

# 論文 HFRCC の材料構成モデルの構築と一面せん断実験に対する数値解析による検証

古城 拓哉\*1・佐藤 裕一\*2・金子 佳生\*3

**要旨:** ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料(HFRCC)に対して、曲げ、割裂、圧縮試験を行い、引張側および圧縮側の材料構成モデルを構築した。モデルの妥当性を検証するため、一面せん断実験を実施し、同実験に対して、既往研究に基づくせん断破壊力学モデルを用いた解析、および非線形有限要素解析を行った。せん断破壊力学モデルを用いた解析においては、想定した損傷領域幅および構築した材料構成モデルを導入することで、最大耐力とその時の変位を適切に評価できることを確認した。また、材料構成モデルを導入した非線形有限要素解析を行った結果、想定と同程度の損傷領域が形成されることを確認した。

**キーワード:** ハイブリッド型繊維補強、せん断破壊力学モデル、非線形有限要素解析、一面せん断実験

## 1. はじめに

近年、セメント系材料の乏しい靱性を向上させるために繊維を混入した繊維補強セメント系複合材料に関する研究が進められている。中でも、モルタルにスチールファイバーとポリエチレンファイバーを混入したハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料(Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites : HFRCC)は、ひび割れ分散性が良好で、HFRCC を用いた部材は変形に対して高いエネルギー吸収性能を有することから制震デバイスへの応用が提案されている<sup>1)</sup>。既往の研究では、HFRCCの建築物への応用を目指し、材料特性に関する実験的研究がなされ、材料構成モデルが構築されている<sup>2,3)</sup>。しかしながら、その妥当性の検証については、引張・圧縮一軸応力下の検証実験のみで、二軸応力下の厳密な要素実験による検証は行われていなかった。

そこで本論では、HFRCC に対して曲げ、割裂、圧縮試験を実施し、材料構成モデルの検討を行い、さらに、一面せん断実験を実施し、既往研究に基づくせん断破壊力学モデル<sup>4,7)</sup>を用いた解析、および非線形有限要素解析と比較することにより、複雑なせん断破壊に対する解析においても、構築した構成モデルが適用可能であるかを検証する。また、解析においてはひび割れの進展および損傷領域幅についても検討する。

## 2. 材料構成モデル

### 2.1 曲げ・割裂・圧縮試験概要

HFRCC の材料構成モデルを検討するため、まず曲げ、割裂、圧縮試験を実施する。ここでは直径 0.38mm、長さ 32mm、破断荷重 230.5N のスチールコード(SC)と、直径 0.012mm、長さ 15mm、引張強度 2770 N/mm<sup>2</sup>のポリエ

チレンファイバー(PE)を使用した。結合剤に早強ポルトランドセメント(C)およびシリカフューム(Si)を用い、細骨材(S)には表乾密度 2.61g/cm<sup>3</sup>の珪砂を用いた。練り混ぜ水には、上水道水(W)および高性能 AE 減水剤(SP)を使用した。

### 2.2 調合および試験体作成

表—1 に調合を示す。調合は既往の実験<sup>2,3)</sup>と同じであるが、試し練りの結果から AE 減水剤については補正を加えた分量とした。

練り混ぜは、容量 10ℓのオムニミキサおよび手練りにて行った。オムニミキサを用いる場合は、HFRCC の高い粘性を考慮して、一回当たりの練り混ぜ量を約 6ℓとしている。まず表乾状態の細骨材と早強セメント、シリカフュームの空練りを 1 分間行った後、水及び減水剤を加えて 3 分間、繊維材料を少しずつ加えながら 5 分間行った。練り混ぜ状況については、繊維がダマとなってモルタルと混ざらない「ファイバーボール」は観察されず、繊維の分散性は良好であると判断した。

その後、表—2 に示す各シリーズに対し 40×40×160mm の曲げ試験片 3 体、φ50×100mm の円柱試験体を割裂用に 3 体、圧縮用に 3 体打設した。打設は高さ 2～3cm ずつ行い、気泡発生防止や、繊維のランダムな配向を維持するため、振動を与えながら突き棒の先でモルタルを動かす程度とし、最後に表面をコテでならした。

表—1 HFRCC 調合

W (g/ℓ)	C (g/ℓ)	Si (g/ℓ)	S (g/ℓ)	SP (g/ℓ)	SC (g/ℓ)	PE (g/ℓ)
441	784	196	392	22	78	1

\*1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

\*2 京都大学大学院工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

\*3 京都大学大学院工学研究科教授 Ph.D. (正会員)

打設後は標準養生を行い、翌日に脱型、材齢1週および2週に試験を行った。圧縮試験体については、試験前日に打設面の研磨を行った。また、曲げ試験体については、コンクリートカッターを用いて中央部に深さ20mm、幅3mmの切欠きを入れた。

### 2.3 試験方法

割裂試験はJIS A 1113に基づいて行い、割裂強度を測定した。圧縮試験は、表面に貼付した抵抗線ひずみゲージにより縦方向のひずみを測定し、普通コンクリート同様、最大応力度の1/3応力度を示す点とひずみ度が $50 \times 10^{-6}$ を示す点とを結ぶ割線の勾配を静弾性係数 $E_c$ とした。3点曲げ試験はスパン150mmとし、検長45mm~55mmのクリップゲージにより切欠き開口変位を測定した。得られた結果から、多直線近似法に基づいた逆解析<sup>8)</sup>により引張強度および引張軟化曲線を推定した。

### 2.4 試験結果

表—2 に曲げ・割裂・圧縮試験の結果を示す。また、逆解析による引張軟化曲線と引張構成モデルの比較を図—1 に、実験結果と圧縮構成モデルの比較を図—2 にそれぞれ示す。材料構成モデルの詳細については後述する。表中の値は各シリーズの3体の平均値である。ただし、HFRCC1シリーズでは圧縮強度到達前にひずみゲージがはがれ計測不良を示した試験体があったため、静弾性係数を求める際には除外した。引張強度および引張軟化曲線は多直線近似法に基づいた逆解析<sup>8)</sup>により許容誤

差5%として算出し、破壊エネルギー $G_F$ は図—3(a)に示すように、第1節点ひび割れ幅 $W_i^{cr1}=2\text{mm}$ までの面積として求めた。

#### 2.4.1 引張構成モデル

HFRCCの引張構成モデル<sup>23)</sup>は、引張強度に達するまでは剛性 $E_c$ で直線関係とし、ひび割れ後は応力-ひび割れ開口変位関係( $\sigma - W_i$ )で定式化する。ひび割れ発生後の引張軟化領域については、既往研究において限界ひび割れ幅 $W_i^{cr2}$ まで一定の応力 $\alpha f_t$ ( $\alpha=0.5$ )を維持するモデルが提案されている<sup>2)</sup>。しかし、このモデルではひび割れ幅 $W_i=2\text{mm}$ 程度からほぼ一定となる応力については概ね一致するものの、応力の上昇がみられた $W_i=0.1\sim 1.5\text{mm}$ の領域における乖離が大きい。そこで、図—3(a)に示すように第1折点ひび割れ幅 $W_i^{cr1}$ までの破壊エネルギー $G_F$ を構成モデルと一致させ、第1折点ひび割れ幅 $W_i^{cr1}$ から限界ひび割れ幅 $W_i^{cr2}$ までは引張強度の半分の応力を維持するものとして、式(1)および式(2)で定義する<sup>3)</sup>。引張軟化曲線から第1折点ひび割れ幅 $W_i^{cr1}$ を2mm、限界ひび割れ幅 $W_i^{cr2}$ を4mmと決定した。

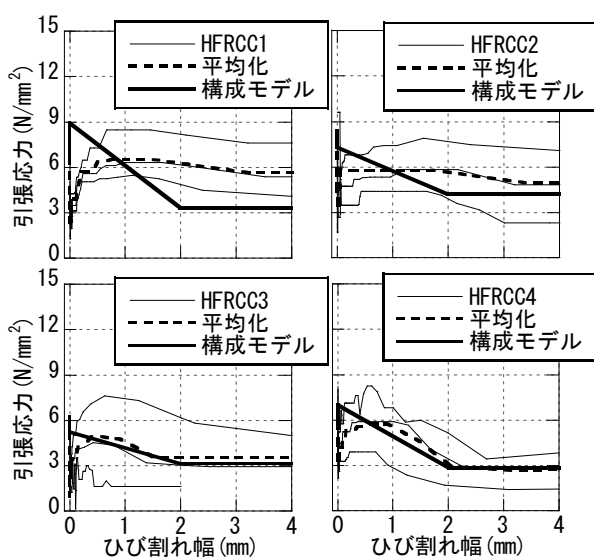
$$\alpha = \frac{2G_F}{W_i^{cr1} f_t} - 0.5 \quad (1)$$

$$W_i^{cr2} = 2W_i^{cr1} \quad (2)$$

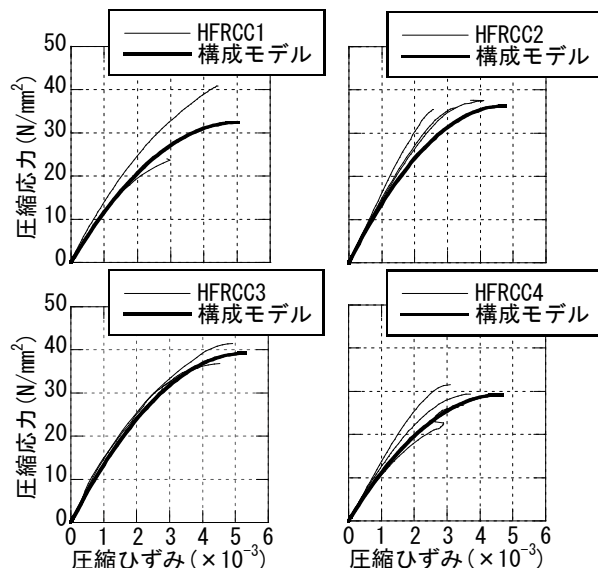
図—1 に示すように、実験結果から得られた引張軟化曲線にばらつきがあるものの、実験結果の平均化を行っ

表—2 材料試験結果

材料	練り混ぜ方法	材齢(週)	圧縮強度 $f'_c(\text{N/mm}^2)$	割裂強度 $f_{st}(\text{N/mm}^2)$	引張強度 $f_t(\text{N/mm}^2)$	破壊エネルギー $G_F(\text{N/mm})$	静弾性係数 $E_c(\text{kN/mm}^2)$
HFRCC1	ミキサ	1	32.4	7.4	6.7	12.27	12.9
HFRCC2	ミキサ	2	36.3	8.4	8.4	11.50	15.2
HFRCC3	ミキサ	1	39.2	6.8	6.0	8.36	14.8
HFRCC4	手練り	1	29.2	-	5.8	9.88	12.5



図—1 引張軟化曲線および構成モデルとの比較



図—2 圧縮試験結果および構成モデルとの比較

たものと引張構成モデルは、HFRCC1 シリーズに若干差が大きく観察されるが、全体として概ね一致している。

後述するせん断破壊力学モデルを用いた解析においては、ひび割れ開口変位  $W_t$  は式(3)を用いてひび割れ直交ひずみ  $\varepsilon_t$  に換算する。

$$\varepsilon_t = W_t / h = 5 \cdot W_t / w_{da} \quad (3)$$

ここに、 $h$  は微視的ひび割れ間距離であり、損傷領域幅の 1/5 の値を用いる<sup>4)</sup>。目視による観測では、損傷領域幅  $w_{da}$  は 10~30mm 程度であった。

#### 2.4.2 圧縮構成モデル

圧縮構成モデル<sup>4)6)</sup>は、図—3 (b) に示すように圧縮強度前の放物線モデルと、直交引張ひずみ  $\varepsilon_t$  による応力低下を考慮した圧縮軟化モデルの組み合わせとして式(4)~(7)で定義する。

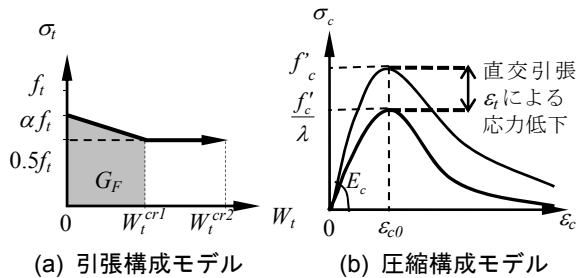
$$\sigma_c = \frac{f'_c}{\lambda} \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad |\varepsilon_c| \leq |\varepsilon_{c0}| \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{f'_c}{\lambda} \quad |\varepsilon_c| > |\varepsilon_{c0}| \quad (5)$$

$$\lambda = 0.8 + 0.34 \left| \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{c0}} \right| \geq 1.0 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (7)$$

ここに、 $\sigma_c$  は圧縮応力、 $\varepsilon_c$  は圧縮ひずみ、 $f'_c$  は圧縮強度、 $\varepsilon_{c0}$  は圧縮強度時ひずみである。



図—3 一軸構成モデル

図—2 に示すように、プレピーク領域は、よく一致しており、構成モデルは妥当であると考えられる。ポストピーク領域については、ひずみゲージによる計測ではデータが得られなかったため比較していないが、その妥当性については解析において検証する。

なお、圧縮試験では直交引張による圧縮強度低下は起こらないものとし、比較する構成モデルは  $\lambda=1.0$  とした。圧縮構成モデルの寸法依存性について、van Mier ら<sup>9)</sup>は、プレピーク領域では寸法依存性は見られないが、ポストピークでは顕著となることを指摘している。一方、金子ら<sup>10)</sup>は、繊維補強セメント系複合材料を用いた圧縮試験において、圧縮強度で基準化した圧縮応力とひずみで定義したモデルは、ポストピーク領域においても寸法依存

性が顕著ではないことを確認している。本材料実験の結果では、各シリーズ内の圧縮強度に大きな差が見られないことから、基準化しない圧縮応力とひずみで定義した構成モデルの寸法依存性は考慮しないものとする。

### 3. 一面せん断実験

#### 3.1 実験概要

材料試験を行った HFRCC に対して、同じ調合で水平切欠き付き試験体の一面せん断実験を行った。試験体一覧を表—3 に、試験体の形状を図—4 に示す。実験は単調荷重、繰返し荷重をそれぞれ 3 体ずつ計 6 体について行った。プレーンコンクリートを用いた既往の一面せん断実験<sup>11)</sup>では、脆性的な破壊を示すことから荷重の制御が困難で、想定した破壊形式で破壊が生じたのは、支持条件を上部・下部ともに球座支持とした場合のみであったと報告されている。本実験に用いる HFRCC は、高い靱性を有するため安定した破壊進行が得られると考え、試験体 HF60-1~HF60-4 の 4 体の支持条件は、設置の容易さを考慮した上部球座、下部固定とした。一方、HF60-5、HF60-6 の 2 体は支持条件の影響を確認するため、プレーンコンクリートの実験で良好な結果が得られた上部球座、下部球座とした。

HF60-1~2 シリーズは、試験機の内蔵変位計により垂直変位を測定した。HF60-3~4 シリーズは、図—4 に示す計測用ボルト A1~2 間の垂直変位を正面と背面でそれぞれ計測した。HF60-5~6 シリーズでは、中央ノッチ間におけるせん断変位をより正確に計測するために、B1~2 および B3~4 間の水平方向の伸び、B1~3 および B2~4 間の垂直方向の伸び、B2~3 間の斜め方向の伸びを、正面と背面でそれぞれ計測し、せん断変位を算定した。しかしながら、HF60-1~2 シリーズにおける垂直変位には、球座、台座と試験体接触面の凹凸による剛性低下が見られたため、二次元弾性有限要素解析を用いて補正した。補正では、実験の初期勾配と解析の初期勾配の変位差を求め、これをせん断力 - 垂直変位関係全体で差し引く処理を行っている(詳細は本論文末尾の付録 1 に記載)。

繰返し荷重は、荷重が 20kN、40kN に達した点、最大荷重点、および垂直変位が 1mm、2mm、4mm に達した点において除荷・再荷重し、以降はノッチ上端が下端に接触するまで荷重を行った。

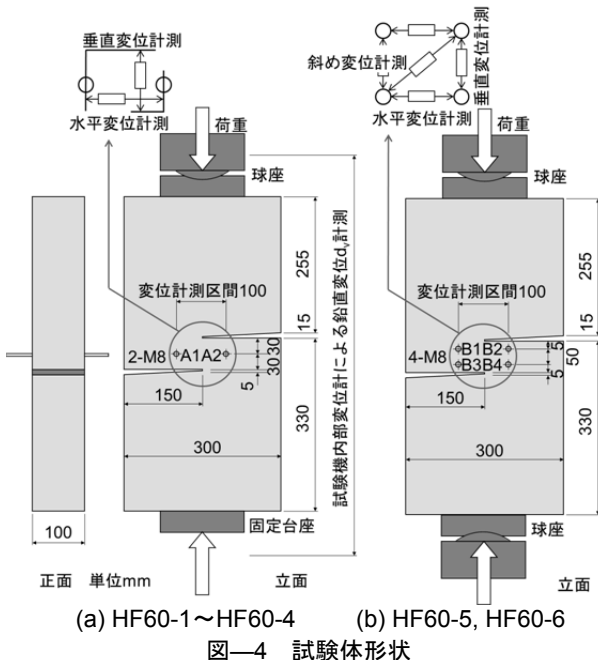
#### 3.2 実験結果

各試験体のせん断力 - 垂直変位関係を図—5 に示す。最大荷重は HF60-1 試験体で 85.2kN、HF60-2 試験体で 51.8kN と大きな差が生じたが、他の 4 体は 60kN 程度となり、支持条件による差は見られなかった。最大荷重到達後は緩やかにせん断力が減少し、実験終了時の荷重は最大荷重の 20~30% であった。

目視可能な初期ひび割れは、40kN 程度で生じ、剛性低下開始も概ねこれらの荷重に対応している。いずれの試験体も、上下ノッチ間に微細なせん断ひび割れが発生し、最終的に複数のひび割れが上下ノッチ間で接続した。上下のノッチ先端から数センチ離れた位置にも、曲げによると思われる複数の独立したひび割れが発生した。ただし、これらのひび割れの長さは 10mm 程度にとどまり、上下ノッチ間で接続することはなかった。HF60-5 試験体において、荷重が 40kN を超えたあたりからせん断変位が減少しているが、これは曲げ変形がせん断変形よりも大きくなったためであると考えられる。

表—3 試験体一覧

試験体	支持条件		材料	荷重方法
	上部	下部		
HF60-1	球座	固定	HFRCC1	単調
HF60-2	球座	固定	HFRCC2	繰返し
HF60-3	球座	固定	HFRCC3	単調
HF60-4	球座	固定	HFRCC3	繰返し
HF60-5	球座	球座	HFRCC4	単調
HF60-6	球座	球座	HFRCC4	繰返し



図—4 試験体形状

#### 4. 材料構成モデルの検証

##### 4.1 せん断破壊力学モデルによる解析

せん断破壊力学モデル<sup>4)6)</sup>を用いて、一面せん断試験体の解析を行い、材料構成モデルの妥当性について検討する。繰返し荷重の試験結果はせん断力 - 変位関係の包絡線を取り、比較対象とする。ここで用いるせん断破壊力学モデルは、損傷領域幅  $W_{da}$  をもつ部分要素の計算を行うが、実験時の目視による観測のみから損傷領域を厳密に決定できないため、解析にあたっては  $W_{da}$  を 10mm, 30mm の 2 種類を採用した。その定式化においては、主応力軸と主ひずみ軸の一致を仮定しており、かつひび割

れ面と主応力軸が直交する回転ひび割れ仮定に基づいている (詳細は文献 4), 6) を参照)。2 章で述べた構成モデルに、表—2 に示した材料特性値を適用して解析を実施した。

解析結果と実験結果を図—6 に比較する。HF60-1, HF60-2 試験体の最大荷重については、解析値と実験値で 20kN 程度の差となり乖離が大きい。HF60-3~6 試験体の最大荷重については、概ね一致する結果が得られた。損傷領域幅については、 $W_{da}=30\text{mm}$  とすることで、初期剛性と最大荷重時の垂直変位は概ね整合するが、最大荷重後の軟化域については、HF60-1 試験体を除いて耐力を若干過大評価している。また、 $W_{da}$  を適切に設定することで、軟化域を評価できていることから、圧縮軟化領域の構成モデルは妥当であると考えられる。

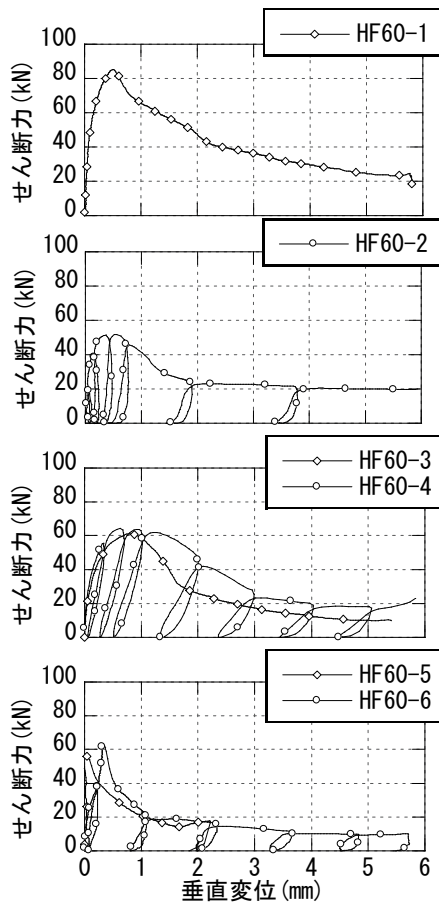
##### 4.2 非線形有限要素解析

有限要素解析プログラム ATENA<sup>12)</sup>を用いて、一面せん断試験体の平面応力単調解析を行い、せん断力 - 垂直変位関係、ひび割れ進展過程、および損傷領域幅  $W_{da}$  を検証する。解析にあたっては、表—2 に示した材料特性値を使用し、分散回転ひび割れを仮定した。HF60-1, HF60-2 試験体は荷重点の垂直変位を、HF60-3~HF60-6 試験体は図—4 (a) に示す A1~2 間の垂直変位差をそれぞれ算出した。HF60-5, HF60-6 試験体については、実験と同じ計測方法でせん断変位を求めたものを付録 2 に記載した。

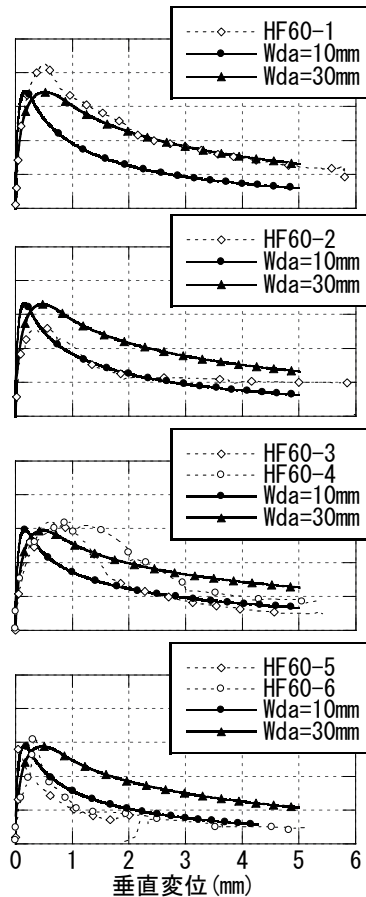
解析結果と実験結果を図—7 に比較する。初期剛性、最大荷重については、HF60-1 を除いて、いずれの試験体においても実験結果と概ね整合する。HF60-1 試験体において実験結果と解析結果の最大荷重に大きな差が見られたが、各シリーズの材料特性値に大きな差がないことから、試験体ノッチ間の繊維の配向性や試験体内の混入率のばらつき等が原因として考えられる。

解析結果のひび割れ状況の例 (HF60-1 試験体) を図—8 に示す。いずれの試験体においても、実験結果と同じくノッチ間にせん断ひび割れが進展し、ノッチ先端から離れた場所にも曲げによると思われるひび割れが発生した。せん断ひび割れはノッチ間の幅 30mm 程度の領域に集中しており、これはせん断破壊力学モデルにおいて実験結果を適切に評価できた損傷領域幅  $W_{da}$  が 30mm であった結果と整合する。

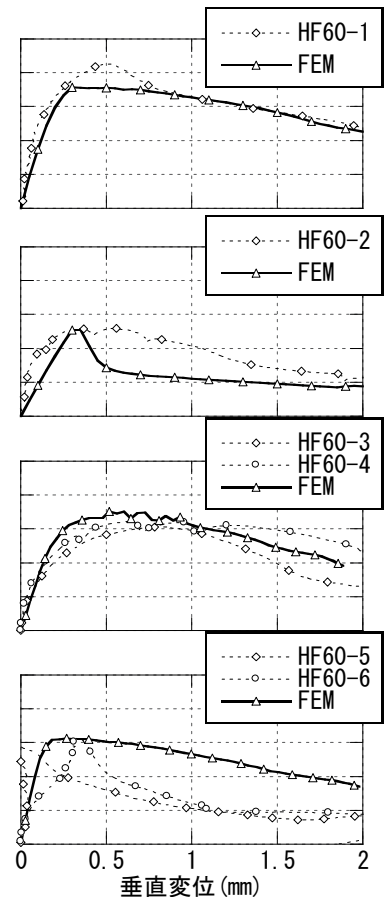
最大荷重後の軟化領域の解析結果は、HF60-2 試験体で過小評価、HF60-5, HF60-6 試験体で過大評価となった。その原因として、HF60-2 試験体では引張強度に対する破壊エネルギーの比が大きくなり、引張強度到達後の荷重低下が大きいため、ひび割れが分散せず、局所的な破壊が起こったためであると考えられる。HF60-5, HF60-6 試験体の過大評価の原因については、より詳細な調査が必要であり今後の研究課題とする。



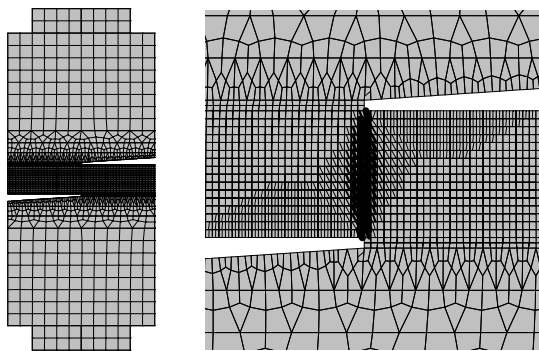
図—5 せん断力 - 垂直変位  
関係 (実験結果)



図—6 せん断破壊力学モデルによる  
解析および実験結果との比較



図—7 非線形有限要素解  
析および実験結果との比較



図—8 解析モデルとひび割れ図(HF60-1 試験体)

## 5. まとめ

HFRCC の材料構成モデルを二軸応力下の厳密な要素実験によって検証するため、曲げ、割裂、一軸圧縮および一面直接せん断試験を実施した。曲げ、割裂、圧縮試験の結果から構築した引張・圧縮構成モデルを用いて、既往研究に基づくせん断破壊力学モデルによる解析を行った。また、構築した材料構成モデルを導入した非線形有限要素解析を行い、ひび割れの進展および損傷領域幅について検討を行った。

実験および解析の結果、以下の知見を得た。

- (1) HFRCC を用いた一面せん断実験では、安定したせん断力 - 変位関係を得ることができ、試験体支持条件によって最大耐力に大きな差は見られない。
- (2) せん断破壊力学モデルに構築した材料構成モデルを導入して行った解析では、損傷領域幅  $W_{da}$  を 30mm とすることで HFRCC 試験体の初期剛性、最大荷重を概ね良好に評価できた。
- (3) 非線形有限要素解析では、構築した材料構成モデルを導入することで最大荷重を概ね良好に評価できた。また、30mm 程度の幅を持つノッチ間の領域にせん断ひび割れが発生する結果が得られた。

## 謝辞

本研究の実施にあたっては、東京製綱および東洋紡より材料の提供を受けた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 石原誠一郎, 三橋博三, 金子佳生, 和地正浩: ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2,

pp.1705-1710, 2003.

- 2) 佐々木勇気, 金子佳生, 桐越一紀: 新構法に用いられる繊維補強セメント系複合材料の材料特性および構成則, 日本建築学会東北支部研究報告集・構造系, 第71号, pp.115-118, 2008.6
- 3) 古城拓哉, 金子佳生, 佐藤裕一: 繊維補強セメント系複合材料の材料特性および一軸構成モデル, 日本建築学会学術講演梗概集・材料施工系, pp.819-820, 2010.
- 4) 金子佳生, 三橋博三: コンクリートの直接せん断破壊の力学モデル—全荷重 - 変形特性の予測—, 日本建築学会構造系論文集, 第535号, pp.101-109, 2000.9
- 5) 金子佳生, 三橋博三: 鉄筋コンクリートディープビームにおけるコンクリートのせん断軟化特性に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第562号, pp.115-122, 2002.12
- 6) 金子佳生, 三橋博三: ひずみ局所化領域におけるコンクリートのせん断軟化特性に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第573号, pp.145-152, 2003.11
- 7) 大作亮平, 金子佳生, 三橋博三, 竹林裕高: 力学モデルを用いたエネルギー吸収壁のモデル化手法に関する研究, 日本建築学会東北支部研究報告集・構造系, 第69号, pp.63-66, 2006.6
- 8) 土木学会: コンクリート技術シリーズ, コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, 3章: 引張軟化曲線の求め方, 1998.
- 9) van Mier J.G.M.: Multiaxial strain-softening of concrete, Part I: Fracture, Materials and Structures, RILEM, Vol.19, No.111, pp.179-190, 1986.
- 10) 金子佳生, 三橋博三, 桐越一紀, 下川博之: 繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性—繊維混入率と試験体寸法をパラメータとした圧縮試験と数値解析—, 日本建築学会構造系論文集, 第592号, pp.19-26, 2005.6
- 11) 石原誠一郎ほか: 水平ノッチのあるプレーンコンクリートの一面せん断実験—マイクロメカニクスによる考察—, 日本建築学会構造系論文集, 第570号, pp.145-150, 2003.8
- 12) Cervenka Consulting: ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, Prague, 2004.2

付録1 HF60-1, HF60-2 試験体の垂直変位補正

実験におけるせん断力  $V_{exp}$  ~ 垂直変位  $\delta_{v,exp}$  関係の初期は, 下に凸の曲線となっている。原点から初期ひび割れ

発生時 (40kN) までの区間を以下の2次式で回帰する。

$$V_{exp} = c_1 \delta_{vreg} + c_2 \delta_{vreg}^2 \quad (A1)$$

ここに  $c_1, c_2$  は回帰計算による係数である。したがって, 回帰式による垂直変位  $\delta_{vreg}$  は,

$$\delta_{vreg} = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_2 V_{exp}}}{2c_2} \quad (A2)$$

420要素, 試験せん断部の平均要素サイズ 15mm の2次元弾性有限要素解析を実施し, せん断力  $V_{exp}$  ~ 検長区間垂直変位  $\delta_{vcal}$  の初期勾配を求める。(検長区間は図-4参照) この勾配を  $c_3$  とする。

$$\delta_{vcal} = \frac{V_{exp}}{c_3} \quad (A3)$$

せん断変位補正值  $\delta_v'$  は, 「垂直変位実験値」 - 「垂直変位回帰値」 + 「有限要素解析による垂直変位計算値」として以下のように与える。

$$\delta_v' = \delta_{v,exp} - \delta_{vreg} + \delta_{vcal} \quad (A4)$$

$$\delta_v' = \delta_{v,exp} - \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4c_2 V_{exp}}}{2c_2} + \frac{V_{exp}}{c_3} \quad (A5)$$

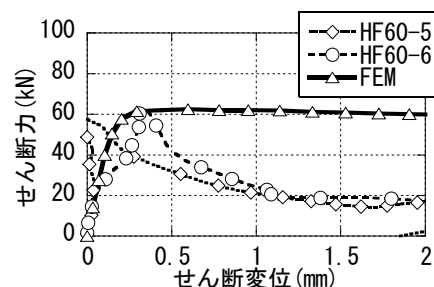
表A-1に回帰係数  $c_1, c_2, c_3$  の値を示す。

表A-1 回帰係数一覧

回帰係数	HF60-1	HF60-2
$c_1$ (N/mm)	22.84	45.02
$c_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	56.12	32.85
$c_3$ (N/mm)	587.7	

付録2 HF60-5, HF60-6 試験体のせん断変位での比較

HF60-5, HF60-6 試験体に対する非線形有限要素解析において, 実験と同様に4点間の垂直・水平・斜め変位から求めたせん断変位による, せん断力 - せん断変位関係の実験結果との比較を図A-1に示す。図-7での比較と同様に, ポストピークでのせん断力を過大評価している。



図A-1 HF60-5, HF60-6 試験体の有限要素解析と実験結果との比較 (せん断力 - せん断変位関係)