

令和元年6月18日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18195

研究課題名(和文)既存RC部材の損傷を考慮した耐震補強接合部の最適実験法の提案と設計施工の高度化

研究課題名(英文) Upgrade of design / construction and proposal of optimal experimental method for seismic retrofit considering damages of existing RC members

研究代表者

高瀬 裕也 (Takase, Yuya)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30515911

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)：既存建築物の耐震補強では、新設部材の性能を十分に発揮させるため、新設部材と既存部材を一体化させることが極めて重要になる。一般的な接合部には、あと施工アンカーと目荒らしが適用される。しかしながら、建物の損傷や変形、あるいは、接合部の力学挙動の解明は十分でなく、現在の設計方法には多くの改善点があった。特に耐震補強に適用される、チッピングと呼ばれる目荒らし面に関する知見は極めて少なかった。

そこで、本研究では設計施工法の高度化に寄与するため、目荒らし面とあと施工アンカーを用いた接合面の、実験やモデル化を行った結果、せん断力-ずれ関係だけでなく、目開き量も定量的に評価できる手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現行の設計法は、耐震補強接合部の挙動を詳細に把握できていないまま、構築されているように思われる。そのため、過剰設計となる場合もあれば、反対に危険側の設計になる可能性も指摘され得る。さらに施工現場では、適切に目荒らし面が形成されていないケースが見られるなどの問題もある。

本研究の成果により、変形を適切に考慮した、理論に基づく設計が可能になった。これにより、効率的で経済的な設計が可能になるだけでなく、施工現場においても、施工精度の目安を示すことができた。以上から、本研究は学術的意義を有しつつ、社会的意義も大きいと判断される。

研究成果の概要(英文)： In seismic retrofits of existing buildings, during an earthquake, the shear stress is transfer through post-installed anchors and roughened concrete; therefore, joints are vital elements for seismic retrofitted structures. However, the researches which focus on damage and deformation of buildings are shortage. Especially, knowledges of roughened concrete which is used for seismic retrofits and called chipping are few.

Therefore, in this study, testing and modelling of joints with post installed-anchors and roughened concrete were conducted; then the mechanical model which can estimate shear load - slip and opening - slip relations of such a joint was proposed.

研究分野：建築構造

キーワード：耐震補強 あと施工アンカー 目荒らし 既存建築物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

既存鉄筋コンクリート部材に新設部材を付加する際に、チップングによる目荒らしとあと施工アンカーを併用した接合法が一般に用いられる。この耐震設計ではアンカーのせん断耐力のみが評価されるが、1)アンカーだけの実験では設計耐力に達しない、2)既存部材の損傷や剛性低下により接合部が破壊する、3)目荒らしすることで最大耐力後に急激に脆性破壊する例などが報告されている。この主な要因として、既存部材の損傷・変形による影響が考慮されずにアンカーの実験が行われてきたため耐力式が実現象に適合しない、目荒らしに関する知見がなく不適当に目荒らしされていることが考えられる。

### 2. 研究の目的

本申請研究では、上述の背景を踏まえ、接合部に生じる変位場を推定し、これを考慮した最適な実験方法および理論に基づいた適切な目荒らし形状を提案して、接合部の新たな設計施工体系を確立し、実験法から設計まで接合法の高度化を図ることが研究当初の目的である。なお、詳細は以下に記述するが、研究を遂行しながら、新たな知見を得たことや、あるいは当初予定通りの成果が得られなかった課題もあることから、最終目標である「設計施工体系の高度化」を睨みつつ、適宜、目的や実施内容を見直しながら研究を実施した。

### 3. 研究の方法

#### (1)コンクリート目荒らし面の力学性状の把握

チップングによるコンクリート目荒らし面の力学性状を把握するため、せん断載荷実験、形状測定、形状分析を実施した。実験パラメータは、目荒らし面積比、目荒らし深さ、コンクリート圧縮強度である。また、形状特性も把握することで、凹凸形状とせん断抵抗性能の関係を把握することが可能になる。さらに、任意の変位経路実験を実現するため、接合面鉛直方向の変位を、スクリュージャッキを用いて自動制御する載荷装置を構築した。

#### (2)コンクリート目荒らし面の力学挙動と耐力評価、および施工現場への応用の試み

チップングによる目荒らしの評価手法に関する既往の研究は極めて少ない。しかしながら、同じコンクリート粗面である、ひび割れ面に関する研究、あるいはランダムな凹凸ではないが、成型されたシャキーの破壊性状に関する研究は多く報告されている。そこで、これらの知見を応用して、目荒らし面の力学挙動および耐力評価を試みた。また、施工現場での形状管理に寄与すべく3Dスキャナを用いて取得した形状測定データを用いた評価も検討した。

#### (3)組み合わせ応力下におけるあと施工アンカーのモデル化

申請者は、これまでに実施した研究で、純せん断応力下におけるあと施工アンカーの力学モデルの構築を行っている。そこで、これらの知見を応用して、組み合わせ応力下の挙動を再現できるように、モデルを拡張した。

#### (4)コンクリート目荒らし面とあと施工アンカーを組み合わせさせた接合部の挙動の評価

前述した通り、チップングによる目荒らしとあと施工アンカーを組み合わせさせた研究例も極めて少ない。そこで、両者を用いた接合部のせん断載荷実験を実施するとともに、上記(2)および(3)で構築した力学モデルを組み合わせることで、実験結果を再現できるか、あるいは修正が必要となるのか検証した。

### 4. 研究成果

#### (1)コンクリート目荒らし面の力学性状の把握

電動ハンマーによって施工される目荒らし面(いわゆるチップング)は、施工者の技術や意識に大きく左右される。そのため、現場で厳密に目荒らし面の形状を管理することは極めて難しい。また、現行の規・基準においても、面積比や深さの規定に統一性はない。この大きな理由は、チップングによる目荒らしの力学特性に関する知見不足、さらには定量的に力学特性を評価する手法が無いことに起因すると考えられる。

そこで本研究では、目荒らし面の面積比や深さ、コンクリート強度を違えた実験<sup>1),3),4)</sup>を行った。加えて、接合面の挙動を任意にコントロールできるように、自動制御プログラミング言語LabVIEWを用いた自動制御システムを開発し、加力システムも構築<sup>9)</sup>した。その結果、以下の知見を得た。

面積比が30%以下では、凹凸面の側面での圧壊が顕著となる支圧破壊が、50%以上では増設側のグラウトと既存側のコンクリートの水平投影面で破壊するせん断破壊となることが明らかとなった。

コンクリート強度が $30\text{N/mm}^2$ くらいまで高くなると、基本的には上記の傾向となるが、面積比が30%では、支圧破壊と混合破壊の両者が確認された。

深さを違えても大きな差は見られないが、おおむね5mmよりも浅くなると、やや耐力が低下する傾向が確認された。

面積比が30%を以上になると、破壊モードの相違に関わらず、最大荷重値は頭打ちになる。

したがって、施工量に対して、もっとも効率的に耐力を発揮する目荒らし面積比は 30%程度であると結論付けられる。

## (2)コンクリート目荒らし面の力学挙動と耐力評価、および施工現場への応用の試み

上記で述べた目荒らし面の力学挙動および耐力を評価すべく、力学モデル<sup>1),5),6),9)</sup>および耐力式<sup>3),4),8)</sup>の構築を試みた。これらを実施するため、レーザー変位計を用いた形状測定とその形状分析も実施した。さらに、施工現場への展開も見据え、3D スキャナを用いた耐力評価式の構築<sup>7),13)</sup>も行った。以下に、得られた知見を列記する。

支圧破壊時の力学挙動の再現を目的に、既往のコンクリートひび割れ面のせん断応力伝達構成式を適用した。使用したモデルは、李・前川モデル(李・前川, 1988)と Bujadaham モデル(Bujadaham, 1991)である。これらのモデルに適用するために、形状測定値から傾斜密度分布を分析し、さらにこのシミュレーション式を提案した。微小凹凸面の摩擦を無視した前者のモデルでは、せん断応力 - ずれ関係を再現することは可能であったが、軸応力を適切に評価することはできなかった<sup>1)</sup>。しかしながら、微小凹凸面の摩擦を考慮した後者のモデルを適用することにより、精度良く実験結果を再現することに成功した<sup>6)</sup>。

せん断破壊時の力学挙動を再現するため、i) 破壊面の水平投影面積を考慮したモールの応力円による最大応力度の推定、ii) Hordijk モデル(Hordijk, 1992)を用いた応力軟化挙動の再現、iii) 応力一定挙動を再現することで、概ね良好に実験結果を追えるようになった<sup>9)</sup>。支圧破壊時の最大耐力を推定するため、形状測定から得られる垂直投影面積を考慮した耐力式を構築した。また、レーザー変位計を用いた形状測定値のみならず、3D スキャナを用いた形状データ<sup>7),13)</sup>を用いている。その結果、図-1 に示すように、高い精度で最大荷重値を推定することが可能となった。

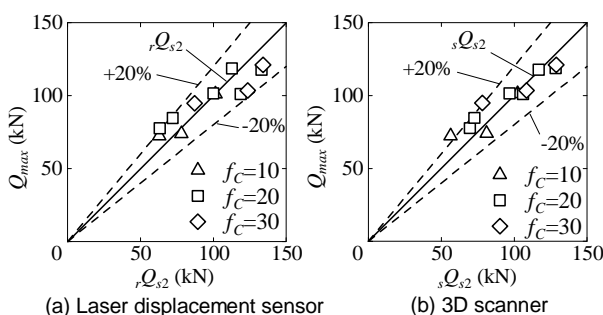


図-1 支圧破壊する目荒らし面の耐力推定精度

せん断破壊時の耐力推定のため、載荷前後のそれぞれ形状測定値から求められる等価破壊面なる新たな概念を用いることで、せん断破壊時の耐力推定が可能なることを示唆した。

## (3)組み合わせ応力下におけるあと施工アンカーのモデル化

外付け耐震補強や、次に触れるが目荒らし面と組み合わせた場合、あと施工アンカーは引張応力を受けながらせん断抵抗することになる。以下にモデル化の方針、および得られた知見を列記する。

申請者が過去に提案した、純せん断応力下におけるダウエルモデルをベースに、組み合わせ応力下(すなわち、一定引張応力と正負交番繰り返しせん断応力の組み合わせ)における力学挙動の再現を試みた。

引張応力が作用する際のせん断力の低下を、以下の式により評価した。

$$q = \sqrt[3]{1 - (T/T_a)^\alpha} \times q_0 \quad (1)$$

ここに、 $q$  は組み合わせ応力下におけるせん断力、 $T$  は一定引張力、 $T_a$  はアンカー筋の引張降伏強度、 $q_0$  は引張力がゼロの時のせん断力、 $\alpha$  は係数である。

$\alpha = 0$  とすることで、図-2 に示すように、概ね良好にせん断応力 - ずれ関係を再現することができた。

アンカー筋の残留ひずみや、コンクリートとアンカー筋の付着すべり関係を考慮することで、目開き量の挙動を再現できる可能性がある<sup>17)</sup>ことを示唆した。

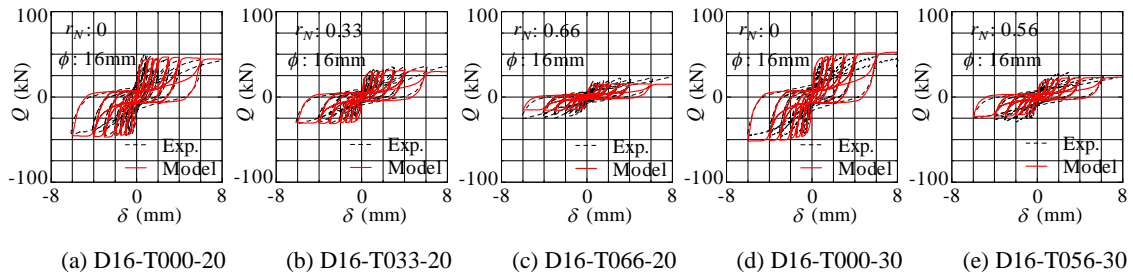


図-2 組み合わせ応力下における提案モデルと実験値の比較 14).[3]

(4)コンクリート目荒らし面とあと施工アンカーを組み合わせた接合部の挙動の評価

既に触れたように、チッピングによる目荒らし面とあと施工アンカーを組み合わせた実験そのものも、既往の文献ではほとんど見られない。そこで、本研究において、まずは D16 のアンカー筋を対象に、目荒らし面積比と軸応力をパラメータとした実験を行った。次いで、これまでに構築してきた目荒らし面とあと施工アンカーの力学モデルを累加し、実験結果の再現を試みた。以下に、得られた知見を列記する。

目荒らし面とあと施工アンカーの、それぞれの力学モデルを単純に組み合わせると、変形が小さい領域でモデルがピーク応力に達し、その後荷重が大きく低下する。これに対し実験結果は、ずれが 2mm 前後でピーク応力に達し、その後の荷重低下もモデルほど大きくはなかった。またピーク時の応力も、モデルはかなり過小に評価した。

上記で述べた知見より、目荒らし面とあと施工アンカーを組み合わせると、単純にそれぞれのモデルを組み合わせただけでは評価できない、何らかのメカニズムの変化が生じたものと考えられる。

あと施工アンカーのモデルにおける塑性ヒンジ点の形成位置や、目荒らし面の接触応力モデルを修正することで、併用時の実験結果の再現を試みた。その結果、図-3 に示す高い精度で実験結果を再現することができた。

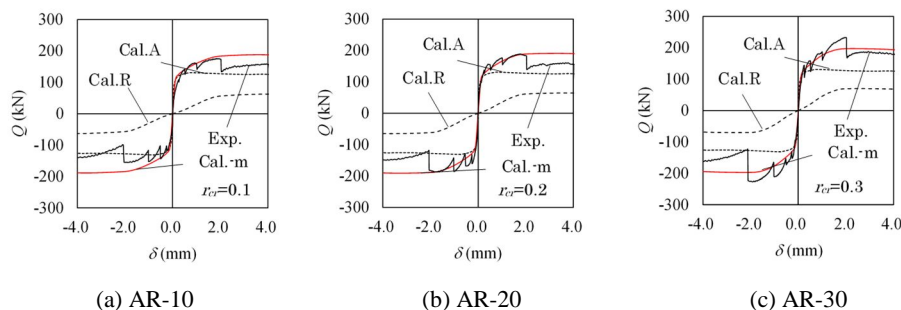


図-3 目荒らしとあと施工アンカーを併用した実験と修正モデルの比較

上記で述べたように、本研究により、設計精度の向上や、3D スキャナを用いた管理方法の提案など、施工現場での改善・発展にも大きく寄与できる成果が得られた。しかしながら、目荒らし面の繰り返し時の再現が未だ開発途中であり、また実構造物における接合部の挙動を詳細に把握しきれていないなど、さらに効率的な設計に繋がる課題も残されている。今後、これらの未解決課題の解明にも着手したいと考えている。

参考文献

Bujadaham Buja: The Universal Model for Transfer across Crack in Concrete, Department of Civil Engineering, The Graduate School of The University of Tokyo, 1991.3  
 Hordijk D. A. : Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete; Experiments, modelling and analyses, HERON, Vol.37, No.1, pp.3-79, 1992  
 李宝祿, 前川宏一: 接触密度串寸に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, コンクリート工学論文, Vol26, No1, pp.123~137, 1988.1

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- 1) 磯崎翼,高瀬裕也,阿部隆英,香取慶一: 既存部材におけるコンクリート目荒らし面のせん断抵抗に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.2, pp.919-924, 2017.6
- 2) 高瀬裕也,和田俊良,池田隆明,篠原保二,溝口光男: 一定引張応力を受けながら繰り返しせん断力を受ける接着系あと施工アンカーの力学挙動と仕事量, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.82, No.738, pp.1255-1263, 2017.8
- 3) 片桐優紀,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 等価破壊面深さをを用いた既存コンクリート目荒らし面のせん断破壊時耐力の推定手法, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.2, pp.967-972, 2018.6
- 4) 武者右京,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 既存コンクリート目荒らし面の垂直投影面積を考慮した支圧破壊時におけるせん断耐力式の提案, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.2, pp.961-966, 2018.6
- 5) 磯崎翼,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 圧縮強度を違えたコンクリート目荒らし面のせん断応力伝達機構を再現する構成モデル, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.2, pp.73-78, 2018.6
- 6) 磯崎翼,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡健,香取慶一: 既存コンクリート部材におけるコンクリート目荒らし面のせん断応力伝達と微小面の接触応力に基づく力学モデル, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.83, No.750, pp.1151-1159, 2018.8
- 7) 武者右京,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡健,香取慶一: 既存コンクリート目荒らし面における 3D スキャナを用いた形状座標値によるせん断耐力式, *日本建築学会技術報告集*, Vol.25, No.59, pp.55-60, 2019.2
- 8) 武者右京,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 既存コンクリート目荒らし面の形状モデルを用いたせん断耐力式の提案, *コンクリート工学年次論文集 (採用決定)*, Vol.41, No.2, 2019.6
- 9) 片桐優紀,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 既存コンクリート目荒らし面のせん断載荷実験手法と耐力性状 (採用決定), *コンクリート工学年次論文集*, Vol.41, No.2, 2019.6
- 10) 奥山裕希恵,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 耐震補強接合部におけるあと施工アンカーのダウエル効果と目荒らし面の噛み合い効果の累加に関する検証 (採用決定), *コンクリート工学年次論文集*, No.30, 2019.7
- 11) 奥山裕希恵,高瀬裕也,阿部隆英,樋渡健: 耐震補強接合部におけるあと施工アンカーのダウエル効果と目荒らし面の噛み合い効果の累加に関する検証 (採用決定), *コンクリート工学年次論文集*, No.30, 2019.7
- 12) 安達拓真,高瀬裕也: 複合応力下における接着系あと施工アンカーのための力学モデルの拡張 (採用決定), *コンクリート工学論文集*, No.30, 2019.7
- 13) Musya, U., Katagiri, Y., Takase, Y., Abe, T., Sakamoto, K., Hiwatashi, T. and Katori, K.: Bearing strength formula of roughened concrete considering vertical projection area (採用決定), *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2019
- 14) Takase, Y.: Testing and Modeling of Dowel Action for a Post-Installed Anchor Subjected to Combined Shear Force and Tensile Force (採用決定), *Engineering Structures*, 2019

〔学会発表〕(計 9 件)

- [1] 磯崎翼,武者右京,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡健,香取慶一: 耐震補強接合部におけるコンクリート目荒らし面のせん断抵抗性能, *日本建築学会北海道支部研究報告集*, 90 巻, pp.45-48, 2017.6
- [2] Isozaki, T., Musya, U., Takase, Y., Abe, T., Sakamoto, K., Hiwatashi, T. and Katori, K.: Mechanical Model of Shear Stress Transfer of Roughened Concrete Surface for R/C Existing Member, *Proceedings of Computational Modeling of Concrete Structures*, pp.973-982, 2018.2
- [3] Takase, Y., Mizoguchi, M. and Wada, T.: Mechanical Model of Adhesive Post-installed Anchor Subjected to Combined Force, *Proceedings of Computational Modeling of Concrete Structures*, pp.955-962, 2018.2
- [4] 奥山裕希恵,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡健,香取慶一: 耐震補強接合部におけるダウエルモデルと目荒らしモデルの累加による実験結果の再現性, *日本建築学会北海道支部研究報告集*, 91 巻, pp.155-158, 2018.6
- [5] 奥山裕希恵,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡健,香取慶一: 既存コンクリート目荒らし面の形状特性に基づくせん断耐力式の構築, *日本建築学会北海道支部研究報告集*, 91 巻, pp.155-158, 2018.6
- [6] 菊地成美,高瀬裕也: 7.一定引張応力下の接着系あと施工アンカーにおける繰り返しせん断載荷が力学挙動に及ぼす影響, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 構造 IV, pp.265-266, 2018.9

- [7] 菊地成美, 窪田凌平, 高瀬裕也: 多数回繰り返し履歴を受ける複合応力下の接着系あと施工アンカーのせん断抵抗に関する基礎的検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 92 巻, pp.155-158, 2019.6
- [8] 奥山裕希恵, 高瀬裕也, 阿部隆英, 坂本啓太, 樋渡健, 香取慶一: 耐震補強接合部の力学挙動を再現する修正モデルと軸力の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 92 巻, pp.155-158, 2019.6
- [9] Katagiri, Y., Takase, Y., Abe, T., Sakamoto, K., Hiwatashi, T. and Katori, K.: Mechanical Model of Roughened Concrete of Existing Members for Shear Failure Mode, 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2019.6