

論文 ポンプ圧送可能な寒冷地仕様 PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の静載荷実験

工藤 雅史^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・安達 優^{*4}

要旨: ポンプ圧送性および凍結融解抵抗性に優れる PVA 短繊維混入軽量コンクリートの RC 部材への適用性を検討することを目的に、同コンクリートを用いて製作した RC 梁の静載荷実験を行った。その結果、1) 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の曲げ耐力および変形性能は、普通コンクリート製 RC 梁の場合と同等級以上であり、通常の RC 梁と同様の計算方法で安全側に評価可能である、2) 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁のせん断耐力は、普通コンクリート製 RC 梁の場合よりも大きく、短繊維の架橋効果を考慮した算定式により十分な安全余裕度をもって評価可能である、ことなどが明らかになった。

キーワード: RC 梁, PVA 短繊維混入軽量コンクリート, 耐荷性能, 残存引張強度

1. はじめに

軽量コンクリートの適用により、地震時における橋梁下部工や基礎の負担が軽減されるため、部材断面が縮小可能となり建設コストの縮減が期待できる。一方で、軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して引張強度が小さいため、鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 部材に適用する場合には設計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 割に低減するのが一般的である¹⁾。

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一つとして、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 梁の静的および衝撃荷重載荷実験を実施してきた^{2),3)}。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。

さらに、積雪寒冷地における実構造物への高速施工を実現するため、ポンプ圧送性と凍結融解抵抗性に優れる

短繊維混入軽量コンクリートを開発した。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 部材の耐荷性状については、未だ十分に検討されていないのが現状である。特に、短繊維や軽量骨材を用いたコンクリートは、ポンプ圧送により材料分離等の品質低下を生じる可能性があるものと考えられる。本コンクリートの実用化のためには、ポンプ圧送後の品質や部材に用いる場合の安全性を検証することが極めて重要であるものと考えられる。

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 梁の耐荷性能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 梁の静載荷実験を行い、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 には、本研究に用いた各コンクリートの配合を示している。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

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE (C×%)	SP1 (C×%)	SP2 (C×%)	VA (W×%)	短繊維混入率 (vol.%)
				W	C	Sg	S	G						
								普通	軽量					
N	39	39	36	151	388	-	648	1158	-	-	3.88	-	-	-
L	35	32	55	150	435	30	920	-	350	3.00	-	1.25	0.05	-
LF	35	32	55	150	435	30	920	-	350	2.00	-	1.25	0.05	0.5

$$P = C + Sg$$

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博 (工) (正会員)

*4 尾張旭市 土木管理課 (正会員)

表-2 使用材料の一覧

材料(配合名)	種類	記号	物性および主成分
セメント(N)	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16 g/cm ³ , 比表面積: 0.33 m ² /g
セメント(L, LF)	早強ポルトランドセメント		密度: 3.14 g/cm ³ , 比表面積: 0.45 m ² /g
混和材	高炉スラグ	Sg	密度: 2.91 g/cm ³ , 粉末度: 4,000 cm ² /g
細骨材(N)	白老産陸砂	S	絶乾密度: 2.67 g/cm ³ , 粗粒率: 2.64, 吸水率: 1.27%
細骨材(L, LF)	苫小牧陸砂		絶乾密度: 2.67 g/cm ³ , 粗粒率: 2.71, 吸水率: 1.36%
粗骨材(N)	峯朗産碎石	G	絶乾密度: 2.70 g/cm ³ , 最大寸法: 25 mm, 吸水率: 0.44%
粗骨材(L, LF)	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: 0.809, 最大寸法: 15 mm, 単位容積質量: 1.67 kg/l
混和剤	AE 剤	AE	天然樹脂酸塩
	AE 減水剤	SP1	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
	高性能 AE 減水剤	SP2	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体
	増粘剤	VA	水溶性セルロースエーテル
短繊維	ポリビニルアルコール	-	密度 1.3 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, 破断ひずみ 7%

* 24 時間吸水時の値

表-3 コンクリートの材料特性

配合名	フレッシュコンクリート性状							硬化コンクリートの特性					
	スランプ (cm)	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)	静弾性 係数 (GPa)	耐久性指数		
		圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後				圧送前	圧送後	
N	7.5	-	-	4.9	-	-	-	2.30	53.8	31.8	-	-	
L	-	635	-	7.9	-	-	-	1.89	41.7	20.0	-	-	
LF	-	613	585	6.5	6.6	17.0	17.0	1.87	50.0	19.9	89	90	

した。軽量および短繊維混入軽量コンクリートの配合は、著者らの既往の文献⁴⁾における配合を基本として、凍結融解抵抗性を改善するため AE 剤を追加し、かつ材料分離抵抗性を向上させるため増粘剤を追加したものである。配合試験時においては、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が既往の配合と同程度となることを確認している。

表-2には、使用材料の一覧を示している。軽量骨材には、国産の頁岩系非造粒型軽量骨材を用いた。軽量骨材の吸水率は、既往の研究⁵⁾と同様に、良好なポンプ圧送性と凍結融解抵抗性を確保するため 11 日間水中に浸漬し 15% 程度にすることとした。PVA 短繊維には、直径 0.66 mm, 長さ 30 mm のものを用いた。

表-3には、コンクリートの材料特性を一覧にして示している。本研究において PVA 短繊維混入軽量コンクリートは、通常のコンクリートプラントを用いて製造しポンプ圧送を行い、その施工性を確認した後 RC 梁製作用型枠に打設した。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, 長さ 50

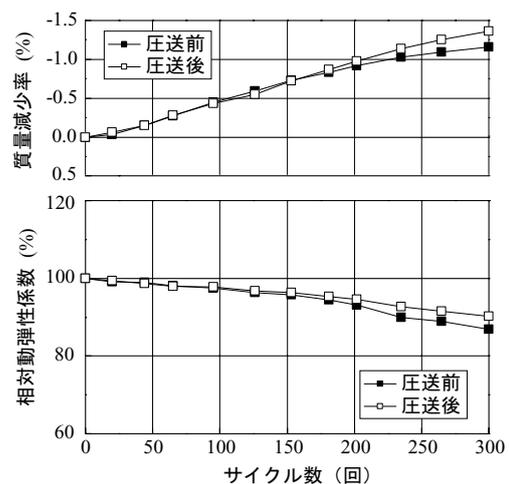


図-1 LF 配合における水中凍結融解試験結果

m の圧送管により実施した。普通および軽量コンクリートについてはポンプ圧送を行わず、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に示しているように、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。また、

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)	弾性係数 (GPa)	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	53.8	31.8	336	185	1.82
F-L			軽量	0	41.7	20.0	295	183	1.61
F-LF			0.5	50.0	19.9	300	184	1.63	
S-N	せん断破壊型	なし	普通	0	53.8	31.8	113	185	0.61
S-L			軽量	0	41.7	20.0	72.9	183	0.40
S-LF			0.5	50.0	19.9	77.5	184	0.42	

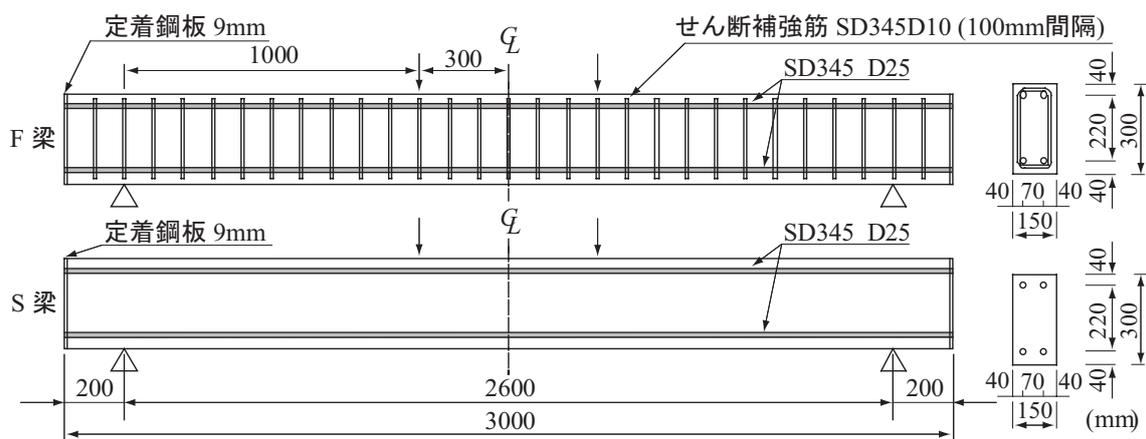


図-2 RC梁の形状寸法および配筋状況

ポンプ圧送時の最大吐出量は $30 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、十分に実施工に適用可能であることを確認している。

硬化コンクリートの特性より、各コンクリートの圧縮強度は $40 \sim 50 \text{ MPa}$ 程度であることが分かる。また、短繊維混入軽量コンクリートの耐久性指数はポンプ圧送後においても 90 となっている。図-1には、ポンプ圧送前後における短繊維混入軽量コンクリートの水中凍結融解試験結果を示している。試験は、JIS A 1148 に準拠して行った。図より、ポンプ圧送前後ともに、 300 サイクル時まではほぼ同様な相対動弾性係数および質量減少率分布を示しており、高い凍結融解抵抗性を有していることが分かる。従って、本研究に用いた短繊維混入軽量コンクリートは、ポンプ圧送の影響をほとんど受けていないことが分かる。

2.2 RC梁試験体

表-4には、本研究に用いた試験体の一覧を示している。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을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 [設計編]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、せん断破壊型となることが分かる。

図-2には、FおよびS梁の形状寸法および配筋状況を示している。いずれの梁も、断面寸法(幅×高さ)が $150 \times 300 \text{ mm}$ 、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。主鉄筋の降伏強度は 391 MPa であった。

荷重実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて実施した。なお、著者らによる既往の研究³⁾において、図-2と同一形状寸法のRC梁に関する単調荷重実験を行っていることより、本研究では漸増繰返し荷重実験により各RC梁の耐荷性能を評価することとした。すなわち、曲げ破壊型のF梁の場合には、スパン中央点変位(以後、変位)を 20 mm ずつ漸増させる片振りの繰返し荷重とし、せん断破壊型のS梁の場合には、荷重荷重を 30 kN ずつ漸増させる片振りの繰返し荷重とした。

本実験の測定項目は、荷重荷重およびスパン中央点変位であり、それぞれ静荷重測定用ロードセルおよび非接

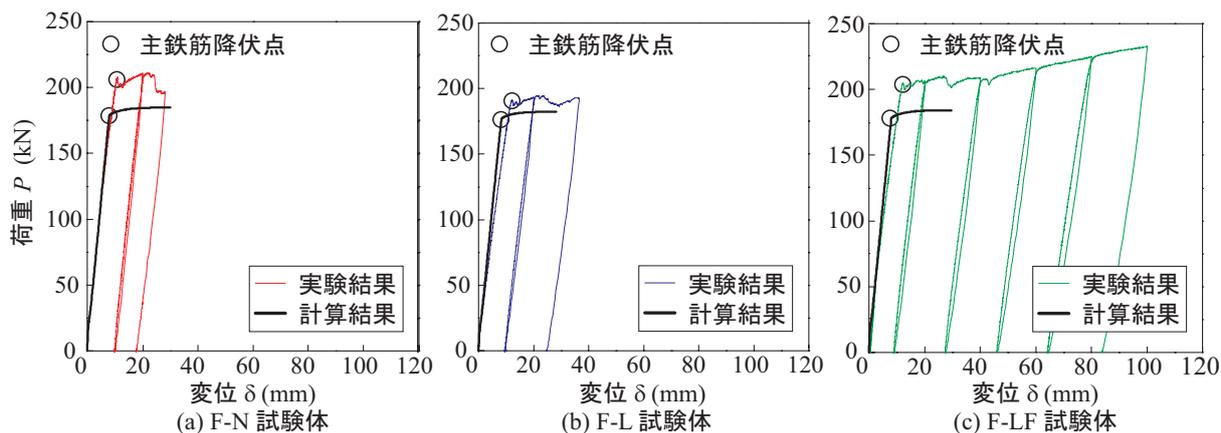


図-3 F梁に関する荷重-変位関係

触型レーザ式変位計を用いて測定した。なお、載荷時には梁側面のひび割れ進展挙動をデジタルカメラを用いて撮影し、実験終了後にはひび割れをトレースして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には、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している。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、いずれの試験体も1サイクル目において、変位量の増加に伴って荷重が線形的に増加し、荷重 $P=200\text{ kN}$ 程度で主鉄筋の降伏に至っていることが分かる。また、主鉄筋降伏時の荷重はいずれの場合も実測値が計算値を上回っている。さらに、1サイクル目の変位振幅 20 mm 到達後の除荷勾配は、載荷時のものとほぼ同様であり、除荷後には変位が 10 mm 程度残留していることが分かる。

F-N/L試験体の場合には、2サイクル目の変位振幅 40 mm に到達する前に上縁コンクリートの圧壊により荷重が低下し終局に至った。なお、後述するように、これらの試験体では上縁コンクリートが圧壊して大きく剥落している。一方、F-LF試験体の場合は、2サイクル目の途中において荷重が若干低下するものの、その後増加に転じ、サイクル数の増加とともに漸増していることが分かる。このようにF-LF試験体の変形性能がF-N/L試験体よりも優れているのは、PVA短繊維の混入により、梁上縁コンクリートの剥離が効率的に抑制されたことによるものと考えられる。

図-4には、F梁に関する実験終了後のひび割れ分布図を示している。図より、F-N/L試験体の場合は、ともに等曲げ区間の上縁コンクリートが圧壊し剥落していることが分かる。F-LF試験体の場合は、等曲げ区間の上縁

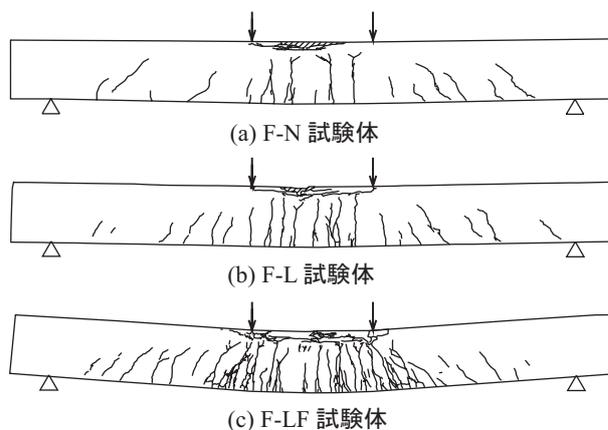


図-4 F梁のひび割れ図

コンクリートに多数のひび割れが見られるものの剥落には至っていない。これは、PVA短繊維の混入によりひび割れが架橋されたことによるものと考えられる。また、F-LF試験体は、F-N/L試験体と比較して大きく曲げ変形したため、梁側面には密な間隔でひび割れが多数発生していることが分かる。

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梁の曲げ耐力および変形性能は、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耐荷性能を十分安全側に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には、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している。また、図には、コンクリート標準示方書に準拠して算出した計算せん断耐力を示している。なお、S-LF試験体に関しては、後述の短繊維分担 V_F を加えた計算せん断耐力を示している。

図より、いずれの梁も繰返し回数の増加に伴って荷重がほぼ線形的に増加し、最大荷重到達後急激に低下していることが分かる。なお、S-N/LF試験体はともに5サイクル目の $P=120\text{ kN}$ 近傍で終局に至っている。一方、S-L試験体は4サイクル目の $P=116\text{ kN}$ で終局に至っており、

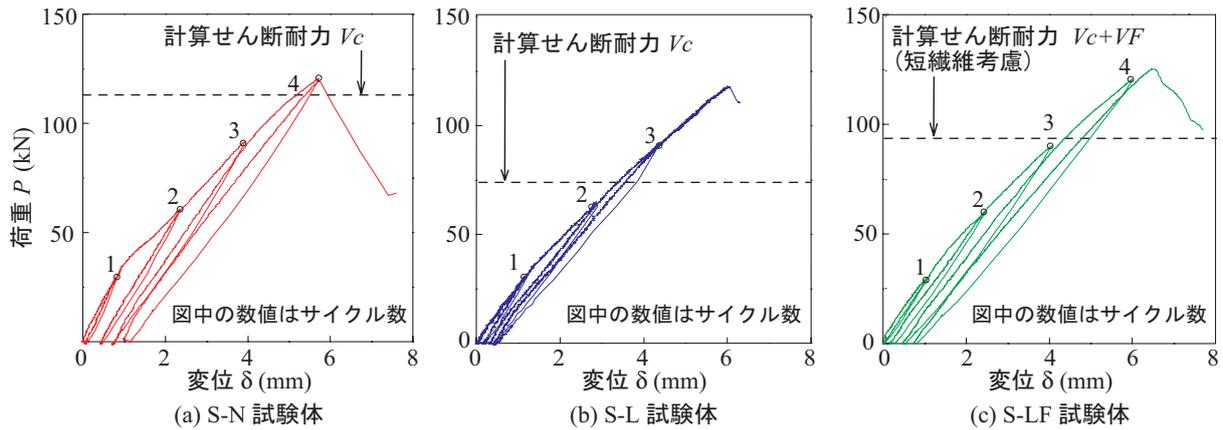


図-5 S梁に関する荷重-変位関係

S-N/LF試験体に比べてサイクル数が少なく、終局荷重が小さいことが分かる。なお、実測耐力を計算値と比較すると、S-N試験体の実測耐力は計算値と同程度であるのに対し、S-L試験体の実測耐力は計算値を大きく上回っており、S-N試験体に近い荷重レベルとなっている。このように、本実験において、軽量コンクリート製RC梁のせん断耐力は普通コンクリート製RC梁のそれと同等であり、示方書の規定は本実験に関しては十分に安全側であることが分かる。

写真-1には、S梁に関する荷重低下直後のひび割れ性状を示している。写真より、S-N/LF試験体の場合には、載荷点から支点側に向かってアーチ状のひび割れが発生していることが分かる。なお、実験時には、S-N試験体はアーチ状のひび割れが一気に開口して荷重低下に至ったのに対し、S-LF試験体の場合には、アーチ状ひび割れ発生後、PVA短繊維の引き抜けもしくは破断による音が断続的に確認され、荷重が徐々に低下する性状を示した。

S-L試験体の場合には、S-N/LF試験体と異なり、載荷点から支点側に向かって斜め下方に発生したひび割れの角度が、断面高さ方向中央部において変化し、下方に進展している。また、主鉄筋配置位置近傍においては支点側に水平に進展している。このように、S-L試験体の場合には、ひび割れの発生および進展状況がS-N/LF試験体とは異なっており、このことが計算せん断耐力を大きく上回る実測耐力を示した要因の一つであるものと推察される。

3.3 短繊維混入によるせん断耐力増分の評価

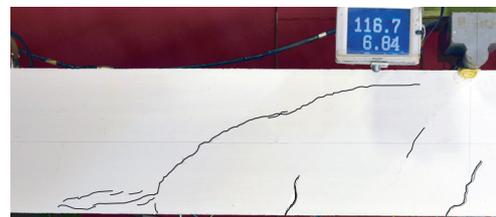
表-5には、S梁に関する実験および計算結果を一覧にして示している。なお、表には、著者らによる同寸法・同配筋における既往のPVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の結果³⁾も併せて示している。表中の残存引張強度 f_r は、ひび割れ発生後に短繊維が耐え得る引張強度として定義されるものである。なお、 f_r は短繊維混入軽量コンクリートを用いて製作した円柱供試体の一軸引張試験により得られた値である。ここで、一軸引張試験において円柱供試体には、直径100mm、高さ200mmのもの



(a) S-N 試験体



(b) S-L 試験体



(c) S-LF 試験体

写真-1 S梁に関する荷重低下直後のひび割れ性状

を用い、載荷速度は0.01 mm/secとした。試験の詳細については参考文献⁶⁾を参考にされたい。

また、既往の試験結果より、残存引張強度 f_r は円柱供試体内における短繊維の配置や配向に大きく依存し、試験体間の誤差が大きくなる場合があることが明らかになっている⁷⁾。従って、本実験では著者らの保有する過去の試験データを全て再整理した結果に基づいて f_r を決定することとした。その結果、試験体数 $N=33$ で、残存引張強度 f_r は0.14~0.63 MPaに分布しており、本実験結果では0.18 MPa、全データの平均値は0.24 MPaであった。従って、本研究では、残存引張強度 $f_r=0.24$ MPaとして、本実験および既往の実験³⁾におけるPVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁のせん断耐力を再評価した。

表-5の計算せん断耐力の短繊維分担分 V_F は、下式に

表－5 S 梁に関する実験および計算結果の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (%)	圧縮強度 (MPa)	平均残存引張強度 f_r * (MPa)	計算せん断耐力 (kN)			実測せん断耐力 V_{ue} (kN)	V_{ue}/V'_{uc}
				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	53.8	-	113	-	113	119	1.05
S-L	0	41.7	-	72.9	-	72.9	116	1.51
S-LF	0.5	50.0	0.24	77.5	16.3	93.8	125	1.33
文献 3)	0.5	40.3	0.24	72.1	16.3	88.4	129	1.46

*: 本研究および過去の試験結果の平均値

より求めたものである。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。表より、S-N 試験体の実測せん断耐力 V_{ue} は計算せん断耐力 V'_{uc} と同程度であり、S-L 試験体の V_{ue} は V'_{uc} を大きく上回っている。また、PVA 短繊維混入軽量コンクリート製の S-LF 試験体および既往の結果³⁾では、いずれの場合も実測値が計算値を上回っている。ただし、計算値に対する実測値の割合 V_{ue}/V'_{uc} は、本実験の結果が既往の結果よりも小さい。この原因としては、本実験に用いた PVA 短繊維混入軽量コンクリートの圧縮強度が既往の実験よりも大きいため、短繊維混入によるせん断耐力向上効果が低下することなどが考えられる。

以上の結果より、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、ポンプ圧送した寒冷地仕様の PVA 短繊維混入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 梁の曲げ耐力および変形性能は、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安全側に評価可能である。

- 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、十分な安全余裕度をもって評価可能である。
- 3) 1), 2) の結果より、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、積雪寒冷地において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 [設計編]，土木学会，2007.
- 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) 田口史雄，栗橋祐介，岸 徳光，三上 浩：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.315-320，2008.
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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，土木学会，1999.