

フローティングブリッジの開発について

運輸省 港湾局 技術課 正会員 吉本 靖俊

運輸省 港湾技術研究所 正会員 南 兼一郎

1. はじめに

我が国の都市部のウォーターフロントは極めて稠密に利用されており、必要な空間の確保が困難になりつつある。このため、運輸省では沖合人工島の整備を推進することにより、空間需要の要請に応えるとともに海域の総合的な利用や地域の振興を図っている。

沖合人工島の建設については、基本的には既存の港湾・海洋土木技術により十分対応が可能であるが、その経済性を一層向上させるため、各種の新形式構造物の開発、施工技術の開発等が行われている。運輸省港湾局及び港湾技術研究所では、この一環として、大水深あるいは軟弱地盤等の過酷な建設条件のもとで高い経済性が期待されるフローティングブリッジ（浮体式橋梁）を開発し、沖合人工島のアクセス手段として活用することを検討している。

フローティングブリッジは、過酷な建設条件のもとで経済性が高くなるほか、短期間で施工が可能であり、また波浪制御構造物としての機能も併せ持つため、周辺海域の静穏化が期待されるなどの特徴を有している。

フローティングブリッジの実績は、我が国においては仮設構造物等を除いて未だないが、海外においては、既に本格的な道路橋として供用されている。

本報では、海外におけるフローティングブリッジの実例を紹介するとともに、我が国の海域への適用にあたっての技術課題の整理を行い、その適用可能性を検討する。

2. フローティングブリッジの現状^{1)~8)}

2. 1 海外における実例

現在、アメリカとトルコに合わせて5橋のフローティングブリッジがある。以下にこれらの簡単な紹介を行う。

1) Lacy V. Murrou Memorial Bridge (第1ワシントン湖浮橋)

シアトル市郊外のワシントン湖の中程に位置し、全長2001m、幅18m(4車線)の道路橋で、1940年に完成したアメリカで最も古いフローティングブリッジである。フローティングブリッジが採用された理由は(これは他のフローティングブリッジにも言えることであるが)、水深が比較的大きく、また湖底の地盤状況も悪いため、ピア式では浮体式の倍の工費が必要となることであった。橋を構成するのは、鉄筋コンクリート製のポンツーン25個であり、最大ポンツーンの全長は114mである。設置場所の条件として、水深は30~75m、水位差(季節変動)は0.9mである。

2) Evergreen Point Floating Bridge (第2ワシントン湖浮橋)

第1ワシントン湖浮橋から北へ約5kmの地点に位置し、全長2275m、幅18m(4車線)のフローティングブリッジで1963年に完成した。開橋部(61m)を持ち、中、大型船の航行が可能である。橋を構成するのは33個のPC製ポンツーンであり、最大ポンツーンの全長は108mである。設置場所の条件として、水深は25~61m、水位差(季節変動)は0.9mである。

3) Third Lake Washington Bridge (第3ワシントン湖浮橋)

第1ワシントン湖浮橋の交通量増大に対処するために、第1ワシントン湖浮橋の北側に作られた最も新しいフローティングブリッジで1989年に完成し、全長1800m、幅23m(5車線)一本の歩道を有している。同浮橋の上で撮影した写真を示す。橋を構成するのは、18個のRC、PC製ポンツーンであり、最大ポンツーンの全長は108mである。設置場所の条件として、水深は61m、水位差(季節変動)は0.9mで、設計波高は $H_{1/3}=1.4\text{m}$ 、 $H_{\text{max}}=2.4\text{m}$ である。

4) William A. Bugge Hood Canal Bridge



第3ワシントン湖浮橋

ワシントン州のフッド海峡の架けられており、潮流のある海域に架けられたフローティングブリッジとしては世界初のもので1961年に完成した。橋の全長は1974m、幅9m（2車線）であり、橋を構成するのは23個のPC製ボンツーンで、最大ボンツーンの全長は110mである。船舶航行用の開橋部（183m）を持つ。この橋は他のフローティングブリッジと異なり、全長に渡りボンツーン上に橋脚を立て、その上に道路を設けている。1979年の暴風によって橋梁の西半分が沈没するという被災歴がある。設置場所の水深は21~104m、潮位差は4.5m、潮流は3.0m/secである。

5) Galata橋

トルコ、イスタンブールにある全長457m、幅27mの道路橋で、1912年に完成した。橋を構成するのは24個のボンツーンで、最大ボンツーンの全長は25mである。設置場所の水深は39mである。

2. 2 構造上の特徴

アメリカにおける4例に見られる構造上の特徴は以下の通りである。

- ① ボンツーンはボルトまたはワイヤーによりリジッド結合され、開橋部を除いて一体の剛体として設計されている。
- ② ボンツーンはアンカーケーブルによりアンカーに固定される。また、アンカーは地盤の性質にあわせていくつかのタイプを使い分けている。
- ③ 水位変化に対応できる機能（バラスト調整機能等）を持つ。
- ④ ヒンジあるいは伸縮性のジョイントシステム等によって陸地（固定部）と連結する。
- ⑤ 船舶航行用の開橋部を必要に応じて設けている。
- ⑥ ボンツーンはコンクリート製（PC、RC）である。

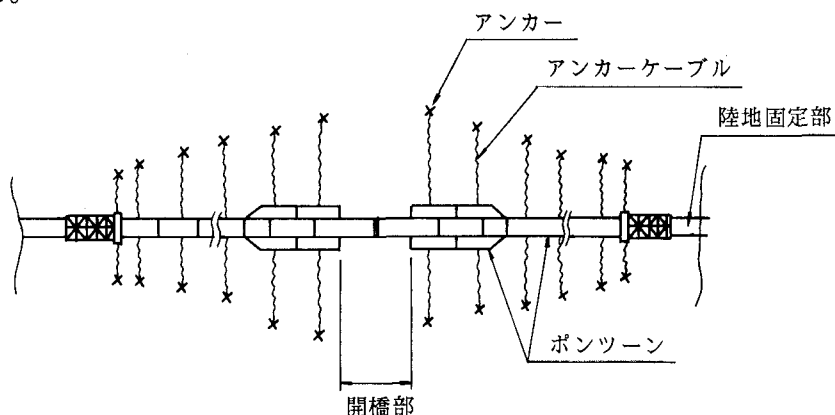


図-1 フローティングブリッジ概念図

これらの特徴を持ったフローティングブリッジの概念図を図-1に示す。

なお、トルコにあるガラタ橋はアメリカの事例とは異なるジョイント方式を採用している。ボンツーンは単体で係留され、上部構造をピンジョイントで繋ぐというものである。この形式の場合、ピンジョイント部にねじりや水平移動に伴う応力が発生し、ジョイント部が大きな負担を受ける。従って、この構造は比較的波や風が穏やかで、短い距離の架橋に適していると考えられる（図-2）。

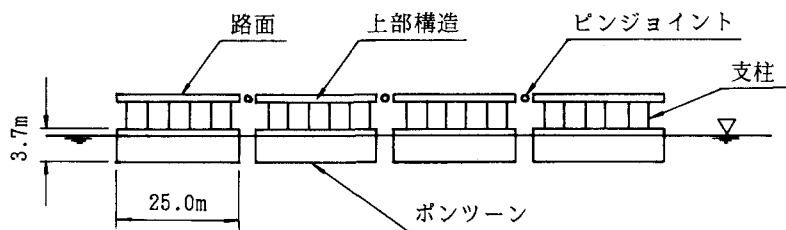


図-2 単体構造のGalata橋

2. 3 被災例

フローティングブリッジの被災例として William A. Bugge Hood Canal Bridge に関するものがあり、1979年2月12日から13日にかけて来襲した暴風のために橋の西半分の12個のボンツーンが沈没した。被災時の条件は最大瞬間風速54m/sec、平均風速36m/sec、波高は1.4~2.0mであった。橋が破壊に至った原因は次の4つのうちいずれかまたはその複合であると考えられている。

- ① 波と風による動的な荷重
- ② ボンツーン内部への水の進入
- ③ アンカーの滑動
- ④ デッキの滞水

しかしながら、この被災例以外に、フローティングブリッジの主体構造が被災したことは報告されていない。ボンツーンを固定する係留索・アンカーの異常、ボンツーンの亀裂・漏水等の部分的な異常も報告されていない。

我が国においてフローティングブリッジを架ける際に William A. Bugge Hood Canal Bridge の教訓は最も重要

なものとなると同時に、海域に架橋されたフローティングブリッジの実例が少ない現在においては、我が国独自の気象・海象条件のもとでのさらに詳細かつ厳密な検討が必要となる。

2. 4 評価

波浪等の影響が大きい湖沼等の水域におけるフローティングブリッジの適用性は、現在のアメリカにおける技術的蓄積により十分なものであると考えることができる。Lacy V. Murrou Memorial Bridge が築後50年を経ても完全な機能を発揮していることから、現地のような立地条件のもとでは構造的にも十分に満足できるものであり、完成度は高いと言えよう。コンクリート製ポンツーンの耐久性も実証されている。

しかし、海域に架橋される場合は必ずしも十分な技術的問題の解決がなされたとは言えない。沖合人工島のアクセスルートとしてフローティングブリッジを採用する場合、過去の実例の少なさから、新たに検討しなければならないことが山積している。特に強風、高波浪時の問題、津波時の問題等はすぐにでも提起されるであろう。また、海洋環境下での耐久性の向上のために解決すべき問題も多く、環境に与える影響等についても検討する必要がある。そこで、以下ではこれらについての技術的検討を行い、フローティングブリッジを国内で実現するための課題を整理する。

3. フローティングブリッジの実用化

3. 1 設計の基本的考え方

アメリカのフローティングブリッジの設計においては、William A. Bugge Hood Canal Bridge (フッドキャナル) の被災を契機に、船体の動揺解析理論を利用した波浪による動揺解析技術が向上し、その結果を用いて従来の解析結果の検証を行っている。我が国でのフローティングブリッジの解析法としても、以上の点から動揺解析を主体とした設計法が要求されるであろう。ただし、その設計手法はアメリカの例と比べて波浪等の厳しい自然条件に対応する必要がある。

フローティングブリッジを実用化するに当たっては、その設計法について検討し、問題点を明らかにしていく必要がある。そこで、まずフローティングブリッジの設計法について概略の設計フローを図-3に示し、項目ごとに検討していくこととする。

設計条件は波浪、水位(潮位、高潮、津波)、流れ(潮流、津波流)、風、地盤条件、上載荷重、地震等の自然条件と、本体の重量、車両走行荷重、乾燥収縮、衝突等のその他の条件であり、その条件を用いてフローティングブリッジ本体と係留システムやジョイント部の諸元を決定する。また、設計条件と本体の諸元より外力を算定し動揺の検討を行う。

動揺解析は、機能に対する検討(利用時)と安全性に対する検討(異常時)を行うことにより、係留システム、本体構造とジョイント部の設計を行うものである。

ここで、機能に対する検討とは、車両の安全な走行の判定に必要な最大変位量、最大加速度等を明らかにし、利用上の安定性を検討するものである。また、安全性に対する検討とは、地震、津波、台風などの異常時の条件下での本体、係留系及びジョイント部の安全限界を示すものである。

3. 2 技術的課題

浮体の設計手法としては、係留船舶の動揺解析手法の研究⁷⁾や、大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究⁸⁾等が既になされており、単体浮体構造物の設計手法はある程度確立されたと考えられる。しかし、フローティングブリッジのような長大な形式の構造物に同手法を適用した場合、表-1に示すような様々な技術的課題が生じてくることが予想される。

荷重の再現期間と耐用年数については、通常の港湾構造物との関係について整理しておく必要がある。また、作用する荷重の算定法についても、フローティングブリッジの形状に合わせて詳細な検討が必要になってくるであろう。

動揺解析を行う場合の荷重の組合せについては、利用時、異常時でどの荷重を用いるかを明確に整理する必要

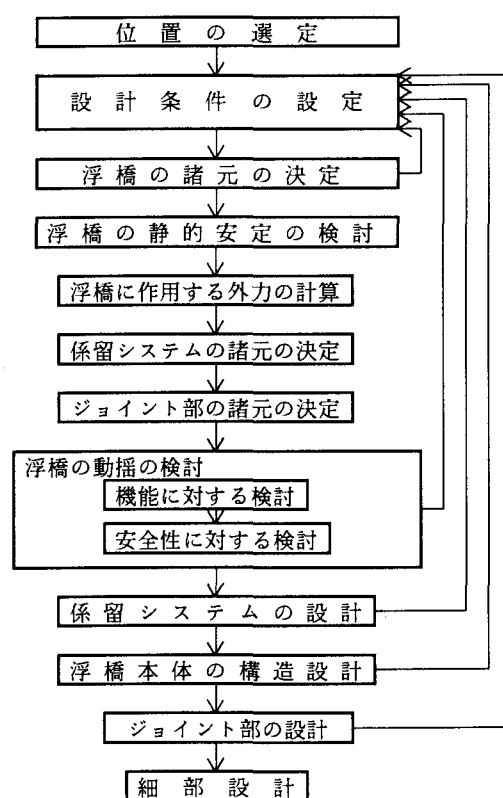


図-3 浮橋構造物の概略の設計フロー

がある。また、動揺解析のモデルの選定については、従来の浮体のシミュレーションにおいて浮体本体を剛体として検討していたが、アメリカの事例のようにポンツーンを剛結し長大な形式にするのであれば、ねじれや振動等を考慮することができる弾性体と仮定するモデルにしなければいけない等シミュレーションを行う上で従来にないモデルの改良が必要になってくる。

波や風には長周期の変動成分が含まれているため、フローティングブリッジは長周期の動揺を生じる。その他、津波もフローティングブリッジに大き

い動揺を引き起こす。そのため、フローティングブリッジは、それらの長周期の外力に抵抗するため、係留装置とジョイント部に減揺性を持たす等の対策を取る必要がある。また、波浪や風等の外力が大きくなり、事例として前述したようなポンツーンを浮かべた形式のフローティングブリッジでは安定性を確保することが困難になる場合には、本体構造にセミサブ形式を採用して作用する外力を低減したり、係留系をドルフィン形式にする等の工夫も必要になることが予想される。さらに、津波に対する検討として、水位の上昇等による係留系への影響や低下による着底についても考慮しなければいけないであろう。

その他、係留系やジョイント部等の可動部における繰返し荷重に対する耐久性の検討や、フローティングブリッジの環境に与える影響、ポンツーンの洋上での接合技術等についても検討していく必要があろう。

4. おわりに

本報においては、沖合人工島のアクセスルートとしてフローティングブリッジを適用した場合の技術的課題を整理した。これらの条件下でフローティングブリッジを建設するためには、減揺性を有し耐波性の高い新たな構造物、係留装置及びジョイントの開発等数多くの広範な技術的課題を解決する必要がある。また、フローティングブリッジの設置可能な条件の限界について明確にする必要がある。しかしながら、これらは既存の技術の応用で対応可能と予想され、フローティングブリッジの実現を妨げるものとはならないと考えられる。したがって、国内における実用化の可能性は高いと言える。

今後、これらの技術的課題を解決するとともに、フローティングブリッジの経済性を検討し、実用化を図ることとしたい。

【参考文献】

- 1) フローティングブリッジに関する調査報告、日本大学理工学研究所速報 第5号、1977, 12
- 2) 古賀尚宏他：フッドキャナル浮橋の事故調査（抄訳）、第1部、第2部、プレストレストコンクリート、1980, 11、p. 31～48.
- 3) 梅澤宣雄他：フローティングブリッジの歴史と現状、橋梁と基礎、1987, 7, p. 21～26.
- 4) 新しい国土の創造－沖合人工島に関する調査報告書（V）－、昭和60年6月, p. 228～231.
- 5) M. Myint Lwin and Charles S. Gloyd: Rebuilding the Hood Canal Floating Bridge, CONCRETE INTERNATIONAL, June 1984, p. 30～35.
- 6) M. Myint Lwin: Design of the Third Lake Washington Floating Bridge, CONCRETE INTERNATIONAL, February 1989, p. 50～53.
- 7) 上田 茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究、港湾技研資料、No. 504、Dec. 1984
- 8) 上田 茂、白石 悟：大型く（矩）型浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第2報）－数値シミュレーション手法について－、港湾技術研究所報告19巻3号、昭和55年9月

表－1 技術的課題

項 目	技 術 的 検 討 項 目
設計条件	荷重の再現期間と耐用年数の設定
外力計算	フローティングブリッジに作用する荷重の算定法
動揺解析	荷重の組合せ（利用時、異常時） モデルの選定 数値シミュレーションプログラムの整備
津 波	長周期動揺に対する検討と対策 水位の上昇と低下に対する検討
耐 久 性	繰返し荷重に対する強度の検討
環 境	フローティングブリッジが環境に与える影響
施 工 性	ポンツーンの洋上での接合技術