

論文 コンクリートのひび割れ面における垂直荷重制御繰返しせん断挙動

石飛 幸子*¹・篠原 保二*²・川道 克祥*³

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、ひび割れ面に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単調圧縮せん断載荷実験を行ってきた。しかし地震時においては繰返しせん断力を受けるため今回は、ひび割れ面に垂直方向の荷重を一定に制御し、繰返しせん断力を変位制御により載荷した。実験結果に基づいて、せん断耐力、せん断変位と垂直変位の関係、せん断剛性に及ぼす繰返し載荷の影響を初期ひび割れ幅をパラメータとして考察した。

キーワード: ひび割れ幅、繰返しせん断挙動、一定垂直荷重、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。

前報^{1), 2)}では、始めに変位制御引張試験でコ

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単調圧縮せん断力を作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。それに続けて本論文では変位制御引張試験により試験体に規定したひび割れを生成させた後、垂直方向荷重を一定に制御し、ひび割れ面に繰返しせん断力を変位制御により載荷し、繰返しによるせん断剛性、最大耐力の低下が初期ひび割れ幅とどのような関係にあるかを明らかにする。

2. 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、初期ひび割れ幅 ($\delta_0 = 0 \sim 0.8\text{mm}$) をパラメータとして、垂直方向荷重一定制御下 (圧縮 1 kN) で繰返しせん断力を作作用させる実験を行った (表 - 1)。

試験体は普通ボルトランドセメント、水、天然骨材 (静岡県沢岡産大井川陸砂・砂利) からなるプレーンコンクリート (最大骨材径 20mm) を用いた。コンクリートの調合を表 - 2 に示す。試

* 1 大阪府庁 (正会員)

* 2 東京工業大学助教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

* 3 東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻

験体の打設は、200mm×880mm×100mmの鋼製型枠を用いて行い、打設24時間後に脱型し、標準水中養生を行った。材齢21日目に水中から取り出した後、ダイヤモンドカッターを用いて一つの型枠から4体の試験体を切り出した。変位制御引張試験を行うには既知の位置にひび割れ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、幅3mm弱のノッチを設けた（図-1）。切り出した試験体は室温20℃の恒温室に保存し、材令28～31日で実験を行った。

本実験では、ひび割れ面に垂直方向の垂直変位（荷重）と水平方向のせん断変位（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。垂直力载荷用には1000kN疲労試験機を使用し、せん断力载荷用には、高压ジャッキシステムでコントロールする圧縮力196kN、引張力98kN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試験日前日までに上下面をローラ支承に接合された鋼板に、また、側面（加圧面）をせん断力载荷用鋼板にエポキシ系接着剤を用いて接着した。

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個所で行った（図-1）。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）である。（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、変位制御引張試験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。

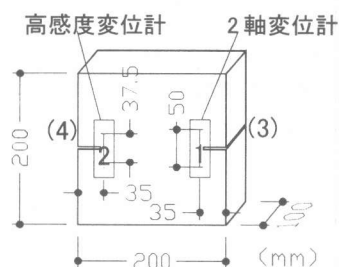
初期ひび割れは、疲労試験機を用いた変位制御引張試験によって試験体中央部のノッチ間に生成させた。あらかじめ規定したひび割れ幅に到達後、垂直方向の引張力を荷重制御に切り替え引張力を除荷した。垂直方向荷重を一定（圧縮1kN）に制御した条件下で繰返しせん断力を変位制御により载荷した。せん断载荷時の引張せん断、圧縮せん断は図-2のように取り決め、引

表-1 試験体

荷重制御 ($\delta_v = \delta_0$)	初期ひび割れ幅 δ_0 (mm)						
	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
試験体数	2	2	2	2	2	2	2

表-2 調合表

調合名称	W/C	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)
C01～C09	0.55	205	353	1078	677



括弧内の数字は裏側にある変位計の意味

図-1 変位計取り付け位置

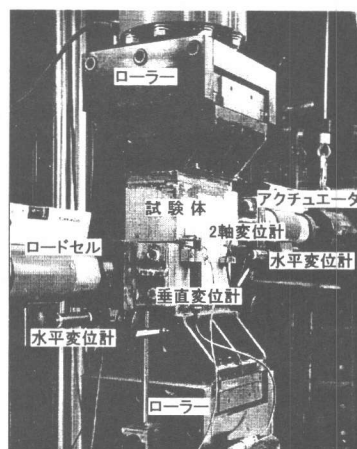


写真-1 加力試験装置

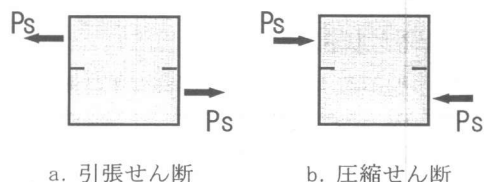


図-2 せん断载荷方向図

張せん断時の荷重，変位を正とする。

せん断力は，①引張せん断 (P_s) で 10 (kN)，
②圧縮せん断で垂直変位 (δ_v) 1.0 (mm)，③
引張せん断で $P_s = 10$ (kN)，④圧縮せん断で
 $\delta_v = 1.5$ (mm)，⑤引張せん断で $P_s = 10$ (kN)，
⑥圧縮せん断で $\delta_v = 2.0$ (mm)，⑦引張せん断
で破断までの荷重を基本とした(図-8, 9 参照)。
しかし，コンクリートに直接接着している変位
計がひび割れにより剥離する可能性があったり，
引張耐力が 10kN まで上がらない場合はその時
点で折り返した。引張折り返しを 10kN としたの
は左右のコンクリートが接着面付近の界面で破
断する恐れがあるためである。(予備実験では最
大引張せん断力は 10～20kN であった。) また圧
縮せん断は破断する恐れがないため垂直変位を
基準に折り返すことにした。

3. 実験結果および考察

シリンダーの圧縮試験の結果を表-3に示す。
圧縮強度 (f_c) および割線弾性係数 ($E_{1/3}$) は，
各材料の平均値で，せん断弾性係数 (G_0) はポ
アソン比 0.2 として割線弾性係数より算出した。

コンクリートの垂直方向引張試験時の最大引
張力 (P_{VMAX})，設定した初期ひび割れ幅到達時の
引張力 (P_{V0})，-1 kN まで除荷後の垂直変位
(δ_{v0}) を表-4に示す。試験体番号は L000-2C05
を例にすると L：垂直荷重制御，000：初期ひび
割れ幅 (μ)，2：同じパラメータの試験体のシリ
アルナンバー，C05：コンクリート打設シリアル
ナンバーを表す。

図-3に垂直引張試験時の典型的な垂直荷重
(P_v) と垂直変位 (δ_v) の関係を示す。 δ_v が
約 0.01mm で最大荷重に達しその後急激に軟化
が始まる。本実験では変位制御試験を可能にする
ため球座を用いていない。それ故，曲げ変形
の影響が大きくなり³⁾ 最大引張耐力がばらつい
ていると考えられる。

初期ひび割れ幅に達した後，-1kN まで除荷
するためせん断試験開始時の垂直変位は初期ひ
び割れ幅に比べ小さくなっている。初期ひび割

表-3 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)
37	29.8	12.4

表-4 垂直引張試験時の挙動

試験体番号	P_{VMAX} (kN)	P_{V0} (kN)	δ_{v0} (mm)
L000-2C05	0.0	0.0	0.000
L000-3C06	0.0	0.0	0.000
L050-1C06	38.0	14.1	0.026
L050-2C07	35.5	13.9	0.019
L100-1C06	31.9	8.2	0.051
L100-2C06	32.1	7.3	0.070
L200-3C03	39.5	3.6	0.093
L200-4C04	34.0	1.7	0.102
L400-1C04	41.8	0.3	0.155
L400-2C05	28.3	1.3	0.129
L600-1C04	29.5	0.5	0.185
L600-2C04	40.9	0.4	0.224
L800-1C01	28.6	0.3	0.178
L800-2C05	34.5	0.0	0.310

表-5 圧縮せん断力1サイクル目載荷時の挙動

試験体番号	P_{SMAX} (kN)	δ_v (mm)	δ_s (mm)	K_{C1} (kN/mm)
L000-2C05	-29.6	0.007	-0.005	1785
L000-3C06	-37.7	0.007	-0.014	3289
L050-1C06	-41.0	0.036	-0.003	1124
L050-2C07	-31.3	0.246	-0.184	6656
L100-1C06	-28.3	0.199	-0.158	1138
L100-2C06	-28.8	0.333	-0.235	3258
L200-3C03	-36.6	0.461	-0.264	332
L200-4C04	-26.8	0.319	-0.217	328
L400-1C04	-23.1	0.250	-0.165	298
L400-2C05	-24.5	0.237	-0.157	295
L600-1C04	-31.0	0.429	-0.573	248
L600-2C04	-26.2	0.463	-0.257	137
L800-1C01	-36.4	0.218	-0.131	267
L800-2C05	-17.2	0.408	-0.242	113

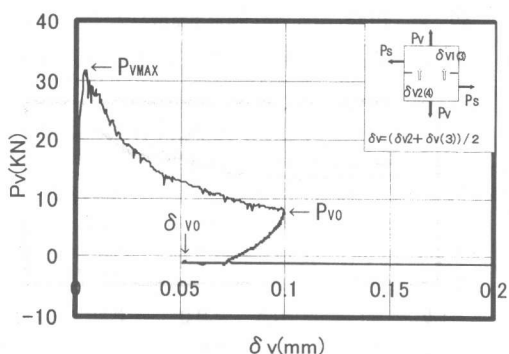


図-3 垂直引張試験時 (L100-2 C 06)

れ幅をパラメータとしたのは、過去に受けたダメージ（破壊の進行）の相違がせん断挙動に及ぼす影響を考察するためである。

各試験体の1サイクル目の最大圧縮せん断力 $P_{S_{MAX}}$ とその点におけるせん断変位 δ_{s1} 、垂直変位 δ_{v1} およびせん断剛性 K_{c1} を表-5に示す。せん断剛性は引張せん断の場合、 $P_s=2\text{kN}$ 、 8kN の点での割線剛性とし、 8kN まで達しなかった場合は 0kN とそのサイクル内での最大引張せん断力の割線剛性とした。また1サイクル目の圧縮の場合 $P_s=-5\text{kN}$ 、 -15kN の割線剛性とし、それ以降のサイクルは 0kN とそのサイクル内での最大圧縮せん断力の割線剛性とした。また表-3に示す G_0 と本試験体のゲージ長さ (50mm)、断面積 ($100 \times 140\text{mm}$) を用いて算出したせん断剛性の計算値 K_0 は 3470kN/mm となる。本実験のせん断耐力は $20 \sim 30\text{kN}$ 程度であり、せん断変位は微小となるため実験値よりせん断剛性を算出すると誤差が大きくなる。それ故、本実験では G_0 より算出した K_0 を基準値として用いた。

図-4, 5, 6, 7, 8, 9 は引張せん断を正とした初期ひび割れ幅 0mm (L000-3C06), 0.05mm (L050-2C07), 0.6mm (L600-2C04) の試験体のせん断荷重とせん断変位の関係 ($P_s - \delta_s$) と垂直変位とせん断変位の関係 ($\delta_v - \delta_s$) を示している。

いずれの初期ひび割れ幅でもせん断力を作用させると、ひび割れ面で骨材等への乗り上げが生じ、垂直変位が増加するが、初期ひび割れが小さいほど垂直変位の増加の割合が大きくなる。また図-8 (初期ひび割れ幅 0.6mm) から、せん断力を繰り返し作用させることによりせん断剛

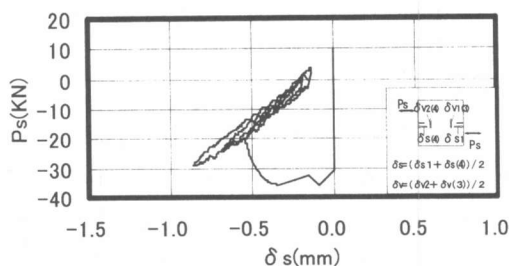


図-4 L000-3C06 $P_s - \delta_s$ の関係

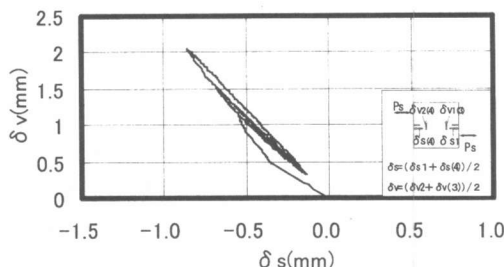


図-5 L000-3C06 $\delta_v - \delta_s$ の関係

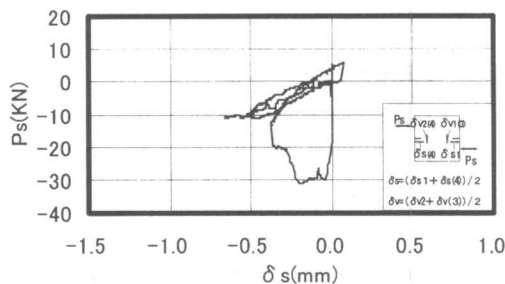


図-6 L050-2C07 $P_s - \delta_s$ の関係

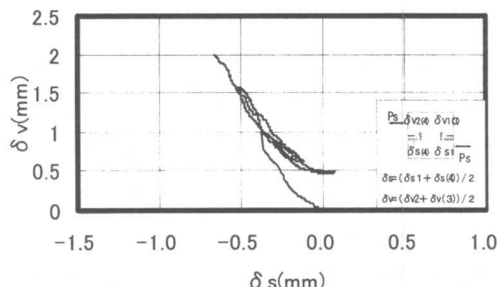


図-7 L050-2C07 $\delta_v - \delta_s$ の関係

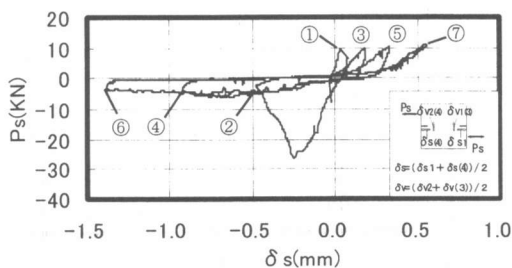


図-8 L600-2C04 $P_s - \delta_s$ の関係

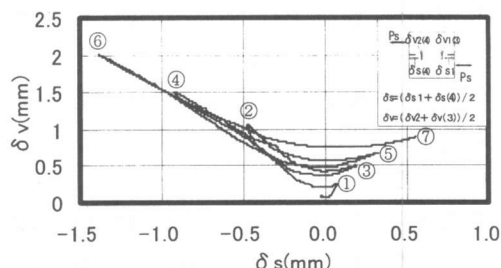


図-9 L600-2C04 $\delta_v - \delta_s$ の関係

性が低下している様子がわかる。しかし初期ひび割れ幅0mm, 0.05mmの試験体は初期ひび割れ幅が0.1mm以上の試験体と異なった履歴を示す。これは写真-2のように圧縮せん断時に最大引張応力方向と直交する方向にクラックが入り、圧縮ストラットが形成されるためである⁴⁾。(初期ひび割れ以外に発生するクラックを2次クラックとよぶ。) その後の繰り返し载荷においても圧縮ストラットが抵抗するためせん断剛性は初期ひび割れ幅0.1mm以上の試験体より高い。

図-10は横軸が初期ひび割れ幅、縦軸が実験の1サイクル目の圧縮せん断剛性 K_{C1} を K_0 (3470kN/mm)で割った値である。グラフ中の $\beta = 1/(1+50\delta_0)$ は前報²⁾の荷重制御試験によって得られた回帰式である。前報の実験でパラメータの設定がなかった初期ひび割れ幅0.1mm以下では実験値は回帰式より高くなっている。初期ひび割れ幅0.05mmでせん断剛性比がひとつだけ1.9と高い値であったため図の上に◆(1.9)であらわした。図-11は横軸が初期ひび割れ幅、縦軸が実験の1サイクル目の引張せん断剛性 K_{T1} を K_0 で割った値である。図-10, 11より引張、圧縮ともに初期ひび割れが0.2mm以上でせん断剛性が急激に低下することがわかる。 $\delta_0=0.2\sim 0.8$ mmでは $\delta_0=0$ mmでのおよそ1/10まで低下している。

図-12は横軸が初期ひび割れ幅、縦軸が2, 3サイクル目の圧縮せん断剛性(K_{C2} , K_{C3})を K_{C1} で割った値である。図-13は横軸が初期ひび割れ幅、縦軸が2, 3, 4サイクル目の引張せん断剛性(K_{T2} , K_{T3} , K_{T4})を K_{T1} で割った値である。 $K_{C2,C3}/K_{C1}$ は0~0.2の値をとり、 $K_{T2,T3,T4}/K_{T1}$ は0~0.6の値をとる。これは圧縮せん断は最大耐力後の軟化域まで载荷しているが、引張せん断は10kNで折り返し最大耐力後まで载荷していないためと考えられる。また引張せん断の初期ひび割れ幅0~0.1mmではせん断剛性比は大きく低下している。これは図-11から分かるように1サイクル目のせん断剛性が初期ひび割れ幅0.2mm以上の試験体のせん断剛性より10倍程

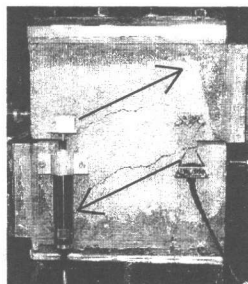


写真-2 2次クラック (L000-2C05)

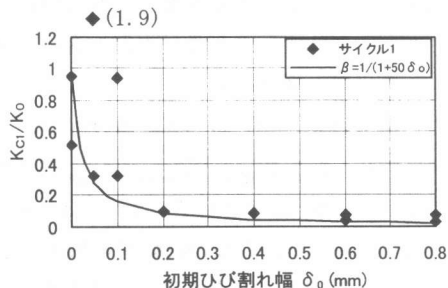


図-10 圧縮時の δ_0 と K_{C1}/K_0 の関係

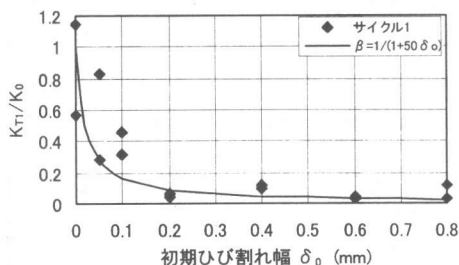


図-11 引張時の δ_0 と K_{T1}/K_0 の関係

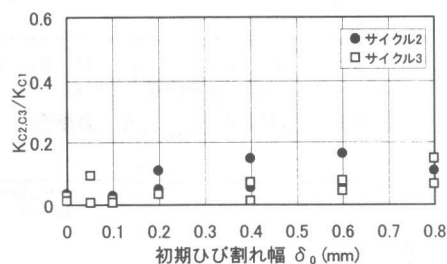


図-12 圧縮時の δ_0 と $K_{C2, C3}/K_{C1}$ の関係

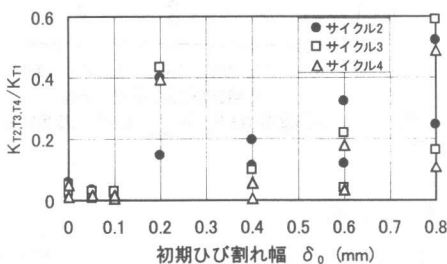


図-13 引張時の δ_0 と $K_{T2, T3, T4}/K_{T1}$ の関係

度大きいのである。引張せん断、圧縮せん断ともにサイクルが増えると骨材等への乗り上げによりせん断剛性は低下するが、1サイクル目から2サイクル目の低下率と比較すれば2サイクル目から3、4サイクル目の低下率は大きくないことがわかる。

図-14は横軸に初期ひび割れ、縦軸に最大せん断力 P_{SMAX1} を示している。最大圧縮せん断力は初期ひび割れ幅による影響は少なくひび割れ面の凹凸の形状すなわち骨材のかみ合いに強く影響を受けると考えられる。

また図-15は2サイクル目、3サイクル目の最大圧縮せん断力 P_{SMAX2} 、 P_{SMAX3} を P_{SMAX1} で割った値である。これより2サイクル目と3サイクル目はほぼ同じで初期ひび割れ幅が0.2mm以上になると最大圧縮せん断力の低下率は大きくなるが、0.1mm以下ではその低下率はそれほど大きくない。これは2次クラックにより形成された圧縮ストラットが繰り返しせん断载荷の間圧せせず、せん断力を伝達したためである。

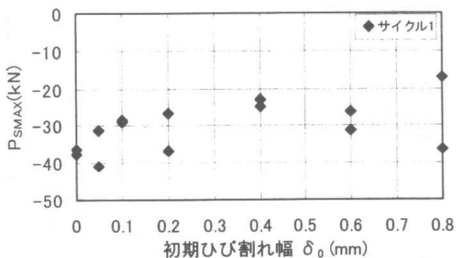


図-14 圧縮時の P_{SMAX} と δ_0 の関係

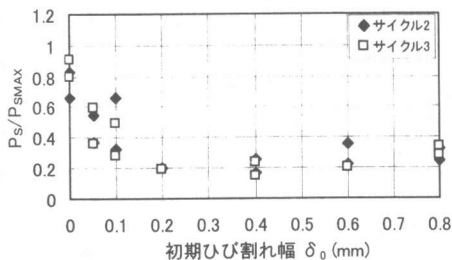


図-15 圧縮時の P_s/P_{SMAX} と δ_0 の関係

4. 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、応力伝達可能な微小なひ

び割れ面に対し垂直な荷重を一定に制御した条件下で繰り返しせん断载荷実験を行った。繰り返しせん断力により垂直変位とせん断変位がどのような影響を受けるのか初期ひび割れ幅をパラメータとして明らかにした。

- 1) 引張、圧縮ともにいずれの初期ひび割れ幅でもせん断力を作用させると垂直変位(ひび割れ幅)が増加し、繰り返し回数が増えるに従いせん断剛性、最大せん断力が低下する。
- 2) 初期ひび割れ幅0と0.05mmの試験体は0.1mm以上の試験体と比べ2、3サイクル目のせん断剛性比が低く、最大圧縮せん断力が高い値を示す。これは2次クラックの発生により急激に剛性は低下するが、圧縮ストラットが形成され圧縮せん断力に抵抗するためである。
- 3) 初期ひび割れ幅が0.1mm以上の試験体は2次クラックは生じず、骨材等への乗り上げにより垂直変位が増加すると共に剛性低下を起こす。

今後は垂直方向変位制御試験による繰り返しせん断载荷を行ない垂直方向荷重制御試験と比較する。また2次クラックの発生について明らかにするため初期ひび割れ幅0.1mm以下についての詳細な実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 篠原保二・室中英男・金子葉：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.655-660，1999.7
- 2) 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
- 3) 篠原保二，安部武雄，古村福次郎：コンクリートの引張強度に及ぼす曲げ変形の影響に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，No.464，pp.25-32，1994.10
- 4) 篠原保二，金子葉：コンクリートの破壊進行領域における圧縮せん断挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.525，pp.1-6，1999.11