

上下揺れ・縦揺れ低減を目指した 新形式係留方式の開発

ATTEMPTS AT DEVELOPING NEW MOORING SYSTEM
REDUCING HEAVING AND PITCHING MOTION

島崎克教¹・白石悟²・飯島一博²

Katsunori SHIMAZAKI, Satoru SHIRAISHI and Kazuhiro IJIMA

¹正会員 工修 NKK エンジニアリング研究所 (〒514-0393 三重県津市雲出鋼管町1番地)

²正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Mooring systems using piles and roller fenders, or chains are often used for coastal floating structures. Pile mooring system can restrict horizontal motion, but not heaving and rotational motion. In contrast, chain mooring system does not cost much, but can not reduce horizontal motion.

In Europe and America, ship design and operation have been recommended to respond to elderly and disabled persons' needs. Also in Japan, Transportation Accessibility Improvement Law came into force in November 2000. This law will probably require ships and facilities in harbor and costal zone to reduce the responses in waves in the near future. Therefore, motion reduction in waves as well as cost is possible to be more important guidelines.

In the background, the present research attempts at developing a new mooring system reducing heaving and pitching motion in particular, and demonstrates the mooring performance and the feasibility.

Key Words : Floating structure, mooring system, mooring force, motion reduction

1. 緒言

沿岸・港湾における浮体の係留には、係留杭とフェンダーを用いた方式かチェーンなどの係留索を用いた方式が多く採用されている。係留杭を用いた方式では、チェーン係留方式と比較して浮体の水平移動量をほぼ拘束できるが、浮体の上下揺れや回転運動を制限することはできない。そのため、暴風時にはかなり大きな動揺が生じローラー部など係留系の破損なども報告されている。

一方で、平成12年には通称“交通バリアフリー法”が施行され、今後、港湾施設においても単にコストだけでなく、今以上に動揺量なども重要な指標になる可能性がでてきた¹⁾。このような状況に鑑み、本研究では、従来と比べて動揺を大幅に軽減できる係留方式を提案し、その実現性を定量的に示すことを目的とする。

2. 新形式係留方式の考案

(1) 新形式係留方式の概要

浮体の動揺低減に関しては、従来から様々な方法が考案されているが^{2), 3)}、本研究では係留方式そのものに着目し、新しい動揺低減型係留方式として

図-1, 2に示すような係留方法を考案した。図-2は、波上側から浮体をみたときの図で、前後の係留部材が直立した状態を示す。

この係留方式は、浮体前後端の係留部材を同じ長さにし、海底の前後のアンカー一点間距離と浮体前後の係留点間隔を等しくすることにより、浮体の縦揺れを強制的に拘束する。その結果、特に浮体前後端における上下変位が大幅に減少する。係留部材の長さは、浮体が異常満潮時においても水没しないように、また浮体が逆側(図-1では左側)に倒れないように異常満潮時に係留部材の傾斜がほぼ45°以下になるように設定している。なお、係留点、アンカー点とも基本的にピン結合とする。

浮体前後端の主係留部材は左右一本ずつ配置され、左右の係留部材は補強部材にてお互いに結合してある。これにより、前後端の係留部材は、アンカー一点を中心にして全体として浮体の縦揺れ方向の回転運動しかできず、横揺れや左右揺れ、船首揺れも強制的に拘束される。

浮体主要目については、とりあえず実際にT湾に設置された浮き棧橋を参考にし、長さ30m、幅8m、深さ2m、喫水1.0mとしてある。T湾の干潮時潮位は5.0m、異常満潮時潮位は8.5mである。

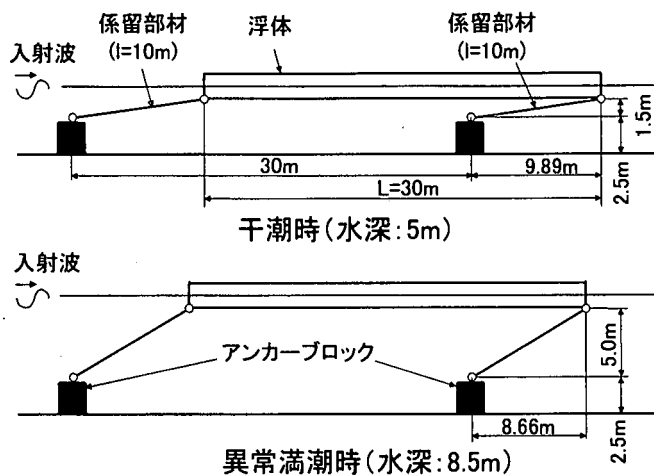


図-1 新形式係留方式の概念図 (側面図)

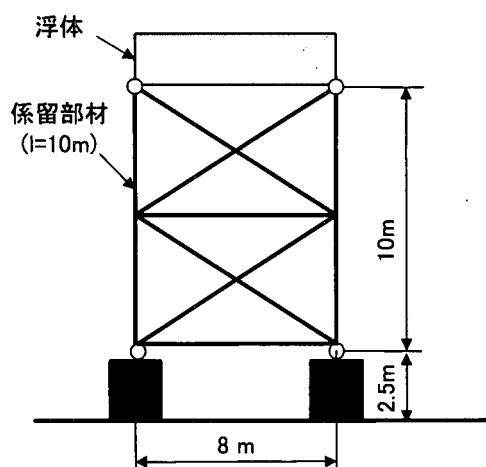


図-2 新形式係留方式の概念図 (正面図)

(2) 係留力に関する考察

本係留方式における係留力について考察する。ここでは、問題を簡単にするため縦波状態を考え、係留部材は左右の主部材のみ考える。

図-3に示すように、係留部材は浮体およびアンカー一点とピンジョイントで接続されているため、基本的には軸力しか発生しない。この軸力が浮体に作用する流体力、慣性力、波力と釣り合う。

今、係留部材と浮体が剛に結合されているとし、波強制力のみ注目すると、浮体中心に働く縦揺れモーメントと係留力で発生するモーメントが釣り合い、本係留方式の特徴である縦揺れの拘束が実現する。

縦揺れモーメントを浮体中心（ほぼ重心位置）で評価すると、釣り合い状態においては、波上側と波下側の係留部材に働く軸力はほぼ逆位相となり、交互に引っ張りと圧縮を繰り返す。水深が浅くなり係留部材の傾斜角 θ が小さくなると、係留部材間の距離 a がさらに短くなり、係留力は増加する。従って、係留部材の主要目は応力状態の厳しい干潮時で決まるものと考えられる。

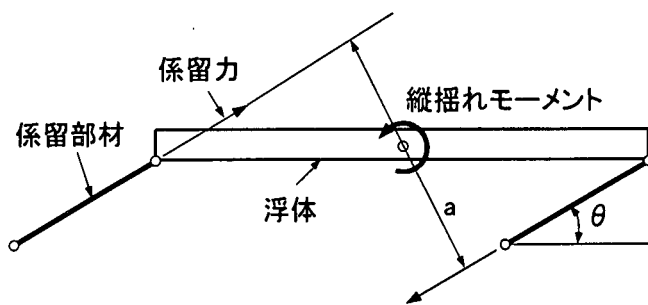


図-3 係留力の発生機構

3. 水槽実験と計算結果

本係留方式の動揺低減効果を水槽実験と数値計算で確認した。ここで用いた数値計算方法は、著者らのうちの一人によって開発されたものである⁴⁾。本計算法は、もともと多数のコラムを有する超大型浮体の流力弾性解析のために開発されたものであり、浮体とコラムを三次元骨組み構造でモデル化しコラム間の流体力干渉を考慮しながら構造解析が可能である。浮体またはコラム表面はパネル分割し三次元特異点分布法により流体力を求めている。

今回は、この数値計算プログラムを改良し、係留部材両端のピン結合をモデル化できるようにした。なお、計算では係留部材に働く流体力と慣性力は考慮していない。

(1) 実験模型

実験用の浮体模型は、2. (1)で述べたように実際の浮き桟橋を参考に主要目を決めた。表-1に浮体の主要目を実機サイズで示す。なお実験模型の縮尺は1/20である。

表-1 浮体主要目

主要目	単位	実機データ
全長	m	30.0
前幅	m	8.0
型深さ	m	2.0
喫水	m	1.0
排水容積	m ³	240.0
水線面積	m ²	240.0
重心高さ	m	1.0
重心位置	-	水線面上浮体中心
横慣動半径	m	2.8
縦慣動半径	m	7.5
GM _T	m	4.8
GM _L	m	74.5

実験では、比較のため浮き桟橋でよく採用されている杭式係留方式による実験も実施した。杭は実機で1.2m角のもの4本とし、浮体の4隅にゴム式のローラーフェンダ（直径0.38m、幅0.2m）を各2個づ

つ合計8個取り付け、極力実機の杭式係留を模擬した。

なお、動揺低減型係留部材は、水中で中性浮力になるように質量と浮力を調整した。

(2) 実験条件と計測項目

実験水槽は、NKKエンジニアリング研究所の造波水路を用いた（水槽幅3.0m）。実験条件は実機相当で以下の通りである。

- ・波の種類：規則波のみ
- ・波高目標値：1.0m
- ・波周期：3.0～9.0s
- ・波向き：縦波状態のみ
- ・水深：5.0, 8.5m

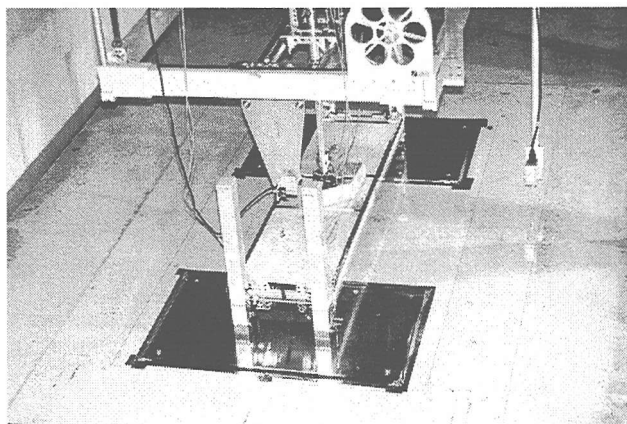


図-4 杭式係留装置と浮体模型

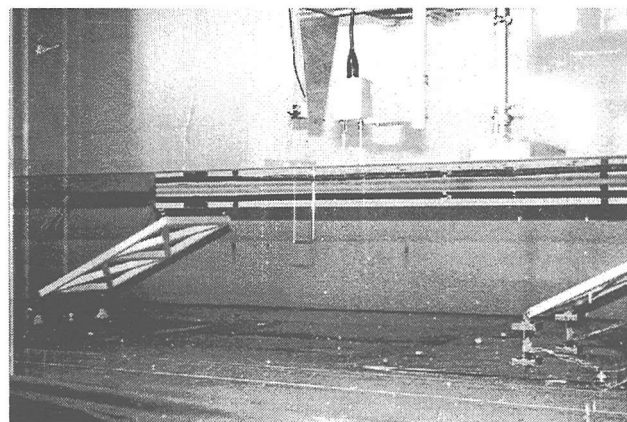


図-5 新形式係留装置と浮体模型

主な計測項目は、浮体の重心運動、船尾端中央（1箇所）における上下変位、前後方向係留力（4箇所）、入射波形（2箇所）などである。

浮体の運動は6自由度運動計測装置で計測し、船尾端の上下変位はポテンショメータを用いて計測した。係留力は係留杭または動揺低減型係留部材の下部に取り付けた係留力センサー（模型サイズで高さ90mm）で係留杭・係留部材に働く前後力を計測し

た。従って、計測した前後力は厳密な意味では係留力の前後方向成分であるが、水深が浅い場合は係留部材が大きく傾斜するので、ほとんど係留力そのものとみなせるようになる。また、係留力については、船首側左右2箇所、船尾側左右2箇所の係留力時系列を重ね合わせ、それぞれ船首係留力、船尾係留力とした。

入射波形は、容量式波高計にて浮体重心位置側方と浮体重心位置前方7mにおける浮体中心線上との2箇所計測した。

計測した時系列は、全てフーリエ解析を行い運動と力の振幅・位相を求めた。但し、入射波振幅は事前に行った波高検定の値を使用し、位相基準は重心側方において計測した入射波形とした。

図-4には、杭式係留装置と浮体の設置状況を波上側上方より概観した写真を示す。また、図-5には新形式係留装置と浮体を側方から概観した写真を示す。図-5の左側が波上側である。

(3) 実験結果と計算結果

図-6～9に異常満潮時（水深8.5m）における実験結果と数値計算結果を示す。順に浮体重心上下変位、波上端における上下変位、浮体重心縦揺れ、船尾（波上側）における前後方向係留合力を示す。同様に図-10～13に干潮時の実験結果と計算結果を示す。

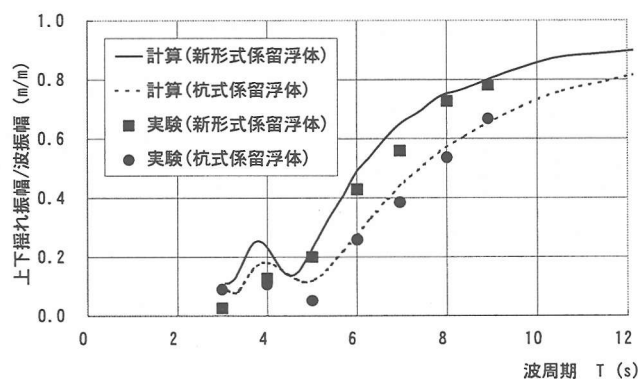


図-6 重心の上下揺れ応答関数
(水深 8.5m, 波向 0°)

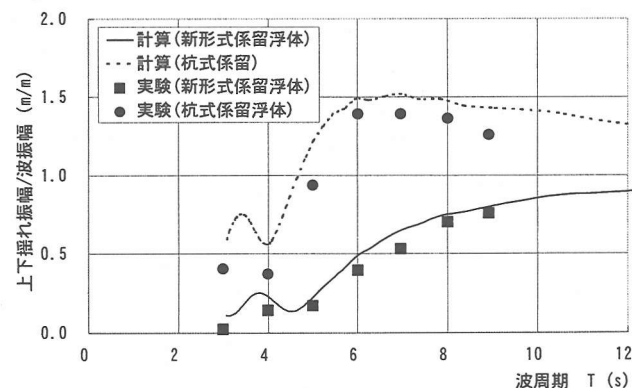


図-7 波上端点の上下揺れ応答関数
(水深 8.5m, 波向 0°)

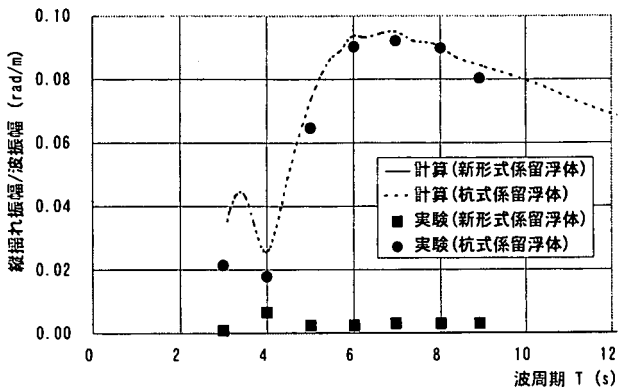


図-8 重心の縦揺れ応答関数
(水深 8.5m, 波向 0°)

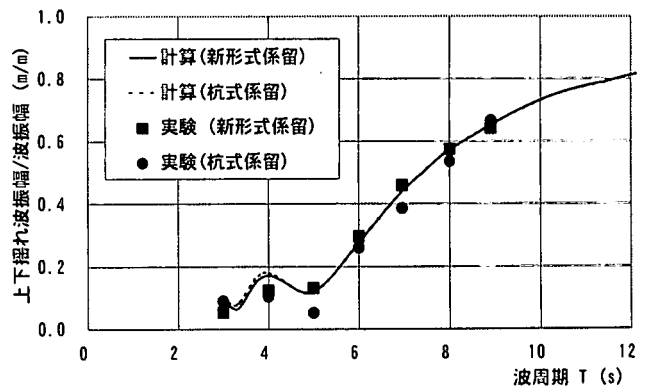


図-10 重心の上下揺れ応答関数
(水深 5.0m, 波向 0°)

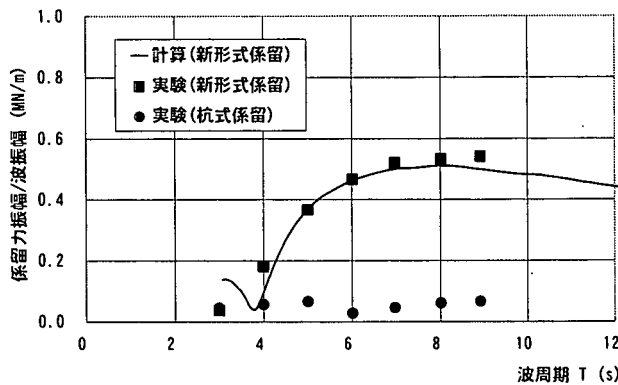


図-9 波上側前後方向係留合力の応答関数
(水深 8.5m, 波向 0°)

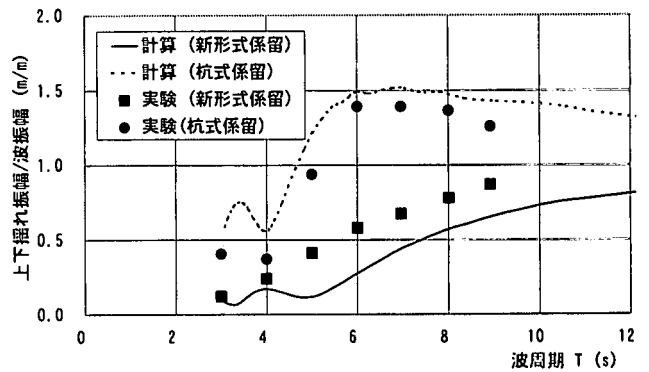


図-11 波上端点の上下揺れ応答関数
(水深 5.0m, 波向 0°)

図-6から判るように、異常満潮時では、浮体重心の上下変位については新形式係留浮体の方が杭式係留浮体よりも大きい。しかし、図-8に示すように縦揺れが全波周期においてほぼ完全に拘束できているため、図-7に示すように波上端における上下揺れは格段に低減できる。波周期のほぼ全域で約50%以上の上下揺れ低減となっている。なお図-8では、新形式係留浮体の計算値はモデル化通り全波周期において完全にゼロになり横軸と一致してしまっている。

図-9をみると、新形式係留浮体の係留力は、縦揺れモーメントに釣り合うように生じるので、かなり大きな値になっている。これは本係留方式の実用化にとっての一つの課題である。計算結果は、全般に実験結果とよく一致しており、今回の改良が成功したことを示している。なお、杭式係留方式の場合の係留力は計算していない。

干潮時(水深5.0m)では、図-10から、両浮体の重心上下揺れにはほとんど差がなくなるものの、縦揺れの拘束により、波上端における上下揺れは同様に激減している(図-11)。ただし、図-12から判るように水深が浅く係留部材の傾斜が大きいため、縦揺れは完全には拘束できていない。これは係留装置と浮体との結合部分の微妙なガタや係留部材の変形などが影響していると思われる。その影響で波上端上下揺れの実験値は計算値よりも少し大きくなって

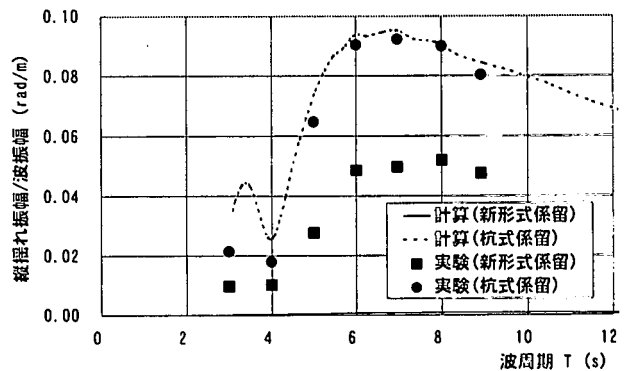


図-12 重心の縦揺れ応答関数(水深 5.0m, 波向 0°)

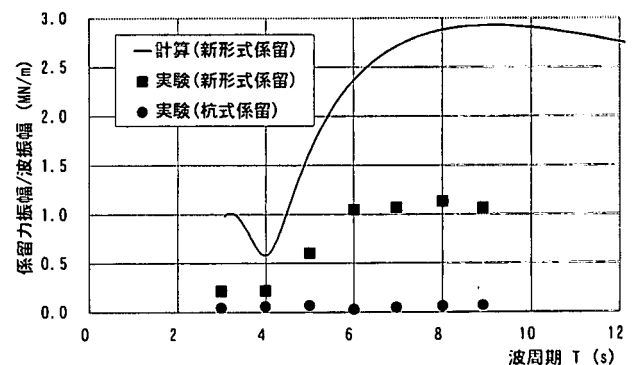


図-13 波上側前後方向係留合力の応答関数
(水深 5.0m, 波向 0°)

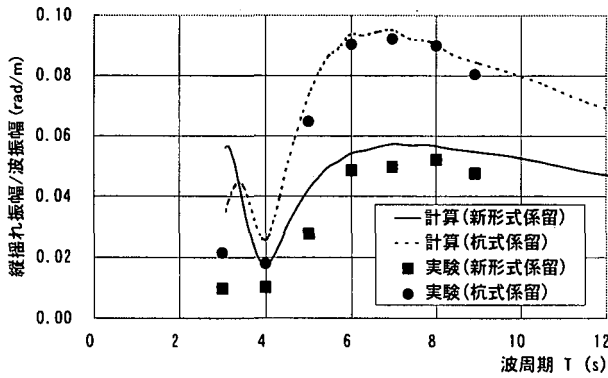


図-14 剛性を下げた場合の重心の縦揺れ応答関数
(水深 5.0m, 波向 0°)

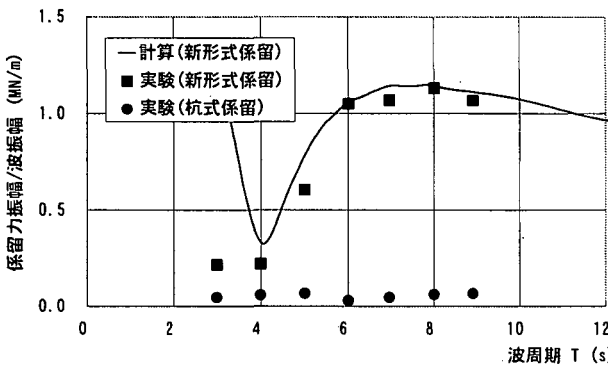


図-15 剛性を下げた場合の波上側前後方向係留合力
応答関数 (水深 5.0m, 波向 0°)

なお、図-12においても図-8と同様に新形式係留浮体の縦揺れの計算値はほぼゼロの値をとっており、横軸と見分けにくくなっている。

図-13をみると、干潮時の新形式係留浮体の係留力実験値は異常満潮時の値よりもさらに大きく2倍程度になっており、2. (2)で予測した通りの傾向を示している。係留力の計算値は、計算上では縦揺れをほぼ完全に拘束できていることになっているため、実験値の約3倍程度の値になっている。

干潮時における計算で、係留部材の断面剛性を減少させ、計算した縦揺れを実験で得られた縦揺れとほぼ一致するように設定してみた(図-14)。その結果、図-15に示すように係留力の計算値と実験値は非常によく一致した。実機においても縦揺れを完全に拘束するのは、建造・設置精度の面からも非常に難しいと考えられ、実際には僅かな縦揺れを許容し、そのかわりに係留力を下げる方が現実的であろうと考える。

4. 試設計

3. で、本係留システムの基本性能を実験と数値計算で確認できたので、これらの結果を元に実機を想定した試設計とコスト試算を行った。

(1) 設計条件

設置場所は既に述べたようにT湾を想定し以下のような設計条件を想定する。

- ・有義波高：1.6 m
- ・最大波高：2.9 m
- ・有義波周期：5.6 s
- ・波向き：0, 45°
- ・潮流：0.5 knot
- ・最大風速：38.2 m/s
- ・干潮時潮位：5.0 m
- ・異常満潮時潮位：8.5 m

(2) 浮体と係留部材の試設計

浮体は鋼製とし主要目は表-1に示す値とした。試設計では概略以下の順に作業を進めた。

まず、浮体と係留部材の概略設計をし、浮体と係留部材をあらためてBEAM要素でモデル化しNASTRANで構造解析を行った。この結果を参考にして、係留部材の寸法・形状の改良を行った。最後にピンジョイントおよびアンカーブロックの設計を行った。

これらの結果、主係留部材は鋼製丸棒でφ609.6 mm×24.6mmとなった。横・斜め部材はφ457.2mm×14.3mmである。係留部材と浮体の結合点位置は、図-16に示すように、図-1の状態よりも少し上げて水線面上にした。これにより係留力を均等化することができると共に、設置時における係留部材と浮体の結合作業が水面上でできるようになる。これに伴い、係留部材はピンジョイント付近の2.33mを45°曲げ、係留部材が完全に水平になっても浮体と接触しないようにした。さらに、浮体の四隅も1.5m×1.0m部分を切り欠いた。ピンジョイントのピンはφ180mmとした。

アンカーブロックは密度 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ のコンクリート製で重力式とした。ブロックと海底面の摩擦係数は0.6と仮定した。前後部それぞれL×B×H=6.3m×10.0m×1.5mのブロックを設置し、それをさらに主係留部材と同じ部材で前後に連結する。これは、前後のアンカーブロックに常に逆位相の係留反力が働くため、両者を連結することでブロックの大きさの低減を図ったためである。

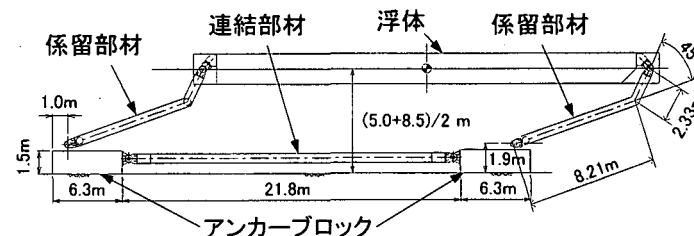


図-16 新形式係留浮体の試設計結果

(3) コスト試算

新形式係留方式による浮棧橋の工事費用の見積を行い、従来工法の4本杭係留方式と比較した。

比較の対象としたT湾の浮棧橋では、実際の海象を考慮して設計条件として波向きは0°としている。このため、比較対照とした杭式係留浮体の杭1本に作用する水平荷重は、波によるものより船舶接岸時の方が最大となり120 kN (12.2tf) としている。

一方、新形式係留方式では波高2.9 mの波が前述のように2方向から来るものとして、その最大値に対して設計を行っている。そこで杭係留方式に対しても同じ波荷重が浮体中心に作用した時の杭1本に発生する水平反力の最大値を求めなおすと、462kN (47.2tf) となり、実際の荷重の約3倍の荷重となる。今回はこの荷重に対する杭の詳細な再設計は行わないが、概略の推測で下記のように杭の寸法および打ち込み深さを実際のものより大きく想定した。

- ・杭直径×厚み：φ800mm×12mm
→φ1200mm×18mm
- ・地中打ち込み深さ：7 m→15 m

表-2 新形式係留浮体のコスト試算

項目	コスト比(新形式係留/杭式係留)
浮体本体製作・塗装費用	1.0
係留システム製作・塗装費	0.93
現地工事費	1.23 ^{注)}
総費用	1.02

注) 新形式係留方式では起重機船の回航費用が加わる。

表-2に両係留方式におけるコスト比を示す。これを見ると、新係留方式の費用が従来の杭式係留浮体と比べて僅かに高いことが分かる。しかし、当初の予想よりもそのコスト差ははるかに小さく、さらに設計上の合理化を進めれば、新係留方式は実現可能な範囲にあると思われる。ただし、本係留方式は全く新しいものであり、海底基礎の設計・設置などには精度の問題も含めまだ技術的な課題が残っている。

5. 結言

本研究では、従来にない新しい動揺低減型の係留方式を考案し、水槽実験と数値計算でその理論的根拠を明らかにすると共に、実機の試設計とコスト試算を行いその実現性を示した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 本係留方式は、干潮時では縦揺れを完全に

拘束できなかったものの、波上端の上下変位は波周期7sまでは杭係留の50%以上低減している。

- 2) 異常満潮時では、縦揺れをほぼ完全に拘束することができ、浮体端点と浮体重心の上下変位は等しくなっている。その結果、波上端の上下変位は、ほぼ全波周期の範囲で50%以上低減した。
- 3) いずれの場合も係留力は、浮体に働く縦揺れモーメントを前後の係留部材で受けるので非常に大きくなっており、今後の課題である。
- 4) 計算結果は、浮体の動揺と係留力の実験値とよく一致しており、係留部材のピン結合がよくシミュレートできている。
- 5) 試設計の結果、主係留部材は直径609.6 mm、横・斜め部材は直径457.2 mmとかなり大きな部材となった。今後、応力緩和装置などの開発などにより、さらに係留部材のスリム化が必要である。アンカーブロックは重力式とし、前後部それぞれ10.0 m×6.3 m×1.5 mのブロックを設置し、両ブロックを前後に連結する。
- 6) コスト試算の結果、新形式係留装置の総費用は、従来の杭係留方式のもの比べて僅かに高いことが判ったが、当初の予想よりもそのコスト差ははるかに小さく、設計上の合理化を進めれば、新係留方式は実現可能な範囲にあると思われる。ただし、本係留方式は全く新しいものであり、海底基礎の設計・設置など技術的な課題は残っている。

謝辞：本研究は、独立行政法人 港湾空港技術研究所とNKKとの共同研究として実施された。本研究を実施するにあたり、水槽実験では(株)ジャパンテクノメイトの浜口正則氏、試設計とコスト試算ではエヌケーケー総合設計(株)の山田直樹次長、浅野皓三氏の多大なる協力を得た。また、今回の研究の機会を与えて頂いたNKKの小宮治彦部長、森山厚夫マネージャにはいろいろな面で協力して頂いたと共に貴重なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 有馬正和：交通バリアフリー法の概要，らん，第50号，関西造船協会，pp.3-10，2001.
- 2) 山下誠也，板橋正泰，蒲谷達雄：波浪中横揺れ低減に関する二，三の考察，関西造船協会誌第232号，pp.63-70，1999.
- 3) 竹村武，落合実，遠藤茂勝：没水平板を持つ矩形浮体の動揺特性について，海洋開発論文集第15巻，pp.65-70，1999.
- 4) 飯島一博，鈴木英之，吉田宏一郎：超大型半潜水式浮体の波浪中構造応答解析，日本造船学会論文集，第181号，pp.281-288，1997.