

竹繊維補強セメント複合材料の開発と活用に関する研究

Study on Application and Development of Cement Composites Reinforced with Bamboo Fibers

研究代表者 工学部建築学科*1 准教授 寺井 雅和
Masakazu Terai

Environmental destruction such as pollution of air and water has been occurring in some regions by rapid development and production of materials like iron, steel, glass, cement and aluminum that use limited mineral resources. On the other hand, plants and fibers are annually reproducible clean resources. Bamboo is a unique group of gigantic grasses the culm of which originates in underground rhizomes. It grows naturally in many parts around the world country but some species are artificially planted. Bamboo forests are found across tropic and sub-tropic zones between latitudes of about 40° south, i.e. areas with mean annual temperatures of from 20°C to 30°C. Bamboo suitable for water pipes grows at altitudes from 20 to 3000 meters. The plant is fully mature at an age of three to four years. This paper investigates the application to explore the possibility of bamboo fiber reinforced cement composites. Some experiments on bamboo fiber reinforced cement composites with the parameters of mix proportion and the shape of bamboo fiber has been carried out. The mechanical properties and the fresh workability on the bamboo fiber reinforced cement composites are studied.

Keywords: Cement Composite, Bamboo Fiber, Compressive Strength, Bending Strength, Splitting Tensile Strength, Sand-total Aggregate Ratio

1. はじめに

コンクリートは、引張強度が低いため熱や乾燥、地震などの外力によって、ひびわれが生じやすい材料である。そのため、通常コンクリート製の構造物は、鉄などの補強材を配してひびわれを防いでいる（鉄筋コンクリート構造や繊維補強コンクリートなど）。著者らは、コンクリートのひびわれを防止するために、鋼材に代わる材料として「竹」を活用した材料・構造の開発研究を行ってきた。これまでの研究では、竹をコンクリート構造物の補強材（竹主筋）にして、開発途上国における耐震建築および耐震補強技術に利用するために、梁、柱、床版などの部材実験を行ってきた（図1）。鉄筋コンクリート構造は、鉄とコンクリートという二つの材料それぞれの長所を活かして、お互いのデメリットを補う形で理想的な複合材料として成立しているが、鉄を使わない研究をして

いるのには理由がある。近年、鋼材の価格が高騰しており、また発展途上国では高価な鋼材は入手が難しく、大量使用は制限されている現状がある。そのため、本来補強が必要なコンクリート構造物において、十分な補強ができていない地域が世界には広く分布している。また、鋼材の生産には大量の化石燃料が使用されるため、炭酸ガス排出の観点から、環境問題への配慮から今後は生産が制限されていくことも考えられる。そこで、鋼材を使用しない構造物の開発は、人類の未来において、意味のあることである。



図1. 竹筋コンクリートの実験研究^{(1)~(3)}

*原稿受付 2014年5月12日

*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

E-Mail terai@hiro.kindai.ac.jp

本研究で想定しているコンクリートの“ひびわれ”とは、地震力などの大きな力が作用しなくても発生する「乾燥ひびわれ」や「収縮ひびわれ」などの微細なひびわれを指し、これらがコンクリート構造物の景観を損ね、構造物としての剛性低下を引き起こす原因にもなっている。通常、ひびわれ抑制には合成繊維や鋼繊維を混入するが、本研究では天然素材である「竹繊維」を使用することが特色である。このときに問題となるのは、コストと耐久性である。コストの面は、日本では問題ない。成長が早く、加工が容易なので、低コストで大量に竹繊維を生産することは可能である。一方の耐久性の面であるが、アルカリ性のセメントの中にセルロースが主成分の竹を混入することで、組織が破壊され強度が上がらないとか長期的なひびわれ抑制が不足することが既往の研究では指摘されている⁴⁾。しかしながら、著者らがこれまで行ってきた基礎的・予備的な研究では、実験データが十分とは言えず、既往の研究で指摘された問題点が明確にはならなかった。そこで、過年度の実験的研究^{5),6)}を更に発展させて実験データを蓄積し、「竹繊維補強セメント複合材料」の実用化に向けての足がかりとしたい。

本研究では、竹繊維をコンクリートに混入することにより、低コストで剥落やひびわれの防止、力学性状の改善ができる方策がないかを考え、竹繊維補強複合材料の製造に関する可能性を探り、基礎的な実験を行った。

2. 実験概要

過年度行った実験では、使用した繊維が細く（0.3mm角）、補強材として有効に作用しなかったと考えている。そこで、実験変数の一つとして、繊維形状や繊維寸法を計画する。竹を特定の形状に加工するとコストが上がるため、本研究の背景を踏まえ現実的ではないので、自然素材を活かした繊維形状を考える。太さや長さを変数として、補強効果の違いを確認する。また、過年度行った実験では、粗骨材（砂利）を通常のコンクリート並みに入れた。施工を踏まえ、骨材が大量に入ると繊維が有効に作用しないため、骨材量を低減して竹繊維の補強が有効に機能するような「セメント複合材料」としての調合設計方法を提案したい。

2.1 実験計画および概要

本論では、次の4つの事項（(a)～(d)）について実験を行い検討した。

(a) 施工性に関する検討（予備実験）

コンクリート中の空気を抜く方法は2種類ある。振動を与える方法と、化学混和剤材を入れて空気分散することで抜けやすくする方法である。過去の実験では、振動を与えすぎると重い骨材は沈み、軽い竹は浮いてくるため、

十分な振動は与えず供試体を作製していた。このたびの研究では、製作の方法と振動時間を管理して、内部状態の違いが生じるかどうかを検証する。テーブルバイブレーターに乗せて、0、30、60、120秒と振動時間を変えて供試体を作成し、実験結果の違いや内部の状態（空気の抜け具合や繊維・骨材の分離など）を観察する。

(b) 竹繊維形状の違いによる影響（Aシリーズ）

竹繊維が補強材として有効に働くために、竹繊維の断面形状や寸法について検討する。実験変数の一つとして、繊維形状や繊維寸法を様々に変化させた供試体を計画し、強度試験を行う。竹を特定の形状に加工するとコストが上がるため、本研究の背景を踏まえ現実的ではないので、自然素材を活かした繊維形状を提案したい。太さや長さを変数とした、補強効果の違いを確認する。

繊維の断面積を変えたものとして、竹ひご（φ1.8mm）・同1/2・竹チップ（0.3mm×2.5mmの板状）を検討している。過去に実験した竹繊維（0.7mm×0.7mm）に比べると、それぞれ約5、2.5、1.5倍程度の断面積であり、補強効果の違いを比較検討できる。

(c) 配合設計の検討（Bシリーズ）

粗骨材（砂利）を通常のコンクリート並みに入れた。施工を踏まえ、骨材が大量に入ると繊維が有効に作用しないため、骨材量を低減して竹繊維の補強が有効に機能するような「セメント複合材料」としての調合設計方法を提案したい。さらに、水セメント比や繊維混入量も変動要因として調製し、基礎データの蓄積を行う。

(d) 化学混和剤が竹に及ぼす影響（Cシリーズ）

3種類の異なる混和剤を使用したモルタルで竹の表面を硬めて、1、6、12か月程度養生した後、竹の強度がどのように変化するか（あるいは変化しないか）を確認する。化学混和剤は、用途に応じた品質規格があり、成分も多岐に渡っている。Cシリーズでは、化学混和剤のどの成分が竹の組織にとって影響があるのか（あるいは影響がないのか）を、実験結果に照らして科学的な視点でメカニズムを明らかにする。

2.2 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は、広島県庄原市西城町大佐産の砕石、細骨材は、島根県仁多郡奥出雲町阿井産の加工砂である。その物理的性質を表1に、写真を写真1に示す。

実験で使用した竹材料は、表2に示す合計5種類を用意し、試験体を製作した。竹繊維束は、竹を繊維方向に解して長さを切りそろえたもので、断面形状は一定ではない（写真2）。表2の寸法（0.7mm×0.7mm）は、断面を矩形で置き換えた時の平均値である。

表 1. 骨材の物理的性質

種別	比重 (g/cm ³)	吸水率 (%)	最大寸法 (mm)	各ふるいに残る重量百分率(%)									粗粒率 FM
				15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	受け皿	
細骨材	2.52	1.15	-	-	0	0	5	29	57	77	93	7	2.61
粗骨材	2.72	0.5	15	0	44	55	1	0	0	0	0	0	6.43



写真 1. 本実験で使用した骨材

表 2. 使用した竹繊維材料

繊維種類*	寸法 (mm)			アスペクト比	写真	断面形状
	厚さ	幅	長さ			
竹繊維束 <繊維束>	0.70	0.70	30.0	42.9		
竹ひご <竹棒1/2>	φ 1.8 (半分にカット)		30.0	46.9		
竹ひご <竹棒>	φ 1.8		30.0	16.7		
竹ひご <竹棒L20>	φ 1.8 (半分にカット)		20.0	31.3		
竹チップ <竹チップ>	0.27	2.54	30.0	111.1		

* <カッコ>内は、本論中での表記



写真 2. 本実験で使用した竹繊維

表 3-1. 調査表(A,Bシリーズ)

シリーズ	繊維混入量 (vol%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	繊維 BF	混和剤
A	0.0	50	68.0	242	484	999	498	0.0	-
	1.0					982	489	9.3	-
B	0.0		40.0			588	934	0.0	-
			80.0			1176	311		-
			100.0			1470	-		-
	1.0		40.0			578	918	9.3	-
		80.0	1155	306	-				
		100.0	1444	-	-				

表 3-2. 調査表(Cシリーズ)

シリーズ	繊維混入量 (°/vol.)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	繊維 BF	
C	-	50	68.0	242	484	999	-	-	-
									AE剤(I種)
									AE減水剤 標準形(I種)
									高性能AE減水剤

2.3 竹繊維補強セメント複合材料の調査設計

全ての調査設計において、水セメント比50%で単位重量は242kg/m³、細骨材率68% (Aシリーズ)、空気量4%

で共通とした。繊維を混入すると施工性が低下することが考えられるが、混和剤は使用していない。混和剤による竹繊維への化学的作用が懸念され、この問題はCシリー

ズで計画しているため、A,Bシリーズで実験するすべての調合で混和剤は使用しないことにした。

竹繊維の調合量は、容積混入量を竹の密度を 1200kg/m^3 （実験で使用した長さ 30mm の竹ひご 10 本あたりの容積と重さを実測して算出）として質量に換算して決定した。全シリーズの配合表を表3に示す。

2.4 試験体製作

コンクリートの練り混ぜは、強制攪拌型コンクリートミキサを用いて行った。始めに、砂とセメントおよび水を投入し2分間混ぜた後、ミキサを止め、竹繊維を手でほぐしながら投入した。繊維投入完了後、1分間練り混ぜ、最後に粗骨材を投入し3分間練り混ぜた。練り混ぜが終わったフレッシュコンクリートは、ミキサから練り板に取り出し、手練りで再度全体を攪拌後、スランブの測定を行った。スランブ試験終了後、強度試験用型枠に打込んだ後、テーブルバイブレーターの上に乗せて振動を与え締めを行った。3.1で後述するように、予備実験による検証を踏まえて、打込み時の振動時間は120秒とした。

圧縮試験と割裂試験用試験体は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の軽量型枠、曲げ試験用試験体は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の鋼製型枠で製作した。円柱供試体は、それぞれ3体ずつ作製し、硬化コンクリートの強度値は3体の平均値として算出した。ただし、曲げ供試体は型枠数の都合により1体ずつ作製している。強度試験用試験体は、打設後3日目に脱型、試験材齢まで水中養生した。材齢28日目で全ての強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 振動時間と強度の関係（予備実験）

予備実験について、型枠打込み時の振動時間と割裂強度との関係を図2に示す。なお、試験体A3, A4は0秒と30秒の作製は行っていないので、60秒と120秒のデータのみ示す。また、図中の一点鎖線は繊維を入れないプレーンコンクリート（A0）の強度を示している。

図2より、繊維を入れたことにより割裂強度は上昇し、その割合は振動時間を長くするほど大きくなっている傾向が見られる。これは、振動することにより徐々に内部の空気量が低下し、材料が締固まったためと考えられる。ただし、A1（繊維束）の120秒振動したものは低下している。また、A2（竹チップ）の60秒振動したものは繊維を入れないものより強度が低下している。これらの原因は、あとで考察するように、A1とA2で使用している繊維の抵抗メカニズムが他とは異なるためと考えられる。よく振動締めを行ったコンクリートは、硬化コンクリートの強度が高い値を示すことは、既往の研究でも確認さ

れている⁷⁾。本実験においても、竹繊維が割裂強度に対して有効に作用するとともに、十分な締め固めを行うことでその増加割合が高くなる傾向を示すことが確認できた。

以上の結果より、本論で検討する供試体は、振動時間120秒で締め固めを行うことにした。

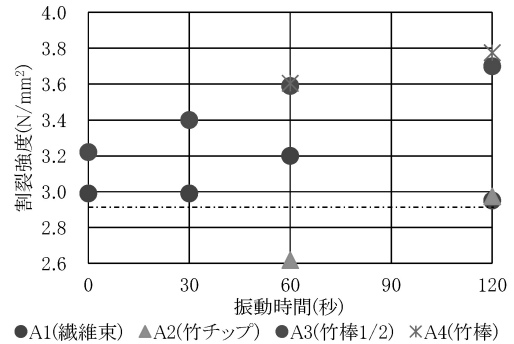


図2. 供試体作成時の振動時間と割裂強度の関係

3.2 竹繊維形状の違いによる影響（Aシリーズ）

竹材料の形状を変化させたAシリーズの実験について、材齢28日目の硬化コンクリートによる各種強度および単位容積質量を表4にまとめて示す。なお、表4に示す値は、各材料の試験体を3体ずつ（曲げ強度試験体は1体ずつ）作成し、実験を行った平均値である。

図3に、繊維の断面積を横軸にとり、圧縮、割裂、曲げ強度の関係をそれぞれプロットする。後で考察するように、断面積が小さな繊維束（A1）と竹チップ（A2）の試験体は、ひび割れの形成とともに繊維が破断するが、竹棒を混入したA3～A5試験体では繊維が破断することなく、コンクリートとの付着、あるいは摩擦により抜け出して強度増加につながったと考えられる。このように、強度を決定するメカニズムが繊維種類によって異なるため、全ての実験結果をひとくくりで評価はできないが、およそ断面積が大きい方が、割裂強度と曲げ強度は大きくなっていることがわかる。

表4. 硬化コンクリート試験結果（Aシリーズ）

Aシリーズ	繊維混入量 (vol%)	繊維種類	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	単位容積質量 ρ ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)
A0	0.0	なし	47.17	4.37	2.87	2.29
A1	1.0	繊維束	45.65	4.69	2.95	2.28
A2		チップ	42.67	4.73	2.97	2.28
A3		竹棒1/2	44.26	4.20	3.70	2.26
A4		竹棒	42.41	4.95	3.78	2.30
A5		竹棒L20	30.84	4.86	3.45	2.30

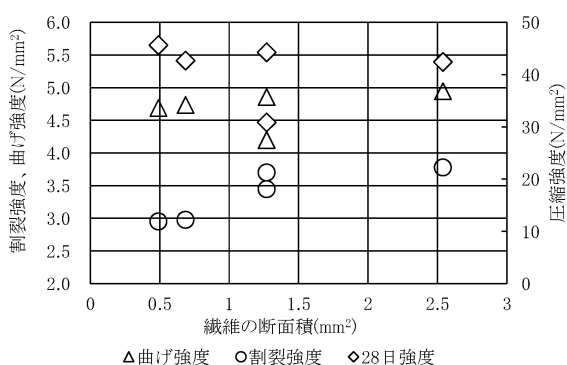


図3. 繊維断面積に対する強度

以下にAシリーズの各試験の概要と考察をまとめる。

(a) 圧縮強度

圧縮試験は、万能試験機により载荷した。繊維混入量にかかわらず、同じような破壊状況であった。圧縮強度は42.4~44.5MPaと、プレーンコンクリート(A0)の47.2MPaに比べて、最大1割程度低下した。なお、A5は30.8MPaと他に比べて極端に低いが、これは養生槽には恒温装置が無く、水温が10℃以上低かったためと考えられる。一般に、繊維補強コンクリートは、繊維量を増加しても圧縮強度の増加はごくわずかであって、繊維の混入により締固めが十分に行われにくく、強度が低下することもあることが知られている。Aシリーズでは、粗骨材が入っているため繊維が入り込める空間が少なく、均質に分散しなかったと推察される。また、混入繊維量が容積の1%だったため、繊維が圧縮強度に対して十分な補強効果を発揮することはなく、むしろひびわれを促進する遺物のような役割で圧縮強度の低下が起こったと考えられる。

(b) 曲げ強度

曲げ強度は、万能試験機により载荷治具を用い三等分点単調曲げ载荷を行った。一般に、コンクリートの曲げ強度と割裂強度には相関性があるが、本実験では強い相関性は見られなかった。

曲げ強度は、特に低かったA3を除くと、4.69~4.95MPaと、プレーン(A0)の4.37MPaに比べて1割程度大きくなり、竹を1%混入することにより、曲げ強度が1割程度大きくなることが確認できた。

(c) 割裂強度

割裂試験は、圧縮試験と同じ万能試験機により载荷した。2.95~3.78MPaと、プレーン(A0)の2.87MPaに比べて、最大3割大きくなり、1%程度の繊維混入で高い強度増加がみられた。

繊維とモルタルマトリックスによる複合材料の引張(割裂)強度を評価するに対して混合則を適用して考え

る。ひびわれ発生前に、繊維がマトリックスと十分に付着している(繊維とマトリックスのひずみは等しい)と仮定すると、竹繊維セメント複合材料の引張強度(α)は一般に次式が成立する⁸⁾。

$$\sigma_c = \eta_1 \eta_2 \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (1)$$

ここに、 η_2 : 繊維形状による係数、 η_1 : 繊維配向効果係数、 σ_f 、 σ_m : 繊維、マトリックスの応力、 V_f : 繊維の体積

この混合則に基づいて、割裂強度において竹繊維が抵抗に寄与する負担強度の割合を計算してみる。

実験後の割裂面を見ると、断面積が小さな繊維束(A1)と竹チップ(A2)の試験体は、ほとんどすべての繊維が破断していた(図4②の状態)。一方、竹棒を混入したA3~A5試験体では繊維が破断することなく、コンクリートとの付着、あるいは摩擦により抜け出して強度増加につながったと考えられる(図4③の状態)。また、一番太い竹棒(A4)では、繊維がくの字に折れ曲がり、縦方向に裂けているものが何本も観察された(写真3)。

実験では、繊維種類に関係なく、繊維を入れたものはいずれも入れないものに比べて割裂強度が高くなったが、強度増分に寄与する繊維の抵抗機構は繊維の太さによって異なっていると考えられる。繊維が細い繊維束(A1)と竹チップ(A2)では、竹繊維の引張強度により強度増分が起こった。また、断面積が大きな竹棒(A3~A5)では、竹繊維は破断せずに、マトリックスとの付着抜け出し抵抗が強度増分に寄与したと考えられる。特に、断面積が大きな竹棒(A4)では、ひびわれが開いた後に、竹繊維が曲げ抵抗を示し(図4④の状態)、この抵抗応力(ダボ抵抗) σ_d は、本実験のようなモルタル強度が低く(20MPa未満)、補強筋強度が低い(400MPa未満)の場合、次式で簡単に計算される⁹⁾。

$$\sigma_d = 0.25 * d^2 \sigma_f \quad (2)$$

ここに、 d : 繊維の直径、 σ_f : 繊維の強度

以上、本実験で観察された現象を踏まえて、各試験体において繊維が負担している強度は、式(1)をもとに以下の式(3)で表すことにする。式(3)の第一項はコンクリートのひびわれ強度(図4①の状態)、第二項は繊維破断または付着による強度(図4②または③の状態)、そして第三項は繊維のダボ抵抗(図4④の状態)による寄与分として

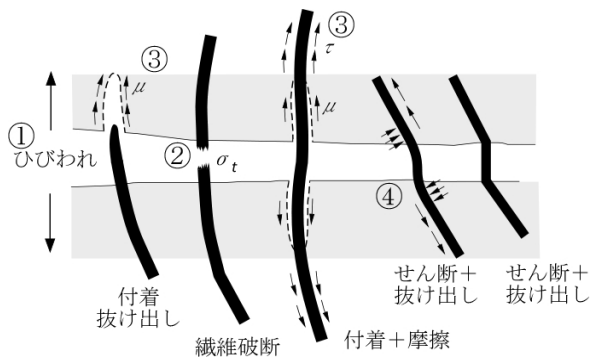


図 4. 繊維混入量と単位容積質量



写真 3. 破断面における竹棒の様子

表 5. 繊維の抵抗に寄与する負担強度の計算

		無補強	繊維束	竹チップ	竹棒1/2	竹棒	竹棒L20
断面積		-	0.49	0.686	1.27	2.54	1.27
繊維の細長比(0/d)		-	42.86	111.1	46.88	16.67	31.25
割裂強度(Exp)		2.87	2.95	2.97	3.70	3.78	3.45
コンクリート	σ_m	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87
	V_m	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	計	2.87	2.84	2.84	2.84	2.84	2.84
繊維破断	σ_t		10.25	10.25			
	V_f		0.01	0.01			
	計		0.10	0.10			
繊維付着	τ				86.48	30.75	57.66
	V_f				0.01	0.01	0.01
	計				0.86	0.31	0.58
繊維ダボ	σ_d				5.06	20.25	5.06
	γ				0.03	0.03	0.03
	計				0.15	0.61	0.15
割裂強度(Cal)		2.87	2.94	2.94	3.86	3.76	3.57
Exp/Cal		1.00	1.00	1.01	0.96	1.00	0.97

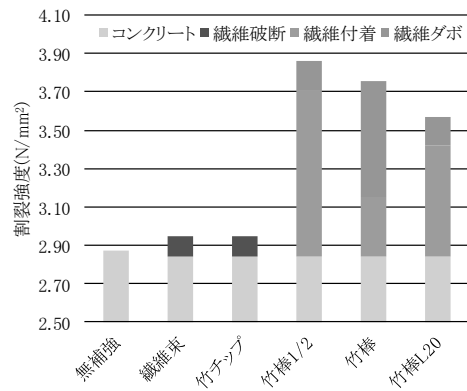


図 5. 割裂強度の負担 (式(3)による)

それぞれの累加で計算する。

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \beta(\sigma_t \text{ or } \tau) V_f + \gamma \sigma_d \quad (3)$$

ここに、 V_m ：マトリックスの体積、 β ：繊維の不連続性、ランダム的な配置による係数(既往の研究⁹⁾より0.41)、 σ_t ：繊維の破断強度(既往の研究¹⁰⁾より25MPa)、 τ ：繊維の付着強度(竹棒とコンクリートの付着力として既往の研究⁹⁾より0.35MPa)、 γ ：繊維ダボの負担割合(実験値をもとに0.03とした)、 σ_d ：ダボ抵抗(式(2))

この式(3)を用いて、割裂強度を計算したものを表5に、また計算値における強度負担が分かるようにグラフにしたものを図5に示す。コンクリートと繊維の負担割合が定量的に計算することができ、実験結果ともよい対応を示していることが分かる。

3.3 細骨材率と強度の関係 (Bシリーズ)

細骨材率を変化させた B シリーズの実験について、材齢 28 日目の硬化コンクリートによる各種強度および単位容積質量を表 6 にまとめて示す。なお、表 6 に示す値は、各材料の試験体を 3 体ずつ(曲げ強度試験体は 1 体ずつ)作成し実験を行った平均値である。試験方法は、A シリーズと同じなので詳細は省略する。

図 6~9 には、B シリーズの変動因子である細骨材率を横軸にとり、単位容積質量、圧縮強度、割裂強度、そして曲げ強度をそれぞれプロットしたものを示している。○は無補強 (B0)、●は補強 (B1) 試験体である。図 6 から、繊維を 1%混入すると密度が小さくなり、粗骨材の割合が減ると、軽くなっていることがわかる。図 7 は圧縮強度の関係であるが、細骨材率が低いと繊維を混入することで強度が低下するが、80%あるいは 100%と粗骨材の量が減り、モルタルに近くなると繊維による補強効果が表れ、繊維を入れるほうが強度は高くなっていることがわかる。図 8 の割裂強度も圧縮強度と同じ傾向が見えるが、強度の増加はわずかである。図 9 は曲げ強度である

表 6. 硬化コンクリート試験結果 (B シリーズ)

Bシリーズ	繊維混入量 (vol%)	細骨材率 (%)	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	単位容積質量 ρ ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)
B0-40	0.0	40.0	43.69	4.39	3.11	2.36
B0-68(A0)		68.0	47.17	4.37	2.87	2.29
B0-80		80.0	35.17	4.50	3.35	2.28
B0-100		100.0	32.66	4.25	3.18	2.23
B1-40	1.0 (竹チップ)	40.0	35.42	3.80	2.69	2.33
B1-68(A2)		68.0	42.67	4.73	2.97	2.28
B1-80		80.0	40.38	4.61	3.75	2.27
B1-100		100.0	36.41	4.12	3.33	2.22

○無補強試験体(B0), ●竹チップ1%補強試験体(B1)

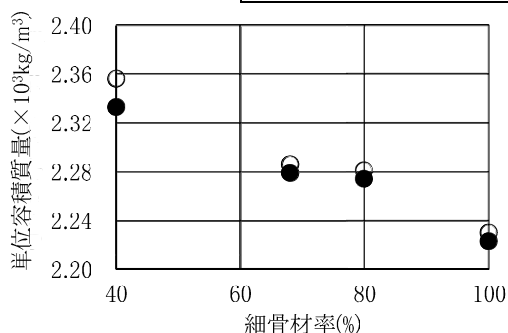


図 6. 細骨材率に対する単位容積質量の変化

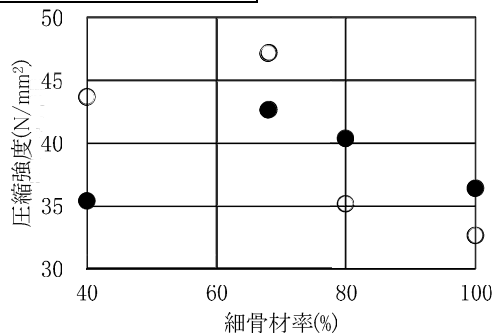


図 7. 細骨材率に対する圧縮強度の変化

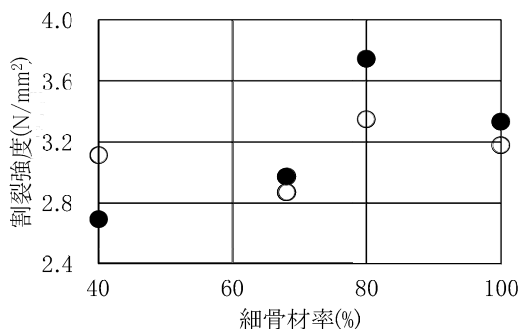


図 8. 細骨材率に対する割裂強度の変化

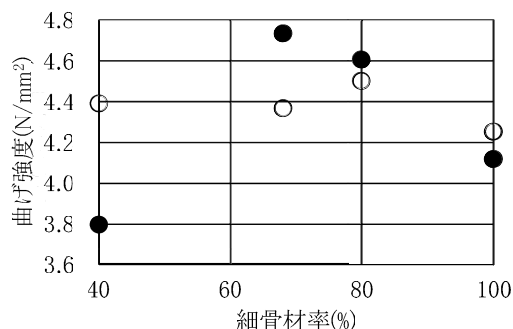


図 9. 細骨材率に対する曲げ強度の変化

が、割裂強度と同じく、ほとんど繊維混入の影響はない。

既往の研究⁹⁾によると、繊維補強コンクリートは、単位水量、単位セメント量および繊維混入率や繊維形状に応じて、コンシステンシーに依存した最適細骨材率が存在する。細骨材率と強度との関係は明確ではなく、本実験結果からも、先に検討した A シリーズと異なり、細骨材率が強度に及ぼす定量的な影響は確認できなかった。

3.4 化学混和剤が竹に及ぼす影響 (Cシリーズ)

アルカリ中において、表面に何も処理していない竹材は、アルカリ成分によって竹の細胞が侵され、次第に引張強度が低下していくことが既往の研究者により確認されている。しかし、古い実験なので詳細が不明であり、このことについてはその後研究された事例がない。C シリーズでは、このことについて検証するため、簡単な試験体を製作して、実験することにする。

C シリーズは、先の実験とは試験体製作方法が異なるので、はじめに研究計画と試験体製作、実験概要を説明する。

(a) 研究計画

実験の方法は、直径 160mm 程度、肉厚 15mm の 3 年目の孟宗竹から、図 10 に示す寸法で試験片を削り出し、試験区間の 60mm 部分を写真 4 に示すような型枠で、モルタルで満たして硬化させた。1, 6, 12 か月目に、硬化したモルタルから試験片を 3 本ずつ取り出し、試験片の断面寸法を測定し引張試験を実施する。

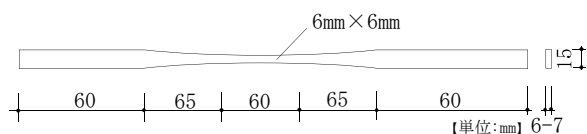


図 10. 引張試験片

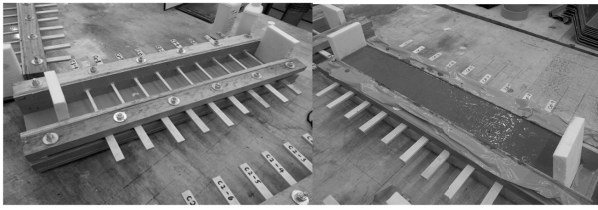


写真 4. 引張試験体型枠



写真 5. 実験で使用した化学混和剤

表 7. 化学混和剤成分表

	AE 剤	AE 減水剤	高性能 AE 減水剤
主成分	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤	変性リグニンスルホン酸化合物	ポリカルボン酸エーテル系化合物
密度 (g/cm ^{20°C})	1.02~1.06	1.06~1.10	1.04~1.11
全アルカリ量 (%)	1.1	1.1	1.4
塩化物イオン量 (%)	0.01	0.03	0.01
外観	淡黄色液体	暗褐色液体	赤褐色液状
使用量	C×0.006%	C×1%	C×0.9%

型枠に流し込んだモルタルには、化学混和剤を添加し、混和剤の主成分が竹の細胞に及ぼす化学的作用を検証する。混和剤の中でも建設現場で比較利用度が高い AE 剤、AE 減水剤、高性能 AE 減水剤の 3 種類を用いる（写真 5）。混和剤の主成分を表 7 に示す。実験では、混和剤を含まないものと、3 種類の混和剤を添加した配合としたもの、4 種類を作成する。

(b) 配合設計

配合設計では、化学混和剤以外の条件はすべて同じとした。本来、化学混和剤には減水効果があるので、使用する混和材の性能に応じて単位水量を変えるべきであるが、今回の実験の目的から、施工性や耐久性は関係ないので、混和剤の添加がある・なし以外は配合を変えていない（表 3-2）。

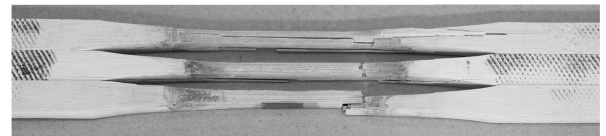
化学混和剤の使用量は、表 7 に示すとおりであるが、本実験では標準量の 1.5 倍を添加している。混和剤による影響を直接見たいため少し多めに添加した。これによって、空気分散効果が大きく、スランプ値やフロー値が計測できない程やわらかいコンクリートが出来たが、上記の通り施工性については触れないので、このまま配合を変えずに型枠に打ち込んだ。

(c) 供試体製作

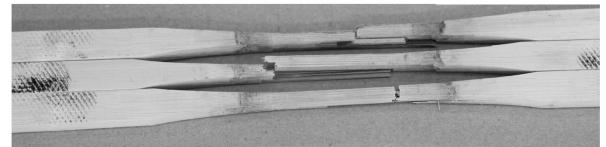
強制攪拌型ミキサに材料を投入し、セメント複合材料を練る。引張試験体の試験部分が、セメントに接触し硬化するように型枠を製作し、この型枠内に練り上がった材料を打込む。打ち込み完了 2 日後に脱型し、20°C の恒温室内で養生する（写真 6）。なお、湿度は調整していないので、30% 程度の乾燥した状態で養生している。



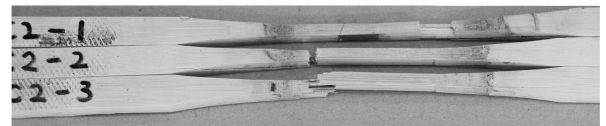
写真 6. 恒温室内の様子



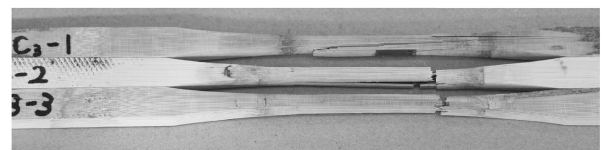
(a) C0



(b) C1



(c) C2



(d) C3

写真 7. 引張試験片の破断状況

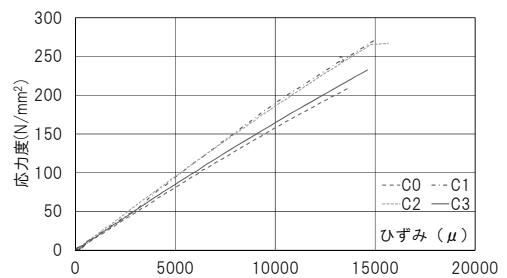


図 11. 引張応力-ひずみ関係

(d) 竹材の引張試験

材齢 28 日目に引張試験をした試験片の試験部分を写真 7 に示す。試験片ごとに大きな違いはなく、断面を輪切りにするように破断したものと、縦方向に長く裂けるように破断したものがそれぞれであった。

同じシリーズは、3 本ずつ試験したが、そのうち 1 本にはひずみゲージを 2 枚貼付して、ひずみを計測した。図 11 に、試験片 4 本の引張応力-ひずみ関係を示す。材齢 28 日では 4 本とも剛性はほとんど変わっていないことが分かる。

各シリーズ 3 本の引張強度を平均したものを、図 12 に示す。引張強度については、明らかに化学混和剤を添加したもの (C1~C3) が低下していることが分かる。ただし、この原因が混和剤の腐食の影響かどうかについては、現時点のデータだけでは判別不能である。図 13 に、単位容積重量を比較したものを示すが、先に述べたように、配合方法、混和剤の添加量、養生方法などの影響から、混和剤を添加した試験体は軽くなっている。これは空気がモルタル内部に分散して、空気量が増えているためと考えられる。したがって、C1~C3 の竹片は空気に広く触れているので、乾燥しやすくなっているとも考えられ、混和剤による化学的な作用があるかどうか、これから実施する 6 か月目、12 か月目の実験結果も踏まえ、検討していきたい。

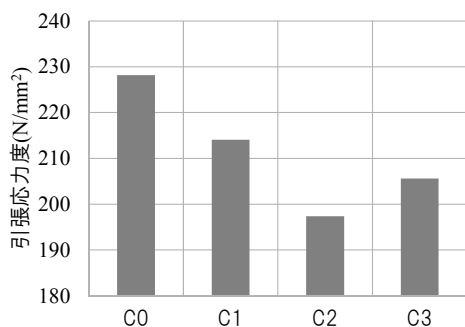


図 12. 引張強度の比較

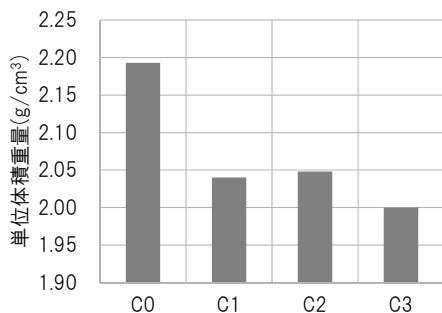


図 13. 単位体積重量の比較

4. まとめ

自然素材である竹を活用することを検討し、竹筋繊維補強コンクリートの開発を行うことを目的に、基礎的な実験データを実測した。実験パラメータとして、竹の形状 (断面積と長さ)、細骨材率など4つのシリーズで試験体を製作し、基本的な物性として、硬化コンクリートの強度特性 (圧縮、割裂、曲げ)、単位容積質量など検討した結果、次のことが明らかになった。

- 1) 施工性に関する検討
繊維を入れることにより、割裂強度は上昇し、その割合は振動時間を長くするほど大きくなった。これは、振動することにより内部の空気が抜けて材料が締固まったためと考えられる。
- 2) 竹繊維形状の違いによる影響 (Aシリーズ)
ひびわれに直接的に関係ある割裂強度は、2.95~3.78MPaと、プレーンコンクリートの2.87MPaに比べて、最大3割大きくなり、1%程度の繊維混入で高い強度増加がみられた。供試体破壊面の繊維の状態から、竹棒を混入した試験体では繊維が破断することなく、コンクリートとの付着、あるいは摩擦により抜け出して強度増加につながったと考えられる。
- 3) 細骨材率と強度の関係 (Bシリーズ)
細骨材率が大きい方が繊維は有効に作用することは確認できた。
- 4) 化学混和剤が竹に及ぼす影響 (Cシリーズ)
化学混和剤を添加したコンクリートに浸した竹材の引張強度は、明らかに化学混和剤無添加に対して低下した。ただし、この原因が混和剤の腐食の影響かどうかについては、現時点のデータだけでは判別不能である。

謝辞

試験体の製作にあたり、中国アサノテクノス株式会社より、竹材料と骨材の一部を提供していただきました。また、試験体製作および実験実施に際し、近畿大学工学部建築生産研究室のH25年度卒業生に協力いただきました。ここに記して深甚の謝意表します。

参考文献

- (1) Masakazu TERAJ, Koichi MINAMI, “Fracture Behavior and Mechanical Properties of Bamboo Reinforced Concrete Members”, 11th International conference on the mechanical behavior of materials (ICM2011), Proceedings Vol.10, (2011-6) pp.2976-2981
- (2) Masakazu TERAJ and Koichi MINAMI, “Basic

- Study on Mechanical Properties of Bamboo Reinforced Concrete”, IABSE-IASS 2011 Symposium, Proceedings DVD, (2011-9)
- (3) 寺井雅和, 南 宏一, “竹筋コンクリートの付着性状および曲げ性状に関する基礎的研究”, コンクリート工学年次論文集, Vol.33(DVD), (2011-7)
- (4) 細田貫一, “竹筋コンクリート工”, 修教社書院, (1942-2)
- (5) Masakazu TERAJ and Koichi MINAMI, “Fracture Behavior and Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Concrete”, Key Engineering Materials, Vols.488-489, Trans Tech Publications, Switzerland, (2011-9), pp.214-217
- (6) 寺井雅和, 南 宏一, “竹繊維補強コンクリートの力学特性に関する実験的研究”, コンクリート工学年次論文集, Vol.34(DVD), (2012-7)
- (7) 徳重英信, 川上 洵, 和田一朗, “もみ殻灰混和モルタルの振動締固め効果に関する研究”, コンクリート工学年次論文集, 第24巻No.1, (2002-7), pp.537-542
- (8) 小林一輔, “繊維補強コンクリートー特性と応用ー”, オーム社, (1981)
- (9) Miha Tomazevic, “Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings Series on Innovation in Structures and Construction”, Vol.1, Imperial College Press, (1999)
- (10) Fergyanto E. GUNAWAN, et al., “Mechanical Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber”, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.3, No.7, (2009-3), pp.943-951