室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

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

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 日本コンクリート工学協会 公開日: 2022-03-29 キーワード (Ja): 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 キーワード (En): concrete surface, shear transfer, aggregate interlock, high strength 作成者: 髙瀬, 裕也, 和田, 俊良, 上田, 正生, 溝口, 光男 メールアドレス: 所属: 室蘭工業大学, 室蘭工業大学
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010504

Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007

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・考察を試みることとする。

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（Fc○○）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（Fc○○）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）

NII-Electronic Library Service

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，せん断変位に随伴し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。

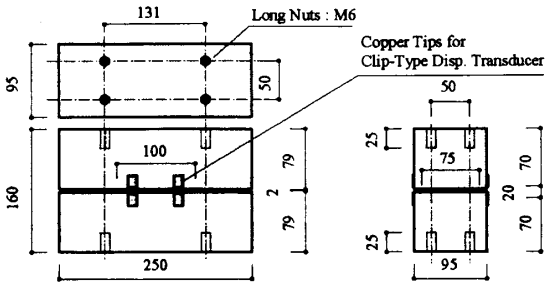
しかし実際の部材内では，ひび割れが拡幅（繰返し時には，閉合する場合もある）しながらせん断変位が漸増してゆく[例えば5)]。従って，実部材の挙動に沿ったせん断応力伝達機構を克明に知るには，せん断変位－ひび割れ幅関係を任意に設定可能とする必要がある。詰まりは，せん断方向の変位と応力の計測値をひび割れ幅制御に組み込むべく，従前のシステムを高機能化させることにした。この拡張システムの詳細を図－2に示すが，ここでは垂直方向のみの計測点数8から，せん断方向も含む16点へ増設し，そのサンプリング周期と分解能は，旧システムと全く同一の12.5Hzと16bitを維持している。

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期されるが，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ω_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ー覧

Specimen	Series	Control	ω_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	-	-

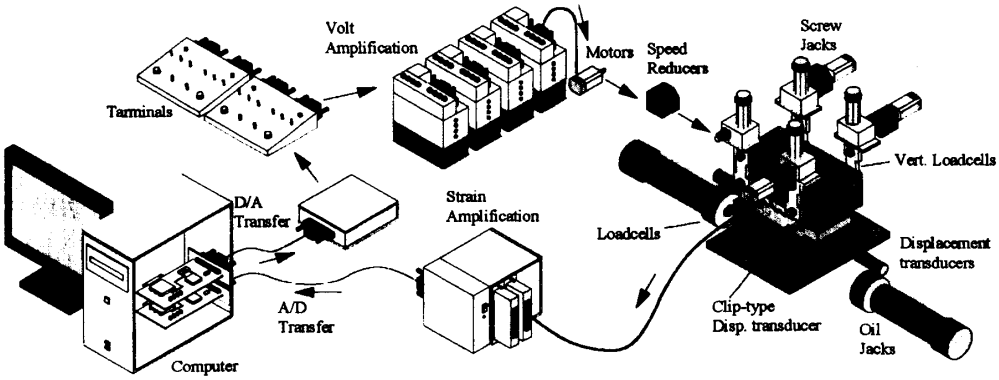
表－2　コンクリートの調合

Serise	W/C (%)	Mix (kg/m³) 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/mm²	2.22 N/mm²
40	20 mm	39.2 N/mm²	3.22 N/mm²
80	20 mm	78.1 N/mm²	4.82 N/mm²



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

NII-Electronic Library Service

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ω_0= 0.5 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ら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。

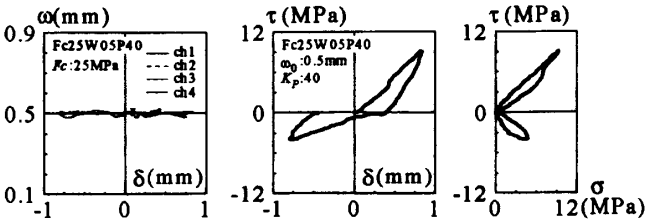
(2) ひび割れ幅ω_0= 0.1 mmと1.0 mmの結果

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。

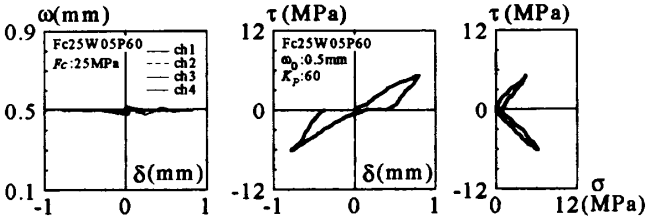
図－4 (a)のω_0=0.1mmのFc25W01P60は，このシリーズの中で最もひび割れ微小面の噛合いが密着しその応力変動が顕著となるが，比例ゲインK_p=60の設定が，安定した応力性状を与えている。

これとは逆に，図－4 (b)と(c)のω_0=1.0mm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。

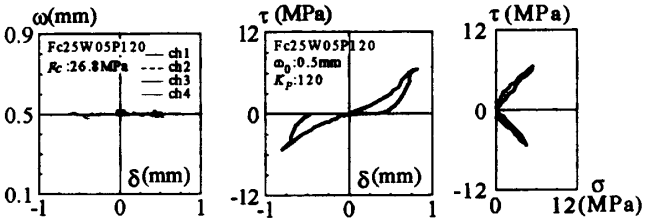
ここでは，ひび割れ面が粗い低強度コンクリート



(a) Fc25W05P40 (ω_0=0.5mm, K_p=40)の実験結果

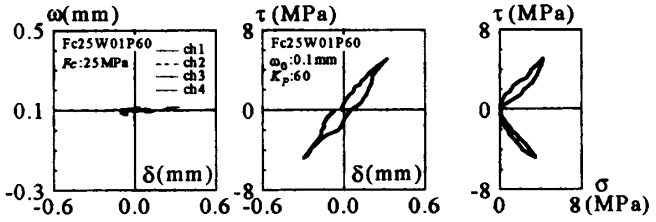


(b) Fc25W05P60 (ω_0=0.5mm, K_p=60)の実験結果

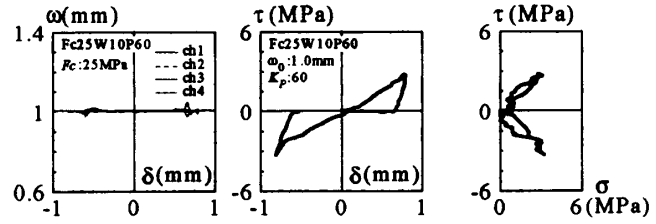


(c) Fc25W05P120 (ω_0=0.5mm, K_p=120)の実験結果

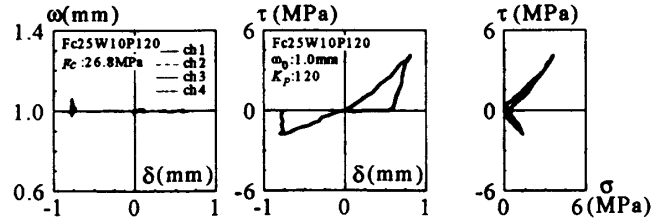
図－3 低強度Fc25-Pシリーズω_0=0.5mmの結果



(a) Fc25W01P60 (ω_0=0.1mm, K_p=60)の実験結果



(b) Fc25W10P60 (ω_0=1.0mm, K_p=60)の実験結果



(c) Fc25W10P120 (ω_0=1.0mm, K_p=120)の実験結果

図－4 低強度Fc25-Pシリーズω_0=0.1mmと1.0mmの結果

NII-Electronic Library Service

試験体を取上げたため，制御動作が的確に追随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ω_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。

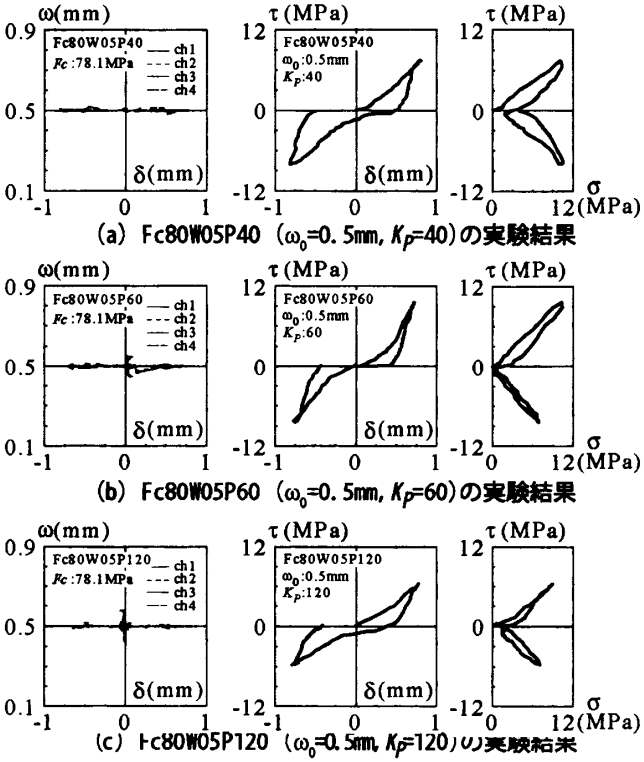
(2) ひび割れ幅ω_0= 0.2 mmと1.0 mmの結果

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。

先ず，ひび割れ幅ω_0=0.2mm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ω_0=1.0mm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

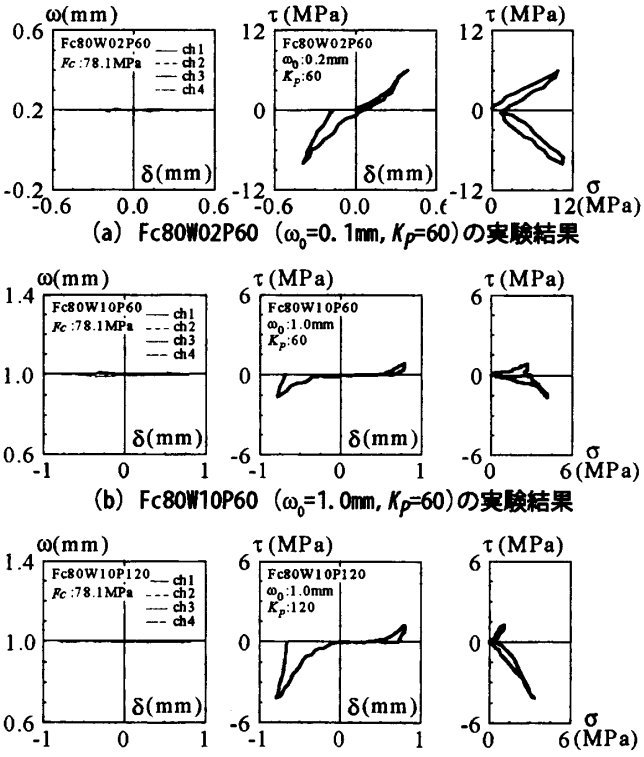


(a) Fc80W05P40 (ω_0=0.5mm, K_p=40)の実験結果

(b) Fc80W05P60 (ω_0=0.5mm, K_p=60)の実験結果

(c) Fc80W05P120 (ω_0=0.5mm, K_p=120)の実験結果

図-5 高強度Fc80-Pシリーズω_0=0.5mmの結果



(a) Fc80W02P60 (ω_0=0.1mm, K_p=60)の実験結果

(b) Fc80W10P60 (ω_0=1.0mm, K_p=60)の実験結果

(c) Fc80W10P120 (ω_0=1.0mm, K_p=120)の実験結果

図-6 高強度Fc80-Pシリーズω_0=0.1mmと1.0mmの結果

NII-Electronic Library Service

装置は高機能に稼動し，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ぬようである。

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Fc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。

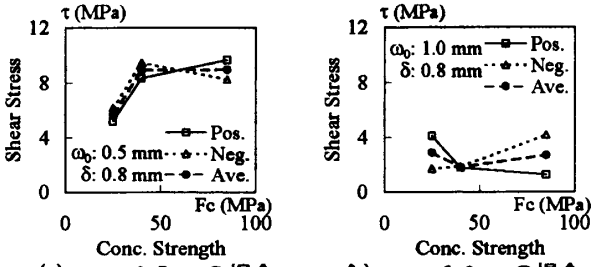
図－7より，ひび割れ幅ω_0=0.5mmでは圧縮強度Fc25MPaから40MPaまで，強度上昇に沿って最大せん断応力τ_{max}も増加するようであるが，その後の圧縮強度40MPa以後から80MPaまで，せん断応力の最大値は略一定である。また，ひび割れ幅が大きなω_0=1.0mmの場合には，いずれの強度でも，その最大せん断応力値の増減の幅は小さいようである。

一般に，圧縮強度Fc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Fc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Fc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。

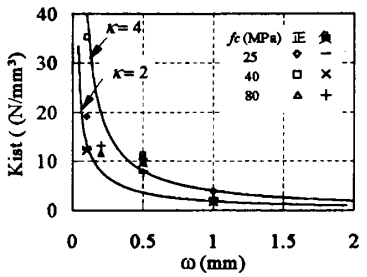
4.2 初期せん断剛性の特徴

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。



(a) ω_0 = 0.5 mmの場合　(b) ω_0 = 1.0 mmの場合

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

図－8より，ひび割れ幅ω_0=0.1mmでおよそ20～50N/mm³の初期せん断剛性を呈示し，その後ω_0=0.2mmあたりから急激に低減し，ω_0=1.0mm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Fcによるバラツキが見られるものの，ω_0=0.2mm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拡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[例えば7]とされる。一方で青柳ら[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。

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

図－8に式（1）を重ねてプロットしてみたが，圧縮強度Fcによらずに，定数κ=2が初期せん断剛性の下限値を，κ=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Fc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

NII-Electronic Library Service

曲線の単調載荷経路の包落部」を示す。

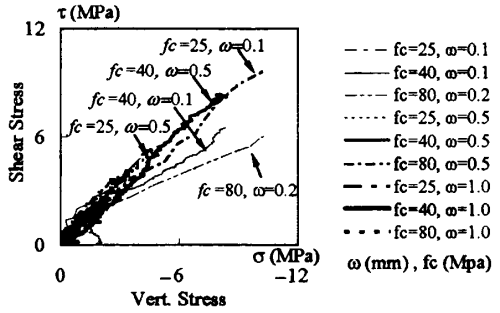
，　図-9から知り得るように，各試験体のせん断応力τ－垂直応力σ関係は，「Fc=40MPa, ω_0=0.1mm」と「Fc=80MPa, ω_0=0.2mm」の試験体２体を除く他のものは，ほぼ同一の経路を辿っており，この性状は篠原ら[9]の実験結果とも一致している。このτ-σ関係から，ひび割れ幅一定のせん断変位が増大下で，せん断剛性と垂直剛性間に交叉連成効果を読取ることができる。勿論，この資料だけではその定量は望めず，更なる資料が必要であり，今後の課題である。

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=60～120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。



図－９　圧縮強度の違いによる垂直応力の比較

参考文献

1) 高瀬裕也，佐藤良介，和田俊良，上田正生：コン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，山田一宇：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

NII-Electronic Library Service