

報告 既存コンクリート目荒らし面のせん断載荷実験手法と耐力性状

片桐 優紀^{*1}・窪田 凌平^{*2}・高瀬 裕也^{*3}・阿部 隆英^{*4}

要旨：既存コンクリート構造物の耐震補強では、既存躯体と新設部材の接合面にチップングによる目荒らしが施され、本研究ではこの力学特性について検討を行ってきた。本報告では、より簡便にかつ精度良くせん断載荷実験を行えるよう、自動制御を用いた加力システムを構築した。これを用いて、目荒らし面のせん断載荷実験を行った結果、多少のバラツキはあるが概ね意図通りに軸力と目開き量を制御することができた。同時に、せん断破壊型の試験体を対象に、耐力性状について検討した結果、コンクリート圧縮強度の増大に伴い、せん断耐力が上昇する傾向が確認されたが、目荒らし深さについては明白な傾向を確認できなかった。

キーワード：コンクリート目荒らし、耐震補強、せん断破壊、自動制御加力システム

1. はじめに

既存コンクリート構造物の耐震補強では、チップングによる目荒らし（以下、単に「目荒らし」と呼ぶ）を施した後、あと施工アンカーを配置することによって、既存部材と補強部材が接合される。

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ることから、著者らは目荒らし面のせん断耐力を適正に評価すべく、面積比や目荒らし深さを違えた目荒らし面の形状測定および形状分析、さらにはせん断載荷実験を行い、支圧破壊時の力学モデル²⁾やせん断耐力式³⁾、さらには等価破壊面積を用いたせん断破壊時の耐力式⁴⁾など、複数の論文にわたり報告してきた。ここで、これまでのせん断載荷実験では、軸力制御およびせん断載荷を、手動の油圧ジャッキで行ってきた。しかしながら、目荒らし面のようにランダムな凹凸を持つ粗面のせん断実験では、せん断加力に伴う凹凸面の接触に惹起され、軸力の変動も大きく、手動で制御するのは非常に困難であり、実験自体の手間（負荷）が大きかった。一方で、コンクリートひび割れ面を対象とした既往の研究において、サーボジャッキを用いてひび割れ面を自動制御することで、精度の高い実験結果が得られることが報告⁵⁾されている。しかしながら、この加力装置は、90mm×90mmの領域を対象とした試験体のためのシステムであり、耐震補強接合部の接合面を対象とした試験体に対しては、軸力の容量に限界があるように思われる。

そこで、本報告では耐震補強接合部のせん断載荷実験を容易に行うことを目的に、自動制御システムを組み込んだせん断載荷装置を開発し、この加力装置によって、良好な実験結果が得られるか検討する。本検討実験では、目荒らし面の中でも、せん断破壊する試験体を対象に追

加試験体を作製し、本加力装置の検討を行いつつ、せん断破壊時の耐力について、新たな知見を得ることを目的とする。

2. 本実験の概要

本報告では、目荒らし部のせん断耐力を評価するために、グラフィカルなプログラミング言語による自動制御プログラムを用いて制御システムを構築した。以下に、本実験の概要を記述する。

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。せん断載荷実験の試験体形状は、既存躯体側コンクリートは440mm×460mm×200mm、補強部材側グラウトは375mm×200mm×175mm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。

実験パラメータは目荒らし面積比 r_0 と目荒らし深さ、コンクリートの目標圧縮強度 F_c である。想定する目荒らし面積比 r_0 は 0.50, 0.75, 1.00 の3段階とし、 $r_0 = 0.50$, 0.75 の試験体では目荒らし深さを浅め、標準および深めとしたものをそれぞれ用意する。さらに試験体名は CH の後ろに、面積比を意味する数値と、目荒らし深さを表す記号 (S:浅い, N:標準および D:深い)、コンクリートの目標圧縮強度を示す数値を併記して構成される。また、目荒らし深さは各試験体の最大深さが浅めでは 10mm 以下、標準では 10mm~15mm、深めでは 15mm 以上になるよう、施工した。

試験体の目荒らし面積比の管理方法として、画像解析を用いる。目荒らしを施す前に、試験体の接合面を黒

*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 環境創生工学系専攻 大学院生

*3 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)

*4 飛島建設 耐震ソリューション部 耐震技術 G 主任 (正会員)

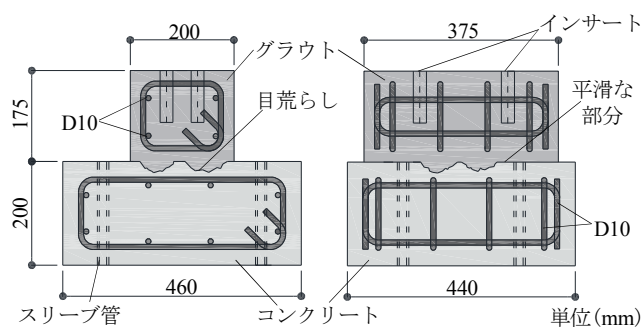


図-1 試験体の諸元寸法

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	目荒らし 深さ	軸力制御 方法
CH-50S-27	0.500	0.537	浅い	自動
CH-50N-9 ⁴⁾		0.489	標準	手動
CH-50N-18 ⁴⁾		0.499	標準	手動
CH-50N-27		0.477	標準	自動
CH-50N-30 ⁴⁾		0.503	標準	手動
CH-50D-27	0.750	0.490	深い	自動
CH-75S-27		0.753	浅い	自動
CH-75N-18 ⁴⁾		0.777	標準	手動
CH-75N-27		0.712	標準	自動
CH-75D-27		0.754	深い	自動
CH-100N-18 ⁴⁾	1.000	—	標準	手動

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-50N-9 ⁴⁾	コンクリート	7.9	14.6	1.10
	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-50N-18 ⁴⁾	コンクリート	17.1	24.7	1.83
CH-75N-18 ⁴⁾	グラウト	64.6	26.2	2.10
CH-50S,N,D-27	コンクリート	26.9	26.1	1.85
CH-75S,N,D-27	グラウト	64.3	25.5	2.29
CH-100N-18 ⁴⁾	コンクリート	20.1	25.6	1.80
	グラウト	72.3	24.4	4.10
CH-50N-30 ⁴⁾	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

色で塗装し、ハンマードリルによって目荒らしを施工した後、黒色で塗装した部分と目荒らし部の明度差を用いて r_0 を算出する。表-1 に画像解析による r_0 の実測値も併記してあるが、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ことが分かる。

また、目荒らしを施さ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が極力小さくなるように配慮している。

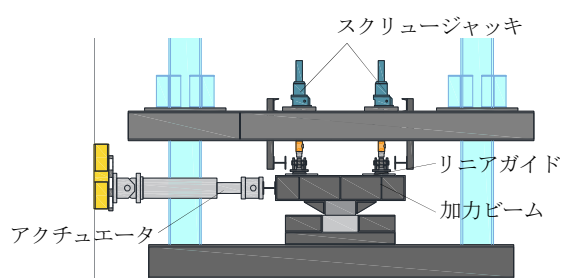


図-2 せん断載荷実験の加力装置

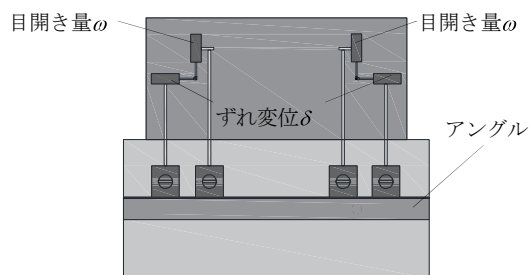


図-3 せん断載荷実験の変位計測の方法

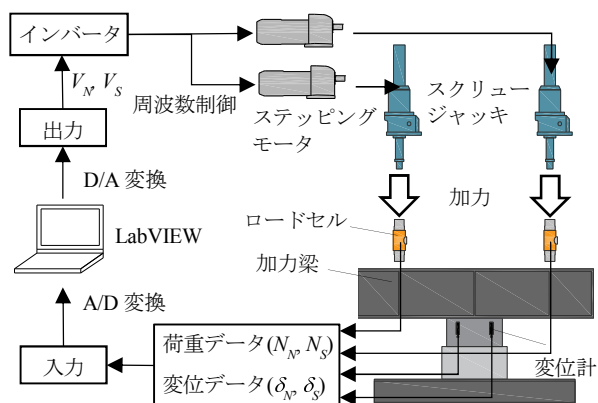


図-4 計測制御加力システム

2.2 せん断載荷実験の加力および計測

図-2 に加力装置図を示す。同図に示す加力装置では、軸力と正負交番繰り返しのせん断力の2方向の加力を制御するために、軸方向の载荷にはステッピングモータの回転動力によって駆動する150kNのスクリージャッキを2本、せん断方向の载荷には500kNの油圧アクチュエータをそれぞれ使用する。せん断方向のアクチュエータによる強制変位は、手動で制御するが、軸力については、鉛直変位を計測する2点の変位計、およびスクリージャッキの先端に取り付けた2点の荷重計の値を用いて、鉛直ジャッキを自動制御する。軸方向は一定荷重とし、既発表の実験⁴⁾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。試験体の上部に加力梁を固定し、この加力梁に計2つのジャッキとアクチュエータを取り付けて、目荒らし面をせん断載荷する。鉛直方向のジャッキの先端にはロードセル (この上下には回転球座を設置している) を固定し、リニアガイドを介してロードセルと加力梁を接

続することで、鉛直ジャッキにせん断変位が伝達しないようにしている。

せん断载荷は、相対水平変位 δ を変位制御した、正負交番の繰り返し载荷である。図-3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 と相対水平変位 δ をそれぞれ計測する。

2.3 自動制御加力システム

目荒らし面のせん断耐力を適正に評価するため、本実験では、軸力を一定に、かつ接合面を平行に維持した状態で正負交番繰り返し荷重を与える必要がある。ここでせん断荷重の増減に伴う軸力および平行度の変動を、出来得る限り、意図した通りに制御することが望まれる。そこで、既往の加力装置と同様に、グラフィカルにプログラミングが可能なシステム開発アプリケーションを用いてPID自動制御理論を導入した、新たな自動制御加力システムを構築する。図-4および図-5に、計測制御加力システムの詳細と制御アルゴリズムをそれぞれ示す。

図-4に示すように既存コンクリートとグラウトの相対鉛直変位を高感度変位計で計測し、この値をA/D変換してコンピュータで読み込んで、プログラム開発環境内でPID制御理論に基づいた演算処理により出力電圧を算出し、これをD/A変換してインバータに入力し、そこからステッピングモータを駆動することで、スクリージャッキをコントロールする。

本システムで使用するグラフィカルプログラムアプリケーションは計測・制御に特化した開発環境であるため、実験における多チャンネルのリアルタイムな計測・制御が可能である。また、フィードバック制御方式であるPID制御理論と組み合わせることで、鉛直変位と軸力の計4チャンネルを別個にデータ集録し、計測データを

フィードバックし、各チャンネルそれぞれ適切な出力値を算出するので、即応性のある制御が可能である。

この際の制御アルゴリズムを図-5に示している。同図からも理解できるように、本制御ではPID制御のうち、比例制御（P制御）を用いている。これは、既往の文献⁵⁾においても、P制御のみで十分にひび割れ面が制御できたことが報告されていることによる。また、軸力と鉛直変位の2成分を制御するため、それぞれ ${}_NK_P$ と ${}_sK_P$ の2つの比例ゲインを設定する必要がある。

3. せん断载荷実験の結果

3.1 実験精度

自動制御した軸力および鉛直方向の変位差より、制御精度を確認する。図-6に軸力-ずれ変位（ N - δ ）関係、図-7に鉛直変位差-ずれ変位（ $\Delta\omega$ - δ ）関係を示す。ここで鉛直変位差 $\Delta\omega$ は2つの鉛直変位計の差である。本実験の目標軸応力が 0.48N/mm^2 であることから、設定軸力が 36kN である。そこで本実験では、载荷中の2つの比例ゲイン ${}_sK_P$ と ${}_NK_P$ を、それぞれ3~4と0.2~0.3程度に設定して载荷を行った。

図-6より、目標軸力 36kN に対し、概ね $\pm 1\text{kN}$ の範囲で軸力が制御されている。しかし本実験はせん断破壊型の試験体を用いているため、後述するせん断力-ずれ変位

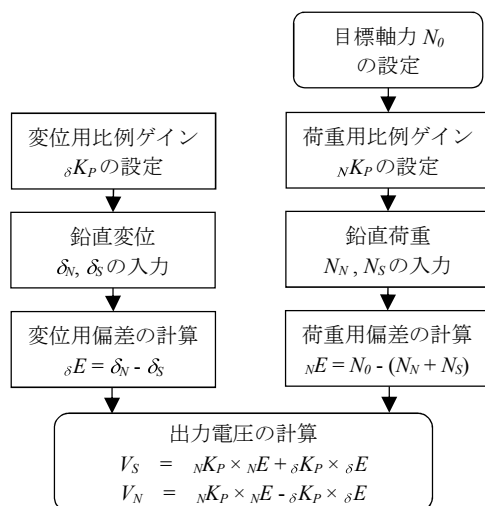


図-5 制御アルゴリズム

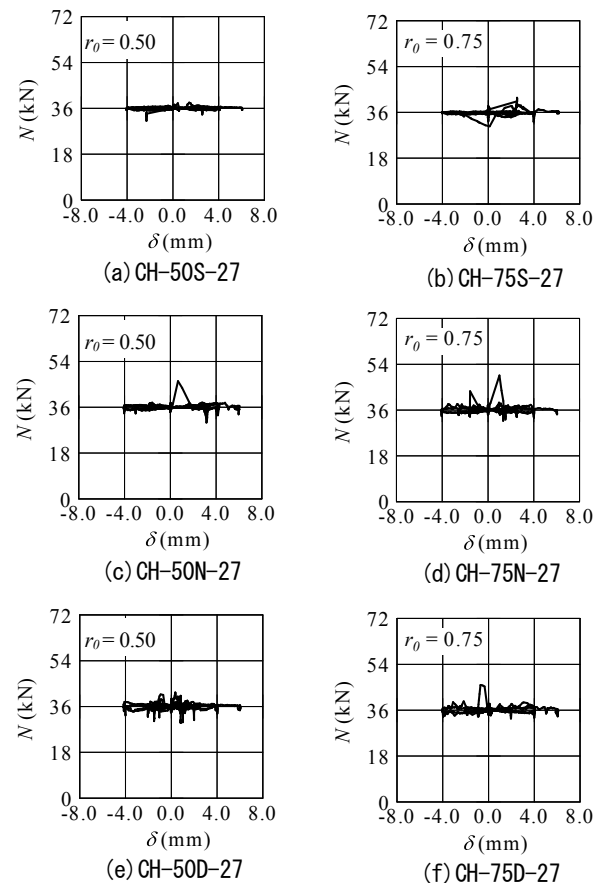


図-6 軸力 N -ずれ変位 δ 関係一例

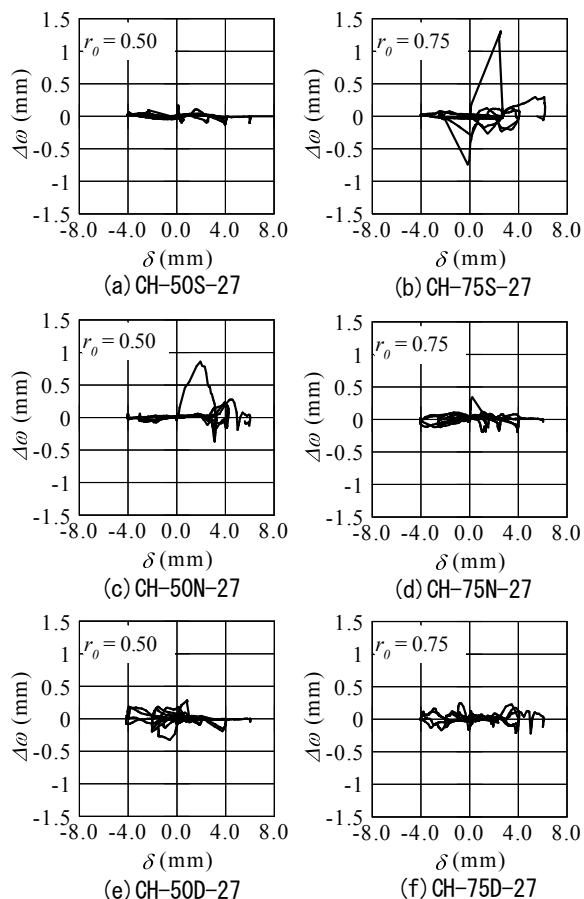


図-7 鉛直変位差 $\Delta\omega$ -ずれ変位 δ 関係一例

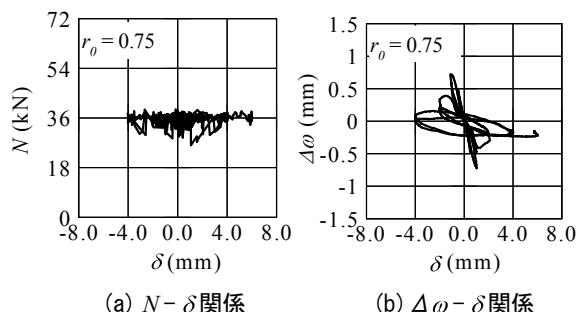


図-8 手動制御における一例 (CH-75N-18)

関係のピーク直後の荷重低下時や、各载荷サイクルの除荷時については、軸力の変動が大きくなる場合があった。

続いて図-7を観察すると、鉛直変位差、つまり接合面の平行度についても、2本のスクリージャッキ出力軸間隔 1012.5mm に対して、基本的には $\pm 0.1\text{mm}$ 程度(つまり、傾きでおおよそ 1/10000)の範囲に収まり、ほぼ純せん断に近い状況を再現できた。しかしながら、上記の軸力と同様に、最大荷重直後の急激な傾きの変化には十分に対応し切れず、最大で 1mm 位の誤差が生じる場合があった。以上から、ピーク時の急激な軸力と傾きの変化に対しては課題が残るが、概ね良好に制御できていたと判断される。

図-8 に手動制御における $N-\delta$ 関係と $\Delta\omega-\delta$ 関係の

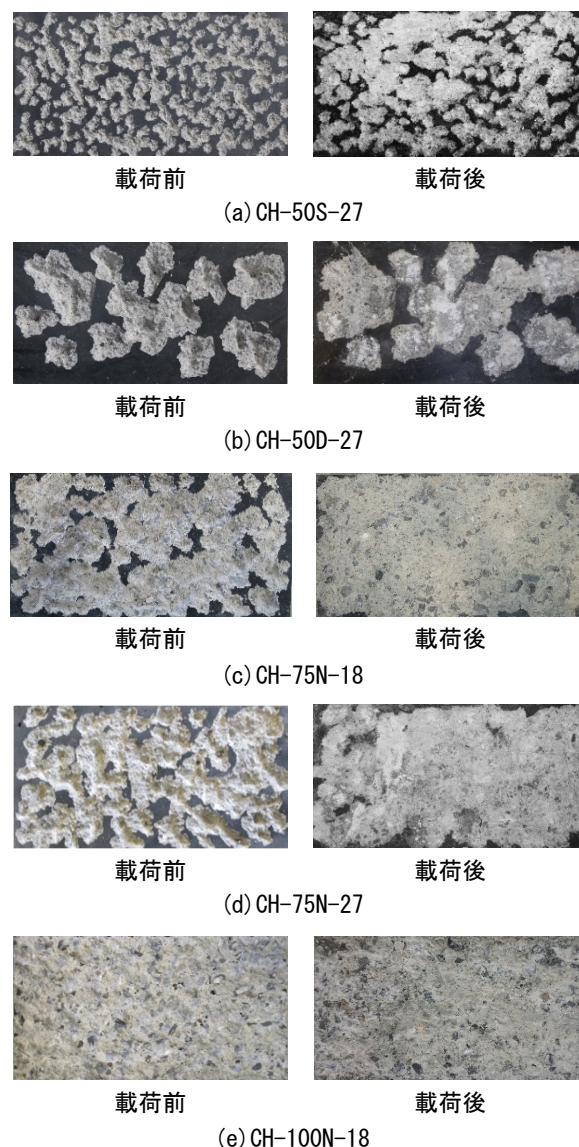


写真-1 接合面の状況 (既存コンクリート側)

一例を示す。図-8(a)を見ると、自動制御のようなピーク直後の荷重低下時や、各载荷サイクルの除荷時の軸力の変動は小さいが、全体的には自動制御よりも軸力の変動が大きい。図-8(b)より、鉛直変位差も、大きく変動しており、正確に平行が保たれていないことがわかる。これらのことから、本加力装置では手動制御よりも厳密に軸力と変位を制御できていたと判断される。

3.2 破壊モード

写真-1 に载荷前後の接合面の状況を、図-9 に破壊モードの概念図を示す。図-9 から、支圧破壊では目荒らし部の凹凸に沿って破壊し、せん断破壊時では既存躯体側コンクリートと新設部材側グラウトが一体となって壊れるため、コンクリートだけでなくグラウトも同様にせん断破壊することになる。写真-1 から目視で破壊状況を観察すると、全ての試験体において、载荷後の方が接合面の黒く塗られていない凹凸部の領域が増え、さらには

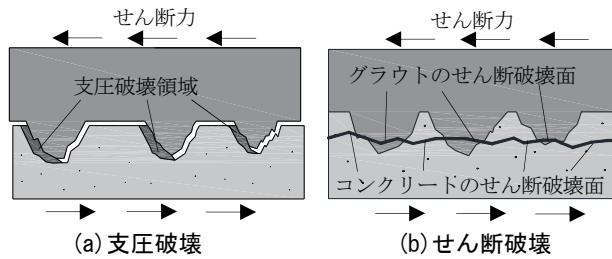


図-9 コンクリート目荒らし面の破壊モードの概念図

破断したグラウトが残っているなど、せん断破壊と判断され得る痕跡が確認された。なお、いくつかの試験体においては部分的に支圧破壊も見られたが、せん断破壊の痕跡の方が顕著であるため、本報告ではこれらの試験体も評価の対象とする。また、部分的にグラウトの残存も見られることから、図-9(b)のせん断破壊時の概念図通りに破壊したと考えられる。

3.3 せん断力-ずれ変位曲線と最大荷重

図-10 にせん断力 Q -ずれ変位 δ 曲線、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-10 には、本論文で自動制御した試験体だけでなく、既往の論文で報告している、手動制御の試験体も示している。図-10 から Q - δ 曲線を観察すると、概ね正負対称な挙動を示していることが分かる。また、自動制御と手動制御の違いによらず、 Q - δ 曲線では最大荷重までの線形挙動、ピーク後に急激に荷重が低下する脆性破壊挙動、その後荷重が一定となる荷重一定挙動の3つの領域が見られた。一方で表-3 から、既往の試験体の正側最大荷重時の変位に注目すると、文献4)において手動で制御した試験体のずれ変位が0.24~0.78mmであるのに対し、本加力装置を用いて行った試験体では0.07~0.13mmとかなり小さい変位となっている。この理由として、自動制御することで、より厳密に軸方向の荷重と変位が制御されていた可能性も考えられるが、今後更なる実験を行って、データ数を蓄積してから、改めてこの違いについて検討したい。

次に図-11 に $r_0 = 0.50, 0.75$ の試験体の $Q_{max}-\sigma_B$ 関係を示す。ここで σ_B はコンクリート強度である。図-11 にも自動制御と手動制御の2パターン試験体を併記している。自動制御した本試験体と文献4)の試験体では、 σ_B が異なるため直接比較することはできないが、図-11(a)を見ると、目荒らし深さが標準の試験体については、 σ_B が9, 18, 27 および 30N/mm² の4水準あるが、 σ_B の増大につれ、 Q_{max} も上昇する傾向が理解される。しかしながら、CH-50N-27 と CH-50N-30⁴⁾ で Q_{max} が逆転する現象が生じている。図-11(b) には、同じ目荒らし深さで比較できる試験体が2体しかないが、 $r_0 = 0.50$ と同様に、 σ_B に相関

表-3 正側・負側の最大荷重 Q_{max} およびずれ変位 δ

試験体名	正側 ずれ変位 δ (mm)	正側 最大荷重 Q_{max} (kN)	負側 ずれ変位 $-\delta$ (mm)	負側 最大荷重 $-Q_{max}$ (kN)
CH-50S-27	0.13	94.4	-0.12	-112.3
CH-50N-9 ⁴⁾	0.73	99.9	-0.47	-107.6
CH-50N-18 ⁴⁾	0.43	126.8	-0.48	-90.0
CH-50N-27	0.10	148.1	-0.03	-102.4
CH-50N-30 ⁴⁾	0.24	135.8	-0.24	-121.1
CH-50D-27	0.07	136.7	-0.04	-99.9
CH-75S-27	0.09	156.7	-0.04	-100.3
CH-75N-18 ⁴⁾	0.47	124.4	-1.64	-122.9
CH-75N-27	0.09	143.9	-0.44	-116.6
CH-75D-27	0.11	124.2	-0.02	-120.1
CH-100N-18 ⁴⁾	0.78	127.8	-0.51	-135.3

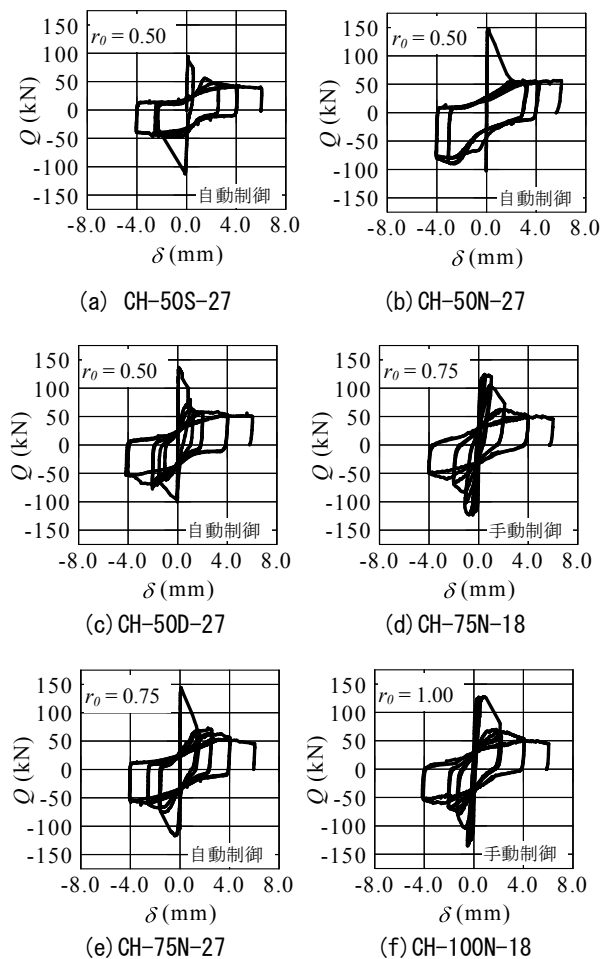


図-10 せん断力 Q -ずれ変位 δ 曲線の例

して Q_{max} が上昇する傾向が確認できる。

加えて、本論文で実施した試験体については、目荒らし深さを違えて実験しているが、このパラメータに関しては、本試験体数のみでは、定性的に評価できる傾向を把握することはできなかった。

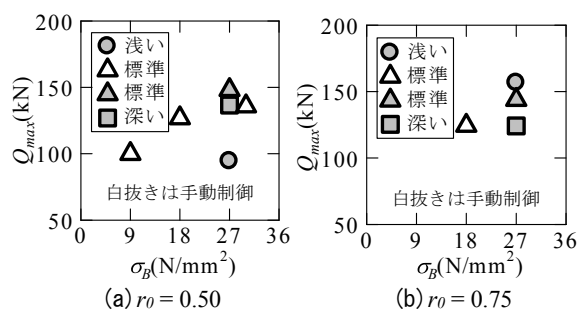


図-11 Q_{max} - σ_B 関係

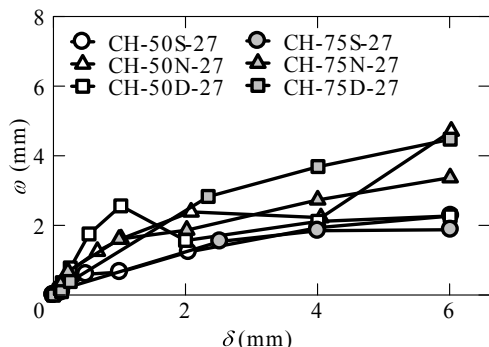


図-12 目開き ω - ずれ変位 δ 曲線

3.4 目開き - ずれ変位曲線

最後に図-12 に目開き ω - ずれ変位 δ 曲線を示す。この ω は 2 つの鉛直変位計の平均値である。図-12 より $\delta = 0.5\text{mm}$ 付近までは試験体ごとに大きな差は見られないが、 $\delta = 0.5\text{mm}$ 以降になると、目荒らし面積や目荒らし深さに依存することなく、目開きの推移に違いが生じている。

本実験では、軸力一定制御としていることから、このような現象が確認されたが、実際の耐震補強架構内の挙動を鑑みると、目荒らし面積や深さだけでなく、補強鉄骨架構から目開き量が抑制される作用が生じると推測される。本加力システムを用いることで、この目開き量も任意に制御することが可能となるため、今後は、実際の架構内の変位挙動も検討しつつ、既存コンクリート目荒らし面の力学挙動の現象説明、および設計への反映について、検討していく予定である。

4. まとめ

筆者らは、コンクリート構造物のチップングによる目荒らしの、せん断破壊する試験体を対象に、自動制御加力システムを用いてせん断載荷実験を行った。また、これらの実験結果に対して、加力システムの実験精度や最大荷重について考察した。以下に、本報告で得られた知見を列記する。

- (1) 高精度で軸力を制御するために、PID 制御などから「自動制御加力システム」の開発を行い、それらを用いることで、せん断載荷実験で軸力を自動制御することができた。
- (2) 自動制御加力システムにて自動制御を行った軸力の実験精度を、せん断力や鉛直変位差などの観点から検証した結果、比較的良好に軸力を制御できていることを確認できた。
- (3) 目荒らし面積比、既存コンクリートの圧縮強度、目荒らし深さをパラメータにせん断載荷実験を行った結果、すべての試験体でせん断破壊となった。
- (4) 目荒らし深さを違えた試験体の実験結果より、目荒らし面積によらず、最大荷重や目開きに大きな差は見られなかった。

本実験により手動と自動による軸力および目開き量の制御精度の違いを把握することができたが、これが耐力や変形性能に、及ぼす影響までは、把握できなかった。また、本加力装置により、目開き量一定や任意経路の制御も可能となるため、今後実施したいと考えている。

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，坂本啓太，樋渡健，香取慶一：既存コンクリート部材におけるコンクリート目荒らし面のせん断応力伝達と微小面の接触応力に基づく力学モデル，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 750 号，pp.1151-1159, 2018. 8
- 3) 武者右京，高瀬裕也，阿部隆英，樋渡健：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.2, pp.961-966, 2018.6
- 4) 片桐優紀，高瀬裕也，阿部隆英，樋渡健：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時耐力の推定手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.2, pp.967-972, 2018.6
- 5) 高瀬裕也，佐藤良介，和田俊良，上田正生：コンクリートせん断亀裂の発生一進展挙動追跡のための実験法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.139-144, 2005.6