

論文 HPFRCC を用いた構造部材の非線形挙動に対する FEM 解析

米澤 健次^{*1}・平田 隆祥^{*2}・渡辺 哲^{*3}・岡野 素之^{*3}

要旨：HPFRCC を用いた構造部材（以下 HPFRCC 部材）の非線形挙動に対する解析手法を検討するために、既往の実験を対象に 3 次元非線形 FEM 解析を行った。非線形解析を行う上で HPFRCC 材料と通常のコンクリート材料との大きな違いは、HPFRCC は繊維が引張力を負担するため引張靱性が向上すること、また、HPFRCC は骨材を有しないためひび割れ面のせん断伝達特性が異なることが想定される。そこで、ひび割れ後の引張特性については、材料試験で得られた引張応力～ひずみ関係を基にモデル化し、ひび割れ面のせん断伝達特性に関しては、通常のコンクリート材料を対象とした既往モデルを基本として、その特性を変化させた解析を行い、実験結果を概ね良好に再現可能なモデル化手法を選定した。

キーワード：HPFRCC, 非線形 FEM 解析, 梁部材, ポリプロピレン

1. はじめに

引張力を分担してひび割れ幅を微細に抑制し、大きな引張変形と靱性を有するセメント系材料として「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cement Composite：以下 HPFRCC と表記）」があり、2007 年 3 月に(社)土木学会からその設計・施工指針（案）¹⁾（以下指針案と表記）が発刊された。この HPFRCC は、セメント系材料と補強用の有機系短繊維を用いた複合材料で、一軸引張応力下において、擬似ひずみ硬化特性を示すとともに、微細で高密度の複数ひび割れを形成する高靱性材料である。近年、この HPFRCC に関する研究は、多くの機関で実験的研究が活発に行われている。しかし、HPFRCC 部材の非線形解析の事例は少なく、その解析手法は確立されているとは言い難いのが現状である。

本研究では、HPFRCC 部材の非線形挙動を精度良く再現かつ予測可能な解析手法の構築を目的に、既往の実験試験体を対象とした 3 次元 FEM 解析を行った。解析を行う上では、HPFRCC 材料とコンクリート材料の特性の違いを適切に考慮する必要がある。通常のコンクリート材料を対象として開発された材料構成則を用いて解析を行っても実験の挙動を精度良く再現できないことは明白である。特に、HPFRCC 材料は繊維が引張負担するため、ひび割れ後の特性が従来のコンクリートとは大きく異なり、また、骨材を有しないため、コンクリートの骨材のかみ合いによるひび割れ面のせん断伝達特性も大きく異なることが想定される。

このひび割れ後の引張特性及びひび割れ面のせん断伝達特性の材料モデルに着目し、実験と解析を比較する

ことにより HPFRCC 部材の非線形挙動に対する解析手法を検討した。

なお、本研究における HPFRCC は、一般に用いられるビニロン系の PVA 繊維に比較して安価なポリプロピレン繊維を用いている。

2. 既往実験の概要

2.1 引張材料試験²⁾³⁾

筆者らは HPFRCC 材料の基本的な引張特性を把握するために 2 種類の引張実験を実施した。1 つは図-1 に示すダンベル型供試体を用い、もう一つは図-2 に示す鉄筋を埋込んだプリズム型供試体を用いた。プリズム型供試体では埋込んだ鉄筋の両端に引張力を載荷し、全体の引張力から鉄筋の負担力を差し引いて HPFRCC 材料の負担引張力を算定した。また、試験結果のバラツキをみるために同じ形状及び材料の供試体を、ダンベル型供試体は 5 体、プリズム型供試体は 3 体製作した。図-3 にダンベル型供試体の引張応力～平均ひずみ関係を示し、図-4 にプリズム型供試体の HPFRCC 材料が負担する引張応力～平均ひずみ関係を示す。各試験体とものバ

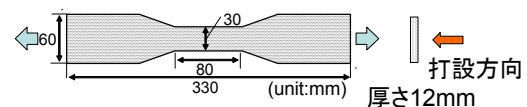


図-1 ダンベル型供試体

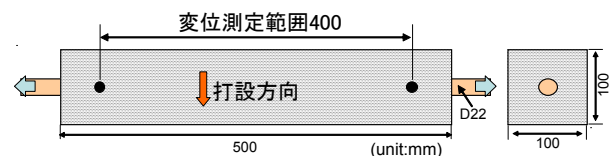


図-2 プリズム型供試体

*1 (株)大林組技術研究所 構造技術研究部 主査 博士（工学）（正会員）

*2 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*3 (株)大林組技術研究所 構造技術研究部 主査 工修（非会員）

*4 (株)大林組技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

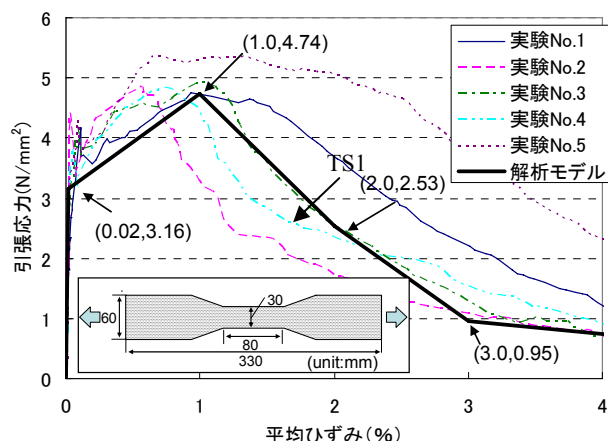


図-3 引張応力～平均ひずみ関係（ダンベル型）²⁾³⁾

ラツキが大きい、ダンベル型供試体では、ひび割れが生じて平均ひずみ 1%程度まで引張応力が上昇し、平均ひずみ 5%程度まで徐々に軟化する傾向を示した。プリズム型供試体の場合には、ひび割れが生じてから鉄筋が降伏するまで引張応力が上昇し、鉄筋降伏後（平均ひずみ 0.2%程度）は徐々に軟化し、平均ひずみ 0.4%程度で一定の引張応力を保持する傾向を示した。このようにダンベル型供試体とプリズム型供試体では、ひび割れ後の引張特性が大きく異なることがわかった。この原因としては、プリズム型試験体では埋込まれた鉄筋が降伏し、その降伏した箇所にひび割れが局所化したために鉄筋降伏と同時に HPFRCC の負担力が軟化したものと考えられる。

2.2 解析対象試験体及び実験概要²⁾³⁾

ここで解析対象とする 5 体の実験試験体の一覧を表-1 に示す。試験体の断面は、幅 200mm×高さ 300mm で、2 体の曲げ破壊型と 3 体のせん断破壊型試験体について解析を行った。

曲げ破壊型の試験体は、1/3 の範囲に HPFRCC を適用した試験体 B-FCS と、全断面に HPFRCC を適用した試験体 B-FS の 2 種類である。一方、せん断破壊型の試験体は、コンクリートのみの無垢な試験体 S-C と、全断面に HPFRCC を適用した試験体 S-F、および全断面に HPFRCC を適用し、かつ帯鉄筋を配置した試験体 S-FS の 3 種類である。荷重は図-5 に示すようにローラー支承とし、スパン中央に対し左右対称の 2 点に対して 1 方向に荷重する曲げ型のはり形式で、せん断スパン比は 2.4 とした。コンクリートおよび HPFRCC の配合を表-2 に、また、それらの物性を表-3 に、鋼材の物性を表-4 に示す。

実験から得られた 5 体の荷重～変位関係を図-6 と図-7 に示す。曲げ破壊型の 2 体に関しては、両試験体ともに指針案¹⁾に準じた耐力計算値と概ね対応し、普通コンクリートと HPFRCC の打ち分けの有無を変数とした

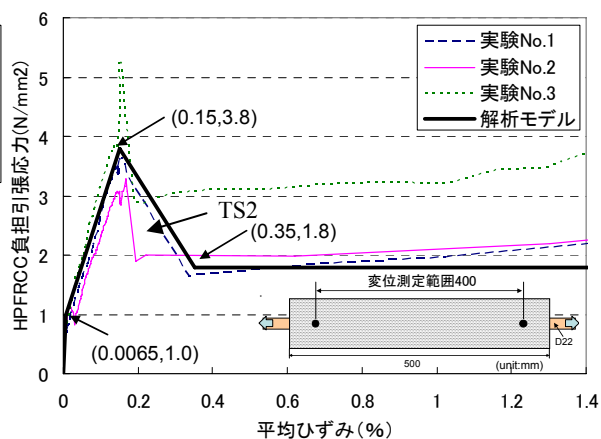


図-4 負担引張応力～平均ひずみ関係（プリズム型）

表-1 試験体一覧²⁾³⁾

形式	曲げ破壊型		せん断破壊型		
試験体	B-FCS	B-FS	S-C	S-F	S-FS
試験体の概略図					
(断面の着色部位に HPFRCC を適用)	1/3 の範囲 HPFRCC	全断面 HPFRCC	HPFRCC なし	全断面 HPFRCC	全断面 HPFRCC
主鉄筋	D19(SD295)		φ23(ゲビデスターブ)		
帯鉄筋	D6@75(SD345)		なし		D6@150(SD345)

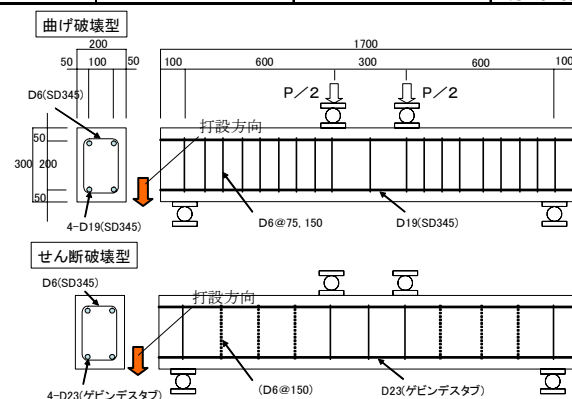


図-5 試験体寸法及び荷重システム²⁾³⁾

表-2 コンクリートおよび HPFRCC の配合²⁾³⁾

配合の種類	W/B (%)	s/a	S/B	W (kg/m ³)	分離低減剤 (kg/m ³)	PP繊維 (vol%)
コンクリート	45.0	45.0	—	160	—	—
HPFRCC	47.0	—	0.83	385	0.3	3.0

W:水量, s:細骨材量, a:粗骨材量, B:結合材料

表-3 コンクリートおよび HPFRCC の物性²⁾³⁾

配合の種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
コンクリート	31.1	2.55	2.53
HPFRCC	39.1	3.16	1.54

表-4 鋼材の物性²⁾³⁾

鋼材の使用部位	サイズ	材質	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
主鉄筋	D19	SD295	327	1.93
	φ23	ゲビデスターブ	1138	2.02
帯鉄筋	D6	SD345	371	1.95

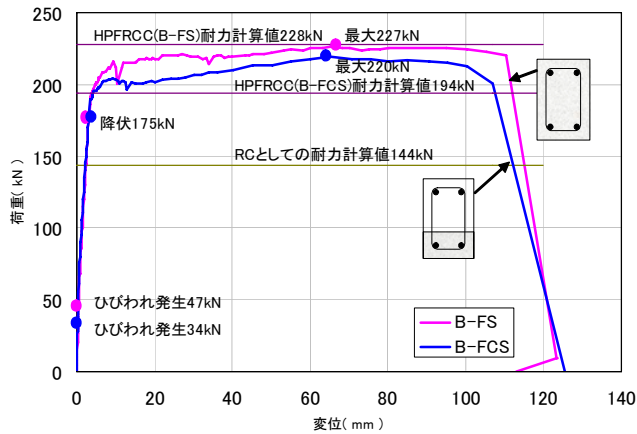


図-6 曲げ破壊型の荷重～変位関係（実験）²⁾³⁾

B-FS と B-FCS に顕著な差異は無かった。また、通常の RC 部材として算定した曲げ耐力と比較して、実験の最大耐力は大きく上回り、HPFRCC の引張負担の効果が顕著に現れた。

せん断破壊型の 3 体に関しても、HPFRCC の繊維補強の効果が、せん断耐力の向上に寄与することがわかり、また、せん断補強筋の効果も顕著で、指針案に準じた計算により概ね最大耐力は算定できることがわかった。

3. 解析の概要

3.1 モデル化手法

解析モデルを図-8 に示す。試験体は対称性を利用して 1/4 をモデル化し、コンクリート及び HPFRCC は六面体要素、鉄筋はトラス要素を用いて表現した。加圧板は六面体要素を用いて表現し、躯体と加圧板の間に接合要素を挿入し、支圧力のみが伝達されるものと仮定した。

3.2 材料構成則

HPFRCC 及びコンクリートは、直交異方性体としてモデル化し、ひび割れは非直交ひび割れ分散モデル⁴⁾を用いて表現した。圧縮側の主応力～等価一軸ひずみに対しては、HPFRCC 及びコンクリートともに修正 Ahmad モデルを用いて表現した。図-8 に HPFRCC の一軸圧縮試験結果と修正 Ahmad モデル⁵⁾の比較を示す。ひび割れ後の圧縮劣化特性に関しては、諏訪田らの研究⁶⁾を参考し、普通コンクリートの純せん断実験から導かれたモデル⁸⁾を採用した。

(1) 引張特性

HPFRCC 材料は前述のように従来のコンクリートに比べて引張靱性が向上する。また、その特性は鉄筋降伏の有無により変化することが、ダンベル型供試体及びプリズム型供試体の鉄筋両引き試験の結果より明らかとなった。そこで、各引張材料試験の結果を基に、2 種類の引張特性のモデル化を行った。図-3.4 に各引張材料試験

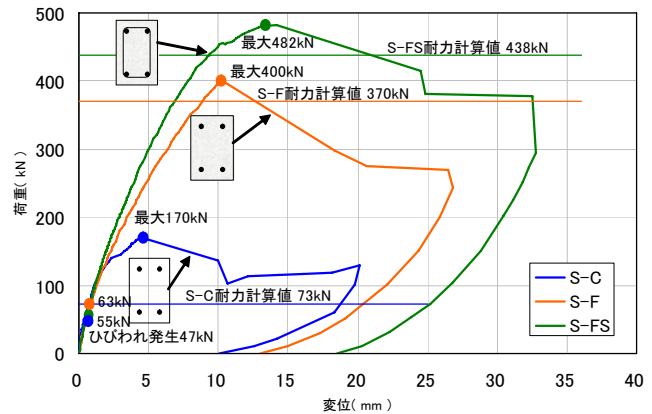


図-7 せん断破壊型の荷重～変位関係（実験）²⁾³⁾

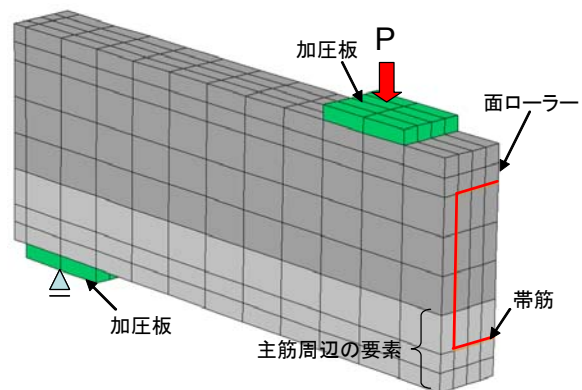


図-8 解析モデル

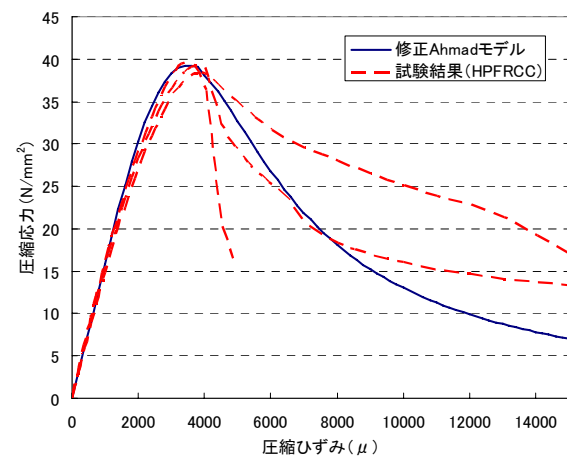


図-9 圧縮特性に対する解析モデルと試験結果の比較

結果と各モデル (TS1, TS2) を示す。降伏が予想される鉄筋周囲の HPFRCC には TS2 の特性を仮定し、その他の HPFRCC にはダンベル型供試体の結果を基にした TS1 の特性を仮定した。各試験結果はバラツキが大きいため、定性的な傾向を捉えることに主眼をおき、試験結果を近似するものとしてモデル化した。なお、コンクリート部の引張特性としては、ひび割れが生じるまでは線形を仮定し、ひび割れ後はコンクリート標準示方書⁷⁾に従う引張軟化特性を与えた。

(2) ひび割れ面のせん断伝達特性

従来の鉄筋コンクリートのひび割れ面においては、骨材のかみ合いと鉄筋のダボ効果によりせん断伝達するものと考えられている。しかし、HPFRCC 材料は骨材が存在しないため、骨材のかみ合いによるせん断伝達はないものと考えられる。よって、コンクリートを対象として誘導された材料構成則をそのまま適用した解析では、ひび割れ面のせん断伝達を過大に評価することが想定される。

そこで、せん断破壊型試験体に対してはひび割れ面のせん断伝達特性を変数として解析を行った。仮定した解析変数を以下に示す。

Case1：長沼モデル⁸⁾により表現

Case2：ひび割れ面のせん断伝達なし

Case3:長沼モデルのひび割れ面最大せん断応力を低減

長沼モデルは、通常の鉄筋コンクリート部材に対して、**図-10**に示すようにひび割れ面の平均せん断応力～平均せん断ひずみの関係を、コンクリート強度、ひび割れを横切る鉄筋量・強度、及びひび割れ直交方向ひずみの関数で表現し、骨材のかみ合いと鉄筋のダボ効果を考慮した材料モデルである。Case3 では HPFRCC 材料において骨材の無いことを便宜的に考慮するために、長沼モデルにおいてひび割れが開くような外力が作用しない場合の最大せん断力 (τ_{du}) を求める(1)式において、右辺第1項(1.38)をゼロと仮定した。(1)式は Mattock 等が実験結果に基づいて提案されたものである。

$$\tau_{du} = 1.38 + 0.8 \cdot (P_s \cdot \sigma_y + \sigma_n) \text{ -----(1)}$$

ここで、 σ_n はひび割れ面に作用する垂直応力（圧縮を正）、 P_s 、 σ_y はひび割れを横切る鉄筋比及びその降伏強度を示す。**図-8**に示すモデルではせん断補強筋は、トラス要素により離散化してモデル化しているため、長沼モデルにおける鉄筋比は、全断面に平均的に分散するものとして平均的な鉄筋比を設定した。

なお、その他の用いた材料構成則を**表-5**に示す。コンクリート部のひび割れ面のせん断伝達特性にはすべて Case1 を仮定した。曲げ破壊型の解析における HPFRCC 部のひび割れ面のせん断伝達モデルは Case3 を仮定した。

4. 解析の結果

(1) 曲げ破壊型試験体

図-11に曲げ破壊型試験体の解析と実験から得られた荷重～変位関係を示す。なお、**図-11**中には、全断面にダンベル型供試体の引張試験結果を基にした引張特

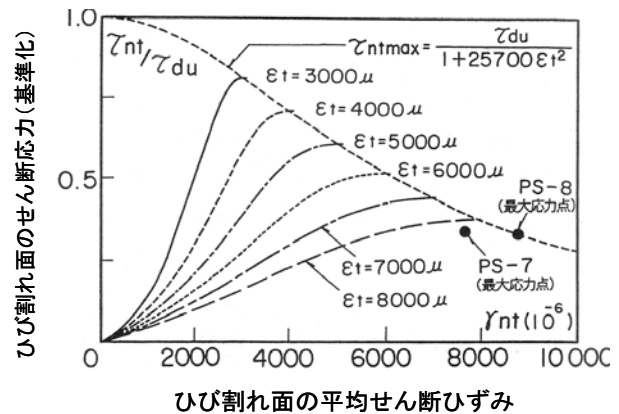


図-10 ひび割れ面せん断伝達モデル⁸⁾

表-5 材料構成則一覧

	コンクリート	HPFRCC
応力～ひずみ関係 (圧縮側)	修正Ahmadモデル ⁵⁾	
応力～ひずみ関係 (引張側)	コンクリート示方書 ⁷⁾ 引張軟化特性	TS1, TS2
破壊条件	Ottesenの4パラメータモデル	
ひび割れ面の せん断伝達特性モデル	長沼モデル	解析変数
ひび割れ後の圧縮低減	長沼モデル ⁸⁾	

性TS1を仮定した解析結果とひび割れ後は引張応力を負担しない解析結果（Tension-cut-off）を併記した。

両試験体共に、引張主筋周辺の HPFRCC に、鉄筋降伏の影響を考慮した引張特性TS2を仮定することで実験結果を良好な精度で再現できている。また、図より全断面にTS1の引張特性を仮定した解析は、実験に比べて、耐力が大きい。ひび割れ後引張応力を負担しないものと仮定した Tension-cut-off の解析は、両試験体ともに実験結果と比べて耐力を過小評価している。これらの結果より、繊維による引張負担が定量的に解析で再現でき、かつ、このことから、鉄筋降伏により HPFRCC のひび割れが局所化して負担引張力が低下することの影響を適切に考慮する必要があることがわかった。

(2) せん断破壊型試験体

せん断破壊型試験体3体の解析と実験から得られた荷重～変位関係の比較を**図-12**に示す。

全断面コンクリートとした S-C 試験体の最大耐力までのせん断非線形挙動に関しては、ここで示す材料構成則及び解析手法により、良好な精度で再現できることがわかる。

全断面を HPFRCC とし、せん断補強筋を配してない S-F 試験体に関しては、ひび割れ面のせん断伝達はないものと仮定した Case2 の解析が最も良好に実験のせん断挙動を再現できていることがわかる。

一方、全断面を HPFRCC として、かつせん断補強筋を配した S-FS 試験体に関しては、便宜的にひび割れを横切るせん断補強筋のダボ効果のみを考慮した Case3 の解

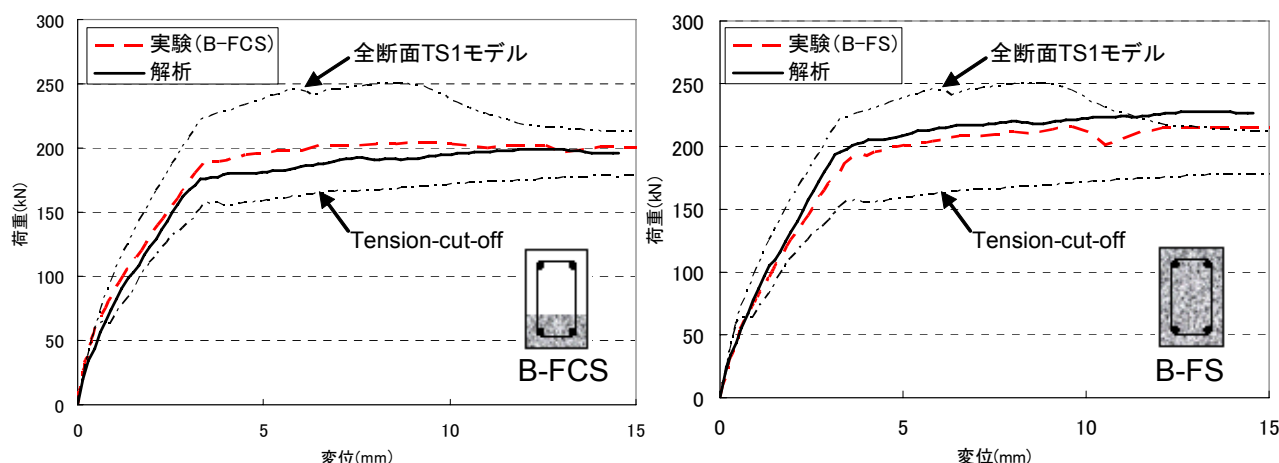


図-11 実験と解析の荷重～変位関係の比較（曲げ破壊型）

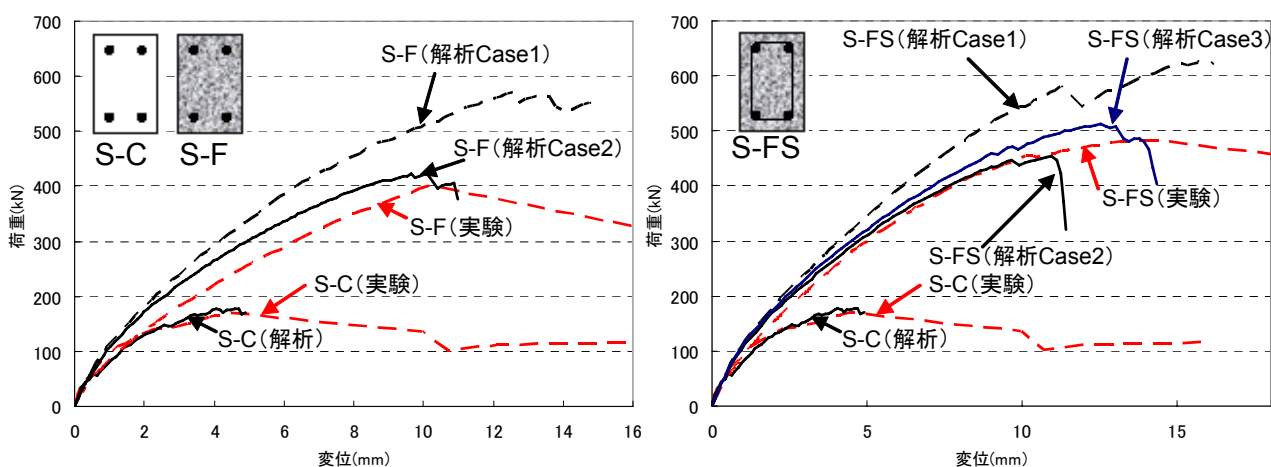


図-12 実験と解析の荷重～変位関係の比較（せん断破壊型）

析が最も実験結果を良好に再現することが分かった。

これらの解析結果より、せん断補強筋を配した場合には、部材のせん断挙動にそのダボ効果を考慮する必要性がわかり、せん断補強筋を配さず HPFRCC のみの場合には、ひび割れ面のせん断伝達は殆どないものとする仮定が妥当であると考えられる。また、HPFRCC のひび割れ面のせん断特性として、通常のコンクリートの材料構成則をそのまま適用した解析では、せん断耐力を過大に評価することがわかった。

図-13 に S-FS と S-F 試験体の実験時の最終破壊状況と解析における最大荷重時の損傷状況を比較して示す。なお、図-13 における解析結果は、S-F については Case2、S-FS については Case3 の損傷状況を示す。解析における主要なひび割れと実験における主要なひび割れの位置や方向など定性的な傾向が概ね一致していることが確認できる。

5. まとめ

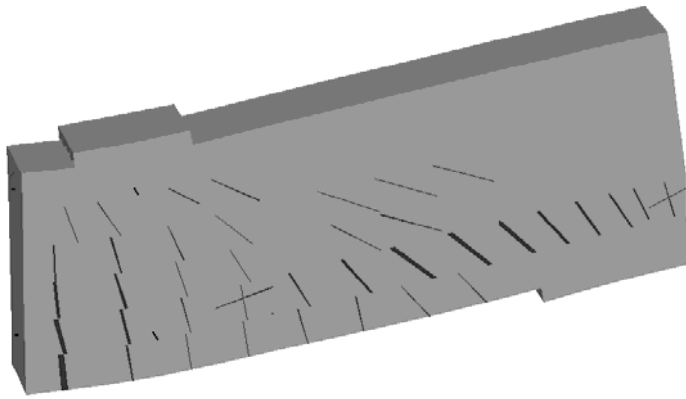
本研究では、HPFRCC を用いた構造部材の非線形解析手法を検討するために、既往の実験試験体 5 体を対象に 3 次元 FEM 解析を行った。以下に得られた知見をまと

めて示す。

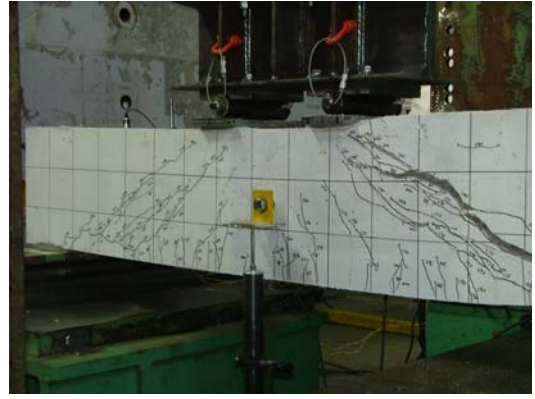
- (1) HPFRCC 部材を対象と非線形解析において、コンクリート材料を対象としたひび割れ面のせん断伝達特性モデルを適用すると、最大耐力を過大に評価することがわかった。
- (2) HPFRCC 材料は、鉄筋降伏によりひび割れの局所化が生じ、鉄筋降伏と同時に引張軟化する。この現象を解析モデルに反映することで、曲げ破壊型試験体の非線形挙動を良好に再現できることが分かった。
- (3) HPFRCC 材料を用いた部材に対するひび割れ面のせん断伝達特性モデルは、せん断補強筋を配さない場合においては、せん断伝達なしと仮定した解析が最も実験結果と良好に対応し、せん断補強筋を配した場合に対しては、そのダボ効果を考慮する必要があることを確認した。

参考文献

- 1) 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，No.127，2007。
- 2) 平田隆祥，川西貴士，岡野素之，渡辺哲：ポリプロ

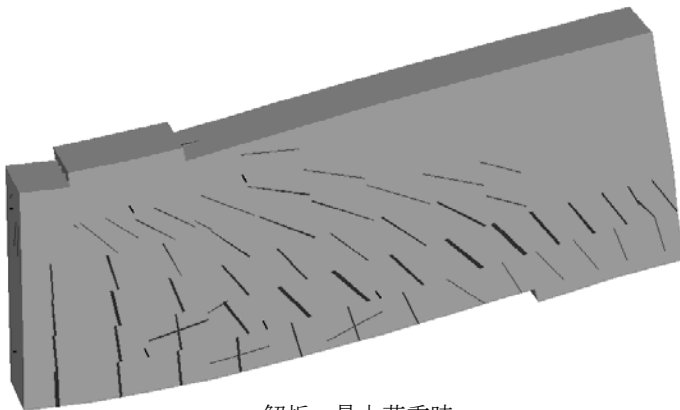


解析：最大荷重時



実験：最終破壊状況

図-13(a) 損傷状況の比較 (S-F 試験体)



解析：最大荷重時



実験：最終破壊状況

図-13(b) 損傷状況の比較 (S-FS 試験体)

ピレン短繊維を用いた複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の基礎的検討，大林組技術研究所報，No.72，CD-ROM，2008 年

- 3) 岡野素之，渡辺哲，川西貴士，平田隆祥：ポリプロピレン繊維を用いた HPRCC 部材の基本性能，土木学会大会，2008 年
- 4) 米澤健次，長沼一洋，江戸宏彰：RC 構造部材の三次元繰返し FEM 解析の精度向上，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.427-430，2003.9
- 5) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，

pp.163-170，1995.8

- 6) 諏訪田晴彦：ひずみ硬化型引張特性を有する高靱性セメント系複合材料を用いたダンパー部材のせん断挙動に関する研究，千葉大学学位論文，2008.1
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 8) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 1），日本建築学会構造系論文報告集，第 421 号，pp.39-48，1991.3