

# 論文 コンクリートせん断亀裂の発生-進展挙動追跡のための実験法の提案

高瀬 裕也<sup>\*1</sup>・佐藤 良介<sup>\*2</sup>・和田 俊良<sup>\*3</sup>・上田 正生<sup>\*4</sup>

要旨：本論文では，コンクリートせん断亀裂の発生-進展挙動を解明するために，自動制御によって亀裂面を3次元拘束する「4軸力システム」を開発した。この自動化にはPID制御理論を採用しており，適切な制御パラメータ $K_p$ を知るために，亀裂幅一定のせん断亀裂実験を執り行っており，「亀裂面のせん断応力・垂直応力・せん断変位・垂直変位の推移」を示した。ここでは，手動実験法による結果も得ており，相互の比較から，手動実験法に精度の限界があることが示された。同時に，比例ゲイン $K_p$ を変えた亀裂実験からは， $K_p$ を40程度に設定すると，安定したデータが計測できることが明かとなった。

キーワード：コンクリートせん断亀裂，亀裂応力，亀裂変位，PID制御，LabVIEW

## 1. はじめに

コンクリートせん断亀裂の応力伝達が，鉄筋コンクリート（以下，RCと略記する）部材の変形性状を解析する際の重要な機構であることは，周知のとおりである。この複雑な応力機構を対象とした実験法<sup>1)~6)</sup>を概覧したところ，その加力軸の自由度（数）の不足から，亀裂面の相互接触が，意図の通り3次元的に拘束しきれていない例が多いように思われる。

せん断亀裂面の高精度な拘束加力実験を行うには，一般に偶発的にそして乱れがちに形成される亀裂面を，ある程度安定した状態で形成させ，そのせん断接触を高精度に3次元拘束する必要がある。

これには，従来の実験装置の構成を格段に高精度・多機能化せざるを得ないことは明らかである。即ち，現況では「自動PID（P：Proportional，I：Integral，D：Difference）制御理論に基づく計測・多軸加力システム」を構築することが，最も实际的であるように思われる。

本論文は，「自動計測・制御4軸加力システム」を実際に設計して組立て，亀裂垂直変位を一定に保持した実験の結果を比較し，加力方法の相

違とPID制御パラメータの影響について，若干の検討を行ったものである。

## 2. コンクリート亀裂面の高精度3次元拘束を可能とする本実験システムの概要

これまでの実験では，せん断亀裂面の垂直変位 $\omega$ （以下，亀裂幅 $\omega$ と称す）を拘束するために，2軸の静的オイルジャッキや単軸アクチュエータシステムが導入されてきた。しかし，亀裂面の任意の3次元位置を確保するには，2軸以下の加力機器では困難と思われる，本システムでは，後述の機器構成を考慮して「4軸加力」を採用することにする。

また，Bujadham<sup>6)</sup>のRC部材実験の観察によると，コンクリート亀裂面のせん断変位 $\delta$ の増減範囲は $\pm 1.5\text{mm}$ 程度，亀裂幅 $\omega$ は $0.1\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ で変化すると計測されており，亀裂幅 $\omega$ の変位量は可成り小さい。従って，この小さな亀裂幅を前述の4軸加力によって人為制御することは，現時点では不可能に近く，これを自動PID制御することが，最善の方法のひとつに違いないものと判断される。

本2節では，上述の実験構想に基づいた4軸

\*1 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士課程（正会員）

\*2 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士課程 工修（正会員）

\*3 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 工博（正会員）

\*4 北海道大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 工博（正会員）

加力システムを構築するが、ここでは、本研究で使用する試験体諸元を掲げた後に、加力機器、荷重と変位の検出、自動計測・制御の順に記述して、「亀裂変位の3次元自動計測・PID制御システム」について詳説することにする。

なお周知のとおり、上記のPID制御は、比例(P)・積分(I)・微分(D)の概念による制御法であり、その本システムへの適用の詳細は次節で触れる。

## 2.1 せん断亀裂試験体の概要

本実験システムを決定する最主要パラメータは、亀裂面積の大きさであり、勿論この値によって、加力フレーム、加力機器、動力源の全ての基本要素が設計されることになる。

著者らは、最大骨材寸法 20mm 程度の粗骨材が、十分配材していると看做せる 10cm × 10cm(100cm<sup>2</sup>)を亀裂面の上限面積と定めることとし、既往の実験結果<sup>1~6)</sup>の最大応力値を参考として、せん断荷重と垂直荷重の最大値を算定しており、先述の亀裂変位の範囲を含めて、本実験システムで必要とされる性能を、表 1 に掲げる。

図 - 1 に、せん断亀裂試験体の詳細を示す。図 - 1 より、せん断亀裂試験体を 95mm × 160mm × 250mm の直方体とし、その中央位置に 100mm × 75mm(面積 75cm<sup>2</sup>)の亀裂面が形成されるよう、4 周囲に亀裂誘発切り欠きスリットを設けている。本試験体の上下部の各々には、鋼製固定治具(スチールキャップ)を 4 本の高力ボルトで取付け、試験体との間に、無収縮セメントペーストを流し込んで硬化させ、試験体とスチールキャップが一体化されたものを加力フレームへ装着し、組込む。この時、下部スチールキャップは、加力フレームへボルト締し、上部スチールキャップは、後述の垂直ロードセルに割ピンで止めている。

## 2.2 せん断加力機器と垂直加力装置の解説

続いて、図 - 2 に本実験システムの加力・計測の概要を、写真 - 1 に加力フレームの詳細を示す。図 - 2 と写真 - 1 より明かなように、加力フレームは鉄骨構造とし、その諸元寸法は、加力フレーム自体に局所的な余分な曲げモーメント

が発生しないように、フレーム全体を極力コンパクトに製作した。

本研究では、「せん断加力によって惹起されるせん断亀裂変位が、その応力伝達機構を如何ように遷移させてゆくのか」を検証するのが目的である。

従って、本システムの構築においては、せん断力の荷重は手動による静的加力で十分であるので、本実験では、垂直荷重と亀裂幅のみを自動制御することとする。

表 - 2 に加力機器の性能一覧を示す。せん断加力には、200kN 静的オイルジャッキをフレーム両

表 - 1 本実験システムの必要性能

| 項目      | 性能           |
|---------|--------------|
| 最大せん断出力 | 130 [kN]     |
| 最大せん断変位 | ±1.5 [mm]    |
| 载荷      | 正負交番繰り返し     |
| 位置制御    | 3次元制御        |
| 最大垂直出力  | 170 [kN]     |
| 亀裂幅     | 0.1~1.0 [mm] |
| 亀裂幅計測感度 | 1/1000 [mm]  |

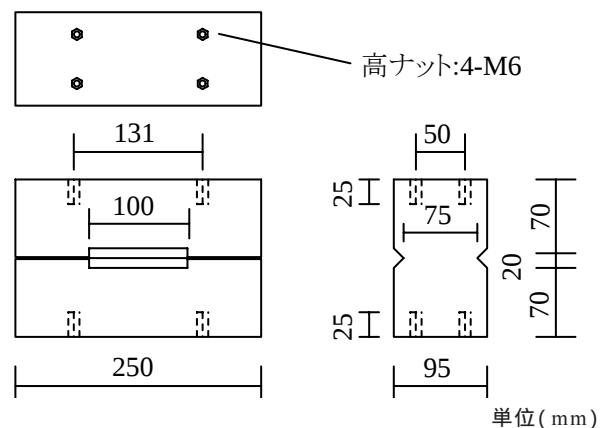


図 - 1 せん断亀裂試験体の詳細

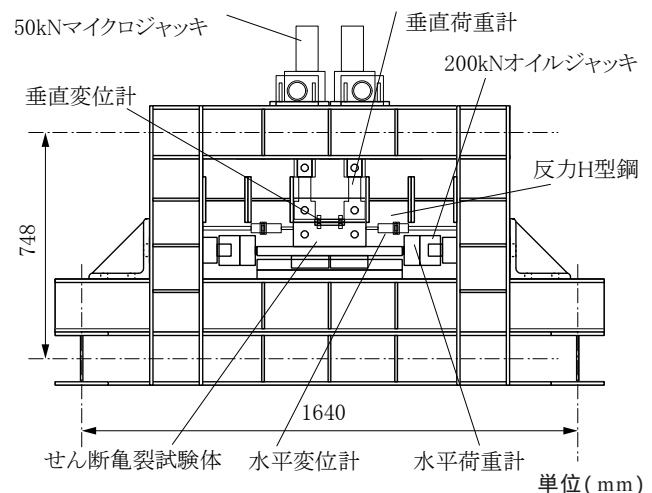


図 - 2 本実験の加力・計測システムの概要

端に1本ずつ固定し、この2本のジャッキ間の中央に、スライディングテーブルを設置し、これにスチールキャップを冠した試験体を固定して、試験体に作用する摩擦力を除去している。

亀裂幅を3次元で拘束するために、本システムでは、4本の50kN マイクロジャッキによる4軸加力制御方式を採用する。4軸加力を採用する理由は極めて単純で、試験体の形態が直方体であり、この四隅を加力することが構成上簡潔であり、しかも3軸加力よりも制御効率が格段に向上するからである。

マイクロジャッキは、減速器(減速比25:1)を介してサーボモータと連結され、このモータの回転動力によりジャッキヘッドが上下に動作する。モータは入力電圧が $\pm 10V$ 、ジャッキヘッド最高速度はおよそ0.5mm/secである。ヘッド速度は、制御出力電圧に対してほぼニアに変化し、その最高速度値は、静的実験における亀裂開閉合に即応する十分な速度を有している。

### 2.3 荷重値と変位置の検出部の解説

表-3に、計測器の性能一覧を示す。せん断変位 $\delta$ の計測は、試験体上下の中央位置の裏表に、表3の25mm変位計を各々1本装着し、得られる4つの変位置の相対差とする。またせん断応力 $\tau$ は、オイルジャッキのヘッドに装着した200kNロードセルの読値を亀裂面積で除したもので求められる。

亀裂幅 $w$ については、その亀裂幅の小ささから、より高感度のクリップ式変位計を採用し、その計測点は亀裂面隅角部の4箇所とするが、これらの取付け位置は垂直ロードセルの近傍である。また、垂直応力 $\sigma$ は、4本の垂直ロードセルによる計測値の総和を亀裂面積で除して求めることとする。

### 2.4 自動計測・制御システムの詳細

図-3に自動計測・制御のシステムの構成を、表-4に自動計測・制御機器の性能一覧を示す。

先に触れたように、本システムの計測・制御は、亀裂面へのせん断と垂直の2系統で構成し、前者のせん断系統は自動化せずに、後者の垂直系統のみを自動PID制御する。せん断荷重を試験体に

加えるには、垂直系統をモニタリングしながら手動で制御するため、本システムの全体構成において、せん断と垂直の2系統に、間接的な同期のみが取られていることになる。

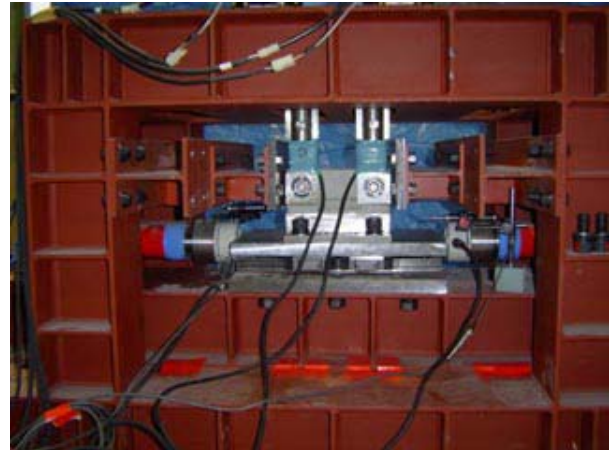


写真-1 加力フレームの詳細

表-2 加力機器の性能一覧

| サーボ装置名                     | 最高速度      | 最大出力     |
|----------------------------|-----------|----------|
| モータ<br>GRS.20AG-N000-P     | 4500r/min | 2.88N・M  |
| 減速器<br>GRS.20AG-G25        | 180r/min  | 12.75N・M |
| マイクロジャッキ<br>JA050DAL100SLT | 0.5mm/sec | 50kN     |

表-3 計測器の性能一覧

| 計測器名 | 型番  | 定格容量    | 定格出力<br>mV/V |
|------|-----|---------|--------------|
| 水平   | 変位計 | CDP-25  | 25 mm        |
|      | 荷重計 | LC-20TV | 200 kN       |
| 垂直   | 変位計 | DTC-A-2 | 2 mm         |
|      | 荷重計 | 自作      | 50 kN        |

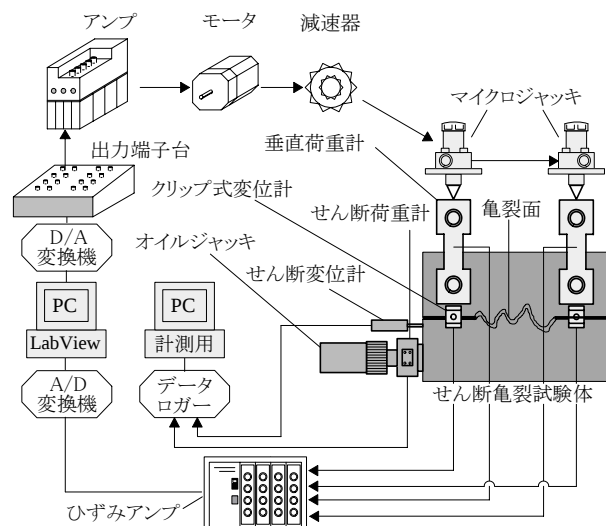


図-3 垂直系統の自動計測・制御システム構成

ここに、自動制御におけるPIDは、比例動作P、積分動作I、微分動作Dのことであり、これらの機能については次項で解説する。

垂直系統では、LabVIEWを自動計測・制御の骨格に据え、入力値としての4つの亀裂幅と4つの垂直荷重を計測し、この応答制御値を4本独立にマイクロジャッキへ電圧で出力するが、この処理系では、AD・DA変換に分解能16bitの信号処理機器と励起電圧3.3Vのひずみアンプを用いている。

本システムのサンプリング周期は80msecであり、これは信号速度10msec/チャンネルと垂直方向の変位・荷重の各々のチャンネル数が4、即ち合計チャンネル数8から設定されている。

また、せん断方向の変位・荷重の計測は、データロガーによって静的に計測する。

## 2.5 自動制御アルゴリズム

図-4に、本システムの自動制御アルゴリズムを示す。図-4から知るように、本自動制御には一般的なPID制御理論を導入しており、亀裂面の隅角点ごとの垂直荷重・亀裂幅関係において、このアルゴリズムが、他とは独立に成立していると仮定されている。即ち、4本のマイクロジャッキの動作は互いに連動しない。

PID制御では、偏差 $e(t)$ と出力値 $U(t)$ との関係に、(1)式の伝達関数が仮定される。

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t)dt + K_D \cdot \frac{d}{dt}e(t) \quad (1)$$

$K_p$ : 比例ゲイン  $K_I$ : 積分ゲイン  $K_D$ : 微分ゲイン  
上(1)式は、ラプラス変換され(2)式を得る。

$$U(s) = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right] \cdot e(s) \quad (2)$$

$T_I$ : 積分時間  $T_D$ : 微分時間

この(2)式中の $K_p$ 、 $T_I$ 、 $T_D$ の3つのパラメータを適切に調整し、対象系の最適制御が可能となる。

これらの3種のゲインの調整には、対象系の質量や剛性等からシステム特性を同定し、それらの値から適切なゲインが設定されている。しかし本システムは、その構成要素が複雑であるばかりではなく、コンクリート亀裂面の凹凸が不均一であるがため

に、システム特性を直接同定することは難しく、種々の設定条件下で実験し、最適なゲインを選定することにした。これらのパラメータ設定については、次節に記述する。

## 3. コンクリートせん断亀裂の最適制御実験手法の検討

著者らの知る限りでは、コンクリートせん断亀裂実験において、手動実験結果と自動制御実験のそれが、比較された例はないようである。手動実験では、亀裂面の位置制御を人為作業によって調整せざるを得ず、不可避のヒューマンエラーより、実験結果が少なからぬ影響を及ぼすことが考えられる。

本論文では、コンクリートせん断亀裂の試験体を作成し、実際に亀裂幅一定下での「手動実験」と「比例ゲイン $K_p$ を変えた自動制御実験」を執り行い、制御方法の相違と比例ゲイン $K_p$ が実験結果に与える影響について考察を加えることとする。

### 3.1 最適制御法確立のための実験プログラム

コンクリートせん断亀裂の応力伝達機構を解明する「最適制御実験手法」を確立するには、比

表-4 自動計測・制御機器の性能一覧

| 機器名     | 入力数<br>ch | 出力数<br>ch | 分解能                | サンプリング<br>速度<br>msec/ch |
|---------|-----------|-----------|--------------------|-------------------------|
| データロガー  | 4         | -         | $1 \times 10^{-6}$ | 80                      |
| LabView | 8         | 4         | 16 bit             | 10                      |

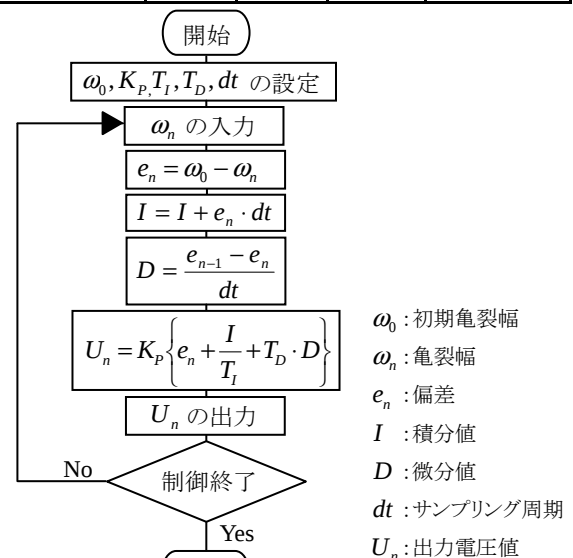


図-4 制御アルゴリズム

例ゲイン  $K_p$  , 積分時間  $T_I$  , 微分時間  $T_D$  の3種のパラメータの適切な調整が重要であることは先に述べた。これには、歴大な組み合わせが考えられるが、本論文においては、研究の緒として比例動作のみに限定し、 $K_p=10$  ,  $K_p=40$  と2段階を設け、亀裂幅  $\omega=0.5\text{mm}$  の1サイクル正負交番加力を与えることにする。

上記の本実験シリーズは表-5のようであり、そのコンクリート材料性状は表-6のとおりである。

本実験の加力手順は、まず4本のマイクロジャッキが純引張に近い状態となるように自動制御操作し、これを亀裂幅  $\omega$  が  $0.5\text{mm}$  となるまで加力し続け、その後、手動制御と自動制御とに分けて、せん断力を漸増・漸減する。

### 3.2 実験結果の比較・考察

図-5にコンクリートせん断亀裂面の亀裂幅の推移を、図-6にせん断亀裂面の応力とせん断変位の推移を示すが、両図には、参考として、早強セメントを用いて同諸元寸法で製作し、圧縮強度がほぼ同等であった、他のシリーズ試験体の亀裂幅  $\omega=0.8\text{mm}$  による手動実験結果を図(b)に併記してある。

図-5より、2つの手動制御結果においては、亀裂幅  $0.5\text{mm}$  を保持できず、载荷途中で乖離を見せ、更には自動制御下の比例ゲイン  $K_p=10$  の加力でも、亀裂幅に僅かな乱れが惹起されている。この比例ゲイン  $K_p$  を40まで増大させ、変位拘束速度を大きく取ると、亀裂幅は十分な変動範囲に収束していることが分かる。即ち、手動制御では、せん断亀裂面の亀裂幅を3次元拘束することは不可能なようである。

次に、せん断亀裂面の応力状況を図6に観察すると、「せん断応力  $\tau$  - せん断変位  $\delta$ 」および「垂直応力  $\sigma$  - せん断  $\tau$ 」の資料から、手動制御加力はもとより、 $K_p=10$  の自動制御加力でも、応力曲線が局所で振動してしまい、応力性状の定量に到らぬようである。しかし、亀裂幅が先に安定した  $K_p=40$  の比例ゲインでは、 $\tau - \delta$  関係と  $\sigma - \tau$  関係とも安定した結果が得られている。

本実験結果より、比例ゲイン  $K_p$  を40ほどに取

ると、せん断亀裂の応力伝達機構における基本4量（せん断変位  $\delta$  , 亀裂幅  $\omega$  , せん断応力  $\tau$  , 垂直応力  $\sigma$ ）が同定されるようであるが、比例ゲインをこれ以上に大きくした場合については、今後精査すべき重要な事項と考えられる。

## 4. まとめ

コンクリート亀裂面の凹凸は激しく、そのせん断亀裂接触における僅かな亀裂幅の齟齬から、伝達応力場は激変することが予想される。この複雑な

表-5 試験体と比例ゲイン  $K_p$  の設定値の一覧

| 試験体名    | 制御方法 | $K_p$ | $T_I$ | $T_D$ |
|---------|------|-------|-------|-------|
| CW05MNU | 手動   | —     | —     | —     |
| CW05P10 | 自動   | 10    | —     | —     |
| CW05P40 | 自動   | 40    | —     | —     |

表-6 コンクリートの材料性状

| 最大骨材寸法  | 圧縮強度       | 割裂強度       |
|---------|------------|------------|
| 20 [mm] | 39.2 [MPa] | 5.05 [MPa] |

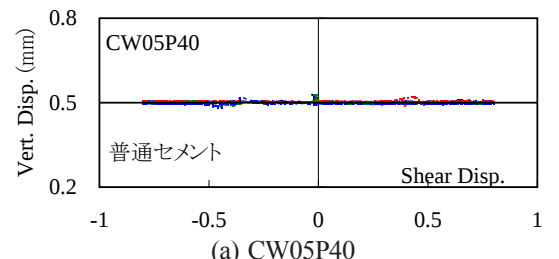
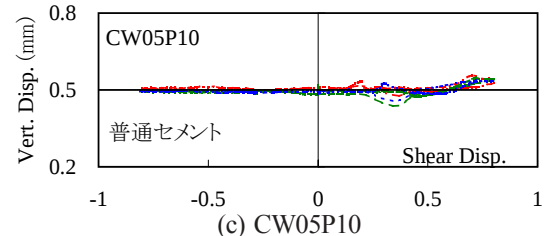
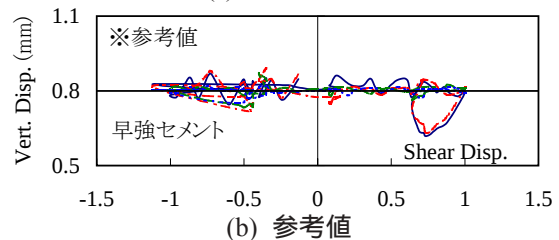
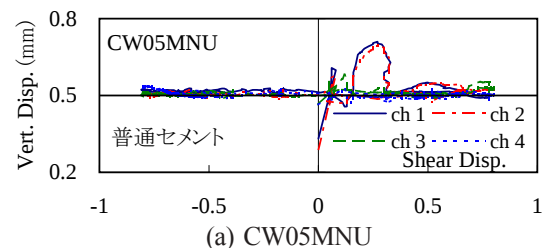


図-5 せん断亀裂面の亀裂幅の推移

応力場を、従来、単軸もしくは2軸加力によって拘束してきたが、このシステムによる本実験結果から、2軸加力では亀裂面の3次元拘束が、ほとんど不可能なことは明らかである。

本論文では、4軸加力による独自の自動制御システムを開発し、せん断応力増減下の亀裂幅の3次元拘束をはじめて実現可能なことを示した。これまで多用されてきた手動実験法と自動制御実験法を、亀裂幅一定のせん断加力に適用し、その両者の結果の比較から、制御パラメータの一つである「比例ゲイン  $K_p$ 」の影響について若干の検討を行ったが、得られた結果は以下のようである。

1) コンクリート亀裂面の3次元拘束を安定させるには、手動制御はおろか、比例ゲイン  $K_p$  が小さい自動P制御でも不可能である。

2) 所定の亀裂幅が保持されない場合には、せん断応力-せん断変位と垂直応力-せん断応力の各曲線が振動し、その定量化は望めない。

3)  $K_p$  を40まで大きくすると、亀裂幅は保持され、せん断応力-せん断変位と垂直応力-せん断応力が高精度に定量化できる。

現在、比例ゲイン  $K_p$  を大きくした場合や、積分動作I、微分動作Dをも取入れ、亀裂幅を0.1mm～1.0mmに設定した自動制御実験を遂行中であり、得られる結果の検証から、せん断亀裂の応力伝達機構を解明する「最適制御実験手法」を確立してゆきたいと考えている。

## 謝 辞

本研究において、北海道職業能力開発大学校・制御技術科・成田忠夫助教授には、貴重な助言、並びに多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Millard, S.G. and Johnson, R.P.: Shear Transfer across Cracks in Reinforced Concrete due to Aggregate Interlock and Dowel Action, M. of Concrete Research, Vol.36, No.126, pp.123~137, 1984.3
- 2) 李宝禄, 前川宏一: 接触面密度関数に基づくコンクリー

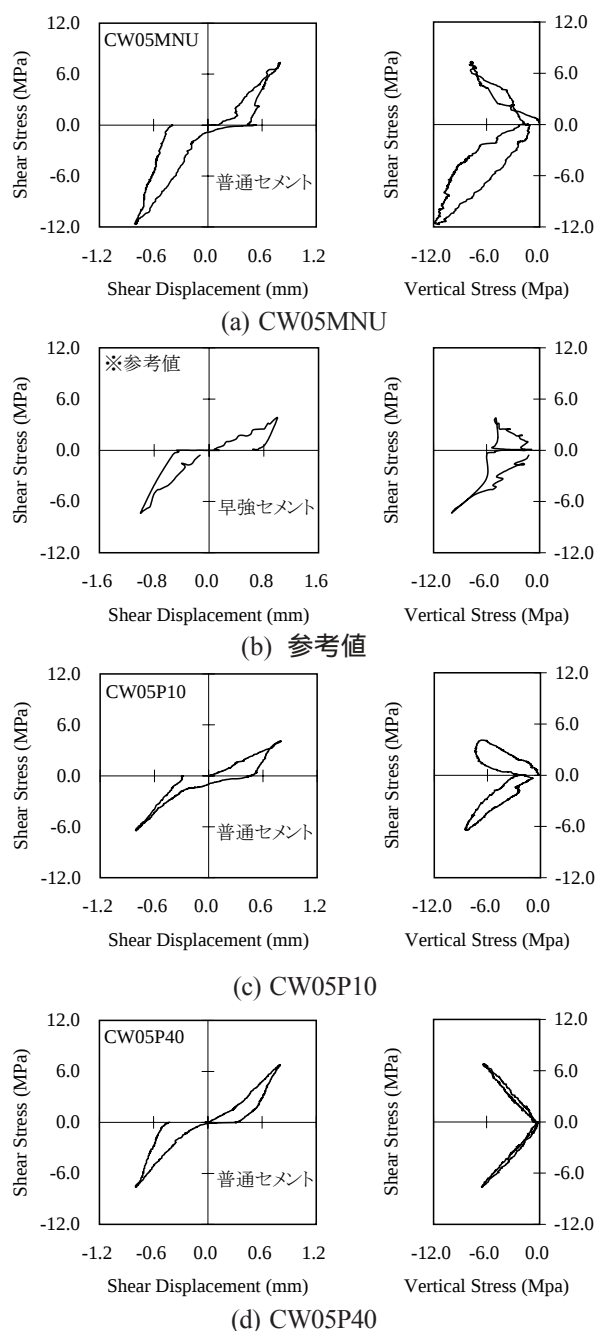


図 - 6 せん断亀裂面の応力とせん断変位の推移

トひびわ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, 1988.1

- 3) 佐々木仁, 寺岡勝: 人工軽量骨材コンクリートのひび割れ面における応力伝達構成式, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp.111~118, 2001.12
- 4) 篠原保二, 川道克祥, 石飛幸子: コンクリートのひび割れ面における変位制御繰返しせん断挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第548号, pp.101~106, 2001.10
- 5) 長谷川了一, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 100N/mm<sup>2</sup>を超える高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断挙動に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.91~96, 2004.
- 6) Bujadham Buja: The Universal Model for Transfer across Crack in oncrete, Department of Civil Engineering, The Graduate School of The University of Tokyo, March 1991.