

PVA 短繊維混入 RC 片持ち梁の静載荷実験

Static loading tests of RC cantilever beams mixed with PVA short-fiber

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
三井住友建設（株）
(独) 土木研究所寒地土木研究所
(独) 土木研究所寒地土木研究所

○ 正会員
フェロー
フェロー
正会員
正会員

栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三上 浩 (Hiroshi Mikami)
安達 優 (Yutaka Adachi)
田口 史雄 (Fumio Taguchi)

1. はじめに

道路橋橋脚の耐震補強において、落橋防止システムの1つである変位制限構造は、地震時における上部工の水平移動の制御を目的に、橋台や橋脚の上面に設置される片持ち梁部材であり、限られた断面寸法で大きな外力に抵抗することが必要となる。従って、鉄筋コンクリート (RC) 構造とする場合には過密配筋となる傾向にあり、適切な施工が困難と考えられる場合には鋼製のブラケットが適用され、建設コストが増加する場合もある。

一方、これまで著者らは、RC 部材の耐荷性能や耐衝撃性能の向上を目的に、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、RC 部材の静的および衝撃荷重載荷実験を行ってきた^{1),2)}。その結果、PVA 短繊維の混入により、RC 梁のせん断耐力や耐衝撃性が飛躍的に向上することを明らかにしている。また、上述の RC 製変位制限構造を模擬した片持ち RC 梁の静載荷実験を実施し、PVA 短繊維の混入によりせん断破壊型の片持ち RC 梁を曲げ破壊型に移行可能であることなどを明らかにしている³⁾。しかしながら、既往の実験結果においては、PVA 短繊維混入による片持ち RC 梁のせん断耐力向上効果を定量的に評価するには至っていない。PVA 短繊維混入コンクリートを適

切に変位制限構造に適用するためには、せん断耐力向上効果の定量的評価の下に合理的設計法を確立することが肝要である。

このような背景より、本研究では、PVA 短繊維混入による片持ち RC 梁のせん断耐力向上効果を定量的に評価することを目的に、せん断余裕度の小さい RC 片持ち梁を対象として、そのせん断耐力に及ぼす短繊維混入率の影響を実験的に検討した。

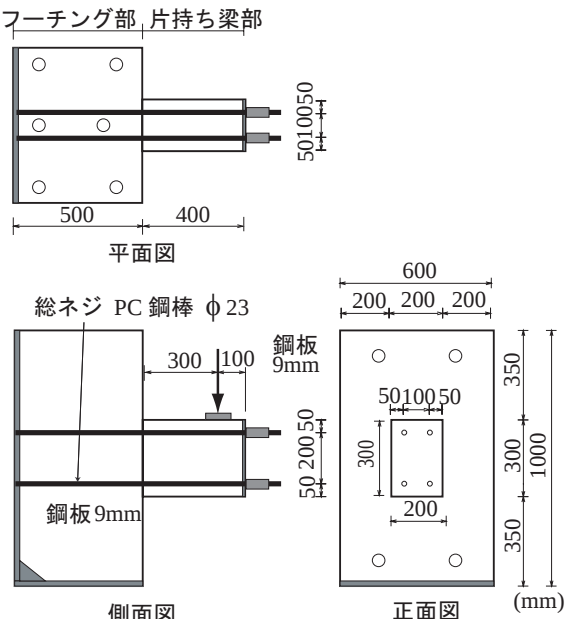
2. 実験概要

2.1 試験体の概要

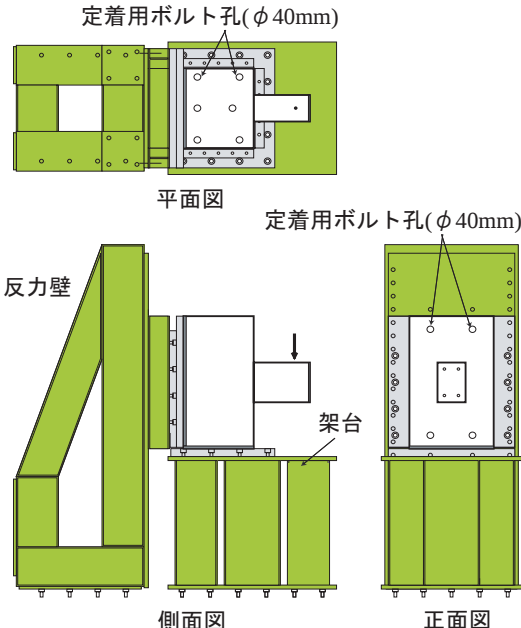
表-1 には、本研究に用いた試験体とコンクリート圧

表-1 試験体および計算耐力の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (%)	圧縮強度 (MPa)	計算曲げ耐力 P_{uc} (kN) (1)	計算せん断耐力 V_{uc} (kN) (2)	せん断余裕度 α (2)/(1)
F0	0	50.8	545	274	0.50
F1	1	49.5	544	271	0.50
F2	2	48.4	543	268	0.49



(a) 試験体の概要 (せん断補強筋配置の場合)



(b) 実験の概要

図-1 試験体と静載荷実験の概要



写真-1 実験状況

表-2 コンクリートの配合一覧

V_f (vol.%)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	SP C × (%)
0	38.5	170	442	1028	682	1.0
1.0						
2.0						

SP: 高性能減水剤

表-3 PVA 短繊維の寸法および材料特性値

長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

縮強度および計算耐力の一覧を示している。試験体数は、PVA 短繊維の体積混入率 (以後、短繊維混入率 V_f) を 0, 1, 2 % に変化させた全 3 体である。試験体名は、英文字の F と短繊維混入率 V_f の組み合わせとしている。なお、本実験では短繊維を混入する場合の V_f を 1, 2 % と設定しているが、これは現場施工において PVA 短繊維をアジテータ車のドラムに投入して攪拌する場合の作業性やポンプ圧送性、および既往の研究²⁾における短繊維のせん断耐力向上効果を考慮して決定したものである。

また、表-1 より、コンクリートの圧縮強度は、短繊維混入の有無によって多少異なっているものの、計算曲げ耐力 P_{uc} や計算せん断耐力 V_{uc} に及ぼす影響は小さいものと考えられる。これらの計算耐力は、短繊維の効果を考慮せず、コンクリートおよび鉄筋の材料試験値を用いて土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して算出したものである。なお、計算せん断耐力 V_{uc} の算出には、ディーブビームの式を用いた。

計算せん断耐力 V_{uc} を計算曲げ耐力 P_{uc} で除したせん断余裕度 α は、0.5 程度となっていることから、短繊維を混入する場合においてもせん断破壊により終局に至ることが予想される。

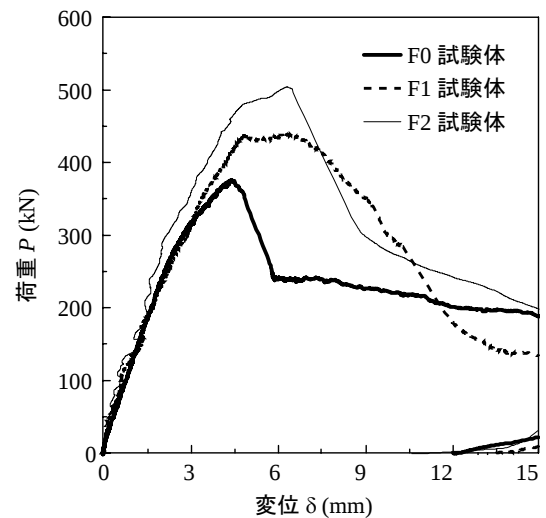


図-2 荷重-変位関係

図-1 には、試験体および静荷重実験の概要を示している。試験体は、フーチング部と片持ち梁部から構成されており、それぞれ、橋台や橋脚などの既設コンクリート部および変位制限構造部をモデル化したものである。なお、フーチング部には一般的なレディーミクストコンクリートを用い、片持ち梁部には圧縮強度が同程度の普通もしくは短繊維混入コンクリートを用いた。

本試験体の片持ち梁部の長さは 400 mm、断面寸法 (幅 × 高さ) は 200 × 300 mm である。軸方向鉄筋には $\phi 23$ mm の総ネジ PC 鋼棒を 4 本用いている。

実験は、図-1(b) に示しているように、試験体を鋼製の架台および反力壁に PC 鋼棒 ($\phi = 32$ mm) を 10 本用いて固定して実施した。荷重は、片持ち梁端部から 100 mm フーチング側の位置に幅 100 mm の鋼製プレートを設置し、油圧ジャッキを用いて行った。写真-1 には、実験状況を示している。

表-2 には、普通および短繊維混入コンクリートの配合を示している。また、表-3 には、用いた PVA 短繊維の寸法および材料特性値を示している。総ネジ PC 鋼棒の降伏強度は、1,071 MPa である。

本実験における測定項目は、荷重、載荷点変位 (以後、変位) および軸方向鉄筋ひずみであり、それぞれ、静荷重測定用ロードセル、非接触式レーザ変位計およびひずみゲージにより測定している。これらの計測機器からの出力データは、デジタルメモリに一括収録している。また、実験時には、片持ち梁側面のひび割れ進展状況をデジタルカメラで撮影している。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-2 には、各試験体の荷重-変位関係に関する実験結果を示している。図より、いずれの試験体も荷重 $P = 300$ kN までは、変位の増加とともに荷重がほぼ線形に増大していることが分かる。しかしながら、F0 試験体は $P = 300$ kN 以降で剛性勾配が低下し、 $P = 380$ kN 程度でせん断破壊により荷重が急激に低下している。

PVA 短繊維を $V_f = 1$ % 混入した F1 試験体は、 $P = 300$

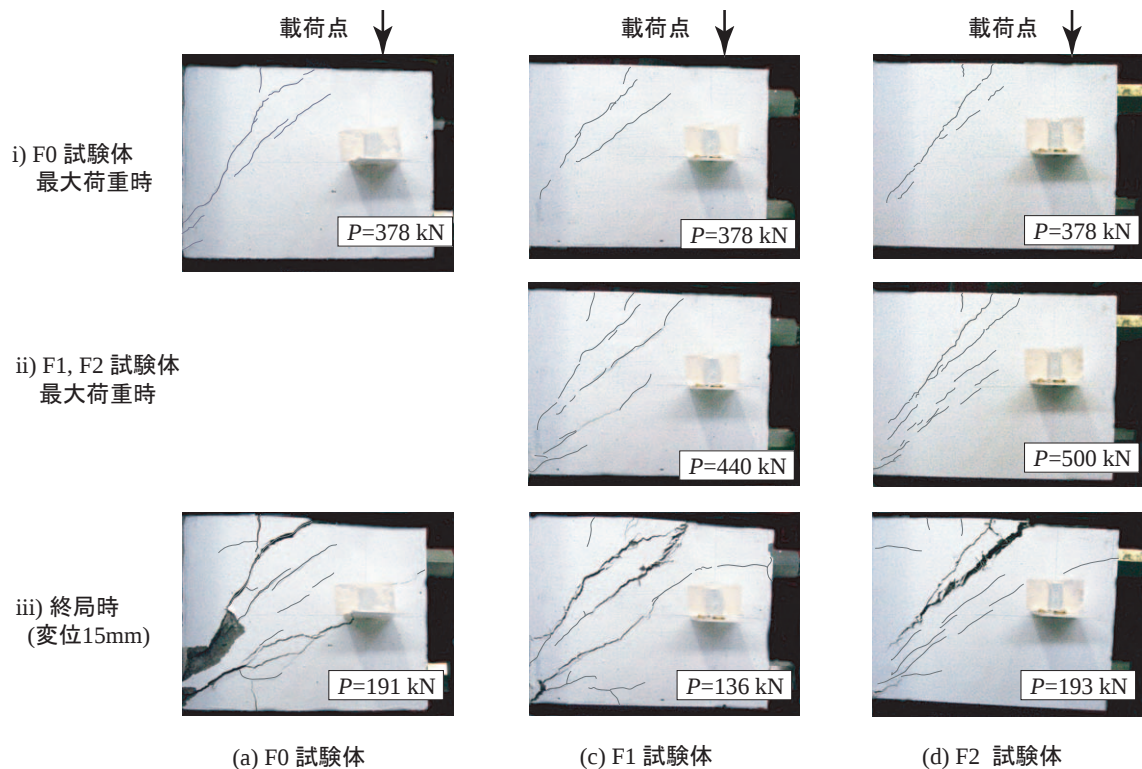


写真-2 各試験体のひび割れ進展状況

kN 以降も剛性勾配は低下せずに、 $P = 440$ kN 程度までほぼ線形に荷重が増大している。その後、変位 δ のみが増大し、 $\delta = 8$ mm 程度で荷重が急激に低下している。また、 $V_f = 2\%$ の F2 試験体は、他の試験体よりも剛性勾配が大きく、荷重 $P = 480$ kN 程度で剛性勾配が低下し、その後 $P = 500$ kN 程度で荷重が急激に低下している。

なお、短繊維を混入した F1/2 試験体の場合には、荷重低下時の勾配は、F0 試験体の場合よりも緩やかである。これは、せん断ひび割れの急激な開口を短繊維が抑制していることによるものである。実験においては、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た。

3.2 破壊性状

写真-2 には、各試験体の最大荷重時および終局時におけるひび割れ分布性状を示している。なお、F0 試験体は他の試験体よりも小さな荷重でせん断破壊により終局に至っていることから、F0 試験体の最大荷重時 ($P = 378$ kN) における各試験体のひび割れ分布性状についても比較して示している。また、終局時としては、各試験体のひび割れの開口が顕著となる変位 15 mm 時の状況を示した。

写真より、F0 試験体の最大荷重時には、いずれの試験体においても載荷部の鋼製プレート端部からフーチング側に向かって斜め下方にひび割れが発生していることが分かる。なお、ひび割れ幅は、短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど、小さくなる傾向にあることを確認している。

次に、F1 および F2 試験体の最大荷重時のひび割れ性状を見ると、いずれの試験体においても F0 試験体の最大荷重時よりもひび割れ幅が大きく、斜めひび割れの本数も多くなっていることが分かる。なお、F1 試験体よりも F2 試験体の方が、ひび割れ幅が狭い。

終局時 (変位 15 mm) の結果より、F0 試験体の場合には、

載荷部とフーチングの間において明瞭なせん断破壊を生じており、片持ち梁下縁のフーチング側ではかぶりコンクリートが剥落している。また、F1 試験体の場合には、載荷部の鋼製プレートの端部からフーチングに向かって発生した 2 本の斜めひび割れが大きく開口している。F2 試験体の場合には、F1 試験体の場合と同様に、載荷部プレート端部から斜めひび割れが発生・開口しているものの、片持ち梁断面の下縁までは到達していない。片持ち梁は、せん断変形よりも曲げ変形に近い変形状を示している。

3.3 せん断耐力向上効果の評価

表-3 には、短繊維混入によるせん断耐力向上効果に関する実験結果を計算結果と比較して示している。せん断耐力の短繊維分担分 V_F は、著者らの既往の研究²⁾を参考に、式 (1) により算定した。

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

ここに、 b : ウェブ幅、 $z = d / 1.15$ 、 d : 有効高さ、 θ : 斜めひび割れの角度、 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、残存引張強度 f_r は、短繊維混入コンクリートの一軸引張試験結果に基づき、ひび割れ発生後に短繊維が保持する引張強度と定義して求めたものである。また、斜めひび割れの角度 θ は、写真-2 を参考に 45° とした。表-4 より、実測耐力は計算せん断耐力を 3 ~ 6 割程度上回っていることが分かる。

ここで、表-4 に示されている計算せん断耐力のコンクリート分担分 V_c は、コンクリート標準示方書によるディープビームに対応した計算値であるのに対し、短繊維分担分 V_F は著者らの研究によるせん断スパン比 $a/d = 4.0$ 程度の RC 梁の静荷重実験結果²⁾に基づいた提案式により算出

表-4 短繊維分担分 V_F の加算による計算せん断耐力と実測耐力との比較

試験体名	圧縮強度 (MPa)	残存引張強度 f_r (MPa)	計算せん断耐力 (kN)			実測耐力 P_{ue} (kN)	P_{ue}/V_{uc}
			コンクリート分担分 V_c	短繊維分担分 V_F	合計 V_{uc} ($= V_c + V_F$)		
F0	50.8	-	274	-	274	375	1.37
F1	49.5	0.40	271	17	288	439	1.52
F2	48.4	0.91	268	40	307	504	1.64

表-5 短繊維混入による割増し係数 β_F を乗算した計算せん断耐力と実測耐力との比較

試験体名	圧縮強度 (MPa)	σ_{BP} (MPa)	計算せん断耐力 (kN)			実測耐力 P_{ue} (kN)	P_{ue}/V_{uc}
			コンクリート分担分 V_c	β_F	合計 V_{uc} ($= \beta_F \cdot V_c$)		
F0	50.8	-	274	1.00	274	375	1.37
F1	49.5	0.40	271	1.24	335	439	1.31
F2	48.4	0.91	268	1.65	441	504	1.14

された値である。一方、本実験に用いた試験体は、せん断スパン比 $a/d = 1.0$ 程度の RC 片持ち梁であるため、上記の RC 梁の場合とはせん断力に対する耐荷機構が異なり、タイドアーチ的な性状が卓越しているものと考えられる。

伊藤らは、せん断スパン比 a/d が比較的小さく、タイドアーチ的な耐荷機構を示す RC 梁を対象とした実験的研究により、PVA 短繊維のせん断耐力向上効果は a/d が小さい場合ほど効率的に発揮されることを明らかにするとともに、破壊力学の概念に基づいて短繊維混入 RC 部材のせん断耐力の算定式を以下のように提案している⁵⁾。

$$V'_c = \beta_F \cdot V_c \quad (2)$$

$$\beta_F = 1 + 0.2(\sigma_{BP} - \sigma_{BP0})/(d/1000) \quad (3)$$

ここに、 β_F : 短繊維混入によるせん断耐力の割増し係数、 σ_{BP} : 引張軟化曲線における折れ曲がり点の応力、 σ_{BP0} : ベースコンクリートの折れ曲がり点の応力 (0.1 N/mm^2)、 d : 有効高さ、である。

表-5 には、上式に基づいて算定した計算せん断耐力を実測耐力と比較して示している。なお、 β_F の算定において、式 (3) の σ_{BP} は、前述の残存引張強度 f_r と等価であるものとして評価した。表より、計算せん断耐力は PVA 短繊維の混入率が 1 および 2 % の場合でそれぞれ 1.24, 1.65 倍増加しており、表-4 の場合よりもせん断耐力の向上効果が大きく評価され、かつ実測耐力とも対応している。

以上のことから、PVA 短繊維混入によるせん断スパン比の小さい RC 片持ち梁のせん断耐力向上効果は、タイドアーチ的な耐荷機構を想定した算定式により、合理的に評価されることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、PVA 短繊維混入による片持ち RC 梁のせん断耐力向上効果を定量的に評価することを目的に、せん断余裕度の小さい RC 片持ち梁を対象として、そのせん断耐力に及ぼす短繊維混入率の影響を実験的に検討した。本実験により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) PVA 短繊維の混入により、RC 片持ち梁のせん断耐力が向上する。その効果は、短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど大きい。
- 2) PVA 短繊維混入によるせん断スパン比の小さい RC 片持ち梁のせん断耐力向上効果は、タイドアーチ的な耐荷機構を想定した算定式により、合理的に評価される。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 田口史雄, 三上 浩, 栗橋祐介: ビニロン短繊維を混入した RC 梁の耐衝撃性に及ぼす短繊維混入率の影響, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1337-1348, 2004.
- 2) 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報告集, Vol.27, No.1, pp.283-288, 2005.
- 3) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 田口史雄: PVA 短繊維混入による RC 片持ち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.30, No.3, pp.1459-1464, 2008.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.
- 5) 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