

論文 三次元拘束を受けるコンクリートの力学的特性

角 広幸*1・米倉亜州夫*2・田澤榮一*3・周 平*4

要旨：CFRP で三軸方向に拘束されたコンクリートの圧縮性状を把握するために、拘束率を一定としてコンクリートの強度を変化させて検討を行った。その結果、アンボンド型の CFRP パイプで拘束した場合、無拘束の場合と比較して圧縮耐力で約 3~6 倍、変形能力は約 7~10 倍も大きくなり通常のコンクリートの性能を大幅に向上することが出来る。また、コンクリートの一軸圧縮強度を越えてからの拘束コンクリートの耐力増分は圧縮強度に関わらずほぼ一定であった。

キーワード：拘束、アンボンド型、EB 型、付着応力、座屈、軸応力、半径方向応力

1. はじめに

これまでに筆者らは、エポキシ樹脂で接着した炭素繊維製パイプ内に、モルタルを打設し、一軸方向に一軸圧縮強度以上のプレストレスを導入することによって生じるモルタルの半径方向の変形を拘束し、半径方向にも圧縮応力が導入されるようにした梁の曲げ特性についての検討を行ってきた。その結果、靱性が著しく向上し、曲げ耐力も約 1.4 倍まで向上することが明らかとなった[1]。この現象を解明していくには、コンクリートが一軸圧縮強度以上の軸応力を受けたときのコンクリートの応力-ひずみ関係あるいは、軸応力-半径方向応力を把握しておく必要がある。本研究では、CFRP パイプで拘束したコンクリートの圧縮性状を把握することを目的とし、三次元的な圧縮プレストレスを積極的に導入することにより靱性、耐力を向上させる構造部材の開発のための基礎実験を行なった。

2. 実験概要

2.1. 使用材料

(1)炭素繊維製パイプおよび鋼管

炭素繊維製パイプは、外径(D)15.7cm、厚さ(t)3.5mm、外径と厚さの比

(D/t)44.9、長さ 60cm で 2 方向に積層された FRP シートをパイプ状に巻き、エポキシ樹脂で固めたものである。表-2 に示しているように、パイプの軸方向と繊維方向のなす角度が 10° および 90° の 2 方向で内側から 10° →90° の順に交互に計 4 層巻いてある。比較

用に用いた鋼管は、外径 16.5cm、厚さ 6.0mm、外径と厚さの比 27.5、長さ 60cm である。メーカーより入手した CFRP シートの材料特性を表-1 に示す。また本研究に用いた CFRP パイプの圧縮試

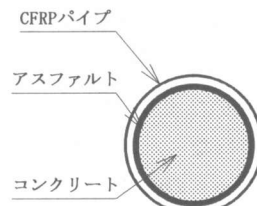


図 1 供試体断面図

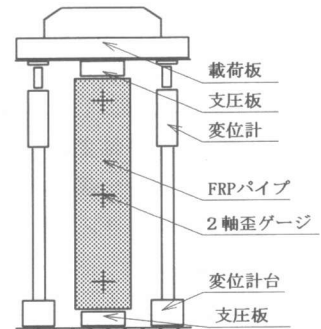


図 2 載荷方法

- *1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻(正会員)
- *2 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博(正会員)
- *3 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博(正会員)
- *4 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻, 工修(正会員)

験結果を表-2 に鋼管の引張試験結果を表-3 に示す。

(2) 配合および養生

コンクリートは、セメントに早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材最大寸法を 20mm とし、配合はコンクリートの圧縮強度の影響を検討するために表-4 に示すように 3 種類とした。

コンクリート強度試験用供試体(φ 10×20cm, φ 15×60cm)は、材齢 1 日で脱型し、20℃、95±5%RH の環境にて養生し、コンクリートを拘束した供試体も同じ環境にて養生した。供試体のキャッピングは、端面が直角なパイプを専用の枠でしっかり固定し、コンクリート充填後セメントペーストで行った。

2.2. 供試体, 荷重方法および測定方法

圧縮耐荷力試験に用いる供試体は、CFRP パイプで拘束したコンクリート充填管柱で、次に示す 2 種類(アンボンド型, EB 型)の合成形式である [2], [3]。アンボンド型は、CFRP パイプの内面にアスファルトを膜状に塗布した後、コンクリートを充填したもので、アスファルトにより CFRP パイプ-モルタル間の付着力を意図的に切ったものである(図 1 参照)。EB 型は、CFRP パイプが鋼管と比較してコンクリートとの付着が悪いと考えられたのでアスファルトを塗布しないで付着による応力伝達機構を残してあるものである。また、比較のためにアンボンド型のコンクリート充填鋼管柱についても検討した。本研究に用いた供試体の一覧を表-4 に示す。

CFRP パイプで拘束されたコンクリートの荷重は、図 2 に示すように上端、下端ともに十分剛な支圧板を介してコンクリート断面のみを圧縮した。荷重速度は、毎秒 2~3kgf/cm² とした。

測定は、荷重、FRP(または鋼管)のひずみ、コンクリート内部の柱中心部の軸方向ひずみと半径方向ひずみおよび軸変形について行なった。CFRP パイプのひずみは、2 軸ひずみゲージを貼付して測定した。柱中央部のコンクリートの軸方向ひずみおよび半径方向ひずみは、十字の埋込ゲージにより測定し、コンクリート全体の軸変形は変位計により測定した。CFRP パイプの円周方向

表-1 CFRP シートの材料特性

繊維方向	引張特性				圧縮特性			
	弾性係数 (TONF/mm ²)	強度 (kgf/mm ²)	伸度 (%)	ポアソン比	弾性係数 (TONF/mm ²)	強度 (kgf/mm ²)	伸度 (%)	ポアソン比
0°	14.1	195	1.33	0.30	13.1	8.3	0.97	0.02
90°	0.93	8.3	0.97	0.02	1.08	21.2	2.9	—
±45°	1.68	22.0	>6	0.77	—	—	—	—

表-2 CFRP パイプの圧縮強度試験結果

繊維の方向及び積層方法	厚み (mm)	破壊荷重 (t)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (TONF/mm ²)	ポアソン比
10°/90° × 4 層	3.5	47.1	2797	6.63	0.06

表-3 鋼管の引張試験結果

厚み (mm)	引張強度 (kgf/mm ²)	降伏強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (TONF/mm ²)	ポアソン比
6	43.2	25.2	20.3	0.27

表-4 配合および供試体一覧

名称	合成形式	拘束パイプ	D/t	破壊荷重 (t)	W/C (%)	s/a (%)	コンクリート強度							
							W	C	S	G	混和剤	スラブ ^o (cm)	φ 10×20cm (kgf/cm ²)	φ 15×60cm (kgf/cm ²)
F65-U	アンボンド型	CFRP	44.9	240	65	45	185	284	786	1039	0	5	221	238
F65-EB	EB 型	CFRP	44.9	175										
S65-U	アンボンド型	鋼管	27.5	201										
F45-U	アンボンド型	CFRP	44.9	308	45	42	172	381	748	1030	0.25	20	442	459
F45-EB	EB 型	CFRP	44.9	226										
S45-U	アンボンド型	鋼管	27.5	227										
F30-U	アンボンド型	CFRP	44.9	321	30	40	158	533	641	1011	0.5	21	741	668
F30-EB	EB 型	CFRP	44.9	299										
S30-U	アンボンド型	鋼管	27.5	328										

力($\sigma_{f\theta}$)、軸方向応力(σ_{fz})は、CFRP パイプを線型弾性体とみなし 2 軸ゲージの円周方向ひずみ($\varepsilon_{f\theta}$)、軸方向ひずみ(ε_{fz})から「弾性理論」を用いて計算をした。鋼管については弾性域において、「弾性理論」を用い、塑性域では、「ひずみ増分理論」を用いて計算した。

3. 実験結果および考察

3.1. 圧縮耐力および変形能力

図 3 に、W/C=65%における各供試体の荷重と柱中央部のコンクリートの軸ひずみの関係を示す。今後、解析はことわりのない限り供試体の柱中央部において進めていく。図 3 には、無拘束コンクリート($\phi 15 \times 60\text{cm}$)の荷重-軸ひずみ関係も含まれている。コンクリートを三次元的に拘束することにより耐力および靱性が非常に向上するのは一目瞭然である。圧縮耐力および変形能力はアンボンド型と EB 型ではかなり異なる。アンボンド型の F65-U は、無拘束のコンクリートと比較して耐力面で約 6 倍、変形能力に至っては約 10 倍も向上する。また D/t が、鋼管パイプの S65-U の場合の約 1.6 倍とかなり大きいにもかかわらず、柱部材としての変形能力では劣るが CFRP の高い強度特性により耐力面では上回る。

3.2. 耐力増分と圧縮強度の関係

各供試体の破壊荷重から無拘束コンクリートの破壊荷重を差し引いたものを耐力増分とし、圧縮強度を変化させた各供試体について耐力増分を求め、求めた耐力増分と一軸圧縮強度の関係を図 4 に示す。アンボンド型の CFRP パイプで拘束した供試体は、圧縮強度に関わらず耐力増分はほぼ一定となっている。このことから一軸圧縮強度を越えてからアンボンド型の FRP パイプにより拘束できるエネルギーが、圧縮強度に関わらずほぼ同じであると考えられる。EB 型の CFRP パイプやアンボンド型の鋼管の場合、耐力増分は一軸圧縮強度が大きくなるにつれて増加する傾向にある。これは、コンクリートとパイプとの付着が影響しているものと考えられ 3.4 節で詳細に述べる。

3.3. 破壊状況

アンボンド型の CFRP パイプで拘束した場合、何の前兆もなく急激に破壊が生じる。円周方向の繊維が破断して破壊する場合には、コンクリートに蓄えられたエネルギーが瞬時に発散されるので極めて脆性的である。F65-U および F65-EB における破壊後のパイプ内のコンクリートの状況を

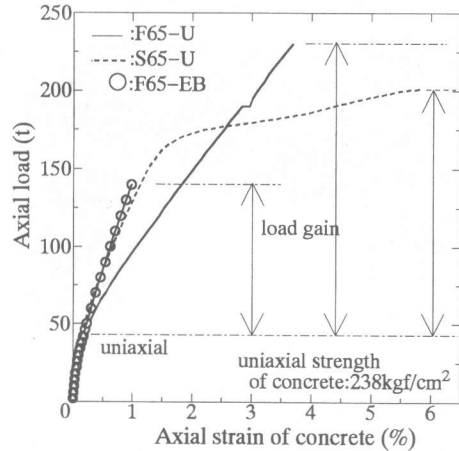


図 3 荷重とコンクリートの軸ひずみ関係(W/C=65%)

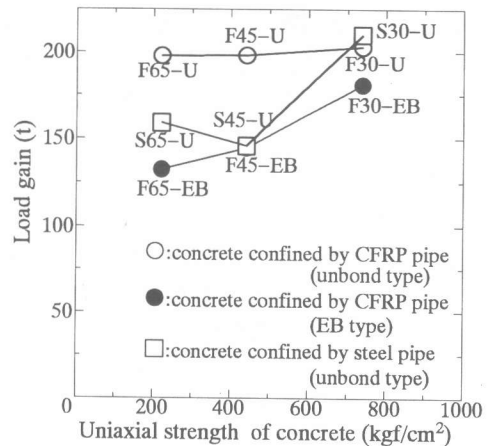


図 4 耐力増分とコンクリートの圧縮強度の関係

写真1、写真2に示す。F65-Uでは、内部のコンクリートは、全体にわたってばらばらで健全な部分はほとんど見られない。この状況は、アンボンド型CFRPパイプで拘束した供試体全てにおいて見られた。F65-EBでは、柱中心部のコンクリートに目で確認できるぐらいのひびわれが軸方向および円周方向に生じているが他の部分はほとんど健全なままである。

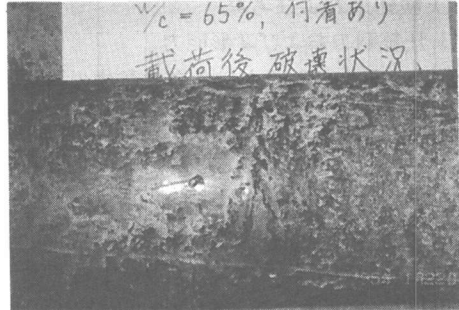
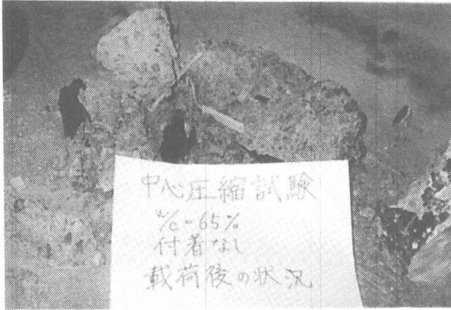


写真1 破壊後の内部のコンクリートの状況 (F65-U) 写真2 破壊後の内部のコンクリートの状況 (F65-EB)

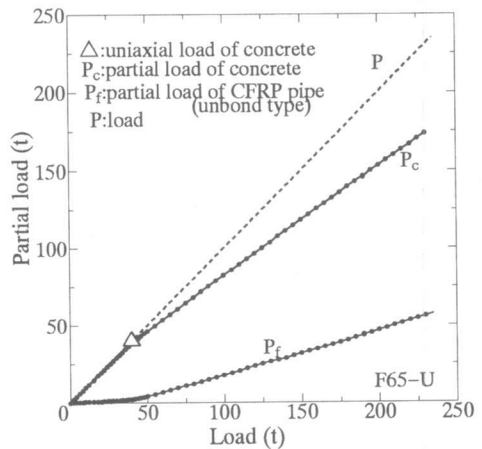
3.4. コンクリートと拘束パイプの付着応力

図3から明らかなようにCFRPパイプで拘束した場合、アンボンド型とEB型とでは一軸圧縮強度を越えてからコンクリートの軸ひずみの増加率は全く異なってくる。そこで一軸強度を越えてから増加してくるCFRPパイプの軸ひずみ(ϵ_f)に着目し、コンクリートとパイプの付着応力がパイプの軸圧縮応力として伝わると考えた。付着によるCFRPパイプの分担荷重は次式(1)で表され、コンクリート分担荷重は次式(2)で表せる。

$$P_f = \sigma_{fz} A_f \quad (1)$$

$$P_c = P - P_f \quad (2)$$

- ここに、 P_c : コンクリートの分担荷重
- σ_{fz} : CFRPパイプの軸方向応力
- A_f : CFRPパイプの断面積
- P_c : コンクリートの分担荷重
- P : 載荷荷重



F65-UおよびF65-EBの荷重分担関係を図5および図6に示す。図から明らかなようにアンボンド型、EB型ともに無拘束コンクリートの破壊荷重を過ぎたあたりからFRPの分担荷重が増加し出す。その増加の仕方がEB型の方が大きく

図5 コンクリートとCFRPパイプの荷重分担 (F65-U)

50tを過ぎたところで破壊に至っており、表-2に示したCFRPパイプのみの圧縮試験結果と非常に近い値となっていることからEB型はCFRPパイプの座屈により破壊したと考えられる。図7および図8に高強度コンクリートのF30-UとF30-EBの荷重分担関係を示す。図5と図7を比較するとコンクリートの一軸圧縮強度が大きくなるとCFRPパイプの分担する荷重が小さくなる傾向がわかる。図6と比較して図8のEB型では一軸圧縮強度が違っても最終的なパイプの分担荷重は、あ

まり変わらずパイプの座屈により破壊してしまう。しかし、一軸強度を越えてからパイプの分担する荷重の割合が、図6のパイプの分担荷重と比較して若干小さくなり座屈しにくくなる。図4においてEB型の荷重増分が圧縮強度が増加するにつれて上昇しているのはこのためであると考えられる。

3.5. 拘束されたコンクリートの挙動

W/C=65%におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線を図9に示す。今後、コンクリートの応力(σ_c)は、コンクリートの分担荷重(P_c)をコンクリートの断面積(A_c)で除したものとする。図9よりF65-Uは、内部のコンクリートが非常に高い延性挙動を示していることが分かる。またCFRPで拘束したコンクリートは、アンボンド型、EB型に関わらず同じ応力-ひずみ経路をたどっている。この現象は、W/Cを変化させた全ての供試体について見られたので図10にW/C=30%における各供試体のコンクリートの応力-ひずみ曲線を示しておく。また、鋼管で拘束した場合と比較して一軸強度を越えてからの同一応力時におけるひずみが大きくなる。これは、CFRPパイプの弾性係数が鋼管の約1/3と小さいことが原因であると考えられる。このことから拘束体の弾性係数は、構成則を提案する際に考慮すべき要素の一つであると思われる。

図11にアンボンド型のCFRPパイプで拘束したコンクリートの軸方向応力(σ_c)と半径方向応力(σ_r)の関係を示す。コンクリートの一軸圧縮強度をある程度過ぎてからの軸方向応力と半径方向応力の関係は、コンクリートの強度に関係なく余り変わらない。そこで、砂をCFRPパイプに詰めて圧縮試験を行なったものの軸応力と半径方向応力との関係も図11に示してある。圧縮試験に用いた砂は、7号、8号珪砂を6:4の比率で混合したもので実積率60%であった。図よりコンクリートの一軸圧縮強度をある程度越えてからの軸応力と半径方向応力

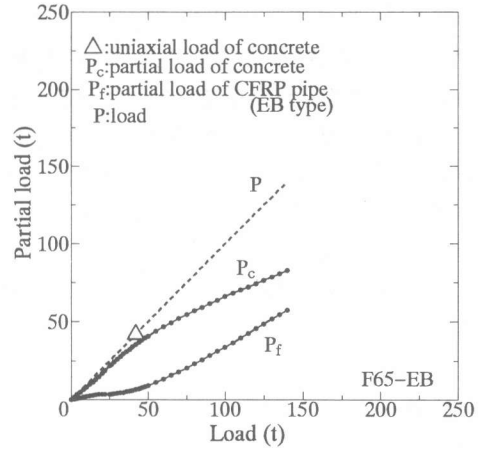


図6 コンクリートとCFRP π イ π の荷重分担(F65-EB)

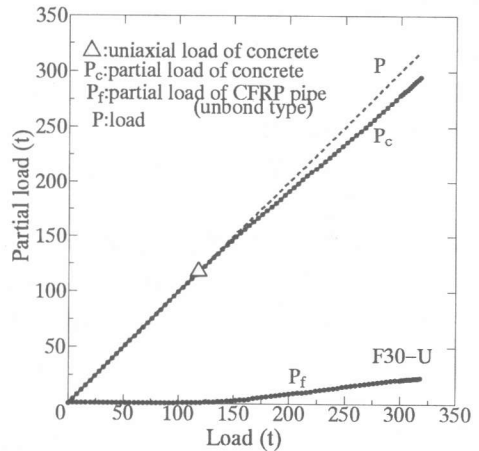


図7 コンクリートとCFRP π イ π の荷重分担(F30-U)

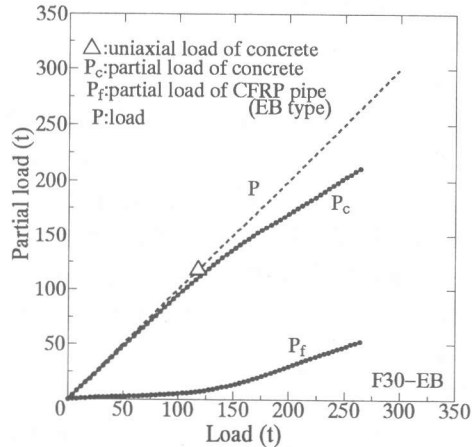


図8 コンクリートとCFRP π イ π の荷重分担(F30-EB)

との関係は、砂のそれと類似している。そこで CFRP パイプで拘束した場合、アンボンド型、EB 型の応力-ひずみ経路がほぼ一致していることより、F65-EB が破壊したときのコンクリートの応力と同一応力における F65-U のコンクリートの状況は、写真 2 に示したひび割れ状況とほぼ同様であると推定される。図 11 において、その状況は F65-U の軸方向応力が 460kgf/cm^2 付近に当たるものと考えられる。

4. 結論

(1) アンボンド型 CFRP パイプ柱の圧縮耐力は、無拘束の場合の約 3~6 倍となり、変形能力は約 7~10 倍となった。コンクリートの強度が高いほどそれらの倍率は小さくなる。

(2) アンボンド型 CFRP パイプ柱の場合、コンクリートの一軸圧縮耐力を越えてからの耐力増分は、コンクリートの強度に関わらずほぼ一定である。

(3) 一軸圧縮強度をある程度越えてからの拘束されたコンクリートの軸方向応力と半径方向応力の関係は、コンクリートの強度に関わらず類似しており、砂のそれとも類似している。

【謝辞】三菱レイヨンより CFRP パイプの提供を受け、実験に際しては、学生の森本英樹君、松林博文君の協力を得た。ここに記して感謝申し上げます。

【参考文献】

[1] 米倉 亜州 夫他：三軸方向に圧縮拘束を受ける PC 梁の曲げ特性，セメント・コンクリート論文集，No. 48，pp. 618-pp. 623，1994

[2] 佐藤 孝典 他：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の中心圧縮性状とその定式化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 10, No. 3，pp. 355-pp. 360，1988

[3] 藤井 堅 他：ボンド型およびアンボンド型モルタル充填鋼管長柱の座屈強度特性，鋼構造論文集，Vol. 1, No. 2，pp. 47-pp. 56，1994

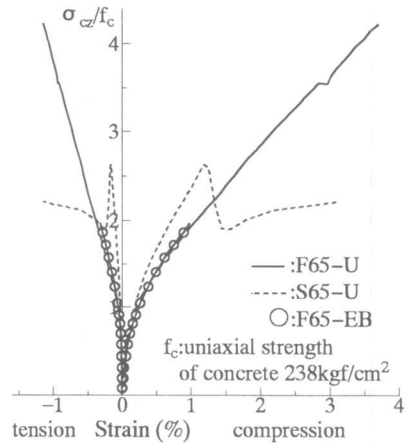


図 9 コンクリートの応力-ひずみ曲線 (W/C=65%)

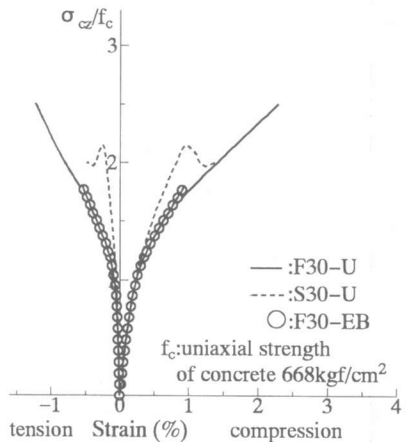


図 10 コンクリートの応力-ひずみ曲線 (W/C=30%)

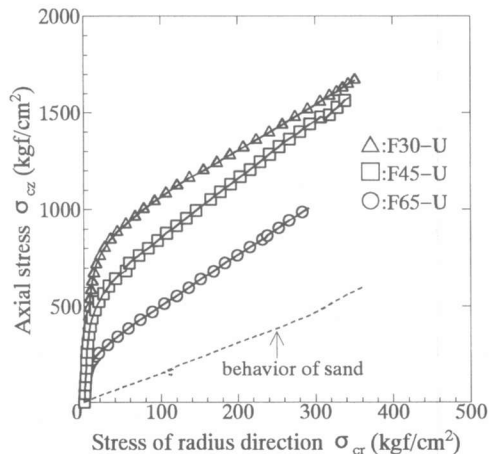


図 11 コンクリートの軸方向応力-半径方向応力関係