

斜張併用吊橋の構造特性および鉄筋コンクリート充填鋼管構造の適用に関する研究

工 藤 浩

要 旨

研究の背景と目的

次世代の超長大吊橋では、国内外の 3,000 m 級の長大吊橋のプロポーザルで見られるように、可撓性の高さを制御し、耐風性、鉛直たわみを改善するために、2,000 m までの技術を超えた新しい構造形式が求められる。同様に、2,000 m 以下の吊橋においても、主懸垂区間が 2 径間に渡る 4 径間吊橋では、本来、中央径間の荷重をアンカーするべき側径間がたわみやすい主径間となるために、可撓性が高い構造となる。4 径間吊橋を既往の基準のたわみ制限値に抑えるためには、国内の海峡横断プロジェクトで検討されているように、中央主塔に既往の規模を超えた剛性の高い主塔を用いる、または、設計活荷重自体を見直すなど、既往の吊橋技術の延長にない考えが求められる。また、たわみやすさの問題は、耐風性、鉛直たわみの問題以外にも、明石海峡大橋において、耐風安定性に対して横方向振動の影響が出るというような、橋梁全体の剛性の低さから来る新たな課題も確認されている。

本論文では、事業費の縮減を念頭におき、これら次世代の超長大吊橋の問題である吊橋の剛性を改善することを目的とし、以下の研究を行う。

1. 超長大吊橋の鉛直剛性を改善するケーブルシステム、斜張併用形式の検討、および、斜張併用吊橋歩道橋における載荷試験
2. 剛性が高く、経済的に優れる充填鋼管主塔実現のための充填鋼管 RCFT (Reinforced Concrete Filled Tube) の靱性向上に関する実験的研究

本論文で提案する CFT 構造に鉄筋補強を施した RCFT 構造は、特に、脆性的な破壊性状を示す薄肉鋼管と高強度コンクリートを用いた CFT の破断性状を見ると、鉄筋による補強は不可欠である可能性を秘めている。本研究では、このような RCFT の特徴を生かした構造としてトラス形式 RCFT 主塔、および、Bow string Arch を提案する。

1. 斜張併用吊橋の検討

斜張併用吊橋は、耐風性に優れ、経済性にも利点を有する構造として、国内外で多くの論文が提出されている。しかし、斜張併用吊橋の構造特性に与えるパラメータは非常に多く、斜張橋、吊橋それぞれにおいても建設地域により有利不利があるように、支間長の異なる全ての設計条件で有用であるとは限らない。

本論文では、中央支間 1,300 m の長大吊橋を対象に、側径間の支持条件をパラメータとして、どのような地形条件で斜吊り併用吊橋が有利となるか、数値計算例を元に検討する。ついで、1,300 m 吊

学位記番号と学位：第 33 号，博士（工学）

授与年月日：平成 18 年 3 月 18 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

橋の検討結果をふまえて、なぎさ・ブリッジについて、歩道橋に斜吊り併用吊橋を採用した場合の利点を考察し、長大吊橋に採用した場合と比較する。なぎさ・ブリッジは、同形式の希少な施工事例であり、将来の長支間化を考える上で、格好の検討対象となりうる。以上の観点から、解析の妥当性を判断する目的で動的、静的載荷試験を平行して行った。

検討の結果、得られた結論は以下の通りである。

1. 斜張併用吊橋は、側径間に中間橋脚が設置できる地形において、吊橋に比べて大幅にたわみを低減できる構造であることが分かった。側径間が長い場合には、主塔と桁の相対変位を拘束することで鉛直たわみを低減できることがわかった。
2. 圧縮力が作用する斜張区間を PC 構造とすることで、ねじり剛性が改善され、通常の吊橋に比べてフラッター発現風速は 20% 向上されることがわかった。
3. 斜張併用吊橋の初期形状を決定する基本式を求め、ケーブルの経済性に与える影響を明らかにした。

2. RCFT 構造の検討

充填鋼管形式は、充填コンクリートにより鋼板の座屈が拘束されるために、補剛構造が省略でき、溶接箇所が少なく、鋼構造と比べて、経済性に優れることが期待される。

充填鋼管を採用した事例として、長大アーチ橋に採用されているトラス形式が挙げられる。トラス形式は、縁端部に断面が集中しているために、曲げ耐力を少ない断面積で得られる効率的な形式である。しかし、問題点として、破壊形態が縁端部に配置した圧縮部材の最大耐力後、急激に構造物の耐力を失う可能性が高い。特に、薄肉鋼管と高強度コンクリートを組合せた鋼材強度比の低い充填鋼管は、高強度コンクリートの破壊に伴い、急激に耐力を失う。また、長大構造物に適用する場合、大口径の充填鋼管では、厚板鋼管の製作が困難であるため、相対的に鋼材の強度比が低い構造とならざるをえない。

本研究は、鋼材強度比の低い充填鋼管を用いた形式の靱性を向上させる構造として、RCFT 構造の短柱圧縮試験を実施し、構造特性を把握する。また、RCFT のエネルギー吸収性能を生かした構造形式として、主に軸圧縮力において抵抗するトラス形式の部材としてトラス形式の吊橋主塔に適用したケースと、高軸力下の曲げ部材として Bow string Arch のアーチリブに適用したケースについて検討する。Bow string Arch は、200 m の実橋を想定した縮尺 1/20 の 3 径間連続アーチ供試体を計画し、活荷重載荷試験を実施する。

本研究では、軸圧縮試験、および、RCFT 構造の解析、実験から次の点を明らかにした。

1. 鋼材強度比 0.3, 0.5 の圧縮要素試験により、充填鋼管に鉄筋を配置することで、最大耐力時のひずみが高く、最大耐力後の軟化が改善されることが分かった。
2. RCFT 要素試験結果から、鋼材とコンファインドコンクリートの一軸応力ひずみ関係を定義し、RCFT 主塔に適用した結果、靱性の優れた構造となることを確認した。
3. RCFT を用いた Bow string Arch と、要素試験から得られた応力ひずみ関係を用いたファイバー解析との比較により、要素試験で得られた特徴は実橋で再現されることを確認した。

本論文の構成

本論文は、長大吊橋の鉛直剛性の改善に着目し、論文前半（第2章）において、ケーブルシステムの開発、論文後半（第3章から第4章）において、鉄筋補強した充填鋼管柱 RCFT 構造の特性の把握と実構造への適用を検討する。

第2章においては、主にケーブルシステムに着目し、斜張併用形式の理論的考察と、地形条件に

よる斜張併用吊橋の適用性について数値解析をもとに検討した。また、“なぎさ・ブリッジ”において、斜張併用吊橋の特性を確認するための動的、静的載荷試験を実施し、解析の妥当性を確認するとともに、斜めケーブルによる橋梁の鉛直剛性の向上について確認した。

第3章では、鉄筋補強した充填鋼管構造の圧縮特性を把握するための短柱軸圧縮試験を行い、CFT構造では、靱性の乏しい、薄肉鋼管と高強度コンクリートを組合わせた構造（鋼材強度比0.3～0.5）に対して、鉄筋補強が靱性向上に有効な手段であることを示した。また、実験結果から、実構造での検証を行うための1軸の応力ひずみ関係を定義した。さらに、各団体の短柱圧縮部材の設計法を整理し、RCFT断面の設計に関する考察を行った。

第4章では、RCFT構造の、高い剛性、耐力、靱性をもつ特徴を生かした構造として、トラスタイプの吊橋主塔構造、Bow string Archの試設計を行った。Bow string Archは、200mの実橋を想定した縮尺1/20の3径間連続アーチ供試体を計画し、活荷重載荷試験を実施した。第3章で得られた応力ひずみ関係を用いたファイバーモデルによる解析により、模型試験結果がRCFTの特性と一致し、設計荷重を超えた領域でもその挙動が発揮されることを確認した。

第5章では本研究で得られた研究成果を要約し、結論として述べるとともに、本研究の成果を踏まえて、4,000m級の超長大吊橋の実現可能性について考察した。

主指導教員 長谷川 明

Study on the Structural Characteristics of Cable-stayed-and-Suspension Bridges and Application of the Reinforced Concrete Filled Steel Tube Structure

Hiroshi KUDOU

Abstract

Background and Purpose of Study

Construction of strait-crossing bridges is planned in various parts of the world. Realization of such next-generation super-long suspension bridges requires a new structural type that goes beyond the conventional up-to-2,000 m length technology so as to improve flexibility, wind resistance and vertical deflection, as suggested in proposals of super-long suspension bridge plans in Japan and overseas. Even for suspension bridges less than 2,000 m in length, if a bridge has four-spans with the main suspended section covering two spans, it will inevitably have slackened side spans if no solutions are planned. Therefore the central main tower of such a bridge should be designed and constructed to be more rigid than that conceived by the conventional norm. Design live loads themselves should often be re-examined. Thus, techniques and ideas beyond the conventional norm of bridge technology are therefore required even for suspension bridges shorter than 2,000 m.

The reinforced concrete-filled steel tube (RCFT) structure, a revised version of the concrete-filled steel tube (CFT) structure reinforced with steel bars, is regarded as a promising technique applicable to such highly rigid main towers. Because of their high axial compressive force as well as excellent toughness and rigidity, RCFTs are also expected to reinforce bow string arches of lower rise/span ratio as such arches can be benefited by the high axial compressive force and excellent toughness and rigidity of RCFTs.

This thesis reports the research on how to improve the rigidity of a suspension bridge, which must have an enhanced rigidity if a super-long suspension bridge were realized in the future, and how to enhance the toughness of RCFTs and apply them to bow string arches. To be specific, the research includes the following :

1. Review of the cabling system that could improve the vertical rigidity of a super-long suspension bridge and of the possibility of a dual (namely, suspension and cable-stayed) system bridge and implementation of loading tests to a dual system pedestrian bridge.
2. Tests on toughness improvement of highly rigid and economic RCFTs and application of RCFTs to truss system main towers and bow string arches

1. Review of Cable-stayed-and-suspension Bridges

A dual (cable-stayed-and-suspension) system bridge is often discussed in many papers issued in Japan and overseas for its excellent wind resistance and economic efficiency. There are, however, a large number of parameters that characterize the structural properties of the dual system bridge, and this dual structural bridge system is not always useful for all design conditions with differing span lengths, for either cable-stayed bridges or suspension bridges are advantageous or not depending on the construction site.

In this thesis, the author tries to identify the type of topographical conditions under which a dual system bridge will be effective, particularly eyeing long suspension bridges with their central span being 1,300 m, by analyzing the numerical calculations with support conditions of side spans used as parameters.

Then the advantages obtained by applying the dual system to a pedestrian bridge by the name of the Nagisa Bridge was analyzed based on the results of the 1,300 m long suspension bridge analysis, and the result was compared with that in case the dual structure is applied to a long suspension bridge. The Nagisa Bridge is a rare example of a bridge constructed by the dual bridge system and may serve to promote the study for future application of the dual system to long suspension bridge plans. From the above viewpoints, dynamic and static loading tests were conducted to judge the validity of the analytical results.

These analyses produced the following results :

1. The dual system bridge is capable of remarkably reducing deflection compared with a suspension bridge when the topography allows construction of intermediate piers in the side span. If the side span is long, vertical deflection can be reduced by constraining relative displacement of the main tower and the girders.
2. Torsional rigidity is improved by using the PC structure on the cable-stayed sections where compressive force works. As a result, the wind velocity that causes flutter will be improved by 20% compared with an ordinary suspension bridge.
3. The basic equation to determine the initial shape of the dual system was established, and the effect on the economy of cables was identified.

2. Review of the RCFT Structure

For the concrete filled steel tube (CFT) system, since buckling of steel plates is constrained by the filled concrete, the stiffening structure can be eliminated, resulting in a smaller number of welding points and higher economic efficiency than the ordinary steel structure. CFTs are used in the truss system, one of structural systems applied to long arch bridges. For the truss structure, the sections are concentrated at its edges, and therefore it can have sufficient flexural capacity with smaller sectional area. But the problem is that the truss system may very likely lose its bearing capacity drastically after fracture morphology reaches the maximum bearing capacity of the compressive members laid out at the edges. Particularly, CFTs consisting of thin-walled steel tubes and high-strength concrete and therefore having small steel strength ratios tend to rapidly lose their bearing capacity with fracture of the high-strength concrete. If it is applied to a long-size structure, since it is difficult to produce thick-

walled large-diameter steel tubes, such a structure would eventually have steel members relatively smaller in strength ratio.

The author's research involves compression testing of short columns made of RCFTs as a structure designed to improve the toughness of the CFT system with small steel strength ratio and identification of its structural characteristics. It also includes the review of the application cases that can benefit from the energy absorbing performance of RCFTs, namely (1) the case where RCFTs were applied to the main tower of a truss type suspension bridge as truss system members resistant mainly to axial compressive force and (2) the case where they were applied to the arch ribs of a bow string arch as bending members receiving high axial force. For the bow string arch, a 3-span continuous arch model, 1 : 20 in scale, of a 200 m long full-size arch bridge, was produced, and the model undertook loading tests.

The research revealed the following points from the axial compression test and analysis of the RCFT system :

1. The results of the compression test using steel strength ratios of 0.3 and 0.5 indicate that arranging of rebars in a CFT increases distortion at the maximum bearing capacity and improves softening after the maximum bearing capacity.
2. The uniaxial stress-strain relationship between steel and confined concrete is established from the results of the RCFT element test, and RCFTs are proven to provide highly tough bridges if they are applied to the main tower.
3. Comparison between the bow string arch loading test and the analysis of fibers using the stress-strain relationship obtained from the element test confirmed that the characteristics identified by the element test will be reproduced in an actual bridge.

Composition of the Thesis

This thesis is composed of the following :

Chapter 1 provides the background and purpose of the research and describes the past research results.

Chapter 2 focuses on the cabling system. To be specific, it includes theoretical discussion of the dual system and the review of its applicability depending on the topographical conditions based on numerical analyses. The validity of the analysis results was confirmed by conducting dynamic and static loading tests on the Nagisa Bridge to clarify the characteristics of the dual system bridge, and the improvement of vertical rigidity of the bridge by diagonal cables was also verified.

In Chapter 3, axial compressive testing was conducted on short columns to identify the compression characteristics of reinforced concrete-filled steel tubes. Steel reinforcement was identified as an effective means to improve the toughness of concrete-filled tubes, particularly less tough CFTs combining thin-walled steel tubes and high-strength concrete (steel strength ratio of 0.3 to 0.5). The experiment results also produced the definition of the uniaxial stress-strain relationship for verification of the dual system in an actual bridge. The design techniques of short-column compressive members proposed by various organizations were summarized, and the discussion on the design of the RCFT section was made.

In Chapter 4, the main tower of a truss type suspension bridge and a bow string arch, which are considered to benefit from the structural features of RCFTs, or high rigidity, bearing capacity and toughness, were designed on an experimental basis. A three-span continuous arch model, which is a 1 : 20 scale of a 200 m bow string arch bridge, was produced for a live loading test. The analysis of the fiber model using the stress-strain relationship identified in Chapter 3 indicated agreement of the model experiment results with the characteristics of RCFTs and confirmed that the behavior will occur even in the areas beyond the design load.

Chapter 5 summarizes the research results and provides the conclusion of the research. The feasibility of a 4,000 m super-long suspension bridge was discussed based on the result of the research.

Professor (Chairperson) Akira HASEGAWA