

論文 パルプサンドを混入したポリプロピレン短繊維補強押出成形体の タフネスに関する一考察

山田寛次*1・三橋博三*2

要旨: パルプサンドを混入した押出成形セメント材料の曲げタフネスが、PP繊維(ポリプロピレン短繊維)を混入し、養生と曲げ試験時含水率を変えた時どう変化するかを調べた。その結果、養生(オートクレーブ、水中)と試験時含水率(絶乾、湿潤)の組合せの違いでPP繊維によるタフネスの向上量が異なった。その原因を破面の繊維長の計測とSEM観察とにより考察し、PP繊維の引張強度と引抜抵抗力が、養生と含水率で変化したためである事を明らかにした。
キーワード: 押出成形、パルプサンド、PP繊維、曲げタフネス、限界繊維長

1. はじめに

押出成形は、打ち込み成形では重要なワーカビリティを気にすることなく、多量の繊維を混入できることが特徴である。それら繊維の最大の目的は、曲げタフネス(タフネスと略)向上であるが、オートクレーブ養生した押出成形材料のタフネスに関する基礎的な研究はほとんど無い。

押出成形材料で使用される繊維のうち、パルプとPP繊維(ポリプロピレン繊維)が、その経済性と供給の安定性から最も基本的であると考えられる。

本論文ではパルプをパルプサンドの形で含むことで軽量化(比重: 約1.7)した押出成形材料の、養生を変えることによるPP繊維とタフネスの変化の関係を明確にすることを目的とする。

なお、本論文では参考文献[1]、[2]にならって、タフネスを曲げたわみ曲線の囲む面積(吸収エネルギー)をもとに評価する。

2. 実験

2.1 試験体調製

押出成形に用いた材料の調合は、PP短繊維を含む4A1調合とPP短繊維を含まない4A0調合の2種類で、水-セメント比と水-粉体比が同じになるように、表-1に示すとおりとした。ここで用いたパルプサンドは、故紙パルプ繊維とフライアッシュからなる軽量骨材[3]で、物性値の概要を表-2に示す。又、PP繊維は比重0.92、直径40 μ m、長さ6mmのものを用い、4A1調合で容量比は3.6%である。

材料は加圧式ニーダーを用い、乾式で3分間、水を加えて8分間の混練をした後、ただちに押出成形した。押出機は、オーガー直径が75mmの真空押出機で、先端の金型は幅40mm、厚さ15mmの開口を持つものを用いた。

表-1 押出材料調合(5リットル調合(g)と粉体合計を100%とした重量%)

調合	区別	セメント	パルプサンド	8号珪砂	PP繊維	マイセルロス	水	合計
4A0	重量	5812	1453	349	0	116	2112	9841
4A1		5603	1401	336	165	112	2036	9653
4A0	重量%	76.3	19.1	4.6	0.0	1.5	27.7	129.3
4A1		76.3	19.1	4.6	2.2	1.5	27.7	131.5

表-2 パルプサンドの概要

項目	単位	数値
平均粒径	(mm)	1.45
見かけ密度	(gr/cc)	1.86
嵩密度	(gr/cc)	0.73

*1 新日本製鐵(株) 先端技術研究所 主任研究員、(正会員)

*2 東北大学 工学部 建築学科 教授、工博 (正会員)

押出成形された試験体は、20℃、60%RHの恒温恒湿室で24時間静置し凝結させた後、それぞれの割合について2種類の養生をした。つまり150℃、8時間のオートクレーブ養生をしたもの、20℃、4週間の水中養生をしたものの2種類である。

養生後、曲げ試験前に試験体の含水率を調整し、それぞれ絶乾状態のものと湿潤状態のものの2種類とした。従って試験体は、調合、養生、含水状態がそれぞれ2水準で、計8水準となる。ここで、絶乾状態は105℃、2日間の条件で乾燥させたものである。又、湿潤状態は、水中養生では水揚げして表面を拭いただけのもの、オートクレーブ養生では養生後20℃の水槽中で1週間浸漬したものである。

試験体は調合、養生、含水率の異なるものが同一の幅と厚みを持つように、全数、研磨した。研磨後の試験体の大きさは、幅39.5mm、厚さ14.8mm、長さ170mmである。

2.2 試験

曲げ試験は、支点間距離160mmの中央集中荷重で実施した。荷重速度は0.5mm/分とし、荷重と載荷点下のたわみを連続的に計測した。たわみは測定レンジが5mmの高感度型変位計で、最大で4mmまで計測した。なお、試験体数はそれぞれの条件でN=3とした。

曲げ試験後、強度が中位のものの破面を観察した。図-1に示すようにMサンプルとBサンプルの2つをダイヤモンドソーにて1.8mm厚さで切出し、その後Bサンプルはプラスチック板に張り付けて1.0mmになるまで研磨した。MサンプルをSEM (Scanning Electron Microscope)により観察し、Bサンプルを接写して、写真から繊維の数と長さを算出した。

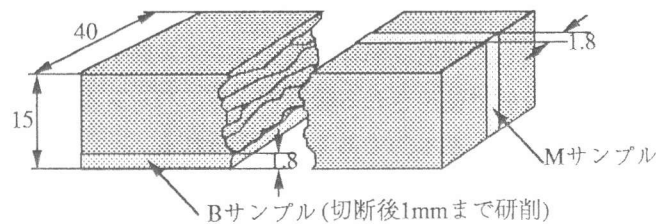


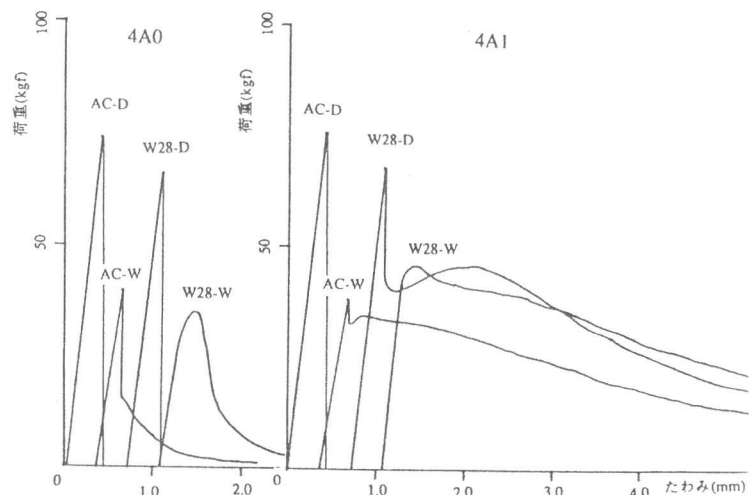
図-1 試験体の切断部位 (単位:mm)

3. 実験結果

3.1 試験結果

図-2に荷重-たわみ関係の代表例を示す。図に示すように湿潤状態では脆性的な破壊モードが改善され、特にPP繊維を混入した場合に著しい事が分かる。

表-3に曲げ試験結果の平均値を示す。ここで密度は絶乾の密度であり、曲げ弾性率は最大荷重までの割線弾性率である。調合から決まる、空気を含まないと仮定した混練後の密度は、4A0調合が1.97で4A1調合が1.93であるため、最終硬化体でも



AC-D : オートクレーブ養生、絶乾状態試験 AC-W : オートクレーブ養生、湿潤状態試験
W28-D : 水中養生、絶乾状態試験 W28-W : 水中養生、湿潤状態試験

図-2 荷重-たわみ関係

表-3 押出成形体の機械的性質

調合	養生	含水状態	密度 gr/cc	曲げ強度 kgf/cm ²	曲げ弾性率 tf/cm ²	I ₁₀ * -	曲げタフネス** kgf-mm	吸水率 %
4A0	AC	絶乾	1.75	199.9	131.9	1.00	13.85	14.3
4A1			1.71	219.5	148.5	1.00	15.38	13.7
4A0		湿潤	-	99.5	99.9	2.42	9.87	-
4A1			-	112.5	108.6	8.96	29.63	-
4A0	水中	絶乾	1.80	188.8	175.6	1.00	10.33	15.4
4A1			1.76	235.4	180.6	4.88	41.82	16.5
4A0		湿潤	-	106.3	165.8	4.26	12.92	-
4A1			-	133.0	98.9	6.33	42.18	-

* I₁₀はACIによるタフネスインデックス:参考文献[2]参照

** 曲げスパンの1/150までの吸収エネルギー

4A0調合の方が4A1調合よりも密度が大きい。又、同一配合の中ではオートクレーブ養生よりも水中養生の方が密度が大きくなった。特徴的なのは、PP繊維を混入した4A1調合が密度が小さいのに曲げ強度、曲げ弾性率とも4A0調合よりも高い点である。

図-2をもとに曲げタフネスを評価した。タフネスは、JCI[1]による曲げスパンの1/150までの吸収エネルギーとACI[2]によるタフネスインデックス(I₁₀)によって評価した。ここでI₁₀は初亀裂時の吸収エネルギーと初亀裂の5.5倍までの吸収エネルギーの比で、1の時に脆性、10の時に塑性を現わす。表-3に示すようにPP繊維を混入した湿潤状態の試験体は、両養生共にタフネスが向上していることが分かる。

3.2 破面観察

4A1調合の破面の写真(図-1に示すMサンプル)を図-3に示す。

4A1

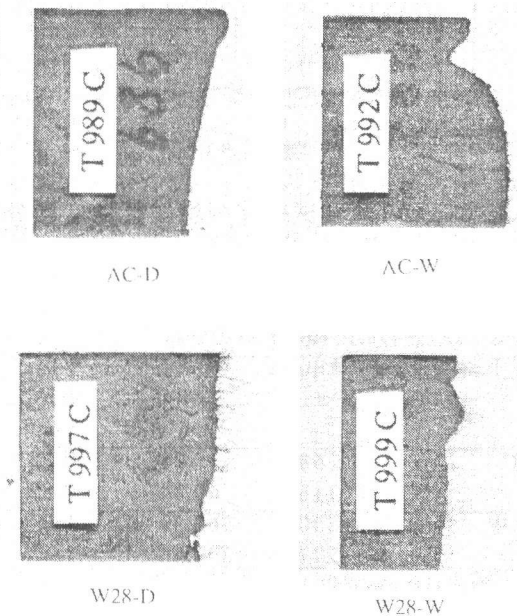


図-3 4A1調合の破面

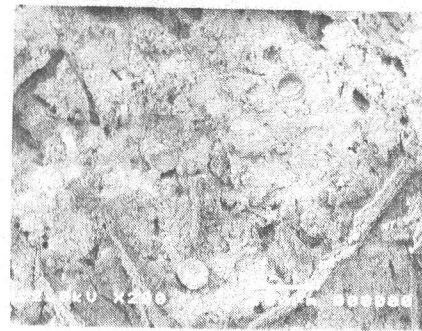
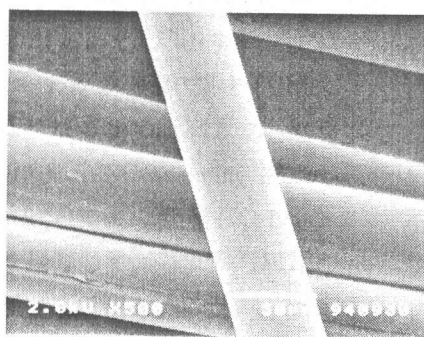


図-4 AC養生した4A1調合の破面

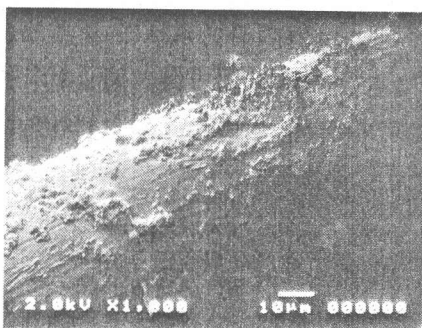
写真でTと表示する側が曲げ引張側で、Cが曲げ圧縮側である。水中養生の997と999では長いPP繊維が数多く認められるのに対し、オートクレーブ養生の場合989では全く認められず992では非常に少ない。又、湿潤状態で試験した992、999の圧縮側の破面は湾曲しており、タフネス向上に関与したと考えられる。

オートクレーブ養生である989ではPP繊維が全て破断しており(図-4参照)、992では破断が多いが、引抜けたものも散見された。又、992のPP繊維をバージンの繊維と比較して見ると、オートクレーブ養生によって繊維表面に付着物を生じ、引抜抵抗力を高めていることが観察される。(図-5参照)

図-1に示すBサンプルを接写して、引張縁に近い厚さ1mmのサンプルから突出している繊維数を算出した。繊維数の算出に当たっては、最終的な写真上での拡大率を30倍にし、写真上で長さが4.0mm(実繊維長:0.13mm)以下のものはパルプ、モルタルとの区別がつかないため除外した。その度数分布を図-6に、平均値を表-4に示す。図-6から分かるように、オートクレーブ養生後、絶乾状態試験のものは平均繊維長が0.22mmと最も短く、水中養生後、湿潤状態試験のものは1.43mmと最も長くなった。



バージンのPP繊維



サンプル992のPP繊維

図-5 AC養生によるPP繊維の表面変化

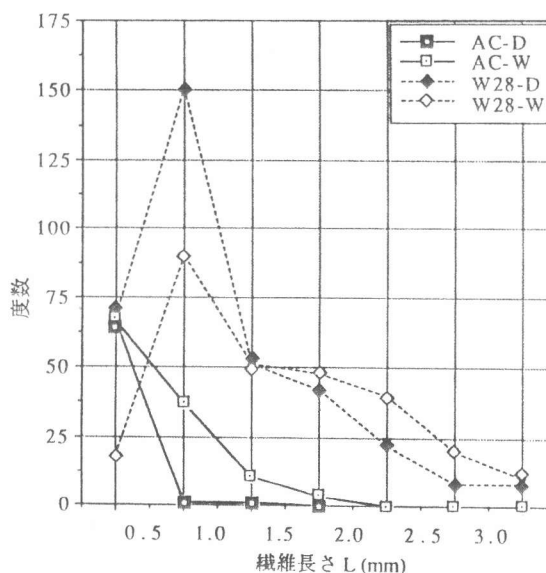


図-6 4A1調合試験体の繊維長さ度数分布

表-4 4A1調合のPP繊維長さの分布

養生	含水状態	算出数*	繊維長合計 mm	平均繊維長 mm
AC	絶乾	68	15.26	0.22
	湿潤	116	60.84	0.52
水中	絶乾	350	362.39	1.04
	湿潤	277	397.46	1.43

* 算出は0.13mm以上について実施

4. 考察

4.1 PP繊維の状況

(1) 繊維数

繊維のVfから、幅39.5mm、厚さ1.0mmの中に入るべき繊維数は、繊維が全部一方向に配向すれば式(1)から1132本(28.66本/mm²)である。

$$n = Vf \frac{4}{\pi d^2} \quad (1)$$

ここで、n：繊維数(1mm²当たりの繊維数)

Vf：繊維の容量比(3.6%) d：繊維の直径(0.04mm)

実際には、最も算出数が多い場合でも、(1)式の結果の30%が観察されたに過ぎない。その理由は、試験体の下縁から薄いサンプルを切断したため、試験体押出時の繊維の片寄り(金型に近い下縁は少ない)、研磨による表面繊維の損失などの表面の効果が出た点と、繊維の2-3次元的配向などが考えられる。又、オートクレーブ養生で極端に算出数が少なくなったのは、繊維が破断しているためと考えられる。

(2) 繊維長

参考文献[4]に示すように、繊維が破面から引抜かれる時、破面に現われる平均繊維長はもとの1/4になり、度数分布も均等になるはずである。今回の実験では繊維長0.13mm以下を除外したため誤差を含むが、水中養生後、湿潤状態試験の破面に現われた平均繊維長は、もとの繊維長の1/4(1.50mm)に近い。又、このケース(W28-W)が示す図-6の度数分布は、0.13mm以下の繊維数を除外した為0.5mm以下の繊維数が少なくなった事と、3.0mm以上に含めた繊維長はほとんど3.0mmに近く、2.5-3.0mmに整理されてもよい事を考え合わせると、ほぼ均等に近い。以上の2点から、水中養生後、湿潤状態試験では引抜が支配的であると推察される。

水中養生後、絶乾状態試験の場合、繊維長0.5から1.0mmに鋭いピークがあるのは、繊維の引抜抵抗力と繊維強度をバランスさせる繊維埋込長である限界埋込長(Lc/2)[4]を示していると考えられる。同様に、オートクレーブ養生の場合には図-6から限界埋込長は0.5mm以下である。一般にPP繊維の引張強度とコンクリートからの引抜抵抗力はそれぞれ300-400MPa、0.34-1.23MPaと報告されている[4]が、この組み合わせで式(2)から計算される限界埋込長は最短でも2.44mmとなり、今回実験結果よりもはるかに長い。この差は水中養生の場合には、押出成形によるマトリックスの緻密さが引抜抵抗力を向上させていることが、オートクレーブ養生の時は、更に引抜抵抗力が向上すると共に繊維強度が低下している(図-5参照)ことが、影響していると推察される。

$$\frac{Lc}{2} = \frac{\sigma_{fu} r}{2 \tau_{fu}} \quad (2)$$

ここでLc/2：限界埋込長

σ_{fu} ：繊維の引張強度、r：繊維半径、 τ_{fu} ：外周面積あたり付着強度

4.2 繊維の効率

表-3に示す4A1調合の曲げタフネスは、マトリックスとPP繊維の両方の寄与分を含んでいる。ここでマトリックス寄与分を4A0調合のタフネスとし、PP繊維の寄与分を4A1調合と4A0調合のタフネスとの差と見做すと、表-5から、何れの場合もマトリックスよりも繊維の方が2-3倍タフネスに寄与していることが分かる。

この繊維の寄与分と破面の繊維長との関係を表-5で見る。オートクレーブ養生、絶乾状態試験のタフネス向上は曲げ強度の向上によるもので、本来のタフネス向上とは関係がない。残りの3ケースについて、PP繊維の引抜総延長に対する曲げタフネス(繊維分)を繊維の効率として表-5に示す。

表-5 PP繊維混入による曲げタフネス向上の効率

養生	含水状態	タフネス構成		繊維引抜総延長 (相対比)	繊維の効率 (相対比)
		マトリックス分 kgf-mm	繊維分 kgf-mm		
AC	絶乾	13.85	1.53	1.00	-
	湿潤	9.87	19.76	3.99	3.74
水中	絶乾	10.33	31.49	23.75	1.00
	湿潤	12.92	29.26	26.05	0.85

表から分かるようにオートクレーブ養生後、湿潤状態試験の 때가最も繊維の効率がよい。この場合、図-5から示唆されるように、引抜抵抗力が増大したためタフネスが向上したと考えられる。又、この時、繊維破断が多く、オートクレーブ養生による繊維強度低下に、湿潤による引抜抵抗力低下がまだ追いついていない状態であると考えられる。次に、水中養生の場合、繊維の効率は絶乾状態試験に比べ湿潤状態試験では15%低下している。これは、湿潤により引抜抵抗力が低下した影響と考えられる。

一般にPP繊維はマトリックスからの引抜抵抗力が弱いと言われている[5]が、以上見たように今回の実験では、養生と含水率によって繊維強度に対する相対的な引抜抵抗力が変化し、タフネスも変化することが分かった。

5. 結論

パルプサンドとPP繊維を混入した押出成形試験体によって曲げタフネスを評価した。その結果、養生条件と含水率によって、PP繊維のタフネスへの寄与が下記のように変化することが明らかになった。

- 1 オートクレーブ養生の場合、絶乾状態試験では、繊維は破断しタフネスは向上しない。これは、繊維引張強度に対する引抜抵抗力の相対関係において、引抜抵抗力過大である事を示している。湿潤状態試験では、湿潤により相対的な引抜抵抗力が低下して繊維破断が減少し、タフネスは若干向上する。
- 2 水中養生の場合、絶乾、湿潤いずれの状態でも繊維は引抜が支配的で、タフネスは向上する。これは、繊維引張強度に対する引抜抵抗力の相対関係において、引抜抵抗力過小である事を示している。なお、絶乾状態に比べ湿潤状態では、繊維引抜長さ当たりのタフネス(繊維の効率)は15%低い。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準、日本コンクリート工学協会、1984.2
- 2) ACI Committee : Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. ACI Journal, Vol. 75, No. 7, July 1978
- 3) 三橋博三・沼尾達弥・成田健・有川智・桐越一紀：古紙および石炭火力発電所の建築材料への再利用、日産科学振興財団研究報告書、Vol.15, pp.81-89, 1992
- 4) Bentur A., Mindess S.: Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, 1990
- 5) 牧恒雄：ポリプロピレン繊維補強コンクリートの曲げ特性について、東京農業大学農学集報、Vol. 26, No. 2, pp.200-208, 1981