

コンクリート充填鋼管 (CFT) アーチの耐荷特性に及ぼす断面諸元の影響

Effect of Cross- Sectional Parameters on Load-Carrying Capacity of Arch Rib with Concrete Filled Steel Tube

日野伸一^{*}, 山口浩平^{**}, 友田富雄^{***}, 片瀬和啓^{****}

Shinichi HINO, Kohei YAMAGUCHI, Tomoo TOMODA, Kazutaka KATAFUCHI

^{*}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), 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)

^{***}工修, (株) 富貴沢建設コンサルタンツ, 構造 2 部 (〒321-0934 宇都宮市梁瀬 2-13-26)

^{****}工修, 東京工業大学研究生, 大学院理工学研究科 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

A hybrid arch structure with CFT, which has superior strength, axial and flexural rigidity, and toughness by the confined effect, has been increasingly applied to middle-span bridges, especially in China. In Japan, however, there are two CFT arch bridges: Yokezawa bridge in Nagano prefecture, completed in 2001 and Daini-Saikai Bridge in Nagasaki prefecture, under construction. 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 capacity of the CFT arch rib, a loading-test has been carried out on CFT arch specimen 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, arch rib, load-carrying capacity

キーワード: コンクリート充填鋼管, アーチ, 耐荷特性

1. はじめに

近年, 国外 (特に中国) において, 耐力やじん性に優れた構造形式であるコンクリート充填鋼管 (CFT) をアーチリブに用いたアーチ橋の建設が次第に増加している。

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十分な断面剛性を確保できるなど種々のメリットのある 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。

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。表-1 にその概要を示す。

除沢川橋は, JR 東日本大糸線豊科～柏矢町間の万水川に架かる橋梁で, 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である¹⁾。アーチリブはコンクリートを

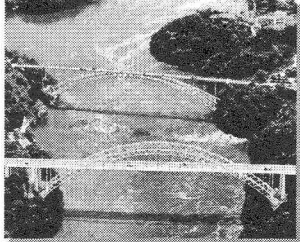
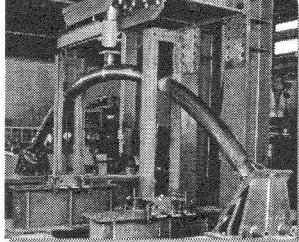
充填した直径 1000mm の鋼管を用い, 補剛桁を直径 110mm の PC ケーブル 6 本で吊っている。この橋は補剛桁およびアーチの支間がそれぞれ 48.5m, 30.2m で, 2001 年 4 月に完成された。

第二西海橋は, 長崎県佐世保市～西彼町に架かる現西海橋と平行する位置に新設 (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。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²⁾。

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, 依然として設計や施工に関する多くの研究課題が残されており, 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は至っていない³⁾。

本研究では, CFT アーチリブの模型供試体による面内鉛直載荷実験を行い, CFT アーチリブの耐荷特性について実験的検討を行った⁴⁾⁵⁾。本論文では, 3 次元非線形 FEM 解析による実験挙動のシミュレーションを行い, 本解析法の妥当性を検証した後, CFT アーチリブ断面の各諸元がアーチの耐荷特性に及ぼす影響についてパラメトリック解析を行い考察を加えた。

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 (m)	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)	Φ1000x25 (クラウン部)	Φ812.8x14~17	Φ139.8x4.5 (アーチ部)
	Φ1000x15 (クラウン部以外)		Φ101.3x5.7 (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)		

2. CFT アーチ供試体の载荷実験

2.1 供試体および载荷方法の概要

模型供試体の 1 つである支間中央点载荷供試体を図-1 に示す。供試体はスパン $L=4000\text{mm}$ 、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。頂部には断面 $\phi 101.3 \times 5.7\text{mm}$ の CFT を载荷用の鉛直材として溶接している。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。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、载荷装置の制限上から決定した (表-1 参照)。

表-2 に鋼管およびコンクリートの材料特性を示す。鋼管は一般構造用炭素鋼 STK400 を用いた。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。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。

表-1 に供試体設置状況の写真を示す。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。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。

载荷は荷重制御による面内鉛直载荷とし順次 75kN、

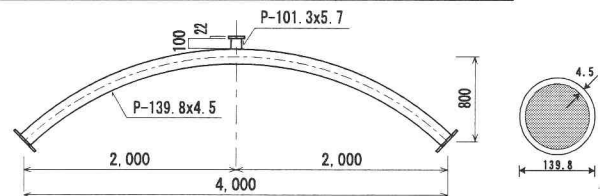


図-1 供試体概略図 (単位:mm)

表-2 材料特性

鋼管	
降伏強度 (N/mm^2)	395
引張強度 (N/mm^2)	443
伸び (%)	32
ヤング率 (kN/mm^2)	205.8
コンクリート	
圧縮強度 (N/mm^2)	46.2
引張強度 (N/mm^2)	4.1
ヤング率 (kN/mm^2)	33.6

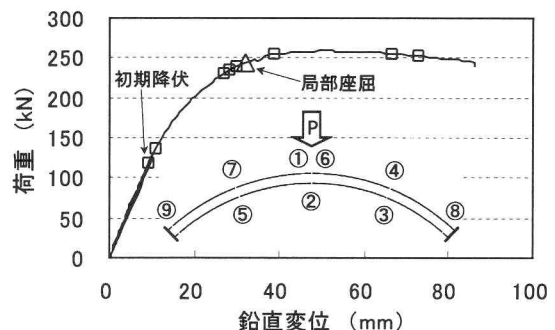


図-2 荷重 - 変位曲線

150kN および弾性域内の最大荷重まで加力して除荷させた後、終局状態まで载荷した。

2.2 実験結果

図-2 に荷重点の荷重-変位関係と鋼管の降伏の発生順序を示す。写真-1 に荷重点近傍の局部座屈状況を示す。117kN 時に荷重点上縁側にて初期降伏が生じた後、鋼管全体の塑性化が徐々に進行し、243kN 時に同箇所にて局部座屈が発生した。局部座屈発生後は一時的に荷重が落ちたものの再び上昇し、最大荷重到達後は耐力を保持した状態で変形が進行していった。最大荷重は 258kN であり、荷重点の変位は 52.3mm であった^{4), 5)}。

また、175kN 付近で大きく荷重-変位曲線がカーブして

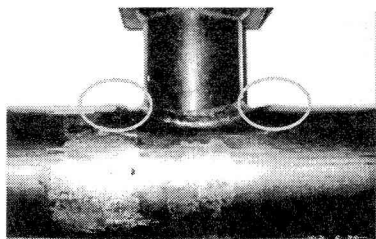
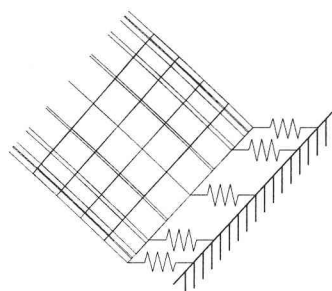
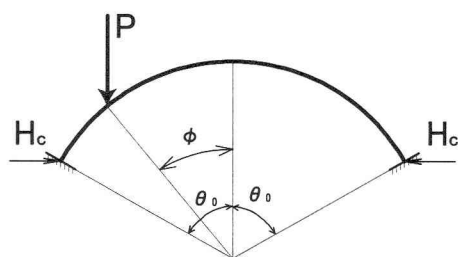


写真-1 局部座屈状況



(a) パネモデル



(b) 固定円弧アーチの概略図
図-3 スプリング部の解析モデル

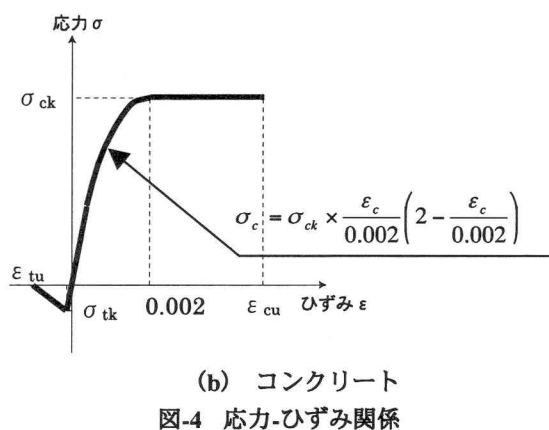
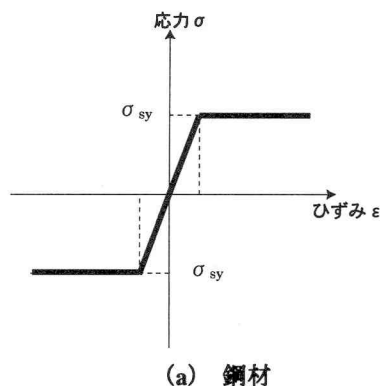
いることから、この付近で鋼管内部の充填コンクリートを含めたアーチリブ全長に渡る供試体全体の塑性化が進行し始めたと考えられる。

3. 構造諸元のパラメータ解析

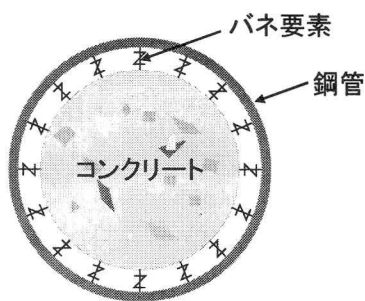
3.1 解析モデル

実験と並行して 3 次元非線形 FEM 解析 (Lusas Ver.13) を行い、構造諸元およびその影響度について検討した。なお、幾何学的非線形問題としては有限変形を考慮しているが、残留応力および幾何学的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。

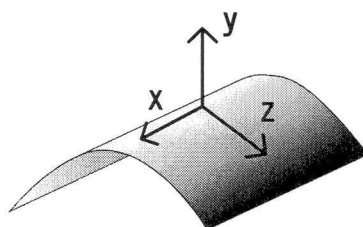
載荷実験で発生した両スプリング部の水平方向の変位を再現するため、バネ要素をスプリング部に挿入



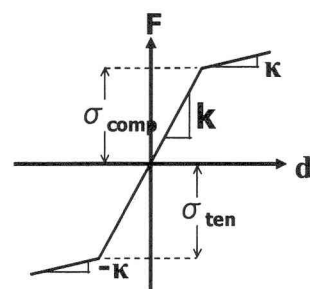
(b) コンクリート



(a) 接合面のモデル



(b) 接合面の座標軸



(c) 付着力-ずれ関係

図-5 鋼管およびコンクリートの付着特性

した。図-3 にバネモデルを示す。各バネ係数は同図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_e と、実験における水平変位から算出した。解析に用いたバネ係数は、スプリング部左側は、29.1kN/cm、同右側は 13.4kN/cm である。実験で両端の水平変位に差が生じたのは、CFT の塑性化がスパン中央に対して対称でなかったためである。

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-4 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 Drucker - Prager の破壊条件を用いた。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⁹⁾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。

3.2 鋼管とコンクリート間の付着の影響

鋼管とコンクリート間の付着は、滑りや剥離を再現するため 3 方向バネ要素を挿入することによりモデル化した(図-5)。半径方向のバネ要素は、バネ係数を十分に大きくすることで圧縮は剛結を再現し、一方、引張はバネ係数を十分に小さくすることで鋼管の剥離を再現することとした。また、橋軸方向は供試体の局所的な付着特性が明確でないことから、同図に示すようなバイリニアモデルを採用し、バネ係数 k を変化させたパラメータ解析を行うことで変形挙動への影響について検討した。

図-6 に解析結果による k の値に対する最大荷重の推移を示す。また、 $k=1.0 \times 10^{-3}$ (摩擦無し)、 1.0×10^4 (最大荷重が実験値と近似)、 1.0×10^9 (完全合成) を比較するため、図-7 に載荷点の荷重-変位関係を、図-8 に同箇所の荷重-軸方向ひずみ関係を示す。荷重-変位、荷重-ひずみともに $k=1.0 \times 10^4$ N/mm、すなわち鋼管-コンクリート間の単位面積あたりの摩擦係数を約 8N/mm とすることで実験結果との良好な一致が得られている。しかし、CFT アーチリブが終局に至るまでの変形挙動に対して、鋼管-コンクリート接合面の合成度の影響は顕著には認められない。また、最大耐力に関しても完全合成と非合成を比較すると、15%程度の差しかなかった。以上より、本実験で用いたスプリング部で端部剛結された CFT アーチリブについては、接合面の付着特性の影響は小さいと考える。

3.3 径厚比の影響

(1) CFT と中空鋼管の耐荷特性の比較

径厚比 D/t の変化による影響を調べるため、鋼管の直径 $D=139.8\text{mm}$ 条件の下 $D/t=20, 30, 31$ (実験供試体)、40, 50, 60 の 6 ケースについて検討を行った。さらに、

中空鋼管アーチリブについても同様の解析を行い CFT アーチリブの結果との比較検討を行った。なお、CFT アーチリブの鋼管-コンクリート間のバネ係数は、前節で検討した結果を考慮し $k=1.0 \times 10^4$ N/mm を用いている。 D/t の検討範囲については除沢川橋 (径厚比がクラウン部 40, クラウン部位外 67) および第二西海橋 (径厚比 17~58) を参考に決定した。解析結果として、図-9 に載荷点の荷重-変位関係、図-10 に各 D/t の耐力の比較を示す。

CFT アーチリブは D/t の値が大きくなるにつれ最大耐力は低下していくものの、補剛効果や拘束効果による鋼管の局部座屈の抑制と優れた靱性を発揮していることがわかる。通常、板厚 t の値が小さい場合、外側鋼管の降伏よりも局部座屈が先行することが懸念されるが、本実験で使用した $D=139.8\text{mm}$ の一般構造用炭素鋼管に関しては板厚を

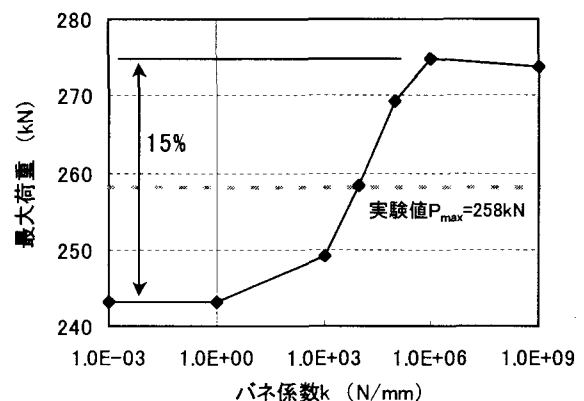


図-6 最大荷重の推移

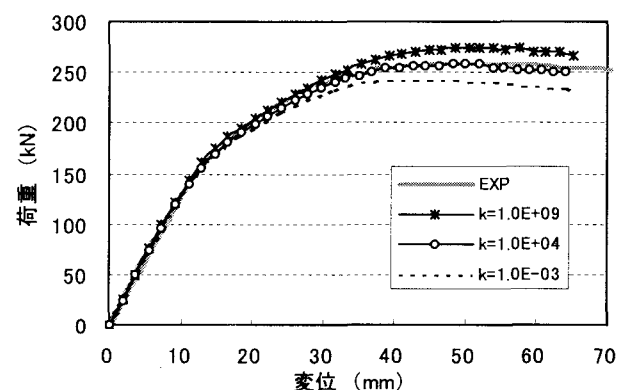


図-7 荷重 - 変位関係

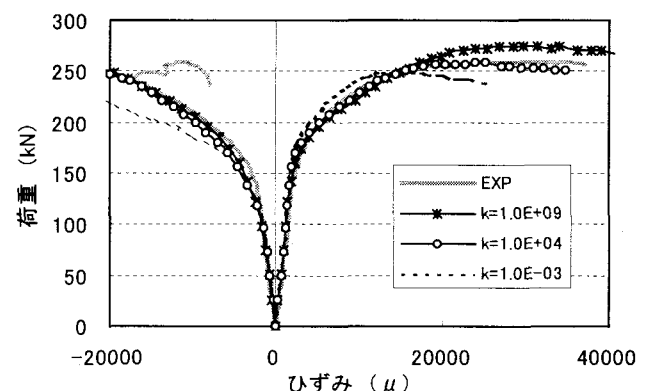
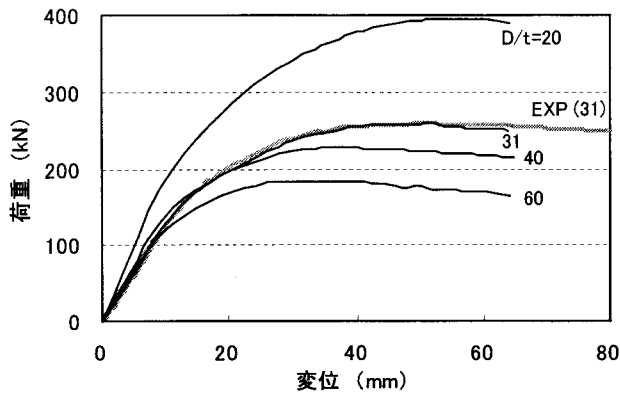


図-8 荷重 - ひずみ関係

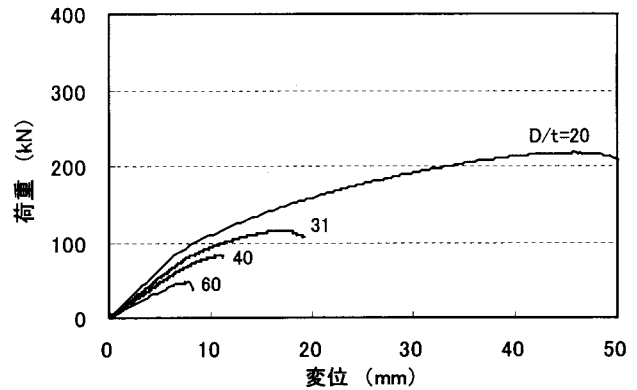
2.33mm ($D/t=60$) まで小さくしても、材料の耐荷性能を十分に活かすことができ、局部座屈発生後も耐力の保持と優れた変形性能の発揮が期待できるものといえる。

一方、中空鋼管アーチリブは局部座屈が発生すると同

時に荷重が落ちる結果となっている。CFT アーチリブと比較すると耐荷力および靱性に乏しい構造であることがわかる。また、 D/t が大きくなるにつれて、初期降伏が発生して間もなく局部座屈が発生していることから、 D/t を

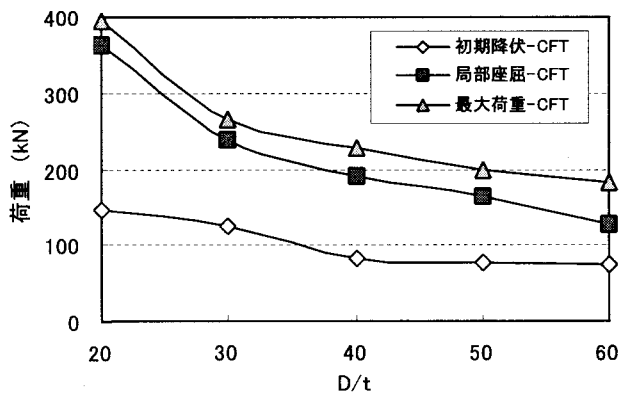


(a) CFT

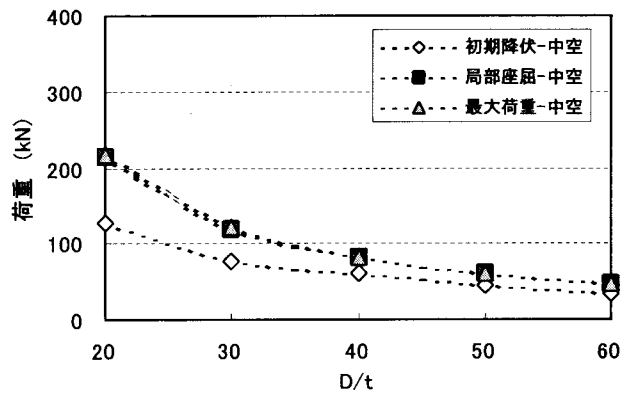


(b) 中空鋼管

図-9 荷重-変位関係



(a) CFT



(b) 中空鋼管

図-10 D/t による耐力の比較

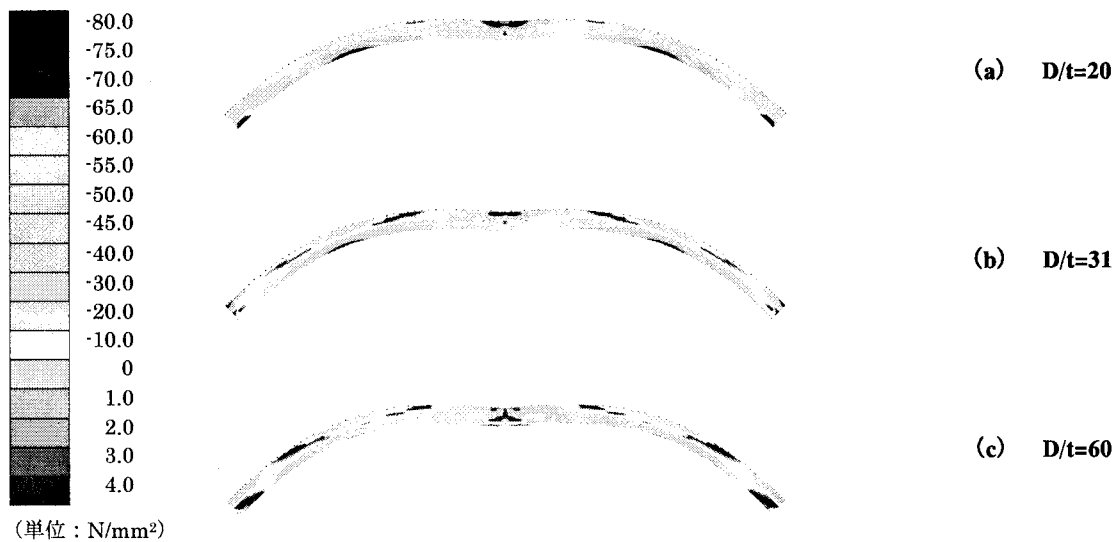


図-11 充填コンクリートの軸方向応力分布

表-3 充填コンクリートの応力状態

D/t	解析値 σ_1 (N/mm ²)	計算値 σ_2 (N/mm ²)	解析値/計算値 σ_1/σ_2
20	72.4	80.8	0.90
30	67.2	68.5	0.98
31	66.9	67.9	0.99
40	65.3	62.6	1.04
50	64.4	59.2	1.09
60	60.7	57.0	1.07

さらに大きくしていくと局部座屈が降伏に先行し、そのまま荷重が落ちていくことが予想される。

以上のことから、中空鋼管アーチリブは局部座屈後に急激に耐力を失うが、CFT アーチリブは充填コンクリートにより局部座屈の発生が抑制され、鋼管の局部座屈発生後、また最大荷重到達後も荷重の急激な低下は見られず、極めて粘りのある耐荷性能を発揮していることがわかる。

(2) 充填コンクリートの応力性状

今回の実験では、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、解析および拘束効果を考慮したコンクリートの累加強度式(1)⁷⁾により終局時の軸方向応力を求めた。ただし、 σ_{ck} はコンクリートの一軸圧縮強度、 σ_y は鋼管の降伏強度、 α は断面の径厚比や材料強度などの影響を受けるパラメータ係数で、ここでは $\alpha=0.19$ とする。

$$\sigma_2 = \sigma_{ck} + k \sigma_r \quad k = 4.1 \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{2t}{(D-2t)} \alpha \cdot \sigma_y$$

図-11にD/t=20, 31（実験）、60における最大荷重時の充填コンクリートの軸方向応力分布を、表-3にスパン1/4点下縁側（圧縮域）のコンクリートの応力状態について示す。同図より、荷重点および両1/4点下縁側に圧縮応力が集中していることがわかる。また、同表に示す通り、径厚比D/tが小さくなるにつれ1/4点下縁側の軸方向応力が大きくなり鋼管の断面積の増加に伴い、コンクリートが受け持つ引張応力も減少している。充填コンクリートの材料試験による一軸圧縮強度は46.2N/mm²であったことから、D/t=31の場合、拘束効果により約45%応力が上昇したことがわかる。

4. まとめ

本研究ではCFT アーチリブの荷重実験により耐荷特性および変形性能を明らかにするとともに、構造諸元をパラメータとした3次元非線形FEM解析を行い、耐荷特性への影響度について考察を行った。以下に、明らかになった知見を述べる。

- (1) CFT アーチリブの面内鉛直荷重試験において、まずは荷重付近で鋼管の圧縮降伏が先行しアーチリブ全長に渡り塑性化が進展した後、最大荷重の直前に局部座屈（対最大荷重比95%）が発生した。このことから、D/t=31の模型供試体は鋼材の耐荷性能を十分に活かした構造であるということがいえる。
- (2) 鋼管とコンクリート間の付着の影響を考慮した解析では、 $k=1.0 \times 10^{-4}$ N/mm の場合に最もよく実験結果を追跡できているが、最大耐力の差はわずかであり、かつ剛性に大きな差は見られないことから、鋼管-コンクリート接合面の合成度の影響は小さいと考えられる。
- (3) 中空鋼管アーチリブは局部座屈直後に急激に耐力を失うが、CFT アーチリブは充填コンクリートにより局部座屈の発生が抑制され、解析対象としているD/t=20~60の範囲であれば、鋼管の局部座屈発生後、また最大荷重到達後も荷重の急激な低下は見られず、極めて粘りのある耐荷性能を発揮した。
- (4) 解析対象であるD/t=20~60の中空鋼管アーチリブは、鋼管内部へのコンクリートの充填により1.5~4倍程度、最大耐力を上昇させることができる。
- (5) 解析対象であるD/t=20~60のCFT アーチリブでは、拘束効果により充填コンクリートの圧縮応力が25~65%程度上昇する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Chen Baochun, Chen Youjie: Experimental Study on Whole-Process Behavior of CFST Rib Arch under In-Plane Loads, Proc. of 6thASCCS Conference, pp.167-172, 2000.3.
- 4) 日野伸一、劉玉擎、山口浩平、彦坂熙：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、構造工学論文集, Vol.50A, pp.1043-1050, 2004.3
- 5) 山口浩平、日野伸一、片渕和啓、劉玉擎：コンクリート充填鋼管（CFT）アーチリブの耐荷特性に関する研究、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集（CD-ROM）、2004.9
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編、1996.12
- 7) 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

（2004年9月17日受付）