

論文 低・中・高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達の性状について

高瀬 裕也^{*1}・和田 俊良^{*2}・上田 正生^{*3}・溝口 光男^{*4}

要旨：本論文では、低強度から高強度までの幅広いコンクリートひび割れ面を対象として、「ひび割れ面高精度制御型せん断加力装置」を用いる際の最適PID制御パラメータ値が同定されている。さらに、本実験シリーズの実験結果と、既報の実験結果を比較・検討して、ひび割れ面のせん断伝達作用の特性について若干の考察が加えられている。

キーワード：コンクリートひび割れ面，せん断伝達，骨材の噛合い，低・中・高強度

1. はじめに

著者らは、コンクリートひび割れ面のせん断伝達機構，即ちせん断方向の変位・応力 - 垂直方向の変位・応力との関係(著者らは、これをせん断ひび割れの基本4量と呼ぶ)を知るために、垂直方向変位を高精度に制御することが可能な「4点(軸)制御せん断加力装置」を開発し、その詳細と基本的なPID自動制御パラメータの同定値を報告¹⁾した。

既報では、圧縮強度40MPa(中強度)のコンクリートのみを対象として検討を行ったが、圧縮強度が増減する場合、せん断伝達のメカニズムも変容することが予想されるため^{2),3)}、当然ながら、制御パラメータ値の更なる吟味・同定が必要となる。

本論文では、新たに低強度(25MPa)と高強度(80MPa)コンクリートを対象としたひび割れ面のせん断応力伝達実験を実施し、既報の中強度の実験結果をも含めて、圧縮強度のグレードの違いがせん断伝達機構に及ぼす影響を検証し、その最適制御パラメータ値を同定する。そして、「せん断ひび割れの基本4量」について若干の検討・考察を試みることにする。

2. 低・高強度コンクリートひび割れ面を自動制御する本せん断加力実験の概要

先述のように、著者らは既報で中強度コンクリートのせん断ひび割れ実験を行なったが、本論文では

この圧縮強度を大きく増減させた2つの実験シリーズを新たに計画した。ここでは、試験体諸元と実験パラメータ、さらに、既報よりも高機能化させた自動計測・制御システムの改善点を解説する。

2.1 ひび割れ試験体詳細と実験パラメータ

図-1に、せん断ひび割れ試験体の諸元寸法を、表-1に実験パラメータ一覧を各々示す。続く表-2には、本試験体に打設した低強度と高強度のコンクリート、合わせて既報の中強度コンクリートの各調合を、表-3にそれらの材料性状を記載する。

図-1より、本試験体の形状は、95mm×160mm×250mmの直方体であり、中央位置に面積7500mm²のひび割れ面が形成されるよう、その4周辺にノッチ(crack start notch)が設けられている。

表-1のとおり、25MPaの低強度と80MPaの高強度コンクリートを本実験対象とし、制御パラメータ値の同定ではPID制御パラメータ⁴⁾の一つ、比例ゲイン(K_p)^{1),4)}を検証する。ここで比例ゲイン(K_p)のみとする理由は、既報の中強度実験の考察より、他の2つの制御変数、即ち積分時間(T_i)と微分時間(T_d)が不要であることが判明しているからである。

本論文の2つの実験シリーズ名称は、圧縮強度(F_c ○○)と比例ゲインPを連記して表示することとし、そして各試験体名は、強度(F_c ○○)と目標の制御ひび割れ幅 ω_0 (W○○と記す)、最後に比例ゲイン値(P○○)を順に連記して表示されている。

*1 北海道大学 大学院工学研究科建築都市空間デザイン専攻博士課程 工修 (正会員)

*2 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究科建築都市空間デザイン専攻教授 工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学 建設システム工学科教授 工博 (正会員)

2.2 自動計測・制御システムの高機能化

本実験システムでは、せん断変位に伴って増減するひび割れ幅を、LabVIEWを用いた自動計測・制御システムによって統御している。これまでの実験シリーズでは、ひび割れ幅一定実験に限定していたため、試験体垂直方向の加力値とひび割れ幅制御のみを自動化するだけで十分であり、その精度の高さは実証済みである。

しかし実際の部材内では、ひび割れが拡幅（繰返し時には、閉合する場合もある）しながらせん断変位が漸増してゆく^{例えば5)}。従って、実部材の挙動に沿ったせん断応力伝達機構を究明に知るには、せん断変位 - ひび割れ幅関係を任意に設定可能とすることが必要である。詰まりは、せん断方向の変位と応力の計測値をひび割れ幅制御に組み込むべく、従前のシステムを高機能化させることにした。この拡張システムの詳細を図 - 2 に示すが、ここでは垂直方向のみの計測点数 8 から、せん断方向も含む 16 点へ増設し、そのサンプリング周期と分解能は、旧システムと全く同一の 12.5Hz と 16bit を維持している。

尚、本実験では、ひび割れ幅を敢えて固定したままにしているが、これは今後のせん断変位とひび割れ幅の任意変動実験に備えて、事前にせん断方向計測値を新システムへ繰込むことによる影響をひび割れ幅一定実験において検証するためである。

3. 低・高強度コンクリートのひび割れ幅を制御するための制御パラメータ値の同定

コンクリートひび割れ面形状は、その強度が低いと粗くなり、強度上昇とともに平滑化することが知られている。従って、強度が高くなるにつれて、ひ

び割れ形成後のせん断伝達機構が変わることが予想されるが、その変容が実験資料から明らかにされたことは少ないようである。

ここでは、低強度 Fc25-P シリーズと高強度 Fc80-P シリーズの「ひび割れ幅 w_0 - せん断変位 δ , せん断応力 τ - せん断すべり変位 δ , せん断応力 τ - 垂直応力 σ の関係」を示し、PID 制御パラメータの比例ゲイン

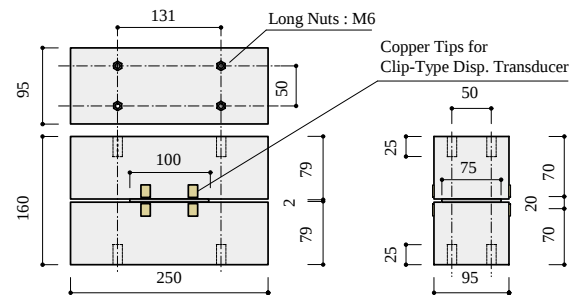


図 - 1 せん断ひび割れ試験体の詳細 (単位 mm)

表 - 1 せん断ひび割れ試験体のパラメータ一覧

Specimen	Series	Control	w_0 (mm)	K_p	T_I	T_D
Fc25W05P40	Fc25-P	Automatic	0.5	40	-	-
Fc25W05P60	Fc25-P	Automatic	0.5	60	-	-
Fc25W05P120	Fc25-P	Automatic	0.5	120	-	-
Fc25W01P60	Fc25-P	Automatic	0.1	60	-	-
Fc25W10P60	Fc25-P	Automatic	1.0	60	-	-
Fc25W10P120	Fc25-P	Automatic	1.0	120	-	-
Fc80W05P40	Fc80-P	Automatic	0.5	40	-	-
Fc80W05P60	Fc80-P	Automatic	0.5	60	-	-
Fc80W05P120	Fc80-P	Automatic	0.5	120	-	-
Fc80W02P60	Fc80-P	Automatic	0.2	60	-	-
Fc80W10P60	Fc80-P	Automatic	1.0	60	-	-
Fc80W10P120	Fc80-P	Automatic	1.0	120	-	-

表 - 2 コンクリートの調査

Serie	W/C (%)	Mix (kg/m ³)				
		Water	Cement	Agg.	Sand	Admix.
25	65.0	168	259	958	899	2.823
40	38.5	176	458	787	880	4.992
80	27.5	165	600	716	891	7.200

w/c : 水セメント比, Agg. : 粗骨材

表 - 3 コンクリートの材料性状

Series	Max. Aggregate	Comp. Strength	Tensile Strength
25	20 mm	26.8 N/mm ²	2.22 N/mm ²
40	20 mm	39.2 N/mm ²	3.22 N/mm ²
80	20 mm	78.1 N/mm ²	4.82 N/mm ²

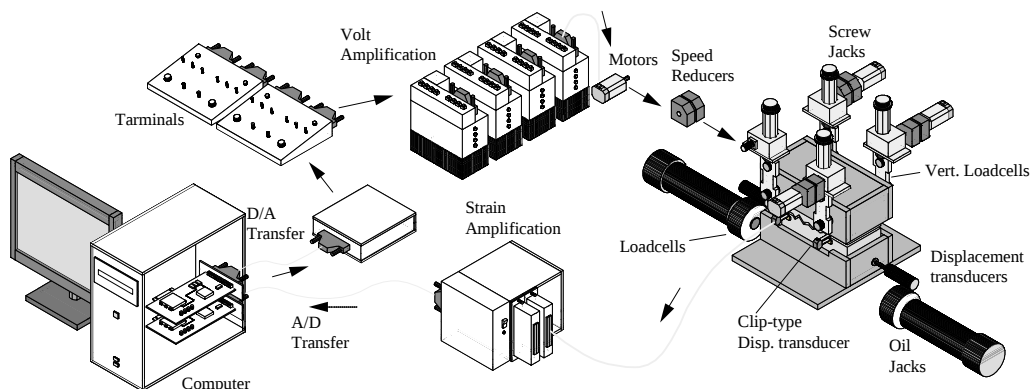


図 - 2 本せん断加力装置における自動計測・制御システムの詳細

K_p 値の同定を試みる。

3.1 低強度 Fc25-P シリーズの実験結果と考察

(1) ひび割れ幅 $\omega_0 = 0.5 \text{ mm}$ の結果

図 - 3 (a) ~ (c) に、Fc25-P シリーズにおいてひび割れ幅 ω_0 を 0.5mm に固定し、比例ゲイン K_p を順に 40, 60, 120 と 3 段階に変動させた試験体、Fc25W05P40, Fc25W05P60 そして Fc25W05P120 の実験結果をそれぞれ示す。

同図中のこれらの 3 体の「ひび割れ幅の推移 (左列図)」と「せん断応力 τ -せん断変位 δ 」(中央図)は全て安定した曲線を示している。しかし「せん断応力 τ -垂直応力 σ 」(右列図)の曲線を見ると、 $K_p=40$ の図 - 3 (a) では、正負両方の加力からその除荷移行時に、乱れた応力変化が観察され、特に、除荷に膨らんだ曲線を描いている。しかし、除荷時の挙動が、せん断ひび割れ伝達機構を比較的精度よく追跡する周知の接触理論^{2),3),6)}に従うとするならば、その除荷曲線は「明確な鋭角の折り返し」形状を示すと考えるのが自然である。

そこで比例ゲイン K_p がより大きな 60 と 120 の場合をみると、図 - 3 (b) の Fc25W05P60 と図 - 3 (c) の Fc25W05P120 の除荷応力曲線に明かなように明瞭な鋭角の折返し点が形成され、比例ゲイン K_p を増大させることによる効果が示されている。

(2) ひび割れ幅 $\omega_0 = 0.1 \text{ mm}$ と 1.0 mm の結果

図 - 4 (a) ~ (c) に Fc25-P シリーズのひび割れ幅 ω_0 を 0.1mm へと小さくし、比例ゲイン K_p を 60 とした Fc25W01P60、次ぎにひび割れ幅を 1.0mm へ大きくし、 $K_p=60$ とした Fc25W10P60 と、そして K_p のみを更に大きくして $K_p=120$ とした場合の Fc25W10P120 の実験結果をそれぞれ示す。

図 - 4 (a) の $\omega_0=0.1\text{mm}$ の Fc25W01P60 は、このシリーズの中で最もひび割れ微小面の噛合いが密着しその応力変動が顕著となるが、比例ゲイン $K_p=60$ の設定が、安定した応力性状を与えている。

これとは逆に、図 - 4 (b) と (c) の $\omega_0=1.0\text{mm}$ とした 2 つの試験体は、ひび割れ微小面の噛合いが最も緩くなる。Fc25W10P60 の同図 (b) より、 $K_p=60$ では τ - σ 性状が局所で微細動している。しかし、 $K_p=120$ と比例制御量を大きく採った同図 (c) の Fc25W10P120

に、安定した応力性状を読み取ることができる。

ここでは、ひび割れ面が粗い低強度コンクリート

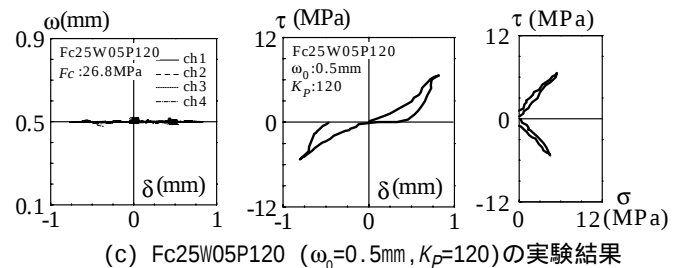
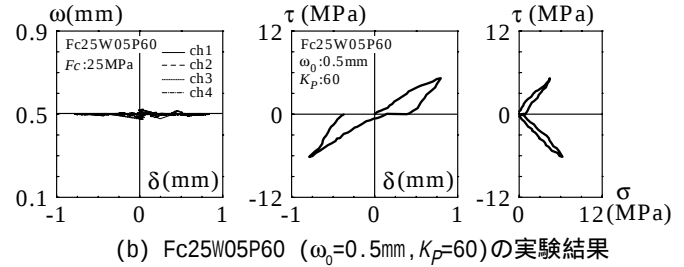
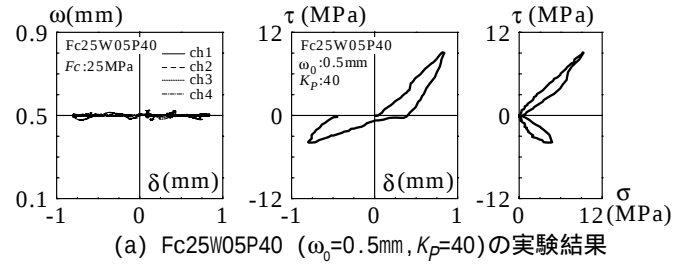


図 - 3 低強度 Fc25-P シリーズ $\omega_0=0.5\text{mm}$ の結果

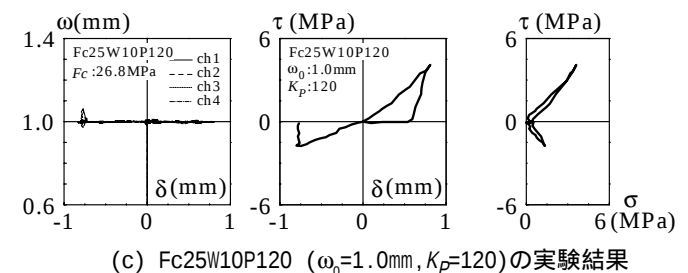
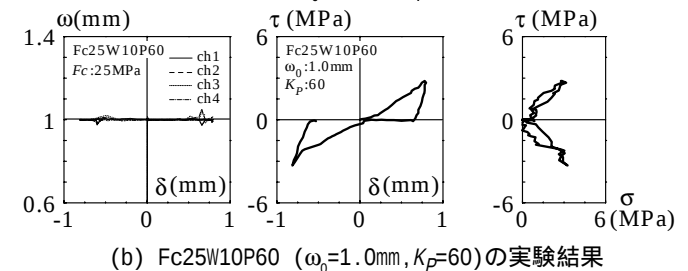
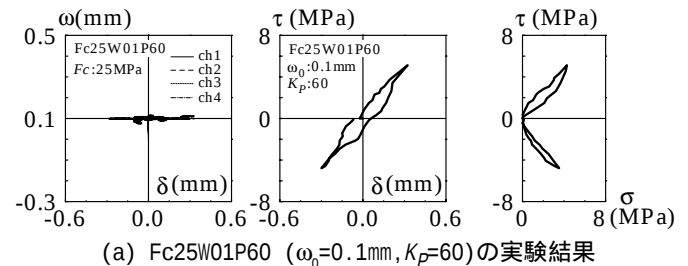


図 - 4 低強度 Fc25-P シリーズ $\omega_0=0.1\text{mm}$ と 1.0mm の結果

試験体を取上げたため、制御動作が的確に追従できない可能性が懸念された。しかし既報の中強度の Fc40-P シリーズと変わらず、比例ゲイン K_p 値を 60 ~ 120 に設定することによって、満足し得る高精度の結果が得られた。この原因は本シリーズの試験体のコンクリート強度が低いため、モルタルの強度と剛性も共に低くて柔らかく、結果として、その制御動作を柔軟にさせたことによるものと考えられる。

3.2 高強度 Fc80-P シリーズの実験結果と考察

(1) ひび割れ幅 $\omega_0 = 0.5$ mm の結果

図 - 5 (a) ~ (c) に高強度 Fc80-P シリーズのひび割れ幅 ω_0 を 0.5mm に固定し、比例ゲイン K_p を 40, 60, 120 と 3 変動させた試験体, Fc80W05P40, Fc80W05P60 及び Fc80W05P120 の実験結果をそれぞれ示す。

これらの 3 試験体の結果では、せん断応力のピーク値やエネルギーの消費量などに若干の相違は見られるものの、ひび割れ幅は目標幅におよそ収束しており、せん断応力と垂直応力の相関にも良好な曲線形状の類似性が認められる。

(2) ひび割れ幅 $\omega_0 = 0.2$ mm と 1.0 mm の結果

図 - 6 (a) ~ (c) に高強度 Fc80-P シリーズのひび割れ幅 ω_0 を 0.2mm と 1.0mm へ増減させ、 K_p を 60 に固定した Fc80W02P60, Fc80W10P60, そしてひび割れ幅 ω_0 を 1.0mm とし、 K_p を 120 とした Fc80W10P120 の実験結果をそれぞれ示す。

まず、ひび割れ幅 $\omega_0 = 0.2$ mm の Fc80W02P60 は、Fc80-P シリーズの中でも、最も骨材やモルタルの噛合いが顕著となるが、図 - 6 (a) のように、 $K_p = 60$ でも良好な実験曲線形状が得られている。

次に、ひび割れ幅が最も大きな $\omega_0 = 1.0$ mm の Fc80W10P60 と Fc80W10P120 の試験体は、コンクリートの高強度化に伴いそのひび割れ面が平滑となる上に、目標ひび割れ幅がかなり大きいため、ひび割れ微小面の接触が不安定となり易い。このため、 $K_p = 60$ の図 - 6 (b) では、先の Fc25W10P60 や Fc40W10P60 のように、 τ - σ 曲線は乱れてしまうが、この K_p を 120 へ増大させると図 - 6 (c) のように、応力性状が明確に読取れるようになる。即ち、この結果からも、ひび割れの拡幅につれて、比例ゲイン K_p の値は大きく設定する必要があることが分る。

本実験は、ひび割れせん断方向の計測値を取り込み、「計測・自動制御点数を増やした新せん断加力システム」を用いて実施されたが、本自動計測・制御

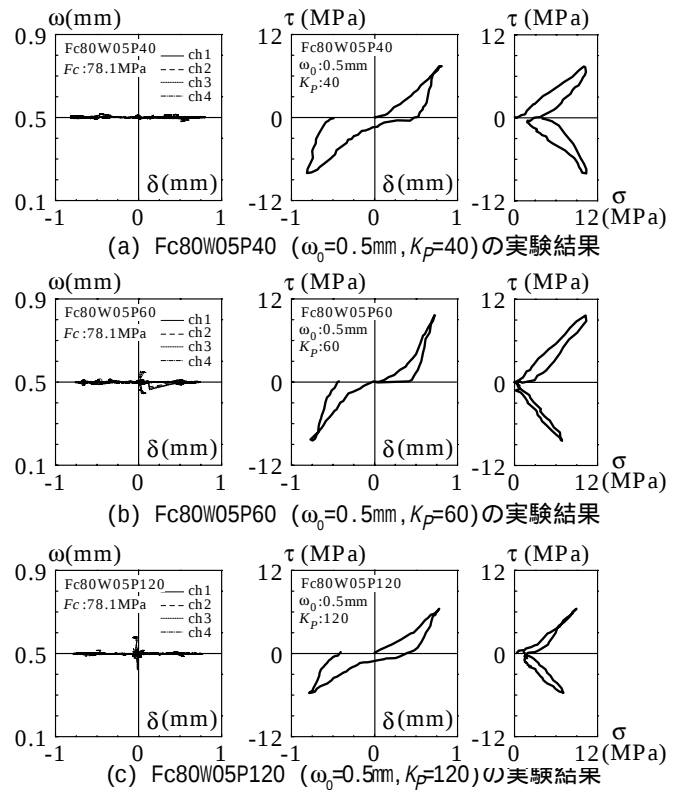


図 - 5 高強度 Fc80-P シリーズ $\omega_0 = 0.5$ mm の結果

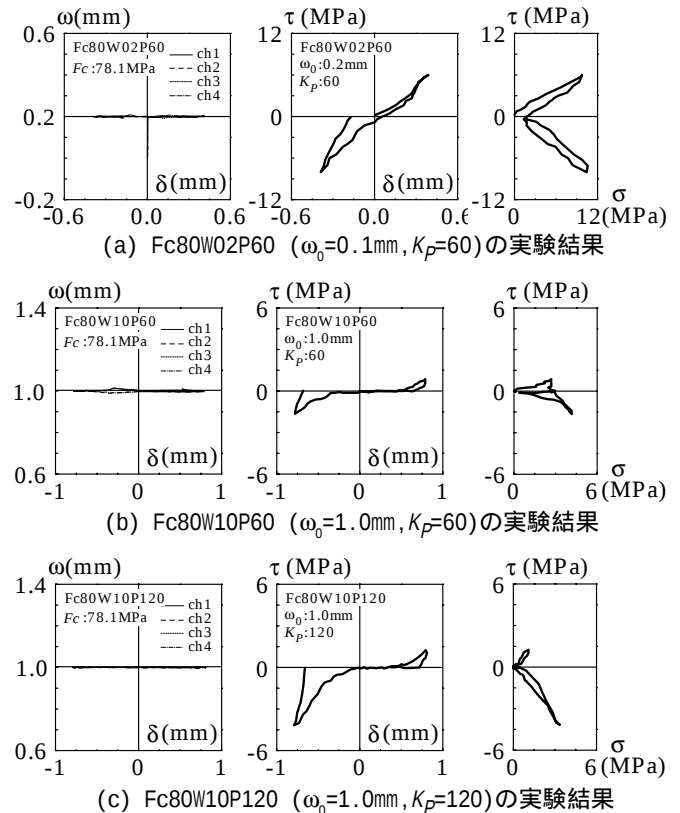


図 - 6 高強度 Fc80-P シリーズ $\omega_0 = 0.1$ mm と 1.0 mm の結果

装置は高機能に稼働し、新システムの精度の高さが実験資料から確かめられた。

4. 低・中・高強度コンクリートひび割れ面のせん断伝達特性の比較

本研究では、全25体（既報¹⁾で13体、本論文で12体）のせん断応力伝達実験を実施したが、これらの中には、圧縮強度のみを異にし、ひび割れ幅、せん断載荷履歴、制御パラメータが同一のものが幾つかある。著者らが知る限りでは、「低強度から高強度までのコンクリートひび割れ面におけるせん断応力伝達性状」が比較可能なものは過去に数体しか見当たらずである。

ここでは紙幅の制約から、コンクリートひび割れ面のせん断伝達の基本性状である「最大せん断応力値 τ_{max} 、初期せん断剛性 K_{ist} 、せん断応力 τ -垂直応力 σ 曲線」のみを取上げて、考察を加えることとする。

4.1 最大せん断応力値の特徴

図-7に、コンクリート圧縮強度 F_c の増減による「せん断応力-せん断変位曲線上の最大せん断応力値 τ_{max} の絶対値とその平均値の推移」を示す。

図-7より、ひび割れ幅 $\omega_0=0.5\text{mm}$ では圧縮強度 F_c 25MPaから40MPaまで、強度上昇に沿って最大せん断応力 τ_{max} も増加するようであるが、その後の圧縮強度40MPa以後から80MPaまで、せん断応力の最大値は略一定である。また、ひび割れ幅が大きな $\omega_0=1.0\text{mm}$ の場合には、いずれの強度でも、その最大せん断応力値の増減の幅は小さいようである。

一般に、圧縮強度 F_c が高くなるに従ってひび割れ微小面の接触剛性や破壊強度は上昇するが、これとは逆に、ひび割れ面の凹凸形状は平滑化に向い、同一ひび割れ変位下でその接触率は減少すると考えられる。

先の図-7の結果は、「圧縮強度 F_c と最大せん断応力値 τ_{max} の間に直接的な相関が希薄であること」を示しており、せん断伝達作用が圧縮強度 F_c のみならず、ひび割れ面形状の相違にも大きく依存していることを物語っていると解釈される。

4.2 初期せん断剛性の特徴

図-8に、各試験体のひび割れ幅 ω_0 と初期せん断

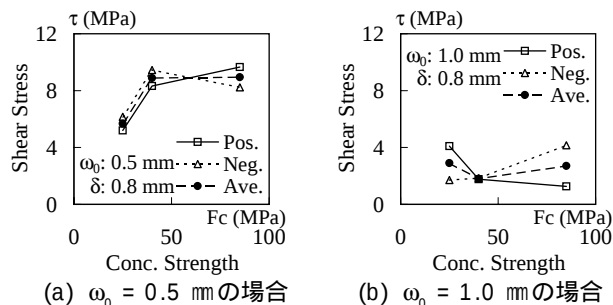


図-7 圧縮強度の違いによる最大せん断応力値の推移

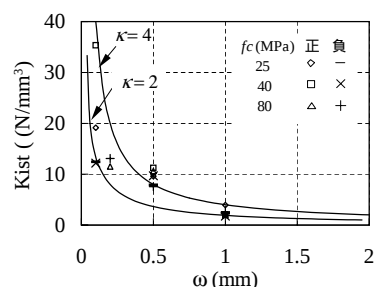


図-8 ひび割れ幅 ω_0 と初期せん断剛性 K_{ist} の関係

剛性 K_{ist} との関係を描画するが、この K_{ist} はせん断応力 τ -せん断変位 δ 曲線における最大せん断応力値 τ_{max} の1/3割線係数として定義されるものである。

図-8より、ひび割れ幅 $\omega_0=0.1\text{mm}$ でおよそ20～50 N/mm²の初期せん断剛性を呈示し、その後 $\omega_0=0.2\text{mm}$ あたりから急激に低減し、 $\omega_0=1.0\text{mm}$ で4MPa程度に収束している。ひび割れ幅が狭小の場合には、圧縮強度 F_c によるバラツキが見られるものの、 $\omega_0=0.2\text{mm}$ 以後にはほぼ同一の値を辿っている。

鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ幅に伴うせん断剛性 K_{ist} の低下は、その配筋量やコンクリートの最大骨材寸法など、様々な要因に依拠する^{例えは7)}とされる。一方で青柳⁸⁾は簡潔に、せん断剛性の低下を、下式(1)のように定数 κ とひび割れ幅 ω_0 のみの双曲線関数として提案している。

$$K_{ist} = \kappa / \omega \quad (1)$$

図-8に式(1)を重ねてプロットしてみたが、圧縮強度 F_c によらずに、定数 $\kappa=2$ が初期せん断剛性の下限値を、 $\kappa=4$ がその中間値を表示し、著者らの初期せん断剛性は、その範囲において、おおよそひび割れ幅 ω_0 による関数で取扱えるようである。

4.3 垂直応力の挙動の推移

図-9に、圧縮強度 F_c とひび割れ幅 ω_0 を異にする9体の試験体が描いた「せん断応力 τ -垂直応力 σ

曲線の単調荷経路の包落部」を示す。

、図-9から知り得るように、各試験体のせん断応力 τ -垂直応力 σ 関係は、「 $F_c=40\text{MPa}$, $\omega_0=0.1\text{mm}$ 」と「 $F_c=80\text{MPa}$, $\omega_0=0.2\text{mm}$ 」の試験体2体を除く他のは、ほぼ同一の経路を辿っており、この性状は篠原ら⁹⁾の実験結果とも一致している。この τ - σ 関係から、ひび割れ幅一定のせん断変位が増大下で、せん断剛性と垂直剛性間に交叉連成効果を読取ることができる。勿論、この資料だけではその定量は望めず、更なる資料が必要であり、今後の課題である。

5. まとめ

本論文では、著者らが開発した4点(軸)制御せん断加力装置を用いて、低・高強度コンクリートを対象として、その制御パラメータである「比例ゲイン K_p の値」を同定した。さらに本実験結果と、報告済みの中強度コンクリートの結果とを合わせて考察を加えた。本論文で得られた知見をまとめると、以下のようである。

- 1) 低強度(25MPa)、中強度(40MPa)から高強度(80MPa)までのコンクリートひび割れ幅を制御するには、比例ゲイン $K_p=60 \sim 120$ の設定によって高精度の実験資料が得られる。
- 2) ひび割れ面のせん断伝達は、その圧縮強度のみならず、ひび割れ面形状にも大きく依拠しており、両者の影響を考慮した構成則モデルの構築が望まれる。
- 3) ひび割れ幅と初期せん断剛性の関係は、双曲線関数によって概ねシミュレートされる。
- 4) ひび割れ面のせん断剛性と垂直剛性の間には、交叉連成効果が認められるようである。

今後、低強度から高強度までのせん断試験体を打設し、本4点(軸)せん断加力装置を用いて、ひび割れ幅とせん断変位を任意に変動させる実験シリーズを実施し、それら資料を適切にシミュレートすることが可能なせん断伝達モデルを提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 高瀬裕也, 佐藤良介, 和田俊良, 上田正生: コン

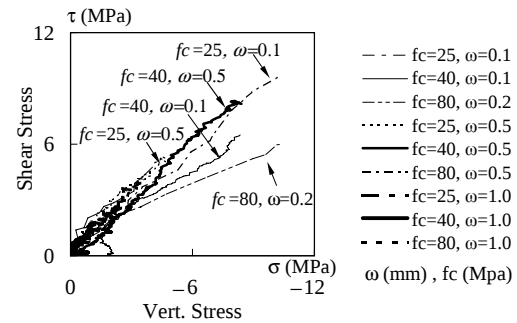


図-9 圧縮強度の違いによる垂直応力の比較

クリートせん断ひび割れのための最適制御実験法の提案 - ひび割れ面高精度制御型せん断加力システムの詳細とPID制御パラメータの同定

その1 - , 日本建築学会構造系論文集, No2, pp.

137-146, 2006.11

- 2) Bujadham Buja: The Universal Model for Transfer across Crack in Concrete, Department of Civil Engineering, The Graduate School of The University of Tokyo, March 1991.
- 3) 長谷川了一, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 100N/mm²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, Vol26, No2, pp. 91~96, 2004.7
- 4) システム制御情報学会編 須田信英 / 著者代表: システム制御情報ライブラリー6 PID制御, 朝倉書店, 1996年4月1日, 第5版
- 5) 田所敏弥, 佐藤靖彦, 上田多門: 斜めひび割れ面のせん断伝達機構と鉄筋コンクリート棒部材の斜め引張破壊, 土木学会論文報告集, No.739号 / V-60, pp. 195~211, 2003.8
- 6) 李宝禄, 前川宏一: 接触面密度関数に基づくコンクリー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
- 7) R.C.Fenwick, Thomas Paulay: Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams, ASCE, Vol. 94, No. ST10, pp. 2325-2350, 1968
- 8) 青柳征夫, 山田一字: 面内力を受けるコンクリートシェル要素の体力変形特性, 土木学会論文報告集, 第331号, pp. 167~180, 1983.3
- 9) 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