

報告 繊維補強した軽量コンクリートのせん断耐力に関する実験的研究

柳 博文^{*1}・松尾庄二^{*2}・川又 篤^{*3}・松岡 茂^{*4}

要旨：普通コンクリートと同等以上のせん断耐力を得るため、PVA 短繊維を混入した人工軽量コンクリートの梁部材の曲げ実験を行いその性能を確認した。繊維混入率 0%の場合は、普通コンクリートのせん断耐力より小さいが、短繊維を混入すると普通コンクリートのせん断耐力を上回る。混入率による違いはみられないが、繊維を混入することで軽量コンクリートのせん断耐力を普通コンクリート以上にすることができると考えられる。

キーワード：繊維補強，せん断耐力，軽量コンクリート

1. はじめに

PC 橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物において、軽量骨材コンクリートを適切に利用することで、基礎構造物への負担の軽減、死荷重や地震時慣性力の軽減、建設コストの削減などが可能であることが知られている。最近では、従来のものに比べて圧縮強度が大きく、吸水率が小さい高性能な軽量骨材も開発されており¹⁾、プレストレスを導入することで、せん断耐力が大幅に改善されることも確認されている²⁾。しかしながら、一般的に軽量骨材を用いた鉄筋コンクリート部材のせん断耐力は、普通の骨材を用いた鉄筋コンクリート部材より低下する。例えば、「コンクリート標準示方書(土木学会)」では、せん断補強鉄筋のない鉄筋コンクリートのせん断耐力は、軽量骨材を使用した場合、普通コンクリートの 70%に低減されるとしている。普通の鉄筋コンクリートでは、二羽ら³⁾がせん断補強筋のない RC はりのせん断耐力の再評価を行っており、鋼繊維補強コンクリートにおいてもせん断耐力に関する実験、解析等が行われている⁴⁾。これによると、コンクリートの引張軟化特性あるいは破壊エネルギーが影響していると考えられる。また、最近になり、橋梁の桁にひ

び割れが発生するなど問題も生じてきている。その原因として、軽量骨材を使用したコンクリートの破壊エネルギーが普通コンクリートより小さいため、普通コンクリートと比較すると、ひび割れの進展が急激であることが考えられる。つまり、軽量骨材コンクリートの力学特性は同等の圧縮強度を有する普通コンクリートと較べて、引張破壊特性、せん断耐力など小さい。しかし、短繊維を混入することでそれらの欠点を改善することができると考えられる。

そこで、軽量コンクリートの引張破壊特性を把握するために、2点および1点載荷による曲げ靱性試験を行い、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線を算出した。さらに、短繊維混入により軽量コンクリートの引張破壊特性を改善することで、普通コンクリートと同等以上のせん断耐力を得られることを、梁部材実験を実施して確認した。

2. 軽量コンクリートの引張破壊特性

2.1 配合および試験ケース

試験体の作製に使用した材料を表-1に示す。粗骨材は膨張頁岩系非造粒型の軽量骨材メサライトを使用した。最大骨材寸法は15mmである。

*1 鉄建建設(株) 技術センター 地盤グループ 工博 (正会員)

*2 鉄建建設(株) 技術センター 材料・構造グループ (正会員)

*3 鉄建建設(株) 九州支店 工博 (正会員)

*4 鉄建建設(株) 技術センター 材料・構造グループ 工博 (正会員)

表 - 1 使用材料

種類	記号	物性他
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm^3
細骨材	陸砂 S1	木更津産、表乾密度 2.57g/cm^3 、吸水率 3.19% 、 $\text{FM}=2.07$
	砕砂 S2	笠間産、表乾密度 2.65g/cm^3 、吸水率 1.15% 、 $\text{FM}=2.58$
粗骨材	G	膨張頁岩系非造粒型、 $G_{\text{max}}=15\text{mm}$ 、 絶乾密度 1.28g/cm^3 、吸水率 28.5%
混和剤	高性能 AE減水剤 SP	ポリカルボン酸系
繊維	VF	PVA繊維、比重 1.30 、繊維径 0.1mm 、長さ 6mm

表 - 2 コンクリート配合

スランブ	空気量	水セメント比	細骨材率	単位量(kg/m^3)					高性能 AE減水剤	繊維	備考
				水	セメント	細骨材		粗骨材			
SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S1	S1	G	SP	VF	
15±2.5	6.5±1.5	35.0	50.0	155	443	168	673	528	3.32	0	VF=0%
									4.65	3.9	VF=0.3%
									6.65	6.5	VF=0.5%

表 - 3 圧縮強度結果(3w)

混入率	圧縮強度 (N/mm^2)
VF0.0	51.4
VF0.3	53.2
VF0.5	51.2

PVA短繊維はクラレ製のREC100L(6mm)である。作製した軽量コンクリートは、表-2のとおりである。練り上がり性状は、すべての配合で、目標スランブ $15\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $6.5\pm 1.5\%$ となるように高性能AE減水剤で調整した。

2.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験については、 100×200 の円柱供試体を試験体として、土木学会規準：JSCE-G551に準拠して行った。試験時(3w)における圧縮強度試験結果を表-3に示す。すべてのケースにおいて 52N/mm^2 前後である。

2.3 コンクリートの破壊特性の標準試験方法

破壊エネルギーを算出する方法としては、

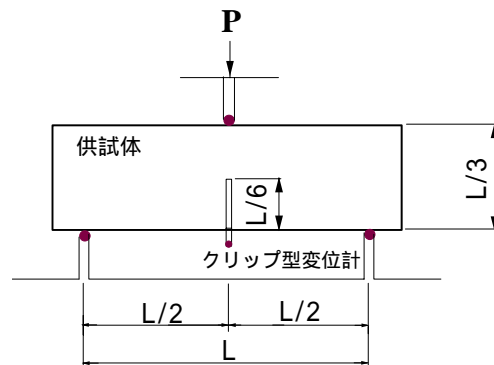
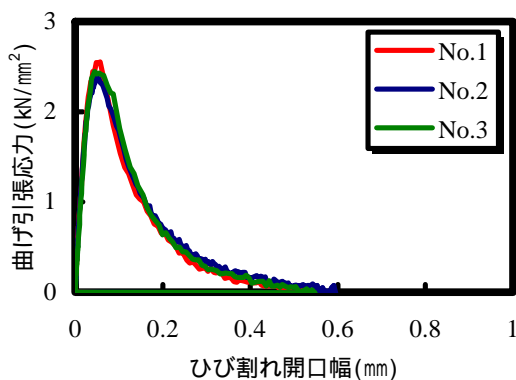
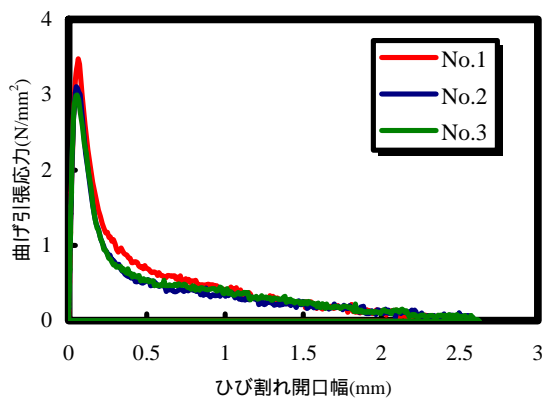


図 - 2 3点曲げ载荷試験図

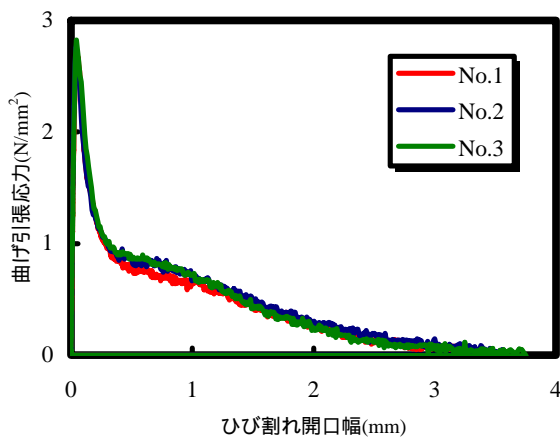
「JCI コンクリートの破壊特性の試験方法に関する委員会」(1999.4-2001.3)で破壊特性の標準試験方法⁵⁾が立案されている。これによると、「コンクリートの引張軟化曲線の評価方法(案)」は、荷重-変位曲線を求める試験方法は特に規定せず、切欠きを有する試験体を用いたモードの破壊試験から得られる荷重-変位曲線を基に、多直線近似された引張軟化曲線を求める解析方法を規定したものである。「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験方法



(a)VF=0%



(b)VF=0.3%



(c)VF=0.5%

図 - 3 曲げ靱性試験結果

(案)」および「繊維補強コンクリートの切欠きはり試験体の荷重変位曲線の計測方法およびタフネスの評価方法(案)」は、引張軟化曲線の評価に用いられる荷重変位曲線を計測する方法の

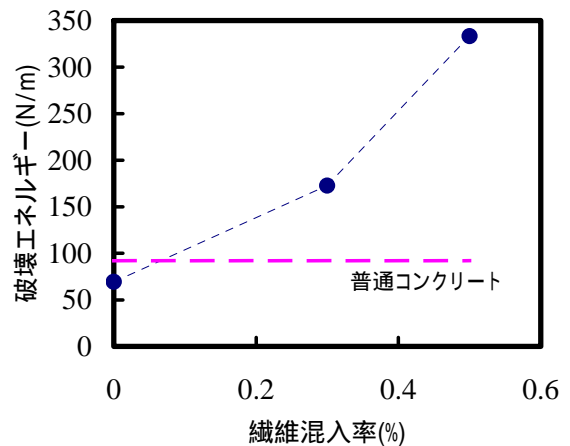


図 - 4 繊維混入率と破壊エネルギーの関係

一例として切欠きはりの 3 点曲げ試験を示しており、破壊エネルギーおよびタフネス評価方法を示している。⁶⁾

今回、破壊エネルギーの算出は、上述の「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」および「繊維補強コンクリートの切欠きはり試験体の荷重 - 変位曲線の計測方法およびタフネス評価法(案)」に準拠して行った。図 - 2 に曲げ試験図を示す。試験体は、100x100x400mm の角柱供試体を各配合で 3 体作製した。試験体作成後、コンクリートカッターにより長手方向中央に断面高さの 1/2 まで切欠きを入れた。載荷方法は、スパン 2 等分 1 点載荷で、変位制御で行われた。試験では、荷重をロードセルでひび割れ開口変位をクリップ型変位計で測定した。

2.4 破壊エネルギーと引張軟化曲線の算出

破壊エネルギーは、式(1)により計測した荷重 - 変位曲線下の面積 W_0 から算出した。

$$G_F = \frac{W_0 + W_I}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここに、 G_F ：破壊エネルギー(N/mm)、 W_0 ：供試体が破断するまでの荷重 - 変位曲線下の面積(N・mm)、 W_I ：供試体自重および載荷治具がなす仕事(N・mm)、 A_{lig} ：リガメント面積(mm²) (供試体断面積)、 g ：重力加速度 9.807(m/s²)である。図 - 3 に 100mm 角曲げ試験結果を、図 - 4 に各

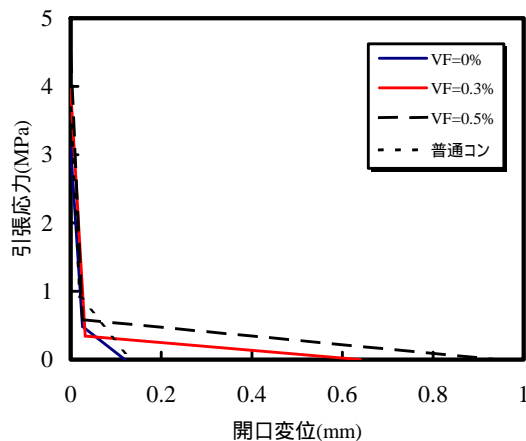


図 - 5 引張軟化曲線

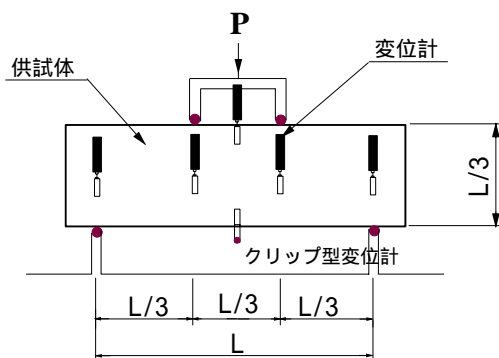
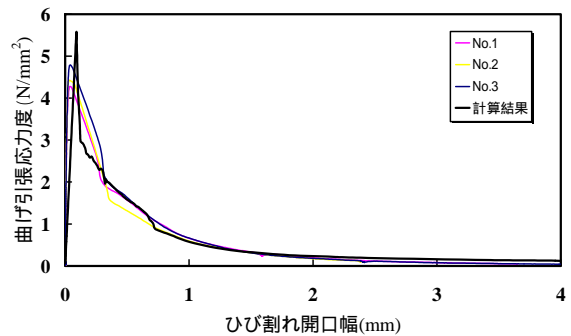
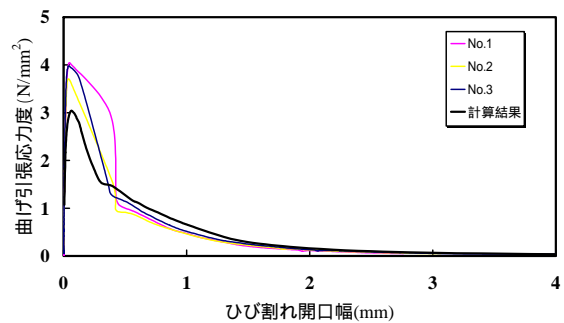


図 - 6 3等分点曲げ靱性試験

ケースの破壊エネルギーの算出結果と短繊維混入率の関係を示す。短繊維を混入することで破壊エネルギーは増加している。また、図中の普通コンクリートの点線は「コンクリート標準示方書」(土木学会)に準拠して、圧縮強度 52N/mm^2 における引張軟化曲線より算出した破壊エネルギーであるが、短繊維を混入することでそれ以上の値になっている。さらに、算出した破壊エネルギーから JCI の「コンクリート引張軟化曲線の評価方法(案)」に基づいて、曲げ試験の結果から各配合の引張軟化曲線を求めた。なお、解析プログラムは、引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード用(作成者:内田祐市)を使用した。その計算結果を図 - 5 に示す。当然のことながら、同等の圧縮強度を有する普通コンクリートと比較して短繊維を混入した軽量コンクリートは同等以上の引張破壊特性を有する



(a) VF=0.5% 150mm 角



(b) VF=0.3% 150mm 角

図 - 7 3等分点曲げ靱性試験結果と計算結果

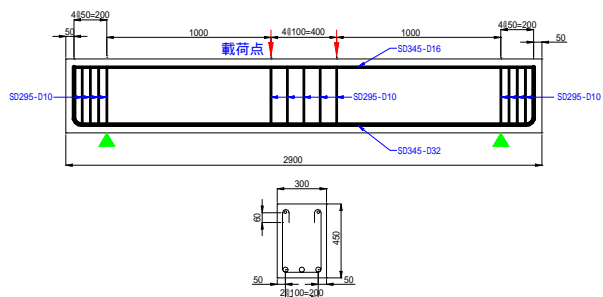


図 - 8 試験体寸法・配筋図

と考えられる。しかし、最大引張応力は普通コンクリートの方が大きく、短繊維を混入した軽量コンクリートは、引張応力がかなり低下してしまっからのひび割れ開口幅が大きいため、破壊エネルギーが大きくなっている傾向がある。

2.5 曲げ靱性試験との比較

2.4 で求めた引張軟化曲線を使用して、試験体中央からひび割れ進展する FEM 解析を行うために、3等分点載荷の曲げ靱性試験を実施した。図 - 6 に曲げ靱性試験図を示す。載荷方法は、2.3 と同様であるが、3等分点曲げ靱性試験では切欠



(a)VF=0%



(b)VF=0.3%



(c)VF=0.5%

写真 - 1 ひび割れ状況

表 - 5 実験結果

	せん断ひび割れ荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (実験時) (N/mm ²)
VF=0.0%	261	508	52.6
VF=0.3%	334	682	56.3
VF=0.5%	338	623	55.8

きを 100mm 角で 10mm ,150mm 角で 15mm 設けた。変位計を支承点, 載荷点と中央部に設置して鉛直変位を, クリップ型変位計でひび割れ開口幅を測定した。ここでは一例として, VF=0.5% の場合の 100mm 角および 150mm 角の試験結果と FEM 解析結果を比較したものを図 - 7 に示す。概ね, 解析結果は試験結果を再現できており, 3 等分点曲げ靱性試験でも軽量コンクリートの引張破壊特性を算出できると考えられる。

3. せん断実験

3.1 試験方法

載荷実験は, 曲げ試験同様, 繊維混入率をパラメータとして実施した。条件は曲げ試験と同様 VF=0%, 0.3%, 0.5% の 3 ケースである。

図 - 8 に試験体寸法, 配筋図を示す。試験体は, 2600x450x300mm で圧縮側鉄筋に SD345D16, 引張側鉄筋に SD345-D32 を配置した。せん断スパン比はすべて 2.5 とした。載荷は鉛直方向の 2 点

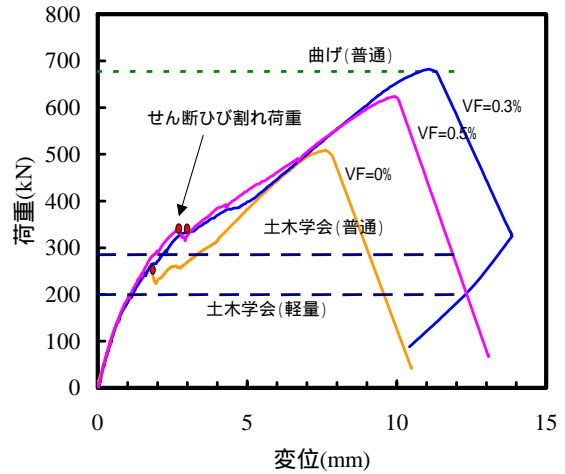


図 - 9 せん断実験結果

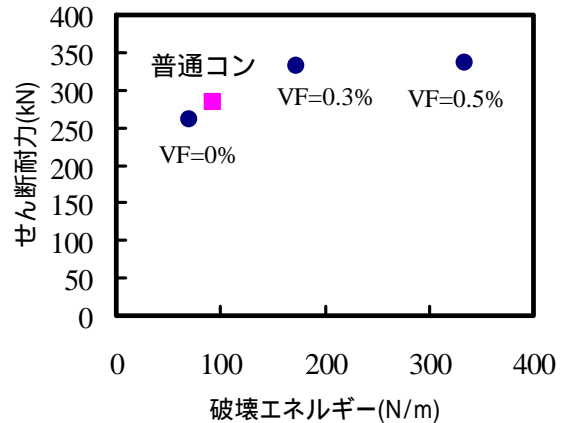


図 - 10 破壊エネルギーとせん断耐力の関係

静的載荷で, 油圧ジャッキストロークを管理した変位制御である。途中, ひび割れ観察を行う以外は連続載荷で行った。なお, 使用したジャッキは 700tf 油圧ジャッキである。

3.2 実験結果

写真 - 1 にひび割れ状況を示す。すべてのケースにおいて, 同様なひび割れ形態を示した。まず, 中央部付近引張側に目視確認でき, 荷重が上昇するにつれて, 発生したひび割れが圧縮縁に伸びるとともに, 支承点から 1d 付近で斜め方向のひび割れが発生した。その後も荷重は増加していき引張鉄筋との付着が徐々に劣化していく。最終的には斜め方向のひび割れが進展し, せん断破壊した。

表 - 5 および図 - 9 に圧縮強度試験結果および実験結果を示す。圧縮強度については、VF=0% の場合が若干低いが、せん断耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。表中のせん断ひび割れ荷重は最初に試験体に斜めひび割れが発生して荷重が一時低下したか、もしくは横滑りした荷重値である。「コンクリート標準示方書」(土木学会)のせん断耐力計算式では、材料係数および構造係数を $\gamma = 1$ として計算すると 285kN である。VF=0% の場合は、普通コンクリートのせん断耐力より小さいが、VF=0.3,0.5% の場合はともに同程度のせん断ひび割れ荷重で普通コンクリートのせん断耐力より上回っている。つまり、VF=0.3,0.5% では繊維混入率による違いは観られなかったが、繊維を混入することで軽量骨材コンクリートのせん断耐力を普通コンクリート以上にすることができると考えられる。図 - 10 に破壊エネルギーとせん断耐力の関係を示す。VF=0.3%,0.5% のせん断耐力は破壊エネルギーに違いがあるものの耐力差はほとんどなかった。しかし、軽量コンクリートのせん断耐力は、0.3%,0.5% と少ない量であるが、短繊維を混入することで、せん断耐力を普通コンクリート以上にしている。その要因としては、PVA 短繊維を混入したことで破壊エネルギーが普通コンクリートより上昇しひび割れの進展を低減できたと考えられる。

4. まとめ

今回、軽量コンクリートの引張破壊特性を把握するために、PVA 短繊維(6mm)混入率 0%、0.3%、0.5% の 3 点および 3 等分点載荷による曲げ靱性試験を行い、さらに、普通コンクリートと同等以上のせん断耐力を得るために、梁部材実験を実施してその性能を確認した。以下に今回実施した実験の範囲において、得られた結果を列挙する。

- (1) JCI の標準試験方法により算出した引張軟化曲線を用いて、3 等分点曲げ靱性試験の FEM 解析を行った結果、試験結果を概ね再現でき、3 等分点曲げ靱性試験でも引張軟化曲線を算出することができる。
- (2) 軽量コンクリートの破壊エネルギーは、少ない量ではあるが、PVA 短繊維を混入し、引張破壊特性を向上させることで、普通コンクリート以上にすることができると考えられる。
- (3) 軽量骨材コンクリートのせん断耐力は PVA 短繊維混入率による違いはみられなかったが、繊維を混入することで普通コンクリートのせん断耐力と同等以上にすることができると考えられる。

参考文献

- 1) 岡本享久, 石川雄康, 棚木 隆, 笹嶋昌男: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.37, No.4, pp.12-18, 1999.4
- 2) 濱田 譲, 田村 聖, 前堀伸平, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いた PC 梁部材のせん断耐力, PC の発展に関するシンポジウム論文集, Vol.9, pp.739-744, 1999
- 3) 二羽淳一郎, 山田一宇, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372, -5, pp.167-176, 1986.8
- 4) 土木学会: 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案), コンクリートライブラリー97, 1999
- 5) (社)コンクリート工学協会: コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査委員会報告書, 2001.5
- 6) 橋高義典, 内田祐市: コンクリートの破壊特性の標準試験方法, コンクリート工学, Vol140, No.2, pp.8-11, 2002.2