

論文 ひび割れ面のせん断伝達特性に基づく PVA 短繊維補強コンクリート梁のせん断耐力評価

松永 たかこ^{*1}・脇坂 文恵^{*2}・鈴木 士郎^{*3}・牧 剛史^{*4}

要旨：繊維補強コンクリートのせん断耐力向上効果が、残存引張強度だけではなくひび割れ幅抑制による骨材のかみ合い作用の増大に起因することに着目し、その効果を定量的に評価することを試みた。ひび割れ幅を一定とした直接せん断試験結果をモデル化し、このモデルを用いて梁部材実験において計測されたひび割れ幅とせん断変位からひび割れ面におけるせん断応力と圧縮応力を算出した。直接引張試験から得られた残存引張強度はひび割れの開口に抵抗する成分として考慮し、斜めひび割れ面における力のつり合いからせん断抵抗力を評価した。繊維混入率が大きいほどかみ合いによるせん断抵抗力が大きくなることが確認できた。

キーワード：PVA 短繊維, せん断耐力, せん断伝達特性, 骨材のかみ合い作用

1. はじめに

繊維補強コンクリートは、コンクリートに繊維を混入することによって靱性を高めた複合材料である。その力学的特徴として、繊維補強コンクリートはひび割れ発生後も引張力を受け持つことや、繊維がひび割れ幅を低減することが挙げられ、それらによってせん断耐力が上昇することは既往の研究により明らかにされている¹⁾。通常の RC 部材に用いられるせん断に対する補強材としてはスターラップが一般的であるが、せん断スパン内に分散して配置することで効果が得られるのであれば、繊維補強コンクリートを使用することで繊維がその代替物となり、結果的に部材内の鉄筋量を減らすことが出来る。

しかし、既往の繊維補強コンクリートのせん断耐力式は、普通コンクリートの耐力に繊維の付加分として残存引張強度をパラメータとする係数を掛け合わせた形式になっているものが多く、それらは精度良く評価出来ているものの補強材としての繊維の効果を表現できているものは少ない。本研究では、このような問題点に着目し、繊維による補強のメカニズムや効果をより定量的に把握して耐力評価することを試みた。

直接せん断試験結果からせん断伝達特性をモデル化する。梁部材実験で計測したひび割れ面における変形状態から応力状態とひび割れ角度を算出し、そこで受け持たれるせん断抵抗力を評価する。

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

PVA 短繊維の体積混入率をパラメータとし、0%, 0.5%, 1.5%の3 ケースで実験を行った。全配合を通して単位粗骨材容積を一定とし、繊維体積分は全て細骨材に置換した。これらの配合は、本研究で行うせん断試験が単位粗骨材量に大きく影響されることに配慮したものである。表-1 に使用した PVA 短繊維の物性値を、表-2 には実験に使用したコンクリートの配合を示す。

2.2 直接せん断試験

断面 150(mm)×300(mm)、長さ 600(mm)、中央の上下にノッチを有する供試体に割裂荷荷によってひび割れを 1 本導入し、荷荷速度 0.05(kN/sec)を目安にせん断荷荷を行った。内部に設置したシースに PC 鋼棒を挿入し、せん断に伴って生じる圧縮応力を計測した。ひび割れ幅は型枠面と打設面、供試体の上下に PI 型変位計を取り付けて計測した。せん断変位は、十分な剛性を持つ鋼板を供試

表-1 PVA 短繊維の物性値

長さ (mm)	直径 (mm)	比重	引張 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)
30	0.66	1.3	800	28

表-2 示方配合

	繊維混入率 (%)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	繊維
Plain	0.0	55	4.5	54.1	183	327	908	832	0.33	—
PVA05	0.5	55		53.8			891			6.5
PVA15	1.5	55		50.8			859			19.5

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境システム工学系専攻

*2 東日本旅客鉄道株式会社

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境システム工学系専攻

*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 准教授

体の片側に接着し、他方に設置したPI型変位計と連結させ、ひび割れた供試体の左右の相対変位を計測した。ひび割れ面に作用する圧縮力は、供試体の両側に設置したロードセルによって計測された値を足し合わせて算出し、せん断力は力のつり合いから、以下の式を用いた(図-2)。

$$Q = \frac{L-A}{L+A} P \quad (2)$$

ここで、 Q ：せん断力、 P ：載荷荷重($P_1 + P_2$)。ただし、 $P_1 = R_1$ 、 $P_2 = R_2$ を仮定している。

また、ひび割れたコンクリートのひび割れ面でのせん断特性は境界条件に大きく依存することが報告されている。本研究では、以下の2つの境界条件で直接せん断試験を行った。

- (1) ひび割れ幅を制御した場合
- (2) ひび割れ幅の開口を許容した場合

ひび割れ幅を制御した試験のセットアップを図-1に示す。供試体の両側に2つのセンターホールジャッキを設置し圧縮力をかけることによって作用せん断力の増加とともに開口するひび割れをおよそ0.001(mm)の精度で一定値に制御した。またひび割れ幅の開口を許容した試験では、水平方向の載荷は行わずセンターホールロードセルのみを取り付けてせん断載荷によって増加する圧縮力を計測した。

2.3 直接引張試験

せん断試験の供試体からφ50×100(mm)の円柱供試体をコア抜きして作製し、直接引張試験を行った。供試体

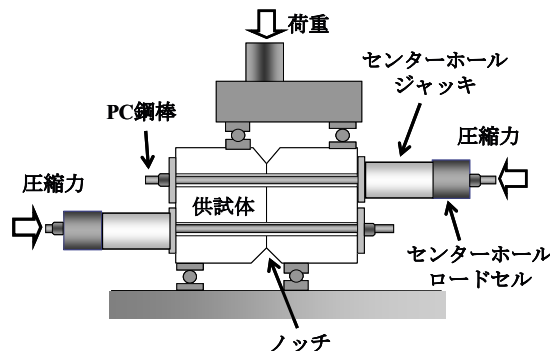


図-1 直接せん断試験セットアップ

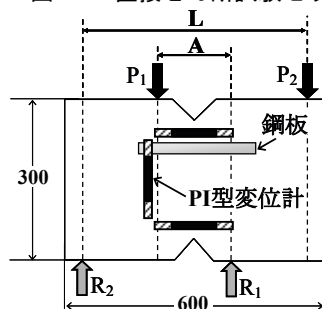


図-2 直接せん断試験供試体概要

中央部にはカッターにより3mm程度の切り欠きを導入し、断面減少させて応力集中を促した。供試体の両側面に切り欠きを跨ぐようにしてPI型変位計を取り付けてひび割れ幅を計測した。また、破壊断面で計測した直径を用いて引張応力を算出した。

供試体の両端面をエポキシ系接着剤で貼り付け、載荷は変位制御のできる万能試験機により載荷速度0.05(mm/min)で行い、載荷終了の目安は残存引張強度がほぼなくなるか、ひび割れ幅がPI型変位計の容量50(mm)に達するまでとした。

2.4 梁部材の載荷試験

図-3に供試体の形状寸法および配筋状況を示す。形状寸法は断面寸法(幅×高さ)150×300(mm)、せん断スパン長480(mm)の1種類とし、繊維混入率のみをパラメータとした。主鉄筋には高強度鉄筋を使用し、さらにせん断スパン内にせん断補強筋は配置せず、繊維を混入した場合でもせん断圧縮破壊するように設計した。材料強度および既往の耐力式によるせん断耐力を表-3に示す。設計耐力は普通コンクリートのディープビームのせん断耐力算定式(1)を用いた²⁾。

$$V_u = 0.244 f'_c{}^{2/3} \left\{ 1 + (100 p_w)^{1/2} \right\} (1 + 3.33 r/d) b_w d / \left\{ 1 + (a/d)^2 \right\} \quad (1)$$

ここに、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(MPa)、 p_w ：鉄筋比、 r ：支圧版の幅(mm)、 d ：有効高さ(mm)、 b_w ：腹部幅(mm)、 a ：せん断スパン長(mm)

載荷は、3000kN油圧式ジャッキによって静的単調2点載荷を行った。計測項目は、荷重および変位に加えて供試体の表面に縦横50(mm)間隔で添付したコンタクトチップによってひび割れ発生後の水平・鉛直方向の相対変位を測定し、ひび割れ幅とせん断変位を算出した(図-4)。また、それらの値から斜めひび割れ角度を計算した。

3. 実験結果

3.1 直接せん断試験

(1) ひび割れ幅を制御した場合

試験により得られたせん断応力-せん断変位関係、圧縮応力-せん断変位関係の一例を図-5に示す。

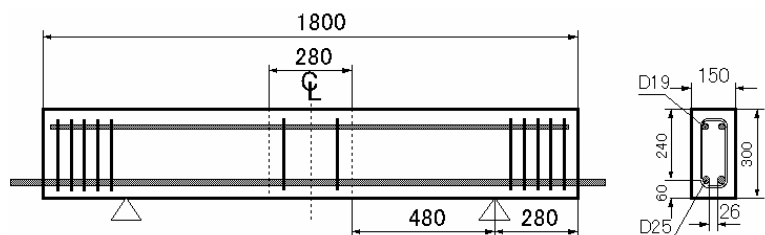


図-3 梁部材供試体概要図

表-3 梁供試体寸法および試験結果

供試体名	供試体寸法			引張側主鉄筋		繊維	結果						
	有効高さ d (mm)	せん断スパン a (mm)	a/d	規格	種類	混入率 Vf (%)	圧縮強度※ f _c (MPa)	残存引張強度※ f _t (MPa)	限界ひび割れ幅※ ω _u (mm)	破壊形式	せん断耐力		
											実験 (kN)	計算 (kN)	実験/計算
Plain	240	480	2	USD 685	D25	0	49.1	—	—	せん断圧縮	300.8	266.2	1.13
PVA05						0.5	42.9	0.56	1.82		342.6	243.3	1.41
PVA15						1.5	45.6	0.84	2.17		367.4	253.3	1.45

※印は供試体3体の平均値を記載

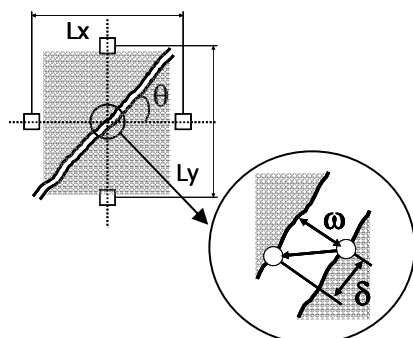


図-4 ひび割れ幅とせん断変位の算定方法

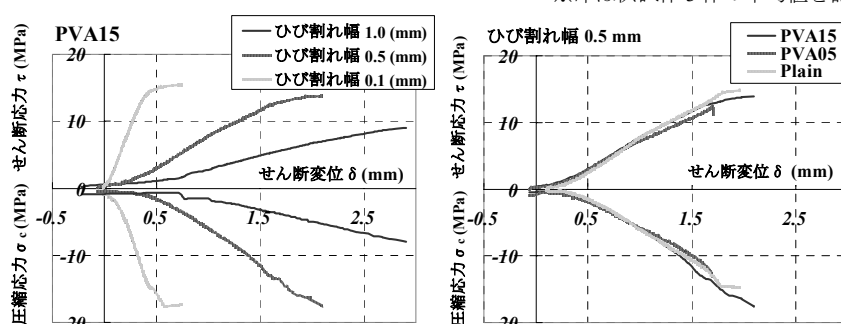


図-5 ひび割れ幅を制御した直接せん断試験結果

同じ配合で制御するひび割れ幅を変化させたケースと比較すると、ひび割れ幅が大きくなるほどせん断強度およびせん断剛性は小さくなる傾向を示した。これは、ひび割れ幅の増加に伴ってひび割れ面での接触面積が減少し、その結果骨材のかみ合いによる伝達せん断応力も小さくなったためであると考えられる。

また、異なる繊維混入率で同一ひび割れ幅のケースと比較すると、すべてがほぼ同一の傾向を示した。よってひび割れ幅が一定に保たれた場合、繊維補強コンクリートのせん断伝達特性は繊維混入率によらず普通コンクリートと同様な傾向を示し、繊維の効果は見られないと言える。

(2) ひび割れ幅の開口を許容した場合

この試験では、せん断応力、せん断変位だけではなく圧縮応力およびひび割れ幅も変化するため、それぞれのピーク値だけで評価することは出来ない。しかし、繊維混入率が大きくなるとせん断応力が大きくなる傾向が見られた(図-6)。ひび割れ幅を制御した直接せん断試験の結果では混入率によらず同様な傾向を示したことから、この試験結果における挙動の違いは、繊維によるひび割れ幅低減効果によってかみ合い作用が増加したために生じたものであると考えられる。

繊維補強コンクリートのせん断耐力向上効果は、繊維による残存引張強度によって評価されてきた。しかし、以上の2つの異なる境界条件下で行ったせん断試験の

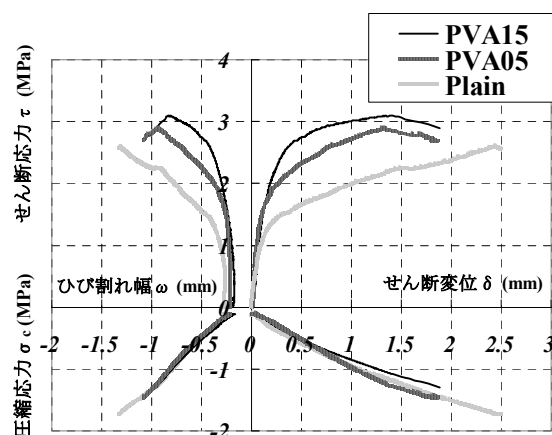


図-6 ひび割れ幅開口を許容したせん断試験結果

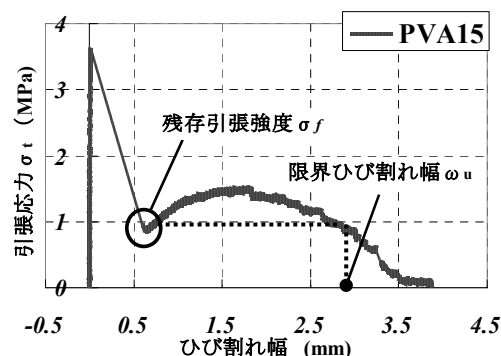


図-7 直接引張試験結果—PVA15

結果は、残存引張強度だけではなく、繊維によるひび割れ幅低減にともなう骨材のかみ合い作用の増加も着目されるべきであることを示唆している。

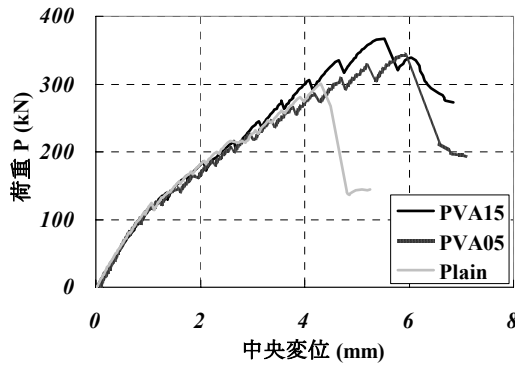


図-8 荷重—変位関係

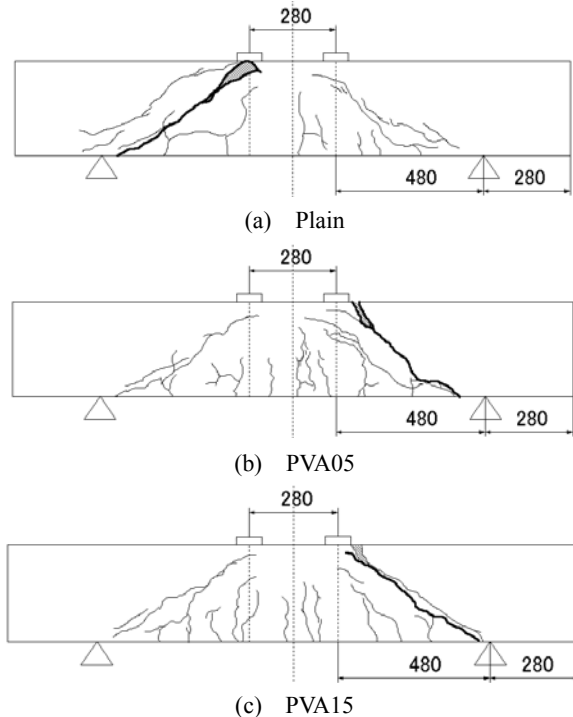


図-9 ひび割れ状況

3.2 直接引張試験

直接引張試験の結果の一例を図-7に示す。繊維補強コンクリートは、引張応力が最大値に到達し、ひび割れが発生してコンクリート自体の引張強度が消失しても繊維の架橋効果により応力を保持する。ここでは引張応力の最大値を引張強度、ひび割れ発生直後の応力を残存引張強度としている。また、限界ひび割れ幅とは繊維が引張応力を受け持つことが出来る限界のひび割れ幅を意味し、引張応力が残存引張強度よりも小さくなるときのひび割れ幅として定義した(表-3)。ひび割れ発生後はコンクリートと繊維の付着力および繊維自体によって引張力が受け持たれ荷重が増加する。荷重が進むと繊維の破断や引き抜けが生じて徐々に荷重が減少する。既往の研究から繊維補強コンクリートはひび割れ発生後、ひび割れが1.5(mm)程度まで引張応力が増加するとされている¹⁾。供試体ごとのばらつきは大きいものの、同様な傾向が確認された。

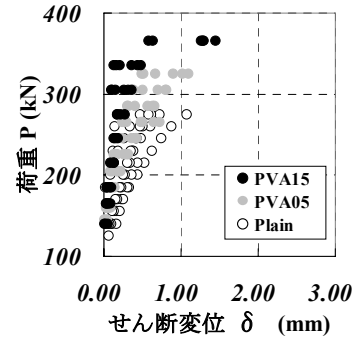
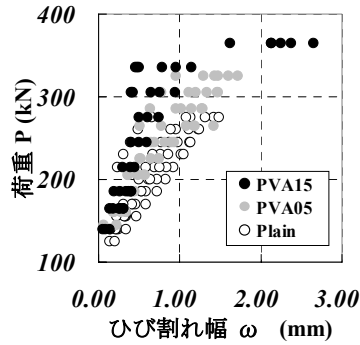


図-10 ひび割れ幅・せん断変位の増加傾向

3.3 梁部材の載荷試験

梁の載荷実験から得られた荷重—変位関係を図-8に示す。コンタクトチップによるひび割れ幅・せん断変位の計測は曲げひび割れ発生後15—25kNごとに荷重を中断して行ったため、載荷途中いくつかのポイントで荷重が減少していることが確認できる。よって本実験ではクリープ変形のために真の耐力よりも過小評価している可能性があるということを言及しておく。

荷重—変位関係より、繊維混入率が大きくなると耐力も増加していることがわかる。また、どの供試体も曲げひび割れ発生荷重はほぼ同じであり、100kN付近で傾きが変化している。

図-9に示したひび割れ状況より、繊維を混入することによってひび割れが分散していることが確認できる。繊維混入率を増すごとに載荷点下における曲げひび割れも増え、深いところまで進展している。斜めひび割れ発生領域においてコンタクトチップにより計測したひび割れ幅とせん断変位を繊維混入率ごとにプロットしたものを図-10に示す。斜めひび割れ発生領域は、終局時に破壊に至った斜めひび割れが貫通している領域と定義した。混入率で比較すると、荷重値が同程度のとき、ひび割れ幅およびせん断変位が小さくなる傾向にある。これは繊維がひび割れを分散することによって、破壊に繋がる斜めひび割れ幅を低減するためであると考えられる。

4. ひび割れ面におけるせん断抵抗

4.1 検討要因

繊維を混入することによるせん断耐力の向上は、せん断スパン比が大きく斜め引張破壊する試験体よりも、せん断スパン比が小さくせん断圧縮破壊する試験体に顕著に見られることが、既往の研究より明らかにされている⁴⁾。すなわち、斜めひび割れが発生した後、ひび割れ面において繊維が残存引張強度によって受け持つのではなく、ひび割れ発生後にその幅や進展を抑制すること

によって耐力を向上させているということが考えられる。このことは、前述の直接せん断試験の結果からも示された。そこで本研究においては、既往の研究で主に取り入れられてきた繊維による残存引張強度を直接的なせん断抵抗の要因とせず、骨材のかみ合いを増大させる付加的要因と考えてせん断抵抗を評価した。

4.2 評価方法

評価の流れを図-11に示す。普通コンクリートにおけるひび割れ面でのせん断伝達モデルは既往の研究において提案されており^{5), 6)}、本研究ではこれを参考にして直接せん断試験の結果をモデル化した。このモデルを用いて梁部材実験において計測されたひび割れ幅とせん断変位からある領域内のひび割れ面におけるせん断応力と圧縮応力を算出する。ここで得られる圧縮応力は、変形状態から算出した見かけの圧縮応力であり、実際にはひび割れ面に架橋する繊維自身が負担する応力が考慮されなければならない。この応力は直接引張試験から得られた残存引張強度とし、計測ひび割れ幅が限界ひび割れ幅に達していない範囲で考慮した。せん断応力 τ 、骨材のかみ合いに伴い生じる圧縮応力 σ_c 、繊維が負担する応力 σ_f と計測された斜めひび割れ角度からひび割れ面でのせん断抵抗を求めた。

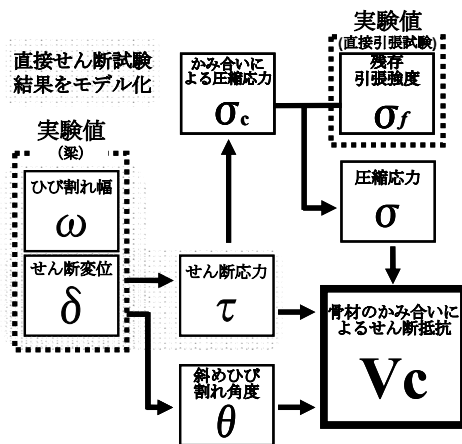


図-11 評価の流れ

4.3 せん断伝達特性のモデル化

ひび割れ面で骨材がかみ合うことによって生じるせん断応力 τ はせん断変位 δ とひび割れ幅 ω の比の関数でモデル化した。図-12にひび割れを0.1mmに制御した場合の直接せん断試験結果とモデルを重ねたグラフを示す。繊維の混入の有無に関わらず概ね良好に整合していることがわかる。以下に用いたモデルを示す。せん断応力と圧縮応力の関係を示した式(5)は既往のモデルから修正していない。

せん断応力 τ

$$\tau = \frac{m\psi^2}{10\omega + \psi^2} \quad (3)$$

$$\psi = \delta/\omega, \quad m = 3.83 f_c'^{1/3} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

圧縮応力 σ

$$\sigma = m \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{m}{\tau} - 1 \right)^{1/2} - \left(\frac{m}{\tau} - 1 \right)^{1/2} \frac{m}{\tau} \right) \quad (5)$$

4.4 せん断抵抗評価

モデルから得られたひび割れ面での骨材のかみ合いによるせん断力と、それと直交する圧縮力からせん断抵抗を算出する。ひび割れ面における力のつり合いは図-13のようになり、水平方向と鉛直方向それぞれの力のつり合いは以下で表される。

$$\sum X = -\tau \cos \theta - \sigma \sin \theta = 0 \quad (5)$$

$$\sum Z = V - (\tau \sin \theta - \sigma \cos \theta) b_w L = 0 \quad (6)$$

$$V = (\tau \sin \theta - \sigma \cos \theta) b_w L \\ = \{ \tau \sin \theta - (\sigma_c - \sigma_f) \cos \theta \} b_w L \quad (7)$$

ここに、 V ：斜めひび割れ面におけるせん断抵抗、 θ ：斜めひび割れ角度、 b_w ：腹部幅、 τ ：ひび割れ面に作用するせん断応力、 σ ：ひび割れ面に作用する圧縮応力、 σ_c ：骨材のかみ合いにより生じる圧縮応力、 σ_f ：繊維が受持つ引張応力（残存引張強度）。ただし、ここでは圧縮縁コンクリートのせん断抵抗や主鉄筋のダウエル抵抗を無視している。

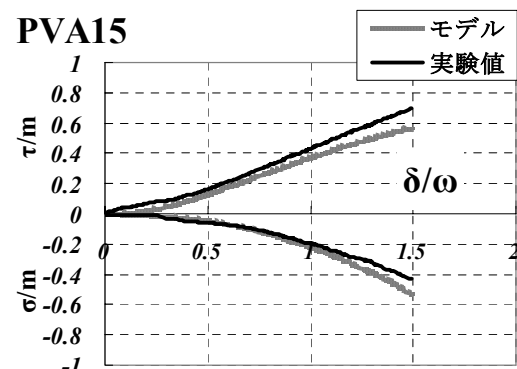
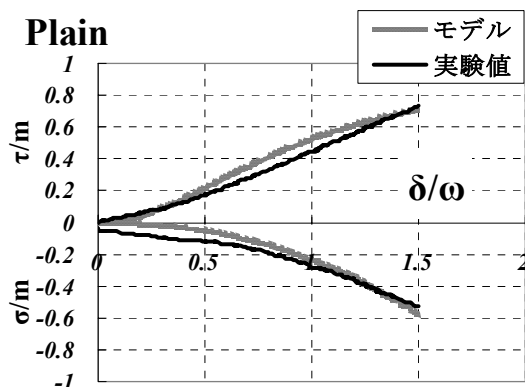


図-12 せん断伝達モデルの検証

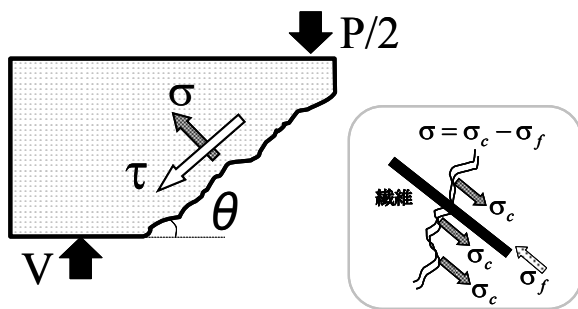


図-13 ひび割れ面における力のつり合い

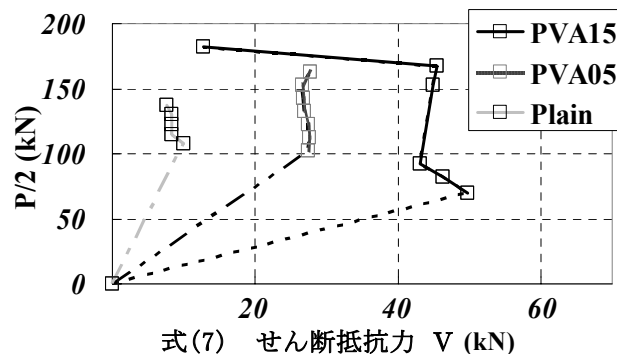


図-14 ひび割れ面でのせん断抵抗

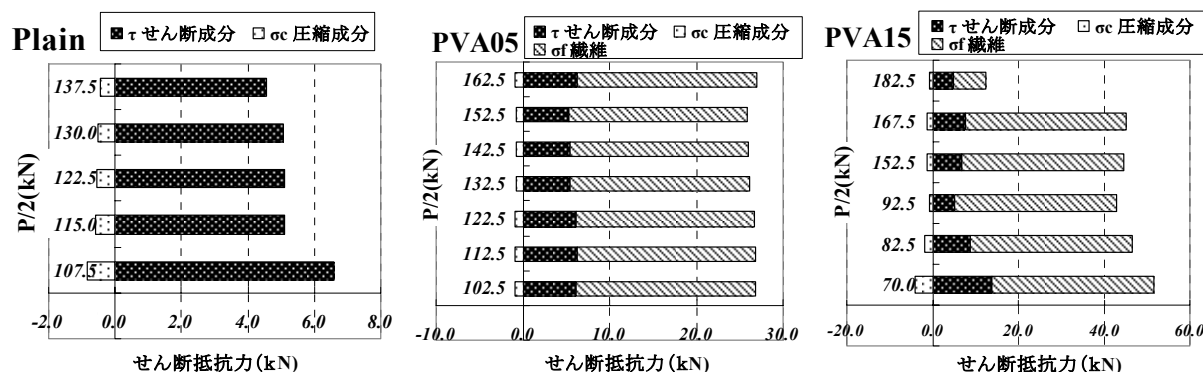


図-15 せん断応力と圧縮応力が受け持つ割合

以上の方法から得られたせん断抵抗を図-14に示す。繊維混入率が大きいほど斜めひび割れ面でのせん断抵抗が大きくなることが確認できる。また、ひび割れ面ではひび割れ発生から終局が近づくまでほぼ一定の荷重を受け持っていることが分かる。また、PVA15のケースにおいてせん断抵抗が急激に減少している点がある。これは、終局直前に計測したひび割れ幅とせん断変位から算出された値であり、このときのひび割れ幅は限界ひび割れ幅以上の値となっていた。よってひび割れ面で受け持つことの出来るせん断力は減少し、作用力がかみ合い以外の抵抗成分へと分配されたと考えられる。

図-14中の各点において、斜めひび割れ面に平行に作用するせん断力 τ と垂直に作用する圧縮力 σ_c 、繊維による残存引張力 σ_f がそれぞれの程度の割合でせん断抵抗を受け持っているかを計算した結果を図-15に表示する。繊維によるひび割れ幅低減効果の寄与分が多いことが確認できる。

5. まとめ

本研究では、繊維補強コンクリートの直接せん断試験結果を用いてせん断伝達特性モデルを提案した。そして直接引張試験の結果と併せて、力のつり合いからひび割れ面におけるせん断抵抗を定量的に評価した。繊維混入率が大きくなると、ひび割れ面での骨材のかみ合い作用

も増加する傾向が確認された。しかし、せん断に抵抗する要因はかみ合い作用の他に圧縮部のせん断抵抗とダウエル作用が挙げられ、これらを個別に抽出して評価することは今後の課題と言える。

参考文献

- 1) 田口史雄ほか：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，vol27，No.1，pp.283-288，2005
- 2) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986
- 3) 児玉亘，大寺一清，二羽淳一郎：短繊維補強されたRCはりのせん断耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol26，No.2，pp.1501-1506，2004
- 4) 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
- 5) Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H.: Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.40, No.1, pp.9-52, 1989
- 6) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991