

# 多点係留ブイバースにおける水工学的諸問題とその対策

高山知司\*・平石哲也\*・関田欣治\*\*・鳥居正志\*\*\*

## 1. まえがき

岩手県久慈港に建設された国家石油備蓄基地の原油受け払い施設として、基地の沖合い2 km の水深24 m の地点に、10万トンクラスの大型タンカー用の多点係留ブイバースが建設された。多点係留ブイバースはタンカーなどの大型船を複数のカテナリー係船ブイで係留するもので、むつ小川原、福井石油備蓄基地における船首単点係留ブイバース（高山ら、1985、1988）の場合と異なり、船舶の水平運動が小さくなることが特徴である。一方、風に対する受圧面積が小さくなるように船体が移動するのを拘束するため、一般に係留張力が大きくなる。したがって、外洋に面し、大きな風速が作用することが予想される石油備蓄基地用の係船バースにおいては、従来、一点係留方式が採用されてきた。しかし、久慈港では津波防波堤が計画されており、係留水域が堤内に限定され、広い水域が確保できない、さらに、係留システムの設置予定地の周辺に浅瀬が多く大きな水平運動を許容することができないために多点係留システムが採用された。

タンカーが係留できる条件は大型タンカー係船用の技術基準（日本港湾協会、1989）により決まっており、波高および風速はそれぞれ1.5 m および20 m/sである。タンカーが離標するまでには波高および風速が若干増大することはあるが、波高が数 m を越えるような暴風時の条件は、タンカー係船時の外力として考える必要はない。しかし、係船ブイは常時係留されているので、暴風時の耐波安定性に対する検討もしておかなければならない。また、久慈港が位置する三陸海岸は過去何度も大きな津波災害に見舞われており、津波に対する安全性も検討しておかなければならない。したがって、久慈港多点係留ブイバースの設計にあたっては以下の2点について諸問題の検討が必要であった。(1) 暴風時および津波作用時におけるブイ単体の挙動とブイ係留張力の特性、(2) タンカー係船時における船体運動と係留張力の特性。本研

究では、模型実験によって上記の2課題を検討し、問題が生じた場合には工学的な対策を提案することを目的とした。また、多点係留された船舶の動揺と係留張力を求める数値計算法を開発し、検証することを目的とした。

## 2. 実験条件と実験方法

### (1) ブイバースの概要

図-1は、多点係留ブイバースにおけるタンカーとブイおよび係船索の配置を模式的に示したものである。タンカーは船首を西側に向けて、6組の係船ブイで係留される。外力となる風・波の作用方向を定義するために、ここでは、船首側すなわち西方向から作用する場合を0°とし、時計回りを正の角度とした。図に矢印で示す外力方向の場合には、225°に相当する。船舶の係留点は、右舷および左舷にそれぞれ3カ所になり、船舶と係船ブイの間は、1カ所につき径70 mm のナイロン製ホーサー3本で繋がれており、右舷のホーサーラインを船尾から1S、2S、3Sとし、左舷側を船尾から1P、2P、3Pとする。実験では3本のナイロンロープを1本のモデルホーサーで代表させる。モデルホーサーは、伸びのない釣糸の先端に数個の伸び率が異なるコイルバネを取り付けたもので、バネの種類を調整して、実物の3本のナイロンホーサーを合わせた場合の伸び率に相似するように製作した（平石・本城、1991）。

図-2は係船ブイの構造を示す。ブイは、直径5.3 m、

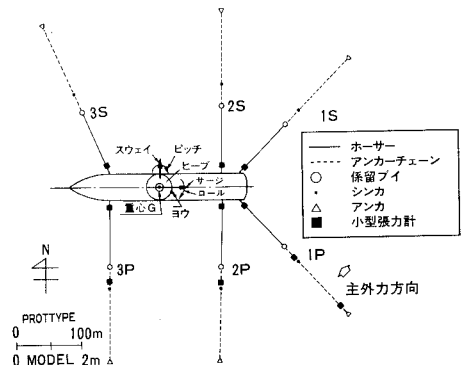


図-1 多点係留ブイバースにおける装置の配置

\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部  
 \*\* 正会員 工博 新日本製鉄(株) 鉄鋼海洋事業部海洋・鋼構造エンジニアリング部  
 \*\*\* 新日本製鉄(株) 鉄鋼海洋事業部海洋・鋼構造エンジニアリング部

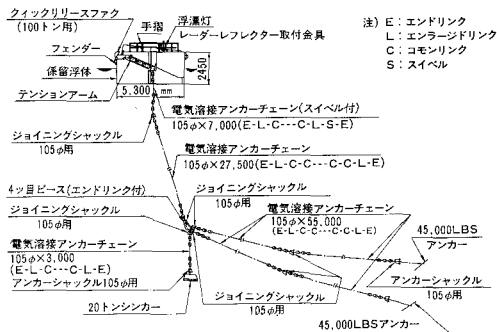


図-2 係船ブイの構造

高さ 2.45 m、重さ 20 tf の円筒型 CALM (Catenary Anchor Leg Mooring) ブイである。ブイは、呼径 105 mm、長さ 35.4 m の鉄鋼製電気溶接チェーン(ブイ係留チェーン)で、4 つ目ピースを介して、海底の 20 ton シンカーおよびアンカーチェーンに係留されている。アンカーチェーンの長さは 55.0 m で重量 10 数トンのアンカーにつながっている。ブイ係留チェーンに作用する張力は主にシンカー重量によって吸収し、アンカーチェーンは海底面との摩擦によってシンカーの水平移動を防ぐ役割をする。ブイバースの潮位を考慮した平均設置水深は 24.05 m であり、実験はすべて同一水深で行った。

(2) 実験条件

実験はすべて縮尺 1/50 で、次の 3 種類の実験を行った。①タンカー非係船時の係船ブイの耐波安定性を、不規則波を外力として、2次元長水路で調べる。②タンカー非係船時に津波が来襲する場合を想定し、津波時のブイ係留張力およびシンカーの移動状況を、流れ発生装置を有する平面水槽で調べる。③タンカー係船時において、波と風が作用した場合の係船張力とタンカーの運動を、変動風が発生できる送風機を有する不規則波造波水槽で検討する。

a) ブイの耐波安定実験

運輸省第二港湾建設局が久慈港港湾計画策定時に実施した沖波波浪推算結果をもとに、久慈港における 100 年確率波を設定し、エネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算法(高山ら, 1991)を用いてブイバース周辺の波高を求めた。その結果、ブイバース地点の有義波高  $H_{1/3}$  は 8~9 m、有義波周期  $T_{1/3}$  は 14~18 s となった。そこで、不規則波造波水路において、 $H_{1/3}=7\sim 9$  m、 $T_{1/3}=14\sim 18$  s で Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを有する波を作用させた。図-3 は、ブイ耐波実験における模型を示す。ブイ係留チェーンは、単位長さ当たりの重量が実機と相似するようなアクセサリチェーンを用いた。シンカーと 4 つ目ピースを結ぶチェーンも同一のものを用いた。アンカーチェーンは実機で 2 本用いられて

いるが、ほぼ同一の方向へ張られているので、模型では 1 本のチェーンで代表させるものとした。ブイと反対側のチェーンの先端はアンカー部として模型水槽上に固定した。シンカーは重量の相似する釣り用の重りを用いた。ブイ係留チェーンの上端(A)および下端(B)、さらに、アンカーチェーンのブイ側(A)およびアンカー側(B)に小型張力計を取り付け、チェーンに作用する張力を測定した。図-4 は、実験水路におけるブイの配置を示したもので、水路の幅および長さはそれぞれ 1.5 および 40 m である。ブイ模型は水路中央に設置し、設置点より消波ビーチ側へ 2 m 離れた点に波高計を設置し波を計測した。図に示すように、アンカー点が波向に対してシンカー位置より前側にあるか後側にあるかによって係留条件が異なる。図の(A)のようにアンカーがシンカーより造波板側にある場合を“前側係留”、(B)のようにアンカーがシンカーより沖側にある場合を“後側係留”とした。また、シンカーの動きを調べるためにガラス製の水槽側壁を通して、実験中のシンカーの移動状況をビデオで撮影した。

b) 津波実験

岩手県が実施した久慈湾における津波計算によると、歴史津波の中で最大級の 1896 年明治三陸津波の場合には、地震発生 105 分後にブイバース建設点の津波流速が最大となり、その値は 3.26 m/s である。そこで、実験では津波流速を 3~4 m/s とし、前側および後側係留について実験を行った。実験では、流れ発生装置を有する長さ 50 m、幅 20 m の平面水槽中央部にアンカーおよびシンカーを設置し、一様流が作用した場合の、ブイ係留チェーンに作用する張力測定と、ビデオによるシンカー位置の記録を行った。シンカー設置水深は 48.1 cm (実機

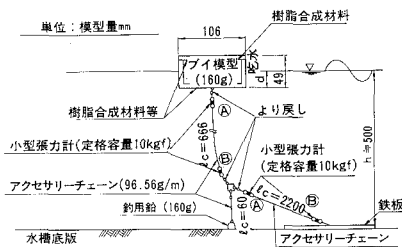


図-3 ブイと係留部の模型(単位: mm)

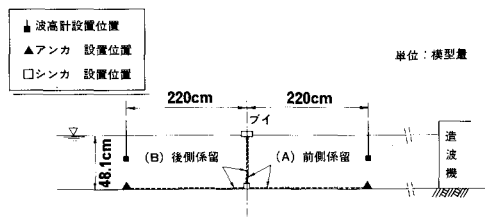


図-4 水路におけるブイ模型の配置

24.05 m) である。

c) タンカー係留実験

久慈港における波と風の状況については、1987年4月から2年間、現地観測が行われている(地下設備設計共同企業体, 1988, 1989)。それによると、波向はEおよびESEが卓越しており、タンカー係船実験でも波向を180°および225°とした。前述の基準(日本港湾協会, 1989)によると、タンカー着標時の波高は1.5m以下であるが、着標中に波高が増大することを考慮して、実験では有義波高を1.5~3.0mとした。係留張力は長周期の波が作用した場合に大きくなるので、有義波周期は8~14sとした。また、着標可能限界風速は15m/s、荷役可能限界風速は20m/sであるので、天候が急変する場合も考慮して、実験では風速が15~25m/sとなる定常風を作用させた。また、風の変動性により係留張力が増大する可能性もあるので、15~20m/sのDavenport型スペクトル(清宮, 1980)を有する変動風を作用させた。風向は、波向と同様に180~225°とした。実験における計測器の配置は前出の図-1に示すとおりで、6本のホーサー張力、1P~3Pの3本のブイ係留チェーン張力、1Pのアンカーチェーン張力を測定した。実験水槽は、当所の大水深多方向造波水槽(平石・本城, 1991)で、本実験では、単一方向不規則波のみを造波した。送風機は径1mのファンを8台並べた可動式のものである。

3. 実験結果と考察

(1) ブイの耐波安定実験

図-5は前側係留の場合に、 $H_{1/3}=9\text{ m}$ ,  $T_{1/3}=18\text{ s}$ の不規則が作用した場合のブイ係留チェーン張力の時間変化を示す。ブイチェーン張力は、図に示されるように衝撃的に作用し、チェーンが弛緩している場合にはほとんど張力が作用しない。アンカーチェーン張力とブイチェーン張力を比較すると、前側係留の場合には、両者にはほぼ同一の張力が作用し、その最大値は54tf(529,200N)であった。一方、一つのアンカーの水中重量 $W_A$ は15tfであり、砂質土の場合は、把駐力 $T_A$ は $3 \times W_A$ として計算できる(運輸省港湾技術研究所設計基準部, 1965)ので、一組のブイに関しては把駐力は90tf(882,000N)となる。したがって、最大張力に対してブイを固定できないという現象は生じない。後側係留の場合には、ブイチェーン張力は、前側係留とほぼ同一であったが、アンカーチェーン張力は小さく5tf(49000N)程度であった。したがって、アンカーチェーンが伸びきることはない。しかし、後側係留の場合には、シンカーが浮き上がったときに水平方向へ移動する現象が生じた。シンカー位置が移動してしまうとブイの設置位置が変化し、多点係留の場合には、計画点にタンカーが係留できない問題が生

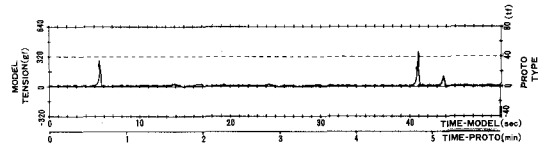


図-5 ブイ係留張力の時間変動波形

じる。したがって、波向に対して前側係留となるようにブイおよびアンカーを設置した方がよい。

前側係留の場合にも、衝撃的に張力が作用した場合には、シンカーが飛び上がるような現象が生じた。衝撃張力は、チェーンの破断荷重より小さい場合でも、ブイチェーン接続部やシャックル等に破断を生じ、ブイを流出させることもある(平石ら, 1993)。また、ブイの安定性のためにはシンカーの飛び上がり避けるべきである。そこで、衝撃張力を吸収するような弾性体を係留ラインの中に組み込んで衝撃的な張力の低減を図った。弾性体として、本実験では弾性チェーンを用いる手法を検討した。これは、チェーン環とチェーン環の間にゴムを充填し、チェーン全体をゴム材でコーティングしたものでラバーチェーンと呼ばれている。ここでは、ブイ係留チェーンのブイ側の10mをラバーチェーンで置き換えた。模型ではラバーチェーンの伸び率を相似できるコイルパネをブイとチェーンの中間に挿入してラバーチェーンの伸びを代表させた。

図-6は、ラバーチェーンを採用した場合と採用しない場合について、最大チェーン張力とシンカーの動きを比較したものである。周期16s以下の場合には、ラバーチェーンのない場合とある場合で大きな変化はみられない。周期が18sになると、ラバーチェーンのない場合には、48~59tf(470,400~578,200N)の最大張力が作用しているが、ラバーチェーンを用いると、23~38tf(225,

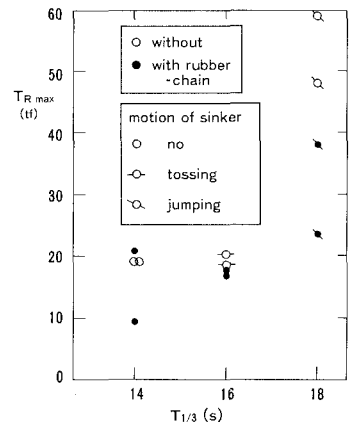


図-6 モデル弾性体による張力低減効果

400~372,400 N) に張力は減少している。弾性体がない場合には、周期 16 s のときに、シンカーが上方へ移動しかける状態が確認できたが、弾性体を挿入すると、シンカーの移動は生じなかった。しかし、周期 18 s の場合にはラバーチェーンが 10 m 程度では、シンカーの飛び上がり現象が防止できないことがわかった。したがって、より安全な係留のためには、ラバーチェーンで置き換える部分を大きくすることが必要であると思われる。

(2) 津波実験

津波を作用させた場合には、後側および前側係留の両者において、最大張力は小さく、流速 4.0 m/s の場合でも 11 tf (107,800 N) であった。衝撃的な張力の発生も見られず、設計においては、津波による外力よりも異常波浪による外力を考慮すべきであることがわかる。図-7 は、後側係留の場合に、津波によるブイの移動状況を示したものである。津波の場合は引き波と押し波が生じるので、後側と前側の両方の係留状態が生じる。前側係留の場合には、シンカーおよびアンカーの移動はなかったが、後側係留の状態になると、シンカーが滑動し、流速

が 4 m/s の場合には、初期位置に比較して、流れの下手側へ 50 m 移動した。したがって、津波が来襲した場合には、ブイが切断される危険性は無いが、シンカー位置が大きく移動してしまうので、係船ブイの再設置が必要である。

(3) タンカー係留実験と運動計算法

図-8 は、時化時条件における各係留ラインの張力波形を示す。風および波は 1P 方向より作用しており、1S~3S の係留ラインには張力が発生しておらず、図では 1P~3P ラインのみの張力を示している。係留ラインの張力は、周期数分で変動する長周期変動成分と、波とほぼ同様の周期で変動する短周期変動成分に分けられる(高山ら, 1985)。長周期変動成分は、風の長周期変動成分と波漂流力による船体の水平運動によって励起され、短周期変動成分は主に波と風の短周期変動成分によって励起される。図に示されるように、ナイロンホーサーのような弾性の大きい係船索を用いた場合には、短周期変動成分は、長周期変動成分に比べて小さく、張力の最大値はほとんど長周期成分の最大値で決められる。係船索張力に対して、短周期の変動外力はほとんど影響を与えない(平石・本城, 1991)。そこで、係留されたタンカーの運動と係留張力の計算法として、長周期変動および短周期変動成分を別個に計算し、結果を重ね合わせる近似計算法(Hiraishi et al., 1993)を採用した。すなわち、6自由度の運動方程式を長周期変動および短周期変動外力に対して解いて、それぞれの計算に対して変位  $\Delta x_1$  および  $\Delta x_2$  をもとめる。合成変位  $\Delta x_1 + \Delta x_2$  から、各係留ライン張力が計算でき、次の時間ステップの計算を行う。以上の計算を繰り返すと、船体変位と係留ライン張力を時間領域で求めることができる。計算においては、減衰係数を適切に設定する必要がある。短周期運動の減衰係

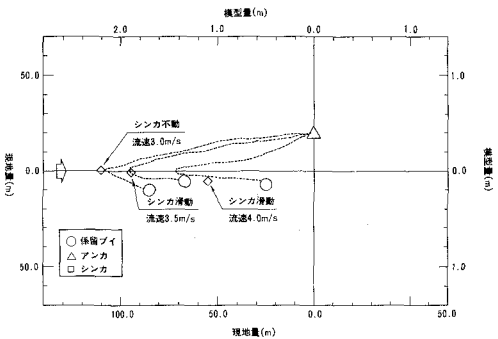


図-7 津波によるブイシンカーの移動

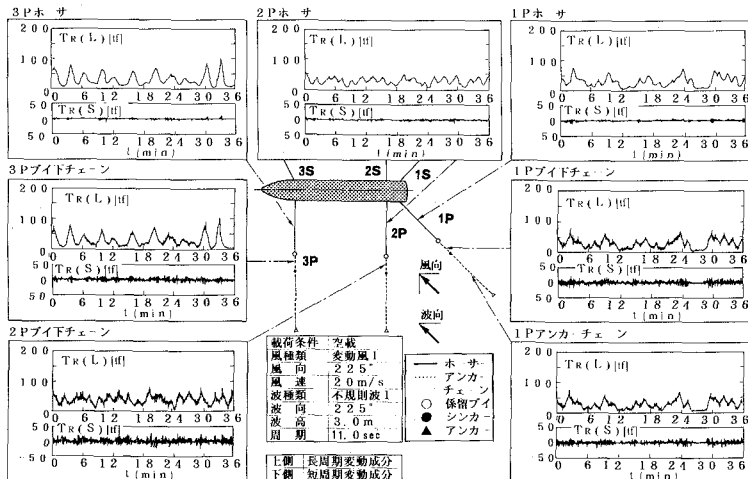


図-8 時化時における係留ライン張力の時間波形

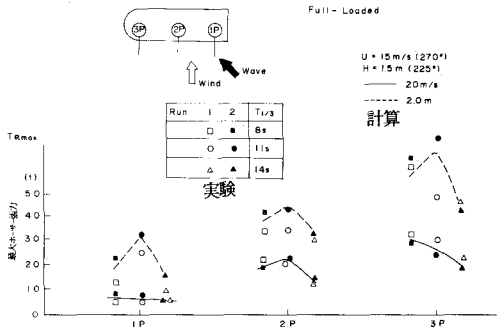


図-9 最大係留張力における実験値と計算値の比較

数は理論解 (Faltinsen・Michlson, 1974) を用い、長周期運動の自由振動減衰係数は実験から求めた。

図-9は、係留ラインに作用する最大張力に関する実験値と計算値の比較を示す。図中の実線は、風速  $U=15$  m/s および波高  $H_{1/3}=1.5$  m における計算結果を示す。破線は  $U=20$  m/s および  $H_{1/3}=2.0$  m における計算値を示す。四角、丸および三角の記号はそれぞれ計算と同一条件下における  $T_{1/3}=8, 11, 14$  s の実験結果を示す。タンカーの荷荷状態は満載である。図に示されるように、実験値と計算値はよく一致し、本近似計算法において、係留ラインに作用する張力を推定でき、設計に用いることができることがわかる。なお、1P ホーサー張力に比較すると、3P ホーサー張力は数倍程度大きく、全係留ラインに等しく張力が作用するわけでない。したがって、風抗力と波漂流力を合わせた合力を係留ラインの数で除しても、作用張力を求めることはできない。

図-10は、サージ方向の変位について計算結果と実験結果を比較したものである。棒グラフが実験値を示し、グラフの下端、中央、上端がそれぞれ水平変位の最小値、平均値および最大値に相当する。計算値は、3本の折れ線グラフで示し、下段、中段および上段がそれぞれ最小値、平均値、最大値に相当する。ただし、 $x$  軸の正方向を船尾方向に取っているため、最小値の場合に変位の絶対値は最も大きくなる。横軸の  $H_s$  は有義波高である。図に示されるように、最大値については、実験値と計算値はよく一致するが、最小値は、実験値の方が少し小さくなる。すなわち、実験値の方が、変位の絶対値が若干大きくなり、危険側の値を示している。実験値と計算値の相違は、減衰係数の評価法などに問題があるためと思われる。本事業においては、計算値を参考にしながら、実験結果によって現地における移動変位量を検討している。

4. あとがき

久慈港多点係留ブイパースの設計上の問題点を検討し

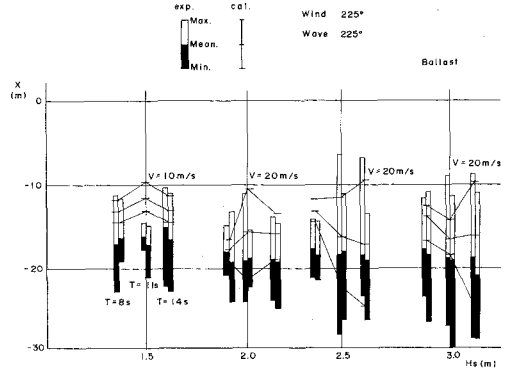


図-10 船体変位における計算値と実験値の比較

た結果、①大波高時の係船ブイの安全性を高めるためには、ラバーチェーンのような弾性体を係留チェーンとして用いることが有効である。②津波来襲時には、ブイシンカーの再設置が必要となる。③係留されたタンカー変位および係船索張力は、長周期と短周期変動成分を別個に計算する手法によって推定できること、を明らかにした。

参考文献

運輸省港湾技術研究所設計基準部 (1965): 係船浮漂に関する設計基準と標準設計, 56 p.  
 清宮 理 (1980): 海上風の性質とそれによる矩形浮体の動揺解析, 港研報告, Vol. 19, No. 2, pp. 115-167.  
 高山知司・平石哲也・古川正美・佐尾邦久・立野信一郎 (1985): 一点係留ブイと係船索張力に関する現地観測, 港湾技研資料, No. 542, 38 p.  
 高山知司・平石哲也・佐尾邦久 (1988): 荒天時における SALM 型ブイの運動と係留張力の特性, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 307-312.  
 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, Vol. 30, No. 1, pp. 21-67.  
 地下備設備設計共同企業体 (1988): 気象海象業務観測報告書 (久慈基地).  
 地下備設備設計共同企業体 (1989): 気象海象業務観測報告書 (久慈基地-その2).  
 日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説.  
 平石哲也・本城 智 (1991): 避泊フェリーの係留張力と振れり運動に関する検討, 港研報告, Vol. 30, No. 2, pp. 3-41.  
 平石哲也・富田康大・松森孝弘 (1993): 衝撃張力低減型ブイの開発に関する模型実験, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 271-276.  
 Faltinsen, O. and F. C. Michlson (1974): Motions of large structures in waves at zero Froude numbers, Proc. the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp. 99-114.  
 Hiraishi, T., T. Takayama, K. Sekita and T. Torii (1993): Experimental and numerical study on tanker mooring tension and motion in a multi-buoy berth, 3rd, ISOPE, pp. 414-419.