

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820205

研究課題名(和文) 繊維補強コンクリートの合理的な設計に資する評価法の提案

研究課題名(英文) Study on Evaluation Method for Design of Fiber Reinforced Cementitious Composite

研究代表者

上田 尚史 (Ueda, Naoshi)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：20422785

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、各種の繊維補強セメント複合材料(FRCC)を対象として、はり部材のせん断耐力に及ぼす要因を明らかにするとともに、直接せん断試験によりひび割れ面のせん断伝達特性の把握を試みた。また、有限要素法に適用可能なFRCCのせん断伝達モデルを開発し、はり部材のせん断破壊挙動に及ぼす影響について考察した。実験と解析による検討の結果、繊維の架橋力は、ひび割れ面のずれ変形の抑制には大きく影響せず、部材のせん断耐力は繊維によるひび割れ幅抑制の影響により増加することを明らかにした。また、FRCCのひび割れ面のせん断伝達特性は、ひび割れ開口に伴い消費される破壊エネルギーにより評価可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：Shear capacity of various Fiber Reinforced Cementitious Composite (FRCC) beam was experimentally investigated considering shear stress transfer characteristics along the crack surface. Numerical evaluation was also conducted by Finite Element Method (FEM), in which shear stress transfer model of FRCC, developed in this study, was introduced to evaluate the effect of fiber bridging at the crack. As the results of direct shear loading tests, the fiber bridging did not have much effect on the shear stress transfer along crack surface of FRCC but the fracture energy which was dissipated energy during crack opening had effects on. This result was also confirmed by FEM analysis considering shear bridging in the constitutive model. Therefore, it is important to evaluate properly the tension softening behavior as well as to consider the shear stress transfer along the crack surface in order to estimate the shear capacity of FRCC.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：繊維補強セメント複合材料 せん断耐力 せん断伝達特性 せん断伝達モデル 超高強度繊維補強モルタル ひずみ硬化型セメント複合材料

## 1. 研究開始当初の背景

材料の高強度化を目指した超高強度繊維補強コンクリート (UFC) や、引張応力下において疑似的な硬化挙動を示すひずみ硬化型セメント複合材料 (SHCC) など、特徴的な力学性能を有する種々の繊維補強セメント材料 (FRCC) が開発されてきていた。これらの FRCC に対しては、これまでにいくつかの指針が提案されていた[引用①、②、③]。しかしながら、それらの指針においては FRCC の種類により異なった耐力評価式が提示されており適用範囲が限定されたものであった。FRCC の構造部材としての利用を考える上では、より適用範囲の広い耐力評価手法が求められている状況であった。

一般に、構造部材としての利用においては、せん断破壊に対する安全性を適切に評価する必要がある。FRCC のせん断耐力評価式は、前述のように指針ごとに異なったものであった。加えて、せん断耐荷機構に関する考え方もそれぞれの指針において異なったものであった。その理由としては、FRCC の力学性能は通常一軸引張応力場におけるひび割れ開口挙動にのみ着目したものであり、引張・圧縮・せん断が混在する構造部材における FRCC の力学性能に対する検討が不十分であったためであると推察される。

これまで、研究代表者らは、有限要素解析を用いた検討を行い、材料試験で得られた力学特性を直接構成則に導入するだけでは、FRCC 部材のせん断破壊挙動を妥当に評価できないことを示していた[引用④]。すなわち、部材の耐荷力を評価する際には、FRCC 部材におけるひび割れ進展挙動やせん断伝達特性を適切に評価する必要がある。とりわけ、FRCC のひび割れ面におけるせん断伝達特性については、実験的な評価はほとんど行われておらず、有限要素解析における材料構成則についても十分に検討された事例はなかった。さらに、FRCC は繊維とマトリクスの組み合わせにより、その性能が異なるのであるが、それらがせん断伝達特性に及ぼす影響も不明であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、種々の FRCC に対して、合理的な設計に資する評価法を提案することであり、特にせん断耐力評価法の提案を行うことにある。その目的を達するために、繊維とマトリクスの異なる FRCC において、せん断耐力に及ぼす要因は何かを明らかにするとともに、FRCC のひび割れ面におけるせん断伝達特性の把握を試みる。さらに、より定量的な評価を実現するために、有限要素法に適用可能なせん断伝達モデルを開発するとともに、FRCC 部材のせん断破壊挙動について解析的に検討する。これらを通してあらゆる FRCC に適用可能な統一的なせん断耐力評価法の可能性について検討する。

## 3. 研究の方法

本研究では、対象とする FRCC を限定せず、あらゆる FRCC を対象とすることで、現象の本質的な理解に努めることが基本的な方針である。すなわち、混入繊維の種類として、繊維の材質としては鋼繊維と合成繊維 (PVA、PE) を対象とし、繊維の幾何学的な違いとしては直径 0.012mm 長さ 12mm のマイクロ繊維から直径 0.66mm 長さ 30mm の短繊維までを対象とする。また、マトリクスとしては、圧縮強度 15~50 N/mm<sup>2</sup> のコンクリートおよびモルタルから、圧縮強度 180N/mm<sup>2</sup> の高強度モルタルまでを対象とする。これらを FRCC の種類に分類すると、従来の繊維補強コンクリートや繊維補強モルタル、超高強度繊維補強コンクリート (UFC) およびひずみ硬化型セメント複合材料 (SHCC) となる。さらに本研究では、SHCC に対して粗骨材を混入した FRCC に対しても検討を行うこととする。

上記の FRCC を対象として、主に以下の 3 点について検討を行う。

(1)FRCC 部材のせん断破壊挙動に及ぼす影響評価

FRCC の構成材料の違い (繊維やマトリクス) と力学特性の違い (圧縮強度や圧縮靱性、曲げ強度や曲げ靱性) が FRCC 部材のせん断破壊挙動に及ぼす影響について実験的に検討する。

(2)有限要素解析によるせん断破壊挙動シミュレーション

繊維やマトリクスの違いを直接考慮可能なせん断応力伝達モデル (材料構成則) を開発し、有限要素解析に導入することで、繊維やマトリクスの違いが部材のせん断破壊挙動に及ぼす影響について検討する。

(3)FRCC のせん断伝達特性の評価

ひび割れ面における一面せん断挙動の評価を可能とした直接せん断試験により、繊維やマトリクスの違いがひび割れ面のせん断伝達挙動に及ぼす影響について考察を行う。

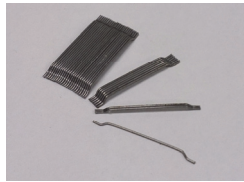
## 4. 研究成果

(1)FRCC 部材のせん断破壊挙動に及ぼす影響評価

①マトリクスと繊維の違いが FRCC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響

マトリクス種類、補強用繊維の種類および混入量の違いをパラメータとした FRCC はりの載荷試験を行い、FRCC はりのせん断破壊に及ぼす影響について検討した。マトリクスには、モルタルと粗骨材最大寸法 20mm のコンクリートを用いた。補強用繊維としては、寸法は同一で力学特性のみ異なる繊維として、写真 1 に示す鋼繊維 (SF) と PVA 短繊維を使用した。また、繊維の混入量を体積混入率で 0.0、0.5、1.0、1.5% とした。

実験の結果、繊維を混入することで、いずれのケースにおいてもせん断耐力が増加することが確認された。ここで、各 FRCC はり



(a) 鋼繊維



(b) PVA 短繊維

写真 1 使用した短繊維

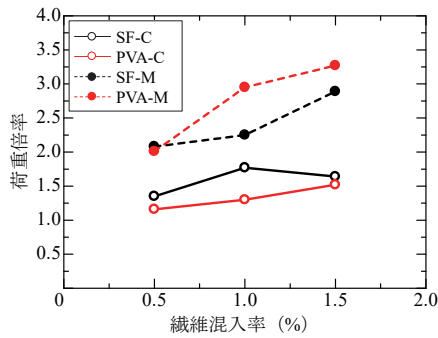


図 1 繊維混入率と荷重倍率の関係

のせん断耐力を繊維混入率 0%のせん断耐力の平均値で正規化した荷重倍率を図 1 に示す。凡例における C と M はそれぞれコンクリート供試体およびモルタル供試体を意味している。図より、SF を混入した FRCC はりにおいては、せん断耐力の増加は、モルタル供試体の方がわずかに大きかったもののコンクリート供試体で同程度であった。一方、PVA 短繊維を混入した FRCC はりのせん断耐力は、マトリクス種類の影響を受け、特にモルタル供試体の場合にせん断耐力の増加が顕著となる結果であった。モルタル供試体の方が繊維混入によるせん断耐力増加の影響が大きかった理由については、①FRCC としての引張軟化特性（破壊エネルギー）の違いや、②繊維によるひび割れ面のずれ変形の抑制効果などが考えられた。

なお、この点については、後述する有限要素解析や直接せん断試験による検討の結果から、破壊エネルギーの違いが大きく影響し、繊維によるひび割れ面のずれ変形の抑制効果はほとんどないことが確認された。

## ②粗骨材の混入が SHCC のせん断耐力に及ぼす影響評価

ひずみ硬化型セメント複合材料 (SHCC) は一般に粗骨材を含まないモルタル材料であることから、コンクリートと比較して静弾性係数が低くひび割れ面でのせん断抵抗も小さいと考えられる。SHCC に粗骨材を混入することでそれらの性能を高めることができ、構造部材としてより広範な利用へつながると考え、SHCC に粗骨材を混入した際の、SHCC そのものの力学特性の変化と、その力学特性の変化が SHCC はりのせん断挙動に及ぼす影響について検討した。

プレミックス粉体を用いた SHCC に対して、最大寸法が 10mm および 20mm の粗骨



写真 2 SHCC に使用したマイクロ PVA 繊維

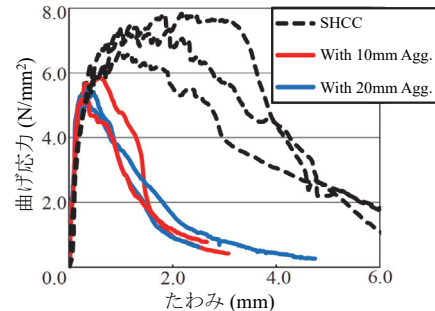


図 2 曲げ応力-たわみ関係

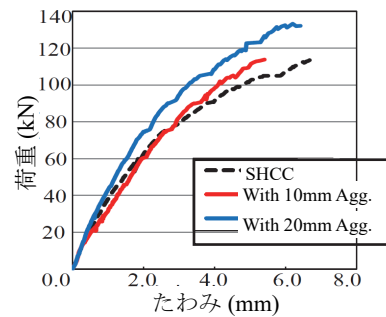


図 3 SHCC 部材の荷重-たわみ関係

材を混入した材料について検討した。SHCC は水結合剤比を 54%とし、補強用繊維として繊維長 12mm、直径 0.04mm のマイクロ PVA 繊維 (写真 2) を単位体積あたり 2.0%混入させた。粗骨材の混入率は、単位体積あたり 10%とした。

寸法 400×100×100mm の角柱供試体を用いた 3 等分点載荷試験から得られた曲げ応力-たわみ関係を図 2 に示す。いずれの供試体も 3.0N/mm<sup>2</sup> 前後において曲げひび割れが発生した。SHCC では、曲げひび割れ発生後に応力が上昇するたわみ硬化挙動が見られた。粗骨材を混入したケースでは、SHCC と同様に曲げひび割れ発生後に応力は上昇し、わずかではあるもののたわみ硬化挙動を示した。ただし、最大曲げ応力時のたわみは大きく低下する結果となった。ひび割れ発生状況に着目すると、SHCC ではピーク時に等曲げ区間に複数本の微細なひび割れが生じていたが、粗骨材を混入したケースでは、数本程度のひび割れが生じるとどまった。これらの結果から、10%程度の粗骨材混入率であっても引張性能は大きく低下することが確認された。

図 3 にはり部材の載荷試験により得られた荷重-たわみ関係を示す。最大荷重は、SHCC はりが 114kN であったのに対して、粗骨材を混入したケースでは、最大粗骨材寸法 10mm および 20mm に対して、それぞれ 114kN および 132kN であった。粗骨材が混

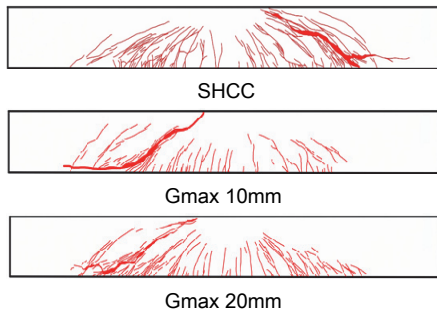


図4 実験終了時のひび割れ状況

入ることによるせん断耐力の低下は明確には認められなかった。いずれの供試体においても明確な斜めひび割れの発生挙動を捉えることができなかったが、SHCC はりでは 30~45kN であり、粗骨材を混入したケースでは 45~60kN において微細な斜めひび割れの存在が確認された。図4に試験終了時のひび割れ図を示すが、粗骨材を混入したケースでは、斜めひび割れの分散性は SHCC はりよりも劣るものであった。なお、いずれの供試体においても、最終的には微細な斜めひび割れの1つが進展し、大きく開口することで急激に荷重が低下した。試験終了時にひび割れ面の状態を確認したところ、いずれの供試体でも繊維の引抜けが確認された。SHCC はりではモルタル分が繊維に絡みついており、必ずしも滑らかな形状ではなかった。一方、粗骨材を混入したケースでは、最大寸法によらずいずれの供試体でもひび割れ面において粗骨材の露出が確認でき、明らかに SHCC はりよりも粗い形状であった。

以上のように、本検討の結果から、粗骨材を混入することで、SHCC と比較して引張性能は低下し、はりのせん断挙動においてもひび割れの分散性は低下した。一方、ひび割れ面のずれ変形に対する抵抗性は、粗骨材の混入により向上することが示唆された。

## (2)有限要素解析によるせん断破壊挙動シミュレーション

### ①繊維の架橋効果を考慮したせん断伝達モデルの開発

ひび割れ面に存在する繊維の架橋効果に着目し、力学機構に基づいた FRCC のせん断伝達モデルを提案した。すなわち、ひび割れ面を図5に示すような凹凸形状であると仮定し、せん断伝達モデルを構築した。その際、ひび割れ面における繊維の架橋効果を、ひび割れ面の凹凸が離れる際の引張抵抗力として考慮した。また、繊維やマトリクスの異なる FRCC のせん断伝達挙動について、粗骨材の有無を凹凸形状の違いでモデル化するとともに、前述の引張抵抗力を混入繊維の種類や寸法、形状をパラメータとしてモデル化することで、提案したせん断伝達モデルの特徴について解析的な検討を行った。

その結果、定性的ではあるものの、繊維混

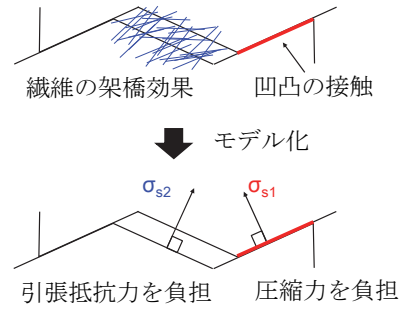


図5 ひび割れ面における繊維の架橋効果とそのモデル化

入によるせん断応力の増加や、繊維の付着応力-すべり関係の違いや繊維混入率の違いによりせん断伝達挙動が変化すること等、繊維の架橋効果がせん断伝達に及ぼす影響を評価できることを示した。ただし、提案したモデルにおいては、繊維の配向性や繊維の付着特性、あるいは繊維補強コンクリートのひび割れ面の凹凸の評価等、モデル化をするにあたって種々の未知パラメータがある。今後は、それらについての詳細な検討が必要であると考えている。

### ②FRCC のせん断破壊挙動に及ぼす影響に関する解析的検討

FRCC の材料としての力学特性の内、せん断破壊挙動に及ぼすものとしては、引張破壊エネルギーとせん断伝達特性が挙げられる。ここでは、前述のせん断伝達モデルを有限要素解析に導入し、FRCC はりの載荷試験を対象とした解析を行った。その際、破壊エネルギーとせん断伝達モデルを独立して変化させることで、FRCC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響を明確にすることを試みた。

鋼繊維を用いた FRCC はりを対象として解析を行った。図6にせん断伝達モデルにお

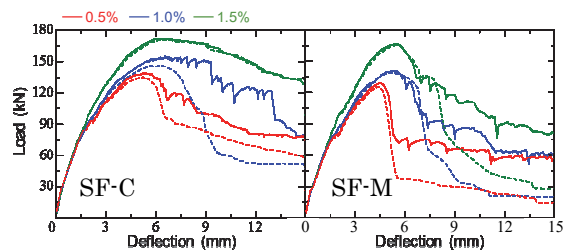


図6 繊維の架橋力を変化させた解析  
(実線は繊維の架橋力を考慮したもの、破線は繊維の架橋力を非考慮)

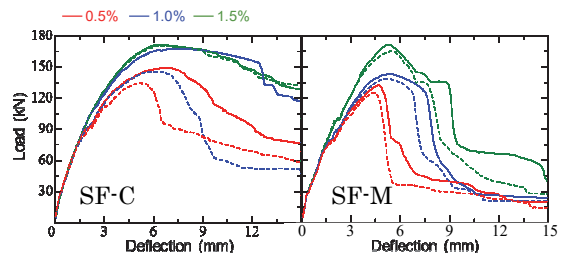


図7 引張軟化曲線を変化させた解析  
(実線は平均値としてモデル化、破線は下限値としてモデル化)





(a) ミクロ鋼繊維 (b) 高強度 PE 繊維

写真3 せん断伝達特性評価に用いた短繊維

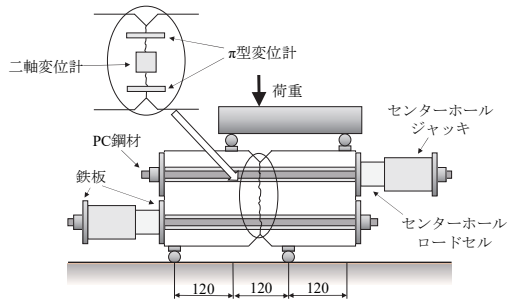


図8 直接せん断試験概要

いて繊維の架橋力を考慮した場合としない場合の結果を示す。また、図7に引張軟化曲線として、実験結果の平均値をモデル化した場合と下限値をモデル化した場合の結果を示す。なお、図中のSF-CおよびSF-Mは、それぞれマトリクスの種類がコンクリートおよびモルタルであることを表している。

図6より、繊維の架橋効果を考慮した場合、最大荷重は大きく変化しない結果となることが分かる。一方、ポストピーク挙動が緩やかになり、部材としてのエネルギー吸収能が増加する結果となった。一方、図7より、引張軟化曲線を変化させた場合は、部材の最大荷重が増加する傾向が得られた。その傾向は、モルタルよりもコンクリートの場合において顕著であった。以上のことから、限られた範囲での検討の結果ではあるものの、今回対象としたFRCCはりにおいては、せん断耐力に及ぼす影響は材料の引張軟化特性であり、せん断伝達特性に及ぼす繊維の架橋効果の影響はそれほど大きくないことが明らかとなった。

### (3)FRCCのせん断伝達特性の評価

#### ①普通強度FRCCのせん断伝達特性の評価

ここでは、繊維やマトリクスの違いがFRCCのせん断伝達特性に及ぼす影響を明らかにするため、直接せん断試験を行った。対象としたFRCCは、写真1および2に示す繊維に加えて、写真3に示すマイクロ鋼繊維(繊維長13mm、直径0.20mm)および高強度PE繊維(繊維長12mm、直径0.012mm)を用いたFRCCも検討対象とした。

直接せん断試験は、図8に示す中央上下にノッチを設けた矩形供試体(寸法150×200×400mm)に対して行った。直接せん断試験は、初期のひび割れ幅を0.5mm程度とし、図8のように三等分点载荷により行った。そ

の際、供試体に予め空けておいた直径30mmの2つ穴にφ21mmのPC鋼棒を挿入し、センターホールジャッキを取り付けることでひび割れ面に作用する圧縮力を制御した。実験では、ひび割れ面に作用するせん断応力 $\tau$ ならびに圧縮応力 $\sigma$ と、せん断変位 $\delta$ ならびにひび割れ幅 $w$ を計測した。繊維がFRCCのせん断伝達特性に及ぼす影響を明らかにするため、次の2つの境界条件で試験を行った。1つは、ひび割れ幅を一定に制御したものであり、もう1つは、ひび割れ面に作用する圧縮応力を可能な限り小さな値で制御(ひび割れの開口を許容)したものである。

ひび割れ幅を一定に制御した直接せん断試験の結果、PVA短繊維や鋼繊維を用いた場合はマトリクスの違いに依らずひび割れ面のせん断変位に繊維は抵抗しないことを確認した。一方、マトリクスがモルタルの場合は、マイクロ鋼繊維やマイクロPVA繊維、高強度PE繊維を用いた場合は、わずかではあるものの、ひび割れ面のせん断変位にある程度抵抗することが明らかとなった。これは、ひび割れ面に存在する繊維量が相対的に多くなったことで、繊維そのものの剛性と、ひび割れ面の粗度が影響を受けたためであると考えられる。

ひび割れの開口を許容した直接せん断試験の結果、FRCCのせん断強度はいずれのFRCCにおいても繊維の混入率に伴い増大することが明らかとなった。ここで、それぞれのFRCCに対して、せん断強度の増加量を直接せん断試験時に生じたひび割れの開口に伴い消費された破壊エネルギー(消費破壊エネルギー)により整理したところ、図9の結果を得た。図より、対象としたFRCCにおいてはいずれにおいても、消費破壊エネルギーと強度の増加量には相関関係があることが確認できた。なお、対象とした直接せん断試験は引張とせん断が混在した変形モードであるため、本検討で用いた消費破壊エネルギーによる整理の妥当性や適用範囲については、今後更なる検討が必要であると考えられる。

②超高強度繊維補強モルタルのせん断伝達特性の評価  
圧縮強度150MPaを超える超高強度繊維補強モルタルのせん断伝達特性を把握するため、前述と同様の方法により直接せん断試

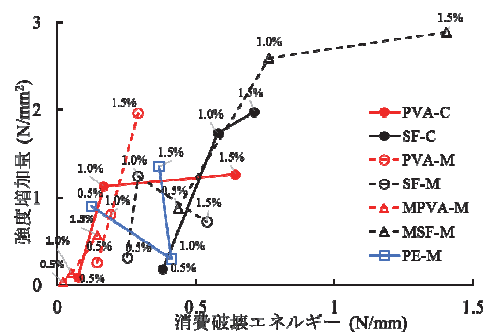


図9 直接せん断試験概要

験を行った。その結果、繊維混入率が大きくなるほど、せん断強度が増加する傾向が得られた。ただし、本実験ではひび割れが分散することなどからひび割れ面のずれ変形が卓越する挙動は見られなかった。このことから、超高強度繊維補強モルタルのせん断伝達特性を評価するには、従来の直接せん断試験は適切な方法ではないことが明らかとなった。超高強度繊維補強モルタルのように複数ひび割れが生じる FRCC のせん断伝達特性を定量的に評価するためには、新たに試験方法を考案する必要があると考える。

#### <引用文献>

- ①土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー97，1999.
- ②土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2004.
- ③土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007.
- ④Yongxing ZHANG, Naoshi UEDA, Yasushi UEMEDA, Hikaru NAKAMURA, Minoru KUNIEDA : Evaluation of shear failure of strain hardening cementitious composite beams, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 908-915, 2011.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文] (計 3 件)

- ①藤村将治、上田尚史：FRCC のひび割れ面におけるせん断伝達特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 38、2016、(掲載決定)
- ②上田尚史、Phamavanh Kongkeo：繊維補強セメント系複合材料のせん断伝達モデルに関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 37、No. 2、2015、pp. 1117-1122
- ③上田尚史、谷口拓峰、鶴田浩章：マトリクスと繊維の違いが FRCC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 36、No. 2、2014、pp. 1147-1152

##### [学会発表] (計 10 件)

- ①上田尚史、藤村将治：超高強度繊維補強モルタルのせん断伝達特性に関する実験的研究、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016 年 9 月 7-9 日、東北大学（宮城県）
- ②藤村将治、上田尚史：FRCC のひび割れ面におけるせん断伝達特性に関する研究、コンクリート工学年次大会 2016(博多)、2016 年 7 月 6-8 日、福岡国際会議場（福岡県）
- ③川本敦司、藤村将治、上田尚史：粗骨材の混入が HPFRCC はりのせん断挙動に及ぼす

影響に関する実験的研究、土木学会第 70 回年次学術講演会、2015 年 9 月 16-18 日、岡山大学（岡山県）

- ④ Naoshi UEDA, Atsushi Kawamoto : Influence of Coarse Aggregate on Mechanical Behavior of Strain Hardening Cementitious Composite, The 10th International Symposium in Science and Technology 2015, August 31 - September 2, 2015, Pathumthani(Thailand)
- ⑤上田尚史、Phamavanh Kongkeo：繊維補強セメント系複合材料のせん断伝達モデルに関する解析的研究、コンクリート工学年次大会 2015(千葉)、2015 年 7 月 14-16 日、幕張メッセ（千葉県）
- ⑥川本敦司、上田尚史：粗骨材の混入が HPFRCC の引張および曲げ性能に及ぼす影響、平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会、2015 年 5 月 30 日、摂南大学（大阪府）
- ⑦Naoshi UEDA : Analytical Evaluation of Shear Failure Behaviour of Various FRCC Beams, 3rd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC3), November 3 - 5, 2014, Dordrecht(The Netherlands)
- ⑧ Naoshi UEDA, Takuho Taniguchi and Hiroaki Tsuruta : Study on Shear Failure Behaviour of Various FRCC Beams, The 9th International Symposium in Science and Technology 2014, August 18 - 20, 2014, Kaohsiung(Taiwan)
- ⑨上田尚史、谷口拓峰、鶴田浩章：マトリクスと繊維の違いが FRCC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響に関する実験的研究、コンクリート工学年次大会 2014(高松)、2014 年 7 月 9-11、サンポート高松（香川県）
- ⑩ Naoshi UEDA, Yongxing ZHANG, Hikaru NAKAMURA and Minoru KUNIEDA: Analytical Evaluation of Shear Failure Behavior of SHCC Beam by Considering Shear Transfer Behavior, The thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), September 11 - 13, 2013, Hokkaido University(Sapporo)

##### [その他]

ホームページ等

<http://www2.itc.kansai-u.ac.jp/~n.ueda/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

上田 尚史 (Naoshi, Ueda)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：20422785