

(16) 折りたたみ可能な新たなオイルフェンスの初期デザイン

Preliminary Design for a New Type of Folding Oil Fence

楊 燦守*, 朴 漢一**, 沢本正樹***

Chan-Su YANG*, Han-II PARK**, Masaki SAWAMOTO***

ABSTRACT; Spilled oil at sea spreads very rapidly and results in a serious impact on coastal activities. Thus oil spreading should be prevented at earlier stage of oil accidents. In this paper, a new concept of an oil boom, called folding type is introduced. The model is a self-inflatable type and a rhombus shape in its cross section. At each corner, springs are equipped for the oil fence to be self-inflatable at an installation stage. The oil fence has advantages in handling and storage sides compared to conventional oil-fences. The oil fence is believed to keep a stable condition at the sea state of up to 4 or 5 and the magnitude of metacenter height of the oil fence is over 2 m.

In this work, a physical experiment is carried out in a two dimensional wave tank to check the dynamic behaviour of the oil fence for incident waves. The natural frequency of the model is obtained through the experiments. The amplitude ratio between wave and oil fence model is approximately 1.0 and the phase lag between them is nearly 11° . From this preliminary study, it is found that the static and dynamic stabilities of the model are acceptable for practical application.

KEY WORDS; oil spill, oil fence, metacenter height

1. はじめに

近年、海上貨物運送量の増加にともない、油槽船による大規模海洋汚染事故が頻発し、油の流出が周辺沿岸領域の生態系に重大な脅威を与えることがあり、この対策が緊急の課題となっている。例えば、2001年1月25日、油流出事故が生態系の宝庫であるガラパゴス諸島(Galapagos Islands)で起こった。我々の周辺でも近年に、約96,000klのアラビア原油が流出した「シー・プリンス号」座礁(1995年7月23日、韓国)事故があり、日本では島根県隠岐島沖でロシアタンカー「ナホトカ号」(1997年1月2日)と東京湾内において「ダイヤモンドグレース号」(1997年7月2日)による油流出事故が発生した。

油流出事故の際には、油の拡散を防ぐためにオイルフェンスが使われるが、今までのオイルフェンスは海洋環境に適応した設計が為されていないため十分には機能しないことがある。例えば、「シー・プリンス号」は海岸近くで座礁し、オイルフェンスが設置されたにもかかわらず事故後7日で事故現場から50マイル付近まで油が到達し甚大な漁業被害をもたらした。「ナホトカ号」油流出事故に対しては、8,640mの固形式オイルフェンスや、4,700mの充気式オイルフェンスを展開したが、その効果は十分ではなかった。既存オイルフェンスは静かな海面では有効であるが、図1のように設置失敗の可能性が高い。また、大きな収納空間や多くの労力を必要とする問題点がある。そこでこのような問題を解決するために新たなオイルフェンスが必要である。

図2はオイルフェンスにおける油の流出挙動を示す。一般に油(図で黒い部分)は大きく3つの経路でオイルフェンスを通過する^{(1),(2),(3)}。一つは、オイルフェンスを越え、二つ目は海面からオイルフェンスに沿って下がりオイルフェンスの下から移動するものであり、三つ目は直接オイルフェンス下方から流れ出すものであ

* 海洋科学技術センター地球観測フロンティア研究システム(FORS GC, Japan Marine Science and Technology Center)

** 韓国海洋大学校海洋科学大学 (College of Ocean Science and Technology, Korea Maritime University)

*** 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (Civil Eng., Graduate School of Engineering, Tohoku University)

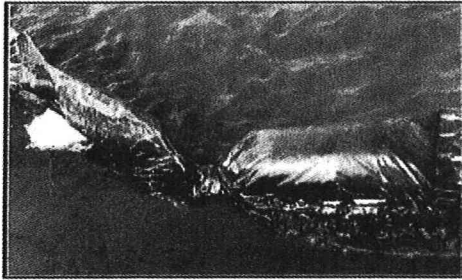


図1 オイルフェンスの設置失敗の例

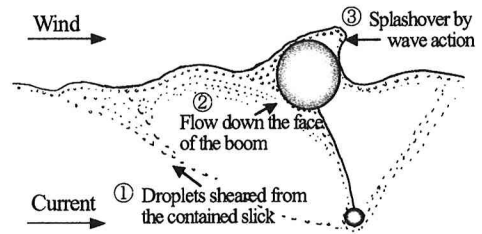


図2 オイルフェンスにおける油の流出挙動

る。そこでオイルフェンスの高さを高く、フェンスが常に海面に対し直角になるようにすればより効率的に油の流出を防ぐことができる^{(1),(4)}。

そこで楊⁽⁶⁾は大型のオイルフェンスの機能を持ち、かつ軽くて自己膨張式であるため労力や保管空間を減少できるオイルフェンスモデルを提案した。このモデルは、固形式、充気式およびフェンス式オイルフェンスのそれぞれのメリットを生かした試験モデルである。本研究では、楊⁽⁶⁾が提案したモデルに対して水が水面下部分に入るように改善し、その新たなオイルフェンスモデルに対して静・動的解析および実験を行ってフェンスの安定性を評価し、新しいオイルフェンス設計の基礎を設けることを目的にする。さらに、実際に沿岸に設置して観察することによって現場での使用可能性を高めることができた。

まず、モデルのディメンションを決めて静的安定性の評価要素の GM 値とオイルフェンスが置かれた環境における外力を計算した。次に上下揺れ及び横揺れについて運動方程式を求めて動的解析を行った。また、理論解析と同じ条件で2次元モデルの実験を実施し、それらの理論解析と実験の結果を比較した。

2. オイルフェンスモデルの概要

図3に示すように、オイルフェンスモデルは3つの部分から成り立っている。それは水面の上の freeboard, 下の skirt, そして floatation 部分である。断面的の形状は高さが幅より大きいダイヤモンド形である。表1にはオイルフェンスモデルの寸法および静的安定性評価要素の結果を示す。このモデルの寸法設定における浮力板の厚さの決定は最後に行われ、モデルの重さと浮力がうまくバランスがとれるように決められた。ここで GM などの計算は楊⁽⁶⁾の方法に従った。

次に図3(a)の単位長さ(1m)モデルを連結してオイルフェンスを実際に作る際に浮力板間隔は一定である必要があるため、最適な浮力板間隔について調べた。そのためオイルフェンスモデルの全長を 20m にし、U 字形など可能なオイルフェンス形状変化を考慮して浮力板間隔を計算した。その結果、一般的にオイルフェンスの形状が 10度変化する時、浮力板間隔は 0.11m を要する。現実的な形状変化として 45 度が最大であると考えられるため、ここでは浮力板間隔を 0.5m とした。

このモデルは現在使われている固形式大型オイルフェンスとほぼ同じ高さであるが、GM 値が約 2.4m であり安定性および運動性が良い。さらに自己重力膨張式なので空気を入れる装備などがいらぬ。全体的に従来のオイルフェンス⁽⁶⁾と比

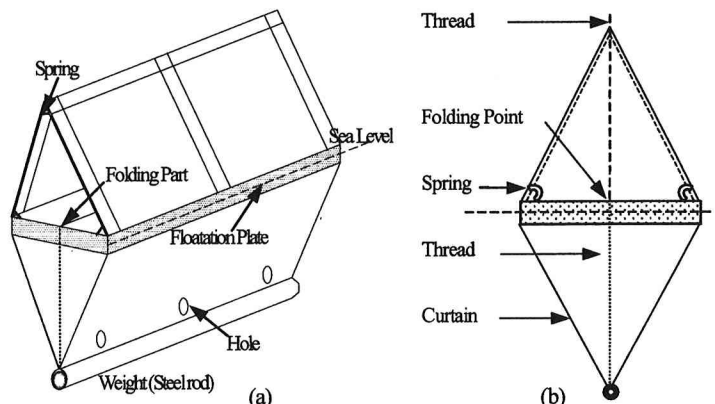


図3 折りたたみ可能なオイルフェンスモデル

べてこのモデルの特徴としては、1)浮力板が水面にあるため安定性が高い、2)回収の時、浮力板が自動的に下向きに折られ、現場設置時も freeboard 部分のスプリングと重力によって自動的に開く、3)設置時、水面下穴には水が入るので skirt 部分の一定形状の維持が可能、4) このモデルのいずれの部分も破壊しても使用不可能とならない、5) 地形に従って skirt 部分の変形ができることと海面のみで浮力が作用することによって浅瀬や砂浜にも設置可能であるため、その使用領域範囲が広いことなどがあげられる。ここで、skirt 部分に水が入るようにしたのは、skirt の下部とオイルフェンスとの相対運動によって油滴がフェンスの下から流されることを防ぐためである。

図3と表1のような試験モデルに作用する流体力としては、風力、海流力、波力の3つの環境荷重を考慮した。一般に(建造物の直径/波長) < 0.2 、(波高/建造物の直径) > 8 である海洋建造物に対する波浪荷重は Morison 式を用いて計算することが多い。建造物の大きさが波長と比べて小さいので慣性力の影響より抗力の影響が大きい。本研究では、水面下全面積とボリューム、そして流体粒子の速度と加速度により2次元モデルにかかる流体力を推定した結果、5.24kN という値が得られた。オイルフェンスがその値以上の流体力に対しても支えられるように、モデル設計の際に素材や縦骨格(図3の Steel rod)を強化した。

海流が 1knot を超えるとその海流に対し直角であるオイルフェンスには図2の①のような現象がおこる ω 。したがって、海流の影響はオイルフェンスの高さとはあまり関係がないので、本研究では波浪によるモデルの動的応答に対して解析を行った。

3. 動的解析

3.1 上下揺れ運動

本研究では入射波を2次元の単純調和波とみなし、海水は非圧縮・非粘性であると仮定した。座標は静水面を基準線にし、モデルの水線、波表面そして水中のある点までをそれぞれ x , y , z ととり、下向きを正とした(図4)。

オイルフェンスに作用する鉛直方向の力はオイルフェンスの重さ(W)、圧力(図4の S)、減衰力(Q)、慣性力(I)である ω 。 $\uparrow \downarrow \Sigma F = ma$ という関係式から水面下任意の点 z (浮力材の底面)に対する運動方程式は次のようになる。

$$W - \rho g A \left(x + \frac{d}{2} - y e^{-k \frac{d}{2}} \right) - b \left(\dot{x} - \dot{y} e^{-k \frac{d}{2}} \right) - m' \left(x - \ddot{y} e^{-k \frac{d}{2}} \right) = m \ddot{x} \quad (1)$$

ここで、 W : オイルフェンスモデルの重さ、 ρ : 海水密度、 g : 重力加速度、 A : 浮力材の底面積、 x : オイルフェンスの鉛直変位、 y : 波の鉛直変位、 d : 浮力材の厚さ、 k : 波数、 b : 線形減衰係数、 m' : 付加質量である。

上式を x と y に対して展開すると(2)式になる。

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + p^2 x = \frac{F_0}{m_v} \cos(\omega t + \sigma) \quad (2)$$

ここで、 $2n = b/m_v$, $p^2 = c/m_v$, $m_v = m + m'$, $c = \rho g a$ (restoring constant), $\sigma = \tan^{-1}(b \omega / (c - m' \omega^2))$, $y = r \cos \omega t$: r は波振幅、 ω は波振動数、 $F_0 = r e^{-k(d/2)} \sqrt{(c - m' \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}$ である。上式の解は、

表1 オイルフェンスモデルの寸法および静的安定性評価

Dimension	Density of floatation plate	478 kg/m ³
	Thickness of floatation plate	0.03 m
	Length of floatation plate	1.00 m
	Width of floatation plate	0.70 m
	Weight of oil fence model	11.50 kg
	Density of curtain	100 kg/m ³
	Density of steel rod	1200 kg/m ³
	Freeboard	0.61 m
	Draft	0.51 m
	Total Height	1.18 m
Stability	KB	0.61 m
	BM (metacentric radius)	2.46 m
	KG	0.63 m
	GM (metacentric height)	2.44 m

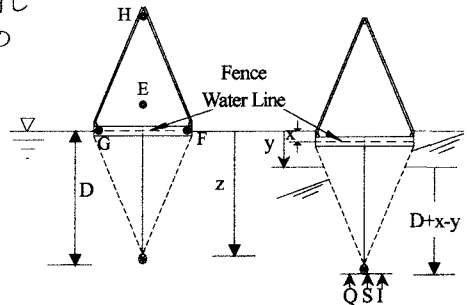


図4 オイルフェンスモデルの運動学概要および実験観測点(◎)

$$x = \frac{F_0 / m_v}{\sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} \cos(\omega t + \phi + \sigma) \quad (3)$$

ただし, $\phi = \tan^{-1}(-2n\omega/(p^2 - \omega^2))$

上下揺れと波との間の位相差は, 波形と波力(exciting force)との間の位相角(σ)と波力とフェンスの上下揺れ反応との間の位相角(ϕ)の和である. 上下揺れ振幅は波振動数(ω)と減衰係数(n)の関数であり, 波振動数がオイルフェンスの固有振動数(p)に近づくと, 上下揺れ振幅は大きくなる. 上下揺れ振幅(x)の波振幅(r)に対する比率, すなわち, response operator は,

$$Y = \frac{x}{r} = \frac{\sqrt{(c - m'\omega^2)^2 + (b\omega)^2}}{m_v \sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} e^{-k\frac{d}{2}} \quad (4)$$

上下揺れの線形減衰係数(b)は, 次の式から繰返し法を用いて計算した⁽⁸⁾.

$$b = \frac{4}{3\pi} \rho C_D A (\dot{x}_{\max}) \quad (5)$$

ここで, C_D は抗力係数である. 他に tuning factor (ω/p)に対する振幅比(Y)を求めて無次元減衰係数曲線から求める方法もある. また, モデルの固有周期は波浪中の動揺実験を実施して求めた(3.3節).

3.2 横揺れ運動

船舶のようにオイルフェンスも横揺れによる転覆危険性が高いので, モデルの横揺れ運動を調べた. 静水面にあるオイルフェンスの片側にトルクを与えると復元モーメントが発生し, 回転運動が始まる. 付加慣性力を含む仮想慣性モーメント $I_v \ddot{\theta}$ は作用トルクと大きさは同じ, 方向は反対であるので次のようになる.

$$I_v \ddot{\theta} + W \overline{GM} \sin \theta = 0 \quad (6)$$

ここに, θ は横揺れ角度である. 微小角度の場合, $\sin \theta \cong \theta$ である. また, 固有振動数は

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{W \overline{GM} / I_v} \quad (7)$$

オイルフェンスが波によって振動すると, 運動方程式は(θ , ξ (wave slope)が小さい時),

$$I_v \ddot{\theta} + W \overline{GM} (\theta - \xi) = 0 \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{W \overline{GM} \theta}{I_v} = \frac{W \overline{GM}}{I_v} \alpha \sin \alpha t \quad (9)$$

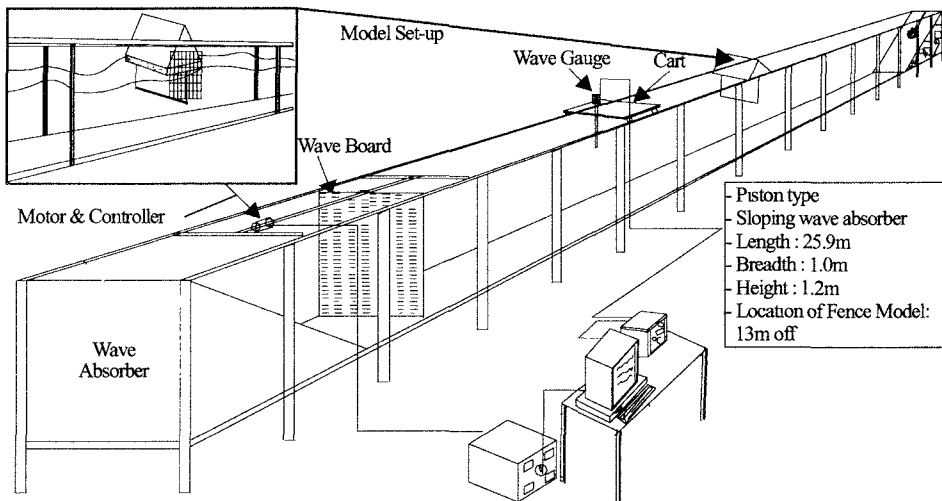


図5 実験装置概要およびオイルフェンスモデルの設置

ここで、 $\alpha = \xi_{\max}$.

横揺れの運動方程式の解は、

$$\theta = \frac{\alpha}{1 - T_0^2/T^2} \left\{ \sin \alpha t - \frac{T_0}{T} \sin \omega_0 t \right\} \quad (10)$$

横揺れの最大角度 θ_{\max} は、

$$\theta_{\max} = \frac{\pi H}{L} \left(\frac{T^2}{T^2 - T_0^2} \right) \quad (11)$$

ここで、 H は波高、 L は波長、 T_0 はオイルフェンスの固有周期、 T は波周期である。

3.3 実験装置および結果

図5は全長25.9m、幅1.0m、高さ1.2mのピストン型波浪発生装置およびオイルフェンスモデルの実験装置を示す。この実験の目的は、本研究のモデルの固有周期を求めることと、モデルの上下揺れおよび横揺れの変位を調べることである。また、オイルフェンスの浮力板とカーテン部分との間の相対運動についても調査した。

一般に、静水中の自由動揺から上下揺れと横揺れの固有周期を求めるが、この実験に用いたモデルの浮力板は浮力が大きいので自由振動実験による固有周期観測が難しい。したがって、波浪中の動揺実験を実施し、波高を一定(15cm)にして波周期を0.7 secから1.8 secまで0.1secずつ変えることによってオイルフェンスモデルの変位を測定した。そこで、一番大きな変位を示す周期をモデルの固有周期とした。

その観測基準点は図4のEからHまでの4点であり、その動きについて調べた。その結果、鉛直変位は1.1secで、水平変位は0.9secで最大となったので、それらをこのモデルの上下揺れおよび横揺れの固有周期とした。

表2にモデルの運動実験で使われた波とモデルの入力値と計算値を示した。表3は、表2の条件で行われた3つの点の変位値を示したものである。鉛直変位は水平変位よりかなり大きかった。また、H点の変位についての軌跡を見ると、その形状は上部より下部が膨らんだ形状をしているのが特徴である。

スカート部分はその形状によって浮力板の動きと非常に異なる運動をすることが分かった。たとえば、スカート部分が中央鉛直カーテンと錘だけの場合(図3(b))、オイルフェンスとスカート部分との間の相対運動によってスカート部分の長さが1/3まで減少した。すなわち、錘の鉛直移動距離は浮力板と比べて非常に長かった。

また、表2に基づいて(3)式と(4)式の上下揺れ計算も行った。表4は上下揺れの解析に使用した計算値とその結果を示す。フェンスから油の流出ともかかわっている波と上下揺れとの間の位相差は0.2rad、すなわち、約11度であるため、油がオイルフェンスを越える確率は低くなると考えられる。上下揺れ振幅(x)の波振幅(X)に対する比率(Y)は約1.01であり、無次元減衰係数は約0.14であった。おおよそ波とモデルの上下揺れの振幅差がないことと振幅比が約1であることから、このオイルフェンスモデルは海況条件にうまく反応してい

表2 モデルの運動実験条件

Depth	0.8 m
Height	0.15 m
Wave length	3.22 m
Wave number	1.95rad/m
Natural frequency of fence	5.71rad/s
Angular frequency of wave	4.19rad/s
Period	1.5 s
Tuning factor	0.73

表3 表2の条件でのモデルの変位実験結果

Marked point	Displacement
point E (vertical)	15.6 cm
point G (vertical)	13.0 cm
point H (horizontal)	4.2 cm
point H (vertical)	15.6 cm

表4 モデルの上下揺れ解析に使用した計算値とその結果

Vertical mass	202.79 kg
Added mass	189.09 kg
Added mass coef.	16.92
Phase angle(σ)	2.26 rad
Phase angle(ϕ)	-2.07 rad
Max. speed(\dot{x}_{\max})	0.76 m/s
Max. amplitude	0.08 m
Response operator	1.01
Critical damping force	2316.7N s/m
Linear damping force	327.8 N s/m

表5 モデルの横揺れ解析に使用した計算値とその結果

Max. Wave Slope (α)	0.13 rad
Virtual Inertial Moment (I_v)	6.70 N·m
Max. Angle of Roll (θ_{\max})	0.23 rad

ることが分かった。

表4の理論解析結果と実験結果(表3)の振幅を比較してみると、7.6cmと7.8cmであり、両者はほぼ一致していることがわかる。

横揺れ運動におけるモデルの固有周期は0.9secであり、振動数は1.1Hzであった。表5で分かるように、オイルフェンスモデルの横揺れ最大角度は約13度、波浪勾配は約7.7度という特性を示した。

また、本研究で使われたオイルフェンスモデルを約5mの長さまで製作して、実際の海(波高約1m)で三日間設置してカメラ観察を行った。その結果、オイルフェンスの元の形状が維持されたのでモデルはかなり良い安定性を持っていると判断される。

4. おわりに

オイルフェンスなどを利用した油汚染防止が重要であることは論を待たないが、既存オイルフェンスでは海洋環境に適応した設計が為されていないので十分に機能していないことが多い。さらに、今までの研究ではオイルフェンスの運動性や設計などの開発面よりもほとんどオイルの動きのみに関心が持たれてきた^{(3),(4)}。そこで、本研究ではオイルフェンスの初期設計が必要なことを記述し、提案された新たなオイルフェンスモデルに対して静的および動的解析を行った。さらに、運動性の実験を通じて次のようなことが明らかになった。

- (1) 折りたたみ可能なオイルフェンスの特徴：水面の浮力板がオイルフェンスの浮力を維持し、浮力板が自動的に下向きに折りたたまれる自己膨張式なので設置時、特別な装備が不用で、かつ少スペースでの貯蔵が可能である。また、スカート部分に水が入るので水面下で安定した形状を保ち、静的安定性のインデックスであるGM値が高い。
- (2) 動的解析の結果、本研究のオイルフェンスは図2に示すような波と風による油の挙動およびskirtの下部からの流出に対して有効であると判断される。
- (3) オイルフェンスは6自由度運動するがその中で重要な要素である上下揺れおよび横揺れの運動方程式の解を求めた。2次元モデルに対して波浪発生装置から実験を通じて得られた上下揺れ(1.1 sec)および横揺れ(0.9 sec)の固有周期を用いて理論解析した。上下揺れの場合、波とモデルの振幅比は1に近く、高い動的安定性を示した。
- (4) 上下揺れの振幅に対する理論解析と実験結果はほぼ一致した。
- (5) オイルフェンスモデルの横揺れ最大角度は約13度であり、波浪勾配は約7.7度であった。

今回は実験室レベルでの研究だったが、今後skirtと浮力板の間の相対運動及び実用モデルについてより正確な理論の解析と実験が必要であると考えられる。

参考文献

- (1) IMO : Manual on Oil Pollution(Section IV; Combating Oil Spills), IMO, pp. 25-47, 1988.
- (2) Canadian Coast Guard : Oil Spill Response field Guide, Canadian Coast Guard, pp. 37-52, 1995.
- (3) Kamata, M. : Oil Slick Behavior in Waves, Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., Rice University, pp. 15-34, 1982.
- (4) Kang, K. H. : Theoretical and Experimental Investigations of Motion and Containment of Contaminated Free Surface Layer, Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., Pohang University of Science and Technology, pp. 11-55, 1996.
- (5) 楊 燦守 : オイルフェンスの静的解析, 海事産業研究所論文集, 第6号, pp. 261-272, 1997. (in Korean)
- (6) Bernard, H. and Jakobson, K. : Effectiveness of Devices for the Control And Cleanup of Oil Spills, The Fourth Annual Offshore Technology Conference, pp. 171-177, 1972.
- (7) Bishop, P. L. : Marine Pollution and Its Control, McGraw-Hill Company, pp. 139-151, 1983.
- (8) Patel, M. H. : Dynamics of Offshore Structures, Butterworths, pp. 127-145, 1989.