

論文 ポンプ圧送した PVA 短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の耐荷性状

田口史雄*1・栗橋祐介*2・岸 徳光*3・三上 浩*4

要旨: 本研究では、PVA 短繊維の体積混入率を 0.5 % としてポンプ圧送した軽量コンクリート製 RC 梁の曲げおよびせん断耐荷性状を検討することを目的に、ポンプ圧送により排出された普通、軽量および短繊維混入軽量コンクリートを用いて製作した RC 梁の静的載荷実験を実施した。その結果、ポンプ圧送した PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の曲げ耐力は一般の RC 梁の場合と同様の計算方法で評価できることや、せん断耐力は短繊維混入コンクリートの残存引張強度を用いたせん断耐力算定式により安全側で評価できることなどが明らかになった。

キーワード: RC 梁, PVA 短繊維, 軽量コンクリート, ポンプ圧送, 耐荷性状

1. はじめに

橋梁上部工等に軽量コンクリートを適用することにより、地震時における下部工や基礎への作用力が軽減されるため、それらの部材断面の縮小が可能となり、建設コストの縮減が期待できる。しかしながら、軽量コンクリートは普通コンクリートに比較して引張強度が小さいため、部材に適用する場合にはせん断耐力も減少する。そのため、土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]¹⁾ では、軽量コンクリート製の RC/PC 部材におけるせん断耐力のコンクリート分担分を普通コンクリートの場合の 7 割に低減することを規定している。

著者らは、これまで軽量コンクリートの引張性能を向上させる方法の 1 つとして、ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維を混入する方法に着目し、PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 梁や RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を実施してきた²⁾。その結果、PVA 短繊維を混入することにより軽量コンクリートの引張性能が改善され、RC 部材のせん断耐力が向上することや、その向上効果はひび割れ発生後における短繊維混入コンクリートの引張強度 (残存引張強度) を用いて評価可能

であることを明らかにしている。なお、伊藤ら³⁾ は比較的せん断スパン比が小さい RC 部材を対象として、短繊維混入によるせん断耐力向上効果を検討している。一方、著者らは橋梁上部工への適用を想定しているため、せん断スパン比が比較的大きい RC 梁を対象に検討を行っている。

軽量コンクリートの施工性については、軽量粗骨材 (以後、単に軽量骨材) の吸水率を 15 % 程度とすることにより、凍結融解抵抗性を低下させずに良好なポンプ圧送性を確保できることを明らかにしている⁴⁾。また、軽量コンクリートの引張性能改善のため PVA 短繊維を体積割合で 0.5 % 程度混入する場合には、高炉スラグを混和して高流動化することにより、良好なポンプ圧送性および耐久性が確保できることを明らかにしている⁵⁾。しかしながら、ポンプ圧送後の短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 部材の曲げおよびせん断耐荷性状については、未だ検討されていないのが現状である。

このような観点から、本研究では、PVA 短繊維の体積混入率 (以後、短繊維混入率 V_f) を 0.5 % としてポンプ圧送した軽量コンクリート製 RC 梁の耐荷性状を明

表-1 コンクリートの配合

配合名	コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (%)	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (B × %)	
						W	C	スラグ	S	G		AE 減水剤	高性能 AE 減水剤
										普通	軽量		
N	普通	0	50.0	50.0	42.2	155	310	0	793	1084	0	1.00	-
L	軽量	0	32.8	27.9	46.5	150	457	80	745	0	400	-	1.10
LF		0.5	32.8	27.9	46.5	150	457	80	745	0	400	-	1.35

$B = C + \text{スラグ}$

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)
 *2 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科講師 博(工) (正会員)
 *3 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科教授 工博 (正会員)
 *4 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

表-2 使用材料の一覧

材料	種類	物性および主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm ³ , 比表面積 0.45 m ² /g
混和材	高炉スラグ	密度 2.91 g/cm ³ , 粉末度 4,000 cm ² /g
細骨材	登別産陸砂	密度 2.68 g/cm ³ , 粗粒率 2.85, 吸水率 1.38
粗骨材 (普通)	登別産砕石	密度 2.67 g/cm ³ , 最大寸法 20 mm, 吸水率 2.73
粗骨材 (軽量)	頁岩系非造粒型軽量骨材	絶乾密度 1.25 g/cm ³ , 表乾密度 1.37 g/cm ³ , 粗粒率 6.32, 単位容積質量 0.809 kg/l, 最大寸法 15 mm
混和剤	AE 減水剤	リグニンスルホン酸系
	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
短繊維	PVA 短繊維 (外割配合)	密度 1.30 g/cm ³ , 直径 0.66 mm, 長さ 30 mm, 弾性係数 29.4 GPa, 引張強度 0.88 GPa, 破断歪 7%

表-3 コンクリートの材料特性

配合名	フレッシュ性状						硬化コンクリートの特性			
	スランプフロー (mm)		空気量 (%)		軽量粗骨材の吸水率 (%)		単位体積質量 (g/cm ³)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	残存引張強度 f_r (MPa)
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後				
N	-	-	-	-	-	-	2.28	36.7	24.7	-
L	600	591	7.5	6.0	15.6	15.4	1.87	51.7	20.8	-
LF	710	713	7.7	6.5	15.0	16.6	1.95	40.3	22.6	0.63

らかにするため、普通および軽量コンクリート、短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の静的荷重実験を行い、各梁の曲げおよびせん断耐荷性状を比較検討した。

2. 実験概要

2.1 PVA 短繊維混入軽量コンクリート

表-1 に本研究に用いた各コンクリートの配合を示す。配合名は、普通、軽量および短繊維混入軽量コンクリートの場合に対して、それぞれ N, L および LF とした。軽量および短繊維混入軽量コンクリートの配合は、スランプフロー試験および空気量試験の他、間隙性通過試験や流下試験を行い、ワーカビリティや分離抵抗性に優れた配合となるように決定した⁶⁾。なお、短繊維混入率 V_f は、これまでの施工性、耐久性、力学特性試験および RC 部材実験の結果等に基づいて総合的に判断し $V_f = 0.5\%$ とした。また、普通コンクリートの配合は、圧縮強度が 40 MPa 程度となるように、事前に実施した室内試験により決定した。

表-2 に使用材料の一覧を示す。軽量骨材には、国産の頁岩系非造粒型軽量骨材を用いた。なお、これまでの研究により、通常の軽量コンクリートの場合と同様に、ポンプ圧送時の閉塞を防止するために、軽量骨材に 30% 程度のプレウェッティングによる吸水を行う場合には、軽量コンクリートの凍結融解抵抗性が低下することが明らかになっている。また、良好なポンプ圧送性と凍結融解抵抗性を確保するための適切な吸水率は 15% 程

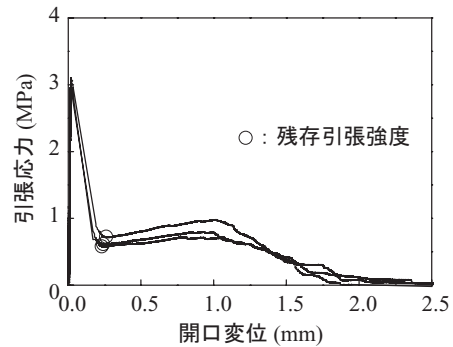


図-1 PVA 短繊維混入軽量コンクリートの一軸引張試験結果

度であることも明らかにしている⁴⁾。これより、本研究においても、軽量骨材の吸水率は 15% 程度にすることとした。吸水率は、絶乾状態の軽量骨材を水槽に 11 日間浸漬させることで調整することとし、その実測値は平均で 16.2% であった。なお、軽量骨材の吸水率の簡易かつ適切な管理方法については、別途検討を進めている。PVA 短繊維には、直径 0.66 mm、長さ 30 mm のものを用いた。

表-3 にコンクリートの材料特性を一覧にして示す。本研究では、通常のコンクリートプラントを用いて製造されたコンクリートをポンプ圧送し、その施工性を確認した後、同コンクリートを RC 梁の打設に用いた。ポンプ圧送は、スクイーズ駆動式 (圧送能力 90~110 m³/h) のポンプを用い、直径 120 mm、39 m の圧送管により実施した。普通コンクリートについてはポンプ圧送を行

表-4 試験体の一覧

試験体名	梁のタイプ	せん断補強筋	コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (%)	コンクリートの圧縮強度 (MPa)	計算せん断耐力 V_{uc} (kN)	計算曲げ耐力 P_{uc} (kN)	せん断余裕度 $\alpha (=V_{uc}/P_{uc})$
F-N	曲げ破壊型	あり	普通	0	36.7	344.9	174.6	1.98
F-L			軽量	0	51.7	323.4	177.7	1.82
F-LF			0.5	40.3	317.2	175.4	1.81	
S-N	せん断破壊型	なし	普通	0	36.7	99.8	174.6	0.57
S-L			軽量	0	51.7	78.3	177.7	0.44
S-LF			0.5	40.3	72.1	175.4	0.41	

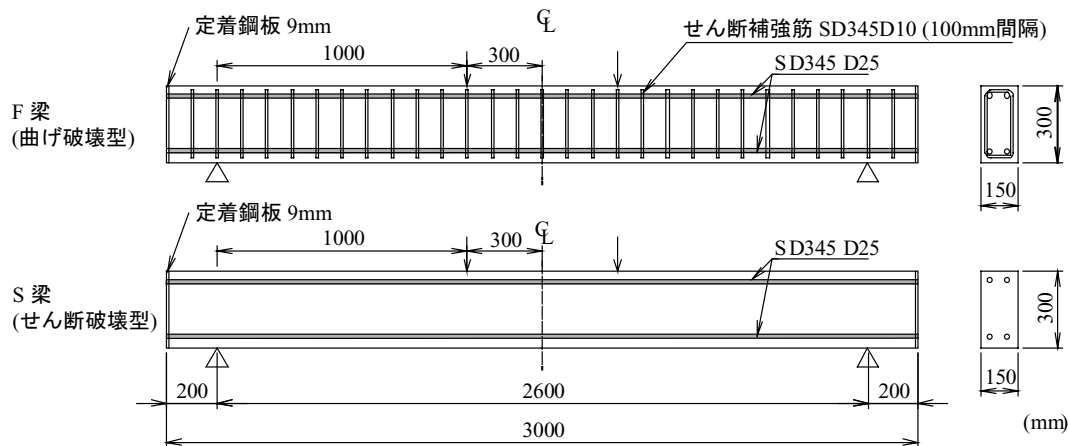


図-2 RC梁の形状寸法および配筋状況

わず、プラントで製造されたコンクリートを用いて打設した。なお、表-3に示したように、ポンプ圧送前後におけるスランプフロー、空気量および軽量骨材の吸水率の変動は小さいことを確認している。

試験では、軽量、短繊維混入軽量コンクリート共にスムーズにポンプ圧送できることを確認している。また、別途実施した短繊維混入軽量コンクリートの水中凍結融解試験 (JIS A 1148) の結果では、耐久性指数が75となったことから、厚さ20 cm以上の部材に用いるのが望ましいといえる⁷⁾。

表-3には、各コンクリートの硬化後の特性についても示している。ここで、残存引張強度 f_r は、短繊維混入軽量コンクリートの一軸引張試験結果 (図-1) により得られたものであり、短繊維の架橋効果の評価指標となるものである。本研究では、著者らによる既往の研究⁸⁾と同様に、ひび割れが発生して引張応力が急激に低下した後、短繊維混入軽量コンクリートが保持する引張応力を残存引張強度 f_r と定義した。なお、残存引張強度は4供試体の結果の平均値として評価したが、大きくばらついた結果や供試体端部で破壊した結果については、除外することとした。

2.2 RC梁試験体

表-4に本研究に用いた試験体の一覧を示す。試験体

数は、せん断補強筋の有無、コンクリートの種類を変化させた全6体である。なお、本実験では、せん断補強筋の有無によりRC梁の破壊形式が、それぞれ曲げおよびせん断破壊型になるように設計している。

表中の試験体名の第1項目は梁のタイプ (F: 曲げ破壊型, S: せん断破壊型)、第2項目は使用したコンクリートの配合名を示している。また、表には、短繊維の効果を考慮しない場合の計算曲げ耐力 P_{uc} および計算せん断耐力 V_{uc} 、せん断余裕度 $\alpha (=V_{uc}/P_{uc})$ を示している。 P_{uc} および V_{uc} は、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]¹⁾に準拠し、前述の各コンクリートの圧縮強度を用いて算出したものである。表より、F梁の場合には α が1.0よりも大きいことから曲げ破壊型となり、S梁の場合には α が1.0よりも小さいことから、設計上せん断破壊型となることが分かる。

図-2にFおよびS梁の形状寸法および配筋状況を示す。いずれの梁も、断面寸法 (高さ×幅) が150×300 mm、純スパン長が2.6 mの複鉄筋RC梁であり、主鉄筋にはSD345 D25を用いた。また、F梁の場合には、せん断補強筋としてSD295A D10を100 mm間隔で配置した。主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度は、それぞれ380、392 MPaであった。

載荷実験は、容量500 kNの油圧ジャッキを用いて実

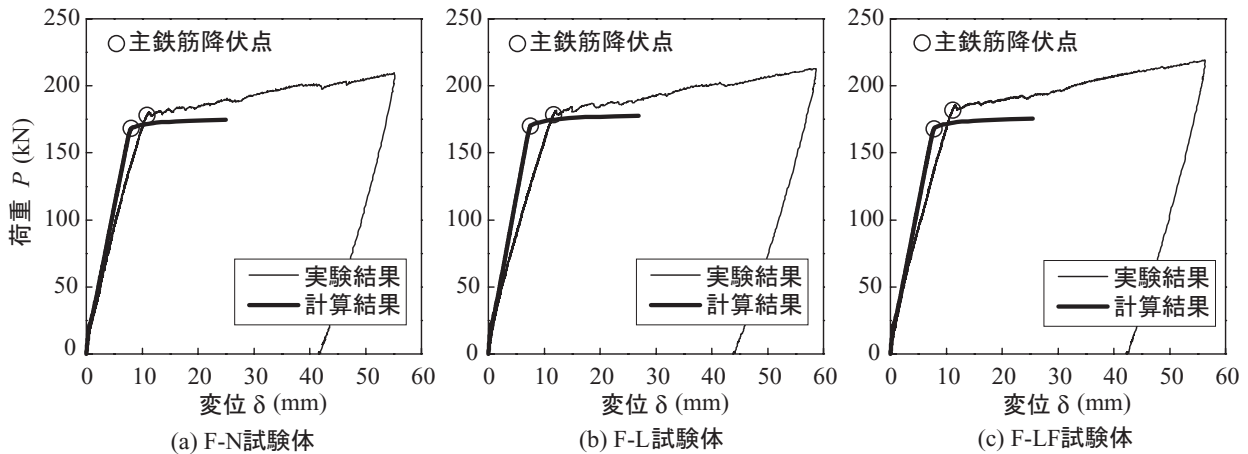


図-3 F 試験体に関する荷重-変位関係

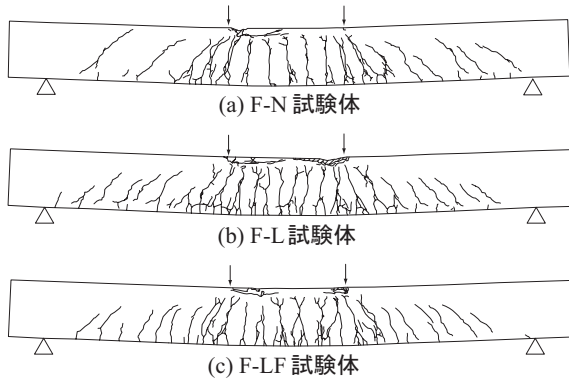


図-4 F 試験体のひび割れ分布図

施した。本実験の測定項目は、載荷荷重およびスパン中央点変位（以後、変位）であり、それぞれ静荷重測定用ロードセルおよび非接触式レーザ変位計を用いて測定した。なお、実験終了後には、梁側面に発生したひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成した。

3. 実験結果

3.1 曲げ破壊型 RC 梁の実験結果

図-3 に曲げ破壊型の F 梁に関する荷重-変位関係の実験結果を計算結果と比較して示す。計算結果は、前述のコンクリートおよび鉄筋の材料特性値を用いて断面分割法により算出したものである。計算は上縁コンクリートのひずみが終局圧縮ひずみ $3,500 \mu$ に至るまで実施した。なお、短繊維の架橋効果は考慮していない。

図より、実験結果はいずれの試験体の場合においても、荷重 P が 175 kN 程度に到達した時点で主鉄筋の降伏により剛性勾配が大きく低下し、その後荷重が漸増する性状を示していることが分かる。実験結果と計算結果を比較すると、降伏荷重は実験結果の方が多少大きいことが分かる。特に、短繊維混入軽量コンクリートを用いた F-LF 試験体の場合には、他の試験体の場合より

も実験結果が計算結果を大きく上回っている。これは、短繊維の架橋効果が曲げ耐力の向上に寄与したことによるものと考えられる。

なお、主鉄筋降伏までの剛性勾配は、一般的に計算結果の方が実験結果よりも若干大きい。これは、本計算結果では、主鉄筋のすべり等を考慮していないことによるものと推察される。

図-4 に F 梁の実験終了後におけるひび割れ分布図を示す。F-N および F-L 試験体の結果より、両試験体ともにほぼ同様のひび割れ分布性状を示しているものの、軽量コンクリートを用いた F-L 試験体の方が多少ひび割れ本数が多く、上縁コンクリートの著しい損傷や主鉄筋配置位置に沿う割裂ひび割れの発生も見受けられる。これは、軽量コンクリートの引張強度が小さいことに起因するものと考えられる。また、F-L、F-LF 試験体の結果を比較すると、載荷点近傍の曲げひび割れの性状は両梁でほぼ同様であるものの、F-LF 試験体の場合には上縁コンクリートの著しい損傷や割裂ひび割れの発生は見られない。これは、短繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと考えられる。

以上のことから、短繊維混入率 V_f を 0.5% としてポンプ圧送した軽量コンクリート製 RC 梁の曲げ耐力は、普通コンクリート製 RC 梁の場合と同等以上であり、通常の RC 梁と同様の計算方法で評価可能であることが明らかになった。

3.2 せん断破壊型 RC 梁の実験結果

図-5 にせん断破壊型の S 梁に関する荷重-変位関係の実験結果を示す。また、図には、計算せん断耐力も併せて示した。なお、短繊維混入軽量コンクリートを用いた S-LF 試験体の場合には、後述の PVA 短繊維混入によるせん断耐力増分を考慮した計算結果も併せて示した。

図より、普通コンクリートを用いた S-N 試験体の場

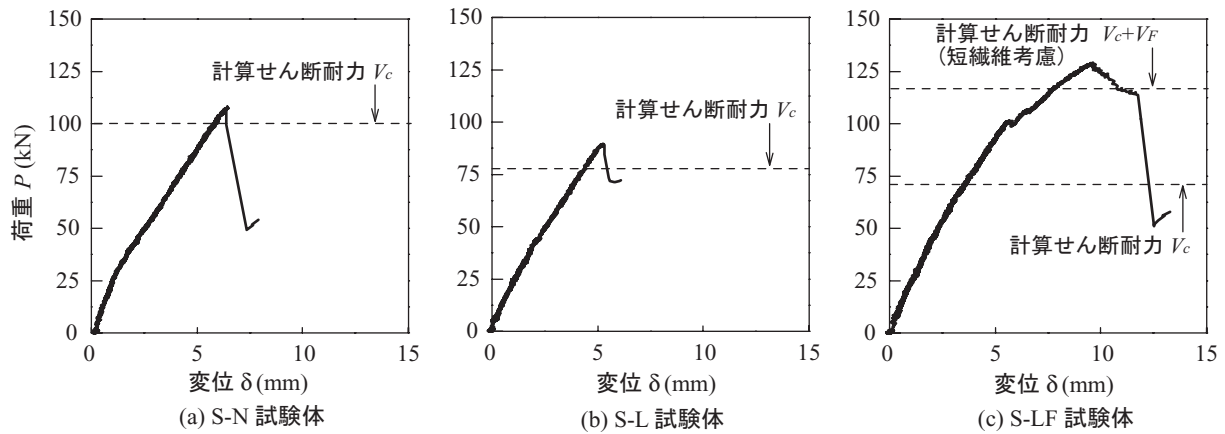


図-5 S 試験体に関する荷重-変位関係

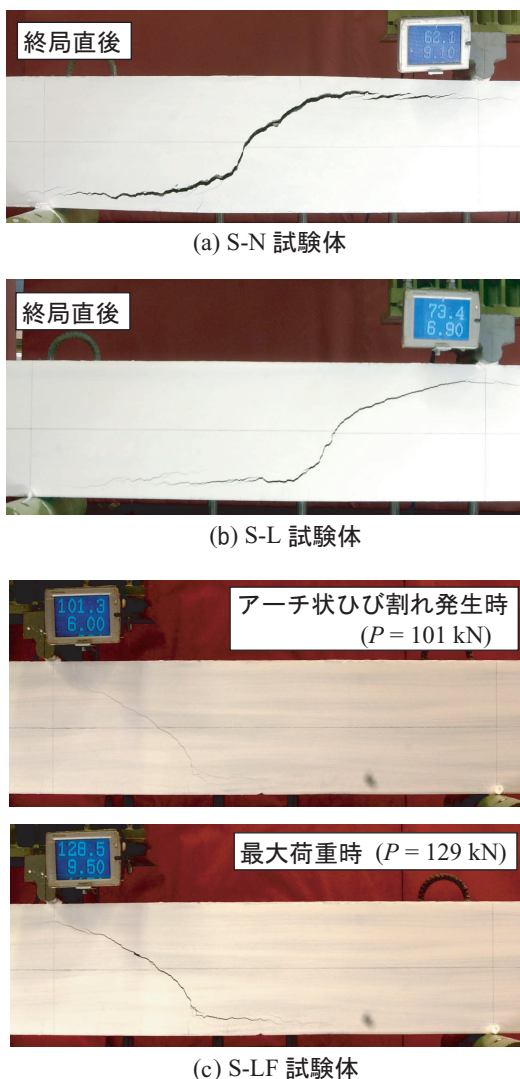


図-6 S 梁に関する最大荷重近傍のひび割れ性状

合には、最大荷重時まで荷重が線形的に増大し、その後急激に低下していることから、せん断破壊により終局に至っていることが分かる。軽量コンクリートを用いた S-L 試験体の場合には、S-N 試験体の場合よりも小さな荷重レベルでせん断破壊に至っている。これは、軽量コ

ンクリートの引張強度が普通コンクリートの場合よりも小さいことによるものである。

また、短繊維を混入した S-LF 試験体の場合には、荷重 $P = 100 \text{ kN}$ 程度で剛性勾配が若干低下するものの、最終的には普通コンクリートを用いた S-N 試験体の場合よりも大きな荷重レベルでせん断破壊により終局に至っている。実験では、荷重 $P = 100 \text{ kN}$ 程度で明瞭なアーチ状ひび割れが発生し、その後はアーチ状ひび割れの開口を伴いながら荷重が増大することを確認している。

図-6 に S 梁に関するひび割れ分布性状を示す。図中、短繊維を混入していない S-N/L 試験体の場合にはせん断破壊による終局直後の状況を示し、短繊維を混入した S-LF 試験体の場合にはアーチ状ひび割れ発生時および最大荷重時の状況を示している。

図より、S-N/L 試験体の場合には、載荷点から支点側に向かって発生したアーチ状ひび割れが、支点近傍の下端鉄筋に沿う割裂ひび割れに進展する性状を示していることが分かる。また、S-LF 試験体の場合には荷重 $P = 101 \text{ kN}$ の時点で載荷点近傍の断面中央部にアーチ状ひび割れが発生し、最大荷重時に到達するまで徐々に開口していることが分かる。これらのことから、短繊維混入の有無にかかわらず、アーチ状ひび割れの性状はほぼ同様であるものの、S-LF 試験体の場合には PVA 短繊維の架橋効果によりひび割れの急激な開口には至らず、せん断耐力が増大していることが分かる。

以上のことより、本研究の条件下においては、短繊維混入率を $V_f = 0.5\%$ とすることにより、軽量コンクリート製 RC 梁のせん断耐力を普通コンクリート製 RC 梁の場合と同等以上に向上可能であることが明らかになった。

3.3 短繊維混入によるせん断耐力増分の評価

著者らによるこれまでの研究⁸⁾では、短繊維混入コンクリートの残存引張強度を用いることにより、せん断スパン比 4 程度の RC 梁のせん断耐力増分を算定可能

表-5 実験および計算結果の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (%)	コンクリートの材料試験値		計算せん断耐力 (kN)			実測せん断耐力 P_{ue} (kN)	P_{ue}/V_{uc}
		圧縮強度 (MPa)	残存引張強度 f_r (MPa)	コンクリート分担分 V_c (kN)	短繊維分担分 V_f (kN)	合計 V_{uc} (kN)		
S-N	0	36.7	-	99.8	-	99.8	108	1.08
S-L	0	51.7	-	78.3	-	78.3	89	1.14
S-LF	0.5	40.3	0.63	72.1	42.7	114	129	1.13

であることを明らかにしている。また、せん断耐力の短繊維分担分 V_f の算定式として下式 (1) を提案している。この式は、せん断ひび割れ発生後、そのひび割れを架橋する短繊維がせん断耐力を分担するとの考え方に基づいて提案したものである。

$$V_f = 2 \times b \times (z / \tan \theta) \times f_r \quad (1)$$

ここに、 b : ウェブ幅, $z = d / 1.15$, d : 有効高さ, f_r : 短繊維混入コンクリートの残存引張強度, である。なお、本論文では、ひび割れ角度 θ を 45 度と仮定している。

表-5 に各試験体の実験結果および計算結果の一覧を示す。なお、S-LF 試験体の計算せん断耐力は、コンクリート標準示方書に準拠して算出したコンクリート分担分 V_c に、式 (1) により求めた短繊維分担分 V_f を加算して算出したものである。表より、いずれの試験体においても、計算せん断耐力は実測せん断耐力を 1 割程度安全側に評価していることが分かる。

このことより、実施工を想定してポンプ圧送した PVA 短繊維混入軽量コンクリートを用いる場合においても、既往の実験結果と同様、残存引張強度を用いることにより短繊維混入による RC 梁のせん断耐力向上効果を安全側に評価可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、PVA 短繊維の体積混入率を 0.5 % としてポンプ圧送した軽量コンクリート製 RC 梁の耐荷性状を明らかにするため、普通および軽量コンクリート、短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の静的載荷実験を行い、各梁の耐荷性状を比較検討した。本研究により、得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) ポンプ圧送後の短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の曲げ耐力は、普通コンクリート製 RC 梁の場合と同等以上であり、通常の RC 梁と同様の計算方法で評価可能である。
- 2) 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁のせん断耐力は、既往の実験結果の場合と同様、残存引張強

度を用いた算定式により、比較的精度良く評価可能である。

- 3) 1), 2) の結果より、短繊維の体積混入率は 0.5 % であるが、本研究に用いた短繊維混入軽量コンクリートの実用性は高く、ポンプ圧送を要する実構造物への適用が十分可能であるものと判断される。

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], 土木学会, 2002.
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介, 竹本伸一：せん断破壊型軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす PVA 短繊維混入率の影響, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1237-1248, 2006.
- 3) 伊藤 始, 岩波光保, 横田 弘：PVA 短繊維で補強した RC はりのせん断耐力評価に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.774/V-65, pp.123-138, 2004.11
- 4) 遠藤裕丈, 田口史雄, 竹本伸一, 松井敏二：頁岩系非造粒型軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性と耐凍害性, 第 60 回土木学会年次学術講演会概要集, pp.727-728, 2005.
- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄, 栗橋祐介, 市川聖芳：PVA 短繊維混入軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究, 寒地土木研究所月報, No.654, pp.9-16, 2007.11
- 6) 市川聖芳, 田口史雄, 遠藤裕丈, 松井敏二：寒冷地における軽量コンクリートの施工性および品質向上に関する実験報告, 第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.185-188, 2006.10
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2002.
- 8) 田口史雄, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介：PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.283-288, 2005.