

## HFRCCの一面せん断実験と数値解析による材料構成モデルの検証

正会員 ○古城拓哉\*1 同 佐藤裕一\*2 同 金子佳生\*3

## 2. 構造—8.鉄筋コンクリート

## ハイブリッド型繊維補強、一面せん断実験、ひび割れ進展、非線形有限要素解析

## 1. はじめに

近年、セメント系複合材料の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、モルタルに鋼繊維とポリエチレン繊維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優れたエネルギー吸収性能を有する。この靱性に富むHFRCCを用いて、セメント系制震デバイスに多く見られるスリップ形の履歴性状を克服し、紡錘形の履歴形状を示すエネルギー吸収壁に関する研究も行われている<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行われ、これら材料実験の結果に基づいてHFRCCの材料構成モデルが圧縮、引張ともに構築されている<sup>2),3)</sup>。モデルは十分な実験データが得られない圧縮強度以降の応力-変位関係を除き、実験から得られた圧縮強度到達前の応力-ひずみ関係および引張強度到達後の応力-ひび割れ幅関係と概ね一致する結果が得られている。しかしながら、構成モデルの妥当性の検証に関しては、圧縮・引張一軸応力下の検証のみで、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。

本研究ではこれらの背景に対し、HFRCCを用いた一面せん断実験を行い、材料構成モデルを導入した非線形有限要素解析と比較することにより、モデルの妥当性を検証した。

## 2. 一面せん断実験

## 2.1 使用材料および調合

本実験では直径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2770N/mm<sup>2</sup>のポリエチレン繊維(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。

表1に調合を示す。調合は既往の材料実験<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。

表1 HFRCC調合

| W<br>(g/l) | C<br>(g/l) | Si<br>(g/l) | S<br>(g/l) | SP<br>(g/l) | SC<br>(g/l) | PE<br>(g/l) |
|------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 441        | 784        | 196         | 392        | 22          | 78          | 1           |

## 2.2 試験体

試験体の形状を図1に示す。試験体には、ノッチ先端幅5mmのくさび状の水平ノッチを上下2ヵ所に設け、ノッチ間の間隔は60mmとした。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性を維持するため、ハンマーで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。打設後は翌日に脱型、材齢1週および2週の試験日まで屋内で養生した。実験に先立って行った材料試験の結果を表2に示す。

試験体一覧を表3に示す。実験は単調載荷、繰返し載荷

表2 材料試験結果

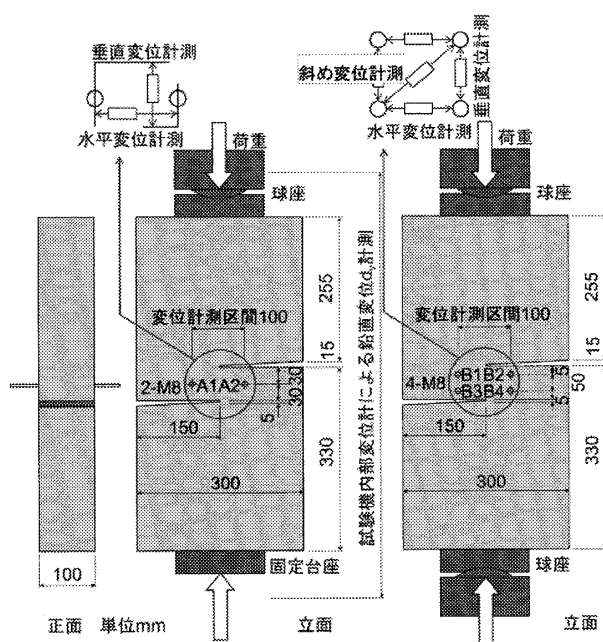
| 材料     | 練り混ぜ<br>方法 | 材齢<br>(週) | 圧縮強度<br>$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 割裂強度<br>$f_{sd}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 破壊エネルギー<br>$G_F$ (N/mm) | 1/3 割線係数<br>$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|--------|------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| HFRCC1 | ミキサ        | 1         | 32.4                                | 7.4                                   | 6.7                                | 12.3                    | 12.9                                    |
| HFRCC2 | ミキサ        | 2         | 36.3                                | 8.4                                   | 8.4                                | 11.5                    | 15.2                                    |
| HFRCC3 | ミキサ        | 1         | 39.2                                | 6.8                                   | 6.0                                | 9.4                     | 14.8                                    |
| HFRCC4 | 手練り        | 1         | 29.2                                | -                                     | 5.8                                | 9.9                     | 12.5                                    |

In-plane Shear Test of HFRCC and Numerical Verification of Material Constitutive Model

FURUJO Takuya, SATO Yuichi and KANEKO Yoshio

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では、脆性的な破壊を示し、荷重の制御が困難であり、想定した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<sup>4)</sup>。本実験で用いるHFRCCは、高い靱性を有することから安定した破壊進行が得られると考え、試験体HF60-1~4の4体の支持条件は、設置の容易さを考慮して上部球座・下部固定とした。一方、HF60-5~6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1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、中央ノッチ間での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 シリーズにおいては、球座、台座と試験体接触面の凹凸により荷重 - 垂直変位関係に剛性の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を行った（付録を参照）。



(a) HF60-1~HF60-4 (b) HF60-5, HF60-6

図1 試験体形状

単調荷重は、ノッチ上端が下端に接触するまで荷重を行った。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・再載荷し、以降はノッチ上端が下端に接触するまで荷重を行った。

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  |

### 2.3 実験結果

各試験体のせん断力 - 垂直変位関係を図2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、ほかの4体は60kN程度となり、支持条件による最大荷重の違いは見られなかった。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%程度であった。

目視可能なひび割れの発生は、荷重 - 垂直変位関係に剛性低下の見られた40kN程度で観察された。ひび割れの進展は、いずれの試験体においてもほぼ同様で、上下ノッチ先端から数センチ離れた位置に曲げによると思われるひび割れが発生し、その後上下ノッチ間に微細なせん断ひび割れが発生、変形が大きくなるにしたがってせん断ひび割れが進展し、最終的に複数のせん断ひび割れが上下ノッチ間で接続した。曲げによると思われるひび割れは、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。

## 3. 構成モデルの検証

### 3.1 構成モデル

本研究で検証を行うHFRCC材料構成モデル<sup>2,3)</sup>の定義を図3に示す。引張構成モデルは、引張強度に達するまでは剛性 $E_c$ で直線関係とし、引張強度到達後は応力 - ひび割れ開口変位関係( $\sigma - W$ )で定式化する。このモデルでは、図2に示すように第1折点ひび割れ幅 $W_{f1}$ までの破壊エネルギー $G_F$ を一致させ、第1折点ひび割れ幅 $W_{f1}$ から限界ひび割れ幅 $W_{f2}$ までは引張強度の半分の応力を維持するものとして定義している。引張軟化曲線から第1折点ひび

割れ幅  $W_{cr1}$  を 2mm, 限界ひび割れ幅  $W_{cr2}$  を 4mm と決定した。圧縮構成モデルは圧縮強度前の応力 - ひずみ関係による放物線モデルと, 圧縮強度後の応力 - 圧縮変位関係による線形モデルの組み合わせとして定義する。圧縮強度後の限界圧縮変位  $W_d$  は 1mm とした<sup>5)</sup>。

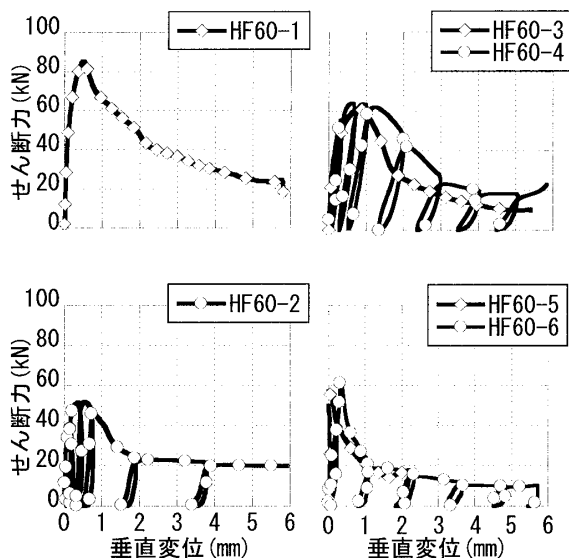


図2 一面せん断実験結果

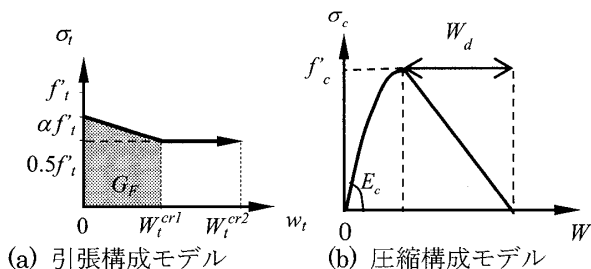


図3 一軸構成モデル

### 3.2 非線形有限要素解析

一面せん断試験体に対し, 構築した材料構成モデルを組み込んだ非線形有限要素解析を行い, モデルの妥当性を検証した。解析には, 有限要素解析プログラム ATENA<sup>®</sup>を用いて単調載荷とし, 回転分散ひび割れを仮定した。

解析結果と実験結果の包絡線を図4に比較する。初期剛性, 最大荷重については, HF60-1 試験体を除いて, 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での繊維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5に示す。いずれの試験体においても, 実験結果と同じく先に曲げによると思われるひび割れが発生し, その後上下ノッチ間にせん断ひび割れが進展するという結果が得られた。

最大荷重到達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, 他の試験体と比べて小さく, 定義する構成モデルの引張強度到達後の荷重低下が大きくな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。

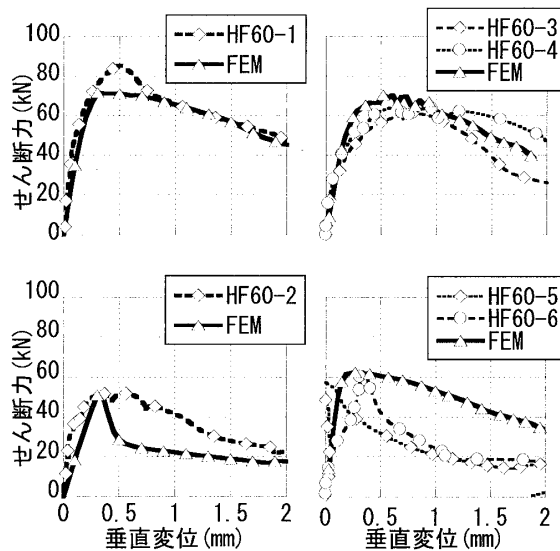


図4 実験および解析結果の比較

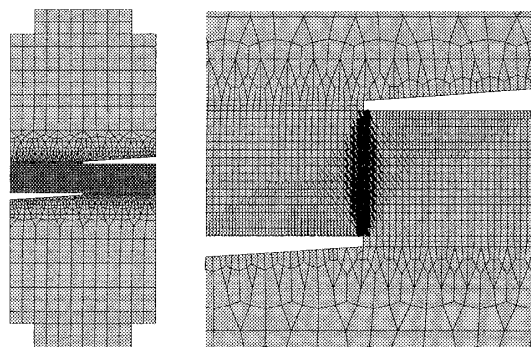


図5 解析モデルとひび割れ図(HF60-1 試験体)

### 4. 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せん断試験を実施した。曲げ, 割裂, 一軸圧縮試験の結果から構築した引張・圧縮構成モデルを

導入して行った非線形有限要素解析により、せん断力 - 変位関係とひび割れの進展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、支持条件によって最大耐力に大きな差は見られない。
- (2) ノッチ間 60mm の一面せん断試験体では、ノッチ先端から数センチ離れた位置に曲げひび割れが先行して発生し、その後ノッチ間にせん断ひび割れが発生、進展する。
- (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る。また、ひび割れの進展プロセスについても、実験とほぼ同様の結果が得られた。

#### ■参考文献

- 1) 石原誠一郎ほか：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) 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
- 5) 金子佳生ほか：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

- 6) Cervenka Consulting: ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, Prague, 2004.2

#### ■付録 HF60-1, HF60-2 試験体の垂直変位補正

実験におけるせん断力  $V_{\text{exp}}$  ～ 垂直変位  $\delta_{\text{vexp}}$  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。

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

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  $\delta_{\text{vreg}}$  は、

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

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  $V_{\text{exp}}$  ～ 検長区間垂直変位  $\delta_{\text{vcal}}$  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。

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

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。

$$\delta_v = \delta_{\text{vexp}} - \delta_{\text{vreg}} + \delta_{\text{vcal}} \quad (\text{A4})$$

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

表 A1 に回帰係数  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  の値を示す。

表 A1 回帰係数一覧

|                      | 単調    | 繰返し   |
|----------------------|-------|-------|
| $c_1(\text{N/mm})$   | 22.84 | 45.02 |
| $c_2(\text{N/mm}^2)$ | 56.12 | 32.85 |
| $c_3(\text{N/mm})$   | 587.7 |       |

\*1 京都大学大学院工学研究科 修士課程

Graduate Student, Kyoto University, Graduate School of Engineering

\*2 京都大学大学院工学研究科 助教・工博

Assistant Professor, Kyoto University, Graduate School of Engineering, Dr. Eng.

\*3 京都大学大学院工学研究科 教授・Ph.D.

Professor, Kyoto University, Graduate School of Engineering, Ph.D.