

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

竹繊維を混入したセメント系複合材料の 力学特性に関する研究

劉 金鵬

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保 利之

2013年 3月

論文概要

構造物の建設で利用するコンクリートは、耐久性と経済性を兼ね備えた欠かすことのできない重要な材料である。しかし、圧縮には強いが引張には弱いという欠点がある。その対策としてコンクリートに補強繊維を混入させた繊維補強コンクリートが開発されている。しかしながら、繊維補強コンクリートに混入される鋼繊維、PVA 繊維といった繊維は高価であることから経済性に問題があり、広く普及していないのが現状である。

竹材は日本国内に豊富にある資源であり、成長も早く、比較的長い繊維長を有しており、力学的特性も優れていることが特徴である。また、有機素材であるため焼却処理をした際にダイオキシンを生じない環境にも優しい材料であり、竹材の有効な利用方法があらゆる分野で注目・検討されている。そこで、本研究では、普通コンクリートまたはモルタルに竹繊維を混入させた竹繊維補強セメント系複合材料の可能性を探るための基礎的な情報を得ることを目的とし、基礎的な材料特性を把握するために、太径竹繊維を普通コンクリートに混入した竹繊維補強コンクリートおよび安価の竹屑をモルタルに混入した細径竹繊維モルタルの練混ぜおよびフレッシュ状況を確認し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行った。

本論文は、全4章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、研究背景および研究目的を示す。

第2章では、太径竹繊維を混入したコンクリートの力学性状の把握することを目的とした。表面加工のない竹繊維、表面に凹凸加工またはシリカサンドを付着させた繊維の3種類の太径竹繊維を用い、混入率を実験因子とし、練混ぜおよびフレッシュ状況を確認し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行った。

実験結果より、竹繊維を混入することで、スランプは低下したが材料分離は見られず、通常の打込みで対応可能な範囲のワーカビリティが確保できていることが確認できた。曲げタフネスおよび換算曲げ強度は繊維の混入率が増加すると伴に大きくなる傾向が見られ、繊維の架橋効果を確認することができた。付着力を増大させるために竹繊維の表面を加工した結果、加工前の繊維を混入した試験体の実験結果と大きな差は見られなかった。

第3章では、安価な細径竹繊維を混入したモルタルの基礎的な材料特性を把握することを目的とした。細径竹繊維を混入した繊維補強モルタルの練混ぜおよびフレッシュ状況を確認し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行った。破断面における繊維の本数を実測し、繊維の分散特性を検討した。

実験結果より、曲げタフネス、換算曲げ強度および曲げ強度は繊維の混入率が増加するとともに大きくなる傾向が見られ、繊維の効果を確認することができた。繊維の分布は正規分布曲線に類似し、繊維混入率6%の供試体の繊維分布は繊維混入率3%の供試体の繊維分布と比較して、平均1.5倍程度であり、曲げ強度試験の結果とほぼ同様の結果となっている。

第4章では、本論文の結論について述べた。

目次

第 1 章	序論.....	1
第 2 章	太径竹繊維を混入したコンクリートの力学試験.....	3
2.1	はじめに	3
2.2	使用材料	4
2.2	竹繊維の引張試験	6
2.4	実験概要	8
2.4.1	供試体概要	8
2.4.2	試験方法	9
2.5	実験結果および考察	11
2.6	破断面の検討	20
2.7	まとめ	26
第 3 章	細径竹繊維を混入したモルタルの力学試験.....	27
3.1	はじめに	27
3.2	使用材料	28
3.3	試し練り	29
3.4	実験概要	34
3.4.1	供試体概要	34
3.4.2	試験方法	35
3.5	実験結果および考察	37
3.6	破断面の検討	40
3.7	まとめ	43
第 4 章	結論.....	44
謝辞.....		45
参考文献.....		46

第 1 章 序論

構造物の建設で利用するコンクリートは，耐久性と経済性を兼ね備えた欠かすことのできない重要な材料である。しかし，圧縮には強いが引張には弱いという欠点がある。図 1.1 に示すように，初期ひび割れ発生後，すぐに脆性的に破壊する。コンクリートに繊維を練り混ぜた繊維補強コンクリートは，この脆性的な破壊を改善したコンクリートで，繊維を長さ数ミリから十数ミリに切断した「短繊維」が用いられる。繊維には鋼繊維や有機繊維が用いられ，繊維の特性を活かして用途に応じて使い分けられている。しかしながら，一般のコンクリートと比較して高価になるため，広く普及はしていない。

一方，竹は日本国内に豊富にある資源であり，伐採・輸送にかかる費用が少ない上に，伐採後 2～3 年程度で再生することができ，環境に優しい素材として注目されてきた。しかし，近年プラスチックの利用が拡大しているため，竹材の利用は減少している。竹は生長速度が速いため，放置した竹林は周囲の森林や耕地に侵入し，様々な問題が生じている。竹繊維は，“天然のガラス繊維”と呼ばれるセルロースとして，比較的長い繊維長を有しており，また，引張性能が優れている¹⁾。また，有機素材であるため焼却処理をした際にダイオキシンを生じない環境にも優しい材料であり，竹材の有効な利用方法があらゆる分野で注目・検討されている。現在，竹繊維に関する多くの研究が行われている²⁾³⁾⁴⁾。

竹材の有効利用の一つとして繊維補強コンクリートとして用いることができれば，手軽に大量に使用することができ，あわせてコンクリートの脆性的な破壊を改善することも可能と考える。

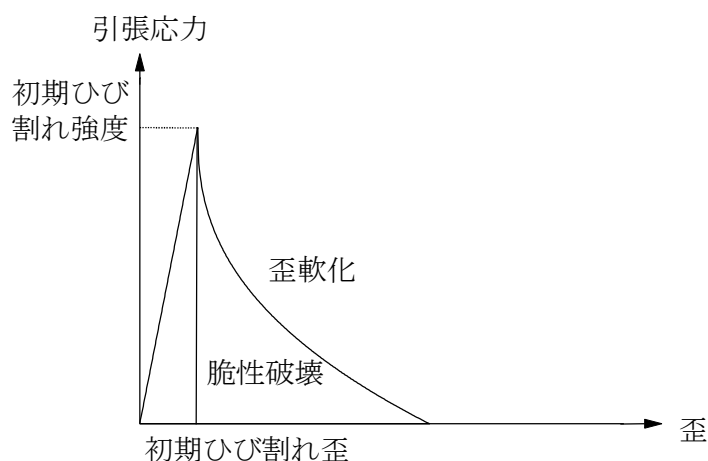


図 1.1 引張応力下の挙動

以上のような背景を受けて，本研究では，普通コンクリートまたはモルタルに竹繊維を混入させた竹繊維補強セメント系複合材料の可能性を探るための基礎的な情報を得ることを目的とする。まずは，基礎的な材料特性を把握するために，太径竹繊維を普通コンクリートに混入した竹繊維補強コンクリートおよび安価の竹屑をモルタルに混入した細径竹繊維モルタル

ルの練混ぜ・フレッシュ状況を確認し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行う。

以下に本論文の構成および目的を示す。

本章では、研究背景および研究目的を示す。

第2章では、太径竹繊維を混入したコンクリートの力学性状を把握する。表面加工のない竹繊維、表面に凹凸加工またはシリカサンドを付着させた繊維の3種類の太径竹繊維を用い、混入率を実験因子とし、練混ぜおよびフレッシュ状況の確認、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行う。また、破断面における繊維の露出分布および配向角の分布を検討する。

第3章では、安価な細径竹繊維を混入したモルタルの基礎的な材料特性を把握する。練混ぜおよびフレッシュ状況を確認し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行う。破断面における繊維の本数を実測し、繊維の分散特性を検討する。

第4章では、本論文の結論を述べる。

第 2 章

太径竹繊維を混入したコンクリートの力学性状

2.1 はじめに

本章では太径竹繊維を混入したコンクリートの力学性状の把握することを目的とする。太径竹繊維を普通コンクリートに混入した太径竹繊維補強コンクリートの練混ぜおよびフレッシュ状況を確認し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行う。また、竹繊維とコンクリートとの付着性能を向上させるために、表面加工を行った竹繊維を混入した竹繊維補強コンクリートの実験も行う。破断面における繊維の露出長分布および配向角の分布を検討する。

2.2 使用材料

使用した竹繊維を写真 2.1 に示す。使用した竹繊維は市販されている竹ひごを長さ 30mm にカットしたものをを用いる。竹繊維の形状を表 2.1 に示す。竹繊維の形状の算出方法については、排水法により、体積および重量を測定することで形状を算出した。



写真 2.1 太径竹繊維

表 2.1 使用竹繊維の形状

密度 (g/cm ³)	体積 (mm ³)	断面積 (mm ²)	真円としたときの径 (mm)
0.985	76.3	2.54	1.80

使用した竹繊維は、無加工の竹繊維、表面に凹凸の加工を施した竹繊維（以降、凹凸加工繊維と称する）、表面にシリカサンドを付着させることで表面加工を施した竹繊維（以降、砂付繊維と称する）の 3 種類である。竹繊維の表面加工を施した理由は、コンクリートとの付着性能を向上させることである。

繊維の表面の凹凸加工器具を写真 2.2 に、凹凸加工繊維を写真 2.3 および図 2.1 に示す。繊維の表面の加工方法については、歯車で竹繊維の表面に凹凸形状を設けたものである。繊維の表面の砂付け加工を写真 2.4 に、砂付繊維の断面図を図 2.2 に、表面の様子を写真 2.5 に示す。繊維の表面の砂付け加工方法では、繊維の表面にエポキシ系接着剤を塗付し、シリカサンドを接着させたものである。

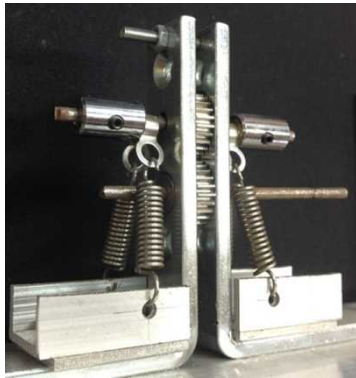


写真 2.2 繊維の表面の凹凸加工器具図

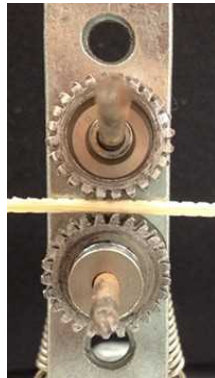


写真 2.3 凹凸加工繊維

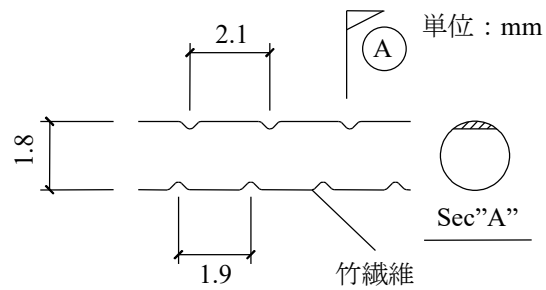


図 2.1 凹凸加工繊維の形状

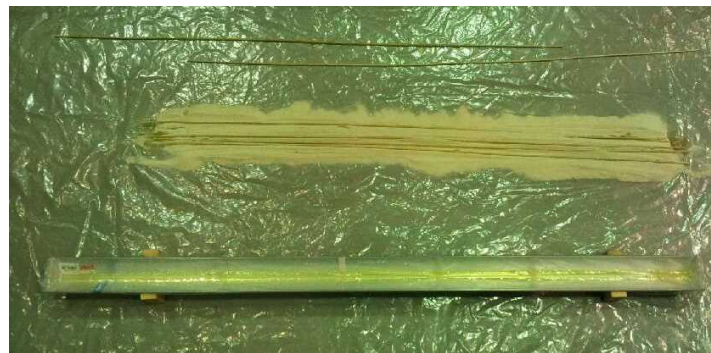


写真 2.4 繊維の表面の砂付け加工

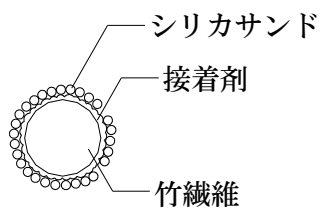


図 2.2 砂付繊維の断面図



写真 2.5 砂付繊維

2.3 竹繊維の引張試験

無加工の竹繊維（N シリーズ）と凹凸加工繊維（P シリーズ）の引張試験を行った。繊維の引張試験概要を図 2.3 および写真 2.6 に示す。試験方法については、試験区間を 200mm とし、試験片の両端 200mm を静的破砕剤により鋼管（外径=34mm，厚=3.2mm）に定着した。また、試験区間の中央部に歪ゲージを貼り付け歪を測定した。引張試験結果を表 2.2 に、竹繊維の応力-歪関係を図 2.4 に示す。応力は、竹繊維の引張力を断面積（表 2.1）で除して求めた。

引張応力-歪の関係について見ると、無加工繊維と凹凸加工繊維を比較すると、弾性係数はほぼ同様であったが、凹凸加工繊維の引張強度は無加工繊維の 70%程度であった。

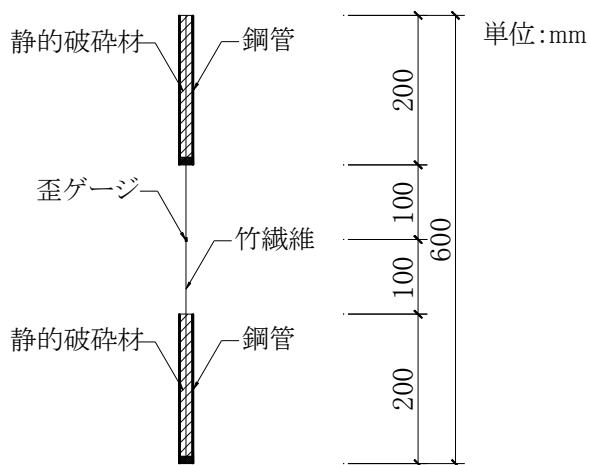


図 2.3 竹繊維の引張試験用供試体

写真 2.6 竹繊維の引張試験

表 2.2 使用竹繊維の引張試験結果

シリーズ		引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
N (加工無) (9 本)	平均値	153	18.7
	最大値	301	23.3
	最小値	55.5	12.7
	標準偏差	68.5	2.98
P (凹凸加工) (5 本)	平均値	104	18.9
	最大値	134	23.3
	最小値	78.7	15.1
	標準偏差	19.3	2.99

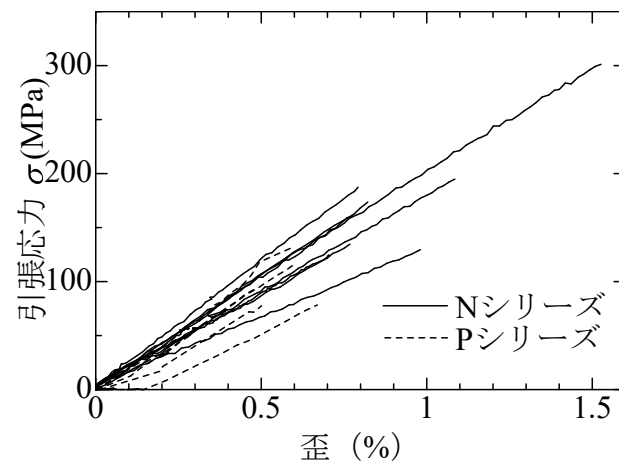


図 2.4 引張応力-歪関係

2.4 実験概要

2.4.1 供試体概要

実験に用いた竹繊維補強コンクリートの一覧を表 2.3 に，コンクリートの配合を表 2.4 に示す。混入した竹繊維の種類を実験因子として，各シリーズにおいて繊維の体積混入率（N，P シリーズ：1%，2%；S シリーズ：0%，1%，2%）をパラメータとして，計 7 種類のコンクリートを計画した。なお，コンクリートの目標圧縮強度は 21MPa，水セメント比は 0.70 とし，目標空気量は 4.5%とした。

N シリーズおよび P シリーズにおいては，セメントには普通ポルトランドセメント，粗骨材には最大径 20mm の碎石，細骨材には陸砂を使用し，混和剤には AE 減水剤を用いた。

S シリーズにおいては，セメントには早強ポルトランドセメント，粗骨材に最大径 13mm の 6 号碎石，細骨材には陸砂を使用し，混和剤には AE 減水剤を用いた。

表 2.3 竹繊維補強コンクリートの一覧

供試体名称	体積混入率 (%)	表面加工	セメント	粗骨材
N-1-1~3	1.0	無	普通 ポルトランド セメント	最大径 20mm の碎石
N-2-1~3	2.0			
P-1-1~3	1.0	凹凸	普通 ポルトランド セメント	最大径 20mm の碎石
P-2-1~3	2.0			
S-0-1~3	0	—	—	—
S-1-1~3	1.0	砂付	早強 ポルトランド セメント	最大径 13mm の 6 号碎石
S-2-1~3	2.0			

表 2.4 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
70	4.5	45	180	257	805	1021	2.57

2.4.2 試験方法

(1) 練混ぜおよびフレッシュ性状

コンクリートの練混ぜには強制パン型ミキサを用いて行う。竹繊維の投入は、通常のコンクリートとしての練混ぜ後に繊維を投入し、1 分間練混ぜを行う。練混ぜの終了後、フレッシュ性状を確認するために、スランプ試験および空気量試験を行った。養生は、N シリーズおよび P シリーズでは室内にて 28 日間気中養生とし、S シリーズでは室内にて 7 日間気中養生とする。

(2) 強度試験

竹繊維補強コンクリートの力学性状を確認するために、圧縮強度試験および曲げ強度試験を行った。圧縮強度試験には、 $\phi 100\text{mm}-200\text{mm}$ のシリンダー供試体を用い、JIS A 1108 に準拠して圧縮試験を行った。

曲げ強度試験の実験概要を図 2.5 および写真 2.7 に示す。曲げ強度試験は、JCI-SF4（繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法）⁵⁾ に準拠し、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い、3 等分点曲げ加力を行った。計測項目は荷重、スパン中央部および載荷点のたわみである。曲げ強度は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (1)$$

P : 供試体が破壊した時の最大荷重 [N]

l : 支点スパン [mm]

b : 破壊断面の幅 [mm]

h : 破壊断面の高さ [mm]

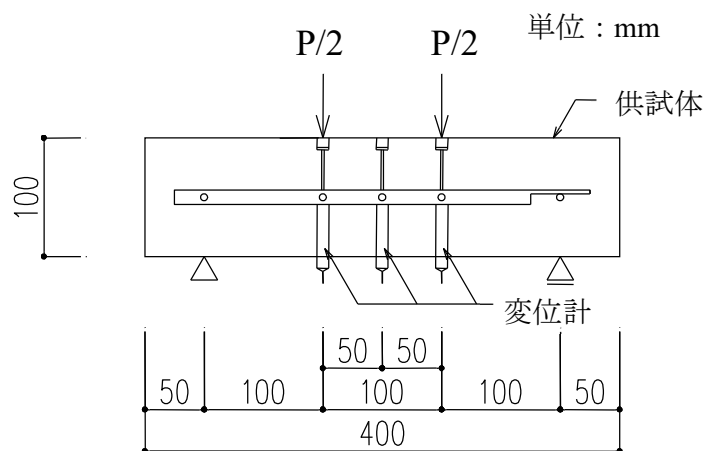


図 2.5 曲げ強度試験概要

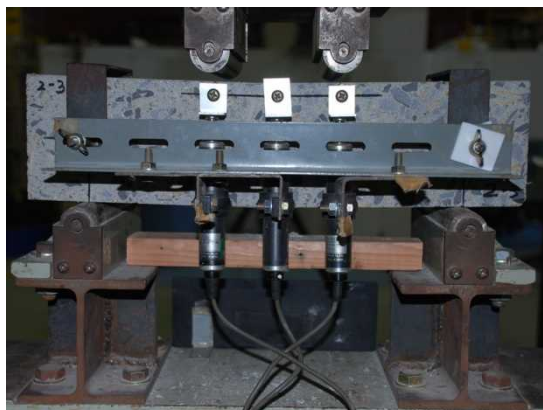


写真 2.7 曲げ強度試験

曲げタフネスは図 2.6 に示すように、たわみがスパンの 1/150 となるまでの荷重－たわみ曲線下の面積から求める。換算曲げ強度を次式で計算する。

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (2)$$

T_b : 曲げタフネス [N/mm²]

δ_{tb} : スパンの 1/150 のたわみ [mm]

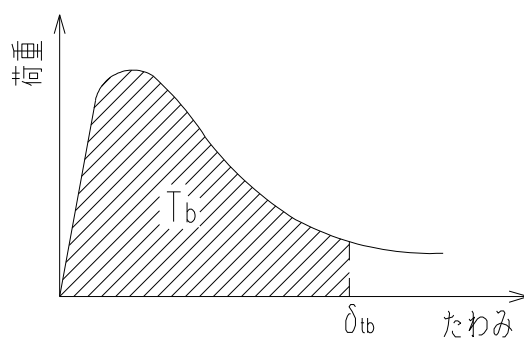


図 2.6 曲げタフネス

2.5 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

竹繊維を混入したコンクリートのフレッシュ性状を表 2.5 に，スランプ試験結果を写真 2.8 に示す。N シリーズでは混入率 1%および 2%でそれぞれ，14.0cm，9.5cm で繊維の混入率の増加に伴う流動性の低下がみられた。P シリーズでは両者とも 15.0cm であった。S シリーズでは，混入率 0%，1%および 2%でそれぞれ，10.5cm，3.5cm および 4.0cm であり，繊維投入後の流動性の大幅な低下がみられた。なお，材料の分離などは見られず，通常の打込みで対応可能な範囲のワーカビリティが確保できていると考えられる。

表 2.5 フレッシュ性状の試験結果

シリーズ	体積混入率	スランプ(cm)		空気量
N (加工無)	1%	14.0		4.2%
	2%	9.0		5.0%
P (凹凸加工)	1%	15.0		3.3%
	2%	15.0		3.2%
S (砂付加工)	0%	10.5		3.1%
	1%	繊維投入前	11.5	—
		繊維投入後	3.5	3.9%
	2%	繊維投入前	9.0	—
		繊維投入後	4.0	2.6%



混入率 1%



混入率 2%

(a) N シリーズ

写真 2.8 (a) スランプ試験結果



混入率 1%



混入率 2%

(b) P シリーズ

写真 2.8 (b) スランプ試験結果



混入率 0%



混入率 1%



混入率 2%

(c) S シリーズ

写真 2.8 (c) スランプ試験結果

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果の一覧を表 2.6 に、圧縮応力-歪関係を図 2.7 に示す。

N シリーズでは、繊維の混入率が増加すると圧縮強度および弾性係数が減少する傾向がみられた。

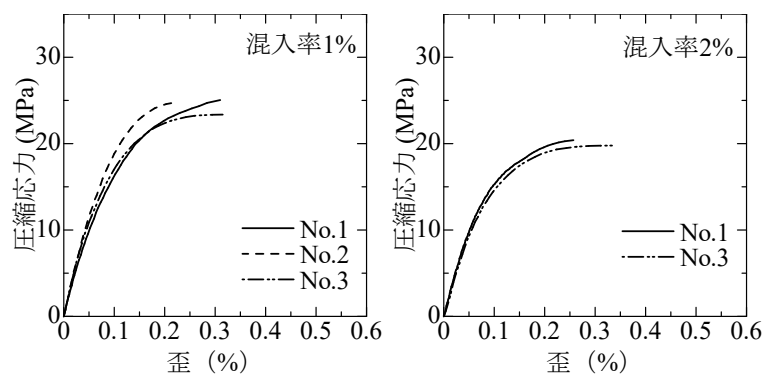
P シリーズでは、圧縮強度および弾性係数ともに繊維混入率における違いは見られなかった。

S シリーズでは、繊維の混入率が増加すると圧縮強度が減少する傾向がみられたが、弾性係数の違いは見られなかった。

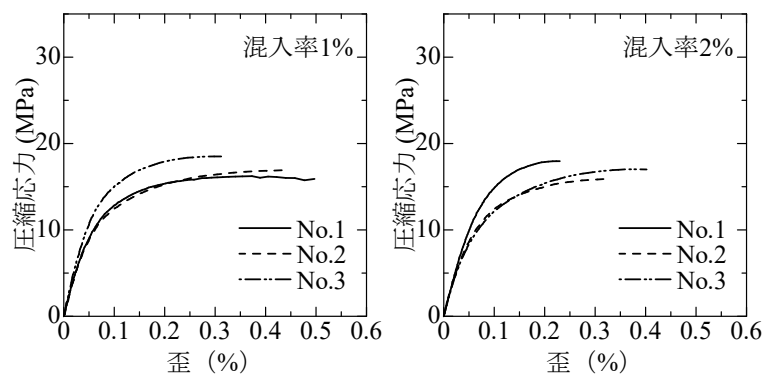
表 2.6 圧縮強度試験結果一覧

シリーズ	体積混入率	供試体 名称	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
N (加工無)	1%	N-1-1	25.1	20.4
		N-1-2	24.8	24.5
		N-1-3	23.6	23.7
		平均	24.5	22.9
	2%	N-2-1	20.4	21.4
		N-2-2	20.2	データ不良
		N-2-3	19.7	20.4
		平均	20.1	20.9
P (凹凸加工)	1%	P-0-1	16.1	16.7
		P-0-2	16.8	16.9
		P-0-3	18.5	19.5
		平均	17.1	17.1
	2%	P-2-1	17.9	17.2
		P-2-2	15.9	16.6
		P-2-3	16.9	15.3
		平均	16.9	16.4
S (砂付加工)	0%	S-0-1	28.3	19.9
		S-0-2	28.4	20.8
		S-0-3	29.2	22.3
		平均	28.6	21.0
	1%	S-1-1	30.0	データ不良
		S-1-2	30.4	22.9
		S-1-3	31.6	20.2
		平均	30.7	21.5
	2%	S-2-1	25.0	20.5
		S-2-2	24.8	20.7
		S-2-3	24.2	20.1
		平均	24.7	20.4

N シリーズ



P シリーズ



S シリーズ

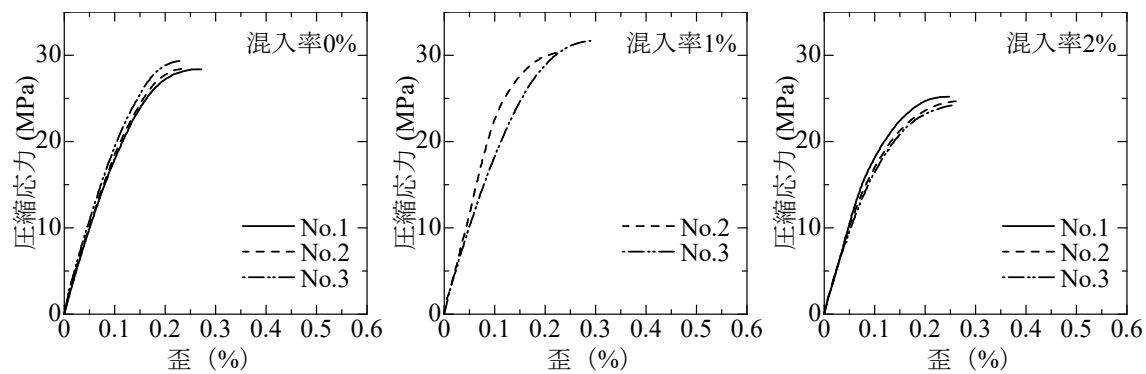


図 2.7 圧縮応力-歪関係

(3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験結果の一覧を表 2.7 に、荷重－たわみ関係を図 2.7 に、加力後の供試体の例を写真 2.9 に示す。

図 2.7 中の破線部は、実験において荷重を追従することができなかった領域を示している。そのため、曲げタフネスを算出する際は、破線部を斜辺とした直角三角形領域の面積を除外している。

表 2.7 曲げ強度試験結果一覧

シリーズ	体積混入率	供試体 名称	曲げタフネス (kN・mm)	換算曲げ強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)
N (加工無)	1%	N-1-1	3.59	0.539	3.42
		N-1-2	4.81	0.722	3.05
		N-1-3	1.61	0.242	3.96
		平均	3.34	0.501	3.47
	2%	N-2-1	4.86	0.729	2.98
		N-2-2	5.61	0.842	3.64
		N-2-3	5.27	0.791	3.26
		平均	5.25	0.787	3.30
P (凹凸加工)	1%	P-0-1	3.28	0.492	3.14
		P-0-2	1.95	0.293	3.97
		P-0-3	1.98	0.297	3.57
		平均	2.40	0.361	3.56
	2%	P-2-1	2.55	0.383	3.73
		P-2-2	4.42	0.663	3.30
		P-2-3	4.85	0.728	3.04
		平均	3.94	0.591	3.36
S (砂付加工)	0%	S-0-1	—	—	4.06
		S-0-2	—	—	4.27
		S-0-3	—	—	4.86
		平均	—	—	4.39
	1%	S-1-1	2.85	0.418	4.16
		S-1-2	3.15	0.467	4.23
		S-1-3	3.64	0.534	4.08
		平均	3.21	0.473	4.16
	2%	S-2-1	6.10	0.879	4.15
		S-2-2	8.03	1.166	3.93
		S-2-3	5.36	0.779	3.43
		平均	6.50	0.941	3.84

荷重－たわみ関係についてみると、N シリーズ、P シリーズおよび S シリーズともに、ひび割れ発生と同時に荷重が低下し、その後なだらかに荷重が低下する傾向を示した。写真 2.9 に示すようにひび割れ発生面は 1 か所であった。混入率 1%と 2%の試験結果を比較すると、混入率 2%の試験体の方が混入率 1%の試験体に比べ、曲げタフネスおよび換算曲げ強度が大きくなっている傾向が見られた。加力後のひび割れ面（写真 2.10）を見ると、破断している繊維はなく、すべてコンクリートからの拔出しによるものだけであり、付着性能の向上を期待した P シリーズについても、表面加工による大きな効果は見られなかった。S シリーズの供試体においても、ひび割れ面（写真 2.10）で破断している繊維はなく、表面のシリカサンド層で剥離している。繊維表面とシリカサンド層の付着力が不足していると考えられる。

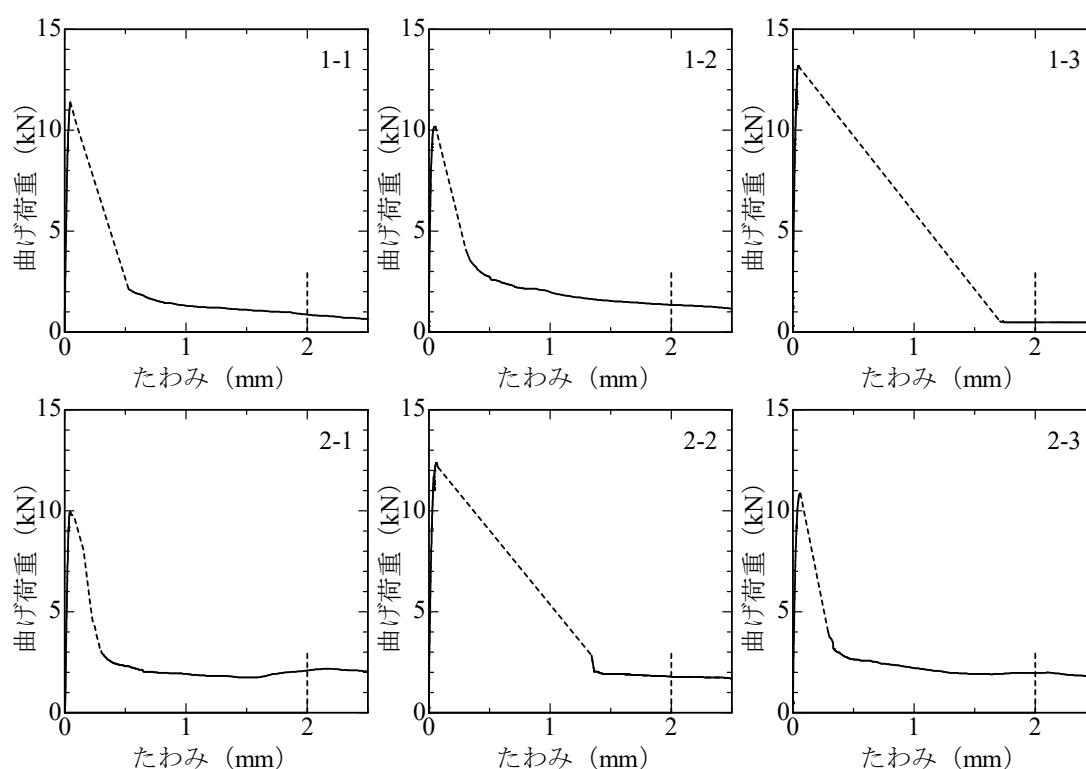


図 2.7(a) 曲げ荷重－たわみ関係 (N シリーズ)

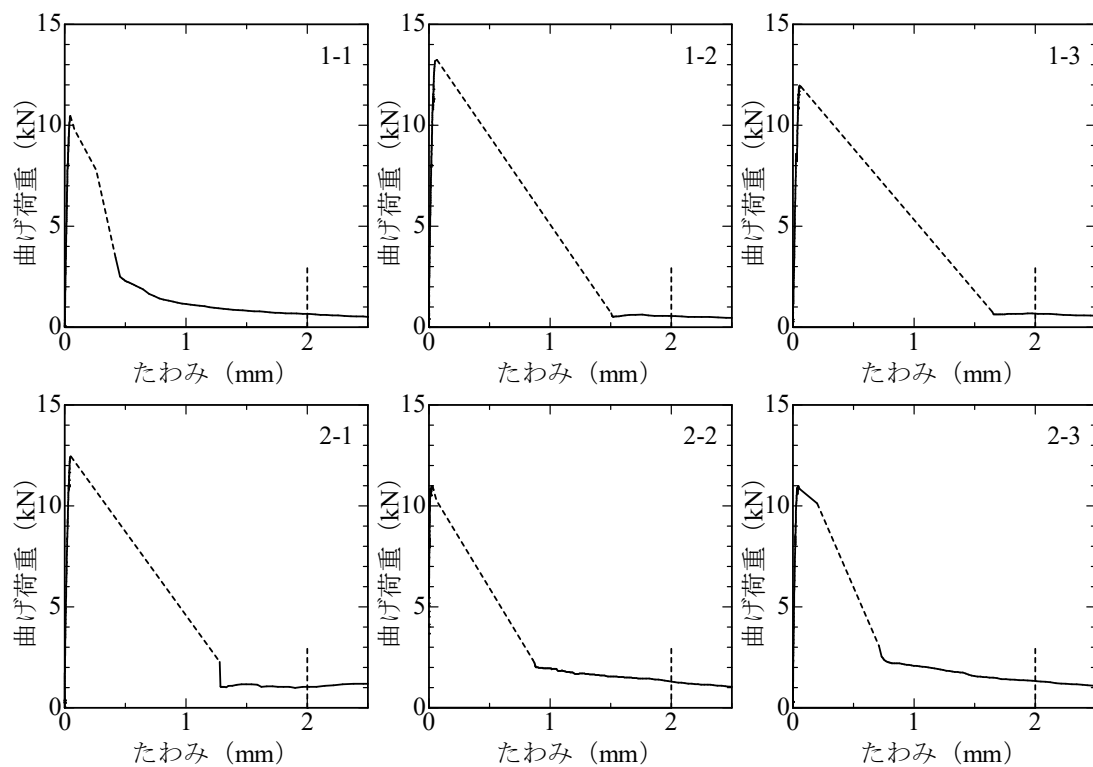


図 2.7(b) 曲げ荷重－たわみ関係 (P シリーズ)

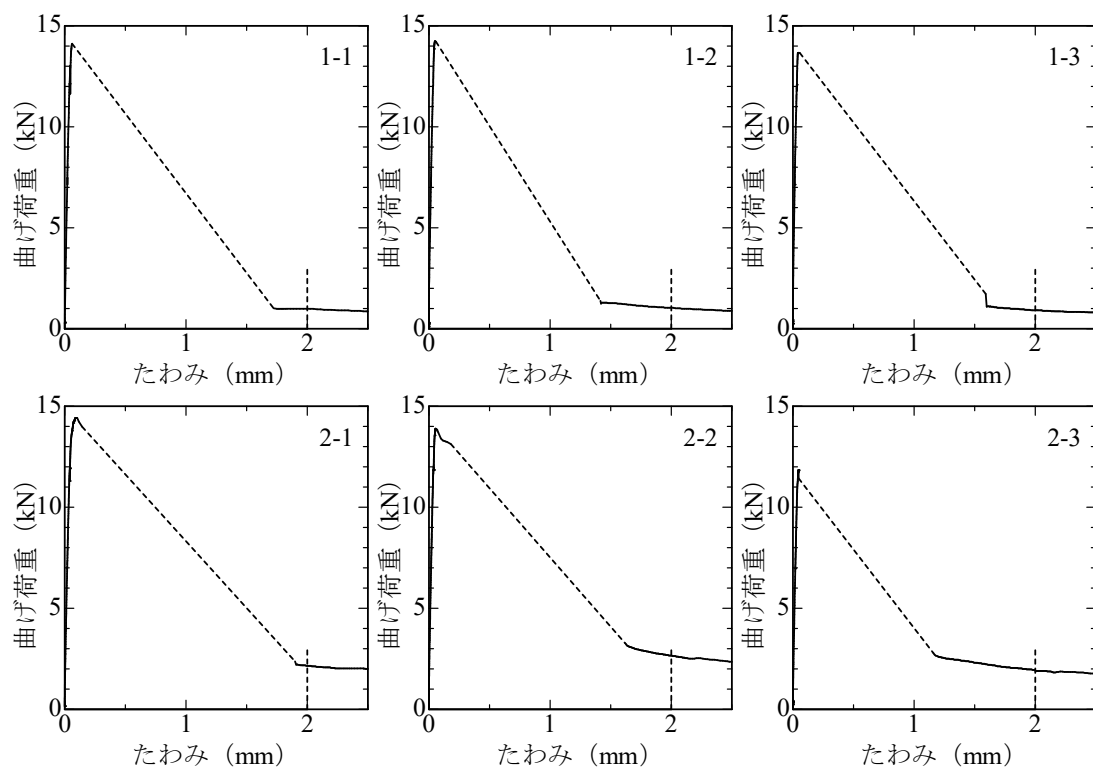


図 2.7(c) 曲げ荷重－たわみ関係 (S シリーズ)



混入率 1%



混入率 2%

(a) N シリーズ



混入率 1%



混入率 2%

(b) P シリーズ



混入率 1%



混入率 2%

(c) S シリーズ

写真 2.9 曲げ強度試験後の供試体の例



写真 2.10 曲げ供試体のひび割れ面 (N シリーズ混入率 2%)



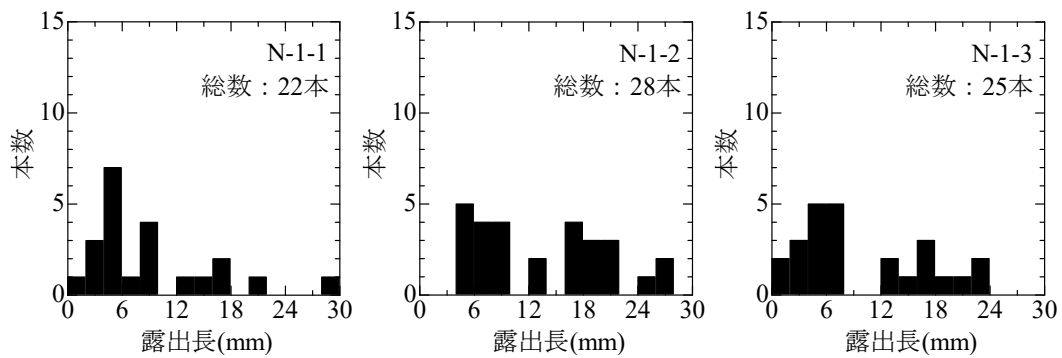
写真 2.11 曲げ供試体のひび割れ面 (S シリーズ混入率 2%)

2.6 破断面の検討

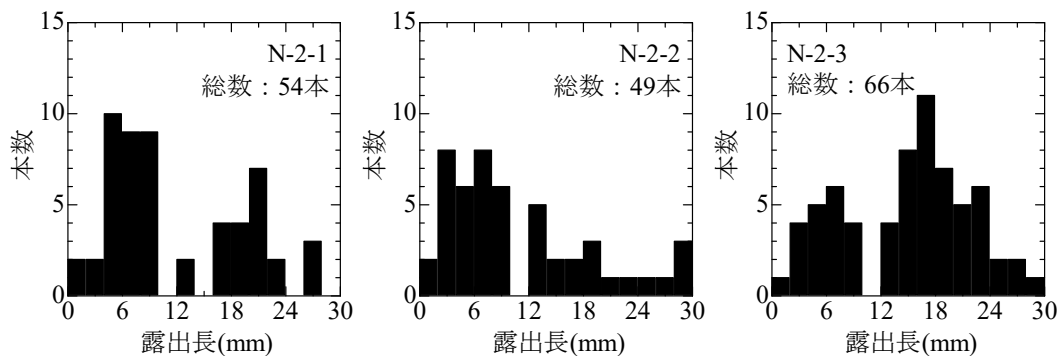
(1) 繊維露出長の検討

曲げ強度試験後の破断面において、破断面における繊維の見え掛け部分の長さ（以降、露出長と称する）および繊維の本数の計測を行う。

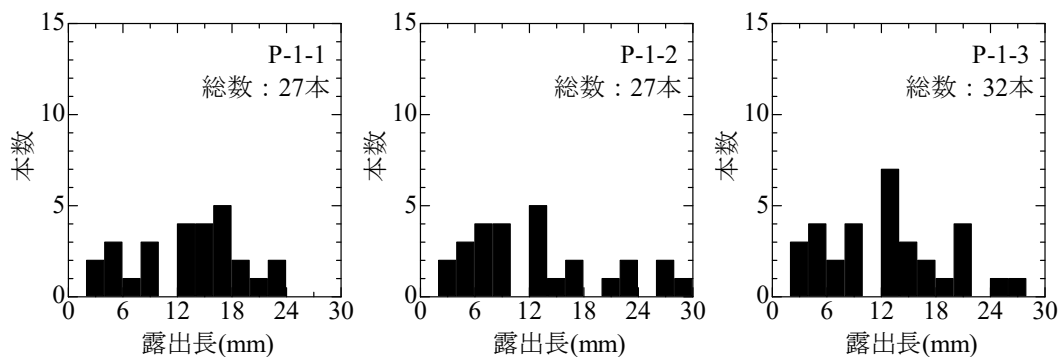
破断面における繊維の露出長の分布を図 2.8 に示す。図の横軸は、階級値の刻みを 2mm 間隔としている。



(a) N シリーズ 繊維混入率 1%



(b) N シリーズ 繊維混入率 2%



(c) P シリーズ 繊維混入率 1%

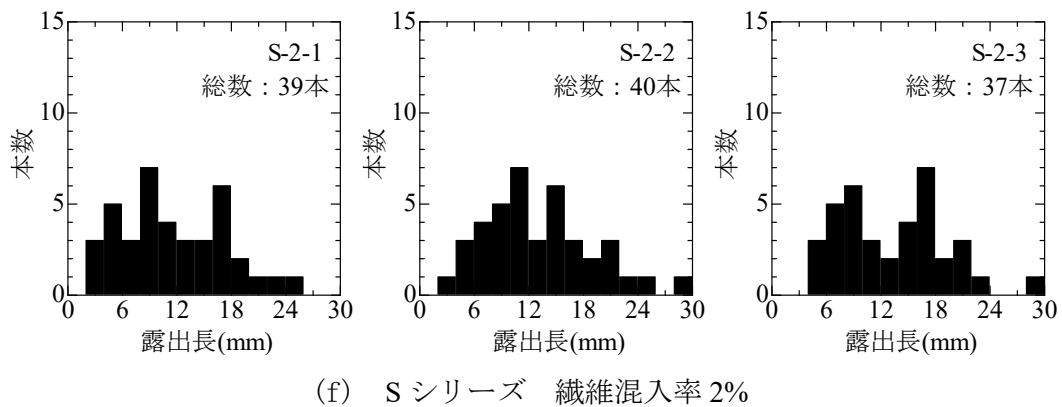
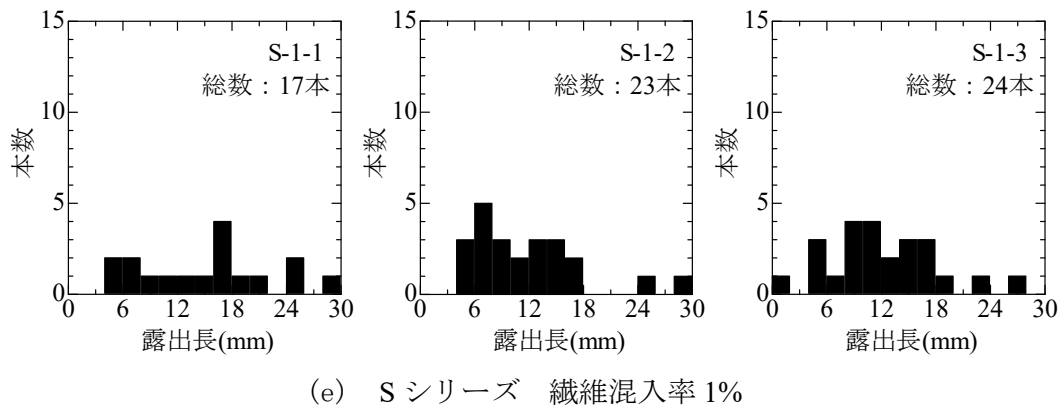
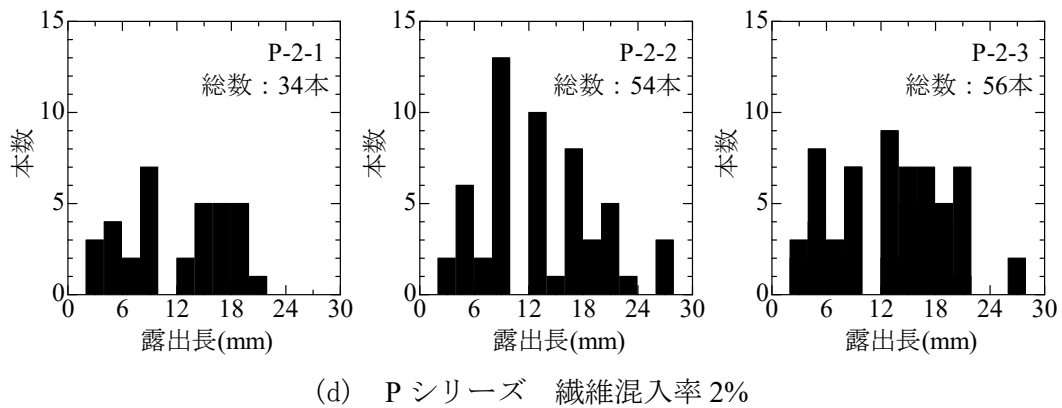


図 2.8 破断面における繊維の露出長の分布

概ね繊維長（30mm）の半分の長さ当たる階級付近にピークが見られ、繊維混入率が大
きい程、その傾向は顕著である。また、繊維混入率に比例して破断面に架かる繊維総数は多
くなっており、供試体全体に均一に繊維が分散されていることを示唆している。

N シリーズ、P シリーズおよび S シリーズ共に、露出長の分布に明確な差は見られなかつ
た。

(2) 角度および本数の関係

定義した繊維の配向角の座標系を図 2.9 に示す。座標系は左手系とし、X 軸は曲げ供試体の軸方向、XY 面は打設面とし、XZ 面は側面とした。破断面における竹繊維は、打設面（XY 面）および側面（YZ 面）における角度を実測した。図 2.10 に配向角分布を示す。

配向角の平均値を表 2.8 に示す。繊維の配向角はいずれの供試体も $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範囲のものが多く、配竹繊維混入率の違いによる差は見られなかった。

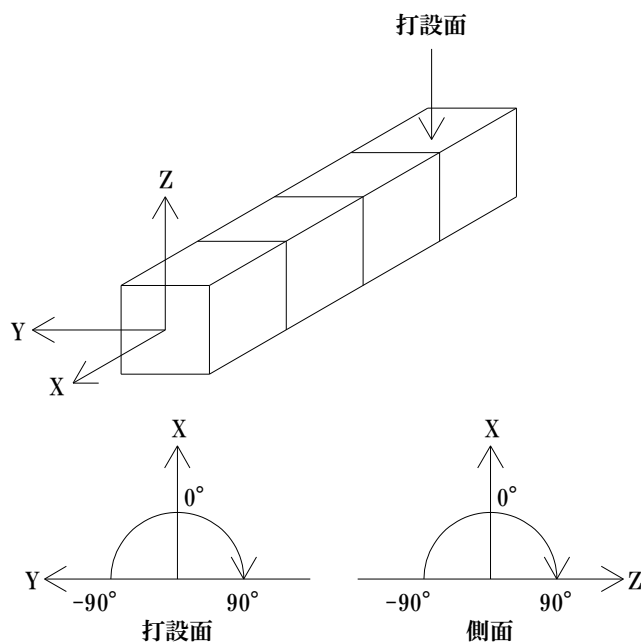


図 2.9 破断面における竹繊維の露出分布

表 2.8 配向角の平均値の一覧

シリーズ	繊維混入率	配向角の平均値(deg)	
		打設面	側面
N	1%	2.9	-3.3
	2%	2.6	-1.5
P	1%	-2.0	5.5
	2%	-3.3	3.5
S	1%	-1.0	-1.0
	2%	-3.6	0.1

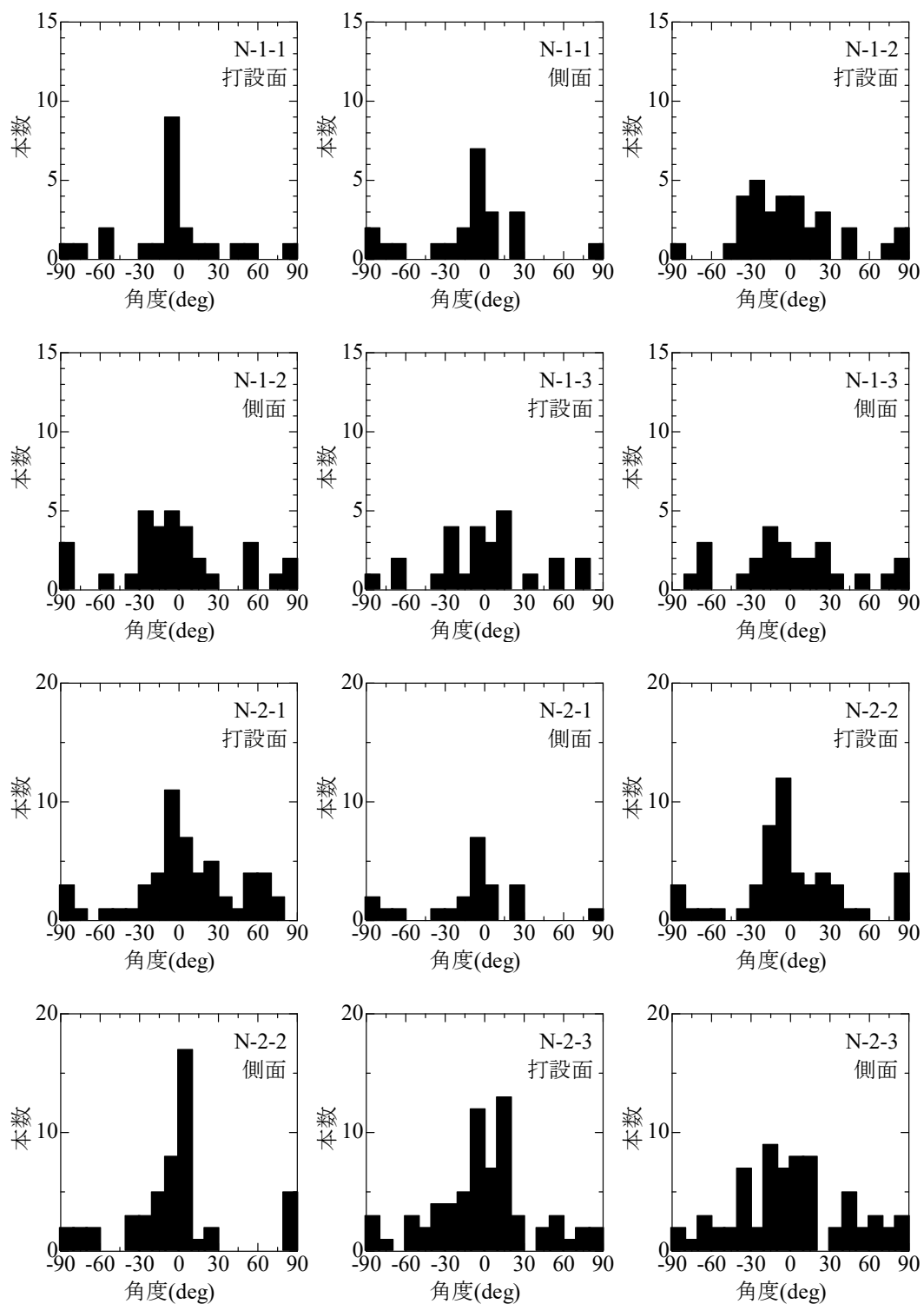


図 2.10(a) N シリーズ配向角の分布

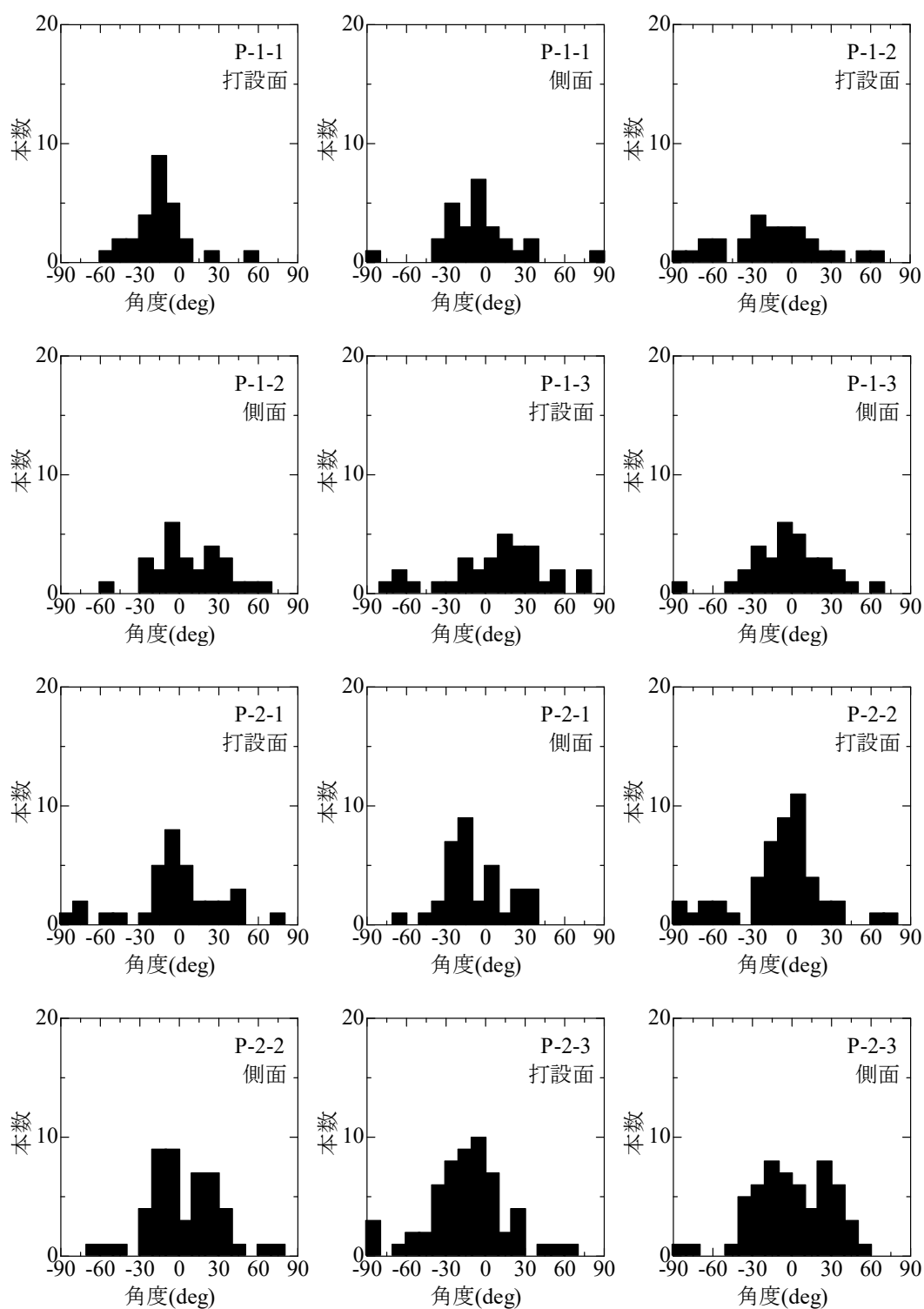


図 2.10(b) P シリーズ配向角の分布

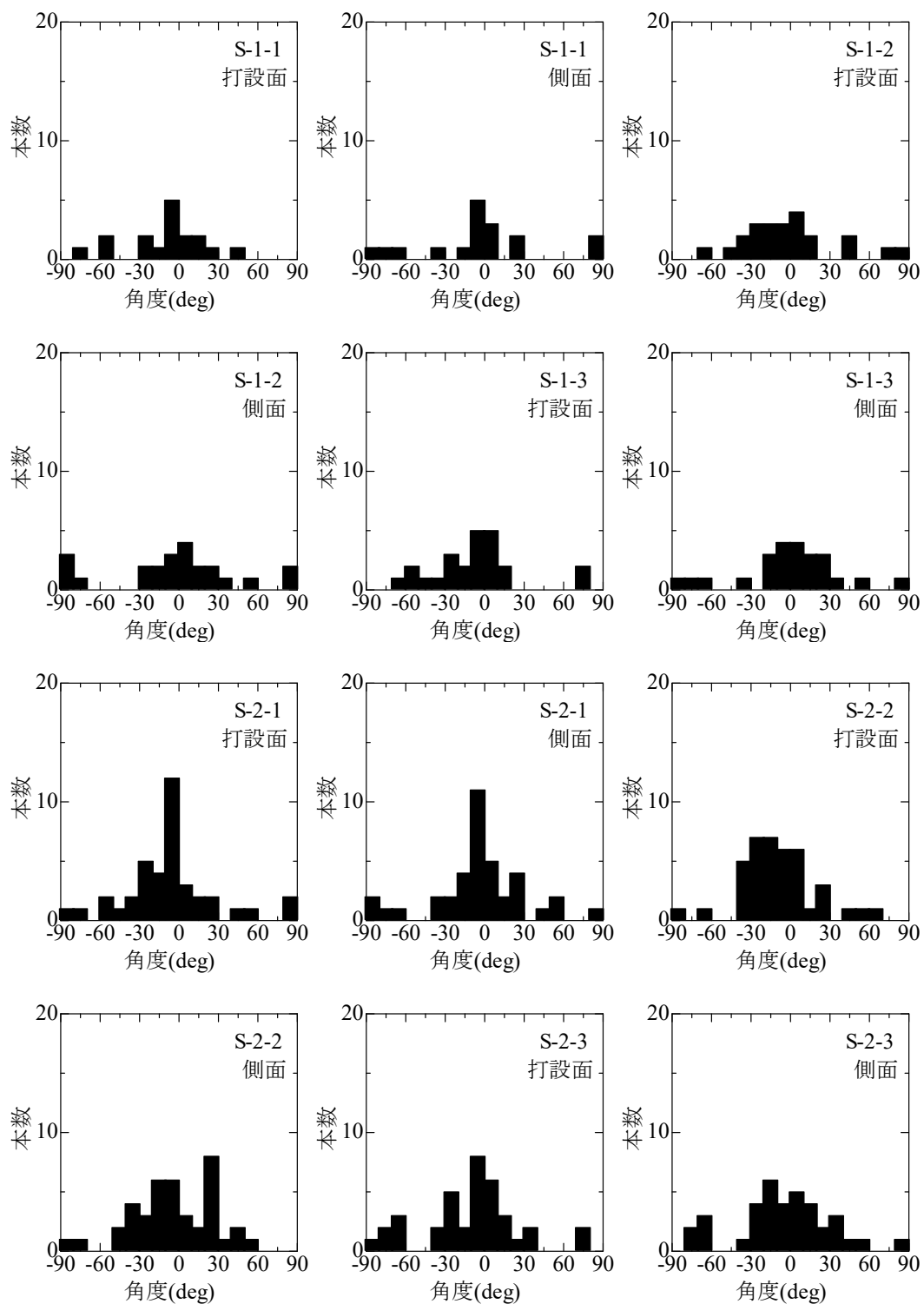


図 2.10(c) S シリーズ配向角の分布

2.6 まとめ

普通コンクリートに、太径竹繊維を体積混入率で 1%および 2%混入させた繊維補強コンクリートの力学性能を確認するための実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 竹繊維を混入することで、スランプは低下したが材料分離は見られず、通常の打込みで対応可能な範囲のワーカビリティが確保できていることが確認できた。
- (2) 曲げタフネスおよび換算曲げ強度は繊維の混入率が増加すると伴に大きくなる傾向が見られ、繊維の架橋効果を確認することができた。
- (3) 付着力を増大させるために竹繊維の表面を加工した結果、加工前の繊維を混入した試験体の実験結果と大きな差は見られなかった。

第3章

細径竹繊維を混入したモルタルの力学性状

3.1 はじめに

本章では安価な細径竹繊維を混入したモルタルの基礎的な材料特性を把握することを目的とする。繊維混入率およびフレッシュ状況を確認するために、細径竹繊維を混入した繊維補強モルタルの練混ぜおよびフレッシュ状況を確認し、また圧縮強度試験および曲げ強度試験を行う。破断面における繊維の本数を実測し、モルタルにおける細径竹繊維の分散特性を明らかにする。

3.2 使用材料

使用した細径竹繊維を写真 3.1 に、繊維の形状を表 3.1 に示す。本研究に用いた竹繊維は竹屑であり、目視でも繊維径および長さにはばらつきがあり、厳密な形状を実測することはできない。また、最大径 2mm 以下の粒状の竹屑（写真 3.2）が混入しており、力学的な効果はないと考え、質量を実測する際は、屑部分(含有比率は概ね 20%)を差し引いている。



写真 3.1 細径竹繊維

表 3.1 使用した竹繊維の形状

密度 (g/cm ³)	長さ (mm)	径 (mm)
0.985	3～12	0.1～0.5



写真 3.2 粒状の竹屑

3.3 試し練り

まず、配合やパラメータを決定するために細径竹繊維を混入したモルタルの試し練りを行い、フレッシュ性状について検討する。

(1) 使用材料および配合

本実験では下記の材料を使用した。配合を表 3.2 に示す。モルタルの目標強度は 30MPa、水セメントは 0.56 とし、繊維の体積混入率は 0%、3%および 6%とした。

早強ポルトランドセメント

フライアッシュ 1 種

硅砂（シリカサンド）7 号

高性能 AE 減水剤：竹本油脂チューポール SSP104

増粘剤：信越化学 Hi メトロローズ SH-4000

表 3.2 配合表

(単位：kg/m ³ =g/L)									
目標強度	繊維混入率	W/C	水	セメント	硅砂	フライアッシュ	繊維	AE 減水剤	増粘剤
30	0,3,6%	0.56	380	678	484	291	26	6	1.91

(2) 実験概要

モルタルの練混ぜには 10ℓ オムニミキサーを用いて下記の要領で行う。

流動性実験は、JSCE-F531（PC グラウトの流動性試験法）に準拠し、JA ロート（写真 3.3）を用いて、グラウトの流出が途切れるまでの時間をストップウォッチで測定する。作製した曲げ供試体を写真 3.4 に示す。1 週間の気中養生を行った。

練混ぜ方法

1. オムニミキサーに、硅砂、セメント、フライアッシュを投入する。
(1 分間空練)
2. 水および AE 減水剤を投入する。
(3 分間練混ぜ)
3. 流動性試験を行う。
4. 増粘剤を投入する。
(1 分間練り混ぜ)
5. 流動性試験を行う。
6. 繊維の半分の量を投入する。
(1 分 30 秒練混ぜ)
7. 残りの繊維を投入する。
(1 分 30 秒練混ぜ)



写真 3.3 ロート試験



写真 3.4 供試体

曲げ強度試験の概要を図 3.1 および写真 3.5 に示す。圧縮強度試験には、 $\phi 50\text{mm} - 100\text{mm}$ のシリンダー供試体を作製し、圧縮加力を行う。曲げ強度試験には、 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を用い、変位計は図 3.1 のように設置して 3 等分点曲げ加力を行う。

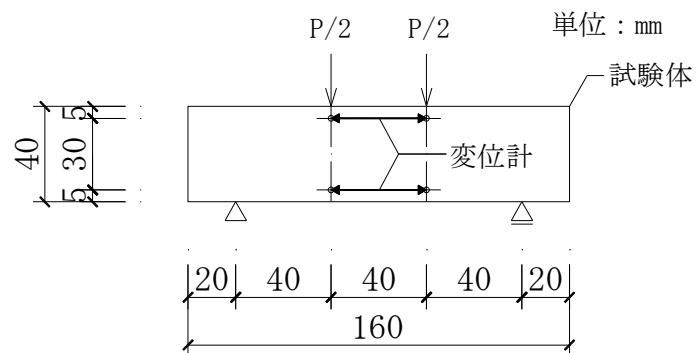
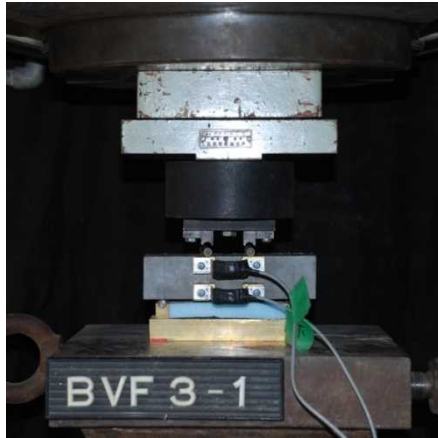
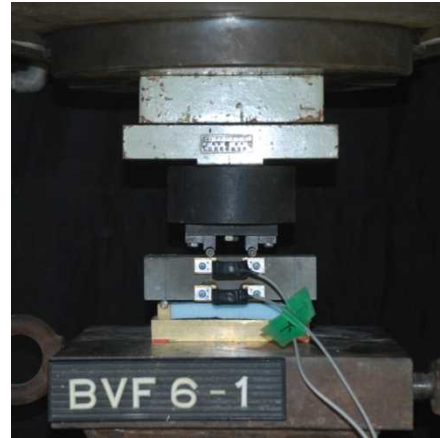


図 3.1 曲げ強度試験の概要



混入率 3 %



混入率 6 %

写真 3.5 曲げ強度試験

曲げ強度試験については、JCI-S-003-2007(繊維補強セメント複合材料の曲げモーメントー曲率曲線試験方法)に基づき、曲げモーメントおよび曲率を次式で計算する。

$$M = \frac{P}{2} \times \frac{l}{3} \quad (1)$$

M : 曲げモーメント(N・mm)
 P : ロードセルの示す荷重 (N)
 l : スパン(mm)

$$\phi = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{d_0} \quad (2)$$

ϕ : 曲率(1/mm)
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 供試体の上側および下側に設置した変位計の値を検長(40mm)で除した歪
 d_0 : 2 つの変位計間の距離 (=30mm)

(3) フレッシュ性状

増粘剤を入れる前後の流動性試験の結果を表 3.3 に示す。増粘剤を入れた後、流下時間は大幅に増加した。

表 3.3 ロート試験の結果

増粘剤	繊維混入率		
	0%	3%	6%
投入前	0'49"	0'49"	0'40"
投入後	4'22"	5'00"	3'46"

(4) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果の一覧を表 3.4 に、圧縮応力－歪関係を図 3.2 に示す。繊維の混入率が増加すると圧縮強度および弾性係数が減少する傾向がみられた。

表 3.4 圧縮強度試験結果

体積混入率	名称	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
0%	0-1	38.1	14.4
	0-2	38.6	14.7
	0-3	33.8	15.1
	平均	36.8	14.7
3%	3-1	33.4	13.8
	3-2	31.4	14.1
	3-3	36.5	13.3
	平均	33.8	13.8
6%	6-1	32.3	11.8
	6-2	32.6	12.0
	6-3	28.7	10.5
	平均	31.2	11.4

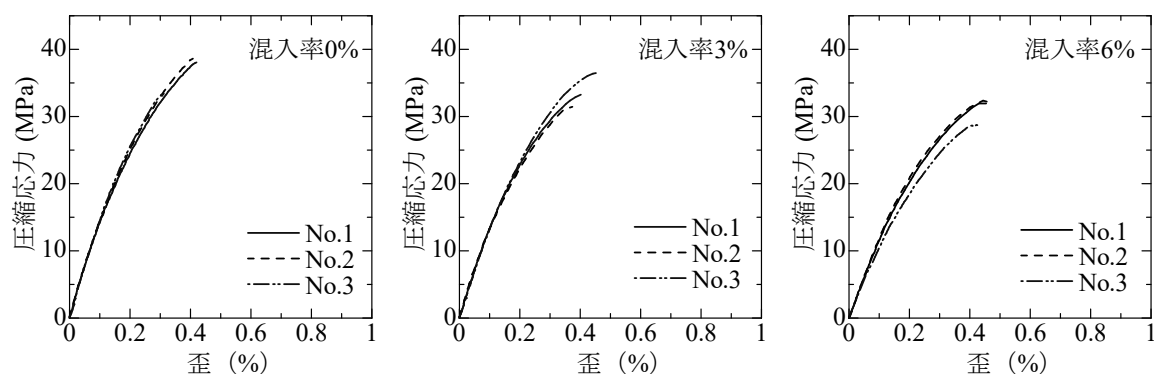


図 3.2 圧縮応力－歪関係

(5) 曲げ強度試験

曲げ強度試験結果の一覧を表3.5に、曲げモーメント－曲率関係を図3.3に示す。繊維の混入率が増加するとともに、曲げ強度が大きくなる傾向がみられた。曲げモーメント－曲率関係では、混入率3%の供試体では初期ひび割れ発生と同時に荷重が一度急激低下し、その後なだらかに荷重が低下する傾向がみられた。混入率6%の供試体では、初期ひびわれが発生した後、荷重の急激な低下はなく、なだらかに低下する傾向がみられた。

表 3.5 曲げ強度試験結果

体積混入率	名称	曲げ強度 (MPa)
0%	0-1	2.20
	0-2	2.89
	0-3	2.46
	平均	2.51
3%	3-1	3.02
	3-2	3.34
	3-3	3.67
	平均	3.34
6%	6-1	4.56
	6-2	4.13
	6-3	4.44
	平均	4.38

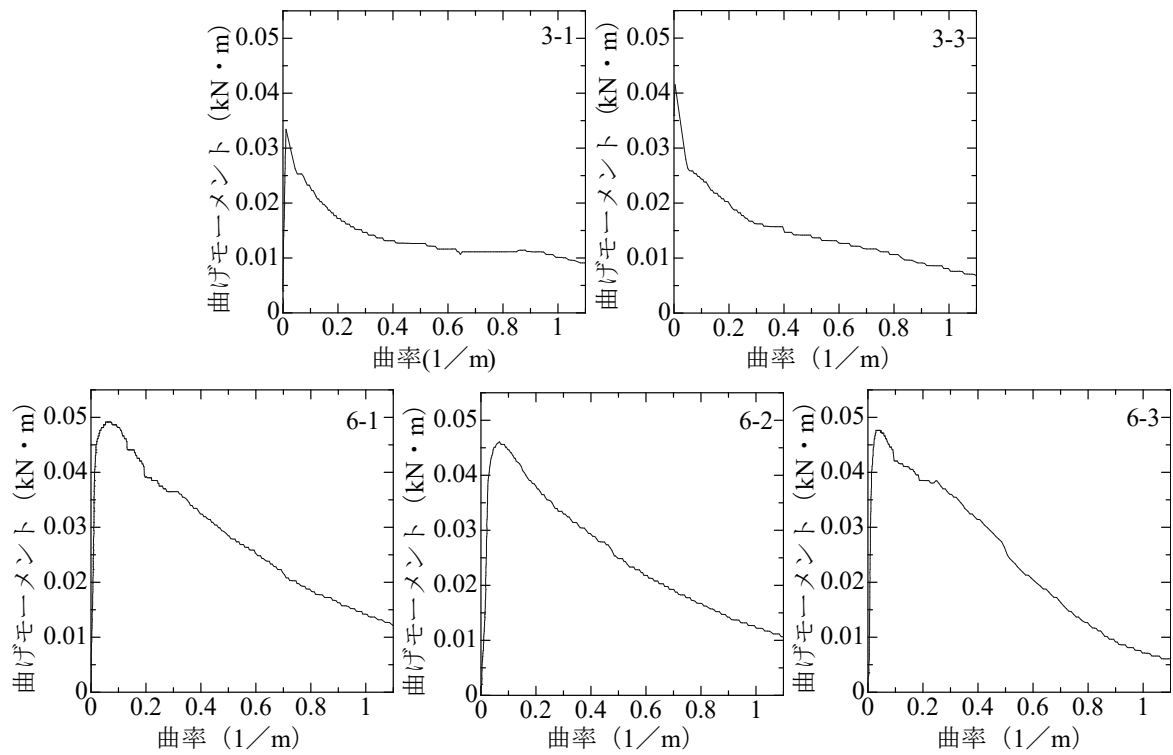


図 3.3 曲げモーメントー曲率関係

3.4 実験概要

3.4.1 供試体概要

細径竹繊維補強モルタルの一覧を表 3.6 に、配合を表 3.7 に示す。細径竹繊維を混入したモルタルの試し練りの結果より、繊維の体積混入率を 3%および 6%とするモルタルの練混ぜの可能性の確認ができ、繊維の混入率（3%、6%）をパラメータとして計 2 種のモルタルを計画した。なお、配合計画は試し練りの配合と同様とし、モルタルの目標圧縮強度は 30MPa、水セメント比は 0.56 とした。

表 3.6 細径竹繊維補強モルタル

供試体名称	体積混入率 (%)
T-3-1~3	3.0
T-6-1~3	6.0

表 3.7 モルタルの配合

(単位 : kg/m³=g/L)

目標強度	繊維混入率	W/C	水	セメント	珪砂	フライアッシュ	繊維	AE 減水剤	増粘剤
30	3,6%	0.56	380	678	484	291	26	6	1.91

3.4.2 試験方法

(1) 練混ぜおよびフレッシュ性状

モルタルの練混ぜには 10ℓのオムニミキサーを用い、オムニミキサーの容量の関係で、混入率ごとに 3 バッチずつ (1 バッチ=7ℓ) に分けて練混ぜし、その後、練舟内で十分に混ぜて供試体を作製する。増粘剤を入れる前後に JA ロートを用いて流動性試験を行う。養生は、室内にて一週間気中養生とした。

(2) 力学性状

圧縮強度試験には、φ 100mm×200mm のシリンダー供試体を作製し、JIS A 1108 に準拠して圧縮加力を行った。供試体中央区間 100mm で変位を測定し、静弾性係数を測定する。

曲げ強度試験の実験概要を図 3.4 および写真 3.6 に示す。曲げ強度試験は、JCI-SF4 (繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法) に準拠し、100mm×100mm×400mm の角柱供試体を用い、3 等分点曲げ加力を行った。計測項目は荷重、スパン中央部および載荷点のたわみである。曲げ強度を次の式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (3)$$

P : 供試体が破壊した時最大荷重 [N]

l : 支点スパン [mm]

b : 破壊断面の幅 [mm]

h : 破壊断面の高さ [mm]

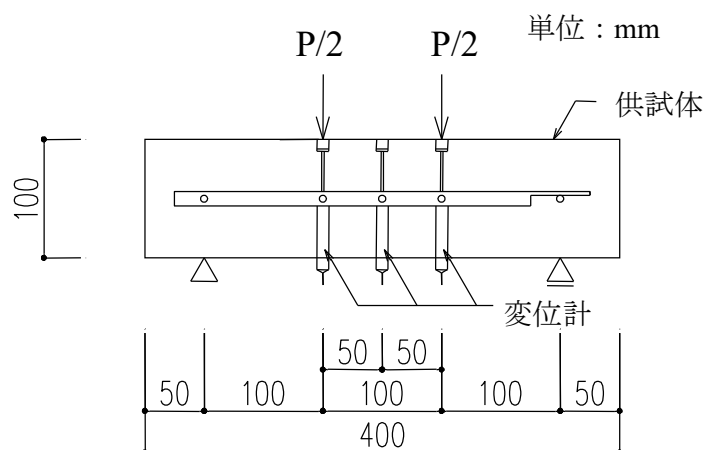
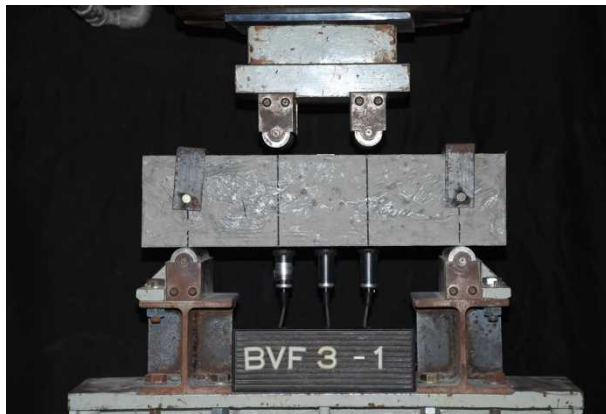
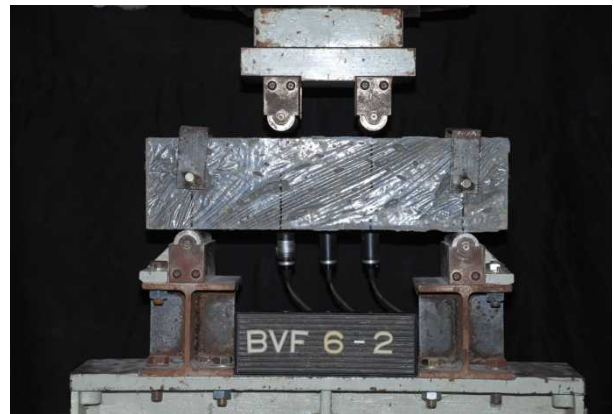


図 3.4 曲げ強度試験の概要



混入率 3 %



混入率 6 %

写真 3.6 曲げ強度試験

曲げタフネスは図 3.5 に示すように、たわみがスパンの 1/150 となるまでの荷重－たわみ曲線下の面積から求める。換算曲げ強度を次式で計算する。

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (4)$$

T_b : 曲げタフネス [N/mm²]

δ_{tb} : スパンの 1/150 のたわみ [mm]

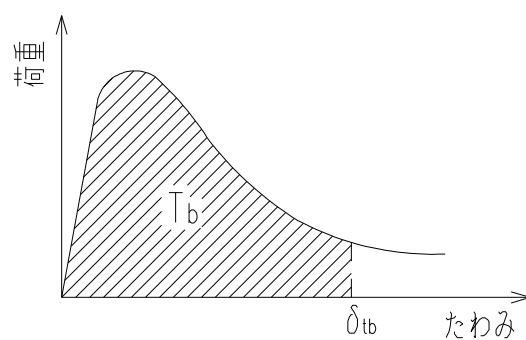


図 3.5 曲げタフネス

3.4 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

流動性試験の結果および空気量を表 3.8 に、練混ぜの状況を写真 3.7 に示す。増粘剤を入れることにより、流下時間が大幅に増加する傾向が見られた。

表 3.8 流動性試験の結果および空気量

		混入率 3%			混入率 6%		
		1 バッチ	2 バッチ	3 バッチ	1 バッチ	2 バッチ	3 バッチ
増粘剤	投入前	1'30"	1'14"	0'53"	0'44"	0'46"	0'59"
	投入後	6'54"	なし	4'27"	4'52"	4'40"	5'09"
空気量		5.8%			4.2%		



繊維の投入直後



練混ぜ中

写真 3.7 練混ぜ状況

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果の一覧を表 3.9 に、圧縮応力－歪関係を図 3.6 に示す。繊維の混入率が増加すると圧縮強度および弾性係数が減少する傾向がみられた。

表 3.9 圧縮強度試験結果一覧

繊維混入率	名称	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
3%	3-1	38.7	15.4
	3-2	37.7	15.4
	3-3	37.1	14.4
	平均	37.9	15.1
6%	6-1	35.1	14.3
	6-2	36.8	13.9
	6-3	37.9	14.2
	平均	36.6	14.1

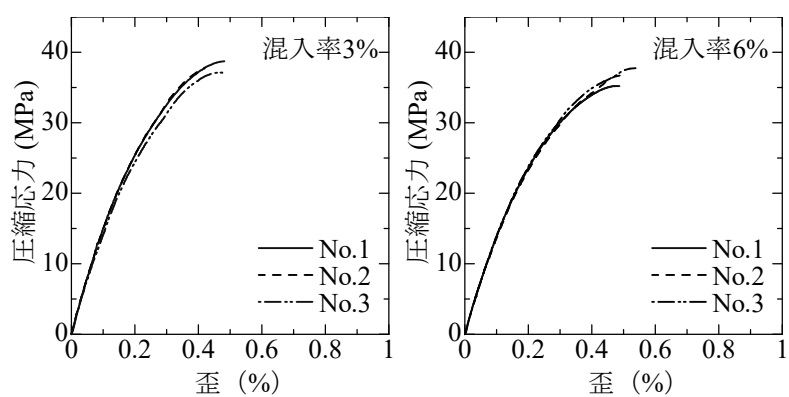


図 3.6 圧縮応力－歪関係

(3) 曲げ強度試験結果

曲げ強度試験結果の一覧を表 3.10 に、曲げ荷重－たわみ関係を図 3.7 に示す。破線部は、実験において荷重を追従することができなかった領域を示している。そのため、曲げタフネスを算出する際は、破線部を斜辺とした三角形領域の面積を除外している。

荷重－たわみ関係についてみると、初期ひび割れ発生と同時に荷重が一度低下し、その後なだらかに荷重が低下する傾向を示した。初期ひび割れが発生した後、混入率 6%の供試体では混入率 3%の供試体と比べて、荷重－たわみ曲線の低下具合が緩やかな傾向がみられた。繊維の混入率が増加すると曲げタフネス、換算曲げ強度および曲げ強度が大きくなる傾向がみられた。

表 3.10 曲げ強度試験結果

繊維混入率	名称	曲げタフネス (kN・mm)	換算曲げ強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)
3%	3-1	4.09	0.600	2.45
	3-2	2.94	0.436	2.59
	3-3	3.63	0.533	2.65
	平均	3.55	0.523	2.56
6%	6-1	6.01	0.865	3.19
	6-2	測定不良	測定不良	4.88
	6-3	6.34	0.921	4.29
	平均	6.18	0.893	4.12

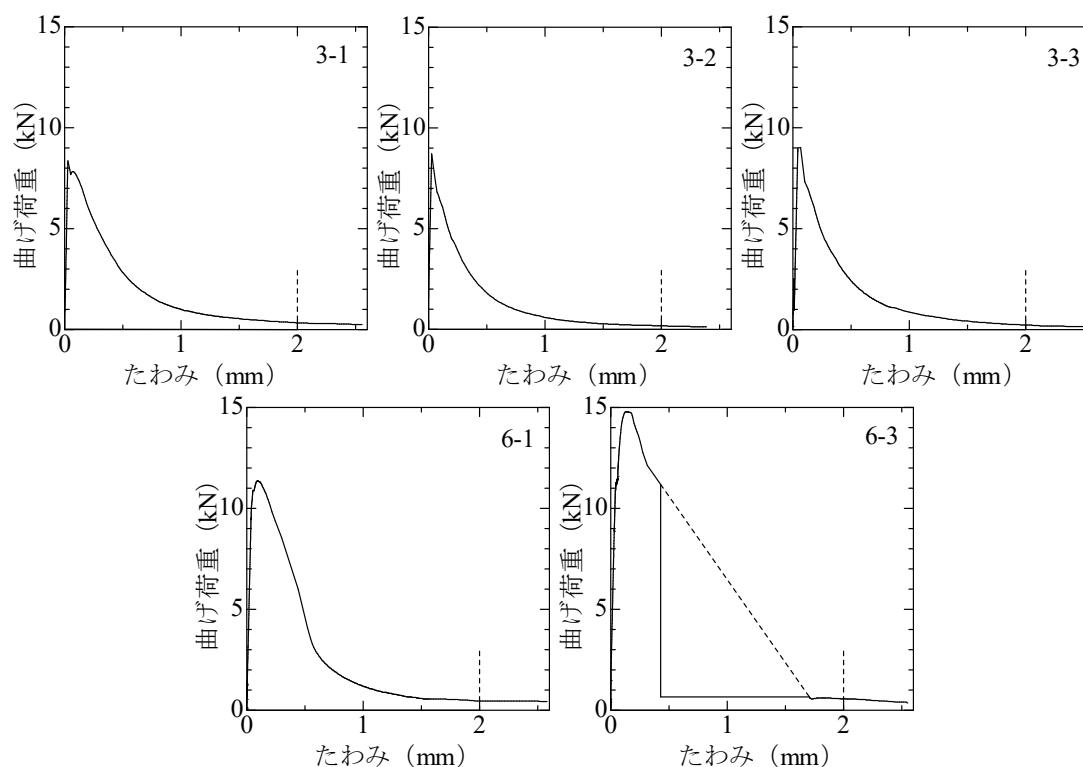


図 3.7 曲げ荷重－たわみ関係

3.5 破断面の検討

曲げ強度試験供試体のひび割れ面の例を写真 3.8 に示す。ひび割れ面における繊維本数の分布を調べ、細径竹繊維の分散性を確認する。

小林らの実験方法⁶⁾を参考にし、加力後の供試体のひび割れ面を図 3.8 に示すように要素に分割し、各要素における繊維の本数を計測した。要素分割の例を写真 3.9 に示す。

破断面における各要素の繊維本数の分布を図 3.9 に示す。繊維の分布は正規分布曲線に類似している。繊維混入率 6% の供試体の繊維分布は繊維混入率 3% の供試体の繊維分布と比較して、平均 1.5 倍程度であり、曲げ強度試験の結果とほぼ同様の結果となっている。



写真 3.8 曲げ試験体のひび割れ面

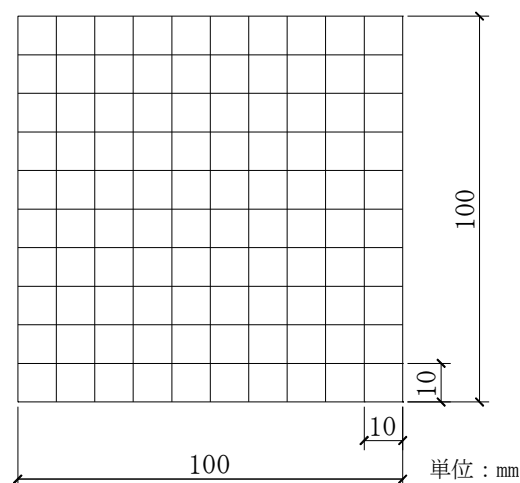


図 3.8 要素の分割



写真 3.9 要素分割の例

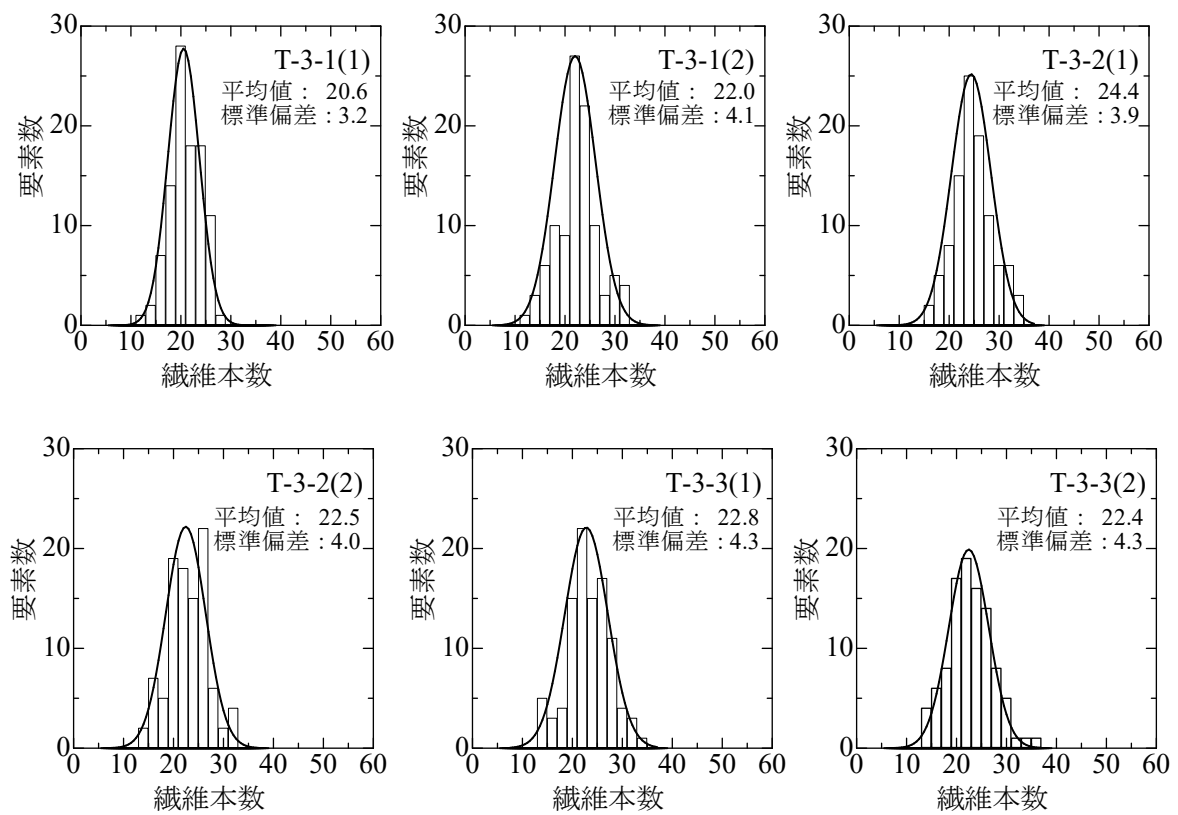


図 3.9 繊維本数の分布(混入率 3%)

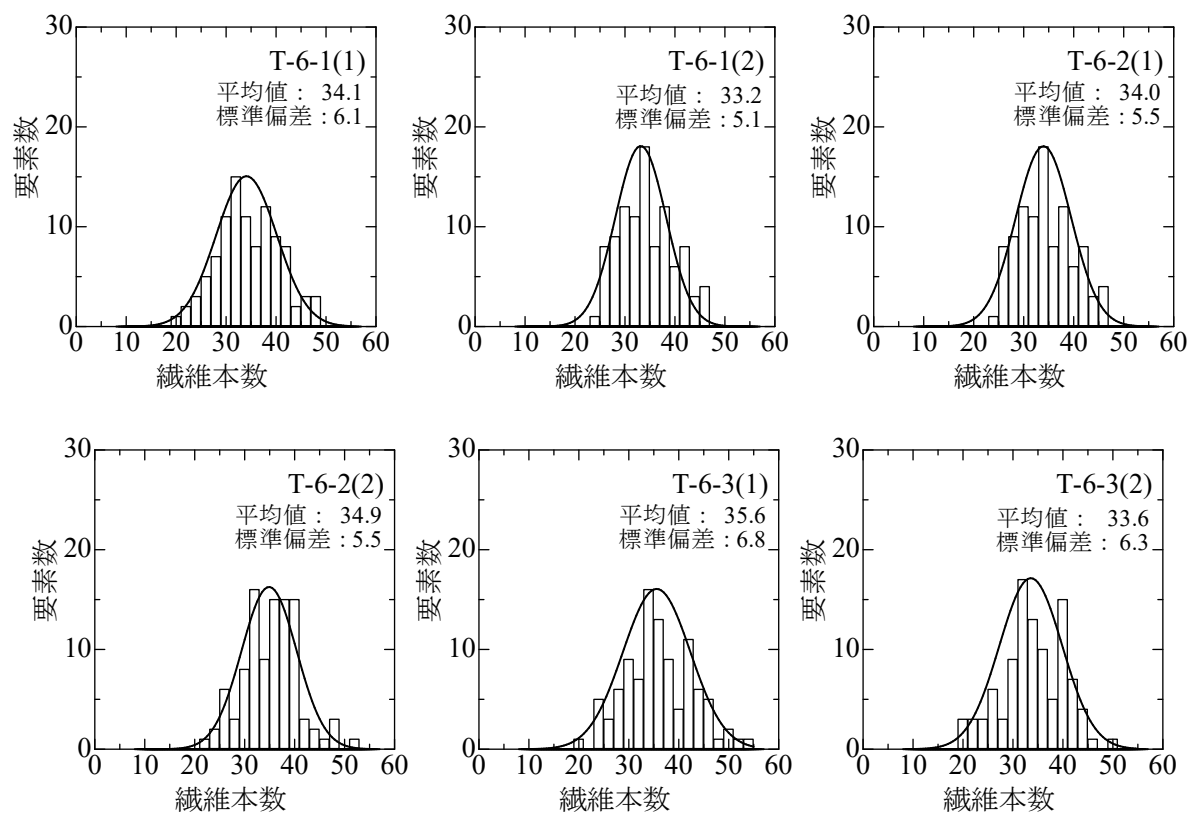


図 3.9 繊維本数の分布(混入率 6%)

3.6 まとめ

モルタルに細径竹繊維を体積混入率で3%および6%混入させた細径竹繊維補強モルタルの力学性能を確認するための実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 曲げタフネス，換算曲げ強度および曲げ強度は繊維の混入率が増加するとともに大きくなる傾向が見られ，繊維の効果を確認することができた。
- (2) 繊維の分布は正規分布曲線に類似し，繊維混入率 6%の供試体の繊維分布は繊維混入率 3%の供試体の繊維分布と比較して，平均 1.5 倍程度であり，曲げ強度試験の結果とほぼ同様の結果となっている。

第4章 結論

本研究では、普通コンクリートまたはモルタルに竹繊維を混入させた竹繊維補強セメント系複合材料の可能性を探るための基礎的な情報を得ることを目的とし、普通コンクリートに太径竹繊維を体積混入率で1%および2%混入させた太径繊維補強コンクリート、モルタルに細径竹繊維を体積混入率で3%および6%混入させた細径竹繊維補強モルタルの力学性能を確認するための実験を行った。以下に得られた知見を示す。

太径竹繊維補強コンクリートについて

- (1) 竹繊維を混入することで、スランプは低下したが材料分離は見られず、通常の打込みで対応可能な範囲のワーカビリティが確保できていることが確認できた。
- (2) 曲げタフネスおよび換算曲げ強度は繊維の混入率が増加すると伴に大きくなる傾向が見られ、繊維の架橋効果を確認することができた。
- (3) 付着力を増大させるために竹繊維の表面を加工した結果、加工前の繊維を混入した試験体の実験結果と大きな差が見られなかった。

細径竹繊維補強モルタルについて

- (1) 曲げタフネス、換算曲げ強度および曲げ強度は繊維の混入率が増加すると伴に大きくなる傾向が見られ、繊維の架橋効果を確認することができた。
- (2) 繊維の分布は正規分布曲線に類似し、繊維混入率6%の供試体の繊維分布は繊維混入率3%の供試体の繊維分布と比較して、平均1.5倍程度であり、曲げ強度試験の結果とほぼ同様の結果となっている。

今後の課題として、竹繊維とマトリクスの付着性状を確認するために、単繊維の付着試験を行う必要がある。

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科の大学院生として、在学中の2年間に行った研究の成果をまとめたものです。

筑波大学准教授 金久保利之先生には、本研究に着手する機会を頂き、本論文に関する一連の研究について、終始懇切丁寧な御指導、御鞭撻を賜りました。心より深謝の意を表します。

筑波大学教授 境有紀先生、筑波大学助教 八十島章先生には論文を作成する上で、貴重な意見を頂きました。厚く感謝いたします。また、供試体作成から実験の遂行まで数おおくのご指導およびお力添えを頂いた筑波大学システム情報工学研究科技官 小島篤志氏に深く感謝いたします。

本研究に関する一連の実験は、筑波大学 金久保研究室の多くの学生の協力の下に行われました。特に、実験の遂行及び論文の作成において数多くのご助言を頂いた本学システム情報工学研究科博士課程 浅野 浩平氏に深く感謝いたします。研究内容に対して多くご助言を頂いた本学システム情報工学研究科博士課程 余 劍華氏、張 偉氏に深く感謝いたします。また、研究室の同期である小川 哲史君には、実験の遂行および論文作成において数多くのご助言を頂いただけでなく、日常生活においても大変お世話になって頂きました。心より感謝いたします。後輩である、佐野 貴之君、木村 太一君、鈴木 健二君は、共に過ごすことができ、とても有意義な研究室生活でした。皆様に、心より深く感謝いたします。

最後に留学生生活を常に温かく見守り、支えて下さった両親、妻、娘に深く感謝いたします。

2013 年 1 月

劉 金鵬

参考文献

- 1) 長谷,朝博：竹繊維の有効利用による持続型社会の構築を目指した材料開発，兵庫自治学[17]，pp.27-31，2011
- 2) 寺井雅和，南宏一：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1279-1284，2012
- 3) 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：日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.987-988，2011.8
- 4) 金井隆太郎，新谷真人，永井拓生：竹材の構造材への利用に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.131-132，2011.8
- 5) 日本コンクリート工学会（2004年4月）JCI規準集（1977-2002年度），pp.66-69
- 6) 小林一輔，睦好宏史：繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形，土木学会論文報告集，第299号，pp.101-112，1980