

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14809

研究課題名（和文）繊維補強コンクリート棒部材のせん断耐荷機構の解明と耐力評価手法の高度化

研究課題名（英文）Investigation of Shear Resisting Mechanism of Fiber-Reinforced Concrete Members and Improvement of Evaluation Method for Shear Capacity

研究代表者

柳田 龍平（YANAGIDA, Ryohei）

金沢大学・地球社会基盤学系・助教

研究者番号：90862326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：繊維補強コンクリート部材の鉄筋量，部材の寸法等の組合せが部材のせん断耐荷機構に与える影響を明らかにするため，実験および解析的検討を行った．その結果，繊維補強とせん断補強鉄筋による補強の併用により，RC部材のせん断抵抗のうちのブーム機構の寄与が斜めひび割れ発生以降にも保持されること，その推移は斜めひび割れ面で繊維が受け持つせん断力と同様となることを明らかにした．さらに，せん断補強鉄筋を持たない高強度の繊維補強部材の場合には，斜めひび割れ発生以降にアーチ作用によるせん断抵抗が作用せん断力のほとんどに抵抗することを明らかにした．

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では，近年積極的な構造利用が進められている繊維補強コンクリート部材に関して，普通強度レベルから超高強度レベルに至るまでの様々なコンクリートを対象に，その補強繊維が部材の破壊時にどの程度抵抗するかを明確にし，それが部材のせん断耐荷挙動に与える影響を検討した．繊維補強したコンクリート部材のせん断抵抗機構の変化と繊維の補強効果の関係に着目した新しい検討を通して，せん断補強鉄筋量と補強繊維量の組み合わせによって，この種の部材の耐力推定時に繊維の効果を考慮する方法を決定できる可能性が示唆された．

研究成果の概要（英文）：Experimental and analytical investigations were conducted to clarify the effect of the combination of fiber reinforced concrete members, such as the amount of steel bars and the dimensions of the members, on the shear resistance mechanism of the members. It was found that the contribution of the beam mechanism to the shear resistance of RC members is maintained after diagonal cracking when fiber reinforcement is combined with shear reinforcement bars, and that the transition is similar to the shear force contributed by steel fibers. Furthermore, in the case of high strength fiber reinforced members without shear reinforcement bars, it was found that the shear resistance due to the arch action resists almost all of the shear forces after the diagonal crack initiation.

研究分野：土木工学

キーワード：繊維補強RC棒部材 せん断耐荷機構 せん断耐力評価 画像解析 FEM解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

繊維補強コンクリート (FRCC) に関する研究は数多く、ひび割れ面における繊維の架橋効果を定量的に構造設計に取り込む考え方が示されてきた。これにより、従来、床版や舗装等の一部など適用箇所が限定的であった FRCC は、近年では部材のせん断耐力の向上や橋梁のひび割れ幅の抑制、トンネル用セグメントの配力鉄筋の省略、かぶりの剥落防止などの目的で多用されており、国土の強靱化のみならず社会インフラの維持管理の省力化にも効果を発揮しつつあるため、その利用拡大が期待されている。一方、各 FRCC の特性の違いなどから指針ごとに繊維混入率やせん断補強鉄筋の使用の可否等の適用範囲が異なり、その適用範囲外の FRCC の積極的な利用について課題が残っている。すなわち、建設・維持管理コストの縮減や国土の強靱化が求められる昨今の社会情勢において、安全性を損なわずにその後の維持管理を容易にし得る技術として FRCC が注目されているにもかかわらず、用いる材料ごとに FRCC 構造の設計手法が異なることに課題が残る現状となっている。したがって、FRCC 構造部材のせん断設計手法を統一できるような、使用材料等の適用範囲の広い汎用的な構造性能評価手法の開発により、社会インフラの強靱化とレジリエント化に貢献するため、この種の部材のせん断耐荷機構を明らかにすることが重要と考えられる。

### 2. 研究の目的

FRCC を用いた鉄筋コンクリート部材のせん断設計では、コンクリートが発揮するせん断抵抗と補強繊維が斜めひび割れ面で発揮するせん断抵抗の足し合わせによって耐力を算定することを基本としているものの、規定されている量のせん断補強鉄筋と補強繊維を用いる場合は安全側の評価となる場合があり、実際にどの程度繊維の補強効果があるかを考慮することでより合理的な設計ができるようにするためには、せん断補強鉄筋量、補強繊維量、主鉄筋比、コンクリート強度などの多様なパラメータがせん断力やせん断耐荷挙動に影響する程度の明確化が求められる。そこで本研究では、FRCC を用いた RC 部材のせん断耐荷機構を明らかにすることを目的に、繊維補強 RC 部材のせん断耐荷挙動について実験及び解析的な検討を行った。まず、コンクリート種別、せん断補強鉄筋量、補強繊維量 (繊維混入率)、部材寸法が繊維補強 RC 部材のせん断破壊挙動に与える影響を実験的に検討した。また、繊維補強 RC 部材のせん断破壊挙動を数値解析的に再現しうる各種解析条件を明らかにし、部材の耐荷挙動のパラメトリック解析を行い、繊維補強 RC 部材のせん断耐荷挙動やひび割れ性状などを確認した。そして、これらの実験および解析結果を踏まえて、繊維補強 RC 部材のせん断設計における繊維の役割について検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 繊維補強 RC 部材の荷重実験によるせん断耐荷機構の検討

せん断スパン比を 3.0 程度とするスレンダーな繊維補強 RC はりに関して、補強繊維量、せん断補強鉄筋量、コンクリートの種類 (粗骨材の有無や強度) を変えて静的曲げ荷重実験を行い、それぞれの実験パラメータが繊維補強 RC はりのひび割れ性状やせん断耐力、ならびにせん断耐荷挙動に及ぼす影響を検討した。一部の試験体では、主鉄筋のはり軸方向のひずみ分布を測定し、部材のビーム機構、アーチ機構などのせん断耐荷機構の推移を明らかにすることを試みた。なお、コンクリートの種類としては、圧縮強度が  $50\sim 70\text{N/mm}^2$  程度で粗骨材を有する一般的な繊維補強コンクリート、粗骨材を持たず圧縮強度が  $100\sim 150\text{N/mm}^2$  程度となる高強度繊維補強モルタル、同じく粗骨材を持たず圧縮強度が  $300\text{N/mm}^2$  以上となる超高強度繊維補強材料を実験に用いた。

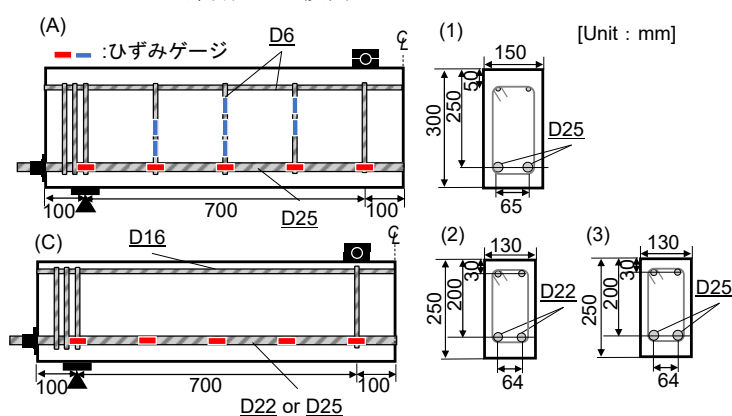


図-1 RC はり供試体の概要図の一例

#### (2) FRCC のせん断伝達挙動の確認と非線形有限要素解析によるせん断耐荷機構の検討

せん断補強鉄筋や部材寸法が繊維補強 RC 部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響について解析的に検討するため、非線形有限要素法による数値解析を実施した。解析は 2 次元 FEM とし、コンクリートのひび割れモデルには固定ひび割れを用い、主鉄筋やせん断補強鉄筋は埋め込み鉄筋要素を用いた。コンクリートの引張挙動としては実験で得られた引張軟化曲線を、圧縮挙動は圧縮

破壊エネルギーを考慮した。この数値解析では、RC 部材のせん断挙動を解析するため、ひび割れ面でのせん断伝達挙動に繊維が及ぼす影響を考慮する必要がある。そこで、解析のための事前の検討として、FRCC のひび割れ面でのせん断伝達特性を明らかにするため、ひび割れ幅の変化が FRCC のせん断剛性に与える影響を要素実験から検討した。その結果として得られたひび割れ幅の増大に伴うせん断剛性低減率の変化は、繊維を用いる場合であっても普通強度のコンクリートやモルタルと顕著な差はなかったため、FEM 解析におけるせん断伝達特性には Al-Mahaidi のモデルを用いた。

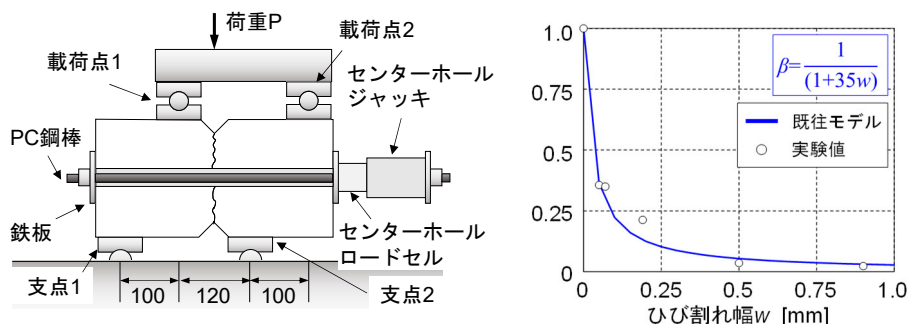


図-2 せん断伝達特性確認のための要素実験とせん断剛性低減率  $\beta$  の結果

(3) 画像解析を用いた斜めひび割れ進展解析による補強繊維のせん断力分担に関する検討

本研究で実施した繊維補強 RC 部材のせん断載荷実験では、はりのせん断スパンに生じる斜めひび割れの進展状況を詳細に把握し、斜めひび割れを架橋する繊維による引張力分担がはりのせん断挙動に与える影響を確認するため、高解像度カメラを用いたひび割れ性状の画像解析を実施した。その狙いは、はりがせん断破壊に至るまでのビーム・アーチ機構といった基本的なせん断耐荷メカニズムと補強繊維のせん断耐力への貢献の関係性を明確にすることにある。本研究では、既往研究による斜めひび割れ進展挙動解析の方法を参考に、一般的な繊維補強コンクリートならびに高強度繊維補強モルタルを用いたはりに斜めひび割れが発生した直後からはりの破壊に至るまでの繊維の貢献の推移を定量化する新しい試みを実施した。

4. 研究成果

本研究では、FRCC を用いた RC 部材のせん断耐荷機構を明らかにすることを目的に、繊維補強 RC 部材のせん断耐荷挙動について実験および解析的な検討を行った。本研究で得られた知見の概要を以下に示す。

- (1) 普通強度繊維補強コンクリートを用いた RC 部材においては、せん断補強鉄筋比と繊維混入率がともに大きい場合、ひび割れの開口だけでなくひび割れの進展も抑制され、せん断破壊モードがせん断圧縮破壊となる場合があることが確認された。また、せん断破壊に至るまでのひび割れ進展長さとしび割れ幅の分布が変化した。せん断補強鉄筋と補強繊維を併用した部材においては、斜めひび割れ発生後にビーム機構の貢献分が低下する通常の RC 部材のせん断破壊機構とは異なり、斜めひび割れ発生後も斜めひび割れ発生せん断力以上の高いせん断力がビーム機構によって保持され、特にせん断補強鉄筋比が大きく繊維混入率も大きい場合においては斜めひび割れ発生以降も破壊に至るまでビーム機構の寄与が増大することが明らかとなった。一方、せん断補強鉄筋を用いない高強度繊維補強モルタル

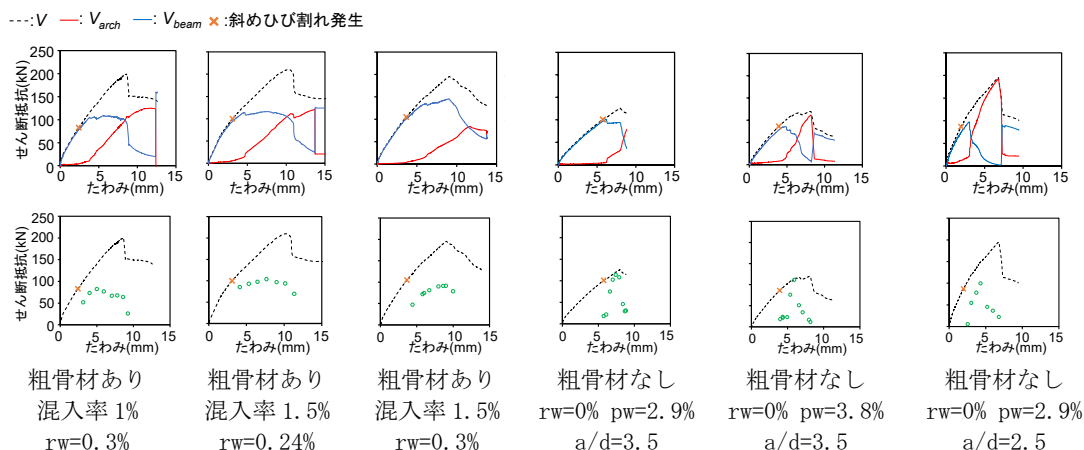
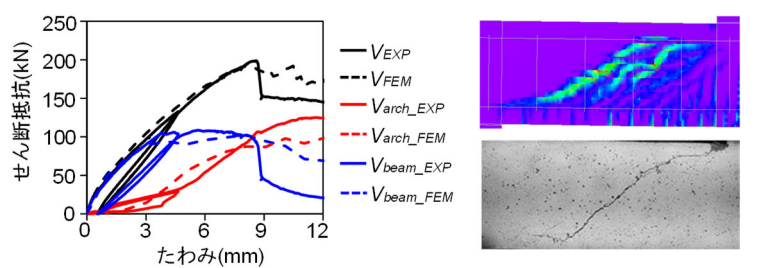


図-3 RC はり部材の  $V_{beam}$ ,  $V_{arch}$  ならびに繊維貢献分  $V_f$  の推移の一例



を用いたはり部材では、斜めひび割れ発生以降にビーム機構が減少に転じ、せん断耐力時においてはアーチ機構がせん断抵抗のほとんどを占めることが確認された。さらに、せん断補強鉄筋を持たない超高強度繊維補強コンクリートを用いたはり部材の場合においても、アーチ的作用によるせん断抵抗が限界を迎えることで部材が破壊に至る傾向が確認されており、せん断補強鉄筋を併用しないことで部材のせん断耐荷機構が大きく変化することが明らかとなった。

- (2) 鉄筋と FRCC の付着特性、FRCC の引張特性、FRCC のせん断伝達特性など各種解析条件がせん断補強鉄筋を併用する繊維補強 RC 部材のせん断耐荷挙動に与える影響を検討した結果、鉄筋の付着特性についてはせん断耐力到達以降の挙動に影響するものの、完全付着とした場合であってもせん断耐力に至るまでのひび割れ性状、耐荷力にはほとんど影響しないことを確認した。一方、FRCC のせん断伝達特性については、せん断伝達に適切な下限値を設けることで実験のひび割れ性状等のせん断破壊挙動を再現でき、特にビーム機構、アーチ機構によるせん断抵抗の変化についても実験結果を良好に再現できた。以上を考慮し、部材のせん断スパン比、有効高さ、主鉄筋比パラメトリック解析を実施した結果、特にせん断スパン比の変化についてはせん断耐荷機構の推移に与える影響があることが確認された。



せん断力ーたわみ関係                      はりのせん断ひび割れ性状  
 図-4 非線形 FEM による繊維補強 RC 部材の破壊性状の再現解析

- (3) 前述の実験結果から、繊維補強した RC 部材のせん断耐荷機構はせん断補強鉄筋量と補強繊維量の組み合わせで変化する傾向にあることが確認された。このことから、この種の部材のせん断耐力の算定においては、補強繊維量のみならずせん断補強鉄筋量も考慮の上で繊維が受け持つせん断力を算定する必要性が示唆された。そこで、実際に補強繊維がひび割れ面で負担した引張力を算出し、斜めひび割れ発生からせん断破壊に至るまでの繊維によるせん断抵抗の推移を明らかにすることとした。載荷試験時に逐次記録したひび割れ写真より、各載荷段階での主たる斜めひび割れ幅の分布を求め、それを引張軟化曲線を用いて引張応力分布に変換しせん断抵抗  $V_f$  を算出 (図-5) した結果、斜め引張破壊するせん断補強鉄筋を有する繊維補強 RC 部材においては、斜めひび割れ発生以降に  $V_f$  が保持される傾向となり、前述したビーム機構の抵抗と同等となることが明らかとなった (図-3)。このことは、せん断設計において繊維によるせん断耐力の増大をビーム機構によるせん断抵抗で表現できる可能性を示唆している。一方、繊維補強量とせん断補強鉄筋量の組み合わせが変化することで耐荷挙動が変化し、ビーム機構によるせん断抵抗と斜めひび割れ面での繊維によるせん断抵抗が一致しない場合もあることが明らかとなった。今後の展望として、この耐荷挙動が変化する条件を明らかにできれば、せん断設計の際の繊維とせん断補強鉄筋の併用効果を適切に考慮でき、さらなる設計の合理化ができると思われる。

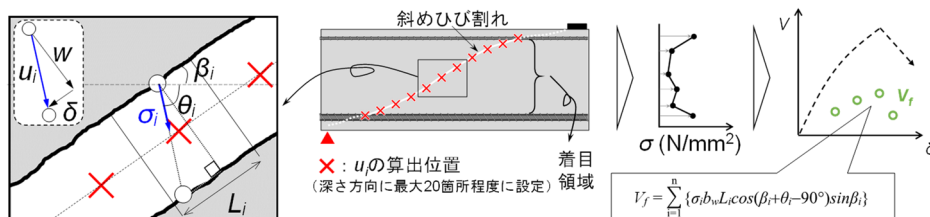


図-5 繊維によるせん断抵抗推移の算出方法の概要

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 黒田拓海, 柳田龍平, 小亀大祐, 河野克哉	4. 巻 21
2. 論文標題 鋼繊維を多く混入した無孔性コンクリートの力学特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 319-324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 若山大幹, 柳田龍平, 河野克哉, 二羽淳一郎	4. 巻 42
2. 論文標題 鋼繊維補強無孔性コンクリートを用いたはり部材のせん断挙動	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 pp.1039-1044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 阿部加苗, 柳田龍平, 中屋柊人, 五十嵐心一	4. 巻 45
2. 論文標題 画像相関法を用いた鋼繊維補強RCはりのせん断耐荷機構の評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柳田龍平, 黒田拓海, 千代延聖, 河野克哉	4. 巻 31
2. 論文標題 繊維補強PFCの引張軟化曲線の評価と梁部材のせん断耐力	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 プレストレストコンクリート工学会第31回シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 43-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 千代延聖, 柳田龍平
2. 発表標題 鋼繊維補強コンクリートの引張特性の再評価とせん断伝達特性の解明
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部加苗, 柳田龍平
2. 発表標題 画像相関法を用いた鋼繊維補強RC部材のせん断耐荷機構
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------