

浮体橋建設の技術課題 — 旋回式浮体橋を例として —

大阪市 建設局 丸山忠明

1. 概説

大阪市は、臨海部において、高次都市機能を有する都市開発として21世紀に向けた「テクノポート大阪」計画を推進している。本計画は、図-1に示す臨海部の舞洲、夢洲および咲洲の3つの埋立地を対象としている。とくに本市は、日本の2008年オリンピック国内候補地に決まっており、舞洲をメイン会場の予定地としている。夢洲は現在埋立て工事中であり、将来は住宅・商業施設等が計画されている。これら埋立地の造成・整備促進と臨海部の交通アクセスの重要な役割を果たすべく、夢洲～舞洲連絡橋（仮称）が計画されることとなった。

夢洲と舞洲間の水路は港湾計画上からは北航路として位置づけられ、その南側の主航路の補助的航路として主に小型船舶が航行している。大阪港の主要施設への航路はこの2航路だけであり、北航路は、主航路がなんらかの事故等で万一船舶の航行利用不能になった場合に、大型船舶が航行できる国際航路としての機能を確保しておく必要がある。このため、架橋計画に際しては、非常時の航路空間を確保することから可動橋として形式選定を進めることとした。これはトンネルや通常の桁下高の高い橋梁と比較した結果、経済性、工期短縮、土地利用の点から可動橋とすることが非常に有利なためである。

現在計画している橋梁は旋回式浮体橋という世界初の形式であり（図-2）、航路部の浮体橋とその両端の緩衝桁、及び舞洲と夢洲の両陸上部取付橋から構成されている。浮体橋は、2つの鋼製ポンツーン（58m×58m×8m）でアーチ橋を支持した大型浮体構造物であり、2基の係留橋脚においてゴムフェンダーを用いて横支持されている。浮体橋は、交通供用時には航路幅135mを確保している。主航路が利用不可能となった非常時には、タグボートで浮体橋全体を旋回させて航路解放（航路幅200m以上）し、大型船舶の航行を可能にするものである（図-3）。

2. 形式選定

可動橋の形式としては、一般的に昇開式、旋回式、跳開式、引き込み式が候補となるが、非常時の必要航路幅が200mと既応の可動橋に比べて大きいことから、跳開式を除いて比較検討を行った。各形式に対する予備検討のなかで、特に旋回式浮体橋については係留方式など様々な形式を検討した。比較検討結果の概略を表-1に示す。表から経済性の点で旋回式浮体橋と斜張橋を旋回させる形式が他案を比較して有利であった。この2案についてさらに検討を行い旋回式浮体方式の橋梁形式を以下の理由により採用した。

- ①開橋頻度が少ないことから、タグボートで浮体橋を旋回させることにより大きな動力が不要であり、駆動設備を極力小さくでき、かつ旋回を確実に行うことができる。
- ②夢洲が埋立て工事中であり、埋立てによる圧密沈下と地盤変動による橋梁部および駆動部への影響が小さくできること。
- ③橋梁本体の組立てを大型造船ドックで行い、組立て後に現地へ曳航架設することから、下部工事と平行に上部工事が行えるので大幅に工期短縮が図れる。

浮体橋上部の構造形式についてはシングルアーチ案、ダブルアーチ案及びトラス案の比較を行った。その結果、橋全体の剛性確保や橋軸方向のねじり及び曲げ剛性の均一化による波浪影響の軽減効果や局部変形の防止等の構造特性の向上を図り、さらに景観的な配慮も行きダブルアーチ形式の浮体橋とした。

3. 技術的課題

本浮体橋の設計においては、「道路橋示方書」(以下、「道示」という)等の各種設計基準だけでなく、設計安全

率の考え方や設計手法等、新しい技術検討が不可欠であった。特に、浮体構造については、関西国際空港計画時の比較設計時に検討されたり¹⁾、運輸省を中心にメガフロート計画²⁾等で様々な研究が今日までに行われている。また、我国の大型浮体構造物としては、上五島や白島の石油備蓄基地が供用している。これらを参考に技術課題を整理し図-4に示す検討フローに従い本橋の設計を進めた。主な検討課題としては以下のとおりであった。

- ①気象及び海象条件による影響が一般の橋梁と比較して大きく、現地特性に適合した自然条件を設定する必要があること。
- ②風、波浪による浮体橋の動揺量を正確に把握し、設計に反映すること。
- ③動揺や潮位変動による道路縦横断線形の変化に伴う道路機能の使用性に対する走行安全性の検証を行う必要があること。
- ④係留用緩衝材であるゴムフェンダーの力学的特性を把握し、設計に反映すること。
- ⑤埋立地の地盤変動の構造物への影響を把握し設計に反映すること。
- ⑥浮体橋は、一般的に免震構造ではあるがそれを検証し、耐震安全性を確認するとともに地震時の応答変位量を設計に反映すること。
- ⑦旋回式であるため閉開オペレーションやメンテナンスについてマニュアルを作成すること。

4. 設計条件

4. 1 気象条件

設計基本風速(V_{10})は、架橋地点に最も近い観測データである北港ヨットハーバーでの観測記録(1987~1995年)に対して大阪管区気象台の記録(1931~1995年)を補正換算し、両者の相関からPetruaskas-Aagaardの方法により架橋地点での設計確率風速を求めた。再現期間を100年とし $V_{10}=42\text{m/s}$ とした。また、走行使用性能の検討条件として架橋地点近傍の港湾地帯の橋梁は $V_{10}=20\text{m/s}$ 以上で通行止めの規制をしていることから、これを設計条件とした。さらに、旋回作業時の条件としては大阪港内の船舶作業基準を参考に $V_{10}=15\text{m/s}$ を採用した。

4. 2 海象条件

設計潮位は、計画基準面(工事基準面)をCDL+0mとし、潮位変動は計画高潮位DL+4.8mから低極潮位DL-0.52mまでを設定した。設計波浪は、1956年~1995年の40年間の台風、強風のデータをもとに有義波法(格子点法)により確率沖波推算(100年確率)を方位別に求め、水路の回折計算と大型水槽実験結果から設計値を設定した($H_{1/3}=0.4\sim 1.4\text{m}$)。なお、風と波浪中の動揺シミュレーション解析等に使用する波浪スペクトルは、大阪湾波浪観測塔において観測された波浪スペクトル等から、プレットシュナイダー&光易型を使用することにした。潮流速について常時は既往のデータにより、データのない暴風時には、現地地形を考慮した推算より定め、常時 0.2m/s 、暴風時 0.5m/s とした。津波については、大阪市の地域防災計画により架橋地点で、潮位変動は $\pm 2.62\text{m}$ 、流速は 2.60m/s (潮流含む)とした。

4. 3 地震力

本浮体橋については、架橋地点の活断層環境及び地形・地質・地盤の影響を考慮した「想定地震」を用いることとした。具体的には「道示」におけるレベルII・タイプI(プレート境界型)に相当する地震波として東南海道・南海道地震断層系を対象とした断層モデルによる想定地震波形を、また、タイプII(内陸直下型)に相当する地震波として上町断層活断層系による想定地震波を用いることとした。さらに、兵庫県南部地震におけるPORT ISLAND・UG-83m・NSの実測波形と「道示」参考資料の標準3波についても参考地震波として位置づけ応答を算出し検証することにした。

4. 4 その他特徴的な荷重

旋回式浮体橋として船舶衝突荷重(CO)と橋体の駆動荷重(DR)を設定した。

4. 5 荷重の組合せ、許容応力度の割増しと安全率

浮体橋の設計実務からは技術課題に対する解析・実験から得られた検討結果を設計にどのように取り入れるかが大きな問題である。新しい構造形式の設計規範を考える場合、その破壊形態を想定して安全率を想定したり、確率論を用いた信頼性理論に基づき検討するのが理想的であるが、そのためには数多くのデータ収集が必要であり、今後の大きな課題である。本橋の設計は、部分的に適用可能な様々な現行設計基準を組み合わせることとし、各基準によりがたい荷重の組合せ等については、土木学会で提言されている安全性の評価手法³⁾を参考に許容応力度の割増しを設定した。浮体構造と海中係留橋脚に対する荷重の組合せと許容応力度の割増しを表-2に示す。ただ、主要部材については崩壊機構を考慮し、終局破壊に対する余裕量を算定することとした。また、支承、伸縮継手、橋脚天端幅等の設計では、動揺、地盤変動、地震の影響により変位量がかなり大きくなることから変位に対する設計検討を行うこととした。

5. 安定性の検討

本橋のような長大橋をポンツーンで2点支持する場合、浮体構造としての安定性が問題となる。本浮体橋は、航路限界として高さ26mを確保することから、重心位置および風荷重の作用位置が高く、その安定性については最も注意を払う必要がある。風や波浪による安定性は動揺問題も含めて、解析や実験で検証するが、ここではその基本となる静的安定性および既応の基準による照査について述べる。

初期復原力による浮体の静的安定性は、図-5に示す橋体の重心と横メタセンターの垂直距離(TGM)が正であることが必要である。これは“やじろべい”の支点と両端のおもりの垂直距離にあたるもので、この数値が大きいくらい、安定性が高いことになる。基本設計のポンツーン寸法に対して、活荷重の無載荷時(S1)、偏載荷時(S2)、全載荷時(S3)の3ケースについて算定した結果を表-3に示す。これらの数値を船舶や従来の海洋構造物と比較すると大きな値となっており、本浮体橋の復原力は非常に大きいことが分かる。

次に、動的安定性については、次式で照査を行った。⁴⁾

$$\text{面積}(A+B) \geq 1.4 \times \text{面積}(B+C)$$

ここで、面積A、BおよびCは図-6の模式図に示されるもので、復原力が傾斜の作用モーメントの1.4倍以上あることを規定している。本橋においてもポンツーンの大きさをパラメーターとして検討し基本設計を実施した。ポンツーンの大きさを58m×58m×8mとした場合、その復原力と傾斜モーメントの比を表-3に合わせて示した。また、不慮の漏水や事故に対しフェイルセーフの観点から、本橋のポンツーンは鋼製二重隔壁構造(ダブルハル構造)としており、船舶衝突などによる外板損傷で外周の隣接2区間に浸水した場合や、また、腐食などにより内部1区画に浸水した場合にも安全であり、かつ使用性に支障がないことを確認している。

6. 係留方法

浮体橋は、鉛直方向には浮力で支持されるが、風及び波浪、地震等横方向の支持が大きな問題となる。横方向支持は係留形式となる。係留方法として、アンカーチェーン方式、軟着底方式、フェンダー係留方式を検討した。アンカーチェーン係留は実績も多く、シンプルなシステムであるが、本橋の場合、径150mm程度のチェーン20点が必要となり、旋回時にチェーンの着脱が困難なことや、定着アンカーが大きくなり広範囲の海底地盤改良が必要であること。また、橋体水平移動量が約3mとなり交通供用に支障となることから不適当とみなした。軟着底方式は波浪や風荷重に対しては滑動しないが、地震時は若干の滑動を許容するという考え方である。形式として風および波による動揺がないという利点を持つが、軟弱な海底地盤の上に設置するには巨大な基礎が必要となることや旋回時に浮上させるために注排水、地切り作業に時間がかかることから不適当とした。フェンダー係留方

式は、橋体の移動を比較的小さく押さえることができ経済的にも有利であるため、最終的に①反力壁方式②リンクダンパー方式の2案に絞られた。2つのフェンダー係留方式の比較表を表-4に示す。本浮体橋については、動揺特性、旋回時の作業性の面から反力壁方式を採用することとした。

係留用フェンダーに用いる定反力型ゴムフェンダーは、図-7に示すような反力特性をもつ。ただし今回の浮体橋を横支持する緩衝材として使用するため、圧縮試験だけでなく多くの項目について特性試験を実施した。その結果を踏まえて選定(サイズ等)規準、設計反力及び性能判定を以下のとおりとした。

- ①フェンダー反力は、動揺シミュレーションにより算定された最大反力の1.5倍とする。
- ②フェンダー特性の変動幅は、特性試験結果より安全側の評価を行い算定した。すなわちフェンダー反力は同一歪に対し、断面力算定では変動幅の上限値15%増、動揺量算定では下限値の20%減を考慮する。また、地震時の速度依存性(動的特性)についても考慮する。
- ③動揺シミュレーションにより算出された定常外力によるフェンダーの最大歪量が10%以下であること。
- ④動揺シミュレーションにより算定された変動外力もふくめた全荷重によるフェンダーの最大歪量が許容変形($\delta a = 38\%$)以下であること。

7. 風洞実験⁵⁾

浮体橋は、安定性や係留方式といった予備検討においても固定式橋梁と比較して、暴風時における風荷重と波力が各部材設計の支配的要因となる。このため、設計においては適切な風荷重の評価が必要であるとともに、比較的簡易な対策により風荷重の低減を図ることが可能であれば経済的にも有利となる。そこで、三次元剛体模型を用いた風洞実験により、本橋の静的風荷重特性(主に抗力係数)に対する検討と風荷重軽減対策を図ることにした。風洞実験は、回流式風洞(測定部:幅2.5m×高さ3.0m×長さ20m)において、縮尺1/100の三次元剛体模型を用いて実施した。基本断面について実験結果から以下の点が明らかとなった。

- ①抗力は、橋軸直角方向からの水平偏角 $\beta = 30^\circ$ の風向に対して最大となり、迎角 $\alpha = 0^\circ$ における抗力係数は $C_p = 1.79$ と、「道路橋示方書」に準じた当初設計での想定値 $C_p = 2.30$ に比べ、約22%小さい値となる。
- ②迎角の影響については、便宜上、橋体にローリング変位(橋軸回りの回転)を与えた状態に対して検討を行った結果、迎角 $\alpha = +15^\circ$ における抗力係数は、 $\alpha = 0^\circ$ での値に比べて約11%増加する。
- ③気流としては、一様流のほか、境界層乱流(路面高度での主流方向乱れ強さ $I_u = 10\%$)を用いた検討も行ったが、気流特性による顕著な影響は認められなかった。

次に、風荷重軽減対策については、主として抗力の低減に着目し、上側アーチ、下側アーチ、補剛桁の各部材に対し、個別にいくつかの対策案について検討を行ったのち、各々の最適な対策の組合せに対しての空気力計測を行い、以下の対応を図ることとした。

- ①上下のアーチリブに対して、その側面に見付け角が約 30° となるような隅切りを設ける。
- ②補剛桁に対しては、フェアリングの設置と桁下面の閉塞により流線形化を図る。

これらの対策によって、抗力は約20%の低減が可能となることから、基本断面に図-8に示す対策を実施することにし、補剛桁については化粧板方式ではなく、桁そのものを箱形とすることとした。

8. 大型水槽実験と動揺シミュレーション

浮体橋の設計において、風および波浪による動揺の特性やその数値を正確に把握することが不可欠である。本橋の場合、前述のようにゴムフェンダーで支持する方式のため、その非線形性も考慮した解析手法を新たに開発する必要があった。また、比較的柔かい橋梁構造の弾性影響や旋回時の安全性の照査も必要となる。

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」には、浮体構造物を設計する場合、シミュレーションによる動的解析と

検証する実験の必要性が規定として挙げられている。本浮体橋の設計においても、構造解析プログラムの開発と、シュミレーション計算の妥当性を検証する大型水槽実験を実施した。さらに、非線形性の大きい定反力ゴムフェンダーの実挙動を把握する目的で、ハイブリッドシュミレーションも実施した。大型水槽実験としては、3種類の実験を実施し、動揺シュミレーションも基本式は同じであるが、それぞれの実験に合致するように改良した3種のプログラムで検証した。表-5にこれら大型水槽実験内容とハイブリッド実験の概要を示す。

8. 1 実験Ⅰ（地形模型による剛体模型実験）⁶⁾

- ① 夢洲～舞洲間の水路、護岸構造を忠実に再現し、波の回折や干渉の影響を取り入れた架設位置での海象条件を把握する。
- ② 浮体橋全体の動揺、ゴムフェンダーの変形等のデータを得るとともに、それを、表現できるシュミレーション手法およびデータを作成する。

8. 2 実験Ⅱ（弾性体模型実験）

- ① 波浪中における浮体橋の弾性応答の特性⁷⁾を実験的に調査すること。
- ② 構造設計に用いる波浪中弾性応答シュミレーションの適用性を実験的に検証すること。

8. 3 実験Ⅲ（旋回機能確認実験）

- ① 旋回機能の確認、及び旋回機構部に働く荷重の確認。
- ② 船舶のタグ推力などの旋回作業における運用データの取得。
- ③ 仮係留時の係留力の確認。
- ④ 数値解析結果との比較による解析プログラムの検証。

8. 4 実験Ⅳ（ハイブリッド試験）⁸⁾

ゴムフェンダーは、実験においては圧縮部材として器具や等価バネで置換し、解析においては1つの圧縮特性（ヒステリシス）を定式化している。しかしながら、浮体橋は6自由度の運動をするため、実際のゴムフェンダーには圧縮変形だけでなく、せん断変形や傾斜変形が発生する。ゴムの反力特性は圧縮以外の変形を同時に受けた時変動することが知られており、繰返し回数によってもヒステリシスが変化する。このため、ゴムフェンダーの特性が、発生する変形に対してどのように変化するか、シュミレーション計算における定式化が妥当であるか検証する必要がある。そこでゴムフェンダーの縮尺模型を作成し、2次元の浮体橋の動揺シュミレーションを行いながら、その変位を3軸圧縮試験機によりフェンダーの圧縮試験を行い、その反力荷重をリアルタイムでシュミレーションにフィードバックし、それを逐次計算するハイブリッド試験を実施した。

参考文献)

- 1) 宝田直之助：超大型海洋構造物のテクノロジ・アセスメントの一例(その6)；土木学会誌647号(1983. 5)
- 2) 久保秀夫：超大型浮体式海洋構造物（メガフロート）の現状と展望；土木学会論文報告集527号，神戸クリスタルタワー(1995. 10)
- 3) 白石成人編：構造物のライフタイムリスクの評価，土木学会誌72，土木学会(1988. 12)
- 4) 浮体構造物技術マニュアル：(財)港湾建設センター(1991. 3)
- 5) 丸山、小川、下戸居：舞洲～夢洲連絡橋(仮称)の風荷重に関する検討；土木学会誌52号秋号増付集録I-701(1995. 9)
- 6) 丸山、川村、武田、永田、三宅、藤田：浮体式橋梁の波浪中動揺に関する研究；土木学会誌74号，土木学会(1997)
- 7) 上田、瀬戸、熊本、井上、岡：浮体橋梁の弾性応答解析法に関する研究；土木学会誌Vol. 13, (1997. 6)
- 8) 丸山、川村、武田、永田、吉田、山瀬：ハイブリッドシュミレーションによる数値係留シュミレーション手法の検討；土木学会誌74号，土木学会(1997)

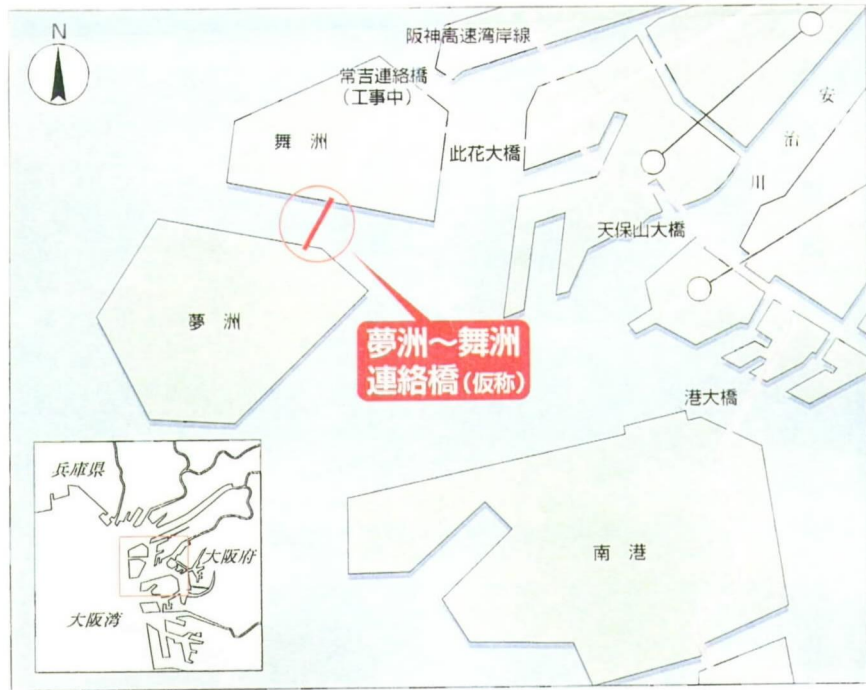


図-1 夢洲～舞洲連絡橋位置

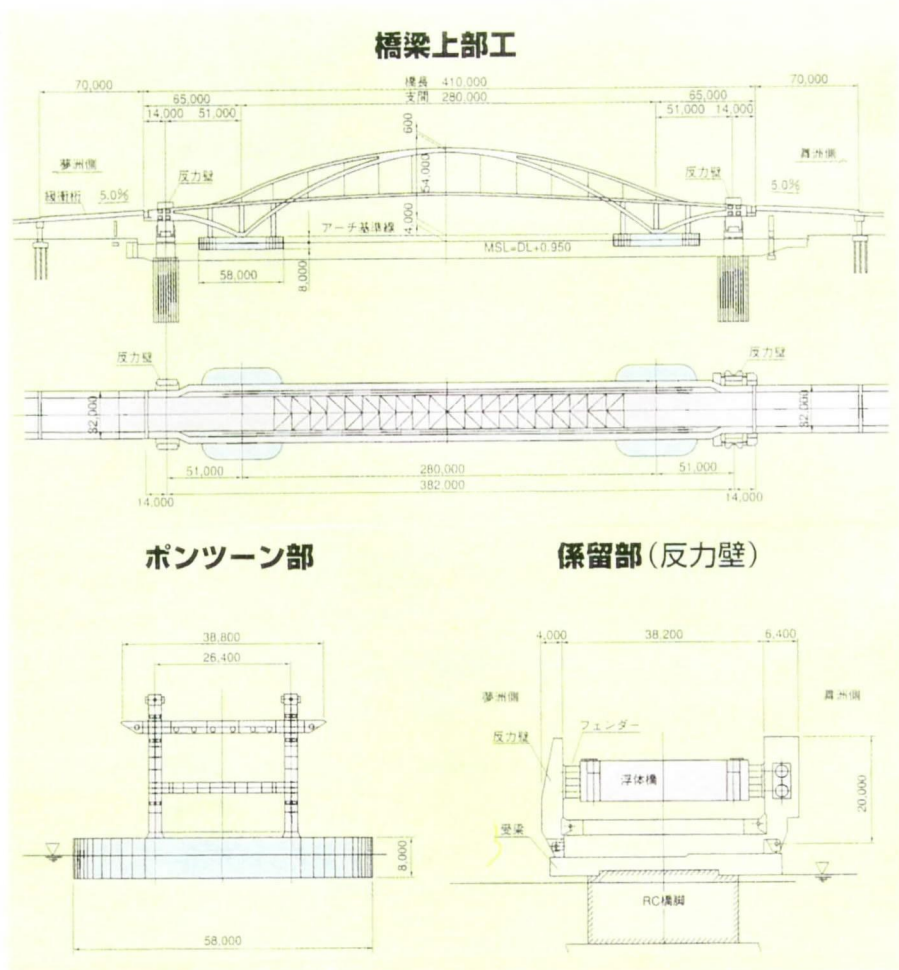
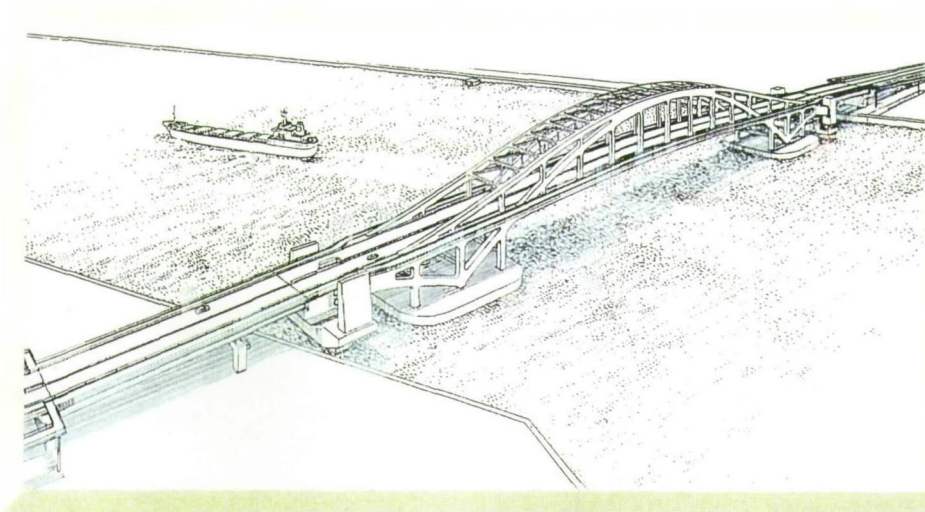


図-2 夢洲～舞洲連絡橋一般図

旋回プロセス

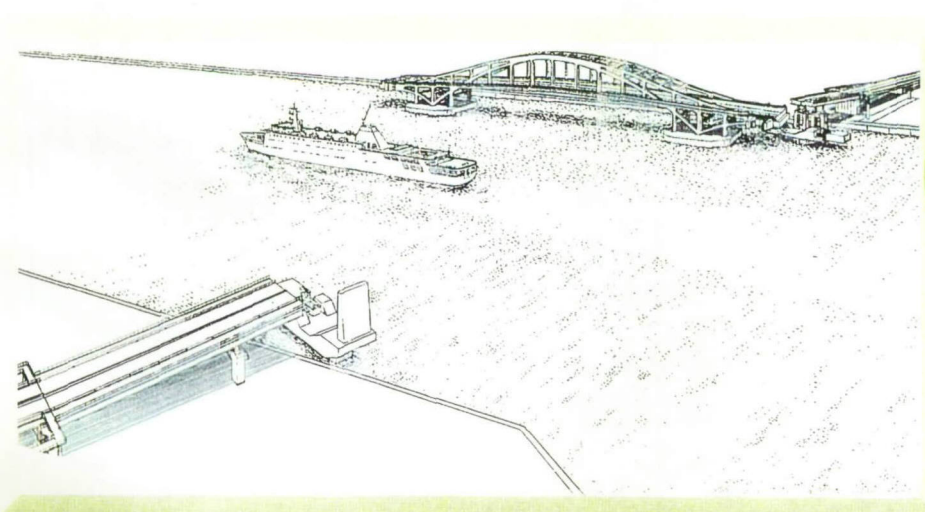
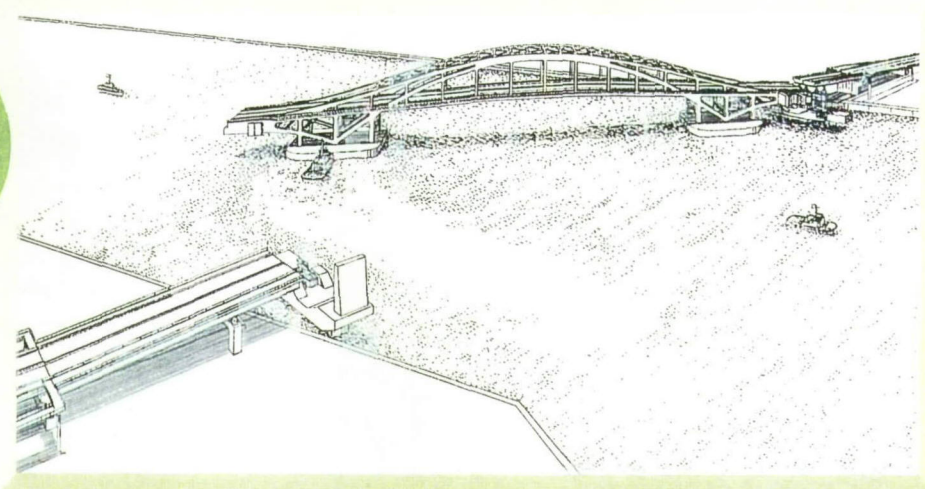


1
供用時

旋回中心である回転ピンを挿入し、浮体構造に結合されている緩衝桁をジャッキアップ装置で持ち上げ、通常浮体橋を係留していた反力壁を倒すことで旋回準備が完了します。

2
旋回時
(タグボート旋回)

浮体構造の浮き袋であるポンツーンをタグボートで押すことで、回転ピンを中心に浮体構造が旋回します。

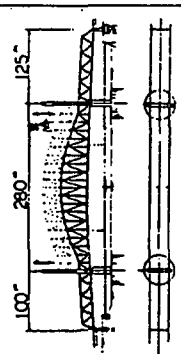
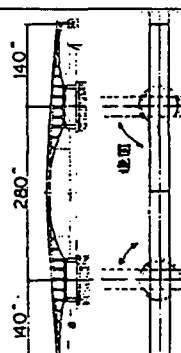
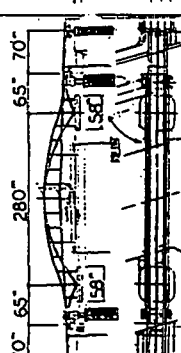
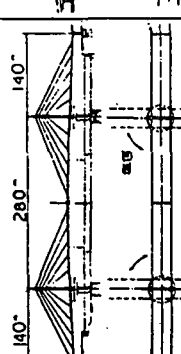
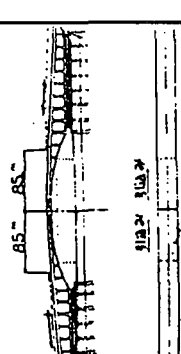


3
開橋時

旋回完了後、浮体構造を仮係留し開橋が完了し、航路として大型船が航行可能となります。

図-3 旋回プロセス想像図

表-1 形式選定における比較

	第1案	第2案	第3案	第4案	第5案
	昇開橋(下路曲弦トラス形式)	浮体橋(ブール式上面支持方式)	浮体橋(一体浮体方式)	旋回橋(斜張橋形式)	引込み橋(昇降橋付きリフト橋)
概略図					
交差条件	○	△	○	○	△
地盤変動	△	○	○	△	△
構造性	△	△	○	○	△
使用性	○	○	△	○	△
可動性能	○	○	△	△	△
経済性	△	△	○	○	△
施工性	△	△	○	△	△
維持管理	△	△	○	△	△
景観	△	△	○	○	△
新規制	△	○	○	○	○
総合評価	△	X	◎	○	X

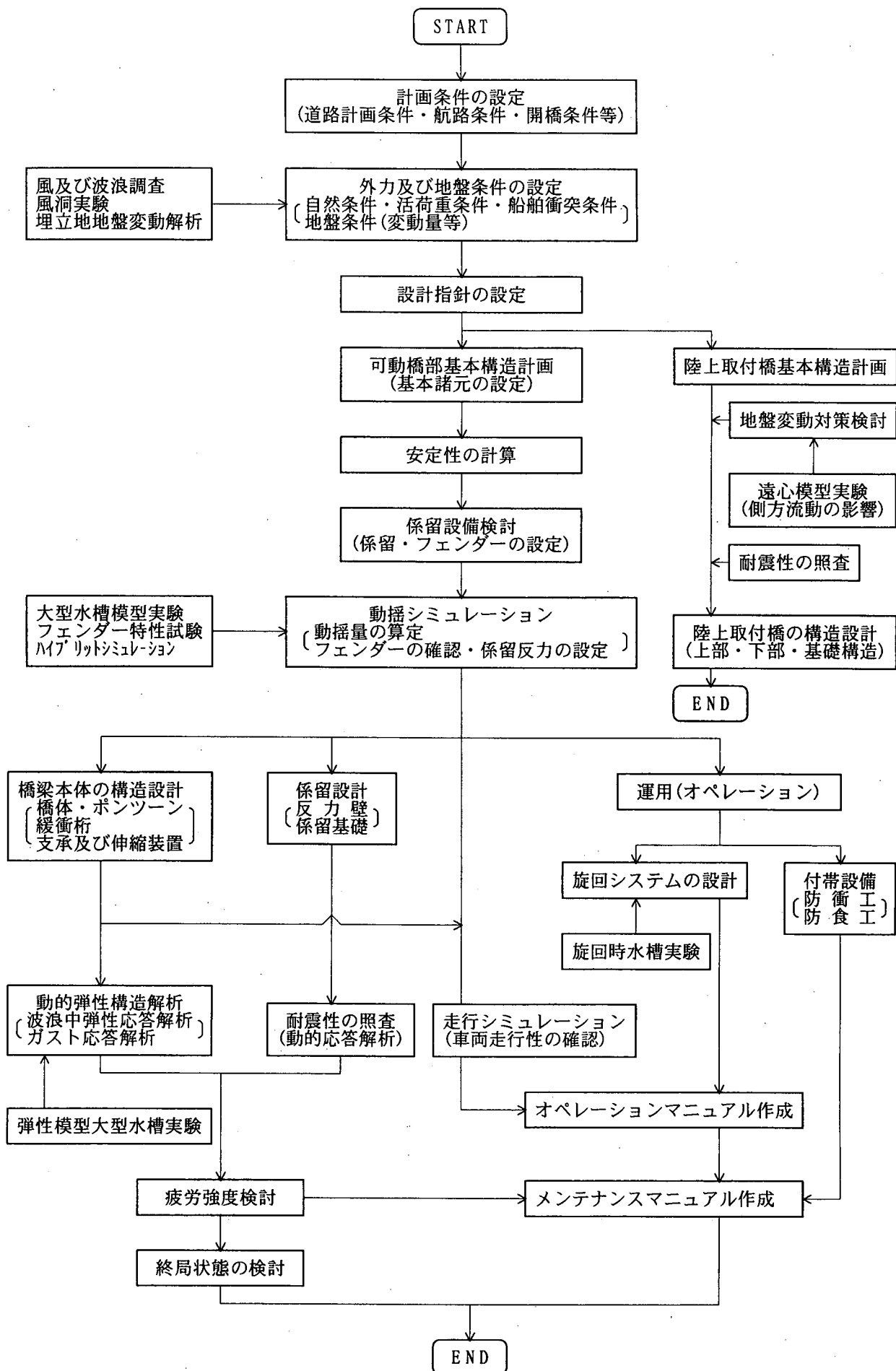


図-4 浮体橋技術課題検討フロー

表-2 荷重の組み合わせと許容応力度の割増

①浮体構造(橋梁上部構造、ポンツーン、回転ピン)

荷重状態	荷重の組合せ	許容応力度の割増し
常時	D+U+L+I	1.00
温度時	D+U+L+I+T	1.15
暴風時	D+U+W+WP	1.20
地震時	D+U+EQ	1.50
旋回作業時	D+U+W+WP+DR	1.25
開橋時	D+U+W+WP	1.25
架設曳航時	D+U+W+WP+ER	1.25

- ここに、
- 死荷重 (D)
 - 活荷重 (L)
 - 衝撃 (I)
 - 浮力または揚圧力 (U)
 - 土圧 (E)
 - 風荷重 (W)
 - 温度変化の影響 (T)
 - 地震の影響 (EQ)
 - 波浪の影響 (WP)
 - 潮流力 (PD)
 - 地盤変動の影響 (GD)
 - 支点移動の影響 (SD)
 - 橋体の駆動荷重 (DR)
 - 施工時の荷重 (ER)
 - 船舶衝突荷重 (CO)
 - 津波 (TU)

②海中橋脚(反力壁、反力壁受梁、同アンカーフレーム、RC橋脚、鋼管矢板井筒基礎、浮体構造の防げん材取付部を含む)

荷重状態	荷重の組合せ	許容応力度の割増し
常時	D+U+GD	1.00
温度時	D+U+T+GD	1.15
暴風時	D+U+W+WP+GD	1.50
地震時	D+U+EQ + $\frac{1}{2}$ GD	1.50
旋回作業時	D+U+W+WP+DR+GD	1.25
開橋時	D+U+W+WP+GD	1.25

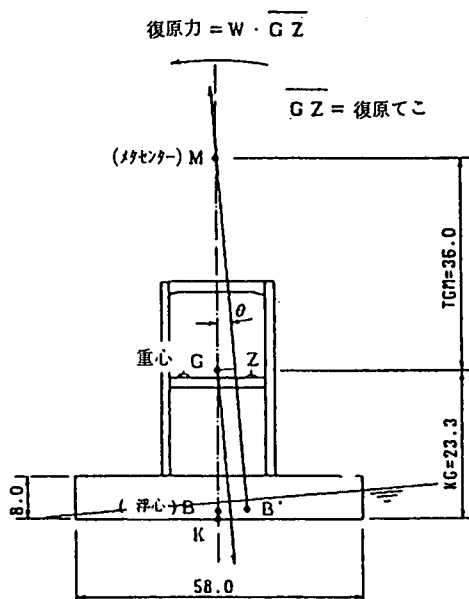


図-5 浮体橋の静的安定模式図

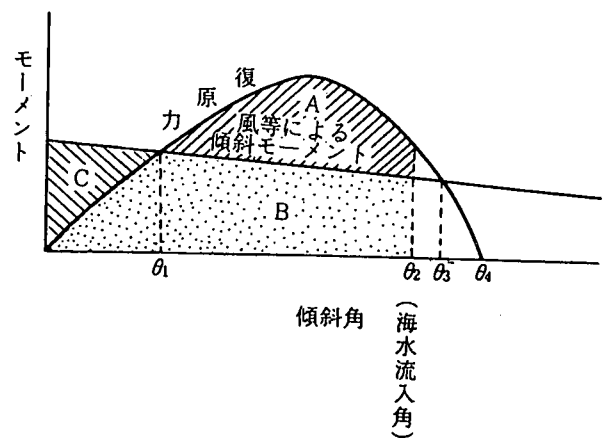


図-6 浮体橋の動的安定模式図

表-3 浮体橋の安定度の算定

	活荷重なし $V_{10}=42\text{m}^3/$	活荷重偏載 $V_{10}=20\text{m}^3/$	活荷重全載 $V_{10}=10\text{m}^3/$	条 件
平均吃水 d (m)	4.80	5.08	5.30	
排水量 Δ (t)	31,445	33,287	34,700	
重心高さ KG (m)	26.38	26.58	26.72	
横メタセンター TGM (m)	30.09	27.03	24.92	$TGM > 0$
$DSR=(A+B)/(B+C)$	1.44	4.97	4.50	$DSR \geq 1.4$

(海水比重 : 1.025)

表-4 係留方法の比較

項目	形式	反力壁方式	リンクダンパー方式
橋体の動揺		橋体の重心レベルの高さで係留するため風、波による動揺が比較的小さい。	ポンツーンレベルで係留するため、反力壁方式に比べ、動揺が大きい。
開閉橋作業性		反力壁の起倒により、位置決めや、係留解除が比較的容易に出来る。	ロッド着脱時、位置保持装置が必要で、着脱作業に手間がかかる。
要検討技術		高さ 20m の起倒式鋼製壁。反力壁の起倒及び固定ピンの脱着装置。	リンク機構。 ロッド脱着機構。
ドルフィン/基礎		荷重作用点が高いため大きなモーメントが作用する。	荷重作用点が低いためモーメントは小さい。

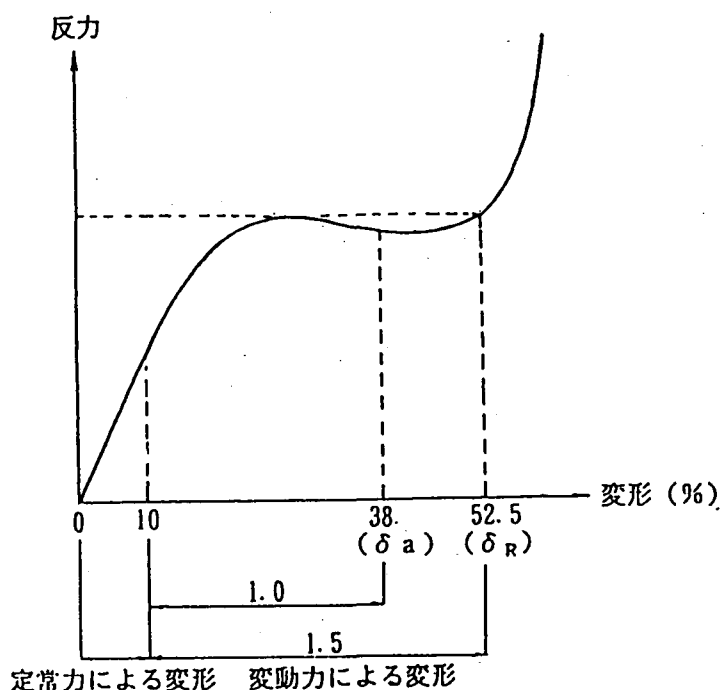


図-7 定反力型ゴムフェンダーの圧縮特性

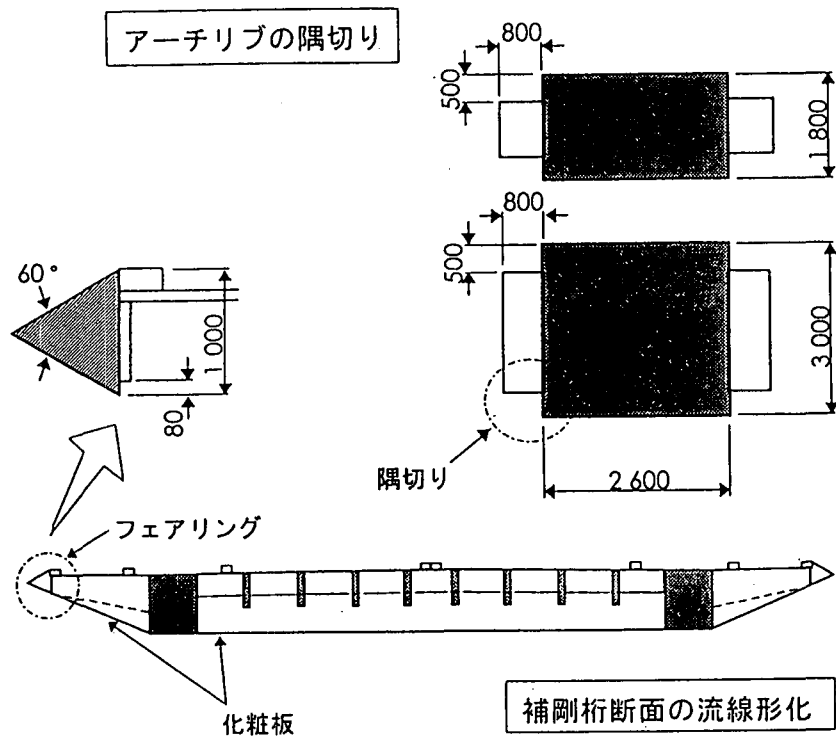


図-8 風荷重低減対策

表-5 水槽実験およびハイブリッドシミュレーションのまとめ

	模 型	縮 尺	水 槽 寸 法 (長さ) (幅) (深さ)	実 験 場 所
実 験 I	地型模型 剛体模型	1/80	50m×40m×*	茨城県土浦市
実 験 II	弾性模型	1/40	190m×30m×*	長崎県長崎市
実 験 III	剛体模型 軸受模型	1/80	100m×5m×*	東京都昭島市
実 験 IV	フエントナー模型	1/12.5	—	運輸省 港湾技術研究所

*深さについては、現地水深に合わせた模型とした。
また、実験 II では深度を変化させた実験も実施した。