

浮遊式係船岸の動揺特性について

第五港湾建設局 正会員 神田勝己

〃 白石修章

〃 〇滝野義和

1. はじめに

港湾を取り巻く状況の変化や、海洋開発の進展に伴って、今後、施設整備の場が大水深、軟弱地盤等建設条件の悪い海域へと発展していくことが予想されており、このような条件下において、経済性に富み、機動性、施工性に優れた浮遊式構造物の開発が強く要請されている。また、東海地震を始めとした地震対策の観点からは、高い耐震性を有する浮遊式構造物が期待されている。さらに、沖合人工島構想を始めとする各種海洋開発の分野においても、浮遊式構造物に対する要請が高まっている。

本調査は、このような各種要請について勘案し、係船機能を有した、より適用性の高い浮遊式構造物を開発するための各種技術的検討の一つとして、波浪等の外力による浮遊式係船岸の動揺特性について考察を行い、プレストレストコンクリート構造の浮遊式係船岸の基本構造の試設計を行ったものである。

2. 浮遊式係船岸の開発方針

開発方針設定のために行った浮遊式係船岸の事例調査、浮遊式係船岸の特性発揮領域の検討、開発すべき技術課題の抽出、荷役作業限界の検討および浮遊式係船岸開発条件の検討結果をまとめると次のようになる。

浮遊式係船岸の事例調査により、6件の海外事例を調べたが、大潮位差、貨物量急増に対する短期間のバース建設、大水深等が浮遊式係船岸を採用する直接の理由となっている。また、係留方法としては、係留ブリッジまたは緊張ラインによる比較的剛な係留系の必要性を提案している。

浮遊式構造物の特性発揮領域の検討によると、浮遊式係船岸は他の構造様式に比べ大水深、軟弱地盤、工期の短縮等に特長があるが、荷役効率、保守において難点がある。

開発すべき技術課題として、利用価値の高い浮遊式係船岸の開発、コンテナクレーンの高稼働が可能な浮遊式係船岸の開発、船舶および浮遊式係船岸の連成系の動揺シミュレーション計算法の開発、係留ブリッジ等による係留装置の開発等が挙げられる。

荷役作業限界を、既往の調査データおよび文献により検討すると、港内波高 $H_{1/3}$ は0.5~1.0m、風速は8~17m/sで荷役作業が行われたことがあるが、通常の荷役作業が行われる限界値としては、港内波高 $H_{1/3}$ は0.5~0.6m、風速は8~14m/sが妥当と考えられる。また、浮体の動揺の面からは、スウェイング $\pm 0.3\sim 1.0$ m、ローリング $\pm 3\sim 4^\circ$ が限界と考えられる。従って、本調査では、荷役作業限界の自然条件を波高 $H_{1/3}$ 0.5m、風速 15m/s、荷役作業限界の動揺量をスウェイング ± 1.0 m、ローリング $\pm 3^\circ$ と設定した。

以上のような検討に基づき、本調査における浮遊式係船岸の開発条件を表-1のように設定した。

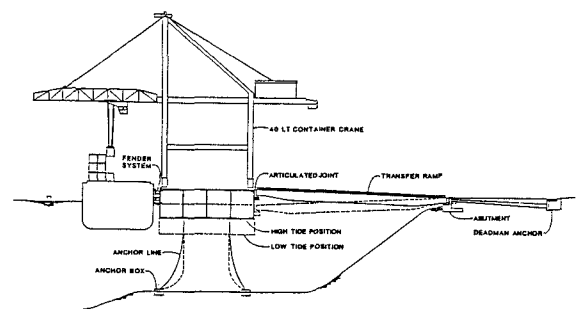


図-1 アラスカバルデス港 コンテナターミナル

3. 浮遊式係船岸諸元の検討

(1) 開発対象係船岸の浮体規模

本調査は、公共埠頭としてのバースの開発を目標としたことにより、コンテナ船、一般定期船および一般不定期船を検討対象船舶とした。

これら船舶が利用する代表的なバースは、内貿バース、外貿ライナーバースおよび外貿コンテナバースであり、本調査では各種バースの今後の計画規模等を勘案して、表-2のように開発対象バースの規模を設定した。

表-2 開発対象バースの規模

バース種類	対象船舶 (DWT)	浮体規模 (m)		
		長さL	幅 B	高さD
内貿バース	5,000	150	70	6
外貿ライナーバース	15,000	200	70	7
コンテナバース	40,000	350	40	9

表-1 開発条件の設定

項目		設定条件	設定根拠
水深		-7.5~-14.0m	対象船舶により決定
異常時	波高	1.5~2.0m	港内（防波堤内）通常波による
	周期	5~ 12sec	日本沿岸における最大有義波高を 10mとして最大周期を求めた
	風速	55 m/s	クレーン鋼構造部分の計算基準 (JIS B8821-1976)による
荷役作業時	波高	0.5m	荷役作業限界に関する既往の調査および文献による検討結果
	周期	4~ 10sec	
	風速	15 m/s	
	動揺限界	スイング ± 1m ローリング ± 3°	
波向		全波向	
風向		全風向	
潮位差		4 m	日本沿岸における潮位の最大値
潮流		0.3kt	港内通常値による

(2) 係留方式

浮遊式係船岸に適用性の高い係留方式としては、①ドルフィン方式、②ブリッジ方式、③アンカー・チェーン方式、が考えられる。

ドルフィン方式では、浮遊式係船岸は短手方向および長手方向にそれぞれ別個のドルフィンを備える。短手方向の係留は係船岸の片側（陸側）に設けたドルフィンの係留装置により浮体の動きを拘束し、長手方向の係留は係船岸の両側に設けたドルフィンの係留装置により行う。（図-2）

ブリッジ方式では、短手方向の係留はブリッジにより行い、これにより浮体の動揺を拘束し、また長手方向の係留は補足的に行えば十分である。但し、係留ブリッジにより浮体の長手方向の動揺制御も可能である。

アンカー・チェーン方式は、係留系が軟らかく定常力による移動量が大きいので検討対象外とする。

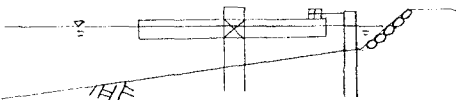
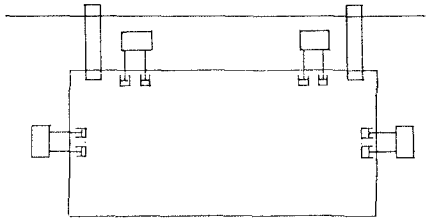


図-2 係留例

4. 浮体動揺の検討

(1) 動揺検討の手順

開発対象バースとして設定した浮体について、異常気象時の作用力および荷役時の浮体の動揺量を動揺シミュレーション計算により検討した。検討条件は、表-3のように設定した。

表-3 検討条件

浮体	I L150 × B70 × D6 (m) II L200 × B70 × D7 (m) III L350 × B40 × D9 (m)	
	海気象	荷役時
波高	1.5m	0.5m
周期	4 ~ 20sec	5 ~ 18sec
波向	90°（浮体長手方向に対して直角）	90°
風	風速 55m/s時の荷重	風速 15m/s時の荷重
風向	60°（浮体長手方向に対して）	60°

検討の手順は以下のとおりである。

- ① 無係留状態での浮体動揺量を求める。
- ② 異常時の風荷重を求める。
- ③ 上記①、②より係留装置に用いる防衝材を求める。
- ④ 上記防衝材を用いて異常時の浮体の動揺量と防衝材反力を動揺シミュレーション計算により求める。
- ⑤ 同様にして荷役時の浮体の動揺量を求める。

(2) 異常時の検討結果

上記浮体Ⅰ、Ⅱ、Ⅲについて、異常時の条件で規則波および不規則波による動揺シミュレーション計算を行って、防衝材反力すなわち係留装置に働く荷重を求めた。

また、規則波の動揺シミュレーション計算においては、表－４に示す項目をパラメーターとして、防衝材反力に及ぼす影響を調べた。なお、浮体Ⅰについては防衝材と浮体の間隔もパラメーターとする計算も行ってみた。

表－４ パラメーター

項 目	パ ラ メ ー タ ー
防 衝 材	定反力型防衝材および反力漸増型防衝材
水 深	浮体Ⅰ： -7.5m、-12.0m、-16.0m 浮体Ⅱ： -10.0m、-14.0m、-18.0m 浮体Ⅲ： -14.0m、-18.0m、-22.0m
護 岸 距 離	40m、30m、20m
支 点 位 置	浮体中央より $\pm 1/4$ Lの位置、浮体中央より $\pm 1/6$ Lの位置
波 高	1.5m、1.0m
防衝材強さ	標準、標準の1/2

その結果を以下に示す。

① 浮体Ⅰの場合

定反力型防衝材(C-2250Hを2列2段計4個／係留点)を用いた場合は、係留施設の設計荷重は700tfとなる。規則波の動揺シミュレーション計算において、表－４に示した防衝材以外のパラメーターを変えても、特に際立った反力の変化はなかった。

反力漸増型防衝材(φ4.5m×12m×3個／係留点)を用いた場合には、規則波の計算においては、波周期12sec以下では防衝材反力は670tf以下であるが、波周期を18secまで考えると防衝材反力は3,000～4,000tfになる。特に、波周期14secではスウェーイングがピークを示し、防衝材反力も約4,000tfのピーク値を示した。また、 $T1/3 = 12\text{sec}$ の不規則波シミュレーション計算では、防衝材反力が約2,500tfとなるので係留施設の設計荷重は2,500tfとなる。

② 浮体Ⅱの場合

定反力型防衝材(C-2250Hを2列2段計4個／係留点)を用いた場合は、係留施設の設計荷重は浮体Ⅰと同様に700tfとなる。

反力漸増型防衝材(φ4.5m×12m×3個／係留点)を用いた場合には、規則波の計算においては、波周期18sec以上では防衝材反力が急激に増加し、3,000～4,000tfになるが、 $T1/3 = 12\text{sec}$ の不規則波のシミュレーション計算では防衝材反力は850tf程度になるので係留施設の設計荷重は850tfとなる。

③ 浮体Ⅲの場合

定反力型防衝材(C-2250Hを2列2段計4個／係留点)を用いた場合は、設計条件内の波周期12sec以下では浮体Ⅰ

、Ⅱと同様に反力はほぼ 700tfであるが、護岸距離 20m、波周期 17sec時に最大 4,000tfもの反力が生じている。

反力漸増型防衝材（φ4.5m×12m×3個／係留点）を用いた場合には、係留施設の設計荷重は大きくなり、表－4のいずれのパラメーターを変化させても、波周期9sec付近で浮体の動揺量は急増し防衝材反力も急増して5,000tf以上に達している。

定反力型および反力漸増型防衝材のいずれを用いた場合も浮体の動揺量が大きくなり、特にローリングは±10°であり、またスウェイングも±2mと浮体Ⅰ、Ⅱの場合の2倍にもなる。これは、浮体幅が他の浮体に比べ小さいためであり浮体の規模を再検討することも必要であるかと考えられる。

(3) 荷役時の検討結果

設定した荷役作業限界の自然条件における浮体の動揺量を計算して荷役作業の可否を検討した。検討条件の項目は、表－4と同様であるが、波高は0.5m、風速は 15m/secとして不規則波の動揺シミュレーション計算を行った。その結果を以下に示す。

浮体Ⅰおよび浮体Ⅱについては幅が等しいので、荷役作業に大きな影響を及ぼすローリング、スウェイングについては、ほぼ同様の特性を示した。ローリングの最大値は $T 1/3 = 9\text{sec}$ で±約 1.4°、スウェイングの最大値は $T 1/3 = 11\text{sec}$ で±約0.9mであり、荷役作業限界の動揺量以内に十分収まっている。

しかしながら、浮体Ⅲについては幅が比較的小さいので、ローリングの最大値は $T 1/3 = 11\text{sec}$ で±約 3.2°、スウェイングの最大値は $T 1/3 = 18\text{sec}$ で±1.5mと大きくなり、あまり作業性は良くない。

したがって、浮体Ⅲは浮体Ⅰ、Ⅱに比べて自然条件において、より波高が小さく波周期の短い立地場所で用いるか、または浮体幅を拡げる等の対策が必要かと考えられる。

5. 浮体の基本構造設計

ここでは、プレストレストコンクリート構造の浮遊式係船岸の基本構造設計を試みた。プレストレストコンクリート構造の採用理由としては、鉄筋コンクリートおよび鋼構造と比べ、強度、耐久性に優れ、プレハブ施工に適する等多くの特長を持っていることである。検討項目としては、次の3点とした。

- ① 安定性の検討
- ② 浮体構造全体の終局限界状態の検討
- ③ 部材（底版）の使用限界状態および終局限界状態の検討

但し、②、③の項目については、底版厚を、浮体Ⅰ、Ⅱは30cm、浮体Ⅲは50cmとして必要なPC鋼材等の規格およびピッチの検討を行った。

(1) 浮体Ⅰ

浮体Ⅰの諸元は、長さ $L=150\text{m}$ 、幅 $B=70\text{m}$ 、高さ $D=6\text{m}$ である。

上記検討項目のうち、①の検討結果から、十分に安定であることがわかり、また、②および③の検討結果より、配置する鋼材等は、長手方向：PC鋼材 12T15.2を65cmピッチ、鉄筋 D16を15cmピッチ、短手方向：PC鋼材1T21.8を40cmピッチ、鉄筋 D13を10cmピッチとなった。

(2) 浮体Ⅱ

浮体Ⅱの諸元は、長さ $L=200\text{m}$ 、幅 $B=70\text{m}$ 、高さ $D=7\text{m}$ である。

上記検討項目のうち、①の検討結果から、十分に安定であることがわかり、また、②および③の検討結果より、配置する鋼材等は、長手方向：PC鋼材 12T15.2を50cmピッチ、鉄筋 D19を15cmピッチ、短手方向：PC鋼材1T21.8を40cmピッチ、鉄筋 D16を10cmピッチとなった。

(3) 浮体Ⅲ

浮体Ⅲの諸元は、長さ $L=350\text{m}$ 、幅 $B=40\text{m}$ 、高さ $D=9\text{m}$ である。

上記検討項目のうち、①の検討結果から、十分に安定であることがわかったが、②の検討において可能な限りの鋼材配置を試みたが、終局限界状態で断面の耐力が不足していた。したがって、高さを大きくする等断面を変更するのが良いと考えられる。

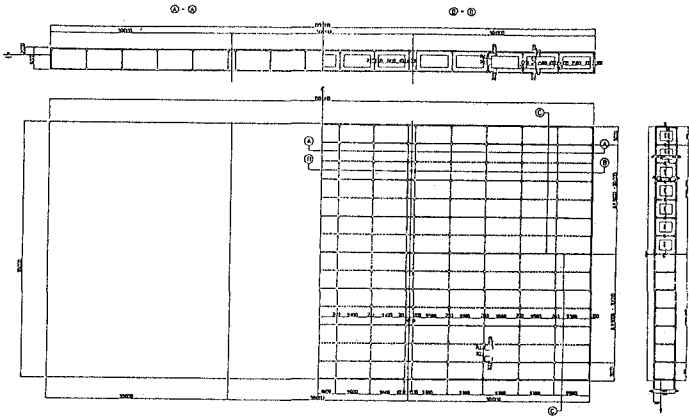


図-3 浮体Ⅰの基本構造

6. 係留装置の検討

浮体Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの係留施設を、短手方向に対しては、定反力型防衝材(C-2250Hを2列2段計4個／係留点)を、長手方向に対しては、定反力型防衝材(C-2250Hを2列1段計2個／係留点)を配置して、動揺シミュレーション計算を行って防衝材反力を検討した結果、短手方向、長手方向とも防衝材反力はほぼ700tf以下であり、また防衝材変形量も許容変形量以下であったので、上記防衝材を係留装置として採用する。

短手方向の係留は、浮遊式係船岸の陸側に設けたドルフィンまたは係留ブリッジにより行い、長手方向の係留については、浮体の両側または片側に設けた係留ドルフィンによって対応する。

これらの係留装置として、表-5および図-4～6等のものを提案した。

表-5 係留装置項目

係留方式	係 留 装 置	浮体の移動方向
ドルフィン	①リンクロッドによる短手方向係留装置	往 復
	①リンクロッドによる長手方向係留装置	
	②ローラー付防衝材による長手方向係留装置	一 方 向
係留ブリッジ	③ブリッジによる短手方向係留装置	往 復

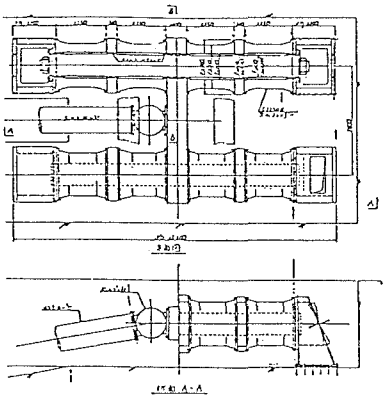


図-4 ①リンクロッドによる短手および長手方向係留装置
(防衝材支持：内部ロッド方式)

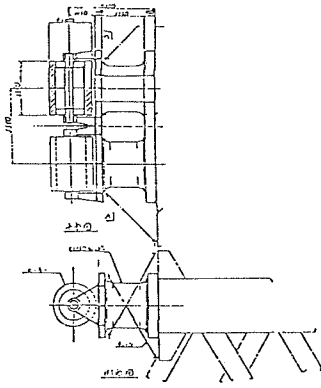


図-5 ②ローラー付防衝材による
長手方向係留装置

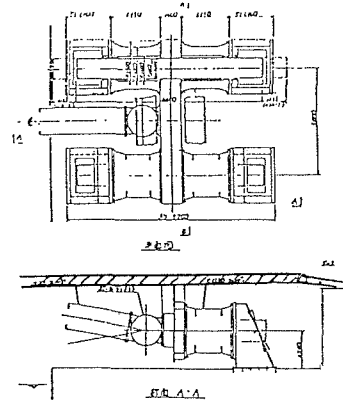


図-6 ③ブリッジによる短手方向係留装置
(防衝材支持：内部ロッド方式)

7. おわりに

本調査では、将来の公共埠頭の動向を踏まえて、3種の用途のそれぞれ最大規模級のバースを検討した。設計条件としては、各項目について国内各地の条件を広く満足するよう条件値を設定し、これに基づいて動揺検討、試設計を行った。

次の段階としては、自然条件、浮体規模等について具体的な設計条件を与えて、建設コスト低減の検討等を含むフィージビリティスタディ、護岸形状、海底勾配の影響を考慮しての係留設備、浮遊式係船岸および係留船舶の3体連成運動の計算、並びに現地実証試験による稼働性、作業性の検証、実用化の解明等を行う必要がある。

なお、本調査は、第五港湾建設局が(財)沿岸開発技術研究センターに委託し実施したものであり、港湾技術研究所構造部海洋構造研究室上田茂室長をはじめ多くの方々の御指導をいただいた。記して謝意を表します。

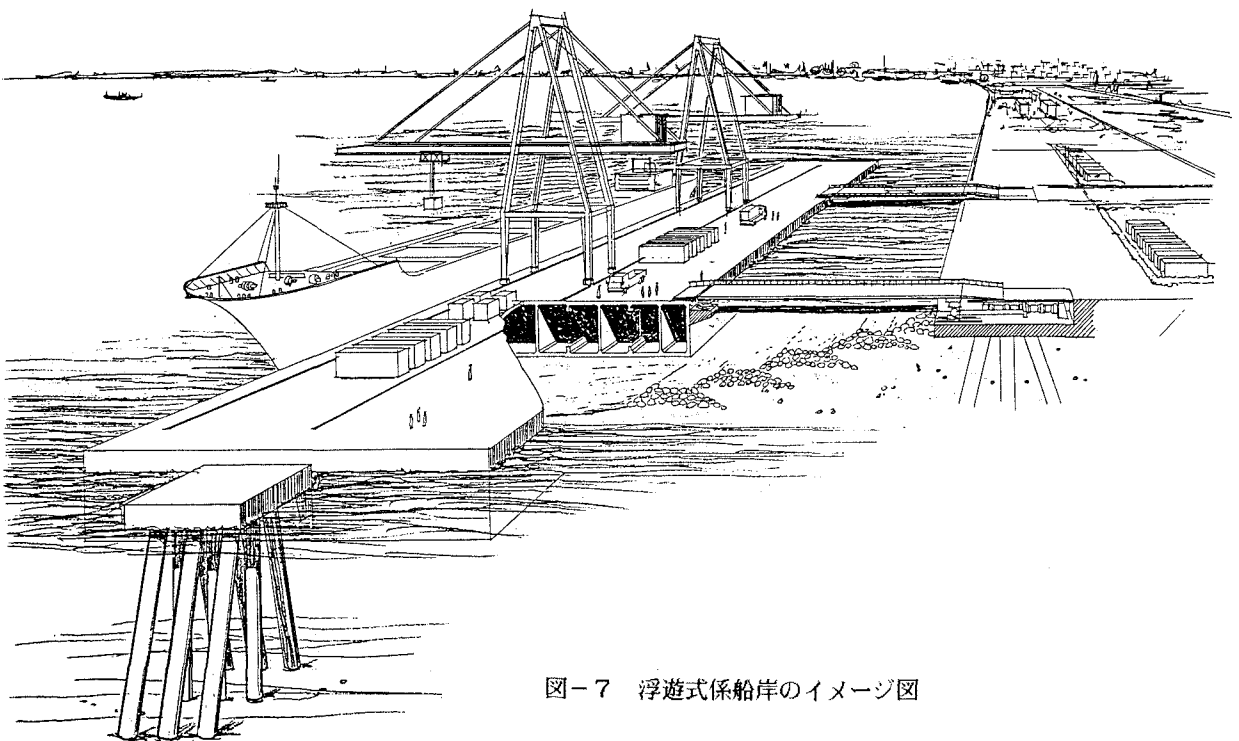


図-7 浮遊式係船岸のイメージ図