

## G1-2. 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

片測 和啓

## 1. 目的

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おり、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なっている。大規模地震時の被害を最小限に抑えるためには、アーチリブの耐力やじん性に優れた構造形式を新たに開発する必要があり、近年、中国、フランス、チェコなどを中心にコンクリート充填鋼管 (CFT) を用いたアーチ橋の建設が次第に増加している。しかしながら、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。そこで本研究では、CFT アーチリブの変形挙動および耐荷特性の解明を目的として、模型供試体を用いた面内鉛直載荷実験および 3次元非線形 FEM 解析による検証を行った。

## 2. 内容

## 2-1. CFT アーチリブの模型載荷実験

供試体は同一形状のものを 2 体製作し、供試体 A は支間中央点載荷、供試体 B は支間 1/4 点偏心載荷である (図-1)。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  $139.8 \times 4.5\text{mm}$  (径厚比 31) の CFT を用いている。両供試体の諸元は、国内における 2 つの実橋例、除沢川橋、第二西海橋のライズ比ならびに円形鋼管の径厚比を参考にし、載荷装置の制限上から決定した (表-1)。供試体 A はクラウン部、供試体 B は左スプリングから支間 1/4 部に載荷用の鉛直材を溶接した。鉛直材は断面  $101.3 \times 5.7\text{mm}$  の CFT を用いている。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。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 を採用した。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。載荷は荷重制御による面内鉛直載荷とし、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た後、10kN 刻みで終局状態まで載荷した。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。

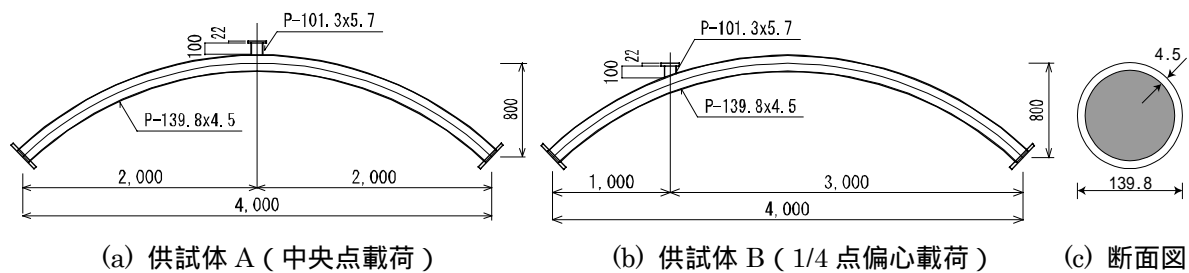


図-1 実験供試体概略図

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
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)	1000 × 25 (クラウン部)	812.8 × 14 ~ 17	139.8 × 4.5 (アーチ部)
	1000 × 15 (クラウン部以外)		101.3 × 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 ( $\text{N/mm}^2$ )	395	
引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	443	
伸び (%)	32	
ヤング率 ( $\text{N/mm}^2$ )	205.8	
(b) コンクリート		
供試体 A	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	46.2
	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	4.1
	ヤング率 ( $\text{kN/mm}^2$ )	33.6
供試体 B	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	47.2
	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	3.5
	ヤング率 ( $\text{kN/mm}^2$ )	35.4

図-2 に荷重点の荷重-変位関係と鋼管軸方向の破壊の順序を、表-3 にその過程を示す。また、図-3 に荷重点近傍の局部座屈状況を、図-4 に同箇所上縁側の荷重-軸方向ひずみ関係を示す。

供試体 A の最大荷重は 258kN で荷重点の変位は 52.3mm であり、供試体 B は同じく 219kN、37.5mm である。供試体 A は 117kN 時に荷重点上縁側にて初期降伏が発生した後、鋼管全体の塑性化が徐々に進行し、243kN 時に初期降伏発生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緩やかに荷重が低下していった。供試体 B に関して、同様に荷重点上縁側にて 88kN 時に初期降伏が発生し、荷重点下縁側、左基部の降伏を経て、195kN 時に初期降伏発生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、その後は再び上昇し、最大荷重に達するまで鋼管全体の塑性化が進行していった。同一断面内においては圧縮側が早く降伏する結果となっていることから、拘束効果が正常に機能しているといえる。また、供試体 A は 175kN 付近、供試体 B は 150kN 付近（対最大荷重比 両者ともに 68%）で大きく荷重-変位曲線がカーブしていることから、この付近で鋼管内部の充填コンクリートを含めた供試体全体の塑性化が進行し始めたと考えられる。なお、両供試体の剛性を比較すると弾性域内ではほぼ同値であり、供試体 A が供試体 B の最大耐力を 18% 上回る結果となった。

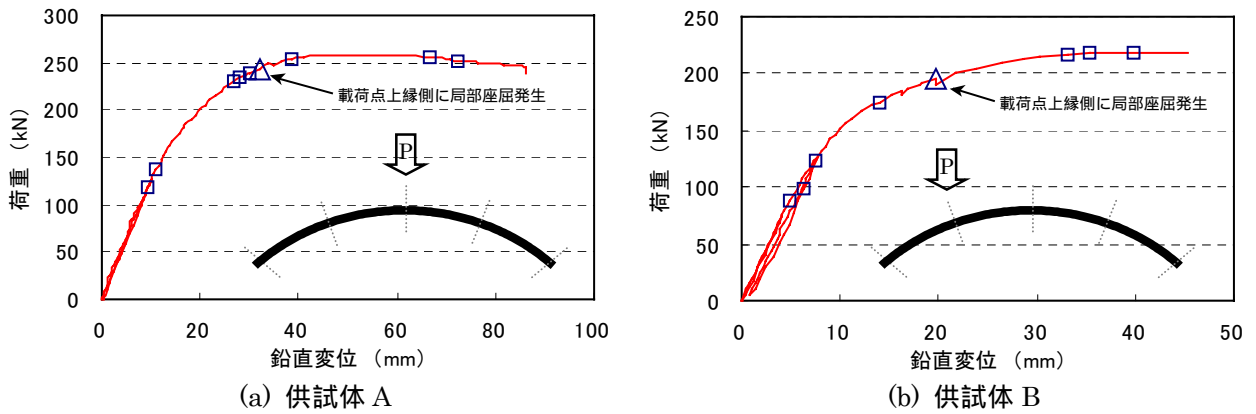
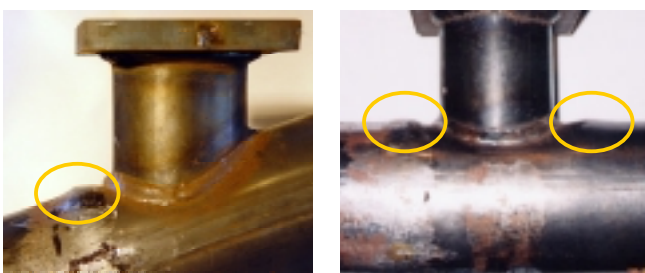


図-2 荷重-変位関係

表-3 鋼管破壊過程（軸方向）

(a) 供試体 A						(b) 供試体 B					
	P (kN)	現象	(mm)	$\delta / \delta_0$	$P/P_{max}$		P (kN)	現象	(mm)	$\delta / \delta_0$	$P/P_{max}$
①	117	荷重点上縁側-圧縮降伏	9.4	1.000	0.453	①	88	荷重点上縁側-圧縮降伏	4.8	1.000	0.341
②	137	荷重点下縁側-引張降伏	11.1	1.180	0.531	②	99	荷重点下縁側-引張降伏	6.2	1.297	0.452
③	230	右1/4点下縁側-圧縮降伏	26.8	2.847	0.891	③	123	左基部下縁側-圧縮降伏	7.5	1.569	0.562
④	235	右1/4点上縁側-引張降伏	28.2	3.003	0.911	④	175	左基部下縁側-引張降伏	14.0	2.926	0.799
⑤	240	左1/4点下縁側-圧縮降伏	29.9	3.185	0.930	⑤	195	荷重点上縁側-局部座屈	19.8	4.115	0.890
⑥	243	荷重点上縁側-局部座屈	32.0	3.404	0.942	⑥	217	右1/4点上縁側-引張降伏	33.1	6.897	0.991
⑦	254	左1/4点上縁側-引張降伏	38.6	4.110	0.984	⑦	218	中央点上縁側-引張降伏	35.4	7.383	0.995
⑧	258	最大荷重	52.3	5.564	1.000	⑧	218	右1/4点下縁側-圧縮降伏	35.4	7.383	0.995
⑨	255	右基部下縁側-圧縮降伏	66.5	7.074	0.988	⑨	219	最大荷重	37.5	7.81	1.000
	252	左基部下縁側-圧縮降伏	72.6	7.723	0.977		218	右基部下縁側-圧縮降伏	39.8	8.292	0.995



(a) 供試体 A (b) 供試体 B

図-3 局部座屈状況

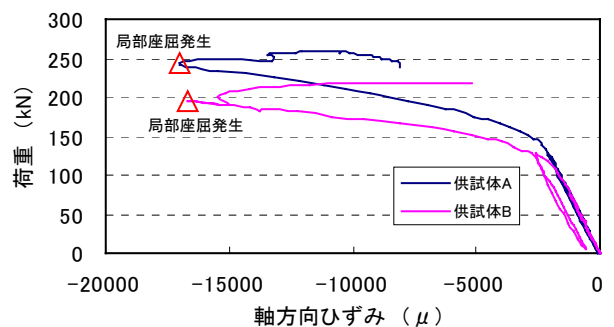


図-4 荷重-ひずみ関係（荷重点上縁部）

## 2-2. 3次元非線形 FEM 解析による構造諸元のパラメータ解析

実験と平行して 3 次元非線形 FEM 解析を行い、構造諸元、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。

### (1) 鋼管とコンクリート間の付着

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。半径方向のバネ要素に関してはバネ係数を十分に大きくすることで圧縮方向は剛結を再現し、一方、引張方向はバネ要素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バネ係数が明確でないことから、供試体 A を例に取り、バネ係数  $k$  を変化させたパラメータ解析を行い変形挙動への影響について検討した。図-5 に解析

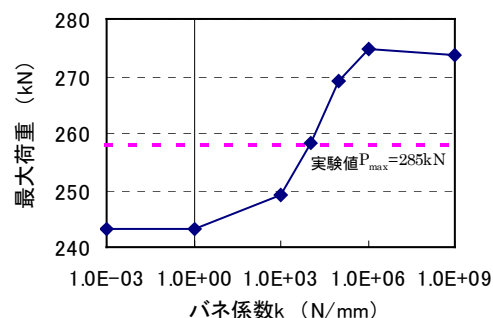


図-5 最大荷重の推移

結果による各  $k$  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)、 $1.0 \times 10^4$  (最大荷重が実験値と近似)、 $1.0 \times 10^9$  (完全合成) を比較するため、図-6 に荷重-変位関係を、図-7 に荷重-軸方向ひずみ関係を示す。荷重-変位、荷重-ひずみともに  $k=1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}$ 、すなわち鋼管-コンクリート間の単位面積辺りの摩擦係数を約  $8 \text{ N/mm}$  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

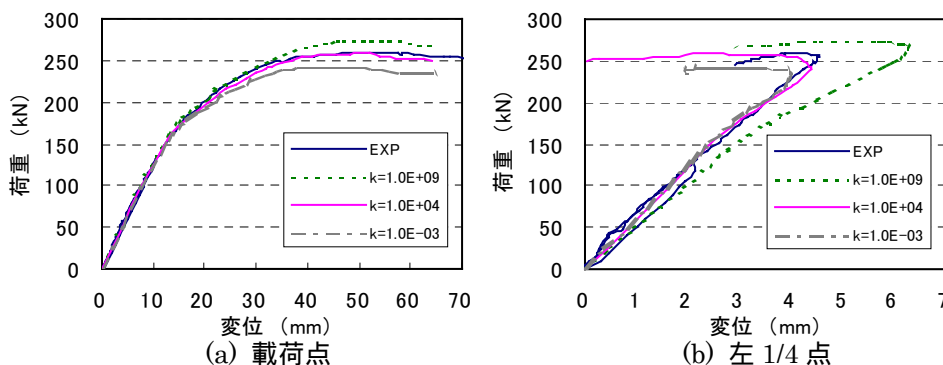


図-6 荷重-変位関係

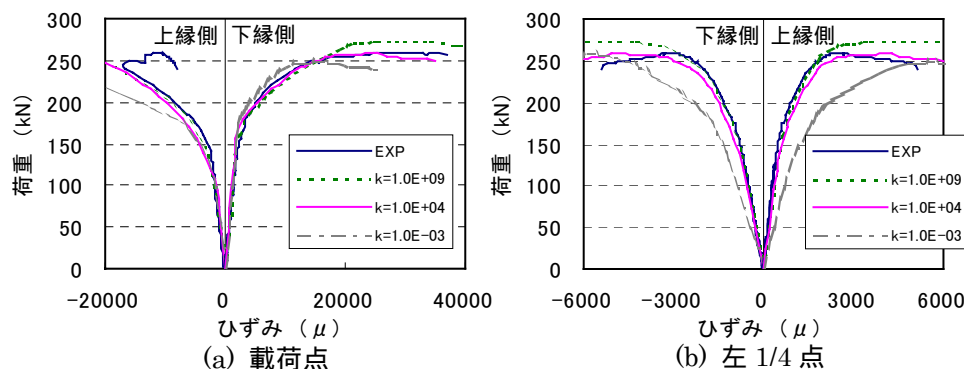


図-7 荷重-ひずみ関係

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 15% 程度の差であった。以上より、本実験で使用した CFT アーチリブについては接合面の合成度の影響は小さいと考える。

### (2) 径厚比

径厚比  $D/t$  の変化による影響を調べるため供試体 A を例に取り、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 アーチリブのバネ係数に関しては前項で検討した結果を考慮し、 $k=1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}$  を用いている。解析結果として、図-8 に荷重点の荷重-変位関係、図-9 に各  $D/t$  ごと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小さくなるものの、補剛効果や拘束効果による鋼管の局部座屈の抑制と、優れた靱性を発揮する

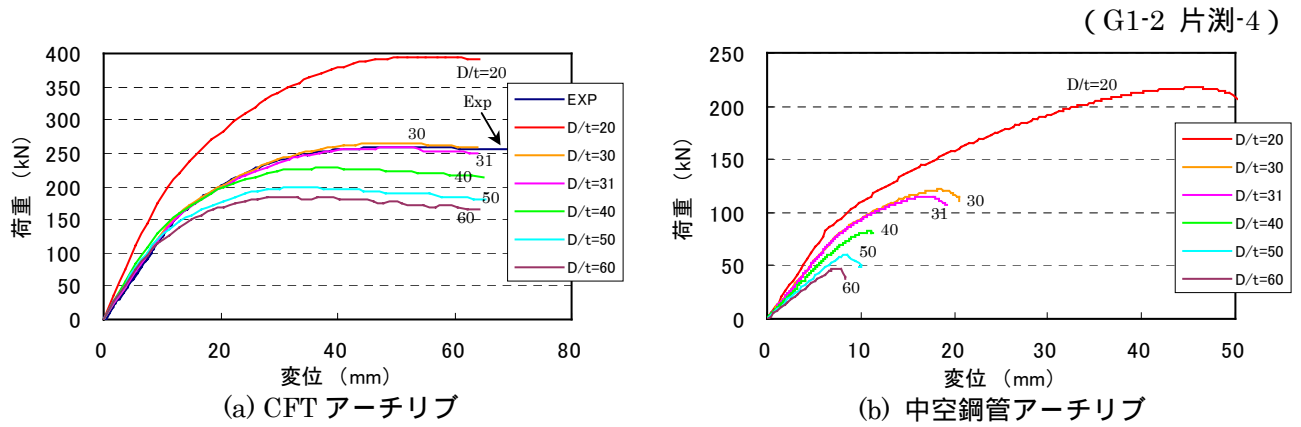


図-8 荷重-変位関係

ことがわかる．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た．特に  $D/t$  が大きくなるにつれ，初期降伏発生して間もなく，局部座屈が発生した．

表-4 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．本実験においては，充填コンクリートの応力（ひずみ）状態を計測することができなかつたため，解析により終局時の軸方向応力  $\sigma_1$  を求めた．供試体 A の材料試験によるコンクリートの一軸圧縮強度は  $46.2\text{N/mm}^2$  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．また，拘束効果を考慮したコンクリートの累加強度式 (1) により算出した計算値  $\sigma_2$  とも良好な一致が得られている．

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

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

ただし， $\sigma_{ck}$  はコンクリートの一軸圧縮強度， $\sigma_y$  は鋼管の降伏強度， $\alpha$  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ある．なお，同じ径厚比であっても，拘束効果は外側鋼管の直径および厚さが大きい程その効果を発揮するため，実橋脚などの規模では本実験および解析で得られた以上の拘束効果が期待できるものと考えられる．

### 3. 結論

- 1) 載荷実験において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，きわめて粘りのある耐荷性能を発揮した．
- 2) 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，鋼管内部へのコンクリートの充填により局部座屈の発生が抑制され，本研究で対象としている  $D/t=20 \sim 60$  のアーチリブであれば約 1.5 ~ 4 倍ほど最大耐力を上昇させることができる．
- 3) 本研究で対象とした  $D/t=20 \sim 60$  の CFT アーチリブの面内耐力およびその変形性能を評価するにあたり鋼管-コンクリート接合面の完全合成を仮定し，かつ鋼管の局部座屈の影響を無視した通常の梁・柱曲げモデルとして取り扱うことが可能であると言える．

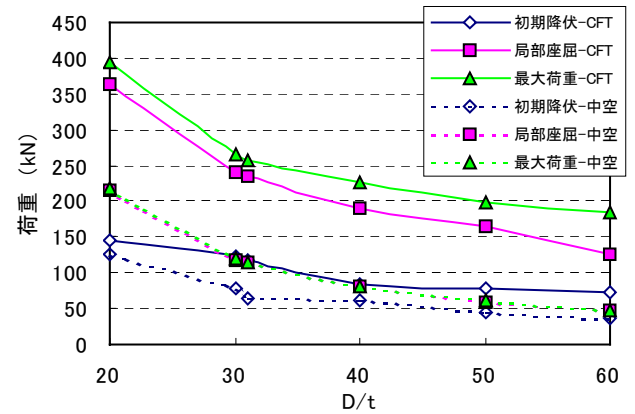


図-9  $D/t$  ごとの耐力の比較

表-4 充填コンクリートの応力状態

$D/t$	解析値		計算値	
	$\sigma_1 (\text{N/mm}^2)$	$\sigma_2 (\text{N/mm}^2)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
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	

