

# 論文 垂直方向変位制御下におけるコンクリートのせん断変位と垂直荷重の関係

篠原 保二<sup>\*1</sup>・室中 英男<sup>\*2</sup>・金子 葉<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリートのひび割れ面（破壊進行領域）における多軸応力状態の力学的挙動に関する実験データが不足している。それを補うため、垂直方向と水平方向の変位および荷重をそれぞれ独立に制御できるサーボ試験装置を用いて実験を行った。引張変位制御試験により試験体に規定したひび割れ（破壊進行領域）を生成させた後、垂直方向変位（ひび割れ幅）を一定に制御し、圧縮せん断力を変位制御により載荷させた。コンクリートおよびモルタルについて実験を行い、実験結果を基に、垂直荷重、せん断変位および初期導入ひび割れ幅の3者の関係を考察した。

**キーワード:** ひび割れ幅、せん断挙動、変位制御試験、破壊進行領域

## 1. はじめに

コンクリートは複合材料で極めて非均質であるため、巨視的なクラック先端前方に損傷は受けているが応力を伝達できる、いわゆる破壊進行領域が形成される。その領域におけるマイクロクラックの発生、累積、連結、進展機構によって、コンクリートは非線形挙動を示すようになる。それらの要因に加え、作用する荷重の種類や方向などの諸条件によってコンクリートの力学的挙動は複雑に変化する。そのため、破壊進行領域の力学的特性を定量化する基礎的な研究は、コンクリート構造物の解析的研究に必要なコンクリートの力学的挙動のモデル化を行うために、さらに、非線形挙動を合理的に予測する上で重要である。

コンクリート構造物のクラックの開始と進展は、引張破壊モードIが支配的であるが、ひび割れ形成後にはせん断力の影響が重要となってくる。したがって、応力伝達可能な破壊進行領域にせん断力が作用した場合の力学的特性を明らかにする必要がある。コンクリートのひび割れ面における垂直荷重が一定であれば、ひび

割れ面のせん断すべりは一定のひび割れ開口変位の下で生じることができず、常にダイラタンシーを伴う。もしその開口変位が拘束されているならば、大きな圧縮力が発生する。鉄筋コンクリート構造物の場合、その圧縮力は鉄筋の引張力とつり合い、結果的に鉄筋の作用引張力はその分付加され危険側になるため、ひび割れ面に発生する圧縮力も重要になってくる。

前報<sup>1)</sup>では、始めに純引張下でコンクリートにひび割れ（破壊進行領域）を生成させ、その後ひび割れ面にせん断力を作用させる実験を行い、垂直力とせん断力の二軸荷重を同時に受ける場合のせん断剛性低下率とひび割れ幅の関係の実験式を提案した。それに統けて本論文は、初期ひび割れ幅を一定とする垂直変位制御せん断載荷試験において発生するひび割れ面に垂直な方向の圧縮荷重について考察し、垂直荷重、せん断変位および初期ひび割れ幅の関係を明らかにすることを目的とする。

## 2. クラック面における荷重と変位の関係

コンクリート内でクラックが発生すると、

\*1 東京工業大学助教授 建築物理研究センター 工博（正会員）

\*2 東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻

\*3 (株) 構造計画研究所 工修

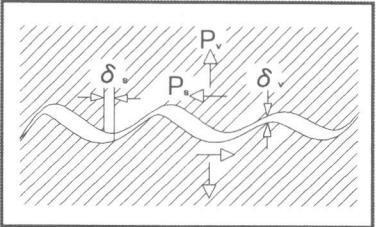


図-1 クラック面における荷重と変位の関係

クラック面にせん断変位 ( $\delta_s$ ) および垂直変位 ( $\delta_v$ ) が生じる (図-1)。その変位増分と垂直およびせん断荷重増分の関係は一般に次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_v \\ \Delta P_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_v \\ \Delta \delta_s \end{bmatrix}$$

$K_{11}$  (破壊モード I) に関しては数多くの研究がなされている<sup>2)</sup>。Bazant<sup>3)</sup>らは、実験事実に基づき、 $K_{12}$ 、 $K_{21}$  が非零であり、かつその剛性マトリクスが非対称であることを明らかにした。その非対称性のため、数値計算は複雑になる。

$K_{12}$ 、 $K_{21}$  は、ひび割れ界面の垂直荷重、せん断荷重および開口変位、すべり変位間の交差効果を表す剛性係数である。 $K_{21}$  はクラック幅の増加に伴うせん断剛性の低下に関係している。そこで、前報<sup>1)</sup>では  $K_{22}$  (破壊モード II) にクラック幅に依存するせん断剛性低下率  $\beta$  を掛けることによって  $K_{21}$  の影響を  $K_{22}$  に取り込み、 $K_{21}$  を 0 とおけることを示し、せん断剛性低下率  $\beta$  と初期ひび割れ幅  $\delta_0$  の関係について述べた。さらに、Walraven<sup>4)</sup>らは、 $\delta_s / \delta_v < 2/3$  のとき  $K_{12}$  も 0 とおけることを示したが、 $\delta_v$  が微小な値の場合その影響が無視できなくなる。本研究では、応力伝達が可能である微小な  $\delta_v$  を対象としているので、 $K_{12}$  の影響について考察する。

### 3. 実験方法

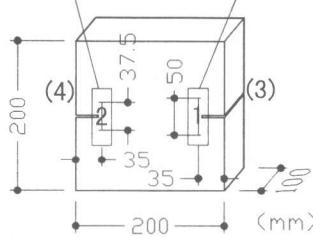
破壊進行領域におけるコンクリートのせん断挙動を調べるために、初期ひび割れ幅 ( $\delta_0=0 \sim 0.8\text{mm}$ ) をパラメータとして、垂直方向変位一定制御下 ( $\delta_v=\delta_0$ ) でせん断力を作用さ

表-1 実験条件

		初期ひび割れ幅 $\delta_0$ (mm)						
		0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
コンクリート	変位制御 ( $\delta_v=\delta_0$ )	(3)	(2)	(1)	(3)	(3)	(1)	(2)
モルタル	変位制御 ( $\delta_v=\delta_0$ )	(2)	-	(1)	(3)	(1)	(1)	-

○の数値は本論文で考察に用いた試験体数

高感度変位計 2軸変位計



括弧内の数字は裏側にある変位計の意味

図-2 試験体形状および変位測定位置

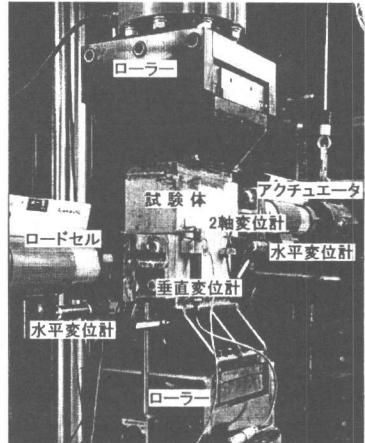


写真-1 加力試験装置

せる実験を行った (表-1)。

試験体は、普通ポルトランドセメントと水、天然骨材からなるプレーンコンクリート (最大骨材径 20mm) とモルタル (最大骨材径 5mm) の 2 種類を用意した。寸法は、200mm × 200mm × 100mm (高さ × 幅 × 厚さ) の正方形板とした。また、せん断力載荷試験を行うには既知の位置にひび割れ (破壊進行領域) を生成する必要があるため、高さ 100mm (中央部) の位置で左右両端に深さ 30mm のノッチを設けている (図-2)。

本実験では、垂直変位 (荷重) とせん断変位 (荷重) をそれぞれ独立して制御できる二軸

加力試験装置（写真-1）を用いた。垂直力載荷用には 1000kN 疲労試験機を使用し、せん断力載荷用には、高圧ジャッキシステムでコントロールする 200kN ジャッキを左右に設置して使用した。試験体の取り付けは、上下面をエボキシ系接着剤を用いて、ローラ支承に接合された鋼板に接着した。また、試験体側面（加圧面）とせん断力載荷用鋼板は間隙を超速硬セメントで埋め固定した。

変位の計測はノッチ部近傍（左右両端より 35mm）の打設時上下面各 2 個所の計 4 個所を行った（図-2）。図中の（1）、（4）は、せん断変位の測定に用いるための二軸型亀裂変位計（感度 1/1000mm, ゲージ長 50mm）で、（2）、（3）は高感度変位計（感度 1/2000mm, ゲージ長 37.5mm）で、平均接続箱で平均化し、変位制御引張載荷時のフィードバック信号に用いた。また、垂直荷重は感度 0.04kN, 水平荷重は感度 0.1kN の 200kN ロードセルで計測した。

初期ひび割れ幅（破壊進行領域）は、疲労試験機を用いた変位制御引張載荷によって試験体中央部のノッチ間に生成させた。あらかじめ規定したひび割れ幅に到達後、そのひび割れ幅を一定に保つホールド波を出力した。初期ひび割れを生成した後、その垂直変位を一定に制御した条件下で、せん断力を変位制御により載荷した。

実験方法の詳細は、前報<sup>1)</sup>を参照のこと。

#### 4. 実験結果および考察

シリンダーの圧縮試験の結果を表-2 に示す。圧縮強度および割線弾性係数は、各材料ごとの平均値で、せん断弾性係数はポアソン比 1/6 として割線弾性係数より算出した。

コンクリートのせん断力載荷試験による垂直荷重（圧縮が正）とせん断変位の関係 ( $P_v - \delta_s$ ) を各初期ひび割れ幅  $\delta_0$  別に図-3 に示す。細線が各試験体の結果で太線が平均値である。初期ひび割れ幅が大きくなるほど、凹凸のバラツキや試験体の回転の影響を受けやすく、各試

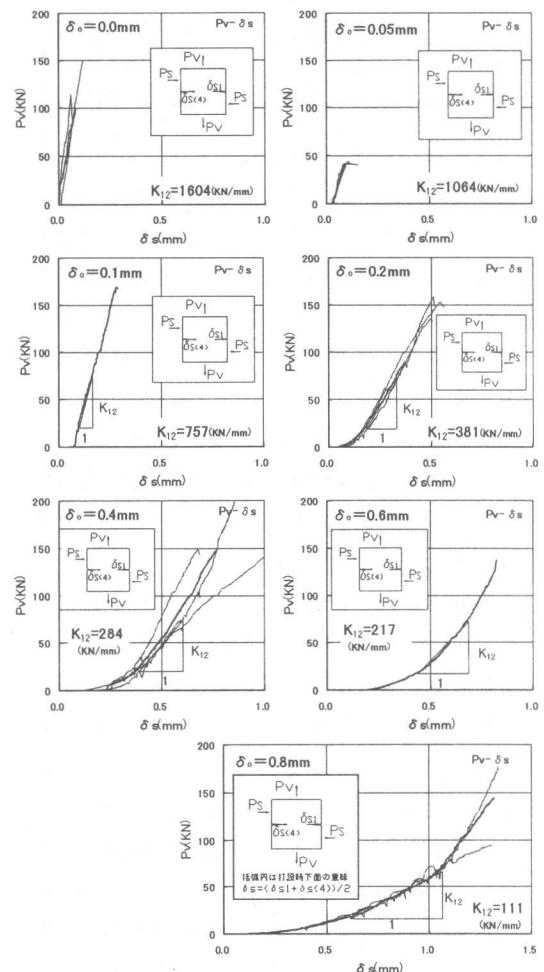
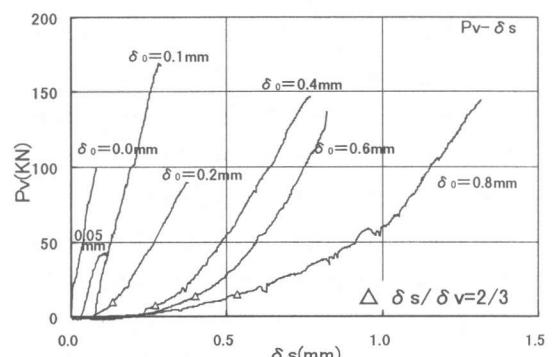


図-3 各初期ひび割れ幅の実験結果  
(コンクリート)



せん断試験時の垂直荷重 ( $P_v$ ) とせん断変位 ( $\delta_s$ ) の関係

図-4 初期ひび割れ幅による比較  
(コンクリート)

表-2 圧縮試験結果

	圧縮強度 $f_c$ (MPa)	割線弾性 係数 $E_{1/3}$ (GPa)	せん断弾 性係数 $G_0$ (GPa)
コンクリート	34.8	28.8	12.3
モルタル	47.0	22.9	9.82

験体のバラツキも大きくなる傾向が見られる。また、初期ひび割れ幅ごとの実験結果の平均値を比較したものを図-4に示す。垂直変位一定制御下でせん断力を作用させた場合、せん断力載荷用ジャッキの容量(200kN)以内では二次クラックの発生とそれに伴う荷重低下は見られなかった。これは、せん断変位の増加により、せん断方向および垂直方向に大きな圧縮力が作用し、二軸圧縮応力状態に近づき、ほとんど破壊に至らないためだと考えられる。

実験結果より、初期ひび割れ幅が小さい場合、せん断力載荷直後の微小なせん断すべりで垂直荷重とせん断変位関係の傾き( $K_{12}$ )が大きくなり垂直荷重が増加していく。それに対し、初期ひび割れ幅が大きくなるに従って初期の $K_{12}$ は小さくなる。これは、ひび割れ面でのすべり現象によるものと考えられる。その後、せん断変位の増加によりひび割れ面に骨材のかみ合いで効果が現れ始め、 $K_{12}$ が大きくなり垂直荷重が大きくなっていく。また、ひび割れ面の凹凸は不規則であるため、異なる変位で接触をする。接觸点の数は無限と考えられるので、荷重-変位関係は連続で滑らかである。

$K_{12}$ を $\delta_s / \delta_v < 2/3$ のとき0とおけることは2章で述べた。しかし、本実験のように $\delta_v$ が微小な場合を対象とすると、わずかなせん断変位で垂直荷重が増加し、 $K_{12} \neq 0$ となり垂直荷重 $P_v$ に $\delta_s$ が少なからず影響を与える。Walraven<sup>4)</sup>による $K_{12} \neq 0$ となる条件は、初期ひび割れ幅0.2mmのとき $\delta_s = 0.133\text{mm}$ 、同様に0.4mmでは $\delta_s = 0.267\text{mm}$ 、0.6mmでは $\delta_s = 0.4\text{mm}$ 、0.8mmでは $\delta_s = 0.533\text{mm}$ となる。その点を図中に△で示している。実験結果で見てみると△に対応する垂直荷重は、初期ひび割れ幅0.2mmの試験体の場合 $P_v = 9.8\text{kN}$ 付

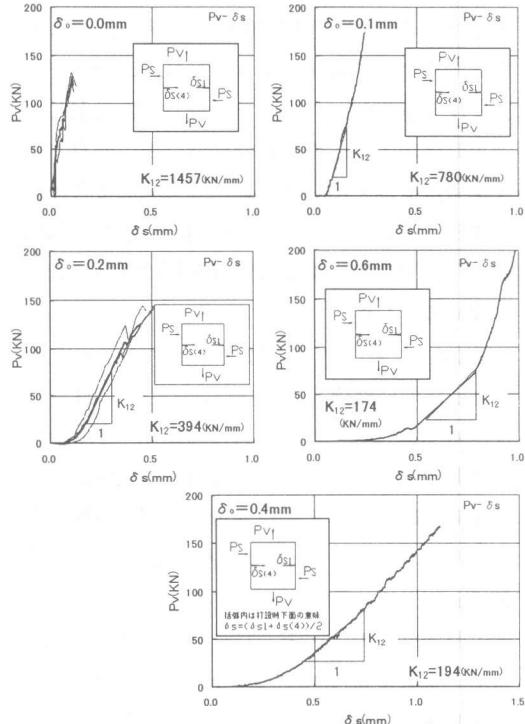


図-5 各初期ひび割れ幅の実験結果  
(モルタル)

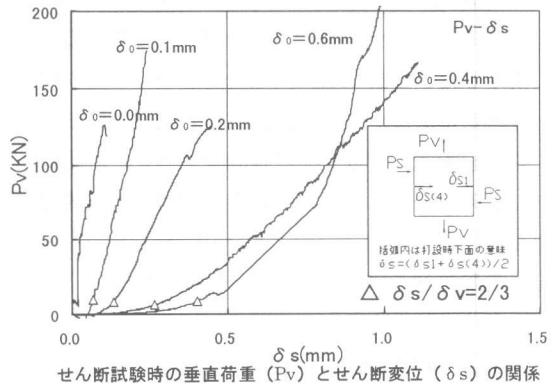


図-6 初期ひび割れ幅による比較  
(モルタル)

近、同様に0.4mmでは $P_v = 7.3\text{kN}$ 、0.6mmでは $P_v = 14.0\text{kN}$ 、0.8mmでは $P_v = 15.2\text{kN}$ である。 $\delta_s / \delta_v < 2/3$ の微小な $\delta_s$ においても、垂直荷重は $\delta_s$ と共に徐々に増加していく様子がわかるが、 $\delta_s / \delta_v \geq 2/3$ 以降の急激な垂直荷重の増加に比べると、実用上 $\delta_s / \delta_v < 2/3$ で $K_{12} = 0$ として差し支えないようと思われる。

モルタルの場合の垂直荷重(圧縮が正)と

せん断変位の関係 ( $P_v - \delta_s$ ) を各初期ひび割れ幅別に図-5 に示す。また、初期ひび割れ幅による実験結果の平均値の比較を図-6 に示す。モルタルの場合もコンクリートとほぼ同様の結果が得られた。 $K_{12} \neq 0$  となる条件もほぼ一致している。初期ひび割れ幅が小さい場合、コンクリートとモルタルの挙動に大きな差は見られない。モルタルの場合でもひび割れ面の凹凸によるかみ合い効果があり、コンクリートと同様にせん断変位の増加によって大きな垂直圧縮力が生じることがわかる。初期ひび割れ幅が 0.4mm を超えた場合、コンクリートと比較するとモルタルの垂直圧縮力の方が小さくなる。したがって、初期ひび割れ幅が小さければ、コンクリートとモルタルの差、骨材の有無による差は見られないが、初期ひび割れ幅が大きくなると骨材寸法の差が現れてくる。

コンクリートとモルタルの  $K_{12}$  と初期ひび割れの関係を図-7 に示す。上図-A がコンクリート、下図-B がモルタルである。縦軸は各ひび割れ幅の  $K_{12}$  を初期ひび割れ幅 0mm のときの  $K_{12}$  ( $\delta_0 = 0$ ) を用いて基準化した値  $\alpha$  を取っている。

$K_{12}$  は、垂直荷重が 20kN と 70kN の時点でのせん断変位により評価した。この試験結果より、 $K_{12}$  の低下率  $\alpha$  と初期ひび割れ幅  $\delta_0$  の関係を式 (1) で近似した。

$$\alpha = 1/(1 + a\delta_0) \quad (1)$$

ここで、 $a$  は実験定数で、各試験条件に対する値を図中に示している。

コンクリートとモルタルのどちらの場合でも、初期ひび割れ幅の増加に伴い、 $K_{12}$  は低下しているが、前報<sup>1)</sup>で示したせん断剛性低下率ほど急激な低下ではない。初期ひび割れ幅 0.1mm で  $K_{12}$  は半減し、0.3mm で既に 1/5 まで低下している。前述のように同じ初期ひび割れ幅を持つコンクリートとモルタルでは  $K_{12}$  の差がほとんど見られない。

しかし  $K_{12}$  の決定には、初期ひび割れ幅だけではなく、図-4, 6 からわかるように、せん断

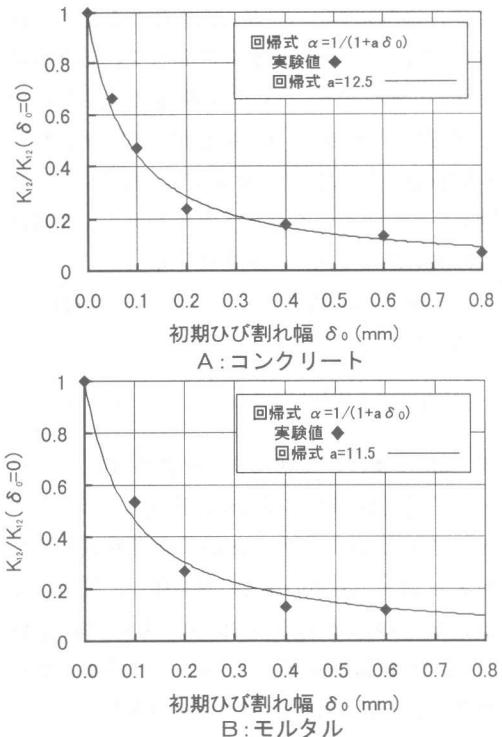


図-7  $K_{12}/K_{12}(\delta_0=0)$  と初期ひび割れの関係

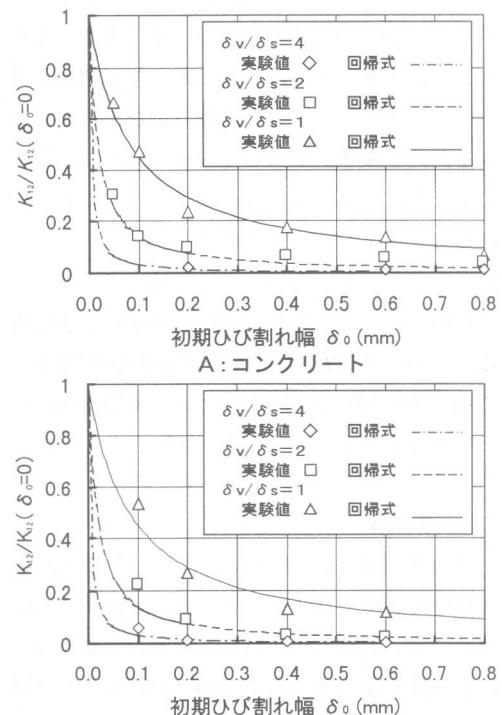


図-8  $K_{12}/K_{12}(\delta_0=0)$  と初期ひび割れの関係  
(初期ひび割れ幅とせん断変位の比)

変位の増加に伴って  $K_{12}$  が増大するため、式(1)ではその挙動を十分に表しているとは言えない。そこで式(1)の定数  $a$  を定数ではなく初期ひび割れ幅とせん断変位の比 ( $\delta_0/\delta_s$ ) の関数  $p$  とした次式で表すことにする。(本実験範囲では、コンクリートとモルタルの挙動はほぼ同じなので同一の式を用いる。)

$$\alpha^{-1} = 1 + p\delta_0 \quad (2)$$

ただし、

$$p = 1 - 7.5 \left( \frac{\delta_0}{\delta_s} \right) + 19 \left( \frac{\delta_0}{\delta_s} \right)^2 \quad (3)$$

式(2)に基づいて初期ひび割れ幅 ( $\delta_0$ ) のほかに、初期ひび割れ幅とせん断変位の比 ( $\delta_0/\delta_s$ ) をパラメータとした結果を実験値と共に図-8に示す。図中の  $K_{12}$  の実験値は、初期ひび割れ幅とせん断変位の比が設定している値(1,2,4)に該当する点を選び、その時のせん断変位に一定の差分( $\pm 0.025\text{mm}$ )を与えたときの垂直荷重とせん断変位から算出した。

これにより、せん断変位が大きくなりパラメータ  $\delta_0/\delta_s$  が小さくなると、 $K_{12}$  は増大することがわかる。これは、せん断変位の増加に伴って、骨材等のかみ合い効果(ひび割れ面における凹凸の接触)が大きくなっていくことを示している。すなわち、このパラメータは骨材のかみ合い状態を示すことになる。

値が大きくなるとかみ合い効果は小さくなり、逆に値が小さくなるとかみ合い効果は大きくなる。なお、式(2)の適応範囲は本実験の範囲、すなわち初期ひび割れ幅  $0 \leq \delta_0 \leq 0.8\text{mm}$ 、せん断変位  $\delta_s \leq 1.0\text{mm}$  程度である。

## 5. まとめ

ひび割れ面におけるコンクリートのせん断挙動を検討するために、ひび割れ面に垂直な変位を一定に制御した圧縮せん断載荷実験を行い、応力伝達可能な微小なひび割れ面に対して垂直荷重とせん断変位の関係  $K_{12}$  を明らかにした。また、ひび割れたコンクリートの構成則を導くために必要な  $K_{12}$  とひび割れ幅の関係も明らかにした。

にした。

本研究による主な結論を以下に示す。

- 1)  $K_{12}$  は、垂直変位(初期ひび割れ幅)の増加に伴い低くが、 $K_{21}$  ほどの急激な低下はない。
- 2)  $K_{12}$  は、初期ひび割れ幅とせん断変位の比 ( $\delta_0/\delta_s$ ) が大きくなると減少し、この比が小さくなると増加する。
- 3) 微小な初期ひび割れ幅では、コンクリートとモルタルの  $K_{12}$  にほとんど差異は認められない。  
しかし、本研究ではコンクリートのせん断挙動に関する初期段階の実験であり、繰り返しなどの載荷履歴の問題を扱っていない。今後は、引張せん断載荷、さらに荷重経路などの影響を検討するための実験も行う予定である。

## 謝辞

本研究費の一部は、平成9、10年度文部省科学研究費補助金・COE形成基礎研究費および基盤研究(C)によった。付記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 篠原保二・金子葉・高田典英：軸方向変位または荷重制御下におけるコンクリートのせん断挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.2, pp.565-570, 1998.6
- 2) 例えば、篠原保二・安部武雄・古村福次郎：ノッチ深さ、載荷速度、骨材寸法、水セメント比、載荷法、養生および材令がコンクリートの曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文報告集、No.442, pp.13-22, 1992.12
- 3) Bazant, Z.P. and Gambarova, P. : Rough Cracks in Reinforced Concrete, ASCE, J. Struct. Div., Vol.106, pp.819-842, 1980
- 4) Walraven, J.C. and Keuser, W. : The Shear Retention Factor as a Compromise between Numerical Simplicity and Realistic Material Behavior , Darmstadt Concrete 2, pp.221-234, 1987