

論文 竹繊維を用いた繊維補強コンクリートの強度特性について

生田 麻実*1・武田 宇浦*2・松本 翼*3・上田 隆之*4

要旨: 近年, 全国の里山で放置竹林問題が発生し, 繁殖し過ぎた竹の適切な間伐が望まれている。竹林の管理には竹間伐材の有効利用方法を確立することが必要である。本研究では竹繊維をコンクリートに混入し, 天然繊維の特性を付与したコンクリートとして利用することを検討した。セメントの質量に対する竹繊維混入率および竹繊維の裁断長さをパラメータとして竹繊維混入コンクリート供試体を作製し, 圧縮, 曲げ, 引張強度を測定した。強度試験の結果, 竹繊維を混入したことによる繊維補強効果が最も得られる竹繊維混入率および竹繊維長の最適値は, 材齢により異なる可能性があることがわかった。

キーワード: 繊維補強コンクリート, 竹繊維, 爆砕処理法

1. はじめに

近年, 繊維強化複合材料に使用される繊維として, 鋼繊維やガラス繊維にかわり, 天然繊維を使用する試みが行われている。繊維として利用検討がされている天然素材の中でも, 竹は他の樹木と比較して成竹になるまでの樹齢が非常に短く, 短期間で使用可能になる再生可能な資源という利点を持つ。また竹は, 全国の里山で放置竹林問題が発生し, 繁殖し過ぎた竹の適切な間伐が望まれている社会的背景を有している。放置竹林問題は国外からの安価な筍の輸入により, 国内の筍の栽培・販売が圧迫され, 採算の合わなくなった竹林が管理の行き届かないまま放置されていることが原因としてあげられる。杉やヒノキの人工林の場合は間伐を行った後の 10 年間程度は良好な状態を維持できるが, 竹林の場合は毎年の手入れが必要であり, その管理には多大な労力を必要とする¹⁾。日本では竹林そのものは宅地等に転用され面積が減少しているが, この面積の減少比率以上に竹材の生産量が激減している。これは竹材の生産が行われていない, つまり適切な管理が行われていない竹林が増加しており, 竹林が放置されていることを意味している²⁾。

竹林の放置化が進むと, 次のような弊害が現れる。

- (1) 竹が肥料によって養分に富んだ田畑に広がる。
- (2) 竹が造林地に侵入して広がり, 針葉樹と竹は根が浅いため養分を取り合い, 広葉樹は樹齢が若く低い樹木が日照不足をおこし, 枯れてしまう。
- (3) 植生が単一化されることにより, 微生物・虫・動物などの生態系も単一化される。
- (4) 伐採が適切に行われていない竹林では地下茎に土を抱えていたヒゲ根がなくなるため, 斜面が崩壊しやすくなる。

前述の短期間での繁殖力も放置竹林問題が深刻化する一因である。竹の適切な間伐・竹林の管理には竹間伐材の有効利用方法の確立が必要となる。これらを背景に, 本研究では竹の有効利用方法として, 繊維化した竹をコンクリートに混入し, 天然繊維の特性を付与したコンクリートとして利用することを検討した。本研究での繊維混入コンクリートとしての利用においては, 繊維の混入による強度増加および破壊性状の改善を主目的とせず, 繊維混入による吸水性や保水性等向上による環境負荷低減効果などをコンクリートに付与することを将来的目標とした。コンクリートを利用する前提として, 繊維を混入しない普通コンクリートと比べ強度が変化するかなど, まず竹繊維混入コンクリートの基礎物性を確認する必要がある。本論文ではその基礎実験として, 竹繊維混入率および竹繊維の長さによる, コンクリートの強度特性への影響を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 爆砕竹繊維

本研究ではコンクリートに爆砕処理によって繊維化した竹繊維を混入した。**写真-1**に爆砕処理法によって取り出した竹繊維の外観を示す。竹繊維は爆砕処理を適用することにより繊維の取り出しが容易となり, 機械的切断によって繊維化した生竹に比べ, 引張強度もより高くなることが報告されている³⁾。

爆砕処理により取り出した竹繊維をコンクリートに混入した際, 竹に含まれる糖分はセメントの凝結遅延を起こす可能性がある。糖はセメントに対し質量比で 1.0% 添加したとき, 著しく硬化が遅れるかまたは硬化不能となる⁴⁾。竹にはフラクトース, グルコース, スクロース

*1 明石工業高等専門学校 技術教育支援センター技術職員 修(工) (正会員)

*2 明石工業高等専門学校 都市システム工学科講師 博(工) (正会員)

*3 明石工業高等専門学校専攻科 建築・都市システム工学専攻 (学生会員)

*4 明石工業高等専門学校 都市システム工学科

等の糖類が含まれ、竹繊維をコンクリートに混和した際にこれらの糖類が練混ぜ水に溶出することで、セメントの凝結に影響を及ぼすと考えられる。そこで、爆砕処理後の竹繊維を水に5日間浸漬して糖분을溶出させ、糖分除去を行った。その後水を入れ替え、糖度計を用いて1時間浸漬した後の水の糖度を測定した。これは1時間浸漬した水に溶出する糖分量を、注水から初期水和水が終わるまでに練混ぜ水に溶出する糖分量と仮定し、硬化に影響する糖分溶出量を評価するものである。1時間浸漬後の糖度はセメントに対する質量比で0.05%となり、前述の硬化遅延または硬化不能となる糖分量1.0%以下であることから、セメント硬化に影響のない状態まで竹繊維の糖分除去が行えたと考えられる。後述の供試体作製においては、糖分除去処理を施した竹繊維を自然乾燥させ含水比13%程度とした状態のものを使用し、所定の長さに裁断し、コンクリートに混入した。

2.2 供試体作製

表-1、表-2、表-3に竹繊維混入コンクリートの使用材料、示方配合、供試体条件を示す。水セメント比をW/C=50%の一定とした。竹繊維はセメント質量に対する混入率及び竹繊維長をパラメータとし、竹繊維混入率0, 3, 6, 9%, 竹繊維長10, 20, 30mmの供試体条件を設定した。供試体はφ100×200mmを圧縮試験および引張試験、100×100×400mmを曲げ試験用として作製し、材齢7日, 28日, 91日まで水中養生を行い、強度を測定した。

2.3 強度試験

各供試体条件につきそれぞれ3体の強度試験を行い平均値を試験結果とした。圧縮試験はJIS A 1108に基づいて行った。曲げ試験はJIS A 1106に基づき、切り欠き等は設けず3等分点載荷を行った。引張試験はJIS A 1113に基づいて割裂引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-1に材齢7日, 28日, 91日での圧縮強度と竹繊維長の関係を竹繊維混入率ごとに示す。ここでは竹繊維を混入しない供試体の強度を竹繊維長0mmの軸上に示している。図-1(a)(b)(c)のいずれの竹繊維混入率においても、材齢7日, 28日, 91日経時変化に伴い圧縮強度が増加した。また、竹繊維混入率9%の材齢7日強度は、竹繊維長30mmのとき、竹繊維を混入しない場合の強度を下回った。これを除く供試体においては、同材齢での竹繊維を混入した供試体の圧縮強度は、竹繊維を混入しない供試体より大きな値を示した。これは載荷方向に発生する微細な亀裂の進行を竹繊維が橋掛けし、架橋効果が得られていると考えられる。これより、コンクリート



写真-1 爆砕竹繊維(裁断前)

表-1 使用材料

使用材料	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	海砂, 表乾密度 2.60g/cm ³ , FM2.83
粗骨材	G	砕石 表乾密度 2.62g/cm ³ , 最大粒径 20mm
混和剤	SP1	AE 減水剤;リグニンスルホン酸化合物
	SP2	AE 助剤;アルキルアリルスルホン酸化合物
竹繊維	BF	爆砕竹繊維, 密度 0.59g/cm ³

表-2 示方配合

竹繊維*		単位量(kg/m ³)					
Vol. %	kg/m ³	W	C	S	G	SP1	SP2
0	0	175	350	737	980	2.10	2.10
3	2	175	350	726	964	2.10	2.10
6	4	175	350	715	952	2.10	2.10
9	6	175	350	704	936	2.10	2.10

*セメントの体積に対する混入率

表-3 供試体条件

記号	繊維混入率 (Vol.%)	竹繊維長 (mm)
BF-0	0	—
BF-3-10	3	10
BF-3-20	3	20
BF-3-30	3	30
BF-6-10	6	10
BF-6-20	6	20
BF-6-30**	6	30
BF-9-10	9	10
BF-9-20**	9	20
BF-9-30	9	30

**材齢 28, 91 日強度試験結果なし

への竹繊維の混入は圧縮強度を増加させる効果があると考えられる。

竹繊維混入率, 材齢ごとに、竹繊維長の変化による圧縮強度への影響を比較した。図-1(a)に示す竹繊維混入

率3%の供試体においては、材齢7日、28日、91日のいずれにおいても竹繊維長10mmの場合に同材齢で最も大きい圧縮強度を示しており、竹繊維混入しない場合を除くと材齢7日では竹繊維長30mm供試体、材齢28日および91日では竹繊維長20mm供試体の圧縮強度が最も小さい。図-1(b)(c)に示す竹繊維混入率6%の材齢28日、91日および竹繊維混入率9%の材齢7日、28日、91日においては、同材齢での圧縮強度は竹繊維長20mm供試体が最も大きく、竹繊維長10mmと30mm供試体はほぼ同等の圧縮強度を示した。

3.2 曲げ強度試験結果

図-2に材齢7日、28日、91日での曲げ強度と竹繊維長の関係を竹繊維混入率ごとに示す。圧縮強度と同様にいずれの竹繊維混入率においても、材齢7日、28日、91日経時変化に伴い曲げ強度が増加した。竹繊維を混入した場合と竹繊維を混入しない場合を比較すると、図-2(a)(b)(c)のいずれの竹繊維混入率においても、材齢7日における竹繊維を混入した供試体は、竹繊維を混入しない供試体よりも曲げ強度が小さい。

材齢28日においては、図-2(a)(b)の竹繊維混入率3%、

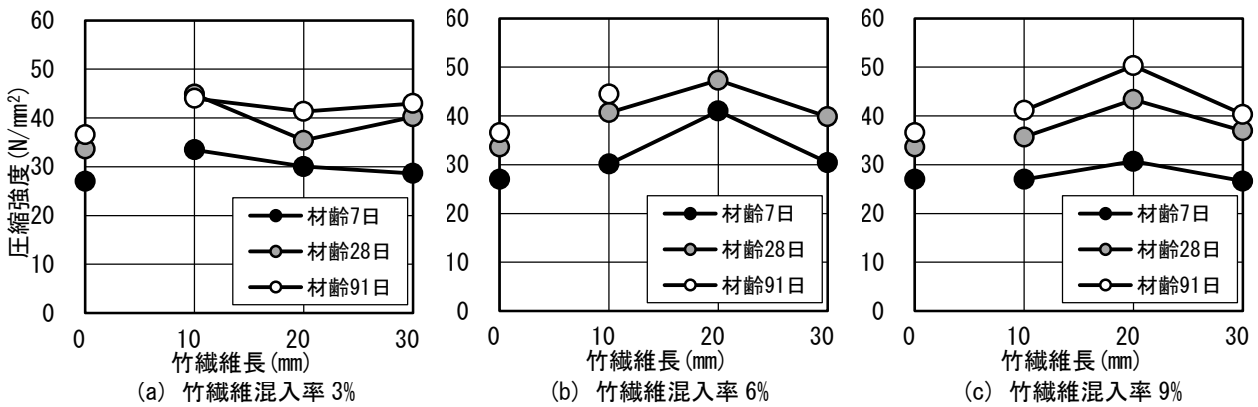


図-1 材齢ごとの竹繊維長と圧縮強度の関係

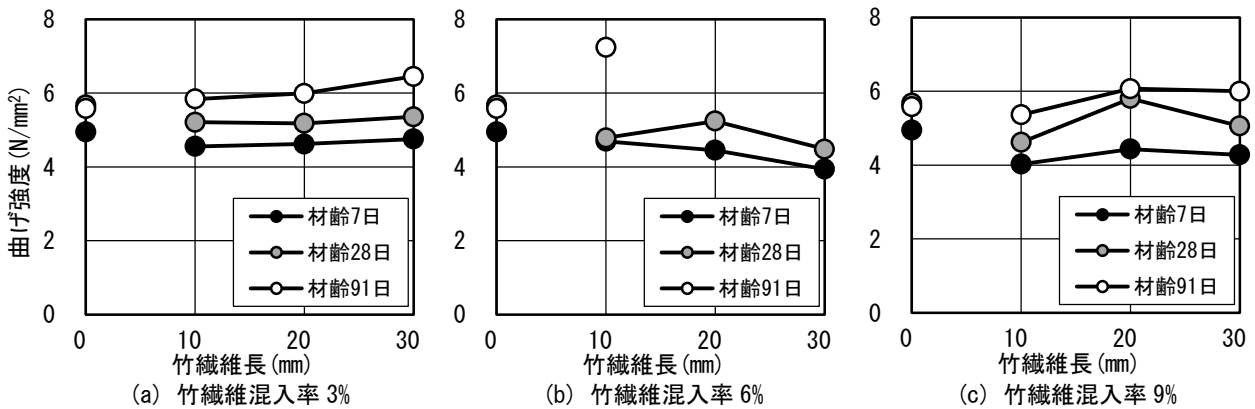


図-2 材齢ごとの竹繊維長と曲げ強度の関係

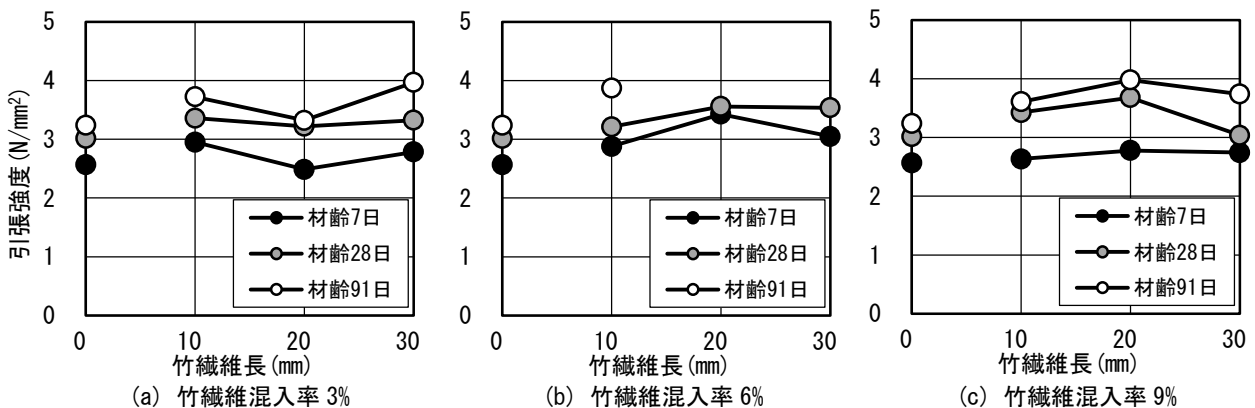


図-3 材齢ごとの竹繊維長と引張強度の関係

9%の全ての竹繊維長および図-2(C)の竹繊維長 10mm, 30mm 供試体(BF-9-10, BF-9-30)において, 材齢 7 日と同様に, 竹繊維を混入した供試体の曲げ強度は竹繊維を混入しない供試体を下回った。材齢 28 日においては, 図-1(C)の竹繊維混入率 9%, 竹繊維長 20mm 供試体(BF-9-20)のみ, 竹繊維を混入しない供試体と比べ曲げ強度が大きい結果を示した。

材齢 91 日においては, 図-2(C)竹繊維長 10mm 供試体(BF-9-10)では竹繊維を混入しない場合の強度を下回った。BF-9-10 を除く材齢 91 日供試体はいずれも竹繊維

を混入しない場合と比較して曲げ強度が大きい。

以上の材齢ごとの比較より, 練混ぜから 7 日程度の若材齢においては, 竹繊維混入による曲げ強度増加が期待できない, または竹繊維混入によって強度が低下する可能性がある。しかし, 材齢の経過に伴い竹繊維混入による補強効果が発現する可能性も有しており, 今後材齢 91 日以上での長期材齢での曲げ強度の変化も調査が必要である。

3.3 引張強度試験結果

図-3 に材齢 7 日, 28 日, 91 日での引張強度と竹繊維

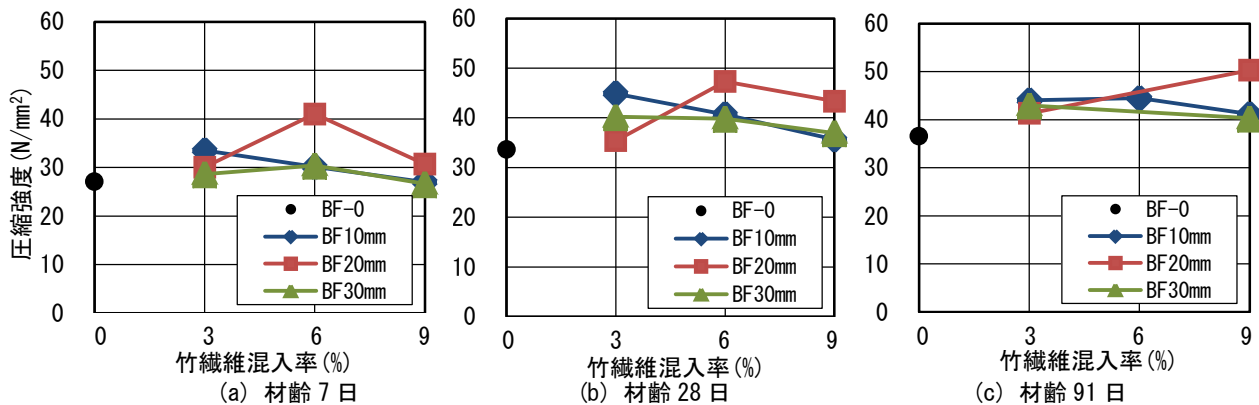


図-4 竹繊維混入率に伴う圧縮強度の変化

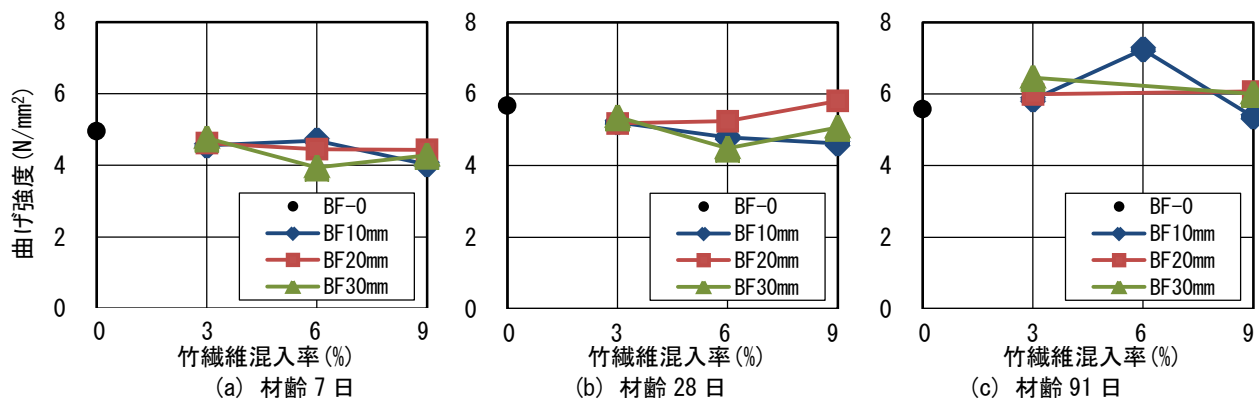


図-5 竹繊維混入率に伴う曲げ強度の変化

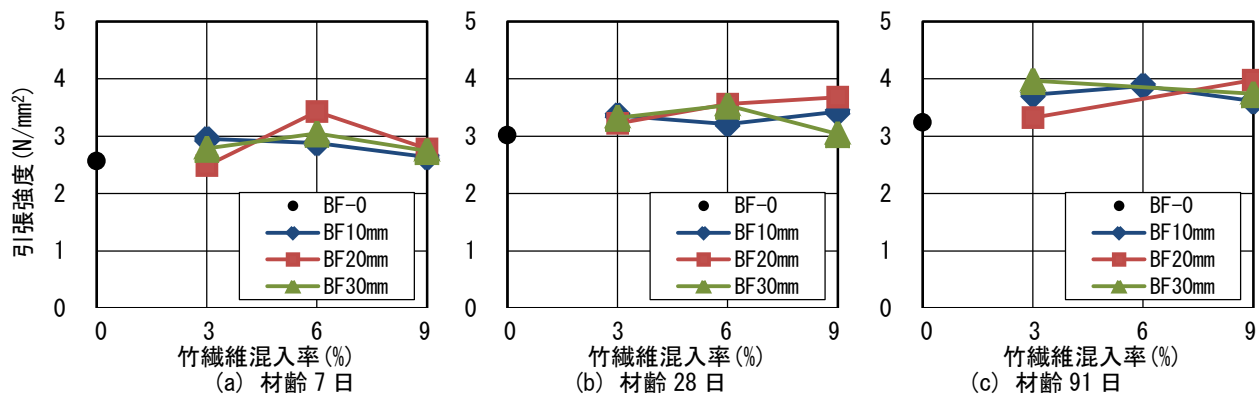


図-6 竹繊維混入率に伴う引張強度の変化

長との関係を竹繊維混入率ごとに示す。いずれの竹繊維混入率においても、材齢 7 日、28 日、91 日の材齢経過に伴い引張強度が増加した。竹繊維を混入した供試体と竹繊維を混入しない場合を比較すると、図-3(a)の竹繊維混入率 3%における、材齢 7 日、竹繊維長 20mm 供試体 (BF-3-20)の引張強度は竹繊維を混入しない場合の引張強度より小さい。この BF-3-20 供試体を除き、いずれの材齢、竹繊維長、竹繊維混入率の場合も、竹繊維を混入しない場合の引張強度以上の強度値を示した。引張においても、コンクリートへの竹繊維の混入によって強度増加に繋がる可能性があることがわかった。

図-3(a)の竹繊維混入率 3%においては、同材齢での引張強度は 7 日、28 日、91 日のいずれでも竹繊維長 20mm 供試体が最も小さい。一方、図-3(b)(c)の竹繊維混入率 6%、9%においては、いずれでの材齢においても、竹繊維長 20mm の場合が同材齢の竹繊維 10mm、30mm の場合よりも大きな引張強度となった。この竹繊維長と引張強度との関係は、圧縮強度と同じ傾向を示している。

3.4 竹繊維混入率と強度の関係

図-4 に各材齢における竹繊維混入率と圧縮強度との関係をそれぞれ示す。竹繊維長ごとの圧縮強度を比較すると、竹繊維長 10mm の場合、材齢 7 日、28 日においては竹繊維混入率の増加に伴い圧縮強度は低下しているが、材齢 91 日においては、竹繊維混入率 6%で最も大きな圧縮強度を示した。竹繊維長 20mm および竹繊維 30mm 供試体の材齢 7 日、28 日供試体においても、同様に竹繊維混入率 6%の場合に、最も圧縮強度が大きい結果となった。

図-5 に各材齢における竹繊維混入率と曲げ強度との関係をそれぞれ示す。竹繊維混入率 3%では、いずれの材齢においても竹繊維長の違いによる曲げ強度の差異は小さく、繊維長による強度への影響は見られなかった。竹繊維長 10mm の場合、材齢 91 日においては竹繊維混入率 6%の場合に曲げ強度が最も大きく、材齢 7 日においても竹繊維混入率 3%、9%に比べわずかであるが 6%の場合に曲げ強度が上回った。材齢 28 日では竹繊維混入率の増加に伴い曲げ強度は低下した。竹繊維長 20mm および 30mm 供試体では、竹繊維混入率 6%供試体の曲げ強度は竹繊維混入率 3%、9%と比較して小さい。曲げ強度においては 3.3 節で述べたように竹繊維を混入しない場合と比べて繊維による補強効果が圧縮強度ほど顕著に現れず、また竹繊維混入率、竹繊維長との関係においても明確な傾向が得られなかった。

図-6 に各材齢における竹繊維混入率と引張強度との関係をそれぞれ示す。竹繊維長 30mm 供試体では、材齢 7 日、28 日において竹繊維混入率 6%供試体が最も大きな引張強度を示した。竹繊維長 10mm、20mm 供試体で

は竹繊維混入率および竹繊維長による引張強度への明確な傾向は得られなかった。

3.5 竹繊維混入率および竹繊維長の最適値について

竹繊維混入量が少なすぎる場合、コンクリート全体のうち、セメントペースト部の強度が支配的となり竹繊維の補強効果が十分に発揮されないことが考えられる。一方、竹繊維混入量が多すぎる場合、ワーカビリティの低下による充填不足や絡まった繊維やファイバーボールの間にできる空隙を原因として、強度低下に繋がる要素が繊維の補強効果による強度への影響以上に支配的となる可能性がある。よって、竹繊維混入コンクリートでは最適な竹繊維混入率を決定する必要があるが、今回の試験結果からは前述のように圧縮、曲げ、引張強度は竹繊維長 20mm において他条件よりも大きな圧縮強度を示すケースが多かった。ただし、これは材齢 7 日の若材齢においてはその限りでなく、竹繊維混入率にも影響されているため、今後長期材齢の強度試験により材齢による影響を考慮して再検討する必要がある。

4. まとめ

以上の研究の結果、以下のまとめを得た。

- (1) コンクリートに竹繊維を混入した場合、いずれの竹繊維混入率、竹繊維長においても材齢経過に伴い圧縮、曲げ、引張強度の増加が確認できた。
- (2) 圧縮強度試験結果より、竹繊維を混入した供試体は竹繊維を混入しない供試体と同等かそれ以上の圧縮強度を有している。
- (3) 圧縮強度においては、繊維長 10mm の場合、材齢 7 日、28 日においては竹繊維混入率の増加に伴い強度は低下しているが、材齢 91 日においては、竹繊維混入率 6%で最も大きな圧縮強度を示した。竹繊維長 20mm、30mm の材齢 7 日、28 日供試体においても、竹繊維混入率 6%で圧縮強度が最大を示した。
- (4) 曲げ強度試験結果より、材齢 7 日では竹繊維を混入した供試体は竹繊維を混入しない場合より小さな曲げ強度を示した。しかし、材齢 91 日においては竹繊維を混入した供試体の曲げ強度は、竹繊維を混入しない場合よりも大きくなった。
- (5) 引張強度試験結果より、竹繊維混入率 3%かつ竹繊維長 20mm の供試体を除き、竹繊維竹繊維を混入した供試体の引張強度は、竹繊維を混入しない場合よりも大きくなった。
- (6) 最も竹繊維の補強効果を得られる竹繊維混入率および竹繊維長の最適値は、材齢によって異なると考えられ、長期材齢での強度を調査する必要がある。

参考文献

- 1) 久米村明, 寺岡行雄, 竹内郁雄: 放置モウソウチク林の林分構造と地上部現存量, 鹿児島大学農学部演習林報告書, Vol.36, pp.1-8, 2009
- 2) 清岡高敏: 竹資源 新素材「竹」の産業化が始まった, (株)マネジメント伸社, PP.39-41, 2001
- 3) 高木均ほか5名: 爆砕法により取り出した竹繊維の引張強度特性, 材料, Vol.52, No.4, pp.353-356, 2003.4
- 4) 鈴木節三, 西晴哉: 糖類ならびにその他の有機物がセメントの水和におよぼす影響, セメント技術年報, No.13(25), pp.160-170, 1959