

実海域データによる複層型単体魚礁の安定性の考察

北海道工業大学 正会員 村木 義男

1. まえがき

200海里時代を迎え、日本の漁業は獲る漁業から育てつくる漁業へと変わりつつある。このような情勢に対処するため、現在、人工魚礁の設置がさかに行われている。魚礁の設計法は、これまでの多くの研究によりほとんど確立されているが⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、形状複雑な魚礁については、外力である流体力の正確な算定は必ずしも容易ではなく、いまだ研究の余地がのこされている。流体力の算定には抗力係数が大きくかわるが、この抗力係数をいかに適正に見積もるかは、魚礁設計上非常に重要である。抗力係数については、各分野の立場から早くから研究がなされ、代表的部材に関しては周知のとうり数値が示されているが、形状複雑な物体の場合、その全体としての正確な値を机上で得ることは難しく、一般には水路実験等により求めるのが良しとされている。

この報告は、室内実験の立場からではなく、実海域に沈設された魚礁の転倒分布データから、この種魚礁の抗力係数を考察したものである。すなわち、同一海域の水深の異なる8区域に設置された同一形状、同一寸法のコンクリート魚礁の転倒データから抗力係数を推定し、一般値と比較を行ったものである。具体的には、抗力係数を種々変え、転倒を生じしめた波浪に対する滑動転倒安全率を各区域ごとに求め、これと魚礁の実際の転倒との関係を調べて適正と思われる抗力係数を推定するとともに、模型実験により、魚礁の設置条件の相違が安定性に及ぼす影響をも調べ、これらを総合し実際の立場からこの種魚礁の安定性を考察したものである。今後の設計精度の向上に役立つところあると考える。なお、現在魚礁の設計は、一般に、「沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針」⁽⁴⁾にしたがって行われているので、本報告における安全率の計算もこれにしたがって行った。

2. 実海域データ

(1) 対象魚礁の諸元

対象とした人工魚礁は、単位体積重量 $2.3 \text{ t} \cdot \text{on} / \text{m}^3$ のコンクリート製で、正六角形を基本形とする図-1に示すような3層構造のものである。寸法は、1辺の長さ 1.32 m 、全高 1.63 m 、空中重量 $8.99 \text{ t} \cdot \text{on}$ 、実容積 3.91 m^3 、投影面積 3.98 m^2 である。

(2) 魚礁の設置状況

魚礁は、図-2に示すように、場所($700 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 内)、水深($12 \text{ m} \sim 20 \text{ m}$)の異なるA~Hの8区域に沈設されてある。数量は1区域あたり40個(A区域のみ34個)、魚礁相互の間隔は平均 5 m 前後である。魚礁は特に一定方向を向けて設置されているわけではない。

底質は岩盤であるが単調ではない。各区域の様子は次のようである。

- A区域：岩盤、所々に径 1 m ぐらいの岩
- B〃：〃、〃 径 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ の岩多い
- C〃：〃、〃 径 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ の岩
- D〃：大小様々な岩、径 1 m ぐらいの岩多い
- E〃：〃、〃 2 m 〃 〃
- F〃：〃、〃 1 m 〃 〃
- G〃：〃、〃 1 m 〃 〃
- H〃：〃、〃

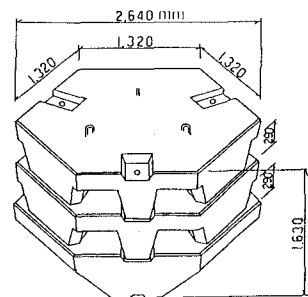


図-1 魚礁の形状

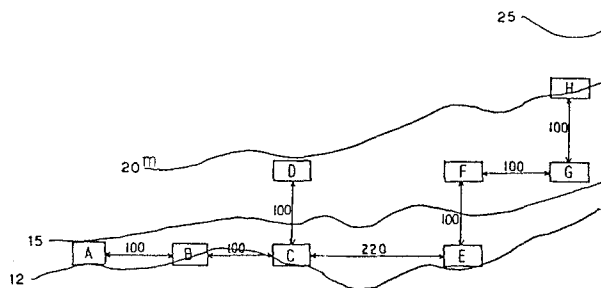


図-2 魚礁設置場所区分、設置水深

(3) 魚礁の転倒状況

魚礁の転倒状況は表-1に示すようなものである。設置総数314個に対し26個の転倒があった。A区域では水深13mのもの3個、B区域では総数40個の内17個と約半数の転倒があり、内訳は水深11m~12mのもの7個、水深12m~13mのもの10個と最も多い数字を示している。C~H区域ではずっと少なく、C区域では水深13mのもの1個、D区域では水深20mという深い所のものが1個、E区域では水深12.5mのもの2個、F区域ではゼロ、G区域では水深16mのもの1個、H区域では水深21mという深い所のものが1個が転倒している。当然11m~13mという浅い範囲のものが殆どを占めるが、水深20m前後という深い所のものの転倒もみられ注意が引かれる。なお転倒はすべて裏返しの状態である。

(4) 転倒を生じしめた波の諸元

設置場所から約10km離れた地点において波浪観測が実施されているので、この観測資料を基にして、転倒せしめた波の諸元を算定した。観測(水深20m)によれば、転倒を生じしめた時点の波は、最大波波高8.4m、最大波周期10.5秒、有義波波高5.67m、有義波周期10.1秒である。これを基に算定した沖波最大波高は9.31m、沖波有義波波高は6.28mである。各区域については表-1に示すとおりで、設置水深の最も浅いB区域で波高が最も高く、最大波で8.17m、有義波で5.32mである。

(5) 砕波水深

各区域への到来波に対する砕波水深を求めると、表-1に示したようになる。区域A、B、Cに到来する最大波を除いては、砕波しないと考えるよい。A区域については、砕波水深11.5~11.8mであるが、転倒魚礁の水深は13mであるので、非砕波としてよいであろう。B区域については、水深11m~12mの魚礁については、砕波の可能性があるが、水深12m~13mの転倒魚礁10個については非砕波としてよいであろう。C区域の1個も水深13mのものであるので、非砕波とみてよいであろう。総じて、A、B、C区域にあつては、到来波は砕波寸前の高い波になっていたものと思われる。なお、表中砕波水深を範囲で示したのは、海底勾配が一樣勾配ではなく、1/20~1/40であるのでこれに合せ示した。

(6) 安全率の算定

魚礁を転倒せしめた波について、質量係数を $C_M = 2$ とし、抗力係数を $C_D = 1.0, 1.5, 2.0$ としたそれぞれの場合の滑動、転倒に対する算定安全率を示すと表-2、表-3のとおりである。表-2は沖波最大波(9.31m)に対するもの、表-3は沖波有義波(6.28m)に対するものである。いずれも非砕波としての値である。計算はさきにも述べたように、「沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針」(以後単に設計指針と記す)にのっとり行つたものである。この設計指針によれば、構造設計事項の1つとして「波、流れに対して安定であること、設置された魚礁が全体として滑動や転倒を起こさず設置位置に安定して存在するよう設計する」とある。そして、外力である流体力計算のための設計波については、「有義波を用いるものとする」とある。魚礁が群体をなしている場合はこれでよいと考えるが、単体で置かれた場合には、単一波に対する安定性を考えるのが至当かと思われるので、最大波に対する安全率の計算も行つた。さきに述べたように、B区域においては到来波は砕波である可能性があるので、「設計指針」に基づき、砕波の場合の安全率を、A、B、C区域について、最大波に対し求めてみると、表-4のようになり、 $C_D = 1.0, C_D = 1.5, C_D = 2.0$ いずれの場合も計算上の安全率は非常に小さく、全魚礁が転倒して当然という結果になる。しかし実際には80%以上の数の魚礁が転倒していないという事実から、砕波になっているとは考えにくく、さきに述べたように、砕波直前の状態にあったと考えるのが至当と思われる。

3. 模型実験データ

現地の海底地盤がかなり不規則であり、また、クレーンによる魚礁の据付けも特に一定方向を向け行っているわけでもなく、さらにまた、魚礁の形状もやや複雑かつ単体設置であることから、魚礁の波に対する向きおよび水平に対する傾きが安定に対しどのような影響を与えるかを知ることが、現地転倒現象を理解する上で必要であろうと考え、2次元造波水路による実験を試みた。ここでこれについて若干述べる。

(1) 実験方法

実験は縮尺1/40として行つた。実験に供した魚礁模型は、図-3に示したとおりで、実際に現地に設置した魚礁の模型の外に、これに類似する他の4種も加え5種類である。A、B型は単層、C、D型は2層、E型は実使用の3層型である。側面的には穴のある状態(図、表中「開」で示す)、穴のない状態(「閉」で示す)に区分される。

実験水路は長さ24m、幅60cm、深さ1mの両面ガラスばりの2次元造波水路である。波高測定は容量式波高計により行つた。図-3に示したA~E5種類の魚礁模型を水路内に横一列に並べ、同一波に対する同時実験を行つた。波に対する向き3種、波周期1.2~2.6秒の間10種、波高は各周期に対し最大10種(最大波高23cm)、水深3種(15cm, 25cm, 35cm)である。波に対する魚礁の向きは図-3に示した

表-1 実海域データ

				沖波最大波 $\begin{matrix} \text{波高 } H_0=9.31\text{m} \\ \text{周期 } T_0=10.5\text{秒} \\ \text{波長 } L_0=172\text{m} \end{matrix}$		沖波最大有義波 $\begin{matrix} \text{波高 } H_0=6.28\text{m} \\ \text{周期 } T_0=10.1\text{秒} \\ \text{波長 } L_0=156\text{m} \end{matrix}$	
設置場所 区分	設置水深 $h\text{ (m)}$	設置数 (コ)	転倒数 (水深) (コ) (m)	波高 $H\text{ (m)}$	砕波水深 $\begin{matrix} h_b\text{ (m)} \\ i=1/20\sim1/40 \end{matrix}$	波高 $H\text{ (m)}$	砕波水深 $\begin{matrix} h_b\text{ (m)} \\ i=1/20\sim1/40 \end{matrix}$
A	12~15	34	3 (13)	7.77	11.5~11.8	5.21	7.9~8.2
B	11~13	40	17 (11~12) 7 (12~13) 10	8.17	11.5~11.8	5.32	7.9~8.2
C	11.5~13.5	40	1 (13)	7.90	11.2~11.6	5.25	7.7~8.1
D	18~20	40	1 (20)	7.70	11.8~12.3	5.17	8.2~8.5
E	12~13	40	2 (12.5)	7.12	10.4~10.9	4.69	7.2~7.5
F	17~18	40	0 ———	7.09	10.8~11.3	4.71	7.5~7.8
G	15~17	40	1 (16)	6.83	10.4~10.9	4.58	7.2~7.5
H	19~21	40	1 (21)	7.01	10.8~11.3	4.68	7.5~7.8

表-2 最大波に対する安全率（非砕波）

沖波諸元 $\begin{matrix} H_0=9.31\text{m} \\ T_0=10.5\text{秒} \\ L_0=172\text{m} \end{matrix}$		安全率					
質量係数 $C_n=2.0$							
抗力係数 C_D		$C_D=1.0$		$C_D=1.5$		$C_D=2.0$	
設置場所 区分	転倒数	滑動	転倒	滑動	転倒	滑動	転倒
A	3	0.84	1.36	0.59	0.95	0.45	0.72
B	17	0.69	1.13	0.48	0.72	0.36	0.59
C	1	0.73	1.18	0.50	0.82	0.38	0.62
D	1	1.22	1.98	0.86	1.39	0.66	1.07
E	2	0.86	1.39	0.60	0.97	0.45	0.74
F	0	1.28	2.06	0.90	1.46	0.69	1.12
G	1	1.19	1.93	0.84	1.36	0.64	0.97
H	1	1.44	2.35	1.03	1.67	0.79	1.29

表-3 有義波に対する安全率（非砕波）

沖波諸元 $\begin{matrix} H_0=6.28\text{m} \\ T_0=10.1\text{秒} \\ L_0=156\text{m} \end{matrix}$		安全率					
質量係数 $C_n=2.0$							
抗力係数 C_D		$C_D=1.0$		$C_D=1.5$		$C_D=2.0$	
設置場所 区分	転倒数	滑動	転倒	滑動	転倒	滑動	転倒
A	3	1.34	2.17	0.95	1.54	0.73	1.19
B	17	1.18	1.92	0.84	1.36	0.64	1.04
C	1	1.24	2.01	0.88	1.42	0.67	1.09
D	1	1.94	3.15	1.41	2.29	1.09	1.77
E	2	1.53	2.48	1.09	1.77	0.84	1.37
F	0	2.02	3.28	1.47	2.38	1.14	1.85
G	1	1.86	3.02	1.35	2.19	1.04	1.69
H	1	2.25	3.64	1.64	2.67	1.28	2.07

表-4 砕波とした場合の安全率

沖波諸元			安 全 率					
$\begin{matrix} H_0=9.31\text{m} \\ T_0=10.5\text{秒} \\ L_0=172\text{m} \end{matrix}$			$C_D=1.0$		$C_D=1.5$		$C_D=2.0$	
設置場所 区分	転 倒 数	砕波波高 (m)	滑動	転倒	滑動	転倒	滑動	転倒
A	3	7.77	0.25	0.41	0.17	0.27	0.13	0.20
B	17	8.17	0.24	0.39	0.16	0.26	0.12	0.19
C	1	7.90	0.25	0.40	0.16	0.27	0.12	0.20

表-5 魚礁の動きの大きさ（階級）区分

- | | |
|-------|---------------------|
| 1 不動 | 全く動かない |
| 2 微振動 | その場で微かに振動する |
| 3 小振動 | その場で小さく振動する |
| 4 中振動 | その場で中ぐらいに振動する |
| 5 大振動 | その場で大きく振動する |
| 6 小移動 | 2 cm 以内移動する |
| 7 中移動 | 2 cm 以上 5 cm 以内移動する |
| 8 大移動 | 5 cm 以上移動する |
| 9 転倒 | 横倒しもしくは裏返しになる |

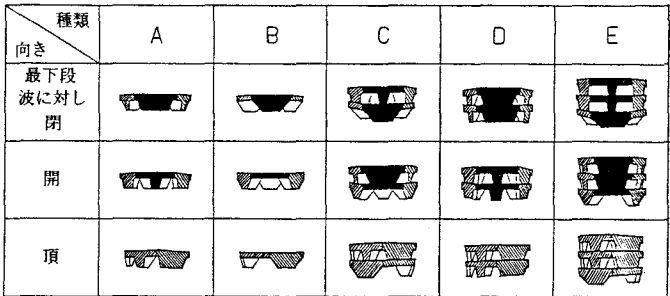


図-3 実験に供した魚礁模型の種類と設置向き区分

ように、最下段に穴のない状態（「閉」で示す）、穴のある状態（「開」で示す）、それに六角形の頂点が波に向いている状態（「頂」で示す）の3種である。また、C、E型については、波到来方向に対し、0、2、4、6、8度の5種の仰角を与え影響をしらべた。魚礁の動きは、表-5に示した階級区分にしたがい目測により判定した。

（2）実験結果

実験結果を総括し表-6、表-7に示した。これらの表には中移動以上の移動についてのみ記載してある。表-6、表-7からわかるように、転倒した魚礁模型は殆どE型で、かつその転倒は特定の設置向きのあるときに生じている。E型と同じ形状で2層のC型もE型と同じ設置向きのあるとき転倒を生じている。表の内容をいまいし詳しく知るため、転倒模型の最も多かった水深25cm、周期2.6秒の場合について、設置向き「閉」、「開」、「頂」各場合の動きの様子を示せば図-4、図-5、図-6のとおりで、設置向きの違いによる安定性の違いがよくわかる。

次に図-7により、魚礁模型の水平に対する傾きすなわち仰角の有無、その大きさの安定性に及ぼす影響をみてる。この図によれば、仰角が2度以内であれば不動若しくは微振動である魚礁模型でも、6度を越えると大移動若しくは転倒に変わるものが多く、設置水平傾きの安定性に及ぼす影響はかなり大きいことがわかる。

4. 考 察

実験の結果で述べたように、複雑な単体魚礁の場合、設置の状態が安定性にかなり影響を及ぼす。海底が凹凸多い場合はその度合いが余計大きいと思われる。ただ、その影響は、不安定な方向だけに向くとはかぎらない。凹部に脚部が入りこんでかえって安定になる場合もあるであろう。要するに海底に設置された魚礁は海底が複雑であればあるほど、魚礁の形状によっては、同じ形状でも1つ1つかなり違った値の安全率を示し、その値のばらつきは広いものになろう。全魚礁を転倒しないようにと考えると、これらの中で条件の悪い魚礁の安全率に注目し、これが1.2よりも大きくなるように設計するということになる。しかし、実際安全率にどのくらいのばらつき、ひらきがあるのか知ることは難しい。現地の転倒データから推定される抗力係数は、設置条件の差異にともなう安全率のばらつきの影響を含めた見掛けの抗力係数ということになろう。

表-6 模型実験データ
(魚礁の設置向きの違いによる安定性の違い)

魚礁種類	向き	水深 (cm)	周期 (秒)	波 (種)(最大cm)	高 (cm)	転 倒	大 移 動	中 移 動
A B C D E	閉	25	1.66	5	(22)			
A B C D E	開	"	"	6	(22)			
A B C D E	閉	"	1.0	1	(16)			
			1.2	2	(19)			
			1.4	3	(20)			
			1.6	3	(22)			
			1.8	4	(22)			
			2.0	4	(22)		E(2)	
			2.2	6	(21)	E(2)		
			2.4	5	(22)	E(3)		
A B C D E	開	"	2.6	10	(21)	E(5), C(4)		
			1.0	1	(15)			
			1.2	2	(19)			
			1.4	3	(21)			
			1.6	3	(22)			
			1.8	3	(23)			
			2.0	4	(22)			
			2.2	6	(22)			
A B C D E	頂	"	2.4	5	(22)			
			2.6	6	(22)		B(1), D(2)	
			1.0	1	(15)			
			1.2	2	(19)			
			1.4	2	(20)			
			1.6	3	(22)			
			1.8	3	(22)			
			2.0	3	(22)			
A B C D E	頂	"	2.2	4	(22)			
			2.4	4	(22)			
			2.6	4	(23)			
			2.6	4	(23)			

()数字：発生件数

表-7 模型実験データ
(魚礁の設置向きの違いによる安定性の違い)

魚礁種類	向き	水深 (cm)	周期 (秒)	波 (種)(最大cm)	高 (cm)	転 倒	大 移 動	中 移 動
A B C D E	閉	15	1.2	7	(13)			
			1.6	7	(15)			
			2.0	7	(17)			
			2.4	7	(16)			
			2.6	7	(17)	E(3), B(1)	E(1), C(1)	
A B C D E	開	"	1.2	3	(14)			
			1.6	3	(15)			
			2.0	4	(17)			
			2.4	5	(18)			
			2.6	5	(18)	A(1)	B(1)	
A B C D E	頂	"	1.2	3	(14)			
			1.6	2	(14)			
			2.0	2	(17)			
			2.4	3	(17)			
			2.6	5	(19)	B(1)		B(1)
A B C D E	閉	35	1.2	3	(22)			
			1.6	4	(26)			
			2.0	4	(26)	E(1)		
			2.4	4	(25)	E(2)		
			2.6	4	(24)	E(2), B(3)		
A B C D E	開	"	1.2	1	(22)			
			1.6	4	(24)			
			2.0	5	(25)			
			2.4	4	(24)			D(1)
			2.6	4	(24)			
A B C D E	頂	"	1.2	1	(23)			
			1.6	4	(24)			
			2.0	4	(26)			
			2.4	3	(24)			
			2.6	4	(25)			

()数字：発生件数

魚礁の種類	水深	向 き	周期
A B C D E	25 ^{cm}	閉	2.58 ^秒

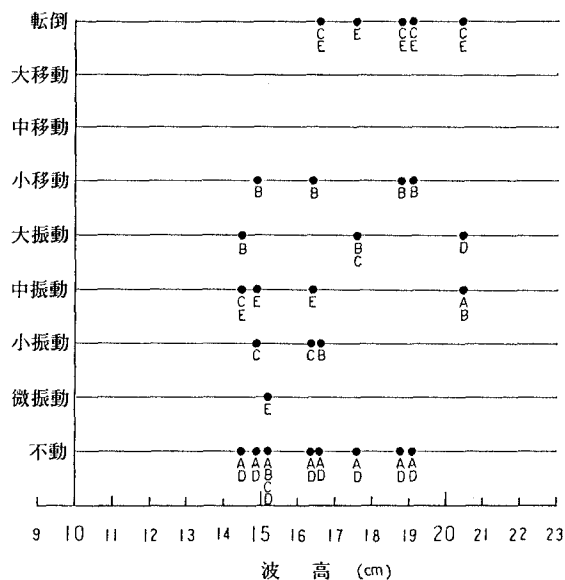


図-4 魚礁模型の動きの大きさと波高との関係

魚礁の種類	水深	向 き	周期
A B C D E	25 ^{cm}	開	2.58 ^秒

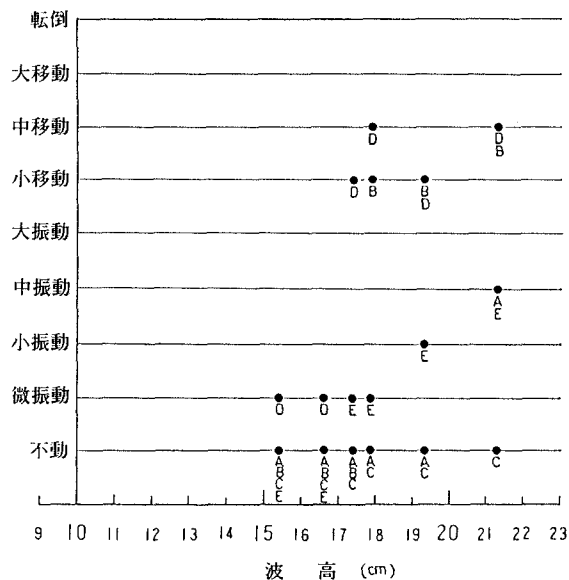


図-5 魚礁模型の動きの大きさと波高との関係

魚礁の種類	水深	向 き	周期
A B C D E	25 ^{cm}	頂	2.58 ^秒

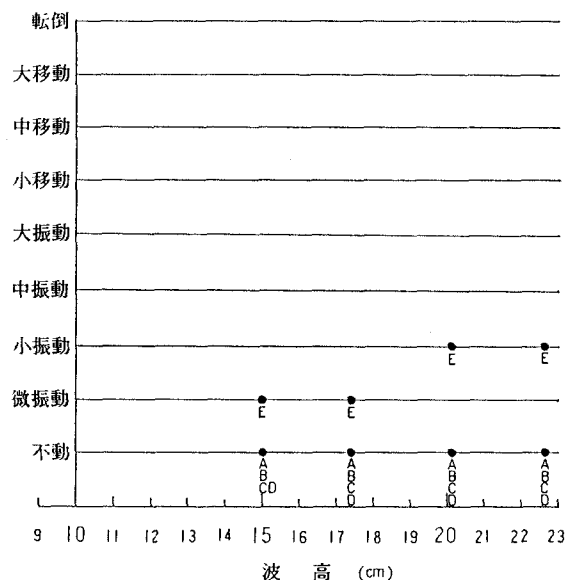


図-6 魚礁模型の動きの大きさと波高との関係

種類	水深	周期	向 き	仰 角
E	25 ^{cm}	1.66 ^秒	閉	0 2 4 6 8 度

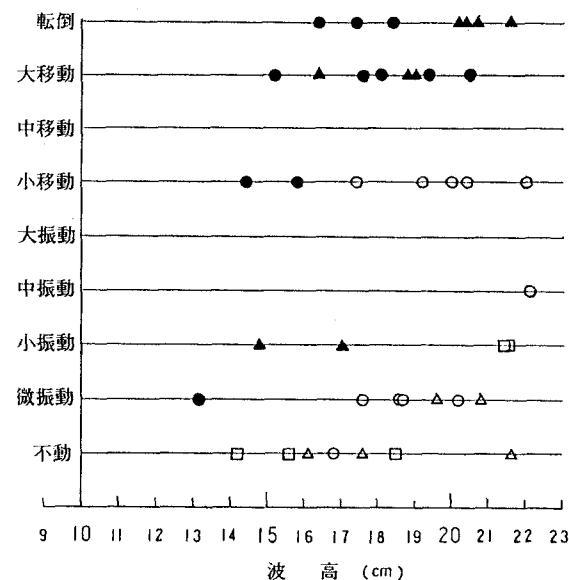


図-7 魚礁模型の動きの大きさと仰角との関係

表-2により、最大波について、転倒安全率と転倒数との関係をみると、A, B, C区域については、 $C_D = 1.5$, $C_D = 2.0$ 両者の場合、転倒安全率が1より小さいことから、この区域の魚礁はほとんど転倒してよいはずのように思われるが、実際には約20%の転倒率であるので、 $C_D = 1.5$, $C_D = 2.0$ の設定は適切とは考えにくい。 $C_D = 1.0$ の場合、転倒安全率は、1.36, 1.12, 1.18と1.2の近傍の値であり、転倒するもの、しないもの両者が混在しておかしくない値であり、現象と一致すると考えることができる。B区域については、安全率1.13で最も小さく、 < 1.2 で一般に不安定と判定される値であるが、この区域の転倒数は17個で最も多いこととよく一致している。

表-3により、有義波について、同様安全率と転倒数との関係をみると、 $C_D = 1.0$ では転倒安全率はおおよそ2.0以上で転倒は考えられない。 $C_D = 1.5$ では、この場合も > 1.2 で不安定に設置されたものでなければ、転倒はしないであろうと思われ、実際の現象と一致するとは考えにくい。 $C_D = 2.0$ の場合は、安全率は1.0~1.2の間の値であるので、計算上もかなりの数が転倒しておかしくない。このようなことから、抗力係数を1.8ぐらいとすれば、安全率の数値と転倒数との関係が現象とがほぼ一致し理解しやすい。

表-1にあるように、D, E, G, H区域においても、それぞれ1, 2, 1, 1個の転倒がみられる。D, G, H区域では水深がかなり深く、最大波に対する算定安全率も表-2に示されるように、 $C_D = 1.0$ の場合で1.93~2.35、 $C_D = 1.5$ の場合でも1.35~1.67であることから、普通の状態に設置されたものの転倒は考えにくく、この場合はよほど不安定に設置された、例えば波に対する向き、水平に対する傾きがともに非常に悪い状態に置かれたものの転倒ではないかと思われる。A, C, E区域についてもあるいは同様の懸念はあるが、B区域についてはその転倒数が多いことから考えて、そうではなく、普通に設置されたものも多く転倒したであろうと思われる。このようなことから最大波からは C_D として1.0ぐらいが適正な値と判断されるが、設計上からはより安全という立場をとり、1.3ぐらいをとりたいところである。有義波を設計波とした場合、適正な見掛け抗力係数は1.8ぐらいと判断されるが、これも設計上からはより安全ということで2.0をとりたい。従前、設計例として、 $C_M = 2.0$, $C_D = 2.0$, 有義波を条件としている場合を多く見かけるが、これと合致する。

滑動安全率についてみると、いずれの場合もかなり小さい値が算定されている。最大波の場合についても、有義波の場合についても、適正値と判断された C_D 値のときの滑動安全率でも、1を割っているケースが多い。しかし実際には、魚礁が大きく移動している様子もない。海底条件が滑りに対して抵抗が大きくなるよう働き（摩擦だけではなく、凹凸部分が滑り止めになる等）、摩擦係数が0.5以上に作用しているためではないかと思われる。

5. あとがき

以上、実海域データによる魚礁の安定性の考察を試み、設計上必要な抗力係数の値について得られた結果を述べた。この種単体魚礁については、単一最大波を設計波とし、抗力係数としては1.3ぐらいをとるのがよいのではないかと考える。単体魚礁の開発にあたっては、施工精度（クレーンによる据付け精度等）を考えると、波に対する向き、水平に対する傾きなどによる安定性の変化の少ない形状のものを求めるのがよいと考える。

参考文献

- 1) 社団法人全国沿岸漁業振興開発協会：沿岸魚場整備開発事業構造物設計指針，pp. 125~139，1984。
- 2) 出口利祐・中村充監修：水産土木事例と計算法（II），pp. 53~77，日本水産資源保護協会，1980。
- 3) 中村充：水産土木学，pp. 401~441，1979。