

(13) 鉄筋コンクリート充填鋼管を用いた ボウ・ストリング・アーチ

鈴木 拓也¹・塩井 幸武²・長谷川 明³・工藤 浩⁴

¹正会員 (株)コサカ技研 (〒039-1103 青森県八戸市大字長苗代字碓田56-2)
E-mail: suzuki0229@kosakagiken.co.jp

²正会員 日本鋼構造協会 (〒160-0004 東京都新宿区四谷3-2-1)
E-mail: y.shioi@jssc.or.jp

³正会員 八戸工業大学 (〒031-8501 青森県八戸市妙字大開88-1)
E-mail: hasegawa@hi-tech.ac.jp

⁴正会員 (株)長大 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)
E-mail: kudou-h@chodai.co.jp

鉄筋コンクリート充填鋼管(RCFT)は、優れた耐荷力と変形性能および靱性を有する構造であることが明らかとなっている。その力学的特性を最大限活用できる構造系として上路式の3径間連続ボウ・ストリング・アーチを提案した。支間200m、幅員12m、ライズ比1/12.5の扁平なアーチ構造を想定し、1/20の実験橋を建設した。本実験では、アーチの基本的な力学的特性を把握するために、死荷重相当の載荷を実施するまでの挙動を計測した死荷重載荷試験を実施した。その結果、死荷重載荷までの鋼管ひずみと変位の実験値は、計算値とおおよそ一致した。本論文では、ボウ・ストリング・アーチ製作から死荷重載荷試験までの結果を中心に報告する。

Key Words : Bow string arch、CFT、Reinforced concrete filled tube、RCFT、Loading test

1. はじめに

CFT 構造の脆性破壊の抑制、CFT 構造以上の優れた変形特性を期待し、CFT 構造に鉄筋を挿入した鉄筋コンクリート充填鋼管 (以下、RCFT) 構造の研究を行ってきた¹⁾²⁾³⁾。研究の成果から、RCFT 構造は CFT 構造よりも塑性域での耐荷・変形性能に優れた力学的特性を有すること、また鋼管の荷重分担率が低い場合においては、コンクリートの脆性破壊を鉄筋が抑制する事を確認した。

このような RCFT 構造の力学的特性を活用するための構造物を考えた場合、高軸力に加え、曲げモーメントが作用するコンクリート構造物に最適であり、ボウ・ストリング・アーチ (以下、Bow String Arch : BSA) アーチリブへの適用が考えられる。充填鋼管アーチは、海外において多く建設され、特に中国において適用事例は多い⁴⁾⁵⁾。充填鋼管アーチは、靱性、変形の向上から断面設計にコスト削減と仮設においてコンクリートアーチ橋に比べると有利であり工期短縮が図れる。

本論文で提案する Bow String Arch は浅いライズの扁平なアーチ橋であり、扁平なアーチ橋の特性として高軸力と曲げモーメントが同時に作用する。よって、軸力と曲げモーメントに優れた RCFT 構造を Bow String Arch へ適用することで、RCFT 構造の力学的特性を最大限に活用できると考えた。また、Bow String Arch に RCFT 構造を適用した構造形式の事例はなく、今後の長大橋梁においても適用可能な新しい複合橋梁となる可能性も十分にある。

そこで、RCFT構造をBow String Archアーチリブへ適用した新しい複合橋梁を提案するとともに、1/20スケールの実験橋を製作し、実験橋にて載荷試験を行った。実験橋は、支間10mの3径間連続上路式アーチ橋で中央径間をRCFT構造、側径間をCFT構造とした。また、水平方向への拘束を抑制するためにPC鋼棒を配置し、全体座屈に対し有効なバスケットハンドルを採用した。

本論文では、実験橋の製作方法および弾性範囲内での載荷試験について、基本的な力学的特性を報告する。

2. RCFT構造を適用したBow String Archの提案

(1) Bow String Archの特徴

Bow String Arch は、弓のように浅いライズを持つアーチ橋を指す。構造特性のみを考えると、一般に計画されるライズ比 1/6 程度と比べて有利とはいえないが、架橋位置の地形、架設工法、および充填鋼管構造を適用した場合の経済性を考慮すると他の橋梁形式との競合性は十分あると考えられる。Bow String Arch を提案する理由は、以下の通りである。

地形上の制約への対応

地形上、基礎位置の制約を受ける場所へのアーチ形式適用が可能となる。

架設の利点

構造物高さが低いことで、組み立て、フローティングクレーンによる一括架設、支保工の設置の点で有利である。

航路の確保

航路上に架橋される場合、桁橋に準じた桁下空間が確保できる。

デザインの可能性

構造全体の高さが低く、アーチリブ構造部材もスレンダーであり、威圧感を与えない新しいデザインの選択肢を提供することができる。

(2) Bow String Archの適用部材について

Bow String Arch の適用部材を考えた場合、全荷重をアーチ主溝で支えることは、これまでのコンクリート、鋼製アーチ橋では困難である。ここで、鋼製アーチ橋、コンクリートアーチ橋の一般的なライズ比の分布図(調査した 24 橋)を図-1 に示す。鋼製アーチやコンクリートアーチ橋の一般的なライズ比は 1/5 ~ 1/10 程度で、Bow String Arch のような高軸圧縮力で浅いライズのアーチへは適用されていない。その理由としては、鋼製アーチでは部材の剛性が低く座屈強度が低いこと、圧縮力に鋼材で抵抗することにより経済性に劣るためである。また、RC アーチでは、ライズが浅い場合、断面力に占める自重の割合が極めて高くなるため長支間化が困難になる。このような欠点を補う構造として、コンクリート充填鋼管構造の適用が考えられる。充填鋼管構造はコンクリート構造に比べて、自重に対する圧縮強度が高く、純粋な鋼アーチに比べて高剛性、安価であり、他の材料では実現困難な構造への適用が期待できる。施工性の面では、RC アーチでは、スリップフォーム工法など、施工の高速化が提案されているが、一般に工期が長くなる傾向があり、鋼殻を型枠として使用できる充填鋼管形式は、工期短縮という点でも経済的

なメリットがある。充填鋼管を用いたアーチ橋は、国内においては、第 2 西海橋(写真-1)が道路橋として初めてアーチ構造の充填鋼管構造が採用された。選定条件の中に、経済性が優れること、地形条件を考慮し、急な潮流である針尾瀬戸を跨ぐことから、陸上からの架設ができることなどが挙げられ充填鋼管(CFT)構造が適用された⁶⁾。

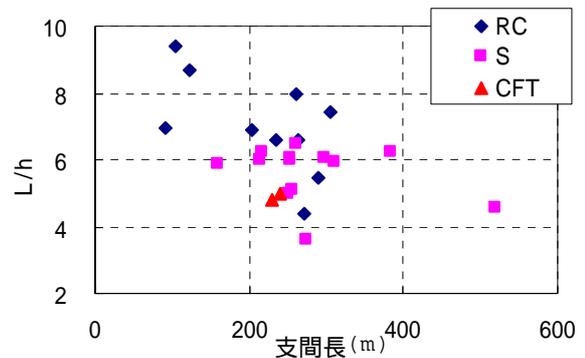


図-1 既存橋梁のライズ比



写真 1 第 2 西海橋(2005.1.16 撮影)

(3) Bow String ArchにRCFT構造を適用する理由

構造物に充填鋼管を適用した場合、薄肉鋼管を用いる事が経済的であるが、薄肉の充填鋼管構造では脆性的な破壊が問題となる可能性がある。薄肉鋼管と高強度コンクリートを組み合わせた場合(鋼材の荷重分担率⁷⁾ = 0.32)の試験結果⁸⁾を図-2 に示す。

図から、CFT 構造は最大耐力以降の耐荷力の減少が顕著に現れており、CFT 構造に鉄筋を施した RCFT 構造においては、内部に挿入した鉄筋が、コンクリートのせん断破壊、脆性破壊を抑制している事がわかる。また、圧縮試験と同じ材料で曲げ試験を行い、実施後に鋼管を切り開いた CFT 試験体と RCFT 試験体の破壊形状を写真-2 に示す。写真-より CFT 試験体は、載荷位置でコンクリートが破断しているのがわかる。

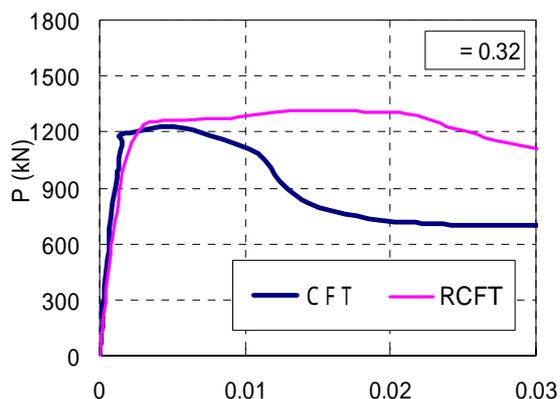


図-2 短柱圧縮試験結果



写真-2 曲げ試験破壊状況

一方、RCFT 試験体は、挿入した鉄筋がコンクリートの破壊を抑制し、破断まで至っていない。以上から、Bow String Arch のように高い軸力、曲げモーメントが作用し、さらに構造の長大化、長支間化を考えた場合、RCFT 構造を Bow String Arch へ適用することが最適であると考えられる。

3. Bow String Arch 実験橋の製作

Bow String Arch 実橋のスケールは、支間 200m、アーチリブ断面は 2200mm×25 を想定し、ライズ比は 1/12.5 を用いた。ライズ比については、1/6～1/15 の試設計を行い 1/12.5 を決定した。実橋と実験橋の緒元を表-1 に示す。試作した実験橋は、実橋の 1/20 スケールで、支間 10m の 3 径間連続アーチ橋である。実験橋の各径間のアーチリブは中央径間に RCFT 構造、側径間に CFT 構造を採用した。RCFT 部の断面形状を図-3、鉄筋挿入状況を写真-3 に示す。挿入した鉄筋量については、これまでの短柱圧縮試験の成果により、鉄筋比を 1% にしたもので CFT 構造の脆性破壊を抑制できることを確認している。Bow String Arch 実験橋での RCFT 断面は、主鉄筋 6mm×4 本、横拘束筋に 3mm のスパイラル鉄筋を使用し、鉄筋比は 1.59% である

表-1 実橋と実験橋の緒元

	実橋	実験橋
縮尺	1	1/20
ライズ	16.0m	800mm
鋼管径	2200mm	101.6mm
鋼管厚	25mm	3.2mm
鋼管強度	490MPa	400MPa
コンクリート強度	40MPa	47.9MPa
鋼材の荷重分担率	0.29	0.54

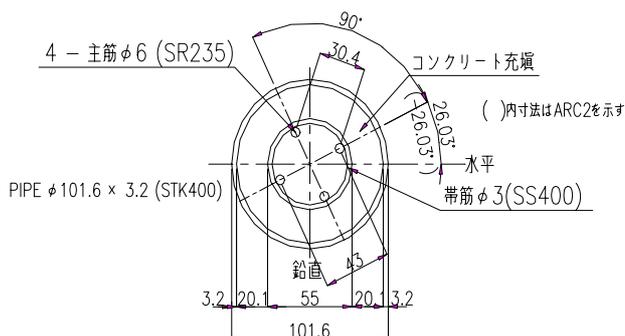


図-3 RCFT 部の断面形状



写真-3 内部鉄筋施工状況

(1) 上部工の製作

実験橋は工場で作成し、各スパンをトラックで搬入、現場にて連結した。完成後は、本試験への準備作業として、コンクリート充填前に予備試験を行い、部材の結合状況を確認した。コンクリート充填作業は、アーチ基部からクラウンに向けて押し上げ打設、充填状況はハンマーによる打診にて確認した。充填コンクリートには実験橋は鋼管内の配筋が密であるため、打設の際に流動性に富み、十分に充填されるよう混和剤に「ポゾリス GF-1700」を使用したモルタルを用いた。圧縮強度は 47.9N/mm² である。製作段階を写真-4～7 に示す。



写真-4 上部工の製作



写真-5 上部工の設置



写真-6 単径間設置完了



写真-7 完成状況

(2) 下部工の製作

Bow String Arch 実験橋の下部構造を図-4 に示す。事前調査により、設置場所はローム地盤であった事から、鋼管杭 457.2m×9.5、1本 12m の鋼管杭基礎を採用し、両端基礎を2本、中央基礎に3本使用した。

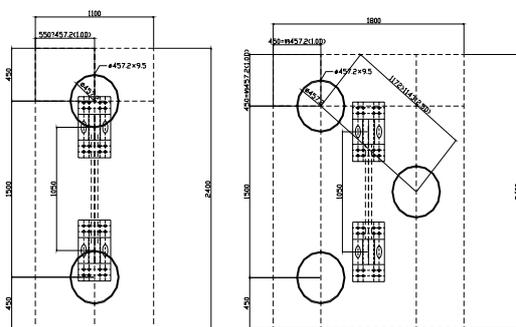


図-4 下部構造 (左: 端部、右: 中央部)

4. 死荷重載荷試験

(1) 実験概要

アーチリブへの死荷重断面力を導入する目的で、死荷重載荷実験を行う。死荷重強度は、200mアーチ

橋の試設計結果との相似から決定した。載荷荷重は、362kgのコンクリートブロックを使用し6段積みで17.04kN/mである。

(2) 測定機器および実験方法

実験はコンクリートブロックをクレーンで載荷した。1段終了毎(2.84kN/m)に測定を行い、6段まで載荷を行った。6段での総重量は511.2kN(17.04kN/m)である。

測定項目は、アーチリブひずみ、鉛直変位、基礎変動量を測定した。設置したゲージ、変位計位置を図-5に示す。実験状況を写真-8に示す。



写真-8 載荷実験の様子

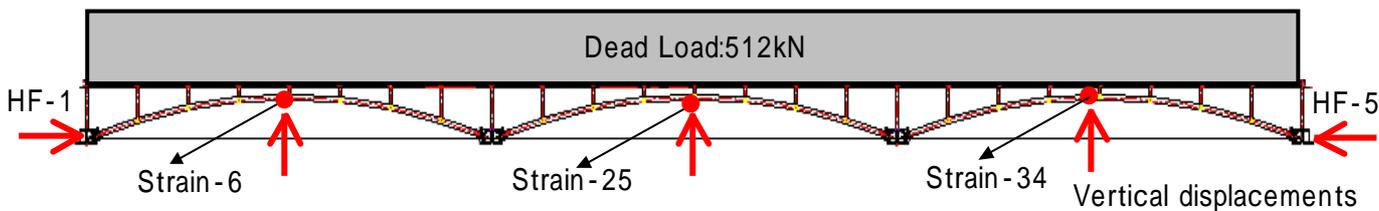


図-5 ひずみゲージ・変位計位置

(3) ファイバー解析モデル

死荷重載荷実験において材料非線形、幾何学的非線形を考慮したファイバー解析を行った。境界条件として、基礎のバネは、死荷重載荷試験より、水平、回転バネを推定し解析モデルに適用した。ファイバーモデルの要素分割を図-6に示す。コンクリートのひび割れモデルはスミアドクラックモデルを用い、単軸引張破壊応力は道示の値 $0.23 \text{ ck}^{2/3}$ で定義し、鋼材と充填コンクリートの材料特性は実験結果から推定した応力 ひずみ関係を用いた。それぞれの応力 - ひずみ関係を図-7に示す。また、使用ソフトは汎用FEMコードのABAQUSを用いた。

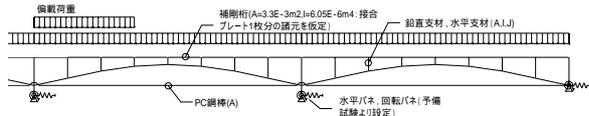


図-6 ファイバー解析要素分割

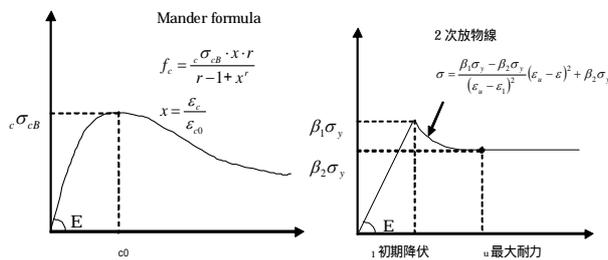


図-7 鋼材・コンクリートの応力 - ひずみ関係

5. 死荷重載荷試験結果

(1) 温度変化と変形特性

温度によるひずみ変動を把握するために、実験橋アーチリブの鋼管表面温度を図-8 に第2 径間 RCFT 部

の鋼管表面温度と鋼管ひずみに示す。クラウンにおいては、ひずみ変動は少なく、基部において少ないことから、温度による影響は少ないことがわかる。

図-9 に示した各載荷段の基礎橋軸変位のグラフから、載荷荷重とともに HF- 1、HF-5 の両端基礎が水平変動していることがわかる。また、実験橋には、PC 鋼棒を配置しており、PC 鋼棒は基礎変動とほぼ同様に変動していることから、基礎の橋軸方向への変動に有効に働いていることがわかる。

図-10 に各載荷段の鉛直変位における実験値とファイバー解析値の比較を示す。1段では実験値と解析値ほぼ等しいが、6 段では側径間で多少の誤差が生じている。これは、側径間の変位計固定点が地盤の影響で動いたことが推測される。また、両端基礎の橋軸方向の変動も要因として挙げられるが、解析における基礎バネ係数の算出は本実験データを採用しており、ここでは前者の基礎変位計の固定点の移動が原因である可能性が高いといえる。

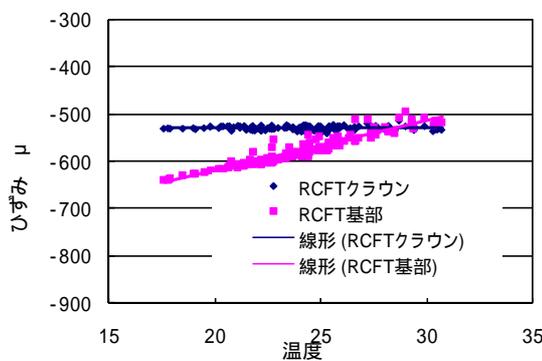


図-8 温度による鋼管ひずみの変化

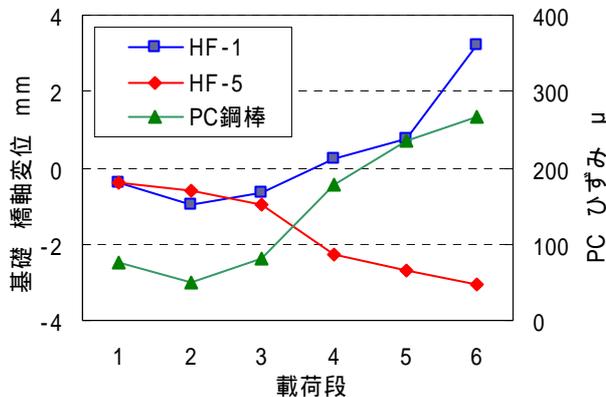


図-9 基礎の橋軸変位

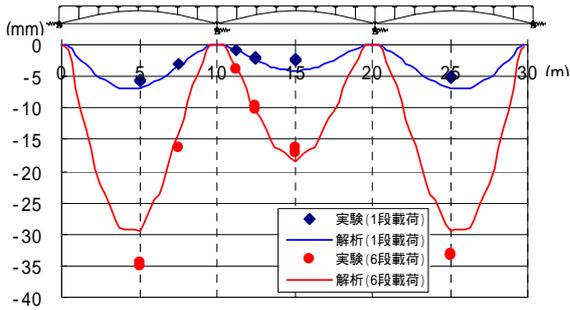


図-10 アーチクラウンの鉛直変位

(2)鋼管ひずみとファイバー解析の比較

6段での鋼管上縁ひずみと下縁ひずみ、ファイバー解析値との比較を図-11、12にそれぞれ示す。

図から上縁、下縁ともファイバー解析値と非常に良く一致している事から、実験橋と同部材で行ったRCFT要素試験で得た応力ひずみ曲線を用いたファイバー解析により実験橋の検証が可能であることが確認された。

また、各部位で鋼管上縁ひずみと下縁ひずみをみると、クラウン上縁では圧縮ひずみが大きく、下縁ではほぼ変化していない。一方、アーチ基部上縁では圧縮ひずみが小さく、下縁では大きくなり、ひずみ特性は異なる。特に、アーチリブ基部は高い軸圧縮力と曲げモーメントが作用していることが分かる。

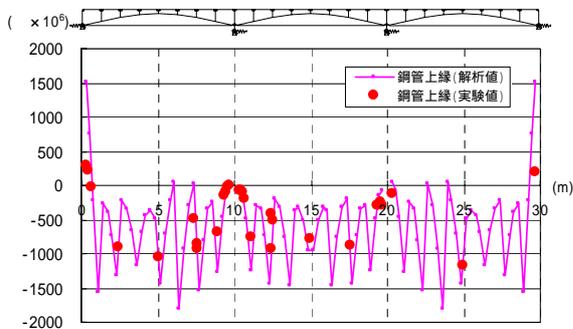


図-11 鋼管上縁ひずみ(6段)

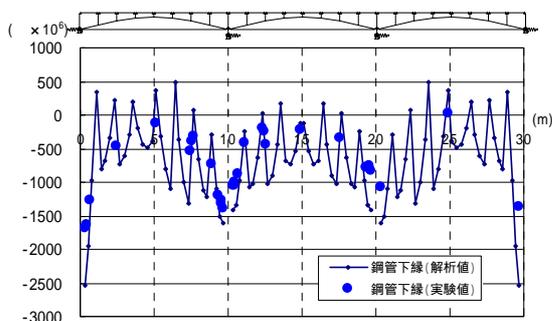


図-12 鋼管下縁ひずみ(6段)

(3)アーチクラウンにおける軸ひずみと曲げひずみ

図-13に各径間アーチクラウンにおける断面ひずみを示す。図から、中央のRCFT部のひずみが小さいことがわかる。本実験橋は連続アーチ橋であることと、両端基礎変動を考慮すると、側径間と中央径間の比較は困難であるが、図-9に示した通り、CFT区間のアーチ基部が水平移動している事から、軸圧縮力はRCFT区間の方が大きいことを予想したが、ひずみは小さい値を示している。以上からRCFT構造はCFT構造よりも軸圧縮力において、優れた特性をもつ構造である事が推測される。

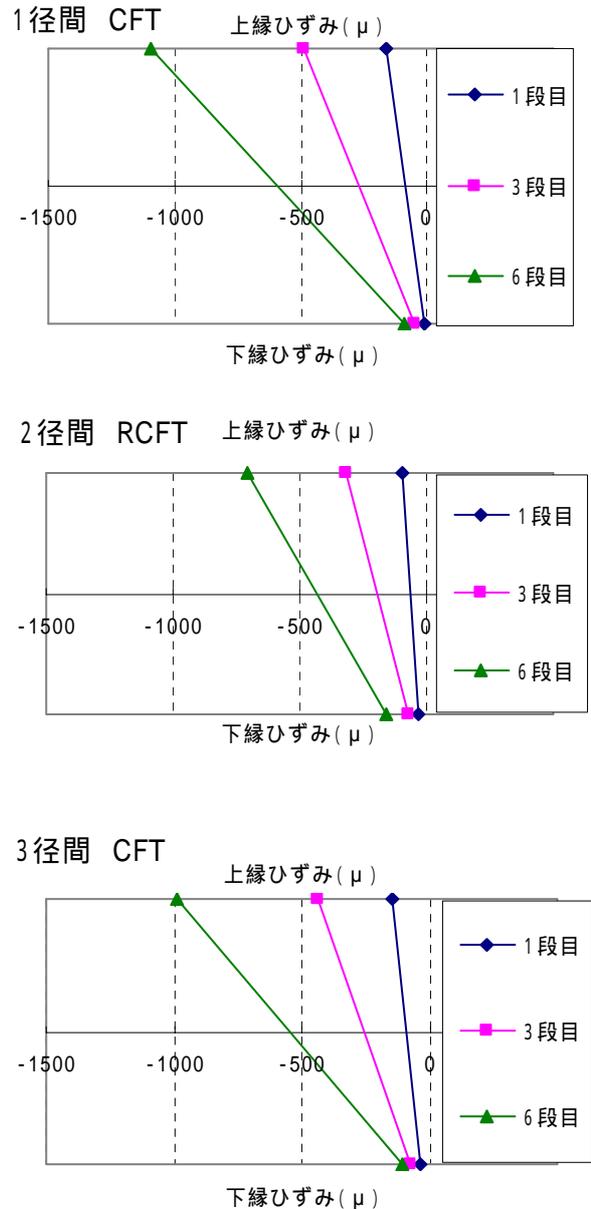


図-13 各径間のアーチリブ鋼管ひずみ

さらに表-2に各径間アーチクラウン上縁と下縁ひずみの平均値とひずみ差を示す。表-2から、RCFT部のひずみにおいて、CFT(1径間)部と比較すると73.0%、3径間と比較しても78.9%に低減しており、RCFT構造はCFT構造よりも軸圧縮力に優れた構造であるという事がいえる。

しかし、鋼管上縁と下縁のひずみ差、すなわち曲げ変形においては、55.2%～63.1%に低減しているが、基礎が橋軸方向への変動しているため、基礎の拘束条件による、軸力・曲げ変形への影響も考慮し、構造を明らかとしていく必要があると考える。

表-2 アーチクラウン部の鋼管ひずみ

	1径間 (CFT)	2径間 (RCFT)	3径間 (CFT)
$(\epsilon_{u^+} - \epsilon_{d^-})/2$	-592	-433	-549
RCFT/CFT (%)	73.0	-	78.9
$\epsilon_{u^-} - \epsilon_{d^-}$	-1003	-553	-877
RCFT/CFT (%)	55.2	-	63.1

6/6D.L.時の値 (μ)

ϵ_{u^+} : 上縁ひずみ (μ)

ϵ_{d^-} : 下縁ひずみ (μ)

6. 結論と今後の展望

本論文はライズの浅いアーチ橋 Bow String Arch への RCFT 構造の適用し、1/20 の実験橋を試作して載荷実験を行った。

また、要素試験より推定した応力 - ひずみ曲線を用い Bow String Arch 実験橋のファイバー解析により、アーチの挙動を確認した。

結論を以下に示す。

Bow String Arch 実験橋と同部材を用いた要素試験を用いたファイバー解析値によると、鉛直変位と鋼管ひずみは実験値と非常によく一致している。

両端基礎には橋軸方向に変位が発生しており、PC 鋼棒のひずみの増加から、PC 鋼棒は有効に働いている。

アーチリブ基部における上縁・下縁ひずみ変化の違いから、アーチリブ基部は高い軸圧縮力と曲げモーメントが作用していることが分かる。

RCFT 断面のクラウンに発生しているひずみは、CFT に対し 73.0%～78.9%に低減しており、軸圧縮力において、RCFT 構造は CFT 優れた構造であるという事が推測される。

曲げ変形においては、55.2%～63.1%に低減しているが、基礎が橋軸方向へ変動をしているため、今後、解析により検討をする必要がある。

各実験値により、荷重載荷実験は弾性範囲において安全に実施することができた。

以上のような結論が得られた。今後、RCFT 構造を適用したことによる優位性を示すため、Bow String Arch 実験橋を用いた塑性域実験、および解析による評価を行う予定である。

謝辞：Bow String Arch 実験橋の製作と実験実施においては、宮地鐵工所、駒井鉄工の協力で行った。ここに熱く感謝の意を表します。

また、本論文における実験データは、八戸工業大学において実施された実験に基づいて成果をとりまとめたものである。実験を行った八戸工業大学構造工学研究室卒業生に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 魏華、岩崎正二、長谷川明、塩井幸武、宮本裕：鉄筋コンクリート充填円形鋼管の力学的特性に関する実験的研究、鋼構造年次論文報告集第10巻、pp.519-526、2002.11.
- 2) 魏華、岩崎正二、長谷川明、塩井幸武、宮本裕：鉄筋コンクリート充填角形鋼管の力学特性に関する実験的研究、鋼構造年次論文報告集第11巻、pp.291-298、2003.11
- 3) Wei Hua、Wang Haijun、A.Hasegawa、T.Suzuki、EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CIRCULAR REINFORCED CFT COLUMNS、8th International Conference for ASCCS、Hrbin China、2006.9.
- 4) Ming-Xian：The Integer Design and Innovation Technology of Maocaojie Bridge、IABSE、2004.
- 5) 汪平伝他：巫山長江公路大橋鋼管拱助安裝与線形控制技術、第十六回全国橋梁学術会議論文集、中国土木学会橋梁及び構造工学会、2004、長沙
- 6) 高冶正信、茂呂充、白井武、西島儀行、田崎智、吉村光弘：新西海橋主橋部の設計と施工、橋梁と基礎 vol.40、pp.13-22、2006.1
- 7) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編：理論編、丸善、1999.4.30
- 8) 鈴木拓也、塩井幸武、長谷川明：鋼材の荷重分担率の違いによる RCFT 構造の圧縮特性、土木学会第63回年次学術講演会、pp.81-82、2008.9

BOW STRING ARCH USING REINFORCED CONCRETE FILLED TUBE

Takuya SUZUKI, Yuki take SHIOI, Akira HASEGAWA and Hiroshi KUDOU

Bow String Arch (BSA) are arch structures which rise in center are low. Because of the low rise, BSA has a large axial compressive force in members. Then, the application of the reinforced concrete filled tube (RCFT) to "Bow String Arch was proposed using the RCFT structure. RCFT structure has excellent performance on the axial force and bending moment. So RCFT is fit to member of Bow String Arch. This paper reports the outline of construction and loading experiments of BSA using RCFT, and comparison with results of experiments to value of fiber analysis.