

論文 引張補強筋比の小さいCFRP コンクリートはりの曲げ挙動

伊藤 忠彦*1・椎名 貴快*2・松浦 誠司*2・小野寺 章夫*3

要旨: 連続繊維補強材の適用例の一つとして、シールド直接発進・到達工法における立坑開口部に用いる方法が開発されている。本研究は、引張補強筋比の極めて小さいCFRP コンクリートはり、従来の最小引張鉄筋比の鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷実験を行い、CFRPの最小補強筋量を検討したものである。実験の結果、はりの曲げひび割れ発生モーメントの2倍程度のCFRP補強筋を配置すれば、CFRPコンクリートはり鉄筋コンクリートはりと同等の変形性能を有することが明らかとなり、円形立坑のような変形量の少ない構造物のCFRP最小補強筋量は、既往の設計指針を低減できる可能性が示唆された。

キーワード: 最小補強筋比, CFRPコンクリートはり, 曲げ, 円形立坑

1. はじめに

連続繊維補強材の効果的な適用例の一つとして、シールド直接発進・到達工法における立坑開口部にCFRP連続繊維補強材(以下、CFRP)を用いる方法が開発されている^{1),2)}。大深度立坑は大きな土圧・水圧に抵抗する必要があるため、壁厚の大きい鉄筋コンクリート(以下、RC)構造としており、立坑の平面形状も円形(以下、円形立坑)とする場合が多い。一般に、円形立坑の壁面の鉄筋量は最小鉄筋比で決定される。円形立坑開口部の鉄筋を引張強度が同等となるCFRPで単純に代替すると、そのCFRP補強筋比は土木学会の設計・施工指針(案)³⁾よりも極めて小さくなる。本研究は、このような引張補強筋比の極めて小さいCFRPコンクリート部材の曲げ挙動を把握するため、はり供試体による曲げ載荷実験を行い、従来の最小鉄筋量を配置したRCはり供試体と比較検討するものである。

2. 曲げ載荷実験

2.1 CFRP補強筋

今回の実験に用いたCFRPは、厚さ5.5mm×幅20.5mmの長方形断面であり、熱可塑性樹脂

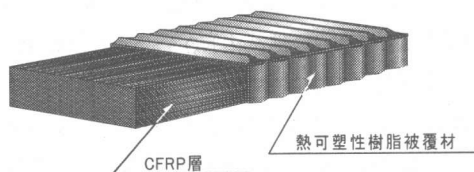


図-1 CFRP概略図

被覆FRP引抜成形法により得られるものである。本CFRPの特徴はCFRP層の周囲に樹脂被覆を設けている点であり、この樹脂被覆に凸凹のエンボス加工を施すことで、CFRPとコンクリートとの付着性能を高めている。図-1にCFRP補強筋の概略図を示す。エンボス加工部の山の高さは約1mm、間隔は約2.5mmである。

2.2 供試体

供試体の形状および配筋を図-2に、供試体の一覧を表-1にそれぞれ示す。供試体は幅35cm×高さ62.3cmの長方形断面を有するコンクリートはりであり、供試体は全部で7体を製作した。

供試体NO.1~NO.2は、引張鉄筋にD22を1

*1 西松建設(株)技術研究所土木技術研究課 材料・施工グループ副課長 博士(工学)(正会員)

*2 西松建設(株)技術研究所土木技術研究課 材料・施工グループ 工修(正会員)

*3 宇部日東化成(株)研究開発部 企画・調査グループ課長

表-1 供試体一覧および実験結果

NO.	補強筋比 (%)	コンクリート強度 (N/mm ²)	ひび割れ荷重 (kN)			降伏または破断荷重 (kN)			最終破壊形態
			実験値	計算値	実計	実験値	計算値	実計	
1	0.2	30	79	88	0.90	107	106	1.01	コンクリート圧壊
2		60	94	117	0.80	107	107	1.00	コンクリート圧壊
3	0.04	30	66	88	0.75	138	119	1.16	CFRP 破断
4		60	92	117	0.79	139	120	1.16	CFRP 破断
5	0.08	30	63	88	0.72	(238)	244	(0.98)	コンクリート圧壊
6		60	87	117	0.74	272	248	1.10	CFRP 破断
7	0.04	60	83	117	0.71	115	120	0.96	CFRP 破断

本配置したRCはりであり、土木学会コンクリート標準示方書の最小鉄筋比の規定を考慮して、引張鉄筋比を0.2%とした。供試体NO.3~NO.4は、引張補強筋にCFRPを1本配置したはりであり、RC供試体と同等の曲げ耐力とした供試体である。NO.3とNO.4の引張補強筋比は0.04%であり、RC供試体と比べて極めて少ない量となっている。供試体NO.5~NO.6はCFRPを2本配置した供試体であり、引張補強筋比は0.08%である。供試体NO.5とNO.6は、CFRP補強筋比の違いによる挙動の差をみるものである。供試体NO.7は、CFRPの表面被覆層にエンボス加工を施さない補強筋を1本配置した供試体である。これは、CFRPとコンクリートとの付着が強いとCFRPが破断しやすいという知見から、意図的にCFRPとコンクリートとの付着強度を低下させ、CFRPを破断しにくくなるように配慮したものである。ただし、はり端部50cm区間に相当する部分のCFRPにはエンボス加工を行い、十分な付着強度を確保するようにした。供試体NO.1~NO.7は表-1に示したように、設計基準強度30N/mm²(以下、普通強度)または60N/mm²(以下、高強度)のコンクリートを使用した。

既往の設計指針³⁾によると、曲げモーメントの影響が支配的な棒部材の最小軸方向引張補強筋比は、 $35 f_t / f_u$ (%) か 0.2% のいずれか大きい方以上とされている。ここに、 f_t はコンクリートの引張強度で f_u は引張補強筋の引張強度である。一般に、CFRP は $f_u = 2000 \text{ N/mm}^2$ 程度であるため、本指針によるCFRPの最小補強筋比は0.2%以上ということになる。

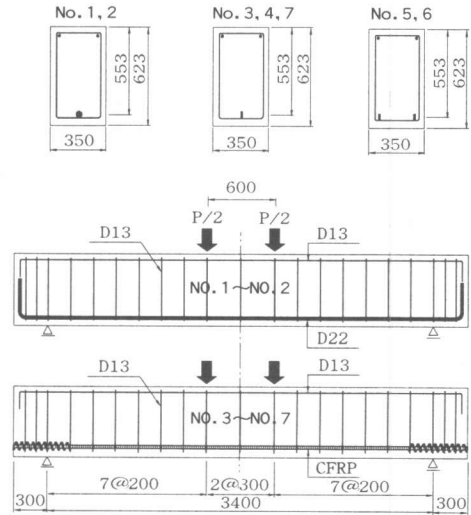


図-2 供試体

2.3 供試体製作および載荷方法

CFRPの端部定着部分は、フックなどの曲げ加工を行えないため、らせん鉄筋および横補強鉄筋などで十分な定着補強をした。せん断補強鉄筋は全ての供試体で共通であり、D13鉄筋を20cm間隔で配置した。実験供試体のせん断耐力は曲げ耐力の2倍以上となっている。普通強度コンクリートは粗骨材Gmax=20mmの早強セメントを使用し、高強度コンクリートは普通セメントを使用した。

載荷はスパン3.4m、純曲げ区間60cmの対称2点載荷とし、コンクリートの圧壊またはCFRPの破断となるまで単調に曲げ載荷を行った。実験は普通強度コンクリートの供試体を先行して行い、高強度コンクリートの供試体は強度発現を待って行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 材料試験結果

今回の実験に使用した材料の試験結果を表-2にまとめて示す。CFRP の試験結果は、樹脂被覆層の保護効果を利用して、引張試験器のチャックで直接引張を行った値である。

表-2 材料試験結果

種類		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
鉄筋 (SD345)	D13	384	532	190	19
	D22	389	581	181	18
CFRP	55×205	—	2190	140	1.5

CFRP の有効断面積：76.0mm²

3. 2 曲げ挙動

各供試体の曲げひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重またはCFRP 破断荷重、最終破壊形態などを表-1に示す。RC 供試体の破壊形態は、鉄筋降伏後のコンクリート圧壊であり、CFRP 供試体のそれは、コンクリート圧壊前のCFRP 破断であった。ただし、供試体 NO.5 はCFRP 破断前にコンクリートが圧壊した。

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
普通強度	33.3	3.06	29.5
高強度	61.8	3.95	34.5

(1) ひび割れ荷重と終局荷重

曲げひび割れ発生荷重は、計算値に対して10%~30%低下した。これは供試体の断面寸法が比較的大きいことによる寸法効果の影響、および乾燥収縮の影響と思われる。また、この低下の割合は、RC 供試体よりもCFRP 供試体の方が大きいように思われた。

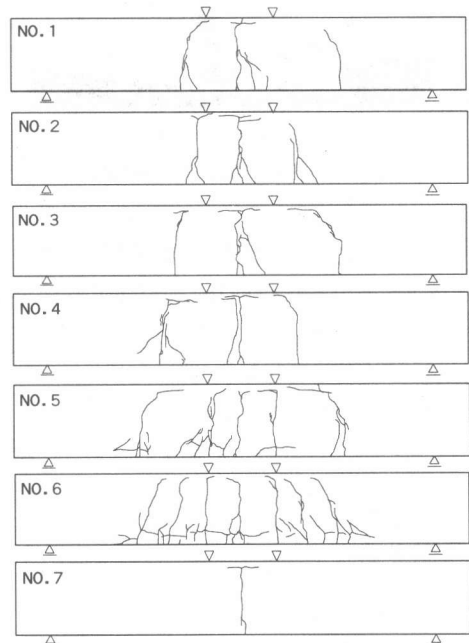


図-3 ひび割れ図

RC 供試体の鉄筋降伏荷重およびCFRP 供試体のCFRP 破断荷重は、終局強度理論による計算値とよく一致した。ただし、付着強度を意図的に低下させた供試体 NO.7 のCFRP 破断荷重は、計算値を若干下回った。これは、平面保持の仮定が終局状態で成立しないことによる影響と思われる。

(2) ひび割れ状況とひび割れ幅

各供試体のひび割れ発生状況を図-3に示す。供試体 NO.1~NO.4 は、補強筋の材質、引張補強筋比およびコンクリート強度が相当に異なるが、いずれもスパン中央付近に3本の主なひび割れが発生し、ひび割れ状況が似たものとなった。供試体 No.5 と NO.6 は引張補強筋比が大きいため、供試体 NO.1~NO.4 よりもひび割れが分散し、曲げ部材として好ましい性状を示した。供試体 No.7 はスパン中央部にひび割れが1本だけ発生し、CFRP 破断時まで他のひび割れは

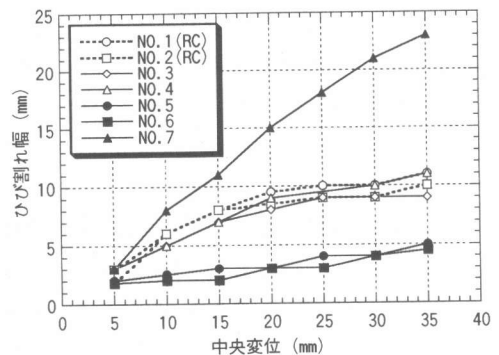
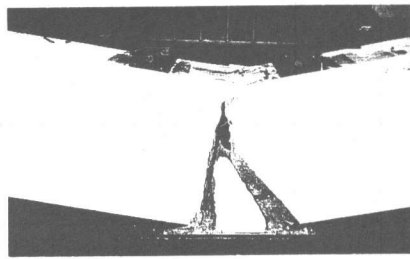
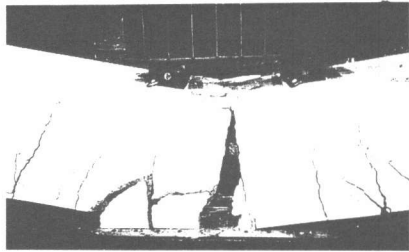


図-4 ひび割れ幅と中央変位の関係



(a) NO.3($pw=0.04\%$)



(b) NO.6($pw=0.08\%$)

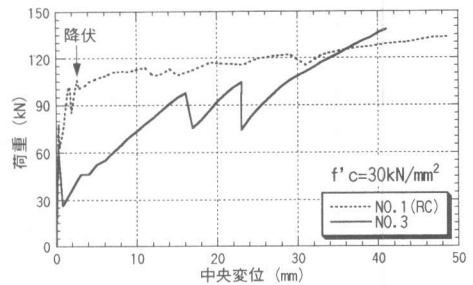
写真-1 CFRP 供試体の破壊状況

発生しなかった。図-4に全供試体のスパン中央変位とスパン中央部のひび割れ幅の関係を示す。供試体 NO.1~NO.4 は、ひび割れ幅の挙動に殆ど差が認められなかった。供試体 NO.5 と NO.6 は、ひび割れ幅が供試体 NO.1~NO.4 より明らかに小さくなった。供試体 No.7 のひび割れ幅は、全ての供試体の中で1番大きく、スパン中央変位に比例して増加した。

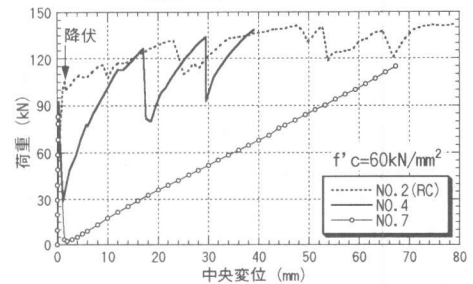
写真-1 (a)および(b)に、供試体 NO.3 および NO.6 の最終破壊状況を示す。

(3) RC 供試体とCFRP 供試体の比較

荷重とスパン中央変位との関係を図-5 (a),(b)に示す。図-5 (a)は普通強度コンクリートを使用した供試体の比較であり、図-5 (b)は高強度コンクリートを使用した供試体の比較である。図-5 (a)に示すRC 供試体 (NO.1) は、鉄筋降伏後も安定した耐荷性状を示し、RC 部材としてねばりのある挙動を示した。CFRP 供試体 (NO.3) は曲げひび割れ発生後の曲げ剛性がRC 供試体の約 1/6 に低下した。また、その耐荷性状はひび割れが発生する毎に大きく変動した。CFRP 破断時の中央変位は、RC 供試体のコンクリート圧壊時の変位を若干下回った。



(a) 普通強度コンクリート使用

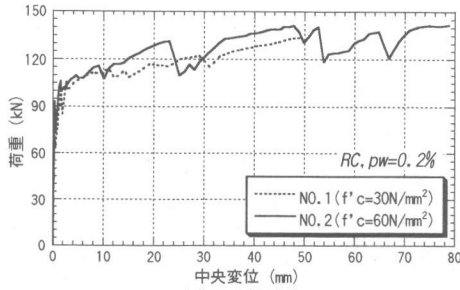


(b) 高強度コンクリート使用

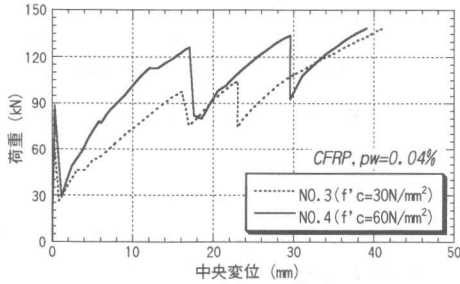
図-5 荷重と中央変位の関係

すなわち、引張補強筋比の小さい CFRP 供試体は、ひび割れ発生後の変形量が RC 供試体よりも大きくなるが、終局的には RC 供試体と同等の耐力と変形性能を有することがわかった。

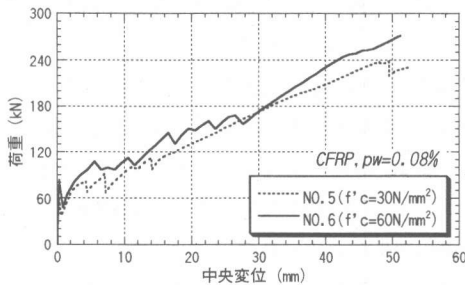
図-5 (b)に示す RC 供試体 (NO.2) は、鉄筋降伏後の耐荷性状にやや変動が見られたが、NO.1 よりもさらにねばりのある挙動を示した。CFRP 供試体 (NO.4) の曲げひび割れ発生後の曲げ剛性は、RC 供試体の約 1/4 に低下したが、NO.3 よりも低下の割合は小さくなった。CFRP 破断時の中央変位は、RC 供試体のコンクリート圧壊時の約 50% となった。したがって、高強度コンクリートを用いた CFRP 供試体は終局的には RC 供試体と耐力は同等であるが、変形性能は劣ることが示された。また、付着を意図的に低下させた CFRP 供試体 (NO.7) は、ひび割れ発生後の変形が極めて大きく、その曲げ剛性は RC はりの 1/10 以下に低下した。ただし、CFRP 破断時の中央変位は NO.4 を大幅に上回った。したがって、エンボス加工を施さない CFRP の使用は、CFRP 破断を効果的に遅らせるが、部材変位量を増大させるため、使用には注意が必要であると思われる。



(a) R C 供試体



(b) CFRP 供試体 (pw=0.04%)



(c) CFRP 供試体 (pw=0.08%)

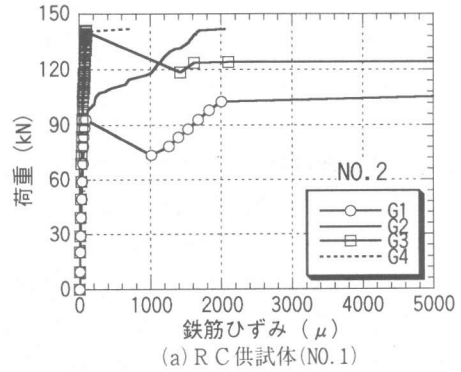
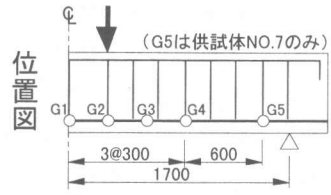
図一六 荷重と中央変位の関係

(4) コンクリート強度の影響

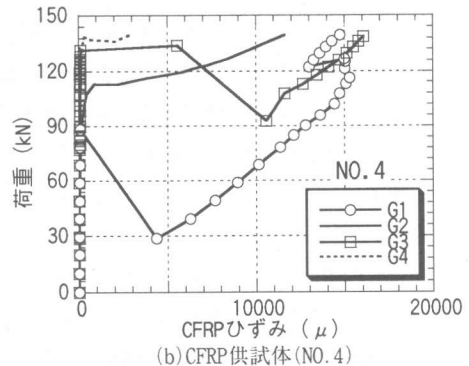
図一六(a),(b),(c)に、荷重と中央変位との関係を補強筋比毎に比較した結果を示す。全体的に、コンクリート強度の高い方が、ひび割れ発生以後の耐荷性状の変動が大きくなった。また、RC 供試体はコンクリート強度の高い方が破壊変位も大きいのが、CFRP 供試体では、コンクリート圧壊前のCFRP 破断となっているため、コンクリート強度の違いによる破壊変位の差は少なかった。

(5) 引張補強筋の挙動

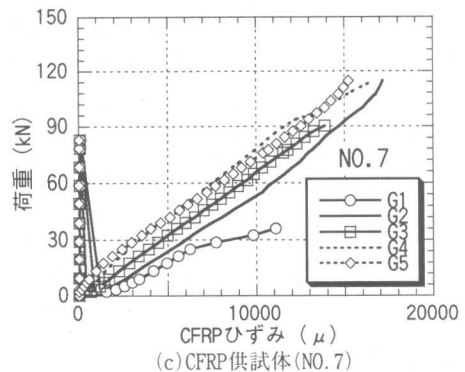
鉄筋 (NO.2) および CFRP (NO.4,NO.7) の荷重とひずみの関係を図一七(a)および(b),(c)にそれぞれ示す。図はいずれも高強度コンクリートを用いたものであり、ひび割れによるひずみ増



(a) R C 供試体 (NO.1)



(b) CFRP 供試体 (NO.4)



(c) CFRP 供試体 (NO.7)

図一七 荷重と引張補強筋ひずみの関係

加が大きく発生するケースである。図一七(a)に示す鉄筋は、ひび割れ発生と同時に降伏ひずみの50%~60%に相当するひずみが発生した。図一七(b)に示すCFRPのひずみは、ひび割れ発生と同時に5000 μ ~10000 μ 急増したが、この増

加量はCFRP破断ひずみの30%~60%であった。すなわち、CFRPの限界ひずみに対するひずみ増加量の割合は、鉄筋のそれと同等であったのである。図-7(c)の付着を意図的に低下させたCFRPは、ひずみが部材軸方向に平均的に増加し、ひずみの急増は無かった。ただし、最終的にCFRPのひずみは、はり端部の支点近傍まで破断ひずみに近い量が発生した。

3.3 曲げモーメント比と変形性能

部材のひび割れ発生モーメント M_c および終局モーメント M_u の比(M_u/M_c)と、ひび割れ発生変位 δ_c および終局変位 δ_u の比(δ_u/δ_c)との関係を図-8に示す。ここに、部材の終局モーメント M_u は、RC供試体では鉄筋降伏モーメントを、CFRP供試体ではCFRP破断モーメントとした。また、終局変位 δ_u はRC供試体ではコンクリート圧壊時の変位を、CFRP供試体ではCFRP破断時の変位(ただし、NO.5は圧壊変位)とした。今回の実験では便宜上この δ_u/δ_c を部材変形率と称す。図-8に示したように、CFRP供試体の部材変形率は曲げモーメントの比(M_u/M_c)と相関性が認められた。また、CFRP供試体は補強筋比が極めて小さくとも、曲げモーメントの比(M_u/M_c)で2程度以上のCFRPを配置すれば、普通強度コンクリートを用いた最小鉄筋比のRC供試体と同程度の部材変形率が確保できることがわかった。したがって、円形立坑のような構造物のCFRP最小補強筋比は、今回の実験の範囲内ならば、既往の設計指針を低減できる可能性が示唆された。

4. まとめ

最小引張鉄筋比の鉄筋コンクリートはりと曲げ耐力を合わせた引張補強筋比の極めて小さいCFRPコンクリートはりの曲げ載荷実験を行い各々の曲げ挙動を比較した。本実験で得られた結果を以下にまとめる。

①普通強度コンクリートを使用したCFRPコンクリートはりの最大耐力および破壊変形量は、

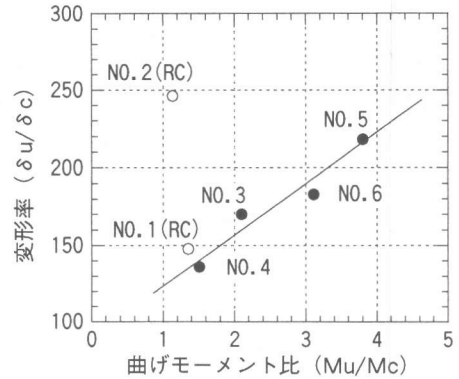


図-8 モーメント比 (M_u/M_c) とじん性率

鉄筋コンクリートはりのそれと同等であった。

②高強度コンクリートを使用したCFRPコンクリートはりの最大耐力は、鉄筋コンクリートはりと同等であったが、破壊変形量はCFRPコンクリートはりの方が小さくなった。

③補強筋の付着強度を意図的に小さくしたCFRPコンクリートはりの最大耐力は、付着の有るCFRPコンクリートはりより約15%小さくなったが、破壊変形量は大きくなりCFRP破断の緩和効果が認められた。

④CFRPコンクリートはりおよび鉄筋コンクリートはりともに、曲げひび割れ発生後の耐荷力の変動は、高強度コンクリート使用の方が大きくなった。

⑤CFRPの最小補強筋量は、通常のコンクリート強度の範囲内ならば、曲げひび割れモーメントの2倍程度の量を配置すれば十分であった。

参考文献

- 1) 園田徹士, 中村稔, 新井時夫, 宮田弘之介, 栗原和夫: NOMSTの開発, 土木学会論文集, NO.522/VI-28, pp.31-34, 1995.9
- 2) 藤田守正, 近藤悦吉, 山根淳, 伊藤忠彦: 大深度円形立坑からNOMSTでシールド発進, トネルと地下, VOL.29, NO.3, pp.33-39, 1998.3
- 3) 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案): 土木学会コンクリートライブラリー-88, 1996.9