

論文 コンクリートひび割れ面のせん断実験のための変位制御手法の開発

和田 俊良*1・高瀬 裕也*2

要旨：本論文では、コンクリートひび割れ面の変位と応力で記述される構成方程式から、微分形のダイラタンシー比 α とインターロック応力比 γ を定義した。次いで、この構成方程式から種々の境界条件を導出して、ダイラタンシー比 α が一定などの力学的意味を明らかにしている。これより、ひび割れ幅を3次元制御しながら α を一定とする計測・加力制御手法を開発し、 α を4段階に変えたせん断実験を実施した。実験結果より、従来の「ひび割れ面の接触論」では説明し難い「戻り変位経路における垂直応力の増大」が計測され、本手法の有用性が示されている。

キーワード：コンクリート、ひび割れ面、ダイラタンシー比 α 、インターロック応力比 γ 、変位制御

1. はじめに

著者らは、コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構を解明するために、これまでに正負交番せん断1軸と垂直4軸の計測・加力機器を組立て、LabVIEWによって自動制御するシステム¹⁾を構築した。そして、このシステムを用いて「ひび割れ幅と接触率を一定とする実験」を実施し、計測された実験資料より、ひび割れ面の応力伝達機構を記述する構成則モデルを開発してきている。

地震時では、鉄筋コンクリート（以下、RCと略記す）部材内のひび割れ面は、せん断変位の増減下で、ひび割れ幅が保持されることなく開閉する。従って、これまで以上に有用で汎用に富む未知の資料を得るには、図-1のせん断変位とひび割れ幅（以下、これらの二者をひび割れ変位と総称する）の経路を多様に定めたせん断実験の結果が必要となるのは、必至のことと思われる。しかし、実際に何の手掛かりを持たないひび割れ変位の経路設定は難しいが、ひび割れ面の変位-応力の構成方程式を一つの理論背景とすることは可能と思われる。

本研究では、新たに、ひび割れ面のせん断接触膨張現象を表示する「ダイラタンシー比 α 」をひび割れ幅 ω のせん断変位 δ による微分で定義し、ひび割れ面の噛合効果を表示する「インターロック応力比 γ 」も垂直応力 σ をせん断応力 τ で微分して定義することにする。

本論文では、上記の2つのパラメータの導出過程を解説し、研究の緒としてダイラタンシー比 α に沿った変位経路を定める。そして、この変位経路を実現する新しい制御加力システムを構築し、ダイラタンシー比 α 一定の実験を実施して、実験結果よりその力学特性と本手法の有用性について検討を加えることを目的とする。

2. せん断応力伝達機構の基本4量と実験的定義

コンクリートひび割れ面の力学挙動は、前掲の図-1のようにせん断変位 δ 、ひび割れ幅 ω とせん断応力 τ 、垂

直応力 σ で記述され、これの適用理論として「ひび割れ微小面の摩擦を無視した接触論¹⁾²⁾」が広く認められてきた。しかし実際に、この接触論に依拠して、各微小面の傾き θ から算定されるせん断変位 δ_0 とひび割れ幅 ω_0 より垂直応力 σ_0 を求め、その積分を取ってひび割れ面全体に惹起されるせん断応力 τ と垂直応力 σ を実験値に適合させることは簡単なことではない。

しかも参照されてきた実験の設定条件は単純化されたものばかりで、どれだけその実相を反映しているのか疑問が残る。これは変位-応力経路の設定理由が明示され難く、相応の高精度の実験手法が未開発だからである。

勿論、ひび割れ面の挙動は実験事実から説明されるが、一方で変位と応力で構成される物理理論（以下、せん断伝達則と呼ぶ）からのアプローチもある。既往の研究例を見ると、このせん断伝達則から導出される境界条件に従った実験例はこれまで殆どなく、僅かに吉川³⁾が包絡曲面を同定しているが、除荷挙動には触れておらず、その実験手法と精度は明示されていないようである。

本研究では、前述のとおり、せん断応力伝達則から記述される変位経路と応力経路より、ひび割れ面のダイラタンシー比 α とインターロック応力比 γ の比を新たに定義し、いくつかの境界条件を導出する。なお、本論文ではダイラタンシー比 α に関わる変位経路のみを設定可能とする手法を開発するに留め、紙幅の制約から、この他の手法については稿を改めて報告する。

2.1 せん断伝達則から定まる変位と応力の関係

前出の図-1のとおり、コンクリートひび割れ面は、2

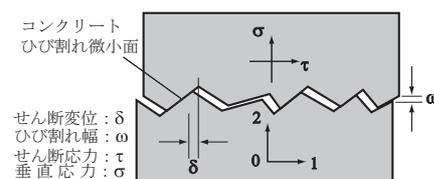


図-1 ひび割れ面のせん断応力伝達機構の基本4量

*1 北海道職業能力開発大学校 建築科能開教授 工博（正会員）

*2 飛鳥建設 技術研究所 工博（正会員）

つの変位と2つの応力で表示され、著者らはこれらを「ひび割れ面のせん断伝達機構の基本4量」と呼んでいる。

先の吉川は摩擦論³⁾に依拠し、出発点の構成方程式を $\delta = \delta(\tau, \omega)$ と $\sigma = \sigma(\omega, \tau)$ を定め、せん断変位 δ はせん断応力 τ とひび割れ幅 ω によって、垂直応力 σ はひび割れ幅 ω とせん断応力 τ で記述されるとした。

著者ら自身の実験では、せん断応力 τ と垂直応力 σ がせん断変位 δ とひび割れ幅 ω で表示されており、本研究ではこの実験事実⁴⁾に依拠し、ひび割れ面の構成方程式として式(1)と式(2)を採用することとする。なお、これらの式は Bazant⁴⁾と同形であり、その増分形は式(3)と式(4)である。

$$\tau = \tau(\delta, \omega) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma(\delta, \omega) \quad (2)$$

$$d\tau = \frac{\partial \tau}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial \tau}{\partial \omega} d\omega \quad (3)$$

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial \sigma}{\partial \omega} d\omega \quad (4)$$

上2式をマトリックス表示すると下式(5)となり、応力と変位は剛性マトリックスによって結び付けられる。

$$\begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\delta \\ d\omega \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに C_{11} は $C_{11} = \partial\tau/\partial\delta$ とするせん断剛性項、 C_{22} は $C_{22} = \partial\sigma/\partial\omega$ とする垂直剛性項である。合わせて、 C_{12} は $C_{12} = \partial\tau/\partial\omega$ とするせん断応力 τ とひび割れ幅 ω との連成項であり、 C_{21} は $C_{21} = \partial\sigma/\partial\delta$ とする垂直応力 σ とせん断変位 δ とのそれである。

一般に理解されている連続体の力学では、初期状態もしくは弾性状態で、剛性マトリックスの連成項は互いに等価の関係を満たし、対称マトリックスとなる。一方において、コンクリートのひび割れ面の構成関係では、初期の状態、即ちひび割れ面が形成されたその瞬間から $C_{12} \neq C_{21}$ であり、式(5)は非対称マトリックスとなるので、その不連続体としての非線形挙動は興味深く、力学特性は特異となる。指摘するまでもないが、破壊に起因する物体の非線形特性を理論のみを用いて記述することはできず、実験計測値による裏付けが求められる。連続体の場合は剛性マトリックスの対称性が約束されるため、その初期挙動に限っても実験値からの同定は比較的容易であると言って良い。

他方、初期状態から構成関係が非対称を示すコンクリートひび割れ面の場合では、高精度の実験法を用いて周到的な実験プログラムを設定せざるを得ず、どのような力学特性を同定しようとするのか、それによって考慮すべき要因は

多種多様に富む。このような事情から、ひび割れ面のせん断変位 δ とひび割れ幅 ω が描く変位経路の設定が、コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構の解明において重要な意味を持つことは自明である。

2.2 変位の境界条件から定める応力増分

実ひび割れ面の変位や応力の経路は多岐に互るのに、従来のひび割れ面のせん断実験¹⁾²⁾で変位経路を拘束する場合、その幅 ω を一定とすることが主流である。本研究では、ひび割れ面の変位経路を多様とするために、式(1)と式(2)から導出した境界条件を満たす実験プログラムを設定し、せん断伝達則を背景とするデータを計測することにする。

2.2.1 ダイラタンシー比 α で定まる一般経路

図-2にコンクリートひび割れ面の形成とせん断モード下におけるひび割れ面の接触状況の概要を示す。同図-2(a)のとおり、コンクリートは粗骨材、細骨材そしてモルタルをマトリックスとする不均一の複合材料である。

ひび割れ形成過程は、せん断応力による破壊として捉えられたり、主応力による引張破壊で説明されたりする。RC部材の有限要素法材料非線形解析では、その smear 型のモデル化において要素 Gauss 点のひび割れ発生を主応力で判定することが多い。主応力がコンクリートの引張強度に達すると主軸を固定し、以後の不釣合応力を初期応力法などを用いて解放してゆく。

著者らは、上記の主応力説に依拠する立場を取るものであり、図-2(b)の上下方向に引張力が作用したコンクリートを想定し、その直交方向に図-2(c)のせん断力を作用させた挙動を研究対象としている。

図-2(b)のひび割れの形成過程は、引張応力の上昇に従って骨材周囲にマイクロクラックが発生し、これらがブリッジングしてひび割れ面が生成される。ひび割れ面は粗骨材の外形に沿ったり、モルタル中に位置したりするが、モルタル強度が高い場合には粗骨材自身が破断する。

続いて図-2(c)のようにせん断力を担うと、ひび割れ面の微小面が離反したままの領域と接触する領域が生まれる。接触微小面はその圧縮応力の大きさからその周辺が圧壊し、接触面がすべりながら他方の接触面を乗越え (override) る。また同図-2(c)には、微小面の局所破壊から生成されるコンクリート残屑も描画しており、ひび割れ面の加力の繰返し回数が多いほど残屑の生成領域は広く、その量も多い。これらの現象は、加力進行時のせん断応力と垂

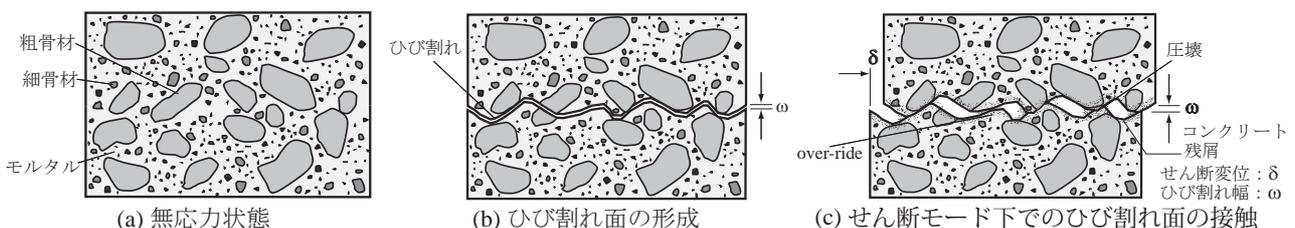


図-2 コンクリートひび割れの形成とせん断接触状況の概要

直応力の急激な変動として計測されたり、微小面の破壊音が聞こえ、実験後の肉視観察から破壊状況が識別される。

上記の微小面の接触挙動は、ひび割れ面の傾きや深さの形状特性（凹凸：asperityであり、傾斜密度分布ならびに深さ密度分布と呼んでいる）と密接に関連している。分離コンクリートは、ひび割れ形成後のせん断変形下で垂直応力を変動させながら凹凸に起因されて直交方向、即ちひび割れ面の垂直方向に互いにさらに離反しようとする。著者らは、この様相をひび割れ面のせん断膨張現象 (dilatancy) であると見定めており、ひび割れ幅 ω をせん断変位 δ で微分し、下式 (6) のダイラタンシー比 α として定義する。通常、ダイラタンシーについては正值を取ることが多いようであるが、本研究では零または負も容認し、拡張して使用する。従前の研究では、吉川のみがダイラタンシー比を導いているが、垂直応力一定下での偏微分³⁾で定義されており、著者らとは相違する。

$$\alpha = d\omega/d\delta \quad (6)$$

このダイラタンシー比 α を (5) 式に代入すると式 (7) と式 (8) を得、垂直応力 σ の変動下で、 α よって記述されるひび割れ面の増分形の構成式が導かれる。

$$d\tau = (C_{11} + \alpha \cdot C_{12}) d\delta \quad (7)$$

$$d\sigma = (C_{21} + \alpha \cdot C_{22}) d\delta \quad (8)$$

実際に、 α を一定とする場合やこれを変動させた実験を行って、その力学特性を調べることとなる。

2.2.2 ひび割れ幅 ω を一定とする経路

ひび割れ幅 ω 一定、即ち $d\omega=0$ ($\alpha=0$) であり、式 (9) と式 (10) の関係を満たす。

$$d\tau = C_{11} \cdot d\delta \quad (9)$$

$$d\sigma = C_{21} \cdot d\delta \quad (10)$$

これらの上 2 式より、ひび割れ幅 ω 一定実験からせん断変位 δ のみの変位履歴の影響をシンプルに観察でき、せん断剛性 C_{11} と連成項 C_{21} の概要を把握できる。この意味において、ひび割れ幅 ω 一定の境界条件が、ひび割れ面のせん断実験のプロトタイプに位置付けられてきた。

しかしひび割れ幅 ω 一定実験は極めて限定された状態に過ぎず、ひび割れ幅 ω の履歴の影響が反映されることはない。RC 部材のひび割れ面の開閉実験⁵⁾を見ると、ひび割れ幅の僅かな大きさの違い、特に開口したひび割れが閉合へと向かう経路では、その垂直応力が急激に減少している。このことは、まさしくせん断変位 δ とひび割れ幅 ω で表示される変位経路のバリエーションが、そのせん断応力 τ と垂直応力 σ を大きく変動させる可能性があることを示唆しているものと思われる。

著者ら以外のひび割れ面のせん断実験⁶⁾では、ひび割れ面のひび割れ幅を数か所測定し、その平均値などをもって「ひび割れ幅」と看做し、各々の偏差を示す個別の測定値を明記したものは見当たらないようである。

ひび割れ面のせん断応力伝達機構がひび割れ幅にかなり鋭敏であるとする、ダイラタンシー比 α をパラメータとするせん断実験を行い、その計測結果を比較・考察するとき、偏差が不明であるひび割れ幅の結果から、どれだけ正確にその様相を把握できるか疑問が呈される。つまりは、変位経路をダイラタンシー比 α によって種々設定した実験を実現するには、ひび割れ幅一定実験よりも遙かに、ひび割れ幅の 3 次元制御の高精度化が必須と判断される。具体的に述べれば、3ヶ所以上で測定されるひび割れ面の 3 次元位置を 3 軸以上の多軸加力によって許容誤差内の目標値に収斂させると言うことである。

2.2.3 せん断変位 δ を一定とする経路

RC 構造の「丈の高いはり」や「短柱」そして「壁」などの部材では、せん断変形を受けながらひび割れは開閉を繰返すため、ひび割れ形成後、せん断変位 δ を段階的に与えながらひび割れ幅 ω のみを増減させる実験資料は、RC 部材の非線形挙動の基本性状を知る上で重要である。

既往の実験例では、その多くが初期ひび割れ導入以後、せん断変位 δ を与えずにひび割れ幅 ω を繰返し増減させて、垂直応力 σ だけの推移を調べている。これは、純曲げモード下の部材のみに適用され得るが、地震時などのせん断モード下の部材には適合しない。現状では、せん断変位 δ 一定、即ち、 $d\delta=0$ を保持しながら、ひび割れ幅 ω を増減させた実験例を著者らは一例³⁾しか知らない。

前掲の式 (5) より、せん断変位 δ 一定下でひび割れ幅 ω を増減させた場合のせん断応力 τ と垂直応力 σ の増分は式 (11) と式 (12) のようになる。

$$d\tau = C_{12} \cdot d\omega \quad (11)$$

$$d\sigma = C_{22} \cdot d\omega \quad (12)$$

結果として、前掲式 (5) の剛性マトリックスのせん断応力 τ とひび割れ幅 ω との連成項 C_{12} と垂直応力 σ とひび割れ幅 ω との垂直剛性 C_{22} が計測される。

2.3 応力の境界条件から定める変位増分

ここまで、ひび割れ面の変位経路を定めるために式 (1) ~ 式 (12) を誘導した。これは実験条件の設定を容易にし、ひび割れ面の変位-応力挙動の検証を明解にする。

しかしコンクリートの破壊は、すべて応力によって惹起されるため、応力経路の設定が異なる物理的意味を持つのは明らかである。既往の実験を概観すると、ひび割れ面のせん断応力伝達機構を応力制御した例は少なく、吉川が垂直応力を一定とした実験の 1 例³⁾を報告している。

なお、応力制御に関しては紙幅の都合から簡潔に誘導式を記すに留め、その実験手法等については後続論文に譲る。

増分応力に応答する増分変位は、式 (5) の逆行列を取って式 (13) として求められる。

$$\begin{Bmatrix} d\delta \\ d\omega \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} C_{22} & -C_{12} \\ -C_{21} & C_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{Bmatrix} \quad (13)$$

ただし、 $\Delta = C_{11} \cdot C_{22} - C_{12} \cdot C_{21}$ である。

2.3.1 インターロック応力比 γ で定まる一般経路

コンクリート微小面の噛合い (interlock) から、せん断応力 τ と垂直応力 σ が励起される。ひび割れ面のせん断実験の载荷中に、しばしば微小面の破壊音が聞こえ、実験後のひび割れ面の肉視観察によって局所破壊が容易に確認できる。この様相が、例えば Mohr-Coulomb の摩擦破壊則のように作用せん断応力 τ と垂直応力 σ の相関 (intarction) によって説明される可能性はあるし、RC 部材の力学特性を組合せ応力で表示することもごく普通である。

本研究では、せん断応力 τ と垂直応力 σ の連関を、垂直応力 σ をせん断応力 τ で微分し、インターロック応力比 γ として式(14)のように定義する。吉川もこの γ に相当する摩擦係数をひび割れ幅一定下での偏微分³⁾で定義してはいるが、当然、下式(14)と異なる物理量である。

$$\gamma = d\sigma/d\tau \quad (14)$$

ここに、ひび割れ幅 ω 変動下での式(15)と式(16)を得る。

$$d\delta = \frac{1}{\Delta} (C_{22} - \gamma \cdot C_{12}) d\tau \quad (15)$$

$$d\omega = \frac{1}{\Delta} (-C_{21} + \gamma \cdot C_{11}) d\tau \quad (16)$$

インターロック応力比 γ を変動させた実験を実施することによって、ある程度、RC 実部材でのひび割れ面の力学特性の一面を追跡することが可能と思われる。

これまで、ひび割れ面の変位経路と応力経路を定める境界条件を示してきたが、次章ではダイラタンシー比 α による変位経路実験について論述する。

3. ひび割れ面変位経路の可変動制御システムの構築

本3章では、ひび割れ変位の経路を任意に設定可能とすべく、著者らの従前の実験システムを拡張する。

3.1 加力システムの概要

本実験システムの詳細¹⁾は報告済みなので、ここではその概要のみを解説する。図-3のコンクリートせん断試験体 (ひび割れ面: 75 mm × 100 mm) に鋼製キャップを被せ、これを図-4の鋼製加力フレームに装填し、4本 (軸) のマイクロジャッキによってひび割れ幅 ω が3次元自動制御される。そして、続く図-5には、せん断試験体に加わる1軸のせん断力、4軸の垂直力の加力状況、ひび割れ隅角部での幅を測定する4本のクリップゲージ (測定箇所数4) を図示し、上述の加力機器構成に自動計測・制御機器を組込んだシステムを図-6に掲げた。

せん断試験体への加力手順は、最初にマイクロジャッキの単純引張加力により導入初期ひび割れ幅 ω_0 を形成させ、次いで手動オイルジャッキ (図-6) を操作してせん断力を試験体に加え、4軸のマイクロジャッキが、別個に伸縮して、ひび割れ面の4隅の幅 ω がPID自動制御のうちのP自動制御される。つまり垂直方向において、4つのひび

割れ幅の全てを設定ひび割れ幅 $\pm \Delta \omega$ ($\Delta \omega$: 許容誤差) に収束させ、結果としてひび割れ面の位置は3次元制御される。PID自動制御¹⁾は、ひび割れ幅の設定目標値と4つの個々の計測値との偏差、ならびに比例(P)、積分(I)、微分(D)の各ゲイン値から各マイクロジャッキの操作量を調整する制御法であるが、本制御がP自動制御のみで高精度制御が達成されることは既に明示済み¹⁾の事項である。

3.2 ひび割れ変位経路の可変動実験の概要

これまでの「ひび割れ幅一定実験」では、導入初期ひび割れ幅 ω_0 (以下、初期ひび割れ幅と呼ぶ) を保持してせん断変位 δ を増減させたが、本論文では、初期ひび割れ幅 ω_0 導入と同時に「せん断変位 δ に対するひび割れ幅 ω の傾き、即ちダイラタンシー比 α 」を一定とする直線変位経路のせん断実験を実施する。著者らが知る限りでは、3軸以上の多軸加力によってひび割れ幅を3次元制御し、この一定実験を行っているのは本研究のみであり、さらにひび割れ変位経路の実験例は皆無のようである。

3.2.1 ダイラタンシー比 α 一定経路実験の制御手法

先の図-6の機器システムのPC (パーソナルコンピュータ) に LabVIEW を搭載し、P制御のみの図-7の制御網を構成しこれを活用する。同図-7より、所定のひび割れ変位を先に入力しておき、試験体に与えたせん断応力より、4つの計測ひび割れ変位と入力変位から各偏差が計算される。これを LabVIEW に送り、1本のマイクロジャック

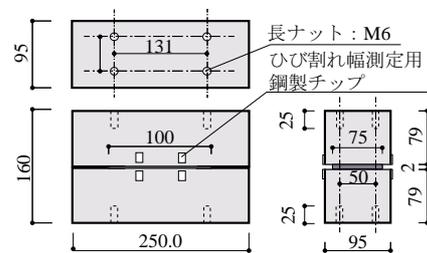


図-3 ひび割れ面のせん断加力実験の試験体詳細

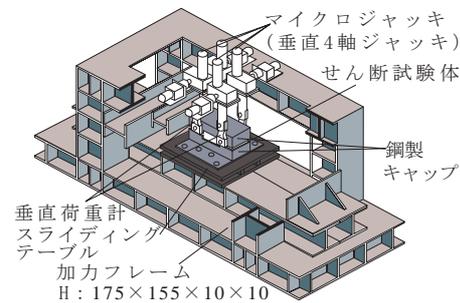


図-4 鋼製加力フレームの概要

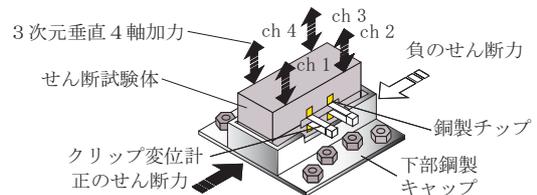


図-5 せん断試験体へのせん断1軸・垂直4軸加力

キと1つの偏差を対応させながら全偏差が収束するまでフィードバック制御させる。このとき各マイクロジャッキは独立動作しており偏差が正であればそのマイクロジャッキは載荷動作し、逆に偏差が負であれば除荷動作する。

図-8に、上記のアルゴリズムを「ダイラタンシー比 α を一定とする変位経路実験のP制御フロー」に組込んだものを示す。せん断応力 τ に励起されてせん断変位 δ と4つのひび割れ幅 ω が変化し、これに追従して垂直応力 σ が変動する。この4軸の垂直応力 σ を比例ゲイン K_p によるP制御によってマイクロジャッキを動作させて垂直応力 σ を増減させるが、ひび割れ幅の偏差の算定ために次式(17)の線形目標関数を組込んでいる。

$$\omega_T = \alpha \delta + \omega_0 \quad (17)$$

ここに、 ω_T は図-7と図-8の入力ひび割れ幅である。

4. ひび割れ面のダイラタンシー比 α 一定経路実験

表-1に、ダイラタンシー比 α を一定としたせん断試験体一覧を掲げる。本実験は、同表-1のとおり、せん断変位 δ に対するひび割れ幅 ω の傾きが一定となり、これを「直線変位経路 VR-STL シリーズ」と呼び、表-2と表

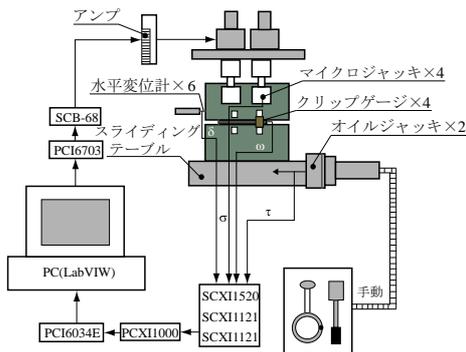
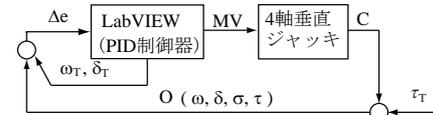


図-6 自動制御計測・せん断加力の機器システム



ω_T : 入力ひび割れ幅 δ_T : 入力せん断変位
 ω : ひび割れ幅 δ : せん断変位 τ_T : 入力せん断応力
 σ : 垂直応力 τ : せん断応力
 Δe : 偏差 O: 計測値 MV: 操作量 C: 制御量

図-7 せん断・垂直加力システムのP制御網

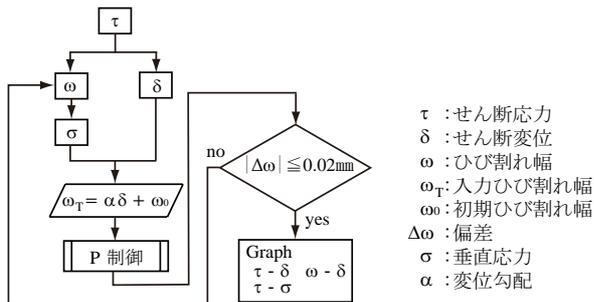


図-8 ダイラタンシー α 一定経路のP制御フロー

-3に、圧縮強度 F_c を65 MPaとするコンクリートの調合表とその材料性状を掲げている。

4.1 ダイラタンシー比 α 一定の実験結果の検証

図-9にダイラタンシー比 α を一定とする直線変位経路実験の入力経路を示す。初期ひび割れ幅 ω_0 を0.2 mmに固定し、ダイラタンシー比 α を0.250, 0.175, 0.0, -0.045と4変動させ、その4試験体の実験結果を図-10に描画する。勿論、この中で α を零とする試験体SLP000はひび割れ幅一定実験である。なお、同図-10の垂直応力 σ は正值へ変換して記載しており、以後、その絶対値の増大を「垂直応力が大きくなった」と記述する。

図-10の各ひび割れ隅角部の幅4箇所 ω - せん断変位 δ を総覧すると、試験体SLP000の完全除荷近傍で4つのひび割れ幅の一つが設定経路からやや外れているが、全般的に設定経路を概ね辿っている。

図-10(a)と(b)より、 α が正の試験体SLP250とSLP175では、その傾き α が大きいほどせん断変位 δ に対してひび割れ幅 ω は大きくなるために、その発生せん断応力 τ と垂直応力 σ は小さくなる。これらのせん断変位 δ が最大値1.1 mmに達するまでせん断応力 τ は上昇し、その後のせん断変位 δ の戻りの経路においても、ひび割れ幅一定のSLP000と同様の安定した減少過程で推移する。

しかしながら、その垂直応力 σ の挙動はかなり特徴的である。せん断応力 τ - 垂直応力 σ を見ると、せん断変位 δ の戻り経路に到っても、垂直応力 σ は増大し続け、せん断変位 δ がほぼ零に近づいて漸く応力値 σ が反転して低下し始め、その後、せん断応力 τ が零となる完全除荷時において垂直応力 σ が大きく残留することを知らる。

表-1 ダイラタンシー α 一定実験のせん断試験体一覧

シリーズ	試験体名	詳細記号	ω_0 (mm)	α	加力
VR-STL	SLP250	F65VW02 α +0250O	0.2	0.250	一方向
	SLP175	F65VW02 α +0175O		0.175	
	SLP000	F65VW02 α +0000O		0.000	
	SLM045	F65VW02 α -0045O		-0.045	

表-2 コンクリートFc65の配合表

W/C (%)	配合 (kg/m ³)				
	水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
31.5	165	524	891	780	7.86

表-3 コンクリートFc65の材料性状

最大骨材寸法 (mm)	圧縮強度 (Mpa)	割裂強度 (Mpa)
20	65.0	3.97

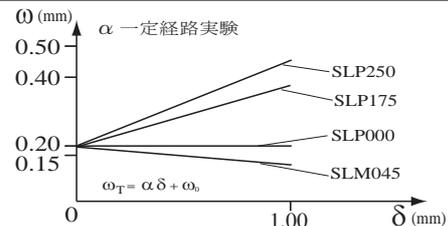


図-9 ダイラタンシー α 一定実験の入力 ω - δ 直線経路

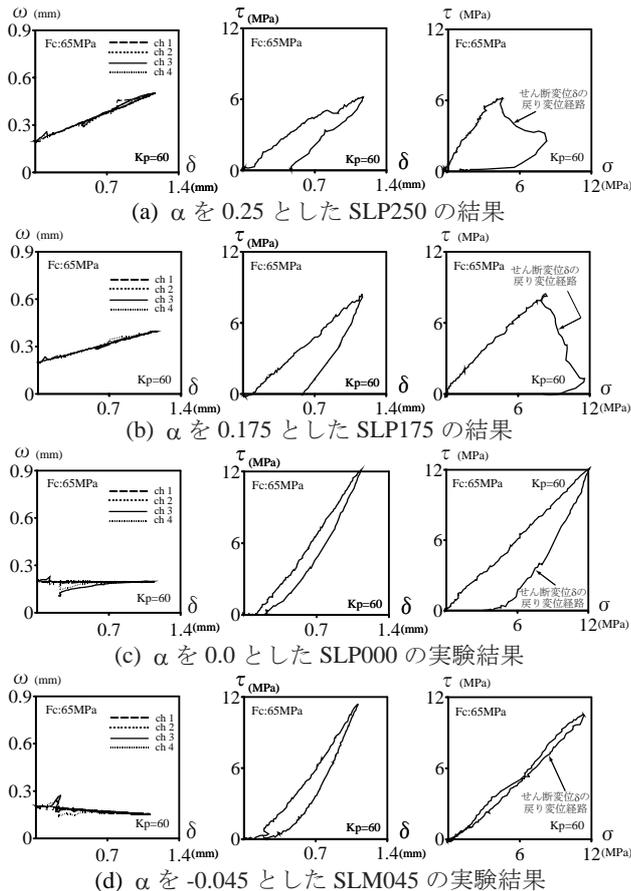


図-10 ダイラタンシー比 α 一定経路の力学性状の推移

これまで上記のせん断変位 δ の戻り経路における垂直応力 σ の増大は、ひび割れ幅一定実験の図-10(c)には観察されない。この挙動は、本実験以外で計測されておらず、前掲の図-2のひび割れ微小面のover-rideやコンクリート残差に起因されるものと著者らは推察している。

一方、図-10(d)の変位勾配 α を-0.045と負に定めた試験体SLM045は、前出の図-10(c)の α を零としたひび割れ幅一定試験体の力学性状とほぼ近い傾向を見せるものの、せん断変位 δ の戻り経路において、垂直応力 σ の値が小さく発生していることを知る。

先に触れたひび割れ面の接触論では、せん断変位 δ が戻りながらひび割れ幅 ω が閉じる場合、接触面の塑性化が原因して、同一せん断変位下における載荷経路の垂直応力の値よりも戻り経路のそれが小さくなる。本実験で計測されたダイラタンシー比 α を正とした戻り経路の垂直応力 σ の増大は、接触論の一部に矛盾があることを示唆しているようであり、今後の重要な検証事項である。

本実験結果を取りまとめると、本手法はひび割れ面の変位経路をほぼ満足される精度で収斂させており、その有用性が示されたと判断される。

5. まとめ

本論文では、コンクリートひび割れ面のせん断応力伝

達機構の伝達則から導出した境界条件を記述する実験パラメータ「ダイラタンシー比 α 」と「インターロック応力比 γ 」を実験結果に従って新たに微分を用いて定義し、いくつかの実験条件の物理的意味を明らかにした。

さらに、ひび割れ面の4隅角部のひび割れ幅を別個に4軸のマイクロジャッキで3次元制御する本制御回路網に変位経路を設定する「線形目標関数」を組み込み、計測実験ひび割れ幅 ω —せん断変位 δ を設定経路に収束させる自動P制御システムを構築した。

この新システムを用いて、導出した境界条件の中からダイラタンシー比 α のみを対象とし、 α を一定とするせん断実験を実施した。せん断変位 δ に従ってひび割れ面隅角部の4つの幅 ω は別個に増減するが、そのひび割れ幅 ω —せん断変位 δ は α による直線変位経路に概ね収斂しており、本制御手法の適用性の高さが示された。

ダイラタンシー比 α を段階的に変えたところ、 α が正の場合、載荷経路から反転し戻り経路に至る周辺で、垂直応力 σ はなおも増大し続けた。この様相は、従来のひび割れ面の接触論で説明しがたい現象と認識される。このような垂直応力 σ の挙動は計測されたことはなく、本制御手法の有用性が示されたようである。

本実験結果は限られた試験体数と実験条件によるものである。今後は、試験体数を増やして多様な経路を設定し、更なる詳細な実験・検証結果については、後続論文で報告する予定である。

参考文献

- 1) 高瀬裕也, 和田俊良, 上田正生: 摩擦を無視した接触論に基づくせん断伝達応力の検証—コンクリートひび割れ面のせん断伝達機構に関する研究 その1—, 日本建築学会構造系論文集, 第622号, pp.155-162, 2007年12月
- 2) 李宝祿, 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, Vol.26, No.1, pp.123-137, 1988年1月
- 3) 吉川弘道, 呉智深, 田辺忠顕: コンクリートのひび割れ面に関する構成方程式と基本4係数の同定, 土木学会論文集, 第408号/V-11, pp.61-70, 1989年9月
- 4) Baznt, Z.P. and Gambarova, P: Rough Cracks in Reinforced Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.106, ST4, pp.819-841, 1980.4
- 5) 松崎育弘, 福山洋, 中澤春生, 物部雅江: コ鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ発生領域の抵抗機構に関する実験研究—ひび割れの閉鎖性状—, 日本建築学会構造系論文集, 第409号, pp.35-44, 1988年6月
- 6) Millard, S.G. and Johnson, R.P: Shear Transfer across Cracks in Reinforced Concrete due to Aggregate Interlock and Dowel action, Magazine of Concrete Reserch, Vol.36, No.126, pp.9-21, 1984.3