

水産基盤整備調査委託事業

大水深に設置する魚礁の設計基準等の構築

報告書

平成24年3月

社団法人マリノフォーラム21
国際気象海洋株式会社
独立行政法人水産総合研究センター

調査課題：大水深に設置する魚礁の設計基準等の構築

本調査課題については、次の2項目に分けて調査し、それぞれの報告書をまとめた。

1. 高層魚礁や浮魚礁の設計法の開発及び設計法に関する検討

目的：魚礁にかかる現行の調査・設計方法について、波・流れ等の調査技術等の進歩に伴い、より適切かつ合理的な調査・設計手法について検証する。
特に、大水深に設置する海底設置型の魚礁や浮魚礁について、外力、構造安定上の要因を把握し、より効果的な設計法の開発を行う。

担当：国際気象海洋株式会社
独立行政法人水産総合研究センター

2. 中層浮魚礁回収方法の開発

目的：耐用年数が経過した中層浮魚礁を効率的に撤去するために必要な回収手法を開発する。

担当：社団法人マリノフォーラム21

I 調査課題名

「大水深に設置する魚礁の設計基準等の構築」
(1) 高層魚礁や浮魚礁の設計法の開発及び設計法に関する検討

II 実施期間名、部局名及び担当者名

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所
水産業システム研究センター生産システム開発グループ
グループ長 高木 儀昌
主任研究員 大村 智宏
国際気象海洋株式会社
技術本部 桑原 正博
第3技術部 永田 美里

III 調査実施年度

平成 19～23 年度

IV 緒言

魚礁にかかる現行の調査・設計手法については、平成 5 年発刊の「沿岸漁場整備開発事業施設設計指針」を基本的に踏襲し、現在の「漁港・漁場の施設の設計の手引 2003 年版」に受け継がれている。しかし、この間に波・流れ等の推算技術や調査方法が大幅に進歩したことに加え、15 年程前から高さ 20m 以上の海底設置型の高層魚礁が実用化される等、周辺環境が大きく変化した。魚礁は、我が国が独自に開発した漁場造成技術であり、水産土木学分野の大きな柱に位置付けられる。また、海岸工学や港湾工学の範疇になく、水産土木学分野で独自に研究開発を進めなければならない。

そこで、魚礁にかかる現行の調査・設計方法について、より適切かつ合理的な調査・設計手法について検証する。特に、大水深に設置する海底設置型の魚礁や浮魚礁について、外力、構造安定上の要因を把握し、より効果的な設計法の開発を行う。

V 調査方法

平成 19～22 年度の過去 4 カ年の研究においては、海底設置型の高層魚礁を想定して、一様流中、波浪中での水理模型実験を実施し、魚礁の作用流体力や挙動、安定性について検討した。特に波浪に関しては、模型縮尺 1/36 程度の大縮尺実験を実施して、規則波に加えて既往の研究では取り扱われていない不規則波が作用した場合の波と振動流速の関係及び振動流速と流体力の関係を明らかにし、魚礁に作用する流体力や挙動、安定性について解明した。

平成 23 年度は、過去 4 カ年の研究で得られた実験データを総合的に解析・検討すると共に、合理的かつ効果的な魚礁設計法の開発に向けて必要な事項を抽出し、補足実験をとり行った。

1) 水理模型実験内容

(1) 実験施設

① 一様流中の実験

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の回流水槽実験棟の回流水槽を使用した。

表 5-1 回流水槽の諸元

	全体	測定部
長さ	24.5m	8.0m
幅	2.82m	2.8m
高さ	7.88m	1.8m
水深	1.4m	
形状	2インペラー駆動方式垂直循環型	
最大流速	3.0m/s	
水量	280t	
材質・構造	SUS鋼板溶接構造, 11ブロックフランジ水封接合	

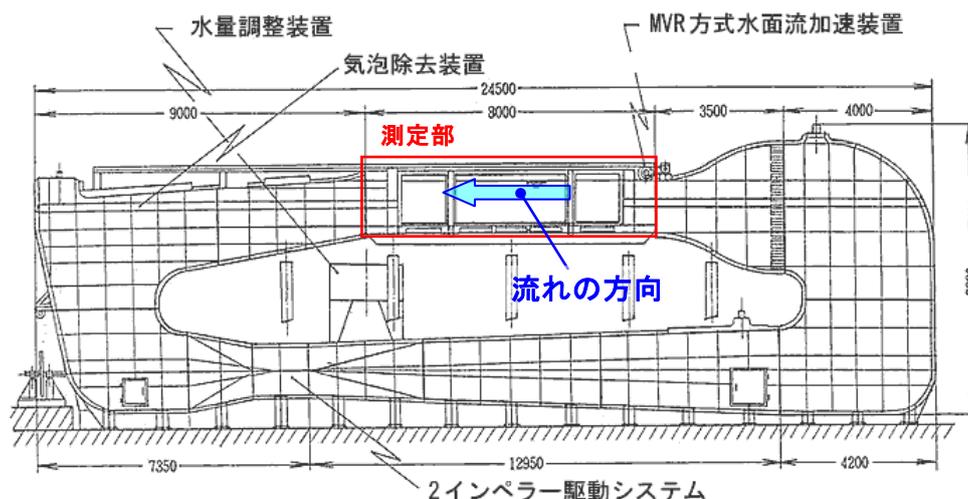


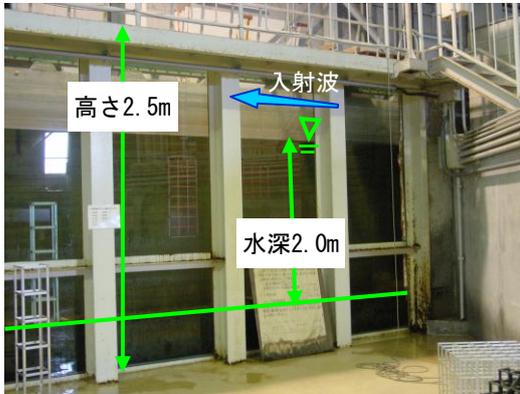
図 5-1 回流水槽断面図



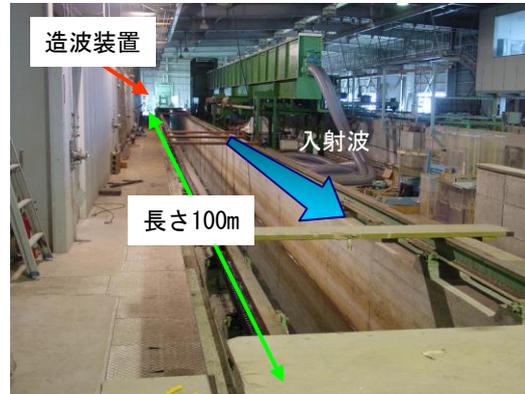
写真 5-1 測定部

② 振動流中の実験

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の増養殖水理実験棟の深水波不規則波造波水槽（長さ 100m×幅 1.0m×高さ 2.5m、水深 2.0m）を使用した。



(a) 実験水槽（ガラス面部）



(b) 実験水槽（上部）



(c) 複式フラップ型
規則波・不規則波造波装置

写真 5-2 深水波不規則波造波水槽

(2) 模型

① 魚礁模型

(a) 模型縮尺：1/36

(b) 模型形状：実験に用いた魚礁模型は骨組の粗密によって3種類（TYPE-I～III）に大別した。模型形状を表5-2に示す。

(i) TYPE-I（模型A～E）：5種類（写真5-3）

- ・ 幅、奥行き、高さがそれぞれ28cmの立方体を基本形とし、基本形に対して高さを1.5倍、2.0倍、2.5倍、3.0倍に設定した計5種類。
- ・ 骨組が最も密なタイプで、射影面積も大きい。
- ・ 部材はステンレス製（密度7.93g/cm³）、部材幅1cm、部材厚0.05cm。

(ii) TYPE-II（模型I～K）：3種類（写真5-4）

- ・ 幅、奥行き、高さがそれぞれ42cmの立方体を基本形とし、基本形に対して高さを1.5倍、2.0倍に設定した計3種類。
- ・ 骨組が粗いタイプで、射影面積はTYPE-Iの約1/3。
- ・ 部材はアルミ製（密度2.70g/cm³）、部材幅1cm、部材厚0.21cm。

(iii) TYPE-III（模型R）：1種類（写真5-5）

- ・ 幅、奥行きが28cm、高さが84cmの模型。
- ・ 骨組の粗密がTYPE-IとTYPE-IIの間で、射影面積はTYPE-Iの約1/2。
- ・ 部材はアルミ製（密度2.70g/cm³）、部材幅1cm、部材厚0.21cm。

(c) 模型端部補助部材（表5-3、写真5-6）

動揺の計測では転倒防止用の補助部材を付加した模型での実験を行った。補助部材はアルミ製、部材幅1cm、部材厚0.21cmで模型の前後下端に3個ずつ取り付けた。

(i) 基本形（模型R）[補助部材なし]

- ・ 基本形となる模型で、TYPE-III（30m型）の模型Rを使用した。
（底辺の長さ：28cm）

(ii) 模型R+14cm

- ・ 模型Rの前後下端に底辺7cmの端部補助部材を取り付けた模型で、模型の底辺の長さはTYPE-Aより14cm長い。
（底辺の長さ：42cm）

(iii) 模型R+28cm

- ・ 模型Rの前後下端に底辺14cmの端部補助部材を取り付けた模型で、模型の底辺の長さはTYPE-Aより28cm長い。
（底辺の長さ：56cm）

表 5-2 模型形状

模型縮尺： 1/36

模型名称		模型形状									
		現地スケール			模型スケール						
		幅 (m)	奥行 (m)	高さ (m)	幅 (cm)	奥行 (cm)	高さ (cm)	射影面積 (cm ²)	質量 (g)	外容積 (空cm ³)	実容積 (cm ³)
TYPE-I	模型A (10m型)	10	10	10	28	28	28	1503.4	1210	21952	152.6
	模型B (15m型)	10	10	15	28	28	42	2204.7	1768	32928	223.0
	模型C (20m型)	10	10	20	28	28	56	2880.7	2318	43904	292.3
	模型D (25m型)	10	10	25	28	28	70	3598.7	2876	54880	362.7
	模型E (30m型)	10	10	30	28	28	84	4301.1	3425	65856	431.9
TYPE-II	模型I (15m型)	15	15	15	42	42	42	775.1	918	74088	340.0
	模型J (23m型)	15	15	23	42	42	63	1106.2	1316	111132	487.4
	模型K (30m型)	15	15	30	42	42	84	1436.0	1707	148176	632.2
TYPE-III	模型R (30m型)	10	10	30	28	28	84	1891.6	2388	65856	884.4

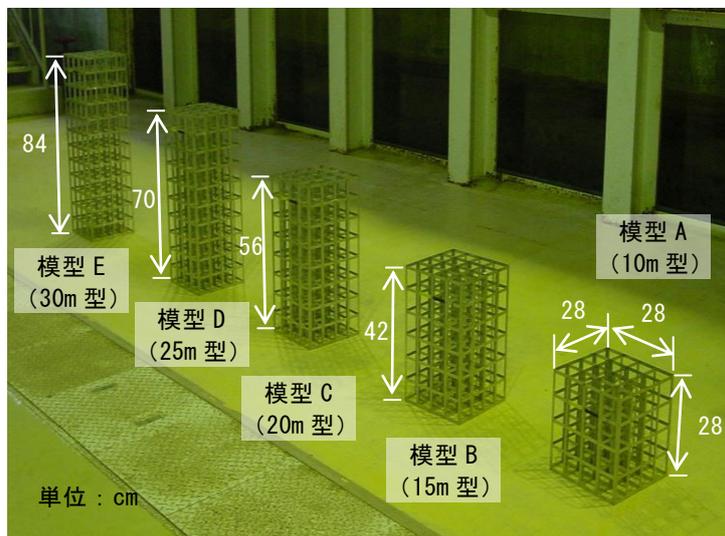


写真 5-3 魚礁模型 (TYPE-I)

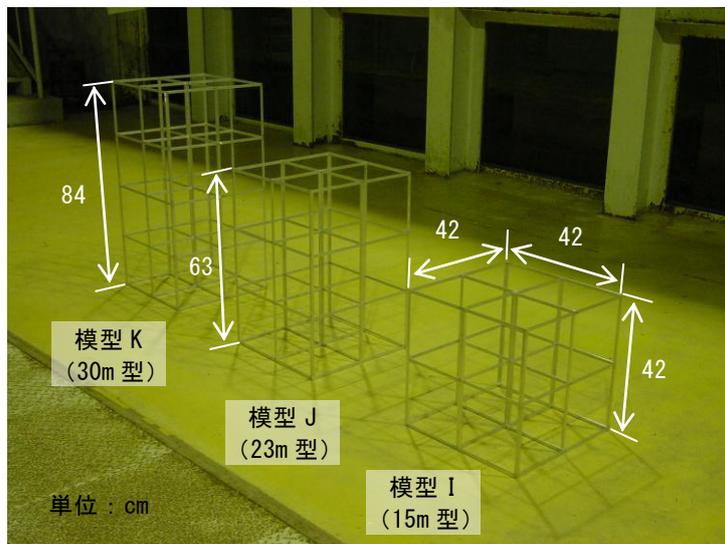


写真 5-4 魚礁模型 (TYPE-II)

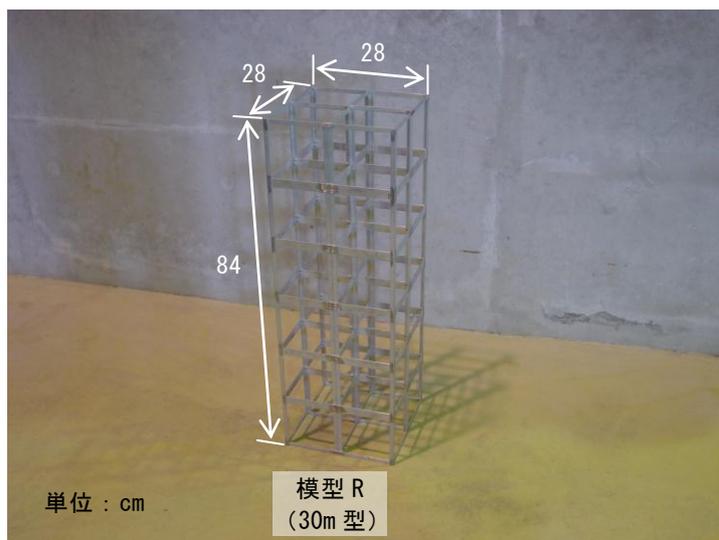


写真 5-5 魚礁模型 (TYPE-Ⅲ)

表 5-3 動揺の計測に使用した模型形状

縮尺 : 1/36

模型名称	模型形状							端部補助部材 (部材幅1cm, 部材厚0.21cm)
	模型スケール			現地スケール			模型の高さ/ 底辺の長さ (h/l)	
	幅 (cm)	奥行 (cm)	高さ (cm)	幅 (m)	奥行 (m)	高さ (m)		
模型R	28	28	84	10	10	30	3.0	-
模型R + 14cm	42	28	84	15	10	30	2.0	端部補助部材a : 底辺7cm, 高さ7cmの直角三角形
模型R + 28cm	56	28	84	20	10	30	1.5	端部補助部材b : 底辺14cm, 高さ14cmの直角三角形

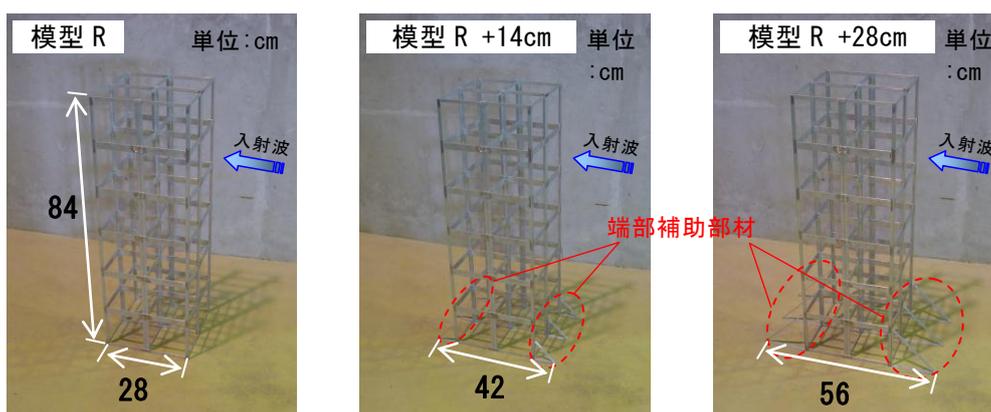


写真 5-6 動揺の計測に使用した模型

② 部材模型

基本的な形状の部材（円柱、角柱）5本を鉛直方向に等間隔で水平に配置したもので、実験に用いた部材模型は次の3種類である。（写真5-7，図5-2）。

- ・円柱 5本
- ・角柱 5本
- ・円柱 3本+角柱 2本（上部3本が円柱、下部2本が角柱）

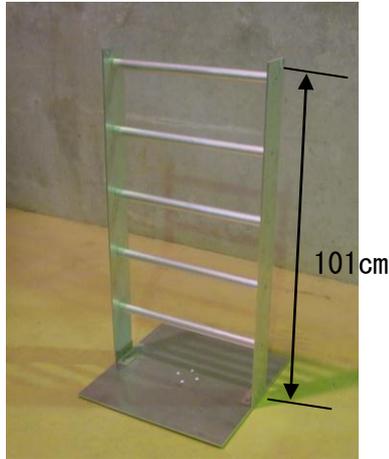


写真 5-7 部材模型（円柱）

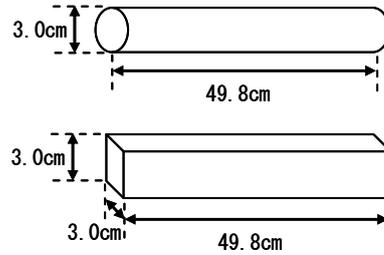


図 5-2 模型で使用した部材
（上図：円柱、下図：角柱）

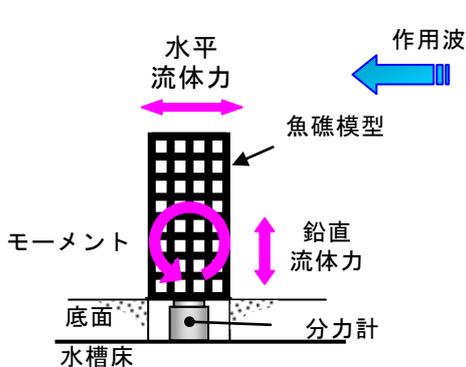
(3) 実験方法

① 流体力の計測（図5-3 参照）

一様流中及び振動流中の流体力の計測においては、水槽底面に分力計を設置し、分力計に固定した魚礁に作用する水平方向・鉛直方向の力を計測するとともに、魚礁にかかるモーメントを計測する。

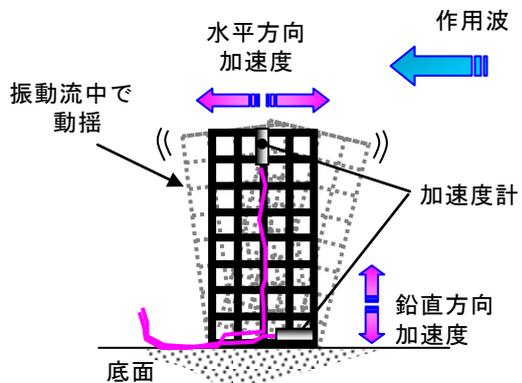
② 動揺の計測（図5-4 参照）

底面を鉄板または砂とした場合で、魚礁を固定せずに魚礁に作用する加速度を計測する。動揺の状況については、目視観察するとともに、加速度の波形などから判断する。



※ 入射波，魚礁周辺流速も同時計測

図 5-3 流体力の計測方法



※ 入射波も同時計測

図 5-4 動揺の計測方法

(4) 計測項目・計測機器・計測位置

① 計測項目

- (a) 水位変動
- (b) 流速変動
- (c) 流体力およびモーメント
- (d) 加速度

② 計測機器

- (a) 容量式波高計 (CHT6 : 株式会社ケネック)
[最大計測波高 : 100cm、応答周波数 : 10Hz、非直線性 : $\pm 0.3\%$ FS]
- (b) 電磁流速計 (VMT2-200 : 株式会社ケネック)
[最大計測流速 : 200cm/s、応答時間 : 0.05s、非直線性 : $\pm 2\%$ FS]
- (c) 6 分力計 (Y116M3-100 : 東京計測株式会社)
[定格容量 : $F_x, F_y, F_z = 200\text{N}$ 、 $M_x, M_y, M_z = 50\text{N}\cdot\text{m}$ 、応答周波数 : 約 1kHz、非直線性 : $\pm 1\%$ FS]
- (d) 加速度計 (A10-5, A10-10 : 東京計測株式会社)
[定格容量 : $\pm 5\text{G}$ (A10-5), $\pm 10\text{G}$ (A10-10)、応答周波数 : 50Hz、非直線性 : $\pm 1\%$ FS]
- (e) AD 変換装置
[入力レンジ : $\pm 5\text{V}$ 、分解能 : 12 ビット、変換速度 : $1\ \mu\text{s}$]

③ 計測位置

- (a) 水位変動 (振動流)
魚礁の中心及び、魚礁の中心から岸側 10m 地点。また、入射波は魚礁の中心から沖側約 10m と魚礁周辺の 2 箇所計 3 地点で計測。入射波計測の 2 本の波高計の間隔は、入射波分離処理のため、周期により変えている (85cm ~ 280cm) (図 5-6)。
- (b) 流速変動
(一様流)
模型の高さに合わせて計測位置を変える 3 地点と、魚礁取り付け用のアルミ板の高さから 5、10、20cm 地点の計 6 地点 (図 5-5)。
(振動流)
魚礁脇 (水路側面から 10cm) の底面から 30、60、90cm の 3 地点 (図 5-6)。
- (c) 流体力及びモーメント
図 5-5、図 5-7 のように分力計を取り付けたアルミ板に魚礁を固定する。
- (d) 加速度
水平方向の加速度は魚礁の上端、鉛直方向の加速度は魚礁前面の下端に加速度計を付け計測 (図 5-8)。

流速の計測位置（底面からの高さ）

模型	模型高さ h (cm)	流速計① z ₁ (cm)	流速計② z ₂ (cm)	流速計③ z ₃ (cm)
A (10m型)	28	7.5	15.0	30.0
C (20m型)	56	15.0	30.0	60.0
E (30m型)	84	22.5	45.0	90.0

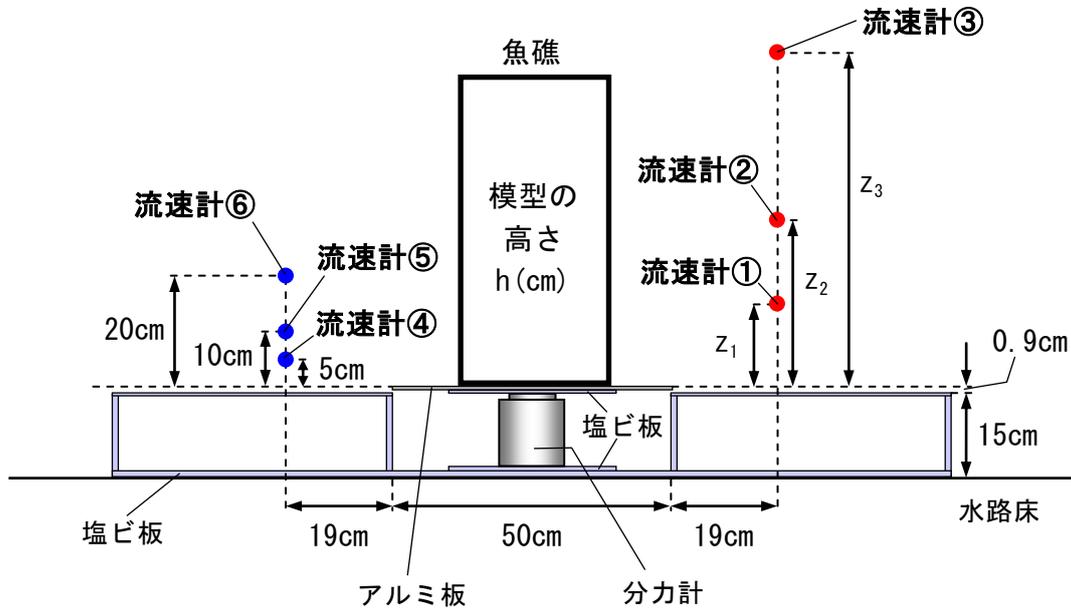


図 5-5 一様流中での流速の計測位置（上流側から見た図）

入射波計測用の波高計の間隔（図中の x）

規則波		不規則波	
T (s)	x (m)	T _{1/3} (s)	x (m)
1.5	0.450	2.0	0.425
2.0	0.750	2.5	0.625
2.5	1.100	3.0	0.625
3.0	1.400		

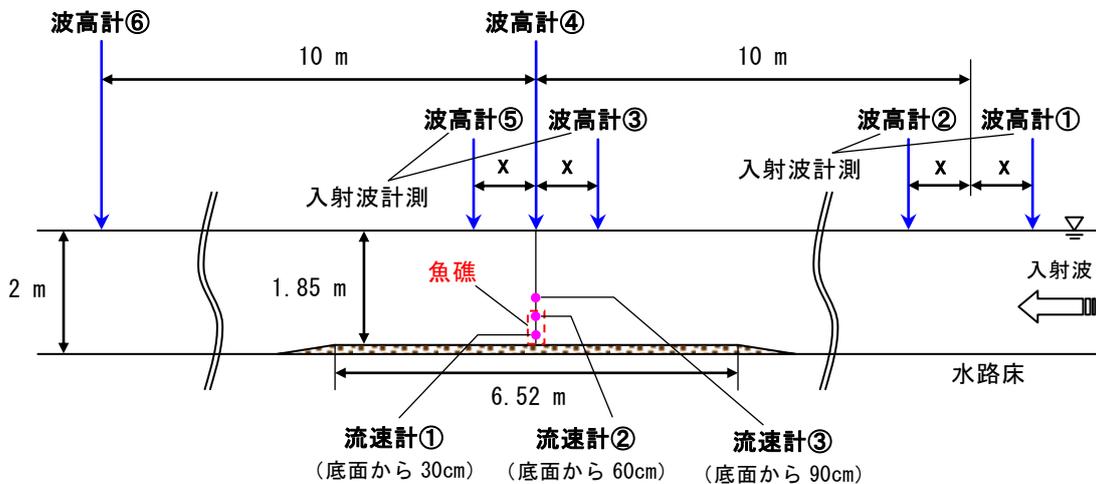


図 5-6 振動流中での波高及び流速の計測位置

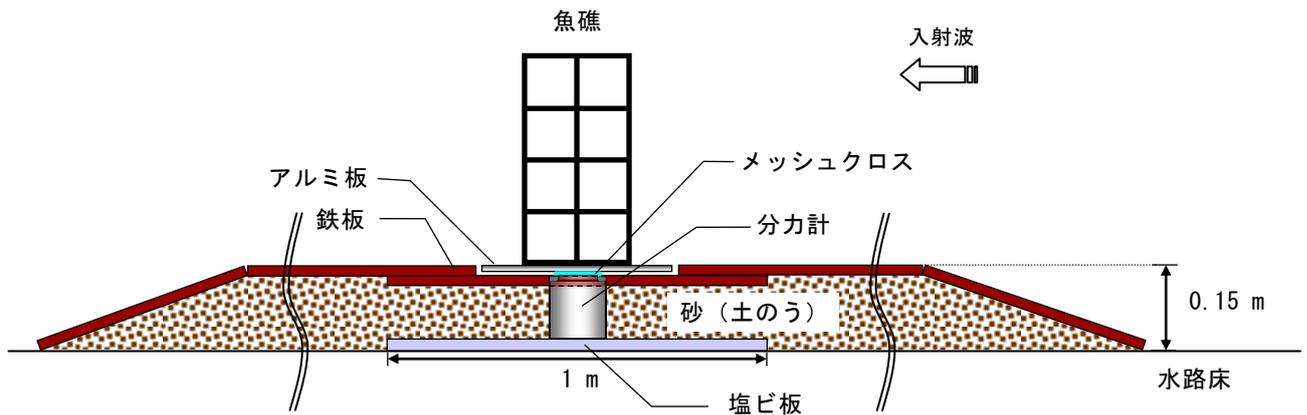


図 5-7 分力計設置図 (振動流での実験の場合)

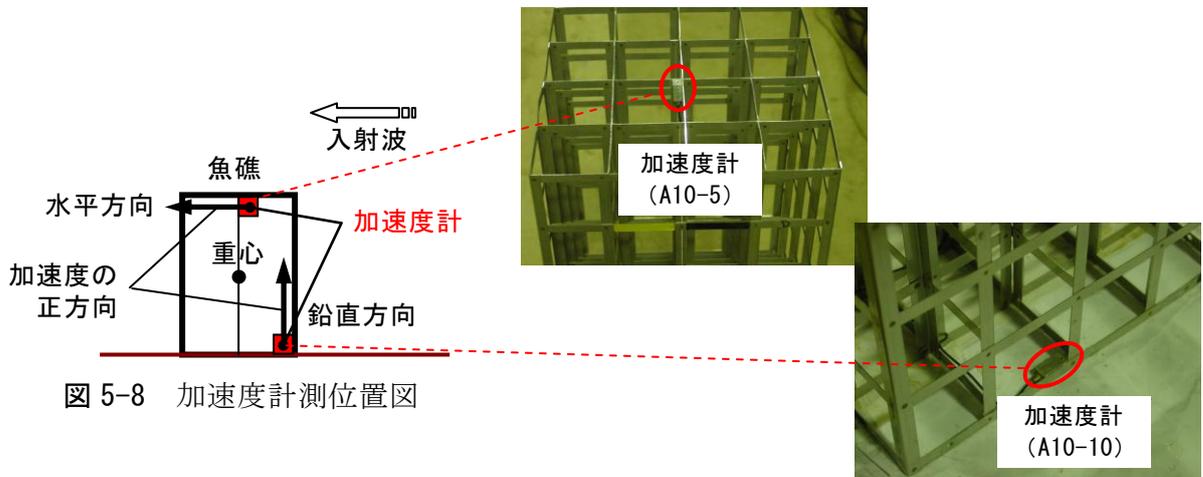


図 5-8 加速度計測位置図

(5) 実験ケース

① 一様流中の作用流体力の計測

- (a) 実験水位：1.24m
- (b) 実験流速：8～60cm/s

② 振動流中の作用流体力の計測

- (a) 実験水位：1.85m
- (b) 実験波浪：規則波及び不規則波
 - ・規則波 波 高：5～40cm
周 期：1.5～3.0s
 - ・不規則波 有義波高：10～30cm
有義周期：2.0～3.0s

③ 振動流中の動揺の計測

- (a) 実験水位：1.85m
- (b) 実験波浪：規則波及び不規則波
 - ・規則波 波 高：10～40cm
周 期：1.5～3.0s
 - ・不規則波 有義波高：10～30cm
有義周期：2.0～3.0s

2) 浮魚礁の設置海域における流動調査

独立行政法人水産総合研究センターの調査船・俊鷹丸（船員 24 名、887 トン）を使用し、図 5-9 に示す三重県熊野灘沖の浮魚礁の設置海域において、ADCP（RD Instruments 製）による層別の流況調査を実施した。調査は平成 21 年 12 月 3 日に行い、浮魚礁を目視確認した後にその設置海域周辺を調査船で航行することにより、当該海域の空間的な流況分布を把握した。

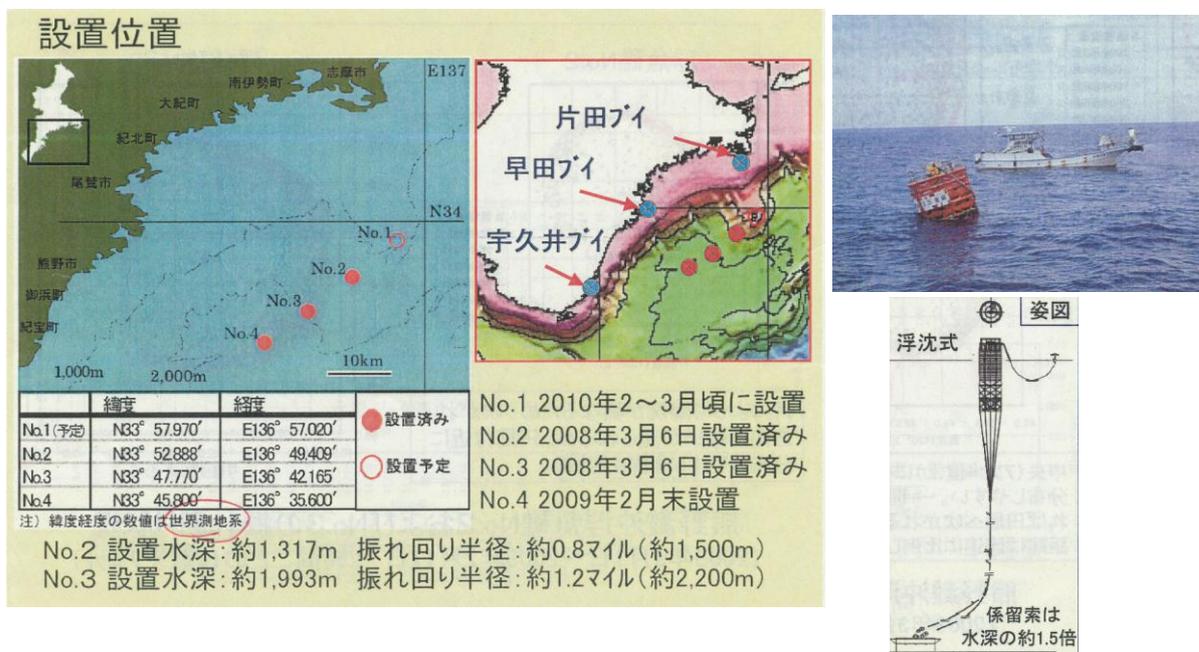


図 5-9 流況観測をした三重県熊野灘沖の浮魚礁の設置海域（出典：三重県水産研究所資料）

VI 調査結果

1) 設計手法の検討

これまでに実施した実験結果より、現行設計法の課題と適切な設計手法について検討した。

(1) 現行の設計法による水平流体力の算定値と実験値の比較

算定値は「漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年版」(以降、「手引き」と呼ぶ)に準じて次のように算定した。

$$u = u_m \sin \theta$$

$$u_m = \pi \frac{H \cosh 2\pi D/L}{T \sinh 2\pi h/L} \quad \dots \text{(式 11-2-6)}$$

$$\left. \begin{aligned} F_D &= C_D A \frac{w_0}{2g} u_m^2 \\ F_M &= C_M V \frac{w_0}{g} \frac{2\pi}{T} u_m \end{aligned} \right\} \dots \text{(式 11-2-7)}$$

$$\left. \begin{aligned} 2F_D < F_M \text{ のとき} & \quad F = F_M \\ 2F_D > F_M \text{ のとき} & \quad F = F_D + \frac{F_M^2}{4F_D} \end{aligned} \right\} \dots \text{(式 11-2-8)}$$

ここに、

u : 魚礁頂部における波による水粒子の水平流速(m/s)

C_M : 質量係数 ($C_M = C_{MA} + 1$)

C_D : 抗力係数

A : 波の進行方向に垂直な鉛直面の全射影面積 (魚礁を構成する各部材の総和) (m²)

V : 魚礁の全実容積(m³)

D : 魚礁の高さ(m)

H, T, L : 設置位置における有義波高(m), 周期(s), 波長(m)

但し、高層魚礁は形状が複雑であり、通常 C_D は各メーカーが提示している一様流中の C_D 値が用いられることが多く、また、 C_M は形状に関わらず 2.0 を用いていることが多い。

①抗力係数 C_D と質量係数 C_M

魚礁模型 TYPE-I (20m 型および 30m 型) について、一様流中の計測結果から求めた C_D 、 C_M を図 6-1 (レイノルズ数で整理) に、振動流 (規則波) での計測結果から求めた C_D 、 C_M を図 6-2 (KC 数で整理) に示す。

一様流中の C_D は 0.6~0.7 の範囲であるが、振動流 (規則波) での C_D は 1.0~4.0 の範囲に KC 数により異なっている。

このことから波浪による振動流の影響を受ける魚礁の C_D 、 C_M に一様流場での値を適用することはできないことが分かる。

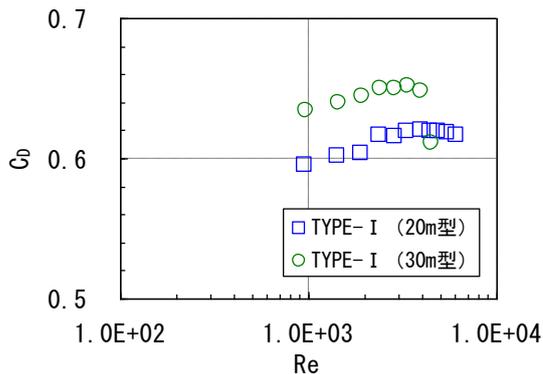


図 6-1 レイノルズ数 Re と抗力係数 C_D の関係

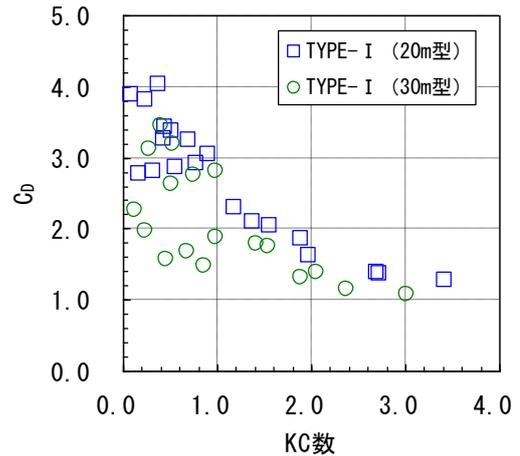


図 6-2 KC 数と抗力係数 C_D の関係

②水平流体力の算定

魚礁模型 TYPE-I (20m 型および 30m 型) について、規則波での流体力及びモーメントの計測値と算定値の関係を図 6-3、3-4 に示す。算定には次に記す 2 通りの C_D 、 C_M を使用した。

(a)一様流の計測結果から算定した C_D と $C_M=2.0(=C_{MA}+1)$ (図中の白抜き記号)

(b)計測された波高と周期から算定される流速に応じた KC 数に対応する C_D 、 C_M (図中の塗りつぶし記号)

また、水平流体力の作用位置は実験の M_x/F_x で求めた位置と流速分布の二乗の図芯の 2 種類としてモーメントを算定した。

上記(a)の一様流中の C_D と $C_M=2.0$ を用いた算定値は、計測値の半分程であったが、上記(b)の振動流中の C_D 、 C_M を用いた算定値は計測値より若干小さい傾向であるが、計測値を再現している。このことから、流体力の算定には、一様流中の C_D を用いることは適当でなく、KC 数に対応した振動流中での C_D 、 C_M の値を使用する必要があると言える。

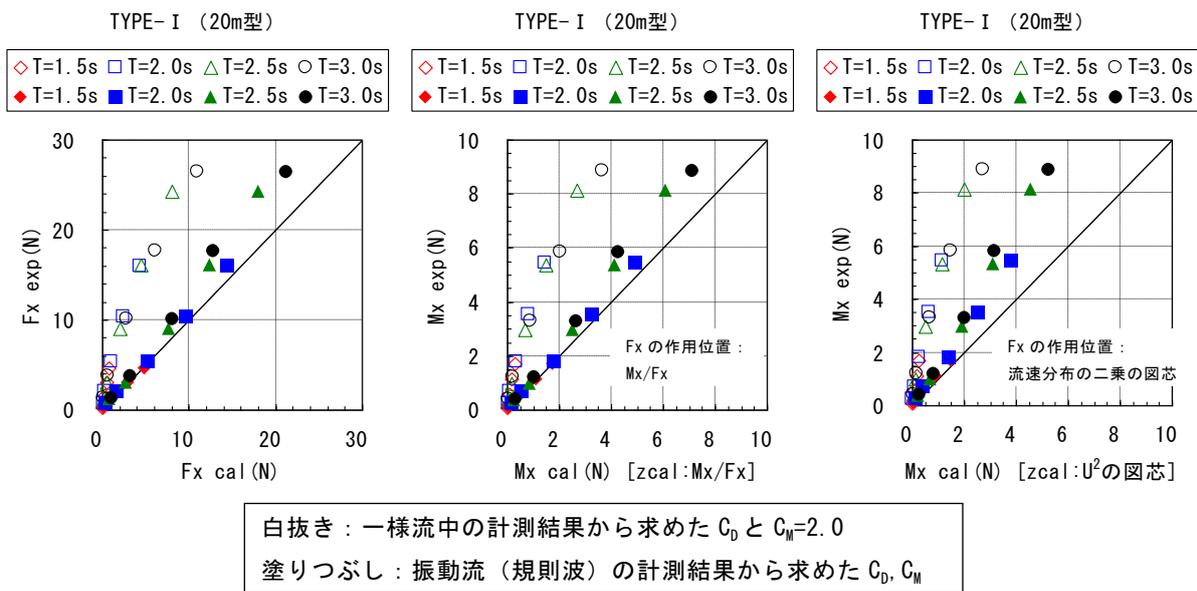


図 6-3 流体力の計測値と算定値 [魚礁模型：TYPE-I (20m型)]

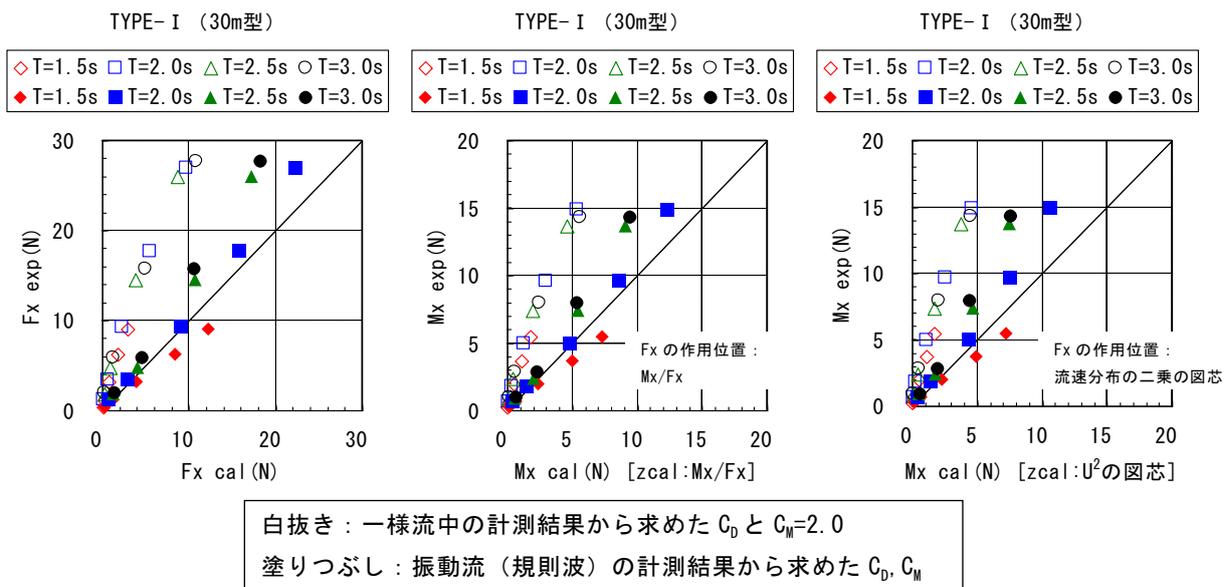


図 6-4 流体力の計測値と算定値 [魚礁模型：TYPE-I (30m型)]

(2) 振動流中の流体力と魚礁の振動

①規則波と不規則波での流体力の比較

魚礁模型 TYPE-I (30m 型) での規則波と不規則波の実験結果から、不規則波とその有義波相当の規則波を作用させた時の波高、流速の関係を図 6-5、流体力の関係を図 6-6 に示す。ここで、不規則波の諸量は最大値である。

不規則波での最大波高は規則波の 1.6 倍に対し、水平流速は 1.8 倍であった。

不規則波での C_D 、 C_M が有義波相当の規則波での C_D 、 C_M と同じであると仮定してモリソン式を適用すれば、不規則波の最大流体力は規則波に対して 2.5 倍程になるが、実際に計測された流体力は水平力、鉛直力ともに 2.3 倍程である。

従って、不規則波の波群中で生じる最大流体力を算定するには、有義波相当の規則波での C_D 、 C_M を用いた場合、安全側ではあるが過大評価傾向である。

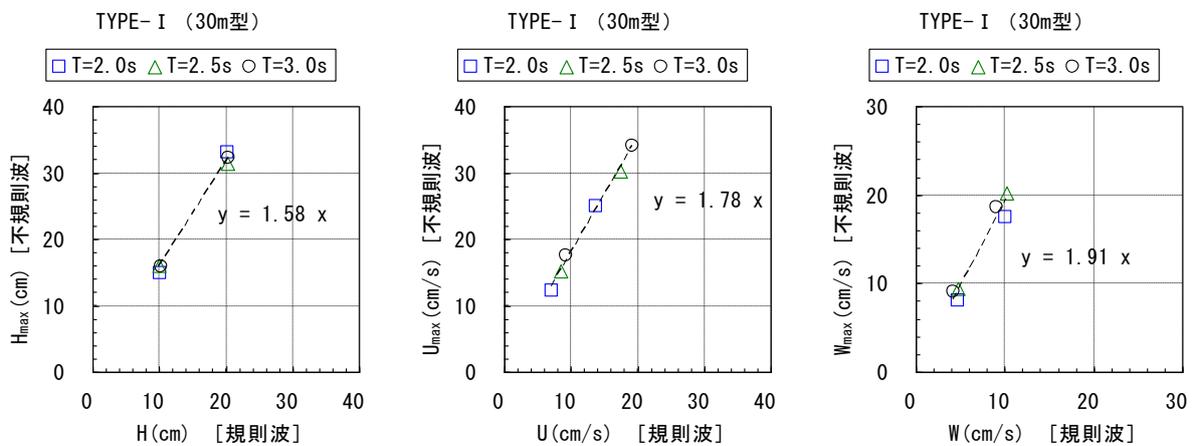


図 6-5 規則波と不規則波の波高、流速の比較 [魚礁模型：TYPE-I (30m型)]

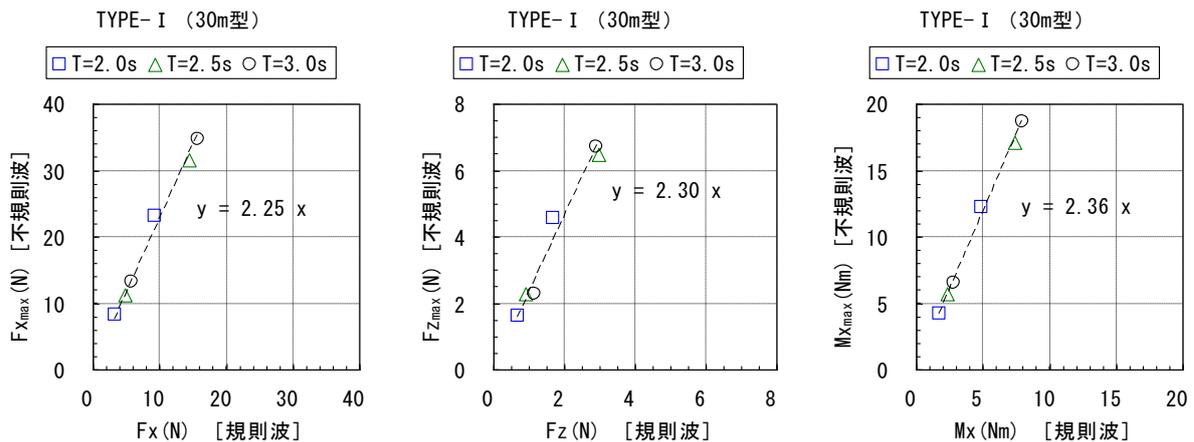


図 6-6 規則波と不規則波の流体力の比較 [魚礁模型：TYPE-I (30m型)]

規則波中の水面変動、流速と流体力の時系列を図 6-7、不規則波中の時系列を図 6-8 に示す。ただし、図 6-8 は波群中で最大水平流体力が発現した時間の時系列である。

水平流体力と鉛直流体力の最大値の発生は同時ではなく、また、水平流体力とモーメントの位相はほぼ同じであり、モーメントに及ぼす影響は水平流体力が支配的であった。

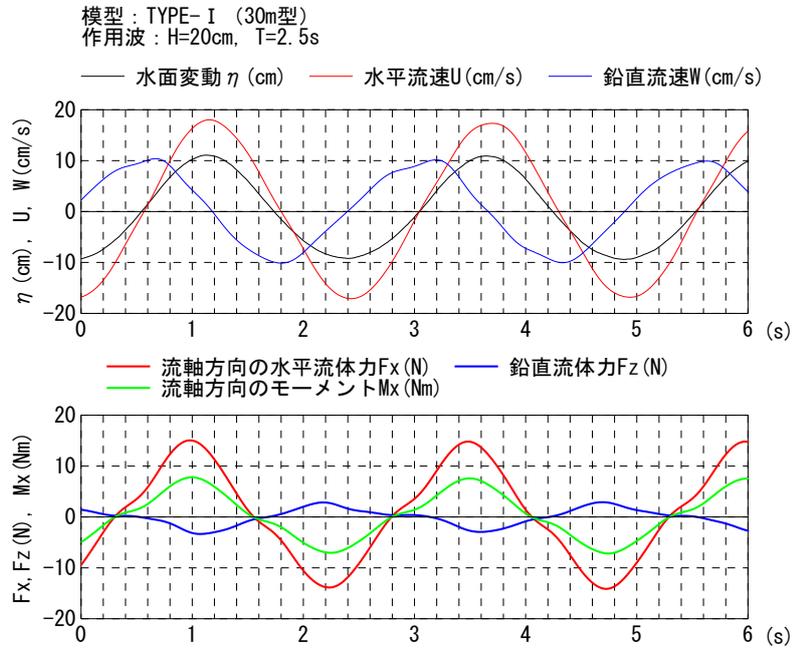


図 6-7 水面変動、流速、流体力の時系列
[魚礁模型：TYPE-I (30m型)，規則波 H=20cm, T=2.5s]

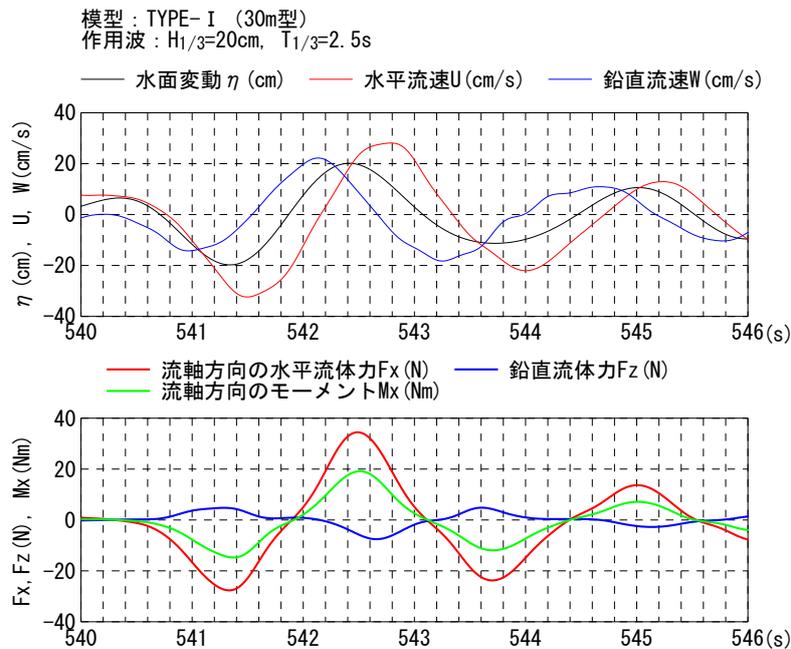


図 6-8 水面変動、流速、流体力の時系列
[魚礁模型：TYPE-I (30m型)，不規則波 $H_{1/3}=20\text{cm}$, $T_{1/3}=2.5\text{s}$, 最大流体力の発現域]

②不規則波作用下での魚礁の動揺

図 6-9 に規則波では転倒しない波高 20cm と同じ有義波高 20cm の不規則波による流体力、水面変動、流速変動及び加速度の経時変化を示したもので、不規則波では転倒が生じている。流速は、底面から 90cm の高さにおける水平・鉛直成分で、岸・上方向が正方向である。加速度計は、図 6-9 (右図) に示す位置に設置し、上端部で水平方向 (岸方向正) を下端部で鉛直方向 (上方向正) を計測した。横軸は、造波開始後の経過時間である。

水面変動 (青実線) と流速変動 (赤実線) の振幅が大きい時、両者の位相はほぼ同じであり、更に、水平流体力に応じ加速度が変化し魚礁が運動している。そして、水平流体力 (モーメント) が魚礁の復元力を越えると転倒する。このように、不規則波の場合は、個々波の 1 波 (最大波) で転倒してしまう。

このことから、不規則波の場合、最大波を考慮しその波に対応した流体力の算定が必要であることがわかった。

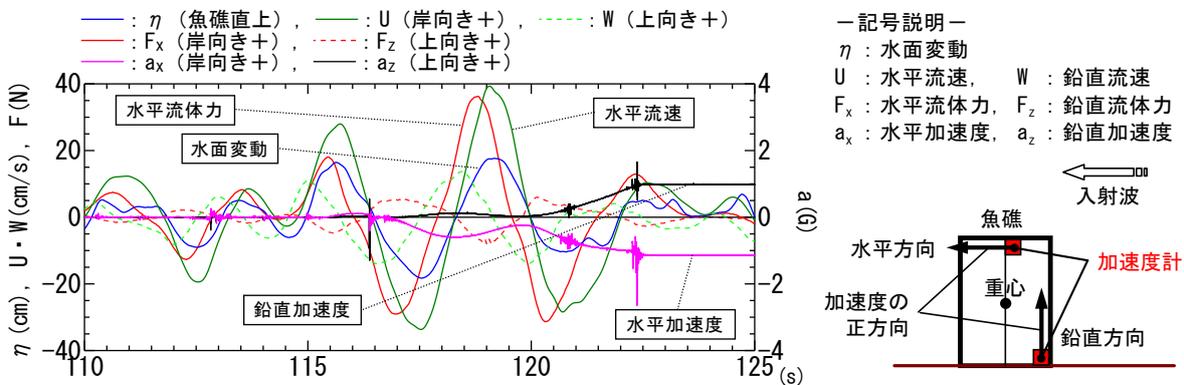


図 6-9 加速度、流体力の時系列

[魚礁模型 : TYPE-I (30m型), 不規則波 $H_{1/3}=20\text{cm}$, $T_{1/3}=3.0\text{s}$]

③不規則波と規則波での C_D , C_M

魚礁模型 TYPE-I (30m 型) について、規則波の計測結果から算定した C_D , C_M を図 6-10、不規則波の結果から算定した C_D , C_M を図 6-11 に示す。

○規則波の C_D , C_M の算定方法

- ・抗力係数 C_D : 加速度 U' が 0 のときの水平流体力 F_x と流速 U を用いて算定
- ・質量係数 C_M : 流速 U が 0 のときの水平流体力 F_x と加速度 U' を用いて算定
この時の加速度 U' は微小振幅波理論で算定している。

○不規則波での C_D , C_M の算定方法

- ・不規則波 200 波程度の中から、水平流体力 F_x が最大となる付近で C_D , C_M を規則波と同様に求めた。
- ・抗力係数 C_D : 加速度 U' が 0 のときの水平流体力 F_x と流速 U を用いて算定
- ・質量係数 C_M : 流速 U が 0 のときの水平流体力 F_x と加速度 U' を用いて算定
このとき、加速度 U' は流速の差分から算定した値を使用した。
- ・なお、 KC 数の算定には、流速は 200 波程度の中の最大流速、周期は有義周期を使用した。

規則波での結果から求めた C_D 、 C_M は KC 数と線形の関係がある。不規則波の結果から算定した C_D 、 C_M と同じ KC 数における規則波での値を比べると、ばらつきはあるが、規則波の KC 数で整理した規則波での C_D 、 C_M の上限を結ぶ線と同程度の値である。従って、 KC 数で整理した規則波で C_D 、 C_M から不規則波での波群中の最大波に対する値を設定可能と考える。

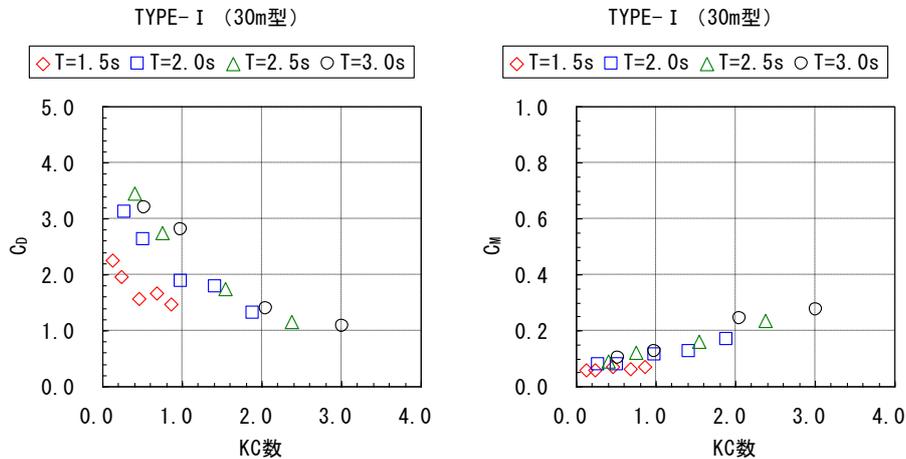


図 6-10 KC 数と抗力係数 C_D 、質量係数 C_M
[魚礁模型：TYPE-I (30m型)，規則波]

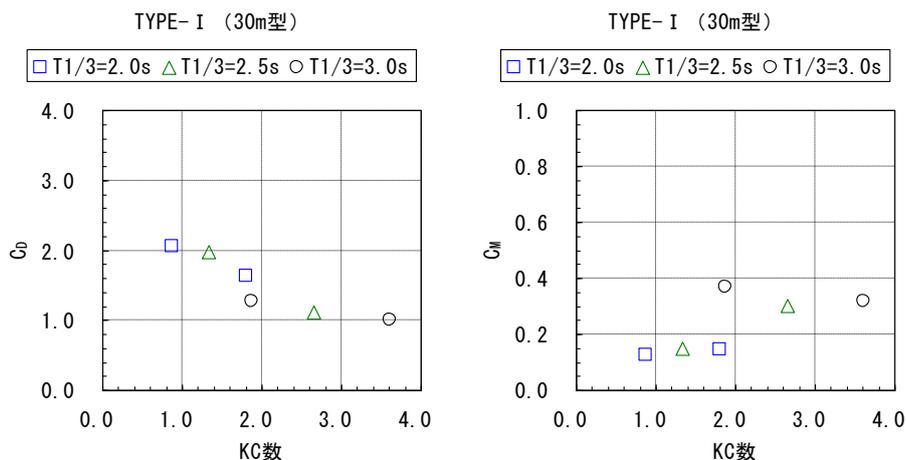


図 6-11 KC 数と抗力係数 C_D 、質量係数 C_M
[魚礁模型：TYPE-I (30m型)，不規則波]

(3) 振動流中の水平流体力の試算

① 流速の理論式の適用性

不規則波の最大波での流速の算定値と実験値の比較図を 図 6-12、3-13 に示す。算定値は、流速計測位置の真上で計測された波高及び周期から求めたもので、 図 6-12 が微小振幅波理論、 図 6-13 が有限振幅性を考慮した流速算定値である。

微小振幅波理論で算定した流速 (図 6-12) は、ばらつきはあるが実験値との相関係数は 1 に近い。また、 図 6-13 の有限振幅性を考慮したストークス波及びクノイド波による流速の算定値を微小振幅波による値と併せて示している。有限振幅性を考慮した場合、波動流成分の減衰が早く、魚礁の上端部付近では、実験値よりも過小評価となる場合も見られ、微小振幅波による流速より小さくなる。

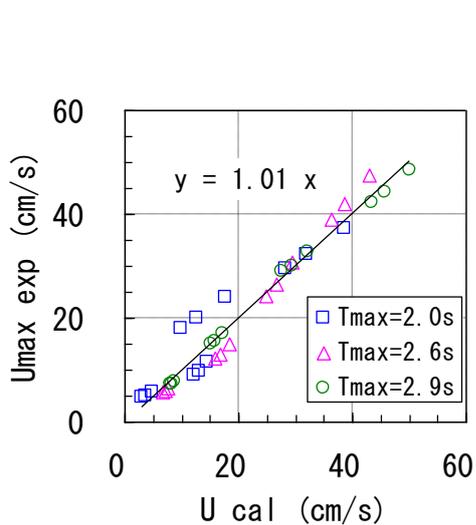


図 6-12 流速の算定値と計測値

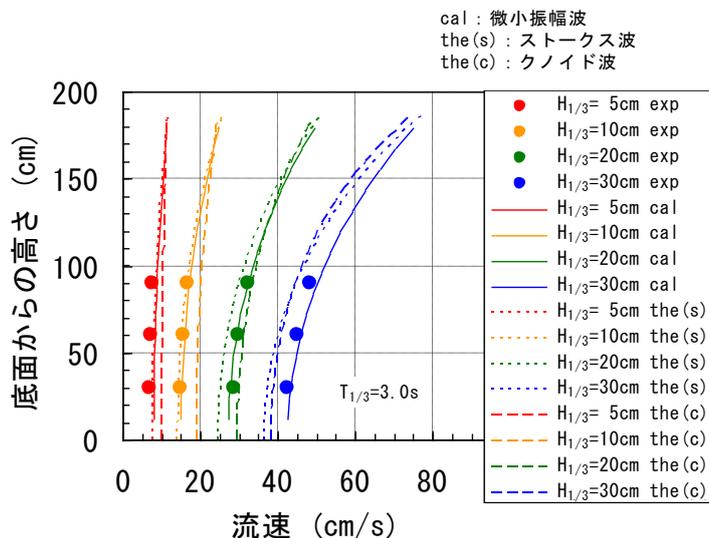


図 6-13 流速の鉛直分布

②規則波でのモリソン式の適用性

図 6-14、3-15 に規則波での流体力の算定値と計測値の比較を示す。
 水平流体力の作用位置は実験でのモーメント M_x / 水平流体力 F_x とした。
 算定値は計測値よりも若干小さい傾向であるが、計測値を再現している。

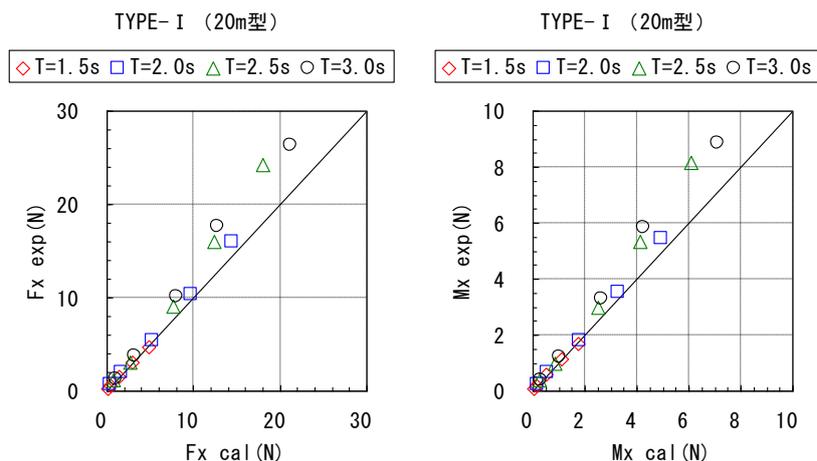


図 6-14 流体力の計測値と算定値 [魚礁模型：TYPE-I (20m型)]

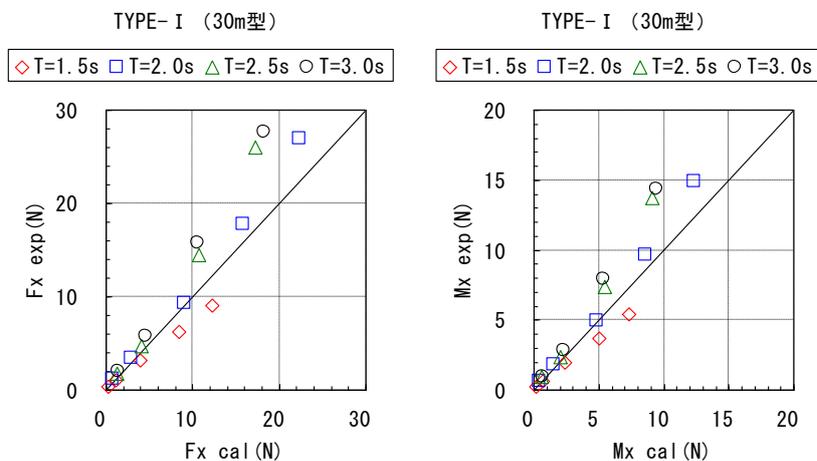


図 6-15 流体力の計測値と算定値 [魚礁模型：TYPE-I (30m型)]

③不規則波でのモリソン式の適用性

図 6-16 に不規則波での流体力の算定値と計測値（最大値）の比較を示す。

不規則波の波群中の最大波は実験で得られた最大波高と有義波周期とした。 C_D 、 C_M は H_{max} 、 $T_{1/3}$ から算定される流速に応じた KC 数に対応する値を規則波での KC 数と C_D 、 C_M の関係から設定した。また、水平流体力の作用位置は実験でのモーメント M_x / 水平流体力 F_x とした。

算定値と計測値を比較したところ、ばらつきが大きな場合もあるが、全体的には計測値よりも若干大きめ程度の算定ができる。

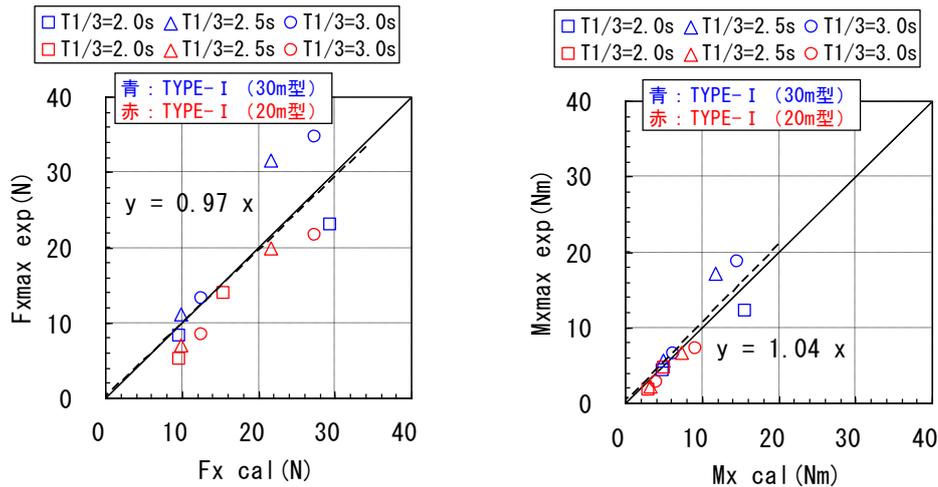


図 6-16 流体力の計測値と算定値 [魚礁模型：TYPE- I (20m型, 30m型)]

(4) 鉛直流体力の算定法の検討

①水平流体力と鉛直流体力の関係

図 6-17 は水平流体力 F_x と鉛直流体力 F_z の比と KC 数の関係を示したものである。

この結果から、 KC 数と F_z/F_x はばらつきはあるものの相関性が見られた。よって、水平流体力と鉛直流体力の関係から鉛直流体力を算定することも可能であると考えられる。

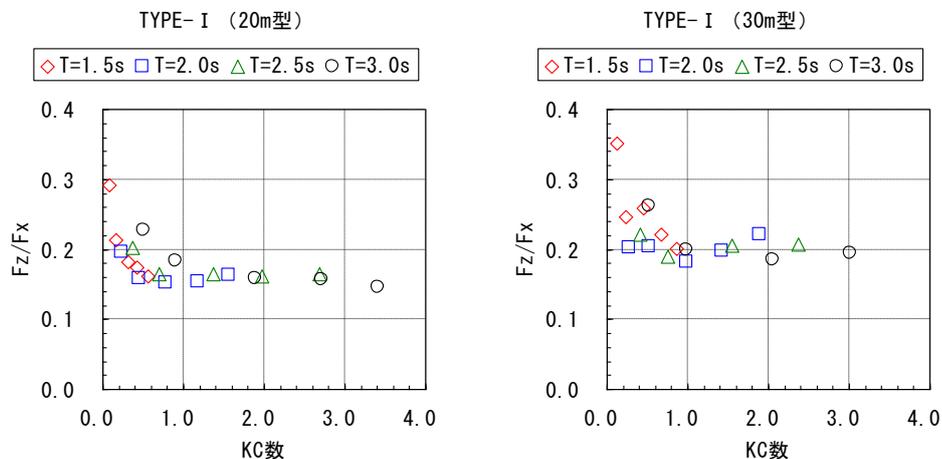


図 6-17 水平流体力と鉛直流体力の関係 [魚礁模型：TYPE- I (20m型, 30m型)]

②鉛直流体力の試算

単純部材模型全体に作用する流体力は、各部材位置の流速とその流速に応じて変化する抗力係数 C_D 、質量係数 C_M を用いて各位置の部材ごとに算定し重ね合わせる手法で試算した。

試算方法は次の通りである。

- 各部材位置での水平流速 U 、 W を算定する。ここで、流速の算定は微小振幅波として行っている。
- 各部材位置の C_D 、 C_M は各部材位置の KC 数に対応した C_D 、 C_M を採用する。本試算での KC 数と C_D 、 C_M の関係は実験結果による値を用いた。
- 上記の流速(U, W)と C_D 、 C_M を使用して、各部材に作用する流体力を算定し、これらを重ね合わせ全体に作用する水平流体力 F_x 、鉛直流体力 F_z を算定する。
- 水平流体力の作用中心位置は規則波実験結果からモーメント M_x / 水平流体力 F_x で求めた値を用い、鉛直流体力の作用位置は部材幅の半分位置として、モーメント M_x を算定する。

図 6-18 に円柱部材模型での計測値と算定値の F_x 、 M_x の関係を、図 6-19 に角柱部材模型での計測値と算定値の F_x 、 M_x の関係を示す。

この試算結果からは以下のことが云える。

- F_x についての算定値は計測値より若干大きい傾向であるが、計測値を再現している。
- F_z は F_x に比べ、ばらつきが大きく、これは、鉛直流速 W は水平流速 U に比べて小さく、 KC 数も小さく、実験から求めた C_D 、 C_M の値のばらつきが大きく、信頼性が低い。
- モーメント M_x は F_x と同様に算定値で計測値を再現している。

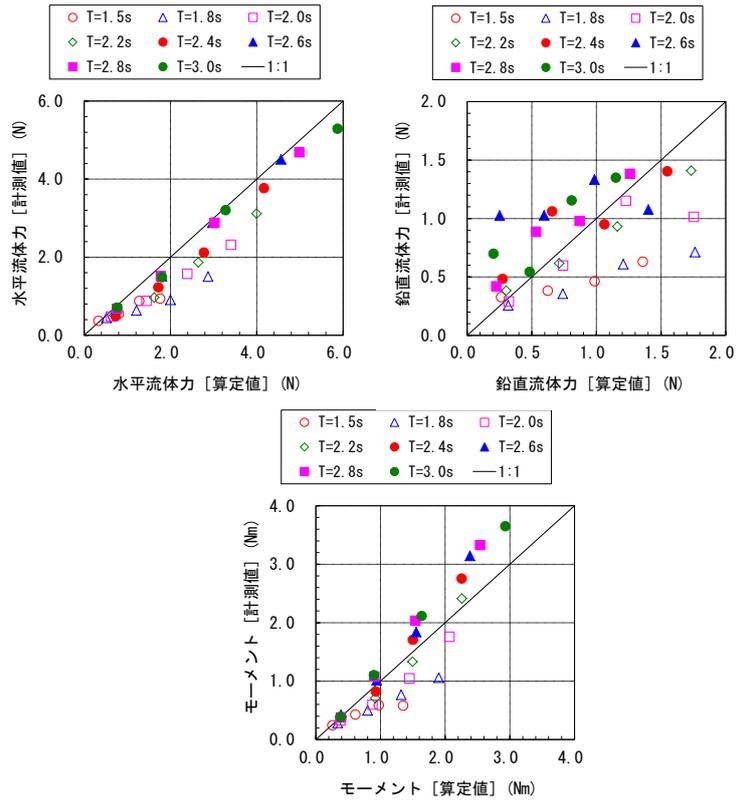


図 6-18 流体力の計測値と算定値（円柱部材模型）

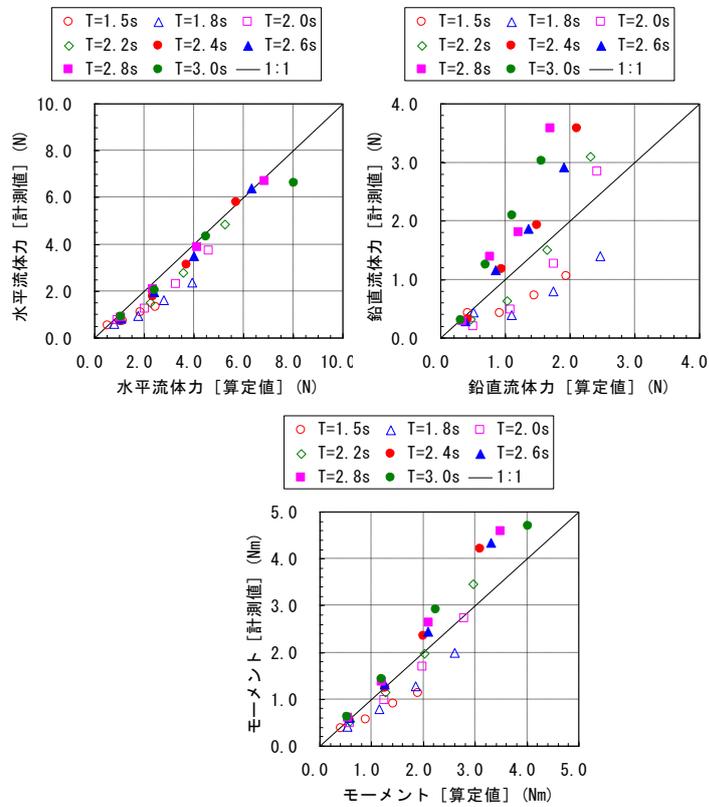


図 6-19 流体力の計測値と算定値（角柱部材模型）

(5) 構成部材の違いによる流体力の低減効果

図 6-20 に、部材模型 3 種類（円柱 5 本、角柱 5 本、円柱 3 本+角柱 2 本）について、規則波の波高 10cm と 40cm の場合の周期と水平流体力の関係を示す。

円柱 5 本の場合には、角柱 5 本の場合と比較して作用流体力の低減効果が確認された。この低減効果は、波高及び周期がそれぞれ大きくなるにつれて、顕著な傾向にあると言える。円柱 3 本+角柱 2 本の場合においても、円柱 5 本の場合と同様の傾向であった。従って、魚礁上部に抗力係数、質量係数の小さな部材を使用することで、魚礁に作用する流体力の低減を図ることができる。

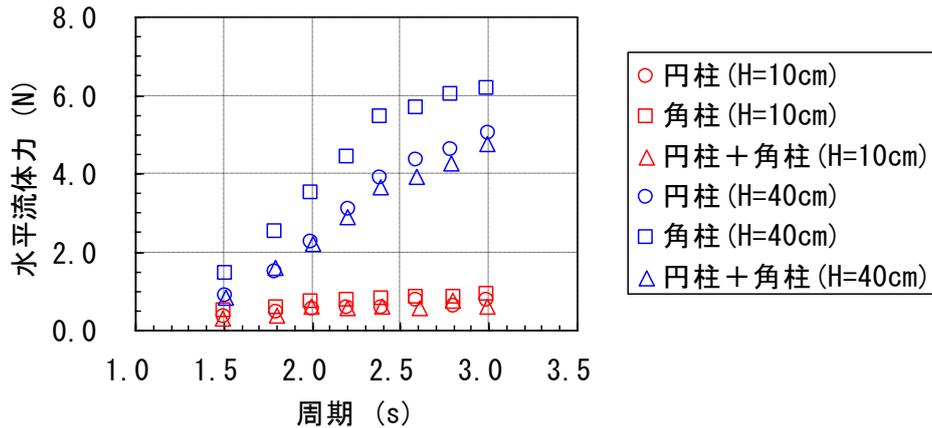


図 6-20 周期と水平流体力の関係 [規則波 H=10, 40cm]

(6) 魚礁の動揺

① 底面の違いによる波高と加速度の関係（不規則波）

図 6-21 に模型 TYPE-I（30m 型）の不規則波での波高と加速度の関係を示す。

底面が鉄板の場合では、鉛直方向の加速度の変動は、下向きで最大 4G 程度、水平方向では 1G 程度であった。砂の場合では、鉛直方向の加速度の変動は、下向きで最大 0.3G 程度と鉄板の場合の 1 割未満であり、水平方向では 0.4G 程度と鉄板での値の 4 割程度であった。

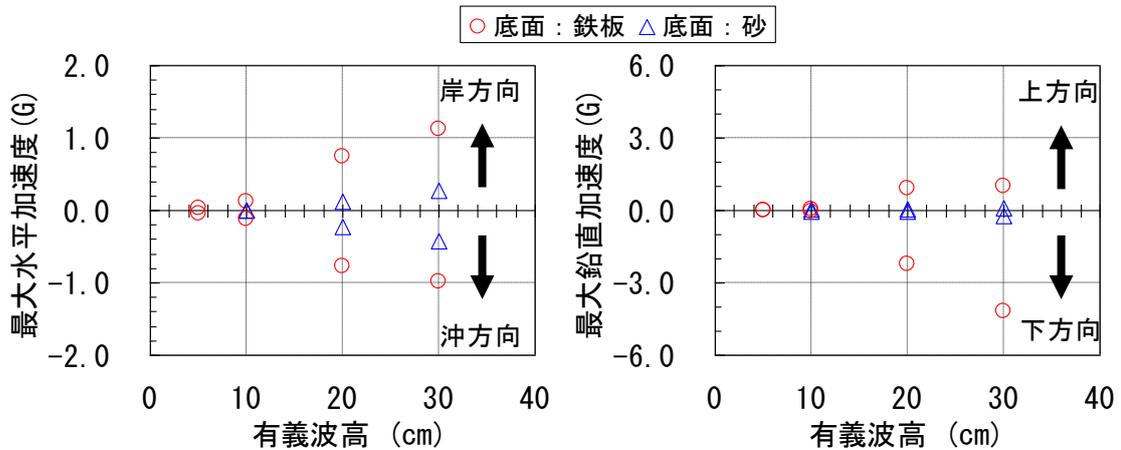


図 6-21 有義波高と最大加速度の関係 [模型 TYPE-I（30m 型）、 $T_{1/3}=2.0s$]
（左図：水平加速度、右図：鉛直加速度）

② 転倒に対する検討

魚礁を底面（鉄板または砂）に固定せずに設置し、振動流中で魚礁に作用する加速度の計測を行うとともに動揺の状況を観察した。ここで使用した模型は TYPE-I の実機 10, 15, 20, 25, 30m 型の全 5 種類である。動揺の状況は動かない、振動（小）、振動（大）、転倒の 4 段階に区分した。この結果と設計の手引き p676 に示されている(式 11-2-2)より魚礁の転倒に対する検討を行った。

$$\frac{W}{P} \cdot \frac{l_V}{l_A} \geq F \quad \dots\dots(式 11-2-2)$$

W : 浮力を差し引いた沈設魚礁の重量, P : 沈設魚礁に作用する波・流れによる水平力, l_A : 流れに直角な鉛直面への魚礁の正射影面の重心までの高さ, l_V : 魚礁重心の底面への射影点から最も近い転倒の中心線までの距離, F : 安全率.

図 6-22 は横軸に(式 11-2-2)の左辺第 1 項の逆数を、縦軸に左辺第 2 項の逆数をとり、それぞれの動揺の状況を表したものである。ただし、これは規則波での結果である。

この図から、転倒したケースはいずれも(式 11-2-2)の左辺が安全率の 1.2 よりも小さいということがわかる。また、安全率 1.2 付近では転倒はしないが大きく振動するという結果であった。

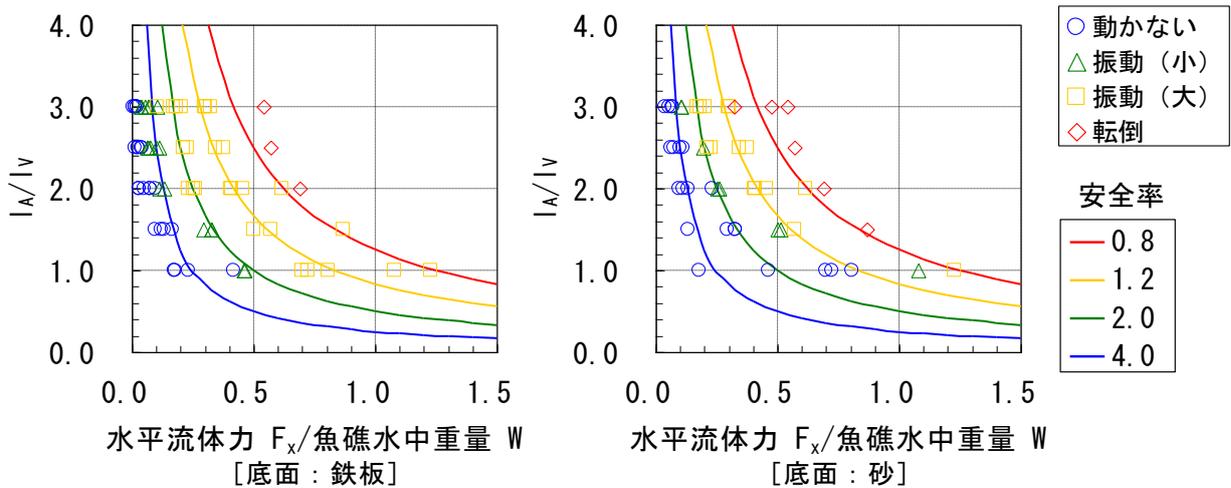
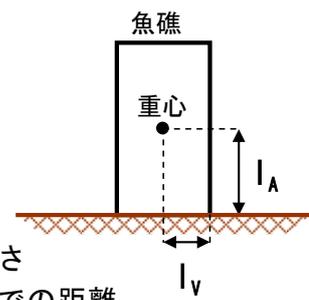


図 6-22 動揺の状況と安全率の関係 [規則波] (左図 底面：鉄板、右図 底面：砂)

表 6-1 重心までの高さと距離 (TYPE-I)

模型名称	模型スケール						
	幅 (cm)	奥行 (cm)	高さ (cm)	l_A (cm)	l_V (cm)	l_A/l_V	
TYPE-I	(10m型)	28	28	28	14	14	1.0
	(15m型)	28	28	42	21	14	1.5
	(20m型)	28	28	56	28	14	2.0
	(25m型)	28	28	70	35	14	2.5
	(30m型)	28	28	84	42	14	3.0



l_A : 流れに直角な鉛直面への魚礁の正射影面の重心までの高さ

l_V : 魚礁重心の底面への射影点から最も近い転倒の中心線までの距離

③ 模型形状と動揺の状況の関係

端部形状の異なる模型 3 種類（表 5-3, 写真 5-6）について、砂面上に固定せずに設置し、振動流中で魚礁に作用する加速度の計測を行うとともに動揺の状況を観察した。

動揺の状況については、目視観察するとともに、魚礁に動揺が見られた場合の加速度とを比較することで確認した。動揺の状況は、「動かない」、「滑動のみ」、「滑動と振動」、「振動のみ」の 4 パターンに大別した（図 6-23）。さらに、「滑動のみ」、「滑動と振動」、「振動のみ」の 3 パターンについては、動揺の程度によって大、中、小の 3 段階に分けた。

波により魚礁が動揺し始める最初の 1~2 波程度を処理し、その中での最大振幅を加速度の実験値とした。ここで、1~2 波程度としたのは、底質が砂であるため動揺によって底質が変わってしまうためである。

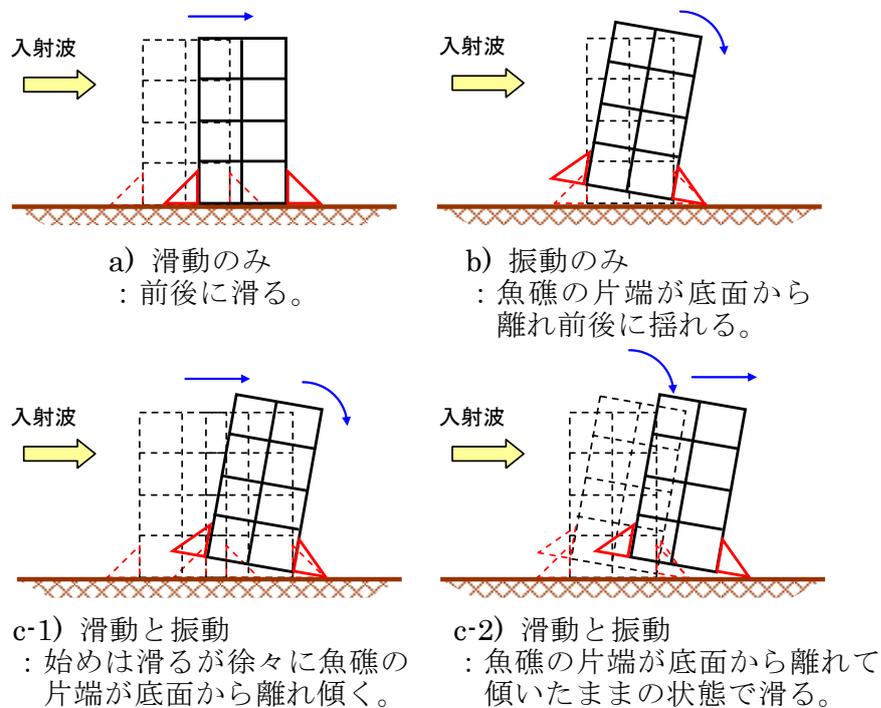


図 6-23 動揺の状況のイメージ

図 6-24 に波高と水平及び鉛直加速度の関係を示す。水平加速度の計測位置は模型頂部、鉛直加速度は、模型前面の下端である。補助部材を付けていない基本形の模型は、滑動は見られず、すぐに振動状態となった。一方、補助部材を付けた模型（模型 R+14cm, 模型 R+28cm）は、鉛直加速度が約 0.005G 以下では滑動が主であったが、約 0.01G 以上になると滑動に加え振動も顕著に現れるようになった。

全体的に、模型 R+28cm ($h/l=1.5$) では滑動が多く、模型 R+14cm ($h/l=2.0$) では滑動と振動の両方が見られるようになり、模型 R ($h/l=3.0$) では振動のみであった。模型の高さと底辺の長さの比 (h/l) が 1.5 (模型 R+28cm) ~ 2.0 (模型 R+14cm) の間に、滑動に比べて振動が増大する境界があると考えられる。

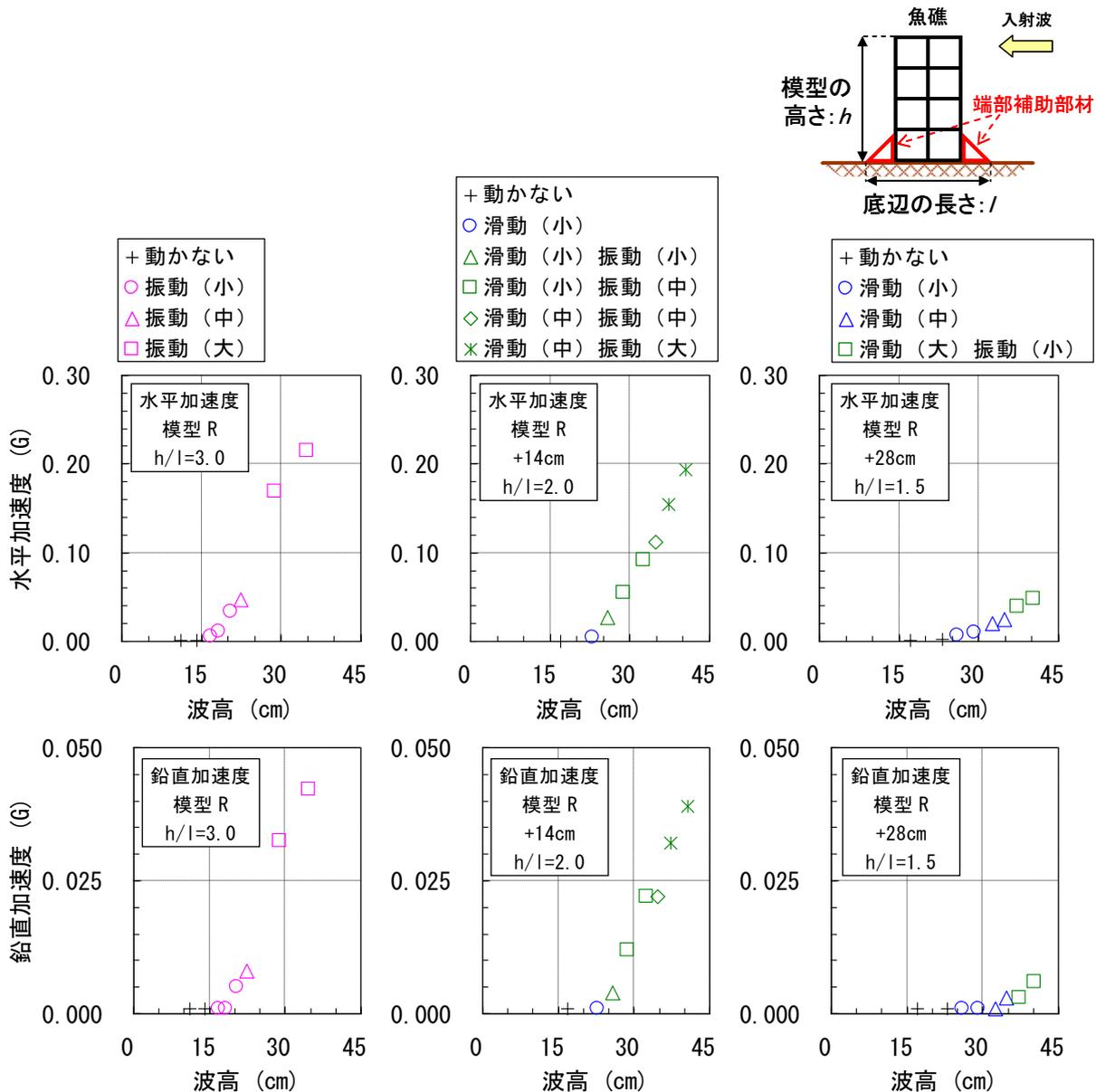


図 6-24 波高と加速度の関係 [規則波 $T=2.5s$]
(上段：水平加速度, 下段：鉛直加速度)

2) 現地調査結果

(1) 流況の現地観測結果

三重県熊野灘沖の浮魚礁設置海域における流況観測の一例として、浮魚礁 No.4 海域（図 5-9 を参照のこと）の水深別の水平方向流速を図 6-25 に示す。

現行の浮魚礁の設計では 700m 以上の水深帯での流速の存在をまったく考慮していないが、この図より水深が 700m 程度の深海域でも有意な流速が存在することがわかる。また、表層 100m 付近と中層の 400m あるいは 700m 付近とを比較すると、流向が異なることも見て取れる。このため、浮魚礁の設計に当たっては、設置海域での現地観測などを実施することにより、適切に設計流速分布を設定する必要があると言える。

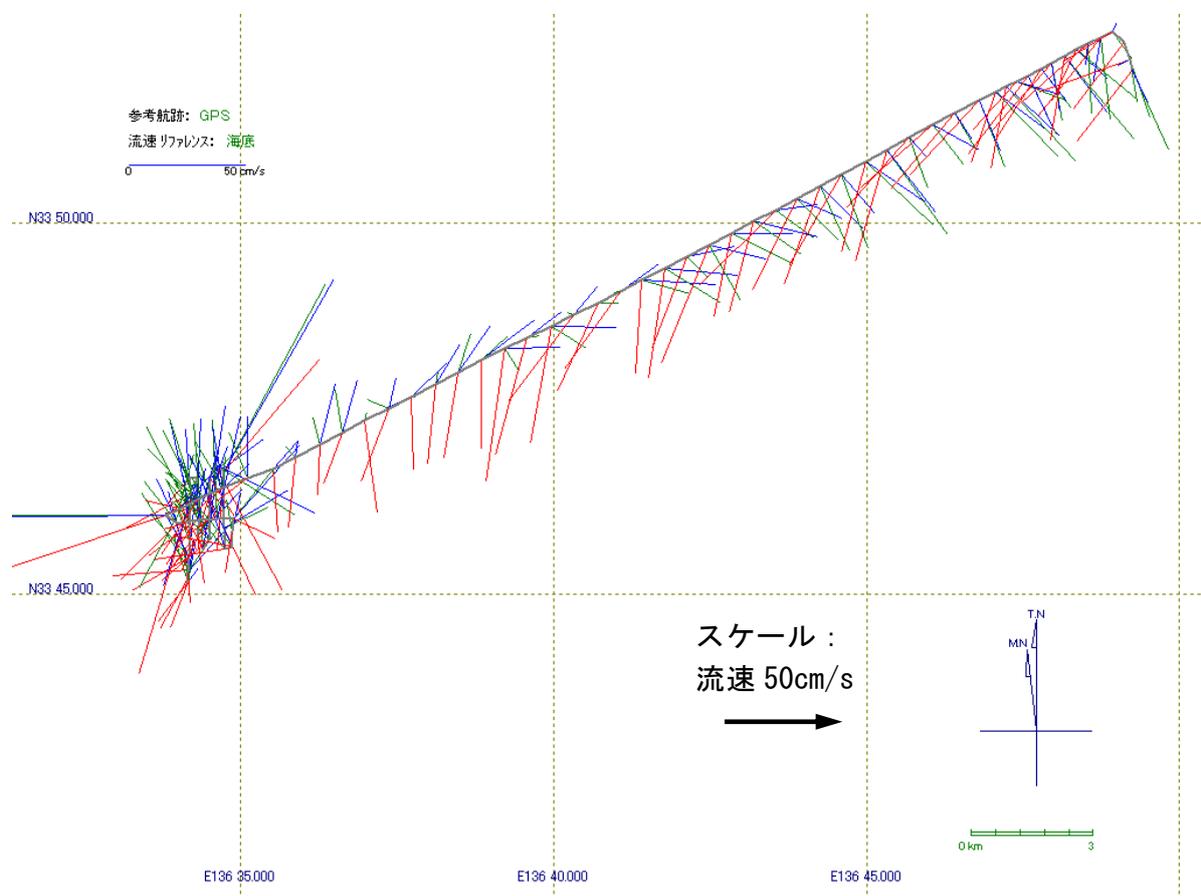


図 6-25 三重県熊野灘沖に設置した浮魚礁 No.4（設置水深 2,050m）における水深別（それぞれ色別に赤色が水深 113m、緑色 401m、青色 721m を表す）の水平方向流速の分布（調査日：平成 21 年 12 月 3 日午前 8:30～11:30）

(2) 高層魚礁や浮魚礁に関する実態調査の結果

高層魚礁については、H23年度に事業実施予定の三重県では、各魚礁メーカーに対し、波浪中における抗力係数 C_D 及び質量係数 C_M を用いて魚礁を設計するよう要求していることがわかった。これは、高層魚礁の設置海域が太平洋に面し、長周期の大波浪が来襲することから、高層魚礁の耐波安定性の確保に当たり、波による流体力を十分に考慮することが重要なためであると言える。

一方、浮魚礁については、各県共に共通した意見が得られ、設計及び管理上の課題・問題点が浮き彫りとなった。以下、主要な結果を列挙する。

- ・10年の耐用年数に至る前に、浮魚礁の礁体の流出事故がしばしば発生しており、流出防止策が必要である。特に、表層型浮魚礁の流出例が多く、補助ブイが流出することもある。流出の原因の一つは船舶との衝突と推測されることから、衝突防止策が必要である。また、流出時に作動することになっている警報装置が動かないことがあり、問題である。
- ・設置海域によって浮魚礁への生物付着量は大きく異なる。この生物付着量が設計時に想定した値を上回ったことにより、礁体が沈み込んだと考えられる事例もあった。また、生物付着は礁体のみならず、係留ロープにも多く確認された事例がある。
- ・従来は表層型浮魚礁及び中層型浮魚礁のどちらかであったが、近年は流れが緩慢な時には表層型浮魚礁として機能し、流れが速い時には礁体が沈み込んで中層型浮魚礁となる表中層型浮魚礁が開発され実用化されている。しかし、現在の設計の手引きは、この表中層型浮魚礁を想定して記述されたものではなく、適用性についての検証が必要ではないか。
- ・浮魚礁の設置海域が航路上であったり、維持管理行為（付着物除去や照明の取替え、保険など）が必要であったりすることから、現状では表層型浮魚礁の事業実施は難しい。
- ・テグスによる係留ロープ損傷を防止するため、係留ロープには外装が施されるが、漁具にワイヤーが使用される場合には、係留ロープに傷が生じる。また、中層型浮魚礁は、海面下にあり目視確認できないことから、漁具が大量に絡み付いていることがある。

その他、浮魚礁の回収撤去や更新についての技術上及び制度上の問題点や、設計の細部の妥当性について判断が付かないこと、現在、浮魚礁のメーカーは2社しか存在せず、選択の幅がないなどの意見があった。

また、浮魚礁の利用者である八重山漁協・浮魚礁研究会の漁業関係者からは、以下の意見が得られた。

- ・表層型浮魚礁と中層型浮魚礁と比較すると、表層型浮魚礁の方が回遊魚の蜻集効果が高く、中層型浮魚礁の蜻集効果の倍以上である。操業も表層型浮魚礁の方が目視確認できやり易いことから、地元漁業者は表層型浮魚礁を要望している。しかし、現行の事業は、中層型浮魚礁あるいは表中層型浮魚礁が採用されている。
- ・中層型浮魚礁は礁体が海面下にあるものの、GPSとソナーを使用することで容易に発見可能である。しかし、礁体を目視確認することができないため、漁具が浮魚礁に引っかかる。操業隻数が多い時には、礁体が見えないことから操船ルールを定めていても適切に操船することができず、危険な状況になることもある。

以上、本調査により特に、浮魚礁に関する課題や問題点が明らかとなった。浮魚礁設計時に留意すべき事項も抽出され、これらの成果は設計の手引きの改訂に資することが期待される。

Ⅶ 考察

調査結果に示した複数の高層魚礁及び簡略化した模型を用いての水理模型実験を実施し、これらの実験的検討から下記のことが云える。

- 振動流速（不規則波、規則波）中に位置する魚礁に作用する流体力は、現行の設計法では適切に算定することができない。
- 不規則波での最大流速、最大流体力は波群中の最大波で発生しており、魚礁の転倒に至るような振動幅もこの時に発現している。
- 水平流体力と鉛直流体力の波形の位相はずれており、両者の最大流体力の発現は同時でない。
- 振動流速（不規則波、規則波）による水平流体力は流速、抗力係数 C_D 、質量係数 C_M 、水平流体力の作用の中心位置と下記の方法で適切に設定すれば、モリソン式で算定可能である。
 - ・ 流速は魚礁位置での波高、周期から微小振幅波理論で算定可能である。
 - ・ 抗力係数 C_D 、質量係数 C_M は対象とする魚礁での振動流（規則波）での値が KC 数との関係で既知である必要がある。この C_D 、 C_M は規則波の水理実験から算定することができる。
 - ・ 水平流体力の作用の中心位置も対象とする魚礁で既知である必要がある。この位置は水理実験でのモーメントと水平流体力から算定することができる。
- 水平流体力について、部材模型の範囲では、対象部材の KC 数に対応する C_D 、 C_M が既知であれば、各部材に作用する流体力をモリソン式で算定し重ね合わせることで、全体に作用流体力を算定することが可能であると云える。
- 鉛直流体力については、部材模型においても、水平流体力のように各部材における流体力をモリソン式で算定し重ね合わせることでは、信頼性のある算定ができない。
- 部材模型の範囲であるが、上部を円柱部材、下部を角柱部材とした場合の流体力は全体を角柱部材とした場合の 8 割程度に低減され、抵抗の異なる部材を適切に配置することで魚礁に作用する流体力の低減を図ることの有効性が示唆される。
- 底面が砂の場合と鉄板の場合を比較した実験からは、魚礁に作用する最大加速度の大きさの有意な違いが見受けられた。砂の場合にはクッション効果により、水平・鉛直加速度ともに鉄板の場合よりも小さい値となることがわかった。
- 転倒防止用の補助部材を取り付けることにより、魚礁に作用する最大加速度が抑制され、併せて魚礁の滑動や振動を抑える効果を有することも判明した。

Ⅷ 摘要

「漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003 年版」(以下、「現行の手引き」)において、高層魚礁の「設計の基本的な考え方は、沈設魚礁一般の記述に準じるものとし、主構造部材の素材を考慮して、コンクリート製あるいは鋼製魚礁単体の設計に準拠して設計するものとする。」とされている。

本調査研究において、大水深に設置される海底設置型の魚礁や浮魚礁について、外力(流体力)や挙動、安定を検討した結果、不規則波が作用した場合の流体力は下記の手法で適切に算定することができる。

【流体力の算定手法】

- ・ 不規則波中の魚礁に作用する水平流体力は、現行の手引きを元に下記の手順で算定する。なお、高層魚礁は大水深域に設置されることから、砕波領域は除外している。

① 波のみを考慮する場合(非砕波領域)

$$u_m = \pi \frac{H \cosh 2\pi D/L}{T \sinh 2\pi h/L} \quad \dots (式 1)$$

$$\left. \begin{aligned} F_D &= C_D A \frac{w_0}{2g} u_m^2 \\ F_M &= C_M V \frac{w_0}{g} \frac{2\pi}{T} u_m \end{aligned} \right\} \dots (式 2)$$

$$\left. \begin{aligned} 2F_D < F_M \text{ のとき} & \quad F = F_M \\ 2F_D > F_M \text{ のとき} & \quad F = F_D + \frac{F_M^2}{4F_D} \end{aligned} \right\} \dots (式 3)$$

ここに、

u_m : C_D 、 C_M の算定に用いた位置における波による水粒子の水平流速の振幅(m/s)

$\frac{\partial u_m}{\partial t}$: 考える点での流体の加速度(m/s²)

C_M : 設計波での KC 数に対応する振動流中(波浪場中)の質量係数

C_D : 設計波での KC 数に対応する振動流中(波浪場中)の抗力係数

C_D, C_M は信頼できる模型実験に基づく値を使用する。

A : 波の進行方向に垂直な鉛直面の全射影面積(魚礁を構成する各部材の総和)(m²)

V : 魚礁の全実容積(m³)

H, T, L : 設置位置における設計波の波高(m), 周期(s), 波長(m)

設計波の波高は波群中の最大波高、周期は有義波の周期

② 流れのみを考慮する場合

(式 2)を用いて流れによる流体力 F を算定してよい。

ここに、抗力係数 C_D は一様流中の値で、信頼できる模型実験に基づく値を使用することが望ましい。ただし、本研究での実験範囲での一様流中の C_D は 1 以下であるので、安全側にとって $C_D=1$ を用いることが一案として考えられる。

③ 波と流れが混在する場合

本研究では、波と流れが混在する場合についての実験は行っていないが、既往の実験的研究によれば、流れが卓越する場合の C_D は一様流中の C_D に、振動流が卓越する場合は振動流中の C_D に漸近し、 C_M は殆ど一定と報告されている^{*1)}。このことを適用すれば、波と流れが混在する場合の流体力 F は、 F_D の算定する使用する $u_m=u_w+u_c$ (u_w : 波動流速の振幅、 u_c : 流れの流速) として、「波のみを考慮する場合」に準じて流体力 F を算定する方法が一案として考えられる。

*1) 「西尾秀樹ら、半球型底設魚礁に作用する流体力に関する実験的研究—波と流れの共存場について—、海岸工学論文集、No.40,1993」

[留意事項]

- ・ 高層魚礁は多層の多数の部材で構成されており、部材間での相互干渉もある。魚礁に作用する流体力を適切に算定するには、個々の魚礁に応じた抗力係数、質量係数を定めることが必要であり、信頼できる模型実験に基づく値を使用することが望ましい。
- ・ 転倒に対する検討にあたっての水平流体力の作用点までの高さは、魚礁の形状によっては「流れに直角な鉛直面への魚礁の正射影面の重心までの高さ」（手引き p676 記載）と異なることがある。

【転倒防止対策、流体力低減対策】

- ・ 転倒防止用の補助部材を魚礁下部に取り付けることにより、魚礁に作用する最大加速度が抑制され、併せて魚礁の滑動や振動を抑えるに有効である。
- ・ 魚礁上部の主構造部材には、抗力係数、質量係数の小さな形状の部材を使用する等、形状の異なる部材を適切に配置することで、魚礁に作用する流体力の低減を図ることができる。

【課題】

- ①鉛直流体力は水平流体力のように振動流中の C_D 、 C_M を用いて適切に算定することはできない。また模型実験から求めた C_D 、 C_M はばらつきが大きく、信頼できる値が決定しがたい。鉛直流体力の算定法は今後も検討を要する。ただし、実施した模型実験の範囲から見れば、 KC 数ベースで整理した水平流体力と鉛直流体力には相関性が見られる。従って、鉛直流体力を模型実験から得られた水平流体力と鉛直流体力の関係から算定することも可能であると考えられる。
- ②これまでに実施してきた模型実験の範囲では、水平流体力と鉛直流体力の極大の発現は同時ではない。水平流体力と鉛直流体力の最大値を重ね合わせて算定した転倒モーメントは安全側であるが、設計手法としての合理性の検討を要する。なお、実験の範

囲では転倒モーメントに及ぼす影響は水平流体力が支配的であり、模型実験などで、対象とする魚礁での水平流体力と鉛直流体力の位相関係や転倒モーメントに及ぼす影響が既知であればその結果を設計に反映することはできる。

③設計手法として信頼性に基づく合理的な設計を考えれば次のような課題があげられる。

- 抗力係数 C_D 、質量係数 C_M の評価

不規則波中での抗力係数、質量係数は、同じ KC 数（水平流速）に対しても、波高と周期の組み合わせが異なると同一の値とならないことも多く、確定的な値ではないことが推察される。

従って、不規則波中の抗力係数、質量係数については変動幅を持つ統計的な扱いを考慮することが考えられる。

- 水平流体力と鉛直流体力の発現時刻差の適切な評価

模型実験により水平流体力と鉛直流体力の発現には時間差があるが、これについての適切な評価方法は検討を要する。

- 転倒には至らないものの高波浪時には魚礁は繰り返し振動するので、繰り返し作用する流体力と合わせて振動も考慮して魚礁の強度を考慮する必要がある。また、海底地盤の底質によっては洗掘、埋没、沈下が生じることもあるのでこれらの評価方法についての検討を要する。

Ⅸ 引用文献

- 1) 漁港・漁場の施設の設計の手引検討委員会（2003）：漁港・漁場の施設の設計の手引 2003年版 [下]、社団法人全国漁港漁場協会、pp.665-679.
- 2) 中村充（1991）：水産土木学（漁場造成・海洋エンジニアリング）、工業時事通信社
- 3) 中村充・上北征男・飯野達夫（1975）：海中落体の着底衝撃に関する研究－人工魚礁の設計外力の算定－、第22回海岸工学講演会論文集、pp.483-487.
- 4) 秀島好昭・上北征男（1983）：人工魚礁の着底衝撃力に関する研究（Ⅱ）－岩盤・コンクリート基盤での着底－、水産工学研究所報告第4号、pp.59-70.
- 5) 明田定満・高木儀昌ら（1991）：角型魚礁の設計法に関する研究－その1～3－、日本水産工学会学術講演会論文集、pp.43-48.
- 6) 高木儀昌ら（1992）：角型魚礁の応力解析－その1～2－、日本水産工学会学術講演会論文集、pp.31-34.
- 7) 上北征男・明田定満（1986）：角型魚礁に作用する流体力について、水産工学研究所報告第7号、pp.13-22.
- 8) 西田秀紀・多田彰秀・西平福宏・野田英明（1993）：半球型底設魚礁に作用する流体力に関する実験的研究－波と流れの共存場について－、海岸工学論文集第40巻、pp.831-835.
- 9) 西田秀紀・多田彰秀・水野晋・西平福宏（1993）：半球型群体魚礁に作用する波力の相互干渉について、西松建設技報 VOL.16、pp.40-47.

付表 1 一様流中での流体力の計測結果 [模型 TYPE-I (20, 30m 型)]

TYPE-I (20m型)

U (cm/s)	F _x (N)	Re	C _D
8.27	0.59	9.52E+02	0.595
12.41	1.34	1.43E+03	0.601
16.55	2.40	1.90E+03	0.604
20.68	3.83	2.38E+03	0.617
24.82	5.51	2.86E+03	0.616
28.96	7.54	3.33E+03	0.620
34.13	10.48	3.93E+03	0.620
38.27	13.16	4.40E+03	0.619
42.40	16.15	4.88E+03	0.619
47.57	20.30	5.48E+03	0.618
52.74	24.89	6.07E+03	0.617

TYPE-I (30m型)

U (cm/s)	F _x (N)	Re	C _D
8.28	0.94	9.65E+02	0.635
12.42	2.12	1.45E+03	0.639
16.56	3.80	1.93E+03	0.644
20.70	5.99	2.41E+03	0.650
24.84	8.63	2.89E+03	0.650
28.99	11.77	3.38E+03	0.652
34.16	16.27	3.98E+03	0.648
38.30	19.28	4.46E+03	0.611

付表 2 振動流（規則波）中での流体力の計測結果 [模型 TYPE- I（20m 型）]

模型：TYPE- I（20m型）

H (cm)	T (s)	U90 (cm/s)	U60 (cm/s)	U30 (cm/s)	W90 (cm/s)	W60 (cm/s)	W30 (cm/s)	Fx (N)	Fz (N)	Mx (Nm)	Fz/Fx	KC	C _D	C _M
5.13	1.51	2.32	1.56	1.43	2.28	1.78	0.62	0.22	0.06	0.07	0.29	0.08	3.89	0.07
10.19	1.53	4.55	3.20	2.65	4.30	2.11	0.99	0.54	0.11	0.19	0.21	0.17	2.77	0.07
20.43	1.52	8.51	6.04	4.68	7.71	4.52	1.62	1.59	0.29	0.58	0.18	0.32	2.80	0.07
30.23	1.52	13.00	7.98	6.32	11.95	5.99	2.58	3.11	0.54	1.13	0.17	0.43	3.27	0.07
38.91	1.53	15.49	10.51	9.09	15.24	8.17	4.10	4.68	0.76	1.69	0.16	0.56	2.86	0.08
5.09	2.00	3.81	3.37	3.14	2.54	1.35	0.42	0.71	0.14	0.25	0.20	0.24	3.81	0.09
10.15	2.00	7.13	6.31	6.15	4.83	2.87	1.37	2.03	0.32	0.68	0.16	0.45	3.44	0.06
20.24	2.00	13.43	10.95	10.71	10.48	6.48	2.69	5.38	0.82	1.80	0.15	0.77	2.92	0.09
30.46	2.00	19.57	16.73	14.79	16.14	10.24	4.37	10.39	1.59	3.53	0.15	1.18	2.30	0.13
40.88	1.99	25.81	22.46	20.24	21.57	11.86	6.37	15.97	2.61	5.45	0.16	1.56	2.04	0.12
5.02	2.49	4.59	4.24	4.26	2.18	1.43	0.60	1.16	0.23	0.38	0.20	0.38	4.04	0.09
10.02	2.49	8.28	7.88	7.75	4.91	3.05	1.43	3.03	0.50	0.99	0.16	0.69	3.24	0.11
20.38	2.49	17.20	15.41	14.39	10.80	7.62	3.05	9.05	1.49	2.99	0.17	1.37	2.10	0.17
30.12	2.50	25.34	22.50	20.91	15.22	10.03	4.97	16.04	2.59	5.35	0.16	1.97	1.62	0.24
39.98	2.51	33.78	30.70	27.33	21.12	11.98	6.43	24.24	4.01	8.15	0.17	2.69	1.39	0.24
5.00	2.99	4.77	4.84	4.91	2.10	1.60	1.15	1.28	0.29	0.41	0.23	0.51	3.37	0.12
10.29	2.99	9.17	8.64	8.59	4.79	3.23	1.30	3.73	0.68	1.21	0.18	0.91	3.05	0.15
20.41	2.99	18.53	17.88	16.43	9.50	6.58	2.62	10.12	1.61	3.31	0.16	1.88	1.87	0.17
30.14	2.99	26.78	26.55	23.85	13.23	8.90	3.84	17.64	2.77	5.84	0.16	2.72	1.37	0.27
40.38	2.99	36.12	33.31	30.87	17.52	11.56	5.65	26.40	3.86	8.87	0.15	3.42	1.28	0.32

H・T：模型直上の波高・周期， U90・U60・U30：底面から90・60・30cm地点の水平流速， W90・W60・W30：底面から90・60・30cm地点の鉛直流速， Fx：流軸方向の水平流体力， Fz：鉛直流体力， Mx：流軸方向のモーメント， KC：KC数， C_D：抗力係数， C_M：質量係数

付表3 振動流（規則波）中での流体力の計測結果 [模型 TYPE-I (30m 型)]

模型：TYPE-I (30m型)

H (cm)	T (s)	U90 (cm/s)	U60 (cm/s)	U30 (cm/s)	W90 (cm/s)	W60 (cm/s)	W30 (cm/s)	F _x (N)	F _z (N)	M _x (Nm)	F _z /F _x	KC	C _D	C _M
5.06	1.51	2.30	1.71	1.40	2.31	1.59	0.65	0.41	0.15	0.23	0.35	0.12	2.26	0.06
10.22	1.51	4.42	3.11	2.54	4.23	2.44	0.97	1.06	0.26	0.65	0.25	0.24	1.96	0.06
20.38	1.51	8.45	5.78	4.72	7.90	4.29	1.63	3.22	0.84	1.98	0.26	0.46	1.57	0.07
30.72	1.53	12.36	7.85	7.21	11.38	6.40	2.59	6.21	1.37	3.70	0.22	0.67	1.67	0.06
39.90	1.51	15.92	10.89	8.98	15.49	8.34	4.25	9.07	1.82	5.44	0.20	0.86	1.48	0.07
5.05	2.00	3.87	3.57	3.28	2.51	1.57	0.49	1.20	0.24	0.64	0.20	0.28	3.11	0.08
10.15	2.00	7.22	6.39	5.88	4.71	2.60	1.15	3.36	0.68	1.78	0.20	0.52	2.63	0.08
20.23	1.99	13.83	11.26	10.63	10.15	6.34	2.87	9.24	1.68	4.94	0.18	0.98	1.88	0.11
30.48	2.00	19.89	16.65	15.38	16.48	9.29	4.20	17.72	3.49	9.63	0.20	1.42	1.79	0.13
40.73	2.00	26.45	21.82	20.57	21.62	10.93	6.05	26.91	5.92	14.87	0.22	1.89	1.31	0.17
5.04	2.49	4.58	4.62	4.43	2.18	1.53	0.59	1.82	0.40	0.91	0.22	0.41	3.44	0.09
10.02	2.49	8.46	8.01	7.70	4.79	3.11	1.30	4.75	0.90	2.36	0.19	0.75	2.75	0.12
20.30	2.49	17.35	16.07	14.44	10.27	7.32	2.50	14.46	2.97	7.39	0.21	1.54	1.75	0.16
30.23	2.50	26.55	24.92	21.31	14.41	9.43	4.69	25.95	5.35	13.69	0.21	2.37	1.15	0.23
4.97	2.99	4.92	5.00	4.87	2.23	1.55	0.76	1.96	0.51	0.95	0.26	0.52	3.19	0.10
10.29	2.99	9.29	9.01	8.63	4.29	3.73	1.26	5.80	1.15	2.83	0.20	0.99	2.81	0.12
20.36	2.99	19.20	17.96	16.84	9.11	5.75	2.95	15.77	2.91	7.93	0.18	2.05	1.39	0.24
30.18	2.99	28.21	25.93	24.09	14.08	8.73	3.52	27.65	5.37	14.32	0.19	3.02	1.07	0.28

H・T：模型直上の波高・周期， U90・U60・U30：底面から90・60・30cm地点の水平流速， W90・W60・W30：底面から90・60・30cm地点の鉛直流速， F_x：流軸方向の水平流体力， F_z：鉛直流体力， M_x：流軸方向のモーメント， KC：KC数， C_D：抗力係数， C_M：質量係数

付表4 振動流（規則波）中での流体力の算定値 [模型 TYPE- I (20m 型)]

模型：TYPE- I (20m型)

入射波		波長	流速	加速度	Fxの作用位置		Case 1			Case 2		
H (cm)	T (s)	L (cm)	U_{cal} (cm/s)	U'_{cal} (cm/s ²)	z_{cal1} (cm)	z_{cal2} (cm)	Fx_{cal} (N)	Mx_{cal1} (Nm)	Mx_{cal2} (Nm)	Fx_{cal} (N)	Mx_{cal1} (Nm)	Mx_{cal2} (Nm)
5.13	1.51	356.20	1.23	5.11	0.30	0.27	0.03	0.01	0.01	0.09	0.03	0.03
10.19	1.53	362.38	2.53	10.42	0.32	0.26	0.07	0.03	0.02	0.37	0.13	0.11
20.43	1.52	359.27	4.99	20.64	0.33	0.27	0.23	0.09	0.07	1.44	0.53	0.44
30.23	1.52	359.30	7.39	30.55	0.32	0.27	0.49	0.18	0.15	2.99	1.09	0.91
38.91	1.53	362.38	9.67	39.81	0.32	0.26	0.83	0.30	0.25	4.85	1.75	1.48
5.09	2.00	599.03	2.74	8.61	0.31	0.22	0.07	0.03	0.02	0.43	0.15	0.11
10.15	2.00	599.03	5.46	17.16	0.30	0.22	0.27	0.09	0.07	1.63	0.55	0.43
20.24	2.00	599.03	10.89	34.22	0.29	0.22	1.03	0.35	0.27	5.30	1.77	1.40
30.46	2.00	599.02	16.40	51.53	0.30	0.22	2.37	0.81	0.63	9.69	3.29	2.56
40.88	1.99	595.58	21.87	68.92	0.30	0.22	4.28	1.46	1.13	14.46	4.93	3.83
5.02	2.49	851.92	3.74	9.42	0.29	0.21	0.13	0.04	0.03	0.81	0.26	0.20
10.02	2.49	848.56	7.43	18.78	0.29	0.21	0.48	0.16	0.12	2.63	0.86	0.66
20.38	2.49	851.92	15.16	38.21	0.29	0.21	2.03	0.67	0.51	7.62	2.51	1.92
30.12	2.50	855.27	22.47	56.49	0.29	0.21	4.52	1.51	1.14	12.37	4.13	3.12
39.98	2.51	858.64	29.92	74.99	0.30	0.21	8.00	2.69	2.02	18.05	6.07	4.55
5.00	2.99	1098.92	4.33	9.09	0.28	0.21	0.17	0.05	0.04	0.97	0.31	0.24
10.29	2.99	1095.68	8.91	18.74	0.28	0.21	0.69	0.22	0.17	3.20	1.04	0.79
20.41	2.99	1095.68	17.67	37.17	0.29	0.21	2.75	0.90	0.68	8.09	2.65	2.00
30.14	2.99	1098.92	26.13	54.86	0.29	0.21	6.10	2.02	1.51	12.79	4.24	3.16
40.38	2.99	1098.92	35.02	73.50	0.30	0.21	10.95	3.68	2.71	21.19	7.12	5.24

Case1：一様流中の計測結果から求めた C_D と $C_M=2.0$ を使用して算定， Case2：振動流（規則波）の計測結果から求めた $C_D \cdot C_M$ を使用して算定， z_{cal1} ：水平流体力の作用位置 (=Mx/Fx) [Fx, Mx は計測値]， z_{cal2} ：水平流体力の作用位置（計測された流速二乗の図芯）， $Mx_{cal1} \cdot Mx_{cal2}$ ：モーメントの算定値 ($z_{cal1} \cdot z_{cal2}$ を使用)

付表5 振動流（規則波）中での流体力の算定値 [模型 TYPE- I (30m 型)]

模型：TYPE- I (30m型)

入射波		波長 L (cm)	流速 U_{cal} (cm/s)	加速度 U'_{cal} (cm/s^2)	Fxの作用位置		Case 1			Case 2		
H (cm)	T (s)				z_{cal1} (cm)	z_{cal2} (cm)	Fx_{cal} (N)	Mx_{cal1} (Nm)	Mx_{cal2} (Nm)	Fx_{cal} (N)	Mx_{cal1} (Nm)	Mx_{cal2} (Nm)
5.06	1.51	356.20	1.84	7.63	0.51	0.55	0.07	0.04	0.04	0.29	0.16	0.17
10.22	1.51	356.20	3.71	15.42	0.57	0.55	0.21	0.13	0.12	1.10	0.67	0.65
20.38	1.51	356.20	7.41	30.76	0.57	0.55	0.79	0.49	0.47	3.90	2.39	2.31
30.72	1.53	362.38	11.44	47.10	0.56	0.55	1.83	1.09	1.07	8.45	5.03	4.96
39.90	1.51	356.20	14.50	60.21	0.56	0.55	2.92	1.75	1.73	12.21	7.32	7.25
5.05	2.00	599.02	3.27	10.27	0.49	0.44	0.16	0.08	0.08	0.83	0.44	0.39
10.15	2.00	599.03	6.56	20.61	0.49	0.44	0.60	0.32	0.28	2.96	1.57	1.41
20.23	1.99	595.58	13.01	41.02	0.49	0.44	2.34	1.25	1.12	9.11	4.86	4.35
30.48	2.00	599.02	19.71	61.92	0.50	0.44	5.44	2.96	2.59	15.87	8.63	7.55
40.73	2.00	599.03	26.33	82.71	0.51	0.44	9.70	5.36	4.62	22.36	12.35	10.64
5.04	2.49	848.56	4.12	10.42	0.46	0.39	0.24	0.12	0.10	1.24	0.62	0.54
10.02	2.49	848.56	8.21	20.74	0.46	0.39	0.94	0.46	0.41	4.06	2.02	1.76
20.30	2.49	851.92	16.66	41.97	0.47	0.39	3.89	1.98	1.69	10.74	5.48	4.66
30.23	2.50	855.28	24.86	62.48	0.49	0.39	8.65	4.56	3.75	17.27	9.11	7.49
4.97	2.99	1095.68	4.57	9.62	0.44	0.38	0.29	0.14	0.12	1.44	0.70	0.60
10.29	2.99	1098.92	9.48	19.91	0.45	0.38	1.24	0.61	0.52	4.64	2.27	1.93
20.36	2.99	1098.92	18.76	39.39	0.46	0.38	4.93	2.48	2.05	10.60	5.33	4.41
30.18	2.99	1098.92	27.81	58.37	0.48	0.38	10.81	5.60	4.50	18.29	9.47	7.62

Case1：一様流中の計測結果から求めた C_D と $C_M=2.0$ を使用して算定， Case2：振動流（規則波）の計測結果から求めた $C_D \cdot C_M$ を使用して算定， z_{cal1} ：水平流体力の作用位置（= Mx/Fx ）[Fx , Mx は計測値]， z_{cal2} ：水平流体力の作用位置（計測された流速二乗の図芯）， $Mx_{cal1} \cdot Mx_{cal2}$ ：モーメントの算定値（ $z_{cal1} \cdot z_{cal2}$ を使用）

付表 6 振動流（不規則波）中での流体力の計測結果 [模型 TYPE-I (30m 型)]

模型：TYPE-I (30m型)

$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	H_{max} (cm)	T_{max} (s)	$U_{90_{max}}$ (cm/s)	$W_{90_{max}}$ (cm/s)	$F_{X_{max}}$ (N)	$F_{Z_{max}}$ (N)	$M_{X_{max}}$ (Nm)	KC	C_D	C_M
9.99	1.99	14.90	1.86	12.23	8.06	8.29	1.61	4.25	0.87	2.06	0.13
20.11	2.02	33.12	1.80	24.97	17.54	23.08	4.55	12.24	1.80	1.62	0.14
10.19	2.47	15.97	2.62	15.13	9.37	11.19	2.28	5.69	1.34	1.97	0.15
19.90	2.46	31.46	2.60	30.25	20.24	31.61	6.49	17.12	2.66	1.11	0.30
10.02	2.98	15.84	2.82	17.58	9.05	13.29	2.26	6.55	1.87	1.27	0.37
20.33	2.97	32.28	2.78	34.05	18.63	34.73	6.72	18.65	3.61	1.01	0.32

付表 7 振動流（規則波）中での流体力の計測結果 [模型：円柱 5 本]

模型：円柱5本

H (cm)	T (s)	U (cm/s)	W (cm/s)	F _x (N)	F _z (N)	M _x (Nm)	KC	C _D	C _M
10.14	1.50	5.01	4.96	0.35	0.33	0.24	2.51	0.22	0.86
20.75	1.51	9.19	9.76	0.55	0.38	0.29	4.64	0.15	0.74
29.87	1.52	13.82	14.11	0.79	0.46	0.33	7.00	0.32	0.65
39.38	1.51	18.86	18.32	0.87	0.63	0.39	9.47	0.40	0.47
10.17	1.80	6.49	5.83	0.44	0.26	0.39	3.89	0.16	1.01
20.22	1.79	12.51	12.16	0.74	0.36	0.42	7.48	0.34	0.89
30.14	1.80	18.93	18.11	1.04	0.61	0.38	11.36	0.40	0.80
40.91	1.79	26.12	24.07	1.50	0.71	0.38	15.61	0.51	0.75
10.33	2.00	7.65	6.00	0.55	0.29	0.43	5.10	0.61	1.07
20.16	1.99	14.61	12.60	0.94	0.60	0.50	9.71	0.54	1.00
30.41	2.00	22.53	19.15	1.57	1.15	0.60	15.02	0.71	0.97
40.65	1.99	31.71	24.02	2.26	1.01	0.71	21.07	0.52	1.02
10.21	2.20	8.05	6.23	0.58	0.38	0.82	5.91	0.87	1.20
20.31	2.20	16.27	12.04	1.02	0.62	1.01	11.93	0.75	1.06
30.31	2.20	24.99	17.82	1.88	0.93	1.08	18.33	0.77	1.06
41.66	2.21	33.78	23.33	3.09	1.41	1.10	24.85	0.66	1.14
10.08	2.39	8.67	6.17	0.58	0.48	0.59	6.91	0.84	1.15
20.36	2.40	17.48	12.37	1.34	1.06	0.77	13.98	0.89	1.04
30.04	2.39	27.28	17.59	2.33	0.95	1.05	21.76	0.75	0.89
40.40	2.39	34.94	22.60	3.90	1.40	1.33	27.80	0.77	1.06
10.15	2.59	8.70	6.10	0.74	1.03	1.71	7.52	1.36	1.39
20.26	2.59	18.08	11.21	1.52	1.03	1.84	15.63	1.02	1.21
30.43	2.59	29.46	17.39	2.70	1.33	2.03	25.47	0.79	1.16
40.27	2.59	36.47	21.35	4.34	1.08	2.12	31.44	0.86	0.99
10.09	2.80	8.94	5.61	0.61	0.42	0.58	8.35	1.09	1.42
20.16	2.79	18.73	10.73	1.56	0.89	1.06	17.44	0.97	1.09
30.01	2.79	29.54	16.08	2.80	0.98	1.76	27.51	0.81	1.18
40.03	2.79	37.72	20.03	4.62	1.38	2.41	35.04	0.85	1.03
10.09	2.99	9.28	5.72	0.75	0.70	2.76	9.26	1.25	1.27
20.32	3.00	19.46	10.47	1.54	0.54	3.14	19.46	0.95	1.05
30.84	2.99	29.19	14.90	3.14	1.15	3.33	29.13	0.85	1.05
40.61	3.00	37.71	20.21	5.03	1.35	3.65	37.71	0.94	1.09

H・T：模型直上の波高・周期， U：底面から 101cm 地点の水平流速， W：底面から 101cm 地点の鉛直流速， F_x：流軸方向の水平流体力， F_z：鉛直流体力， M_x：流軸方向のモーメント， KC：KC 数， C_D：抗力係数， C_M：質量係数

付表 8 振動流（規則波）中での流体力の計測結果 [模型：角柱 5 本]

模型：角柱5本

H (cm)	T (s)	U (cm/s)	W (cm/s)	F _x (N)	F _z (N)	M _x (Nm)	KC	C _D	C _M
10.20	1.50	5.01	4.96	0.50	0.42	0.38	2.51	0.87	0.98
20.47	1.49	9.19	9.77	0.69	0.43	0.42	4.57	0.44	0.76
30.33	1.51	13.82	14.08	1.08	0.73	0.48	6.94	0.62	0.72
38.57	1.51	18.86	18.35	1.44	1.05	0.53	9.51	0.70	0.57
10.25	1.80	6.49	5.84	0.58	0.44	0.58	3.89	1.08	1.00
20.26	1.79	12.51	12.16	1.01	0.39	0.60	7.48	0.72	0.93
30.42	1.79	18.96	17.87	1.66	0.80	0.60	9.91	-0.79	0.87
41.01	1.79	26.12	24.07	2.52	1.40	0.62	15.61	0.64	0.87
10.43	1.99	7.65	6.00	0.72	0.19	0.57	5.09	1.01	1.18
20.34	1.99	14.61	12.60	1.34	0.48	0.79	9.71	0.84	1.14
30.53	1.99	22.53	19.15	2.34	1.27	0.98	14.97	0.75	1.15
40.78	1.99	31.71	24.02	3.51	2.84	1.15	21.07	0.69	1.27
10.34	2.20	8.05	6.23	0.74	0.32	1.24	5.91	1.34	1.31
20.35	2.20	16.27	12.04	1.60	0.64	1.31	11.93	0.86	1.32
30.49	2.19	24.99	17.79	2.68	1.51	1.37	18.27	0.80	1.36
41.10	2.20	33.78	23.33	4.42	3.10	1.43	24.78	0.81	1.51
10.22	2.39	8.67	6.17	0.81	0.32	0.91	6.91	1.32	1.32
20.43	2.40	17.92	12.19	1.88	1.17	1.29	14.34	0.80	1.34
30.17	2.39	27.28	17.58	3.13	1.92	1.69	21.70	0.77	1.61
40.67	2.39	34.94	22.61	5.45	3.59	1.98	27.79	0.92	1.48
10.27	2.59	8.70	6.12	0.85	0.29	2.35	7.52	1.43	1.42
20.39	2.60	18.08	11.21	1.88	1.16	2.44	15.67	0.89	1.53
30.53	2.59	29.46	17.39	3.34	1.87	2.63	25.47	0.82	1.69
40.45	2.59	36.47	21.35	5.68	2.91	2.92	31.44	0.98	1.49
10.21	2.80	8.94	5.61	0.85	0.28	1.12	8.35	1.20	1.59
20.25	2.80	18.73	10.75	1.90	1.39	1.99	17.48	0.99	1.53
30.18	2.79	29.54	16.14	3.58	1.81	2.73	27.51	0.91	1.77
40.06	2.79	37.72	20.03	6.00	3.58	3.45	35.04	1.04	1.48
10.16	2.99	9.28	5.72	0.90	0.30	4.21	9.26	1.39	1.61
20.51	2.99	19.46	10.47	1.95	1.25	4.34	19.42	0.96	1.64
30.80	2.99	29.19	14.90	3.85	2.10	4.59	29.12	0.95	1.83
40.76	2.99	37.71	20.15	6.17	3.02	4.70	37.63	1.14	1.42

H・T：模型直上の波高・周期， U：底面から 101cm 地点の水平流速， W：底面から 101cm 地点の鉛直流速， F_x：流軸方向の水平流体力， F_z：鉛直流体力， M_x：流軸方向のモーメント， KC：KC 数， C_D：抗力係数， C_M：質量係数

付表9 振動流（規則波）中での流体力の計測結果 [模型：円柱3本+角柱2本]

模型：円柱3本+角柱2本

H (cm)	T (s)	U (cm/s)	W (cm/s)	Fx (N)	Fz (N)	Mx (Nm)
10.30	1.49	5.01	4.96	0.30	0.26	0.25
20.46	1.50	9.19	9.77	0.47	0.41	0.32
30.11	1.50	13.82	14.08	0.71	0.54	0.38
38.96	1.51	18.86	18.35	0.84	0.65	0.41
10.28	1.80	6.49	5.83	0.39	0.36	0.44
20.32	1.80	12.51	12.17	0.73	0.36	0.45
30.45	1.79	18.96	17.87	1.12	0.58	0.43
41.09	1.79	26.12	24.02	1.58	0.91	0.42
10.36	1.99	7.65	6.01	0.59	0.32	0.42
20.31	2.00	14.61	12.62	0.95	0.40	0.56
30.48	2.00	22.53	19.15	1.62	1.13	0.68
40.57	2.00	31.71	24.02	2.20	0.95	0.82
10.29	2.20	8.05	6.23	0.58	0.35	0.91
20.38	2.20	16.27	12.04	1.08	0.61	1.03
30.39	2.20	24.99	17.79	1.86	0.94	1.07
41.11	2.20	33.78	23.35	2.89	0.90	1.12
10.21	2.39	8.67	6.18	0.62	0.40	0.61
20.42	2.39	17.38	12.14	1.39	0.92	0.88
30.12	2.39	27.28	17.58	2.24	0.64	1.16
40.60	2.39	34.94	22.61	3.65	1.95	1.41
10.25	2.61	8.70	6.12	0.59	0.31	1.75
20.41	2.60	18.08	11.23	1.40	0.43	1.86
30.69	2.61	29.46	17.42	2.49	0.94	2.02
40.53	2.59	36.47	21.35	3.92	0.95	2.13
10.15	2.79	8.94	5.61	0.78	0.81	0.66
20.42	2.79	18.73	10.75	1.42	0.61	1.25
30.21	2.79	29.54	16.08	2.52	0.99	1.79
40.04	2.79	37.72	20.03	4.28	1.28	2.34
10.11	2.99	9.28	5.72	0.63	0.25	2.76
20.49	3.00	19.46	10.49	1.51	0.67	3.15
30.49	3.01	29.19	14.90	2.65	1.16	3.38
40.60	2.99	37.71	20.15	4.76	1.68	3.78

H・T：模型直上の波高・周期， U：底面から101cm地点の水平流速， W：底面から101cm地点の鉛直流速， Fx：流軸方向の水平流体力， Fz：鉛直流体力， Mx：流軸方向のモーメント

付表 10 振動流（規則波）中での流体力の算定値と計測値 [模型：円柱 5 本]

模型：円柱5本

入射波		$F_{x_{cal}}$	$F_{z_{cal}}$	$M_{x_{cal}}$	$F_{x_{exp}}$	$F_{z_{exp}}$	$M_{x_{exp}}$
H (cm)	T (s)	(N)	(N)	(Nm)	(N)	(N)	(Nm)
10.14	1.50	0.33	0.26	0.26	0.35	0.33	0.24
20.75	1.51	0.80	0.62	0.61	0.55	0.38	0.29
29.87	1.52	1.28	0.99	0.97	0.79	0.46	0.33
39.38	1.51	1.76	1.36	1.35	0.87	0.63	0.39
10.17	1.80	0.51	0.32	0.34	0.44	0.26	0.39
20.22	1.79	1.21	0.74	0.80	0.74	0.36	0.42
30.14	1.80	2.00	1.21	1.32	1.04	0.61	0.38
40.91	1.79	2.87	1.76	1.90	1.50	0.71	0.38
10.33	2.00	0.62	0.32	0.38	0.55	0.29	0.43
20.16	1.99	1.44	0.74	0.88	0.94	0.60	0.50
30.41	2.00	2.39	1.23	1.45	1.57	1.15	0.60
40.65	1.99	3.40	1.75	2.07	2.26	1.01	0.71
10.21	2.20	0.69	0.30	0.39	0.58	0.38	0.82
20.31	2.20	1.62	0.71	0.92	1.02	0.62	1.01
30.31	2.20	2.64	1.16	1.50	1.88	0.93	1.08
41.66	2.21	4.00	1.73	2.26	3.09	1.41	1.10
10.08	2.39	0.73	0.27	0.39	0.58	0.48	0.59
20.36	2.40	1.72	0.66	0.93	1.34	1.06	0.77
30.04	2.39	2.77	1.06	1.50	2.33	0.95	1.05
40.40	2.39	4.17	1.55	2.26	3.90	1.40	1.33
10.15	2.59	0.75	0.25	0.39	0.74	1.03	1.71
20.26	2.59	1.80	0.60	0.94	1.52	1.03	1.84
30.43	2.59	2.97	0.99	1.55	2.70	1.33	2.03
40.27	2.59	4.56	1.40	2.38	4.34	1.08	2.12
10.09	2.80	0.76	0.23	0.39	0.61	0.42	0.58
20.16	2.79	1.78	0.53	0.91	1.56	0.89	1.06
30.01	2.79	3.02	0.87	1.54	2.80	0.98	1.76
40.03	2.79	4.99	1.26	2.54	4.62	1.38	2.41
10.09	2.99	0.76	0.20	0.38	0.75	0.70	2.76
20.32	3.00	1.80	0.48	0.90	1.54	0.54	3.14
30.84	2.99	3.28	0.81	1.64	3.14	1.15	3.33
40.61	3.00	5.87	1.15	2.93	5.03	1.35	3.65

付表 11 振動流（規則波）中での流体力の算定値と計測値 [模型：角柱 5 本]

模型：角柱5本

入射波		$F_{x_{cal}}$	$F_{z_{cal}}$	$M_{x_{cal}}$	$F_{x_{exp}}$	$F_{z_{exp}}$	$M_{x_{exp}}$
H (cm)	T (s)	(N)	(N)	(Nm)	(N)	(N)	(Nm)
10.20	1.50	0.53	0.42	0.38	0.50	0.42	0.38
20.47	1.49	1.15	0.91	0.57	0.69	0.43	0.42
30.33	1.51	1.86	1.46	0.91	1.08	0.73	0.48
38.57	1.51	2.48	1.94	1.12	1.44	1.05	0.53
10.25	1.80	0.80	0.50	0.42	0.58	0.44	0.58
20.26	1.79	1.74	1.09	0.79	1.01	0.39	0.60
30.42	1.79	2.80	1.74	1.29	1.66	0.80	0.60
41.01	1.79	3.94	2.47	1.99	2.52	1.40	0.62
10.43	1.99	0.95	0.51	0.48	0.72	0.19	0.57
20.34	1.99	2.05	1.09	0.98	1.34	0.48	0.79
30.53	1.99	3.27	1.75	1.69	2.34	1.27	0.98
40.78	1.99	4.59	2.43	2.73	3.51	2.84	1.15
10.34	2.20	1.02	0.47	0.53	0.74	0.32	1.24
20.35	2.20	2.24	1.02	1.15	1.60	0.64	1.31
30.49	2.19	3.55	1.64	1.98	2.68	1.51	1.37
41.10	2.20	5.24	2.31	3.45	4.42	3.10	1.43
10.22	2.39	1.05	0.43	0.58	0.81	0.32	0.91
20.43	2.40	2.36	0.94	1.24	1.88	1.17	1.29
30.17	2.39	3.70	1.49	2.35	3.13	1.92	1.69
40.67	2.39	5.72	2.11	4.21	5.45	3.59	1.98
10.27	2.59	1.09	0.39	0.60	0.85	0.29	2.35
20.39	2.60	2.39	0.85	1.31	1.88	1.16	2.44
30.53	2.59	4.01	1.36	2.44	3.34	1.87	2.63
40.45	2.59	6.31	1.90	4.34	5.68	2.91	2.92
10.21	2.80	1.09	0.35	0.60	0.85	0.28	1.12
20.25	2.80	2.37	0.76	1.37	1.90	1.39	1.99
30.18	2.79	4.14	1.21	2.63	3.58	1.81	2.73
40.06	2.79	6.85	1.70	4.59	6.00	3.58	3.45
10.16	2.99	1.07	0.31	0.62	0.90	0.30	4.21
20.51	2.99	2.42	0.70	1.43	1.95	1.25	4.34
30.80	2.99	4.48	1.11	2.92	3.85	2.10	4.59
40.76	2.99	8.04	1.56	4.70	6.17	3.02	4.70

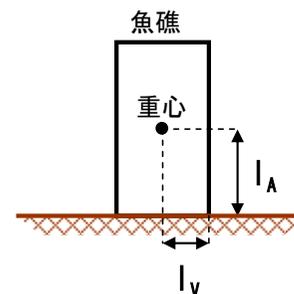
付表 12 振動流（不規則波）中での加速度の計測結果 [模型 TYPE-I (30m 型)]

底面	有義波		最大水平加速度 (G)		最大鉛直加速度 (G)	
	周期 (s)	波高 (cm)	岸方向	沖方向	上方向	下方向
鉄板	2.0	5	0.03	-0.05	0.01	-0.02
		10	0.11	-0.13	0.05	-0.07
		20	0.75	-0.77	0.93	-2.23
		30	1.12	-0.99	1.01	-4.19
	2.5	5	0.07	-0.10	0.03	-0.07
		10	0.25	-0.39	0.10	-0.40
		20	0.82	-0.82	1.01	-1.96
		30	1.07	-2.58	1.75	-2.42
	3.0	5	0.07	-0.09	0.03	-0.07
		10	0.44	-0.34	0.17	-0.80
		20	0.86	-2.60	1.63	-1.79
		30	-	-	-	-
砂	2.0	5	-	-	-	-
		10	0.01	0.00	0.02	-0.03
		20	0.13	-0.23	0.05	-0.07
		30	0.28	-0.42	0.08	-0.25
	2.5	5	0.01	0.00	0.03	-0.03
		10	0.04	-0.06	0.03	-0.03
		20	0.24	-0.34	0.07	-0.09
		30	0.06	-1.38	1.08	-0.04
	3.0	5	0.01	0.00	0.03	-0.03
		10	0.04	-0.11	0.03	-0.02
		20	0.09	-1.73	1.08	-0.04
		30	-	-	-	-

付表 13 振動流（規則波）中での動揺の状況 [模型 TYPE- I（10～30m 型）]

入射波	模型	TYPE- I（10m型） l_A (cm) : 14 l_V (cm) : 14 l_A/l_V : 1.0				TYPE- I（15m型） l_A (cm) : 21 l_V (cm) : 14 l_A/l_V : 1.5				TYPE- I（20m型） l_A (cm) : 28 l_V (cm) : 14 l_A/l_V : 2.0				TYPE- I（25m型） l_A (cm) : 35 l_V (cm) : 14 l_A/l_V : 2.5				TYPE- I（30m型） l_A (cm) : 42 l_V (cm) : 14 l_A/l_V : 3.0			
		周期 (s)	波高 (cm)	Fx/W	動揺の状況 底面：鉄板 底面：砂		Fx/W	動揺の状況 底面：鉄板 底面：砂		Fx/W	動揺の状況 底面：鉄板 底面：砂		Fx/W	動揺の状況 底面：鉄板 底面：砂		Fx/W	動揺の状況 底面：鉄板 底面：砂				
1.5	5	0.01	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	0.00	—	—	0.00	動かない	—					
	10	0.02	—	—	0.02	—	—	0.01	—	—	0.01	動かない	—	0.01	動かない	—					
	20	0.06	—	—	0.04	—	—	0.04	—	—	0.04	動かない	—	0.04	振動（小）	—					
	30	0.11	—	—	0.09	—	—	0.07	動かない	—	0.07	振動（小）	—	0.07	振動（小）	動かない					
	40	0.18	動かない	動かない	0.13	動かない	動かない	0.11	振動（小）	動かない	0.10	振動（小）	動かない	0.10	振動（大）	振動（小）					
2.0	5	0.03	—	—	0.02	—	—	0.02	—	—	0.01	—	—	0.01	動かない	—					
	10	0.09	—	—	0.06	—	—	0.05	動かない	—	0.04	動かない	—	0.04	振動（小）	動かない					
	20	0.23	動かない	—	0.16	動かない	—	0.13	振動（小）	動かない	0.11	振動（小）	動かない	0.11	振動（小）	振動（小）					
	30	0.46	振動（小）	—	0.32	振動（小）	動かない	0.26	振動（大）	振動（小）	0.23	振動（大）	振動（大）	0.20	振動（大）	振動（大）					
	40	0.70	振動（大）	動かない	0.50	振動（大）	振動（小）	0.40	振動（大）	振動（大）	0.34	振動（大）	振動（大）	0.30	振動（大）	振動（大）					
2.5	5	0.05	—	—	0.04	—	—	0.03	動かない	—	0.02	動かない	—	0.02	動かない	—					
	10	0.14	—	—	0.10	動かない	—	0.08	動かない	—	0.06	振動（小）	動かない	0.05	振動（小）	動かない					
	20	0.42	動かない	—	0.29	振動（小）	動かない	0.23	振動（大）	動かない	0.19	—	振動（小）	0.17	振動（大）	振動（大）					
	30	0.72	振動（大）	動かない	0.51	—	振動（小）	0.41	振動（大）	振動（大）	0.34	—	—	0.30	振動（大）	振動（大）					
	40	1.08	振動（大）	振動（小）	0.77	—	—	0.62	振動（大）	振動（大）	0.51	—	—	0.48	振動（大）	転倒					
3.0	5	0.05	—	—	0.04	—	—	0.03	動かない	—	0.02	動かない	—	0.02	動かない	—					
	10	0.17	動かない	—	0.12	動かない	—	0.09	動かない	動かない	0.08	振動（小）	動かない	0.07	振動（小）	動かない					
	20	0.46	振動（小）	動かない	0.32	振動（小）	動かない	0.25	振動（大）	振動（小）	0.21	振動（大）	振動（大）	0.18	振動（大）	振動（大）					
	30	0.80	振動（大）	動かない	0.57	振動（大）	振動（大）	0.45	振動（大）	振動（大）	0.38	振動（大）	振動（大）	0.32	振動（大）	転倒					
	40	1.23	振動（大）	振動（大）	0.87	振動（大）	転倒	0.69	転倒	転倒	0.57	転倒	転倒	0.54	転倒	転倒					

l_A : 流れに直角な鉛直面への魚礁の正射影面の重心までの高さ,
 l_V : 魚礁重心の底面への射影点から最も近い転倒の中心線までの距離,
 F_x : 計測された水平流体力, W : 魚礁水中重量



付表 14 振動流（規則波）中での動揺の計測結果
 [模型 R, 模型 R+14cm, 模型 R+28cm]

模型	波高 (cm)	周期 (s)	水平加速度 (G)	鉛直加速度 (G)	動揺の状況
模型R (h/l=3.0)	11.09	2.46	0.001	0.001	動かない
	14.04	2.46	0.001	0.001	動かない
	16.85	2.46	0.006	0.001	振動 (小)
	18.27	2.46	0.011	0.001	振動 (小)
	20.46	2.46	0.033	0.005	振動 (小)
	22.42	2.45	0.047	0.008	振動 (中)
	28.89	2.45	0.169	0.033	振動 (大)
	34.74	2.44	0.215	0.042	振動 (大)
模型R +14cm (h/l=2.0)	16.94	2.46	0.000	0.001	動かない
	22.89	2.45	0.005	0.001	滑動 (小)
	25.79	2.45	0.027	0.004	滑動 (小) 振動 (小)
	28.84	2.45	0.055	0.012	滑動 (小) 振動 (中)
	32.50	2.44	0.092	0.022	滑動 (小) 振動 (中)
	34.74	2.44	0.112	0.022	滑動 (中) 振動 (中)
	37.22	2.44	0.154	0.032	滑動 (中) 振動 (大)
	40.55	2.43	0.194	0.039	滑動 (中) 振動 (大)
模型R +28cm (h/l=1.5)	17.13	2.40	0.001	0.001	動かない
	23.08	2.45	0.002	0.001	動かない
	25.89	2.45	0.006	0.001	滑動 (小)
	29.13	2.45	0.010	0.001	滑動 (小)
	32.60	2.44	0.020	0.001	滑動 (中)
	34.79	2.44	0.025	0.003	滑動 (中)
	37.26	2.44	0.040	0.003	滑動 (大) 振動 (小)
	40.26	2.44	0.049	0.006	滑動 (大) 振動 (小)

h/l : 模型の高さと底辺の長さの比