

コンクリート充填鋼管 (CFT) アーチの耐荷特性に関する実験および解析

Experiment and Analysis on Load-Carrying Characteristics of Arch Rib with Concrete Filled Steel Tube

日野伸一*, 劉玉擎**, 山口浩平***, 彦坂熙****

Shinichi HINO, Liu Yuqing, Kohei YAMAGUCHI, Hiroshi HIKOSAKA

*工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**博 (工学), 中国 同済大学橋梁工程系 (200-092 上海市四平路 1239 号)

***博 (工学), 九州大学大学院助手, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

****工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Hybrid arch structure with concrete filled steel tube (CFT), which has superior strength, axial and flexural rigidity, and toughness by the confined effect, has been increasingly applied to middle-span bridges. However, some efficient information has not been provided with respect to the reasonable design for such a CFT arch bridge. In order to make clear the nonlinear behavior and the load-carrying characteristics of the CFT arch rib, a loading-test has been carried out on two CFT arch specimens for this study. And then, the ultimate performance of the specimens is demonstrated and its credibility is inspected by 3-D finite element analysis. Also the comparison between the CFT arch rib and the one with equivalent steel tube is discussed on the basis of analysis. From the result, it is concluded that the CFT arch rib retains much superior performance to the steel one.

Key Words: concrete filled steel tube, load-carrying characteristics, confined effect, arch rib

キーワード: コンクリート充填鋼管, 耐荷特性, コンファインド効果, アーチ

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (以下, CFT) は, 外側鋼管の局部座屈の防止, コンファインド効果による充填コンクリートの強度増加, 施工時の型枠不要などのメリットがある。また, 阪神・淡路大震災という未曾有の大災害でも大きな損傷もなく, その激震に耐えるという耐震性能の高さを示した。

アーチ橋の主構であるアーチリブは, 常時荷重下でも大きな軸圧縮力および曲げモーメントを受けている。しかしながら, 大規模地震時にはそれらがさらに増大するため, 他の橋梁形式以上に設計条件が厳しく, 大規模地震時の被害を最小限に抑えるためにも, アーチリブの耐力やじん性に優れた構造形式を選定する必要がある。したがって, こ

のような軸圧縮力と曲げモーメントが卓越するアーチリブに CFT を適用することは, 設計上のみならず施工上の観点からも有用である。

CFT をアーチリブに用いた橋梁はフランス, チェコ, 中国などで事例を見ることができる。特に, 中国では 1990 年以降現在まで 60 橋を超える CFT アーチ橋が建設されており, とりわけ現在建設中の巫山長江大橋は主径間 460m の世界最長の CFT アーチ橋である¹⁾。

一方, わが国では CFT を用いたアーチ橋の適用事例はきわめて少なく JR 東日本の除沢川橋 (2001 年) と長崎県の第二西海橋 (仮称 建設中) の 2 橋があるのみである。以下にその概要を紹介する。

① 除沢川橋

長野県による河川改修事業にともない, JR 東日本大糸

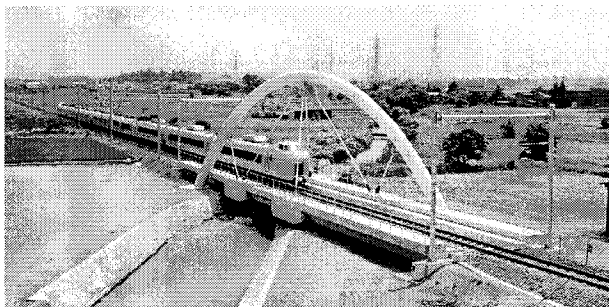


写真-1 除沢川橋

(提供: JR 東日本構造技術センター)

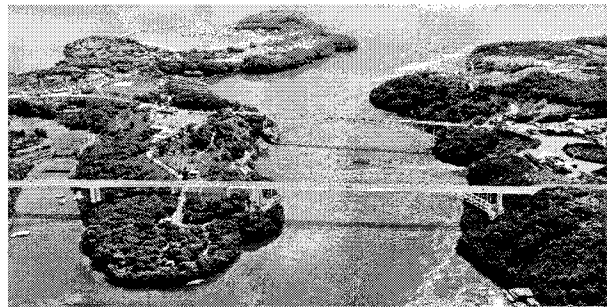


写真-2 第二西海橋

(提供: 長崎県)

線豊科～柏矢町間の万水川に架かる除沢川橋が架替えられ、鉄道橋としては他に例のない線路と河川を跨ぐ単弦アーチを採用している（写真-1）²⁾。アーチリブはコンクリートを充填した直径 1000mm の鋼管を用い、補剛桁を直径 110mm の PC ケーブル 6 本で吊っている。この橋は補剛桁およびアーチの支間がそれぞれ 48.5m、30.2m で、2001 年 4 月に完成された。

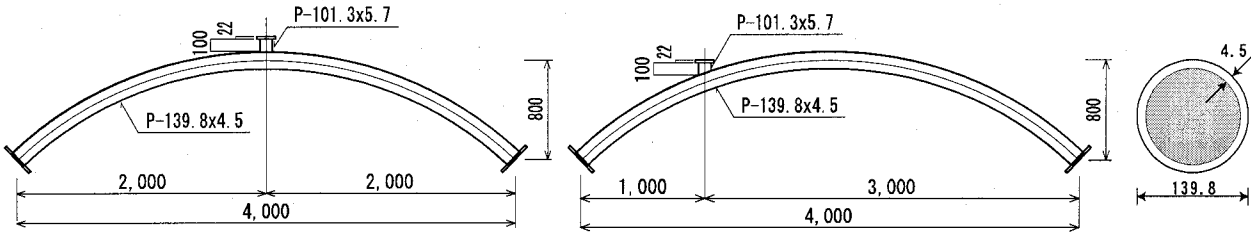
② 第二西海橋

長崎県佐世保市～西彼町に架かる現西海橋と並行する位置に新設（平成 17 年春の竣工予定）されるアーチスパン 230m、全長 300m のコンクリート充填ブレースドリブアーチ橋である（写真-2）。アーチリブは、直径 80cm の鋼管を逆三角形断面に組立てたブレースドリブアーチである³⁾。

以上のように、CFT を用いたアーチ橋の適用事例は国内外ともに次第に増えつつあるものの、CFT 構造の力学特性を反映した合理的な設計法を導入するまでに至っていない。それどころか、CFT アーチの耐荷性能の解明を目的とした荷重実験ですら、著者らの知る限りほとんど見られないのが現状である⁴⁾。そこで本研究では、CFT アーチ小型模型供試体の荷重実験および 3 次元非線形 FEM 解析を行い、理論上、期待される CFT アーチの構造性能の検証を含めた耐荷特性および変形挙動の解明を試みた。

2. CFT アーチ供試体の荷重実験方法

2.1 供試体概要



(a) 供試体 A の側面図

(b) 供試体 B の側面図

(c) 断面図

図-1 供試体概略図 (単位:mm)

表-1 橋梁諸元の比較

	除沢川橋	第二西海橋	実験供試体
鋼管材質	SM490YB	STK400	STK400
スパン L (mm)	30.2	230	4.0
ライズ f (m)	11.3	48	0.8
ライズ比 f/L	0.37	0.2	0.2
鋼管断面 (mm)	Φ 1000x25 (クラウン部) Φ 1000x15 (クラウン部以外)	Φ 812.8x14~ 17	Φ 139.8x4.5 (アーチ部) Φ 101.3x5.7 (鉛直材)
径厚比 D/t	40 (クラウン部) 67 (クラウン部以外)	17~58	31

表-2 材料特性

(a) 鋼管

降伏強度 (N/mm ²)	395.0
引張強度 (N/mm ²)	443.0
延び (%)	32.0
ヤング率 (kN/mm ²)	205.8

(b) コンクリート

供試体	A	B
圧縮強度 (N/mm ²)	46.2	47.2
引張強度 (N/mm ²)	4.1	3.5
ヤング率 (kN/mm ²)	33.6	35.4

供試体は同一形状のものを 2 体製作し、供試体 A は支間中央点荷重、供試体 B は支間 1/4 点荷重である。両供試体の概略図を図-1 に示す。両供試体ともスパン L=4000mm、ライズ f=800mm（ライズ比 1/5）の円弧状アーチで、断面 φ139.8x4.5mm（径厚比 31）の CFT を用いている。これらの諸元は、前述の除沢川橋、第二西海橋などの実橋におけるライズ比ならびに円形鋼管の径厚比を参考にして、荷重装置の制限上から決定した（表-1 参照）。両スプリング部は長さ 100mm、厚さ 16mm の 4 枚鋼板リブで鋼管外側を補強した。供試体 A はクラウン部、供試体 B は左スプリング部から支間 1/4 部に荷重用の鉛直材を溶接した。鉛直材は断面 φ101.3x5.7mm の CFT を用いている。鋼管材質は STK400、充填コンクリートの設計基準強度は 35 N/mm² である。鋼管内面には全長を通じて一切の補剛材およびずれ止めを配置していない。

表-2 に鋼管およびコンクリートの材料特性を示す。中空鋼管アーチ供試体は一般構造用炭素鋼の鋼管を採用し、プレス曲げによりライズ比 f/L=1/5 の円弧状に加工した。充填コンクリートは、早強ポルトランドセメントおよび最大寸法 20mm の骨材を用い、打設時のスランプは 9.6cm である。

コンクリートの鋼管への充填は、反転している中空鋼管アーチに片側のスプリング部から行い、反対側のスプリング部からコンクリートが溢れるまで充填した。充填性を確保するために、振動機により鋼管外側から振動を加えた。

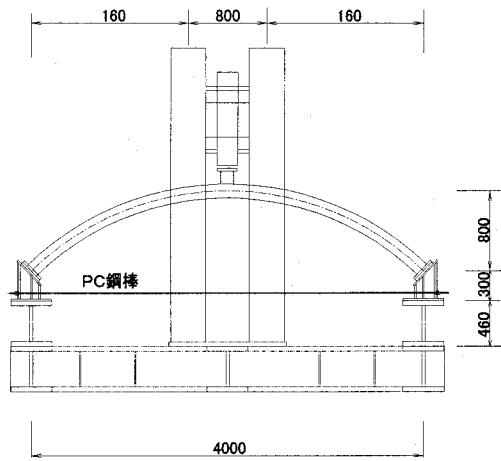


図-2 荷重装置（供試体 A）（単位：mm）

2.2 荷重方法

図-2 に荷重装置、写真-3 に供試体設置状況を示す。供試体を鉛直方向に設置し、両スプリング部を引張ボルト接合により支承台に固定した。支承台は、フレームの両端横梁にボルトで固定するとともに、2本のPC鋼棒（φ23mm）を用いて水平反力の不足を補強した。なお、スプリング部の支点変位を計測し、解析結果との比較に反映させた。また、供試体の横倒れを防止するために、横倒れ防止枠と供試体との間にテフロンシートを設置して、面内変形が拘束されないようにした。

計測箇所は、鉛直および水平方向変位、鋼管の軸および周方向のひずみ、支承部の水平方向変位である。

荷重は、供試体 A は順次 75kN、150kN および弾性域内の最大荷重まで加力して除荷させて、供試体 B は順次 75kN、130kN および弾性域内の最大荷重まで加力して除荷させて、それから 10kN 刻みで終局状態まで荷重した。

3. 数値解析の概要

3.1 解析モデル

実験結果に対する評価の妥当性また鋼管内の充填コンクリートの応力状態、鋼管の座屈挙動などを明らかにするために、3次元非線形 FEM 解析を行った。本解析は、構造解析用汎用ソフト Lusas Ver. 13.4 を用いて行った。解析モデルは、荷重点近傍の鋼管は 8 節点シェル要素、その他の部分は 4 節点シェル要素を用いた。充填コンクリートは、コンクリート断面の半径と同一の厚さを有する 4 節点厚肉シェル要素としてモデル化した。幾何学的非線形問題は有限変形を考慮しているが、残留応力および幾何学的な初期不整については、実態を把握することが難しいこと、終局挙動への影響が小さいことなどの理由から考慮していない。

鋼管とコンクリート間の付着は、3方向バネ要素でモデ

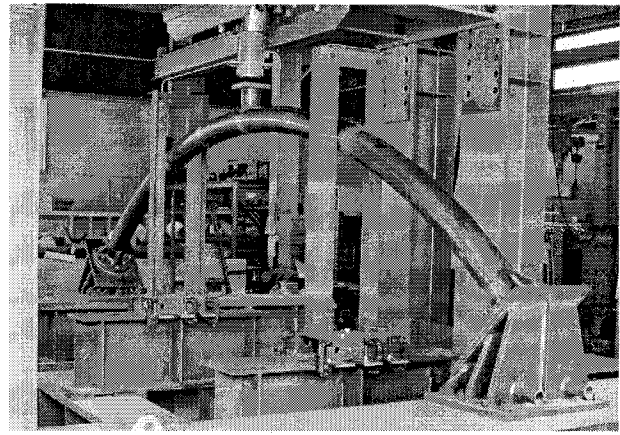
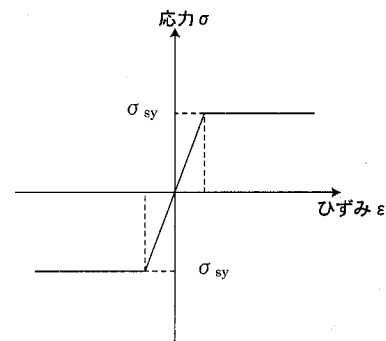


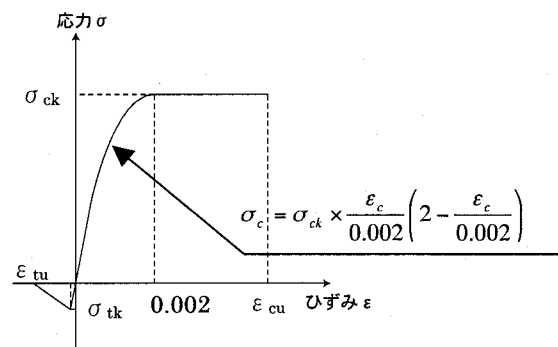
写真-3 供試体設置状況（供試体 A）

ル化した。しかし、供試体はスプリング部両端でコンクリートが端部拘束されていることおよび鋼管とコンクリート間の付着バネ係数が明確でないことなどから、本解析では両者間の完全付着を仮定した。また半径方向のバネ要素には圧縮方向は剛結、引張方向はバネ係数を十分小さくすることで鋼管の剥離を考慮することとした。

鋼材およびコンクリートの応力ひずみ関係を図-3 に示す。コンクリートおよび鋼管の材料特性は一軸荷重試験によるものを用いることとする。鋼材の降伏判定は Von Mises 降伏条件、コンクリートの破壊判定には Drucker Prager モデルを用いた。鋼材およびコンクリートとも等方硬化則により塑性域の硬化を考慮している。また、コンクリートは道路橋示方書⁵⁾に示される応力-ひずみ関係を用いた。ここで σ_{sy} は鋼材の降伏応力、 σ_{ck} 、 σ_{tk} 、 ϵ_{cu} 、 ϵ



(a) 鋼材



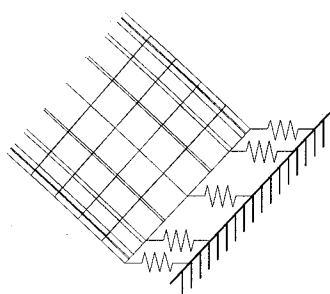
(b) コンクリート

図-3 応力-ひずみ関係

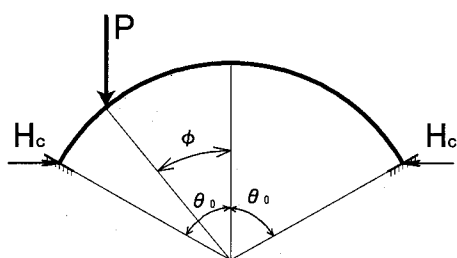
σ_{tu} は、それぞれコンクリートの最大圧縮応力、最大引張応力、終局時の圧縮ひずみ、終局時の引張ひずみである。

3.2 スプリング部

載荷実験で発生した両スプリング部の水平方向の変位を再現するため、前節の FEM 解析に対してバネ要素をスプリング部に挿入した。図-4 (a) にバネモデルを示す。各バネ係数は図-4 (b) に示すような固定円弧アーチの弾性計算によるスプリング部の水平反力 H_c と、実験における水平変位から算出した。解析に用いた両供試体のバネ係数を表-3 に示す。



(a) バネモデル



(b) 固定円弧アーチの水平反力の概略図
図-4 スプリング部の解析モデル

表-3 スプリング部のバネ定数

供試体	左 (kN/cm)	右 (kN/cm)
A	29.1	13.4
B	60.7	15.2

4. 結果および考察

4.1 変形状

両供試体の載荷点の荷重-変位関係を図-5 に示す。供試体 A の最大荷重は 258kN で載荷点の変位は 52.3mm であり、供試体 B は同じく 218kN, 37.5mm である。供試体 A は最大荷重到達後に荷重が低下しはじめ、変位 86.2mm で試験を終了させ除荷した。最終の残留変位は 53.7mm で、除荷時の剛度は初期剛度とあまり変わらないことがわかる。供試体 B は変位 46.5mm まで計測できた。また、実験値と解析値は、剛性および耐力ともよく一致していることがわかる。

面内鉛直方向変位を考慮した変形（実験結果）を図-6 に示す。なお、鉛直方向変位および水平方向変位をそれぞれ 3 倍のスケールで表示している。図-7 に 267kN 時（供試体 A）の載荷点付近の変形図および載荷後の写真を示す。載荷用鉛直材があることを考慮して、載荷用鋼管部を弾性体として解析を行ったが、実験で鉛直材溶接部の両端に生じた局部座屈による変形とよく類似した変形モードを示すことが確認できた。図-8 に示す供試体 B も同様の挙動を呈した。

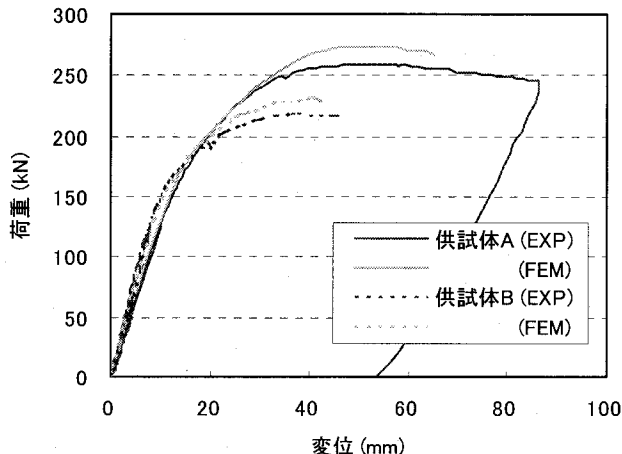


図-5 荷重-変位関係

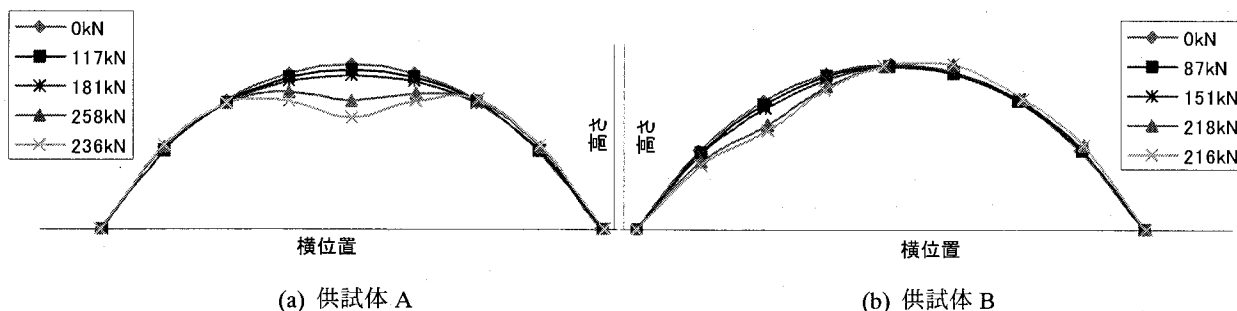
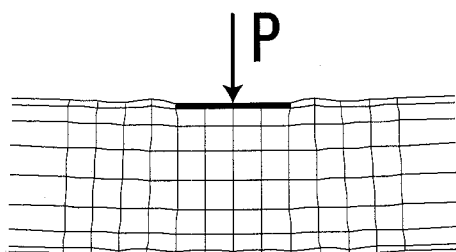


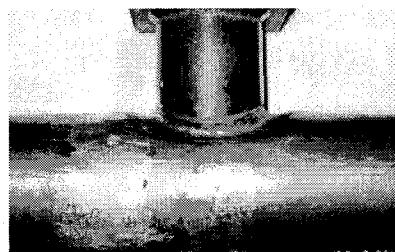
図-6 全体変形図

4.2 鋼管のひずみ性状

載荷点付近上縁側の荷重-ひずみ関係を図-9、下縁側の荷重-ひずみ関係を同図(b)に示す。上縁側においては、荷重 117kN 時に降伏し、荷重 243kN 時に座屈が起きており、降伏後に座屈が起きていることがわかった。また座屈発生時、一時的に荷重が低下したがその後も荷重は増加した。すなわち局部座屈発生時が終局耐力ではなく、座屈発生後も荷重増加が期待できることがわかった。解析値は、座屈発生前まで精度よく再現できている。下縁側においては、軸方向は精度よく再現できているが、周方向が 150kN 付近で解析値のひずみのほうが大きくなっている。この点では 174kN で周方向降伏している。

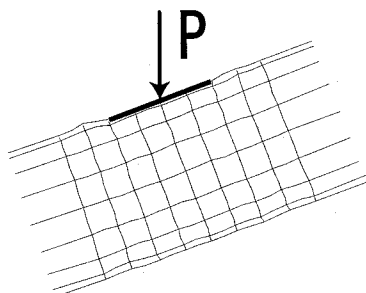


(a) 解析結果

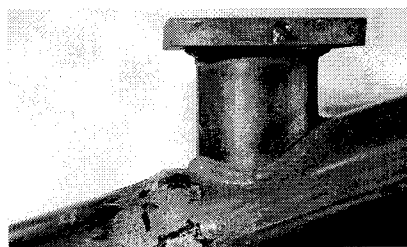


(b) 実験結果

図-7 座屈状況（供試体 A）

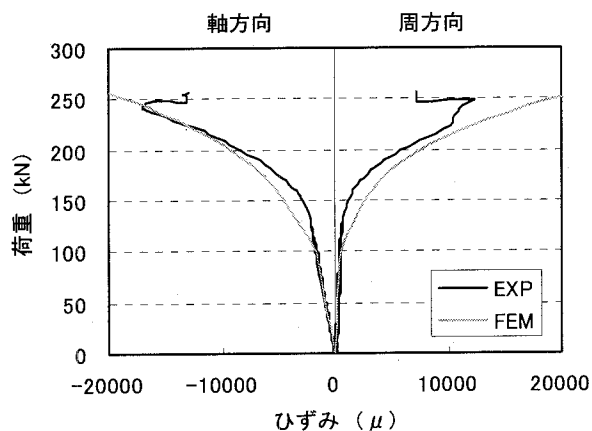


(a) 解析結果

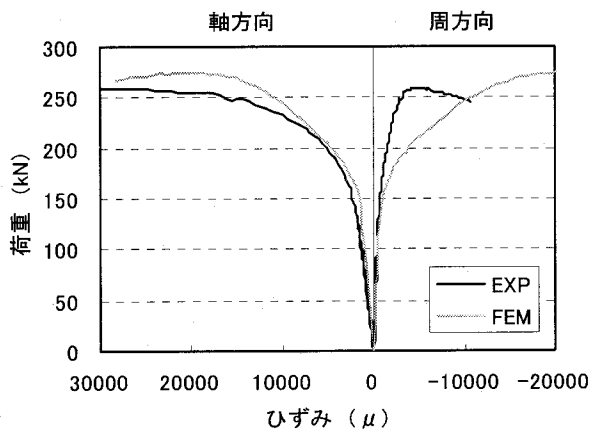


(b) 実験結果

図-8 座屈状況（供試体 B）



(a) 上縁



(b) 下縁

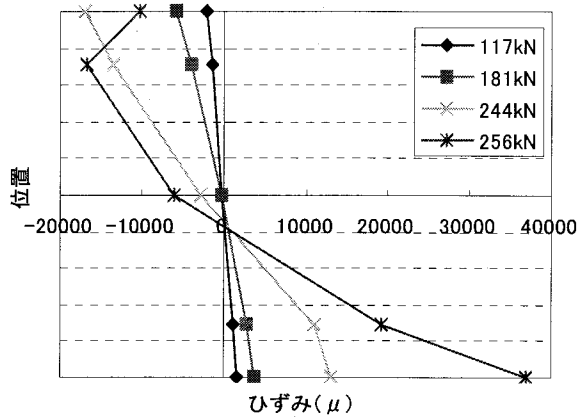
図-9 荷重-ひずみ関係（供試体 A：載荷点）

4.3 充填コンクリートの応力性状

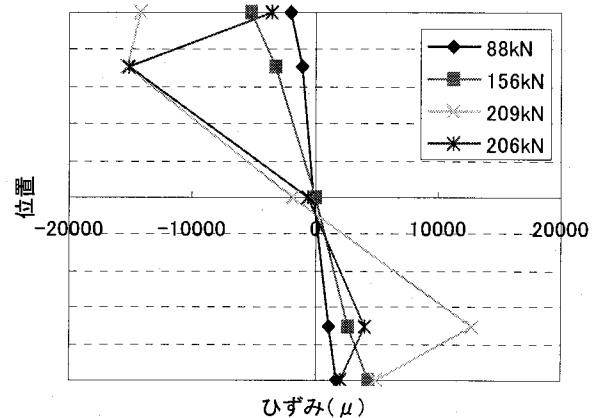
今回の実験においては、充填コンクリートの応力（ひずみ）状況を計測することができなかった。そこで、図-11に終局時の充填コンクリートの軸方向応力分布についての解析結果を示す。同図より、供試体 A は荷点および

両 1/4 点下縁側に、供試体 B は荷点およびその反対側の 1/4 点に圧縮応力が集中していることがわかる。

図-12 に、供試体 A は支間 1/4 点下縁側コンクリートの軸方向、供試体 B は非荷点側の 1/4 点下縁側コンクリートの応力-ひずみ関係（解析値）を示す。供試体 A では終局状態で 74.3N/mm^2 の応力が生じている。材料試験による

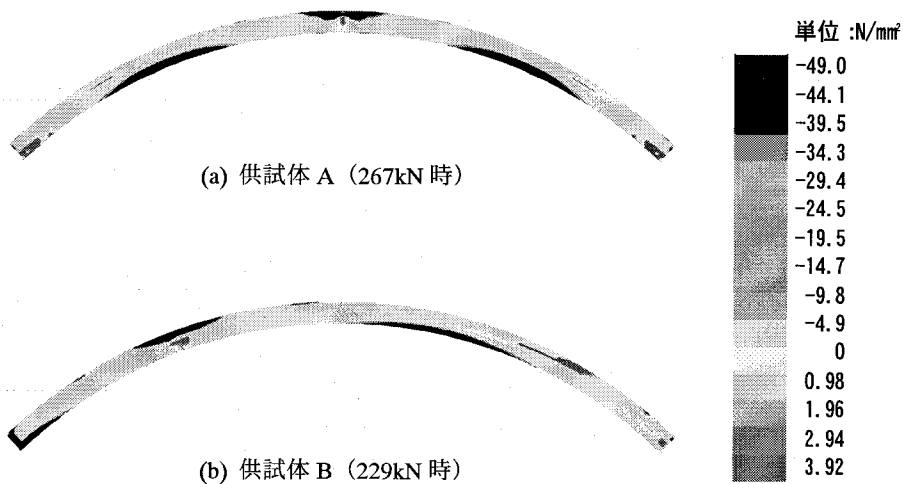


(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

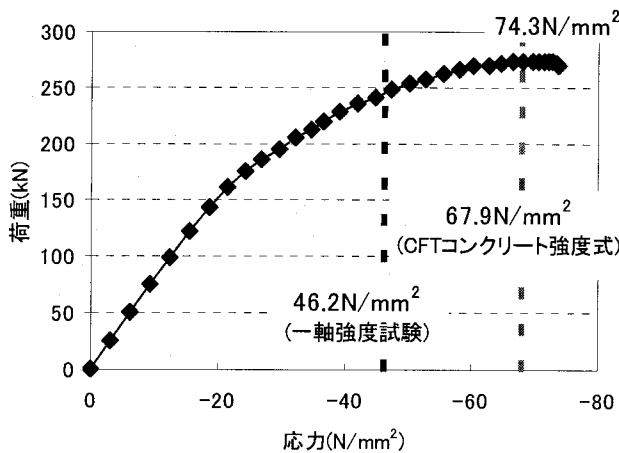
図-10 ひずみ分布図（荷点）



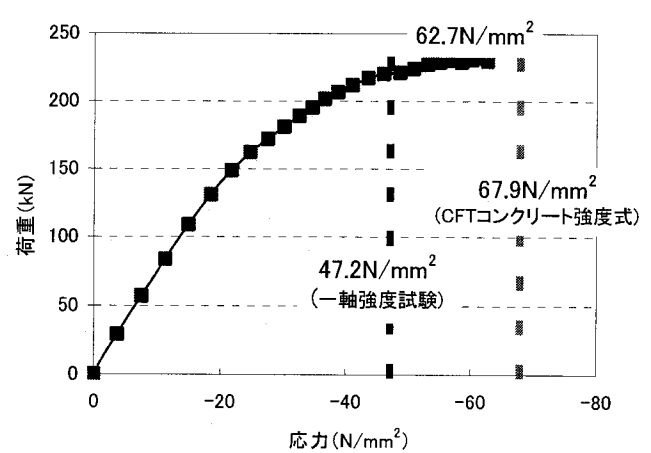
(a) 供試体 A (267kN 時)

(b) 供試体 B (229kN 時)

図-11 充填コンクリートの応力分布図



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

図-12 応力-ひずみ関係（解析値）

コンクリートの一軸圧縮強度は 46.2N/mm^2 なのでコンファインド効果により約 61%終局応力が上昇したことがわかる。コンファインド効果を考慮したコンクリートの累加強度式⁹⁾により算定すると 67.9N/mm^2 となり、解析上のコンクリートの終局応力と近いことがわかった。

同様に供試体 B は、終局状態で 62.7N/mm^2 の応力が生じており、材料試験によるコンクリートの一軸圧縮強度 47.2N/mm^2 に比べて、約 33%終局応力が上昇したことがわかる。累加強度式では 67.9N/mm^2 となり、解析値 (62.7N/mm^2) とほぼ一致していることがわかった。

4.4 充填コンクリートの破壊性状

供試体を切断し、鋼管内部の充填コンクリートの破壊状況を確認した。切断箇所はスプリング部、支間1/4点、荷重点近傍であり、図-13に荷重点近傍の断面写真およびひび割れ図を示す。両供試体とも、圧縮応力域に大きなひび割れが見られ、ひび割れはモルタル部だけでなく骨材にも発生していることがわかる。また目視観察する限り、鋼管とコンクリートの間の剥離は認められなかった。

4.5 鋼管の降伏状況

鋼管に起きた現象を表-4に、鋼管の降伏発生箇所・順序を図-14に示す。供試体 A の鋼管の初期降伏荷重は 117kN 、局部座屈発生は 243kN 、最大荷重は 258kN で、供試体 B も同様に、それぞれ 88kN 、 195kN 、 218kN であった。このことから、CFT は座屈しても急激に耐力を失わず、座屈以降も荷重を受け持つことができる構造であることがわかった。

5. 中空鋼管アーチリブとの比較

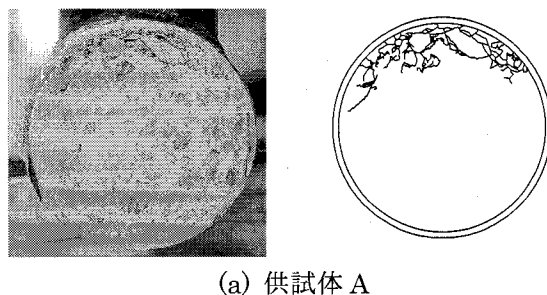
5.1 解析モデルの概要

本章では、CFT アーチリブと中空鋼管アーチリブを解析し比較することで、CFT アーチリブの有用性を考察する。解析対象モデルは、前述の CFT アーチリブ供試体の

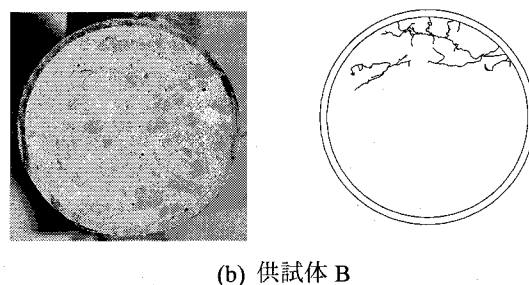
鋼管アーチリブと同一諸元をもつモデルである。コンクリートを充填していないこと以外の材料構成則、支承部のバネなどの条件は CFT アーチリブの解析条件と同一である。

5.2 変形性状および耐荷性能

図-15に荷重点の荷重-変位関係を示す。中空鋼管アーチリブの支間中央点荷重モデルの最大荷重は 115kN となったが、CFT アーチリブの最大荷重は実験値 258kN 、解析値 274kN である。また中空鋼管アーチリブの支間1/4点荷重モデルの最大荷重は 107kN となったが、CFT アーチリブの最大荷重は実験値 218kN 、解析値 232kN である。このことからコンクリートを充填することで最大荷重が2倍以上になり、また最大荷重後の変形性能も大幅に増加することがわかった。図-16、17に、それぞれ支間中央点荷重モデル、支間1/4点荷重モデルの荷重点付近の座屈状況を示す。中空鋼管の両モデルとも荷重点で大きな座屈を起こしており、この座屈が原因でその後急激に耐力を失った。それに対して、CFT の両モデルは、座屈は起きているものの、座屈発生荷重が大きく、鋼管の変形量が小さいのがわかる。図-15に局部座屈発生荷重とその時の鋼管ひずみを示している。CFT の両モデルは中空鋼管モデルに比べて、座屈発生ひずみも大きいことがわかる。このことから、CFT アーチリブは中空鋼管アーチリブに比べて、座屈の起こりにくい構造形式であることがわかった。なお、特に中空鋼管アーチリブにおいて、最大耐荷力到達以後の



(a) 供試体 A

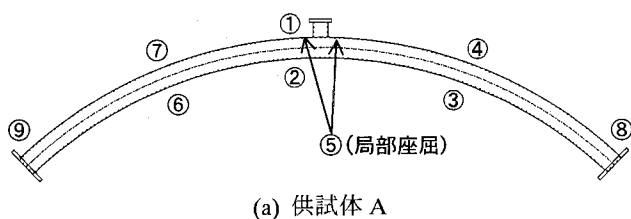


(b) 供試体 B

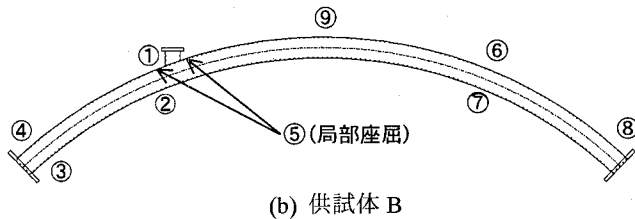
図-13 断面の破壊状況（荷重点近傍）

表-4 鋼管に起きた現象

供試体	A	B
初期降伏発生時の荷重	117kN	88kN
局部座屈発生時の荷重	243kN	195kN
最大荷重	258kN	218kN

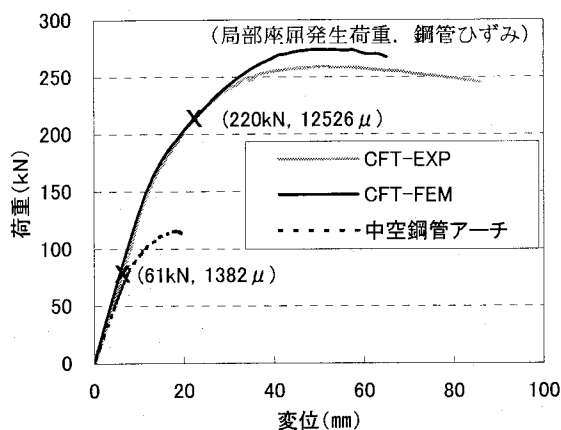


(a) 供試体 A

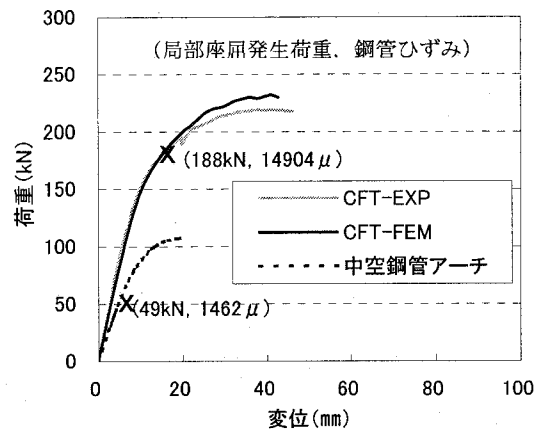


(b) 供試体 B

図-14 鋼管の降伏・局部座屈発生の箇所と順序



(a) 支間中央点載荷



(b) 支間 1/4 点載荷

図-15 荷重-変位関係

変形挙動については満足できる結果が得られておらず、現在解析を継続中である。

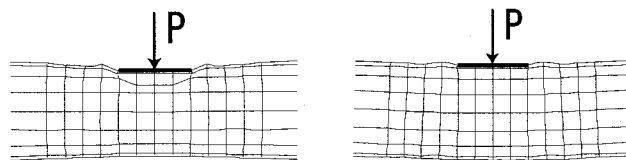
6. まとめ

本研究では、CFT アーチリブの面内鉛直載荷実験により耐荷特性、変形性能などを明らかにするとともに、3次元非線形 FEM 解析により実験結果のシミュレーションならびに実験供試体と同一断面諸元を持つ中空鋼管アーチリブとの比較を行った。

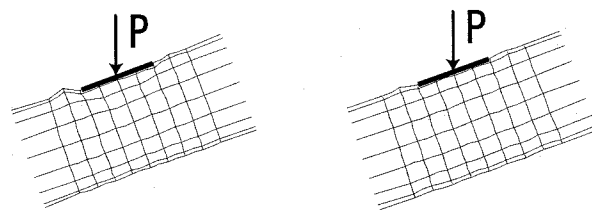
以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 支間中央点（クラウン部）、支間 1/4 点のいずれの面内鉛直載荷に対しても、まず載荷点付近で鋼管の圧縮降伏が先行し、充填コンクリートの補剛効果により鋼管の局部座屈の発生が抑制されることが示された。
- (2) 鋼管の局部座屈の発生は、アーチリブの降伏進展後、最大荷重の直前（対最大荷重比 供試体 A：95%、供試体 B：90%）に起こった。
- (3) 鋼管の局部座屈発生後、また最大荷重到達以後も荷重の急激な低下は見られず、きわめてねばりのある耐荷性能を発揮した。
- (4) FEM 解析により、CFT アーチリブの終局に至る実験挙動を精度よく追跡できることが明らかにされた。
- (5) FEM 解析により、コンファインド効果で充填コンクリートの強度が増加していることを確認できた。
- (6) 接合面の完全合成を仮定した FEM 解析と実験値の最大荷重直前までの良好な一致より、鋼管とコンクリートの接合面は機械的なずれ止めを用いなくとも、最大耐力付近まではほぼ完全合成に近い状態を保持しているものと推測される。
- (7) 中空鋼管アーチリブとの解析結果の比較より、CFT アーチの優れた耐荷性能を確認できた。

最後に、本実験は（社）日本鋼構造協会「鋼橋の高性能化委員会」（委員長：中村俊一東海大学教授）の補助を受け実施されたものであり、貴重なご助言を賜った委員各位



(a) 中空鋼管の 113kN 時 (b) CFT の 267kN 時
図-16 座屈状況（支間中央点載荷）



(a) 中空鋼管の 103kN 時 (b) CFT の 229kN 時
図-17 座屈状況（支間 1/4 点載荷）

ならびに実験にご協力を戴いた、当時九州大学大学院杉原大志郎、片渕和啓、加島敏博の諸氏に対し心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 彭天文 他：中国における最近の長大橋の建設と発展、橋梁と基礎、pp.43-49, 2003.2
- 2) 佐藤清一、伊藤昭夫、丸山孝、駿河正敏：大糸線除川橋梁、JSSC, No45, pp.5-7, 2002
- 3) 吉村光弘 他：第二西海橋（仮称）コンクリート充填施工試験報告、土木学会第 57 回年次学術講演会概要集、I, pp.669-670, 2002.9
- 4) Chen Baochun, Chen Youjie: Experimental Study on Whole-Process Behavior of CFST Rib Arch under In-Plane Loads, Proc. of 6th ASCCS Conference, pp.167-172, 2000.3.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編、1996.12
- 6) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針、1997.10

（2003 年 9 月 12 日受付）