

コンクリート充填中空式二重鋼管柱の曲げ特性に関する研究

Experimental study on bending behavior of concrete filled double skin tubular members

林堂靖史*, 杉浦邦征**, 河野広隆***, 大島義信****, 出向井雄一*****

Yasushi HAYASHIDO, Kunitomo SUGIURA, Hiroataka KAWANO, Yoshinobu OSHIMA, Yuichi DEMUKAI

* 京都大学工学研究科 都市環境工学専攻 修士 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

** Ph. D 京都大学工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

*** 工博 京都大学工学研究科 都市環境工学専攻 教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

**** 工博 京都大学工学研究科 都市環境工学専攻 助教 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***** 工修 西日本旅客鉄道 (〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目 4 番 24 号)

CFT (Concrete Filled steel Tubular members) has attracted much attention because of its structural superiority, especially after the Hanshin –Awaji Earthquake. However, the increase of weight by filling with concrete inside is one of problem associated with CFT. Thus in this study, to reduce the self-weight of CFT, CFDT (Concrete Filled Double-skin steel Tubular members) and CFFT (Concrete-Filled FRP-steel Tubular members) are proposed particularly for higher bridge piers. It is shown by four points bending tests that CFDT has higher bending strength than CFT. But buckling of the outer steel tubes occurred. If the buckling can be effectively prevented, CFDT would have even higher bending strength and ductility. As for CFFT, it becomes clear that the circumferential constrain of outer sheet exhibits especially after the concrete reaches its fracture with dilation of filled concrete.

Key Words: CFT, CFDT, Double Skin Steel Tube, CFS, constraining effect

キーワード: コンクリート充填鋼管, コンクリート充填二重鋼管, CFS, 拘束効果

1. はじめに

1995年に発生した阪神淡路大震災により、既存の土木構造物は大きなダメージを受けたが、その多くは鉄筋コンクリート構造物のせん断破壊や鋼構造物の局部座屈によるものであった。これをうけて、鋼構造物や鉄筋コンクリート構造物に対する耐震性向上技術に注目が集まるようになった。そのひとつとしてコンクリート充填鋼管構造 (Concrete Filled Tubular members : 以下, CFT) が挙げられる。

CFTは図1に示すような鋼管とコンクリートの複合構造であり、鋼管がコンクリートに及ぼす拘束効果と、コンクリートによる鋼管の座屈防止効果の相乗効果により耐震性に優れた構造といえる。

さらに近年、地震力が作用した場合の自重による慣性力と構造基礎部への負担を軽減することを目的に、コンクリート充填二重鋼管構造 (Concrete Filled Double Tubular members : 以下, CFDT) についての研究が進められている^{1) 5)}。CFDTとは、図1に示すように同心円状に径の異なる二つの鋼管を配置し、鋼管の間をコンクリートで充填した構造である。また、より合理的な構造として、図1に示すような外管にFRPを適用した構造 (Concrete Filled FRP-steel Tubular members : 以下, CFFT) が提

案されている。

本研究では、CFDTの曲げ耐荷性状を明らかにすると共に、CFFTの可能性について検討する。そのためにCFT, CFDT供試体の4点曲げ試験を行い、特に外鋼管、FRP管の挙動に着目しつつ曲げ耐荷性状について検討を行った。

また、実験結果をもとにファイバーモデルを用いた断面性能解析を行い、等しい断面積の制約下でのCFT, CFDTの曲げ挙動について検討した。

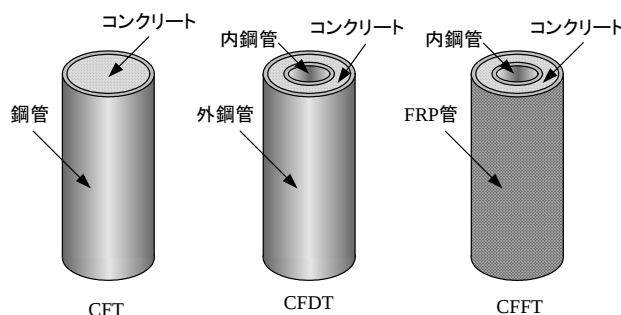


図1 CFT, CFDT, CFFTの概形

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体はCFT：2種類、CFDT：2種類、CFFT：4種類の計8種類を用意した。なお、CFFT 供試体ではFRP管を模擬するため、円周方向に繊維を配置してCFS（炭素繊維シート）を巻きたて、エポキシ樹脂により硬化させた。なお、CFSの積層数は、比較する4.5mm、7.0mmの鋼管の降伏引張耐力を基に決定した。また、部材軸方向に繊維を配置したシートを1層のみを巻きたてた供試体も用意した供試体の外観を図2に、供試体一覧を表1に示す。また、供試体に用いた材料の特性を表2に示す。

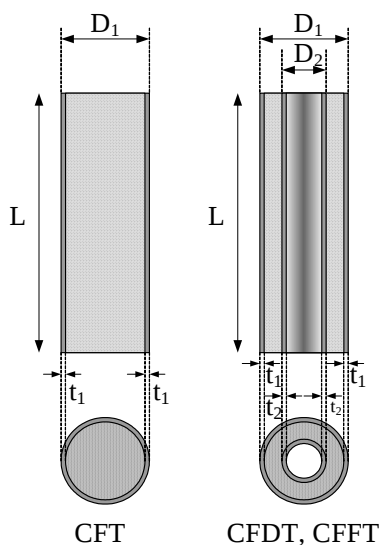


図2 供試体概観

表2-1 鋼材の材料諸元

厚さ (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	ポアソン比
7	350	442	198	0.23
4.5	290	380	185	0.35
4.2	300	390	174	0.35

表2-2 モルタルの材料諸元

圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	終局ひずみ (μ)	ヤング率 (kN/mm ²)
62.4	6.5	4000	22

表2 供試体の材料特性

2.2 実験方法

載荷実験は万能試験機により4点曲げ試験を行った。試験区間は曲げモーメントが一定となる供試体中央の300mmとし、載荷点の外側に半鋼管を合わせてボルト締めした割鉄帯を巻き、外への屈座変形を拘束した。実験装置の外観を図3に示す。

図4にひずみゲージの貼り付け位置、変位計の設置位置を示す。ひずみは3軸ゲージを用いて測定した。外管におけるひずみ測定位置は供試体中央と、中央より左右に75mm離れた計3断面にて計24箇所とした。また、内管におけるゲージ位置は供試体中央の断面にて4箇所とした。供試体の上縁と下縁において、供試体より50mm離れた位置で試験区間中央200mm間での伸び、縮みを計測し、曲率に換算した。

表1 供試体一覧

		径厚比	長さ	外鋼管		内鋼管		CFS巻き数	
				外径	鋼管厚	外径	鋼管厚	円周方向	軸方向
				D1 (mm)	t1 (mm)	D2 (mm)	t2 (mm)		
CFT	4.5	42.4	1400	190.7	4.5	-	-	-	-
	7	27.2	1400	190.7	7	-	-	-	-
CFDT	4.5	42.4	1400	190.7	4.5	101.6	4.2	-	-
	7	27.2	1400	190.7	7	101.6	4.2	-	-
CFFT	2A	-	1400	190.7	-	101.6	4.2	2	-
	2B	-	1400	190.7	-	101.6	4.2	2	1
	3A	-	1400	190.7	-	101.6	4.2	3	-
	3B	-	1400	190.7	-	101.6	4.2	3	1

表2-3 CFSの材料諸元

厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
0.167	3400	245

表2-4 エポキシ樹脂の材料

引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	せん断強度 (kN/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
53	1670	19.6	3.29

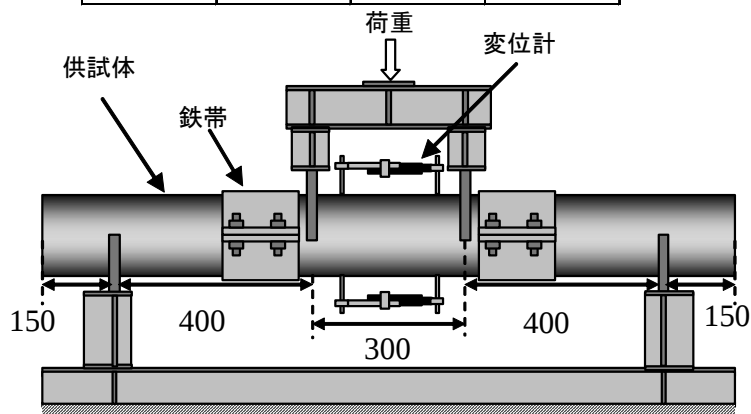


図3 実験装置概観 (寸法単位: mm)

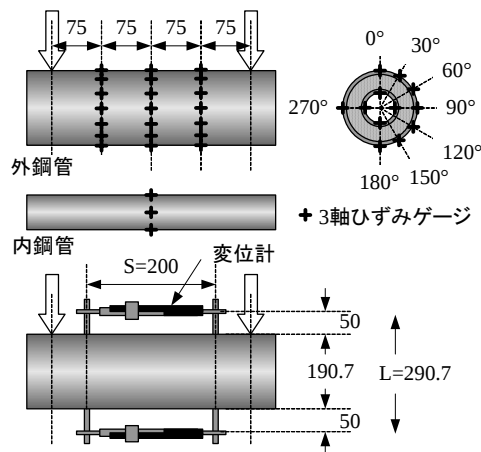


図4 ひずみ、変位測定位置 (寸法単位: mm)

3. 実験結果および考察

3.1 曲げモーメント - 曲率関係

供試体の上縁と下縁での伸び縮みから式(1)によって曲率を求めた。得られた $M - \phi$ 曲線を図5に示す。なお、本実験では上縁変位計の設置部分で座屈が起こったため、それ以降は供試体の曲率は、試験区間で不均一となっていることに注意されたい。

$$\phi = (-\delta_1 + \delta_2) / (S \cdot L) \quad (1)$$

ここで、 ϕ : 曲率, δ_1 : 上縁の縮み, δ_2 : 下縁の伸び, S : 変位計間の距離, L : 変位の標点距離 (図4を参照) である。

本実験では試験機の載荷能力等の問題から特に CFT, CFDT について最大曲げモーメントには至ることなく試験を終えている。そこで、曲率が 0.5 (1/m) に達したときの曲げモーメントを終局曲げモーメント (M_{eq}) とし、考察することとした。

CFT, CFDT は $M - \phi$ 曲線を比較すると、終局曲げモーメントは最大曲げモーメントに近い値をとっていると思われる。曲げ耐力は CFDT が CFT を上回るという結果が得られたが、これは CFDT の断面鋼材量が CFT よりも多いためであると考えられる。しかし、供試体では CFDT の重量は CFT の重量よりも軽く、剛性を維持しつつ自重を軽減するという CFDT の目的が実現されていると言える。

CFS を周方向にのみ巻き立てた CFDT2A, 3A の2ケースは曲げ挙動や耐力に差はなく、 $M - \phi$ 関係から拘束効果について確認するには至らなかった。円周方向と軸方向に CFS を巻き立てた CFDT2B, 3B については、降伏点と呼ぶべきポイントはなく、荷重が増加中、突然大きな音の発生とともに破壊した。これは、CFS に塑性域がないためである。また、CFDT2-A, 3-A と比べて曲げ耐力がはるかに向上していることから、曲げ耐力を向上させるには軸方向への巻き立てが有効であることがわかる。よって、十分な拘束効果と曲げ耐力を得られる積層数の組み合わせを検討する必要があると共に、CFS を円周方向と軸方向へ巻く順序についても検討が必要であると考えられる。

3.2 曲げ強度

(1) 算定曲げ強度

図6のような応力分布を仮定し、曲げ強度を算定する¹⁾。なお、日本建築学会では、特に CFT の算定曲げ強度に対して充填コンクリートによる合成効果を表現する係数を提案しているが²⁾、本研究ではこれを考慮せず算定を行った。また、CFS を周方向にのみ巻いた供試体については、CFS が曲げに対しては抵抗力を持っていないとみなし、外管がないものとしてモデル化した。

式(2)によって終局時圧縮力 N_u が 0 になるときの中立軸位置 (α_o , α_i) を求め、式(4)に代入することで終局モーメントを算定する。

$$N_u = \frac{\pi}{2} f_c \left\{ R^2 \left(1 - \frac{2\alpha_o}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha_o}{\pi} \right) - r^2 \left(1 - \frac{2\alpha_i}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha_i}{\pi} \right) \right\} - 4 f_y (R t_o \alpha_o + r t_i \alpha_i) \quad (2)$$

$$M_u = \frac{2}{3} f_c (R^3 \cos \alpha_o^3 - r^3 \cos \alpha_i^3) + 4 f_y (R^2 t_o \cos \alpha_o + r^2 t_i \cos \alpha_i) \quad (3)$$

ここで、 N_u : 終局軸力, M_u : 終局曲げ強度, R : 外鋼管の半径, t_i : 内鋼管厚, r : 内鋼管の半径, f_y : 鋼管の降伏強度, t_o : 外鋼管厚, f_c : モルタルの圧縮強度 (拘束効果を加味した場合, f_{cb}), α_o : 外管の図心軸から中立軸までの角度, α_i : 内管の図心軸から中立軸までの角度 である。

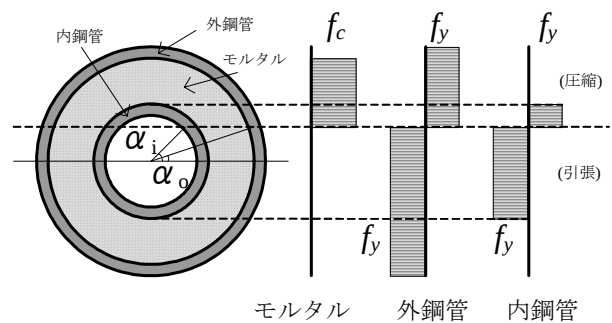


図6 曲げ強度算定のため仮定した応力分布

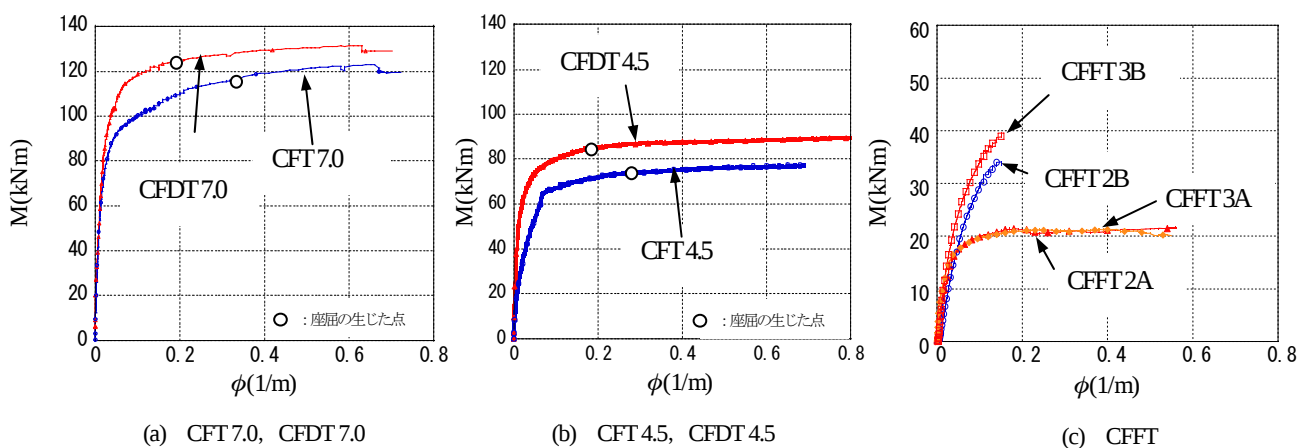


図5 曲げモーメント - 曲率曲線

充填モルタルの応力 - ひずみ関係においては、拘束効果による圧縮強度の増加を式(4)で定義し³⁾、これを考慮した場合と考慮しない場合での曲げ耐力を算定することとした。なお、この拘束効果を考慮した曲げ耐力を M_{cb} 、考慮しない曲げ耐力を M_c とする。

$$f_{cb} = f_c + \frac{1.56t_s f_y}{2R - 2t_s} \quad (4)$$

ここで、 f_{cb} ：モルタルの上昇後の圧縮強度、 f_c ：モルタルの圧縮強度、 t_s ：鋼管の厚み（エポキシ含浸 CFS の厚み）、 f_y ：鋼管の降伏強度（エポキシ含浸 CFS の引張強度）、 R ：供試体の半径 である。

(2) 実験結果と算定強度の比較

本研究では供試体の曲率が 0.5 (1/m) に達した時点の曲げモーメントをもって終局曲げモーメント (M_{exp}) とするが、実験結果を算定値とともに比較した結果を表 3 に示す。実験では、曲げ強度について CFDT は CFT と同等、あるいは若干優れているということがわかった。CFFT において、周方向と軸方向に CFS を巻いた供試体の終局モーメントが、周方向にのみ巻いた供試体をはるかに上回る結果となった。CFT、CFDT における実験値と算定値の比 (M_{exp}/M_{ul}) を見ると、算定値は概ね良好な結果を出していると言え、そして安全側に評価できている。しかし CFFT ではモルタルの強度上昇を加味すると実験値を超える結果となった。CFS の拘束効果が実際には十分発揮されておらず、何らかの対策が必要と考えられる。

3.3 ひずみ分布

M - ϕ 関係から曲率 0.02 (1/m) オフセットでの点を降伏と考え、その点での曲げモーメントを降伏曲げモーメント (M_y) とした。ただし、CFFT2B、3B では、降伏状態がなく破壊に至ったので、破壊時の曲げモーメントを M_y としている。これに対して 10%、20%、40%、80%、100% の曲げモーメントが作用したときのひずみ分布を図 6(a)～(d) に示す。

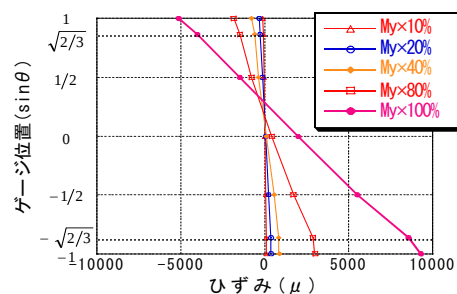
表 3 算定強度と実験結果の比較

供試体名		実験値 $M_{exp} (kN \cdot m)$	算定値 $M_u (kN \cdot m)$			
			拘束効果を考慮		拘束効果を考慮せず	
			M_{u1}	M_{exp}/M_{u1}	M_{u2}	M_{exp}/M_{u2}
CFT	7	123.5	108.3	1.025	105.7	1.168
	45	78.2	60.9	1.025	59.4	1.316
CFDT	7	130	112.3	1.048	107.2	1.213
	45	88.3	74.2	1.094	67.8	1.302
CFFT	2A	21.3	23.2	0.918	20.8	1.024
	3A	21.8	24.3	0.897		1.048
	2B	34.5	46.9	0.736	28.6	1.206
	3B	39.6	48.2	0.822		1.385

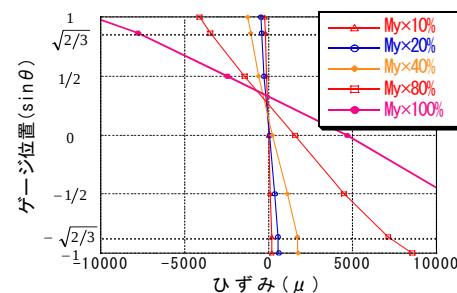
いずれも、曲げモーメントが大きくなるにしたがって中立軸が上昇していることが分かる。これは、充填モルタルのひび割れによって応力を伝達する断面が減少したこと起因している。

CFDT のひずみ分布に注目すると、中立軸の上昇程度が CFT と同等であることから、CFT と同等の拘束効果を持っていると言える。また CFT に比べて、大きなひずみが発生しても曲げ耐力低下を示さないことから、CFDT は高い変形性能を持っていると言える。

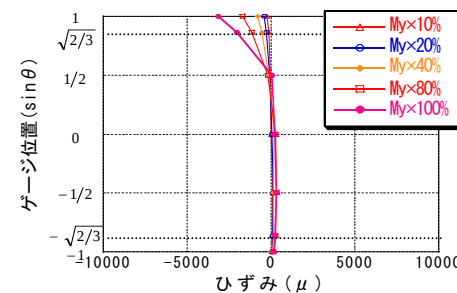
CFFT については、CFFT 2A、3A とともに引張側にはひずみがほとんど発生していない。また、中立軸が早期に上昇していることから、CFS はほぼ曲げに対して抵抗しておらず、CFS が縦断間ではがれることで拘束効果も十分発揮されず、充填モルタルは早期にひび割れを発生していると考えられる。



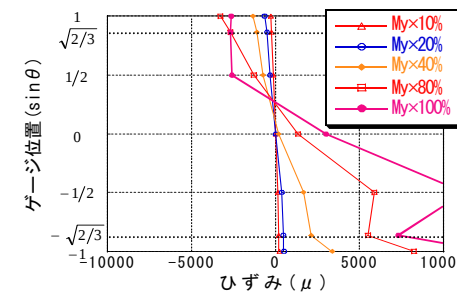
(a) CFT 7.0 の外鋼管



(b) CFDT 7.0 の外鋼管



(c) CFFT 2A の CFS



(d) CFFT 2B の CFS

図 6 ひずみ分布

3.4 応力状態

供試体に配置した3軸ひずみゲージの測定値から算出される鋼管の2方向応力をもとにvonMisesの降伏条件と比較し、外鋼管及び内鋼管に生じる応力状態について調べた。その結果を図7(a)~(c)に示す。グラフは引張を正としており、 σ_1 は軸方向応力、 σ_2 は周方向応力である。また、 σ_1 、 σ_2 を鋼管の降伏強度(σ_y)で除して無次元化している。

(1) 圧縮側の応力状態

外鋼管圧縮側の応力状態を見ると、CFT、CFDTでは曲げモーメントによって鋼管が降伏に達した後、周方向に引張応力が働いていることがわかる。これは充填モルタルの圧壊による体積膨張を、図8のように鋼管が内側から拘束しているためであると考えられる。その後、円周方向の引張応力は消散し、圧縮に転じる。これは、外鋼管の座屈により、この拘束力が失われたためと考えられる。また、CFDTの内鋼管では、降伏後、周方向への圧縮応力がはたらいっている。これも、図8のように外側から受ける充填モルタルの体積膨張による圧力から生じると考えられる。

一方、CFFTにおいては、内鋼管の円周方向応力はほとんど作用しておらず、充填モルタルによる拘束を受けていないことがわかる、このことから、CFSの充填モルタルへの拘束効果が弱かったと推察される。

(2) 引張側の応力状態

引張側の外鋼管では、降伏後、応力は周方向の引張側に進んでいる。これは図9に示すように、充填モルタルは引張ひび割れにより応力は伝達しないものの、鋼管の周方向への変形に対しては拘束するためと考えられる。

引張側の内鋼管の応力状態についても図9に示すようなメカニズムによって、降伏後は周方向へ圧縮力を受ける。

これらのことから、CFT、CFDTでは鋼管により、充填モルタルは十分拘束されているという事が分かる。一方、CFFTの内鋼管では、やはり円周方向への応力はほとんど発生せず、モルタルの拘束力が不十分であったという事が分かる。

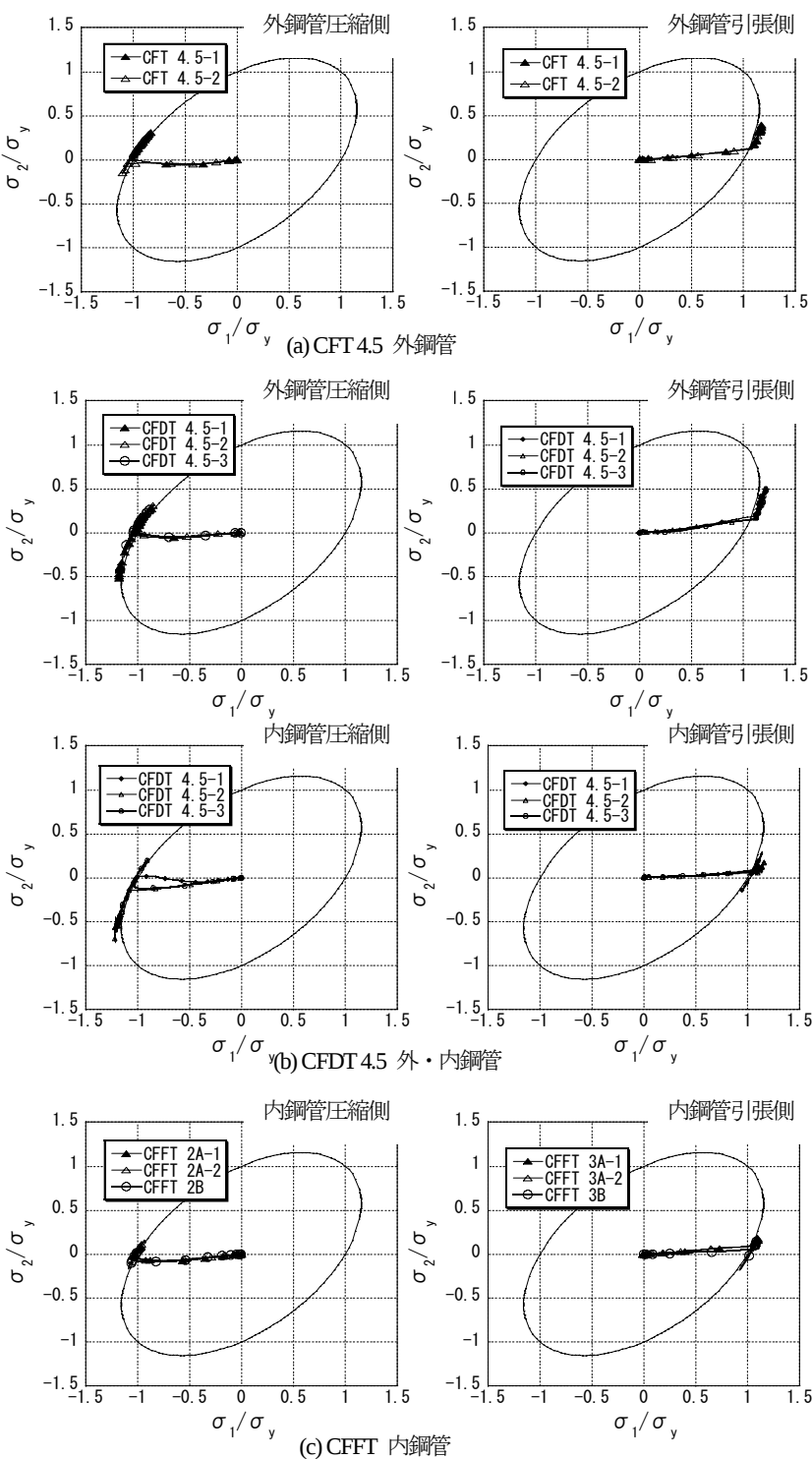


図7 各供試体の応力経路

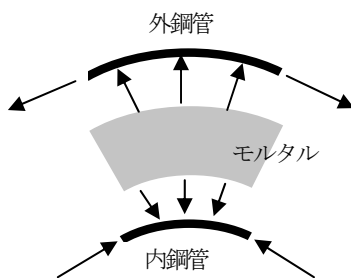


図8 圧縮側の応力状態

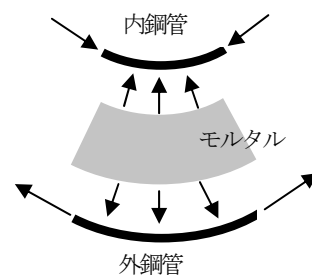


図9 引張側の応力状態

3.5 破壊性状

CFT, ならびに CFDT の破壊性状を図 10 に示す。全ての供試体について、外鋼管上縁の荷点内側における局部座屈が観察された。内鋼管の圧縮部における座屈は見られなかったが、ひずみの計測結果より圧縮側、引張側ともに降伏していることが確認された。

また、図 11 に示すように供試体の両端にて鋼管と充填モルタルのずれが観察された。本実験では供試体は両端でのずれを拘束しておらず、鋼管とモルタルとのずれを防止するような構造にすれば、内・外鋼管はより拘束力を発揮すると考えられる。

CFFT の破壊性状を図 12、図 13 に示す。CFFT2A、CFFT3A については、引張側の CFS が曲げによる引張に抵抗することなく破れ、モルタルのひび割れも観察された。CFFT2B、CFFT3B については軸方向の CFS が曲げ引張力に抵抗し、曲げ耐力が向上したが、CFS の引張破壊による脆性的な破壊となった。すべての供試体で内鋼管に座屈はみられなかったが、ひずみの計測結果より圧縮側、引張側ともに降伏していることが確認された。

また、図 14 に示すように、供試体端部で鋼管とモルタルのずれが観察された。ずれ量は CFDT より大きく、CFS による拘束は鋼管による拘束効果と比べて低いと考えられる。



図 10 CFDT 外鋼管の座屈



図 12 CFFT 2A の破壊形状



図 13 CFFT 2B の破壊形状

4. 数値解析

4.1 解析モデル

次に、平面保持の仮定に基づくファイバーモデルを用いて断面解析を行い、それぞれの供試体の曲げモーメント - 曲率関係を求めた。

鋼管の応力 - ひずみ関係には、ひずみ硬化係数を考慮し、図 15 に示す応力 - ひずみ関係を適用した。充填モルタルの応力 - ひずみ関係については、式(4)で定義した拘束効果による圧縮強度の上昇を考慮することとし、図 16 に示す応力 - ひずみ関係を適用した。特に、CFFT のモルタルには図 17 の応力 - ひずみ関係を用いた³⁾。CFFT については、周方向に巻いた CFS は曲げに対して抵抗しないとみなし、CFS を軸方向にも巻いたものは、エポキシ含浸 CFS の物性値を与えた。

また、実験では CFT と CFDT において断面鋼材量、モルタル量が異なるため単純な曲げ耐力の比較はできなかったが、解析では参考として図 18 のように鋼材断面積、モルタル断面積が等しい、つまり同重量での CFT、CFDT について曲げモーメント - 曲率関係を求め、それぞれ比較した。



図 11 CFDT の鋼管とモルタルのずれ



図 14 CFFT の内鋼管とモルタルのずれ

4.2 結果と考察

解析結果を実験結果と共に図19～21に示す。弾性域での挙動については、実験結果と解析結果は概ね一致していると言えるが、降伏を迎えてからの挙動に違いが見られる。解析では、CFT、CFDTともに曲げモーメントが最大値を超えて下降しているが、これは解析では充填モルタルが圧壊後抵抗力を受け持たないと仮定したためであり、実際は鋼管の拘束効果により耐力を維持していることがわかる。また、いずれのケースにおいても最大曲げモーメントは実験値が算定値を大きく上回っており、拘束効果の高精度化に課題があると考えられる。

CFFTの結果については、CFFT2A、CFFT2Bどちらも実験結果の曲げ耐力が解析結果の曲げ耐力を上回る結果となった。また、CFFT2Bについては解析結果の初期剛性が実験結果よりも大きく下回る結果となったが、これは周方向のCFSが曲げに対して抵抗しないものと仮定したためであり、実際には周方向のCFSも曲げに対してある程度の抵抗力を持っていることが分かる。また、解析ではCFSの破断後の挙動はうまく表現できていない。

次に鋼・モルタル断面積の等しいCFT、CFDTについての比較を行う。解析では、どちらもCFTよりもCFDTの方がより曲げ耐力が大きくなっていることがわかる。また、断面二次モーメントに寄与の大きい外側により鋼材を配置したCFDTの方が、曲げ剛性も大きく、同じ重量であればCFTよりもCFDTの方が構造的に優れているという事が分かる。ただし、この解析では座屈を考慮に入れていないため、座屈を考慮に入れた、より効果的な設計手法について検討する必要がある。

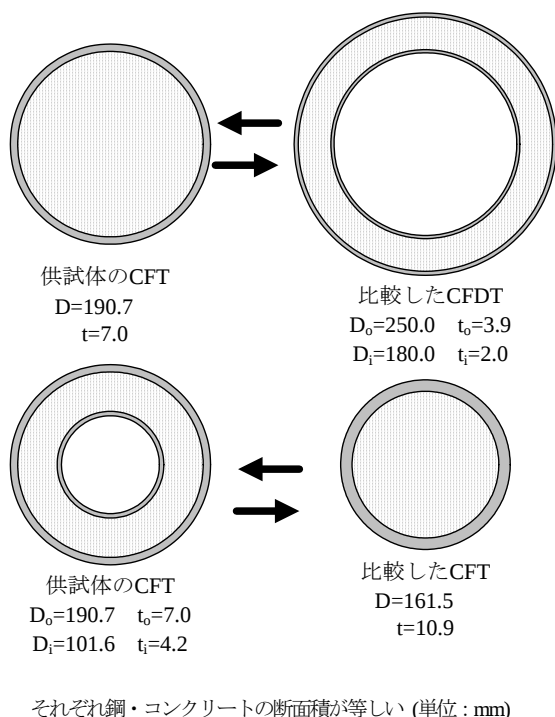


図18 解析で比較したCFT, CFDT

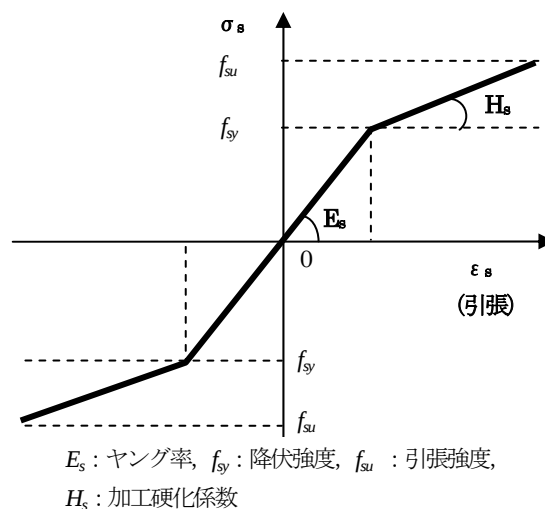


図15 鋼管の応力 - ひずみ関係

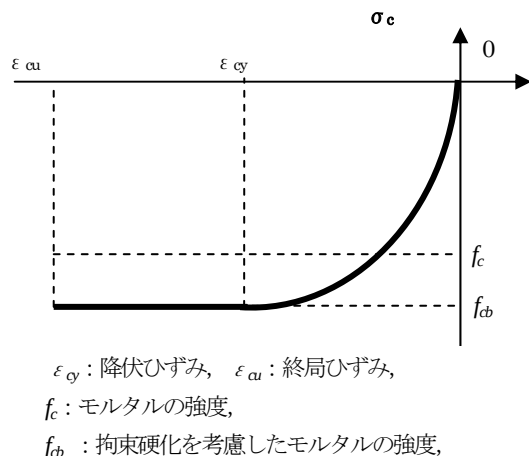


図16 CFT,CFDTに用いた
モルタルの応力 - ひずみ関係

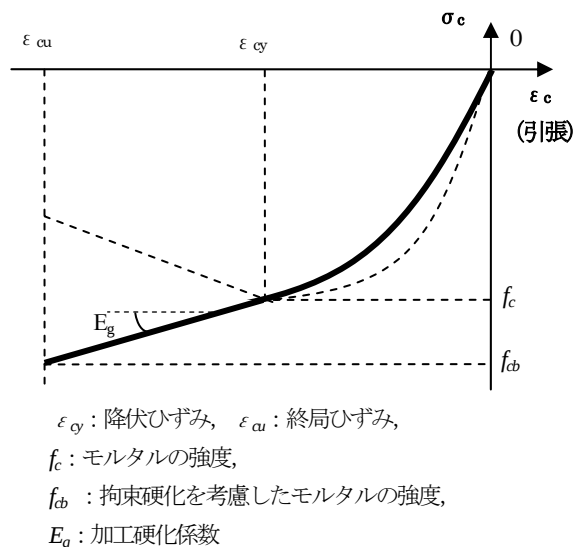


図17 CFFTに用いたモルタルの応力 - ひずみ関係

5. 結論

本研究では、コンクリート充填二重鋼管部材（CFDT）、および外鋼管を FRP に置き換えた部材（CFFT）の高橋脚への適用性を検討するため、これらの部材に対して4点曲げ試験を行い、CFDT の曲げ性状を把握するとともに、外鋼管の挙動に着目することでCFFT の可能性についても検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) CFT, CFDT では荷重部分付近の外鋼管で座屈が発生し、座屈を抑制することができれば、より曲げ変形能を上げることができると考えられる。
- 2) 鋼管の応力経路を調べた結果、外鋼管で円周方向に引張応力が、内鋼管で円周方向に圧縮応力が発生しており、鋼管は充填モルタルに対して十分な拘束効果を発揮していることが確認された。
- 3) CFS を周方向にのみ巻いた供試体では、CFS が早期に破壊し、CFS の拘束効果については確認できなかった。また、軸方向にCFS を巻くことで周方向CFS の拘束効果に改善が見られたが、CFS に塑性域がないため脆性的な破壊となり、CFS の積層数、積層方向、積層順について今後検討が必要である。
- 4) 同じ重量の制約条件下でCFDTはCFT よりも構造的に優れているといえるが、拘束効果や座屈を精度よく入れた検討が必要である。

参考文献

- 1) 上中宏二郎, 鬼頭宏明, 後藤亮太: 中空式二重鋼管・コンクリート剛性部材の曲げ特性, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.3, Issue42
- 2) 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年10月。
- 3) 細谷学, 川島一彦, 星隈順一: 炭素繊維シートで横拘束したコンクリート中の応力度-ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.592, V-39, 37-52, 1998.5.
- 4) 日本道路公団(1998): 鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル, 1998.8.
- 5) 崔 鉉俊, 杉浦邦征大島義信: コンクリート充填二重鋼管柱の圧縮耐力に関する研究, 6 回復合構造の活用に関するシンポジウム, 2005.11(CD-ROM).
- 6) 佐原啓介: 大径厚比を有するコンクリート充填円形鋼管部材の純曲げ特性, 大阪市立大学院, 都市系専攻, 修士論文梗概集, 2004年3月。
- 7) Walter Odhiambo Oyawa: Structural response of filled steel composite members, January 2000. Dr. thesis submitted to Kyoto University.
- 8) 井上真澄: 連続繊維補強材のコンクリート構造部材への適用に関する研究, 立命館大学, 2003年, 博士論文。

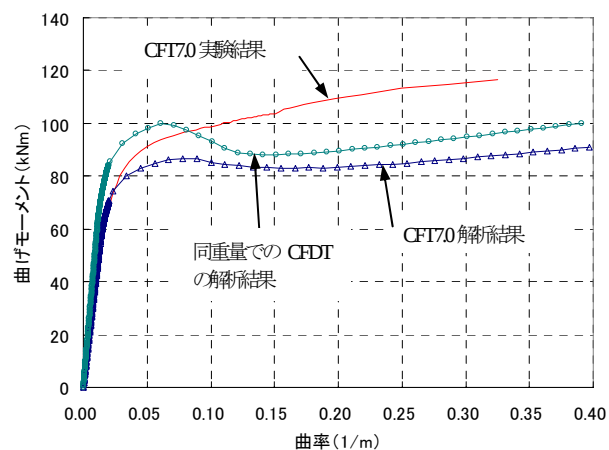


図 19 CFT の曲げモーメント - 曲率曲線の比較

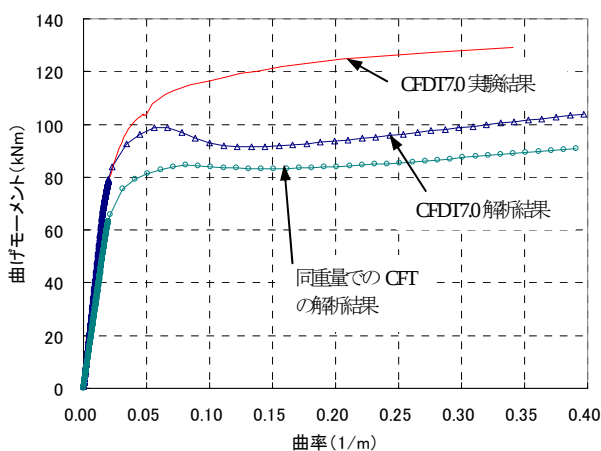


図 20 CFDT の曲げモーメント - 曲率曲線の比較

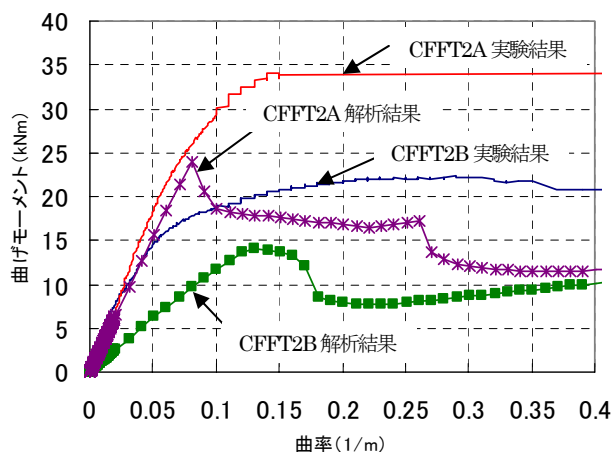


図 21 CFFT の曲げモーメント - 曲率曲線の比較