

# 超高強度コンクリートのひび割れにおけるせん断力伝達機構

林 静雄

東京工業大学 応用セラミックス研究所

## 1. はじめに

応用セラミックス研究所では、平成18年4月より、セキュアマテリアル研究センターを新設した。極大地震や爆発など偶発的な作用荷重に対する高速破壊現象をも視野に入れた安全で安心な社会を構築することを目的として、材料の観点から研究を行うこととしている。こうした想定外の建築構造物への高速荷重下における材料や構造の応答に関する研究は容易ではない。これらの諸現象を解析する場合、衝撃波の発生や破壊と言った数学的不連続を伴い、材料的な非線形性が顕著に現れる。周期振動の組合せとしての把握が可能な一般振動問題と異なり、解析的手法で理解・表現することが極めて困難で、個々の材料の強さや破壊現象が極めて重要な役割となる。

本研究プロジェクトにおいて、本研究所では、建築構造物の重要な要素である鉄筋コンクリート部材の衝撃応答特性を静的から高速荷重まで幅広い負荷速度域で調べ、実用的な構成則を再評価することから手がけることとした。

ここでは、圧縮強度が通常使用されているコンクリート圧縮強度の3倍以上の $100\text{N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリートの構成則とこれを使用した部材の力学的性状について報告する。衝撃破壊に関する構成則に関する研究は、本年度は、高速飛翔体を衝突させて破壊・回収することができる大型飛翔体発射装置を作成し、その実験準備を行った。次年度では、 $200\text{m/s}$ を越える衝突速度領域での衝撃破壊実験を目標とし、高速衝突に伴う不均質部材のマクロな高速破壊現象を把握することを目標としている。

## 2. 実験の目的

近年、建築物の高層化、大型化、あるいは省資源化を目的として鉄筋やコンクリートの高強度化が進み圧縮強度が $100\text{N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリートを使用した建物も建てられている。しかし、超高強度コンクリートの圧縮特性に関する研究は多いものの、引張特性やひび割れモデルに関する研究は少なく、これを使用した部材の力学的性状は必ずしも明確になっているわけではない。超高強度コンクリートをより一般的に使用するために解明すべきことが残されている。

コンクリートはセメントペースト、細骨材および粗骨材からなる複合材料である。図1に示すように通常強度のコンクリートでは、ひび割れはセメントペーストおよびセメントペーストと粗骨材との界面において発生するが、圧縮強度が $100\text{N/mm}^2$ を超え

る超高強度コンクリートになると粗骨材を貫通するひび割れが発生する。粗骨材が破断するとひび割れ面が平滑になり、ひび割れ間のせん断力伝達能力が損なわれることになる。

ひび割れ面におけるせん断力の伝達は、せん断ひび割れ発生後の鉄筋コンクリート部材の性状に及ぼす影響は大きく、特に、降伏時変形や繰返し履歴特性に及ぼす影響が大きい。

本論は、超高強度コンクリートのひび割れ面の形状とせん断伝達メカニズムについて報告し、さらに部材の復元力特性について考察する。

## 3. ひび割れ面のせん断力伝達に関する実験

### 3.1 実験概要

試験体形状を図2に、コンクリートの調合と圧縮強度を表1に、加力装置を図3に示す。

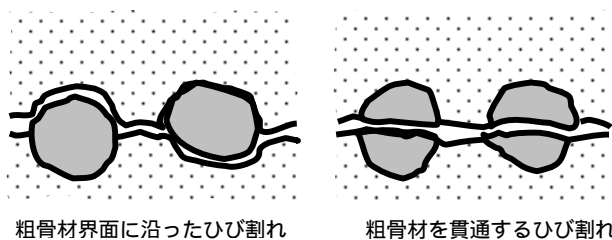


図1 ひび割れ発生のパターン

表1 コンクリートの強度ならびに調合

$F_c$ $\text{N/mm}^2$	$c_B$ $\text{N/mm}^2$	W/B (%)	G (cm)	Flow (cm)	Slump (cm)	Air (%)
130	132	17	20	55	-	1.0
80	79	31	20	-	18	1.6
20	22	55	20	-	18	3.0

$F_c$ :設計基準強度,  $c_B$ :圧縮強度, W:水, B:結合材

G:粗骨材の最大寸法

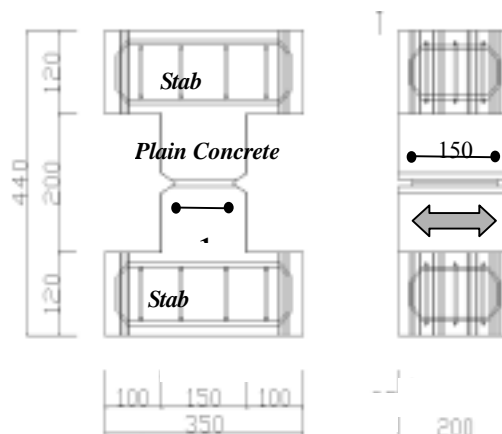


図2 試験体形状

試験体の鉛直方向引張载荷を行い，中央部切り欠き部にひび割れを発生させた後ひび割れ幅を一定に保ちながら，水平方向に交番繰返し载荷を行った。試験体パラメータの一覧を表2に示す。

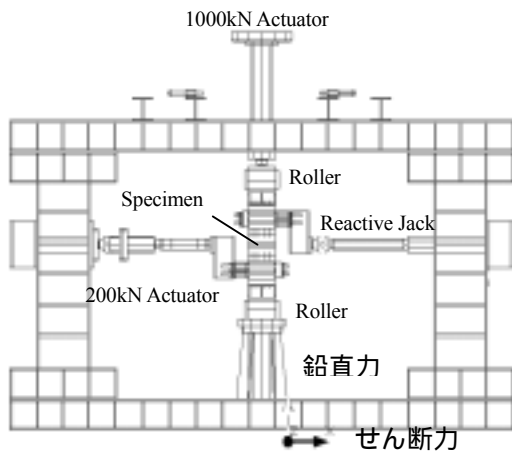


図3 加力装置全景

表2 試験体パラメータの一覧

Fc	引張	ひび割れ幅(mm)		
		0.6	0.8	1.0
130				
80				
20		-		-

### 3.2 引張ひび割れ特性とひび割れ面の粗さ

引張加力時の応力ひずみ関係を図4に示す。引張ひび割れ発生後の応力ひずみ関係を(1)式で近似し，係数Cを記入した。

$$\sigma_t = f_t (\delta_{tu} / \delta_t)^C \quad \dots \dots (1)$$

係数Cはひび割れ発生後の負勾配の傾きを示す指標となり，大きな値ほど応力の開放が急激に進行することを示している。

ひび割れ面の状況を写真1に，ひび割れ面の凹凸測定値とそれから計算したひび割れ表面の法線方向が鉛直面となす角度の分布を図5に示す。

圧縮強度が高強度のものほどひび割れ面が平滑になっている。Fc=20N/mm<sup>2</sup>の場合ひび割れ面の高低差が10mmと最大粗骨材寸法の約半分であるのに対し，Fc=130N/mm<sup>2</sup>の場合は5mmしかなく，骨材が割れていることが分かる。

ひび割れ面表面の法線方向が鉛直面となす角度( )の分布は，接触面密度呼ばれており，ひび割れ面のせん断力伝達能力に大きな影響を及ぼす因子である。普通強度コンクリートについての李・前川モデルでは，接触密度関数として，0.5cos で表されており 本実験結果もほぼ一致している。しかし，

は，高強度になると0°近傍に集中し，±60°を超えるものはほとんどなくなるなど，李・前川モデルでは表現できなくなっている。Fc=130N/mm<sup>2</sup>の場合とFc=80 N/mm<sup>2</sup>の場合でも分布形は異なっており，今後より詳細な検討が必要である。

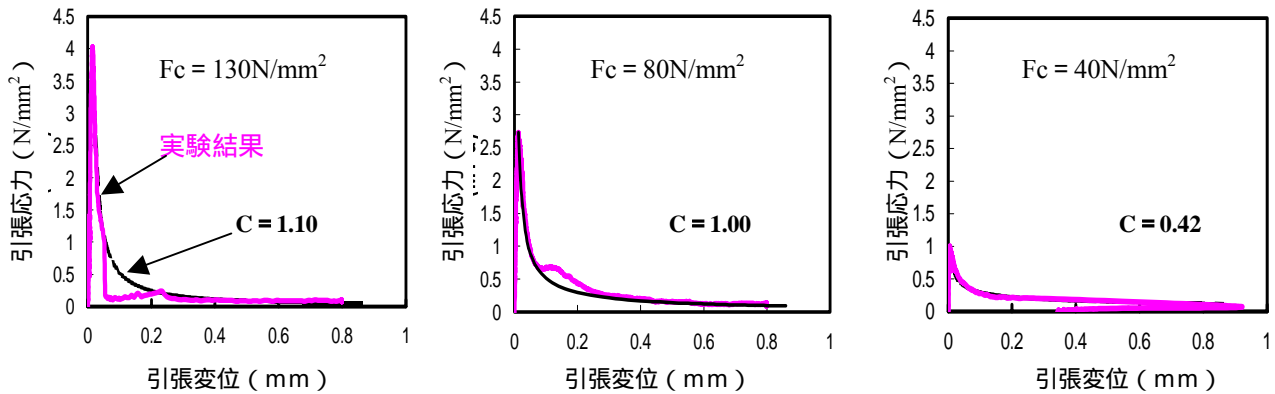


図4 引張応力と引張変位の関係

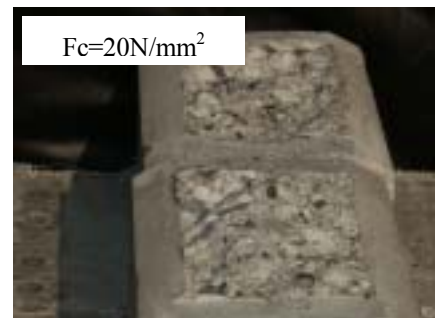
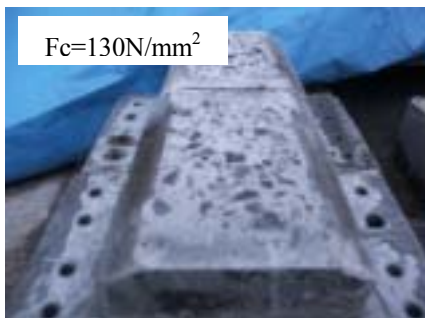


写真1 ひび割れ面形状

### 3.3 ひび割れ面におけるせん断力伝達

ひび割れ幅一定で行った、正負交番繰返しせん断実験によるせん断耐力と水平ずれ変位の関係を図5に示す。図中の実線で  $A=1$  のものは、李・前川モデルによる接触面密度関数 ( $0.5\cos$ ) とし、最大粗骨材径を  $20\text{mm}$  として計算した値である。 $A$  が  $1$  以下のものは、 $A=1$  の計算値を比例して落として計算した数値である。

同じひび割れ幅  $0.8\text{mm}$  で、ひび割れ面でのせん断伝達能力を比較してみると、 $F_c = 20\text{N/mm}^2$  から  $130\text{N/mm}^2$  とコンクリート強度が高くなるにしたがって、せん断伝達能力が低下している。 $F_c = 20\text{N/mm}^2$  の場合、李・前川モデルによる計算値とよく一致しているが、コンクリート強度が  $80\text{N/mm}^2$  の場合には、

李・前川モデルによる計算値の  $40\%$  程度、 $130\text{N/mm}^2$  の場合には、 $20\%$  程度となっている。この低下量は、ひび割れ幅によっても異なり、 $130\text{N/mm}^2$  の場合、ひび割れ幅  $0.6\text{mm}$  では、李・前川モデルによる計算値の  $40\%$  であるが、ひび割れ幅  $0.8\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$  では  $20\%$  から  $30\%$  程度しかない。

また、せん断耐力ずれ関係もコンクリート強度によって異なっており、 $F_c = 80\text{N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートのように、粗骨材にひび割れが発生する場合には、今後さらにひび割れ面伝達モデルの検討が必要である。

## 4 高強度コンクリートを使用した部材の復元力

### 4.1 実験概要

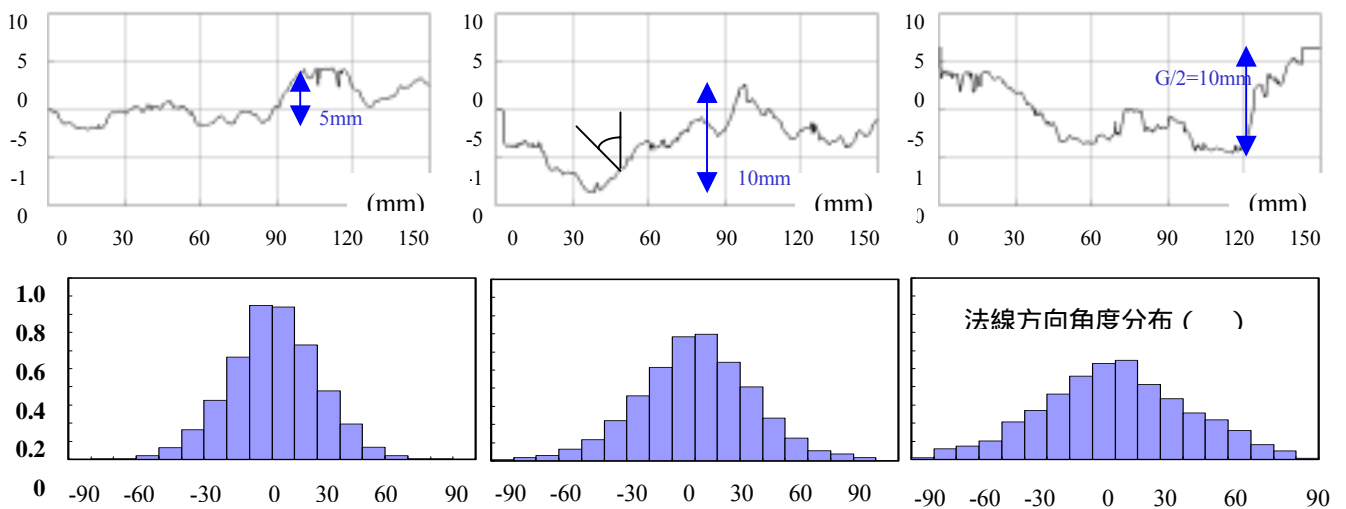


図5 ひび割れ面粗さ

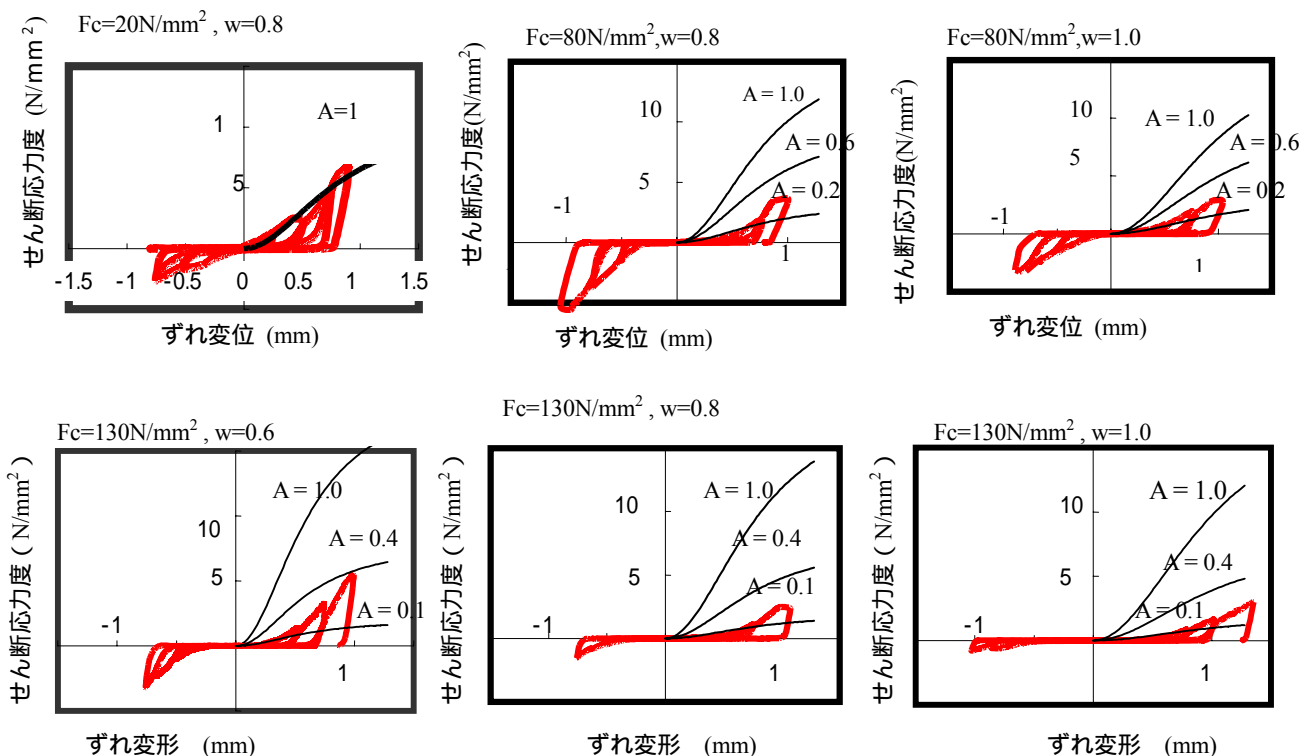


図6 せん断耐力とずれ変形の関係

圧縮強度が  $F_c = 80 \text{ N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートの場合には、ひび割れ面でのせん断伝達機構が通常強度のコンクリートと異なることが明らかとなったが、そのことが部材の性状に及ぼす影響について調べるために実験を行った。試験体一覧を表 3 に、試験体形状と断面形状を図 7 に示す。

使用材料の一覧を表 5 に、加力方法を図 8 に示す。

共通因子としては、断面寸法(200mm×250mm)、試験区間長さ(750mm)、シアスパン比(1.5)、主筋(8-D13)、軸力(0N)である。ひび割れの影響を見ることを主体としたので、軸力は載荷しないこととした。

表 3 試験体一覧

試験体記号	せん断補強筋	
	配筋	せん断補強筋比
No.1	3.5mm@120mm	0.19
No.2	3.5mm@60mm	0.37
No.3	5.0mm@120mm	0.37
No.4	3.5mm@30mm	0.74
No.5	5.0mm@60mm	0.74
No.6	5.0mm@30mm	1.48

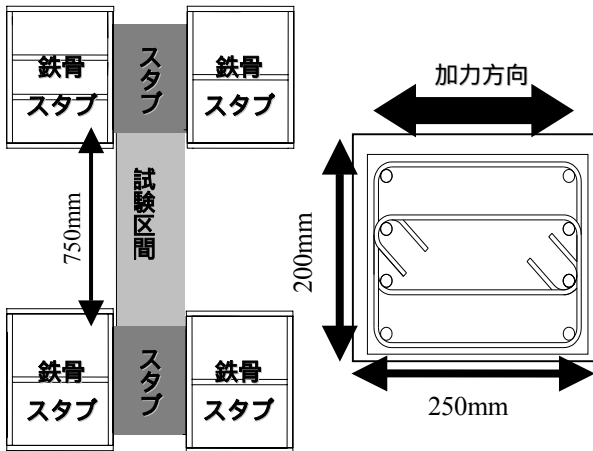


図 7 試験体の断面と形状

表 4 使用材料の力学的性質

鉄筋			
径	降伏強度 $\text{N/mm}^2$	破断強度 $\text{N/mm}^2$	ヤング係数 $\times 10^5 \text{ N/mm}^2$
3.5	1767	1964	1.90
5.0	1740	1933	1.97
D13 (焼入れ)	939	956	1.94
コンクリート			
	圧縮強度 $\text{N/mm}^2$	ヤング係数 $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$	
	125	4.5	

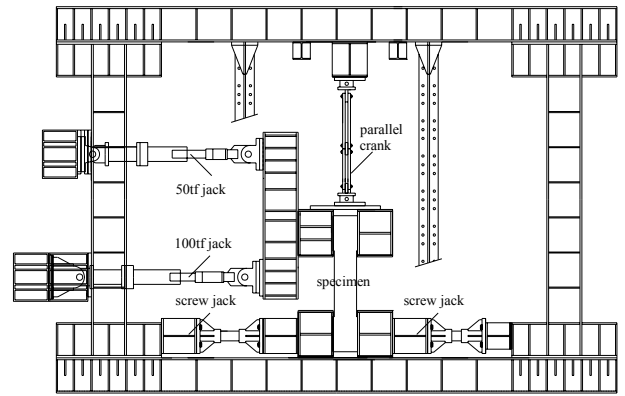
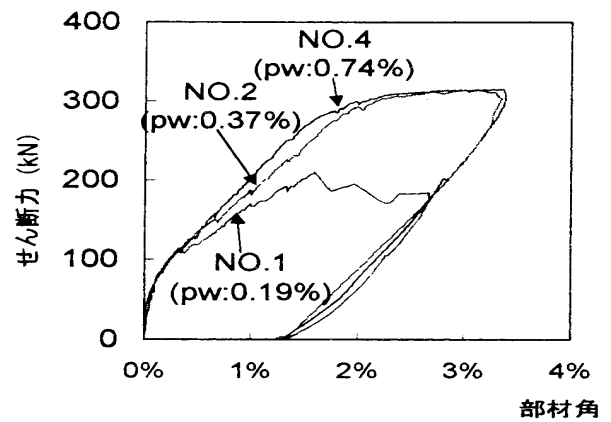


図 8 加力装置全体

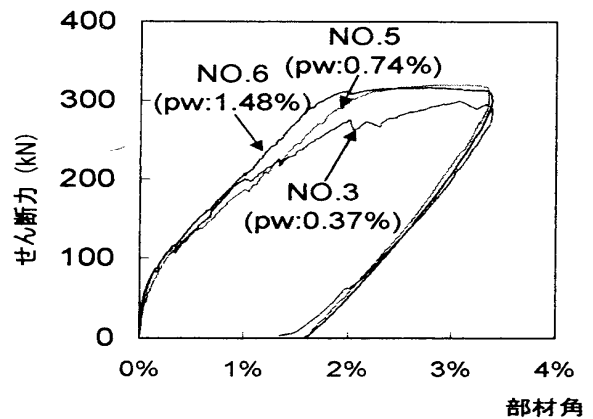
加力は逆対称変形加力とし、下端を固定して、上端を回転しないように 2 台のジャッキでコントロールしながら、せん断力を載荷した。ひび割れ法線方向変位(ひび割れ幅)とひび割れ接線方向変位(ずれ変位)については、マイクロメータスコープを用いて測定した。

#### 4.2 せん断力と変形の関係

せん断力と変形関係の正方向包絡線の比較を図 9 に示す。最もせん断補強筋量の少ない No.1 はせん断破壊した。他の 5 体は曲げ降伏し、大きな変形性能を示した。せん断補強筋量の少ないものは多いもの



(a)  $\phi: 3.5\text{mm}$



(b)  $\phi: 5.0\text{mm}$

図 9 荷重変位関係

に比べて、せん断ひび割れ発生後の剛性低下が大きく、曲げ降伏時の変形が大きい。

曲げ降伏する場合には、曲げ降伏時の変形に及ぼすせん断補強筋量の影響は、普通強度のコンクリートを使用した場合にはほとんど見られない。普通強度コンクリートを使用した場合の降伏時変形推定式は、菅野によって提案されたものが一般的に用いられているが、せん断補強筋量は影響因子に含まれていない。

高強度コンクリートを用いた場合、降伏時変形にせん断補強筋量が影響するのは、ひび割れ面のせん断伝達能力が低下することが原因であると考えられる。せん断補強筋量が多くなると、補強筋の拘束によって、ひび割れ幅が小さくなること、また、せん断補強筋自身のせん断力伝達（ダボ効果）能力も大きくなることにより、ひび割れ面でのせん断力伝達能力が向上するものと考えられる。

せん断ひび割れ幅とせん断ずれの関係を、5.0mmのせん断補強筋を使用した3体について、同一の断面で行ったコンクリート強度  $25\text{N/mm}^2$  でせん断補強筋比 0.37%の例とあわせて、図 10 示す。

最もせん断補強筋量の少ない No.3 は、せん断ひび割れ幅も大きく、せん断ずれも大きい。せん断補強筋量が多くなるほど、最大せん断ひび割れ幅が小さくなるが、同じひび割れ幅で比較してもせん断補強筋量が多いほどせん断ずれが小さくなっている。普通強度試験体の場合、せん断ひび割れ幅が大きくなってもせん断ずれは少ない。高強度コンクリートを

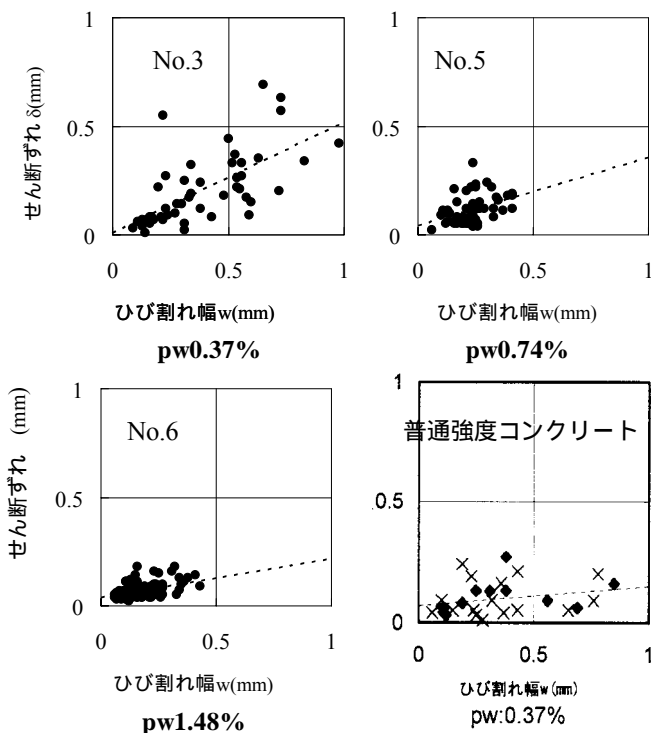


図 10 せん断ひび割れ幅とせん断ずれの関係

使用した場合には、せん断補強筋量 0.74%の場合でも、普通強度でせん断補強筋量が 0.37%のものよりもせん断ずれ量が大きくなっている。

せん断ひび割れ幅は、せん断補強筋量の影響を受けるが、せん断ずれはコンクリート強度（ひび割れ面の平滑さ）の影響を受ける。

曲げ降伏する柱のせん断伝達機構の模式図を図 11 に示す。せん断力は、コンクリート（アーチ効果による材端コンクリートとひび割れ間の骨材の噛み合い）、せん断補強筋、主筋のせん断伝達能力（ダボ効果）によって伝達される。主筋のせん断伝達分は無視できるほど少ないことが分かっている。せん断補強筋のひずみを測定することによってせん断補強筋負担分は計測することができるので、全せん断力からせん断補強筋の負担分を差し引いたものをコンクリート負担分と考えることができる。

曲げ降伏時せん断力の約 1/2 のせん断力時における各試験体のせん断力の負担割合を図 12 に示す。

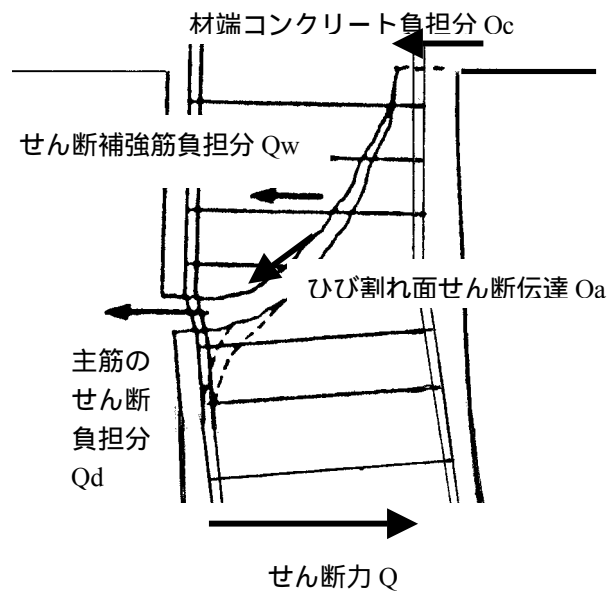


図 11 せん断力伝達機構

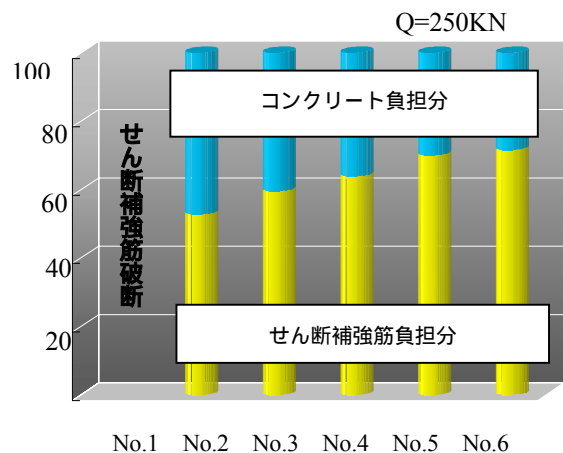


図 12 せん断力の負担割合



せん断補強筋量の多いものほどせん断補強筋の負担分が多くなっているが、せん断補強筋量に比例して大きくなっていない。せん断補強筋量が多くなるほど同一荷重時でのせん断補強筋ひずみが小さいことがわかる。このことは、せん断補強筋量が多いほどひび割れ幅が小さいことを示している。

降伏時変形よりやや小さい変形時での、コンクリート負担分とひび割れ伝達分を図 13 に示す。せん断補強筋量が多くなるほどひび割れ面でのせん断力伝達分が多くなっている。最もせん断補強筋量の多い No.6 はせん断ひび割れ面での伝達の割合が小さい。No.6 はもともとコンクリート負担分が小さいこと、同一変形時では最もせん断力が高いので、ひび割れ伝達せん断力が必ずしも小さいことを示しているわけではないことなどによるものと思われる。

#### 4.3 超高強度コンクリート部材の復元力特性

超高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱の復元力特性について既往の実験例を図 14 に示す。普通強度コンクリートを使用した場合、正荷重時と負荷重時では対称となるのに対し、図に示すように超高強度コンクリートを使用した場合、正負

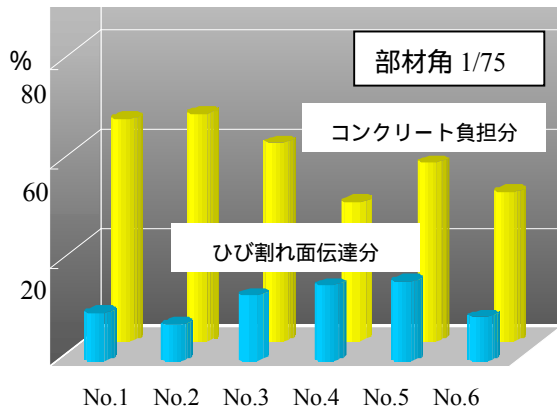


図 13 コンクリート負担分とひび割れ面におけるせん断伝達

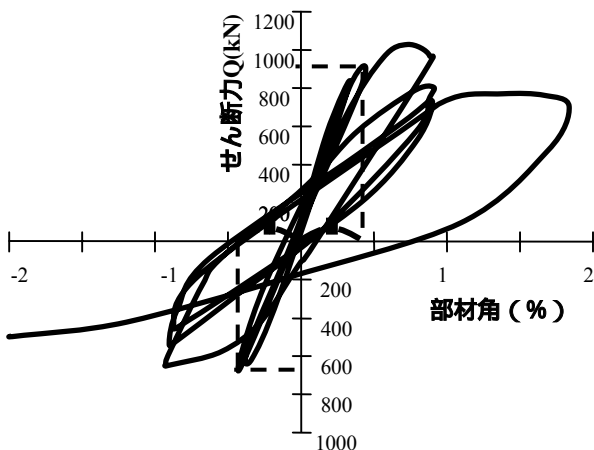


図 14 超高強度コンクリート造部材の復元力

同じ変形時でのせん断力が異なり、正荷重時に比べ負荷重時のせん断力が小さくなることもある。

既往の超高強度コンクリートを使用した部材の実験について、負荷重時せん断力低下係数とせん断補強筋比の関係を図 15 に示す。せん断補強筋量が多くなるほど低下が少なくなっている。

負荷重時せん断力低下係数に及ぼす軸力とせん断補強筋の関係を図 16 に示す。図中に実線で示したように低下係数には、軸力とせん断補強筋比がともに影響を及ぼしている。

これは、ひび割れが閉じたときのひび割れ面でのせん断力伝達メカニズムの違いによるものと思われるが、今回ひび割れが閉じた状態での実験は行っていないので、詳細な検討は今後の課題である。

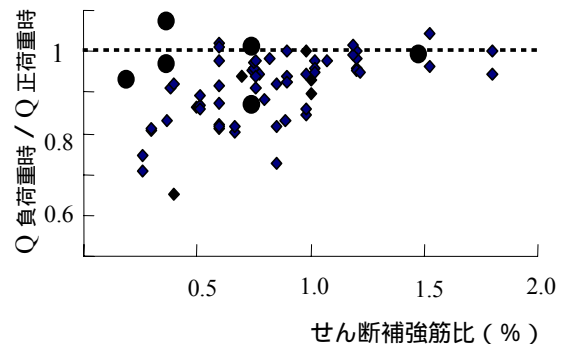


図 15 せん断補強量と非対称性の関係

負荷重時せん断力低下係数  
 0.9 以上  
 0.8 以上 0.9 未満  
 0.8 未満

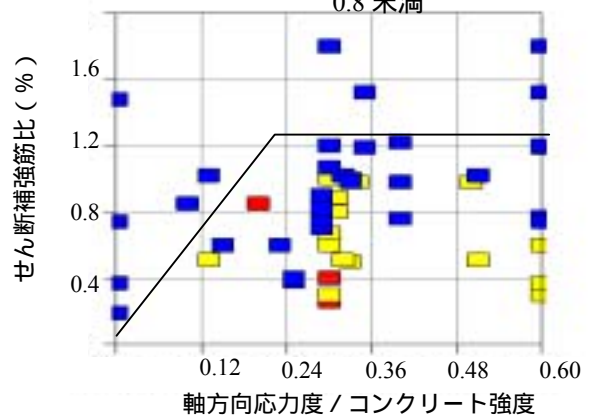


図 16 最小必要せん断補強量の検討

#### 5 まとめ

圧縮強度  $100\text{N/mm}^2$  を超える超高強度コンクリートを使用した場合、ひび割れ面におけるせん断力伝達メカニズムが普通強度のコンクリートを使用した場合とは異なり、そのことが部材の力学的性状に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。

超高強度コンクリートを使用した部材の性状を明らかにするためには、新たなひび割れ面でのせん断力伝達モデルの構築が必要である