

論文 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

武者 右京*1・高瀬 裕也*2・阿部 隆英*3・樋渡 健*4

要旨: コンクリート構造物などの耐震補強では、既存躯体と新設躯体の接合面にチッピングによる目荒らしが施されるが、この目荒らしについて論じた研究は少ない。そこで、目荒らし部のせん断耐力を評価するため、目荒らし面の形状測定およびせん断載荷実験を行った。せん断載荷実験の結果、主に、目荒らし面積の違いにより、支圧破壊とせん断破壊（シアオフ破壊）の二種類の破壊形式に分けられた。本論文では、コンクリート強度、ヤング係数および形状測定による垂直投影面積等を考慮して支圧破壊する場合のせん断耐力式を構築し、実験値のせん断耐力を良好に推定できることを明らかにした。

キーワード: コンクリート目荒らし、耐震補強、支圧破壊、形状測定、せん断耐力

1. はじめに

既存 RC 構造物における耐震補強の接合部では、既存躯体側に、チッピングによる目荒らし（以下、目荒らしと呼称する）を施した後に、接着系と施工アンカーが配置される。目荒らし面では、凹凸の噛み合い効果によって、せん断力が伝達される。しかし、目荒らしの面積・深さ等の形状は施工者の技術や意識によって相違する。

そのため、目荒らし形状を管理するのは困難であると推察され、現行の間接接合部の設計¹⁾では、目荒らしに関する規定はないことから、目荒らしは補助的なものと認識されやすい。しかし、接合部の設計耐力を満足するには、適切に目荒らしする必要がある²⁾。

また、昨年行った実験²⁾より、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）を離れたせん断載荷実験において、 r_{cr} が 0.1 および 0.3 の試験体では既存躯体側コンクリートが支圧破壊するのに対し、 r_{cr} が 0.5 および 0.75 の試験体は、支圧破壊がほとんど認められず、既存躯体側コンクリートと補強部材側グラウトが一体となって破壊する、せん断破壊（以下、シアオフ破壊³⁾と呼称する）が確認された。既発表の論文²⁾では支圧破壊時における力学挙動を再現するための評価を行ったが、せん断耐力式を構築するには、破壊形式の違いを適切に評価する手法の確立が必要となる。この耐力式を構築する際に、支圧破壊は凹凸部の垂直投影面積、シアオフ破壊は水平投影面積に影響されると考えられる。そこで、本論文では、支圧破壊とシアオフ破壊のうち、支圧破壊に焦点をあて、垂直投影面積を考慮したせん断耐力式の構築を目的とする。

2. コンクリート目荒らし面における実験概要

本実験では、目荒らし部の支圧耐力を評価するために、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称する）を用いた形状測定および形状分析を行う。

次いで、せん断耐力を評価するために目荒らしのみを施した試験体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 に試験体パラメータを示す。既存躯体側コンクリートは、580mm×400mm×200mm、補強部材側グラウトは、375mm×200mm×200mm、の直形状である。また、形状測定実験とせん断載荷実験は同一の試験体を用いる。既存躯体側コンクリートの試験領域は、375mm×200mm とし、これを接合面と呼称する。実験パラメータは目荒らし面積比 r_{cr} 、目荒らし深さおよびコンクリート圧縮強度 c_{0B} である。想定する r_{cr} は 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0 の 6 段階とする。 r_{cr} が 0.1, 0.2, 0.3 の試験体は深さを離れたもの、 r_{cr} が 0.1~0.5 の 4 段階では、目標圧縮強度 F_c を 10, 20, 30N/mm² に設定したものをそれぞれ用意した。

試験体名は CH の後に、面積比を意味する数値と深さを意味する記号（S:浅い、N:標準および D:深い）コンクリート強度を表す記号（L: $F_c=10$ N/mm², M: $F_c=20$ N/mm² および H: $F_c=30$ N/mm²）を併記して構成される。なお、表-1 に各試験体の最大目荒らし深さおよび F_c も併記している。表-2 にコンクリートとグラウトの材料特性を示す。既存躯体側コンクリートを打設し、接合面に打撃型の電動工具を用いて、目荒らしを施す。目荒らしを施工する際の r_{cr} の確認方法として、画像解析を用いる。まず、平滑な接合面に黒色の塗料を添付し、その後、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 暮らし環境系領域 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 飛鳥建設 耐震ソリューション部 耐震技術 G 主任（正会員）

*4 東亜建設工業 技術研究開発センター主任研究員 博士（工学）（正会員）

を施工して、黒と目荒らしを施した箇所の色相違を利用して画像解析を行い r_{cr} の確認を行う。写真-1 に本試験体の各 r_{cr} の目荒らし面の施工状況の一例を示す。表-1 に画像解析結果による r_{cr} の実測値も併記している。

想定目荒らし面積比と比較すると、意図したとおりの面積比で、目荒らしを施工出来ている。 r_{cr} の確認後、接合面の3次元座標データを取得し、接合面の上に補強部材であるグラウトを打設する。なお、目荒らしを施さない平滑面にはグリスを塗布し、既存躯体側コンクリートと補強部材側グラウト間に生じる付着抵抗や摩擦抵抗の影響が小さくなるように配慮する。また、使用している塗料が、水性なため付着特性にはあまり影響しないと思われる。

2.2 目荒らしの形状測定実験

図-2 に形状測定装置図を示す。同図に示すように、レーザー変位計およびリニアエンコーダを用いた形状測定装置を構築した²⁾。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ことで、接合面の3次元座標データを計測する。既報の実験²⁾と同様に、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。

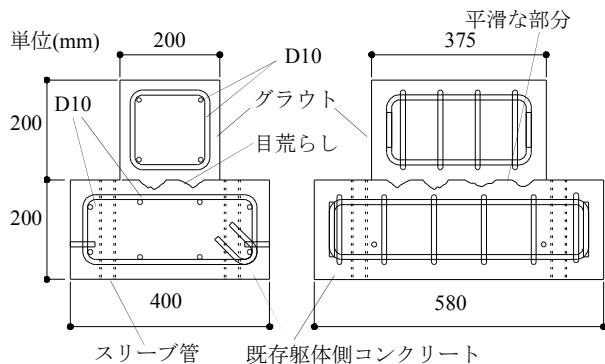


図-1 試験体の諸元寸法

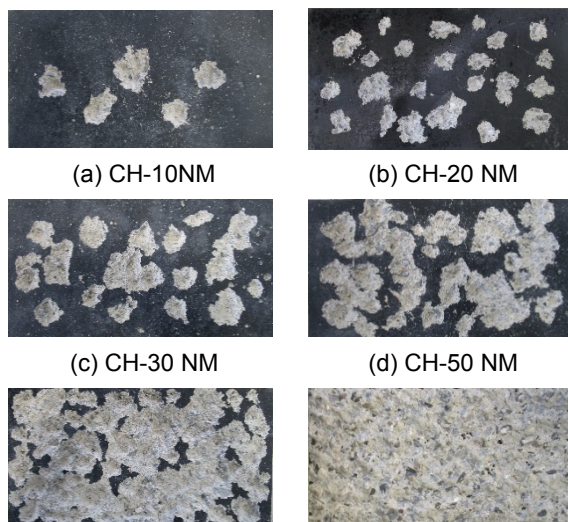


写真-1 試験体目荒らし状況の一例

2.3 せん断載荷実験の加力および計測方法

図-3 に加力装置図を示す。同図に示すように加力装置は軸力の制御と正負繰り返しの水平加力を制御するために、最大荷重 500kN 油圧ジャッキをそれぞれ使用する。水平方向は、相対水平変位 δ を変位制御しながら、正負交番繰り返し載荷を行う。繰り返しの水平加力の載荷位置は、試験体の接合面と同じ高さである。軸力は一定荷重とする。昨年の実験²⁾と同様に軸方向応力度 $\sigma = 0.48$ N/mm²となるように軸力を与え、加力ビームを水平に維持しつつ、油圧ジャッキを使用し、所定の荷重となるよ

表-1 試験体パラメータ

試験体名	面積比の 目標値 r_{cr}	$c\sigma_B$ の目標値 F_c (N/mm ²)	面積比の 実測値	深さ	最大深さ (mm)
CH-10NL		10(L)	0.154	標準	16.5
CH-10NM ²⁾	0.100	20(M)	0.099	標準	13.5
CH-10DM		20(M)	0.117	深い	23.9
CH-10NH		30(H)	0.137	標準	12.5
CH-20NL		10(L)	0.212	標準	20.2
CH-20SM		20(M)	0.201	浅い	7.7
CH-20NM	0.200	20(M)	0.213	標準	10.7
CH-20DM		20(M)	0.182	深い	20.7
CH-20NH		30(H)	0.190	標準	15.1
CH-30NL		10(L)	0.288	標準	16.5
CH-30SM		20(M)	0.337	浅い	7.3
CH-30NM ²⁾	0.300	20(M)	0.290	標準	13.5
CH-30DM		20(M)	0.308	深い	20.5
CH-30NH		30(H)	0.297	標準	11.5
CH-50NL		10(L)	0.489	標準	18.7
CH-50NM ²⁾	0.500	20(M)	0.499	標準	18.0
CH-50NH		30(H)	0.503	標準	15.3
CH-75NM ²⁾	0.750	20(M)	0.777	標準	20.2
CH-100 NM	1.000	20(M)	—	標準	14.9

表-2 材料特性

試験体名	材料	$c\sigma_B$ (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
CH-10,20NL	コンクリート	7.9	14.6	1.10
CH-30,50NL	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-10,30NM	コンクリート	17.1	24.7	1.83
CH-50,75NM	グラウト	64.6	26.2	2.10
CH-20,30SM	コンクリート	19.9	29.1	1.90
CH-20NM				
CH-10,20,30DM	グラウト	68.7	26.3	3.42
CH-100 NM	コンクリート	20.1	25.6	1.80
	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-10,20NH	コンクリート	31.7	30.1	2.50
CH-30,50NH	グラウト	72.3	24.4	4.10

$c\sigma_B$: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

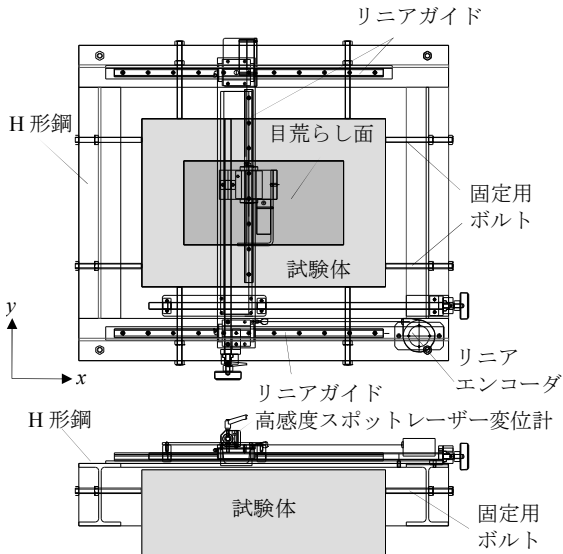


図-2 形状測定装置

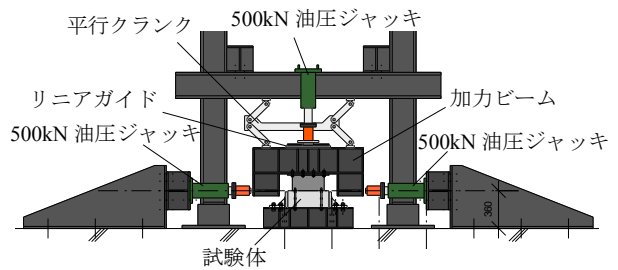


図-3 せん断載荷実験の荷装置

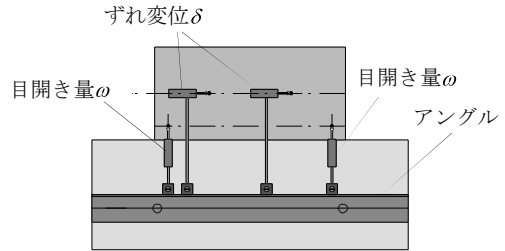
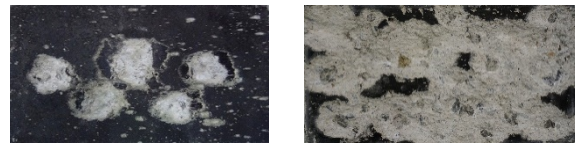


図-4 せん断載荷実験における変位の計測方法

う制御する。

図-4 に変位の計測方法を示す。同図に示すように、既存躯体側コンクリートに固定した鋼製アングルの上に変位計を設置し、そこから補強部材側グラウトに取り付けたターゲットに対する、離間距離 (以下、目開き量 ω と呼称する)と相対水平変位 δ をそれぞれ計測する。



(a) 支圧破壊(CH-10NM) (b) シアオフ破壊(CH-50NL)

写真-2 試験体目荒らし破壊状況

3. せん断載荷実験の結果

3.1 破壊形式

写真-2 に CH-10NM と CH-50NL における荷終了後の試験体目荒らし破壊状況、図-5 に支圧破壊とシアオフ破壊の破壊概念図を示す。CH-10NM のコンクリート目荒らし部の様子を観察すると、目荒らし面の凹凸部分で支圧破壊が確認され、シアオフ破壊の痕跡はほとんど確認されない。これに対し、 $F_c=30\text{N/mm}^2$ の試験体では支圧破壊に加え部分的にシアオフ破壊を伴う混合破壊となった。これ以外の $r_{cr}=0.1\sim 0.3$ の試験体はすべて支圧破壊となった。

上記とは反対に、CH-50NL では支圧破壊がほとんど認められず、既存躯体側コンクリートと補強部材側グラウトが一体となって破壊するシアオフ破壊が確認された。既存躯体側コンクリートでは、およそ 8~10 mm の深さでのグラウトの残留が確認され、 r_{cr} が 0.5~1.0 の試験体でシアオフ破壊となった。

3.2 せん断力-ずれ変位曲線と最大荷重

図-6 にせん断力 Q -ずれ変位 δ 関係の一例、図-7 に $F_c=20\text{N/mm}^2$ の試験体の最大荷重 Q_{max} -目荒らし面積比 r_{cr} 関係、表-3 に正側・負側の最大荷重 Q_{max} およびその際のずれ変位 δ を示す。図-6 より r_{cr} が異なる試験体を比較する。 Q - δ 曲線は、①最大荷重まで線形挙動、②ピーク後、荷重が急激に低下する脆性破壊挙動、③破壊後荷重

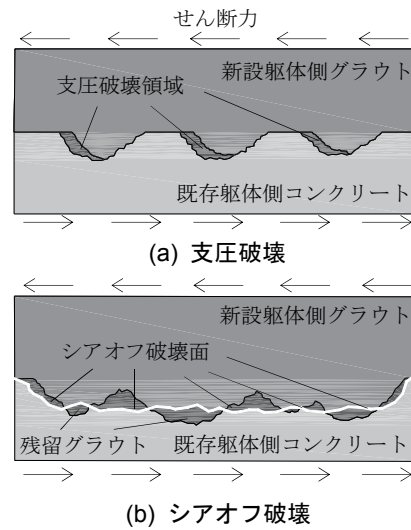


図-5 破壊概念

が一定となる荷重一定挙動の3段階に分類できる。図-7 および表-3 からわかるように r_{cr} が大きくなるにつれて最大荷重も大きくなる。しかし、 r_{cr} が 0.3 を超えると、最大荷重の増加がほとんど見られなくなる。これは、既述したように r_{cr} が 0.3 を超えると破壊形式が支圧破壊からシアオフ破壊に変化することが影響していると考えられ、 Q_{max} が r_{cr} に依存していないことと整合する。ピーク後の破壊挙動では r_{cr} が大きいほど、荷重低下が顕著に見られる。また、目荒らし深さの違いによる最大荷重の違

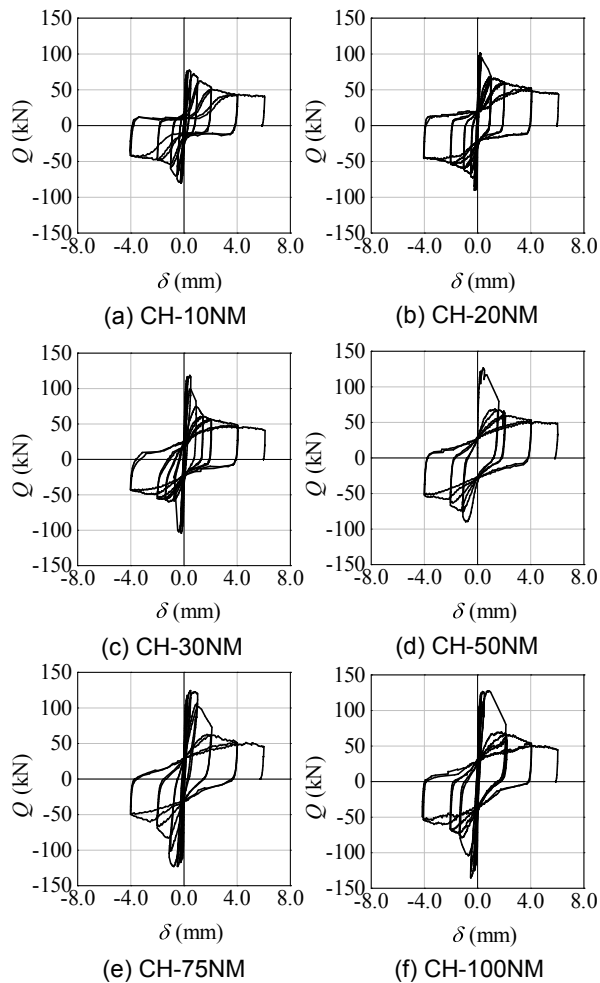


図-6 せん断力 Q -ずれ変位 δ 関係の一例

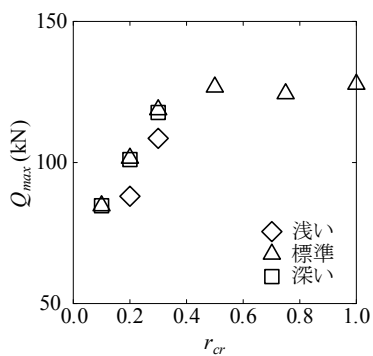


図-7 $F_c=20 \text{ N/mm}^2$ の試験体の Q_{max} - r_{cr} 関係

いはあまり見られなかった。表-3 より、全体的には、各試験体の最大荷重およびその際のずれ変位について、大きな差異は認められない。

図-8 に $c\sigma_B$ に着目して Q_{max} を整理した Q_{max} - $c\sigma_B$ 関係を示す。同図に示すように、どの r_{cr} でも $c\sigma_B$ が大きくなるにつれて耐力が上昇する。

4. 目荒らし面の垂直投影面積

1章で述べたように、支圧破壊は凹凸部の垂直投影面

表-3 正側・負側の最大荷重 Q_{max} およびその際のずれ変位 δ

試験体名	正側 ずれ変位 (mm)	正側 最大荷重 Q_{max} (kN)	負側 ずれ変位 (mm)	負側 最大荷重 $-Q_{max}$ (kN)	$-Q_{max}/Q_{max}$
CH-10NL	0.51	72.3	-0.26	-71.4	0.99
CH-10NM	0.39	77.7	-0.24	-80.4	1.03
CH-10DM	0.46	84.7	-0.41	-80.9	0.95
CH-10NH	0.25	94.9	-0.21	-95.5	1.01
CH-20SM	0.20	88.0	-0.20	-88.0	1.00
CH-20NL	0.47	74.0	-0.41	-81.8	1.11
CH-20NM	0.20	101.5	-0.22	-90.0	0.89
CH-20DM	0.32	101.0	-0.21	-82.0	0.81
CH-20NH	0.21	103.5	-0.26	-93.1	0.90
CH-30SM	0.17	108.6	-0.12	-83.8	0.77
CH-30NL	0.41	101.2	-0.41	-96.3	0.95
CH-30NM	0.43	118.7	-0.20	-104.2	0.88
CH-30DM	0.47	117.7	-0.49	-116.9	0.99
CH-30NH	0.25	121.1	-0.21	-120.3	0.99
CH-50NL	0.73	99.9	-0.47	-107.6	1.08
CH-50NM	0.43	126.8	-0.48	-90.0	0.71
CH-50NH	0.24	135.8	-0.24	-121.1	0.89
CH-75NM	0.47	124.4	-1.64	-122.9	0.99
CH-100 NM	0.78	127.8	-0.51	-135.3	1.06
平均					0.92

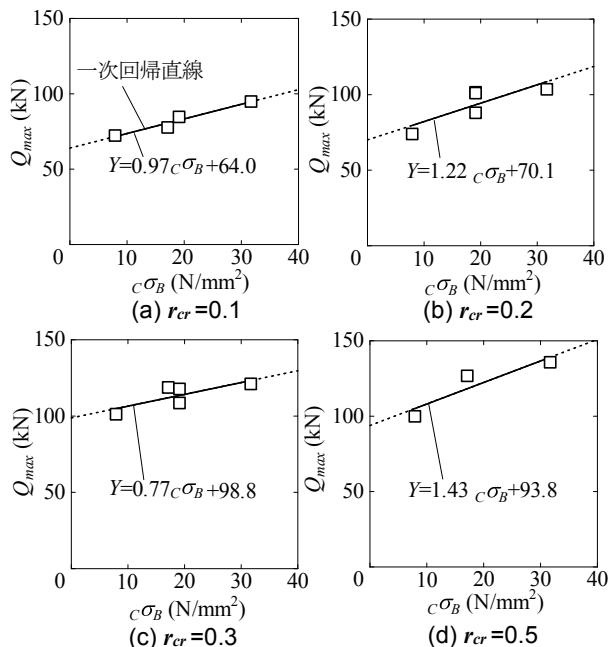


図-8 Q_{max} - $c\sigma_B$ 関係

積に影響されると考えられる。そのため、本章では目荒らし面の垂直投影面積について検証する。目荒らし面の形状測定実験の際、試験体の設置および作成精度によって、接合面が傾いた状態で計測されている可能性がある。そ

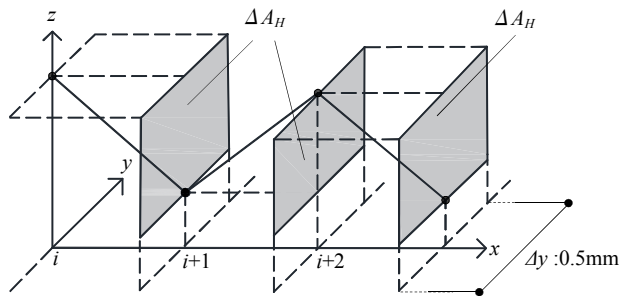


図-9 垂直投影面積の分析方法

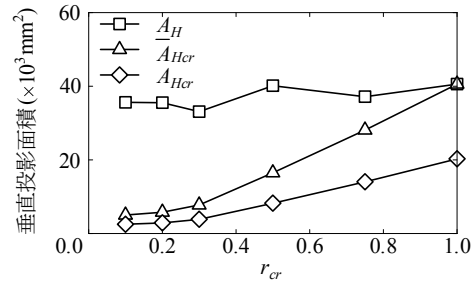


図-10 r_{cr} と垂直投影面積の関係

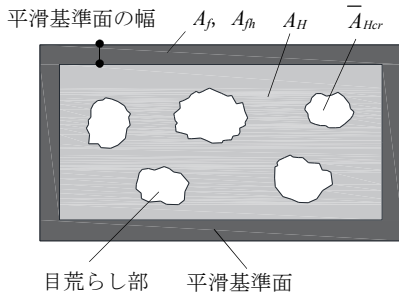


図-11 接合部のイメージと記号の定義

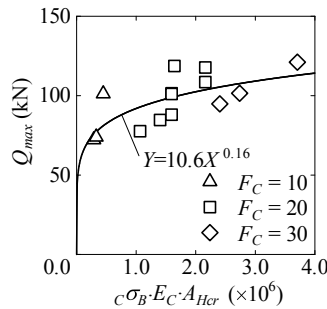


図-12 $Q_{max} - c\sigma_B \cdot E_C \cdot A_{Hcr}$ 関係

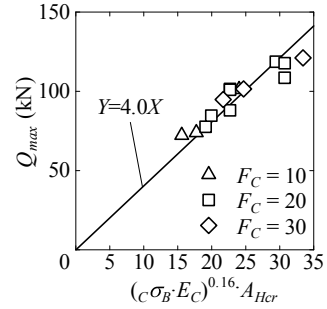


図-13 $Q_{max} - (c\sigma_B \cdot E_C)^n \cdot A_{Hcr}$ 関係

のため、初めに、取得した目荒らし面の3次元座標データを補正する。目荒らしを施していない平滑な面を対象として、最小二乗法を用い、座標基準面を算出する。その後、求めた座標基準面の傾きによって、測定した3次元データを座標変換し、垂直投影面積に関する形状分析を行う。垂直投影面積の分析方法を図-9に示す。目荒らし微小面の垂直投影面積 ΔA_H は隣接する $i+1$ の座標値を用いて次式で表す。

$$\Delta A_H = \Delta y \times |Z_i - Z_{i+1}| \quad (1)$$

ここに、測定間隔から $\Delta y = 0.5\text{mm}$ である。

図-10に r_{cr} ごとに試験体を平均した試験体全体の垂直投影面積 A_H 、目荒らし部の垂直投影面積 A_{Hcr} および実際に支圧を受けている垂直投影面積 A_{Hcr} を、図-11に接合部のイメージと記号の定義を示す。 \bar{A}_{Hcr} の算出方法としては、試験体接合面の平滑部にも微小な凹凸がある。そこで、接合面の端部を平滑基準面と定義し、 r_{cr} が0.3までは平滑基準面の幅を10mm、 r_{cr} が0.5以上の試験体では端部の幅にばらつきがあるため、試験体に合わせて平滑基準面の幅を定めた。この平滑基準面の計測データを用いて、目荒らし部のみに着目した \bar{A}_{Hcr} を算出した。接合面から目荒らしが施されてない平滑部の垂直投影面積を取り除いた、目荒らし部の垂直投影面積 \bar{A}_{Hcr} の算出方法を次式に示す。

$$\bar{A}_{Hcr} = A_H - \frac{A_j(1-r_{cr})}{A_f} \cdot A_{fh} \quad (2)$$

A_f は平滑基準面の水平投影面積、 A_{fh} は平滑基準面の垂直投影面積である。

\bar{A}_{Hcr} は目荒らし部の垂直投影面積であるが、荷重する際には正側、負側で別々の面が接触するので、耐力評価では \bar{A}_{Hcr} を1/2にした値 A_{Hcr} を用いる。また、CH-100NMは平滑基準面がないため、 A_H と \bar{A}_{Hcr} は同じ値とする。

A_{Hcr} の算出方法を次式に示す。

$$A_{Hcr} = \bar{A}_{Hcr} / 2 \quad (3)$$

5. 支圧破壊時のせん断耐力式の構築

既述したせん断荷重実験および形状測定実験で得られた Q_{max} や A_{Hcr} などの知見を踏まえ、本節では Q_{max} を推定可能なせん断耐力式を構築する。

5.1 せん断耐力式の基本形

コンクリートの支圧耐力式として、例えば、下式に示すような中野らによるプレキャストRC接合部のシヤキーの耐力式³⁾がある。

$$Q_{sky} = A_p \cdot \sigma_B \cdot (1 + \gamma) \quad (4)$$

ここに、 A_p はシヤキー支圧面積、 σ_B はコンクリート強度、 γ は実験係数である。

しかし、式(4)ではコンクリート強度の影響が大きく、図-8に示したように、本実験結果ではコンクリート強度の影響があまり大きくないため、本実験に適用するのは困難のように思われる。そこで、本論文では、耐震改修設計指針¹⁾のあと施工アンカーの支圧耐力式や、ディスク型シヤキーのせん断耐力式⁴⁾でも参考にされている、Fisher et al.のスタッドボルトのせん断耐力式⁵⁾による考えに基づいて、支圧耐力の推定を試みる。この耐力式では、 $f_c^{0.3} \cdot E_c^{0.44}$ の関数(f_c はコンクリート圧縮強度)でせん断耐力が評価され、設計式として $\sqrt{E_c \cdot \sigma_B}$ の関数が提

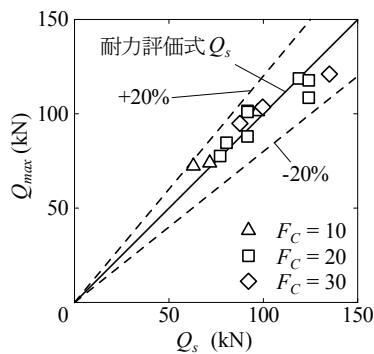


図-14 支圧破壊時の実験値と計算値の比較

表-4 シアオフ破壊時の実験値と計算値の比較

試験体名	実験値 Q_{max} (kN)	計算値 Q_s (kN)	Q_s / Q_{max}
CH-50NL	99.9	206.0	2.06
CH-50NM	126.8	252.5	1.99
CH-50NH	135.8	286.8	2.11
CH-75NM	124.4	429.8	3.45
CH-100NM	127.8	640.4	5.01

案されている。このため、 $c\sigma_B \cdot E_C$ をパラメータとし、さらに A_{Hcr} も考慮して、せん断耐力 Q_s を次式で提案する。

$$Q_s = K(c\sigma_B \cdot E_C)^n \cdot A_{Hcr} \quad (5)$$

K は実験係数、 n は指数である。

5.2 実験係数 K および n の推定

図-12 に $Q_{max} - c\sigma_B \cdot E_C \cdot A_{Hcr}$ 関係、図-13 に $Q_{max} - (c\sigma_B \cdot E_C)^n \cdot A_{Hcr}$ 関係で整理した結果を示す。なお、CH-10NH ~ CH-30NH は混合破壊であったが、支圧破壊が顕著であることから、これらの試験体も考慮する。図-12 において、最小二乗法より、原点を通る指数関数で回帰曲線を求めると $Y=10.6X^{0.16}$ が得られる。これより、 $n=0.16$ となる。次に、図-13 も同様に、原点から最小二乗法より、回帰直線を求めると $Y=4.0X$ が得られる。したがって、 $K=4.0$ になる。

5.3 せん断耐力式の実験結果への適合精度

図-12、図-13 より算出した係数より、提案耐力式は最終的に次式で表される。

$$Q_s = 4.0 \cdot (c\sigma_B \cdot E_C)^{0.16} \cdot A_{Hcr} \quad (6)$$

図-14 に支圧破壊時の実験値と計算値の比較を示す。式(6)による支圧破壊する全試験体の安全率 (Q_{max}/Q_s) の平均値を求めると 1.02 となり、相関係数が 0.94 である。また、 $\pm 20\%$ の範囲ですべての試験体を評価できていることから、本提案式により、高い精度で Q_{max} を推定することが可能である。

シアオフ破壊時の実験値と計算値を比較したものを表-4 に示す。それぞれ比較していくと計算値が実験値のおよそ 2~5 倍の値となっている。この結果より、 r_{cr} が 0.5 を超える試験体では支圧破壊する耐力よりも既存躯体側コンクリートがシアオフ破壊する耐力のほうが低いと推察され、別途、検討が必要である。

6. 結論

筆者らは、既存躯体と補強部材の接合面の目荒らし面を対象とし、せん断載荷実験および形状測定・分析を行った。これらの実験結果より、支圧破壊が支配的な場合のせん断耐力式を提案し、実験値との適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) $F_c=30\text{N/mm}^2$ の試験体では混合破壊、他の $r_{cr}=0.1\sim 0.3$ の試験体では支圧破壊、 $r_{cr}=0.5\sim 1.0$ の試験体ではシアオフ破壊が顕著に見られた。
- 2) 目荒らし部の垂直投影面積は r_{cr} が大きくなるにつれて増加した。
- 3) せん断載荷実験より、実験値と提案したせん断耐力式を比較した結果、良好に再現できた。
- 4) 提案したせん断耐力式は、支圧破壊を対象としているため、 $r_{cr}=0.5\sim 1.0$ の試験体で、シアオフ破壊するケースについては適用できなかった。

今後、軸力の影響や、現場管理で簡便化するために 3D スキャナ等を用いた A_{Hcr} の計測手法についても検証する予定である。

謝辞

本研究は、飛島建設・坂本啓太氏、東洋大学教授・香取慶一博士に、多大なるご協力をいただきました。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) 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.1, pp.919-924, 2017.7
- 3) 中野克彦,松崎育弘：プレキャスト RC 部材接合部におけるせん断抵抗要素の耐力累加方法、日本建築学会構造系論文誌, No.550, pp.151-158, 2001.12
- 4) 高瀬裕也,阿部隆英,板谷貴志,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誌, No.79, Vol.698, pp.507-515, 2014.4
- 5) Ollgaard, J.P.; Slutter, R.G. and Fisher, J.W.: Shear strength of studconnectors in lightweight and normal-weight concrete, AISC Eng. Journal, pp.55-64, 1971