 \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^k [1 - G(K-x)] dG^{(i)}(x) \quad (5.6)$$

次に, 期待予防保全費用 $E[V_j^2(k)]$ は, 次式として表される.

$$E[V_j^2(k)] = c_2 \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^k [G(K-x) - G(k-x)] dG^{(i)}(x) \quad (5.7)$$

以上より, 第 j 区間における期待保全費用 $E[V_j(k)]$ は, 次式として導出される.

$$E[V_j(k)] = E[V_j^1(k)] + E[V_j^2(k)] \quad (j = 1, 2, \dots, N_T(k)) \quad (5.8)$$

供用期間における再生回数について考える. 供用期間 T 中に発生する期待再生回数 $H_T(k) = E[N_T(k)]$ は, Cox³⁾による再生関数の近似式より, 次式で表される.

$$H_T(k) = \frac{T}{E[R_j(k)]} + \frac{\text{Var}[R_j(k)] - E[R_j(k)]^2}{2E[R_j(k)]^2} + o(1) \quad (5.9)$$

ここに、 $E[R_j(k)]$ は、第 j 再生区間長 $R_j(k)$ の期待値を表し、次式として求められる。

$$E[R_j(k)] = \sum_{i=0}^{\infty} G^{(i)}(k) \int_0^{\infty} F_{i_i}(t) dt = \frac{1+M(k)}{\lambda_1} \quad (5.10)$$

関数 $M(k)$ は、損傷過程に対する再生関数とも呼ばれ、次式として定義される。

$$M(k) = \sum_{j=1}^{\infty} G^{(j)}(k) \quad (5.11)$$

関数 $M(k)$ の現象的意味は、累積損傷量が k に至るまで、平均何回の異常波浪が襲来するかを表している。関数 $\text{Var}[R_j(k)]$ は、第 j 再生区間長 $R_j(k)$ の分散を表しており、次式として求められる。

$$\begin{aligned} \text{Var}[R_j(k)] &= \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^k 1 - G(k-x) dG^{(i-1)}(x) \times \int_0^{\infty} (t - E[R_j(k)])^2 dF_i(k) \\ &= \frac{2}{\lambda_1} \left\{ E[R_j(k)] + \frac{1}{\lambda_1} \sum_{i=1}^{\infty} i G^{(i)}(k) \right\} - E[R_j(k)]^2 \end{aligned} \quad (5.12)$$

以上、式 (5.8), (5.9), および Wald's の関係式⁴⁾より、供用期間 T を考慮した消波施設の総期待保全費用は、次式として求めることができる。

$$C_T(k) = [H_T(k) + 1]E[V_j(k)] - E[V_{N_T(k)+1}] \quad (j = 1, 2, \dots, N_T(k)) \quad (5.13)$$

ここで、関数 $E[V_{N_T(k)+1}]$ は、

$$E[V_{N_T(k)+1}] = c_2 + (c_1 - c_2) \frac{1}{\lambda_1 E[R_j(k)]} \sum_{i=1}^{\infty} i \int_0^k 1 - G(K-x) dG^{(i-1)}(x) \quad (5.14)$$

ここに、 c_1 は事後保全費用、 c_2 は予防保全費用とし、 $c_1 > c_2$ とする。なお、上記、有限な供用期間 $(0, T)$ における期待費用導出にあたり、理論背景は Christer モデル⁵⁾を用いている。

5.2.3 無限期間における最適保全方策

5.2.2 節では、供用期間を有限期間として期待保全費用の導出を行った。多くの LCC 法において、供用期間が有限の場合、解析的に最適保全方策を構築する手法はほとんど示されていない。本節では、供用期間に対する縛りを有限から無限へ緩めた制約のもと、いつ保全を実施すべきかを解析的に議論する。供用期間を無限化するに伴い、本節における評価規範を単位年齢あたりの期待保全費用とする。さらに、先の予防保全機会である累積損傷量 k 、もしくは再生点（新設時を含む）からの経過年齢が TR のいずれかに達したとき、予防保全を実施する問題へと拡張する。この拡張問題は、 $TR \rightarrow \infty$ の場合、累積損傷 k の予防保全問題へ、また、 $k \rightarrow \infty$ の場合、年齢 TR の単一制御変数による予防保全問題になる。

(1) 期待保全費用の定式化

単位年齢あたりの期待保全費用は、再生報酬定理⁶⁾より、1 再生区間の期待長に対する 1 再生区間に必要とされる期待保全費用の比として導出される。すなわち、関数 $C_T(TR, k)$ を供用期間 T 中の総保全費用と考えるとき、単位年齢あたりの期待保全費用 $C_T(TR, k)$ は、次式で表される。

$$C(TR, k) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{C_T(TR, k)}{T} = \frac{1 \text{ 再生区間に必要とされる期待保全費用}}{\text{期待1再生区間長}} \quad (5.15)$$

以降、上式における期待確率量を求める。

消波施設が要求性能を喪失する前に、予防取替年齢 TR において予防保全される確率は、次式として求まる。

$$A_1(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(k) \quad (5.16)$$

消波施設が要求性能を喪失する前に、異常波浪襲来後、累積損傷量が k 以上 K 未満となり予防保全される確率は、次式として求まる。

$$A_2(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) \int_0^k [G(K-x) - G(k-x)] dG^{(j)}(x) \quad (5.17)$$

ここに、関数 $H_j(TR)$ は、予防取替年齢 TR までに少なくとも 1 回の異常波浪が襲来する確率を表している。消波施設が、予防保全を実施する前に要求性能を喪失する確率、すなわち故障確率は次式として求まる。

$$A_3(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) \int_0^k \bar{G}(K-x) dG^{(j)}(x) \quad (5.18)$$

ここに、 $\bar{G}(x) \equiv 1 - G(x)$ である。以上、式(5.16)～式(5.18)より、1再生区間に必要とされる期待保全費用は、次式として導出される。

$$A(TR, k) = c_2 \sum_{j=1}^2 A_j(TR, k) + c_1 A_3(TR, k) \quad (5.19)$$

期待1再生区間長は、次式として求まる。

$$L(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} G^{(j)}(k) \int_0^{TR} F_{1j}(t) dt \quad (5.20)$$

以上より、無限計画期間における単位年齢あたりの期待保全費用は、次式として導出される。

$$C(TR, k) = \frac{A(TR, k)}{L(TR, k)} \quad (5.21)$$

(2) 最適方策

単位年齢あたりの期待保全費用の最小化を目的とする、最適予防保全方策について考察を行う。はじめに、予防取替年齢 TR により、式(5.21)を最小化するための必要条件を導く。式(5.21)を予防取替年齢 TR で偏微分し、0と置くことにより、必要条件は次式として導出される。

$$\sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) B_j(k) - \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) G^{(j)}(k) \left[\frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) B_j(k)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(k)} \right] = c_2 \quad (5.22)$$

ここで、

$$B_j(k) = (c_1 - c_2) \int_0^k G(K-x) dG^{(j)}(x) \quad (5.23)$$

式(5.22)の左辺を $P1(TR, k)$ とする。すなわち、

$$P1(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR)B_j(k) - \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR)G^{(j)}(k) \left[\frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR)B_j(k)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR)G^{(j)}(k)} \right] \quad (5.24)$$

次に、式 (5.21) を最小化する最適累積損傷量 k^* の必要条件を導く。式 (5.21) を k で偏微分し、0 とおくとこにより、次式が求まる。

$$(c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) \int_0^k \int_{K-k}^{K-x} dG(y) dG^{(j)}(x) = c_2 \quad (5.25)$$

式 (5.25) の左辺を $P2(TR, k)$ とする。次式より、関数 $P2(TR, k)$ は任意の $TR (0 < TR < \infty)$ 、 $k (0 < k \leq K)$ に対し、常に $P1(TR, k)$ より大きい。

$$P1(TR, k) - P2(TR, k) = (c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) G^{(j)}(k) \times \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \int_0^k \int_{K-k}^{K-x} dG(y) dG^{(j)}(x)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(k)} \right\} < 0 \quad (5.26)$$

以上より、式 (5.22) と式 (5.25) を同時に満足する有限な制御変数 (TR^*, k^*) は、理論上存在しない。すなわち、単位年齢あたりの期待保全費用を最小化する方策としては、 $k^* = K$ とし、必要条件式 (5.22) を満足する有限な $TR^* < \infty$ を選択するか、もしくは $TR^* \rightarrow \infty$ とし、必要条件式 (5.25) を満足する有限な $k^* < K$ を選択するほかない。以上より、2 制御変数による最適化は、1 制御変数の極限化によってのみ得られることが分かる。したがって、以下に単一制御変数による最適予防保全方策について述べる。

(3) 累積損傷量 k による最適予防保全方策

ここでは、累積損傷量 k のみによる予防保全方策について考察を行う。単位年齢あたりの期待保全費用は、式 (5.21) において $TR \rightarrow \infty$ とすることにより求めることができる。したがって、

$$C_B(k) \equiv \lim_{TR \rightarrow \infty} C(TR, k) = \lambda_1 \left\{ \frac{c_2 + (c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} \int_0^k \bar{G}(K-x) dG^{(j)}(x)}{1 + M(k)} \right\} \quad (5.27)$$

式 (5.27) を制御変数 k で偏微分し、0 と置くことにより、 $C_B(k)$ を最小化するための必要条件は次式として導出される。

$$\int_0^k [1 + M(K - x)] dG(x) = \frac{c_2}{c_1 - c_2} \quad (5.28)$$

式 (5.28) の左辺は、制御変数 k に関する 0 から $M(k)$ までの増加関数であることから、以下の最適予防保全方を提案することができる。

(i) もし、 $M(k) > c_2/(c_1 - c_2)$ ならば、式 (5.28) を満足する有限かつ唯一の $k^* (0 < k^* < K)$ が存在する。また、最小化された期待保全費用は次式となる。

$$C_B(k^*) = \lambda_1 (c_1 - c_2) \bar{G}(K - k^*) \quad (5.29)$$

(ii) もし、 $M(k) \leq c_2/(c_1 - c_2)$ ならば、 $k^* = K$ である。つまり、消波施設が故障状態になるまで、一切の保全活動を実施しないことが、期待保全費用最小化に対する最良の選択となる。この場合の期待保全費用は次式となる。

$$C_B(k^*) = C_B(K) = \frac{\lambda_1 c_1}{1 + M(K)} \quad (5.30)$$

(4) 予防取替年齢 TR による最適予防保全方策

ここでは、予防取替年齢 TR のみによる予防保全方策について考察を行う。単位年齢あたりの期待保全費用は、式 (5.21) において $k \rightarrow K$ とすることにより求めることができる。したがって、

$$C_A(TR) \equiv \lim_{k \rightarrow K} C(TR, k) = \frac{c_2 + (c_1 - c_2) \sum_{j=1}^{\infty} F_{1j}(TR) \bar{G}^{(j)}(K)}{L(TR, K)} \quad (5.31)$$

式 (5.31) を制御変数 TR で偏微分し、0 と置くことにより、 $C_A(TR)$ を最小化するための必要条件は次式として導出される。

$$\lambda_1 Q_1(TR) \sum_{j=0}^{\infty} G^{(j)}(K) \int_0^{TR} F_{1j}(t) dt - \sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \bar{G}^{(j)}(K) = \frac{c_2}{c_1 - c_2} \quad (5.32)$$

ここで、

$$Q_1(TR) = \frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \int_0^K \bar{G}(K-x) dG^{(j)}(x)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(K)} \quad (5.33)$$

もし関数 $Q_1(TR)$ が TR に関する増加関数である場合、式 (5.32) の左辺も 0 から $Q_1(\infty)[1+M(K)]-1$ までの増加関数となる。以上から、 $Q_1(\infty)[1+M(K)] > c_1/(c_1-c_2)$ が成立する場合、式 (5.32) を満足する $C_A(TR)$ を最小とする有限かつ唯一の最適予防保全年齢 TR^* が存在する。

(5) 数値実験

供用期間を考慮したモデルにおける総期待保全費用 $C_T(k)$ の数値実験例を示す。なお、パラメータ λ_1 を目的関数 $C_T(k)$ の変数と見なし、 $C_T(k, \lambda_1)$ と記す。

はじめに、1 回の異常波浪により被る平均損傷（ダメージパラメータ）を 1、分散 0.25 の正規分布 $N(1, 0.25)$ に従うと仮定し、消波施設の致命的損傷レベル $K=10$ 、供用年数を $T=50$ （年）、予防保全費用を単位費用 $c_2=1$ とし、事後保全費用 $c_1=10$ とする数値実験を実施した。

図 5-3 は、異常波浪の襲来頻度 λ_1 、および予防保全レベル k に対する総期待保全費用 $C_T(k)$ を表している。襲来頻度 λ_1 が大きい場合、すなわち、期待襲来間隔が短いほど、総期待保全費用 $C_T(k)$ の k に対する感度が大きいことが分かる。これは、頻繁な異常波浪襲来は、保全実施回数の増加を招くためであると考えられる。また、予防保全レベル k が高い場合、事後保全費用の増大を招き、結果として供用期間における総期待保全費用の急激な増加を引き起こしている。

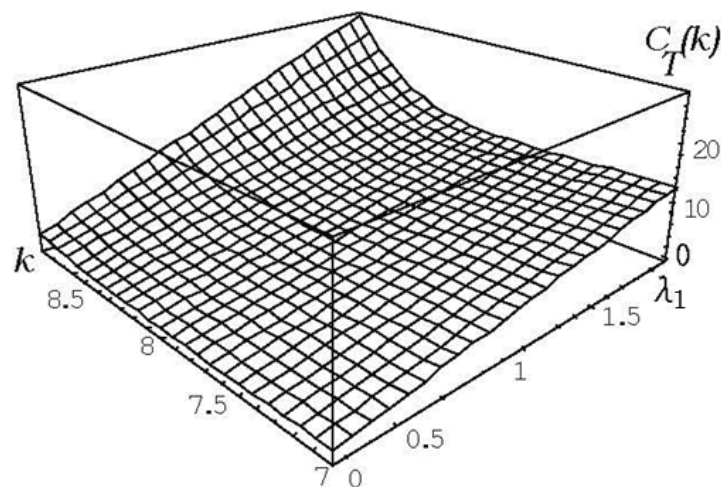


図 5-3 襲来頻度・予防保全レベルに対する総期待保全費用

図 5-4 は、図 5-3 の $\lambda_1=1$, $\lambda_1=2$ における断面図と、新たに $\lambda_1=4$ の場合を合成した図である。総期待保全費用 $C_T(k)$ を最小とする k^* は 7.9 前後に集中している。また、最小化された総期待保全費用 $C_T(k^*)$ も、 λ_1 の増加とともに高くなる様子が明らかに分かる。したがって、頻繁な異常波浪襲来が予想される環境下であるほど、適切な予防保全レベル設定の必要性が強くなることが考えられる。

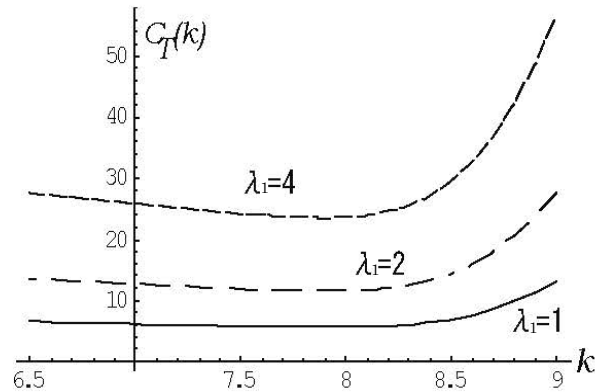


図 5-4 予防保全レベルに対する総期待保全費用

図 5-5, 5-6 は、1 回の異常波浪により被る期待損傷量と、正規分布 $N(1, 0.25)$ を基準とし、図 5-5 は相対的に損傷程度が小さい場合、図 5-6 は損傷程度が大きい場合における総期待保全費用 $C_T(k)$ を表している。図 5-5 において、異常波浪 1 回あたりの平均損傷が小さいほど、 k^* は大きく、 $C_T(k^*)$ は小さくなる。平均損傷が小さくなる場合、各異常波浪により引き起こされる事後故障確率は減少する。このため、予防保全レベル k は過剰な安全マージンの削減を目的とし、高い値へと動く。さらに、高い k を採るため、期待再生期間が長くなり、供用期間中に必要な保全活動回数の減少が発生し、結果として総期待保全費用が減少する。また、平均損傷が同じ場合においても、損傷分散が大きいほど、 $C_T(k^*)$ が大きくなる。これは、異常波浪の大きさにばらつきがあるほど、事後故障のリスクが増加するため、早期予防保全が要求されるためと考えられる。図 5-6 においても、図 5-5 と同様な理由で総期待保全費用 $C_T(k)$ 、および最適予防保全レベル k^* について説明ができる。

図 5-7 は、供用期間に対する総期待保全費用について示している。供用期間の違いに、最適予防保全レベル k^* は影響を受けていないことがわかる。

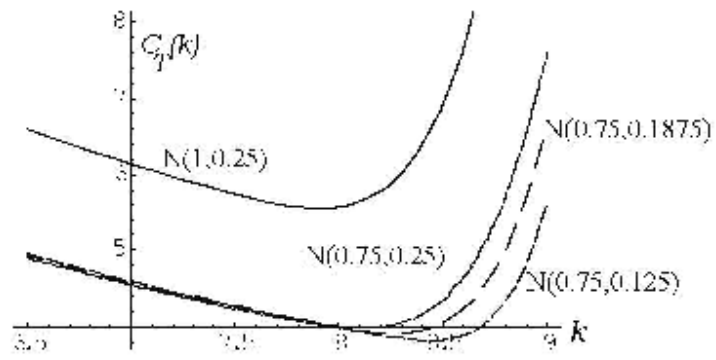


図 5-5 損傷の平均・分散に対する総期待保全費用（ケース 1）

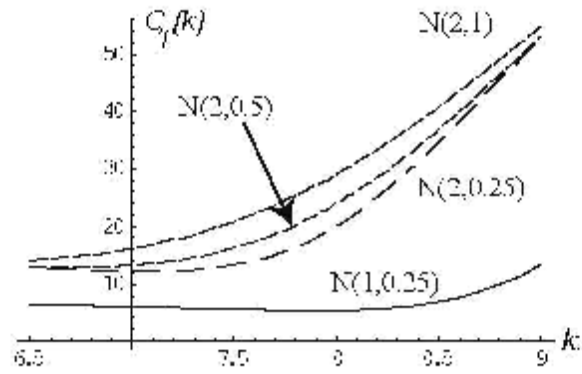


図 5-6 損傷の平均・分散に対する総期待保全費用（ケース 2）

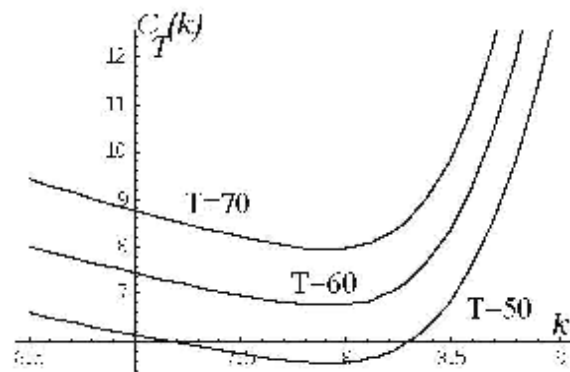


図 5-7 供用期間に対する総期待保全費用

5.3 耐力劣化モデルを用いた消波施設保全モデル

5.3.1 耐力劣化モデルの概要

施設破壊事象はある程度の外力が必要と考えられ、破壊事象に無影響な外力は検討の対象外とする。ここで、破壊事象に無影響な外力による負荷の大きさ、すなわち負荷の最大値を最小負荷量 L_m と定義する。また、施設破壊は負荷が施設耐力を超えた場合に発生するものとする。

次に、施設破壊をもたらす外力の負荷量を確率変数 Y_1 とし、確率分布関数 Φ_1 を用いて次式とする。

$$P\{Y_1 \leq x\} \equiv \Phi_1(x) \quad (5.34)$$

消波施設に破壊をもたらす L_m 以上の負荷をもたらす異常波浪襲来を、平均 λ_2 の定常ポアソン過程に従い発生すると仮定する。この L_m 以上の負荷をもたらす異常波浪を他の波浪と区別するために以後、第 1 種波浪と呼ぶ。時刻 t までに j 回の第 1 種波浪が襲来する確率は、次式として表される。

$$\Pr\{N(t) = j\} = F_{2j}(t) = \frac{(\lambda_2 t)^j}{j!} \exp(-\lambda_2 t) \quad (5.35)$$

破壊確率の推定には、構造物の耐力変化を表す過程と、外力発生の過程および負荷量を考慮する必要がある。そこで、負荷の発生に関してはポアソン過程に従うと仮定する。また、異常波浪のもつ外力の大きさは不確実なため、確率分布に従うとする。この 2 つの確率過程を同時時間軸上で結合し、破壊確率の推定を行う。各異常波浪によりもたらされる消波施設への負荷量は、独立かつ同一な確率分布 (i.i.d) に従うものとする。

消波施設は新設時、異常波浪等によりもたらされる外力に対し R_0 の耐力をもつ。消波施設の耐力は時間とともに衰え、消波施設の修復保全を実施しない限り回復することはない。耐力の衰えを非負かつ連続関数 $\{D(t), t \geq 0\}$ と仮定する。消波ブロック新設時から t 時間後の施設耐力は $R_0 - D(t)$ となる。消波施設耐力劣化、第 1 種波浪襲来に伴う消波施設破壊過程の概要図を図 5-8 に示す。

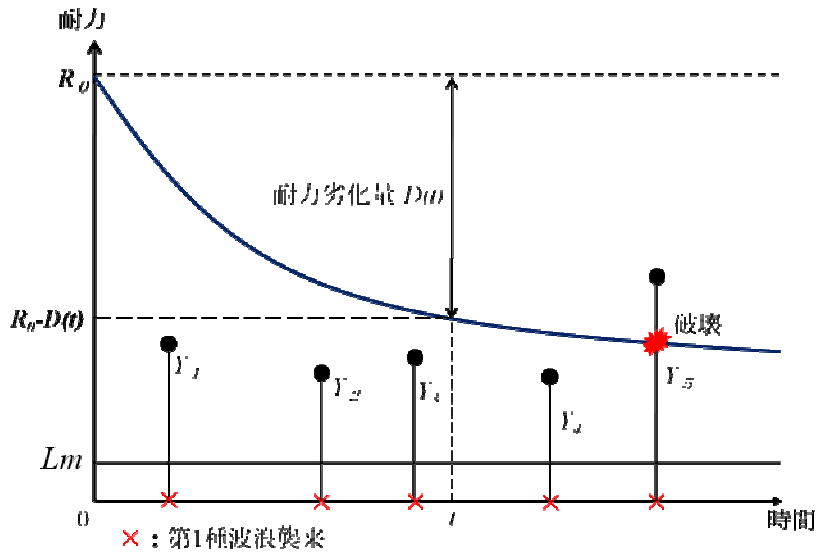


図 5-8 耐力劣化モデル概要図

5.3.2 一定水準修復モデル

消波施設が新設時から t 単位期間後までに破壊されない確率を求める．ここで，時刻 t までに j 回の第 1 種波浪（ポアソン到着）がある場合，時間間隔 $[0, t]$ 上に一様分布する j 個の事象で構成される順序統計量をもって第 1 種波浪到着時間列とみなすことができる．時刻 t までに j 回の第 1 種波浪襲来条件のもと，施設が破壊されない条件付確率は次式となる．

$$P_j(t) = \left\{ \frac{1}{t} \int_0^t \Phi_1(R_0 - Lm - D(y)) dy \right\}^j \quad (5.36)$$

ここで，確率分布関数 $\Phi_1(x)$ は，消波施設破壊をもたらす外力の負荷量を Y_1 とし， $P\{Y_1 \leq x\} \equiv \Phi_1(x)$ とする．全確率の法則により，時刻 t までに消波施設が破壊されない確率 $\bar{Z}_1(t)$ は次式として求まる⁷⁾．

$$\bar{Z}_1(t) = \sum_{j=0}^{\infty} P_j(t) F_{2j}(t) = \exp \left\{ -\lambda_2 \int_0^t \bar{\Phi}_1(R_0 - Lm - D(y)) dy \right\} \quad (5.37)$$

施設は，一定期間 TR ごとに大規模保全が実施され，新設時と同等の状態まで回復される．この保全は予防保全と呼ばれる保全形態となる．大規模保全完了時は再生点（renewal point）と呼ばれ，施設運用開始と同時に耐力劣化モデルと同じ過程のもと施設劣化が進行する．以後，一定期間 TR ごとの予防保全形態を予防保全年齢 TR と称

する。

次に、施設破壊が生じた場合、応急的に修復し、消波施設耐力を $R_1(R_0 > R_1 > Lm)$ へと回復させる。また、限界制御モデルと同様に、修復に必要な期間は供用期間長に比べ短いと考え、無視するものとする。大規模保全費用を c_p 、応急保全費用は保全状態に依存するものと仮定し、 $c_f(R_1)$ とする。施設の新設時、もしくは再生点から次の再生点までを再生期間と呼ぶ。最後に、消波施設の供用期間を T とする。本モデルに関する概要図を図 5-9 に示す。

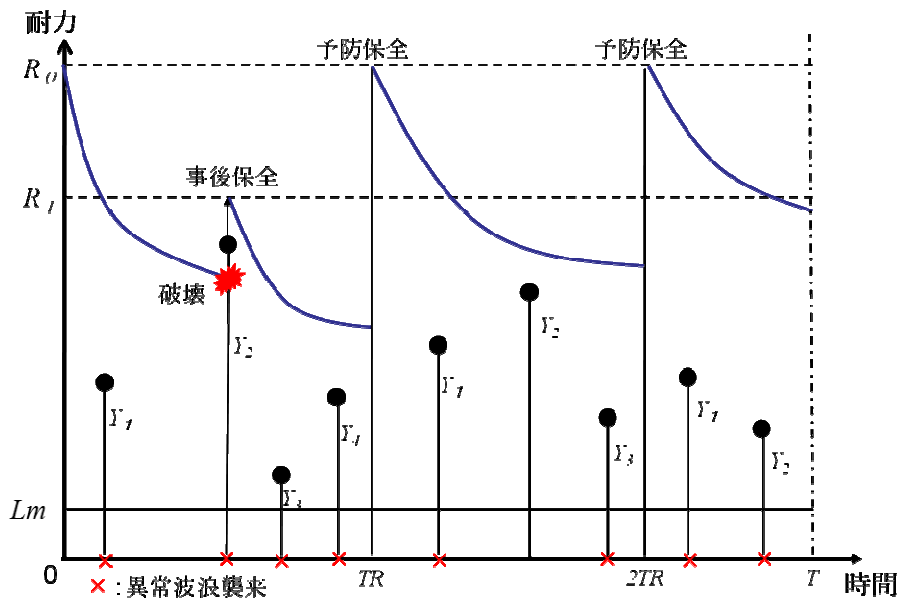


図 5-9 一定水準修復モデル概要図

供用期間 T 中に実施される施設の予防保全回数は、次式として求められる。

$$N_{TR}(T) = \left\lceil \frac{T}{TR} \right\rceil \quad (5.38)$$

ここで、上式の左辺は演算結果の整数部のみを出力する記号である。ただし、割り切れる場合は 1 を減算するものとする。また、1 再生期間における期待事後保全回数は次式として求められる。

$$\int_0^{TR} 1 + M(R_1, TR - t) dZ_1(t) \quad (5.39)$$

ここで、関数 $M(R_1, t)$ は時刻 t までの平均事後保全回数を表す再生関数であり、次式として求められる。

$$M(R_1, t) = \sum_{j=1}^{\infty} Z_{R_1}^{(j)}(t) \quad (5.40)$$

関数 $Z_{R_1}^{(j)}(x)$ は分布関数 $Z_{R_1}(x)$ の j 重畳み込みである。また関数 $Z_{R_1}(t)$ は、次式として与えられ、施設耐力が R_1 から減少した場合の施設破壊分布関数となる。

$$Z_{R_1}(t) = \exp\left\{-\lambda_2 \int_0^t \overline{\Phi}_1(R_1 - Lm - D(y)) dy\right\} \quad (5.41)$$

以上より、各再生期間における総期待保全費用は、次式として求められる。

$$A_I(R_1) = c_p + c_f(R_1) \int_0^{TR} 1 + M(R_1, TR - t) dZ_1(t) \quad (5.42)$$

次に、最後の再生点（予防保全時点）から供用期間までの期待保全費用は、次式として求められる。

$$B_I(R_1) = c_f(R_1) \int_0^{S(TR)} 1 + M(R_1, S(TR) - t) dZ_{R_1}(t) \quad (5.43)$$

ここで、関数 $S(T)$ は最後の大規模保全時から供用期間終了時までの期間長であり、次式で表される。

$$S(TR) = \begin{cases} T - N_{TR}(T)TR & (T/TR \text{ が整数}) \\ T - \{N_{TR}(T)TR + 1\}TR & (T/TR \text{ が整数でない}) \end{cases} \quad (5.44)$$

以上より、供用期間における総期待保全費用は、次式として求められる。

$$C_I(R_1) = N_{TR}(T)A_I(R_1) + B_I(R_1) \quad (5.45)$$

(1) 最適保全レベル R_1^* について

総期待保全費用を最小にする最適保全レベル R_1^* について考察する。本研究では、供用期間 T が予防保全年齢 TR で割り切れる場合における最適保全レベル R_1^* につ

いて考える．式 (5.45) は変数 R_1 の連続関数であることから， R_1^* が 0 以上 R_0 未満で存在するための必要条件は式 (5.45) を R_1 で偏微分し 0 と置くことにより，次式として求まる．

$$\frac{Z_1(TR) + \alpha(R_1, TR)}{\alpha'(R_1, TR)} + \frac{c_f(R_1)}{c_f'(R_1)} = 0 \quad (5.46)$$

$$\alpha(R_1, TR) = \int_0^{TR} M(R_1, TR-t) dZ_1(t) \quad (5.47)$$

また，記号'は R_1 に関する偏微分を意味し，任意の連続関数 $Q(R_1)$ に対し $Q'(R_1) = \partial Q(R_1) / \partial R_1$ である．また，十分条件については，次式としてまとめられる．式 (5.46) 左を $\beta_1(R_1)$ とおいた場合，

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} \beta_1(R_1) < 0 \quad \text{かつ} \quad \lim_{R_1 \rightarrow R_0} \beta_1(R_1) > 0 \quad (5.48)$$

(2) 数値実験

ここでは，最適保全レベル R_1^* ，最適予防保全年齢 TR^* を数値的に導出する．本数値実験における施設破壊に至る基本設定として，オランダ北西部 Den Helder の海岸防波堤のデータ Van Noortwijk ら (2007) ⁷⁾ を使用する．異常波浪に対する施設耐力は，物理面と性能面の 2 つの意味合いを持つ．物理的耐力はブロックの移動や天端高の沈下等に代表され，性能的耐力は反射率や越波量等の防波および消波性能を意味する．本数値実験では，施設耐力変化を異常波浪による堤高変化に伴う性能変化と捉え，防波堤高をもって施設耐力と仮定する．ここで，初期堤高 $R_0 = 4.61\text{m}$ ， t 年後の堤高（耐力）の低下を $0.07tm$ とした．各パラメータ値は断りが無い限り，次のように設定する．施設破壊に無影響な負荷の最大値である最小負荷量を $Lm = 2.19\text{m}$ とする．パレート分布の尺度パラメータ $\beta = 0.3245$ ，および形状パラメータ $\xi = 0.05465$ とする．従来，50 年確率波を前提とした施設劣化過程による評価が一般的であった．しかし，本モデルにおける施設破壊は 1 機会により生じる外力によってのみ生じるのではなく，累積的な施設疲労に伴う施設耐力の低下を考慮し，中規模な外力であっても施設状態によっては施設破壊が生じうる．したがって，ポアソン過程の外力到着パラメータ $\lambda_2 = 0.5$ ，つまり期待的に 2 年に 1 度程度，第 1 種波浪が襲来すると仮定する．また，供用期間 T を 100 年とする．確率変数 Y_1 の分布 Φ_1 は，以下の一般化パレート分布 ⁸⁾ として与え， $P\{Y_1 \leq x\} \equiv \Phi_1(x)$ と記す．

$$P\{Y_1 > x\} \equiv \begin{cases} \left(1 - \frac{\xi}{\beta} x\right)^{-1/\xi} I_{(0,\infty)}(x) & (\xi \neq 0) \\ \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) I_{(0,\infty)}(x) & (\xi = 0) \end{cases} \quad (5.49)$$

一定水準修復モデルにおける事後保全費用は、修復レベル R_1 に依存する項、緊急対応および社会的損失を表すペナルティ項 c_d により構成する。予防保全費用 c_p を単位費用 ($c_p=1$) とし、事後保全費用を次式として定義する。

$$c_f(R_1) = c_p \frac{R_1}{R_0} + c_d \quad (5.50)$$

図 5-10、図 5-11 は修復レベルに対する総期待保全費用を、3 種類の予防保全年齢期間 $T=10, 13, 17$ (単位：年) のもと、それぞれ計算している。事後保全時のペナルティ費用を以下に設定する。

特急工事費用などの直接経費については、標準工事費と考える予防保全費用の 2 倍、社会基盤機能停止に伴う損失を先の直接費用と同額の場合 (ケース 1) と、相対的比較対象としてケース 1 の 5 倍の損失が生じる (ケース 2) とする。図 5-10 をケース 1、図 5-11 をケース 2 とする。総期待保全費用を最小とする最適補修レベル R_1^* には▼印を図中に記す。

大まかな傾向として、予防保全年齢の延長は最適補修レベル R_1^* の上昇を招くことが分かる。これは、予防保全年齢の延長に伴う施設破壊リスクの増大を避けるため、応急修復レベルを引き上げることにより施設破壊リスクの低減を図っているものと考えられる。また、図 5-10 では予防保全年齢が短いほど総期待保全費用が高くなっているが、図 5-11 では一部逆転現象が生じている。これは、施設のおかれる環境ごとに適切な保全計画を立てる必要があることを示唆していると考えられる。

図 5-12 は、予防保全年齢に対する総期待保全費用について、事後保全時のペナルティ $c_d=12$ (先のケース 2 に相当) における修復レベルの違いごとにまとめた結果で、いわば最適予防保全年齢を記した図である。図 5-12 では、事後保全レベル R_1 が初期耐力値 R_0 に近い場合、ほとんど差が出ない様子が分かる。ケース 2 の場合、図 5-11 および図 5-12 より、最適予防保全年齢 T^* は 13 年、最適補修レベル R_1^* は 4.35m であることが分かる。本ケースの場合、修復レベルは総期待保全費用に対し大きな影響を与えていないが、予防保全年齢はそれに比べ大きな影響力を持っている。すなわち、施設管理者は両保全方針 R_1^* 、 T^* を決定後、13 年ごとに予防保全実施を厳守すべきであると考えられる。

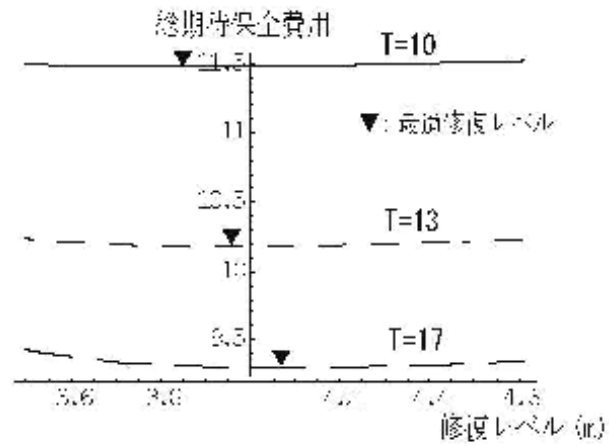


図 5-10 修復レベルに対する総期待保全費用 (ケース 1)

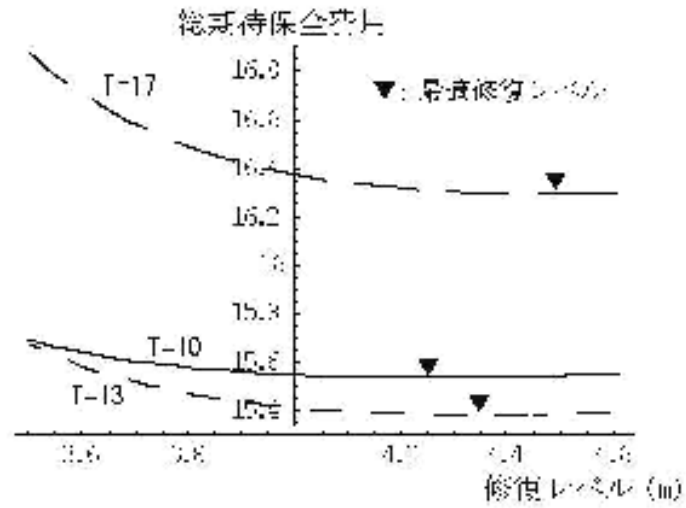


図 5-11 修復レベルに対する総期待保全費用 (ケース 2)

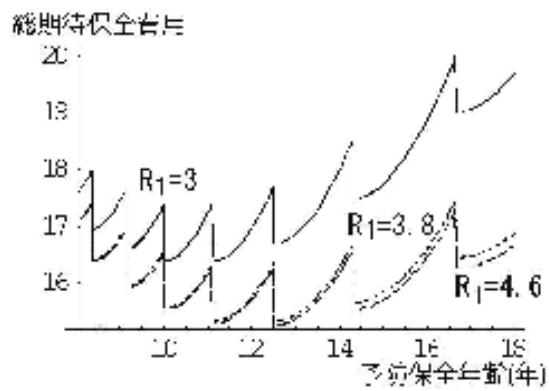


図 5-12 予防保全年齢に対する総期待保全費用

5.3.3 現状回復モデル

施設は、一定期間 TR ごとに大規模保全を受け、新設時と同等な状態（初期耐力レベル R_0 ）まで回復する。ただし、施設破壊が発生した場合、応急的な修復により施設破壊直前の状況に修復するモデルである。破壊直前と同等な状態に戻す修理形態は小修理と呼ばれ、信頼性工学における保全問題では広く知られ、理論考察は Nakagawa・Kowada（1983）⁹⁾により行われている。一定水準修復モデルにおいては、供用期間を考慮した総期待保全費用を導出し、最小化問題として議論した。現状回復モデルでは、供用期間が十分に長く事前設定が適切ではない場合を想定し、無限計画期間における単位期間当たりの総期待保全費用を評価規範とする。本モデルに関する概要図を図 5-13 に示す。

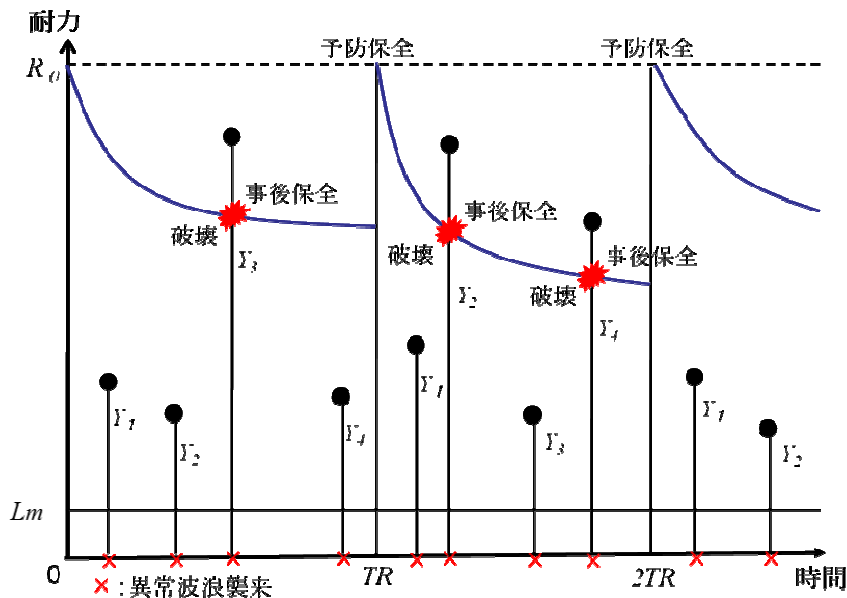


図 5-13 現状回復モデル概要図

はじめに、事後保全発生回数に関する確率を求める。関数 $N_2(t)$ は、時刻 t までに施設破壊が何回発生するかを数え上げる計数過程である。本モデルでは、事後保全後施設破壊が発生する直前と同状態まで保全を実施することから、供用開始、もしくは予防保全実施直後から t 単位期間経過までに j 回事後保全が実施される確率は、平均値関数 $\Lambda(t)$ を持つ非定常ポアソン過程に従うと考えられ、次式として与えられる。

$$\Pr\{N_2(t) = j\} = F_{3j}(t) = \frac{\{\Lambda(t)\}^j}{j!} e^{-\Lambda(t)} \quad (5.51)$$

$$A(t) = \lambda_2 \int_0^t \overline{\Phi}_1(R_0 - Lm - D(y)) dy \quad (5.52)$$

したがって、1 再生区間 TR 中に発生する期待事後保全回数は、次式として求めることができる。

$$E[N_2(TR)] = \sum_{j=0}^{\infty} j \Pr\{N_2(TR) = j\} = \Lambda(TR) \quad (5.53)$$

修復にかかわる費用構造としては、1 回の予防保全に必要な大規模補修費用を c_p とする。また、1 回の事後保全費用を c_m とし、保全レベルに依存しないとする。以上より、各再生期間における総期待保全費用は次式として求められる。

$$A_{II}(TR) = c_p + c_m \Lambda(TR) \quad (5.54)$$

以上より、無限計画期間における単位期間当たりの総期待保全費用は、次式として求めることができる。

$$C_{II}(TR) = \frac{A_{II}(TR)}{TR} \quad (5.55)$$

(1) 最適予防保全年齢 TR^* について

単位期間当たりの総期待保全費用 $C_{II}(TR)$ を最小にする最適予防保全年齢 TR^* について考察する。最適予防保全年齢 TR^* 存在の必要条件として、次式を与えることができる。

$$TR \lambda_A(TR) - \Lambda(TR) = \frac{c_p}{c_m} \quad (5.56)$$

$$\lambda_A(TR) = \frac{\partial \Lambda(TR)}{\partial TR} = \lambda_2 \overline{\Phi}_1(R_0 - Lm - D(TR)) \quad (5.57)$$

上式 (5.56) の解の存在、およびそのユニーク性について考える。式 (5.56) の左辺を $\xi(TR)$ とおく。このとき、明らかに次式が成立する。

$$\lim_{TR \rightarrow 0} \xi(TR) < \frac{c_p}{c_m} \quad (5.58)$$

また,

$$\lim_{TR \rightarrow \infty} \xi(\infty) > \frac{c_p}{c_m} \quad (5.59)$$

が成立すれば, 有限な解 TR^* が存在する. さらに, 式 (5.56) を満足する最適予防保全年齢 TR^* を式 (5.55) に代入することにより, 最小化された単位期間当たりの総期待保全費用 $C_{II}(TR^*)$ を次式として与えることができる.

$$C_{II}(TR^*) = c_m \lambda_2 (TR^*) \quad (5.60)$$

(2) 数値実験

ここでは, 最適予防保全年齢 TR^* を数値的に導出する. 本数値実験における施設破壊に至る基本設定として, 5.3.2 一定水準修復モデルの (2) 数値実験と同じオランダ北西部 Den Helder の海岸防波堤のデータ設定とする. ただし, t 年後の堤高 (耐力) の低下のみを $0.007m$ とした. 予防保全費用 c_p を単位費用, つまり $c_p = 1$ とする. また, 事後保全費用 c_m を緊急対応および社会的損失を表すペナルティを考慮し, 単位保全費用に対する重みを用いて $c_m = \delta c_p$ とする. 本数値実験においては $\delta = 12$ とし, 前節の数値実験例におけるケース 2 の費用設定とほぼ同じ状況とする.

図 5-14 は, 第 1 種波浪襲来頻度 $\lambda_2 = 1, 2, 3$ に対する単位期間当たりの総期待保全費用を表している. 第 1 種波浪襲来間隔の減少 (λ_2 の増加) に対し, 最適予防保全年齢 TR^* は短くなる. これは, 施設耐力減少に伴う施設破壊確率の増加がもたらす現象である. 最適予防保全年齢 TR^* が高年齢になっているのは, t 年後の施設耐力劣化が小さい値であることが, 1 つの原因であると考えられる.

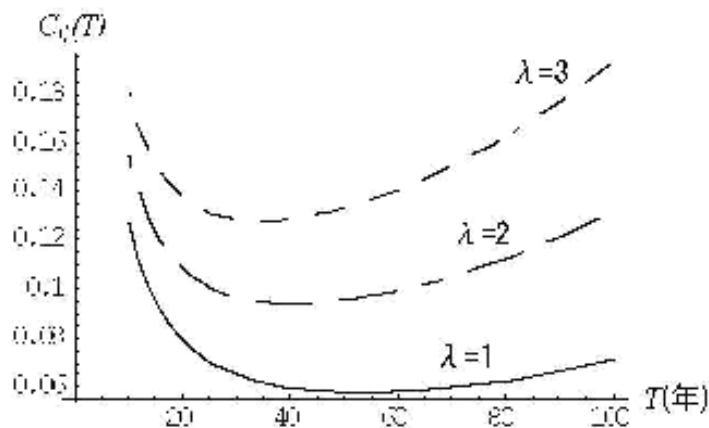


図 5-14 総期待保全費用 $C_{II}(T)$

5.3.4 現状回復回数制限モデル

5.3.3 現状回復モデルにおいて、予防保全実施までの事後保全回数は無制限であった。しかし、頻繁な事後保全の実施は総保全費用の増加を招く恐れがある。そこで、1 再生期間における事後保全回数に上限 v を設定し、上限数に達した場合、新設時と同等な施設耐力まで保全するモデルを提案する。これにより、本モデルでは事後保全回数上限 v に達する場合、もしくは上限到達以前に予防保全年齢 TR のいずれか早い事象発生時点が再生点となる。本モデルに関する概要図を図 5-15 に示す。

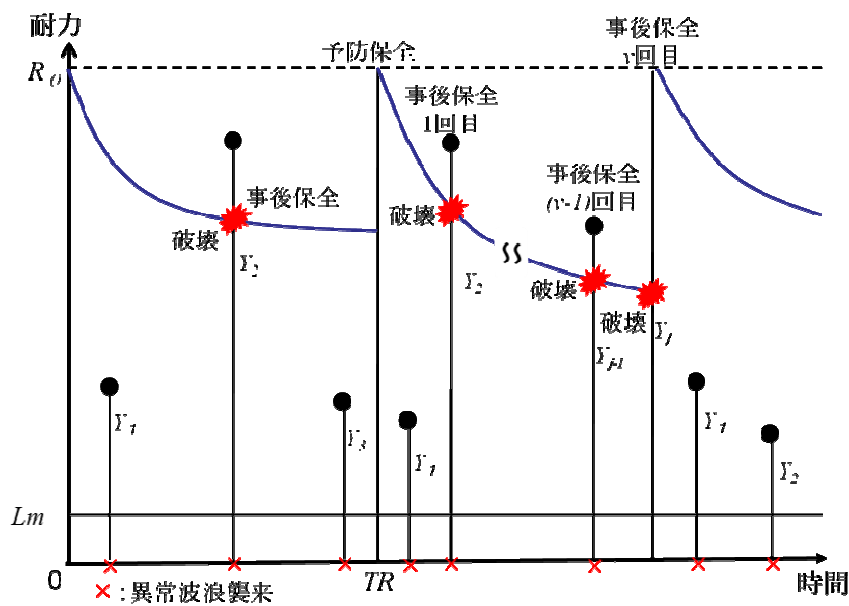


図 5-15 現状回復回数制限モデル概要図

はじめに、1 再生期間における期待事後保全回数 $W(v, TR)$ は、次式として求められる。

$$W(v, TR) = \sum_{j=0}^{v-1} jF_{2j}(TR) + v \sum_{j=v}^{\infty} F_j(TR) = v - 1 - \sum_{j=0}^{v-1} (v-1-j)F_{2j}(TR) \quad (5.61)$$

次に、期待 1 再生期間長は、次式として求められる。

$$TRP\{S_v > TR\} + \int_0^{TR} t d\Omega_v(t) = \sum_{j=0}^{v-1} \int_0^{TR} F_{2j}(t) dt \quad (5.62)$$

ここで、確率変数 $O_j (j=1, 2, \dots)$ は j 回目の事後保全年齢を表し、その分布関数が $\Omega_j()$

である。すなわち、

$$P\{O_j \leq t\} = \Omega_j(t) = \sum_{i=j}^{\infty} F_i(t) \quad (5.63)$$

以上より、無限計画期間における単位期間当たりの総期待保全費用は、次式として求められる。

$$C(v, TR) = \frac{c_p + c_m W(v, TR)}{\sum_{j=0}^{v-1} \int_0^{TR} F_{2j}(t) dt} \quad (5.64)$$

(1) 最適事後保全上限回数 v^* について

式 (5.64) を最小とする最適事後保全回数の上限 v^* について考察する。有限な予防保全時間 $TR > TR^*$ に対し、有限な最適上限回数 v^* が存在する場合、次式を満たす。

$$U(v^*, TR) \geq \frac{c_p}{c_m} \quad \text{and} \quad C(v-1^*, TR) < \frac{c_p}{c_m} \quad (5.65)$$

ここで、関数 $U(v, TR)$ は次式として与えられる。

$$U(v, TR) = \frac{\sum_{j=v+1}^{\infty} F_{2j}(TR) \sum_{i=0}^{v-1} \int_0^{TR} F_i(t) dt}{\int_0^{TR} F_{2v}(t) dt} - \left\{ v - \sum_{j=0}^{v-1} (v-j) F_{2j}(TR) \right\} \quad (5.66)$$

また、 $TR < TR^*$ に対し、最適上限回数は $v^* \rightarrow \infty$ である。つまり、時間による予防保全が費用最小化の意味において最適である。さらに、 $TR^* = \infty$ の場合、最適上限回数は $v^* = \infty$ である。

5.4 結語

本章では，海岸保全施設である消波施設を対象に，ライフサイクルマネジメント（LCM）の中で定義されている適時，適切な保全対策の確立を目的とした．消波施設の保全計画策定には，施設の物理・性能面の劣化過程を把握し，施設破壊への信頼性評価が重要であると考え，施設破壊モデルとして，衝撃型累積損傷モデルと耐力劣化モデルの2種類を用いて，施設保全モデルの構築を行った．それぞれ，衝撃型累積損傷モデルにおいて2種類の施設保全モデル，耐力劣化モデルにおいて3種類の施設保全モデルを提案した．また，衝撃型累積損傷モデルにおいては，予防保全を実施する累積損傷量 k ，間隔 TR を制御変数として，耐力劣化モデルにおいては，予防保全を実施する間隔 TR ，施設耐力 R_1 ，予防保全回数上限 v を制御変数とし，数値実験を行った．本章で得られた結果を，以下に要約する．

1. 消波施設劣化においては，具体的な劣化スケールを採用せず，損傷量という概念による一般化を行い，用途に応じ劣化進度を損傷量を変数とした関数として再定義できる柔軟性を持たせた劣化モデルとして提案を行った．
2. 衝撃型累積損傷モデルを用いて提案した施設保全モデルにおいて数値実験を行った結果，予防保全レベルは総期待保全費用に大きな影響を与え，最適予防保全レベル k^* は，供用期間長や異常波浪襲来頻度よりも各異常波浪により被る損傷程度に大きな影響を受ける様子が示された．
3. また，頻繁に異常波浪襲来を受ける場合にも，適切な予防保全を実施することにより，理論上，期待保全費用の大幅な削減が可能であることも判明した．
4. 耐力劣化モデルを用いて提案した施設保全モデルにおいて数値実験を行った結果，適切な保全時期の設定が総期待保全費用削減に有効な手段となりえることを示した．
5. また，施設の暴露環境が最適な保全時期に大きな影響を与えることも分かった．

<参考文献>

- 1) 農林水産省・国土交通省：ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～，2008.
- 2) 小和田正：確率過程とその応用，実教出版，183p., 1991.
- 3) Cox, D. R. : Renewal Theory, Methuen, London, 142p., 1970.
- 4) Tijms, H. C. : A First Course in Stochastic Models, England, John Wiley and Sons, 478p., 2003.
- 5) Christer, A. H. : Refined Asymptotic Costs for Renewal Reward Processes, J. Opl. Res. Soc. Vol.29, pp.577-583, 1978.
- 6) Ross, S. M. : Applied Probability Models with Optimization Applications, San Francisco, Holden-Day, 198p., 1970.
- 7) Van Noortwijk, J. M. , Van der Weide, J. A. M. , Kallen, M. J. , and Pandey, M. D. : Gamma Processes and Peaks-Over-Threshold Distributions for Time-Dependent Reliability, Reliab. Eng. Sys. Safety. Vol.92, pp.1651-1658, 2007.
- 8) Pickands III, J. : Statistical Inference Using Extreme Order Statistic, Annals of Stat Vol.3, pp.119-131, 1975.
- 9) Nakagawa, T and Kowada, M. : Analysis of a system with minimal repair and its application replacement policy, EJOR, Vol.12, pp.176-182, 1983.

第6章 ライフサイクルコストを考慮した防波堤消波材 の最適設計法

6.1 緒言

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、その観点からも社会基盤施設に関する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積算する必要がある。最近では、防波堤などの海岸・港湾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⁾、吉岡・長尾²⁾、高山ら^{3),4)}）。このうち、高山ら^{3),4)}は沿岸構造物の消波材および被覆材（消波ブロック、被覆石、被覆ブロック）を対象とし、LCCを最小化する最適設計（最適な消波・被覆材の選定）手法を提案している。

本章では、この高山らの手法を用いて、消波ブロック被覆堤を対象として消波材の最適設計を行う。具体的な消波材には、消波ブロックのシーロックを取り上げている。また、外力の波浪条件の影響についても検討するため、波浪特性が異なる日本沿岸の4地点を対象として検討を行うこととした。この種の従来の研究においては、消波材の被災をもたらす高波の発生回数を年1回に限定しており、その発生回数が最適設計に及ぼす影響は明らかにされていないのが現状である。そこで、本章では上述の消波ブロックを対象として、その最適設計における高波発生回数の影響についても検討を行うことにした。

6.2 最適設計法の概要

6.2.1 最適設計法の考え方

海岸・港湾構造物の消波材について、LCCを最小化する最適設計法の概要を示す。まず、LCCとして計上する費用には、初期建設費と補修費、維持管理費、撤去費等、さらに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。ここでは、防波堤の

消波材を対象にしているため、LCCとして計上する費用には初期建設費と被災に伴う補修費のみを計上することにする。その計上費用は、次式で与えられる。

$$LCC = C_1 + \overline{C}_R \quad (6.1)$$

ここに、 C_1 ：初期建設費、 \overline{C}_R ：期待補修費（設計供用期間の補修費の平均値）である。

つぎに、最適設計法概念について、図 6-1 を用いて説明する。図の横軸は消波材の種別（種類と質量）であり、縦軸は消波構造物の各種費用（初期建設費、補修費、総費用）である。消波材の質量を大きくするほど被災を受けにくくなり補修費は減少するが、一方で消波材の単価が高くなるため初期建設費は増加することになる。最適設計法とは、消波材の全種別の中で LCC が最小になる消波材種別（図中の○に対応する種別）を選定するものである。

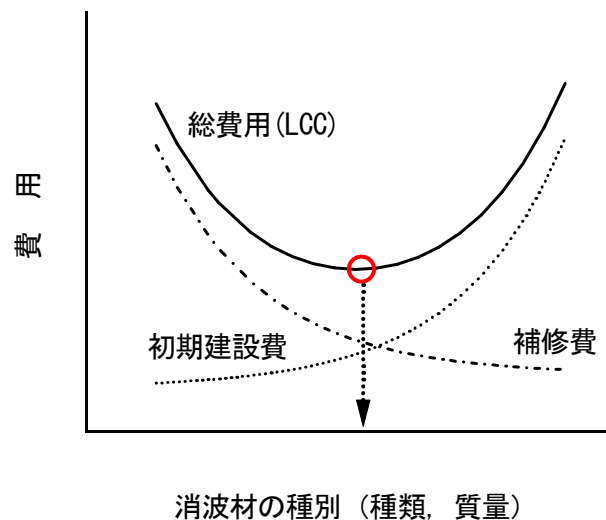


図 6-1 最適設計法概念図

6.2.2 費用計算の概要

初期建設費と補修費については、一般に積算する工事価格として、図 6-2（（社）日本港湾協会⁵⁾）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当たり直接消費される材料費、直接経費および労務費であり、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共通仮設費および現場管理費である。

直接工事費と間接工事費に関して、供用期間中の総補修費を考えると、第 5 章において明らかにしたように補修を行うタイミングが重要となる。軽微な被災で幾度も

補修を繰り返すのか、破壊限界の直前になって補修するのかによって、補修費は当然のごとく大きく変わってくる。この時、直接工事費のみを補修費として計上すると、補修規模（被災した被覆材の数）にのみ依存することから、補修費としては補修回数に関係しなくなってしまうという欠点をもっている。そこで、補修工事費に間接工事費を含めることによって、補修回数によって異なる工事費が計上されることになる。具体的には、小規模な工事（600万円以下等）では工事費全体における間接工事費の比率が高く、大規模な工事（20億円以上等）では間接工事費の比率が低くなっており、小規模な工事を何回も繰り返す場合よりも、大規模な工事を数少なく行う方が経済的に有利になる場合が存在することになる。したがって、ここでは間接工事費を含めた計算を採用している。

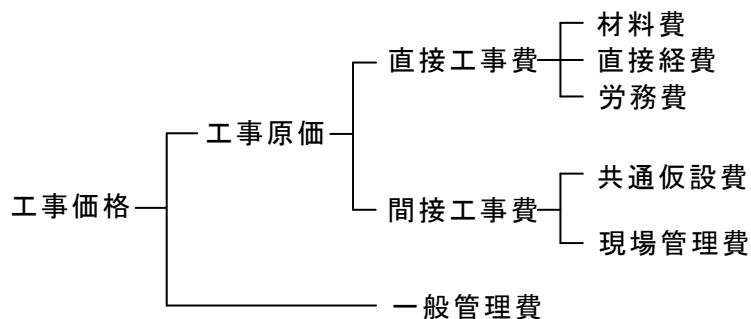


図 6-2 工事価格の構成

6.2.3 最適設計法のフロー

本章においては、LCCのうち期待補修費をモンテカルロ法によって求める。モンテカルロ法とは、確率論的な現象のシミュレーションを行うものであり、計算機で一様乱数を用いて不確定な現象を繰り返し再現試行し、その結果から現象の特性値や確率分布を推定する手法である。ここでは、モンテカルロ法を用いて供用期間中の期待補修費および補修費の標準偏差を求める。図 6-3 に最適設計のフローチャートを示す。また、図 6-3 中の期待補修費の算出に関する詳細なフローチャートを図 6-4 に示す。以下に、各手順の概要を述べる。

1. 消波材の設定

消波材の代表径や密度、空隙率等の消波材の諸元を設定し、対象となる消波材の種類を設定する。

2. 初期建設費の算出

抽出した消波材の代表径に対して単価を設定する。代表径からそれぞれの型に応じた天端幅を求め、天端幅と水深から初期断面を求める。初期断面と空隙率から単位幅における消波材の数量（単位幅あたりの個数）を算出する。算出した数量に消波材の単価を乗じて初期建設費の直接工事費を算出する。

3. 期待補修費の算出

あらかじめ供用期間と補修判定基準を設定する。また、消波材に被害を与えるであろう高波が年1回発生すると仮定した場合と、後述するように年間発生回数を考慮した場合とに分けて、以下の手順で期待補修費を算出する。

- a) 対象地点ごとに設定した沖波波高（有義波高）の発生確率分布と一様乱数を用いて、1回の高波における沖波波高を抽出する。周期（有義波周期）は、地点ごとに設定した沖波波形勾配により求める。その際、沖波波高と周期の推定誤差を考慮する。

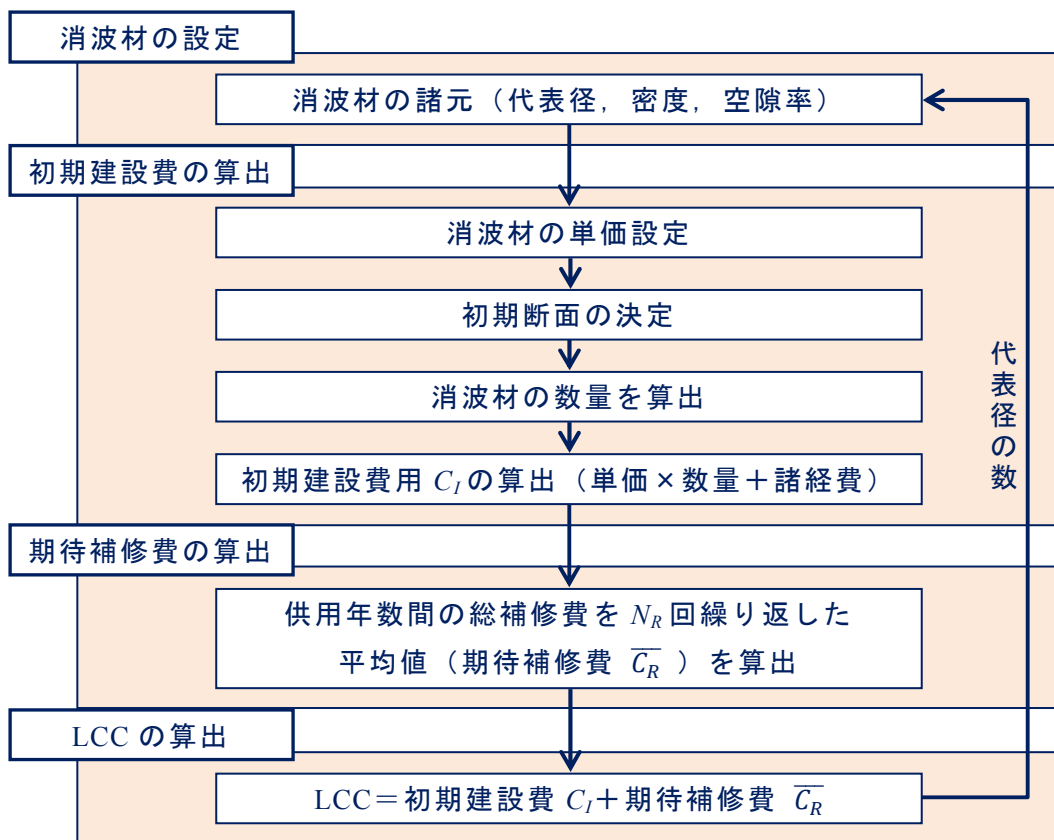


図 6-3 最適設計のフロー

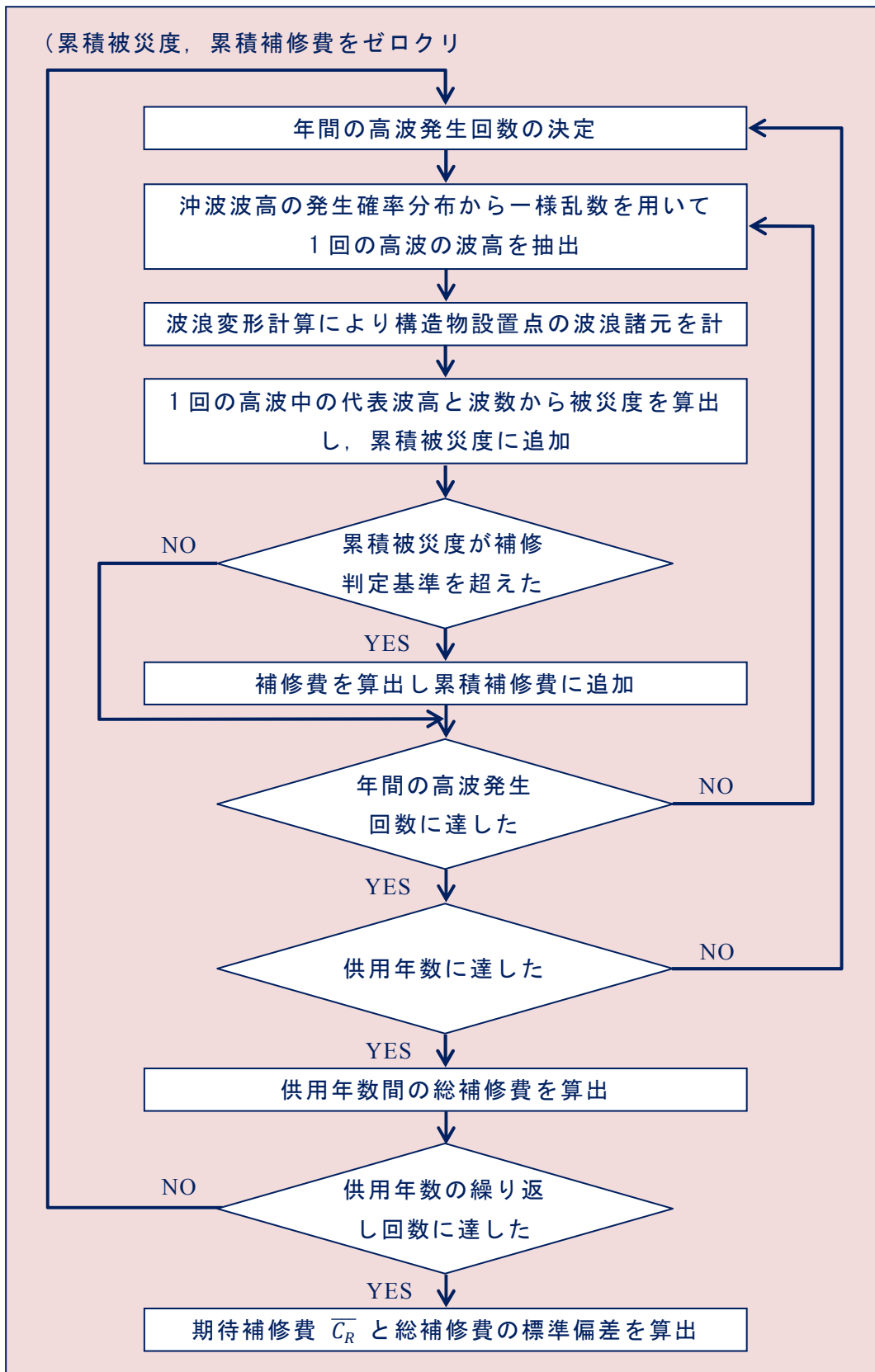


図 6-4 期待補修費算出の詳細フロー

- b) 抽出した沖波波高に対して波浪変形計算を行い、構造物設置位置での波浪諸元を算出する。波浪変形計算の算定誤差を考慮して、波浪諸元を決定する。
- c) 1回の高波の作用時間（ここでは2時間とした）における有義波高と作用波数から、後述する被災度算定式によって被災度を求める。このとき、当該年までの相当波数を算出した後、相当作用波数と当該年の作用波数を足し合わせ、被災度算定式に代入して累積被災度とする。
- d) 累積被災度があらかじめ設定した補修判定基準を上回る場合は補修を行い、そのときの補修費を算出して累積補修費に加算する。
- e) a)～d)を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。
- f) 期待値の変動が小さくなるように a)～e)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。合わせて総補修費の標準偏差も求める。

4. LCCの算定

2, 3で算出した初期建設費と期待補修費を足し合わせて、LCCを算出する。

5. 最適消波材の決定

1～4を選定した消波材の種別（各トン型）ごとに行い、その中でLCCが最小となった種別が対象地点での最適な消波材と判定される。

6.3 消波ブロックを対象としたLCCの算定

ここでは、6.2.3に述べた最適設計のフローにしたがって、消波ブロックを対象としたLCC算定の詳細を示す。LCC算定では、沖波の波浪特性が異なると考えられる茨城（鹿島港）、大阪（大阪港）、鳥取（鳥取港）および高知（高知港）を対象地点とする。

6.3.1 対象とする消波ブロック

本章で対象とする消波ブロックは、図6-5に示すシーロックである。シーロックの特徴は、四本の脚と胴体部から構成されたブロックで、据付後の相互の絡み合いが良く、波や流れなどの外力に対して卓越した安定性を発揮する。また、構築された消波工は、表面の粗度と適当な空隙とにより、あらゆる波に対して優れた消波機能を持っている。シーロックは代表径0.76～3.5m（トン型1～100t）の19種類であり、表6-1に各トン型の実質量と代表径を示す。初期建設費および補修費の直接工事費の計算に用いるシーロック単価は、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ている。ただし、据付費は水上と水中で異なるため、両者の平均をとって加算す

る．一例として，鳥取における単価を表 6-1 に併記している．

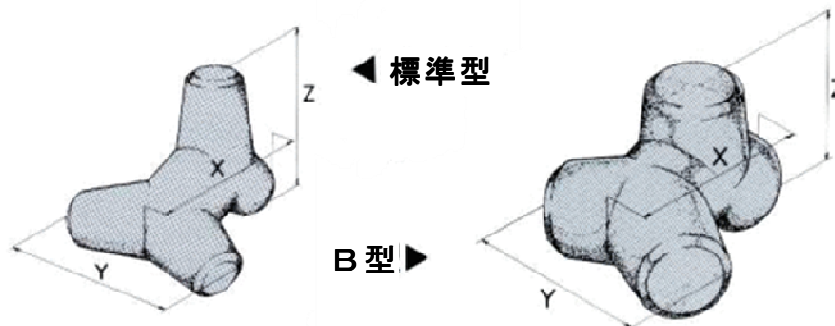


図 6-5 シーロックの形状（左が 1t～30t，右が 40t～100t）

表 6-1 シーロックの種類

トン型(t)	実質量(t)	代表径(m)	単価(千円)(鳥取)
1	0.99	0.76	26.80
2	1.99	0.95	35.70
3	2.98	1.09	43.85
4	3.97	1.20	51.45
5	4.97	1.29	68.55
6	5.99	1.38	75.35
8	7.96	1.51	97.65
10	9.96	1.63	112.45
12	11.99	1.73	123.35
15	14.97	1.87	152.40
20	20.04	2.06	186.20
25	24.96	2.21	221.45
30	30.05	2.36	251.95
40	39.97	2.59	331.40
50	49.77	2.79	388.40
60	59.69	2.96	474.95
70	70.06	3.12	566.80
80	79.99	3.26	632.65
100	99.72	3.51	744.85

6.3.2 防波堤に関する諸条件と初期建設費の算出

LCC 算定における防波堤に関わる条件としては，防波堤設置水深（消波工法先水深）を 10.0m，天端高は大阪を除く 3 地点で 5.5m，大阪で 2.5m とした．消波工に関する条件は，天端幅をブロック 2 個並び，天端高は防波堤と同一，法面勾配を 1:1.5 とし

た。ブロックの積み方は、2層整積と乱積（全断面被覆）の2種類とする。また、沖合から防波堤設置位置までの海底は1/30の一様勾配としている。

つぎに、消波ブロックの各トン型に対する断面積内のブロック個数は、以下の式により算出される。

$$n = \frac{A \times (1 - \alpha)}{v} \quad (6.2)$$

ここに、 A ：消波工の断面積， α ：空隙率， v ：消波ブロックの体積である。なお、シーロックの空隙率は、積み方に関係なく0.5一定である。初期建設費は、ブロック個数とブロック単価を掛け合わせたものに、間接工事費を加えることにより求められる。

6.3.3 波浪諸元の決定

1回の高波における波浪諸元のうち、沖波の有義波高については、対象地点ごとに設定した波高の極値分布関数を用いて一様乱数に対応する波高の値を与える。本章では、大阪を除く各地点での極値分布関数として合田⁶⁾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、式(6.3)、(6.4)で尺度母数 A と位置母数 B を与える。

$$A = H_{50} \frac{1 - 1/\gamma_{50}}{\gamma_{50} - \gamma_{10}} \quad (6.3)$$

$$B = H_{50} \left[1 - \frac{1 - 1/\gamma_{50}}{1 - \gamma_{10}/\gamma_{50}} \right] \quad (6.4)$$

ここに、 γ_{10} 、 γ_{50} ：再現期間10年、50年に対する基準化変量で、極値分布関数がWeibull分布の場合、再現期間 R 年は次式で与えられる。

$$\gamma_R = [\ln(\lambda' R)]^{1/k} \quad (6.5)$$

ここに、 λ' ：高波の平均発生率， k ：極値分布関数の形状母数である。表6-2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 、 B および λ' を示す。

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、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高波一覧表のデータを用いて極値分布関数の推定⁶⁾を行った。ただし、大阪港での波浪観測データがないため、代わりに神戸港のデータを用いた。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NOWPHAS1991～2010⁷⁾を使用した。神戸港での高波データ（波高の閾値1.0m、データ数247、有効統計年数（後述）16.9年）に対して最小2乗法による極値分布関数

の推定⁶⁾を行い、最適合の分布関数とその母数、 H_{50} および γ_{50} を求めた。表 6-2 は、それらの結果も合わせて示した。ただし、 λ' の値については 6.4 で述べる。

表 6-2 極値分布関数に関する条件

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

周期については、小舟ら⁸⁾や全国港湾海洋波浪観測資料 25 か年統計資料⁹⁾を参考に各地点の沖波波形勾配を設定し、次式により与える。

$$T = \sqrt{H / (1.56 H_0 / L_0)} \quad (6.6)$$

ここに、 T ：(有義波) 周期， H ：抽出した沖波の(有義)波高， H_0/L_0 ：沖波波形勾配である。沖波波形勾配は、茨城：0.02，大阪：0.04，鳥取：0.03，高知：0.02 とした。

上記の方法で抽出した沖波の波高と周期については、それらの推定誤差を考慮することとし、高橋ら¹⁰⁾にならって波高と周期にそれらの 10% の標準偏差をもつ正規乱数を付加する。また、上述のように 1 回の高波の作用時間を 2 時間 (3600 秒) とし、これを周期で除して作用波数を与える。

6.3.4 潮位変動の考慮

防波堤設置水深には、潮位変動を考慮するため、高波の発生ごとに異なる潮位を付加する。本章では、河合ら¹¹⁾にならって潮位の出現確率分布を三角形分布とし、表 6-3 に示した各地点での朔望平均満潮位 (H.W.L.)，朔望平均干潮位 (L.W.L.) およびそれらの平均値を用いる。すなわち、H.W.L. と L.W.L. の出現確率が最小で、平均値の確率が最大となる三角形分布に従う乱数を一様乱数から発生させて潮位を与える。

6.3.5 波浪変形計算

6.3.3 に述べた方法により決定した沖波諸元にもとづき、波浪変形計算を行って防波堤設置位置での波浪諸元を求める。波浪変形計算には、合田⁶⁾が提案した以下の略算式を用いる。

表 6-3 潮位に関する条件

地点	H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	平均値 (m)
茨城(鹿島港)	1.50	0.00	0.75
大阪(大阪港)	1.74	0.00	0.87
鳥取(鳥取港)	0.50	0.00	0.25
高知(高知港)	1.90	0.10	1.00

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_S H_0 & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0 + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0, K_S H_0\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (6.7)$$

$$\beta_0 = 0.028(H_0/L_0)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta] \quad (6.8)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta] \quad (6.9)$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H_0/L_0)^{-0.29} \times \exp[2.4 \tan \theta]\} \quad (6.10)$$

ここに、 $H_{1/3}$ ：波浪変形後の有義波高、 h ：防波堤設置水深、 $\tan\theta$ ：海底勾配、 β_0 、 β_1 、 β_{\max} は略算係数である。なお、算出された $H_{1/3}$ には波浪変形の推定誤差を考慮するものとし、高橋ら¹⁰⁾にならって $H_{1/3}$ の・13%の偏りと 9%の標準偏差をもつ正規乱数を付加する。

6.3.6 消波ブロックの被災規模の算定

1) 安定数算定式

期待補修費を算出する際、異常波浪によりどれだけのブロックが動くか、という被災規模を算出しなければならない。本章では、被災規模の算定に式(6.11)で表される高橋ら¹⁰⁾が提案している消波ブロックの安定式を用いて、被災度を求める。

$$N_S = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = C_H \left\{ a(N_0/N^{0.5})^c + b \right\} \quad (6.11)$$

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（ $=1.4/(H_{1/20}/H_{1/3})$ 、 $H_{1/20}$ ：1/20最大波高）、 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る。本章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¹⁰⁾と同様に $c=0.2$ とする。ブロックの代表径については、体積の 3乗根と

し，次式によって算定できる．

$$D_n = \sqrt[3]{M/\rho} \quad (6.12)$$

ここに， M ：ブロックの質量， ρ ：ブロックの密度である．

2) 被害の履歴

消波ブロックの被災度の計算においては，被害の程度を何らかの方法で表示しなければならない．本研究では，式（6.11）を変形した次式を利用する．

$$N_0 = \left(\frac{H_{1/3}/C_H(S_r - 1)D_n - 1.56}{2.32} \right)^5 N^{0.5} \quad (6.13)$$

消波ブロックによる消波工では，何度かの異常波浪によって被害が進行していくため，高橋ら¹⁰⁾に従って被害の履歴を考慮できるように，累積被災度をつぎのように設定している．まず，当該年における入射波高を $H_{1/3}(i)$ ，前年までの累積被災度を $N_0(i-1)$ とし，式（6.13）を変形した次式により，累積被災個数 $N_0(i-1)$ が生じる波数 N' を求める．

$$N' = \left(\frac{H_{1/3}(i)/C_H(S_r - 1)D_n - 1.56}{2.32} \right)^{-10} N_0^2(i-1) \quad (6.14)$$

式（6.14）において，当該年における発生波数を $N(i)$ とし，これに N' を加え， $N = N(i) + N'$ とする．つぎに， N と $H_{1/3}(i)$ を用いて，式（6.13）より，当該年までの累積被災度個数 $N_0(i)$ を求める．

$$N_0(i) = \left(\frac{H_{1/3}(i)/C_H(S_r - 1)D_n - 1.56}{2.32} \right)^5 N^{0.5} \quad (6.15)$$

この累積被災度個数 $N_0(i)$ と補修条件を比較し，補修条件より大きいと補修を開始することになる．補修は原形復旧で補修直後の被災度はゼロとして，次の年の被災個数を算定する．

6.3.7 間接工事費の算出

消波材の初期建設費および補修費に関しては，上述のように直接工事費と間接工事費を考慮する．このうち，間接工事費は以下のように算出する．

間接工事費は，直接工事費のように対象物に施工されるものではなく，各工事種目に対し共通に施工されるものの費用である．本章での対象である港湾構造物では共通

仮設費、現場管理費がこれに当たる。間接工事費の計算は、率計算による額と積み上げ計算による額とを加算して行い、港湾土木請負工事積算基準⁵⁾より定められた方法により計算する。ここでは、共通仮設費を例にあげて説明する。共通仮設費は以下の方法で算出される。

$$K = P \times K_r \quad (6.16)$$

ここに、 K ：共通仮設費、 K_r ：共通仮設費率、 P ：算出対象費用（直接工事費）である。共通仮設費率は算出対象費用によって変化し、算出対象費用が600万円以下の場合、 $K_r = 7.97\%$ となり、20億円以上場合、 $K_r = 2.80\%$ となる。また、算出対象費用が600万円から20億円の間の場合、以下の関係式で与えられる。

$$K_r = a_1 \times P^{b_1} \quad (6.17)$$

ここに、 a_1, b_1 は定数値であり、港湾工事の構造物では $a_1 = 132.7$ 、 $b_1 = -0.1802$ である。また、現場管理費の算出も上記と同様な方法を用いるが、共通仮設費と率と定数値が異なる。各費用の率と定数値を表6-4に示す。

表 6-4 間接工事費の率と定数値

直接工事費	600万円以下	600万円を超え20億円以下		20億円を超えるもの
共通仮設費率	下記の率とする	a_1	b_1	下記の率とする
	7.97%	132.7	-0.1802	2.80%
直接工事費	700万円以下	700万円を超え10億円以下		10億円を超えるもの
現場管理費率	下記の率とする	a_1	b_1	下記の率とする
	21.02%	30.4	-0.0234	18.42%

6.4 高波発生回数の統計的特性

6.1で述べたように、従来の研究では海岸・港湾構造物のLCCをモンテカルロ法により算定する際、高波の発生回数が年1回に限定されていた。しかし、構造物の被災を生じる高波が1年に複数回発生することもある。また、6.3.3に記した極値分布関数も波高の年最大値資料ではなく極大値資料を用いて推定されたものであり、表6-2に示したように平均発生率（1年間の平均発生回数）も高い。本節では、モンテカルロ法における供用期間中の各年の高波発生回数を与えることを目的に、波浪観測データにもとづいて高波発生回数の統計的特性について検討する。

高波発生回数の統計的特性については、合田¹²⁾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。本節では、上述の対象4地点に関して、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 1991～2010⁷⁾のうち、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する。

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る。その際の有義波高の閾値は、鹿島港および室津港で2.5m、鳥取港で3.0m、神戸港で1.0mとする。上記の20年間のデータから求められた高波の合計回数は、鹿島港：315回、神戸港：247回、鳥取港：343回、室津港：225回である。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）を求める。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6-6～図6-9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。

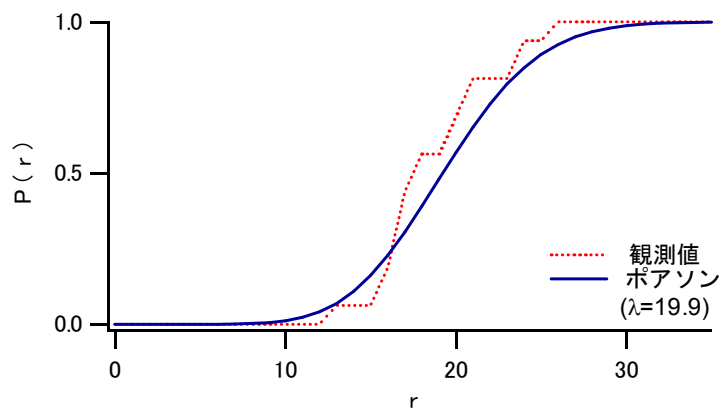


図6-6 高波発生回数の累積相対度数とポアソン分布（鹿島港）

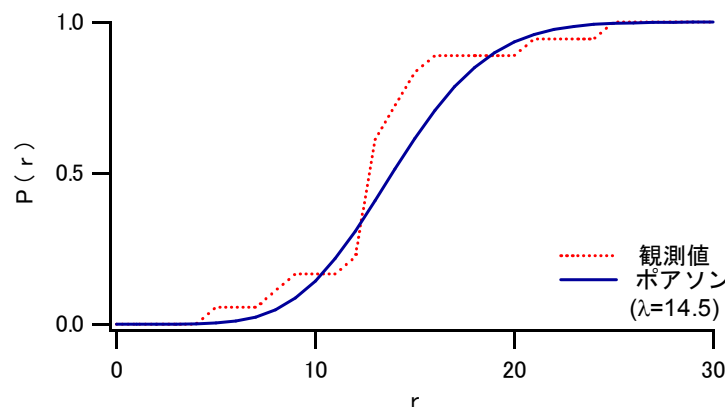


図6-7 高波発生回数の累積相対度数とポアソン分布（神戸港）

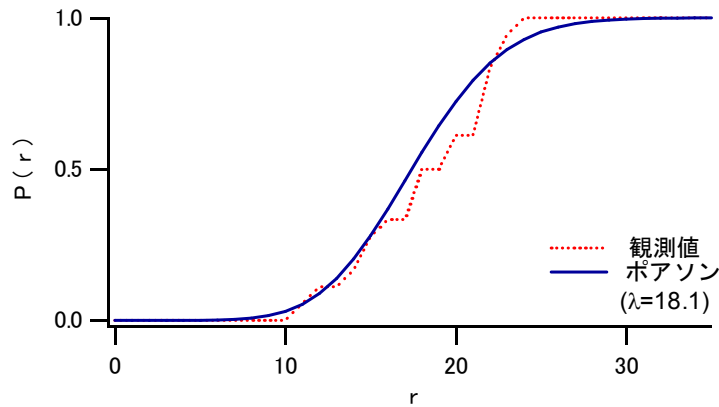


図6-8 高波発生回数の累積相対度数とポアソン分布（鳥取港）

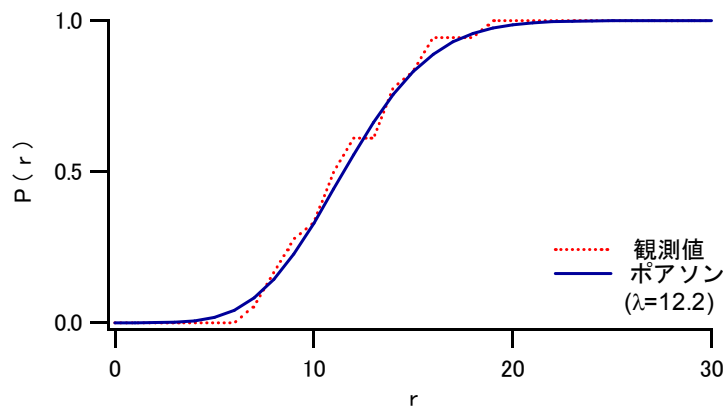


図6-9 高波発生回数の累積相対度数とポアソン分布（室津港）

本節では、合田¹²⁾と同様にポアソン分布による近似についても検討を行う。ポアソン分布の確率分布関数は式(6.18)で与えられる。

$$P(r) = \frac{1}{r!} e^{-\lambda} \lambda^r \quad : \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (6.18)$$

ここに、 r ：1年間の高波発生回数、 λ ：平均発生回数である。 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。ここでは、高波一覧表から求めた各月の高波発生回数と、月別平均および最大有義波の表に記載されている各月のデータ測得率を用い、合田¹³⁾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る。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、式(6.18)によりポアソン分布の非超過確率を求めた。図6-6～図6-9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。

6.5 LCC算定とその結果

6.5.1 計算の諸設定

ここでは、上に述べた方法により消波ブロックのLCCを算定する。補修判定基準は、消波材の被災断面積の全被覆断面積に対する割合で与え、高山ら⁴⁾にならってその割合が5%以上となったときに補修を行うものとする。また、構造物の供用期間は50年とする。高波発生回数は、年1回とする場合と、6.4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、表6-2に示した λ の値を式(6.18)の λ 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。

6.2.3の手順に述べた供用期間(50年)の繰り返し回数については、高橋ら¹⁰⁾が行った式(6.11)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、本節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。

6.5.2 計算結果

図6-10～図6-13にシーロック2層整積のLCC算定結果を示す。図中の破線は、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。また、ケース3の結果は示していないが、ケース2との差異は最大でLCCの5%程度であった。

これらの図より、 D_n が小さいブロックではケース1と2の差は大きい、 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る傾向にある。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。 H_{50} が他の地点の約半分以下である大阪では最適径も小さいが、茨城と高知では H_{50} の差が2m近くあるにもかかわらず最適径は同じである。高山ら^{3), 4)}は、沖波波高が異なっても最適径は変わらない結果を示し

ており、波高の条件だけで説明できないと考えられる。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。

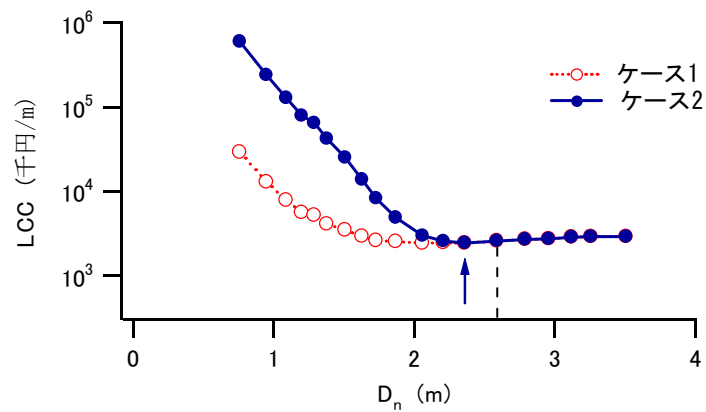


図 6-10 消波ブロックの代表径と LCC との関係（茨城）

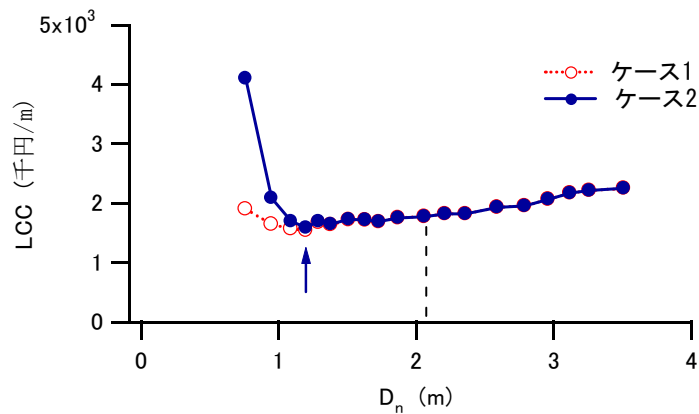


図 6-11 消波ブロックの代表径と LCC との関係（大阪）

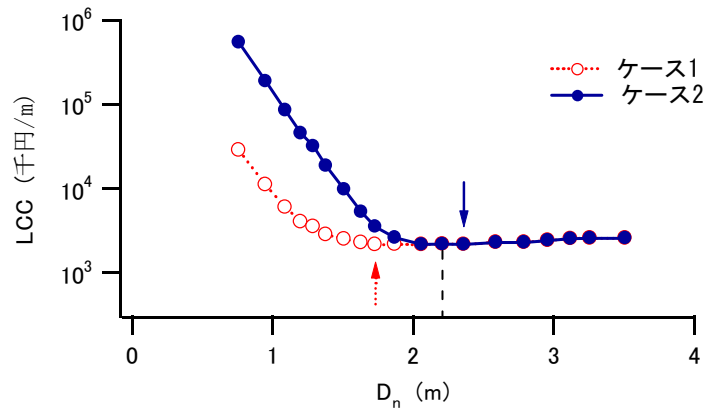


図 6-12 消波ブロックの代表径と LCC との関係（鳥取）

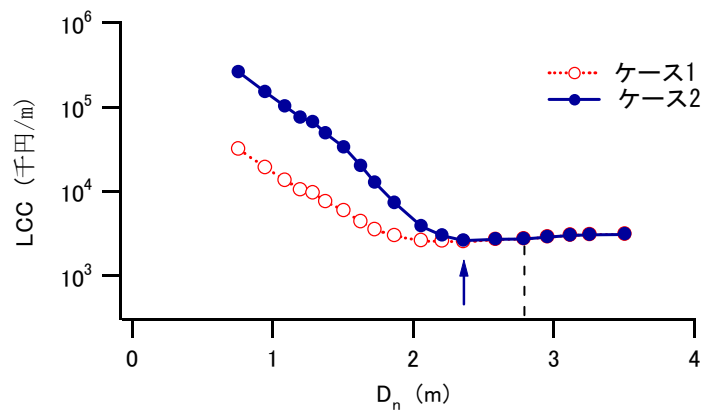


図 6-13 消波ブロックの代表径と LCC との関係（高知）

次に、図 6-14～図 6-17 は、シーロック 2 層整積の場合について、6.2.3 の手順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 6-10～図 6.13 に示したように、大阪を除く 3 地点では 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 σ_{CR} と LCC の比が大きくなっているが、 D_n の増加に伴ってケース 2, 3 の σ_{CR} と LCC の比が上回る。また、図中の矢印は、図 6-10～図 6-13 の矢印と同様に LCC の最小点を示すものである。2 層整積において、鳥取を除く 3 地点における LCC の最小点はケース 1 から 3 で同一の D_n となるが、総補修費の変動の LCC に対する割合 (σ_{CR}/LCC) 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 LCC が最小となる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、例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。

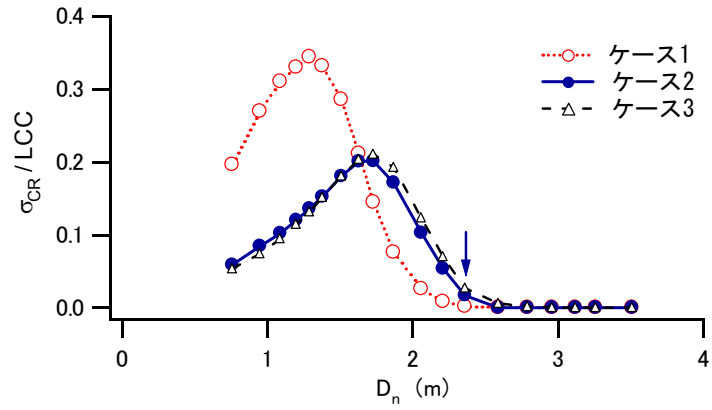


図 6-14 総補修費の標準偏差と LCC との比（茨城）

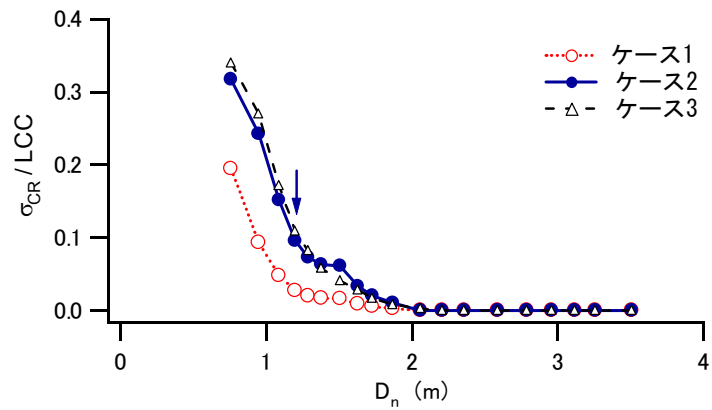


図 6-15 総補修費の標準偏差と LCC との比（大阪）

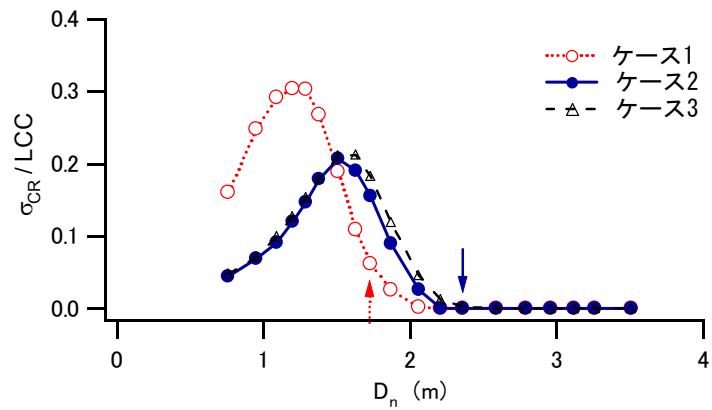


図 6-16 総補修費の標準偏差と LCC との比（鳥取）

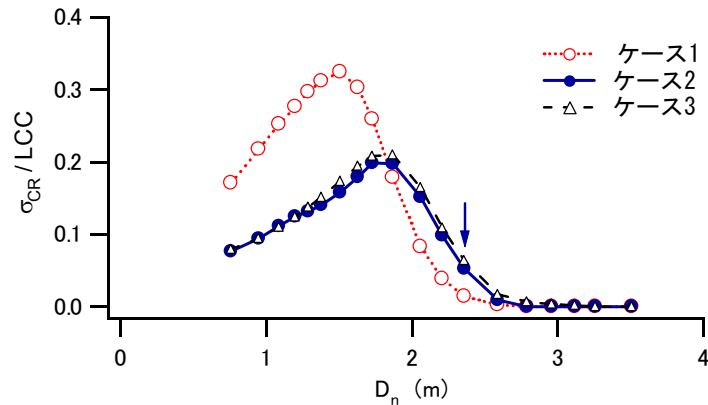


図 6-17 総補修費の標準偏差と LCC との比 (高知)

6.6 結語

本章では，高波発生回数の統計的特性を考慮した防波堤消波材のライフサイクルコスト(LCC)の算定方法を詳細に述べるとともに，具体的な消波ブロックのシーロックを対象に LCC 計算を行い，高波発生回数の LCC に及ぼす影響を検討した．本章で得られた結果を，以下に要約する．

1. 鹿島港，神戸港，鳥取港および室津港の波浪データにおいて，年間の高波発生回数はポアソン分布で近似可能であった．
2. 高波の年間発生回数を年 1 回とする場合とポアソン乱数で与える場合，また消波工を消波ブロックの 2 層整積と乱積(全断面被覆)として LCC 算定を行ったところ，LCC を最小とするブロック径が高波発生回数の与え方で異なったのは，2 層整積と乱積で各 1 地点であった．
3. 高波発生回数の与え方が異なる 2 つの場合で，期待補修費を用いる LCC で決まるブロックの最適径が同じで，その LCC の差異が小さくても，補修費の変動性(標準偏差)は異なることがあり，LCC を見積もる際にこれ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) 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, 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.
- 4) 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.
- 5) (社) 日本港湾協会: 港湾土木請負工事積算基準, 平成 21 年度改訂版, 2009.
- 6) 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.
- 7) (独) 港湾空港技術研究所: NOWPHAS 1991~2010, <http://www.pari.go.jp/unit/kaisy/nowphas/annuareport/>
- 8) 小舟浩治, 菅原一晃, 後藤智明: 日本沿岸の波候特性について, 第 35 回海岸工学論文集, pp.232-236, 1988.
- 9) (財) 沿岸開発技術研究センター: 全国港湾海洋波浪観測 25 か年統計資料, 640p., 1996.
- 10) 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.
- 11) 河合弘泰, 高山知司, 鈴木康正, 平石哲也: 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港湾技術研究所報告, 第 36 巻, 第 4 号, pp.3-41, 1997.
- 12) 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.
- 13) 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.

第 7 章 結論

本研究は、海岸保全施設の一つである消波工に対して、「施設の老朽化と性能低下の把握を行い、適時、適切な保全対策を実施することにより、必要な防護機能を維持しつつ、ライフサイクル（供用期間）に生ずる全ての費用を最小化することを目指した維持管理を行うこと」と定義されている、ライフサイクルマネジメント（LCM）の導入検討を行い、消波工の適切な維持管理手法の確立を目的としたものである。LCMを導入する際、①施設の老朽化と性能低下の把握、②適時・適切な保全対策、③ライフサイクル（供用期間）に生ずる全ての費用の最小化、この3つの重要な項目に対する検討・対策が必要不可欠であるため、それぞれについて詳細な検討を行った。

本章では、これまでの各章で得られた研究成果を要約し、本論文の結論とする。

第 1 章では、研究の背景および研究の目的を述べた。そして、本論文の構成と各章の概要を述べた。

第 2 章では、第 3 章で検討を行う累積損傷を受けた消波工の消波性能の変動特性の把握と、第 4 章で述べるニューラルネットワーク構築の際に必要な教師データの作成を目的とするため、波・流れ・地盤の相互作用について数値シミュレーションを迅速かつ容易に行うことが可能な数値波動水路を活用するものとし、その概説を行った。また、数値解析を行うために必要となる各パラメータについて概説を行い、適切な数値解析結果が得られるように各パラメータの設定を行った。

第 3 章では、海岸保全施設の一つである消波工に、ライフサイクルマネジメント（LCM）の考え方を導入する際、消波工の累積損傷によって生じる消波性能の変動特性について適切に評価することが必要不可欠であると考え、その変動特性を数値波動水路を用いた数値解析より明らかにすることを目的とした。累積損傷断面としては、既往の研究を参考にし、消波工の沈下に関する被災が日本各地で多く報告されていることを踏まえ、①天端被災、②複合型被災の 2 パターンを検討対象とした。消波性能指標としては反射率と越波流量の 2 つを対象とした。入射波としては規則波と不規則波を用い、不規則波については、波列構成の違いによる消波性能への影響を検討するため、波浪統計量および総エネルギーがほぼ同等である 15 種類の不規則波を作成した。それぞれの累積損傷断面のモデル化を行い、数値波動水路でモデル化された断面を再現し、数値解析を行った。本章で得られた結果を、以下に要約する。

1. 複合型被災モデルおよび天端被災モデルを対象とした消波工の累積被災に伴う消波性能の変化について、反射率および越波流量とダメージパラメータの間には一様性が見られない不規則な変動を示し、反射率および越波流量の被災進行に伴う変動

- 特性をダメージパラメータのみの回帰式によって構築できないことを明らかにした。
2. 不規則波を入射波とした場合の反射率の変動特性を検討した結果、不規則波の波群性および構成波列に関わらず、反射率そのものが入射波エネルギーと反射波エネルギーの比によって求められることから、実験に用いた入射不規則波の総エネルギーがほぼ同等であるため、不規則波の構成波列に関わらず反射率がほぼ同じ値を示す結果を得ることができた。
 3. 不規則波を入射波とした場合の越波流量の変動特性を検討した結果、波浪統計量、スペクトル形状が同等な不規則波であるにも関わらず、越波流量の変動特性には大きなばらつきがあり、一様性が認められなかった。したがって、越波を不規則波により検討する場合、構成波列の不規則性に配慮した確率統計的な考察が必要であることが明らかになった。

第4章では、第3章で行った数値波動水路による数値解析結果より、被災の程度を表すダメージパラメータという単一パラメータのみで消波性能の変動特性を直接評価することは困難であること、また、消波性能の変動特性はダメージパラメータという単一パラメータのみに依存するのではなく、その他のパラメータ（例えば、天端高や被覆材の種類・規格等）にも依存すると考えられたため、データ間の因果関係が不明確な情報処理の分析に有効であるニューラルネットワークを利用した、累積損傷を伴う消波工の消波性能に関する評価システムの構築を行った。本章で得られた結果を、以下に要約する。

1. 構築した反射率の評価システムに関する検証として実験値と予測値の比較検討を行った結果、評価システムは実験値を10%程度の誤差範囲で予測できることが明らかになった。
2. 越波流量の評価システムに関する検証として実験値と予測値の比較検討を行った結果、評価システムは天端被災モデルの場合が最大50%程度の誤差、複合型被災モデルの場合が最大40%程度の誤差となった。しかし、数値実験での越波流量のバラツキを数量化した変動係数の値として、天端被災モデルの場合が約0.65（平均値）、複合型被災モデルの場合が約0.55（平均値）であることを考慮すると、本研究で構築した越波流量の評価システムによる予測値は妥当な結果を与えることが明らかになった。

第5章では、海岸構造物の一つである消波施設に対して、ライフサイクルマネジメント（LCM）で定義されている適時、適切な保全対策を行うためには、施設の物理・性能面の劣化過程を把握し、施設破壊への信頼性評価が重要であると考え、施設破壊モデルとして、衝撃型累積損傷モデルと耐力劣化モデルの2種類を用い、施設保全モデルの構築を行った。衝撃型累積損傷モデルにおいて2種類の施設保全モデル、耐力劣化モデルにおいて3種類の施設保全モデルを提案した。また、衝撃型累積損傷モデルにおいては、予防保全を実施する累積損傷量 k 、間隔 TR を制御変数として、耐力劣

化モデルにおいては、予防保全を実施する間隔 TR 、施設耐力 R_1 、予防保全回数上限 ν を制御変数とし、数値実験を行った。本章で得られた結果を、以下に要約する。

1. 衝撃型累積損傷モデルを用いた保全モデルにおける数値実験の結果、予防保全レベルは総期待保全費用に大きな影響を与え、最適予防保全レベル k^* は、供用期間長や異常波浪襲来頻度よりも各異常波浪により被る損傷程度に大きな影響を受ける様子が示された。また、頻繁に異常波浪襲来を受ける場合、適切な予防保全を実施することにより、理論上、期待保全費用の大幅な削減が可能であることも判明した。
2. 耐力劣化モデルを用いた保全モデルにおける数値実験の結果、適切な保全時期の設定が総期待保全費用削減に有効な手段となりえることを示した。また、施設の暴露環境が最適な保全時期に大きな影響を与えることも分かった

第 6 章では、高波発生回数の統計的特性を考慮し、モンテカルロ法により防波堤消波材のライフサイクルコスト(LCC)を算定して、高波発生回数の LCC に及ぼす影響を検討した。本章で得られた結果を、以下に要約する。

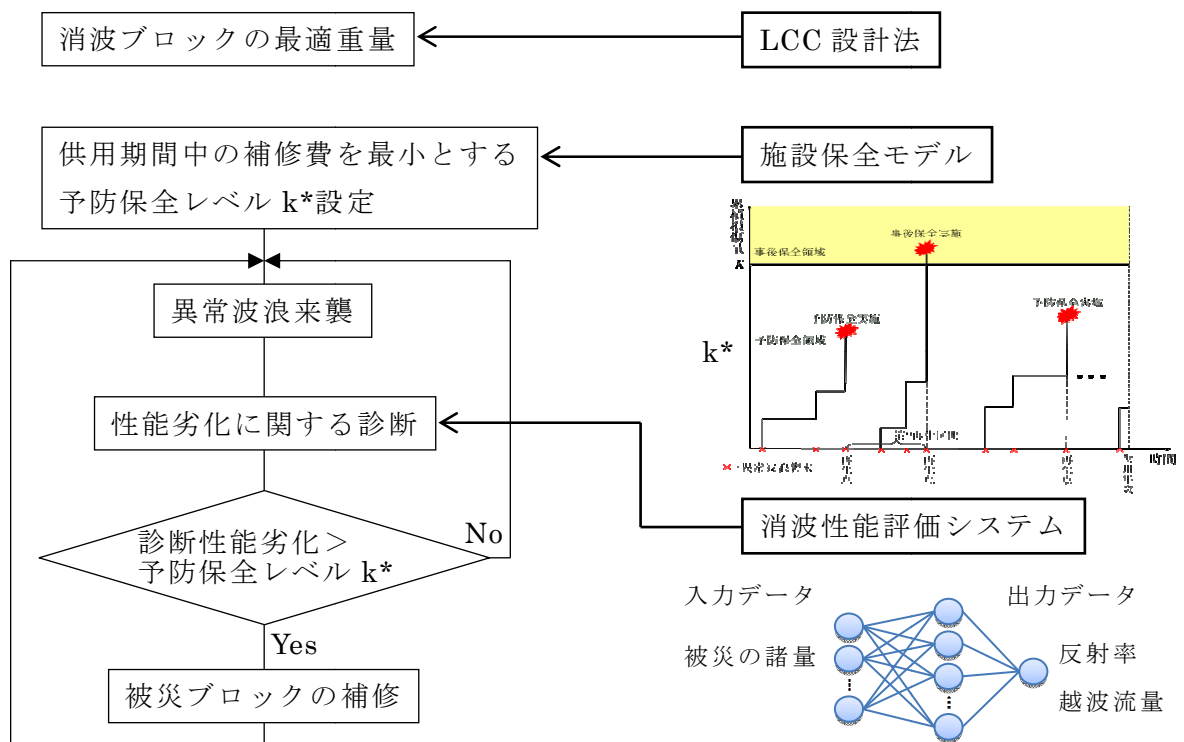
1. 鹿島港、神戸港、鳥取港および室津港の波浪データにおいて、年間の高波発生回数はポアソン分布で近似できることを明らかにした。
2. 高波の年間発生回数を年 1 回とする場合とポアソン乱数で与える場合、また消波工を消波ブロックの 2 層整積と乱積(全断面被覆)として LCC 算定を行ったところ、LCC を最小とするブロック径が高波発生回数の与え方で異なったのは、2 層整積と乱積で各 1 地点であった。また、LCC として計上される費用のうち、補修費についてはその変動性が高波発生回数の与え方で異なる場合があり、LCC 算定においてはこれを考慮する必要があることを明示した。

今後の展望と課題

本研究は、海岸保全施設の一つである消波工の適切な維持管理手法の確立を目指すために、ライフサイクルマネジメント（LCM）で定義されている、①施設の老朽化と性能低下の把握、②適時・適切な保全対策、③ライフサイクル（供用期間）に生ずる全ての費用の最小化、の3つの重要な項目について検討を行ったものである。

①に関わる消波工の性能劣化に関する評価ツールとしては、第4章において構築されたニューラルネットワークを用いた消波性能評価システムが非常に有効であることを明らかにした。②については、第5章で提案した施設保全モデルが、消波工の適時・適切な保全対策を可能にすることを解析的に証明できた。また、③については、第6章で行った設計手法で、ライフサイクルコスト（LCC）を最小化する最適消波工の選定が可能となった。

今後は、上記3つの研究成果を単独で活用するのではなく、相互を連携させた設計から維持管理に至る総合的なエキスパートシステムの開発を行い、消波工に関する精度の高い維持管理手法の確立が望まれる。例えば、消波ブロックに関する維持管理手法として以下のようなことが考えられる。まず、LCC設計法に基づいてある許容被災確率のもとで消波ブロックの安定質量が算定される。次に、その消波ブロックに関する最適保全計画、すなわち供用期間中の補修費を最小とする予防保全レベルを施設保全モデルにより決定する。消波ブロック施工後の異常波浪に伴う性能劣化を消波性能評価システムにより現場にて診断する。その結果として、性能劣化が先に定めた予防保全レベルを超える場合には、被災消波ブロックの補修を実施することになる。下図に簡単なフロー図を示す。



謝 辞

本論文は、鳥取大学大学院工学研究科 梶見吉晴教授の御指導のもと、5年間の研究成果を取り纏めたものであり、その間、終始熱心な御指導、御鞭撻を頂きました同先生に心より感謝致します。先生には、研究に関することは勿論のこと、研究者としてだけではなく社会人としての姿勢や心構えについても色々と教えて頂きました。これからは、先生に教えて頂いたことを忘れること無く、研究者として、また、社会人として少しでも先生に近づけるよう努力して参ります。本当にありがとうございました。

鳥取大学大学院工学研究科 松原雄平教授には、本論文を取り纏めるにあたり貴重な御意見、御指導を頂きましたことを深く感謝致します。鳥取大学大学院工学研究科 太田隆夫准教授には、研究内容全般について色々と御教授して頂くと共に、研究に行き詰まった時に御相談に乗って頂いたことを大変感謝致します。鳥取大学大学院工学研究科 佐藤毅助教には、第5章の保全モデルについて、御指導および御教授頂きましたことをここに記して感謝致します。鳥取大学名誉教授 木村晃先生には、研究に対する姿勢を御教授頂き、鳥取大学大学評価室 大野賢一准教授には、常に暖かい激励のお言葉を頂きましたことを改めて感謝致します。

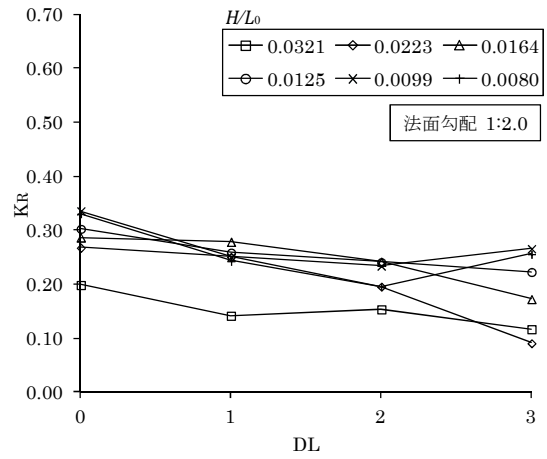
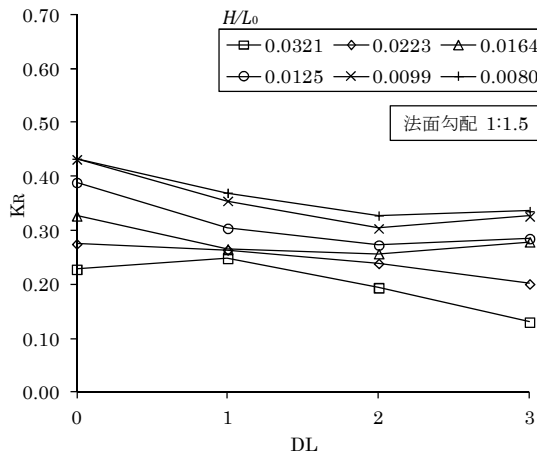
鳥取大学社会開発システム工学科防災計画研究室の皆様にも大変お世話になりました。特に、当時の鳥取大学大学院生 河合直樹氏（現高菱検査サービス㈱）、同藤本啓伸氏（現㈱ウエスコ）には、数値波動水路における数値解析と水理模型実験において協力して頂きましたことを、心より感謝致します。

土木業界の低迷が続く中、大学院への進学を理解して頂き、会社の業務と研究の掛け持ちを認めて頂きました、三省水工㈱重岡良則社長に大変感謝致します。また、西日本支店 矢野弘毅支店長には、終始激励を頂きましたことを改めて感謝致します。研究の間、著者の所属している西日本支店 伊井洋和技術部次長、水野満博設計課課長代理には、大変御迷惑をお掛けしたことをお詫び申し上げます。また、水野満博課長代理には、本論文で使用している図面の一部を作成して頂きましたことを併せて感謝致します。技術研究所 浅田潤一郎所長、河村裕之課長代理には、本研究で検討対象としましたシーロックのモルタル模型の準備をお願い致しました。また、研究に関して有益なご意見を頂きましたことを感謝致します。大学院博士後期課程へ社会人として進学するにあたって、当時、進学を後押しして頂きました河野晴行元九州支店長に感謝致します。

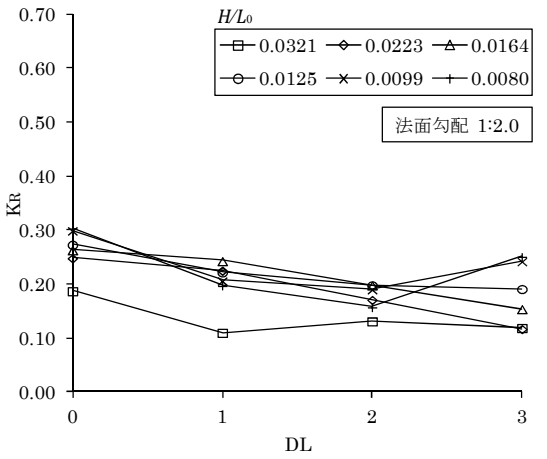
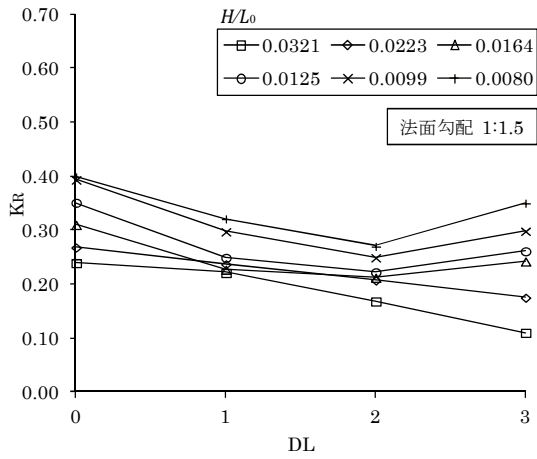
最後になりますが、研究の間、常に暖かく見守って頂いた家族に感謝致します。特に、常に著者の体のことを気遣い、支えになってくれた妻富士子と、在学中に誕生し、いつも元気を与えてくれた娘彩香に心から感謝致します。

付 録

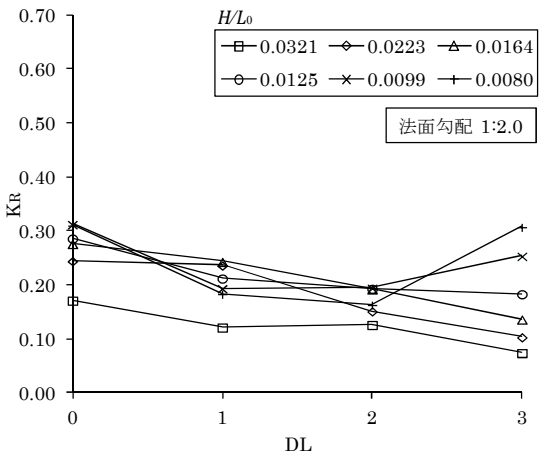
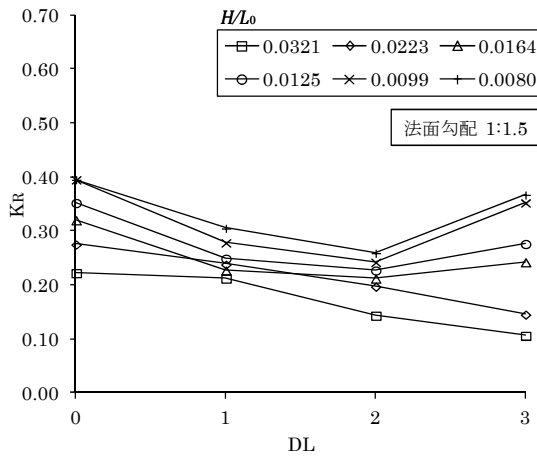
- ・ 複合型被災モデル-1 における反射率変化：規則波
- ・ 消波ブロックの LCC 算定結果：乱積



(a) 碎石 35~50g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

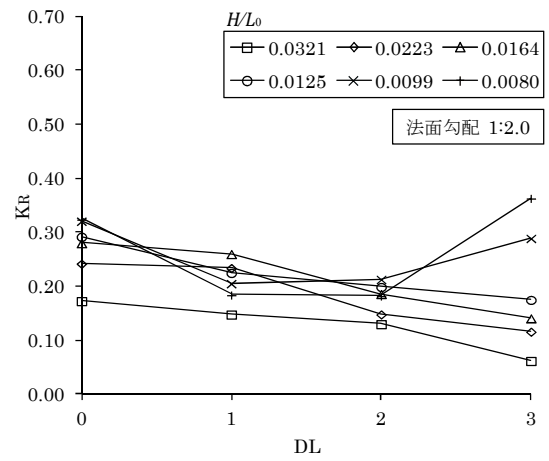
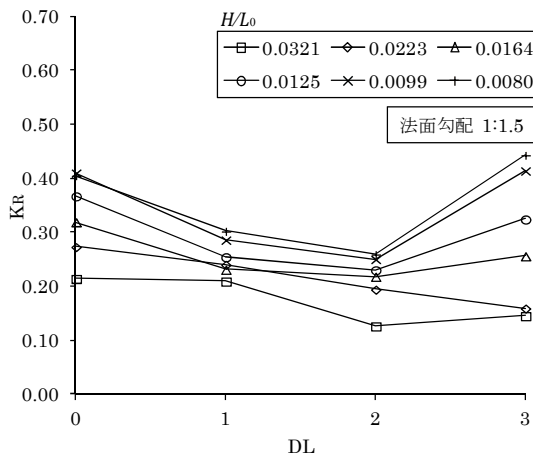


(b) 碎石 50~70g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

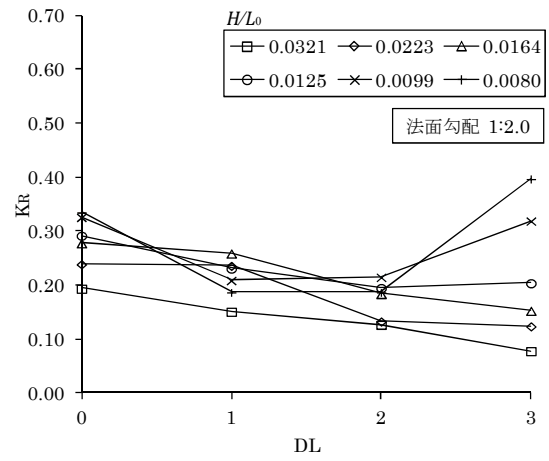
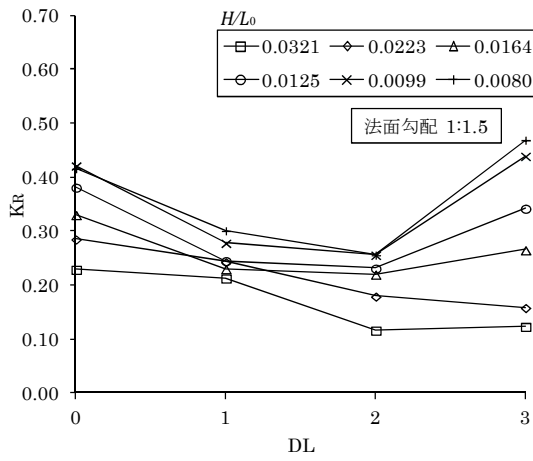


(c) 碎石 70~100g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

付図-1 各被災レベルにおける反射率変化 (碎石, H=0.05m)

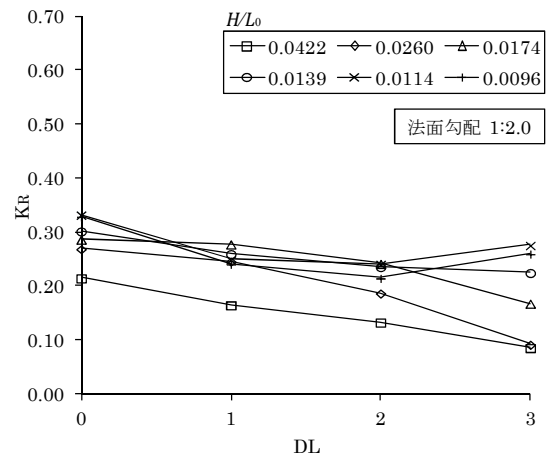
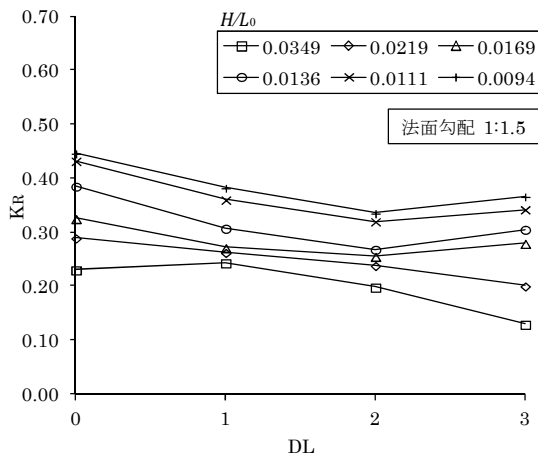


(d) 砕石 100~130g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

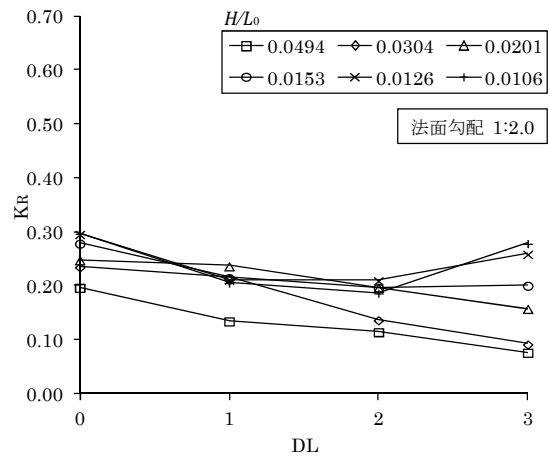
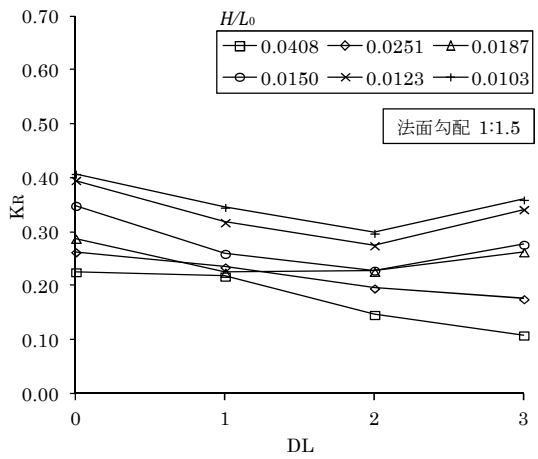


(e) 砕石 130~150g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

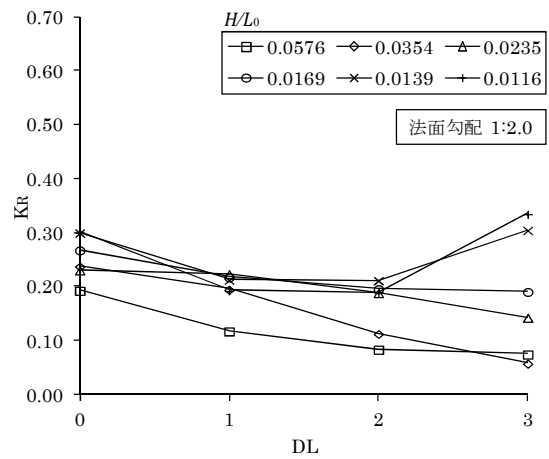
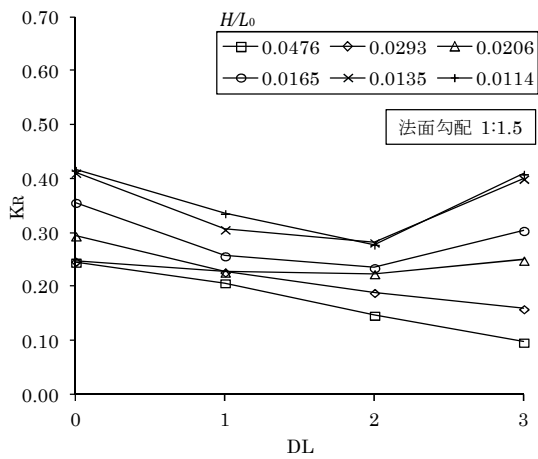
付図・2 各被災レベルにおける反射率変化 (砕石, H=0.05m)



(a) 砕石 35~50g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

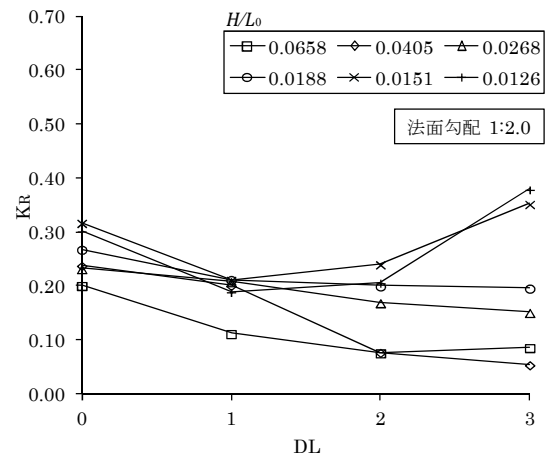
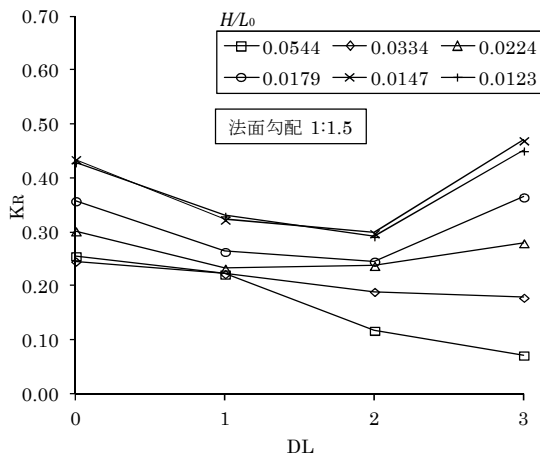


(b) 砕石 50~70g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

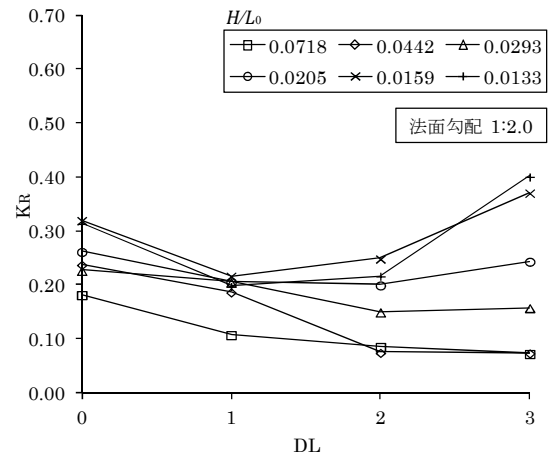
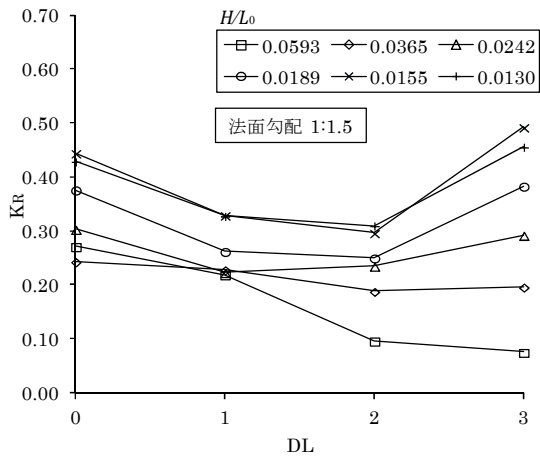


(c) 砕石 70~100g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

付図-3 各被災レベルにおける反射率変化 (砕石, H: 安定限界波高)

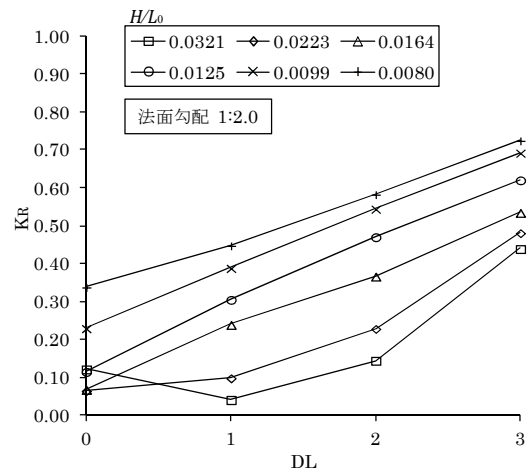
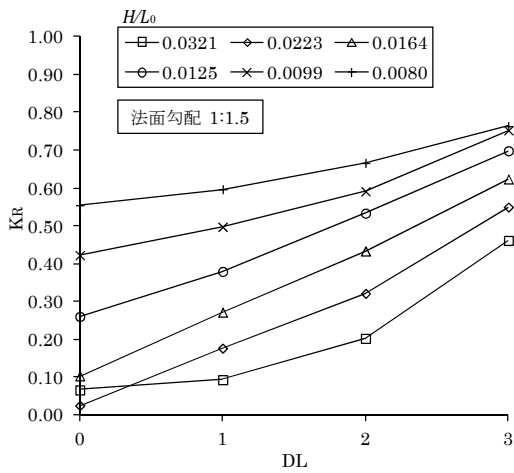


(d) 碎石 100~130g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

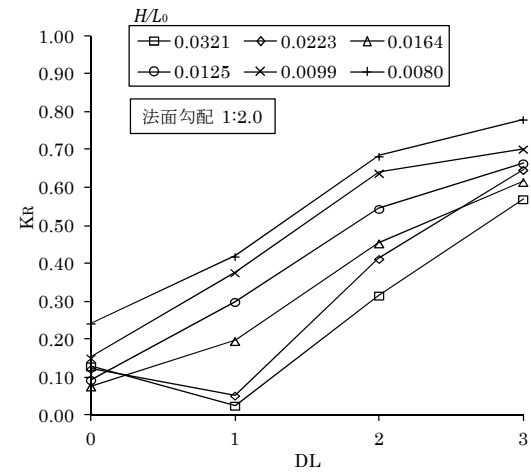
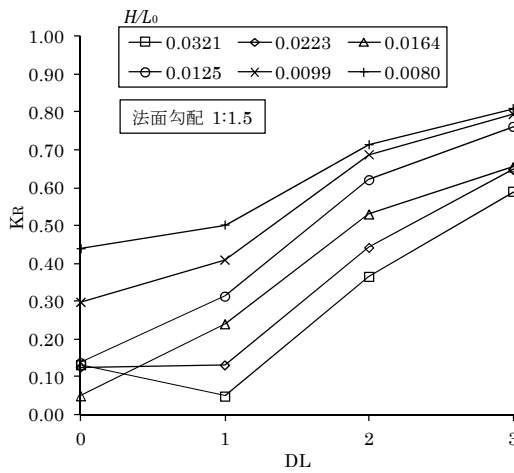


(e) 碎石 130~150g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

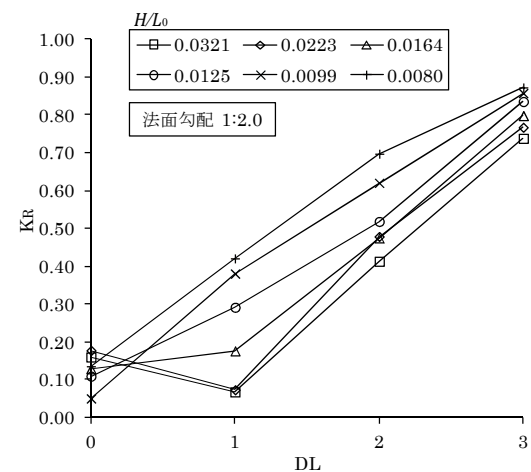
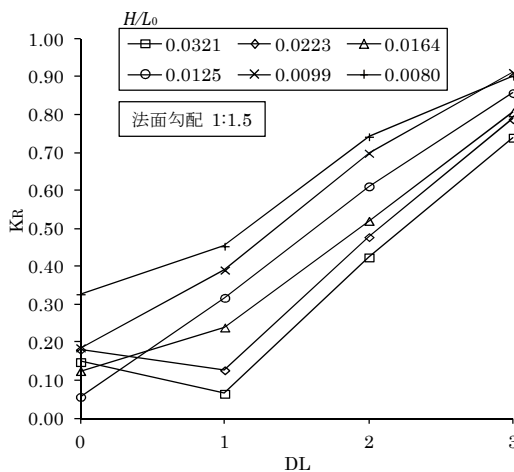
付図-4 各被災レベルにおける反射率変化 (碎石, H: 安定限界波高)



(a) 消波ブロック No.1_74g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

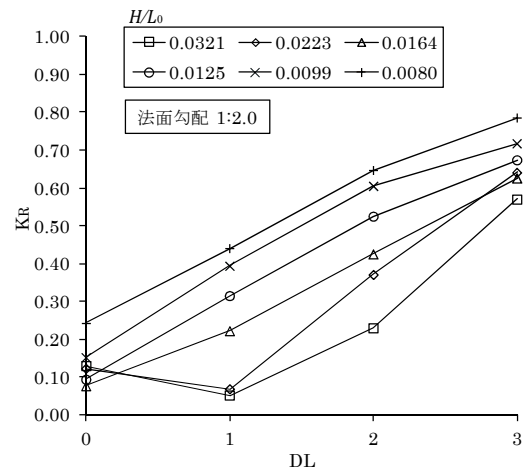
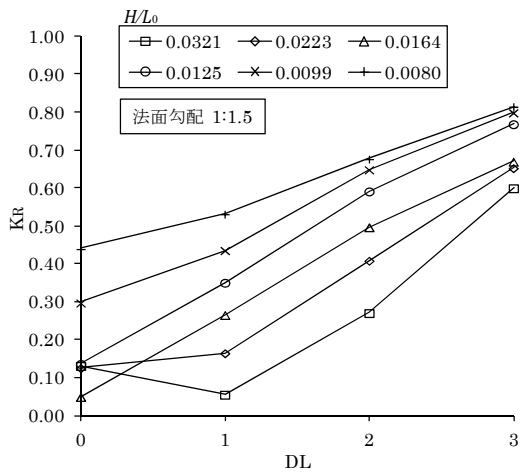


(b) 消波ブロック No.2_247g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

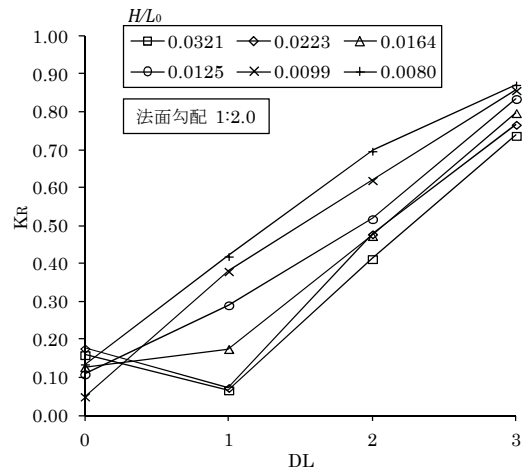
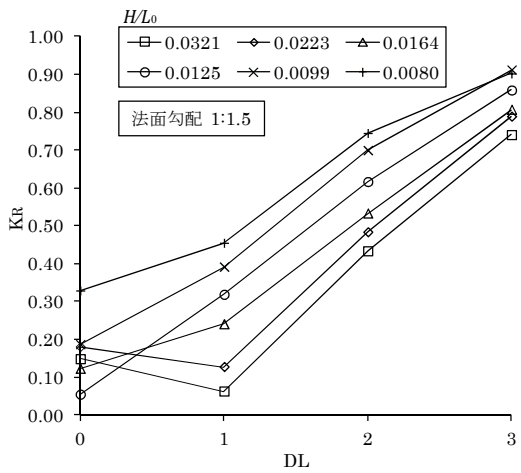


(c) 消波ブロック No.3_473g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

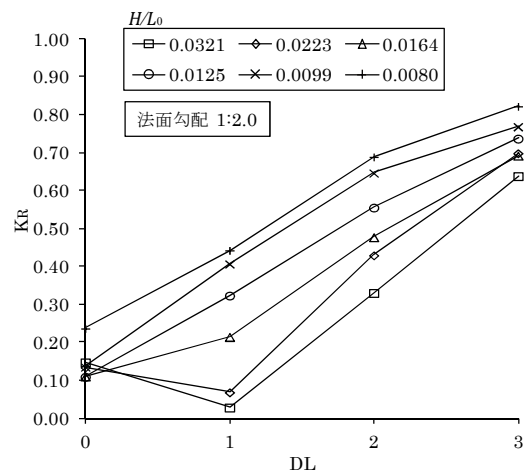
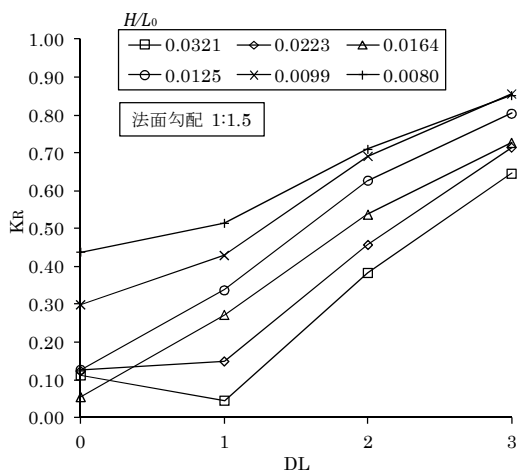
付図-5 各被災レベルにおける反射率変化 (消波ブロック, H=0.05m)



(d) 消波ブロック No.4_232g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

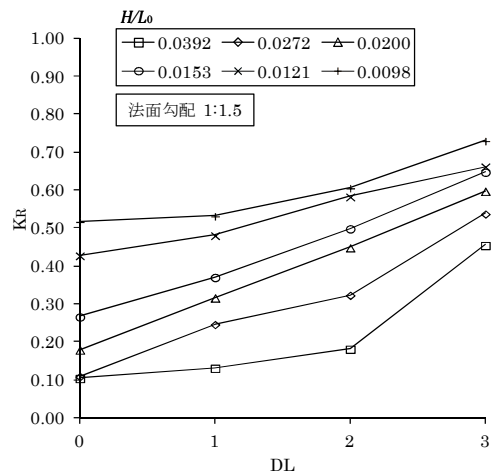
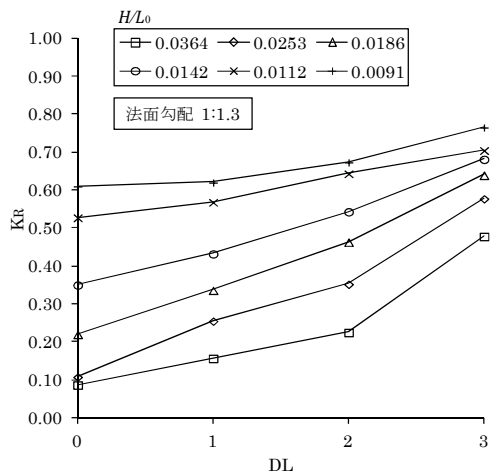


(e) 消波ブロック No.5_472g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

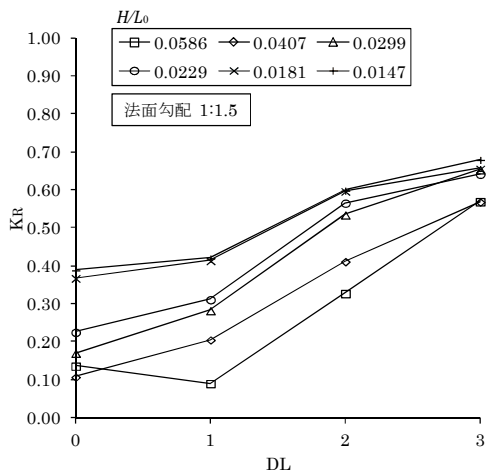
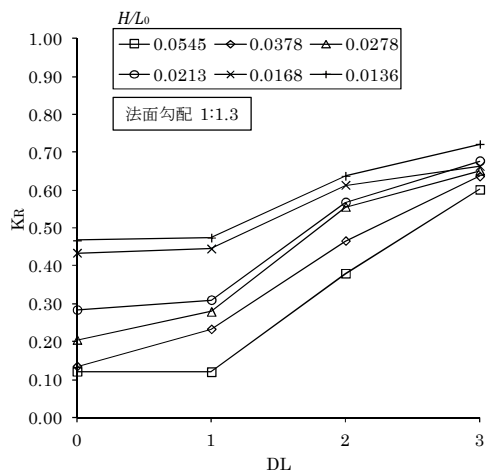


(f) 消波ブロック No.6_283g の反射率変化 (法面勾配 1:1.5, 1:2.0)

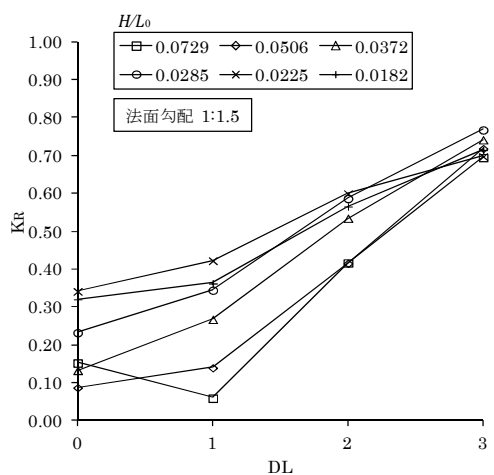
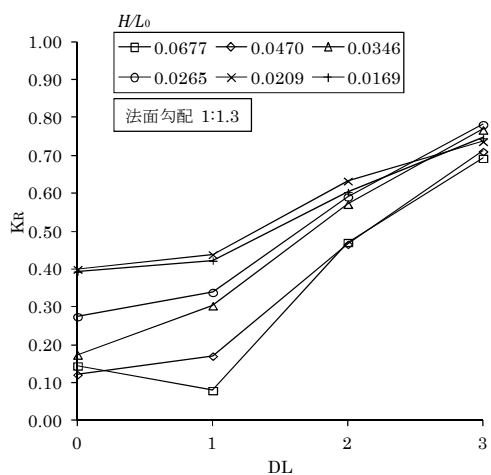
付図-6 各被災レベルにおける反射率変化 (消波ブロック, H=0.05m)



(a) 消波ブロック No.1_74g の反射率変化 (法面勾配 1:1.3, 1:1.5)

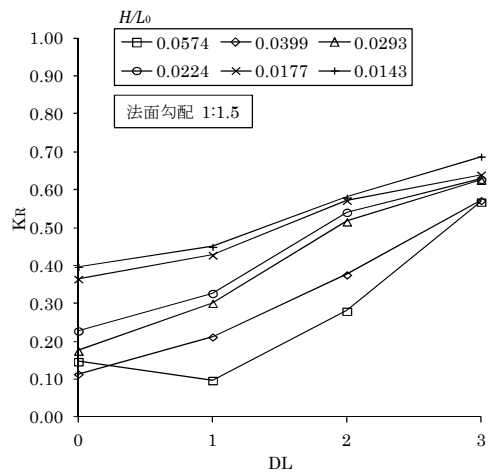
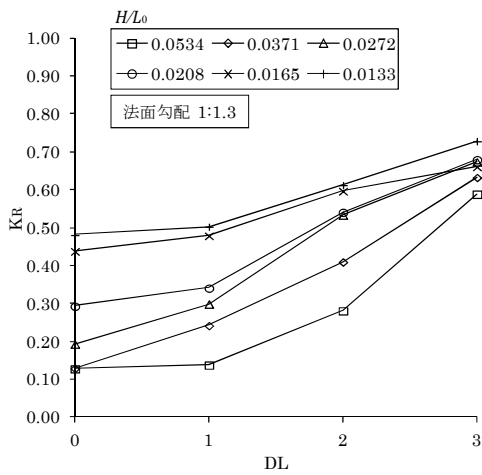


(b) 消波ブロック No.2_247g の反射率変化 (法面勾配 1:1.3, 1:1.5)

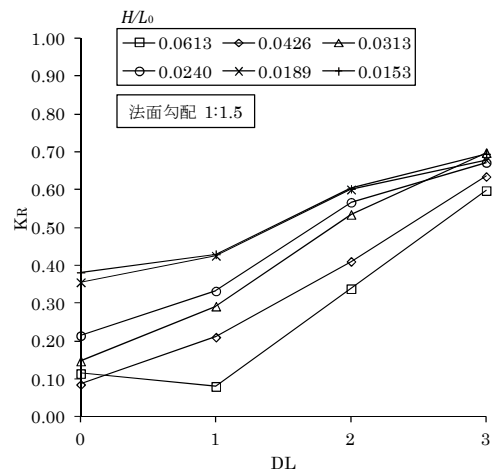
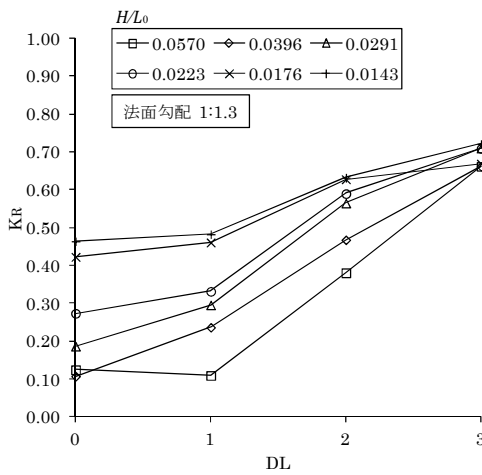


(c) 消波ブロック No.3_473g の反射率変化 (法面勾配 1:1.3, 1:1.5)

付図-7 各被災レベルにおける反射率変化 (消波ブロック, H: 安定限界波高)

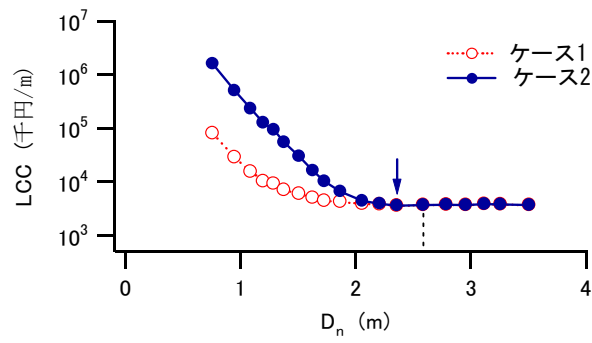


(d) 消波ブロック No.4_232g の反射率変化 (法面勾配 1:1.3, 1:1.5)

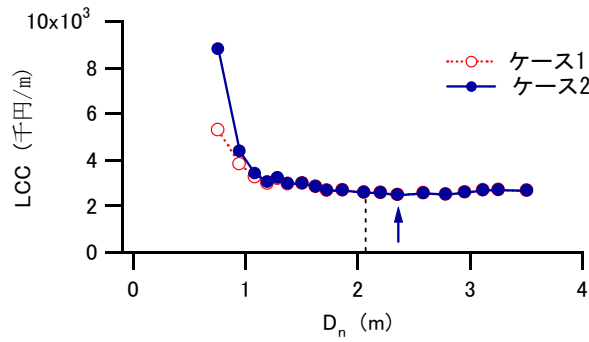


(e) 消波ブロック No.6_283g の反射率変化 (法面勾配 1:1.3, 1:1.5)

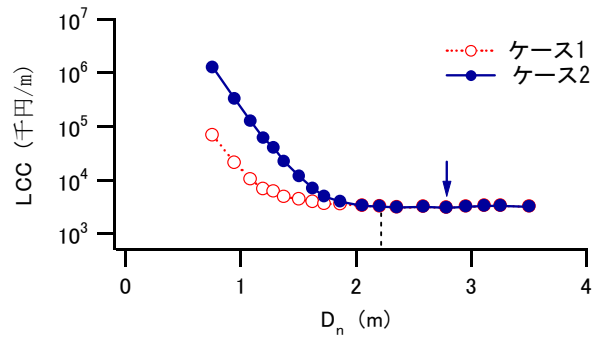
付図-8 各被災レベルにおける反射率変化 (消波ブロック, H: 安定限界波高)



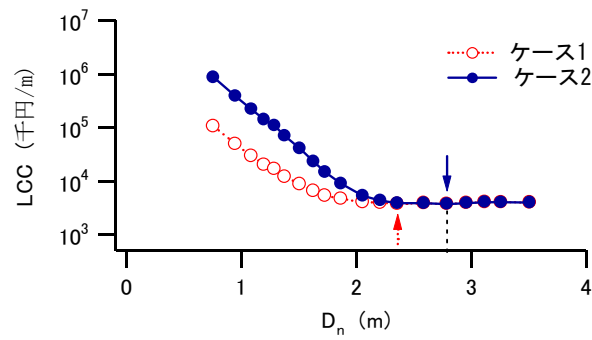
(a) 茨城



(b) 大阪

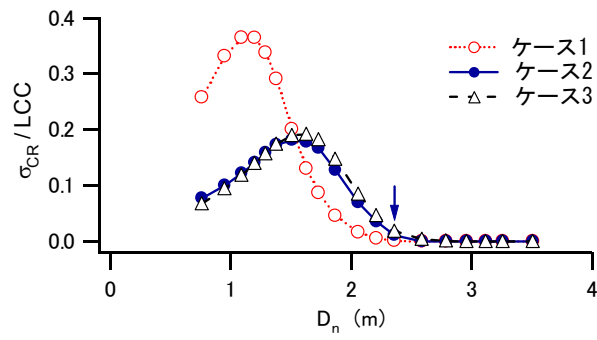


(c) 鳥取

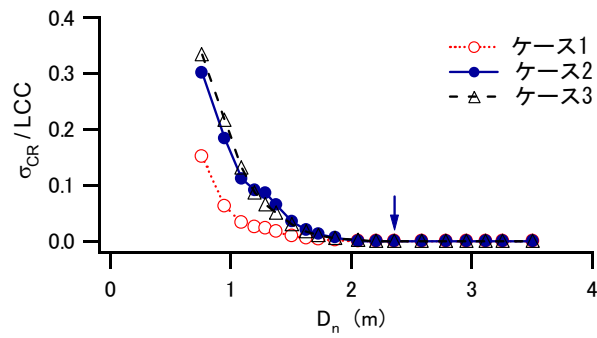


(d) 高知

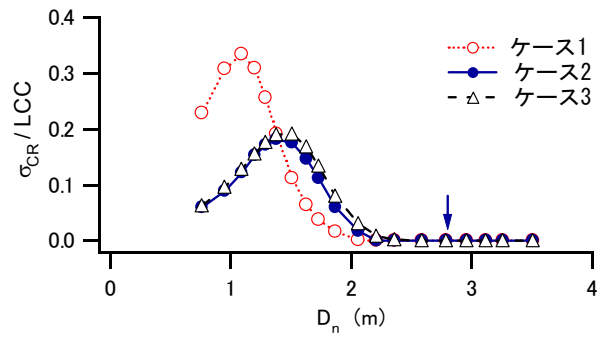
付図-9 消波ブロックの代表径と LCC との関係 (乱積)



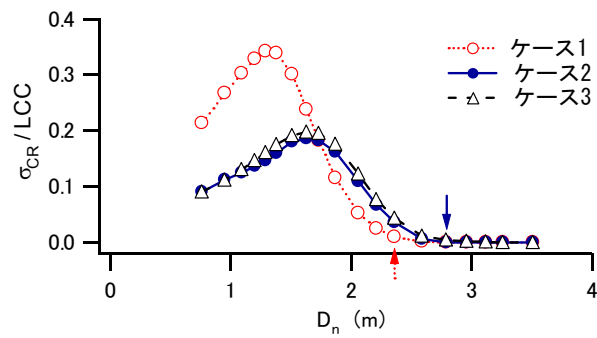
(a) 茨城



(b) 大阪



(c) 鳥取



(d) 高知

付図-10 総補修費の標準偏差と LCC との比 (乱積)