

[1116] 抄造成型繊維補強セメントの強度特性

正会員 白川 潔 (住友金属工業 総合技術研究所)
 正会員 ○中川 憲一 (住友金属工業 総合技術研究所)
 三好 彰 (住友金属工業)

1. まえがき

抄造成型されたFRC (繊維補強セメント) は繊維が2次元配向となっているため、流込成型されたFRCよりも補強効果が大きい。一般に、抄造成型で得られるFRC製品には石綿が混入されているが、この石綿は補強繊維の他にプロセス繊維としても重要な役割を果たしている。しかし、発癌物質といわれている石綿は今後使用規制の可能性もあることから、代替繊維の開発が強く求められており北欧ではポリプロピレン繊維などが実用化されている[1]。そこで本報では、プロセス繊維にバルブを、補強繊維として物性の異なる2種類の繊維、すなわち弾性係数がマトリックスのそれより高い炭素繊維 (以下CFと称す) と逆に低いポリプロピレン繊維 (以下PPと称す) をそれぞれ使い、丸網抄造成型したFRCの強度特性を明らかにしたのでその結果につき述べる。

2. 試験方法

2.1 供試体の製作

表1に使用材料、表2に配合条件を示す。ここで、CFは同一ロットのトウを所定長さに切断したものをを用いた。固体分に固体分重量の10倍の水を加えて得た原料スラリーを丸網抄造機で抄き上げた。抄造に際してはポリアクリルアミド系凝集剤を0.2%水溶液で添加した。抄き上げられた0.2~0.3mmの膜厚のグリーンシートは目標板厚の6mmになるまで20kg/cm²の圧力を加えながらメーカーロールに巻き取った。所定板厚になった原板はメーカーロールから切り離され、厚さ10mmのフェルト間に挟み所定圧力で加圧脱水 (プレス圧:P) した。CFRCは180°C×5hr, PPRCは165°C×5hrのオートクレーブ養生を施した。PPはセメント上澄液中に浸漬し、所定温度で5時間のオートクレーブ養生を行なったところ、表3に示すように180°Cの高温になると物性が極度に変化することが明らかとなったため、PPRCのオートクレーブ養生温度は165°Cとした。バルブを含有したセメント板の強度特性は

表1 使用材料

種類	諸物性
CF	ビッチ系, 直径18μm, 長さ3.5, 9.5, 19m, 比重1.6
PP	表面処理系, 直径42μm, 長さ6mm, 比重0.91
バルブ	針葉樹クラフトバルブ, 比重1.25
セメント	普通ポルトランドセメント, 比重3.15
微粉けい砂	平均粒径28μm, 比重2.68

表2 繊維の配合条件(wt%)

CF	PP	バルブ
0, 1, 2, 2.5, 3	0, 1, 3	4.7

骨材セメント比S/C=1.18 (一定)

表3 CF, PPの性能

項目	繊維	CF	PP
	温度		
引張強度 (kg/mm ²)	常温	58.1	41.2
	165°c	57.6	39.2
	180°c	55.9	18.8
弾性係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)	常温	30.2	1.4
	165°c	27.7	0.9
	180°c	27.0	0.2
伸度 (%)	常温	1.9	28.5
	165°c	2.1	45.1
	180°c	2.1	68.7

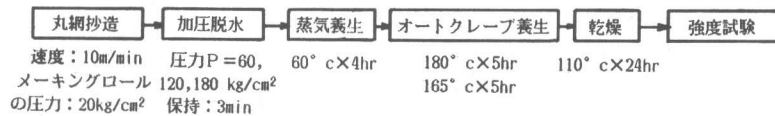


図1 供試体の製造条件

含水率により異なることが報告されているため[2], オートクレーブ養生後の供試体は乾燥し、含水率が0~1%の状態強度試験を行なうこととした。供試体の製作手順を図1に示す。

2.2 各材料の単位量の算定

抄造材の絶乾比重、吸水率を計測することにより、各材料の単位量を以下の方法で求めた。抄造材は図2のような材料構成であり、水1を110°C程度の乾燥で逸散する蒸発水、水2を110°C程度では蒸発しない非蒸発水とする。ここで水の比重を ρ_w とすると、絶乾比重は $\rho_0 = W_s / V$, 吸水率は $\beta = (W_{w1} + V_A \rho_w) / W_s$ となり、気孔率を $\alpha = \rho_0 \cdot \beta$ と仮定すると(1)式の関係が得られる。

$$\rho_0 = (1 - \alpha) W_s / V_s \quad (1)$$

ここで、 $W_s = \sum_{n=1}^i W_{sn} + W_{w2} \cdot \rho_w$, $V_s = \sum_{n=1}^i V_{sn} + V_{w2}$ であるため、 $\rho_w = 1$ としこれらを(1)式に代入すると未知数 V_{w2} が求まる。したがって、各材料の比重が判っていれば各材料の単位量が求まることになる。

2.3 繊維の長さ

CFRC強度に影響するマトリックス中のCF長さは、加圧脱水後のCFRCから洗い試験によって分離したCFの長さを計測して求めた。計測はCFを方眼紙の上に置いた状態の拡大写真から求める方法で、1条件約300本とした。また曲げ試験片の破面を顕微鏡で観察し、最も長く突出しているCF長さを求め、その2倍の長さを限界長さ l_c と仮定した。なお、PPは半透明のため洗い試験後の長さ測定は出来なかった。

2.4 繊維配向

CFの配向はX線面分析装置を用いてCFRC表面の炭素元素分布を測定することにより求めた。ビーム径は $10\mu\text{m}$ 、一ヶ所の分析面積は $8 \times 8\text{mm}$ である。測定深さは表層から約 $5\mu\text{m}$ である。この炭素元素分布より判明した1本のCFを図3に示すように抄造方向(L方向)成分 $\sin\theta$ と抄造と直角方向(C方向)成分 $\cos\theta$ とに分けて配向比 $\cos\theta / \sin\theta$ を計算する。他のCFについても同様の作業を行ない面全体のCFの配向比を $\sum \cos\theta / \sum \sin\theta$ で求めた。

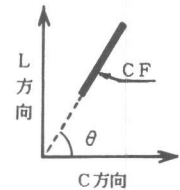


図3 CFの配向

2.5 強度試験

曲げ試験は幅40,長さ120mmの供試体をスパン100mmの中央集中荷重で行なった。試験には2.5tonインストロン試験機を用い、荷重速度は $2\text{mm}/\text{min}$ とした。衝撃試験はアイゾット衝撃試験機を用いて行なった。供試体寸法は幅25,長さ70mmである。

3. 試験結果と考察

3.1 繊維の配向

CFRCの面分析結果の一例を写真1に示す。ここで、線状に見えるのがCFである。面分析を行なった箇所のCFRCのC方向の曲げ強度 σ_{bc} とL方向の曲げ強度 σ_{bL}

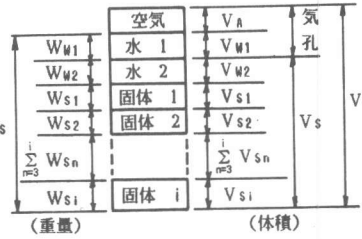


図2 抄造材の材料構成

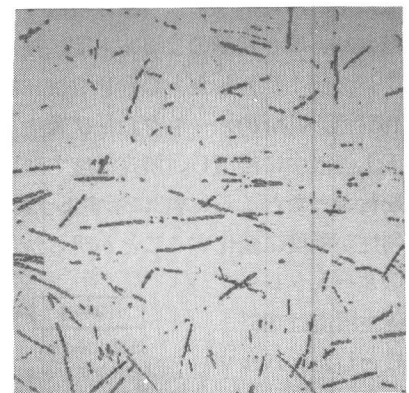


写真1 X線面分析結果(一辺4mm)

との比（実測値）と面分析の結果得られた配向比との関係を図4に示す。図より、両者の間にはよい相関が認められ、抄造材の強度の異方性は繊維の配向に起因していることが確認できた。なお、供試したCFRC, PPRCの σ_{bc}/σ_{bL} はいずれも0.7~0.8であり、同一設備で抄造された石綿セメント材と同等であった。以後、ここでは、曲げ強度は全て σ_{bL} に関して議論を進める。

3.2 曲げ強度に及ぼすバルブ繊維の影響

図5にCF, PPのいずれも用いずバルブのみを用いて抄造成型したバルブセメント板（以下PCと称す）の曲げ応力たわみ曲線を示す。ここに、バルブA, Bはいずれも針葉樹のクラブトバルブ（叩解度約20° SR）であるが、バルブの引張強さの指標である裂断長は、バルブAが約10000km, バルブBが約8500kmと異なっている。このためバルブAの方がバルブBより補強効果が大きくなったと考えられる。

3.3 CFRCの曲げ強度特性

3.3.1 CF混入率の影響

図6に物性の異なるバルブを用いた2種類のCFRC材のCF混入率と曲げ強度との関係を示す。ここで、破線は計算で求めた曲げ強度である。計算の考え方を以下に示す。CFRCはマトリックスにひび割れが発生した後、バルブとCFが共同で外力に抵抗する。ここで、バルブの引張破断ひずみは、CFのそれより大きいといわれているので、CFRCの引張ひずみがCFの引張ひずみを越えても、バルブはまだ破断していないと仮定し、またCFRCの曲げ破面観察よりCFは引抜けの形跡が認められることからその引抜け抵抗があると仮定した。これより、CFRCの曲げ強度は(2)式に示すバルブの破断によるものと、CFの引抜け抵抗によるものの和として算定出来る。

$$\sigma_b = (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sigma_{f1} \cdot V_{f1} + \eta_1' \cdot \frac{l_c}{2 \cdot l} \cdot \sigma_{f2} \cdot V_{f2}) \cdot \alpha \quad (2)$$

$\eta_1 \cdot \eta_1'$: バルブ、CFの配向効果係数、 η_2 : バルブの繊維長さに依存する効果係数、 σ_{f1}, σ_{f2} : バルブ、CFの引張強度、 V_{f1}, V_{f2} : バルブ、CFの容積混入率、

l_c : CFの限界長さ、 l : 洗い試験で得られるCFの平均長さ、 α : 曲げ強度/引張強度 (=2.44) [3]

ここで、バルブの物性が測定されていないので(2)式右辺第1項をCF混入率0のPCの曲げ強度に等しいと仮定し、第2項による強度増分を求めると図6の破線に示すように実験値とよく一致した。CFは2次元ランダム配向のため η_1' は

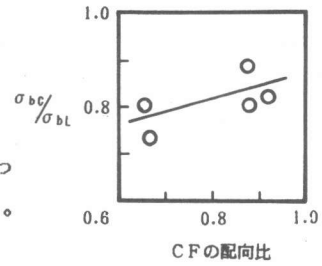


図4 強度の異方性とCFの配向との関係

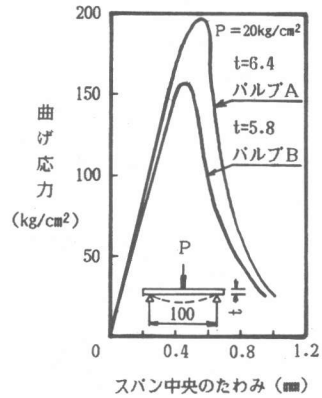


図5 PCの曲げ応力たわみ曲線

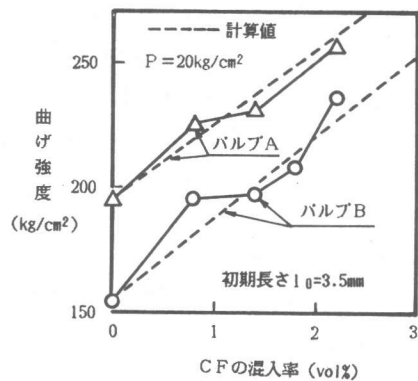


図6 CFの混入率と曲げ強度との関係

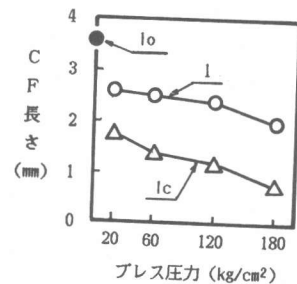


図7 CFの長さ l , l_c

2/πとした。CF長さ l 、 l_c は実測値を用いた。初期長さ $l_0=3.5\text{mm}$ の洗い試験後の繊維長さ l と、パルプAを用いたCFRC (CF:2wt%)の曲げ試験後の破面観察で得られた l_c を図7に示す。

3.3.2 プレス圧力の影響

プレス直後のPC含水率から求めた水セメント比とPCのひび割れ強度とは図8に示すようによい相関が認められる。すなわち、プレス圧力の増大に伴い脱水が進み水セメント比が小さくなるためマトリックスの曲げ強度が大きくなる。それに伴いパルプとマトリックスとの付着が増大し、その結果(2)式における η_2 が大きくなり、図9に示すようにプレス圧の増大に伴いPCの曲げ強度が向上することになる。これより、プレス圧の増大に伴いCFRCの曲げ強度が高くなる現象はマトリックス強度の増大が主因と考えられる。ここで、(2)式右辺第2項を用いてCFの付着による曲げ強度の増分を求めると、図10に示すように実験値とよく一致していることが判る。ここで、プレス圧が増大すると曲げ強度の増分が減少するのは、付着力の増大に伴い限界長さが短くなるためである。

3.3.3 CF長さの影響

図11,12に示すようにCFの初期長さ l_0 が長くなるにつれて曲げ強度が大きくなる傾向にある。また、曲げ破面観察で実測したCFの限界長さ l_c は長いCFを用いた方が長くなる傾向にあった。なお l_0 が長くなると曲げ強度が大きくなることから、(2)式右辺第2項 $l_c/2l$ が大きくなっていると考えられる。一方 l_0 が長くなると限界長さ l_c が長くなることが観察されていることから、 l は l_0 にかかわらず少なくとも同様の長さであったと推定される。これより長いCF程プレスによる切損が著しかったものと考えられる。

3.4 PPRC

の曲げ強度特性

PPの混入率と曲げ、ひび割れ強度との関係を図13に、PPRCとCFRCとの曲げ応力たわみ曲線の比較を図14に示す。

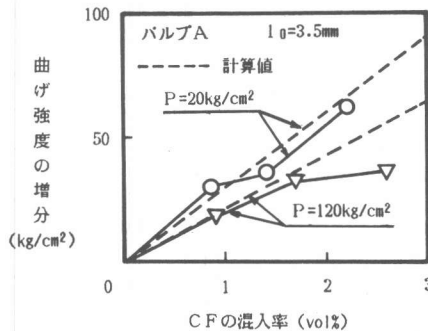


図10 CFの混入率と曲げ強度増分との関係

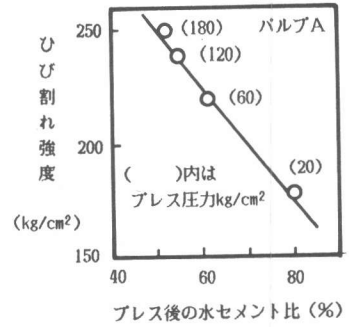


図8 水セメント比とPCのひび割れ強度との関係

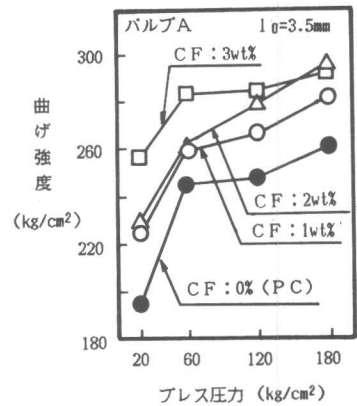


図9 プレス圧力とCFRCの曲げ強度

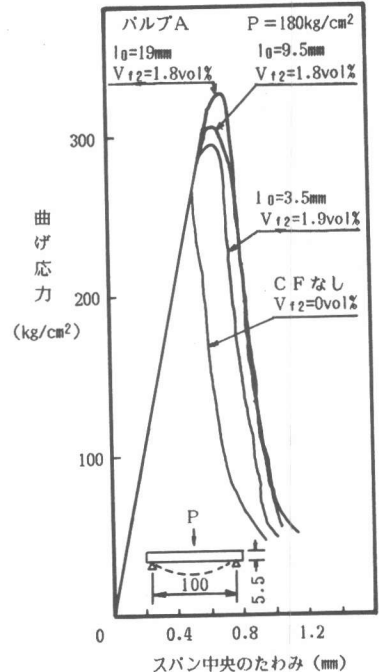


図11 曲げ応力たわみ曲線 (CF長さの影響)

これらの図より、PPの混入率が多くなるのに伴いPPRCの曲げ強度が低下すること、またPPRCはCFRCよりエネルギー吸収能が大きいことが判る。ここで、PPの混入率と曲げ強度について考える。マトリックスの曲げ強度 σ_{mb} に対するPPRCのひび割れ強度 σ_{cr} の比は(3)式で得られる。

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{mb}} = (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \frac{E_{f1}}{E_m} - 1) \cdot V_{f1} + (\eta_1'' \cdot \eta_2'' \cdot \frac{E_{f3}}{E_m} - 1) \cdot V_{f3} + 1 \quad (3)$$

E_m, E_{f1}, E_{f3} : マトリックス、バルブ、PPの弾性係数、 V_{f3}

: PPの容積混入率

ここで、(3)式右辺第1項はバルブの弾性係数、容積混入率が一定ならば定数となるので右辺第2項について考える。実測したPCの弾性係数は $12 \sim 15 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ である。マトリックスの弾性係数 E_m はPCのそれとほぼ等しいとみなすと、PPの弾性係数は表3に示すように $0.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ であるため、右辺第2項は負となる。したがって、PPの混入率の増加に伴ってPPRCのひび割れ強度が低下することになる。なお、図13においてひび割れ強度と曲げ強度との差がPPの容積混入率にかかわらずほぼ一定であることから、ひび割れ後の強度向上はバルブの影響によるものであり、PPは強度向上に寄与していないと考えられる。

3.5 アイゾット衝撃強度

CFRCのアイゾット衝撃強度とCFの混入率との関係を図15に示す。図より、プレス圧が 20 kg/cm^2 の場合は、CFの混入率が多くなると衝撃強度が大きくなり、 $2.2 \text{ vol}\%$ の混入率でPCの1.75倍の強度向上となるのに対し、プレス圧が 180 kg/cm^2 の場合はCFの混入率にかかわらずほとんど強度が変化しないことが判る。プレス圧が 180 kg/cm^2 の場合補強効果が認められないのはプレスによるCFの切損の影響と考えられる。また、PPRCのアイゾット衝撃強度とPPの混入率との関係を図16に示す。これより、PPの混入率の増加に伴い衝撃強度が増大し、 $4.8 \text{ vol}\%$ における強度はPCの5.9倍となることが判る。なお、CFRCとPPRCの衝撃強度を繊維混入率を同一にして比較すると、PPRCはCFRCの約1.8倍の強度となっている。この衝撃強度の大小は図14に示すCFRCとPPRCの曲げ試験におけるエネルギー吸収能の大小に対応している。

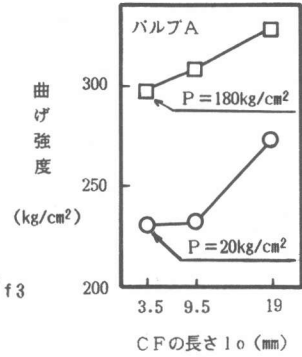


図12 CF長さ と曲げ強度との関係

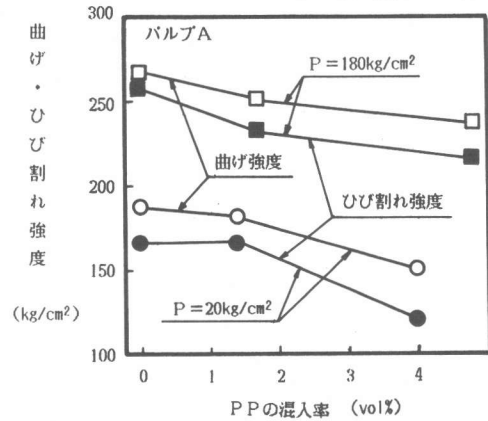


図13 PPの混入率と曲げ強度との関係

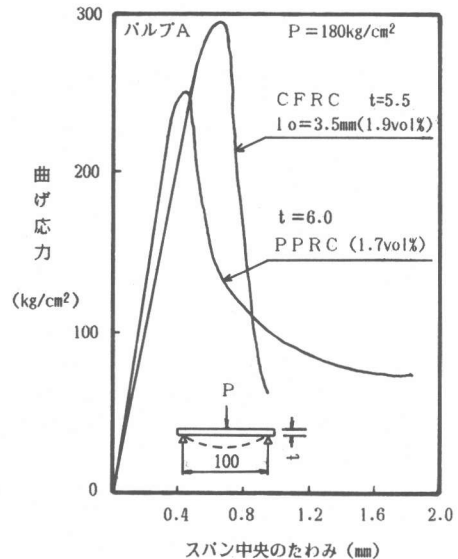


図14 曲げ応力たわみ曲線

4. まとめ

石綿を使用せずに丸網抄造成型するために、プロセス繊維としてパルプを用い、補強繊維としてCFとPPをそれぞれ用いたFRCの強度特性を調査した結果、以下のことが判明した。

- (1) CFRCの表面の炭素元素の分布をX線分析装置で解析し、これより求めたCFの配向比とCFRCの曲げ強度比 σ_{bc}/σ_{bL} の間には正の相関関係が認められ、抄造材の強度の異方性は繊維の配向に支配される。
- (2) CFの混入率が多くなるにつれ、またCF長さが長くなるにつれてCFRCの曲げ強度が高くなる。この曲げ強度は、CFの引き抜け抵抗を考慮した式で推定が可能である。
- (3) PPは弾性係数がマトリックスのそれより小さいため、PPRCの曲げ強度の向上には寄与しないが、伸びが大きいので、アイゾット衝撃強度を大幅に増大させ、混入率が同一の2vol%の場合CFRCの約1.8倍の値を示す。

5. 参考文献

- [1] J.G.Keer and A.Thorne : Performance of Polypropylene-Reinforced Cement Sheeting Elements, Publ Am Concr Inst, SP-81 pp213-231
- [2] Robert S.P.Coutts and Vidas Ridikas : Refined Wood Fibre-Cement Products, Appita, vol 35, No5, pp395-400
- [3] D.J.Hannant : Fibre Cements and Fibre Concrete, JOHN WILEY & SONS

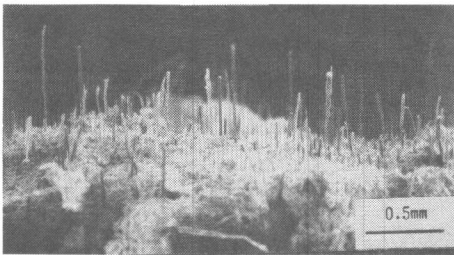


写真2 CFRCの曲げ破面 ($l_0=3.5\text{mm}$, $P=180\text{kg/cm}^2$)



写真4 CFRCの曲げ破面 ($l_0=19\text{mm}$, $P=20\text{kg/cm}^2$)



写真3 CFRCの曲げ破面 ($l_0=3.5\text{mm}$, $P=20\text{kg/cm}^2$)

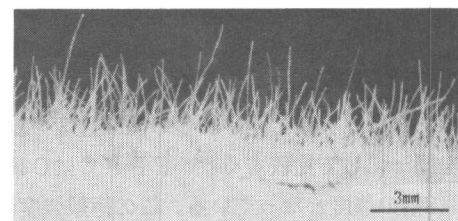


写真5 PPRCの曲げ破面 ($P=180\text{kg/cm}^2$)

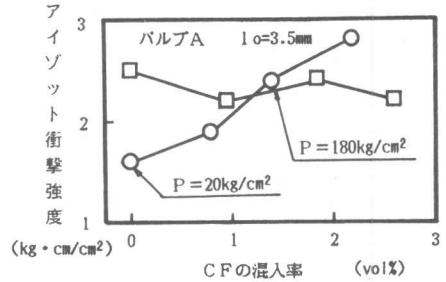


図15 CFRCのアイゾット衝撃強度

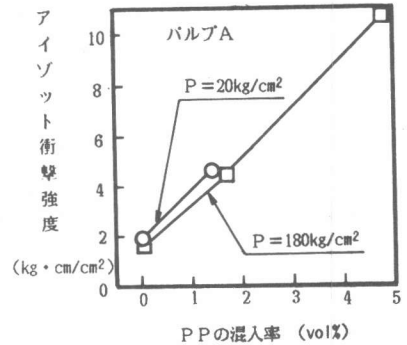


図16 PPRCのアイゾット衝撃強度