

論文 DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部のせん断性能における繊維種類の影響

山田 大*1・八十島 章*2・佐野 直哉*3・金久保 利之*4

要旨: プレキャスト工法の特徴を活かし、接合部のみに DFRCC を用いた十字形柱梁接合部の接合部せん断強度および構造性能における繊維種類の影響を把握するため、接合部に用いる DFRCC の繊維種類および混入量を変動因子とし、接合部せん断破壊が先行する試験体により加力実験を行った。実験結果より、最大荷重に関して繊維種類の影響が確認された。接合部のひび割れ幅を基に架橋則または一軸引張試験結果を用いて繊維の負担する接合部せん断力を算出し、繊維種類による架橋効果の違いを明らかにした。

キーワード: 柱梁接合部, PCa, 繊維補強セメント複合材料, せん断強度, 繊維負担せん断力, ひび割れ幅

1. はじめに

近年、都心部を中心に大規模な鉄筋コンクリート造建築物の需要が高まっており、施工の合理化を図るため、工場で作製した構造部材を現場で接合するプレキャスト（以下、PCa）工法が多く用いられている。これまでに、柱、梁、接合部のすべてを工場生産としたフル PCa 工法も実用化されつつある。一方、コンクリートの引張性能を向上させる材料として、セメント系材料に長さ 10mm 程度の短繊維を混入させた高靱性繊維補強セメント複合材料（以下、DFRCC）の研究開発が多く機関で行われている。DFRCC は、初期ひび割れ発生後に繊維がひび割れを架橋し、引張力を負担することで引張性能が向上する特長を有している。筆者らは、PCa 工法の打ち分けできる特徴を活かし、接合部のみに DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部の構造実験を行い、接合部せん断強度の上昇を確認した^{2,3)}。さらに、ひび割れ性状に基づき、繊維架橋則を用いることで繊維負担せん断力を評価できることが確認された。

本研究では、DFRCC に用いる繊維の種類（PVA 繊維、鋼繊維）および混入量による構造性能の違いを把握することを目的とし、接合部に使用する繊維を変動させた接合部せん断破壊先行の試験体で構造実験を行い、DFRCC のせん断性能向上効果をひび割れ性状に基づき検討する。

表-1 試験体諸元

試験体名	接合部			梁		柱		
	F_c (MPa)	使用繊維	繊維量 (%)	横補強筋	主筋	横補強筋	主筋	横補強筋
No.24 ³⁾	40	—	0.0	—	18-D22 (USD685)	6-D10@60 (SD785)	16-D22 (USD685)	4-D10@60 (SD785)
No.25 ³⁾		—	1.0					
No.26	PVA 繊維	—	1.0	4-D10×3 (SD295)				
No.27		—	2.0					
No.28		—	1.0					
No.29	—	鋼繊維	2.0	—				

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体諸元を表-1 に、試験体の配筋を図-1 に示す。また、使用した繊維の諸元を表-2 に示す。試験体数は4体であり、既往の研究³⁾の試験体 No.24 を基準試験体とし、梁断面 380mm×420mm、柱断面 500mm×500mm

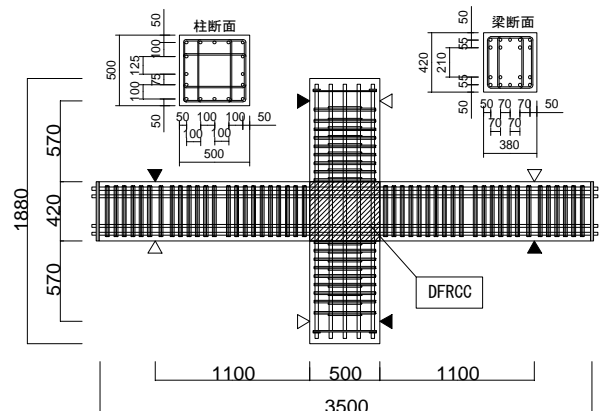


図-1 試験体配筋図

表-2 使用繊維諸元

繊維	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA 繊維	12.0	0.10	1200	28
鋼繊維	13.0	0.16	2830	210

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域助教 博士 (工学) (正会員)

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 大学院生 (学生会員)

*4 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域准教授 博士 (工学) (正会員)

の十字形試験体とした実部材の約 1/2 スケールの試験体で実験を行った。接合部せん断強度の評価を行うために、接合部せん断破壊先行型の試験体を作製し、梁および柱の主筋には USD685、横補強筋には SD785 の高強度鉄筋を用いることで、接合部せん断余裕度を 0.6 程度とした。なお、接合部せん断余裕度は、靱性保証型指針式⁴⁾による接合部せん断耐力を、断面解析により算出した梁曲げ耐力を接合部せん断力に換算した値で除すことで算出した。変動因子は接合部に用いる DFRCC に混入させる繊維の種類および混入量とし、試験体 No.26 および試験体 No.27 はそれぞれ PVA 繊維を体積混入率で 1.0%、2.0% 混入させた試験体であり、試験体 No.28 および試験体 No.29 はそれぞれ鋼繊維を体積混入率で 1.0%、2.0% 混入させた試験体である。試験体 No.26 のみ横補強筋を配筋した。また、比較対象として文献 3) の試験体 No.24 および試験体 No.25 の結果を用いる。なお、試験体の作製を簡略にするために主筋継手やシース管などは用いていない。コンクリートおよび DFRCC の材料試験結果を表-3 に、鉄筋の引張試験結果を表-4 にそれぞれ示す。

2.2 加力・計測方法

試験体の加力は、柱の反曲点位置を油圧ジャッキで支持し、梁の反曲点位置に取り付けたアクチュエータで層間変形を制御して加力を行った。加力サイクルは層間変形角で $R=\pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50, \pm 1/33, \pm 1/25, \pm 1/20\text{rad}$ を各 2 回ずつ行う正負交番漸増繰り返し載荷である。変位計による計測位置を図-2、図-3 に示す。計測項目は梁入力せん断力、柱および梁の各部材変形、各部材の局部変形、主筋の歪である。また、接合部せん断ひび割れを評価するために、2 台の定点カメラを用いて加力中のひび割れ状況を 10 秒毎に撮影した。

3. 実験結果

3.1 梁せん断力-層間変形角関係および破壊状況

試験体 No.24 と各試験体の梁せん断力-層間変形角関係 ($Q-R$ 関係) および試験体 No.28, No.29 が最大耐力に達した層間変形角 $R=1/33\text{rad}$ 時の破壊性状を図-4 に示す。図中には接合部せん断強度時の梁せん断力の計算値⁴⁾も併せて示す。すべての試験体において接合部せん断ひび割れ、梁せん断ひび割れと順次ひび割れが発生した。その後、接合部せん断ひび割れが拡大し、試験体 No.26, No.27 においては層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ 時に、試験体 No.28, No.29 においては層間変形角 $R=1/33\text{rad}$ 時に最大耐力に達した。最大耐力以降においては、すべての試験体において接合部せん断ひび割れの拡大はみられたが、繊維を混入していない

表-3 コンクリートおよび DFRCC 圧縮試験結果

コンクリート種類	試験体名	使用箇所	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
普通	No.24	梁、柱	39.9	3.55	29.6
	No.25		39.1	3.42	28.0
	No.26		54.6	3.71	29.5
	No.27		57.1	3.03	30.5
モルタル	No.24	接合部	50.3	2.55	17.6
DFRCC (PVA 繊維)	No.25		52.5	2.57	17.1
No.26	52.9		-	15.6	
普通	No.27	梁、柱	50.0	-	15.7
	No.28		89.4	5.57	38.4
DFRCC (鋼繊維)	No.29	接合部	88.6	4.42	39.0
	No.28		56.8	-	18.7
	No.29		59.2	-	19.6

表-4 鉄筋引張試験結果

鋼種	呼び名	試験体名	使用箇所	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
USD685	D22	No.24~No.27	主筋	717	899	192
SD785	D10		柱・梁横補強筋	833	991	216
SD295	D10	No.26	接合部横補強筋	346	468	192
USD685	D22	No.28 No.29	主筋	712	898	189
SD785	D10		横補強筋	833	1047	209

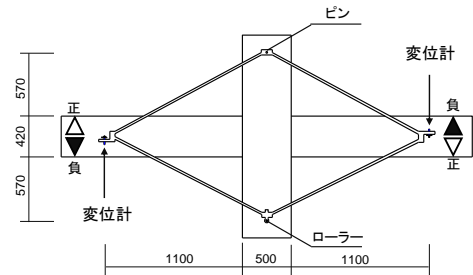


図-2 全体変形の計測

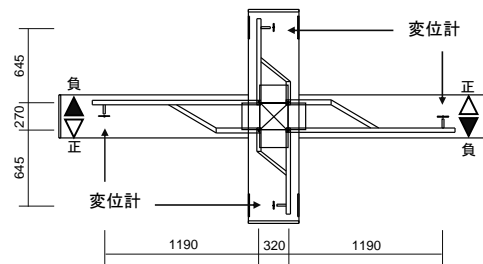


図-3 部材変形の計測

試験体 No.24 と比較すると損傷は軽微であった。

試験体 No.26 と試験体 No.28, 試験体 No.27 と試験体 No.29 を比較すると、PVA 繊維を用いた試験体 No.26, No.27 は、鋼繊維を用いた試験体 No.28, No.29 よりもひび割れ本数が多く、ひび割れ間隔は狭くなり、ひび割れ分散効果が顕著に現れた。また、鋼繊維を用いた試験体 No.28, No.29 のひび割れ発生状況について、変形の小さいときは、接合部せん断ひび割れは目視では確認されず、最大耐力に達する直前にひび割れ幅の拡大が見られた。また、最終的な破壊性状について繊維混入量の影響は確認されなかった。最大荷重に関しては、試験体 No.24 が 389kN、試験体 No.26 が 447kN、

試験体 No.27 が 467kN, 試験体 No.28 が 577kN, 試験体 No.29 が 644kN であり, 全試験体とも接合部せん断破壊が先行する破壊形式であったため, DFRCC 内の繊維がひび割れに架橋し引張力を負担することで, ひび割れの拡大を抑制して有効に働いたことにより, 繊維を混入していない試験体 No.24 よりも最大荷重が上昇したものと考えられる。また, 鋼繊維を用いた試験体は, PVA 繊維を用いた試験体よりも最大荷重が大きくなり, PVA 繊維と鋼繊維では, 繊維の架橋効果が異なると考えられる。

接合部に横補強筋を配筋した試験体 No.26 は, 横補強筋を配筋していない試験体 No.25 (459kN) と比較したところ, 横補強筋の有無による最大耐力の違いは確認されず, 試験体 No.25 と試験体 No.26 の接合部に用いた DFRCC の圧縮強度が同程度であったことから, 横補強筋が DFRCC の接合部せん断強度にあまり影響を与えないことが示唆された。

3.2 各部材変形量

各試験体の全体変形に対する梁, 柱および接合部の変形割合を図-5 に示す。試験体 No.26, No.27 は最大耐力に達する層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ まで接合部の変形が支配的であり, 最大耐力以降, 柱や梁の変形割合が増加した。試験体 No.28, No.29 は変形が進むに伴い, 接合部の変形割合が大きくなる結果となった。試験体 No.26 と試験体 No.28, 試験体 No.27 と試験体 No.29 を比較すると, 鋼繊維を用いた試験体 No.28, No.29 は, 層間変形角 $R=1/67\text{rad}$ まで, 接合部の変形割合が小さくなった。鋼繊維を用いた試験体では, 繊維とマトリクスが一体的に作用し, 接合部全体で抵抗していたため, 接合部のひび割れ進展が抑制されていたと考えられる。

4. 接合部せん断ひび割れ

4.1 接合部の写真撮影方法

接合部せん断ひび割れ性状の評価を行うにあたり, 接合部に $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ のメッシュを描き, 2 台の定点カメラを用いて写真を撮影した。撮影箇所は, 図-6 に示すように接合部中央から左上と右下の 2 箇所とした。なお, 図中にはひび割れ性状評価に用いたひび割れも併せて示している。変形に伴うひび割れ幅拡大の推移を把握するために, 撮影範囲は 1pixel が 0.02mm 相当となる $120\text{mm} \times 80\text{mm}$ とし, 撮影間隔は, 載荷速度(梁端変位で約 $3\text{mm}/\text{分}$)を考慮して 10 秒毎とした。

4.2 ひび割れ評価方法

ひび割れ評価方法を図-7 に示す。接合部に生じたせん断ひび割れ面には, 引張応力とせん断応力が同時に作用する二軸応力状態であると考えられる。引張応

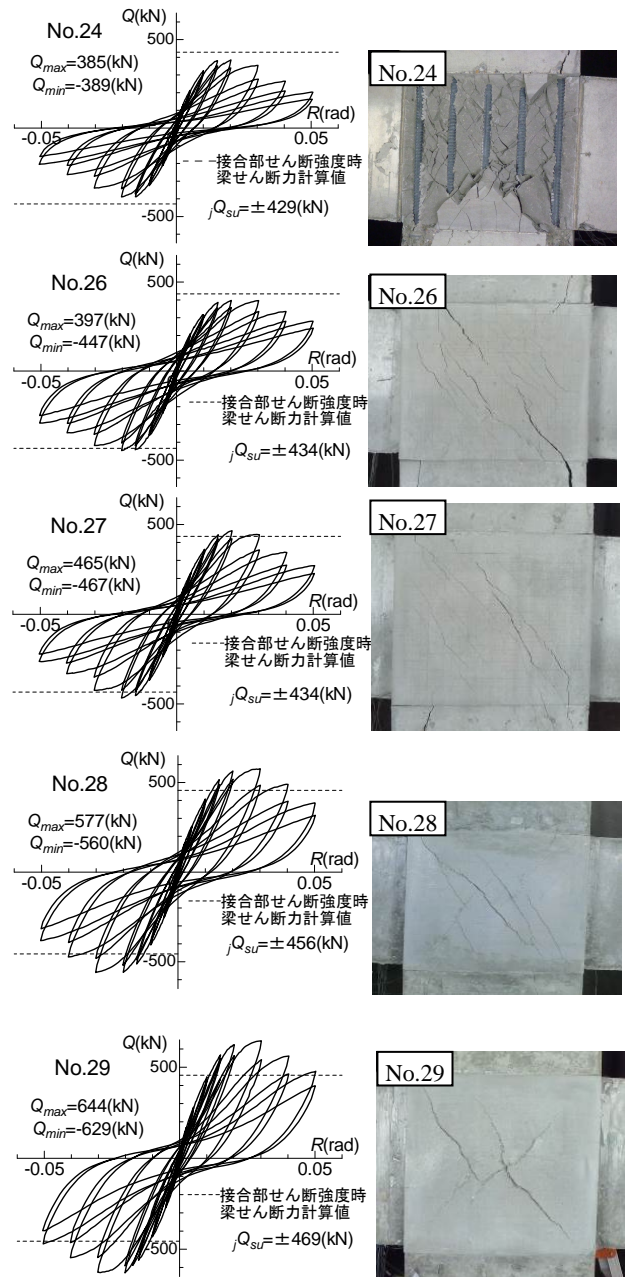


図-4 Q-R 関係および破壊性状 ($R=1/33\text{rad}$ 時)

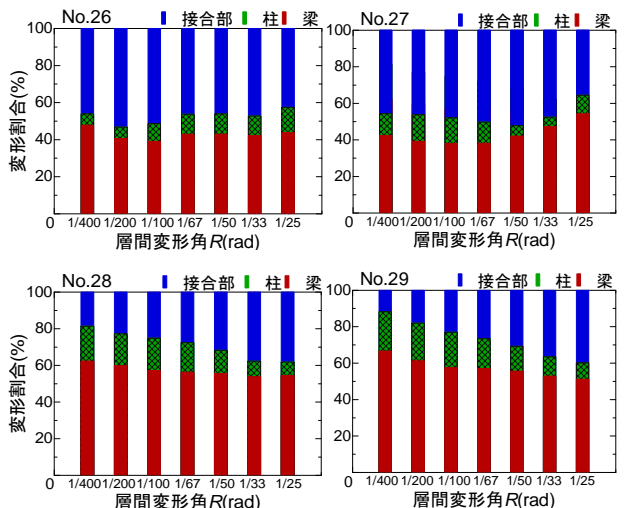


図-5 部材変形量

力が作用したことによる変位をひらき、せん断応力が作用したことによる変位をせん断ずれ（図中の向きを正）とした。ひらきとせん断ずれを考慮した主応力方向の変位をひび割れ幅、主応力方向と水平方向のなす角（反時計回りを正）を主歪角度とした。前節の方法で撮影した画像におけるメッシュの座標を用いることで、ひび割れとメッシュの交点ごとにひらき、せん断ずれ、ひび割れ幅、主歪角度をそれぞれ算出した。

4.3 ひび割れ性状

図-6 に示す各試験体 2 本ずつのひび割れについてひび割れ幅、ひらき、せん断ずれおよび主歪角度の平均値と層間変形角の関係を図-8 に示す。図中のプロットは、各サイクル 1 回目のピーク時の値である。ひび割れ幅は変形が進むに伴い拡大し、試験体 No.26, No.27 では、最大耐力に達した層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ 時において、0.8mm 程度であった。最大耐力以降、さらに拡大し、最大で 4~6mm 程度となった。一方、試験体 No.28, No.29 は、変形が小さい時は、ひび割れ幅は小さかったが、最大耐力に達した層間変形角 $R=1/33\text{rad}$ 時において、急激に拡大し、2~4mm 程度となり、試験体 No.26, No.27 と比較するとかなり大きくなった。その後、さらに拡大し、ひび割れ幅は最大で 8~10mm 程度となった。

ひらきは、層間変形が増加するに伴い拡大し、ひび割れ幅と同様の傾向であった。せん断ずれも、層間変形が増加するに伴い拡大する傾向であったものの、最大耐力に達するまでは、せん断ずれはわずかであり、最大耐力以降において拡大した。

主歪角度は、ひび割れ発生時では 40 度程度であり、変形が進むにつれ増加していくが、最大耐力に達したサイクルから、減少する傾向が見られた。試験体 No.28

と試験体 No.29 を比較すると、大きな違いは見られず、繊維混入量の与える影響はないと考えられる。また、試験体 No.26 は試験体 No.27 よりも主歪角度が小さくなったが、これは、横補強筋の水平方向の拘束効果によるものであると考えられる。

5. DFRCC の接合部せん断補強効果

5.1 繊維負担接合部せん断力の導出

繊維負担せん断力の導出過程を図-9 に示す。前章

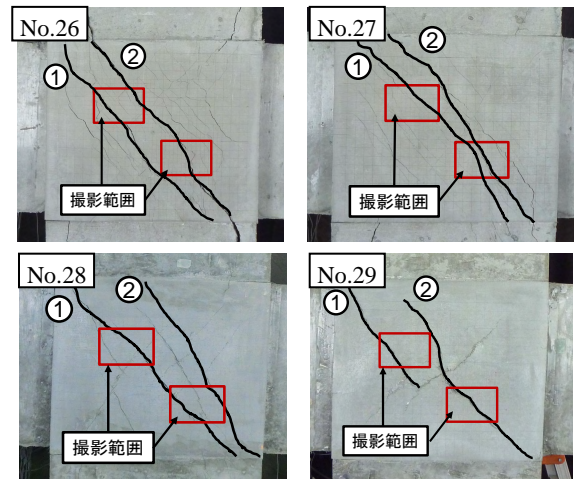


図-6 写真撮影箇所

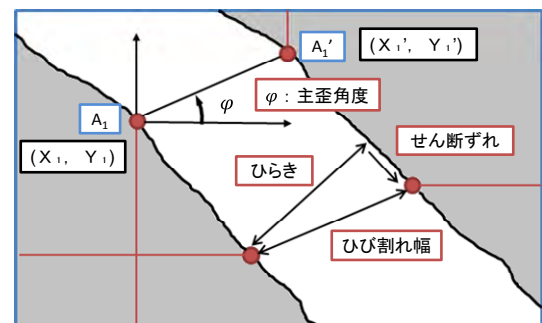


図-7 ひび割れ評価方法

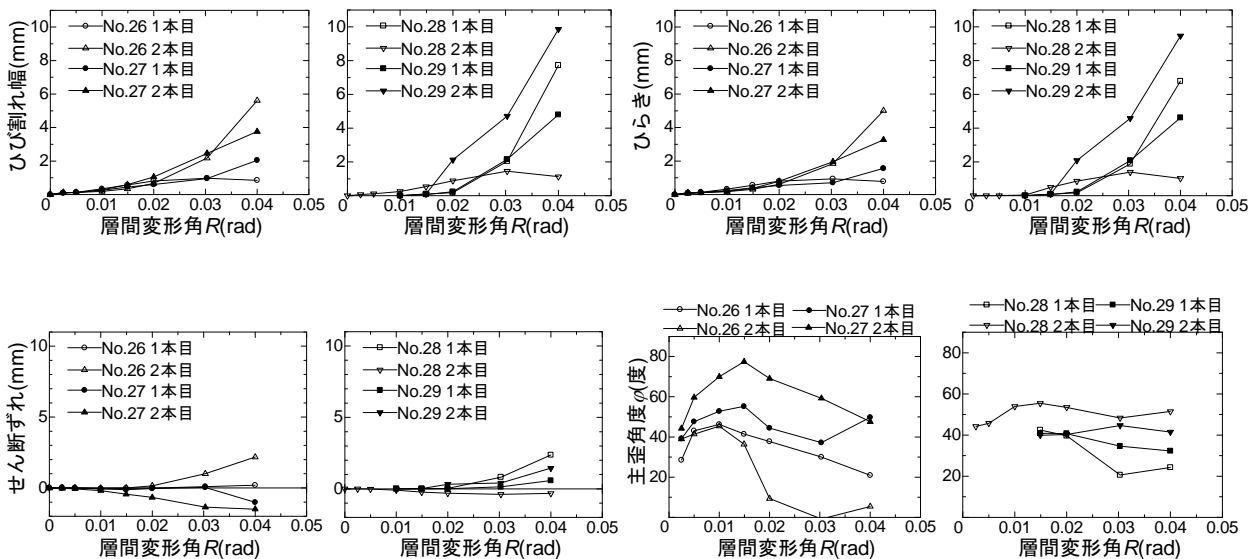


図-8 ひび割れ性状

の方法で算出したひび割れ幅および主歪角度を用いて、接合部せん断ひび割れ面に架橋した繊維が負担する接合部せん断力を導出する。ひび割れとメッシュの交点ごとに求めたひび割れ性状を、1本のひび割れに対して隣接する2点で平均し、その値をその2点間の領域のひび割れ幅および主歪角度として引張応力と引張力を算出した。

DFRCCの繊維が負担する引張応力を、PVA繊維では次節で述べる架橋則⁵⁾により求め、鋼繊維では文献5)および文献6)と同一形状のくびれ型供試体による一軸引張試験の結果により算出した。なお、架橋則の引張応力-ひび割れ幅関係と一軸引張試験の結果は文献5)において良好に対応することが確認されているため、両繊維の算出方法の違いによる影響は小さいと考える。次に、ひび割れ面に作用している引張応力を引張力へと換算する。主応力方向の引張応力は、算出した主歪角度とメッシュを横切るひび割れの長さから、引張応力の作用する長さを求め、柱幅を乗じて引張応力の作用する断面積とし、引張応力に乗じることで主応力方向に作用する繊維の負担する引張力を算出した。

繊維が負担する接合部せん断力は、ひび割れ面に作用する繊維負担引張力の分力として導出した。1本のひび割れに対してメッシュごとに接合部せん断力を算出し、それらを足し合わせることで接合部全体の繊維負担接合部せん断力とした。写真撮影範囲外のひび割れについては、写真撮影範囲内と同様のひび割れが発生していると仮定し、それ以外では撮影画像のひび割れ幅を外挿させ、領域内写真および全体写真における各々のひび割れの長さを考慮し、1本のひび割れに対する繊維の負担する接合部せん断力を算出した。

5.2 架橋則

ひび割れを架橋する繊維の引張力の総和とひび割れ幅の関係は架橋則⁵⁾と呼ばれており、繊維の付着性状、配向角によるスナビング効果、繊維破断強度の低下を考慮し、繊維配向角分布に基づいた単繊維の引抜挙動の総和として次式で提案されている。繊維の配向性は、繊維の配向角分布を示す確率密度関数として表現され、配向強度 k および主配向角 θ による楕円分布が提案されている。文献5)および文献6)を参考にし、くびれ型供試体の繊維配向性を考慮した配向強度($k_{xy}=2, k_{yz}=2.5$)を設定し、引張応力-ひび割れ幅関係の架橋則を計算した。

$$\sigma(\delta) = \frac{V_f}{A_f} \sum_h \sum_i \sum_j P_{ij}(\delta, \psi) p_{xy}(\theta_i) p_{xz}(\phi_j) p_x(y_h, z_h) \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdots (1)$$

ここで、 V_f : 繊維体積混入率、 A_f : 繊維断面積、 ψ : ひび割れ面に対する繊維配向角、 θ, ϕ : 軸方向に平行な面に対して ψ を投影した配向角、 P_{ij} : 単繊維の引抜力、 p_{xy}, p_{xz} : 繊維配向角分布を表す確率密度関数、 p_x : ひび割れ面法線方向の繊維分布を表す確率密度関数

5.3 繊維負担接合部せん断力の比較

DFRCCの繊維が負担する接合部せん断力の差および各サイクルにおけるピーク時の接合部せん断力の差と層間変形角の関係を図-10に示す。図中のひび割れによる計算値の差は、それぞれの試験体に生じている2本のひび割れの繊維負担接合部せん断力の平均値の差であり、PVA繊維を使用した試験体No.25と試験体No.27、鋼繊維を使用した試験体No.28と試験体No.29

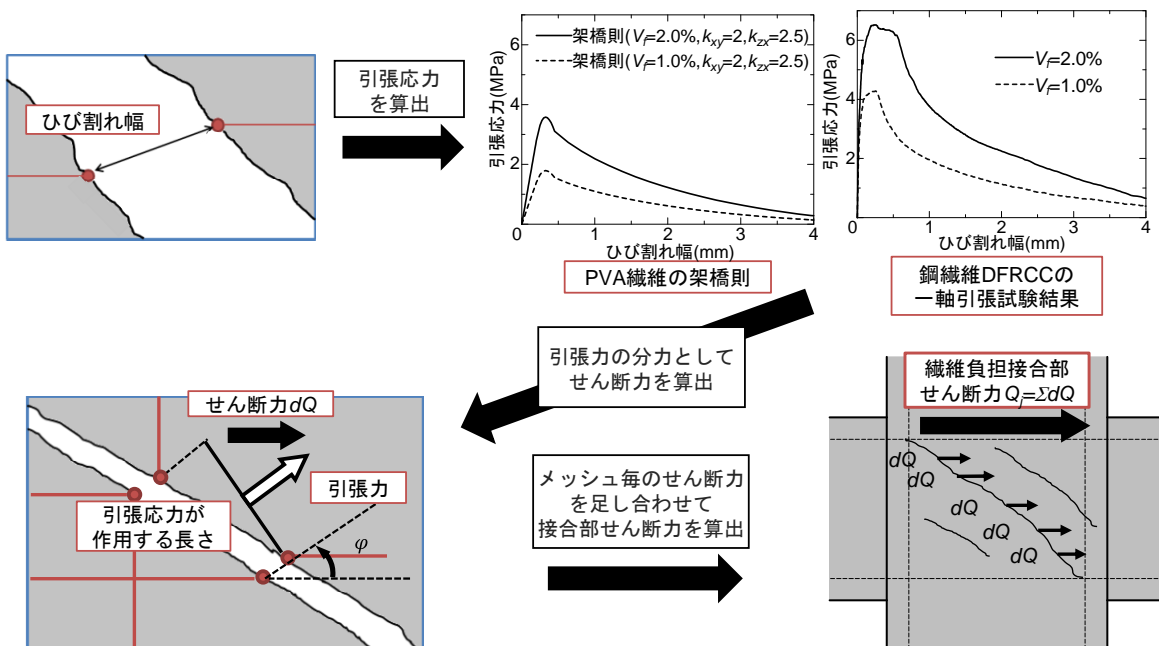


図-9 繊維負担接合部せん断力の導出過程

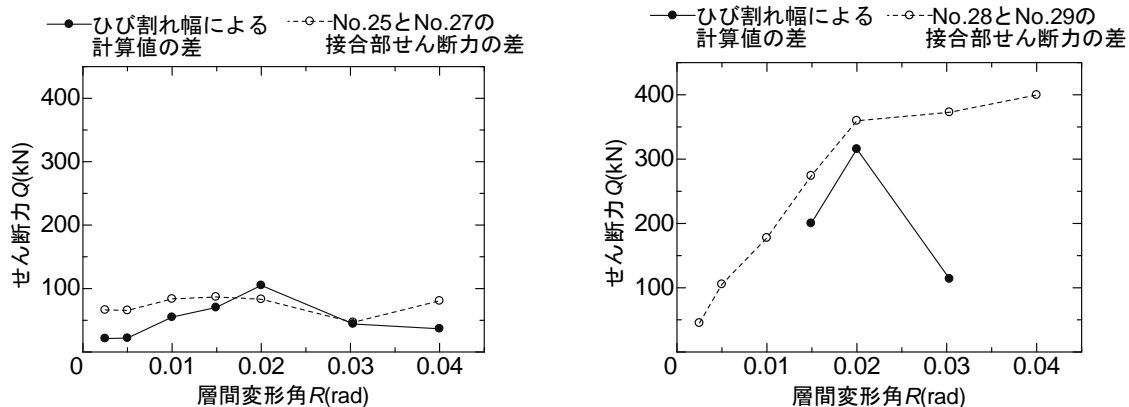


図-10 繊維負担接合部せん断力の比較

(左図：試験体 No. 25 と No. 27 の差の比較，右図：試験体 No. 28 と試験体 No. 29 の差の比較)

における比較である。各試験体における接合部せん断力の差は、正負サイクルにおける接合部せん断力の差の平均値である。また、試験体 No.28 と試験体 No.29 のひび割れによる計算値の差は、試験体 No.29 において、層間変形角 $R=1/67\text{rad}$ 時までひび割れが写真撮影によって観測されなかったことと層間変形角 $R=1/25\text{rad}$ 時にひび割れ幅が急増して算出した引張応力がゼロになったことから、層間変形角 $R=1/67\text{rad}$ ～ $1/33\text{rad}$ までの計算値を示している。

試験体 No.25 と試験体 No.27 の比較においては、ひび割れ幅から算出した繊維負担接合部せん断力の差が、試験体 No.25 と試験体 No.27 の接合部せん断力の差と概ね傾向が一致した。一方、試験体 No.28 と試験体 No.29 の比較において、ひび割れ幅から算出した繊維負担接合部せん断力の差は、層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ 時までは、試験体 No.28 と試験体 No.29 の接合部せん断力の差と同様の傾向を示したが、それ以降において違いが見られた。層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ 以降における繊維種類による対応の違いは、接合部ひび割れの分散性や接合部の拘束効果に起因すると思われる。また、鋼繊維は、繊維が破断しないため、PVA 繊維よりもせん断ずれに対する架橋効果が有効に働くと考えられる。鋼繊維を用いた試験体は、層間変形が小さいときにはせん断ずれが小さく、せん断ずれによるせん断抵抗力はあまり作用せず、層間変形が進行してせん断ずれが大きくなるにつれ、せん断ずれによって繊維のせん断抵抗力が増加したため、層間変形角 $R=1/33\text{rad}$ 以降において、繊維負担接合部せん断力を過小評価したと考えられる。PVA 繊維を用いた試験体では、主応力方向のひび割れ幅と架橋則を用いて繊維負担せん断力を評価できることが示唆されたが、鋼繊維を用いた試験体では、繊維負担せん断力を的確に評価するために、せん断ずれによるひび割れ面に対する繊維負担せん断力や繊維による拘束効果を考慮しなければならないと考えられる。

6. まとめ

本研究では、接合部のみに DFRCC を用いた柱梁接合部の構造実験を行い、繊維の種類および混入量によるせん断性能の影響について検討した。ひび割れ性状に基づき、一軸引張試験結果を用いて繊維の負担する接合部せん断力を算出し、繊維種類による架橋効果の違いを明らかにした。

謝辞

本研究の試験体を作製するにあたり、東京鐵鋼より材料提供のご支援を受けた。本研究は、科学研究助成基金基盤研究 (B) 課題番号 26289188 によっている。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用方法に関するシンポジウム，2012.9
- 2) 佐野直哉ほか：パネルゾーンに DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部の構造性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.419-420，2014.9
- 3) 佐野直哉，八十島章，山田大，金久保利之：接合部に DFRCC を用いた PCa 柱梁接合部の構造性能，コンクリート工学年次論文集，vol.37，No.2，pp.1105-1110，2015
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999.8
- 5) 浅野浩平，金久保利之：高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性を考慮した架橋則に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.185-186，2014.9
- 6) 月崎良一ほか：HFRCC における繊維の配向性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.179-184，2014.9