

消波工の断面変形に伴う性能変化の評価と
最適保全方策に関する研究

2018年 1月

河 村 裕 之

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	2
1.3 論文の構成.....	3
参考文献.....	6
第2章 数値波動水路による数値解析.....	7
2.1 緒言.....	7
2.2 数値波動水路の概説.....	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.....	11
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.....	15
2.4.3 セルの分類.....	15
2.4.4 ポーラスセルの設定.....	16
2.4.5 Dupuit-Forchheimer 則.....	17
2.4.6 波力計算法.....	17
2.4.7 圧力計測におけるデータ時間間隔.....	18
2.4.8 圧力ノイズ処理機能について.....	18
2.5 ポーラスセルの抵抗力算定法の検討.....	19
2.5.1 検討目的.....	19
2.5.2 水理模型実験.....	19
2.5.3 数値波動水路による計算.....	20
2.5.4 実験結果と計算結果の比較.....	21
2.5.5 異なる係数値による計算結果の比較.....	26
2.5.6 ポーラスセルの抵抗力算定法の検討結果.....	29
2.6 結語.....	29
参考文献.....	30

第3章 消波工の被災進行過程および断面変形のモデル化.....	31
3.1 緒言	31
3.2 水理模型実験.....	31
3.2.1 実験装置および実験方法	31
3.2.2 実験結果.....	34
3.3 被災進行過程のモデル化.....	37
3.3.1 マルコフ連鎖の概説.....	37
3.3.2 マルコフ連鎖による検討結果.....	39
3.3.3 マルコフ連鎖の適用について	40
3.4 断面変形のモデル化.....	41
3.5 モデル断面の設定.....	44
3.5.1 検討断面.....	44
3.5.2 モデル断面の諸元	45
3.6 結語	48
参考文献.....	49
第4章 消波工の断面変形による性能変化.....	51
4.1 緒言	51
4.2 断面変形による波力の変化.....	51
4.2.1 水理模型実験の概要.....	51
4.2.2 実験結果.....	55
4.2.3 数値計算の概要.....	59
4.2.4 計算結果と実験結果の結果.....	62
4.3 断面変形による越波流量の変化.....	65
4.3.1 数値計算の概要.....	65
4.3.2 数値計算の結果.....	67
4.3.3 計算結果と実験結果の比較.....	67
4.4 結語	71
参考文献.....	72
第5章 消波工の性能診断モデル.....	73
5.1 緒言	73
5.2 ニューラルネットワークの概説.....	73
5.2.1 ニューラルネットワークの構成	74
5.2.2 ニューラルネットワークの学習法.....	75
5.3 性能診断モデルの構成	76
5.3.1 入力データの項目と中間層ユニット数の設定.....	77

5.3.2	学習データおよび予測精度検証データの設定.....	77
5.4	性能に関する予測値の検討.....	78
5.4.1	学習法と中間層ユニット数の影響.....	78
5.4.2	水平波力に関する実験値と予測値の比較.....	78
5.4.3	越波流量に関する計算値と予測値の比較.....	79
5.5	結語.....	82
	参考文献.....	82
第6章	消波工の性能変化を考慮した最適予防保全レベルの検討.....	83
6.1	緒言.....	83
6.2	累積損傷モデルを用いた消波工保全モデル.....	83
6.2.1	累積損傷モデルの概要.....	83
6.2.2	限界制御モデル.....	85
6.2.3	無限期間における最適保全方策.....	87
6.3	理論モデルによる最適予防保全レベルの検討.....	92
6.3.1	1回の異常波浪による損傷の確率分布.....	92
6.3.2	最適予防保全レベルの算出.....	95
6.4	力学的観点からの予防保全レベルの検討.....	96
6.5	実用化に向けた予防保全方策の提案.....	99
6.6	モンテカルロシミュレーションにもとづく最適予防保全レベルの検証.....	100
6.6.1	期待補修費の算定の概要.....	100
6.6.2	消波ブロックを対象としたLCCの算定方法.....	104
6.6.3	期待補修費用およびLCCの算定結果.....	109
6.7	結語.....	112
	参考文献.....	113
第7章	結論.....	115
謝辞	119
付録	121

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本は台風や地震・津波など世界的にも非常に厳しい自然環境にあり、度重なる被害を受けてきた。台風では1959年の伊勢湾台風がほぼ全国にわたって甚大な被害を及ぼし、近年では、地球温暖化によって海面や海水温が上昇し、台風の大型化や大洪水によって全国的に被害をもたらしている。このような災害から海岸を防護するため、1956年に海岸法が制定され、海岸保全施設が整備されてきた。海岸保全施設とは、津波、高潮、波浪などの被害から海岸を防護し、海水の侵入又は海水による侵食を防止するための施設であり、背後の人命や財産を守る役割を担っている。このような施設において、1960年頃から堤防・護岸、突堤、離岸堤、人工リーフ、砂浜などに消波ブロックや被覆ブロックを用いるようになってきた。このうち、消波ブロック被覆堤は高度経済成長期の1960年代後半から混成堤の改良型として普及し、越波や反射波を低減する機能を有する優れた構造を持つ防波堤として活躍してきた。(図1-1)さらに、消波ブロックで波力を緩衝するため、堤体幅を縮小できるなどの効果が期待できる。また、施工面においても、型枠の組み立て、コンクリートの打設、型枠脱形の単純作業であるため特殊な工法を必要としないことや本体工のケーソンに比べて消波ブロックは質量が小さく、据付時には大型クレーンを必要としない。このため、地場の中小企業でも施工可能であり、高度経済成長期に全国に急速に普及した。一方、これらの施設は老朽化が進み、維持管理が求められる時代となった。農林水産省・国土交通省¹⁾は、全国の堤防・護岸等のうち築後50年以上経過した施設や築後年数が不明な施設は、2010年では約4割であるが、2030年には約7割に達する見込みであるとしており、このため、良好な状態に保つよう維持・修繕すべきこと及び予防保全の観点からの維持・修繕の基準を策定するためのライフサイクルマネジメントに係る検討が推進されており、消波ブロックにおいても適時・適切な保全が求められる。

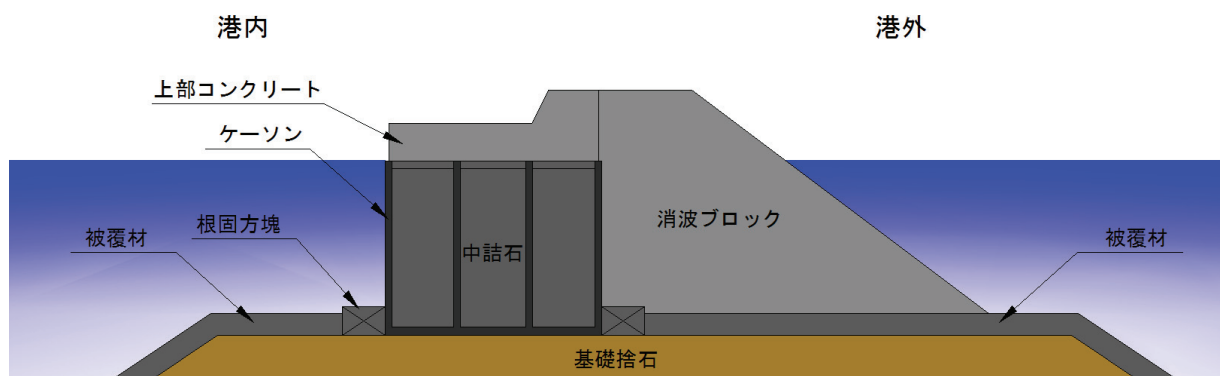


図1-1 消波ブロック被覆堤

1.2 研究の目的

本研究ではライフサイクルコスト（以下、LCC）を最小化する補修の方針（方策）を見出すことを最終的な目的として、消波ブロック被覆堤を対象に消波工の適切な維持管理システムの構築を目指すものである。2008年に農林水産省・国土交通省¹⁾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（以下、LCM）を導入し、『海岸保全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、2014年には海岸保全施設維持管理マニュアルを改訂²⁾し、事前調査による重点点検箇所³⁾の抽出、巡視（パトロール）の導入等点検の効率化、長寿命化計画の策定方法の具体化等に係る検討が示されている。維持管理計画のためのLCC算出には、施設が故障状態になる前に適切な予防対策を実施する予防保全と故障状態になった後に保全する事後保全レベルの設定やこれらにかかる費用を計上することが重要である。しかしながら、予防保全と事後保全の設定が不明瞭であり、ほとんどの場合、事後保全として復旧しているのが現状である。このため、研究や知見などによって設定根拠を示す必要がある。マニュアル²⁾では、劣化の程度を4段階にランク分けしており、消波工断面がブロック1層分以上減少している場合を要事後保全レベル相当として示されている。しかしながら、要求性能を満たしているかの性能診断がなされておらず、適切な維持管理計画に基づいた保全とはいえない。また、災害時の消波工の復旧基準として、港湾関係災害事務必携³⁾では、港湾施設においてブロックの高さの1/3～2/3程度以上、水産関係施設災害復旧事業事務必携⁴⁾では、漁港施設において1/3程度沈下とされており、海岸施設は、両者とも1/2程度沈下とされている。これらの復旧は事後保全であるか、それとも予防保全に該当するのか明確ではないことや要求性能を満たしているかの性能診断がなされていない。

性能を診断するためには、消波工の劣化による断面変形の定量的把握とこれに対する性能変化を把握する必要がある。消波工を劣化させる要因として、地盤変形、地震動、コンクリートの劣化など様々であるが、本研究では飽くまで海岸工学にもとづき、波浪を対象とした消波工の劣化を検証する。対象構造物は上記したように、消波ブロック被覆堤を対象としているが、消波工の性能としては船舶が安全に航行できるよう近海や港口を静穏にするための反射波低減性能、消波工背後のケーソンなどの本体工へ作用する波力低減性能、越波流量を減少させるための越波低減性能などが挙げられる。このうち、波力低減性能と越波低減性能に着目している。波力低減性能については、波力に対する安定性の観点から防波堤を対象としており、このような外郭施設は湾内の静穏や波浪から防護するための施設であることから、漁港や港湾などで広く用いられている。また、比較的水深が深く波浪条件も厳しいため、建設費用が大きくなることや波浪による劣化・損傷が激しいことから、性能変化を把握し適切な維持管理が必要である。仮に消波工が変形し消波性能に劣化が生じた場合、防波堤の本来の役目は外海の波浪から背後施設を防護することであり、防波堤本体の安定性能が維持できているかが重要である。万一、このような大型の施設が損壊した場合、復旧には長期間を要するため、その間の防護できないことによるリスクも大きい。

したがって、消波工が変形することによる消波性能よりも、ケーソンなどの本体工に作用する外力（波力）の変化に着目して消波工を維持管理することが優先されるべきである。次に、越波低減性能については、越波増大による港内の静穏度低下や背後施設の損傷などが考えられることから様々な施設が対象となる。越波流量は主に護岸天端高算定で用いられ、外郭施設などの沖合の構造物ほど波浪条件は厳しくはないが、背後に道路や民家などが存在することが多く、激浪時には越波による道路通行止めなどによる間接的な損害や家屋の直接的な被害が生じる可能性がある。このような施設においても適切な維持管理が必要である。以上、ケーソンなどの本体工に作用する波力と越波流量の2つの性能について、水理模型実験と数値計算の両面から検討する。

また、性能が維持されているかを診断するため、性能診断モデルの構築が必要である。性能変化をもたらすパラメータは消波工の断面変形だけではなく、波浪条件や堤体諸元などの複数のパラメータが混在し、どのパラメータが支配的であるか把握することは困難であり、それぞれの因果関係を究明することは容易ではない。このような相互間の不明確な情報処理を分析するために有効なツールとして、本研究ではニューラルネットワークを利用し、その有用性について検討する。

一方、供用期間中に発生するLCCには初期費、補修費、故障による損害費などが挙げられる。構造物の完成直後から進行する劣化に対し、要求性能を保持させるためには、適切な維持管理が必要であり、初期建設費のみならず供用期間中の補修費を考慮する必要がある。初期建設費を抑え頻繁に補修が必要となれば、かえって費用の増大を招く可能性もある。補修費を抑えると、構造物の耐力を極限まで低下させるため、甚大な被害を受けるリスクが高くなる。また、故障状態となると背後施設が利用できないことによる損害費が発生することも考えられる。このように供用期間中のコストが最小となるように効率のよい保全計画を立てることが重要である。本研究では、消波工を保全するための最適予防保全レベルの導出には佐藤ら⁵⁾のモデルを用いる。このモデルでは、予防保全と事後保全の関係について検討しており、予防保全レベルは期待保全費用に大きく影響することを確認し、期待保全費用を最小化する最適予防保全レベルを理論的に導出している。本研究では、消波工を保全する理論的な最適予防保全レベルの導出と、この保全レベルが性能を維持できているか力学的な観点からの検証を行い、性能変化を考慮した最適予防保全レベルを見出す。また、モンテカルロシミュレーションにより消波工のLCCを算出し、理論モデルの妥当性を検証する。

1.3 論文の構成

第1章では、本論文の概要と目的について述べた。

第2章では、沿岸開発技術研究センターのVOF (Volume of Fluid) 法を用いた数値波動水路 (CADMAS-SURF) について基本的な理論を概説するとともに、数値解析における条件の設定方法について詳細に述べ、適切なパラメータ設定する。特に、本研究の対象となる消波工のポーラスセルの設定については詳細に検討する。本研究における数値解析の位置づけであるが、消波工

の性能変化の変動特性を把握するため、防波堤に作用する波力と越波流量を計算し、水理模型実験で得られたデータとの比較やニューラルネットワークのチューニングデータとして活用する。

第3章から第6章では本論文の研究内容であり、論文全体の流れと各章の位置づけを図1-2のフロー図として示す。

第3章では、消波ブロック被覆堤を対象とし、水理模型実験によって消波工に波浪による累積ダメージを与え、これに伴う断面変形データを計測した。このデータにもとづいて被災形態、変形過程を定量的に把握し、最終的に消波工の性能変化を検証するため、変形量に対応した平均的な断面形状（モデル断面）を決定する。

第4章では、第3章でモデル化した消波工の断面変形を用いて性能変化を検証する。消波工の性能としては消波工背後のケーソンなどの本土工へ作用する波力低減性能と越波流量を減少させるための越波低減性能の2種類とした。波力低減性能については、波力に対する安定性の観点から防波堤を対象とし、越波低減性能については港内の静穏や背後施設の損傷などが考えられることから様々な構造物が対象となる。これらの性能を水理模型実験と数値計算の両面から検証し、両者の比較や変動特性を定量的に把握することを目的とする。

第5章では、性能診断モデルの構築を目的とする。消波工の変形に伴う防波堤鉛直面に作用する波力と越波流量の性能が維持されているか診断するためには、消波工の断面変形に対する性能変化のデータが必要不可欠であり、第3章の消波工の断面変形のモデル化、第4章の消波工の断面変形による波力や越波流量の変動データを蓄積しており、これらのデータにもとづき消波工の性能診断モデルを構築する。これらのデータ処理に関しては、複数のパラメータが混在し、どのパラメータが支配的であるか把握することは困難である。このような相互間の不明確な情報処理を分析するために有効なツールとしてニューラルネットワークを用い、性能予測モデルの構成と予測精度を検証する。

第6章では、消波工を保全するための期待保全費用を最小化する最適予防保全レベルの導出には佐藤ら⁵⁾の理論モデルを用いる。まず、この理論モデルの概説と必要な条件の設定方法について詳細に述べ、最適予防保全レベルを導出する。また、この理論的に求めた最適予防保全レベルにおいて安定性能を維持できているか力学的な観点からの検証を行い、性能変化を考慮した最適予防保全レベルを検証する。また、供用期間50年のLCCをモンテカルロシミュレーションによって算出し、理論モデルの妥当性を検証する。

第7章は、第2～6章における結論を要約し、今後の課題について述べる。

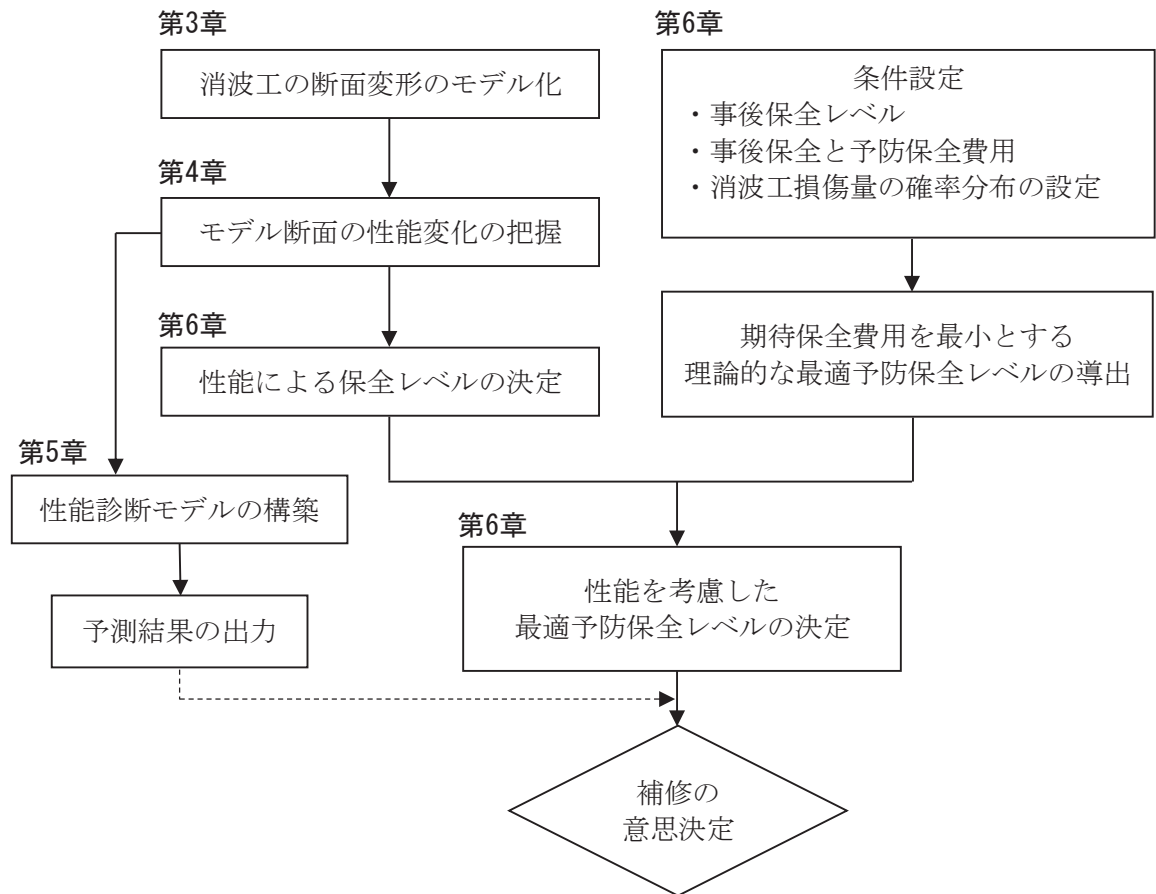


図 1-2 論文のフロー図

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) 農林水産省・国土交通省：海岸保全施設維持管理マニュアル ～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～，2014.
- 3) 社団法人日本港湾協会：港湾関係災害事務必携，68p，2007.
- 4) 公益社団法人全国漁港漁場協会：水産関係施設災害復旧事業事務必携，平成 27 年度版，pp.65-66，2015.
- 5) 佐藤毅，松見吉晴，角勇人，平山隆幸，太田隆夫：供用期間を考慮した消波ブロックの損傷度に基づく予防保全問題，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，pp.951-955，2009.

第2章 数値波動水路による数値解析

2.1 緒言

沿岸開発技術研究センターの数値波動水路^{1),2),3)}(CADMAS-SURF)は自由表面運動をコンピューター上で精度よく計算できる手法として民間・研究機関・大学のメンバーらによって開発されたVOF (Volume of Fluid)法であり汎用性が高い。2001年に発刊された数値波動水路の研究・開発¹⁾から現在に至るまでに、2008年に実務計算事例集²⁾や2010年に3次元構造物に対応したCADMAS-SURF/3D数値波動水槽の研究・開発³⁾が発刊され、現在では研究者のみならず設計実務レベルで用いられており、本研究では、有効なツールの1つとして採用することとした。本研究における数値解析の位置づけであるが、消波工の性能変化の変動特性を把握するため、防波堤に作用する波力との越波流量を計算する。計算結果は、水理模型実験で得られたデータとの比較や実験データの補間データ、ニューラルネットワークのチューニングデータとして活用する。本章では、数値波動水路による数値解析の検討にあたって、基本的な理論について概説するとともに、数値解析における条件の設定方法について詳細に述べる。特に、本研究の対象となる消波工のポーラスセルの設定については詳細に検討する。

2.2 数値波動水路の概説

2.2.1 基礎方程式

海岸域における波動場の解析では、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⁴⁾には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。連続式は質量保存の法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 : 水平・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。

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

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

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)、式(2.3)の λ_v 、 λ_x 、 λ_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。

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \tag{2.4}$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \tag{2.5}$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \tag{2.6}$$

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

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

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

ここに、 Δx 、 Δz ：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とする VOF (Volume of Fluid) 法が用いられている。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により無反射造波が可能である。式 (2.1) ~ 式 (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、造波モデルについて規則波では 5 種類、不規則波では 1 種類の造波関数が利用できる。規則波の造波関数はストークス波第 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，不規則波ではマトリクスデータ（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波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 つが用意されている。

(1) Sommerfeld の放射境界

境界条件として，以下に示す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。波速 C は微小振幅波理論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，さらに工夫が必要である。

(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衰させることで，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_1, θ_2 ：無次元の係数である。

2.3 入射波の造波法

本研究の検討項目は、波力と越波流量の2項目である。波力については規則波、越波流量については不規則波を用いる。規則波の造波モデルには水理模型実験で用いた造波装置と同様のピストンタイプ、不規則波についてはマトリクスデータのモデルを採用した。

2.3.1 規則波の造波法

規則波のピストンタイプの造波モデル⁵⁾について、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

数値波動水路における不規則波の造波法⁶⁾として、まず、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に適していることから、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・光易型スペクトルは次式で示される。

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

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水位変動、流速の評価を示す。不規則波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 は成分派の周波数 f_m に対応した波数であり、次式で表される。

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

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)、式(2.24)、式(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、高周波成分が水表面付近で非常に大きな流速値となってしまうため、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 ($=H_{1/3}L^2_{1/3}/h^3$) である。なお、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。本研究における設定値を示す。

(1) 計算時間・時刻歴の点数

波浪統計学では、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。大野・松見ら⁷⁾は不規則波の構成波数について研究しており、約 600 波以上とするのが望ましいとされている。

時刻歴の点数についてはデータ時間間隔が大きいと捉える波形の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、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・光易型スペクトルを使用する。標準形のスペクトルの係数は 0.257, -1.03 が用いられるが、水理模型実験では係数 0.205, -0.75 の方が適切であるとされている。

(3) 周波数 f_m の選び方

周波数の選び方としては、下記の①, ②の 2 種類ある。

- 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 $S(f_m) \Delta f_m$ 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), 式 (2. 28) のどちらを使用するか選択する。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。

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⁸⁾

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、 $\Delta X=0.02\text{m}$ 、 $\Delta Z=0.01\text{m}$ とし、 $\Delta X:\Delta Z=2:1$ となるように設定した。ただし構造物周辺では $\Delta X=0.01\text{m}$ としている。

2.4.2 差分スキームの設定⁹⁾

数値波動水路では、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にあり、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 セルの分類¹⁰⁾

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、以下に示す3つに分類される。

- 1) 気体また液体で構成される一般セル
- 2) 気体または液体と構造物で構成されるポーラスセル
- 3) 構造物で構成される構造物セル（障害物セル）

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に設定することができ、これにより、複雑

な断面形状を再現することができる。例えば、消波構造物や基礎捨石などは一定の空隙を有しているため気体や液体が透過する構造物であることからポーラスモデル、護岸や防波堤などの気体や液体が透過しない構造物は構造物セルで再現することができる。

2.4.4 ポーラスセルの設定

本研究で対象とする消波工のモデル図を図 2-1 に示す。図中の内、消波工および基礎捨石は気体または液体と構造物から構成されており、これらはポーラスセル¹⁰⁾として設定する。堤体断面をセルに分割する際、セルは 5 つに分類される。①セル内の全てが流体の場合、②セル内に流体と消波工が混在する場合、③セル内の全てが消波工の場合、④セル内に流体と基礎捨石が混在する場合、⑤セル内の全てが基礎捨石の場合の 5 パターンである。③、⑤はセル中の水の割合（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のパターンは、セル 1 つ 1 つについて計算により空隙率を求めなければならない。②の場合は、セルに含まれる消波工内の水の割合と消波工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。④の場合も、セルに含まれる基礎捨石内の水の割合と基礎捨石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。

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。

ポーラスセルの入力値として、慣性力係数 C_M 、抵抗係数 C_D 、気体または液体に相当する空隙率を指定する必要がある。数値波動水路では消波工や基礎捨石の慣性力係数 C_M 、抵抗係数 C_D については、これまでの研究結果からそれぞれ 1.2, 1.0 を標準的な値¹¹⁾として示している。

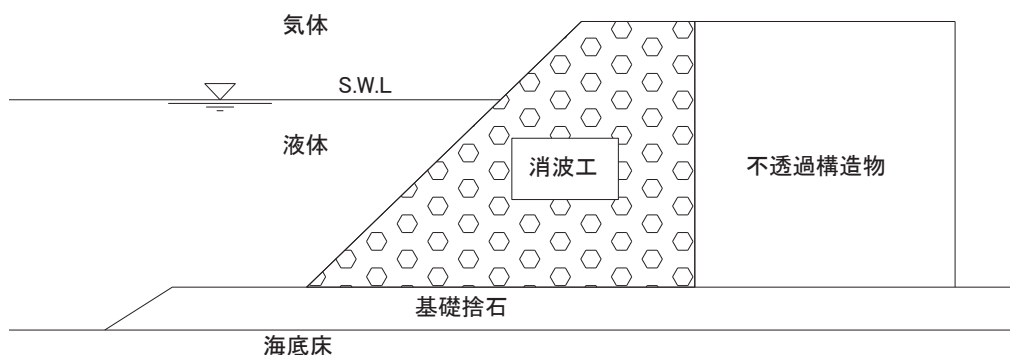


図 2-1 消波工のモデル断面

2.4.5 Dupuit-Forchheimer 則¹²⁾

数値波動水路にはもう一つのポーラスセルの設定として、粒径 d の効果を取り込んだ Dupuit-Forchheimer 則（以下 D-F 則と記す）を導入している。式(2.7)、式(2.8)に示される流速の 2 乗に比例する抵抗力を用いた場合には、捨石の粒径と抵抗係数 C_D の関係が不明であるなどの問題があるため、数値波動水路には新たに D-F 則が追加され、ユーザーが選択できるようにした。D-F 則では、抵抗力 R_x 、 R_z は、次のような形でモデル化されている。

$$R_x = \gamma_v (\gamma_x u) \left(\alpha + \beta \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_z w)^2} \right) \quad (2.30)$$

$$R_z = \gamma_v (\gamma_z w) \left(\alpha + \beta \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_z w)^2} \right) \quad (2.31)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1 - \gamma_v)^3}{\gamma_v^2} \frac{v}{d^2} \quad (2.32)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1 - \gamma_v)}{\gamma_v^3} \frac{1}{d} \quad (2.33)$$

ここに、 α_0 、 β_0 ：透過性構造物の構成材料による係数、 d ：構成材料の代表径である。D-F 則では、空隙率 γ_v 、慣性力係数 C_M 、構成材料の係数 α_0 、 β_0 、構成材料の代表径 d を指定する必要がある。数値波動水路で紹介されている係数は表 2-1 に示す近藤¹³⁾の研究を参考にしている。

表 2-1 材料ごとの係数の設定

		γ_v	C_M	α_0	β_0	d
消波工 なし	石（乱積）	0.43	1.2	1500	3.6	0.02
消波工 あり	石（乱積）	0.43	1.2	1500	3.6	0.02
	10t 型異形ブロック（乱積）	0.50	1.2	2100	2.2	0.08

2.4.6 波力計算法¹⁴⁾

数値波動水路ではセルごとに圧力を出力することができる。実験で波圧計を設置する場合、構造物に埋め込むことが多いが、数値波動水路による圧力出力点は障害物（OBST）の中でなく、

流体の存在するセル（障害物セルの外側）を指定しなければならない。このため、構造物を解析領域底面や障害物セルで設定した海底地形上に設置した場合には、揚圧力は算定できないことに注意が必要である。なお、捨石マウンドなどポーラスモデルで設定した空隙率が 1.0 未満の構造物セルでは、流体の圧力を出力できる。また、表面セルに関しては、表面セル内の水表面の圧力が 0 となるように設定されている。一方時系列ファイルに出力される圧力値はセルの中心の値であるため、表面セルの F 値が 0.5 よりも小さい場合（表面セル内の流体の割合が半分未満で、中心が気体側に存在すると判定される場合）には、負の値が出力されることにも注意が必要である。波力（波圧合力）を算出する場合は、各セルで出力した同一時刻歴の波圧を面積積分により波力を算出する。データの処理上では波圧の出力位置の間隔は大きい方が有利であるが、必ずしも静水面で最大となるとは限らない。このような状況を踏まえ、格子間隔で計測することが望ましい。

本研究では、防波堤消波工を対象としており、消波工背後に位置するケーソンなどに作用する波力を計算するため、この構造物セルの沖側直前のセルの圧力を出力させ、これを面積積分させて波力を求める。

2.4.7 圧力計測におけるデータ時間間隔

圧力を計測する際もデータ時間間隔が大きいと波形の精度が悪くなるため、データ時間間隔は対象となる周期特性に対し適切に設定する必要がある。特に圧力の計測の場合は、衝撃力が生じることがあり、このような波形の場合、力の作用時間が非常に短いためデータ時間間隔を小さくする必要がある。このため、圧力計による衝撃力の計測は、力の作用時間を確認した上で設定する必要がある。

2.4.8 圧力ノイズ処理機能について ¹⁵⁾

数値波動水路では、計算過程において圧力ノイズ処理の根本的な対策は実施されていない。圧力ノイズは、対象とするセルの状態が気体セルもしくは表面セルから流体セルに変化した場合に、その流体セルが連続の式を満たしていないために生じる。このため、オプションデータで流速・圧力計算のサブグループを使用し、数値的なスパイクノイズを除去する方法が実務的な対策として有効とされている。サブグループによる圧力ノイズの対策方法は、①気体セルもしくは表面セルから流体セルに変化するセルがあった場合、次のステップでの時間間隔 Δt を求めた後に、 $\Delta t = \Delta t / N$ として、流速および圧力の計算のみ繰り返し計算を実施する。②気体セルから流体セルに変化した場合、そのセルの圧力は周りの流体セルの平均値としている。ただし、完全に除去できるとは限らないため、留意する必要がある。サブグループ回数は 2 回（通常計算+1 回）が標準とされており、実務上問題の無い程度にノイズ処理が可能であるが、一方で、計算過程が増加するために計算時間の増大を伴う。

本研究では、圧力計による波力計算の際には、オプションデータで流速・圧力計算のサブグループを使用し、数値的なスパイクノイズを除去することとした。

2.5 ポーラスセルの抵抗力算定法の検討

2.5.1 検討目的

捨石や消波ブロックによる透過性構造物を含む計算を行う場合、CADMAS-SURF (Ver. 5.1) では透水層における抵抗力を算定するために、前述のように抵抗係数 C_D を用いるモデルと D-F 則によるモデルの 2 つが組み込まれており、何れかを選択することになる。鈴木ら¹⁶⁾は、傾斜堤と消波ブロック被覆堤を対象とした水理模型実験と数値計算の結果を比較することにより、D-F 則の適用性を示しているが、数値波動水路のユーザーの視点からは、2 つのモデルの比較も含めてさらに検討を加えることが必要であると考えられる。また、D-F 則における係数に関しては、近藤¹³⁾が透過性構造物の各種材料に対する値を与えており、鈴木ら¹⁶⁾も捨石と消波ブロックに対する値を提案しているが、これについても系統的な検証が必要である。本節では、捨石および消波ブロックを用いた消波工を対象に、波の反射率と越波量を評価指標として、規則波を用いた水理模型実験と数値計算の結果を比較することで、透水層の抵抗力の算定方法と係数の設定について検討する。

2.5.2 水理模型実験

水理模型実験は、造波水路（長さ 29m、幅 0.5m、高さ 0.75m）内の水平床上に、捨石または消波ブロックを被覆層とする模型を設置し、規則波を用いて行った。図 2-1 と表 2-2 に実験装置の概要と波高計の設置位置（造波板からの距離）を示す。消波工は、法面勾配 1 : 1.5、天端高および天端幅 10cm であり、砂利によるコア部の有・無の 2 種類とした。水深は 35cm、堤体背面には高さ 45cm のベニヤ板を止水板として設置しており、越波量計測時には止水板背後に越波枡を置いた。被覆層には、質量の範囲が 35~50g（代表粒径 $D_n=2.5\text{cm}$ 、空隙率 $\gamma_v=0.39$ ）、50~70g（ $D_n=2.8\text{cm}$ 、 $\gamma_v=0.41$ ）、70~100g（ $D_n=3.2\text{cm}$ 、 $\gamma_v=0.41$ ）である 3 種類の碎石と、質量 73g、 $D_n=3.2\text{cm}$ の消波ブロック（乱積、 $\gamma_v=0.5$ ）を使用した。コア部には、目開き 0.95cm のふるいを通り 0.476cm のものに残る砂利を用いており、 $D_n=0.6\text{cm}$ 、 $\gamma_v=0.37$ である。実験では、反射率を測定するために波高 $H=6\text{cm}$ 、周期 $T=1.0\sim 2.0\text{s}$ で 0.2s 刻みに設定した規則波（波形勾配 0.017~0.042）を造波し、水位変動をサンプリング間隔 0.05s で 100s 間計測した。反射率は、水路内に設置した波高計のうち 2 本（W2、W3）の水位変動データを用いて、合田ら¹⁷⁾の入反射波分離法により求めた。また、 $H=13\text{cm}$ 、 $T=1.4, 1.6, 2.0\text{s}$ と設定した規則波を造波し、波が安定した状態になった初めの 5 波分の越波量を計測して、1 波あたり・単位幅あたりの越波量を求めた。なお、後述する数値計算における波高設定および反射率・越波量の検証のため、合わせて以下のような実験を行っている。

- ・消波工と止水板を取り除いて水路端部に消波材を設置し、上記の諸元の波を造波する実験。
- ・止水板のみを設置して上記の諸元の波を造波し、反射率と越波量を計測する実験。

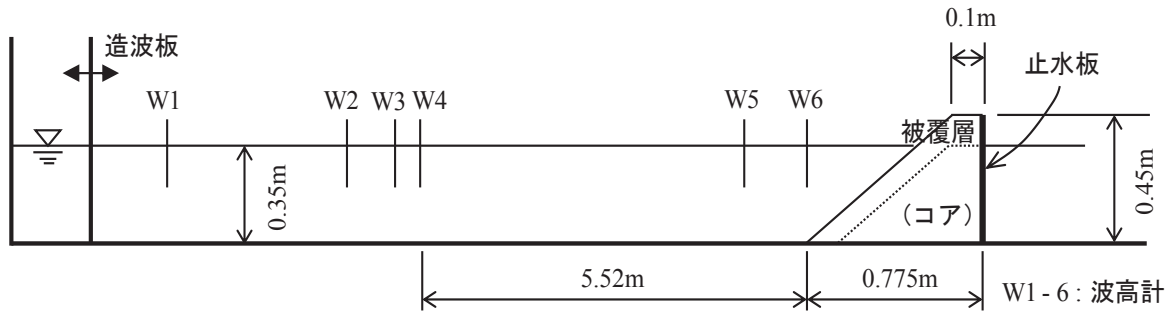


図 2-1 実験装置の概要

表 2-2 波高計の設置位置

	W1	W2	W3	W4	W5	W6
距離 (m)	3.0	12.42	12.72	12.92	16.45	18.44

2.5.3 数値波動水路による計算

(1) 抵抗力の算定方法

数値波動水路における多孔質体からの抵抗力のモデルとしては、①抵抗係数 C_D を用いるもの、②D-F 則によるものがある。①のモデルで抵抗力は式 (2.7)、式 (2.8) のように表される。このモデルについて鈴木ら¹⁶⁾は、式 (2.7)、式 (2.8) には格子間隔 Δx 、 Δz が含まれているため、これらの値により計算結果が異なること、透過性構造物を構成する捨石などの粒径の影響が評価できず、粒径と C_D との関係が明確でないことを問題点として指摘している。

一方、D-F 則を用いた抵抗力の算定式は前述したように式 (2.30)～式 (2.33) のように表される。近藤¹³⁾は各種材料に対する α_0 、 β_0 の値を示しており、石では $\alpha_0=800\sim 1500$ 、 $\beta_0=1.8\sim 3.6$ 、消波ブロック（テトラポッド）乱積では $\alpha_0=2100$ 、 $\beta_0=2.2$ としている。鈴木ら¹⁶⁾は、砕石と消波ブロック（テトラポッド）のそれぞれで構成された傾斜堤における反射率と伝達率、および消波ブロック被覆堤マウンド（砕石）内の流速を対象として、 $\alpha_0=734$ 、 $\beta_0=1.04$ （石）、 $\alpha_0=426$ 、 $\beta_0=0.7$ （消波ブロック乱積）を用いた計算結果が実験結果とよく合うことを示している。

(2) 数値計算の設定

数値波動水路における計算領域については、大きさが水平(x)方向 20.10m(通過波検定時 28.00 m)、鉛直(z)方向 0.80mで、 $\Delta x=2\text{cm}$ 、 $\Delta z=1\text{cm}$ とした。差分スキームは VP-DONOR、スキームパラメータは 0.2 である。造波モデルとして造波境界を用い、造波時間はすべての計算において 60s とした。

まず、計算領域の岸側端部に幅 6m のエネルギー減衰帯のみを設置して通過波検定を行い、水理模型実験での波高に対応するように設定値を決定した。つぎに、反射率および越波量の検証のため、実験における止水板と同じ位置に高さ 45cm、厚さ 2cm の障害物(不透過壁)を設置し、その岸側領域($x=19.24\sim 20.10\text{m}$)を越波柵(初期水位 10cm、岸側境界は壁境界)として、実験に対応する計算を行った。実験における波高計と同じ位置での水位変動と、越波柵を含む領域($x=19.24\sim 20.10\text{m}$ 、 $z=0\sim 0.80\text{m}$)における F 値の面積積分値を出力し、これらにより反射率と越波量を求めた。反射率は、W2、W3 に対応する位置での水位変動データから入射波分離法により計算し、越波量は実験と同様に 5 波分の越波量から 1 波あたり・単位幅あたりの越波量を求めた。実験結果との比較により、反射率では $T=1.0\text{s}$ で約 10% の誤差が生じたが、他の周期では 5% 以内であり、越波量では約 20% 以内の誤差であることを確認した。

護岸を設置した場合の計算については、抵抗力のモデル①では被覆層(砕石、消波ブロック)、コア部ともに $C_D=1.0$ 、 $C_M=1.2$ としたケース(CD 型と表記)のみであり、したがって透水層内の材料の違いは空隙率だけで表される。モデル②で被覆層が砕石の場合は、近藤¹³⁾が石に対する α_0 、 β_0 の上下限值としている値を組み合わせた 2 つのケース($\alpha_0=1500$ 、 $\beta_0=3.6$; DF 型と表記、 $\alpha_0=800$ 、 $\beta_0=1.8$; DF2 型と表記)とし、コア部の α_0 、 β_0 は被覆層と同じ値とした。モデル②で被覆層が消波ブロックの場合は、近藤¹³⁾がテトラポッドに対して示している $\alpha_0=2100$ 、 $\beta_0=2.2$ を用い、コア部は DF 型、DF2 型それぞれの値とした。なお、モデル②ではすべての計算でどの材料についても $C_M=1.2$ としている。被覆層とコア部は、POROUS.TBL によりそれぞれの領域を設定し、各材料の γ_r と D_n は 2.5.2 項に示した値を用いている。検証ケースは表 2-3 に示す。

表 2-3 検証ケース

ケース	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'
被覆層	砕石 35~50g		砕石 50~70g		砕石 70~100g		消波ブロック	
コア部	有	無	有	無	有	無	有	無

2.5.4 実験結果と計算結果の比較

図 2-2 に $T=1.0$ 、1.4、1.8s のケースにおける反射率 K_R を示す。横軸の A~D' が表している護岸の種類(被覆層の材料とコア部の有無)は以下のとおりである：A=砕石 35~50g、コア部有；A'=砕石 35~50g、コア部無；B=砕石 50~70g、コア部有；B'=砕石 50~70g、コア部無；C=

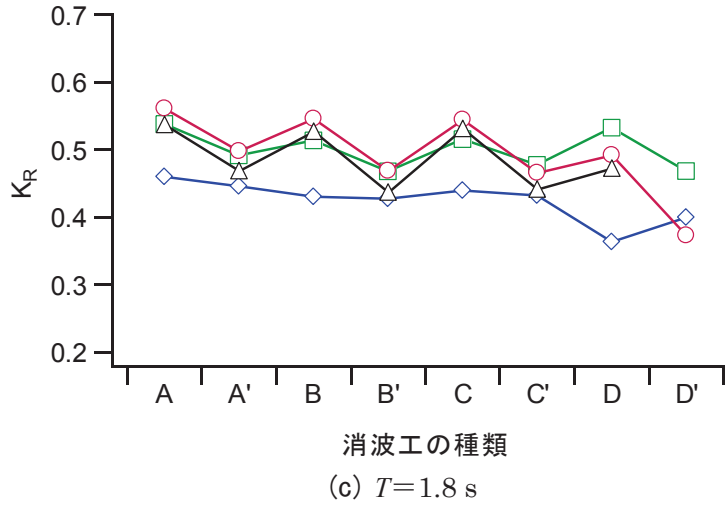
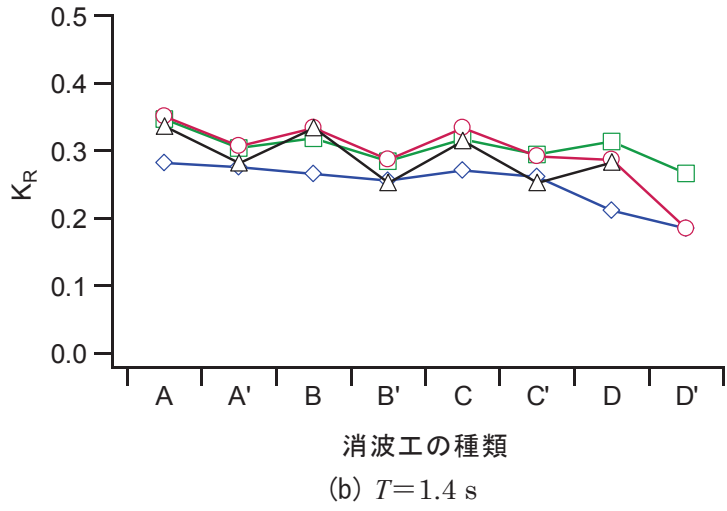
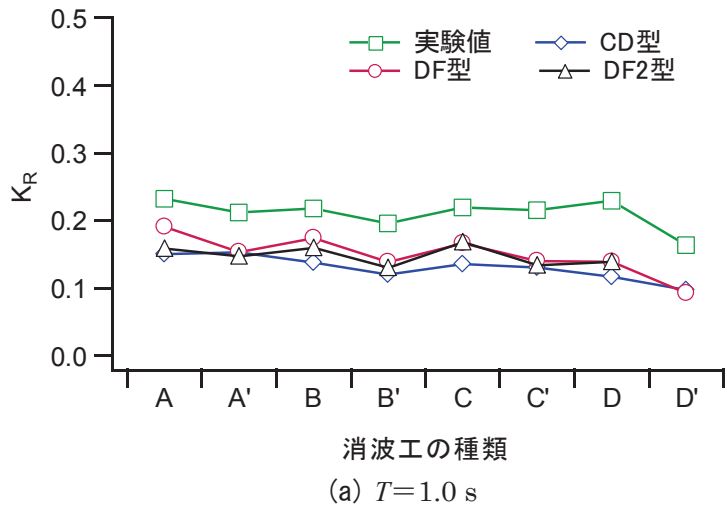


図 2-2 消波工の種類と反射率

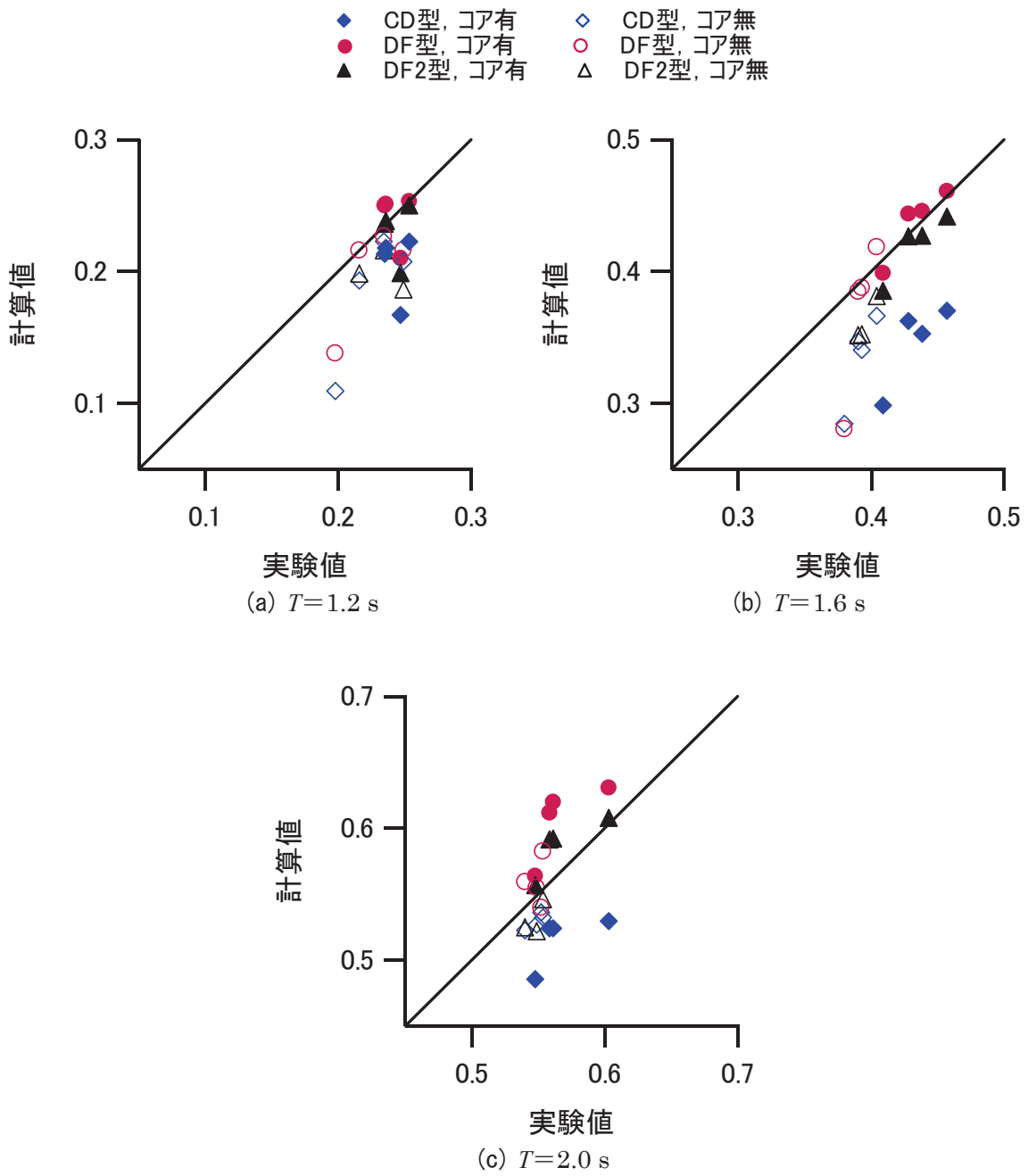


図 2-3 反射率の比較

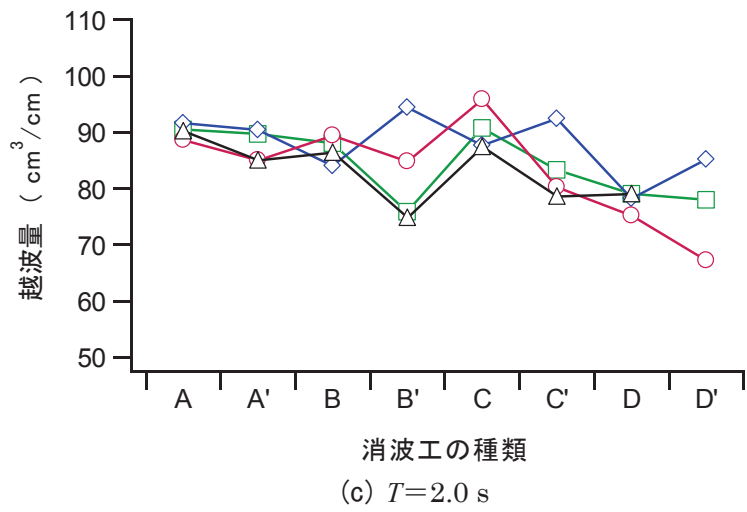
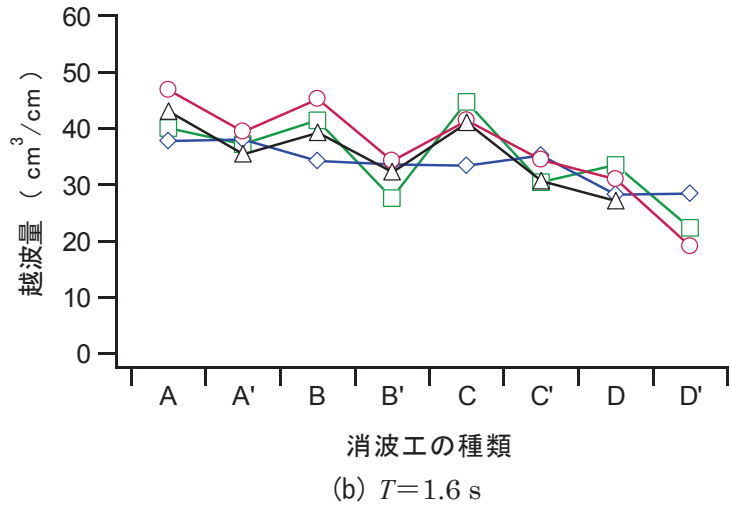
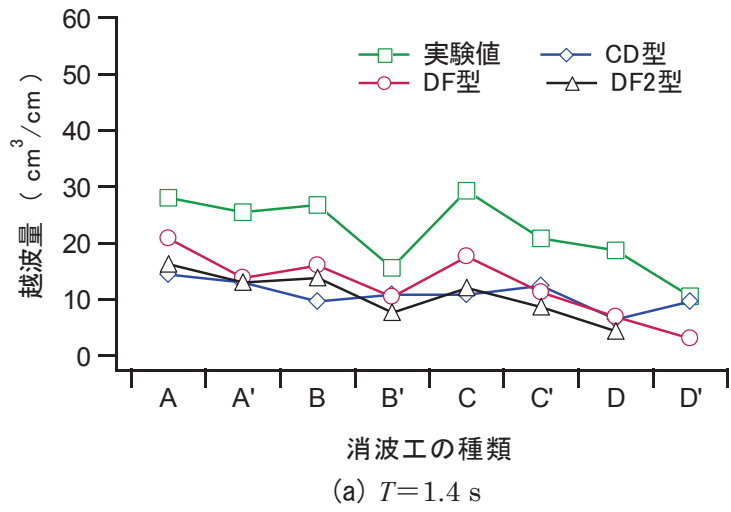


図 2-4 消波工の種類と越波量

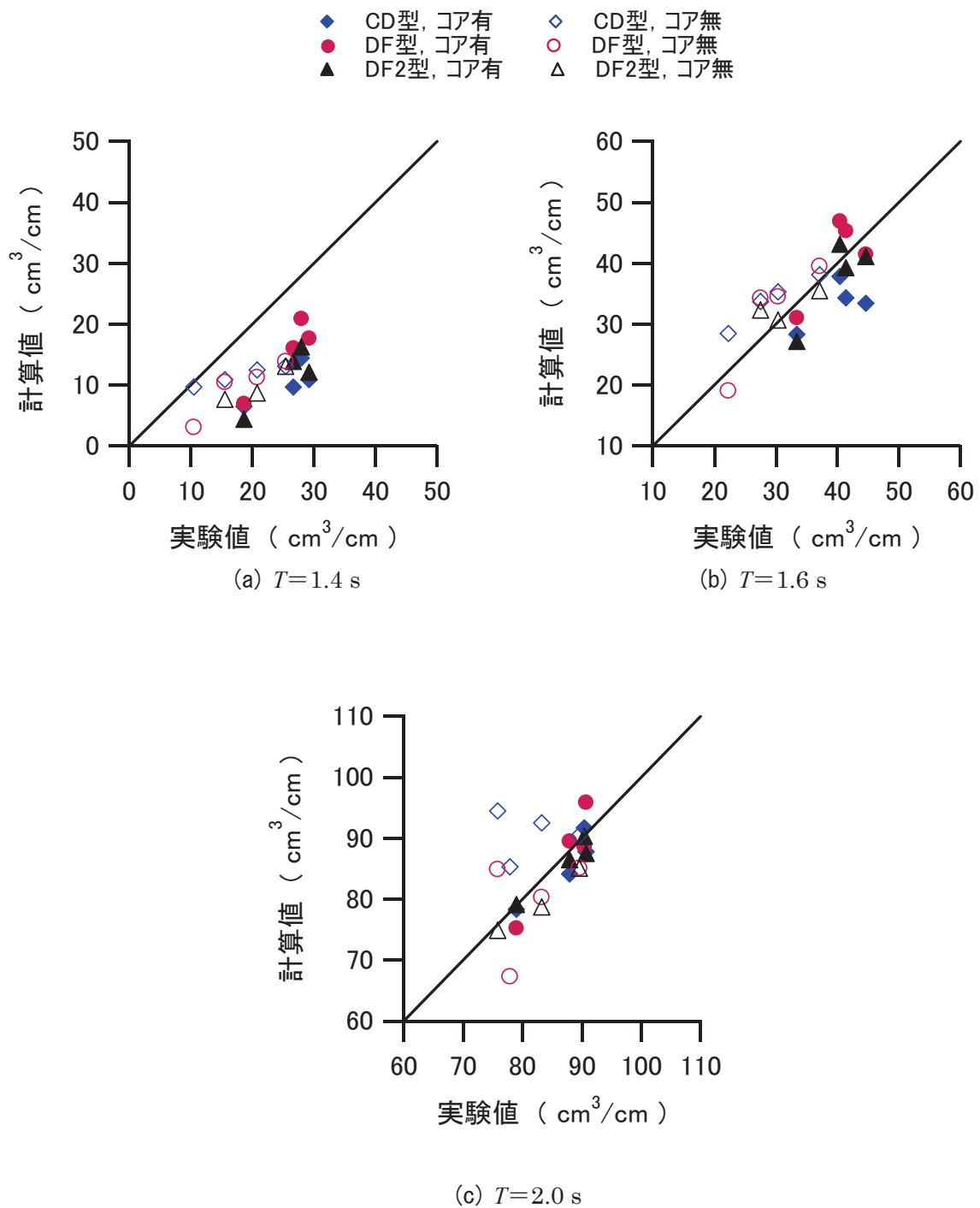


図 2-5 越波量の比較

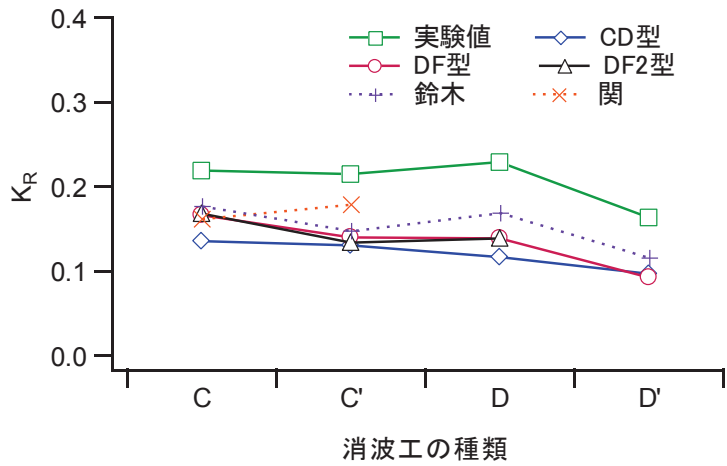
砕石 70~100g, コア部有 ; C'=砕石 70~100g, コア部無 ; D=消波ブロック, コア部有 ; D'=消波ブロック, コア部無. 図 2-3 は $T=1.2, 1.6, 2.0s$ の反射率を示したものである. これらの図から, $T=1.0s$ では実験値と計算値との差異が見られるものの, 実験値と DF 型, DF2 型の結果がよく対応していることがわかる. なお, $T=1.0s$ での差異は, 2.5.3 項(2)に述べた誤差に関係するものと考えられる. 図 2-2 に示されているように, 被覆層の材料が同じである場合, コア部有のほうがコア部無よりも K_R は大きくなり, DF 型, DF2 型ではその変化を表すことができている. コア部無のケースでは CD 型, DF 型, DF2 型で K_R の差はあまりないが, CD 型ではコア部の有無による K_R の変化が小さい. 同様の傾向は $T=1.2, 1.6, 2.0s$ の場合にも見られた. これについては, 2.5.3 項(2)に述べたように CD 型では透水層内の材料の違いが空隙率だけで表されているのに対し, DF 型, DF2 型では粒径の影響が考慮されていることから, 実験値に近い結果が得られたと考えられる. また, DF 型と DF2 型の比較では, DF 型のほうが DF2 型よりも反射率はわずかに大きく, 実験値との誤差は全体的に DF 型のほうが小さい. なお, 消波ブロック・コア部無 (D') のケースで, 実験値と計算値 (CD 型, DF 型) は $T=2.0s$ を除いて対応がよくない (図 2-3(a), (b) では左下の点) が, その理由は明らかでない.

図 2-4, 図 2-5 は 1 波あたり・単位幅あたりの越波量を示したものであり, $T=1.4s$ では 2.5.3 項(2)に述べた誤差に関係すると考えられる実験値と計算値との差があるものの, 全体的には DF 型, DF2 型のほうが実験値と合っていることがわかる. 反射率と同様に, 被覆層の材料が同じである場合, コア部有のほうがコア部無よりも越波量は多くなるが, DF 型, DF2 型はその変化を表しており, その理由は反射率の場合と同様であると考えられる. DF 型と DF2 型の比較については, ほとんどのケースで DF 型のほうが DF2 型よりも越波量が大きく, 全体的に DF 型のほうが実験値との誤差は小さいが, $T=1.6, 2.0s$ では DF2 型のほうが実験値と合っている.

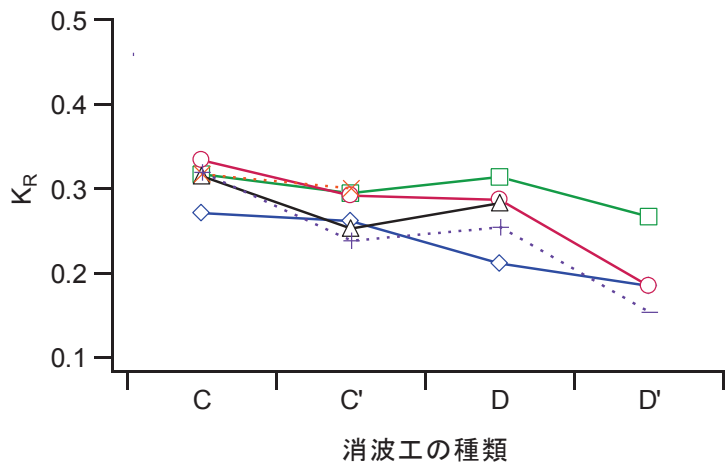
2.5.5 異なる係数値による計算結果の比較

2.5.3 項(1)に述べたように, 鈴木ら¹⁶⁾は石に対して $\alpha_0=734, \beta_0=1.04$, 消波ブロック (テトラポッド, 乱積) に対して $\alpha_0=426, \beta_0=0.7$ を用いている. また, 関ら¹⁸⁾は捨石傾斜堤における反射率, 透過率およびエネルギー損失量を対象として, 水理模型実験の結果と CADMAS-SURF/3D³⁾による計算結果との比較により, $C_D=2.0, C_M=2.4$ がよいとしている. なお, 関ら¹⁸⁾は構造物による波高の変化に対しては, 特に C_D の影響が大きいと述べている. これらの係数値を用いた場合の結果を比較するため, 本研究で設定した消波工のうち C, C', D, D' を対象として, $T=1.0, 1.4, 1.8s$ での反射率と $T=1.4, 1.6, 2.0s$ での越波量を計算した. ただし, $C_D=2.0, C_M=2.4$ は捨石に対する値であるため, C と C' について計算を行い, C でのコア部には同じ C_D, C_M の値を用いた. 鈴木ら¹⁶⁾の値を用いる場合の C では, 被覆層・コア部ともに石に対する係数値, D では被覆層に消波ブロックに対する値, コア部には石に対する値を使用した.

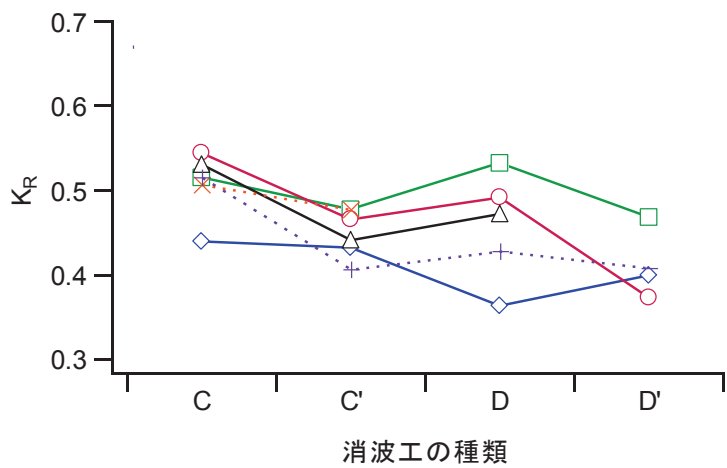
図 2-6, 図 2-7 に 2.5.4 項での結果も合わせて反射率と越波量の計算結果を示す. 鈴木ら¹⁶⁾の値を用いた結果において, 反射率は $T=1.4, 1.8s$ のケースで DF 型, DF2 型より小さく, 越波量では $T=1.4, 1.6s$ で DF 型, DF2 型と同程度, $T=2.0s$ ではそれらより大きな値である. 全体的



(a) $T=1.0$ s



(b) $T=1.4$ s



(c) $T=1.8$ s

図 2-6 係数値による反射率の相違

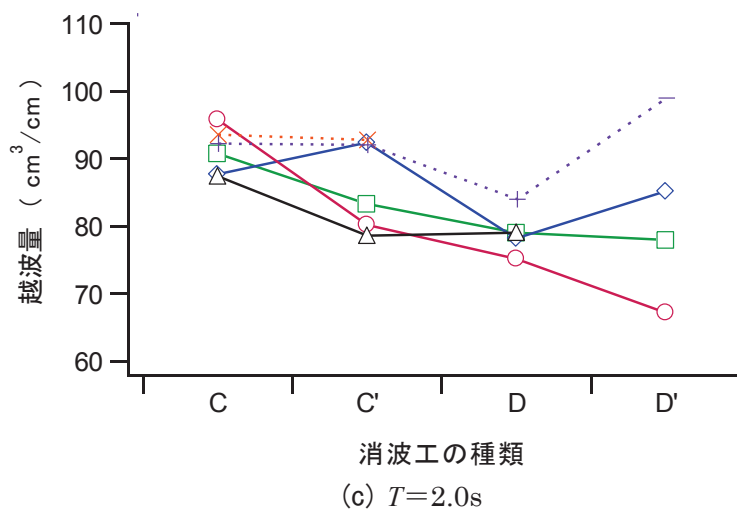
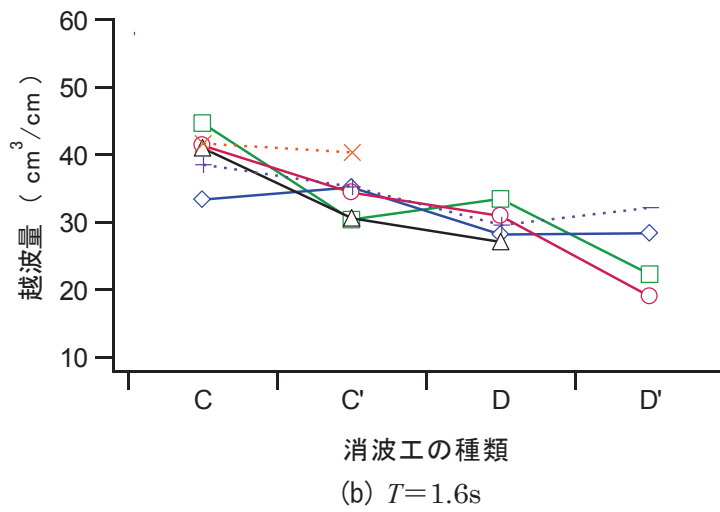
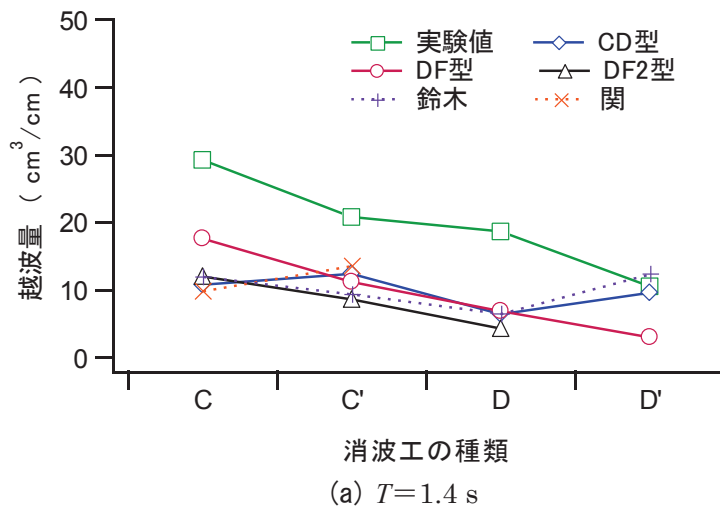


図 2-7 係数値による越波量の相違

に DF 型, DF2 型より実験値との差は大きくなっている. 関ら¹⁸⁾の値を用いた計算結果で, 反射率は CD 型より大きく, $T=1.4$, $1.8s$ のケースでは実験値に近い値であり, 越波量では $T=1.6$, $2.0s$ の C (コア部有) で実験値とよく合っているが, C' (コア部無) では差が若干大きくなっている. 図 2-2~図 2-7 に示した反射率と越波量に関する結果から, 本研究で設定した条件下では, D-F 則を用い, 石に対して $\alpha_0=1500$, $\beta_0=3.6$, 消波ブロックでは $\alpha_0=2100$, $\beta_0=2.2$ とした場合が全体的に実験値と近い値を与えているといえる. ただし, 特に D' の消波ブロックによる全断面被覆の場合については, さらに検討が必要である.

2.5.6 ポーラスセルの抵抗力算定法の検討結果

捨石や消波ブロックで構成される透過性構造物を対象として, 数値波動水路における透水層の抵抗力算定法と係数の値について検討した. 数値波動水路で使用できる抵抗力の算定モデルは, 抵抗力係数を用いるものと D-F 則によるものの 2 つであり, 波の反射率と越波量を評価指標として, 規則波を用いた水理模型実験と数値計算の結果を比較した. これらのモデルに含まれる係数の値として, これまでの研究で提案されているいくつかの組み合わせを用いた. 結果として, D-F 則を用い, 石に対する係数を $\alpha_0=1500$, $\beta_0=3.6$, 消波ブロックに対する係数を $\alpha_0=2100$, $\beta_0=2.2$ とした場合が, 全体的に実験値との対応のよいことがわかった.

ただし, 消波工の種類 D' (消波ブロック, コア部無) については, 2 つの抵抗力算定法のどちらが適切であるかを判断することが難しい結果であった. 第 3 章以降で対象とする構造物は D' に近いものであるが, 図 2-2, 図 2-4, 図 2-6, 図 2-7 から判断すると, CD 型についても全体的に実験結果と顕著な差が生じていないことから CD 型を採用する. 消波工や基礎捨石の慣性力係数 C_M , 抵抗係数 C_D については, これまでの研究結果からそれぞれ 1.2, 1.0 を標準的な値として用いる.

2.6 結語

本章では数値波動水路の基本的な理論について概説するとともに, 数値解析における条件の設定方法について詳細に述べ, 適切なパラメータ設定を示した. 特に, 本研究の対象となる消波工のポーラスセルの設定については詳細に検討した. 透水層における抵抗力を算定するために, 抵抗係数 C_D を用いるモデルと D-F 則による 2 つのモデルを比較検討した結果, 第 3 章以降で対象とする消波ブロックによる消波工については, 抵抗係数 C_D を用いる CD 型を採用することとした. 数値波動水路による計算結果は, 水理模型実験で得られたデータとの比較や実験データの補間データ, ニューラルネットワークのチューニングデータとして活用する.

参考文献

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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/3D，数値波動水槽の研究・開発，2010.
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.
- 6) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.
- 7) 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.
- 8) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.
- 9) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.
- 10) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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，59p，2001.
- 11) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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，58p，2001.
- 12) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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，付録A.3p，2008.
- 13) 近藤淑郎：直立消波構造物の水理的特性，第17回水工学に関する夏期研修会講義集，B.1.1-B.1.16，1981.
- 14) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.33-40，2008.
- 15) 財団法人沿岸開発技術研究センター：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.41-46，2008.
- 16) 鈴木高二朗，大寄菜々子，山本泰司：防波堤基礎での洗掘量の推定について，海岸工学論文集，第50巻，pp.886-890，2003.
- 17) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技術研究所資料，No.248，24p，1976.
- 18) 関克己，有川太郎，水谷雅裕，平山克也：捨石傾斜堤におけるエネルギー損失量に関する実験的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1229，pp.1-15，2011.

第 3 章 消波工の被災進行過程および断面変形のモデル化

3.1 緒言

社会基盤施設にはある水準以上の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）で性能変化が生じることから、適切かつ効率的な維持管理が必要であり、そのためには施設の劣化過程を把握し、それにもとづく維持管理計画を立案しなければならない。本研究では、消波ブロック被覆堤の消波工を対象としており、ライフサイクルコストを最小化する補修の方針（方策）を見出すことを最終的な目的として、水理模型実験で得られた断面変形データにもとづく、消波工の変形（被災）と性能変化の関係の把握が重要である。

既往の研究として、久保田ら¹⁾により、消波ブロック被覆堤の消波工の変形過程に関する実験的検討が行われており、この研究では被災形態を 3 つのパターンに大別している。主に天端付近が被災・主に法面が被災・天端及び法面が被災の 3 パターンである。そして相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ (h_c : 天端高, $H_{1/3}$: 有義波高) が大きいと法面が、小さいと天端が被災する傾向を把握している。さらに久保田ら²⁾は消波工の変形過程に基づき断面のモデル化と波圧・波力の実験を行い、消波工の断面変形による波力増大を示している。関ら³⁾は、消波ブロック被覆堤を対象に、その消波工を変化させた場合（不完全被覆状態）の断面模型実験を行い、その被覆状態が波圧に及ぼす影響を検討している。また、消波工の不完全被覆状態に対する数値波動水路の適応性についても検討し、耐波性能設計において重要なツールとして考えられる数値波動水路の消波工の不完全被覆状態への適応についても検討している。ただし、消波工の変形を天端の沈下のみ仮定している。

本章では、消波ブロック被覆堤を対象とし、消波工の変形過程の定量的把握を目的とする。このため、水理模型実験により消波工に対し波浪による累積ダメージを与え、それに伴う断面変形を計測する。消波工の断面変形による性能変化を把握するためには、変形後の代表的な断面が必要であり、このデータにもとづいて変形量に対応した平均的な断面形状（モデル断面）を決定する。

3.2 水理模型実験

3.2.1 実験装置および実験方法

消波工の変形量に対応した平均的な断面形状を決定するためには、より多くのデータを収集す

ることが望ましい。このため、本研究では図 3-1 に示す多方向不規則波造波水槽を用い、その中に 2 基の造波水路（長さ 8.6m、幅 0.6m、高さ 0.6m）を設置した。これは太田ら⁴⁾の研究と同様に、サーペント型の多方向不規則波造波装置のうち、2 枚の造波板をベニヤ板で仕切ることによって造波水路としている。なお、ベニヤ板は造波板の間隙を貫通するように設置し、造波板の駆動範囲を含めて仕切っている。図 3-2 に示すように、各水路内にマウンドと消波ブロック模型、および 2 本の波高計を設置し、消波工の背後は高さ 0.45m の止水板とした。水路底からの水深は 0.35m である。マウンド部の上面はベニヤ板で作製しており不透過である。消波工の初期断面における前のり面勾配は 1:4/3、天端高 $h_c=0.1\text{m}$ 、天端幅 0.06m とした。

本研究では、消波工の下に被災状況を顕著にするためにマウンドを設置した。マウンドの概要として上底 90cm、下底 117cm、高さ 13cm、法面勾配が 1:2 の台形である。一方、消波工模型は天端を 45cm に設定し、全断面を同じ消波ブロックの乱積とし、消波工全体の断面が上底 6cm、下底 47.6cm、高さ 33cm、法面勾配が 1:1.3 の台形となるようにした。実験に用いた消波ブロックはシーロックであり、図 3-3 に示す四脚型のもので、実験に使用した全ての消波ブロックの質量は 36~39g の間にあり、1 個当たりの平均質量は 37.6g、密度 $\rho_s=2.24$ 、代表径 $D_n=2.56\text{cm}$ （体積の 3 乗根）である。また、消波ブロックの空隙率は 50% であり、必要となる消波ブロックの個数を求めて設置した。

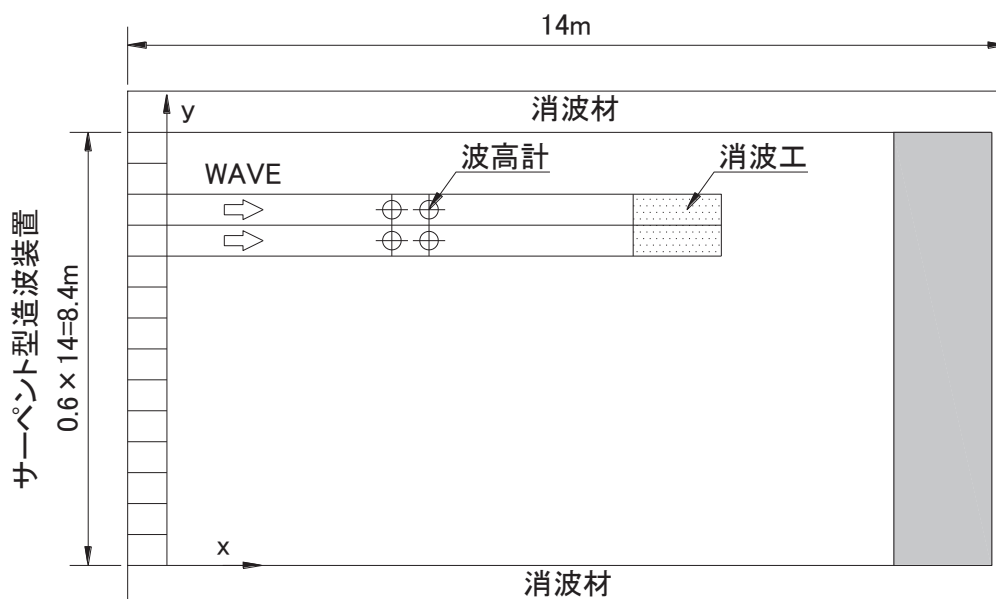


図 3-1 多方向不規則波造波水路の平面図

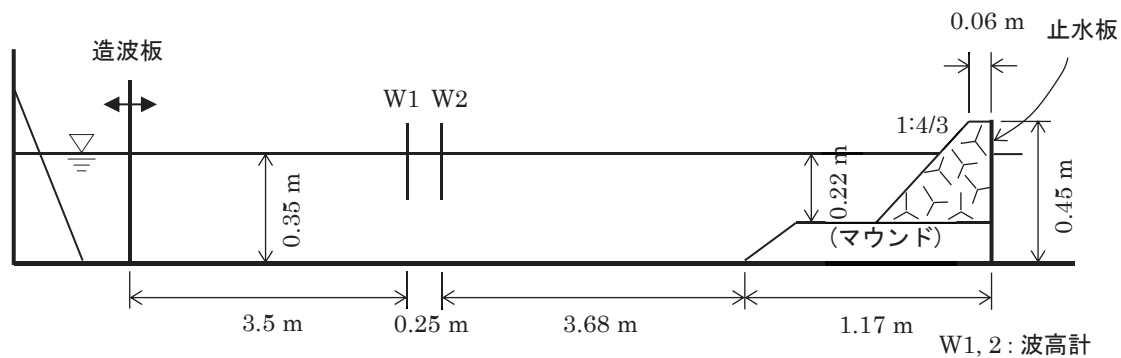


図 3-2 実験装置の概要

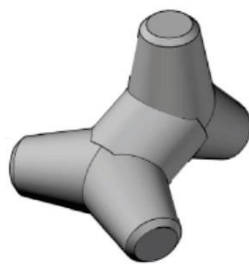


図 3-3 消波ブロックの形状（シーロック）

作用させた不規則波は、JONSWAP スペクトル（ピーク増幅率 $\gamma=3.3$ ）を期待スペクトルとし、有義波周期 $T_{1/3}=1.2\text{s}$ として作成した一方向不規則波の信号により造波した。したがって、2 基の水路で同波形・同位相の不規則波を消波工に作用させている。1 回（約 20 分間）の作用波数は約 1100 波で、有義波高は $H_{1/3}\cong 0.11\text{m}$ である。同じ不規則波を 10 回繰り返し作用させて、断面変形のデータを取得することを 1 セットの実験とする。1 セット終了後には消波ブロックを初期断面に戻し、これを 10 セット行った。

図 3-4 に消波工の断面形の計測方法を示す。計測にはレーザー変位計を用いた。レーザー変位計は、レーザー光線によって対象物までの距離を測定し、距離に応じた電圧値を出力するものである。不規則波を 20 分間作用させるごとに、1 水路あたり水路の中央と中央から左右 15cm ずつの 3 測線において、消波工の断面形（岸沖方向）をレーザー変位計により計測する。レーザー変位計は台車に固定し、水路上に設置したレールを岸沖方向に走らせることで消波工の断面形を測定した。台車のレール上に 1cm 間隔で設置された外部トリガマーカを通過するごとに電圧値をパソコンに取り込むように設定しており、計測した断面形として 1cm 間隔の高さのデータ電圧値が出力される。レーザー変位計の出力電圧を距離（高さ）に換算する際には、水中と空中に設置した角柱（高さ 7cm）による電圧差を用い、水中部分と空中部分をそれぞれ換算した。ただし、断面計測時には静水面近傍での出力電圧と距離（高さ）との関係から、水中部分と空中部分の境界でギャップが生じていないことを確認しつつ計測を行った。

各測線のデータから、初期断面を基準とした断面の変形量を表すパラメータ S^* を求めることが

できる。また、1水路あたり3測線の断面データの平均を断面形とする場合は S とする。 S は次式で表される。

$$S = \frac{A_e}{D_n^2} \quad (3.1)$$

ここに、 A_e ：消波工の初期断面からの侵食面積である。

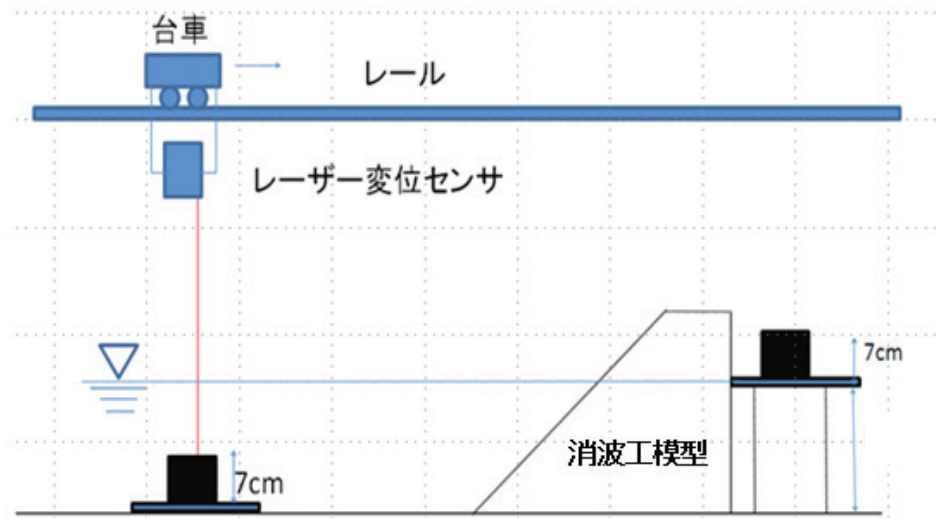


図 3-4 レーザー変位計による断面形の計測方法

3.2.2 実験結果

(1) 消波工の変形特性

水理模型実験によって消波工に累積ダメージを与え、それに伴う変形形状を計測した。その代表例を図 3-5 に示す。この図は、レーザー変位計により計測した 1 セット (10 回) あたりのデータを示したものである。この図の z 方向の 0 の値が静水面に位置し、 x 方向の計測点は 1cm 間隔となっている。凡例に示す回数は 0 回が初期断面を意味し、1~10 回は 1 回あたり不規則波約 1100 波を 10 回作用させたときの変形過程を示している。この図に示すように、消波工は波の作用回数とともに初期断面から徐々に変形量が増加し、静水面付近から天端までの範囲では侵食が発生し、法面の下側では堆積している状況がわかる。滑落・滑動した消波ブロックが前法面に堆積し、緩い S 字型の断面となるが、鹿島ら^{5),6)}、久保田ら¹⁾の実験結果と同様に、変形量が大きくなるにつれて、特に侵食部の形状が直線的になっている。また、久保田ら¹⁾の消波ブロック被覆堤の被災事例では、消波工の被災形態は「天端被災」、「法面被災」、「天端および法面被災」の 3 パターンに分類されている。本研究では、変形が比較的小さい場合には「法面被災」も確認されたが、変形量が大きくなると「天端および法面被災」の複合被災でとなった。

消波工の侵食および堆積は、初期断面と変形断面の交点を境に判断される。この交点については、実験のケースおよび変形度合によって多少異なるが、変形量が大きくなるにつれ交点の変動が小さくなる傾向が見られ、 $S > 10$ の断面データから求めた x 方向の変動の標準偏差は約 2cm であり、交点の変動は比較的小さいことがわかった。なお、全データのうち、消波工がほとんど変形しないケースも確認され、変形量があまりにも小さいデータについては検討から除外している。

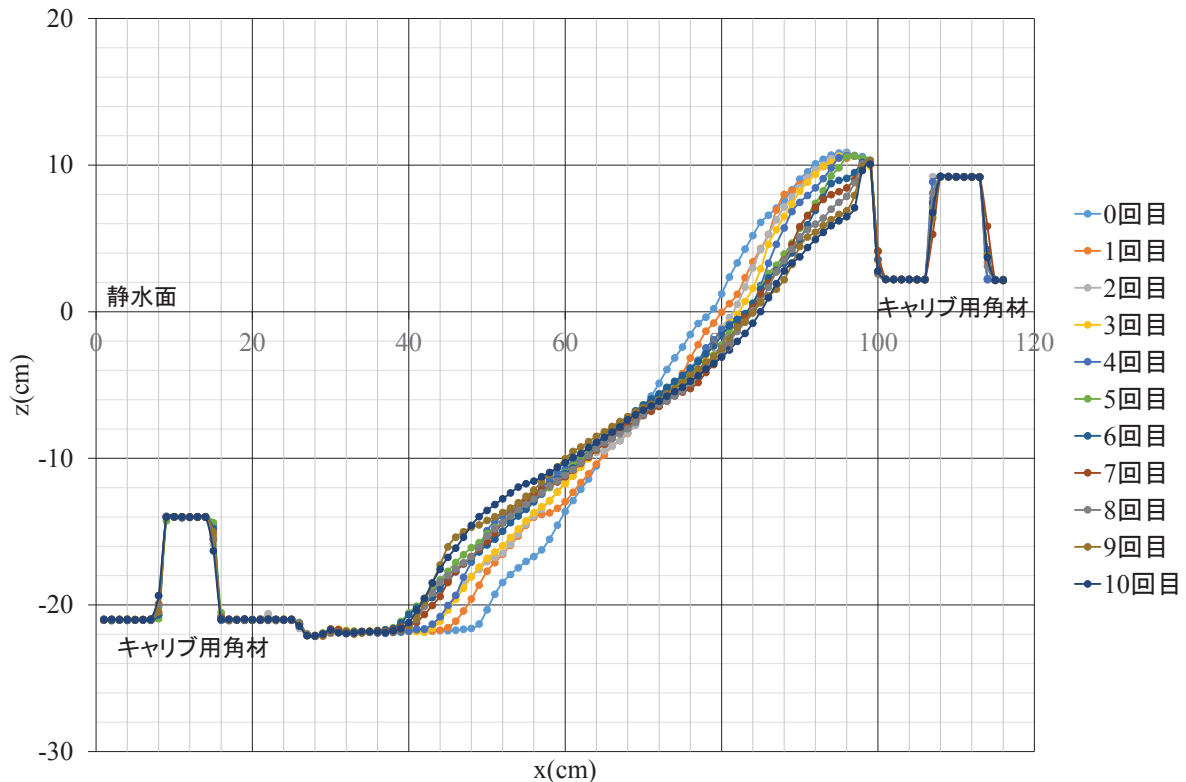


図 3-5 変形断面の計測結果の代表例 (4 回目, 水路 1)

(2) 変形量パラメータ S^* の統計的特性

ここでは、作用波数に対する被災進行過程について統計的な変動特性を検討する。まず、実験で得られた各側線の断面データから、式(3.1)を用いて S^* を求め、次に、1 セットあたり 1~10 の波の繰り返し回数ごとに得られた S^* の平均値および標準偏差を求めた。図 3-6 は累積作用波数 N と S^* の平均値 S_m および標準偏差 σ_s との関係を示す。1 回目の波の作用で S^* は大きく増加したあと、その後緩やかに増加している。また、累積作用波数 N の増加に対して標準偏差 σ_s はあまり変化していない。図 3-7 は、 S_m と σ_s および変動係数 σ_s/S_m との関係を示したものである。多少の増減はあるが、 S_m が大きくなるにつれて σ_s は若干増加し、変動係数は逆に減少することがわかる。つまり、 N の増加につれ、 S^* の相対的な変動は小さくなる。Melby・Kobayashi⁷⁾は、傾斜堤を対象とした実験結果から、 S^* の平均値が大きくなるにつれて σ_s が増えること、逆に変動係数は減少

することを指摘しているが、本研究の実験においても同様の結果となった。Melby・Kobayashi⁷⁾の実験結果では、入射波高が大きい場合は、波の累積作用時間がかなり長くなっても、 S^* の平均値と標準偏差の増加傾向は変わらないことが示されている。本研究の実験で N をさらに増やした場合に、 S^* の変化がどのようになるかは不明であるが、Melby・Kobayashi⁷⁾と同様に収束傾向を示さない可能性もある。

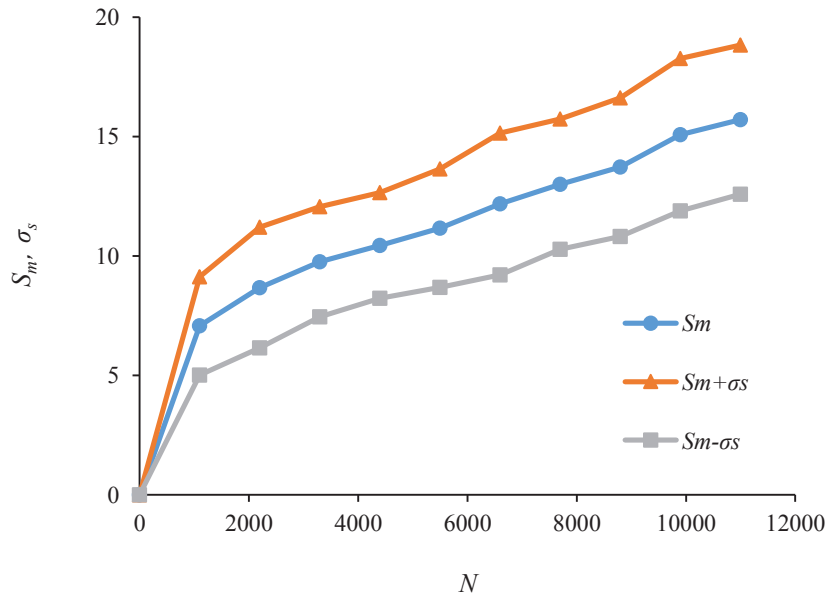


図 3-6 作用波数 N と変形パラメータ S^* および標準偏差 σ_s の関係

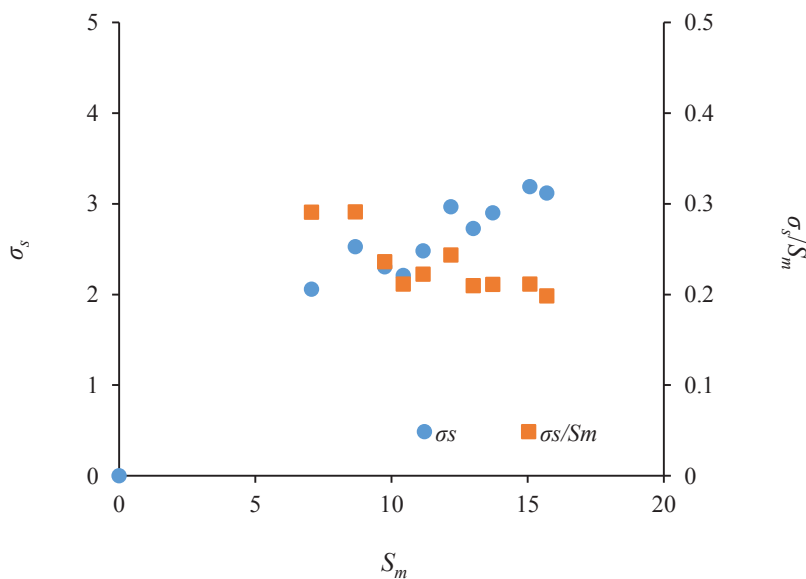


図 3-7 変形パラメータ S^* の標準偏差 σ_s と変動係数 σ_s/S_m の関係

3.3 被災進行過程のモデル化

前節で示した消波工の被災進行過程について、断面変形データから得られた変形量パラメータ S^* の値により、被災度のランク分けを行い、その変化（推移）過程に対して定常推移確率をもつマルコフ連鎖モデルを用いて、その適用性を検証する。

3.3.1 マルコフ連鎖の概説

3.2 節に記した S^* のデータにもとづいて、被災（変形）度の変化特性に関して以下のような検討を行った。まず、 S^* の値を四捨五入して整数値とし、太田ら⁸⁾と同様にその値によりランク a ($S^*=0\sim3$), b ($S^*=4\sim7$), c ($S^*=8\sim11$), d ($S^*\geq 12$) として被災度をランク分けした。不規則波（20 分間）の作用回数 N_r ($=0\sim10$) ごとにランク a から d に入るデータ数の割合（以後、被災度割合と表記）を求め、図 3-8 に示す被災度割合の推移が得られた。ただし、 $N_r=0$ は初期状態で被災度はすべてゼロであることから、ランク a の割合を 1 としている。図 3-8 から、ランク a の割合は急速に減少し、ランク d の割合は徐々に増加していることがわかる。

このような被災進行過程に対して、定常推移確率をもつマルコフ連鎖モデルの適用を検討した。本節では 3 種類のマルコフ連鎖モデル⁸⁾を用いた。各モデルの状態推移は図 3-9 のように表され、図中の p は推移確率である。

モデル 1；被災度は 1 ランクずつ推移しランク間の推移確率はすべて等しい

モデル 2；被災度は 1 ランクずつ推移し推移確率は各々異なる

モデル 3；2 ランク以上の被災度の推移が生じ推移確率は各々異なる

このモデルは、被災度が大きいランクへの推移のみが生じ、ランク d が最終状態であることから、 d にとどまる確率は 1 である。また、各モデルにおける波の作用回数 N_r での被災度割合は、式 (3.2) から式 (3.4) で与えられる。

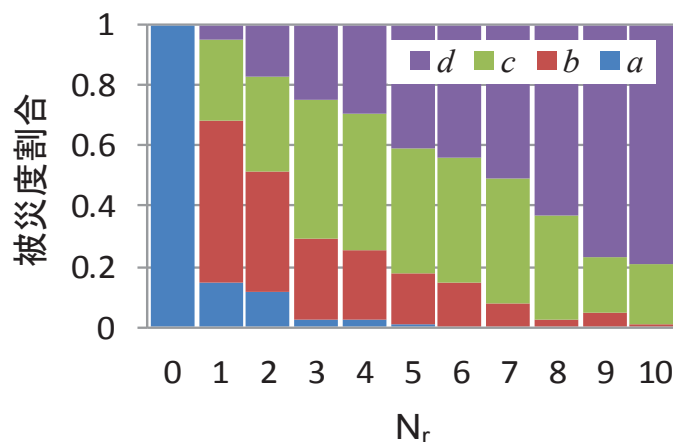
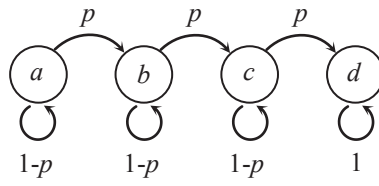
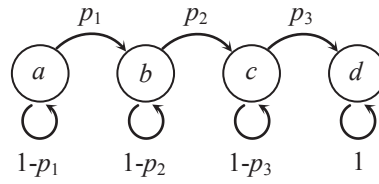


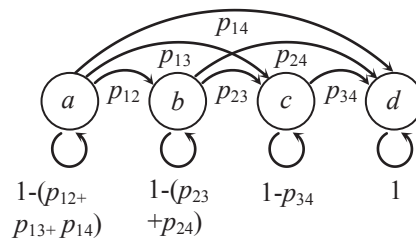
図 3-8 被災度割合の推移（実験値）



(a) モデル 1



(b) モデル 2



(c) モデル 3

図 3-9 各モデルの状態推移図

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p & 0 & 0 & 0 \\ p & 1-p & 0 & 0 \\ 0 & p & 1-p & 0 \\ 0 & 0 & p & 1 \end{pmatrix}^{N_r} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p_1 & 0 & 0 & 0 \\ p_1 & 1-p_2 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 1-p_3 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 1 \end{pmatrix}^{N_r} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-(p_{12}+p_{13}+p_{14}) & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & 1-(p_{23}+p_{24}) & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{23} & 1-p_{34} & 0 \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & 1 \end{pmatrix}^{N_r} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

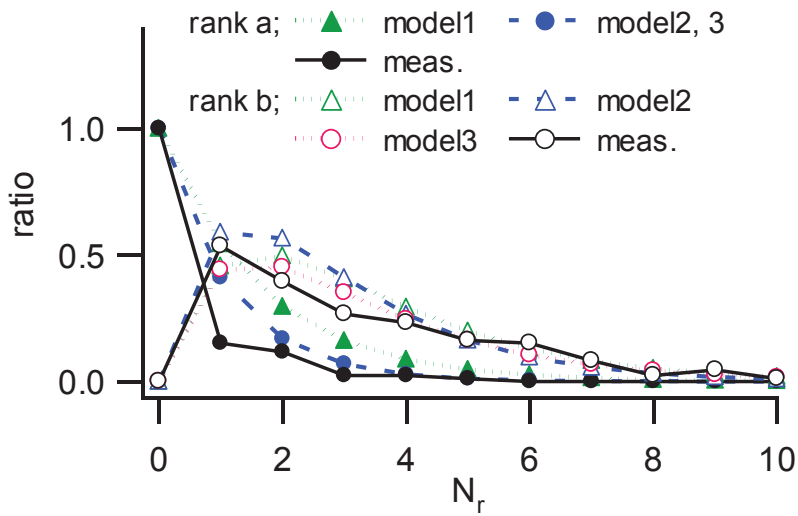
各モデルの推移確率は、ランク a の割合がゼロでない $N_r=5$ における被災度割合の実験値と、モデルによる計算値との誤差の 2 乗和が最小となるように、Excel のソルバー機能を用いて算出した⁹⁾。具体的な手順を以下に示す。まず、ワークシート内に上記のモデル 1 から 3 における推移確率の初期値として(0,1)の任意の値を与え、式(3.2)から式(3.4)で表される被災度割合の推移を $N_r=1, 2, \dots, 5$ について計算する。 $N_r=5$ での被災度割合の実験値と計算値から誤差の 2 乗和を求め、Excel のソルバー機能を用いて誤差の 2 乗和を最小にする推移確率を算出する。ソルバー機能のパラメータ設定における制約条件およびオプション設定の追加事項としては、推移確率をすべて 1 未満の値とすることと非負数の仮定のみであり、その他は初期設定のままとした。表 3-1 に各モデルの推移確率の推定値を示す。

表 3-1 推移確率の推定値

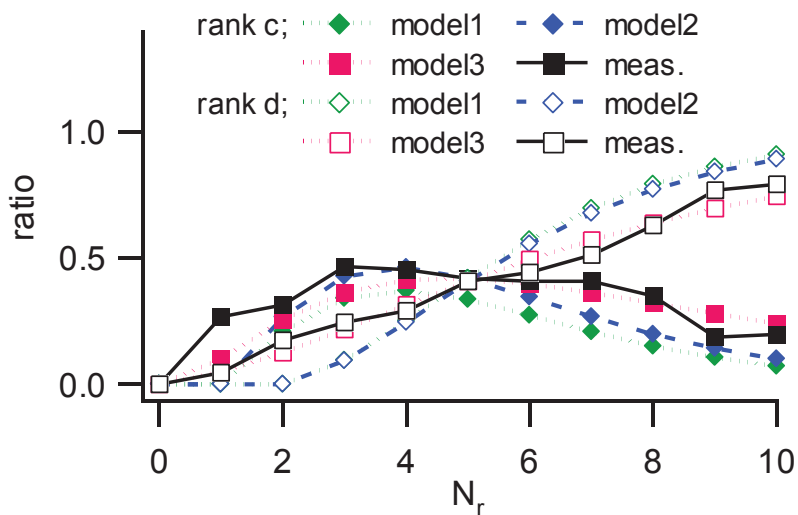
モデル 1	推定値	モデル 3	推定値
p	0.4563	p_{12}	0.4410
モデル 2		p_{13}	0.1006
p_1	0.5897	p_{14}	0.04809
p_2	0.4507	p_{23}	0.2963
p_3	0.3526	p_{24}	0.09096
		p_{34}	0.1687

3.3.2 マルコフ連鎖による検討結果

表 3-1 に示す各モデルの推移確率と式(3.2)から式(3.4)を用いて被災度割合を求めた。図 3-10(a)にランク a, b 、図 3-10(b)にランク c, d についての $N_r=10$ までのランク別の割合変化を実験結果も合わせて示したものである。ランク a の被災度割合は、実験結果および全モデルについて N_r の増加にともない減少し、被災が進行する状況を再現できている。ランク a では実験結果に近いモデルはモデル 2, 3 であった。ランク b の被災度割合は、実験結果とモデル 2 では $N_r=1$ で、モデル 1, 3 では $N_r=2$ で最大となり、その後は減少する。どのモデルも全体的に実験結果を再現できている。ランク c の被災度割合は、ランク b に遅れて $N_r=3\sim 5$ で緩やかに最大を迎えるが最終的に減少する。全体的に実験結果に近いモデルはモデル 3 であった。ランク d の被災度割合は、 N_r の増加にともない増加し、モデル 3 が最も精度よく再現できている。総合的にモデル 3 が実験結果による被災度割合の推移傾向に近いことがわかる。



(a) ランク a , b



(b) ランク c , d

図 3-10 ランク別の割合変化 (実験値とモデル計算値)

3.3.3 マルコフ連鎖の適用について

以上のように、消波工の被災進行過程に対して、マルコフ連鎖モデルの適用を示すことができた。特にモデル 3 が最も精度よく消波工の被災進行過程を示すことができた。このモデルは前述したとおり、定常推移確率をもつモデルであり、推移確率を求めれば被災進行過程の予測は簡単に行うことができる。さらに、補修モデル（例えば、ランク d から a に推移させるモデル）を設

定すれば、補修過程を考慮した被災進行予測と補修費用の算定も可能であり、この方法で、期待補修費用を最小化する補修方針を決定することも可能である。しかし、このモデルの問題点として、消波工の諸元や波浪条件などによって推移確率が変化する可能性がある。例えば、本研究よりも波高が小さくなると a から d へ推移する確率は小さくなるものと考えられる。また、このモデルに必要である推移確率を求めるためには、多数の実験データが必要であり、多大な労力を要する。

本研究では消波工の被災進行過程に対するマルコフ連鎖モデルの適用性を示すことができたものの、実用化にはこれらの問題点を解決する必要があると判断した。

3.4 断面変形のモデル化

断面変形のモデル化のためには、代表的な測点を定義し、変形形状を定量的に示すことが必要である。本節では、実験により得られた 1 水路あたり 3 測線での断面データの平均を断面形とし、天端と法面が変形したケースのデータより、天端岸側（止水板前面）および天端法肩での初期断面からの沈下量 η_s , η_t 、静水面における水平方向の消波工厚さ減少量 l 、法先位置の変化量 x_t を読み取った。図 3-11 に初期断面と変形断面および変形量を模式的に示す。ここに、 l_0 ：初期断面の静水面における消波工厚さ、 h_c ：初期断面における天端高、 l_b ：初期断面における消波工の底辺の長さである。前述したように、本研究では「天端および法面被災」の複合被災を対象とすることから、静水面～天端までの範囲に測点を多く設定した。図 3-12 から図 3-15 には、天端岸側での沈下率 η/h_c 、天端法肩での沈下率 η_s/h_c 、消波工厚さ減少率（水平減少率；久保田ら¹⁾） l/l_0 、法先位置変化率 x_t/l_b と変形パラメータ S との関係と、式 (3.5)～(3.8) にデータに対する近似式を示す。

$$\eta_t/h_c = 0.0003067 S^{2.407} \quad (3.5)$$

$$\eta_s/h_c = 0.001443 S^{2.004} \quad (3.6)$$

$$l/l_0 = 0.03369 S^{0.8119} \quad (3.7)$$

$$x_t/l_b = 0.01386 S \quad (3.8)$$

これらの近似式により、与えた S の値に対して、天端の 2 点での沈下量、静水面での消波工厚さの減少量、法先位置の変化量が求めることができる。断面変形の変化率として表 3-2 に η/h_c , η_s/h_c , l/l_0 および x_t/l_b の値を示す。

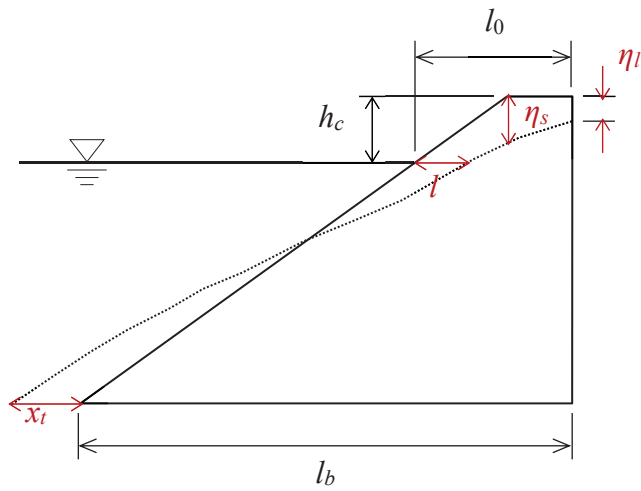


図 3-11 消波工の初期断面，変形断面および変形量の模式図

表 3-2 天端沈下率，消波工厚さ減少率および法先位置の変化率

S	η_l/h_c	η_s/h_c	l/l_0	x_t/l_b
10	0.078	0.146	0.218	0.139
15	0.208	0.328	0.304	0.208
20	0.415	0.584	0.384	0.277
25	0.710	0.914	0.460	0.347

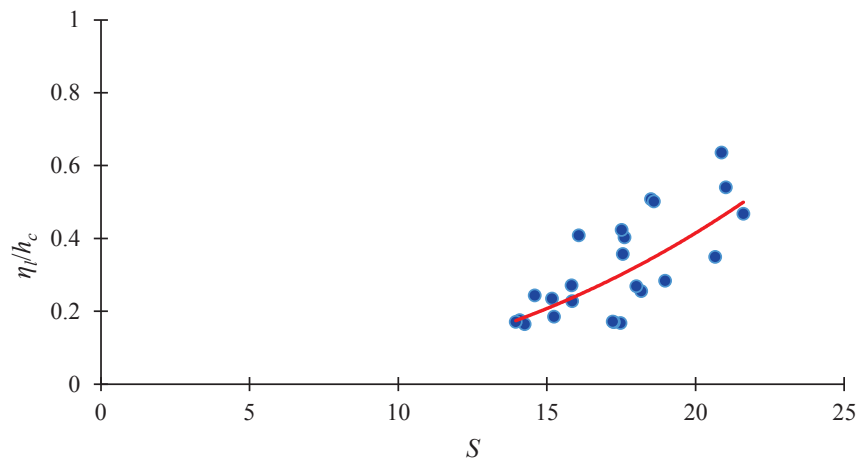


図 3-12 天端岸側における沈下率と S との関係

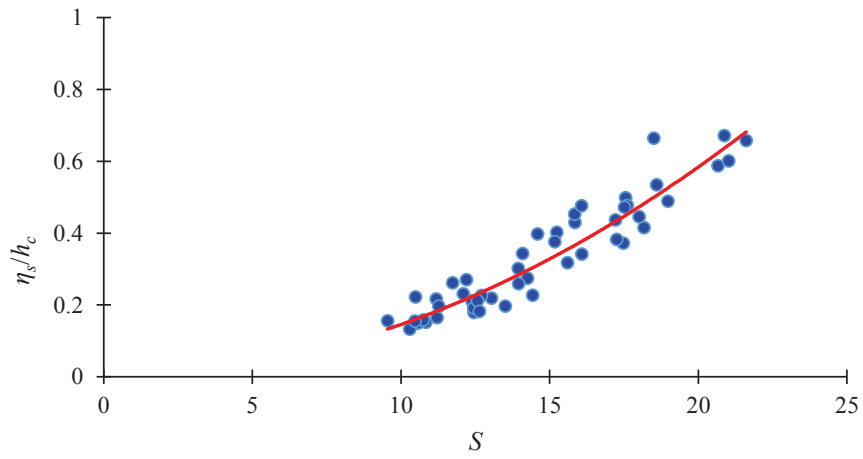


図 3-13 天端法肩における沈下率と S との関係

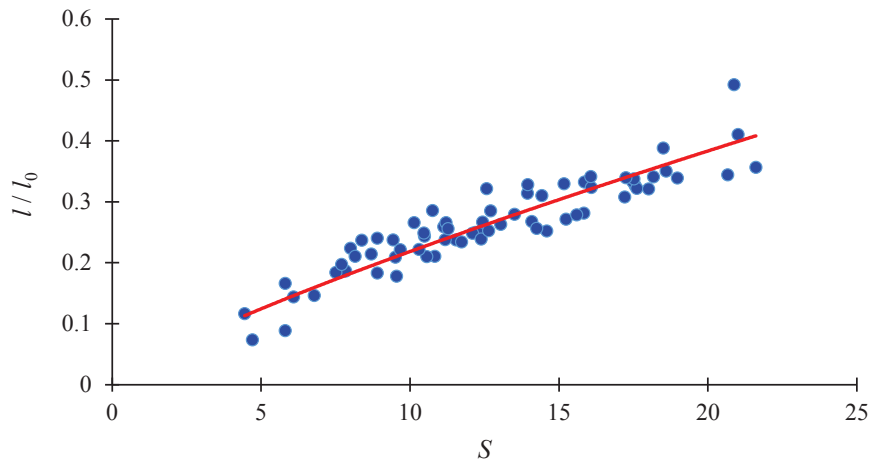


図 3-14 静水面における消波工厚さの減少率と S との関係

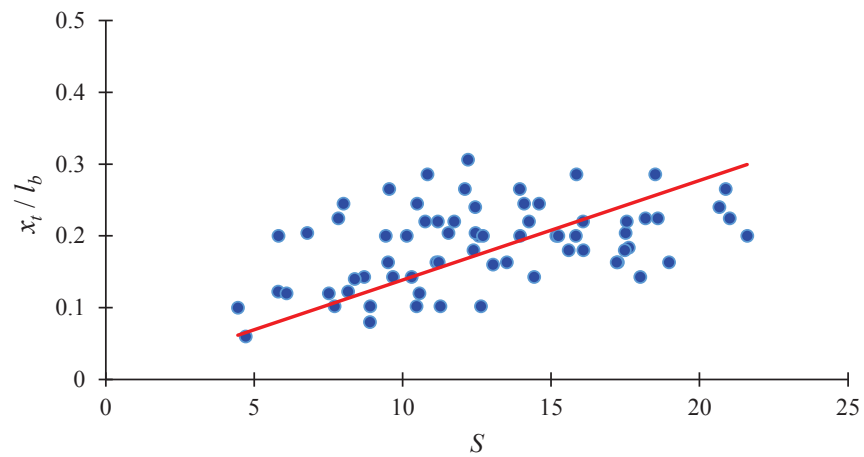


図 3-15 消波工法先位置と S との関係

3.5 モデル断面の設定

3.5.1 検討断面

消波工の断面変形による性能変化を検証するための検討断面を図3-16に示す。これらの断面は日本海側の防波堤を参考に設定し、それぞれA港、B港とした。波浪条件等は表3-3に示す。また、後述する第4章の水理模型実験では模型縮尺を1/70としており、フルードの相似則を用いて波浪条件を設定した。図3-17には模型縮尺1/70の実験断面をそれぞれ示す。

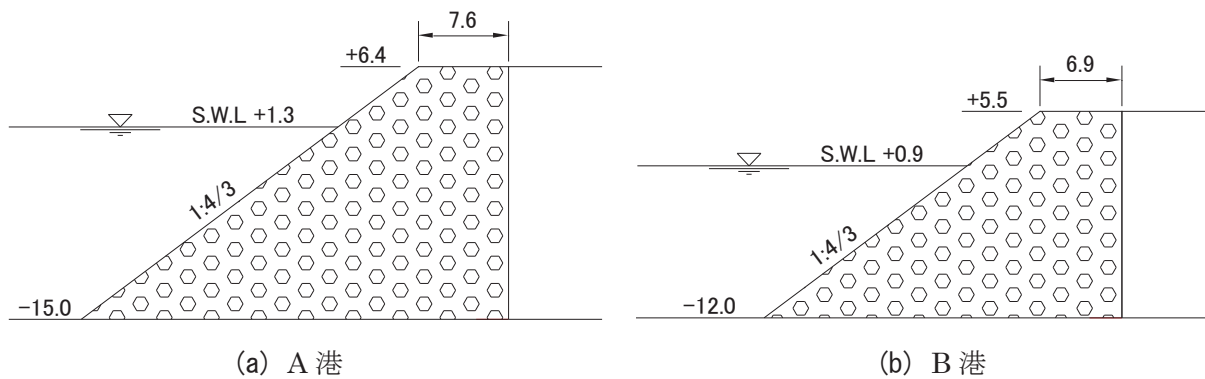


図3-16 検討断面（現地スケール）unit;m

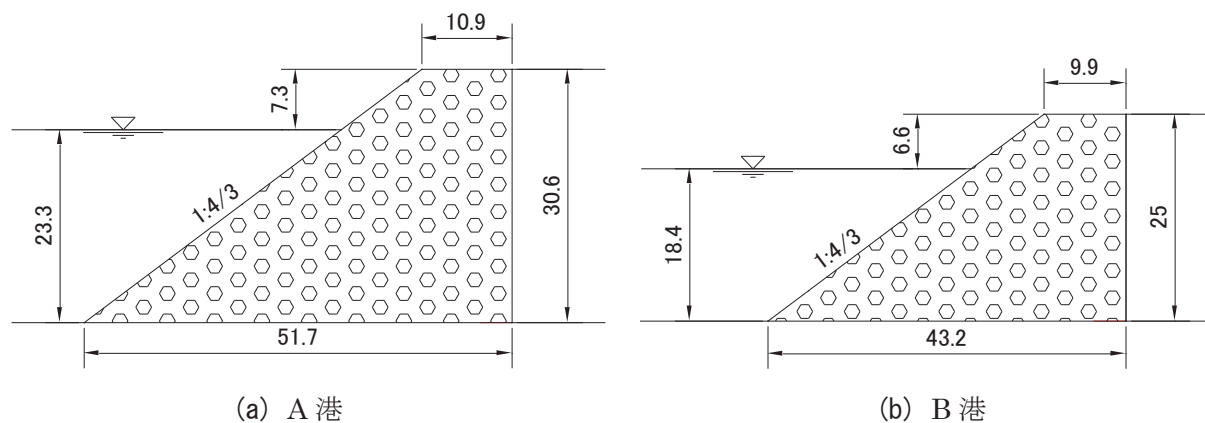


図3-17 検討断面（模型スケール 1/70）unit;cm

表 3-3 構造条件および波浪条件（括弧内は模型スケール）

条 件	A 港	B 港
設計周期 $T_{1/3}$	12.8s (1.53s)	14.0s (1.67s)
設計波高 $H_{1/3}$	8.8m (12.6cm)	8.5m (12.2cm)
前面水深 h_s	16.3m (23.3cm)	12.9m (18.4cm)
消波工天端高 h_c	5.1m (7.3cm)	4.6m (6.6cm)
消波工天端幅 B	7.6m (10.9cm)	6.9m (9.9cm)
消波ブロック質量 M	80t (233g)	60t (174g)
消波ブロック代表径 D_n	3.26m (4.66cm)	2.96m (4.23cm)

3.5.2 モデル断面の諸元

図 3-17 の検討断面について消波工の断面変形のモデル化を行う。表 3-2 の 4 点の変化率を用いて、それぞれ S の値に対する天端岸側での沈下量，天端法肩での沈下量，静水面での消波工厚さの減少量，法先位置の変化量を求め、これらの 4 点を直線で結ぶことにより消波工の断面形状を与える。表 3-4，表 3-5 に各断面における天端沈下量，消波工厚さ減少量および法先位置変化量を、図 3-18，図 3-19 に消波工の断面形状を与えるモデル断面（複合被災と表記）を模型スケールで示す。これらの図中の S' はモデル断面における侵食部面積を再計算し、表 3-3 に示す消波ブロックの代表径 D_n （A 港；4.66cm，B 港；4.23cm）の 2 乗で除したものであり、各港の消波工における実質のダメージパラメータの値を示している。表 3-6 に η_l と D_n との比を示しているが、最大で約 $1.1 D_n$ の沈下量を与えている。また、図 3-20，図 3-21 に示すように A 港と B 港の法面勾配は変えずに天端のみを沈下させるモデル断面（天端沈下と表記）を比較のために設定し、それぞれをケース 3，ケース 4 とする。ケース 1，ケース 2 の複合被災と侵食面積を対応させているわけではないため、これらの図中における S の値は 0 を除いて実質的な意味を持たないが、図 3-18，図 3-19 の各断面における鉛直前面での天端高と対応することを表している。なお、これらの図中の●は第 4 章の波力実験で取り扱う圧力計センサーであり、A 港（ケース 1，3）では圧力計 P1 から圧力計 P7，B 港（ケース 2，4）では圧力計 P1 から圧力計 P5 の位置を表している。

表 3-4 天端沈下量，消波工厚さ減少量および法先位置変化量（A 港）

S	η_l (cm)	η_s (cm)	l (cm)	x_l (cm)
10	0.57	1.06	4.50	7.17
15	1.52	2.40	6.26	10.75
20	3.03	4.26	7.90	14.33
25	5.19	6.67	9.47	17.91

表 3-5 天端沈下量, 消波工厚さ減少量および法先位置変化量 (B 港)

S	η_l (cm)	η_s (cm)	l (cm)	x_t (cm)
10	0.52	0.96	4.09	5.99
15	1.37	2.17	5.68	8.98
20	2.74	3.86	7.17	11.98
25	4.69	6.03	8.60	14.97

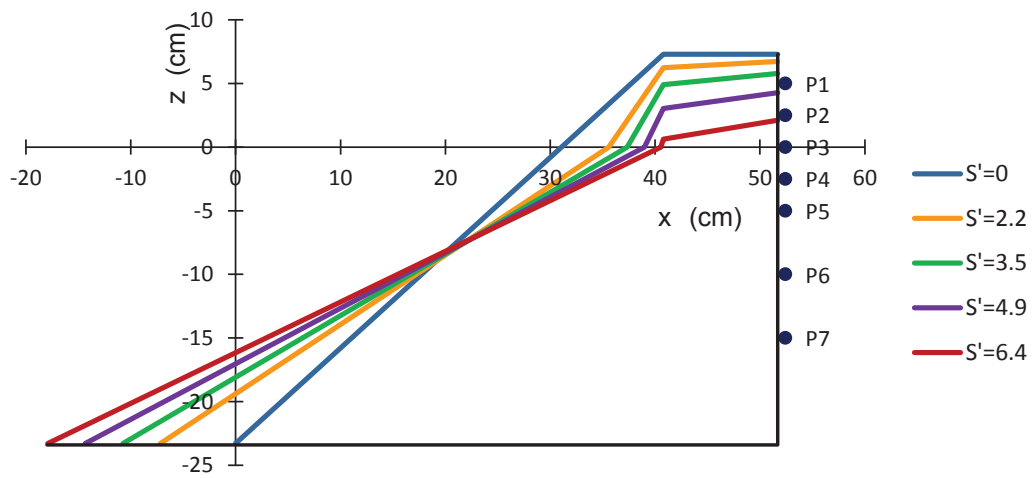


図 3-18 モデル断面 (A 港, ケース 1, 複合被災)

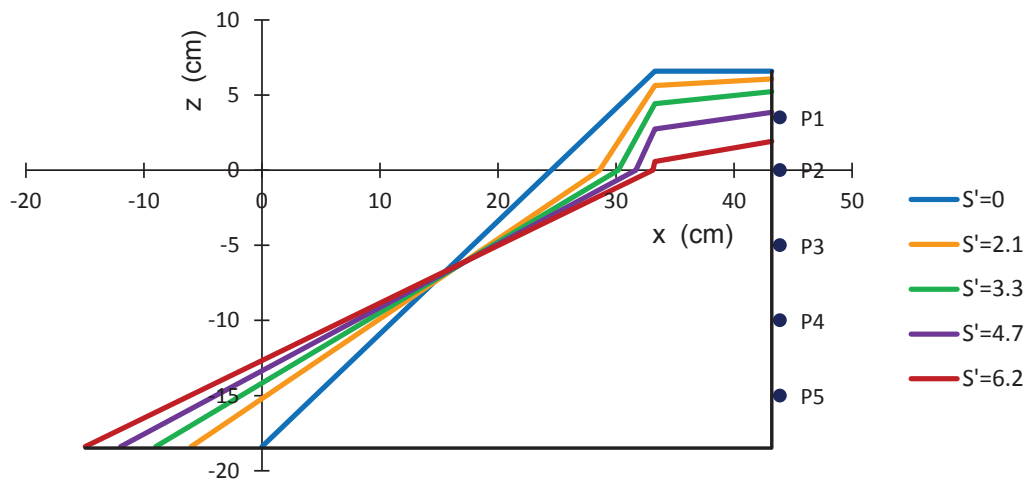


図 3-19 モデル断面 (B 港, ケース 2, 複合被災)

表 3-6 天端岸側での沈下量と代表径との比

A港(ケース1, 3)		B港(ケース2, 4)	
S'	η_l/D_n'	S'	η_l/D_n'
0	0	0	0
2.2	0.12	2.1	0.12
3.5	0.33	3.3	0.32
4.9	0.65	4.7	0.65
6.4	1.11	6.2	1.11

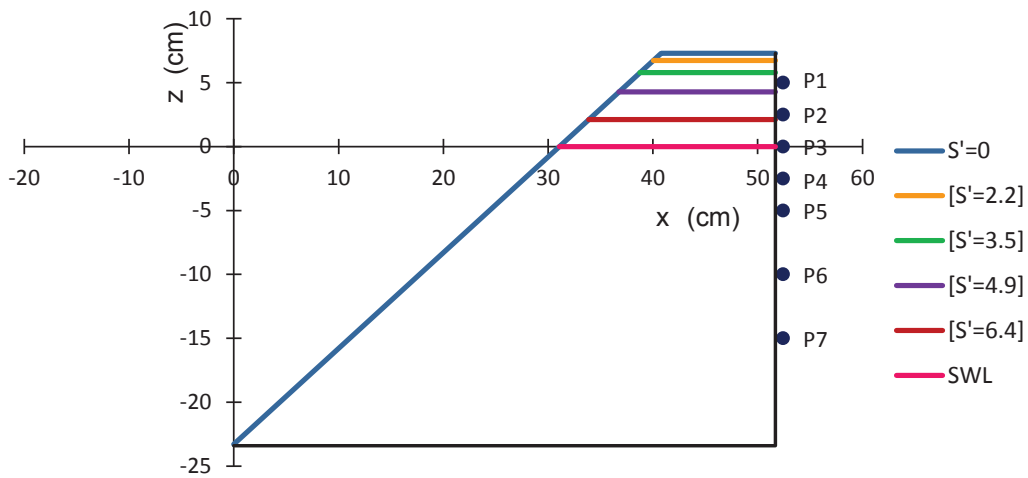


図 3-20 モデル断面 (A 港, ケース 3, 天端沈下)

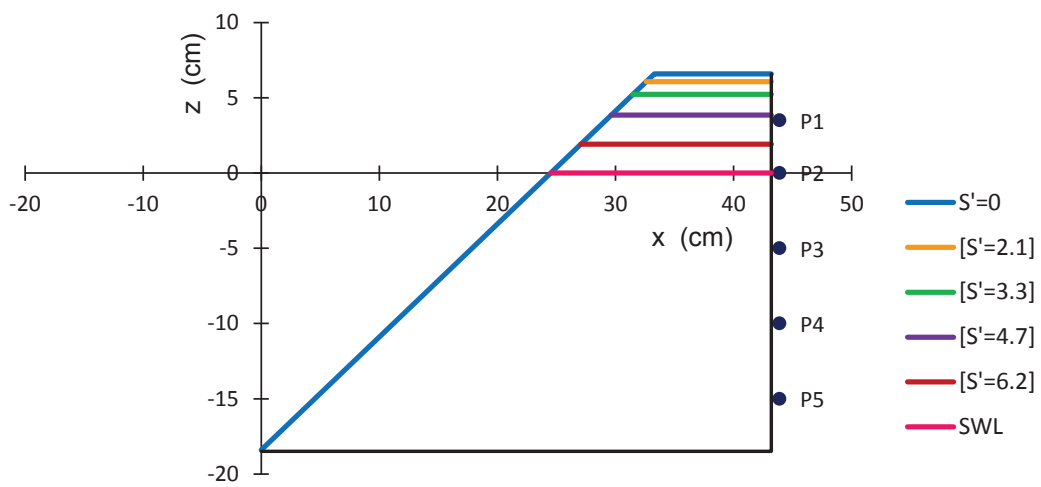


図 3-21 モデル断面 (B 港, ケース 4, 天端沈下)

3.6 結語

本章では、消波ブロック被覆堤を対象とし、水理模型実験により得られた断面変形データから被覆層の変形過程の定量的把握を目的とした。水理模型実験によって消波工に波浪による累積ダメージを与え、それに伴う断面変形を計測し、そのデータにもとづいて変形量に対応した平均的な断面形状（モデル断面）を決めることができた。このモデル断面は第4章において性能変化を検討するための基礎データとなる。また、実験過程および実験結果の解析において得られた知見を以下に示す。

消波工の法肩および天端が被災する場合には、波の作用によりまず静水面付近が侵食され、滑落・滑動した消波ブロックが前法面下部に堆積して緩いS字型の断面になるが、さらに侵食面積が大きくなると、侵食部分において断面が直線的になることがわかった。消波工の被災形態は「天端被災」、「法面被災」、「天端および法面被災」の3パターンに分類されるが、本研究では変形量が大きくなると「天端および法面被災」の複合被災となった。

断面変形量の統計的特性を検討した結果、変形量パラメータ S の平均値が大きくなるにつれて標準偏差は若干増加するが、 S の変動係数は逆に減少することがわかった。つまり、作用波数 N の増加につれ、相対的な S の変動は小さくなる。ただし、本研究での累積作用波数の範囲では S の平均値は増加傾向を示しており、さらに作用波数を増やした場合にある一定の値に収束していくかは不明である。

変形量パラメータの値によって消波工の被災度をランク分けし被災度割合およびその推移を求め、被災進行過程に対して定常推移確率をもつ3種類のマルコフ連鎖モデルの適用性を検討した。各モデルに対して推移確率が得られ、これにより被災度割合を算出した結果、2ランク以上の推移を考慮したモデルが最もよく現象を表すことがわかった。しかし、消波工の諸元や波浪条件などによって推移確率が変化する可能性があり、その都度、水理模型実験のデータにもとづいて推移確率を検証することになり、多大な労力を要することから、実用化にはこれらの問題点を解決する必要があると判断した。

参考文献

- 1) 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，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，pp.906-910，2009.
- 2) 久保田真一，山本方人，松本朗，半沢稔，荒木進歩，出口一郎：消波工の変形過程が波力低減効果の変化に及ぼす影響，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-66，No.1，pp.866-870，2010.
- 3) 関克己，有川太郎，水谷雅裕：消波ブロック被覆堤における消波工被覆状態の波圧に及ぼす影響，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，pp.816-820，2009.
- 4) 太田隆夫，松見吉晴，山口秀樹，木村晃：捨石護岸の断面変形量の統計的特性について，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-66，No.1，pp.871-875，2010
- 5) 鹿島遼一，榊山勉，松山昌史，関本恒浩，京谷修：安定限界を超える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.671-675，1992
- 6) 鹿島遼一，榊山勉，清水琢三，関本恒浩，国栖広志，京谷修：不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について，海岸工学論文集，第 40 巻，pp.795-799，1993
- 7) Melby, J. A. and N. Kobayashi : Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters, J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 124, No. 6, pp. 286-29, 1998
- 8) 太田隆夫，松見吉晴，鳩野敦士，佐藤毅：実験データにもとづく捨石護岸の被災進行過程のモデル化，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.I_911-I_915，2012.
- 9) 港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術研究センター，229p，2007.

第4章 消波工の断面変形による性能変化

4.1 緒言

本章では、消波ブロック被覆堤を対象とし、消波工の断面変形に伴う性能変化を検討する。消波工の変形形状においては第3章で検討したモデル断面を用いる。消波工の性能としては船舶が安全に航行できるよう近海や港口を静穏にするための反射波低減性能、消波工背後のケーソンなどの本体工へ作用する波力低減性能、越波流量を減少させるための越波低減性能などが挙げられる。このうち、本章では波力低減性能と越波低減性能に着目する。先ず、波力低減性能については、波力に対する安定性の観点から防波堤を対象としている。このような外郭施設は湾内の静穏や波浪から防護するための施設であり、漁港や港湾などで広く用いられておりストック量も多い。また、比較的水深が深く波浪条件も厳しいため、建設費用が大きくなることや波浪による劣化・損傷が激しいことから、性能変化を把握し適切な維持管理が必要である。仮に消波工が変形し消波性能に劣化が生じたとしても、防波堤の本来の役目は外海の波浪から背後施設を防護することであり、防波堤本体の安定性能が維持できているかが重要である。万一、このような大型の施設が損壊した場合、復旧には長期間を要するため、その間の防護できないことによるリスクも大きい。したがって、消波工が変形することによるケーソンなどの本体工に作用する波力の変化に着目して消波工を維持管理することが優先されるべきである。次に、越波低減性能については、越波増大による港内の静穏や背後施設の損傷などが考えられることから様々な施設を対象としている。また、越波流量は主に護岸天端高算定で用いられ、外郭施設などの沖合の構造物ほど波浪条件は厳しくはないが、背後に道路や民家などが存在することが多く、越波による道路通行止めなどによる間接的な損害や家屋の直接的な被害が生じる可能性がある。護岸は延長が長いことや施工箇所が多く、結果的にストック量が多いことから、このような施設においても適切な維持管理が必要である。

以上のことから、本章では消波工の断面変形にともなう防波堤本体工に作用する波力および越波流量の変化を、水理模型実験と数値計算の両面から検討する。

4.2 断面変形による波力の変化

4.2.1 水理模型実験の概要

防波堤の設計では、安定性を左右する外力は波力である。防波堤の耐波安定性はほとんどのケースにおいて水平波力に対する滑動抵抗力によって決定されることが多い。このため、水理模型実験によって、防波堤消波工を対象とした消波工の断面変形に伴う本体工に作用する水平波力の

変化に着目して検討することを目的とする。以下に水理模型実験を概説する。

(1) 実験装置および実験断面

水理模型実験には、**図 4-1** に示す長さ 29m、幅 0.5m、高さ 0.75m の断面 2 次元水路を用いた。水路内には、海底勾配 1/30 の斜面、その先の水平床上にマウンドと消波ブロックによる消波工の模型を設置した。消波ブロック模型は、質量 37.6g、代表径 2.56cm のものを使用した。マウンドの高さは各ケースとも 4cm とし、代表粒径 6mm、空隙率 0.37 の砂利を敷き詰め、飛散防止用の金網で表面を覆った。なお、後述する防波堤底面（アクリル板）の岸側端まで砂利を入れている。この図中の沖側の水深 h は、A 港（ケース 1, 3）; 51.8cm, B 港（ケース 2, 4）; 46.9cm である。

消波工の検討断面は第 3 章に示したモデル断面であり、**図 3-18**、**図 3-19** のケース 1, 2（複合被災）と**図 3-20**、**図 3-21** のケース 3, 4（天端沈下）の 4 断面である。

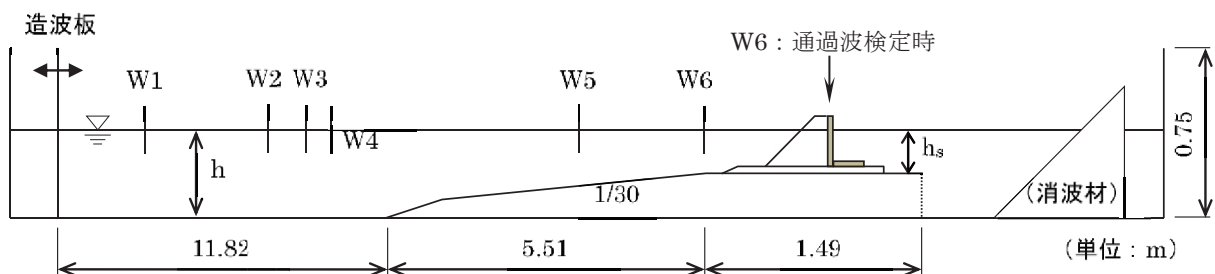


図 4-1 実験装置の概要（W1～W6 は波高計）

(2) 波浪条件

波浪条件は、A 港（ケース 1, 3）では周期 1.53s, B 港（ケース 2, 4）では 1.67s であり、設計有義波相当を含む数種類の波高の規則波を造波することとした。まず、正確な入射波高を計測するために通過波検定を行った。通過波検定ではマウンドおよび防波堤模型を設置しない状態で、**図 4-1** の波高計 W1 から W5 および防波堤鉛直面位置での波高を計測した。通過波検定による結果を**表 4-1** に示す。 H は波高計 W2 から W4 での波高の平均値、 H_s は防波堤鉛直面位置での波高、 h_s は防波堤設置位置での水深である。波高値の設定に関して、港湾では波力算定時に最大波高を用いることから、設計有義波高よりも大きい値を設定している。なお、造波板から防波堤鉛直面位置までの距離は、A 港（ケース 1, 3）; 18.08m, B 港（ケース 2, 4）; 18.00m である。A 港の $H=21.7\text{cm}$, 22.0cm と B 港の $H=16.5\text{cm}$, 17.8cm の条件では H_s が H に比べて大きく減少しており、防波堤位置までに碎波していることがわかる。

(3) 圧力計の配置と波圧計測

波圧計測のために、防波堤の鉛直面および底面は 1cm 厚のアクリル板で作成し、鉛直面に A 港では 7 個, B 港では 5 個の圧力計を取り付けた。使用した圧力計は、フラッシュダイヤフラム型圧力計で、受圧面の直径 1cm、定格容量 19.6kPa、固有振動数 5.3kHz である。**図 4-2**、**図 4-3** は圧力計配置の概略を示したものであり、**写真 4-1** に実験水路での設置状況を示す。消波工の断面変形は天端部分の侵食が主であり、この部分における波力変化を把握するため、圧力計は静水

面から上側に密に設置した。A 港での圧力計 P3 と、B 港での P2 は、実験での静水面位置となるように取り付けている。図 4-4 から図 4-5 には、各ケースの鉛直面における圧力計の配置を示す。波圧計測においては、サンプリング周波数 200Hz, 500Hz, 1000Hz で事前に検討し、十分に波形が捉えられていることを確認して 500Hz とし、計測時間 30s でデータを取得した。なお、波圧計測中に波の作用によって消波ブロックが移動しないように、消波工表面を目の粗い金網で覆った。

表 4-1 通過波検定による規則波の諸元

A港(ケース1, 3)				B港(ケース2, 4)			
H (cm)	H_s (cm)	h_s (cm)	H/h_s	H (cm)	H_s (cm)	h_s (cm)	H/h_s
11.1	12.3	27.3	0.41	11.2	12.0	22.4	0.50
14.0	15.3	27.3	0.51	12.9	14.1	22.4	0.58
15.6	16.6	27.3	0.57	13.8	15.2	22.4	0.62
18.1	17.6	27.3	0.66	14.6	14.9	22.4	0.65
19.1	18.0	27.3	0.70	15.5	14.8	22.4	0.69
20.5	18.1	27.3	0.75	16.5	12.4	22.4	0.74
21.7	14.3	27.3	0.79	17.8	11.4	22.4	0.79
22.0	14.7	27.3	0.81				

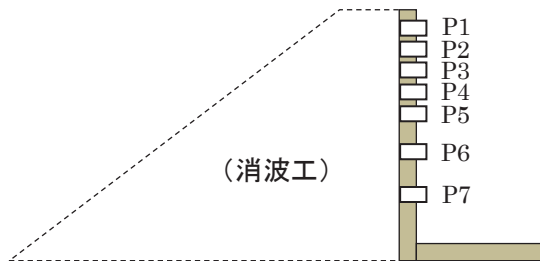


図 4-2 圧力計配置の概略 (A 港, ケース 1,3)

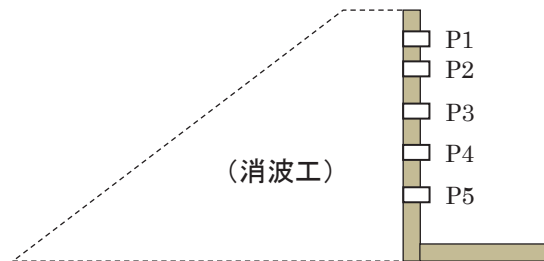


図 4-3 圧力計配置の概略 (B 港, ケース 2,4)

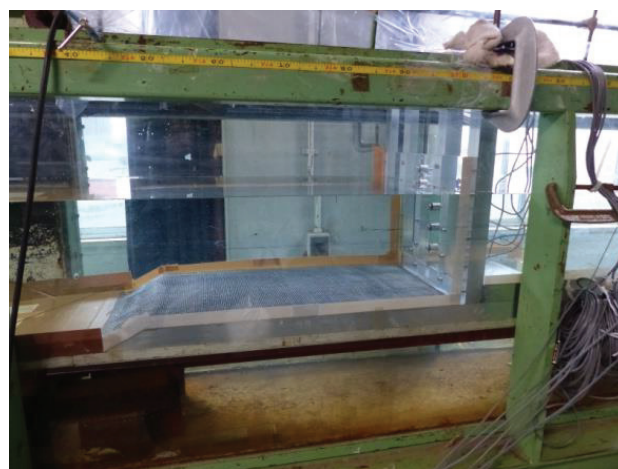


写真 4-1 防波堤模型と圧力計の設置状況

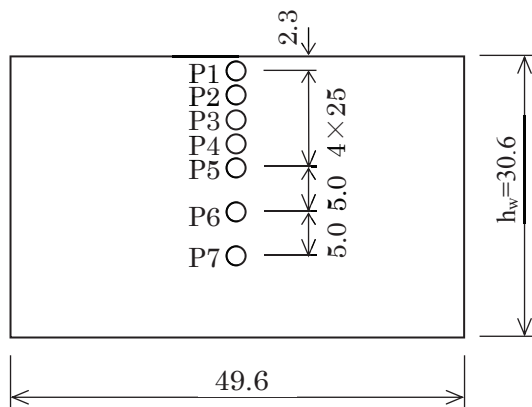


図 4-4 鉛直面の圧力計の配置
(A 港, ケース 1, 3)

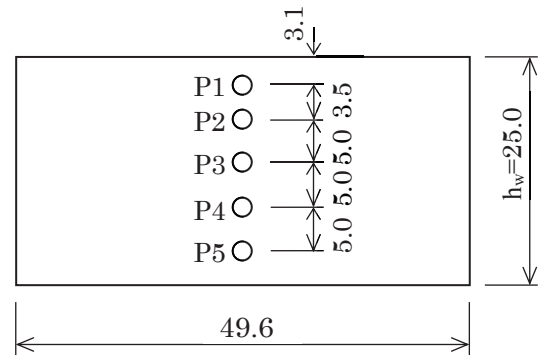


図 4-5 鉛直面の圧力計の配置
(B 港, ケース 2, 4)

単位 ; cm

(4) 波力算出方法

圧力計によって得られた波圧データから防波堤鉛直面に作用する波力(水平波力)を算出する。波力算出方法を図 4-6 に示す。各圧力計の波圧データは同時刻とし、それぞれ鉛直分布幅を与えて波圧と分布幅の積を合計することにより時々刻々の値を求める。分布幅は、鉛直面の上下端と圧力計間の midpoint から、各圧力計に対する領域の長さを決めた。さらに、鉛直面に波が作用し始めた後、波高計 W6 での波形が比較的安定している 5 波における波力のピーク値を平均して水平波力として算出している。

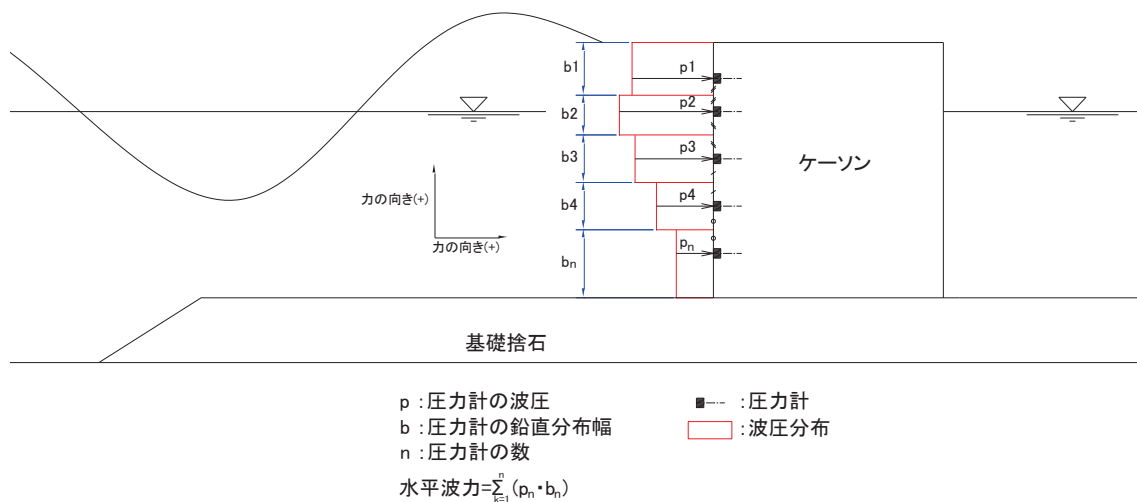


図 4-6 波力の算出方法

4.2.2 実験結果

(1) 複合被災の波力特性

図 4-7, 図 4-8 は, 図 3-18, 図 3-19 に示した消波工の断面変形 (複合被災) による防波堤鉛直面の単位幅あたりに作用する水平波力の変化を示している. 縦軸は, 消波工初期断面 ($S'=0$) における作用波力を 1 として表した波力比, 横軸は表 4-1 に示した波高水深比 H/h_s である. ケース 1 では, $S'=3.5$ 以下で波力の変化は小さく, 圧力計 P1 が露出する $S'=4.9$ から大きく増加している. 圧力計 P2 がほぼ露出する $S'=6.4$ の断面形状では, 最大で初期断面時の 3.7 倍程度の波力が作用している. ケース 2 では, $S'=3.3$ 以下で波力の変化は小さく, 圧力計 P1 前面の消波工厚さが小さくなる $S'=4.7$ で増加が見られ, P1 が完全に露出する $S'=6.2$ では最大で 2.6 倍程度になっている. 両者とも $H/h_s=0.7$ 付近で最大となり, それ以上では波力は低下している. また, 天端沈下量に対する波力変化については, 表 3-6 に示した S' と D_n に対する天端岸側沈下量 η_l との関係より, $\eta_l/D_n=0.65$ まで沈下すると波力は大きく増加していることがわかる.

図 4-9 には A 港の複合被災について, $S'=0$ と $S'=6.2$ の $H/h_s=0.66$ の場合の防波堤鉛直面に作用する波力の時系列波形の例を示す. 縦軸は水平波力 P_H を堤体位置での波高 H_s による静水圧と鉛直壁の高さ h_w で除した無次元水平波力で示し, 波形が重ならないように時系列をずらしている. 無次元水平波力の極大値は $S'=0$ の場合に比べ, $S'=6.4$ では 3 倍以上に増大しており, 衝撃力が作用していることが確認できる. このような事例について, 例えば, 関ら²⁾は天端沈下において, 三上ら³⁾は消波工施工途中の完全被覆されていない状態において波力を計測し, 本研究と同様に波力増幅傾向を得ている.

以上の結果から, 消波工の変形が一定以上進行 (S' 値が増加) すると, 防波堤鉛直面に作用する水平波力は初期状態よりも大きくなることが確認された.

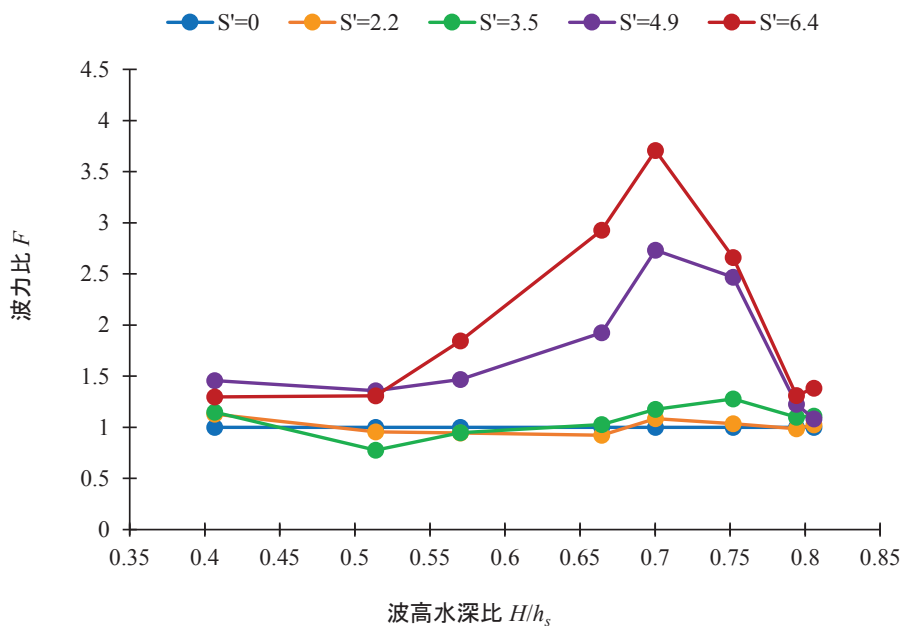


図 4-7 防波堤鉛直面に作用する波力 (A 港, ケース 1, 複合被災)

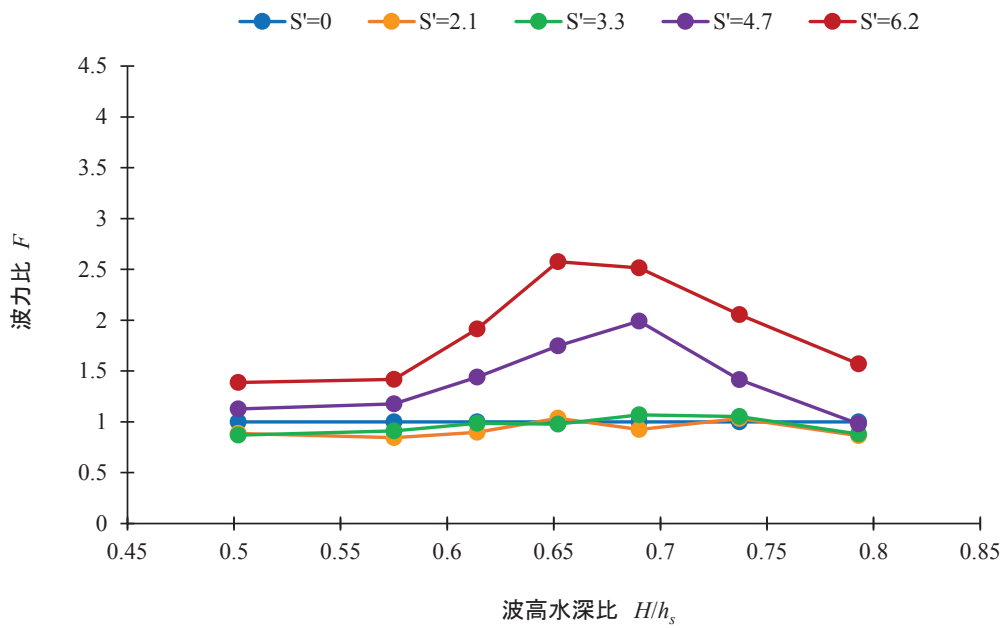


図 4-8 防波堤鉛直面に作用する波力 (B 港, ケース 2, 複合被災)

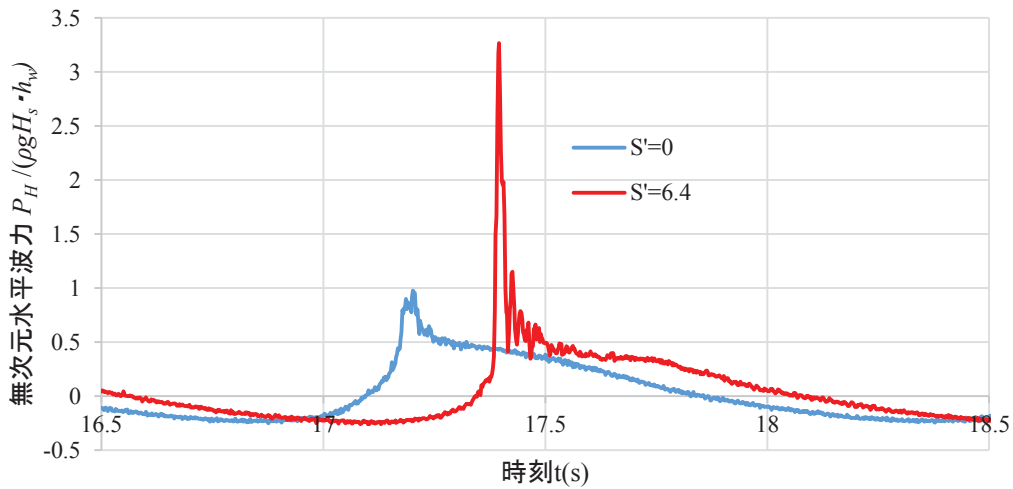


図 4-9 防波堤鉛直面に作用する波力の時系列波形の例 (A 港, ケース 1, $H/h_s=0.66$)

(2) 天端沈下被災の波力特性

図 4-10, 図 4-11 は, 比較のために設定した天端沈下における波力比を示したものであり, それぞれ A 港 (ケース 3), B 港 (ケース 4) の場合である. 波力比の基準となる $S'=0$ における波力の値は, 図 4-7, 図 4-8 に示した複合被災の場合と同じものである. ケース 3 では $[S'=3.5]$ から波力が増加する傾向が見られるが, 圧力計 P1 が露出する $[S'=4.9]$, P2 がほぼ露出する $[S'=6.4]$ での増加割合は図 4-7 の場合よりも小さく, $[S'=6.4]$ の断面形状で最大約 2.6 倍となっている. さらに変形が大きくなり消波工天端が静水面と一致する SWL では, 最大で約 3.8 倍である. ケース 4 では, $[S'=3.3]$ でわずかに増加が見られ, $[S'=4.7]$, $[S'=6.2]$ では図 4-8 の場合よりも増加割合

が大きく、 $[S'=6.2]$ の断面形状で最大約 3.3 倍となっている。SWL では最大 4 倍程度の波力である。A 港では複合被災と同様に $H/h_s=0.7$ 付近で、B 港では $H/h_s=0.65$ 付近で最大となり、それ以上では波力は低下している。

以上の結果から、複合被災と同様に、消波工の変形が一定以上進行すると防波堤鉛直面に作用する水平波力は初期状態よりも大きくなることが確認された。

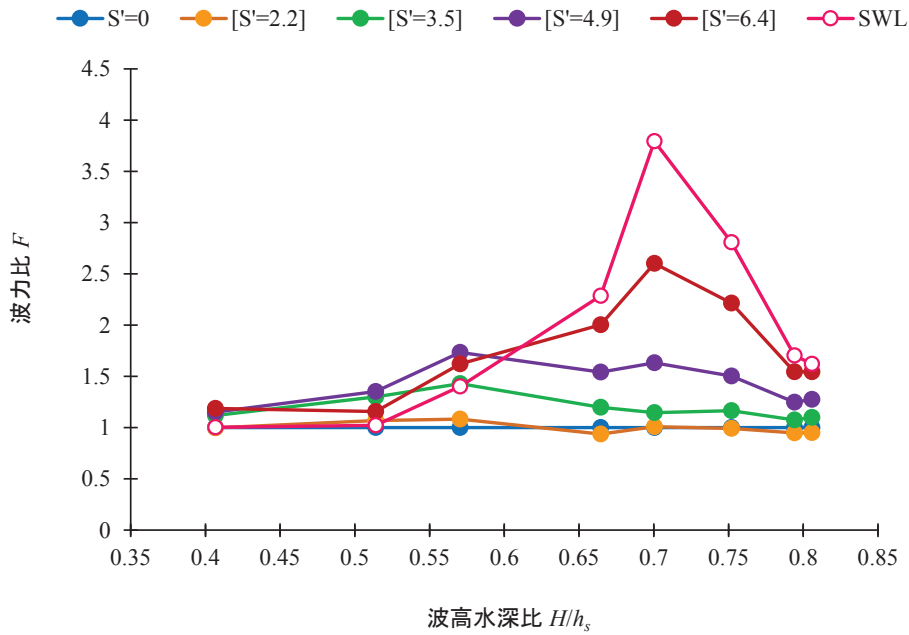


図 4-10 防波堤鉛直面に作用する波力 (A 港, ケース 3, 天端沈下)

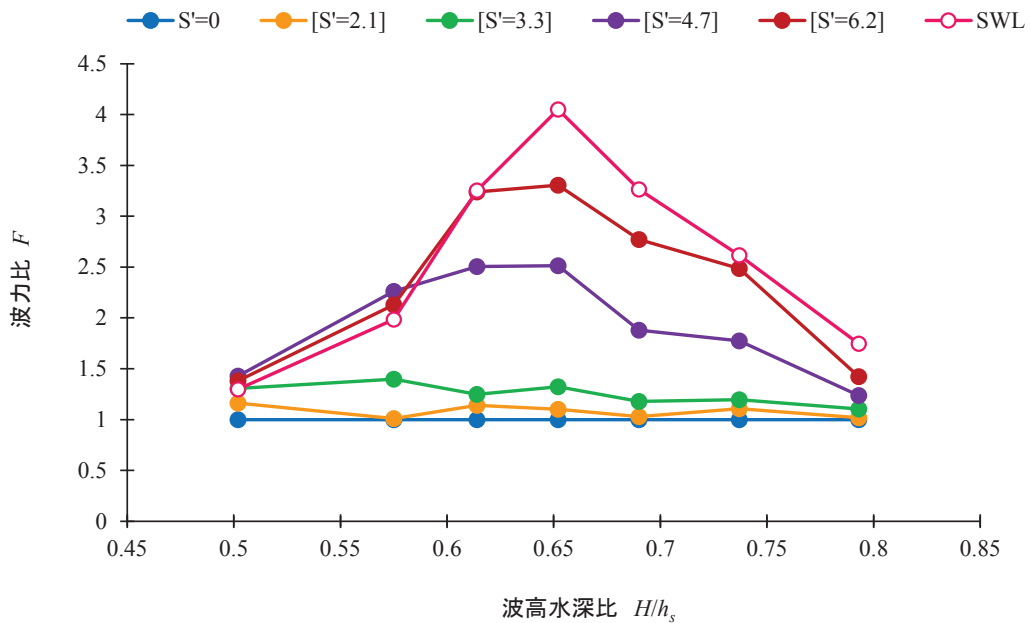


図 4-11 防波堤鉛直面に作用する波力 (B 港, ケース 4, 天端沈下)

(3) 波圧分布特性

図 4-12 から図 4-15 に、各港で大きな波圧・波力を計測した波浪条件における、波圧の鉛直分布を示す。これらの図の縦軸は、鉛直面の z 座標を図 4-4、図 4-5 に示した鉛直面の高さ h_w で除した値である。図に示した波圧の値は、波力を求める際と同じ 5 波における波圧のピーク値の平均である。ケース 1 では $S'=3.5$ 、ケース 2 では $S'=3.3$ までは、波圧の変化が比較的小さく、さらに消波工の断面変形が進むと波圧も大きく増加している。また、断面変形の進行とともに露出するようになる圧力計だけでなく、鉛直面上部の圧力計においても波圧が増大していることがわかる。図 4-12 から図 4-15 に示したケースは衝撃波圧が作用する波浪条件であり、断面変形に伴って露出した鉛直面に作用した衝撃波圧が鉛直面上部まで影響を及ぼしていると考えられる。

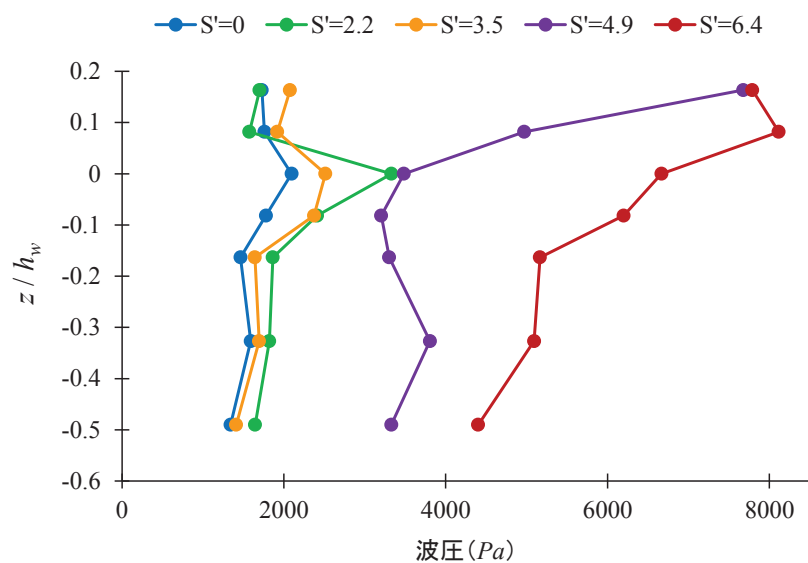


図 4-12 波圧の鉛直分布 (A 港, ケース 1, 複合被災, $H/h_s=0.70$)

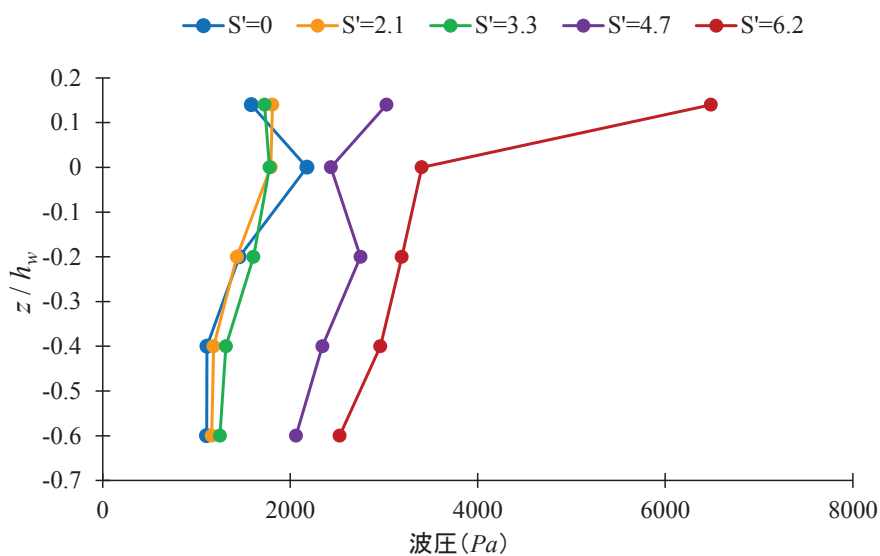


図 4-13 波圧の鉛直分布 (B 港, ケース 2, 複合被災, $H/h_s=0.65$)

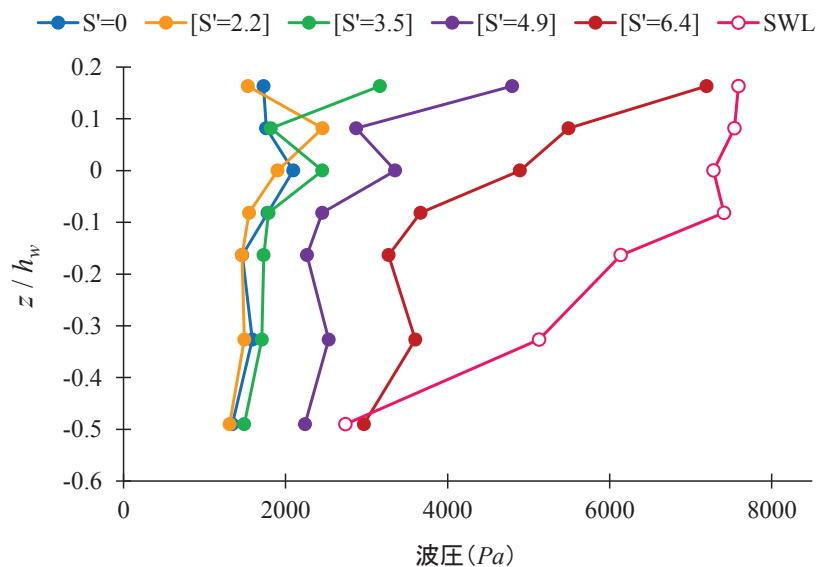


図 4-14 波圧の鉛直分布 (A 港, ケース 3, 天端沈下, $H/h_s=0.70$)

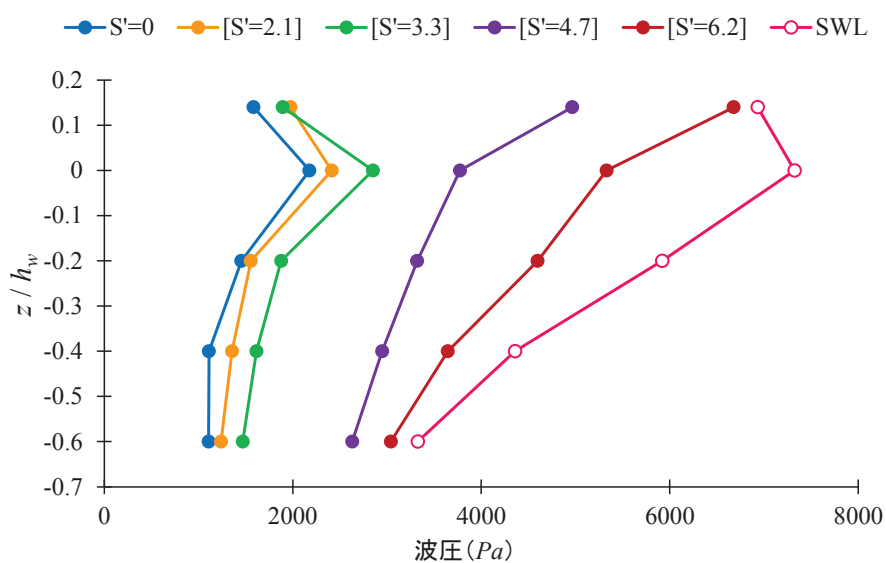


図 4-15 波圧の鉛直分布 (B 港, ケース 4, 天端沈下, $H/h_s=0.65$)

4.2.3 数値計算の概要

数値波動水路を用いた数値計算によって、防波堤消波工を対象とした断面変形に伴う本体工に作用する波力の変化を検討する。

(1) 計算条件

数値波動水路 (CADMAS-SURF/2D, Ver.5.1) を用いて, 水理模型実験と同様に消波工断面を変化させ, 防波堤鉛直面に作用する水平波力の変化を検討する. 図 4-16 に数値波動水路における計算領域設定の概要を示す. 計算領域は水平方向に 26.0m, 鉛直方向に 1.0m であり, 一様水深部の水深は水理模型実験と同じである. 領域の右側端部には波の反射波の影響を無くするために波のエネルギーを徐々に減衰させることができる幅 6.0m のエネルギー減衰帯を設定している. 計算格子間隔は, 水平方向に関して $x=0\text{m}\sim 14.66\text{m}$ と $18.93\sim 26.0\text{m}$ を 2cm 間隔, 消波工および鉛直面が含まれる $14.79\sim 18.80\text{m}$ を 1cm 間隔, 残りの区間は格子間隔を等差的に変化させた. 鉛直方向はすべて 1cm 間隔である.

図 4-16 の水平床に設置した消波工およびマウンドは透過層 (ポーラス) とし, 消波工部分の空隙率は消波ブロックに合わせて 0.50, マウンド部分は実験に用いた砂利に合わせて 0.37 と設定した. 抵抗係数 C_D , 慣性力係数 C_M の値は, 従来の研究事例⁵⁾にもとづき, 1.0, 1.2 とする. 消波工の断面形状は, 水理模型実験と同様に天端および前法面の変形と天端高の沈下の 2 種類のモデル断面により与え, 各断面形状に対して規則波を作用させて, 防波堤鉛直面の直前のセルの圧力を出力し, 積分して水平波力を求める. 圧力の計測点は 13 箇所配置し, 図 4-17 のように静水面付近から上側に密に設定した. サンプル周波数は実験と同様に 500Hz とする.

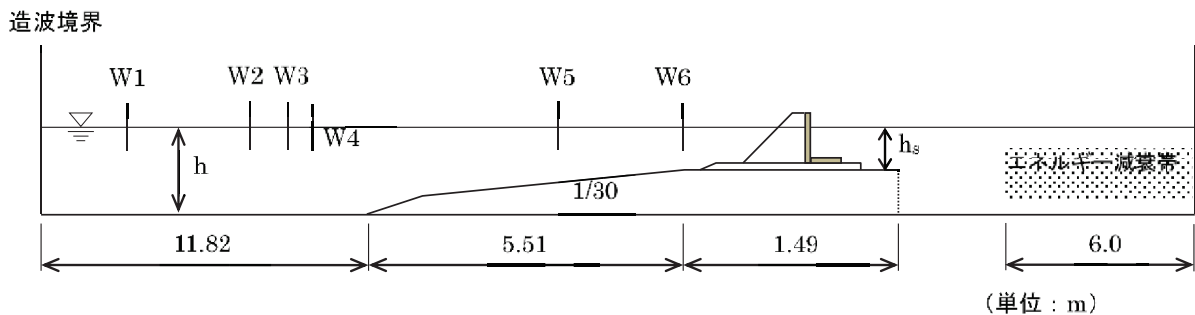
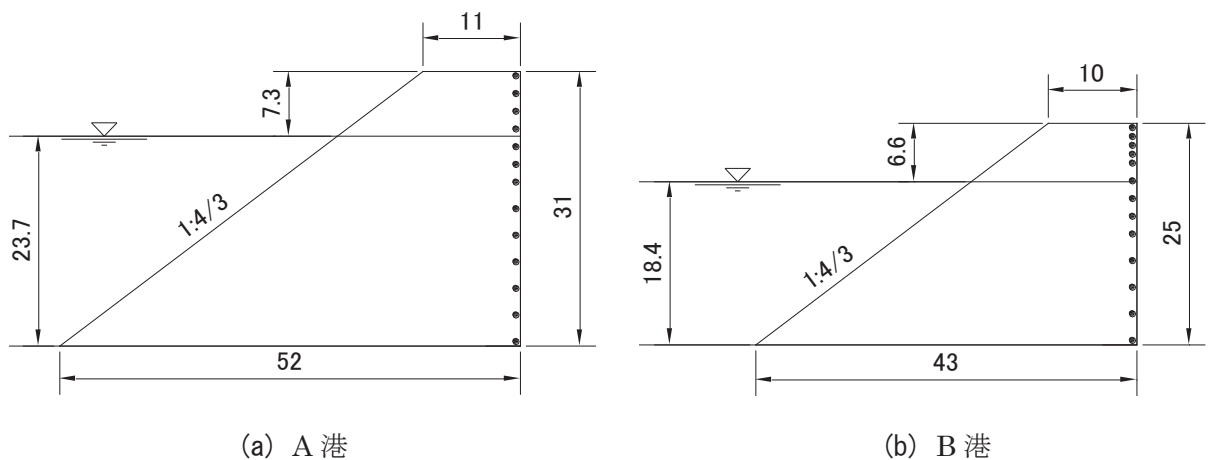


図 4-16 数値波動水路 (計算領域) の概要



(a) A 港 (b) B 港

図 4-17 数値波動水路による圧力の計測点 (単位 cm)

(2) 通過波検定

数値計算においても模型実験と同様に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。数値波動水路による通過波検定の概略図を図4-18に示す。水理模型実験と同様に、通過波検定では堤体及びマウンドを設置せず、斜面と水平床のみの状態で造波し、正確な入射波を計測することを目的としている。水路終端側に幅6mのエネルギー減衰帯を設置した。このため、計算領域を余分に必要とするが、無反射状態となるため、計測した波浪を入反射分離推定する必要がない。表4-2に通過波検定の結果として、数値波動水路の入力データの設定波高値 H_{IN} 、波高計 W3 での波高値 H 、防波堤鉛直面位置 W6 での波高 H_s 、防波堤設置位置での水深 h_s 、波高水深比 H/h_s の値を示す。計算した水位変動の例を図4-19に示す。防波堤設置位置の W6 では 18~29s あたりの波形が安定しており、この間の波高の平均を H_s としている。これらの結果と水理模型実験の結果を比較すると、同等の沖側の波高 H に対して数値波動水路の方が H_s は高い値を示しており若干の誤差はあるが、本研究では、波圧計測地点に近い W6 での波高 H_s について実験結果とほぼ一致するように数値波動水路の入力データを設定することとした。

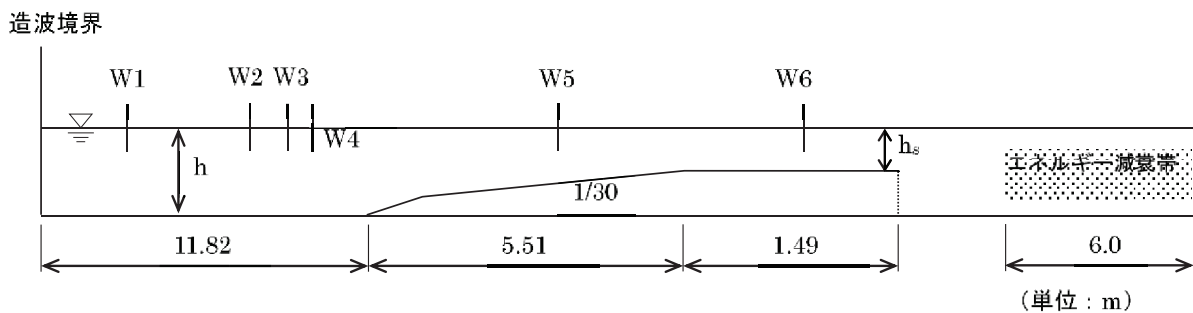


図4-18 数値実験による通過波検定の概要（波力実験，W1～W6は波高計）

表4-2 数値波動水路による通過波検定の結果（規則波）

A港(ケース1, 3)					B港(ケース2, 4)				
H_{IN} (cm)	H (cm)	H_s (cm)	h_s (cm)	H/h_s	H_{IN} (cm)	H (cm)	H_s (cm)	h_s (cm)	H/h_s
11	11.2	12.0	27.3	0.41	9	8.4	11.7	22.4	0.38
12	12.1	13.3	27.3	0.44	10	9.4	13.5	22.4	0.42
13	13.0	14.8	27.3	0.48	11	10.5	15.1	22.4	0.47
14	14.0	16.8	27.3	0.51	12	11.5	17.4	22.4	0.51
15	14.9	17.6	27.3	0.55	13	12.5	18.5	22.4	0.56
16	15.8	18.0	27.3	0.58	14	13.6	17.1	22.4	0.61
16.5	16.3	18.8	27.3	0.60	15	14.6	17.5	22.4	0.65
17	16.6	19.4	27.3	0.61	16	15.6	17.9	22.4	0.70
18	17.6	19.3	27.3	0.65	17	16.7	17.4	22.4	0.74

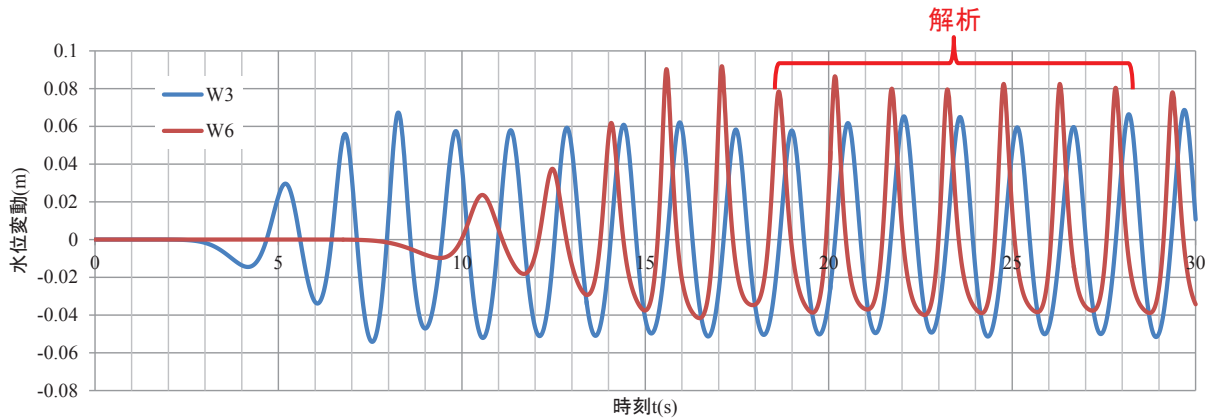


図 4-19 数値実験による通過波検定の時系列波形 (A 港, ケース 1, $H=11.2\text{cm}$)

4.2.4 計算結果と実験結果の結果

図 4-20, 図 4-21 はケース 1, 2 の複合被災の断面変形による水平波力の変化について, 実験値と計算値を比較した結果を示す. 両軸とも入射波高 H_s , 波力分布幅 h_w を用いた無次元量水平波力としている. 比較の際には, 通過波検定時における実験と計算の H_s のうち, 条件の近い値を抽出し, 波浪条件による差異が生じないようにした. ケース 1 では $S'=3.5$, ケース 2 では $S'=3.3$ までは実験値と計算値は同程度であるが, ケース 1 では $S'=4.9$, ケース 2 では $S'=4.7$ 以上になると計算値よりも実験値の方が大きく, 断面変形が進行すると両者の差は大きくなる. 図 4-22, 図 4-23 はケース 3, 4 の天端沈下の断面変形について水平波力を比較したものであり, ケース 3 では $[S'=4.9]$, ケース 4 では $[S'=6.2]$ 以上になると計算値よりも実験値の方が大きくなる. これは, 消波工の断面変形量が大きくなると, 実験では強い衝撃波圧が計測されたが, 計算ではそれほど大きな波圧は発生しなかったことが原因であり, 実験での衝撃波圧が強くなるほど計算値と実験値の差は大きくなる.

数値波動水路では, 上記のような実験値と計算値の差異の原因について検討課題として示している 4). 第 2 章においても述べたが, 数値波動水路では表面セルから流体セル, または気体セルから流体セルへと変化したセルが連続式を満足しないときに, スパイクノイズが発生する. この原因として数値波動水路は流体の非圧縮性を前提とした单相流モデルであるため, 複雑に変化する自由表面で適切な境界条件が設定されないこと, 密封された空気圧を評価できないことなどが挙げられる. 密封された空気は気体セルと判断され, 圧力はゼロに設定される. しかしながら, 実際の空気圧は圧縮されるためゼロとならず, 大きな差異が生じることが指摘されており, 本研究においても同様のことが原因であると推測する.

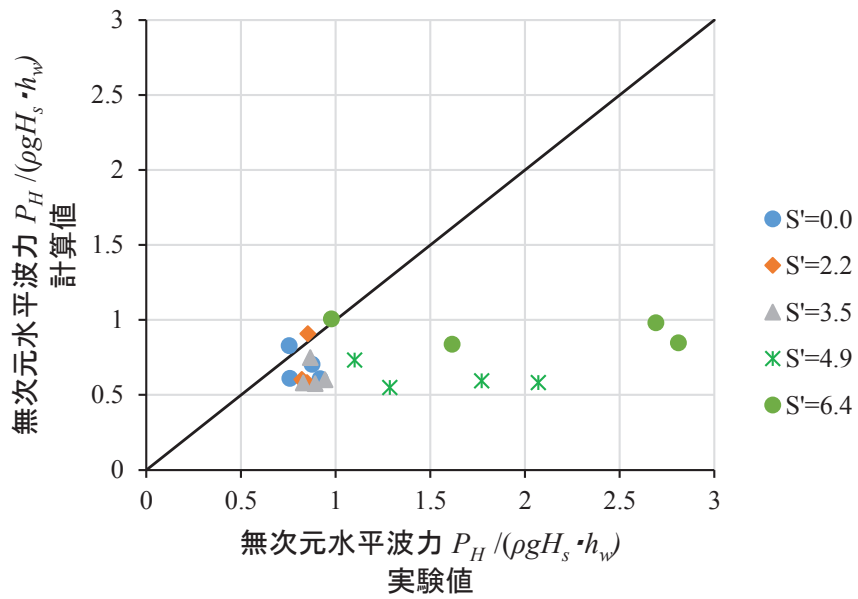


図 4-20 断面変形に伴う水平波力の実験値と計算値の比較 (A 港, ケース 1, 複合被災)

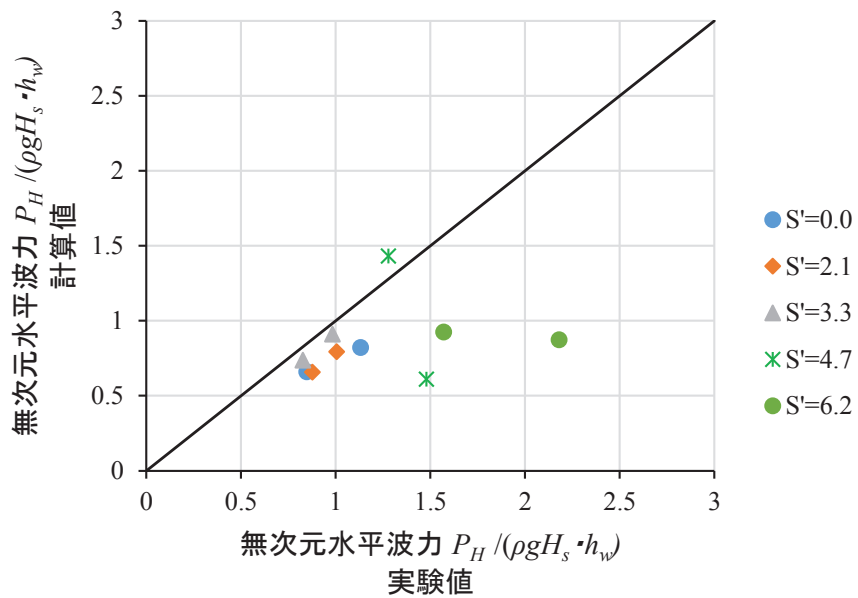


図 4-21 断面変形に伴う水平波力の実験値と計算値の比較 (B 港, ケース 2, 複合被災)

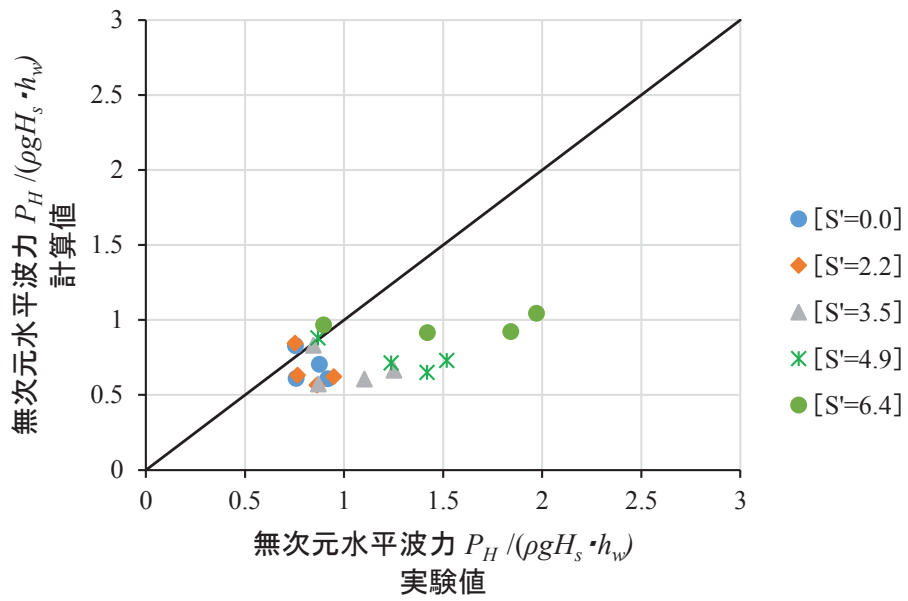


図 4-22 断面変形に伴う水平波力の実験値と計算値の比較 (A 港, ケース 3, 天端沈下)

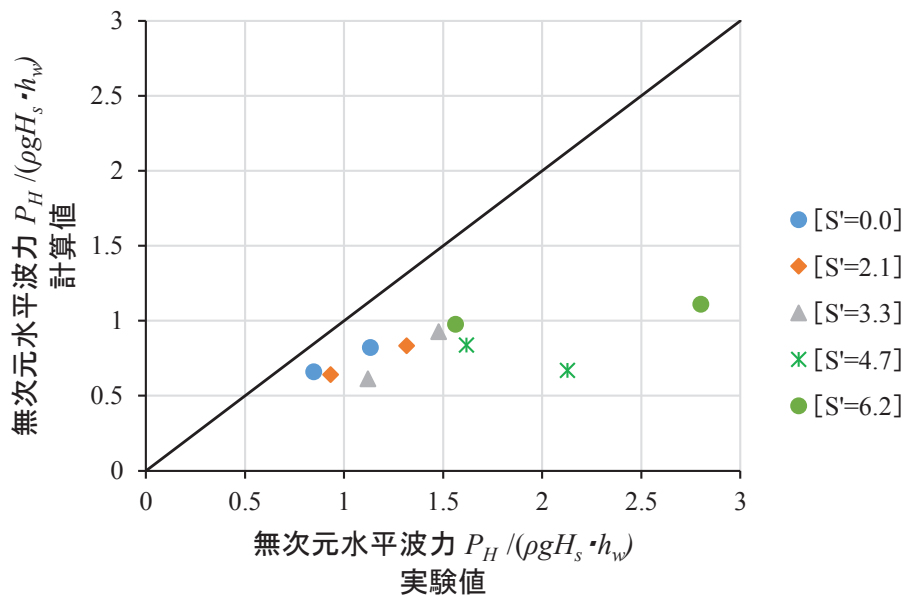


図 4-23 断面変形に伴う水平波力の実験値と計算値の比較 (B 港, ケース 4, 天端沈下)

4.3 断面変形による越波流量の変化

本節では、消波工の断面変形に伴う越波流量の変化を数値計算によって検討することを目的とする。越波流量が増加すると港内の静穏度が悪化し背後施設や荷役稼働率に影響を及ぼすため、消波工の劣化によって越波低減性能がどの程度低下するか把握することが重要である。比較のために水理模型実験による越波流量の計測も行う。

4.3.1 数値計算の概要

(1) 数値計算の条件

数値波動水路 (CADMAS-SURF/2D, Ver.5.1) を用いて、前節と同様に消波工断面を変化させ、越波低減性能の変化に関する数値計算を実施した。図 4-24 に数値波動水路の概要を示す。計算領域は水平方向に 29.0m、鉛直方向に 1.0m であり、一様水深部の水深は前節での設定と同じである。領域の左 (沖) 側端部には幅 6.0m のエネルギー減衰帯を設定し、境界を開境界としている。斜面、水平床および消波工を前節と同じ条件で設定し、鉛直面 (不透過) の背後を越波量計測のための領域 (越波枡) とした。なお、岸 (右) 側境界は壁境界である。前節での実験及び数値計算と異なり、マウンドは鉛直面までとし、鉛直面は水平床に接している。これは、鉛直面の前後でマウンドを通して水が移動しないようにするためである。これにより、鉛直面天端上を越えて流入した水の体積 (越波量) を求めることができる。水平床は岸側 (右側) 境界まで伸ばしてあり、斜面、水平床とも不透過である。計算格子間隔は、水平方向に関して $x=-7.0\text{m}\sim 14.66\text{m}$ と $19.26\sim 22.0\text{m}$ を 2cm 間隔、消波工および鉛直面が含まれる $14.82\sim 19.10\text{m}$ を 1cm 間隔、残りの区間は格子間隔を等差的に変化させた。鉛直方向はすべて 1cm 間隔である。

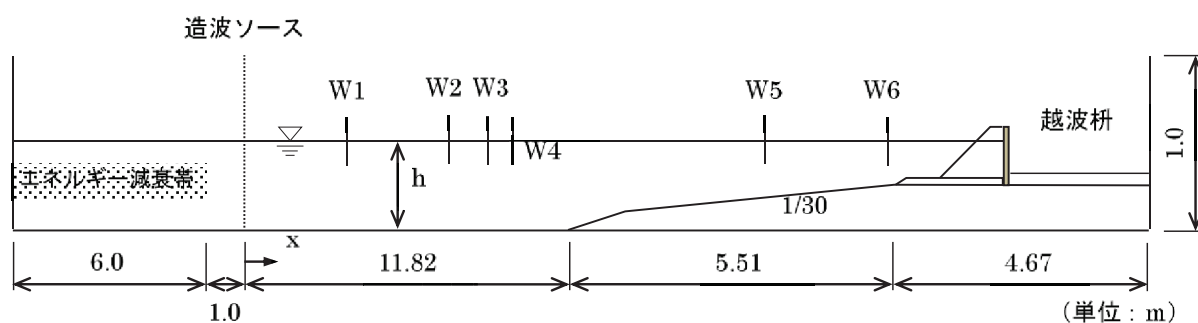


図 4-24 数値波動水路 (計算領域) の概要

図 4-24 の水平床上に設置した消波工およびマウンドのポーラス設定は、波力実験と同様に消波工部分の空隙率は消波ブロックに合わせて 0.50、マウンド部分は実験に用いた砂利に合わせて 0.37 と設定した。抵抗係数 C_D 、慣性力係数 C_M の値は、従来の研究事例⁵⁾にもとづき、1.0、1.2 とする。また、消波工の断面形状も同様に、天端および前法面の変形（複合被災）と天端高の沈下（天端沈下）の 2 種類のモデル断面により与え、各断面形状に対して不規則波を作用させて、越波柵全体の水の体積を出力することにより越波量 Q を求めた。なお、水位変動などの計算結果は 0.05s 間隔で出力した。

(2) 通過波検定

越波流量の数値計算においても波力実験と同様に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。数値波動水路による通過波検定の概略図を図 4-25 に示す。水理模型実験と同様に通過波検定では、堤体及びマウンドを設置せず海底床のみの状態で造波し、正確な入射波を計測する。通過波検定において、A 港では有義波周期を $T_{1/3}=1.53\text{s}$ 、B 港では $T_{1/3}=1.67\text{s}$ 、とし、有義波高の設定値を 7 種類として、造波地点（図 4-24 中の造波ソース）での不規則波の表面波形データおよび水粒子速度の鉛直分布データ（マトリクスデータ）を作成した。造波時間 T_{All} は、A 港で $T_{All}=300\text{s}$ 、B 港で $T_{All}=330\text{s}$ （ともに $T_{All}\doteq 200T_{1/3}$ ）とし、不規則波のエネルギースペクトルには修正 Bretschneider-光易型スペクトルを用いた。通過波検定の結果から、一様水深部の W2～W4 における有義波高の平均を沖波有義波高 H_0 とした。表 4-3 に H_0 、鉛直面の天端高と H_0 との比 h_c/H_0 、沖波波形勾配 H_0/L_0 を示す。

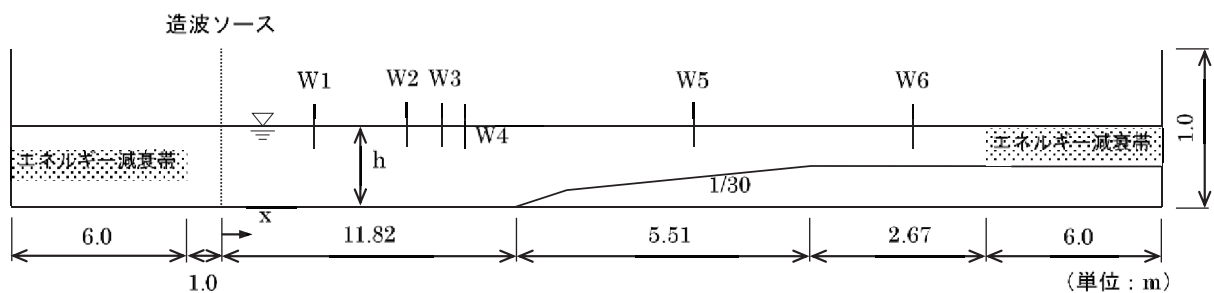


図 4-25 数値実験による通過波検定の概要（越波実験，W1～W6 は波高計）

表 4-3 越波計算における波浪条件

A港(ケース1, 3)			B港(ケース2, 4)		
H_0 (cm)	h_c/H_0	H_0/L_0	H_0 (cm)	h_c/H_0	H_0/L_0
8.7	0.839	0.024	8.7	0.759	0.020
9.6	0.760	0.026	9.7	0.680	0.022
10.5	0.695	0.029	10.6	0.623	0.024
11.1	0.658	0.030	11.6	0.569	0.027
12.0	0.608	0.033	12.5	0.528	0.029
13.2	0.553	0.036	13.2	0.500	0.030
13.7	0.533	0.038	13.7	0.482	0.031

4.3.2 数値計算の結果

越波量 Q を造波時間 T_{All} で除して平均越波流量 q を求め、さらに無次元越波流量 $q/\sqrt{gH_0^3}$ (g : 重力加速度) を求めた。図 4-26 から図 4-29 に各港での無次元越波流量を示す。何れの結果においても、沖波波形勾配が大きくなるにつれ越波流量が増加している。図 4-26 と図 4-27 に示したケース 1 とケース 2 の複合被災においては、 $S'=4.9$, $S'=4.7$ までは断面変形の進行にともなって越波流量も増えているが、 $S'=6.4$, $S'=6.2$ では減少している。これは、鹿島ら⁶⁾や Ota et al.⁷⁾ が述べているように、露出した鉛直面により波が鉛直上向きの運動となることや、前法面の勾配が緩くなったことにより越波流量が減少したものと考えられる。図 4-28 と図 4-29 に示したケース 3 とケース 4 の天端沈下においても、断面変形が大きくなると越波流量が頭打ちになる、もしくは若干減少しており、露出した鉛直面の影響によるものと推察される。また、天端沈下(ケース 3, 4) よりも複合被災(ケース 1, 2) のほうが、断面変形に伴う越波流量の増加が大きいことがわかる。天端沈下では $S'=0$ での越波流量の約 1.2~1.5 倍までの増加であるのに対し、複合被災では約 1.4~1.8 倍となっている。

4.3.3 計算結果と実験結果の比較

越波に関する水理模型実験においても数値計算と同様の条件とし、越波量 Q を造波時間 T で除して平均越波流量 q を求め、さらに無次元越波流量を求めた。実験における通過波検定で得られた波高計 W2~W4 の有義波高の平均値(沖波有義波高) H_0 は、A 港では 10.3cm ($h_c/H_0=0.709$)、B 港では 9.8cm ($h_c/H_0=0.673$) であり、この不規則波を用いて消波工の断面形状を変化させて越波量を計測した。図 4-30, 図 4-31 に A 港, B 港の複合被災での無次元越波流量を示す。図中の実線は数値計算の結果であり、実験結果は破線で示す。数値計算の結果は、図 4-26, 図 4-27 に示した無次元越波流量を h_c/H_0 をパラメータにして書き換えたものである。実験結果は A 港, B 港のそれぞれの h_c/H_0 に対応する計算結果と差が生じたが、消波工の変形とともに越波流量は増加し、さらに変形が進むと頭打ちもしくは減少しており、計算結果と同様の傾向が確認できた。

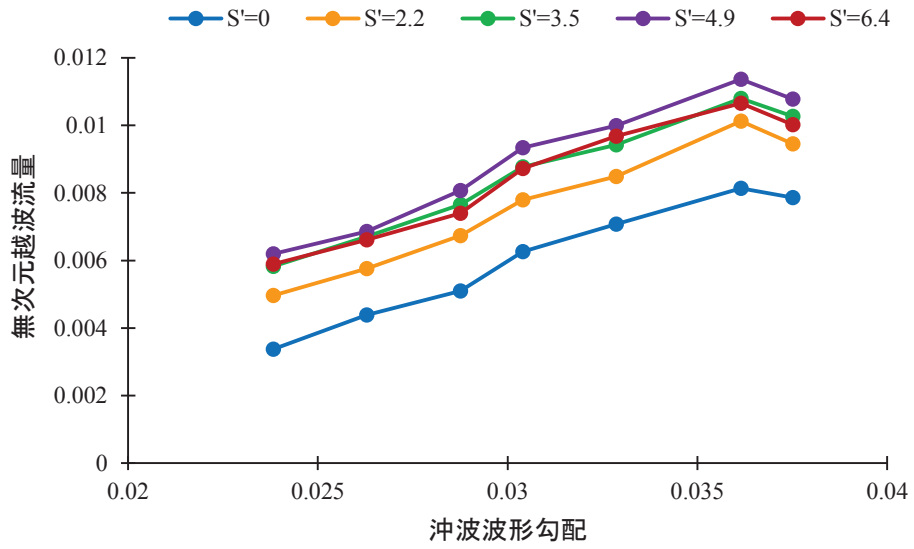


図 4-26 越波流量の変化 (A 港, ケース 1, 複合被災)

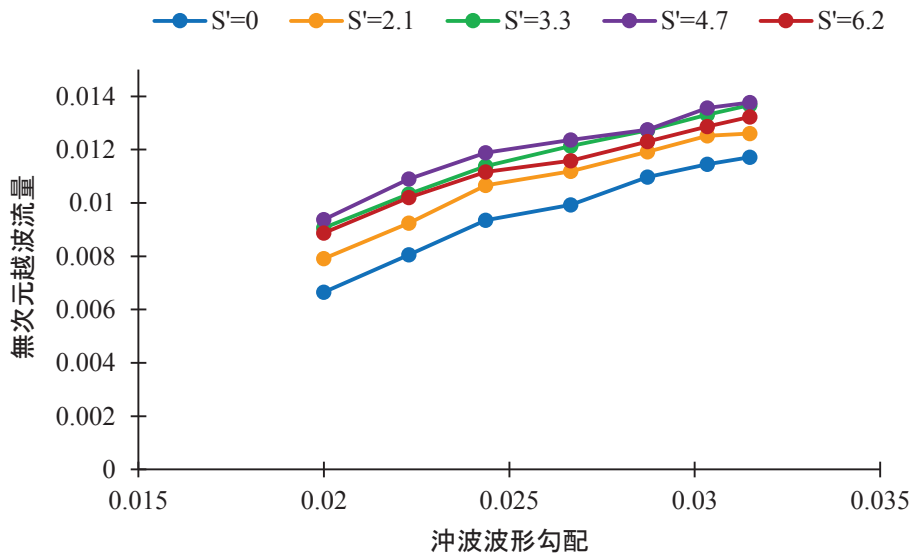


図 4-27 越波流量の変化 (B 港, ケース 2, 複合被災)

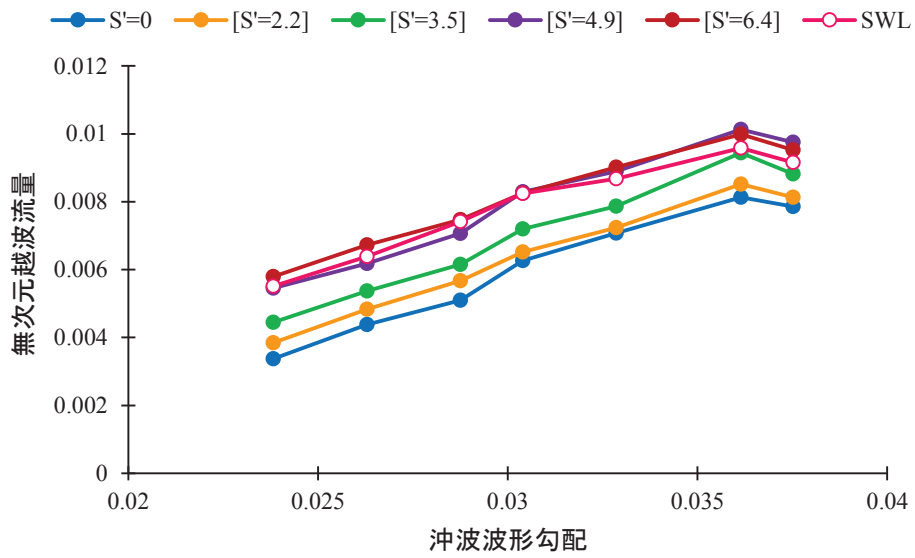


図 4-28 越波流量の変化 (A 港, ケース 3, 天端沈下)

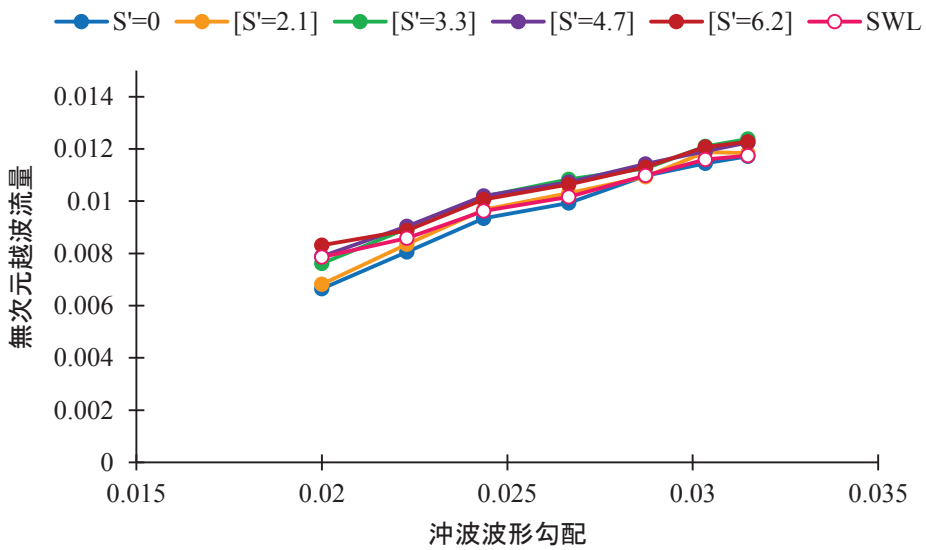


図 4-29 越波流量の変化 (B 港, ケース 4, 天端沈下)

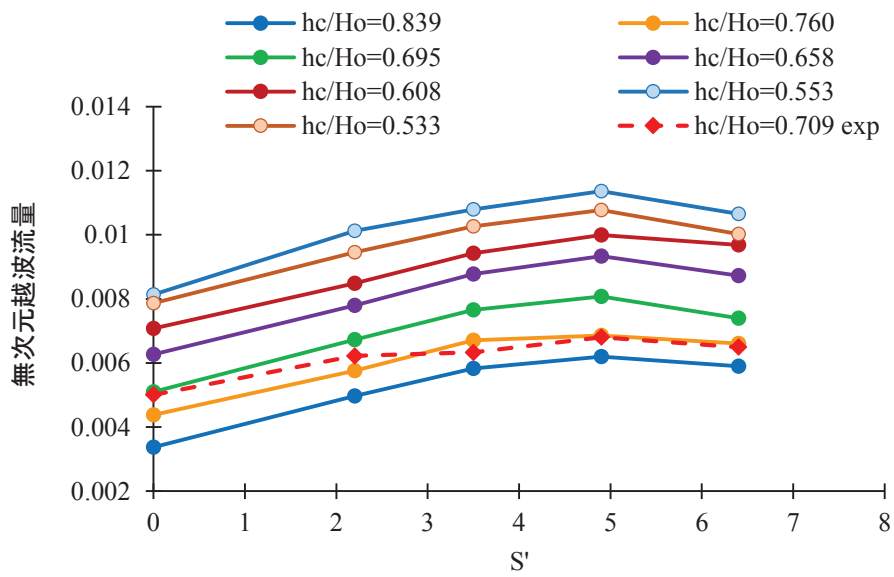


図 4-30 越波流量の比較 (A 港, ケース 1, 複合被災)

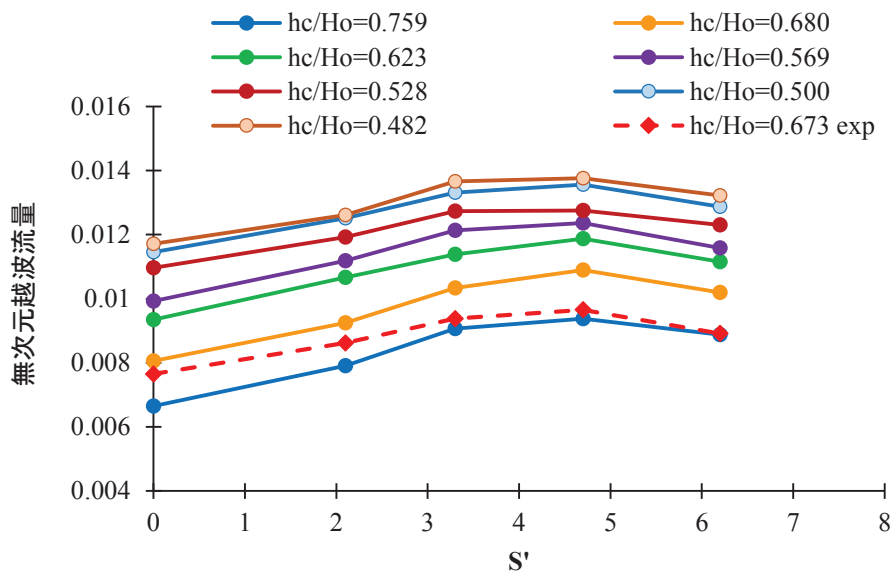


図 4-31 越波流量の比較 (B 港, ケース 2, 複合被災)

4.4 結語

本章では消波工の断面変形にともなう性能変化について検討した。防波堤本体工に作用する波力および越波流量の変化に着目し、水理模型実験と数値波動水路による数値計算の両面から検討した結果、有用なデータを得ることができたが、同時に様々な問題点も浮上した。

防波堤本体工に作用する波力を検討した結果、消波工の変形が一定以上進行すると、防波堤鉛直面に作用する水平波力は初期状態よりも大きくなることが確認された。また、大きな水平波力を計測した波浪条件における波圧の鉛直分布より、断面変形の進行とともに露出する防波堤鉛直面上部のみならず、鉛直面下部においても波圧が増大していることがわかった。断面変形に伴って露出した鉛直面に作用した衝撃波圧が鉛直面下部まで影響を及ぼしていると考えられる。しかし、数値計算では実験ほど大きな波圧の発生が見られず、本章で設定した条件下では両者に差異が生じた。この原因として、数値波動水路は流体の非圧縮性を前提とした単相流モデルであるため、複雑に変化する自由表面で適切な境界条件が設定されないこと、密封された空気圧を評価できないことなどが挙げられる。密封された空気は気体セルと判断され、圧力はゼロに設定される。しかしながら、実際の空気圧は圧縮されるためゼロとならず、大きな差異が生じることが指摘されており、本研究においても同様のことが原因であると推測する。本研究では、衝撃力が卓越すると数値計算では実験結果に比べ過小評価している可能性があるため、**第5章**で用いるニューラルネットワークのチューニングデータや、**第6章**で行う性能を考慮した最適予防保全の検討には実験結果のみを使用する。

数値計算により越波流量を検討した結果、断面変形が大きくなると越波流量も多くなり、性能変化が認められた。天端沈下よりも複合被災のほうが、断面変形に伴う越波流量の増加が大きいことがわかる。また、断面変形がさらに進むと越波流量の増加は緩やかになるか、もしくは若干下がった。これは、露出した鉛直面により波が鉛直上向きの運動となることや、前法面の勾配が緩くなったことにより越波流量が減少したものと考えられる。

これらの結果にもとづいて、**第5章**ではニューラルネットワークを用いた波力および越波低減性能の予測モデルを構築し、その適用性を検討する。

参考文献

- 1) 河村裕之, 太田隆夫, 松見吉晴, 権守真也: 消波工の断面変形に伴う性能変化と性能予測モデルについて, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2017. 印刷中
- 2) 関克己, 有川太郎, 水谷雅裕: 消波ブロック被覆堤における消波工被覆状態の波圧に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.816-820, 2009.
- 3) 三上信雄, 山本正昭: 施工途中での消波工による波圧増大とその対策, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.611-615, 1991
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書, pp.41-46, 2008.
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書, 306p, 2008.
- 6) 鹿島遼一, 榊山勉, 松山昌史, 関本恒浩, 京谷修: 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.671-675, 1992.
- 7) Ota, T., Matsumi, Y., Kato, N. and Ohno, K.: Modeling of damage progression of rubble mound revetment and application to performance evaluation, *Proc. 33rd Int. Conf. on Coastal Engineering*, Paper #: structures.50, Retrieved from <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce>, 2012.

第5章 消波工の性能診断モデル

5.1 緒言

老朽化した構造物を補修するには、ライフサイクルコストを考慮して経済的負担が小さくなるように補修モデルの構築と補修レベルを設定することが重要である。しかし、単にライフサイクルコストのみを最小化とする補修レベルを設定した場合、そのレベルに至るまでの過程において、構造物本来の性能も満たしているか検証する必要がある。そうでなければ周辺施設に損害を与えてしまう可能性がある。つまり、LCCモデルと性能診断モデルを同時に満たす補修レベルの設定が必要である。

本章では性能診断モデルの構築を目的とし、消波工の変形に伴う防波堤鉛直面に作用する波力と越波流量の性能を対象としている。消波工の性能が維持されているかを診断するためには、消波工の断面変形に対する性能変化のデータが必要不可欠であり、既に第3章では水理模型実験による消波工の断面変形のモデル化、第4章では消波工の断面変形による波力や越波流量の変動データを蓄積しており、これらのデータにもとづき消波工の性能診断モデルを構築する。

これらのデータ処理に関しては、性能変化をもたらすパラメータは消波工の断面変形だけではなく、波浪条件や堤体諸元などの複数のパラメータが混在し、どのパラメータが支配的であるか把握することは困難であり、それぞれの因果関係を究明することは容易ではない。このような相互間の不明確な情報処理を分析するために有効なツールとしてニューラルネットワークを利用する。ニューラルネットワークは複数のパラメータを入力データの項目とし、ネットワークを形成するパラメータ値を調整（学習）することで性能の予測値を出力させることができる。本章ではニューラルネットワークを概説するとともにネットワークの構成、学習法について述べ、性能予測モデルの構成と予測結果を示しその有用性について検討する。

5.2 ニューラルネットワークの概説

ニューラルネットワーク^{1), 2)}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、加えてその基本原理、計算手法および汎用化された多くのプログラムが提供されている。本研究においては、MATLABのNeural Network Toolboxを用いる。

5.2.1 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、相互結合型ネットワークと階層型ネットワークの2つに大別される。

ニューロンのモデルであるユニットとしては、図5-1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、信号は一方方向に伝わる。ユニットでは、シナプスからの入力信号は、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 が差し引かれた値がユニットに入力され、応答関数 f に応じた出力信号を伝達する。

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5-2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。このネットワークモデルでは、その出力値 \bar{y} は次のように与えられる。

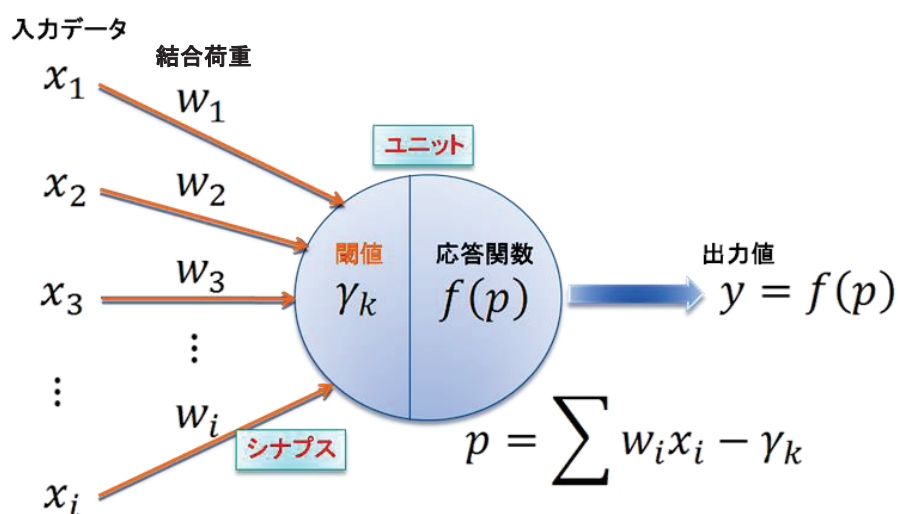


図 5-1 ニューロンモデル

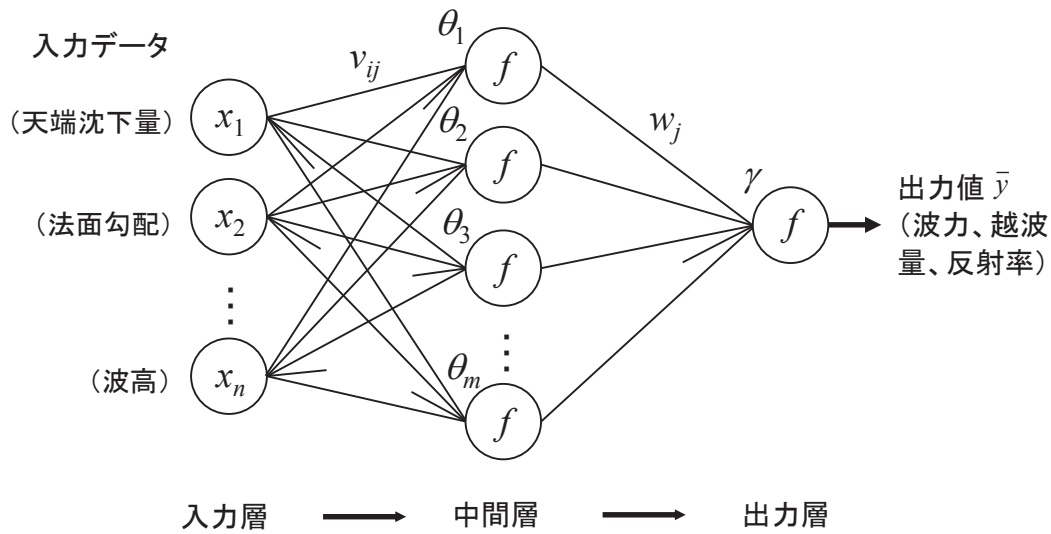


図 5-2 階層型ニューラルネットワークの概要図

$$\bar{y} = f(S) \quad , \quad S = \sum_{k=1}^m w_k H_k - \gamma \quad , \quad (5.1)$$

$$H_k = f(U_k) \quad , \quad U_k = \sum_{i=1}^n v_{ik} x_i - \theta_k$$

ここに、 S ：出力層ユニットへの入力、 w_k ：中間層第 k ユニットから出力層への経路の重み係数、 H_k ：中間層第 k ユニットからの出力、 γ ：出力層ユニットに対する閾値、 U_k ：中間層第 k ユニットへの入力、 v_{ik} ：入力層第 i ユニットから中間層第 k ユニットへの経路の重み係数、 x_i ： i 番目の入力データ、 θ_k ：中間層第 k ユニットに対する閾値である。

5.2.2 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、学習の指針として望ましい出力データ（教師データとも呼ばれる）を学習データとして与え、繰り返し学習で入力データに対するネットワークからの出力値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得られるようユニットにかかる結合荷重と閾値を調整し、ネットワークを改良する。ネットワークからの出力値と教師データとの誤差は、 N 個の学習データに対して次式の平均二乗誤差で表され、評価関数またはパフォーマンス関数と呼ばれる。

$$E_t = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N (y^p - \bar{y}^p)^2 \quad (5.2)$$

ここに、 y^p : p 組目の学習データにおける教師データ、 \bar{y}^p : p 組目の入力データに対するネットワークの出力値である。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、新しい入力が与えられると、学習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データと教師データの組をネットワークの学習に与えなくても、結果を得ることができる。

ニューラルネットワークの学習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、教師データ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トレーニングデータ、バリデーションデータ、テストデータの3つに分割する。バリデーションデータに対する誤差は、トレーニングデータに対する誤差と同様に学習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に対する誤差は増加し始めるため、最小になったときに学習を停止させる。テストデータは学習には用いないが、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、ネットワークは教師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学習アルゴリズムである共役勾配法の Levenberg-Marquardt 法（以下、LM 法と表記）など多くの種類がある。

本研究では、間瀬ら⁶⁾と同様に、学習アルゴリズムに LM 法を用い、早期停止法と Bayesian 正則化法を付加した2種類の学習法を採用する。

5.3 性能診断モデルの構成

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、複合型被災、天端被災のニューラルネットワークを構築する。中間層ユニットの伝達関数には出力が-1~1の tangent 型シグモイド関数を、出力層ユニットには間瀬ら⁶⁾と同様に線形関数を使用する。

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，中間層ユニット数を変化させて計算を行い，ニューラルネットワークによる予測値と水理模型実験の結果（以下，実験値と表記）またはCADMAS-SURFによる計算結果（以下，計算値と表記）との相関の違いや誤差を検討した．

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，多数の入力データと出力値に関する学習データが必要となる．本研究では，第3章，第4章で行った，水理模型実験または数値波動水路を用いた消波工の断面変形に伴う性能変化に対する多数の実験解析結果および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（波力または越波量）の1項目とした．波力については，第4章に示した水平波力を，堤体位置での波高 H_b による静水圧と鉛直壁の高さ h_w で除した無次元水平波力の値を用い，越波量については示した無次元越波流量の値を用いた．

性能予測モデルについては，A港（ケース1，3）とB港（ケース2，4）のそれぞれで波力用と越波量用に分けて，合計4つのモデルを作成した．

5.3.1 入力データの項目と中間層ユニット数の設定

入力データの項目として，表5-1に示す被災に関する諸量（天端幅，法面勾配，水平減少率，天端岸側沈下率，天端法肩沈下率），堤体諸元（法先水深，初期天端高，空隙率），波浪条件（波力に対しては波高 H_s と周期，越波に対しては沖波有義波高と有義波周期）の10項目を用いた．

中間層ユニット数に関しては，ユニット数を変化させて計算を行い，予測値と実験値または計算値との相関や予測誤差を調べた．ユニット数は，10，15，20，25，30の5種類とした．

表5-1 入力データ項目

分類	入力項目	項目数
被災に関する諸量	共通：天端幅，法面勾配，水平減少率，天端岸側沈下率，天端法肩沈下率	5
堤体諸元	共通：法先水深，初期天端高，空隙率	3
波浪条件	水平波力：堤体前面波高 H_s ，周期	2
	越波流量：沖波有義波高，有義波周期	2

5.3.2 学習データおよび予測精度検証データの設定

水平波力に関しては，第4章に述べた水理模型実験において，断面変形（複合被災および天端沈下）と波浪条件の組み合わせにより，A港（ケース1，3）では80組，B港（ケース2，4）では70組の実験値が得られている．また，越波流量に関しては，第4章に示した数値計算を用いてA港（ケース1，3）およびB港（ケース2，4）のそれぞれで60組の計算値が得られた．上述の

10項目を入力データ、無次元水平波力または無次元越波流量を出力データとするデータセットを作成し、そのうちから出力データの値に偏りがないように各10組の入出力データを抽出して予測精度検証用とし、残りの入出力データを学習データとした。したがって、A港の波力および越波量に対するニューラルネットワークでの学習データは70組と50組、B港では60組と50組である。

5.1.2で述べたように、早期停止法では学習データをトレーニングデータ、バリデーションデータおよびテストデータの3つに分割することになるが、本研究ではそれらの割合を80%、15%、5%として、学習データをランダムに分割する方法を用いた。

5.4 性能に関する予測値の検討

5.4.1 学習法と中間層ユニット数の影響

表5-2から表5-5は、ニューラルネットワークによる性能予測モデルにおいて、上述の2種類の学習法と5種類の中間層ユニット数に対する無次元水平波力と無次元越波流量の予測結果を示したものである。表中のCCは実験値または計算値と予測値との相関係数、RMSEは実験値または計算値と予測値との二乗平均平方根誤差である。これらの値は、5.2.2項に述べた予測精度検証用のデータ（各10組の入出力データ）から得られたものである。これらの結果から、Bayesian正則化法を付加した場合は、中間層ユニット数による予測結果の違いがわずかであることがわかる。学習回数については、Bayesian正則化法のほうが早期停止法よりも多く、特に表5-2、表5-5の場合ではかなり大きな値になっている。また、各表でCCが大きくRMSEが小さい結果を与えているのは、早期停止法を付加した場合で、中間層ユニット数は15または20である。

5.4.2 水平波力に関する実験値と予測値の比較

図5-3、図5-4は、A港（ケース1, 3）およびB港（ケース2, 4）における無次元水平波力の実験値と予測値を比較したものである。表5-2、表5-3に示した結果のうち、予測精度が高いもの（表中の緑色の欄）を示している。図5-3に示した結果では、9個のデータに対してはかなり誤差の小さい予測値が得られており±15%の誤差範囲であるが、1個だけ予測値が実験値を大きく上回っており、結果的に±40%の誤差範囲に収まっている。図5-4では、実験値と大きく異なる予測値は見られず、±30%の誤差範囲に収まっていることがわかる。図5-3、図5-4に示したデータには、4.2.2項に示した波力比で2を超えるような大きな波力の場合も含まれており、本研究で構築した予測モデルは、衝撃波力が作用する場合も含めて適用可能であると言える。

5.4.3 越波流量に関する計算値と予測値の比較

図5-5, 図5-6は, A港(ケース1, 3)およびB港(ケース2, 4)における無次元越波流量の計算値と予測値を比較したものである. 表5-4, 表5-5に示した結果のうち, 予測精度が高いもの(表中の緑色の欄)を示している. A港では予測誤差が小さく, $\pm 10\%$ の誤差範囲で予測できていることがわかる. B港でも予測誤差は比較的小さく, $\pm 15\%$ の誤差範囲に収まっている. 堤体諸元や波浪条件が異なるため単純に比較できないが, 太田ら⁵⁾, 平山ら⁷⁾は断面変形に伴う越波流量の変化をニューラルネットワークで予測した結果として $\pm 25\sim 40\%$ 程度の誤差範囲を報告している. このことから, 本研究での予測モデルの適用可能性が示されたと考えられる.

表5-2 実験値と予測値の相関係数と平均二乗誤差および学習回数 (A港, 無次元水平波力)

学習法		中間層ユニット数				
		10	15	20	25	30
Bayesian	CC	0.904	0.904	0.904	0.904	0.904
	RMSE	0.232	0.232	0.232	0.232	0.232
	学習回数	1363	1379	1764	2374	2853
早期停止	CC	0.909	0.896	0.931	0.481	0.866
	RMSE	0.244	0.283	0.274	0.493	0.328
	学習回数	22	11	13	9	13

表5-3 実験値と予測値の相関係数と平均二乗誤差および学習回数 (B港, 無次元水平波力)

学習法		中間層ユニット数				
		10	15	20	25	30
Bayesian	CC	0.967	0.973	0.967	0.968	0.967
	RMSE	0.182	0.166	0.182	0.182	0.182
	学習回数	176	93	251	296	337
早期停止	CC	0.969	0.974	0.921	0.940	0.956
	RMSE	0.168	0.160	0.290	0.279	0.234
	学習回数	14	10	32	9	9

表5-4 計算値と予測値の相関係数と平均二乗誤差および学習回数 (A港, 無次元越波流量)

学習法		中間層ユニット数				
		10	15	20	25	30
Bayesian	CC	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984
	RMSE	3.60×10^{-4}	3.60×10^{-4}	3.60×10^{-4}	3.60×10^{-4}	3.60×10^{-4}
	学習回数	84	114	133	139	220
早期停止	CC	0.984	0.984	0.961	0.963	0.963
	RMSE	4.40×10^{-4}	3.30×10^{-4}	5.40×10^{-4}	4.90×10^{-4}	4.70×10^{-4}
	学習回数	13	22	12	13	12

表 5-5 計算値と予測値の相関係数と平均二乗誤差および学習回数（B 港，無次元越波流量）

学習法		中間層ユニット数				
		10	15	20	25	30
Bayesian	CC	0.914	0.914	0.914	0.914	0.914
	RMSE	6.50×10^{-4}	6.50×10^{-4}	6.50×10^{-4}	6.50×10^{-4}	6.50×10^{-4}
	学習回数	2961	2453	5000	5000	5000
早期停止	CC	0.955	0.931	0.953	0.858	0.905
	RMSE	5.40×10^{-4}	6.00×10^{-4}	4.80×10^{-4}	9.20×10^{-4}	6.60×10^{-4}
	学習回数	18	15	19	10	11

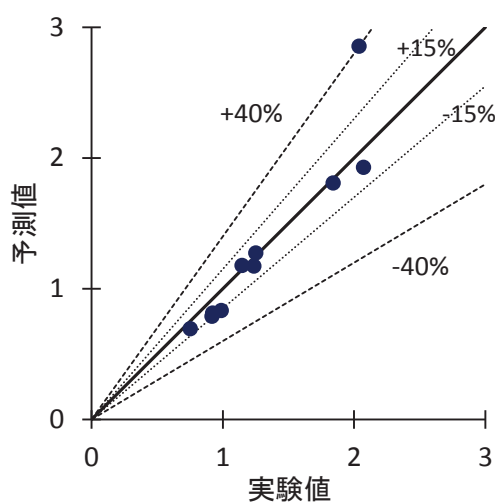


図 5-3 無次元水平波力に関する実験値と予測値の比較
(A 港，ケース 1,3，早期停止法，中間層ユニット数 20)

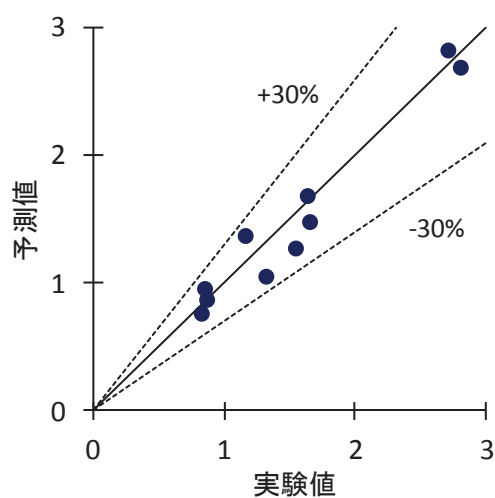


図 5-4 無次元水平波力に関する実験値と予測値の比較
(B 港，ケース 2,4，早期停止法，中間層ユニット数 15)

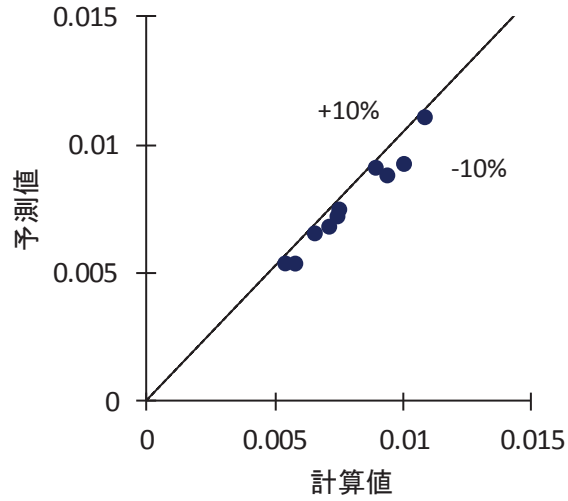


図 5-5 無次元越波流量に関する計算値と予測値の比較
(A 港, ケース 1,3, 早期停止法, 中間層ユニット数 15)

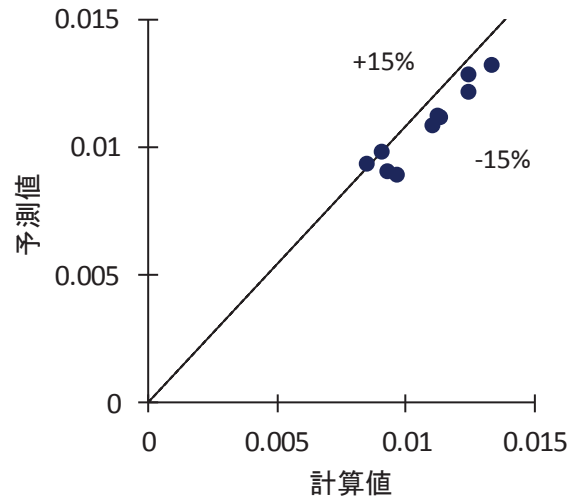


図 5-6 無次元越波流量に関する計算値と予測値の比較
(B 港, ケース 2,4, 早期停止法, 中間層ユニット数 20)

5.5 結語

本章では消波工の変形に伴う防波堤鉛直面に作用する波力と越波流量の性能診断モデルの構築を行った。モデル構築には、多くのパラメータが混在するため、相互間の不明確な情報処理を分析するために有効なツールとしてニューラルネットワークを用いた。ニューラルネットワークを概説し、ネットワークの構成、学習法について述べ、水平波力や越波流量の性能予測モデルの構成と予測結果を示し、その有用性について示した。なお、入力データには第4章を踏まえ、水平波力では水理模型実験、越波流量では数値計算のデータを用いた。

水平波力の予測結果は±40%の誤差範囲内に収まっており、衝撃波力が作用する場合も含めて適用性が示された。越波流量は±15%の誤差範囲で予測できており、この予測モデルについても適用性が確認された。

学習法については、Bayesian 正則化法よりも早期停止法のほうが少ないことや、相関係数(CC)が大きく二乗平均平方根誤差(RMSE)が小さい結果を与えているのは、Bayesian 正則化法よりも早期停止法を付加した場合であったことなどから、本研究では早期停止法を用いて評価した。その際の中層ユニット数は15または20が最適であった。

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，318p，1989.
- 2) 吉富康成：ニューラルネットワーク朝倉書店，158p，2002.
- 3) 間瀬肇，高山知司：ニューラルネットワークによる捨石防波堤の安定性に及ぼす支配要因の影響度評価，海岸工学論文集，第43巻，pp.801-805，1996.
- 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) 太田隆夫，松見吉晴，吉木弘軌，平山隆幸，大野賢一：傾斜護岸の複合被災に伴う消波性能変化の予測モデル，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.69, No.2, pp.I_761-I_765, 2013.
- 6) 間瀬肇，永橋俊二，T., 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用性に関する研究，海洋開発論文集，第21巻，pp.593-598，2005.
- 7) 平山隆幸，藤本啓伸，松見吉晴，太田隆夫，大野賢一：傾斜被覆堤の複合被災に伴う越波量変化に関する評価システムの開発，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.68, No.2, pp. I_330-I_335, 2012.

第 6 章 消波工の性能変化を考慮した最適予防保全レベルの検討

6.1 緒言

建造物の完成直後から進行する劣化に対し、要求性能を保持させるためには、適切な維持管理が必要であり、初期建設費のみならず供用期間中の補修費が最小コストとなるように効率のよい保全計画を立てることが重要である。既に、農林水産省・国土交通省では LCM を導入し適時適切な保全対策が求められている。本章では、消波工を対象に最適な保全計画の策定を行うため、後述する佐藤ら¹⁾のモデルを用いる。消波工を保全するタイミングにより、施設が故障状態になった後に保全する事後保全と、故障状態になる前に適切な予防対策を実施する予防保全の 2 つの保全が存在し、佐藤ら¹⁾のモデルでは、両者の関係について理論的に説明している。さらに、予防保全レベルは期待保全費用に大きく影響することを確認し、期待保全費用を最小化する最適予防保全レベルを理論的に導出している。このモデルで、理論的に求めた最適予防保全レベルにおいて、消波工の性能がどの程度変化しているか確認しておく必要があり、本章では第 4 章で示した波力に対するケーソンの安定性能を用いて検討する。すなわち、消波工を保全する理論的な最適予防保全レベルの導出と、この保全レベルが性能を維持できているか力学的な観点からの検証を行い、性能変化を考慮した最適予防保全レベルを見出す。また、モンテカルロシミュレーションにより消波工の LCC を算出し、理論モデルの妥当性を検証する。

6.2 累積損傷モデルを用いた消波工保全モデル

本節では、佐藤ら¹⁾が信頼性工学における保全問題を応用して構築した、累積損傷モデルに基づく消波工保全モデルについて概説する。

6.2.1 累積損傷モデルの概要

消波工を構成する消波ブロックは、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ことはない。累積された損傷量が K を超えた場合、消波工は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され、維持管理者は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。異常波浪襲来にもなう消波施設事後保全実施の概略図を図 6-1 に示すが、上述のように K は事後保全を行う累積損傷量（以下、事後保全レベル）を表している。

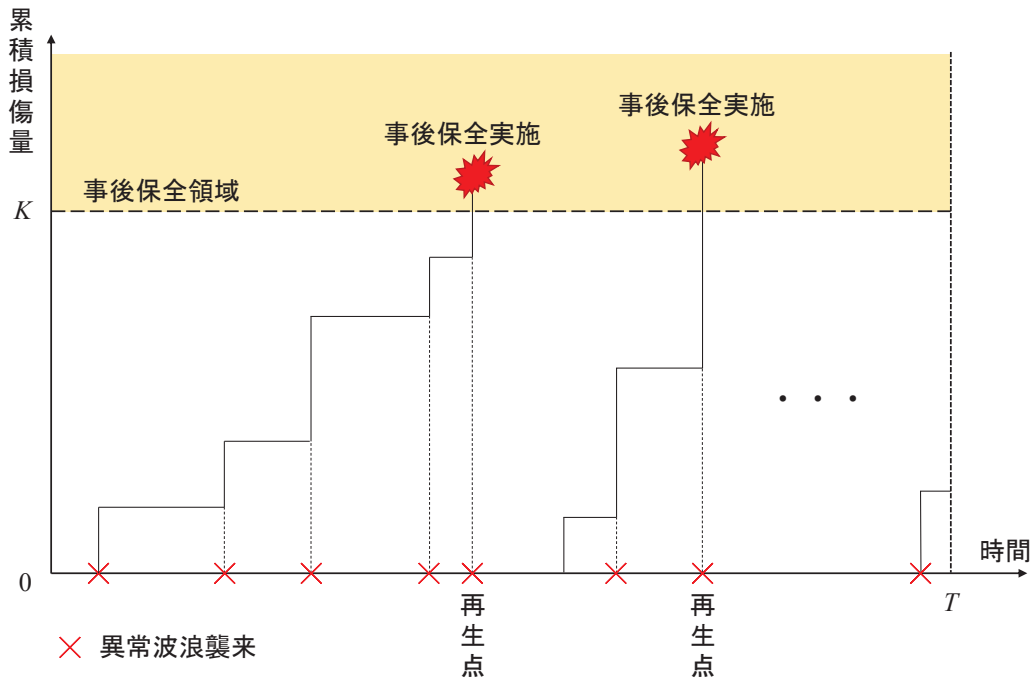


図 6-1 累積損傷モデルの概略図

異常波浪の襲来は、平均 λ_1 の定常ポアソン過程（例えば、小和田²⁾）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、次式で表される。

$$\Pr\{N(t)=j\}=F_{1j}(t)=\frac{(\lambda_1 t)^j}{j!} \exp(-\lambda_1 t) \quad (6.1)$$

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。

$$\Pr\{Z_j \leq x\}=G^{(j)}(x)=\int_0^x G(x-y)dG^{(j-1)}(y) \quad (6.2)$$

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。なお、 $G(x)$ は 1 回の異常波浪により被る損傷量の確率分布関数である。また、以下を付記する。

$$G^{(0)}(x) \equiv \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (x \geq 0) \end{cases} \quad (6.3)$$

6.2.2 限界制御モデル

累積損傷モデルの概念のもと、消波工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。モデルの概略図を図6-2に示すが、 k は予防保全を行う累積損傷量（以下、予防保全レベル）を表している。

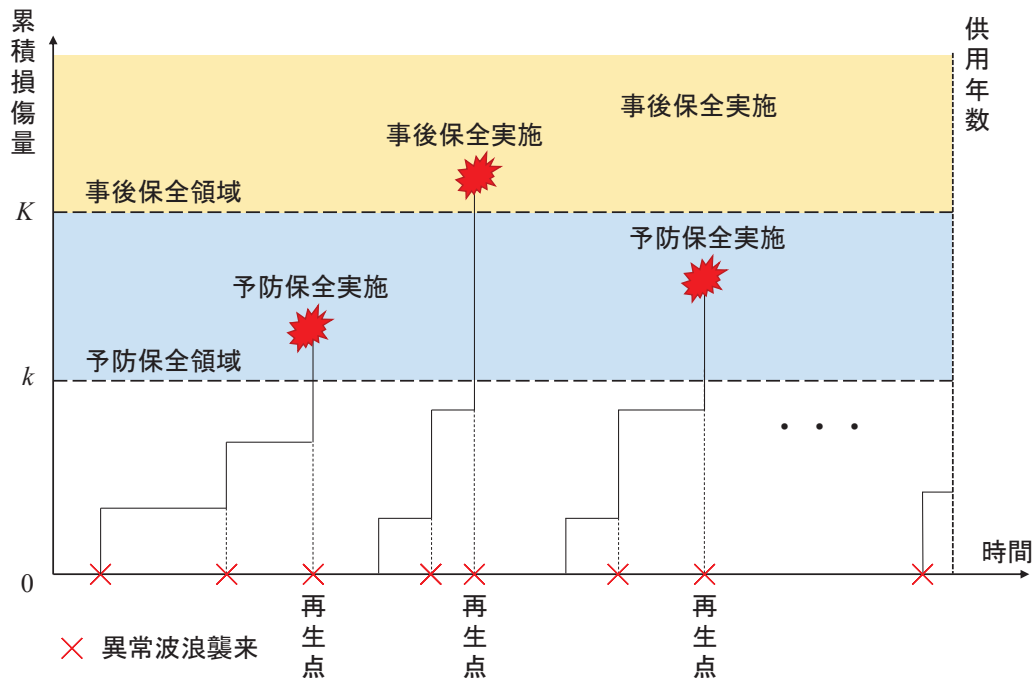


図6-2 限界制御モデルの概略図

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産点と呼ぶ。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。消波工新設時を第0生産点と呼び、以降、順次番号付けをする。なお、消波工の供用年数を T 年とする。第 $j-1$ 生産点と第 j 生産点間の区間を第 j ($j=1,2,\dots$) 生産区間と呼ぶ。各生産区間において、 j 回目の異常波浪により再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、式(6.2)として求まる。

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。

$$E[V_j^1(k)] = c_1 \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^k 1 - G(K-x) dG^{(i)}(x) \quad (6.4)$$

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。

$$E[V_j^2(k)] = c_2 \sum_{i=0}^{\infty} \int_0^k [G(K-x) - G(k-x)] dG^{(i)}(x) \quad (6.5)$$

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。

$$E[V_j(k)] = E[V_j^1(k)] + E[V_j^2(k)] \quad (j=1, 2, \dots, N_T(k)) \quad (6.6)$$

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 $H_T = E[N_T(k)]$ は、Cox³⁾による再生関数の近似式より、次式で表される。

$$H_T(k) = \frac{T}{E[R_j(k)]} + \frac{\text{Var}[R_j(k)] - E[R_j(k)]^2}{2E[R_j(k)]^2} + o(1) \quad (6.7)$$

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。

$$E[R_j(k)] = \sum_{i=0}^{\infty} G^{(i)}(k) \int_0^{\infty} F_{1i}(t) dt = \frac{1+M(k)}{\lambda_1} \quad (6.8)$$

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。

$$M(k) = \sum_{j=1}^{\infty} G^{(j)}(k) \quad (6.9)$$

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。

$$\begin{aligned} \text{Var}[R_j(k)] &= \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^k 1-G(k-x) dG^{(i-1)}(x) \times \int_0^{\infty} (t-E[R_j(k)])^2 dF_i(k) \\ &= \frac{2}{\lambda_1} \left\{ E[R_j(k)] + \frac{1}{\lambda_1} \sum_{i=1}^{\infty} i G^{(i)}(k) \right\} - E[R_j(k)]^2 \end{aligned} \quad (6.10)$$

以上、式(6.6)、式(6.7)および Wald's の関係式⁴⁾より、供用期間 T を考慮した消波工の総期待保全費用は、次式として求めることができる。

$$C_T(k) = [H_T(k)+1]E[V_j(k)] - E[V_{N_T(k)+1}] \quad (j=1,2,\dots,N_T(k)) \quad (6.11)$$

ここで、関数 $E[V_{N_T(k)+1}]$ は、

$$E[V_{N_T(k)+1}] = c_2 + (c_1 - c_2) \frac{1}{\lambda_1 E[R_j(k)]} \sum_{i=1}^{\infty} i \int_0^k 1-G(K-x) dG^{(i-1)}(x) \quad (6.12)$$

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 $(0, T)$ における期待保全費用導出にあたり、理論背景は Christer モデル⁵⁾を用いている。

6.2.3 無限期間における最適保全方策

6.2.2 項では、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、いつ保全を実施するべきかを解析的に議論する。供用期間を無限化するにともない、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、累積損傷量 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。

$$C(TR, k) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{C(TR, k)}{T} = \frac{1 \text{ 再生区間に必要とされる期待保全費用}}{\text{期待 1 再生区間長}} \quad (6.13)$$

以降、上式における期待確率量を求める。

消波工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。

$$A_1(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(k) \quad (6.14)$$

消波工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。

$$A_2(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) \int_0^k [G(K-x) - G(k-x)] dG^{(j)}(x) \quad (6.15)$$

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。消波工が、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。

$$A_3(TR, k) = \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) \int_0^k \bar{G}(K-x) dG^{(j)}(x) \quad (6.16)$$

ここに、 $\bar{G}(x)=1-G(x)$ である。以上、式(6.14)～式(6.16)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。

$$A(TR,k)=c_2 \sum_{j=1}^2 A_j(TR,k)+c_1 A_3(TR,k) \quad (6.17)$$

期待1再生区間長は、次式として求まる。

$$L(TR,k)=\sum_{j=0}^{\infty} G^{(j)}(k) \int_0^{TR} F_{1j}(t) dt \quad (6.18)$$

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。

$$C(TR,k)=\frac{A(TR,k)}{L(TR,k)} \quad (6.19)$$

(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(6.19)を最小化するための必要条件を導く。式(6.19)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。

$$\sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR)B_j(k) - \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR)G^{(j)}(k) \left[\frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR)B_j(k)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR)G^{(j)}(k)} \right] = c_2 \quad (6.20)$$

ここで、

$$B_j(k)=(c_1-c_2) \int_0^k G(K-x)dG^{(j)}(x) \quad (6.21)$$

式(6.20)の左辺を $P1(TR,k)$ とする。すなわち、

$$P1(TR,k)=\sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR)B_j(k) - \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR)G^{(j)}(k) \left[\frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR)B_j(k)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR)G^{(j)}(k)} \right] \quad (6.22)$$

次に、式(6.19)を最小化する、予防保全を行う累積損傷量の最適値（以下、最適予防保全レベル） k^* の必要条件を導く。式(6.19)を k で偏微分し、0と置くことにより、次式が求まる。

$$(c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) \int_0^k \int_{K-k}^{K-x} dG(y) dG^{(j)}(x) = c_2 \quad (6.23)$$

式(6.23)の左辺を $P_2(TR, k)$ とする。次式より、関数 $P_2(TR, k)$ は任意の $TR(0 < TR < \infty)$ 、 $k(0 < k < K)$ に対し、常に $P_1(TR, k)$ より大きい。

$$P_1(TR, k) - P_2(TR, k) = (c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} H_{j+1}(TR) G^{(j)}(k) \\ \times \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \int_0^k \int_{K-x}^{K-k} dG(y) dG^{(j)}(x)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(k)} \right\} < 0 \quad (6.24)$$

以上により、式(6.19)と式(6.23)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、必要条件として式(6.19)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、必要条件として式(6.23)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(6.19)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、

$$C_B(k) \equiv \lim_{TR \rightarrow \infty} C(TR, k) = \lambda_1 \left\{ \frac{c_2 + (c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} \int_0^k \bar{G}(K-x) dG^{(j)}(x)}{1 + M(k)} \right\} \quad (6.25)$$

式(6.25)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、次式で導出される。

$$\int_0^k [1 + M(x)] dG(K-x) = \frac{c_2}{c_1 - c_2} \quad (6.26)$$

式 (6. 26) の左辺は、制御変数 k に関する 0 から $M(x)$ 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 (6. 26) 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。

$$C_B(k^*) = \lambda_1(c_1 - c_2)\bar{G}(K - k^*) \quad (6. 27)$$

- (ii) もし、 $M(k) \leq c_2/(c_1 - c_2)$ ならば、 $k^* = K$ である。つまり、消波工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。

$$C_B(k^*) = C_B(K) = \frac{\lambda_1 c_1}{1 + M(K)} \quad (6. 28)$$

(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 (6. 19) 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、

$$C_A(TR) \equiv \lim_{k \rightarrow K} C(TR, k) = \frac{c_2 + (c_1 - c_2) \sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \bar{G}^{(j)}(K)}{L(TR, K)} \quad (6. 29)$$

式 (6. 29) を制御関数 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。

$$\lambda_1 Q_1(TR) \sum_{j=0}^{\infty} G^{(j)}(K) \int_0^{TR} F_{1j}(t) dt - \sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \bar{G}^{(j)}(K) = \frac{c_2}{c_1 - c_2} \quad (6. 30)$$

ここで、

$$Q_1(TR) = \frac{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) \int_0^K \bar{G}(K-x) dG^{(j)}(x)}{\sum_{j=0}^{\infty} F_{1j}(TR) G^{(j)}(K)} \quad (6. 31)$$

もし関数 $Q_1(TR)$ が TR に関する増加関数である場合、式 (6.30) 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 (6.30) 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。

6.3 理論モデルによる最適予防保全レベルの検討

信頼性工学的アプローチにより、期待保全費用を最小とする最適予防保全レベルや最適予防保全年齢の設定が可能となる理論モデルを構築した。ここでは、最適予防保全レベルを与える理論モデルの実用化を目的として、式 (6.26) に含まれる 1 回の異常波浪により被る損傷量の確率分布の検討を行うとともに、消波工の最適予防保全レベルを算出する。

6.3.1 1 回の異常波浪による損傷の確率分布

最適予防保全レベルの算出においては、上述のように 1 回の異常波浪による消波工の損傷量の確率分布を与えることが必要である。この確率分布を水理模型実験の結果から推定するのは困難であることから、半沢ら⁷⁾、高橋ら⁸⁾が提案している、消波ブロックの安定数算定式にもとづく被災度の計算法を用いたモンテカルロシミュレーションの結果より推定する。モンテカルロシミュレーションは、確率論的な現象に対して、計算機で乱数を用いて現象を繰り返し試行し、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。なお、被災度とは消波工において消波ブロック代表径の幅の断面内における消波ブロックの移動個数である。1 回の異常波浪による被災度 N_0 は、式 (6.32) のように与えられる。

$$N_0 = \left\{ \frac{H_{1/3}/C_H(S_r-1)D_n - b}{a} \right\}^5 N^{0.5} \quad (6.32)$$

ここに、 $H_{1/3}$ ：有義波高、 D_n ：ブロックの代表径、 S_r ：ブロックの海水に対する比重、 N ：作用波数、 C_H ：碎波の効果を表す係数、 a 、 b ：係数である。ここでは、 $C_H=1.0$ 、消波ブロック（シーロック）の安定数、 $a=2.32$ 、 $b=1.45$ とする。シミュレーションにおいて、沖波有義波高は各港における波高の極値分布関数を用いて求め、各種の推定誤差と被災度のバラツキを考慮して、1 回の異常波浪による被災度を計算する。この計算を多数繰り返し、その結果から被災度の確率分布を推定する。被災度の計算手順は以下のようである。

- ① 計算対象とする消波ブロックの諸元、消波工の初期断面を設定する。
- ② 設定した波高の極値分布関数と一様乱数を用いて、1 回の高波における沖波波高を与える。周期については、設定した沖波波形勾配により求める。また、高橋ら⁸⁾にならって沖波波高と周期の推定誤差を考慮する。

- ③ 波浪変形計算により消波工法先位置での波浪諸元を求める．波浪変形についても②と同様に推定誤差を考慮する．
- ④ 1回の高波の作用時間（本研究では2時間とした）における作用波数と有義波高から被災度を算出する．計算結果を出力した後に被災度をゼロクリアする．
- ⑤ ②から④を所定の回数繰り返す．

第3章から第5章で対象としたA港とB港において，沖波波高の極値分布関数には合田⁹⁾が示した地域共通分布関数であるWeibull分布（形状母数1.4）を用いる．各港における設計沖波の有義波高と裾長さにより，尺度母数と位置母数を与える．A港とB港での裾長さは，合田⁹⁾が示している値を用いる．高波の平均発生率についても合田⁹⁾にならない設定する．表6-1に各港における設計沖波の諸元，上記②で用いる沖波波形勾配，裾長さ，尺度母数，位置母数，平均発生率を示す．沖波波形勾配は，設計沖波の有義波高と有義波周期から求められる波形勾配に近い値をとっている．なお，これらの諸元の詳細な算出方法については後述6.6.2項に示す．また，シミュレーションにおいては，海底勾配を1/50，防波堤設置水深を第3章の表3-3に示した前面水深とし，消波ブロックの代表径は各港でのブロックの質量にもとづいて与えて，上記⑤の繰り返し回数を250000回とする．

表 6-1 設計沖波諸元，極値分布関数に関する条件および平均発生率

地点	分布関数	設計沖波		沖波波形 勾配	裾長さ γ_{50}	尺度母数 A	位置母数 B	平均発生回数 λ'
		波高 $H_{50}(m)$	周期 $T(s)$					
A港	Weibull [1.4]	10.9	12.8	0.04	1.13	1.84	3.52	22.3
B港	Weibull [1.4]	10.0	14.0	0.03	1.13	1.68	3.30	20.7

図6-3と図6-4に，各港における1回の異常波浪による被災度の頻度分布を示す．図の横軸は単位幅（1m）あたりの消波ブロックの移動個数（単位幅あたりの被災度， N_0/D_n ）であり，図中の実線は頻度分布に対して最小2乗法を用いて当てはめたWeibull分布（2母数型），点線は比較のために示した指数分布である．Weibull分布と指数分布の確率密度関数は式(6.33)，式(6.34)で表される．

$$g(x)=cmx^{m-1}\exp(-cx^m) \quad (6.33)$$

$$g(x)=\lambda\exp(-\lambda x) \quad (6.34)$$

式(6.33)，式(6.34)のパラメータ m ， c ， λ の値は以下のとおりである．

A港： $m=0.38879$ ， $c=7.0682$ ， $\lambda=50$ B港： $m=0.49881$ ， $c=8.8631$ ， $\lambda=50$

図 6-3 と図 6-4 より、頻度分布に対して指数分布よりも Weibull 分布がよく合っていることがわかる。

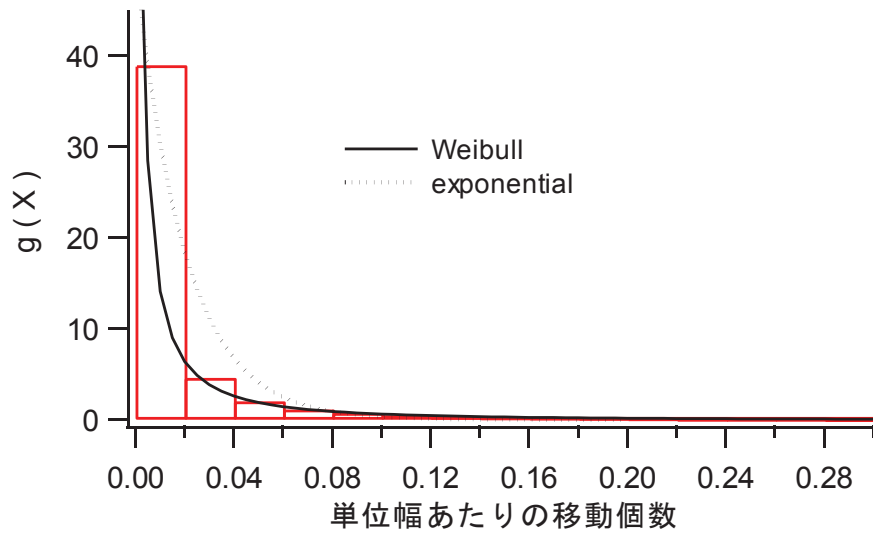


図 6-3 1 回の異常波浪による被災度の頻度分布 (A 港)

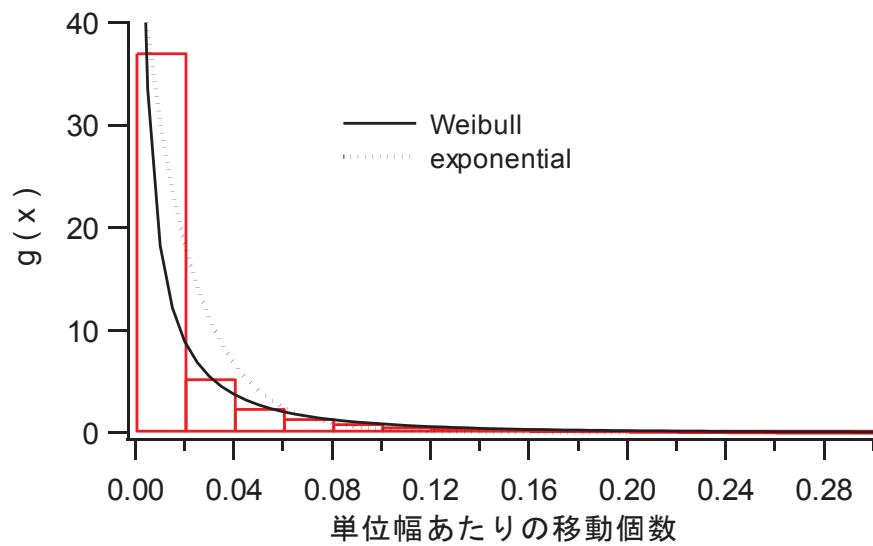


図 6-4 1 回の異常波浪による被災度の頻度分布 (B 港)

6.3.2 最適予防保全レベルの算出

6.2 節で述べたように、消波工保全の理論モデルでは、累積損傷量 k のみによる予防保全方策において、単位年齢あたりの期待保全費用を最小化する必要条件として、式(6.26)が与えられており、この式の中の $G(x)$ の確率密度関数を $g(x)$ とすると式(6.35)のように表される。また、累積損傷量 k は消波工単位幅(1m)あたりのブロック移動個数であり、式(6.36)として与えている。

$$\int_0^k [1+M(x)] g(K-x) dx = \frac{c_2}{c_1 - c_2} \quad (6.35)$$

$$k = N_0 / D_n \quad (6.36)$$

前述のように、 K : 事後保全レベル、 c_1 : 事後保全費用、 c_2 : 予防保全費用である。また、関数 $g(x)$ は1回の異常波浪により被る損傷量の確率密度関数であり、 $M(x)$ は損傷過程に対する再生関数で、累積損傷量が x 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。 $M(x)$ は式(6.9)、関数 $G^{(j)}(x)$ は、式(6.2)のように表される。 $G^{(j)}(x)$ は、 $G(x)$ 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。なお、 $G^{(0)}(x)$ は式(6.3)で与えられる。

式(6.2)→式(6.9)→式(6.35)の順で計算を行うことにより、式(6.35)を満たす k として最適予防保全レベル k^* の値を求める。 $g(x)$ には、6.3.1 項で単位幅あたりの消波ブロック移動個数の頻度分布に対して当てはめた Weibull 分布と、比較のために指数分布も用いて計算を行う。Weibull 分布の場合は、式(6.2)と式(6.35)の積分計算を数値的に行い、指数分布の場合は畳み込みの計算にガンマ分布を用いて、式(6.35)の計算を数値的に行っている。

表 6-2 に k^* の算定結果を示す。 K は 0.5, 0.75, 1.0 とした。指数分布の場合は $\lambda=50, 100$ とした結果である。Weibull 分布と指数分布の結果を比較すると、Weibull 分布の場合の k^* が小さくなっている。これは、図 6-3 と図 6-4 よりわかるように、Weibull 分布のほうが裾の広い分布となっており、大きな波浪による消波ブロックの移動の発生する可能性が指数分布より高く、予防保全レベルを下げるべきであることを表している。Weibull 分布の結果で、 k^* の値は A 港よりも B 港のほうが大きい値となっているが、これも基本的に上記と同じ理由によるものである。図 6-5 は表 6-2 の Weibull 分布の結果を示したもので、 $c_2/(c_1-c_2)$ の値が小さくなるにつれ k^* は減少しており、事後保全費用が予防保全費用に比べて大きくなるほど最適予防保全レベルを下げる必要のあることがわかる。また、 K が大きくなると同程度の割合で k^* も大きくなることから、事後保全レベルの設定が大きく影響する。

表 6-2 最適予防保全レベルの算定結果

Weibull分布				指数分布			
K	$c_2/(c_1-c_2)$	k^*		K	$c_2/(c_1-c_2)$	k^*	
		A港	B港			$\lambda=50$	$\lambda=100$
0.5	0.2	0.285	0.303	0.5	0.2	0.407	0.445
	0.1	0.229	0.255		0.1	0.394	0.438
	0.05	0.177	0.207		0.05	0.381	0.432
	0.01	0.082	0.111		0.01	0.350	0.416
0.75	0.2	0.459	0.497	0.75	0.2	0.648	0.691
	0.1	0.382	0.435		0.1	0.635	0.684
	0.05	0.307	0.372		0.05	0.621	0.677
	0.01	0.158	0.230		0.01	0.590	0.661
1.0	0.2	0.644	0.704	1.0	0.2	0.891	0.938
	0.1	0.549	0.632		0.1	0.878	0.931
	0.05	0.454	0.557		0.05	0.864	0.924
	0.01	0.253	0.379		0.01	0.833	0.908

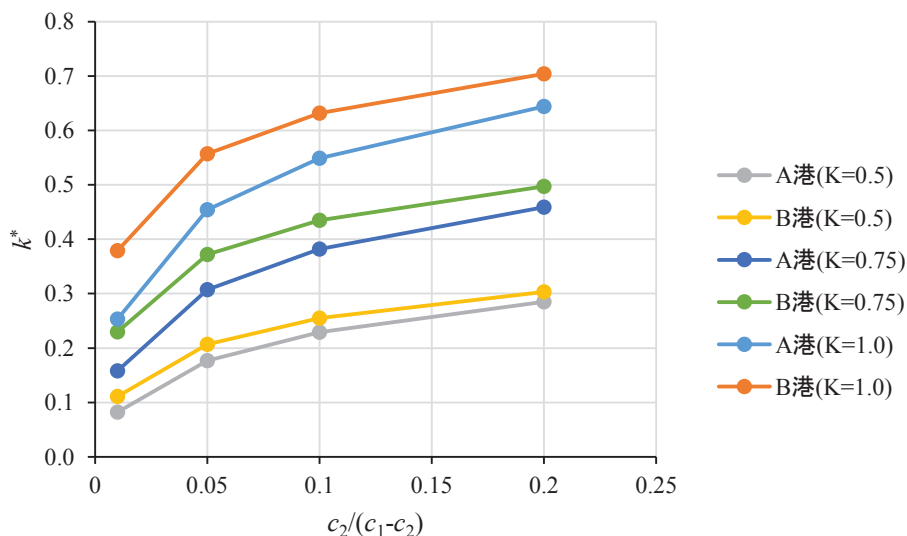


図 6-5 事後保全と予防保全費用の割合による最適予防保全レベルの変化 (Weibull 分布)

6.4 力学的観点からの予防保全レベルの検討

本節では、消波工の断面変形によるケーソンへの作用波力増加に対する安定性能を考慮した保全レベルを検討する。一般的に、設計における重力式防波堤などの耐波安定性に関して、設計波の水平波力に対する滑動抵抗力で決定されることが多く、種々の不確定要素に対応するための余

裕として安全率の概念がある。港湾基準¹⁰⁾では、平成19年版の基準が発行されるまで、漁港基準¹¹⁾では現在も安全率1.2を準用している。本節では安定性能を考慮した保全レベルの設定において、安全率の概念を用い、消波工の断面変形に伴うケーソンに作用する波力比増幅の許容値として1.2を与える。このときの断面変形量 S から累積損傷量 k を求め、安定性能を考慮した保全レベルの1つの指標として定義する。

手順として、断面変形量 S に対し波力比がどの程度増加しているか把握するため、第4章で検討したA、Bの両港における波力比の実験結果から、1.2未満となる限界の S から k を求める。消波工の侵食面積 $A_e(=S \times D_n^2)$ と k の関係は式(6.37)で表され、 k と S の関係は式(3.1)と式(6.37)より、式(6.38)で表される。

$$A_e \times (1 - \gamma_v) = k \times V_b \quad (6.37)$$

$$S = k \frac{D_n}{(1 - \gamma_v)} \quad (6.38)$$

ここに、 V_b ：消波ブロックの1個あたりの体積（ $=D_n^3$ ）、 γ_v ：空隙率である。

図6-6、図6-7は第4章で検討した実験結果を再整理し、ケース1、2（A港およびB港の複合被災）の消波工の初期断面での波力に対する断面変形後の波力の比と、 S および k との関係を表している。 k は $\gamma_v=0.5$ として式(6.38)より求めた値である。波力比は、波高 H が大きい場合において、それぞれの初期断面における波力を基準にしており、波高値によって波力が異なる影響を考慮した比率としている。値にばらつきはあるが、全体的に S および k が大きくなると波力比は大きくなる。ケース1では $S=3.5$ 、ケース2では $S=3.3$ よりも大きくなると波力は急激に増加する傾向にある。これらの図中の実験結果と波力比1.2未満となる交点における累積損傷量 k_p を安定性能の限界値として縦線で示している。ケース1では $k_p=0.569$ 、ケース2では $k_p=0.637$ である。以上のように、これらの k_p 値はケーソンが安定する限界の損傷量を表す。

さらに、理論モデルによる最適予防保全レベルは力学的な性能を満たした保全レベルであるか、その妥当性について検証する。仮に、消波工の累積損傷量が理論的に求めた最適予防保全レベル内であっても、防波堤に作用する波力の増幅によってケーソンの安定性能を満たしていない損傷量であれば、性能から判断して保全を実施することも想定される。表6-3は表6-2と安定性能を考慮した保全レベルの結果を用い、それぞれA港（ケース1）、B港（ケース2）の理論と安定性能を比較した結果を示す。判定の欄には、理論モデルによる最適予防保全レベルが安定性能を満たしている場合は“○”とし、安定性能を考慮したほうが良い場合は“●”とした。 $K=1.0$ 、 $c_2/(c_1-c_2)=0.2$ については安定性能を考慮したほうが良い結果であるが、この1ケースを除き、理論モデルによる最適予防保全レベルの方が値は小さい。以上のことから、理論モデルによる最適予防保全レベルは概ね安定性能を満たす範囲にあることが確認できた。

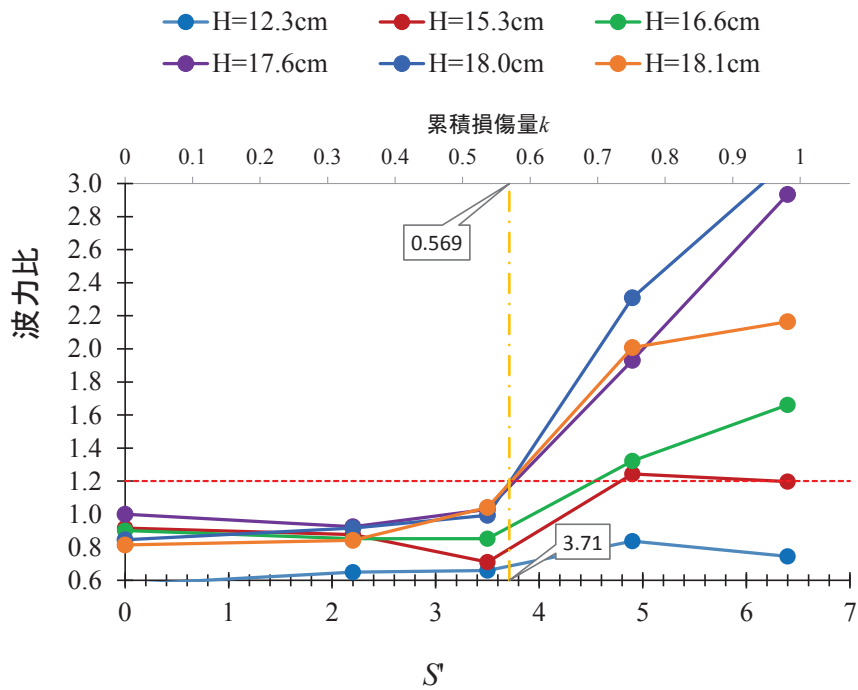


図 6-6 断面変形に伴う水平波力の変化（ケース 1 A 港，複合被災，実験結果）

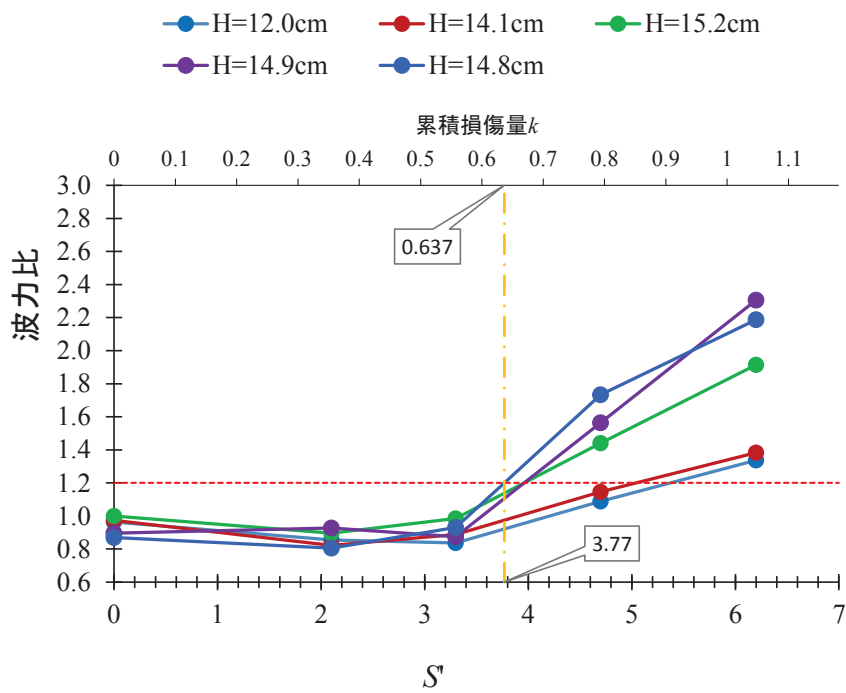


図 6-7 断面変形に伴う水平波力の変化（ケース 2 B 港，複合被災，実験結果）

表 6-3 理論と安定性能を考慮した最適予防保全レベルの検討結果

K	$c_2/(c_1-c_2)$	理論的に求めた k^*		安定性能から求めた k_p		判定	
		A港	B港	A港	B港	A港	B港
0.5	0.2	0.285	0.303	0.569	0.637	○	○
	0.1	0.229	0.255			○	○
	0.05	0.177	0.207			○	○
	0.01	0.082	0.111			○	○
0.75	0.2	0.459	0.497			○	○
	0.1	0.382	0.435			○	○
	0.05	0.307	0.372			○	○
	0.01	0.158	0.230			○	○
1.0	0.2	0.644	0.704			●	●
	0.1	0.549	0.632			○	○
	0.05	0.454	0.557			○	○
	0.01	0.253	0.379			○	○

6.5 実用化に向けた予防保全方策の提案

本節では予防保全方策の実用化に向けた検討方法を提案する。6.3節、6.4節の検討内容を踏まえ、期待保全費用を最小化する理論モデルに安定性能を考慮し、予防保全の意思決定方法についての手順とフロー図（図 6-8）を以下に示す。

1. 現地調査によって消波工の変形形状を測量し、被災パターンを確認する。（天端岸側沈下量 η_p 、天端法肩沈下量 η_s 、法先位置の変化量 x_p 、静水面の消波工厚さ減少量 l を計測することも可能）
2. 被災パターンが法面のみの被災の場合は、ケーソン全体が被覆されている状態であることから保全は不要であると判断する。複合被災の場合は、初期断面と変形断面を比較し侵食面積 A_e を求める。さらに、式(6.37)を用い、侵食面積 A_e から累積損傷量 k を求める。（これ以外の被災パターンは別途検討が必要）
3. k が最適予防保全レベル k^* を超えていないか比較し、超える場合は保全を実施する。超えない場合は、保全は不要である。

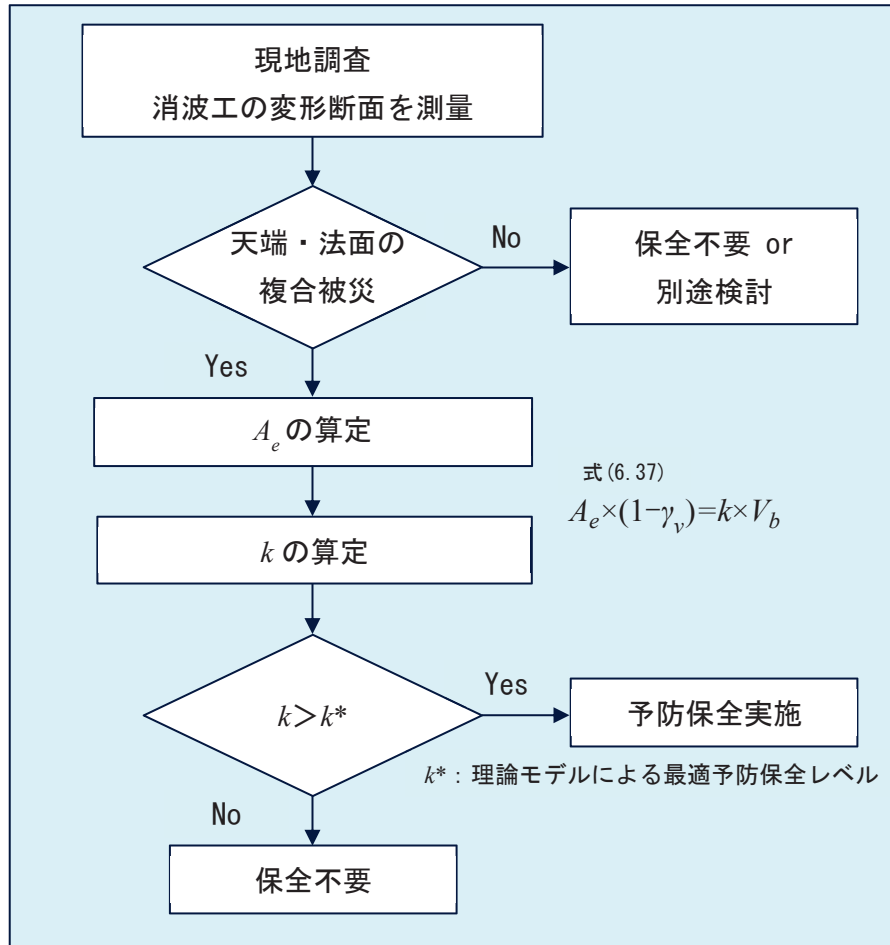


図 6-8 実用化を想定した予防保全実施の意思決定の流れ

6.6 モンテカルロシミュレーションにもとづく最適予防保全レベルの 検証

高山ら^{12),13)}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、半沢ら⁷⁾、高橋ら⁸⁾の方法を用いて 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。本節では、この手法を用いて LCC、期待補修費および補修費の標準偏差を算出し、6.3 節で求めた最適予防保全レベルの検証を行う。

6.6.1 期待補修費の算定の概要

本節においては、消波工の LCC として計上する費用として、初期建設費と被災に伴う消波工の補修費（予防保全費用）を考慮し、さらに事後保全費用も加えて LCC を算出する。事後保全費用

の設定については 6.6.2 項 (7) で述べる。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港湾土木請負工事積算基準¹⁴⁾では図 6-9 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費用であり、間接工事費は、直接工事の対象物に施工されるものでなく、各工事種目に対し共通して使用されるものの費用である。

直接工事費と間接工事費に関して、供用期間中の補修費を考えると、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、当然補修費は変わってくる。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（被災した消波材の数）にのみ依存するので、補修費としては補修回数に関係しなくなってしまう。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率が高く、大規模な工事（20 億円以上等）では間接工事費の率が低くなっており、小規模な工事を何回も繰り返すよりも、大規模な工事を 1 回行うほうが経済的になる。したがって、ここでは間接工事費を含めた計算を行う。

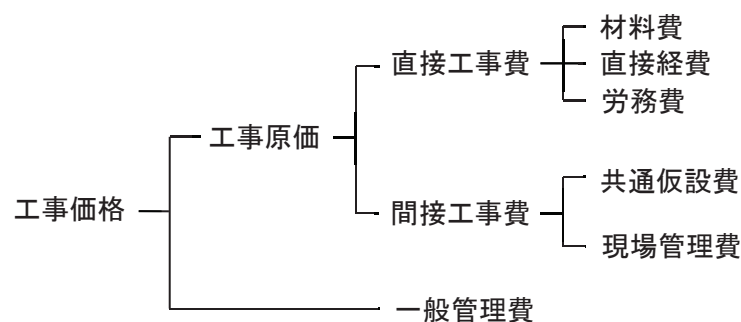


図 6-9 工事価格の構成¹⁴⁾

本節においては、上述のように補修費を予防保全費用と事後保全費用の和とし、供用期間 50 年の補修費の期待値（期待補修費）と標準偏差をモンテカルロシミュレーションによって求める。図 6-10 に LCC 算定のフローチャートを示す。また、図 6-10 中の期待補修費の算出について、詳細なフローチャートを図 6-11 に示す。以下に、各手順の概要を述べる。

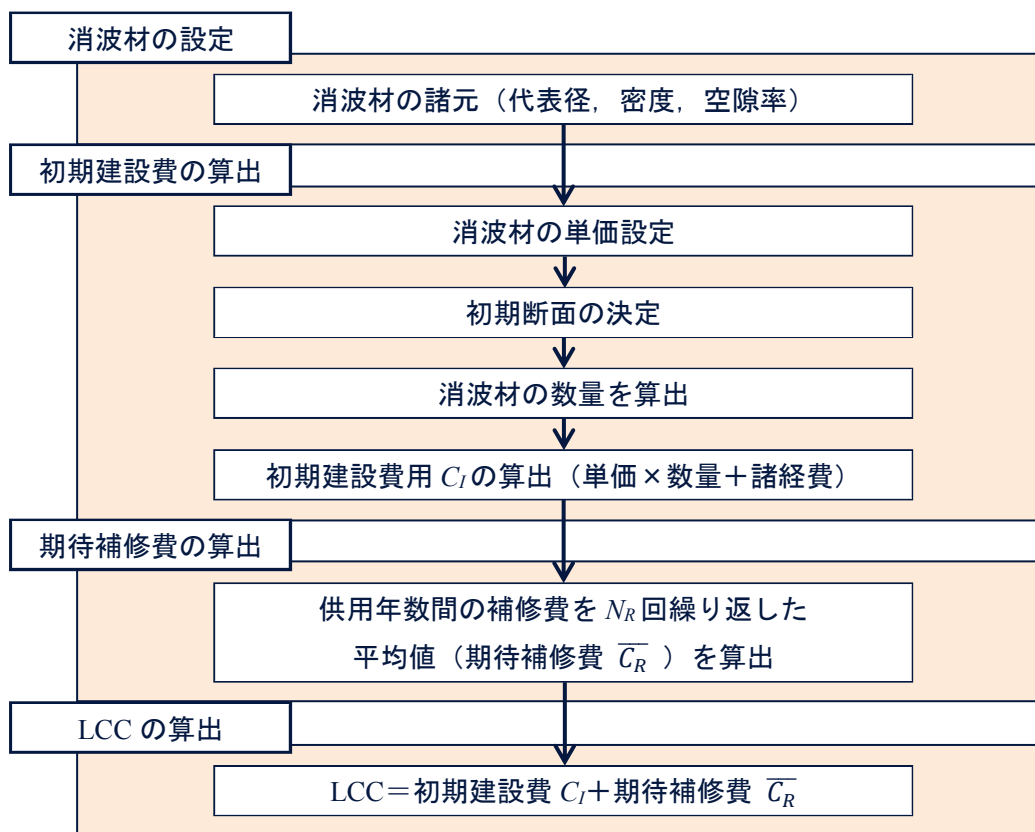


図 6-10 LCC算定の全体フロー

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別を設定する。

2. 初期建設費の算出

抽出した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，さらにこれをもとにして間接工事費を求め，初期建設費を算出する。

3. 期待補修費の算出

あらかじめ供用期間と保全レベル（予防保全レベルと事後保全レベル）を設定する。また，消波材に被害を与える高波が年 1 回発生すると仮定した場合として，以下の手順で期待補修費を算出する。

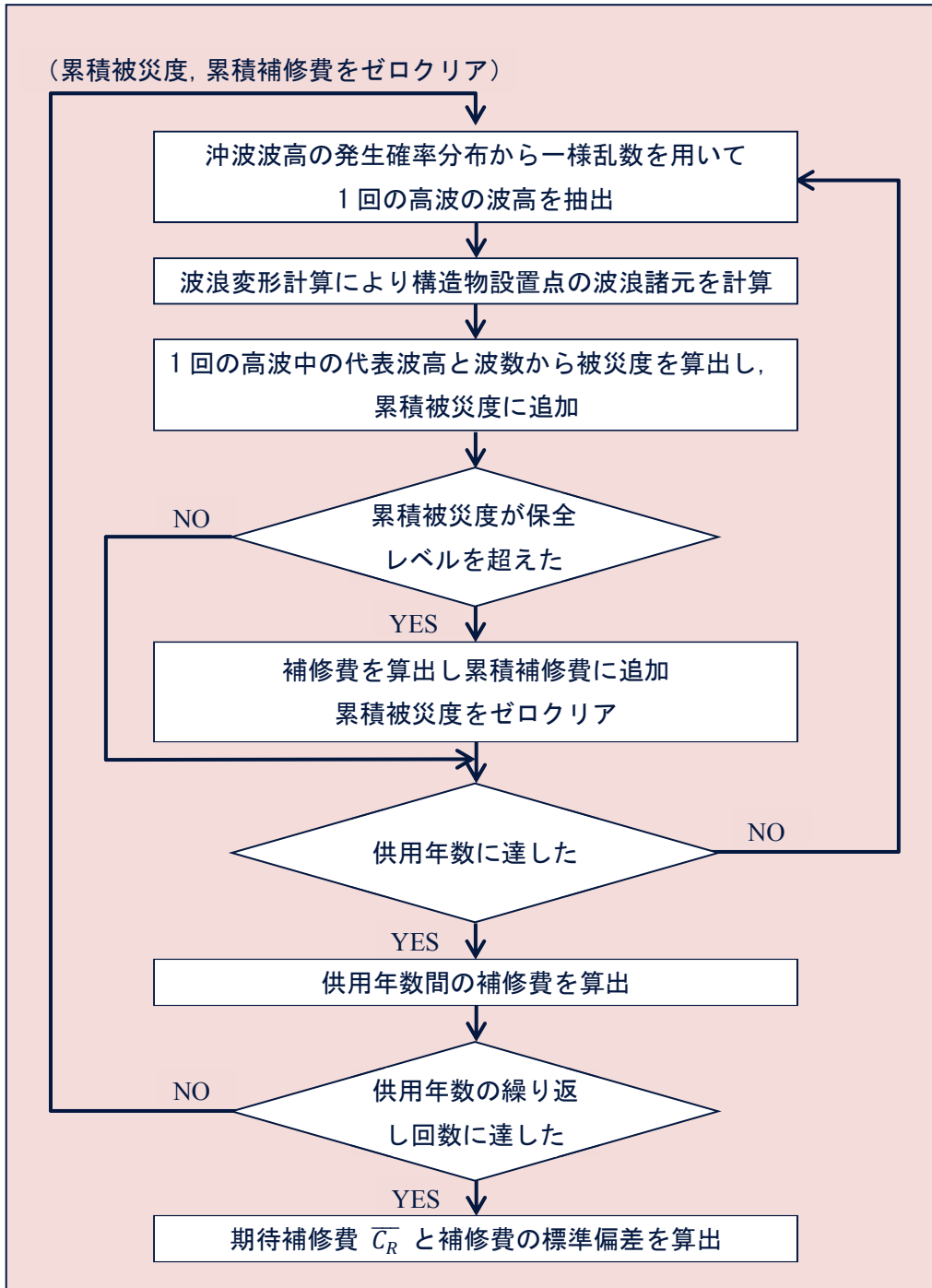


図 6-11 期待補修費算出の詳細フロー

- 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）については、地点ごとに設定した沖波波形勾配により求める。また、沖波波高と周期の推定誤差を考慮する。
- 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) 累積被災度が設定した保全レベル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追加する。なお、補修費を求める際にも直接工事費と間接工事費を計上する。
- e) a)～d)を供用期間の年数分繰り返し、供用期間中の補修費を算出する。
- f) 期待値の変動が小さくなるようにa)～e)を繰り返し、供用期間中の補修費の平均値として期待補修費を算出する。合わせて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。

6.6.2 消波ブロックを対象としたLCCの算定方法

6.6.1項に述べた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。

(1) 消波ブロックの単価

上述のように、本章で対象とする消波ブロックは、シーロックである。シーロックは代表径0.76～3.51m（規格1～100t）の19種類であり、表6-4に各トン型の実質量と代表径および1個当たりの単価を示す。また、ここでは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の単価は、A港：80t型、B港：60t型を対象に製作費、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。

(2) 初期建設費の算出

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と求められる。ブロック個数は消波工の初期状態における断面積と消波工の空隙率から求めることができる。シーロックの空隙率は0.5である。消波ブロックの各規格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。

$$n = \frac{A_0 \times (1 - \gamma_v)}{V_b} \quad (6.39)$$

ここに、 A_0 ：消波工の初期状態の断面積， γ_v ：空隙率， V_b ：消波ブロックの体積である．初期状態の断面積は図 3-16 から求める．

表 6-4 シーロックの種類

ブロック規格	実質量(t)	体積(m ³)	代表径(m)	製作・据付単価(千円/個)	
				A港	B港
1t型	0.99	0.432	0.756	34.015	32.687
2t型	1.99	0.865	0.953	45.958	43.277
3t型	2.98	1.295	1.090	57.730	53.720
4t型	3.97	1.724	1.199	69.086	63.756
5t型	4.97	2.162	1.293	93.194	86.529
6t型	5.99	2.604	1.376	106.627	98.638
8t型	7.96	3.462	1.513	133.298	122.690
10t型	9.96	4.33	1.630	155.257	142.005
12t型	11.99	5.213	1.734	167.839	152.015
15t型	14.97	6.51	1.867	202.976	183.243
20t型	20.04	8.711	2.058	249.993	223.612
25t型	24.96	10.852	2.214	313.572	280.793
30t型	30.05	13.064	2.355	359.083	319.784
40t型	39.97	17.38	2.590	459.472	407.332
50t型	49.77	21.639	2.787	548.359	483.477
60t型	59.69	25.952	2.961	641.175	563.621
70t型	70.06	30.462	3.123	760.441	669.440
80t型	79.99	34.777	3.264	844.318	740.447
100t型	99.72	43.356	3.513	1039.435	909.998

(3) 波浪諸元の決定

1 回の高波における波浪諸元は 6.3.1 項で述べたように、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．本節では、各地点での極値分布関数として合田⁹⁾が示した地域共通分布関数と裾長さ γ_{50} を用いて式(6.40)、式(6.41)で極値分布関数の尺度母数 A と位置母数 B を与える．

$$A = H_{50} \frac{1 - 1/\gamma_{50}}{\gamma_{50} - \gamma_{10}} \quad (6.40)$$

$$B = H_{50} \left[1 - \frac{1 - 1/\gamma_{50}}{1 - y_{10}/\gamma_{50}} \right] \quad (6.41)$$

ここに、 H_{50} : 50年確率波高、 y_{10} 、 y_{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 年に対して

$$y_R = [\ln(\lambda'R)]^{1/m} \quad (6.42)$$

と表される。ここに、 λ' : 高波の平均発生率、 m : 極値分布関数の形状母数である。ここでは、6.3.1項と表6-1に示した条件を用いることとし、表6-1の設計沖波波高（有義波高）を式(6.40)、式(6.41)の H_{50} とする。

周期については、各地点の沖波波形勾配を設定し、次式により与える。

$$T = \sqrt{H/(1.56 H_0/L_0)} \quad (6.43)$$

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。沖波波形勾配についても表6-1に示した値を用いる。

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⁸⁾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。

(4) 波浪変形計算

(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¹⁵⁾が提案した以下の略算式を用いる。

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0 : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0 + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0, K_s H_0\} : h/L_0 > 0.2 \end{cases} \quad (6.44)$$

$$\beta_0 = 0.028 (H_0/L_0)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta] \quad (6.45)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta] \quad (6.46)$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32 (H_0/L_0)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\} \quad (6.47)$$

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、 $\beta_0, \beta_1, \beta_{\max}$ 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⁸⁾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。

(5) 消波ブロックの被災規模の算定

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。本節では、6.3.1項と同様に式(6.48)で表される高橋ら⁸⁾が提案している消波ブロックの安定式を用いて被災度 N_0 を求める。

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = C_H \left\{ a(N_0/N^{0.5})^{0.2} + b \right\} \quad (6.48)$$

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 ：砕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 ：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。6.3.1項と同様に、 $C_H=1.0$ 、 $a=2.32$ 、 $b=1.45$ とする。被災度の計算には、式(6.48)を変形した次式を利用する。

$$N_0 = \left\{ \frac{H_{1/3}/C_H(S_r - 1)D_n - b}{a} \right\}^5 N^{0.5} \quad (6.49)$$

消波ブロックによる構造物では、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⁸⁾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(6.48)を変形した次式により、 $N_0(i-1)$ が生じる波数 N を求める。

$$N = \left\{ \frac{H_{1/3}(i)/C_H(S_r - 1)D_n - b}{a} \right\}^{-10} N_0^2(i-1) \quad (6.50)$$

式(6.50)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(6.49)より、当該年までの累積被災度 $N_0(i)$ を求める。

$$N_0(i) = \left\{ \frac{H_{1/3}(i)/C_H(S_r - 1)D_n - b}{a} \right\}^{-5} N^{0.5} \quad (6.51)$$

この $N_0(i)$ が、保全レベル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) 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¹⁴⁾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。

$$C_t = P \times K_r \quad (6.52)$$

ここに、 C_t ：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。

$$K_r = a_1 \times P^{b_1} \quad (6.53)$$

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 6-5 に示す。

表 6-5 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20億円以下		20億円を超えるもの
現場管理費率	下記の率とする	a_1	b_1	下記の率とする
	21.54%	31.1	-0.0235	18.80%

(7) 保全レベルおよび費用の設定

消波工の累積損傷量が一定以上を超えると予防保全または事後保全として補修を実施する。予防保全レベルと事後保全レベルはともに消波工単位幅あたりのブロック移動個数で表し、このうち事後保全レベルは 6.3 節の理論モデルの設定に合わせ、 $K=0.5, 0.75, 1.0$ の 3 種類とする。この保全レベルは被災度に換算すると、A 港： $N_0=1.63, 2.45, 3.26$ 、B 港： $N_0=1.48, 2.22, 2.96$ に相当する。また、事後保全費用は予防保全費用よりも高くなる設定とし、以下に関係式を示す。

$$c_1=R_a \times c_2 \quad (6.54)$$

ここに、 c_1 ：事後保全費用、 c_2 ：予防保全費用、 R_a ： c_1 と c_2 の比率であり、 $R_a=6, 11, 21, 101$ の 4 種類とする。これは、6.3 節で示した $c_2/(c_1-c_2)=0.2, 0.1, 0.05, 0.01$ に相当する。式 (6.54) における事後保全費用を求めるための c_2 については一定とし、単位幅あたりのブロック移動個数が 0.5 (A 港： $N_0=1.63$ 、B 港： $N_0=1.48$) に対する補修費と同額であると設定する。LCC 算定における予防保全レベル k は、 $0.01 \leq k < K$ の範囲とし、表 6-2 の最適予防保全レベル k^* の前後で刻みを小さくして値を設定する。

6.6.3 期待補修費用および LCC の算定結果

6.6.1 項に示した手順にしたがって供用期間 50 年における補修費を算出し、これを 5000 回繰り返した。5000 回のデータから期待補修費と補修費の標準偏差を求め、初期建設費と期待補修費の和として LCC を算定した。A 港の結果を図 6-12～図 6-15 に、B 港の結果を図 6-16～図 6-19 に示す。これらの図は $K=0.75$ を固定して R_a を変化させた場合である。横軸は予防保全レベル k であり、図中の赤い点は LCC、青い点は LCC に補修費の標準偏差を加算したものである。

全体的に k の変化による LCC の変動は小さいが、 $R_a=6 \sim 21$ では k が大きくなるにつれて減少し、最終的に横這いとなっており、 $R_a=101$ では減少傾向が見られない。 k が小さい場合は、予防保全を多く実施することになるため期待補修費が増加し、 k が大きくなるにつれて期待補修費は減少する。減少傾向が見られる場合でも、上述のように k がある程度より大きくなると期待補修費の変化は小さくなっている。シミュレーションの過程で計算結果を詳しく見ると、 k が小さく予防保全をこまめに行う場合でも、稀に発生する 1 回の極端な高波で大きな損傷量が生じて事後保全となることがある。 k が大きくなると、予防保全は少なくなるが許容する累積損傷量が大きくなり、結果的に事後保全の発生回数が増加することになる。予防保全費用（消波ブロックの移動個数分の補修費）と事後保全費用の和が補修費であり、LCC にも反映されることから、 $R_a=101$ の場合や $R_a=6 \sim 21$ の k が大きい部分では、予防保全費用の減少が事後保全費用の増加により相殺されていると考えられる。図に示していないが、事後保全を考慮せずに予防保全（消波ブロックの補修）のみで LCC 算定を行った結果では、LCC、期待補修費、補修費の標準偏差のいずれも k の増加に伴って単調減少する。これは、上述のように k が大きくなるにつれて単純に予防保

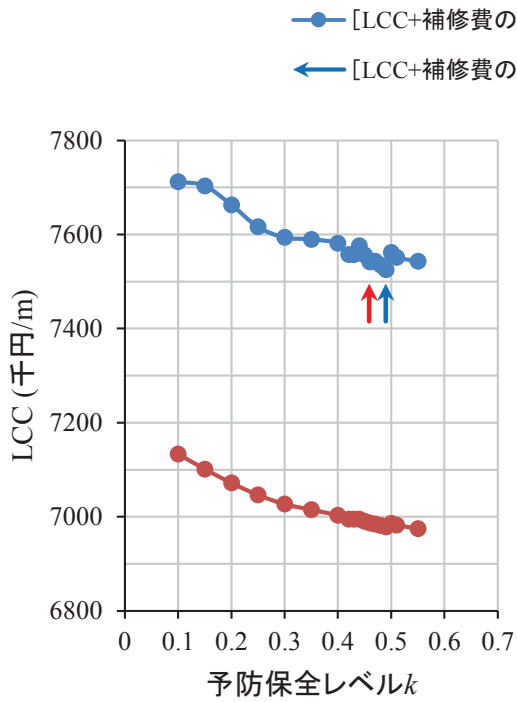


図 6-12 LCC 算定結果(A 港, $K=0.75$, $R_a=6$)

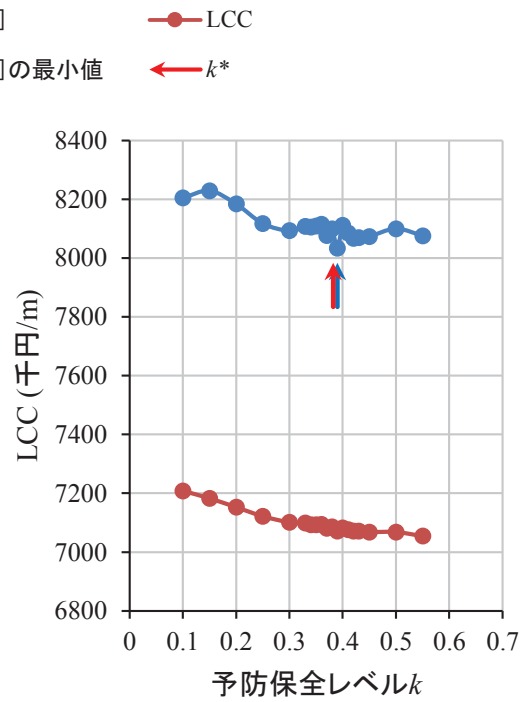


図 6-13 LCC 算定結果(A 港, $K=0.75$, $R_a=11$)

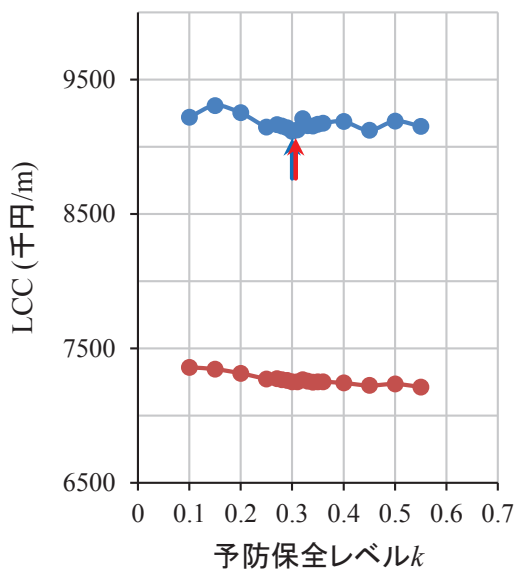


図 6-14 LCC 算定結果(A 港, $K=0.75$, $R_a=21$)

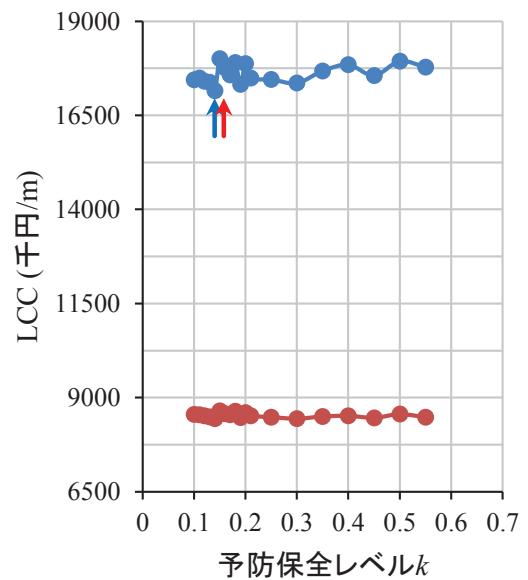


図 6-15 LCC 算定結果(A 港, $K=0.75$, $R_a=101$)

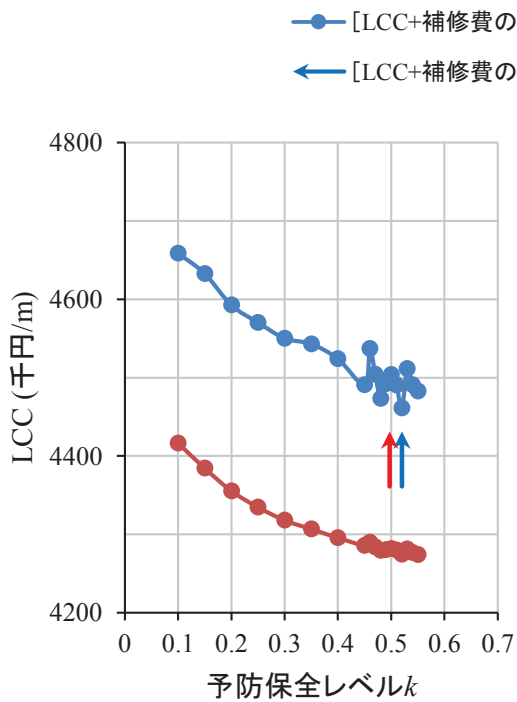


図 6-16 LCC 算定結果(B 港, $K=0.75$, $R_a=6$)

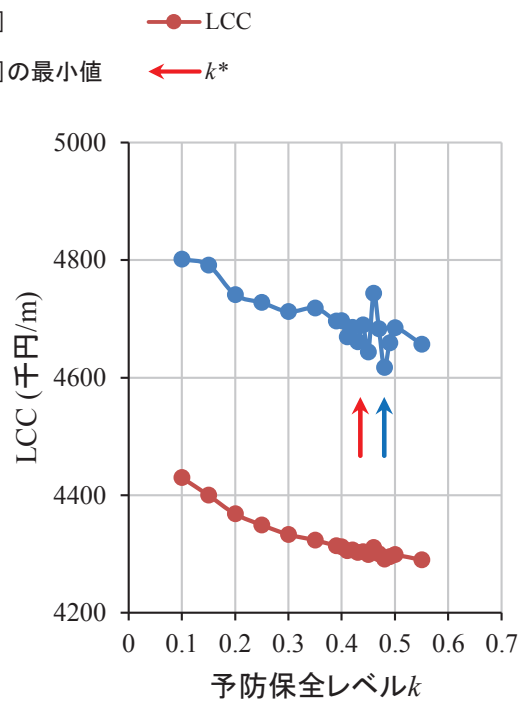


図 6-17 LCC 算定結果(B 港, $K=0.75$, $R_a=11$)

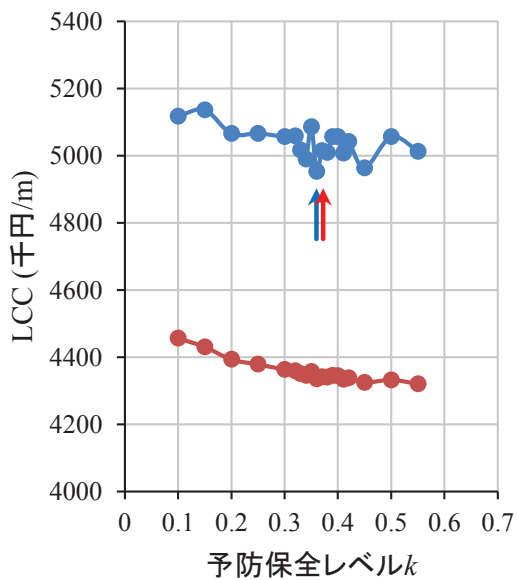


図 6-18 LCC 算定結果(B 港, $K=0.75$, $R_a=21$)

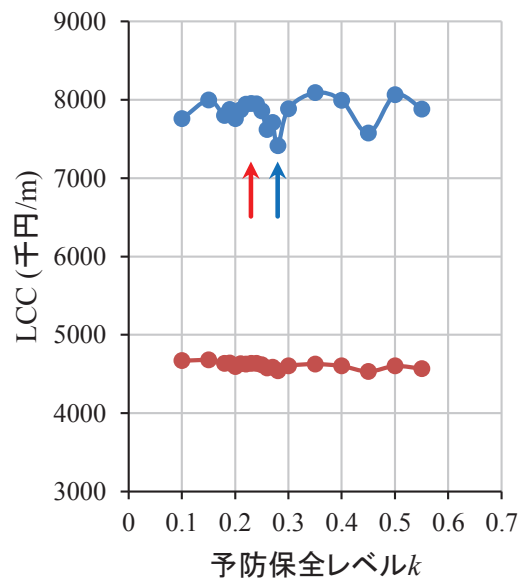


図 6-19 LCC 算定結果(B 港, $K=0.75$, $R_a=101$)

全が減少するためである。

図 6-12～図 6-19 には、[LCC+補修費の標準偏差]のグラフも示しており、LCC に比べて変動が大きいこと、 R_a の増加に伴って LCC のグラフとの差が大きくなっていることがわかる。宮田ら¹⁶⁾は、補修費が著しく大きくなる事後保全のリスクを評価するために、期待補修費に補修費の標準偏差を加えて補修費のバラツキを考慮し、[期待補修費+補修費の標準偏差]が最小とする消波ブロック補修基準を示している。図 6-12～図 6-19 の青い矢印は、[LCC+補修費の標準偏差]を最小とする予防保全レベルを示しており、事後保全費用 (R_a) が大きくなるにつれて青矢印は図の左側へ移動していくことがわかる。これは、事後保全費用が小さい場合では、予防保全による補修費の割合が大きくなるため、 k をある程度まで上げて予防保全の回数を減らしても補修費の期待値および標準偏差を小さくすることが可能であることを示している。逆に、事後保全費用が大きい場合では、 k を下げて頻繁に予防保全を行うことで事後保全の発生リスクを抑えたほうが、補修費は小さくなる。また、図中には理論モデルによる最適予防保全レベルも赤い矢印で示しており、[LCC+補修費の標準偏差]の最小値の結果とよく一致していることから、理論モデルの妥当性が確認できる。なお、 $K=0.5$ 、 1.0 のケースについては、付録として図を示しており、 $K=0.75$ の場合とほぼ同様の結果が得られている。

6.7 結語

本章では、消波工の期待保全費用を最小化する理論モデルによる最適予防保全レベルの導出と、この保全レベルにおいて性能を維持できているか力学的な観点からの検証を行い、性能変化を考慮した最適予防保全レベルを示した。また、モンテカルロシミュレーションにより、保全レベルを変化させて消波工の LCC を算出し、最適予防保全レベルを検証した。主要な結果を以下に示す。

佐藤ら¹⁾のモデルを概説し、最適予防保全レベルの検討を行った結果、事後保全費用が予防保全費用に比べて大きくなるほど最適予防保全レベルを下げる必要があること、事後保全レベルの設定が最適予防保全レベルに大きく影響することがわかった。また、このモデルを用いるには、消波工の損傷量を確率的に与える必要があり、モンテカルロシミュレーションによって検討した結果、1 回の異常波浪による消波工の被災度の頻度分布に対しては指数分布よりも Weibull 分布がよく合うことがわかった。

理論的に求めた最適予防保全レベルにおいて、波力に対する安定性能を考慮した保全レベルと比較した結果、理論モデルによる最適予防保全レベルは概ね安定性能を満たす範囲にあり、妥当な保全レベルであることが確認できた。また、期待保全費用を最小化する理論モデルに安定性能を考慮し、予防保全の意思決定方法についての提案を示した。

予防および事後保全レベルを変化させて、モンテカルロシミュレーションにより供用期間 50 年の期待補修費を求め、LCC を算出した結果、LCC が最小となる予防保全レベルは理論モデルによる最適予防保全レベルとよく一致しており、理論モデルの妥当性を示すことができた。

参考文献

- 1) 佐藤毅, 松見吉晴, 角勇人, 平山隆幸, 太田隆夫: 供用期間を考慮した消波ブロックの損傷度に基づく予防保全問題, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.951-955, 2009.
- 2) 小和田正: 確率過程とその応用, 実教出版, 183p., 1983.
- 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) 半沢稔, 高橋重雄, 下迫健一郎: モンテカルロ法を用いた消波ブロックの期待被災度の計算, 海岸工学論文集, 第 43 卷, pp.796-800, 1996.
- 8) 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 卷, 第 1 号, pp.3-32, 1998.
- 9) 合田良実: 耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計—, 375p., 鹿島出版会, 2008.
- 10) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成 11 年 4 月, 601p., 1999.
- 11) 公益社団法人: 全国漁港漁場協会漁港・漁場の施設の設計参考図書, 379p., 2015.
- 12) 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 卷, pp.856-860, 2006.
- 13) 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.
- 14) 社団法人日本港湾協会: 港湾土木請負工事積算基準, 平成 26 年度改訂版, 2014.
- 15) 合田良実: 耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計—, 60p., 鹿島出版会, 2008.
- 16) 宮田正史, 熊谷健蔵, 辻尾大樹, 大久保陽介: 消波ブロック被覆堤の期待補修費を考慮した維持管理手法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.911-915, 2009.

第7章 結論

本研究では、消波ブロック被覆堤を対象に消波工の適切な維持管理システムの構築を目指し、施設が故障状態になる前に適切な予防対策を実施する最適予防保全レベルについて検討した。消波工を劣化させる要因として波浪を対象とし、実験による断面変形の定量的把握とこれに対する性能変化を把握し、単にLCCが最小となる最適予防保全だけではなく、性能を考慮した保全レベルも検討し、理論モデルの妥当性を示した。また、この研究過程においても多くの知見が得られた。本章では、これらの成果を示して結論とし、今後の検討課題について述べる。

第1章では、研究の背景と研究目的について述べた。また、本論文の構成について概説した。

第2章では、数値波動水路の基本的な理論について概説するとともに、数値解析における条件の設定方法について詳細に述べ、適切なパラメータ設定を示した。特に、本研究の対象となる消波工のポラスセルの設定については詳細に検討した。透水層における抵抗力を算定するために、抵抗係数 C_D を用いるモデルとD-F則による2つのモデルを比較検討した結果、第3章以降で対象とした消波ブロックによる消波工については、抵抗係数 C_D を用いるCD型を採用することとした。数値波動水路による計算結果は、水理模型実験で得られたデータとの比較や実験データの補間データ、ニューラルネットワークのチューニングデータとして活用した。

第3章では、消波ブロック被覆堤を対象とし、水理模型実験により得られた断面変形データから被覆層の変形過程の定量的把握を目的とした。水理模型実験によって消波工に波浪による累積ダメージを与え、それに伴う断面変形を計測し、そのデータにもとづいて変形量に対応した平均的な断面形状（モデル断面）を決めることができた。このモデル断面は第4章において性能変化を検討するための基礎データとなる。また、実験過程および実験結果の解析において得られた知見を以下に示す。

消波工の法肩および天端が被災する場合には、波の作用によりまず静水面付近が侵食され、滑落・滑動した消波ブロックが前法面下部に堆積して緩いS字型の断面になるが、さらに侵食面積が大きくなると、侵食部分において断面が直線的になることがわかった。消波工の被災形態は「天端被災」、「法面被災」、「天端および法面被災」の3パターンに分類されるが、本研究では変形量が大きくなると「天端および法面被災」の複合被災となった。

断面変形量の統計的特性を検討した結果、変形量パラメータ S の平均値が大きくなるにつれて標準偏差は若干増加するが、 S の変動係数は逆に減少することがわかった。つまり、作用波数 N の増加につれ、相対的な S の変動は小さくなる。ただし、本研究での累積作用波数の範囲では S の平均値は増加傾向を示しており、さらに作用波数を増やした場合にある一定の値に収束していくかは不明である。

変形量パラメータの値によって消波工の被災度をランク分けし被災度割合およびその推移を求

め、被災進行過程に対して定常推移確率をもつ3種類のマルコフ連鎖モデルの適用性を検討した。各モデルに対して推移確率が得られ、これにより被災度割合を算出した結果、2ランク以上の推移を考慮したモデルが最もよく現象を表すことがわかった。しかし、消波工の諸元や波浪条件などによって推移確率が変化する可能性があり、その都度、水理模型実験のデータにもとづいて推移確率を検証することになり、多大な労力を要することから、実用化にはこれらの問題点を解決する必要があると判断した。

第4章では、本章では消波工の断面変形にともなう性能変化について検討した。防波堤本体工に作用する波力および越波流量の変化に着目し、水理模型実験と数値波動水路による数値計算の両面から検討した結果、有用なデータを得ることができたが、同時に様々な問題点も浮上した。

防波堤本体工に作用する波力を検討した結果、消波工の変形が一定以上進行すると、防波堤鉛直面に作用する水平波力は初期状態よりも大きくなることが確認された。また、大きな水平波力を計測した波浪条件における波圧の鉛直分布より、断面変形の進行とともに露出する防波堤鉛直面上部のみならず、鉛直面下部においても波圧が増大していることがわかった。断面変形に伴って露出した鉛直面に作用した衝撃波圧が鉛直面下部まで影響を及ぼしていると考えられる。しかし、数値計算では実験ほど大きな波圧の発生が見られず、本章で設定した条件下では両者に差異が生じた。この原因として、数値波動水路は流体の非圧縮性を前提とした单相流モデルであるため、複雑に変化する自由表面で適切な境界条件が設定されないこと、密封された空気圧を評価できないことなどが挙げられる。密封された空気は気体セルと判断され、圧力はゼロに設定される。しかしながら、実際の空気圧は圧縮されるためゼロとならず、大きな差異が生じることが指摘されており、本研究においても同様のことが原因であると推測する。本研究では、衝撃力が卓越すると数値計算では実験結果に比べ過小評価している可能性があるため、**第5章**で用いるニューラルネットワークのチューニングデータや、**第6章**で行う性能を考慮した最適予防保全の検討には実験結果のみを使用することとした。

数値計算により越波流量を検討した結果、断面変形が大きくなると越波流量も多くなり、性能変化が認められた。天端沈下よりも複合被災のほうが、断面変形に伴う越波流量の増加が大きいことがわかる。また、断面変形がさらに進むと越波流量の増加は緩やかになるか、もしくは若干下がった。これは、露出した鉛直面により波が鉛直上向きの運動となることや、前法面の勾配が緩くなったことにより越波流量が減少したものと考えられる。

第5章では、消波工の変形に伴う防波堤鉛直面に作用する波力と越波流量の性能診断モデルの構築を行った。モデル構築には、多くのパラメータが混在するため、相互間の不明確な情報処理を分析するために有効なツールとしてニューラルネットワークを用いた。ニューラルネットワークを概説し、ネットワークの構成、学習法について述べ、水平波力や越波流量の性能予測モデルの構成と予測結果を示し、その有用性について示した。なお、入力データには**第4章**を踏まえ、水平波力では水理模型実験、越波流量では数値計算のデータを用いた。水平波力の予測結果は±40%の誤差範囲内に収まっており、衝撃波力が作用する場合も含めて適用性が示された。越波流

量は±15%の誤差範囲で予測できており、この予測モデルについても適用性が確認された。学習法については、Bayesian 正則化法よりも早期停止法のほうが少ないことや、相関係数 (CC) が大きく二乗平均平方根誤差 (RMSE) が小さい結果を与えているのは、Bayesian 正則化法よりも早期停止法を付加した場合であったことなどから、本研究では早期停止法を用いて評価した。その際の間層ユニット数は 15 または 20 が最適であった。

第 6 章では、消波工の期待保全費用を最小化する理論モデルによる最適予防保全レベルの導出と、この保全レベルにおいて性能を維持できているか力学的な観点からの検証を行い、性能変化を考慮した最適予防保全レベルを示した。また、モンテカルロシミュレーションにより、保全レベルを変化させて消波工の LCC を算出し、最適予防保全レベルを検証した。

佐藤らのモデルを概説し、最適予防保全レベルの検討を行った結果、事後保全費用が予防保全費用に比べて大きくなるほど最適予防保全レベルを下げる必要があること、事後保全レベルの設定が最適予防保全レベルに大きく影響することがわかった。また、このモデルを用いるには、消波工の損傷量を確率的に与える必要があり、モンテカルロシミュレーションによって検討した結果、1 回の異常波浪による消波工の被災度の頻度分布に対しては指数分布よりも Weibull 分布がよく合うことがわかった。

理論的に求めた最適予防保全レベルにおいて、波力に対する安定性能を考慮した保全レベルと比較した結果、理論モデルによる最適予防保全レベルは概ね安定性能を満たす範囲にあり、妥当な保全レベルであることが確認できた。また、期待保全費用を最小化する理論モデルに安定性能を考慮し、予防保全の意思決定方法についての提案を示した。

予防および事後保全レベルを変化させて、モンテカルロシミュレーションにより供用期間 50 年の期待補修費を求め、LCC を算出した結果、LCC が最小となる予防保全レベルは理論モデルによる最適予防保全レベルとよく一致しており、理論モデルの妥当性を示すことができた。

今後の検討課題

本研究における実用化のための課題と考察を述べる。

- 数値計算による衝撃波力の再現が不十分であった。このため、衝撃波力が発生する波力評価については、水理模型実験が必要となると考えている。
- 性能を考慮した最適予防保全を検討する際、越波流量低減性能については、耐波安定性の検討で用いられる安全率の概念がないため、消波工が少しでも変形すれば越波流量は増加し、直ちに補修が必要となる。仮に補修した場合、この保全は事後保全となるため予防保全を定義する余地がない。
- 理論モデルによる最適予防保全レベルの導出には、事後保全レベルや事後保全費用の設定が必要であり、どのような状態を事後保全レベルと設定するかが課題である。最適予防保全レベルは事後保全レベルの設定によって変化するため、事後保全レベルを適切に設定する必要がある。

謝 辞

本論文は、鳥取大学理事 松見吉晴教授ならびに鳥取大学大学院工学研究科 太田隆夫教授のご指導のもと取りまとめたものであり、松見教授には研究の進め方や研究結果の活用方法についてご指導をいただき、太田教授には水理模型実験や数値計算において丁寧なご指導ご説明を賜りましたことを心より感謝いたします。鳥取大学大学院工学研究科 黒岩正光教授には、本論文を取りまとめるにあたり貴重なご意見、ご指導を頂きましたことを感謝いたします。鳥取大学大学評価室 大野賢一准教授には、終始励ましていただき、研究の進め方のアドバイスをいただきましたことを感謝いたします。神戸学院大学 佐藤毅准教授には消波工の予防保全の確率モデルに関するご助言を、鳥取大学大学院工学研究科 小柳淳二准教授には最適予防保全レベルに関する数値計算においてご指導いただきましたことを感謝いたします。

当時学生の権守真也氏（現ヒルタ工業株式会社）、森山裕貴氏（現国土交通省中部地方整備局）ならびに防災計画研究室の学生諸氏には、本研究における水理模型実験の準備やデータの整理など大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

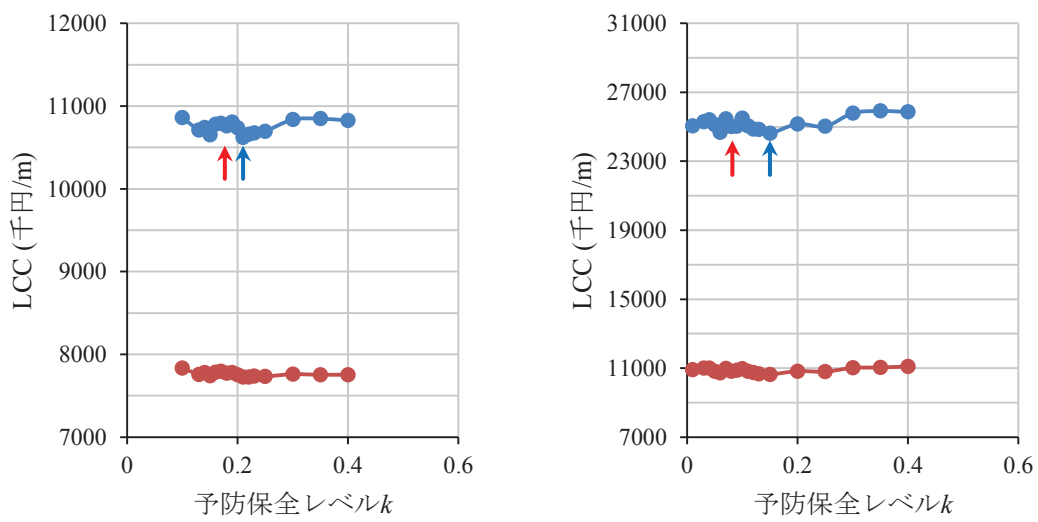
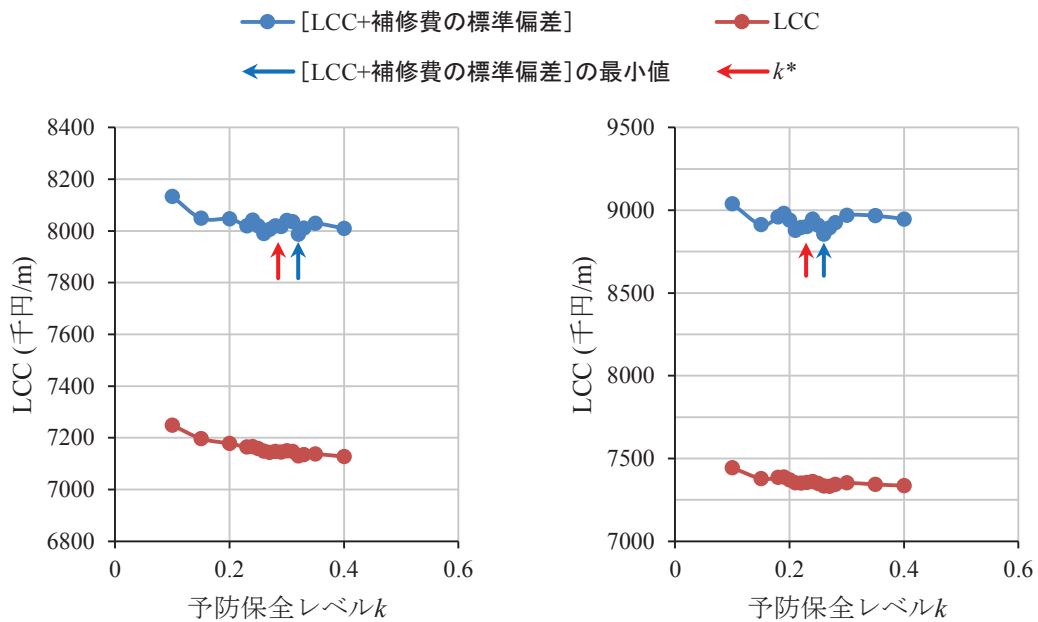
愛媛大学 OB の株式会社荒谷建設コンサルタント 佐伯信哉氏、復建調査設計株式会社 榎本一徳氏には終始激励をいただき、大変勇気づけられましたことを感謝いたします。

三省水工株式会社の皆様には大学院進学にご理解いただきましたことを感謝いたします。重岡良則相談役ならびに皆川曜児社長には、大学院進学のお機会を与えていただきましたことを感謝いたします。技術営業部 富永準本部長、技術研究所 浅田潤一郎所長には会社業務において大変ご迷惑をお掛けいたしましたことをお詫びいたします。西日本支店 矢野弘毅支店長ならびに支店の皆様にはご支援いただき、終始激励をいただきましたことを感謝いたします。西日本支店技術部 伊井洋和次長には設計実務の観点からの有益なご助言を、東日本支店設計課 平山隆幸課長には保全レベルの設定に関する助言など有益な情報を頂きましたことを感謝いたします。

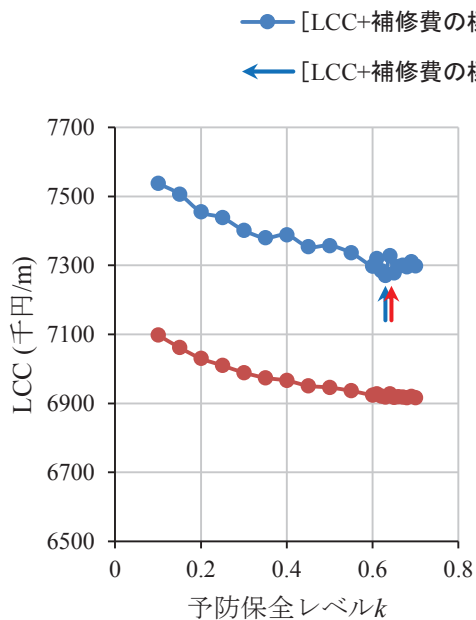
愛媛大学 中村孝幸名誉教授（現三省水工顧問）には、水理模型実験における圧力計の取り扱い方やデータ収集方法についてご指導いただきました。同教授には著者が大学生のときに大変お世話になり、当時ご指導いただきました水理模型実験の知識を活かすことができました。重ねて感謝いたします。

最後に著者のことを理解し、4年間にわたって支えてくれた家族に感謝いたします。

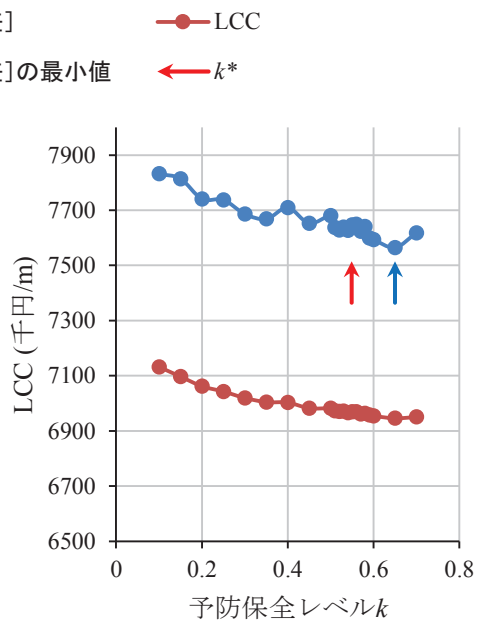
付 録



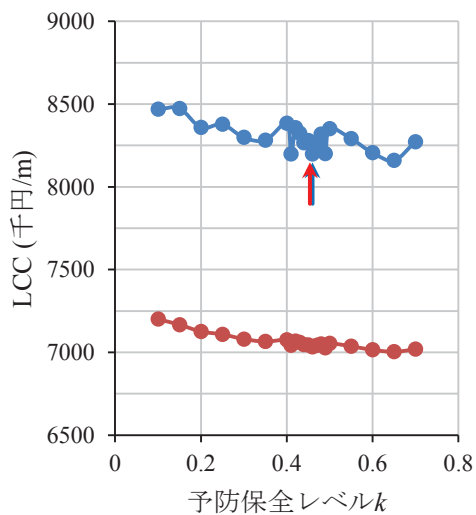
付図 - 1 供用期間 50 年における消波工の LCC 算定結果 (A 港)



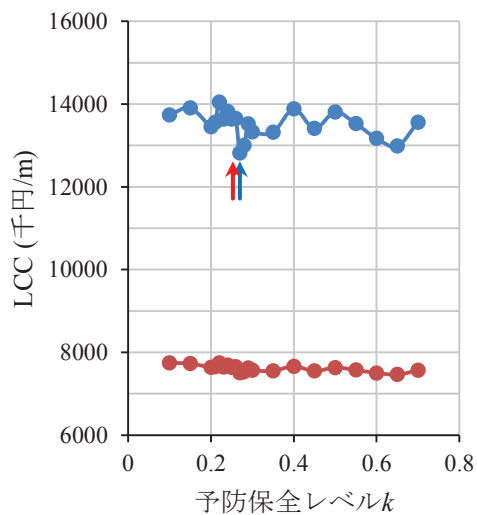
(e) A 港, $K=1.0$, $R_a=6$



(f) A 港, $K=1.0$, $R_a=11$

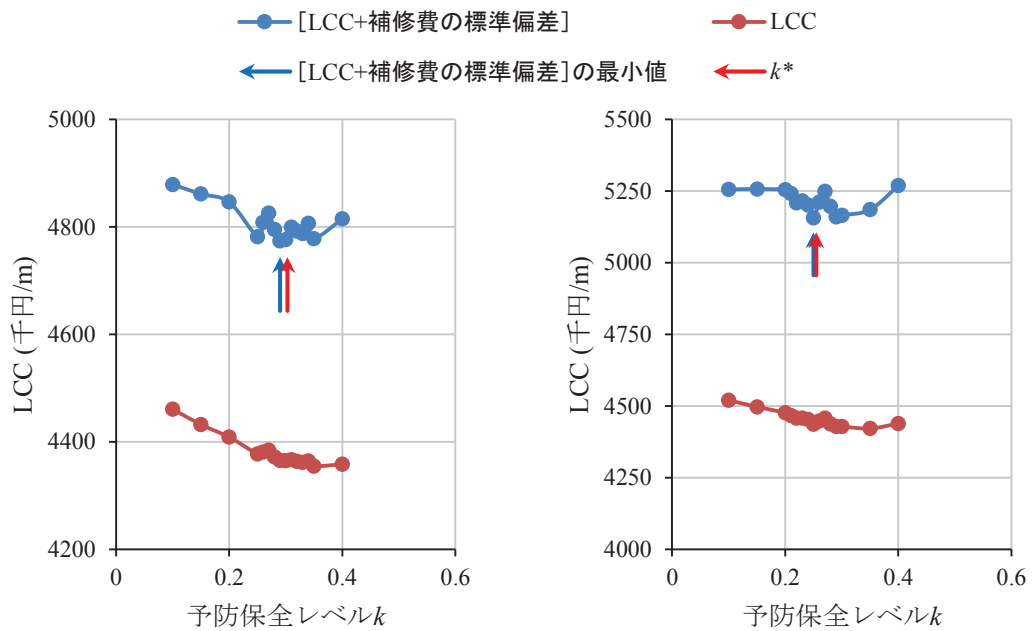


(g) A 港, $K=1.0$, $R_a=21$



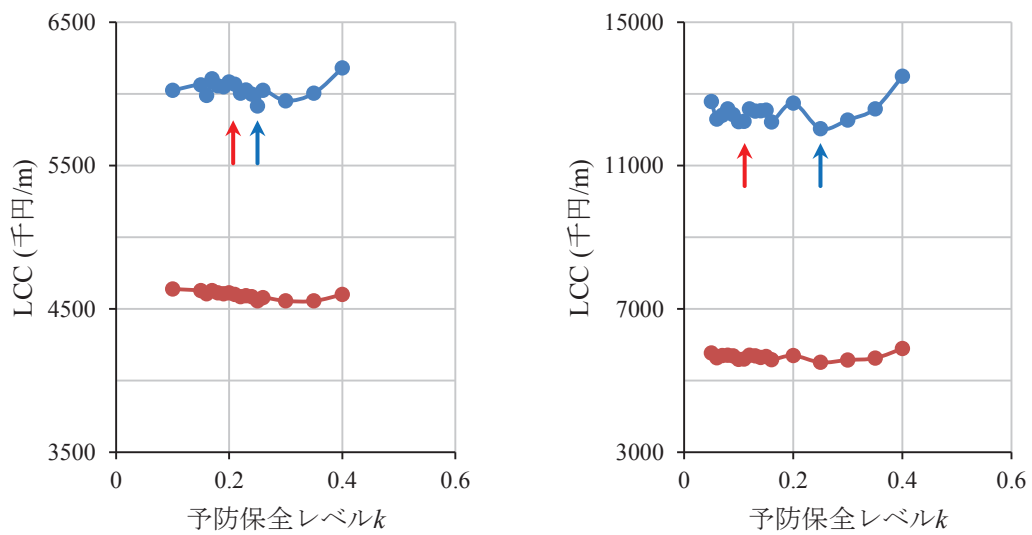
(h) A 港, $K=1.0$, $R_a=101$

付図 - 2 供用期間 50 年における消波工の LCC 算定結果 (A 港)



(a) B 港, $K=0.5$, $R_a=6$

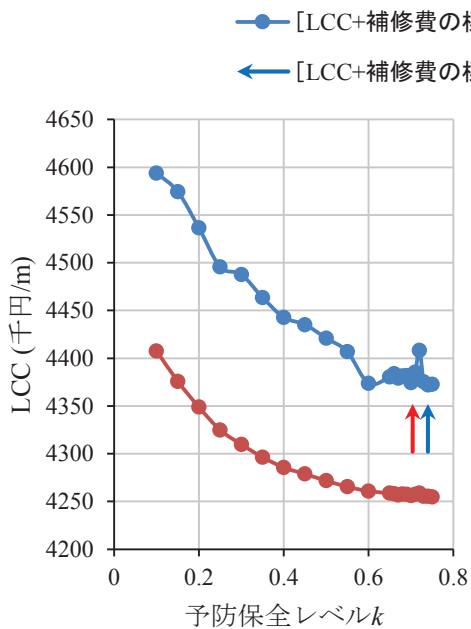
(b) B 港, $K=0.5$, $R_a=11$



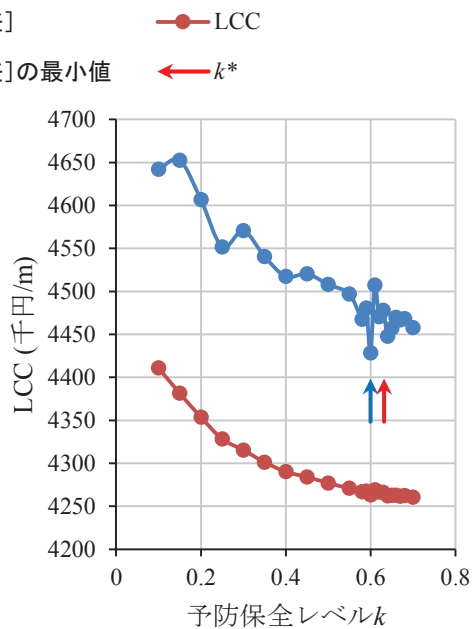
(c) B 港, $K=0.5$, $R_a=21$

(d) B 港, $K=0.5$, $R_a=101$

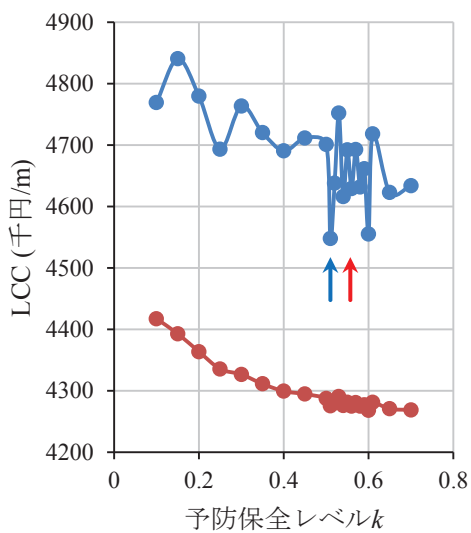
付図 - 3 供用期間 50 年における消波工の LCC 算定結果 (B 港)



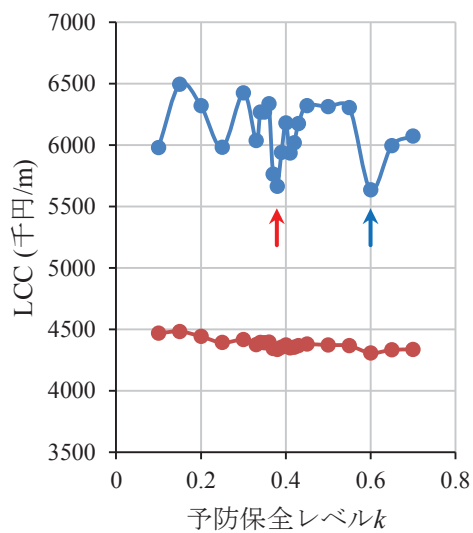
(e) B港, $K=1.0$, $R_a=6$



(f) B港, $K=1.0$, $R_a=11$



(g) B港, $K=1.0$, $R_a=21$



(h) B港, $K=1.0$, $R_a=101$

付図 - 4 供用期間 50 年における消波工の LCC 算定結果 (B 港)