

論文 コンクリートのビニロン短繊維補強に関する実験的研究

浜田敏裕^{*1}・日笠純一^{*2}・末森寿志^{*3}・平居孝之^{*4}

要旨：高強度で伸び率を変化させた太径ビニロンを作製し、その短繊維のコンクリートへの補強効果を調べた結果、引張破断伸び率8%のビニロンで補強したコンクリートの曲げ強度と換算曲げ強度が極大値となることが分かった。その理由はビニロンの伸び率が増加するにつれてコンクリートの破断面の繊維挙動を想定した繊維の斜め引張強度が増大し、逆にビニロンの伸び率増加で繊維の引張ヤング率および繊維のコンクリートからの引抜き仕事量が減少するためであると考えられた。

キーワード：太径ビニロン, 曲げ強度, 換算曲げ強度, 斜め引張試験, 引抜き試験

1. はじめに

有機合成繊維、炭素繊維、ガラス繊維などを用いた繊維補強モルタルの研究は多く報告されているが、これらの短繊維で補強したコンクリートの研究は少ない^{1)~5)}。これはコンクリートの混練打設時の短繊維の損傷、短繊維の分散不良および短繊維の性能の適正化等が明らかになっていないことが理由である。そこで繊維損傷や分散不良が生じないように繊維直径が太く、引張ヤング率と引張破断伸び率を種々変えた太径ビニロンを作製し、その補強効果について調べた。

2. 太径ビニロンの作製

作製方法はポリビニルアルコール水溶液の原液をノズル穴から加熱空气中に紡出させ、溶媒の水を蒸発除去し、熱延伸を行い強度を発現させた後に、熱収縮させることにより伸びを与えた。表-1に示す様に、引張破断時の伸び率が4.3~22.8%まで段階的に変化するように太径ビニロンを作成した。伸び率の小さい方から記号でA、B、C、D、E、Fと区別する。6種類の太径ビニロンの断面積は0.36~0.52 mm²で円形

断面換算直径は0.68~0.81 mmである。

JIS L 1073に定められた合成繊維フィラメント糸試験方法で測定した引張破断荷重と伸びの関係を図-1に示す。

引張破断時の荷重を載荷前の断面積で割った値を繊維の引張破断強度とし、初期立上がり勾配を引張ヤング率とした。引張荷重50 N付近で変曲点を持つが、その部分は非結晶部分のポリビニルアルコールのOH基の水素結合が応力増加ではずれる領域と考えられており、ビニロンに特徴的なものである。水素結合がはずれると非結晶部分はさらに伸び易くなり、応力-伸び率曲線の勾配が低下する。6種類のビニロンは太さが若干異なるが、引張破断荷重がほぼ等しく、引張破断伸び率が異なる繊維である。

3. 試験方法

3.1 曲げ試験体作成方法

各種太径ビニロンを30 mm または40 mm に切断し、短繊維とした。表-2の材料配合によるコンクリート試験体と比較のために表-3のモルタル試験体を作製した。

^{*1} クラレ（株）産資開発部開発主管・大分大学大学院（正会員）

^{*2} クラレ（株）産資開発部開発主管

^{*3} クラレ（株）産資開発部研究員

^{*4} 大分大学教授 工学部福祉環境工学科 工博（正会員）

表-1 各種太径ビニロンの物性

ビニロン	試料	A	B	C	D	E	F
デシテックス	dtex	4536	5051	5280	5651	5831	6433
断面積	mm ²	0.36	0.41	0.42	0.45	0.47	0.52
平均直径	mm	0.68	0.72	0.73	0.76	0.77	0.81
引張破断荷重	N	277	304	329	307	335	325
引張破断伸び	%	4.3	8.4	11.4	14.0	19.7	22.8
引張破断強度	MPa	761	751	776	678	716	636
引張ヤング率	GPa	29.9	23.4	21.0	18.2	17.7	16.2

デシテックス単位：繊維10000mのg重量

比重：1.30

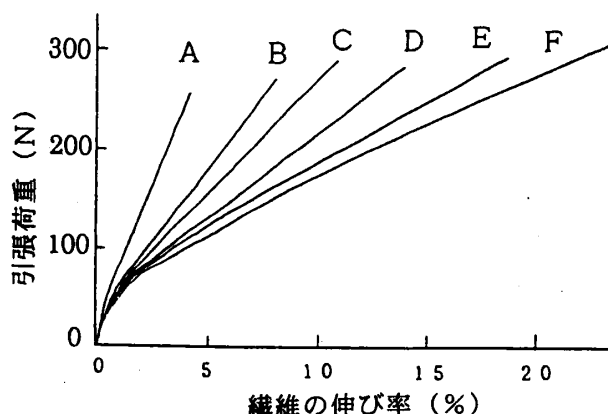


図-1 各種太径ビニロンの物性

用いた粗骨材と細骨材のふるい試験の結果はいずれもJASS5の標準粒度の範囲に入っている。コンクリートの試験体の場合はビニロンを体積で0.75%混入し、モルタルの試験体の場合はビニロンを体積で1.00%混入した。ビニロン混入量は試し練りにより適当なワーカビリティのフレッシュコンクリートが得られる場合を探す方法で定めた。混練はオムニミキサを用いてビニロン以外の材料を混練した後にビニロンを投入して混練した。

表-2 繊維補強コンクリートの配合組成

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量 (Kg/m ³)					繊維比率 ビニロン (Vol%)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP-8N	
55	55	185	337	947	784	1.7	0.75

表-3 繊維補強モルタルの配合組成

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/C(%)	単位量 (Kg/m ³)				繊維比率 ビニロン (Vol%)
		水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 SP-8N	
35	20	237	677	1355	6.8	1.0

コンクリートの圧縮強度：42.2MPa

モルタルの圧縮強度：54.0MPa

粗骨材：岡山県御津郡御津町産砕石

細骨材：香川県坂出市室木島産海砂 70

兵庫県飾磨郡家島町産砕砂 30

10×10×40 cmの寸法の型枠に2層に分けて打設成形し、翌日脱型して以後20℃の水中で試験材齢28日まで養生した。なお試験体の作成方法は日本コンクリート工学協会の繊維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方(JCI-SF2)に準じた。

3.2 曲げ試験方法試験

日本コンクリート工学協会の繊維補強コンクリートの曲げ強度及びタフネス試験方法(JCI-SF4)に準じ、スパン300mmの3等分点載荷で荷重し、スパン中央底面のたわみを測定した。スパン300mmの1/150のたわみの2mmまでの曲げタフネスを求め、それから計算される換算曲げ強度(N/mm²)を求めた。

3.3 繊維の引抜き試験

日本コンクリート工学協会の繊維補強コンクリートの付着試験方法に関する規準に記載の方法(JCI-SF8)に準じ30mm長のビニロンを埋め込んで試験をすると繊維が切断してしまったので、次の様な方法で繊維の引抜き試験を行った。すなわち10mm間隔で向い合う2枚のプラスチック板に繊維太さの穴を開け繊維を挿入後その間隙にモルタルを流し込み良く充填さ

されるように電動歯ブラシでパイブレーションを与えた。モルタル配合は水セメント比50%配合とした。20℃で14日養生し、脱型後、片端の繊維を切断し各繊維ごとに10個の試験体を準備した。試験体を治具で把持し、モルタルの際で繊維を把持して引張試験を行った。引張速度は0.5mm/分で、引抜き荷重と引抜き変位の関係を記録した。

3.4 繊維の斜め引張試験

繊維の引張試験方法はJIS L 1073に定められているが、繊維の切断部分は測定治具などに接触していない直線部分であり、表-1に試験結果を示している。繊維の斜め引張試験はコンクリートの破壊面での繊維の引張りを想定したもので、2枚の鋼板のチャックで繊維を強く把持し、そのチャックを傾ける付属装置を作成した。この方法では繊維は鋼板のチャックの直角の角に接することになる。チャックの角の曲率により測定値が影響を受けると考えられるが、コンクリートの破壊面は不定形であることからその再現は困難で、むしろ同じチャックの条件で各繊維を定量的に評価することを試験目的とした。チャックの傾け角度は繊維の曲げ角度であり、15、30、45、60度と変化させた。平板チャックでの0度の引張試験は繊維の把持力が不十分で困難であり、JIS方法の表-1の値で代用した。

4. 試験結果と考察

4.1 コンクリートの曲げ試験結果と考察

各種配合のスランプ値と4個の試験体の曲げ試験結果の平均値を表に示す。繊維長30mm及び40mm混入コンクリートの結果を表-4と表-5に示し、繊維長30mm混入モルタルの結果を表-6に示す。曲げ荷重とたわみの関係図を4個の試験体の中から平均的であるものを選び図に示す。繊維長30mm及び40mm混入コンクリートの結果を図-2と図-3に示し、繊維長30mm混入モルタルの結果を図-4に示す。ビニロン試料Eは繊維長30mm混入コンクリートのみ試験を行った。

表-4 コンクリートの試験結果(繊維30mm)

ビニロン試料		A	B	C	D	E	F
スランプ値	cm	11.0	9.9	10.6	12.1	11.0	11.2
空気量	%	3.9	3.9	4.9	4.0	3.9	4.4
曲げ強度	N/mm ²	4.35	4.13	2.90	2.71	2.40	2.23
たわみ量	mm	0.54	1.33	1.14	1.79	2.40	2.89
換算曲げ強度	N/mm ²	2.51	3.80	2.92	2.68	2.32	2.11

表-5 コンクリートの試験結果(繊維40mm)

ビニロン試料		A	B	C	D	E	F
スランプ値	cm	7.9	8.1	9.8	8.9	—	10.0
空気量	%	3.4	4.3	3.7	3.5	—	3.74
曲げ強度	N/mm ²	4.37	5.00	4.30	3.96	—	1.65
たわみ量	mm	0.50	1.27	1.47	2.20	—	2.45
換算曲げ強度	N/mm ²	2.68	4.68	3.92	3.59	—	2.01

表-6 モルタルの試験結果(繊維30mm)

ビニロン試料		A	B	C	D	E	F
スランプ値	cm	14.6	15.5	14.6	17.4	—	16.9
空気量	%	6.9	6.8	6.5	7.0	—	6.2
曲げ強度	N/mm ²	5.01	4.82	5.01	4.28	—	3.35
たわみ量	mm	0.47	1.28	1.49	2.28	—	2.95

ビニロン試料Bで補強したコンクリートが曲げ強度と換算曲げ強度の両方の性能で優れている。特にビニロン試料AからBへの変化が大きいことが分かる。ビニロン試料Aの試験体がたわみの増大により曲げ荷重が急激に低下するのに対し、ビニロン試料B、Cの試験体は曲げ荷重低下が少ない。さらにビニロン試料D、E、F試験体ではクラック後の曲げ荷重が高くなり、たわみ2mm以上の領域で曲げ荷重が最大になる傾向を示す。

コンクリートの曲げ強度および換算曲げ強度を繊維の引張破断伸び率との関係で表わすと図-5および図-6になる。これらの性能が繊維の引張破断伸び率に大きく関係している。

つぎに測定後の試験体の破壊面の観察を行った。ビニロン試料Aの試験体は破壊面に露出する繊維が相対的に少なく、繊維破断しているものが目立った。一方ビニロン試料C、D、E、F試験体は破壊面に露出する繊維が多く、繊維がマトリックスから抜け出ているように見えた。ビニロン試料Bの試験体は破壊面に露出する繊維がビニロ

ン試料Aの試験体よりも相対的に多く、繊維破断と抜けが混在しているように見えた。混在しているのはコンクリート破壊面での繊維の斜め角度と埋め込み長さの違いによって繊維は破断と抜けに分かれると考えられる。繊維の破断と抜けの確率が、繊維性能の違いで異なっていた。この現象に着目し、ビニロン短繊維補強のメカニズムを明らかにするために、繊維の斜め引張試験と繊維の引抜き試験を行った。

4. 2 繊維の斜め引張試験結果と考察

各種ビニロンの斜め引張試験結果を表-5に示す。斜め角度の増大にともない繊維破断荷重が低下している。特にビニロン試料Aでその傾向が大きい。各種ビニロンの斜め引張破断荷重を角度に対して表示すると図-7となる。30、45、60度の角度における各種ビニロンの斜め引張破断荷重を繊維の破断伸び率で表示すると図-8となる。

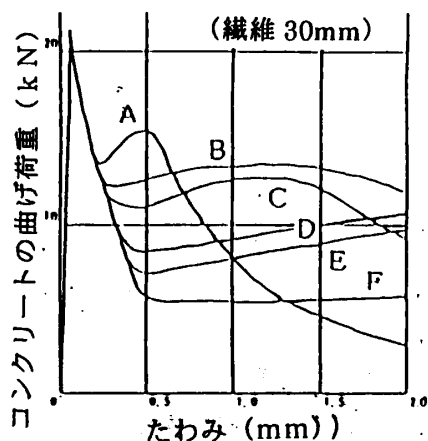


図-2 コンクリートの試験結果(繊維 30mm)

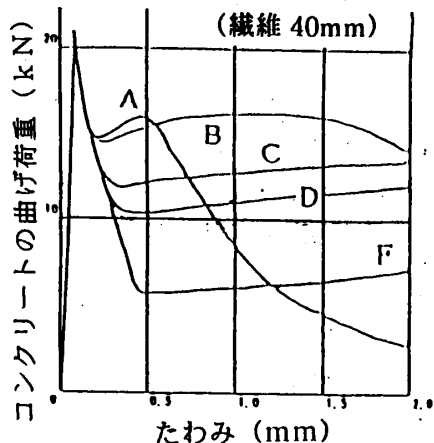


図-3 コンクリートの試験結果(繊維 40mm)

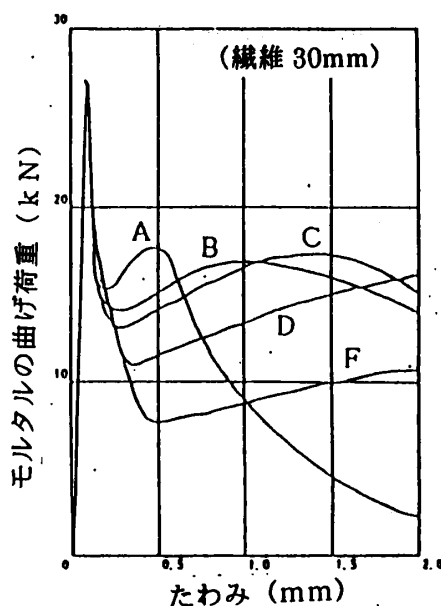


図-4 モルタルの試験結果(繊維 30mm)

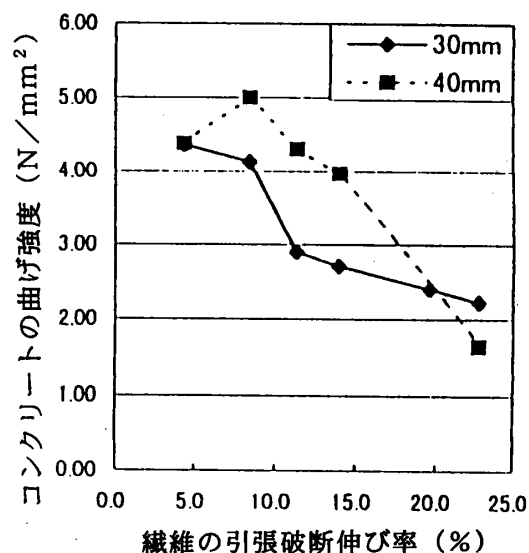


図-5 曲げ強度と繊維の伸び率との関係

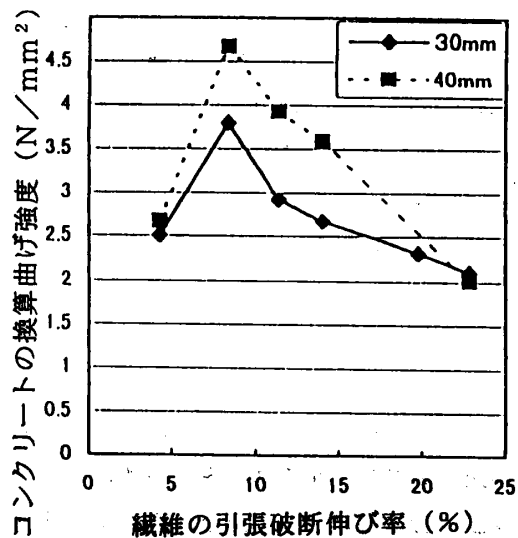


図-6 換算曲げ強度と繊維の伸び率との関係

表-7 引張角度による繊維破断荷重の影響

ビニロン 試料	A	B	C	D	E	F
角度 0 度	277(100)	304(100)	329(100)	307(100)	335(100)	328(100)
角度 15 度	211 (74)	—	—	—	—	—
角度 30 度	138 (50)	185 (61)	207 (63)	193 (63)	218 (65)	219 (67)
角度 45 度	58 (21)	146 (48)	148 (45)	160 (52)	164 (49)	171 (52)
角度 60 度	30 (11)	142 (47)	154 (47)	153 (50)	161 (48)	166 (51)

表中数字：繊維破断荷重 N（角度 0 を 100 とした比率）－印：繊維が測定治具から滑り測定不可

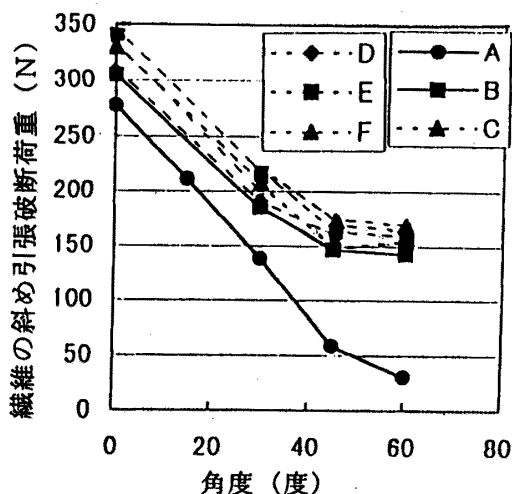


図-7 斜め引張破断荷重と角度の関係

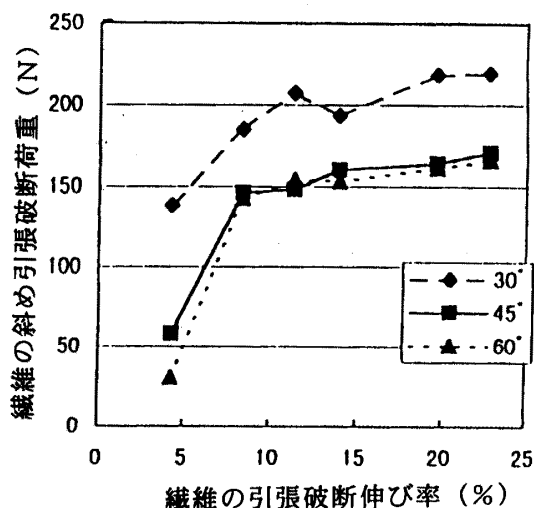


図-8 斜め引張破断荷重と伸び率の関係

図-7 のように繊維の斜め引張破断荷重は角度とともに低下する。その原因は繊維が角で曲げられると伸長側に曲げ応力が余分に掛かるので、より低い引張荷重で繊維破壊が起こると考えられる。繊維の曲げ角度が大きくなるにつれて伸長側の曲げ応力も大きくなり、引張破断荷重がさら

に低下する。繊維の伸び率が大きくなると伸長側の曲げ応力が大きくなり、引張破断荷重の低下が少なくなり、図-8 の様な結果となると考えられる。

4. 3 繊維の引抜き試験結果と考察

繊維の引抜き試験の測定結果はバラツキが大きく、10 個の測定値の中には他に比べて異常に小さい値があった。これらは繊維とセメントの界面での接触不良が原因と考えられる。したがって測定結果から引抜き荷重と引抜き長さの関係の代表的なものを図-9 に示す。

初期のピークは繊維とマトリックスとの接着力を反映し、一度低下して増大する引抜き荷重は繊維とマトリックスとの摩擦力を反映したものであると考えられる。繊維が伸びるとポアソン効果で断面積が減少し、界面に隙間ができ、摩擦力が低下する。したがってヤング率が小さく伸びやすい繊維ほど引抜き荷重が小さいと考えられる。

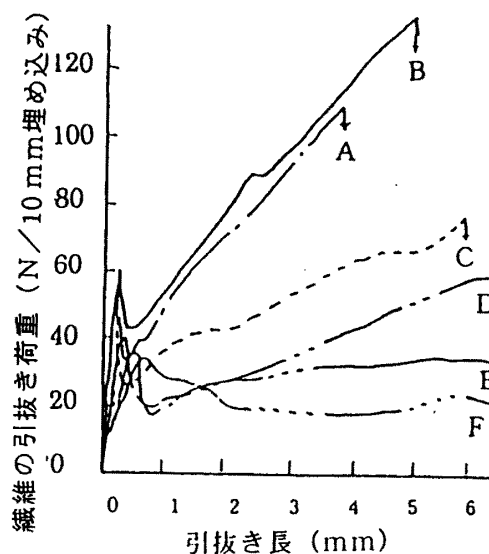


図-9 繊維の引抜き荷重曲線

JCI-SF8に示された荷重-すべり量曲線から仕事量を求める方法を参考にし、試験結果を滑り2.5mmまでの仕事量を平均値した結果を繊維の伸び率で表わすと図-10になる。繊維の伸び率の大きい領域で引抜き仕事量が低下しており、曲げタフネスから求められる換算曲げ強度が繊維の伸び率の大きいビニロンC、D、E、F領域で低下している図-6の傾向と一致している。

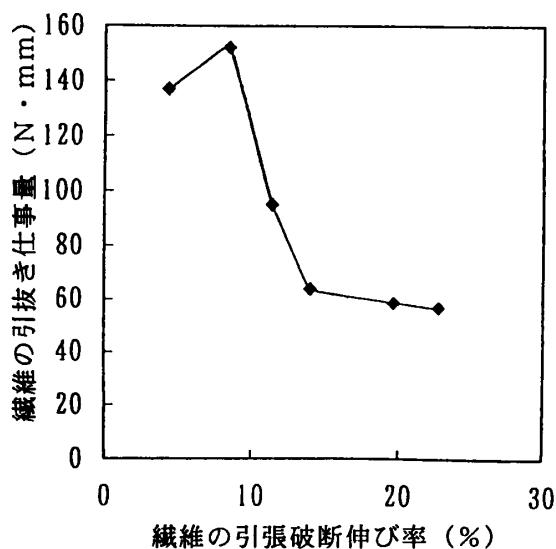


図-10 繊維の引抜き仕事量

5. ビニロン短繊維補強メカニズムの考察

これまでの知見からコンクリートの曲げ試験結果を考察すると、ビニロン試料Aは引張ヤング率が高いためビニロン短繊維補強コンクリートの曲げ試験において、まだ繊維破断に至らないたわみの小さい領域で繊維の応力が増大し曲げ強度を発現するが、その後のたわみ増大で繊維がさらに引張られると斜め引張破断荷重が低いため、繊維破断が始まり換算曲げ強度が低下する。

ビニロン試料Bはビニロン短繊維補強コンクリートの曲げ試験において、斜め引張破断荷重が大きいため、たわみが増大しても繊維が破断しにくく繊維の抜けも起こりにくいので、大きなたわみまで繊維の応力を維持すると考えられる。

ビニロン試料C、D、E、Fは引張ヤング率が低いため、ビニロン短繊維補強コンクリートの曲げ試験において、クラック後の曲げ荷重低下が大

きく、繊維の斜め引張破断荷重が大きいため、繊維の抜けがおり、その後の曲げ荷重回復が乏しい。ビニロン試料Fにいたっては、繊維がマトリックスから滑って抜けてしまうため、曲げ応力が増大しないと考えられる。

6. まとめ

繊維の引張破断伸び率を4.3～22.8%まで変化させた太径ビニロン短繊維のコンクリート補強に関して実験した結果、次のような結論が得られた。

- (1) 引張破断伸び率が8%の太径ビニロン試料Bにおいて、コンクリートの曲げ強度および換算曲げ強度が極大値となる。
- (2) 繊維の引張破断伸び率増加の8%までは繊維の斜め引張荷重が増大し、その後は逆に繊維の引張ヤング率と繊維の引抜き仕事量は減少する。このため換算曲げ強度に極大値が表れる。

参考文献

- 1) 平居孝之：セメントコンクリート補強の短繊維について、建材試験情報, Vol.30, pp.6-10, 1987
- 2) 小泉徹：ビニロン補強コンクリートの性質, 43回セメント技術大会講, Vol.43, pp.730-735, 1987
- 3) 大野定俊ほか：短繊維補強軽量コンクリートを用いたRC部材の曲げ特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1527-1532, 1997
- 4) 柿沢忠弘ほか：集束型ビニロン短繊維補強軽量コンクリート中での分散状態がコンクリートの材料特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1213-1218, 1997
- 5) 関田徹志ほか：ビニロン繊維を用いた高靱性FRCの材料設計と開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.229-234, 1998