

論文 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

寺井 雅和^{*1}・南 宏一^{*2}

要旨: コンクリートのひび割れ防止として、繊維を混入する繊維補強コンクリートがある。繊維の種類は、様々な材料や形状が提案されているが、繊維混入分のコスト増が問題である。そこで、本研究では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。実験パラメータとして、設計基準強度(10 と 20MPa)、混入繊維量(0, 1, 2, 3%)の掛け合わせで、8 種類の調合設計で試験体を製作し、基本的な物性として、フレッシュ性状、硬化コンクリートの強度特性(圧縮、割裂、曲げ)などを検討した。既往の繊維補強コンクリートの研究とおおよそ近い性状が確認でき、竹繊維の利用可能性が確認できた。

キーワード: 繊維補強コンクリート、竹繊維、圧縮強度、曲げ強度、割裂強度、空気量

1. はじめに

コンクリートは引張強度が小さく、ひびわれを生じやすい。このような脆性材料の強化方法として、短繊維材料を混入する繊維補強コンクリートが開発されてきた¹⁾。繊維は、各種原料を化学的手段によって加工もしくは合成してつくった「合成繊維(化学繊維)」と、植物、動物、鉱物などの天然物の一部から採取した原料を加工、精製してできる「天然繊維」に大別できる。コンクリートやモルタルの補強には、耐久性のために、鋼、炭素、ガラス、ポリプロピレンなどの合成繊維が使用される。しかし、このような繊維補強コンクリートは、繊維混入分のコストアップによる経済性が問題となり、鋼繊維補強コンクリートやガラス繊維補強コンクリートは、プレーンコンクリートの数倍のコスト増と試算されている²⁾。

竹は、熱帯や亜熱帯性の植物であるが、日本にも北海道を除く全土に広く分布している。竹は、成長するまで2~4年と高い生育力を有し、竹が森林に侵入して、樹木を駆逐しつつあることが大きな環境問題・社会問題となっている。このような中、竹から繊維を得る技術が開発され、竹繊維は、衣料用新素材や工業製品としてのハイブリッド素材として応用が検討されている。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、このような動きに対する期待は大きい。

筆者らは、様々な材料で補強したコンクリート構造物の生産に関する可能性を探って、使用材料の検討とそれらを用いたコンクリート部材の基礎的性状を検討している^{3)~5)}。竹は伐採・輸送にかかるエネルギーが少なく、竹繊維は、鋼繊維やガラス繊維のような合成繊維と比べると製造コストが低いので、高度な製造技術や建設技術を持たない国や地域でも、幅広く活用できる可能性が期待できる。また、このような国や地域では、昔ながらの施工法や現地で調達された低品質な材料で建設が行われ

ていることが多い。さらに、地震多発地域にもかかわらず、地震に対する対策が配慮されていないものが非常にたくさんあり、経年劣化した建物も多数存在している。例えば、2008年5月に発生した四川大地震は、中国内陸の山間部で発生したが、耐震性の低い組積造建築物の多くが倒壊するなど甚大な被害を受けている。このような中、諸国の事情に適した、できるだけ安価で信頼性の高い建設技術の開発を行うことは、国際的な視野に立っても重要であると言える。

本研究では、低品質な材料で造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た。また、この実験に関連して、アルカリ中の竹材がどのように変化するか、引張試験片による強度変化と断面積の変化についても実験を行った。

2. 竹材の引張試験

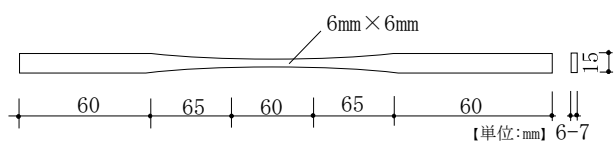
アルカリ中において、表面に何も処理していない素竹材は、アルカリ成分によって竹の細胞が侵され、次第に引張強度が低下していくことが既往の研究者により確認されている⁶⁾。しかし、古い時代の実験なので詳細が不明であり、このことについてはその後研究された事例がないので、本研究の中で確認することにした。

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-1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-1に示すような型枠で、水セメント比 50%、100%のセメントペーストで満たして硬化させた。セメントペースト打設後は、乾燥を防ぐために上部を密封して養生した。打設後 28 日目脱型し、1 か月目の引張試験を行ったが、その後は室内に放置し

*1 福山大学 工学部建築・建設学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 福山大学 名誉教授 工博 (正会員)

た。1, 2, 3 か月目に、硬化したセメントペーストから試験片を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した（写真－2）。

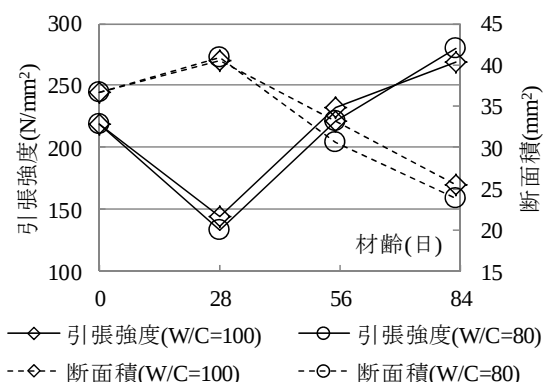


図－1 引張試験片



写真－1 試験片と型枠

写真－2 引張試験



図－2 引張強度と断面積の推移

材齢3か月目までの引張強度と断面積の変化を図－2に示す。図－2の引張強度は、破断時荷重を同図中の実測断面積で除した値で求めている。材齢28日目に大きく強度が低下するが、材齢が進むにつれて強度が上がり、アルカリ埋設前の強度よりも大きくなっていることがわかる。これは、材齢2,3か月目には乾燥収縮により断面積が大きく減少しているため、みかけの強度が大きくなっただけと考えられる。既往の研究⁶⁾では、試験片をアルカリ水に漬けて養生していたので、養生の過程で竹が乾燥することはない、そのため竹材の内部も常にアルカリ成分に浸かっており、次々と竹細胞が侵されたと想像される。コンクリートに埋め込まれた竹は乾燥収縮をすることで水分が失われ、竹の内部からアルカリ成分は抜けていくと考えられる。したがって、既往の研究でみら

れたような組織破壊に伴う強度低下は、このたびの実験では確認されなかったと思われる。

表－1 実験計画

材料番号	設計基準強度 (N/mm ²)	コンクリート容積当たりの竹繊維混入量 (°/vol)
10-0.0	10	0.0
10-1.0		1.0
10-2.0		2.0
10-3.0		3.0
20-0.0	20	0.0
20-1.0		1.0
20-2.0		2.0
20-3.0		3.0

表－2 実験概要

実験項目		試験体の大きさ	試験材齢
硬化コンクリート性状	圧縮強度試験	φ100×200mm	28日(1か月)
	割裂強度試験		56日(2か月)
	曲げ強度試験	100×100×400mm	168日(6か月)
フレッシュ性状	スランブ試験		
	空気量		

3. 竹繊維補強コンクリート

3.1 実験計画

竹繊維混入量とコンクリートの設計基準強度を実験要因として、合計8種類のコンクリートを計画し（表－1）、試験体を製作した。実験では、竹繊維を混入することによる施工性を確認するためのフレッシュ性状と、硬化したコンクリートの強度特性などについて、表－2に示す試験を計画した。

竹繊維は、全ての試験体で共通のものをを用い、コンクリート容積に対する比として繊維混入量を0, 1, 2および3%の4種類について計画した。「はじめに」でも述べたように、本研究の背景には、低品質な材料（コンクリート）への竹繊維の適用効果を確認する目的があるので、コンクリートは単位水量を一定にして、設計基準強度が10および20N/mm²となるように調合設計した2種類について計画した。

3.2 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碎石、細骨材は、島根県仁多郡奥出雲町阿井産の加工砂である（写真－3）。その物理的性質を表－3に示す。

本研究で使用する竹繊維は、繊維というより、むしろ竹を細く解したもの（繊維束）である（写真－4）。製造方法は、広島県産の真竹を、木槌で叩いて解し、乾燥させた後に長さを切りそろえている。使用した竹繊維は、不規則な断面形状をしているが、実測値を平均して、断面を長方形に置き換えると、断面寸法は0.4mm×0.7mm、長さは30mmとなるので、アスペクト比は約50の繊維であるとみなすことができる（表－4）。

表－3 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

表－4 本実験で使用した竹繊維の形状

種類	産地	寸法(mm)			アスペクト比
		断面		長さ	
真竹	広島県三次市	0.40	0.70	30.0	50

表－5 調合表

設計基準 強度 Fc	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
20	0.0	80	60.0	225	281	996	682	0.0	－
	1.0	80	60.0	225	281	980	671	10.8	－
	2.0	80	60.0	225	281	965	661	21.6	－
	3.0	80	60.0	225	281	949	650	32.4	－
10	0.0	100	60.0	225	225	1024	701	0.0	－
	1.0	100	60.0	225	225	1008	690	10.8	－
	2.0	100	60.0	225	225	992	680	21.6	－
	3.0	100	60.0	225	225	977	669	32.4	－



写真－3 本実験で使用した骨材



写真－4 本実験で使用した竹繊維

把握することを目的に、すべての調合で混和剤など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/m³として質量に換算して決定した。表－5に調合表を示す。

3.4 試験体の製作

コンクリートの練り混ぜは、強制二軸練り攪拌機ミキサを用いて行った。始めに、砂とセメントを投入し1分間混ぜた後、ミキサは回転状態のまま竹繊維を手でほぐしながら投入した。手でほぐしながら投入する方法は時間がかかるが、繊維量2%を超えると繊維が分散しづらく、ミキサが回転しなかったり、繊維が分散せず塊となるファイバーボールが出来たりしたので、この方法にした。繊維投入にかかる時間は繊維量にかかわらず2分以内とした。繊維投入完了後、水を投入し、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、スランプ試験と空気量の測定を行った。

コンシステンシー試験終了後、強度試験用型枠に打ち込んだ。圧縮試験と割裂試験用試験体は、φ100×200mmのサミットモールドを、曲げ試験用試験体は、100×100×400mmの大きさになるようにメタルフォームで型枠を製作した。同一種類の試験体は、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。強度試験用試験体は、打設後3日目に脱型、ビニール封緘した後、実験室内に放置した。材齢28日目前後で全ての強度試験を行った。

3.3 調合設計

設計基準強度は10および20N/mm²として、水セメント比100%と80%で調合した。全ての調合設計において、単位水量は225kg/m³、細骨材率60%、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。混和剤は大量に使用するとコストアップにつながるなので、本研究の目的でもある発展途上国などでの低価格な製造には適さない。また、本研究は緒についたばかりなので、まず基本的な特性を

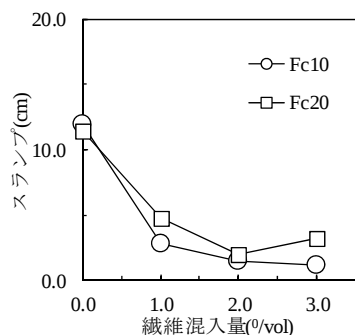


図-3 繊維混入量とスランプとの関係

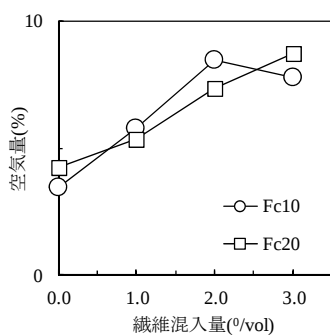


図-4 繊維混入量と空気量との関係



写真-5 圧縮試験用試験体
(左から竹繊維混入量0, 1, 2, 3%)

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

材料番号	設計基準強度 (N/mm ²)	繊維混入量 (%/vol.)	スランプ (cm)	空気量 (%)
10-0.0	10	0.0	12.0	3.42
10-1.0		1.0	2.8	5.79
10-2.0		2.0	1.5	8.49
10-3.0		3.0	1.2	7.79
20-0.0	20	0.0	11.4	4.25
20-1.0		1.0	4.8	5.36
20-2.0		2.0	2.0	7.38
20-3.0		3.0	3.2	8.72

び弾性係数、単位容積質量を表-7にまとめて示す。なお、表-7に示す値は、各材料の試験体を3体ずつ作成し、実験を行った平均値である。以下に各試験の概要と考察をまとめる。

(a) 圧縮強度

圧縮試験は、万能試験機により載荷し、コンプレッションメータおよびひずみゲージを用いて軸方向変形(ひずみ)を測定した。繊維混入量にかかわらず、同じような破壊状況であった。8種類の竹繊維補強コンクリートの強度推移を図-5に示す。6か月程度までの材齢では、繊維混入量にかかわらず、同じような傾向で強度発現していることがわかる。

3.5 実験結果および考察

3.5.1 フレッシュ性状

スランプ試験および空気量を、表-6及び図-3、4に示す。スランプは、設計基準強度にかかわらず、繊維混入量の増加とともに急激に小さくなった。また、空気量は、繊維を入れないものは、調合計画通り4%程度となったが、混入繊維量の増加とともに、空気量は増大する傾向を示した。これは、繊維が空気を連行し、締固めをしても十分に抜けきらなかったためと考えられる。このことは、写真-5に脱型後のテストピースの表面状態を示すように、繊維混入量が多くなるにつれて空隙が大きくなり、多くなっていることからわかる。

3.5.2 硬化コンクリートの強度

材齢28日目の硬化コンクリートによる各種強度、およ

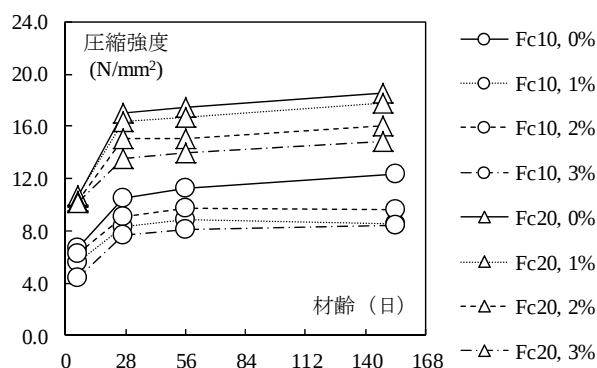
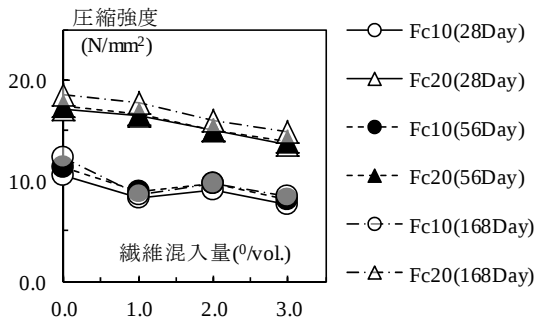


図-5 強度発現の推移

表-7 硬化コンクリート試験結果

材料番号	28日目					56日目					168日目		
	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	単位容積質量 ρ ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	単位容積質量 ρ ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	単位容積質量 ρ ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)
10-0.0	10.5	2.8	1.1	23.1	2.18	11.2	3.1	1.2	20.5	2.19	12.3	1.2	2.18
10-1.0	8.3	2.5	1.3	11.9	2.10	8.9	2.9	1.3	15.6	2.09	8.6	1.2	2.10
10-2.0	9.0	2.5	1.3	17.0	2.07	9.7	2.8	1.3	14.7	2.05	9.7	1.5	2.06
10-3.0	7.7	2.4	1.2	11.0	2.01	8.1	2.6	1.2	12.4	1.99	8.4	1.3	1.99
20-0.0	17.1	3.7	1.3	24.8	2.22	17.5	4.3	1.6	25.0	2.22	18.6	1.5	2.23
20-1.0	16.4	3.4	1.7	22.4	2.17	16.7	3.9	1.8	22.1	2.16	17.8	1.6	2.18
20-2.0	15.0	3.7	1.8	21.6	2.13	15.1	4.2	1.8	17.4	2.11	16.0	1.8	2.12
20-3.0	13.5	3.5	1.9	18.7	2.09	13.9	3.7	1.9	17.3	2.08	14.9	1.8	2.10

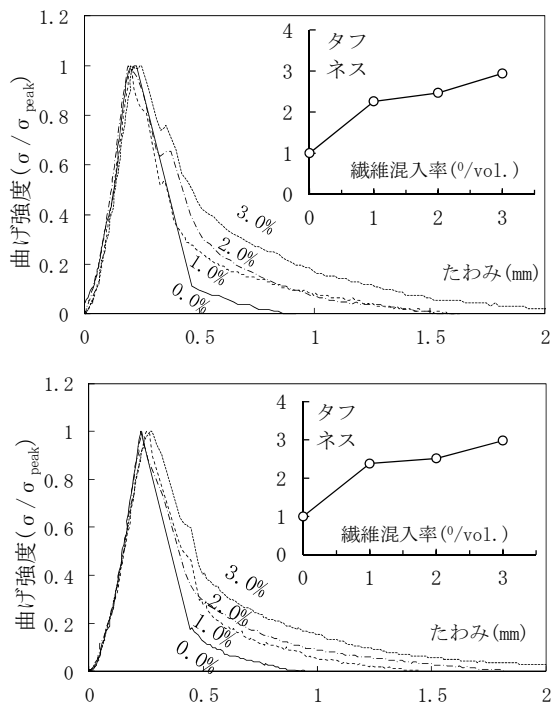
図－６に、繊維混入量と圧縮強度の関係を示す。設計基準強度に関わらず、繊維混入量が増えるにつれ、圧縮強度はやや低下する傾向にある。これは繊維の混入によって、空隙量が増加したためと考えられる。材齢ごとに線種を変えてプロットしているが、材齢が進んでもその傾向に大きな変化は見られない。



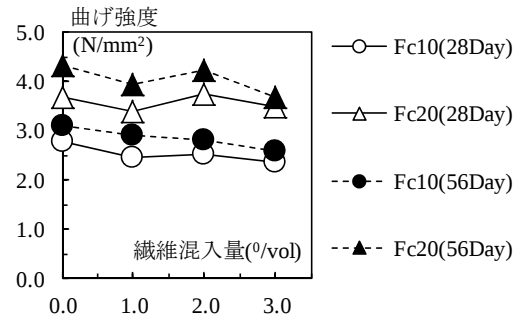
図－６ 繊維混入量と圧縮強度



写真－６ 曲げ試験実験装置全景



図－７ 繊維混入率とタフネスとの関係
(上：Fc10, 下：Fc20)



図－８ 繊維混入量と曲げ強度

(b) 曲げ強度

曲げ強度は、精密万能試験機により、写真－６に示す荷重治具を用い、三等分点単調曲げ荷重を行った。試験体のたわみは、加力点直下と試験体中央部下面の3点をカンチレバー型変位計で計測した。図－７に、曲げ強度－たわみ曲線、ならびにその曲線と座標軸によって囲まれた面積の大きさで表したタフネスが、繊維混入量によってどのように変わるか、プレーンコンクリート（繊維混入量0%）に対する比で示したものである。曲げ強度－たわみ曲線の縦軸は、それぞれの試験体について、最大曲げ強度（ σ_{peak} ）で無次元化している。横軸のたわみは、加力点下のたわみ量の平均としている。

繊維の混入量にかかわらず、たわみが0.2～0.25mmでピークを迎えていることがわかる。プレーンコンクリート（繊維混入量0%）では、曲げひび割れが発生とともに急激に進展し、強度が一気に低下する極めて脆性的な破壊状況を呈した。これに対して、繊維を混入した試験体でも、曲げひび割れ発生後、強度は低下するものの、繊維が抵抗するために一旦低下は止まる。その後、繊維の引張抵抗によって少し強度が回復するが、繊維の破断や抜け出しが進み、緩やかな軟化傾向を示すことがわかる。

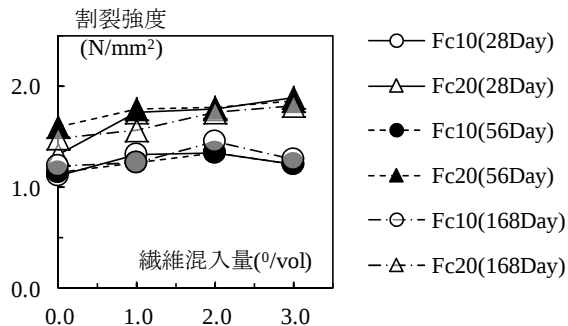
繊維混入量の増加に伴って、タフネスは増大している。その増大率は2～3倍程度であり、コンクリートマトリックスを使用した鋼繊維補強コンクリート（SFRC）の傾向とほぼ近い値を示した⁷⁾。

図－８に、繊維混入量と曲げ強度の関係を示す。設計基準強度に関わらず、繊維混入量が増えるにつれ、曲げ強度はわずかに低下する傾向を示し、繊維そのものが最大曲げ強度の向上に寄与することはないと確認できた。

(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荷重した。図－９に、繊維混入量と割裂強度の関係を示す。設計基準強度に関わらず、繊維混入量が増えるにつれ、割裂強度は大きくなることがわかる。Fc20の場合、繊維量が3.0%では、プレーンコンクリートの約1.5倍になり、竹繊維はコンクリートのひび割れ抵抗に効果があること

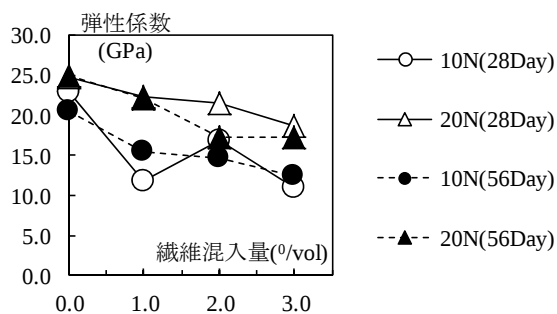
が確認できた。一方、Fc10の場合には、繊維量2.0%をピークに3.0%では上昇がみられない。また、圧縮強度のような材齢による強度発現は見られず、ほとんど変化しないか、ばらつきの範囲の変化であろうと思われる。



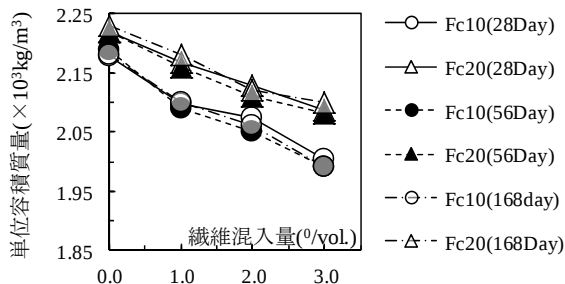
図－9 繊維混入量と割裂強度

(d) 弾性係数および比重

弾性係数は、圧縮応力－ひずみ曲線から、最大強度の1/3点における割線勾配として算出した。図－10に、繊維混入量と弾性係数の関係を、図－11に、繊維混入量と単位容積質量の関係を示す。繊維混入量の増加にともない、弾性係数も比重も小さくなる傾向が示された。繊維量が増えるということは、比重の小さな竹繊維が増大するためこれらの数値が低下する。また、図－4で示されたように、繊維量の増加とともに、空気量が増大することも原因として考えられる。



図－10 繊維混入量と弾性係数



図－11 繊維混入量と単位容積質量

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、設計基準強度(10と20MPa)、混入繊維量(0, 1, 2, 3%)の掛け合わせで、8種類の調合設計で試験体を製作し、基本的な物性として、フレッシュ性状、硬化コンクリートの強度特性(圧縮、割裂、曲げ)、弾性係数、単位容積質量など検討し、竹繊維混入量との関係を明らかにした。既往の繊維補強コンクリートの研究などと、およそ近い性状が確認でき、竹繊維の利用可能性が確認できた。

謝辞 本研究の一部は、公益財団法人大林都市研究振興財団の研究助成金を受けて実施しました。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、竹繊維と骨材を提供していただきました。試験体の製作には、工務店梁山泊の協力を得ました。また、試験体製作および実験の実施にあたり、福山大学学部生の久保田明日香君には多大なる協力を得ました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 福山 洋：特集 建築材料学の現在「新世紀の鉄筋コンクリート 繊維補強コンクリート」，建築雑誌，Vol.113，No.1420，pp.44-46，1998.3
- 2) 河野 清：総説 繊維補強コンクリートについて，材料，第26巻，第290号，pp.37-47，1977.11
- 3) Masakazu TERAИ and Koichi MINAMI: Fracture Behavior and Mechanical Properties of Bamboo Reinforced Concrete Members, 11th International conference on the mechanical behavior of materials (ICM2011), Lake Como (Italy), proceedings vol.10 (DVD), 2011.6
- 4) 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，第33巻（CD），2011.7
- 5) Masakazu TERAИ 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
- 6) 細田貫一：竹筋コンクリート工，修教社書院，1942.2
- 7) 亀田泰弘，小泉 肇，秋浜繁幸，末永龍夫，坂野正：SFRCの力学的性質に関する実験的研究：その2．圧縮強度，曲げ強度，Toughness，引張ひずみ性状について，学術講演梗概集 Vol.54（構造系），日本建築学会，pp.181-182，1979.9