

論文 架橋則を適用した DFRCC 部材の非線形 FEM 解析

伊藤 綾哉*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*3

要旨：高靱性繊維補強セメント複合材料（以下、DFRCC）部材の構造性能を評価するために、金久保らが提案する架橋則を適用した FEM 解析手法について検討し、その破壊性状について考察した。また、DFRCC が有する繊維の不均質性が部材の構造性能に及ぼす影響に関する基礎的な検討として、試験区間内の要素に対して異なる引張特性をランダムに付与した FEM 解析を実施した。その結果、架橋則より DFRCC の引張強度および引張破壊エネルギーを評価し、線形軟化モデルを用いることで DFRCC 部材の構造性能を評価できた。また、引張特性の不均質性はひび割れ発生状況、部材の抵抗機構および構造性能に影響を及ぼした。

キーワード：DFRCC, FEM 解析, 架橋則, 破壊エネルギー

1. はじめに

高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC：Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites）を構造部材に適用する場合、DFRCC の優れた引張性能を構造性能の評価に反映させることが重要である。また、効果的な DFRCC の構造部材への適用方法を検討するにあたっては、種々の条件を変更して組み合わせるパラメトリックスタディが可能な数値解析手法の活用が有効である。

既往の研究では、DFRCC を用いた構造部材に対する数値解析事例がいくつか存在する。非線形 FEM 解析を実施した事例では、渡部ら¹⁾は耐震壁に対する検討を通じて、DFRCC の破壊力学パラメータを適切に評価することが重要であることを指摘している。諏訪田ら²⁾は引張および圧縮に対する構成則モデルを提案し、構造要素のせん断強度および破壊性状を良好に再現している。磯部ら³⁾は、鉄筋を有する一軸引張部材に対して異形鉄筋の節のサイズまでモデル化し、引張軟化特性の違いが荷重-変位関係やひび割れ分散性に与える影響について検討している。また、繊維 1 本 1 本をモデル化した剛体バネモデルによる数値解析を実施した小倉らの研究⁴⁾では、繊維の架橋力-ひび割れ幅曲線に着目して鉄筋を有する一軸引張部材のひび割れの進展性状を考察している。

これらの既往の研究より、数値解析によって DFRCC 部材の構造性能を評価する場合、DFRCC の力学的な性能を適切に評価した構成則の適用が重要であり、とりわけ繊維の架橋力-ひび割れ幅関係を反映した引張軟化特性の評価が重要である。これに対し、金久保らは DFRCC における繊維の架橋性能を架橋則と呼ばれる引張応力-ひび割れ幅関係によって評価する手法を構築し⁵⁾、せん断ひび割れ面における繊維の挙動を考慮した架橋則により、せん断架橋性能の評価を試みている⁶⁾。さ

らに、DFRCC を用いた梁部材の曲げせん断実験を実施し、実験におけるひび割れ性状に基づいた架橋則に基づく DFRCC のせん断補強効果の評価を通じて、架橋則を用いた構造性能評価の可能性を示唆している⁷⁾。

本研究は、金久保らが提案する架橋則を FEM 解析に適用することにより、DFRCC 部材の構造性能の評価を試みるものである。本報では大圖ら⁸⁾の DFRCC を用いた梁部材の曲げせん断実験を対象とし、架橋則の適用方法について検討するとともに、それが梁部材の破壊性状に及ぼす影響について考察する。

2. 解析対象試験体

図-1 に解析対象試験体⁹⁾の概要を示す。また、表-1 に試験体一覧を示す。本試験体はせん断破壊先行型とするため、主筋に SD490 を使い、筋筋比を 0.15% としている。また、試験体は 3 体であり、PVA 繊維の体積混入率を 0%、1.0% および 2.0% としている。

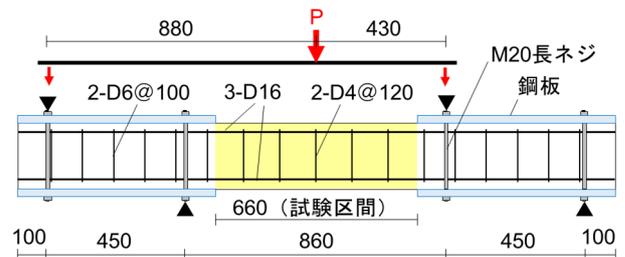


図-1 試験体形状および加力方法（単位：mm）

表-1 試験体一覧

試験体名	共通事項	繊維混入率 (%)
No.1	断面：梁幅 160 mm × 梁せい 220 mm せん断スパン比：1.5	— ※モルタル
No.2	主筋：3-D16 (SD490) $p_f = 2.01\%$	1.0
No.3	筋筋：2-D4@120 (SD295) $p_w = 0.15\%$	2.0

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻（学生会員）

*2 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士（工学）（正会員）

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

表-2 に使用した PVA 繊維の諸元、表-3 に DFRCC の調合計画を示す。また、表-4 に DFRCC および鉄筋の力学的性質を示す。DFRCC のマトリックスであるモルタルでは 7 号珪砂が用いられており、骨材径が約 0.2mm と小さい。図-2 に実験結果を示す。No.2 の $Q-R$ 関係では、部材角 0.02rad 以降に顕著な荷重低下を示しており、No.3 においても同様に部材角 0.03rad 以降に荷重低下を示した。大圖ら⁷⁾は、繊維の抜け出しまたは破断によりこのような荷重低下が引き起こされると考察している。また、No.2 が No.1 と同様な脆性的な傾向を示した理由については、繊維の架橋効果がピークに達し、繊維の抜け出しが生じていることを推察している。

3. FEM 解析モデル

3.1 要素分割

図-3 に要素分割図を示す。本解析では試験体を 2 次元でモデル化し、モルタルおよび DFRCC を平面応力要素でモデル化する。ひび割れモデルは固定ひび割れモデルとし、ひび割れ後のせん断伝達特性は後述するパラメトリックスタディに基づいて決定し、 $\beta = 0.015$ で一定とした。また、主筋および試験区間内の肋筋は、付着すべり挙動を考慮するため、トラス要素でモデル化した。鋼板は平面応力要素で弾性を仮定した。また、荷重ビームを梁要素でモデル化し、変位制御により荷重を付与した。また、実験同様に 2 点でピン支持した。なお、解析には、DIANA10.2 を用いた。

3.2 モルタル試験体のモデル化

図-4 にモルタルの材料構成則を示す。圧縮側は放物線モデルとし、圧縮破壊エネルギーを考慮した。引張側は線形軟化モデルとし、引張破壊エネルギーを考慮した。なお、特性長さ h は要素面積 A の 1/2 乗とした。また、鉄筋は bi-linear モデルとし、付着すべりモデルについては島ら⁸⁾のモデルを適用した。

金久保らの DFRCC のマトリックスであるモルタルの力学的性質として、引張強度や破壊力学パラメータである引張および圧縮の破壊エネルギーが不明である。また、これらの推定手法も十分に確立されていない。この点は今後の課題であるが、ここでは便宜的にこれらの推定を試みる。そこで、引張強度に関しては、実験で観察された主たるせん断ひび割れが概ね梁せいの 80% の領域に発生したと仮定し、その角度 (21.5°) からひび割れ長さを求め、梁幅 (160mm) を乗じて求めたひび割れ面の断面積で肋筋降伏時のせん断力 (30.7 kN) を除して推定した。また、引張破壊エネルギーについては、石黒ら⁹⁾が実施した珪砂を用いたモルタルの引張破壊エネルギー試験結果を参考にして決定した。一方、モルタルの圧縮破壊エネルギーについては検討事例が少ないため、筆者ら

¹⁰⁾が実施したグラウトの圧縮破壊エネルギー試験結果を参考にして、パラメトリックスタディにより決定した。

表-2 PVA 繊維の諸元 (メーカー公称値)

繊維長	繊維径	引張強度	弾性係数
12mm	0.10mm	1200 MPa	28 GPa

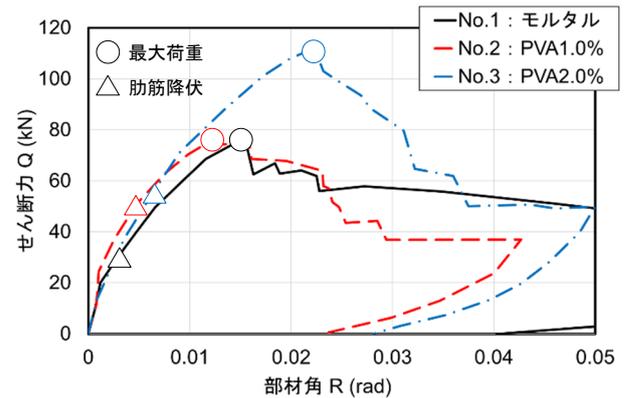
表-3 DFRCC の調合計画

試験体名	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	FA	Ad	Fiber
No.1	380	678	484	291	6	0
No.2						13
No.3						26

※W: 水道水, C: 早強ポルトランドセメント, S: 7号珪砂
FA: フライアッシュ II 種, Ad: 高性能減水剤, Fiber: PVA 繊維

表-4 DFRCC および鉄筋の力学的性質

試験体名	DFRCC		鉄筋	
	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
No.1	47.2	16.3	513 (SD490) 391 (SD295)	196 (SD490) 180 (SD295)
No.2	45.3	16.8		
No.3	43.1	15.7		



(a) せん断力-部材角関係



(b) 最終破壊状況

図-2 実験結果

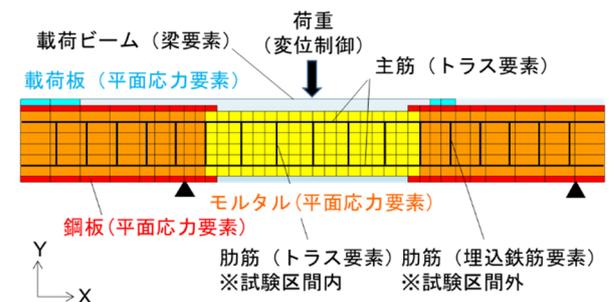


図-3 要素分割図

図-5 にモルタル試験体 (No.1) の解析結果を示す。ここでは、圧縮破壊エネルギーおよびせん断伝達特性に関するパラメトリックスタディの結果を併せて示す。なお、図中の赤線が最終決定したパラメータによる解析結果であるが、解析結果は実験結果の剛性、最大耐力および最大耐力以降の軟化挙動を良好に再現した。

また、パラメトリックスタディでは、圧縮破壊エネルギーは圧縮強度 F_c に基づき、コンクリートに対する中村ら¹¹⁾の提案式 ($G_{FC} = 8.8\sqrt{F_c} = 60.5 \text{ N/mm}$) および既往のグラウトに関する実験¹⁰⁾から得られた平均式 ($G_{FC} = 5.9\sqrt{F_c} = 39.8 \text{ N/mm}$) および下限式 ($G_{FC} = 2.2\sqrt{F_c} = 15.1 \text{ N/mm}$) により算定した。その結果、モルタル試験体においてはグラウト実験における下限式が妥当であるとともに、圧縮破壊エネルギーの影響が大きいことを確認した。これは、図-6 に示す X 方向ひずみ分布図より、最大耐力に到達する前後で梁端部モルタルの圧縮ひずみが増大していることから、その圧縮破壊に伴う試験体の圧縮ストラットの消失が最大耐力の決定要因であることに起因すると考えられる。一方、せん断伝達特性については、骨材径が小さい 7 号珪砂を使用していることを考慮して、せん断剛性低下率 β を通常のコングリートに設定される値よりも低く設定した。その結果、 $\beta = 0.015$ が妥当であることを確認するとともに、 β 値によって剛性が大きく変化することを確認した。これは、モルタルの引張強度が低く、早期に試験体全域にひび割れが発生したためであると考えられる。

3.3 DFRCC 試験体のモデル化

大圖¹²⁾は、DFRCC 試験体におけるひび割れ発生状況に基づいて、PVA1%試験体 (No.2) および PVA2%試験体 (No.3) に対する架橋則を求めている。本研究では、図-7(a)に示すように、架橋則における最大架橋力を引張強度 f_t 、架橋則に囲まれた面積から引張破壊エネルギー G_F を求め、図-7(b)に示すような線形軟化モデルを構築した。また、比較のため、PVA1%の場合において、fib モデルおよび架橋則を直線近似したモデルも作成した。なお、fib モデルにおいてひび割れ発生時のひび割れ幅は線形軟化モデルと一致させている。

一方、圧縮側については、モルタルと同様に放物線モデルを採用することとし、圧縮破壊エネルギーについては繊維混入の影響について検討する。DFRCC の圧縮破壊エネルギーに関して、渡部ら¹¹⁾は PVA 繊維を 2%混入した場合、圧縮破壊エネルギーがコンクリートの 2.5 倍程度になることを示している。また、伊藤ら¹³⁾は、コンクリートに対する繊維混入量 R_V と破壊域での相対応力-相対ひずみ関係下の面積 a_0 との関係を表す次式を提案しており、これより圧縮破壊エネルギー G_{FC} の増加を表現可能であるとしている。

$$a_0 = (10R_V + 12)/\sigma_{max}^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 σ_{max} : コンクリートの圧縮強度(MPa)である。これより、繊維混入量による圧縮破壊エネルギーの増加量を求めると、1%の場合で 1.83 倍、2%の場合で 2.83 倍となる。しかし、この増加量はコンクリートに対するものであり、モルタルの場合とは異なることが予想される。そこで、DFRCC の圧縮破壊エネルギーについては、モルタルに対する増加量に関するパラメトリックスタディにより決定した。また、せん断剛性低下率 β ならびに鉄筋および付着すべりモデルについては、モルタル試験体と同様とした。

図-8 に PVA1%試験体 (No.2) の解析結果を示す。引張モデルに関する検討では、線形軟化モデルと fib モデルが実験結果の剛性、最大耐力および最大耐力以降の軟化挙動を良好に再現した。これより、本研究では DFRCC に対しても簡便な線形軟化モデルを採用することにする。また、架橋則を線形近似した場合、耐力および剛性を過

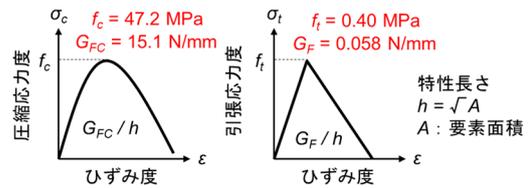


図-4 モルタルの構成則

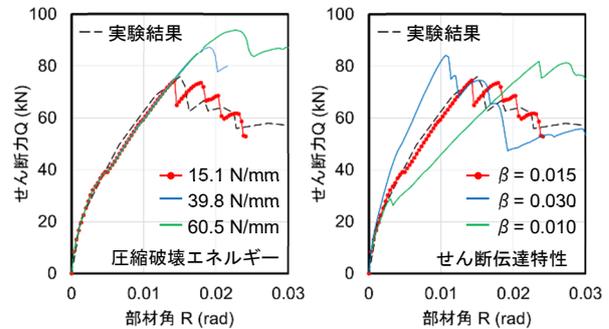


図-5 せん断力-部材角関係 (No.1)

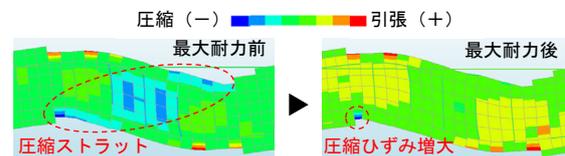


図-6 X 方向ひずみ分布 (No.1)

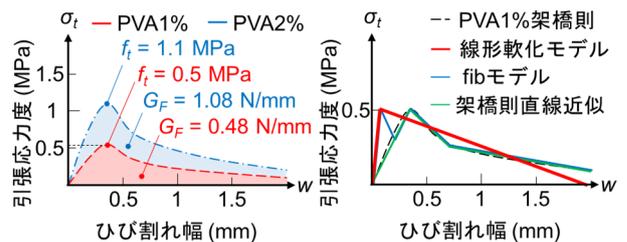


図-7 架橋則に基づく引張モデル

大に評価し、脆性的な破壊傾向を示した。これは、架橋則は DFRCC のマトリックスにひび割れが発生した後の繊維の架橋性能を表したものであり、ひび割れ発生までのマトリックスの抵抗を含んでいないためである。図-7(b)に示すように、他のモデルに比べて剛性を低く評価するため、部材としての抵抗機構も異なり、マトリックスであるモルタルの引張性能が発揮されず、図-9 に示す最大耐力時のひび割れ発生状況に違いがみられた。

一方、圧縮破壊エネルギーに関しては、モルタル試験体と同様の傾向を示すとともに、繊維混入による圧縮破壊エネルギーの増大を考慮しない場合が実験結果の傾向を良好に再現した。なお、図-10 に示すように、PVA2%試験体 (No.3) においては、圧縮破壊エネルギーの増大によって実験結果の傾向に近づいており、モルタルの場合の6倍とした場合に最大耐力を再現した。今回の解析対象試験体では、梁端部のかぶり部分から圧縮破壊が進行することから、繊維の分散性や配向性の観点から DFRCC の圧縮破壊エネルギーについて今後詳細な検討が必要であると考えられる。

3.4 PVA1.0%試験体の破壊性状に関する考察

実験では、PVA1%試験体 (No.2) がモルタル試験体 (No.1) と同様に脆性的な破壊傾向を示した。図-11 に示す通り、FEM 解析結果は両者の実験結果の傾向を良好に再現したため、両者の解析結果の比較を通じて No.2 の破壊性状について考察する。ここでは、図中に示した最大耐力近傍と耐力低下点に着目する。

図-12 に最大耐力近傍における No.2 の X 方向ひずみ分布図を示す。図-6 に示した No.1 の X 方向ひずみ分布図と比較すると、概ね同様の傾向であり、最大耐力到達後に梁端部モルタルの圧縮破壊によって圧縮ストラットが消失している様子が確認できる。図-13 に耐力低下点における No.1 および No.2 の Y 方向ひずみ分布図を示す。両者とも耐力低下前から Y 方向ひずみの局所化が進行しているが、耐力低下後にはその傾向が明確になっている。特に No.2 では局所化の傾向が顕著である。図-14 に耐力低下点における No.1 および No.2 の筋筋応力度分布を示す。Y 方向ひずみの局所化は筋筋の抵抗に影響しており、耐力低下前にはほぼ試験区間内全域の筋筋が降伏応力度に達していたのに対し、耐力低下後にはひずみが局所した範囲の筋筋のみが降伏応力度を維持した。以上のことから、PVA1%試験体の破壊性状はモルタル試験体と同様であり、脆性的な破壊傾向を示した要因として、Y 方向ひずみの局所化に伴う筋筋の抵抗の減少が考えられる。また、Y 方向ひずみの増大は実現象におけるせん断ひび割れの拡幅に対応すると考えられ、実験において確認されたせん断ひび割れの局所化の傾向を FEM 解析によって概ね再現できたと考えられる。

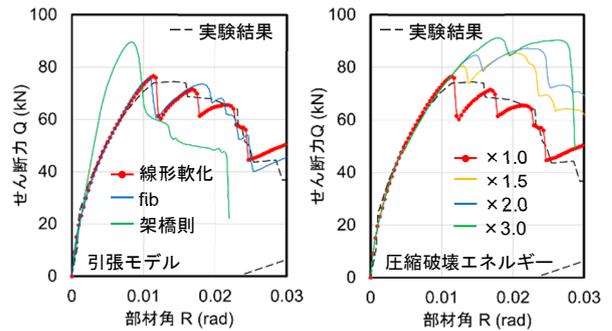


図-8 せん断力-部材角関係 (No.2)

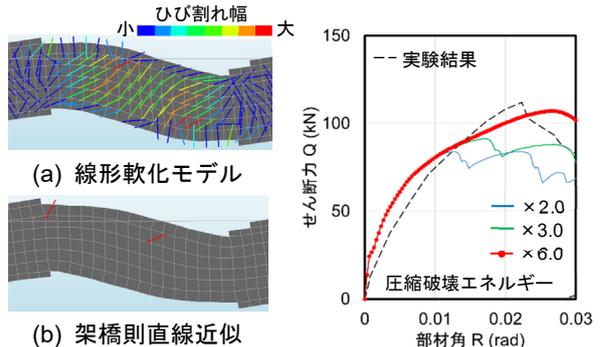


図-9 ひび割れ発生状況 図-10 せん断力-部材角関係 (最大耐力時) (No.3)

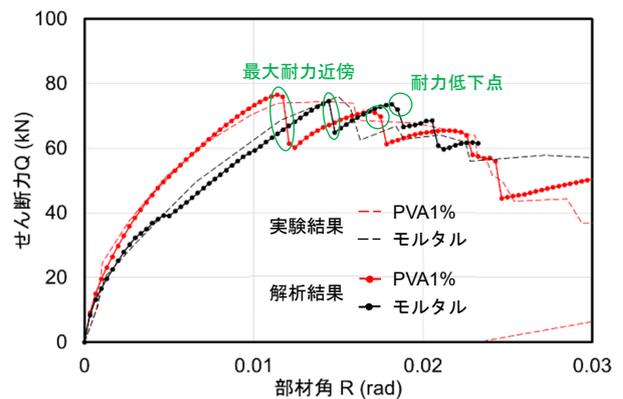


図-11 せん断力-部材角関係 (No.1, No.2)

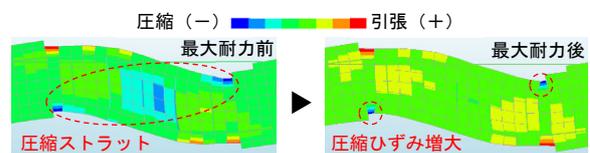
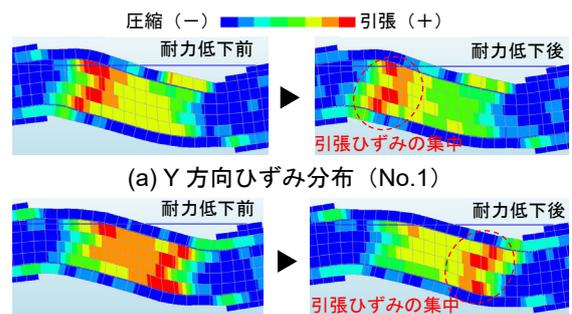


図-12 X方向ひずみ分布 (No.2)



(a) Y方向ひずみ分布 (No.1)
(b) Y方向ひずみ分布 (No.2)
図-13 Y方向ひずみ分布 (耐力低下点)

4. 繊維の分散性を考慮した FEM 解析に関する基礎検討

前章では、DFRCC を均質材料として取り扱うことで FEM 解析モデルを構築した。しかし、小倉ら⁴⁾の数値解析では、多数のひび割れが形成されるひずみ硬化型材料において繊維分布のばらつきに起因する材料不均一性が顕在化することを指摘している。また、金久保らは架橋則の構築にあたり、繊維の分散性を考慮するために繊維の配向角や配向強度を定義している。したがって、今後の検討においては、これらの繊維の分散性と対応づけた FEM 解析の手法について検討する必要がある。

ここで、繊維の分散性を考慮した FEM 解析の基礎的な検討として、小林ら¹⁴⁾による繊維の分散性を考慮した曲げ解析を参考にし、試験区間内の DFRCC に対して異なる引張特性をランダムに付与した FEM 解析を試みる。解析対象試験体は PVA1% (No.2) とし、引張側の線形軟化モデルに適用した引張強度 f_t および引張破壊エネルギー G_F をそれぞれ 1/2 倍、1 倍および 2 倍した合計 9 ケースの引張特性を仮定した。表-5 に仮定した引張特性を示す。なお、⑤の組み合わせが No.2 で採用した引張特性である。

検討に先立ち、9 ケースの引張特性をそれぞれ全要素均一に付与して FEM 解析を実施した。図-15 に解析結果を示す。ここでは代表して、最小値および最大値の組み合わせである①および⑨と最も脆性的な③および最も延性的な⑦の結果を示す。最小値の組み合わせである①では、剛性・耐力ともに最小となったが、引張特性の軟化勾配が緩やかであるため、荷重低下は緩やかである。一方、最大値の組み合わせである⑨では、初期剛性は高いものの、最大耐力が梁端部の圧縮破壊で決定されるため、最大耐力および最大耐力後の挙動は⑤と大差ない。また、最も脆性的な③では、梁端部の曲げひび割れが卓越するとともに梁端部に圧縮ひずみが集中し、他のケースとは異なる傾向を示した。これに対し、最も延性的な⑦では、ひび割れ発生後も引張応力を負担し続けるため、最大耐力後は梁端部の圧縮破壊の進行が顕著であり、荷重低下が著しい。

続いて、9 ケースの引張特性を試験区間内の 108 要素にランダムに割り当てて FEM 解析を実施する。図-16 に仮定した A~F の 6 パターンの引張特性の分布を示す。引張特性の割り当てには乱数を用い、①~⑨の引張特性が 12 要素ずつ試験区間内に偏りなく割り当てられるようにした。図-17 に解析結果を示す。全体的な傾向として、A~F 全てが引張特性⑤を試験体全体に適用した PVA1% 試験体に対する解析結果の近傍に集まる結果となった。これは、最大耐力が全て梁端の圧壊によって決定されているためである。しかし、個々の挙動に着目すると、剛性、最大耐力およびポストピーク挙動はすべて

のパターンで異なっている。このような違いを生じさせている要因の 1 つとして、ひび割れの発生傾向の違いが挙げられる。図-18 に 1 ステップ目でのひび割れ発生状況を示す。比較のため、引張特性⑤を試験体全体に適用した PVA1% の場合の結果も示す。PVA1% の場合、均質な仮定をしているため、試験区間内の広範にひび割れが発生するが、不均質な場合にはひび割れの発生数が少なく、

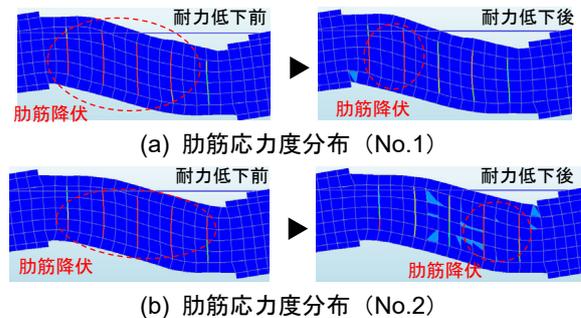


図-14 筋筋応力度分布 (耐力低下点)

表-5 仮定した DFRCC の引張特性

		f_t (MPa)		
		0.25	0.50	1.00
G_F (N/mm)	0.238	①	②	③
	0.475	④	⑤	⑥
	0.950	⑦	⑧	⑨

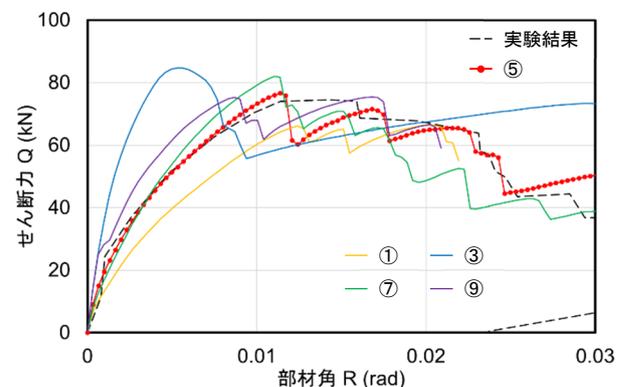


図-15 せん断力-部材角関係 (①, ③, ⑤, ⑦, ⑨)

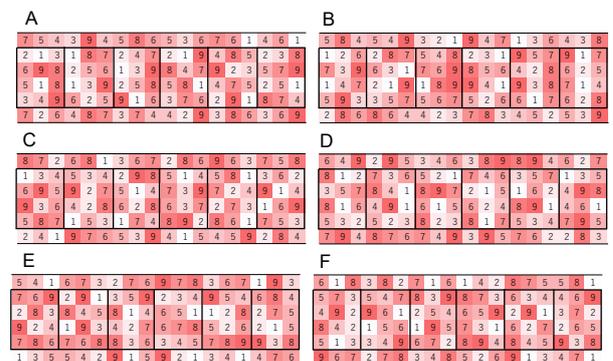


図-16 仮定した引張特性の分布

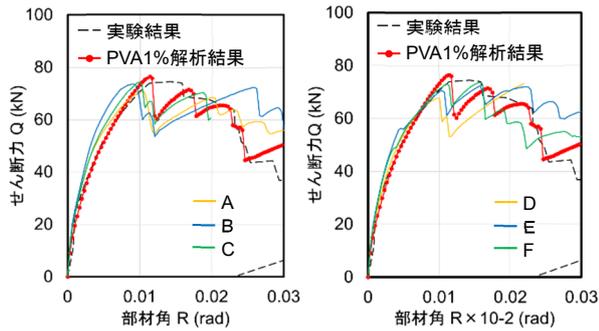


図-17 せん断力-部材角関係 (A~F)

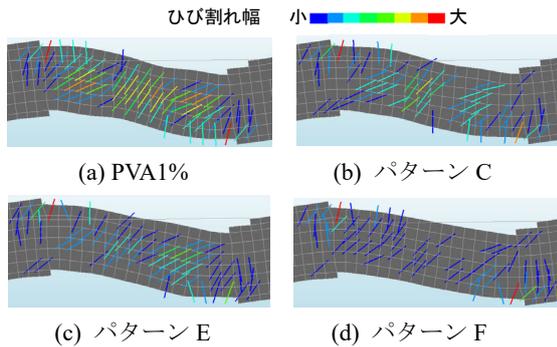


図-18 ひび割れ発生状況 (1ステップ目)

その発生個所およびひび割れ幅に違いがみられる。このような違いは部材としての抵抗機構に影響し、部材全体の応答にも影響を与えるため、繊維の分散性による不均質性が生じる DFRCC においても同様の影響が生じる可能性がある。

5. まとめ

架橋則を FEM 解析に適用し、DFRCC 部材の破壊性状に及ぼす影響について考察した結果、以下の知見を得た。

- (1) 架橋則に基づいて DFRCC の引張強度および引張破壊エネルギーを評価し、線形軟化モデルを適用した。その結果、PVA1%試験体のせん断力-変形関係および破壊挙動を評価することができた。PVA2%試験体については圧縮破壊エネルギーの検討が必要である。
- (2) DFRCC の不均質性を模した場合、均質性を仮定した場合とひび割れの発生状況が異なり、それが部材性能に影響を及ぼす可能性があることを確認した。
- (3) DFRCC の破壊力学特性や鉄筋との付着すべり挙動については、今後の研究の蓄積が必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金(基盤研究(A)18H03802)の助成を受けて行われたものである。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 渡部憲, 白井伸明, 大岡督尚, 白都滋, 藤田敬: 高

韌性ビニロン繊維補強モルタル耐震壁の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.211-218, 2002.9

- 2) 諏訪田晴彦, 福山洋: 高韌性セメント系複合材料を用いた構造要素のせん断破壊挙動に関する非線形 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.147-154, 2004.11
- 3) 磯部岳, 竹山忠臣, 佐々木亘, 内田裕一: 繊維補強鉄筋コンクリート部材のひび割れ性状に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1159-1164, 2019
- 4) 小倉大季, 国枝稔, 中村光: 鉄筋補強した繊維補強セメント系複合材料の引張破壊解析と架橋力に着目した破壊挙動評価, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, pp.249-267, 2016
- 5) 浅野浩平: 高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性と架橋則に関する研究, 筑波大学大学院博士論文, 2014.3
- 6) 大圖友梨子, 山田大, 八十島章, 金久保利之: 架橋則に基づく DFRCC のせん断架橋性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1123-1128, 2017
- 7) 大圖友梨子, 金久保利之: 架橋則に基づく DFRCC 部材のせん断架橋性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1195-1200, 2018
- 8) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第 378/V-6 号, pp.165-174, 1987.2
- 9) 石黒覚, 小合俊平: 充填モルタルの破壊力学特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.447-452, 2004
- 10) 國本拓也, 田嶋和樹, 白井伸明: グラウト材の力学的性能と破壊エネルギーの実験的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.673-678, 2008
- 11) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
- 12) 大圖友梨子: 架橋則に基づく DFRCC のせん断架橋性能の評価, 筑波大学修士論文, 2018.3
- 13) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘, 岸添拓, 石川靖晃, 久保全弘: 短繊維補強コンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.341-355, 2006.5
- 14) 小林一輔, 睦好宏史: 繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形, 土木学会論文報告集, 第 289 号, pp.101-112, 1980.7