

論文 ビニル短繊維を混入した鉄筋コンクリート柱のせん断性能

小坂 英生*1・北山 和宏*2・岸田 慎司*3

要旨: ポリビニルアルコール(以下 PVA)短繊維を混入した鉄筋コンクリート(以下 PVA-FRC)部材の基本的なせん断性状を把握するため、柱のせん断加力実験を実施した。PVA 短繊維の混入はかぶりコンクリートの剥落を防止し、ひび割れ幅を抑制し、コアコンクリートを拘束する効果があり、更に、ブリッジング作用によりひび割れ発生後も最大で引張強度の 1/2 程度まで引張力を伝達してせん断耐力の増加に寄与した。

キーワード: 短繊維補強コンクリート、柱、せん断、せん断抵抗機構

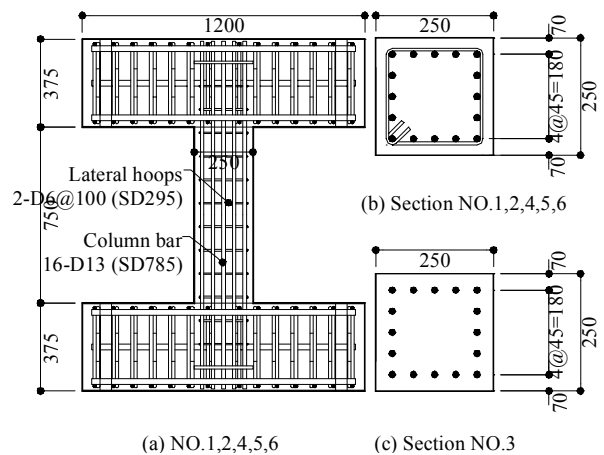
1 はじめに

PVA 短繊維をコンクリートに混入することで有効破壊エネルギー等の各種破壊パラメータは無混入よりも大きくなり、靱性向上に効果があることが確認されており[1,2]、このようなコンクリートを利用した PVA-FRC 部材の開発が期待される。一方で、PVA-FRC と類似した短繊維補強セメント複合材料と呼ばれる材料に関する研究が進み、その靱性に富んだ挙動が明らかにされつつある[3,4]。しかしながら、粗骨材を含む PVA-FRC のような材料の挙動はそれらとは異なるため、本研究では、PVA-FRC 部材の基本的な力学特性および変形性能を把握することを目的とし、柱の曲げせん断加力実験を実施した。実験では、PVA 短繊維混入の有無、コンクリート圧縮強度、横補強筋の有無、軸力、軽量細骨材の使用の有無をパラメータとして、PVA-FRC 部材のせん断性状を明らかにすることを目指す。

2 実験計画

2.1 試験体および加力方法

図-1 に試験体形状、表-1 に試験体一覧を示す。試験体は実大の約 1/3 スケールを想定した正方形柱とし、柱せいが 250mm、せん断スパンは 375mm ($a/D=1.5$)とした。主筋および横補強筋の配筋は、全ての試験体においてせん断破壊先行型の破壊モードとなるように決定した。表-2 に使用コンクリ



(a) NO.1,2,4,5,6 (c) Section NO.3

図-1 試験体配筋図

表-1 試験体一覧

試験体 No.		1	2	3	4	5	6
コンクリート	種類	PVA-FRC	PVA-FRC	PVA-FRC	PVA-FRC	RC	PVA-FRLCC
	圧縮強度 [MPa]	39.7	76.8	40.5	40.5	37.1	42.1
	引張強度 [MPa]	3.4	5.0	3.4	3.4	2.8	2.7
	ヤング率 [GPa]	30.0	33.5	29.0	29.0	27.6	16.1
主筋	配筋	16-D13					
	降伏強度 [MPa]	885					
	引張鉄筋比 [%]	1.016					
補強筋	配筋	2-D6@100	-	-	-	2-D6@100	-
	降伏強度 [MPa]	343.4	-	-	-	343.4	-
	補強筋比 [%]	0.260	-	0.000	-	0.260	-
軸力 (圧縮正)	N [kN]	784	735	784	-392	735	833
	軸力比 η	0.32	0.15	0.31	-0.15	0.32	0.32

*1 大成建設株式会社 技術センター 建築技術研究所 工修 (正会員)

*2 東京都立大学大学院助教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

*3 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 博士(工学) (正会員)

ートの調合を示す。使用したコンクリートは F35N、F72N、35N、LF35N の 4 種類である。実験に使用した試験体は、F35N を使用し $P_w=0.26\% \cdot$ 圧縮軸力比（軸力を全柱断面積とコンクリート圧縮強度で除したものを）を 0.32 とした NO.1 を基準試験体として、高強度コンクリート（F72N）を使用した NO.2、せん断補強筋の無い NO.3、引張一定軸力を加えた NO.4、繊維を混入しない普通コンクリート（35N）を使用した NO.5、骨材に軽量細骨材のみを使用した PVA 短繊維補強セメント複合材料（以下 PVA-FRLCC）の NO.6 である。なお、繊維は PVA 短繊維を用い、繊維混入量は体積比で 1% とした。表-3 に PVA 短繊維の特性を示す。

加力には建研式試験装置を用い、パンタグラフで上下スタブを平行に維持することによって逆対称曲げせん断加力した。

2.2 せん断強度の推定

各コンクリートの荷重 - 開口変位関係を図-2 に示す。これは文献[3]に示されており、本研究と同バッチで混練したコンクリートを用いて 100x100 x400 mm の供試体を作成し、その中央部に 50mm の切り欠きをいれ、中央部の荷重と切り欠き部の開口変位との関係を示したものである。RC の供試体では最大荷重後に急激に荷重が低下したが、PVA-FRC の供試体は最大荷重後も最大荷重の 5 割以上の荷重を維持した。一般にコンクリートはひび割れ発生後は引張力を負担しないと考えるが、PVA 繊維を混入することでひび割れ後も引張力を伝達することができる。よって、PVA-FRC 試験体においては既往のせん断強度式を修正する必要

表-2 コンクリート配合表

	35N	F35N	F72N	LF35N
呼び強度 [N/mm ²]	35	35	72	35
粗骨材最大径 [mm]	20	20	20	-
スランプ [cm]	18	5	15	5
空気量 [%]	3.5	3.5	3.5	3.5
水セメント比 [%]	57.0	57.0	29.5	28.0
細骨材比 [%]	50.3	50.3	42.3	-
ビニロン繊維 [%]	0	1	1	1
水 [kg/m ³]	168	168	175	203
セメント [l/m ³]	93	93	187	196
シリカヒューム [l/m ³]	-	-	-	48
細骨材 [l/m ³]	349	349	251	-
粗骨材 [l/m ³]	345	345	342	-
軽量細骨材 [l/m ³]	-	-	-	553
混和材 [%]	1.2	1.5	1.2	1.7

表-3 ポリビニルアルコール短繊維の特性

径	長さ	密度	引張強度	ヤング係数	破断伸び
0.66 mm	30.0 mm	1.3 g/cm ³	880 MPa	29.4 Gpa	6.0 %

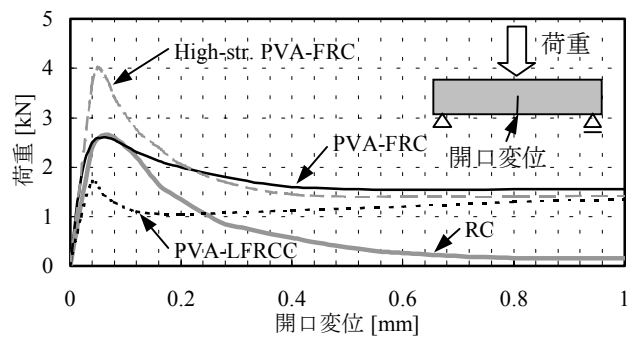


図-2 各コンクリートの荷重 - 開口変位関係

がある。そこで、荒川 mean 式と終局強度指針[5]式の中で補強筋の効果項にコンクリート引張割裂強度の 1/2 を加えて、(1)~(4)式のように修正した。

$$Q_{mean} = \{0.069 p_t^{0.23} (B+18)/(a/D+0.12) + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy} + 0.5 \sigma_{cr}} + 0.1 \sigma_c\} b j \quad \dots (1)$$

$$V_u = V_t + V_a \quad \dots (2)$$

ここに、

$$V_t = b j_r \{ p_w \sigma_{wy} + 0.5 \sigma_{cr} \cos^2 \theta \} \cot \theta \quad \dots (3)$$

$$V_a = \tan \theta (1 - \mu) b D \quad \dots (4)$$

表-4 計算結果一覧

試験体 No.		1	2	3	4	5	6	
曲げ終局強度時せん断力	Q_{mu} [kN]	597	675	599	337	586	597	
せん断強度	終局強度指針式 ^{注1}	V_u [kN]	209	276	177	185	153	209
	荒川mean式 ^{注2}	Q_{bumeam} [kN]	238	447	282	229	203	238

注1 文献[5]式を修正した本文中(2)~(4)式により算出。注2 荒川式を修正した本文中(1)式により算出。

表-5 実験結果一覧

試験体 No.		1	2	3	4	5	6
曲げひび割れ	Q_{mc} [kN]	160	108	159	-	134	143
せん断ひび割れ	Q_{sc} [kN]	246	264	233	-	206	143
部材降伏 ^{注3}	Q_y [kN]	247	294	-	141	223	186
	δ_y [%]	0.77	0.80	-	1.00	0.65	0.50
最大耐力	Q_{max} [kN]	248	300	239	167	225	186
	δ_{max} [%]	0.50	0.85	0.45	1.50	0.50	0.50
限界変形時 ^{注4}	Q_u [kN]	198	240	191	133	180	149
	δ_u [%]	1.30	1.00	0.60	3.00	1.10	1.20

注3 部材降伏は、せん断補強筋が降伏歪みに達し、柱の層せん断力 - 層間変形角関係より剛性が低下する点を明記した。注4 限界変形時耐力は、層せん断力 - 層間変形角関係上で各サイクルの最大荷重を結んだ包絡線より、せん断耐力が最大耐力の80%に低下した時の変形とした。

$$\cot = \min. \{ 2.0, j_i / (D \tan \phi) \},$$

$$\sqrt{v \sigma_B / (p_w \sigma_{wy} + 0.5 \sigma_{cr} \cos^2 \phi) - 1}$$

$$\tan = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$$

$$= \{ (1 + \cot^2) (p_w \sigma_{wy} + 0.5 \sigma_{cr} \cos^2 \phi) \} / B$$

$$= 0.7 - B/200$$

上式中で、 B :コンクリート圧縮強度、 σ_{cr} :コンクリート引張強度、 p_i :引張鉄筋比、 p_w :横補強筋比、 σ_{wy} :横補強筋降伏応力度、 ϕ :柱軸応力度、 α :トラス角度、 β :アーチ角度、 b 、 j 、 j_n 、 D 、 a/D はそれぞれ柱幅、応力中心間距離、主筋間距離、柱せい、シアスパン比である。計算結果を表-4に示す。実験値と計算値の比較は4.3節にて後述する。

3 実験結果

3.1 破壊性状

いずれの試験体も主筋が降伏することなく、引張軸力を導入した PVA-FRC 試験体 (NO.4) はひび割れの増加とともに徐々に横補強筋が降伏し最

大耐力に至ったためせん断引張破壊と判断し、他の5体の試験体はいずれも最大耐力に達すると同時に材端部圧縮域を結ぶ対角線上のせん断ひび割れが発生し、横補強筋も同時に降伏して急激に耐力が低下したことによりせん断斜張力破壊と判断した。表-5に実験結果一覧、図-3に最終的なひび割れ状況を、図-4にP-効果を検討した層せん断力-層間変形角関係を示す。

3.2 ひび割れ状況

PVA短繊維を混入したNo.1,4,6試験体は試験区間全域に渡り多数のひび割れが分散して発生したが、急激に破壊したNo.2,3試験体はひび割れの本数は少なかった。また、RCのNo.5試験体もひび割れの本数は少なく、かぶりコンクリートの剥落が顕著であった。No.1,5,6試験体はまず柱中央部に縦にせん断ひび割れが発生し、上下のヒンジ領域に斜めせん断ひび割れが発生した。引張軸力を導入したNo.4試験体を除く全試験体において、材端部圧縮域を結ぶ対角線上のせん断ひび割れが大きく支配的であった。

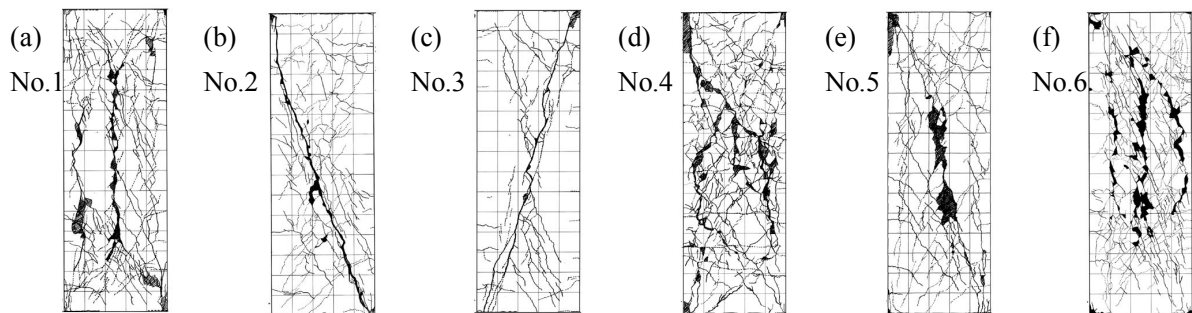


図-3 最終的なひび割れ状況

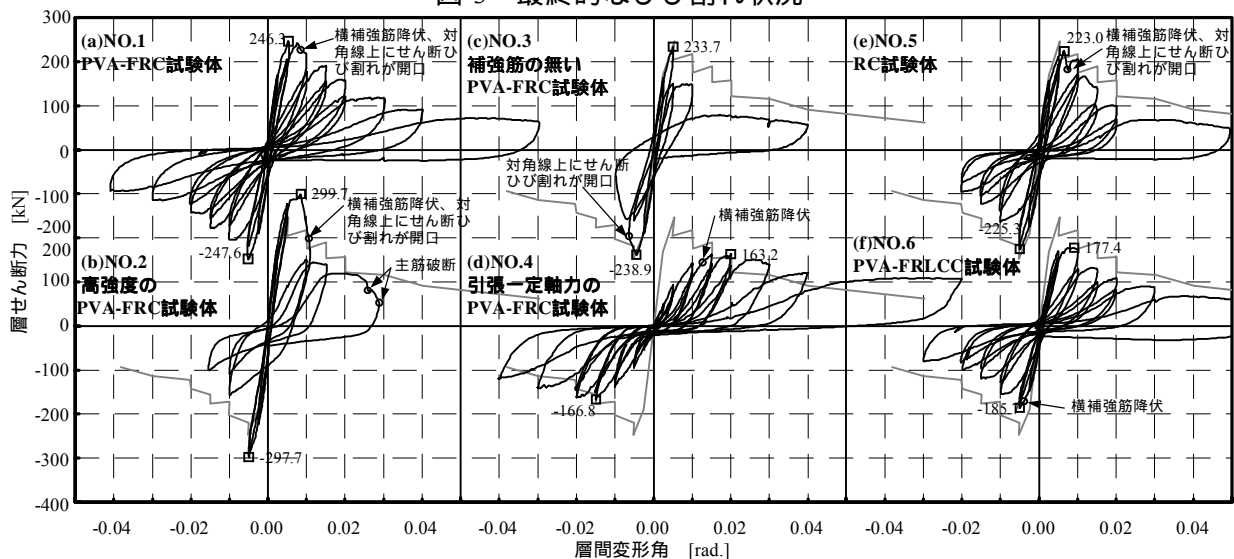


図-4 層せん断力 - 層間変形角関係

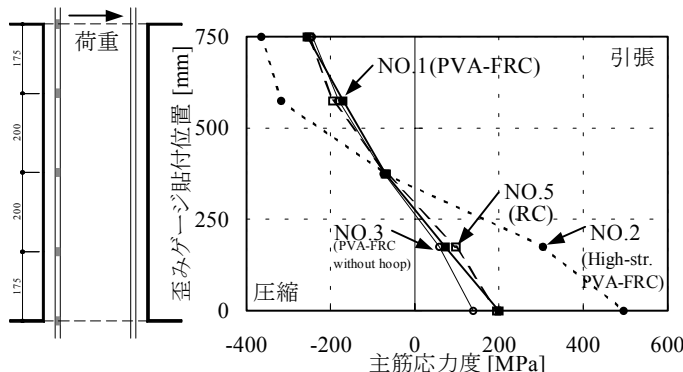


図-5 最大耐力時の主筋応力度分布

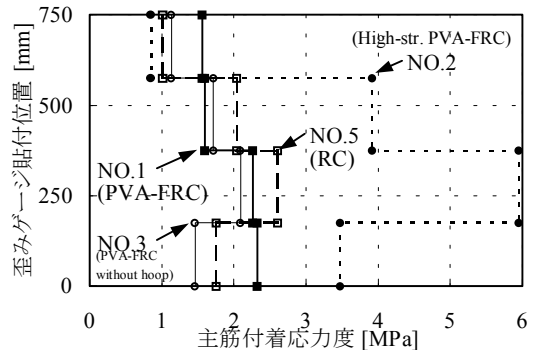


図-6 最大耐力時の付着応力度分布

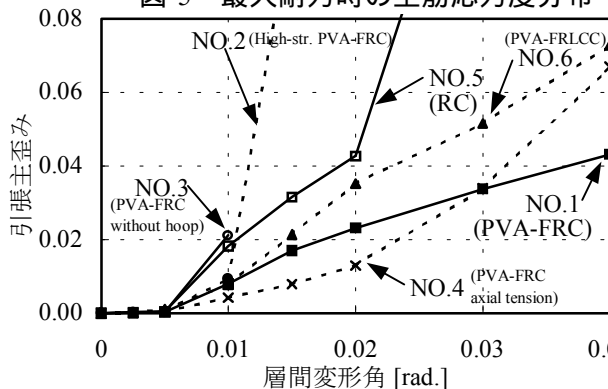


図-7 コンクリート引張主歪み

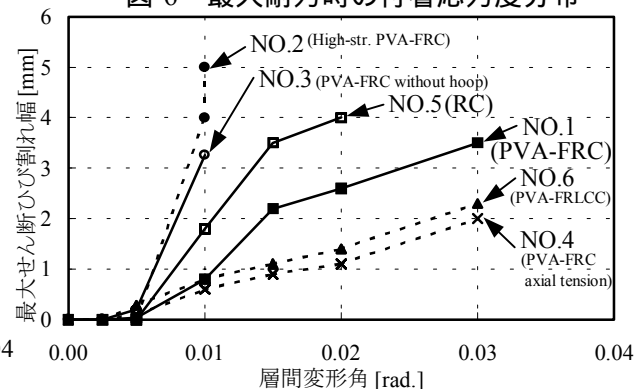


図-8 最大せん断ひび割れ幅

3.3 せん断耐力および変形性能

せん断耐力を比較すると、PVA-FRC の No.1 試験体は RC の No.5 試験体よりも 10 % 上回り、更に、せん断補強筋比 0 % の PVA-FRC の No.3 試験体においてもせん断補強筋比 0.26 % の No.5 試験体を若干上回る結果となった。高強度 PVA-FRC の No.2 試験体のせん断耐力は、No.1 試験体と比べ 21% 増加した。PVA-FRLCC の No.6 試験体は No.5 試験体の 83% のせん断耐力に留まった。また、せん断耐力後の靱性能は、PVA-FRC の No.1 試験体は RC の No.5 試験体と比較して優れていたが、せん断補強筋比 0 % の PVA-FRC の No.3 試験体、および、圧縮基準強度 72 MPa の PVA-FRC の No.2 試験体は非常に脆性的な性状を示した。

3.4 主筋の応力度および付着応力度分布

最大耐力時の主筋の応力度分布および付着応力度分布をそれぞれ図-5、図-6 に示す。主筋は全試験体とも最後まで降伏しなかった。主筋の応力度分布性状において、各試験体に差は見られなかった。付着応力度は No.2 を除く全試験体とも 2~3 MPa に達したが、終局強度指針[5]の解説に示された算定式による付着割裂強度 5.6 MPa を大きく下回った。No.2 試験体は最大で 6 MPa に達し、付着

割裂強度 6.5 MPa に近い値となった。全試験体とも最大耐力時の付着性状は良好に保たれており、大きな差は現れなかった。

3.5 コンクリートの引張主歪み

コンクリートの引張主歪みは試験区間に設置した変位計により算出した。変位計は試験区間を 3 分割し上・中・下区間に設置し測定したが、中区間の各正サイクルピーク時のコンクリート引張主歪み推移を図-7 に示す。PVA-FRC の No.1 試験体は最大耐力以降、層間変形角 1% から RC の No.5 試験体に比べて小さく抑えられた。No.4 と No.6 試験体も No.5 試験体に比べて小さく抑えられた。No.2 と No.3 試験体は最大耐力以降に急激にコンクリート引張主歪みが増加した。

3.6 最大ひび割れ幅

各正サイクルピーク時の最大せん断ひび割れ幅の推移を図-8 に示す。PVA-FRC の No.1 試験体は最大耐力以降、層間変形角 1% から RC の No.5 試験体に比べて小さく抑えられた。No.2 と No.3 試験体は最大耐力以降に急激にひび割れ幅が増大した。それに対し、No.4 と No.6 試験体はひび割れ幅は小さく抑えられた。

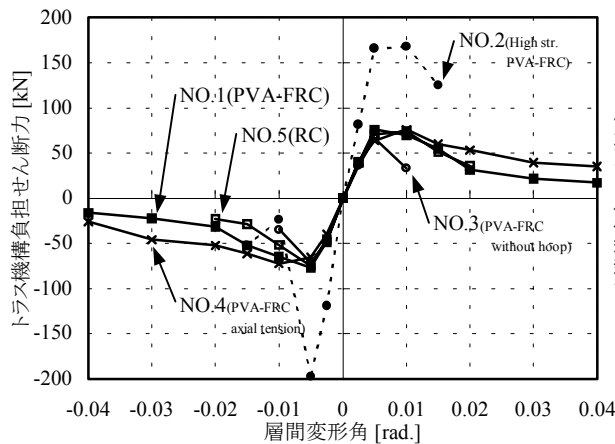


図-9 トラス機構の負担せん断力

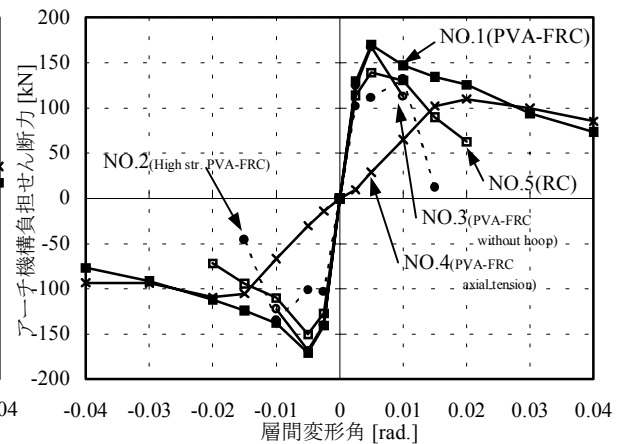


図-10 アーチ機構の負担せん断力

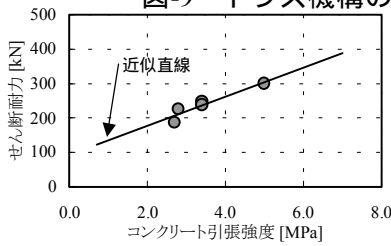


図-11 せん断耐力 - コンクリート引張強度関係

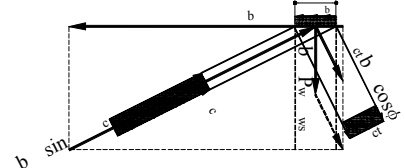
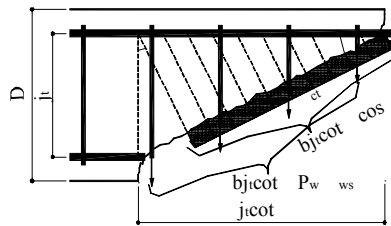


図-12 コンクリート引張力を含むトラス機構

4 実験結果の検討

4.1 せん断抵抗機構の検討

平均付着応力度から(5)式および(6)式により算出されるトラス機構およびアーチ機構の負担せん断力の各サイクルピーク時を結んだ包絡線を図-9、図-10に示す。

$$Q_t = n \cdot b \cdot j_t \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$Q_a = Q_s - Q_t \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 Q_t :トラス機構の負担せん断力、 Q_a :アーチ機構の負担せん断力、 Q_s :実験値、 n :主筋本数、 j :主筋表面積、 b :主筋の平均付着応力度である。各試験体において、トラス機構の負担せん断力に大きな相違は現れなかった。一方、アーチ機構の負担せん断力では、PVA-FRCのNo.1とNo.3試験体がRCのNo.5試験体を上回る結果となった。

4.2 繊維混入の影響

前述したように本実験では引張一定軸力のNo.4試験体を除く5体はせん断斜張力破壊したが、この場合のせん断耐力はコンクリートの引張強度に良く比例する(図-11参照)。 $f_c = 40$ MPa程度のコンクリートにPVA短繊維を体積比で1%混入することで、引張強度を1.2倍高めることができ、最も脆性的な破壊形式であるせん断斜張力破壊の耐力もおよそ1.2倍に高めることができる。

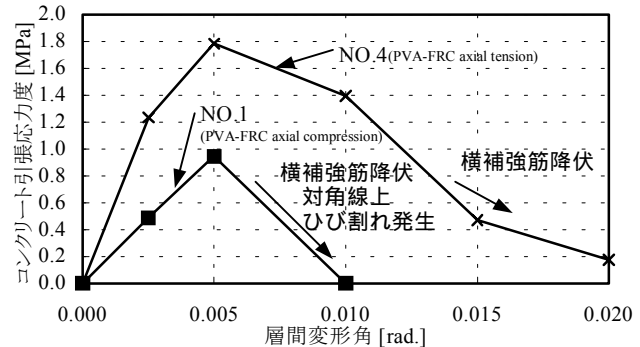


図-13 トラスのコンクリートが負担する引張力

PVA短繊維混入コンクリートのひび割れ後の引張抵抗を含むトラスによるせん断抵抗機構を図-12に示す。図-12によるトラス機構の負担せん断力は、ひび割れ面に平行に圧縮主応力が働くのでそれと直交する方向に引張主応力が作用するとすれば、前述2.2節の(3)式のように理論的に求められる。ここで、(3)式と(5)式によるトラス機構の負担せん断力が等しいとすると、歪みゲージより測定した横補強筋に作用する応力 w_s とトラス角度 α がわかればコンクリートがトラス機構において負担する引張力 $c_t (=0.5 c_r)$ を算出できる。 α をひび割れ角度と同一と考え、ひび割れ図よりNo.1試験体では $\alpha = 26.6$ 度($\cot \alpha = 2.0$)、No.4試験体では $\alpha = 39.8$ 度($\cot \alpha = 1.2$)で変形角に関わらず一定として、トラスのコンクリートが負担する引張力を算出し図-13に示す。PVA-FRCのNo.1

試験体は最大 0.9 MPa、引張一定軸力の No.4 試験体は最大 1.8 MPa の引張力を負担しており、PVA 短繊維のブリッジング作用によりコンクリートひび割れ発生後も最大で引張強度の 1/2 まで伝達した。さらに、両試験体は軸力以外は全く同一の試験体であるが、圧縮軸力を受ける No.1 試験体は層間変形角 0.5% から 1% に至るまでに横補強筋が降伏し、それとともにコンクリートの負担する引張力も急激に減少した。それに対し、No.4 試験体は横補強筋が降伏する 1.5% の変形角までコンクリート引張力を維持し続けた。つまり、ひび割れを介して PVA 短繊維によって伝達される引張力はひび割れが大きく開口するとその能力を失い、横補強筋がひび割れの開口を抑えていると PVA 短繊維の働きは持続することになる。よって、PVA 短繊維は横補強筋と共同でせん断抵抗機構を形成する場合に最大の効果が得られると思われる。

また、PVA-FRC の No.1 試験体は RC の No.5 試験体に比べ最大耐力後のせん断耐力の低下割合が小さく抑えられたことは、ひび割れ幅が抑制されたこと、コンクリート引張主歪みが抑えられたこと、かぶりコンクリートの剥離が防止されたことから判断し、PVA 短繊維によってコアコンクリートを拘束して圧縮強度の低減係数に影響を与えたことによるとと思われる。

4.3 せん断耐力式の適用性

図-14 に終局強度指針式、荒川 mean 式、および、前述 2.2 節に示したそれらを修正した(1)式と(2)~(4)式によるせん断耐力と実験値との比較を示す。計算結果は全般的に実験値を過小評価したが、修正終局強度式では短繊維の影響を考慮したため実験

参考文献

- [1] 大岡督尚、橋高義典、渡部憲：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響、日本建築学会構造系論文集、NO.529、pp.1-6、2000.3
- [2] 神山力、橋高義典、田村雅紀：各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.3、2001.6
- [3] 関田徹志、渡部茂雄、Li, Victor C.：PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による短スパンはりのせん

値に近づいた。しかし、修正荒川 mean 式では過大評価となり高強度の No.2 試験体では実験値の 1.5 倍とな

った。修正終局強度式は概略では一致したが、軸力が考慮されていないことなども含め、高い精度でせん断耐力を予測することは難しい。

5 まとめ

- (1)PVA 短繊維の混入はかぶりコンクリートの剥落を防止し、ひび割れ幅を抑制し、コアコンクリートを拘束する効果があり、その拘束効果によりせん断耐力を増加させることができる。(2)PVA 短繊維のブリッジング作用によりコンクリートひび割れ発生後も最大で引張強度の 1/2 まで伝達でき、せん断耐力の増加に寄与する。(3)PVA 短繊維の混入により最大耐力後の靱性能が改善される。(4)PVA-FRLCC 試験体は RC 試験体の 83% のせん断耐力を保持するに留り、その使用には慎重を期さなければならないが、重量は RC の約 65[%]と軽いことを考慮すると実用化の可能性は充分ある。

謝辞

本研究は文部科学省および日本学術振興会の科学研究費（特定領域研究 B：計画研究代表 壁谷澤寿海東京大学教授、および基盤研究 B：代表者-橋高義典東京都立大学教授）によって実施した。

断挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.3、2000.6

- [4] 松崎育弘、他：高靱性セメント材料の構造物への利用に関する研究（その 6）PVA-ECC を用いた梁部材の曲げ・せん断加力実験（実験概要および実験結果）日本建築学会学術講演梗概集、pp.645-646、1999.9
- [5] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11

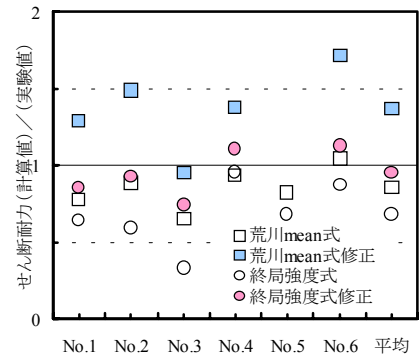


図-14 計算値と実験値の比較