

9章 係留構造の設計

9.1 係留構造の形態，配置及び基数

浮体橋の規模，周辺施設，環境条件，使用条件，経済性に配慮し，係留方式，係留構造の配置を選定する。

9.1.1 係留構造の形態

- (1) 浮体橋の規模，周辺施設，環境条件，使用条件に配慮し，係留方式，係留施設の配置を検討する。
- (2) 係留構造は浮体橋の水平変位を抑制し，長期間確実に係留し漂流させないものとする。

浮体橋梁の規模，周辺施設への影響（係留構造の専有面積，航路），自然環境条件（波浪，水深，潮位，風，土質，海底地形，地震），日射による浮体橋梁の伸縮量，施設の要求機能に配慮して係留方式，係留配置を選定する。また，係留構造を浮体橋梁架設時の仮係留施設として使用する場合には建設工程等に配慮する。

係留構造には次の機能が要求される。

- 1) 異常時の風，波，潮流に対する耐荷力
- 2) 常時の風，波に対する浮体橋梁の変位，端部の回転の抑制
- 3) 地震に対する耐荷力及び係留力の抑制
- 4) 不均一日射による浮体橋梁の面内変形（そり）の吸収

係留の形態としては，カテナリー係留，ドルフィン係留，TLP 係留，両端固定係留，等があり，水深などの自然条件や使用条件に応じて選定する。

1) カテナリー係留

カテナリー係留は，チェーン係留のようにカテナリー形状の幾何学的変形に伴う復元力により係留する方法であり，水深 10m 以深に適用される事例が多い。大水深では経済的であるが，水平移動が大きく，係留構造の水域占有面積が大きくなることがある。

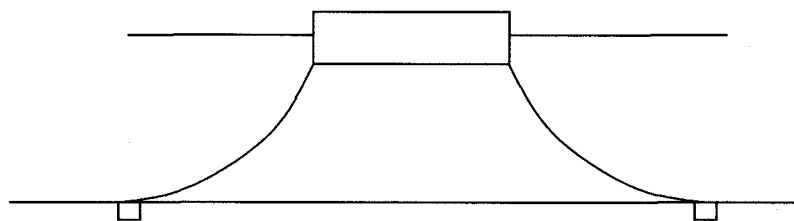


図-9.1.1 カテナリー係留

2) ドルフィン係留

ドルフィン係留は、海底に支持されたドルフィン及び浮体橋梁との間に設置されるゴムフェンダーなどにより浮体を係留する方法であり、固定式構造のため比較的浅い水深に適用され、変位の抑制には有効である。ドルフィンの形式として重力式、組杭式、ジャケット式がある。

ドルフィン係留は、浮体の変位をフェンダーの歪により吸収するが、フェンダーの荷重変形特性が非線形のため、必要に応じ非線形性、ヒステリシスを考慮した解析が必要となる。

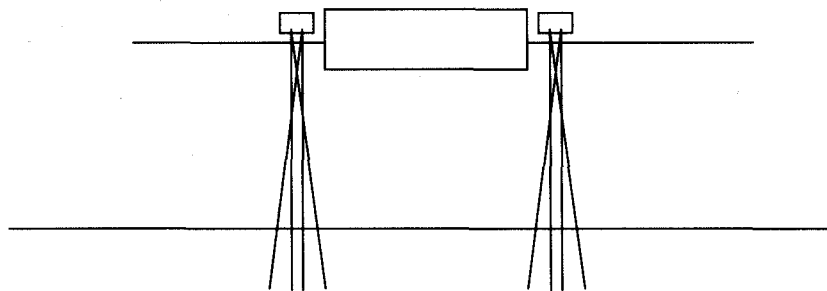


図-9.1.2 ドルフィン係留

3) TLP係留

TLP係留は、チェーン、鋼管テザー、ワイヤーなどのテンドンにより浮体を静的平衡状態よりも下方へ引き込み、それによって生じる過剰浮力と初期張力により浮体を係留する方法である。

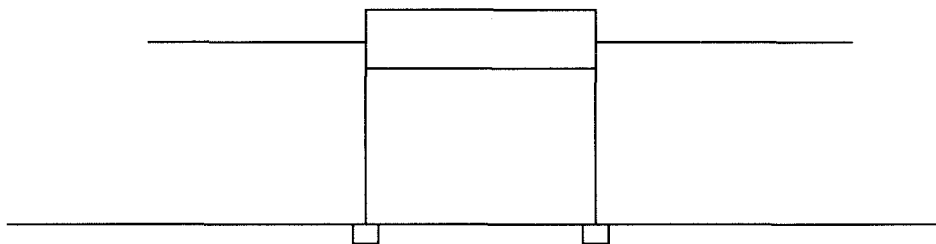


図-9.1.3 TLP係留

4) 両端固定係留

両端固定係留は、ポンツーン等の浮体部を直接係留するのではなく、浮体橋梁に作用する荷重を橋梁端部で受け持つ係留方法である。ノルウェーの浮体橋では、浮体橋構造を水平アーチ形状とし、外力に対し構造自体のアーチアクションで抵抗させ、橋梁端部においてフレキシブルロッドやフレキシブルプレートにより定着させる係留方法を採用している。

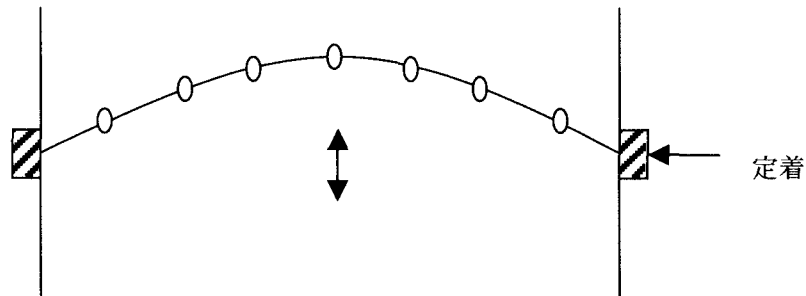


図-9.1.4 両端固定係留

9.1.2 配置及び基数

係留構造の基数及び配置は各種荷重に対して浮体橋を安全に係留できるように選定する。

係留構造の基数、係留特性は各種荷重（風、波、潮流、地震、長周期波、津波）に対する浮体の挙動シミュレーション結果に基づき決定する。

- 1) 定常外力の算定結果や係留の基本特性の検討結果を踏まえて、係留施設の基数について1次選定を行う。1次選定にあたっては、ばねの剛性変化と係留力の応答を算定した周波数応答解析を援用することが有効である。
- 2) 1次選定した係留施設について係留特性をモデル化し、風、波、潮流及び地震に対する浮体の時刻歴応答解析を行い、応答値が許容値内であることを確認する。結果に応じて基数などを再設定し、許容値内に収まるように設定するとともに経済性、安全性を検討する。

9.2 動揺解析

- (1) 各環境条件のもとで風、波、流れ、地震、温度変化に対する浮体橋梁の動揺及び係留力の推定を行うものとする。
- (2) 主として浮体橋梁の水平面内についての時刻歴応答シミュレーションを行い、各荷重に対する浮体の動揺量、係留力を推定する。

9.2.1 風、波、流れ

- (1) 環境条件に応じた時刻歴応答シミュレーションを行い、浮体橋梁の水平面内の動揺および係留力に関する検討を行うものとする。

(2) 浮体橋の水平面内動揺について、構造タイプによっては、浮体橋本体を剛体として取り扱っても良いものとする。

各種環境条件に対する係留シミュレーションを行う。風、波、流れ、潮位等の環境条件は、現地観測データに基づき、設定するものとし、観測データが得られない場合は係留系に最も厳しくなる条件（方向の組合せ）を設定するものとする。

解析フローを以下に示す。

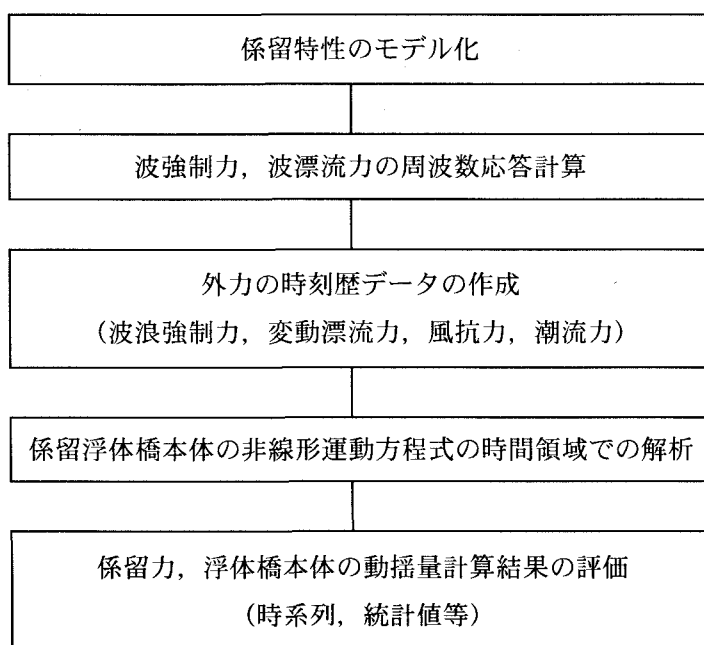


図-9.2.1 解析フロー

- 1) 変動風スペクトルは、浮体橋近傍の観測データに基づいて適切なスペクトルを用いる。
- 2) 浮体部に作用する流体力、波浪強制力の周波数に応じた値は、浮体部の形状を考慮した適切な方法で計算する。
- 3) 波浪強制力の時系列は、与えられた不規則波に対して適切な方法で計算する。
- 4) 適切な方法により変動波漂流力の時系列を計算し、波浪強制力に加える。
- 5) 係留シミュレーションの継続時間は、想定した外力の継続時間程度とする。
- 6) 挙動計算に用いる係留系の反力特性は、使用する係留構造の非線形性や配置等を十分考慮した近似モデルを用いる。
- 7) フェンダーを用いる場合は、ヒステリシス、フェンダーと浮体とのクリアランスを考慮し、フェンダーの最大歪み、平均歪みを検討する。

9.2.2 地震

浮体橋の場合、構造規模、係留方式によっては地震荷重が支配荷重となることがあるため、必要に応じて浮体橋本体と係留構造の相互作用を考慮した地震応答解析を行うこととする。

浮体構造物は一般的に免震構造であるが地盤の堆積層が厚い場合や係留施設による浮体橋本体の拘束の度合いが大きい場合等、係留系の固有周期が入力地震動の周期と近い場合には、地震荷重が大きくなるため、浮体橋本体と係留構造の相互作用を考慮した地震応答解析を行うものとする。

- 1) 解析モデルは地盤、係留構造、浮体橋本体を一体とした解析モデルとして相互の動的影響を考慮するものとする。
- 2) 浮体部に作用する地震時付加質量を考慮するものとする。
- 3) 必要に応じて入力地震波の空間的な位相差を考慮する。
- 4) 水平地震動を主として取り扱うものとする。場合によっては鉛直地震動を検討対象とする。

9.2.3 温度

温度変化による浮体橋の変形（面内変形、伸縮量）を検討し、係留点における浮体橋本体と係留構造との相対的なずれを設定する。

浮体橋の温度変形解析は、環境条件に応じた熱・応力解析を行い、係留点における浮体橋本体の面内変形量、伸縮量を算定する。

9.2.4 津波、副振動、長周期波による影響

- (1) 津波の異常潮位による浮力変動、水平流による荷重を考慮して検討を行うものとする。
- (2) 設置水域における副振動、長周期波による浮体橋の係留挙動計算を行う。

津波は設計再現期間の最大地震により発生する津波を設定し、水位変動と海水流によりモデル化して・津波による流れ・波形・水位変動について検討する。

副振動、長周期波は設置予定水域で観測された値を用いるか、適当な手法で推定された値を用いる。特にカテナリー係留の場合には長周期波に対する検討が必要である。

9.3 係留構造の追加要件

想定外の外力に対しても浮体橋本体を漂流させることがないようにする。

設計想定値を越える外力に対して係留構造が損傷を受ける場合に対しては、万が一そのような状況が生じたとしても浮体橋本体が漂流することがないことを確認する。

想定外の外力の例として、

- 1) 暴風時、レベル1，2を越える自然条件（波，風，地震）
- 2) 船舶衝突などによる一部係留構造の損傷状態での再現確率波の来襲
- 3) 維持管理上、係留構造の一部を除去した状態での10年確率波の来襲

想定外力に対して例えば許容応力度法の設計をすると不経済な構造となる。一方、係留構造によっては構造としての靱性が大きいものがあり、一部損傷はうけても漂流には至らない場合があることから、靱性が大きい構造については Ductility レベルで検討を行ない要求性能3を確保するものとする。

9.4 係留構造の設計

係留構造は、浮体橋本体の動揺によって生ずる外力等に対して十分に安全な構造とする。設計外力に対して十分な部材強度および支持力を有するものとし、さらに、施工時に於いても十分な強度を有することを確認する。

動揺解析結果に基づいて設定される設計係留力に基づいて係留構造（ドルフィン、チェーン等）を設計するものとする。設計にあたっては「港湾施設の技術上の基準・同解説」、 「コンクリート標準示方書」に準拠する。

9.4.1 ドルフィン係留

- (1) 係留構造の設計にあたっては次に掲げる外力及び荷重を考慮するものとする。
 - 1) 係留力
 - 2) 波力
 - 3) 摩擦力
 - 4) 地震力
 - 5) 温度変形による荷重
 - 6) 自重及び上載荷重
 - 7) 浮力
- (2) 緩衝材としてフェンダーを用いる場合は、フェンダー軸方向についてフェンダー受衝板とドルフィン上部工の間のクリアランスを適切に設定する。

(1) 外力及び荷重

1) 係留力

数値シミュレーションにより算定されたフェンダー最大反力に安全率を乗じた値を設計係留力とする。

参照基準：「港湾の施設の技術上の基準・同解説（下）」¹⁾

2) 波力

ドルフィンを杭基礎方式とする場合には以下の波力を考慮する。

- ① 上部工に作用する水平波力及び揚圧力
- ② 杭及びレグに作用する波力

3) 摩擦力

フェンダー受衝版と浮体接触面に作用する上下方向摩擦力を考慮するものとする。

4) 地震力

浮体橋本体とドルフィンの相互影響を考慮した地震応答解析結果に基づき設定するものとする。

(2) 部材設計

定反力フェンダーを用いる場合には数値シミュレーションにより算定されたフェンダーの平均歪，最大歪が許容歪み以下となるように設定する。参考値を以下に示す。

- 1) 平均歪みがフェンダー高さの 10%以下（クリープ発生の抑止）。
- 2) フェンダーの最大歪みが 38%以下（SUC の場合）。

9.4.2 カテナリー係留

- (1) ワイヤロープ、チェーンなどの係留ラインの破断強度に対して十分な安全率を確保するものとする。
- (2) 係留ラインは繰り返し荷重に対して十分な疲労強度を有するものとする。
- (3) 設置海域の土質条件に応じて十分な把駐力を有するアンカーを選定する。

ラインの疲労強度（S-N 曲線）と張力の頻度分布から累積損傷度を算定し，所要の安全率を確保するものとする。

カテナリー係留の場合，海域占有面積が大きくなる場合があるので検討が必要である。

海底土質条件に応じてアンカー形式（打設型，埋設型）を選定し，アンカーの把駐力係数に応じてアンカーの所要重量を算定し十分な安全率を確保する。

9.4.3 TLP方式

最大発生張力に対してテンドンの強度，疲労強度，基礎構造の安定性を確保する。

海底のアンカーから初期張力を導入したテンドン（鋼管，ワイヤーケーブル）により，係留された緊張係留構造であり，上下動揺の抑制が可能である。

潮位変動，波，風により発生する最大張力に対して，テンドンの安全率を確保する。また，テンドンに衝撃力を与えてはならないので常にプラスの張力となるように初期張力を導入する必要がある。テンドンは波浪により張力変動を受けるため，テンドンの疲労検討が重要であり，Heaving の固有周期を算定し疲労損傷度を算定する必要がある。例えば波浪による応力の長期超過確率がワイブル分布に従うとしてマイナー則により累積疲労損傷度を算定し疲労強度を照査する。

デッキ（あるいは上部工）との波峰とのエアギャップの確保，Slamming 力の検討が必要である。

API RP-2T³⁾では，検査等のために1本あるいは複数本の Tendon を除去した状態での10年ストームの検討を例として上げている。

基礎構造には，重力式と杭基礎方式がある。杭基礎方式では繰り返し荷重による耐荷力の減少（Cyclic degradation）を考慮することが必要である。

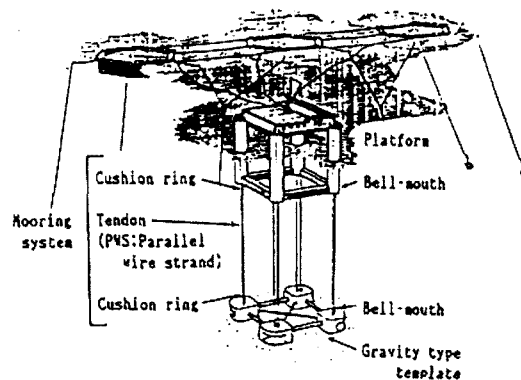


図-9.4.1 MF21 pilot farm TLP “EHIME”（重力式基礎）

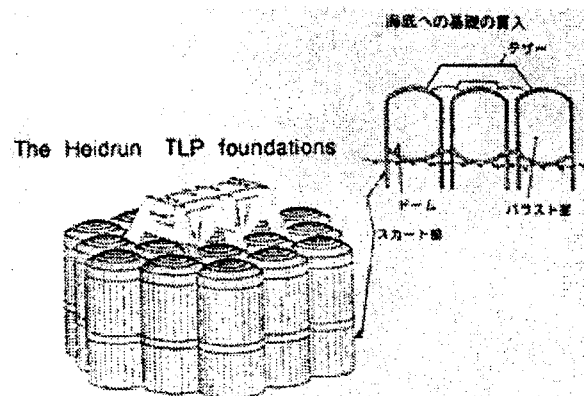


図-9.4.2 Conoco Hutton 油田（スカート基礎）

9.4.4 両端固定係留

両端固定係留では、橋梁端部に発生する橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直軸方向の力および変位について、伝達機構を明確にし、それぞれについて十分な部材強度を有するよう設計するものとする。

両端固定係留を適用した浮体橋梁では、死荷重、交通荷重による反力は比較的小さく、波、潮位、風による反力が支配的となる⁴⁾。

Nordhordland Bridgeでは、鉛直反力、トルクはネオプレンゴム製の支承により橋台に伝達し、橋軸方向水平力、橋軸直角方向水平力および鉛直軸周りのモーメントはフレキシブルプレートにより橋台に伝達する構造としている。また、橋軸直角方向軸回りの回転は、フレキシブルプレートの変形で吸収することにより潮位変動に対応できる構造としている。

Bergsoysund Bridgeでは、鉛直反力、橋軸直角方向水平力はネオプレンゴム製の支承により橋台に伝達し、橋軸方向水平力、トルクは、フレキシブルロッドにより橋台に伝達する構造としている。また、橋軸直角方向軸回りおよび鉛直軸回りの回転に対しては、ヒンジとして挙動する構造としている⁵⁾。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：「港湾施設の技術上の基準・同解説」（上巻），（下巻）平成11年4月
- 2) 土木学会：「コンクリート標準示方書」設計編 平成8年
- 3) API: Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Tension Leg Platforms, 1997
- 4) Meaas, P., Landet, E. and Vindoy, V. : Design of the Salhus floating bridge (Nordhordland bridge), Strait Crossings 94, Krokeborg (ed.), pp. 729-734, 1994
- 5) Solland, G., Haugland, S. and Gustavsen, J. H. : The Bergsoysund floating bridge, Norway, Structural Engineering International, pp. 142-144, 1993