

論文 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

磯崎 翼^{*1}・高瀬 裕也^{*2}・阿部 隆英^{*3}・香取 慶一^{*4}

要旨：コンクリート系構造の既存建物の耐震補強では、既存部材と補強部材の接合面にチッピングによる目荒らしが施されるが、この目荒らし面におけるせん断応力伝達機構を詳細に論じた研究は少ないようである。そこで、目荒らし面の形状測定およびせん断載荷実験を行った。また、コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構を記述する構成則を応用し、力学モデルを構築した結果、目荒らし面積を違えた場合でも、形状特性を適切に考慮することで、せん断応力-せん断変位関係を概ね良好に再現できることが明らかになった。

キーワード：コンクリート目荒らし、せん断抵抗性能、耐震補強、形状測定

1. はじめに

地震大国である我が国において、建物は十分な耐震性能を持つ必要がある。特に近年では、既存建物の有効活用から、耐震性の低い建物への耐震補強が重要視されている。鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造の建物を耐震補強する場合、耐震化のために付加される補強部材は、あと施工アンカーおよびチッピングによる目荒らし（以下、単に「目荒らし」と呼ぶ）を用いた接合部を介して、既存躯体に一体化されることが多い。

現状の接合部の設計¹⁾では、あと施工アンカーの耐力のみが評価され、目荒らしに関する耐力評価はなされていない。したがって、一般的な設計や施工においては、目荒らしのせん断抵抗は補助的なものであり、接合部の耐力は、あと施工アンカーだけで十分に発揮され得ると認識され易い。

しかしながら、幾つかの既往の実験²⁾³⁾を観察すると、目荒らしを施さずに、あと施工アンカーのみを施工した部材実験の結果、最大せん断耐力が設計耐力（アンカー筋の降伏強度を用いて計算した値）を下回るが、目荒らしを施す²⁾ことで、設計耐力を上回る例が報告されている。この事実から、現状の接合部の設計耐力を満足するためには、目荒らしによるせん断耐力を適切に評価すべき場合もあると考えられる。

加えて、打撃型の電動工具（以下、ハンマードリルと呼ぶ）を用いて既存躯体に施す目荒らしの形状は、施工者の技術や意識によって大きく左右され、その凹凸形状を正確に規定することは現実的には不可能に近い。また、この形状のランダムさ故に、現状の設計指針では、目荒らしに関する、深さ、面積等について統一の見解はないようである。さらに著者らが調べた範囲では、目荒らし

面におけるせん断抵抗性能を理論的に追求した文献は見当らない。

一方で、既往の研究分野には、コンクリートひび割れ面におけるせん断応力伝達機構に関する研究⁴⁾⁷⁾があり、これらの知見によれば、微小凹凸面に作用する接触応力を界面全体の面積で積分することにより、ひび割れ面全体に作用するせん断応力と垂直応力を再現できる。つまり、ひび割れ面と同様にランダムな凹凸形状を持つ目荒らし面に、これらの理論を適用することで、このせん断抵抗性能を定量的に評価できると推量される。そこで本論文では、はじめに目荒らし面の形状特性を把握するために形状測定および形状分析を行い、次いでせん断抵抗性能を検証するためのせん断載荷実験を実施し、最後にこの力学挙動を再現し得る力学モデルの構築を図る。

2. コンクリート目荒らし面におけるせん断応力伝達機構を解明するための実験概要

一般的な接合部では、あと施工アンカーと目荒らしの両方が併用され、両者が互いに影響を及ぼし合うものと推察されるが、まずは本論文では、純粋な目荒らしによるせん断抵抗性能に焦点を当て、あと施工アンカーを用いずに実験を行う。以下に、実験概要について述べる。

2.1 試験体の諸元と実験パラメータ

図-1 に試験体の諸元寸法を、表-1 に試験体パラメータを、表-2 にコンクリートとグラウトの材料特性を示す。形状測定およびせん断載荷実験ともに、同一の試験体を用いる。既存躯体側のコンクリートおよび新設部側のグラウトの圧縮強度 σ_B は、それぞれ 17.1N/mm²、64.6N/mm²である。

既存躯体側コンクリートは、580mm×400mm×200mm の

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 大学院生 (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 くらし環境系領域 准教授 博士(工学)(正会員)

*3 飛鳥建設株式会社 技術研究所 耐震技術開発グループ 主任(正会員)

*4 東洋大学 理工学部 建築学科 教授 博士(工学)(正会員)

直方形状である。この上面の 375×200mm の領域に目荒らしを施す。目荒らし面の形状測定を実施した後に、375mm×200mm×200mm の型枠を組んで鉄筋籠を設置し、プレミックスタイプのグラウトを打設する。

本実験では計 5 体の試験体を作製し、このうち 4 体に目荒らしを施工する。残りの 1 体は、目荒らしのようなランダムな凹凸ではなく、接触する面積が明白となるように、円柱状の凹凸²⁾ (円柱状シアキー) を設ける。この円柱形状を図-2 に示す。具体的には、湿式コアドリルを用いて既存側コンクリートを穿孔して残部をはつり取り、直径 52mm、深さ 5mm の円柱状の凹部を形成する。

本論文では、目荒らし面の水平投影面積 A_{cr} を目荒らし面積として、対象とする接合面 (グラウト) の水平投影面積 A_j に対する A_{cr} の比率 r_{cr} を、主たる実験パラメータとし、 $r_{cr}=10\%, 30\%, 50\%, 75\%$ の 4 段階とする。 A_{cr} の確認方法として、画像解析を用いる。目荒らしを施す前に、 A_j の領域をペンキで黒く塗装し、それからハンマードリルで目荒らしし、施工中に、デジタルカメラで目荒らし面の写真を撮影し、目荒らし面の面積を画像解析によって確認しながら、目荒らし面積を調整していく。本試験体における、目荒らし面の状況を写真-1 に示す。表-1 には面積比の実測値も示しているが、想定通りの面積で施工できていることが確認できる。なお、目荒らしの凹凸がない平滑な部分には、グリスを塗布し固着や摩擦の影響を極力少なくしている。

2.2 目荒らし面の形状測定

図-3 に形状測定装置図を示す。図-3 に示すように、高感度スポットレーザー変位計 (以下、レーザー変位計と呼ぶ) を用いて 3 次元座標測定システムを構築して、目荒らし面の凹凸形状を測定する。

計測対象とする試験体の周囲に、リニアガイドを取り付けた H 型鋼を固定する。このリニアガイドに、レーザー変位計を設置し、レールに沿って x, y 平面上に走査させながら、凹凸部の高さをレーザー変位計によって計測することで、目荒らし面の 3 次元形状データを取得する。測定間隔は x 方向 (せん断載荷方向) に 0.04mm 間隔、 y 方向に 0.5mm 間隔とする。

2.3 セン断載荷実験の加力及び計測方法

加力装置図および計測方法を、それぞれ図-4 および図-5 に示す。せん断載荷実験では、既存躯体側に対する新設部側の相対水平変位 δ を変位制御し、正負交番の繰り返しの載荷を行う。

加力装置は、鉛直軸力制御として最大荷重 500kN の押し引き油圧ジャッキを 1 台使用し、水平加力用として最大荷重 500kN の油圧ジャッキを正負それぞれに使用した。水平加力は、接合面と同じ高さとし、加力による偏心を極力小さくした。軸力は、加力ビームを水平に保持し、

1 台の油圧ジャッキで目標軸力となるように制御した。

また、接合面に作用する圧縮応力 σ が、 0.5N/mm^2 一定となるように与えた。この理由として以下の 2 点がある。即ち、1) 既往の文献 8) において、内付け補強架構の接合部に作用する圧縮応力が 0.4N/mm^2 程度になると報告されている、2) アンカー筋の引張応力の反力が接合面に圧縮応力として作用すると仮定し、アンカー筋のピッチが

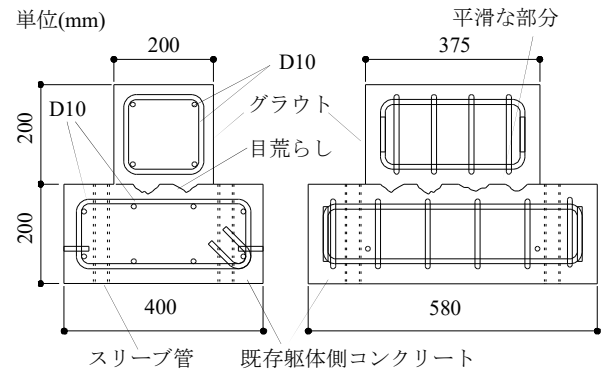


図-1 試験体の諸元寸法

表-1 試験体パラメータ

試験体名	接合面	想定 面積比 r_{cr}	面積比の 実測値
CH-10	目荒らし	10%	9.9%
CH-30		30%	29.0%
CH-50		50%	49.9%
CH-75		75%	77.7%
CY-52	円柱状シアキー	—	—

表-2 コンクリートとグラウトの材料特性

	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)
コンクリート	17.1	24.7	1.83
グラウト	64.6	26.2	2.10

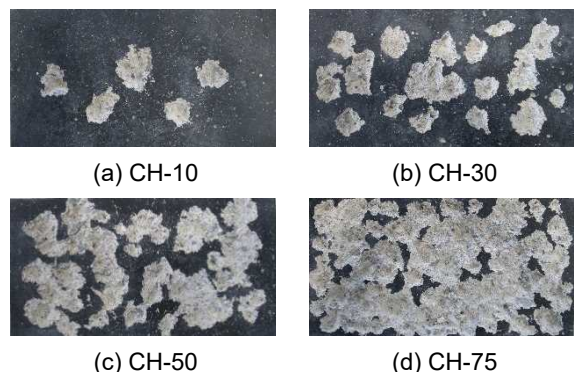


写真-1 載荷実験前の目荒らし面の状況

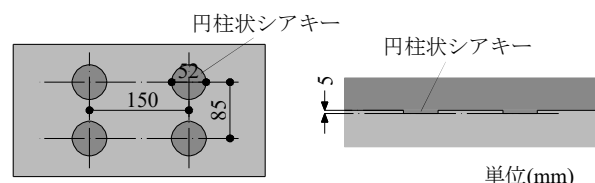


図-2 CY-52 の凹凸形状

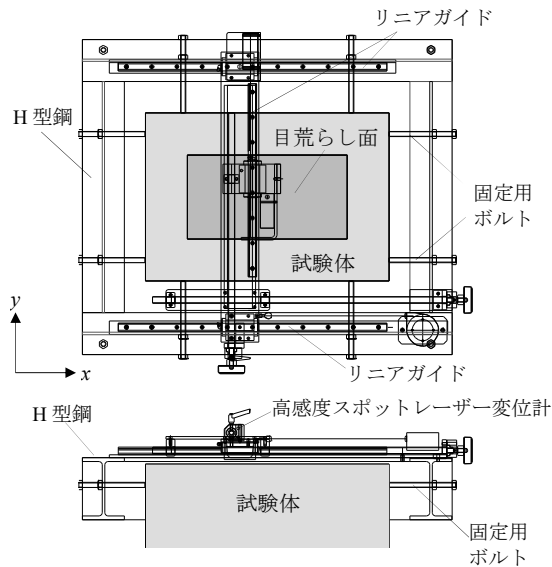


図-3 形状測定装置

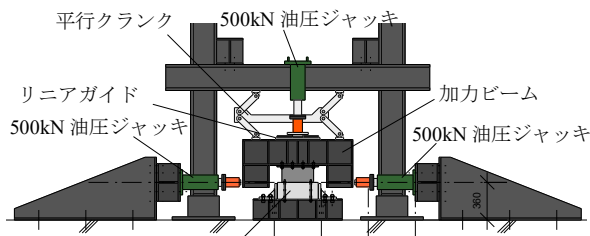


図-4 せん断载荷実験の载荷装置

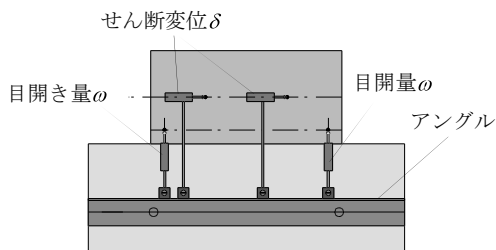


図-5 せん断载荷実験の計測方法

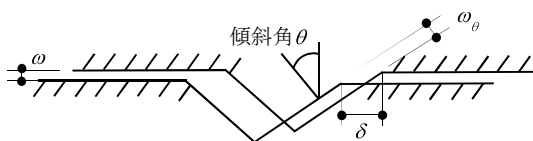


図-6 微小凹凸面に作用する接触応力の概念

150mm, 接合部幅が 200mm, アンカー筋サイズ D16~D19 とすると, $\sigma=2.27\sim 3.3\text{N/mm}^2$ となり $\sigma=0.5\text{N/mm}^2$ とすることで, 十分安全側の評価ができる。

接合面の上下で相対水平変位と相対鉛直変位を計測し, これらをせん断変位 δ , 目開き量 ω とする。

3. コンクリート目荒らし面のせん断応力伝達機構のモデル化

コンクリートひび割れ面におけるせん断応力伝達機構を表す構成則として様々なものが提案されているが, そ

れらの中でも, 李・前川モデル⁴⁾が, 凹凸形状とせん断応力伝達の関係が明快である。そこで本論文では, このモデルをベースとして, 目荒らし面のせん断応力伝達機構を記述する。

3.1 微小凹凸面に作用する接触応力

図-6 に, 微小凹凸面に作用する接触応力の概念図を示す。記述の通り, 微小凹凸面に作用する接触応力 σ_{con} のせん断方向成分と垂直方向成分を, 傾斜密度分布 $\Omega(\theta)$ および接触面有効率 K を乗じてそれぞれ積分することで, ひび割れ面全体に作用するせん断応力と垂直応力と釣り合う。

$$\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K \cdot \sigma_{con} \cdot \Omega(\theta) \cdot \sin\theta d\theta \quad (1)$$

$$\sigma = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K \cdot \sigma_{con} \cdot \Omega(\theta) \cdot \cos\theta d\theta \quad (2)$$

ここに, θ は傾斜角である。

$\Omega(\theta)$ は下式を満足する。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega(\theta) d\theta = 1 \quad (3)$$

また, 界面の目開き量が大きくなると, 微小凹凸面の接触が成立しなくなり, 応力伝達機構が低下⁴⁾する。これが接触面有効率 K である。そのため凹凸面の最大深さを D_{max} とし, 次式で K を表す。

$$K = 1 - 2\omega/D_{max} \quad (4)$$

以上を踏まえると, 円柱状シアキーを用いた CY-52 は, 前傾の図-2 から理解できるよう, 傾斜角 $\pm\pi/2$ の成分のみを持つ接触現象を再現していることになる。

3.2 傾斜密度関数 $\Omega(\theta)$

コンクリートひび割れ面を対象とした李・前川モデルでは, $\Omega(\theta)=0.5\cos\theta$ が用いられているが, 当然, 目荒らし面を対象とする際に, これを適用できるかは不明である。特に本実験では, 目荒らしの面積比を離れた 4 体を用意しているため, 個々に異なることも, 十分に予測され得る。そこで, 形状測定から得られた 3 次元データを用いて, 目荒らし面の傾斜角から傾斜密度分布を求める。

図-7 に本形状測定によって得られた 3 次元データを, 図-8 に形状分析方法を示す。本形状測定データは, 測定時の試験体の設置精度により, 僅かながら傾いた状態で計測された値となっている。そこで, 目荒らしを施していない平滑な面を対象に, 最小自乗法を用いて座標基準面を算出し, 図-8 に示すように, この傾きによって測定データを座標変換して形状分析する。

目荒らし面の傾斜角 θ_i は, 隣接する $i+1$ 点の座標値 (x_{i+1}, z_{i+1}) を用いて下式で表すことができる。

$$\theta_i = \tan^{-1}\{(z_{i+1} - z_i)/(x_{i+1} - x_i)\} \quad (5)$$

この傾斜角 θ_i の頻度分布を全目荒らし面で積分し, 面

積を1にしたものが傾斜密度分布 $\Omega(\theta)$ である。

目荒らし面積がそれぞれ CH-10～CH-75 の試験体の傾斜密度分布を図-9 に示す。同図より、いずれの試験体も傾斜角 $\theta=0(\text{rad.})$ でピークを示し、目荒らし面積が大きくなるにつれ、ピークの値は小さく、かつ傾斜角 θ が $\pm\pi/2(\text{rad.})$ 近傍で $\Omega(\theta)$ が大きくなっている。

3.3 傾斜密度関数 $\Omega(\theta)$ のシミュレーション

前傾の図-9 には、目荒らし面を測定・分析した結果および提案する傾斜密度関数のシミュレーション式の値を併記している。形状分析によって得た $\Omega(\theta)$ を、式(1)および式(2)に代入するには、これを数式化する必要がある。ここでは、傾斜密度関数の近似式として下式7を用いる。

$$\Omega(\theta) = \frac{4}{3}(a_0 + a_1 \cdot |\theta|^n) \cdot \cos^m \theta \quad (6)$$

ここに、 a_0 , a_1 , n , m は解析係数であり、表-3 に各試験体の傾斜密度関数を表すために用いる値を示している。図-9 よりこの近似式を用いることで各試験体の目荒らし面の $\Omega(\theta)$ を再現できることが分かる。

3.4 接触直応力のモデル化

図-10 に微小凹凸面における接触応力をモデル化したものを示す。 ω_θ は微小凹凸面の接触直応力方向の接触変位であり、下式4で表される。

$$\omega_\theta = \delta \sin \theta - \omega \cos \theta \quad (7)$$

ひび割れ面を対象としたモデル4)では、完全弾塑性モデルが採用されているが、ここでは目荒らし面の接触直応力を、図-10 に示すようにピーク後に $\sigma_{con}=0$ とする、脆性的な挙動とする。これは後述する CH-10 から CH-75 のせん断応力-せん断変位関係において、ピーク後に大きく荷重低下する挙動を呈したことに起因する。具体的な $\sigma_{con}-\omega_{lim}$ 曲線の形状は、CY-52 を参考に定める。

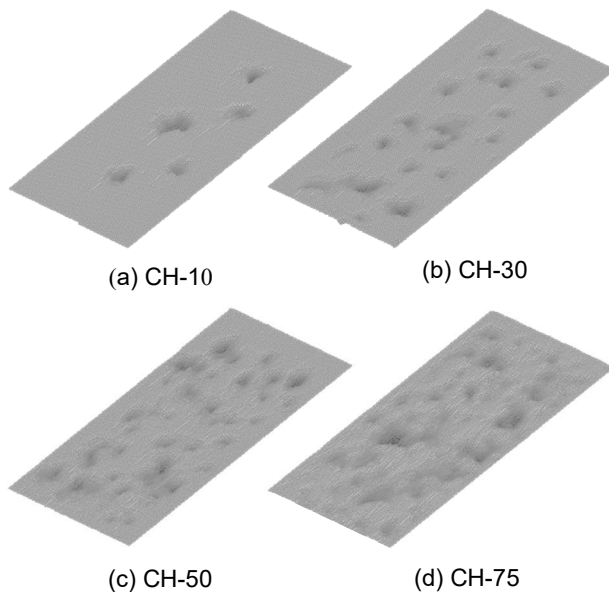


図-7 形状測定結果

CY-52 では σ_{con} の応力増分が $\omega_\theta=0.20\sim0.25\text{mm}$ 付近(CY-52 では傾斜角 $\theta=\pm\pi/2$ である)でほぼゼロになるため、 $\omega_{lim}=0.2\text{mm}$, 剛性 E_{cr} を $500\text{N/mm}^2/\text{mm}$ とすることで、CY-52 の $\sigma_{con}-\omega_{lim}$ 曲線と概ね一致するようにモデル化した。

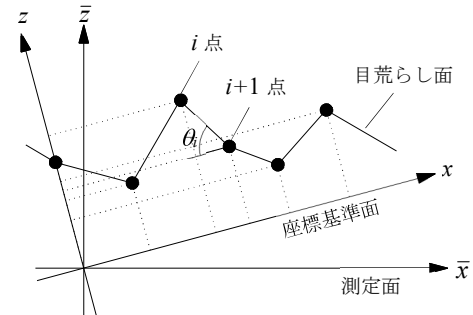


図-8 形状分析方法

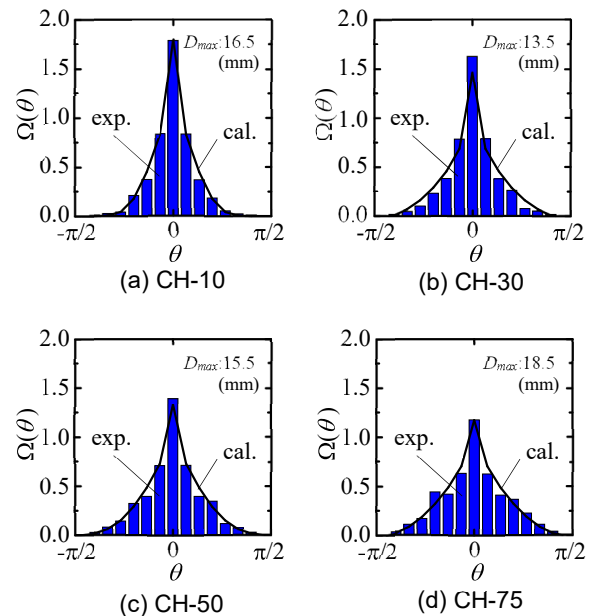


図-9 目荒らし試験体の傾斜密度分布およびシミュレーションモデル

表-3 傾斜密度関数のパラメータ

目荒らし面積	パラメータ			
	a_0	a_1	n	m
10%	1.35	-0.85	0.2	7.0
30%	1.1	-1.0	0.35	0.7
50%	1.0	-0.8	0.4	2.0
75%	0.88	-0.75	0.5	0.8

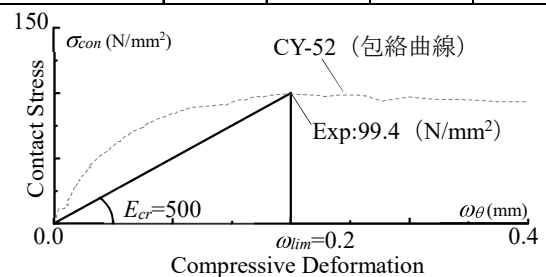


図-10 微小凹凸面における接触応力のモデル化

4. 本力学モデルの実験結果に対する整合性

4.1 目荒らしした試験体の破壊形式

図-11 に目荒らしを施した試験体の破壊形式を概念的に示す。せん断載荷実験後の目荒らし面を観察すると、CH-10 および CH-30 では、図-11 (a)に示すように、目荒らし面の凹凸に沿って既存コンクリートが支圧破壊する形式が顕著であった。これに対し、CH-50 および CH-75 では、図-11 (b)に示すように、既存コンクリートと目荒らし面が一体となって破壊した。この事実から述べれば、本実験の範囲では、目荒らし面積比を 50%以上とすることで、既存部と新設部が一体化すると言えよう。しかしながら、このことを明言するためには、コンクリート圧縮強度や軸応力など、より詳細な検証が必要となる。

4.2 実験結果と提案モデルの比較

せん断載荷実験の結果と前 3 章で述べた提案モデルを比較し、再現精度について検証する。なお、基礎的な検討を行うため、包絡曲線を対象に解析する。

図-12 に目開き量 ω -せん断変位 δ 関係、図-13 に各試験体のせん断応力 τ -せん断変位 δ 関係の実験結果と提案モデルを比較したものを示す。また、図-14 に垂直応力 σ の推移を示す。本解析では、図-12 に示す ω - δ 関係を用いて、 τ と σ を算定する。また式(4)の ω にも、図-12 に示す値を適用する。ここで、本実験では δ と ω を 2 箇所ずつ計測しているが、左右の値に大きな差は見られなかったため、これらの平均値を用いる。実験値の τ および σ はそれぞれ、せん断荷重 Q および垂直荷重 N を、接合面領域 A_j で除して求める。

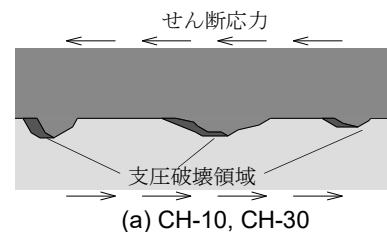
$$\tau = Q/A_j \quad (8)$$

$$\sigma = N/A_j \quad (9)$$

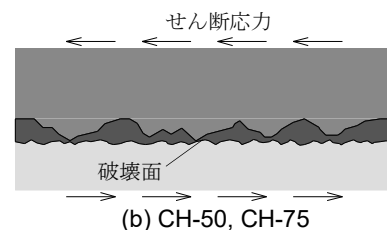
図-13 より、4 体全ての試験体において、最大荷重までの挙動は、概ね本提案モデルによって再現できる。しかしながら、最大荷重後の挙動について、応力低下する挙動は、定性的には捕らえられるものの、完全には追跡できていない。特に、CH-10 および CH-30 よりも、CH-50 および CH-75 では、実験値と解析値の乖離が大きい。上述したとおり、CH-50 および CH-75 では、既存コンクリートと目荒らし面が一体となって破壊したが、本提案モデルでは、これを再現できていないことが理由として考えられる。またピーク後の挙動に対し、既往の理論⁴⁾をどこまで適用できるかについても、今後検証が必要であると考えている。

続いて図-14 から σ の挙動を観察する。図-14 より、いずれの試験体の解析結果も最大応力までは、実験結果を大きく上回り、ピーク後は δ の進展とともに σ が徐々に小さくなっていく。それでも σ の値は実験値よりも大きく、その傾向は目荒らし面積比が小さい方が、顕著であり実験値の 3~4 倍近く大きな値を示す。前記の通り、せ

ん断応力はある精度で実験結果を再現できているが、垂直応力は過大に評価してしまう現象から、傾斜角が浅い成分の接触現象を過度に評価している可能性がある。つまり、本提案モデルでは形状を表す指標として、既往の理論に基づいて傾斜角のみを扱っているが、これだけでは力学挙動を再現するには不十分なようであり、今後、深さなどの成分も考慮して、より現実に近い接触現象を再現することで、解析精度が向上するものと推察される。



(a) CH-10, CH-30



(b) CH-50, CH-75

図-11 目荒らしした試験体の破壊形式

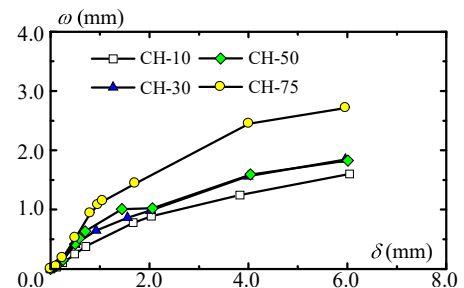
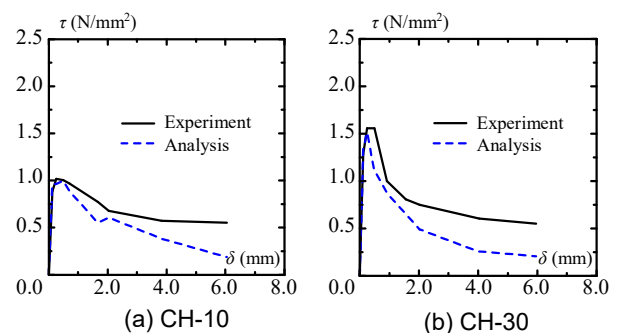
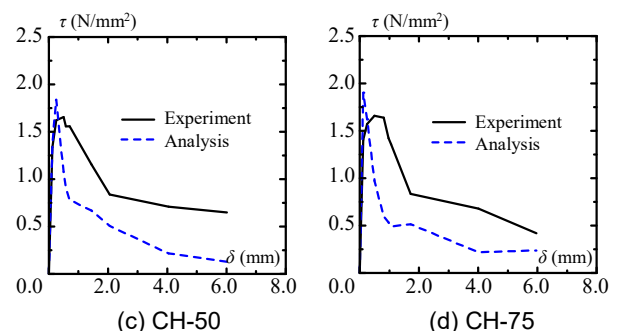


図-12 目開き量-せん断変位関係



(a) CH-10

(b) CH-30



(c) CH-50

(d) CH-75

図-13 せん断応力-せん断変位関係

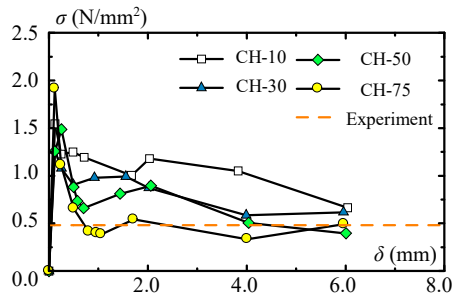


図-14 垂直応力-せん断変位関係

5. まとめ

本論文では、耐震補強における既存躯体と補強部材の接合面の目荒らし面を対象とし、目荒らし面の応力伝達機構を明らかにするため、目荒らし面の形状測定及びせん断載荷実験を行った。また、目荒らし面の力学モデルを構築し、実験値との比較を行った。本研究より得られた知見を列記すると以下のようである。

- 1) 目荒らし面積比の違いにより、傾斜密度分布も異なり、目荒らし面積比が大きくなるにつれ、ピーク時の $\Omega(\theta)$ は小さく、傾斜角が大きい領域で $\Omega(\theta)$ が大きくなる傾向になる。
- 2) 本実験の範囲では、目荒らし面積比を 50%以上とすることで、既存側と新設側が一体となって破壊した。
- 3) せん断応力の包絡線における最大応力までの挙動は、本提案モデルにより良好に再現できる。
- 4) 本提案モデルでは、垂直応力を精度良く再現することができなかった。これを改善するために、凹凸面の形状をモデル化する際に、深さ成分を加えるなど、より詳細な形状評価が必要であると考えている。

本論文では、コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構を記述する既往の理論を用いて、チッピングによる目荒らし面のせん断抵抗性能について基礎的な検証を行った。この目荒らし面は、コンクリートひび割れ面と異なり、意図的に粗さをコントロールできるため、粗さの度合いはひび割れ面以上にランダムとなり、傾斜密度分布にもこの傾向は如実に現れている。既往の理論を応用して力学モデルの構築を試みた結果、せん断抵抗性能については概ね実験値を再現することができ、このことは極めて重要な知見である。しかしながら、垂直応力の再現精度は低く、ここに新たな理論を組み込む必要があると考えている。このことに付随して、 $\sigma_{con} - \omega\theta$ 関係の修

正も必要となる可能性がある。今後著者らは、この問題を解決できるよう本研究を発展させる予定である。

謝辞

本研究は、飛島建設、東亜建設工業の技術協力を得て実施しました。また東洋大学の学生には、本試験体の形状測定において、多大なるご協力を賜りました。ここに深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, 日本建築防災協会, 2001 年 (2001 年改訂版第 7 刷)
- 2) 香取慶一, 阿部隆英, 久保田雅春, 高瀬裕也, 坂崎友美, 樋渡健, 村田鉄男, 平田誠之：低騒音・低振動の目荒らし工法の開発(その 7)耐力の検証, 日本建築学会学術講演梗概集(北海道), pp293~294, 2013 年 8 月
- 3) 南宏一, 津吉真人, 石村光曲, 貞松和史：傾斜あと施工アンカーのせん断強度に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp985~990, 2010
- 4) 李宝禄, 前川宏一：接触密度関数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, Vol.26, No.1, pp.123~137, 1988.1
- 5) J.C.Walraven : Fundamental Analysis of Aggregate Interlock, ASCE, Vol.107, No.ST11, pp.2245-2270, 1981
- 6) Bujadham Buja : The Universal Model for Transfer across Crack in Concrete, Department of Civil Engineering, The Graduate School of The University of Tokyo, March 1991
- 7) 高瀬裕也, 和田俊良, 上田正生：ひび割れ微小面のせん断軟化現象を考慮した 2 次元せん断伝達モデルの提案とその適合性の検証 - コンクリートひび割れ面のせん断伝達機構に関する研究 その 2 -, 日本建築学会構造系論文集, No.630, pp.1323-1330, 2008.8
- 8) 高瀬裕也, 阿部隆英, 板谷秀彦, 佐藤貴志, 尾中敦義, 久保田雅春, 池田隆明：ディスク型シャキーを用いた内付け補強架構の接合部破壊時の保有水平耐力の評価手法 - 鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震補強用シャキーに関する研究 -, 日本建築学会構造系論文集, No.79, Vol.698, pp.507-515, 2014.4