

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18189

研究課題名（和文）接着系あと施工アンカーの破壊進行メカニズムの解明と引抜き耐力算定式の提案

研究課題名（英文）Investigation of fracture process mechanisms and proposal of pull-out strength formulation of post-installed adhesive anchor

研究代表者

佐藤 あゆみ (Ayumi, Satoh)

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・助教

研究者番号：60644995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：接着系あと施工アンカー（接着系アンカー）は、RC構造物の補修・補強に広く用いられているが、引抜き力を受けたときの破壊進行メカニズムは未解明のことが多く、そのため引抜き耐力式にも改善の余地がある。本研究では、引抜き力を受ける接着系アンカーを対象に、引抜き試験による実験的検証と有限要素解析による解析的検証を行った。その結果、アンカーボルト周辺コンクリートへのせん断応力伝達メカニズム、コンクリートのひび割れ発生メカニズムを明らかにすることができた。さらに接着系アンカーの破壊モードの一つであるコンクリートのコーン状破壊について、せん断破壊基準をベースとした新たな引抜き耐力式を提案することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で接着系アンカーの破壊進行メカニズムを解明できたことで、理論的根拠に基づいた施工方法の明示化、応力集中部を局所的に補強する新工法の開発、さらに新規接着剤の提案が出来るなど、本研究の成果が接着系アンカーの技術革新につながることを期待される。例えば、アンカーボルトの埋込底部が最も引抜き耐力向上に影響を与えるため、頭付きアンカーボルトの適用が効果的であることが分かった。さらに、接着系アンカーの主要な破壊モードのコンクリートのコーン状破壊について、新たな提案式を学会発表した。つまり、今までの引張破壊基準に代わり、せん断破壊基準をベースとした引抜き耐力算定式への修正提案である。

研究成果の概要（英文）：The post-installed adhesive anchor is very convenient for repairing concrete structures and attaching some peripherals to concrete substrate. However, the fracture progress mechanisms of post-installed anchor under pull-out force is not well known, therefore there should be an improvement of the pull-out strength for design formulae.

In this study, experimental pull-out test and finite element analysis were conducted in order to discuss the pull-out behavior of post-installed adhesive anchor. The analytical results revealed the mechanisms of crack formation in concrete and shear stress transfer mechanisms between anchor and adhesive, and also between adhesive and concrete. Furthermore, a new pull-out strength formula was proposed which is based on the shear failure criterion of cone failure in concrete.

研究分野：建築材料・施工（特にコンクリート）

キーワード：接着系あと施工アンカー 耐震補強 引抜き 破壊進行メカニズム 耐力算定 有限要素解析 超高強度繊維補強コンクリート

1. 研究開始当初の背景

接着系あと施工アンカー（接着系アンカー）は、設備機器の据付の他、既存建築物を耐震補強する際の緊結材として用いられており、高い引抜き耐力を有することが求められる。日本建築学会の設計指針¹⁾では、引張力を受けた接着系アンカーの破壊モードを図-1に示す4種類に分類し、破壊面積に基づいた引抜き耐力算定式 ($p_1 \sim p_3$) を提案している。しかし、実際には図-1に示す破壊モードが単独で生じることは少なく、これらが混在した複合破壊を生じる場合が多いが、複合破壊が発生するメカニズムは明らかになっていない。さらに、現行の設計指針では、複合破壊に対する引抜き耐力の算定式は定められておらず、試験後に混在して表れた破壊モード毎の耐力を求め、それらを累加して引抜き耐力を算定した例も見られるが、決定的な提案には至っていない。以上のように、最終的な破壊状態に基づいて引抜き耐力を算定する方法には限界があり、破壊進行メカニズムによる新しい設計理念に基づいた引抜き耐力の算定方法が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、下記2点を達成することを目的とする。

- 1) 引張力を受ける接着系アンカーの破壊進行メカニズムの解明
- 2) 接着系アンカーの引抜き耐力算定式の提案

これらを達成するために、引抜き試験で破壊した試験体に対する有限要素解析によって、外観では観察できない内部ひび割れの状態やアンカー引抜き破壊の進行過程を明らかにする。破壊進行過程で生じる内部応力をモデル化、力学的に合理性を有する簡便な引抜き耐力算定式を提案するとともにその有効性について実験的検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 接着系アンカーの引抜き試験

① 試験体

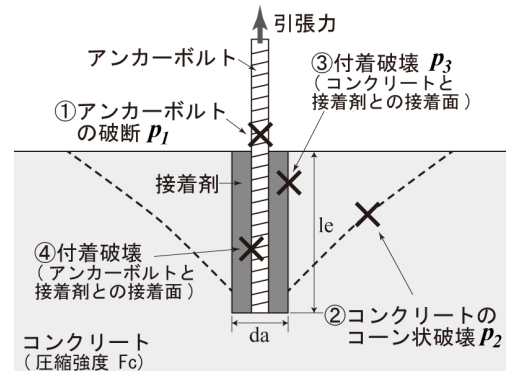
図-2に示すように、試験体は無筋コンクリートの中央部に穿孔を施し、孔内に接着材を充填することでアンカーボルトを固着したものである。表-1に試験体名および実験条件を示す。試験体の母材にはレディーミクストコンクリートを使用した。接着材にはエポキシ樹脂と超高強度繊維補強コンクリート (UHPFRC) を用いた。

② 引抜き試験

図-2に引抜き試験形式を示す。引抜き力は反力台の上置いたセンターホールジャッキによって加えた。反力用鋼板には中空円盤を用いた。載荷は一方方向単調載荷とし、荷重と変位を測定した。

(2) 有限要素解析

図-3に解析モデルの要素分割図の例を示す。解析モデルは円柱試験体の対称性を考慮した2次元の軸対称モデルである。有限要素解析の計算には



$$p_1 = s\sigma_{pa} \cdot s_c a \text{ (N)}$$

$$p_2 = 0.31 \sqrt{F_c} \cdot A_c \text{ (N)}$$

$$p_3 = \tau_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot l_{ce} \text{ (N)}$$

図-1 接着系アンカーの破壊モードと引抜き耐力算定式¹⁾

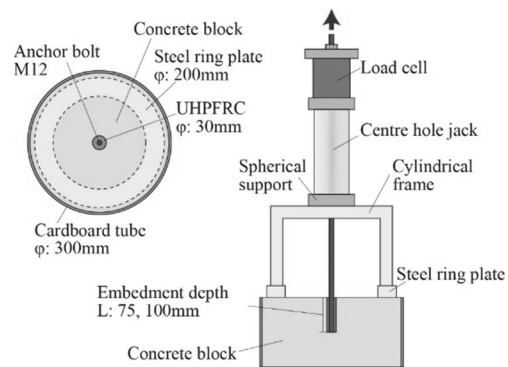


図-2 試験体の形状と引抜き試験方法

表-1 試験体種類および引抜き試験結果

Specimen	Adhesive	Diameter of drilled hole (mm)	Length of drilled hole (mm)	Maximum load (kN)	Fracture* mode
U-D30-L50	UHPFRC	30	50	38.5	C
U-D30-L75			75	48.6	M
U-D30-L100			100	54.9	M
Ua-D30-L75	UHPFRC(a)	30	75	51.1, 51.9 **	M
E-D30-L50	Epoxy resin	30	50	35.1	C
E-D30-L75			75	50.4	C
E-D30-L100			100	58.7	C

*Fracture mode is as follows. C: Concrete cone fracture, M: Combined bond-cone fracture

** : Two experimental results for Ua-D30-L75

表-2 解析モデル

Model name	Embedment depth (mm)	Interface C-U		Interface U-A	
		Tn (N/mm ²)	Tt (N/mm ²)	Tn (N/mm ²)	Tt (N/mm ²)
U-D30-L50 (FEM-I)	50				
U-D30-L75 (FEM-I)	75	10	10	10	20
U-D30-L100 (FEM-I)	100				
U-D30-L50 (FEM-D)	50			Direct connection	Direct connection
U-D30-L75 (FEM-D)	75	10	10		
U-D30-L100 (FEM-D)	100				

Tn: Normal bond strength, Tt: Shear bond strength

汎用非線形構造解析ソフト DIANA を利用した。表-2 に示すとおり、穿孔深さとインターフェイス要素の構成則を変えた解析を行った。また、本解析の接着材は UHPFRC のみとした。

インターフェイス要素は、C-U 界面（コンクリートと UHPFRC）、U-A 界面（UHPFRC とアンカーボルト）の 2ヶ所とし、それぞれに 2次元のインターフェイス要素を適用した。インターフェイス要素の面垂直方向とせん断方向の付着強度の値を表-2 に示す。

4. 研究成果

(1) 引抜き試験および有限要素解析の結果

① 接着系アンカーの引抜き試験結果

引抜き試験から得られた各試験体の最大荷重を表-1 に、荷重-変位関係の例を図-4 に示す。これらより穿孔深さが深くなるほど、最大荷重が大きくなるのが分かる。

各試験体の破壊モードを調べるために、引抜き試験後の試験体を直径方向に切断した。図-5 は切断面の例である。本実験の試験体の破壊モードは、表-1 に示すようにコンクリートのコーン状破壊、もしくはコーン状破壊と付着破壊が混在した複合破壊となった。図-5 では、最終的なコンクリートのコーン状破壊以外にも、アンカーボルトを固着した底部から伸びるひび割れがコンクリート中に確認できた。また、UHPFRC には櫛状のひび割れが多数見られた。

② 有限要素解析結果

図-4(a)、(b)に有限要素解析で得られた荷重-変位関係を示す。図-4(a)の FEM-I を見ると、実験結果の荷重-変位関係を精度良く推定できているのが分かる。図-4(b)の FEM-D は、界面 U-A にインターフェイス要素がなく、アンカーボルトと UHPFRC の要素が直接接続されモデルであり、FEM-I より界面 U-A の力学的特性が改善されたモデルと見ることができる。図-4(b)の FEM-D の荷重-変位関係は、FEM-I より荷重が大きい結果となった。

(2) 破壊進行メカニズムの解明

① ひび割れの形成とせん断応力の伝達

図-5 のひび割れ状態から、UHPFRC のアーチ機構による圧縮応力によって、アンカーボルト周辺のせん断応力はコンクリートに伝達されたと考えられる。この場合、UHPFRC の高い圧縮強度と剛性が、接着系アンカーの引抜き耐力向上に有効であると考えられる。

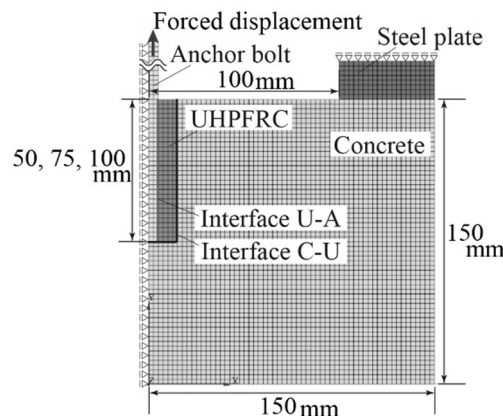
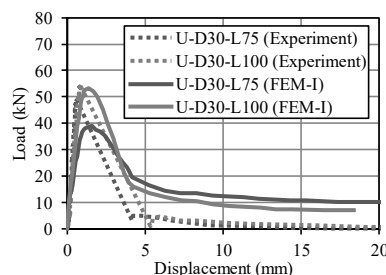
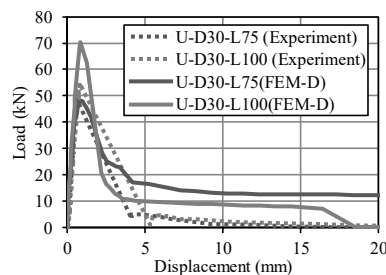


図-3 解析モデルの要素分割図



(a) FEM-I



(b) FEM-D

図-4 荷重-変位関係



図-5 切断した試験体のひび割れ図

(コーン状破壊と付着破壊が混在した複合破壊、UHPFRC 接着材使用)

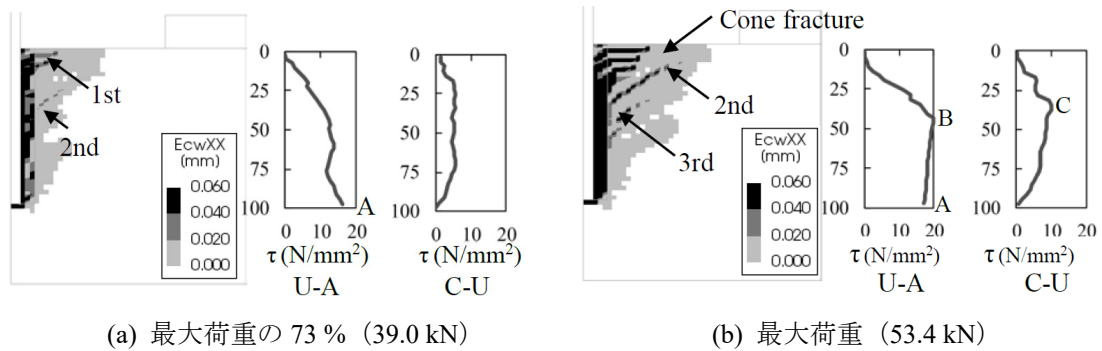


図-6 U-D30-L100 (FEM-I) の解析結果

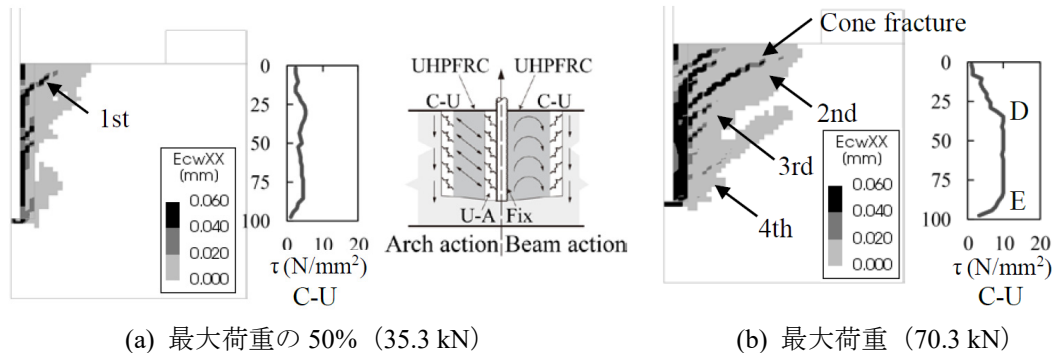


図-7 U-D30-L100 (FEM-D) の解析結果

図-6(a)、(b)は有限要素解析で得られた U-D30-L100 (FEM-I) のひび割れ幅と界面せん断応力分布を示している。図-6(a)の最大荷重の73%の段階では、UHPFRCのほぼ全体の領域に0.04mm以上のひび割れが生じている。界面U-Aでのせん断応力分布は底部に行くほど大きく、底部(点A)で16.1 N/mm²に達しており、界面U-Aのせん断強度(20 N/mm²)の80%である。界面U-Aのせん断応力分布が底部で大きくなるのは、底部で周囲のコンクリートによる拘束効果が大きくなるためである。表面近くで界面U-Aのせん断応力が減少する原因は、初めに生じる局所的なひび割れ(図中1stひび割れ)が、アーチ機構(図-5)によるせん断応力伝達を無効にするためであると考えられる。

② 複合破壊発生メカニズム

図-6(b)のひび割れ図から、最大荷重時にコンクリートのコーン状破壊(図中2ndひび割れ)が形成されたことが見てとれる。また、図-6(b)の界面U-Aのせん断応力分布からA点とB点の間で、せん断強度に達して、アンカーボルトとUHPFRC間に剥離が生じたことが確認できる。つまり、埋込み底部での剥離によって、コンクリートのコーン状破壊が引き起こされたことが分かった。さらに、コンクリートのコーン状破壊が形成された後、埋込み部の下半分の界面U-Aの界面特性が、接着系アンカー全体の引抜き性能を支配したことが分かった。

③ 引抜き耐力向上に関するシミュレーション

図-7(a)、(b)は有限要素解析で得られた U-D30-L100 (FEM-D) のひび割れ幅と界面せん断応力分布を示している。図-6(a)のFEM-IではUHPFRCの全体的な領域が黒色となり、ひび割れが拡大していたが、図-7(a)のFEM-Dではアンカーボルトに隣接する層のみが黒色である。これは、UHPFRCのせん断応力伝達機構の違いに由来すると考えられる。界面U-AとC-Uの両方のインターフェイス要素が存在する場合(FEM-I)では、UHPFRCのせん断応力伝達機構は、UHPFRCに圧縮応力が作用するアーチ機構によるものである。一方、アンカーボルトとUHPFRCの要素が直接接続されている場合(FEM-D)では、UHPFRCのせん断応力伝達機構は、主に梁機構に起因し、曲げモーメントは固定端(つまり、アンカーボルトに隣接する層)で最大になる。なお、梁機構とは、引張応力・圧縮応力、せん断応力の両方が有効であることを意味する。

FEM-Dの最大荷重(70.3 kN)は、FEM-Iの最大荷重(53.4 kN)より40%高くなっている。最大荷重時では、FEM-IとFEM-Dはともにアーチ機構でUHPFRCのせん断応力を伝達していると考えられる。最大荷重時の界面C-Uのせん断応力分布を見ると、図-6(b)のFEM-Iの場合は埋込部の深さに沿って減少しているが、図-7(b)のFEM-DのD点とE点の間で10 N/mm²で一定である。このことから、界面U-Aの性能は、界面C-Uでのせん断応力伝達にも影響するのである。FEM-Dの界面C-Uのせん断応力分布が一定となることで、図-7(b)のひび割れ図では底部近くに4番目のひび割れ(図中4thひび割れ)が発生する。また、FEM-Dの最終的な破壊モードは、FEM-Iと同じ複合破壊であるが、最大荷重は40%向上した。

以上のように、接着材がUHPFRCの場合、アンカーボルトとUHPFRC間の付着性能を改善することで、引抜き耐力向上が期待できる。具体的には、アンカーボルトに表面処理を適用するか、

頭付きアンカーボルトを適用することなどが考えられる。

(3) 引抜き耐力算定式の提案

図-8に各試験体の穿孔深さと引抜き試験から得られた最大荷重との関係を示す。実験結果から、コーン状破壊の角度 θ は、アンカーボルトの穿孔深さと反力用鋼板との位置関係に依存し、図-9(a)に示すようにボルト先端と反力用鋼板内縁を結ぶ直線の角度で近似できると考えられる。ここでは、この角度 θ を考慮した引抜き耐力算定方法を提案し、実験結果との比較検討を行う。

日本建築学会の設計指針¹⁾では、図-10の左側に示すように、コーン状破壊表面の引張破壊基準をベースに、破壊表面(A:破壊表面積)に作用する引張強度 σ の合力(σA)の鉛直方向成分($\sigma A \cos \theta$)と破壊時の引張力 p_2 のつり合いにより、式(1)が得られる。

$$p_2 = \sigma A \cos \theta = \sigma \pi l_e \cot \theta (l_e \cot \theta + d_a) \quad (1)$$

ここで、 p_2 : コーン状破壊時の引張力 (N)、 σ : コーン状破壊に対する引張強度 (N/mm²)、 A : 破壊表面積 (mm²)、 θ : コーン状破壊の角度 (度)、 l_e : 接着系あと施工アンカーボルトの有効埋込み長さ (本稿では穿孔深さ) (mm)、 d_a : アンカーボルトの径 (mm)

それに対して、本提案では、図-10の右側に示すように、押し抜きせん断破壊のアナロジーからコーン状破壊表面のせん断破壊基準をベースに、破壊表面に作用するせん断強度 τ の合力(τA)の鉛直方向成分($\tau A \sin \theta$)と破壊時の引張力 p_2' のつり合いにより、式(2)が得られる。

$$p_2' = \tau A \sin \theta = \tau \pi l_e (l_e \cot \theta + d_a) \quad (2)$$

ここで、 p_2' : 本提案のコーン状破壊時の引張力 (N)、 τ : コーン状破壊に対するせん断強度 (N/mm²)

式(1)の $A \cos \theta$ は破壊表面の水平投影面積であり、 $\theta=45$ 度(図-9(b))、 $\sigma=0.31\sqrt{F_c}$ (F_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²))とすると、日本建築学会の設計指針式と一致する。角度 θ を45度とした場合の p_2 を計算した結果は、図-8の破線で示される二次曲線であり、実験結果と比較すると、穿孔深さが浅いほど実験結果が算定値より高い傾向になった。

式(2)の $A \sin \theta$ は破壊表面の鉛直投影面積である。式(2)は、 $\theta=45$ 度、 $\tau=\sigma=0.31\sqrt{F_c}$ とすると、日本建築学会の設計指針式と一致する。なお、文献²⁾で示している純せん断強度は $0.33\sqrt{F_c}$ で与えられており、学会指針の $0.31\sqrt{F_c}$ にほぼ一致する。穿孔深さと反力用鋼板との位置関係で決まる角度 θ を考慮すると、反力用鋼板位置が同じ場合には、アンカーボルトの穿孔深さによって鉛直投影面積ひいては引抜き耐力 p_2' も変化し、図-8に示す実線のように実験結果との一致は良好であることが分かる。

以上より、コンクリートのコーン状破壊の引抜き耐力算定時には、コーンの角度 θ を45度一定とするのではなく、破壊表面のせん断破壊基準をベースに、穿孔深さと反力用鋼板との位置関係で決まる角度 θ を考慮することが有効である。

現時点では、複合破壊のうちコンクリートのコーン状破壊の引抜き耐力式の提案をすることができた。今後は、本研究で明らかになった破壊進行メカニズムを踏まえて、付着破壊を加味した複合破壊の引抜き耐力式を提案する予定である。

参考文献:

- 1) 日本建築学会編：各種合成構造設計指針・同解説，339pages，2010
- 2) 日本建築学会編：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，440pages，1999

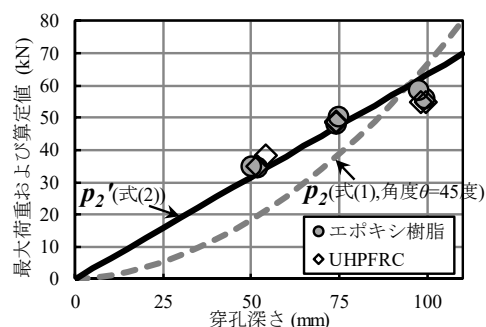
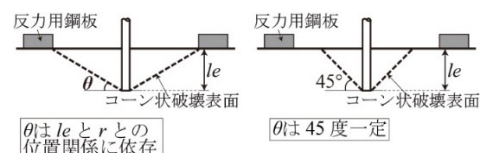


図-8 最大荷重の算定値と実験値の関係



(a) 本提案 (b) 日本建築学会設計指針
図-9 コーン状破壊の角度 θ

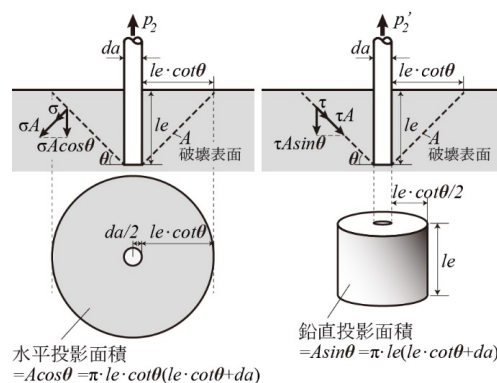


図-10 コーン状破壊の角度 θ と破壊面積

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ayumi Satoh, Koji Takeda and Kiyoshi Murakami	4. 巻 100
2. 論文標題 FEM analysis on combined bond-cone fracture of a post-installed adhesive anchor filled with UHPFRC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 46-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.12.012	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 Ayumi Satoh, Koji Takeda and Kiyoshi Murakami	4. 巻 -
2. 論文標題 Fracture process and strength of a post-installed adhesive anchor filled with UHPFRC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 "The 6th International Conference on CRACK PATHS (CP 2018)"	6. 最初と最後の頁 183-188
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 無
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 坂上友紀, 佐藤あゆみ, 武田浩二, 村上聖	4. 巻 17
2. 論文標題 接着系あと施工アンカーのコーン状破壊モードにおける耐力算定方法	5. 発行年 2017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 79-82
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 佐藤あゆみ, 坂上友紀, 御手洗駿, 武田浩二	4. 巻 70
2. 論文標題 接着系あと施工アンカーの引抜き性状に関する有限要素解析	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 526-532
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://doi.org/10.14250/cement.70.526	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ayumi Satoh
2. 発表標題 STRENGTH OF A POST-INSTALLED ADHESIVE ANCHOR FILLED WITH UHPFRC
3. 学会等名 ConMat'20 6th International Conference on Construction Materials. (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上友紀
2. 発表標題 超高強度繊維補強コンクリートを接着材とした接着系あと施工アンカーの引抜き耐力に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会 学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤あゆみ
2. 発表標題 接着系あと施工アンカーの引抜き耐力の算定方法に関する研究
3. 学会等名 2016年度 第56回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂上友紀
2. 発表標題 超高強度繊維補強コンクリートを接着剤とした接着系あと施工アンカーの引抜き耐力に関する研究
3. 学会等名 2016年度 第56回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

熊本大学 建築材料・施工研究室
<http://www.murakami-lab.jp/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----