論文　竹繊維形状が繊維補強セメント複合材料の強度物性に及ぼす影響

寺井　雅和*1

要旨：自然素材である竹を活用することを検討し，竹筋繊維補強セメント複合材料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），細骨材率について２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，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。

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，細骨材率

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 [1)]。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。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。

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 [2)]。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 [3) 4)] 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。

2. 実験概要

2.1 実験計画

竹材料の形状（断面，長さ）と細骨材率を実験要因として，2 つのシリーズを計画する。実験では，竹繊維コンクリートを振動締固めにより施工する際に，締固め時間を選定するための予備実験も行った。

竹材料の形状が硬化コンクリート強度に及ぼす影響を調べる実験を A シリーズとする。A シリーズでは，繊維を入れないプレーンコンクリートと，**表－３**の竹材をコンクリート容積に対する比としてそれぞれ 1%混入したものを 5 種類，合計 6 種類について計画した。コンクリートは単位水量，水セメント比，細骨材率を一定にして，**表－１**に示す調合とした。

細骨材率によって繊維の効果を確認する実験を B シリ

*1 近畿大学　工学部建築学科准教授　博士（工学）　（正会員）

表－１　調合表

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－２　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(%) 15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	受け皿	粗粒率 FM
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－３　実験計画

繊維種類*	寸法 (mm) 厚さ	幅	長さ	アスペクト比	写真	断面形状
竹繊維束 ＜繊維束＞	0.70	0.70	30.0	42.9		□
竹ひご ＜竹棒1/2＞	φ1.8 (半分にカット)		30.0	46.9		⌓
竹ひご ＜竹棒＞	φ1.8		30.0	16.7		○
竹ひご ＜竹棒L20＞	φ1.8 (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

ーズとする。B シリーズでは，竹材料は竹チップを使用した。細骨材率 40, 68, 80 および 100%と変化させた 4 種類について，竹チップを入れないプレーンコンクリートと容積比で 1%混入したものを計画する。なお，細骨材率 68%は，A シリーズの該当する試験体である。

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－２**に示す。

実験で使用した竹材料は，**表－３**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。**表－３**の寸法は，断面を矩形で置き換えた時の平均値である。

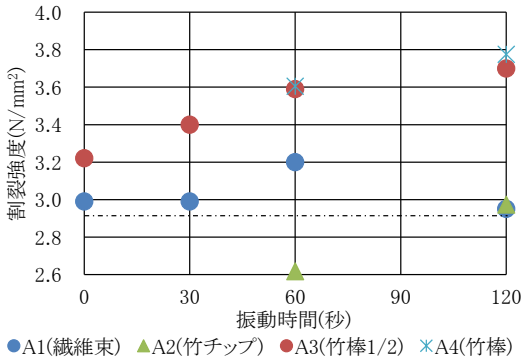
2.3 調合設計

全ての調合設計において，水セメント比50%で単位水量は242kg/m^3，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，この問題は別のシリーズで計画しているため，本論の範囲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。

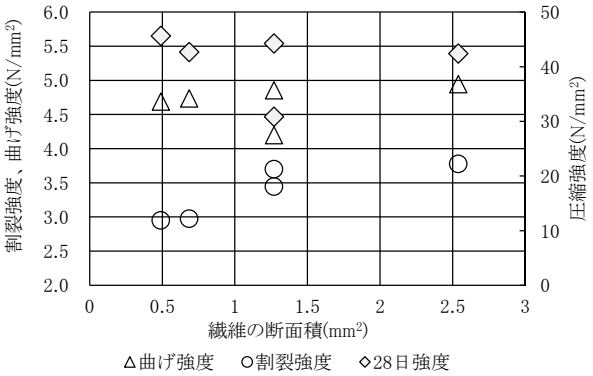
竹繊維の調合量は，容積混入量を竹の密度を1200kg/m^3（実験で使用した長さ30mmの竹ひご10本あたりの容積と重さを実測して算出）として質量に換算して決定した。

2.4 試験体の製作

コンクリートの練り混ぜは，強制撹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分間練りまぜ，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撹拌後，スランプの測定を行った。スランプ試験終了後，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載せて振動を与え締固めを行った。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。



図－１　供試体作成時の振動時間と割裂強度の関係



図－２　繊維断面積と強度の関係

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 (*10³kg/m³)
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

圧縮試験と割裂試験用試験体は，φ100×200mmの軽量型枠，曲げ試験用試験体は，100×100×400mm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は行った。

3. 実験結果および考察

3.1 振動時間と強度の関係

Aシリーズについて，型枠打込み時の振動時間と割裂強度との関係を**図－１**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－１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，4章で考察するように，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。よく振動締固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[5)]。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秒で締固めを行うことにした。

3.2 竹繊維の形状と強度の関係

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－２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。第4章で考察するように，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。

以下に各試験の概要と考察をまとめる。

表－５　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 (*10^3kg/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

(a) 圧縮強度

圧縮試験は，万能試験機により載荷した。繊維混入量にかかわらず，同じような破壊状況であった。

Aシリーズの圧縮強度は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30.84MPa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。本実験Aシリーズでは，粗骨材が入っているので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，万能試験機により載荷治具を用い三等分点単調曲げ載荷を行った。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載荷した。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。

3.3 細骨材率と強度の関係

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－５**にまとめて示す。なお，**表－５**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－３～６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－３**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－４**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－５**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－６**は曲げ強度であるが，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[6]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，前節で検討した 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。

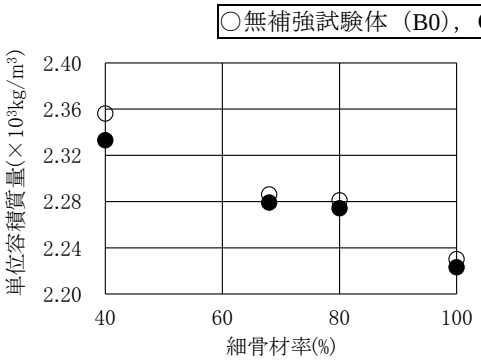
4. 竹の形状と割裂強度の関係

竹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（σ_c）は一般に次式が成立する[6]。

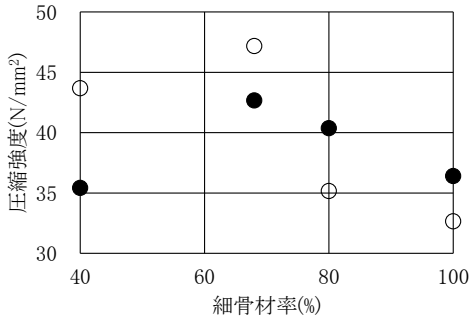
$$\sigma_c = \eta_1 \eta_2 \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \qquad (1)$$

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

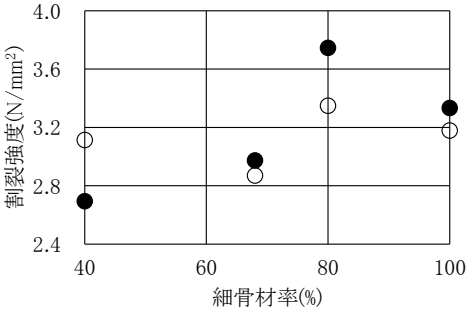
この混合則に基づいて，割裂強度において竹繊維が抵抗に寄与する負担強度の割合を計算してみる。



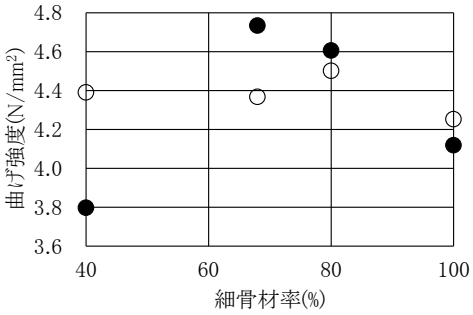
図－３　細骨材率に対する単位容積質量の変化



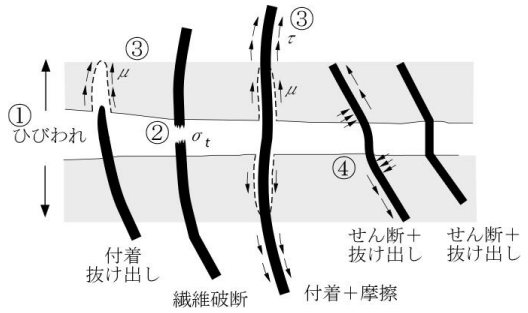
図－４　細骨材率に対する圧縮強度の変化



図－５　細骨材率に対する割裂強度の変化



図－６　細骨材率に対する曲げ強度の変化



図－７　繊維混入量と単位容積質量

写真－１　ひびわれ面における竹棒の状態

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－７②**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－７③**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－１**）。

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－７④**の状態），この抵抗応力（ダボ抵抗）が強度増加に更に付加されたと考えられる。ひび割れ面周辺のモルタルによって拘束された棒材のダボ抵抗 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[7]。

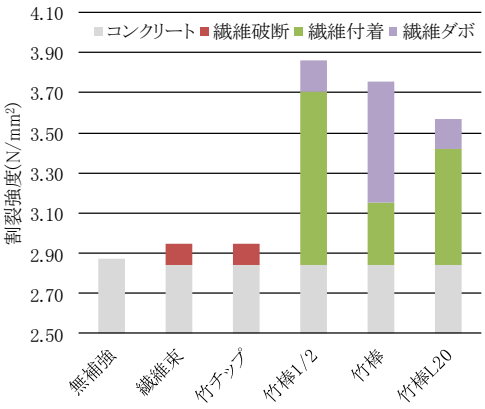
$$\sigma_d = 0.25 * d^2 \sigma_f \qquad (2)$$

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－７①**の状態），第二項は繊維破断または付着による強度（**図－７②**または**③**の状態），そして第三項は繊維のダボ抵抗（**図－７④**の状態）による寄与分としてそれぞれの累加で計算する。

表－６　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(ℓ/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－９　割裂強度の負担（式(3)による）

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \beta(\sigma_t \ \ or \ \ \tau)V_f + \gamma\sigma_d \qquad (3)$$

ここに，V_m：マトリックスの体積，β：繊維の不連続性，ランダム性な配置による係数（既往の研究[7]より0.41），σ_t：繊維の破断強度（既往の研究[8]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[3]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－６**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－９**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。

5. 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，基礎的な材料試験を行った。実験パラメータとして，竹繊維の形状（断面積と長さ），細骨材率について２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，繊維量1%という限られた条件の範囲であるが，竹補強コンクリートの基本的な力学性状が確認できた。

1）竹繊維の形状をパラメータとした実験では，形状にかかわらず，繊維を入れることにより無補強に比べ曲げ強度は１割，割裂強度は最大３割大きくなり，1%程度の繊維混入で高い強度増加が期待できる。

2）細骨材率を変化させた実験では，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）竹繊維補強コンクリートにおける繊維の強度負担は，繊維破断，繊維付着，繊維ダボの累加として定量的に計算することができた。

謝辞　本研究は，公益財団法人 LIXIL 住生活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，竹材料と骨材を提供していただきました。ここに記して深甚の謝意表します。

参考文献

1) Masakazu TERAI 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

2) 細田貫一：竹筋コンクリート工，修教社書院，1942.2

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，第 33 巻（CD），2011.7

4) Masakazu TERAI 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

5) 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，pp.537-542，2002.7

6) 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

7) Miha Tomazevic, Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings Series on Innovation in Structures and Construction – Vol.1, Imperial College Press, 1999.

8) 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, pp.943-951, 2009.3