

複合構造を活用した新橋梁に関する研究

鈴木 拓也

要 旨

近年、橋梁の長支間化、耐荷性や耐震性の観点から複合構造が適用されている。複合構造の目的は、異種材料あるいは異種部材を結合することによって単一材料では得られない優れた特性を作り出すことにある。構造物に与えられる要求によっても様々な複合構造が適用される。超長大橋の観点から見ると、吊橋と斜張橋を組合せた上部構造におけるケーブルシステムの複合構造や、下部構造においては、大断面かつ高い剛性が必要とされるため、従来までの鋼構造、コンクリート構造に代わる複合構造の適用が考えられる。これらのことから、複合構造は橋梁の長支間化、耐荷性や耐震性、コスト削減、工期短縮など多くの利点を有しており、今後の土木構造物や新しい橋梁形式の開発に必要な構造である。

これまでの研究では、海峡横断プロジェクト実現のため、支間 4,000 m 級の斜張併用吊橋を提案し、数値解析により構造特性について検討されている。斜張併用吊橋は、斜張橋が橋梁全体のたわみ剛性を向上させ、吊橋よりも優れた変形特性を有する構造であることが確認されている。

また、超長大橋であるためタワーや基礎は大規模かつ高い剛性が必要となることから、耐荷力、変形特性に優れた CFT 構造と、CFT 構造に鉄筋を施した RCFT 構造の実験的研究が行われている。その結果、CFT 構造は軸圧縮力、曲げ耐力とも鋼構造やコンクリート構造以上の変形特性を有する構造であり、RCFT 構造に関しては、塑性域において優れた変形特性を有する構造であることと、鉄筋による充填コンクリートのせん断破壊の抑制、ひび割れに対する復旧性、復元性に優れた構造であることが確認されている。しかし、斜張併用吊橋と RCFT 構造には以下のような課題があげられる。

超長大橋のための斜張併用吊橋は、超長大橋であることから自重の増加が懸念されること、異なる構造システムの組み合わせによる不連続性などから実構造物への適用事例が少なくなっていることが課題である。

一方、RCFT 構造に関しては、大規模構造物を想定した場合、鋼材の荷重分担率 γ の低減によるコンクリートの脆性破壊が懸念されることと、土木分野においては実構造物への適用事例がないことが課題として挙げられる。

そこで本論文では、斜張併用吊橋と RCFT 構造について、以下の課題を研究目的として、実験および解析を行った。

- 1) 超長大橋のための斜張併用吊橋において、自重軽減のため FRP をケーブル材料として適用した数値解析により変形特性を明らかにする。
- 2) 既存の斜張併用吊橋“なぎさブリッジ”を用いた実橋振動実験を行い、斜張併用吊橋の不連続性などの力学的特性、振動特性を明らかにする。
- 3) 鋼材の荷重分担率 γ が異なる RCFT 構造の圧縮試験を行い、鋼材の荷重分担率 γ の違いに

学位記番号と学位：博第 42 号，博士（工学）

授与年月日：平成 20 年 3 月 20 日

授与時の所属：大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程

よるせん断補強の有効性を確認し、塑性域における新しい合成効果の評価方法を提案し、新しい指標で評価する。

- 4) RCFT 構造の力学的特性を生かした実構造物として、RCFT 構造を適用した Bow String Arch 実験橋を製作し、載荷実験から構造特性を把握する。

実験および解析によって、以下のようなことが明らかとなった。

- 1) 超長大橋のための斜張併用吊橋に FRP ケーブルを適用した場合の変形特性は、鋼ケーブルに比べ、劣る結果となるが、断面最適化や超高強度の新素材が適用されることで、鋼ケーブルと同等な変形特性になることを確認した。特に、重量が大幅に低減するため、超長大橋へ有利である。
- 2) なぎさブリッジを用いた実橋振動実験では、ケーブルシステムにおいて不連続性を確認したが、桁の減衰や変形からみると、特に問題ないといえる。また、配置した PC 桁と斜張ケーブルが剛性向上に有効に働いていることが明らかとなった。さらに、複合構造における減衰定数の新しい評価方法を提案できた。
- 3) 鋼材の荷重分担率 γ の違いによる RCFT 圧縮試験において、大規模構造物のような鋼材の荷重分担率 γ が低いケースにおいて、鉄筋の有効性を確認した。これは、将来の充填鋼管構造の大規模構造物への適用を考慮した場合に有効である。また、同一変位での塑性域における新しい合成効果を計算した結果、鋼材の荷重分担率 γ が低いケースで合成効果が高い傾向にあり、圧縮試験の結果と同様な知見を得た。
- 4) RCFT 構造の実構造物の適用を考え、Bow String Arch に RCFT 構造を適用した実験橋載荷実験では、弾性内における基本的な構造特性の把握と、アーチクラウン軸ひずみに対する RCFT 構造の有効性を確認した。

以上のように、本論文は複合構造を活用した斜張併用吊橋と RCFT 構造について、抱えている課題を数値解析と実験により解明した。得られた結論および知見は、今後の土木分野において、超長大橋のみならず、橋梁形式の多様化、都市空間の確保、構造景観など目的とした、複合構造を活用した新橋梁へつながる論文である。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では、本論文の背景となっている超長大橋、橋梁の長支間化、複合構造および課題と論文の目的等について述べた。

第 2 章では、これまでの研究成果と現在抱えている課題について、斜張併用吊橋と RCFT 構造それぞれについて論じた。

第 3 章では、斜張併用吊橋に関して、橋梁の自重軽減のため FRP ケーブルを適用した斜張併用吊橋の数値解析について述べた。また、斜張併用吊橋“なぎさブリッジ”の実橋振動実験により、斜張併用吊橋の不連続性、力学的特性および減衰特性を明らかにした。さらに、提案した支間 4,000 m の斜張併用吊橋模型橋に対する数値解析を行った。

第 4 章においては、RCFT 構造に関して、鋼材の荷重分担率 γ をパラメータとした圧縮試験を行い、鉄筋の有効性、塑性域における合成効果を適切に評価する新しい合成効果を提案した。また、実験により明らかにした RCFT 構造の特性を生かした構造物として、Bow String Arch への RCFT 構造の適用を提案し、弾性範囲内における 1/20 実験橋載荷実験により、力学的挙動を調査した。

第 5 章においては、本論文の結論を論じた。

主指導教員 長谷川 明

Study on New Bridges that Adopt Hybrid Structure

Takuya SUZUKI

Abstract

In recent years, hybrid structures have been attracting attention from the viewpoints of longer bridge spans, load-carrying capacity, earthquake resistance. The purpose of the hybrid structure is to create excellent qualities unobtainable with simple materials alone by combining different materials or members. Various hybrid structures can be adopted depending on the requirements imposed on them. Viewed from the standpoint of super long span bridges, since a large cross section and high rigidity are required in the hybrid structure of the cable system of the superstructure that combines the suspension bridge and the cable-stayed bridge as well as in the substructure, the application of a hybrid structure is considered in place of conventional steel or concrete structures. Viewed also from the standpoints of the load-carrying capacity and earthquake resistance, a CFT structure is adopted for the columns and beams of structural objects, and it becomes possible to use temporary members for the body structure by building a steel structure as support and afterwards combining it with concrete, thereby leading to cost reduction and the enhancement of construction performance. For these reasons, the hybrid bridge structure possesses a number of advantages, such as the long span, load-carrying capacity, earthquake resistance, cost reduction, and shorter construction periods, and this structure is expected to be adopted hereafter in building new bridges, replacing conventional structures.

An existing study proposes a cable-stayed and suspension bridge the span length of which is in the order of 4,000 m for the purpose of achieving a cross channel project, and its structural characteristics are examined by numerical analysis. With its cable-stayed bridge improving the deflection rigidity of the whole bridge, it has been confirmed that a cable-stayed and suspension bridge is a structure that possesses deformation characteristics that are superior to those of a suspension bridge. Moreover, since it is a super long span bridge, its towers and foundations are of a large scale and require high rigidity. Hence, experimental research has been conducted on a CFT structure that excels in load-carrying capacity and deformation characteristics and also on the RCFT structure that is obtained by applying reinforcing bars to the CFT structure. As a result, it has been confirmed that the CFT structure is a structure that possesses better deformation characteristics than the steel structure and concrete structure in terms of axial force and flexural capacity. It has also been found that the RCFT structure is a structure that possesses excellent deformation characteristics in the plasticity zone and excels in the prevention of the shearing destruction of the filling concrete by reinforcement and in restoration and reconstruction from cracks. However, the following problems can be

pointed out about the cable-stayed and suspension bridge and the RCFT structure.

The problems of the proposed cable-stayed and suspension bridge are: (1) it is a super long span bridge, and so there is a concern about an increase in the bridge's own dead load; (2) there is the problem of discontinuity that arises from the combination of different structural systems; and (3) there are not many cases of its application to real structural objects, with the result that the reality of its remarkable features have not been made clear yet. The dead load reduction of the super long span bridge and the resolution of the discontinuity problem will contribute to work saving for the cross sections of towers, anchorages, etc., making it possible to enhance construction performance and reduce costs.

The problems to be anticipated for a large-scale RCFT structure are: (1) there is a concern about concrete brittle fracture due to a decrease in the load share ratio γ of steel products; and (2) there has been no case of its application to real structural objects in the field of civil engineering. On the other hand, it is possible to apply the concrete filled steel tube structure to a large-scale structural object by clarifying the effect of the reinforcement of the RCFT structure with the load share ratio γ of steel products. Moreover, the composite effect, which is one of the conventional methods to evaluate the RCFT structure, performs calculation by using the maximum load in different displacements, and does not conduct evaluation in the plasticity zone. Also, the calculation of the proof strength of the CFT structure uses the confined effect coefficient for superposed strength that adopts the maximum load, and does not conduct evaluation at the same displacements. It is important to evaluate the concrete filled steel tube structure in the plasticity zone, and adopting an evaluation method in the plasticity zone can be considered as effective for behavior during large deformation such as earthquakes.

Based on the above discussion, this study conducted experiments and analysis on the cable-stayed and suspension bridge and the RCFT structure with the following tasks as its objectives:

- 1) To clarify the deformation characteristics of the super long span cable-stayed and suspension bridge with the numerical analysis in which FRP is applied as a cable material to reduce the bridge's dead load.
- 2) To conduct a real bridge oscillating experiment using an existing cable-stayed and suspension bridge, the "Nagisa Bridge," and to clarify the kinetic and oscillating characteristics of this type of bridge, such as discontinuity.
- 3) To conduct a compression test of the RCFT structure in which the load share ratio γ of steel products is varied, to confirm the effectiveness of the shearing reinforcement in accordance with the variations of the load share ratio γ , to propose a new method to evaluate the composite effect in the plasticity zone, and to perform evaluation with new indexes.
- 4) To build the Bow String Arch experimental bridge that applies the RCFT structure as a real structural object that takes advantage of the kinetic characteristics of the RCFT structure, and to understand its structural characteristics from the load experiment.

Experiments and analysis have brought about the following results :

- 1) The numerical analysis of the cable-stayed and suspension bridge has confirmed that although the deformation characteristics of the cases in which the FRP cable is applied are inferior to the cases in which the steel cable is applied, the former come to possess the deformation characteristics similar to the latter by means of the cross sectional optimization and the application of the new super-high strength materials.
- 2) The real bridge oscillating experiment using the Nagisa Bridge has revealed that the PC girders and staying cables that have been arranged contribute effectively to rigidity improvement. Moreover, a new method to evaluate the damping constant of the hybrid structure has been proposed.
- 3) In the RCFT compression test in which the load share ratio γ is varied, the effectiveness of reinforcement has been confirmed for cases such as large-scale structural objects where the load share ratio γ of steel products is low. This result is useful when the future application of the concrete filled steel tube structure to large-scale structural objects is considered. Moreover, as a result of calculating the new composite effect in the plasticity zone at the same displacements, a finding similar to the result of the compression test has been obtained, that is: the composite effect tends to be high in cases where the load share ratio γ of steel products is low.
- 4) In the experimental bridge loading experiment in which the RCFT structure is applied to the Bow String Arch with a view to applying the same structure to real structural objects, the basic structural characteristics within elasticity have been understood and the effectiveness of the RCFT structure against the axis strain of arch crown has been confirmed.

As has been discussed so far, this paper reveals the problems concerning hybrid structure cable-stayed and suspension bridges and the RCFT structure, and has evaluated a new type of bridge, indexes, etc. The obtained findings will contribute to the application of the new type of bridge to real structural objects with a view to not only constructing super long span bridges, but also diversifying the bridge form, securing the urban space, and improving the structural landscape in the future field of civil engineering.

Professor (Chairperson) Akira HASEGAWA