

論文 アラミド繊維を用いた FRCC ト形柱梁接合部の構造性能

浅山 智*1・八十島 章*2

要旨: アラミド繊維を用いた繊維補強セメント系複合材料 (AFRCC) をパネルゾーンのみを使用したト形柱梁接合部の構造性能を評価するために、接合部せん断破壊が先行するように設計した柱梁接合部試験体の構造実験を行った。実験結果より、繊維の混入によって最大荷重の上昇および損傷抑制効果が確認された。また、AFRCC の一軸引張試験を行い、引張応力とひび割れ幅の関係を把握するとともに、その関係に基づき、接合部のひび割れ幅分布から繊維の負担する接合部せん断力を算出し、繊維混入による接合部せん断補強効果を明らかにした。

キーワード: ト形柱梁接合部, DFRCC, 架橋効果, 繊維負担せん断力, ひび割れ幅

1. はじめに

高靱性繊維補強セメント系複合材料を建築物の適材適所に用いることで、耐震性の向上はもとより、損傷制御性や耐久性の高度化を実現することが可能である。繊維の架橋性能は、使用する繊維種類、径、長さ、配向性によって異なり、期待する性能を必要かつ十分に発揮させるためには、繊維架橋性能の精確な評価に基づき、材料設計から構造性能評価までを含む体系化された最適な設計法の構築が重要である。

本研究では、アラミド繊維を使用した繊維補強セメント系複合材料 (Aramid Fiber-Reinforced Cementitious Composite 以下、AFRCC) によるト形柱梁接合部のせん断性能向上効果と、混入する繊維の寸法による構造性能への影響を把握することを目的とし、接合部せん断破壊先行のト形柱梁接合部試験体による構造実験を行った。また、接合部ひび割れ性状と繊維架橋性能を関連付けるために、AFRCC 一軸引張試験を行い、その結果を用いて繊維の負担する接合部せん断力をひび割れ幅分布に基づき検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の配筋を図-1 に、使用した繊維の物性を表-

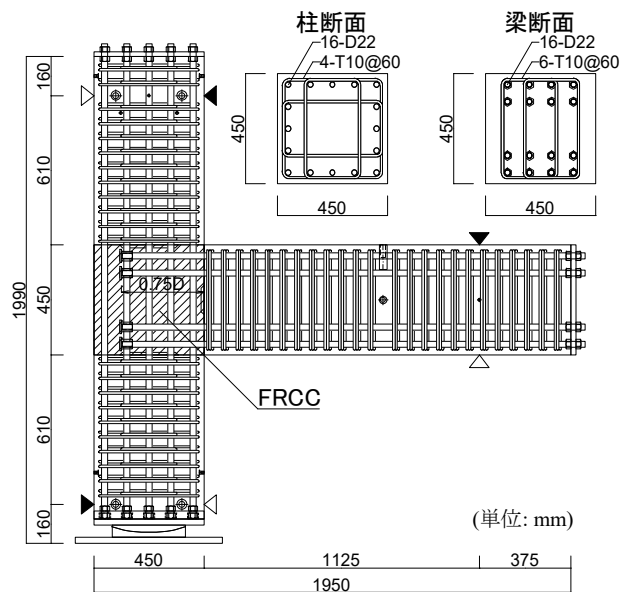


図-1 試験体の配筋

表-1 使用繊維

繊維種類	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
アラミド	500	30.0	3432	73
	12	12.0		

表-2 試験体諸元

試験体名	接合部				柱			梁		
	F_c (MPa)	使用繊維	繊維径 (μm)	繊維体積混入率 (%)	F_c (MPa)	主筋	横補強筋	F_c (MPa)	主筋	横補強筋
No.1	54	—	—	0.0	70	16-D22 (USD685)	6-T10@60 (SPR785)	70	16-D22 (USD685)	4-T10@60 (SPR785)
No.4		アラミド	500	1.0						
No.5			12	0.5						

*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 准教授 博士(工学) (正会員)

1に、試験体諸元を表-2に示す。また、使用した繊維の外観を写真-1に示す。繊維径 500 μm 、繊維長 30.0 mm のアラミド繊維（以下、太径アラミド繊維）と、繊維径 12 μm 、繊維長 12.0 mm のアラミド繊維（以下、細径アラミド繊維）の 2 種類の繊維を使用し、寸法が異なる 2 種類の繊維の物性は同一である。

試験体は、柱断面および梁断面 450mm \times 450mm、梁スパン 2700mm、柱スパン 1670mm とした実部材の 1/2 スケールのト形柱梁接合部である。変動因子は繊維混入の有無および繊維寸法とし、基準試験体の試験体 No.1¹⁾は、繊維を混入していないモルタルの試験体である。試験体 No.4 は太径アラミドを繊維体積混入率 1.0%混入させた試験体であり、試験体 No.5 は細径アラミドを繊維体積混入率 0.5%混入させた試験体である。細径アラミド繊維においては、繊維体積混入率 1.0%とするとワーカビリティおよび繊維分散性が低下するため、繊維体積混入率を 0.5%とした。柱および梁の主筋およびせん断補強筋には高強度鉄筋 (USD685, SPR785) を使用し、柱および梁のコンクリートには高強度コンクリートを用いて接合部せん断破壊が先行するように設計した。接合部の横補強筋については、繊維混入のみによる接合部のせん断補強効果を検討するために配筋していない。梁主筋の接合部内定着は機械式定着とし、定着長さは柱せいの 0.75 倍とした。AFRCC、モルタルおよび高強度コンクリートの圧縮試験結果を表-3に示す。

2.2 加力・計測方法

加力装置を図-2に示す。試験体の加力は、柱の反曲点位置をオイルジャッキで支持し、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载荷した。加力サイクルは層間変形角 $R = \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50, \pm 1/33, \pm 1/25, \pm 1/20 \text{ rad}$ を各 2 回ずつ行う正負交番漸増繰り返し载荷である。また、柱の軸力は一定軸力（軸力比 0.05）とし、载荷速度は層間変形に対して約 0.08mm/sec とした。計測項目は、梁入力せん断力、層間変形、柱および梁の各部材変形、各部材の局所変形、主筋のひずみである。

2.3 ひび割れ幅の測定

接合部の対角方向の斜めストラット付近におけるひび割れ性状を検討するために、接合部に 10mm \times 10mm のメッシュを描き、2400 万画素の定点カメラを用い、载荷速度を考慮して 10 秒ごとに撮影した。ひび割れ幅の写真撮影箇所を写真-2に示す。撮影箇所は、正側加力時の圧縮側入隅部から引張側梁主筋の重心位置へ延びる、接合部内の圧縮ストラット上の 5 箇所とし、各箇所の撮影範囲は 120mm \times 80mm とした。ひび割れとメッシュの交点ごとに、接合部表面でのひび割れ幅および主歪角度をそれぞれ算出した。

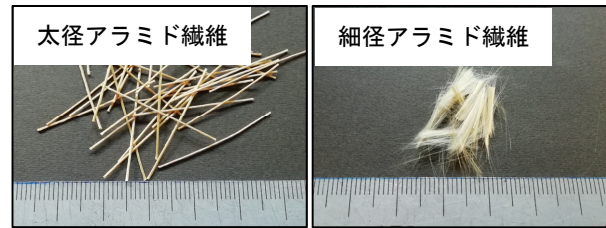


写真-1 使用したアラミド繊維

表-3 AFRCC およびコンクリートの圧縮試験結果

コンクリート種類	試験体名	使用箇所	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
高強度コンクリート	No.1	柱・梁	90.2	31.8
	No.4		74.3	35.2
	No.5		74.3	35.2
モルタル	No.1	接合部	58.0	17.5
AFRCC (太径アラミド繊維)	No.4		62.8	17.1
AFRCC (細径アラミド繊維)	No.5		54.5	17.1

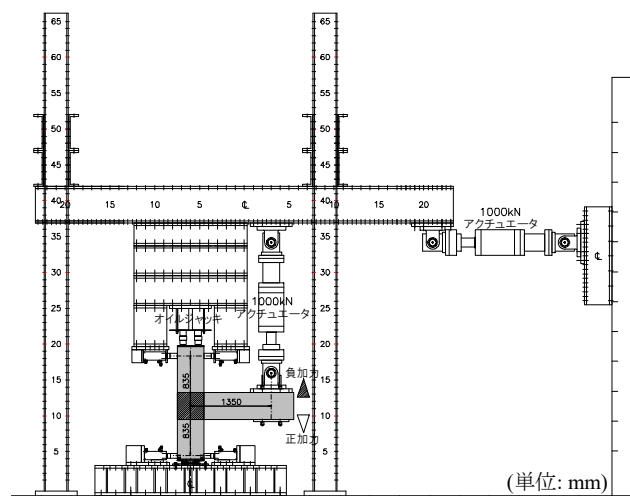


図-2 加力装置

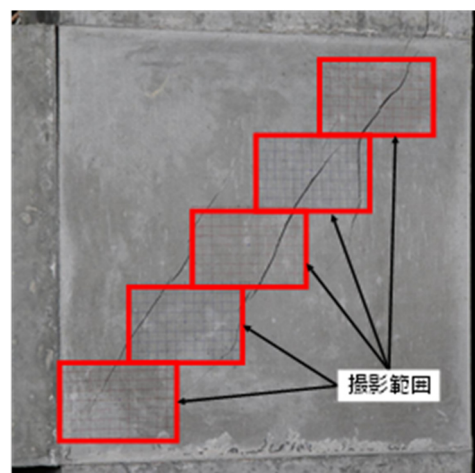


写真-2 写真撮影箇所

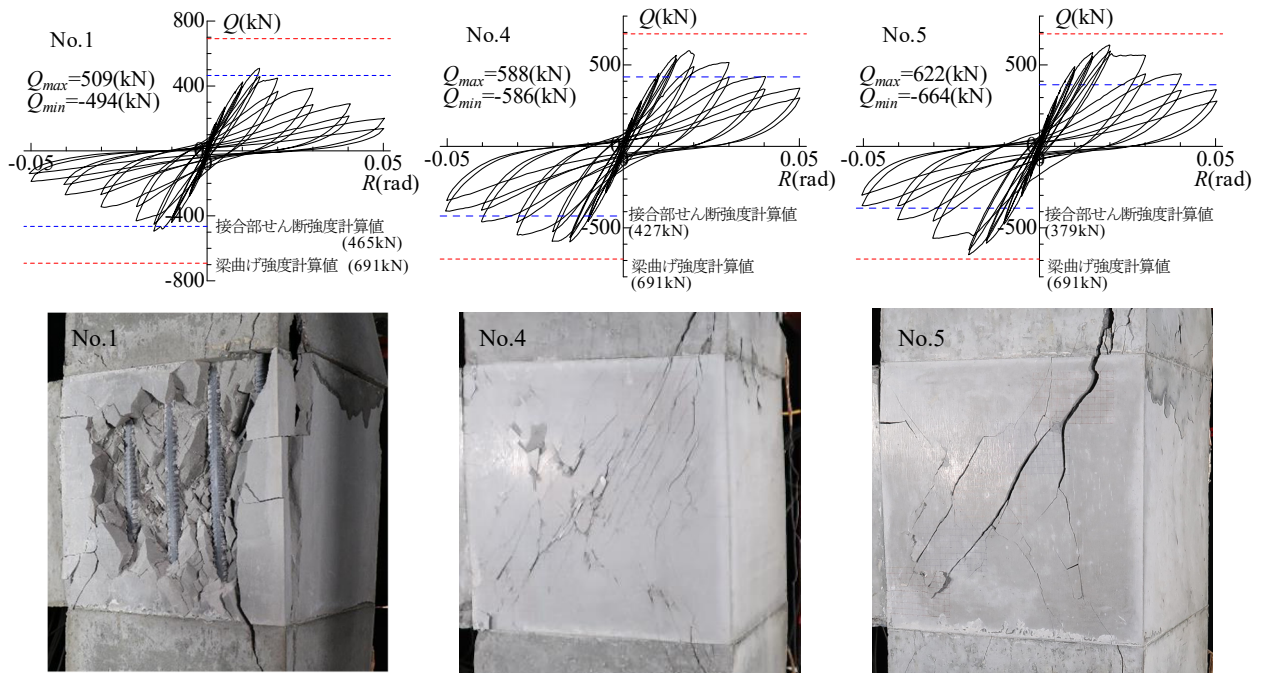


図-3 Q-R 関係および破壊性状 ($R = 1/25$ rad)

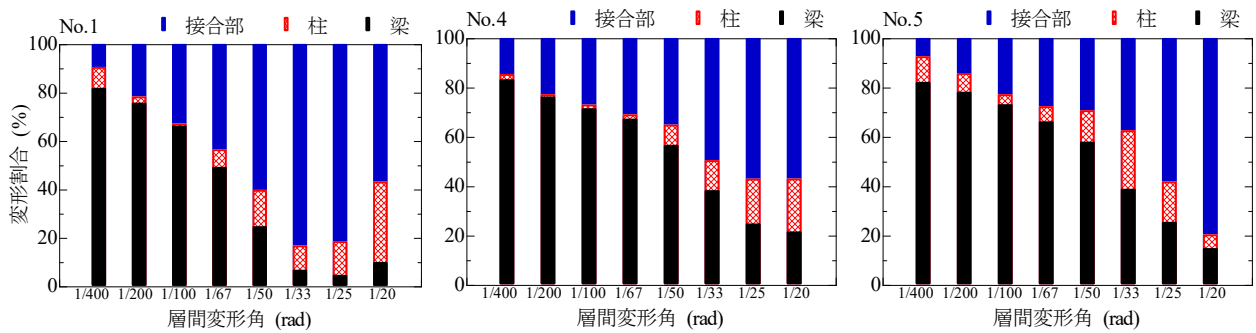


図-4 部材変形量

3. 実験結果

3.1 梁せん断力-層間変形角関係

各試験体の梁せん断力-層間変形角関係および層間変形角 $R=1/25$ rad 時の破壊性状の写真を図-3 に示す。図中には、梁曲げ強度計算値および接合部せん断強度時の梁せん断力の計算値²⁾も示す。また、いずれの試験体においても、接合部せん断ひび割れが先行して損傷した。試験体 No.1 は層間変形角 $R=1/66$ rad 時に、試験体 No.4 および No.5 は層間変形角 $R=1/50$ rad 時に最大耐力に達した。 $R=1/25$ rad において、繊維が混入されていない試験体 No.1 のかぶりコンクリートはほとんど剥落したが、試験体 No.4 および No.5 ではかぶりコンクリートの剥落は軽微であった。試験体 No.4 では、同程度のひび割れ幅が多数平行して発生し、ひび割れ分散効果が確認された。一方、試験体 No.5 では、ひび割れの本数が少なく、そこに損傷が集中し、ひび割れ分散効果は試験体 No.4 と比較して少なかった。

正側の最大荷重は、試験体 No.1 で 509kN、試験体 No.4 で 588kN、試験体 No.5 で 622kN であった。繊維が混入

されていない試験体 No.1 と比較して、パネルゾーンに AFRCC を用いた試験体の最大荷重が向上したことから、繊維がひび割れを架橋して接合部せん断力に寄与したことが確認された。

3.2 各部材変形量

各試験体の全体変形に対する梁の変形量と、柱および接合部の変形量を梁変形量に換算した部材変形割合を図-4 に示す。いずれの試験体においても、層間変形が進むにつれて接合部の変形割合が大きくなる傾向が見られた。なお、試験体 No.1 の層間変形角 $R=1/25$ rad 以降において、接合部の変形割合が減少する挙動が見られたが、パネルゾーンの損傷が甚大になり、かぶりコンクリートが剥落して計測位置がずれたためと考えられる。基準試験体の No.1 と比較すると、試験体 No.4、No.5 の接合部の変形割合は低い傾向となり、AFRCC による接合部の損傷抑制効果が確認された。

3.3 包絡線

各試験体の荷重変形関係の包絡線を図-5 に示す。試験体 No.1 と比較すると、試験体 No.4 および No.5 のい

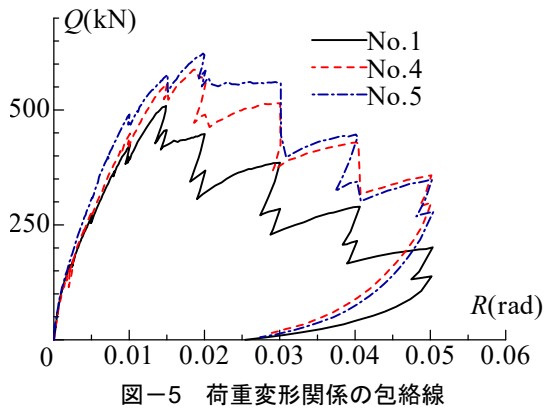


図-5 荷重変形関係の包絡線

れも耐力とそのときの層間変形角の上昇が見られた。また、最大耐力に至るまでの剛性についても上昇が見られた。試験体 No.4 と No.5 で比較すると、全体的に試験体 No.5 の荷重が大きい、層間変形角 $R=1/25$ rad の 2 回目サイクル載荷以降、試験体 No.4 が No.5 を上回った。

4. AFRCRC による接合部せん断補強効果

4.1 一軸引張試験の概要

AFRCRC の引張性能を把握するため、一軸引張試験を行った。使用した繊維種類、繊維体積混入率およびマトリクスの調合はト形柱梁接合部と同一であり、同じバッチから試験体を作製した。試験体の形状寸法を図-6 に示す。試験体は $70\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ の角柱型試験体である。試験体両端のねじ棒を介して引張力を作用させ、試験体中のねじ棒の先端は急激な剛性の変化を避けるため、斜めに加工した。試験体中央部の両側面に幅 3mm 、深さ 20mm の切り欠きを設け、その部分の断面は $70\text{mm} \times 60\text{mm}$ で、断面積は他の部分の 60% になっている。ひび割れ幅は、試験体の裏表に取り付けられた 2 つのパイ型変位計で得られた変位の平均値とした。引張力の増加に伴う二次曲げの影響を抑制するために、一端のネジ棒をユニバーサルジョイントで把持してピン支持し、他端を固定の条件で引張試験を行った。

4.2 一軸引張試験の結果

実験によって得られた応力-ひび割れ幅関係、およびそれらを平均化した曲線を図-7 に示す。いずれの試験体においても、初期ひび割れが発生した後も引張応力が上昇して最大応力に達し、それ以降はひび割れ幅の増大に伴い引張応力が下降する曲線を示した。太径アラミド繊維の試験体は、細径アラミド繊維の試験体と比較して、大きいひび割れ幅においてもある程度応力を保持しており、最大応力後の応力低下が緩やかに下降している。これは、繊維長および繊維径の違いによるものと考えられ、繊維長が長くて太径のアラミド繊維では、ピーク後においても繊維の抜け出しや破断が起こらずに、架橋する繊

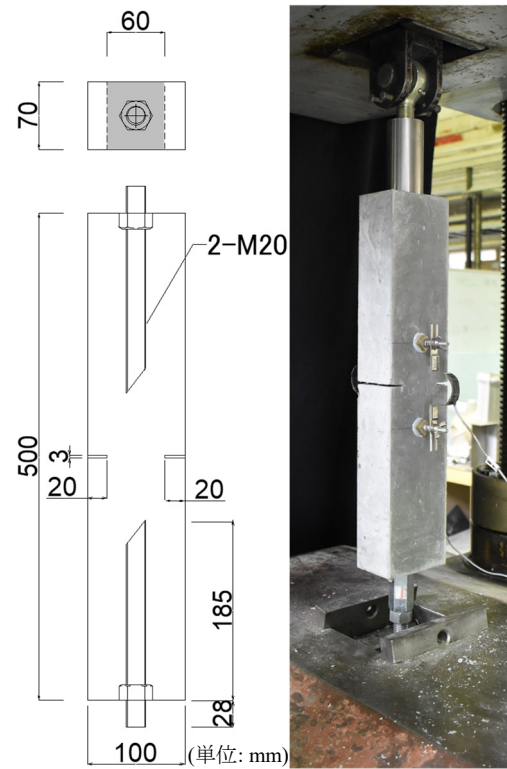


図-6 一軸引張試験体の形状寸法

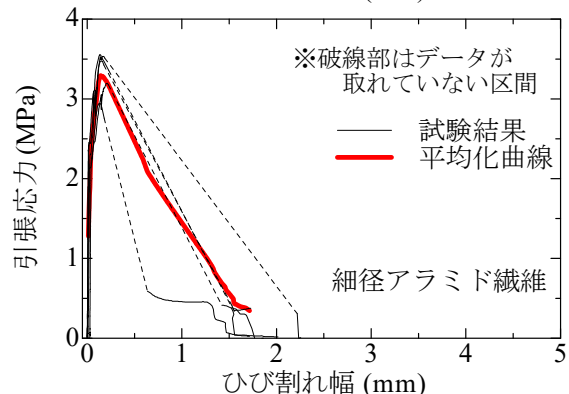
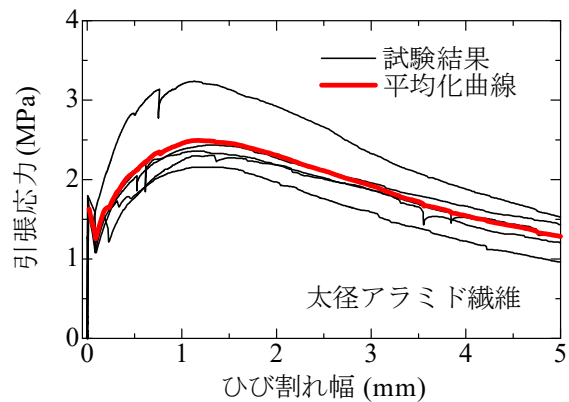


図-7 引張応力-ひび割れ幅関係

維が多く残っているためと考えられる。一方、ひび割れ幅の小さい範囲では、細径アラミド繊維の引張応力が太径アラミド繊維よりも大きくなった。また、太径アラミド繊維の試験体で観察された、ひび割れの発生と同時に一時的に荷重が低下した後に、再びひび割れ幅の増大と

ともに引張応力が上昇していく挙動については、細径アラミドでは見られなかった。細径アラミド繊維の試験体では、引張強度に到達後、ひび割れ幅が急増し、応力が一気に低下した。繊維径 $12\mu\text{m}$ の細径アラミド繊維は、純引張応力下では、ひび割れを架橋する繊維の一部が破断すると、連鎖的に残りの繊維も破断したと考えられる。引張強度の平均値は、太径アラミド繊維の試験体で 2.50MPa 、細径アラミド繊維の試験体で 3.34MPa であった。また、平均化曲線のピーク時ひび割れ幅は、太径アラミド繊維では 1.17mm 、細径アラミドではひび割れ 0.14mm であった。加力終了時における切り欠き部周辺の破壊状態を写真-3 に示す。

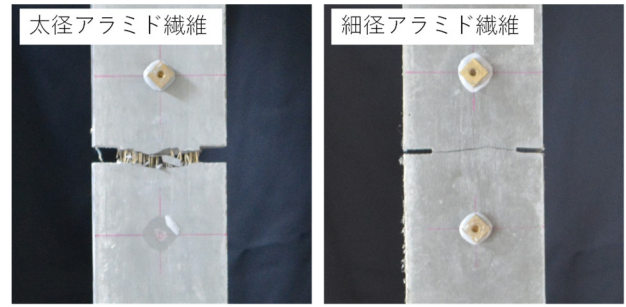


写真-3 一軸引張試験体の破壊状況

4.3 繊維負担接合部せん断力の導出

既往の研究³⁾で提案された手法を用いて、繊維負担せん断力を導出する。導出に用いたひび割れを図-8 に、導出過程の概要を図-9 に示す。画像計測で測定したひび割れ幅の分布と一軸引張試験による引張応力-ひび割れ幅関係を用いて、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。1本のひび割れに対して、メッシュとの交点で求めたひび割れ幅および主歪角度を、次の交点までの領域におけるひび割れ幅および主歪角度とした。これによって得られた各区間のひび割れ幅に、一軸引張試験結果の平均化した引張応力-ひび割れ幅関係を適用することで領域内の引張応力を算出した。領域内の主歪角度および1本のひび割れに対するメッシュとの交点間の距離から、引張応力の作用する長さを求め、これに柱幅を乗じて引張応力の作用する断面積とし、領域ごとに繊維が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引張力の分力とした。そして、ひび割れと

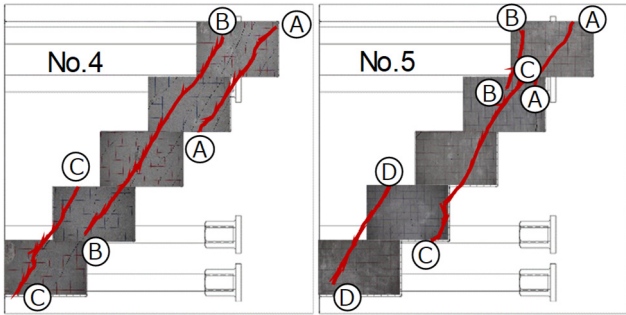


図-8 繊維負担せん断力の導出に用いたひび割れ

メッシュの交点ごとに繊維の負担するせん断力を算出し、それらを総和することで接合部全体における繊維負担接合部せん断力を算出した

4.4 繊維負担接合部せん断力の検討

繊維負担接合部せん断力の算出に用いたひび割れ幅、主歪角度および引張応力の分布を図-10 に示す。最大荷重時における接合部内の圧縮ストラット上にあるひび割れについて繊維負担接合部せん断力を算出し、梁せん断力に換算した計算値と実験値の比較を表-4 に示す。なお、複数本のひび割れが並行して入った場合は、それぞれのひび割れに対して、繊維せん断力成分を圧縮ストラ

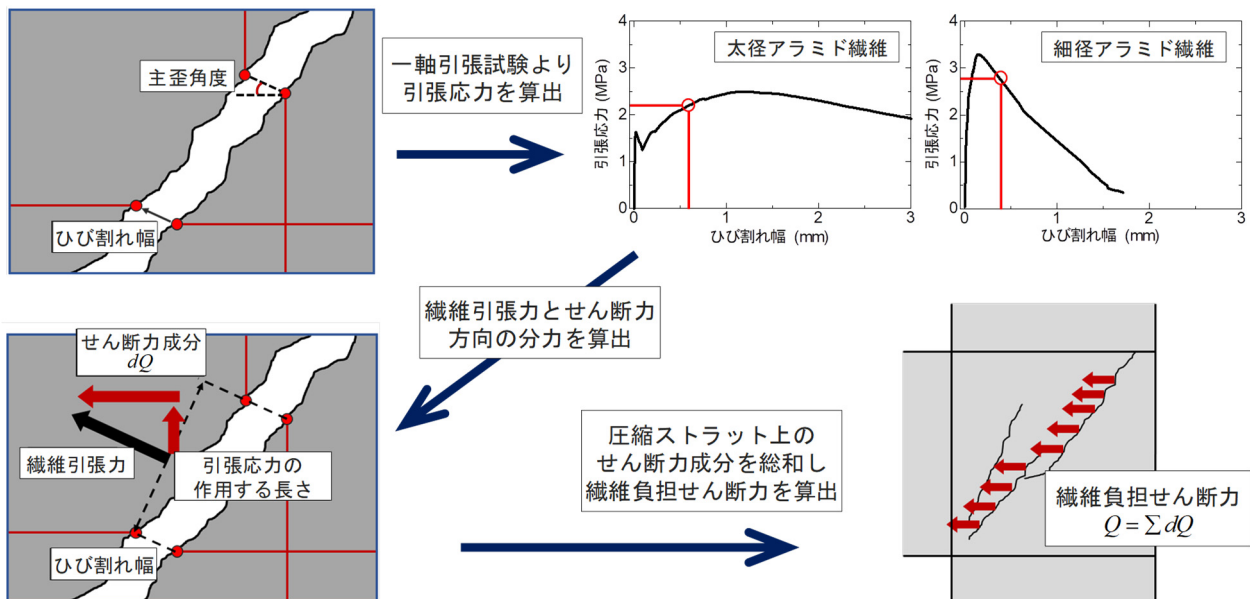


図-9 繊維負担接合部せん断力の導出過程

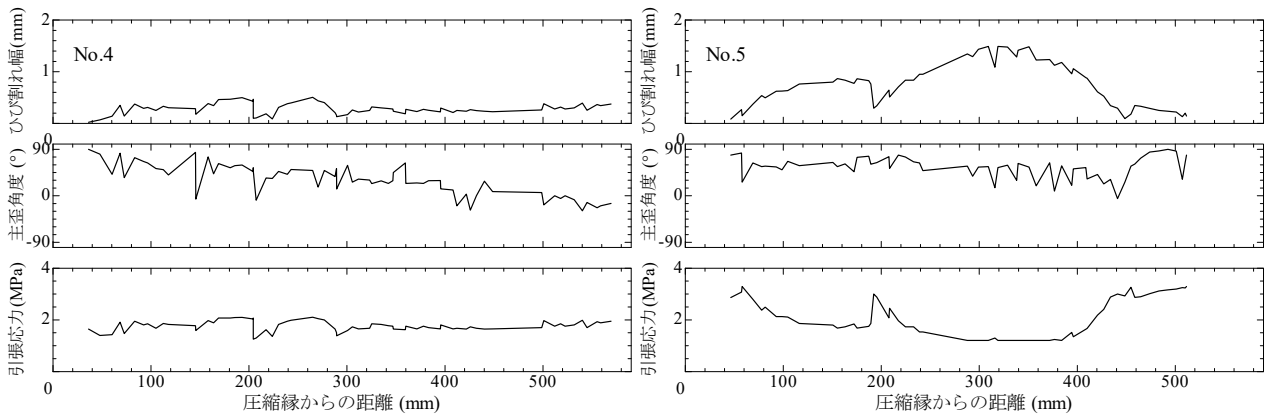


図-10 繊維負担せん断力の算出に用いたひび割れ幅，主歪角度，引張応力の分布

表-4 繊維負担せん断力の実験値と計算値

試験体名		No.1	No.4	No.5
実験値	最大耐力 V_{exp} (kN)	509	588	622
	繊維補強 による増分 $V_{exp,f}$ (kN)	—	79	113
繊維負担接合部 せん断力の計算値 V_{jf} (kN)		—	81	62
繊維負担接合部せん断力の 実験値/計算値 $V_{exp,f}/V_{jf}$		—	0.98	1.82

ットに渡って総和した繊維負担せん断力を算出し，その値が最大になるひび割れを選択することとした。

太径アラミド繊維を用いた試験体 No.4 については，実験値と計算値の比が 0.98 で良く対応しており，接合部負担せん断力を引張特性とひび割れ分布によって評価できることが確認された。一方，細径アラミド繊維を用いた試験体 No.5 については，実験値と計算値の比が 1.82 で過小評価になった。

細径アラミド繊維の一軸引張試験では，純引張の様な応力場のために，引張強度に到達後，ほぼすべての繊維が破断して急激に応力が低下したが，接合部のひび割れ面では引張，圧縮，せん断が作用する複合応力状態であるため，繊維は部分的な破断にとどまっていたと考えられる。また，細径アラミド繊維は非常に小さいひび割れ幅においても，比較的大きい引張応力を負担できることから，画像計測による測定方法では見えないほどの細かいひび割れが接合部の斜めストラット上に複数存在し，そのひび割れがせん断耐力の上昇に寄与していた可能性も考えられる。一軸引張試験結果によって得られた引張

応力-ひび割れ幅関係では，引張強度後の引張靱性および応力軟化特性を過小評価している可能性があり，繊維径が細く繊維破断しやすい場合は部材の応力状態に近い試験方法によって引張特性をモデル化し，高解像度で連続的な画像計測によるひび割れ幅の評価が必要であることが示唆された。

5. まとめ

本研究では，アラミド繊維を用いたト形柱梁接合部の構造実験を行い，繊維混入の有無および繊維寸法の違いによる構造性能の影響を検討した。また，アラミド繊維を用いた一軸引張試験を行い，引張性能を把握するとともに繊維寸法の違いによる影響を確認した。AFRCC による接合部負担せん断力を，接合部のひび割れ分布と一軸引張試験の結果を用いて算出し，計算値と実験値を比較した。太径アラミド繊維では計算値と実験値が良い対応関係であったが，細径アラミド繊維での計算値は過小評価であった。

謝辞

本研究は，科学研究費補助金（基盤研究（A）課題番号 18H03802）の助成を受けて実施しました。試験体作製にあたり，東京鐵鋼株式会社より材料提供を受けました。

参考文献

- 1) 高橋優太ほか：パネルゾーンに FRCC を用いたト形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，Vol.38，No.2，pp.143-144，2019.8
- 2) 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
- 3) 山田大ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1327-1332，2016.7