

研究題目：鉄筋コンクリート造建築物におけるあと施工アンカーと目荒らしを用いた
耐震補強の接合部の力学的性質に関する研究

飛島建設株式会社

阿部 隆英

指導教員 香取 慶一 教授

学位請求論文要旨

1. 序論

1981年に建築基準法、同施行令が改正され、それ以前の基準で設計・施工された建築物は、現行では既存不適格建築物の扱いとなる場合がある。その後、1995年に阪神・淡路大震災が発生し、日本は甚大な被害を受けた。そして、近年では2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震と未曾有の地震が頻発している。著者は東北地方太平洋沖地震の被災調査を行い、耐震補強されている多くの建築物は損傷を抑えられ、人命を守る役割を果たしていることから、耐震補強の効果は大きいと実感した。

現在、多くの耐震補強の工法が開発、施工されている。例えば、鉄骨ブレースや耐震壁の増設や増し打ちにより、建物の強度を増大させる工法がある。また、オイルダンパーや摩擦ダンパー等の制震デバイスを用いた制震ブレースによる補強工法がある。これら多様な耐震補強工法の全てにおいて、既存躯体と鉄骨ブレース、耐震壁、制震ブレース等（以下、補強部材と呼称する）を接合させる必要があり、補強部材と既存躯体は補強効果を高めるために、限りなく一体的であることが重要であると言える。この既存躯体と補強部材を接合する方法として、既存躯体側の接合面には目荒らしとあと施工アンカーが一般的に用いられている。

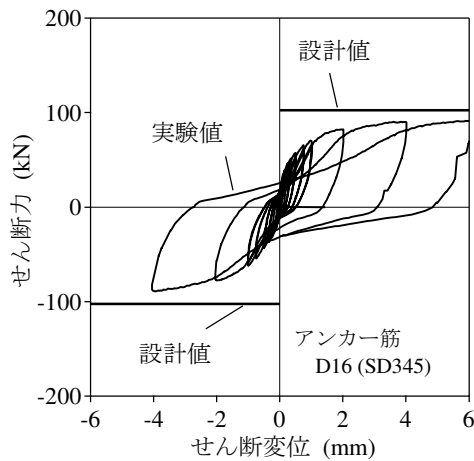
目荒らしについては、電動ピックに研り用のドリルビットを装着して行う、チップングと呼ばれる目荒らしが多く用いられている。写真1にチップング施工状況を示す。チップングによる目荒らしは局所的に研ることから、仕上がりの深さが深いという特徴を有する。そのため、チップングによる目荒らしを施した場所にコンクリートやグラウトが充填され、この充填されたコンクリートやグラウトと既存部のコンクリートは、地震時にそれぞれ支圧抵抗する。また、目荒らしは各基・規準で構造規定として面積や深さが記載されているが、この面積や深さ等による形状の一律的な見解は見られないように思われる。この理由は、既存躯体に施す目荒らしの面積の測定方法が確立されていないこと、形状が複雑であること、更に施工者の技量により深さや形状が異なるためだと思われる。これらのことから、チップング施工時の面積や形状の管理は非常に困難であり、期待する構造性能を満足するような品質を確保することも難しいと言える。さらにチップングを施工する現場では、騒音、振動及び粉塵の発生が伴うため、建物を使用しながら耐震補強工事を実施する際には、建物の使用者と施工者に大きな負担を強いることになる。また、チップングの施工者は振動工具を扱うため、振動病の予防の観点から、施工時間が制限される。こ



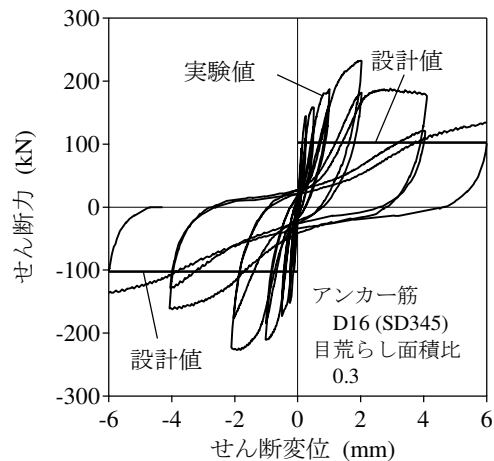
写真1 チッピング施工状況



写真2 円柱状シアキー施工状況



(a) あと施工アンカー単独



(b) あと施工アンカーとチッピング併用

図1 設計値と実験値の比較

これらの課題を解決するために、チッピングによる目荒らしに代わる新しい目荒らし工法として、円柱状シアキーの開発に着手した。

円柱状シアキーは、湿式コアドリルを用いて円柱状の凹部を設ける接合方法である。写真2に実際の施工における円柱状シアキーの施工状況を示す。湿式コアドリルに専用のダイヤモンドコアビットを装着し、穿孔することで接合面に円柱状の形状を形成することができる。また、コアドリルを用いることで、凹部の形状が施工者の技量によらず均等化され、さらに前述したような振動、騒音及び粉塵の発生においてもチッピングと比較して大きく低減できる。この円柱形状の凹部にグラウトまたはコンクリートが充填されることで接合部にせん断力が作用する際に、シアキーとして抵抗することが期待される。なお、本研究の試験体では、コンクリートコアを抜くためのダイヤモンドコアビットを湿式コアドリルに装着して切削し、残置しているコンクリートはコンクリートタガネを用いて除去している。

既存躯体と補強部材を接合する接合面の設計は、一般的にあと施工アンカーに関する諸元のみで構成されており、目荒らしについては構造規定で定められている。つまり設計ではあと施工アンカーと目荒らしを合算される形で評価されていると推察される^{図1}。このことから、あと施工アンカー及び目荒らしが各々負担するせん断力を明確にし、設計に反映することが重要と考える。そのためには、あと施工アンカー及び目荒らしの力学挙動やせん断力とせん断変位関係の評

価が必要となる。

あと施工アンカーとチップングによる目荒らしを併用した場合、初期の剛性はチップングが寄与することで高くなり、チップングの荷重低下領域では、あと施工アンカーのダウエル効果により、せん断力の低下が抑制されると考えると、両者を適切に用いることで、接合面は高い剛性と耐力を得ることが可能になると推定できる。しかしながら、あと施工アンカーに関する構造的な性能は、多くの研究が行われ始めているものの、耐震補強の目荒らし、特にチップングの構造的な性能については、未解明なことが多く、せん断耐力式やせん断力 - せん断変位関係を定量評価した研究は極めて少ない。

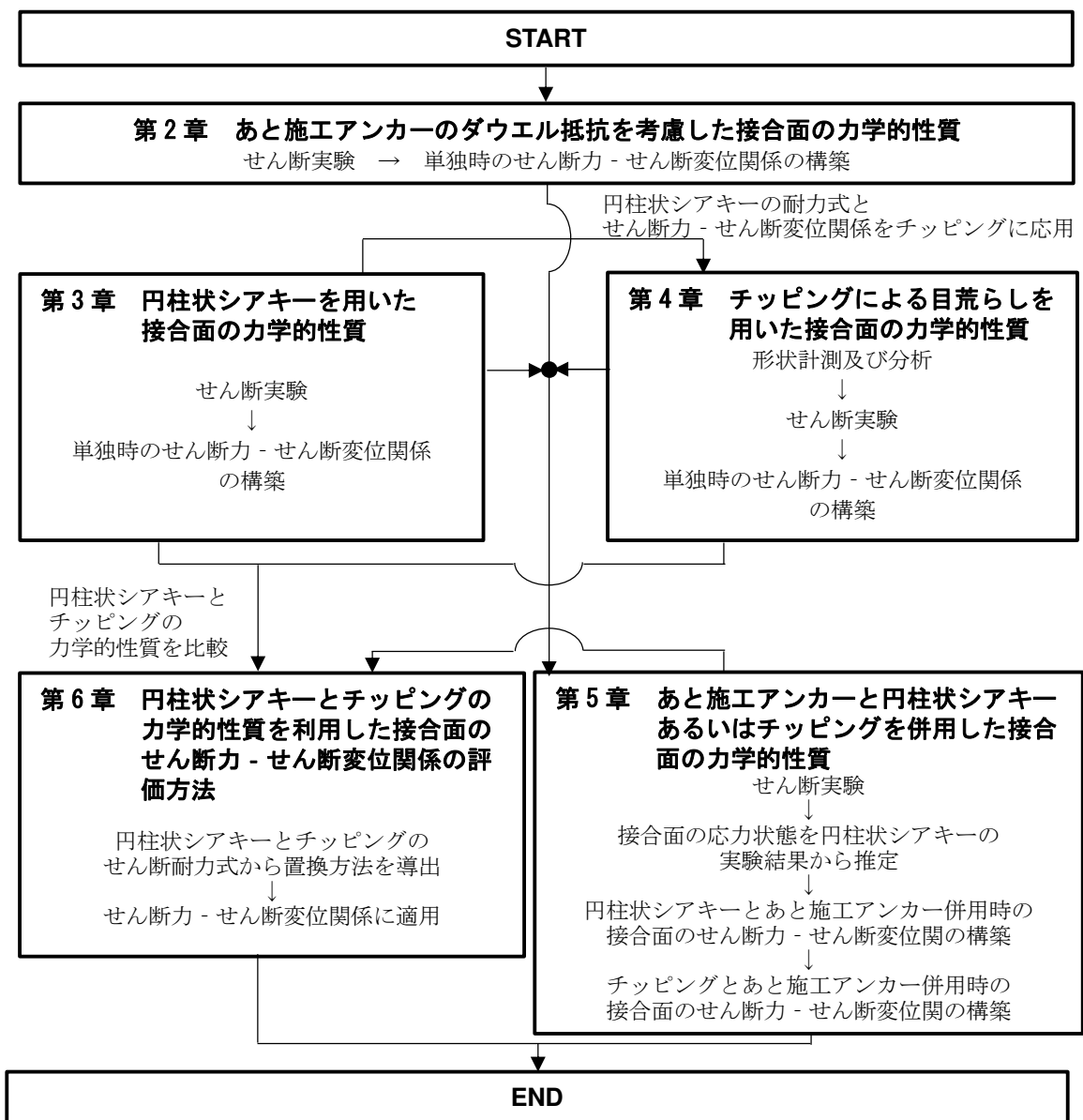


図2 研究フロー

本論文では、図2の研究フローに示すように、あと施工アンカー、円柱状シアキー及びチップングを単独で用いた場合のせん断実験を行い、その結果から各々のせん断力 - せん断変位関係を構築する。また、チップングにおいては凹凸の形状や面積が構造性能に及ぼす影響が大きいと考えられることから、画像解析や高感度スポットレーザー変位計で詳細に形状を測定し、この計測結果とせん断実験結果の相関関係を検証する。続いて、あと施工アンカーと円柱状シアキー及びあと施工アンカーとチップングを併用した場合のせん断力 - せん断変位関係を構築する。そして最後に、施工や設計条件に応じて柔軟に目荒らしの施工が対応できるように、構築した円柱状シアキーとチップングのせん断耐力式及びせん断力 - せん断変位関係の評価式を比較し、期待する構造性能を確保しながら、チップングから円柱状シアキーへ置換する方法を提案する。

2. 本論

第1章 序論では、本研究の背景として耐震補強に用いるチップングによる目荒らしの課題を抽出し、このチップングに代わる新しい目荒らし工法として開発した円柱状シアキーの特徴について記載する。そして、本研究の概要及び目的について述べる。

第2章 あと施工アンカーのダウエル抵抗を考慮した接合面の力学的性質では、あと施工アンカーのせん断抵抗性能について基礎的な検討を行うため、単調載荷実験の結果から弾性支承梁の理論を応用して、反力係数の設定方法を定め、既存部と補強部の非線形挙動の相違を考慮した、せん断力 - せん断変位関係の評価式を構築する^{図3(a)}ことを目的とする。また、この評価式から算出される計算耐力の実験値への適合性について検証する^{図3(b)}。なお、本研究で対象とするあと施工アンカーは、接着系あと施工アンカーであり、使用した接着剤は注入方式カートリッジ型の2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤（有機系接着剤）である。

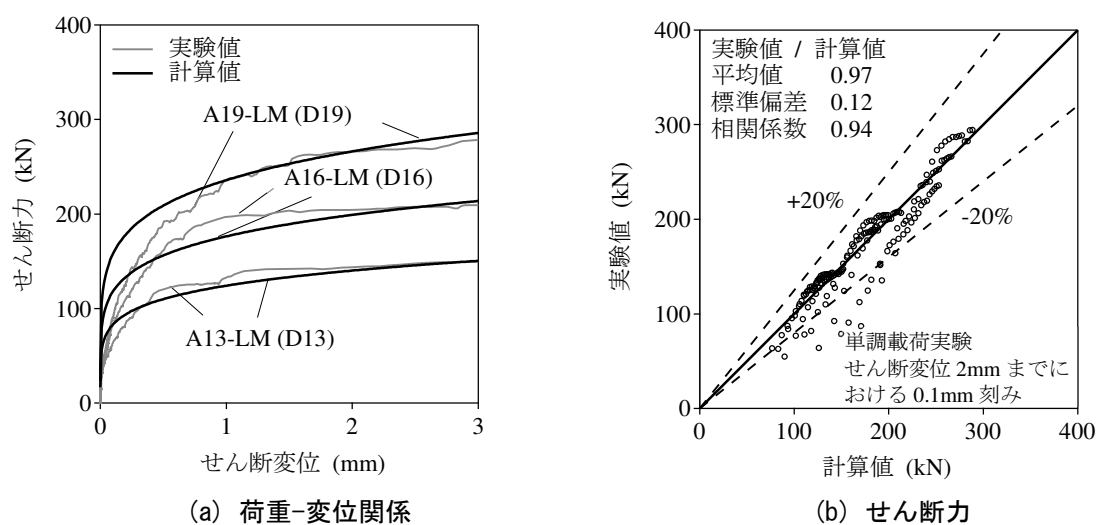


図3 せん断力 - せん断変位関係の実験値と計算値の比較
(あと施工アンカー単独)

第3章 円柱状シアキーを用いた接合面の力学的性質では、チップングによる目荒らしに代わる工法である円柱状シアキーを用いたせん断実験を行い、その構造性能について検証する。

本論文が対象としている耐震補強の接合部では、あと施工アンカーと円柱状シアキーが併用されることを想定している。しかしながら、あと施工アンカーと円柱状シアキーそれぞれの抵抗要素は各々異なった力学挙動を示すと推察される。即ち、シアキーによる支圧抵抗では、シアキーの底面(凸部側に対する底面)でのせん断破壊、もしくはシアキーの側面の支圧破壊によって、最大耐力後、荷重が低下する挙動を呈する。これに対し、あと施工アンカーのダウエル効果による挙動では、変形の進展と共に緩やかに荷重が増加する傾向を示す。これらの各力学挙動は、剛性、最大耐力時の変形量およびポストピーク領域の挙動もそれぞれ異なることから、適切なせん断力-せん断変位関係を構築するためには、各抵抗要素の力学挙動を緻密にモデル化し、これらを合わせて検証する必要がある。

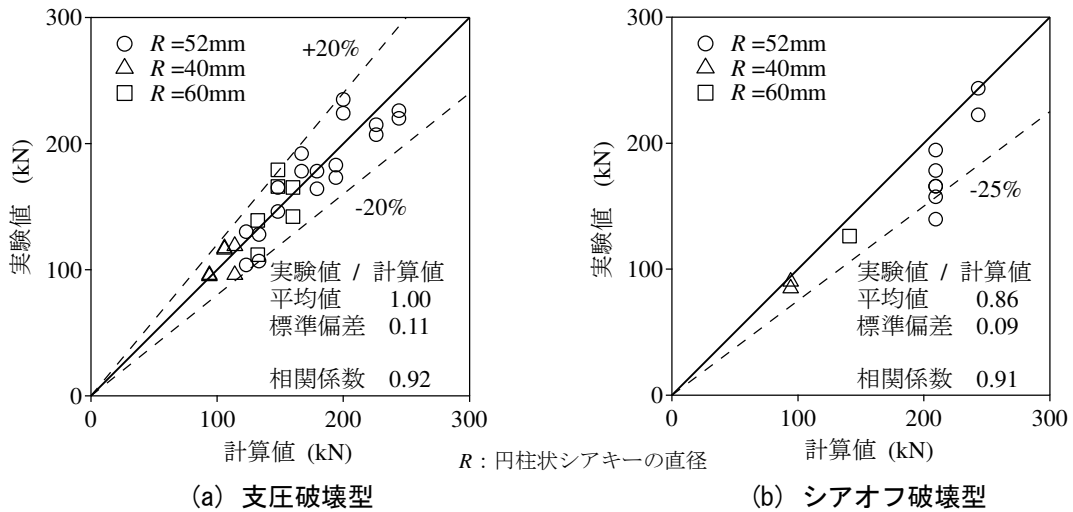


図4 せん断耐力の実験値と計算値の比較 (円柱状シアキー単独)

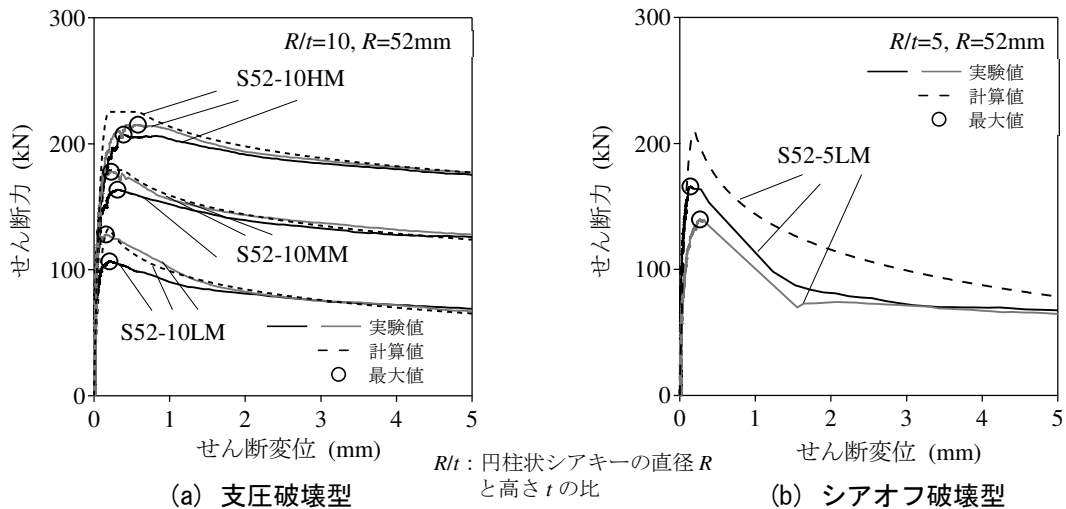
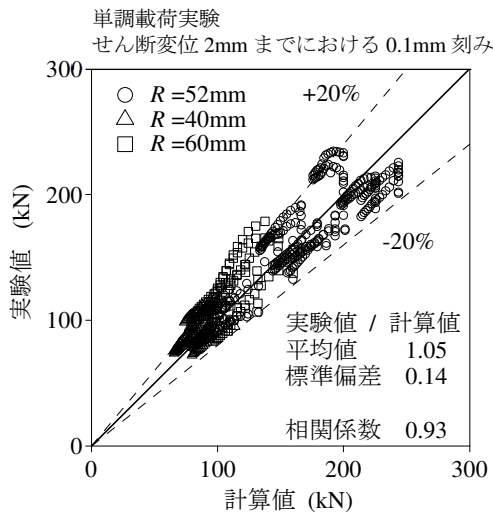
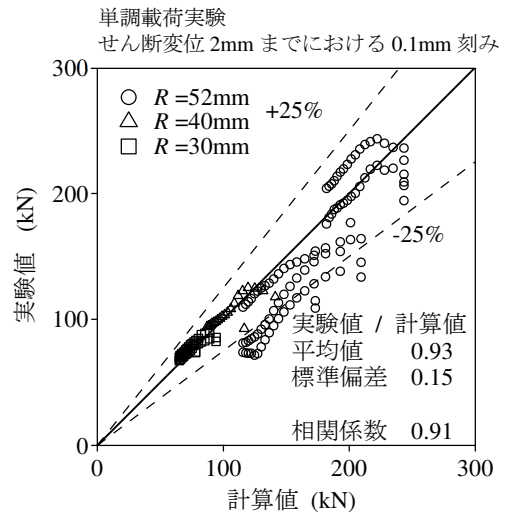


図5 せん断力-せん断変位関係の実験値と計算値の比較 (円柱状シアキー単独)



(a) 支圧破壊型



(b) シアオフ破壊型

図6 せん断力-せん断変位関係におけるせん断力の実験値と計算値の比較
(円柱状シアキー単独)

以上より、第3章では円柱状シアキー自体の構造性能に焦点を当て、破壊性状とせん断耐力を把握すると共にせん断耐力を評価し⁴,更に実験結果をポストピーク領域まで含めて整理することで、円柱状シアキーのせん断力-せん断変位関係を構築⁵及び評価⁶することを目的とする。

第4章 チッピングによる目荒らしを用いた接合面の力学的性質では、チッピングによる目荒らしを接合面に適用した試験体のせん断実験を行い、その構造性能について検証する。

チッピングによる目荒らしのせん断耐力式を実務の設計に用いるためには、①せん断耐力が目荒らし面積比 r_{cr} によらず同じせん断耐力式で算定できること、②施工者の技能により異なる目荒らしの深さを数値的に捉え、その深さとせん断耐力との関係を明確にすること、③接合面に生じる圧縮軸力の影響をせん断耐力式に反映することができ、更に極力容易に計算可能であることが望まれる。

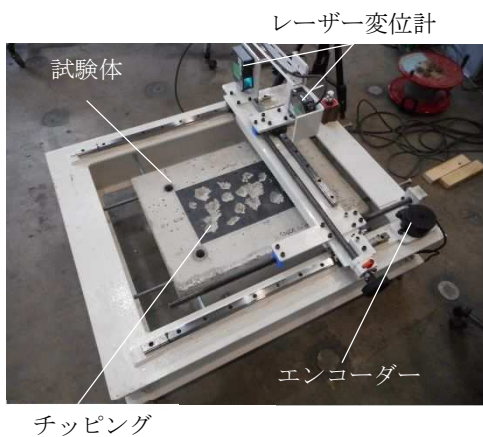


写真3 形状計測装置

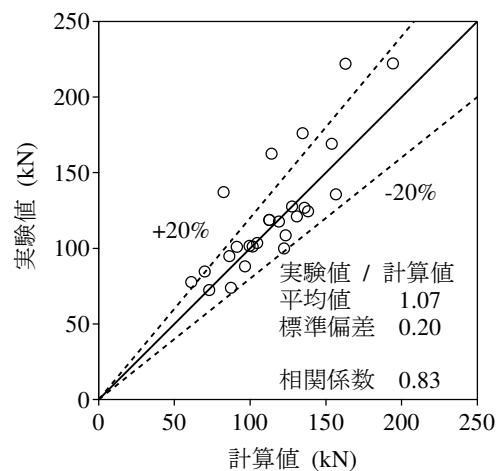


図7 せん断耐力の実験値と計算値の比較 (チッピング単独)

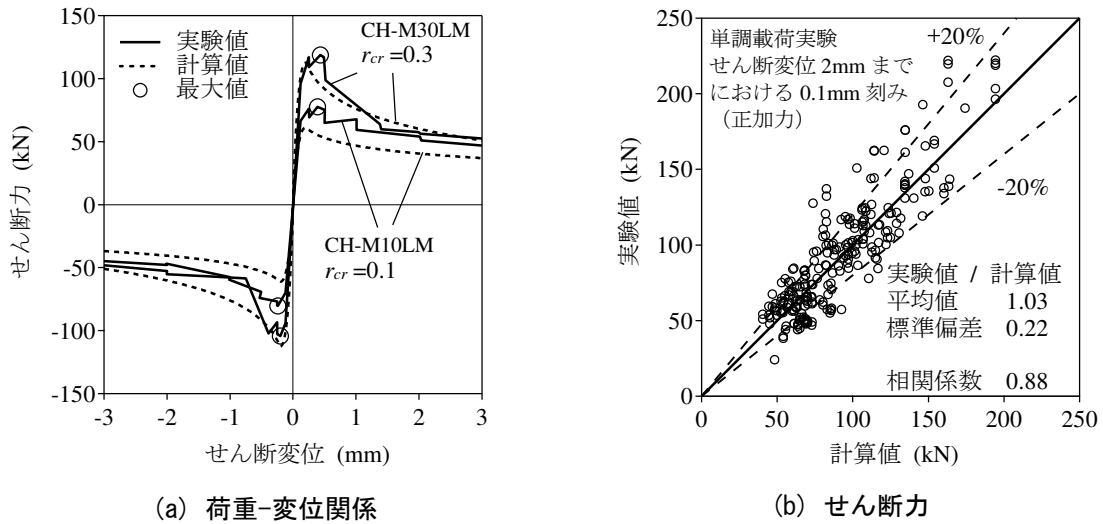


図8 せん断力-せん断変位関係の実験値と計算値の比較 (チップング単独)

まず、画像解析を用いて r_{cr} を詳細に計測する。そして、スポットレーザー変位計を使用した形状計測装置を構築し^{写真3}、この形状計測装置を用いてチップングの凹凸を詳細に計測及び分析する。その後、せん断実験を行い、 r_{cr} やチップングの形状によるせん断力や力学挙動の違いを比較する。これらの計測、分析及び実験結果から、せん断耐力式を構築及び評価^{図7}し、さらにせん断力 - せん断変位関係の評価式の構築^{図8(a)}及びその計算値の実験値への適合性を評価^{図8(b)}することを目的とする。

第5章 あと施工アンカーと円柱状シアキーあるいはチップングを併用した接合面の力学的性質では、あと施工アンカーと円柱状シアキー及びあと施工アンカーとチップングを併用した試験体のせん断実験を行い、これらの構造性能について検証する。

円柱状シアキー、もしくはチップングを単独で用いた場合 (以下、単独時と称する) の力学挙動とあと施工アンカーの力学挙動は、それぞれ大きく異なる。そのため、両者を併用した場合 (以下、併用時と呼称する) の実験結果を、各々の単独時のせん断力 - せん断変位関係を累加したモデル (以下、修正前モデルと称す) で、評価可能か検証する必要がある。そこで、はじめにあと施工アンカーと円柱状シアキーそれぞれの単独時のモデルを単純に累加した修正前モデルと実験結果を比較する。その後、実験結果から接合面の軸応力による応力状態及び力学挙動を推定し、これらの影響を反映した併用時のせん断力 - せん断変位関係 (以下、修正モデルと称する) を構築する^{図9}。続いて、この円柱状シアキーとあと施工アンカーを併用した修正モデルをチップングの場合に適用できるかを検証する^{図10}。これらの検証から、第5章ではあと施工アンカーと円柱状シアキー及びあと施工アンカーとチップングを併用した場合のせん断力 - せん断変位関係の評価式を構築することを目的とする。

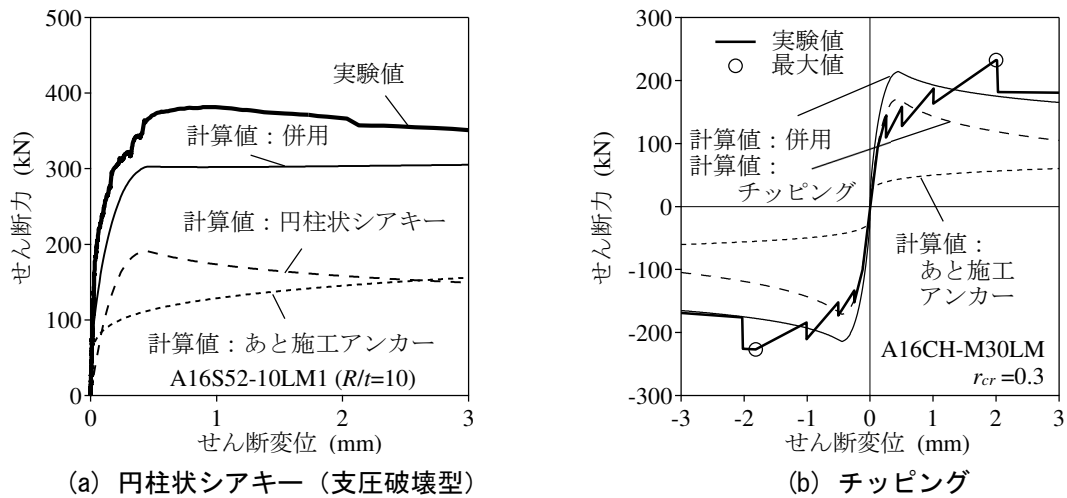


図9 せん断力-せん断変位関係の実験値と計算値の比較（あと施工アンカーと併用）

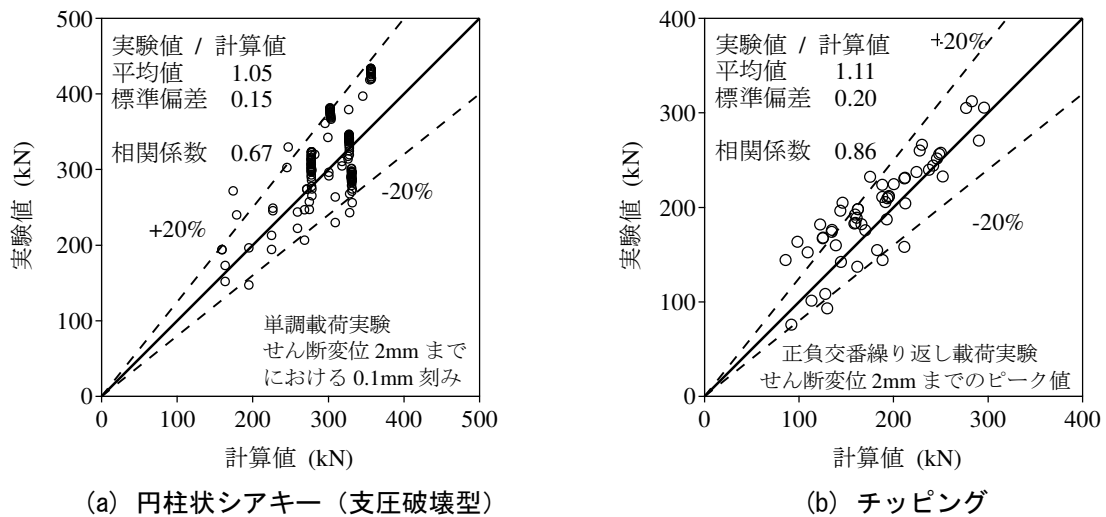


図10 せん断力-せん断変位関係における実験値と計算値の比較
（あと施工アンカーと併用）

第6章 円柱状シアキーとチップングの力学的性質を利用した接合面のせん断力-せん断変位関係の評価方法では、施工や設計条件に応じて柔軟に目荒らしの施工が対応できるように、構築した円柱状シアキーとチップングのせん断耐力式及びせん断力-せん断変位関係の評価式を比較し、期待する構造性能を確保しながら、チップングから円柱状シアキーへ置換する方法を提案する。

円柱状シアキーのせん断耐力式は、支圧破壊とシアオフ破壊の破壊形式毎に構成されており、この支圧破壊型によるせん断耐力式に用いられている既存部コンクリート強度による補正係数 C_c と平均圧縮応力度による補正係数 C_N が、チップングのせん断耐力式に適用されている。つまり、円柱状シアキーとチップングの両者において、既存部コンクリート強度及び平均圧縮応力度による影響は、概ね同様であることが言える。また、円柱状シアキーの支圧破壊型とチップング

は、同様の力学挙動を呈していると考え、チップングの力学挙動は円柱状シアキーの支圧破壊型のせん断力 - せん断変位関係を基本に構成されている。更に、円柱状シアキーとあと施工アンカーを併用した場合のせん断力 - せん断変位関係の評価式は、併用時のアンカー筋の引張力の鉛直成分による接合面の平均圧縮応力度 σ_0 と併用時の円柱状シアキーに生じる平均圧縮応力度 σ_0' による接合面の応力状態を加味して構築している。これらをチップングに適用して考えると、せん断力 - せん断変位関係の計算値は実験値を高い精度で推定することができた。

そこで第6章では、円柱状シアキーとチップングの力学的性質が類似している関係を活かし、施工や設計条件に応じて柔軟に対応できる目荒らしの施工が可能となるように、期待する構造性能を確保しながら、チップングから円柱状シアキーへ置換する方法を検討する。この方法を用いることで、騒音、振動、粉塵の問題が懸念され、チップングによる目荒らしの施工が困難な箇所や、目荒らし面積比の管理が難しい場合は、同等の構造性能を有する円柱状シアキーを適用することが可能となる。例えば、設計上期待するチップングによる目荒らし面積比が定められているものの、施工時に目荒らし面積比が管理できない場合は、同等のせん断力を有する円柱状シアキーにせん断力を置換することで、施工後は円柱状シアキーの個数で管理することができる。これに反して接合面の面積が狭小な場合やあと施工アンカーが密に配置されているため、円柱状シアキーが施工できない場合等は、期待するせん断耐力をチップングに置き換えることで施工が可能となる。

3. 結論

本論文では、チップングによる目荒らしに代わる円柱状シアキーの開発に着手し、あと施工アンカー（第2章）、円柱状シアキー（第3章）及びチップング（第4章）を単独で用いた場合のせん断実験を行い、その結果からせん断力 - せん断変位関係の評価式を構築した。また、チップングにおいては、画像解析やレーザー変位計で詳細に形状を測定し、この計測結果とせん断実験結果の相関関係を導出した。そして、あと施工アンカーと円柱状シアキー及びあと施工アンカーとチップングを併用した場合のせん断力 - せん断変位関係の評価式（第5章）を構築した。更に、円柱状シアキーとチップングの力学的性質について比較検証を行い、期待する構造性能を確保しながら、チップングから円柱状シアキーへ置換する方法を提案した（第6章）。

各章の総括を下記に記載し、本論文の結論とする。

- 1) 第2章では、補強部にあと施工アンカーを用いた試験体のせん断载荷実験を行い、この結果から既存部と補強部の非線形挙動の相違を考慮した反力係数 k_c を求める手法を提案し、接合面のせん断ずれ変形によるあと施工アンカーの耐力評価を試みた。そして、载荷条件による影響を反映したせん断力 - せん断変位関係の評価式を構築し、この評価式から算出される計算値と実験値の適合性について検証した。
- 2) 第3章では、チップングに代わる新たな接合方法として、個々の凹凸形状を均等化することでせん断耐力の評価が可能な円柱状シアキーを提案し、基本的な構造性能を検証した。

この検証に基づき、本論文では円柱状シアキーの破壊形式に応じて、既存部コンクリートの支圧破壊時のせん断耐力式および補強部グラウトのシアオフ破壊時のせん断耐力式を構築した。また、円柱状シアキーの破壊形式毎及び载荷条件毎に力学挙動を整理し、それぞれのせん断力 - せん断変位関係を構築した。

- 3) 第4章では、実務の設計に用いることを目的とした、目荒らし面積比 r_{cr} による連続性を有し、最大目荒らし深さ z_{max} による変数が無く、平均圧縮応力度 σ_0 を考慮した局所噛み合い抵抗によるせん断耐力 Q_I と全体支圧抵抗によるせん断耐力 Q_B で構成される新たなせん断耐力式を構築した。このせん断耐力式は目荒らし形状を詳細に測定し、その測定データから r_{cr} 、 z_{max} 及び目荒らし部内の垂直投影面積 A_H の分析を行い、 r_{cr} 、 z_{max} に加え、 σ_0 、既存部コンクリート強度 $c\sigma_B$ をパラメータとして実施したせん断実験結果に基づいている。そして、チップングのせん断力 - せん断変位関係の評価式は、円柱状シアキーの支圧破壊型の関係を基本として構築することができた。
- 4) 第5章では、あと施工アンカーと円柱状シアキーを併用した試験体のせん断実験の結果から接合面の軸応力による応力状態を推定し、更に力学挙動を詳細に検討した。その結果、これらの影響を反映した併用時のせん断力 - せん断変位関係である修正モデルは、単に累加した修正前モデルより、実験値を推定する精度が向上した。そして、この円柱状シアキーの支圧破壊型のせん断力 - せん断変位関係の評価式を基本にあと施工アンカーとチップングを併用した時のせん断力 - せん断変位関係の評価式を構築した。
- 5) 第6章では、施工や設計条件に応じて柔軟に対応できる目荒らしの施工が可能となるように、期待する構造性能を確保し、チップングから円柱状シアキーへ置換する方法を検討した。その結果、チップングから円柱状シアキーへせん断耐力を置換する場合、設計上期待する目荒らし面積比 r_{cr} が与えられ、施工する円柱状シアキーの直径 R を設定することで、接合面に配置する円柱状シアキーの個数 n_{sky} が求められる。そのため、施工後はこの円柱状シアキーの個数を管理すればよいことになる。また、円柱状シアキーの支圧破壊型のせん断耐力 ${}_bQ_{sky}$ とチップングのせん断耐力 Q_{ch} が同じであると、円柱状シアキーもしくはチップングに作用する平均圧縮応力度 σ_0 は円柱状シアキーとチップングの場合で異なる値となる。これより、単独時の円柱状シアキーとチップング両者のせん断力 - せん断変位関係は、荷重漸増領域及び荷重一定領域では同じであるが、荷重低下領域ではせん断変位 δ_H が増大するに連れ、円柱状シアキーの方がチップングより荷重低下が小さくなる。

あと施工アンカーと円柱状シアキー及びあと施工アンカーとチップングを併用した場合の最大荷重時の変位は、計算値と実験値で異なることがある。この理由として、本研究ではあと施工アンカーのひずみから、併用時の接合面の平均圧縮応力度を推定した上で一定の値を付加したが、実際の併用時の接合面の応力状態は、せん断変位と共に刻々と変化していることだと考えられる。また、あと施工アンカーと円柱状シアキーのそれぞれの配置数量、あと施工アンカーの配置数量とチップングの面積割合によりせん断耐力の負担割合が大きく変動することから、これ

らの条件によっても接合面の応力状態は異なると思われる。これらより、あと施工アンカーと目荒らしを併用した時の挙動は、今後も詳細に検証する予定である。

本研究では実験を主体としてあと施工アンカー、円柱状シアキー及びチップングのせん断耐力式やせん断力 - せん断変位関係の評価式を構築してきたが、今後は有限要素解析を用いて接合面の応力状態を推定することや、機械学習を用いて力学挙動を再現できるかなど、多様な方向から研究を継続していきたいと考えている。また、本研究では耐震補強の接合部を対象としたが、将来的にはこの研究成果を新築のコンクリートの打継部や、土木分野へ応用し、幅広く適用して行く予定である。