

平成 31 年度水産基盤整備調査委託事業
「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」
報告書

水 産 庁

「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」
共同研究機関

国立研究開発法人水産研究・教育機構
一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所
株式会社アルファ水エコンサルタンツ
国際気象海洋株式会社

目次

研究開発の目的

- 1) 津波等の強い流れに対する安定質量算定手法の検討
1-1 ~ 1-41 ページ
 - 2) 沈設魚礁の流体力算定式及び着定基質の安定質量算定式の検討
2-1 ~ 2-34 ページ
 - 3) 浮魚礁の合理的な機能保全手法の検討
3-1 ~ 3-35 ページ
- 【巻末資料】浮魚礁の維持管理ガイドライン(案)
表紙、目次、本体 1~ 25 ページ

研究開発の目的

漁港漁場施設の設計は、「漁港・漁場の施設の設計参考図書 2015 年版」において性能規定化が実現し、漁港・漁場施設の目的・機能に応じ、その目的の達成や機能の確保のために施設に備わるべき能力である「性能」が明文化された。しかし、「性能」を一層明確にし、性能規定化に対応した設計を一層推進することが課題となっている。また、よりの確で合理性の高い照査方法の確立のため、現場条件に適合した地震、津波等の力や海域環境を考慮した流体力の算定手法などを改善することが課題となっている。

平成 29 年 3 月に変更された「漁港漁場整備事業の推進に関する基本方針」では、地震・津波などの災害発生後の漁業の継続や早期回復を図るための防災・減災技術等について開発と普及を図るとされている。また、平成 29 年 6 月に水産庁から示された「漁港漁場整備事業の推進に関する技術開発の方向」では、優先して取り組む技術開発テーマとして、外郭施設や係留施設等の耐震・耐津波・耐波浪強化に関する技術開発、性能規定化に対応した設計の高度化に関する技術開発、現場条件に適合したよりの確で合理性の高い照査に関する技術開発等が挙げられている。

こうした国の施策方針に沿う形で、漁港漁場施設について、新たな知見を取り入れた実用的な設計手法の構築が求められている。そこで本事業では、漁港漁場施設の設計手法について、国や地方公共団体が指摘する課題や、新しい社会的ニーズに対応すべく、技術の進歩、社会情勢・需要の変化等に応じた更なる高度化を図るための調査・検討を行い、「漁港・漁場施設の設計参考図書」の見直しを検討することを目的としている。

具体的には、漁港施設については、東日本大震災における津波被害の実態等を踏まえ、津波等の強い流れの影響を考慮した設計手法の高度化（安定質量算定手法の検討）を行う。また、漁場の施設について、主要な設計の基本となっている沈設魚礁の安全性の照査法と着定基質（石材）の安定質量算定式に関して、新しい知見等を踏まえ、設計手法の体系的な見直しを提案・検証し、とりまとめる。浮魚礁については、維持管理上の課題点や劣化の現状をふまえ、保守点検等の高度化手法を検討し、摩耗速度等を考慮した係留策の強化方法について検討して、よりの確で合理性の高い設計・維持管理手法をとりまとめる。

平成 31 年度水産基盤整備調査委託事業報告書

I. 課題名

「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」のうち
(1) 津波等の強い流れに対する安定質量算定手法の検討

II. 実施機関及び担当者名

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所	
主幹研究員	三上信雄
水産土木工学部水産基盤グループ	
グループ長	佐伯公康
主幹研究員	大村智宏
主任研究員	古市尚基
主任研究員	井上誠章
一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所	
第1調査研究部 次長	林 浩志
第1調査研究部 上級研究員	加藤広之
第1調査研究部 主任研究員	岩瀬浩之
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	
東京本社 特任執行役員	中山哲厳
東京本社 執行役員	佐藤勝弘
東京本社 技術部主任	千原美季
東京本社 技術部主任	遠藤次郎
国際気象海洋株式会社	
取締役社長	門 安曇
銚子グループ グループリーダー	小林 学
銚子グループ 主任	野地雅貴
建設コンサルグループ 技師	橋野公一

III. ねらい

津波来襲時の防波堤の根固め・被覆ブロック等の安定質量は、「平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方 平成 25 年 水産庁漁港漁場整備部整備課長通知」により、イスバッシュにより提案されている捨石等の安定質量算定式（以下、イスバッシュ式という）又は水理模型実験によって定めることができる。ただし、津波の流速が大きくなるとイスバッシュ式によって算出される被覆材の質量が極めて大きくなることが指摘されている。

平成 30 年度の水産基盤整備調査委託事業「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」の調査では、定常流を用いた水理模型実験（断面実験）と数値計算による検討を行った。その主要な結果として、被覆ブロックを形状同一のままで比重変化させた場

合、安定限界流速と質量の関係が 6 乗に近くなっており、流速の 6 乗則を用いたイスバッシュ式の関係が成立しているものと考えられた。一方で、被覆ブロックを比重一定で大きさを変化させた場合、安定限界流速と質量の関係が 3 乗程度となった。このことは、ブロックの体積増加に応じてイスバッシュ数が大きくなる、すなわち、異なる大きさのブロックに対して同式および共通のイスバッシュ数を適用して質量を算定することが困難と考えられることを示す。このため、流速の 3 乗式に基づく式を提案することで、安定質量を合理的に算定できると期待された。

しかしながら平成 30 年度事業では、ブロック形状（大きさ、厚さ）を変化させたケースが限られていた。そこで、2 次元条件下において、異なるブロック形状についての追加実験を行い、イスバッシュ式の基本特性の把握や適用性の検討を進めていく必要がある。さらに 3 次元条件において、側壁の影響を軽減させた平面（大型）実験を行い、算定式の適用性等を検討する必要がある。

平成 31 年度の本調査では、水理模型実験（断面実験および平面実験）と数値計算による検討を行い、津波等の強い流れに対する被覆ブロック等の合理的な安定質量算定手法を検討するとともに、その妥当性及び実用性について評価し、課題を抽出・整理する。

IV. 方法

(1) 水理模型実験による検討

a) 断面実験

2 次元条件下において、ブロック形状変化の影響を把握するための関連データを拡充するため、平成 30 年度に実施しなかった項目についての追加実験を行い、イスバッシュ式の基本特性の把握や適用性の検討を行った。

断面実験は循環流発生装置を有した水槽を使用し、模型縮尺は 1/80 とした。実験模型は、捨石マウンド上に被覆材を敷き詰めた台形形状とした（図 1.1、図 1.2 参照）。被覆ブロックについては直方体形状の方塊型を基本とし、同一比重で大きさ、厚さ等を変更したものを実験に使用した。

計測項目は流速、水位などとし、計測位置は上・下流のマウンド法肩付近、マウンド中央付近等である。また津波作用状況をビデオカメラで撮影し、被覆材の移動箇所、移動個数を記録した。ブロックへの作用波圧の計測も一部のケースで実施した。

実験ケースは、模型 1 形状、被覆ブロック 8 種（うち新規作製 6 種）、法勾配 3 種を組み合わせたケースとし、各ケースについて流速を段階的に上げ、移動が開始する流速まで計測を行った（実験ケースの詳細は V.結果に記載）。

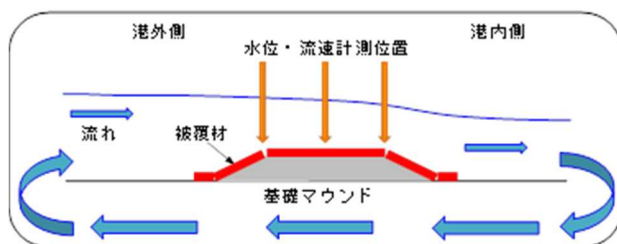


図 1.1 断面実験模式図



図 1.2 断面実験模型形状平面図

b) 平面実験

壁体を有する堤頭部においては、壁体を回り込む流れ等の影響により、被覆ブロックの安定性が低下する可能性が考えられる。また断面実験では水路幅が狭く（0.5m）、側壁の存在が形成される流動場に影響を及ぼす可能性がある。このため側壁の影響を軽減させた3次元条件下において、壁体を有する堤頭部による平面実験（大型実験）を行い、断面実験で検討した算定式の適用性等の確認を行った。

平面実験は大型造波水路を使用し、模型縮尺は1/50とした。実験模型は、捨石マウンド上に堤頭部を模した壁体を設置し、マウンド上に被覆材を敷き詰めた形状とした（図1.3）。計測項目は、流速、水位などとし、堤体周辺の被覆ブロック上について平面的に計測した。また津波作用状況をビデオカメラで撮影し、被覆材の移動箇所、移動個数を記録した。

実験ケースは、模型1形状（堤頭部）、被覆ブロック質量1種、流動条件は周期変更による3ケースとした。

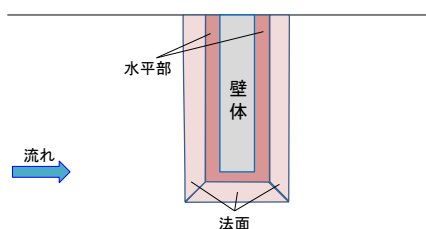


図 1. 3 平面実験模型形状平面図

(2) 数値計算による検討

被災メカニズムの理解と設計への応用の観点から、数値計算の再現性の精査を実施した上で、流速分布や圧力分布等、設計に資する情報を蓄積することを目的とした。

また、計測装置や水槽の特性上、水理模型実験では実施・計測が困難な条件について数値計算を行い、実験結果を補完した。特に、被災箇所における流速分布やブロック周りの圧力分布について把握することを目的とした。

本検討では、昨年度検討に用いた OpenFOAM（3次元流体解析モデル）の計算条件を検討し、再現性の精査を実施した。次に、再現性の向上を図ったうえで、ブロックに作用する流体力の算定を行った。また、実験水路の制約上実施が困難である、同流速で水位が異なる条件について数値計算により検討した。

(3) 安定質量算定式の検討

水理模型実験および数値計算による評価結果等を踏まえ、強い流れに対する合理的なブロック等の安定質量算定手法を検討するとともに、その妥当性および実用性について評価し、課題を抽出・整理した。

(4) 検討部会の実施

本業務の実施にあたって、専門分野の知見を有する学識経験者を委員とする調査検討委員会を設け、2回実施し、指導・助言を得ながら業務のとりまとめを行った。

V. 結果

(1) 水理模型実験による検討

1) 断面実験

a) 実験内容

実験施設は水産工学研究所の津波回流実験装置（幅 0.5m，深さ 1.0m，図 1.4）を使用し、模型縮尺は 1/80 とした。実験模型は、捨石マウンド上に被覆ブロックを敷き詰めた台形形状とし（図 1.5）、被覆ブロックは直方体形状の方塊型を基本とし、同一比重で大きさ、厚さ、縦横比を変更したブロックを使用した。実験ケースを表 1.1 に示す。平成 30 年度作製済みのブロックサイズ中および大について、未実施の法勾配 1:2、1:3 のケースを実施した。また新規作製ブロックとしては、サイズ変更 2 種（特小・特大）、厚さ変更 2 種（厚さ大・小）、縦横比変更 2 種（長方形形状 1 種で、向きを変更した 2 ケース）のブロックを用意し、計 12 ケースで実験を実施した。

実験では被覆ブロックの移動実験と、水位・流速の計測実験の 2 種類を行った。被覆ブロックの移動実験については、ポンプ流量を段階（ランク）的に増加させ、流れがほぼ定常になってから 30 秒間継続させ、被覆ブロックの移動（めくれ）箇所、個数を記録した。被覆ブロックが 1 個分以上移動したランクの 1 ランク手前の条件を安定限界の流量として整理を行った。移動実験は各 3 回程度行った。

水位・流速の計測実験については、被覆ブロックが移動しないよう固定し、ポンプ流量を移動実験と同様の手順で変化させながら計測を実施した。計測位置は上・下流のマウンド法肩付近、マウンド中央付近、上流側、下流側の 5 箇所とした（図 1.6）。マウンド上の流速は、ブロック上 1cm、および 3 点法による 3 点（水深の 20%，60%，80%）の計 4 層の高さで計測を行った。



図 1. 4 津波回流実験装置



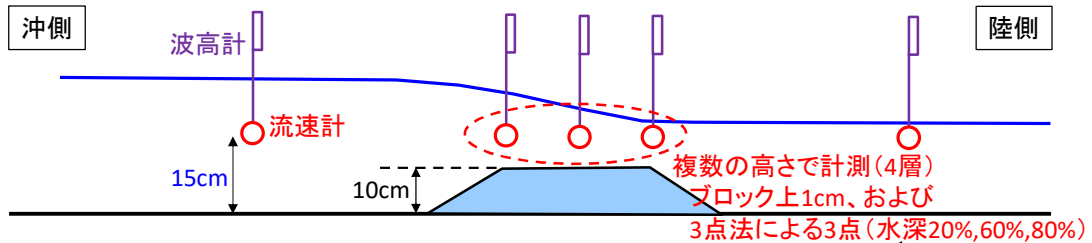
図 1. 5 実験模型設置状況
(堤幹部・法勾配 1:1.5)

表 1. 1 実験ケース一覧

	縮尺	種類	サイズ	寸法 (mm)	被覆ブロック			堤幹部 法勾配			堤頭部 法勾配			比重を加味した 質量パラメータ(cm ³) M(Sr-1) ³ /pr	
					質量		比重	1:1.5	1:2	1:3	1:1.5	1:2	1:3		
					模型(g)	現地(t)									
断面実験	1/80	作製済みブロック	方塊型	小	40×40×15	37	19	1.5	□	○	○	□	○	○	3.1
						58	30	2.3	□	○	○	□	○	○	56.4
						95	49	3.8	□	○	○	□	○	○	531.2
			127	65	5.0	□	○	○	□	○	○	1625.6			
			中	50×50×19	108	55	2.3	□	★	★			101.2		
			大	56×56×21	147	75	2.3	□	★	★			135.2		
		有孔型	小	42×42×15	58	30	2.3	□					56.4		
		新規 作製	サイズ変更 " " 厚さ変更 " " 縦横比変更 " "	方塊型	特小	33×33×12	32	16	2.3	★	★				30.6
					特大	60×60×22	180	92	2.3	★	★				171.9
					厚さ大	29×29×29	58	30	2.3	★					55.4
					厚さ小	50×50×10	58	30	2.3	★					55.4
					縦長	50×34×15	58	30	2.3	★					55.4
横長	34×50×15				58	30	2.3	★					55.4		
平面実験	1/50	作製済みブロック	方塊型	中	50×50×19	108	14	2.3				★		101.2	

○□ : 平成30年度実施済み
(□ : 岩手県ケース)
★ : 令和元年度実施

(横から見た図)



(上から見た図)

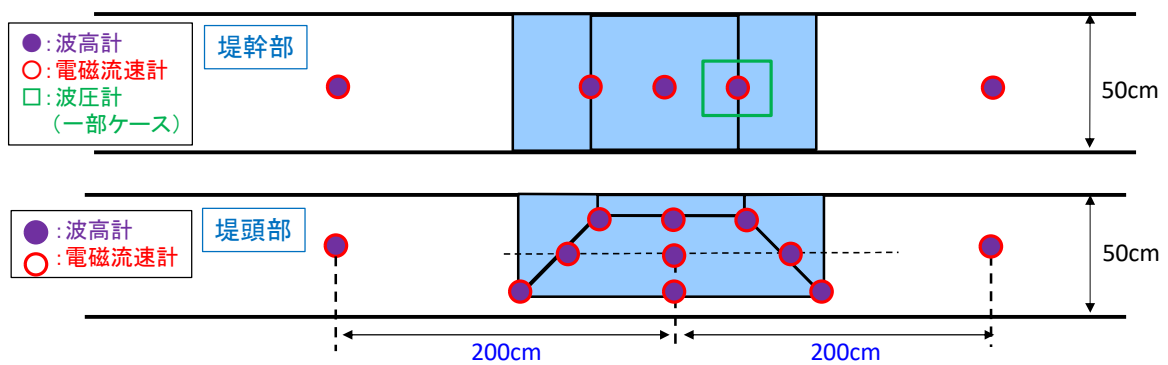


図 1. 6 計測位置概要

b) 実験結果の概要

被覆ブロックの安定実験の撮影例を図 1. 7、安定実験・計測実験の結果例を図 1. 8、被覆ブロックのめくれ位置の度数分布例を図 1. 9、マウンド上各位置における水位と流速分布例を図 1. 10 に示す。なお図 1. 9 において、ブロックの移動数(種類)は繰り返し回数 $N=3$ の平均値であり、度数分布中の棒の色はブロック移動時の流量を示す(大きな流量値ほど寒色)。

図 1. 7・図 1. 9 内の多くのケースで、下流側法肩でブロックがめくれて移動した。小質量のブロックではマウンド水平部前端付近から移動する場合があるが、大質量のブロックではマウンド水平部後端や法肩上部付近から移動するケースが多く、安定限界の流量も大きくなる傾向がみられた。流動場については、下流側ほど水位が低く、流速が増大した(図 1. 8・図 1. 10)。以上の特徴が、本実験における全体的な傾向として確認された。

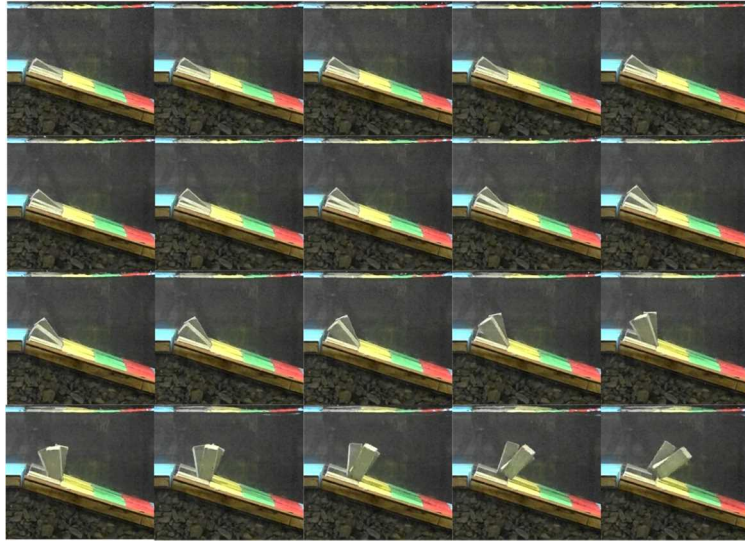
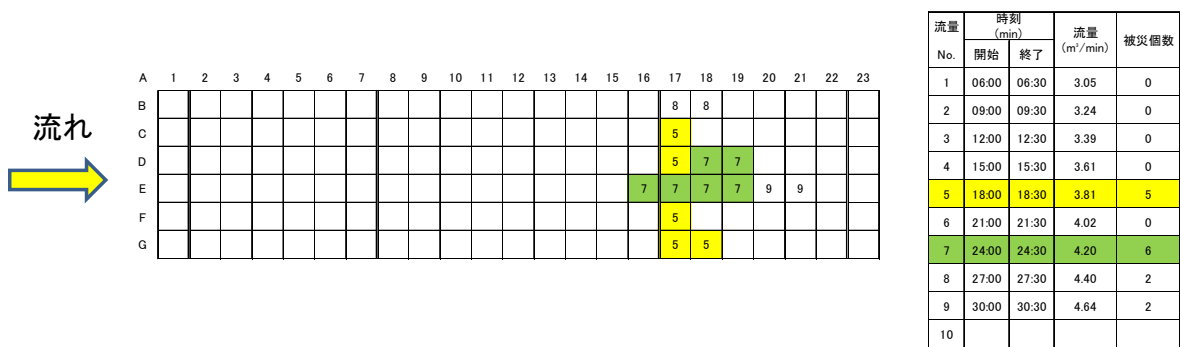


図 1. 7 被覆ブロックの安定実験撮影例
(堤幹部、法勾配 1:3、方塊型：中、撮影 60fps)



(a) 被覆ブロックの移動箇所 (数字は右表の流量 No. に対応)

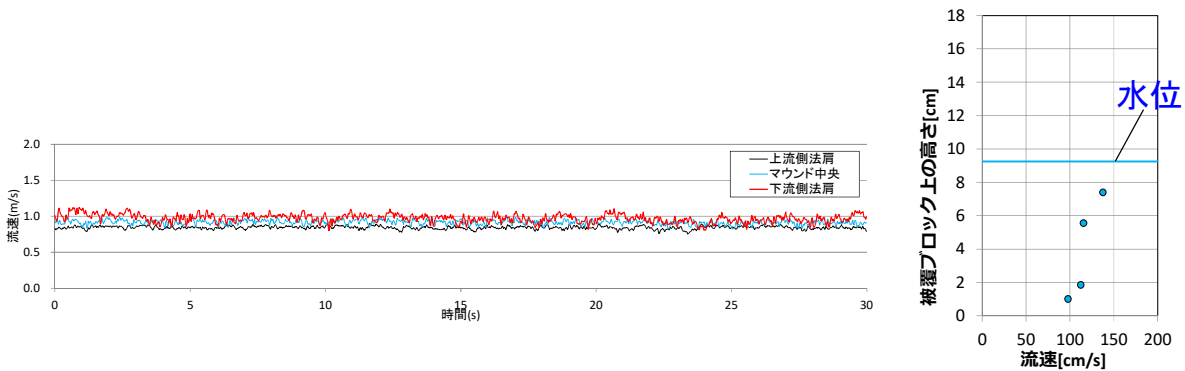
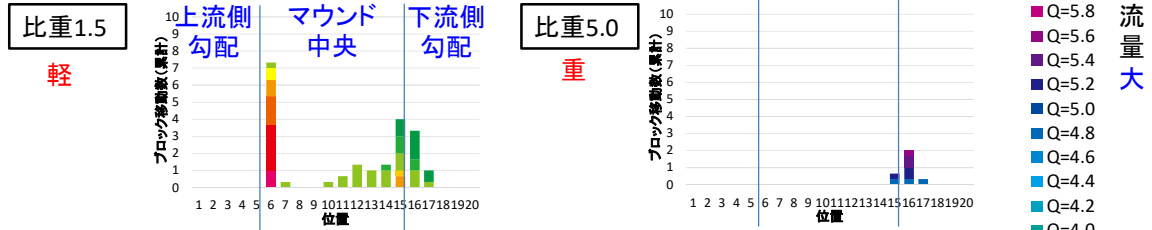
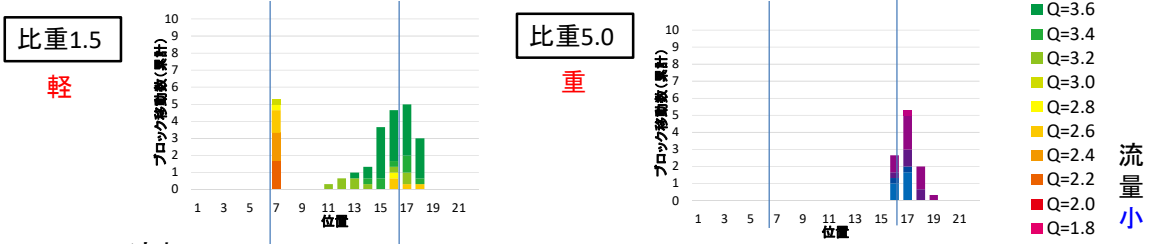


図 1. 8 安定実験・計測実験結果例 (堤幹部、法勾配 1:3、方塊型：中)

○断面堤幹部、法勾配1:1.5 ブロック小 / 比重1.5 & 5.0

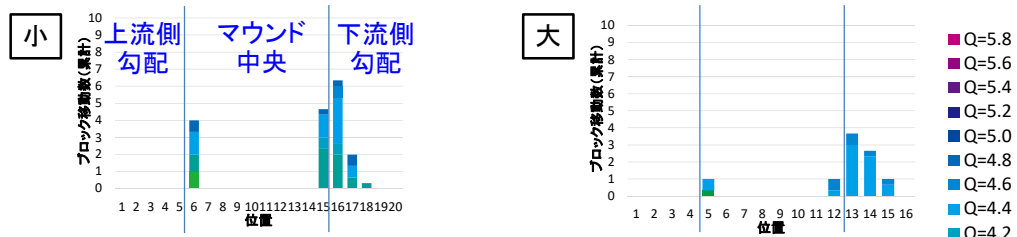


○断面堤幹部、法勾配1:2 ブロック小 / 比重1.5 & 5.0

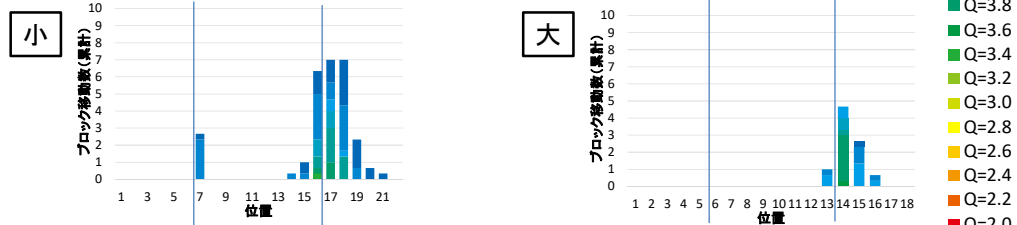


(a) 比重 1.5・比重 5.0 の比較

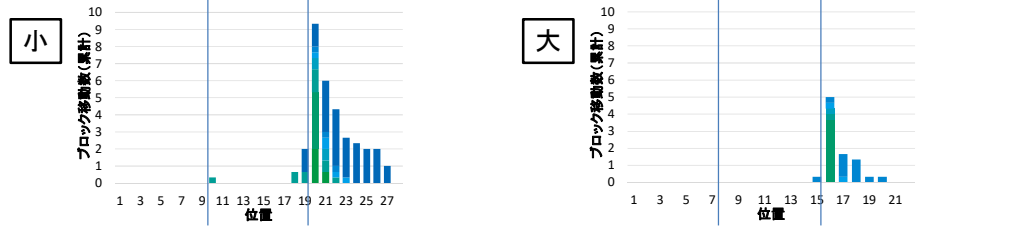
○堤幹部、法勾配1:1.5 / ブロック小・ブロック大



○堤幹部、法勾配1:2 / ブロック小・ブロック大



○堤幹部、法勾配1:3 / ブロック小・ブロック大



(b) ブロック小・大の比較

図 1. 9 被覆ブロックのめくれ位置の度数分布

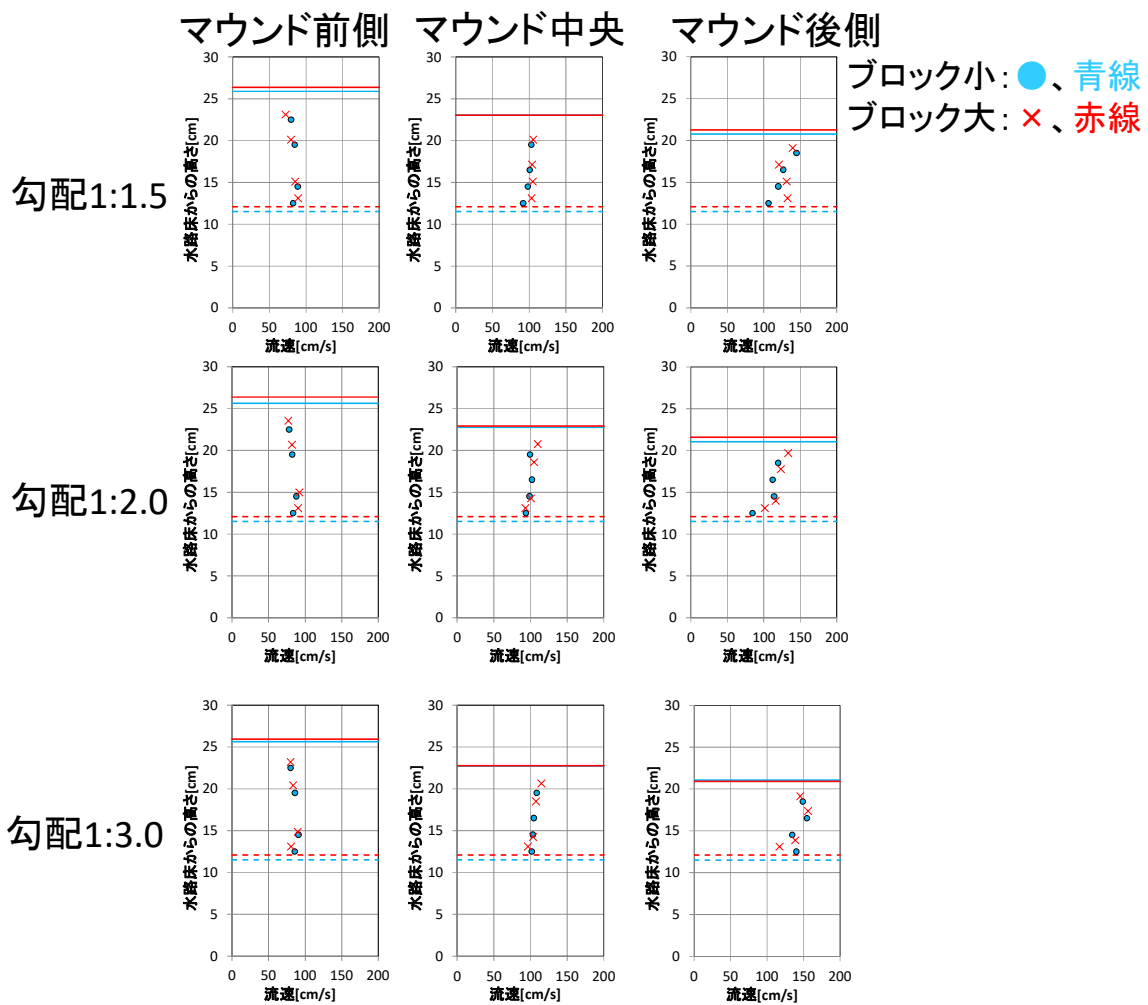
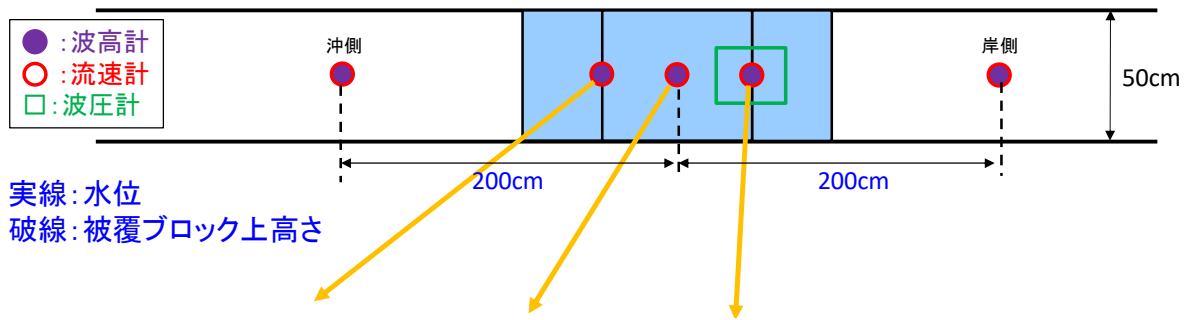


図 1. 10 水位・流速分布例 (流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$, 30s 平均値)

法肩上部での鉛直平均流速とマウンド近傍の最下層流速 (ブロック上1cm) の散布図を図 1. 11 に示す。設計実務での参照が容易と思われる鉛直平均流速とブロック移動と直接的に関連するマウンド近傍流速の間に比例関係が見られることから、設計実務で鉛直平均流速を用いることについての一定の妥当性が示唆される。

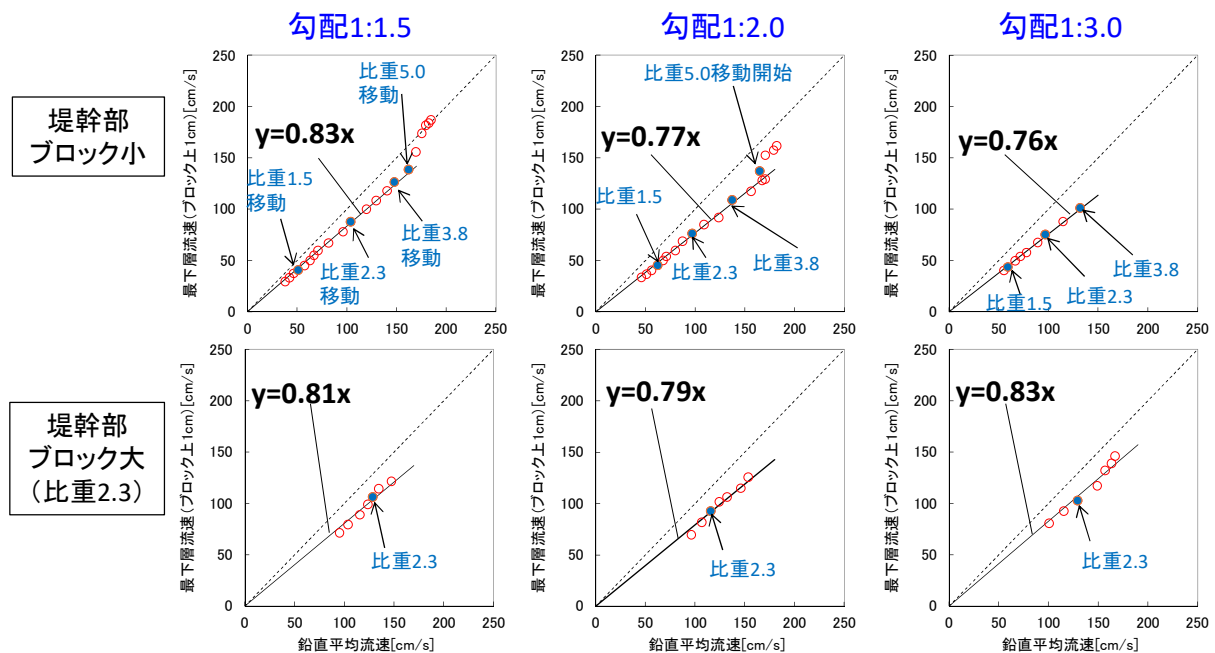


図 1. 11 法肩上部での鉛直平均流速とマウンド近傍流速の散布図
(青点：ブロック移動開始流速)

次に、流速や水位、圧力の時間変動について検討を行った。各計測位置の詳細を図 1. 12 に示す。移動開始時の流速と圧力の時間変動の例を図 1. 13 に示すが、流速は下流側法肩より下流側で変動が大きくなっていることが分かる。法面上面の圧力値が大きく低下し、その結果、下面との圧力差が大きくなることにより揚力が発生していることが分かる。

移動開始時の流速と水位の平均値と標準偏差を図 1. 14 に示す。下流側法肩における流速の標準偏差は高々 10cm/s 程度であり、ブロックサイズや法勾配の変化による流速変化（最大 30cm/s 程度）に比べ突出していないことが分かる。このことから、流速参照箇所として時間平均値を用いることに一定の妥当性があるものと考えられる。

圧力の平均値と標準偏差の例を図 1. 15 に示すが、流量の多い条件ほど、法面での上下面の圧力差や圧力変動が増加していることが分かる。

底面流速（もしくは底面流速の 2 乗）と揚力との関係を図 1. 16 に示す。揚力は以下で定義する。

$$p_u = (p_1 - p_2) - p_b$$

ここで、 p_u ：揚力、 p_1 ：下面圧力、 p_2 ：上面圧力、 p_b ：浮力（単位面積あたり）である。なお本稿では、揚力をマウンド面の法線方向に働く流体力として定義・算定しており、以下の議論において、マウンドの水平部と法面部で揚力として作用する方向が異なっていることに注意していただきたい。

底面流速が大きくなるほど、いずれの条件でも法面での揚力が大きくなるが、水平部では法勾配やブロックの大きさによって傾向が異なる。また、揚力は単純に流速の 1 乗や 2 乗では説明ができず、複雑な傾向を示しており、ブロックの移動には複数のメカニズムが作用していることが示唆される。

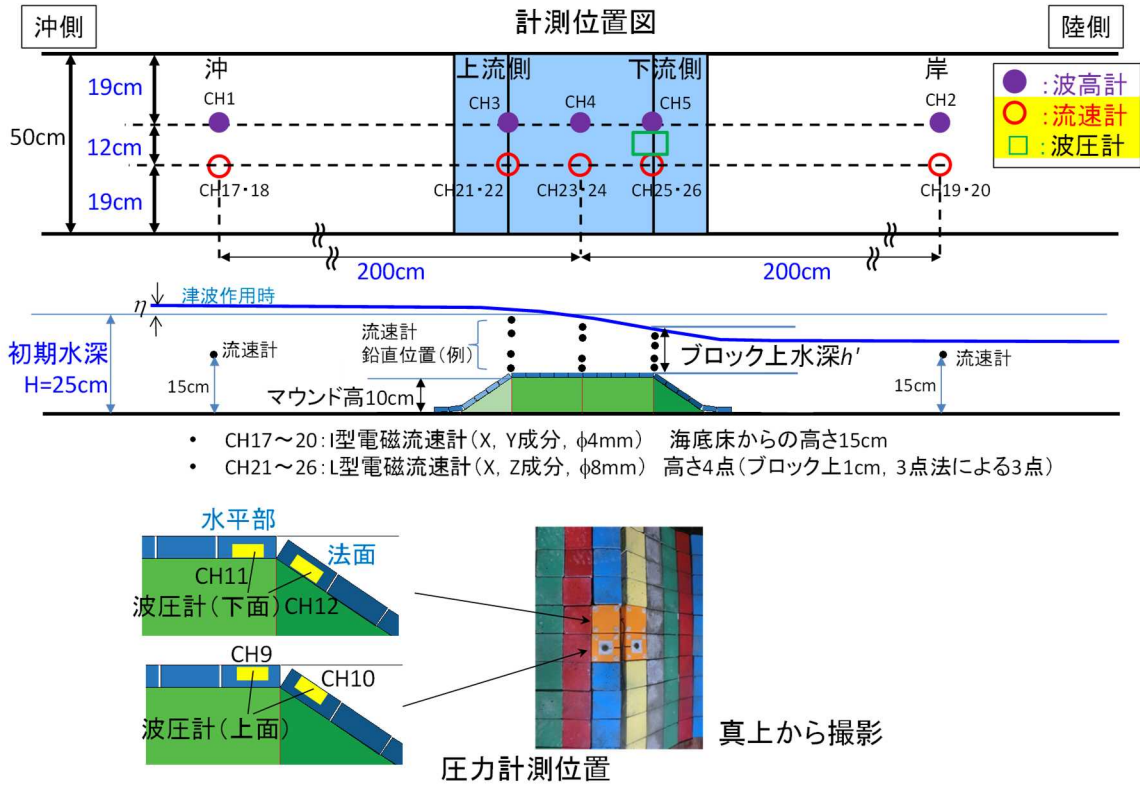


図 1. 12 計測位置詳細 (堤幹部)

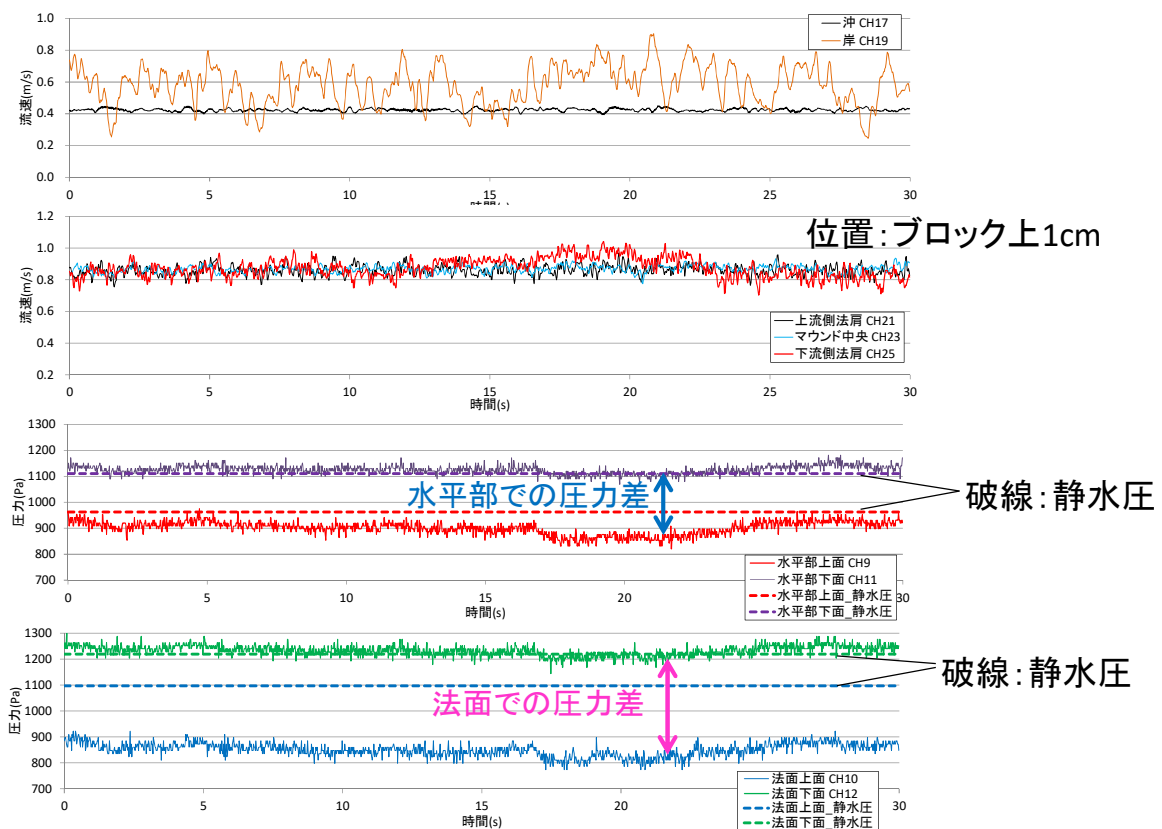


図 1. 13 流速・圧力の時間変動例 (堤幹部、法勾配 1:1.5、ブロック小、流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$ (移動開始時付近))

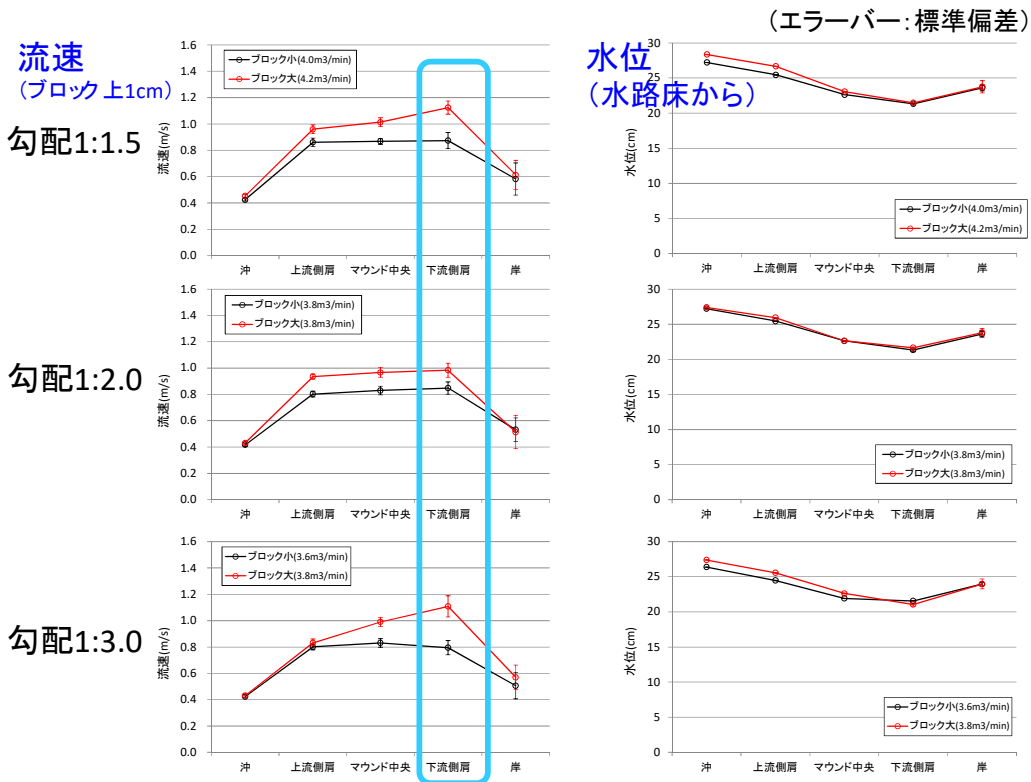


図 1. 14 流速・水位の平均値・標準偏差（堤幹部、移動開始時）

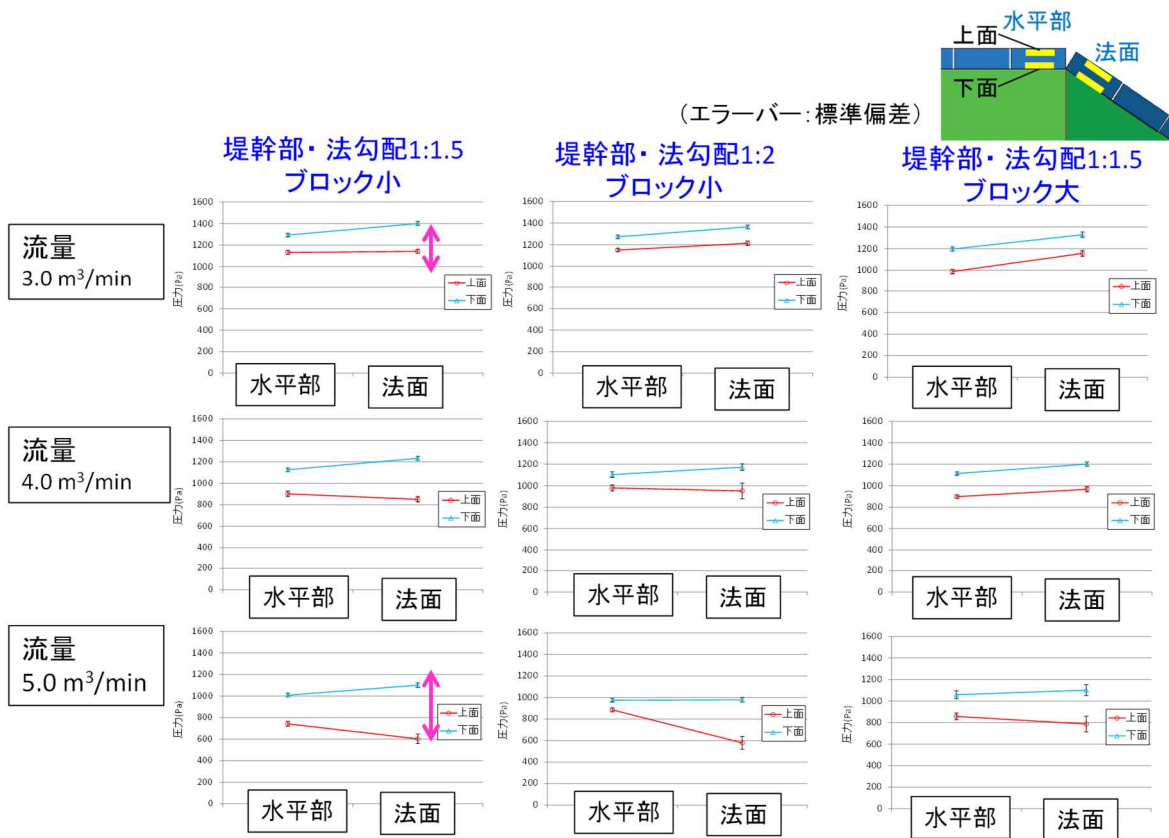


図 1. 15 圧力の平均値・標準偏差（堤幹部、ブロック比重 2.3）

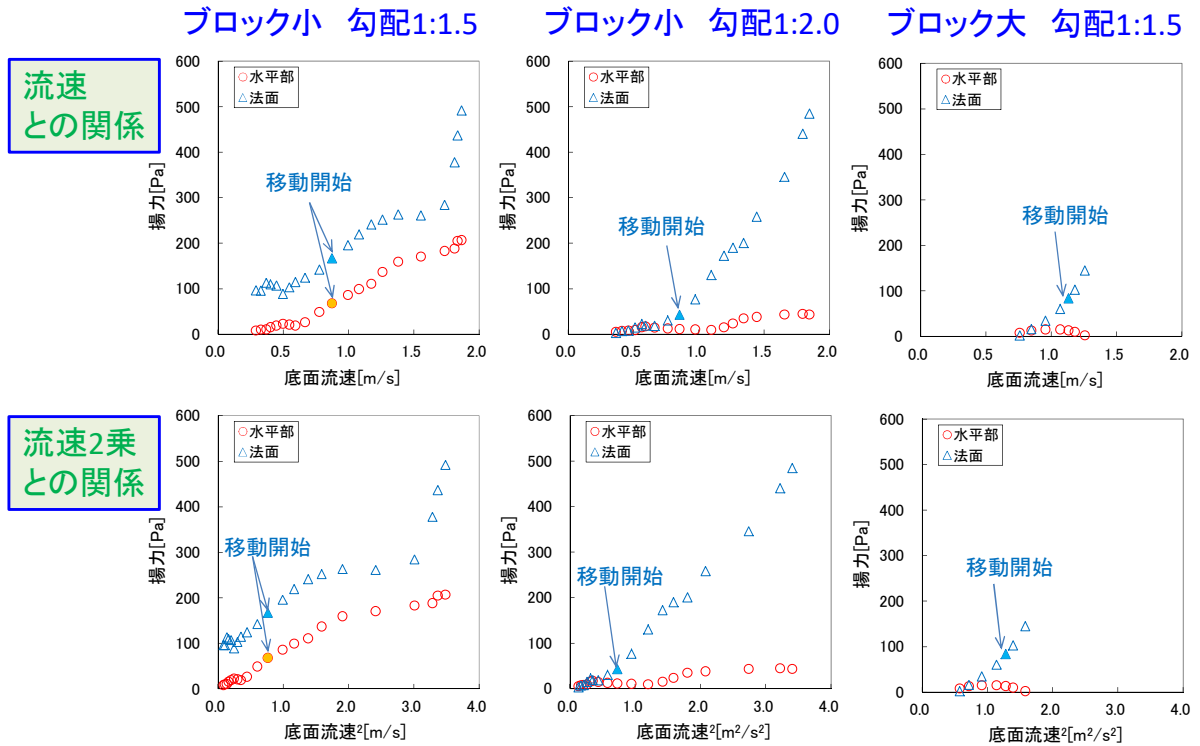


図 1. 16 底面流速と揚力の関係（堤幹部、ブロック比重 2.3）

被覆ブロックの厚さおよび縦横比を変更した場合の、安定限界の鉛直平均流速と形状の関係を図 1.17 に示す。厚さ、縦横比による安定限界の流速への影響は比較的小さく、顕著な差は見られなかった。仮に、厚さが小さくなるにつれて限界流速が小さくなれば、底面積の増大により不安定化に揚力が寄与することが示唆される。また横長になるにつれて限界流速が小さくなれば、流れが作用する側面積（図 1.17 内の直方体図形の青色部分）が増大することにより抗力が不安定化に寄与することが示唆される。このことから、揚力・抗力ともに不安定化に突出した影響を及ぼすものではなく、複合的に影響していることが示唆される。

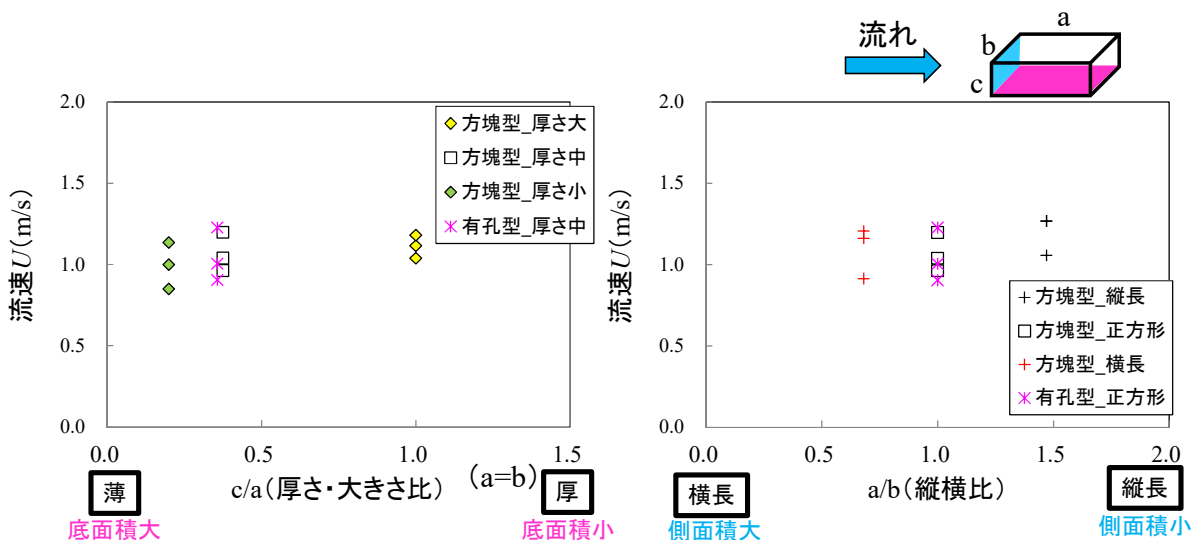


図 1. 17 安定限界の鉛直平均流速と形状の関係（堤幹部、法勾配 1:1.5、ブロック質量 58g）

2) 平面実験 (大型実験)

a) 実験内容

実験施設は水産工学研究所の大型造波水路 (長さ 100m, 幅 1.0m, 深さ 2.0m, ピストン型造波機、図 1.18、図 1.19) を使用し、模型縮尺は 1/50 とした。実験模型の海底地形は 1/30 とし、1/30 勾配上に壁体 (ケーソン) を有する堤頭部を設置した。捨石マウンド上に壁体を設置し、壁体周辺のマウンド上に被覆ブロックおよび根固めブロックを敷き詰めた。斜面の法勾配は 1:1.5 とした。実験模型形状を図 1.20 に示す。被覆ブロックは直方体形状の方塊型ブロックとし、断面実験で使用したブロックサイズ中 (比重 2.3, 質量 108g (現地 14t)) を使用した。

実験波形は正弦波 (長周期波・押し初動) とした。実験波形の例を図 1.21 に示す。周期は 25~33s (現地換算: 約 180~230s) 内の複数種類とした。実験内容としては断面実験と同様、「被覆ブロックの安定実験」と、「水位・流速の計測実験」の 2 種類を行った。被覆ブロックの安定実験については、正弦波の振幅を 2cm 刻みで段階的に引き上げ、被覆ブロックの移動箇所、個数を記録した。安定実験は各正弦波条件で 3 回程度行い、安定限界時の鉛直平均流速を求めた。水位・流速の計測実験については、被覆ブロックが移動しないよう固定し、安定実験と同様の手順で行った。計測位置は移動位置近傍の下流側稜線付近の 3 箇所、および上流側・下流側とした (図 1.22)。



図 1.18 大型造波水路

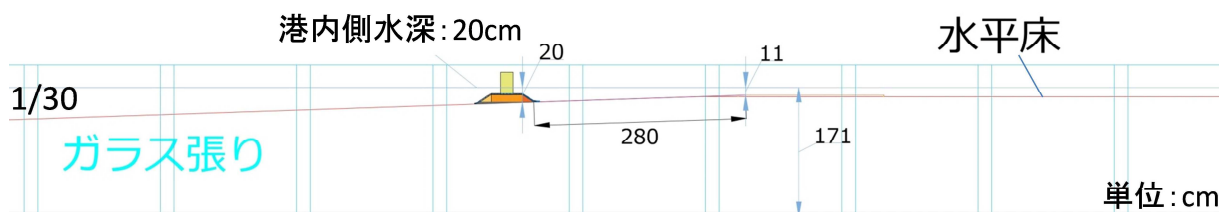


図 1.19 大型造波水路における模型設置方法



図 1. 20 実験模型形状

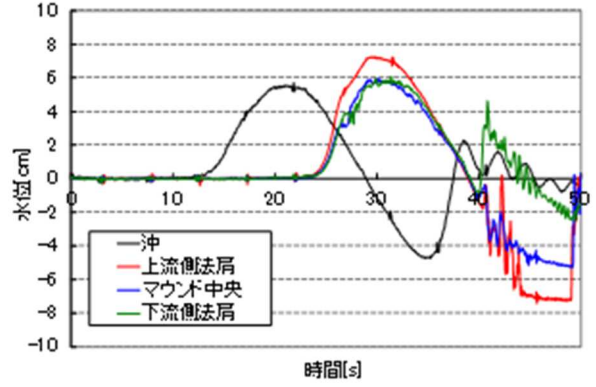


図 1. 21 実験波形例

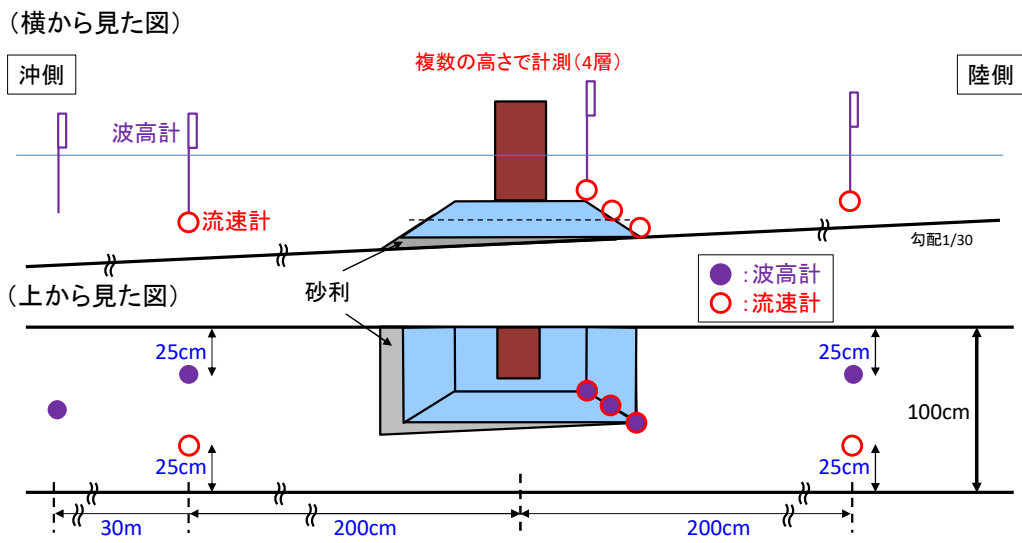


図 1. 22 計測位置概要

b) 実験結果

被覆ブロックの安定実験の撮影例を図 1. 23 に、安定実験の結果例を図 1. 24 示す。多くのケースで下流側の稜線部付近のブロックが最初に移動開始した。

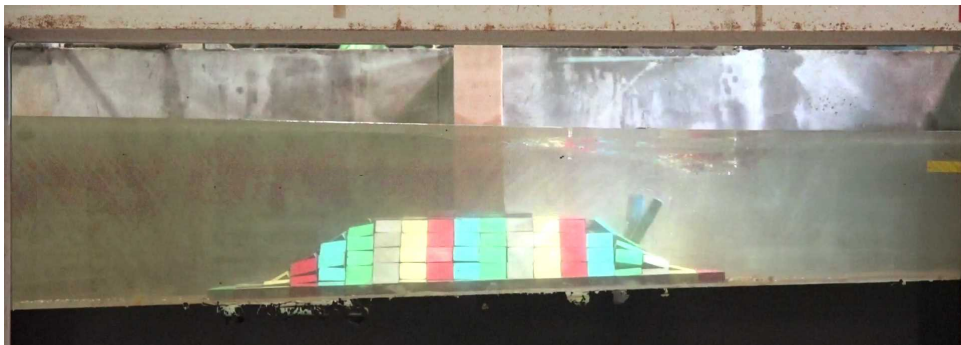


図 1. 23 被覆ブロックの移動状況例 (正弦波 : 周期 30s、振幅 74cm)

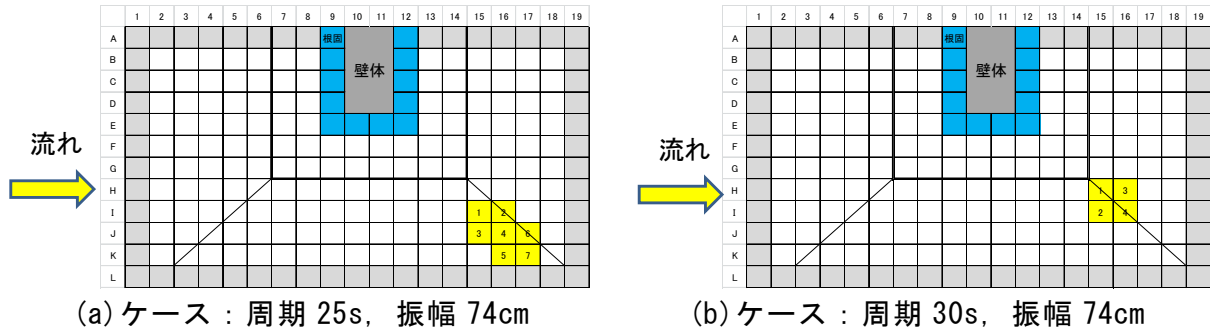


図 1. 24 安定実験結果例 (被覆ブロックの移動箇所)

鉛直平均流速の算出には、移動開始位置近傍の図 1.25 に示す下流側稜線の肩の位置での計測値 (3 点法による 3 点) を使用した。安定限界の鉛直平均流速の結果を表 1.2 に示す。

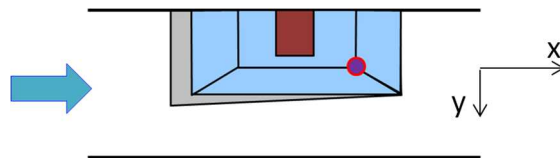


図 1. 25 鉛直平均流速の算出に使用した計測位置

表 1. 2 平面 (大型) 実験結果

周期 (s)	run No.	移動開始時 振幅 (cm)	安定限界 振幅 (cm)	安定限界 鉛直平均流速 合成値 (x成分, y成分) (m/s)	現地換算 安定限界 鉛直平均流速 合成値 (x成分, y成分) (m/s)
25	1	42	40	0.735 (x=0.735, y=0.001)	5.20 (x=5.20, y=0.01)
	2	44	42	0.774 (x=0.774, y=-0.026)	5.47 (x=5.47, y=-0.19)
	3	44	42	0.774 (x=0.774, y=-0.026)	5.47 (x=5.47, y=-0.19)
30	1	62	60	0.780 (x=0.778, y=-0.056)	5.52 (x=5.50, y=-0.39)
	2	62	60	0.780 (x=0.778, y=-0.056)	5.52 (x=5.50, y=-0.39)
	3	62	60	0.780 (x=0.778, y=-0.056)	5.52 (x=5.50, y=-0.39)
33	1	66	64	0.690 (x=0.686, y=-0.078)	4.88 (x=4.85, y=-0.55)
	2	66	64	0.690 (x=0.686, y=-0.078)	4.88 (x=4.85, y=-0.55)
	3	68	66	0.750 (x=0.747, y=-0.072)	5.30 (x=5.28, y=-0.51)

※縮尺 1/50

(2) 数値計算による検討

1) 再現性の精査

a) 既往検討の課題

平成 30 年度検討では、図 1. 26 に示すように、実験での水位変化及び流速の鉛直分布を概ね再現した。しかし、被災の発端となりやすいと考えられる下流側法肩部の底面近傍流速の再現性（図中黄色楕円）に課題が残った。さらに、下流側法肩部のブロックに作用する揚力について、図 1. 27 に示す。実験では、被災開始時の流量条件で、計測揚力が自重による圧力（浮力を除く。揚力と逆向きに作用）を上回っていたが、計算では、ブロックに作用する揚力が再現できないという課題があった。

再現計算結果 法勾配1:1.5(流量4.0m³/min)

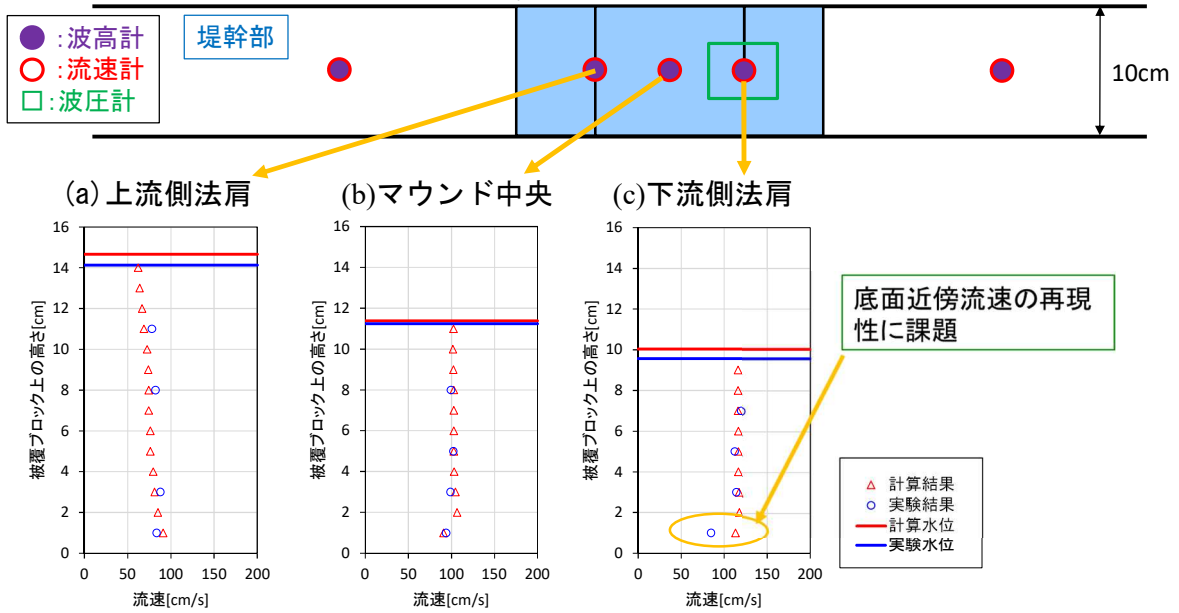


図 1. 26 既往検討結果（水位変化及び流速の鉛直分布）

法勾配 1 : 1.5 流量 3.6m³/min

法勾配 1 : 1.5 流量 4.4m³/min

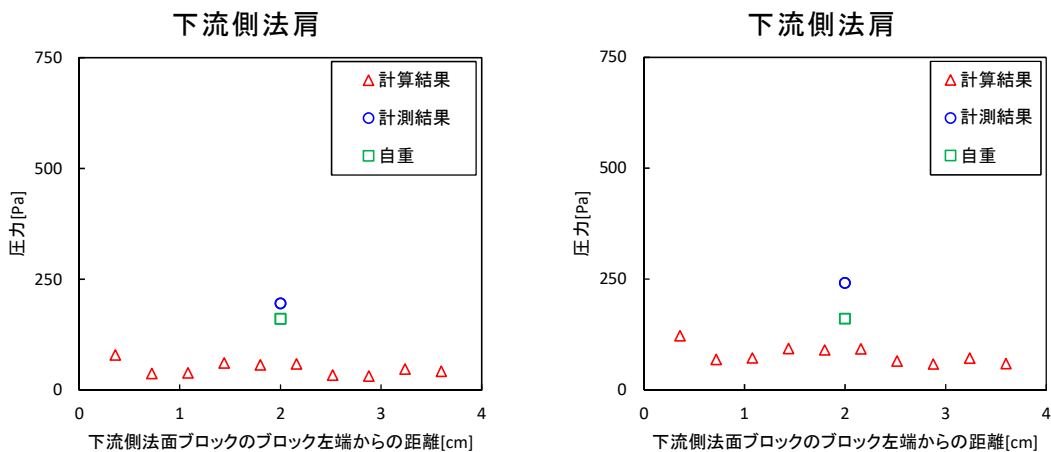


図 1. 27 既往検討結果（ブロックに作用する揚力）。ただし、揚力をブロック上下面での圧力差から浮力相当分を減じたものとして定義。

b) 検討方法

本検討では、底面近傍の流速分布の再現性向上のため、まず、より簡素な問題（開水路流）を対象とした既往実験¹の再現を目標とした。開水路流を対象とした検討の後、水理模型実験でのブロック周りの流れの再現計算を実施した。

開水路流計算では、下記①～③の条件について検証を行った。

- ①粗度の考慮
- ②乱流モデルの検討（RNG k- ϵ モデル（過年度実施）、k- ω SST モデルなど）
- ③格子間隔の検討

検証計算の模式図を図 1.28 に、検討ケース一覧を表 1.3 に示す。

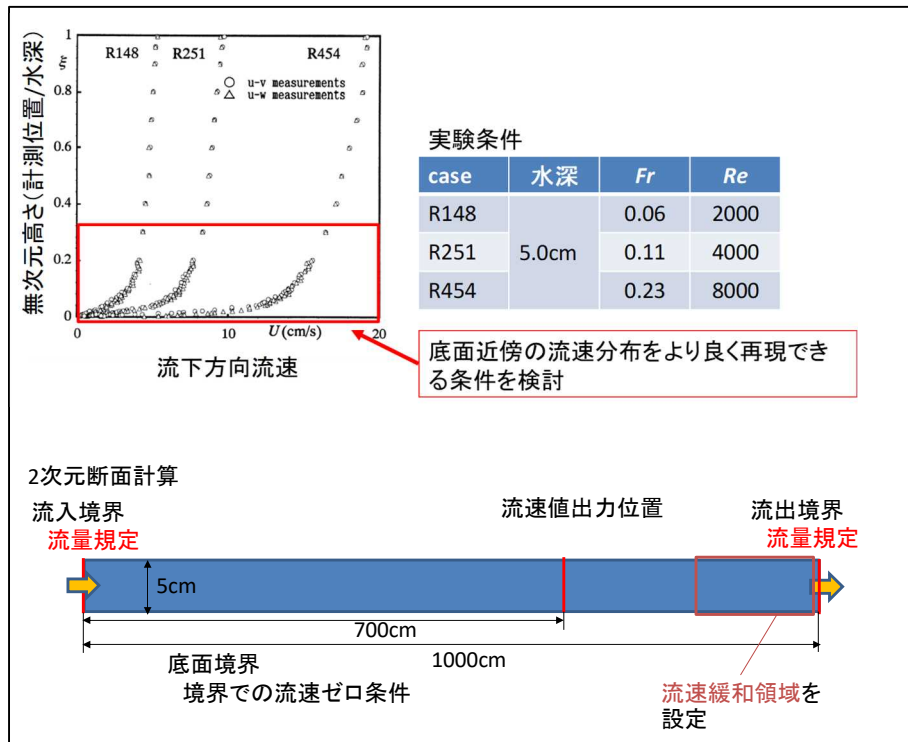


図 1. 28 開水路流を対象とした検証計算（既往実験¹の再現計算）

¹ 禰津家久・鬼塚幸樹・Dan NAOT：2成分LDAを2台用いた開水路流の3次元同時計測，水工学論文集，第43巻，1999。

表 1. 3 検証計算ケース一覧

検討ケース	①粗度	②乱流モデル	③格子間隔 (cm)
case01	考慮しない	RNG $k-\epsilon^2$	0.500
case02			0.250
case03			0.125
case04		$k-\omega$ SST ³⁴	0.500
case05			0.250
case06			0.125
case07	考慮する 粗度高さ Ks=0.001	RNG $k-\epsilon$	0.500
case08			0.250
case09			0.125
case10		$k-\omega$ SST	0.500
case11			0.250
case12			0.125
case13	考慮しない	低 Re 型低 Re 型 $k-\epsilon^5$	0.500
case14			0.250
case15			0.125

使用した乱流モデル 3 種類についての特徴を以下に記す。

- RNG $k-\epsilon$ モデル：壁面近傍の流速の大きな勾配を、関数（壁関数）を用いて取り扱う高 Re 数型の乱流モデルである。工学分野で一般に使われる標準 $k-\epsilon$ よりも、剥離を良好に予測可能とされる。既往検討（平成 30 年度）で使用した乱流モデル。
- $k-\omega$ SST モデル：壁面近傍は、剥離を良好に予測可能とされる wilcox $k-\omega$ モデル、壁面から離れた領域は $k-\epsilon$ モデルを用いる乱流モデルである。OpenFOAM に標準的に実装されている $k-\omega$ SST モデルは、壁面近傍の流速の大きな勾配を、関数（壁関数）を用いて取り扱う高 Re 数型の乱流モデルである。
- 低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデル：壁面近傍の流速の大きな勾配を、低 Re 数効果を表現する付加項を導入して方程式を解く乱流モデルである。壁面近傍の格子を密に設定する必要がある。

² V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, and C.G. Speziale. Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion technique. Physics of Fluids A Fluid Dynamics, 4(7), 1992.

³ Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, August 1994, pp. 1598-1605.

⁴ F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer, pages 625–632, Antalya, Turkey, 2003. Begell House.

⁵ Launder, B.E. and Sharma, B., Letters in Heat and Mass Transfer, 1, 131-138, 1974.

c) 検討結果

検証計算結果を図 1. 29 に示す。乱流モデルに RNG $k-\epsilon$ モデル及び $k-\omega$ SST モデル(以下、高 Re 数型モデルと記す) を用いた検討ケースでは、おおむねどのケースも対象既往実験の流速鉛直分布を再現できていた。さらに、高 Re 数型モデルを用いたケースでは、粗度・乱流モデルによる差は小さい一方で、格子間隔による差が大きい傾向がうかがえた。低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデルは、格子間隔が大きいと流速の鉛直分布を再現できないが、格子間隔が最も小さい 0.125cm のケースのみ、流速が海底近傍で小さくなるという特徴が、高 Re 数型モデルを用いた場合と同様の精度で再現できた。

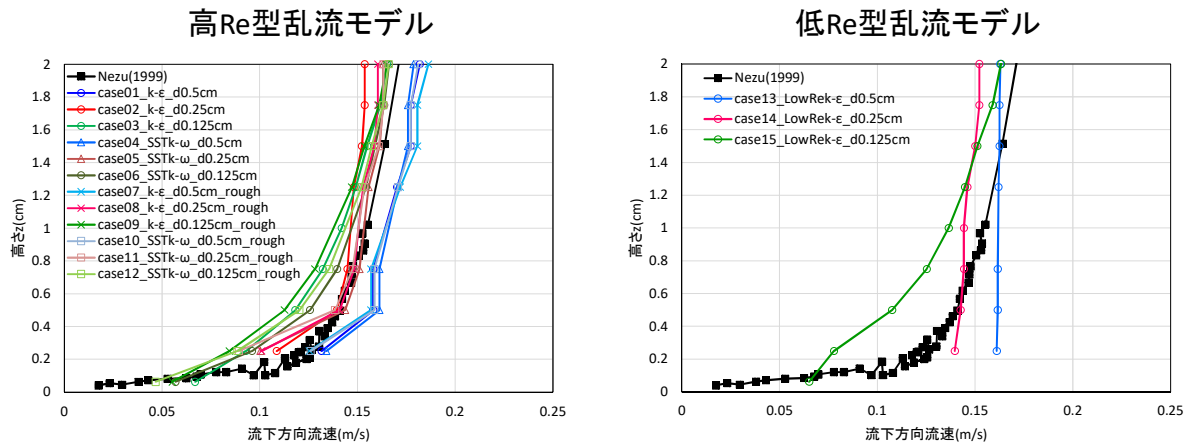


図 1. 29 検証計算結果

既往検討では、対象とするマウンド実験の圧力の再現性等について課題が残されていたが、図 1. 29 の結果に基づき、本検討は、高 Re 数型の別の乱流モデルに変更したり、粗度高さを変更したりしても、水平流速や圧力の計算結果は顕著に変化しないと推察した。そこで、続く被覆ブロック安定実験の再現計算への適用では、底面付近の解像度を可能な限り細かくするように留意しつつ、低 Re 数型乱流モデルを採用することとした。

d) 被覆ブロック安定実験の再現計算

低 Re 数型乱流モデルを用いて、被覆ブロック安定実験の再現計算を実施した。計算条件を表 1.4 に示し、再現計算ケース一覧を表 1.5 に示す。

表 1.4 被覆ブロック安定実験の再現計算条件

項目	設定条件	
使用モデル	OpenFOAM (3次元流体解析モデル)	
使用ソルバ	interFoam(VOF (volume of fluid) 体積割合に基づいた界面捕獲法による不混和流体の非圧縮性・等温 2 相流用非定常解析ソルバ)	
離散化方法	有限体積法	
縮尺	1/80 (実験と同一スケール)	
境界条件	流入境界	流量を設定 (流速と、流速を指定する高さを指定)
	水路の壁面境界	Slip
	構造物・底面境界	境界での流速ゼロ
	流出境界	自由流出境界
計算領域	水路長 : 700.0cm × 水路幅 : 40.0 cm	
計算格子間隔	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.25 \sim 2.0$ cm (ブロック周辺で最も細かく、空気相で最も粗い)	
計算時間、時間間隔	最大 60 秒 (30 秒程度で定常)、自動制御	
地形条件	一定水深 25.0 cm にマウンド(透水性、天端高:底面から+10.0 cm)を設置し、マウンド上に被覆ブロック (サイズ小 : 4.0 × 4.0 × 1.5cm) を設置	
透水モデル	Dupuit-Forchheimer 則により抵抗力をモデル化 空隙率 $\gamma = 0.46$ 、代表径 $d = 0.051$ 、材料係数 $\alpha_0 = 1500$ 、 $\beta_0 = 3.6$	
乱流モデル	低 Re 型標準 $k-\varepsilon$ モデル	

表 1.5 再現計算ケース一覧

検討ケース	ブロックサイズ	法勾配	再現対象ポンプ流量	初期水位	検討内容	
ケース 1	小 40×40×15 mm	1:1.5	4.0 m ³ /min	25 cm	流速の影響検討	
ケース 2			3.6 m ³ /min			
ケース 3			4.4 m ³ /min			
ケース 4		1:2.0	4.0 m ³ /min		法勾配の影響検討	
ケース 5		1:1.5		4.4 m ³ /min ^{※1}	30 cm	フルード数の影響検討
ケース 6				3.6 m ³ /min ^{※2}	20 cm	

※1 流入境界での流量を 4.4 m³/min 相当とし、下流側法肩部での鉛直平均流速がケース 1 (流量 4.0 m³/min) と同等になるよう、条件を設定

※2 流入境界での流量を 3.6 m³/min 相当とし、下流側法肩部での鉛直平均流速がケース 3 (流量 4.4 m³/min) と同等になるよう、条件を設定

図 1.30 に、実験結果（図中青線・青印）、本年度計算結果（図中赤線・赤印）及び平成 30 年度の計算結果（図中緑線・緑印）の水位変化及び水平流速の鉛直分布を示し、図 1.31 に流量や法勾配を変化させた他ケースの下流側法肩部での水平流速の鉛直分布再現結果を示す。図より、下流側法肩部での水平流速の鉛直分布の再現性が向上したことがうかがえる。

さらに、図 1.32 に、下流側法肩部での鉛直方向流速及び水平方向流速の鉛直分布を示す。図より、既往計算（図中緑線・緑印）は、実験結果（図中青線・青印）の鉛直方向流速を再現できていない一方で、本年度計算結果（図中赤線・赤印）は、実験結果を良好に再現していることがうかがえる。

図 1.33 に下流側法肩部周辺の流速（ベクトル）及び圧力分布（等値線図）を示す。図より、既往計算では法肩付近でほぼ水平な流れとなっているのに対し、本年度計算では法肩付近で鉛直下向きの流れが強化されている。法肩付近での流れが強化されることにより、ブロック上面の圧力が低下し、揚力が強化されているものと考えられる。

表 1.6 に、マウンド中央部から下流側法肩部にかけての水面勾配を整理した。表より、既往計算と比較して、本年度計算においてブロック周りの局所的な流れのみならず、水面勾配についても再現性が良好であることが確認できる。

さらに、流量・勾配の異なる 4 ケースについて、下流側法肩部法面側ブロックの上下面に作用する圧力を、図 1.34 に整理した。図より、ブロック左端の上面圧力が静水圧に比べ大きく低下することで、ブロック左端で揚力が大きくなることが推察される。

図 1.35 に、既往計算結果（左図）及び本年度計算結果（右図）の、下流側法肩部周辺の圧力分布を示す。ここでは、全圧力から静水圧相当の圧力を差し引いた値を示している。本年度計算結果では、法肩部周辺で圧力が静水圧に比べ大きく低下していることがうかがえる。その範囲は局所的であり、流体力が局所的にブロックに作用することを支持する結果であった。

これらの圧力の計算結果を用いて、単位面積当たりの揚力（法線方向流体力）を計算し、実験結果と比較した（図 1.36・図 1.37）。本年度の手法で、既往検討の課題であった圧力ならびに揚力の再現性が向上したことがうかがえる。

図 1.38 及び図 1.39 は、法勾配 1:1.5 及び 1:2.0 の実験ケースの上面圧力、下面圧力及び揚力の流量毎の変化を示したものである。図には、計算結果から計算された揚力を併せて示している。図より、流量が大きい条件ほど圧力が低下し、下面より上面、水平部より法面部の圧力低下が大きいことがうかがえる。実験より、ブロックが移動する流量条件は 3.8m³/min 前後であり、法面部の揚力がブロック自重（図中緑線）を上回る流量条件とほぼ一致した。計算から得られた揚力も実験の計測揚力と一致しており、ブロックの移動開始と揚力に何らかの関係があることが示唆される。

このように、主要な被災発生箇所である下流側法肩部の流速鉛直分布及び圧力の再現性が向上したことを確認できたため、引き続き本調査において、被災メカニズムの検討に数値計算を用いることとした。

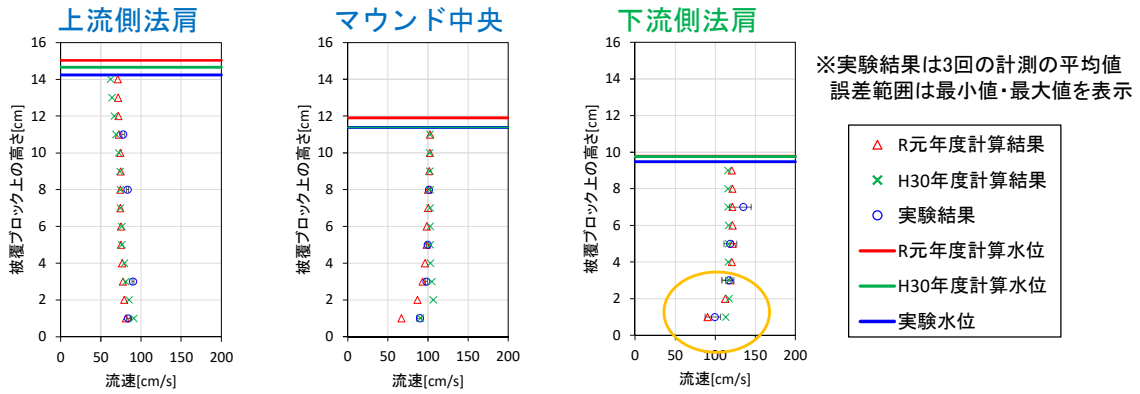


図 1. 30 水位変化及び流速の鉛直分布（ケース 1：流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$ ・法勾配 1:1.5）

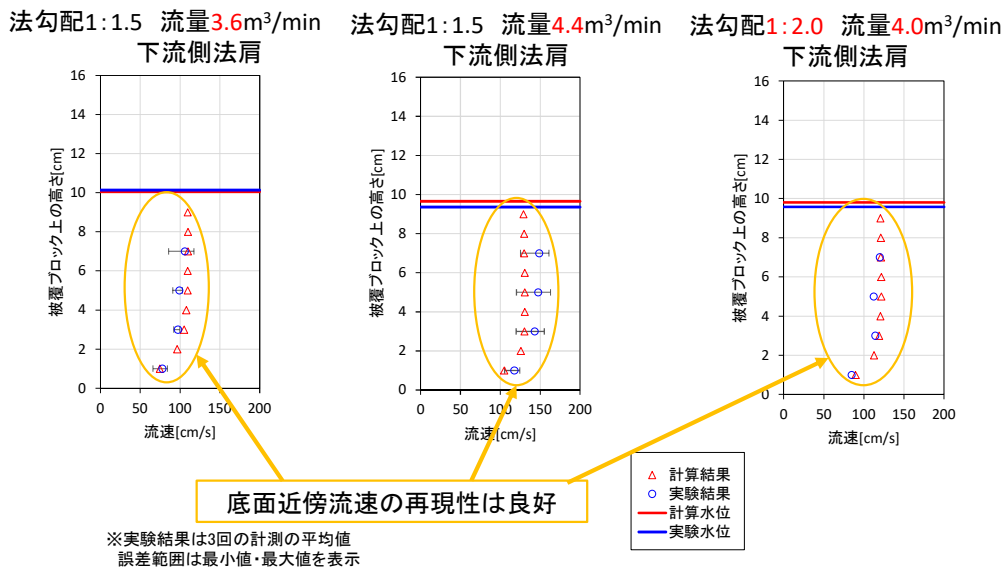


図 1. 31 下流側法肩部における水位変化及び流速の鉛直分布（その他のケース）

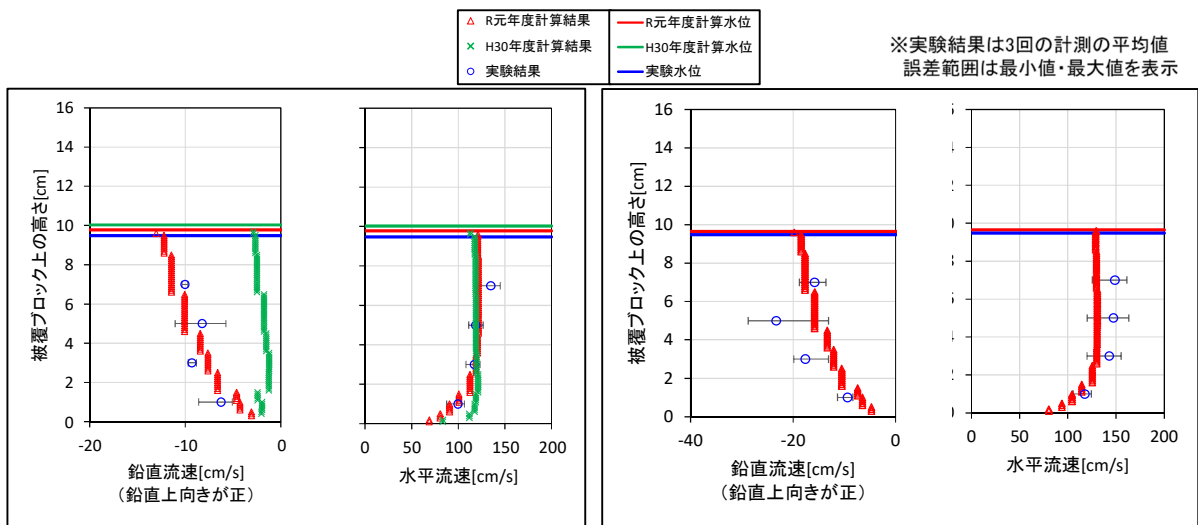
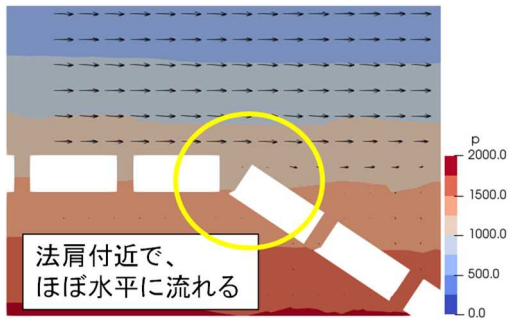


図 1. 32 下流側法肩部における鉛直流速及び水平流速の鉛直分布（左図：ケース 1：流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$ ・法勾配 1:1.5、右図：ケース 3：流量 $4.4\text{m}^3/\text{min}$ ・法勾配 1:1.5）

H30年度: RNG $k-\epsilon$ モデル(高Re数型)計算



R元年度: 低Re数型標準 $k-\epsilon$ モデル計算

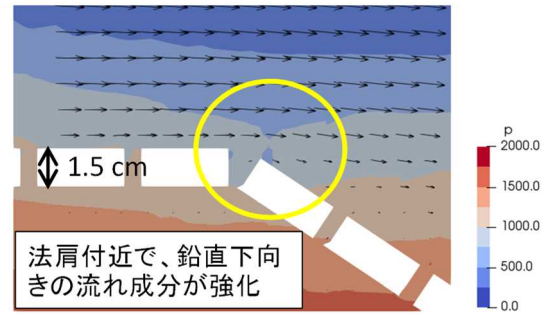


図 1. 33 下流側法肩部周辺の流速(ベクトル)及び圧力分布(等値線図)
(左図: H30年度計算結果・右図: 本年度計算結果)

表 1. 6 マウンド中央から下流側法肩の水面勾配

	マウンド中央	下流側法肩	水面勾配
H30年度計算水位	0.228 m	0.213 m	0.07
R元年度計算水位	0.234 m	0.213 m	0.10
実験水位	0.229 m	0.210 m	0.09

ブロック上下面の波圧分布

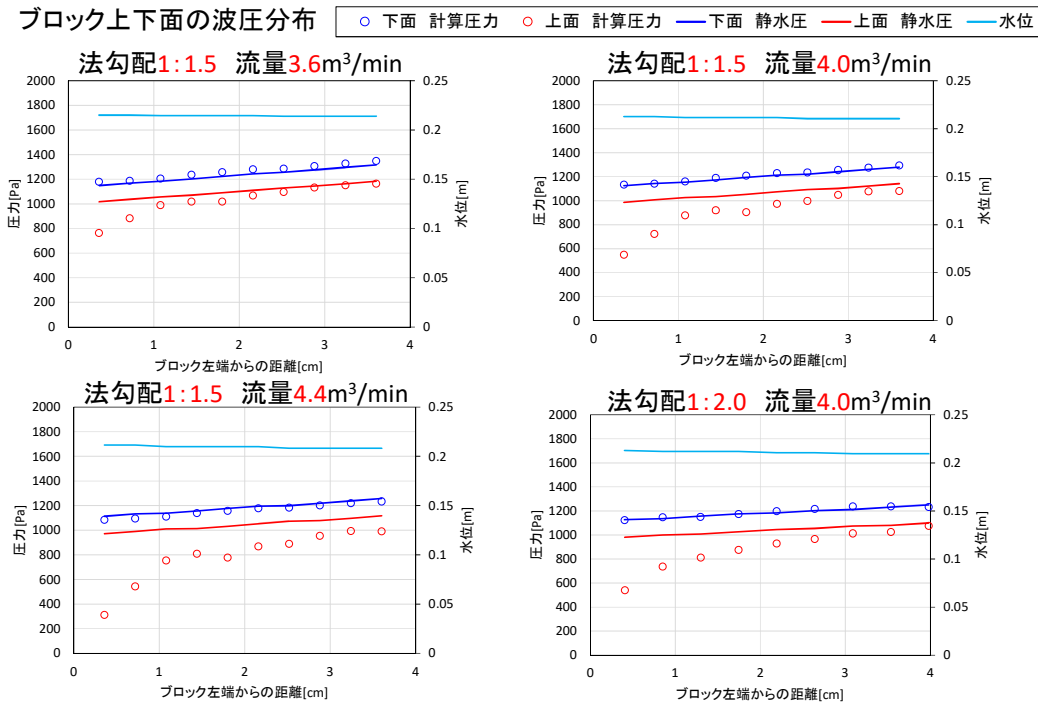


図 1. 34 ブロック上下面に作用する圧力

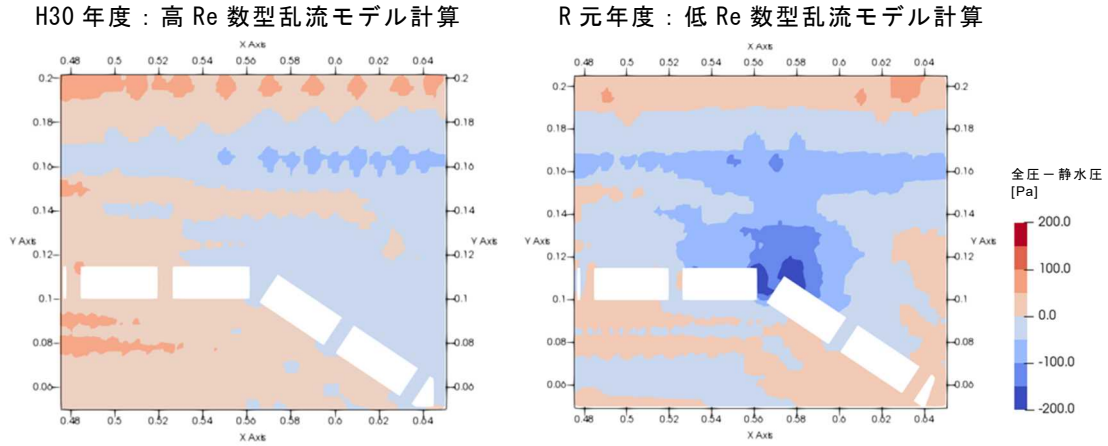


図 1. 35 下流側法肩部周辺の圧力分布（全圧力から静水圧相当分を引いた値を表示）
（左図：H30 年度計算結果・右図：本年度計算結果）

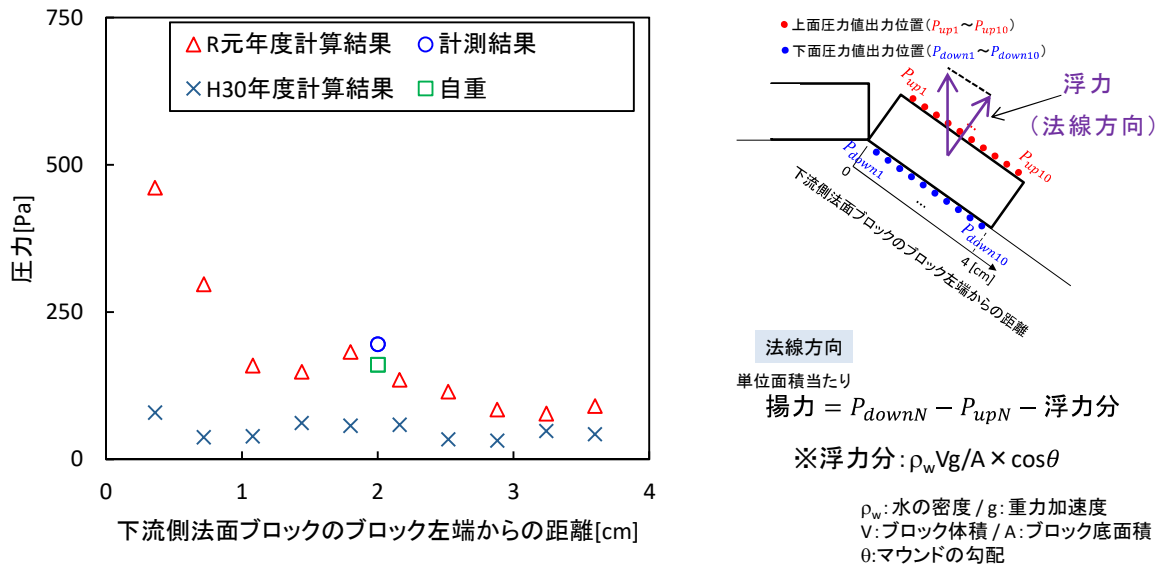


図 1. 36 実験結果と計算結果の圧力の比較

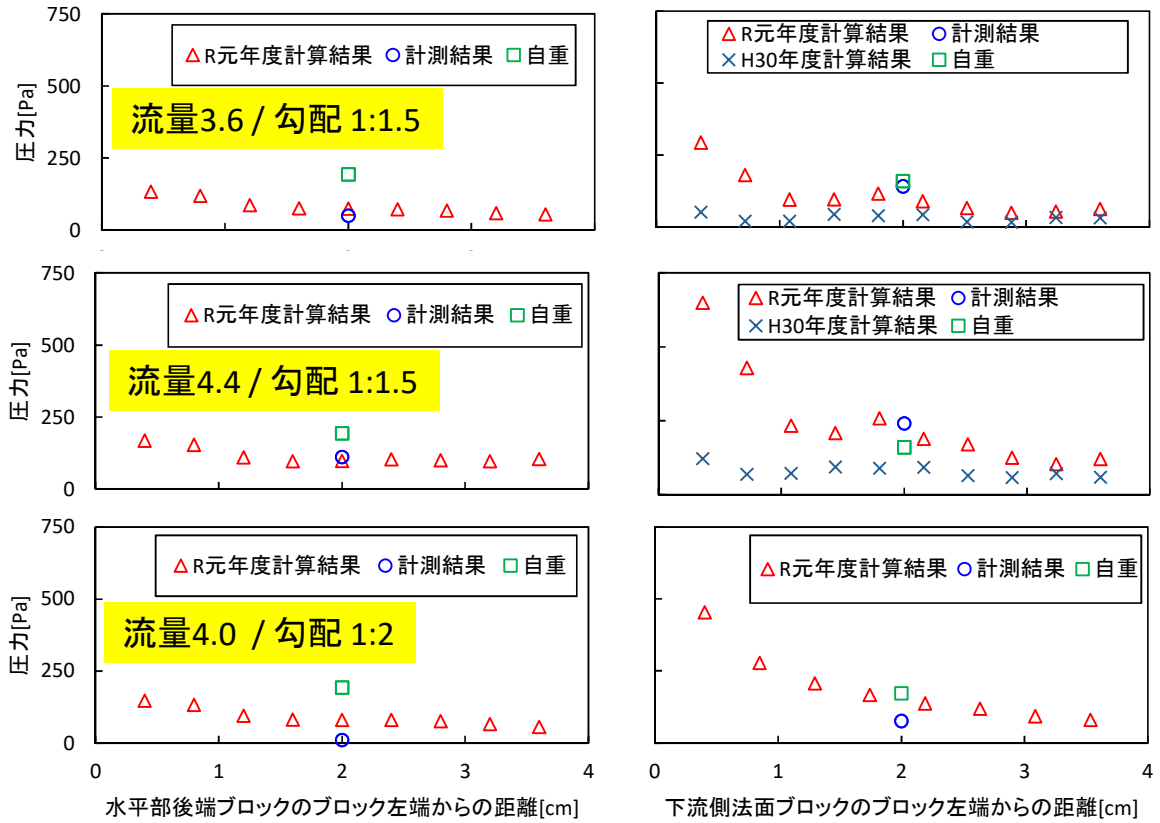


図 1. 37 実験結果と計算結果の圧力の比較（その他のケース）

・ケース：堤幹部、法勾配1:1.5、方塊型：小・比重2.3

$$p_u = (p_1 - p_2) - p_b$$

p_u :揚力, p_1 :下面圧力, p_2 :上面圧力, p_b :浮力(単位面積当たり)

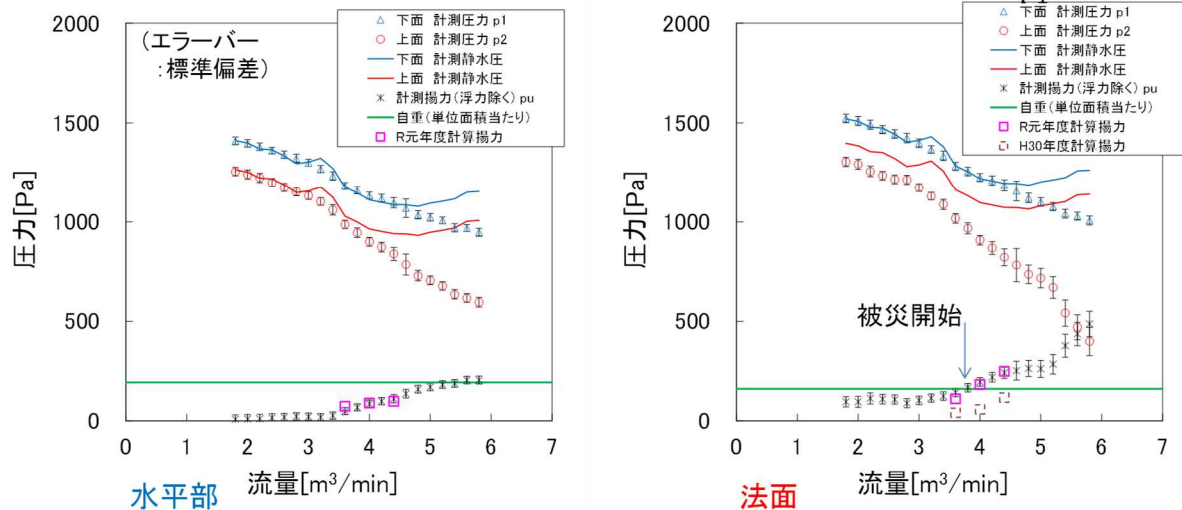


図 1. 38 流量毎の揚力の比較（法勾配 1 : 1.5）

・ケース：堤幹部、法勾配1:2、方塊型：小・比重2.3

$$p_u = (p_1 - p_2) - p_b$$

p_u :揚力, p_1 :下面圧力, p_2 :上面圧力, p_b :浮力(単位面積当たり)

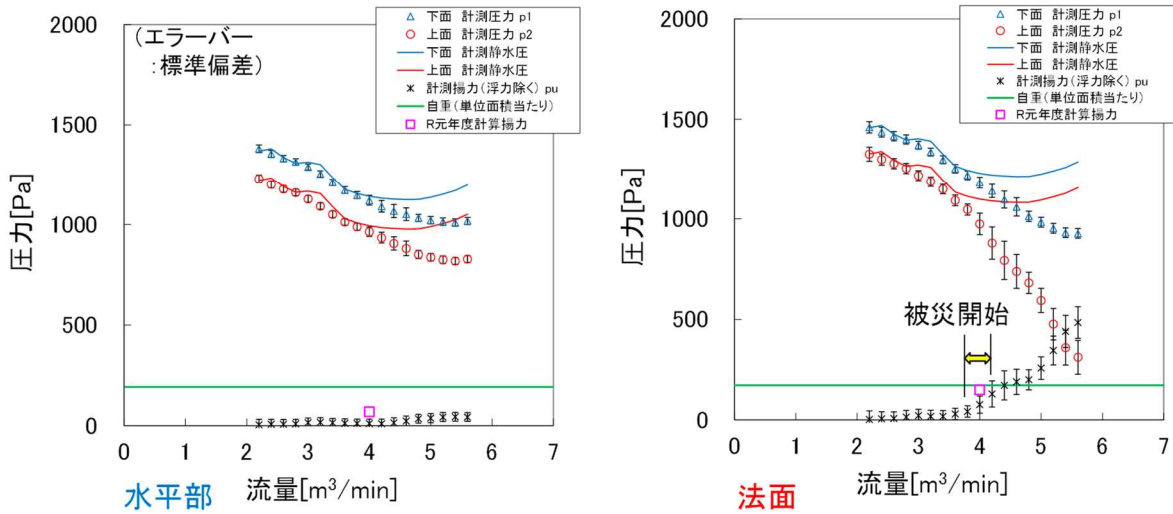
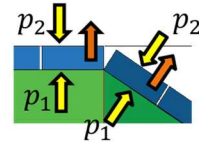


図 1. 39 流量毎の揚力の比較 (法勾配 1 : 2.0)

2) 流体力の算定

数値計算での流速場・圧力場の再現性の向上が確認できたため、数値計算結果を用いて、実験では計測が困難な被覆ブロックに作用する流体力（揚力や抗力、モーメント等）を算定し、ブロックの被災に関わる流動特性・流体力特性等について検討した。流体力は、数値計算結果から得られるブロック周囲の圧力の合力として求めた。

a) 揚力の算定

これまでに述べているように、本検討では、ブロックの上下面に作用する圧力の合力から浮力分を減じて、単位面積当たりの揚力（法線方向）として定義した。

図 1.40 及び図 1.41 に、水平部前端、水平部後端、下流側斜面上端及び下流側斜面上端から 2 番目のブロックに作用する揚力を示す。図より、下流側斜面上端及び水平部前端のブロックに揚力が局所的に作用することがうかがえる。上記の箇所は、実験でブロックが被災する割合が高いことから、ブロックの移動開始と揚力に関係があることを支持する結果であった。

ケース 1) 法勾配 1 : 1.5、流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$
 及びケース 3) 法勾配 1 : 1.5、流量 $4.4\text{m}^3/\text{min}$

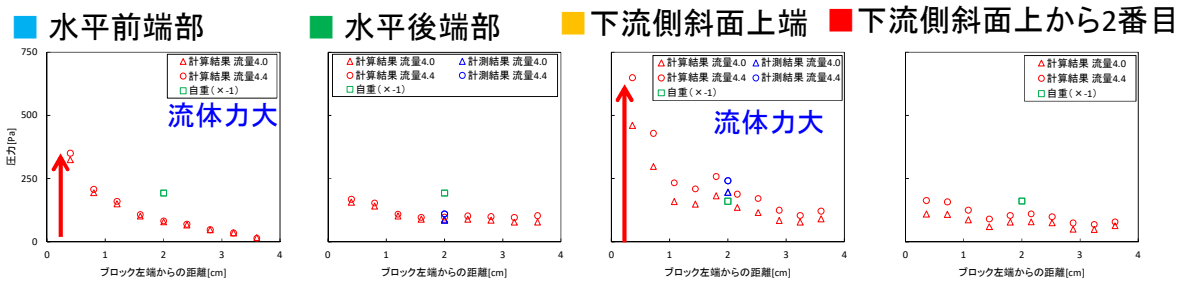


図 1. 40 各ブロック位置での揚力の比較 (ケース 1 及びケース 3)

ケース 4) 法勾配 1 : 2.0、流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$

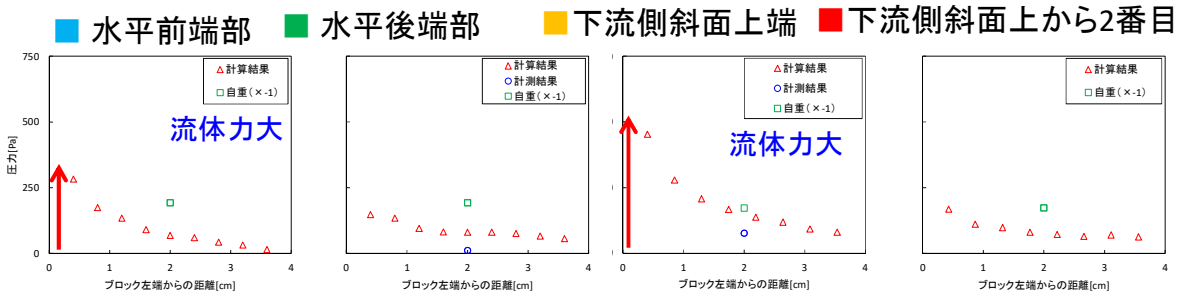


図 1. 41 各ブロック位置での揚力の比較 (ケース 4)

b) 抗力の算定

本検討では、ブロックの上流・下流側の側面に作用する圧力の合力に浮力分を加えた力を、単位面積当たりの抗力と定義した。この時、流下方向を正とした。流量・勾配の異なる 4 ケースについて、下流側法肩部法面側ブロックの上流・下流側面に作用する圧力を、図 1. 42 に整理した。

図 1. 43 に抗力算定の考え方を示した模式図を、図 1. 44 及び図 1. 45 にブロックに作用する抗力を整理している。なお、図中での μ は最大静止摩擦係数であり、本稿では $\mu = 0.7$ と仮定した。抗力も、揚力と同様局所的に分布し、ブロックが回転しながら移動することに流体力が寄与することが示唆された。

作用流体力の算定
ブロック側面の波圧分布

○ 上流側面 計算圧力 ○ 下流側面 計算圧力 — 上流側面 静水圧 — 下流側面 静水圧

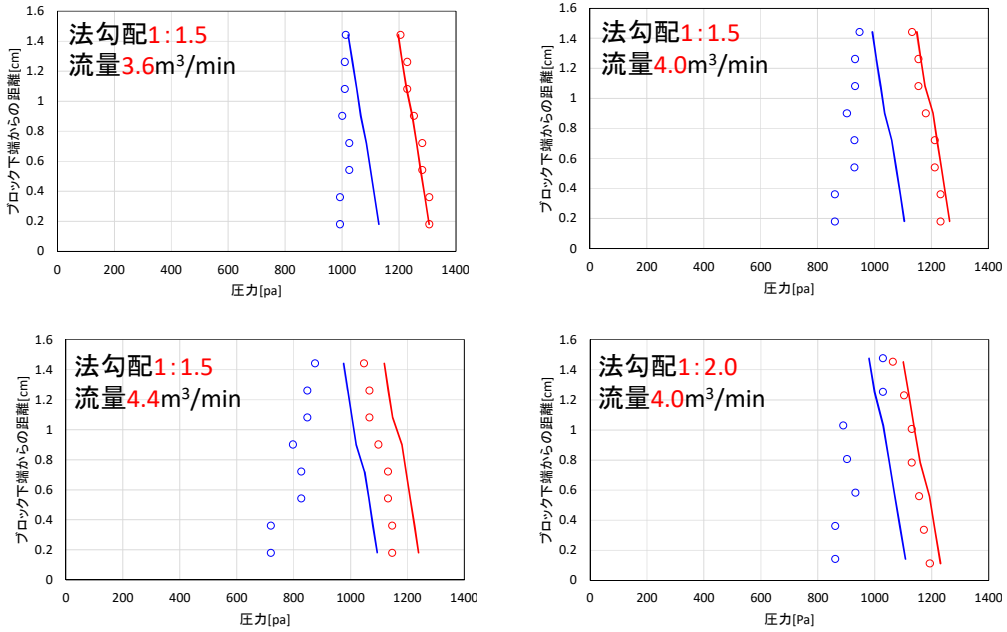


図 1. 42 ブロック上流・下流側面に作用する圧力

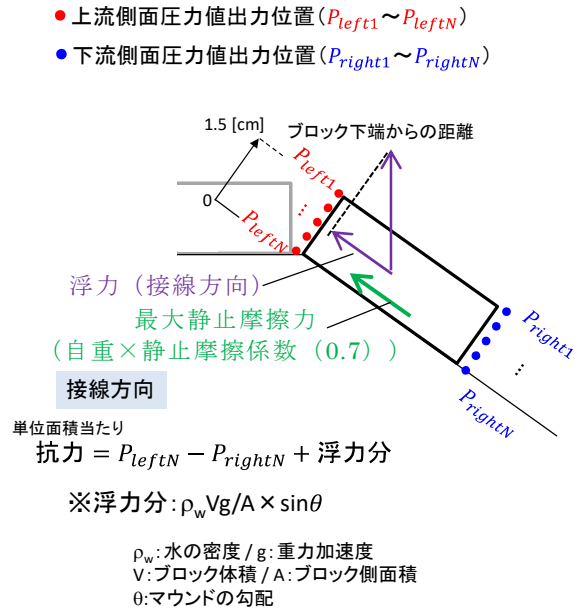
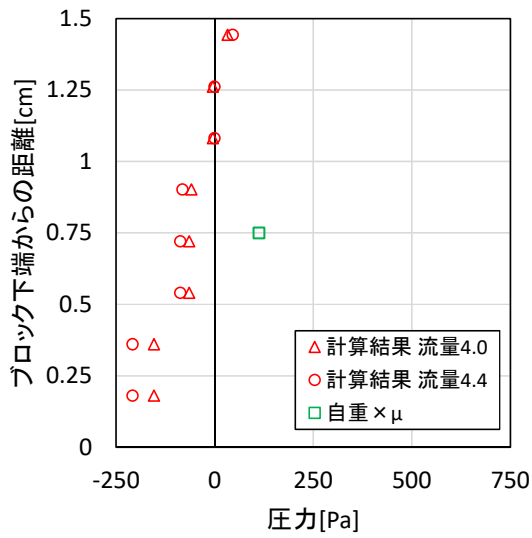


図 1. 43 抗力算定の模式図

ケース 1) 法勾配 1 : 1.5、流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$
 及びケース 3) 法勾配 1 : 1.5、流量 $4.4\text{m}^3/\text{min}$



■ 水平前端部 ■ 水平後端部 ■ 下流側斜面上端 ■ 下流側斜面上から2番目

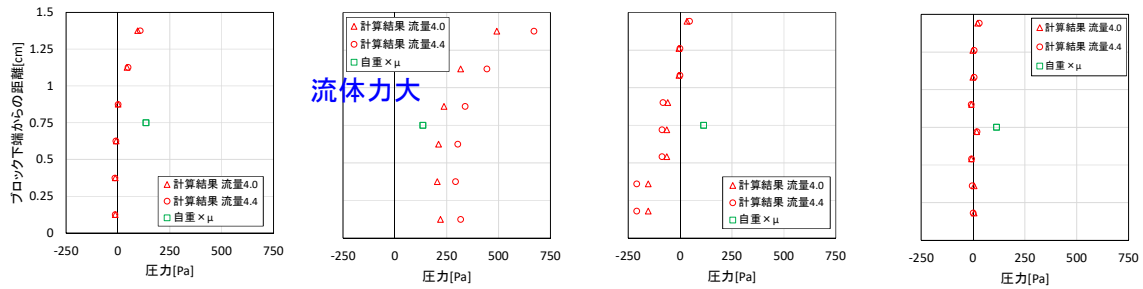


図 1. 44 各ブロック位置での抗力の比較 (ケース 1 及びケース 3)

ケース 4) 法勾配 1 : 2.0、流量 $4.0\text{m}^3/\text{min}$



■ 水平前端部 ■ 水平後端部 ■ 下流側斜面上端 ■ 下流側斜面上から2番目

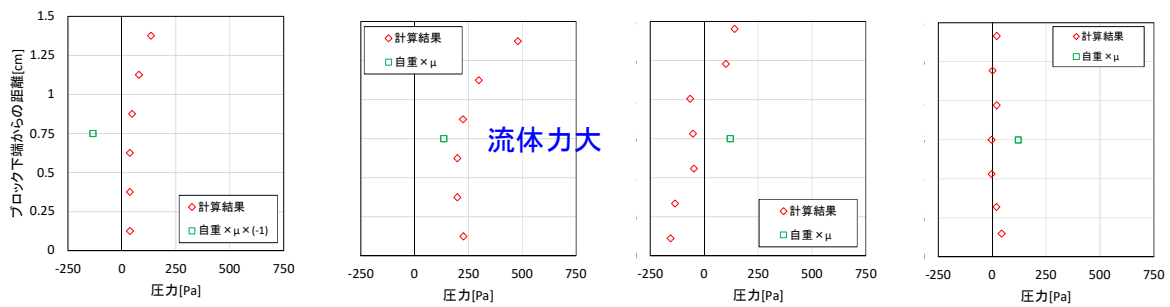


図 1. 45 各ブロック位置での抗力の比較 (ケース 4)

3) 水面形状（フルード数）がブロックの安定性へ与える影響の検討（実験補完計算）

水面形状がブロックの安定性へ与える影響を検討するため、鉛直平均流速が同等で、かつ水位が異なる条件での計算を行った（表 1.5 中、ケース 5 及びケース 6）。条件設定の考え方を下記に記す。

- ケース 5：流入境界での流量を 4.4 m³/min 相当とし、下流側法肩部での鉛直平均流速がケース 1（流量 4.0 m³/min）と同等になるよう、初期水位を 30cm（ケース 1 の初期水位 + 5 cm）に設定
- ケース 6：流入境界での流量を 3.6 m³/min 相当とし、下流側法肩部での鉛直平均流速がケース 3（流量 4.4 m³/min）と同等になるよう、初期水位を 20cm（ケース 3 の初期水位 - 5 cm）に設定

図 1. 46 に、ケース 5 及びケース 1 での水平流速の鉛直分布及びブロックに作用する揚力分布を示し、図 1. 47 に、ケース 6 及びケース 3 での水平流速の鉛直分布及びブロックに作用する揚力分布を示す。

図 1. 46 及び図 1. 47 より、鉛直平均流速が同等で水位が高い場合、揚力が小さくなることがうかがえる。このことから、水位（フルード数）が、ブロックに作用する流体力へ影響することが推察され、津波等の強い流れに対する安定質量算定式の高精度化の上での検討課題となりうると考えられる。

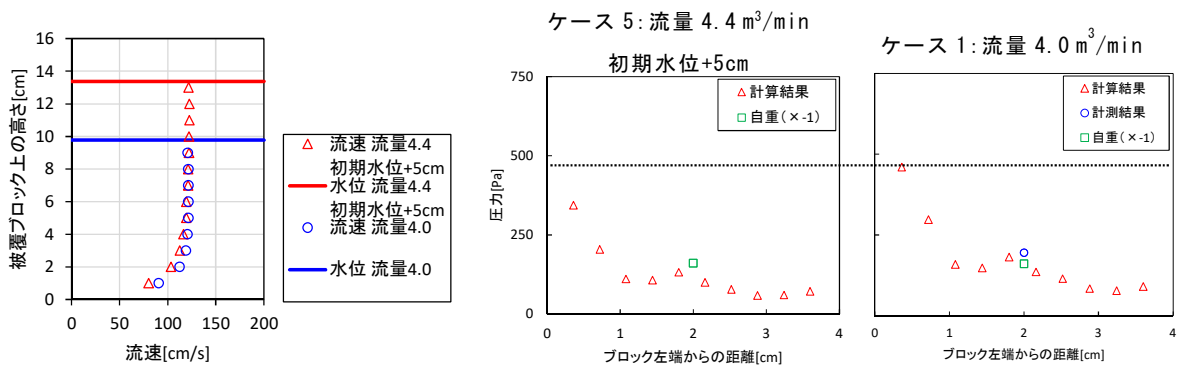


図 1. 46 ケース 1 及びケース 5 の水平流速の鉛直分布（左図）及び揚力分布（右図）

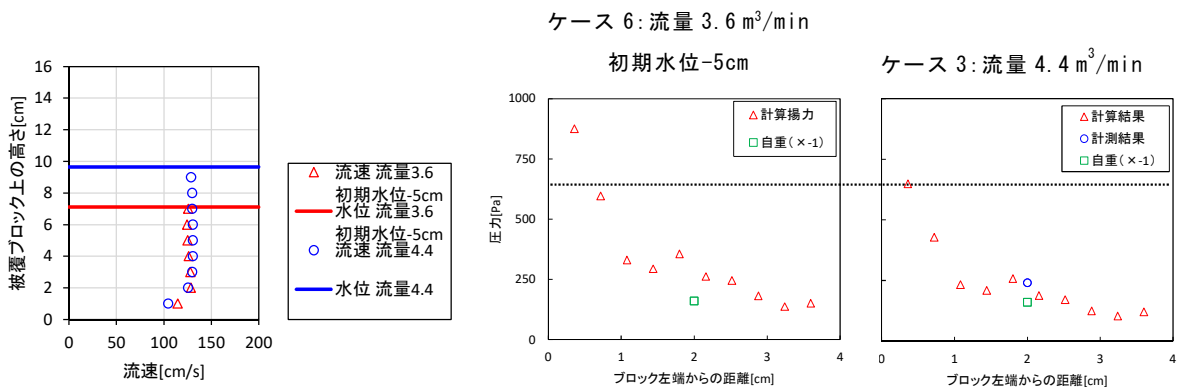


図 1. 47 ケース 3 及びケース 6 の水平流速の鉛直分布（左図）及び揚力分布（右図）

4) 被災メカニズムの検討

ブロックの被災に寄与する力を検討するため、数値計算から得られた圧力分布から、揚力、抗力、ブロック周りの回転モーメントを算定し、それぞれの力のつり合いから、被災メカニズムを検討した。ブロック周りの回転モーメントは、次のとおり定義した：

- 抗力によるモーメント(1)の定義：
 (回転軸から法線方向の距離) × 作用点における F_x 値 (流下方向を正)
 × (抗力定義間隔) の和
- 揚力によるモーメント(2)の定義：
 (回転軸から接線方向の距離) × 作用点における F_y 値 (上方向を正)
 × (揚力定義間隔) の和
- 自重の斜面接線方向成分によるモーメント(3)の定義：
 (回転軸から法線方向の距離) × 作用点における接線方向の自重 (浮力分除く)
- 自重の斜面法線方向成分によるモーメント(4)の定義：
 (回転軸から接線方向の距離) × 作用点における法線方向の自重 (浮力分除く)

図 1. 48 にブロックの安定に寄与する力の模式図を、表 1. 7 にそれぞれの力のつり合いによる安定性の判定を、図 1. 49 にそれぞれの力のつり合いの模式図を示す。この時、抗力(斜面接線方向の力)のつり合いには、抗力、自重の斜面接線方向成分及び最大静止摩擦力を考慮している。

表 1. 7 より、揚力、抗力、回転モーメントのそれぞれがブロックの安定性に寄与しており、これらが複合的に作用することでブロックが被災することが示唆された。

図 1. 50 に、底面近傍流速と流体力の関係を示す。ここでは、流速の 2 乗との関係を図示している。図より、揚力(左図)及び回転モーメント(右図)は流速の 2 乗と正の相関関係にあり、抗力(中央図)は流速の 2 乗と負の相関関係にあることがうかがえる。このことから、流速の増大に伴ってブロックに作用する流体力が大きくなり、ブロックが不安定化することが推察される。

回転に対するモーメントのつり合い式

$$\boxed{\text{抗力によるモーメント(1)}} + \boxed{\text{揚力によるモーメント(2)}} + \boxed{\text{自重の斜面接線方向成分によるモーメント(3)}} \rightleftharpoons \boxed{\text{自重の法線方向成分による抵抗モーメント(4)}}$$

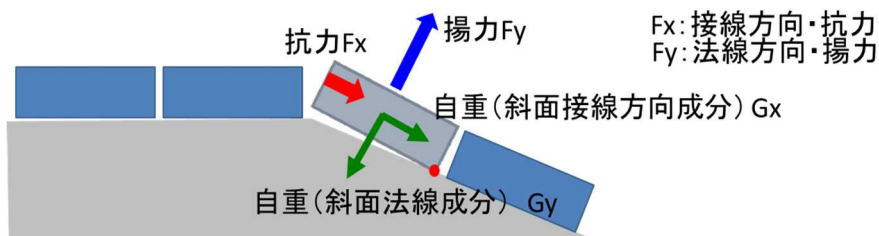


図 1. 48 ブロックの安定に寄与する力の模式図

表 1. 7 揚力、抗力及び回転モーメントの、力のつり合いによる安定性の判定

実験 ケース	揚力			抗力				モーメント 回転軸：下流側下端			モーメント 回転軸：下流側中央		
	揚力 (N)	法線方向 自重 (N)	判定 (揚力) (N)	抗力 (N)	接線方向 自重 (N)	最大静 止摩擦 力(N)	判定 (抗力) (N)	前頁 1+2+3 (N・m)	前頁 4 (N・m)	判定 (モー メント) (N・m)	前頁 1+2+3 (N・m)	前頁 4 (N・m)	判定 (モー メント) (N・m)
勾配1.5 流量3.6	0.177	0.256	安定	-0.057	0.171	-0.055	安定	0.0057	0.0051	不安定	0.0045	0.0051	安定
勾配1.5 流量4.0	0.280	0.256	不安定	-0.095	0.171	0	不安定	0.0084	0.0051	不安定	0.0071	0.0051	不安定
勾配1.5 流量4.4	0.398	0.256	不安定	-0.126	0.171	0	不安定	0.0114	0.0051	不安定	0.0101	0.0051	不安定
勾配2.0 流量4.0	0.307	0.276	不安定	-0.049	0.138	0	不安定	0.0091	0.0055	不安定	0.0079	0.0055	不安定
勾配1.5 流量4.4 水位+5cm	0.203	0.256	安定	-0.071	0.171	-0.037	安定	0.0064	0.0051	不安定	0.00512	0.00513	安定
勾配1.5 流量3.6 水位-5cm	0.549	0.256	不安定	-0.097	0.171	0	不安定	0.0154	0.0051	不安定	0.0141	0.0051	不安定

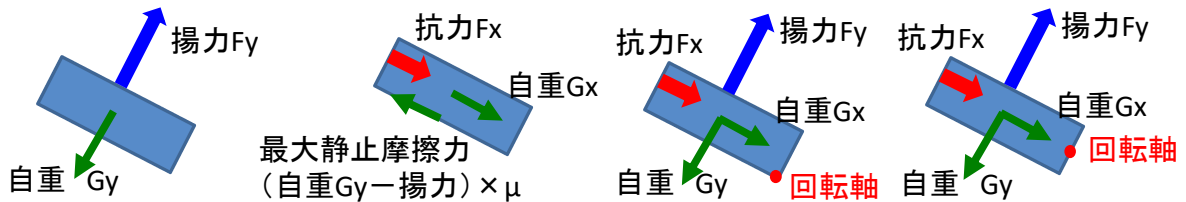


図 1. 49 揚力、抗力、モーメントのつり合いの模式図

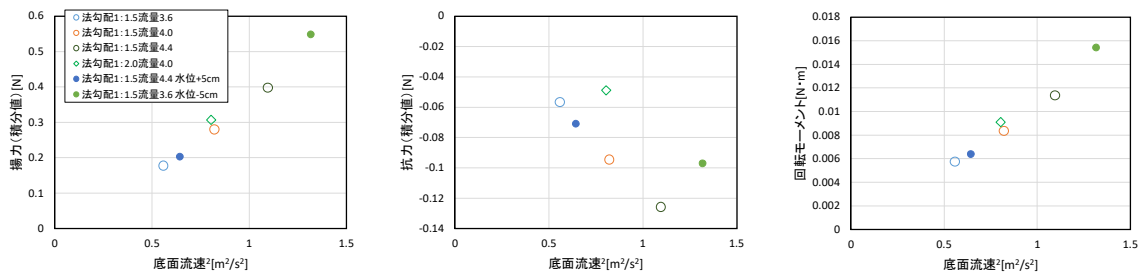


図 1. 50 底面流速と流体力の関係（左：揚力、中央：抗力、右：回転モーメント）

(3) 安定質量算定式の検討

断面実験（2次元条件）の結果について、被覆ブロック質量と安定限界流速との関係に着目して整理を行い、イスバッシュ式の適用性の検証や、その他の算定式との比較検討を行った。

イスバッシュ式については「平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方」に示されている CERC の式（1977）のほか、Isbash が原論文で示した式（1932）とも比較検討を行った。以下に両式を示すが、Isbash の原論文による式では傾斜角 θ の項が $\cos\theta$ であり、この項のみ CERC 式と異なる。イスバッシュ定数は CERC 式では y 、Isbash 原論文の式では Y と表記し区別する。

CERC の式（1977）：

$$M = \frac{\pi\rho_r U^6}{48g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos\theta - \sin\theta)^3} \quad (1)$$

Isbash 原論文の式（1932）：

$$M = \frac{\pi\rho_r U^6}{48g^3 Y^6 (S_r - 1)^3 (\cos\theta)^3} \quad (2)$$

ここで、 M は被覆ブロック質量、 ρ_r は被覆ブロックの密度、 U は流速、 y はイスバッシュの定数（参考値 1.08）、 S_r は被覆ブロックの水に対する比重、 θ は傾斜角である。

イスバッシュ式に用いる流速 U としては、鉛直平均流速を用いた。通常の耐津波設計においてはシミュレーションにより算定される流速は鉛直平均流速であるため、設計時の使用しやすさを考慮すると鉛直平均流速の使用が望ましいと考えた。実験による鉛直平均流速は、流速鉛直分布を積分し水深で除して算出した。

また傾斜角 θ については、ブロックの設置角度を用いて整理した。多くのケースで上流側法肩（水平部）と下流側法肩（法面）の 2 箇所での移動が確認されているが、上流側法肩については天端上流端のブロックを対象としたため $\theta = 0^\circ$ での結果、下流側法肩については法面を対象としたため斜面勾配での結果として、整理を行った。

堤幹部における方塊型ブロックの実験結果について、安定限界時の鉛直平均流速とイスバッシュ式の比重の項を加味した質量 $M(S_r - 1)^3/\rho_r$ の関係を図 1.51 に示す。 $y=Y=1.08$ とした CERC 式（黒線）と Isbash 原著の式（青破線）の関係をあわせて示す。平成 30 年度の結果に示したように、被覆ブロックの質量を同形状で比重を変化させることで増加させた場合、流速と質量の関係は 6 乗に近くなっているが、法勾配 1:1.5 の条件下では、実験結果は、CERC 式による算定値はよりはるかに小さく、Isbash 原著の式と近い傾向となり、一方、緩勾配（1:2, 1:3）の条件となるにつれ、CERC 式による値に近づいた。

本年度実験から得られた結果として、ブロックの質量を形状を大きくすることで増加させた場合における流速と質量の関係は法勾配 1:1.5 の条件下では、6 乗より小さい様子が伺えた。Isbash 原著の式と比較すると、形状が大きくなるほど実験結果が算定値から乖離した。すなわち、形状が大きくなるほどイスバッシュ数が大きくなり、同一のイスバッシュ数を適用することが難しいと考えられる。また、被覆ブロックの厚さや縦横比を変更したケースも併せてプロットしているが、安定限界時の流速に顕著な差は見られなかった。また、緩勾配（1:2, 1:3）の条件では、ブロックの質量を形状を大きくすることで増加させた場合における流速と質量の関係が Isbash 原著の式に近い傾向となった。

傾斜角とイスバッシュ数の関係を図 1.52 に示す。傾斜角 $\theta = 0^\circ$ は上流側法肩のブロック移動結果を示している。CERC 式によるイスバッシュ数 y は、傾斜角が大きくなる

ほど増大する傾向であるが、Isbash 原著によるイスバッシュ数 Y は、傾斜角による変化は比較的小さくなっている。この結果から、傾斜角による効果は Isbаш 原著の式 ($\cos\theta$ を使用) の方が適切に反映されていることが推察される。

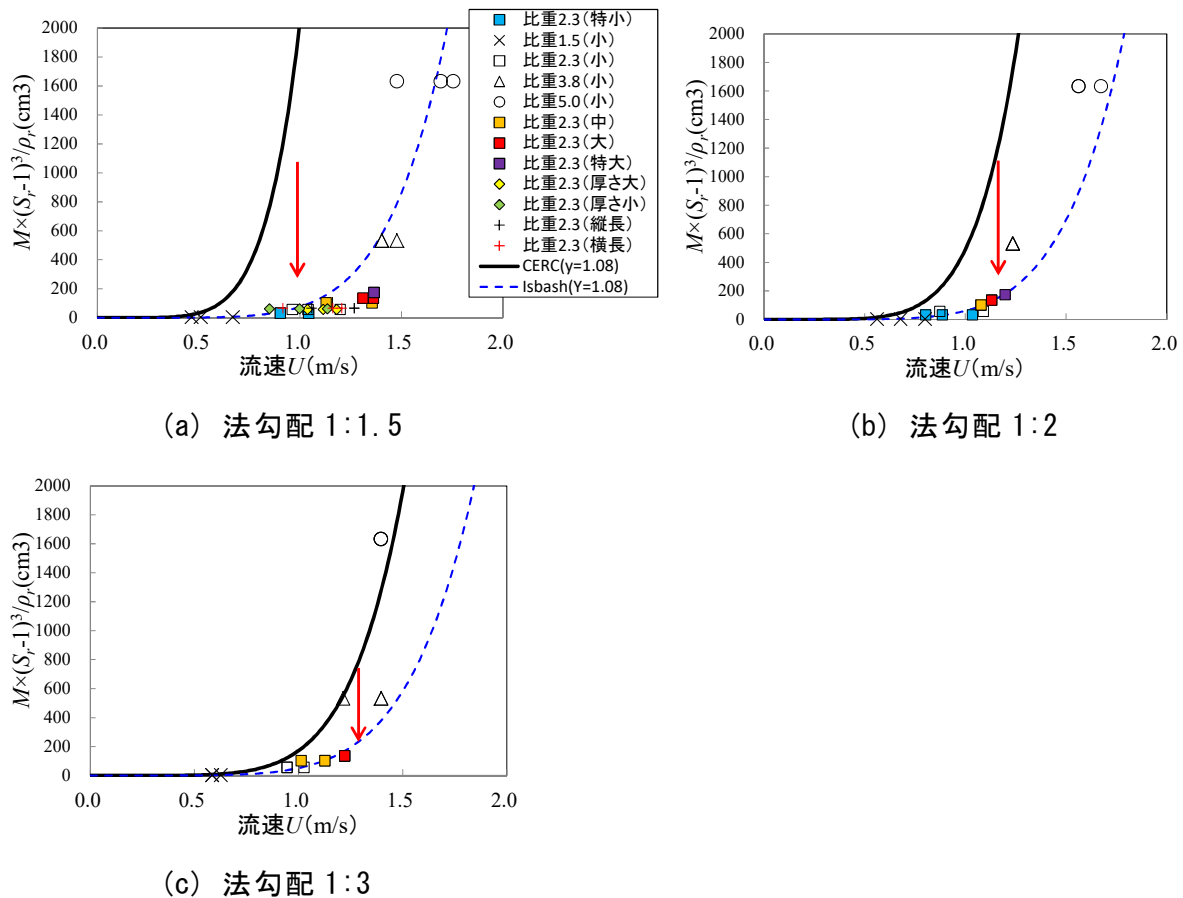


図 1. 51 安定限界の鉛直平均流速と比重を加味した質量の関係 (堤幹部・方塊型)

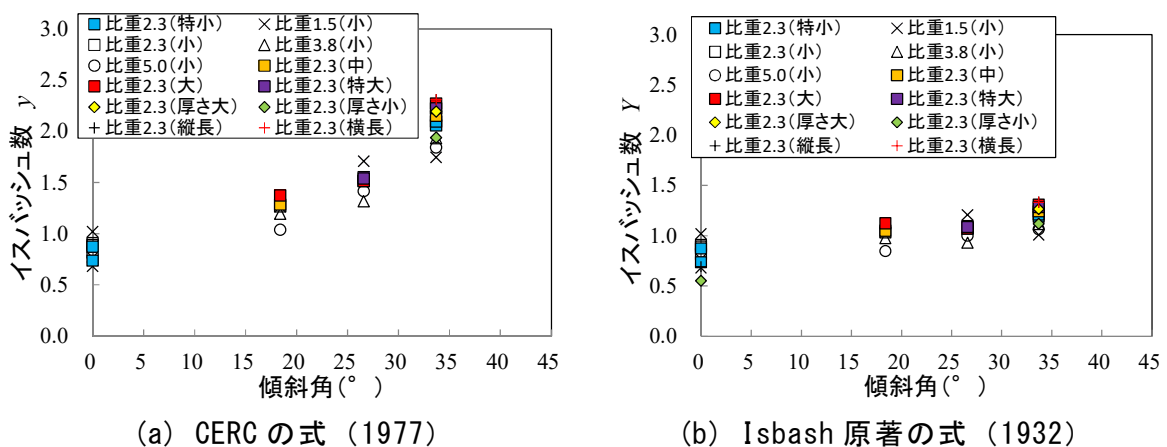


図 1. 52 傾斜角とイスバッシュ数の関係 (堤幹部・方塊型)

Isbash の原論文 (1932) によると、イスバッシュ式はダム建設時の石を対象とし、流速と石の質量の関係について導出した式であるため、敷き詰められた状態の方塊型ブロックに対する適用性には課題があるものと考えられる。そこで、イスバッシュ式

の導出過程を一部修正し、合理的な安定質量算定式について検討を行った。

イスバッシュ式は回転に対するモーメントのつり合い式から導出されている（図 1. 53、三井ら 2015）。

$$k\Delta_w \frac{U^2}{2g} a^2 \xi a + (\Delta_s - \Delta_w) a^3 \sin \theta \left(\frac{a}{2} - \zeta a \right) = (\Delta_s - \Delta_w) a^3 \cos \theta \frac{a}{2} \quad (3)$$

ここで、 k ：形状係数、 Δ_s 、 Δ_w ：石および水の単位体積重量、 a ：石の径、 U ：回転に対する限界流速、 ξ ：回転軸から流体力の作用位置までのアーム長を a で除した値、 ζ ：斜面表面から法線方向に測った回転軸の高さを a で除した値、 θ ：斜面の角度である。式(3)の左辺の第1項が抗力によるモーメント、第2項が石の自重の斜面接線方向成分によるモーメント、右辺が自重の法線方向成分による抵抗モーメントである。石の形状を直径 a の球と仮定して展開すると、 $\zeta = 0$ の場合はCERC式(1)、 $\zeta = 0.5$ の場合はIsbash原著の式(2)が得られる。

式(3)の左辺の第1項に関して、抗力の投影面積が径 a の2乗に比例するとされているが、 a^2 を $a \times \Delta$ と置き換え展開する。ここで、 Δ は仮想的な換算高さであり（図 1. 54）、径 a により不変と仮定する。流速 U について整理すると、

$$U = Y \sqrt{2g(S_r - 1)} \frac{a}{\sqrt{\Delta}} \sqrt{\cos \theta - (1 - 2\zeta) \sin \theta} \quad Y = \sqrt{\frac{1}{2\xi k}} \quad (4)$$

直径 a の球と仮定すると、

$$M = \rho_r \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2} \right)^3 \quad (5)$$

$\zeta = 0.5$ の場合（Isbash原著の考え方）、以下の式(6)が得られる。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^3}{12\sqrt{2}g^{\frac{3}{2}} \left(\frac{Y}{\sqrt{\Delta}} \right)^3 (S_r - 1)^{\frac{3}{2}} \cos \theta^{\frac{3}{2}}} \quad Y' = \frac{Y}{\sqrt{\Delta}} \quad \left[\frac{1}{\sqrt{m}} \right] \quad (6)$$

$\zeta = 0$ の場合（CERCの考え方）、以下の式(7)が得られる。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^3}{12\sqrt{2}g^{\frac{3}{2}} \left(\frac{y}{\sqrt{\Delta}} \right)^3 (S_r - 1)^{\frac{3}{2}} (\cos \theta - \sin \theta)^{\frac{3}{2}}} \quad y' = \frac{y}{\sqrt{\Delta}} \quad \left[\frac{1}{\sqrt{m}} \right] \quad (7)$$

Y' (y') はスケールに依存することになる。実験模型の縮尺は1/80より、現地の Δ が80倍になると仮定すると、以下のように現地換算することができる。

$$Y'_{\text{現地}} = \frac{Y'_{\text{実験}}}{\sqrt{80}} \quad (8)$$

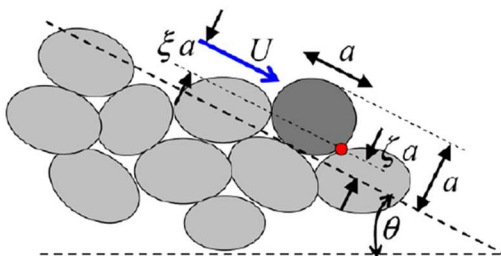


図 1. 53 Isbash (1932) によるモーメントのつり合いモデル

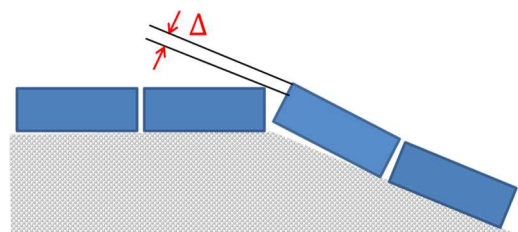


図 1. 54 換算高さ Δ の概念図

式(6)および(7)は流速の3乗式となっているが、図 1. 52 で示された傾斜角とイスバッシュ数の関係に基づき、式(6)が回転軸の位置の効果についてより適切に表現していると考えた。そこで、本検討における本年度の式の提案として、実験結果との比較による式(6)の検証を行った。図 1. 55 は式(6)の3乗式で表現された比重の影響を加味した質量値 $M(S_r - 1)^{3/2}/\rho_r$ と安定限界時の鉛直平均流速の関係について、堤幹部の方塊型ブロックの実験結果をプロットしたものである。勾配 1:1.5 から 1:3 までの条件について、比重を変化させた場合、比重一定の場合の双方において、実験結果が概ね流速の3乗で近似できることが分かる。 $Y'=0.6$ とした式(6)の関係を赤線で併せて示すが、いずれの勾配についても Y' の値は概ね 0.6 前後の値となっていることがうかがえる。

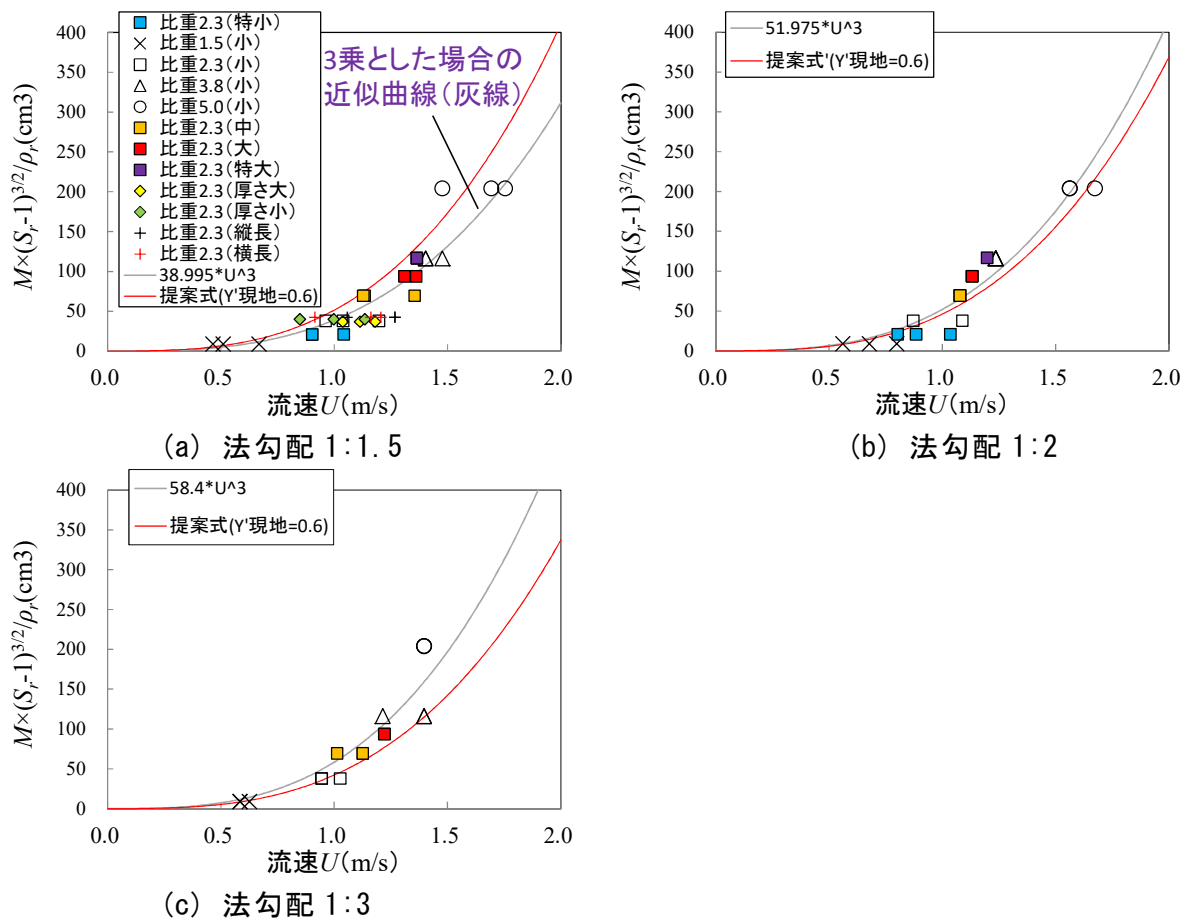
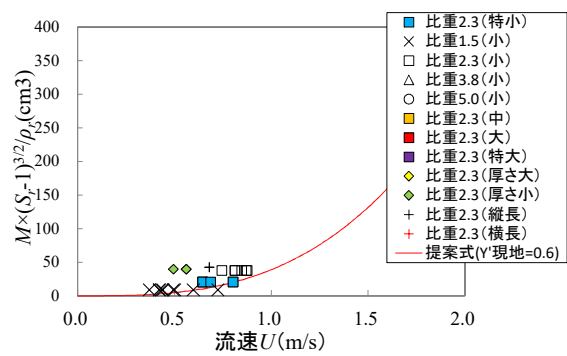
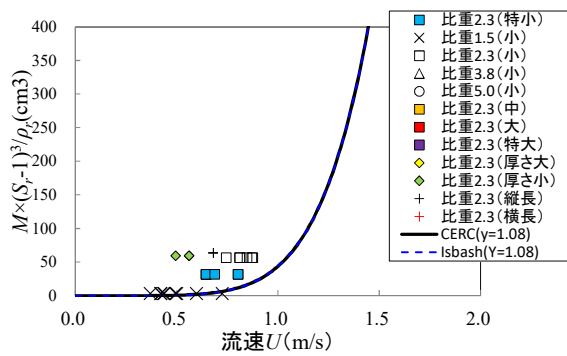


図 1. 55 安定限界の鉛直平均流速と提案式の比重を加味した質量の関係 (堤幹部・方塊型)

上流側法肩（水平部）について、安定限界時の鉛直平均流速とイスバッシュ式および提案式の比重の項を加味した質量との関係を図 1. 56 に示す。 $\theta = 0^\circ$ のときは CERC 式と Isbash 原著の式は同一となる。実験結果は CERC 式 (Isbash 原著の式) による算定値を上回るケースが多く、CERC 式 (Isbash 原著の式) では低流速側で過小評価となる可能性があるが、提案式 (流速の3乗式) では実験結果により近い傾向となることが分かる。



(a) CERC 式・Isbash 原著式との比較

(b) 提案式（流速 3 乗式）との比較

図 1. 56 安定限界の鉛直平均流速とイスバッシュ式・提案式の比重を加味した質量の関係（堤幹部・方塊型、上流側法肩（ $\theta=0^\circ$ ））

平面実験（大型実験）の結果について、断面実験結果と合わせて整理を行った。法勾配 1:1.5、比重 2.3 のブロックについて、流速と質量の関係（現地換算）を図 1. 57 に示す。大型実験では断面実験と比較して安定性に大きな相違はなく、提案式（流速の 3 乗式）に近い傾向となった。提案式（流速の 3 乗式）による Y' と傾斜角の関係を図 1. 58 に示すが、 Y' の値も断面実験と大きな相違はなく、0.5~0.6 程度の値となっている。

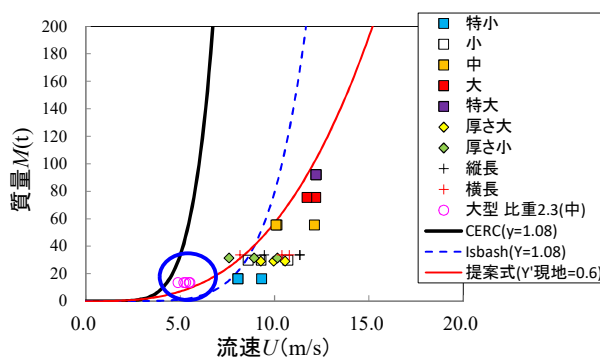


図 1. 57 流速と質量の関係（現地換算）
（法勾配 1:1.5、比重 2.3）

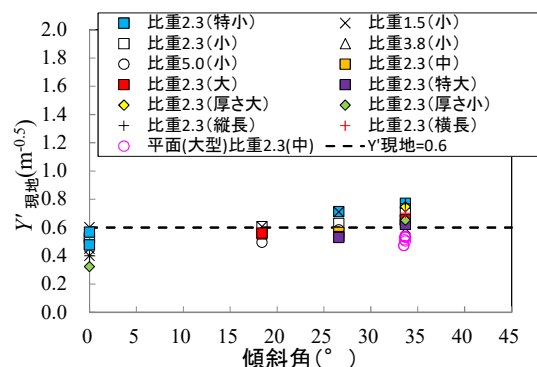


図 1. 58 3 乗式による Y' と傾斜角
の関係

最後に、各算定式による算定値と実験値の誤差の評価を行った。平均誤差 ME（バイアス）を表 1. 8 に、2 乗平均平方根誤差 RMSE を表 1. 9 に示す。なお、各指標は以下のように求めた。

$$ME = \frac{1}{n} \sum (M_{\text{算定}} - M_{\text{実験}})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (M_{\text{算定}} - M_{\text{実験}})^2}$$

ここで、 M ：安定限界の質量（単位：t、現地換算；1 t = 1000 kg）， n ：データ数である。

ME は正值で大きいほど算定式が過大評価と判断できる。CERC 式では急勾配の条件を中心に過大評価となっているが、Isbash 原著の式および提案式（3 乗式）では ME が 0 に近づき、妥当な評価となっていることが分かる。

RMSE については、CERC 式よりも Isbash 原著の式、さらに提案式（3 乗式）の方が小さい値となっており、誤差が縮小していることが窺える。

表 1. 8 平均誤差 ME（単位：t）

形状	法勾配	CERC式 (6乗式) ($y=1.08$)	Isbash原著式 (6乗式) ($Y=1.08$)	提案式 (3乗式) ($Y'=0.6$)	n
堤幹部	1:1.5	2530.0	53.0	17.7	38
	1:2	308.3	-3.0	-4.0	21
	1:3	76.8	-11.6	-9.7	18
	水平	-18.8	-18.8	-11.9	30
	全勾配	966.7	11.0	0.5	107
堤頭部	1:1.5	1562.9	14.5	8.5	10
	1:2	74.2	-26.3	-12.7	12
	1:3	-0.8	-28.8	-16.0	12
	水平	-12.9	-12.9	-7.0	9
	全勾配	381.2	-14.7	-7.5	43
3次元大型	1:1.5	36.0	-11.7	-4.9	9
全形状		755.7	2.8	-1.9	159

表 1. 9 2 乗平均平方根誤差 RMSE
(単位：t)

形状	法勾配	CERC式 (6乗式) ($y=1.08$)	Isbash原著式 (6乗式) ($Y=1.08$)	提案式 (3乗式) ($Y'=0.6$)
堤幹部	1:1.5	3305.3	83.9	23.9
	1:2	366.5	24.4	15.9
	1:3	115.1	24.9	14.6
	水平	21.2	21.2	14.7
	全勾配	1977.1	53.3	18.7
堤頭部	1:1.5	2017.9	58.7	25.3
	1:2	83.6	29.9	15.6
	1:3	24.6	31.8	19.0
	水平	13.5	13.5	8.2
	全勾配	974.2	37.0	18.2
3次元大型	1:1.5	38.3	11.7	5.1
全形状		1699.2	47.9	18.0

このようにして CERC 式、Isbash 原著式および提案式（3 乗式；式(6)）の 3 者の適用可能性を検証したところ、Isbash 原著式および提案式が良好な算定量を示す傾向が得られた。特に、Isbash 原著式は勾配 1:2, 1:3 のケースで、提案式は勾配 1:1.5 のケースで、実験結果とよく合致した。ただし、本年度の実験では、最大サイズのブロックに対しても安定限界時の流速が中規模（ブロックサイズを変化させた水理模型実験結果で最大 1.4 m/s 程度；現地スケール換算で 7-12 m/s 程度）に留まり、元来、両式の差が顕著になりやすいと期待されるさらに高流速条件下での実験情報が得られない結果となった。本年度における実験結果に基づく場合、イスバッシュ原著式および提案式が合理的かつ現実的な算定式改訂にむけた素案・候補として提示される。

(4) 検討部会の実施

本業務の実施にあたっては、専門分野の知見を有する学識経験者を委員とする調査検討委員会を設け、2回実施し、指導・助言を得ながら業務のとりまとめを行った。

委員は、専門を津波、海岸工学とする各有識者とした。

- ・岡安 章夫：東京海洋大学学術研究院 海洋資源エネルギー学部門 教授
- ・八木 宏：防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 教授
- ・田島 芳満：東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授
- ・今井健太郎：海洋研究開発機構 海域地震火山部門地震津波予測研究開発センター 技術研究員

第1回委員会

日 時：令和元年7月8日(月)10:00～12:00

場 所：エッサム神田ホール1号館 7階会議室 (701)

主な議事内容

- ・検討計画の妥当性、留意点について

第2回委員会

日 時：令和2年1月27日(月)13:30～16:30

場 所：エッサム神田ホール7階大会議室 (701)

主な議事内容

- ・検討結果、今後に残された課題の妥当性について

成果取りまとめに向けて、第2回検討委員会やその事前説明で得られた主な意見とそれらへの対応あるいは方針案は以下の通りである。

・水理模型実験について

(意見) データが増えた結果全体をみると、イスバッシュ原著式(流速6乗式)と提案式(流速3乗式)で顕著な差がみられない。差が出やすいように、もっと強い流れ、もっと大きいブロックでの比較はできないか?

(方針案) 重要なお指摘であるが、ブロックの新規作成等が必要なため、令和2年度での課題とさせていただきたい。

(意見) 基礎的なパラメータ検討は定常流実験での検討でも良いが、今回の実験結果をみると、津波の来襲形態を踏まえた検討も必要ではないか。例えば引き波から始まると、マウンドが露出してから段波が来ることが考えられるが、模型実験でも確認しておいた方が良いのではないか。

(方針案) ご指摘の通り、現実には定常流の津波が来るわけではない。令和2年度の課題として、マウンド干出時等について、別の事業での検討ケースも含めて、できるだけ情報を集める必要があると考えている。

・数値計算について

(意見) 前年度の手法と比べて改善したという部分のうち、圧力分布については、静水圧を抜いたものを作っていたいただきたい。また、水面勾配は重要であり、外力的な水理条件、抵抗で決まる水面勾配の再現性についても

乱流モデルの導入で変化したか、確認していただきたい。

(対応) いただいた意見を反映し、圧力の静水圧からの差や、水面勾配を描画し、本報告書に記載した。水面勾配について確認したところ、水面勾配についても変化が見られた。少なくとも、本年度の計算結果が計測結果を良好に再現している様子が窺えた。

(意見) 数値計算は良好な性能を持っているように思われるので、現地スケールの数値計算を実施することによって 3 次式のパフォーマンスを評価することについて、検討していただきたい。

(方針案) ご指摘の通り、今回の検討では水理模型実験を縮尺条件の制約下で進めてきており、現地スケールでの検討は重要な課題である。現地スケールでの数値計算を実施することで、本当に 2000 t ではなく、100 t や 200 t でも安定と判断できるのか等の検討がある程度可能と期待される。一方でこのような計算の実施・検討には相応の労力が必要であるため、この作業については、今後の課題として位置づけさせていただきたい。

・揚力発生メカニズムについて

(意見) 揚力は、上面側の圧力低下に主として依存するという点で、要は上面側の流れ場によって揚力が決定するという話に概ね集約できそうである。その圧力低下する空間スケールが、提案式における係数 (Δ) に関係してくると考えれば、 Δ の大きさは、ブロックの大きさというよりも、流れ場の強度や法面の勾配で決まるものになる。この辺りが上手く整理出来れば、提案式に係るメカニズムについて、道理にかなう説明が考えられるのではないかと。

(方針案) 受託側でも頂いたコメントのようなイメージを持っており、令和 2 年度では、それらのイメージを参考としつつ、安定質量算定式の定式化をまとめていくことを取り組むべき課題とさせていただきたい。

(意見) 質量が小さい場合、前側が被災するという報告がなされたが、メカニズムや算定式について、検討する必要があるのではないかと。

(方針案) 算定式性能評価の際には、マウンド前側の被災を対象とした検討も実施した。安定質量算定式の提示に際して、被災箇所（マウンド前側、後側）に応じて異なるメカニズム・提案式が必要かどうかについての検討については、令和 2 年度での課題とさせていただきたい。

・修正式の提案の際の留意点について

(意見) 数値計算で揚力と抗力を比較しているが、積分値で見ると、揚力の方が抗力より圧倒的に大きい。評価式をみると力のバランスを抗力ベースで考えているが、揚力ベースで考えなければいけないのでは。

(方針案) ご指摘の通りである。現在提案式を球状のものを対象とした力学バランスに基づき考えているが、直方体で提案式を整理していくこと、その際に揚力の影響を考慮して考えていくことを令和 2 年度での課題とさせていただきたい。

VI. まとめと今後の課題

平成 31 年度の本調査では、水理模型実験（断面実験および平面実験）と数値計算による検討を行い、津波等の強い流れに対する被覆ブロック等の合理的な安定質量算定手法を検討するとともに、その妥当性及び実用性について評価し、課題を抽出・整理した。主な成果と今後に残された課題は以下の通りである。

(1) 水理模型実験による検討

2次元条件下で、ブロックの大きさ・形状を変化させた追加の水理模型実験を実施した。実験の安定質量は現行のイスバッシュ（CERC）式の算定値を大きく下回った。イスバッシュ原著式と提案式（3乗式；式(6)）の適用可能性を検証したところ、両式とも実験結果とよく合致した。ただし、ブロック移動時の流速が中規模（ブロックサイズを変化させた水理模型実験結果で最大 1.4 m/s 程度；現地スケール換算で 7-12 m/s 程度）に留まる結果となった。

イスバッシュ原著式と提案式（3乗式；式(6)）の2者の妥当性・特性差を評価するため、2次元条件下において、両式の差が顕著になりやすいと考えられる高流速の条件下（水理模型実験実験で 1.4 m/s 以上；現地スケール換算で 12 m/s 以上）での実験を実施する必要がある。

(2) 数値計算による検討

数値計算により、模型実験の流速・圧力データと同様の結果が得られ、流体力や被災メカニズムを検討できるようになった。ただし、提案式（3乗式）における係数の問題等、被災メカニズムには解明されていない点が残る。

また、設計実務では、非線形長波モデルによる津波遡上計算の流速値を使用するため、非線形長波モデルの流速値を使用する上での留意点を整理する必要がある。

(3) 安定質量算定式の検討

提案式（3乗式）において、係数に次元が含まれてしまう点への対応を検討する必要がある。今後、検討結果をとりまとめ、設計参考図書に追加する強い流れに対するブロック等の安定質量算定手法の案を提案する。

平成 31 年度水産基盤整備調査委託事業報告書

a. 課題名

「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」のうち (2) 沈設魚礁の流体力算定式及び着定基質の安定質量算定式の検討

b. 実施期間及び担当者

国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所
水産土木工学部 生物環境グループ長 川俣 茂
水産土木工学部 水産基盤グループ長 佐伯公康
水産土木工学部 主幹研究員 三上信雄
国際気象海洋株式会社 銚子グループ グループリーダー 小林 学
常務執行役員 門 安曇
一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所 第 2 調査研究部 部長 伊藤 靖
第 2 調査研究部 主任研究員 廣瀬紀一

c. ねらい

漁場の施設について、主要な設計の基本となっている沈設魚礁の安全性の照査法と着定基質（石材）の安定質量算定式に関して、新しい知見等を踏まえ、設計手法の体系的な見直しを行い、見直し案をとりまとめる。本年度は、次の 5 つの項目について検討した。

1. 波と流れの共存場における流体力算定手法の検討

平成 29 年度に浅海域における非対称性の強い波動流速にも適用でき、モリソン式よりも簡便で精度の高い最大流体力算定法として次式を確立した。

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F\max} A U_a^2 \quad \text{式 2.1}$$

ここに、 F_{\max} ：最大流体力、 ρ ：海水の密度、 $C_{F\max}$ ：波動流中での最大力係数、 A ：魚礁の基準面積、 U_a ：最大流速半振幅

しかし、沈設魚礁の設置海域の多くは波と流れの共存場であり、式 2.1 は波の場にしか適用できないため、そのままでは適用が制限される。そこで提案してきたのが次式である。

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{F\max} A U_a^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2 \quad \text{式 2.2}$$

ここに、 C_{DS} ：定常流の抗力係数、 U_c ：定常流速

式 2.2 は、沈設魚礁の設置海域が波と流れがある程度交差する沿岸域であることが多いため、従来の設計と同じように同一方向の波と流れを仮定すると、流体力を過大評価してしまうという問題と、波・流れ共存場での流体力係数を実験的に求められないという問題を回避するために考え出された便宜的方法であるが、その実験的根拠がない。そのため、回流水槽内の一様流中で魚礁模型を流れと任意の交差角で振動させることで、波と流れの交差条件下で流体力を測定する手法を考案し、平成 30 年度にその実験を試みた。実験には一部不備が見出されたため、今年度はその改良を行いつつ式 2.2 の妥当性を検討し、妥当でない場合はその改良を行うこととした。

2. 沈設魚礁の安定性の照査法の検討—見直し案の作成

沈設魚礁の安定性の照査法では、流体力算定法と安定性の評価方法の見直し案について検討した。

流体力算定法については、昨年度、水深の深い領域から浅い領域まで不規則波の波群中での最大流体力を算定するための手法（図 2.1）を構築し、水槽実験と現地観測データによる検討により $C_{F\max}$ の式は非対称な流速波形に対しても妥当な推定値を与えることを確認

した。図中の最大流速波形とは、不規則な底面波動流速波形からゼロ・ダウン・クロス法により定義される波のうち、最大の全振幅をもつ波をいい、その波の特性値（図 2.2 で定義する U_a 、 T_{pp} 、 T_{zp} ）の算定式を構築した。それらのうち、流体力算定に最も影響の大きい U_a については、次の実験式を提案した。

$$U_a = rU_{\text{Airy}} \quad \text{式 2.3a}$$

$$r = 1 - 0.384 \tanh \left[1.91 \left(\frac{H_{\text{max}}}{h} \right)^{1.81} \right] \quad \text{式 2.3b}$$

$$U_{\text{Airy}} = \frac{\pi H_{\text{max}}}{T_0 \sinh \frac{2\pi h}{L_0}} \quad \text{式 2.3c}$$

ここに、 H_{max} ：最大波高、 h ：水深、 U_{Airy} ：微小振幅波の底面流速振幅、 T_0 ：有義波周期、 L_0 ：微小振幅波の波長。

しかし式 2.3 の妥当性については、 U_a が過小算定されるケースがみられ、課題が残された。今年度はその改良を検討した。

安定性の評価方法については、これまでの検討結果を踏まえて、安定性評価の場合分け（案）（図 2.3）を提示している。従来、沈設魚礁は一律に滑動も揺動もしないよう設計されてきた。しかし、大部分の魚礁は平坦な砂礫底に設置され、少し滑動しても機能に影響しない。また砂礫底上に設置された魚礁では、平坦な砂面上での最大静止摩擦係数 0.6 を摩擦係数の設計値とするため一般に設計上、滑動が転倒よりも起こりやすく安定性の制約条件になっていた。

しかし、実際には魚礁が移動するほどの流動があれば、洗掘や沈下・埋没により滑動抵抗が増加し、有意な滑動が生じる前に転倒が生じることが予想される。この予想は、模型実験（平成 28～29 年度実施）で検証された。ただし、魚類の蛸集を目的として魚礁を層積みする場合は、魚礁が多少滑動しても落下により高さが低下してしまうため、滑動は許容できない。実際にそのような事例が平成 27～29 年度に実施した調査により複数見出されている。図 2.3 は以上の検討結果を考慮した沈設魚礁の安定性評価の場合分け（案）である。

安定性の照査法では、

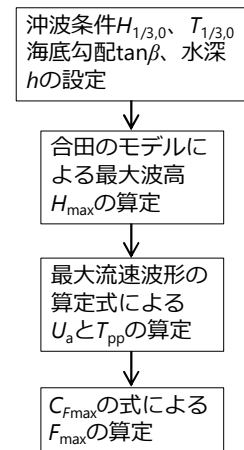


図 2.1 波の場での最大流体力 F_{max} の算定の流れ

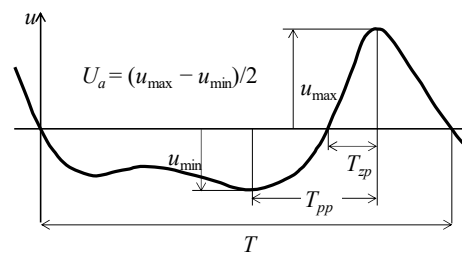
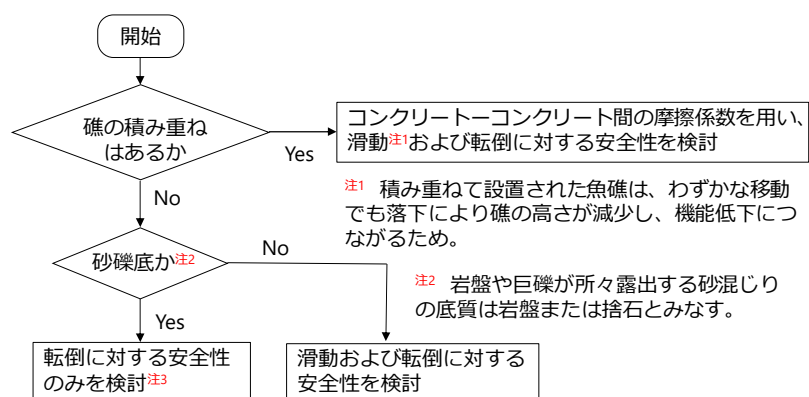


図 2.2 最大流速波形の特性値 U_a 、 T_{pp} 、 T_{zp} の定義



注1 積み重ねて設置された魚礁は、わずかな移動でも落下により礁の高さが減少し、機能低下につながるため。
注2 岩盤や巨礫が所々露出する砂混じりの底質は岩盤または捨石とみなす。
注3 砂礫底上では礁の機能低下をつながる移動は転倒により生じるため、滑動に対する安全率は考慮しなくてもよい。

図 2.3 設置条件による沈設魚礁の安定性評価の場合分け

委員会で新たな課題として指摘された転倒モーメントの算定方法についても検討した。従来の設計では、沈設魚礁の流体力と転倒モーメントは、礁高の低い魚礁と高い魚礁で分け、前者では魚礁頂部での流速から求められる流体力 F_i が、また後者では魚礁を高さ方向に微小な層に分割し、各層頂上での流速から求められる流体力の総和 F_i が、図心の高さ z_c に作用すると仮定して $F_i \times z_c$ で算定してきた（図 2.4）。

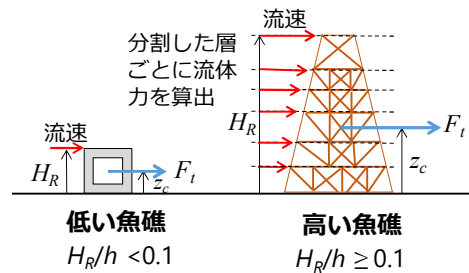


図 2.4 従来の転倒モーメントの算定法

しかし、この方法では、①転倒モーメントを高さ方向に積分して求めていること、②流体力係数は簡略化のため、一般に層ごとに実験で求めずに同一と仮定されていること、③流速を与える高さを最上端としているため、設計流速が過大になること、から、高さ方向に分割して計算量を増やしても、算定精度の向上を保証するものにはなっていない。

高層魚礁の流体力に関する平成 25～26 年度の調査により、礁全体に作用する水平流体力は、図心の高さでの流速を代表流速として算出される流体力 F_i で精度よく求められることが示されている。したがって、その流体力と z_c との積から簡単に転倒モーメントを求められる可能性がある。ここではその可能性を検討した。

3. 沈設魚礁の安定性の照査法の検討—見直し案の影響評価

沈設魚礁の安定性の照査法（案）を沈設魚礁と増殖礁の実施例に適用して安全率が従来法とどの程度変わるかを比較し、見直しの影響の程度を予測した。

4. 複合部材からなる構造物の流体力算定手法の検討

流体力の新算定法に対応するためには、施設タイプごとに造波水槽での模型実験により流体力係数を決める必要があるが、施設形状の多様さから、短期間にすべての施設で対応するのは困難である。新設計法移行への猶予期間だけでなく、実験によらない流体力係数の推定方法の確立が望まれる。そこで、以下の方法について課題を抽出し、それぞれの課題について検討を行った。

実験によらない方法として、これまでの検討により以下の 2 つの方法が考えられる。

方法 1：流体力を構成部材の流体力から推定する方法（部材流体力法）

方法 2：礁全体の流体力係数を特定の部材の流体力係数で代替する方法

方法 1 では、部材間隔が密な魚礁では閉塞効果により流体力が単独部材の流体力の合力より増加するという問題がある。そこで、まず単独部材の合力から流体力を推定できる部材間隔の目安を検討した（課題 1）。また方法 1 は、部材間隔の粗い鋼製魚礁では適用可能性が比較的高いが、流体力係数を求めるためには基準面積 A 、基準体積 V 及び基準幅 D （以下これらを総称して「参照スケール」という）を適切に決める必要がある。このことは方法 2 にも共通する課題となっており、部材の流体力係数に関する記述を新算定法に適した内容に改定する（課題 2）とともに、参照スケールの適切な決め方（課題 3）を検討した。

流体力係数に及ぼす部材間隔の影響は、特に間隔が部材幅に対して相対的に狭い部材からなるコンクリート魚礁では無視できない。しかし、魚礁の形状は複雑で多様であり、汎用的手法の構築のためには多くの検討課題が予想される。その取りかかりとして昨年度に引き続き、比較的単純で基本的な構造である角型魚礁とその組み合わせ構造を対象として流体力係数の推定手法の構築を検討した（課題 4）。

5. マウンド状に積み上げられた石材の安定重量算定式の検討

近年、藻場造成のため、石材をマウンド状に積み上げて浅場を造成する事例が増えている。着定基質の安定質量算定式については、新しい手法が構築されたが、当手法は石材の積み重ねによる水深の変化の影響を考慮していない。新手法がそのような浅場造成工法に適用できるかを実験により検討した。

d. 方法

1. 波と流れの共存場における流体力算定手法の検討

1) 実験方法

昨年度と同様に、図 2.5 に示すような流れを発生できる回流水槽（観測部：長さ 6.0 m × 幅 2.8 m × 高さ 1.4 m）上に設置した振動装置に魚礁模型（外寸 13 × 13 × 13 cm；質量 396.86 g、密度 1.14 g/cm³）を取り付け、振動装置の設置角度を変えることにより擬似的に作り出した、波と流れが任意の角度で交差する条件下で魚礁に作用する流体力を計測、解析した。

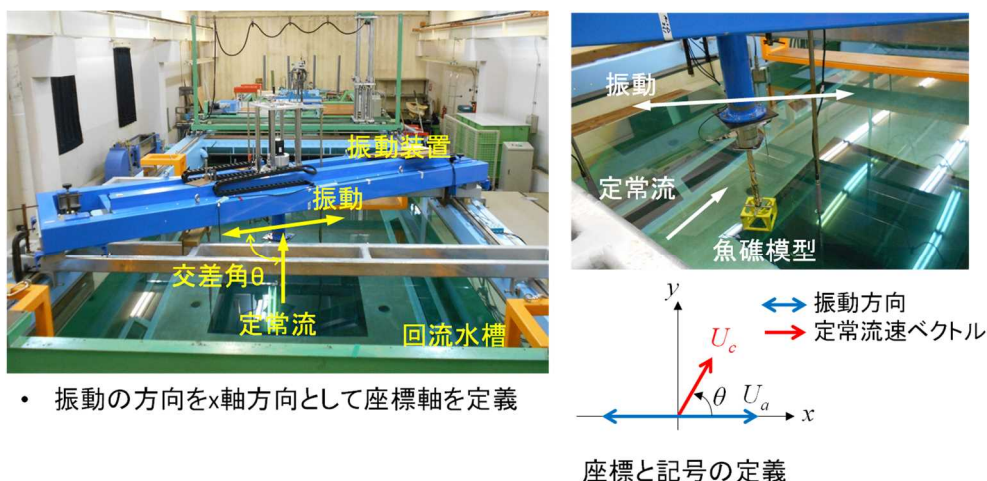


図 2.5 実験装置および座標と記号。魚礁模型の固定方法は昨年度の方法。

魚礁に作用する流体力は、流れと振動の同じ条件で魚礁模型のあるときとないときで実験を行い、魚礁模型があるときの計測力から模型がないときの計測力を差し引いて求められるが、昨年度の実験で、模型を付けないときの計測力に短周期の変動（ノイズ）と異なる“うなり”が発生することが明らかになった。このうなりの影響は、ノイズのようにデータの平滑化等の前処理では完全に消去できないため、その影響の程度が問題視された。そのため、まずうなりの発生を抑えるための実験方法を検討し、次にそれにより得られた結果を昨年度の結果と比較し、実験結果の妥当性を評価した。

うなりの発生抑止方法としては、二つの方法を試験した。一つは、振動方向の回転モーメントを小さくするため、魚礁模型を固定する支持棒を昨年度の 1 本から 2 本に変更し、それぞれの支持棒に 3 分力計 1 台ずつを取り付けた（図 2.6）。もう一つの試験では、魚礁模型を取り付けるとノイズとうなりがほとんど発生しなくなることから、従来の支持棒に模型の他に抵抗体として PLA 樹脂性円盤（径 107mm × 30mm）を取り付けた（図 2.7）。

これらのうち改善のみられた方法により、昨年度実験を実施した交差角の条件 $\theta = 0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° のうち比較のため、 $\theta = 0^\circ$ と 90° について再実験を行った。また交差角

60°と 90°間で提案式の推定精度が著しく変化したことからその中間の $\theta = 75^\circ$ でも実験を行った。各交差角 θ において以下の定常流速と振動の各組み合わせ条件で計測を行った。

定常流速 : $U_c = 0.0, 7.4, 14.4, 29.0, 39.4, 49.6, 50.2, 58.7$ cm/s

振動 : $T = 2.0, 2.4, 3.0$ s の各周期に対して $U_a = 7.3, 14.0, 27.9, 49.1$ cm/s

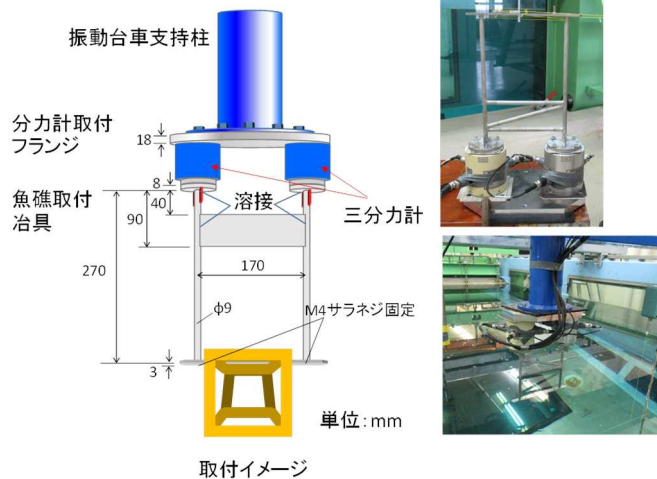


図 2.6 うなり対策 1

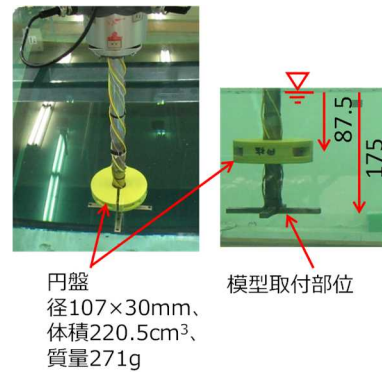


図 2.7 うなり対策 2

2) データの解析方法

静水中で魚礁を振動させた場合に魚礁に作用する流体力から、振動流中に固定された魚礁に作用する流体力を推定することをモリソン式に基づき考える。静水中で魚礁を振動させる場合に必要な力は次式で表される。

$$F_x(t) = -(m + \rho C_a V)\ddot{x} - \frac{1}{2}\rho C_D A |\dot{x}| \dot{x} \quad \text{式 2.4}$$

ここに、 F_x : x 方向の力、 m : 魚礁の質量、 C_a : 付加質量係数、 V : 魚礁の体積、 x : 振動装置の変位、 $\dot{\quad}$ と $\ddot{\quad}$ は時間に関する 1 階及び 2 階微分、 C_D : 抗力係数。したがって、振動流中に固定されている魚礁に作用する流体力は次式で表される。

$$\tilde{F}_x(t) = -\rho(1 + C_a)V\ddot{x} - \frac{1}{2}\rho C_D A |\dot{x}| \dot{x} = F_x(t) + (m - \rho V)\ddot{x} \quad \text{式 2.5}$$

ここに、 $F_x(t)$ は静水中での x 方向の流体力 $C_{F\max}$ は式 2.5 で推定される流体力の最大値 ($\tilde{F}_{x,\max}$) より次式で求められる。

$$C_{F\max} = \frac{\tilde{F}_{x,\max}}{\rho A U_a^2 / 2} \quad \text{式 2.6}$$

式 2.5 において $-\dot{x}$ を $U_c \cos\theta - \dot{x}$ に置き換えても $\tilde{F}_x(t) = F_x(t) + (m - \rho V)\ddot{x}$ の関係が成り立つことから、流れがある場合の流体力は、式 2.5 で求められる $\tilde{F}_x(t)$ と振動方向と直交する向き (y 軸方向) の流体力 $F_y(t)$ から次式で求められる。

$$F(t) = \sqrt{\tilde{F}_x^2(t) + F_y^2(t)} \quad \text{式 2.7}$$

最大流体力は式 2.7 の最大値 (以下、これを最大流体力の測定値という) として求められ、最大流体力の提案式 (式 2.2) による計算値と比較した。

3) 力の成分解析による最大流体力の推定

波・流れ共存場での流体力を算定する別の方法として、流体力の方向別の平均と振動成分を解析し、各成分から最大流体力を推定する方法を検討した。

(1) x 方向分力

x 方向分力を次式で表す。

$$\tilde{F}_{x,\max} = \bar{F}_x + F_{x,w} \quad \text{式 2.8}$$

ここに、 $\tilde{F}_{x,\max}$ 、 \bar{F}_x および $F_{x,w}$: \tilde{F}_x の最大値、平均値および変動成分の振幅。

\bar{F}_x と $F_{x,w}$ は、それぞれ定常流速ベクトルの x 成分による抗力と振動流速による力を基準として以下の 2 式で表されると仮定する。

$$\bar{F}_x = f_{x,c}(\theta, r_u) \times \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_{c,x}^2 \quad \text{式 2.9}$$

$$F_{x,w} = f_{x,w}(\theta, r_u) \times \frac{1}{2} \rho C_{Fmax} A U_a^2 \quad \text{式 2.10}$$

ここに、 $f_{x,c}$ と $f_{x,w}$ は実験係数で、 θ と $r_u = U_c / (U_c + U_a)$ の関数、 $U_{c,x} = U_c \cos \theta$

(2) y 方向分力

y 方向分力は、平均成分が卓越する（変動成分は無視できる）ので、次式で表されると仮定する。

$$\bar{F}_y = f_{y,c}(\theta, r_u) \times \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_{c,y}^2 \quad \text{式 2.11}$$

ここに、 $f_{y,c}$ は実験係数で θ と r_u の関数、 $U_{c,y} = U_c \sin \theta$

4) 汎用的流体力算定式構築の検討

すべての r_u と θ の条件に適用可能な波・流れ共存場での汎用的流体力算定式の構築をより簡潔的な方法により検討した。図 2.8 に示すように、波の場での流体力と流れの場での流体力が同じ式型（流体力係数×代表流速の 2 乗）で表示されていることに着目し、流体力係数と流速が r_u によって徐々に変化すると考える。代表流速としては二つの可能性が考えられる。一つは、流体力への寄与では波動流速の方が定常流速よりも大きいことから波動方向の流速成分 V_{wc} とするもので、もう一つはベクトル合成流速の最大値 V_m とする

波単独	波・流れ共存場	流れ単独
$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{Fmax} A U_a^2$		$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2$ 式型は同じ
$r_u :$	0	1
流体力係数:	C_{Fmax}	徐々に変化すると考える
代表流速:	U_a	U_c

波・流れ共存場での代表流速には V_{wc} (波が卓越する場合) または V_m が考えられる

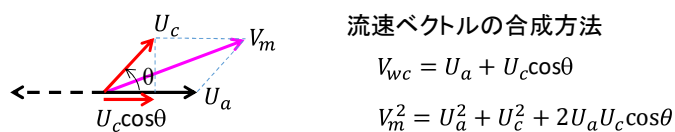


図 2.8 汎用式構築の考え方

ものである。以上の考えに基づき、汎用式の構築を検討した。

2. 沈設魚礁の安定性の照査法の検討—見直し案の作成

1) 残された課題 1: U_a の算定式

U_a の算定式については、昨年度の提案式では補正係数 r を H_{\max}/h のみの関数としたが、 H_{\max}/h だけでは r の変動を十分に説明できていない可能性がある。そこで、浅海域での波浪・流速観測データから残差 (= 実測値 - 式 2.2 による予測値) を求め、その変動の説明変数となる無次元パラメータを探索した。用いたデータセットの観測概要を表 2.1 に示す。ここで、Hiwasa は、水産工学研究所と徳島県農林水産総合技術支援センター水産研究課(担当 棚田教生主任研究員)との共同研究による調査結果であることを付記する。

表 2.1 解析に用いたデータの観測場所、期間及びモード

データ名	観測場所	観測期間	観測モード
Shiwagi	徳島県海部郡美波町志和岐沖 平均水深 9.6 m	2015/7/29 ~ 11/17	1h 間隔に 2Hz で PUV ¹⁾ の 20 分間連続観測
Mashike	北海道増毛郡増毛町別苺沖 平均水深 7.6 m	2017/10/9 ~ 11/30	1h 間隔に 2Hz で APUV ²⁾ の 20 分間連続観測
Hiwasa	徳島県海部郡美波町日和佐沖 平均水深 5.3 m	2018/11/22 ~ 2019/2/5	1h 間隔に 5Hz で PUV の 20 分間連続観測

¹⁾ PUV : 水圧式波高計と水平 2 成分電磁流速計

²⁾ APUV : PUV と超音波式波高計

底面波動流速データは、①流速計による計測のほか、②超音波による水面変位データまたは③水圧データからのスペクトル法による推定によっても得られる。しかし、①には流速センサーへの付着生物の被覆による出力低下や浮遊物の絡みつきによる異常値の発生等の問題があり、また②には激浪時に浮遊物や砕波に伴う気泡の発生による欠測の問題がある。これに対して、③は最も間接的な計測であり、また不規則波の成分波が一方向に進行すると仮定しているため、反射波や波の方向分散性が無視できないほど大きくなると問題が生じることがある。しかし、水圧データには計測ノイズがほとんど発生せず、付着生物の影響も発生しにくいいため、反射波や波の方向分散性の影響が小さければ、信頼性の高い流速の推定データを確実に得ることができる。実際に、流速計により良好なデータが得られたときに、その波動流速の主変動方向の流速時系列と水圧からの推定波動流速の時系列とを比較すると、両者は概ねよく一致し、それらの影響は大きくないことを示した。以上から、ここでは水圧からの推定波動流速を解析データとして用いた。

上述の方法により得られる 20 分間の波動流速と水圧データよりスペクトル法で得られる水面変位の時間波形より、それぞれ最大流速波形の U_a と最大波高 H_{\max} を求め、解析に供した。解析ではまず U_a の実測値と、式 2.3 による推定値との比と高い相関を示す無次元の説明変数を探索し、 U_a の推定式を構築した。

2) 残された課題 2 : 転倒モーメントの算定方法

部材流体力法により、構成部材の流体力 F_i が適切に求められれば、転倒モーメントは、その合力 $F_t = \Sigma F_i$ と図心高さ z_c との積ではなく、部材に作用する流体力によるモーメント $M_i = F_i \times z_i$ (z_i : 部材 i の海底からの高さ) の和 $M_t = \Sigma M_i$ として正確に求められる。しかし、魚礁全体に作用する流体力は、礁高の高い高層魚礁の場合でも z_c での流速のみから精

度よく求められることが平成 26 年度の模型実験で示されていることから、転倒モーメントも同様に $F_t \times z_c$ で適切に評価できる可能性がある。その可能性を次の二つの方法で検討した。一つは、部材流体力法が適用可能な高層魚礁の実機模型を対象に、平成 26 年度に実施した実験と同じ条件で試計算を行い、 ΣM_i と $F_t \times z_c$ とを比較した。もう一つは、実測に基づく方法で、平成 26 年度に実施した高層魚礁模型に作用する流体力 F_t に関する造波水槽実験では、図 2.9 に模式的に示す装置で F_t のほかに分力計によるモーメント測定値 M_{meas} も得られている。 M_{meas} は魚礁模型に作用する転倒モーメントとは異なり、

$$M_{meas} = \Sigma F_i(z_i + z_b) = \Sigma F_i z_i + z_b \Sigma F_i = M_t + F_t z_b \quad \text{式 2.12}$$

となるので、正確な転倒モーメントは M_{meas} を次式により補正して与えられる。

$$M_t = M_{meas} - F_t z_b \quad \text{式 2.13}$$

ここに、 z_b ：モーメントの計測位置から魚礁取付面までの高さ（図 2.9）
式 2.13 により魚礁の転倒モーメント M_t を求め、 $F_t \times z_c$ と比較した。

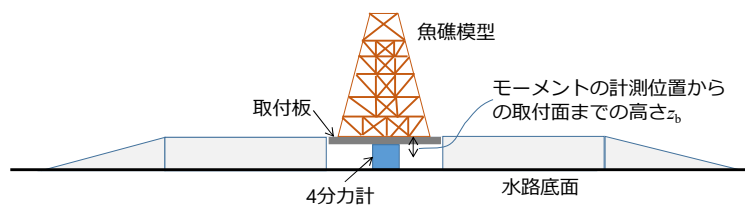


図 2.9 高層魚礁模型の流体力とモーメントの測定方法（H26 年度実験）

3. 沈設魚礁の安定性の照査法の検討—見直し案の影響評価

流体力係数がすでに実験により得られていた、または推定可能と考えられた沈設魚礁及び増殖礁 7 タイプ（図 2.10、表 2.2）の設計事例を対象に、沈設魚礁の安定性の新照査法と現行法から算定した安全率を比較し、新照査法の影響等について検討した。

検討した設計事例は、水産庁より入手した安定計算表 370 件のうち、7 タイプの施設に関する 169 件（表 2.2）である。これらの事例の設置水深と設計波高との関係を図 2.11 に示す。検討対象とした事例は設計事例全般を概ね網羅した。

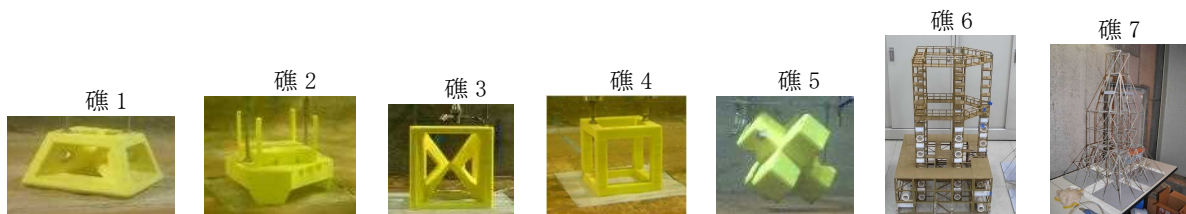


図 2.10 照査法見直し案の影響評価の対象とした魚礁・増殖礁の模型

表 2.2 影響評価で対象にした魚礁・増殖礁

礁 No	分類	型式	件数
礁 1	コンクリート製魚礁	FP1.5 海洋土木（株）	1
礁 2	コンクリート製増殖礁（藻場礁）	k-hat リーフβ、住友大阪セメント（株）	1
礁 3	コンクリート製魚礁	FP3.25 海洋土木（株）（相似形タイプ FP2.00、FP3.00、FP4.00、FP5.00 を含む）	34
礁 4	コンクリート製魚礁	エースロック、太平洋マテリアル（株） ¹⁾	9
礁 5	囲い礁ブロック、コンクリート製増殖礁	六脚ブロック(A1.00 型)、技研興業（株）	111
礁 6	鋼製魚礁	kk-21、神鋼建材工業（株）	7
礁 7	鋼製魚礁	AS、岡部（株）	6

¹⁾流体力係数は図 2.10 に示す角型ブロックで代用した。

1) 追加施設の流体力係数の測定

対象にした7タイプの施設のうち、 C_{Fmax} の実験式が得られていない礁5について、縮尺1/25の模型 ($D=4.0$ cm、 $A=101.184$ cm²、 $V=439.50$ cm³)を用いて造波水槽(全長100 m×幅1 m)で規則波下での流体力測定を行った。実験条件は、勾配1/30の斜面上8 mm、水深75.5 cmの断面において周期 $T=1.5$ 、2.0、3.0、4.0 sで $U_a=6.58$ ~58.19 cm/sの波動流速を発生させ、流体力と流速(測定高さ: 図心の高さ)を三分力計2台と3次元超音波式流速計を用いて50 Hzで計測した。実験結果より、流体力係数 C_{Fmax} をKC数の関数として定式化した。

2) 見直しに伴う安全率の変化

ここで、滑動と転倒に対する安全率(以下、滑動安全率と転倒安全率という)を、従来と同様にして次の2式で求め、それらのうち小さい方を安全率とした。

$$\text{滑動安全率} : F_{S,sliding} = \frac{\mu R}{P} \quad \text{式 2.14}$$

$$\text{転倒安全率} : F_{S,toppling} = \frac{Rl_a}{Pz_c} \quad \text{式 2.15}$$

$$R = W \cos \beta - F \sin \beta \quad \text{式 2.16}$$

$$P = F \cos \beta + W \sin \beta \quad \text{式 2.17}$$

ここに、 μ : 摩擦係数、 R と P : それぞれ魚礁に作用する底面に垂直方向と水平方向の力の合力(図2.12参照)、 W : 魚礁の水中重量、 F : 流体力、 l_a : 図心と魚礁端部との水平距離、 β : 魚礁の傾斜角。

式2.14と式2.15は海底勾配の影響を考慮した安全率を表す。海底勾配の影響については、以前から設計の手引きには記載はあったが、数式による記述はなかった。しかし、収集した安定計算表の多くで、海底勾配の影響を考慮した安定計算が行われていることから、この検討でも従来法と同じ方法により海底勾配の影響を評価した。また転倒安全率には揚力が影響する可能性があるが、魚礁の部材は一般に左右対称に配置されているため、揚力は左右で相殺され、無視できるとした。

安全率については、従来法を表2.3に記載する提案法A及び提案法Bと比較した。提案法Aの適用に当たっては、入手した安定計算表で海底が砂質または砂

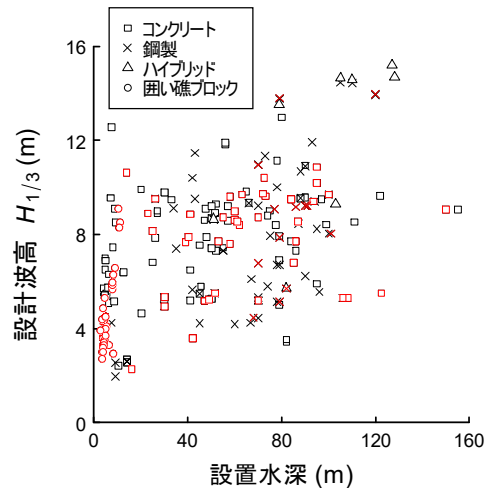


図 2.11 入手した安定計算表 370 件(赤の記号: 検討対象 169 件)の設計事例における設置水深と設計波高との関係。コンクリート: コンクリート製魚礁・増殖礁、鋼製: 鋼製魚礁・増殖礁、ハイブリッド: 鋼製魚礁にコンクリート製魚礁を組み込んだ高層魚礁、囲い礁ブロック: コンクリート製囲い礁ブロック。

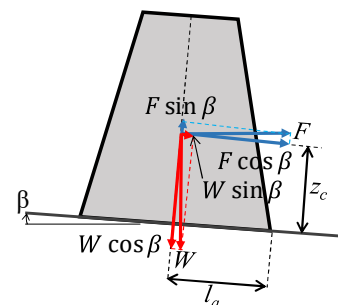


図 2.12 魚礁に作用する力とモーメントに関する記号

礫質で、施設が層積みされていない場合はすべて転倒安全率を安全率とした。

表 2.3 検討した安全率の算出法

呼称	安全率の算出法	仮定
従来法	従来の設計法（安全率は安定計算表の値）	
提案法 A	新算定法（図 2.3 に示す場合分けを含む）に基づく。	砂礫底の場合は十分な層厚がある。 波と流れの交差角 $\theta = 0, 60, 90^\circ$
提案法 B	場合分け以外はすべて新算定法に基づく。	波と流れの交差角 $\theta = 0, 60, 90^\circ$

なお、流れの設計流速は従来の設計法に従い、波との交差角 θ を考慮して次式により求めた。

$$U_c(z_R) = U_R \sqrt{\cos \theta + 1.5} \quad \text{式 2.18}$$

$$U_c(z) = U_c(z_R) (z/z_R)^{1/7} \quad \text{式 2.19}$$

ここに、 $U_c(z)$ ：海底からの高さ z における設計流速

U_R ：海底からの高さ z_R における参照流速。参照流速は海図の海面流速や観測に得られた最大流速など。

4. 複合部材からなる構造物の流体力算定手法の検討

1) 課題 1：部材間隔の影響

部材間隔の影響の予測手法について、これまでの実験結果及び文献情報の再解析により検討した。

2) 課題 2：新算定法に対応した部材の流体力係数の整理

正四角柱、円柱、平板及び L 型アングル（等辺山形鋼）を基本的部材として、それらの C_{Fmax} について、これまでの実験結果と既往文献の再解析により実験公式の構築を試みた。

3) 課題 3：参照スケールの適切な決め方

参照スケールについては、2つの観点から検討した。一つは同じ部材でも流れに対する迎角が異なる場合で、もう一つは形状の異なる部材間の統一的表示方法である。

最初の課題は、魚礁の場合、複雑な構造や流れ場を作り出すために、流れに対して軸や面を意図的に傾けた部材（以下、斜材という）が少なくないことから重要である。斜材の流体力を求めるためのモデルとして、交差流の原理 cross-flow principle がある。交差流の原理とは、迎角のある物体に作用する流体力は物体に直交する流速成分による力により表され、流体力係数は迎角 α に独立であるとするもので、非定常流中の場合、流体力は次式で表される（図 2.13）。

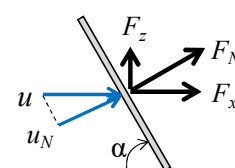


図 2.13 迎角のある細長い物体に作用する流体力

$$F_N = F_{DN} + F_{IN} \quad \text{式 2.20}$$

$$F_{DN} = (1/2)\rho C_{DN} A_N u_N |u_N| \quad \text{式 2.21a}$$

$$F_{IN} = \rho C_{MN} V_N \dot{u}_N \quad \text{式 2.21b}$$

$$F_x = F_N \sin \alpha \quad \text{式 2.22a}$$

$$F_z = F_N \cos \alpha \quad \text{式 2.22b}$$

ここに、 F_{DN}, F_{IN} ：物体の法線方向の抗力と慣性力、 A_N, V_N ：法線方向の基準面積と基準体積、 C_{DN}, C_{MN} ： $\alpha = 90^\circ$ のときの C_D と C_M 、 $u_N = u \sin \alpha$ したがって、任意の α のときの C_D と C_M は、流れ方向の基準面積 $A = A_N \sin \alpha$ と基準体積 $V = V_N \sin \alpha$ から、

$$C_D = \frac{F_{DN} \sin \alpha}{(1/2)\rho A u |u|} = C_{DN} \sin^2 \alpha \quad \text{式 2.23}$$

$$C_M = \frac{F_{IN} \sin \alpha}{\rho V \dot{u}} = C_{MN} \sin^2 \alpha \quad \text{式 2.24}$$

となるので、次の関係が得られる。

$$C_{DN} = C_D / \sin^2 \alpha \quad \text{式 2.25}$$

$$C_{MN} = C_M / \sin^2 \alpha \quad \text{式 2.26}$$

交差流の原理が成り立つかは、式 2.25 及び式 2.26 で求められる C_{DN} と C_{MN} が迎角によらない値になることから確かめられる。

交差流の原理は、円柱では定常流だけでなく、振動流でも適用できることが確認されている (Sumer, B. M., and J. Fredsøe. 1997. Hydrodynamics around cylindrical structures. World Scientific Publishing, Singapore) が、円柱以外の形状部材への適用可能性については明らかにされていない。そこで、円柱以外の部材への交差流の原理の適用性について文献情報の収集・解析により検討を行った。

参照スケールに関するもう一つの課題については、これまでの検討では簡略化のため、様々な種類の部材から構成される沈設魚礁であっても、各部材の参照スケールを同等とみなし、魚礁全体の平均部材幅 D_A と基準面積 A をそれぞれ $D_A = \sum A_i D_i / A$ と $A = \sum A_i$ (ここに、 A_i, D_i ：各部材の基準面積と部材幅) により求めてきた。しかし、基準面積 A は流体力算定式では常に $C_{Fmax} \times A$ や $C_{DS} \times A$ の形でしか現れないことからわかるように、流体力係数と独立ではない。形状の異なる部材間の場合、そのことを考えた参照スケールの一般化が必要である。その一般化を、次の二次元水路中での物体の抗力係数に及ぼす閉塞率 D/B の影響 (図 2.14) を表す次式 (「機械工学便覧」日本機械学会 2006) をヒントに検討した。

$$C_D = C_{D*} (U_*/U)^2 \quad \text{式 2.27}$$

$$U_*/U = C(1 - D/B)^{-m} \quad \text{式 2.28}$$

ここに、 U ：主流速度 (接近流速)、 U_* ：修正接近流速、 C_D ：閉塞のある場合の抗力係数、 C_{D*} ：閉塞のない ($D/B = 0$) 場合の抗力係数、 C, m ：下表で与えられる実験係数

形状	C_{D*}	m	C	D/B
→ ○	1.17	0.6	0.97	0.05~0.40
→ ■	2.0	1.25	0.95	0.05~0.333
→ ◁	1.25	0.8	0.96	0.075~0.333
→ ▷	2.2	1.0	0.96	0.075~0.333

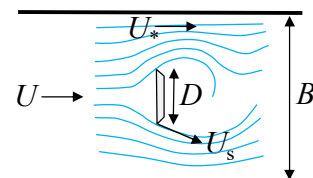


図 2.14 水路内に置かれた物体とその周辺の流れ

式 2.27 において $r_c = U_*/U$ とおくと、 $C_D/C_{D*} = r_c^2$ となるので、

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2 = \frac{1}{2} \rho (C_{D*} r_c^2) A U^2 = \frac{1}{2} \rho C_{D*} (A r_c^2) U^2 \quad \text{式 2.29}$$

式 2.29 は、基準面積を A から $A r_c^2$ に変更すれば、同じ流速 U と係数 C_{D*} を用いて抗力が求められることを意味する。この考えを応用して、単独部材の C_{Fmax} の式の一般化を考える。そのために、まず以下を仮定する。

仮定 I : C_{Fmax} の部材種類間の差異は主に部材周辺の流速の差異による。
 仮定 II は、迎角 90° の平板を基準 (*で表す) とすれば、次式で表される。

$$F_{max} = \frac{1}{2} \rho C_{Fmax*} A U_a^2 \quad (\text{迎角 } 90^\circ \text{ の平板の場合}) \quad \text{式 2.30}$$

$$F_{max} = \frac{1}{2} \rho C_{Fmax} A U_a^2 = \frac{1}{2} \rho C_{Fmax*} A U_{a*}^2 \quad (\text{別形状部材の場合}) \quad \text{式 2.31}$$

ここに、 U_{a*} は対象とする形状部材の周辺の修正接近流速であり、次式で定義される r_c が部材形状の関数であると考えられる。

$$r_c = U_{a*} / U_a \quad \text{式 2.32}$$

したがって、ある形状部材の C_{Fmax} と KC 数は式 2.31 と式 2.32 より次の二式で表される。

$$C_{Fmax} = \frac{F_{max}}{(1/2) \rho A U_a^2} = \frac{F_{max}}{(1/2) \rho A (U_{a*} / r_c)^2} = r_c^2 C_{Fmax*} \quad \text{式 2.33}$$

$$K_C = \frac{2 U_a T_{pp}}{D} = \frac{2 U_{a*} T_{pp}}{D r_c} = K_{C*} / r_c \quad \text{式 2.34}$$

U_{a*} は直接求められないが、式 2.33 より導かれる次式により推定できる。

$$r_c = \sqrt{C_{Fmax} / C_{Fmax*}} \quad \text{式 2.35}$$

高 KC 数の r_c の値を用いて K_C と C_{Fmax} との関係を $K_{C*} (= K_C r_c)$ と $C_{Fmax*} (= C_{Fmax} / r_c^2)$ との関係に置き換えれば、部材の種類によらない関係になるはずである。この予想を基本部材に当てはめ、 C_{Fmax} の一般化の妥当性を検討した。

4) 課題 4 : 角型魚礁を基本構造とする魚礁の流体力係数の推定方法の検討

昨年度に引き続き、比較的単純で基本的な構造である角型魚礁とその組み合わせ構造を対象として部材間隔または部材の混み合い度合いや礁全体の大きさなどが流体力係数に及ぼす影響について実験により検討した。実験は 2 次元造波水槽 (図 2.15) で行い、角型魚礁単体 (1 辺 60 mm の立方体 ; 柱・梁の断面 : 10×10 mm)、角型魚礁の組み合わせ魚礁、及び角型魚礁と斜板の組み合わせ魚礁 (図 2.16) により以下を検討した。

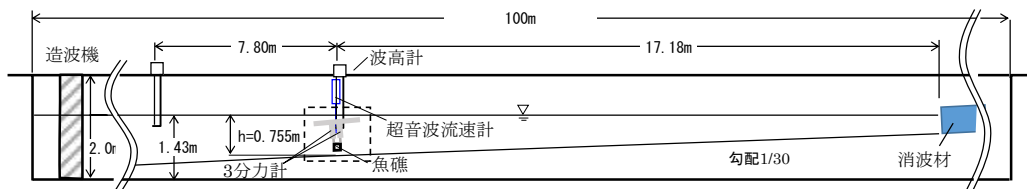


図 2.15 実験水槽断面図

- (1) 角型魚礁単体の流体力係数の推定
- (2) 角型魚礁の組み合わせ魚礁 (図 2.16 左) の流体力係数の算出方法

(3) 角型魚礁と斜板との組み合わせ魚礁 (図 2.16 右) の流体力係数の算出方法

実験では規則波($T=1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ s; $U_a = 6\sim 54$ cm/s)を発生させ、角型魚礁とその組み合わせ魚礁に作用する流体力を測定した。流体力の計測を行った模型の仕様と計測方法をそれぞれ図 2.17 と図 2.18 に示す。



図 2.16 実験に用いた魚礁模型

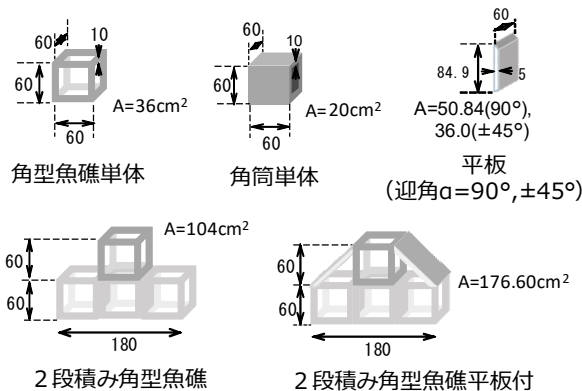


図 2.17 流体力を測定した模型

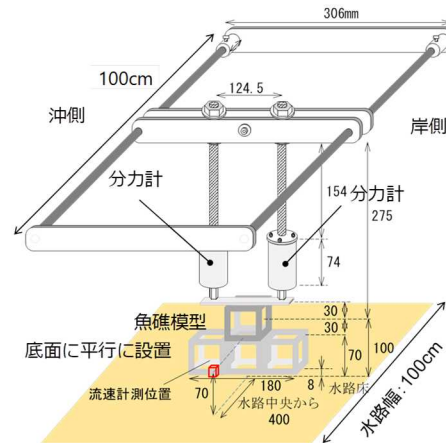


図 2.18 流体力の計測方法

5. マウンド状に積み上げられた石材の安定重量算定式の検討

囲い礁を用いた石材 (沖側にコンクリートブロックの囲いを配置した石材のマウンド) による浅場造成工法における石材の安定質量について、造波水槽による水理模型実験 (図 2.19) を行い、石材の安定質量の新算定式の適用性について検討した。

1) 実験方法

模型の想定縮尺は 1/25 とした。2次元造波水路 (全長 70 m×幅 0.70 m) 内の勾配 1/50 の斜面上に、図 2.19 に模式的に示す浅場造成工法の模型を設置した。この模型は沖側に囲い礁ブロックの模型 (高さ 9.5 cm) を配置し、その岸側背後に碎石 ($M_{50} = 15.8$ g; 範囲: 12.9–19.1 g) を敷き詰めて形成した。囲い礁ブロックの法先水深は 16 cm または 21 cm とし、有義波周期 $T_{1/3} = 2.0\sim 4.0$ s、換算沖波波高 $H_0' = 8\sim 11$ cm の不規則波を 227–342 波与えて、1 個分以上移動した表面の碎石の個数を調べた。

また沖波の入射波を容量式波高計 2 本で測定するとともに、囲い礁背面直後の碎石面との境界上 10 mm の高さでの水平流速を

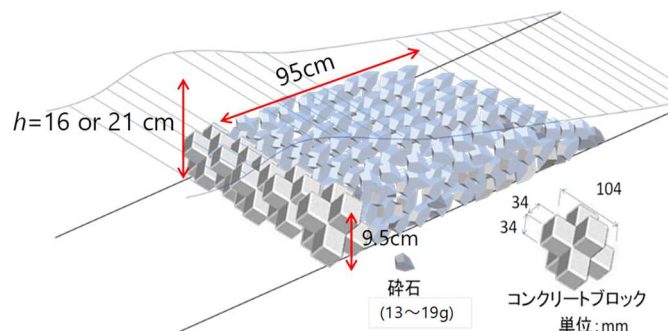


図 2.19 囲い礁を用いた石材の浅場造成工法に関する実験模型

電磁流速計（プローブ径 4 mm）により 50Hz で測定した。

2) 解析方法

石材の安定質量新算定手法 (Kawamata, S., M. Kobayashi, N. Tanada, 2018. Empirical model for probabilistic rock stability on flat beds under waves with or without currents. Coastal Engineering 140: 257-271) では、単体設置の石が 1 個分以上移動する確率（被害率 r_d ）を次式により求めることができる。

$$r_d = \exp\{-\exp[-0.608(\phi - 4.17)]\} \quad \text{式 2.36a}$$

$$\phi = (8.665 - \ln K_C) \frac{U_a^2}{\mu(\rho_s/\rho - 1)gD_{50}} \quad \text{式 2.36b}$$

$$K_C = 4u_{\max}T_{zp}/D_{50} \quad \text{式 2.36c}$$

ここに、 μ ：石材と海底との最大静止摩擦力、 ρ_s と ρ ：石材と海水の密度、 U_a , u_{\max} , T_{zp} ：

図 2.2 に示す最大流速波形の特性値、 D_{50} ：石材質量中央値の立方体相当径。

囲い礁内に敷き詰められた石材の場合、 D_{50} は単体設置の場合よりも小さくなる。その設置方法による効果は従来法と同じであると仮定でき（平成 27 年度調査結果による）、 D_{50} は次式で表される。

$$D_{50} = \sqrt{M_{50}/(\alpha\rho_s)} \quad \text{式 2.37}$$

ここに、 M_{50} ：石材質量の中央値、 α ：設置方法の効果を表す係数で、囲い礁内に敷き詰めて設置された石の場合は $\alpha=0.04$ 。

波動流速は、現在の設計では囲い礁を設置しない状態での囲い礁位置での水深から求めているが、囲い礁背面直後の石材面では水深の急激な減少により、波動流が狭窄されて流速が最大になると考えられる。そこで、ここでは囲い礁を設置しない状態での最深部での U_a , u_{\max} , T_{zp} を沖波条件から新算定手法により計算するとともに、囲い礁背面直後の石材面での流速の測定値からも求め、2 組の流速値から式 2.36 と式 2.37 を用いて被害率を算定して石の移動状況と比較した。

6. 検討部会の実施

本業務の実施にあたって、専門分野の知見を有する学識経験者を委員とする検討委員会を設け、2 回実施し、指導・助言を得ながら業務のとりまとめを行った。

e. 結果

1. 波と流れの共存場における流体力算定手法の検討

1) 計測力の妥当性の検討

振動方向の流体力 F_x について、昨年度と同じ方法による測定値とうなり対策 1 及びうなり対策 2 による測定値との比較例を図 2.20 に示す。図中の F_x の平滑値 $F_x(\text{DF})$ が示すように、うなり対策 1 では流体力のうなり（振幅がより大きい周期で変動）がむしろ増大したが、うなり対策 2 ではノイズ成分が増大したものの、うなりは消えて、平滑化によりほぼ一定周期の波形が得られた。以上からうなり対策 2 により実験を行った。

2) 流体力係数の再検討

図 2.21 に定常流中での抗力係数 C_{DS} の計測結果を示す。図にはレイノルズ数 $Re(=U_c D/\nu)$ 、ここに、 ν : 水の動粘性係数)と C_{DS} との関係を変差角 θ 別に示した。設計では、 C_{DS} 値として一般に Re の増加に伴い低下した後のほぼ一定になる領域 (亜臨界域) の値を用いる。この亜臨界域における C_{DS} 値は、 θ によってあまり大きく変化せず (平均は 0.75)、実験に用いた魚礁では流体力の流向依存性が小さいことがわかった。以降の流体力の計算では、 C_{DS} として便宜的に上記の平均値を用いた。

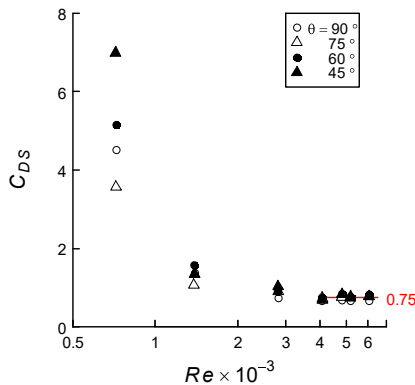


図 2.21 Re と C_{DS} との関係

また、流れなしの条件で魚礁模型を振動させた場合の KC 数と C_{Fmax} との関係は、昨年度とほとんど変わらず、次式の近似式で表された。

$$C_{Fmax} = 1.15 + 22.7KC^{-0.811} \quad \text{式 2.38}$$

2) 提案式の妥当性の検討

提案式 2.2 による最大流体力の計算値と測定値との比が流速比 r_u と変差角 θ によりどのように変化するかを図 2.22 に示す。データの一部に外れ値がみられるものの、昨年度の測定値とうなり対策を施した今年度の測定値に大きな相異はなく、昨年度のデータも含めてうねりの影響によるデータの偏りは小さかったと考えられる。したがって、図中の曲線で示す平均的な関係で判断すると、提案式の適用可能な (縦軸の値 < 1.2) 範囲は $\theta = 90^\circ$ ではすべての r_u に及ぶが、 $\theta < 90^\circ$ では θ の低下に伴い縮小し、 $\theta = 75^\circ$ であっても $r_u < \text{約 } 0.5$ の範囲で、 $\theta = 0^\circ$ では $r_u < \text{約 } 0.3$ にとどまる。

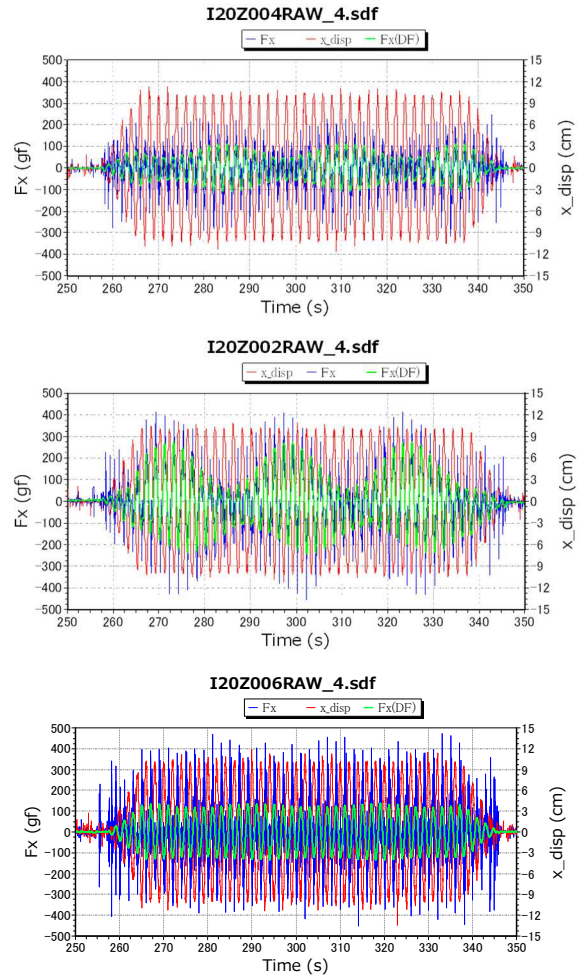


図 2.20 昨年度の方法 (上)、うなり対策 1 (中) 及びうなり対策 2 (下) による測定力の比較. x_disp : 振動装置の変位、 $Fx(DF)$: カットオフ周波数 2Hz のローパスフィルタをかけた Fx

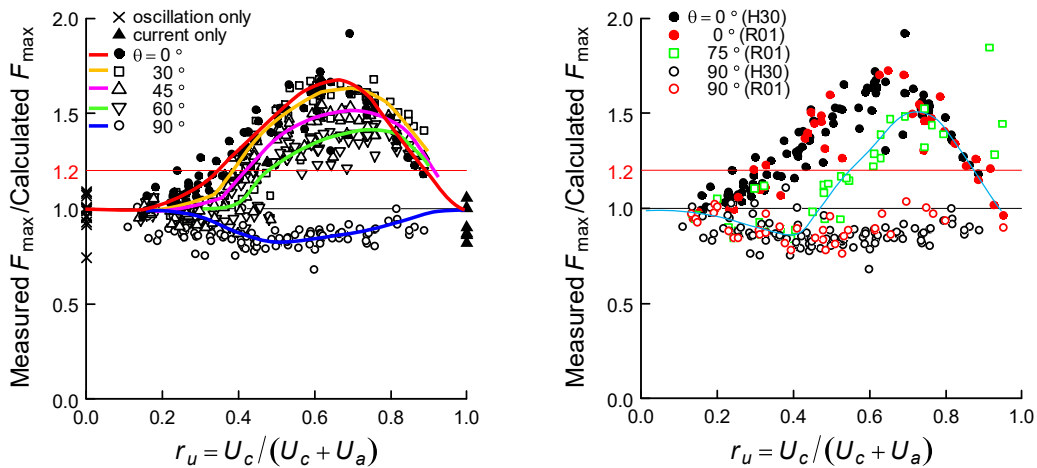


図 2.22 最大流体力の測定値と計算値との比に及ぼす流速比 r_u と交差角 θ の影響。昨年度の結果 (左) のうち、右図には今年度の実験結果(R1)に加えて同じ θ での昨年度の結果 (H30) を比較のため再プロットした。

3) 力の成分解析による最大流体力の推定

(1) x 方向分力の平均成分

x 方向分力の平均成分 $f_{x,c}$ と定常流 U_c と振動流速振幅 U_a の比 r_u との関係を図 2.23 に示す。 r_u が 1 に近づくとき、 $f_{x,c}$ は 1 に近くなる。逆に r_u が 0 に向かって減少すると、 $f_{x,c}$ は増加する。この増加は流体力を流速の 2 乗に比例する抗力とみなしたときの $f_{x,c}$ の式(A1)によりある程度説明できる。しかし、実験値は、例えば図 2.23 中の $\theta=60^\circ$ のときの値が示すように、式(A1)よりもさらに増加した。このことは、振動による乱れの発生により流体力が平均流速から推定される値よりも増加した結果と解釈できる。

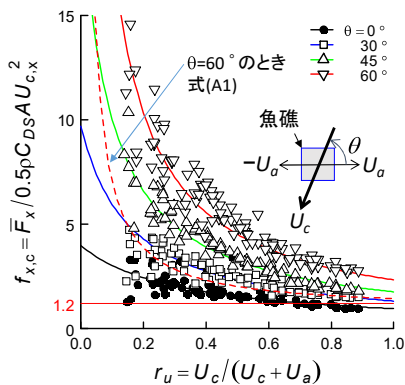
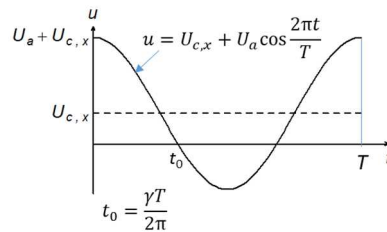


図 2.23 x 方向の平均成分力係数 $f_{x,c}$

図中の曲線は回帰式：

$$f_{x,c}(\theta, r_u) = \begin{cases} \frac{a_1(1 - a_2 \cos \theta)}{a_3(1 - a_4 \theta)(1 - r_u) + r_u} & \theta < 90^\circ \\ 0 & \theta = 90^\circ \end{cases}$$

ここに、 $a_1 = 3.71$, $a_2 = 0.741$, $a_3 = 0.242$, $a_4 = 0.0144$



「流体力=抗力」を仮定したときの $f_{x,c}$ の式(A1)：

$$f_{x,c} = \frac{2}{U_{c,x}^2 T} \int_0^{T/2} \left(U_{c,x} + U_a \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \left| U_{c,x} + U_a \cos \frac{2\pi t}{T} \right| dt$$

$$= \begin{cases} \left(1 + \frac{1}{2a^2} \right) \left(\frac{2\gamma}{\pi} - 1 \right) + \frac{4}{\pi a} \sin \gamma \left(\frac{\cos \gamma}{a} + 1 \right) & a < 1 \\ 1 + \frac{1}{2a^2} & a \geq 1 \end{cases}$$

ここに、 $a = U_{c,x} / U_a = r_u \cos \theta / (r_u + 1)$ 、 $\gamma = \cos^{-1}(-a)$

(2) x 方向分力の振動成分

図 2.24 に x 方向分力の振動成分力係数 $f_{x,w}$ を示す。 $r_u \rightarrow 0$ のとき、 $f_{x,w}$ は 1 に近づく。逆に r_u が 1 に向かって増加すると、 $f_{x,w}$ は急激に増加する。この増加は式(B1)によりある程度説明できる。しかし、実験値は式(B1)の計算値よりも小さい（例えば、図中の $\theta=0^\circ$ のときの値）。このことは、振動と交差する流れが振動方向の後流渦を押し流し、流体力を減少させるよう作用することを予想させる。 $\theta=90^\circ$ のとき、 $r_u=0.4$ 前後で $f_{x,w}$ が 1 より低下しているのは、その作用が $\theta=90^\circ$ で最大化するためと考えられる。

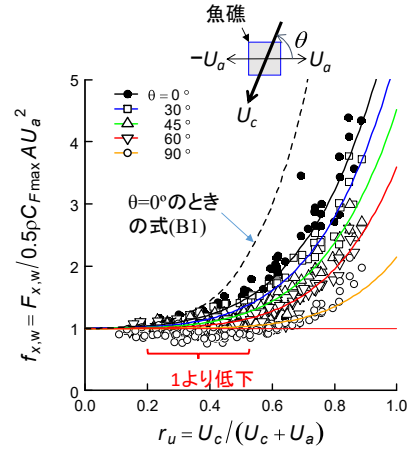


図 2.24 x 方向の変動成分力係数 $f_{x,w}$

図中の曲線は回帰式： $f_{x,w}(\theta, r_u) = b_1(\cos\theta + b_2 r_u) b_3$

ここに、 $b_1 = 0.0033$, $b_2 = 3.01$, $b_3 = 5.31$

「流体力=抗力」を仮定したときの $f_{x,w}$ の式(B1)：

$$f_{x,w} = \begin{cases} \frac{(U_{c,x} + U_a)^2 + (U_{c,x} - U_a)^2}{2U_a^2} = 1 + \left(\frac{U_{c,x}}{U_a}\right)^2 & : U_{c,x} < U_a \\ \frac{(U_{c,x} + U_a)^2 - (U_{c,x} - U_a)^2}{2U_a^2} = 2\frac{U_{c,x}}{U_a} & : U_{c,x} \geq U_a \end{cases}$$

(3) y 方向分力

図 2.25 に y 方向分力係数とその回帰式を示す。 $\theta \geq 45^\circ$ 、 $r_u \rightarrow 1$ のとき、 $f_{y,c}$ は 1 に近づく。 r_u が逆に 0 に向けて減少すると、 $f_{y,c}$ は増加傾向を示すが、データのばらつきも大きくなる。増加傾向とばらつきの原因として、それぞれ流れと交差する方向の振動による乱流抵抗の増加と振動による渦の発生が考えられる。

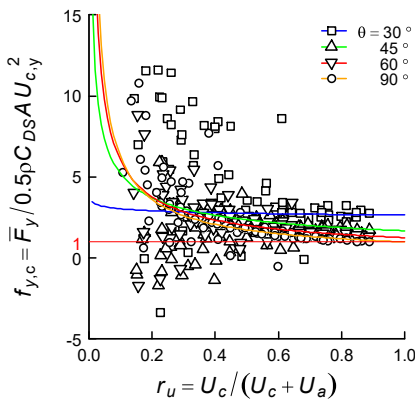


図 2.25 y 方向分力係数 $f_{y,c}$

図中の曲線は回帰式： $f_{y,c}(\theta, r_u) = \begin{cases} 0 & \theta = 0^\circ \\ a r_u^b & \theta > 0^\circ \end{cases}$
ここに、 $a = c_1(\sin^{-1}\theta - 1) + 1$ 、 $b = c_2 + c_3 \sin^{-1}\theta$ 、
 $c_1 = 1.65$ 、 $c_2 = -1.54$ 、 $c_3 = 0.74$

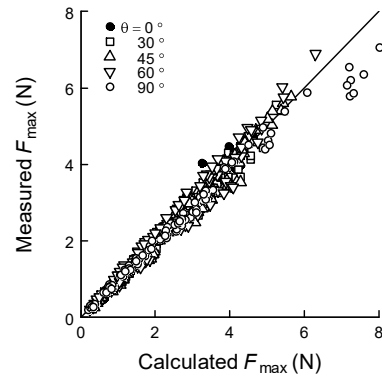


図 2.26 ベクトル合成力と測定値との比較

$$\text{Calculated } F_{\max} = \sqrt{(\bar{F}_x + F_{x,w})^2 + \bar{F}_y^2}$$

ここに、 $\bar{F}_x = f_{x,c}(\theta, r_u) \times \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_{c,x}^2$ 、 $F_{x,w} = f_w(\theta, r_u) \times \frac{1}{2} \rho C_{Fmax} A U_a^2$ 、 $\bar{F}_y = f_{y,c}(\theta, r_u) \times \frac{1}{2} \rho C_{DS} A U_c^2$

(4) ベクトル合成力の実験値と予測値の比較

図 2.26 に最大流体力の測定値と図 2.23～図 2.25 に示した各分力の回帰式から予測されるベクトル合成力との比較を示す。計算値は測定値によく一致した。したがって、波・流れ共存場の力を振動方向（波向）分力の平均成分と振動成分およびその直交成分の 3 成分に分解すると、成分力はそれぞれ、基準力 $0.5 \rho C_{DS} A U_{c,x}^2$ 、 $0.5 \rho C_{Fmax} A U_a^2$ 、 $0.5 \rho C_{DS} A U_{c,y}^2$

と係数 (θ と r_u の関数) との積で表すことができるといえる。しかし、各係数の実験式は非常に複雑で、また θ や r_u が 0 や 1 に近づくと、著しく大きくなることから、実用面では問題がある。

4) 汎用的流体力算定式構築の検討

振動流が卓越する条件 ($r_u < 0.5$) で C_{Fmax} を用いた式による流体力の算定値を測定値と比較した結果を図 2.27 に示す。流れの影響を無視して流体力を C_{Fmax} と U_a から算出する (図 2.27 左) と、 r_u の増加に伴い、過小算定の程度が増加し、 $\theta \leq 75^\circ$ では明らかに許容値の 1.2 を超えてしまう。しかし、振動流速に振動方向の平均流速成分を加えた V_{wc} を代表流速として $K_C = V_{wc}T/D$ の関数として算定した C_{Fmax} 値を流体力算定に用いる (図 2.27 右) と、逆に明らかに過大算定になった。

一方、流れが卓越する条件 ($r_u > 0.5$) では、慣性力の影響を無視した流体力係数 (すなわち C_{DS}) と波と流れの合成流速ベクトルの大き

さ V_m を代表流速として流体力を求めると (図 2.28)、明らかな過小算定になった。

以上をまとめると、流体力係数に C_{Fmax} をとると、代表流速に V_{wc} をとっても過大評価になるが、流体力係数に C_{DS} をとると、代表流速に V_m をとっても過小評価になるといえる。このことを踏まえて、すべての交差角 θ と流速比 r_u に適用可能な、流体力係数と代表流速の関数化を検討した。様々な関数の適用性を検討した結果、目的に合致する汎用式として次式が得られた。

$$F_{max} = \frac{1}{2} \rho C_F A V_m^2 \tag{式 2.39a}$$

$$C_F = (1 - \sqrt{r_u}) C_{Fmax} + \sqrt{r_u} C_{DS} \tag{式 2.39b}$$

$$V_m = \sqrt{U_a^2 + U_c^2 + 2U_a U_c \cos\theta} \tag{式 2.39c}$$

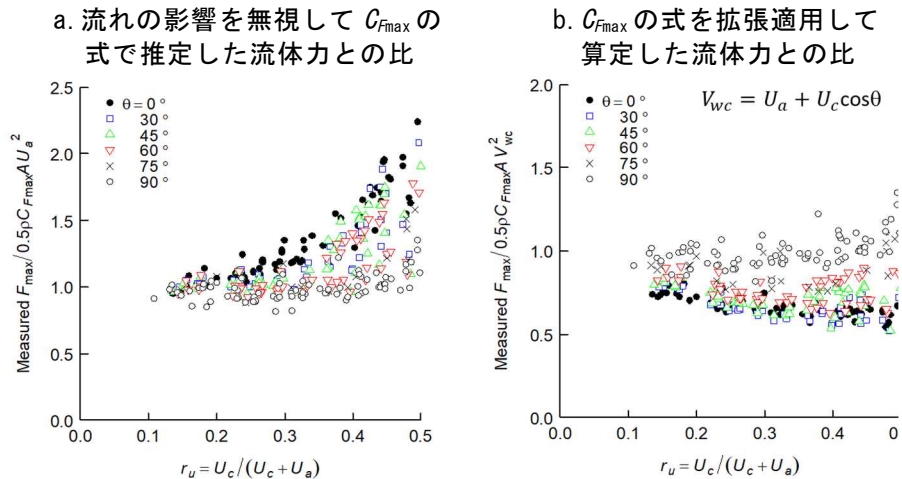


図 2.27 振動流が卓越する条件 $r_u < 0.5$ における流体力の測定値と C_{Fmax} の式による算定値との比

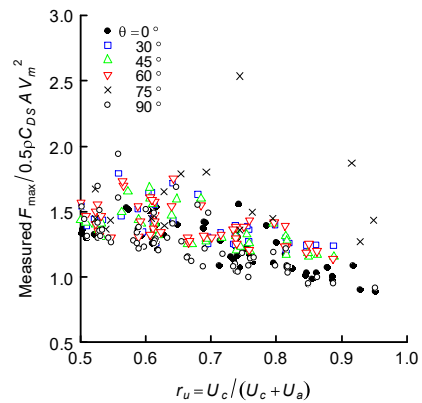


図 2.28 流れが卓越する条件 $r_u > 0.5$ における流体力の測定値と抗力の式による算定値の比

C_{Fmax} は実験式 (式 2.38) により算定されるが、波・流れ共存場での KC 数の可能性のある定義として以下の 2 式があり、両者の適合性を比較した (図 2.29)。

$$KC_1 = (U_c + U_a)T/D \quad \text{式 2.40}$$

$$KC_2 = V_m T/D \quad \text{式 2.41}$$

C_{Fmax} の算定に KC_1 を用いると、最大流体力を過小算定する傾向が認められたが、 KC_2 ではその傾向はほぼ消失した。この結果は、 $U_c + U_a \geq V_m$ の関係と、KC 数の計算に用いる流速 (すなわち、KC 数) の増加に伴い、 C_{Fmax} が減少することを反映したものと解釈され、KC 数の計算に用いる流速としては V_m の方が適切であるといえる。 KC_2 から算出される C_{Fmax} と式 2.39 を用いて求

められる最大流体力は、すべての r_u と θ の条件に対して相対誤差がほぼ 20% 以下であり、実用的に十分な精度を持つものと結論される。この結果は、以下の点でも重要である。流体力算定ではこれまでモリソン式が国際的な標準法になっていた

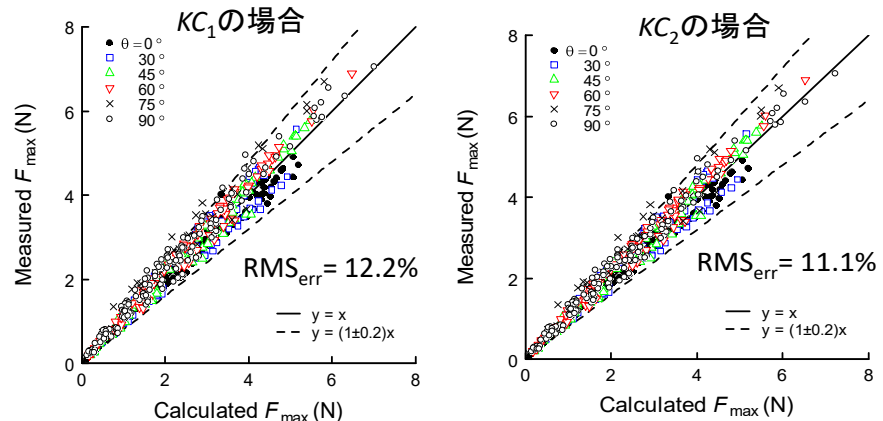


図 2.29 汎用式による算定値と実験値の比較

が、最大流体力の算定に必要な情報が、新算定式では U_a 、 T_{pp} の特性値だけであるのに対して、モリソン式では流速の時間波形そのものであること、さらに波と流れが交差する条件でのモリソン式の適用性は検証されていないことから、新算定式はモリソン式に代わる流体力算定の標準法になり得るといえる。

2. 沈設魚礁の安定性の照査法の検討—見直し案の作成

1) 残された課題 1: U_a の算定式

H_{max}/h と U_a/U_{Airy} との実験式とともに、表 2.1 の現地観測データ (波高の小さいデータを除いた $H_{m0} > 0.4$ m、ここに $H_{m0} = 4\eta_{rms} \approx H_{1/3}$; $N = 4130$) と水槽実験データ (Lab.; s : 斜面勾配) を図 2.30 にプロットした。現地観測データは水槽実験データの範囲を網羅し、より広い条件に及んでいることがわかる。また、実験式は水槽実験データだけでなく、現地観測データの全体的傾向をよく表しているものの、残差が大きいケースがみられる。この残差の説明要因を検討するため、現地観測データを用いて補正係数 $r_c = U_a/rU_{Airy}$ の単回帰分析を行った (表 2.4)。可能性が考えられた 4 つの無次元数のうち、 $H_{1/3}/L$ が、決定係数 R^2 が最も高く、統計的にも有意であった。図 2.31 に $H_{1/3}/L$ と補正係数 r_c との関係を示す。

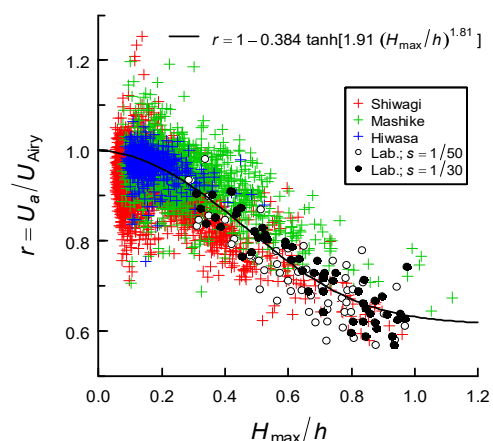


図 2.30 H_{max}/h と U_a/U_{Airy} との関係

回帰式はデータの変動を偏りなく説明し、良好な説明変数になっていることを示した。

しかし、補正係数をこの実験式に乗じて用いるのは回帰係数を2段階で異なるデータを用いて決定したことになり、望ましくない。そこで、すべての観測データを用いて、補正係数 r を2つの変数 H_{\max}/h と $H_{1/3}/L$ の関数として非線形最小2乗法で決定し直し、次式を得た。

$$r = \left\{ 1 - c_1 \tanh \left[c_2 \left(\frac{H_{\max}}{h} \right)^{c_3} \right] \right\} \left(c_4 + c_5 \frac{H_{1/3}}{L} \right) \quad \text{式 2.42}$$

ここに、 $c_1=0.458$ 、 $c_2=1.71$ 、 $c_3=1.50$ 、 $c_4=0.945$ 、 $c_5=4.45$ ($R^2=0.473$ 、 $SE=0.052$ 、 $N=4101$)。

現地観測データを用いて昨年度の式(式 2.3b) と式 2.42 により計算した U_a を観測値と比較したものを図 2.32 と図 2.33 に示す。式 2.3b を式 2.42 に置き換えることにより推定誤差が縮小し、ほぼ $\pm 10\%$ の範囲に収まった。

表 2.4 補正係数 $r_c = U_a/rU_{\text{Airy}}$ の単回帰分析結果

説明変数	回帰係数 ($\pm 95\%$ 信頼限界)	R^2
H_{\max}/L	1.59 (± 0.103)	0.183
$H_{1/3}/L$	2.74 (± 0.164)	0.207
h/L	0.326 (± 0.0477)	0.042
$H_{1/3}/h$	0.237 (± 0.0206)	0.110

$H_{1/3}$: 有義波高、 h : 平均水深、 L : 有義波周期 $T_{1/3}$ と h から求めた微小振幅波の波長

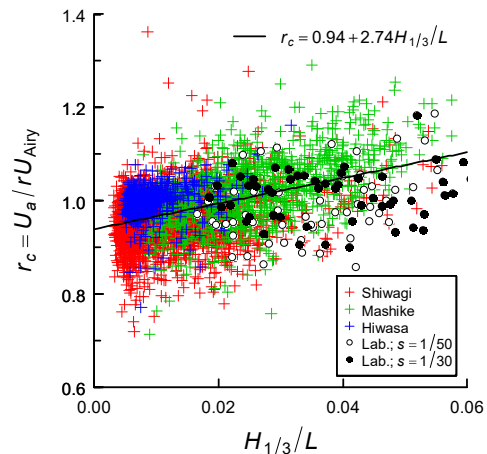


図 2.31 $H_{1/3}/L$ と r_c の関係と回帰式

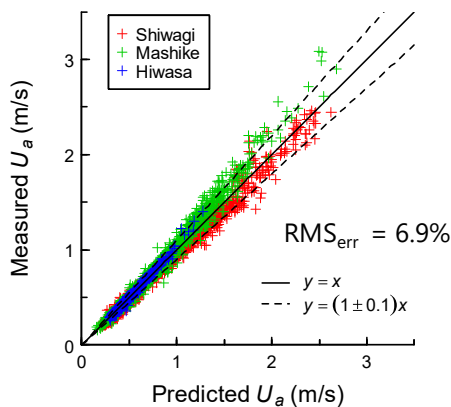


図 2.32 現地観測データの U_a の測定値と昨年度提案式 2.3 による算定値との比較

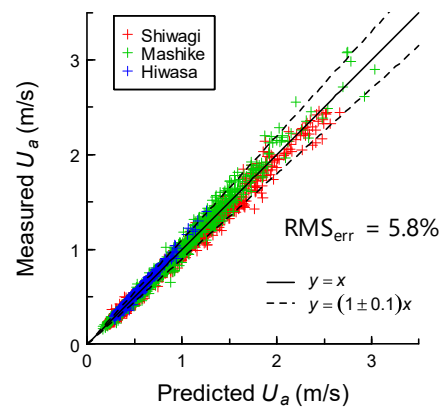


図 2.33 現地観測データの U_a の測定値と修正式 2.38 による算定値との比較

水槽実験データについても式 2.3b と式 2.42 に基づく U_a の計算値と測定値を比較する(図 2.34 と図 2.35) と、誤差の rms 値 RMS_{err} は修正式の方が若干大きくなったものの、昨年度の提案式でみられた、 U_a が 10%以上過小算定されるケースが、修正式ではほとんどみられなくなり、過小算定の問題がほぼ解消された。

以上より、式 2.3a、式 2.3c 及び式 2.42 により U_a の妥当な算定が得られると結論される。

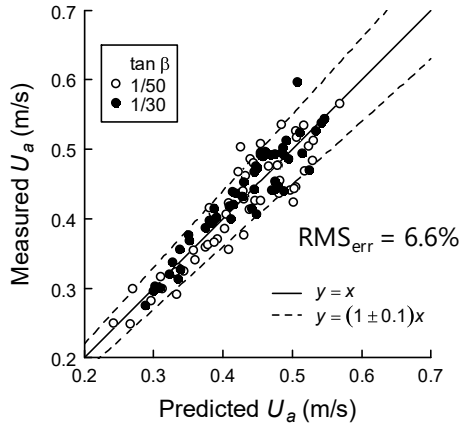


図 2.34 水槽実験データの U_a の測定値と昨年度提案式 2.3 による算定値との比較

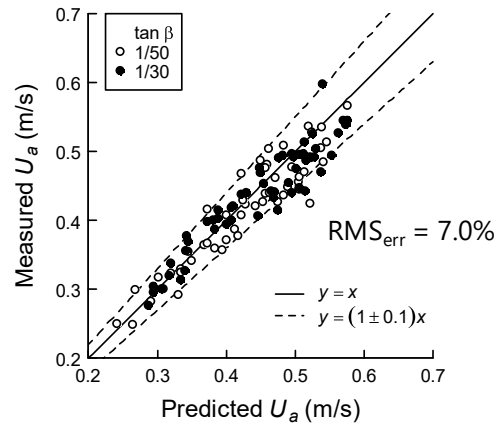


図 2.35 水槽実験データの U_a の測定値と修正式 2.38 による算定値との比較

2) 残された課題 2 : 転倒モーメントの算定方法

部材流体力が適用可能な高層魚礁の実機模型 (kk-21, AS) を対象にして、部材流体力法による流体力の計算値 F_t と図心高さ z_c との積と部材ごとに求めた転倒モーメントの合計 M_t とを比較した (図 2.34)。これらの実験条件は $h=185.7\text{cm}$ 、 $h/L=0.167\sim 0.530$ 、礁高・水深比 $H_R/h=0.45, 0.54$ であった。礁高・水深比は非常に大きかったにもかかわらず、 $F_t \times z_c$ による推定精度はかなり高く、誤差はほぼ許容範囲にとどまった。

流体力の測定値 F_t と z_c との積と転倒モーメント M_t の測定値との比較を図 2.35 に示す。高さ方向の部材密度が下方ほど多い実機模型では高 $H_R/h (\geq 0.45)$ にもかかわらず、 $F_t \times z_c$ による推定値は M_t の測定値によく一致した。高さ方向の部材密度が均一である矩形模型では、 $F_t \times z_c$ による推定値は $H_R/h \leq 0.3$ では測定値によく一致するものの、

H_R/h がその範囲を超えると、転倒モーメントを過小算定する傾向が強まり、 $H_R/h=0.45$ では誤差が許容値の 20% を超えてしまう可能性があることが示唆された。

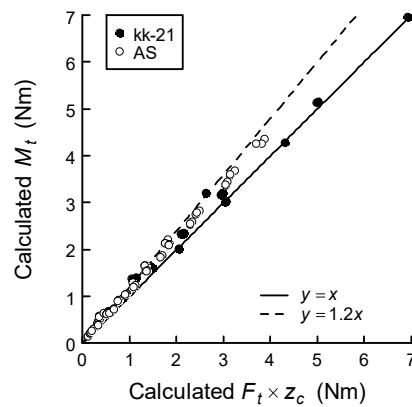


図 2.34 高層魚礁模型を用いた部材流体力法による $F_t \times z_c$ と M_t との比較

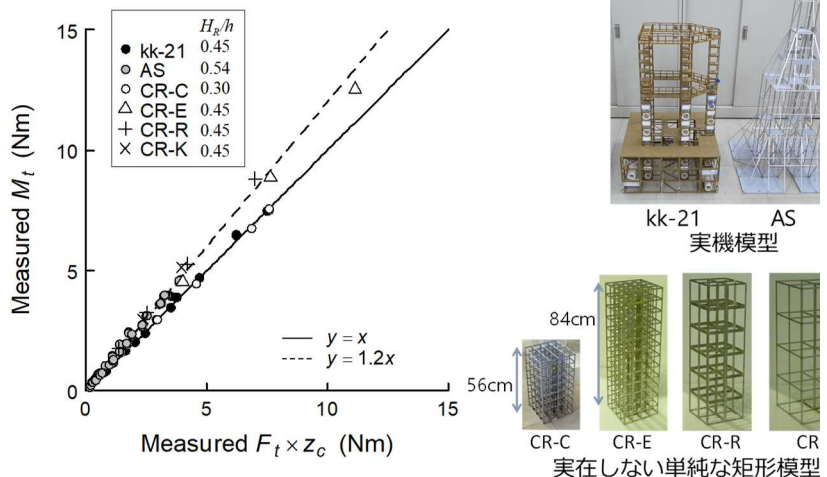


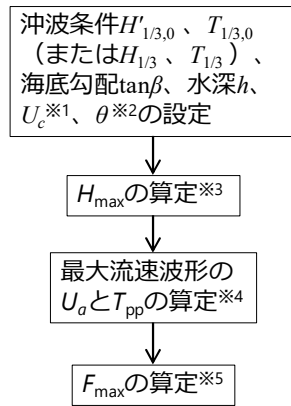
図 2.35 高層魚礁模型の流体力の測定値と z_c との積と M_t の測定値の比較

以上より、 $F_t \times z_c$ は、少なくとも $H_R/h \leq 0.3$ であれば、転倒モーメントの近似値として用いることができ、高さ方向の部材密度が下方ほど多い一般の沈設魚礁であれば、その適用範囲はより高い H_R/h に及ぶといえる。

3) 見直し案

以上の検討結果を踏まえて策定した沈設魚礁の安定性照査法の見直し案のうち、流体力算定に関する部分をまとめて図 2.36 に示す。図中の合田モデルの値とは砕破の影響を考慮した水深による波

高算定手法（合田良実, 1975. 浅海域における波浪の砕波変形. 港湾技術研究所報告 14:59-106）により算定される 1/250 最大波高 $H_{1/250}$ である。この波高値は、設計参考図書では「不規則波砕破を考慮した水深のみによる波高の変化」から算定される有義波高に「直立消波ブロック堤に作用する波力の算定」から算定される λ_0 を乗じて算出できる。



$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho C_F A V_m^2$$

$$C_F = (1 - \sqrt{r_u}) C_{F\max} + \sqrt{r_u} C_{DS}$$

$$V_m = \sqrt{U_a^2 + U_c^2 + 2U_a U_c \cos \theta}$$

$$r_u = U_c / (U_c + U_a)$$

ここに、 ρ :海水の密度、 $C_{F\max}$:最大力係数($K_C = V_m T/D$ の関数; D :代表部材幅)、 A :基準面積、 C_{DS} :定常流中での抗力係数

- ※1 砕波領域では一般に波動流速が卓越するため、流れの速度 U_c は無視してもよい。
- ※2 波と流れの交差角 θ が不明の場合は $\theta = 0^\circ$ とする。

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H_{1/3} & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \text{合田モデルの値} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

ここに、 K_s :微小振幅波の浅水係数、 $L_0 = gT^2/(2\pi)$ 、 $T = T_{1/3} = T_{1/3,0}$

$$U_a = r U_{\text{Airy}}$$

$$r = \left\{ 1 - c_1 \tanh \left[c_2 \left(\frac{H_{\max}}{h} \right)^{c_3} \right] \right\} \left(c_4 + c_5 \frac{H_{1/3}}{L} \right)$$

$$U_{\text{Airy}} = \frac{\pi H_{\max} \cosh(2\pi z_c/L)}{T \sinh(2\pi h/L)}$$

$$T_{pp} = \min\{1, 0.514 + 0.535 \exp(-0.00933Ur)\} T/2$$

$$Ur = H_{\max} L^2 / h^3$$

ここに、 $c_1 = 0.458, c_2 = 1.71, c_3 = 1.50, c_4 = 0.945, c_5 = 4.45, z_c$:魚礁の図心の高さ、 L :微小振幅波の波長

図 2.36 沈設魚礁の安定性の照査法見直し案における流体力算定

3. 沈設魚礁の安定性の照査法の検討—見直し案の影響評価

1) 追加施設の流体力係数の測定

規則波実験により求めた礁 5 の $K_C (=U_a T_{pp}/D ; D=4 \text{ cm})$ と $C_{F\max}$ の関係を回帰式とともに図 2.37 に示す。

2) 見直しに伴う安全率の変化

(1) 提案法 A に変更した場合の安全率の変化

従来法と提案法 A ($\theta=0^\circ$ を仮定) による安全率を比較して図 2.38a に示す。提案法 A ($\theta=0^\circ$) により、安全率は全般的に低下し、169 件中 32 件で 1.2 未満となった。安全率 < 1.2 となった事例を詳しくみるため、その設置水深と安全率を図 2.38b に示す。浅い水深に平置きされたコンクリート礁（増殖礁または囲い礁ブロックとして設置された礁 5）の安全率は提案法 A ($\theta=0^\circ$) により 1.2 を下回るケースはわずかで、下回っても 1.2 より

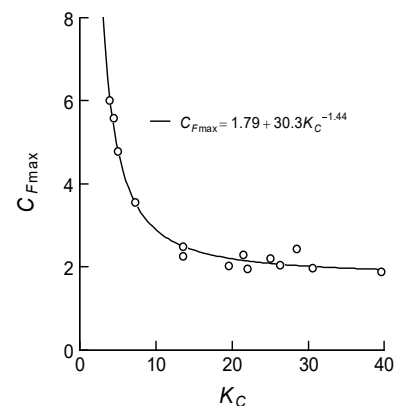


図 2.37 礁 5 の K_C 数と $C_{F\max}$ の関係

も大幅に小さくなることはなかった。これに対して、特に層積みした魚礁では 1.2 を大きく下回るケースが多く、影響が比較的大きいことが示唆された。

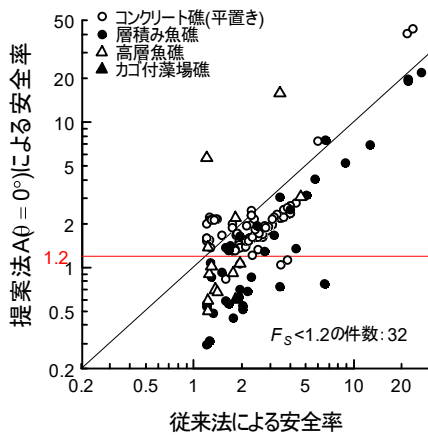


図 2.38a 従来法と提案法 A ($\theta=0^\circ$) の安全率の比較 (総件数 169)

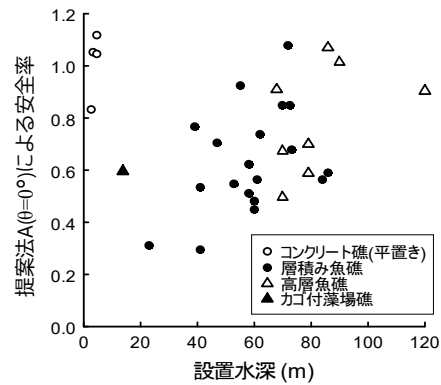


図 2.38b 提案法 A ($\theta=0^\circ$) による安全率が < 1.2 となったケース (32 件) の設置水深と安全率

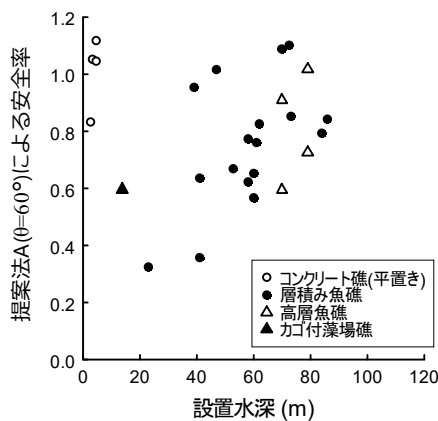


図 2.38c 提案法 A ($\theta=60^\circ$) による安全率が < 1.2 となったケース (26 件) の設置水深と安全率

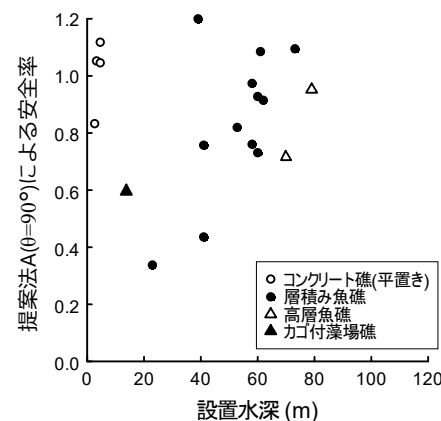


図 2.38d 提案法 A ($\theta=90^\circ$) による安全率が < 1.2 となったケース (19 件) の設置水深と安全率

提案法 A ($\theta=60^\circ$) と提案法 A ($\theta=90^\circ$) による安全率が < 1.2 となったケースの設置水深と安全率の関係をそれぞれ図 2.38c と図 2.38d に示す。波・流れ共存場となることの多い非砕波 (水深の深い) 領域では、交差角の増加に伴い、安全率が < 1.2 となるケースが減少した。この交差角の影響は、特に大水深域に設置される高層魚礁で大きかった。

(2) 提案法 B に変更した場合の安全率の変化

図 2.31a に従来法と提案法 B ($\theta=0^\circ$ を仮定) の安全率の比較を、また図 2.31b~d に $\theta=0^\circ$ 、 60° 、 90° を仮定した場合の提案法 B の設置水深と安全率の関係を示す。安全率 1.2 を下回る件数でみるかぎり、従来法に対する提案法 B による安全率の低下は、提案法 A によるものに比べて大きくはなかった。

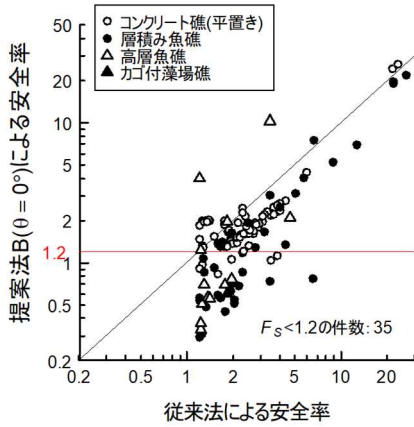


図 2.39a 従来法と提案法の安全率の比較
提案法 B ($\theta=0^\circ$) に変更した場合の安全率の変化 (総件数 169)

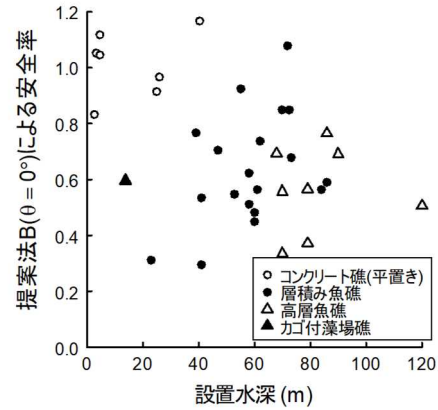


図 2.39b 提案法 B ($\theta=0^\circ$) による安全率が<1.2となったケース (35件) の設置水深と安全率

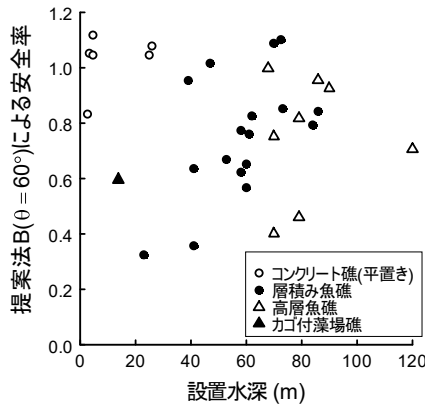


図 2.39c 提案法 B ($\theta=60^\circ$) による安全率が<1.2となったケース (32件) の設置水深と安全率

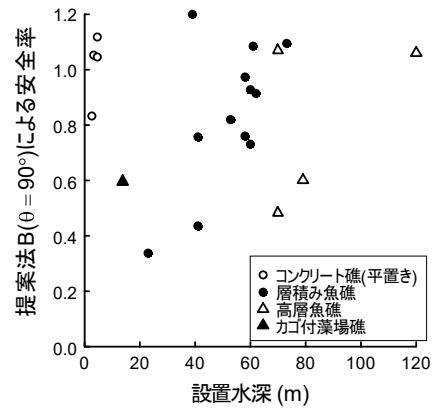


図 2.39d 提案法 B ($\theta=90^\circ$) による安全率が<1.2となったケース (21件) の設置水深と安全率

(3) 安定性評価に及ぼす場合分けの影響

安定性評価の場合分け (砂礫底での滑動抵抗の増加を考慮すること) の影響を調べるため、 $\theta=0^\circ$ を仮定したときの提案法 B と提案法 A による安全率を比較した (図 2.40)。ここでは、場合分けの影響がない層積み魚礁は除いた。場合分け (提案法 A) により、安全率を 1.6 倍ほど高くできるケースが多くみられた。これは、式 2.15 で求められる転倒安全率が式 2.14 の滑動安全率よりも $(l_d/z_c)/\mu$ 倍大きくなるため、砂礫底の場合 $\mu=0.6$ であるので、 $l_d/z_c \approx 0.96$ の施設が多かったことを意味する。

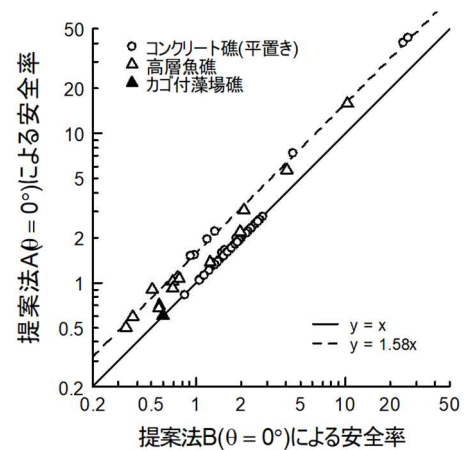


図 2.40 $\theta=0^\circ$ のときの提案法 B と提案法 A の安全率の比較

4. 複合部材からなる構造物の流体力算定手法の検討

1) 課題 1 : 部材間隔の影響

円柱杭群の最大力係数に及ぶ杭間隔の影響に関する Bonakdar らの研究 (Bonakdar, L., H. Oumeraci, and A. Etemad-Shahidi. 2015. Coastal Engineering **102**:49–68)を再検討した。Bonakdar らは、円柱杭群と単独杭に作用する最大波力(F_{group} と F_{single})の比 K_G を検討し、並列配置と縦列配置 (図 2.41) の場合の K_G として以下の実験式を示した。

並列配置の場合：

$$K_G = \begin{cases} 1.14(S_G/D)^{-0.19} & S_G/D \leq 1.5, KC \leq 6 \\ 0.87(S_G/D)^{-0.51}KC^{0.26} & S_G/D \leq 1.5, 6 < KC \leq 13 \\ 1.4(S_G/D)^{-0.46}\exp(52.7KC^{-2.22}) & S_G/D \leq 1.5, KC > 13 \\ 1.1 & 1.5 < S_G/D \leq 2 \\ 1 & S_G/D > 2 \end{cases} \quad \text{式 2.43}$$

縦列配置の場合：

$$K_G = \begin{cases} 1 - 0.074(S_G/D)^{-0.8}\exp(KC/56) & S_G/D \leq 3 \\ 1 & S_G/D > 3 \end{cases} \quad \text{式 2.44}$$

Bonakdar らは、上記 2 式において部材間隔の影響を無視できる (すなわち $K_G=1$ を仮定できる) 範囲を縦列配置で $S_G/D > 3$ 、並列配置で $S_G/D > 2$ としている。しかし、並列配置の場合の図から読み取ったデータのうち、 KC 数の影響が無視できる $KC > 30$ のみを詳しく調べてみると (図 2.42)、 K_G は $2 < S_G/D < 3$ でも 1.05 よりも大きい。したがって、並列配置の場合も含めて $K_G=1$ と仮定できる範囲は $S_G/D > 3$ といえる。

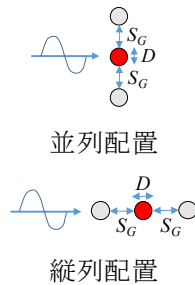


図 2.41 円柱群の配列

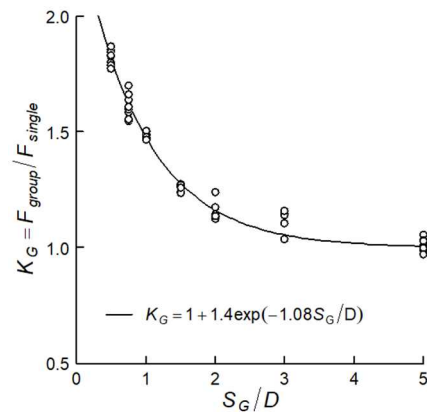


図 2.42 並列配置の円柱杭群の K_G ($KC > 30$ の場合)

以上の考え方を応用し、高層魚礁の単純矩形模型 (図 2.43) において、部材間隔の影響を考慮した最大力係数 C_{Fmax} の実験公式の構築を検討した。これらの模型は、波動流に対して矩形セル (図 2.43 最上段左の四角形) からなる垂直面を形成する。各矩形セルにおいて、図中の赤の一点破線内の断面上流側から接近する流線は矩形セル中央の開口部を通過する。開口部を通過するときの流速の増加率 r_A は

$$r_A = (S_{G1} + D_1)(S_{G2} + D_2)/(S_{G1} \times S_{G2}) \quad \text{式 2.45}$$

で近似できる。円柱杭の r_A を同様の考えに基づき求めると、

$$r_A = (S_G + D)/S_G$$

となるので、隙間比は r_A により次式で表される。

$$S_G/D = 1/(r_A - 1)$$

2次元 L 型アングルの C_{Fmax} との比は、 $1/(r_A - 1)$ と KC 数の関数：

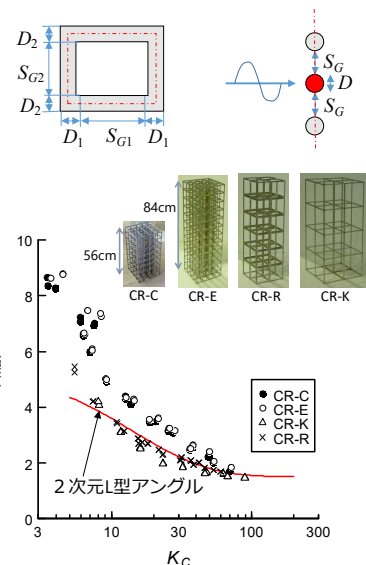


図 2.43 単純矩形模型の KC 数と C_{Fmax} との関係

$$\frac{C_{Fmax}}{C_{Fmax, angle}} = f\left(\frac{1}{r_A - 1}, K_C\right)$$

ここに、 $C_{Fmax, angle}$: 2次元L型アングルの C_{Fmax}

として、当てはめのよい経験式を非線形回帰分析により求めると、次式が得られた。

$$\frac{C_{Fmax}}{C_{Fmax, angle}} = 1 + c_1 \exp\left(-\frac{c_2}{r_A - 1}\right) \exp(c_3 K_C^{-c_4}) \quad \text{式 2.46}$$

ここに、 $c_1 = 1.5, c_2 = 0.99,$

$c_3 = 4.5, c_4 = 0.48 (N = 120,$
 $SE = 0.107, R^2 = 0.85)$

各模型の r_A は式 2.40 により表 2.5 に示す値になる。これらの r_A 値より、閉塞効果は CR-C と CR-E で同程度に高く、CR-R と CR-K は同程度に低く、単独の L 型アングルに近いと予想される。実際に r_A から式 2.45 を用いて求められる各模型の KC 数と C_{Fmax} の関係 (図 2.44) はその予想に合致し、実験値にもよく一致した。このことは、3次元構造物の閉塞効果が遮蔽面の最大の断面での r_A により評価できる可能性を示唆する。

表 2.5 各模型の r_A

模型名	r_A
CR-C	1.37
CR-E	1.37
CR-R	1.10
CR-K	1.16

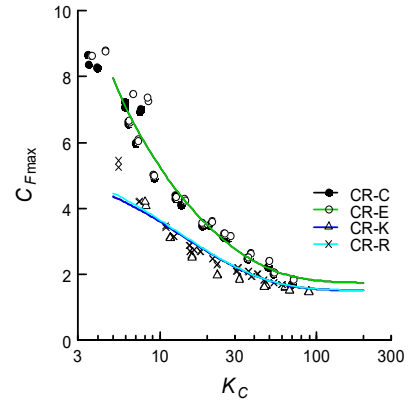


図 2.44 式 2.40 による予測値 (実線) と実験値との比較

2) 課題 2 : 新算定法に対応した部材の流体力係数の整理

4 種類の 2 次元基本部材 (正四角柱、円柱、平板及び L 型アングル (等辺山形鋼)) の C_{Fmax} の実験式を KC 数の関数として最小 2 乗法により得た (図 2.45)。この式型には KC 数 $\rightarrow \infty$ のとき、一定値に漸近するものを採用した。回帰分析に用いた基礎データには、円柱では Keulegan & Carpenter (Keulegan, G. H., and L. H. Carpenter. 1958. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. J. Res. Natl. Bur. Stand. 60:423-440) の実験データを、またそれ以外では造波水槽実験 (平成 25 年度実施) のデータを用いた。

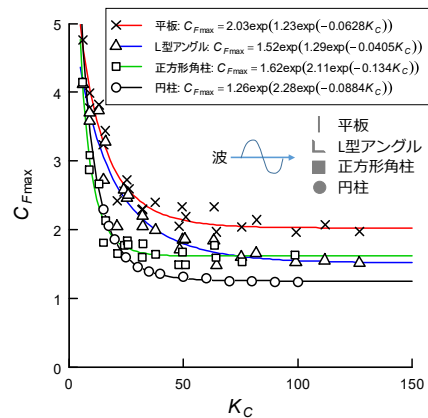


図 2.45 基本部材の KC 数と C_{Fmax} との関係とその近似式

3) 課題 3 : 参照スケールの適切な決め方

(1) 形状は同じで迎角の異なる場合 : 交差流の原理の適用性

交差流の原理の適用性を検証できるデータとして、定常流と振動流中での迎角のある平板の流体力に関する文献が得られた。

定常流中での迎角のある 2 次元平板に作用する流体力は、Applied Fluid Dynamics Handbook (Blevins, R. D. 1984. Krieger Publishing Co., Malabar, Florida ; 以下 AFDH と略記) によると、次の近似式で表される。

$$C_D = C_N \sin \alpha \quad \text{式 2.47a}$$

$$C_L = C_N \cos \alpha \quad \text{式 2.47b}$$

$$C_N = \begin{cases} 2\pi \tan \alpha & \alpha < 8^\circ \\ 0.8 & 8^\circ \leq \alpha < 12^\circ \\ (0.222 + 0.283/\sin \alpha)^{-1} & 12^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad \text{式 2.48}$$

従来モデル (AFDH の近似式) と交差流の原理によるモデルの迎角と C_D の関係を図 2.46 に示す。両者はおおむね一致し、交差流の原理は定常流中での平板にも適用できることを示した。

振動流中での迎角のある二次元平板に作用する流体力については、松本・岡島 (松本達治, 岡島厚 2000. 正弦振動流中の平板周りの流れ. 構造工学論文集 46A:1013-1022) の実験データに基づき検討した。松本・岡島は、振動流水槽中に迎角 α で固定した平板

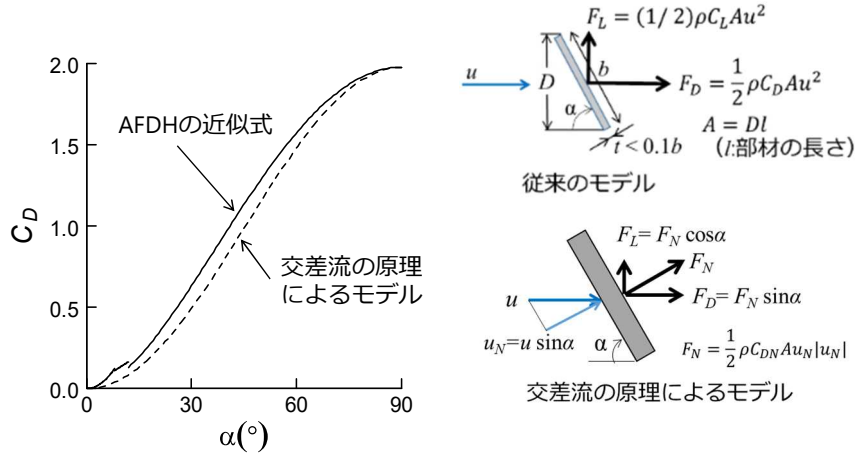


図 2.46 定常流中に迎角 α で固定された平板の抗力係数

の流体力を測定し、参照スケールを図 2.47 上図のように定義して抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M を求めたが、これらの流体力係数は迎角により大きく異なった (図 2.47)。

次に、松本・岡島の実験データに交差流の原理を適用する。簡略化のため、平板の厚さ t が無視できるほど小さいと仮定すると、KC 数は次式で表され、交差流の原理を適用しても変わらないことがわかる。

$$K_C = \frac{U_{Nm} T}{b} = \frac{U_m \sin \alpha \cdot T}{b} \approx \frac{U_m T}{D} \quad \text{式 2.49}$$

ここに、 U_{Nm} : 平板に垂直方向の振動流の流速振幅

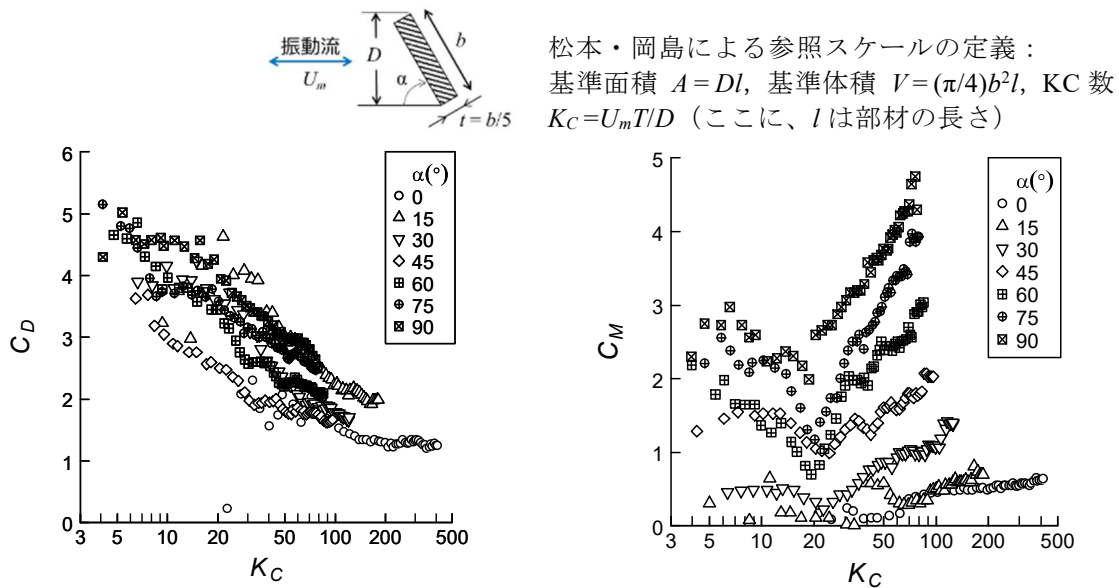


図 2.47 振動流中に迎角 α で固定された平板の流体力係数 (松本・岡島 2000)

図中のデータは原図画像からの読み取り値

これに対して、交差流の原理における C_{DN} と C_{MN} に相当する $C_D/\sin^2\alpha$ と $C_M/\sin^2\alpha$ を KC 数に対してプロットする (図 2.48) と、平板の厚さの影響が無視できない迎角が小さい ($\alpha \leq 30^\circ$) 場合を除き、迎角によらずほぼ一致し、交差流の原理が適用できることを示した。

以上により、交差流の原理は迎角のある平板にも適用でき、流れ方向の投影面積 A を $A \sin^2\alpha$ に変更すれば、 $\alpha=90^\circ$ のときの流体力係数をそのまま用いることができるといえる。

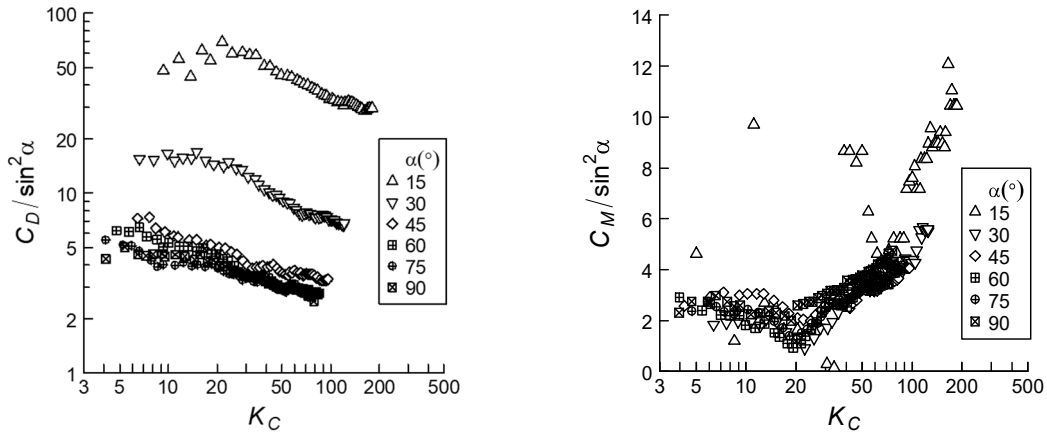


図 2.48 交差流の原理に基づき、平板に垂直な成分の値に換算した松本・岡島(2000)の KC 数と流体力係数との関係

最後に、交差流の原理の 3 次元平板への適用性について実験により検討した。実験は造波水槽で行い、図 2.49 上図に示す 3 次元平板 ($s = 6 \text{ cm}$, $b = 6\sqrt{2} \text{ cm}$, $t = 1 \text{ cm}$) を迎角 $\alpha = 90^\circ$ 、 135° 、 -135° で固定して規則波下で流体力を測定した。その結果を図 2.49 に示す。結果は交差流の原理よりも従来のモデルに近くなった。交差流の原理が当てはまらなかった原因としては以下が考えられる。交差流の原理はスパン長が長い 2 次元部材を想定し、流れの剥離が幅方向にしか起こらないときに適用できるが、スパン長が短い 3 次元部材では剥離が幅方向だけでなく長さ方向の端部からも生じ、現象が異なるためである。

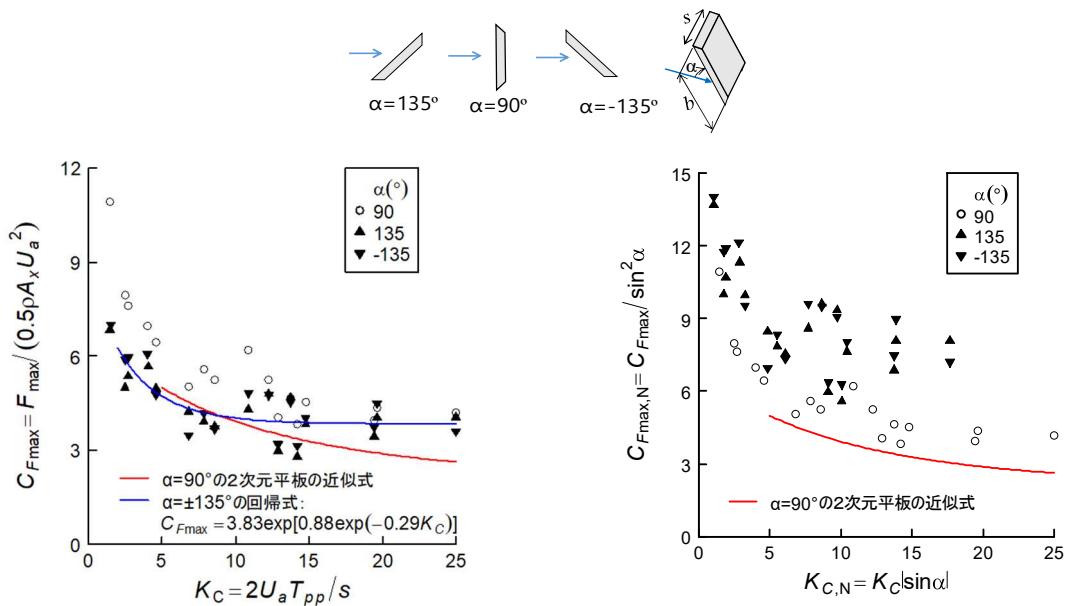


図 2.49 3 次元平板の波動流中での KC 数と C_{Fmax} との関係を従来法 (左) と交差流の原理 (右) で解析した結果. A_x : 波動方向の平板の投影面積

(2) 形状の異なる基本部材の参照スケールの一般化

図 2.45 に示した基本部材 4 種類の C_{Fmax} の実験式と式 2.35 により求められる r_c とともに、一般化した KC 数と C_{Fmax} との関係を図 2.50 に示す。低 KC 数領域 ($KC^* < 60$) を除き、部材種類間の差は小さく、参照スケールの一般化は概ね妥当であることを示した。

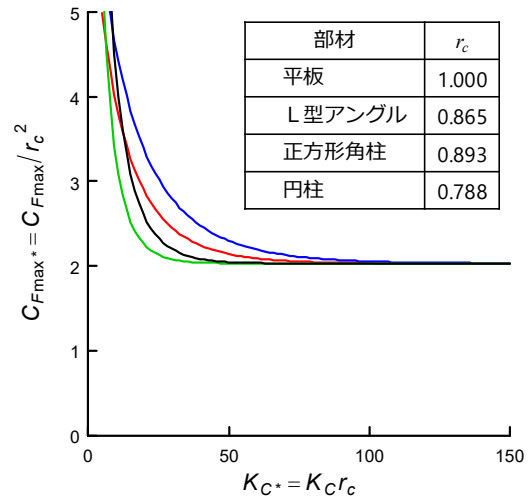


図 2.50 基本部材の KC^* と C_{Fmax}^* の関係

4) 課題 4 : 角型魚礁を基本構造とする魚礁の流体力係数の推定方法の検討

同じ波の条件下で測定された、同じ大きさの角型魚礁と角筒の最大流体力を図 2.51 に示す。角型魚礁単体は、図中の模式図のように、構成部材の波に対して垂直に縦列する 2 本 1 組の角柱に作用する流体力が 1 枚の平板と同等であると仮定すると、角型魚礁も角筒と同等になるはずである。しかし、実験結果はそれとは異なり、流体力は角型魚礁の方が約 1.4 倍大きくなった。また、角型魚礁単体の流体力は単独角柱の合力にほぼ一致した (図 2.52)。角型魚礁の縦列する 2 本の角柱の隙間比 (隙間 / 角柱幅) は 4 で、先に述べた円柱杭群における流体力学的に単独部材とみなせる限界隙間比の 3 よりも大きい。したがって、ここで試験した形状の角型魚礁単体の場合、構成部材の角柱は流体力学的に単独部材の集まりとみなせると結論される。

同じ波の条件下で測定された、同じ大きさの角型魚礁と角筒の最大流体力を図 2.51 に示す。角型魚礁単体は、図中の模式図のように、構成部材の波に対して垂直に縦列する 2 本 1 組の角柱に作用する流体力が 1 枚の平板と同等であると仮定すると、角型魚礁も角筒と同等になるはずである。しかし、実験結果はそれとは異なり、流体力は角型魚礁の方が約 1.4 倍大きくなった。また、角型魚礁単体の流体力は単独角柱の合力にほぼ一致した (図 2.52)。角型魚礁の縦列する 2 本の角柱の隙間比 (隙間 / 角柱幅) は 4 で、先に述べた円柱杭群における流体力学的に単独部材とみなせる限界隙間比の 3 よりも大きい。したがって、ここで試験した形状の角型魚礁単体の場合、構成部材の角柱は流体力学的に単独部材の集まりとみなせると結論される。

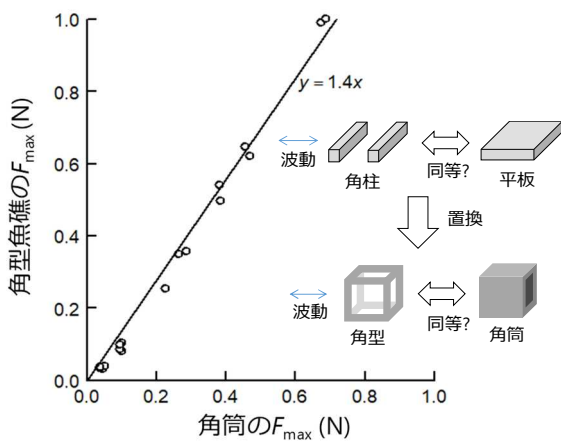


図 2.51 同じ波の条件下で測定された角筒魚礁と角型魚礁の最大流体力の比較

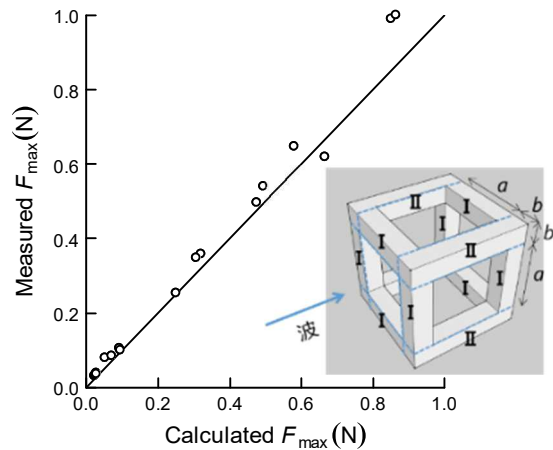


図 2.52 角型魚礁の部材流体力法による最大流体力の計算値と実測値との比較。部材流体力法では、波向に直交する 8 本の角柱 I と平行な 4 本の角柱 II の C_{Fmax} をそれぞれ単独の角柱 (C_{Fmax} : 図 2.45 中の式、 $A=ab$) と平板 ($C_{Fmax}=2$ 、 $A=b^2$) と仮定。

次に、2 段積み角型魚礁に作用する流体力を次の 2 つの方法で推定した結果を図 2.53 に示す。

推定方法 A1 : 角型魚礁単体の推定流体力 × 礁の数 (= 4)

推定方法 A2：流れに直交する $A=4\times 1\text{ cm}$ と $A=4\times 2\text{ cm}$ の角柱それぞれ 20 本と 2 本、及び流れに沿う角柱 ($A=1\times 1\text{ cm}$) 8 本の流体力の和

図は推定方法 A1 が明らかな過大算定になり、単体礁間の遮蔽効果により流体力が減少することを明示した。これに対して、推定方法 A2 による計算値は実験値にほぼ一致し、ここでも単独部材の合力が礁全体の流体力のよい推定になり得ることを示した。

最後に、2 段積み角型魚礁に 2 枚の平板をハの字型に取り付けた魚礁の作用流体力を次の 2 つの方法で推定した結果を図 2.54 に示す。

推定方法 B1：1 段目の構成部材と 2 段目の平板 2 枚に作用する流体力の推定値の和

推定方法 B2：1 段目の構成部材と 2 段目の平板 1 枚に作用する流体力の推定値の和

推定方法 B2 による計算値は実験値にほぼ一致したが、推定方法 B1 では明らかな過大算定になった。この場合、平板の間隔と平板の短辺長 ($s=6\text{ cm}$) との比は 1~3 (平均で 2) と小さい。推定方法 B2 により妥当な推定値が得られたことから、2 枚の平板は遮蔽効果により流体力学的には平板 1 枚とみなせ、また 2 枚の平板間の角型魚礁 1 個に作用する流体力も無視できると考えられる。

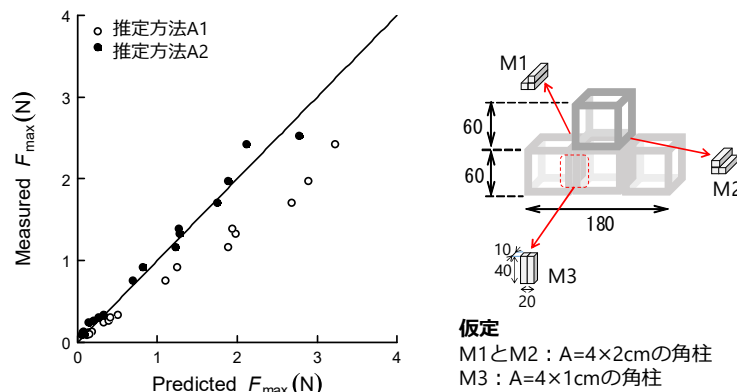


図 2.53 角型魚礁 2 段積み礁に作用する流体力の推定方法 A1 と推定方法 A2 による計算値と実験値との比較

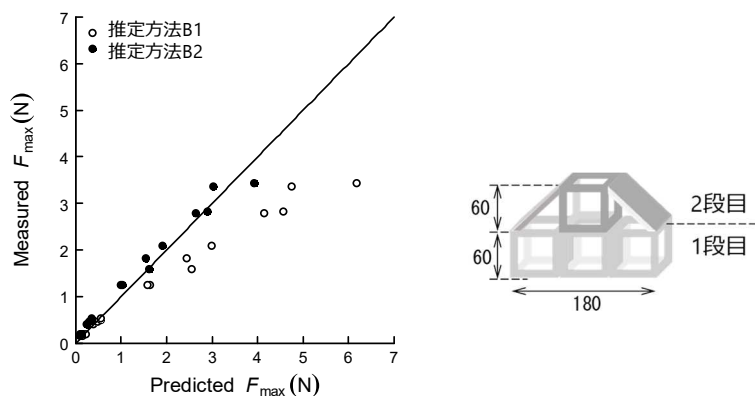


図 2.54 角型魚礁 2 段積み礁にハの字型に平板 2 枚を取り付けた魚礁に作用する流体力の推定方法 B1 と推定方法 B2 による計算値と実験値との比較

5. マウンド状に積み上げられた石材の安定重量算定式の検討

一群の不規則波の作用前と後で碎石の状況を調べた例を図 2.55 に示す。1 個分以上移動した碎石は、囲い礁背面直近 (図中の黄色の碎石) だけでなく、広い範囲にわたっていた。

表 2.6 に各造波条件における U_a 、 u_{\max} 及び T の天端上実測値と法先水深での予測値、及びそれから計算された被害率、並びに一個以上移動した碎石の個数を示す。この表より、浅場造成による水深の低下率が大きい方 ($h=16\text{ cm}$ のとき) で、被害率が増加する可能性が高いことが推察される。また、この表では被害率の実測値を示していないが、表層の碎石総数が約 500 個であることから、移動した石の最大個数 27 個は被害率で約 5% に相当する。このことから、安定質量の算定に、天端上での流速を用いると、過大算定することになるが、施設のない状態での流速を用いると、逆に過小になることが予想される。

また、移動した石の個数と天端上での実測流速からの被害率に相関がみられない(表 2.6) ことから、本工法における石材の移動メカニズムが従来の石材の安定質量算定式が想定している場合と異なり、式の適用自体に問題がある可能性が考えられる。すなわち、囲い礁内に石材を敷き詰める従来の工法では面的な広がり重視し、水深の変化があまり起こらないことを想定したもので、従来の石材の安定質量算定式もそのことを前提にしている。これに対して、囲い礁を用いた浅場造成工法では水深の急激な減少により流速が急激に増加し、その流速変化の違いが石の安定性に影響すると考えられる。したがって、浅場造成工法における石材の安定質量については、新算定式は適用できず、より詳細な実験により検討する必要がある。

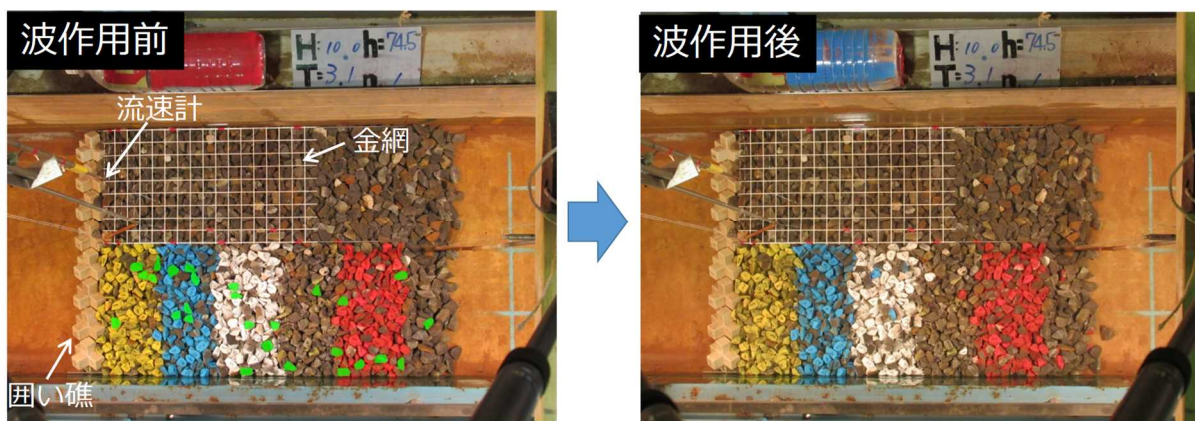


図 2.55 浅場造成工法に関する模型実験結果の例 ($h=16.0\text{ cm}$, $H_0'=9.45\text{ cm}$, $T_0=2.99\text{ s}$) : 水槽上面から撮影した石材の移動状況。碎石敷き詰め域のうち、写真向かって上側では石が動かないようにするため金網で押さえて流速測定を実施。下側半分の碎石領域の表面の石には、黄色、青色、白色、無色、赤色に塗った石を設置。左側写真で緑色の碎石が波作用後に 1 個分以上移動した石で、この場合、黄色 5 個、青色 6 個、白色 6 個、無色 2、赤色 7、無色 1 の合計 27 個が移動。

表 2.6 浅場造成工法に関する水理模型実験の結果

h (cm)	入射波(沖波)		波数	天端上実測値			法先水深予測値			移動した石の数	被害率 r_d	
	H_0' (cm)	T_0 (s)		U_a (m/s)	u_{\max} (m/s)	T_{zp} (s)	U_a (m/s)	u_{\max} (m/s)	T_{zp} (s)		天端上実測値による	法先水深予測値による
16.0	10.46	2.08	342	0.713	0.950	0.17	0.344	0.510	0.61	3	0.48	0.001
	9.45	2.99	270	1.474	1.874	0.19	0.349	0.550	0.78	27	1.00	0.001
	8.35	3.87	247	0.801	1.083	0.26	0.348	0.567	1.00	13	0.62	0.001
	8.13	4.02	252	0.839	1.086	0.18	0.349	0.572	1.03	13	0.76	0.001
21.0	11.14	2.11	324	0.810	0.962	0.25	0.380	0.550	0.67	1	0.67	0.002
	9.84	2.99	251	0.774	1.007	0.39	0.389	0.599	0.80	1	0.49	0.002
	8.52	4.01	227	0.972	1.131	0.20	0.388	0.621	1.03	0	0.92	0.001

6. 検討部会の実施

本業務の実施にあたっては、専門分野の知見を有する学識経験者を委員とする検討委員会を設け、2回実施し、指導・助言を得ながら業務のとりまとめを行った。

委員は、専門を水産工学、海岸工学、沿岸域環境学とする各有識者とした。

- ・大竹 臣哉：福井県立大学海洋生物資源学部 教授
- ・岡安 章夫：東京海洋大学学術研究院 海洋資源エネルギー学部門 教授
- ・田島 芳満：東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授
- ・楳田 真也：金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 准教授

第1回委員会

日 時：令和元年6月18日(火) 9:30～12:00

場 所：アーバンネット神田カンファレンス 3D

議事内容：

- ① 平成30年度第2回委員会の指摘と対応について
- ② 波と流れの共存場における流体力算定手法について
- ③ 複合部材からなる構造物の流体力算定手法について
- ④ 非対称波動流速にも対応した流体力算定手法について
- ⑤ 沈設魚礁の安定性の照査法について

第2回委員会

日 時：令和元年11月26日(火) 13:30～16:30

場 所：アーバンネット神田カンファレンス 3D

議事内容：

- ① 平成31年度第1回委員会の指摘と対応について
- ② 波と流れの共存場における流体力算定手法について
- ③ 非対称波動流速にも対応した流体力算定手法について
- ④ 沈設魚礁の安定性の照査法について
- ⑤ 複合部材からなる構造物の流体力算定手法について

第2回委員会で委員から受けた指摘のうち、次年度における対応を必要とする事項を表2.7に示す。同表に、次年度の対応に関する調査担当者の考えを併記した。

表 2.7 次年度における対応を必要とする指摘一覧

委員の指摘事項	調査担当者の考え
●沈設魚礁の転倒モーメントの計算方法について	
<ul style="list-style-type: none"> ● (図心の高さでの流速から流体力を計算し、その高さで積で転倒モーメントを評価する方法について) 方法として悪くはないが、注意点を整理しておく必要があるのではないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設計参考図書の改訂案には、「モーメントや流体力は高さ方向に積分して求めることを基本とするが、適用範囲を示して提案する簡略法を用いることができる」といった表現で提案法を提示する。
●波と流れの共存場における流体力算定法の検討について	
<ul style="list-style-type: none"> ● KC 数の定義で使用する流速としては $U_a + U_c$ (波動流速振幅 + 定常流速) よりも最大流速ベクトルの大きさ V_m の方がよいのではないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ● V_m の方が式の推定精度も向上することから、ご指摘のとおり変更した。※1
<ul style="list-style-type: none"> ● 流速比 $r_u (= U_c / (U_a + U_c))$ と KC 数の考え方について何らかの形で示して頂きたい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 非常に難しい問題であるが、検討する。
●非対称波動流速にも対応した流体力算定手法の検討について	
<ul style="list-style-type: none"> ● 提案式については、委員会として了承するが、観測データの追加により検証を継続することをお願いしたい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設計参考図書の改定後に検討する。
●沈設魚礁の安定性の照査法について	
(特に異論はなく、結果は了承)	
●複合部材からなる構造物の流体力算定手法の検討について	
(特に異論はなく、提案している4つの課題の検討を進めていくこととなった)	

※1 は 31 年度報告書において対応済み。

f. 今後の課題

- ・ 沈設魚礁の安定性の評価の場合分け (図 2.3) に加えて、流体力算定手法 (図 2.36) がとりまとめられた。すでに構築されている着定基質の安定質量算定式と合わせて設計参考図書改訂案の作成が次の課題となる。
- ・ 部材流体力法については、矩形セルからなる鋼製魚礁の流体力係数について部材間隔の影響を隙間比の関数として考慮するモデルの可能性を、また角柱からなるコンクリート魚礁について単独の角柱部材の集まりとして流体力を求められる可能性を示した。しかし、魚礁・増殖礁には多種多様な形状のものがある。さらに異なる形状部材を追

加検討し、より多様な形状の魚礁の流体力係数を推定できるよう、部材流体力法を適用できる基本構造のバリエーションを充実させる必要がある。

- ・ 囲い礁を用いた浅場造成工法の石材の安定質量については、新算定式の適用可能性は低く、構造形式の異なる工法として設計方法を別に検討する必要があることが示された。

平成 31 年度水産基盤整備調査委託事業報告書

I. 課題名

「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」のうち (3) 浮魚礁の合理的な機能保全手法の検討

II. 実施機関及び担当者名

一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所	
第2調査研究部 部長	伊藤 靖
第2調査研究部 主任研究員	廣瀬紀一
国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所	
水産土木工学部	
主幹研究員	三上信雄
水産基盤グループ長	佐伯公康

III. ねらい

浮魚礁の供用期間は、「漁港・漁場の施設の設計参考図書」（以下、「設計参考図書」）において標準で 10 年と示されている。現状では、供用期間中に浮魚礁本体の保守点検、維持管理が十分に実施されているとは言えず、流出事故等も発生している。浮魚礁の機能診断により劣化の早期発見を行い、補強や早期の撤去等の対応策を実施することにより、未然に流出事故等を防ぎ、回収にかかる予想外の経費負担を低減できる可能性がある。そこで、供用期間中の着実な供用を実現するため、標準的かつ実用的な機能保全手法をとりまとめる。

また、浮魚礁はメーカーにより設計方法の違いが大きいため、個々の施設について「設計参考図書」の要求性能が満たされているか否かの判断が難しい状況にある。そのため、「設計参考図書」の浮魚礁の記述について、実態と整合をとりつつ、いっそう標準的な記述をめざして改良の余地がある。そこで、実態との整合性が十分に検証されていなかった事項を抽出して検証し、「設計参考図書」の改訂が必要な部分についてはその改訂案を示す。

IV. 方法

(1) 浮魚礁の保守点検等の維持管理の高度化手法

平成 30 年度には、浮魚礁担当者会議等の既存資料の収集整理や事業主体、浮魚礁メーカーへのアンケート調査、ヒアリング調査により、浮魚礁の機能保全に関する実態を把握した。その結果、浮魚礁の耐用年数 10 年を確保するため、定期的に浮魚礁本体の点検を実施する必要があるが、浮魚礁の保守点検は搭載した観測機器のみを対象としていることが多く、魚礁本体はほとんど点検されていないことが判明した。

浮魚礁の点検項目として、「浮魚礁保守点検・点検要領」（マリノフォーラム 21(以下 MF21)、平成 5 年)が刊行されているが、26 年前の刊行で現在の技術と異なる記載があり、具体的な点検方法や判断基準が記載されていないなどの課題を有している。

そこで、平成 31 年度調査では、この「浮魚礁保守・点検要領」を基に、より具体

的な点検方法と機能診断方法を提案した。

具体的な点検方法と対策方法を検討するうえで、宮崎県と高知県の表層型浮魚礁の回収後の調査報告書、平成 27 年度中層浮魚礁の保守管理方法の開発 (MF21) を参考にした。また、判断基準は、「水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン」(水産庁漁港漁場整備部) を参考にした。本検討での判断基準、評価、および対処法を表 3.1 に示す。なお、本検討での判断基準は、原案であり今後議論の必要がある。

表 3.1 判断基準と評価および対処法

判断基準	評価	対処法
a	部材に変形や破損、腐食等が確認され、機能が著しく低下している状態である。	対応策を早急に浮魚礁メーカーと協議し、応急処置を施す。さらに、今後の修繕の可否を決定する。
b	部材に変形や破損、腐食等が確認され、機能の低下が認められる状態である。	対応策を浮魚礁メーカーと協議し、今後の修繕計画を立案し、修繕を実施する。
c	部材に軽微な変形や破損、腐食等が確認されるが、機能低下は認められず、機能は維持されている状態である。	次回点検時までには機能低下する可能性がある場合は、対応策を浮魚礁メーカーと協議する。
d	部材に変形や破損、腐食等は認められず、十分に機能が維持されており、当面、機能低下の可能性がない状態である。	経過観察を継続する。

(2) 摩耗速度等を考慮した係留索の強化方法

浮魚礁の係留索の摩耗・腐食速度について、「設計参考図書」では「実測値がない場合、1 mm/年を用いてもよい」としているが、一部の事業主体では回収した浮魚礁の計測結果に基づく部材毎の摩耗値として上記よりも大きな数値を浮魚礁の部材毎に設定していることが平成 30 年度調査で分かった。しかし、その設定根拠等は未検討であった。そこで、高知県および宮崎県で実施された浮魚礁回収品調査の資料を入手し、資料から係留環 (係留環・特殊アンカー、シャックル)、係留索 (チェーン・シャックル) の寸法測定結果から摩耗速度の実態を整理した。

また、浮魚礁供用期間中の流速を上層 (水深 10m) と下層 (水深 100m または 50 m) について整理し、波浪や流れの条件と摩耗速度との関係を検討した。

高知県の流速データは、高知県漁海況情報システムの黒潮牧場ブイ情報 (www.suisan.tosa.pref.kochi.lg.jp/bui_inf/show_search)、宮崎県は宮崎県水産試験場高度海況情報サービスシステム (<https://umiten.pref.miyazaki.lg.jp/pc/>) より取得した。また、各浮魚礁が位置する 5km メッシュの波高データを GPV より収集、整理した。

(3) その他

設計参考図書の記述の見直しに向け、生物付着量、設計波高・流速の設定、繊維ロープの結束部の強度について検討を行った。また、係留索 (下部チェーン) およびア

ンカーの再利用について技術的な検討を行った。

1) 生物付着量

表層型浮魚礁の生物付着量について、高知県、宮崎県における浮魚礁の回収品調査報告書を調査し、生物付着量の記述を収集した。

生物付着量は、浮魚礁の外観を観察し、側板、斜底板、底板、ダンパー、チェーン毎に目視で平均的に付着している位置を決定し、付着物を採取後、バネ秤にて重量を計測している。

2) 設計波高・流速の設定

設計流速の算定式として、「設計参考図書」では、水深 100m 以浅では 1/7 乗則を使用することになっている。しかしながら、各地の流速の鉛直分布の計測結果を参照すると、多くの場合、1/7 乗則で減少していないことがわかっている。また、設計波高として $H_{1/3}$ を使用することとしているが、一部の事業主体では、流出を防止するため、 $H_{max}=2.0H_{1/3}$ を採用しており、これら設計流速・波高の現場の実態に即した見直しが課題として残っていた。

そこで、設計波高や流速の設定について、他の浮体構造物と比較することを計画した。具体的には、浮体構造物メーカー職員への質問と文献調査を行い、他の浮体構造物の設計条件の書かれた基準類を探索した。

特に、浮魚礁と規模が似ている浮体構造物である、灯浮標と GPS ブイを主な対象とした。

3) 繊維ロープの結束部の強度

繊維ロープの結束部の強度について、ロープメーカー2 社に対し、繊維ロープの結束部の強度および繊維ロープの耐久性についてヒアリング調査を実施した。

4) 係留索（下部チェーン）およびアンカーの再利用

漁港構造物等の施設では、長寿命化を目標に維持管理が実施されている。しかし、浮魚礁では流出警報装置機器の寿命が 10 年であり、長寿命化が困難となっている。そして、耐用年数を経過すると浮魚礁はアンカーも含め、全てを撤去することが原則である。一般的に、表層型浮魚礁は浮魚礁の中でも費用は高額であるが、社会的なニーズから、コスト縮減が求められ、平成 30 年度に自治体に情報を求めたところ、再利用の可能性があるなら検討したいという意見があった。そして、再利用の可能性をメーカーにヒアリングしたところ、表層型浮魚礁のメーカー2 社からは、下部チェーンおよび鋳物製のダンフォースアンカーについては、目視上では劣化の程度が比較的低く再利用の可能性があるが、メーカーとしては推薦できないとの意見があった。

このような背景から、下部チェーンおよびダンフォースアンカーの再利用の事例、再利用に当たっての既往の診断方法について、メーカーや検査機関にヒアリングを実施した。ヒアリングでは再利用の事例がなく、再利用のための診断方法も存在しないことから、製作時の検査方法を一部準用して、再利用に当たっての診断方法（案）を検討した。



図 3.1 ダンフォースアンカー
出典；みやざき県庁職員日記



図 3.2 回収後のアンカー
出典；高知西部地区(足摺岬 6 工区)水産
環境整備工事回収品調査報告書

V. 結果

(1) 浮魚礁の保守点検等の維持管理の高度化手法

「浮魚礁保守点検・点検要領」(MF21、平成 5 年)は、「表層型浮魚礁礁体」、「中層型浮魚礁礁体」、「係留索系」、「安全対策用機器」、「搭載機器等」を対象とし、各項目に、「点検箇所」、「点検方法」、「判断基準」、「処置および対策」、「点検頻度」を示している。この、「浮魚礁保守・点検要領」の構成を基に、より具体的な点検方法と機能診断方法を収集して提示した。点検では目視観察中心の簡易調査と、潜水調査や ROV 調査を必要とする詳細調査に分け、判断基準となる具体的な数値を示した。

点検頻度は、水中部を除く目視点検可能な箇所については 1 回/年(簡易調査)の点検とし、ROV 調査や潜水調査による水中部の点検については 1 回/5 年(詳細調査)とした。また、陸上局(パソコン)については、日常管理を行うこととした。対象は表層型浮魚礁を主体としたが、中層型浮魚礁についても位置確認等の項目を設けた。浮沈式浮魚礁については、礁体上部が喫水面上に出現しているときに表層型浮魚礁の点検要領で検討するものとした。表 3.2 に点検箇所及び点検頻度の一覧を示す。

なお、水中部の点検は、高気圧作業安全衛生規則「ガス分圧の制限；第 15 条」の規定により、空気による潜水は約 40m までに制限されているが(「中層浮魚礁流出警報発信機保守管理の手引き」、MF21、平成 28 年 3 月)、調査時の安全面を考慮し、30m 以深の箇所は点検対象外とした。また、海上保安部が定める海上作業における安全対策を参考に、潜水作業は、潮流 1 ノット以上、波高 0.5m 以上の時は作業を中止することとした。

作成した「浮魚礁の維持管理ガイドライン(案)」を巻末資料に掲載した。ここで、ガイドライン(案)での点検方法および判断基準の記載例を示す(図 3.3)。

表 3.2 点検箇所及び点検頻度一覧

表層型・浮沈式	
点検頻度	点検箇所
日常管理(毎日)	礁体位置
日常管理(1回/週)	陸上局(パソコン)
1回/年	礁体喫水
	甲板
	外板(喫水上部)
	室内機器
	手摺り・マスト
	防舷材(喫水上部)
	標識灯
	レーダーレフレクター
1回/5年	外板(水中部)及び ダンパー(水平板)
	防舷材(水中部)
	係留環
	シヤックル
	係留索(上部チェーン)
	防食電極
中層型	
点検頻度	点検項目
1回/年	礁体位置・頂部水深
<p>【備考】 中層型の流出警報装置の点検は、MF21 発行の「中層浮魚礁流出警報発信機保守管理の手引き(平成 28 年 3 月)」に準ずることとする。</p>	

【係留索系(接続部)の点検診断】

3.8 係留環

潜水目視によって、係留環の摩耗状況を確認する。

点検頻度：1回/5年

【解説】

潜水目視によって、係留環の摩耗状況について点検する。点検箇所は、図-3.8.2に示す摩耗しやすい連結部を計測し、摩耗量を算出する。摩耗量は、メジャーやノギスによって計測する。点検箇所のうち、最も摩耗が進んでいる箇所での摩耗量が、計画値よりも大きい場合には、対応策を浮魚礁メーカーと協議する。

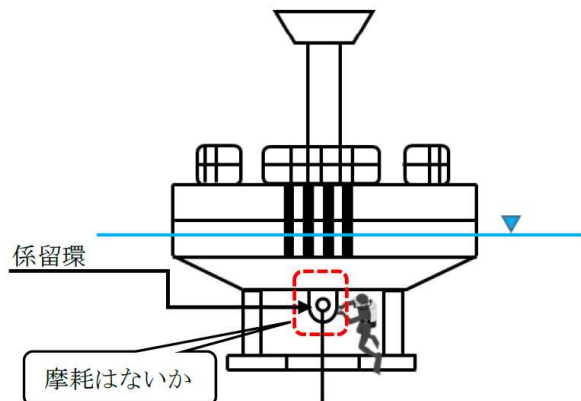


図- 3.8.1 係留環の目視点検箇所

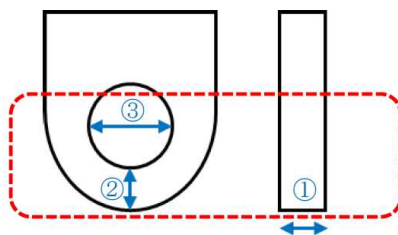


図- 3.8.2 係留環の計測箇所

表- 3.8.1 係留環の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・摩耗	目視による摩耗の確認	a	<input type="checkbox"/> 摩耗量が計画値よりも大きい。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値どおりである。
		d	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値よりも小さい。
		計画値	実測値
摩耗量① _____ mm/年	摩耗量① _____ mm/年		
摩耗量② _____ mm/年	摩耗量② _____ mm/年		
摩耗量③ _____ mm/年	摩耗量③ _____ mm/年		

図 3.3 点検方法および判断基準の記載例

(2) 摩耗速度等を考慮した係留索の強化方法

1) 係留環・係留索の摩耗速度

高知県、宮崎県で実施された浮魚礁回収品調査の資料から係留環（係留環・特殊アンカー、シャックル）、係留索（チェーン・シャックル）の摩耗量を収集し、摩耗速度の実態を整理した。調査対象とした浮魚礁を図 3.4、浮魚礁の設置場所と供用期間を表 3.3 に示す。

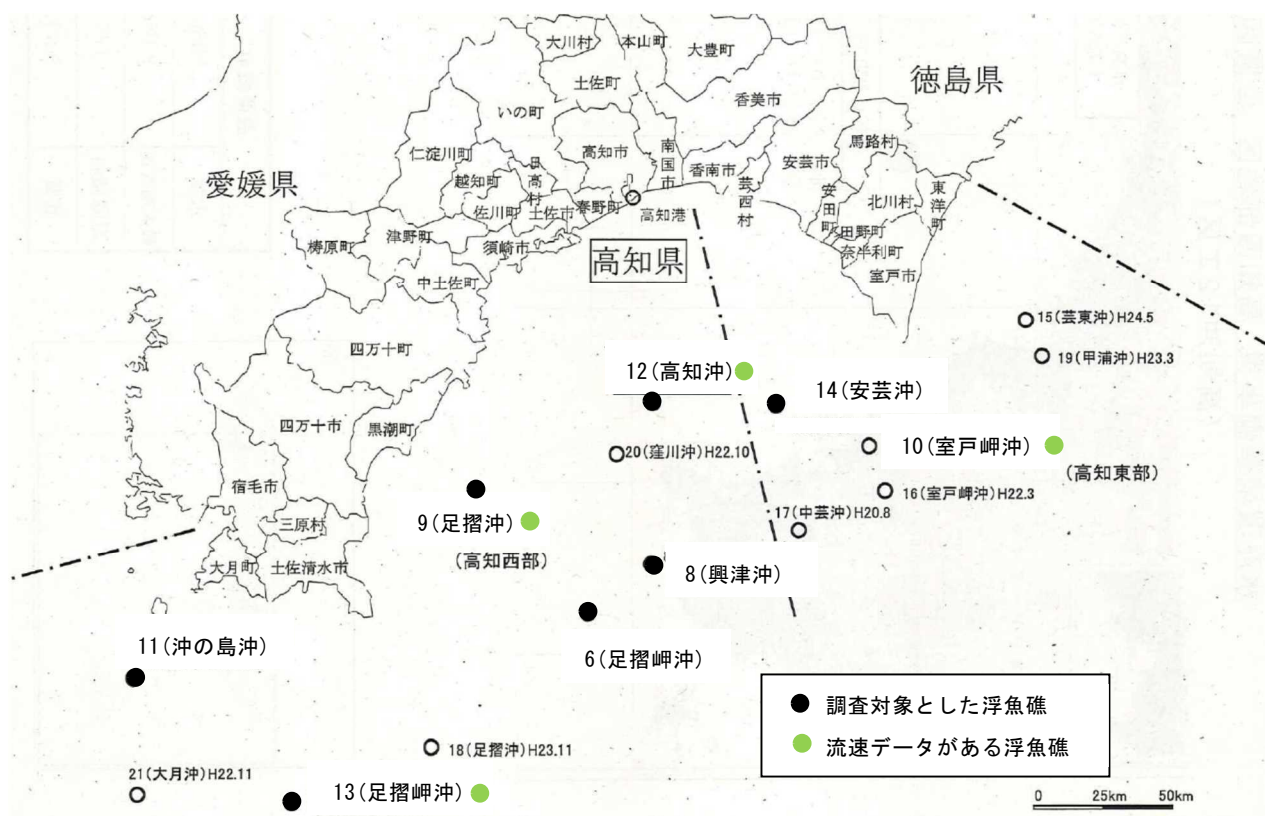


図 3.4 (1) 調査対象とした浮魚礁（高知県）



図 3.4 (2) 調査対象とした浮魚礁 (宮崎県)

表 3.3 調査対象の浮魚礁の設置場所と供用期間

(高知県)

浮魚礁	場所	供用期間
黒牧 6 号	足摺岬沖	H19 ~ H28
黒牧 8 号	興津沖	H18 ~ H28
黒牧 9 号	足摺沖	H21 ~ H27
黒牧 11 号	沖の島沖	H20 ~ H29
黒牧 12 号	高知沖	H20 ~ H29
黒牧 13 号	足摺岬沖	H16 ~ H25
黒牧 14 号	安芸沖	H21 ~ H30

(宮崎県)

浮魚礁	場所	供用期間
うみさち 1 号	日南市沖合	H19 ~ H30
うみさち 5 号	串間市沖合	H17 ~ H29

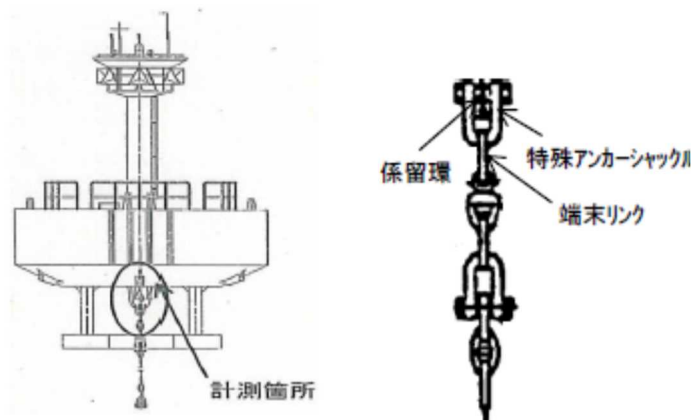
流速は高知県の 7 施設のデータ (うち 4 施設は近くの施設のデータで代用)、宮崎県の 2 施設のデータを収集、整理した。波高については、高知県の 7 施設のデータを収集、整理した。後述するように波高について摩耗速度との相関が低い部位が多かったため、宮崎県の波高データは収集していない。

浮魚礁の回収品調査の内容を表 3.4 に示す。係留環、係留索では図 3.5 に示す部分の寸法測定等が行われている。

表 3.4 浮魚礁の回収品調査内容

調査部位	調査項目	調査要領
浮体本体	浮体の損傷状況	・船舶衝突による損傷箇所及びその程度 (本体外周、デッキ、ダンパー、マスト)
	浮体内部への浸水状況	・機械内部の外観 ・隔室内の浸水の有無及び浸水状況 ※浸水が確認された場合は、漏水箇所の調査を行う
	塗装・鋼板腐食状況	・塗装膜厚、鋼板板厚
浮体付属品	アルミ陽極	・形状寸法及び重量の測定
	防舷材	・外観
係留環	係留環・特殊アンカー	・係留環ピン孔の形状寸法
	シャックル	・特殊アンカーシャックルのピン切断調査
係留索	チェーン・シャックル	・チェーン及びシャックルの残存断面寸法
		・チェーンの荷重試験
	スパイラルロープ	・外観
		・ソケット部の腐食状況 ・ソケットピンの腐食摩耗状況 ・素線の腐食の有無
浮体本体 ・上部チェーン	生物付着状況	・付着生物の空中・水中重量

係留環



係留索

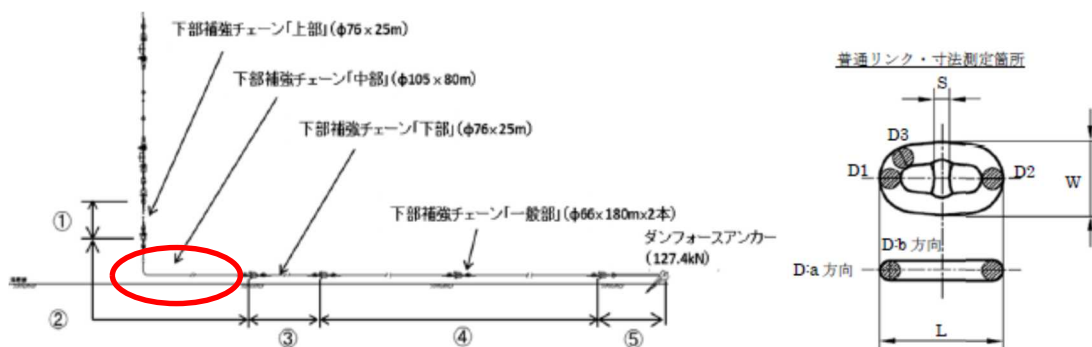


図 3.5 寸法測定箇所

係留環、係留索の寸法測定結果から摩耗速度を整理した結果を表 3.5 に示す。ここで、下部チェーン径は各回収品調査において、図 3.5 に示す箇所を 3～25 リンクについて測定しており、各回調査での測定値の最大値、最小値、平均値を示している。

係留環の摩耗速度は 0.20～2.10mm/年であり、9 事例中 4 事例が 1mm/年を超えていた。特殊アンカーシャックルピン径の摩耗速度は 0.00～2.90mm/年で 8 事例中 3 事例が 1mm/年を超えていた。端末リンク径の摩耗速度は 0.20～4.27mm/年で 9 事例中 8 事例が 1mm/年を超えていた。下部チェーン径の最大の摩耗速度は+0.36～4.60mm/年で 9 事例中 7 事例が 1mm/年を超えていた。このように、特に端末リンク径、下部チェーン径において、設計参考図書に掲載された参考値（1mm/年）を上回る場合が多く見られた。

表 3.5 係留環・係留索の摩耗速度

浮魚礁		黒牧6号	黒牧8号	黒牧9号	黒牧11号	黒牧12号	黒牧13号	黒牧14号	うみさち1号	うみさち5号
係留環(縁距離)		0.20	0.44	1.27	1.30	0.70	2.10	0.90	0.91	1.17
特殊アンカーシャックルピン径		2.50		0.31	0.10	1.40	2.90	0.20	0.00	0.50
端末リンク径		3.30	1.46	4.27	2.20	0.20	3.80	1.70	1.82	1.83
下部チェーン径	最大	1.30	3.84	+0.36	2.46	2.52	0.46	3.20	4.60	3.16
	最小	+0.14	0.85	+0.51	+0.26	+0.13	+0.15	+0.20	0.47	+0.05
	平均	0.52	2.51	+0.42	0.73	0.87	0.27	1.30	2.28	1.24

単位:mm/年

2) 流速と摩耗速度との関係

係留環、係留索の摩耗速度と流速との関係を検討するにあたって、有義流速を指標として用いることとした。平均流速では地点間の差が表れないと考えたためである。なお、有義流速は、有義波高と同様の考え方で流速の大きい方から 1/3 を取り出し、平均した流速である。

表 3.6 に各浮魚礁の供用期間中の有義流速を示す。ただし、黒牧 6 号、8 号、11 号、14 号については流速データがないため、近くの浮魚礁の流速データを用いた。なお、上層は水深 10m、下層はうみさち 1 号の水深 50m を除いて水深 100m の値である。

表 3.6 供用期間中の有義流速

浮魚礁		黒牧6号	黒牧8号	黒牧9号	黒牧11号	黒牧12号	黒牧13号	黒牧14号	うみさち1号	うみさち5号
有義流速	上層	0.41	0.46	0.56	1.56	0.40	1.70	1.52	0.91	0.95
	下層	0.22	0.39	0.23	1.17	0.43	1.11	1.11	0.95	1.00
用いた流速データ		黒牧9号	黒牧12号	黒牧9号	黒牧13号	黒牧12号	黒牧13号	黒牧10号	うみさち1号	うみさち5号

単位:m/s

- ・黒牧9号は平成21年～27年3月の観測データなし
- ・黒牧12号は平成18年～25年、27年～29年の下層の観測データなし
- ・黒牧13号は平成17年～25年の下層の観測データなし

係留環、特殊アンカーシャックルピン径及び端末リンク径については、上層の有義流速との関連性が想起されることから、上層の有義流速と摩耗速度との関係を検討した。以下の検討では、流速データのない黒牧 6 号、8 号、11 号、14 号は除外した。

図 3.6 に係留環、特殊アンカーシャックルピン径及び端末リンク径の摩耗速度と上層有義流速との関係を示す。係留環の摩耗速度と流速の間に相関がある程度見いだせる。

また、特殊アンカーシャックルピン径及び端末リンク径と有義流速の間には弱い相関が見いだせた。

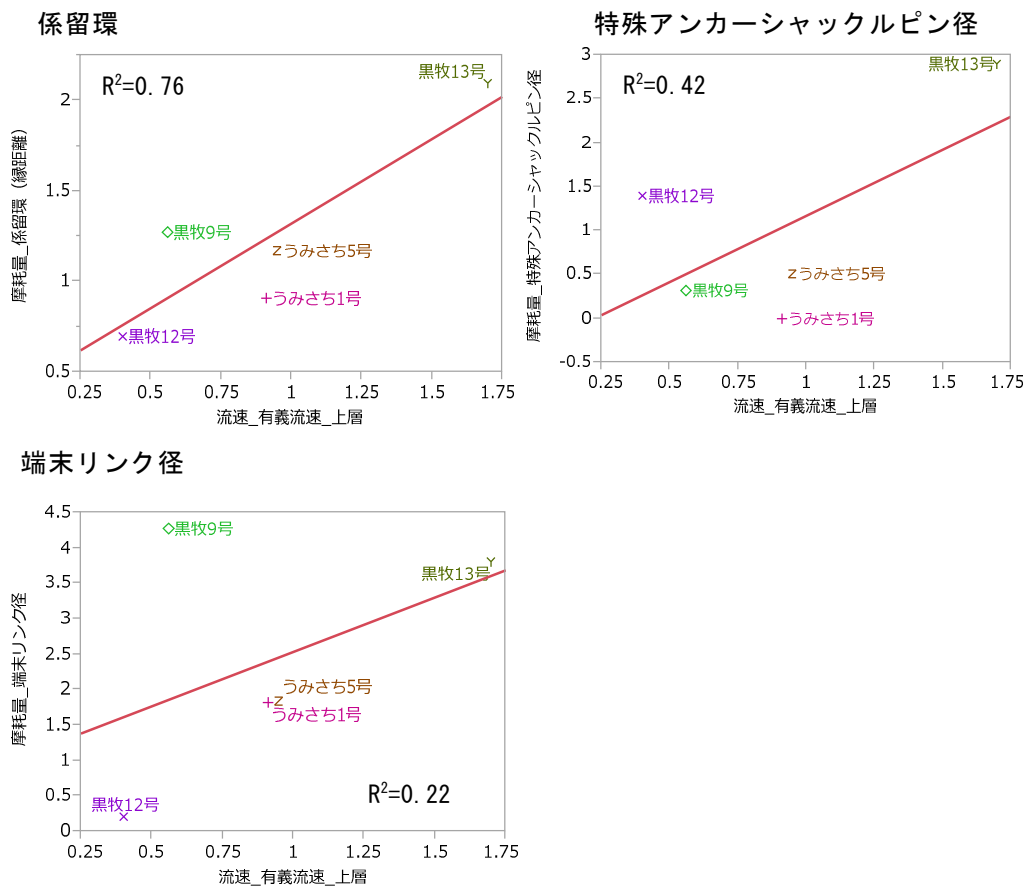


図 3.6 係留環、特殊アンカーシャックルピン径及び端末リンク径の摩耗速度と上層有義流速との関係

下部チェーン径については下層の有義流速との関連性が想起されたことから、下層の有義流速と摩耗速度との関係を検討した。図 3.7 に下部チェーン径と下層有義流速との関係を示す。下部チェーン径と有義流速の間に相関はほとんど見いだせなかった。

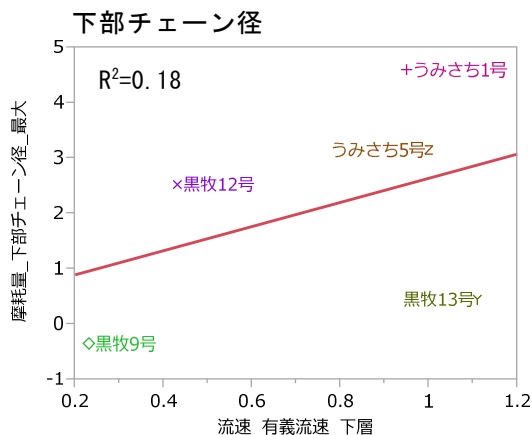


図 3.7 下部チェーン径の摩耗速度と下層有義流速との関係

3) 波高と摩耗速度との関係

高知県における浮魚礁設置箇所の有義波高の出現頻度を表 3.7 に示す。対象とした波高は、平成 21 年 1 月から平成 30 年 12 月まで 3 時間ごとの各浮魚礁が位置する 5km 四方のメッシュデータの値である。

表 3.7 浮魚礁設置箇所の有義波高の出現頻度

有義波高		黒牧6号		黒牧8号		黒牧9号		黒牧11号	
		出現頻度	累積出現頻度	出現頻度	累積出現頻度	出現頻度	累積出現頻度	出現頻度	累積出現頻度
10m以上		0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
9m以上	10m未満	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
8m以上	9m未満	0.03	0.06	0.04	0.07	0.02	0.04	0.01	0.02
7m以上	8m未満	0.09	0.15	0.09	0.16	0.05	0.09	0.05	0.07
6m以上	7m未満	0.16	0.31	0.15	0.31	0.17	0.26	0.13	0.20
5m以上	6m未満	0.37	0.68	0.38	0.69	0.30	0.56	0.31	0.51
4m以上	5m未満	1.07	1.75	1.09	1.78	0.90	1.46	0.83	1.34
3m以上	4m未満	3.85	5.60	3.82	5.60	3.23	4.69	2.97	4.31
2m以上	3m未満	12.94	18.54	13.00	18.60	11.17	15.86	12.17	16.48
1m以上	2m未満	49.69	68.23	49.86	68.46	45.79	61.65	50.28	66.76
0m以上	1m未満	31.77	100.00	31.56	100.02	38.34	99.99	33.22	99.98
平均有義波高(m)		1.46		1.46		1.36		1.40	
有義波高		黒牧12号		黒牧13号		黒牧14号			
		出現頻度	累積出現頻度	出現頻度	累積出現頻度	出現頻度	累積出現頻度		
10m以上		0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02		
9m以上	10m未満	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03		
8m以上	9m未満	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.06		
7m以上	8m未満	0.05	0.09	0.07	0.12	0.07	0.13		
6m以上	7m未満	0.14	0.23	0.20	0.32	0.15	0.28		
5m以上	6m未満	0.26	0.49	0.44	0.76	0.31	0.59		
4m以上	5m未満	0.78	1.27	1.08	1.84	0.90	1.49		
3m以上	4m未満	2.85	4.12	4.22	6.06	3.18	4.67		
2m以上	3m未満	10.16	14.28	15.08	21.14	11.63	16.30		
1m以上	2m未満	43.73	58.01	52.24	73.38	46.72	63.02		
0m以上	1m未満	41.98	99.99	26.61	99.99	36.97	99.99		
平均有義波高(m)		1.29		1.54		1.37			

単位: %

波高の大きさを示す指標を有義波高 5m 以上の累積出現頻度とした。有義波高 5m 以上の累積出現頻度と浮魚礁の各部位の摩耗速度との関係を図 3.8 に示す。

波高とアンカーシャックルピン径の摩耗速度の間にある程度の相関が見られ、端末リンク径との間にも弱い相関が見られた。しかしながら、係留環と下部チェーンについては相関を見いだせなかった。

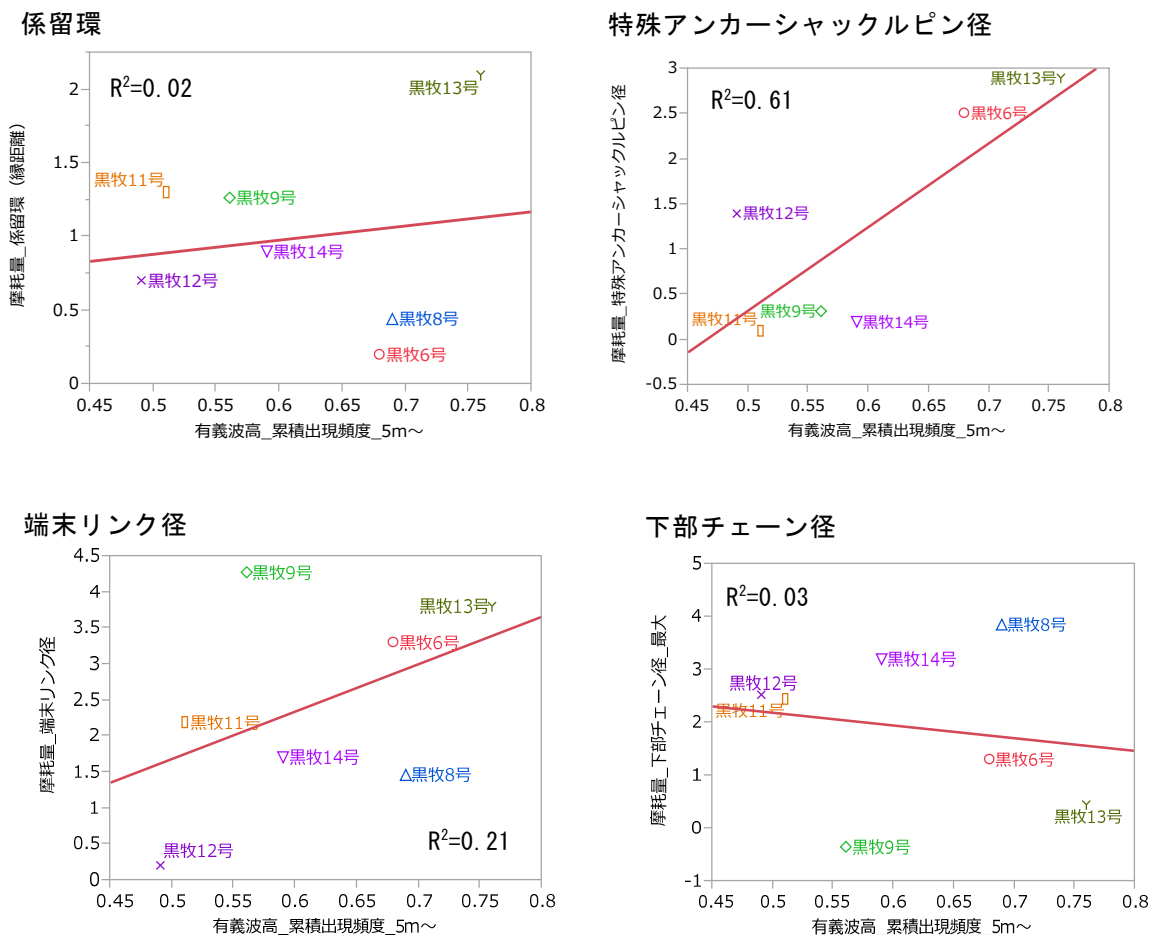


図 3.8 有義波高 5m 以上の出現頻度と摩耗速度との関係

以上のように、摩耗速度と流速、波高との間に相関性が見られない組合せもあるが、係留環の摩耗速度と有義流速、特殊アンカーシャックルピンと 5m 以上の有義波高の出現頻度の関係のように、部位によっては流速、波高との相関性が見られた。

ここに示した相関性は限られたデータに基づく結果であり、相関性を設計参考図書に記すことは慎重であるべきだが、設計参考図書に記された参考値 (1mm/年) について実態を踏まえてより大きな値への変更の検討が必要と考えられる。

(3) その他

1) 生物付着量

付着生物量の値について、設計参考図書には次のように記されている。

「浮体部及び係留部（アンカーチェーンを配する場合）において、海面から水深 60m までの範囲にある物体の全表面（海水と接する表面）に生物が付着するものとし、それによる重量、体積、射影面積の増加を考慮するのがよい。

付着生物の重量や付着生物厚さは海域条件によって大きく異なるため、当該海域の付着生物の重量や付着生物厚さを実測することを原則とする。ただし、実測値が得られない場合は、平均的な付着生物の重量として 80N/m^2 （水中）、付着生物厚さとして 7cm としてもよい。付着生物は海域や水深によって差が大きく、鋼構造物では最大で 700N/m^2 という報告もあり、 80N/m^2 は平均的な値であることに留意すべきである。」（「漁港・漁場の施設の設計参考図書 2015 年版」 p.791）

既存のデータとして、表 3.8 にマリノフォーラム 21 の浮魚礁設計・施工技術基準に記載されている過去の生物付着量の調査結果を示す。この表には浮魚礁以外にも様々な施設で測った値が混在している。また、計測・算出方法もまちまちであると推定される。そのため、最近の、浮魚礁を対象とし、計測・算出方法がはっきりわかる資料を参照して再検証する余地がある。

表 3.8 マリノフォーラム 21 浮魚礁設計・施工技術基準の海中付着生物量

資料名	付着生物量(N/m ²)	その他
沿岸漁場整備開発事業 構造物設計指針	78.4	
沖合漁場利用養殖技術開発 事業化試験研究S52成果報告	5.19 (係留索) 24.5~58.8 (ロープ円柱部材) 76.44~117.6 (隅角部補強材) 6.76 (金網地)	高知県
海の中の森の生態	29.4	下田湾 カジメ
日本の海洋生物	245 (コンクリート岸壁) 5,880 (灯浮標)(注1)	東京湾
海産付着生物と水産増養殖	301.84 春(min) 214.62 秋(max) 389.06	橋脚型構造物 平塚
海産付着生物と水産増養殖	98~686	
浮魚礁の水工学的研究と問題点	24.5 19.6 19.6	岩手県(設計値) 鳥取県(設計値) 高知県(設計値)
浮魚礁の実証実験 I	313.6	高知県、アカフジツボ
浮魚礁の実証実験 II	35.28 (ブイ) 18.62 (リング) 21.56 (塩ビ板) 16.66 (塩ビ板)	鳥取県
海洋構造物を取りまく環境	490	浮消波堤
人工藻場開発試験報告	79.38	34ヶ月目
浮魚礁設置技術開発試験調査資料集	max 10.78 5.88~12.74	浮魚礁 北海道
	4.9~97.02 (本体) 0.98~4.9 (フロート)	岩手県
	49.98~52.92 (フロート、リング) 49.98~53.9 (網、ロープ)	静岡県
	98 (上部) 9.8 (下部)	高知県
	max 23.52~86.24 4.9~78.4	鳥取県
昭和62年度内湾養殖に関する報告	16.66 102.9	金網 愛媛県
平成元年度機能に関する報告	173.46	浮魚礁、徳島県
	4.12~157.78	浮魚礁、北海道
昭和63年度実証実験に関する報告	48.02 (浮魚礁浮体A) 26.46 (浮魚礁浮体B)	和歌山県
平成元年度実証実験に関する報告	169.54	浮魚礁、徳島県
平成2年度実証実験に関する報告	98.98	浮魚礁 徳島県
	78.4	
	95.06	

※ 1kg/m²=9.8N/m² として換算、塗りつぶしは浮魚礁

注1 値が非常に大きく、誤植の可能性がある

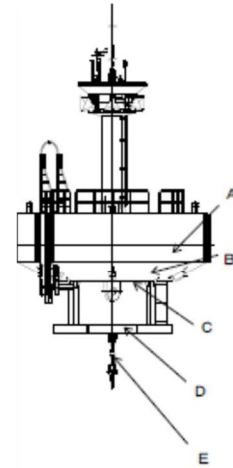
そこで、高知県、宮崎県の表層型浮魚礁の回収品調査報告書で報告されている生物付着量の調査事例の一例を図 3.9 に示す。他の浮魚礁でも同様に浮魚礁の部位毎の調査が行われている。各浮魚礁の生物付着量を表 3.9 に示す。

いずれも設計参考図書に平均的な付着生物の重量として示されている 80N/m² に比べ、大きな値となっており、80N/m² の 135~493% の値となっている。

位置	範囲(mm)	計測結果	
		空中重量(kg)	水中重量(kg)
A 側板	500 × 500	8.8	2.0
B 斜底板	500 × 500	5.4	1.2
C 底板	500 × 500	7.2	2.4
D ダンパー	350 × 500	11.8	3.8
E チェーン	1000 (長さ)	32.2	9.6

* 想定生物付着面積及び付着重量の推定

A	浮体側面	25.13 m ² (付着高さ約1m)	
	付着重量	(空中) 884.6 kg	(水中) 201.0 kg
B	浮体斜部	34.12 m ²	
	付着重量	(空中) 737.0 kg	(水中) 163.8 kg
C	浮体底部	20.27 m ²	
	付着重量	(空中) 583.8 kg	(水中) 194.6 kg
D	ダンパー	31.66 m ²	
	付着重量	(空中) 2134.8 kg	(水中) 687.5 kg
E	チェーン	8.42 m ² (15m分)	
	付着重量	(空中) 483.0 kg	(水中) 144.0 kg
総重量		(空中) 4823.1 kg	(水中) 1390.9 kg
1m ² 当たり		(空中) 40.3 kg	(水中) 11.6 kg



設計付着生物量	80 N/m ² (水中)
推定生物付着量	114 N/m ² (水中)

図 3.9 生物付着量の調査結果の一例 (宮崎県うみさち1号)

表 3.9 浮魚礁回収品調査報告書による生物付着量

浮魚礁	推定生物付着量	設計付着生物量比
宮崎県 うみさち1号	114	142%
宮崎県 うみさち5号	283	353%
高知県 黒潮牧場14号	263	328%
高知県 黒潮牧場13号	346	433%
高知県 黒潮牧場9号	394	493%
高知県 黒潮牧場6号	309	386%
高知県 黒潮牧場8号	164	206%
高知県 黒潮牧場12号	217	271%
高知県 黒潮牧場11号	108	135%

※生物付着量の単位はN/m²、設計付着生物量は80N/m²

次に「平均的な付着生物の重量として 80N/m²」という記述と、上記表 3.8 の実測結果を比較してみる。

浮魚礁の母集団における付着生物量の分布を、正規分布とみなす。(本項のように母集団と標本値の関係を調べる場合は、正規分布とみなして問題ないとする。)

設計用値は、設計において厳しめ側となる値を、確率的に稀な場合を除外して設定することが多い。この考えを当てはめると、付着生物量が図 3.10 (ア) のような分布であるときに、付着生物量の設計用値を「80N/m²」と書くことになる(除外するケースを全体の 5%とした場合)。

しかし設計参考図書は、「平均的な値」として 80N/m^2 を載せている。これは、平均的な値を設計値とし、設計においてそれより厳しめになる分は安全率によって考慮するという考え方を採ったものと推察される。この考え方に沿うと、付着生物量は図 3.10 (イ) のような分布となる。

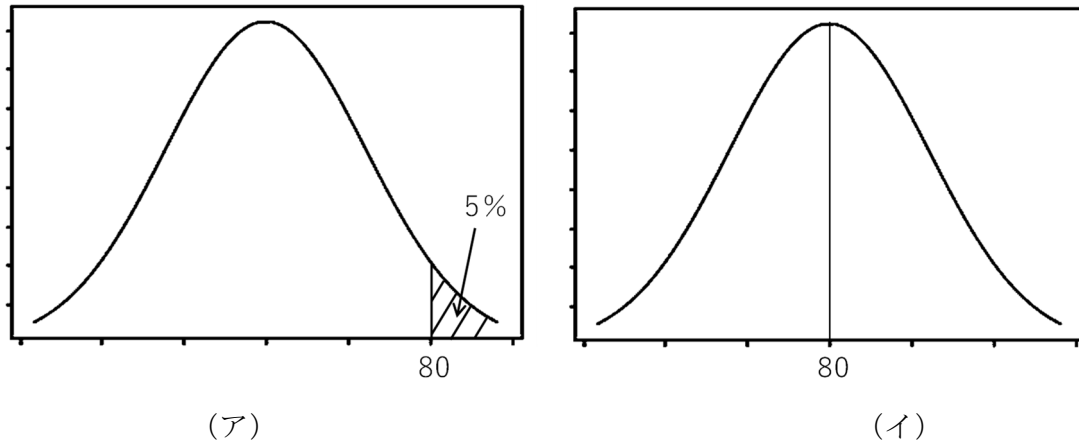


図 3.10 分布例

ここで、推測統計学の手法に則り、ケース数の少ない標本（上記表 3.7 の実測結果）がある場合に、標本平均、標準偏差を求めて、それらから母集団の平均（母平均）を推測する。

本件で得られている標本は {114, 283, 263, 346, 394, 309, 164, 217, 108} である。

ケース数 $n = 9$

標本の平均値 $m = 244.2$

標本の標準偏差 $s = 101.0$

平均値の標準誤差 (Standard Error) $SE = \frac{s}{\sqrt{n}} = 33.7$

標本平均から母平均を推測するとき、標本数が大きいときは、正規分布を仮定して、母平均は 95% の確率で、標本平均 $\pm 1.96SE$ の範囲に存在すると考える（平均値の 95% 信頼区間）。しかし、標本数が少ないときは、正規分布の代わりにスチューデントの t 分布を仮定する。スチューデントの t 分布は、標本数が少ないときほど裾広がりな分布になる。

自由度 (標本数 - 1) = 8 のとき、スチューデントの t 分布を仮定すると、母平均は 95% の確率で、標本平均 $\pm 2.306SE$ の範囲に存在する。また、母平均は 99% の確率で標本平均 $\pm 3.355SE$ の範囲に存在する。

つまり、本件の母平均は、95% の確率で [166.5, 321.9] の範囲に存在し、99% の確率で [131.1, 357.3] の範囲に存在する。

この母平均の範囲は、図 3.10 (ア) の示す母平均と矛盾する。すなわち、付着生物量の母集団を図 3.10 (ア) のように考えて、設計用値 80N/m^2 を設定したのだとすると、今回の標本数 9 の標本は、その母集団に起因するものとは言えないことになる。

また、図 3.10 (イ) の示す母平均とも矛盾する。すなわち、付着生物量の母集団を図 3.10 (イ) のように考えて、設計用値 80N/m^2 を設定したのだとすると、今回の標本数 9 の標本は、その母集団に起因するものとは言えないことになる。

つまり、今回の標本は、母集団の平均として図 3.10 (ア) を仮定しても (イ) を仮定しても、母集団に起因するものとは言えない。つまり、母集団の仮定はいずれも正しくないものとして棄却すべきである。よって、現行の設計用値を見直すほうがよいと考えられる。

参考文献

新村秀一：JMP 活用統計学とっておき勉強法，pp.54-62，講談社，2004 年

2) 設計波高・流速の設定

まず、浮魚礁の波・流れの設計条件を「漁港・漁場の施設の設計参考図書」を基に整理する。その後に調査結果を示す。

①浮魚礁について

「漁港・漁場の施設の設計参考図書」には次の記述がある。

【第 15 編第 3 章 浮魚礁】

- ・浮体部に働く流体力の算出について、海・潮流の流速、吹送流速、有義波による海面最大流速を考慮した数式が示されている。(p.789)
- ・係留部に作用する流体力の算出について、設置する海域の水深に応じた流速分布の算定式が掲載されている。水深 $h \leq 100\text{m}$ の海域については、海面での海・潮流速 V_0 に、海底面からの高さ z と水深 h の比を $1/7$ 乗した値を乗じて流速分布を求める、いわゆる「7 分の 1 乗則」の数式が示されている。水深 $h > 100\text{m}$ の海域については、流速分布を直線分布とする数式（但し 700m 以深の範囲はゼロとする）が示されている。(p.790～791)
- ・照査に用いる波について、「『第 2 編第 3 章 波』を参照する。」との記述がある。(p.788)
- ・吹送流速について、「60 分平均風速の 3% の値とする」との記述がある。(p.789)

【第 2 編第 3 章 波】

- ・「海域における施設の設計に際しては、有義波を基本条件としている。」との記述がある (p.39)。
- ・確率波高の算定における再現期間として「例えば 30 年、50 年など」との記述がある。(p.49)
- ・設計供用期間と再現期間の関係の解説において、最初に再現期間 30 年の波を示し、そのあと 50 年と 60 年の波を示して比較している。(p.51)

実際の浮魚礁の設計では、波に対する照査については、30 年確率の有義波が多く使用されている。但し、高知県と宮崎県の表層魚礁には 30 年確率の最大波が使用されている。

なお、浮魚礁の設計に限らず、海上の風速は、海面上の高さ 10m の風速を用いることが標準的となっている。

②浮体構造物全般について

浮体構造物全般における波・流れの設計条件について、浮体構造物メーカー A 社の技術職員に質問したところ、具体的な設計条件は依頼主との関係上回答できないとのことであったが、同職員の個人的な所感として、浮体構造物全般の実態はおおよそ次のとおりとのことであった。

- ・波は、20～50年間の有義波や最大波を使用している。（施設による設置期間の違いを考慮している。ブイだと例えば20年、洋上風車だと例えば50年など。）
- ・吹送流速は、例えば、海面10m高さの風速の2%としている。
- ・表層の潮流速度は海上保安庁のデータを使うことが多い。深さ方向の潮流速度は7分の1乗則を使って求めることが多い。

③浮魚礁と規模が似た浮体構造物について

浮魚礁と規模が似た浮体構造物として、灯浮標とGPSブイについて調査したところ下記の通りであった。

メーカー職員への質問と文献の探索を行ったが、灯浮標とGPSブイについて、波・流れの設計条件を記した公開された基準類の存在を確認できなかった。

③-1 灯浮標

灯浮標における波・流れの設計条件について、浮体構造物メーカーB社の職員へ質問したところ、次の回答を得た。

- ・灯浮標の波・流れの設計条件について、国や地方公共団体から公表された基準等は見当たらない。
- ・海上保安庁が設置する灯浮標は、海上保安庁が自ら設計し、受託した業者は、海上保安庁から示された仕様に従って製作している。
- ・タンカーや貨物船を受け入れる企業（電力会社など）は、設定した航路に航行のための灯浮標を設置している。このような灯浮標は、浮標メーカーが設計を行っている。設計においては、設置する海域の特性（凍結の有無、干満差の大きさ、波浪の大きさ、潮流の大きさなど）に応じた波・流れの設定をしている。この設定には経験的な要素もある。

③-2 GPS波浪計

全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASのGPS波浪計の波・流れの設計条件を記した文献を検索したところ、次のものがあつた（いずれもインターネットで閲覧可能）。しかし、GPS波浪計の波・流れの設計条件を記した基準類は見当たらなかった。

また、港湾分野の研究者に、NOWPHASのGPS波浪計の設計について質問したところ、「設計は国土交通省の各地方整備局が実施している。波は、一般に、港湾基準に沿って50年確率の有義波が使われている。」とのことであつた。

- ・寺田幸博ら：GPS海洋ブイ係留系の長期耐久特性に関する実証調査，土木学会論文集（海洋開発），2014年
（要旨）

実証試験用GPS海洋ブイを室戸岬沖に3年7か月間設置し、揚収して摩耗量を計測した。

（設置場所）

室戸岬西方沖13km、水深128mの地点

（設計条件（波浪・流速））

流速（表層）2.6m/s

有義波高（50年確率波）14.9m、有義波周期16.5s

- ・合田和弘（沿岸技術研究センター）ら：室戸岬沖における GPS 波浪計の検討について、沿岸技術研究センター論文集 No.13, 2013 年
(要旨)

室戸岬沖に設置が予定されている GPS 波浪計の基本仕様の検討を行った。

(設計条件)

設置水深：約 290m

設計波：有義波高 $H_{1/3}=15.8\text{m}$ 有義波周期 $T_{1/3}=17.8\text{s}$

風速：10 分間 $U_{10}=60.0\text{m/s}$

流速：海水流速（潮流速） 2.6m/s

- ・田中真史（沿岸技術研究センター）ら：北陸地方における GPS 波浪計利活用に向けた基礎的検討、沿岸技術研究センター論文集 No.15, 2015 年
(要旨)

北陸管内における GPS 波浪計の将来的な設置に備えて、GPS 波浪計に関する情報の整理および基礎的検討を行った。全国 18 箇所既設 GPS 波浪計設置箇所における諸条件および係留方法に関する仕様を整理した。

(情報の整理結果)

設置水深は、最大約 410m まで実績があった。

設計波については、有義波高 9m～17m、有義波周期 12s～19s 程度であった。

以上に示したように、他の浮体構造物の波・流れの設計条件について公表された基準類が無く、浮魚礁との比較結果を示すには至らなかった。

しかし、波については浮魚礁でも自治体によって異なる設計条件が使用されているため、今後、類似する浮体構造物の設計事例を収集して参考にしながら、浮魚礁の波の条件設定の考え方について議論を進めるのがよいと考えられる。

流れについては、今後、類似する浮体構造物の設計事例と比較し、明らかな相違があれば、浮魚礁の流れの条件設定について検討を始めるのがよいと考えられる。

また、上記のほか、流体力を求めるときの抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M の設定（漁港・漁場の施設の設計参考図書 p.789、p.800 など）について、類似する浮体構造物の設計事例と比較して検討することも考えられる。

3) 繊維ロープの結束部の強度

ロープメーカー2 社に協力を依頼し、繊維ロープの結束部の強度および繊維ロープの耐久性についてヒアリング調査を実施した。ヒアリング結果を表 3.10 に示す。

ロープメーカーが結束部に関する強度データを所有していることを想定していたが、ロープメーカー2 社へのヒアリング調査の結果、繊維ロープの結束部に関する強度試験は実施されていなかった。また、浮魚礁の他に繊維ロープを係留に使用する船舶等や建設現場において落下防止に用いる親綱等においても、結束部の強度に関する基準等は見当たらなかった。

結束部の強度に関する指針を設けるためには、強度試験が必要であることから、漁港・漁場の施設の設計参考図書へ新たに繊維ロープの結束部の強度に関する指針を追加することは今後の課題である。

なお、漁港・漁場の施設の設計参考図書 2015 年版では合成繊維ロープの強度劣化、

ロープ末端の処理方法による強度低下について、以下のように算出してよいとしている。

$$T_n = T_0(K_1 K_2) \dots\dots\dots \text{(式 15-3-19)}$$

ここで、

T_n : n 年後のロープの強度 (kN)

T_0 : ロープの初期強度 (kN)

K_1 : 長期的な強度劣化係数

K_2 : ロープ末端の処理方法による強度低下

1) 海水中での長期的な強度劣化 K_1

$$K_1 = (1 - \alpha)^n$$

ここで、

n : 経過年数

α : 強度劣化率 (ロープの素材によるが、一般的には0.1としてよい)

2) ロープ末端の処理方法による強度低下 K_2

一般にロープは、曲率半径の2倍/ロープ径(D/d)の比が小さいと疲労・損傷が早く、 D/d が1~2の場合、強度効率が50~60%であり、曲げに対する割増し係数1.6~1.7は安全を確保する意味で考慮する。これを、強度低下として係数にすると以下ようになる。

$$K_2 = 0.59 \sim 0.63$$

強度劣化係数 K_1 は、MF21 浮魚礁設計・施工基準 (平成4年3月、MF21 浮魚礁システム研究会) にも同じ考え方が示されており、「水産庁で昭和53年から実施された浮魚礁設置技術開発試験一表6.2.1および図6.2.6より、太さ、形態等は異なるが、養殖施設、浮消波堤等で使用された係留ロープ類の強力低下実測値から、ロープ類の年間強力低減率を推定した。種々のデータでバラツキはあるが、年率10%程度低減していくとするのが妥当と現時点では推定される。」と記されている。

また、強度低下係数 K_2 についても、MF21 浮魚礁設計・施工基準 (平成4年3月、MF21 浮魚礁システム研究会) に「一般にロープは、曲げ半径×2/ロープ径 (D/d) の比が小さいと疲労・損傷が早い。 D/d が1~2の場合、強度効率が50~60%であり、曲げに対する割増し係数1.6~1.7を安全率に乗ずるのが良い。」との記載がある。

係留索に用いる繊維ロープの安全率は規格切断荷重に対して3としてよく、供用期間経過後の断面または強度に対して行うのがよい、とされている (漁港・漁場の施設的设计参考図書2015年版)。なお、MF21 浮魚礁設計・施工基準 (平成4年3月、MF21 浮魚礁システム研究会) では、「ポリエステルロープの安全率は繰り返し疲労の面からは対応年数を10年とした場合の繰り返し疲労回数を 10^7 回と設定した場合、約5倍の安全率が必要と推定される。」とされている。

ここで、供用期間を10年とした場合、10年後の繊維ロープの強度 T_{10} は、式15-3-19より、 $K_2=0.59$ とすると、

$$T_{10} = T_0 ((1-0.1)^{10} \times 0.59) = 0.206 T_0$$

となる。このときの安全率が 3 を満たすとする、供用開始時の安全率は

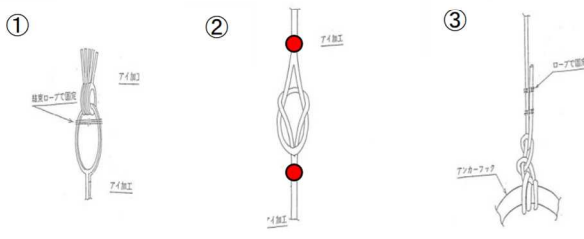
$$3 \div 0.206 = 14.56$$

となり、概ね 14.6 が必要となる。

仮にロープの結束部の強度がロープの規格切断荷重の 1/2 になる（ロープメーカーD社へのヒアリング結果）とすると、供用開始 10 年後に安全率 3 を満たすようにするには、供用開始時には安全率が約 30（ $14.6 \div 1/2 = 29.2$ ）となるロープを使用する必要がある。一方、安全率 14.6 のロープを使用した場合の供用 10 年後の安全率は約 $3 \times 1/2 = 1.5$ となり、1 以上は確保される。

繊維ロープの結束部の強度について、現在、安全率を考慮して設計がなされているが、強度試験を実施して明確な値を求めることは今後の課題である。

表 3.10 ロープメーカー2社のヒアリング結果

聞き取り項目	C社	D社
<p>繊維ロープの結束部の強度について</p>	<p>・繊維ロープの強度試験はJIS、JIS外の方法があるが、端末を処理した状態でやっている。</p> <p>・①は礁体と係留索の連結で6本のロープではなく、3本のロープを折り返して使用している。この部分では強度を検討していない。</p> <p>・②の連結で切断するのはアイ加工を施した下の部分（赤丸）。接続部分は2本になっているので、ここで切断することは考えにくい。</p> <p>・②についてはだいぶ以前に強度試験を行ったかもしれない。</p> <p>・③のロープで固定としている部分は、最近ではスプライスしている。</p> <p>・近年、係留索の劣化で浮魚礁の流出が起こったことはないのではないか。</p> <p>・繊維ロープは外的損傷だけでなく、内部の交点が痛むが、陸上の使用に比較して紫外線の影響や熱が発生しないので、耐久性は良いと思われる。なお、魚礁の運用中に繊維ロープ内部の劣化を確認することは不可能と思われる。</p> 	<p>・結束部の強度は、ロープの半分くらいになる。</p> <p>・ロープの素材によっても異なる。</p> <p>・初期強度はわかるが、使用中、使用後の強度はわからない。</p> <p>・固縛するよりスプライスの方が強度が大きい。</p>
<p>繊維ロープの耐久性について</p>	<p>・ロープの端末処理をした部分の強度を80%として魚礁メーカーに提出したことがある（その魚礁メーカーは強度を75%として設計している。）</p> <p>・漁港・漁場の施設の設計参考図書に記載の強度劣化の式、係数の根拠、出典は不明である。</p>	<p>・漁港・漁場の施設の設計参考図書の海水中での強度劣化率は、沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針のときにデータをとっている。</p> <p>・ロープ端末の処理方法による強度低下の係数は、社内試験の結果とほぼ同等である。</p>
<p>その他</p>	<p>・浮魚礁以外では船舶係留用や陸上土木の親綱などロープの用途としてあげられるが、いずれも社内ルールでロープの仕様を決めていると思われる。業界団体ではこのような事項に関してのガイドラインはないであろう。</p> <p>・一般的には目視で損傷状況を確認し、5年程度で交換している。使用頻度にもよるので、使用頻度が高い場合は早めに交換している。</p> <p>・仮設工業会では使用するロープの径は決めているが、劣化についての基準、考え方は特にない。</p> <p>・ロープの劣化を数値化して運用しているところはない。</p>	<p>・浮魚礁の設置10年後の係留系の安全率が3であることから、設置時は10倍くらいの安全率になっている。</p> <p>・漁港・漁場の施設の設計参考図書には結束部の強度の数値を示すというより、結束部は強度が低下することに留意する程度の書き方になるか。</p> <p>・今すぐには難しいが、長期的には試験条件を提示してもらえば、試験に協力することはできる。</p>

4) 係留索（下部チェーン）およびダンフォースアンカーの再利用

①浮魚礁回収時の下部チェーンおよびダンフォースアンカーの状況

10年を経過した表層型浮魚礁が回収される際に、浮体の状況、係留索の摩耗やアンカーの状態が観察されている。高知県や宮崎県の表層型浮魚礁の回収時の報告書によると、図 3.11 に示す係留索下部チェーンやアンカーについては、以下のような記載がある。

- ・下部チェーンについては、塗装の剥がれ、摩耗、損傷がほとんど見られなかった。多くの土が付着していることから海底に埋没していたと考えられる。
- ・アンカーのシャンク先端側、フルーク先端側に多くの土が付着しており、ストック部には付着が少なかった。ストック部には塗装が残っており、アンカーリング部の摩耗もないことから、アンカーには海底に潜るような牽引力は働かなかったと考えられる。

(出典；平成 30 年度 室戸岬沖地区(安芸沖 14 工区)水産環境整備工事(漁場環第 1 号回収品調査報告(黒潮牧場 14 号ブイ), 日鐵エンジニアリング)

このような記載は、高知県の 5 年の回収品調査報告書、宮崎の浮魚礁うみさち 1 号の回収品報告書にも記載されている。このことから、図 3.11 の④と⑤下部チェーンはほとんど移動せず、底質中に埋没しているものと推察される。過去の係留索の破断事故は③の下部チェーンで発生していることが指摘されている。

以上から、④⑤の係留索下部チェーン、ダンフォースアンカーには通常の状態では外力は作用せず、係留索の摩耗・変形はなく、金属疲労を発生させる応力は作用していないことが推察される。したがって、構造的に損傷がなければ再利用の可能性はある。

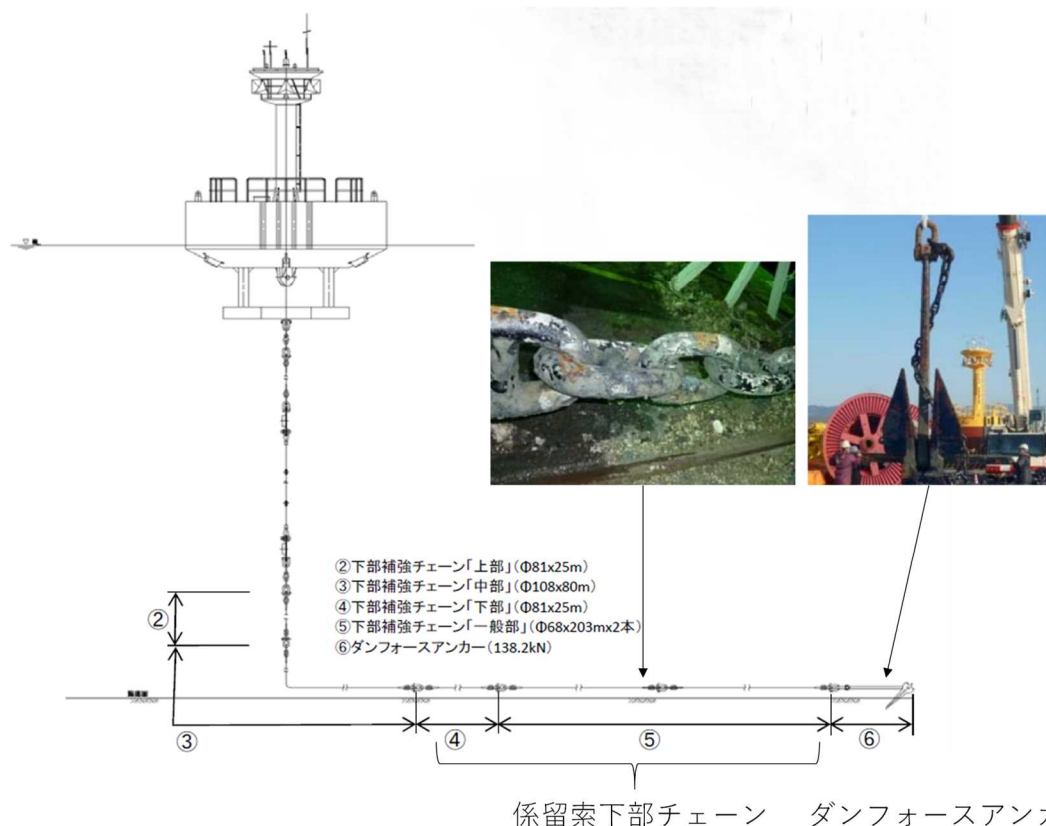


図 3.11 下部チェーン・ダンフォースアンカーの位置および回収時の写真
 (出典；高知西部地区(沖の島沖 11 工区)水産環境整備工事(漁場環第 1 号) 回収品調査報告)

②ヒアリングの結果

係留索（下部チェーン）およびダンフォースアンカーの再利用の事例について、浮魚礁メーカー2社に情報を求めたが、図 3.11 に示すような下部チェーンとアンカーでは回収後も腐食や摩耗、変形等がないが、再利用の事例はないとの回答であった。また、表層型浮魚礁の新造のアンカーや係留索チェーンの承認審査を担当している一般財団法人日本海事協会に再利用時の規則等を問い合わせたところ、新規の施設の基準はあるが、再利用に当たっての診断基準は存在せず、今後も基準化の計画はないとのことであった。

さらに、一般の漁具を扱っている船具専門店にアンカー等の再利用の実態をヒアリングした。その結果、中古部材の売買に関して、強度等の基準はなく、売る側と買う側の責任において実施している。自動車では基準があるが、船では該当する基準はない。なお、ダンフォースアンカーは鋳造品なので、強い衝撃時にクラックが発生する可能性があるとの指摘があった。

③ダンフォースアンカー再利用時の試験について

ダンフォースアンカーは鋳造品である。構造としては、底質の砂に潜るアンカーヘッド、アンカーが斜めにならないように支えるストック、アンカーヘッドが海底に刺さるような角度で支持するシャンクから構成されている（図 3.12）。製作が終わるとアンカーにはビスマチックソリューション(アスファルト系黒色塗料)を1回塗布する（図 3.13）。

ダンフォースアンカーの適用規格が日本海事協会の鋼船規則 L 編に示されており、浮魚礁の製作時はこの規則に従って試験を実施しているメーカーがある。具体的には、「ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 2 章 2.2 位置保持設備用アンカー」の記載が参考になる。この規則は新規の製作時を対象にしたものである。材料や製造方法に関する規則以外で、再利用に必要と考えられる構造強度、耐久性に関する試験を表 3.11 に示す。



図 3.12 ダンフォースアンカーの部材名称
(出典；<https://www.openbic.jp/product/2948/> に加筆)

表 3.11 鋼船規則 L 編に記載されたアンカーの強度に関する試験

項 目	試験内容
1. 寸法および質量	所要寸法・質量以上あることを確認する
2. 落下試験	4m の高さから硬質な地盤上に落下させても、割れや欠陥が生じないことを確認する
3. つち打試験	アンカーを吊し、3kg 以上の質量のつちで打ち、割れその他の欠陥を確認する
4. 耐力試験	接続する係留ラインの破断強度の 50%、又はアンカーの最大把駐力を安全率で除した値のいずれか大きい荷重をフック(爪)に与え(図 3.13)、割れ、変形その他の異状を確認する
5. 外観検査及び非破壊検査	耐力試験後、割れその他の有害なキズが無いことを確認する。また、超音波探傷試験、磁粉探傷試験により割れやキズのないことを確認する

出典 ; ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 2 章 2.2 位置保持設備用アンカー

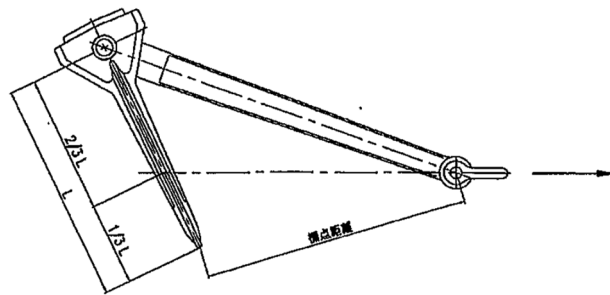


図 3.13 耐力試験要領図

外観検査では

- ・シャंकとアームとをヘッドピンで連結するアンカーでは、シャंकとアンカーリングの隙間は、アンカーの質量に応じて表 3.12 のとおりとする。
- ・リングピンとアンカーリングのアイの径の差はリングピンの直径に応じて表 3.13 のとおりとする。
- ・シャंकの傾きは 3 度を超えてはならない (図 3.14) としている。

表 3.12 シャंकとアンカーリングとの連結部の隙間

アンカー質量(t)	超え	3	5	7	
	以下	3	5	7	
連結部の隙間(mm)		3 以下	4 以下	6 以下	12 以下

出典 ; ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 2 章 2.1 アンカー

表 3.13 リングピンとアンカーリングのアイの径の差

リングピンの直径(mm)	57 以上	57 超え
径の差(mm)	0.5 以下	1.0 以下

出典 ; ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 2 章 2.1 アンカー

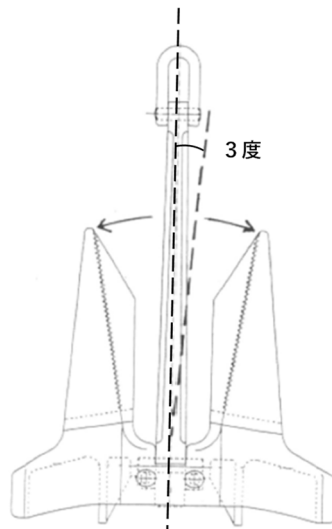


図 3.14 シャンクの傾き許容範囲

出典；ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 2 章 2.1 アンカー

鋼船規則 L 編では、非破壊検査および衝撃試験に合格した場合には、落下試験やつち打ち試験を省略することができるとしている。

再利用の場合でも、耐力試験と非破壊検査を実施することで、落下試験やつち打ち試験を省略するものとする。また、新製品の場合に品質に欠陥がある場合、補修可能であれば、基準に従って適切に補修が可能としている。しかし、再利用の場合は安全第一を基本とし、補修はしないものとする。

表 3.14 にダンフォースアンカーの再利用可能性の検証試験（案）を示す。耐力試験は正確な荷重を付加する施設・装置（図 3.13）が必要であり、製作工場での検査が必要になることもある。また、外観検査については、シャンクとアンカーリングとの連結部の隙間やリングピンとアンカーリングのアイの径の差およびシャンクの傾き（図 3.14）は鋼船規則 L 編に従うこととする。

試験の結果、質量が不足する場合や耐力試験および非破壊検査の結果、亀裂、割れが発見された場合は、原則として再利用はできないものとする。

表 3.14 ダンフォースアンカーの再利用の可能性を検証する試験(案)

項 目	試験内容
1. 寸法および質量	所要寸法・質量以上あることを確認する
2. 耐力試験	接続する係留ラインの破断強度の 50%、又はアンカーの最大把駐力を安全率で除した値のいずれか大きい荷重をフック(爪)に与え、割れ、変形その他の異状を確認する
3. 外観検査及び非破壊検査	耐力試験後、割れその他の有害なキズが無いことを確認する。また、超音波探傷試験、磁粉探傷試験により割れやキズのないことを確認する

【参考】

※磁粉探傷検査

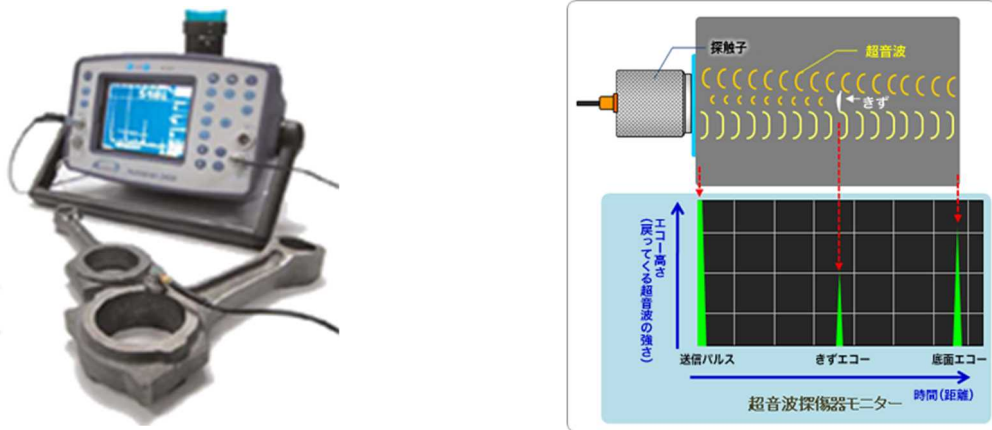
鉄鋼材料などの強磁性体を磁場の中に置くと、磁化された材料は材料の両端以外の連続した部分では、普通に材料内部に磁束が通り何も発生しないが、表面や内部に磁

束を遮断する欠陥（クラック）があると、欠陥の両端に磁極（N極・S極）が現れ、磁束が表面空間に漏洩する。

この部分に、鉄粉または着色磁粉・蛍光磁粉などの検査液をかけると、磁極に吸引されて磁粉模様が形成され、欠陥の幅が拡大され、容易に欠陥の存在を見つけることができる。また欠陥部の磁粉の付着は、磁粉の特性と欠陥の漏洩磁場に支配され、これが大きいほど、磁粉に付着しやすい。

※超音波探傷検査（図 3.15）

超音波探傷器より高電圧の電気パルスを超音波探触子の振動子に送信させ、超音波のパルス信号として、機械的な振動を金属材料等の表面や内部に伝播させる。これにより、音響的に不連続な部分からの反射信号・強度、伝播時間が変わるため、材料内部のキズや長さ、形状などを非破壊で評価できる。その良否判定を検査規格などにより良否判定する。探傷に使用する超音波の周波数は 0.1MHz～25MHz の範囲であり、その範囲の内の 1～5MHz の周波数が最もよく使用される。アンカーの探傷は 1～5MHz の周波数とする。



モニターY軸のエコー高さは、戻ってくる超音波の強さを表す。高ければ高いほど、超音波が強いことを意味する。X軸の時間は、発信された超音波が戻ってくるまでの時間を表す。右側にいくほど戻ってくる時間が遅くなり、トランスデューサーからの距離が遠いことを意味する。

図 3.15 超音波探傷器の概要

出典； <https://www.dakotajapan.com/ufd/point/structure.html>

④ダンフォースアンカー再利用の課題

ダンフォースアンカーの再利用に当たっては以下のような留意点が考えられる。実施にあたり、事前によく検討しておく必要がある。

- イ) 耐力試験を実施するには、試験ができる工場へ運搬する必要がある。
 - ロ) ダンフォースアンカーの質量・把駐力に余裕が必要である。新設の浮魚礁のアンカーとして質量が不足すると機能が不足することになるので、再利用に当たっては、新設の浮魚礁に利用できる質量・把駐力が事前に設計書で確認が必要である。
 - ハ) アンカー製作には数ヶ月を要する。再利用が出来ないと判断された場合、新規工事の完成はアンカーの製作後に遅れることになる。
- ニ) 再利用までの期間が長くなる場合、保管や運搬の費用が発生する。

⑤係留索（下部チェーン）の再利用時の試験について

浮魚礁の係留索チェーンはフラッシュバット溶接法で製造される普通リンクを連続して連結したものである（図 3.16）。チェーンについても製造時の管理基準や試験方法が、日本海事協会の鋼船規則 L 編に示されている。具体的には、「ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 3 章 3.2 海洋構造物用チェーン等」の記載が参考になる。この規則は新規の製作時を対象にしたものである。材料や製造方法に関する規則以外で、再利用に必要と考えられる構造強度、耐久性に関する試験を表 3.15 に示す。

表 3.15 のうち、切断試験および機械試験は、アンカーチェーンの製造方法や使用材料を対象にした強度の確認を行うものと考えられる。表 3.16 にアンカーチェーンの再利用可能性の検証試験（案）を示す。耐力試験の荷重については、鋼船規則を参考にして表 3.17 に示す。なお、寸法では摩耗によるすり減りを診断することとする。

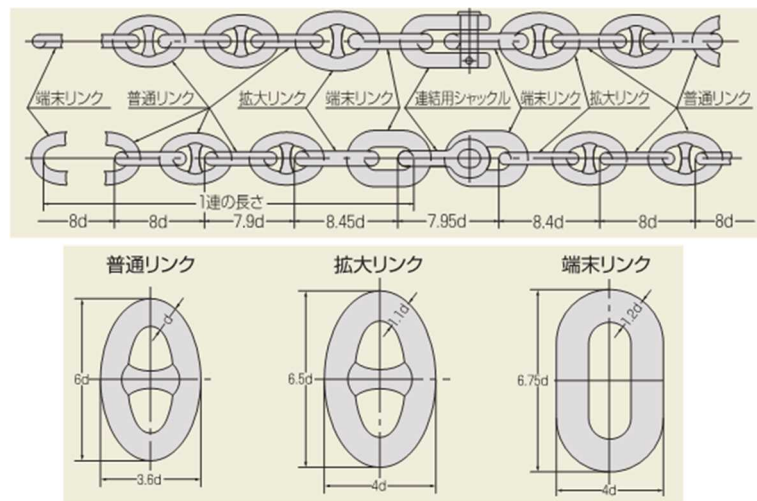


図 3.16 フラッシュバット溶接スタッド付きアンカーチェーン
（出典;コンドーテック総合カタログ）

表 3.15 鋼船規則 L 編に記載されたスタッド付きチェーンの強度に関する試験

項目	試験内容
1. 寸法および質量	5リンクの長さは22d以上22.5d(mm)以下、チェーン質量は0.0219d ² (kg/m)であること
2. 切断試験	対象とするチェーンから一部を抜き取り、普通リンク3リンク以上で構成される連鎖について、切断荷重を30秒以上加えた場合、これに耐えなければならない
3. 耐力試験	チェーン全体にわたり、耐力試験荷重(表3.17)を加えた場合、裂け傷、切断その他の異状を生じてはならない。なお、試験荷重は耐力試験荷重の110%を超えてはならない
4. 機械試験	チェーンやシャックルを対象に、その一部を試験片として採取し、引張試験、衝撃試験、硬さ試験を行い、チェーンの種類に対応した基準値以上の値を計測できなければならない
5. 外観検査及び非破壊検査	耐力試験の後に、すべてのリンクを対象に目視検査、磁粉探傷試験又は染色浸透探傷試験、さらに全てのリンクのフラッシュバット溶接部に対し、超音波探傷試験をおこない、パイプ状欠陥、き裂等の有害と考えられる欠陥があつてはならない

出典 ; ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 3 章 3.2 海洋構造物用チェーン

【参考】

※染色浸透探傷試験

表面に開口しており目視では見えにくい大きさの傷を目で見ることができるように行う非破壊検査手法である。浸透探傷試験（PT）では人間の目で見えやすい色や蛍光色を発する浸透液を試験面の表面に塗布する。試験面に開口した傷があると塗布された浸透液は傷の内部に浸透していく。傷の内部に浸透した浸透液を試験面まで現像剤と呼ばれる溶剤により吸い出すこと（毛管現象）で、浸透液が試験体表面に広がり、傷を知覚的に感知しやすくなる。ただし、探傷表面に開口していない傷を見つけることはできない。

表 3.16 アンカーチェーンの再利用の可能性を検証する試験(案)

項 目	試験内容
1. 寸法および質量	5リンクの長さは22d以上22.5d(mm)以下、チェーン質量は0.0219d ² (kg/m)であること。また、チェーンの摩耗量から、今後の摩耗量を推定し、許容範囲内であればならない
2. 耐力試験	チェーン全体にわたり、耐力荷重を加えた場合、裂け傷、切断その他の異状を生じてはならない。なお、試験荷重は耐力試験荷重の110%を超えてはならない
3. 外観検査及び非破壊検査	耐力試験の後に、すべてのリンクを対象に目視検査、磁粉探傷試験又は染色浸透探傷試験、さらに全てのリンクのフラッシュバット溶接部に対し、超音波探傷試験をおこない、パイプ状欠陥、き裂等の有害と考えられる欠陥があってはならない

表 3.17 アンカーチェーンの耐力試験荷重(d；チェーンの呼び径)

チェーンの種類	耐力試験荷重 (kN)
第 R3 種チェーン	0.0148d ² (44-0.08d)
第 R3S 種チェーン	0.0180d ² (44-0.08d)
第 R4 種チェーン	0.0216d ² (44-0.08d)
第 R4S 種チェーン	0.0240d ² (44-0.08d)
第 R5 種チェーン	0.0251d ² (44-0.08d)

出典；ClassNK 2019 鋼船規則 L 編 3 章 3.2 海洋構造物用チェーン

チェーンの各リンクの接合部は摩耗する。対象とするチェーンの各リンクの最も細くなった部材の径を計測し、今後、10年間の使用に耐えられるか判定しなければならない。

鋼船規則 L 編 3.2.12 の耐力試験の判定では、1個のリンクが不合格になった場合、不合格リンクの両側から切断試験用の連鎖を採取し、切断試験を実施して強度低下の原因を把握することとしている。また、耐力試験で2個以上のリンクが不合格であった場合、その耐力試験に用いた部分は不合格とすることとしている。チェーンの切断は回避しなければならないので、再利用の場合も同様な判定とすることが望ましい。

鋼船規則 L 編 3.2.14 の非破壊検査の判定では、すべてのリンクを対象に検査を行い、少なくとも次の値を超える傷があってはならないとしている。なお、非破壊検査の結果、軽微な欠陥が発見された場合、チェーンの呼び径の5%を超えない深さであれば、グラインダ等により、周囲となだらかになるように補修することができるとしている。

- ・リンクの幅方向の線状の傷；1.6mm
- ・リンクの長さ方向の線状の傷；3.2mm
- ・非線状の傷；4.8mm

チェーンの再利用に当たっても同様な判定基準が望ましいと考える。

⑥係留索（下部チェーン）の再利用の課題

下部チェーンの再利用に当たっては以下のような留意点が考えられる。実施にあたり、事前によく検討しておく必要がある。

- イ) 耐力試験を実施するには、試験ができる工場へ運搬する必要がある。
- ロ) 下部チェーン製作には、時間を要する。再利用が出来ないと判断された場合、新規工事の完成はアンカーの製作後に遅れることになる。
- ハ) 再利用までの期間が長くなる場合、保管や運搬の費用が発生する。
- ニ) ①の解説および図 3.11 に示すとおり、繰り返し応力が発生すると想定される箇所
の下部チェーンは再利用をしない。もし、そのようなチェーンを再利用する場合はここで示した検討に加え、金属疲労の検討が必要となる。浮魚礁における金属疲労の評価基準は現段階で示せないが、今後の検討材料として基礎的な知見を以下に参考としてまとめた。

【参考】金属疲労について

金属疲労は、繰返しせん断変形によって起こる破壊である。応力振幅が σ （公称応力）のとき、き裂発生繰返し数 N_c や破断繰返し数 N_f との関係を、縦軸に応力振幅、横軸に N_c や N_f をとって両対数線図で表すことができる。この関係は一般的に直線となり、次式を用いて表すことができる。

$$N\sigma^a = K$$

ここで、 a と K は疲労試験条件によって実験から求まる材料定数である。

この直線をS-N線図という。

鉄鋼材料のS-N線図の例を図 3.17 に示す。鉄鋼材料では 10^7 回の繰返し数に耐えて疲労き裂発生や破壊しない応力が存在する。この応力のことを疲労限度という。

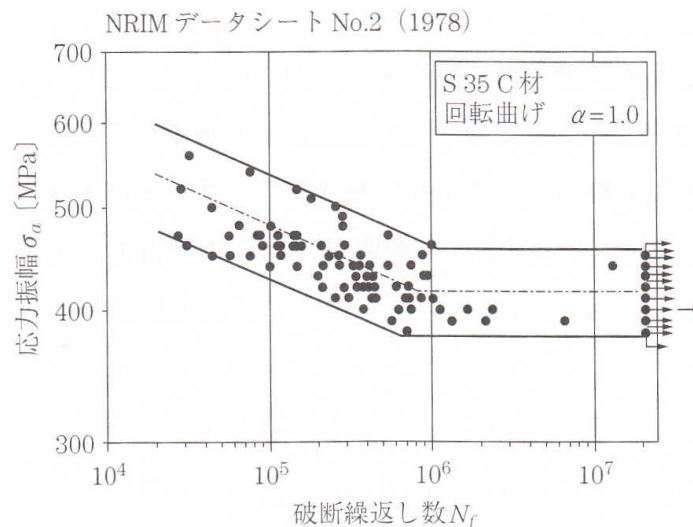


図 3.17 鉄鋼材料（炭素鋼）の S-N 線図の例（中村・堀川，2008）

疲労限度は種々の因子によって影響を受ける。また、それぞれの影響因子が競合して影響することもある。

材料の疲労限度は、一般的には直径 10 mm 程度の平滑試験片を用いて実験室の大気中（腐食の影響をほとんど受けない）の疲労試験から得ている。したがって、この値を使って実機部材の許容応力を推定するためにはそれぞれの影響因子についての評価が必要になる。影響因子には次のものがある。

[1] 使用環境

主として、腐食環境。

[2] 応力の種類の影響

回転曲げ、引張圧縮など。

[3] 材料強度の影響

一般に引張強さや硬さに比例して疲労限度は上昇する。しかし高強度材料になると微小欠陥や介在物への敏感性が増し、それらの存在が疲労限度を低下させる。

[4] 表面処理の効果

焼入れなど。

[5] 表面粗さの影響

多くの疲労破壊は部材の表面から発生する。このことから、部材の表面粗さが疲労限度に大きく影響する。

[6] 形状、寸法効果

機械部品の切欠部分では応力集中により疲労限度が低下する。

[7] 平均応力

疲労限度は平均応力の存在によって影響を受ける。

機械や構造物が稼働中に受ける荷重と環境の組み合わせ、それに対応して発生する損傷の分類は表 3.18 の通りである。

表 3.18 機械や構造物における荷重因子と環境因子および損傷の分類(中村・堀川, 2008)

		環境因子	
		あり	なし
荷重因子	あり	領域 C : 「環境破壊」 ・ 応力腐食割れ ・ 腐食疲労	領域 A : 「破損」 ・ 静的破壊 ・ 衝撃破壊 ・ 疲労破壊
	なし	領域 B : 「腐食」 ・ 全体腐食 ・ 隙間腐食 ・ 孔食	

このうち領域 C は環境と外力の組合せによる強度を考えなければならない領域であり、応力が繰り返される場合は腐食疲労 (corrosion fatigue) が問題となる。

腐食環境下では a) 金属材料の疲労限度は存在しない、b) 時間強度が大気中に比較して低い、c) 繰返し強度に大きく影響されるなど、特有の疲労現象を示す。

大気中と食塩水中（腐食環境下）の疲労試験の結果の比較を図 3.18 に示す。

腐食疲労では金属材料の疲労限度が存在しないことから、疲労限度を用いた設計はできない。

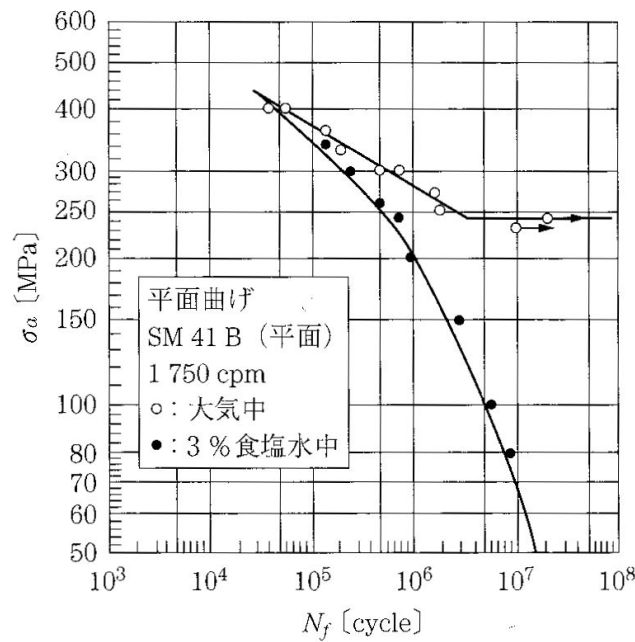


図 3.18 鋼板の腐食疲労試験結果の例 (中村・堀川, 2008)

金属疲労の発見に使用できる非破壊検査方法について、一般的な方法を表 3.19 に示す。いずれも材料内部または表層部にできた亀裂または割れの検出である。亀裂が発生するとそこから割れが広がり加速的に材料の破壊が進む。言い換えれば、現在の検査方法は材料が壊れる寸前の状態を検査していることになる。

表 3.19 非破壊検査の方法 (西島, 2005)

名称	感度	注意点
浸透探傷	1 mm 長	表面き裂に限る 粗面や隅角部には不適
磁気探傷	1 mm 長	ほぼ表面き裂に限る 強磁性材料に限る
渦電流法	1.5 mm 長	表面き裂に限る コイルの接触範囲だけ
超音波法	1 mm 角	面状の欠陥に適する 高減衰材には不向き
X線法	t の 10%	密着き裂は見えない 放射線管理区域で行う

以上のことをふまえて、海中で繰り返し荷重を受ける鋼材の疲労の評価について考える。

疲労を評価するには、その鋼材が現地で供用中にどのような繰り返し荷重を受けるかを把握し、海水に浸漬した条件で繰り返し荷重を受けた際の疲労き裂の発生を予め S-N 線図等に整理しておく必要があると考えられる。海中は腐食環境にあるため、上表の「領域 C」に該当すると考えられ、上述の「疲労限度」、すなわち、それ未満の応力ならばき裂は起きないという閾値が存在しないことに注意を要する。

また、現地での繰り返し荷重を受けた鋼材を検査対象とするとき、その鋼材にき裂または割れが全く生じていない段階では、非破壊検査のみによって現時点の S-N 線上の位置を知ることができないことに注意を要する。

引用・参考文献：

高橋正氣：磁気測定による疲労損傷評価の可能性，まてりあ，1996 年

西島敏：金属疲労とは何か，ばね論文集，2005 年

中村宏，堀川武：金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用，コロナ社，2008 年

⑦再利用に当たっての課題

平成 30 年度での浮魚礁の試算では、ダンフォースアンカーと下部チェーンの割合は製作費全体の約 25% であり、これらの再利用により、コスト削減が可能となる。

しかしながら、再利用の可能性を診断し不可となった場合、全体工事に大きな遅れが出てしまう。上記に示した検査についても、簡易なものではなく、試験設備や試験に対する熟練度が必要であり、アンカーやチェーンの製作工場へ運搬後の試験になると予想される。したがって、結果を得るにも時間がかかるので、長期間の工期で実施される工事での使用が想定される。その場合は、上記で示したように、保管費用や運搬費用が発生することも考慮しておく必要がある。なお、診断方法については、日本海事協会の鋼船規則に準拠した方法を提案したが、再利用ならではの特殊性についてはさらに吟味し、今後、有識者の意見を参考に、修正する必要がある。

VI. 今後の課題

(1) 浮魚礁の維持管理ガイドライン（案）

本業務で作成した「浮魚礁の維持管理ガイドライン(案)」は、点検方法および判断基準を現地調査で適用性の検証を行い、ガイドライン(案)の精度を高める必要がある。また、検討委員会を設置し、有識者からの意見を聴取し、ガイドライン(案)に反映させることが望まれる。さらに、事業主体や関係業界へも案を示し、その意見を必要に応じて反映させる。

(2) 摩耗速度等を考慮した係留索の強化方法

係留索の摩耗速度と流速、波高との相関に言及するには、サンプル数が少なく、さらなるデータの蓄積が望まれる。ただし、設計参考図書に示された係留索等の摩耗速度 (1mm/年) を越える実態があることから、設計参考図書の記述をより大きな値へ変更する見直しが必要と考えられる。

(3) その他

1) 生物付着量

高知県、宮崎県の浮魚礁回収品調査報告において、得られた実測値が、設計参考図書に示された平均的な付着生物の重量 (80N/m²) を越えていることから、設計参考図書の見直しの検討が必要と考えられる。

2) 設計波高・流速の設定

波高については今年度に引き続き、類似する浮体構造物の設計事例を収集し、参考にしながら浮魚礁の波の設計条件について検討することが望まれる。流速については、類似する浮体構造物の設計事例と比較し、明らかな相違があれば、流速の設計条件について検討を始めるのがよいと考えられる。

また、流体力を求めるときの抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M の設定について、類似する浮体構造物の設計事例と比較して検討することも考えられる。

3) 繊維ロープの結束部の強度

繊維ロープの結束部の強度は、現在、安全率を大きくとることで設計がなされている。必要に応じて、強度試験の実施を検討することが今後の課題である。

4) 係留索（下部チェーン）およびダンフォースアンカーの再利用

係留索(下部チェーン)およびダンフォースアンカーの再利用の診断方法について、日本海事協会の鋼船規則に準拠した方法を提案したが、再利用ならではの特殊性について、さらに吟味し、今後、有識者の意見を参考に、修正する必要がある。

【巻末資料】

浮魚礁の維持管理ガイドライン(案)

目 次

1. 浮魚礁の維持管理ガイドライン(案)の目的.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 経緯.....	1
1.3 考え方.....	1
2. 浮魚礁の構造形式.....	4
2.1 表層型浮魚礁の例.....	5
2.2 浮沈式浮魚礁の例.....	6
2.3 中層型浮魚礁の例.....	7
3. 表層型浮魚礁の点検診断.....	8
3.1 礁体位置.....	8
3.2 礁体喫水.....	9
3.3 甲板.....	10
3.4 外板(喫水上部).....	11
3.5 外板(水中部)及びダンパー(水平板).....	12
3.6 室内機器.....	14
3.7 その他.....	15
(1) 手摺り・マスト.....	15
(2) 防舷材(喫水上部).....	16
(3) 防舷材(水中部).....	17
3.8 係留環.....	18
3.9 シャックル.....	19
3.10 係留索(上部チェーン).....	20
3.11 防食電極.....	21
3.12 標識灯.....	22
3.13 レーダーレフレクター.....	22
3.14 陸上局(パソコン).....	23
4. 中層型浮魚礁の点検診断.....	24
4.1 礁体位置・頂部水深.....	24
4.2 流出警報装置.....	24
5. 点検作業時の参考費目と数量(案).....	25

1. 浮魚礁の維持管理ガイドライン(案)の目的

1.1 目的

浮魚礁の機能診断により劣化の早期発見を行い、補強や早期の撤去等の対応策を実施することにより、未然に流出事故等を防ぎ、回収にかかる予想外の経費負担を低減するため、保守点検や機能診断方法をガイドラインとしてとりまとめた。

1.2 経緯

浮魚礁の点検は、表層型浮魚礁では搭載している観測機器のメンテナンスや浮体部上部の目視点検を行っているが、浮魚礁本体を対象にした点検はほとんど実施されていない。中層型浮魚礁においては、浮体の水深が 30m 程度と浅い場合には、流出警報装置の点検を実施しているケースがあるが、一般的には、魚探を使用して、年に 1 回位置確認を行っている状況である。

浮魚礁の点検要領は、1993 年に「浮魚礁保守・点検要領 (MF21)」が刊行された。これは、「表層型浮魚礁礁体」、「中層型浮魚礁礁体」、「係留索系」、「安全対策用機器」、「搭載機器等」を対象とし、各項目に、「点検箇所」、「点検方法」、「判断基準」、「処置および対策」、「点検頻度」を示している。しかしながら、この点検要領は、26 年前の刊行で現在の技術とは異なる記載があり、具体的な点検方法や判断基準が記載されていないなどの課題がある。

平成 30 年度水産基盤整備調査委託事業報告書では、浮魚礁管理者にアンケートを実施したが、点検が実施されていない理由として、

- ・点検する費用がかかること
 - ・点検すべき部位、方法、頻度等の内容が明確になっていない
 - ・点検後の補修等を行うための機能診断方法が明確になっていない
- ことなどが挙げられている。

1.3 考え方

1993 年に刊行された「浮魚礁保守・点検要領」を基に、より具体的な点検方法と機能診断方法を提案することとし、点検では目視観察中心の簡易調査、潜水調査や ROV 調査を必要とする詳細調査に分け、判断基準では具体的な数値目標を検討することとした。

具体的な点検方法と対策方法を検討するうえで、宮崎県と高知県の表層型浮魚礁の回収後の調査報告書、平成 27 年度中層浮魚礁の保守管理方法の開発(MF21)を参考にした。また、判断基準は、「水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン」(水産庁漁港漁場整備部)の老朽化度(a, b, c, d)を参考にした。本検討での判断基準、評価、および対処法を表- 1.3.1 に示す。なお、本検討での判断基準は、原案であり今後議論の必要がある。

点検頻度は、基本的に水中部を除く目視点検可能な箇所については 1 回/年(簡易調査)の点検とし、ROV 調査や潜水調査による水中部の点検については 1 回/5 年(詳細調査)として検討した。また、陸上局(パソコン)については、日常管理を行うこととした。検討対象は表層型浮魚礁を主体としているが、中層型浮魚礁についても検討した。浮沈式浮魚礁については、礁体上部が喫水面上に出現しているときに点検することとし、表層型浮魚礁の点検要領で検討するものとした。表- 1.3.2 に点検箇所と点検頻度の一覧を示す。

なお、水中部の点検は、高気圧作業安全衛生規則「ガス分圧の制限；第 15 条」の規定により、

空気による潜水は約 40m までに制限されているが(「中層浮魚礁流出警報発信機保守管理の手引き」、MF21、平成 28 年 3 月)、調査時の安全面を考慮し、30m 以深の箇所は点検対象外とした。また、海上保安部が定める海上作業における安全対策を参考に、潜水作業は、潮流 1 ノット以上、波高 0.5m 以上の時は作業を中止することとした。

表- 1.3.1 判断基準と評価および対処法

判断基準	評価	対処法
a	部材に変形や破損、腐食等が確認され、機能が著しく低下している状態である。	対応策を早急に浮魚礁メーカーと協議し、応急処置を施す。さらに、今後の修繕の可否を決定する。
b	部材に変形や破損、腐食等が確認され、機能の低下が認められる状態である。	対応策を浮魚礁メーカーと協議し、今後の修繕計画を立案し、修繕を実施する。
c	部材に軽微な変形や破損、腐食等が確認されるが、機能低下は認められず、機能は維持されている状態である。	次回点検時まで機能低下する可能性がある場合は、対応策を浮魚礁メーカーと協議する。
d	部材に変形や破損、腐食等は認められず、十分に機能が維持されており、当面、機能低下の可能性がない状態である。	経過観察を継続する。

表- 1.3.2 点検箇所及び点検頻度一覧

表層型・浮沈式	
点検頻度	点検箇所
日常管理(毎日)	礁体位置
日常管理(1回/週)	陸上局(パソコン)
1回/年	礁体喫水
	甲板
	外板(喫水上部)
	室内機器
	手摺り・マスト
	防舷材(喫水上部)
	標識灯
	レーダーレフレクター
1回/5年	外板(水中部)及びダンパー(水平板)
	防舷材(水中部)
	係留環
	シャックル
	係留索(上部チェーン)
	防食電極
中層型	
点検頻度	点検項目
1回/年	礁体位置・頂部水深
<p>【備考】 中層型の流出警報装置の点検は、MF21発行の「中層浮魚礁流出警報発信機保守管理の手引き(平成28年3月)」に準ずることとする。</p>	

2. 浮魚礁の構造形式

現在、各地で施工されている浮魚礁は図- 2.1 に示す3形式である。表- 2.1 に各浮魚礁の特徴を示す。

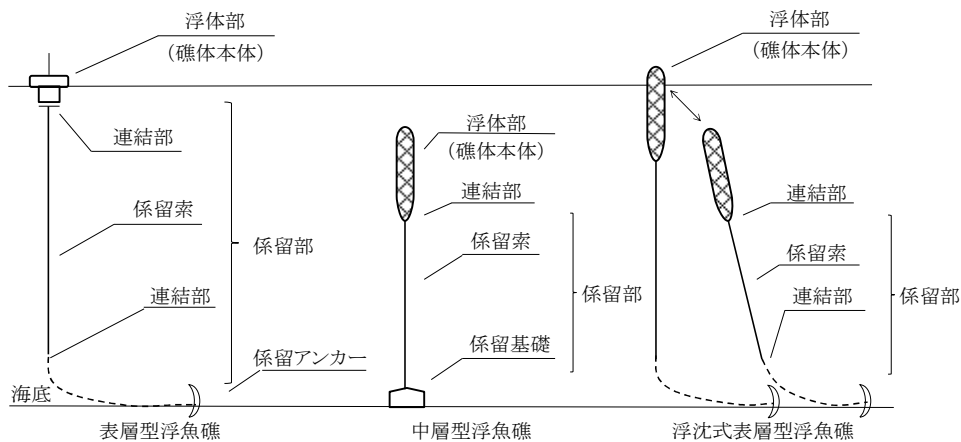


図- 2.1 浮魚礁の構造形式(出典：漁港・漁場の施設の設計参考図書)

表- 2.1 浮魚礁の特徴

形 式	特 徴
表層型	<ul style="list-style-type: none"> ・従来から実績のある形式であり、カツオ、ブリ、カンパチ、シイラ等が蛸集する。 ・黒潮の北上に沿って高知沖や和歌山沖、宮崎沖に配置されている。 ・様々な計測機器を搭載し、海洋情報を発信している。 ・航路標識としても認められるので、位置は海図上に示されている。 ・表層は外力が大きいため、係留索強度を高くする必要があり、費用は高額となる。 ・係留索はチェーン・ワイヤーの場合や合繊ロープの場合がある。 ・アンカーはダンフォースかコンクリートブロックで、前者が多い。
浮沈式(表中層型)	<ul style="list-style-type: none"> ・流速が小さい時は海面に浮いているが、流速が大きくなると(約2.5ノット以上)、海中に没水する形式であり、平成19年頃から施工実績がある。カツオ、カンパチ、カジキ類が蛸集する。 ・海面に浮いた状態は表層型、没水時は中層型の設計法を運用する。 ・価格は表層型より安価であり、中層型より高価である。 ・対応可能なメーカーは1社のみである。
中層型	<ul style="list-style-type: none"> ・平成13年頃から、価格が表層型の1/10と安価であり採用が増えた。 ・浮体の頂部水深は30~100m、係留索は合繊ロープ、アンカーはコンクリートブロックである。 ・ヒラマサやウマヅラハギ等が蛸集する。 ・計測機器の取付けは困難で、維持補修はほとんど行わない。

2.1 表層型浮魚礁の例

表層型浮魚礁は最も歴史のある浮魚礁である。海面に浮いていることから、灯標の設置が義務付けられている。そのほか、風向風速計や水温や流速の鉛直分布を計測するための計測機器、レーダーレフレクター、流出警報装置等が搭載されている。

係留索は合成繊維ロープの場合もあるが、下図のようにチェーンとワイヤーを使用する事例が多い。アンカーは把駐力が大きいダンフォースアンカーが使用されている。

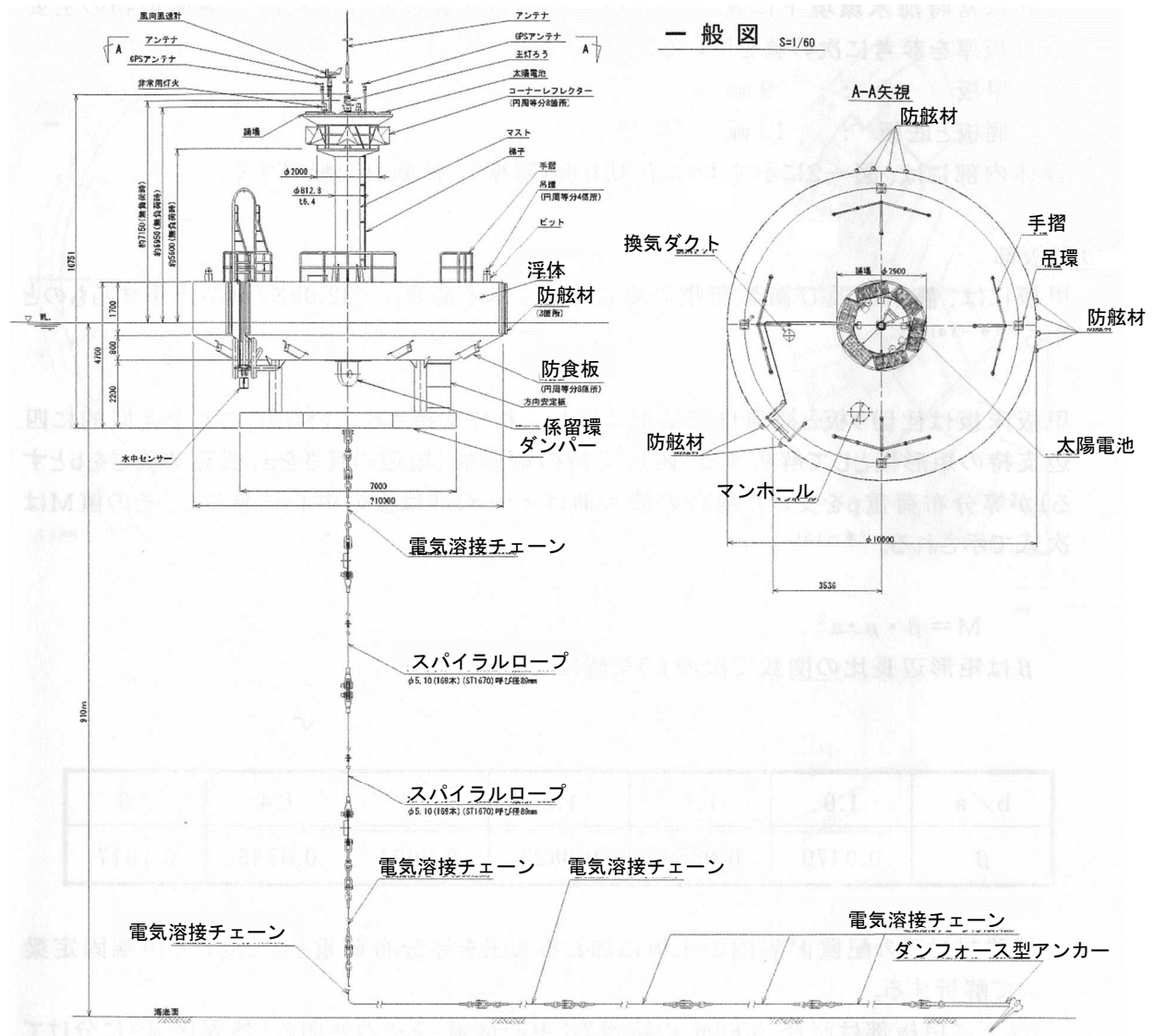


図- 2.1.1 宮崎県表層型浮魚礁 (H19)

2.2 浮沈式浮魚礁の例

潮流が緩やかな状態では、浮体は表層浮魚礁として海面に位置し、流速が2～2.5ノット程度で浮体は海中に引き込まれ水没する。浮体部の構造はFRP製およびABSフロート製で、係留索には、漁具対策として繊維ロープ表面に「樹脂チューブ+ワイヤーネット+樹脂チューブ」の3層の被覆を施した高機能繊維ロープを使用している。浮体上部には、ソーラー電源方式の耐水圧型標識灯および位置監視装置を搭載し、耐水圧小型標識灯ブイを浮体よりロープで係留させることにより、浮体が海面直下に水没した状態でも航行船舶に対して浮魚礁の存在を知らせるようにしている。アンカーはコンクリートブロックの場合とダンフォースアンカーの場合がある。

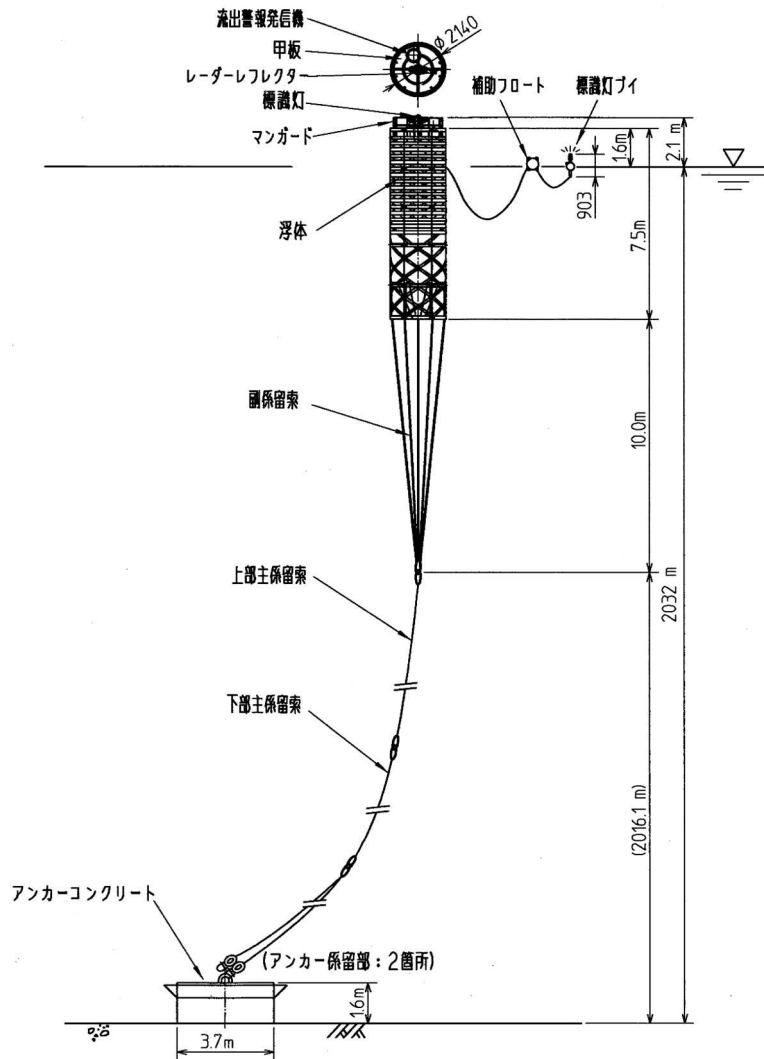


図- 2.2.1 鹿児島県 AK 表層浮魚礁（浮沈式）(H24)

2.3 中層型浮魚礁の例

中層型浮魚礁の一般的な構成は礁体（浮体）、副係留索、主係留索、アンカーからなっており、礁体にはソナーレフレクター、流出警報装置（発信側）を備えている。係留索は漁具による損傷の恐れがある場合には擦れに強い特殊ロープを用いている。係留索にワイヤロープを使用する場合は、防食の為に樹脂被覆を行っている。係留索は緊張係留であり、アンカーはコンクリートブロックを使用している。下図は浮体頂部の水深 R_0 が浅い例である。一般的には R_0 は水深 30m から 100m が多い。

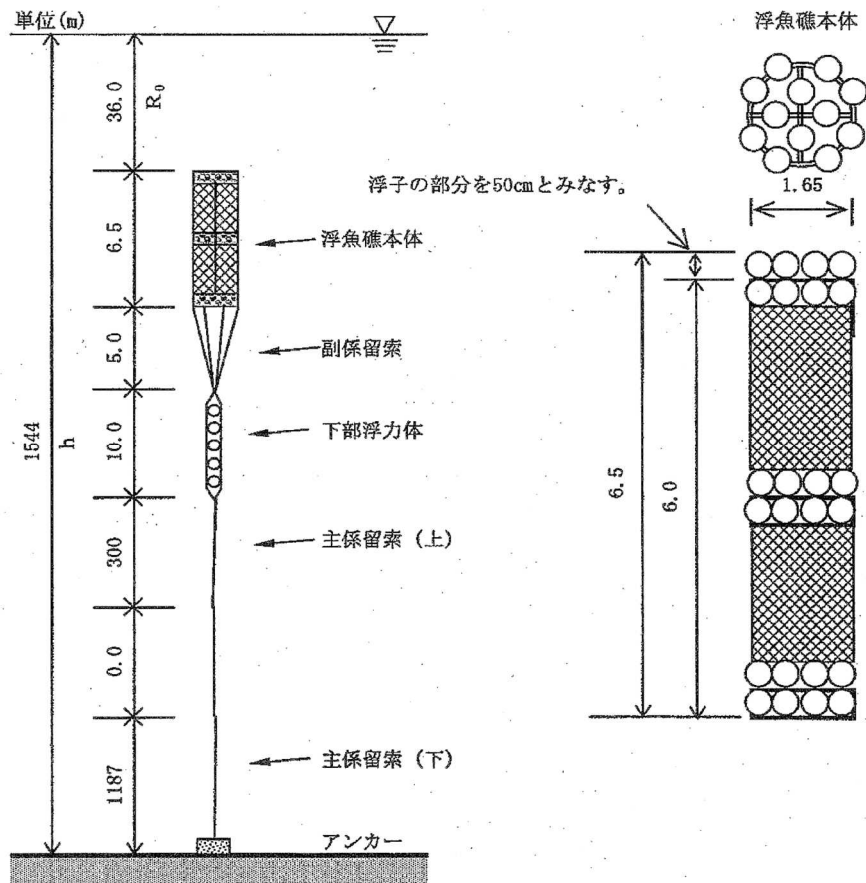


図- 2.3.1 鹿児島県中層型浮魚礁 (H24)

3. 表層型浮魚礁の点検診断

【礁体本体の点検診断】

3.1 礁体位置

GPS データによって現在位置を解析し、設定した想定範囲内に礁体が存在するか確認する。
点検頻度：毎日(一定時間毎)

【解説】

陸上局において、一定時間ごとに GPS データを解析し、礁体の位置が事前に設定した想定範囲内に存在するか確認する。礁体位置が想定範囲を逸脱した場合は、陸上局の警報等が作動するため、直ちに関係先に通報するとともに、その原因やアンカー位置調整等の処置を浮魚礁メーカーと協議する。

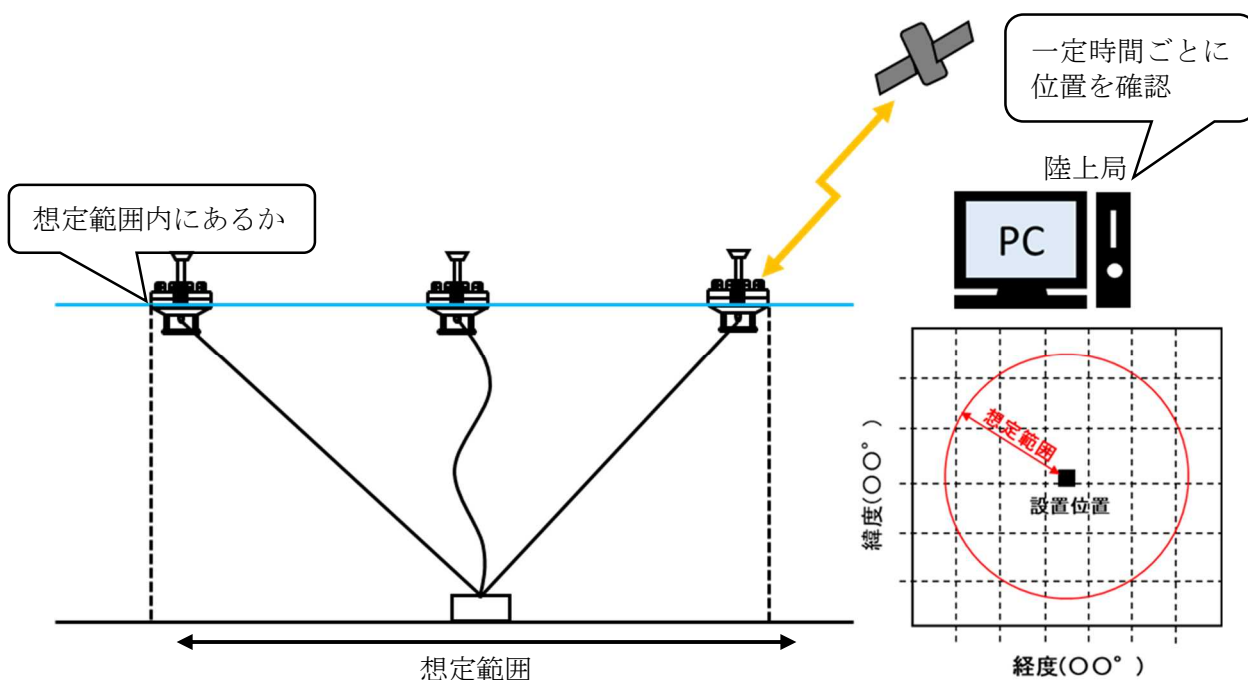


図- 3.1.1 礁体の位置確認

表- 3.1.1 礁体位置の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・ 礁体位置	GPS による現在位置の確認	a	<input type="checkbox"/> 礁体が想定範囲外にある。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> -
		d	<input type="checkbox"/> 礁体が想定範囲内にある。

3.2 礁体喫水

乾舷の喫水ラインにより沈下状態を確認する。

点検頻度：1回/年

【解説】

船上から目視により喫水を確認し、沈下量が設定最大喫水を超えたときは浸水の恐れがあり、原因や対応策を浮魚礁メーカーと協議する。浮体部の付着生物量が多いと判断された場合は、応急処置として、ケレン作業で付着生物を除去する。

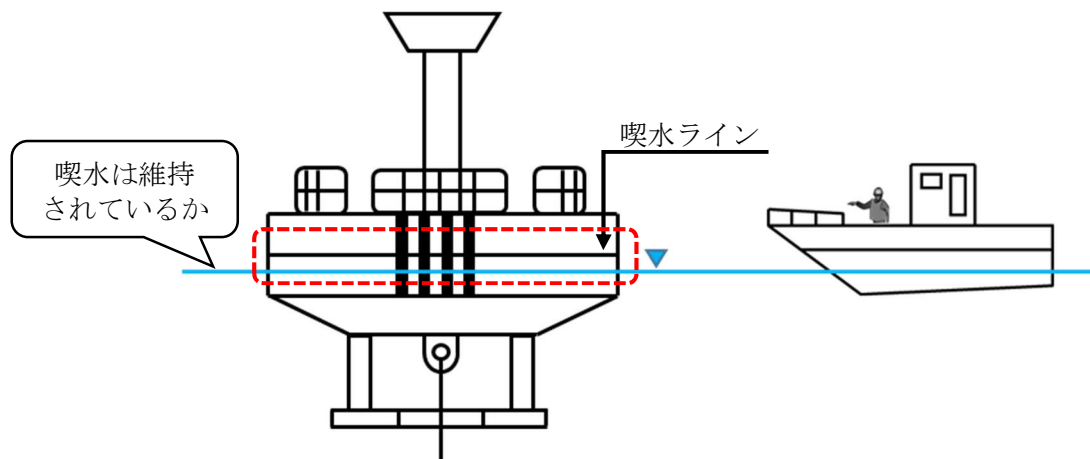


図- 3.2.1 喫水の目視点検箇所



図- 3.2.2 喫水ライン

(出典：和歌山県浮魚礁データ公開 <http://wave.pref.wakayama.lg.jp/gyoshou/>)

表- 3.2.1 喫水の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・設定最大喫水	船上から目視によって喫水面を確認	a	<input type="checkbox"/> 沈下量が設定最大喫水を超えている。
		b	<input type="checkbox"/> 喫水がほぼ喫水ライン上にある。
		c	<input type="checkbox"/> 喫水は確保されているが、喫水ラインに近い場所にある。
		d	<input type="checkbox"/> 喫水が十分に確保されている。

3.3 甲板

目視によって甲板の変状等を点検する。

点検頻度：1回/年

【解説】

礁体上で、目視により甲板の凹み、破損、亀裂等の状況確認、および塗装の剥がれや、発錆の有無を確認する。点検の結果、損傷の程度によって修理の要否を浮魚礁メーカーと協議する。

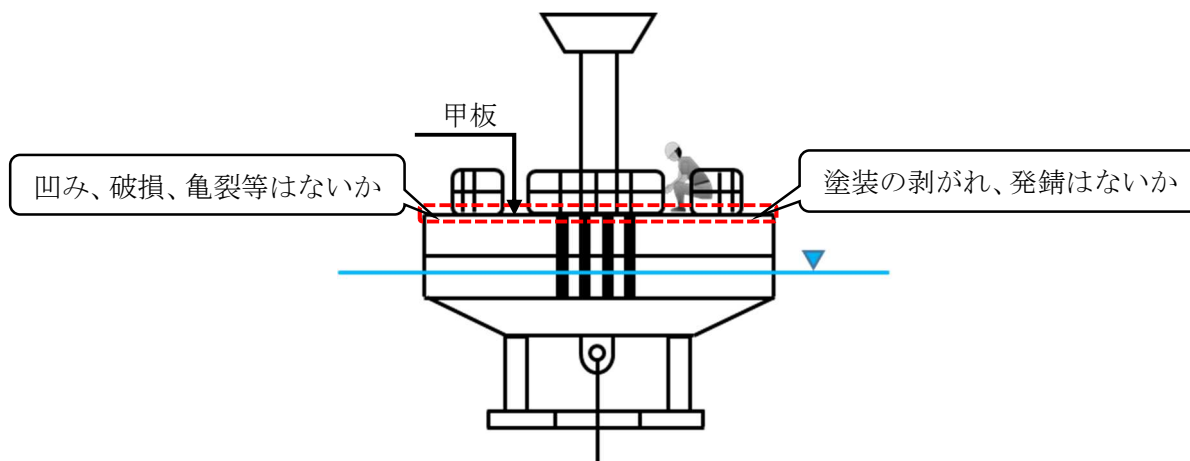


図- 3.3.1 甲板の目視点検箇所

表- 3.3.1 甲板の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・凹み、曲がり、破損、亀裂	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や著しい変形、損傷がある。
		b	<input type="checkbox"/> 変形や損傷がある。
		c	<input type="checkbox"/> 軽度な変形や損傷がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。
点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・塗装の剥がれ、発錆	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 全体的に腐食が進んでいる。
		b	<input type="checkbox"/> 全体的に発錆や塗装の剥がれがある。
		c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆や塗装の剥がれがある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

3.4 外板(喫水上部)

目視によって外板の変状等を点検する。

点検頻度：1回/年

【解説】

浮体上から目視により外板の凹み、破損、亀裂等の状況確認、および塗装の剥がれや、発錆の有無を確認する。また、付着生物量の状況についても、写真を撮影し記録を残す。外板の水中部は、目視できる範囲で観察し、その状況を記録しておく。点検の結果、損傷の程度によって修理の可否を浮魚礁メーカーと協議する。

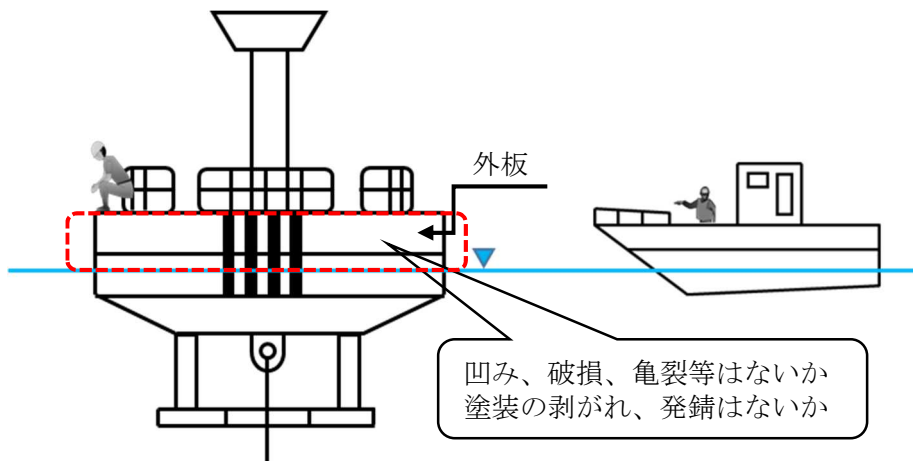


図- 3.4.1 外板の目視点検箇所

表- 3.4.1 外板(喫水上部)の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・凹み、曲がり、破損、亀裂	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や著しい変形、損傷がある。
		b	<input type="checkbox"/> 変形や損傷がある。
		c	<input type="checkbox"/> 軽度な変形や損傷がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。
点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・塗装の剥がれ、発錆	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 全体的に腐食が進んでいる。
		b	<input type="checkbox"/> 全体的に発錆や塗装の剥がれがある。
		c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆や塗装の剥がれがある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

3.5 外板(水中部)及びダンパー(水平板)

潜水目視または ROV (簡易的な水中カメラも含む) によって変状等を点検する。
点検頻度：1 回/5 年

【解説】

潜水目視または ROV (簡易的な水中カメラも含む) によって外板およびダンパー(水平板)の凹み、破損、亀裂等の状況確認、塗装の剥がれや、発錆の有無を確認する。また、付着生物量の状況についても、写真を撮影し記録を残す。なお、点検前に、点検箇所の付着生物をケレン作業で除去する(幅 50cm 程度)。点検の結果、損傷の程度によって修理の可否を浮魚礁メーカーと協議する。

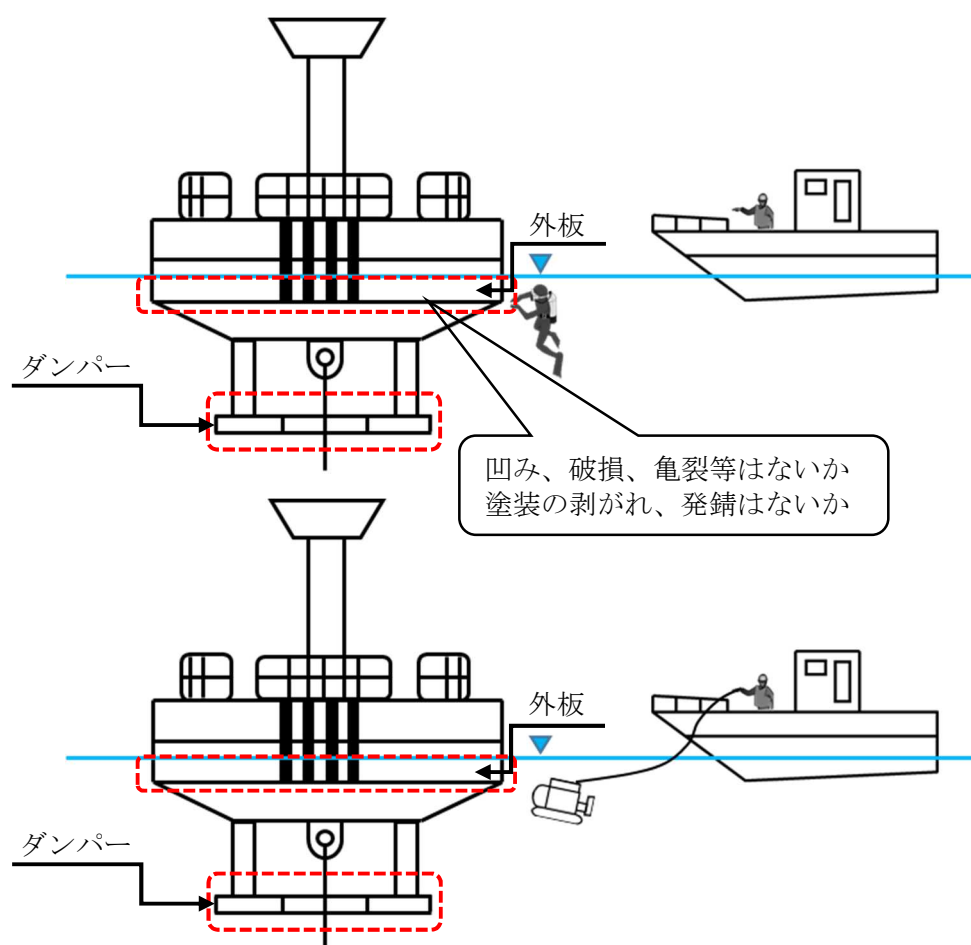


図- 3.5.1 外板(水中部)及びダンパー(水平部)の目視点検箇所(上図：潜水目視調査、下図：ROV 撮影による調査)

表- 3.5.1 外板(水中部)及びダンパー(水平板)の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・凹み、曲がり、破損、亀裂	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や著しい変形、損傷がある。
		b	<input type="checkbox"/> 変形や損傷がある。
		c	<input type="checkbox"/> 軽度な変形や損傷がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。
点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・塗装の剥がれ、発錆	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 全体的に腐食が進んでいる。
		b	<input type="checkbox"/> 全体的に発錆や塗装の剥がれがある。
		c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆や塗装の剥がれがある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

3.6 室内機器

目視によって室内の浸水状況、機器類の損傷の有無を点検する。また、出入り口のパッキンの損傷の有無を確認する。

点検頻度：1回/年

【解説】

室内機器の浸水状況および機器類に損傷等がないかを、目視で点検する。なお、室内に入る場合は、酸欠事故防止のため、十分換気を行ったうえで、酸素濃度計で酸素濃度が18%以上であることを確認して室内に入る。点検の結果、浸水が見られた場合は浮魚礁メーカーを通して、機器類メーカーに修理を依頼する。また、出入り口のパッキンが損傷していれば、新品と交換する。



図- 3.6.1 室内機器の点検

(出典：室戸岬沖地区(安芸沖14工区)水産環境整備工事(漁場環第1号)回収調査報告(黒潮牧場14号ブイ))

表- 3.6.1 室内機器の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 浸水状況 ・ 機器類の損傷 	目視による室内機器の損傷、 浸水状況の確認	a	<input type="checkbox"/> 著しい浸水が見られる。著しく浸水した痕跡がある。 <input type="checkbox"/> 機器類に著しい損傷がある。
		b	<input type="checkbox"/> 軽微な浸水が見られる。
		c	<input type="checkbox"/> 軽微に浸水した痕跡がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。
点検診断の項目	点検方法	判断基準	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 室内出入口のパッキンの損傷 	目視によるパッキンの損傷 具合の確認	a	<input type="checkbox"/> 著しい損傷があり、室内の気密性が確保できていない。
		b	<input type="checkbox"/> パッキンに亀裂が見られる。
		c	<input type="checkbox"/> パッキンが硬化している。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

3.7 その他

(1) 手摺り・マスト

目視によって手摺り・マストの変状等を点検する。

点検頻度：1回/年

【解説】

礁体上で、目視により手摺りの凹み、破損、亀裂等の状況確認、および塗装の剥がれや、発錆の有無を確認する。点検の結果、損傷の程度によって修理の可否を浮魚礁メーカーと協議する。

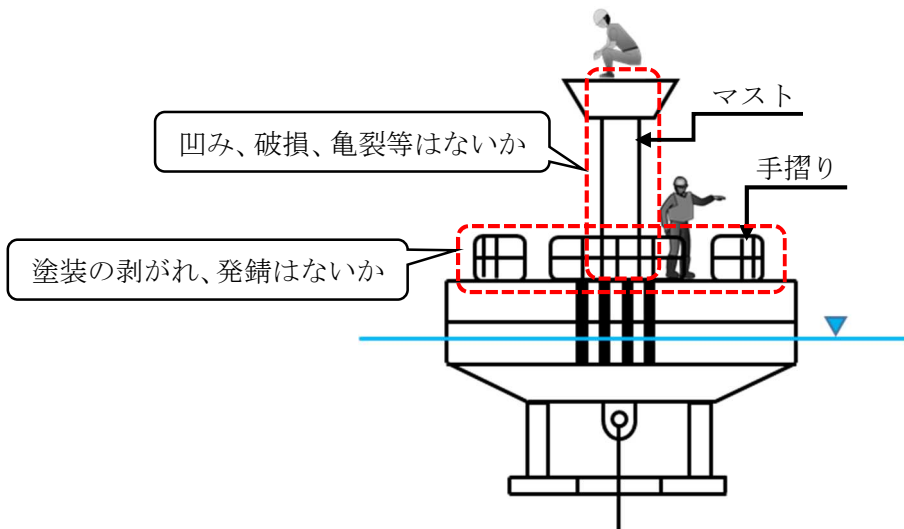


図- 3.7.1 手摺り・マストの目視点検箇所

表- 3.7.1 手摺り・マストの判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・凹み、曲がり、破損、亀裂	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や著しい変形、損傷がある。
		b	<input type="checkbox"/> 変形や損傷がある。
		c	<input type="checkbox"/> 軽度な変形や損傷がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。
点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・塗装の剥がれ、発錆	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 全体的に腐食が進んでいる。
		b	<input type="checkbox"/> 全体的に発錆や塗装の剥がれがある。
		c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆や塗装の剥がれがある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

(2) 防舷材(喫水上部)

目視によって防舷材の変状等を点検する。

点検頻度：1回/年

【解説】

浮体上から目視により、防舷材の変状や、取付金具の抜けや曲がりの有無を確認する。点検の結果、損傷の程度によって修理の要否を浮魚礁メーカーと協議する。

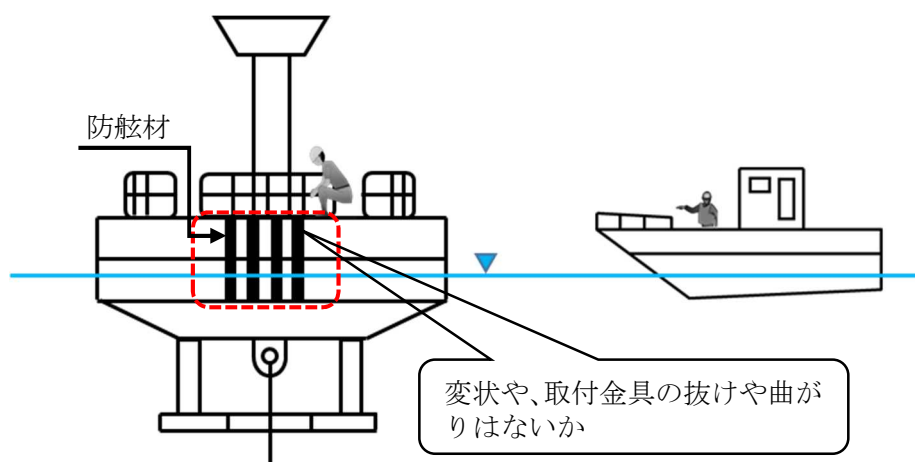


図- 3.7.2 防舷材の目視点検箇所

表- 3.7.2 防舷材(喫水上部)の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・凹み、曲がり、破損、亀裂	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 本体(ゴム部)が脱落、永久変形がある。 <input type="checkbox"/> 取付金具(ボルト)が抜け、曲がり、切断がある。
		b	<input type="checkbox"/> 一部ボルトが抜けている。一部変形している。
		c	<input type="checkbox"/> 取付金具(ボルト)に発錆がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

(3) 防舷材(水中部)

潜水目視または ROV (簡易的な水中カメラも含む) によって防舷材の変状等を点検する。
点検頻度：1 回/5 年

【解説】

潜水目視または ROV 撮影により、防舷材の変状や、取付金具の抜けや曲がりの有無を確認する。防舷材に付着生物が付いている場合は、ケレン作業で付着生物を除去してから点検を行う。点検の結果、損傷の程度によって修理の可否を浮魚礁メーカーと協議する。

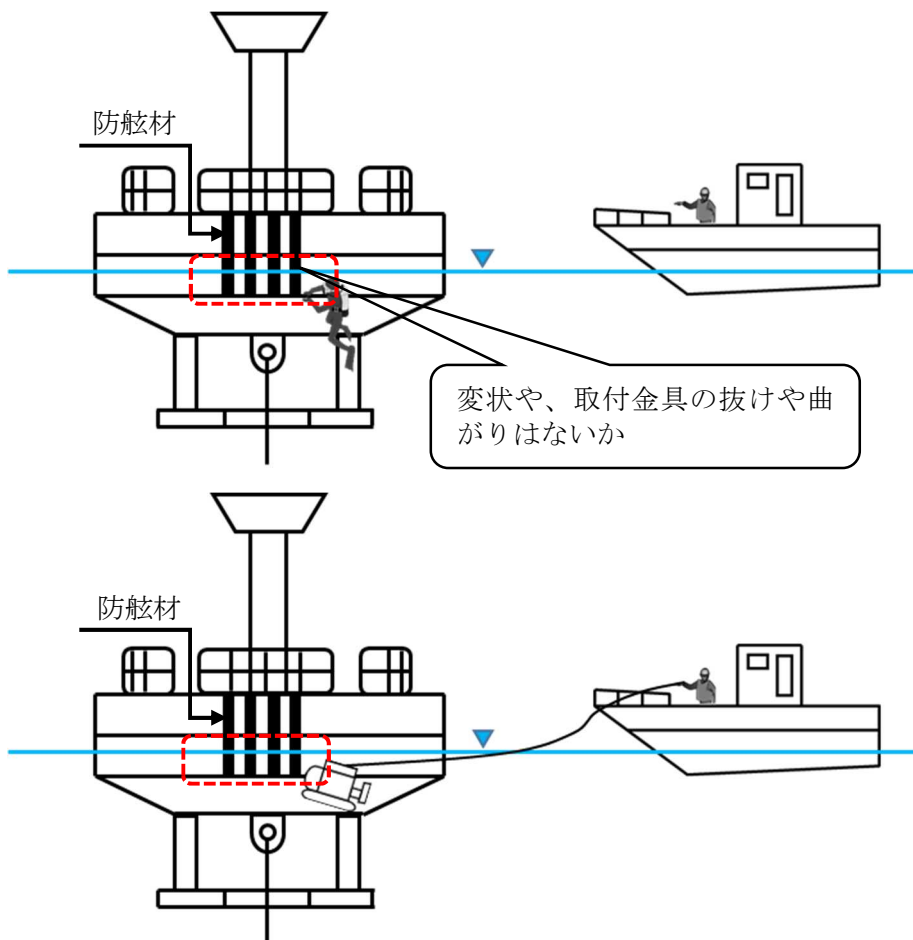


図- 3.7.3 防舷材の目視点検箇所(上図：潜水目視調査、下図：ROV 撮影による調査)

表- 3.7.3 防舷材(水中部)の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・凹み、曲がり、破損、亀裂	目視による変状等の確認	a	<input type="checkbox"/> 本体(ゴム部)が脱落、永久変形がある。 <input type="checkbox"/> 取付金具(ボルト)が抜け、曲がり、切断がある。
		b	<input type="checkbox"/> 一部ボルトが抜けている。一部変形している。
		c	<input type="checkbox"/> 取付金具(ボルト)に発錆がある。
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

【係留索系(接続部)の点検診断】

3.8 係留環

潜水目視によって、係留環の摩耗状況を確認する。

点検頻度：1回/5年

【解説】

潜水目視によって、係留環の摩耗状況について点検する。点検箇所は、図- 3.8.2 に示す摩耗しやすい連結部を計測し、摩耗量を算出する。摩耗量は、メジャーやノギスによって計測する。点検箇所のうち、最も摩耗が進んでいる箇所での摩耗量が、計画値よりも大きい場合には、対応策を浮魚礁メーカーと協議する。

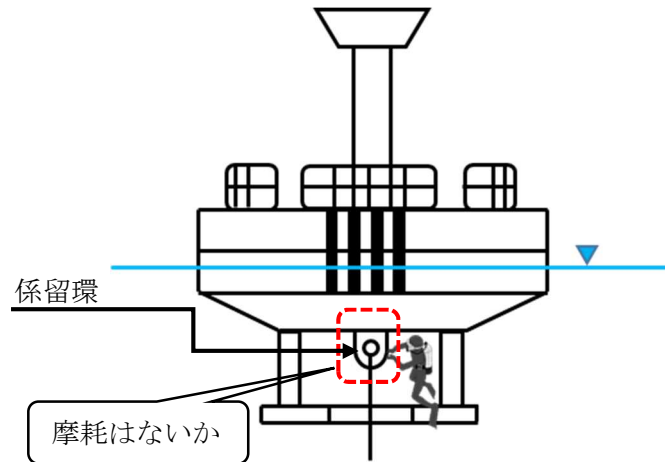


図- 3.8.1 係留環の目視点検箇所

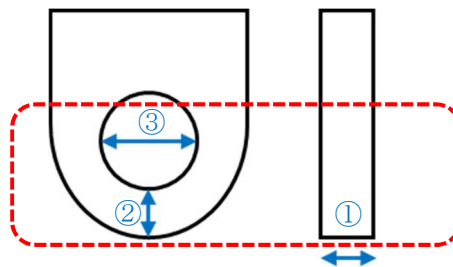


図- 3.8.2 係留環の計測箇所

表- 3.8.1 係留環の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・摩耗	目視による摩耗の確認	a	<input type="checkbox"/> 摩耗量が計画値よりも大きい。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値どおりである。
		d	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値よりも小さい。
		計画値	実測値
		摩耗量① _____ mm/年	摩耗量① _____ mm/年
摩耗量② _____ mm/年	摩耗量② _____ mm/年		
摩耗量③ _____ mm/年	摩耗量③ _____ mm/年		

3.9 シャックル

潜水目視によって、シャックルの摩耗状況を確認する。

点検頻度：1回/5年

【解説】

潜水目視によって、シャックルの摩耗について点検する。点検箇所は、図- 3.9.2 に示す摩耗しやすい連結部を計測し、摩耗量を算出する。シャックルの摩耗量は、メジャーやノギスによって計測する。点検箇所のうち、最も摩耗が進んでいる箇所での摩耗量が、計画値よりも大きい場合には、対応策を浮魚礁メーカーと協議する。

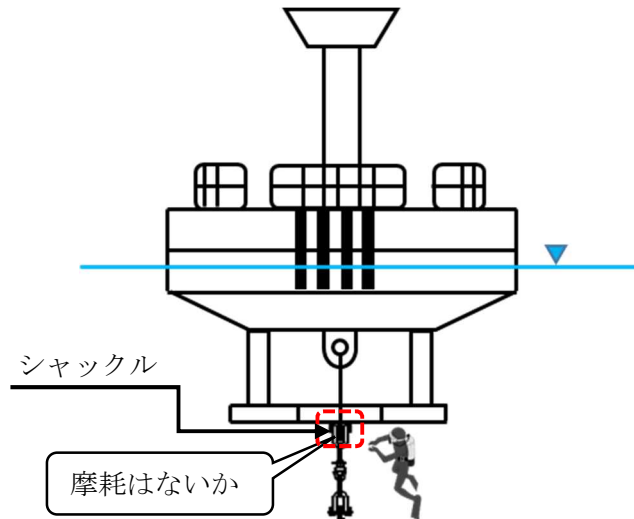


図- 3.9.1 シャックルの目視点検箇所

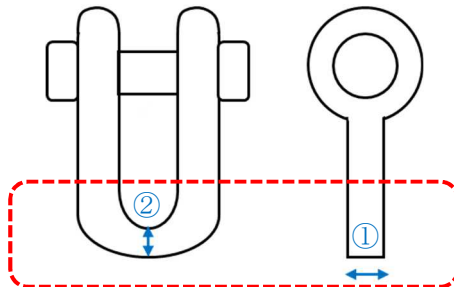


図- 3.9.2 シャックルの計測箇所

表- 3.9.1 シャックルの判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・摩耗	目視による摩耗の確認	a	<input type="checkbox"/> 摩耗量が計画値よりも大きい。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値どおりである。
		d	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値よりも小さい。
		計画値	実測値
		摩耗量① _____ mm/年	摩耗量① _____ mm/年
摩耗量② _____ mm/年	摩耗量② _____ mm/年		

【係留索系(係留索)の点検診断】

3.10 係留索(上部チェーン)

潜水目視または ROV によって、チェーンの摩耗状況を確認する。

点検頻度：1 回/5 年

【解説】

水深 30m 以浅の箇所におけるチェーンは、潜水目視または ROV によって画像を撮影し、摩耗状況を確認する。点検箇所に付着生物が付いている場合は、ケレン作業で付着生物を除去してから点検を行う。点検の結果、著しい摩耗が確認された場合は、対応策を浮魚礁メーカーと協議する。

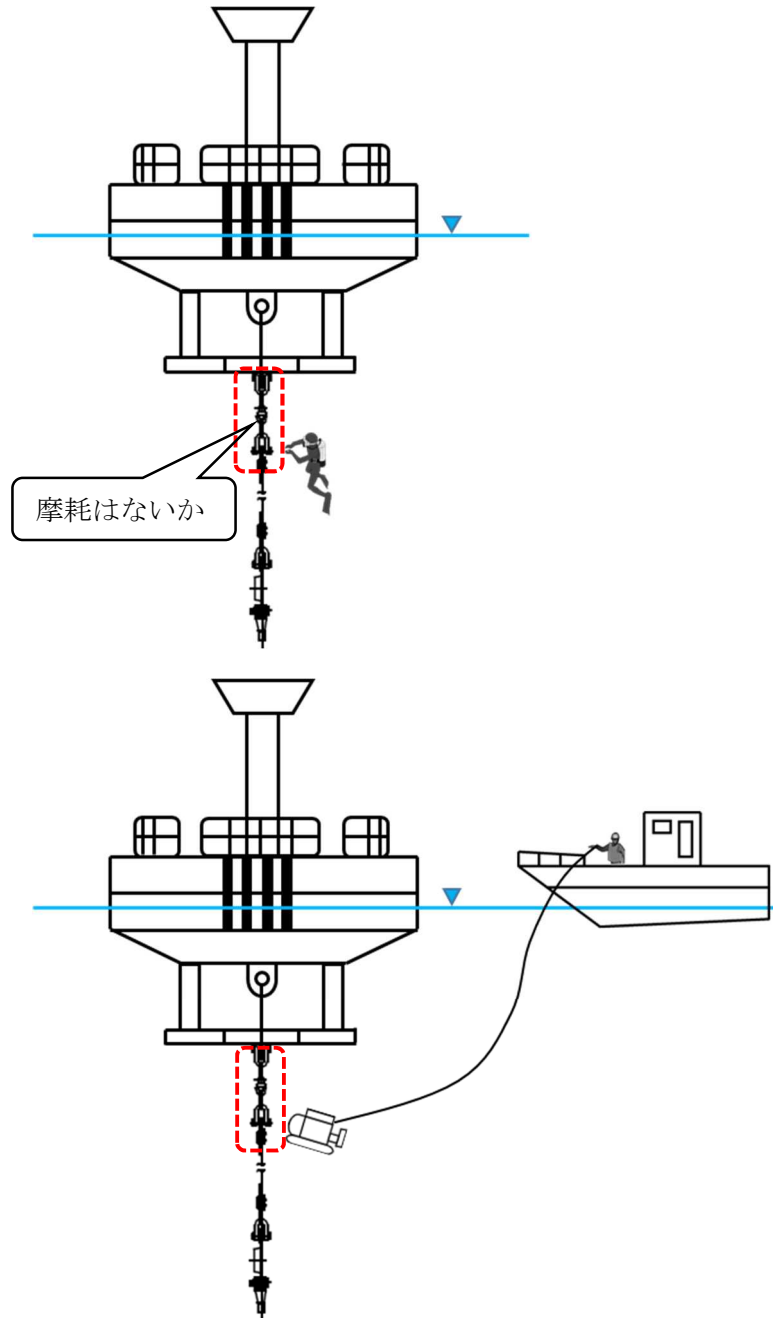


図- 3.10.1 係留索(チェーン)の目視点検箇所(上図：潜水目視調査、下図：ROV 撮影による調査)

表- 3.10.1 係留索(チェーン)の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準		
・ 摩耗	目視による摩耗の確認	a	<input type="checkbox"/> 摩耗量が計画値よりも大きい。	
		b	<input type="checkbox"/> -	
		c	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値どおりである。	
		d	<input type="checkbox"/> 摩耗量は計画値よりも小さい。	
		計画値		実測値
		摩耗量① _____ mm/年	摩耗量② _____ mm/年	摩耗量① _____ mm/年

3.11 防食電極

潜水目視または ROV によって、水深 30m 以浅の箇所における防食電極の残存の有無を確認する。

点検頻度：1 回/5 年

【解説】

潜水目視または ROV によって防食電極の残存の有無を確認する。点検の結果、損耗の程度により交換増設の要否を検討する。

表- 3.11.1 防食電極の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・ 残存の有無	目視による確認	a	<input type="checkbox"/> 陽極の欠落又は全消耗。
		b	<input type="checkbox"/> 陽極の半数以上が欠落している。
		c	<input type="checkbox"/> 陽極の一部が欠落している。
		d	<input type="checkbox"/> 欠落等の異常なし。

【安全対策用機器の点検診断】

3.12 標識灯

標識灯の点灯状況と電源電圧を確認する。

点検頻度：1回/年

【解説】

日光弁を覆い、夜間と同じ周辺照度として点灯させ、点灯しない場合は、電球あるいは点滅機器を交換する。また、テスターで電源電圧を測定し、所定の電圧がない場合は電源を交換する。

表- 3.12.1 標識灯の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・点灯	日光弁を覆い、夜間と同じ周辺照度として点灯させる。	a	<input type="checkbox"/> 点灯しない。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> -
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。
・電源電圧	テスターで電源電圧を測定する。	a	<input type="checkbox"/> 所定の電圧がない。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> -
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

3.13 レーダーレフレクター

目視によって、変形、破損の有無を確認する。

点検頻度：1回/年

【解説】

目視によって、変形、破損の有無を確認する。点検の結果、著しく変形、破損したものは新品と交換する。

表- 3.13.1 レーダーレフレクターの判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・変形・破損	目視による確認	a	<input type="checkbox"/> 著しい変形、破損がある。
		b	<input type="checkbox"/> 一部変形、破損がある。
		c	<input type="checkbox"/> -
		d	<input type="checkbox"/> 老朽化なし。

【搭載機器の点検診断】

3.14 陸上局(パソコン)

搭載機器の計測データに異常値が無いか確認する。

点検頻度：週1回

【解説】

搭載機器の計測データは異常値を示していないか、一定時間ごとに確認する。計測データが、異常値を示している場合は、原因を究明し復旧に務める。また、パソコンに表示される搭載機器類の蓄電池の電圧を確認し、交換の可否を検討する。

表- 3.14.1 陸上局(パソコン)の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・計測データ	目視による確認	a	<input type="checkbox"/> 計測データが異常値を示す。
		b	<input type="checkbox"/> 頻繁にデータが欠測になる。
		c	<input type="checkbox"/> 時々データが欠測になる。
		d	<input type="checkbox"/> 計測値が正常範囲内にある。
点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・搭載機器類の蓄電池電圧	目視による確認	a	<input type="checkbox"/> 規定電圧よりも電圧が明らかに低下している。
		b	<input type="checkbox"/> 規定電圧よりも電圧が低下し始めている。
		c	<input type="checkbox"/> -
		d	<input type="checkbox"/> 電圧は正常である。

4. 中層型浮魚礁の点検診断

【礁体本体の点検診断】

4.1 礁体位置・頂部水深

魚群探知機によって、礁体の現在位置を把握し、想定範囲内に礁体が存在するか確認する。
点検頻度：1回/年

【解説】

魚群探知機によって、礁体の現在位置を把握し、想定範囲内に存在するか確認する。また、頂部水深についても確認する。礁体が、想定範囲内に無い場合は、直ちに関係先に通報するとともに、その原因やアンカー位置調整等の処置を浮魚礁メーカーと協議する。

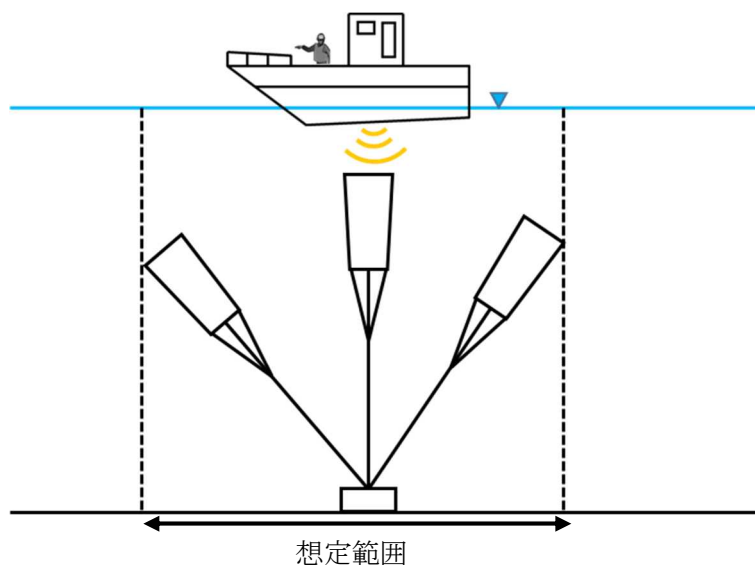


図- 4.1.1 礁体の位置確認

表- 4.1.1 礁体位置の判定基準

点検診断の項目	点検方法	判断基準	
・礁体位置	魚群探知機による現在位置の確認	a	<input type="checkbox"/> 礁体が想定範囲外にある。
		b	<input type="checkbox"/> -
		c	<input type="checkbox"/> -
		d	<input type="checkbox"/> 礁体が想定範囲内にある。

4.2 流出警報装置

流出警報装置の点検は、MF21 発行の「中層浮魚礁流出警報発信機保守管理の手引き(平成 28 年 3 月)」に準ずることとする。

5. 点検作業時の参考費目と数量(案)

浮魚礁の点検作業に要する費用の積算基準が無いため、漁港漁場関係工事積算基準等に記載の類似工事を参考に算出する必要がある。参考として、点検作業時(潜水作業を含む)の参考費目と数量(案)を以下に示す(表- 5.1)。今後、現地調査を実施し、より現実的な歩掛に修正していく必要がある。

表- 5.1 点検作業時の参考費目と数量(案)

費目	工種	区分	名称	単位	数量
	計画準備				
		計画策定			
			主任技師	人	1
			技師	人	2
			技師補	人	2
			雑材料	式	1
		諸準備・魚礁探索			
			調査船運転	日	1
			交通車	日	1
			技師	人	1
			技師補	人	1
			雑材料	式	1
		魚礁探索・仮固定			
			作業船運転	日	2
			交通車	日	1
			技師	人	1
			技師補	人	4
			確保用資器材	式	1
			雑材料	式	1
	浮魚礁点検				
		浮魚礁点検			
			メーカー技術者	人	3
			交通車	日	1
			旅費交通費	式	3
			カメラ損料	式	2
		潜水道具一式			
			ポンベ損料	式	1
			可搬式再圧室損料	式	1
			雑材料	式	1
		交換部品費			
			交換部品	式	1
			雑材料	式	1
	成果				
		報告書作成	主任技師	人	1
			技師	人	3
			雑材料	式	1