

植物繊維補強材料の強度特性に関する実験的研究

寺井 雅和

Experimental Study on Properties of Strength of Natural Fiber Reinforced Materials

Masakazu TERAII

Abstract

Plain concrete is a brittle material, with low tensile strength and strain capacities. To help overcome these disadvantages, there has been a steady increase, since the late 1960s, in the use of fiber reinforced concrete (FRC). Fibers are widely used in the past for reinforcement as stabilizing agents in many types of mortar and concrete. The most common fibers are steel, organic polymers, glass, carbon, asbestos, and cellulose. The fibers can be divided into "synthetic fibers" made from various materials processed by chemical means, and "natural fibers" processed and purified materials taken from part of the mineral, plants, and animals. For durability, steel, carbon, glass, synthetic fibers such as polypropylene is used for the reinforcement of concrete and mortar. However, the cost of FRC is estimated to increase several times the cost of plain concrete.

In order to improve the cracking strength and durability, this paper investigates the possibilities of cement composites with some natural fibers. Two types of cement-based building materials, "mortar" and "rammed earth" were taken up.

Keywords: Natural Fiber, Fiber Reinforced Material, Cement, Rammed Earth, Bamboo

1. はじめに

繊維補強材料は、カーボン繊維やガラス繊維でプラスチックを補強するFRP (Fiber Reinforced Plastic) が古くから開発され、飛行機や自動車など幅広い産業で実用化されている。このような工業製品に利用される繊維は、主に化学繊維と呼ばれ、化学的プロセスにより人の手によって造りだされる。一方で、人工的に造られない繊維を天然繊維と言い、表1に分類される。植物繊維も強化プラスチックなどで、自動車のバンパーや内装材として工業製品に利用される。例えば、竹繊維は、天然繊維のうち藁（わら）などと同じ茎幹繊維に分類され（表1）、他の植物繊維に比べると、軽く、高い弾性係数があるため（表2）、近年では衣料用や自動車の内装材など工業製品にも幅広く利用されている。竹の単繊維の太さは平均15μmで、5~25μmの広い範囲に分布し、繊維長は平均で約2mmと綿繊維に比べると細く短いため、紡績糸には不向きであると考えられているが、山間地で放置される竹林が資源に変わり、山林の荒廃の歯止めにもなるため、このような工業製品への活用の動きに対する期待は大きい。

表1 天然繊維の種類

鉱物繊維	石棉(アスベスト)	
動物繊維	羊毛・絹・羽毛 など	
植物繊維	種子毛繊維	綿(コットン)・カボック
	韌皮繊維	亜麻(リネン)・苧麻(ラミー) / 大麻(ヘンプ)・黄麻(ジュート) など
	葉脈繊維	マニラ麻・サイザル麻・ニュージーランド麻・羅布麻(ロープーマ)・パイナップル・バナナ など
	果実繊維	やし、へちま など
茎幹繊維	竹・麦藁・稲藁 いぐさ・シユロ など	

表2 自然植物繊維の物性

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Elasticity modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Steel	7.8	250~4200	210	0.5~35
Carbon	1.8	780~6500	50~800	0.5~2.5
Glass	2.5	1000~3900	70	1.5~3.5
Polyester	1.4	700~900	8.4	11~13
Polypropylene	0.9	550~800	3.5	~25
Rayon	1.5	400~650	7.0	10~25
Nylon	1.1	750~850	7.0	16~20
Aramid	1.4	2500~5500	74~240	1.3~4.6
Vinylon	1.3	700~1500	11~37	7
Asbestos	3.2	550~1000	84~140	~0.6
Cotton	1.5	400~700	5.0	3~10
hemp	1.5	300~400	13~35	-
Bamboo	1.2	390~730	21~38	-
Banana	1.4	-	27~32	-
Coconut	1.5	-	13.7	-

筆者は、低品質な材料でつくられる諸外国の建築物に対して、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、竹繊維補強コンクリートの製造に関する可能性を探り、基礎的な実験を行ってきた¹⁾。ここで言う“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植物繊維を有効利用することを検討している。海外では、麻やバナナなどの植物繊維をコンクリートの補強材にしている研究がいくつか見られる²⁾。日本国内では、竹チップ（竹をミキサーなどで荒く砕いたもの）をセメント硬化体に混入した事例は見られるが、海外に比べて研究事例は極めて少ない。

セメント材料に植物繊維を混入するとき問題となるのは、耐久性である。すなわち、アルカリ性であるセメントの中に、セルロースが主成分の植物を混入することで脂肪分や糖質が分解され、この分解成分が水和反応を阻害し強度が上がらないとか、長期的なひび割れ抑制が不足することなどが指摘されている。しかしながら、筆者らが過去に行った研究では、適度な繊維量であれば、既往の研究で指摘されたような硬化阻害の問題は明確にはならなかった³⁾。

本研究では、セメントを固化材料とした建設資材に、天然素材である植物繊維を補強材として混入することで、低コストで低技術、かつ環境に優しい建材開発を狙う。ひびわれ強度や耐久性の向上を図るために、多数ある植物繊維のうち最適な補強材料を探索することを目的とした。セメント系建材として、「モルタル」および「版築」の2種類を取り上げた。版築は、湿った土を型枠の中に注ぎ込み、それぞれの層が10~15cm厚になるように、突き棒で突き固めて圧縮して壁面を製造する工法である。施工の手間が多めで非生産的である反面、人力で施工可能なこと、地産地消が可能であることから、建設に伴う二酸化炭素の排出量を抑制でき、環境負荷低減へ一定の効果を期待できるものと考えられる。最近、この版築工法が一部の先進国で見直され、洗練された型枠システムや電動式・空気圧式による突固めにより、環境的・経済的な理由から、在来の組積造建築の有効な代替建築構法となりうると言われている。筆者の研究室では、コンクリート、モルタル、ソイルセメント、版築など様々な建材の開発を行っており、近年、ひびわれ補強や強度補強に植物繊維の適用可能性を検討している。本論では、モルタル材料と版築材料への適用事例を紹介する。

2. 植物繊維

今回の実験で補強材として使用する植物繊維は、写真

1に示す9種類であり、縄や紐としてホームセンターで販売されているもの、あるいはペットショップで餌や飼育用として販売されているものを入手した。

大きく分けて繊維状のものとそうでないものがある。繊維状のものとして、ヤシ、綿、竹（以上3種類は左上のトレー内）、麻（下段左）、サイザル麻（下段中央）、パームヤシ（下段右）の6種類、繊維状を形成していないものとして、木くず（右上）、もみ殻（上段中央）、チモシー（右端）の3種類である。



写真1 実験で使用した繊維

3. 植物繊維の吸水率

3.1. 実験計画

セメント系材料の中に植物繊維を混入すると、周囲の水分を吸収してしまい、水和反応が十分に行われず強度が発現しない。繊維によって吸水の程度は異なり、これを定量的に確認するため、吸水率試験を行った。初めに繊維単体の吸水率を調べ、その結果から特徴ある繊維を3種類選出して繊維補強モルタルで再び吸水率および強度試験を行った。

植物繊維を100℃のオーブンに10分程度入れ、十分に乾燥させた後、正確に10g計測したものを水に浸け一定時間（30分・1時間・2時間・3時間・72時間）経過した後の重さを計測する（写真2）。質量計量前には、繊維表面に付着している水分を切るため一度ザルに通し（写真3）、布の上で1分間静置した。吸水率Qは、次式(1)で算出する。

$$Q = \frac{\text{吸水量}(\text{吸水した繊維の質量} - \text{乾燥質量})}{\text{乾燥質量}} \times 100(\%) \quad (1)$$



写真2 吸水中の繊維



写真3 繊維質量の計量

繊維補強モルタルの供試体は、φ50×100mmの型枠を用いて作成し、養生期間は28日目から吸水実験を始めた。始めに、オープンで約48時間乾燥させる。その後、水槽内に供試体を浸し、1時間・1日・7日・28日目それぞれの質量を計量し、上式(1)で吸水率を計算する。さらに、乾燥や吸水による強度変化を検証するために、圧縮試験も同時に行った。

3.2. 実験結果および考察

図1に0.5・1・2・3・72時間後に計量した植物の質量の推移を示す(横軸は、単位を時間とし対数表示にしてある)。繊維により傾向は異なるが、一般的に浸水後30分後には急激に質量が増加し、1時間後にはほぼ質量は安定した。竹は30分で最大値を示すが、その後徐々に質量は低下する。一方、チモシーや綿は時間とともに徐々に質量が増える傾向が見られる。浸水前の乾燥植物は10gで始めたが、72時間後の質量は、30~50gと吸水量は数倍の違いがあることが分かった。

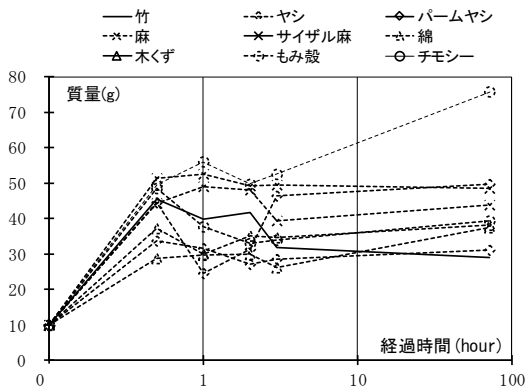


図1 各植物の質量の推移

表3 時間ごとの質量の増減量

試験体種類	質量(g)				
	乾燥後	1時間後	1日後	7日後	28日後
無混入	-41.5	31.6	6.6	0.1	0.8
ヤシ繊維混入	-44.2	27.4	15.4	0.6	0.6
麻繊維混入	-51.3	36.9	14.0	0.4	1.7
もみ殻混入	-45.0	32.0	10.9	0.2	1.3

次に、各植物の吸水量が大きい(ヤシ)・中(麻)・下(もみ殻)の3種類の繊維を選択し、これらの繊維を混入した繊維補強モルタル供試体を製造し、この供試体の吸水率の変化を測定する。比較のために、繊維を無混入のモルタル材料も測定する。表3に乾燥直後の質量と、浸水後所定時間の質量の増加分をまとめる。繊維を混入した3種類の供試体は、乾燥させると質量減少が大きい。繊維の保水が大きく、乾燥によってこの水分も減少したためと考えられる。1時間後の吸水量は、麻が大きく、ヤシが小さい。この傾向は、植物単体の吸水量とほぼ同じ

であり、繊維の吸水特性が繊維補強モルタル材料の吸水特性に依存することが確認できた。

吸水時の圧縮応力度の推移を、図2に示す。繊維無混入のモルタルは、一度乾燥を経験すると、吸水しても強度はもとに戻らない。これは、乾燥によって内部に微細な乾燥ひびわれが発生し、これが強度低下に繋がっていると考えられる。一方の繊維を入れたものは、乾燥後も強度はあまり低下していない。

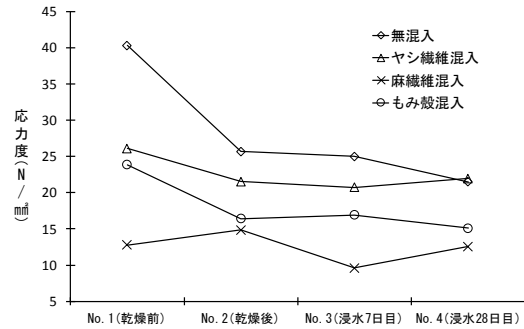


図2 乾燥・吸水による圧縮応力度の変化

表4 繊維補強モルタルの配合

試験体番号(繊維種類)	水(g)	セメント(g)	砂(g)	繊維(g)
No.1(無混入)	225	450	1350	-
No.2(ヤシ)	230			14.6
No.3(竹)	234			14.4
No.4(サイザル麻)	234			17.0
No.5(麻)	248			18.6
No.6(パームヤシ)	234			14.6
No.7(綿)	234			19.1
No.8(木くず)	234			18.6
No.9(もみ殻)	234			14.9
No.10(チモシー)	234			17.0



写真4 フロー試験



写真5 脱型後の供試体

4. 繊維補強モルタル

4.1. 実験概要

植物繊維を混入したモルタルの特性を確認するために、施工法・フレッシュ性・硬化性状について検討する。表4に示すように、配合は、水225g、セメント450g、砂1350gを基本としたが、フロー値を調節するために、試験体ごとに水量を調整した。植物繊維の混入量は、試験体体積の約1%とした。試験体はJIS R 5201によりモルタル試料を混練りし、フロー試験を行った後、三連型枠に打設した(写真4, 5)。2日後に脱型し、28日目の材齢まで水中養生を行った。曲げ強度はJIS A 1106に従

い3点曲げ試験を3本の試験体全てに対して行い、曲げ試験により破断した6個の供試体を用いて圧縮強度試験を行った。それぞれの平均値として応力度を算出した。

4.2. 実験結果および考察

計8種類の植物繊維をモルタルに混入し、施工時にフロー値、硬化後に曲げ強度と圧縮強度を測定した。図3にフロー値を示す。繊維状の植物を混入した6種類は、無混入のモルタルに比べて大きくフロー値は低下した。また、繊維状ではない、木くずとチモシーは、それほど大きく低下していない。もみ殻を混入した場合は、フロー値が大きくなり、流動性が高くなる性状を示した。繊維の長さはいずれも30mmに切り揃えて混入しているが、フローが大きくなったもののうち、もみ殻や木くずはそのまま混入、チモシーは切り揃えたものの乾燥してあるため、脆く、細かく粉砕されてしまった。

図4に曲げ応力度(白棒, 右目盛り)と圧縮応力度(灰棒, 左メモリ)を示す。なお、チモシーを混入した供試体は、脱型時に十分に硬化しなかったため強度データは残っていない。いずれの実験結果も、植物を混入することにより、無混入よりも低くなる結果となった。これは、植物内部の糖分が溶け出したことにより、セメントの硬化を疎外したと考えられるが、麻・サイザル麻のように大幅に数値が変化したものや、ヤシ・竹繊維のようにそれ程数値が低下しなかったものなど、混入する繊維の種類によって違いがあることが分かった。この考えに基づくと、耐アルカリ性が植物によって差があると考えられ、ヤシや竹はアルカリには強いと言える。写真6に、曲げ破壊後の供試体断面の様子を撮影したものを示す。断面を横切るように繊維が分散し、曲げに対して抵抗している様子が確認できる。もみ殻や木くずは、そのまま混入したので、あまり補強に寄与しているようには見えない。

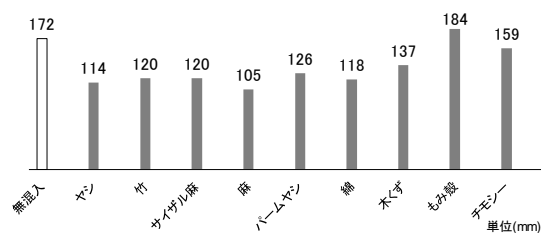


図3 フロー値一覧

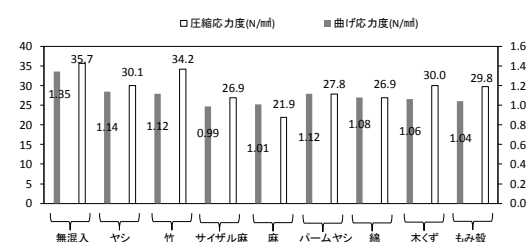


図4 曲げ・圧縮応力度一覧



写真6 実験後の供試体断面の様子
(上段左から、ヤシ、竹、サイザル麻、麻、
下段左から、パームヤシ、綿、木くず、もみ殻)

5. 繊維補強版築

5.1. 実験概要

版築壁に使用される壁土は、藁スサを加えて練り混ぜ使用されている⁴⁾。藁スサが補強材として古くから使用されてきたのは、農家では大量の藁が廃棄されるほどあり、その有効活用的一端と考えられるが、版築壁の補強として藁が最も適しているのは、壁土の特性を確認する実験的研究が行われた事例は見られない。本研究では、版築壁に混入してより大きな強度が出る繊維の選択を探るための実験を行うものである。

本研究で使用する土は、広島県東広島市の山中から掘り出し、オープンで十分に乾燥させたものである。土質試験の結果を表5に示す。この結果より、本実験で使用した土は、真砂土で、沖積層の砂質土であると判断される。また、土粒子の密度は大きく、間隙率が低いため、粒径が大きいことがわかる。図5にふるい分け試験の結果を実線で示す。点線はコンクリート用細骨材の粒度の標準であるが、およそ砂の標準粒度の範囲内に分布していることがわかった。供試体作成に使用した水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

表5 本実験で使用した土の物性

含水比 (%)	土粒子の密度 (g/cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	乾燥密度 (g/cm³)	間隙率 (%)
5.21	2.65	1.87	1.44	45.75

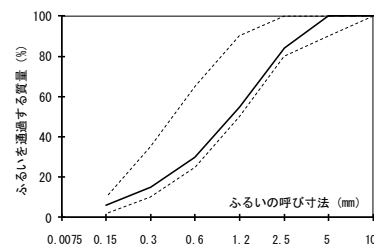


図5 ふるい分け試験の結果

体積比で土95、セメント5の配合で、φ50mmの円柱供試体を製作した。締固めに加えた水量は、試料土の最適含水率13%に対して、より強度が発現する11%になるよ

うに火水をした。繊維は、長さ 20mm で切り揃え、混入量は体積比 1%とした。

版築は土を突き固めることにより締め固まり、より強固になるが、この突き固めの程度を定量化するために“締め固めエネルギー(E)”が用いられる⁵⁾。既往の研究では、Modified Proctor 試験から、 $E=2500\text{kJ/m}^3$ 程度で供試体を製作しているものが多い^{6),7)}。本実験でも、締め固めエネルギーが 2500kJ/m^3 となるように製作した(写真7, 8)。



写真7 供試体製作



写真8 突き固めの様子

表6 版築材料の実験結果一覧

混入繊維	単位容積質量 g/cm ³	圧縮強度 N/mm ²
ヤシ	1.74	3.60
パームヤシ	1.75	4.29
サイザル麻	1.69	3.00
竹繊維	1.73	4.24
竹チップ	1.71	3.21
藁	1.72	2.76
広葉樹	1.73	3.34

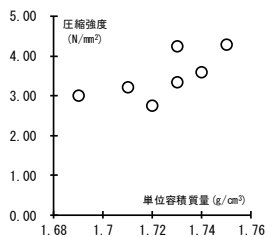


図6 単位容積質量と強度の関係

写真9 破壊後の供試体
(左から、藁、サイザル麻、竹繊維)

5.2. 実験結果および考察

ここでは、計 7 種類の植物繊維を版築材料に混入し、硬化後に単位容積質量と圧縮強度を測定した。表6に測定した結果を一覧にして示す。繊維を混入しない版築材料の単位容積質量は 1.76g/cm^3 であったが、繊維を混入した供試体はいずれも小さくなっていることがわかる。サイザル麻を混入したものは、特に小さくなっている。圧縮強度は混入繊維の種類によって、かなり差が出た。特に高いのは、パームヤシと竹繊維である。一方、古典的に使用されてきた藁は今回の実験の中では、最も小さくなった。図6に、実験で得られた単位容積質量と圧縮強度の関係を示す。単位容積質量が小さい供試体は、圧

縮強度も小さくなっている。いずれの供試体も繊維が混入されているが、混入する繊維の種類によって締め固まりの程度は異なり、このことが強度の違いとして現れたと考えられる。

写真9に、破壊試験後の供試体を示す。ひびわれは、供試体上部に集中しているが、これは版築供試体の施工方法に依存するためと考えられる。すなわち、層状に突き固めるため、下層部は十分に締め固まるものの、上層部は比較的緩い状態にあったことが考えられる。

6. まとめ

セメントを固化材料とした建設資材に、天然素材である植物繊維を補強材として混入することで、低コストで低技術、かつ環境に優しい建材開発を狙う。ひびわれ強度や耐久性の向上を図るために、多数ある植物繊維のうち最適な補強材料を探索することを目的とした。セメント系建材として、「モルタル」および「版築」の2種類を取り上げて実験を行った結果を以下にまとめる。

- 1) 植物繊維の吸水率：繊維の種類によって、給水能力は数倍の違いがある。吸水能力が高いのは、チモシー、麻、ヤシなどで、逆に低いのは、竹やパームヤシであった。
- 2) 繊維補強モルタル：麻やサイザル麻を混入したモルタルは、強度低下が大きく、ヤシや竹繊維を混入してもそれ程強度は低下しなかった。耐アルカリ性が植物によって差があると考えられ、ヤシや竹はアルカリに強いと言えることができる。
- 3) 繊維補強版築：繊維を混入することで、圧縮強度が向上したのは、パームヤシと竹繊維であった。古典的に壁土に使用されてきた藁は今回の実験の中では、最も小さい値となった。

植物繊維を建材に混入すると、水分を吸収するため、硬化後の強度やひびわれ性状に影響することが考えられる。今回の実験では、モルタル材料と版築材料で混入したが、強度向上に効果がある繊維は異なっていた。ただし、竹繊維の場合は(今回実験で使用した)他の植物に比べて吸水能力が低いため、どちらの建材の中に混入しても水をあまり吸収しなかったと考えられ、モルタル材料では大きく強度低下せず、版築材料では強度向上に寄与した。

参考文献

- 1) 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, pp.214-217, 2011.9
- 2) R. Filho, K. Joseph, K. Ghavami, G. L. England: The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e

Ambiental. 3(2), pp.245-256, 1999

- 3) Masakazu TERAJ and 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, pp.2976-2981, 2011.6
- 4) ゲルノート・ミンケ著：土・建築・環境 エコ時代の再発見，西村書店
- 5) 赤谷樹一郎，ほか3名：荒木田土を用いた版築壁の強度性状に及ぼす調合および施工要因の影響に関する研究，日本建築学会関東支部研究報告集 I，pp.41-44，2012.3
- 6) 荒木裕行，ほか2名：伝統的な版築壁材料の一軸圧縮試験，生産研究，62巻6号，pp.39-43，2010
- 7) 橋本佳大，ほか2名：版築による土壁の築造方法に関する研究（その1：最適含水比と固化材添加量），日本建築学会大会（近畿）学術講演梗概集，pp.729-730，2005.9