

既存コンクリートのチッピングによる目荒らしの凹凸形状がせん断耐力に及ぼす影響

EFFECTS OF SHAPE OF ROUGHENED CONCRETE BY CHIPPING ON SHEAR STRENGTH FOR EXISTING BUILDING

阿部隆英 — * 1 樋渡 健 — * 2
坂本啓太 — * 3 高瀬裕也 — * 4
香取慶一 — * 5

Takahide ABE — * 1 Takeshi HIWATASHI — * 2
Keita SAKAMOTO — * 3 Yuya TAKASE — * 4
Keiichi KATORI — * 5

キーワード：

目荒らし, 耐震補強, せん断抵抗, 形状測定, 間接接合部

Keywords:

Concrete surface roughening, Seismic retrofitting, Shear resistance, Measurement of shape, Indirect joint

In seismic retrofitting of existing building, concrete surface are chipped using an electric chipping hammer in order to connect retrofitting members to R/C frames. The roughened concrete surface has very complex concavo-convex shape. Therefore, estimating of the shear strength is very difficult.

In this paper, we conducted the shape-measurement and shape-analysis of roughened concrete. In addition, the shear tests are also conducted. Using the obtained data, we tried to evaluate the shear strength as sum of strength by bearing stress and by local interlocking. As a result, it was concluded that the optimal area ratio r_{cr} was about 0.3.

1. はじめに

既存建築物の耐震補強における、補強部材（ブレースなど）と既存躯体の接合には、一般に電動ピックを用いて施工した目荒らし（以下、目荒らしと呼称する）と接着系あと施工アンカーが用いられる。既存躯体から補強部材へせん断力を確実に伝達させるためには、既存躯体と間接接合部の界面（以下、接合面と称する）のずれ変形を小さく抑えることが重要である。現行の間接接合部の設計¹⁾のせん断耐力は、あと施工アンカーに関する項目しかなく、目荒らしに関する影響は考慮されていない。そのため間接接合部のせん断耐力は、あと施工アンカーのみで発揮されると認識され易い。また、目荒らしは各基・規準^{例えば 1)~3)}で構造規定として定められているが、前述の要因から実施工においてこの規定が守られていないこともある。

しかし、既往の研究⁴⁾⁵⁾において、目荒らしをせずにあと施工アンカーのみを配置した試験体では、せん断耐力が設計せん断耐力を下回るが、目荒らしを施すことで設計せん断耐力を超える例が幾つか報告されている。このことから現行のせん断耐力を確実に発揮させるには、目荒らしのせん断抵抗を適切に評価する必要がある。

既存躯体に施す目荒らしの面積や形状は、施工者の技能や設計者、管理者及び監理者の意識や認識により異なる上に、前述の目荒らしによる基・規準では面積や形状に一律性がない。更に目荒らしの形状や面積と力学挙動の関係を定量的に評価している既往の研究も、著者らが知る限り無いように思われる。そこで本研究では、目荒らしを施した接合面の形状測定、形状分析及びせん断実験を行って、せん断耐力に対し効率的な目荒らしの形状を提案することを目的とする。

2. 目荒らしを施した接合面の形状測定方法及びせん断実験の概要

2.1 試験体の諸元及び実験パラメータ

図1に試験体の諸元寸法を示し、表1に試験体一覧を示す。目荒らしの形状測定及びせん断実験共に同一の試験体を用いる。既存部コンクリートの試験領域は375mm×200mmとし、これを接合面と呼ぶ。実験パラメータは、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} ）及び平均圧縮応力度 σ_0 である。ここに、 σ_0 は軸方向力 N を A_j で除して求められる。

$$\sigma_0 = N / A_j \quad (1)$$

想定する r_{cr} は0.1、0.2、0.3、0.5及び0.75の5水準、 σ_0 は0.48、0.95及び1.43 N/mm²の3水準とした。目荒らしの形状は不規則な凹凸を形成するため、同じ r_{cr} においても形状が異なる可能性がある。このことから、 $r_{cr}=0.3$ の試験体は3体として形状を比較する。また、既往の文献⁶⁾から内付け補強の接合部に生じる σ_0 が0.4 N/mm²程度であると報告されているため、 $\sigma_0=0.48$ N/mm²を基本とし、 $r_{cr}=0.3$ において σ_0 を3水準設定とした。

2.2 試験体製作方法

既存部コンクリート側の型枠を垂直に立てて組んだ後、コンクリートを打設した。既存部コンクリートの型枠に表面加工コンクリート型枠用合板を用いており、接合面の仕上がり状態は平滑である。この平滑な接合面に対し、電動ピックを用いて目荒らしを施工する。そのため、目荒らしを施していない部分の噛み合い抵抗は、実験にほぼ影響しないと判断できる。また、目荒らしの施工者及び使用した工具は、全試験体同じである。

目荒らしを施工する際の A_{cr} の確認方法として、画像解析を用い

¹⁾ 飛鳥建設(株)耐震ソリューション部耐震技術 G 主任
(〒108-0075 東京都港区港南1-8-15 Wビル4F)

²⁾ 東亜建設工業(株)技術研究開発センター 主任研究員・博士(工学)

³⁾ 飛鳥建設(株)耐震ソリューション部耐震技術 G 主任・修士(工学)

⁴⁾ 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)

⁵⁾ 東洋大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

¹⁾ Chief, Seismic Solution Dept., TOBISHIMA Corporation

²⁾ Senior Researcher, Research and Development Center, TOA Corporation, Dr. Eng.

³⁾ Chief, Seismic Solution Dept., TOBISHIMA Corporation, M. Eng.

⁴⁾ Assoc. Prof., College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

⁵⁾ Prof., Dept. of Architecture, Fac. of Sci. & Eng., Toyo Univ., Dr. Eng.

る。まず、平滑な接合面（以下、平滑部と呼称する）に黒の塗料を塗装し、その後目荒らしをする。目荒らしを施した部分（以下、目荒らし部と記述する）は、塗料が付着したコンクリートが除去されるため、平滑部と目荒らし部に大きな明度の差が生じる。写真1に目荒らし状況を示す。この明度の差を利用して画像解析することで、 A_{cr} を数値的に確認できる。表1に示すように実測値の r_{cr} は、ほぼ想定値通りであることがわかる。また、 r_{cr} が0.3以上になると平滑部が減少し、1回の電動ピックの打撃で生じる目荒らし部（以下、単体目荒らし部と称する）同士が重なる現象が生じ得る。平滑部に囲まれた目荒らし部の数量 n_c を写真1に併記する。特にCH-30Lでは単体目荒らし部が重なり、CH-30M及びCH-30Hより n_c が少ない。また、 $r_{cr}=0.5$ 以上は n_c が大きく減少する傾向が見られる。

せん断実験において、固着や摩擦の影響を極力少なくするため、平滑部にグリスを塗布し、接合面上部に375mm×200mm×200mmの型枠を組み、鉄筋籠を設置し、プレミックスタイプのグラウトを打設した。

2.3 目荒らしを施した接合面の形状測定

図2に形状測定装置を示す。図2に示すように、高感度スポットレーザー変位計及びリニアエンコーダーを用いて、せん断載荷方向 x 、へりあき方向 y 及び深さ方向 z の形状座標を同時に測定可能な、形状計測装置を構築した。

リニアガイドを取り付けたH型鋼によって囲まれた中央に試験体を固定し、リニアガイドに設置されたレーザー変位計を x 方向と y 方向に走査させることで、接合面の3次元座標を取得する。 x 方向の計測間隔 Δx は0.04mm、 y 方向の計測間隔 Δy は0.5mmとした。

2.4 せん断加力方法

図3に加力装置を示す。加力装置は、軸力を制御するための最大荷重500kNの油圧ジャッキを、水平加力を制御するための最大荷重500kNの油圧ジャッキを正負それぞれに使用した。軸方向は一定の荷重制御とし、水平方向は強制せん断変位を与える正負交番繰り返し載荷とした。また、水平加力位置は接合面と同じ高さとするので、加力による偏心を極力小さくした。実験方法の詳細は参考文献7)を参照されたい。

3. 接合面の凹凸形状の定量評価

既往の粗面の形状に関する研究例として、コンクリートひび割れ面における微小凹凸面の傾斜角による接触密度関数を導出した研究⁸⁾や、凹凸の接触面高さを評価した研究例⁹⁾がある。これらの手法を応用し、目荒らしを施した接合面の形状を評価する。

3.1 形状分析を行うための準備

図4に形状分析方法を示す。図2の形状計測装置を用いて得られた3次元データは、試験体を設置する精度により僅かに傾いた状態となっている。まず、 x - z 軸上の2次元座標において、接合面の計測開始点である座標値と、計測終了点である座標値を1次関数で結んだ面を座標基準面とし、図4に示すように座標変換をする。ここに i は計測番号を示す。

平滑部においても微小な凹凸がある。そこで、写真1(a)に併記しているように、接合面の外周5mm幅($r_{cr}=0.1, 0.2$)もしくは1mm幅($r_{cr}=0.3, 0.5, 0.75$)を平滑基準面とし、この面の計測データを考慮して密度関数を求め、目荒らし部のみに着目した形状分析も実施する。

接合面全体に作用するせん断力は、単体目荒らし部のマクロ的な接触による抵抗（以下、全体支圧抵抗と称する）と単体目荒らし部内に存在する個々の微小凹凸面の接触による局所的な噛み合い抵抗（以下、局所噛み合い抵抗と称する）を総和して得られると考える。図5に全体支圧抵抗と局所噛み合い抵抗の概念を示す。同図(a)に示すように全体支圧抵抗は、単体目荒らし部周囲の平滑部の面積（以下、支圧抵抗面積 A_B と呼称する）の大きさに影響を受けると推測

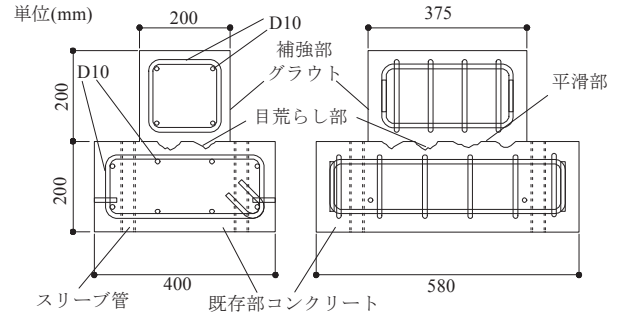


図1 試験体の諸元寸法

表1 試験体一覧

試験体名	目荒らし面積比		平均圧縮応力度 σ_0 (N/mm ²)	既存部コンクリート		補強部グラウト	
	想定値	実測値		$c\sigma_B$	E_C	$c\sigma_B$	E_C
CH-10L	0.1	0.099	0.48	17.1	24.7	64.6	26.2
CH-20L	0.2	0.213		19.9	29.1	68.7	26.3
CH-30L		0.290		17.1	24.7	64.6	26.2
CH-30M	0.3	0.283	0.95	19.9	29.1	68.7	26.3
CH-30H		0.284	1.43				
CH-50L	0.5	0.499	0.48	17.1	24.7	64.6	26.2
CH-75L	0.75	0.777					

$c\sigma_B$: 既存部コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 E_C : 既存部コンクリートのヤング係数(kN/mm²)、 $c\sigma_B$: 補強部グラウトの圧縮強度(N/mm²)、 E_C : 補強部グラウトのヤング係数(kN/mm²)、

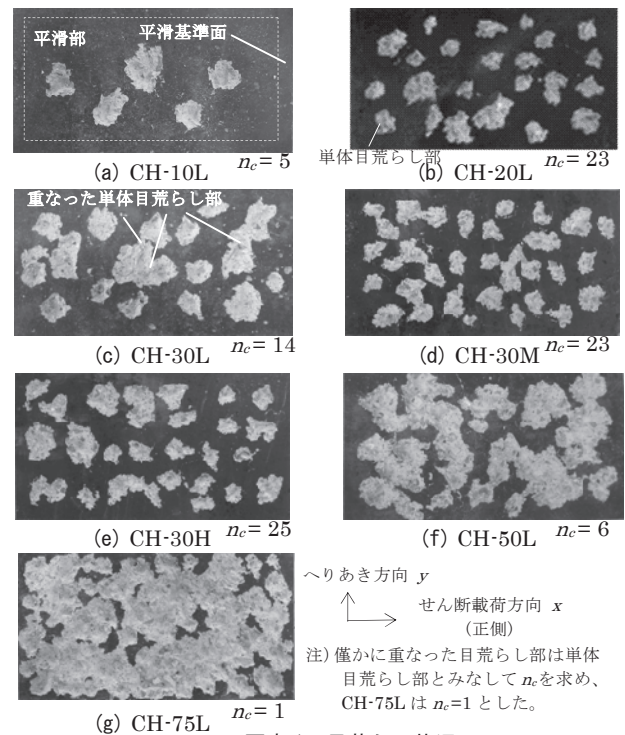


写真1 目荒らし状況

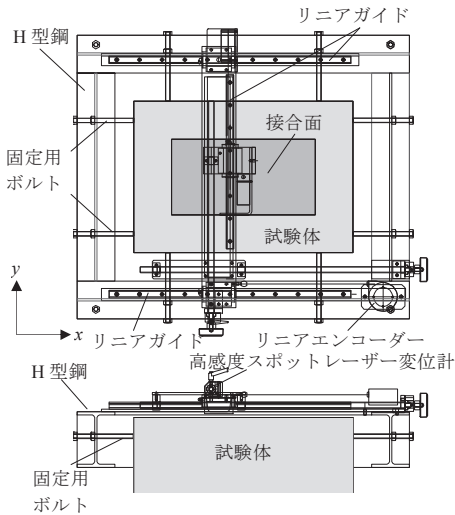


図2 形状測定装置

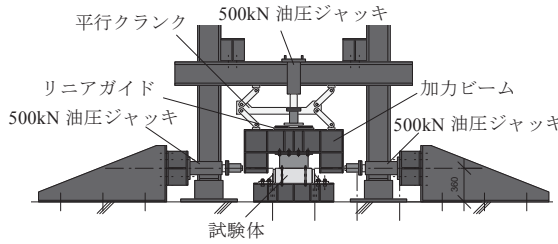


図3 加力装置

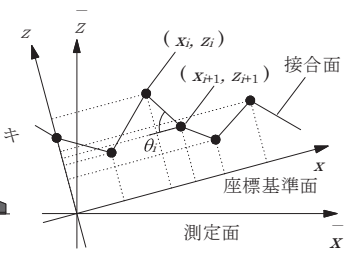


図4 形状分析方法

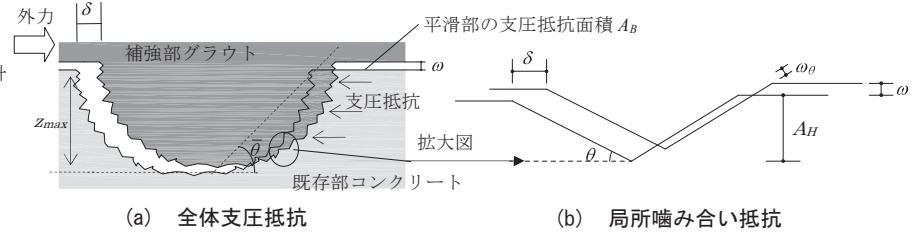


図5 全体支圧抵抗と局所噛み合い抵抗の概念

される。更に、この支圧抵抗面積は目荒らし部の最大深さ z_{max} や平均傾斜角 θ から求められ、また同図(b)より局所噛み合い抵抗は、微小凹凸面の垂直成分である垂直投影面積 A_H に依存すると考えられる。続いて図6に示すように、目荒らし部を平面的にモデル化する。 A_j は、 A_{cr} 、 A_B 及びせん断抵抗に寄与しない面積 A_n に区別できる。また、目荒らし部を等価直径 \bar{R} の円にモデル化すると、式(2)より幾何学的に \bar{R} を算出できる。

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{4A_{cr}}{n_c \cdot \pi}} \quad (2)$$

3.2 傾斜密度関数

図4に傾斜角 θ の分析方法を併記している。図4に示すように接合面の傾斜角 θ_i は、 x 方向に隣接する $i+1$ 点の座標値を用いて表すことが出来る。 θ_i を次式により算定する。

$$\theta_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right\} \quad (3)$$

次に接合面全領域の傾斜密度関数 ${}_{\theta}\Omega_j(\theta)$ は、次式の条件を満たす。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} {}_{\theta}\Omega_j(\theta) d\theta = 1 \quad (4)$$

接合面全領域の傾斜密度分布を図7に示す。いずれの試験体も $\theta=0\text{rad}$ 近傍でピークを示しており、 r_{cr} が大きくなるにつれピーク値が減少する。また、 $r_{cr}=0.3$ とした試験体3体に大きな差異は見られない。続いて式(5)より目荒らし部の傾斜頻度分布 ${}_{\theta}N_{cr}(\theta)$ を求め、 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の区間の積分値が1となるような目荒らし部の傾斜密度関数 ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ を求める。

$${}_{\theta}N_{cr}(\theta) = {}_{\theta}N_j(\theta) - \frac{A_j(1-r_{cr})}{A_f} {}_{\theta}N_f(\theta) \quad (5)$$

$${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta) = {}_{\theta}N_{cr}(\theta) / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} {}_{\theta}N_{cr}(\theta) d\theta \quad (6)$$

ここに ${}_{\theta}N_j(\theta)$ は接合面全領域の傾斜頻度分布、 ${}_{\theta}N_f(\theta)$ は平滑基準面の傾斜頻度分布、 A_f は平滑基準面面積である。

図8に目荒らし部の傾斜密度分布を示す。平滑部を取り除いた ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ は ${}_{\theta}\Omega_j(\theta)$ 同様に、 $\theta=0\text{rad}$ 近傍でピークを示し、 θ の正負でほぼ対称的に推移しているが、 r_{cr} に着目すると r_{cr} によらず概ね同じ推移を示している。更に全ての試験体において、 $\pm\pi/5\text{rad}$ 近傍で

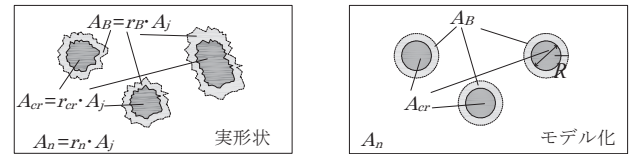


図6 目荒らし部のモデル化

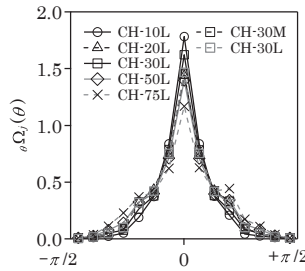


図7 接合面全領域の傾斜密度分布

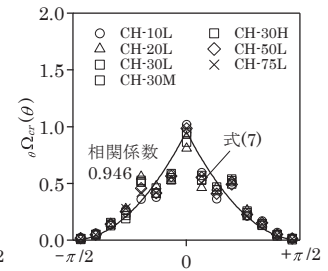


図8 目荒らし部の傾斜密度分布

${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ が突起している。この傾向は、電動ピックによる目荒らしの特質であると思われるが、詳細な検討は今後の課題としたい。そこでこの突起の影響を無視すると、 ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ は2次関数で表現できそうである。また、 ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ のピークが $\theta=0\text{rad}$ 近傍で突出していることから、 ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ を正負に分けて定式化すると次式となる。

$${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta) = \begin{cases} \left(\frac{12}{\pi^3} \right) \cdot (\theta - \pi/2)^2 & (0 \leq \theta \leq \pi/2) \\ \left(\frac{12}{\pi^3} \right) \cdot (\theta + \pi/2)^2 & (-\pi/2 \leq \theta \leq 0) \end{cases} \quad (7)$$

図8に示すように提案式による ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ は、相関係数0.946であり高い精度で再現できている。

3.3 深さ密度関数

深さ z の頻度分布から次式を満たす接合面全領域の深さ密度関数 $z\Omega_j(z)$ を次式を満たすように求める。

$$\int_0^{z_m} z\Omega_j(z) dz = 1 \quad (8)$$

ここに z_m は採用した深さの最大値を示し、母数のほぼ全数を網羅する $z_m=30\text{mm}$ とする。接合面全領域の深さ密度分布を図9に示す。同図では $z \geq 20\text{mm}$ における密度が小さいため、 $0 \leq z \leq 20\text{mm}$ の範囲

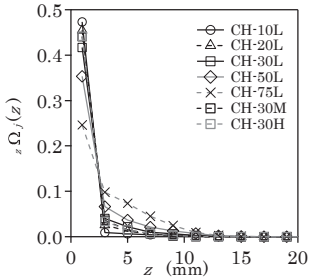


図9 接合面全領域の深さ密度分布

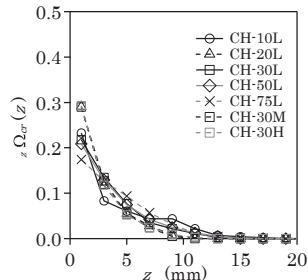


図10 目荒らし部の深さ密度分布

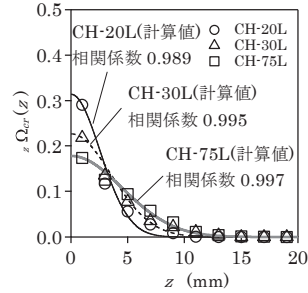


図11 $z\Omega_{cr}(z)$ の計測値と計算値の比較

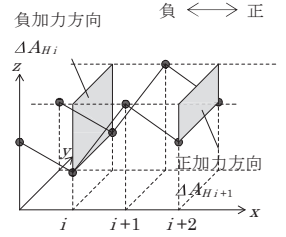


図12 垂直投影面積の分析方法

で表示する。図9より、 $z=0\text{mm}$ 近傍における $z\Omega_j(z)$ は r_{cr} の増加に伴い減少する。続いて傾斜密度分布と同様に、平滑部を取り除いた目荒らし部の深さ密度関数 $z\Omega_{cr}(z)$ は、次式より求められる。

$$zN_{cr}(z) = zN_j(z) - \frac{A_j(1-r_{cr})}{A_f} zN_f(z) \quad (9)$$

$$z\Omega_{cr}(z) = zN_{cr}(z) / \int_0^{z_m} zN_{cr}(z) dz \quad (10)$$

ここに $zN_j(z)$ は接合面全領域の深さ頻度分布、 $zN_f(z)$ は平滑基準面の深さ頻度分布、 $zN_{cr}(z)$ は目荒らし部の深さ頻度分布である。

前掲の写真1に示すように、単体目荒らし部が重なり、1つ当たりの目荒らし部の面積が増大すると、 z の大きい成分が多くなるため、 $z=0\text{mm}$ 近傍における $z\Omega_{cr}(z)$ が小さくなる。図10に目荒らし部の深さ密度分布を示す。同図から実際の凹凸形状の相違によりばらつきは見られるが、単体目荒らし部が重なった試験体 CH-30L は、他の $r_{cr}=0.3$ の試験体と比較し、 $z\Omega_{cr}(z)$ が $z=0\text{mm}$ 近傍において小さく、多くの単体目荒らし部が重なった $r_{cr}=0.5$ 及び 0.75 では、 $z=0\text{mm}$ 近傍で更に小さくなる。続いて、 $z\Omega_{cr}(z)$ を定式化する際に、 $z\Omega_{cr}(z)=0$ の漸近線かつ、 $z=0$ で $z\Omega_{cr}(z)$ の値を持つ特徴を有する釣鐘型の曲線であるガウス関数をベースに次式を提案する。

$$z\Omega_{cr}(z) = a \cdot e^{-bz^2} \quad (11)$$

$$\int_0^{\infty} z\Omega_{cr}(z) dz = 1 \quad (12)$$

$$a = 2/\sqrt{\pi/b} \quad (13)$$

ここに式(12)に示す条件から式(13)が導かれる。また b は、目荒らし部の深さや重なり具合に依存する係数であり、本論文で $z=1\text{mm}$ における $z\Omega_{cr}(z)$ の計測値と同値になるように、式(11)と(13)を連立して a 及び b を算定する。

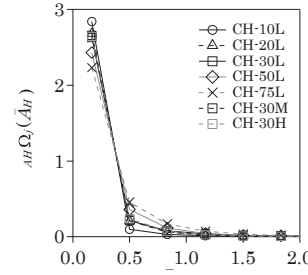
図11に $z\Omega_{cr}(z)$ の計測値と計算値の比較を示す。図11に示すように相関係数は高い値を示しており、式(11)の提案式は深さ密度分布を概ね模擬できている。つまり $z=1\text{mm}$ における b を設定できれば、 $z\Omega_{cr}(z)$ を推定できると考えられる。なお、図11には試験体3体のみの比較を示しているが、同様に求めた全試験体の相関係数の最小値は0.939であり、高い値を示している。

3.4 垂直投影面積関数

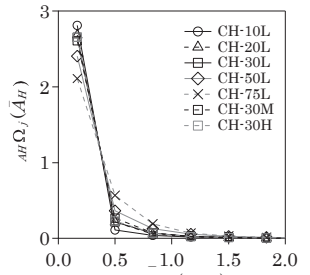
垂直投影面積の分析方法を図12に示す。 x, y 方向に隣接する4点から加力方向毎に垂直投影面積 ΔA_{Hi} 、単位接合面面積当たりの垂直投影面積 \bar{A}_H を算出して、接合面全領域の垂直投影面積密度関数 $A_H\Omega_j(\bar{A}_H)$ を次式を満足するように算定する。

$$\int_0^{A_{Hm}} A_H\Omega_j(\bar{A}_H) d\bar{A}_H = 1 \quad (14)$$

ここに A_{Hm} は採用した \bar{A}_H の最大値を示し、母数のほぼ全数が内



(a) 正加力方向



(b) 負加力方向

図13 接合面全領域の垂直投影面積密度分布

包される $A_{Hm}=5\text{mm}^2$ とする。

接合面全領域の垂直投影面積密度分布を正加力、負加力方向に別けて図13に示す。ここでは、 $\bar{A}_H \geq 2\text{mm}^2$ の範囲で密度が小さいため、 $0 \leq \bar{A}_H \leq 2\text{mm}^2$ の範囲で表示する。 $\bar{A}_H=0\text{mm}^2$ 近傍における正負それぞれの $A_H\Omega_j(\bar{A}_H)$ は、 r_{cr} の増加に伴い減少する。また、 $\theta\Omega_{cr}(\theta)$ や $z\Omega_{cr}(z)$ と同様に、平滑基準面の垂直投影面積頻度分布 $A_HN_i(\bar{A}_H)$ から、平滑部を取り除いた目荒らし部の垂直投影面積密度関数 $A_H\Omega_{cr}(\bar{A}_H)$ を次式により算定する。

$$A_HN_{cr}(\bar{A}_H) = A_HN_j(\bar{A}_H) - \frac{A_j(1-r_{cr})}{A_f} A_HN_f(\bar{A}_H) \quad (15)$$

$$A_H\Omega_{cr}(\bar{A}_H) = A_HN_{cr}(\bar{A}_H) / \int_0^{A_{Hm}} A_HN_{cr}(\bar{A}_H) d\bar{A}_H \quad (16)$$

ここに $A_HN_j(\bar{A}_H)$ は接合面全領域の垂直投影面積頻度分布、 $A_HN_{cr}(\bar{A}_H)$ は目荒らし部の垂直投影面積頻度分布を示す。

図14に目荒らし部の垂直投影面積密度分布を示す。同図を見ると $A_H\Omega_{cr}(\bar{A}_H)$ は、全ての試験体において大きな差異が見られないことがわかる。このことから、 \bar{A}_H は A_{cr} に比例すると解釈される。

4. 全体支圧抵抗と局所噛み合い抵抗

本章では、前章の形状分析結果を用いて、全体支圧抵抗と局所噛み合い抵抗について考察する。

4.1 重なりあう目荒らし部による支圧抵抗面積への影響

図15に単体目荒らし部が重なる条件を示す。単体目荒らし部を直径 R の円であると仮定すると、ある4個の目荒らし部の中央に新たな目荒らしを施工する際に重ならないようにするには、単体目荒らし部の中心間距離を $\sqrt{2}R$ 以上確保する必要がある。この既存の単体目荒らし部の中心で囲まれた面積を A_j とすると、図15に示す r_{cr} は $\pi/8$ (≈ 0.39) になる。実際の不規則な形状を考えると、 r_{cr} はもう少し小さい値で単体目荒らし部同士が重なる可能性がある。この現象は2.2節で触れた、 $r_{cr}=0.3$ 以上の試験体で単体目荒らし部同

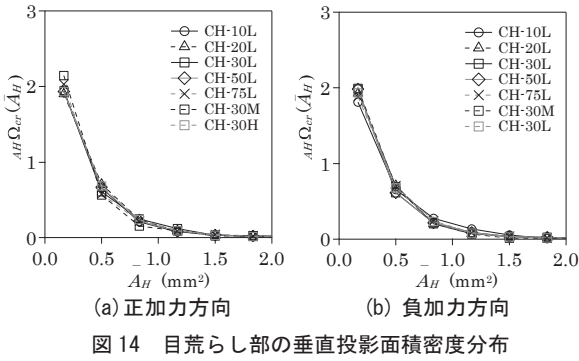


図 14 目荒らし部の垂直投影面積密度分布

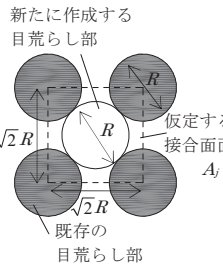


図 15 目荒らし部が重なる条件

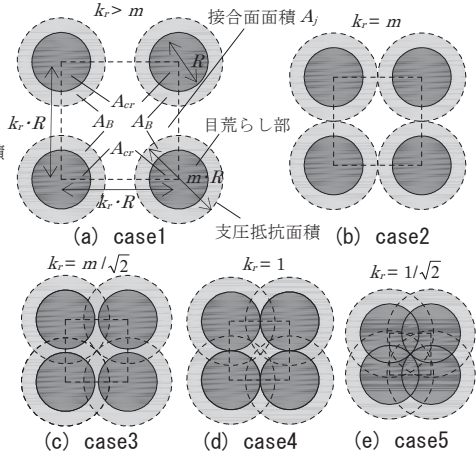


図 16 平面における A_{cr} と A_B の関係の概念

士が重なることも整合する。また、目荒らし部が円形の場合、 A_B はせん断方向に扇状に分布すると考えられるが、目荒らしは複雑な形状であるため一様な評価は難しい。そこで、 A_B が R の m 倍の直径となる円形状に分布すると仮定する。また、目荒らし部の中心間の距離は、 R を k_r 倍した値で表す。図 16 に平面における A_{cr} と A_B の関係の概念を示す。case1 から case2 に移行する過程では、支圧抵抗面積比 $r_B = A_B/A_j$ は r_{cr} の増加に伴って大きくなる。また、case2 から case3 へ移行する間で r_B が最大となり、case3 以降は A_j が A_B と A_{cr} で支配される。ここで r_{cr} と r_B の関係は次式で表現できる。

$$r_{cr} = 1 - r_n - r_B \quad (17)$$

ここに r_n は A_j に対する A_n の面積比である。

3章では ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ 、 $A_H\Omega_{cr}(\bar{A}_H)$ は r_{cr} によらず概ね同様の傾向を呈したが、 $z\Omega_{cr}(z)$ は r_{cr} の増大に伴い単体目荒らし部同士が重なり、 z の大きい成分が増加した。これらの傾向から単体目荒らし部の形状は相似形に近いと考えられる。そこでマクロ的に目荒らし部の形状を捉えることとし、単体目荒らし部の形状を図 17 のように三角錐でモデル化する。更に同図では、単体目荒らし部が重なることによる、支圧抵抗領域(面積)と深さの関係の導いていく。同図を見ると単体目荒らし部が重なることで、等価直径 \bar{R} の増大に伴い、見掛けの目荒らし部の最大深さ \bar{z}_{max} や見掛けの支圧抵抗面積 \bar{A}_B は大きくなる。そこで、 z_{max} と見掛けの目荒らし部の最大深さ \bar{z}_{max} の関係は式(18)で表され、 A_B と \bar{A}_B の関係は式(19)で表される。

$$z_{max} / \bar{z}_{max} = 0.5R \cdot \tan\bar{\theta} / 0.5\bar{R} \cdot \tan\bar{\theta} = R / \bar{R} \quad (18)$$

$$A_B / \bar{A}_B = 0.5R(m-1) / 0.5\bar{R}(m-1) = R / \bar{R} \quad (19)$$

式(18)、(19)より z_{max} / \bar{z}_{max} と A_B / \bar{A}_B は同値である。この原理から、単体目荒らし部が重なることによる A_B / \bar{A}_B を求める。理想的には $r_{cr} \leq \pi/8$ で単体目荒らし部が重ならなければ A_B / \bar{A}_B は 1 となり、重なる数量が増大する $r_{cr} > \pi/8$ では A_B / \bar{A}_B は 0 に近づくと想定される。この想定値と計測値を比較し、図 18 に示す。ここで、各試験体の z_{max} は、図 11 に示す試験体毎の $z\Omega_{cr}(z)$ の $z=0\text{mm}$ からの範囲における標準偏差の 3 倍の信頼区間とする z を用いると、式(18)より $z_{max} / \bar{z}_{max} \cdot r_{cr}$ 関係が求められ、図 18 より計測値は想定値より小さくなるのがわかる。これは複雑な目荒らし形状を円形にモデル化したり、平均化した傾斜角を用いているためと考えられる。そこで r_{cr} を低減係数 α と面積比を用いて修正すると次式となる。

$$r_{cr} = 1 - \beta \cdot r_n - \alpha \cdot r_B \quad (20)$$

ここに β は α に伴う r_n の増大係数である。

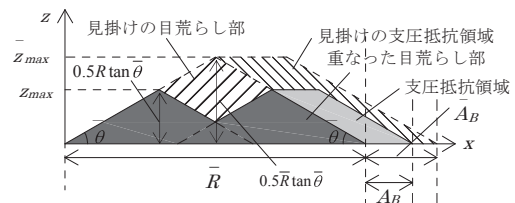


図 17 断面における目荒らし部のモデル化

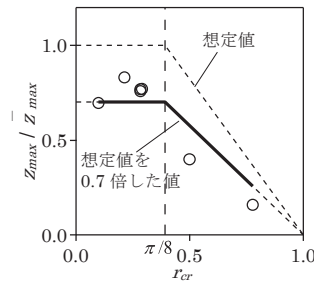


図 18 $z_{max} / \bar{z}_{max} - r_{cr}$ 関係

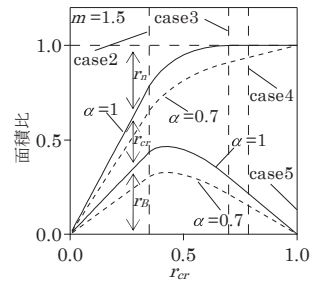


図 19 $r_B, r_n - r_{cr}$ 関係

李・前川らの理論から、接合面にずれ変形が生じると傾斜角が急な凹凸面から接触する。図 5(a) より既存部コンクリートと補強部グラウトの離間距離 ω が 0 と仮定すると、微小凹凸面の接触変位 ω_{θ} は $\delta \cdot \sin\theta$ (δ はずれ変形⁹⁾) で表される。そこで ω_{θ} を考慮して ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ に $\sin\theta$ を乗じた値の中央値を $\bar{\theta}$ とすると、 ${}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta)$ と $\bar{\theta}$ の関係を次式で示すことができる。なお、式(21)より $\bar{\theta}$ を同定すると正負でそれぞれ値が算定されるため、これらの絶対値の平均値を $\bar{\theta}$ として用いる。

$$\int_0^{\pm\bar{\theta}} {}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta) \cdot \sin\theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^{\pm\pi/2} {}_{\theta}\Omega_{cr}(\theta) \cdot \sin\theta d\theta \quad (21)$$

次に r_B 及び r_n と r_{cr} の関係を導く。ここで、既往の円形状の鋼製ディスクを用いた実験¹⁰⁾において、支圧抵抗の損傷領域が鋼製ディスクの直径の 1.5 倍になると示唆されていることから、本論文においても $m=1.5$ とする。図 19 に $r_B, r_n - r_{cr}$ 関係を示す。同図より $\alpha=0.7$ とすると $r_{cr} \geq 0.5$ の範囲では $r_n < 0.2$ となり、接合面はほぼ r_B と r_{cr} で支配される。また、 r_B のピーク時の r_{cr} は実形状を考慮すると目荒らし部が重なるため小さくなり、 $r_{cr}=0.3$ 程度となると考えられる。

4.2 局所噛み合い抵抗

3章で噛み合い抵抗に影響する垂直投影面積は r_{cr} に依存せず、 A_{cr} に比例することを示した。このことより \bar{A}_H は傾斜角のみで表現でき、 $\bar{\theta}$ を用いると次式で表される。

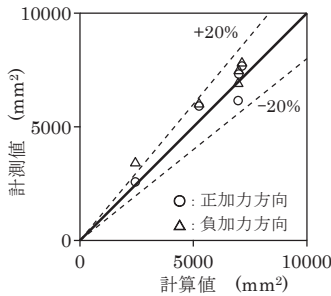


図 20 A_H の計測値と計算値の比較

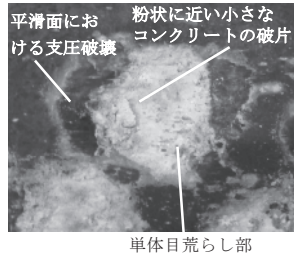


写真 2 最終破壊状況の一例

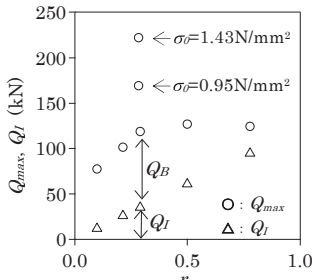


図 21 $Q_{max}, Q_I - r_{cr}$ 関係

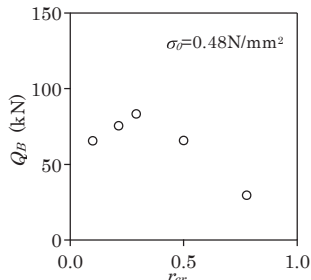


図 22 $Q_B - r_{cr}$ 関係

$$\bar{A}_H = 0.5 \tan \bar{\theta} \quad (22)$$

式(7)及び(21)より $\bar{\theta}$ は 0.581 rad となる。また、加力方向毎の垂直投影面積の合計 A_H は \bar{A}_H に A_{cr} を乗じた値であり、次式となる。

$$A_H = 0.5 A_{cr} \cdot \tan \bar{\theta} = 0.328 A_{cr} \quad (23)$$

A_H の計測値と式(23)による計算値の比較を図 20 に示す。計測値は計算値の $\pm 20\%$ に概ね納まっていることがわかる。

5. せん断実験結果

写真 2 に最終破壊状況の一例を示す。実験終了後、既存部コンクリートの表面を観察すると、平滑面では支圧抵抗により破壊した形跡があり、単体目荒らし部の内部では粉状に近い小さなコンクリートの破片が存在していた。これらの現象を踏まえ、 $\sigma_0 = 0.48 \text{ N/mm}^2$ とした試験体のせん断実験結果から、せん断耐力を検討する。全体支圧抵抗によるせん断耐力 Q_B は A_B に比例し、局所噛み合い抵抗によるせん断耐力 Q_I は A_H に比例すると考えられる。また、目荒らしによるせん断耐力 Q_{max} は、 Q_B と Q_I の累加となることから、 Q_{max} は次式となる。

$$Q_{max} = Q_I + Q_B = r_{cr} \cdot A_j \cdot \sigma_s + r_B \cdot A_j \cdot \sigma_s \quad (24)$$

ここに $r_{cr} \sigma_s$ は単位目荒らし面積当たりの局所噛み合い抵抗によるせん断強度、 $r_B \sigma_s$ は単位目荒らし面積当たりの全体支圧抵抗によるせん断強度である。

負側では正加力時の既存部コンクリート及び補強部グラウトの損傷の影響を受けるため、本論文では正側のみの Q_{max} のせん断実験結果を用いて検討する。図 21 に $Q_{max}, Q_I - r_{cr}$ 関係を示す。 $r_{cr} = 0.3$ まで r_{cr} が增大するにつれ Q_{max} は増大したが、それ以降の Q_{max} の増大率は小さく、 $r_{cr} = 0.5$ と 0.75 はほぼ同じ値を示した。また 4.1 節で述べたように、 $r_{cr} \geq 0.5$ の範囲において接合面は r_B と r_{cr} でほぼ支配されていることから、 $r_{cr} = 0.5$ と 0.75 の試験体の平滑部の全域が、 A_B になると考える。つまり、 $r_{cr} = 0.5$ で $r_B = 0.5$ 、 $r_{cr} = 0.75$ で $r_B = 0.25$ と見なされ、式(25)、(26)より $r_{cr} \sigma_s$ を求めることができる。

$$0.5 A_j \cdot \sigma_s + 0.5 A_j \cdot r_B \cdot \sigma_s = Q_{0.5} \quad (25)$$

$$0.75 A_j \cdot \sigma_s + 0.25 A_j \cdot r_B \cdot \sigma_s = Q_{0.75} \quad (26)$$

ここに $Q_{0.5}$ 及び $Q_{0.75}$ は試験体 CH-50L 及び CH-75L のそれぞれの正加力時の最大せん断力であり、式(25)、(26)から $r_{cr} \sigma_s = 1.63 \text{ N/mm}^2$ となる。また、式(24)より Q_B は次式となる。

$$Q_B = Q_{max} - r_{cr} \sigma_s \cdot A_{cr} \quad (27)$$

図 22 に $Q_B - r_{cr}$ 関係を示す。コンクリート強度は試験体により若干異なるが、本論文では全試験体において同じ $r_{cr} \sigma_s$ とする。図 22 より Q_B は、 $r_{cr} = 0.3$ で最も大きい値を示している。4.1 節で触れた通り、図 22 から実形状を考慮すると、 $r_{cr} = 0.3$ 近傍で A_B が大きく確保されると推察される。また $\sigma_0 = 0.95$ 及び 1.43 N/mm^2 とした試験体の Q_{max} は、 σ_0 の影響により $\sigma_0 = 0.43 \text{ N/mm}^2$ の試験体より大きい値を示しており、今後この σ_0 の影響も検討する。

6. 結論

本論文では、目荒らしの形状、特に面積比に着目し、形状分析及びせん断実験を実施した。その結果、実際目荒らしでは目荒らし面積比 r_{cr} が 0.3 を超えると単体目荒らし部同士が重なりやすくなる。この重なる現象に起因して、全体支圧抵抗によるせん断耐力は $r_{cr} = 0.3$ 程度でピークとなり、それ以降減少する。これとは反対に、局所噛み合い抵抗によるせん断耐力は r_{cr} に比例して増大する。要するに、せん断耐力に効率的な r_{cr} が、形状分析及びせん断実験の両視点から 0.3 程度であることを本論文において示したことになる。

紙幅の制限から本論文では正側のせん断耐力のみに着目したが、今後、荷重-変形関係等の詳細を報告すると共に、繰り返し載荷がせん断耐力に及ぼす影響等を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001年改定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, 2001
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル」, 2002
- 3) 建築保全センター：建築改修工事監理指針 平成 25 年版(下巻), 2013
- 4) 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.293-294, 2013.8
- 5) 南宏一, 津吉真人, 石村光曲, 貞松和史：傾斜および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, 2010.6
- 6) 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に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.698, pp.507-515, 2014.4
- 7) 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
- 8) 李宝録, 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
- 9) 佐々木仁, 寺岡勝：人口軽量骨材コンクリートのひび割れ表面形状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.541, pp.137-144, 2001.3
- 10) 高瀬裕也, 佐藤貴志, 今井清史, 尾中敦義, 阿部隆英, 池田隆明, 久保田雅春：コンクリート系構造物の耐震補強に用いる高いせん断耐力と剛性を持つ新たな接合要素のせん断抵抗性能の基礎的検証 -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に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.681, pp.1727-1736, 2012.12

[2017年6月7日原稿受理 2017年9月20日採用決定]