

論文 繊維補強材を用いた軽量コンクリート梁のせん断耐荷力に関する実験的研究

小野 聖久*1・稲葉 尚文*2・室井 智文*3・上平 謙二*4

要旨：軽量骨材を用いたコンクリートは、普通コンクリートに比べ引張強度やせん断耐力が低下するため、短繊維を用いた補強が効果的であると考えられる。このような短繊維で補強した軽量コンクリートの力学的特性は、繊維の種類や混入率にも影響される。そこで、繊維の種類や混入率が軽量骨材コンクリートのせん断に関する力学的特性に及ぼす影響を把握するため、せん断載荷試験を実施した。その結果、繊維の種類および混入率の相違に伴う軽量骨材コンクリートのせん断に関する力学的特性が確認された。

キーワード：軽量コンクリート, 短繊維補強材, せん断耐力

1. はじめに

近年、良質な天然骨材の枯渇や環境問題の深刻化により、人工軽量骨材の利用が見直されてきている。このような人工軽量骨材を用いたコンクリート（以下、軽量コンクリート）は、特に上部工の建設において普通コンクリートに比べて構造物の死荷重を軽減でき、下部工の縮小や地震時における上部工慣性力の低減により、建設コストの削減が見込まれる。

しかし、軽量コンクリートは、普通コンクリートに比べ、一般的にせん断耐力が低下するため¹⁾、繊維補強材を用いて補強することが有効であるといわれている。

そこで、本研究では、繊維の種類や混入率が軽量コンクリートのせん断に関する力学的特性に及ぼす影響を把握するため、せん断載荷試験を実施した。

2. 試験体の種類

2.1 使用材料および配合条件

対象とした人工軽量骨材は、堆積土を主原料とした中国産の高性能軽量骨材である。また、繊維補強材としては、非金属繊維として近年使

用されているポリビニルアルコール（以下、VL）とポリプロピレン（以下、PP）を素材とした繊維とし、繊維の長さをそれぞれ 30mm とした。それぞれの物性値を表-1に示す。

また、対象としたコンクリートは、目標強度を PC 橋の設計基準強度でよく用いられる 40N/mm^2 を考慮して 50N/mm^2 とした。スランブはポンプ圧送や施工性を考慮して $12\pm 1\text{cm}$ とし、空気量は凍結融解抵抗性を考慮して $5.5\pm 0.5\%$ とした。本試験に用いたコンクリートの配合条件を表-2に示す。

2.2 試験体の種類

本試験で実施した試験体の種類を表-3に示す。

表-1 材料の物性値

材料の種類	物性値
人工軽量骨材	絶乾密度 1.15g/cm^3 , 表乾密度 1.17g/cm^3 , 粗粒率 6.45, 実積率 63.0%, 最大寸法 15mm
VL 繊維	密度 1.30g/cm^3 , 直径 0.66mm, ヤング係数 22.0kN/mm^2
PP 繊維	密度 0.91g/cm^3 , 断面 $1.17\times 0.38\text{mm}$ の矩形, ヤング係数 3.7kN/mm^2

*1 日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室 工修（正会員）

*2 日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室主任 工修（正会員）

*3 日本道路公団 試験研究所 橋梁研究主幹（正会員）

*4 プレストレストコンクリート建設業協会 工博（正会員）

表-2 コンクリートの配合条件

呼名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)	AE (C×%)
			W	C	S	G		
NC-0.0	42.5	38.5	143	336	711	1149	2.02	0.60
LC-0.0	38.0	45.2	145	382	803	440	0.70	0.60
LC-PP1.0	38.0	52.3	163	429	870	359	0.75	0.50
LC-PP2.0	38.0	61.8	186	489	944	264	0.70	0.20
LC-VL1.0	38.0	58.5	175	461	925	296	0.65	0.90
LC-VL2.0	38.0	58.5	175	461	925	296	0.65	0.80

(例)NC：普通コンクリート，LC：軽量コンクリート，PP1.0：PP 繊維 1.0%Vol.混入

軽量コンクリートのせん断耐力を検討するため本試験で考慮したパラメータは、①骨材の種類、②繊維の種類、③繊維の混入率、④プレストレスの有無である。骨材の種類については、軽量コンクリートと普通コンクリートの比較を行うため2種類考慮した。繊維の種類については、繊維の種類による軽量コンクリートのせん断抵抗性能を比較するため、表-1に示す一般的な非金属繊維である2種類とした。繊維の混入率については、事前の物性試験や試験練り結果から、本試験での軽量コンクリートのワーカビリティや強度を満足する練り混ぜ可能な混入率を考慮し、また、繊維の混入率が軽量コンクリートのせん断抵抗性能に及ぼす影響を把握するため、混入率の上限値を2.0%Vol.とし、その他に1.0%Vol.を設定した。またプレストレスの有無については、通常のPC構造を対象としたときのプレストレスが、軽量コンクリートのせん断抵抗性能に及ぼす影響を把握するためのもので、プレストレスを導入したものと導入しないものの2種類設定した。導入プレストレスは、一般的なPC橋の有効プレストレスによる引張縁応力度から、断面下面に導入するプレストレス量を5.0N/mm²とした。以上のパラメータを考慮して、12体の試験体を製作した。

3. 試験方法

3.1 試験体の諸元

本試験に用いた試験体の形状および寸法を図-1に示す。

RCはりおよびPCはりのせん断耐力に及ぼす影響を正確に把握するためには、寸法効果を考

表-3 試験体の種類

試験体の種類	骨材の種類	繊維の種類	繊維の混入率 (%)	プレストレスの有無
NC-0.0-RC	普通	—	0.0	無
LC-0.0-RC	軽量	—	〃	〃
LC-PP1.0-RC	〃	PP	1.0	〃
LC-PP2.0-RC	〃	〃	2.0	〃
LC-VL1.0-RC	〃	VL	1.0	〃
LC-VL2.0-RC	〃	〃	2.0	〃
NC-0.0-PC	普通	—	0.0	有
LC-0.0-PC	軽量	—	〃	〃
LC-PP1.0-PC	〃	PP	1.0	〃
LC-PP2.0-PC	〃	〃	2.0	〃
LC-VL1.0-PC	〃	VL	1.0	〃
LC-VL2.0-PC	〃	〃	2.0	〃

慮する必要があるため、本試験では、引張鋼材の有効高さをd=1.000mと大きくし、せん断スパン長をa=3.750mとした。また、等曲げ区間および桁がかりを0.500mとした結果、試験体のスパン長はL=8.000mとなり、試験体の全長はL=9.000mとなった。

引張鋼材には、RCはりおよびPCはりの条件を同じにするために、どちらも異形PC鋼棒(ゲビンダスターブ)φ32mmを6本配置した。なお、PCはりのプレストレスは、プレテンション方式により導入した。その際、プレストレスの導入に伴うPC鋼棒の滑り込みを制御するため、PC鋼棒は、アンカープレートとナットを用いてプレストレスを導入する前にはり端部に定着した。なお、導入プレストレス力については、PC鋼棒に貼付したひずみゲージによるひずみ量で管理した。

3.2 荷重の載荷

荷重の載荷は、曲げひび割れが発生するまで

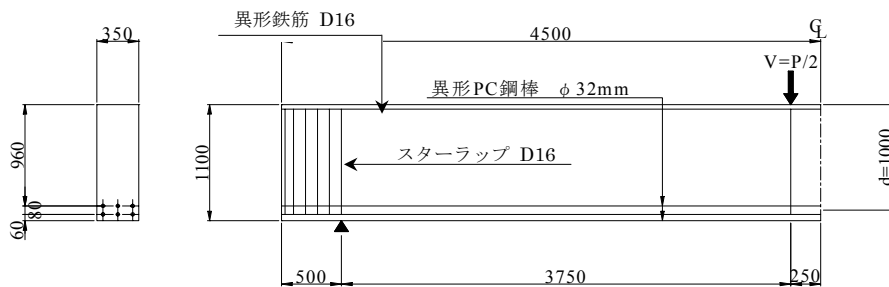


図-1 試験体の形状

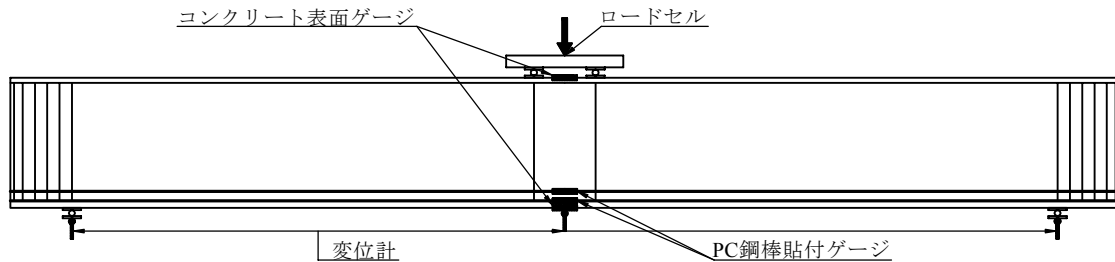


図-2 計測位置

は5kNピッチ、その後曲げひび割れ発生から破壊に至るまで10kNピッチで漸増载荷した。また、载荷荷重は、静的载荷試験機の能力の1500kNまでとした。

载荷荷重については、試験体表面の载荷位置に鉄板を石膏で固め、その上にローラを置き、さらにその上にローディングビームを設置し载荷した。荷重の制御は、ローディングビーム上に設置したロードセルによった。また、はりの支持条件については、堅固な支持台の上に荷重の载荷条件と同様に鉄板とローラを用い支持した。

3.3 計測

計測位置を図-2に示す。変位の計測については、変位計を支間中央に設置するとともに、支持台での支点沈下や相対変形を考慮するため、両側の支持点にも変位計を設置した。

また、試験体の表面には、ひび割れ観察がしやすいように石膏を薄く塗布するとともに、20cmピッチにメッシュを入れた。

4. 試験結果および考察

せん断载荷試験結果を表-4に示す。表中の()内値は、RCはりにおける普通コンクリートの試験値に対する軽量コンクリートの試験

値の比であり、同様に[]内値はPCはりにおける比をそれぞれ示す。また、斜めひび割れ荷重は、目視によってひび割れが確認できた値とし、RCはりの斜めひび割れ角度については、はり図心近傍での角度と、はり上縁近傍での角度をそれぞれ示した。

以下にそれぞれの試験結果について詳述する。

4.1 せん断耐力

本試験から得られたPCはりとはりとのP- δ 曲線をそれぞれ図-3および図-4に示す。

本試験では、12体の試験体を用いてせん断载荷試験を行ったが、プレストレスを導入し2.0%Vol.のPP繊維を混入した軽量コンクリートの試験体(LC-PP2.0-PC)およびプレストレスの有無に関わらず、2.0%Vol.のVL繊維を混入した軽量コンクリートの試験体(LC-VL2.0-PC, LC-VL2.0-RC)では、試験機の载荷能力から破壊に至らなかった。更に、図-3および図-4から、繊維の混入率とせん断耐力との関係を整理すると、図-5の通りとなり、実験パラメータごとの比較を示すと以下の通りとなる。

(1) 骨材の種類の違い

繊維を混入しない軽量コンクリートと普通コンクリートのせん断耐力の比較では、表-4に

表-4 せん断載荷試験結果

試験体の種類	せん断耐力 (kN)	曲げひび割れ荷重(kN) (P-δ 曲線)	斜めひび割れ荷重(kN)	斜めひび割れ角度	破壊形式	圧縮強度 (N/mm ²)
NC-0.0-RC	600	220	500~600	48°, 22°	斜め引張破壊	54.0
LC-0.0-RC	405(0.68)	160(0.73)	400	53°, 18°	〃	44.2
LC-PP1.0-RC	900(1.50)	200(0.91)	800~900	56°, 18°	〃	51.9
LC-PP2.0-RC	1435(2.39)	200(0.91)	960~1000	40°, 17°	〃	55.4
LC-VL1.0-RC	1186(1.98)	220(1.00)	700~900	54°, 13°	〃	49.4
LC-VL2.0-RC	未確認	210(0.95)	未確認	未確認	未確認	54.9
NC-0.0-PC	1239	700	950~1000	25°	せん断圧縮	65.3
LC-0.0-PC	1023[0.82]	600[0.86]	850	28°	〃	44.2
LC-PP1.0-PC	1382[1.12]	600[0.86]	950~1000	20°	〃	47.7
LC-PP2.0-PC	未確認	600[0.86]	1150	20°	未確認	51.8
LC-VL1.0-PC	1272[1.03]	625[0.89]	970	23°	〃	50.9
LC-VL2.0-PC	未確認	600[0.86]	未確認	未確認	未確認	52.1

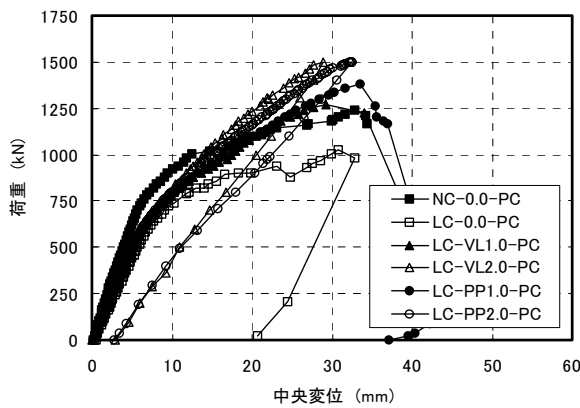


図-3 PCはりのP-δ曲線

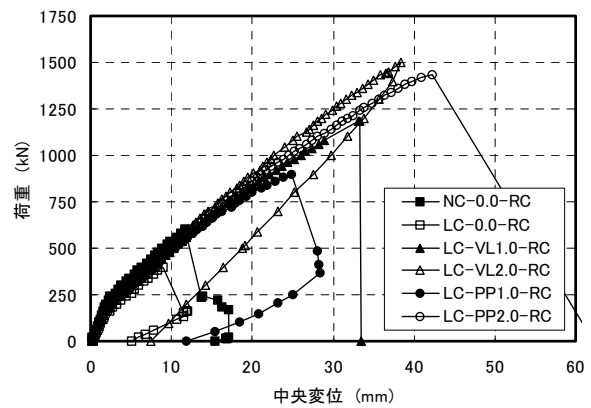


図-4 RCはりのP-δ曲線

示すように、圧縮強度のばらつきはあるものの、既往の研究成果と同様、軽量コンクリートのせん断耐力は普通コンクリートに比べ2割から3割程度低下した。

(2) プレストレスによる効果

繊維を混入しない試験体でプレストレスの効果を比較すると、PCはりのせん断耐力はRCはりの2~2.5倍程度となった。

(3) 繊維の混入効果

PCはり、RCはりのせん断耐力は、いずれも繊維混入率とともに増加傾向にある^{2),3)}。PCはりのせん断耐力は繊維混入率1.0%Vol.で約3割増加し、RCはりは2~3倍に増加する効果が認められた。また、軽量コンクリートのPCはりのせん断耐力は、混入率1.0%Vol.で普通コンクリートと同等以上の耐力を示し、同様にRCはりでは、混入率1.0%Vol.で普通コンクリートに

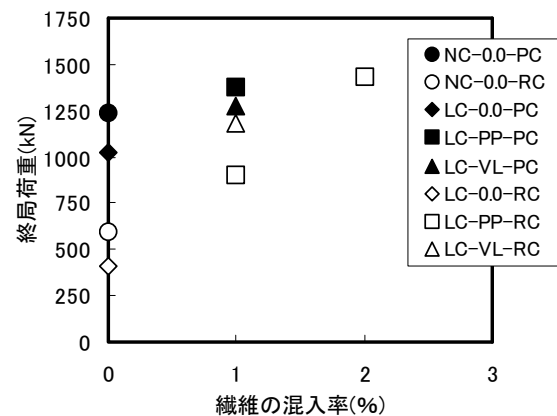


図-5 繊維の混入率とせん断耐力の関係
比べ1.5~2.0倍の耐力となった。

更に、RCはりのせん断耐力とPP繊維の混入率の相関関係がほぼ線形関係にあり、このことから、普通コンクリートのせん断耐力と等価なせん断耐力を有する軽量コンクリートの繊維混入率は、0.5%Vol.程度で十分であるとの結果が

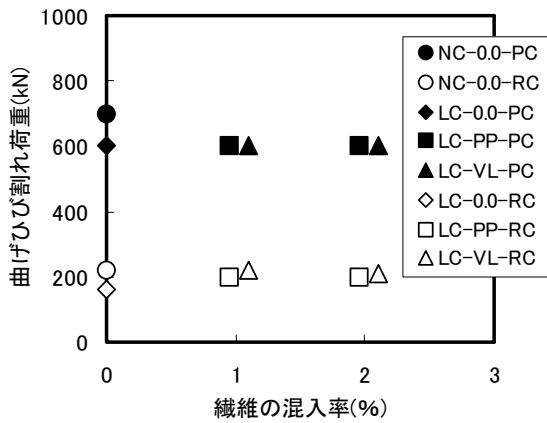


図-6 繊維混入率と曲げひび割れ荷重

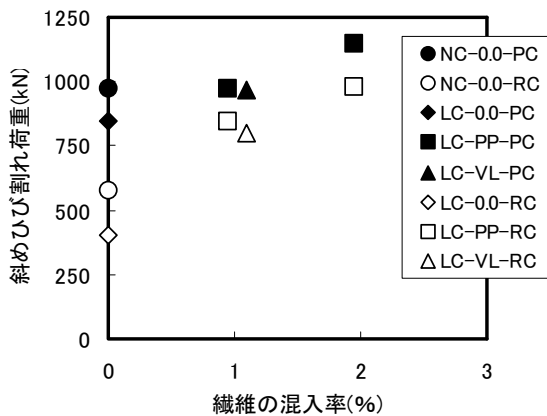


図-7 繊維混入率と斜めひび割れ荷重

得られた。

(4) 繊維の種類による相違

PP 繊維と VL 繊維を比較すると、RC はりでのせん断耐力では、VL 繊維よりも PP 繊維の方が若干小さい傾向となった。また、PC はりの混入率 1.0% Vol. では、PP 繊維を混入したはりの方が VL 繊維を混入したはりよりもせん断耐力が大きかったが、PP 繊維の混入率 2.0% Vol. のはりでは斜めひび割れの発生が認められた。ただし、これらの傾向の差は僅かであり、繊維の種類によるせん断耐力等の差は殆どないと考えられる。

4.2 ひび割れ荷重およびひび割れ角度

荷重の載荷に伴って、曲げひび割れおよび斜めひび割れが観察されるが、繊維の混入率とそれぞれのひび割れ発生荷重の関係を整理すると図-6 および図-7 のとおりとなる。

(1) 曲げひび割れ荷重

載荷の初期段階では、はりには曲げ挙動が観

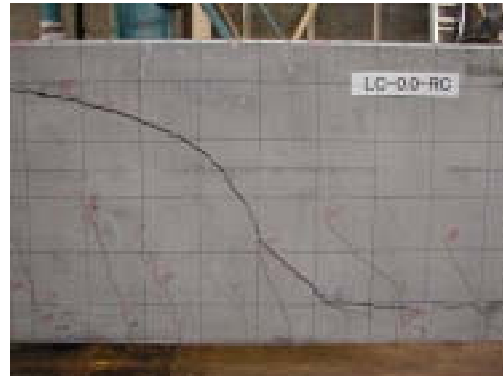


写真-1 RC はりのひび割れ状況



写真-2 PC はりのひび割れ状況

察されるが、その際の載荷点近傍でのはり下縁の曲げひび割れ発生荷重を観察した。図-6 に繊維の混入率と曲げひび割れ荷重の関係を示すが、RC はりでは、繊維を混入することによって混入しないはりよりも曲げひび割れ荷重は 1 割程度向上したが、繊維の混入率の増加に伴う曲げひび割れ荷重の向上は見られなかった。一方、PC はりでは繊維の混入率に関係なく、曲げひび割れ荷重は 600kN 程度であり、繊維の混入率の増加に伴う曲げひび割れ荷重の向上は見られなかった。また、繊維を混入しない RC はりと PC はりでは、圧縮強度にばらつきはあるものの、既往の研究成果と同様、軽量コンクリートの方が普通コンクリートに比べ 3 割程度低下した。

(2) 斜めひび割れ荷重

図-7 に繊維の混入率と斜めひび割れ荷重の関係を示すが、斜めひび割れ荷重は、せん断耐力と同様に繊維の混入率に伴い増加する傾向にあった。特に、本試験結果では、RC はりにおいて、斜めひび割れ荷重と繊維混入率の相関関係はほぼ線形関係にあった。

(3) ひび割れ角度

RCはりおよびPCはりの代表的な斜めひび割れ状況を写真-1および写真-2に示す。

RCはりの斜めひび割れ状況を写真-1に示すが、40~56°の角度で発生したひび割れが、途中13~22°の角度で載荷点に向かって進展する傾向を示した。はり図心近傍での斜めひび割れ角度を比較すると、RCはりでは、普通コンクリートに比べて軽量コンクリートの方が斜めひび割れ角度は大きかった。また、軽量コンクリートに繊維を混入した場合、混入率1.0%Vol.では繊維を混入しない場合とほぼ同様であったが、混入率2.0%Vol.では普通コンクリートの場合に近づいた。一方、PCはりでは、普通コンクリートに比べて軽量コンクリートの方が斜めひび割れ角度は若干大きかった。また、軽量コンクリートに繊維を混入した場合、混入率に関係なく繊維を混入しない場合より若干小さくなった。

これらの結果から、少なくともPCはりでは、RCはりに比べ斜めひび割れ角度は小さく、スターラップへの引張力の伝達能力は大きく、更に、繊維を混入することで伝達能力は向上すると考えられる。

4.3 破壊形式

破壊形式は、繊維の混入率に関係なく、いずれの試験体もPCはりではせん断圧縮破壊を、また、RCはりでは斜め引張破壊となった。ただし、混入率2%の3試験体では1500kNまでに破壊しなかったため、せん断耐力および破壊形式は未確認である。

5. まとめ

本研究は、人工軽量骨材を用いたコンクリートの弱点である引張強度やせん断強度を補うために、短繊維で補強したRCはりおよびPCはりのせん断載荷試験を実施したが、試験結果より以下の知見を得ることができた。

(1)繊維を混入しない軽量コンクリートと普通コンクリートのせん断耐力の比較では、既往

の研究成果と同様、軽量コンクリートのせん断耐力は、普通コンクリートに比べ2~3割低下した。

- (2)今回の試験での繊維の混入率の範囲では、RCはり、PCはりともに、繊維の混入率の増加に伴う曲げひび割れ荷重の向上はほとんど見られなかった。また、繊維を混入しないRCはりおよびPCはりでは、圧縮強度にばらつきはあるものの、既往の研究成果と同様、軽量コンクリートの方が普通コンクリートに比べ曲げひび割れ荷重は3割程度低下した。
- (3)本試験結果では、RCはりにおいて、せん断耐力と繊維混入率の相関関係はほぼ線形関係にあり、このことから、普通コンクリートのせん断耐力と等価なせん断耐力を有する軽量コンクリートの繊維混入率は、0.5%Vol.程度で十分であるとの結果が得られた。
- (4)繊維の種類の違いによるせん断耐力の差は殆どなかった。
- (5)少なくともPCはりでは、RCはりに比べ斜めひび割れ角度は小さく、スターラップへの引張力の伝達能力は大きく、更に、繊維を混入することで伝達能力は向上すると考えられる。今回の試験結果については、圧縮強度のばらつきによる影響も含まれていることが考えられるため、今後、これらの影響を考慮した分析を進める予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・[構造性能照査編]，pp. 70，2002年
- 2) 喜多俊介，小室文也，二羽淳一郎：短繊維補強されたRC部材の力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 2，pp. 1717-1722，2003
- 3) 伊藤 始，岩波光保，横田 弘：ビニロン短繊維の混入がRCはりのせん断耐力に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 2，pp. 1723-1728，2003