

論文 等価破壊面深さをを用いた既存コンクリート目荒らし面のせん断破壊耐力の推定手法

片桐 優紀*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。昨年度、本研究で行ったせん断実験の結果、目荒らし面積比が 0.3 以下では支圧破壊が、0.5 以上ではせん断破壊で壊れることが分った。そこで、本論文ではせん断破壊時の耐力を適切に評価できる耐力式の構築を目的に追加実験を行った。さらに、深さ方向に変容する面積比に着目し、等価破壊面深さをを用いることで、コンクリートと補強部材側グラウトのせん断破壊面の水平投影面積を算出し、これにより精度良くせん断破壊時の最大荷重を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、せん断破壊、形状測定、等価破壊面深さ

1. はじめに

既存コンクリート構造物の耐震補強では、あと施工アンカーとチッピングによる目荒らし（以下本論文では、単に「目荒らし」と呼び、特記の無い限りチッピングによる目荒らしを意味する）によって、既存部材と新設部材が接合される工法が多く用いられる。

しかしながら、既報りの論文で触れているように、目荒らしに関する知見は十分ではない。昨年度、本研究において実施した実験りによれば、目荒らし面積比 r_0 （接合面面積 A_j に対する目荒らし部の水平投影面積 A_{or} の比）が 0.3 以下であれば凹凸部側面での支圧破壊が、0.5 以上では凹凸部水平面でのせん断破壊が顕著となることが分った。より効率的な接合部の設計を実施するため、あるいは合理的な目荒らし形状（深さや目荒らし面積比など）を規定するためには、破壊モードに応じて、実験結果を精度良く推定可能な耐力式を構築する必要がある。

ここで上記の通り、支圧破壊時の耐力は凹凸部の垂直投影面積に、せん断破壊時の耐力は水平投影面積に大きく依存するものと考えられる。また、せん断破壊する際には、コンクリートとグラウトの両方、もしくはどちらか一方がせん断破壊すると推察される。すなわち、せん断破壊時の耐力は、コンクリートおよびグラウトのそれぞれの破壊面の面積に依拠する。

そこで本論文では、せん断破壊する試験体を対象に追加試験体を作製し、これらの試験体のせん断載荷前と載荷後の目荒らし面の形状測定および形状分析を行い、せん断破壊耐力を推定可能な評価式の構築を試みる。

2. 本実験の概要

本論文では、昨年度りと同様に、目荒らし面の形状測

定およびせん断載荷実験を行う。以下に、詳細を述べる。

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 および表-2 に、試験体パラメータとコンクリートとグラウトの材料特性をそれぞれ示す。試験体形状は、昨年度の実験と同じ形状である。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 の直方体である。既存躯体側コンクリートの試験領域は、375mm × 200mm であり、この領域を接合面と呼ぶ。

本実験では、形状測定実験とせん断載荷実験で、同一の試験体を用いる。つまり、既存躯体側コンクリートを作製し、目荒らし施工を実施した後に形状測定を行ってから、補強部材側の部位を製作する。また、補強部材側は載荷後、容易に分離することができる。

実験パラメータは目荒らし面積比 r_0 とコンクリート強度である。想定する目荒らし面積比 r_0 は 0.5, 0.75, 1.0 の 3 段階とし、 $r_0=0.5$ の試験体で、コンクリートの目標圧縮強度 F_c を 10, 20, 30N/mm² の 3 段階に違えた

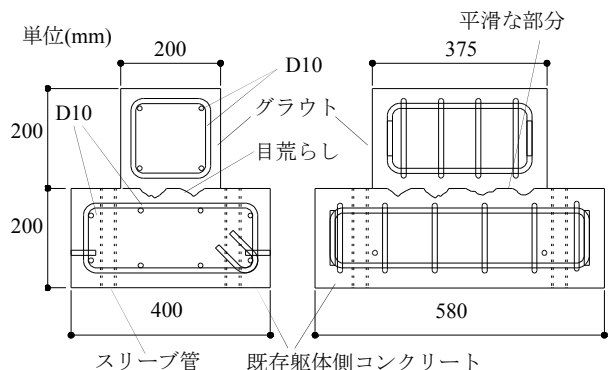


図-1 試験体の諸元寸法

*1 室蘭工業大学 工学部 建築社会基盤系学科 大学生 (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)

表-1 試験体パラメータ

試験体名	面積比の 目標値 r_0	面積比の 実測値	最大深さ z_{max} (mm)
CH-50L		0.489	18.7
CH-50M ¹⁾	0.500	0.499	18.0
CH-50H		0.503	15.5
CH-75M ¹⁾	0.750	0.777	20.2
CH-100M	1.000	—	14.9

表-2 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-50L	コンクリート	7.9	14.6	1.10
	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-50M ¹⁾	コンクリート	17.1	24.7	1.83
	グラウト	64.6	26.2	2.10
CH-75M ¹⁾	コンクリート	20.1	25.6	1.80
	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-100M	コンクリート	31.7	30.1	2.50
	グラウト	72.3	24.4	4.10

σ_B :圧縮強度 E_c :ヤング係数 σ_t :割裂強度

ものをそれぞれ用意する。試験体名は CH の後ろに、面積比を意味する数値と、コンクリート強度を表す記号 (L, M, H はそれぞれ $F_c=10, 20, 30 \text{ N/mm}^2$ を意味する。) を併記して構成される。

試験体の目荒らし面積比の管理方法として、画像解析を採用する。試験体を黒色で塗装してから、目荒らし施工を実施し、明度差を用いて r_0 を算出する。表-1 に画像解析結果による r_0 の実測値を併記しているが、概ね意図したとおりの面積比で、目荒らしを施工出来ている。

また、目荒らししない平滑な接合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を極力小さくし、まずは純粋な目荒らし面の耐力を評価できるように配慮する。

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。図-2 に示すように、高感度スポット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。試験体の周囲に、リニアガイドを取り付けた H 形鋼をボルトで固定する。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、目荒らし面の 3 次元座標データを取得する。測定間隔は x 方向(せん断方向)と y 方向で、それぞれ 0.04, 0.5mm である。

2.3 せん断载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荷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。

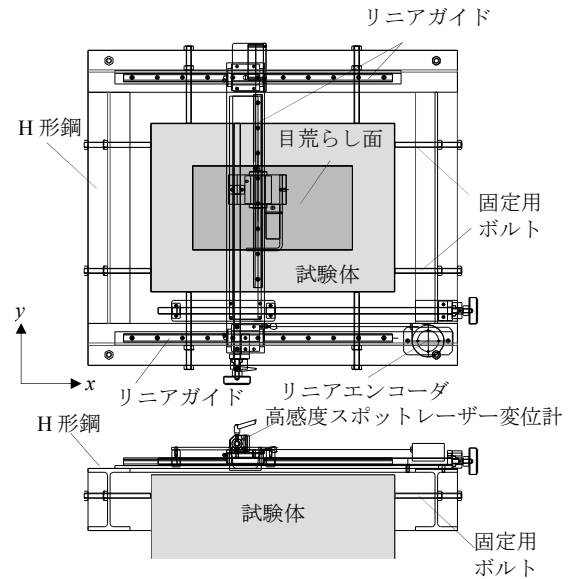


図-2 形状測定装置

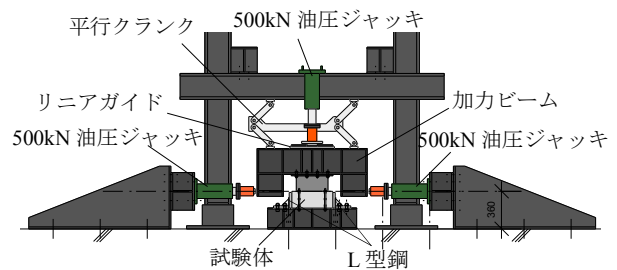


図-3 せん断载荷実験の载荷装置

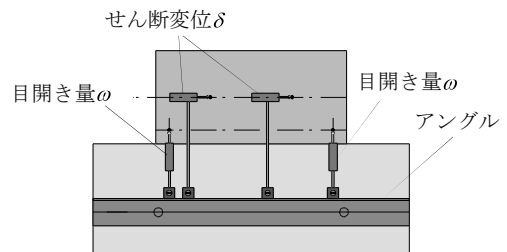


図-4 せん断载荷実験の変位計測の方法

既存躯体側のスリーブ管にボルトを通して加力フレームに緊結して曲げに抵抗し、さらに両サイドに反力用の L 形鋼を接触させ水平反力とする。軸方向は一定荷重であり、昨年度の実験と同様に $\sigma_0=0.48 \text{ N/mm}^2$ (接合面面積 $375 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ に対する応力度) になるように軸力を与えた。水平方向は、せん断変位 δ を変位制御しながら、正負交番繰り返し荷荷を行う。図-4 に変位計測の方法を示す。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、目開き量 ω とせん断変位 δ をそれぞれ計測する。

3. せん断破壊時耐力の推定手法

本論文の最大の目的は、目荒らし面におけるせん断破壊時の耐力推定手法を構築することである。特に接合面

に対する水平投影面積に着目することで、これを評価できると考えている。以下に、提案手法の詳細を記述する。

3.1 破壊モード

図-5 にコンクリート目荒らし面の破壊モードの概念図を示す。1 章でも触れたように、コンクリート目荒らし面の破壊モードは、支圧破壊とせん断破壊の 2 タイプに大別される。支圧破壊は図-5 (a)に示すように、目荒らし面の凹凸部の側面で局所的な圧縮破壊が支配的となつて、破壊が決まる。これに対しせん断破壊は、目荒らし面のある特定の深さで水平に破壊面が形成される。そのため、グラウトとコンクリートがそれぞれせん断破壊することになる。

写真-1 に全 5 体の載荷前と載荷後の既存コンクリート側の接合面の状況を示す。写真-1 から目視で破壊状況を観察すると、載荷前に比べ載荷後の方が、既存コンクリートの凹凸部が増え（黒く塗装した部分の面積が減り）、また部分的にグラウトが残存していることが分かる。つまり、図-5 (b)に描いたせん断破壊時の概念図の通りに、実際の破壊も生じたと推量される。これより、せん断破壊時の耐力 Q_s は以下の式で表される。

$$Q_s = \tau_c \cdot A_{sc} + \tau_g \cdot A_{sg} \quad (1)$$

ここに、 τ_c はコンクリートのせん断破壊強度(N/mm²)、 τ_g はグラウトのせん断破壊強度(N/mm²)、 A_{sc} はコンクリートのせん断破壊面の面積(mm²)、 A_{sg} はグラウトのせん断破壊面の面積(mm²)である。ただし、形状測定値の最大深さが載荷後の方が深い場合は、全てコンクリートがせん断破壊したものと見なす。

3.2 目荒らし面の深さの面積比

本 3.2 節では、コンクリートとグラウトのせん断破壊面の面積を算出する手法を考える。この準備段階として、図-6 に目荒らし面の深さ方向の面積比分布 $r_{cr}(z)$ の概念図を示す。

本研究では、目荒らし面積比 r_0 を用いて、目荒らし面の特徴を論じてきたが、これは接合面上における面積比である。しかしながら、目荒らしは 3 次元に広がる凹凸形状を有しており、深さに応じた面積比を定義すること

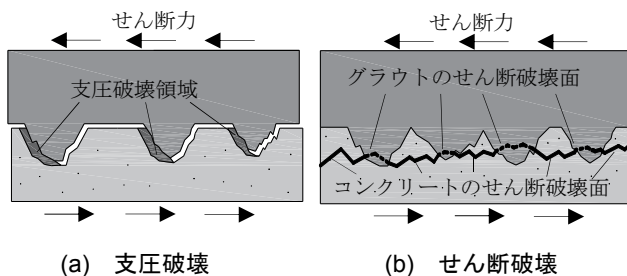


図-5 コンクリート目荒らし面の破壊モードの概念図

ができる。この面積比を、本論文では深さ方向の面積比分布 $r_{cr}(z)$ と定義する。図-6 に示しているように、接合面で深さ $z=0$ とし、下向き（コンクリート側）に正の値を取る。つまり、 r_0 は $r_{cr}(0)$ と同じである。またこの $r_{cr}(z)$ は、「接合面の面積 A_j に対する、ある深さのグラウトの面積 A_g の比 A_g/A_j 」と捉えることもできる。

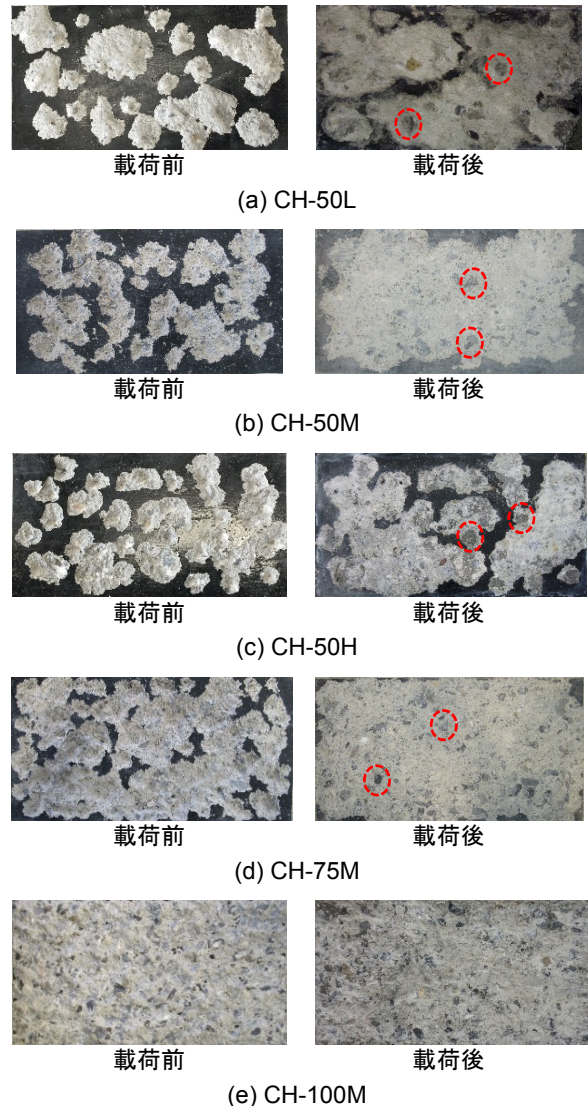


写真-1 既存コンクリート側の接合面の状況 (図中の点線内の領域は残存グラウトの例である)

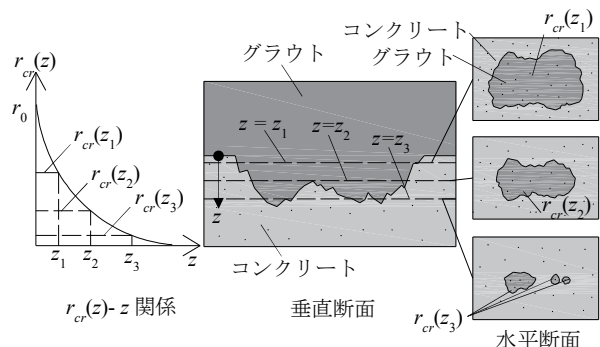


図-6 目荒らし面の深さ方向の面積比分布の概念図

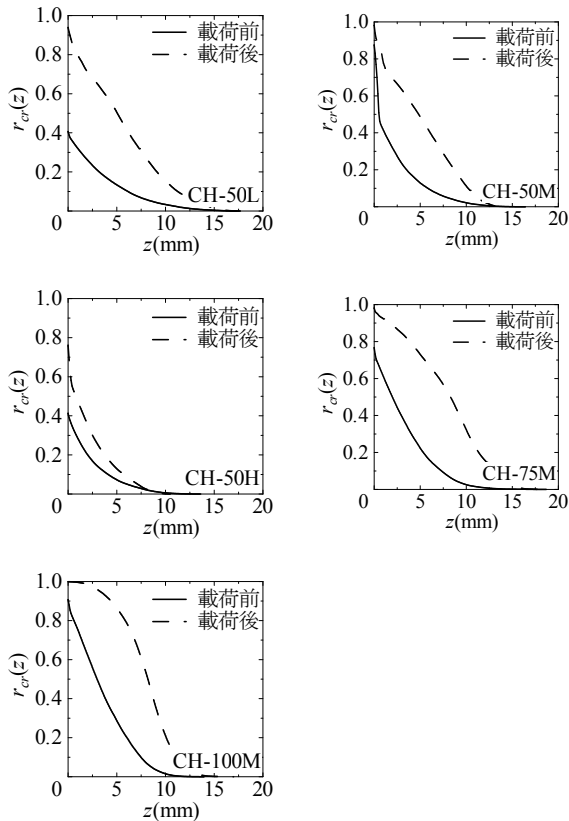


図-7 目荒らし面の深さの面積比 $r_{cr}(z)$

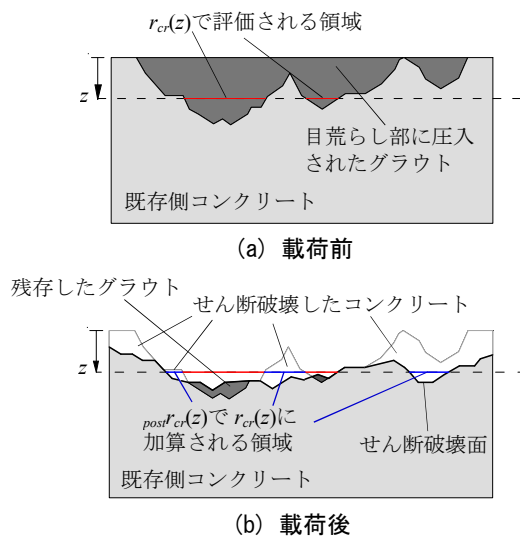


図-8 せん断破壊後の目荒らし形状の特徴

チップングによる目荒らし形状の特徴から、 $z=0$ の位置で $r_{cr}(z)$ が最も大きくなり、深くなる (z の値が大きくなる) につれ、 $r_{cr}(z)$ は小さくなっていく。さらに最大深さを超えた後は、理屈上は 0 になる。

図-7 に各試験体の、深さ方向の目荒らし面積比の分布 ($r_{cr}(z)$ - z 関係) を示す。各グラフに示している実線が荷重前の $r_{cr}(z)$ である。同図より、 $z=0$ の位置で概ね試験体パラメータとして定めた r_0 の値を示す。また全試験体において、曲線形状は下に凸形となり、深くなるにつれ、 $r_{cr}(z)$ が 0 に向かって減少していく。

3.3 コンクリートのせん断破壊面の面積

図-8 にせん断破壊後の目荒らし形状の特徴を示す。

前述したように、破壊形式がせん断破壊モードとなる場合、コンクリートとグラウトのそれぞれにせん断破壊面が生じる。ここで、先に述べた深さ方向の目荒らし面積比分布の関係を用いて、この特徴について検証する。

前掲の図-7 には、荷重後の $post\ r_{cr}(z)$ の分布も併記している。荷重前と荷重後で比較すると、荷重後の方が同じ深さの $r_{cr}(z)$ が大きい。これは、図-8 に示しているように、ある深さにおいて、コンクリートがせん断破壊すると、その分だけ見かけ上の面積比 (図-8 (b) の青線部分) が増えることに影響を受けるためと考えられる。つまり、荷重前の面積比 $r_{cr}(z)$ と荷重後の面積比 $post\ r_{cr}(z)$ の差分 $\Delta r_{cr}(z)$ が、深さ z におけるコンクリートのせん断破壊面の面積比となり、以下の式により z におけるコンクリートのせん断破壊面積 $A_{sc}(z)$ を算出できる。

$$A_{sc}(z) = \{post\ r_{cr}(z) - r_{cr}(z)\} \cdot A_j \quad (2)$$

なお、厳密に言えば、荷重後にグラウトが残存する部分の深さで評価する場合、逆に $post\ r_{cr}(z)$ が増える場合も想定されるが、荷重後の目荒らし面の状況から、残存するグラウトの面積はコンクリートのせん断破壊面積に比べて僅かであり、基本的にはコンクリートのせん断破壊が顕著であるため、式(2)が成立すると考えて問題は少ないと判断される。

3.4 コンクリートとグラウトのせん断強度

続いて式(1)における τ_c と τ_g について検討する。本論文では、複合材としてコンクリートまたはグラウトを扱うこととする。これらのせん断強度、あるいはシヤキーのせん断破壊強度 (凹凸のせん断破壊としては、シヤキーも同様の破壊形式と考えられる。) について、圧縮強度を用いた推定式が既往の研究で幾つか提案されている。本論文では、これらの式を適用することとする。シヤキーのせん断強度式として、阿久津²⁾らの提案式がある。

$$\tau = 0.24\sigma_B + 0.68\sigma_0 \quad (3)$$

ここに σ_B は、コンクリートおよびグラウトの圧縮強度 (N/mm^2) であり、 τ_c を求める際はコンクリートの、 τ_g を求める際はグラウトの圧縮強度をそれぞれ代入すればよく、以下、同様である。また σ_0 は軸応力度であり、前記の通り本実験では $0.48N/mm^2$ に設定している。なお、既往の実験²⁾で、接合面にグリスが塗布されたかは不明である。

また上式の他にも、小阪ら³⁾による式(4)や、大淵ら⁴⁾による式(5)などが提案されている。

$$\tau = 0.53\sigma_B^{0.82} \quad (4)$$

$$\tau = 0.21\sigma_B \quad (5)$$

3.5 せん断面の等価破壊面深さ

現実的なせん断破壊面は、荷重前の目荒らし面と同様に、ランダムな凹凸形状を呈する。ここで、簡便にコン

表-4 等価破壊面深さの検証

(a) グラウトとコンクリートのせん断強度

材料	試験体名	せん断強度(N/mm ²)		
		式(3)	式(4)	式(5)
τ_c	CH-50L	2.22	2.89	1.66
	CH-50M ¹⁾	4.43	5.44	3.59
	CH-75M ¹⁾	5.15	6.21	4.22
	CH-50H	7.93	9.02	6.66
	下記以外	17.7	17.7	15.2
τ_g	CH-50M ¹⁾	15.8	16.2	13.6
	CH-75M ¹⁾			

(b) 実験値と等しくなる等価破壊面深さ

試験体名	等価破壊面深さ(mm)		
	式(3)	式(4)	式(5)
CH-50L	8.5	8.8	7.7
CH-50M ¹⁾	8.0	8.3	7.3
CH-50H	4.9	5.0	4.5
CH-75M ¹⁾	10.1	10.6	9.6
CH-100M	8.8	9.2	8.3

(c) 等価破壊面深さにおけるせん断耐力

試験体名	$Q_{s(+)}$ (kN)	式(3) (kN)	式(4) (kN)	式(5) (kN)
CH-50L	99.9	99.4	94.4	101.4
CH-50M ¹⁾	126.8	117.6	120.5	117.6
CH-50H	135.8	156.1	145.2	158.9
CH-75M ¹⁾	124.4	115.8	118.0	118.6
CH-100M	127.8	129.3	136.0	129.0

$Q_{s(+)}$: 実験での正側の耐力

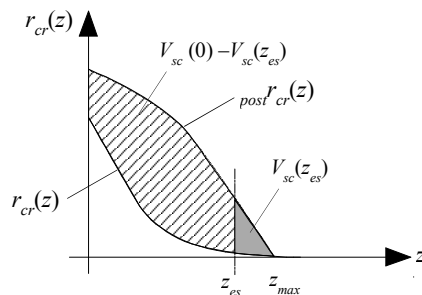


図-9 等価破壊面深さの推定手法

クリート破壊面の面積とグラウトの破壊面の面積を導くために、「せん断面の等価破壊面深さ」なる、新たな概念を導入する。つまり、実際のグラウトの破壊面の面積 A_{sg} とコンクリートの破壊面の面積 A_{sc} の比 A_{sg}/A_{sc} と、等しくなる深さが存在すると仮定し、その時の深さを等価破壊面深さ z_{es} と定義する。この等価破壊面深さを用いると、式(1)は下記のように書き直される。

$$Q_s = [\tau_c \cdot \{ \text{post } r_{cr}(z_{es}) - r_{cr}(z_{es}) \} + \tau_g \cdot r_{cr}(z_{es})] A_j \quad (6)$$

4. 提案耐力式と実験結果の比較

4.1 等価破壊面深さの同定

本節では、等価破壊面深さの同定を試みる。等価破壊

表-5 各試験体の R_{sc}

試験体名	R_{sc}		
	式(3)	式(4)	式(5)
CH-50L	0.130	0.114	0.179
CH-50M ¹⁾	0.144	0.120	0.213
CH-50H	0.100	0.093	0.131
CH-75M ¹⁾	0.144	0.111	0.185
CH-100M	0.131	0.098	0.184
平均値 \bar{R}_{sc}	0.130	0.107	0.178

表-6 耐力評価に用いた z_{es} と $r_{cr}(z_{es})$ の値

試験体名	式(3)		式(4)		式(5)	
	z_{es} (mm)	$r_{cr}(z_{es})$	z_{es} (mm)	$r_{cr}(z_{es})$	z_{es} (mm)	$r_{cr}(z_{es})$
CH-50L	8.5	0.051	9.0	0.045	7.7	0.064
CH-50M ¹⁾	8.2	0.046	8.5	0.041	7.6	0.056
CH-50H	4.5	0.087	4.8	0.078	4.0	0.104
CH-75M ¹⁾	10.3	0.022	10.7	0.018	9.7	0.031
CH-100M	8.9	0.039	9.2	0.031	8.4	0.055

面深さは、適用するせん断強度式に依存する。そこで、表-4 に、各適用式に応じた等価深さの同定結果を示す。同表からも理解できるように、本論文で提案した手法によってほぼ実験結果と等しくなる、等価破壊面深さが存在することが理解される。

4.2 耐力算定で用いる等価破壊面深さの検討

上記の通り、等価破壊面深さが存在する一方で、この値は、各試験体で異なる値を示している。特にコンクリート強度が高い CH-50H が 4.5mm~5.0mm となっており、他の 7.3mm~10.6mm と比べ、小さな値となっている。

そこで、この破壊面深さを推定する手法を検討する。図-9 に、コンクリートせん断破壊面の推定手法を示す。本手法では、式(1)による水平投影面積と、破壊面深さを用いていることから、破壊部の体積を用いて評価する。式(2)によって、ある深さの面における、コンクリートのせん断破壊面積の評価方法を提案した。この式から、ある面ではなく目荒らし全体で考えると、深さ z の位置から、破壊後の最大深さまでを積分した値が、 z より深い位置でせん断破壊するコンクリートの体積 $V_{sc}(z)$ となる。

$$V_{sc}(z) = \int_z^{z_{max}} A_{sc}(z) dz \quad (7)$$

さらに、下式による R_{sc} を定義する。

$$R_{sc} = V_{sc}(z_{es}) / \{ V_{sc}(0) - V_{sc}(z_{es}) \} \quad (8)$$

$V_{sc}(0)$ はせん断破壊した全コンクリートの体積であり、 $V_{sc}(z_{es})$ は等価破壊面より深い位置でせん断破壊したコンクリートの体積である。即ち R_{sc} は、せん断破壊した全コンクリートの体積に占める、等価破壊面以下のコンクリートの体積を意味する。

表-5 に各試験体の R_{sc} を示す。表-5 より、適用強度式毎に比較すると、やはり CH-50H のみ他よりも、やや小

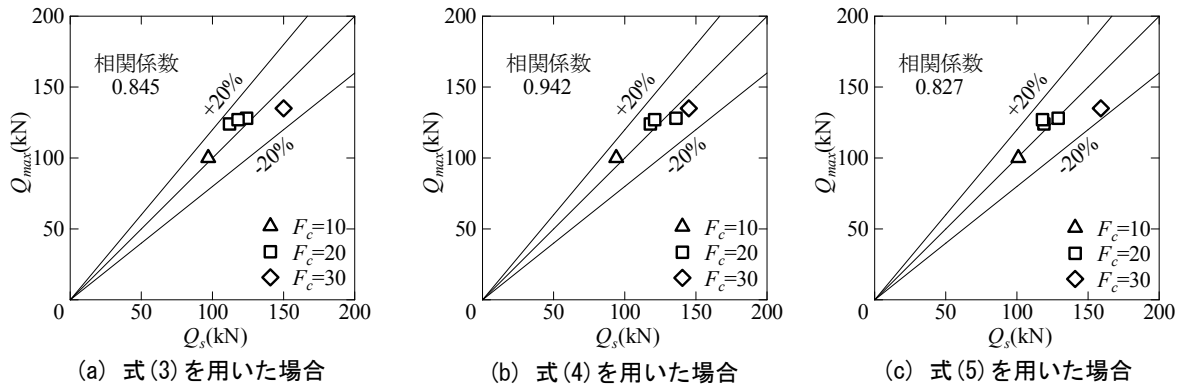


図-10 提案耐力式と実験値の比較

さな値を示すが、それでも表-4(b)で示した純粋な等価破壊面深さの値よりは、その誤差が小さくなる。そこで、等価破壊面深さを推定する方法として、 R_{sc} が表-5に示す平均値 \bar{R}_{sc} の値となる深さ z の位置を、等価破壊面深さとして用いることとする。

4.3 計算耐力と実験値の比較

表-6に耐力計算に用いた z_{es} と $r_{cr}(z_{es})$ の値を、図-10に計算耐力 Q_s と実験値(最大せん断荷重 Q_{max})の比較を示す。CH-100Mについては、3.1節の末尾で述べたように、載荷後の最大深さが載荷前よりも深かったため、コンクリートのみのせん断破壊を考慮して耐力を計算した。

図-10の(a)~(c)に、式(3)から式(5)を適用したそれぞれのケースの結果を示している。またこれらの図には、計算耐力の±20%のラインも併記した。図-10を観察すると、どのせん断強度式を適用しても、計算耐力は±20%の範囲に納まり、また相関係数も0.827~0.942となり、高い精度で実験結果を予測できる。この相関係数の観点からは、式(4)が最も適合性が高い。

本実験の範囲では、試験体数が限定的であること、さらに実際の接合部にはあと施工アンカーと併用されることから、今後も種々の検証が必要ではあるが、著者らが提案した「等価破壊面深さ」を導入することで、せん断破壊時の耐力評価に極めて有効である可能性を示すことができた。加えて、本論文では、正側のみの耐力評価を行った。負側については、正側のせん断破壊後に形成される新たな凹凸形状に基づいて破壊形式が左右されるなど、より一層、複雑なモードになると予測され、このことについては今後の研究課題としたい。

5. まとめ

著者らは、既存コンクリートのチッピングによる目荒らしの、せん断破壊時の耐力を推定するため、目荒らし深さの面積比と等価破壊面深さを導入した評価手法を提案した。以下に、本論文で得られた知見を列記する。

(1) 目荒らし面の深さ方向の面積比分布 $r_{cr}(z)$ を定義し、

本形状測定結果を用いて載荷前の $r_{cr}(z)$ を示した結果、 $z=0$ ではほぼ面積比の値になり、深くなるにつれ0に向かう傾向を捉えることができた。

(2) 載荷前と載荷後の $r_{cr}(z)$ の積分値からせん断破壊するコンクリートの体積の比を使うことで、耐力評価に適用するための等価破壊面深さを算出し、これを用いてせん断破壊面の面積比を求めることができた。

(3) 等価破壊面深さを適用して耐力式を構築し、実験結果と比較した結果、精度良く実験値を推定できた。

最後に、本提案式は載荷後の形状特性がないと、耐力を計算することができない。今後は、この破壊後の形状特性も推定できるよう、研究を進める予定である。

謝辞

本研究では、室蘭工業大学大学院生・武者右京氏、飛鳥建設・坂本啓太氏、東洋大学教授・香取慶一博士に、多大なるご協力を頂きました、ここに謝意を評します。

参考文献

- 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, Vol139, No1, pp.919-924, 2017.6
- 阿久津好太, 松崎育弘, 福山洋, 木村博, 高橋啓, 今道律子: 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート構造の鉛直接合部に関する実験研究, その4 変形を考慮したせん断伝達機構, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.565-566, 1990.10
- 小阪義夫, 谷川恭雄: コンクリートの直接せん断強度について, 日本建築学会東海支部研究報告, pp.9-12, 1969.11
- 大淵英夫, 鈴木基晴, 南尚吾, 中野克彦, 松崎育弘: りん変形を考慮したプレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.491, pp.97-104, 1997.1