

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820269

研究課題名(和文) 超高強度繊維補強モルタルを用いた薄肉埋設型枠の極浅層定着技術の開発

研究課題名(英文) Development of ultra-shallow surface anchorage method of permanent form using UHPFRC

研究代表者

佐藤 あゆみ (SATO, Ayumi)

熊本大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：60644995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超高強度繊維補強モルタル(UHPFRC)を用いた埋設型枠の後打ちコンクリートに接合する面の凹凸形状およびセパレータを活用した定着部を提案し、その付着・定着性能について部分圧縮試験と引抜き試験より評価した。提案した埋設型枠を用いたRC梁の曲げ性状について実験および解析的検討を行った。その結果として、埋設型枠と後打ちコンクリートとの接合面に凹凸加工を施したRC梁の方が、接合面が平滑なRC梁より優れた曲げ性状を発揮することが確認できた。また、普通RC梁に比べて埋設型枠を用いたRC梁のひび割れ発生荷重が向上すること、終局時点まで普通RC梁と同等以上の耐力を示すことが確認された。

研究成果の概要(英文)：This study aims to propose a permanent form using UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) which has many studs on its surface for bonding and ultra-shallow surface anchorages for fixing. The bonding and the fixing performances of UHPFRC permanent form were evaluated by partially compression test and pull-out test respectively. Furthermore, flexural behavior of RC beams installed with the proposed permanent form was evaluated experimentally and analytically. The results showed that the rough surface with many studs on the permanent form contributed to the increased bending performance of RC beams. Compared with reference RC beams, cracking load of RC beams installed with the permanent formwork was improved. It was revealed that RC beams with the UHPFRC permanent form kept equal to or higher ultimate load than that of the RC beam without the permanent form.

研究分野：建築材料・施工

キーワード：UHPFRC 超高強度繊維補強コンクリート 埋設型枠 定着 付着 曲げ補強 有限要素解析 施工省力化

1. 研究開始当初の背景

超高強度繊維補強モルタル(UHPFRC)は、圧縮強度の特性値が 150N/mm^2 以上という極めて高い強度を持つ繊維補強セメント複合材料である。また UHPFRC は普通コンクリートに比べ耐久性も極めて高く、この材料の基本的な性状は、多くの研究によって明らかにされ用途開発が進められている。しかしながら、UHPFRC は現時点で使用実績が少なく、UHPFRC の特性を活かせる用途拡大が期待されている。その中で、埋設型枠はこの材料の特質を活かせる用途として極めて有望であるが、セパレータの固定ができず省力化に限界がある。また、埋設型枠は終局時に脱落してしまうことから、構造性能がハーフプレキャストよりも劣ることが課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、コンクリートへの高い付着力を持つと同時に、現行のセパレータを固定できる定着部を持つ UHPFRC 埋設型枠を開発することである。この UHPFRC 埋設型枠が開発されることで、施工省力化、終局時の型枠脱落さらに耐久性の弱点となる貫通孔をなくすることが可能となると考えられる。

本研究が達成されることで、UHPFRC の用途を建築の外壁や躯体に用いる埋設型枠へ飛躍的に拡大することが期待される。

3. 研究の方法

(1) UHPFRC 埋設型枠と後打ちコンクリートとの付着性能の評価

本項では、埋設型枠とコンクリートとの付着剥離性状を調べるために、UHPFRC 埋設型枠を接合したコンクリート試験体を作製し、部分圧縮試験を行った。

① UHPFRC 埋設型枠の作製

UHPFRC の使用材料および調合は表 1 に示すものである。混練にはオムニミキサーを使用した。UHPFRC 埋設型枠は、図 1(a)~(c)に示すような、3 種類の裏あし形状をもつものを作製した。UHPFRC の打設後、室温 20°C の恒温室内で気中養生を 5 日間行い脱型した。脱型後、温度 80°C 湿度 90% の養生槽で 48 時間の蒸気養生を行った。

② 後打ちコンクリートの打設

両側面に UHPFRC 埋設型枠を固定した鋼製型枠内に、コンクリートを後打ちし、図 2 に示す試験体を作製した。

③ 部分圧縮試験

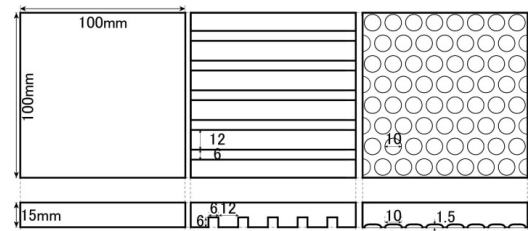
図 2 に示す部分圧縮試験は、接合面上の局所的な剥離の発生とその進展を調べるのに適している。上下面から圧縮载荷する試験であり、荷重と試験体中央のコンクリートおよび UHPFRC 埋設型枠表面の軸方向ひずみを測定した。なお、表面ひずみの計測には、ゲージ長さ 30mm のひずみゲージを使用した。

(2) UHPFRC 埋設型枠の定着部の開発とその性能評価

本項では、図 3 に示すようなセパレータを

表 1 UHPFRC の使用材料および調合表

使用材料	単用量 (kg/m^3)
低熱ポルトランドセメント, 密度 3.21g/cm^3	905
シリカフェューム, 密度 2.2g/cm^3	191
珪砂8号, 密度 2.6g/cm^3	344
珪砂6号, 密度 2.6g/cm^3	709
鋼繊維, ストレートタイプ, 長さ 1.6mm , 直径 $d:0.16\text{mm}$, 引張強度 2000N/mm^2	157
鋼繊維, ストレートタイプ, 長さ 1.13mm , 直径 $d:0.2\text{mm}$, 引張強度 2000N/mm^2	157
高性能減水剤, ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度 $1.05\sim 1.09\text{g/cm}^3$	55
水	172



(a) 平滑面 (b) リブ (c) エアセル
図 1 UHPFRC 埋設型枠の種類

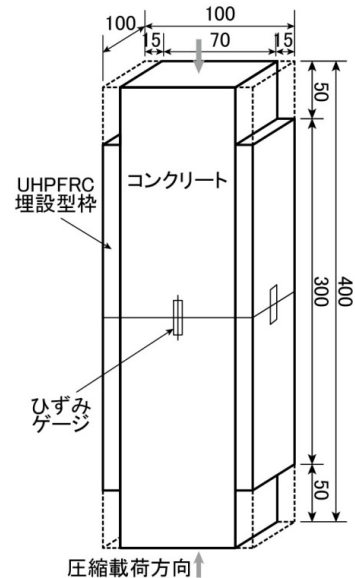


図 2 部分圧縮試験の概要

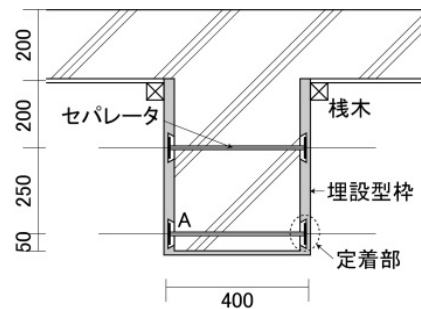


図 3 定着部を用いた埋設型枠を使用した RC 梁型枠の構成

固定できる定着部を持つ埋設型枠を開発することで、埋設型枠の支保工の省力化を図るとともに耐久性の弱点である貫通孔をなくすことを検討した。

図4に示す定着部を提案し、定着部の引抜試験を行った。埋設型枠の定着部を作製する前提として、図3に示す梁型枠のセパレータ1本に作用する荷重の計算を行い、1.88kNを耐力の目標値とした。

① UHPFRC 埋設型枠の作製

図4に示すようにセパレータを固定するための孔を持つ埋設型枠を作製した。埋設型枠は、幅250mm×長さ250mm×厚さ30mmの板状とし、試験体中央部にスタイロフォームを用いて上部直径65mm、下部直径85mm、高さ18mmの定着用の孔を作製した。埋設型枠は気中養生を7日間行った後、温度80℃、相対湿度90%の蒸気養生を48時間行った。

② 定着部の作製

引抜試験に用いた試験体一覧を表2に示す。定着部の条件を変えて計12種類の試験体を作製した。充填材には、建築補修用のエポキシ樹脂、高粘性エコバインダー(以下HTEB)、UHPFRCおよび補修工専用グラウト材(以下RB、RBS、RBP)の合計6種類を用いた。

③ 定着部の引抜試験

定着部の養生後、万能試験機を用いて定着部の引抜試験を行い、引抜荷重と変位を測定した。

(3) UHPFRC 埋設型枠を用いた RC 梁の曲げ載荷試験

本項では、U字型のUHPFRC埋設型枠を用いたRC梁を作製し、曲げ載荷試験を行うと同時に有限要素解析による解析的検討を行うことで、UHPFRC埋設型枠を用いたRC梁の曲げ性状を評価した。

① 試験体概要

図5に、RC梁の試験体形状寸法、配筋および載荷形式を示す。試験体は埋設型枠を用いない普通RC梁(記号C-1)、後打ちコンクリートと接する埋設型枠内面(接合面)を平滑面としたRC梁(記号U-1)、同接合面に凹凸部を設けたRC梁(記号U-2)、凸部を設けた埋設型枠にさらにセパレータをエポキシ樹脂によって定着したRC梁(記号U-3)の4水準とした。図6は、試験体U-2の埋設型枠断面の詳細図であり、凸部直径は10mm、凸部高さは2mmとした。

UHPFRCは容量30Lのオムニミキサーで混練し、図5の埋設型枠の形状に打設を行った。鉄筋を配置した後、コンクリート(普通-30-18-20-N)をUHPFRC埋設型枠に後打ちした。

② RC梁の載荷試験方法

RC梁の載荷試験は、図5に示すとおりスパン長さ2000mm、載荷点間隔500mmの単純曲げ載荷とした。載荷試験では、荷重およびスパン中央変位を測定した。

③ UHPFRC 埋設型枠を用いた RC 梁の有限要素解析

本研究では、表3に示すとおり、界面要素の材料構成則を変更した3ケースについて解析を行った。図7に解析モデルの要素分割図を示す。有限要素解析の計算には汎用非線形構造解析ソフトDIANA9.5を利用した。

コンクリート、UHPFRC埋設型枠および鉄筋の材料構成則には、実験から求めた素材試

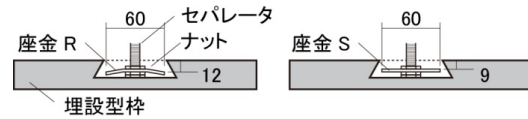


図4 埋設型枠の定着部

表2 定着性能評価用の試験体一覧

試験体名	埋設型枠の調合	座金	充填材	反力直径(mm)
R-EPOXY	SF7.5BSF30	湾曲	エポキシ樹脂	100
R-HTEB			HTEB	
R-UHPFRC			UHPFRC	
R-RB	SF7.5BSF50	湾曲	RB	140
R-RBS			RBS	
R-RBP			RBP	
S-EPOXY	SF7.5BSF30	ストレート	エポキシ樹脂	100
S-HTEB			HTEB	
S-UHPFRC			UHPFRC	
S-RB	SF7.5BSF50	ストレート	RB	140
S-RBS			RBS	
S-RBP			RBP	

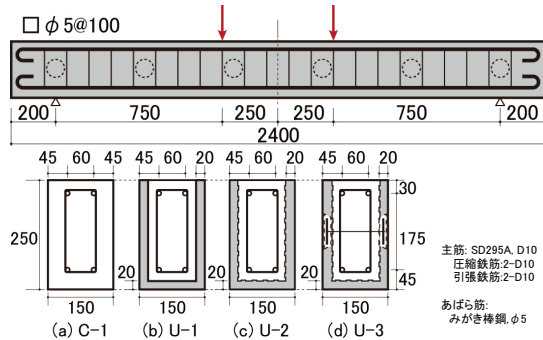


図5 RC梁試験体形の形状寸法、配筋および載荷形式

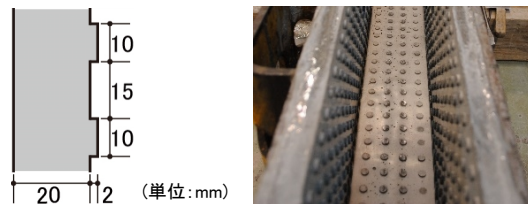


図6 試験体U-2の埋設型枠の詳細図

表3 解析ケース

解析ケース	界面要素のせん断方向構成則
T1.0-B	せん断付着強度: 1.0(N/mm ²) 完全脆性
T2.8-B	せん断付着強度: 2.8(N/mm ²) 完全脆性
T2.8-P	せん断付着強度: 2.8(N/mm ²) 完全弾塑性

験結果を適用した。界面要素は面垂直方向とせん断方向に抵抗するモデルであり、構成則は応力-相対変位関係で表される。

4. 研究成果

(1) UHPFRC 埋設型枠と後打ちコンクリートとの付着性能の評価

図8に部分圧縮試験より得られた代表的な荷重-コンクリートおよびUHPFRC埋設型枠の表面ひずみ関係を示す。裏あし形状が平滑面の場合、剥離開始荷重が最も低かった。一方で、裏あし形状がリブやエアセルの場合、剥離開始荷重が高く、剥離進展に対する凹凸形状の効果が確認された。

(2) UHPFRC 埋設型枠の定着部の開発とその性能評価

図9は引抜試験から得られた結果と、頭付きアンカーの耐力計算式を適用して計算した結果との相関を見た図である。耐力計算式では圧縮強度に充填材の強度を適用した。

図9よりすべての試験体でセパレータ1本あたりの目標耐力1.88kNを大きく超えていることがわかる。全体的には座金の形状による大きな影響は見られず、エポキシ樹脂を充填材に用いた試験体の耐力が高いなど充填材の違いが耐力を決定づける結果となった。

(3) UHPFRC 埋設型枠を用いたRC梁の曲げ載荷試験

① 実験結果

実験によって得られたRC梁の最終的なひび割れ図を図10に示す。図10より、普通RC梁試験体(C-1)ではスパン方向に曲げひび割れが広く分散しているが、UHPFRC埋設型枠を用いたRC梁試験体(U-1、U-2、U-3)は載荷点直下に局所的にひび割れが発生・拡大した。図11に各RC梁の荷重-スパン中央変位関係の測定値の比較を示す。図11より接合面が平滑な試験体U-1よりも接合面に凹凸加工を施した試験体U-2、U-3の方が最大荷重および最大荷重以降の耐力が大きくなり、接合面の加工を行った効果が認められた。

試験体U-3はセパレータ定着によって耐力が向上することはなかった。試験体U-3は定着孔があるため、試験体U-2に比べるとUHPFRC埋設型枠の断面積が小さいが、試験体U-2とほぼ同等の耐力を示した。

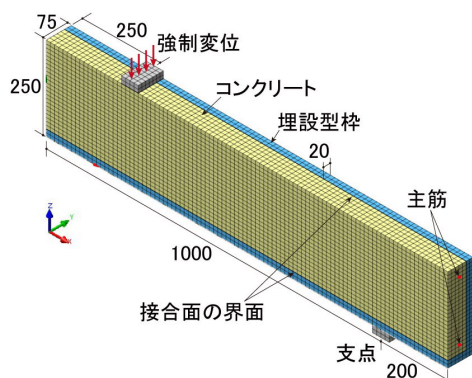
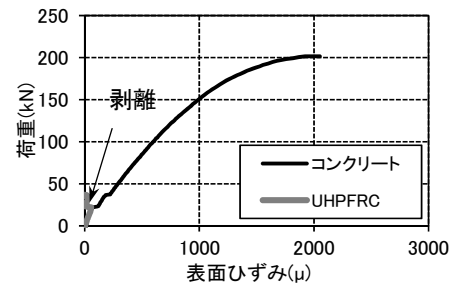
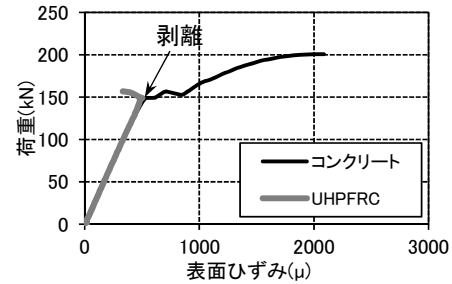


図7 解析モデル



(a) 平滑面 No1



(b) エアセル No2

図8 荷重-表面ひずみ関係

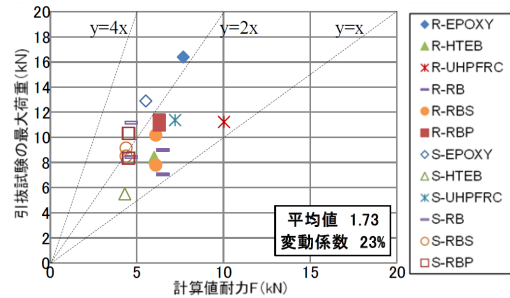


図9 計算値耐力と実験値最大荷重の関係

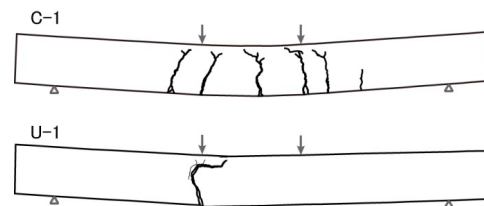


図10 各試験体のひび割れ図

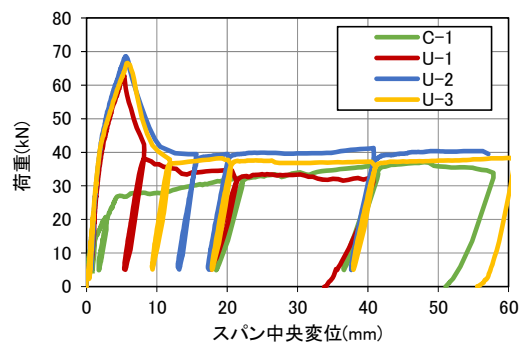


図11 荷重-変位関係 (実験結果)

② 解析結果

有限要素解析によって得られた解析モデルの最終的なひび割れ図を図 12 に示す。すべての解析ケースで実験結果と同様に RC 梁の載荷点直下に局所的なひび割れの発生・拡大が見られる。有限要素解析によって得られた試験体 U-1、U-2 の荷重-変位関係の解析結果を図 13 に示す。図 13 より、すべての解析ケースで最大荷重以降、急激に耐力が低下し、UHPFRC 埋設型枠の引張抵抗が喪失する結果が再現され、実験結果に近い傾向が得られた。引張鉄筋の降伏以降は、T1.0-B で耐力が低下しており、これは UHPFRC 埋設型枠がコンクリートから剥離したことによる圧縮側の断面欠損が原因であると考えられる。一方、T2.8-B と T2.8-P の場合には、引張鉄筋の降伏以降は、鉄筋のひずみ硬化に伴って耐力が漸増している。特にせん断方向の界面要素の構成則として完全弾塑性を適用した T2.8-P では、耐力の増加傾向が強かった。

③ 実大寸法の RC 梁に関する解析的検討

図 5 の RC 梁の断面寸法に対して埋設型枠の厚さが 20mm と相対的に大きかったため、本実験では UHPFRC 埋設型枠のひび割れ発生荷重が引張鉄筋の降伏荷重より大きな結果となった。しかし、実大寸法の RC 梁(以下、実大 RC 梁)に厚さ 20mm の埋設型枠を使用した場合、UHPFRC 埋設型枠のひび割れ発生荷重は、引張鉄筋の降伏荷重より小さくなると予想される。そこで、実大 RC 梁のモデル(図 14)を対象に解析的検討を行った。UHPFRC 埋設型枠とコンクリートとの界面要素には表 3 の T2.8-B と同じ条件を適用した。

実大 RC 梁を対象とした解析結果のうち、荷重-変位関係を図 15 に示す。図 15 より、普通 RC 梁のコンクリートのひび割れ発生荷重が 117kN であるのに対して、UHPFRC 埋設型枠を使用した RC 梁のひび割れ発生荷重は 319kN と普通 RC 梁の約 2.7 倍高くなった。このことから、UHPFRC 埋設型枠を使用することで耐久性に関与するひび割れ発生荷重を向上できることが明らかになった。また、引張鉄筋の降伏以降は普通 RC 梁と UHPFRC 埋設型枠を用いた RC 梁でほぼ同等の挙動を示しており、UHPFRC 埋設型枠の剥離に伴う圧縮側断面欠損による耐力低下が終局時点まで生じていないことが確認された。

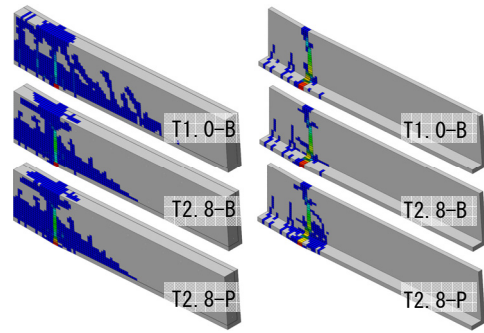


図 12 解析結果のひび割れ図
(左：モデル全体表示，右：UHPFRC 埋設型枠のみ表示)

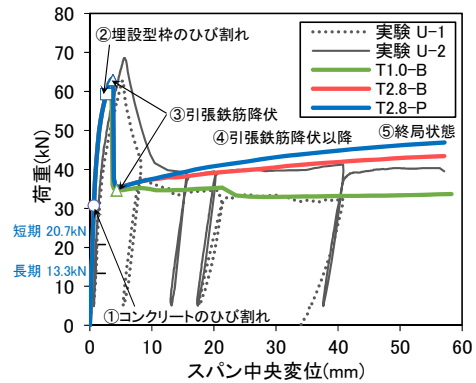


図 13 荷重-変位関係に関する実験結果と解析結果との比較

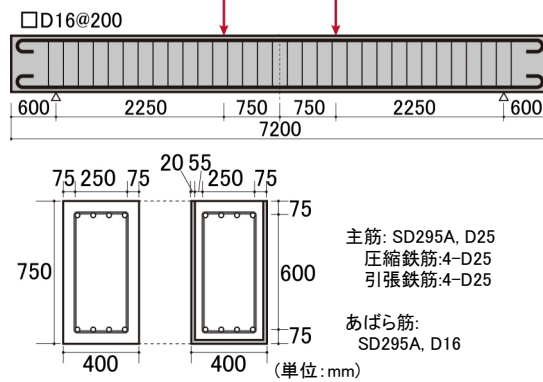


図 14 実大 RC 梁の形状寸法，配筋および載荷形式

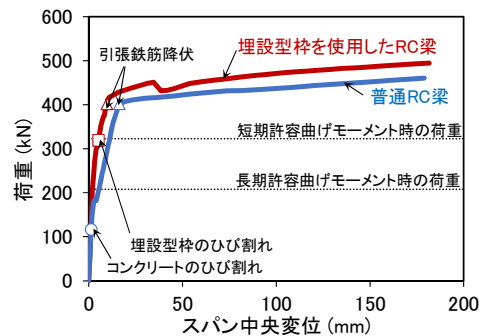


図 15 荷重-変位関係
(実大 RC 梁を対象とした解析)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- 1) 佐藤あゆみ・御手洗駿・武田浩二・村上聖：超高強度繊維補強コンクリート埋設型枠を用いた RC 梁の曲げ性状に関する研究, 査読有, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.38, 2016, (掲載決定)
- 2) 佐藤あゆみ, 佐脇開, 御手洗駿, 武田浩二, 村上聖, 山口信：UHPFRC 埋設型枠とコンクリートとの界面における付着剥離性状に関する FEM 解析, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (55), pp.45-48, 2016
- 3) 御手洗駿, 佐藤あゆみ, 佐脇開, 武田浩二, 池崎智美, 村上聖, 山口信：UHPFRC 埋設型枠を用いた RC 梁の曲げ載荷試験, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (55), pp.17-20, 2016
- 4) 佐藤あゆみ, 佐脇開, 武田浩二, 山口信, 池崎智美, 村上聖：高炉スラグ微粉末を使用した環境負荷低減型の超高強度繊維補強コンクリートの圧縮強度, 学術講演梗概集, 2015(材料施工), pp.523-524, 2015
- 5) 佐脇開, 佐藤あゆみ, 村上聖, 武田浩二, 山口信, 池崎智美：UHPFRC 埋設型枠の定着部における引抜性状の実験的評価, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (54), pp.193-196, 2015
- 6) 佐藤あゆみ, 村上聖, 武田浩二, 山口信：UHPFRC 埋設型枠とコンクリートとの界面における付着剥離性状の実験的評価, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (53), pp.173-176, 2014

〔学会発表〕(計 5 件)

- 1) 佐藤あゆみ, 佐脇開, 御手洗駿, 武田浩二, 村上聖, 山口信：UHPFRC 埋設型枠とコンクリートとの界面における付着剥離性状に関する FEM 解析, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (55), pp.45-48, 2016 年 3 月 6 日, 琉球大学
- 2) 御手洗駿, 佐藤あゆみ, 佐脇開, 武田浩二, 池崎智美, 村上聖, 山口信：UHPFRC 埋設型枠を用いた RC 梁の曲げ載荷試験, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (55), pp.17-20, 2016 年 3 月 6 日, 琉球大学
- 3) 佐藤あゆみ, 佐脇開, 武田浩二, 山口信, 池崎智美, 村上聖：高炉スラグ微粉末を使用した環境負荷低減型の超高強度繊維補強コンクリートの圧縮強度, 学術講演梗概集, 2015(材料施工), pp.523-524, 2015 年 9 月 4 日, 東海大学
- 4) 佐脇開, 佐藤あゆみ, 村上聖, 武田浩二, 山口信, 池崎智美：UHPFRC 埋設型枠の定着部における引抜性状の実験的評価, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (54), pp.193-196, 2015 年 9 月 4 日, 東海大学

- 5) 佐藤あゆみ, 村上聖, 武田浩二, 山口信：UHPFRC 埋設型枠とコンクリートとの界面における付着剥離性状の実験的評価, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系 (53), pp.173-176, 2014 年 3 月 2 日, 佐賀大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤あゆみ (SATOH Ayumi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：60644995