

7章 浮体橋特有の設計項目と解析

7.1 構造計画

7.1.1 構造計画

浮体橋の設計にあたっては、浮力を有効に活用できる全体構造系を選定しなければならない。

浮体橋は、固定橋の上部工形式に相当する橋体部の形態だけでなく、浮体部の形態や係留方法によって多様な構造形式が考えられる。架設地点の自然及び交通条件を考慮して全体構造系を選定する必要がある。

浮体橋の構造的長所としては、

- 1) 大水深や軟弱地盤等、苛酷な基礎建設条件での架橋
- 2) 係留施設と並行工事による工期の大幅短縮（移動、撤去が容易）
- 3) 周辺海域の静穏化
- 4) 設置海域における水質の保全が可能

等が挙げられる。全体構造系選定にあたっては、これらの構造的特質を十分発揮できるように留意して構造計画をする必要がある。

7.1.2 全体構造系の選定項目

構造計画では以下の項目について最適な選定を行うこととする。

- (1) ポンツーンの形状と配置
- (2) 係留方法
- (3) 橋体部構造
- (4) 接続構造

浮体橋の全体構造系を決定する際の検討項目を示した。

(1) ポンツーンの形状と配置

ポンツーンは、水線面積が広いほど、活荷重等の上載荷重による沈み込みが小さくなるとともに、一般には動揺も小さくなるが、波浪の周期によっては動揺が大きくなる場合がある。ポンツーンの選定には、架設地点の条件を勘案しつつ、経済性、安全性及び使用性を考慮する必要がある。

ポンツーン構造（分離型あるいは連続型）、ポンツーンの平面及び断面形状、ポンツーンの配置（カタマランタイプ（双胴型）や消波効果のある複合型等）の選定については、その理由を明確にしておく必要がある。

(2) 係留方法

浮体橋の係留方法は、以下のような方法が考えられる。

- 1) シンカーとケーブルやチェーン
- 2) 橋台
- 3) フレキシブルロッドやフレキシブルプレート
- 4) 反力壁やリンクダンパー等のドルフィン

浮体橋の横方向支持方法は、その動揺特性を決定する重要な項目である。免震性等浮体橋の構造的長所を活用するためには浮体を柔らかに横支持する方法がよい。そのため、橋台や反力壁等のドルフィンで支持する場合、浮体橋と横支持部材の間に定反力型フェンダー等の非線形材料や減衰機能を付加する装置を設置する方法もある。ただし、動揺に伴う使用性及び伸縮装置の適応変位に留意する必要がある。

また、想定外の過大な外力に対しては浮体橋をリリースし、漂流だけを避ける等、目的構造物の要求性能によって最適な支持方法を選定する必要がある。

(3) 橋体部構造

橋体部構造形式の選定は、一般の固定橋と同様の要領で行うものとするが、以下の項目に留意する必要がある。

1) ポンツーンの変位による変形

ポンツーン変位の位相差によって橋体部構造に強制的な変位が発生したり、橋体部構造の変形が構造系全体の応答に影響（7.4.5弾性影響を参照）する。

2) 架設地点の波浪の卓越周期と橋体部構造の固有周期

架設位置での有義波周期と橋体部構造の固有周期については、橋体部構造の固有周期を有義波周期から十分に離すことにより、大きな動揺を避けるように計画する。

3) 橋体部構造形式によっては、変形を1ヶ所に集中したり、曲げ及びねじり剛性をユニフォームにして分散する等、風及び波浪に伴う弾性変形の対応を明確にするのがよい。

(4) 接続構造

浮体橋の端部変位や縦横断勾配の変化を推測し、その量に応じた接続構造（支承、伸縮装置及び緩衝桁）の選定を行う必要がある。

7.2 安定性

浮体橋のポンツーン基本寸法は、静的安定性及び動的安定性を考慮して決定しなければならない。また、重心、浮心のバランスに留意して部材配置を行う必要がある。

浮体橋の全体系の解析は、動的な動揺解析を基本とするが、ポンツーン基本寸法については、「浮体構造物技術マニュアル」(沿岸技術研究センター)¹⁾にしたがって定めるのがよい。また、予期しない動揺応答を避けるため、重心及び浮心の偏心量をできるだけ小さくするような構造配置とするのがよい。

7.2.1 静的安定性

浮体橋本体の浮心、重心、横メタセンターの位置関係により浮体橋の静的安定性を確認しなければならない。

浮体の静的安定性は、横メタセンターが浮体橋重心より上にあることが安定の第1条件である。「浮体構造物技術マニュアル」(沿岸技術研究センター)¹⁾では、浮体構造物の静的安定性について、横メタセンターMが重心位置Gより上にあることを必要条件として規定している。

その距離 \overline{GM} (横メタセンター高さ)を大きくするほど、浮体の復原力は大きくなり、安定性が高まる。風・波浪等の外力による変位や動揺を考慮すると、次節の動的安定性評価と併せて \overline{GM} をある程度大きくすることが必要である。 \overline{GM} をどの程度大きくとるかは、当該浮体橋のポンツーン寸法や喫水、路線の重要度、架橋地点の気象・海象条件、浮体橋の固有周期等の諸条件を考慮した上で決定する必要がある。

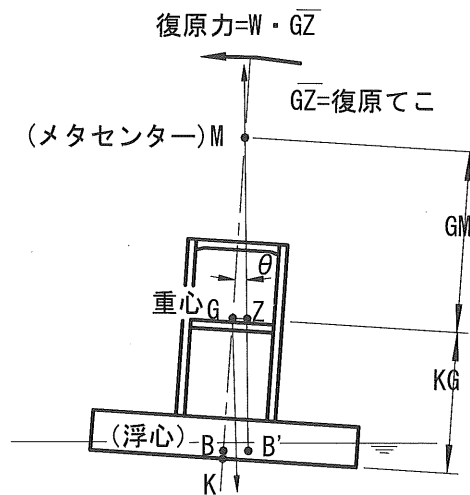


図-7.2.1 横メタセンターと重心の位置関係¹⁾

7.2.2 動的安定性

浮体橋に風荷重と活荷重を載荷した場合の傾斜モーメントと復原モーメントを比較し、荷重載荷時の動的安定性を確認しなければならない。

浮体橋に活荷重と風荷重を載荷し、図-7.2.2に示すように、その傾斜モーメントと復原モーメントをポンツーンの傾斜に応じて計算し、仕事量として面積により安定性を確認することとする。傾斜モーメントとは風荷重や活荷重により浮体橋が傾こうとする偶力モーメントのことであり、復原モーメントとは浮体橋が傾いた時に元に戻ろうとする偶力モーメントのことである。

$$\text{面積}(A+B) \geq \alpha \cdot \text{面積}(B+C)$$

ここで α は、安全率としており、「浮体構造物技術マニュアル」(沿岸技術研究センター)¹⁾では、 $\alpha=1.4$ を推奨している。また、活荷重については、満載、偏載及び無載荷の各ケースについて照査するものとする。

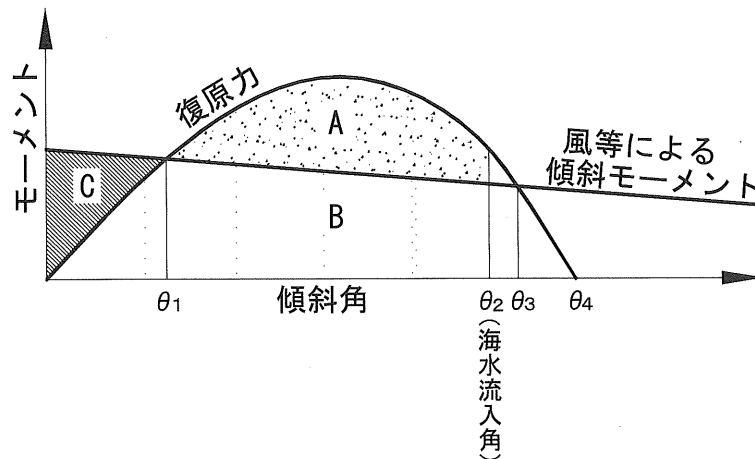


図-7.2.2 傾斜モーメントと復原モーメント¹⁾

7.2.3 損傷時の安定性

ポンツーンの漏水や一部破損による浸水時における安定性を確認しなければならない。

浮体橋ポンツーンは、沈没のような致命的な損傷をおこさないような構造としなければならない(8.3 浮体部の設計参照)。ただし、ポンツーン外壁部材の経年変化や船舶の衝突等の原因により、漏水や一部破損による浸水の可能性は否定できないため、このような状況を想定し、安定性を確認するものとした。適切な水密区画の配置により、想定されるすべての損傷状態に対して、ポンツーンの傾斜は、安定性を損なうことのないように制限することが望ましい。

7.3 変位に関する検討

活荷重の載荷、風、波浪、地震等の外力により、浮体橋には橋全体としての剛体変位を生じ、一般橋梁よりも大きな変位が発生することから、これらの変位に対して十分留意する必要がある。

浮体橋の大きな特徴として、外力に対して大きな剛体変位を発生し、陸上取り付け部や横支持部材との間に大きな相対変位を生じる場合がある。この変位は、支承、伸縮装置、ドルフィン等浮体に接続する部材の設計に大きく影響する。また、これらの変位(運動)は、あまり大きくなると、浮体橋の使用性に影響する恐れもある。ただし、浮体橋の長所を十分に生かすた

めには、大きめの変位を許容できる方が望ましいが、大きな変位により供用性が損なわれる場合もあるため、通行制限が可能かどうかの検討が必要である。

7.3.1 鉛直方向変位

- (1) 浮体橋の鉛直方向変位については、その変位が浮体橋支持機構からの離脱・浮体漂流につながる場合、設計条件により算出された鉛直変位に余裕量を見込むか、もしくは制御機構を付加することが必要である。
- (2) 鉛直方向変位による縦断線形の変化が大きい場合については、7.5 に示す走行シミュレーション等を用いて、車両走行の安全性及び快適性について検討することが望ましい。

浮体橋の鉛直方向変位については、

- 1) 活荷重の载荷による沈下
- 2) 潮位変動による上下動（台風時の高潮影響を含む）
- 3) 風・波浪による動揺
- 4) 風による橋体回転による変位
- 5) 津波
- 6) その他（地盤の変動等）

の各ケースについて検討する必要がある。これらについては、考えられる重ね合わせを行うものとする。ただし、固定橋における活荷重たわみ規定とは異なるため、橋体の活荷重によるたわみは重ね合わせを行わないこととした。

- (1) ドルフィンや橋台により浮体橋を支持している場合、鉛直変位により、その高さを超え、支持機構から逸脱することは漂流という致命的な損傷となることから、余裕量を設定することを義務づけた。また、条件的に逸脱防止機構を設けることにより制御機能を加えることも推奨した。
- (2) 鉛直変位に伴う取り付け部との相対変位を桁構造（緩衝桁）で吸収する場合、縦断勾配の変化による走行車両への影響が懸念されるため、走行シミュレーション等によって照査をすることとした。これについては、「道路構造令」の線形規定を構造上完全には遵守できないことから、それぞれの架設条件に適合した照査を行うことになる。

7.3.2 水平方向変位

- (1) 取り付け部との伸縮装置や支承の設計においては、解析から求められた浮体橋水平方向変位に対して余裕量を見込むことが必要である。
- (2) 水平方向の拘束部材に対して遊間がある場合、その非線形性を考慮した解析を行うことが望ましい。

浮体橋の水平方向変位については、

- 1) 風・波浪による動揺
- 2) 地震
- 3) 水流（潮流）
- 4) 津波

の各ケースについて検討する必要がある。これらのうち 1) 風・波浪及び 2) 地震に対しては動的解析によって算出することを基本とする。

- (1) 取り付け部における想定外の水平方向変位は、伸縮装置や支承等の破損に直結し、供用性を損なうことになることから、動的解析による変位に対して余裕量を見込むこととした。
- (2) 浮体橋の長所を生かすためには、ゆるい拘束が望ましく、水平方向拘束部材と浮体橋に遊間を設定する場合も多い。このような構造系に対しては、遊間の効果による非線形性を考慮した動的解析を行うことを推奨した。

7.3.3 傾斜

浮体橋の傾斜は、車両走行の安全性に支障がない範囲に制限するものとする。

浮体橋傾斜の検討は、活荷重の偏載及び風・波浪を対象とする。風・波浪による橋体の傾斜については、動的解析により算出するものとする。

7.4 全体構造解析

7.4.1 一般

全体構造解析は、静的解析法及び動的解析法によって行うものとする。これらの解析においては、解析目的及び入力波浪及び風荷重のレベルに応じて、適切な解析方法を選定するとともに、適切な解析モデルを設定するものとする。

なお、これらの解析によっても浮体橋の挙動を精度よく求めることが困難な場合は、7.4.6 に示す要領に従い、実験によって検証しなければならない。

7.4.2 静的解析

静的解析は、浮体橋が平水面上で静的釣り合いを保つため満たさなければならない条件を満足することを確認する解析である。

浮体橋が、海上等で十分にその機能をはたすためには、まず安全に浮かぶことが必要である。浮体の安定性は重心とメタセンターの相対位置で決定される。風・波等の浮体に作用する傾斜偶力に抗して、浮体橋が安全であるためには十分な復原力を持たなければならない。

詳しくは、7.2.1, 7.2.2に記載がある。

7.4.3 動的解析

浮体橋の供用時及び異常時の安定性を検討するため、及び係留構造を設計するため、浮体橋の動揺シミュレーションを適切な方法で行わなくてはならない。

なお、浮体橋が係留構造等を通して地震の影響を大きく受けると考えられる場合は、地震応答解析を行なう必要がある。

供用時の動揺量は、浮体橋が安全かつ円滑に利用に供されるように制限しなければならない。異常時についても、浮体の構造等を勘案して動揺量制限を適切に設定するものとする。動揺量は、動揺角度のほか、水平、鉛直変位について基準量設定することが望ましい(7.3参照)。

さらに、動揺量のほか、必要に応じ動揺加速度についても目標値を設定することが望ましい。供用中強風時(再現期間1年)の動揺加速度の許容値は、ノルウェーの浮体橋(Bergsoysund floating bridge)が活荷重影響を含めて $0.6(m/s^2)$ 及び $2(deg/s^2)$ であり²⁾、米国の浮体橋が水平・鉛直ともに $0.5(m/s^2)$ 及び $0.05(rad/s^2)$ となっている³⁾。

また、浮体橋は基本的には免震構造と考えられるが、係留構造等からの地震入力に対して地震応答解析により検証することが望ましい。

7.4.4 入力条件の設定

動揺解析の入力条件は、構造物の特性を反映して適切に想定し、計算精度を確保しなければならない。

動揺解析の主な仮定として以下の項目が挙げられる。

- 1) 浮体は剛体または弾性体とするが、構造的に弾性影響が大きいと予想される場合には弾性体として扱うことが望ましい。
- 2) 水の粘性は一般に無視してもよいが、必要に応じロールダンピングや柱状部材に作用する抗力を考慮する。
- 3) 浮体挙動に対する波の非線形性の影響は小さいので、波は微小振幅波理論により、浮体挙動は線形理論により評価してもよい。
- 4) 波はロングクレスト波とし、単一方向不規則波と仮定してもよい場合があるが、架橋地点の地形及び自然環境を考慮して定めなければならない。
- 5) 係留構造等の反射による波力について、その影響が無視できないと考えられる場合は、適切な反射率を与えた鏡像モデルによって求める等、配慮が必要である。
- 6) 不規則波による波力は、波の周波数スペクトル(例えば、ブレットシュナイダー光易スペクトル)を用いて規則波による波力の線形重ね合わせとして入力する。
- 7) 浮体は動揺することによって、ラディエーション流体力を受けるが、これを慣性力成分と

減衰力成分とに分離し、それぞれ、付加質量及び造波減衰係数の形式で取り扱う。

- 8) 浮体に作用する風荷重は風の時間的変動（例えば、日野のスペクトルのフーリエ逆変換）を考慮して入力する。
- 9) 係留構造（例えば、チェーン・ケーブル部材やゴムフェンダー等）のヒステリシス及び非線形性を考慮して取り扱う。

7.4.5 波浪中弾性応答による影響

橋長に比較して剛性が小さい浮体橋では、波浪による弾性応答を考慮することが望ましい。

橋長に比較して剛性の小さい浮体橋においては、剛体運動のみならず弾性変形が顕著となるため、弾性変形を考慮した波浪中弾性応答解析を用いることが望ましい。浮体橋が長大になれば、入射する波浪は相対的に短波長となるため、浮体全体からみた剛体運動モードは小さくなり弾性変形の影響は大きくなる。流体運動と弾性応答の両方を考慮する手法、すなわち、流力弾性を考慮した波浪中弾性応答解析により現象を明らかにする必要がある。

・分離ポンツーン型浮体橋に対する波浪中弾性応答解析法の例

ポンツーン部を、6自由度を有する剛体としてモデル化し、その浮面心に関するラディエーション流体力（付加質量力、造波減衰力）及び強制波力を周波数毎に算出する。その算出にあたっては、通常、線形ポテンシャル理論にもとづき、特異点分布法や領域分割法等を用いればよい。

橋体部（上部工）は、有限要素モデルによりモデル化をおこない、ポンツーン部の取り付く浮面心位置での節点において6自由度の付加質量、造波減衰マトリクスを入力する。汎用有限要素法解析プログラムにおいては、通常、そのための入力方法が用意されている（例：NASTRANではDMIG命令）。また、強制波力についても同様に、浮面心位置に設けた節点に調和加振外力としてこれを作用させればよい。

直接周波数応答解析により、規則波中での応答関数が求められ、さらにパワースペクトルを用いた線形重ね合せ法により不規則波中での応答が求められる。

ただし、上記の手順において、ロール方向の減衰係数として造波減衰のみを考慮したのでは減衰力が過小評価されロール応答が大きくなりすぎることがあるため、ロール方向に関しては粘性影響を考慮するのがよい。例えば、次の評価式が知られている⁴⁾。

$$B_{e0} = \frac{2}{\pi} \rho L D^4 (H_0^2 + 1 - \overline{OG}/D) [H_0^2 + (1 - \overline{OG}/D)^2] R_0 \omega$$

ここで、 B_{e0} ：等価線形化されたロールダンピング係数、 ρ ：流体密度、 L ：浮体長、 D ：喫

水, $H_0 = B/(2D)$: 半幅喫水比, B : 浮体幅, \overline{OG} : 重心の z 座標 (浮面心 O から下向きを正にとる), R_0 : ロール応答角度 (rad), ω : 角周波数 (rad/s) である。

係留系の非線形反力特性を同時に考慮する場合には, 時刻歴応答解析を実施する必要があるが, その際, 厳密には流体力のメモリー影響を考慮することが望ましい。周波数に対して一定の流体力係数を用いて時刻歴応答解析をおこなう際には, 得られた応答の周波数帯域と, 流体力係数の計算に用いた周波数がほぼ一致していることを確認する必要がある。

メモリー影響を考慮した運動方程式は以下のとおりとなる。

$$\sum_{j=1}^N [m_{ij} + a_{ij}(\infty)] \ddot{x}_j + B_{ij} \dot{x}_j + C_{ij} x_j + G_i(x_i) = F_i(t) - \sum_{j=1}^N \int_0^t L_{ij}(\tau) \dot{x}_j(t-\tau) d\tau$$

$x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$: 節点変位, 速度, 加速度ベクトル

m_{ij} : 質量マトリクス (浮体部+上部工)

$a_{ij}(\infty)$: 周波数無限大時の付加質量マトリクス

B_{ij} : 線形減衰マトリクス (上部工+係留系)

C_{ij} : 剛性マトリクス (浮体復原力バネ+上部工+線形係留系)

$G_i(x_i)$: 非線形係留力ベクトル (非線形バネ)

$F_i(t)$: 強制外力ベクトルの時系列

$L_{ij}(\tau)$: メモリー影響関数

ここで, メモリー影響関数 $L_{ij}(\tau)$ は, 造波減衰係数 $b_{ij}(\omega)$ のフーリエ逆変換から求めることができる。

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega) \cos \omega \tau d\omega$$

また, 周波数無限大時の付加質量 $a_{ij}(\infty)$ は, 次式において適当な ω を設定することによって得られる。

$$a_{ij}(\omega) - a_{ij}(\infty) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega') \frac{d\omega'}{\omega^2 - \omega'^2}$$

このメモリー影響を考慮した方法にもとづく, 波浪中での浮体橋の時刻歴応答解析法のフローチャート例⁵⁾を図-7.4.1に示す。

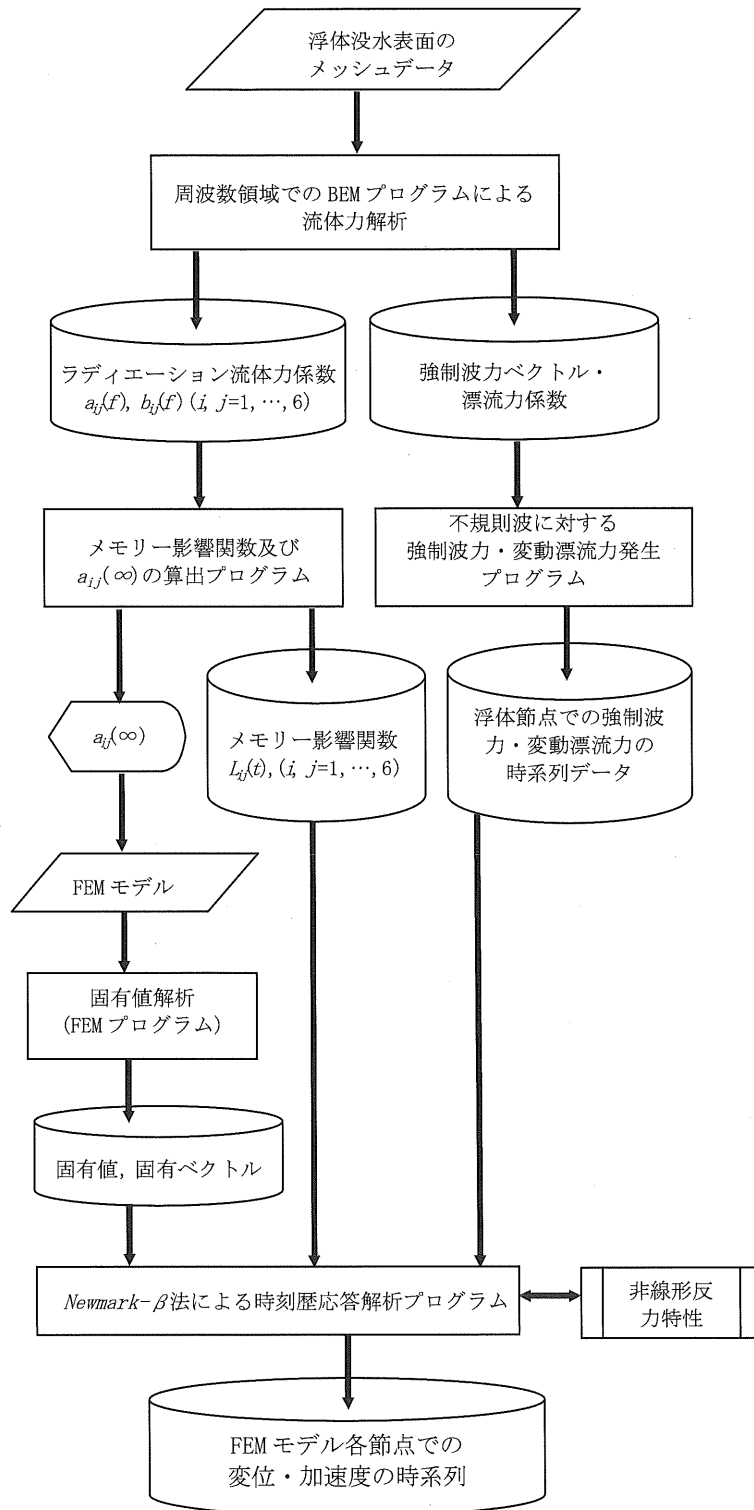


図-7.4.1 浮体橋の時刻歴応答解析のフローチャートの例⁵⁾
(メモリー影響を考慮する場合)

・連続ポンツーン型浮体橋の波浪中弾性応答解析法の例

基本的には、分離ポンツーン型浮体橋と同様な手法によればよいと考えられるが、橋軸方向にポンツーンが連続し、ポンツーン自身の弾性たわみ変形が無視しえないと考えられる場合には、例えば以下のような方法が考えられる。

連続ポンツーンの構造を有限要素モデルの梁要素によりモデル化し、有限要素モデルの各節点において、浮力バネ及び断面 2 次元モデルから算出した付加質量及び造波減衰マトリクスを与える。橋軸直角方向入射波に対する強制波力は断面 2 次元モデルに作用する強制波力として計算可能である。一方、斜波中での強制波力を厳密に算出するためには、3 次元特異点分布法プログラムを用いて、浮体没水表面パネルの圧力の積分から、有限要素モデルの該当節点に作用する強制波力を求める必要がある。

・超大型浮体式海洋構造物の波浪中弾性応答解析法の例（参考）

鉛直方向のたわみ応答に関しては弾性挙動を示すため流力—弾性解析の必要があるが、水平方向に関しては十分な面内剛性を有するため、剛体 3 自由度系として動揺解析を実施すればよい。この際、鉛直応答に対しては係留系の非線形反力特性の影響はほとんどないと考えられるため、周波数領域において解析し、不規則波応答については線形重ね合せ法によるのが合理的である。一方、水平面内の動揺については、係留系の非線形反力特性が影響するため、時間領域でのシミュレーション解析を実施する必要がある。

7.4.6 模型実験

必要に応じ、実験的に浮体橋の性能照査を行うものとする。実験は設計条件が適切に反映され、結果が明確に照査できるように計画しなければならない。

模型実験の目的は大別すると以下のように集約できる。

- 1) 理論がどの程度正しいかの判定をするため。
- 2) 理論では推定できないことを知るため。
- 3) 構造物の性能特性を模型実験から推定し設計に適用するため。

例えば、超大型浮体構造物の建造に当たっては、海面上において部分浮体同士を接合する必要があるが、接合時の波浪作用から微小な動揺が接合作業に支障をきたすことがある。よって実験によって現象を明らかにし、動揺を制御する方法を検討しておく必要がある。

7.5 走行安定性

7.5.1 一般

浮体橋の設計にあたっては、車両の走行安定性について適切な検討を行い、道路橋として問題ないことを検証しなければならない。

浮体橋は通常の固定橋と比べて以下の要因により変位しやすく、車両の安全性及び乗り心地に大きな影響を与える。

1) 潮位変動による浮体橋のレベル変化

潮位変動によって浮体橋レベルが変化するため、浮体橋～固定橋間の接続構造部道路の縦断勾配が変化し、浮体橋部～接続構造部間及び接続構造部～固定橋部間の接点において道路の縦断線形に角折れが生じる。このことにより、道路構造令で規定される縦断線形の緩和規定は構造的に遵守できないことがある。

2) 活荷重による喫水変化

活荷重の載荷状況によって喫水が変化するため、浮体橋部及び接続構造部の道路において縦断勾配と横断勾配が動的に変化する。

3) 風、波、潮流による浮体橋の静的変位

風、波、潮流により浮体橋は静的に変位（水平方向及び傾き）するため、浮体橋部～接続構造部間及び接続構造部～固定橋部間の接点において道路の横断線形に角折れが生じ、浮体橋部道路では横断勾配が変化する。

4) 風、波による浮体橋の動揺

風、波により浮体橋は6自由度を有する剛体として動揺するため、走行車両は加速度を受け、道路線形も変化する。また、浮体橋は弾性体としても応答することから、その影響についても考慮する必要がある。

このため、浮体橋の設計にあたっては、車両の走行安定性について定量的検討を行い、道路橋として問題ないことを検証しなければならないこととした。

7.5.2 走行シミュレーション

車両の走行安定性の検討では、走行シミュレーション及び動揺シミュレーションを適切に実施して、定量的に車両の走行安定性を評価することが望ましい。

車両の走行安定性の検討においては、動的な走行シミュレーションを以下の点に留意して適切に行い、定量的に評価しなければならない。

- 1) 走行シミュレーションにおいては、浮体橋部と接続構造部だけでなく固定橋部も含めた車両走行区間を設定しなければならない。
- 2) 走行シミュレーションにおいては、道路面の不整量を適切に設定しなければならない。
- 3) 走行シミュレーションにおいては、車両の走行状態（台数、方向、間隔、速度）を適切に設定しなければならない。
- 4) 走行シミュレーションにおいては、運転者が受ける乗り心地の的確な評価ができるよう車両の車体を適切にモデル化しなければならない。

図-7.5.1 は車両モデルの一例⁶⁾であり、2軸ばねモデルとしている。

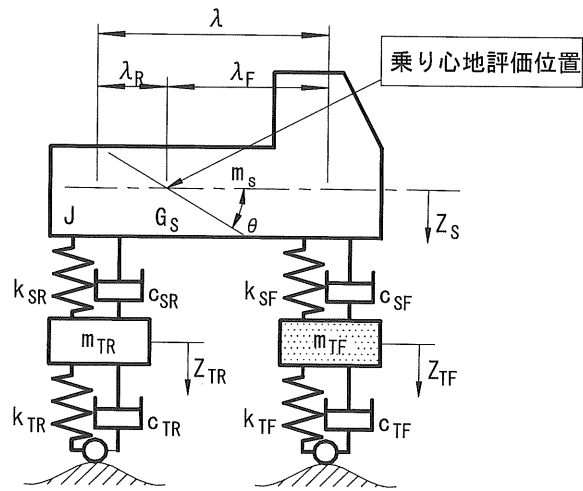


図-7.5.1 車両モデルの一例⁶⁾

7.5.3 走行安定性の評価方法

車両の走行安全性及び乗り心地については、適切な方法で評価しなければならない。

過去の研究実績から、『走行車両の乗り心地は、車両床上での最大両振幅加速度が大きいほど、その平均値が大きいほど、その発生頻度が多いほど、不快感を感じ易い傾向がある。』との知見が得られている。このことから車両の走行安全性及び乗り心地については、走行車両の応答加速度をその周波数領域を考慮に入れて定量的かつ総合的に評価するものとする。

ただし、これらの評価方法については、明確な指標が確立されていないのが実情であり、今後の研究成果に期待しなければならない。

7.6 疲労に対する検討

7.6.1 一般

浮体橋の設計にあたっては、風や波浪等によって生じる繰り返しの変動応力に対して適切な検討を行い、問題ないことを検証しなければならない。

浮体橋は通常の固定橋と異なり、風や波浪の動的作用によって、構造物に繰り返しの変動応力が発生する。浮体橋の設計にあたっては、風・波による構造物の疲労安全性について適切に検証しなければならない。

7.6.2 風・波の発生頻度分布と応力頻度分布

(1) 疲労の検討にあたっては、風や波浪等により構造物に生じる繰り返し応力について

て、適切な方法により応力頻度分布を設定しなければならない。

- (2) 応力頻度分布の設定にあたっては、架橋地点の気象・海象条件に十分配慮して推定しなければならない。

- (1) 疲労安全性の検討においては応力頻度分布を適切に設定することが重要である。
 (2) 応力頻度分布の設定にあたっては、架橋地点における風向や風速等の気象条件と波高や波周期等の海象条件を十分考慮に入れて適切に推定することが重要であり、架橋近辺での観測データを基にした風・波発生頻度を使用することが望ましい。

応力頻度分布の推定手順例を以下に示す。

1) 風・波発生頻度の設定

架橋近辺の観測データを基に風・波発生頻度をワイブル分布等で近似して設定する。風については風向毎・風速毎に、波については波向毎・波高毎に発生頻度を設定する。このとき設計風速や設計波高の設定方法との整合性についても配慮が必要である。

2) 風・波組み合わせ条件の発生頻度の設定

動揺現象は風条件（風向・風速）と波条件（波向・波高・波周期）の組み合わせから推定することが可能である。風条件と波条件にはある程度の相関性があり、風条件と組み合わせる波条件を推定することが可能である。

まず風向を橋軸方向と橋軸直角方向を基準としていくつかの風向域に分類し、各風向域について風速レベルを適切に区分して1)の近似分布形状から各風条件（風向域及び風速レベル）毎の発生頻度を算出する。

次に各風条件に対して発生頻度が同じ波高範囲（波向＝風向）を求め、風と波の組み合わせ条件と発生頻度を設定する。

3) 風・波組み合わせ条件毎の短期応力頻度分布の算定

2)の風と波の組み合わせ条件毎に適切な時間の動揺シミュレーションを実施して、応答値と照査箇所応力の関係から応力時刻歴を求める。この応力時刻歴からスペクトル法、レインフロー法等を用いて短期応力頻度分布を求める。

4) 長期応力頻度分布の算定

風・波組み合わせ条件毎の2)発生頻度と3)短期応力頻度分布から疲労設計寿命における長期応力頻度分布を算定する。

7.6.3 疲労安全性の評価方法

疲労安全性の評価は、部材の置かれている腐食環境にも配慮して、適切な方法によって行わなければならない。

疲労安全性の評価は、「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」（日本鋼構造協会）⁷⁾等によるものとするが、以下の点に注意が必要である。

- 1) 公称応力を用いて疲労設計曲線から求まる累積損傷度での評価を基本とし、平均応力の影

響と板厚の影響についても考慮するものとする。ただし、公称応力の計算や定義が困難な継手部についてはホットスポット応力を用いるものとする。

- 2) 疲労設計曲線（S-N 線図）は、部材に応じて適切に設定するものとする。
- 3) 実績のない構造様式、継手形式、材料等を使用した場合、疲労試験やFEM解析により疲労強度を確認することが望ましい。
- 4) 冗長係数、重要度係数、検査係数等の安全係数は適切に設定すること。
- 5) 水中や飛沫帯等部材の置かれている腐食環境にも配慮して疲労安全性を評価することが望ましい。
- 6) 疲労評価は下記フローの手順で行うものとする。

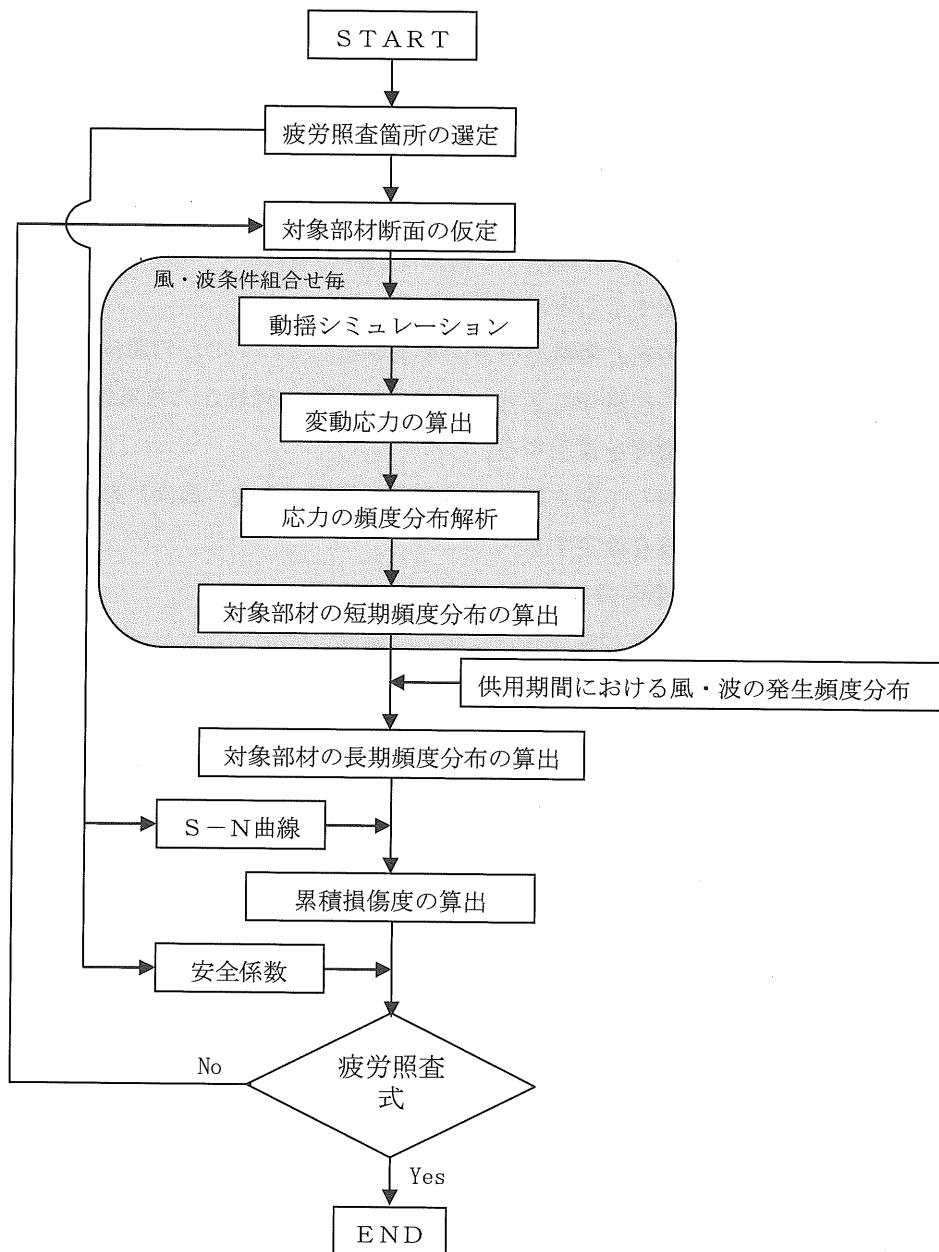


図-7.6.1 疲労評価フロー

7.7 地震の影響

7.7.1 一般

地震波は橋台や係留構造から入力するので、浮体橋に対する地震の影響は、その支持機構を含めた動的解析により照査を行わなければならない。

浮体橋は、せん断変形を伝達しない水に浮いていることから一般的に免震構造となっている。ただし、鉛直方向及び水平方向の拘束部材（係留構造）から地震波が入力されるため、これら拘束部材の地震時耐力や水中での浮体の振動による浮体橋及び拘束部材の影響を照査することを義務付けた。

7.7.2 長周期地震波の設定

地震の影響を照査する場合、その地域の地震環境（活断層の状況）に応じた地震波を設定するものとする。ただし、浮体橋の振動モードが長周期領域にあることが多いので、長周期成分を含む地震波も検討対象の地震波のひとつに設定するのがよい。

地震応答解析に用いる地震波は、その架設地点の地震環境（活断層の位置、大きさ、震央の位置等の地震パラメータ、架設位置の地盤条件）を考慮して選定することとした。ただし、浮体橋は、橋全体の剛体運動を許すことから、これらに相当するモードの固有周期が長周期領域にあることが多く、動的解析を実施する場合、入力地震波の選定では一般的な固定橋を照査する地震波との違いに注意する必要がある。しかしながら、長周期に卓越周期のある地震記録は非常に少ないので、使用する地震波の選択は、浮体橋の固有周期を考慮して行うのがよい。

7.7.3 地震応答解析

(1) レベル1地震動

レベル1地震動は、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」（日本道路協会）に規定されている加速度応答スペクトルに基づいて設定するものとする。

(2) レベル2地震動

レベル2地震動は、当該地点における想定地震波を設定することを原則とする。ただし、当該地点における強震記録データが少なく、想定地震波の作成が難しいような場合には、プレート境界型の地震動と内陸直下型の地震動の2種類以上を考慮するものとする。

(3) 解析手法

浮体橋の挙動については、レベル1地震動に対しては応答スペクトルを用いて、レベル2地震動に対しては時刻歴解析法を用いて検討するものとする。

(1) レベル1地震動

レベル1地震動は、橋の使用期間中に発生する確率が高いことから、様々なタイプの地震動を想定する必要がある。「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」(日本道路協会)には、多くの地震記録を参考にして設定された加速度応答スペクトルが記載されているので、道路橋示方書に示されている加速度応答スペクトルに基づいてレベル1地震動を設定することとした。ただし、道路橋示方書に記載されている図表の範囲は、固有周期が5.0s以下になっているので、5.0s以上の浮体橋に適用するのは難しい。このような場合には、道路橋示方書で用いられた元の地震波を使用することに立ち戻るか、当該地点におけるレベル1地震動を設定するのが望ましい。

(2) レベル2地震動

レベル2地震動は、橋の当該地点の地下構造特性等を考慮した想定地震に基づいて設定されるが、そのときの浮体橋の挙動は地震波の特性により大きく異なってくる。そのことから、当該地点の地域特性(活断層の位置や大きさ、地形、地盤、過去の地震記録等)を考慮した想定地震波に基づいて検討することとした。ただし、当該地点の想定地震波を設定することが難しい場合もあることから、そのようなときにはプレート境界型の地震動と内陸直下型の地震動の2種類以上を用いることができるものとした。

(3) 解析手法

レベル1地震動に対しては、「道路橋示方書・同解説」(日本道路協会)での扱いと同じように応答スペクトルを用いて検討できるものとした。応答スペクトルを用いる手法は、1自由度系での最大応答値を求めるものであるが、浮体橋の全体的な挙動を調べる上では適している。レベル2地震動に対しては、下記の理由により、時刻歴解析の手法を用いることとした。

- 1) 係留ばねが排水量と比べて相対的に小さいことから、浮体橋の固有周期は長めになる。長周期のために、浮体橋に作用する地震力は小さくなるが、応答変位が大きくなる場合が多い。そのため、緩衝桁や係留構造等との相対変位が重要な検討課題となるので、そのような検討には時刻歴解析が適している。
- 2) レベル2地震動では、部材塑性化後の挙動や非線形ばね・非線形減衰装置の効果を調べる必要があるため、このような挙動・効果を適切に検討できる時刻歴解析を用いることとした。時刻歴解析の事例は、「参考資料 4.地震応答解析の事例」に示す。

(4) 地震応答解析におけるその他の留意事項

1) 地震時動水圧

壁状構造物に作用する地震時動水圧としては、Westergaardや後藤・土岐の提案式が知られている。浮体橋の場合、浮力体が水面から水底まで連続する壁状構造物ではなく、水面からある喫水までになることが多い。このようなときには、浮力体の形状効果(喫水・幅を含む3次元特性)、水深、周期等を考慮して動水圧を求めるのがよい。この解析には、特異点分布法や有限要素法等があり、解析で得られる動水圧を浮体表面で積分して、付加質量、減衰項の形で求める。その後、付加質量、減衰項を組み込

んだばね質点モデルを用いて、地震時の浮体橋の挙動解析を行う。

2) 鉛直方向成分

浮体橋の鉛直方向の拘束が比較的剛な場合や水深が大きい場合には、地震の鉛直方向成分に対しても検討が必要である。しかしながら、鉛直方向成分を設定している基準や、想定地震波は、わが国ではほとんどなく、鉛直方向成分の地震波を水平方向成分の1/2としている例がある。

3) 海震

多くの浮体を連続させた形式を用いて、活断層を横切るような海峡横断橋の場合、海震の影響を検討しなければならない。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：浮体構造物技術マニュアル，1991.3
- 2) Vabo, P., et al.: Feasibility of a semi-submersible floating bridge, Strait Crossings, J. Krokeborg (ed.), pp.487-495, 1990
- 3) Lwin, M.M.: Floating bridges, Bridge Engineering Handbook, W.-F. Chen and L. Duan (ed.), Chap.22, 2000
- 4) Chakrabarti, S.: Empirical calculation of roll damping for ships and barges, Ocean Engineering, Vol.28, pp.915-932, 2001
- 5) 渡邊英一，宇都宮智昭，岡藤孝史，村越潤，麓興一郎：浮体橋の波浪応答シミュレーションプログラムの開発，構造工学論文集，Vol.49A, pp.661-668, 2003
- 6) 川谷充郎，丸山忠明，川村幸男，岸本俊雄，三輪宜弘：浮体橋の振動使用性，構造工学論文集，Vol.43A, pp.757-764, 1997
- 7) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993