

中層浮き魚礁流出時の安全性に関する実験的研究

小 野 正 順*・鷺 澤 栄二郎**

1. はじめに

中層浮き魚礁は、水深 500 m～1500 m の海域の中層域に設置される浮き魚礁である。本研究で対象とした中層浮き魚礁は図-1 に示すような魚礁である。魚礁の形状は外径約 2 m、高さ 7 m の円筒形であり、FRP の蛇籠で作られている。本体上部 3 m の部分は内側にフロートを備えており、浮力を確保している。係留索は上部が 32 mm 径のワイヤー外層ポリアリレートロープで、下部が 42 mm 径のポリエステルロープで係留されている。中層浮き魚礁は、係留索が破断して浮上流出した場合の対策として、流出警報発信機とソナーレフレクターが装備されている。しかしながら、夜間の航行や警報音がエンジン音で聞こえないとか、付着生物により正常に装置が作動しないなど、必ずしも万全な対策とはなっていない。

漁船航行の安全性に関する研究は、久保ら (1990) による入港支援ガイドに関する一連の研究があるが、対象が入港時であるため漁船の速度が比較的遅い場合を想定している。また、防舷材に関する研究も同様であり、漁船が通常航行時に障害物に衝突するような状況を取り扱った研究はほとんど見られない。

従って本研究では、係留索が何らかの原因で破断され、中層浮き魚礁が水面に浮上した場合における漁船航行時の安全性について水理模型実験により検討を行った。

2. 現地の状況

2.1 漁船の状況

本研究で取り扱う中層浮き魚礁の設置予定のいくつかの現地において漁船の形状を調査した。その結果、漁船の形状はほとんどキールのない通常の形状であった。従って、漁船が魚礁に衝突することでキールが魚礁に突き刺さるということはほとんどなく、衝突形態としては船首が魚礁側面に衝突する場合と船首の下側と魚礁上部が衝突する場合が考えられる。また、魚礁との衝突で問題となるのは、対象魚礁と同程度の大きさの 1.5～2 t タイプの漁船 (全長 8～10 m) や 5 t タイプの漁船 (全長

11.86 m) であると考えられる。これ以上の大きさの漁船は、魚礁の方が十分小さいので衝突に関しては特に問題ないと考えた。

2.2 魚礁の状況

魚礁の形状はほぼ決まっており、径が 2 m 高さが 7 m の円筒形である。設置場所の水深によって魚礁本体の形状は変わらないが係留索の長さが異なる。また、係留索が切断される位置と付着生物の状況によって、海面上に浮上したときの魚礁の喫水が決まる。現地において魚礁の喫水は 5.06～6.46 m となり、水面上には 0.54～1.94 m 突出することになる。

3. 航行漁船と浮き魚礁の衝突に関する水理模型実験の概要

3.1 実験水槽と実験模型

実験水槽は、神戸商船大学の長さが 60 m、幅が 6 m、水深は 1.5 m の水槽を使用させて頂いた。水深は 1 m と一定として実験を行った。模型船も神戸商船大学の模型

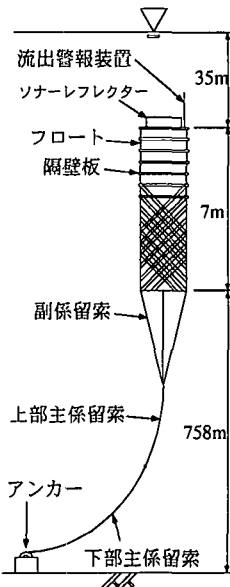


図-1 中層浮き魚礁の設置例

* 正会員 博(工) 高知工業高等専門学校助教授 建設システム工学科
旭化成マリンテック(株)

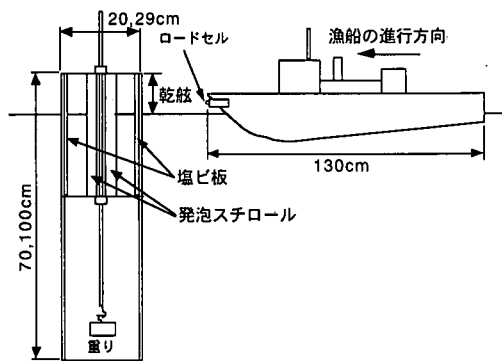


図-2 魚礁模型の断面図と実験状況

船を使用させて頂いた。模型船は図-2に示すように、全長130 cm、幅28 cm、重量は17.2 kgである。5 tタイプの漁船(全長11.86 m)を想定して1/10の実験縮尺とした。重量的には模型船は現地スケールで17.2 tタイプとなり、重量の重い歪みモデルとなっている。また、1.5~2 tタイプの漁船(全長8~10 m)を想定して1/7の実験縮尺を考えた。漁船重量は積載量によっても異なるが、それぞれの漁船の最大積載量は総トン数と同程度である。

中層浮き魚礁の模型は、長さスケールの縮尺 $N=1/7$ 、1/10に対して、図-2に示すように外径と魚礁高さがそれぞれ29 cm, 100 cmと20 cm, 70 cmの2種類の模型を作成した。相似則はフルード則とした。漁船と衝突する時に支配的となる魚礁の剛性は、フロート部に50 cm間隔で入れられている水平方向の隔壁板である。この蓋のパネ定数を有限要素法により算定し、フルード則により縮尺したパネ定数になるようにリング幅と厚みを決定した。リング幅は歪みゲージを貼る関係から7 mmとし、リングの厚さを $N=1/7$ の場合 $t=6.6$ mm、 $N=1/10$ の場合 $t=3.6$ mmとした。上から2段目、3段目のバンドについては、模型船が衝突する幅を考えて20 mmとし、厚みを $t=2.6$ mmとした。フロートは発泡スチロールで作成し、魚礁の中心に集中させた。フロートの空隙の分だけ発泡スチロールの外径が小さくなるので、厚さ3 mmの塩ビ板でフロートの部分を不透過にした。模型魚礁の中心には重量調整の重りを取り付けたり、重心の位置を変化させるためのフックの付いた金棒が通している。実験の状況を図-2に示す。

3.2 実験方法及び実験条件

実験は2種類の実験を行った。1つは漁船と浮き魚礁が衝突する場合の両者の挙動を計測する実験で、もう1つは漁船と浮き魚礁が衝突する場合の衝突力の計測である。

a) 挙動実験

挙動実験は、浮き魚礁に漁船が衝突する状況及びその

後のそれぞれの運動をビデオカメラにより調べた。実験は、魚礁の乾舷や重心位置を変化させて行った。魚礁模型の運動で最も支配的だったロール運動に対する固有振動周期、魚礁上端からの重心位置を含めて魚礁模型の緒元を表-1に示す。実験は表-1における各模型魚礁に対して、船速を1~3 m/sに変化させて5回ないし10回衝突させた。

b) 衝突力実験

衝突力は船首に金具を取り付けその先端に取り付けたロードセル(KYOWA製, LM-50 KA)により測定した。また、浮き魚礁の方にも衝突によって生じる魚礁の歪みから衝突力を測定できるように歪みゲージ(KYOWA製, KFWS-2 N-120-C1-11 L5 M2 R)を取り付けた。両者の計測から測定される衝突力はほとんど一致していた。実験ケースは挙動実験と同様、表-2に示すように魚礁の乾舷と重心位置、船速を変化させた。データのサンプリング周期は100 Hzとした。

4. 漁船と浮き魚礁の衝突時の挙動特性

本実験では魚船の進行方向と魚礁中心が多少ずれていても両者の間で衝突が発生し、衝突せずに漁船は魚礁の横をすり抜けるということにはなかった。また、ほとんど

表-1 挙動実験の魚礁模型の緒元

1/10 模型	乾舷, 重り	重心位置	固有周期 (ロール)
case 1	4.5 cm, 2.2 kg	40 cm	3.2 s
case 2	4.1 cm, 2.2 kg	24 cm	16.3 s
case 3	16.5 cm, 0.5 kg	40 cm	4.6 s
case 4	16.5 cm, 0.5 kg	31 cm	7.9 s
1/7 模型	乾舷, 重り	重心位置	固有周期 (ロール)
case 1	8.0 cm, 6.5 kg	57 cm	3.5 s
case 2	8.0 cm, 6.5 kg	33 cm	14.4 s
case 3	20.0 cm, 3.2 kg	57 cm	3.7 s
case 4	20.0 cm, 3.2 kg	40 cm	15.2 s

表-2 衝突実験の魚礁模型の緒元

1/10 模型	乾舷, 重り	重心位置 (魚礁上端から)
case 1	4.5 cm, 2.2 kg	40 cm
case 2	4.5 cm, 2.2 kg	24 cm
case 3	11.0 cm, 1.3 kg	40 cm
case 4	11.0 cm, 1.3 kg	28 cm
case 5	17.0 cm, 0.5 kg	40 cm
case 6	17.0 cm, 0.5 kg	31 cm
1/7 模型	乾舷, 重り	重心位置 (魚礁上端から)
case 1	8.0 cm, 6.9 kg	57 cm
case 2	8.0 cm, 6.9 kg	40 cm
case 3	11.0 cm, 6.2 kg	57 cm
case 4	11.0 cm, 6.2 kg	42 cm
case 5	20.0 cm, 3.9 kg	57 cm
case 6	20.0 cm, 3.9 kg	33 cm

のケースで漁船が浮き魚礁との衝突により衝突力を受けていた。衝突時の挙動特性の詳細については、紙面の都合上割愛する。

漁船の航行に支障が生じそうなケースは、浮き魚礁の乾舷が小さいため魚礁上部に乗り上げそうになるケースがあった。魚礁は乾舷が小さいために喫水が大きく大部分が水面下に没しているために、上端に水平方向の瞬間的な衝撃力を受けたとしても、付加質量が大きく重心も低いために魚礁自身の移動量は小さく、漁船が魚礁上部に乗り上げてしまう可能性がある。

また、魚礁の重心位置が高くロール運動の固有周期の長い条件では、魚礁が傾いている時間が長いので、他の漁船の航行の障害になる可能性があることがわかった。

5. 漁船と浮き魚礁の衝突力の特性

5.1 航行漁船の安全基準

漁船航行時の安全基準は、FRP 設計便覧 (1984) の高速艇基準に従うこととする。高速艇基準は、計画速長比により適用される船舶が規定されている。本研究で対象とする船舶は、船速 $V=20$ knot (10 m/s)、船長 $L=10$ m の漁船であるため、計画速長比 $V/(L^{0.5})=6.3$ で 4 以上の規定を満たす。高速艇基準によると、波浪による外力について、船首における衝撃加速度を表-3 のように定めている。

この安全基準を用いて、衝突力の実験結果を漁船の安全面から考察する。

5.2 衝突力の発生と時間波形

図-3 は、乾舷が 0.77 m、重心が 3.99 m の浮き魚礁に 1.5~2 t タイプの漁船が衝突する場合に計測された衝突力の時間波形の一例を示す。図より衝突力の緒元としては、衝突力の最大値： F_c と衝突力の作用時間： D_t が考

表-3 船首における衝撃加速度の安全基準

沿海区域を航行する船舶	3 G
限定沿海区域及び平水区域を航行する船舶	2 G
十分に訓練された乗員が体力の限度まで使用する船舶	6 G

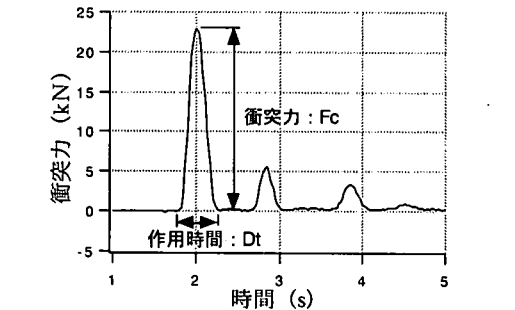


図-3 衝突力の時間波形の一例(乾舷 0.77 m、重心 3.99 m)

表-4 漁船と浮き魚礁の衝突力の作用時間

1.5 t~2.0 t の漁船		
船速 (m/s)	乾舷:1.4 m, 重心:4.0 m	乾舷:1.4 m, 重心:2.8 m
2.7	0.32 s	0.32 s
5.3	0.32 s	0.32 s
8.0	0.32 s	0.40 s
船速 (m/s)	乾舷:0.6 m, 重心:4.0 m	乾舷:0.6 m, 重心:2.3 m
2.7	0.40 s	0.53 s
5.3	0.40 s	0.50 s
8.0	0.40 s	0.32 s

5.0 t の漁船		
船速 (m/s)	乾舷:1.7 m, 重心:4.0 m	乾舷:1.7 m, 重心:3.1 m
3.2	0.32 s	0.35 s
6.3	0.35 s	0.35 s
9.5	0.35 s	0.32 s
船速 (m/s)	乾舷:0.5 m, 重心:4.0 m	乾舷:0.5 m, 重心:2.4 m
3.2	0.38 s	0.44 s
6.3	0.47 s	0.44 s
9.5	0.38 s	0.44 s

えられ、これら 2 つのパラメータが浮き魚礁に作用する力積を定義する。

5.3 衝突力の作用時間の特性

表-4 は、漁船と浮き魚礁の衝突力の作用時間を示す。表より乾舷が小さいケースで 30% 程度大きくなる傾向にあるが、ほとんどのケースでほぼ一定の作用時間となっていることがわかる。

5.4 衝突力の最大値の特性

a) 1.5~2 t タイプの漁船の場合

図-4~6 はそれぞれ 1.5~2 t タイプの漁船が乾舷 0.56 m~1.40 m の浮き魚礁に衝突する場合の漁船速度と衝突力の現地換算した関係を示す。図中の C_g は浮き魚礁の魚礁上端からの重心位置を示す。また、図中には各船速に対する衝突力の最大値を原点を通る直線で示し、漁船に対する衝撃加速度も示している。縦軸の衝突力のスケールが図-4 と他の図と異なることから、乾舷の大きいケースの方が 2~3 倍の衝突力が生じていることがわかる。このケースは浮き魚礁の側面に漁船が正面衝突するケースである。図-5, 6 の乾舷の低いケースはそれぞれ浮き魚礁の上端部と漁船船首先端、浮き魚礁の上端部と漁船船首の下側が衝突する場合で、漁船が魚礁に乗り上げる状態になるために衝突力がそれほど大きくならなかったこと、漁船船首下側の傾いた面が魚礁に衝突するので衝撃力がそれほど大きくならなかったことが考えられる。しかしながら、漁船も船首部分と船首の下側部分で材料強度が異なると考えられるので、衝突力が大きいのは漁船が魚礁の側面に正面衝突するケースであるが、漁船にとっては必ずしもそのケースが危険側であるとは言えない。

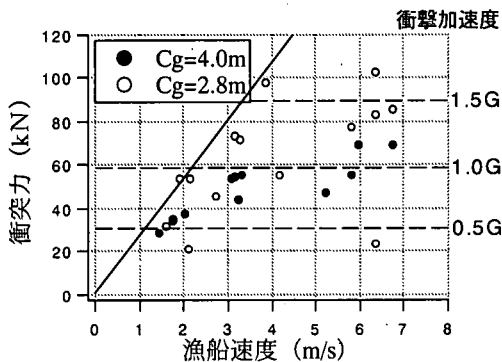


図-4 船速と衝突力の関係 (乾舷 1.40 m)

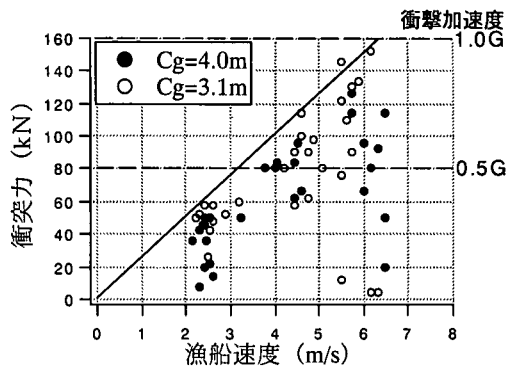


図-7 船速と衝突力の関係 (乾舷 1.70 m)

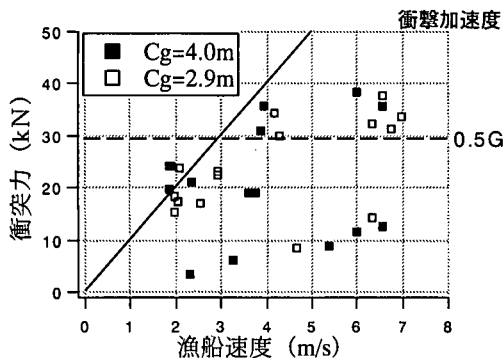


図-5 船速と衝突力の関係 (乾舷 0.77 m)

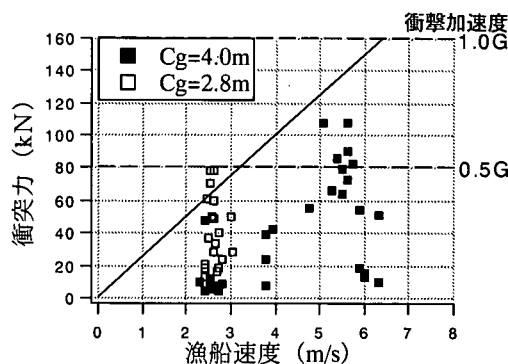


図-8 船速と衝突力の関係 (乾舷 1.10 m)

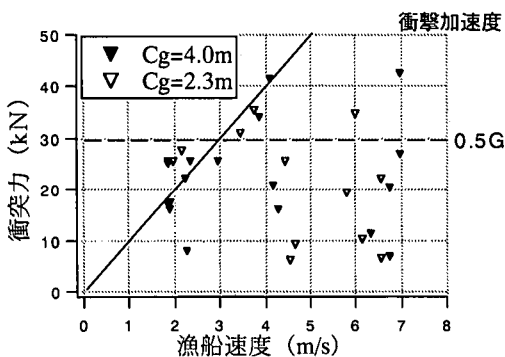


図-6 船速と衝突力の関係 (乾舷 0.56 m)

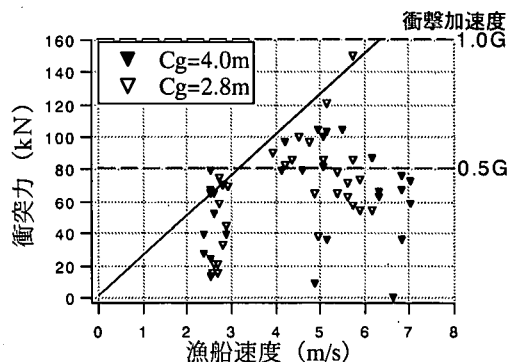


図-9 船速と衝突力の関係 (乾舷 0.45 m)

漁船の速度に着目すると、図-4の魚礁の側面に正面衝突するケースでは速度に比例して衝突力も増大していくことがわかる。図-5の場合も同様に漁船の速度が速くなるに従って衝突力は大きくなっているが、多少頭打ちになっている。これは漁船の速度が上がることで船首の位置が上がるため船首の下側に魚礁が衝突しているためである。この衝突場所が変化することは実験中に目視でも確認している。最も乾舷の低い図-6のケースは漁船が乗り上げるために衝突力が船の速度によってほとんど変化していないことがわかる。重心の位置による衝突力

の差異はほとんど確認できなかった。漁船に作用する衝撃加速度は船速が大きくなるほど増加するが、本実験で行った7 m/sまでの船速の場合、3 G以上の大きな衝撃加速度は作用していないことがわかる。

b) 5 tタイプの漁船の場合

図-7～9はそれぞれ5 tタイプの漁船が乾舷0.45 m～1.70 mの浮き魚礁に衝突する場合の漁船速度と衝突力の現地換算した関係を示す。衝突力の特性は1.5～2 tタイプの漁船の場合と同様の特性を示す。しかしながら、図-7の浮き魚礁の乾舷が大きい場合のように、乾舷が

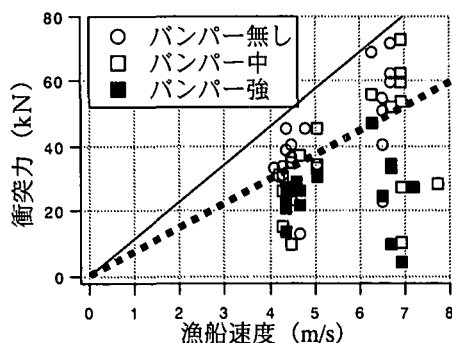


図-10 ダンパーによる衝突力低減効果 (乾舷 1.58 m)

大きいケースで他のケースよりも大きな衝撃力が作用することはなかった。このケースは浮き魚礁に比較すると漁船の方が大きいケースなので、浮き魚礁の衝突時の応答性が乾舷の大小でそれ程変化しなかったためと考えられる。漁船に作用する衝撃加速度は船速に比例して増加するが、本実験で行った 7 m/s までの船速に対して生じる衝撃加速度は 1 G 程度なので、安全に航行できると考えられる。

6. 安全のための対策

挙動実験からは、浮き魚礁の乾舷が小さい場合に漁船が乗り上げる可能性があることがわかった。この対策としては、フロートの上部についても FRP の蛇籠を取り付け、最も乾舷が小さい場合でも漁船が魚礁上部に乗り上げないように、蛇籠の嵩上げを行うことで対応する。

次に、漁船への衝突力の低減を目的として、バンパーの設置について検討を行った。用意したバンパー形状はリング状である。実験室スケールでリング径 34 cm, リング幅 10 mm, 厚みがそれぞれ 2, 3, 4 mm のバンパー弱, 中, 強の 3 種類を用意した。バンパー強のバネ定数は 30.7 N/cm (現地換算で 150 kN/m) である。図-10 は、1.5~2 t タイプの漁船が乾舷 1.58 m の浮き魚礁に衝突するケースについて、バンパーによる衝突力の低減効果を示している。バンパー中は 10% 程度の減少しかみられないが、バンパー強は 40% 程度の減少を生じる。これ以上、バンパーのバネ定数を大きくするとバンパーとの衝突力が問題になってくるので、50% 以上の減少は困難であることがわかった。

7. 結 論

本研究では、浮き魚礁の係留索が何らかの原因で切断

されて水面上に浮上した場合における漁船の航行の安全性と衝突する場合の衝突力について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 漁船の航行に最も危険な衝突形態は、漁船が浮き魚礁に乗り上げるケースである。このケースは、漁船の速度が速く、浮き魚礁の重心が低く、乾舷が小さいケースで生じる。

(2) 漁船が浮き魚礁に衝突する場合、衝突の仕方は大きく分けて浮き魚礁の側面に漁船船首が正面衝突する場合と、浮き魚礁の上端が漁船の側面に衝突する場合の 2 つのケースがある。どちらのケースになるかは浮き魚礁と漁船の乾舷の差に左右される。浮き魚礁の乾舷は、切断される係留索の長さや付着生物の付き方により決まるので、衝突形態がどちらのケースになるかはわからない。

(3) 漁船が浮き魚礁に衝突する場合、衝突力は漁船の速度に比例して大きくなる。しかしながら、浮き魚礁の乾舷が小さい場合は、漁船が魚礁に乗り上げるため、衝突力は漁船の速度の増大に対してそれ程大きくはならない。

(4) 漁船が浮き魚礁に衝突する場合の衝突力は、現地スケールで 6-7 m/s で航行する漁船に対して 120-160 kN (12-16 tf) の大きさである。

(5) 漁船が浮き魚礁に衝突する場合の衝撃加速度は 1-2 G 程度であり、波浪による船首の衝撃加速度よりも小さな衝撃になる。

(6) 漁船の浮き魚礁への乗り上げ防止については、浮き魚礁の蛇籠を嵩上げる事で対処できる。また、浮き魚礁にバンパーを取り付けることで、衝突力を 40% 程度低減させることが可能であることがわかった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり神戸商船大学 久保雅義教授、榊原繁樹助教授には貴重な御意見を賜り、また実験施設、実験装置を借用させて頂きました。神戸商船大学の太塚 仁技術専門職員には本実験を遂行するにあたり御協力頂きました。旭化成工業 (株) の担当者の方々には実験において御助力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 植村益次編 (1984): FRP 設計便覧, 社団法人強化プラスチック技術協会社団法人, pp. 245-246.
- 久保雅義・斎藤勝彦・大音宗昭 (1990): 漁船の入港援助施設に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 728-732.