

一点係留ブイバースに働く波浪中の 係留力に関する模型実験

高山 知司*・鈴木 康正**・永井 紀彦***・蜂須賀和吉****

1. は し が き

一点係留ブイバースとは、図-1 に示すような沖合につくられた大型タンカーの係留施設であり、大水深海域では建設費が比較的安いと数多くの国で建設されており、我国においてもすでに多くの一点係留ブイバースが稼働している。しかし、すでに実績があるとはいえ、今までに建設された一点係留ブイバースは湾内の比較的静穏な海域のものがほとんどであり、外洋に面した自然条件のきびしい海域に建設された例は非常に数少ない。したがって、今後、波浪条件のきびしいところに一点係留ブイバースを建設するためには、ブイと海底アンカーを結ぶ係留チェーンや、タンカーとブイを結ぶ係船ロープに働く係留力を、十分に検討しておく必要がある。

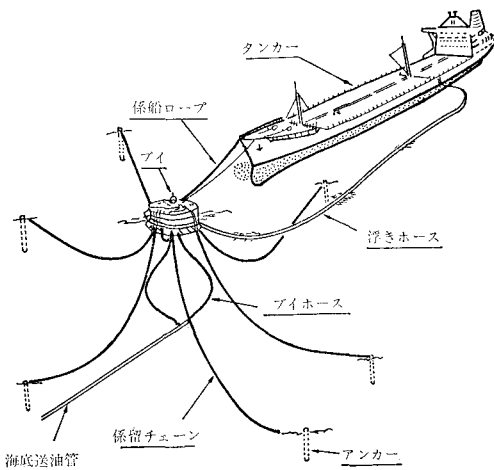


図-1 一点係留ブイバース概略図

係留力を検討する方法としては、数値シミュレーションによる方法と水理模型実験による方法とがある。現状では、数値シミュレーションによる方法は、ある程度の設計外力を推定するためには有効であるが、詳細な検

討をおこなうためには水理模型実験に頼らざるを得ない。

本報告は、一点係留ブイの設計外力を算定するためにおこなった水理模型実験について述べたものである。

2. 実験条件と内容

検討対象としたブイは、30万D.W.T.のタンカーを係留する一点係留ブイで、表-1に示すように水深45mの地点に設置される。本ブイバースでは波高が3.0m以上になるとタンカーはブイから離脱すると考え、係船時の設計波高は3.0mとなる。一方、ブイ本体にはその地点で発生する最大の波が来襲することになるため、非係船時の設計波高は7.0mと想定された。そして、本実験では、係船時および非係船時のそれぞれの設計波高に対して2種類の周期を与えて、これを設計波とした。また、係船時における係船ロープの長さの影響を調べるため、係船ロープの全長が80mの場合と50mの場合について検討した。

実験は、運輸省港湾技術研究所大型水工実験場内の長

表-1 実験条件

項目	現 地	模 型
設置水深	45 m	60 cm
潮 位	+2.1 m	+2.8 cm
非係船時 設計波	$H_{1/3}=7\text{ m}, T_{1/3}=14\text{ s}$	$H_{1/3}=9.3\text{ cm}, T_{1/3}=1.6\text{ s}$
	$H_{1/3}=7\text{ m}, T_{1/3}=9\text{ s}$	$H_{1/3}=9.3\text{ cm}, T_{1/3}=1.0\text{ s}$
係 船 時 設計波	$H_{1/3}=3\text{ m}, T_{1/3}=14\text{ s}$	$H_{1/3}=4.0\text{ cm}, T_{1/3}=1.6\text{ s}$
	$H_{1/3}=3\text{ m}, T_{1/3}=9\text{ s}$	$H_{1/3}=4.0\text{ cm}, T_{1/3}=1.0\text{ s}$
対象船舶	300 000 D.W.T.	0.71 D.W.T.
	全 長 315 m	全 長 4.2 m
	喫 水 19.7 m	喫 水 26 cm
	直 径 -15 m	直 径 20 cm
	高 さ 5.1 m	高 さ 6.8 cm
ブ イ	重 量 270 t	重 量 640 g
	水中重量 300 kg/m	水中重量 53.4 g/m
係 留 チェーン	8 本	8 本
	全 長 80 m	全 長 107 cm
係 船 ロープ	全 長 50 m	全 長 67 cm

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波力解析主任研究官

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

**** 正会員 運輸省第一港湾建設局秋田港工事事務所

さ 30m, 幅 5m の水路でおこなわれた。造波機は幅 5m のピストン型を用い, 規則波と不規則波を作用させた。模型縮尺は表-1 のように縦横とも 1/75 とし, 実験水深は満潮時の 47.1m (62.8cm) と一定にした。

実験内容としては, 静的実験, ブイ固定実験, 非係船時のブイの動揺実験, 係船時の船舶とブイの動揺実験をおこなった。静的実験では, ブイを水平および鉛直に静的に変位させたときの係留チェーン張力を測定した。ブイ固定実験では, 非係船状態でブイを固定し, 波浪中の係留チェーン張力を測定した。非係船時の動揺実験では波浪中のブイの運動と係留チェーン張力を測定した。係船時の動揺実験では, 波浪中の船舶の運動, 係留チェーンおよび係船ロープの張力を測定した。波高は容量式波高計で, 張力は超小型荷重変換器で測定した。非係船時のブイの運動は, ブイの中央に豆電球をつけ, 水路全体を暗幕でおおい, XY アナライザーで豆電球の光を追跡し測定した。係船時の船舶の運動は, 水路の上から写真撮影をして解析した。

3. 静的変位に対する反力と係留チェーンの張力

(1) 水平変位に対する反力とチェーン張力

図-2 は, ブイを波の進行方向に水平に静的変位させたときの, 反力 F_x と, もっとも大きい張力のかかる沖側チェーンのブイとの結合部で測定した張力 T を示したものである。図中の黒丸は反力, 白丸はチェーン張力の測定値をそれぞれ示している。また, 図中の実線および点線は, それぞれカテナリー理論(懸垂線理論)によって計算した, 反力およびチェーン張力である²⁾。この図によって, 静的な水平変位によって生ずる反力やチェーン張力は, カテナリー理論によく一致していることがわかる。

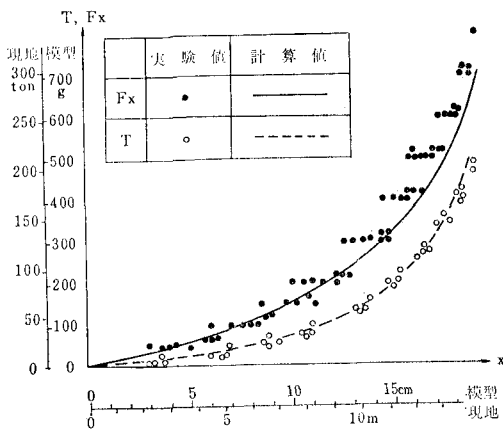


図-2 岸側水平変位 x に対応した反力 F_x と沖側チェーン張力 T

チェーン張力は, 水平力を作用させない状態を基準とした。実際には, 外力を加えない状態でも, チェーン自身の重量のためチェーンには張力が働いている。この初期張力を, やはりカテナリー理論から計算すると, 29t (68g) となる。したがって, チェーンに働く張力は, 図中の値にこの初期張力を加えたものと考えることができる。

(2) 鉛直変位に対するチェーン張力

図-3 は, 水位を変化させて静的にブイを上下させたときの, 鉛直変位とチェーン張力の測定結果を示したものである。●○×は, それぞれ異なった方向に張られたチェーンのブイとの取り付け部分における張力である。図中の実線は, カテナリー理論から求めた計算値である。図-2 と同様に, チェーン張力は変位を与える前を基準としている。

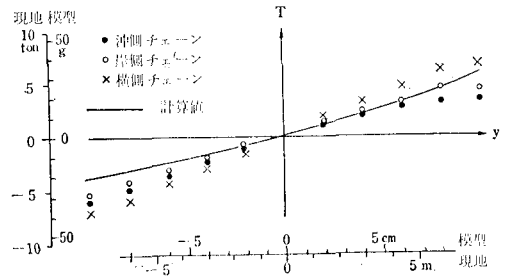


図-3 鉛直変位 y に対応した各チェーン張力 T

チェーンは対称に張られているので, 鉛直変位に対する張力の増減はすべてのチェーンで等しくなければならないが, 図-3 からわかるように, 3本のチェーンが示した張力の値は若干異なる値となった。ここで張力の測定に用いた張力計は, 1kg F.S. のものであるので, 精度が 1% としても 10g の誤差を含むことになる。したがって, 計算値と各チェーンの張力の差をとってみると, 最大で 20g 程度の差であり, 測定精度を考慮すると差はさらに小さくなることや, 鉛直変位によって生じるチェーン張力は, 前述した水平変位によるものと比較して小さいことを考えると, 鉛直変位によって生ずる張力も, カテナリー理論でほぼ見つめることができると考えられる。

4. 非係船時の係留チェーンの張力

(1) 規則波中の係留チェーン張力

図-4 は, 規則波中における係留チェーン張力を示したものである。横軸には, ブイの直径 D を波長 L で除し無次元化した周期の値と, 実際に作用させた波の周期の値とを両方示している。縦軸には, 係留チェーンに生ずる張力の極大値から極小値を減じた値である張力変動

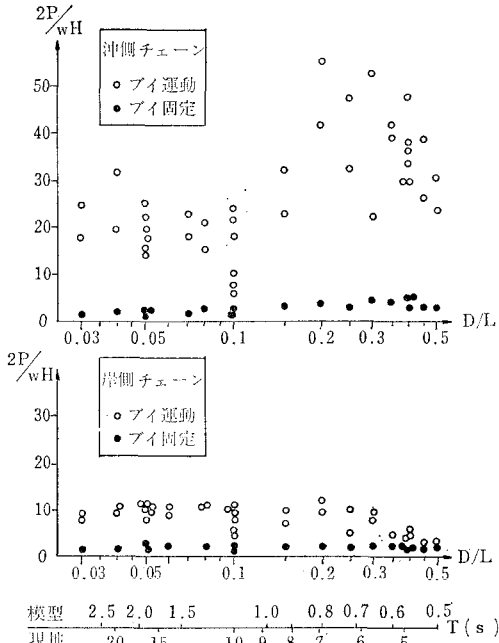


図-4 非係船時チェーン張力

の両振幅 $2P$ を、単位長さ当りのチェーンの水中重量 w と波高 H で除し、無次元化したチェーン張力の値を示している。上の図は、波の来襲する方向に張りだされている沖側チェーンの張力を示し、下の図は波の進行方向に張りだされている岸側チェーンの張力を示している。図中の黒丸は、パイを固定したときの実験結果であり、白丸はパイの運動を許したときの実験結果である。

沖側チェーン、岸側チェーンとも測定値に大きなばらつきがあり、あまりはっきり傾向はあらわれていない。しかし、両者に共通している点として、パイの運動を拘束したときとしないときとは、張力に大きな差があらわれていることがあげられる。沖側チェーンの場合、パイの運動を許したときの $2P/wH$ の値は $5 \sim 60$ の間に分布しているのに対し、パイを固定したときは $0.5 \sim 4$ の間に分布しており、運動を許したときの $1/10$ 程度の値になっている。岸側チェーンでも、やはり、パイを固定したときは、パイの運動を許したときの $1/5 \sim 1/10$ 程度の値となっている。すなわち、係留チェーンに発生する波浪中の張力は、主としてパイの運動のために生ずると考えられる。

パイの運動を許した場合、沖側チェーンにあらわれる張力変動は、岸側チェーンよりもかなり大きい値を示している。これは、パイが波浪漂流力による定常外力で岸側に変位した状態で運動しているためにおこるもので、図-2 からわかるように、岸側に変位した状態でパイが運動すると、沖側チェーンには大きな張力変動がおきる³⁾。

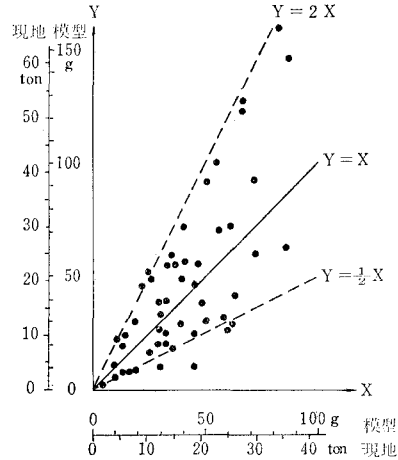


図-5 パイの極大变位から計算したチェーン張力 X と実測値 Y

図-5 は、パイの極大变位とチェーン張力の極大値との関連を求めたものである。XY アナライザーでパイの運動を測定した結果、パイがもっとも岸側へ変位したとき、パイはもっとも上に持ちあげられていた。そこで、パイの水平および鉛直極大变位がおきた状態における沖側チェーンの張力を、静的カテナリー理論から計算した値を、図-5 の横軸 X にとり、実測の沖側チェーン張力の極大値 Y を縦軸にとった。ここでも、チェーン張力は、波を作用させない初期の状態を基準としている。

X と Y とは、傾向的には一致しているが、 $Y=X$ の線を中心として、データは $Y=\frac{1}{2}X$ から $Y=2X$ の範囲に大きくばらついて分布している。すなわち、波浪中の係留チェーンに発生する張力の極大値は、パイの極大变位から静的カテナリー理論で求めた張力とオーダー的には一致するが、 $50 \sim 100\%$ 程度のばらつきをもつ。このばらつきの原因としては、チェーン自身の運動による慣性力や、パイの回転運動などが考えられるが、今後の研究課題として残される問題となるであろう。

(2) 設計相当不規則波中の係留チェーン張力

表-2 は、非係船時の設計相当波を作用させたときの、沖側チェーン張力を示したものである。チェーン張力としては、実測値および変位からカテナリー理論で計算した値のそれぞれについて、最大値と $1/3$ 最大値を求めた。これからわかるように、非係船時における係留チェーンに生ずる張力は最大でも $86.9t$ であり、チェーンの破断強度が約 $1000t$ であることを考えると、破断強度の 10% 以下の値である。もっとも、この実験は、波浪のみを外力として与えたものであるため、風や潮流によって生ずる力に関しては、今後の検討が必要だと思われる。

張力の実測値と、変位から計算した張力とを比較する

表-2 非係船時の設計相当波中における沖側チェーン張力

波 浪	$H_{1/3}=6.5\text{ m (8.6 cm)}$ $T_{1/3}=14.7\text{ s (1.7 s)}$	$H_{1/3}=7.3\text{ m (9.7 cm)}$ $T_{1/3}=10.0\text{ s (1.15 s)}$
項目		
実測最大チェーン張力	51.2 t (122 g)	86.9 t (207 g)
最大変位より求めた最大チェーン張力	34.6 t (82 g)	36.1 t (86 g)
実測 1/3 最大チェーン張力	17.6 t (42 g)	22.7 t (54 g)
1/3 最大変位より求めた 1/3 最大チェーン張力	22.7 t (54 g)	17.6 t (42 g)

と、どちらの波でも最大値では実測値の方がかなり大きくなっているが、1/3 最大値では 20% 程度の差はあるものの、実測値と計算値とが比較的良好に一致している。これは 図-5 によく対応しており、張力の実測値と計算値とは平均的にはよく一致しているが、個々の値は 50~100% 程度のばらつきをもつ。実測最大値が計算から求めた最大値よりかなり大きくなっているのは、慣性力やブイの回転のためであろう。

5. 係船時の係船ロープと係留チェーンの張力

(1) 係留船舶の運動

図-6 は、係留中の船舶の運動を写真解析して求めたものである。横軸には時間を示し、縦軸には、それぞれ、波向方向の変位 X、波向直角方向の変位 Y、XY 平面の回転角 θ をとった。X は岸方向を正とし、X の零

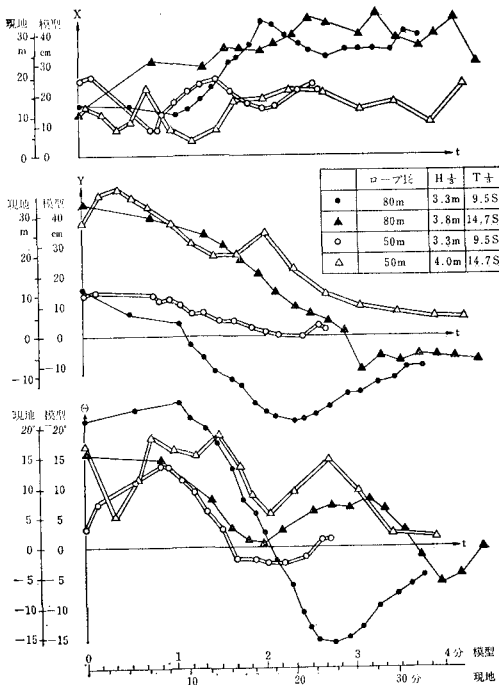


図-6 船舶の運動

点は便宜上定めたものであり特に意味はない。Y は波の進行方向に向かって右側を正とし、ブイの静止位置を基準とした。 θ は水路を上から見たときの時計まわりを正とし、波の進行方向を基準とした。

実験は、係船ロープの長さが 80 m と 50 m の場合それぞれについて、2 通りの周期の設計相当不規則波を作らせ、4 ケースについておこなわれた。

図-6 からわかるように、船舶は波の周期の数十倍の時間的スケールできわめて複雑な動揺をおこなう。このようなゆっくりした船舶の運動をスロードリフトオシレーションと呼んでいる。なお、図中にはあらわれていないが、目視観測によると一波一波の波による動揺は小さかった。ここで注意しなければならない点は、この実験は幅 5 m の水路でおこなったことである。水路幅が十分になく水路側壁に消波工を設けていなかったため、船舶で反射された波が側壁で再反射され、船舶の運動に影響を与えた可能性がある。しかし、本実験のデータからは、水路側面における再反射の影響を定量的に把握することはできなかった。

(2) 係船ロープと係留チェーンの張力

図-7 は、係船ロープと係留チェーンに働く張力の測定結果の一例であり、係船ロープの長さが 50 m、波の周期が 14.7 秒の場合の結果である。横軸には時間を示し、縦軸には張力を示している。

係船ロープの張力を見ると、船舶のスロードリフトオシレーションに対応した、波の周期に比して長い時間変動で働く力と、一波一波の波によるブイの船舶の運動のために生ずる衝撃的な力が見られる。しかし、本実験で用いた係船ロープは、現地のもものとバネ定数が相似になっておらず、かなりかたいバネになっているため、現地でもこのような衝撃的な力が発生すると結論づけることはできない。

ここで示した係留チェーンの張力とは、沖側チェーンの張力のことである。係留チェーンに働く張力は、係船ロープに張力が働くのに対応して発生している。ただし、係留チェーンにあらわれる張力には、一波一波の波による衝撃的なものは少ない。

表-3 は、それぞれの実験ケースごとにあらわれた、

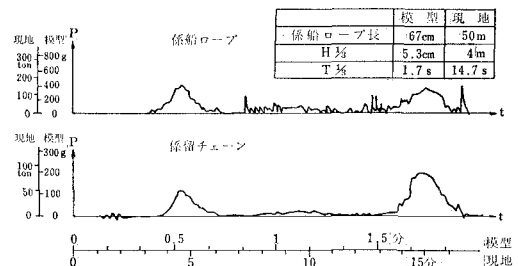


図-7 係船ロープと係留チェーンに働く張力の一例

表-3 係船時の設計相当波中における係船ロープと沖側チェーン最大張力

係船ロープ長 波浪	50 m (67 cm)		80 m (107 cm)	
$H_{1/3}=3.3\text{ m}$ (4.4 cm) $T_{1/3}=9.5\text{ s}$ (1.1 s)	係船ロープ	77 t (180 g)	係船ロープ	87 t (210 g)
	沖側チェーン	33 t (80 g)	沖側チェーン	69 t (160 g)
$H_{1/3}=4.0\text{ m}$ (5.3 cm) $T_{1/3}=14.7\text{ s}$ (1.7 s)	係船ロープ	161 t (381 g)	係船ロープ	116 t (280 g)
	沖側チェーン	86 t (200 g)	沖側チェーン	88 t (210 g)

係船ロープと沖側係留チェーンの最大張力を示している。これより、どのケースにおいても、係留チェーンに作用する張力の最大値は、係船ロープに作用する張力の最大値より小さくなっていることがわかる。係留チェーンは8本あり、他の方向に張られているチェーンもブイに働く力の一部を受けもつことを考えれば、これは当然のことであろう。

4 ケースの中で、係船ロープに働く最大張力は 161 t であり、係船ロープの破断強度約 600 t の 1/4 程度の値であった。また、係留チェーンに働く最大張力は 88 t であり、破断強度約 1000 t の 1/10 以下であった。したがって、今回の実験からは、係船ロープや係留チェーンの破断強度に近い大きな張力は検出されなかった。しかし、前述したように、本実験では風や潮流の影響を考えていないことには、注意しなければならない。

6. 結 論

本実験で得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 静的実験で求められた水平および鉛直方向の、変位、反力、チェーン張力の関係は、カテナリー理論から計算された結果に比較的良好に一致した。

(2) ブイ固定時の波浪中の係留チェーン張力は、ブイの動揺を許したときの 1/10 程度の値であった。これは、係留チェーンに生ずる張力は主としてブイの運動のために生ずることを意味している。

(3) ブイの運動変位の極大値からカテナリー理論で

計算されるチェーン張力と、実測チェーン張力とは、傾向的には一致したが、50~100% のばらつきを示した。これはチェーン自身の運動による慣性力のためとも、ブイの回転のためとも考えられるが、今後の課題として残される問題であろう。

(4) 係船中の船舶は、波の周期の数十倍の時間スケールで複雑なスロードリフトオシレーションを示した。一波一波の波による船舶の動揺は小さかった。運動はきわめて複雑であったが、これには水路側面からの反射波も影響していると考えられる。

(5) 係船中の係船ロープに作用する張力は、船舶のスロードリフトオシレーションに対応するものと、一波一波の波による衝撃的なものとが検出された。しかし、係船ロープのバネ定数が現地と相似でないため、現地でもこのような力が発生するとは結論づけられない。係留チェーンにあらわれた衝撃的な力は小さかった。

(6) 係船時、非係船時を通じて、係留チェーンや係船ロープには破断強度に近い大きな張力は検出されなかった。しかし、本実験では波浪のみを考慮したため、風や潮流の影響についてはさらに検討が必要であろう。

7. あとがき

一点係留ブイバースに働く波浪中の係留力に関する模型実験は、昭和 52 年度と 53 年度に港湾技術研究所波浪研究室で実施した。54 年度以後は、風の影響も加え実験を継続する予定である。

本実験の実施にあたっては、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所の多大なる御協力をいただいたので、ここに感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本海洋開発産業協会：石油の海洋備蓄システムの技術検討に関する調査、一点係留ブイとブイ付きホースの波浪中における挙動に関する実験報告書、1976、3。
- 2) 運輸省・通商産業省：海洋開発技術ハンドブック、朝倉書店、pp. 830~840、1975。
- 3) 2) の pp. 334~337。