

杭式シーバースの波力問題

— 50万トンシーバースに対する模型実験 —

谷 本 勝 利*

1. はじめに

船舶の繋留施設は防波堤等によって波が遮蔽される所に設けられるのが普通であって、波力はそれほど問題でなかった。しかし、近年では波の作用を受ける沖合に繋留施設、すなわちシーバースが建設されるようになり、そうした施設における波力の検討が重要な問題となってきた。

こうしたシーバースにおける波力は設計外力の観点から言えば次の3つに大別される。1) シーバースに直接作用する波力、2) 波浪中着筏時の船舶衝突力、3) 繋留船舶の波浪動揺による衝突力および牽引力。

一般に波力はそれを受ける物体があって初めて具現化する。その効果は構造物の特性によって異なる。そうした特性の中には地盤の支持条件も含まれ、波力問題を真に解明しようとすれば、地盤—構造—波力の三位一体的取扱いが重要なことは言うまでもない。特に杭式ドルフィンのような構造様式ではそうである。

こうしたシーバースにおける波力問題はいまだ十分解明されているとは言えない。筆者らは上述の三位一体的取扱いの観点から、50万 DWT タンカーを対象とした杭式シーバースについて、以下の実験を行なった。

- 1) 非繋留状態を対象とした激浪時の波による実験
- 2) 繋留状態を対象としたうねり性の波による実験

本論文では、こうした実験における模型や波力の現われ方等の種々の特性について述べることにする。これによって、シーバースにおける波力問題の解析や実験に際して留意すべき事項が把握できるであろう。

2. 模型と実験の方法

本実験の場合、波動と地盤を含めた構造物の挙動を同時に扱うものであり、両方の現象を考慮して縮尺の関係を求めなければならない。幾何学的縮尺はひずみなしとして、基本的には次のように各パラメーターの縮尺を求めた。1) 水理的パラメーターはフルード則による。2) ドルフィンおよび船舶の外形状

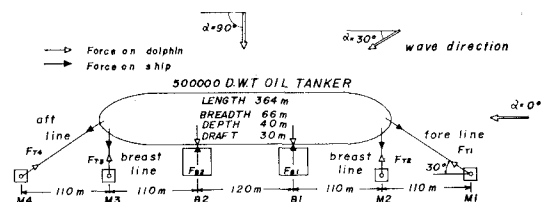
は幾何学的縮尺による。3) ドルフィン変位は幾何学的縮尺に合わせる。4) ドルフィンおよび船舶の固有周期は波の時間縮尺に合わせる。

この場合、時間縮尺 n_t 、ばね定数の縮尺 n_c 、力の縮尺 n_F は、幾何学的縮尺と次の関係にある。

$$n_t = n_l^{0.5}, \quad n_c = n_l^2, \quad n_F = n_l^3$$

今回の実験では $n_l = 1/50$ である。

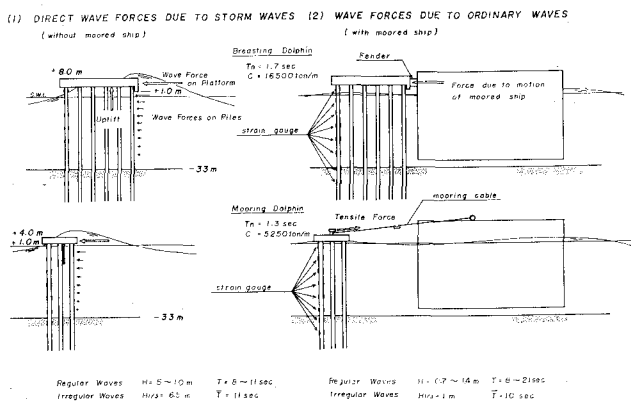
シーバース模型は一部に深さ 1 m の砂地盤槽を設けた 20 m × 30 m × 1 m の平面水槽に設置した。図—1 はドル



図—1 ドルフィンの配置と繋留索の取り方

フィンの配置とタンカー繋留状態を示すものである。測定の対象とする構造物は2基のプレスティング・ドルフィン (B1, B2) と4基のムアリング・ドルフィン (M1, M2, M3, M4) であり、断面形状は図—2 に示してある。

このプレスティング・ドルフィンは現地でばね定数 16 500 t/m、空中固有周期 1.7 sec のものに相当し、直径 1.5 m の杭 36 本と 32 m × 32 m の上部工から成る。ム



図—2 ドルフィンに作用する力

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

アリング・ドルフィンにはばね定数 5250 t/m, 空中固有周期 1.3 sec のもので, 直径 1.71 m の杭 9 本と 16 m × 16 m の上部工から成っている。模型杭はアクリルパイプで製作しており, 十分な根入れを有する。

タンカーは長さ 364 m, 幅 66 m, 深さ 40 m のもので, 水深 33 m, 満載吃水 30 m に対するヒービング, ローリング, ピッチング周期はそれぞれ 23, 22, 30 sec である。

実験では, 図-2 に示したように, 杭に貼付したひずみゲージによりひずみ測定を行なっている。この測定ひずみから, あらかじめ行なった水平載荷試験の関係を用いて等価な上部工に作用する水平力を求めた。繫船状態の牽引力については索の中間に入れた張力計による直接測定も行なっている。

3. ドルフィン特性

ドルフィン杭には種々の高さにゲージを貼付してあるが, 各ゲージのひずみ-荷重の関係, ばね定数, 固有振動周期等を求めるため, 水平載荷試験と振動試験を行なった。

特定位置での杭のひずみ ϵ と水平荷重との関係は, 試験結果でもほぼ直線とみなしうる。これを $P = a\epsilon$ と表わし, 各ゲージに対する係数 a の値を求めた。図-3 は M1 と B2 に対する各ゲージ高での係数の逆数の分布を示したものである。これは単位荷重によるひずみ分布を表わしており, 杭頭および地盤面下付近で絶対値の大きいひずみが認められる。

図-4 は M4 の上部工荷重と上部工変位の履歴曲線を示すものである。地盤の非線型の性質がうかがえるが, 前述のドルフィンばね定数は, こうした試験結果から多少の非線型性にかまわず直線を描いてその勾配をとったものの平均値である。

振動試験においても非線型の性状が認められるが, 平

均的な試験結果を表-1 に一括して示しておいた。

表-1 ドルフィンの振動試験結果

ドルフィン	現地設置固有周期 (sec)		減衰定数 (%)	
	空中	水中	空中	水中
ムアリング	1.3	1.5	9.6	9.7
プレスティング	1.7	1.9	6.8	6.9

4. 非繫船時の激浪による等価上部工全波力

図-5 は水深 33 m, 周期 11 sec, 波高 10 m の場合のプレスティング・ドルフィン杭に生じたひずみ記録である。杭の上端および地盤面下付近で大きなひずみが認められ, すべての記録にドルフィンの固有振動に対応する振動が現われている。

この場合の波の作用状況は, 波が上部工前面に衝突して跳ね上がり, 部分的に上面を洗う状態となる。こうした場合上部工にかなり大きい水平力が作用する。これはやや衝撃的性格を帯びたものであり, かつ波の進行方向のみに断続的に作用するため, 上述の固有振動が現われてくるわけである。またその 1 方向性のためひずみが一方側に大きく生ずることになり, こうした特徴が記録によく現われている。

各ゲージ位置でのピークひずみから, そうしたひずみを生じせしめる等価な上部工に作用する静的水平力を求めることができる。これを等価上部工全波力と呼ぶ。波力は杭および上部工に作用する分布荷重であるため, 原理的には杭の各高さに対し違った等価上部工全波力を得る。しかし実際には, 他の杭に作用する波力の効果は上部工の変位を通じて当該杭に影響するため, ほぼ一定値となる。

図-6 は, ひずみの大きいほぼ杭の上端での測定ひずみから求めたこうした等

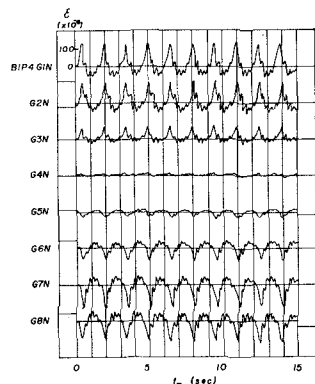


図-5 プレスティング・ドルフィンひずみ記録

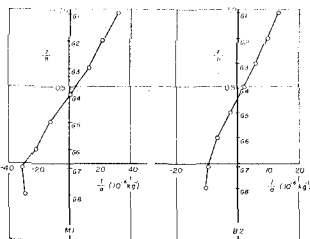


図-3 $P = a\epsilon$ における $1/a$ の分布

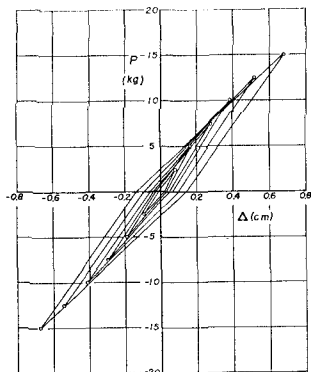


図-4 上部工変位-荷重履歴曲線 (零点修正)

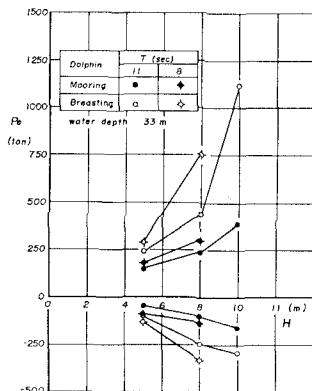


図-6 等価上部工全波力

価上部工全波力を示したものである。正の力は波の進行方向、負の力はその逆方向の力を表わす。これらのケースのうち、波高5mのプレスティング・ドルフィンを除いて波は上部工に作用する。

なお、平均周期 11 sec, 有義波高 6.5 m, 最大波高 9.8 m の不規則波による実験も行なったが、最大等価上部工全波力はほぼ最大波に相当する周期 11 sec, 波高 10 m の規則波による値を越えない。前に行なった簡単な柱状構造物（水深 30 m, 固有周期 3.0 sec の 4 脚柱構造物）の杭に作用する波力のみを対象とした波力応答計算では、有義波高 5 m の不規則波群に対して動的計算による杭頭応力が静的計算によるものの約 2 倍となり、この種の問題の不規則・動的取扱いの重要性を指摘したり。今回の場合は、全波力のうち上部工に作用する波力が大きな比重を占めており、かつ、それが構造物の固有周期よりかなり大きい間隔で断続的に作用するため、動的応答はむしろ単一波に対する過渡現象としてとらえられる。こうした効果は規則波においてもすでに含まれており、不規則波による検討の取扱い方が、杭に作用する波力のみの場合と異なってくることになる。

5. 繫船時のうねりによる船舶の衝突力および牽引力

(1) 繫留索の取り方および特性

繫船状態では、水理的条件のほか防舷材の特性、繫留索の特性、取り方、張り具合（初期張力）等要因が多くなる。本実験では衝突力、牽引力を簡単な形で測定するため、繫留索は前掲図-1 に示したように各ムアリング・ドルフィンに 1 本ずつの索をとり、プレスティング・ドルフィンにはとっていない。満載吃水に対する繫留索の仰角、ドルフィン法線中心側への平面角および索の長さは表-2 のとおりである。

50 万 DWT クラスのタンカーが備えている繫留索の実例では、フォアおよびアフ・ラインとして 85 φ のナイロンロープを 4 本ずつ、プレスト・ラインとして 40 φ の鋼索 8 本、スプリング・ラインとして 40 φ の鋼索 6 本である。

表-2 繫留索の取り方 ($d=30$ m)

ライン	仰角 (°)	平面角 (°)	索長 (m)
プレスト	6	90	56.5
フ・ア, アフト	3	30	116

現地繫留索の特性については Wilson の研究²⁾がある。それによれば公称直径 D の索の単位長当りの空中重量 W , 有効断面積 A , 破断張力 F_{Tu} などが

$$(W, A, F_{Tu}) = (c_a, c_A, c_u) \times D^2$$

で与えられ、鋼索およびナイロンロープに対する係数の平均値と 1 本当りの各計算値は表-3 のようになる。

繫留索の弾性特性

は一般的に図-7 のように与えられる。すなわち新しい索に張力を与えれば σ の応力を生ずる。この時のひずみは ϵ であるが、今張力を除いてもひずみ ϵ_p が残留する。再び前と同じ張力を与えれば

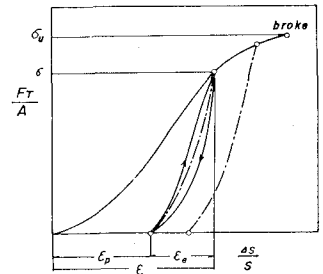


図-7 繫留索の一般弾性特性

ば最初の状態となり、図のように履歴曲線を描く。この履歴曲線の形は、どのレベルでも大体同じとなる。したがって、すでにかかなり大きい張力を受けた繫留索では、図中の 1 点鎖線のような弾性特性を示すと考えてもよい。これは直線でないので一定の弾性係数では表わせないが、破断応力の 50 % 付近の応力を中心とした局所的弾性係数を用いて 4 本の索全長のばね定数を求めれば表-4 のとおりとなる。

これから繫留索はかなり伸びやすいものであることがわかる。特にナイロンロープのフォア、アフ・ラインの場合には、波力に対する船舶拘束力としてはほとんど期待できないであろう。

今回の実験では、模型繫留索として 1.6 φ の鉄線を用いている。これら張力計と合わせた合成ばね定数は内側ムアリング・ドルフィンに対して 8.7×10^4 t/m, 外側に対して 4.4×10^4 t/m となり、かなり固い。実情に合した

表-3 現地繫留索の諸特性

索の種類	c_a (t/m/m ²)	c_A	c_u (t/m ²)	D (m)	W (t/m)	A (m ²)	F_{Tu} (t)
鋼索	3.69	0.405	4.9×10^4	4×10^{-2}	5.9×10^{-3}	6.48×10^{-4}	78.4
ナイロンロープ	0.67	0.630	1.6×10^4	8.5×10^{-2}	4.8×10^{-3}	45.5×10^{-4}	116

表-4 現地繫留索の合成特性

索の諸元	E_{50} (t/m ²)	C (t/mm)	F_{Tu} (t)	W (t)
鋼索 40 φ×56.5 m×4 本	9.70×10^6	444	314	1.3
ナイロン 85 φ×116 m×4 本	2.37×10^6	37	464	2.2

めさらに 300 t/m のばねを入れた実験も実施している。

本論文では主としてプレスティング・ドルフィンへの衝突力について述べ、とりあえず固い繫留索による実験結果を示す。牽引力については、拘束度の高い繫留状態での値であるから当然大きなものとなっている。

繫留索の張り具合、すなわち初期張力の与え方は、すべての索について一様とする場合にはそれほど影響がない。しかし不均一な場合、特に斜め入射波に対して牽引力はかなり違ったものとなる。

(2) 防舷材の効果

防舷材模型としてはコイルばねと空気ばねの2種を製作し、プレスティング・ドルフィン1基に対し、空気ばね防舷材2個 (AF 2)、コイルばね防舷材2個 (CF 2)、コイルばね防舷材1個 (CF 1) を取り付けた場合の3種を検討した。防舷材なし (NF) および現地防舷材として H 型防舷材を用いた場合も合わせて、ドルフィン・防舷材の合成特性曲線を示せば 図-8 のようになる。ここに E は合成吸収エネルギーである。現地防舷材に対しては衝突力 1000 t 付近では CF 2、2500 t 付近では CF 1 が近い。

図-9, 10 は、水深 33 m、波向き 90° 、周期 11 sec、波高 1.4 m、吃水 30 m の場合のプレスティング・ドル

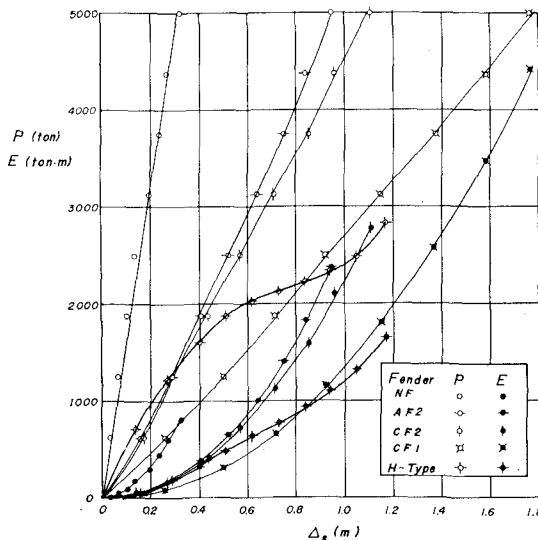


図-8 ドルフィン・防舷材合成特性

フィン衝突力および内側ムアリング・ドルフィン牽引力を示したものである。ここに横軸は、合成性能における変位・荷重の関係を直線とみなした合成ばね定数で表わしている。衝突力は防舷材の柔らかいものほど小さくなるのに対し、牽引力はほとんど影響されないことが認められる。

(3) 波向き等の影響

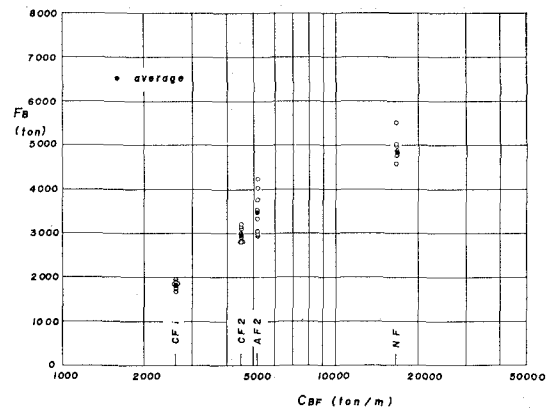


図-9 プレスティング・ドルフィンへの船舶衝突力

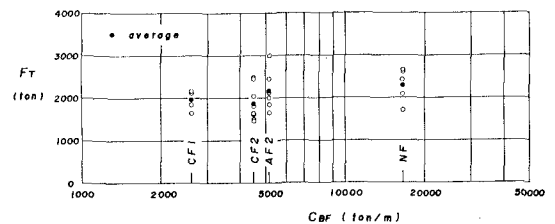


図-10 内側ムアリング・ドルフィン牽引力

図-11 はプレスティング・ドルフィン衝突力について、各波向き、各周期の実験結果の平均値を示したものである。いずれも防舷材形式は、CF 1、吃水 30 m の場合のものである。波向き 90° の場合が最も大きく、 0° の場合が最も小さい。周期別では 15 sec、21 sec が 8 sec、11 sec より大きい。

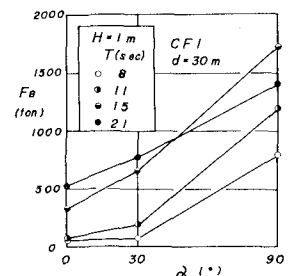


図-11 プレスティング・ドルフィンに作用する衝突力

牽引力については結果は示していないが、初期張力の不均衡がかなり値に影響する。

波高については、実験の範囲 ($H=0.5 \sim 2.5$ m) では衝突力、牽引力ともほぼ波高に比例する。吃水を 20 m とすれば、30 m の場合の約 7 割程度となる。

(4) 記録波形の一例

図-12 は不規則波による実験での張力計記録およびドルフィン杭のひずみ記録を示したものである。実験条件は通過波の有義波高 1.0 m、平均周期 10 sec、波向き 90° 、水深 33 m、吃水 30 m、防舷材形式 CF 1 である。記録のうち張力計によるもの (F_{T3} , F_{T4}) は同時記録であるが、他は別々に測定したものである。初期張力が小さい場合には図に見られるように、記録は片振れとな

る。

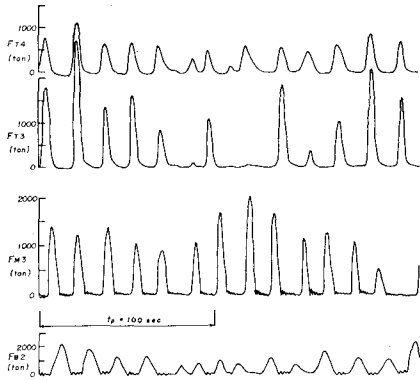


図-12 不規則波による測定記録

なお、ここに言う通過波の有義波高 1.0 m とは船体模型を置かない場合の波高である。実験時には船体からの反射波が造波板に達し再反射されて船体に作用する。したがって、この状態で作用している波は通過波とは異なる。規則波による実験ではこうした造波板からの再反射波の影響を考慮した合成入射波の概念で実験結果を処理している。不規則波に対してはとりあえず通過波高で示した。

6. 矩形断面浮体動揺理論による解析

矩形浮体の断面的取扱いによる動揺解析は井島ら³⁾の厳密理論、伊藤ら⁴⁾の近似理論を用いて可能である。ここでは後者を用いて波向 90° の場合の繫船状態を対象とした計算例を示す。

図-13 は矩形断面浮体のモデルを示したものである。実際の船体拘束は波の進行方向動揺に対してはプレスティング・ドルフィンへの衝突、逆方向に対してはムアリング・ドルフィン

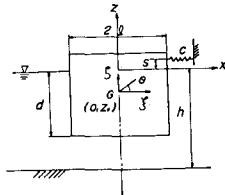


図-13 矩形断面浮体モデル

による牽引であり、作用位置やばね定数など異なるが、計算では平均的な値を用いた。単位長当りの計算を行っており、計算上の諸数値は以下のとおりである。

$$l = 33 \text{ m}, d = 30 \text{ m}, h = 33 \text{ m}, z_0 = -10 \text{ m}, s = 5 \text{ m}$$

$$I = 87\,500 \text{ t} \cdot \text{sec}^2 \text{ m} / \text{m}, C = 27 \text{ t/m}$$

図-14 に実験結果と合わせて計算結果を示す。横軸は自由浮体の計算ローリング周期 20.3 sec に対する波の周期の比で示してある。点線は固定浮体に作用する水平波力、実線はばね拘束浮体の拘束力である。このように拘

束力は固定浮体水平波力よりかなり小さくなり、ローリング周期より大きいところで零となる周期が現われる。

実験結果は船体を矩形浮体とした等価船長 330 m の単位長当りの値を示したものであるが、計算結果はこれによく合っている。

現地の非対称、非線型的特性を考慮した計算では時系列的解析が必要であり、数値波動解析法の応用⁵⁾として検討中である。

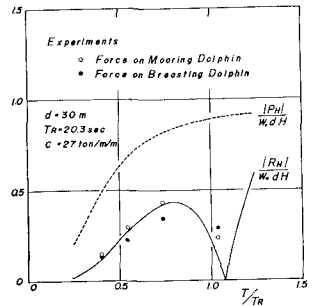


図-14 ばね繫留浮体拘束力

7. 結 語

以上、50 万 DWT タンカー杭式シーバースに対する繫船時、非繫船時の総合的模型実験および若干の解析による特性をとりまとめた。

特に繫船状態については要因も多く、また実験手法的には造波板からの再反射波の影響等さらに検討を要する問題も含まれている。設計に直接資する数値的データについては、今後要因ごとの検討も加えて別の機会に報告することにしたい。

なお、本論文における実験は建設局の要請に応じ運輸省港湾技術研究所の防波堤研究室、模型試験課、海洋構造研究室が行なったものである。矩形浮体動揺近似理論のプログラミングは小舟浩治が担当した。

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行・谷本勝利・小舟浩治：柱状構造物の波力応答計算，第19回海岸工学講演会論文集，1972。同名の詳細な報告は港湾技術研究所報告，第11巻第3号，1972にある。
- 2) Wilson, B. W.: Elastic characteristics of moorings, Bretschneider 編 Topics in ocean engineering, Vol. 1. 1969.
- 3) 井島武士・田淵幹修・湯村やす：有限水深の波による矩形断面浮体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第206号，1972。
- 4) 伊藤喜行・千葉 繁：浮防波堤の水理に関する近似理論と応用，港湾技術研究所報告，第11巻第2号，1972。
- 5) 伊藤喜行：浮防波堤の水理，昭和47年度港湾技術研究所講演会講演概要，1972。