

◆ 報文 ◆

浮体橋の建設技術に関する調査

佐藤弘史* 平原伸幸** 楠原栄樹*** 麓興一郎****

1. はじめに

海に囲まれ、多数の島嶼部を有するわが国においては、海峡などにより隔てられた地域が多く存在している。これらの地域の連携、交流を図り、多様な地域特性を活かし、国土の均衡ある発展を実現するためには、海上を横断する構造物が必要となる。

海上を横断する構造物を実現には、大幅なコストの縮減を可能とする新たな技術開発が必要であり、新道路技術五ヵ年計画の中で「地域の連携と交流を促進する新交通軸形成技術」の開発調査を実施している。この検討の中では、新たな海峡横断構造物として浮体橋・トンネル等を対象に、技術調査を行っている。

ここでは、浮体橋に焦点をあて、事例調査を通して、新たな海上横断構造物として浮体橋の実現可能性および、技術的課題の整理を行い、現在、研究開発を実施するためのポイントとなっている点を報告する。

2. 事例調査と可能性の検討

国内外における海上構造物の実例や構想について文献等を調査し、主要な海上構造物の事例として表-1に示すような結果が得られた。今後、新たな海上横断構造物として体系的な検討を進めにあたり、わが国において実績が無く、設計手法が確立されていない構造を選定することも必要である。

これらのうち、浮体橋は、図-1(浮体構造が箱形のポンツーン形式(連結型と単体型)と半潜水型のセミサブ形式)の様に、浮力を利用した橋梁であり、下部工の省略により費用対効果が高くなる可能性のある構造である。

また、諸外国の比較的静穏な水域(湖やフィヨ

表-1 海上構造物の主な事例

形式	構造物名	延長	備考
吊橋	明石海峡大橋(兵庫)	2.0km	1998完成
	海峡横断道路プロジェクト	—	構想
	メッシナ海峡(イタリア)	3.3km	構想
浮体橋	ベルグソイスンド橋(ノルウェー)	0.8km	1992完成
	ノルトホルトランド橋(〃)	1.2km	1994完成
	第1ワシントン湖橋(アメリカ)	2.0km	1992改築
	第1ワシントン湖橋(〃)	2.3km	1963完成
	第1ワシントン湖橋(〃)	1.8km	1989完成
	夢舞大橋(大阪)	0.4km	2001完成
トンネル	東京湾アクアライン(東京)	15.1km	1997完成(水底)
	多摩川トンネル(東京)	1.5km	1994完成(沈埋)
	室蘭噴火湾トンネル(北海道)	22km	構想(水中)
	ジブラルタル海峡	50-70km	構想(水中)

その他の海洋構造物：海上石油備蓄基地、浮き消波堤、メガフロート

ルド等)において既に実績のある構造であり、国内においても十分適用できると考えられる。

既往の実例を参考に工費の試算を行い、1mあたりの費用で従来構造と比較した結果を表-2に示す。既往の実例としては水深と延長より適用構造を選定した。例えば、水深15mでは、比較的軟弱で30m程度の鋼管杭が必要なケースを選定し、水深30mでは、橋脚の設置が困難であるため、多柱式基礎を有するPC斜張橋を選定した。なお、水深200m、延長12kmというものは従来構造物では適用が困難なことから山岳トンネルとの比較とした。一方、浮体橋の方はポンツーンの諸元は設計波高1mであるノルウェーのBergsoysund橋を参考にし、費用はコンクリートケーソン製作の実績など既往のものを用い算出した。セミサブ型については、有義波高(ある時間内の波のうち、波高の大きな方から1/3を抽出し平均した波高で、目視で観測される波高はほぼ有義波高に等しいとされている)4.2mで検討された例を参考に求めた。この表から、従来構造の橋梁に比べ、場合によっては大幅なコスト縮減の可能性が見込めることがわかる。なお、トンネルとの差があまり現れていないが、岸の近くに急深部があるなどの条件

(a) 連続ポンツーン
第一ワシントン湖橋(アメリカ)(b) 分離ポンツーン
ノルトホルトランド橋(ノルウェー)

(c) セミサブ型

図-1 浮体橋のイメージ

表-2 浮体橋における工費試算例

ケース	水深	延長	単価比	適用構造	比較構造
①	15m	600m	0.5	連続ポンツーン	連続鋼床版桁橋
②	30m	600m	0.5	分離ポンツーン	PC斜張橋
③	50m	1,400m	1.1	セミサブ型	沈埋トンネル
④	200m	12,000m	0.9	セミサブ型	山岳トンネル

単価比は一番右の比較構造と適用構造の1m当たりの比

では、トンネルの場合は、必要な深さに至るまでのアプローチ部分が必要となることから、浮体橋の方が経済的になる可能性がある。

以上より、諸外国の静穏な水域において、既に実例があり、下部工の省略により経済的となる可能性が高い浮体橋を対象に、さらに検討を進めることにした。

3. 技術的課題の整理

我が国で浮体橋を建設する場合に解決すべき主要な技術的課題は、以下のとおりある。

① 設計条件の設定

これまでの諸外国における浮体橋は、比較的静穏な場所に建設されてきているが、わが国において浮体橋が必要とされる建設サイトは、必ずしも静穏な場所ばかりであるとは限らない。特に浮体橋は、潮流力や波力の影響を大きく受けすることが予想されるため、精度の高い設計条件の設定方法の開発が必要である。

② 合理的な係留方法の開発

より厳しい気象、海象条件下及び大水深の現地条件においても、経済性を損なうことなく安定して浮体を係留できる方法の開発が必要である。

③ 浮体の動揺量推定方法の開発

浮体橋の形式に関わらず、波力、潮流力、自動車の走行等に伴い浮体橋は動搖することが予想さ

れる。浮体の動搖は、使用性や耐久性に大きな影響を与えると考えられ、浮体橋の動搖量を精度良く推定する方法の開発が必要である。

④ 維持管理技術の開発

浮体橋においては、浮力が確保されることが前提条件であるため、腐食対策や船舶衝突等も考慮した維持管理技術の開発が必要である。

これらは、解決しないといけない課題であるが、まずは建設の可能性があるかということに着目した。そこで、建設後の④は除き、建設に必要な①か③については、とりあえず現在得られている知見を元に、実際に現地で適用が可能かどうかの予備的な検討を行った。尚、評価としては、水平変位についてと車の走行性に支障をきたさない加速度以下になるかということに着目した。

4. 浮体橋適用に関する検討

4.1 現地条件等の整理

日本沿岸部における風、波浪、潮位差、水深、航行船舶の条件を、これまで公表されている資料により整理した。浮体橋に影響を与えると考えられる有義波高、潮位変動の整理結果を図-2、3に示す。

図-2より日本海側の一部を除き有義波高が3m以下となる確率は95%を超えており、通常の使用状況においては3m程度の波高を考慮しておけば良いと考えられる。一方、潮位差については図-3に示すとおり、最大で6m程度の場所があるものの、2~3m程度を見込んでおけば良いと考えられる

4.2 浮体橋の変形に関する検討

浮体橋は鉛直方向の荷重には浮力で抵抗してい

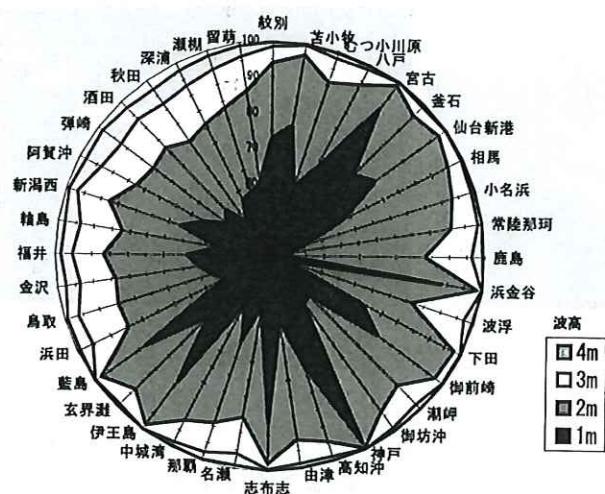


図-2 有義波高の生起確率

るのに対して、水平方向の荷重（風力、潮流力等）には係留による何らかの抵抗手段を使用する必要がある。

浮体の係留方法としては、図-4に示す3種類のものが考えられる。チェーン係留は、チェーンが描くカテナリー曲線（ケーブル構造の自重による自然な曲線）への復元力を期待した構造であるため、水深が深くなると非常に長いチェーンが必要となり不経済となる傾向にある。逆に、テンションレグ係留は、浮体を支えるテンションレグの反力を地盤に伝達するための基礎が必要となることから、水深が浅い場合には不経済となる傾向がある。また、上部工による抵抗は、水平力をアーチ効果により軸力に変換するために必要な曲線（放物線）にそった桁形状とする必要があるため、長支間への対応が困難な構造であると考えられる。

水平力に対する抵抗力は一般に、小さい方から整理すると (a) チェーン係留、(b) テンションレ

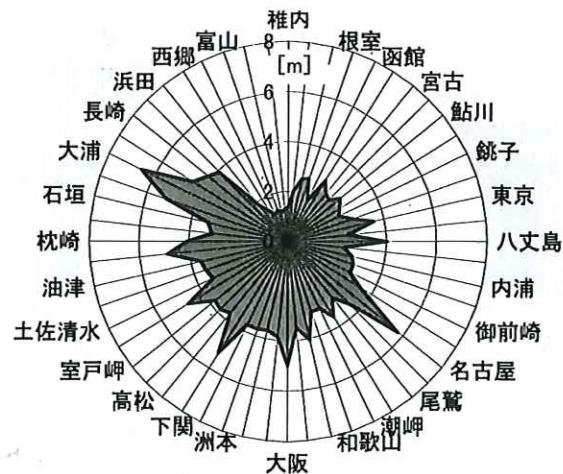
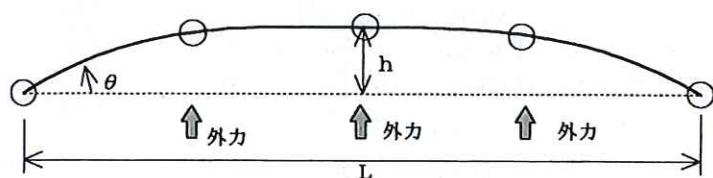


図-3 国内の潮位変動



$$\tan \theta = 4h/L$$

(θ ; 端部における角度、 h ; 支間中央における水平変位、 L ; 全長)

図-5 浮体橋の変形量

グ係留、(c) 上部工による抵抗の順であると考えられるが、上述のように採用できる係留方法は現地条件に大きく左右されるため、各係留方法の単純な経済比較は困難である。

一方、水平荷重が作用した場合に生じる変形量については、図-5の様な変形状態を想定し、通常の橋梁で一般的に使用される伸縮装置（変形性能約3°）の適用を考えた場合、全長の1.5%程度が水平変位の限界と考えられる。

4.3 動揺に関する検討

車の走行性に支障をきたさないためには、ある

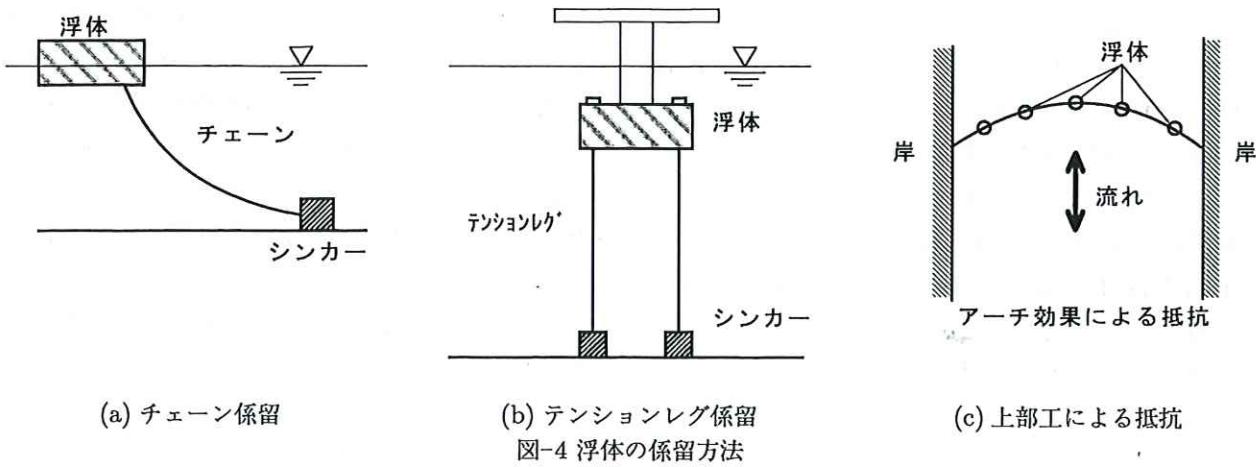


図-4 浮体の係留方法

加速度以下にする必要がある。それには浮体が波力をうけてどの程度、動搖するのかを調べておかねばならない。そのため、船舶等で使用されている動搖解析プログラム(特異点分布法)を用いて、①チェーン係留、②テンションレグ係留に対して、波高および周期をパラメータとした動搖解析を実施した。今回の解析は分離型ポンツーンの1つの浮体に対して行い、連続化の影響等は考慮していない。検討対象は、橋軸直角方向の水平運動の加速度と、橋軸周りの回転運動の加速度に着目した。波は規則波で一方向、入射角は橋軸直角とした。浮体の規模としては、支間100m程度の連続桁橋の鉛直荷重に対して静的に安定する大きさ(図-6)を想定した。

動搖解析に用いた特異点分布法は境界要素法の一種であり、速度ポテンシャルから物体表面の圧力を求め、流体力を算出する方法である。この流体力から下記の運動方程式に基づいて解析を行った。

$$\sum_{k=1}^{16} (M_{jk} + A_{jk}) \cdot k + B_{jk} \cdot k + C_{jk} \cdot X_k = F_{ej} \quad (j = 1 \sim 6)$$

X_k : k モードの動搖

M_{jk} : 浮体の質量、慣性モーメント

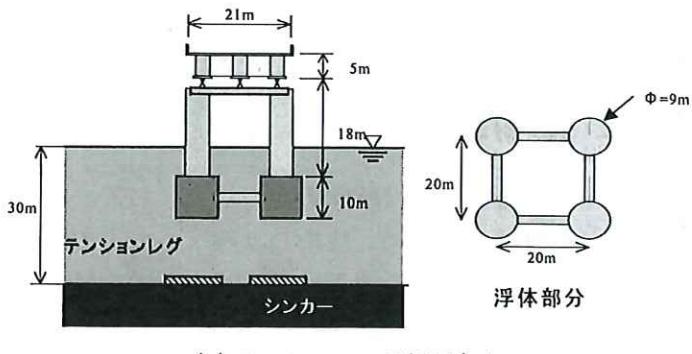
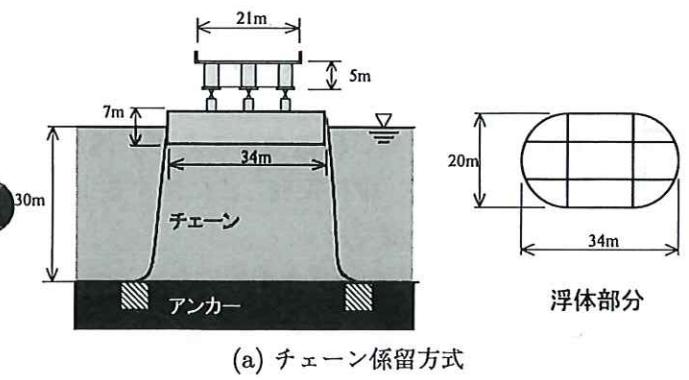


図-6 想定した浮体断面

- A_{jk} : 付加質量 浮体周囲の流体で浮体とともに運動する流体の質量
 B_{jk} : 減衰力係数(造波減衰)
 C_{jk} : 復元力係数
 F_{ej} : 波強制力

解析結果を図-7に示す。現時点において、このような浮体構造の許容加速度についての規定はないため、仮にノルウェーの浮体橋で設定されている許容加速度(水平方向0.6m/s²、回転方向2deg./s²)を適用すれば、チェーン係留で約1m、テンションレグ係留で約3mの波高まで許容できることとなる。波高については図-3でも示したとおり、有義波高3mの非超過確率は日本海側の一部の地域を除いて95%以上であり、国内における適用性は比較的高いものと考えられる。

4.4 一般橋梁との概略比較

以上の検討結果より、諸外国の基準を用いれば、わが国においても浮体橋を適用できることが明らかとなったため、従来の橋梁との工費を概略で比較した。想定した現地条件としては、水深30m程度、延長1kmとし、従来構造としては支間500m程度の斜張橋を選定した(図-8)。

前節の動搖解析の結果、有義波高が1m程度の場合には、チェーン係留による浮体橋の適用が考えられる。一般的な橋梁(支間100mで4車線の連続桁橋)の上部工を想定して浮体部分(図-8(a))を試設計し、浮体橋の工費を試算すると、図-8(b)に示すような斜張橋に対して、およそ半分となる結果を得た。

一方、有義波高が3m程度になると、供用時の加速度を適切な値とするため、テンションレグ係留方式(図-6(b))を採用する必要がある。今回の検討のように水深があまり深くないような場合には、シンカーの工費が大きなウエイトを占めるため、チェーン係留方式に比べ工費はやや高くなる傾向にある。チェーン係留の場合と同様に、支間100m程度の上部工を想定した場合の工費を試算すると、同規模の斜張橋に対して約60%程度の値となる結果を得た。

今回の試設計では、小型船舶の航行を考慮し、分離型の浮体形式を採用したが、湖沼部等の航行船舶を考慮しなくても良い場合には、浮体の上面を車道として利用する連続ボ

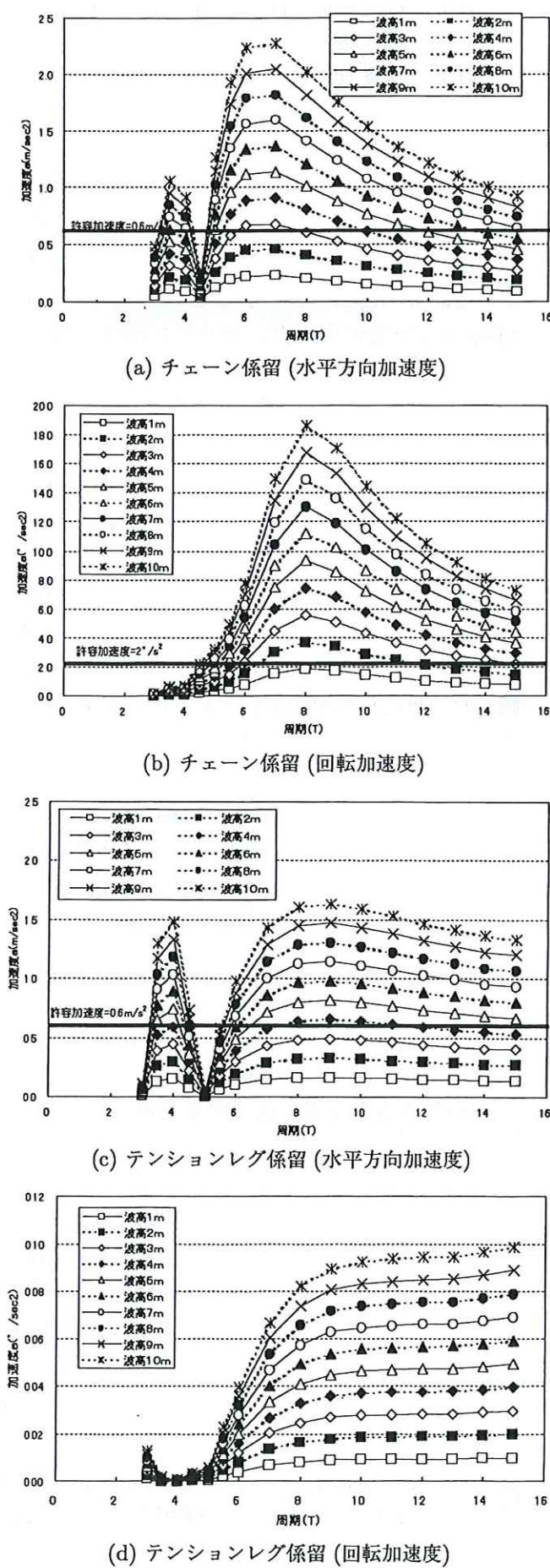


図-7 動揺解析結果

ンツーン方式の採用も考えられ、より経済化が図られる可能性がある。

4.5 浮体橋の実現のための課題

浮体橋を実現するためには、今後以下に示す技術的課題を解決していく必要がある。

- ①外力として大きな影響を及ぼす風、潮流、波等についてそれぞれの外力の相関等を明らかにし、合理的な設計外力設定手法を開発する必要がある。
- ②実際の現象を精度良く再現可能な解析方法(プログラム、モデル化手法)の開発が必要である。わが国は欧米に比べ外的環境が厳しいため、動揺解析を精度よく行う方法を開発すれば、今回安全側に設定している条件の緩和が可能になる。ちなみに、今回の検討では浮体橋の上部工及び連続化の影響と係留アンカーの効果が十分に見込まれていないが、今後は、これらも考慮した解析手法を開発することで、より精度の高い解析が可能となる。
- ③使用時における適切な許容加速度の設定が必要である。今回はノルウェーの基準を用いたが、今後は道路構造令等の観点から整理すれば、より経済的な設計が可能となる。
また今回は検討していないが次の項目も検討する必要がある
- ④異常気象時や船舶衝突等により浮体としての機能が損なわれた場合の終局状態における検討が必要である。
- ⑤これまでに無い構造であるため、係留方法、架設方法、維持管理方法に関するより詳細な検討が必要である。

浮体橋は浮力の確保が前提である。そのため、浮体部の浮力を失わないような維持管理や浮力を失った時の検討が欠かせない。浮体橋の場合、設計時から維持管理を取り込んでおく必要がある。

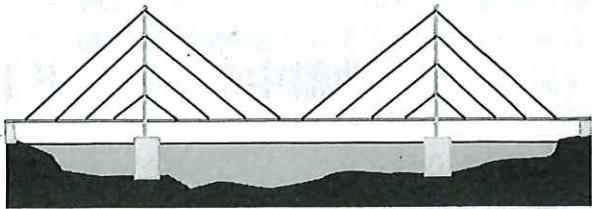
5. おわりに

新たな海上横断構造物の対象として、浮体橋を検討した結果、技術的課題はあるものの、わが国においても適用性が高く、大幅な経済化を図る可能性の高い構造であることが明らかとなった。

以上の検討結果を受けて、現在、土木研究所



(a) 浮体構造



(b) 従来構造(斜張橋)

図-8 比較を行った橋梁のイメージ

では新道路技術5ヵ年計画の中で浮体橋の設計手法に関する検討を実施しており、性能設計型の設計法の提案や動搖量推定方法の開発を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 建設省：次世代海上横断構造物の建設技術の開発報告書、平成12年3月

佐藤弘史*



独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ長
Hiroshi SATO

平原伸幸**



同 構造物研究グループ
橋梁構造チーム上席研究員
Nobuyuki HIRAHARA

楠原栄樹***



本四公団
Shigeki KUSUHARA

麓興一郎****



独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ橋梁
構造チーム主任研究員
Koichiro FUMOTO