

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04772

研究課題名（和文）コンクリートにおける異種界面の損傷局所化機構解明とあと施工アンカーの力学性能向上

研究課題名（英文）Investigation on damage localization mechanisms of heterogeneous interface in concrete followed by improving mechanical properties of post-installed anchor

研究代表者

佐藤 あゆみ（Sato, Ayumi）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：60644995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：補修、補強の重要性が高まる中、本研究はそれらの共通課題である接着部の破壊機構を明らかにして、接着系アンカーの力学性能向上を図る事を目的とした。本研究では、引抜き力を受ける接着系アンカーの損傷が局所化して最終的なひび割れが形成される機構を解析的に明らかにした。さらに、最大耐力時の耐荷機構として引抜抵抗モデルを提案した。複合破壊を対象に、全引抜抵抗をコンクリートのコーン状破壊面での引張抵抗とコーン状破壊面より下部の界面付着応力による抵抗に分離し、それらの最大耐力への寄与率を算定した。その結果、外見上の破壊モードは複合破壊であっても、支配的な破壊モードは付着破壊であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果によって、接着系アンカーの現行指針式の拡充の必要性が示された。例えば、付着破壊する界面の分類、UHPFRCのような高強度セメント系接着剤の適用が考えられる。また、本研究は当該工法の力学性能を向上させ、更にコンクリート剥落や補修材の界面劣化に応用でき、新工法開発や保守点検にも生かせると期待される。

研究成果の概要（英文）：With the increasing importance of repair and reinforcement, this study aimed to improve the mechanical performance of the post-installed adhesive anchor by clarifying the failure mechanism of the adhesive of the interface, which is a common issue for them. In this study, we analytically clarified the mechanism by which damage to the post-installed adhesive anchor subjected to pull-out forces is localized and final cracks are formed. Furthermore, a pull-out resistance model was proposed as a mechanism of load bearing at the maximum pull-out force. For the composite failure, the total pull-out resistance was separated into the tensile resistance at the cone fracture surface of concrete, and the resistance due to the adhesion stress at the interface below the cone fracture surface, and their contributions to the maximum pull-out capacity were calculated. The results suggest that the dominant failure mode is a bond failure, even though the apparent failure mode is a composite failure.

研究分野：建築材料・施工（特にコンクリート、RC）

キーワード：あと施工アンカー 引抜き 耐力算定 有限要素解析 超高強度繊維補強コンクリート 耐震補強

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の経年劣化に対する維持管理と激甚災害への対応を図り、国土を強靱化するには、補修、補強が必須である。しかし、コンクリートへの補修は、異種材料との界面を作ることでありその界面が最大の弱点となる。従来その接着強度だけを問題にしていたが、接着強度が高いだけでは界面ごく近傍でコンクリートを破壊して力学性能は頭打ちとなりがちである(図-1②)。補修材料が本来の性能を発揮するには、界面から遠く離れたコンクリートを壊すようにひび割れ進展経路を制御できると良いと考えられる(図-1①)。

接着系あと施工アンカー(以下、接着系アンカー)には、図-1①②の破壊が共存するなど異種界面の破壊に関して、一般の補修工法に通じる全ての技術要素が含まれている。接着系アンカーは古くから使用され設計基準もあるが、樹脂や普通モルタルを対象にしたもので、実験に基づく破壊モードと設計式から成り立っている。近年、非線形構造解析技術は発展を遂げ、コンクリートのひび割れの発生から破壊に至るまでの過程を詳細に追うことが可能になってきた。非線形構造解析技術を用いることにより、新しい材料に対応した精密で信頼性の高い接着系アンカーの構造設計基準が確立出来ると考えられる。その際、力学性能の向上を図るには、前述した様に接着剤と母材との界面近傍が鍵となる。接着系アンカーにおいても、図-2②のような界面での破壊や、図-2①に示すようなコンクリートをコーン状に破壊するもの、さらにそれらが複合して生じる複合破壊があり、異種界面の破壊を考える上で、極めて示唆に富んでいる。

### 2. 研究の目的

補修、補強の重要性が高まる中、本研究はそれらの共通課題である接着部の破壊機構を明らかにして、接着系アンカーの力学性能向上を図る事を目的とする。

研究に際し、接着材料と躯体コンクリートとの界面近傍における損傷過程とその支配機構を力学的に検討する。つまり接着強度以外に、界面の剪断剛性、摩擦特性等を考慮し、接着材料の躯体への応力伝達機構等を検討するのである。有限要素解析による破壊過程追跡と数値実験を多用し、破面解析で検証するのが特徴である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 接着系アンカーの引抜き試験

図-3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、孔内に接着剤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。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。接着剤にはエポキシ樹脂、セメント系接着剤と超高強度繊維補強コンクリート(UHPFRC)を用いた。図-3に引抜き試験形式を示す。引抜き力は反力台の上に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。载荷は一方方向単調载荷とし、荷重と変位を測定した。

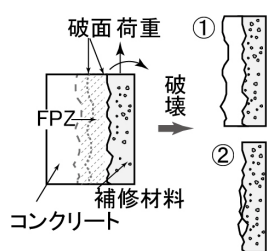


図-1 接着面の破壊

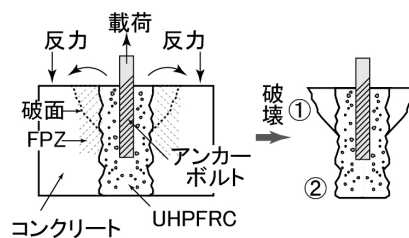


図-2 接着系アンカーの破壊

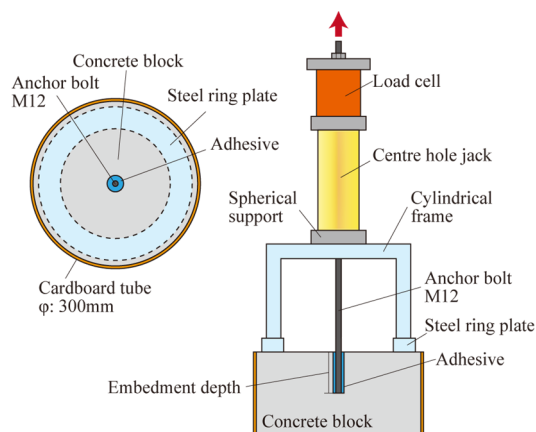


図-3 引抜き試験形式

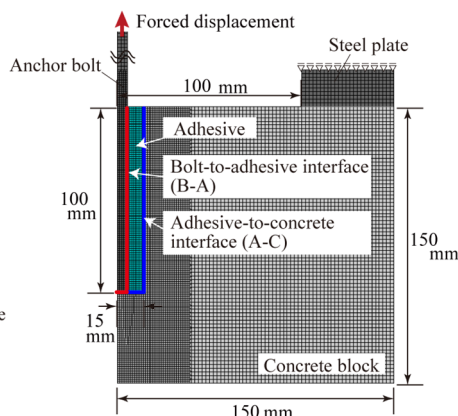


図-4 解析モデルの要素分割図

## (2) 有限要素解析

本研究の有限要素解析には、汎用非線形構造解析ソフト DIANA10.5 を利用した。図-4 に解析モデルの要素分割図を示す。解析モデルは軸対称ボルト・接着剤間界面および接着剤・コンクリート間界面にそれぞれ界面要素を設けた。載荷手法として、図-4 に示す赤い矢印の位置に強制変位を与え、かつ反力用鋼板の鉛直方向変位成分を拘束した。コンクリートのひび割れ軟化特性として要素の応力-ひずみ関係を用いる分散ひび割れモデルに回転ひび割れモデルを適用して解析を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 接着系アンカーの破壊機構

図-5 に解析結果の一例として、実験で複合破壊したエポキシ樹脂を用いた接着系アンカーの結果を示す。図-5 には、ひび割れ分布図、三主応力のうち最小および最大主応力図、ボルトひずみ分布図、界面要素の付着応力分布図および Y 方向（強制変位方向）変位図を示す。界面要素の付着応力分布図中の破線は付着強度に対応する。

ひび割れ図と最大主応力図を見ると、ボルトの引張力と反力用鋼板の反力により試験体全体にせん断応力を生じ、その斜張力で、接着剤-コンクリート界面から斜めひび割れが発生した。

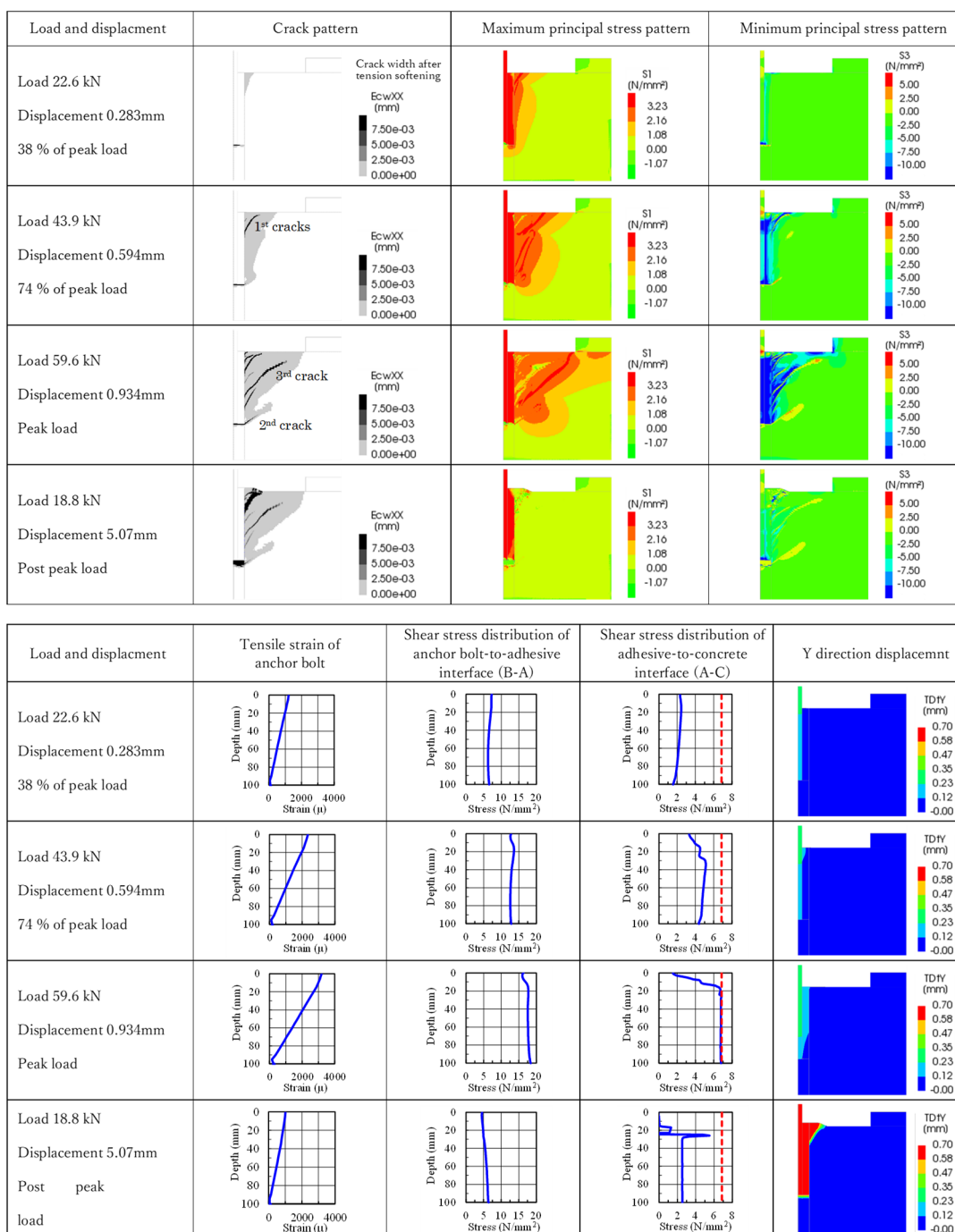


図-5 エポキシ樹脂を用いた接着系アンカーの解析結果

その後、コンクリート表層の一次ひび割れが顕在化し、次に埋込み部の末端に二次ひび割れが、そして埋込み長さの中間部分に三次ひび割れが、相互に平行な角度で順次発生した。最小主応力図を見ると、ひび割れで分割されたコンクリートに圧縮束が形成されており、ひび割れ数の増加に応じて、圧縮束の領域も拡大した。

ボルトひずみ分布図を見ると、載荷初期ではボルトのひずみ分布はコンクリート表面で最大、埋込み部の末端で 0 のほぼ直線分布となり、ボルトの付着応力がほぼ一様に分布していることが分かる。このことは、界面の付着応力分布図にも表れている。最大耐力時には、一次ひび割れ下部の接着剤-コンクリート界面で、付着応力がほぼ一様に付着強度に達し、付着破壊したことが確認できる。日本建築学会の指針式<sup>1)</sup>では、平均付着強度による付着強度の算出方法を採用しており、本解析結果から指針式の合理性が確かめられたと言える。

図-6 は、FEM 解析によるひび割れ状況と実験結果（赤色）との比較を示す。図-6 では、FEM 解析の一次ひび割れと接着剤-コンクリート界面の破壊部の形成する破面が、複合破壊に相当し、また FEM 解析の三次ひび割れがコーン状破壊に相当する。解析結果の最終的な破壊モードは、図-5 のポストピークの Y 方向変位図から分かるように、両解析結果共に、一次ひび割れより下部の付着破壊部+一次ひび割れより上部のコーン状破壊部による複合破壊の形状で引抜けたことが分かる。

### (2) 最大耐力時の耐荷機構

前述の破壊モードから、図-7 に示す最大耐力時の引抜抵抗モデルを考える。図-7 は、コンクリートのコーン面（ひび割れ面とその延長の仮想ひび割れ面）での引張応力による抵抗と、コーン下部の界面の付着応力による抵抗の合計値が、最大耐力時の引抜抵抗であるとしたものである。モデルでは、一次ひび割れ部で抵抗する R1、三次ひび割れ部で抵抗する R3a、R3b の概略形状を表している。R1、R3b はひび割れ部分であるが、R3a だけは引張軟化に達した直後の、まだ明確なひび割れではない部分である。

以上の仮定で区分した円錐コーン毎に FEM 解析による存在応力とその部分の面積を乗じて求めた引張力の引抜方向成分の合計と付着応力の計算結果を表-1 に示す。表-1 の最下段（合計）の結果は、FEM 解析の引抜き力に近いのは当然であるが、その値は実験結果の最大耐力にも近い値となった。また、一次ひび割れ部のコーン状破壊の方が三次ひび割れ部のコーン状破壊よりもやや引抜き力が小さく、図-5 のポストピークの Y 方向変位図から分かるように解析でも一次ひび割れ部のコーン状破壊が先行している。そのとき、引抜抵抗合計値に対する付着応力による抵抗の割合は、今回示した例で 80%であり、支配的破壊モードは両試験体とも付着破壊であると考えられる。つまり最大耐力時の耐荷機構は界面の付着抵抗によると言える。

### (3) まとめ

接着系アンカーの今後の発展のためには、本研究の試験体を包括できるように、現行指針式の拡充が求められる。例えば、付着破壊する界面の分類、UHPFRC のような高強度セメント系接着剤の適用が考えられる。また、本研究は当該工法の力学性能を向上させ、更にコンクリート剥落や補修材の界面劣化に応用でき、新工法開発や保守点検にも生かせると期待される。

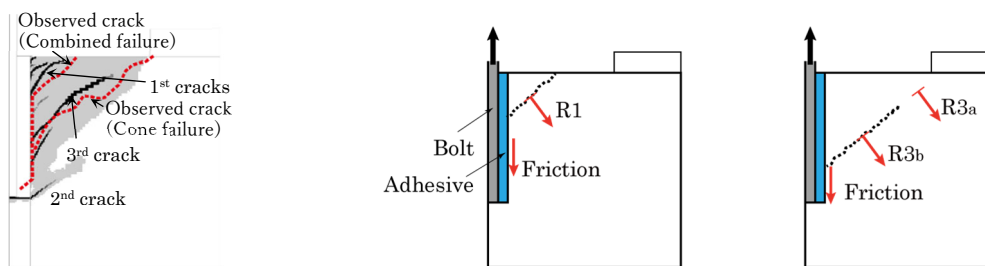


図-6 実験結果と解析結果のひび割れ図

図-7 最大耐力時の耐荷モデル

表-1 最大耐力時の抵抗力（エポキシ樹脂を用いた接着系アンカー）

R1	12.2 (20%)	R3a	12.2 (19%)
Friction below R1	49.2 (80%)	R3b	35.4 (56%)
Total	61.4 (100%)	Friction below R3	16.1 (25%)
		Total	63.7 (100%)

\*Experimental results=56.3 and 58.7 kN

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

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 佐藤 あゆみ, 村上 聖	4. 巻 87
2. 論文標題 接着系あと施工アンカーの最大耐力を支配する破壊機構に関する解析的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1278 ~ 1287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.1278	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉武涼花
2. 発表標題 超高強度モルタルで接着した接着系あと施工アンカーの付着強度に関する実験的研究
3. 学会等名 2020 年度日本建築学会大会 (関東)
4. 発表年 2020年

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 6th International Conference on Construction Materials (ConMat ' 20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高慧
2. 発表標題 大径穿孔した接着系あと施工アンカーの引抜き性状 その1 実験概要および実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤あゆみ
2. 発表標題 大径穿孔した接着系あと施工アンカーの引抜き性状 その2 エポキシ樹脂で接着した試験体のFEM 解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高慧
2. 発表標題 大径穿孔した接着系あと施工アンカーの引抜き性状に関する解析的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2023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 <a href="http://www.murakami-lab.jp/">http://www.murakami-lab.jp/</a>
--

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