

コンクリート充填 FRP 管の軸圧縮挙動に関する研究

東山 浩士*, 林 修平**

Study on Axial Compressive Behavior of Concrete Filled Fiber Reinforced Plastic (FRP) Tubes

Hiroshi HIGASHIYAMA* and Shuhei HAYASHI**

Many studies have been carried out on concrete filled steel tubes in recent years. It is generally recognized that this structural system is enhanced ductility and stability. However, the use of steel tube in corrosive environment needs to prove. Using FRP tube, whose properties are lightweight, high strength and durability, may eliminate the problem of steel tube. In this study, axial compressive tests of concrete filled FRP tubes formed by the filament winding method were carried out to know the compressive behavior. And the stress-strain behavior was investigated by 2D nonlinear finite element analysis. From these results, axial compressive strength model was proposed and compared with various models proposed by some researchers.

Key Words: concrete filled FRP tube, filament winding, lateral confinement, compressive strength, compressive behavior

1. 序論

1. 1 背景

コンクリート充填鋼管構造は、鉄骨構造、鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造に次ぐ「第4の構造」と言われ、鋼管内部にコンクリートを充填した鋼とコンクリートの合成構造である。中心軸圧縮力を受けるコンクリート充填鋼管構造はコンクリートの体積膨張を鋼管が拘束するとともに、鋼管の局部座屈をコンクリートが拘束するため、耐力増加が顕著となる¹⁾。一方、近年、新素材の複合材料として、繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, 以下 FRP) が注目されている。高強度の繊維で構成された FRP は軽量かつ高耐食性であり、疲労強度が高く、成形性にも優れている。FRP は繊維による補強量、配向角を適切に選択することによって多様な構造部材に応用が可能であり、構造設計の自由度は非常に高いと言える。国外においては、FRP 部材を新設構造物に適用するための基礎的研究²⁾が行われており、FRP 管にコンクリートを充填したコンクリート充填 FRP 管の軸圧縮強度や変形特性に関する種々のモデルが提案されている。国内においては、コンクリート充填鋼管の

鋼管の代わりに FRP 管を用いたコンクリート充填 FRP 管に関する研究は少なく、基礎的挙動の把握と軸圧縮強度モデルの構築など検討すべき課題は多いようである。FRP 管とコンクリートの合成構造は、充填形式による型枠の不要、FRP の特徴である軽量による施工の効率化、異方性を活かした繊維配向による構造の合理化が期待できる。

1. 2 目的

本研究では、フィラメント・ワインディング (FW) 法により成形された FRP 管内に、コンクリートを充填したコンクリート充填 FRP 管の単軸圧縮試験を行い、FRP 管の拘束効果、軸圧縮強度、軸圧縮挙動を調べる。また、充填コンクリートの圧縮強度、FRP 管の周方向弾性係数および周方向引張強度をパラメータとした 2 次元非線形有限要素解析を行い、実験パラメータを含む広い範囲でのパラメータ解析により、コンクリート充填 FRP 管の力学的特性を調べる。さらに、コンクリート充填 FRP 管の軸圧縮強度モデルを提案し、既往の研究により提案されている軸圧縮強度モデルと比較・検討する。

2. 試験概要

2. 1 試験体および使用材料

試験体は内径(d)150mm、長さ(L)300mm、管厚さ(t)約 2mm の FRP 管内にコンクリートを充填したコンクリート充填 FRP 管を

平成16年5月22日受理

* 社会環境工学科

** 総合理工学研究科環境系工学専攻

平成15年度土木学会関西支部および全国大会にて一部発表

Table 1 Details of concrete filled FRP tubes

Specimen	Number	Fiber	Matrix	Ply Order (°)	d (mm)	L (mm)	t (mm)	
GFV	2	C-glass	Vinyl ester	$\pm 79/\pm 79/\pm 79$	153	300	1.9	
CFV	1	Carbon	Vinyl ester	$\pm 79/\pm 79/\pm 79$	153	300	2.2	
CFE	CFE-1	3	Carbon	Epoxy	90/90/90/ ± 15 /90/90/90	150	300	2.1
	CFE-2	3	Carbon	Epoxy	90/90/ ± 15 /90/90	150	300	2.0
	CFE-3	3	Carbon	Epoxy	90/ ± 15 /90	150	300	2.3

Table 2 Material properties

Specimen	f'_{co} (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	f_h (N/mm ²)	E_h (kN/mm ²)	f_l (N/mm ²)
GFV	25.8	23.0	475	30.9	11.8
CFV			1470	75.5	42.2
CFE	29.3	27.6	990	111.8	27.7
			1037	114.4	27.6
			855	79.7	26.3

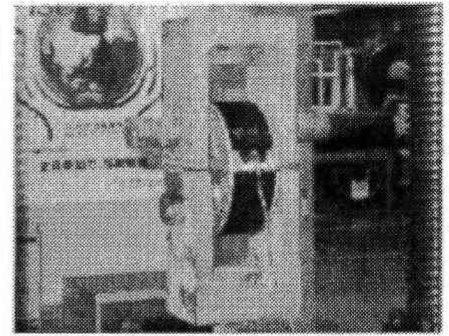


Photo 1 Tensile test of FRP tube

12 体製作した。FRP 管は全て FW 法により成形した。コンクリート充填 FRP 管の諸元は Table 1 に示す通りである。試験体 GFV は繊維に C-ガラス、マトリックスにビニルエステル樹脂を、試験体 CFV は繊維にカーボン(T700S)、マトリックスにビニルエステル樹脂を用い、繊維の配向角は管軸に対して $\pm 79^\circ$ で各 3 層積層している。試験体 CFE-1, CFE-2, CFE-3 は繊維にカーボン(T700S)、マトリックスにエポキシ樹脂を用いている。これら 3 種類の試験体については繊維の配向角を管軸に対して 90° と $\pm 15^\circ$ の組み合わせにより厚み比を変化させ、総繊維量は同じとした。充填コンクリートには乾燥収縮による FRP 管との肌離れを避けるために乾燥収縮保証程度の膨張材を添加した。

2. 2 材料試験

各試験体の材料試験結果を Table 2 に示す。充填コンクリートの圧縮強度 f'_{co} は試験体 GFV および試験体 CFV が 25.8N/mm^2 であり、試験体 CFE が 29.3N/mm^2 であった。FRP 管の周方向引張強度 f_h は Photo 1 に示す ISO FDIS 8521 B 法に基づいたリング形試験片 3 本による平均値により求めた。試験片は幅 50mm の環片で、半径 10mm の切欠きを両側に有し、破断面の幅は 30mm である。また、周方向弾性係数 E_h はリング形引張試験時、あるいは、内水圧試験時に貼付したひずみゲージの値から算出した。試験体 CFE に用いた FRP 管の引張試験結果の一例を Fig. 1 に示す。Table 2 に示した拘束応力度 f_l は FRP 管の周方向引張強度と FRP 管の形状寸法を関係づけるパラメータとして次式のように表される。

$$f_l = \frac{2f_h t}{d} \quad (1)$$

ここに、 f_h は FRP 管の周方向引張強度、 t は FRP 管の厚さ、 d は FRP 管の内径である。

2. 3 試験方法

載荷状況を Photo 2 に示す。試験体 GFV の載荷は 2000kN 高剛性歪率圧縮試験機で、試験体 CFE は 5000kN 万能圧縮試験機で行った。試験体 CFV に関しては、2000kN 高剛性歪率圧縮試験

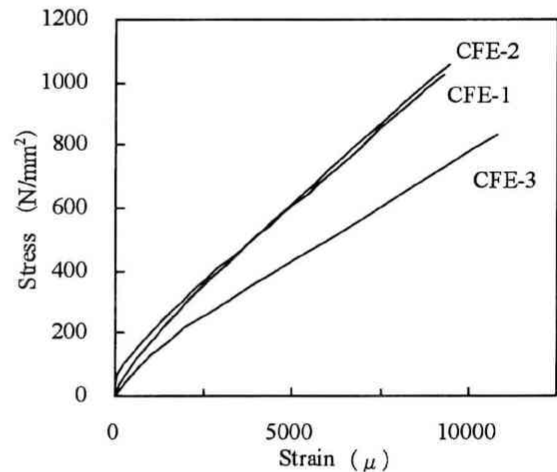


Fig. 1 Results of tensile test of FRP tubes

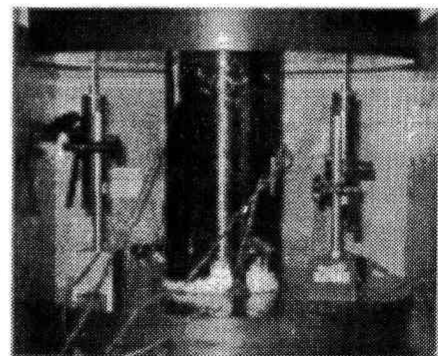


Photo 2 Loading condition

機の載荷能力を超える耐力を有したため、1800kN で載荷を一旦中止し、5000kN 万能圧縮試験機にて、再び試験を行った。全ての試験体について、管軸中央に軸方向および周方向のひずみゲージ(30mm 長)を貼付した。試験時の測定項目は荷重、軸方向ひずみ、周方向ひずみ、軸方向変位である。

3. 単軸圧縮試験結果

3.1 耐力および圧縮強度

単軸圧縮試験結果を Table 3 に示す。軸圧縮強度 f'_{cc} は耐力 P_u を充填コンクリートの断面積で除した値である。全ての試験体において、充填コンクリートの軸圧縮強度に比べて、顕著な強度増加が確認される。また、拘束応力度比 f_l/f'_{co} が高いほど、軸圧縮強度比 f'_{cc}/f'_{co} も高くなる傾向にある。

3.2 軸応力度比-ひずみ関係

各試験体の軸応力度比-ひずみ関係の一例を Fig. 2 に示す。いずれの試験体も充填コンクリートの圧縮強度 ($f'_c/f'_{co}=1.0$) までほぼ同様の挙動を示すことが確認され、その後は、充填コンクリートの内部ひび割れ発生による周方向の変形を FRP 管が拘束するため、ほぼ線形挙動を示しながら破壊に至るまで荷重は増加する。これは円柱コンクリートに連続繊維シートを巻き付けた場合⁷⁾とほぼ同様の挙動である。試験体 CFE の破断時の周方向ひずみは約 10000 μ であり、これは Fig. 1 に示したリング形引張試験片を用いて行った周方向引張試験時の破断ひずみと同程度のひずみであった。

Table 3 Results of axial compressive tests

Specimen	P_u (kN)	f'_{cc} (N/mm ²)	f'_{cc}/f'_{co}	f_l/f'_{co}	
GFV	1173	63.8	2.47	0.46	
	1132	61.5	2.38		
CFV	2050	111.3	4.31	1.65	
CFE	CFE-1	2000	113.5	3.87	0.95
		1972	111.7	3.81	
		2058	116.6	3.98	
	CFE-2	2019	113.9	3.89	0.94
		1764	99.0	3.38	
		2029	114.1	3.89	
CFE-3	1940	110.7	3.78	0.90	
	1558	89.0	3.04		
	1862	105.5	3.60		

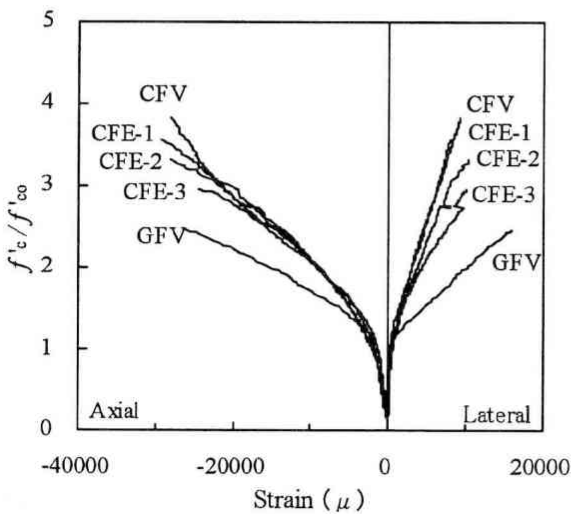


Fig. 2 Relationships between axial stress ratio and strain

3.3 軸応力度比-体積ひずみ関係

コンクリート充填 FRP 管の体積ひずみは次式により求められる。

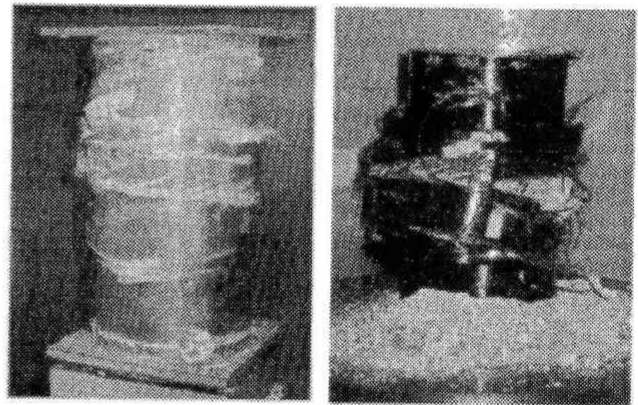
$$\epsilon_v = \epsilon_c + \epsilon_r + \epsilon_\theta = \epsilon_c + 2\epsilon_r \quad (2)$$

ここに、 ϵ_v : 体積ひずみ、 ϵ_c : 軸方向ひずみ、 ϵ_r : 周方向ひずみ、 ϵ_θ : 半径方向ひずみである。

各試験体の軸応力度比-体積ひずみ関係の一例を Fig. 3 に示す。いずれの試験体も充填コンクリートの圧縮強度まで、充填コンクリートとほぼ同様の挙動を示している。FRP 管の周方向弾性係数が小さい試験体 GFV では、他の試験体と比較して体積膨張が生じている。また、FRP 管の周方向弾性係数が同程度の試験体 CFV と試験体 CFE-3 とを比べると、拘束応力度が大きい試験体 CFV に顕著な体積収縮が生じている。FRP 管の周方向弾性係数が高い試験体は載荷直後から破壊に至るまで常に体積収縮が生じている。このような結果から、コンクリート充填 FRP 管の体積変化は FRP 管の周方向弾性係数に依存すると言える。

3.4 破壊状況

破壊状況の一例を Photo 3 に示す。試験体 GFV、CFV は FRP



(a) Specimen GFV (b) Specimen CFE

Photo 3 Failure condition

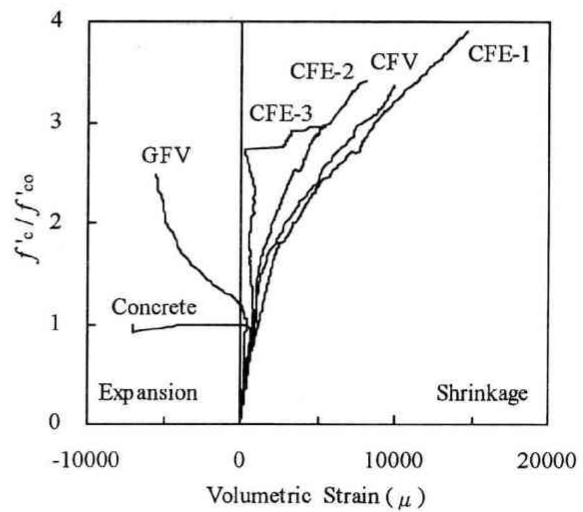


Fig. 3 Relationships between axial stress ratio and volumetric strain

管の層間剥離が先行して発生した後、繊維の破断を伴って、急激な破壊に至った。試験体 CFE は荷重の増加とともに FRP 管の周方向繊維が局部的に破断し始め、最終的には周方向繊維が周方向応力に耐えられなくなり、一気に破断に至った。

4. 2次元非線形有限要素解析

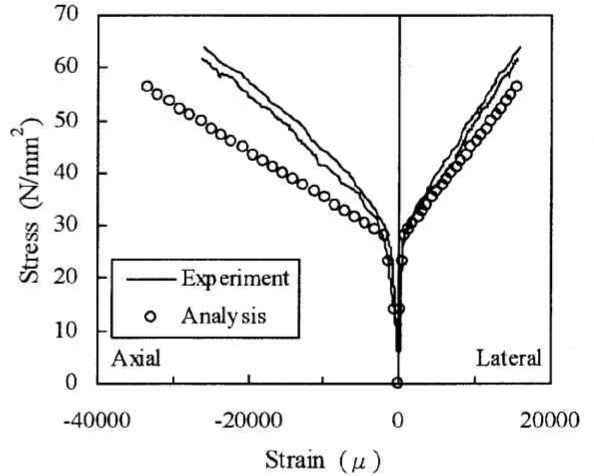
4. 1 解析モデル

解析には2次元非線形有限要素解析プログラム AITENA 2D[®]を用い、解析モデルは、充填コンクリートの中心軸を対称とする軸対称モデルとし、軸方向に60分割、半径方向に15分割とした。コンクリートにはアイソパラメトリック要素を用い、ひび割れが考慮できる Nonlinear Cementitious モデルを適用した。充填コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係は Fig. 4 に示す関係を用い、コンクリートの非線形挙動の開始点を一軸圧縮強度の2/3点とし、最大圧縮応力 f_{c0} に達した後は圧縮側での臨界変位まで直線的に応力低下させたモデルを用いた。コンクリートのひび割れは固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルを組み合わせ、ひび割れに伴うコンクリートの引張強度の低下は Fig. 5 に示す引張軟化曲線によってモデル化した。FRP 管については軸方向力に対する抵抗はないものとして、コンクリートの周方向変形のみを拘束するように、完全弾性体としたフープ鉄筋を密に配置することによってモデル化した。コンクリート充填FRP管の破壊条件は、本研究で対象とするモデルでは充填コンクリートが圧縮破壊するよりも先に FRP 管が破断することによって終局状態に至ると判断されたため、解析においては、FRP 管の破断ひずみをもってコンクリート充填FRP管の破壊とした。

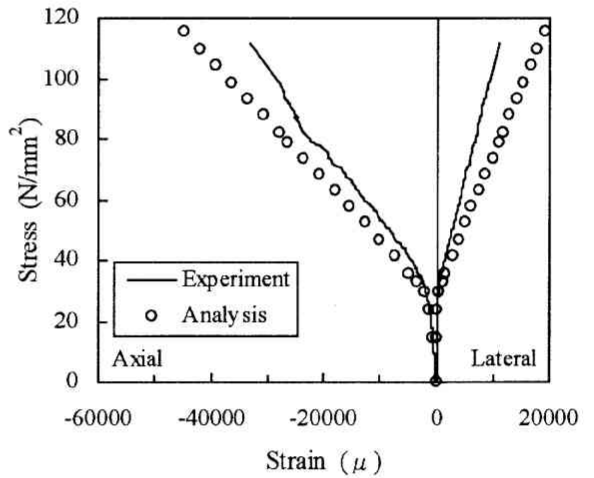
4. 2 解析モデルの妥当性

解析モデルの妥当性を検証するため、コンクリート充填 FRP 管の解析を本試験で得られた材料定数を用いて行った。解析によるコンクリート充填FRP管の応力-ひずみ関係の一例を Fig. 6 に示す。解析結果も試験結果同様にバイリニア型の挙動を示し、塑性域における勾配はほぼ線形挙動を呈している。拘束応力度の低い試験体 GFV に関しては、軸方向ひずみの塑性域の勾配に差がみられ、周方向ひずみの塑性域の勾配はほぼ一致している。拘束応力度の高い試験体 CFV に関しては、軸方向および周方向

ひずみの塑性域の勾配に差がみられる。試験体 CFE-1 に関しては周方向ひずみの塑性域の勾配にわずかな差がみられ、軸方向ひずみの塑性域の勾配は試験結果とほぼ一致している。試験体 CFE-2 は解析結果と試験結果に良い一致が見られる。試験体 CFE-3 に関しては軸方向および周方向ひずみの勾配は一致している。全体的な挙動の傾向は試験値に近いことが分かるが、試験体によっては塑性域での勾配や最大応力に差が見られるものもある。コンクリート充填 FRP 管の全体的な挙動を把握すると



(a) Specimen GFV



(b) Specimen CFV

Fig. 6 Comparison with experimental results

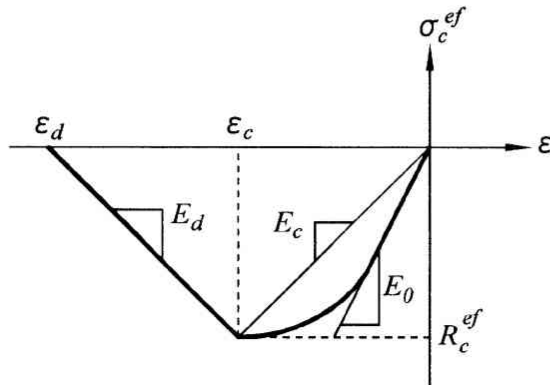


Fig. 4 Compressive stress-strain curve of concrete

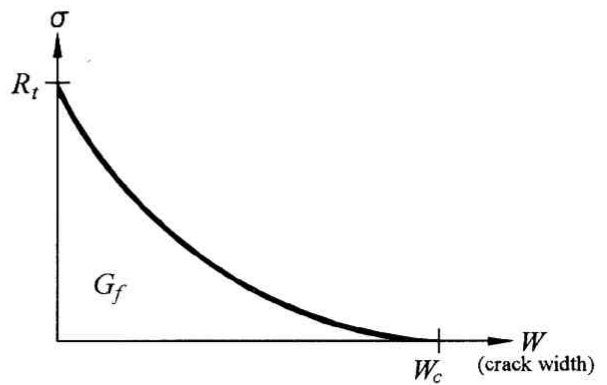
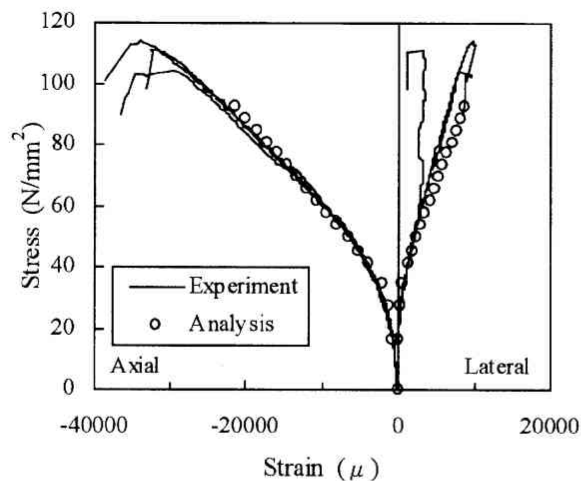


Fig. 5 Tension softening curve of concrete

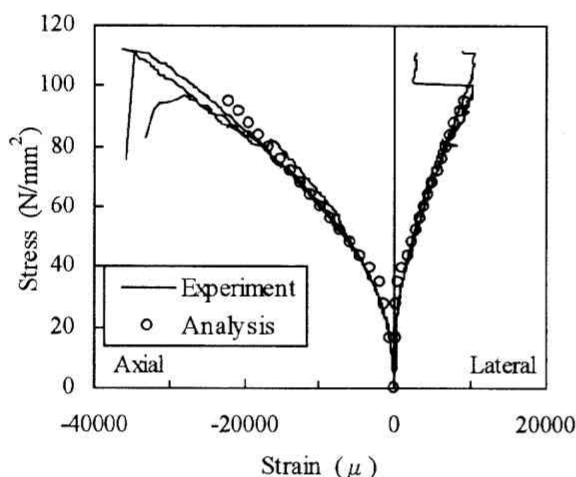
いう意味において、本解析プログラムを用いることにした。

4. 2 解析試験体および解析結果

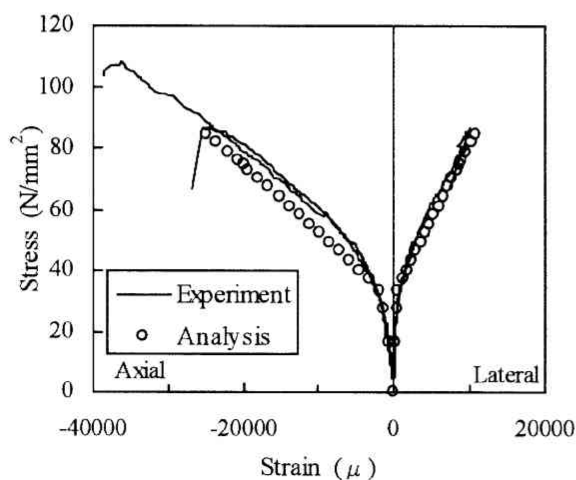
解析試験体および解析結果の一覧を Table 4 に示す。試験体名の数値は充填コンクリートの圧縮強度、FRP 管の周方向弾性係数、FRP 管の周方向引張強度の順で示してある。解析試験体の



(c) Specimen CFE-1



(d) Specimen CFE-2



(e) Specimen CFE-3

Fig. 6 Comparison with experimental results

FRP 管の寸法は内径 150mm, 管厚 2mm, 管長 300mm の一定とし、充填コンクリートの圧縮強度, FRP 管の周方向弾性係数, FRP 管の周方向引張強度をパラメータとして解析を行った。充填コンクリートの圧縮強度は 4 水準, FRP 管の周方向弾性係数は 3 水準, FRP 管の周方向引張強度は 4 水準とした。Table 3 に示した試験結果同様に、拘束応力度および充填コンクリートの圧縮強度が高いほど、コンクリート充填 FRP 管の軸圧縮強度は高くなる傾向にある。

4. 3 拘束効果

Fig. 7 に軸圧縮強度比と充填コンクリートの圧縮強度の関係を示す。図中の凡例は FRP 管の周方向引張強度を示す。充填コンクリートの圧縮強度が高いほど拘束効果は小さくなり、FRP 管による拘束効果が十分に発揮されていないと言える。なお、 $E_h=60, 90\text{kN/mm}^2$ の場合も同様の傾向が見られた。

4. 4 塑性域勾配

Fig. 2 および Fig. 6 から分かるように、コンクリート充填 FRP 管の軸応力度-ひずみ関係はバイリニア型の挙動を示し、塑性域の勾配はほぼ線形である。そこで、解析結果から塑性域の勾配にどのパラメータが影響しているかを調べた結果、充填コンクリートの圧縮強度および弾性係数, FRP 管の周方向弾性係数によって異なったものとなることが分かった。そこで、解析結果をもとに、コンクリート充填 FRP 管の応力度-ひずみ関係における塑性域勾配を次式のように提案することとした。

$$E_{2A} = 4729.36(f'_{co})^2 \frac{E_h t}{E_c d} + 291.62 \text{ [N/mm}^2 \text{]} \quad (3)$$

$$E_{2L} = 10682.06(f'_{co})^2 \frac{E_h t}{E_c d} + 527.55 \text{ [N/mm}^2 \text{]} \quad (4)$$

ここに、 E_{2A} : 軸方向の塑性域勾配, E_{2L} : 周方向の塑性域勾配, f'_{co} : 充填コンクリートの圧縮強度, E_c : 充填コンクリートの弾性係数, E_h : FRP 管の周方向弾性係数, t : FRP 管の厚さ, d : FRP 管の内径である。

試験結果および解析結果と各モデルとの関係を Fig. 8 に示す。

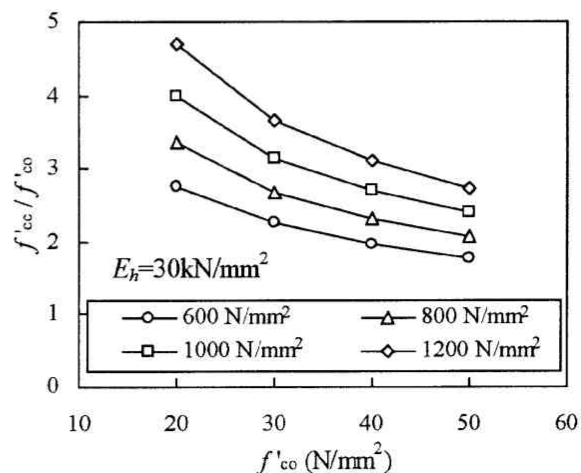


Fig. 7 Relationship between axial stress ratio and compressive strength

Table 4 Analytical models and results

Specimens	f'_{co} (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	E_h (kN/mm ²)	f_h (N/mm ²)	f_l (N/mm ²)	P_u (kN)	f'_{cc} (N/mm ²)	f_l/f'_{co}	f'_{cc}/f'_{co}	E_{2A} (N/mm ²)	E_{2L} (N/mm ²)
CF20-30-600	20	23	30	600	16.0	975	55.2	0.80	2.76	900	1800
CF20-30-800				800	21.3	1184	67.0	1.07	3.35	900	1800
CF20-30-1000				1000	26.7	1406	79.6	1.34	3.98	900	1800
CF20-30-1200				1200	32.0	1657	93.8	1.60	4.69	900	1800
CF20-60-600			60	600	16.0	985	55.7	0.80	2.79	1500	3300
CF20-60-800				800	21.3	1173	66.4	1.07	3.32	1500	3300
CF20-60-1000				1000	26.7	1373	77.7	1.34	3.89	1500	3300
CF20-60-1200				1200	32.0	1529	86.5	1.60	4.33	1500	3300
CF20-90-600			90	600	16.0	971	54.9	0.80	2.75	2100	4700
CF20-90-800				800	21.3	1124	63.6	1.07	3.18	2100	4700
CF20-90-1000				1000	26.7	1338	75.7	1.34	3.78	2100	4700
CF20-90-1200				1200	32.0	1492	84.4	1.60	4.22	2100	4700
CF30-30-600	30	28	30	600	16.0	1198	67.8	0.53	2.26	900	2000
CF30-30-800				800	21.3	1426	80.7	0.71	2.69	900	2000
CF30-30-1000				1000	26.7	1673	94.7	0.89	3.16	900	2000
CF30-30-1200				1200	32.0	1938	109.6	1.07	3.65	900	2000
CF30-60-600			60	600	16.0	1227	69.4	0.53	2.31	1600	3500
CF30-60-800				800	21.3	1393	78.8	0.71	2.63	1600	3500
CF30-60-1000				1000	26.7	1604	90.8	0.89	3.03	1600	3500
CF30-60-1200				1200	32.0	1820	103.0	1.07	3.43	1600	3500
CF30-90-600			90	600	16.0	1276	72.2	0.53	2.41	2300	5000
CF30-90-800				800	21.3	1447	81.9	0.71	2.73	2300	5000
CF30-90-1000				1000	26.7	1676	94.9	0.89	3.16	2300	5000
CF30-90-1200				1200	32.0	1803	102.0	1.07	3.40	2300	5000
CF40-30-600	40	31	30	600	16.0	1389	78.6	0.40	1.96	1000	2200
CF40-30-800				800	21.3	1642	92.9	0.53	2.32	1000	2200
CF40-30-1000				1000	26.7	1905	107.8	0.67	2.70	1000	2200
CF40-30-1200				1200	32.0	2192	124.0	0.80	3.10	1000	2200
CF40-60-600			60	600	16.0	1448	82.0	0.40	2.05	1700	3700
CF40-60-800				800	21.3	1626	92.0	0.53	2.30	1700	3700
CF40-60-1000				1000	26.7	1852	104.8	0.67	2.62	1700	3700
CF40-60-1200				1200	32.0	2084	117.9	0.80	2.95	1700	3700
CF40-90-600			90	600	16.0	1445	81.8	0.40	2.04	2400	5400
CF40-90-800				800	21.3	1753	99.2	0.53	2.48	2400	5400
CF40-90-1000				1000	26.7	1876	106.2	0.67	2.65	2400	5400
CF40-90-1200				1200	32.0	2062	116.7	0.80	2.92	2400	5400
CF50-30-600	50	33	30	600	16.0	1578	89.3	0.32	1.79	1100	2300
CF50-30-800				800	21.3	1828	103.5	0.43	2.07	1100	2300
CF50-30-1000				1000	26.7	2120	120.0	0.53	2.40	1100	2300
CF50-30-1200				1200	32.0	2424	137.2	0.64	2.74	1100	2300
CF50-60-600			60	600	16.0	1647	93.2	0.32	1.86	1900	4000
CF50-60-800				800	21.3	1893	107.1	0.43	2.14	1900	4000
CF50-60-1000				1000	26.7	2084	117.9	0.53	2.36	1900	4000
CF50-60-1200				1200	32.0	2329	131.8	0.64	2.64	1900	4000
CF50-90-600			90	600	16.0	1660	93.9	0.32	1.88	2600	5700
CF50-90-800				800	21.3	1855	105.0	0.43	2.10	2600	5700
CF50-90-1000				1000	26.7	2116	119.7	0.53	2.39	2600	5700
CF50-90-1200				1200	32.0	2313	130.9	0.64	2.62	2600	5700

軸方向の塑性域勾配は精度良く算定できており、周方向の塑性域勾配にはばらつきが見られるが、概ね推定できると言える。

5. 軸圧縮強度モデルの提案および妥当性

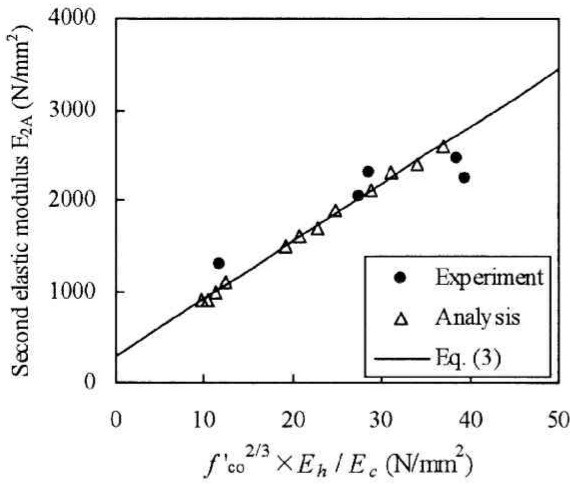
5. 1 軸圧縮強度モデル

Richart et al.は円周方向と半径方向の二つの主応力が等しい三軸応力状態にあるコンクリートの降伏条件式を式(5)のように表

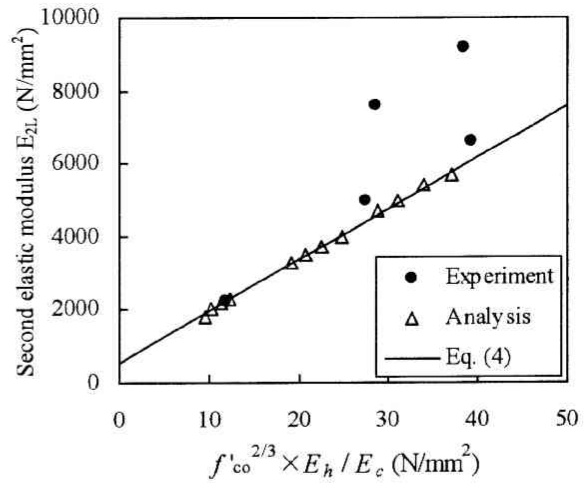
している¹²⁾。また、Richart et al.は密に配筋した円形スパイラル筋で拘束されたコンクリートの降伏条件に対しても、式(5)を用いることができることを明らかにしており¹³⁾、コンクリート充填鋼管にも採用されている¹⁾。

$${}_c\sigma_{cB} = {}_c\sigma_B + k \cdot \sigma_r \quad (5)$$

ここに、 σ_r : 側圧、 ${}_c\sigma_{cB}$: 側圧 σ_r を受けるコンクリートの軸方向強度、 ${}_c\sigma_B$: コンクリートの軸方向強度、 k : 拘束係数(=4.1)



(a) Second elastic modulus in the axial direction



(b) Second elastic modulus in the lateral direction

Fig. 8 Second elastic modulus in the both axial and lateral directions

さらに、式(5)はFardis et al.によってコンクリート充填FRP管の軸圧縮強度モデルに適用が可能とされており¹⁴⁾、コンクリート充填FRP管の場合は式(6)で表される。

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (6)$$

ここに、 f'_{cc} ：コンクリート充填FRPの軸圧縮強度、 f'_{co} ：充填コンクリートの圧縮強度、 f_l ：FRP管の拘束応力度、 k_1 ：拘束係数である。

既往の研究において、提案されているコンクリート充填FRP管の軸圧縮強度モデルを以下に紹介する。

Karbhari and Gao's I モデル⁵⁾

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.0 + 2.1 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.13} \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (7)$$

Samaan et al. モデル²⁾

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.0 + 6.0 f_l^{-0.3} \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (8)$$

Saafi et al. モデル⁶⁾

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.0 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.16} \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (9)$$

Purba and Mufti モデル³⁾

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (10)$$

Lam and Teng モデル⁴⁾

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.0 + 2.0 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (11)$$

5. 2 軸圧縮強度モデルの提案

解析結果と近似曲線の関係を Fig. 9 に示す。解析結果からコンクリート充填FRP管の軸圧縮強度モデルは、次式のような軸圧縮強度比と拘束応力度比との関係で表すのが適切であると判断した。解析結果の軸圧縮強度比 f'_{cc}/f'_{co} と拘束応力度比 f_l/f'_{co} の関係から、次式に示す曲線式を用いて軸圧縮強度式を提案することにした。

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.0 + a \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^b \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (12)$$

この関係は Karbhari and Gao's I モデル、Saafi モデルと同様の表現である。そこで、本試験結果と既往の試験結果を用いて試験値と計算値との比の平均値が 1.000、変動係数(COV)が最小となるように定数を決定し、次式を提案することとした。

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1.0 + 2.311 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{-0.168} \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (13)$$

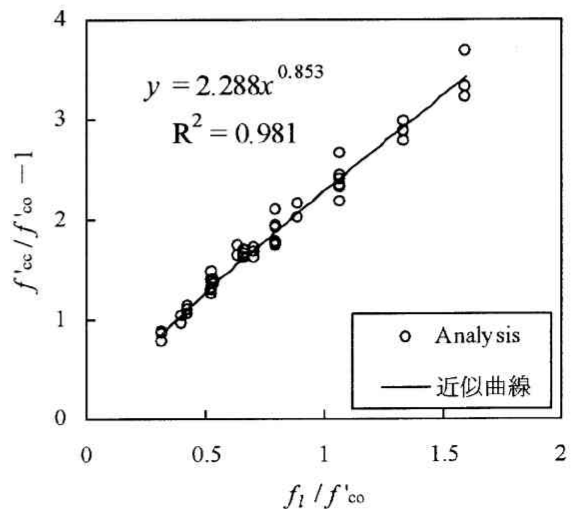


Fig. 9 Analytical results of axial compressive strength

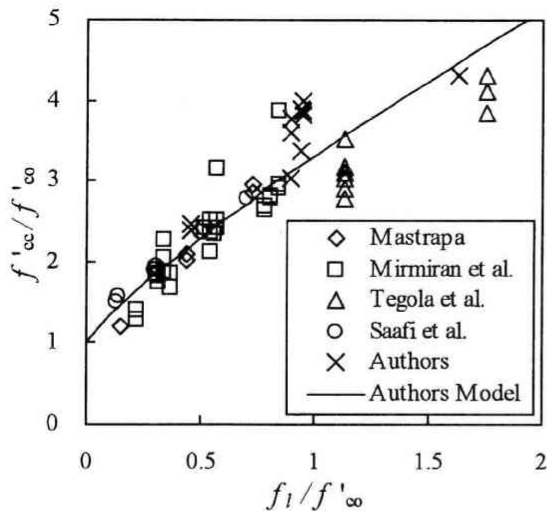


Fig. 10 Comparison of axial compressive strength model

Table 5 Accuracy of each axial compressive strength model

モデル	Exp. / Cal.	COV (%)
Karbhari and Gao's I	1.067	12.86
Samaan et al.	1.009	13.01
Saafi et al.	1.031	12.78
Purba and Mufti	0.891	14.84
Lam and Teng	1.126	13.34
Authors	1.000	12.73

5. 3 軸圧縮強度モデルの妥当性

リング形引張試験片を用いて FRP 管の引張強度を求めた既往の試験結果および本試験結果、解析結果と本提案モデルとの関係を Fig. 10 に示す。試験結果においては、同じ拘束応力度比を有する試験体においてもばらつきを有するものが見られる。また、文献 4) にも述べられているように、拘束応力度比が 1.0 付近までは軸圧縮強度比とほぼ線形関係にあるが、1.0 を越える拘束応力度比が高い範囲では軸圧縮強度比が鈍化する傾向にある。

既往の試験結果も含めた各モデルの算定精度を Table 5 に示す。既提案モデルに対して、本提案モデルは既往の試験結果および本試験結果の試験値と算定値との比の平均値が 1.000、変動係数が 12.73% と最も良く、本提案モデルの妥当性を示せたと言える。

6. まとめ

本研究は、フィラメント・ワインディング (FW) 法により成形された FRP 管内に、コンクリートを充填したコンクリート充填 FRP 管の単軸圧縮試験を行い、FRP 管の拘束効果、軸圧縮強度、軸圧縮挙動といった軸圧縮特性について実験をもとに考察した。また、充填コンクリートの圧縮強度、FRP 管の周方向弾性係数および周方向引張強度をパラメータとした 2 次元非線形有限要素解析を行い、コンクリート充填 FRP 管の軸圧縮強度モ

デルを検討し、既往の研究により提案された軸圧縮強度モデルと比較・検討した結果についてまとめると以下の通りである。

- (1) コンクリート充填 FRP 管の応力度-ひずみ関係は、バイリニア型の挙動を示し、充填コンクリートの圧縮強度まではほぼ同様の挙動であり、塑性域に入ってから挙動は充填コンクリートの圧縮強度および弾性係数、FRP 管の周方向弾性係数によって異なったものとなる。
- (2) コンクリート充填 FRP 管の破壊時の周方向ひずみはリング形引張試験によって得られた破断時のひずみとほぼ一致すると言える。
- (3) 軸圧縮強度比と拘束応力度比との関係は拘束応力度比が 1.0 付近までは軸圧縮強度比とほぼ線形関係にあるが、1.0 を越える拘束応力度比が高い範囲では軸圧縮強度比が鈍化する傾向にある。ただし、このような傾向はリング形引張試験により得られる FRP 管の周方向引張強度を用いて拘束応力度を求めた場合について言えるようである。
- (4) これまでに提案された軸圧縮強度モデルと本研究で提案した軸圧縮強度モデルを比較した結果、本提案モデルは試験値を精度良く算定することができた。

謝辞

本研究の遂行において、(株)栗本鐵工所の野村浩史氏、津田久嗣氏、栗本化成工業株式の宮崎 徹氏、野久保裕行氏には試験体の製作、技術資料の提供を賜りました。ここに、感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 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。
- 2) Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M.: Model of concrete confined by fiber composite, *J. Struct. Eng., ASCE*, Vol.124, No.9, pp.1025-1031, 1998.
- 3) Purba, B. K. and Mufti, A. A.: Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets, *Can. J. Civ. Eng.*, Vol.26, pp.590-596, 1999.
- 4) Lam, L. and Teng, J. G.: Strength Models for Fiber-Reinforced Plastic-Confined Concrete, *J. Struct. Eng., ASCE*, Vol.128, No.5, pp.612-623, 2002.
- 5) Karbhari, V. M. and Gao, Y.: Composite jacketed concrete under uniaxial compression -verification of simple design equations, *J. Mater. Civ. Eng.* Vol.9, No.4, pp.185-193, 1997.
- 6) Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z.: Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes, *ACI Mater. J.*, Vol.96, No.4, pp.500-509, 1999.
- 7) 宮内克之・井上正一・黒田 保・小林 朗：連続繊維シー

- ト補強の剛性がコンクリート柱の横拘束効果に及ぼす影響,
コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.865-870, 2001.
- 8) Cervenka Consulting: Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures ATENA PLOGRAM DOCUMENT, 2002.
 - 9) Mastrapa, J. C.: The effect of construction bond on confinement with FRP composites, MSc thesis, Univ. of Central Florida, Orlando, Fla., 1997.
 - 10) Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., and El Echary, H.: Effect of column parameters on FRP-confined concrete, J. Compos. Constr., Vol.2, No.4, pp.175-185, 1998.
 - 11) Tegola, L. A. and Manni, D.: Experimental investigation on concrete confined by fiber reinforced polymer and comparison with theoretical model, Proc., 4th Int. Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforced for Reinforced Concrete Structures, SP-188, ACI, Farmington, Mich., pp.243-254, 1999.
 - 12) Richart, F. E., Brandzaeg, A. and Brown, R. L.: A study of failure of concrete under combined compressive stresses, University of Illinois Engineering Experimental Station Bulletin No.185, 1928.
 - 13) Richart, F. E., Brandzaeg, A., and Brown, R. L.: The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression, University of Illinois Engineering Experimental Station Bulletin No.185, 1929.
 - 14) Fardis, M. N. and Khalili, H.: FRP-encased Concrete as a Structural material, Mag. Concrete Res., 34(122), pp.191-202, 1982.