

超長大橋のための鉄筋コンクリート充填鋼管 構造に関する研究

王 海 軍

要 旨

1. はじめに

21世紀において日本経済が新たに成長をするために、北東北日本は大きな役割を担うことが期待されている。また、青函地域は新たな国土軸構想において、北東国土軸と日本海国土軸の2つの国土軸構想が重なり合う重要な地域として位置づけられている。しかし、現在の北海道と本州間は、飛行機、鉄道及びフェリーで結ばれているが、自動車による自由な移動ができないことから、将来の国土の有効利用を図る上で大きな阻害要因となることは明らかである。そのため、本州と北海道を隔てている津軽海峡に橋を建設する必要がある。

こうした背景に基づいて、本研究では、本州と北海道を隔てている津軽海峡に超長大橋を建設するための技術開発の一環として、超長大橋に適切な新しい構造様式を提案しその合理性を示した。また、超長大橋に必要なとされる大きな部材力を支持するための新しい構造部材として、鉄筋コンクリート充填鋼管構造を開発し、実験的研究を行った。さらに、実験結果からこの新しい構造の耐荷力評価式を提案し、その妥当性を検証した。

2. 津軽海峡大橋に関する研究

本州・北海道架橋構想は、津軽海峡の自然条件と設計条件によって下北半島と亀田半島を結ぶ東ルート、津軽半島と松前半島を結ぶ西ルートの二つのルートを構想とした。

津軽海峡大橋の全体としては、4kmの吊橋2橋（南大橋と北大橋）と12kmの4径間連続の吊橋部と斜張橋を有する混合橋1橋（中央大橋）で構成される。下部工の設置水深は最深部では約200mとなるため、重量軽減と剛性確保を考慮し鉄筋コンクリート（RC）構造の橋脚・基礎を提案した。南大橋と北大橋のメインスパンは2000mであり、明石海峡大橋と同レベルの吊橋である。中央大橋は主ケーブルの荷重負担を減少するために吊橋と斜張橋の混合橋梁とし、潮流、水深及び船舶の航行を考慮して2000m+4000m+4000m+2000mの4径間連続橋とした。主ケーブルは、発生する張力の大きさと将来のケーブル交換時を考慮し、3本と提案した。主塔付近は斜張橋で、斜材に発生する張力の水平成分を活用するため補剛桁はプレストレストコンクリート（PC）箱桁とし、支間中央部は吊橋で、補剛桁は鋼桁とし軽量化を図った。

学位と学位記番号：博士（工学），博第3号

授与年月日：平成12年3月18日

授与時の所属：八戸工業大学大学院客員研究員・瀋陽工業大学建築工程系助教

提案した津軽海峡大橋の解析結果をまとめると、次の通りである。

- (1) 提案した津軽海峡大橋は吊橋と斜張橋の複合橋梁として、支間中央部のたわみを低減することができ、偏載荷に対する抵抗を高めることができる。
- (2) 活死荷重比が従来の吊橋より大きく、力学的に合理的であって、経済性が良い。
- (3) 斜張橋部の長さは、主塔の高さと同じ程度とすれば、橋の力学特性が良い。
- (4) 主塔の高さは、支間に対して1/10程度とすることが適切である。
- (5) サブケーブルを直線とすると、ハンガー張力が0となり橋全体の剛性を低下させ変位を大きくすることとなる。これに対し、斜めケーブルを下に凸の曲線とすると、変位を大きく減少させる効果が生まれる。
- (6) メインケーブルとサブケーブルの節点部におけるハンガーの張力は、ほかのハンガーに比較し、2倍の値となっている。このため、このハンガーはほかのハンガーとは異なった役割を果たす。

このような力学的に合理的な橋梁形式を設定しても本橋に発生する部材力は、これまでの吊橋に比べ非常に大きな部材力が発生する。このため、新しい構造、特に耐荷力と変形性能に優れる構造の開発が必要であることが示され、鉄筋コンクリート (RC) 充填鋼管構造を提案し、研究を行った。

3. 主塔と基礎を対象とした鉄筋コンクリート充填鋼管柱・梁に関する研究

本研究では、津軽海峡大橋の要求性能を満たす構造として鉄筋コンクリート充填鋼管構造を考え、主塔を柱と梁モデルとし、実験的に研究を実施した。

リブ無し鋼管とリブ有り鋼管を使用し、様々な配筋形式の RC を充填させた試験体で圧縮耐荷力実験(柱)と曲げ実験(梁)を行い、それぞれの力学的性状を実験的に調査した。得られた結果をまとめると、次の通りである。

- (1) 鉄筋コンクリート充填鋼管構造は鋼管と充填コンクリートがそれぞれ単独に働くよりも高い耐荷力が得られる。
- (2) 充填コンクリートは鋼管による強い横拘束を受けてコンクリート強度、変形性能、靱性および剛性が大幅に向上される。
- (3) 充填コンクリートに鉄筋が挿入されることによって、中心部のコンクリートのせん断力に対する有効的な力学的挙動が期待され、鋼とコンクリートの複合効果が改善される。その結果、コンクリート充填鋼管柱と比較して、強度、靱性および剛性が改善される。
- (4) リブを有する鋼管を使用すると鋼とコンクリートの一体化が促進され、終局時まで両者が一体となって挙動する複合効果が向上し、優れた力学的特性を発揮できる。
- (5) このような効果を評価した鉄筋コンクリート充填鋼管構造の軸圧縮力および曲げモーメントの耐荷力算定式を提案し、その利用が適切であることを示した。

RC 充填鋼管構造は、鋼管の局部座屈を充填コンクリートで抑制し、鋼管の高い性能を発揮することができ、充填コンクリートは鋼管によって強い横拘束を受けてコンクリート強度、変形性能、靱性および剛性が大幅に向上する。

4. 津軽海峡大橋の基礎を対象とした先端根固め工法に関する研究

津軽海峡大橋の基礎についてはジャケット式とし、建設中の海上作業足場を兼ねるものとする。直接基礎杭は直杭と斜杭によって構成され、ジャケット中央の支柱は約13mの径で、その中に鋼管 RC 合成杭(径12m)を岩盤の中まで施工する。本研究では、利用される基礎杭工法を開発した。開発した工法は中堀先端根固め工法に基づくもので、単純に従来の刃口補強板の位置を下側にずらすことによって生じる鋼管内部の段差部で中詰めコンクリートの応力を鋼管杭本体に伝達させる二重管構造である。二重管鋼管杭の先端構造に関する実験と二重管鋼管杭の外管の突出長に関する実験を行い、二重鋼管構造杭の先端支持力、先端閉塞

効果、変形性能、および杭先端抵抗の機構等を検討し、鋼管とコンクリートの荷重伝達メカニズムを調査した。得られた結果をまとめると、次の通りである。

- (1) 二重管構造は、中詰めコンクリートを十分に拘束することができ、補強リブ付き構造より完全な先端閉塞効果を得ることができる。これは、補強リブ付き鋼管が中詰めコンクリートの破断によって、鋼管とコンクリートの付着が切れるのに対し、二重管構造では、鋼管が破壊されるまで中詰めコンクリートは一体となっているからである。
- (2) 二重管構造杭先端の二重管構造はドーム効果が発生でき、単管杭及び補強リブ付き杭より耐荷力が高く、変形性能が改善される。
- (3) 二重鋼管構造の杭先端抵抗は外管の突出長さによって異なることが示され、外管の突出長さは $0.65D$ (D : 内管の直径)程度にすれば、先端根固め球根に対して、ほぼ完全な先端閉塞効果を得られ、大きな先端抵抗を発揮できると推定される。しかし、ドーム効果を発生させるためには、二重管構造の外管は十分な長さが必要である。このため、設計上は、その長さは D とすることが適当であると考えられる。
- (4) 二重管構造の外管の先端形状は杭の力学的特性に影響されるが、内管の先端形状は杭の力学的特性にほぼ影響されない。外管の先端をカットにすると十分な先端効果が生じる。

5. おわりに

本研究では津軽海峡の建設のため、橋の構造提案と、その解析結果に基づいておもに主塔と基礎を対象とした複合構造の研究を行った。今後、試験体の寸法効果、載荷形式等を考慮する実験の計測データを蓄積し、理論的な研究に併せて RC 充填鋼管構造の全面的な評価手法を検討する必要がある。津軽海峡大橋の建設には、これまでの超長大橋とは異なる多くの技術的な課題がある。このような地道な研究がその可能性を拡大するものと考えている。

Research on Reinforced Concrete Filled Pipe Structures for an Ultra-long Span Bridge

Haijun WANG

ABSTRACT

1. Introduction

Northeastern Japan has rich natural resources that will play an important role as it serves as a new source growth of Japanese economy in the 21st century. Moreover, the new national development plan has assigned Sapporo, Tokyo, and Fukuoka as an principal axis of Japanese islands. The Seikan region (Aomori & Hakodate) is located along the new national axis and is an important area where two national axes, a northeastern axis and a Japan Sea axis, overlap. Therefore, it is necessary to built a connecting bridge for the Tsugaru Strait.

In this paper, a Tsugaru Strait Bridge was proposed and the reasonability of new structures was demonstrated. As technical development of new structures for construction, experimental studies on reinforced concrete filled steel pipe structures (RCFT) were performed. The evaluation formula of the bearing capacity for RCFT structure has been proposed and tested.

2. Research on Tsugaru Strait Bridge

The Tsugaru Strait provides two favorable bridge routes. That to the east is 19 km wide and 270m at its maximum depth. That to the west is 19 km wide and 140 m at its maximum depth. With the Tsugaru Strait Bridge proposal RCFT towery, RC shell pier and jacket foundation have been suggested. CENTER BRIDGE is consisted of 4 spans of 2,000 m+4,000 m+4,000 m+2,000 m. In order to decrease the load on the main cables, CENTER BRIDGE is proposed as a mixed bridge with suspension bridges in the center of span and cable-stayed bridges near the towers. Pre-stressed concrete decks are proposed in the cable-stayed bridges, and two separate decks of steel boxes stiffened with trusses are proposed in the suspension bridges. The towers are steel structures in the upper portions and steel-concrete composite structures in the lower portions. Three parallel main cables are used to carry the loads in the suspension bridge section.

Results of the proposed Tsugaru Strait Bridge indicate that :

(1) As a compound bridge with suspension bridges and cable-stayed bridges, the Tsugaru Strait Bridge as proposed can reduce bending in the central portion and can enhance resistance

to partial loads.

(2) The Live-dead load ratio is smaller than general suspension bridge and the proposed structure is economical.

(3) If the length of the cable-stayed bridge is the same as the main tower height, the bridge's mechanical characteristics appear adequate.

(4) The reasonable height of main towers is one tenth of the span.

(5) When shaping a sub-cable as a straight line, the rigidity of the entire bridge will be reduced and displacement will increase. On the other hand, if a sub-cable is shaped like a downward convex curve, the effect of the decreasing displacement will increase significantly.

Although thus reasonable structures are adopted in Tsugaru Strait Bridge, there great displacements, axial compression, shear and bending moment are generated because of long span. For this reason, it has been necessary to develop a new structure with economical, exceptional mechanical characteristics and construction. This decision has resulted in the research of a RCFT pipe structure.

3. Research on RC filled pipe structures for the Tsugaru Strait Bridge

In order to develop structures meeting the inquired performance in Tsugaru Strait Bridge, pier and tower are simplified to pillars and beams and experimental study was carried out.

Rib-less pipes and rib owner pipes were used and compression experiments (pillars) and bending experiments (beams) were carried out with the object under examination filled with RC in various reinforced bar designs. The pipe's performance can be verified. Concrete intensity, modification performance, ductility, and rigidity can be improved sharply. It is as follows when collecting the results :

(1) Reinforced-concrete filled pipe structures have a higher bearing capacity than steel pipe and RC structures, and a compound effect is produced by the combination of different types of material.

(2) Concrete intensity, modification performance, ductility, and rigidity can be improved sharply in response to a strong horizontal restraint with steel pipe.

(3) By different form of reinforced bar design in filled concrete, the effective mechanical action in response to shear can be improved. Consequently, as compared to a concrete-filled pipe pillars, it appears that intensity, ductility, and rigidity are improved.

(4) When rib owner pipes are used, unification of steel and concrete is accomplished and a greater compound effect is created. Outstanding mechanical characteristics have been demonstrated.

(5) The evaluation formula of the bearing capacity for an RC filled pipe structure has been proposed and tested, and it is identical to results from the experiment.

4. Research on the inner excavation method of construction for the Tsugaru Strait Bridge foundation

The Tsugaru Strait Bridge foundation is considered to be a jacket structure. Direct basic stake is consisted of vertical and slanting piles. The center support of jacket is a pipe with

about a 13-m diameter and in it is a steel-RC composite stake (12-m diameter) until base rock. In order to achieve an adequate plugging effect and obtain a sustaining force at the tip of the steel pipe pile installed via an inner excavation method, a doubled steel pipe pile method has been developed. Experimental study was carried out. It is as follows when collecting the obtained and the results obtained indicate that :

(1) double pipe structure can fully retain the internal poured concrete and it can provide a plugging effect at the tip that is superior to a structure with reinforcement ribs. Double pipe structure can create a dome effect, bearing capacity and ductility can be improved sharply.

(2) The bearing capacity of a double pipe structure changes with the projecting length of an outside pipe. If the projecting length of an outside pipe is $0.65D$ (D : diameter of inner pipe), a near perfect plugging effect will be obtained at the tip bulb; it is indicated that a large tip resistance can be achieved.

(3) Although the mechanical characteristics of double pipe structures is affected by the tip shape of outside pipe, and is not readily affected by the tip shape of an inner pipe. If the tip of outside pipe is made to a cut shape, the results of using the tip will prove adequate.

5. Future directions

In this study, Tsugaru Strait Bridge was proposed. Based on the result of the structure proposal and analysis, a composite construction structure for the main towers and the foundation has been studied. Furthermore, measurement data from the experiment with respect to the effect of the size, the form of the load, and other information needs to be accumulated. Once combined with theoretical research, a method for designing with RCFT structures will be possible in construction.