

ポンプ圧送した寒冷地仕様 PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の静載荷実験

Static loading tests on RC beams with PVA short-fiber mixed LW-AG concrete for use in cold regions

室蘭工業大学 大学院 ○ 学生会員 工藤雅史 (Masashi Kudo)
 室蘭工業大学 大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 寒地土木研究所 正会員 安達 優 (Yutaka Adachi)
 室蘭工業大学 大学院 正会員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)

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と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、そのせん断耐力も減少する傾向にある。そのため、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕¹⁾では、軽量コンクリート製 RC/PC 部材の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 梁や RC 版の静的および衝撃荷重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。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。PVA 短繊維には、直径 0.66 mm、

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/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						増粘剤 (W × %)	ポゾリス No.70 (C × %)	SP8 SBZ	ヴァインソル
						W	C	スラグ	S	G					
										普通	軽量				
N	普通	0	40	40	40	162	411	0	697	1083	0	-	0.9	-	-
L	軽量	0	35	32	55	150	435	30	920	0	350	0.05	-	1.3	1.1
LF		0.5	35	32	55	150	435	30	920	0	350	0.05	-	1.3	1.1

P = C + スラグ

表-2 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	346	185	1.87
F-L			軽量	0	41.7	20.0	235	183	1.29
F-LF			0.5	50.0	19.9	240	184	1.31	
S-N	せん断破壊型	なし	普通	0	53.8	31.8	124	185	0.67
S-L			軽量	0	41.7	20.0	79.5	183	0.44
S-LF			0.5	50.0	19.9	84.5	184	0.46	

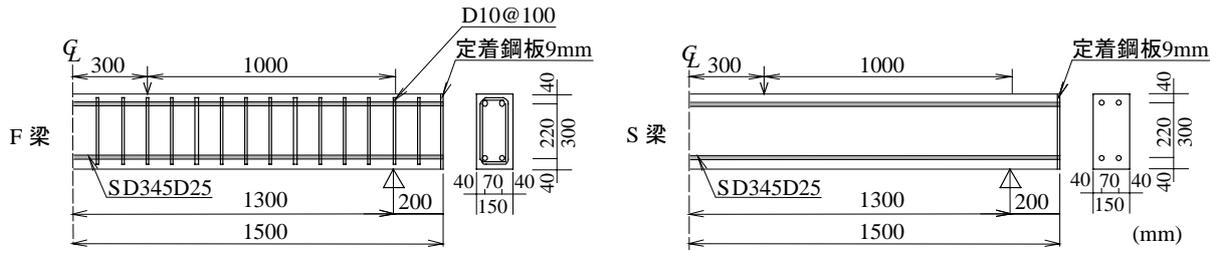


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

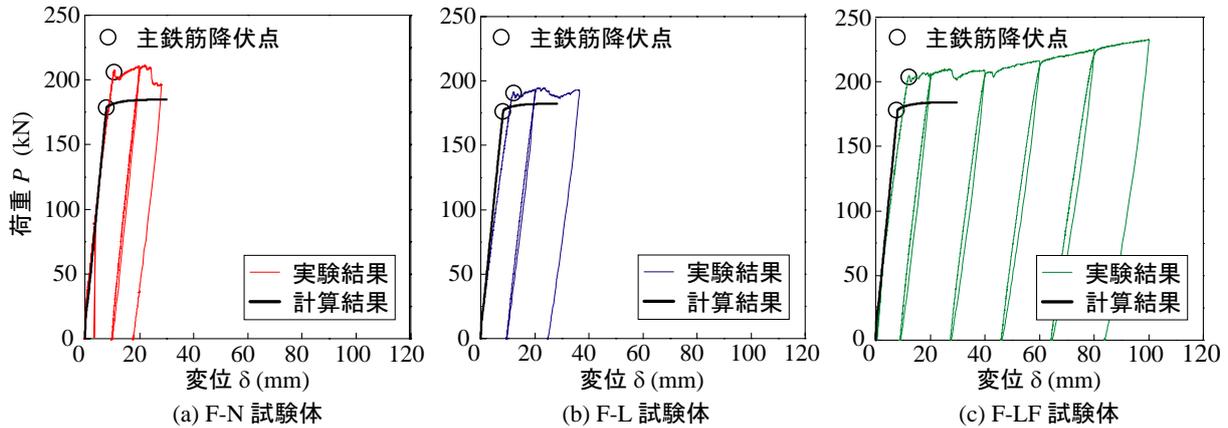


図-2 F梁に関する荷重-変位関係

長さ 30 mm のものを用いた。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。なお、短繊維混入軽量コンクリートの耐久性指数は、ポンプ圧送前後でそれぞれ 87 および 90 であり、凍結融解抵抗性に優れていることを確認している。

2.2 RC 梁試験体

表-2 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、短繊維の効果を検討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、設計上せん断破壊型となることが分かる。

図-1 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 \times 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。主鉄筋の降伏強度は 391 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施した。なお、著者らによる既往の研究³⁾において、図-1

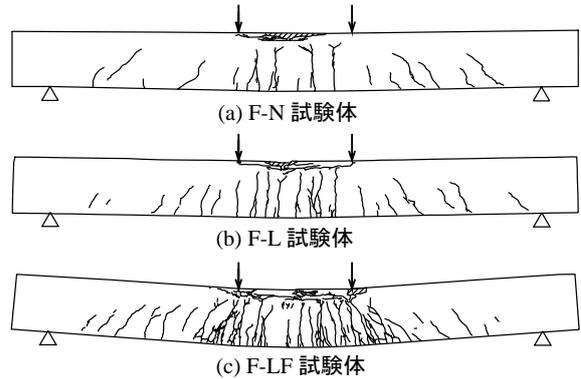


図-3 F梁のひび割れ図

と同一形状寸法の RC 梁に関する単調載荷実験を行っていることより、本研究では漸増繰返し載荷実験により各 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、スパン中央部変位 (以後、変位) を 20 mm ずつ漸増させる片振りの繰返し載荷とし、せん断破壊型の S 試験体の場合には、載荷荷重を 30 kN ずつ漸増させる片振りの繰返し載荷とした。

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、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-2 には、曲げ破壊型の F 梁に関する荷重-変位関係

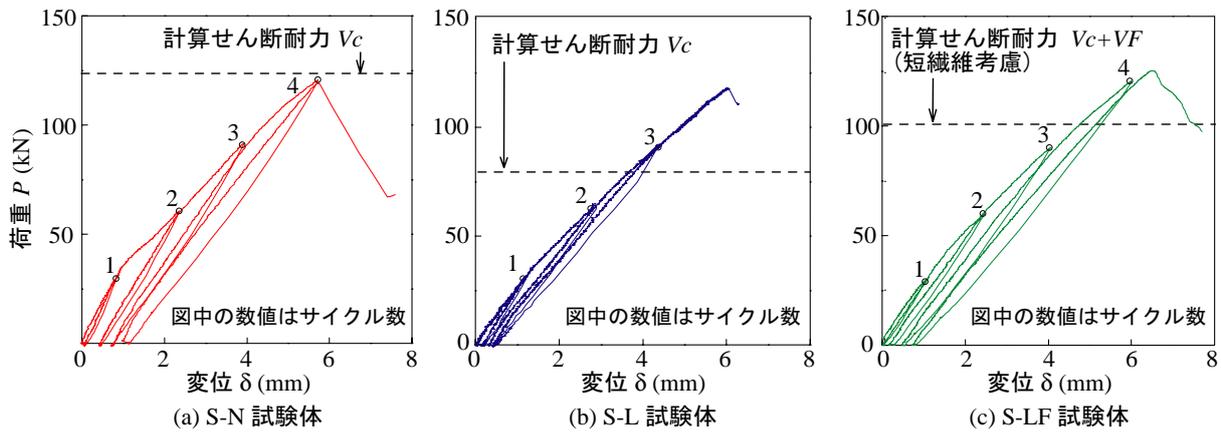


図-4 S梁に関する荷重-変位関係

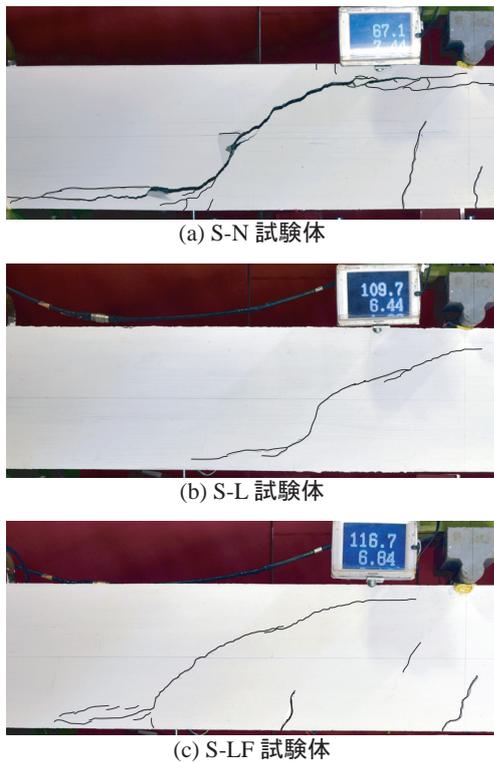


写真-1 S梁に関する荷重低下直後のひび割れ性状

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、いずれの場合も実測荷重が計算荷重を上回っている。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コンクリートの圧縮靱性が向上し、梁上縁コンクリートの圧壊や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-3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、等曲げ区間の上縁コンクリートに多数のひび割れが見られるものの剥離には至っていない。これは、PVA短繊維の混入によるひび割れの架橋効果によるものである。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、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-4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、短繊維分担分 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 $P=110 \text{ kN}$ で終局に至っており、S-N/LF 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安全側であることが分かる。

表-3 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 (%)	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 V_{ue} (kN)	V_{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	53.8	-	124	-	124	119	0.96
S-L	0	41.7	-	79.5	-	79.5	110	1.38
S-LF	0.5	50.0	0.24	84.5	16.3	101	125	1.24
文献2)	0.5	31.4	0.24	66.8	19.4	86.2	123	1.43
文献3)	0.5	40.3	0.24	72.1	16.3	88.4	129	1.46

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の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-3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、著者らによる既往のPVA短繊維混入軽量コンクリート製RC梁の結果^{2),3)}も併せて示している。ここで、表中の残存引張強度 f_r は、短繊維混入軽量コンクリートを用いて作製した円柱供試体の一軸引張試験により得られる値である。すなわち、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、著者らによる試験結果では、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するものであり、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。従って、本実験では著者らの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0.14~0.54 MPaに分布しており、本研究ではその平均値として $f_r=0.24$ MPaとした。すなわち、 $V_f=0.5\%$ の場合の残存引張強度を $f_r=0.24$ MPaとした。

表-3の計算せん断耐力の短繊維分担分 V_F は、下式に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^{2),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} は本実験の結果よりも既往の結果の方が大きい。この原因としては、S-LF試験体のコンクリート圧縮強度が既往の実験よりも大きいことが考えられる。

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。