

(17) コンクリート充填鋼管アーチリブの耐荷特性および弾塑性挙動に関する研究

Study on Load-Carrying Characteristics and Elasto-Plastic Behavior of Arch Rib with Concrete Filled Steel Tube

日野伸一^{*}, 劉玉擎^{**}, 山口浩平^{***}, 杉原大志郎^{****}, 片渕和啓^{*****}, 加島敏博^{*****}

Shinichi HINO, Liu Yuqing, Kohei YAMAGUCHI, Daishiro SUGIHARA, Kazutaka KATAFUCHI, Toshihiro KASHIMA

^{*}工博, 九州大学大学院助教授, 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 同济大学桥梁工程系 (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)

^{****}日本テレコム (株) (〒151-0053 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

^{*****}九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

^{*****}九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Hybrid arch structure with concrete filled steel tube (CFT) has superior strength, axial and flexural rigidity, and toughness by the confined effect. 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 load-carrying characteristics and elasto-plastic behavior 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. From the result, it is concluded that the CFT arch rib retains much superior performance to the steel one.

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

1. はじめに

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。

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。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 CFT プレースドリブアーチ橋である。アーチリブは、直径 80cm の鋼管を逆三角形断面に組立てたプ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載荷実験ですら、著者らの知る限りほとんど見られないのが現状である。そこで本研究では、CFT アーチ小型模型供試体の載荷実験および 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。

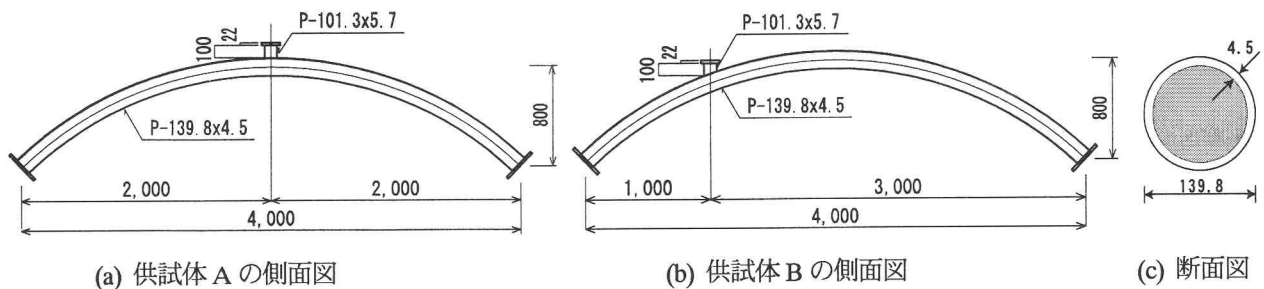


図-1 供試体概略図 (単位:mm)

2. CFT アーチ供試体の載荷実験の概要

2.1 供試体

供試体 A は支間中央点載荷、供試体 B は支間 1/4 点載荷であり、形状は同一である。両供試体の概略図を図-1 に示す。両供試体ともスパン $L=4000\text{mm}$ 、ライズ $f=800\text{mm}$ (ライズ比 1/5) の円弧状アーチで、断面 $\phi 139.8 \times 4.5\text{mm}$ (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、載荷装置の制限上から決定した (表-1 参照)。

鋼管材質は STK400、充填コンクリートの設計基準強度は 35 N/mm^2 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。

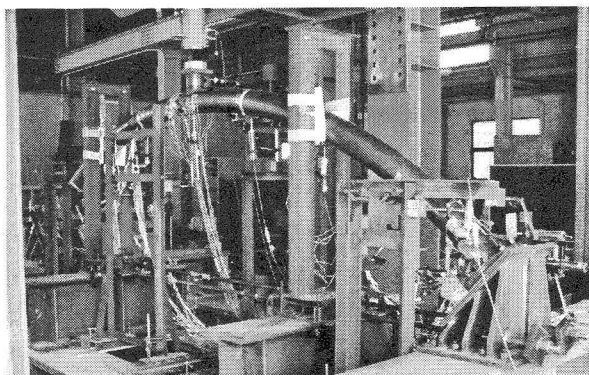


写真-1 供試体設置状況 (供試体 A)

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)	$\Phi 1000 \times 25$ (クラウン部)	$\Phi 812.8 \times 14 \sim 17$	$\Phi 139.8 \times 4.5$ (アーチ部)
	$\Phi 1000 \times 15$ (クラウン部以外)		$\Phi 101.3 \times 5.7$ (鉛直材)
径厚比 D/t	40 (クラウン部)	17~58	31
	67 (クラウン部以外)		

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

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から行い、反対側のスプリングからコンクリートが溢れるまで充填した。

2.2 載荷方法

写真-1 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 ($\phi 23\text{mm}$) 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。載荷は、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載荷した。

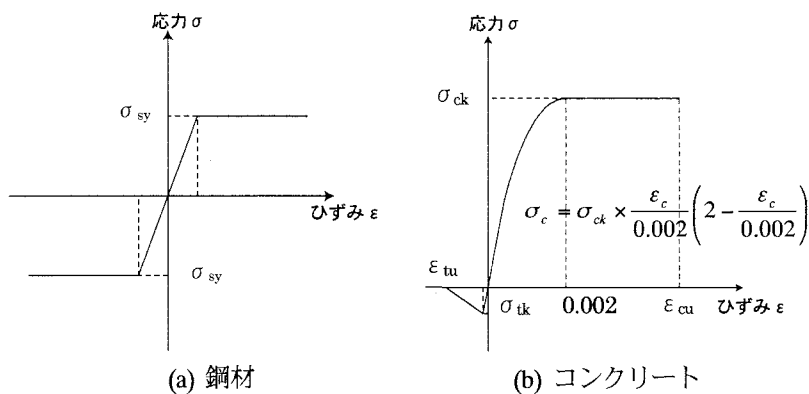


図-2 応力-ひずみ関係

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

3. 数値解析の概要

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。解析には、汎用FEMソフトLusas Ver.13を用いた。解析モデルは、鋼管、コンクリートともにシェル要素を用いた。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。

コンクリートおよび鋼管の材料特性は一軸載荷試験によるものを用いることとする。鋼材およびコンクリートの応力ひずみ関係を図-2に示す。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Von Mises降伏条件を拡張したものを用いた。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。なお、コンクリートは道路橋示方書⁴⁾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_{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。

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、バネ要素をスプリング部に

挿入した。バネ係数は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。

鋼管とコンクリート間の付着は、水平方向においては両者間の完全付着を仮定した。また垂直方向においては、圧縮方向は剛結、引張方向は鋼管の剥離を考慮することとした。

また、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した。解析対象モデルは、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などの条件はCFTアーチリブの解析条件と同一である。

4. 結果および考察

4.1 変形性状

図-3に両供試体における載荷点の荷重-変位関係を示す。供試体Aの最大荷重は実験値258kN、解析値274kNであり、中空鋼管アーチリブの最大荷重は115kNとなった。また、供試体Bの最大荷重は実験値218kN、解析値

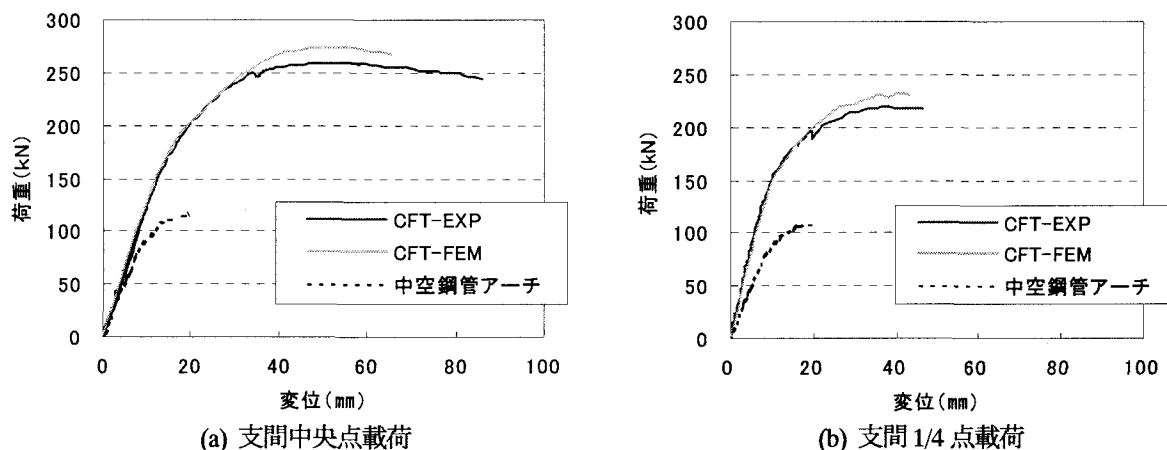


図-3 荷重-変位関係

232kN であり、中空鋼管アーチリブの最大荷重は 107kN となった。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。

面内鉛直方向変位を考慮した変形（実験結果）を図-4 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。

4.2 鋼管の座屈および降伏性状

供試体 A の載荷点付近の荷重-ひずみ関係を図-5 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、座屈発生時に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

屈発生後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。

供試体 B においても、荷重 88kN 時に降伏し、荷重 195kN 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、供試体 A と同様に座屈発生時、一時的に載荷荷重が落ちているがその後も荷重は増加した。

載荷実験において鋼管に起きた現象を表-4 に、鋼管に起きた現象の荷重-変位関係における推移を図-6 に、鋼管の降伏発生箇所・順序を図-7 に示す。CFRTP は座屈後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

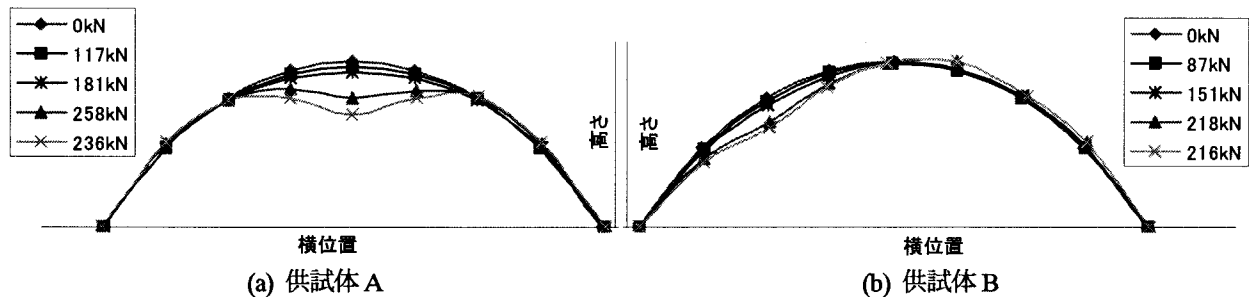


図-4 全体変形図

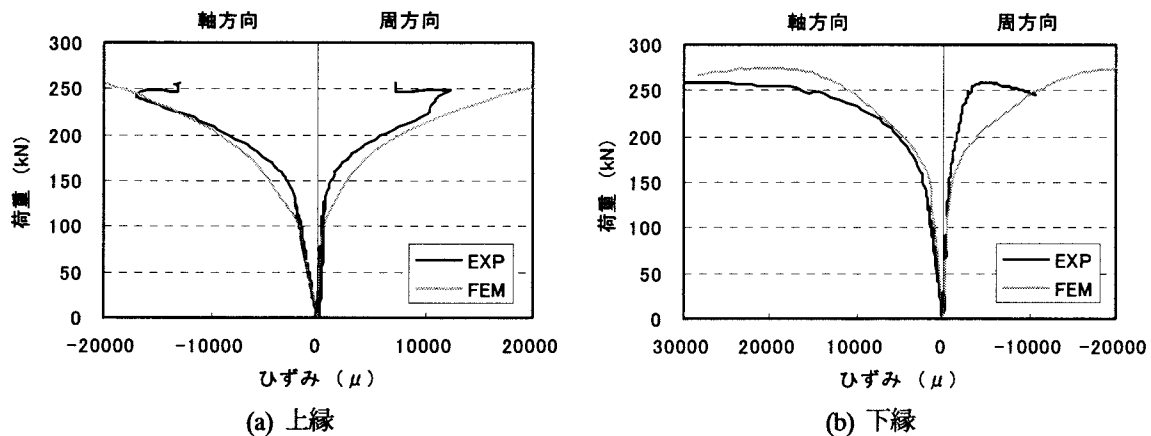


図-5 荷重-ひずみ関係 (供試体 A: 載荷点)

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	117 kN	88 kN
局部座屈発生時の荷重	243 kN	195 kN
最大荷重	258 kN	218 kN

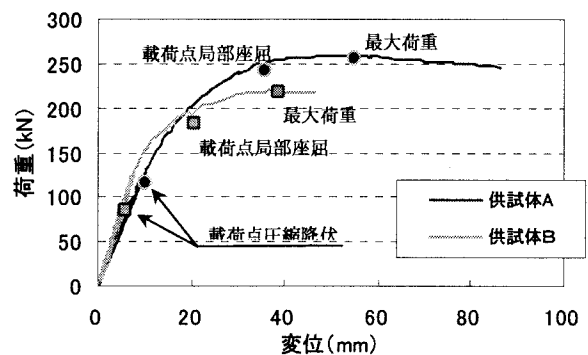
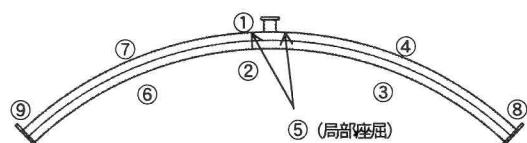
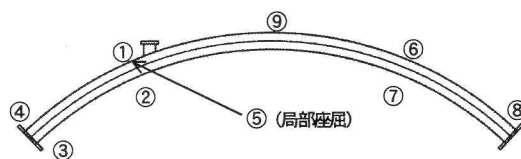


図-6 荷重-変位関係

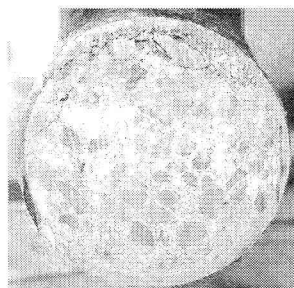


(a) 供試体 A

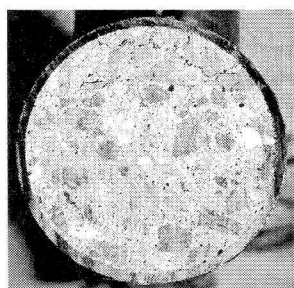


(b) 供試体 B

図-7 鋼管の降伏・局部座屈発生箇所の順序



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

写真-2 断面の破壊状況（荷点近傍）

きる構造であることがわかった。

4.3 充填コンクリートの応力性状

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、荷点近傍であり、写真-2 に荷点近傍の断面写真を示す。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。

解析の結果、充填コンクリートの軸方向応力分布は、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った。

図-8 に、供試体 A における支間 1/4 点下縁側コンクリートの荷重-軸方向応力関係（解析値）を示す。終局状態で 74.3N/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日本建築学会の CFT コンクリートの累加強度式⁹⁾を式 (1) に示す。

$$\sigma_{cB} = \sigma_B + k \cdot \sigma_r, \quad k = 4.1$$

$$\sigma_r = \frac{2t}{(D - 2t)} \alpha_s \sigma_y \quad (1)$$

ここに、

σ_{cB} : 側圧を受ける充填コンクリートの圧縮強度

σ_B : コンクリートの一軸圧縮強度

σ_r : 鋼管により充填コンクリートが受ける側圧

D : 鋼管の直径

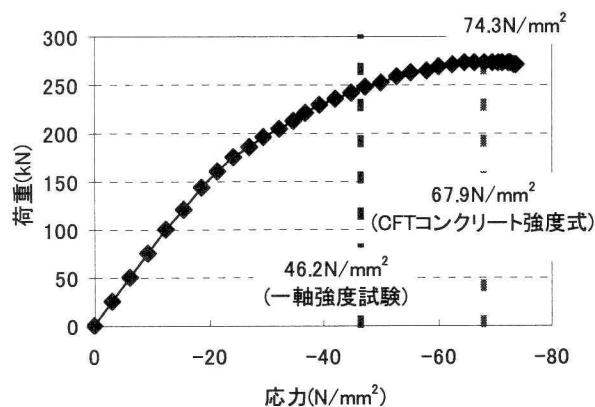


図-8 荷重-軸方向応力関係（解析値）

t : 鋼管の厚さ

α_s : 鋼管の円周方向の大きさを示すパラメータ

σ_y : 鋼管の降伏強度

である。

同式により、見かけ上の充填コンクリートの終局応力を算定すると 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。

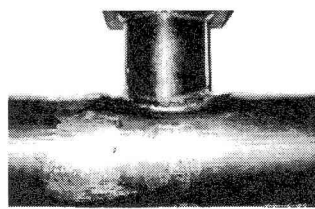
供試体 B も同様に、非荷点側の 1/4 点下縁側コンクリートにおいて終局状態で 62.7N/mm^2 の応力が生じており、一軸圧縮強度 47.2N/mm^2 に比べて、約 33% 終局応力が上昇したことがわかる。累加強度式も 67.9N/mm^2 となり、解析値とほぼ一致していることがわかった。

4.4 鋼管の座屈状況

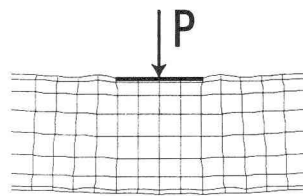
図-9, 10 にそれぞれ支間中央点荷重モデル、支間 1/4 点荷重モデル（実験供試体、CFT-FEM、中空鋼管-FEM）の終局状態における荷点付近の座屈状況を示す。

本解析では、荷点用鉛直材があることを考慮して、荷点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。

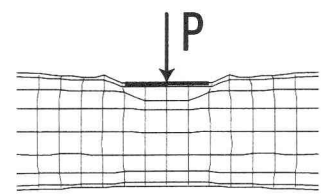
中空鋼管は両モデルとも荷点で大きな座屈を起こしている。それに対して CFT の両モデルは、座屈は起きているものの座屈発生荷重が大きく、鋼管の変形量が小さいことがわかる。このことより、CFT アーチリブは中空鋼管アーチリブに比べて、座屈の起こりにくい構造形式であることがわかった。



(a) CFT (実験後)

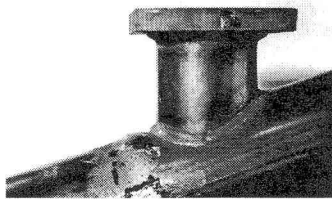


(b) CFT : 267kN 時 (FEM)

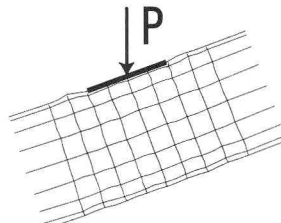


(c) 中空鋼管 : 113kN 時 (FEM)

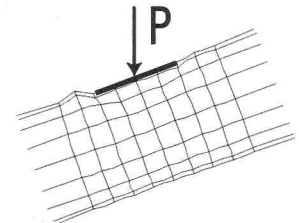
図-9 座屈状況 (支間中央点載荷 : 供試体 A)



(a) CFT (実験後)



(b) CFT : 229kN 時 (FEM)



(c) 中空鋼管 : 103kN 時 (FEM)

図-10 座屈状況 (支間 1/4 点載荷 : 供試体 B)

5. 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、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。

- (5) 接合面の完全合成を仮定した FEM 解析と実験値の良好な一致より、鋼管とコンクリート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と推測される。
- (6) 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、貴重な助言を賜った委員各位ならびに実験にご協力を戴いた、

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: 大糸線除沢川橋梁, 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) 日本道路協会: 道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編, 1996.12
- 5) 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