

植生の有機物骨格を利用した無機有機複合体の基礎的物性に関する研究

1. 材料施工-7. 有機系材料・工法・工事

準会員 ○ 五十嵐^{*1}

正会員 田村雅紀^{*2}

有機物骨格 無機 複合体 ヘチマ繊維 ペースト

1. はじめに

近年、様々な分野で複合化やハイブリット化といったことを目にする。これらはそれぞれの物質を単に足し合わせた効果だけではなく、単独の物質では得られない物性、機能を発現する可能性がある。建築材料の分野では鉄筋コンクリートのように複数の異質の物質を組み合わせ互いの欠点を補うことで、更に品質を向上させてきた。古代のエジプトはレンガの中に切り藁や麻を混ぜ、欠陥を減らすためにこれに圧力をかけて成形することで強度や耐久性を向上させた。日本では藁を土壁に混入し、格子状に組んだ竹を補強材として用いることで強度を向上させ、更に湿度を一定に保つ効果や、耐火性などの耐久性を向上させる特徴もある。このように、建築材料の分野では複合材料を作製し実生活に応用させてきた¹⁾²⁾。現在、建築材料の分野で主として使用される有機系材料(木材等)と無機系材料(コンクリート等)は別々に用いられることが多いが、このような専門性の分離は、材料におけるイノベーションを妨げる可能性がある。又、建材として利用される天然の有機系材料の多くは強固な繊維骨格を維持しており、骨格を維持しつつ無機系材料であるセメント固化体と複合化することで、互いの欠点を補いつつ新たな特性を持つ材料ができる可能性がある。そこで本研究では、有機物骨格を利用した無機有機複合材料がどのような物性を持ち合わせるのかを評価するため、まずは有機物骨格の製造及び物性評価を行い、次に有機物骨格を考慮した無機有機複合体を作製し基礎的物性評価を行った。(図1)

2. 研究概要

2.1 実験方法

表1に実験項目と方法を示す。有機物骨格試験では、繊維の溶解を行った後に、マイクロスコープにて繊維の細部の測定を行う。次に、物性評価を行うためデジタルフォースゲージを用いて繊維の直接引張強度を算出する。表2に使用材料、図2に有機物骨格切断モデルを示す。本研究では有機物骨格としてヘチマ繊維を用いるが、細部まで充填させることを考慮し、セメントペーストでの評価を行うことにした。圧縮・引張試験体の有機物骨格についてはH0, H1, H2の3種類とプレーンのN, 計4種類を作製。H0, H1, プレーンについてはφ10×20, H2については繊維の構造上、φ5×10の円柱試験体を作製。又、曲げ試験体については、H3aとH3bの2種類とプレーンの計3種類の角柱試験体(40×40×160mm)を作製。表3に実験要因と水準を、表4に計画調合を、図3に曲げ試験図を示す。セメント種類は、普通ポルトランドセメントで、W/C=40, 55, 70%の3水準とした。安定したコンスタンシーの確保の為、微粉末を混入し比較した。

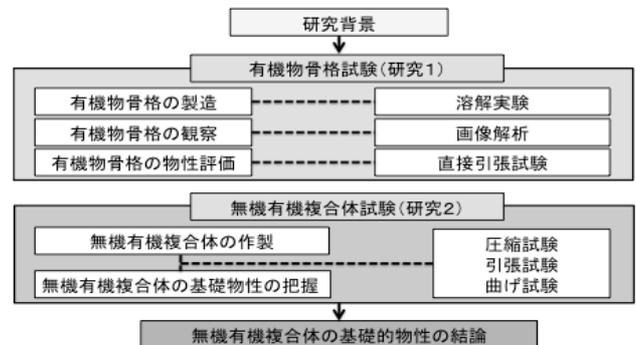


図1 研究概要図

表1 実験項目と方法

項目		内容
有機物骨格試験	溶解実験	ヘチマより、有機物骨格の製造
	画像解析	マイクロスコープにより繊維径(μm)と繊維充填度を測定
	物性評価	デジタルフォースゲージにより有機物骨格の直接引張試験を行い繊維の直接引張強度を測定
無機有機複合体試験	引張試験	JIS A 1113:コンクリートの割裂引張強度試験方法を参照にして、引張強度を測定
	圧縮試験	JIS A 1108:コンクリートの圧縮試験方法を参照にして試験を行い、縦ひずみはコンプレッションメータ、横ひずみはひずみゲージ(測定区間60mm)により測定
	曲げ試験	JIS R 5201:セメント物理試験方法を参照にして、3線式中央1点荷法により、曲げ強さとたわみ量の関係を測定
	色差測定	色差計により、破断面の色彩を計測

表2 無機有機複合体に用いる使用材料

項目	記	内容	
セメント	N	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 (g/cm ³)
微粉末	S	硬質砂岩砕石粉	密度 2.59 (g/cm ³)
有機物骨格	H	ヘチマ繊維	密度 0.02 (g/cm ³)程度

表3 実験の要因と水準

要因	水準
W/C (%)	40, 55, 70
混和材 配合率 (%)	0, 20, 40
有機物骨格 ヘチマ	H0, H1, H2, H3a, H3b (図2)
養生条件	水中養生 (20℃一定)

表4 ペーストの計画調合

記号	W/C (%)	配合率 (%)	単位量 (kg/m ³)		
			水	セメント	微粉末
N40	40	0	558	1392	0
N55 (20S)	55	20	589	1074	215
N70 (40S)	70	40	608	875	350

備考) 微粉末量はペーストの良好なコンスタンシーが得られるように設定
 有機物骨格は複合体重量の 0.3%~0.6%で混入

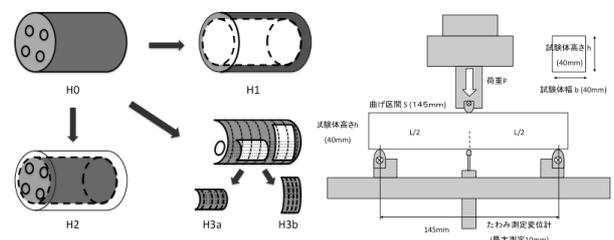


図2 有機物骨格 切断モデル

図3 曲げ試験図

圧縮試験においては、JIS A 1108 を参照し、コンプレッソメーターとひずみゲージを用いて各ひずみを算出し、強度及びひずみの関係性を評価する。引張試験については、JIS A1113 を参照にした。曲げ試験は JIS R 5201 を参考に 3 線式中央 1 点載荷方により、曲げ強さとたわみ量の関係性を評価する。

2.2 有機物骨格(ヘチマ繊維)の物性評価(研究 1)

1) 溶解及びヘチマ繊維の構造

表5にヘチマ繊維の溶解方法、図4にヘチマ繊維断面モデル、図5に繊維平均太さの比較を示す。繊維の溶解方法には大きく分けて4種類ありそれぞれに利点と問題点がある。本研究では薬品処理した後に水で十分にさらしたものを使用した。

溶解後の繊維の計測について、本体の質量は 40g、長さは 498.7m、直径は約 80mm が平均値であり、湾曲しているものも多数確認された。最大直径は 95mm、最小直径が 63mm となり、最小直径の 1.5 倍が最大直径になる傾向があり、孔は 4 つ穴と、3 つ穴の 2 種類が確認された。

ヘチマの繊維は網目状の繊維が三次元方向に発達し、内部は空洞を有している³⁾(写真1)。又、繊維方向は部位により異なり、空洞の外側部分では軸方向に繊維が発達している柵状構造を有している。それに対して外周部である b) では円周方向に繊維が発達することが確認された。c) の部分は、他の部分に比較すると複雑な構造かつ、繊維が不均一に分布している。円周方向へ繊維が成長するのは内から外へ広がる力を抑制する為であると推測される。又、顕微鏡を使用し、上記で分類した繊維の太さの計測を行い、平均値を算出した。その結果を図5に示す。繊維は柵状構造、包圍状構造、立体網状構造の順に繊維が太いという結果であった。これはヘチマ本体には内から外へ広がる力より、本体にかかる垂直の力の方が大きい為であると考えられる。

2) 二次元充填度評価

図7 a) に二次元充填度の結果を示す。本研究では、各繊維を顕微鏡により撮影した画像を二値化処理し、二次元充填度評価を行った。柵状構造、包圍状構造、共に大きな差は見られないが、立体網状構造については前者に比べやや低い傾向にあった。包圍状構造は柵状構造に比べて繊維が細いにも関わらず、面積割合はほぼ変わらないということより、繊維の強度が低いことが考えられる。(写真2)

3) 力学特性

図6に直接引張試験の繊維方向、デジタルフォースゲージを使用して、各繊維の引張試験を行った。直接引張試験におけるヘチマ繊維の引張方向を図6に示す。端部は固定し、包圍状構造及び柵状構造は繊維の発達方向に引張り、立体網状構造については柵状構造と同方向に引張りを行った。計測した荷重は、画像解析により算出した(充填度評価同様)断面積で除した値を引張強度とした。平均して最も引張強度が高かったものは柵状構造になり、次いで立体網状構造となった。包圍状構造繊維は柵状構造繊維に対して半分近く下回る値であり、引張力に対しては他の部位に比べ劣ることが確認された。この結果より包圍状構造単体での使用は好ましくないといえる。

表 5 繊維の溶解方法

溶解方法	内容		
	溶解期間	利点	問題点
自然乾燥	数ヶ月	手間がかからない	時間がかかる
水中腐敗	2週間	ほぼ時間がかからない	腐敗臭の発生
薬品	1日	大きさに左右されない	薬品の購入が必要
煮沸	数時間	短時間で作成可能	器の大きさで制限



写真1 繊維の解析画像 (倍率: ×20)

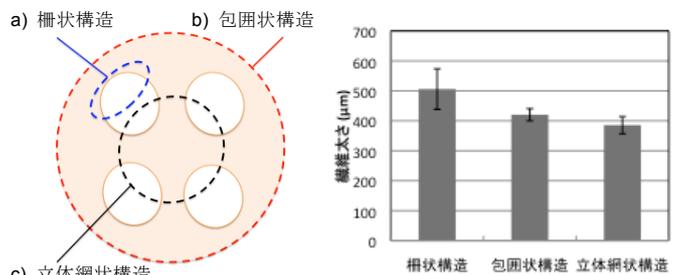


図4 ヘチマ繊維断面モデル

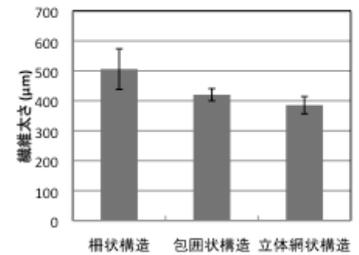


図5 繊維平均太さの比較

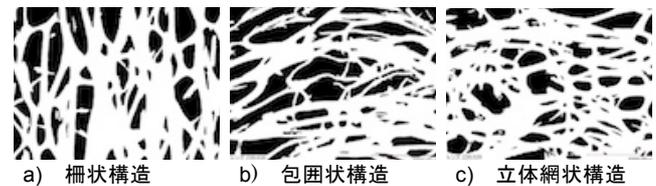


写真2 ヘチマ繊維の解析画像 (倍率: ×20)

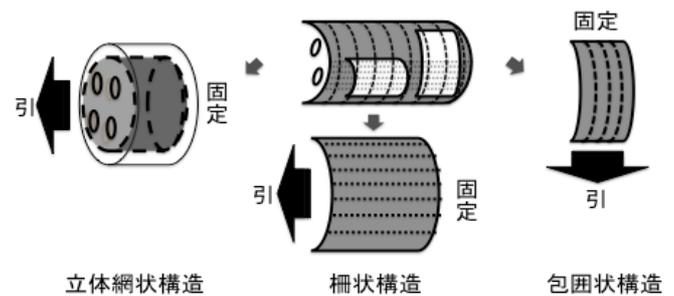


図6 有機物骨格 直接引張試験の繊維方向

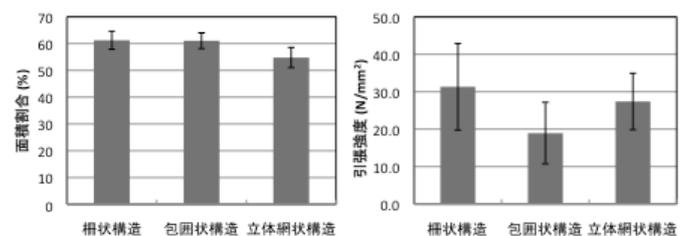


図7 有機物骨格の物性

2.3 無機有機複合体の基礎物性(研究2)

1) 密度評価

図8 a)にヘチマ繊維のかさ密度と複合体の密度を示す。Nは繊維なし(=0)で、H0はヘチマ繊維の端部を切断した状態であり密度が高い傾向にあるが、H1, H2は大きな変化は見られなかった。その有機物骨格を用いて複合体を作製し密度比較をした。NシリーズよりH0が1~2%低い値を示し、H2は他に比べやや高くなる傾向にあった。

2) 引張強度

引張試験結果を図8 b)に示す。W/C=40%においてはNシリーズが全てのHシリーズより強度が高い傾向を示したが、W/C=55%, 70%についてはNシリーズと同程度又は、やや高くなる傾向であり、HシリーズではH2が高くなる傾向にあった。

3) 圧縮強度

図8 c)に全試験体の圧縮強度と静弾性係数を示す。全体的に、圧縮強度は水セメント比に依存し、同一W/CではHシリーズよりNシリーズの方が強度は高い傾向であった。Hシリーズに着目すると、H0よりH1, H2の方がやや強度が高くなる傾向がある。静弾性係数については大きな相関得られなかったが、H2はNシリーズと同程度の数値を示した。ヘチマ繊維のかさ密度と圧縮強度の結果を比較すると、かさ密度が高い方が強度は低下することが確認された。又、Nシリーズは脆性的な破断をするのに対し、Hシリーズは繊維の拘束力が働く為、脆性的な破断を生じないと推測される。

4) 破壊特性

図9に破壊臨界ひずみと破壊臨界点評価を、図10にW/C=70%の破壊臨界ひずみ特性を示す。NシリーズとHシリーズを比較すると、Hシリーズの方が低い数値を示し、最大でNシリーズの4割程度ひずみが減少した。又、W/C=70%でのHシリーズではH1が最もひずみ量が大きい値を示した。

5) 曲げ-たわみ特性

図11に曲げ-たわみ曲線を、図12 a)に曲げ破壊エネルギーの比較を示す。曲げ破壊エネルギーは、縦軸に各強度、横軸に変位をとり荷重変位曲線に囲まれた部分を積分して算出した⁴⁾。

曲げ-たわみ曲線に関して、曲げ強さは、Nシリーズでは水セメント比に依存するが、Hシリーズは関係性が弱く数値大きく変化することは確認されなかった。又、H3bよりH3aの方がやや数値が高く、たわみ量も多い傾向がある。Nシリーズは最大強度に到達後、脆性的な破断を生じるが、Hシリーズについては、Hシリーズは強度が低下してから再び強度及びたわみ量が緩やかに上昇した。

曲げ破壊エネルギーは、総じてNシリーズよりHシリーズの方が高い値を示した。H3aに着目するとW/C=70%が最も高く水セメント比との関係性はあまり見られず、H3bも同様にW/C=70%が高い値を示した。Hシリーズで比較するとH3aの方が高い結果を得た。これより、有機繊維方向により若干の変化はあるが、繊維を混入することでひび割れの進展を抑える効果が見込め、セメント固化体のひび割れの剥離抑制等に効果が見込める。

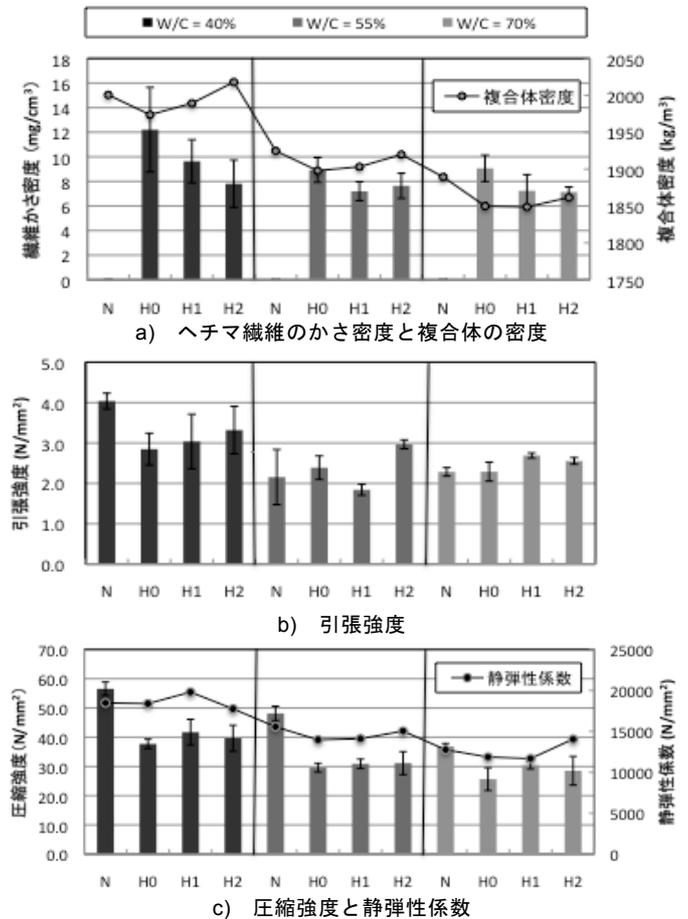


図8 無機有機複合体の基礎物性

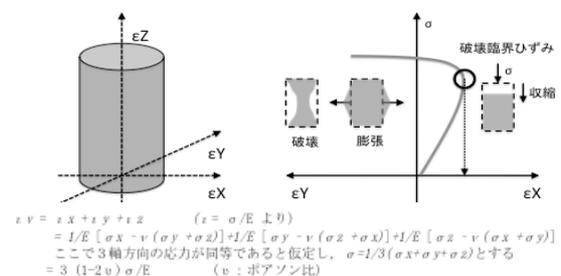


図9 破壊臨界ひずみと破壊臨界点評価

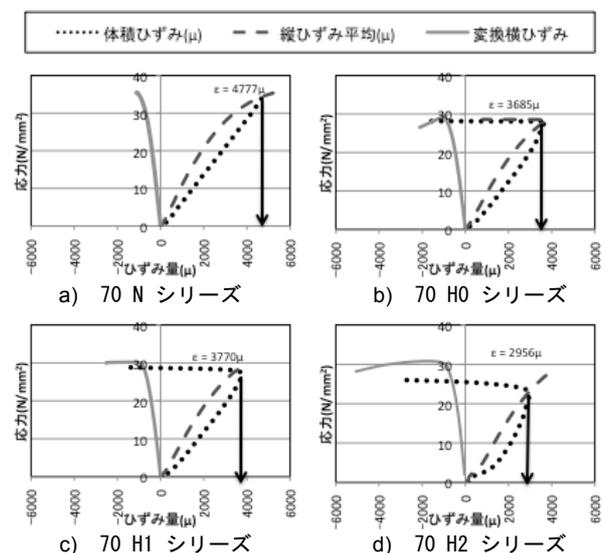


図10 破壊臨界ひずみ特性 (w/c = 70%)

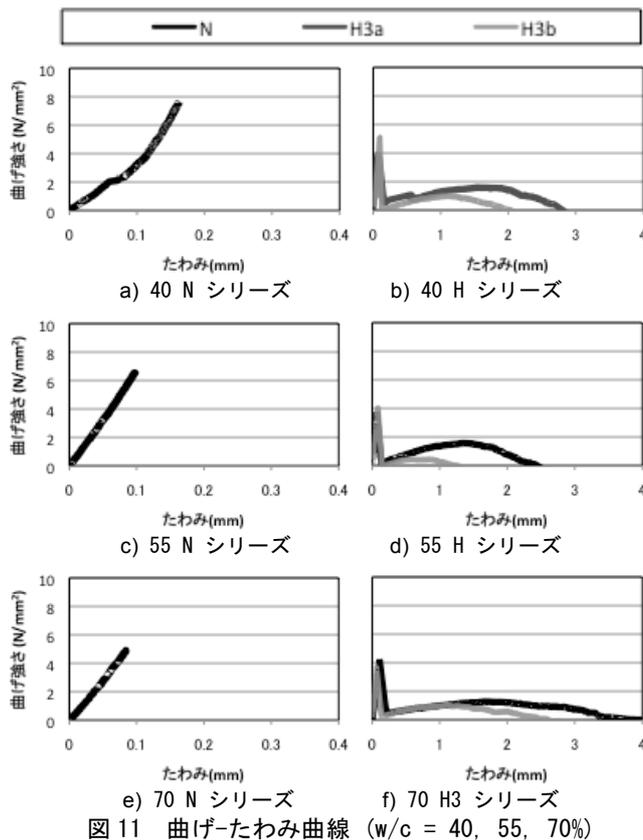


図 11 曲げ-たわみ曲線 (w/c = 40, 55, 70%)

4) 曲げ試験体のひび割れ進展長さ

図 12 b) に曲げ試験体のひび割れ進展長さを示す。N シリーズは 40mm からのずれは少ないことが確認できる。対して、H シリーズは 1.5mm 以上ずれが生じ、ばらつきも大きくなる傾向がある。H3a と H3b を比較すると、大きな相関は見られない。又、W/C が高くなるにつれひび割れが長くなる傾向がある。これらより H シリーズではひび割れの分散効果がある可能性がある。

5) 試験体破断面の色差測定

図 12 c) に破断面組織の明度を示す。試験後の曲げ試験体の断面を測定箇所とし、水中養生から取り出し 6 時間後に色差計を用いて計測を行った。L*値は明るさを表現する明度であり、L=0 が最暗(黒色) L=100 が最明(白色)を表している。N シリーズに比べ H シリーズの方が L*値が低く、やや黒によりの値を示した。H シリーズに着目すると、H3a より H3b の方がやや L*値は低くなる傾向がある。又、W/C が高くなると黒さが増加する傾向にある。これらのことより、ヘチマ繊維を含むペースト試験体には水分を蓄える効果があるといえる。

3. まとめ

1) 測定結果から、ヘチマ繊維は部位によって繊維方向が異なり、柵状構造、包圍状構造、立体網状構造の 3 種類を有している。又、その順に平均的に繊維が太いという結果であった。

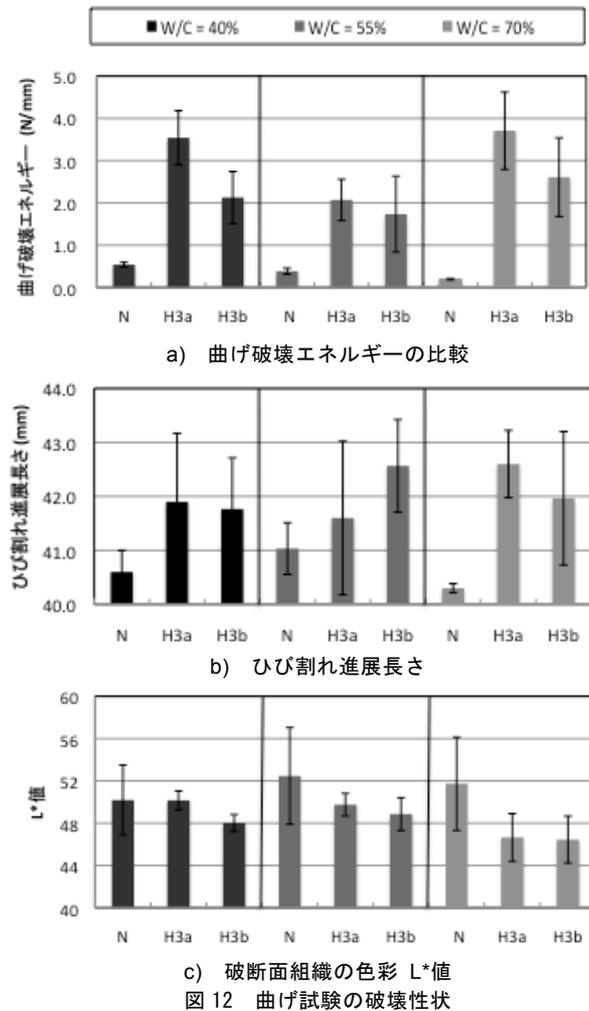


図 12 曲げ試験の破壊性状

- 2) 直接引張強度は、柵状構造、立体網状、包圍状構造の順に高く、包圍状構造単体での使用はあまり好ましくない。
- 3) 曲げ試験の結果から、有機繊維方向により若干の変化はあるが、繊維を混入することでひび割れの進展を抑える効果が見込め、セメント固化体のひび割れの剥離抑制等に効果が見込める。
- 4) 色差測定の結果から、ヘチマ繊維を含むペースト試験体には水分を蓄える効果があるといえる。
- 5) 実用的な部分を考えると、脆性破断しないことよりパネル材(剥離防止)への適応が考えられる。

参考文献

- 1) 玉井孝幸, 嵩英雄: 現存する竹筋コンクリート造を求めて, コンクリート工学, vol.47, No.6, pp.19-27, 2009.6
- 2) 安藤貴広, 河辺伸二: 竹を混入したリサイクルボードの力学的特性, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.987-988, 2011
- 3) 尾崎純一, 真鍋健一, 前田健浩: ヘチマ繊維の引張特性, 日本機械学会大会講演論文集, pp.543-544, 2007
- 4) 小室清人, 田村雅紀: 海洋生物殻廃棄物を用いたコンクリート系材料の破壊特性とカーボンニュートラル性の評価, コンクリート工学年次論文集 vol.33, No1, pp.1877-1882, 2011.7

*1 工学院大学建築学科学部 4 年

*2 工学院大学建築学部建築学科准教授・博士(工学)