

## 7章 浮体橋特有の設計項目と解析

### 7.1 一般

浮体橋の設計においては、本指針に規定のない設計項目については道路橋示方書もしくは既往の設計基準に準拠するものとする。ただし、いずれの基準においても規定されていない項目については、解析もしくは実験により検証したうえで設計を行うものとする。

本設計指針は、浮体橋の設計全般を規定しているものではない。本指針は、浮体橋設計の特徴的な項目について、性能照査型のフォーマットを用いて記述したものである。この指針に記述のない設計項目については、道路橋示方書をはじめとする既往の設計基準に準拠することとした。ただし、浮体橋については既往の基準類ではその対象外となっていることから規定されていない項目も多く、それらの項目については架設位置や構造により異なる条件によって解析、実験を行い、安全性と使用性を検証することを原則とした。

### 7.2 安定性

浮体橋のポンツーン基本寸法は、静的安定性および動的安定性を満足すること。また、重心、浮心のバランスを取るよう部材配置を行うこと。

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、上部工の死荷重や活荷重および浮体橋の断面とポンツーンの寸法については、既往の浮体構造に関する基準によって定めるのがよい。これは、通常安定問題として重心と浮心の関係を整理した基準に安全率を考慮したものである。この基準に対して活荷重と風荷重の組み合わせに対して所定の安全率を確保したポンツーン寸法を基本として動的検討を行うものとする。

また、予期しない動揺応答を避けるため、重心およ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

浮体橋のポンツーン位置において、浮心、重心、横メタセンターの位置関係により浮体橋の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」((財)沿岸開発技術研究センター 1991年3月)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、浮体の復元力は大きくなり、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の目標値設定に当たっては、当該浮体橋のポンツーン寸法や吃水、路線の重要度、架橋地点の気象・海象条件、等の諸条件を考慮することが望ましい。

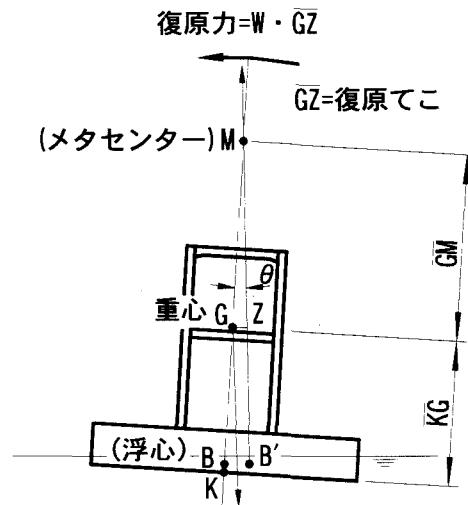


図-7.2.1 横メタセンターと重心の位置関係<sup>1)</sup>

## 7.2.2 動的安定性

浮体橋が、風荷重と活荷重を載荷した場合の傾斜モーメントと復元モーメントを比較し、荷重載荷時の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元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した。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、復元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 $\alpha$ は、安全率としており、「浮体構造物技術マニュアル」では、 $\alpha=1.4$ を推奨している。また、活荷重については、満載、偏載および無載荷の各ケースについて照査するものとする。

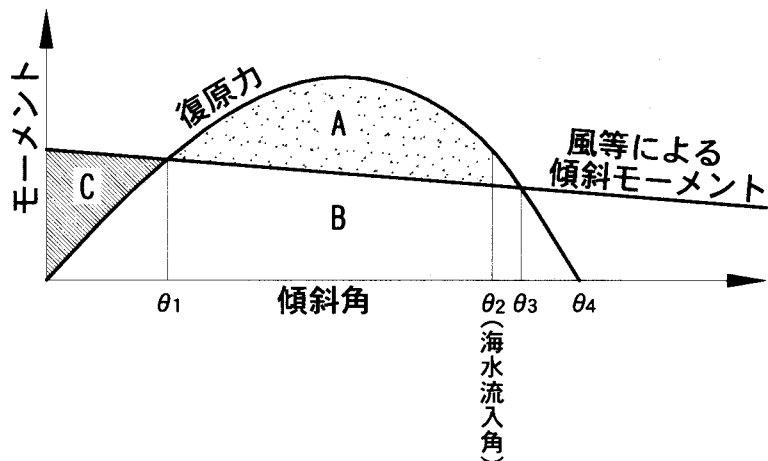


図-7.2.2 傾斜モーメントと復元モーメント<sup>1)</sup>

### 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。

浮体橋ポンツーンの沈没のような致命的な損傷を起こさないような構造法をとらなければならない(8.3 浮体部の設計参照)。ただ、ポンツーン外壁部材の経年変化や船舶の衝突などの原因により、漏水や一部破損による浸水の可能性は否定できない。そこでこのような状況を想定し、安定性を確認するものとした。ここでは、考えられるすべての損傷状態を想定し、適切な水密区画の配置により、ポンツーンの傾斜増加を $3^{\circ}$ までに制限することが望ましい。

### 7.3 変位設計

浮体橋は、活荷重の载荷、風、波浪、地震などの外力により、橋全体が剛体変位を発生し、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な配慮を行うこと。

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大きな相対変位を生じる。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、3.8 構造計画で規定されているように浮体橋の長所を十分生かすように応答変位は、大きめに制御する方が望ましい。また、大きな変位により供用性が損なわれる場合、通行制限が可能かどうかを考慮する。

### 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こと。もしくは制御機構を付加して対応すること。
- (2) 鉛直方向変位による縦断線形の変化については、7.5 に示す走行シミュレーションなどを用いて、車両走行の安全性および快適性について検討すること。

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（地盤の変動など）

の各ケースについて算出する必要がある。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、一般橋梁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（渡り桁）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大きく、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えばよい。

### 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、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。
- (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。

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算出する必要がある。これらのうち 1) 風・波浪および 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、伸縮装置や支承などの破損に直結し、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たいしては、遊間の効果を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こと。

風・波浪による橋体の傾斜およびローリング運動による傾斜については、風・波浪を入力とする動的解析により算出するものとする。ただし、路面の横断勾配が 3% 以上変化する場合は、走行車両の安全性に問題が生じることから、これを制限する部材もしくは装置を設置することを推奨した。

## 7.4 全体構造解析

### 7.4.1 一般

全体構造解析は、静的解析法およ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、解析目的および入力波浪およ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、7.4.7 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 解析モデル

浮体橋の波浪中応答を求める場合、剛体構造物と見なすことが出来る場合、数個の質点にモデル化して簡易な運動方程式で解いてもよい。大型浮体構造物（メガフロート）のように平面的で縦横の寸法が大きく剛性が小さい構造物は弾性変形を考慮してモデル化し解析しなければならない。

### 7.4.3 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、海上などで十分にその機能をはたすためには、まず安全に浮かんでいられなければならない。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・波など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元力を持たなければならない。7.2.2を参照のこと。

### 7.4.4 動的解析

浮体橋の供用時および異常時の安定性を検討するため、および係留施設を設計するため、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、浮体橋が係留施設など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、浮体の構造など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  $0.6 \text{ (m/s}^2\text{)}$  及び  $2 \text{ (deg/s}^2\text{)}$  であり<sup>5)</sup>、米国の浮体橋が水平・鉛直ともに  $0.5 \text{ (m/s}^2\text{)}$  及び  $0.05 \text{ (rad/s}^2\text{)}$  となっている<sup>6)</sup>。

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。

### 7.4.5 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) 水の粘性は無視してよい。
- 3) 浮体橋の動揺は微小と仮定してよい。
- 4) 波は微小振幅波とする。

- 5) 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、架橋地点の地形および自然環境を考慮して定めなければならない。
- 6) 係留設備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など、配慮が必要である。
- 7) 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。
- 8) 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、付加質量および造波減衰係数の形式で取り扱う。
- 9) 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。
- 10) 係留設備（例えば、チェーン・ケーブル部材やゴムフェンダー等）のヒステリシスおよび非線形性を考慮して取り扱う。

#### 7.4.6 弾性影響

水平方向の寸法に比較して剛性が小さく、波浪中弾性応答が顕著となる浮体橋では、波浪中弾性応答解析を使用することが望ましい。

水平方向の寸法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、浮体に働く流体力や運動応答等の正しい算定にあたっては、その弾性変形を考慮した波浪中弾性応答解析を用いなければならない。浮体構造物が巨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さらに大きくなる。剛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。

#### 7.4.7 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、結果が明確に照査適用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模型同士を接合する必要があるが、接合時の波浪作用から微少な動揺が接合作業に支障をきたす。よって実験によって現象を明らかに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。

#### 2) 活荷重による吃水変化

活荷重の載荷状況によって吃水が変化するため、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自由度に動揺し、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しなければならない。

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うことで、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であり、2軸ばねモデルとしている。

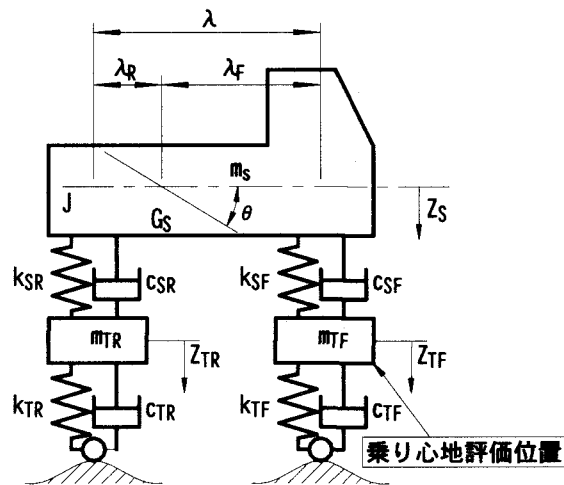


図-7.5.1 車両モデル<sup>3)</sup>

### 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 疲労評価

### 7.6.1 一般

浮体橋の設計にあたっては、風や波浪など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、風や波浪などの繰り返し荷重とこれにより生じる動揺現象によって、構造物に繰り返しの変動応力が発生する。浮体橋の設計に当たっては、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) 疲労の検討に当たっては、風や波浪などにより構造物に生じる繰り返し応力について、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。過小な危険側の設定が好ましくないのはもちろんのこと、過大で安全側に偏ったものも合理的でなく、実際の現象に合致した適切な応力頻度分布の設定が望ましい。
- (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当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』<sup>4)</sup>（日本鋼構造協会 1993 年）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、検査係数などの安全係数は適切に設定すること。
- 5) 水中や飛沫帯など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。

## 7.7 地震の影響

浮体橋に対する地震の影響は、その支持機構から地震入力し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大きな免震構造となっている。ただし、鉛直方向および水平方向の拘束部材（係留装置）から地震入力され、これら拘束部材の地震耐力や水中での浮体の振動による浮体橋および拘束部材の影響を照査することを義務付けた。

### 7.7.1 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、浮体橋は全体系の剛体モードが長周期領域にあることから、地震応答解析にあたっては卓越周期が長周期の地震波を選定すること。

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り、動的解析（時刻歴応答解析）を実施する場合、入力地震波の選定では一般橋梁を照査する地震波との違いに注意が必要である。

しかしながら、長周期に卓越周期のある地震記録は、非常に少なく、その波形も表面波としての扱いもあり、今後の研究を待つところが多い。

### 7.7.2 地震応答解析

浮体橋に対する地震の影響は、時刻歴応答解析により照査するものとする。応答解析モデルは、係留系および取り付け部を含めた構造系を用いるのが望ましい。また、水の付加質量および付加減衰も考慮するものとする。

浮体橋は、一般橋梁とは異なる経路で地震波入力されるため、時刻歴応答解析を用いて照査することとした。浮体橋の地震応答は、橋全体としては免震構造であるため、一般的にはあまり大きくないが、固有周期が長周期領域にあることで応答変位が大きくなる特徴がある。そのため、係留系や取り付け部は浮体橋への地震入力部材となるだけでなく、浮体橋との相対応答変位を照査する必要があり、これらの部材を含めた全体系での解析を推奨した。また、水に対する付加質量および付加減衰についても境界要素法等を用いて周波数に応じた数値を採用すること。

### 参考文献

- 1) 財団法人沿岸開発技術研究センター：浮体構造物技術マニュアル，1991. 3
- 2) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999
- 3) 川谷充郎，他：浮体橋の振動使用性，構造工学論文集，Vol. 43A，pp. 757-764，1997. 3
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993. 4
- 5) Vabo, P., et al. : Feasibility of a semi-submersible floating bridge, Strait Crossings, J. Krokeborg (ed.), pp. 487-495, 1990
- 6) Lwin, M. M. : Floating bridges, Bridge Engineering Handbook, W.-F. Chen and L. Duan (ed.), Chap. 22, 2000