

論文 二方向ひび割れを有する HPFRCC の空間平均化構成モデルの構築

長井 宏平^{*1}・Benny SURYANTO^{*2}・前川 宏一^{*3}

要旨:多方向にひび割れを有する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の構成モデルを構築すべく、初期ひび割れ導入後の HPFRCC 薄板の曲げ試験を行った。初期ひび割れ導入角度により曲げ挙動の違いが確認された。実験結果と既往の研究を基に空間平均化構成モデルの構築が試みられ、Mindlin 板要素を用いた有限要素解析により検証を行い、精度向上の為に今後明らかにすべき材料特性等を考察した。

キーワード: HPFRCC, 多方向ひび割れ, FEM, 分散ひび割れ構成モデル

1. はじめに

繊維補強セメント複合材料 (FRCC) は、繊維種類、マトリックス特性、付着性状等を適切に選択することにより様々な性能を選択可能な材料であり、補修補強のみならず新規構造物へ向けての研究及び適用が増加している¹⁾²⁾³⁾。複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) は引張応力下において擬ひび割れ効果と複数微細ひび割れ特性を有するものであり土木学会より設計・施工指針 (案) が発刊されるに至っている⁴⁾。FRCC が補修・補強や新規構造物材として用いられた場合、環境作用による劣化にも起因して多方向ひび割れが発生する可能性が考えられ、この時 FRCC のせん断伝達力は普通コンクリートに比べ粗骨材が存在しないために小さいと考えられる。そのため構造物としての性能を評価するためには FRCC のせん断伝達力の把握が必要であるが、その引張特性に関する研究に比べ、せん断伝達特性に関する研究は少ない⁵⁾⁶⁾。本研究では、HPFRCC 薄板の曲げ試験の初期荷重により第一ひび割れを導入した後、主応力方向を回転させ再曲げ荷重することで第二ひび割れを発生させ、挙動を追跡する。測定結果と既往の研究を基に HPFRCC のせん断伝達構成モデルの構築を試み、これを三次元 RC 非線形 FEM プログラム COM3 に組み込み、Mindlin 板要素を用いて検証の解析を行った。

2. 実験概要

2.1 試験供試体

HPFRCC として市販の Engineered Cementitious Composite (ECC) プレミックス材料を用いた。直径 0.04mm、繊維長 12mm の PVA 繊維を体積比で 2% 混入した⁴⁾。薄板供試体 400×250×20mm を 2 体 (Reference, S1-S2)、550×450×20mm を 8 体 (Main, S3-S10) 作製し (図-1, 表-1)、打設後に封緘し、2 日後に脱型した後、気温 20℃湿度 60% の環境室で 28 日以降まで養生し荷重試験を行った。

2.2 荷重手順

Main 供試体は所定の曲げモーメントにより第一ひび割れが導入され除荷した後 (第一荷重)、コンクリートカッターにより Reference 供試体と同曲げ試験を行えるよう切断され、主応力方向を回転させ再荷重を行う (第二荷重) (図-2)。なお、再荷重を平坦な状態から開始するため、第一ひび割れ導入後に供試体を反転させ底面より荷重することで残留変形を可能な限り取り除いた。主応力回転角度と、第一荷重による初期導入ひび割れがパラメータとなる。本研究では供試体底面に小型軽量のポテンショメータ (CPT) を 6 個取り付け

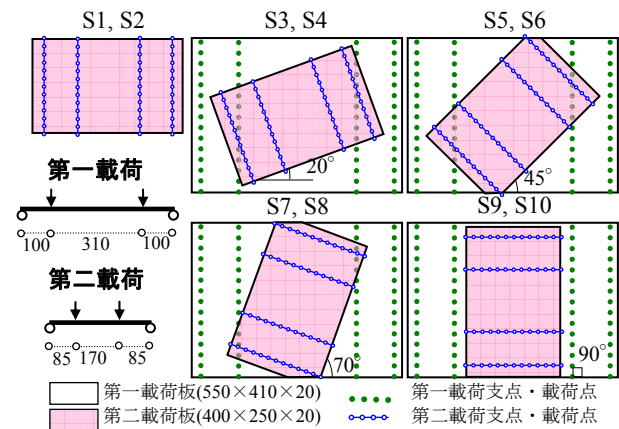


図-1 曲げ試験供試体

表-1 供試体変数

	Dimension			Initial Damage		Specimen Type
	W mm	L mm	H mm	Orientation Degree	Level % ϵ_{ft}	
S1	250	400	20	-	-	Reference
S2	250	400	20	-	-	Reference
S3	410	550	20	20	40	Main
S4	410	550	20	20	70	Main
S5	410	550	20	45	40	Main
S6	410	550	20	45	70	Main
S7	410	550	20	70	40	Main
S8	410	550	20	70	70	Main
S9	410	550	20	90	40	Main
S10	410	550	20	90	70	Main

*1 東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻助教 博士 (工学) (正会員)

*2 東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻博士課程 M.E. (正会員)

*3 東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻教授 工博 (正会員)

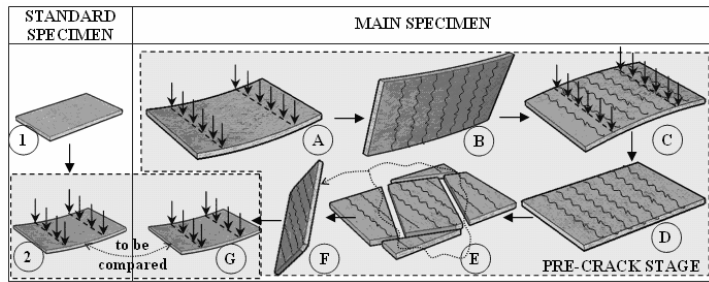


図-2 実験過程

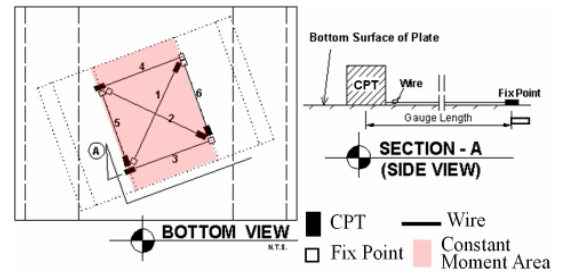


図-3 ポテンショメータ(CPT)配置

ことで底面の変形を曲面に沿って測定し(図-3), 任意方向の平均ひずみを得る。表-1 に実験変数一覧を示す。Reference 供試体である S1, S2 の最大荷重時下縁ひずみを計測し, Main 供試体第一載荷では初期ひずみをその 40% または 70%まで導入することで第一ひび割れを発生させる。第二載荷は破壊に至るまで変位制御で行った。なお, 実験では, 第一ひび割れは主応力方向に正確には垂直には発生せず, 最大で 9° のずれを伴った。また, コンクリートカッター使用によるひび割れの発生は確認されなかった。

3. 実験結果

図-4 に S1, S2 載荷試験及び S3-S10 第二載荷試験の荷重-中央点変位関係を示す。Reference である S1, S2 では, ひずみ硬化型セメント材料にみられるたわみ硬化が確認され, 供試体下面には複数ひび割れが観察された。S3-S10 では Reference 供試体と比較して, 強度の低下と第一ひび割れ角度が小さいほど初期剛性が低下した。また, 初期導入ひずみが大きい(S4, S6, S8, S10)ほど剛性が小さく靱性が高い傾向が確認された。これは多方向ひび割れが発生した場合に HPRC の性能が一軸引張状態と異なることを示しており, 特に剛性と強度低下を適切に評価することが性能を担保するために必要である。図-5 に S3-S8 の試験終了後のひび割れ性状を示す。第二ひび割れは主応力方向に垂直には発生せず, 第一ひび割れを介しながら第一ひび割れに垂直に近い角度で発生し, 終局時の局所化したひび割れは第一及び第二ひび割れが混合し全体として主応力垂直方向に近い角度を伴った。鉄筋コンクリートの場合第二ひび割れは主応力方向に対して垂直に発生するのに対し, HPRC では垂直とはならないのでひび割れ発生状況の把握も重要であると考えられる。これらひび割れ発生挙動など実験結果の詳細については別報にて報告したい。

4. 空間平均構成則

4.1 圧縮-引張モデル

本研究で行われた実験と既往の研究を基に HPRC に適用する空間平均構成則の開発を試みた。解析プラットフォーム

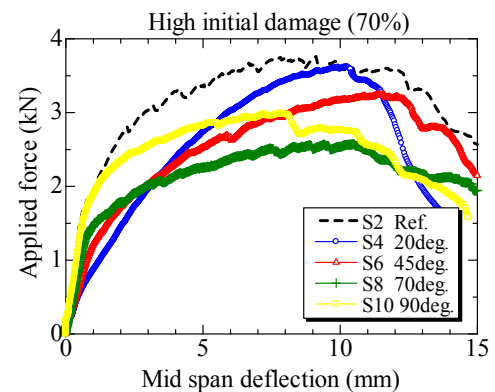
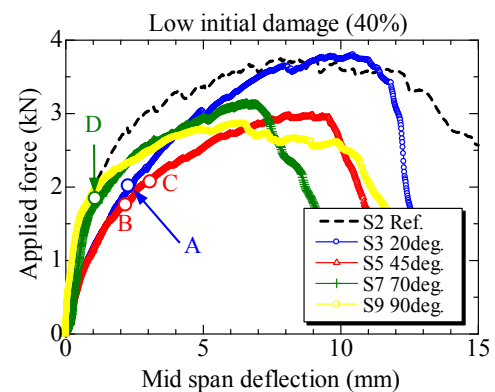
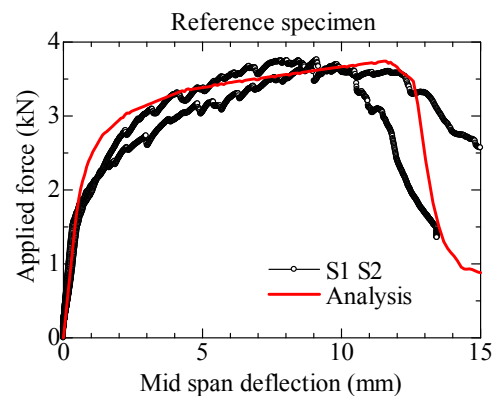


図-4 試験結果(S3-S10 は第二載荷)

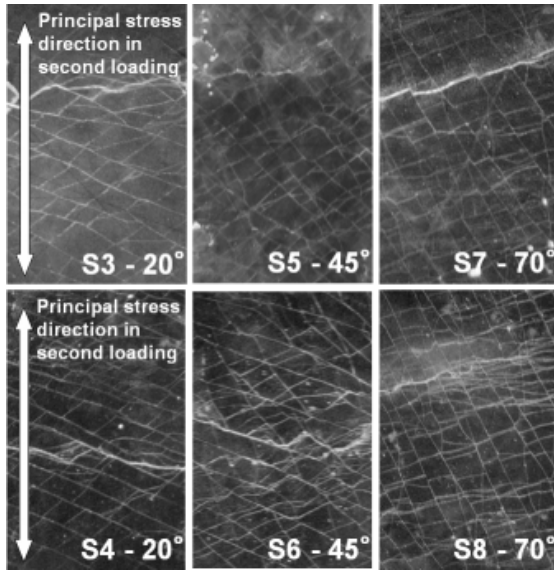
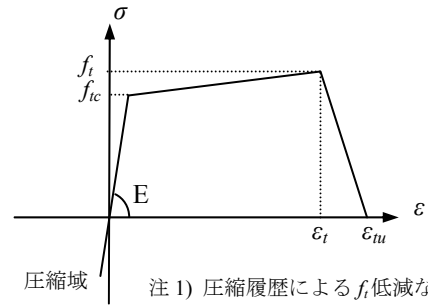


図-5 試験後の供試体底面ひび割れパターン

ームには3次元RC非線形FEM解析プログラムCOM3を用いた。COM3では独立して交差するひび割れを最大4方向まで、擬直交ひび割れ群とアクティブクラック法を用いて表現可能であり、多方向ひび割れ挙動の再現に適している⁷⁾。図-6にHPFRCC材料特性を表現する引張モデルを示す。圧縮域の基本的な挙動は前川らが開発したコンクリートの構成モデルを採用し⁸⁾、引張モデルに最大強度までのバイニア直線を組み込んだ。圧縮ひずみを受けた後の引張強度は、Billingtonらの研究によると圧縮破壊ひずみ以下の経験であれば引張強度への影響は小さいので⁹⁾、本研究の曲げ試験において圧縮破壊は確認されていないことを考慮し、減少させないこととした。HPFRCCの圧縮応力ひずみ曲線はコンクリートと比べ剛性が低く圧縮強度ひずみが大きいことが知られている⁴⁾。本研究では圧縮試験で得られた初期剛性と圧縮強度ひずみを得られるよう構成則内の定数 E_0 ⁸⁾を2.32に設定することで、ピークまで圧縮試験と同様の応力ひずみ曲線を得た。除荷-再載荷及び再接触モデルは前川らのモデルをそのまま適用した。図-7にFukuyamaらの圧縮-引張繰り返し実験¹⁰⁾と構成モデルの比較を示すが、高ひずみ領域への圧縮域から引張域への再載荷曲線で実験と違う傾向がみられ、改善の余地が残ることが確認された。

4.2 せん断モデル

FRCCには通常粗骨材が用いられないためコンクリートと比較してせん断伝達力が小さいと考えられ、清水らやKabeleの研究でもその傾向は示されている⁵⁾。本研究では曲げ試験の結果といくつかの仮定を用いてせん断モデルの構築を行う。第二載荷時の曲げスパン内断面応力分布を計算するために、図-8のように断面の平面保持を仮定し、応力の計算には圧縮側では上述の圧縮モデル、引張側は単純化し応力一定とした。図-8の断面のモーメント釣り合いから以下の式変形を行い引張応力を求める。



注1) 圧縮履歴による f_t 低減なし⁹⁾
注2) 構成則⁸⁾のうち定数 $E_0=2.32$

図-6 引張モデル

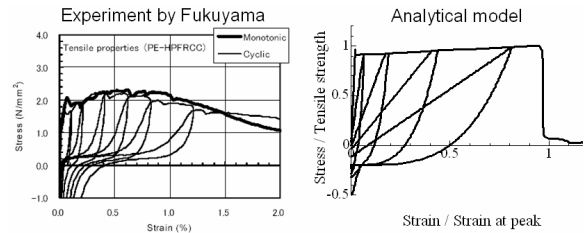


図-7 圧縮-引張繰り返しモデルの実験¹⁰⁾との比較

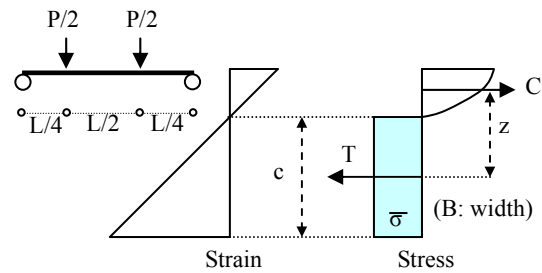


図-8 主応力方向断面のひずみと応力の分布仮定

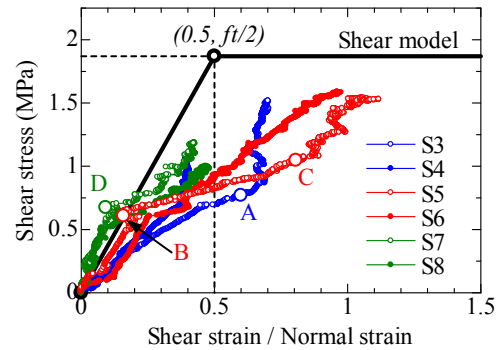


図-9 初期ひび割れ面のひずみとせん断応力の関係

$$M = T \cdot z \quad (1)$$

$$\frac{P \cdot L}{8} = (\bar{\sigma} \cdot c \cdot B) \cdot z$$

$$\bar{\sigma} = \frac{P \cdot L}{8 \cdot B \cdot c \cdot z}$$

ここで各試験の初期載荷最大荷重時力のモーメントと引張下縁ひずみから c 及び z を求め、簡単のために第二載荷では $c \cdot z$ をこの値を一定と仮定することで第二載荷における主応力方向引張応力を得る。S3-S8で用いられた $c \cdot z$ の値は163-169 mm^2 であった。この主応力方向の引張応力を初期

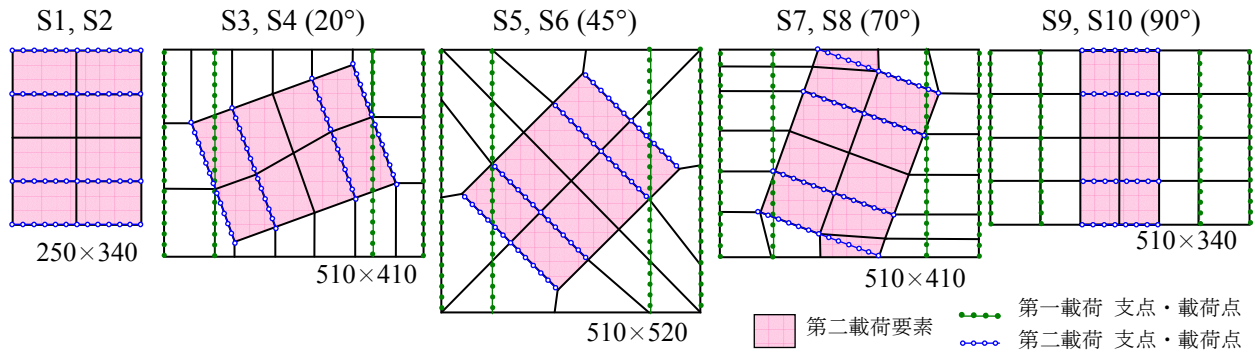


図-10 解析モデル要素分割

ひび割れ方向の座標系に変換することで初期ひび割れ面上の垂直及びせん断応力を計算する。また、ひずみはポテンシオメータの値から計算する。図-9にS3-S8の実験から計算された初期ひび割れ面のせん断ひずみ/垂直ひずみとせん断応力関係を示す。初期の弾性挙動後、0.8MPa程度で非線形となる。これはひび割れに垂直に近い第二ひび割れが発生(図-5)したため、この後は第一ひび割れのせん断ずれと第二ひび割れの引張挙動が混合されて図-9の曲線が表される。本研究では第一ひび割れのせん断挙動のモデル化を目的としているので、初期剛性のみを採用し、清水らの研究⁵⁾を参考に最大せん断応力は引張強度の0.5倍とし、その時のひずみ比を0.5とするバイリニアモデルをせん断モデルとして採用した(図-9)。また、この初期剛性はKabeleの提案モデル⁶⁾と同程度となった。

5. 解析

5.1 解析モデルと解析手順

構築した構成モデルをCOM3に組み込み、Mindlin板要素(8節点要素)を板厚方向に9分割し曲げ試験解析を行った。解析モデルを図-10に示す。S1,S2は初期ひび割れを導入せず純曲げ解析のみを行った。Main供試体は第二ひび割れ载荷の為にメッシュが不規則に分割されており、分割の問題により実験供試体とサイズが異なるモデルがあるが、第一・第二载荷共にせん断及び曲げスパンは実験と同様としている。なお、今後示す解析結果の荷重は実験供試体幅に正規化している。Main供試体シリーズでは、第一ひび割れを所定の曲げ応力を加え発生させ除荷し、更に負方向に载荷してから除荷することで実験と同様に残留変形及び応力を極力避けた。図-11に本研究で行われた第一载荷から除荷までの解析を実験結果と共に示す。なお、実験では供試体を反転させ負方向に载荷するがその変位は計測していない。その後COM3のRe-Start機能を用い実験でカットされた部分の要素を剛性の極端に低い弾性要素に置き換えることで取り除き、境界条件を変更して第二载荷を行った。その際、第一载荷の支点及び载荷点の拘束力は開放される。

5.2 材料定数

表-2に解析に用いた材料定数を示す。圧縮強度 f'_c と圧縮強度ひずみ ϵ'_c は圧縮試験から求め、本研究では定数 E_0 を2.32と設定することで実験と同様の弾性係数を構成モデルより得た。本研究では直接引張試験は行っていない。ひび割れ発生強度 f_{ic} はReference供試体の初期ひび割れ発生時の底面ひずみと弾性係数から決定し、引張強度ひずみ ϵ_t はReference供試体曲げ試験において急激に荷重が低下する時の底面ひずみと本研究では定義し、2.0%までの軟化域を持たせた(ϵ_m)。HPCFRCCは通常ひずみ硬化を示すが、本研究ではその割合は不明である。そこで、ここでは引張強度 f_t をひび割れ発生強度から10%増加させることとした。採用された材料定数を用いた引張モデルと既往の同配合の直接引張試験結果を図-12に示す⁴⁾。これによりモデルが材料特性をある程度適切に表現していると判断した。また、ポアソン比は文献⁴⁾を参考に決定した。

5.3 解析結果と検証

Reference供試体の解析結果を図-4に示す。おおむね実験と同様の挙動が得られた。解析での最大荷重時において下縁ひずみは引張強度ひずみである1.6%であったのでMain供試体S3-S10の解析にはこの40%または70%のひずみを第一载荷において与えた(図-12)。図-13にS3-S10の第二载荷解析結果を示す。初期ひび割れの小さいS3,S5,S7については第二・第三ひび割れ発生点も併せて示す。実験と比較して初期ひび割れ角度による剛性低下傾向は同様であるものの、20°(S3,S4)の場合は剛性低下が大きく、70°(S7,S8)と90°(S9,S10)の場合は強度の低下が表現できていない。45°回転させたS5,S6については実験と同様の結果が得られた。

これらの挙動について構成則とひび割れ発生の観点から考察する。S3,S4は主応力方向が初期ひび割れと垂直に近いので、初期ひび割れの再開口、即ち引張再载荷モデルが全体挙動を支配する。図-7のように本再载荷モデルは実験結果を十分には反映しておらず低ひずみから高ひずみ域への剛性が低い。このため解析では全体剛性が低くなり、S4では顕著である。S3では荷重2.5kNで第一ひび割れに垂直

な第二ひび割れが発生し、2.9kN で第三ひび割れが導入され、第三ひび割れ開口により終局に至った。なお COM3 の擬似直交ひび割れモデルでは第一ひび割れに垂直に近い角度 ($\pm\pi/8$ 内) に発生したひび割れは計算上垂直にひび割れが入ったものとして計算が行われる⁷⁾。実験において、第一ひび割れに垂直に近い第二ひび割れが観察されているが明確な第三ひび割れは観察されていない(図-5)。他の供試体も含め、実験では終局に至るひび割れは一直線上には発生せず、第三ひび割れが第一・第二ひび割れを包括しながら発生していると考えられその明確な判断は困難であるが、図-9 A 点よりせん断ひずみの増加停止が見られる。これはこの点以降主応力方向の変形が全体を支配する第三ひび割れ、もしくは第三ひび割れと等価な第一・第二ひび割れ混合面の発生を示唆するものである。実験では図-4A点 2.0kN にあたり、解析より低い荷重から第三ひび割れが発生していることが分かる。

角度の大きい S7-S10 では初期ひび割れの影響は小さく、主応力方向に垂直に近い角度で新たに発生した第二ひび割れが挙動を支配する。特に 90°の場合 (S9,S10), 初期ひび割れの影響は無く Reference と同結果となった。荷重-変位関係の形状は実験と同様であるが、実験では 25%程度の強度低下が確認されている。本モデルには横方向引張ひずみによる引張強度低下の影響が組み込まれていないことが原

因であると考えられる。また S7 では第三ひび割れは発生せず終局に至ったが、図-9D 点の実験での第二ひび割れ発生点と考えられ、図-4D 点にあたる。実験と解析で荷重変位関係中の第二ひび割れ発生点は同様となった。また実験のひび割れ図からも第三ひび割れは観察されなかった(図-5)。

S3,S4 は初期ひび割れに垂直な第二ひび割れが発生し剛性が低下した後、第三ひび割れの発生により増加に転じる。その後は第三ひび割れの発生した要素と第一・第二ひび割れのみ要素の挙動が包括して全体挙動を表す。実験では初期ひび割れとそれに垂直な第二ひび割れが図-9B 点付近で、第三ひび割れが C 点付近で発生したと考えられ、これは荷重変位関係上では図-4 及び図-13 の点 B,C であり、解析とおおむね一致した。解析はひび割れ面上で引張とせん断が混在する挙動を多方向ひび割れ下において実験と同様に表現できたと考えられる。

6. まとめ

本研究の結論を以下に纏める。

- (1) HPRCC の曲げ試験において主応力方向を変化させることにより第二ひび割れを発生させる実験を行い、多方向ひび割れ時に HPRCC の性能が一軸引張状態と異なることを確認した。

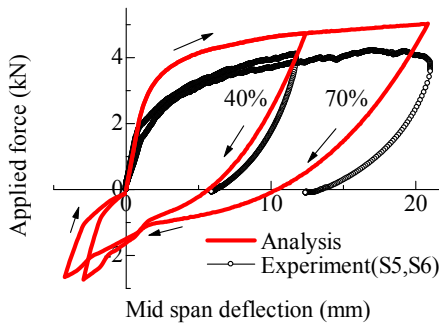


図-11 第一载荷

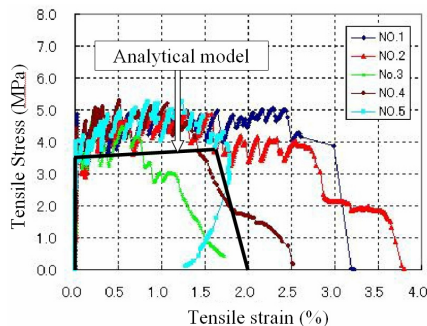


図-12 解析モデルと既往の実験⁴⁾の比較

表-2 材料定数

f'_c (MPa)	33.6	f_t (MPa)	3.74
ϵ'_c	0.005	f_{tc} (MPa)	3.4
E (MPa)	15,000	ϵ_t	0.016
ν	0.23	ϵ_{tu}	0.02

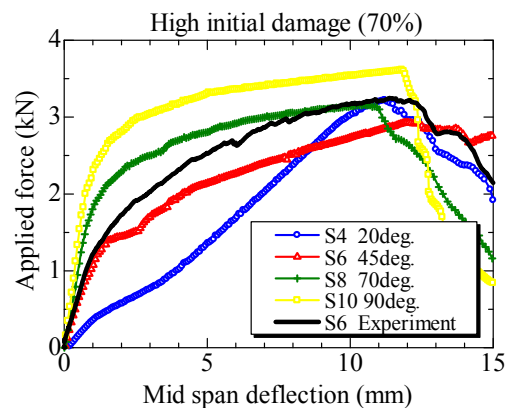
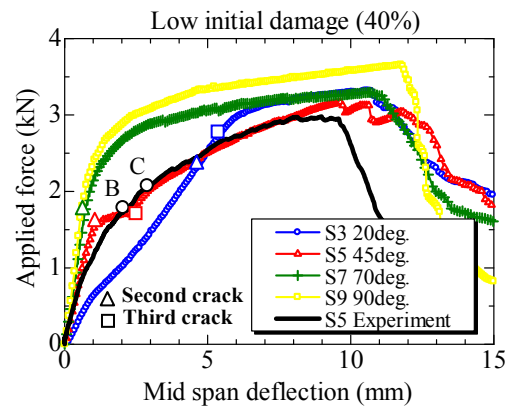


図-13 解析結果

- (2) 実験結果と既往の研究を基に簡易な空間平均化構成モデルを構築し COM3 に導入した。
- (3) 主応力方向を変化させる複雑な荷重過程を COM3 により再現可能であることを確認した。第二荷重時の剛性及び強度低下の解析による定量的評価はできなかったが、第二・第三ひび割れの発生をある程度実験と同様に表現できた。
- (4) 多方向ひび割れ発生時の挙動を追跡するには、引張再荷重構成モデルの向上と横方向ひずみ履歴の引張強度への影響を導入することが必要であることを示した。
- (5) 提案した引張及びせん断伝達モデルを用いて、ひび割れ面上に引張とせん断が混在し多方向ひび割れが発生する主応力 45°回転のケースを実験と同様に解析できた。

謝辞

本研究の実験を行うにあたり、鹿島建設より ECC プレミックス材料を提供頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Naaman, A. E.: Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, pp241-252, 2003.
- 2) Kunieda, K. and Rokugo, K.: Recent Progress on HPFRCC in Japan, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.1, pp19-33, 2005.
- 3) 福浦尚之ほか：超高強度繊維補強コンクリートはり部材の曲げ・せん断荷重実験，土木学会論文集，No.795/V-68, pp67-80, 2005.
- 4) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，土木学会，2007.
- 5) 清水克将ほか：PVA-ECC のひび割れ面でのせん断伝達機構と部材のせん断耐力評価，日本建築学会構造系論文集，No.619, pp131-139, 2007.
- 6) Kabele, P.: New Developments in Analytical Modeling of Mechanical Behavior of ECC, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, pp253-264, 2003.
- 7) 福浦尚之，前川宏一：非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面 RC 要素の空間平均化構成則，土木学会論文集，No.634/V-45, pp.177-195, 1999.
- 8) Maekawa, K. et al.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
- 9) Billington, S. L. and Kesner, K. E.: Cyclic Response of Ductile Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, HPFRCC4 Workshop, pp363-378, 2003.
- 10) Fukuyama, H. and Suwada, H.: Experimental Response of HPFRCC Dampers for Structural Control, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, pp317-326, 2003.