

## 論文

[2021] 低側圧 3 軸圧縮応力を受けたプレーンコンクリートの最大  
応力以降の破壊性状石田健吾\*<sup>1</sup>・村上雅英\*<sup>2</sup>・大谷恭弘\*<sup>3</sup>・窪田敏行\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

著者等は、2次元的に破壊を捉えることの可能な3軸圧縮試験装置を独自に開発した。そして、一連の実験より以下の成果が得られた[1, 2]。

- 破壊が完全に終了した時の残留強度を最終安定条件として定式化した。
  - 破壊の進行によりせん断帯の摩擦機構が、微細なひび割れ面間の摩擦から滑り面間の骨材の乗りあげやめり込みによる摩擦へと変化し、摩擦係数が増加することを見出した。
  - Mohr-Coulombの破壊基準を拡張して適用し、損傷指標 $\alpha$ を導入することによって、最大強度時から最終安定状態までの粘着力と摩擦係数を分離する方法を考案した。
  - 粘着力と摩擦係数をせん断帯の接線方向変位の関数で表現した数学モデルも提案した。
- しかしながら、上述した概念に基づく数学モデルに対応した破壊形式を再現できる実験に関しては他には例が無いとため、実験技術面で以下の問題点が残されていた。
- 側圧载荷の制御の精度が低く、再現性が悪かった。
  - 試験体と载荷板間の摩擦の除去が完全でなかった。
  - 打設後の沈下の影響で試験体の上部の強度が低くなり、上部に破壊が集中した。そのため、ひび割れによって形成される不連続面が $y$ 、 $Y$ あるいは $X$ 字状に発生する試験体が多くみられた。そのため、モデルで想定しているような対角方向に1本のひび割れが生じる場合の割合が低かった。
  - 単一形状、単一強度、単一調合の実験であったため、実験結果の普遍性に欠けていた。

そこで本論文では上述した問題を解決するために、以下のように実験方法に改良を加えるとともに、表-1に示すようにコンクリート強度、骨材の最大粒径、試験体形状を実験変数に取り入れた合計193体の3軸圧縮試験を実施した。

そして、滑り面近傍の微細ひび割れによるエネルギー散逸の機構を明確にするため滑り面近傍の破壊状況の可視化を試み、ひび割れ性状の検討を行った。

## 2. 実験方法

载荷治具は図-1に示すように基本的に文献[1]と同じものを使用した。第2軸方向の面外応力 $\sigma_2$ については前回と同様にPC鋼棒の拘束による受動载荷により導入した。側圧 $\sigma_1$ の载荷と制御に関しては、新たに開発した75MPaで作動可能な電気式サーボバルブを有する高压油圧源システムを使用し、側圧载荷用シリンダーを $\sigma_1$ 測定用のロードセルの出力電圧で直接制御する荷重制御とした[3]。また、高压油圧源システムはコンピュータと16ビットD/A変換器で接続されており、コンピュータ制御により、任意の载荷経路による側圧载荷高精度で行うことが可能である。なお、側圧の载荷範囲は、 $0 > \sigma_1 \geq -6\text{MPa}$ であり、一定側圧载荷時の側圧の変動幅は

\*1 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻 (正会員)

\*2 近畿大学講師 理工学部建築学科、工博 (正会員)

\*3 神戸大学助教授 工学部建設学科、Ph. D (正会員)

\*4 近畿大学教授 理工学部建築学科、工博 (正会員)

±0.05MPa以下である。また、変動側圧時のタイムラグは $\sigma_3$ の荷重速度と比べて無視できるほど小さい。計測システムは文献[1]と同様の方法、すなわち、急激な破壊に対応できる様に動ひずみ計と12ビットA/D変換器を用いたコンピュータによる自動計測とした。荷重板と試験体間の摩擦の除去の方法については、減摩パット（テフロンシート（ $t=0.1\text{mm}$ ）+カップグリス+アルミ箔+カップグリス+テフロンシート（ $t=0.1\text{mm}$ ））を予め-10MPaでプレスしてカップグリスを均等に馴染ませたものを使用した。減摩パットを使用した場合の荷重板と試験体間の摩擦係数は、荷重面の圧縮応力度が-10MPaにおいて0.01であった。減摩パットは試験体の全面（6面）で使用した。荷重板間で伸縮量の計測を行っているため、予め、減摩パットのみの変形を計測し、計測された伸縮量より減摩パット分を差し引くことで試験体の伸縮量を算出した。試験体の製作に際しては、打ち込み高さ30cmの鋼製型枠（ $7.5 \times 30 \times 15\text{cm}$ ）に打設したコンクリートより、沈下による影響の小さい区間17cmを切り出した。さらに、各面の角を2mmずつ研磨して面取りするとともに、切断面も研磨仕上げとした。文献[1]の実験では、ひび割れが対角方向に1本のみ生じる試験体数が、全試験体数の約50%であった。以上のような改良を行った結果、本実験では87%までZタイプの割合が向上した。さらに、実験結果の信頼性を高めるために、同一パラメータによる実験では、ひび割れが対角方向に1本のみ生じる試験体が原則として3体確保できるように、同一バッチによる試験体数を決定した。形状効果の影響を調べるために、 $5.1 \times 17 \times 15\text{cm}$ と $7.5 \times 9 \times 15\text{cm}$ の試験体も製作した。各実験変数とひび割れパターンの分類を表-1に示す。なお、応力とひずみの符号の定義は引張りを正とするが、表現においては、慣例に従い、絶対値による大小関係を用いる。

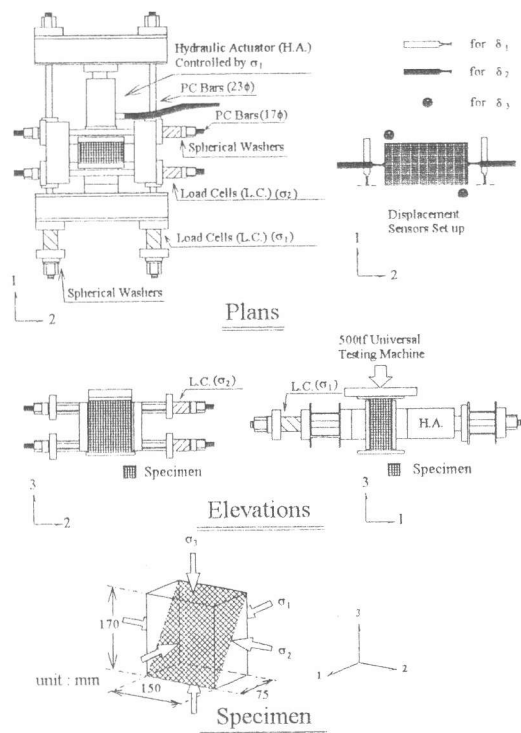


図-1 実験装置の概要

さらに、各面の角を2mmずつ研磨して面取りするとともに、切断面も研磨仕上げとした。文献[1]の実験では、ひび割れが対角方向に1本のみ生じる試験体数が、全試験体数の約50%であった。以上のような改良を行った結果、本実験では87%までZタイプの割合が向上した。さらに、実験結果の信頼性を高めるために、同一パラメータによる実験では、ひび割れが対角方向に1本のみ生じる試験体が原則として3体確保できるように、同一バッチによる試験体数を決定した。形状効果の影響を調べるために、 $5.1 \times 17 \times 15\text{cm}$ と $7.5 \times 9 \times 15\text{cm}$ の試験体も製作した。各実験変数とひび割れパターンの分類を表-1に示す。なお、応力とひずみの符号の定義は引張りを正とするが、表現においては、慣例に従い、絶対値による大小関係を用いる。

### 3. Mohr-Coulombの破壊基準と最終安定条件

各実験シリーズ毎にMohr-Coulombの破壊基準と最終安定条件を最小2乗法によって求め、表-2に示した（ここでは、Mohr-Coulombの破壊基準を用いているため、中間主応力 $\sigma_2$ は計算に表れない）。最大強度時では、摩擦機構は微細なひび割れ間の摩擦によって生じるが、最終安定状態では、滑り面間の骨材の乗り上げやめり込みによって生じる。従って、全シリーズにおいて、摩擦係数は $\mu_{\text{peak}} < \mu_{\text{final}}$ となっている。

### 4. ひび割れ形状とひび割れ角度

側圧が-2MPa以上（ $\sigma_1 \leq -2\text{MPa}$ ）の場合では、 $f_c=80\text{MPa}$ 以外の大部分の試験体でひび割れ本数に関係なく、支配的なひび割れは、Z、yタイプのように試験体の対角方向に生じた。代表的な $\sigma_3-\epsilon_3$ 曲線の関係を図-2に示す。一般的にZタイプは最も損傷領域（せん断帯）の体積が小さく、最大強度以降のエネルギー吸収量が少なくなるため、ひずみ軟化勾配が最も急になる。

側圧 $\sigma_1 = -0.2\text{MPa}$ では、ひび割れ角度が小さく、V字状に2本以上生じるものが多く見られた（Vタイプ）。しかしながら、 $\sigma_3 - \varepsilon_3$ 曲線における最大応力以降のエネルギー吸収量ではZタイプとの差は、ほとんど認められなかった。 $f_c = 80\text{MPa}$ の試験体群では、側圧の大きさに関係なくVタイプのひび割れが多く見られた。

ひび割れ角度に対する形状効果の影響を調べるために、アスペクト（高さ／幅）比 $=17/7.5$ の標準試験体に対して、アスペクト比 $=17/5.1$ と $9/7.5$ の大小2種類について実験した。図-3にアスペクト比を変化させた場合のひび割れパターンの比較を示す。ひび割れ角度は試験体形状に関係なく平均して約20度とほぼ一定の角度であることが確認された。そこで、各試験体の第2面に5mmのメッシュシートを貼付けて3軸圧縮試験を行った、そして最終安定状態を確認し、実験終了後にメッシュシートに現れた主要なひび割れを折れ線による直線で近似した。そして、折れ線内の各直線区間の角度と長さを測定し、長さを重みとして平均することにより、各試験体の平均ひび割れ角度を算出し、表-1中に示した。平均ひび割れ角度とMohr-Coulombの破壊基準中の摩擦係数から算出されるひび割れ角度の関係を図-4に示す。ひび割れ角度は計算値の方が実験値よりもやや大きくなった。 $G_{\max} \geq 10\text{mm}$ でかつ $f_c < 60\text{MPa}$ の範囲では両者の差は2.5度程度であり、Mohr-Coulombの破壊基準より計算されたひび割れ角度で実験値を十分近似できるものと判断される。

### 5. ひび割れの可視化による滑り面付近のひび割れ状況の観察

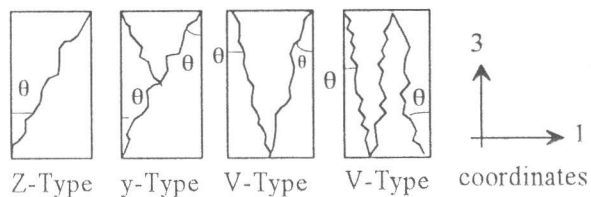
主要なひび割れ線の評価に対しては

表-1 実験変数、破壊形式、ひび割れ角度の一覧

Batch No. $G_{\max}$ (mm) W/C(%) Size(cm)	Comp. strengths		Lateral stress (MPa)	N	Fracture mode			Averaged crack angle (degree)
	cylinder (MPa)	prism (MPa)			sliding		V-Type	
					Z-Type	y-Type		
(A) $G_{\max}=10\text{mm}$ W/C=74% 7.5X17X15	24.2	25	-0.2	3	3		17	
			-2	4	4		21	
			-3.9	4	4		21	
			-5.9	5	3	2	21	
(B) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=74% 7.5X17X15	22	23	-0.2	5	2		3	16
			-2	4	3	1	21	
			-3.9	4	3	1	21	
			-5.9	4	3	1	21	
(C) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=74% 7.5X17X15	27.8	26	-0.2	4	2		2	16
			-2	3	3		21	
			-3.9	5	3	2	20	
			-5.9	3	3		22	
(D) $G_{\max}=20\text{mm}$ W/C=68% 7.5X17X15	31.5	33.8	-0.2	4	3		1	18
			-2	4	4		20	
			-3.9	4	3	1	20	
			-5.9	4	2	2	22	
(E) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=59% 7.5X17X15	40.1	39.8	-0.2	5	3		2	15
			-2	3	3		19	
			-3.9	3	3		22	
			-5.9	3	3		21	
(F) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=49% 7.5X17X15	49.2	58.8	-0.2	4	3	1		16
			-2	4	3	1	20	
			-3.9	4	2	2	19	
			-5.9	3	3		21	
(G) $G_{\max}=5\text{mm}$ W/C=74% 7.5X17X15	21.8	24	-0.2	3	3			18
			-2	4	3	1	22	
			-3.9	5	3	2	20	
			-5.9	5	2	3	22	
(H) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=26% 7.5X17X15	85.4	80.1	-0.2	4			4	9
			-2	4			4	12
			-3.9	4		2	2	16
			-5.9	4		2	2	17
(I) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=74% 7.5X9X15	25	25.3	-0.2	3				19
			-2	4				19
			-3.9	3				20
			-5.9	7				23
(J) $G_{\max}=13\text{mm}$ W/C=74% 5.1X17X15	28.4	25.9	-0.2	4				16
			-2	4				17
			-3.9	4				19
			-5.9	4				20

note

cylinder: ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ) without Teflon sheets  
 prism: ( $150 \times 75 \times 175\text{mm}$ ) with Teflon sheets N: number  
 < all lateral stresses are in compression >



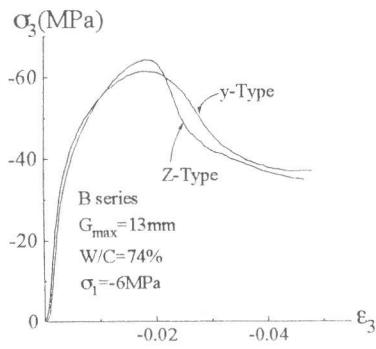


図-2 ひび割れタイプによる  $\sigma_3 - \varepsilon_3$  関係の比較

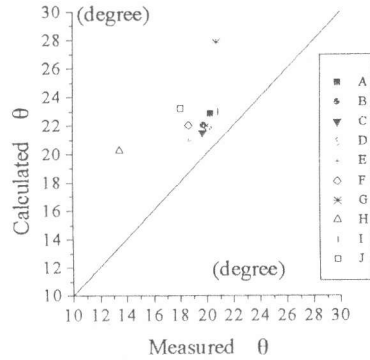


図-4 ひび割れ角度の実験値と計算値の比較

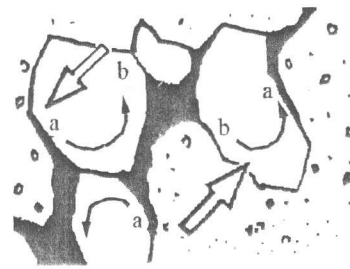


図-5 骨材の回転によるひび割れの進展

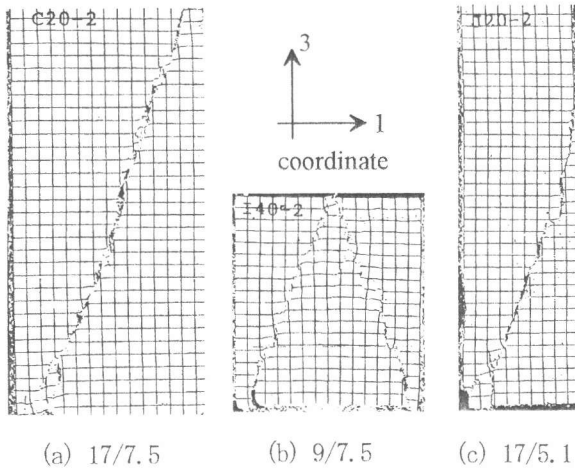
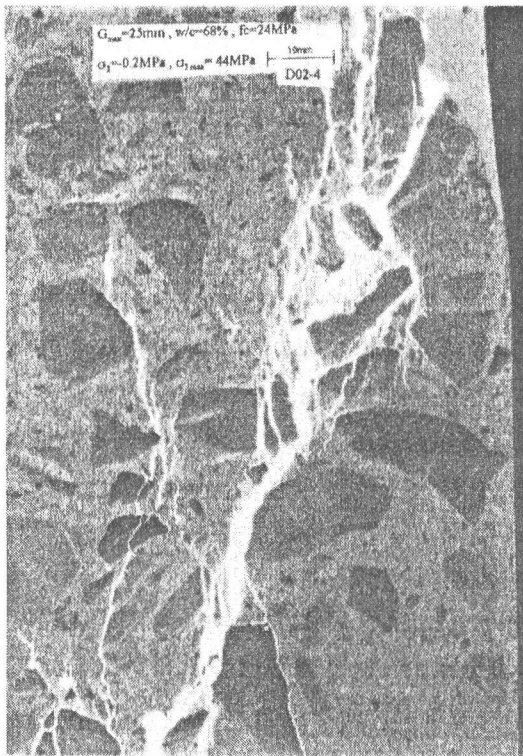


図-3 アスペクト比によるひび割れの比較

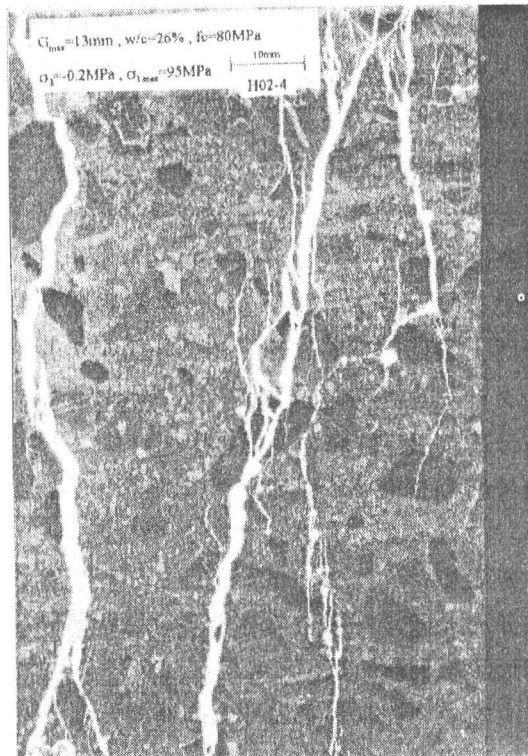
表-2 各シリーズの破壊基準と最終安定条件

Batch No.	Mohr-Coulomb's fracture criterion		residual strength criterion	
	$\tau_t = C_{peak} + \mu_{peak} \cdot \sigma_n$		$\tau_t = C_{final} + \mu_{final} \cdot \sigma_n$	
	$C_{peak}$ (MPa)	$\mu_{peak}$	$C_{final}$ (MPa)	$\mu_{final}$
A	8	0.83	1.25	0.89
B	8.05	0.88	1.15	0.96
C	7.54	0.91	1.04	0.94
D	9.46	0.89	1.35	1.03
E	11.14	0.94	0.8	1.03
F	15.88	0.88	1.76	0.99
G	8.16	0.6	0.72	0.85
H	20.03	0.99	2.4	1.11
I	8.35	0.83	1.27	0.95
J	9.58	0.82	1.55	1.02

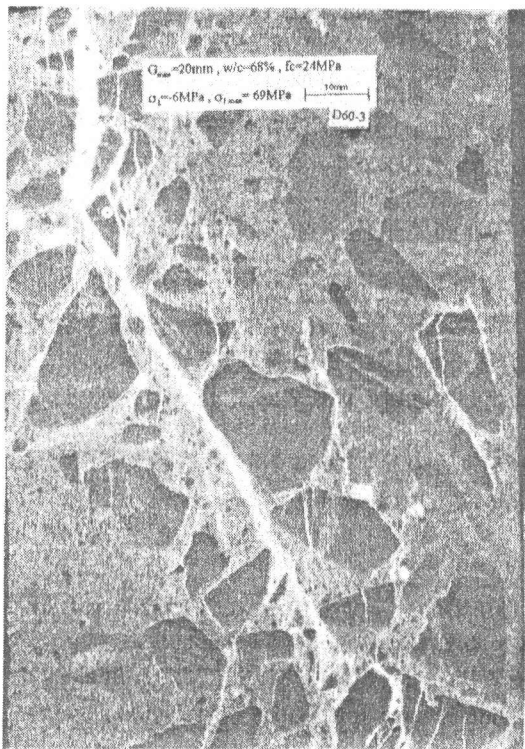
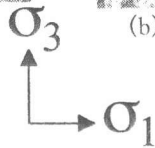
メッシュシートによるひび割れ観察は有効な手段である。しかしながら、滑り面付近の損傷程度を詳細に観察するためには、微細なひび割れの可視化が必要となる。そこで、実験終了後に各実験変数の試験体群に対して1体ずつ蛍光顔料を含有したエポキシ樹脂を低圧力(0.3~0.4MPa)で硬化開始まで持続して圧入した。硬化後に第2面に平行にスライスして、ブラックライトを照射しながら写真撮影をした。写真(a)~(d)に典型的な滑り面付近のひび割れ状況を示す。全体的に微細なひび割れの発生方向は滑り面の発生方向よりも軸圧縮力 $\sigma_3$ の作用方向に近い。圧縮力を受けたコンクリートに生じるひび割れは圧縮力の作用する方向に生じ、それらが斜め方向に連結して滑り面が形成されると解釈できる。これらの観察結果は、Buyukozturkら[4]が示したモデル骨材を用いた実験結果と一致した破壊現象である。写真(a)(b)では、上下に隣接する微細な縦ひび割れが縦方向に連結して形成された各板要素が個々に破壊する、すなわち座屈することによって、試験体が軸方向に縮まる機構を形成する破壊モード(Vタイプ)となる場合がある。そのため、対角にひび割れが1本のみ生じる試験体(Zタイプ)の割合が少なかった。一方、写真(c)(d)の場合では、横拘束により座屈が阻止されるため、微細な縦ひび割れが斜め方向に連結して滑り面が形成され、試験体が軸方向に縮まる機構が成立する(Zタイプ)。コンクリート強度が $f_c=80\text{MPa}$ の場合では、側圧が $\sigma_1 \geq -5.9 \sim -6\text{MPa}$ の範囲では座屈を阻止するために必要な横拘束力に達しなかったため、表-1に示すように全側圧レベルで微細な縦ひび割れが縦方向に連結するVタイプが多く見られた。側圧が $\sigma_1 = -0.2\text{MPa}$ の写真



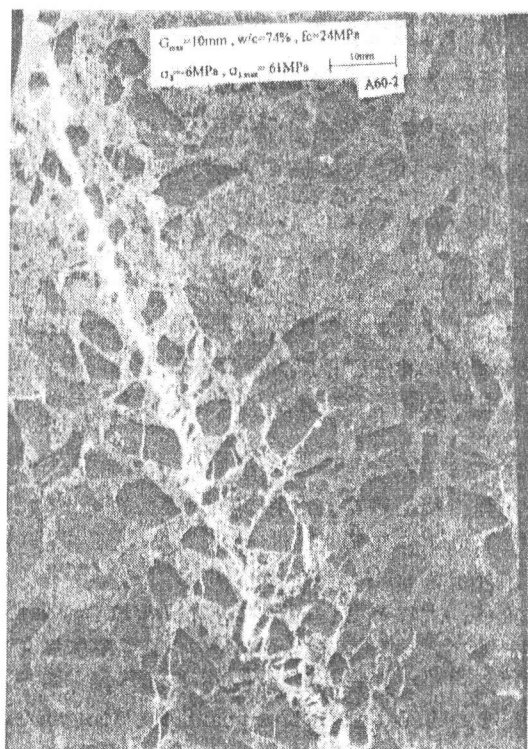
(a)  $G_{max}=20\text{mm}$ ,  $w/c=68\%$ ,  $\sigma_1=-0.2\text{MPa}$



(b)  $G_{max}=13\text{mm}$ ,  $w/c=26\%$ ,  $\sigma_1=-0.2\text{MPa}$



(c)  $G_{max}=20\text{mm}$ ,  $w/c=65\%$ ,  $\sigma_1=-6\text{MPa}$



(d)  $G_{max}=10\text{mm}$ ,  $w/c=74\%$ ,  $\sigma_1=-6\text{MPa}$

写真 可視化によるひび割れの観察



(a)では、滑り面付近の粗骨材周囲にボンドクラックが多く見られる。一方、側圧が $\sigma_1=-6\text{MPa}$ の写真(c)(d)では、滑り面付近の粗骨材周囲でモルタルクラックが多く見られる。これらのボンドクラックとモルタルクラックの発生原因は、以下のように推論できる。滑り面の接線方向変位が増大するにつれて滑り面付近の粗骨材はめり込みながら回転する。そのため、図-5のaの部分すなわち回転によりモルタルと粗骨材が剥離する部分ではボンドクラックが多く見られる。一方、モルタルと粗骨材が密着する部分(図中のb)では、側圧の大きさによって次のように現象が異なる。側圧が $\sigma_1=-6\text{MPa}$ の場合では、写真(c)(d)に示す様に粗骨材はめり込みながら回転するため、モルタルクラックが多く発生している。側圧が $\sigma_1=-0.2\text{MPa}$ の場合や高強度の場合では、写真(a)(b)に示す様に粗骨材の乗りあげが卓越し、めり込みが少なくなるため、モルタルクラックの発生はあまり見られない。以上のように、側圧が $\sigma_1=0\sim-6\text{MPa}$ の範囲では、滑り面付近の損傷範囲の側圧の大きさによる拡大はわずかである。しかし、側圧の増大により、滑り面付近のモルタルクラックの密度が増加している。

## 6. まとめ

2次元的な破壊が再現できる3軸圧縮試験装置を用いて、粗骨材寸法、コンクリート強度、試験体形状を実験変数とした合計193体の3軸圧縮試験を行った。試験装置の改良等によって、対角に1本のひび割れが生じる破壊モードが87%以上の割合で安定して得られるようになった。そして、エポキシ樹脂注入によってひび割れを可視化することにより、ひび割れ性状に関して以下の知見を得た。

- 形状が異なっても滑り面の発生角度はほぼ一定であることを確認した。
- Mohr-Coulombの破壊基準より計算されるひび割れ角度で実際に計測された平均ひび割れ角度をほぼ近似できることを確認した。
- 滑り面は微細な縦ひび割れが斜め方向に連結することによって形成されている。
- 側圧が $\sigma_1=0\sim-6\text{MPa}$ の範囲では、滑り面付近の損傷範囲の側圧の大きさによる拡大はわずかである。しかし、側圧の増大により滑り面付近のモルタルクラックの密度が増加する。

## 謝辞

高圧油圧源システムの開発にあたり、(株)島津製作所より協力を頂きました。エポキシ樹脂注入に際しては、ショーボンド建設株式会社より資材提供を頂きました。実験等に際しては、近畿大学大学院生 西野和弥氏、及び平成5年度卒論生 前田祐司、中沢哲、柳本茂喜氏の協力を得ました。また、大阪大学 中塚信講師より貴重な助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 西野和弥、村上雅英、大谷恭弘、窪田敏行：低側圧3軸圧縮応力を受けるプレーンコンクリートの最大応力以降の破壊性状に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 51-56, 1993. 6
- 2) 村上雅英、大谷恭弘、西野和弥、窪田敏行：低側圧3軸圧縮応力下で生じたひび割れ面のせん断伝達劣化機構のモデル化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 57-62, 1993. 6
- 3) 島津評論刊行委員会：島津評論、島津評論編集部、オーム社、Vol. 50 No. 3 pp. 287-292, Dec. 1993
- 4) Buyukozturk, O., et al.: Stress-Strain Response and Fracture of a Concrete Model in Biaxial Loading, ACI Journal, Aug. 1971, pp. 590-599