

論文 高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達モデルと実験値との比較

木畑 雅章^{*1}・高瀬 裕也^{*2}・和田 俊良^{*3}・上田 正生^{*4}

要旨:本論文では、高強度コンクリートひび割れ面のせん断伝達挙動を精度良く記述するために、実ひび割れ面の3次元座標値から「2次元粗さ密度 X_s 関数」を初めて同定し、これを李・前川の接触密度モデルに組み込むことにより若干の修整を施した。本修整モデル、Bazantモデル、Bujadhamモデルと本せん断ひび割れ実験結果(せん断ひび割れの基本4量)との比較から、本修正モデルの方が既往のモデルよりも適合性が向上することが確認された。

キーワード:高強度コンクリート, ひび割れ面, 2次元粗さ密度関数, せん断伝達モデル

1. はじめに

近年,60MPaを超える高強度コンクリートが普通に鉄筋コンクリート建築物に使用されるようになった。この高強度コンクリートの圧縮・引張材料特性は周知されているが、ひび割れ形成以後のせん断伝達挙動、即ち、せん断・垂直応力-せん断・垂直変位関係の解明を意図した実験(以下、せん断ひび割れ実験と略称する)資料となると極めて少ないのが現状のようである。

既にBazantによって指摘されているが、ひび割れ面のせん断伝達挙動は鉄筋コンクリート構造の変形能評価にとって極めて重要であり、その数値構成則モデル(以下、せん断伝達モデルと呼ぶ)も幾つか提示されている。しかし、その実験資料不足から数値モデルの検証に限度があったのも事実である。また、高強度コンクリートにおいては、粗骨材が破断するため普通強度の場合よりもひび割れ面が平滑性を帯びる傾向があり、当然、その滑らかさがせん断伝達機構を更に変容させることが予想されるが、これに関する実験資料も殆ど見当らぬようである。

本論文では、高強度コンクリートせん断伝達モデルの主要パラメータである2次元ひび割れ粗さ X_s 関数を測定・分析し、これを広く知られている李・前川モデル³⁾に繰込んで一部修整を施

す。そして、この修整モデルを軸に、李らのモデルから拡張されたBujadhamモデル⁷⁾などと、著者らのせん断伝達実験の結果とを比較・検証し、粗さ X_s 関数の有用性について若干の考察を加える。

2. 高強度コンクリートひび割れ面のせん断伝達実験

本論文では、高強度コンクリートひび割れ面のせん断伝達モデルの適合性を検証する。このために行った本実験プログラムは、1)ひび割れ面の2次元粗さ X_s 関数の測定と2)高精度せん断加力実験で構成される。ここでは、先に、粗さ測定にも使用される本実験システムと試験体の詳細等について解説し、ひび割れ形状分析については後述することとする。

2.1 高強度せん断ひび割れ試験体の概要

著者らは、ひび割れ面の垂直方向変位(以下、ひび割れ幅と称す)を任意に高精度制御可能な「4点(軸)せん断載荷装置¹⁾」を開発した。その詳細やせん断ひび割れ試験体の諸元寸法、自動制御方法は、既報¹⁾で解説済みであるので、ここでは実験概要についてのみ記述する。

せん断ひび割れ試験体と取付け治具の詳細を図-1に示す。図-1より、本試験体は95mm×160mm×250mmの直方体であり、その中央に7500mm²のひび割れ面が形成されるように、4周辺にノッ

*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修士課程 (正会員)

*2 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 修士(工学)(正会員)

*3 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 博士(工学)(正会員)

*4 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専攻教授 博士(工学)(正会員)

チが設けられている。この試験体に同図 - 1 の鋼製キャップを被せて、これを上記の加力装置に装着し、所定の垂直力とせん断力を加える。

2.2 ひび割れ試験体パラメータの設定

せん断ひび割れ実験では、表 - 1 の調合と表 - 2 の材料性状に掲げるように、使用コンクリートは圧縮強度 $f_c=65\text{MPa}$ の高強度コンクリートのみとし、表 - 3 に試験体一覧を掲げる。

表 - 3 より、本実験パラメータは 1) ひび割れ幅と 2) 加力履歴の 2 項である。ひび割れ幅を $0.1\text{mm}, 0.3\text{mm}, 0.5\text{mm}, 1.0\text{mm}$ の 4 段階に変動させ、加力履歴を正負交番 1 サイクル(せん断変位 $\delta: \pm 0.5\text{mm} \sim \pm 1.2\text{mm}$) と片振幅 3 サイクル(せん断変位 $\delta: 0.3\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$) に設定し、亀裂幅一定実験がプログラムされる。この正負交番実験から、ひび割れ幅の違いによる応力や剛性等の変化を検証し、さらに片振幅実験から、ひび割れ接触方向を保持した場合の繰返し効果を追跡する。正負交番加力用に 5 体、片振幅加力用に 3 体、計 8 体の試験体を作製し、その試験体名称は、先頭文字「W」の後の数値がひび割れ幅を、続く「 δ 」の後が最大せん断変位の大きさを意味しており、更にその次の記号「C」に載荷サイクル数を添えて表記している。

3. コンクリートひび割れ面の座標測定・分析と 2 次元ひび割れ粗さ密度 X_s モデルの構築

著者らは、既報²⁾でコンクリートひび割れ面の 2 次元形状分析手法を提案し、ひび割れ微小面の傾きや深さを計測してきた。ここでは、著者らの手法を更に発展させ、ひび割れ面の粗さを記述する「2 次元ひび割れ粗さ密度 X_s 関数」を実ひび割れ面の 3 次元座標値から同定することを試みる。

3.1 ひび割れ面の座標測定システムの組立

従前では、ひび割れ面の 3 次元座標値の測定に「レーザビーム・光切断法」に依拠する計測システムを使用したが、ここ数年来、レーザ変位計のスポットサイズ等が飛躍的に小さくなり、コンクリートひび割れ面の座標値の取得に耐えられる性能を備えるようになった。そこで、著者らは新たに、図 - 2 のレーザ変位計・ひび割れ座標測定シ

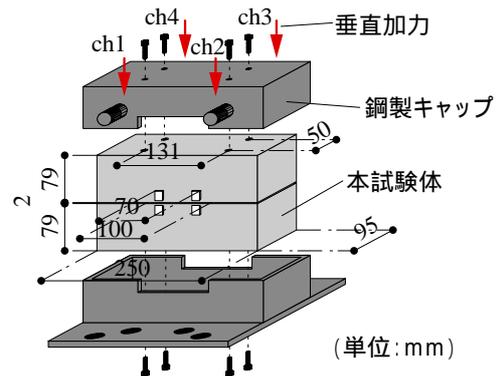


図 - 1 せん断ひび割れ試験体と鋼製キャップの詳細

表 - 1 コンクリートの調合 (65MPa)

W/C (%)	配合(Kg/m ³)				
	水	セメント	粗骨材	細骨材	混和材
31.5	165	524	891	780	7.860

表 - 2 コンクリートの材料特性 (65MPa)

最大骨材寸法 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
20	65.0	3.97

表 - 3 せん断ひび割れ試験体一覧 (65MPa)

試験体名	ひび割れ幅(ω_0)(mm)	載荷履歴(mm)
W01d05C1	0.1	+0.5,-0.5
W03d08C1	0.3	+0.8,-0.8
W05d08C1	0.5	+0.8,-0.8
W10d08C1	1.0	+0.8,-0.8
W10d12C1	1.0	+1.2,-1.2
W03d07C3	0.3	+0.3,+0.5,+0.7
W05d08C3	0.5	+0.4,+0.6,+0.8
W10d12C3	1.0	+0.8,+1.0,+1.2

CCDレーザ変位センサヘッド

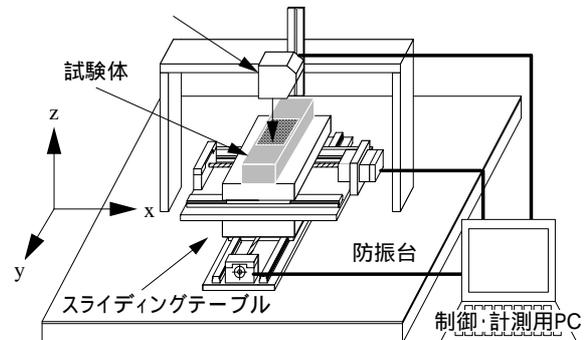


図 - 2 レーザ変位計・ひび割れ座標測定システム

表 - 4 ひび割れ座標測定システムの仕様

機器名	諸性能
スライディングテーブル	0.01mm/pulse
CCDレーザ変位センサヘッド	スポット径: $\phi 70\mu\text{m}$, 分解能: $3\mu\text{m}$

表 - 5 ひび割れ形状測定用コンクリートの調合

試験体シリーズ	W/C (%)	配合(Kg/m ³)				
		水	セメント	粗骨材	細骨材	混和材
F40	42.0	173	412	915	803	4.491
F65	31.5	165	524	891	780	7.860
F80	26.0	165	635	891	686	8.255

表 - 6 ひび割れ形状測定試験体の一覧

試験体名	加力形式	試験体数
F40-01 ~ F40-03	直引張	3
F65-01 ~ F65-03	直引張	3
F80-01 ~ F80-03	直引張	3

ステムを組立てた。

新システムは、図-2のように、防振台に据付けた直交スライディングテーブル上にひび割れ形状分析用の試験体を置き、これを x - y 平面上でコンピュータ自動制御によって等速移動させ、その任意点の高さ座標値 (z 値) を CCD レーザ変位計で直接読取るものである。表-4は本システムのレーザ変位計とスライディングテーブルの仕様を示したものである。

3.2 2次元粗さ分析手法の解説

コンクリート強度の上昇に伴われ、ひび割れ面は平滑に向うが、著者らの既往の研究¹⁾では、中高度コンクリート(37MPa)のみしか分析しておらず、その平滑化の推移には触れていない。本論文では、表-5のように、圧縮強度40,65,80MPaの3種のひび割れ面を2次元分析し、これらの比較から圧縮強度によって変容する形状特性値を評価する。

同表-5中の65MPaのコンクリートは、先のせん断ひび割れ実験と同一材料で、後述の修整モデルに繰込まれる2次元粗さ密度関数の構築のために用意したものである。

コンクリートひび割れは粗面であるがため、単なる相加平均ではその粗さを算定できないばかりか、狭小なひび割れ面積ではその局所の粗さのみが卓越してしまい、肝心の粗さの全容を掌握することができない。著者らは、複数のひび割れ面からその粗さを抽出するために、「ひび割れ基準線と測定参照面の概念」を2次元形状特性分析に導入し、ひび割れ微小面の傾きと深さが連成する「2次元ひび割れ粗さ密度 X_s 関数」を導出することとする。

図-3に、ひび割れ基準線と測定参照面によるひび割れ測定座標値の取扱いを示す。本実験では、先述試験体を本加力装置に装着し、単純引張加力によってひび割れを形成させる。ひび割れの想定位置は試験体中央であるが、試験体ごとに僅かなズレが生じる。この位置補正は、図-3のように、ひび割れ基準線を用いた測定座標値の測定参照面への移動によって処理し、これより複数ひび割れ面からの粗さが算定可能となる。

表-7 ひび割れ形状測定用コンクリートの材料性状

試験体シリーズ	最大骨材寸法 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
F40	20	40.1	2.61
F65	20	65.0	3.97
F80	20	79.7	5.02

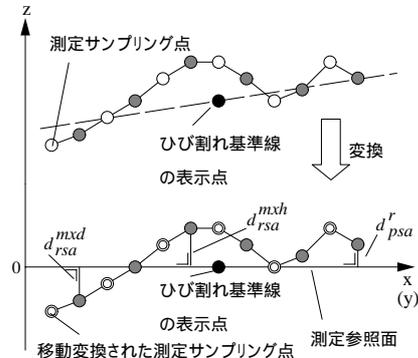


図-3 測定参照面座標系でのひび割れ面の取扱い

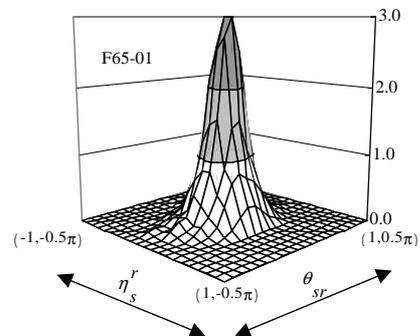


図-4 x 軸方向の粗さ密度分布 X_s^r の一例

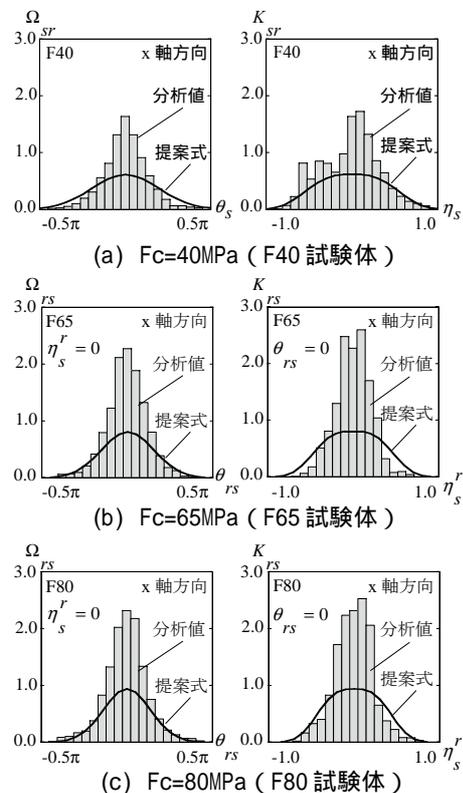


図-5 粗さ密度 X_s^r 関数から特定された傾斜密度分布 Ω と深さ密度分布 K_{rs}

前川らのせん断伝達モデル³⁾を例に挙げて、ひび割れ微小面の接触に粗さの概念が導入されたことはなく、その傾斜角や理想化形状が組み込まれている。著者らは、ひび割れ微小面の傾斜だけではなくその深さも加えた「粗さ」こそが、せん断伝達モデルの適合性を向上させると推察しており、特に、強度の相違によってひび割れ形状が異なる場合には、粗さが有効に機能すると考えている。

そこで本分析では、ひび割れ微小面の傾きと無次元化深さを連成させる「2次元粗さ密度 X'_s 関数」を定式化する。その詳細は文献⁴⁾に譲るが、測定参照面の X'_s を式(1)で、無次元化深さ η'_s を式(2)で表示する。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 X'_s(\theta_{rs}, \eta'_s) d\eta'_s d\theta_{rs} = 1 \quad (1)$$

$$\eta'_s = 2(d_{rs}^r - d_{rs}^{mxh}) / (d_{rs}^{mxh} - d_{rs}^{mxd}) + 1 \quad (2)$$

ここに θ_{rs} はひび割れ微小面の傾斜角、 d_{rs}^{mxd} は最高深さ、 d_{rs}^{mxh} は最高高さである。

3.4 2次元ひび割れ粗さ密度 X'_s モデルの構築

表-6にひび割れ形状測定のための試験体一覧を、表-7にそのコンクリートの材料性状一覧を掲げる。2次元ひび割れ粗さ密度 X'_s 分布(以下、粗さ密度 X'_s と略称する)を同定するための試験体は、先に述べたとおり、せん断ひび割れ試験体と同一である。その強度のみを変えて各3体を作成し、単純引張によってひび割れを誘発させて、その後、図-2の測定システムを用いてひび割れ座標値が取得される。

図-4に、x軸方向の「粗さ密度 X'_s 分布」の一例を、図-5に粗さ密度分布から定められた $\eta'_s=0$ の傾斜密度分布 Ω_{rs} 、及び $\theta_{rs}=0$ における深さ密度分布 K_{rs} をそれぞれ示す。図-4より、粗さ密度分布において、ひび割れ微小面の傾きと深さは互いに独立してはならず、連成していることが確認される。また図-5より、65,80MPaの高強度コンクリートでは、傾斜角 $\theta_{rs}=0$ radと $\eta'_s=0$ の近傍に密度が卓越し、そこに平坦な微小凹凸が集中していることが読み取れる。即ち、強度の上昇に伴うひび割れ面の平滑化が、本数値資料によって実証されたことになる。これらの分析結果を基に、粗さ密度 $X'_s(\theta_{rs}, \eta'_s)$ 関数を

圧縮強度 fc を変数とする式(3)で、その傾斜密度 Ω_{rs} 関数を式(4)とし、深さ密度 K_{rs} 関数を式(5)を用い、それらの係数は式(6)と式(7)である。図-5に示した Ω_{rs} 、及び K_{rs} はこの式(4)と式(5)に基づくものである。

$$X'_s(\theta_{rs}, \eta'_s) = \Omega_{rs}(\theta_{rs}) K_{rs}(\eta'_s) \quad (3)$$

$$\Omega_{rs} = A \exp(B(\theta_{rs})^2) \quad (4)$$

$$K_{rs} = A \exp(C|\eta'_s|^3) \quad (5)$$

$$A = 2.34(0.10 \times 10^{-4} fc^2 + 0.20 \times 10^{-3} fc + 0.30) \cdot 0.20 fc^{0.38} \quad (6)$$

$$B = -fc/30, C = -fc/10 \quad (7)$$

4. ひび割れ面のせん断伝達を記述する李・前川モデルの修整と本実験結果との比較

Fennstra⁵⁾は、ひび割れ面のせん断伝達モデルを、「実験経験モデル」と「物理モデル」に2分類した。前者は、Bazant⁶⁾に代表されるように、実験計測されたひび割れ面のせん断応力-せん断変位を数学モデル化し、これを基本関数に据えて、他の垂直応力や亀裂幅との関係を導出するモデルである。後者は、李・前川の接触密度モデル³⁾とBujadhamの一般化接触密度モデル⁷⁾として知られているもので、実ひび割れの形状モデルによって微小面の接触率を算定し、その降伏塑性状態の総和応力から、「せん断ひび割れの基本4量」をシミュレートするモデルである。

本4節では、2次元粗さ密度 X'_s 関数を李・前川の接触密度モデルに組込んだ修整モデルを作成する。そして、上記の1)Bazantモデル、2)Bujadhamモデルと3)修整李・前川モデルと著者ら自身の実験結果とを比較し、各モデルの適合性の範囲を調べてみることにする。

4.1 接触密度型モデルへの粗さ密度関数の導入

著者らは既に、実ひび割れ面の「粗さ密度 X'_s 分布」から、傾斜密度分布と深さ密度分布が連成していることを実証した。この深さの変化が、せん断応力伝達時の接触や応力に寄与すると見做し、以下のように修整モデルを構築する。

まず、接触変位 $\omega_{(\theta_s, \eta_s)}$ として無次元化深さ η_s を乗じる式(8)を提案し、この接触量から式(9)の微小面の接触応力 Z' を式(10)と式(11)を用

いて求めることとする。

$$\omega_{(\theta_s, \eta_s)} = \eta_s (\delta \sin \theta_s - \omega \cos \theta_s) \quad (8)$$

$$Z' = R \cdot K \cdot (\omega_{(\theta_s, \eta_s)} - \omega_{(\theta_s, \eta_s)P}) \cdot X_s(\theta_s, \eta_s) \quad (9)$$

$$R = 435.95 \cdot f_c^{1/3} \text{ (MPa/mm)} \quad (10)$$

$$K = 15.5 \cdot \eta_s \omega^{0.5} (1 - \omega/3) \quad (11)$$

ひび割れ面のせん断応力 τ と垂直応力 σ は、上記の接触応力 Z' を傾斜角 θ_s と深さ密度 η_s の二重積分を取って、それぞれ式(12)と式(13)として導出される。

$$\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 Z' \sin \theta \, d\theta d\eta \quad (12)$$

$$\sigma = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 Z' \cos \theta \, d\theta d\eta \quad (13)$$

4.2 Bazant の分数関数モデルの検証

図 - 6 に、「実験経験モデル」である Bazant の分数関数モデルを用いて、正負交番と片振幅繰返しの本せん断伝達実験値を解析した結果を示すが、Bazant のモデルはひび割れ面の応力包落曲線のみを算定し、除荷や繰返し挙動は除外されているので、応力の正值領域のみを掲げている。同図 - 6 を一見すると、実験経験モデルが高強度のひび割れせん断伝達値と乖離していることは明らかである。この乖離の理由は、この種のモデルが実ひび割れ形状を模擬しておらず、このことが実際のひび割れ微小面の接触応力状態に齟齬を生じせしめたためと考えられる。

4.3 修整李・前川接触密度モデルの検証

上記の実験経験モデルの検証から、ひび割れ面の形状特性の評価の重要性が示されたように思われる。ここでは、ひび割れ微小面の傾きのみが取扱われている「Bujadham の一般化接触密度モデル」と著者らの「2次元粗さ密度 X_s 関数」によってその深さの効果も考慮された「修整李・前川モデル」の適合性について検証を加える。

(1) 正負交番実験結果との比較

図 - 7 に、Bujadham モデル、修整李・前川モデルと正負交番 1 サイクルの実験結果を比較する。尚、図 - 7 左側の ω - δ 曲線中の「ch」は、図 - 1 の試験体図に記した垂直加力位置を意味する。

図 - 7 (a) のひび割れ幅 $\omega_0=0.1\text{mm}$ と図 - 7 (b) の $\omega_0=0.3\text{mm}$ の試験体について、本修整モデルは、

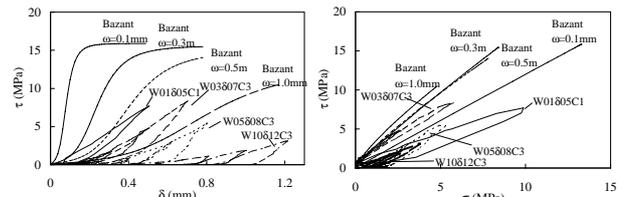
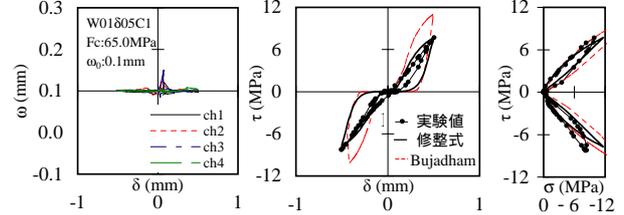
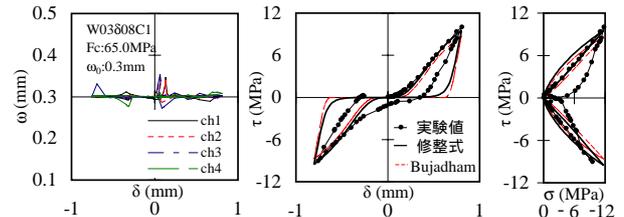


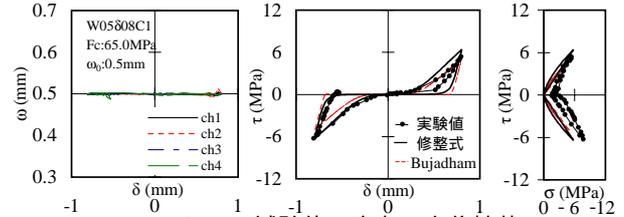
図 - 6 Bazant モデルと本実験値との比較



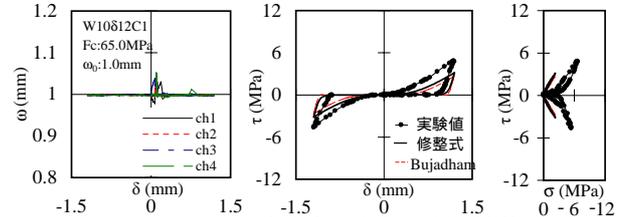
(a) W01805C1 試験体の応力 変位性状



(b) W03808C1 試験体の応力 変位性状



(c) W05808C1 試験体の応力 変位性状



(d) W10812C1 試験体の応力 変位性状

図 - 7 修整李・前川モデルと正負交番実験との比較

Bujadham モデルよりもせん断応力 τ の値を精度よく解析し、除荷曲線を実験値に幾分近づけている。ひび割れ幅を 0.8mm と 1.0mm と大きくした図 - 7 (c) と (d) では、両モデルともせん断応力 τ と垂直応力 σ の実験値を小さく評価し、せん断 τ -垂直応力 σ の交叉連成効果について改良すべき点があることが分かる。

(2) 片振幅繰返し実験結果との比較

続いて図 - 8 に、片振幅繰返しの加力履歴下での Bujadham モデルと修整モデルの解析値と実験値の比較を示す。図 - 8 (a) ~ (c) は、ひび割れ幅 ω_0 を順次 0.3mm , 0.5mm , 1.0mm と 3 段階に固定し、その载荷 - 除荷の繰返し挙動について調べてお

り、両モデルとも、3体の試験体のせん断応力 τ -せん断変位 δ 曲線を良好に追跡している。また、その除荷時を詳細に観ると、本修正モデルの方が幾分適合しているようである。応力 τ - σ 曲線に関しては、図-8(b)の $\omega_0=0.3\text{mm}$ の場合では、垂直応力 σ をやや大きく、よりひび割れ幅を大きく設定した図-8(c)の $\omega_0=1.0\text{mm}$ の場合では、垂直応力 σ をやや小さく算定している。

本論文では、Bujadhamモデル、修整李・前川モデルと圧縮強度を65MPaとした高強度コンクリートのひび割れせん断伝達実験値とを比較した。本修正モデルの特徴として、除荷時の τ - δ 曲線の勾配を緩やかにしてその残留変位を小さくし、幾分、本実験曲線に近づくようである。しかし、適合性にまだ一部不十分な箇所があり、今後の改良に余地を残している。

5. まとめ

本論文では、高強度コンクリート(65MPa)のひび割れ面から分析した「2次元粗さ密度 X_s 関数」を李・前川のせん断伝達モデルに組み込み、その修正モデルを導出した。Bazantの分数関数モデル、Bujadhamモデル、本修正モデルと著者らの実験結果とを比較・検証から、得られた知見は以下に要約される。

- 1) 40, 65, 80MPaのひび割れ面の2次元粗さ密度 X_s 分布から、65MPaを越えると、ひび割れの傾斜角と凹凸の起伏が小さくなり、ひび割れ形状が平滑化される。
- 2) ひび割れ面形状を考慮しないBazantモデルは、高強度ひび割れ面のせん断伝達挙動に追随しない。
- 3) 粗さ密度 X_s 関数を組込んで修整した李・前川モデルの適合性の一部について、向上が確認された。

今後、低強度から高強度までのコンクリートを対象として、せん断加力時の境界条件を種々設定した実験を実施し、その実験資料から、ひび割れ面の粗さを組込んだせん断伝達モデルを構築して行きたいと考えている。

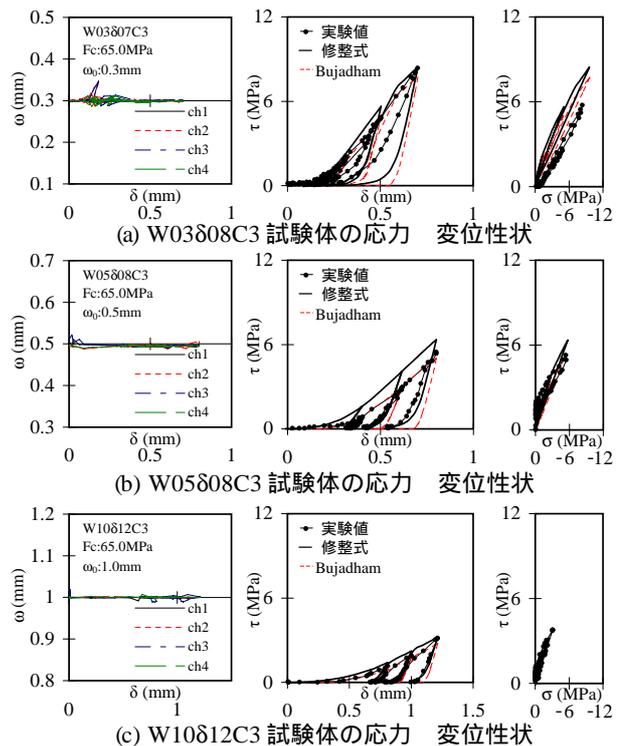


図-8 修整李・前川モデルと片振実験値との比較

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P I D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) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定の開発とデータの2次元分析手法の提案 - コンクリート亀裂面の形状分析に関する基礎的研究(その1) -, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.179~188, 1996.12
- 3) 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
- 4) 和田俊良, 佐藤龍司, 上田正生, 佐藤良介, 大石哲也: コンクリート亀裂面の粗さ密度2次元分析手法の提案, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.72, pp. 83~86, 2002.6
- 5) Feenstra, P.H, de Borst, R. and Rots, J.G.: Numerical Study on Crack Dilatancy I: Models and Stability Analysis, J. of the Engineering Mechanics Division, SCE, Vol.117, No.4, 1991.4.
- 6) Z.P. Bazant, P. Gambarova: Rough Cracks in Reinforced Concrete, ASCE, Vol. 106, No. ST4, pp. 819-842, 1980
- 7) 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.