

論文 ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究

住 学^{*1}・竹内 博幸^{*2}・中出 睦^{*3}・谷垣 正治^{*4}

要旨：ビニロン繊維を用いた繊維補強コンクリートを建築構造物へ適用するため、その基礎性状を把握することを目的として、フレッシュ性状、強度特性、耐久性に関する実験を行った。フレッシュ性状は、繊維種類、繊維混入率により大きく変化することが認められた。曲げ性能は繊維混入率の増加に伴い大きく改善された。乾燥収縮率は繊維の混入により小さくなる傾向にあった。凍結融解試験における劣化状況は、繊維の混入により表層部のスケーリングが抑制され、比較用コンクリートに対して耐凍害性が向上する結果であった。

キーワード：繊維補強コンクリート、ビニロン繊維、フレッシュ性状、強度特性、耐久性

1. はじめに

繊維補強コンクリートは、コンクリート部材に発生したひび割れの幅を抑制し、微細なひび割れ（multiple cracking）が一様に分散することによって、靱性の向上が期待できる材料として注目されており、建築構造物への適用が模索されている。

本研究では、繊維補強コンクリートを実施工に適用するために、径および長さの異なる3種類のビニロン繊維（ポリビニルアルコール繊維、以下それぞれ、細径：200 μm 、中径：400 μm 、太径：660 μm ）を混入したコンクリートの基礎的な性質を把握することを目的とした。試験は、フレッシュ性状、強度（圧縮、曲げ、引張）、耐久性（乾燥収縮、中性化、耐凍害性）についてであり、繊維種類、繊維混入率が各種性状に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

使用したビニロン繊維の標準性能を表-1に、繊維種類と繊維混入率の組合せを表-2に示す。練混ぜは20℃±2℃の室内で行い、強制2軸練

りミキサ（公称容量100 L）を用いて、ベースコンクリートの品質確認後にビニロン繊維を投入し製造した。

表-3に試験項目を示す。フレッシュ性状では、繊維混入前のベースコンクリートおよび混入後の繊維補強コンクリートそれぞれについて試験を行った。圧縮試験、引張試験では、同時に静弾性係数を測定し、曲げ試験では、変位（たわみ）の測定を行った。強度試験材齢は28日と

表-1 ビニロン繊維の標準性能

名称	径 (μm)	長さ (mm)	破断強度 (N/mm^2)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$)	密度 (g/cm^3)
ビニロン	細径	200	24	912	3.04
	中径	400	30	883	2.94
	太径	660	30	883	2.94

表-2 繊維径と混入率の組合せ

繊維種類	繊維混入率 (vol.%)					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
細径	○	○	○	—	—	—
中径	○	○	○	○	○	—
太径	○	○	○	○	○	○
比較用コンクリート 2種類						

*1 (株) 鴻池組 技術研究所 建築技術研究部門 研究員 工修 (正会員)

*2 五洋建設 (株) 建築エンジニアリング部 課長 (正会員)

*3 日産建設 (株) 技術研究所 第二研究室 担当主任研究員 工修 (正会員)

*4 三井住友建設 (株) 技術研究所 小山研究所 耐震免制震研究室 室長 工博 (正会員)

し、引張試験は直接引張試験¹⁾とした。**写真-1**に直接引張試験状況を示す。

乾燥収縮試験における長さ変化の測定は、JIS A 1129-2 によるコンタクトゲージ法とし、材齢

26 週まで測定した。促進中性化試験は、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ 、炭酸ガス濃度 $5\pm 0.2\%$ とし、材齢 26 週まで測定した。凍結融解試験では、前養生として標準水中養生 2 週の後、サイクル数

表-3 試験項目

種類	試験項目
フレッシュ性状	・スランプ (JIS A 1101) ・スランブフロー (JIS A 1150) ・空気量 (JIS A 1128) ・コンクリート温度 ・材料分離抵抗性 (目視) ・ワーカビリティ (ハンドリング)
強度特性	・圧縮試験 (JIS A 1108, 静弾性係数 JIS A 1149) ・引張試験 ($\phi 10\times 20\text{cm}$, 直接引張試験¹⁾) ・曲げ試験 ($10\times 10\times 40\text{cm}$, JIS A 1106, 変位)
耐久性	・乾燥収縮試験 (JIS A 1129-2) ・促進中性化試験 (高耐久性鉄筋コンクリート造 設計施工指針 (案)・同解説 付1) ・凍結融解試験 (JIS A 6204 付属書2)

表-4 使用材料

材料	品質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度： $3.14\text{g}/\text{cm}^3$
水(W)	上水道水
細骨材(S)	君津産山砂，表乾密度： $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率： 1.98% ，F.M.： 2.66
粗骨材(G)	青梅産碎石(1505)，表乾密度： $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率： 0.70% ，F.M.： 6.43 実積率： 60.0%
混和材(FA)	フライアッシュ (Ⅱ種) 密度： $2.27\text{g}/\text{cm}^3$ ，比表面積： $3710\text{cm}^2/\text{g}$
混和剤(Ad)	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-5 調合条件

種類	繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	単位水量 (kg/m^3)	W/B (%)	スランプまたはスランブフロー (cm)	空気量 (%)	粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)	S/a (%)
繊維補強コンクリート	細径	0.5~1.5	175	40	10~18	3.0	0.320~0.500	55~72
	中径	0.5~2.5						
	太径	0.5~3.0						
比較用コンクリート	—	—	—	—	40, 65	—	—	—



写真-1 直接引張試験状況

表-6 実施調合

No.	繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	W/B* (%)	FA置換率 (%)	空気量 (%)	粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)						Ad ($\text{B}^*\times\%$)
								W	C	FA	S	G	繊維(外割)	
1	細径	0.5	40.0	30.0	3.0	0.400	64.6	175	307	131	1073	600	6.5	2.00
2		1.0				0.320	71.7				1190	480	13.0	2.90
3		1.5				0.320	71.7				1190	480	19.5	2.70
4	中径	0.5				0.500	55.7				926	750	6.5	1.30
5		1.0				0.370	67.2				1117	555	13.0	1.90
6		1.5				0.320	71.7				1190	480	19.5	2.60
7		2.0				0.320	71.7				1190	480	26.0	2.60
8	太径	2.5				0.320	71.7				1190	480	32.5	2.80
9		0.5				0.500	55.7				926	750	6.5	1.30
10		1.0				0.450	60.1				999	675	13.0	1.80
11		1.5				0.400	64.6				1073	600	19.5	2.00
12		2.0				0.350	69.0				1146	525	26.0	2.50
13		2.5				0.320	71.7				1190	480	32.5	2.90
14		3.0				0.320	71.7				1190	480	39.0	2.90
15	比較用1	—				0.500	55.7				926	750	—	1.55
16	比較用2	—				0.320	71.7				1190	480	—	2.70

*： $\text{B}=\text{C}+\text{FA}$

を 200 サイクルまでとし、JIS A 1127 による一時共鳴振動数および質量を測定した。

2.2 コンクリートの使用材料および調合

使用材料を表-4、調合条件を表-5 に示す。実施調合は表-6 に示す 16 調合とし、水結合材比 (W/B) は 40%一定とした。繊維混入後の目標スランプは 18cm、空気量を 3.0%とした。セメントは普通ポルトランドセメントとし、フライアッシュで 30%置換した。粗骨材かさ容積は予備練りの結果から繊維混入率に応じて所要の品質が得られるように設定し、繊維混入率は細径 1.5%、中径 2.5%、太径 3.0%までとした。なお、比較用コンクリートは繊維混入前の S/a 55.7%、71.7%のベースコンクリートであり、空気量は繊維補強コンクリートと同じ 3.0%とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

表-7 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。いずれの調合も繊維混入率の増加に伴い、スランプおよび空気量が低下した。その傾向は細径繊維ほど大きく、繊維の比表面積、本数の影響が大きいといえる。本研究の範囲では、目標スランプを満足していない調合もあるが、実施工への適用を考慮した場合、繊維混入率は細径で 1.0%、中径で 2.0%、太径で 3.0%が上限であると考ええる。

3.2 強度試験結果

(1) 圧縮強度試験

図-1 に圧縮強度と繊維混入率の関係を示す。圧縮強度は、既往の研究²⁾と同様に繊維の混入による影響は認められず、繊維径による差異も認められなかった。なお、圧縮強度は 42.2~51.1N/mm² (標準偏差: 2.69N/mm²) の範囲であった。

図-2 に静弾性係数と繊維混入率の関係を示す。静弾性係数は、繊維混入率の増加に伴い低下する傾向が認められた。この傾向は中径および太径繊維において顕著であった。

表-7 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	繊維種類	繊維混入率 (%)	ベースコンクリート		繊維補強コンクリート		
			スランプフロー (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	細径	0.5	55.0 × 55.0	5.0	15.5	4.5	18.0
2		1.0	66.5 × 65.5	6.8	11.0	3.7	18.0
3		1.5	64.0 × 62.0	6.8	2.0	2.8	19.0
4	中径	0.5	35.5 × 35.0	3.0	12.0	2.9	18.0
5		1.0	58.5 × 56.5	4.9	20.0	2.7	17.5
6		1.5	71.0 × 70.0	7.6	13.0	2.5	17.0
7		2.0	69.5 × 69.0	7.8	11.0	2.8	18.0
8	太径	2.5	67.0 × 66.0	6.8	1.5	2.5	18.0
9		0.5	30.5 × 30.5	5.0	10.0	3.3	20.0
10		1.0	48.0 × 46.5	5.0	15.5	3.4	20.0
11		1.5	53.5 × 51.5	5.7	14.5	3.8	20.0
12		2.0	63.0 × 61.0	4.5	17.0	3.1	19.5
13		2.5	67.5 × 66.0	5.2	16.5	3.4	19.0
14		3.0	65.5 × 64.0	5.6	12.0	2.7	19.0
15	比較用1	—	40.5 × 39.5	2.8	—	—	18.0
16	比較用2	—	67.5 × 66.0	3.2	—	—	18.0

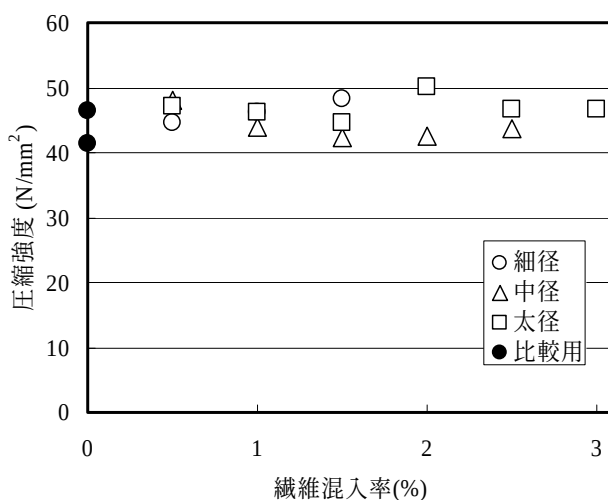


図-1 圧縮強度と繊維混入率

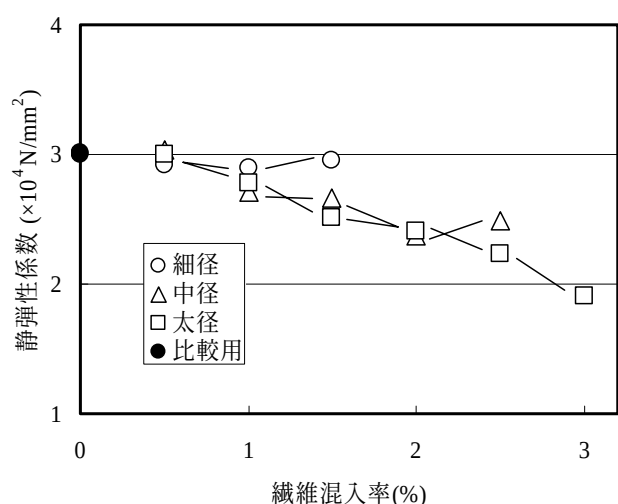


図-2 静弾性係数と繊維混入率

(2) 引張試験

図-3 に中径繊維を混入した供試体の直接引張応力と引張ひずみの関係を示す。いずれの供試体も初ひび割れ発生後に直接引張応力が大きく低下し、それ以降も増加することなく、初ひび割れ発生時の応力が最大引張応力となった。

最大応力以降の直接引張応力の低下は、繊維混入率が高いほど小さくなり、引張靱性が向上する傾向にあった。また、引張強度におよぼす繊維混入率の影響については、本研究の範囲では顕著でなかった。なお、細径繊維および太径繊維においても同様の結果であった。

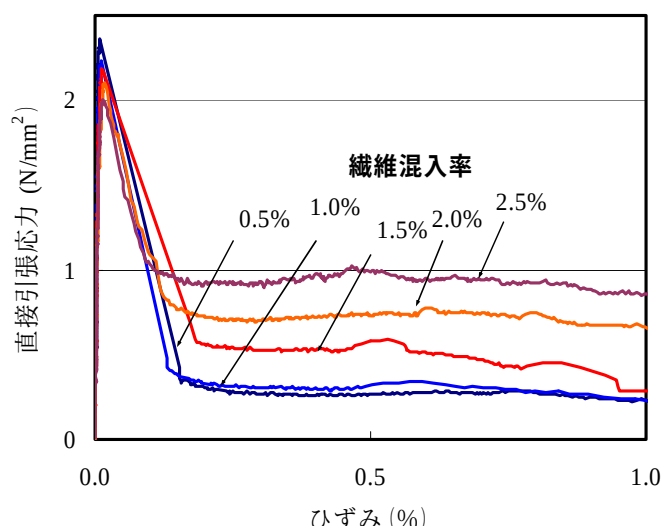


図-3 直接引張応力と引張ひずみ（中径繊維）

(3) 曲げ試験

図-4 に曲げ強度と繊維混入率の関係を示す。繊維補強コンクリートでは、比較用コンクリートに対して、繊維混入率の増加に伴い曲げ強度が大きくなる傾向にあり、本実験の範囲では、中径繊維において顕著であった。このことから、曲げ強度を向上させる最適な繊維アスペクト比が存在すると考えられる。

図-5 に中径繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げ応力と変位（たわみ）の関係を示す。なお、同図には初ひび割れ発生（●）時の応力・変位も示した。最大曲げ応力度は、繊維混入率の増加に伴い大きくなる傾向にあり、曲げ靱性の向上も認められた。また、曲げ応力は、初ひび割れ発生後も増加し最大曲げ応力となる傾向にある。さらに、初ひび割れ発生後から最大曲げ応力となるまでの変位は繊維混入率が増加するほど大きくなる傾向が認められた。これらの傾向は太径繊維においても同様であったが、細径繊維では顕著に認められなかった。

初ひび割れは目視およびひずみデータからの観測であり、一概に判断することはできないが、中径繊維および太径繊維による供試体では、最大応力度となる前に先行して初ひび割れが発生し、数本の微細ひび割れを生じることが確認された。

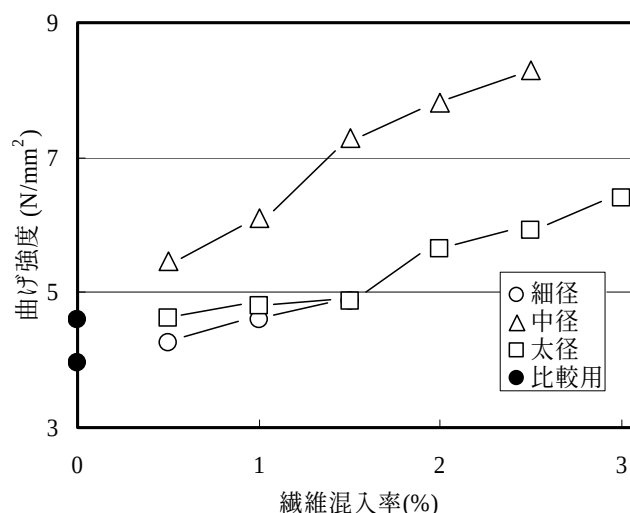


図-4 曲げ強度と繊維混入率

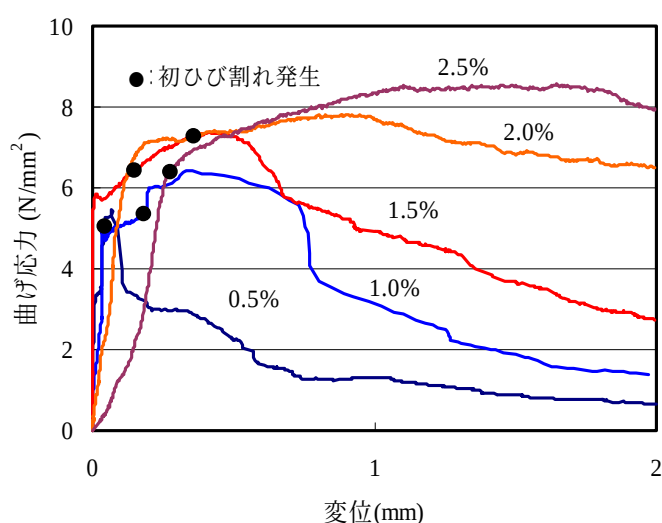


図-5 曲げ応力と変位（中径繊維）

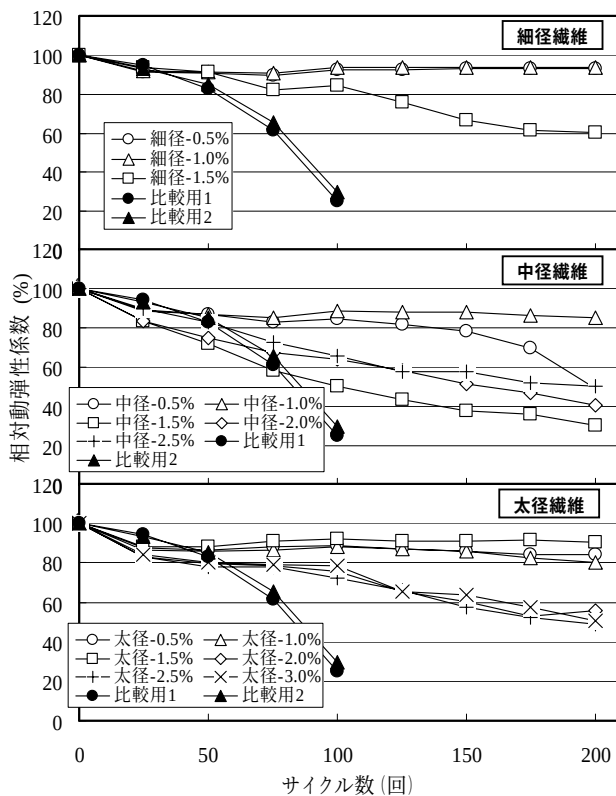


図-6 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数, 質量減少率)

3.3 耐久性試験結果

(1) 凍結融解試験

図-6 に相対動弾性係数, 質量減少率の変化を示す。比較用コンクリートである繊維混入率 0%と比較すると, 繊維混入により相対動弾性係数の低下が抑えられ, 耐凍害性が向上する傾向にあるといえる。また, 外観からも比較用コンクリートが著しいスケーリングを生じているのに対し, 繊維補強コンクリートではスケーリングの程度が軽微であり, 繊維の架橋効果により表層部のスケーリングが抑制されたものと考えられる。しかし, 繊維混入率が 1.5~2.0%を超えた場合, サイクルの経過に伴い相対動弾性係数が低下し, 質量が増加していることから, スケーリングはある程度抑制されているものの, 内部の微細なひび割れが進展し, 吸水膨張しているものと推測される。

図-7 に耐久性指数と繊維混入率の関係を示す。耐久性指数は, 全ての繊維補強コンクリートにおいて, 繊維混入率が 1.5~2.0%以上で大きく低下する傾向にあった。本研究の範囲では繊維径および繊維混入率により耐久性指数の低下

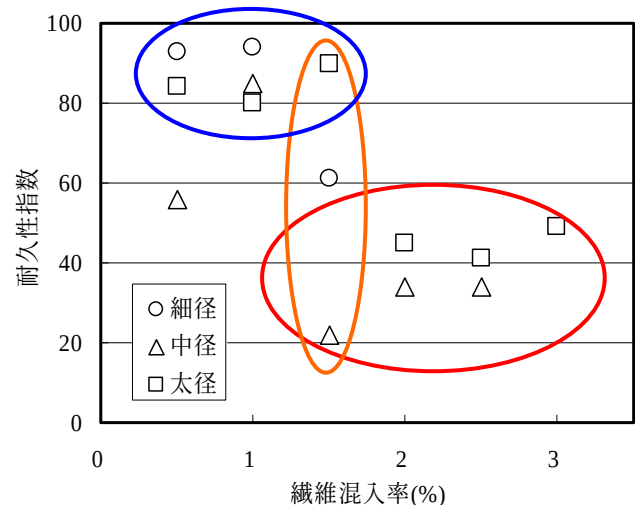


図-7 耐久性指数と繊維混入率

する割合が異なるが, 概ね混入率 2.0%以上の場合に大きく低下していることから, 繊維混入率 1.5%に推移域が存在する可能性がある。

本研究では目標空気量を 3%としたことから, ベースコンクリートの空気量を最大 7.8%とした。繊維混入により消泡された空気泡の径の範囲が明らかでないことから, マトリックスの気泡組織も異なることが考えられるため, 気泡組織の測定や空気量を 4.5%とした場合の実験など, 今後詳細な検討が必要と考える。

(2) 乾燥収縮試験

図-8 に乾燥収縮率（材齢 26 週）と繊維混入率の関係を示す。繊維補強コンクリートの乾燥収縮率は、比較用コンクリートの乾燥収縮率（ 5×10^{-4} 程度）を上回っているものも認められたが、繊維混入率が増加すると、全般的に小さくなる傾向にあった。この傾向は、太径繊維において顕著であった。なお、本実験の範囲では、概ね繊維混入率 1.5% 以上の場合に、比較用コンクリートよりも小さくなる結果であった。

(3) 促進中性化試験

図-9 に中性化深さ（材齢 26 週）と繊維混入率の関係を示す。繊維補強コンクリートの中性化深さは、材齢 26 週までの測定では、繊維径、混入率による大きな差異は認められなかった。

4. まとめ

- (1) 建築構造物への適用に際しては、繊維種類および混入率に応じてベースコンクリートの調合計画を適切に行うことが必要であり、本研究の範囲では細径で 1.0%、中径で 2.0%、太径で 3.0% までであれば、適用可能と考えられる。
- (2) 圧縮試験における静弾性係数は、繊維混入率の増加に伴い低下する傾向が認められた。
- (3) 引張靱性は、繊維混入率の増加に伴い向上する傾向が認められた。
- (4) 中径および太径繊維を用いた供試体では、曲げ靱性の向上が認められ、初ひび割れ以後にも曲げ応力が増加する傾向にあった。
- (5) 繊維補強コンクリートの耐凍害性は、比較用コンクリートに対して向上する傾向にあり、表層のスケリングもある程度抑制される傾向にあった。
- (6) 乾燥収縮率は、繊維混入率 1.5% 以上で比較用コンクリートのよりも小さくなる結果となった。

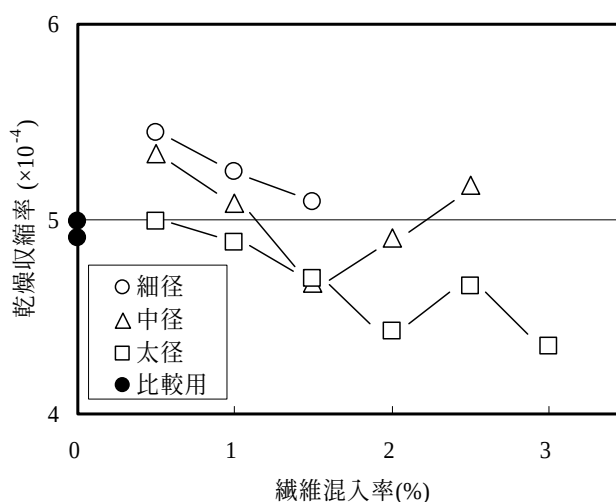


図-8 乾燥収縮率（材齢 26 週）と繊維混入率

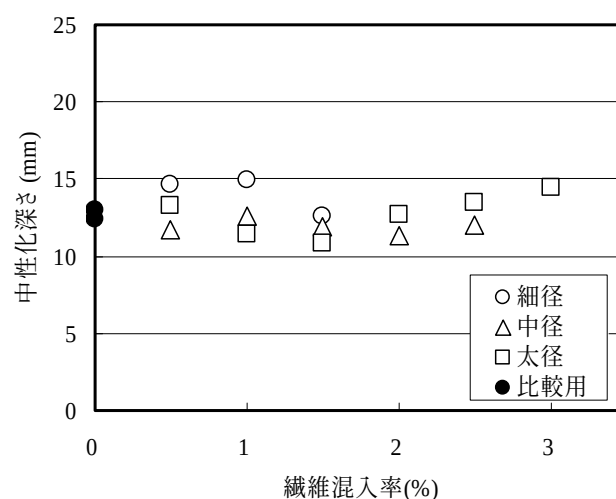


図-9 中性化深さ（材齢 26 週）と繊維混入率

謝辞

実験実施にあたり、(株)クラレより繊維材料を提供いただいた。ここに記して、感謝の意を表します。なお、本研究は、鴻池組、大木建設、五洋建設、錢高組、鉄建建設、日産建設、三井住友建設 7 社による共同研究成果である。

参考文献

- 1) 佐藤幸博，福山洋，諏訪田晴彦：高靱性セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰返し試験方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 539 号，pp.7-12，2001.1
- 2) 高田和法，信田佳延，高尾洋平，梅原秀哲：高強度繊維補強コンクリートの力学特性と破壊パラメータに及ぼす配合要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.463-468，1995.6