

(10) コンクリート充填二重鋼管構造の 曲げ耐荷特性に関する実験的研究

林堂靖史¹・杉浦邦征²・河野広隆³・大島義信⁴

¹ 学生員 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)
hayashidou@csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 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)
sugiura@csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 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)
kawano@csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴ 正会員 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)
ohshima@csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp

近年、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っており、そのひとつとしてコンクリート充填鋼管柱(CFT)が挙げられる。本研究では、さらにコンクリート充填二重鋼管柱(CFDT)、コンクリート充填鋼管 FRP柱(CFFT)について提案し、曲げ耐荷性状を明らかにするために、4点曲げ試験を行った。その結果、曲げ強度では、CFDTはCFTと同等、あるいは若干優れていることがわかり、曲げ耐力を保ちつつ自重を減らすという目的は実現されていると言える。CFFTについては、CFSの拘束効果を曲げ耐力に反映させるには、より積層数を増やす必要があり、十分な拘束効果を発揮するには、軸方向にも巻き足す必要があることが分かった。CFSの積層数、積層方向、積層順についての検討が今後の課題である。

Key Words : CFT, CFDT, Double-Skin Steel Tube, CFS, FRP

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のせん断破壊や鋼管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柱(CFT: 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合成構造であり、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柱(CFDT: Concrete Filled Double Tubular members 以下、CFDT)についての研究が進められている。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、より効率的な構造として、図1に示すような外管にFRPを適用した構造(CFFT: 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。そのために実験では供試体の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。

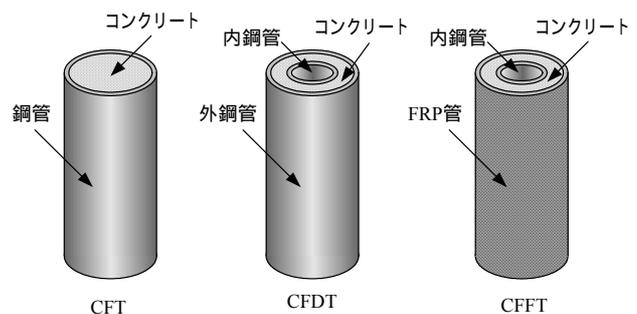


図1 CFT,CFDT,CFFTの概形

2. 実験概要

(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，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。CFS の積層数は，比較する鋼管の引張力を基に決定した。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。

(2) 実験方法

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，試験区間外での供試体の座屈を防止するため，載荷点の外側に鉄帯を巻いた。実験装置の外観を図3に示す。

(3) 測定項目

図-3 にひずみゲージ，変位計位置を示す。ひずみは3軸ゲージ用いて測定した。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。変位は供試体の上縁と下縁において，供試体より5cm離れた位置で試験区間中央20cmを測定した。

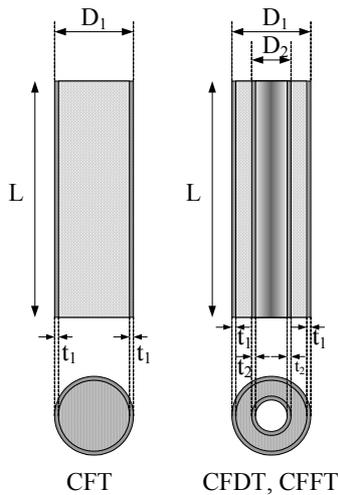


図2 供試体概観

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
				D ₁ (mm)	t ₁ (mm)	D ₂ (mm)	t ₂ (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 供試体の材料特性

	厚さ	降伏点	引張強度	圧縮強度	曲げ強度	終局ひずみ	せん断強度	ヤング率	ポアソン比
	(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(μ)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	
鋼材	7	350	442	-	-	-	-	198	0.23
	4.5	290	380	-	-	-	-	185	0.35
	4.2	300	390	-	-	-	-	174	0.35
モルタル	-	-	-	62.4	6.5	4000	-	22	-
CFS	0.167	-	3400	-	-	-	-	245	-
エポキシ樹脂	-	-	53	1670	-	-	19.6	3.29	-

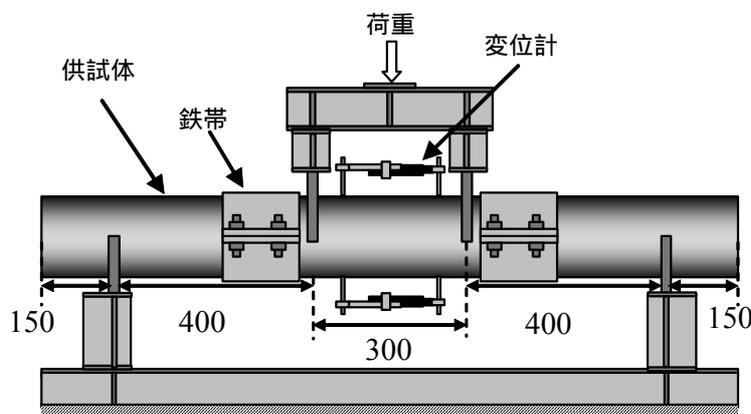


図3 実験装置概観 (寸法単位: mm)

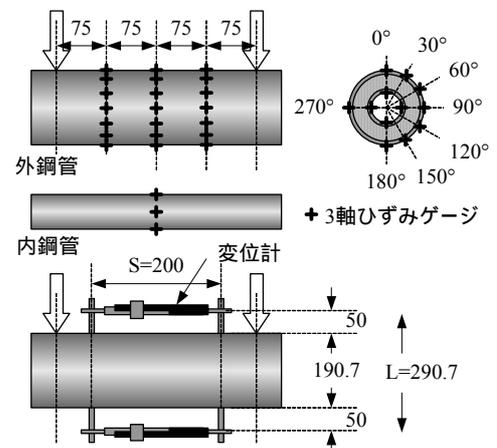


図4 ひずみ，変位測定位置 (寸法単位: mm)

3. 実験結果および考察

(1) 曲げモーメント曲率関係

供試体の上縁と下縁の変位から式(1)によって曲率を求めた。得られた M- ϕ 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、それ以降の値は供試体の真の曲率ではないことに注意されたい。

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

ただし、 ϕ : 曲率, δ_1 : 上縁の変位, δ_2 : 下縁の変位, S : 変位計間の距離, L : 変位の標点距離 (図 4 を参照) とする。

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_{exp}) とし、考察することとした。

CFT, CFDT は M- ϕ 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。変形性能では CFT と CFDT はほぼ同じ挙動を示しており、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 CFFT2A, 3A の 2 ケースは曲げ耐力や挙動に差はなく、M- ϕ 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 CFFT2B, 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、CFFT2-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。

(2) 曲げ強度

a) 算定曲げ強度

図 6 のようなひずみ分布を仮定し、曲げ強度を算定する¹⁾。なお、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補剛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 N_u が 0 になる時の中立軸位置 (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。

$$N_u = \frac{\pi}{2} f_c \left\{ R^2 \left(1 - \frac{2\alpha_o}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha_o}{\pi} \right) - r^2 \left(1 - \frac{2\alpha_i}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha_i}{\pi} \right) \right\} - 4f_u (Rt_o \alpha_o + rt_i \alpha_i) \quad \dots \dots (2)$$

$$M_u = \frac{2}{3} f_{cb} (R^3 \cos \alpha_o^3 - r^3 \cos \alpha_i^3) + 4f_u (R^2 t_o \cos \alpha_o + r^2 t_i \cos \alpha_i) \quad \dots \dots (3)$$

ただし、 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とする。

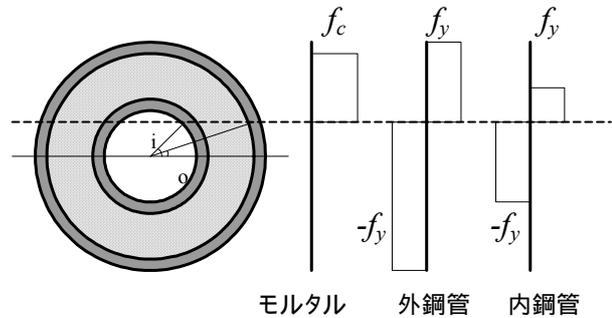


図 6 曲げ強度算定のため仮定した応力分布

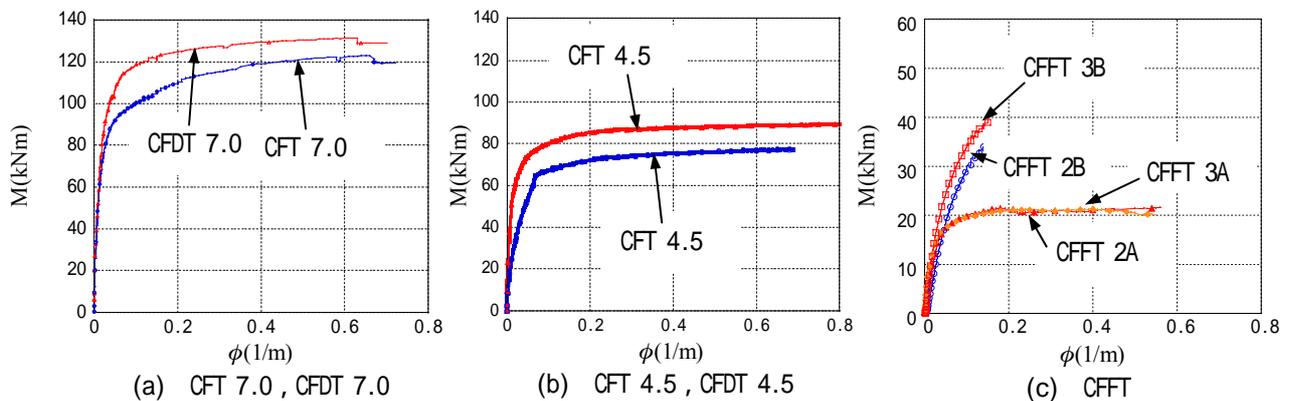


図 5 曲げモーメント 曲率曲線

モルタルの応力 ひずみ関係については、拘束効果による圧縮強度の増加を式(4)で定義し、これを考慮したものと考慮しないものの両方を算定することとした。モルタルの拘束効果を考慮したものを M_{u1} 、考慮しないものを M_{u2} とする。

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

ただし、 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 とする。

b) 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。実験結果を算定値とともに表 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_{u1}) 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) ひずみ分布

M 関係からグラフの傾きが緩やかになり始める点を部材としての降伏と考え、その点での曲げモーメントを降伏モーメント (M_y) とした。ただし、CFFT2B、3B では、降伏状態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。

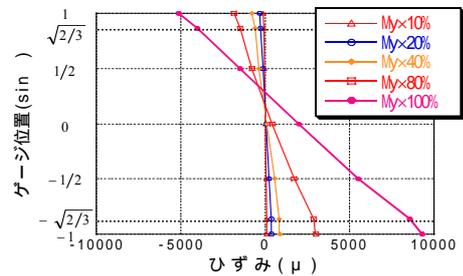
表 3 算定強度と実験結果の比較

		実験値 M_{exp} (kN・m)	算定値 M_u (kN・m)		
			M_{u1}	M_{u2}	M_{exp}/M_{u1}
CFT	7	123.5	108.3	105.7	1.025
	4.5	78.2	60.9	59.4	1.025
CFDT	7	130	112.3	107.2	1.048
	4.5	88.3	74.2	67.8	1.094
CFFT	2A	21.3	23.2	20.8	1.115
	3A	21.8	24.3		1.168
	2B	34.5	46.9	28.6	1.64
	3B	39.6	48.2		1.685

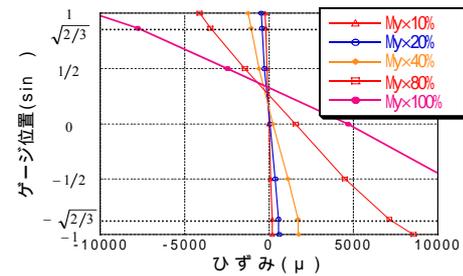
いずれも、曲げモーメントが大きくなるにしたがって中立軸が上昇していることが分かる。これは、充填コンクリートのひび割れによって応力を受ける断面積が減少したことに起因している。

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、曲げモーメントが大きくなるほど CFT に比べて大きなひずみを示していることから、CFDT は高い変形性能を持っていると言える。

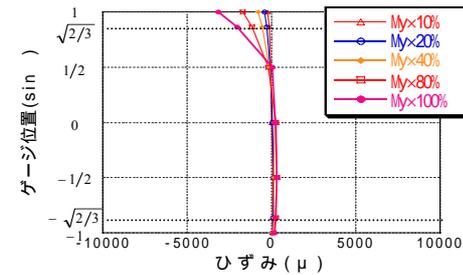
CFFT については、CFFT 2A、3A とともに引張側にはひずみがほとんど見られない。また、中立軸が早期に上昇していることから、CFS はほぼ曲げに対して抵抗しておらず、CFS が破れることで拘束効果が失われ、充填モルタルは早期にひび割れを発生していると考えられる。



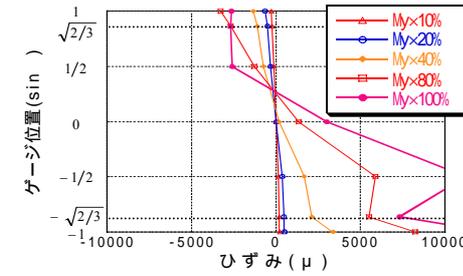
(a) CFT 7.0 外鋼管



(b) CFDT 7.0 外鋼管



(c) CFFT 2A CFS



(d) CFFT 2B CFS

図 6 ひずみ分布

(4) 応力状態

供試体に配置した3軸ひずみの測定値から算出される主応力をもとに von-Mises の降伏条件により、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、 x 軸、 y 軸を鋼管の降伏強度 (σ_y) で除して無次元化している。

a) 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のため、図 8 のように内側から拘束力を受けているから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ている。これも、図 8 のように外側から受けるモルタルの体積膨張による拘束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、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 のモルタルへの拘束効果が弱かったと推察される。

b) 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、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、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。

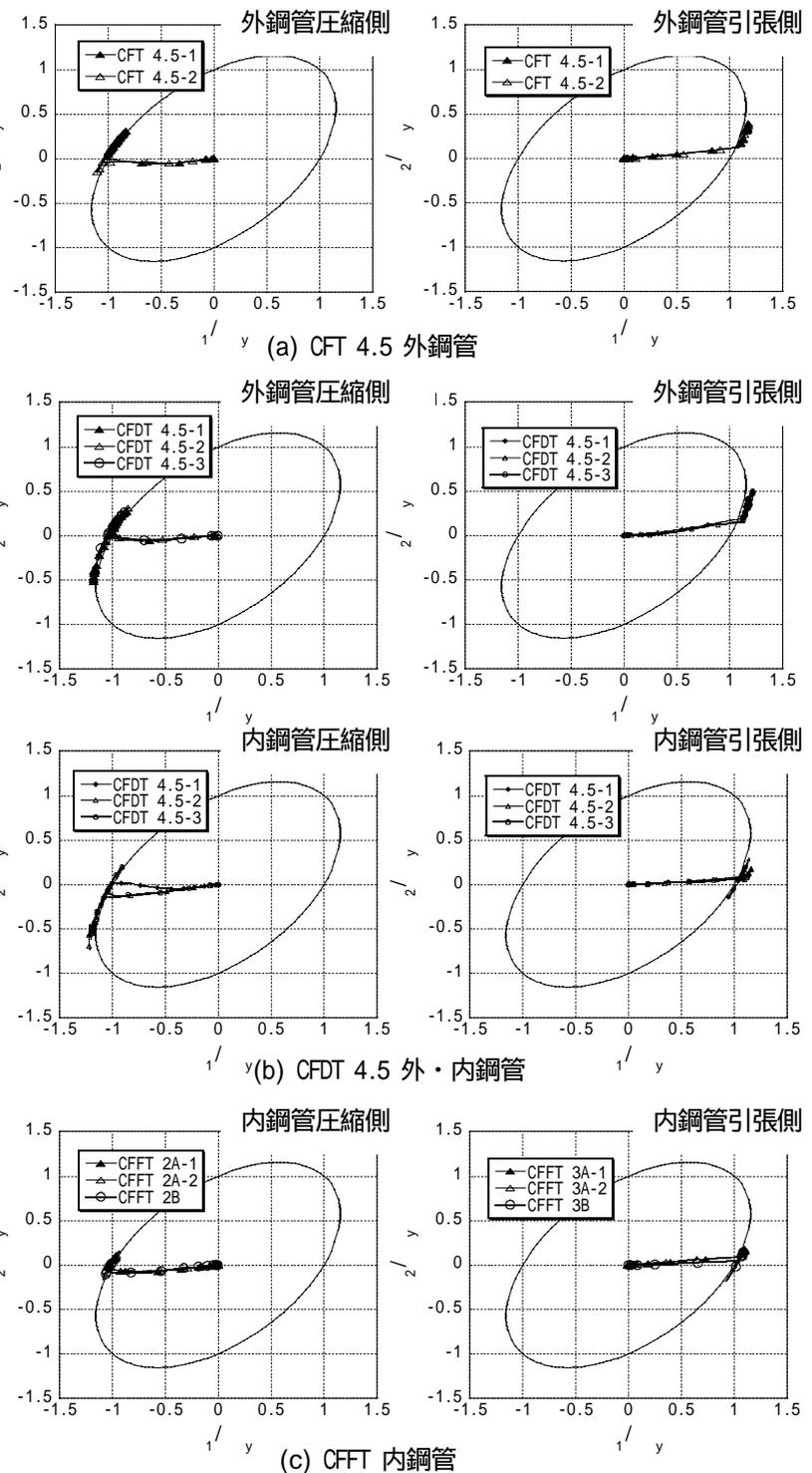


図 7 各供試体の応力経路

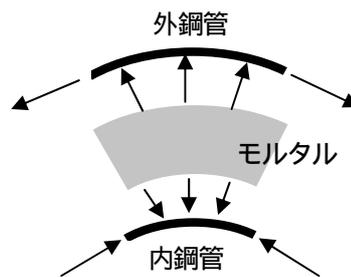


図 8 圧縮側の応力状態

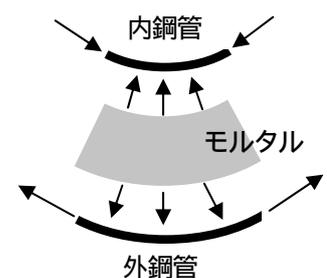


図 9 引張側の応力状態

(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、外鋼管上縁の載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、ひずみデータより圧縮側、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、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。CFFT2-A, CFFT3-A 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。CFFT2-B, CFFT3-B 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。すべての供試体内鋼管に座屈はみられなかったが、ひずみデータより圧縮側、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と比べて弱いと考えられる。



図 10 CFDT 外鋼管の座屈



図 11 CFDT の鋼管とモルタルのずれ

4. 数値解析

(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。



図 12 CFFT 2A の破壊形状



図 13 CFFT 2B の破壊形状



図 14 CFFT の内鋼管とモルタルのずれ

(2) 結果と考察

解析の結果を実験結果と共に図 18(a) ~ (c)に示す．弾性域までの挙動については，実験値と概ね同様の結果が出ていると言えるが，降伏を迎えてからの挙動に違いが見られる．解析によると，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のに対し，実験値では曲げモーメントは上昇し続けている．このことから，塑性域に達してからも充填モルタルによる拘束効果が外鋼管の強度に影響を与えていることが考えられる．

解析値に着目すると，CFDT では曲げモーメントが一度最大値から下降し，再び上昇している．これは外鋼管が降伏後，内鋼管が曲げ力に抵抗し始めるという挙動であると考えられる．CFFT2A, 3A においては，モルタルの引張破壊ののち，内鋼管の曲げ挙動を示していると言える．CFFT2B, 3B においても，CFS の破断とともにモーメントが下降し，内鋼管の曲げ挙動を示していると考えられる．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．

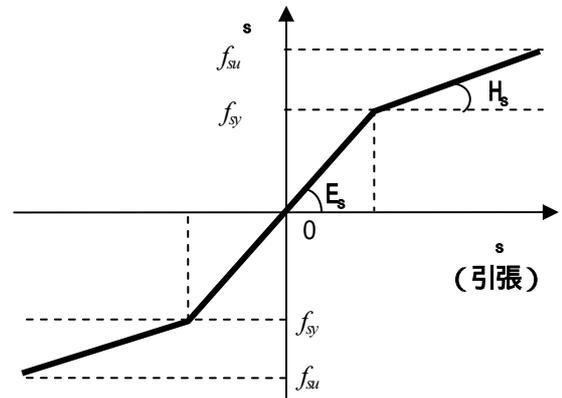


図 15 鋼管の応力ひずみ関係

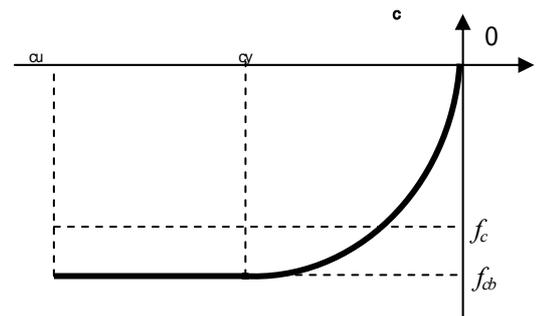
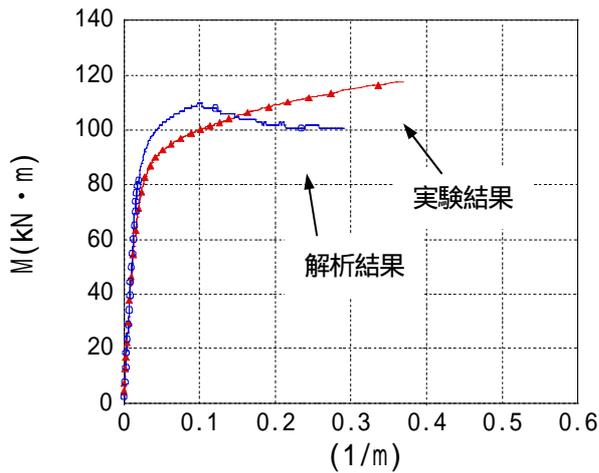
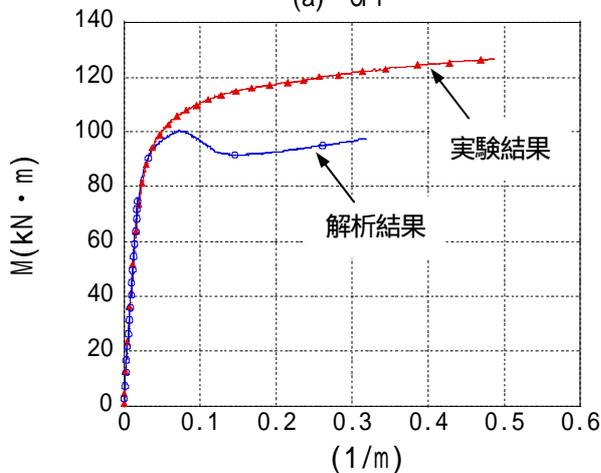


図 16 CFT,CFDT に用いたモルタルの応力ひずみ関係



(a) CFT



(b) CFDT

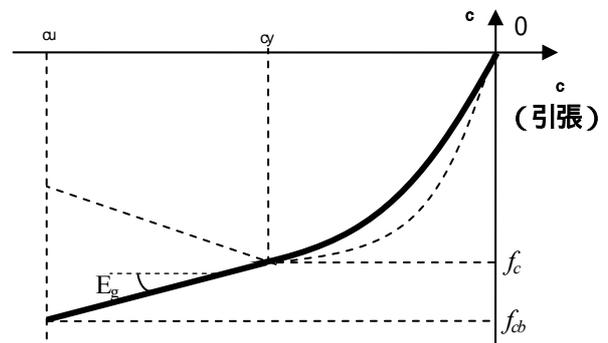
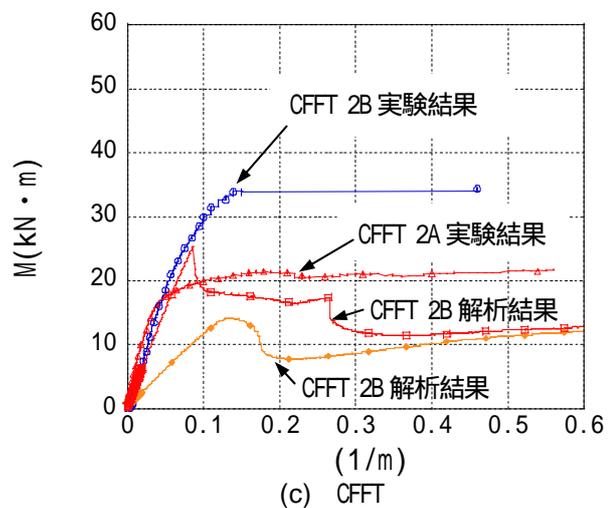


図 17 CFFT に用いたモルタルの応力ひずみ関係



(c) CFFT

図 18 曲げモーメント 曲率曲線の比較

5. 結論

本研究では、コンクリート充填二重鋼管柱（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 では載荷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、より曲げ強度を上げることができると考えられる。
- 2) 曲げモーメント 曲率関係において、CFDT が CFT とほぼ同じ挙動を示していることから、曲げ剛性を保ちつつ自重を減らすという目的は実現されている。
- 3) 鋼管の応力経路を調べた結果、圧壊による充填モルタルの体積膨張が、外鋼管で円周方向に引張を、内鋼管で円周方向に圧縮を作用させていることが確認された。
- 4) CFS を周方向にのみ巻いた供試体では、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。
- 5) 軸方向に CFS を巻くことで周方向 CFS の拘束効果が発揮されるが、CFS に塑性域がないため脆性的な破壊となる。
- 6) CFS の積層数、積層方向、積層順について検討が必要である。

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: Structural Behavior of Concrete-Filled Double-Skin Tubular Columns
- 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。

EXPERIMENTAL STUDY ON BENDING BEHAVIOR OF CONCRETE FILLED DOUBLE SKIN TUBULAR MEMBERS

Yasushi HAYASHIDO, Kunitomo SUGIURA, Hirotaka KWANO
and Yoshinobu OSHIMA,

Examined herein are the bending characteristics of CFDT (Concrete Filled Double-skin steel Tubular members) and CFFT (Concrete-Filled FRP-steel Tubular members) by four points bending test. 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 is proposed particularly for higher bridge piers. This structure consists of outer and inner steel tubes, between which concrete is filled to avoid buckling. In this structure, the bending strength and stiffness is equal to those of CFT by adjusting equivalent geometric moment of inertia. Moreover, CFFT is also proposed to replace the outer tube by CFS (Carbon Fiber Seat) to examine the mechanism of outer tube on their performance. 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 because the constraining effect may need expansion of the concrete. It is thought that when we install some reinforcements along the axial direction to induce the expansion of concrete the constraining effect may exhibit.