

学 位 論 文 題 名

多径間吊橋の変形特性に関する研究

学位論文内容の要旨

長大吊橋の建設技術は、近年の著しい進歩により主径間長 1,991m の長大吊橋、明石海峡大橋をも建設可能にした。橋梁建設技術の更なる進歩を見通すならば、今後はより渡海距離の長いプロジェクトをも具現化することが期待される。

水深が深く広大な海峡を渡海する場合、複数の吊橋を連続して建設することも考えられるが、主径間を連続させる多径間吊橋形式を採用することが経済化を図る上で効果的と考えられる(多径間吊橋とは、主ケーブルが二つ以上の主径間を連続して補剛桁を支持する吊橋形式)。既往の研究では多径間吊橋は活荷重が一方の主径間に偏載される場合の撓みが非常に大きくなり、橋梁全体としての剛性が不足していると評価されてきた。

多径間吊橋の建設事例としては 1961 年完成の小鳴門橋(支間割 70.6+160+160+50.8m) の四径間吊橋がある。この事例では中央塔を A 型フレームとして橋軸方向の剛性を高め、かつ主ケーブルを中央塔の塔頂にアンカー定着することで剛性の向上とケーブル滑動の問題点を解決している。

さらに 1962 年に発足した土木学会本州四国連絡橋に関する技術調査委員会において本州と四国をつなぐ五つのルートについて技術的検討が行われた。この中で明石海峡や来島海峡等の橋梁計画の一つとして多径間吊橋の検討が行われ、1967 年 7 月にその結果が報告された。ここでの検討は十分に詳細なものではなく、技術的可能性を示唆しながらも、耐風安定性やケーブル構造等に懸念される問題があることを提示し、今後さらに詳細な検討が必要であるとの結論となっていた。

このような経緯を踏まえ、本州四国連絡橋建設の実施主体として発足した本州四国連絡橋公団では懸念されていた問題点を具体的に調査を行った。その中では本四連絡橋以外に、将来の海峡横断プロジェクトとして想定されるケースについても構造的な検討が行われた。

本研究ではこれらの研究経緯をベースに、多径間吊橋の構造的な問題点を解決するために既往の研究事例から問題点を抽出し、この課題に対する解決策を追求した。構造検討を行うにあたって解析法の精度の検証を行い、その上でパラメトリックな構造特性の分析によって合理的な解決策を見いだそうとするものである。

第 1 章では、本研究の背景ならびに既往の研究事例を示し本研究の目的、研究内容について述べている。

第 2 章では、吊橋解析法に関する撓度理論等の基本的な原理と剛性マトリクス補正法による線形化有限変形理論の基礎理論と解析精度について述べ、本研究に用いる骨組解析法を述べる。吊橋の構造解析については撓度理論を初めとする研究経緯があるが、現在では有限変形理論を骨組解析法に取込みこれを線形化した計算法が汎用プログラムとなっておりこの精度確認を行った。また、動的解析の場合の基本原理解を述べ、死荷重時を原点として同じ線形化法が適用できることを述べた。

第 3 章では、実際の吊橋の地震時の観測結果を取り上げ、これを解析し前記の解析法の妥当性について詳細に検証する。1995 年の兵庫県南部地震における大鳴門橋の観測結果を対象にこれを忠実に再現する 3 次元応答解析を行いこの解析結果と実測値とを比較分析したところ、吊橋上部工の各部位の実際の応答記録を相当程度精度良く再現できることが判明した。ただし次に述べる多点入力による影響の再現では一様入力の解析結果は明らかに実測記録と乖離する応答成分があることも判明した。

これに対して各基礎への入力が一様でない多点入力による応答解析の結果は実測値と整合するものとなり、一様入力の解析では再現できない応答の増幅現象があることが確認された。これにもとづき、多点入力による応答が吊橋の耐震設計へもたらす影響とそれが長支間化するに従って顕在化することを述べた。また補剛桁の橋軸方向変位（遊動円木運動）は実測値において他のモードよりも明瞭に大きな減衰を示し、減衰定数としては 8%程度となっていることを明らかにした。

第 4 章では、多径間吊橋の変形特性を分析するため吊橋を構成するケーブル、塔、補剛桁の諸元をパラメータとしたパラメトリック解析と、海峡横断プロジェクトとして調査中である豊予海峡、津軽海峡の架橋計画の橋梁諸元に基づく解析計算を行った。

この章では実構造物の観測結果が得られていないために風洞試験を除いてすべて理論解析によっている。多径間吊橋の場合には、主径間を二つ以上連続していることが原因となって、中央塔付近におけるケーブルの橋軸方向の剛性が低下する。このケーブル自体が持っている橋軸方向の剛性をケーブル剛度と呼び多径間吊橋の変形特性を特徴付ける指標として位置付けられる。ケーブル剛度をケーブル張力、主径間長、サグ比を変数として示すことができることを、力と変位の釣り合いから導出した。これにより多径間吊橋の活荷重剛性が低下する要因の一つを明らかにした。

この章のパラメトリック解析結果の要点等を以下に列挙する。

- 1) 主径間長 1,000m 級の二径間吊橋の撓み剛性確保については、三径間吊橋の設計事例から主径間長の 1/200 以下の活荷重撓みに抑制することを基準とし、活荷重撓みを抑制する構造因子として中央塔の曲げ剛性並びに補剛桁の死荷重をパラメータとして解析した。この結果、ケーブル滑動安全率 2.0 を確保するためには、中央塔の曲げバネ係数 500tonf/m/c 並びに 20%の付加死荷重となる全死荷重 27t/m/br を最も合理的な諸元として得た。
- 2) 中央塔の前後において主ケーブルの張力差が発生するため、ケーブルを塔頂に固定するための対策として塔頂サドルに水平摩擦板を併設する摩擦サドルの機構を開発し、この摩擦補強効果を理論解析と実験によって明らかにした。
- 3) 1,000m 級二径間吊橋の場合に三径間吊橋よりも曲げモード振動数が 50%程度低下するが、風洞試験の結果では曲げとねじれの振動数が乖離することによってフラッター限界風速はむしろ向上する傾向が見られた。
- 4) 主径間長 2,000m 級の四径間吊橋の活荷重撓みを主径間長の 1/200 程度に抑制するために必要な中央塔の曲げ剛性はバネ係数 270tonf/m/c であり、1,000m 級の場合よりも小さい。なお、この場合には主ケーブルの中央塔における滑動安全率は所要値以上を確保しており、付加死荷重および摩擦サドルによる固定力の強化は不要である。このケースでの構造諸元をパラメトリックに変化させて固有値解析を行ったところ、中央塔の剛性を強化するだけでは補剛桁の捩れモード振動数を高める効果は頭打ちとなり限定的であることが明らかとなった。
- 5) 主径間長 3,000m 級の豊予海峡架橋（四径間吊橋）、ならびに津軽海峡架橋（五径間吊橋）を取上げ、静的・動的な変形特性の解析として、活荷重変位、暴風時変位、固有値を算出し、具体的数値を明らかにした。

第 5 章では、超長大架橋計画（主径間長 2,000m 以上）の多径間吊橋の構造特性の合理化を図るために、捩れ剛性を向上させる幾何構造として 3 次元サグ・ケーブル構造について解析を行いその効果を明らかにした。定量的には、活荷重片側偏載時の補剛桁回転角が平行ケーブルの場合よりも 2,000m 級四径間吊橋で 15%、3,400m 級五径間吊橋で 34%低下し、捩れモード振動数がそれぞれ 20%ならびに 36%向上する。

また主径間長 3,400m の五径間吊橋の地震応答解析を行ったところ、Type I 地震入力による応答が Type II 地震入力よりも大幅に上回る応答振幅となった。特に補剛桁 L/2 点の橋軸直角方向変位は最大振幅が 10.44m となり、これは同じ成分の Type II 入力による応答（0.51m）の約 20 倍に及ぶものである。超長大吊橋が非常に長い固有周期特性をもつことが端的に現れており、この大きな変位は自由減衰によって消滅するのに数分間を要する。

第 6 章では、上記の構造的な分析結果の総合的な取りまとめとして要点を列記し、長大多径間吊橋

が技術的に可能であることを述べ、残された課題を挙げた。また今後の技術進展の促進を図るためには、民間の技術力を的確に推進させ、事業実施レベルでの様々な問題に対応する新たなマネジメント手法が必要であり、事業手法のあり方についても述べた。

第7章では、本研究によって得られた結果を要約し結論を述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 藤 浩 一
副 査 教 授 角 田 興史雄
副 査 教 授 三 上 隆
副 査 助教授 林 川 俊 郎

学 位 論 文 題 名

多径間吊橋の変形特性に関する研究

多径間吊橋とは主ケーブルが二つ以上の主径間を連続して補剛桁を支持する吊橋形式である。換言すれば、主塔が三つ以上を有する吊橋形式である。世界にもほとんど建設事例がなく、日本で1961年に完成した小鳴門橋の四径間吊橋がある程度である。しかし、小規模のものである。本州四国連絡橋公団で三ルートに数多くの橋梁を建設した。その中で、日本で開発された近年の著しい長大吊橋の建設技術の進歩により、主径間長1,991mの現時点で世界一の明石海峡大橋を建設したが、長大多径間吊橋は建設されていない。橋梁建設技術が更なる進歩を遂げるならば、今後はより渡海距離の長いプロジェクトの実現化されることが期待できるであろう。水深が深く広大な海峡を渡海する場合、複数の吊橋を連結して建設することも考えられるが、その場合と比較してケーブルアンカーを節減することを目指している主径間を連続させる世界に実在しない長大あるいは未来の超長大多径間吊橋形式を採用することが経済上有利であると考えられる。

既往の研究では長大多径間吊橋は活荷重が一方の主径間に偏載される場合の補剛桁の撓みが非常に大きくなり、橋梁全体としての剛性が不足していると評価されてきた。

本研究では長大あるいは未来の超長大多径間吊橋の実現の可能性を探究することを目的に、これまでの研究経緯をベースに、構造的課題点を解決するために既往の研究事例から課題点を抽出し、この課題に対する解決策を追求している。構造検討を行うにあたって解析法の精度の検証を行い、その上でパラメトリックな構造特性の分析により合理的な解決策を見いだそうとしている。

本論文は7章から構成されている。

第1章では、研究の背景、既往の研究、研究の目的、研究内容について述べている。

第2章では、吊橋解析法に関する撓度理論等の基本的な原理と剛性マトリクス補正法による線形化有限変位理論の基礎理論と解析精度について述べ、本研究に用いる骨組解析法について述べている。

第3章では、実在する吊橋の地震時の観測結果を取り上げ、これを解析し前記の解析法の妥当性について詳細に検証している。具体的には、平成7年1月の兵庫県南部地震における大鳴門橋の観測結果を対象に3次元地震応答解析を行い、この解析結果と実測値とを比較分析したところ、吊橋上部工の各部位の実際の応答記録を相当程度精度良く再現できることを明らかにしている。即ち、各基礎への入力が一様でない多点入力による地震応答解析を行えば実測値と整合することをつきとめている。また補剛桁の橋軸方向変位（遊動円木運動）は実測値において他のモードよりも明瞭に大きな減衰を示し、減衰定数としては8%程度となっていることを明らかにしている。

第4章では、実在する構造物がないので、すべて理論解析によっている。長大多径間吊橋の場

合には、主径間を二つ以上連続していることが原因となって、中央塔付近におけるケーブルの橋軸方向の剛性が低下するため補剛桁の撓みが大きくなる。このケーブル自体が持っている橋軸方向の剛性をケーブル剛度と呼び長大多径間吊橋の変形特性を特徴つける指標と定義している。即ち、ケーブル剛度をケーブル張力、主径間長およびサグ比を変数として示すことができることを、力と変位の釣り合いから誘導している。また、正規の基準ではないが、Selberg の提案として主径間長の $1/200$ 以下に活荷重による補剛桁の撓みになるよう抑制することが要求されている。因みに、中小橋梁ではおよそ $1/500$ 以下である。塔剛性と死荷重を適切に選択することで、活荷重による補剛桁の撓みを $1/200$ に制御し、ケーブル滑動を防止することが可能であることを明らかにしている。また、主径間長が長大化した場合、多径間吊橋の活荷重による補剛桁の撓みを主径間長の $1/200$ 程度に抑制するために必要な中央塔の曲げバネ係数は小さくなることを明らかにしている。さらに、将来の海峡横断プロジェクト（未来の超長大多径間吊橋）を想定した主径間長 $3,000\text{m}$ 級の豊予海峡架橋（四径間吊橋）、ならびに津軽海峡架橋（五径間吊橋）を取上げ、静的・動的な変形特性の解析結果として、活荷重による補剛桁の変位、暴風時における補剛桁の変位、固有値を算出し、具体的数値を示している。

第5章では、未来の超長大架橋計画（主径間長 $2,000\text{m}$ 以上）の多径間吊橋の構造特性の合理化を図るために、振れ剛性を経済的かつ効率的に向上させる幾何構造として3次元サグ・ケーブル構造について解析を行いその効果を明らかにしている。

第6章では、上記の構造的な分析結果の総合的な取りまとめとして要点を列記し、長大あるいは未来の超長大多径間吊橋が技術的に建設可能であることを述べている。また今後の技術進展の促進を図るためには、民間の技術力を的確に推進させ、事業実施レベルでの様々な問題に対応する新たなマネジメント手法が必要であり、事業手法のあり方についても述べている。

第7章では、各章で明らかとなった事項を要約し、本論文を総括している。

これを要するに、著者は長大あるいは未来の超長大多径間吊橋の実現の可能性を探求することを目的に、既往の研究から問題点を抽出し、変形特性を示す指標がケーブル剛度であることをつぎとめ、塔剛性と死荷重を適切に選択することで、活荷重による補剛桁の撓みを $1/200$ に制御し、ケーブル滑動を防止することが可能であることを明らかにしている。また、将来の海峡横断プロジェクト（未来の超長大多径間吊橋）を想定し、3次元サグ・ケーブル構造は振れ剛性を向上させるのに効果があることを明らかにし、技術的に建設可能であることを示したものであり、橋梁工学、鋼構造学ならびに耐震工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。