

論文 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

磯崎 翼^{*1}・高瀬 裕也^{*2}・阿部 隆英^{*3}・樋渡 健^{*4}

要旨：コンクリート系構造の既存建物の耐震補強では、既存躯体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、目荒らし面におけるせん断応力伝達機構を定量評価した研究は少ない。そこで、コンクリート強度を主たる実験パラメータとし、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、既往の目荒らし面の構成則にコンクリート強度を変数として組み込み、力学モデルを再構築した結果、せん断応力-せん断変位関係および垂直応力-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、コンクリート強度

1. はじめに

規模の大きな地震が比較的多く発生する我が国において、建物の耐震性能向上に関する技術は日々進化している。特に近年では、既存建物の有効利用の観点から、現行の耐震基準を満たしていない既存コンクリート構造物に、補強部材（鉄骨プレースなど）を設置することで、耐震性能の向上が図られている。鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造の既存建物を耐震補強する場合、既存躯体と補強部材は、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、「目荒らし」と呼ぶ）を用いて接合されることが多い。現状の接合部の設計^①では、目荒らしのせん断耐力は評価されておらず、あと施工アンカーのせん断耐力のみが評価されている。

しかし、幾つかの既往の実験結果^{②,③}を観察すると、目荒らしを施さない接合部の実験では、設計耐力を下回ることが報告されており、現行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る必要があることを、既報で述べている^{④,⑤}。

そこで著者らはこれまでに、ランダム性に富む目荒らし面のせん断抵抗性能の定量評価を目的として、目荒らし面の形状測定実験とせん断載荷実験、さらに既往のコンクリートひび割れ面の応力伝達モデルをベースに目荒らし面の力学モデルの構築^{④,⑤}を行ってきた。既往の研究では^⑤、目荒らし面積比 r_{cr} （接合面面積 A_j に対する目荒らし部の水平投影面積 A_{cr} の比）および目荒らし深さを実験パラメータに設定し、これらのパラメータが実験結果に及ぼす影響について記述し、力学モデルによって実験結果（せん断力および軸力）の追跡を行ってきた。しかしながら、これらの実験では、既存躯体側のコンクリート強度 σ_B が 1 水準固定であるため、実構造物への適応を

考えると、これまでの実験および提案モデルでは不十分である。既存躯体側の σ_B が大きくなれば、同じ目荒らし面積比でもせん断耐力が大きくなることが予測されるが、現状のモデルでは σ_B が変化した場合、目荒らし面のせん断抵抗を定量評価できない。

そこで本論文では、既存躯体側のコンクリート強度 σ_B を新たな実験パラメータに加え、既往研究と同様、目荒らしを施した接合面の形状測定、形状分析およびせん断載荷実験を行い、 σ_B が及ぼす影響について記述した後、実験パラメータに対応できるよう、目荒らし面の力学モデルの改良を試みる。

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

本論文では、目荒らしのせん断応力伝達を定量評価することに焦点を当て、目荒らしのみのせん断載荷実験を行う。

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 に実験パラメータを、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。

既存躯体側コンクリートおよび補強部材側グラウトの試験体形状はそれぞれ、580mm×400mm×200mm、375mm×200mm×200mm である。このコンクリート上面の 375mm×200mm の領域に目荒らしを施す。実験パラメータは r_{cr} および σ_B である。想定する r_{cr} は 0.1, 0.3 の 2 水準とし、目標 σ_B は 10N/mm², 20N/mm², 30N/mm² の 3 水準としている。ここでは画像解析を用いて r_{cr} を確認する。目荒らしを施す前に、 A_j の領域を黒色の塗料で塗装し、その後ハンマードリルで目荒らしを施工する。目荒らし

*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 飛島建設 建築事業本部 耐震ソリューション部 技術開発 G 主任 (正会員)

*4 東亜建設工業 技術開発センター 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

を施すと黒色の塗料がついたコンクリートが除去され、接合面をコンクリートと黒色の塗料の2色で表現することができる。施工中に、デジタルカメラで目荒らし面を撮影し、色相の違いから r_{cr} 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。**表-1**に面積比の実測値も示しており、多少の差異はあるが、人為的作業にも関わらず、概ね目標通りの r_{cr} で施工できていることが分かる。試験体名は、CH記号の後ろに、面積比を意味する数値と σ_B を表す数値を併記して構成される。なお、表-1には試験体毎の最大目荒らし深さも併記している。

目荒らし面の形状測定を実施した後に、補強部材側の型枠を組んで鉄筋籠を設置し、プレミックスタイルのグラウト（材料指定の水量で配合）を打設する。

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、摩擦や固着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-2に形状測定装置図を示す。リニアガイドを取り付けたH形鋼を試験体の周囲に設置した後、基準となる0点にレーザー変位計が定まるよう、試験体を微調整しながら固定用ボルトでH形鋼と固定する。試験体とH形鋼の固定が終了した後、リニアガイドに設置されたレーザー変位計を、 x 、 y 方向に走査させながら、 z 方向の深さを計測する。測定間隔は x 方向（せん断方向）、 y 方向で、それぞれ0.04mm、0.5mmとする。

2.3 せん断載荷実験の加力及び計測方法

図-3に加力装置図を示す。同図に示すように加力装置は、正負繰り返しの水平加力および軸力を制御するために、最大荷重500kNの油圧ジャッキをそれぞれ用いる。軸力は一定荷重制御とする。本実験では、相対水平変位 δ を変位制御しながら正負交番の繰り返し載荷を行う。

図-4に変位計測方法を示す。既存躯体側コンクリートの中央位置に固定した鋼製のアングルに変位計を設置し、そこから補強部材側グラウトに取り付けた標点に対する、相対垂直距離（以下、目開き量 ω と呼ぶ）と相対水平変位 δ をそれぞれ計測する。せん断荷重および鉛直荷重は、油圧ジャッキに取り付けたロードセルの値とし、正加力、負加力で個別に計測する。

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

前述したとおり、本論文では、既往の研究⁵⁾で構築した目荒らし面の力学モデルをベースとする。また、既往のモデルは σ_B を変数とした場合に対応できない。そこで本章では、既往モデルの目荒らし面のせん断応力伝達機構を記述し、 σ_B を変数とする微小凹凸面の接触応力を新たにモデル化していく。

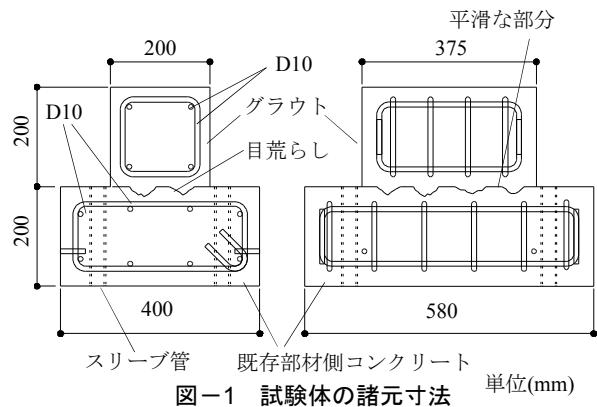


図-1 試験体の諸元寸法 単位(mm)

表-1 実験パラメータ

試験体	r_{cr}	実測値	目標 σ_B	最大深さ
CH10-10		0.154	10N/mm ²	16.5mm
CH10-20	0.100	0.099	20N/mm ²	13.5mm
CH10-30		0.137	30N/mm ²	12.5mm
CH30-10		0.288	10N/mm ²	16.5mm
CH30-20	0.300	0.290	20N/mm ²	13.5mm
CH30-30		0.297	30N/mm ²	11.5mm

表-2 コンクリートとグラウトの材料特性

試験体名	材料	σ_B (N/mm ²)	E_C (kN/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
CH-10,30-10	コンクリート	7.9	14.6	1.10
	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-10,30-20	コンクリート	17.1	24.7	1.83
	グラウト	64.6	26.2	2.10
CH-10,30-30	コンクリート	31.7	30.1	2.50
	グラウト	72.3	24.4	4.10

σ_B :コンクリートとグラウトの圧縮強度 E_C :ヤング係数

σ_t :割裂強度

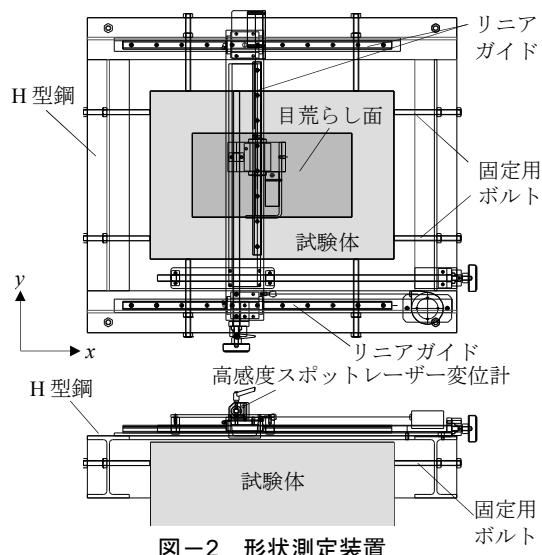


図-2 形状測定装置

3.1 微小凹凸面に作用する接触応力

図-5に摩擦を考慮した微小凹凸面に作用する接触応力の概念図を示す。目荒らし面の力学モデルは、既往のコンクリートひび割れ面の構成則⁶⁾を元に構築している。この構成則では、微小凹凸面が接触した際に発生する接触応力 σ_{con} および摩擦応力 $\mu \times \sigma_{con}$ をせん断成分と垂直成分に分解し、接触面積有効率 K および傾斜密度関数 $\Omega(\theta)$ を乗じ、界面全体にわたり積分することで、ひび割れ面のせん断応力 τ と垂直応力 σ がそれぞれ算出される。図-5の概念図より以下の式が算出される。

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

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

ここに、 θ は微小面の傾斜角、 μ は摩擦係数である。目荒らし面の力学モデルでベースとしている Bujadaham モデル⁶⁾の摩擦係数は 0.4 が採用されている。しかしながら、Bujadaham モデルはあくまでコンクリートひび割れ面の応力伝達機構を表す構成式として構築されているため、この値の適応性は明らかではない。そこで本論文では、現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針（案）・解説⁷⁾に記述されている摩擦係数を採用することとする。本指針⁷⁾の摩擦係数は、「打ち継ぎ面に表面処理を行わない場合」は $\mu=0.6$ 、「人為的凹凸面を設けた場合」は $\mu=1.0$ を用いることと記述されている。本論文では、図-5に示す概念図のように、微小凹凸面の接触はフラットな面同士で発生すると仮定しているため、指針に記述されている「打ち継ぎ面に表面処理をしない場合」の摩擦係数 $\mu=0.6$ を採用する。

また、図-5を見てわかる通り、 ω が大きくなると、微小凹凸面の接触が徐々に減少していく。これを表す低減係数が K ⁶⁾であり、Bujadaham モデルの式を参考に、本論文では、表-1に示した最大目荒らし深さ D_{max} を用いて、下式で表す。

$$K = 1 - 2\omega / D_{max} \quad (3)$$

3.2 傾斜密度関数 $\Omega(\theta)$

前章で記述した形状測定実験から得られた3次元座標データを用いて、目荒らし面の形状分析を行う。図-6に形状分析方法を示す。目荒らし面の形状測定実験の際、試験体の設置精度および作製精度によっては、計測面がわずかに傾くことがある。そこで、図-6に示すように、目荒らしを施していない平滑面の座標データに焦点を当て、最小二乗法で座標基準面を算出し、その座標基準面の傾きから計測した3次元座標データを座標変換し、微小凹凸面の傾斜角に関する形状分析を行う。

微小凹凸面の傾斜角 θ は、 i 点と隣接する $i+1$ 点の座標値を用いて下式で表すことができる。

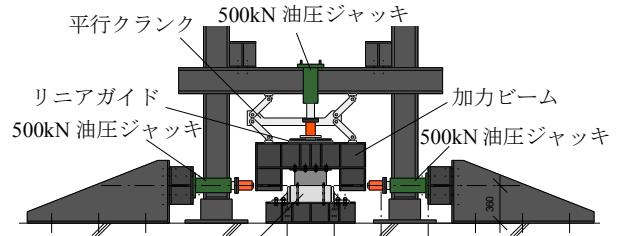


図-3 せん断載荷実験の載荷装置

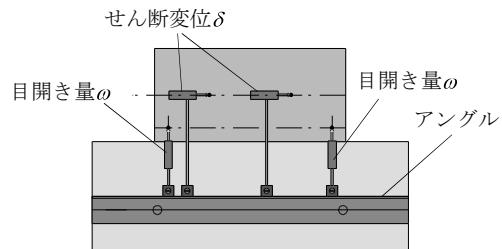


図-4 せん断載荷実験の変位計測方法

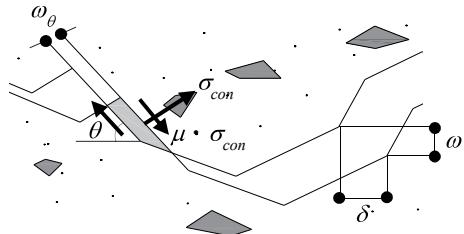


図-5 微小凹凸面に作用する接触応力の概念図

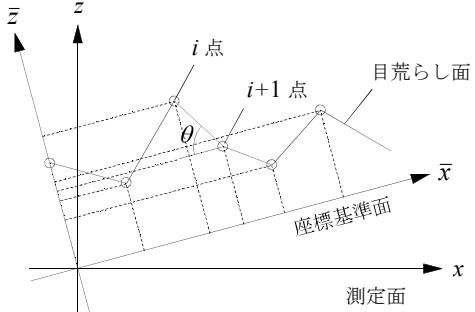


図-6 形状分析方法

$$\theta_i = \tan^{-1} \left\{ (z_{i+1} - z_i) / (x_{i+1} - x_i) \right\} \quad (4)$$

傾斜密度分布は、 θ の頻度分布を全目荒らし面で積分し、下式の積分を1にすることで得られる。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega(\theta) d\theta = 1 \quad (5)$$

図-7に θ に関する形状分析から算出した傾斜密度分布を示す。全試験体において、 $\theta=0(\text{rad.})$ でピークを示し、 θ が $\pm\pi/2$ に近づくと、 $\Omega(\theta)$ が小さくなる。

また、 r_{cr} 毎に観察すると、 σ_B を変化させた場合でも、多少の差異は確認されるものの、傾斜密度分布の形状に大きな違いは見られない。

3.3 傾斜密度関数 $\Omega(\theta)$ のシミュレーション

図-7には r_{cr} 毎の $\Omega(\theta)$ 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。形状測定実験から取得した3次元座標データを元に算出した傾斜密度を、数式化しなければならない。本モデルでは、傾斜密度分布をシミュレーションする式として次式を用いる。

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

表-3に傾斜密度関数のパラメータを示す。上述したとおり、本論文で対象としている目荒らしはランダム性に富み、同じ r_{cr} の試験体同士でも傾斜密度分布に若干の差異が認められる。そこでシミュレーション式は r_{cr} 毎に平均値として求め、より簡便なモデルとしている。図-7よりこの近似式を用いることで、各試験体の傾斜密度分布を概ね再現できていることが分かる。

3.4 接触直応力のモデル化

目荒らし面の応力伝達機構を表現するために接触直応力のモデル化を行う。接触変位 ω_θ ⁶⁾は微小凹凸面の接触直応力における接触変位であり、接触する際の傾斜角 θ 、せん断変位 δ および目開き量 ω を用いて次式で表すことができる。

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

既往の研究⁵⁾では、 σ_B を実験パラメータとした実験を実施していないため、既往のモデルにおいても、 σ_B は変数として組み込まれていない。本論文では、 σ_B を変数として接触直応力のモデルに組み込んでいく。なお、既往研究では、最小二乗法を用いて、実験値にフィッティングするよう σ_c を算出している。図-8に最大接触応力 σ_c -コンクリート強度 σ_B 関係を示す。次章でも触れるが、実験結果より、目標 $\sigma_B=20\text{N/mm}^2$ を上回ると、ピーク応力の変化が非常に小さくなる。そこで、実験結果を元に、 σ_c を σ_B の関数で表現し、 σ_B が 20N/mm^2 以上で σ_c 一定の関係を設定し次式で表す。

$$\sigma_c = 13.0 \cdot (\sigma_B)^{1/3} \quad (\sigma_B < 20) \quad (8)$$

$$\sigma_c = 13.0 \cdot (20)^{1/3} \quad (\sigma_B \geq 20) \quad (9)$$

図-9に微小凹凸面の接触直応力をモデル化したものと示す。既往のモデルでは、ピークまでを線形でモデル化しており、本論文では、ピーク値を σ_B の変数として、実験値に近似するように定めていく。ポストピーク領域では、既往のモデルと同様、圧縮軟化特性を考慮することとし、Darwin-Pecknoldによる一軸圧縮軟化特性⁸⁾の関係を参考に接触応力のモデル化を行う。純粋な一軸圧縮状態に比べ、目荒らしの微小凹凸面の接触面は、脆性的な破壊が生じる可能性があるため、Darwin-Pecknoldモデルを一部修正し、目荒らし面の接触応力モデルに適応させる。ピークまでを σ_B の関数として表現しているため、軟化勾配も σ_B に依存する。また、応力軟化後の応力一定区間は、 σ_c に依存しない定数($\sigma_m=2.8\text{N/mm}^2$)としている。

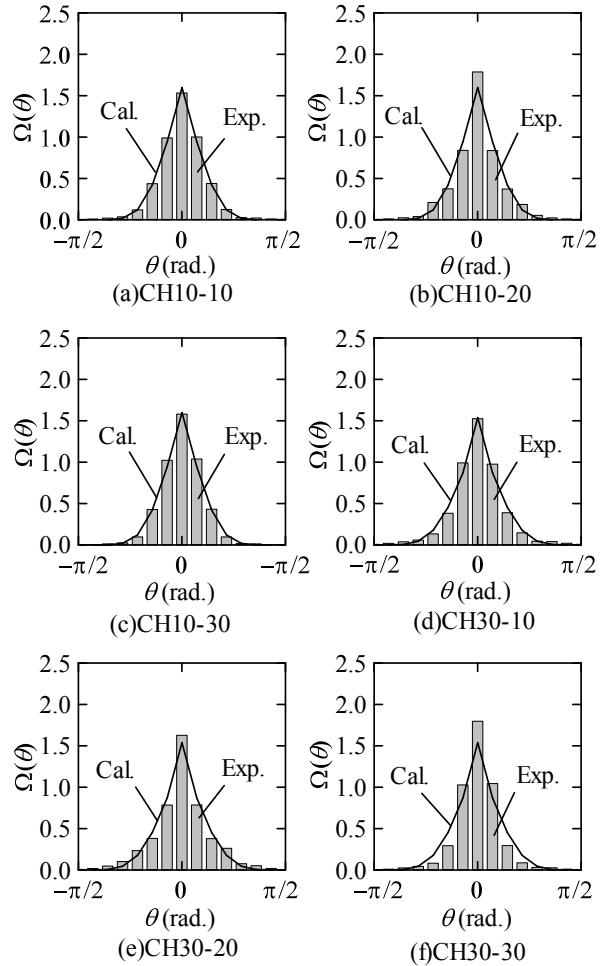


図-7 傾斜密度分布およびシミュレーションモデル
表-3 傾斜密度関数のパラメータ

r_{cr}	パラメータ			
	a_0	a_1	n	m
0.10	1.20	-0.97	0.64	7.88
0.30	1.15	-0.98	0.54	5.13

これは σ_B に関係なく、応力低下後は、一定の応力に収束する実験結果に起因するものである。

4. 本力学モデルの実験結果に対する整合性

4.1 せん断載荷実験結果

図-10にせん断載荷実験結果による荷重-変位曲線を示す。試験体毎に正負それぞれ最大応力点を比較すると、正負で概ね対称な曲線形状を示している。いずれの試験体の τ - δ 関係も、最大応力までは線形挙動、その後応力が急激に低下し、ある程度応力が低下すると応力一定で推移する。 r_{cr} 毎に比較すると、 $\sigma_B=10\text{N/mm}^2$ の試験体よりも $\sigma_B=20\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ の試験体の方が、ピーク応力が大きくなる。しかし $\sigma_B=20\text{N/mm}^2$ と $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ の試験体では、荷重変形曲線に大きな差異は確認されない。

4.2 実験結果と本提案モデルの比較

本節では、せん断載荷実験と本提案モデルの比較を行い、実験結果の再現精度について検証する。図-11には ω - δ 関係を示している。ピーク応力となる $\delta=0.2\sim0.5\text{mm}$ 近傍までは、いずれの試験体の ω - δ 関係に特段の差異は見られない。しかし、ピーク後 $\delta=0.5\text{mm}$ 以降の ω - δ 関係を観察すると、実験パラメータである r_{cr} および σ_B に依存することなく、試験体毎にばらつきが確認される。これは上述したとおり、目荒らし面が有するランダム性に起因するものと推察され、本解析で用いる場合、各試験体の ω - δ 関係を直接扱うと、計算結果が不安定になる。また、実験結果を観察しても、目開き量にせん断耐力が大きく依存しているとは考えにくいため、本論文では、各試験体の ω - δ 関係を最小二乗法で近似した式(10)の近似曲線を用いる。

$$\omega = -0.036\delta^2 + 0.446\delta \quad (10)$$

なお、実験値の τ および σ はせん断荷重 Q 、軸力 N を A_j で除した値を用いる。

$$\tau = Q / A_j \quad (11)$$

$$\sigma = N / A_j \quad (12)$$

図-12にせん断載荷実験結果による荷重-変位曲線と、 σ_B を変数として組み込んだ本提案モデルの結果を示している。本論文では、基礎的な検証を行うため、荷重包絡曲線に主眼を置いている。同図より、いずれの試験体も実験結果を精度良く再現できていることが分かる。CH10-30はピーク後の挙動で、解析値が実験値を上回る結果となった。これはピーク後、応力が急激に低下した実験結果を解析で追跡できていないことによるものである。既往研究⁵⁾では、 r_{cr} が0.3までの試験体は、支圧破壊型とされていたが、本実験では σ_B が高い試験体については、支圧破壊だけでなく、部分的にせん断破壊も混在しており、この混合モードを定量評価できなかったため、実験結果を良好に再現できなかったと推察される。

続いて垂直応力 σ について、解析結果と実験結果を比較する。図-13に垂直応力 σ -せん断変位 δ 関係を示す。既往の研究⁴⁾では、実験値を精度良く再現できていなかったが、微小凹凸面の摩擦を考慮したモデルを用いることによって、ピーク応力となる $\delta=0.2\sim0.5\text{mm}$ では解析値が実験値を多少上回るもの、いずれの試験体も実験値を概ね良好に追跡できることが分かる。

5. 結論

著者らは、コンクリート構造物における既存躯体と補強部材の接合部の目荒らし面を対象とし、既存躯体側コンクリートの圧縮強度 σ_B を違えた試験体の形状測定・分析およびせん断載荷実験を行った。また、既往の目荒ら

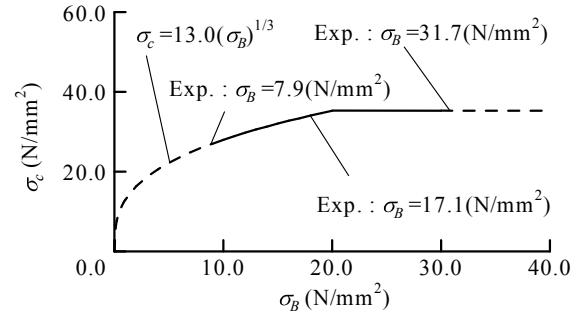


図-8 σ_c - σ_B 関係

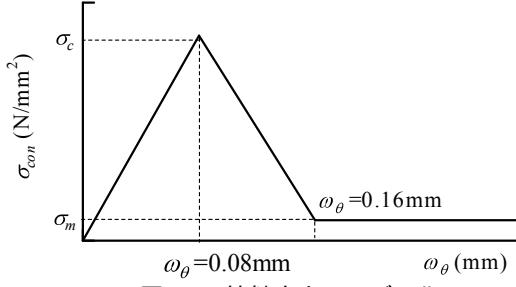


図-9 接触応力のモデル化

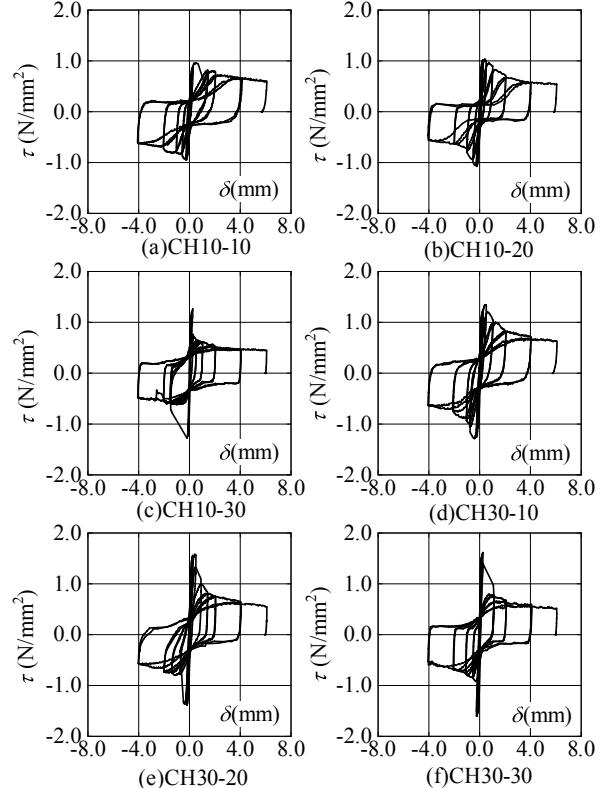


図-10 せん断載荷実験結果による荷重-変位曲線

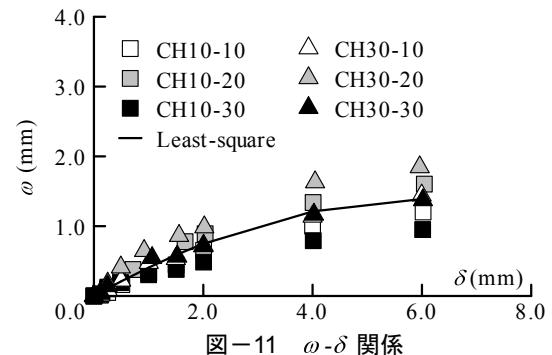


図-11 ω - δ 関係

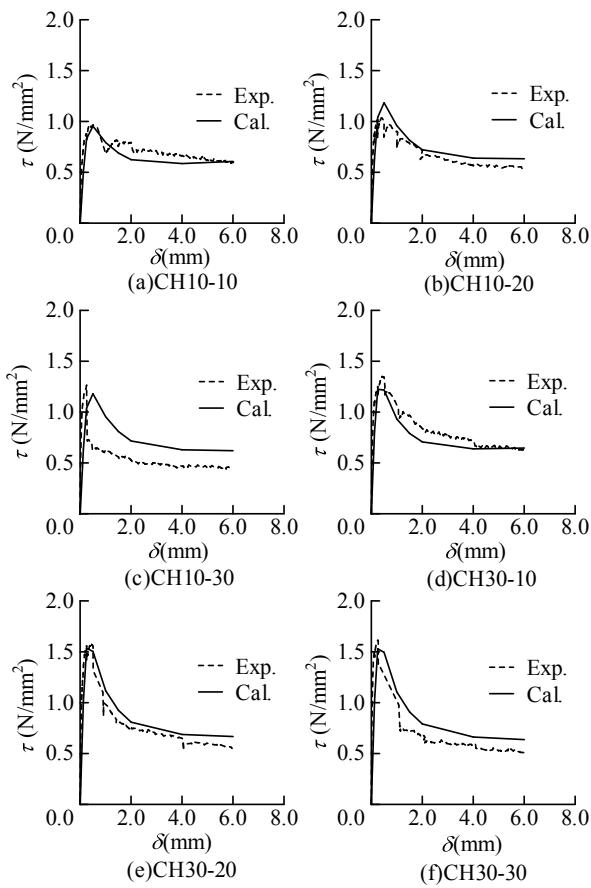


図-12 τ - δ 関係

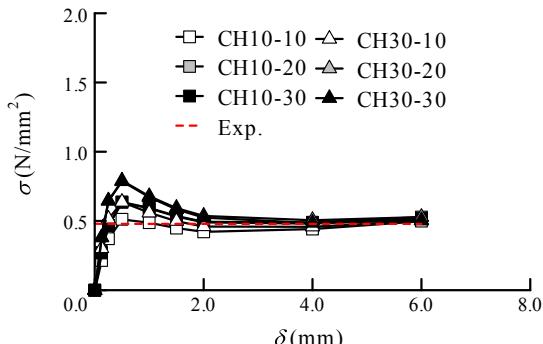


図-13 σ - δ 関係

し面の応力伝達モデルの汎用性の拡大を目指し、圧縮強度 σ_B を変数として接触応力のモデルに組み込み、力学モデルを改良した。その後、実験結果との整合性について検証した。以下に本論文で得られた知見を列記する。

- 1) σ_B を違えた試験体の実験結果より、 $\sigma_B=10\text{N/mm}^2$ よりも $\sigma_B=20\text{N/mm}^2$ および 30N/mm^2 の方が耐力は大きくなつたが、 $\sigma_B=20\text{N/mm}^2$ と 30N/mm^2 を比較

すると、大きな差は見られなかつた。

- 2) 実験値と解析値を比較した結果、支圧破壊型の試験体では、 τ - δ 関係、 σ - δ 関係とともに、概ね良好に実験値を再現することができた。
- 3) 本提案モデルは、接触応力に基づく支圧破壊を対象としたモデルであるため、部分的にせん断破壊が混在する試験体については、実験値を精度良く再現することができなかつた。
- 4) 微小凹凸面の摩擦を考慮したモデルを用いることにより、実験値と解析値の適合性が向上した。

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 (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, 桶渡健, 村田铁男, 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, 日本建築学大会学術講演梗概集(北海道), pp.293~294, 2013.8
- 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, pp.985~990, 2010
- 4) 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性能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
- 5) T.Isozaki, Y.Takase, T.Abe, T.Hiwatashi, K.Katori : Mechanical Model of Shear Stress Transfer of Roughened Concrete Surface for R/C Existing Member, Proc. of Performance Improvement of Concrete for Long life span Structure, pp.181-186, 2017.8
- 6) 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
- 7) 日本建築学会: 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2002
- 8) Darwin, D., D. A. Pecknold. : Analysis of RC Shear Panels under Cyclic Loading, J. of Structure Div., ASCE, Vol. 102 No. ST2, pp.355-369, 1976