

高靱性繊維補強セメント複合材料の引張性能評価と 部材の構造性能に関する研究

筑波大学

システム情報工学研究科

2007 年 3 月

清水 克将

STUDY ON EVALUATION OF TENSILE PROPERTIES AND STRUCTURAL PERFORMANCE OF DUCTILE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

Graduate School of Systems and Information Engineering
University of Tsukuba

March, 2007

Katsuyuki Shimizu

高靱性繊維補強セメント複合材料の引張性能評価と 部材の構造性能に関する研究

論 文 概 要

建築構造物に対する社会の要求の多様化および高度化により、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物においても新技術や新材料の開発が求められるようになってきている。また同時に、新技術や新材料を受け入れやすい建築基準体系の確立が望まれている。このような背景の下、脆性的な破壊を示す従来のコンクリートの性能を大幅に改善した新材料として、セメント材料に短繊維を混入させた高靱性繊維補強セメント複合材料（Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite, 以下、DFRCC）が開発されてきている。この材料は、引張応力下または曲げ応力下において、初期ひび割れ発生以降にひび割れを分散発生させながら荷重が上昇する特長を有している。また、さらに破壊力学的な検討を基にマトリックスのひび割れ破壊エネルギーと繊維の架橋エネルギーを勘案して作製される ECC（Engineered Cementitious Composite）が開発されている。ECC では、繊維とマトリックスとの付着力によりマトリックスのひび割れ面において繊維が応力を伝達し（繊維の架橋効果）、一軸引張応力下において、初期ひび割れ発生以降、非常に微細な分散ひび割れ（マルチプルクラック）をとともないながら応力が上昇する（疑似歪硬化）性状を示す。DFRCC や ECC のこのような特長を生かし、部材の最大耐力の向上や大変形時における損傷の低減、ひび割れ分散性による耐久性の向上など、土木建築構造物へ利用するための研究開発が近年活発に行われており、橋梁の床版やダムへの補修などの実施工も報告されている。建築分野でも、高層 RC 建築物の境界梁など、大変形を受ける耐震要素に適用されており、材料特性を生かした DFRCC の構造部材への利用拡大が今後期待されている。

DFRCC を構造部材に適用して有効利用するためには、その特長である引張性能を適切に評価し、構造設計に反映させることが重要な課題である。既存の RC 構造部材の設計においては、シリンダー型圧縮試験により得られた圧縮強度がコンクリートの材料性能を表現するほとんど唯一の設計要因であったのに対し、セメント系材料である DFRCC の引張性能を構造設計に陽な形で取り込むことは、RC 構造の可能性を広げる革新的な試みといえる。この試みの基礎となるのが前述の引張性能の評価方法の確立であり、またその評価法により得られた材料性能を用いた構造設計方法の確立である。

DFRCC の引張性能の評価方法に関しては、力学的に明解な方法として一軸引張試験が考えられる。これまでもコンクリートや繊維補強コンクリート（Fiber Reinforced Concrete, 以下、FRC）等を対象としてさまざまな試験が行われているが、コンクリートの圧縮試験のように一般的に認知されている方法は存在しない。また、近年、DFRCC を対象として一軸引張試験が各機関で試みられているが、試験体の形状、寸法、境界条件等様々であり、試験方法による横並びの比較が出来ていない現状にある。さらに、一軸引張試験は試験体の作製や実施に多くの時間と労力を要するため、DFRCC 部材の製造や施工にともなう品質管理のように日常的に試験を行なう必要があるものに対しては不向きである。また、DFRCC 構造部材の性能の評価に関しては、部材実験

のバックデータが不足していること、DFRCC の引張性能が部材性能へ与える影響について未解明な点が多いこと等により定量的な評価に至っていない。特にせん断耐力評価に関しては、通常のコンクリートのひび割れ面での骨材やコンクリートの噛合い性状に加え、DFRCC ではひび割れ面で繊維の架橋効果によりせん断に対して抵抗すると考えられ、通常の RC 構造部材の評価法を発展させて考える必要がある。

本研究では、まず、一軸引張応力下で明確な擬似歪硬化性状を示す ECC に着目し、試験体形状、寸法、境界条件を試験因子とした一軸引張試験を行って、試験方法の横並びの評価を行う。さらに、簡便な試験方法である曲げ試験により ECC の引張性能を評価する方法を提案する。また、部材のせん断耐力評価に資するために ECC の引張応力下における一面せん断試験を行い、その基礎的性状を得る。最終的にはそれらの評価値をもとに、部材の構造設計方法の構築、具体的には部材の曲げ強度およびせん断強度の評価方法の構築を行うことを目的としている。

また、これらの材料特性の評価から部材の耐力評価までの一連の流れをより一般的に拡張し、一軸引張応力下で明確な擬似歪硬化性状を示さない DFRCC に対しても適用を試み、その適合性を検討する。

本論文は、全 7 章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を示すとともに、研究対象である DFRCC の概要、セメント系材料における従来の引張試験方法について、その特徴と問題点をまとめた。

第 2 章では、ECC の特長である引張性能を直接把握することができる一軸引張試験について、新しく提案する方法および既往の研究により提案されている様々な試験方法により評価し、試験方法毎の特徴および ECC の打設方向による影響について検討した。また、日常的に行う試験方法として現状では困難な一軸引張試験に代わる新たな引張性能を得る試験方法として、また、各種引張試験のベンチマークとなる試験方法として、普通コンクリートで従来から行われてきた 3 等分点加力 (4 点) 曲げ試験に着目し、引張性能を導出し検討を行った。なお、検討対象とした ECC は、PVA 繊維 (ビニロン) を用いた PVA-ECC である。

引張試験の検討では、試験体形状 (矩形くびれ型、円柱くびれ型、円柱型、平板ダンベル型) および端部支持条件 (ピンー固定支持、両端固定支持) 等が異なる計 4 種類を用いて引張試験を行った。ECC の引張性能 (強度および変形能) は一軸引張試験の試験体形状および寸法に多大に影響を受けること、また、施工条件による影響等を指摘した。すなわち、試験体の内部で繊維が 2 次元状に配向されると考えられる平板ダンベル型試験体において最も引張強度、引張終局歪が大きく、試験体の断面が大きくなり繊維が 3 次元状に配向されると強度および終局歪が減少することが確認された。また、打設方向に関しては、縦方向打設より横方向打設の方が強度、歪とも大きく、これは、打設時のマトリックスの流れの方向が繊維配向に影響を及ぼしていると考えられる。これらの結果より、ある程度ボリュームの大きい部材を対象とした引張性能評価では、実際の部材の応力状態と同様になるように打設方向を配慮した、矩形くびれ型試験体を用いたピン

一固定支持による一軸引張試験が工学的に有用であることを提案した。

引張性能評価法の提案では、より容易に引張性能の評価が可能な曲げ試験を行い、一軸引張試験との関係性を評価することを目的としている。そのためには、簡易な表現モデルを用いることが望ましい。そこで、まず、ECC の引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現したファイバーモデルによる断面解析を行った。解析の結果、通常の ECC で得られる材料特性の範囲では、曲げ加力における最大曲げモーメント時に引張縁歪が終局歪に達し、その時の圧縮縁歪は最大応力時歪に達しないことが確認された。断面解析では引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルと仮定しているが、最大曲げモーメント時には引張側の弾性範囲部分のごくわずかであり、完全剛塑性モデルとの差異はほとんどないことが分かった。

そこで、PVA-ECC の曲げ試験時における最大モーメント時の応力分布を、平面保持を仮定し、圧縮側応力は三角形分布、引張側応力は一様分布とし、引張縁が引張終局歪に達し、圧縮縁では圧縮強度に達していない状態を仮定した。本モデルは、パラメータが 2 つのみ（一様分布である引張強度と引張終局歪）で構成されているため非常に簡易に算出可能である。断面内の力とモーメントの釣合式により立式される中立軸に関する方程式の解から引張強度および引張終局歪を算出し、曲げ試験により得られた引張性能を曲げ試験と同等の断面形状を有する一軸引張試験により得られた引張性能との比較検討を行った。曲げ試験による引張性能は、曲げ試験に対する一軸引張試験の比較値が、引張終局歪で 0.85、引張強度で 0.82 であった。また、低減係数を 0.7 とすることでおおむね両者とも下限値を表すことが可能で、品質管理に利用できることが分かった。しかしながら、この換算係数は、対象とする材料や曲げ試験体の寸法等に影響を受けるため、本研究の範囲において有効となる値であると考えられる。

また、曲げ試験時における曲率とたわみの関係に着目し、純曲げ区間内の曲率を一様分布として算出されるたわみと、たわみの実測値を比較検討した。その結果、両者はおおむね一致しており、マルチプルクラックが発生する ECC においては、純曲げ区間の平均曲率を用いて歪を評価できることを確認した。

第 3 章では、PVA-ECC のせん断ひび割れ面でのせん断伝達機構を把握するため、ひび割れ面の垂直応力として引張力を作用させた直接せん断試験方法を提案し、加力実験を行った。加力は、引張加力を行って、まずひび割れを発生させ、目標ひび割れ幅に達した時点で引張力を維持し、一面せん断加力を行う方法である。

新たな加力方法の是非を検討するため、まず、通常のコンクリートおよびモルタルを使用した試験体を作製し、加力実験を行った。その結果、垂直応力として圧縮力を作用させた直接せん断試験方法により得られたせん断強度評価式を用いてせん断強度の評価が可能であり、提案する加力方法が妥当なものであることを確認した。

ECC を対象とした加力実験の試験パラメータは、PVA 繊維の体積繊維混入率（1.5%、2.0%）および目標ひび割れ幅（0.02～0.16mm）である。一面せん断試験の破壊経過から、せん断応力-せん断変位関係においてひび割れ面でのマトリクスの噛合いに起因した応力上昇が引き起こされる直前の応力を繊維架橋によるひび割れ面のせん断強度と定義し、本試験方法での破壊現象について検討した。目標ひび割れ幅が 0.1mm 程度以下の場合に噛合いによる応力上昇の後に破壊に至る

のに対し、0.1mm 程度以上の場合には噛合いは生じず、引張破壊すると考えられる。

ひび割れ面において垂直応力に引張力が作用する場合のせん断強度は、定引張応力がほぼ引張強度程度であることを考慮すると、引張強度の 1/2 程度を有すると考えられる。逆に、ひび割れ面においてせん断ずれが生じて、垂直応力は引張強度を保持できると捉えることも可能である。せん断変形がさらにすすむ場合には、噛合いにより ECC が圧壊すると考えられる。

第 4 章では、PVA-ECC の部材性能の把握およびバックデータの蓄積を目的として、ECC 梁部材の大野式逆対象曲げせん断一方向加力実験を行った。試験パラメータは筋筋比 (0%~1.2%)、せん断スパン比 (1.5, 1.25)、PVA 繊維の体積繊維混入率 (1.5%, 2.0%) および想定破壊形式 (せん断破壊型、曲げ降伏先行型) である。実験の結果、繊維混入により最大荷重および変形能が向上し、従来の耐力式である日本建築学会終局強度型指針式 A 法によるせん断強度計算値を大幅に上回った。破壊経過では、部材においても複数ひび割れが生じ、最大荷重付近では、ある一つのひび割れに変形が集中して破壊に至ることが分かった。またそのひび割れでは噛合いによる圧壊が観察された。最大荷重時における各区間の主歪の検討では、引張主歪が繊維混入率により影響を受け、圧縮主歪は繊維混入による差は認められなかった。また、筋筋比が大きい試験体では、圧縮主歪が材料試験での圧縮強度時歪程度に相当しており、ひび割れ観測の結果と一致していた。

第 5 章では、第 2 章で得られた ECC の引張性能を取り込んだ構造性能の評価を行った。曲げ強度は ECC の引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現したファイバーモデルによる断面解析により評価した。せん断強度は、第 3 章において ECC のひび割れ面においてせん断ずれが生じて垂直応力として引張強度を保持するとの結果を鑑み、終局強度型 A 法のアーチ・トラス理論を拠り所として、圧縮ストラットの直方向すなわち引張主応力方向に ECC が引張強度程度を有すると考え、アーチ・トラス式に ECC の引張強度に低減係数を乗じた値を累加する形とした。低減係数を実験結果から逆算し、0.41 なる値を得た。この値の意味する詳細な原因は現時点では不明であるが、複雑な曲げせん断応力下では ECC がひび割れ面上において必ずしも一様な応力を負担するとは限らないこと、終局強度型 A 法では最大耐力決定の主要因はコンクリートの圧縮ストラットの破壊であり (せん断圧縮破壊)、その時に ECC の負担引張力がどの程度になっているか不明であること、等の理由が考えられる。

第 6 章では、ECC を包含する形として定義されている、曲げ応力下において初期ひび割れ発生以降に荷重増加するたわみ硬化性状を示す DFRCC を対象として、第 2 章の一軸引張試験から得られる引張性能と曲げ試験から得られる引張性能の対応、第 4 章と同様の大野式逆対象曲げせん断一方向加力による梁の加力実験および第 5 章の曲げおよびせん断強度評価方法の適合性を検討した。DFRCC には、一軸引張応力下において歪軟化性状を示す材料も含まれており、本評価方法は、ECC の引張応力-歪関係を完全剛塑性モデルで表現した引張性能評価法が基となっていることから、実際の引張性状と曲げ試験による引張性能評価法により得られた引張性状との差異により危険側の評価になることが懸念される。特に、一般的な DFRCC に本評価法を適用する際に注意すべき点として次の項目が挙げられる。

- ・ 曲げ試験により得られる性状は構造性能である。つまり、一軸引張応力下において歪硬化を示す材料であるか、歪軟化を示す材料であるか、複数ひび割れを生じるか生じないかは曲げ試験によって判別できない。
- ・ 寸法効果が存在する。特に、複数ひび割れが生じない DFRCC に対しては寸法効果が大きいと考えられる。

検討の結果、引張性能評価では、ECC と同様の評価を行うことで、引張強度および終局歪（一軸引張応力下における 1/2 引張強度時歪）の大まかな傾向を捉えることが可能であることを示した。また構造性能評価では、ECC と同様の方法によって曲げ強度およびせん断強度を評価することが可能であることを示した。

第 7 章では、本論文全体をまとめ、最後に今後の課題について述べた。

本論文に関する投稿論文

- [1] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.281~286, 2003. 7
- [2] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : PVA-ECC 梁部材のせん断終局耐力評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1537~1542, 2004. 7
- [3] K. Shimizu, T. Kanakubo, T. Kanda S. Nagai : Shear Behavior of Steel Reinforced PVA-ECC Beams, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Conference Proceedings DVD, Paper No. 704, 2004. 8
- [4] 清水克将, 氏家隆博, 金久保利之, 閑田徹志 : PVA-ECC 梁部材のせん断性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1333~1338, 2005. 6
- [5] 氏家隆博, 清水克将, 金久保利之, 片桐 誠 : 超高強度繊維補強コンクリートを用いた梁部材の曲げせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1339~1344, 2005. 6
- [6] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : 曲げ試験による PVA-ECC の引張性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 604 号, pp. 31~36, 2006. 6
- [7] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : PVA-ECC のひび割れ面における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, (投稿中)

高靱性繊維補強セメント複合材料の引張性能評価と 部材の構造性能に関する研究

目 次

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的	2
1.1.1 繊維補強セメント複合材料	2
1.1.2 高靱性繊維補強セメント複合材料	3
1.1.3 研究目的	5
1.2 セメント系材料の引張試験	7
1.2.1 直接引張試験	7
1.2.2 割裂試験	8
1.2.3 曲げ強度試験	9
1.2.4 DFRCC の引張試験	9

第2章 引張性能評価

2.1 はじめに	12
2.2 一軸引張試験	12
2.2.1 一軸引張試験法の提案	12
2.2.2 共通試験	14
2.2.2.1 使用材料および試験方法	14
2.2.2.2 試験結果	15
2.3 引張性能評価	18
2.3.1 曲げ試験	18
2.3.2 曲げ解析	20
2.3.3 引張性能評価法の提案	21
2.3.4 評価法の検証	23
2.3.5 たわみ計測による評価	25
2.4 まとめ	27

第3章 ひび割れ面でのせん断伝達機構

3.1 はじめに	30
3.2 既往のせん断試験	30
3.3 試験装置の提案	32

3.4 RCによる予備実験	33
3.4.1 実験概要	33
3.4.2 実験結果	34
3.4.3 既往の提案式との比較	35
3.5 ECCによる本実験	36
3.5.1 使用材料	36
3.5.2 試験体および試験方法	37
3.5.3 試験結果	37
3.5.4 考察	39
3.6 まとめ	40

第4章 梁部材の曲げせん断実験

4.1 はじめに	42
4.2 実験概要	42
4.3 材料試験結果	44
4.4 実験結果	45
4.4.1 ひび割れ状況	45
4.4.2 せん断力－部材角関係	46
4.4.3 鉄筋の歪	47
4.4.4 主歪	48
4.4.5 既往の耐力式による評価	48
4.5 まとめ	49

第5章 部材の構造性能評価

5.1 はじめに	51
5.2 既往の強度式	52
5.3 材料性能	54
5.4 曲げ強度	55
5.5 せん断強度	55
5.6 検証	57
5.7 まとめ	58

第6章 DFRCC への適用

6.1 はじめに	60
6.2 引張性能評価	61
6.2.1 使用材料	61
6.2.2 引張試験および曲げ試験	62

6.2.3 引張試験と曲げ試験結果の比較	64
6.3 構造性能評価	65
6.3.1 梁部材実験概要	66
6.3.2 実験結果	67
6.3.3 曲げ強度およびせん断強度の評価	69
6.4 まとめ	72
第7章 結論	
7.1 研究結果のまとめ	74
7.2 今後の課題	76
参考文献	78
謝辞	83
本研究に関連した既発表論文	84
付録 梁部材の曲げせん断実験	86

第 1 章

序 論

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 繊維補強セメント複合材料

コンクリートの引張強度は圧縮強度に比べてかなり小さな材料であるため、鉄筋コンクリート（RC）構造物は、コンクリートが圧縮力を負担し、鉄筋が引張力を負担するように考えられており、コンクリートの引張強度は通常無視して設計される。特に避けるべき RC 部材の脆性的な破壊であるせん断破壊は、コンクリートの引張破壊が発端となって起こる破壊形式であり、付着割裂破壊においてもコンクリートの割裂引張破壊による鉄筋との一体性の低下が引き起こしたものである。このようなコンクリートの引張靱性が小さいがゆえの脆性的な性質を改善するため、古くから長さが数 mm～数十 mm の短繊維を混入させることによりモルタルやコンクリートの靱性を確保しようとする研究が行われてきた。それらは繊維補強セメント複合材料（以下、FRCC: Fiber Reinforced Cementitious Composites）と呼ばれ、おおよそ 100 年以上の歴史がある。

FRCC に用いられた繊維は主にアスベスト（石綿）繊維、鋼繊維、ポリプロピレン繊維、ガラス繊維などであり、それぞれの特長を生かし適用されてきている。鋼繊維を用いた FRC（Fiber Reinforced Concrete）、すなわち SFRC（Steel Fiber Reinforced Concrete）は、主にひび割れ抑制効果に期待した舗装や床版および吹付けによるライニング、耐アルカリガラス繊維は、高い衝撃強度と耐火性から外装パネルや永久型枠、ポリプロピレン繊維は、鋼繊維やガラス繊維に比べて安価で、耐衝撃性などを期待した外装パネルや浮き桟橋などへ適用されていた [1.1]。また、これらの繊維が台頭する以前は、耐アルカリ性に優れ入手が容易であったアスベスト繊維が用いられていたが、健康障害を引き起こすことが明らかとなってからは使用が規制されている。上述以外にも植物繊維や動物繊維などの天然繊維など、様々な繊維が生産されていたが、セメント系材料に用いることから、繊維にはセメントアルカリに対する強い抵抗性が要求される。FRCC は繊維がマトリクス（セメントやコンクリート）から引き抜かれることなく破断するような材料の組み合わせでは、FRCC の靱性が十分に発揮されないため、繊維およびマトリクスの選定、繊維とマトリクスとの付着性状の把握が重要な鍵となっている。

繊維をセメント系材料に混入することで、ひび割れを抑制し、耐衝撃性を向上させる従来のセメント系材料にはない高い靱性を得ることができる。しかしながら、FRCC の適用は、ひび割れ抑制効果やひび割れ発生後のコンクリートの剥落防止などに期待したものが多く、非構造部材への適用が主であった。

1.1.2 高靱性繊維補強セメント複合材料

1970 年代以降，日本では高度経済成長期に入り，省スペース化および合理化から都市部に超高層ビルが立ち並ぶようになり，同時に RC 構造の発展も目覚しく進歩してきた。建築物の高層化を実現するために，セメント系材料には高強度化および軽量化が求められるようになり，それに伴いセメント系材料はさらに脆性的な性質を併せ持つようになり，構造物の靱性の確保が議論されるようになった。

このような中，セメント系材料の開発と同時に繊維においても従来の FRCC には使用されてこなかった新しい繊維が開発され，従来の FRCC を上回る性能を有した繊維補強セメント材料の研究開発が各研究機関により盛んに行われるようになった。2001 年に日本コンクリート工学協会（JCI）により「高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会」（以下，JCI 委員会）が発足し，様々な種類の繊維やセメントを用いて開発されている幾多の繊維補強セメント材料における統括的な議論がなされた。JCI 委員会により，材料の定義，用語の定義が整理され，材料の性質や適用についてまとめられた [1.2]。図 1.1 に材料の分類を示し，以下に各材料の定義について述べる。

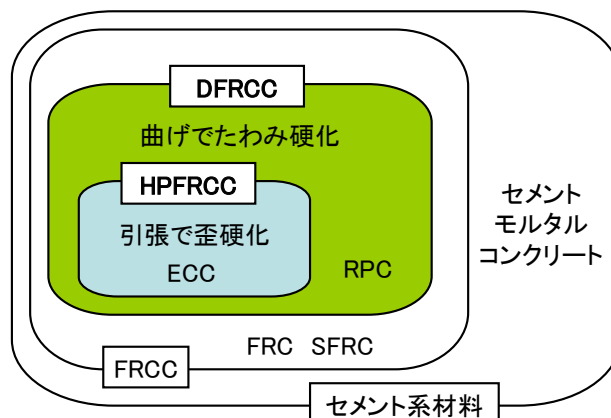


図 1.1 繊維補強セメント材料の分類 [1.2]

繊維補強セメント系材料 FRCC（Fiber Reinforced Cementitious Composites）

セメント系材料を繊維で補強した複合材料全体を指す。繊維補強コンクリート FRC（Fiber reinforced Concrete）や鋼繊維補強コンクリート SFRC（Steel Fiber Reinforced Concrete）もこの範疇に入る。

高靱性セメント複合材料 DFRCC（Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites）

セメント系材料を繊維で補強した複合材料であり，曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示して応力上昇するたわみ硬化性状を示し，曲げ，引張および圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料。

高性能セメント複合材料 HPFRCC（High Performance Fiber Reinforced Cement Composites）

A. E. Naaman と H. W. Reinhardt により定義され，一軸引張応力下において複数ひび割れを伴い

ながら初期ひび割れ発生以降に応力上昇する歪硬化性状（図 1.2 参照）を示す材料。

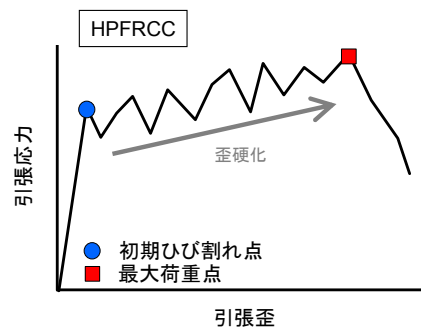


図 1.2 HPFRCC の引張応力-歪関係

以下に代表的な DFRCC の特長について述べる。

ECC（Engineered Cementitious Composite）[1.3]

ミシガン大学の Victor C. Li により開発された材料で、一軸引張応力下において微細で高密度の複数ひび割れを生じさせながら、最大引張歪が 8%に達するという極めて高靱性な材料である。ECC は破壊力学およびマイクロメカニクスと呼ばれる材料の微視的構造に着目した力学理論に基づき材料設計を構築して最適化を行っており、材料挙動の予測および設計の双方向が可能となり、少ない繊維混入率であっても高い靱性を有した材料となっている。道路橋床版などへ適用されている。

繊維補強 RPC（Reactive Powder Concrete）[1.4]

圧縮強度 150MPa 以上、引張強度が 5MPa 以上の超高強度繊維補強コンクリート。反応性微粉末からなる緻密質なセメント質複合材料 RPC を用い、繊維を混入させることで、超高強度であるとともに、高耐久、高靱性、自己充填性等の特長を併せ持つ。繊維補強 RPC を用いた構造物は歩道橋や護岸壁用アンカープレートなどに適用されている。

DFRCC はコンクリートに比べて研究の歴史が浅く、調合や練り混ぜなどの製造段階から、基礎的力学特性および構造部材への適用とその評価方法に至るまで未だ研究段階であり、現在も更なる改良が進められている。DFRCC の適用方法例について表 1.1 に示す。

道路橋床版に使用される下面増厚補強 [1.5] は、DFRCC の引張応力負担を期待し、床版の長期たわみや疲労性状を改善しようとする目的で使用されている。これに引張能力の高い ECC を用いると、主筋の降伏まで ECC の引張応力負担を期待できるため、通常のコンクリートを使用した床版と比較して材厚を小さくできる。

表面保護工としての適用は、現在ダムや擁壁等に適用されている [1.6] [1.7]。この使用方法では DFRCC の引張応力負担を直接期待する訳ではなく、複数ひび割れ特性によるひび割れ開口幅の低減や、それに伴う耐久性の向上を期待している。

耐力壁や境界梁、耐震補強における増設柱としての適用も考えられている [1.8]。この場合に

は、DFRCC の引張能力により部材の大変形時におけるせん断力や軸力の保持が期待されている。さらに DFRCC を用いた部材は大変形時の見た目の損傷が小さく、部材の寸法や部材剛性の設定が鉄骨材と比較して容易であることから、制振部材や損傷制御部材としての適用が考えられている [1.9]。

表 1.1 DFRCC の適用方法とその要求性能の例

適用方法	利用方法	要求性能
下面増厚補強	道路橋床版下面・吹付け	長期荷重下での引張応力負担・疲労性状の改善
表面保護工	擁壁，橋脚，床版，外壁・吹付け，流し込み，プレキャスト	ひび割れ幅の低減・物質透過性の低減
高応力部材	境界梁，耐力壁，制振部材・流し込み，プレキャスト	短期荷重下での応力負担・部材としてのせん断力および軸力保持，変形能の改善，損傷制御

1.1.3 研究目的

建築構造物に対する社会の要求の多様化および高度化により，RC 構造物においても新技術や新材料の開発が求められるようになってきており，このような風潮の中において DFRCC のような新材料に対する期待は高い。また，1995 年に起こった阪神淡路大震災において新耐震基準により設計された構造物が，人命保護性能は満たされたが，修復性および使用性の低下により建て替えを余儀なくされた事例が多くあったことから，地球環境問題改善のための構造物の長寿命化，ライフサイクルコストを見込んだ設計の重要性が今後更に高まっていくものと考えられる。

このような風潮において重要な役割を果たすものが新材料や新工法などである。DFRCC のような高性能材料を構造物に適用する際には，DFRCC 構造物には表 1.1 で示したように従来の RC 構造物に要求されている性能より高い性能が要求されることになる。

DFRCC 構造物が一般的に使用されるためには，従来の RC 構造物のような設計体系が望まれる。すなわち，シリンダー型圧縮試験により得られる圧縮強度により各種部材強度が算出可能である設計体系に見られる，材料性能から構造性能を評価する体系を構築する必要がある。DFRCC 構造物の性能を評価するためには，DFRCC の特長である引張性能が構造性能に反映されねばならない。しかしながら，DFRCC が構造性能に与える影響について未だ不明な点が多く，さらに，DFRCC の引張性能を評価する手法としては，最も直接的である一軸引張試験が用いられているが，統一された一軸引張試験方法は存在せず，各研究機関によって様々な引張試験により評価されているのが現状である。特に，DFRCC を一軸引張試験により評価する場合には，端部の支持，特殊な試験体形状などから実施が困難であり，日常的に行うような品質管理試験などに適用するには難がある。

本研究では，DFRCC の引張性能を容易な試験法により評価し，得られた評価値により構造性能を評価する体系を構築することを目的としている。DFRCC の引張性能を構造性能の評価に陽な形で取り込むことができれば，RC 構造の可能性を広げる革新的な試みとなろう。

以下に本論文の構成および各章の目的を述べる。

本章では、繊維補強セメント複合材料の歴史および概要について整理するとともに、その特長である引張性能を評価する手法である引張試験について、従来の普通コンクリートを例に各種引張試験方法についてそれぞれの特徴をまとめる。

第2章では、DFRCCの中でも高性能な引張性状を示すHPFRCCに分類されているECCに着目し、その特長である引張性能を評価する。まず、部材中での挙動を表現し得る断面形状を有する一軸引張試験方法を提案し、既往の研究により提案されている様々な試験方法とともに評価し、試験方法毎の特徴についてまとめる。さらに実施困難な一軸引張試験に代わる容易な試験方法として、また、各種引張試験のベンチマークとなる試験方法として、普通コンクリートで従来から行われていた3等分点加力（4点）曲げ試験に着目し、引張性能の導出および検討を行う。

第3章では、セメント系材料の構造性能において重要な性質であり、ECCについても同様に重要であると考えられる、ひび割れ面でのせん断伝達機構の把握を目的とし、ひび割れ面の垂直応力として引張力を作用させた直接せん断試験方法を提案し、加力実験を行う。新たな加力方法の是非を検討するため、通常のコンクリートによる予備実験によりその是非を確認し、ECCに適用しそのせん断伝達機構を把握する。

第4章では、ECCの部材性能の把握およびバックデータの蓄積を目的として、ECC梁部材の大野式逆対称曲げせん断一方向加力実験を行う。試験パラメータは筋筋比（0%～1.2%）、せん断スパン比（1.5, 1.25）、繊維の体積繊維混入率（1.5%, 2.0%）および想定破壊形式（せん断破壊型、曲げ降伏先行型）である。部材の荷重－変形関係、ひび割れ性状、最終破壊性状、各歪性状等の構造性能を把握し、既往の強度式との整合性について検討する。

第5章では、第2章で得られたECCの引張性能を取り込んだ構造性能の評価を行う。第2章で提案した方法により得られた引張特性値を用いて、部材の曲げ強度はファイバーモデルによる断面解析により、せん断強度はアーチ・トラス理論を拠り所として各強度を評価し、妥当性を検証する。

第6章では、HPFRCCに分類されるECCを包含する形として定義されている、曲げ応力下において初期ひび割れ発生以降に荷重増加するたわみ硬化性状を示すDFRCCを対象として、第2章の一軸引張試験から得られる引張性能と曲げ試験から得られる引張性能の対応、第4章と同様の大野式逆対称曲げせん断一方向加力による梁の加力実験および第5章の曲げおよびせん断強度評価方法の適合性を検討する。

第7章では、本論文全体をまとめ、最後に今後の課題について述べる。

本論文の構成を図1.3に示す。

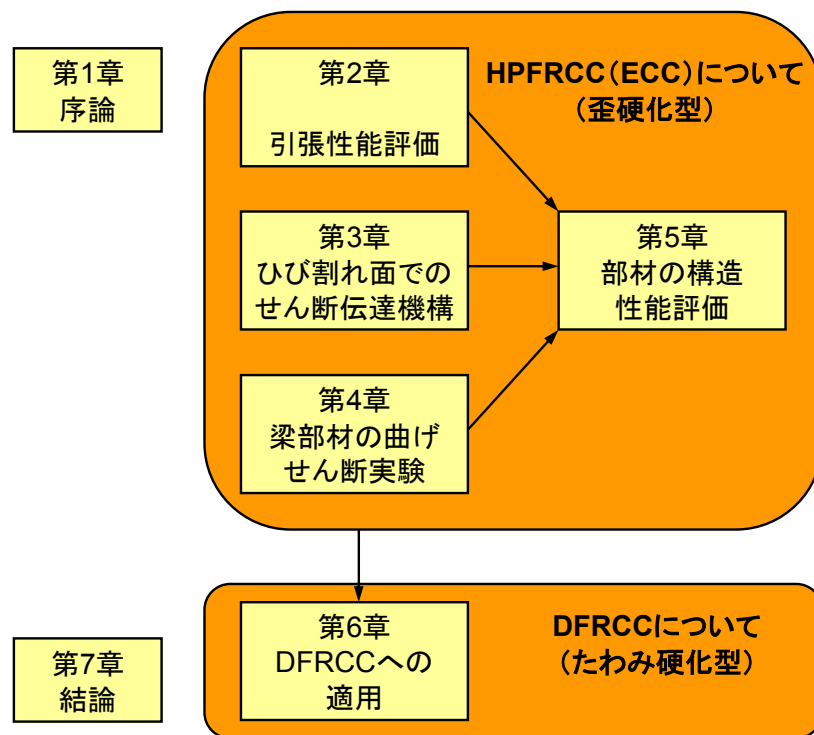


図 1.3 本論文の構成

1.2 セメント系材料の引張試験

本節では、DFRCC の引張性能を検討する上で有益な資料となり得る、既存のセメント系材料に対する引張・曲げ試験法およびそれらの評価法についてまとめる。コンクリートに代表されるセメント系材料において、特に力学的性能に関しては直接に部材設計等に反映されないため、一般に引張試験が行われることは多くない。さらに、直接引張試験を行うためには特殊な形状の型枠や加力治具が必要であり、試験が容易ではないので、間接的に引張強度を評価する曲げ強度試験や割裂試験が通常行われている。

1.2.1 直接引張試験

コンクリートの直接引張試験を行う場合には、供試体への加力方法に工夫を要する。直接引張試験用供試体の端部の形状と加力方法の例を、図 1.4 に示す [1.10]。着目要因は、主として力の伝達機構（応力集中）と境界条件（モーメントの伝達）である。

供試体を一様な断面の形状にすると端部もしくは掴み部で破壊が生じ、また変形（ひび割れ幅）を得るための測定箇所の設定が難しい。供試体端部に拡大部を設ける場合には、変断面位置で応力集中が生じ、その箇所に破壊が集中する。供試体端部に定着材を埋め込む場合も同様に、剛性が急変する箇所で破壊しやすく、定着材の先端を鋭角に加工する等の工夫がなされる。

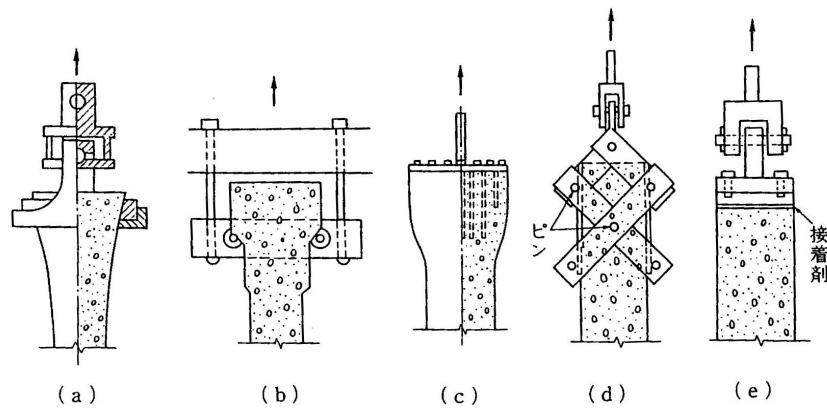


図 1.4 直接引張試験の端部形状の例 [1.10]

境界条件に関しては、両端ピン、両端固定およびピンー固定の支持方法が考えられる。理想的には境界条件に関係なく純引張状態が考えられるが、実際には供試体の精度、材料の不均一性、加力装置の剛性、加力装置への設置状況等によって、多少なりとも供試体には曲げモーメントが作用する。端部支持条件を両端ピンとすることで初期不整を少なくできる [1.11] が、通常ひび割れ発生は供試体のある側面から起こり、断面内の剛性の不均一性から 2 次的な曲げモーメントが作用することになる。曲げモーメントが作用すると供試体の断面内に一様な引張応力は生じず、大きな試験誤差の原因となる [1.12]。

コンクリートの破壊力学の分野で用いられる引張軟化曲線を引張試験から直接求めるためには、最大荷重点以降も安定に試験を制御するため、供試体側面に切欠きを加工し、切欠き部分の開口幅を測定する場合が多い。

従来型の FRCC に対して直接引張試験を行う場合にも、コンクリートの直接引張試験で指摘される要因がほぼそのまま当てはまる。FRCC の力学性能を評価するためには架橋応力を定量化することが重要であり、この意味から FRCC を評価する要因としては引張軟化曲線が適しているため、切欠き供試体の引張試験が行われる。

引張試験に限ることではないが、要素試験においては寸法効果が存在し、一般に供試体がいほど強度が小さい。特にセメント系材料の場合、空隙・気泡等の欠陥寸法、乾燥収縮、材料分離等の影響がある。さらに FRCC の場合には、繊維長と供試体断面寸法の比率、材料打設方向の影響があるとされている [1.10]。

1.2.2 割裂試験

一般に、円柱供試体を横にして上下方向から圧縮力を作用させ、供試体を割裂破壊させて弾性理論による引張応力の分布をもとに引張強度を算出する割裂試験は、供試体の作製および加力が容易なことから、コンクリートに関してもっとも一般的に行われる引張試験法である。実際には引張応力の 3 倍の圧縮応力が作用する二軸応力下の試験ではあるが、割裂試験により求めた引張強度は直接引張試験により得られた引張強度とほぼ一致するとされている [1.10]。

FRCC を対象とした場合、コンクリートと異なり初期ひび割れ発生以降も供試体が分断されないため、明確な荷重低下を伴わず圧縮場が卓越した状態となり、供試体は最終的に載荷端面で圧

縮破壊する。そのため、供試体端面に変位計を設置して変形を計測し、荷重－変形関係から特性点を特定する等の工夫もされている [1.13] が、この方法では初期ひび割れ強度のみしか求まらず、それ以降の性状を得ることはできない (図 1.5 参照)。

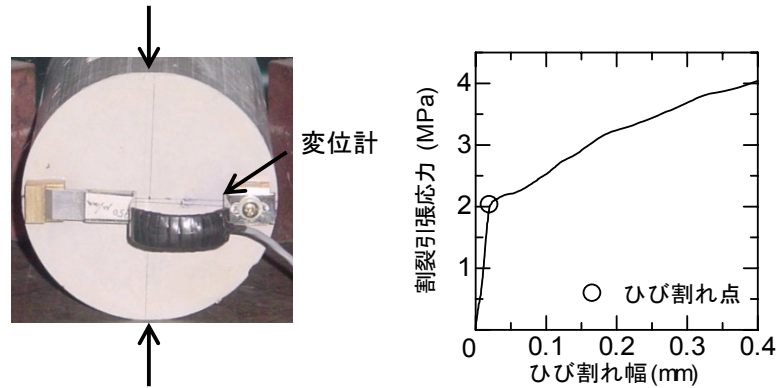


図 1.5 FRCC の割裂引張試験の例 [1.13]

1.2.3 曲げ強度試験

曲げ強度は、試験における供試体の作製や加力も比較的容易であることから、割裂試験とあわせてセメント系材料の引張強度を代替する特性値として使用される。特に、想定される部材の内力状態が曲げモーメントが卓越する場合には、部材の曲げ性状を材料の曲げ強度によって評価することになり、明快である。

一般には、純曲げモーメント箇所が存在する 3 等分点曲げ試験 (4 点曲げ試験) が行われるが、直接引張試験と同様にひび割れ箇所が特定されないため、材軸方向の変形を測定することが難しい。そのため、切欠けを設けた供試体に 1 点载荷加力 (3 点曲げ試験) を行い、荷重とひび割れ開口変位の関係から破壊エネルギーや引張軟化曲線を得る方法が取られる。直接引張試験が難しいことから、特に FRCC の場合、引張性能を評価する標準試験法として、日本コンクリート工学協会、土木学会で採用されている。

曲げ強度試験においても引張試験と同様に、寸法効果、乾燥収縮、材料分離等の影響がある。さらに、歪勾配がある場合に引張軟化曲線の寄与が相対的に小さくなり、供試体寸法により曲げ強度と引張強度の差が大きく現れる [1.10]。特に引張軟化域での破壊エネルギーが大きい FRCC では、歪勾配によって曲げ性状が供試体寸法に及ぼされる影響は大きい [1.14]。

1.2.4 DFRCC の引張試験

ECC に代表されるような、特に引張能力に卓越した DFRCC では、引張性状を確認する方法として薄板状のダンベル型供試体を用いた直接引張試験が行われている [1.15]。また、材料の構成則を評価する手段として、円柱供試体やドッグボーン型供試体による引張－圧縮繰返し試験が行われている [1.16] [1.17]。また、近年では、特に ECC の場合に繊維長と供試体断面寸法の比率が引張変形能力に与える影響が大きいことが指摘されている [1.18]。

一軸引張応力下で複数ひび割れが生じ、変形が増大する材料を包含する DFRCC において、コ

ンクリートや FRCC で安定した引張性能評価が行える切欠け供試体を, DFRCC の引張性能評価に用いることは原則として好ましくないと考えられる。特に一様な応力場が容易に存在し得る部材の性能評価に DFRCC の引張性能を用いる場合には, 危険側の評価にならないような考慮が必要である。さらには, 標準試験法として整備されるためには, 特殊な治具や装置を必要とせず比較的容易に試験が行えることが望まれている。

第 2 章

引張性能評価

第2章 引張性能評価

2.1 はじめに

一軸引張応力下において、初期ひび割れ発生以降に微細なひび割れを分散発生（マルチプルクラック）させながら、数%程度の歪まで引張応力が上昇（擬似歪硬化性状）する ECC が開発され、繊維補強セメント材料に対する注目が高まる中、DFRCC の特長である引張性能を評価する方法が未だ確立されていないのが現状である。また、DFRCC を構造部材へ適用するためには、その性能を適切に評価するだけでなく、得られた材料性能値により構造性能が適切に評価できることが望ましい。特に、既存の RC 構造部材の設計では、圧縮強度がコンクリートの材料性能を表現するほとんど唯一の設計要因であったのに対し、セメント系材料である DFRCC の引張性能を構造設計に陽な形で取り込むことが出来れば、RC 構造の可能性を広げる革新的な試みとなろう。この試みの基礎となるのが上記の引張性能の評価方法の確立である。

本章では、DFRCC の中でも引張性能に優れた材料である HPFRCC に分類されている ECC に着目し、ECC の特長である引張性能を直接得ることのできる一軸引張試験について、新しく提案する方法および既往の研究により提案されている様々な試験方法により評価し、試験方法毎の特徴および ECC の打設方向による影響について検討する。また、日常的に行う試験方法として現状では困難な一軸引張試験に代わる新たな引張性能を得る試験方法として、また、各種引張試験法のベンチマークとなる試験方法として、普通コンクリートで従来から行われてきた 3 等分点加力（4 点）曲げ試験に着目し、引張性能を導出し検討を行った。なお、検証対象とした ECC は PVA 繊維（ビニロン）を用いた PVA-ECC である。

2.2 一軸引張試験

2.2.1 一軸引張試験法の提案

DFRCC の引張性状を直接得る試験方法として、これまで各研究機関により提案されている一軸引張試験方法を以下にまとめる（図 2.1 参照）。

(1) 平板ダンベル型 [2.1]

試験区間の長さが 80mm で試験部分断面が $30 \times 13\text{mm}$ の試験体を用いる。端部支持方法はピンー固定である。端部はジャッキにより直接把持させることができるため載荷準備が比較的容易に行える。板厚が 13mm であり薄肉形状のため、柱や梁などの断面がある程度大きい部材へ適用する場合には、引張性能が過大に評価される恐れがある。打設方向は一般的に横方向である。

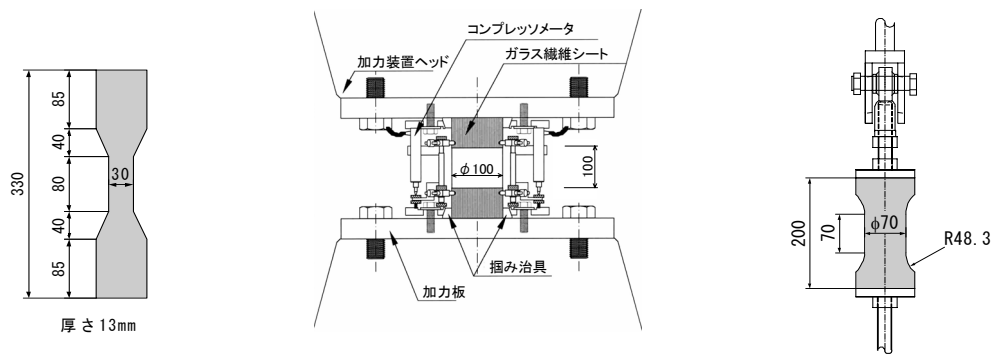
(2) シリンダー型 [2.2]

コンクリートの圧縮試験に用いられる JIS A 1108 に規定されている $\phi 100 \times 200\text{mm}$ シリンダー型試験体を用い、両端部をガラス繊維シートで補強させてチャックで固定する方法である。油圧サーボ試験機を使用することにより、引張－圧縮繰返し加力が可能である。設置時の載荷盤の遊びによる回転に注意する必要がある。また、シリンダー形状のため打設方向が縦方向に限定される。

(3) シリンダーくびれ型 [2.3]

上述のシリンダー型試験体の中央部をくびれさせ、中央部断面を $\phi 70\text{mm}$ 、試験区間を 70mm とした試験体を用いる。端部支持条件はピンー固定支持であり、比較的に安定して引張性状を得ることができるが、くびれ部分の曲率半径が $R48.3$ であるため断面変化が大きく、その部分で最終破壊する例も見られる。この試験体もシリンダー形状のため打設方向が縦方向に限定される。

薄板形状ではマッシブな部材中の挙動を模擬できない可能性があり、打設方向により得られる結果が異なるとの懸念もあるため、打設方向に因らず作製が可能であり、繊維径に対してある程度大きい断面形状を持った引張試験法が必要であると考えられる。また、ストレート形状やくびれ形状などの軸方向の断面変化が引張性能へ与える影響については、打ち込み方法によって様々であろうが、破壊箇所を限定するためにはくびれ形状が良いと思われる。そこで、新たな一軸引張試験として、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の矩形試験体の中央部を $60 \times 100\text{mm}$ にくびれさせた矩形くびれ型試験体を提案する（図2.2参照）。この試験体は測定断面がDFRCCに使用される一般的な短



(1) 平板ダンベル型 [2.1] (2) シリンダー型 [2.2] (3) シリンダーくびれ型 [2.3]

図 2.1 一軸引張試験法の例

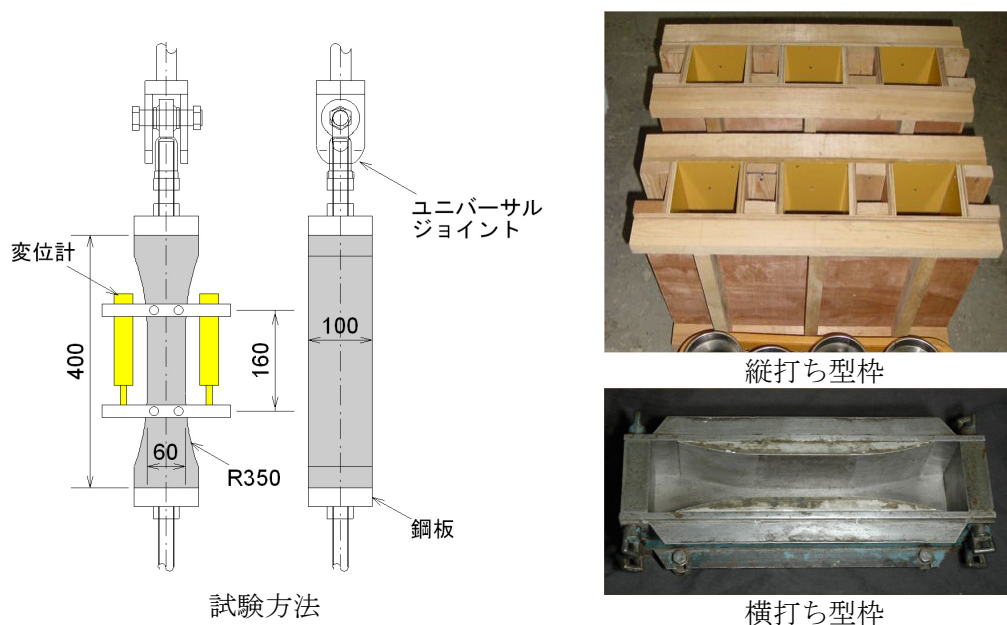


図 2.2 矩形くびれ型試験体

繊維の繊維長の2～5倍程度と比較的大きいため、繊維が3次元に配向することが期待でき、また角柱形状のため打設方向に関わらず作製することが可能となる。この試験体は、JIS A 1106で規定されている100×100×400mmの矩形試験体作製用鋼製型枠の内側に、くびれ部分の形の成形を施したアルミ製の型枠を固定した専用の型枠を用いて、横打ちの引張試験体として作製される。また合板等により作製した型枠内に同様のアルミ製型枠を固定することで縦打ちの試験体を作製するものである。試験方法は、試験体上下面にM24ナットを溶接固定した鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で接着させ、端部支持条件が初期不正や2次曲げの影響を考慮したピンー固定[2.3]となるように、ユニバーサルジョイントおよびM24ネジ棒を介して試験機のヘッドチャックに固定して加力を行う。変位計測は、検長を160mmとした2つの変位計により行う。

2.2.2 共通試験

同一の材料を用いて、前述の3つの引張試験法および新たに提案する試験法により引張試験を行い、試験方法毎の特徴およびECCの打設方向による影響について検討する。

2.2.2.1 使用材料および試験方法

使用材料はPVA繊維を体積混入率2.0%混入させたECC（PVA-ECC）である。使用繊維の力学特性を表2.1、調合計画および圧縮試験結果を表2.2に示す。使用した結合材は普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュ（JIS A 6201に規定するⅡ種）である。細骨材としては、比表面積が2500cm²/gの石灰石砕砂を用いた。試験体の打設は、均一かつ連続的に打ち込み、打ち継ぎによる繊維の不連続性を排除するように行った。養生方法は、練り上がり後に蒸気養生（最高温度35℃、8時間）を施し、その後20℃で封緘養生を行った。

一軸引張試験方法は、前節で紹介した平板ダンベル型（T1）、シリンダーくびれ型（T3）、シリンダー型（T4）および前節で新たに提案した矩形くびれ型（T2）の4つであり、打設方向の影響を検討するために矩形くびれ型は縦打ち（T2-V）および横打ち（T2-H）の試験体を作製した。端部支持条件はT1～T3はピンー固定、T4は固定ー固定である。加力および計測方法を表2.3に示す。計測項目は荷重および変位とし、変位は試験体表裏に取り付けた2つの変位計の平均値とした。

表 2.1 使用繊維の力学特性

名称	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA 繊維	12.0	0.04	1600	40.0

表 2.2 調合計画および圧縮特性

名称	水結合材比*	砂結合材比*	繊維混入率 (%)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	割線剛性 (GPa)
PVA20	0.42	0.77	2.0	10.0	31.3	13.7

* 結合材重量のうち、セメント：フライアッシュ JIS2 種 = 0.7 : 0.3

表 2.3 加力方法

試験種別	打設方向	加力方法	試験体数
T1	横	平板ダンベル型 ピンー固定	6
T2-H	横	100×100×400mm 矩形くびれ型 ピンー固定	2
T2-V	縦		1
T3	縦	φ100×200mm シリンダーくびれ型 ピンー固定	5
T4	縦	φ100×200mm シリンダー型 固定ー固定	3

2.2.2.2 試験結果

各試験体の破壊状況の例を図 2.3 に示す。試験方法によりひび割れ状況が異なっており、T2 試験体では横打ち（H）が縦打ち（V）に比べてひび割れが多く発生している。縦打ちの T3 試験体および T4 試験体においても同様の傾向が見て取れる。横打ち試験体では、打ち込み時に繊維が材軸方向に配向しやすいことが考えられ、一方の縦打ち試験体では横打ち試験体に比べてその傾向が薄く、さらにエントラップトエアを巻き込みやすいこと等が考えられる。T3 試験体および T4 試験体では、断面変化またはシート補強による剛性急変部において最終破壊に至る試験体が見られた。ファイバーボール等の欠陥が少なく、繊維が分散した均質材料である PVA-ECC において、一軸引張試験を行う際には剛性急変部はなるべく避ける必要があると考えられる。

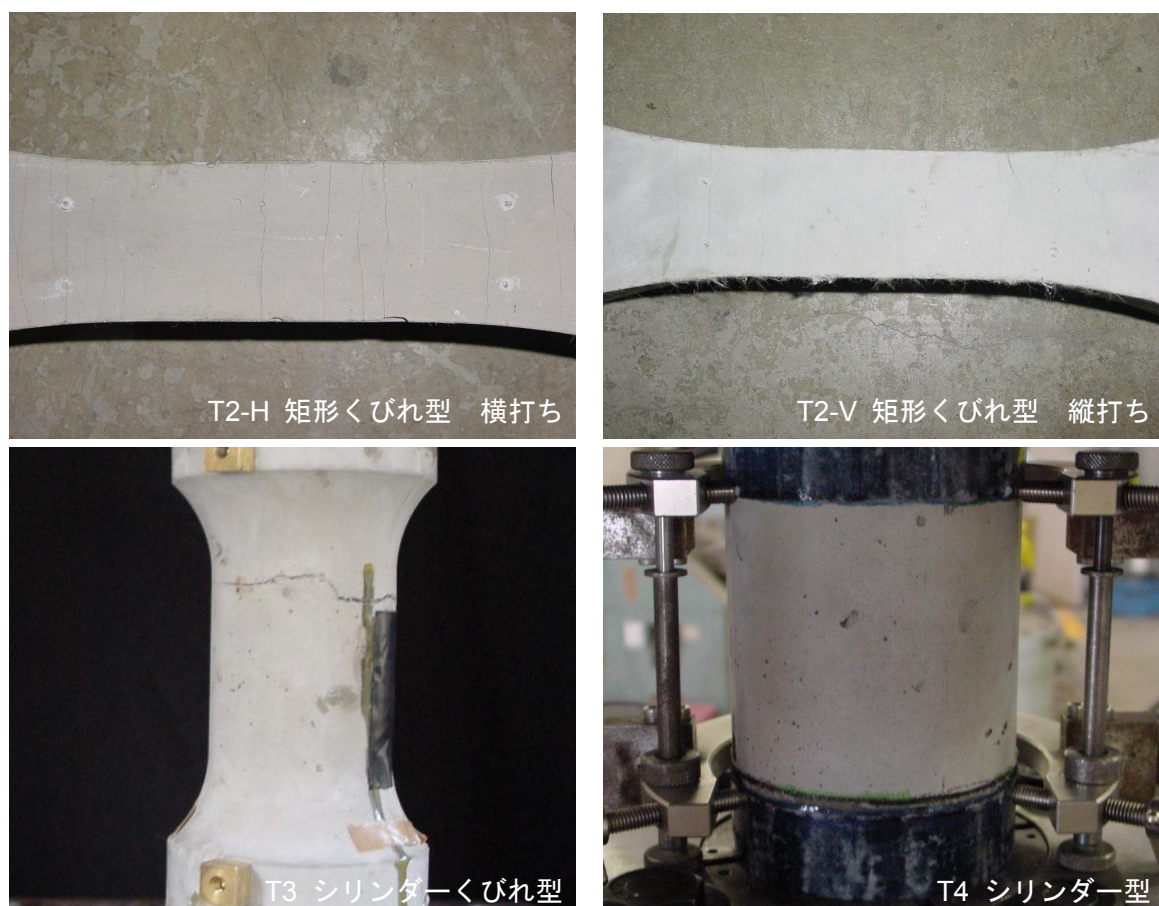


図 2.3 最終破壊状況

引張応力－歪関係を図 2.4 に、試験結果一覧を表 2.4 に示す。なお引張歪は変位計測値を標点間距離で除して求めた。T1 および T2 試験体においては初期ひび割れ以降に応力上昇する擬似歪硬化性状がはっきりと見て取れるが、T3 では初期ひび割れ以降に応力低下を示しており、試験法により得られる引張性状が異なっている。HPFRCC の定義については、「一軸引張応力下において擬似歪硬化性状かつマルチプルクラック性状を示す材料」としているが、引張試験により引張性状が異なるため、本論文では横打ちの角柱くびれ型試験体 (T2-H) による一軸引張試験結果におい

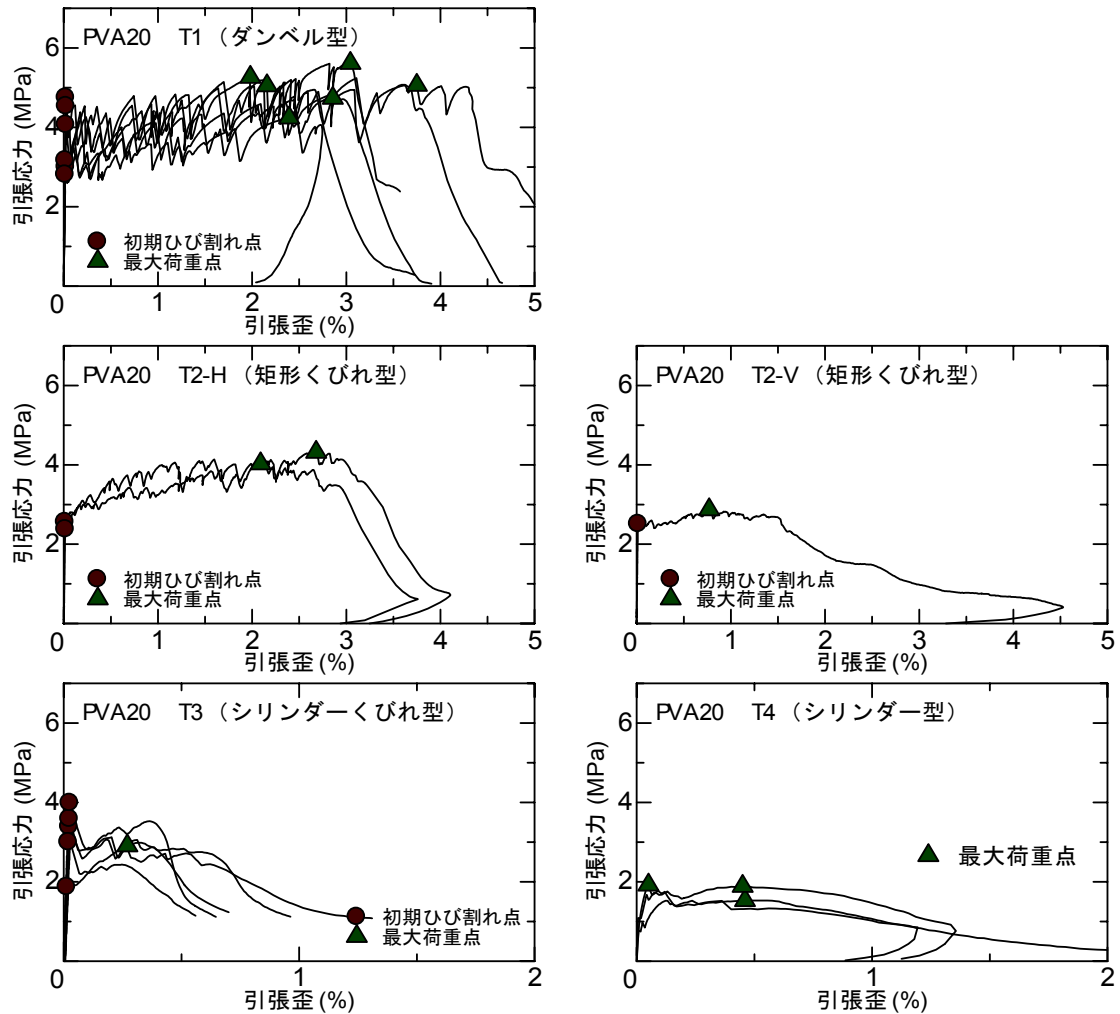


図 2.4 引張応力－歪関係

表 2.4 引張試験結果一覧 (平均値)

試験 種別	初期ひび割れ強度 (MPa)	初期ひび割れ時歪 (%)	引張強度 (MPa)	引張強度時歪 (%)
T1	3.72	0.021	5.00	2.70
T2-H	2.47	0.015	4.18	2.38
T2-V	2.51	0.006	2.87	0.769
T3	3.17	0.021	3.38	0.071
T4	—*	—*	1.78	0.320

* 引張応力－歪関係において初期ひび割れ点不明瞭であったため掲載せず

て上記の定義が明確に現れる材料を HPRCC と定義する。

引張試験法毎による、初期ひび割れ応力・歪、引張強度および引張強度時の歪の比較を図 2.5 に示す。初期ひび割れ点については引張試験法による大きな違いは見られないが、引張強度では、試験方法により $T1 > T2-H > T2-V \approx T3 > T4$ の傾向が見られ、引張強度時歪では T1 および T2-H 試験体が高い。用いる引張試験法により得られる引張性状が異なるため、試験法毎の特徴を十分理解した上で評価を行う必要がある。

初期ひび割れ時の応力と歪は、マトリックスの性状が支配的であり、試験体の端部支持条件が同一であればほぼ同様の傾向を示すものと思われる。端部支持条件に関しては、ピンー固定の場合の初期ひび割れ強度は、ピンーピンの場合より小さめに評価されることが指摘されている [2.3]。ただし、ピンーピンの場合はひび割れ発生以降二次曲げの影響により適正な引張試験を行うことは不可能である。一軸引張試験においてひび割れ発生により時々刻々変化する二次曲げの影響を相殺させる装置の開発も報告されているが [2.4]、加力装置は特殊で複雑であり、容易に実験を行うことはできない。

ある程度ボリュームの大きい部材を対象とした引張性能の評価において、T2 試験体はある程度の断面形状を有し、断面変化部を R350 とすることで断面急変部での最終破壊を極力避け、実施も現状で提案されている試験法としては比較的容易に実施可能であるなどを総合的に考慮すれば、T2 試験体により望ましい一軸引張試験法であると考えられる。

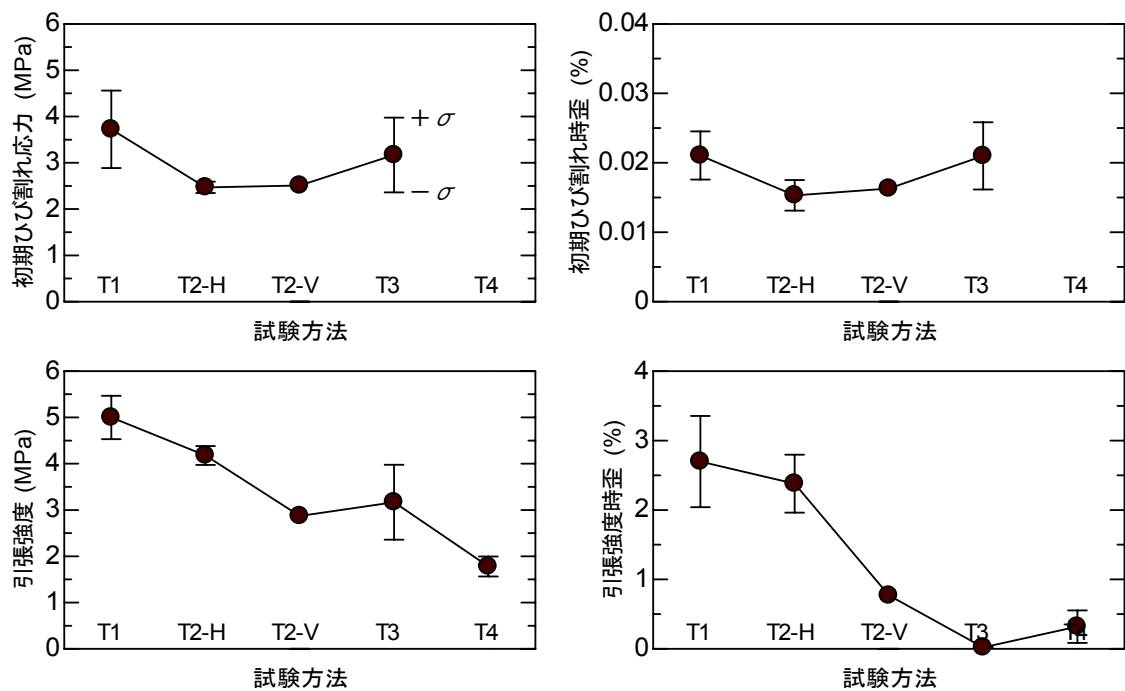


図 2.5 引張試験結果の比較

2.3 引張性能評価

前節で述べたように ECC に代表される DFRCC の引張性能を評価する方法が数々検討されており、一軸引張試験は直接的に引張性能を得ることができるため有用である。しかし、一軸引張試験は特殊な型枠や治具が必要であるなど実施が困難なものが多く、例えば薄板状のダンベル型試験体では、試験機チャックにより加力装置に直接固定でき比較的容易に载荷を行なうことができるが、载荷軸と試験体の中心軸を一致させることは難しく、また薄板形状のために繊維が 2 次元配向となり、引張性能を過大評価する傾向がある。また、一軸引張試験用に提案した矩形くびれ型試験体では、試験断面が $60 \times 100 \text{mm}$ と大きいことにより繊維配向の影響を除いたものであり、部材中の DFRCC の引張性能をある程度再現できると考えられるが、特殊な型枠の使用や試験体のセッティングに多くの時間を要する等のデメリットがある。このように、現状では一軸引張試験は多くの時間と労力を要するため、DFRCC 部材の製造や施工に伴う品質管理のように日常的に試験を行なう必要があるものに対しては不向きである。また、DFRCC が広く一般に使用されることを目指す場合には、専用の器具（型枠や加力治具等）が必要であることが障害となると考えられる。

そこで本節では、普通コンクリートで従来から行われてきた 3 等分点加力（4 点）曲げ試験に着目し、曲げ試験結果から引張性能を評価し、前節で提案した矩形くびれ型試験体による引張試験結果との相関を探る。曲げ試験は、加力の容易さ、型枠および加力治具の存在等のメリットがあり、一軸引張試験に比べ試験実施に掛かる労力を大幅に低減できる。このような曲げ試験による評価の有用性を考え、材料の精細な挙動や材料開発にともなう確認実験等における評価ではなく、実施工において日常的に行われる品質管理試験への適用を目指した評価を行う。そのために、簡易な表現モデル、少ない評価因子、明瞭な評価方法を用いる。一軸引張試験結果と曲げ試験結果の相関を明確化し、また、DFRCC の引張性能から DFRCC を用いた部材の構造性能を評価することができるになれば、コンクリートの $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 円柱供試体の圧縮強度から種々の性能を評価できる現在のコンクリート構造物の設計形態のように、DFRCC を用いた構造の評価を曲げ試験により行うことができるようになることを考える。

2.3.1 曲げ試験

曲げ試験は JIS A 1106 に規定されているコンクリートの曲げ強度試験方法に準じて行った。ただし、引張性能を評価するにあたり、本実験では図 2.6 に示すように、曲げ試験で通常行うたわみ計測ではなく、純曲げ区間の試験体材軸方向の変形を計測した。上下の変位計から得られる材軸方向の変形により、純曲げスパンにおける平均曲率 ϕ を以下の式から算定する。

$$\phi = \left(\frac{\delta_2 - \delta_1}{100} \right) / 70 \quad (2.1)$$

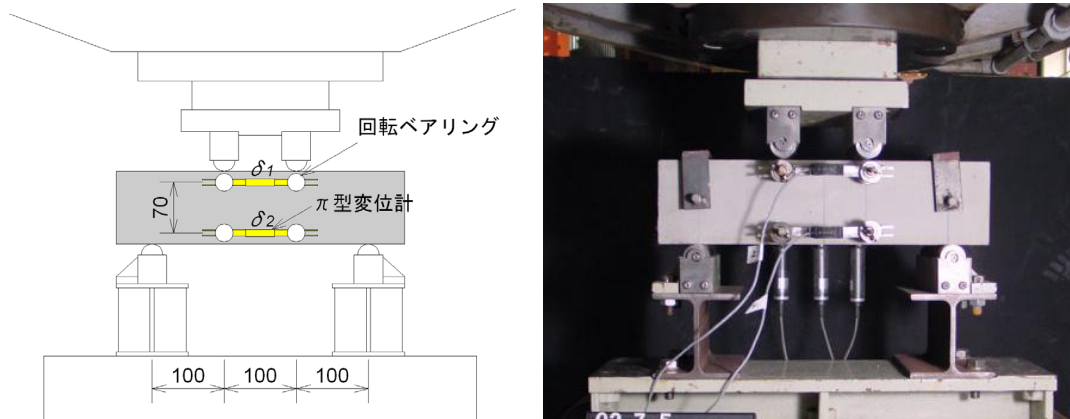


図 2.6 曲げ試験方法

使用材料は前節と同様で、繊維混入率が 2.0%である PVA-ECC を用いた。図 2.7 に打設方向を縦打ちおよび横打ちとした曲げ試験結果を示す。前節の一軸引張試験結果と同様に、横打ち試験体の強度および靱性が縦打ち試験体を上回っていることが分かる。また、ひび割れ状況（図 2.8 参照）についても同様の傾向にあることが分かる。つまり、引張性能が曲げ試験結果に影響を与えているといえよう。また、初期ひび割れが発生した後も荷重が上昇するたわみ硬化性状が認められた。

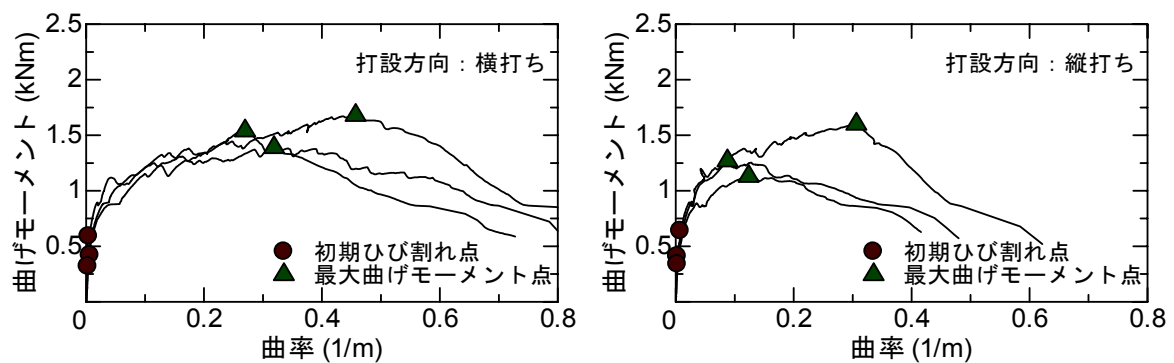


図 2.7 モーメントー曲率関係

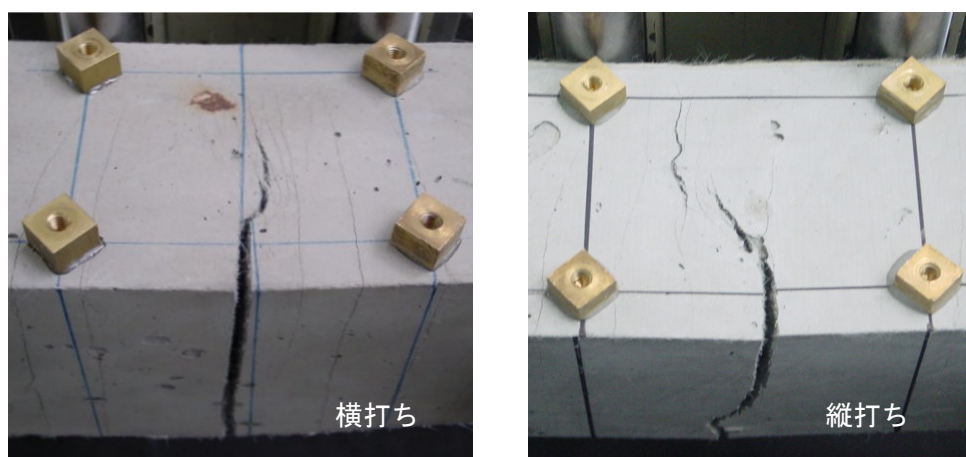


図 2.8 ひび割れ状況

2.3.2 曲げ解析

一軸引張性状と曲げ性状の関連を検討するため、PVA-ECC の応力-歪関係の圧縮側を放物線モデル、引張側を完全弾塑性モデルで表現し、完全弾塑性モデルの引張強度 σ_{max} および終局歪 ε_u をパラメータとした断面曲げ解析を行った。解析モデルを図 2.9 に示す。圧縮側は、圧縮試験結果を基に圧縮強度 σ_B ($=35.4\text{MPa}$) および圧縮強度時歪 ε_B ($=0.38\%$) から成る放物線モデルとした。引張側モデルの剛性は圧縮試験結果で得られた割線剛性を用いた。解析パラメータは、引張強度 σ_{max} が 1.5, 3.0 および 4.5MPa の 3 パターン、終局歪 ε_u が 0.5, 1.5 および 2.5% の 3 パターンの合計 9 パターンである。

パラメトリック解析結果を図 2.10 に示す。引張強度は最大曲げモーメントに、終局歪は最大曲げモーメント時曲率に概ね影響を与えていることが分かる。図 2.11 に示す断面応力分布を見ると、最大曲げモーメント時に引張縁歪が終局歪に達し、その時の圧縮縁歪は圧縮強度時歪に達していないことが確認された。また、最大曲げモーメント時には引張側の弾性範囲部分のごくわずかにあり、完全剛塑性モデルとの差異はほとんどない。

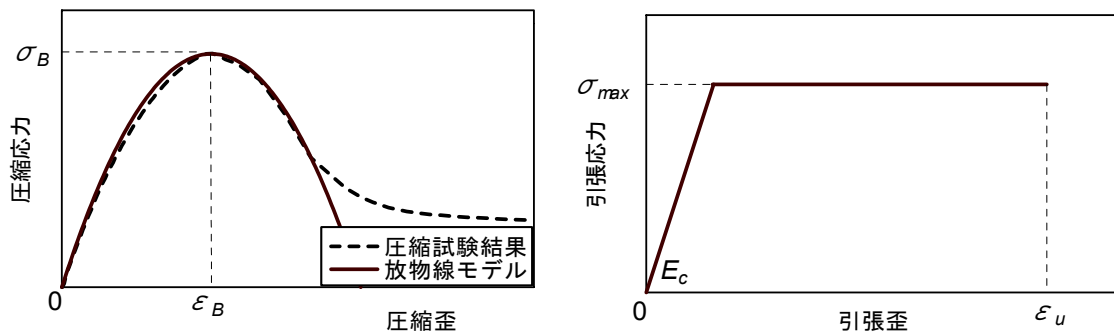


図 2.9 解析モデル

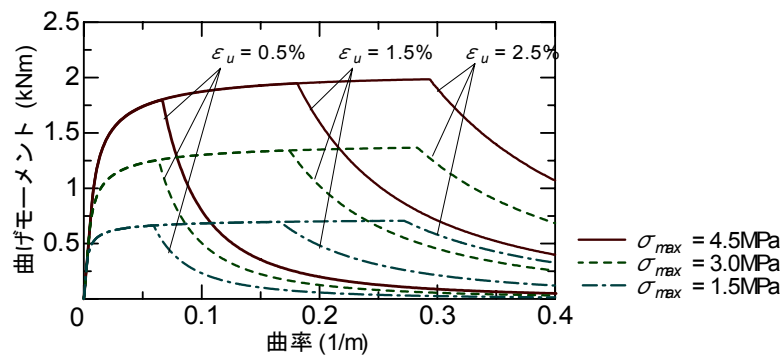


図 2.10 パラメトリック解析結果

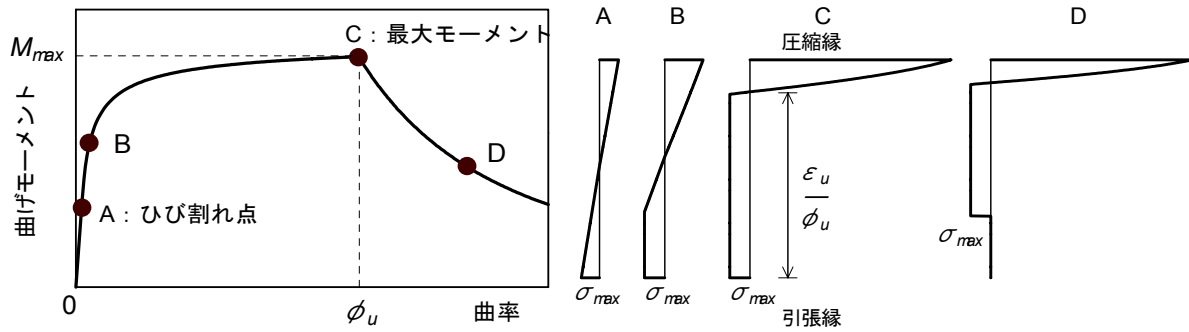


図 2.11 断面応力分布

2.3.3 引張性能評価法の提案

前節のファイバーモデルによる断面曲げ解析結果から、PVA-ECC の曲げ加力時における最大モーメント時の応力分布を、図 2.12 のように仮定する。すなわち、平面保持を仮定し、圧縮側応力は直線分布、引張側応力は一様分布とし、引張縁が引張終局歪に達し、圧縮縁では圧縮強度に達していない状態を仮定する。この仮定は、少ない影響因子（引張強度および終局歪の 2 つ）を用いることによって引張性能を容易に算出することができ、構造性能評価法の構築へ資すると思われる。

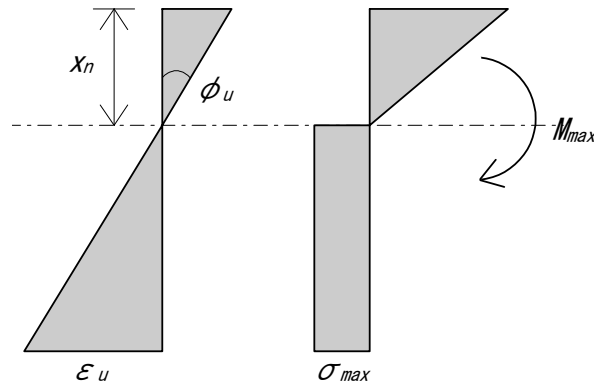


図 2.12 応力分布の仮定

圧縮縁から中立軸までの距離を x_n とすると、力とモーメントの釣り合いから次式が成り立つ。

$$\frac{E \cdot \phi_u \cdot b}{2} \cdot x_n^2 = \sigma_{max} \cdot b \cdot (D - x_n) \quad (2.2)$$

$$M_{max} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot b}{3} \cdot x_n^3 + \frac{\sigma_{max} \cdot b}{2} \cdot (D - x_n)^2 \quad (2.3)$$

ここで、

E : 弾性係数
 σ_{max} : 引張強度
 b : 試験体幅

ϕ_u : 最大荷重時の曲率
 D : 試験体全せい
 M_{max} : 最大モーメント

(2.2) 式を (2.3) 式に代入して、両辺を bD^2 で除して下式を得る。

$$m_{max} \equiv \frac{M_{max}}{b \cdot D^2} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot D}{3} \cdot x_{nl}^3 + \frac{E \cdot \phi_u \cdot D}{4} \cdot x_{nl}^2 \cdot (1 - x_{nl}) \quad (2.4)$$

ここで、

$$x_{nl} = x_n / D \quad (\text{ただし, } 0 < x_{nl} < 1)$$

(2.4) 式の両辺を $E \cdot \phi_u \cdot D$ で除し、新たに m^* を定義すると、

$$m^* \equiv \frac{m_{max}}{E \cdot \phi_u \cdot D} = \frac{x_{nl}^3}{3} + \frac{x_{nl}^2 \cdot (1 - x_{nl})}{4} \quad (2.5)$$

従って、

$$x_{nl}^3 + 3x_{nl}^2 - 12m^* = 0 \quad (2.6)$$

が成り立つ。(2.6) 式の解は (算出方法は章末に示す)、

$$x_{nl} = -1 + 2 \cos \frac{\theta}{3} \quad (2.7)$$

ただし、

$$\theta = \arccos(-1 + 6m^*) \quad (2.8)$$

従って、次式から引張終局歪 ε_u および引張強度 σ_{max} が求められる。

$$\varepsilon_u = \phi_u \cdot D \cdot (1 - x_{nl}) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{max} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot D \cdot x_{nl}^2}{2(1 - x_{nl})} \quad (2.10)$$

2.3.4 評価法の検証

曲げ試験結果より (2.9), (2.10) 式を用いて引張性能の評価を行う。検証に用いた材料は PVA-ECC で、繊維混入率は 2.0% (PVA20) および 1.5% (PVA15) の 2 種類とし、作製日の異なる合計 13 バッチで検証を行った。なお PVA15 は、表 2.2 に示す PVA20 の調合を基に繊維量のみを減じて計画したもので、合計 2 バッチである。PVA15 の一軸引張試験結果 (T2 引張試験：横打ち) の例を図 2.13 に示す。PVA20 と同様の歪硬化性状を示している。

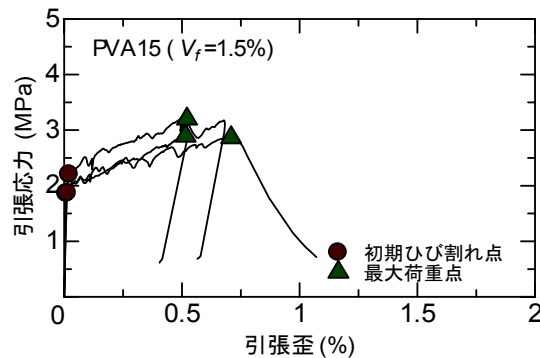


図 2.13 一軸引張試験結果 (PVA15)

一軸引張試験結果および曲げ試験による引張性能評価法の評価結果一覧を表 2.5 に、引張性能評価法の検証を図 2.14 に示す。ここで、一軸引張試験での終局歪は、変形の局所化により連続的に応力低下を引き起こす (引張軟化域) 直前の歪と定義する。各試験結果の変動係数は、引張試験では引張強度が 15%，終局歪が 40%，曲げ試験では引張強度が 15%，終局歪が 51%であり、ばらつきが大きいものの、引張試験と曲げ試験による引張性能評価のそれぞれの対応は良い。一軸引張試験結果と曲げ試験による引張性能評価を比較すると、比較値の平均値は引張終局歪が 0.85，引張強度が 0.82 となり、曲げ試験より算出した強度および歪の方が引張性能を高く評価する結果となった。これらの値は、対象とする材料の特性、曲げ試験体の寸法および加力条件に依存して変化するものと考えられる。この依存性は、引張性能が本質的には材料特性と考えることができるのに対し、曲げ性能が加力条件や試験体の寸法に大きな影響を受ける構造性能であることによるものであることから、説明され得ると考える。ここで、これらの比較値が持つ力学的意味について理論的に導くことは現状では容易ではないが、力学的な背景について以下に述べる。

引張終局歪に関する比較値は、曲げによる複数ひび割れ現象が引張よりも容易に実現しやすいことを反映するものといえる。曲げ加力によるたわみ硬化は、一軸引張試験において見られる歪硬化と類似の現象ではあるが、たわみ硬化が実現する力学的条件は歪硬化と比較して緩やかである。引張載荷で歪硬化が生じるためには、少なくとも複合材料の引張強度はマトリクスのひび割れ強度以上なくてはならないから、この差は大きく、曲げでは引張よりも容易に複数ひび割れ現象が起こり易い。引張終局歪に関する比較値は、この曲げと引張における複数ひび割れ現象が生じる条件の違いを反映し、曲げから得られる終局歪の推定値を低減する意味づけを有するといえる。なお、引張終局歪が小さい領域 (概ね 1.5% 以下) では、むしろ一軸引張試験結果の方が曲げ試験結果より評価値が大きい傾向が見受けられる。これは繊維の分散性や配向等の終局歪を決定

表 2.5 一軸引張試験結果および引張性能評価結果一覧

名称	繊維 混入率 (%)	一軸引張試験		曲げ試験			
		終局歪* (%)	引張強度 (MPa)	最大モー メント時 曲率 (1/m)	最大モー メント (kNm)	引張性能評価法	
						終局歪 (%)	引張強度 (MPa)
PVA20	No.1	1.19	3.37	0.201	2.07	1.72	4.58
	No.2	1.66	4.05	0.145	2.03	1.21	4.57
	No.3	2.02	4.16	0.267	1.66	2.36	3.59
	No.4	1.63	2.87	0.174	1.33	1.49	3.01
	No.5	2.92	4.18	0.349	1.53	3.10	3.33
	No.6	2.13	4.06	0.183	2.11	1.53	4.75
	No.7	0.91	3.40	0.0839	1.86	0.67	4.33
	No.8	1.98	3.69	0.297	2.16	2.56	4.83
	No.9	2.10	3.60	0.344	2.30	2.99	5.07
	No.10	2.22	3.94	0.370	2.00	3.22	4.41
	No.11	2.59	3.27	0.382	2.25	3.32	4.97
PVA15	No.1	1.50	2.50	0.124	1.66	1.02	3.83
	No.2	0.64	2.99	0.0528	1.55	0.41	3.66

* 連続的に荷重低下する直前の歪

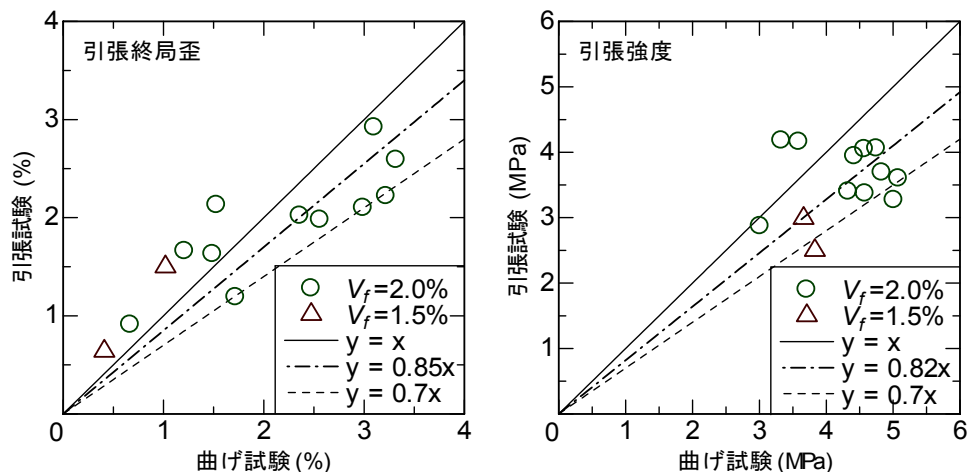


図 2.14 引張性能評価法の検証

付ける繊維架橋性能が、引張終局歪の小さい範囲では引張試験より曲げ試験の方が影響を受け易いことに起因するものと考えられる。すなわち、一軸引張下では断面内の一部に架橋性能が劣る箇所があっても、同一断面内の他の部分に余力が残っていればトータルとしては架橋性能が発揮される一方、曲げ試験では最大モーメントは引張縁で引張終局歪を迎えた時点であり、その引張終局歪は引張縁の最も架橋性能の弱い部分の終局歪によって決定されることによる。

また、引張強度の比較値は、曲げ解析で仮定した完全剛塑性による引張応力-歪関係と実際の差異を反映していることが考えられる。一般に、ECCの引張応力-歪関係は、初期ひび割れが生じた後に応力が漸増するバイリニアによる近似の方がより正確と考えられる。ここで用いた完全剛塑性モデルによる引張強度推定値は、モーメントの釣合を考えた場合、引張縁に近い応力値ほど曲げモーメントに寄与し、バイリニアによる平均的な引張応力よりも大きな値を示すと考えら

れる。

したがって、曲げ試験結果をもとにした引張性能の推定は、対象とする材料および曲げ試験の条件を限定した上で行なうことが必要であり、これら条件に応じて引張終局歪および引張強度の比較値が変化することになる。現状では、これらの値を理論的に導くことができる技術レベルがなく、実験定数として扱うことが現実的である。

本研究で対象とした PVA-ECC では、図 2.14 に示すように、引張試験から得られた特性値の曲げ試験に対する比の下限值は、引張終局歪および引張強度ともおよそ 0.7 であり、この値を低減係数として用いることによって、曲げ試験を PVA-ECC の引張性能に対する品質管理に利用することが可能であると考えられる。

2.3.5 たわみ計測による評価

JIS A 1106 に規定されている曲げ試験の一般的な計測方法はたわみ計測である。本節では、より容易な引張性能評価に資するため、たわみ計測により算出した曲率を、図 2.6 に示した軸方向変位により算出される曲率との関係について検討を行う。たわみ計測方法および曲率算出方法を図 2.15 に示す。曲げ試験体には表面で図 2.6 に示す軸方向変位を計測し、裏面で図 2.15 に示すたわみ計測を同時に行った。たわみ計測による曲率算定は、純曲げ区間内の曲率を一様分布と仮定し、中央たわみ δ_B と加力点たわみ δ_A および δ_C の差分より以下の式から算出した。

$$\frac{2\delta_B - \delta_A - \delta_C}{2} = \frac{M \cdot l_0^2}{8E \cdot I} = \frac{\phi \cdot l_0^2}{8}$$

$$\therefore \phi = \frac{4}{l_0^2} \cdot (2\delta_B - \delta_A - \delta_C) \quad (2.11)$$

ここで、

M : 曲げモーメント

E : 弾性係数

I : 断面 2 次モーメント

ϕ : 曲率

l_0 : 純曲げスパン (=100mm)

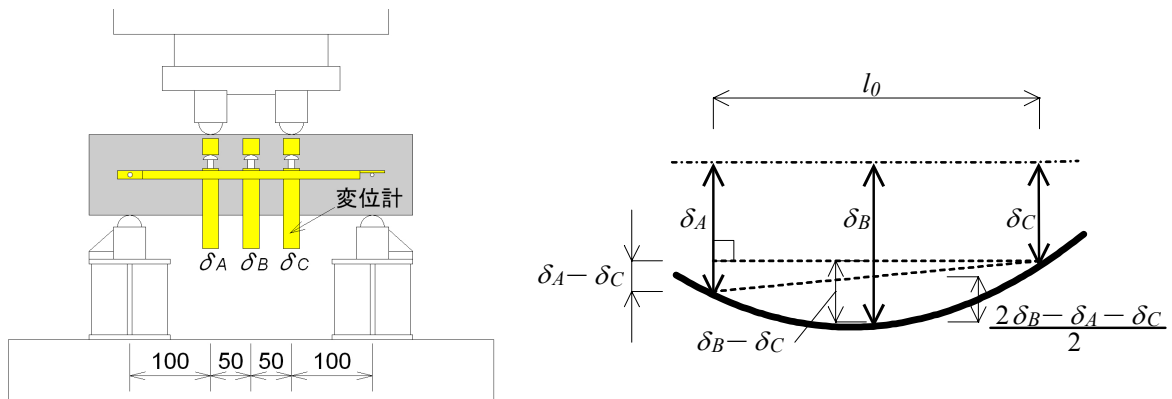


図 2.15 たわみ計測方法および曲率算出方法

PVA20による曲げモーメントと軸方向変位およびたわみから求めた曲率の関係の例を図2.16に、最大曲げモーメント時の曲率の比較を表2.6に示す。表中の平均は純曲げスパン外で最終破壊に至ったものを省いて算出してある。なお破壊形式とは、純曲げスパン内で最終破壊した(○)か否(×)かを示している。たわみから求めた曲率と軸方向変位から求めた曲率は概ねよい対応を示している。縦打ち試験体に関しては、得られる曲率のばらつきが横打ち試験体に比べて大きい。この理由としては、縦打ちの試験体はひび割れ本数が横打ち試験体に対して少なく、純曲げスパン内の曲率分布一定であるという仮定の適用が困難な場合があるためと考えられる。

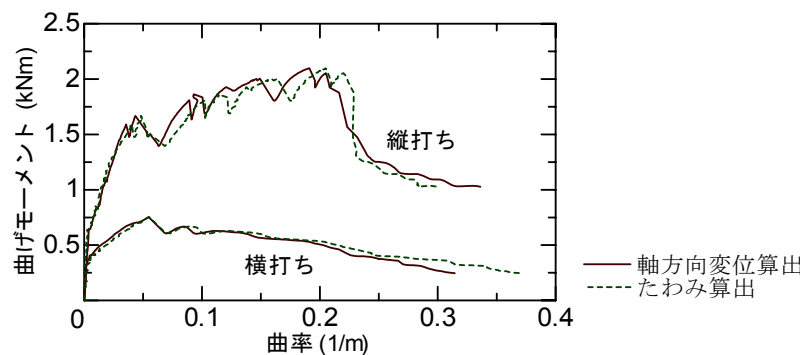


図 2.16 曲げモーメントー曲率関係 (PVA20)

表 2.6 最大曲げモーメント時の曲率の比較

供試体		最大モーメント時の曲率 (1/m)		軸方向 ／たわみ	破壊 形式
		軸方向変位算出	たわみ算出		
縦打ち	No.1	0.085	0.075	1.13	×
	No.2	0.055	0.055	1.00	○
	No.3	0.049	0.073	0.67	×
	No.4	0.149	0.076	1.96	○
	No.5	0.040	0.062	0.65	○
	No.6	0.019	0.061	0.31	×
	平均	0.081	0.064	1.27	
横打ち	No.1	0.191	0.205	0.95	○
	No.2	0.148	0.183	0.81	○
	No.3	0.264	0.218	1.21	○
	No.4	0.167	0.148	1.13	○
	No.5	0.195	0.180	1.08	×
	No.6	0.123	0.182	0.68	○
	平均	0.179	0.187	1.04	

2.4 まとめ

DFRCCの中でも引張性能に優れた材料である HPFRCC に分類されている ECC に着目し、ECC の特長である引張性能を直接得ることのできる一軸引張試験について、新しく提案する方法および既往の研究により提案されている様々な試験方法により評価し、試験方法毎の特徴および ECC の打設方向による影響について検討した。また、日常的に行う試験方法として現状で実施困難である一軸引張試験に代わる新たな試験方法として、さらに各種引張試験のベンチマークとなる試験方法として、普通コンクリートで従来から行われてきた 3 等分点加力（4 点）曲げ試験に着目し、引張性能を導出し検討を行った。

引張試験の検討では、試験体形状、端部支持条件および施工条件により得られる引張性能が多分に影響を受けることを指摘し、ある程度ボリュームの大きい部材を対象とした引張性能評価では、実際の部材の応力状態と同様になるように打設方向を配慮した、矩形くびれ型試験体を用いたピン固定支持による一軸引張試験が工学的に有用であることを提案した。

引張性能評価法の検討では、ECC の引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現したファイバーモデルによる断面曲げ解析による結果を基に、曲げ試験時における最大モーメント時の応力分布を、平面保持を仮定し、圧縮側応力は三角形分布、引張側応力は一様分布とし、引張縁が引張終局歪に達し、圧縮縁では圧縮強度に達していない状態を仮定し、断面内の力とモーメントの釣合式により立式される中立軸に関する方程式の解から引張強度および引張終局歪を算出する引張性能評価法を提案した。曲げ試験による引張性能評価では、曲げ試験に対する一軸引張試験の比較値が、引張終局歪で 0.85、引張強度で 0.82 であった。また、低減係数を 0.7 とすることでおおむね両者とも下限値を表すことが可能で、品質管理に利用できることが分かった。しかしながら、この換算係数は、対象とする材料や曲げ試験体の寸法等に影響を受けるため、本研究の範囲において有効となる値であると考えられる。

また、曲げ試験時における曲率とたわみの関係に着目し、純曲げ区間内の曲率を一様分布として算出されるたわみと、たわみの実測値を比較検討した。その結果、両者はおおむね一致しており、マルチプルクラックが発生する ECC においては、純曲げ区間の平均曲率を用いて歪を評価できることを確認した。

<付録 (2.6) 式の解について>

(2.6) 式の解について以下に記述する。

$$A = -1 + 6m^* + \sqrt{12m^* \cdot (-1 + 3m^*)} \quad (2.12)$$

とおくと、(2.6) 式の解は、

$$x_{nl} = \begin{cases} -1 + A^{\frac{1}{3}} + A^{\frac{1}{3}} & (2.13) \end{cases}$$

$$-1 - e^{\frac{\pi \cdot i}{3}} \cdot A^{\frac{1}{3}} - e^{-\frac{\pi \cdot i}{3}} \cdot A^{\frac{1}{3}} \quad (2.14)$$

$$-1 - e^{-\frac{\pi \cdot i}{3}} \cdot A^{\frac{1}{3}} - e^{\frac{\pi \cdot i}{3}} \cdot A^{\frac{1}{3}} \quad (2.15)$$

となる。

i) $-1+3m^* < 0$ の場合

A は複素数となるが、(2.12) 式を虚数単位 i を用いて表記すると、

$$A = -1 + 6m^* + i \cdot \sqrt{12m^* \cdot (1 - 3m^*)} \quad (2.16)$$

と変形でき、絶対値 $|A|$ は、

$$|A| = \sqrt{(-1 + 6m^*)^2 + \left(\sqrt{12m^* \cdot (1 - 3m^*)}\right)^2} = 1 \quad (2.17)$$

となるから、(2.16) 式をオイラーの公式を用いて、

$$A = \cos \theta + i \cdot \sin \theta = e^{i\theta} \quad (2.18)$$

と表せる。ただし、

$$\theta = \arccos(-1 + 6m^*) \quad (2.19)$$

よって (2.6) 式の解は、

$$x_{nl} = \begin{cases} -1 + 2\cos\frac{\theta}{3} & (2.20) \end{cases}$$

$$x_{nl} = \begin{cases} -1 - 2\cos\left(\frac{\theta}{3} - \frac{\pi}{3}\right) & (2.21) \end{cases}$$

$$x_{nl} = \begin{cases} -1 - 2\cos\left(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3}\right) & (2.22) \end{cases}$$

と導ける。この3つの解の中で、条件 $0 < x_{nl} < 1$ を満たす解は (2.20) 式のみとなる。

ii) $-1+3m^* \geq 0$ の場合

(2.13) 式、(2.14) 式および (2.15) 式はいずれも条件 $0 < x_{nl} < 1$ を満足しない。

以上から、(2.6) 式の解は、

$$x_{nl} = -1 + 2\cos\frac{\theta}{3} \quad (2.23)$$

となる。

第 3 章

ひび割れ面でのせん断伝達機構

第3章 ひび割れ面でのせん断伝達機構

3.1 はじめに

DFRCC を構造部材へ適用するためには、RC 構造物の場合と同様に、その構造性能を的確に把握し評価する必要がある。特に、DFRCC を構造部材に適用する場合には、境界梁や制振部材等、曲げ応力と比較してせん断応力が大きい部位に利用されることが想定され、DFRCC 部材のせん断破壊のメカニズムについて把握することは重要である。RC 部材のせん断強度は、現在、終局強度型耐震設計指針 [3.1] および靱性保証型耐震設計指針 [3.2] に示されているせん断強度式により評価されており、また、より精度の高い結果を与えるための修正式も提案されている。せん断強度式は塑性理論に基づくトラス機構およびアーチ機構の足し合わせによりせん断抵抗メカニズムが構築され、主にせん断圧縮破壊を想定しており、せん断ひび割れ面での応力伝達機構が重要なファクターの一つであると考えられている。

RC のひび割れ面におけるせん断伝達機構に関する研究は古くから行われており、せん断力の主な抵抗機構としては、骨材やコンクリート面での噛み合い、鉄筋のダウエル作用などが挙げられる。例えば李らは、ひび割れ面の形状を確率密度関数で表現し、ひび割れ面におけるせん断応力と圧縮応力の関係を提案している [3.3]。

DFRCC においては、粗骨材を使用しないため骨材の影響は比較的少ないと考えられ、ひび割れ面において繊維が架橋することで応力が伝達されると考えられる。Kabele は、ECC のひび割れ面でのせん断伝達強度は一軸引張強度程度を有していると解析的に求めている [3.4] が、直接せん断加力試験による実験的検討は行われていない。そこで本章では、引張性能に優れた HPFRCC に分類されている ECC のせん断ひび割れ面でのせん断伝達機構を把握するため、ひび割れ面の垂直応力として引張力を作用させ、ひび割れを発生させた後の直接せん断試験方法を提案する。普通コンクリートおよびモルタルによる予備実験を行い、提案したせん断試験法の是非を検討した上で、ECC のせん断加力実験を行う。

3.2 既往のせん断試験

RC 構造物は、乾燥収縮や鉄筋の腐食、風や地震などの外乱により様々なひび割れが生じるため、RC のひび割れ面におけるせん断伝達機構に関する研究が古くから行われてきた。また、工期の短縮や安定した品質を提供できるプレキャスト (PCa) 構造が頻繁に用いられるようになり、PCa 部材との接合面でのせん断伝達機構の解明に向けて様々な加力実験が行われてきた。その主な加力形式は図 3.1 示す Mattock らの S 字型試験体による push-off および pull-off 試験 [3.5] である。この試験方法はせん断面においてモーメントが生じないため面内拘束力が少なく、純せん断応力状態で加力可能な試験方法である。また、図 3.1 (c) に見られるようにせん断面の角度を持たせることで、せん断面に圧縮力を作用させたせん断加力も可能となっている。せん断ずれに伴うひび割れ幅増大 (ダイレタンス) を制御するため、図 3.2 に示すように S 字型試験体のせん断面に付加拘束力を与えた実験も行われている [3.6]。また、図 3.3 に示す梁部材の曲げせん断実験の一般的な方法である大野式加力の試験体中央部に切欠きを設けたルーマニア式試験法も提案され

ている [3.7]。この試験は比較的容易に実施が可能であるが、断面内にモーメントによる拘束力が作用するため注意を要する。これらはせん断面が一つであるため総称して一面せん断と呼ばれている。

一面せん断試験以外にも、二面せん断試験や、プレキャスト部材を模擬した片持ち梁方式や構面試験があるが、前者は4点曲げ試験のせん断スパンを短くしたものであり、ルーマニア式試験と同様の拘束力がせん断面に作用することが考えられ、また後者は実用に最も近い試験ではあるが試験装置の規模が大きく実施が困難であるという欠点を有している。

繊維補強コンクリート (FRC) 部材のせん断性状に関する実験研究は今までに数多く報告されている。特に鋼繊維補強コンクリート (SFRC) に関して、部材のせん断強度を繊維混入量 (V_f) の関数で与える [3.8] 等、実験的にせん断耐力における影響因子を定めているものが多く見られる。しかしながら、その伝達機構そのものに着目した報告はあまり多くない。その中で、永坂は軸方向鉄筋を配した切欠き試験体に引張加力を行い、引張軟化曲線のある領域 (具体的にはひび割れ幅が 0.3mm のとき) の引張応力が、部材のひび割れ面において一様に分布するものとして、ひび割れ角度を 45° と仮定したトラス機構に累加してせん断耐力を算定している [3.9]。また、望月等は SFRC に対して S 字型試験体による push-off せん断実験を行い、ひび割れ面での繊維の引抜抵抗を考慮することによってせん断耐力を推定できるだろうと言及している [3.10]。

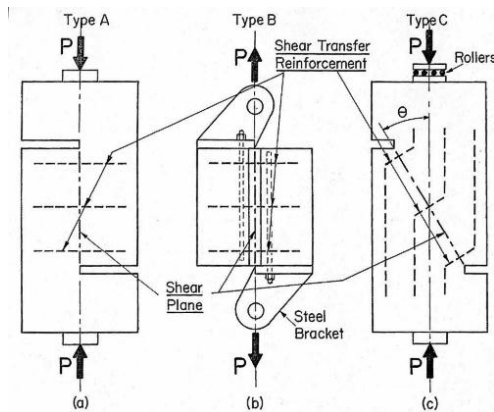


図 3.1 S 字型試験 [3.5]

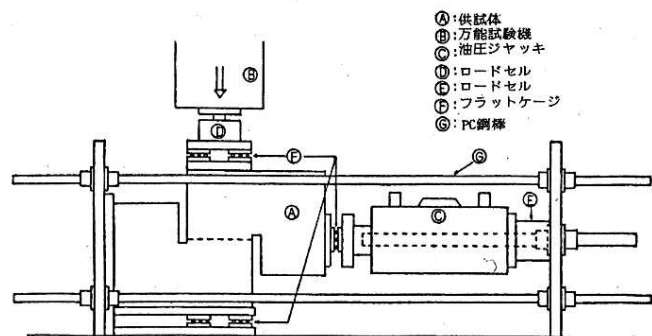


図 3.2 付加拘束力を与えた S 字型試験 [3.6]

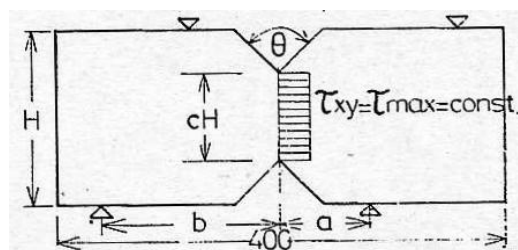


図 3.3 ルーマニア式試験 [3.7]

3.3 試験装置の提案

ECC のひび割れ面でのせん断伝達機構の基礎的性状を把握することを目的とし、図 3.4 に示すように比較的容易に加力可能なルーマニア式試験法を用いた一面せん断試験を提案する。この一面せん断試験体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の矩形試験体の中央部に切欠きを設け、両端には引張力を伝達するために M16 ネジ棒を挿入した形状となっている。この試験装置により、ひび割れを発生させるために試験体両側にある 2 本の油圧ジャッキによりネジ棒を介して引張力を与えた状態で一面せん断加力を行う。なお、試験体両端には曲率半径 (R) 350mm および 250mm の回転支承を設置し、せん断変形による試験体の回転変形を許容させている。変位計測は試験体の表裏にそれぞれトラス状に取り付けた 3 つのパイ型変位計により、以下の式から軸方向変位 w およびせん断変位 δ_s を算出する。

$$w = (\delta_1 + \delta_2) / 2 \quad (3.1)$$

$$\delta_s = \frac{122}{70} \cdot \left(\delta_3 - \frac{100}{122} \cdot \left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) \right) \quad (3.2)$$

ここで、

δ_1, δ_2 : 上下に設置した変位計の変位 (mm)

δ_3 : 斜め方向の変位計の変位 (mm)

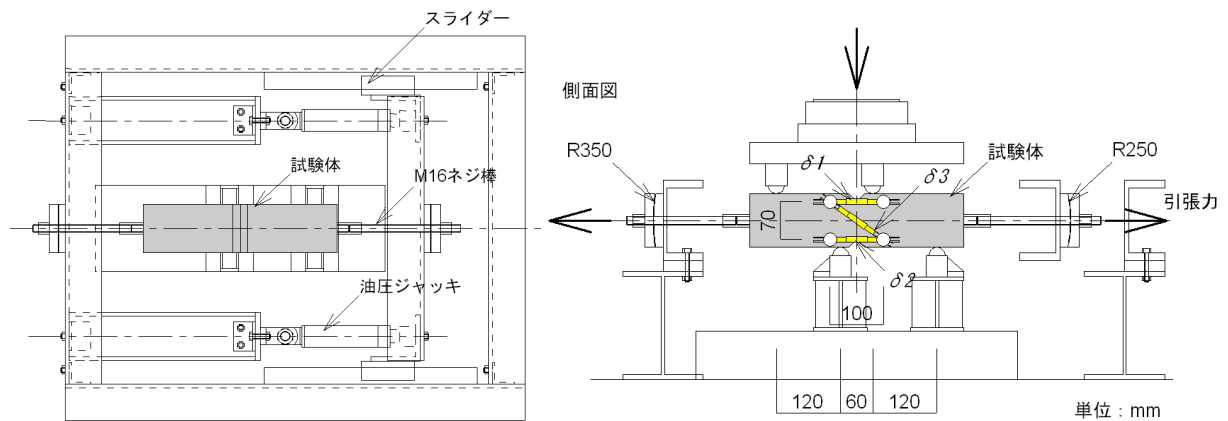


図 3.4 一面せん断試験装置

3.4 RCによる予備実験

新たに提案した一面せん断試験方法の是非を検討するため、まず、モルタルおよび普通コンクリートを使用した試験体を作製し加力試験を行った。

3.4.1 実験概要

使用材料の力学特性を表 3.1 および表 3.2 に、試験体形状を図 3.5 に示す。使用材料は、モルタル (MT) および普通コンクリート (NC) の 2 種である。コンクリートの最大粗骨材寸法は 15mm である。試験体の切欠き高さは、材料試験結果を基にひび割れ発生荷重をほぼ同一とするため、NC 試験体が 70mm, MT 試験体は 40mm とした。試験体にはひび割れ発生後の引張抵抗要素として、SD295 の D4 鉄筋を引張力方向に M16 ネジ棒に沿わせる形で 4 本配した (図 3.6 参照)。MT 試験体および NC 試験体をそれぞれ 6 体ずつ作製した。

実験因子は一定引張力 (0~14kN の 6 レベル) とし、加力はまず引張加力をして一定引張力に到達した後、この引張力を一定に維持したまま一面せん断加力させる方法とした。試験体名称を図 3.7 に示す。

表 3.1 コンクリートの力学性状

名称	割線剛性 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)
MT (モルタル)	25.6	50.6	3.02
NC (普通コンクリート)	24.0	30.0	2.42

表 3.2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋の呼び径	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
D4	200	290	377	30.9

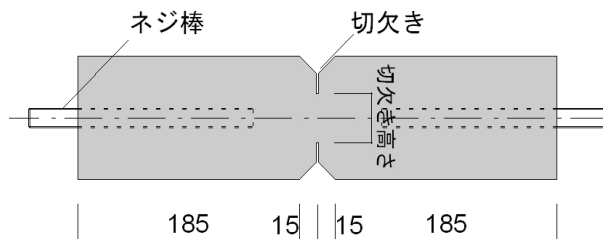


図 3.5 一面せん断試験体形状

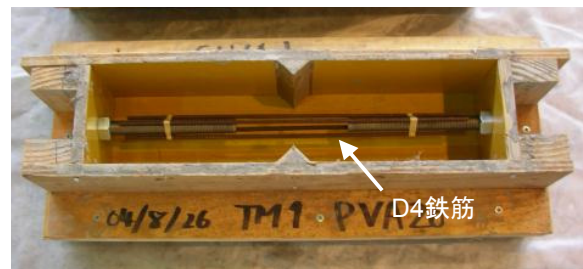


図 3.6 試験体型枠

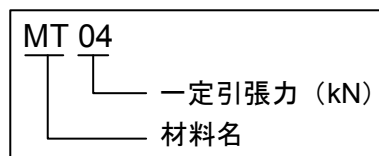


図 3.7 試験体名称

3.4.2 実験結果

ひび割れ状況を図 3.8 に示す。一定引張力が小さいほど加力支点間で圧縮ストラットを形成し易く、一定引張力の大きい試験体では切欠きを結ぶひび割れで破壊に至っている。

せん断応力-軸方向変位，せん断変位関係を図 3.9 に示す。なお，軸方向変位およびせん断変位は (3.1) 式および (3.2) 式により算出し，せん断応力はせん断力を切欠き部の断面積で除した平均応力とし，せん断力は引張力による $P-\delta$ 効果を考慮して算出した。一定引張力が小さい試験体 (0kN および 8kN 試験体) では，ほぼ直線的な挙動を示した後，あるせん断応力に達するとひび割れ幅およびせん断変位が増加し，最大荷重以降に急激な荷重低下を示している。一方，一定引張力の大きい試験体 (14kN 試験体) では初期剛性および最大荷重が低く，最大荷重時の変位が大きい。

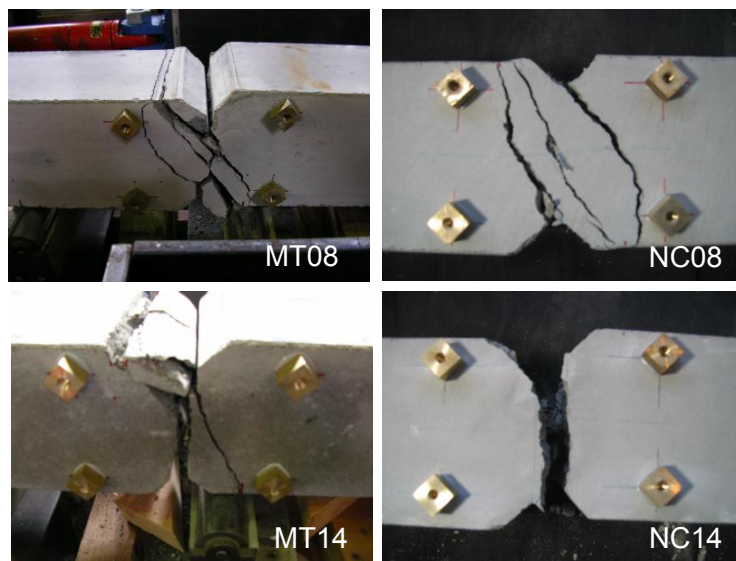


図 3.8 ひび割れ状況

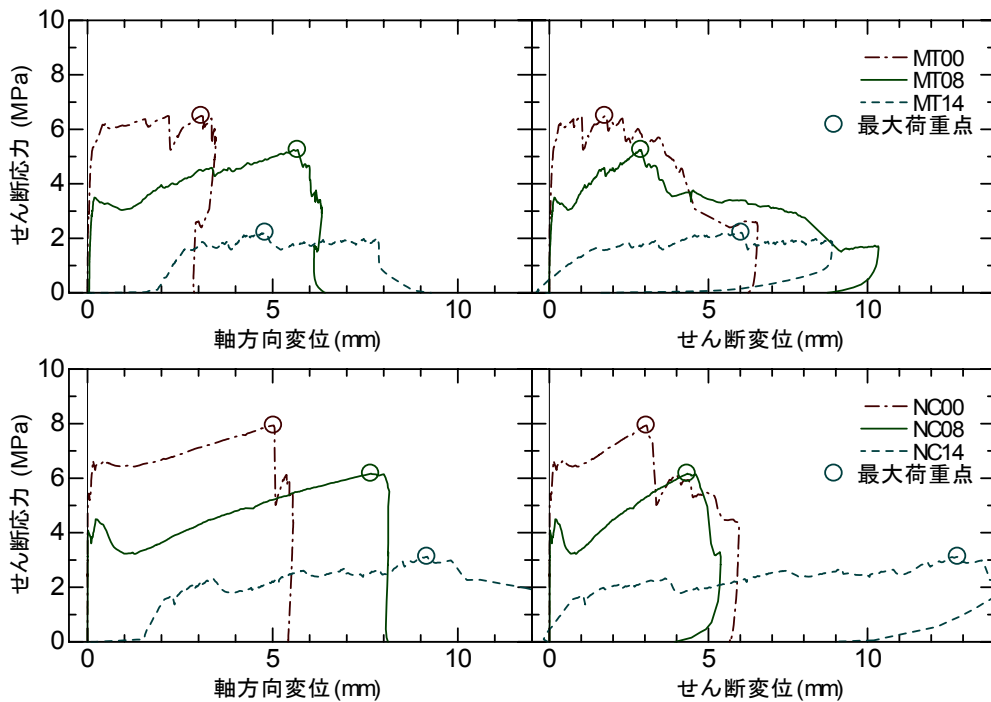


図 3.9 せん断応力-軸方向変位，せん断変位関係

せん断強度と一定引張応力の関係を図 3.10 に示す。ここではそれぞれを圧縮強度で除して無次元化し、材料強度の影響を排除した。一定引張力が大きい試験体ではせん断強度が小さく、また同一引張応力で NC 試験体と MT 試験体を比較すると、NC 試験体の方がせん断強度が大きい。これは、NC 試験体は粗骨材の存在により、噛み合いが生じて強度が増加しているものと考えられる。

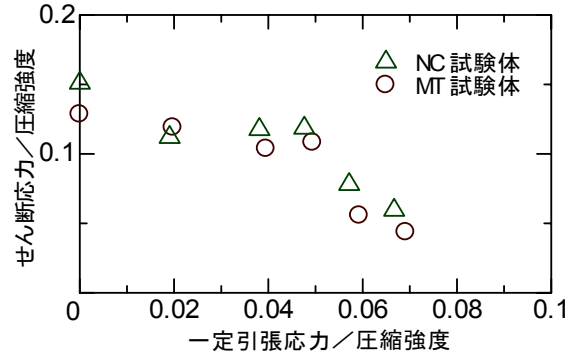


図 3.10 せん断強度—一定引張応力の関係

3.4.3 既往の提案式との比較

既往の強度式との適合性について検討を行う。検討には、Mattock ら [3.5] および李ら [3.3] の強度式を用いた。以下に強度式を示す。

(1) Mattock・Hawkins 式 [3.5]

$$v_u = 1.38 + 0.8(p \cdot f_y + \sigma_N) \quad (3.3)$$

補強筋降伏強度 $f_y \leq 414$ (MPa) かつ $pf_y \leq \min(0.15f_c, 4.14)$ (MPa) を満たす場合、せん断強度 v_u は (3.3) 式により安全側に評価されること実験的に示している。ただし、適用範囲は、 $1.38 \leq pf_y + \sigma_N \leq 9.65$ である。

(2) 李・前川・岡村式 [3.3]

$$p \cdot f_y + \sigma_N = m \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{m - v_u}{v_u} \right)^{0.5} - \frac{\left(\frac{m - v_u}{v_u} \right)^{0.5}}{1 + \frac{v_u}{m - v_u}} \right] \quad (3.4)$$

$$m = 3.826 f_c^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

ひび割れ面の粗度を確率密度関数で表現し、微小区間での接触応力と接触面の圧縮変位との関係を剛塑性挙動と仮定し、積分することで (3.4) 式の直応力とせん断応力の関係を導いている。この強度式には鉄筋のダボ作用に起因したせん断伝達機構は考慮されていないが、Mattock らが行った S 字型の一面せん断実験 [3.5] を精度良く評価することを示している。

ここで、

v_u : せん断強度 (MPa) p : 鉄筋比
 σ_N : 直応力 (圧縮を正) (MPa) f_y : 鉄筋の降伏強度 (MPa)

図 3.11 に実験結果と既往の提案式の比較を示す。李らのせん断強度式により本実験結果は十分精度よく評価されており、提案する加力試験方法が妥当なものであると考えられる。なお、一定引張力が大きい ($pf_y + \sigma_N$ が小さい) 試験体では実験結果が強度式を若干上回る傾向が見て取れるが、これは一定引張力が大きいためコンクリートの骨材の噛み合いが減少し、相対的に鉄筋のダボ作用の占める割合が大きくなっているためであると考えられる。

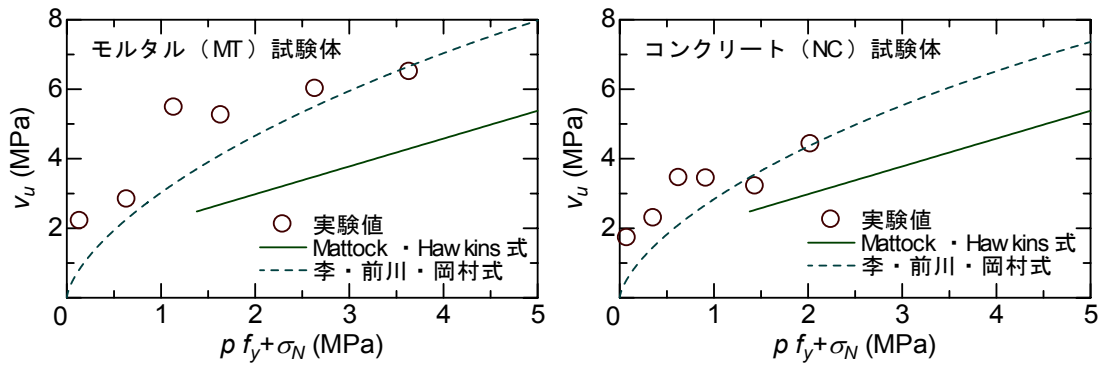


図 3.11 実験結果と既往の提案式の比較

3.5 ECC による本実験

3.5.1 使用材料

使用した材料は、一軸引張力下において歪硬化性状を示す、PVA 繊維を用いた ECC (PVA-ECC) である。繊維混入率は 2.0% (PVA20) および 1.5% (PVA15) の 2 種類である。使用繊維および調合計画は 2 章で述べたものと同一である。表 3.3 に PVA-ECC の力学性能を示す。引張特性は、2 章で述べた曲げ試験による引張性能評価法により得られた結果に低減係数 (引張強度が 0.82, 終局歪が 0.85) を乗じたものである。繊維混入率が圧縮特性に与える影響は小さいが、引張特性に与える影響は大きく、引張強度が PVA20 で 4MPa 程度、PVA15 で 2MPa 程度であった。

表 3.3 PVA-ECC の力学特性

名称	圧縮特性		引張特性*	
	割線剛性 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	終局歪 (%)
PVA20	16.7	42.5	3.93	0.91
PVA15	16.2	40.1	1.98	0.36

* 引張性能評価法により得られた結果に低減係数を乗じたもの。低減係数は 2 章により、引張強度は 0.82, 終局歪は 0.85 である。

3.5.2 試験体および試験方法

一面せん断試験体の形状を図 3.12 に示す。100×100×400mm の角柱試験体の中央部に高さ 15mm の切欠きを設け、両端には引張力を伝達するために M16 ネジ棒を挿入した。試験体は PVA20 が 6 体、PVA15 が 4 体である。加力は、図 3.4 に示す提案した新たな試験装置により行った。引張力は前節の予備実験の方法とは異なり、切欠きにひび割れを発生させ（予亀裂導入引張加力）目標の軸方向変位 w_{exp} に到達した時点でその引張力を維持したまま一面せん断加力を行うこととする。変位計測は軸方向変位 w およびせん断変位 δ_s を (3.1) 式および (3.2) 式により算出した。

ここで、実験因子を目標軸方向変位としているが、実際に加力を行う際に目標軸方向変位をコントロールすることは非常に困難である。つまり、過度に軸方向変位を与えた試験体や繊維混入率の少ない PVA15 試験体においては、予亀裂導入引張加力時において引張破壊する恐れがある。本実験では、可能な限り目標軸方向変位を変動させて実験を行うこととし、引張破壊した実験結果は省くこととした。

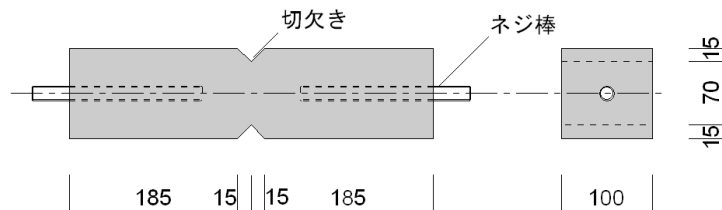


図 3.12 一面せん断試験体形状

3.5.3 試験結果

一面せん断試験結果一覧を表 3.4 に、せん断応力／定引張応力－軸方向変位およびせん断変位関係を図 3.13 に示す。せん断応力はせん断力を切欠き部の断面積で除した平均応力とし、せん断力は引張力による $P-\delta$ 効果を考慮して算出した。なお試験体 No. は、引張加力時に経験した軸方向変位（経験軸方向変位 w_{exp} ）が小さいものから順次つけた。図 3.13 より、PVA20 の試験体では全ての試験体で、ある剛性を示して荷重が増加し、せん断応力／定引張応力が 0.3～0.4 程度まで上昇すると剛性が低下し、せん断応力を一定に維持したまま変形が生じている。その後、軸方向変位が小さい試験体（No.1～No.4）では、せん断変位 0.4mm 付近で応力上昇し、その後破壊に至っている。経験ひび割れ幅の大きい試験体（No.5, No.6）では、応力上昇はほとんど見られず、破壊に至っている。一方、PVA15 の試験体では、PVA20 の目標軸方向変位が大きい試験体でも見られるような、変形およびせん断応力が比較的小さいレベルで破壊に至っていることから、繊維混入率による引張性能の違いが、せん断伝達特性に影響を与えていることが考えられる。

表 3.4 一面せん断試験結果

試験体名		一定引張力 $\sigma_{t,cons}$ (MPa)	目標軸方向変位 w_{exp}^{*1} (mm)	引張せん断強度 τ_f^{*2} (MPa)	せん断強度 τ_{max} (MPa)
PVA20	No.1	3.58	0.0245	1.87	2.62
	No.2	3.86	0.0495	1.79	2.52
	No.3	3.84	0.0598	1.84	2.70
	No.4	4.25	0.121	1.73	2.89
	No.5	3.72	0.124	1.43	1.43
	No.6	4.28	0.161	1.13	1.13
PVA15	No.1	2.14	0.0918	1.15	1.78
	No.2	2.47	0.108	1.56	1.56
	No.3	2.44	0.122	1.25	1.57
	No.4	2.59	0.162	1.19	1.19

*1 予亀裂導入引張加力時に経験した軸方向変位

*2 せん断応力ーせん断変位関係における降伏棚の応力

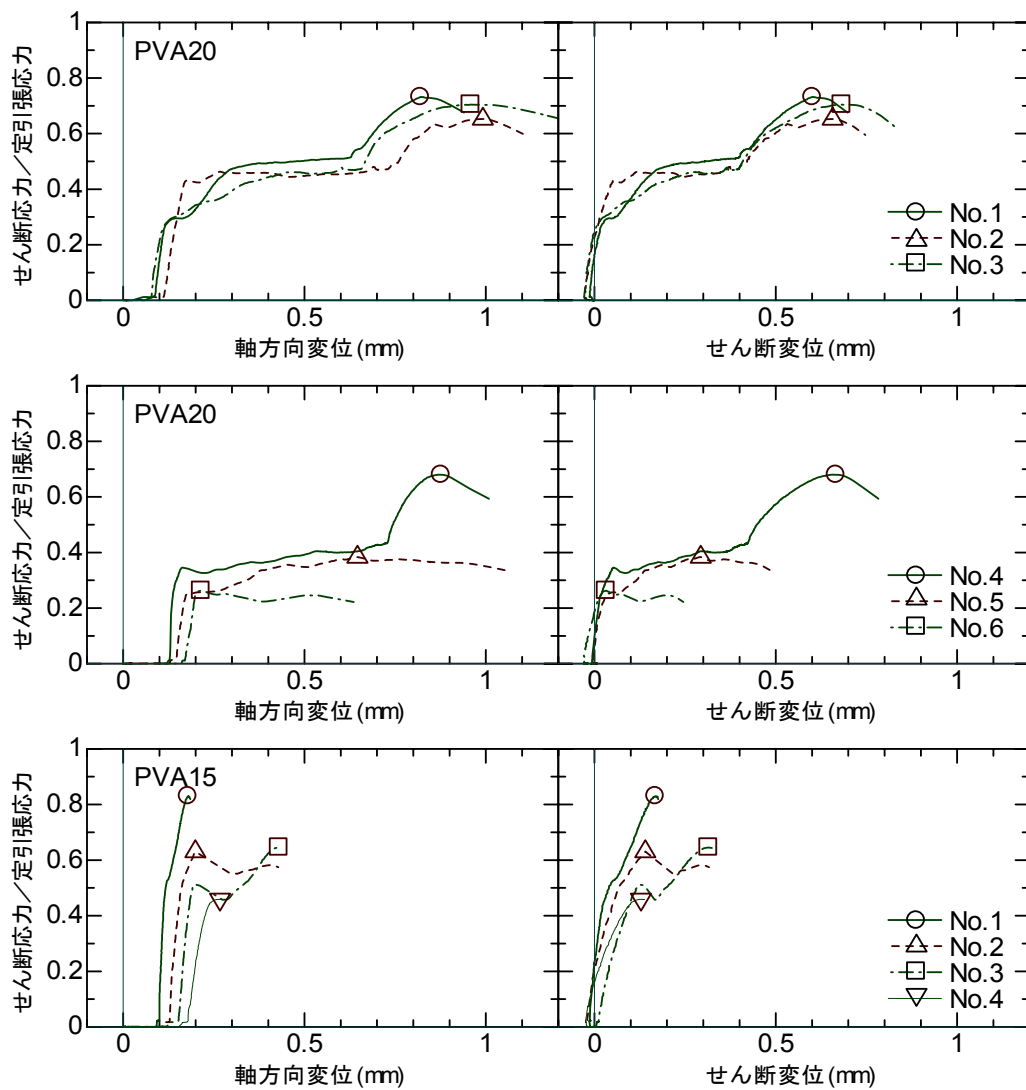


図 3.13 せん断応力／定引張応力ー軸方向変位，せん断変位関係

加力終了後のひび割れ状況を図 3.14 に示す。PVA15 の試験体ではひび割れは目視上 1 本であったが、PVA20 の試験体では、切欠きを結ぶひび割れに加え、せん断加力支点間を結ぶひび割れが生じているものが多くあり、最終的に圧縮ストラットが形成されているものと考えられる。

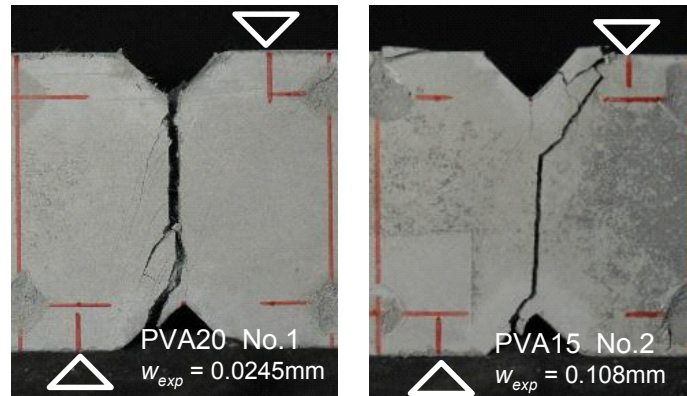


図 3.14 加力終了後のひび割れ状況

3.5.4 考察

実験結果から本実験の試験体は、次のような破壊過程を経ているものと考えられる。図 3.15 に一面せん断試験の破壊過程の概略を示す。①引張加力によりひび割れを発生させ、②目標のひび割れ幅まで加力する。ただし、この時点では、ひび割れが断面全体に貫通しておらず、上端側にひび割れが偏って生じる場合が多い。これは、本試験方法では、両端ピン支持での引張加力となるため、二次曲げの影響を多大に受け、一様に引張加力を行えないことによる。その後、③せん断加力させ、断面全体にひび割れが貫通した時点で、④剛性が低下し、応力一定のまま変形が進む。ある程度変形が進むと⑤a マトリックスの噛合いが生じて応力上昇し破壊に至る。ここで、目標軸方向変位が大きい試験体では、引張加力による損傷が大きいため、噛合いに至らずに引張破壊する(⑤b または⑤c)。また、本試験装置の引張加力は油圧ジャッキであるため、一軸引張力下で引張軟化性状を示す DFRCC ではひび割れが発生した時点で破壊に至ってしまうため、軸方向変位を拘束する要素(PC 鋼棒など)を設置するなどして工夫する必要がある。

④の状態の時、すなわちマトリックスの噛合いが生じる前では、繊維の引張力のみがせん断力に抵抗していると考えられる。そこで、噛合いが生じる直前の応力を引張せん断強度 τ_f と呼ぶこととする。図 3.16 に引張せん断強度－目標軸方向変位関係を示す。PVA20 の目標軸方向変位が 0.1mm 以内の試験体では、繊維のせん断強度が 1.8MPa 程度であるが、目標軸方向変位が 0.1mm を超える試験体では引張せん断強度が小さく、1.3MPa 程度であった。また PVA15 では、目標軸方向変位が 0.1mm より大きい試験体がほとんどであり、1.3MPa 程度であった。以上のことから、ひび割れ面において垂直応力に引張力が作用する場合の引張せん断強度は、定引張応力がほぼ引張強度程度であることを考慮すると、引張強度の 1/2 程度を有すると考えられる。逆に、ひび割れ面にせん断ずれが生じて、ひび割れ面に対する垂直応力として引張強度を維持できると考えることもできる。せん断変形がさらに進行する場合には、ひび割れ面でのマトリックスの噛合いにより圧壊すると考えられる。

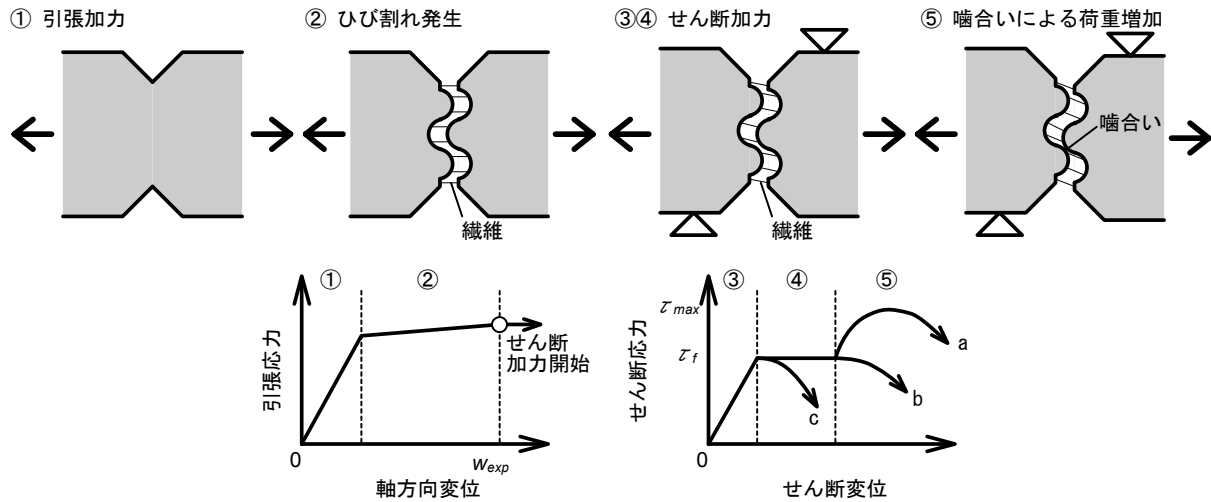


図 3.15 一面せん断試験の破壊経過

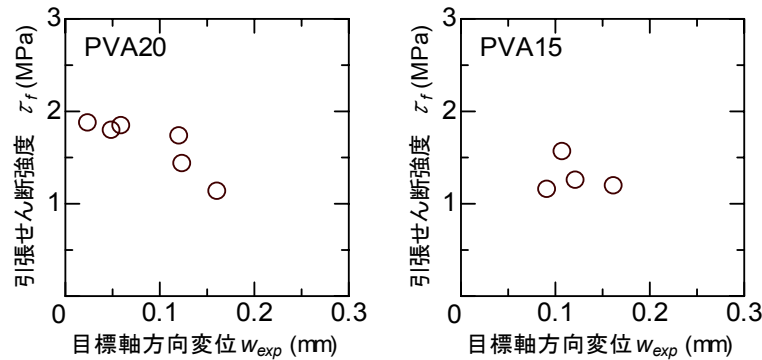


図 3.16 引張せん断強度—目標軸方向変位関係

3.6 まとめ

PVA-ECC のせん断ひび割れ面でのせん断伝達機構を把握するため、ひび割れ面の垂直応力として引張力を作用させた直接せん断試験方法を提案し、この新たな加力方法の是非を検討した上で、ECC のせん断加力実験を行った。

まず、通常のコンクリートおよびモルタルを使用した試験体を作製し、新たな加力方法の是非を検討した。その結果、垂直応力として圧縮力を作用させた直接せん断試験方法により得られたせん断強度評価式を用いてせん断強度の評価が可能であり、提案する加力方法が妥当なものであることを確認した。

PVA 繊維の体積繊維混入率（1.5%，2.0%）および目標ひび割れ幅（0.02～0.16mm）を実験因子とし、PVA-ECC に対して新たに提案した直接せん断実験を行った。その結果、ひび割れ面において垂直応力に引張力が作用する場合のせん断強度は、定引張応力がほぼ引張強度程度であることを考慮すると、引張強度の 1/2 程度を有すると考えられる。逆に、ひび割れ面においてせん断ずれが生じて、垂直応力は引張強度を保持できると捉えることも可能である。せん断変形がさらにすすむ場合には、噛合いにより ECC が圧壊すると考えられる。

第 4 章

梁部材の曲げせん断実験

第4章 梁部材の曲げせん断実験

4.1 はじめに

DFRCC の特長である個々のひび割れ幅が極めて小さく抑えられるマルチプルクラック特性による低い物質透過性を期待した表面保護や、引張力負担を期待した下面増厚補強などの実構造物への適用が近年報告 [4.1] される中、DFRCC を高応力部材への適用に向けた研究も盛んに行われてきている。DFRCC を構造的要素として使用するために、これまで鉄筋補強された DFRCC 部材の加力実験が行われている。これらの実験では、制振デバイスや耐震壁、境界梁といった部材に着目した実験が多く、エネルギー吸収部材とした設計が前提のため、部材実験でも曲げ降伏先行型の実験結果が多い。これまでに各研究機関により行われてきた DFRCC 部材実験の中で、柱および梁部材実験の主な例として文献 [4.2] ～ [4.15] における破壊形式と部材数を表 4.1 に示す。なお逆対象モーメント作用下の加力形式以外のものは対象外とし、破壊形式は原則として実験者により報告されているものとした。表 4.1 を見ると、全 77 試験体の内、曲げ降伏以前にせん断破壊したものは 19 体と少なく、また、DFRCC 自体の引張性能を評価する試験法が様々であり、統一された試験法による部材耐力評価の構築の支障となっている。さらに部材中における DFRCC の挙動、特にせん断抵抗に関する問題については未だ研究の段階であり、更なるバックデータの蓄積が必要である。本章では、PVA 繊維を用いた一軸引張応力下において歪硬化性状を示す ECC (PVA-ECC) に着目し、鉄筋補強した PVA-ECC 部材を対象として、大野式加力による逆対称曲げせん断加力実験を行い、PVA-ECC の部材中での挙動について検討する。

表 4.1 既往の実験における破壊形式別に見た部材数 [4.2] ～ [4.15]

せん断破壊 S	曲げ降伏後 せん断破壊 F→S	曲げ降伏後 曲げ圧縮破壊 F→FC	曲げ降伏後 付着破壊 F→B	曲げ降伏 先行 F	合計
19	16	6	1	35	77

4.2 実験概要

梁試験体の名称を図 4.1 に、梁試験体形状を図 4.2 に、梁試験体一覧を表 4.2 に示す。実験因子はせん断スパン比、想定破壊形式、肋筋比および繊維混入率である。比較対象として普通コンクリート (NC) およびモルタル (MT) 試験体も作製した。使用した PVA-ECC は 2 章のものと同一調合の PVA20 および PVA15 である。MT は PVA-ECC の繊維を除いたモルタル材料である。梁断面は $180 \times 280\text{mm}$ と共通で、せん断破壊型の試験体の主筋には SHD685 を、曲げ降伏先行型試験体の主筋には SD390 を用いた。PVA-ECC 試験体は、せん断スパン比が 1.5 の試験体 (L) は肋筋比が 0.00%～0.89%までの 5 レベル、せん断スパン比が 1.25 の試験体 (S) は肋筋比が 0.89%および 1.20%の 2 レベルであり合計 16 体作製し、NC および MT 試験体は 3 体ずつ作製した。肋筋比が 1.20%の試験体では配筋が 4-D6 となっている。加力方法は、大野式の曲げせん断一方向載荷とし、加力梁を取り付けた 2MN ユニバーサル試験機により加力を行った。計測項目は、せん断力、両スタブ間の相対変位、引張側主筋歪、肋筋歪、および図 4.2 に示す梁側面 3 区間 (A～C) での各部分の変位である。

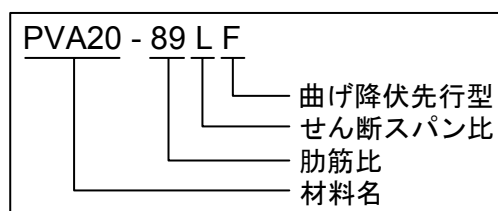


図 4.1 試験体名称

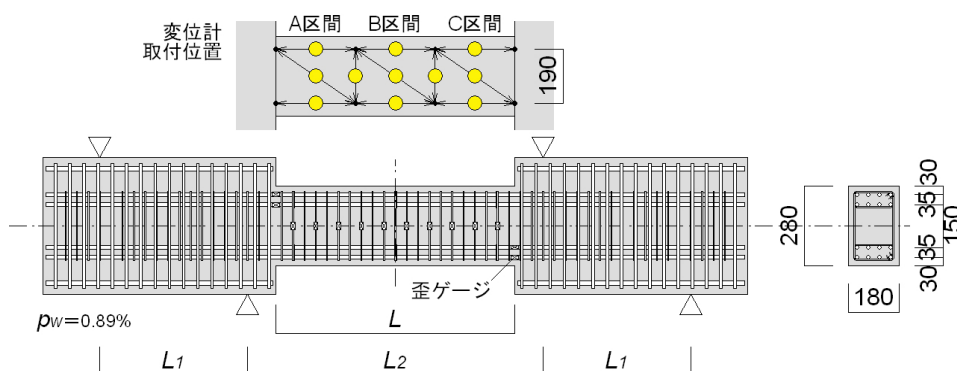


図 4.2 梁試験体形状

表 4.2 梁試驗體一覽

試験体名	混入率 V_f (%)	せん断 スパン 比	内法 スパン L (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	断面 $b \times D$ (mm)	主筋		肋筋	
							配筋	強度	配筋	p_w (%)
PVA15-00L	1.5	1.50	840	520	1040	180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	—	0.00
PVA15-15L									2-D4@93	0.15
PVA15-30L									2-D4@47	0.30
PVA15-60L									2-D6@59	0.60
PVA15-89L		SD390	2-D6@40	0.89						
PVA15-89LF			SHD685	2-D6@40	0.89					
PVA15-89S				4-D6@59	1.20					
PVA15-120S										
PVA20-00L	2.0	1.50		840	520			1040	SHD685	—
PVA20-15L			2-D4@93							0.15
PVA20-30L			2-D4@47							0.30
PVA20-60L			2-D6@59							0.60
PVA20-89L		SD390	2-D6@40	0.89						
PVA20-89LF			SHD685	2-D6@40	0.89					
PVA20-89S				4-D6@59	1.20					
PVA20-120S										
NC-00L	—	1.50		840	520	1040	SHD685	—	0.00	
NC-15L			2-D4@93					0.15		
NC-30L			2-D4@47					0.30		
MT-30L	—	1.50	840	520	1040	SHD685	2-D4@47	0.30		
MT-60L							2-D6@59	0.60		
MT-89L							2-D6@40	0.89		

4.3 材料試験結果

鉄筋の引張試験結果を表 4.3 に、使用した PVA-ECC の力学特性を表 4.4 に示す。なお、引張特性は、2 章で述べた曲げ試験による引張性能評価法により得られた結果に低減係数（引張強度が 0.82，終局歪が 0.85）を乗じた値である。圧縮強度は繊維混入率に依らず概ね 40MPa であったが、引張性能は PVA20 は引張強度が概ね 4MPa，終局歪が 0.6～1.3%，PVA15 は引張強度が 2～3MPa，終局歪が 0.4～0.9% であった。また MT は圧縮強度が 61MPa となっている。

表 4.3 鉄筋の引張試験結果

呼び名	ヤング係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	降伏歪 (μ)	破断伸び (%)	備考
D4	193	295	1528	27.4	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用肋筋
D6	173	334	1940	17.9	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用肋筋
D6	207	427	2061	15.1	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用肋筋
D13	191	719	3764	10.0	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用主筋
D13	178	711	3850	10.8	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用主筋
D13	168	691	4113	10.9	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用主筋
D13	175	438	2510	18.3	F シリーズ用主筋

表 4.4 PVA-ECC の力学特性

材料名	圧縮特性			引張特性 ^{*1}		備考
	割線剛性 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度 時歪 (%)	引張強度 (MPa)	終局歪 (%)	
PVA20	19.5	39.1	0.36	3.90	1.30	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用
	19.5	45.8	0.39	3.55	0.57	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用
	19.9	44.3	0.48	3.93	0.91	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用
PVA15	16.3	35.7	0.35	3.14	0.87	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用
	19.4	50.3	0.39	3.00	0.35	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用
	17.4	42.0	0.42	1.98	0.36	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用
NC	26.2	39.0	0.23	2.72 ^{*2}	—	—
MT	28.6	61.0	0.33	2.20 ^{*2}	—	—

*1 引張性能評価法により得られた引張性能に低減係数（引張強度が 0.82，終局歪が 0.85）を乗じた値 *2 割裂引張試験による割裂引張強度

4.4 実験結果

4.4.1 ひび割れ状況

最終破壊状況を図 4.3 に示す。ただし、図中のひび割れをなぞった線は部材角 $1/100\text{rad}$ までに生じたひび割れを示している。全ての PVA-ECC 試験体において、曲げひび割れおよびせん断ひび割れが部材角 $1/200\text{rad}$ 付近までに順次発生し、複数ひび割れを伴い荷重増加した後、最大荷重付近である一つのひび割れに変形が集中して破壊に至った。また、実験中に写真撮影によるひび割れ観測を行った肋筋比 0.60%以上の試験体においては、変形が集中するひび割れ面では図 4.4 に示すように一部でマトリクスの噛み合いが生じ、圧壊しているのが観測された。

NC および MT 試験体と PVA-ECC 試験体の最終破壊状況を比較すると、繊維混入によりひび割れが分散発生していることが分かる。最大荷重以前においては、PVA-ECC 試験体のせん断ひび割れ幅は NC および MT 試験体に比べて小さい傾向があり、ひび割れ抑制効果が認められた。最終的な破壊を決定するせん断ひび割れの部材軸に対する角度は肋筋量が多いほど大きいですが、繊維混入量による差は認められない。

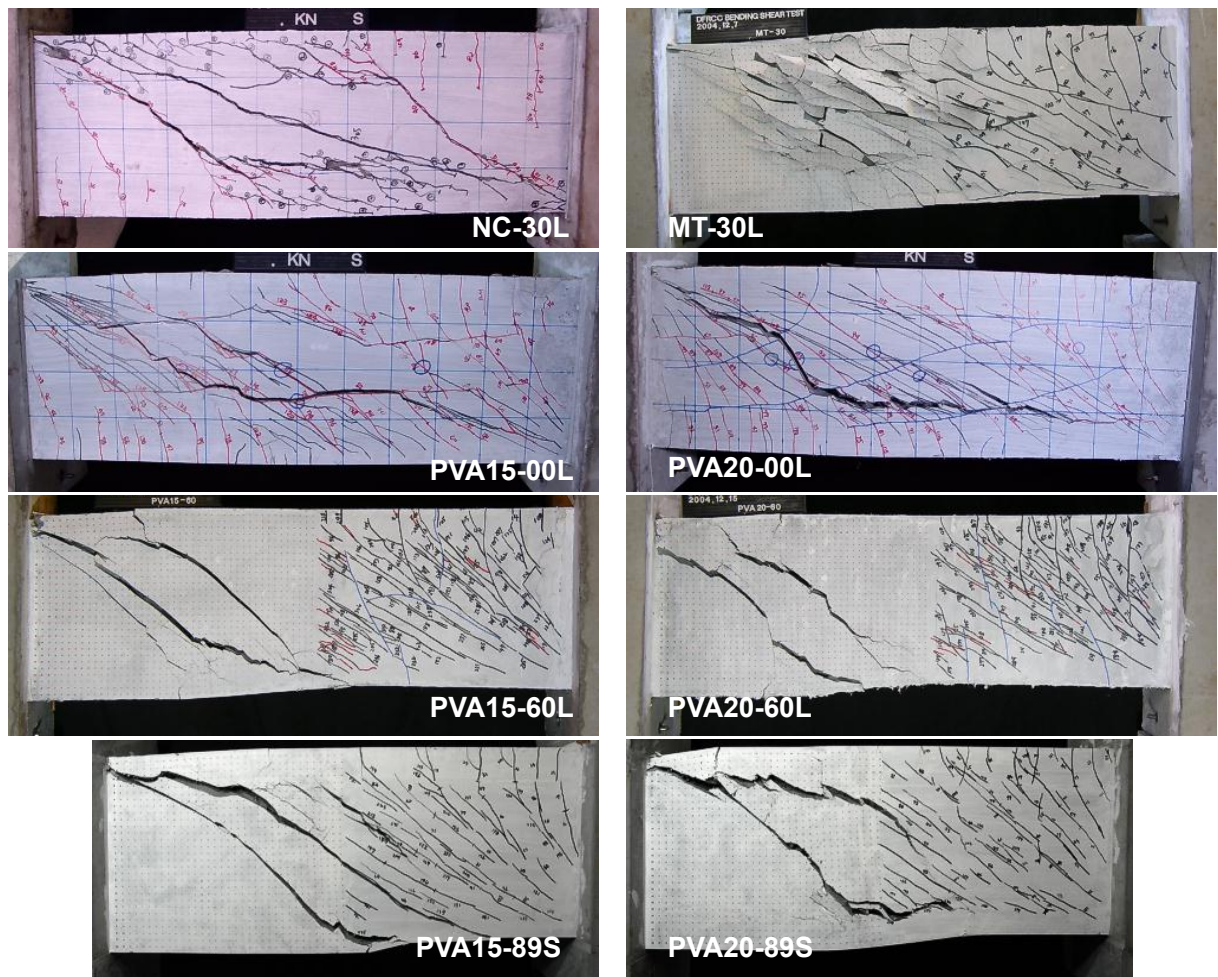


図 4.3 最終破壊状況

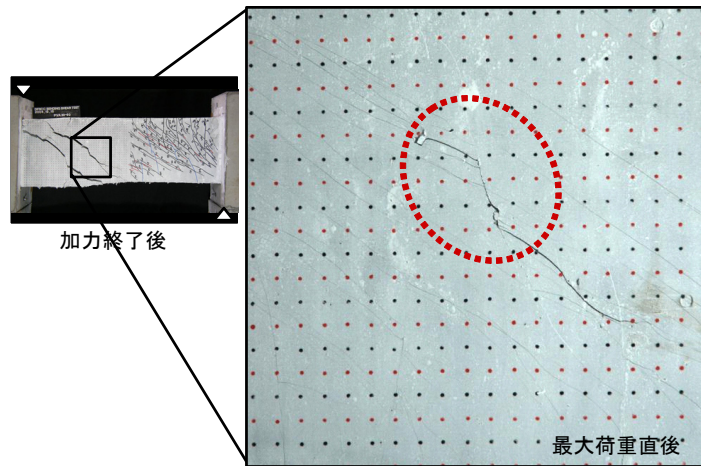


図 4.4 最大荷重直後のひび割れ面の状況 (PVA20-60L)

4.4.2 せん断力一部材角関係および実験結果

せん断力一部材角関係を図 4.5 に、実験結果一覧を表 4.5 に示す。せん断破壊した試験体のせん断強度およびその時の部材角を同じ筋率の試験体と比較すると、ほとんどの試験体で PVA20 が PVA15 を上回っていることから、繊維混入率が部材の耐力および変形能に影響を与えていることが分かる。同一筋率の試験体において MT 試験体に対する最大荷重の増加量は、PVA15 試験体が 5kN ($p_w=0.30\%$)、65kN ($p_w=0.60\%$)、67kN ($p_w=0.89\%$)、同様に PVA20 試験体が 31kN、79kN、64kN であった。この増加量を梁幅 (180mm) と主筋中心間距離 (185mm) で除して応力に換算すると、それぞれ PVA15 試験体で 0.15MPa、1.95MPa、2.01MPa、PVA20 試験体で 0.93MPa、2.39MPa、1.92MPa であった。なお、曲げ降伏先行型試験体 (F シリーズ) においては $1/20\text{rad}$ においても荷重が増加中であった。

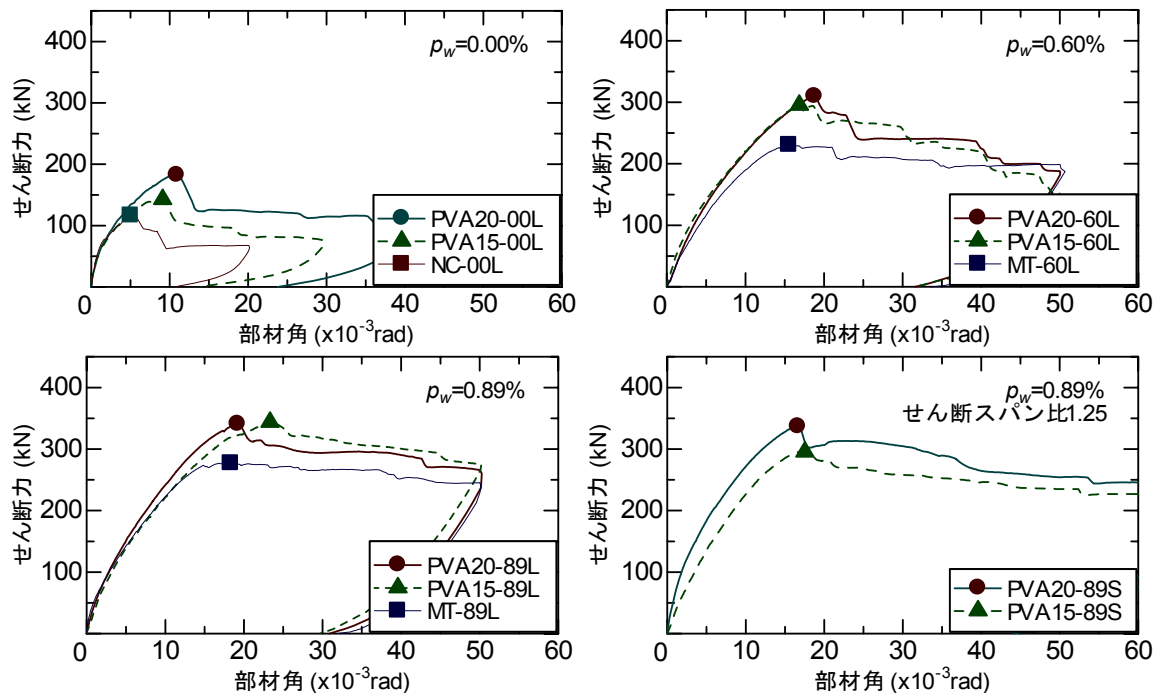


図 4.5 せん断力一部材角関係

表 4.5 実験結果一覧

試験体名	鉄筋降伏時部材角 ($\times 10^{-3}$ rad)		最大荷重時		限界 変形角 ^{*1} ($\times 10^{-3}$ rad)	破壊 形式 ^{*2}
	肋筋降伏時	主筋降伏時	せん断力 (kN)	部材角 ($\times 10^{-3}$ rad)		
PVA15-00L	—	—	143	8.7	10.4	S
PVA15-15L	2.60	—	170	15.0	17.9	S
PVA15-30L	3.27	—	183	12.0	14.3	S
PVA15-60L	8.34	—	296	16.9	31.1	S
PVA15-89L	11.8	22.7	344	23.3	>50	S
PVA15-89LF	13.1	10.8	270 ^{*3}	>50 ^{*3}	>50	F
PVA15-89S	8.36	—	296	17.5	46.0	S
PVA15-120S	7.34	—	344	22.0	56.1	S
PVA20-00L	—	—	183	10.6	12.6	S
PVA20-15L	—	—	206	12.8	15.2	S
PVA20-30L	5.50	—	209	19.0	22.6	S
PVA20-60L	11.1	—	310	18.8	23.9	S
PVA20-89L	11.5	19.2	341	19.2	43.1	S
PVA20-89LF	11.6	10.8	272 ^{*3}	>50 ^{*3}	>50	S
PVA20-89S	9.43	—	337	16.6	38.6	S
PVA20-120S	9.23	19.7	409	23.9	44.9	F→S
NC-00L	—	—	116	5.1	7.4	S
NC-15L	3.62	—	105	6.9	>30.3	S
NC-30L	19.9	—	132	12.0	19.6	S
MT-30L	9.12	—	178	11.4	>50	S
MT-60L	8.36	—	231	15.5	>50	S
MT-89L	6.27	—	277	18.3	>50	S

*1：最大荷重の80%まで荷重低下したときの変形角 *2：S=せん断破壊，F=曲げ降伏

*3：除荷開始（部材角 1/20rad）直前の荷重

4.4.3 鉄筋の歪

肋筋の歪分布の例（肋筋比 0.60%の試験体）を図 4.6 に示す。ここで、ゲージ位置とは梁試験区間の左端からの距離である。また鉄筋降伏時の部材角を表 4.5 に示す。せん断破壊した試験体では、最大荷重以前においてひび割れを貫通する箇所の肋筋で降伏が認められた。曲げ降伏先行型の試験体全てにおいて主筋の降伏が認められた。また、せん断破壊型試験体においても主筋が降伏した試験体があったが、最大荷重時において見られたため破壊形式はせん断破壊とした。

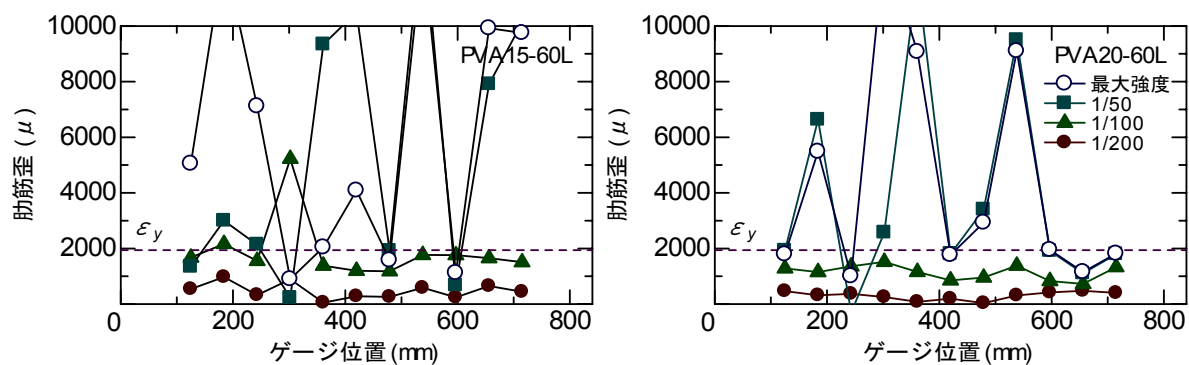


図 4.6 肋筋の歪分布

4.4.4 主歪

図 4.2 に示す梁側面に設置した変位計から各区間（A～C 区間）における区間平均の主歪を算出した。せん断破壊型試験体の最大荷重時における 3 区間の主歪の平均値、最大値および最小値の比較を図 4.7 に示す。主引張歪は、肋筋比が 0.00～0.60%までの試験体では、その値が PVA15 で 0.6%程度、PVA20 で 0.75%程度と PVA15<PVA20 の傾向があり、繊維混入による影響が見て取れる。しかし肋筋比 0.89%を超える試験体については逆の傾向となっており、必ずしも主引張歪が最大荷重を決定する因子とはならないと考えられる。一方、主圧縮歪の比較を見ると、繊維混入による一義的な影響は見られず、肋筋比の増大により主圧縮歪が増加する結果となった。また、肋筋比が 0.89%以上の試験体では、主圧縮歪が 0.3～0.4%と材料試験での圧縮強度時の歪程度となっていることが分かる。ただし、算出した主歪は図 4.2 に示す各区間での平均歪であり、最大荷重付近でのひび割れ状況（図 4.4）で見られた局所的な破壊性状を直接的に表すものではないと考えられるため注意が必要である。

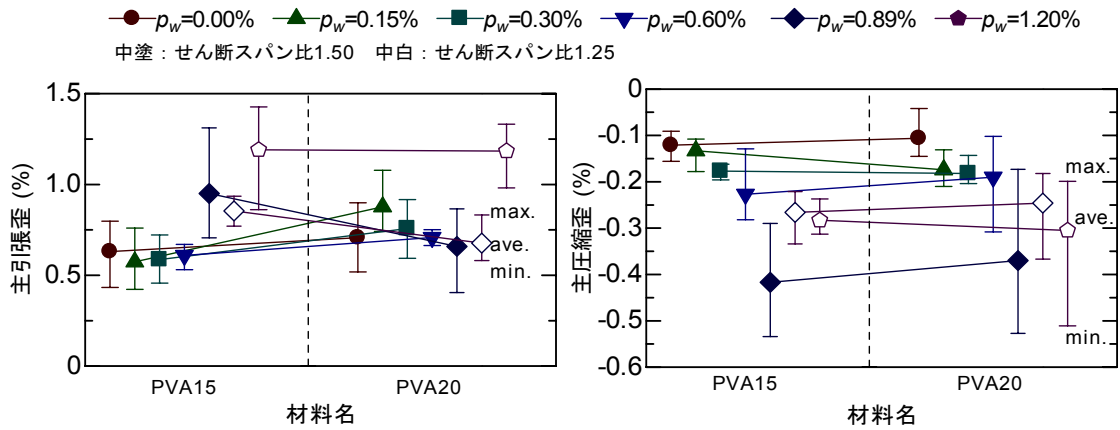


図 4.7 主歪の比較

4.4.5 既往の耐力式による評価

日本建築学会終局強度型指針式 A 法 [4.16]（以下、A 法）によるせん断耐力式と本実験結果を比較検討した。なお、圧縮ストラットの有効圧縮強度係数は以下に示す CEB 式 [4.17] とし、PVA-ECC の引張特性は考慮せず、普通コンクリートと同様に取り扱った。比較結果を図 4.8 に示す。実験値が大幅に耐力式を上回り、従来の鉄筋コンクリートのせん断耐力式に繊維混入による影響を考慮する必要がある。

$$\nu = 1.70\sigma_B^{-0.333} \quad (4.1)$$

ただし、

σ_B : 圧縮強度 (MPa)

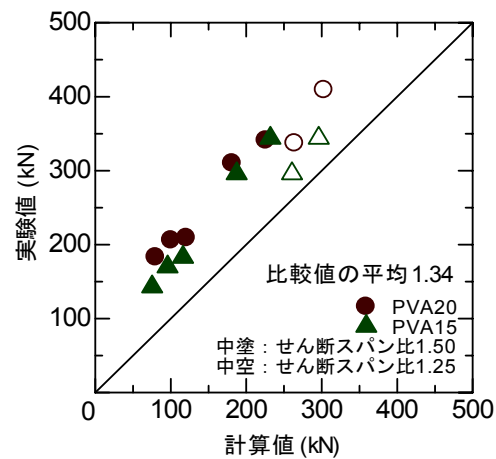


図 4.8 せん断耐力の実験値と計算値の比較

4.5 まとめ

せん断破壊する部材実験データの蓄積，および部材中における PVA-ECC の挙動，特にせん断抵抗に関する問題の解明を目的とし，PVA 繊維混入率，肋筋比およびせん断スパンを実験因子とした梁部材の曲げせん断実験を行った。その結果，繊維混入により最大荷重および変形能が向上し，従来の耐力式である A 法による計算値を大幅に上回った。繊維混入による耐力上昇分を加味したせん断耐力式の構築が必要である。破壊経過では，部材においても複数ひび割れが生じ，最大荷重付近ではある一つのひび割れに変形が集中して破壊に至ることがわかった。またそのひび割れでは噛み合いによる圧壊が観察された。最大荷重時における各区間の主歪の検討では，引張主歪が繊維混入率により影響を受け，圧縮主歪は繊維混入による差は認められなかった。また，肋筋比が大きい試験体では，圧縮主歪が材料試験での圧縮強度時歪程度に相当しており，ひび割れ観測の結果と一致していた。

第 5 章

部材の構造性能評価

第5章 部材の構造性能評価

5.1 はじめに

阪神淡路大震災において新耐震基準により設計された構造物が、人命保護性能は満たされたが、修復性および使用性の低下により建て替えを余儀なくされた事例が多くあったことから、地球環境問題改善のための構造物の長寿命化、ライフサイクルコストを見込んだ設計の重要性が今後更に高まっていくものと考えられる。このような風潮において重要な役割を果たすものが新材料や新工法であり、新材料である DFRCC のような高性能材料を構造物に適用する際には、DFRCC 構造物には従来の RC 構造物に要求されている性能より高い性能が要求されることになる。このような場合には、最低の要求性能を定めている建築基準法による設計ではなく、適用対象（構造部材、非構造部材）ごとに要求される性能を明記し、その性能を満たしているかどうかを判定する設計形態（性能設計）により評価される必要がある。建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」において開発された「構造性能評価指針案」[5.1] [5.2] では、「目標構造性能を適切に設定」し、その「性能を適切に検証」し、「性能を表示」という性能設計の一連の流れを提案している。

本研究では、従来の RC 構造物のような設計に見られる、材料性能（シリンダー型圧縮試験による圧縮強度）から構造性能を評価する形態を DFRCC の引張性能において構築することを目的としている。DFRCC の中でもさらに高性能材料である HPRCC に分類されている ECC について、第 2 章において ECC の特長である引張性能を簡便な試験方法である曲げ試験により評価した。第 3 章では、コンクリート系材料である ECC において重要な性能であるひび割れ面でのせん断挙動の把握のための一面せん断実験を行い、その性状について検討を行った。第 4 章では、既往の研究でデータ数の少ないせん断破壊型の部材実験結果のデータ蓄積および鉄筋補強された ECC 部材の部材中での挙動の把握を目的とした、ECC 部材の曲げせん断実験を行い、従来のせん断耐力式と比較検討し、実験値が大幅に上回る結果を得た。ECC 部材の性能を、ECC の材料性能により得られた評価値により適切に評価されれば、上述の性能評価に則った設計が可能となり、ECC の適用される場が広がることが大いに期待できる。

5.2 既往の強度式

DFRCCを対象とした研究・報告において、これまでに提案されている構造性能の評価法（せん断耐力および曲げ耐力）について以下にまとめる（表 5.1 参照）。

表 5.1 既往の研究による耐力評価

文献	繊維 ^{*1} (V_f %)	引張 試験 方法 ^{*2}	圧縮 強度 (MPa)	引張 強度 (MPa)	加力	部材 (M/QD)	肋筋比 (%)	破壊 形式 ^{*3} (試験 体数)	耐力評価 ^{*4}	
									曲げ 強度	せん断 強度
[5.3]	PVA(1.0)	一軸 引張	34.2	2.46	曲げ 単調	梁 (5)	0.96	F(1)	F-1	—
	PVA(1.5)		33.8	2.50				F(1)		
	C (0.75)		36.8	2.51				F(1)		
	C (1.0)		36.8	2.65				F(1)		
[5.4]	PVA(2.0)	NR	42	3.2	大野式 繰返し	梁 (0.5, 1)	0, 1	S(4)	—	S-1
[5.5]	PVA(2.0)	DB	61	5.3	大野式 繰返し	梁 (2)	0~0.48	S(1) FS(3)	F-2	S-2
[5.6]	PVA(1.5)	CL	26	1.94	大野式 繰返し	梁 (2)	0.21~ 0.64	FS(1) FB(1) F(1)	F-3	S-1
	PVA(1.5)		49	1.90			0~0.43	SB(1) FS(1) F(3)		
	PVA(1.5)		20.8	1.62	建研式 繰返し	柱 (1.5)	0.13~ 1.19	FS(1) FC(2) F(2)		
[5.7]	PVA(1.0)	切欠き 曲げ	40.1	3.4	建研式 繰返し	柱 (1.5)	0, 0.26	DT(2) ST(1)	—	S-3
	PVA(1.0)		42.1	2.7			0.26	DT(1)		
	PVA(1.0)		76.8	5.0			0.26	DT(1)		
[5.8]	PVA(1.0)	割裂 試験	52.7	4.11	曲げ 単調	梁 (3.85)	0	FS(1)	—	S-5
	PVA(2.0)		41.0	4.82				F(1)		
	PVA(3.0)		39.3	4.99				F(1)		
[5.9]	PVA(0.3)	切欠き 曲げ	26.3	2.2	曲げ 単調	梁 (3.5)	0	ST(1)	—	S-6
	PVA(0.5)		32.8	2.5				ST(1)		
	PVA(1.0)		26.6	2.4				ST(1)		
	S(0.3)		33.6	2.9				ST(1)		
	S(0.5)		33.0	2.1				ST(1)		
	S(1.0)		27.2	3.2				ST(1)		
[5.10]	S (0.5)	S-002	34.4	2.79	曲げ 単調	梁 (3.5)	0	ST(1)	—	S-7
	S (1.0)		31.2	2.01				DT(1)		
	S (1.5)		31.4	2.03				DT(1)		
	S (3.0)		30.0	2.45				DT(1)		
	S+PP (1.5+1.5)		36.0	2.45				DT(1)		
[5.11]	PVA(2.0)	DB	41.0	4.97	建研式 繰返し	間柱 (1~2)	0.95~ 2.37	F(7)	F-4	S-4

*1 PVA：ポリビニルアルコール繊維，C：炭素繊維，S：鋼繊維，PP：ポリプロピレン繊維

*2 NR：試験方法の記載なし，DB：薄板ダンベル型，CL：シリンダー型，S-002：JCI 規準「切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法」[5.12]

*3 DT：斜張力破壊，ST：せん断引張破壊，SB：せん断付着破壊，S：せん断破壊，FS：曲げ降伏後せん断破壊，FB：曲げ降伏後付着破壊，FC：曲げ圧縮破壊，F：曲げ降伏

*4 本文中に記す

< 曲げ強度 >

- (F-1) 材料試験結果を近似した応力－歪関係を用いたファイバーモデルによる断面解析値
- (F-2) 引張側を引張降伏応力（引張強度の 1/2）の一様分布とした ACI 規準のストレスブロック法 [5.13] による略算値
- (F-3) 引張側を引張降伏応力（引張強度）の一様分布とした日本建築学会規準のストレスブロック法 [5.14] による略算値
- (F-4) 引張強度の 1/2 とした完全弾塑性モデルを用いたファイバーモデルによる断面解析値

< セン断強度 >

以下に示す建築学会終局強度型指針式 [5.15]（以下，A 法）のトラス・アーチ式に DFRCC の引張寄与分を累加したものが多く報告されている。

$$V = V_t + V_a \quad (5.1)$$

$$V_t = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi \quad (5.2)$$

$$V_a = \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D / 2 \quad (5.3)$$

$$\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - (L/D) \quad (5.4)$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B \quad (5.5)$$

$$\cot \phi = \min \left(2.0, \quad j_t / (D \cdot \tan \theta), \quad \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (p_w \cdot \sigma_{wy}) - 1} \right) \quad (5.6)$$

ただし，

V : セン断耐力	V_t : トラス機構の負担するセン断力
V_a : アーチ機構の負担するセン断力	b : 部材幅
j_t : 主筋中心間距離	p_w : セン断補強筋比
σ_{wy} : セン断補強筋の降伏強度	σ_B : コンクリートの圧縮強度
ϕ : 圧縮束の材軸に対する角度	θ : アーチ機構の材軸に対する角度
ν : コンクリートの圧縮強度の有効係数	D : 部材せい
L : 内法スパン	

- (S-1) トラス機構に引張強度を累加
- (S-2) トラス機構に引張強度の 1/2 を累加
- (S-3) トラス機構に $0.5 \sigma_t \cos^2 \phi$ を累加
- (S-4) トラス機構に引張強度の 1/2 を累加し， $\beta = ((1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy} + \cot^2 \phi \sigma_t) / \nu \sigma_B$

また，セン断補強筋のない [5.8] ～ [5.10] では，

- (S-5) 土木学会の鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針式 [5.16] による評価 $\kappa = 1.0$

(S-6) [5.17] に引張寄与分を累加

(S-7) 平均引張応力 σ_p および斜め割れ角度 ϕ を推定することでせん断耐力 $V=b_wj\sigma_p\cot\phi$ を算出

研究機関により DFRCC の材料性能を評価する手法は様々であり，それにより評価される構造性能についても，材料試験法に依存した形になっている。第2章の一軸引張試験で述べたように，材料試験により得られる引張性能は試験法により異なるため，試験法の特徴をよく理解した上で構造性能を評価しなければ危険側の評価になる可能性がある。このような危険性を排除するために，また簡便な評価法の構築のためには，材料試験方法を一本化した上で構造性能が評価されることが望ましい。本章では，第2章で述べた簡易な材料評価法である引張性能評価法を基に，柱および梁部材の曲げ強度およびせん断強度の評価を行う。

5.3 材料性能

以下に，本論文における各項目についての評価方法を述べる。

(1) 圧縮強度

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行って得られた圧縮強度を用いる。

(2) 引張強度

第2章で述べた曲げ試験による引張性能評価法により得られた引張強度を用いる。なお PVA-ECC については，低減係数 0.82 を乗じた値を使用する。

(3) 引張終局歪

第2章で述べた曲げ試験による引張性能評価法により得られた引張終局歪を用いる。なお，PVA-ECC については，低減係数 0.85 を乗じた値を使用する。

(4) ヤング係数

JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」によって求める。また，弾性範囲では圧縮と引張のヤング係数は同等と考える。

5.4 曲げ強度

曲げ強度は、ECC の圧縮応力-歪関係および引張応力-歪関係を適切に設定したファイバーモデルによる断面解析により求めることとする。RC 部材においても平面保持を仮定した断面解析は常用されており、その適合性は良いとされている。ECC の引張応力-歪関係は、上述の引張強度および終局歪をパラメータとする完全弾塑性モデルを用い、圧縮応力-歪関係は圧縮試験結果との整合性のよい圧縮強度および圧縮強度時歪をパラメータとした放物線モデルとする。図 5.1 に解析モデルを示す。第2章で述べた曲げ試験による ECC の引張性能評価法は、言わば断面解析の逆解析により引張強度および終局歪を得る方法であるため、引張性能評価法により構築したモデルを用いた断面解析結果は、寸法効果や拘束効果の影響があるものの、適切に曲げ強度を評価し得るものとする。

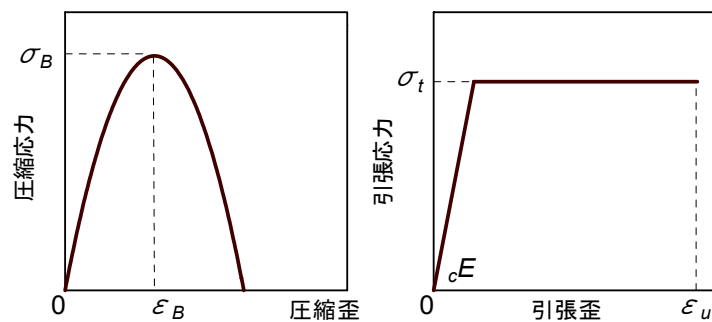


図 5.1 解析モデル

5.5 セン断強度

梁部材のせん断強度は、あるせん断ひび割れに変形が集中した時点で最大荷重に至っていることから、せん断ひび割れ面に対する垂直応力（引張応力）およびせん断応力が同時に作用する二軸応力下で破壊に至ると考えられる。すなわち、ECC の引張主応力はひび割れに対してある角度を有しており、マトリクスの噛み合いが生じるまでは一定の応力を負担しているものと考えられる。第3章の引張力作用下での一面せん断実験では、ひび割れ面でせん断ずれが生じてもひび割れ面の直交方向力である引張力は引張強度程度を維持しており、その後せん断ずれが進行すると圧壊が生じること、また、第4章の梁部材の曲げせん断実験では、最大荷重付近である一つのひび割れに変形が集中し、圧壊して耐力低下を引き起こすことが分かった。そこで本章では、引張主応力方向に ECC が引張強度を維持し、その直交方向の圧縮ストラットの破壊で耐力が決定され则认为、A 法に ECC の引張強度 σ_t を累加する形でせん断強度を評価することとした。また、ECC の引張強度に低減係数 v_t を乗じるものとし、低減係数を実験結果から逆算した。なお、せん断強度時にはせん断補強筋は降伏しているものとする。

ECC の抵抗機構の概略図を図 5.2 に示す。なお、トラス機構における圧縮ストラットの釣り合いには、従来の A 法と同様にせん断補強筋によるものだけを考慮し、ECC の引張強度はひび割れ面で釣り合いを保つものと考えた。また、トラス機構とアーチ機構の圧縮ストラットの角度の違いは無視し、圧縮ストラットの圧縮強度有効係数は CEB 式 [5.18] に依った。以上の仮定によるせん断強度は、アーチ・トラス式に式 (5.7) を累加し、式 (5.1) ～式 (5.8) により評価する。

$$V_{ECC} = b \cdot j_t \cdot \nu_t \cdot \sigma_t \cdot \cot \phi \quad (5.7)$$

$$\nu = 1.70 \sigma_B^{-0.333} \quad (5.8)$$

ただし、

ν_t : 引張強度低減係数

σ_t : 引張性能評価法により得られた引張強度

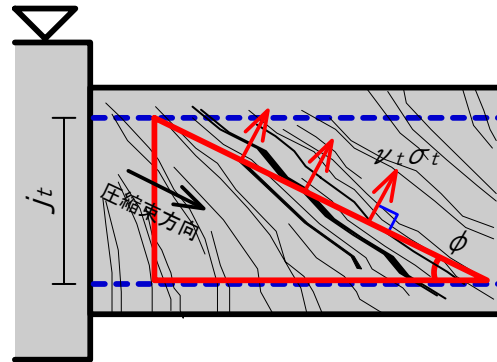


図 5.2 ECC の抵抗機構の仮定

第4章で用いた PVA-ECC 梁試験体の実験結果から逆算した低減係数 ν_t の比較を図 5.3 に、低減係数 ν_t 一覧を表 5.2 に示す。なお、ECC を用いた部材の曲げ強度は主筋の降伏が先行した後も危険断面での繊維の架橋により荷重が増大するため、主筋降伏が見られた PVA20-120S 試験体の結果も有効なデータとして扱った。

実験結果より逆算した低減係数 ν_t の平均値は 0.41 となった。また、PVA15 ($V_f=1.5\%$) 試験体の低減係数 ν_t の平均値が 0.40, PVA20 ($V_f=2.0\%$) 試験体の平均値が 0.41 であり、繊維混入率による差は認められない。また、肋筋比も 0.3~0.5% 程度であり差は認められない。以上から ECC の引張強度有効係数は 0.41 を用いることとする。

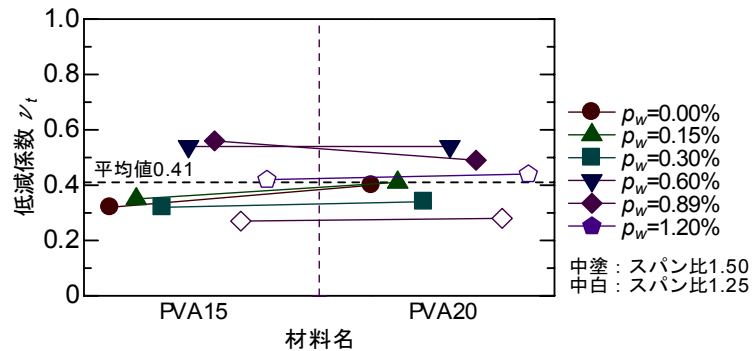


図 5.3 引張強度低減係数 ν_t の比較

表 5.2 引張強度低減係数 ν_t 一覧

試験体名	引張強度低減係数 ν_t	試験体名	引張強度低減係数 ν_t
PVA15-00L	0.32	PVA20-00L	0.40
PVA15-15L	0.35	PVA20-15L	0.41
PVA15-30L	0.32	PVA20-30L	0.34
PVA15-60L	0.54	PVA20-60L	0.54
PVA15-89L	0.56	PVA20-89L	0.49
PVA15-89S	0.27	PVA20-89S	0.28
PVA15-120S	0.42	PVA20-120S	0.44
平均	0.40	平均	0.41

5.6 検証

図 5.4 に曲げ強度およびせん断強度の検証結果を示す。繊維混入率および肋筋比に依らず精度良く評価できており、また破壊形式も判別できている。引張強度低減係数 ν_t の意味する詳細な原因については現時点では不明であるが、複雑な曲げせん断応力下では ECC がひび割れ面において必ずしも一様な応力分布を負担するとは限らないこと、最大応力を決定する主要因を圧縮ストラットの破壊とし、その時に ECC の負担引張力がどの程度になっているか不明であること等の理由が考えられる。

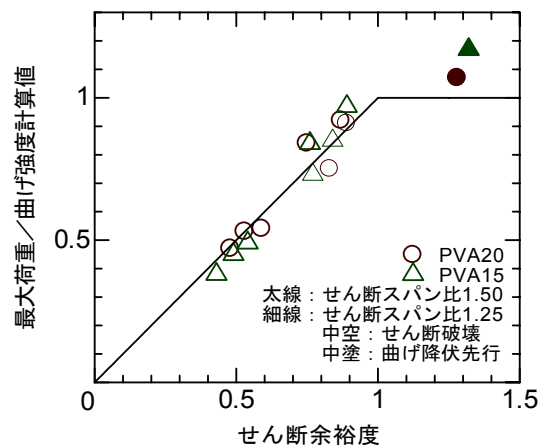


図 5.4 最大荷重／曲げ強度計算値－せん断余裕度関係

5.7 まとめ

第5章では、第2章で得られた ECC の引張性能を取り込んだ構造性能の評価を行った。曲げ耐力は ECC の引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現したファイバーモデルによる断面解析により評価した。せん断耐力は、第3章において ECC のひび割れ面においてせん断ずれが生じても垂直応力として引張強度を保持するとの結果を鑑み、終局強度型 A 法のトラス・アーチ理論を抛り所として、圧縮ストラットの直行方向すなわち引張主応力方向に ECC が引張強度程度を有すると考え、アーチ・トラス式に ECC の引張強度に低減係数を乗じた値を累加する形とした。低減係数を実験結果から逆算し、0.41 なる値を得た。この値の意味する詳細な原因は現時点では不明であるが、複雑な曲げせん断応力下では ECC がひび割れ面上において必ずしも一様な応力を負担するとは限らないこと、終局強度型 A 法では最大耐力決定の主要因はコンクリートの圧縮ストラットの破壊であり（せん断圧縮破壊）、その時に ECC の負担引張力がどの程度になっているか不明であること、等の理由が考えられる。

第 6 章

DFRCC への適用

第6章 DFRCC への適用

6.1 はじめに

一軸引張応力下において初期ひび割れ以降に歪硬化を示す材料として定義されている HPFRCC の中でも高性能材料である ECC について、第 2 章の材料性能の評価では曲げ試験により ECC の引張性能を評価し、第 5 章では得られた評価値を用いて構造性能の評価を行い、高い精度で評価可能であることを示した。本章では、材料の範囲をさらに拡張して、図 6.1 に示すように HPFRCC を包含する形として定義されている、曲げ応力下において初期ひび割れ以降に荷重増加するたわみ硬化性状を示す DFRCC を対象とし、第 2 章の一軸引張試験から得られる引張性能と曲げ試験から得られる引張性能の対応、第 4 章と同様の大野式逆対象曲げせん断一方向加力による梁部材の実験および第 5 章の曲げおよびせん断強度評価方法の適合性を検討する。

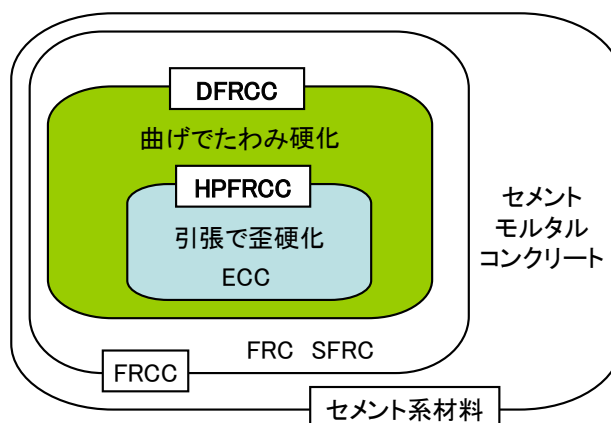


図 6.1 DFRCC および ECC の包含関係

6.2 引張性能評価

6.2.1 使用材料

使用した DFRCC は PVA 繊維を体積混入率で 1.0%混入させた PVA10, ポリエチレン繊維を 1.5%混入させた PE [6.1], ポリエチレン繊維および鋼繊維を 1.0%ずつ混入させた HB [6.2], 反応性粉体コンクリート (RPC) に鋼繊維を 2.0%混入させた DCT [6.3] の 4 材料である。表 6.1 に使用材料の力学的性質を, 表 6.2 に繊維の力学特性を示す。PVA10 は, 前章までに使用した PVA20 および PVA15 と同調合であり, 繊維量のみを減じて製作した。圧縮強度は PVA10 および HB で 40MPa 程度, PE で 70MPa 程度, DCT では 200MPa であり超高強度となっている。

表 6.1 使用材料

材料 カテゴリ	材料名	使用繊維	繊維 混入率 (%)	水セメ ント比 (%)	水結合材 比 (%)	圧縮 強度 (MPa)	割線 剛性 (GPa)
HPRCC	PVA20	PVA 繊維	2.0	—	42.7	36.2	16.2
	PVA15		1.5	—	42.7	42.0	17.3
DFRCC	PVA10		1.0	—	42.7	42.6	18.2
	PE	ポリエチレン繊維	1.5	30	—	67.3	21.0
	HB	ポリエチレン繊維 鋼繊維	1.0 1.0	—	45	43.6	17.4
	DCT	鋼繊維	2.0	22	—	202	57.4

表 6.2 繊維の力学特性 (メーカー値)

材料名	使用繊維	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	破断強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
PVA	PVA 繊維	12	0.040	1600	40
PE	ポリエチレン繊維	12	0.012	2600	73
HB	ポリエチレン繊維	15	0.012	2600	73
	鋼繊維	32	0.405	2700	200
DCT	鋼繊維	15	0.2	2500	210

6.2.2 引張試験および曲げ試験

一軸引張試験は矩形くびれ型引張試験により行い、曲げ試験は3等分点曲げ载荷により行った。PVA10の各試験体は横打ちで作製し、その他の各試験体は横打ちおよび縦打ちで作製して打設方向の差異による比較を行った。

DFRCCの引張試験および曲げ試験のひび割れ状況を図6.2に、実験結果を図6.3に示す。なお、DCT試験体は強度が高いため、鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で接着させる矩形くびれ型引張試験法では、加力中に鋼板が剥がれてしまうため、実験を行うことができなかった。

ひび割れ状況を見ると、引張試験ではひび割れが1本で破壊する試験体がほとんどであったが、曲げ試験では純曲げ区間において1本以上発生しており、曲げが一軸引張に比べて複数ひび割れが発生し易いことが伺える。

引張および曲げ試験結果をみると、一軸引張試験では初期ひび割れ以降に応力低下する歪軟化挙動を示したが、曲げ試験結果では、ひび割れ発生以降も荷重増加するたわみ硬化挙動を示した。ほとんどの材料で横打ち試験体の結果が縦打ちに比べて大きいですが、PE試験体は逆の結果となり、使用材料によって引張および曲げ性状に与える打設方向の影響が異なっている。また材料によっては試験結果にばらつきが大きいものがあった。



図 6.2 ひび割れ状況（左：引張試験，右：曲げ試験）

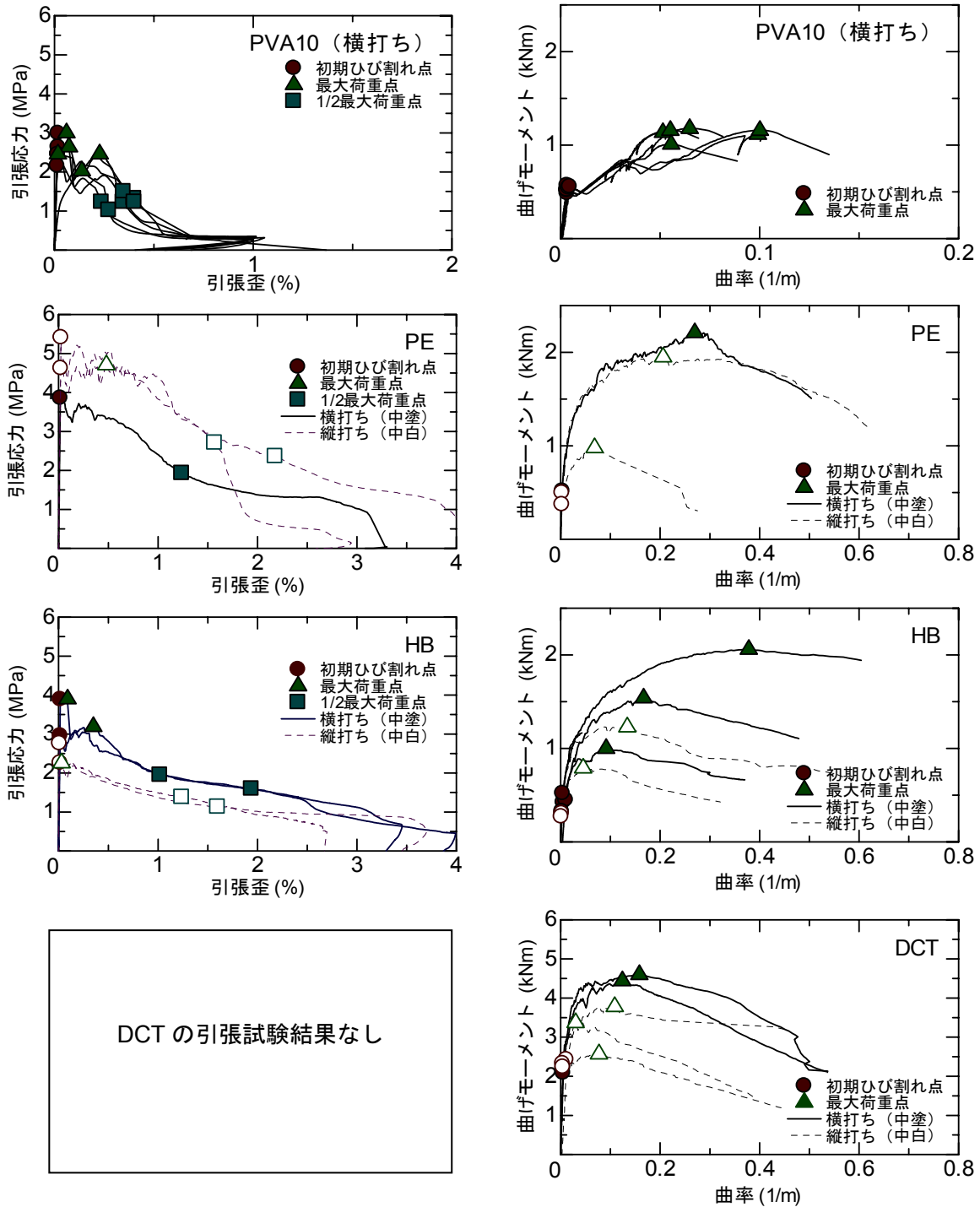


図 6.3 実験結果 (左：引張試験, 右：曲げ試験)

6.2.3 引張試験と曲げ試験結果の比較

第2章に示した方法により曲げ試験結果から引張終局歪および引張強度を算出し、引張試験結果との比較を行う。なお、一軸引張試験において歪軟化を示す DFRCC における引張終局歪は、引張強度の1/2まで低下した時点での歪と定義した。比較結果を図6.4に示す。図中には2章で評価した HPRCC も一緒に示し、DCT は引張試験が行えなかったため検証していない。試験体数が少なく、ばらつきも大きい一義的な結果を把握することは困難であるが、HPRCC の検証結果とほぼ同様の傾向を示している。ただし、DFRCC においては引張強度は初期ひび割れ強度であり、終局歪は1/2 引張強度時歪であることに注意する必要がある。つまり引張終局歪の定義は、引張強度を引張終局歪まで保障するものではない。しかし、HPRCC および DFRCC の曲げ試験により得られる引張性能評価のイメージ(図6.5)を見ると、曲げは中立軸から離れた点の応力がモーメントに多く寄与するため、HPRCC においては平均的な引張応力に対して引張強度が大きめに、DFRCC では小さめに評価される。

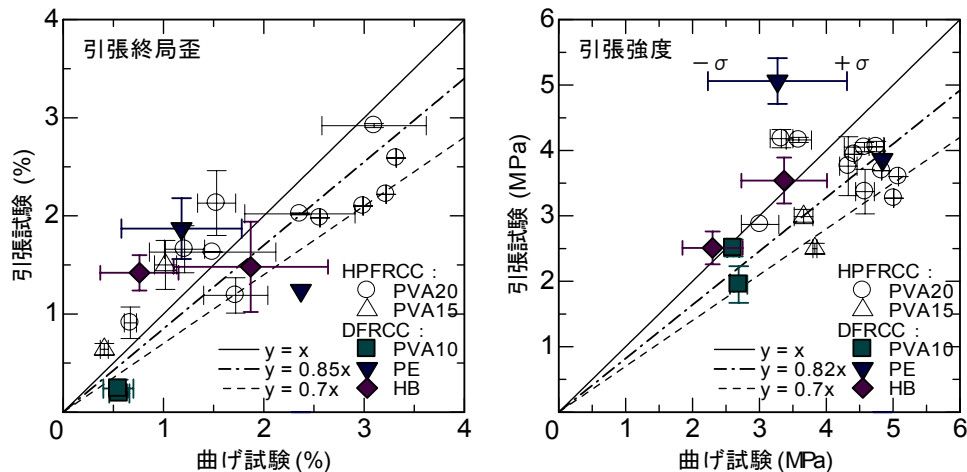


図 6.4 引張性能評価の検証

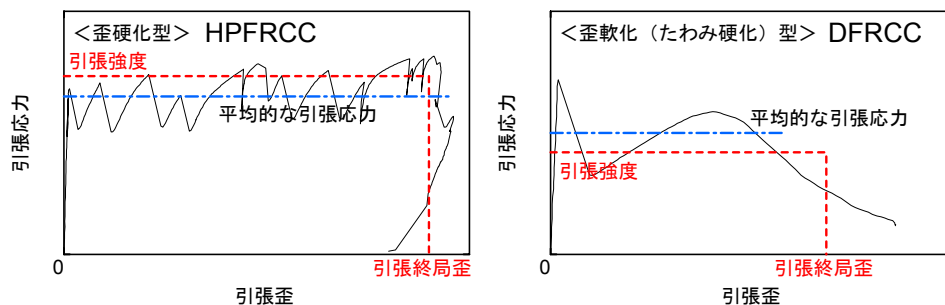


図 6.5 引張強度と平均的な引張応力との差異

6.3 構造性能評価

前節で示した評価方法により、一軸引張応力下で歪軟化性状を示す DFRCC についても、曲げ試験による引張性能評価を行うことは可能であるが、適用するにあたり注意すべき点として以下の項目が挙げられる。

- ・ 曲げ試験により得られる性状は構造性能である（図 6.6）。

一軸引張応力下において歪硬化を示す材料であるか、歪軟化を示す材料であるか、複数ひび割れを生じるか生じないかは曲げ試験により判別できない。引張応力下において初期ひび割れ以降に歪軟化する DFRCC においても、中立軸の推移によるモーメントの増大により、曲げ応力下においてたわみ硬化するためである。曲げ試験から引張性能を評価するためには、応力-歪関係を仮定する必要がある。その意味では、曲げ試験から評価した性状は構造性能である。

- ・ 寸法効果が存在する（図 6.7）。

セメント系材料の主な変形はひび割れの発生および開口による変形である。その変形を検長で除して歪や曲率にするため、検長間にあるひび割れ本数や間隔による寸法効果の影響を多大に受ける。特に、ひび割れ本数の少ない DFRCC では寸法効果が大きいと考えられ、また曲げ試験ではさらに部材のせいに大きな影響を受ける。また、繊維補強セメント材料の場合には、セメントや骨材等のマトリクスに寸法効果に加え、繊維補強による寸法効果があり、断面寸法が繊維長に対して小さい場合にはウォールエフェクトの影響を多大に受ける。

一つ目の項目に関しては、モーメント-曲率関係の開始点から逐次逆解析する方法が提案されており、その方法により歪硬化型や歪軟化型の区別が可能であるとの結果が得られているが [6.4]、様々な材料の一軸引張試験結果との整合性については未だ検討段階であり、また実務でこの評価法を行うには煩雑すぎる。

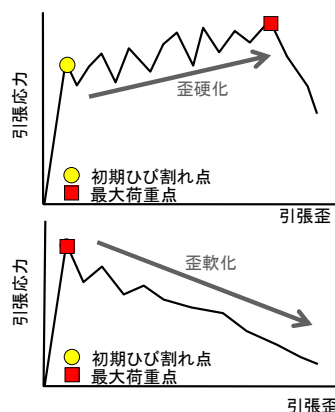


図 6.6 引張性状および曲げ性状の関係

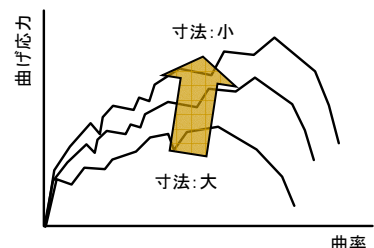


図 6.7 寸法効果

一方、対象とする材料の性能があらかじめ明確であり、曲げ強度やせん断強度等、部材における評価項目が限られていれば、曲げ試験による引張性能評価値と部材の構造性能の関連をあらかじめ把握しておくことで、性能確認試験や品質管理試験として曲げ試験による引張性能評価が行

える可能性がある。本節では、一軸引張応力下で歪軟化性状を示した PVA10 および DCT に焦点をあて、梁部材の曲げせん断実験を行い、HPFRCC に分類される ECC に対して提案した第2章～第5章の評価方法の適用性を検討する。

6.3.1 梁部材実験概要

使用した材料は、前節で述べた PVA10 および DCT の2材料である。試験体一覧を表 6.3 に、DFRCC の力学特性を表 6.4 に示す。また、鉄筋の引張試験結果を表 6.5 に示す。梁試験体形状、加力・計測方法および実験因子は第4章と同様であり、実験因子は想定破壊形式（曲げ降伏先行型、せん断破壊型）、肋筋比（0～1.2%）およびせん断スパン比（1.25, 1.5）である。

表 6.3 試験体一覧

試験体名	混入率 V_f (%)	せん断 スパン 比	内法 スパン L (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	断面 $b \times D$ (mm)	主筋		肋筋			
							配筋	強度	配筋	p_w (%)		
PVA10-00L	1.0	1.50	840	520	1040	180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	—	0.00		
PVA10-15L									2-D4@93	0.15		
PVA10-30L									2-D4@47	0.30		
PVA10-60L									2-D6@59	0.60		
PVA10-89L									2-D6@40	0.89		
PVA10-89LF		1.25	700	600	SD390			2-D6@40	0.89			
PVA10-89S					SHD685			2-D6@40	0.89			
PVA10-120S					4-D6@59			1.20				
DCT-00L	2.0	1.50	840	520	1040			180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	—	0.00
DCT-15L											2-D4@93	0.15
DCT-30L											2-D4@47	0.30
DCT-60L											2-D6@59	0.60
DCT-89L											2-D6@40	0.89
DCT-00S		1.25	700	600	900					—	0.00	
DCT-30S					2-D4@108					0.30		

表 6.4 DFRCC の力学特性

材料名	圧縮特性			引張特性*		備考
	割線剛性 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度 時歪 (%)	引張強度 (MPa)	終局歪 (%)	
PVA10	17.8	37.3	0.35	2.14	0.48	$p_w=0.00 \sim 0.30\%$ L 用
	20.2	49.9	0.37	2.21	0.47	$p_w=0.60 \sim 0.89\%$ L 用
	18.1	40.2	0.40	2.34	0.48	$p_w=0.89 \sim 1.20\%$ S 用
DCT	54.7	211	0.42	9.76	0.76	$p_w=0.00 \sim 0.89\%$ L 用
	57.5	190	0.37	11.3	0.85	$p_w=0.89 \sim 1.20\%$ S 用

* 引張性能評価法により得られた引張性能に2章で得られた低減係数（引張強度が0.82，終局歪が0.85）を乗じた値

表 6.5 鉄筋の引張試験結果

呼び名	ヤング係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	降伏歪 (μ)	破断伸び (%)	備考
D4	193	295	1528	27.4	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用肋筋
D6	173	334	1940	17.9	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用肋筋
D6	207	427	2061	15.1	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用肋筋
D13	191	719	3764	10.0	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用主筋
D13	178	711	3850	10.8	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用主筋
D13	168	691	4113	10.9	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用主筋
D13	175	438	2510	18.3	F シリーズ用主筋

6.3.2 実験結果

最終破壊状況を図 6.8 に示す。ただし、図中のひび割れをなぞった線は部材角 $1/100\text{rad}$ までに生じたひび割れを示している。第 4 章で述べた普通コンクリート試験体やモルタル試験体に比べて複数ひび割れが生じていることが分かる。ひび割れ角度は ECC 試験体と同程度であった。せん断スパン比が 1.25 の DCT 試験体では、ひび割れの本数が他の試験体と比較して少なく、部材端の圧縮域を結ぶ対角線状のせん断ひび割れにより破壊（せん断斜張力破壊）した。図 6.9 にせん断力一部材角関係を、表 6.6 に実験結果一覧を示す。PVA10 は全てのせん断破壊型の試験体でせん断破壊した。DCT 試験体は、DCT-00L、DCT-00S および DCT-30S はせん断破壊し、それ以外は曲げ降伏が先行した。PVA10 試験体の最大荷重を第 4 章で述べたモルタル試験体と比較すると、材料の圧縮強度の違いはあるが、PVA10 試験体が大きく、DFRCC においても繊維混入による最大荷重の増加が認められた。

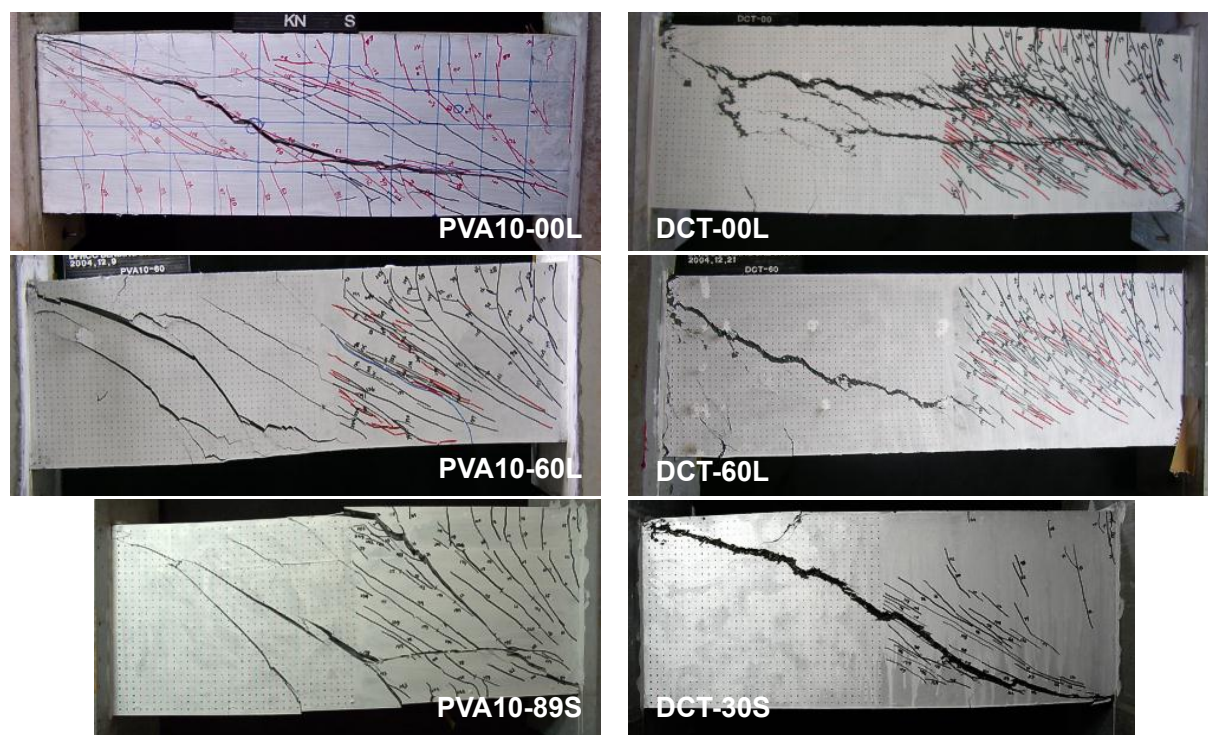


図 6.8 最終破壊状況

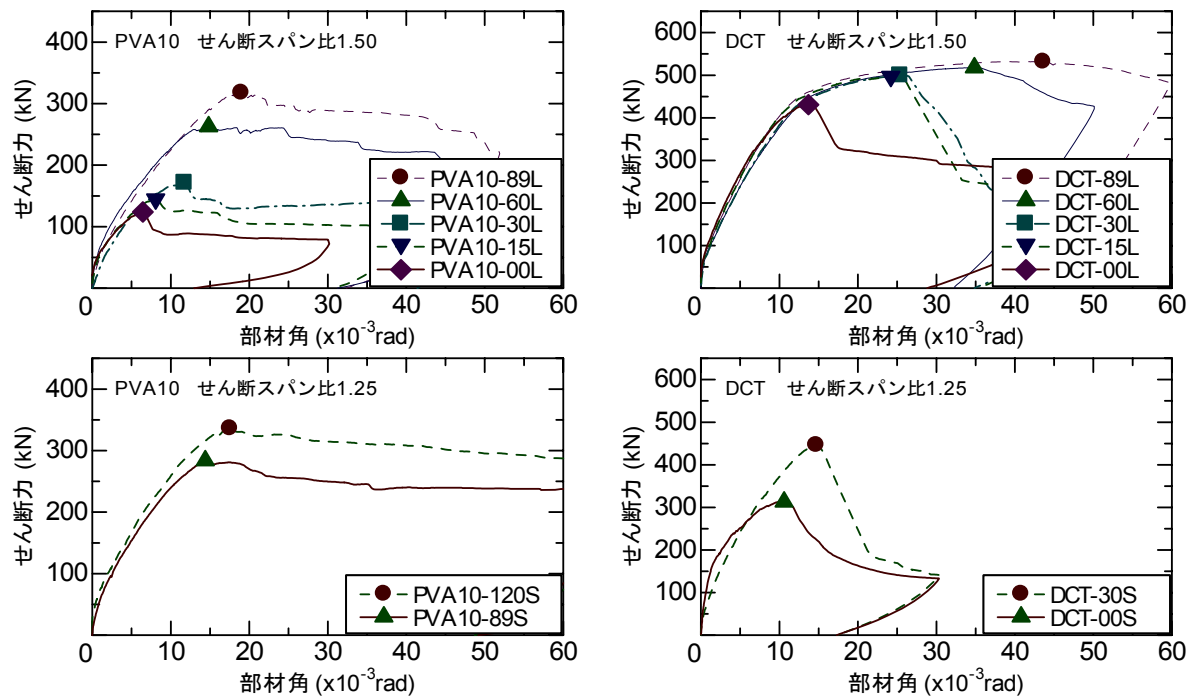


図 6.9 せん断力一部材角関係

表 6.6 実験結果一覧

試験体名	鉄筋降伏時部材角 ($\times 10^{-3}$ rad)		最大荷重時		限界 変形角* ¹ ($\times 10^{-3}$ rad)	破壊 形式* ²
	肋筋降伏時	主筋降伏時	せん断力 (kN)	部材角 ($\times 10^{-3}$ rad)		
PVA10-00L	—	—	124	6.4	7.6	S
PVA10-15L	2.75	—	145	13.8	16.4	S
PVA10-30L	12.3	—	172	13.8	16.4	S
PVA10-60L	6.24	—	263	14.8	44.0	S
PVA10-89L	9.24	—	318	19.0	47.5	S
PVA10-89LF	11.4	8.29	259* ³	>50* ³	>50	F
PVA10-89S	8.88	—	283	14.4	>67	S
PVA10-120S	8.61	—	336	17.5	>67	S
DCT-00L	—	9.41	431	13.7	16.9	F→S
DCT-15L	7.10	7.06	497	24.2	28.8	F→S
DCT-30L	7.69	9.35	500	25.4	30.8	F→S
DCT-60L	7.56	—	518	34.8	>50	F→S
DCT-89L	40.9	—	532	43.6	>59	F→S
DCT-00S	—	—	313	10.6	13.3	S
DCT-30S	—	—	446	14.7	17.3	S

*1：最大荷重の 80%まで荷重低下したときの変形角

*2：S=せん断破壊，F=曲げ降伏

*3：除荷開始（部材角 1/20rad）直前の荷重

6.3.3 曲げ強度およびせん断強度の評価

第5章の構造性能評価を DFRCC 試験体に適用し、曲げ強度およびせん断強度の検証を行った。すなわち、曲げ強度は、DFRCC の圧縮応力-歪関係を PVA10 では放物線モデル(図 6.10 左参照)、DCT では 2 直線モデル(図 6.10 右参照)を用い、引張応力-歪関係を曲げ試験評価法から算出した引張強度および終局歪による完全弾塑性モデルを用いた断面解析により、せん断強度は、DFRCC の引張強度を低減係数 ν_t (0.41) を乗じてアーチ・トラス式(日本建築学会終局強度型指針式 A 法)に累加する方法により求めた。

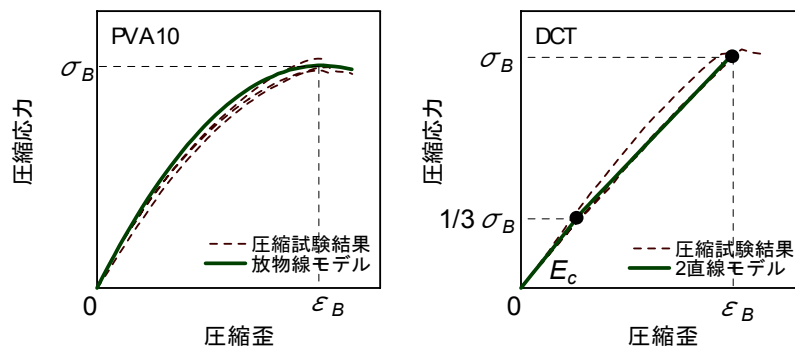


図 6.10 DFRCC の圧縮モデル

曲げ強度およびせん断強度の算定結果を、横軸にせん断余裕度、縦軸に最大荷重比をとり ECC 試験体とともに図 6.11 に示す。また、各試験体の最大荷重および各計算強度の一覧を表 6.7 に示す。せん断強度の対応、破壊形式の区別ともに概ね評価できている。DFRCC (PVA10 および DCT) 試験体において、せん断破壊型試験体の最大荷重実験値とせん断強度計算値の比較値の平均値は 0.97、曲げ降伏先行型試験体の最大荷重実験値と曲げ強度計算値の比較値の平均値は 1.14 である。一方、ECC 試験体においては、せん断破壊型試験体の最大荷重実験値とせん断強度計算値の比較値の平均値は 0.99、曲げ降伏先行型試験体の最大荷重実験値と曲げ強度計算値の比較値の平均値は 1.12 であり、全試験体ではそれぞれの比較値は 0.98, 1.13 である。

以上の検討より、本研究の試験体の範囲においては、第2章に示した曲げ試験より算定される引張性能評価値を用いて、一軸引張応力下で歪軟化性状を示す DFRCC においても曲げ強度およびせん断強度が評価可能であるといえる。

曲げ強度に関しては、もともと曲げ強度から算定した特性値を用いて逆の演算を行っただけであり、寸法効果の影響の懸念が残るが、材料の応力-歪関係の仮定に関係なく評価が可能であることは至極当然である。本研究の範囲では、断面が $100 \times 100 \text{ mm}$ の試験体の結果を用いて、梁せいが約 300 mm の試験体の曲げ強度の評価が可能であった。

せん断強度に関しては、引張強度の低減係数 ν_t (0.41) の持つ意味が ECC の場合と同様であるとする、最大荷重時にひび割れ面で繊維の架橋により負担する DFRCC の引張応力は、ひび割れの部分によって引張応力下の歪軟化域の種々の箇所に対応し、その平均的な引張応力が曲げ試験により評価される引張強度に対応するものと思われる。ただし、本提案では DFRCC の引張強度を累加するため、DFRCC の架橋力が発揮される部材の最大荷重時にせん断補強筋が降伏してい

る必要があり、DFRCC にはある程度の変形能力（終局歪）が要求されると考えられる。これらのことは、第3章で述べたように従来の繊維補強コンクリート（FRC）においても同様な手法が試みられており、例えば永坂は引張試験において切欠き部のひび割れ幅が 0.3mm のときの引張応力をトラス機構に累加している [6.5]。

本研究で提案する、曲げ試験による DFRCC の引張強度評価法は、部材の最大荷重時に発揮する引張軟化域の代表応力を求めるための評価方法であると捉えることもできる。この評価方法の利点は、DFRCC が引張応力下で歪硬化型であるか歪軟化型であるかの区別なく、両者に適用可能なことである。すなわち、本評価法では、歪硬化型の材料であればひび割れ発生後の引張強度を得ることができ、歪軟化型の材料であれば終局状態（最大荷重時）のときの、引張強度（＝ひび割れ強度）より小さい代表応力を得ることができる。

例えば従来の RC 部材では、真の圧縮強度にかかわらずシリンダー型のテストピースによる圧縮強度をもって種々の評価値が定まる。材料自体の性状がある程度明確であるならば、引張性状における特性値を曲げ試験による評価法で捉え、その評価値をもって部材の性状を判断することができるになれば、セメント系材料である DFRCC の引張性能を構造設計に陽な形で取り込むことができ、RC 構造の可能性を広げる革新的な試みとなろう。

なお、図 6.11 において、せん断スパン比が 1.25 の DCT 試験体では、他の試験体と比較して実験値が算定値よりも小さいものが見られる。せん断スパン比が 1.25 のせん断型の DCT 試験体は斜張力破壊で耐力が決定しており、せん断圧縮破壊を前提とする本評価法では過大評価するものと考えられる。

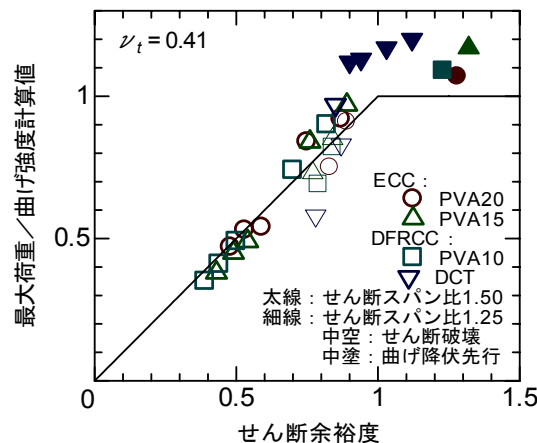


図 6.11 最大荷重／曲げ強度計算値－せん断余裕度関係

表 6.7 DFRCC 梁試験体の各強度計算値

材料 カテゴリ	試験体名	最大荷重 (kN)	破壊形式*1	計算値 (kN)		実験値 ／計算値*2
				曲げ強度	せん断強度	
HFRCC	PVA20-00L	183	S	388	186	0.98
	PVA20-15L	206	S	388	207	1.00
	PVA20-30L	209	S	388	227	0.92
	PVA20-60L	310	S	370	278	1.11
	PVA20-89L	341	S	370	323	1.06
	PVA20-89LF	270	F	253	323	1.07
	PVA20-89S	337	S	448	371	0.91
	PVA20-120S	409	S	448	398	1.03
HFRCC	PVA15-00L	143	S	374	161	0.89
	PVA15-15L	170	S	374	182	0.94
	PVA15-30L	183	S	374	202	0.91
	PVA15-60L	296	S	353	269	1.10
	PVA15-89L	344	S	353	314	1.10
	PVA15-89LF	278	F	238	314	1.17
	PVA15-89S	296	S	407	315	0.94
	PVA15-120S	344	S	407	343	1.00
DFRCC	PVA10-00L	124	S	352	136	0.91
	PVA10-15L	145	S	352	156	0.93
	PVA10-30L	172	S	352	177	0.97
	PVA10-60L	263	S	354	247	1.06
	PVA10-89L	318	S	354	292	1.09
	PVA10-89LF	259*3	F	238	292	1.09
	PVA10-89S	283	S	409	322	0.88
	PVA10-120S	336	S	409	345	0.97
DFRCC	DCT-00L	431	F→S	443	376	1.15
	DCT-15L	497	F→S	443	397	1.12
	DCT-30L	500	F→S	443	419	1.13
	DCT-60L	518	F→S	443	456	1.17
	DCT-89L	532	F→S	443	495	1.20
	DCT-00S	313	S	540	424	0.74
	DCT-30S	446	S	540	471	0.95

*1 : S=せん断破壊, F=曲げ降伏

*2 : 曲げ強度計算値とせん断強度計算値の小さい方の値との比較値

6.4 まとめ

一軸引張応力下で歪軟化性状を示す DFRCC に対して、ECC の場合と同様の曲げ試験による引張性能評価および構造性能評価を行った。引張性能評価に関しては、ECC と同様の評価を行うことで、引張強度および終局歪（一軸引張応力下における 1/2 引張強度時歪）の大まかな傾向を捉えることが可能である。また構造性能評価において、ECC の場合と同様の方法によって曲げ強度およびせん断強度を評価することが可能である。曲げ強度に関して本評価法は、DFRCC の曲げ強度から算定した特性値を用いて逆の演算を行う評価法であり、材料の応力-歪関係の仮定に関係なく評価が可能であることは当然の結果である。せん断強度に関しては、曲げ試験により得られた引張性能評価値は、部材の最大荷重時にひび割れ面で繊維の架橋により負担する DFRCC の引張応力の代表値を与えるものと捉えることができ、その値をアーチ・トラス式に累加することによって評価できるものと考えられる。

第 7 章

結 論

第7章 結 論

本論文は、セメント系材料に短繊維を混入させて従来のコンクリートにはない高い変形能力とひび割れ分散性を有する新材料である DFRCC に焦点をあて、材料特性の評価および構造性能の評価方法の構築を目的とした研究である。DFRCC の特長である引張性能を適切な方法により評価し、コンクリートの圧縮試験のように、圧縮強度から各種部材性能が評価できるような設計体系が DFRCC において構築されれば、従来の RC 構造にはない高い性能を有する構造が期待できる。第 2 章～第 5 章では、DFRCC の中でも一軸引張応力下において複数ひび割れを発生させながら応力上昇する擬似歪硬化性状を示す HPFRCC に分類されている ECC に着目し、簡易に実施可能な曲げ試験による引張性能の評価方法を構築し、部材のせん断強度および曲げ強度を算定する一連の流れを体系化した。さらに、第 6 章では、本評価法を DFRCC へ拡張した場合においても十分な精度でせん断強度および曲げ強度を評価しうることを示した。本章では、各章で得られた知見をまとめ、総括する。

7.1 研究結果のまとめ

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べ、研究対象である DFRCC の概要、セメント系材料における従来の引張試験方法について、その特徴と問題点をまとめた。

第 2 章では、ECC の特長である引張性能を直接把握することができる一軸引張試験について、新しく提案した方法および既往の研究により提案されている様々な試験方法により評価し、試験方法毎の特徴および打設方向による影響について検討した。また、日常的に行う試験方法として現状では困難な一軸引張試験に代わる新たな引張性能を得る試験方法として、さらに各種引張試験のベンチマークとなる試験方法として、普通コンクリートで従来から行われてきた 3 等分点加力(4 点)曲げ試験に着目し、引張性能の評価検討を行った。検証対象は PVA 繊維を用いた PVA-ECC である。

引張試験の検討では、試験体の形状、端部支持条件および施工条件により得られる引張性能が多分に影響を受けることを指摘し、ある程度ボリュームの大きい部材を対象とした引張性能評価では、実際の部材の応力状態と同様になるように打設方向を配慮した、矩形くびれ型試験体を用いたピンー固定支持による一軸引張試験が工学的に有用であることを提案した。

曲げ試験による引張性能評価法の検討では、ECC の引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現したファイバーモデルによる断面曲げ解析による結果を基に、曲げ試験時における最大モーメント時の応力分布を、平面保持を仮定し、圧縮側応力は三角形分布、引張側応力は一様分布とし、引張縁が終局歪に達し、圧縮縁では圧縮強度に達していない状態を仮定し、断面内の力とモーメントの釣合式により立式される中立軸に関する方程式の解から引張強度および引張終局歪を算出する引張性能評価法を提案した。曲げ試験により得られる引張性能は、曲げ試験に対する一軸引張試験の比較値が、引張終局歪で 0.85、引張強度で 0.82 であった。しかしながら、この換算係数は対象とする材料や曲げ試験体の寸法等に影響を受けるため、本研究の範囲において有効となる

値と考えられる。

また、曲げ試験時における曲率とたわみの関係に着目し、純曲げ区間内の曲率を一様分布として算出されるたわみと、たわみの実測値を比較検討した結果、両者は概ね一致しており、マルチプルクラックが生じる ECC においては、純曲げ区間の平均曲率を用いて歪を評価できることを確認した。

第3章では、ECC のせん断ひび割れ面でのせん断伝達機構を把握するため、ひび割れ面の垂直応力として引張力を作用させ、ひび割れを発生させた直接せん断試験方法を提案し、この新たな加力方法の是非を検討した上で、ECC のせん断加力実験を行った。

まず、普通コンクリートおよびモルタルを使用した試験体による予備実験により、新たな加力方法の是非を検討した。その結果、垂直応力として圧縮力を作用させた直接せん断試験方法により得られた既往のせん断強度評価式を用いてせん断強度の評価が可能であり、提案する加力方法が妥当なものであることを確認した。

PVA 繊維の体積混入率 (1.5%, 2.0%) および目標ひび割れ幅 (0.02~0.16mm) を実験因子とし、PVA-ECC に対して新たに提案した直接せん断実験を行った。その結果、ひび割れ面において垂直応力に引張力が作用する場合のせん断強度は、一定引張応力がほぼ引張強度程度であることを考慮すると、引張強度の 1/2 程度を有すると考えられる。逆に、ひび割れ面においてせん断ずれが生じて、垂直応力は引張強度を保持できると捉えることも可能である。せん断変形がさらに進む場合には、噛合いにより ECC が圧壊すると考えられる。

第4章では、PVA-ECC 部材のせん断破壊する実験データの蓄積および部材中における ECC の挙動、特にせん断抵抗に関する問題の解明を目的とし、PVA 繊維混入率、肋筋比およびせん断スパン比を実験因子とした梁部材の曲げせん断実験を行った。その結果、繊維混入により最大荷重および変形能が向上し、従来の耐力式である日本建築学会終局強度型指針式 A 法によるせん断強度計算値を大幅に上回った。破壊経過では、部材においても複数ひび割れが生じ、最大荷重付近では、ある一つのひび割れに変形が集中して破壊に至ることが分かった。またそのひび割れでは噛合いによる圧壊が観察された。最大荷重時における各区間の主歪の検討では、引張主歪が繊維混入率により影響を受け、圧縮主歪は繊維混入による差は認められなかった。また、肋筋比が大きい試験体では、圧縮主歪が材料試験での圧縮強度時歪程度に相当しており、ひび割れ観測の結果と一致していた。

第5章では、第2章で得られた ECC の引張性能を取り込んだ構造性能の評価を行った。曲げ耐力は ECC の引張応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現したファイバーモデルによる断面解析により評価した。せん断耐力は、第3章において ECC のひび割れ面においてせん断ずれが生じて垂直応力として引張強度を保持するとの結果を鑑み、終局強度型 A 法のアーチ・トラス理論を拠り所として、圧縮ストラットの直交方向すなわち引張主応力方向に ECC が引張強度程度を有すると考え、アーチ・トラス式に ECC の引張強度に低減係数を乗じた値を累加する形とした。低減係数を実験結果から逆算し、0.41 なる値を得た。この値の意味する詳細な原因は現時点では不明

であるが、複雑な曲げせん断応力下では ECC がひび割れ面上において必ずしも一様な応力を負担するとは限らないこと、終局強度型 A 法では最大耐力決定の主要因はコンクリートの圧縮ストラットの破壊であり（せん断圧縮破壊）、その時に ECC の負担引張力がどの程度になっているか不明であること、等の理由が考えられる。

第 6 章では、HPFRCC を包含する形として定義されている、曲げ応力下において初期ひび割れ発生以降に荷重増加するたわみ硬化性状を示す DFRCC を対象として、第 2 章の一軸引張試験から得られる引張性能と曲げ試験から得られる引張性能の対応、第 4 章と同様の大野式逆対象曲げせん断一方向加力による梁の加力実験および第 5 章の曲げおよびせん断強度評価方法の適合性を検討した。引張性能評価では、ECC と同様の評価を行うことで、引張強度および終局歪（一軸引張応力下における 1/2 引張強度時歪）の大まかな傾向を捉えることが可能であることを示した。また構造性能評価では、ECC と同様の方法によって曲げ強度およびせん断強度を評価することが可能であることを示した。

7.2 今後の課題

本研究では未検討であった問題点を以下に列記し、今後の研究課題とする。

引張性能評価法の問題点

本論文で述べた引張性能評価法は、曲げ加力試験において引張破壊をする材料を適用対象とすることを暗に示唆している。つまり引張縁において終局歪を迎えることにより最大強度を示す材料でなければならない。今後、さらに引張能力の高い DFRCC が開発され、曲げ加力試験において圧縮縁で終局歪を迎えるような材料の場合には、当然のことながら曲げ試験により引張性能を得ることが困難となるため、本評価法に代わる評価法が必要になると思われる。

圧縮強度有効係数

部材がせん断圧縮破壊する場合には、圧縮ストラットのひび割れ発生後の劣化特性に関して定量的に評価する必要があるが、RC 部材においてはひび割れ面を跨ぐ圧縮強度を、圧縮強度が高ければ高いほど係数が小さくなるように設定された圧縮強度有効係数により評価している。本論文では DFRCC のひび割れを跨ぐ圧縮強度を、高強度コンクリートへの適用を考慮した CEB 式により算出した。CEB 式による圧縮強度有効係数は、圧縮強度の関数として与えられている。しかし、繊維により補強された DFRCC では、圧縮強度有効係数は繊維による影響を受け、通常のコンクリートほど圧縮強度による影響は受けないとの報告がされており [7.1]、また DFRCC の種類により影響を受けることも考えられるため、種々の DFRCC について検討する必要がある。

DFRCC 部材の変形能

DFRCC を構造部材へ適用する場合、特に損傷制御部材や制振部材などの高応力部材へ適用する際にはその変形能に対する評価が必要不可欠である。曲げ降伏後にせん断破壊する部材においては、曲げ強度に対するせん断強度の比率（せん断余裕度）によりある程度評価が可能であると思

われるが、DFRCC 部材の変形能が DFRCC の終局歪により決定されないこともあり、今後検討すべき項目である。

参考文献

第 1 章

- [1.1] D. J. Hannant 著, 槇谷栄次訳: 繊維コンクリート, 森北出版株式会社, 1980
- [1.2] 日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書「高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う」, 2002.1
- [1.3] Li, V. C. : From Micromechanics to Structural Engineering – The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.10, No.2, pp.37-48, 1993
- [1.4] 鶴澤正美, 山田一夫: RPC を用いた超高強度・高じん性コンクリートの開発動向, コンクリート工学, Vol.39, No.2, pp.53-56, 2001
- [1.5] 福田一郎, 須田久美子, 閑田徹志, 坂田昇, 平石剛紀: 高靱性セメント複合材料の引張性能を考慮した曲げ部材の設計法, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.169-174, 2003.12
- [1.6] 平石剛紀, 閑田徹志, 坂田昇, 須田久美子, 福田一郎: 吹付け ECC の引張性能の信頼性に関する実験的研究, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.119-124, 2003.12
- [1.7] 高木薫, 森井直治, 林承燦, 国枝稔, 六郷恵哲: ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料の引張試験方法ならびに曲げ試験方法の提案, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.113-118, 2003.12
- [1.8] 岩渕一徳, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性セメント複合材料を用いたデバイスによるピロティ建築物の応答制御, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.163-168, 2003.12
- [1.9] 福山洋, 勅使川原正臣, 諏訪田晴彦, 福田顕議: HPRCC ダンパーによる鉄骨架構の地震応答制御, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.155-162, 2003.12
- [1.10] 笠井芳夫, 池田尚治編著: コンクリートの試験方法, 下巻, 技術書院, 1993.6
- [1.11] 日本コンクリート工学協会: コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, pp.75-78, 2001.5
- [1.12] 秋田宏, 小出英夫, 外門正直: コンクリートの直接引張試験における実際的方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.643-648, 1999
- [1.13] 古田昌弘, 金久保利之, 閑田徹志, 永井覚: 高靱性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法 (その 1: 初期ひび割れ点の簡易実験評価法), 日本建築学会構造系論文集, 第 568 号, pp. 115-121, 2003.6
- [1.14] Stang, H. : Scale Effects in FRC and HPRCC Structural Elements in High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, RILEM Proceedings Pro 30, pp.245-258, 2003
- [1.15] 閑田徹志, Li, V. C. : 疑似ひずみ硬化性引張挙動を有する短繊維補強セメント複合材料の設計ガイドライン—その 1—マイクロメカニクス理論に基づく初期ひび割れ強度の推定

法, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.13-21, 2001.1

- [1.16] 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰返し試験法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.7-12, 2001.1
- [1.17] K. E. Kenser, S. L. Billington, K. S. Douglas : Cyclic Response of Highly Ductile Fiber - Reinforced Cement - Based Composites, ACI Material Journal, Vol.100, No.5, pp.381-390, 2003.9
- [1.18] Victor C. Li, Shunxin Wang : On High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.13-23, 2003.12

第2章

- [2.1] 秋浜繁幸, 末永龍夫 他: ビニロン繊維補強コンクリート (VFRC) の実験的研究 (その1) — ビニロン短繊維で補強した VFRC の力学的性能について, 鹿島技術研究所年報, 第33号, pp.123-128
- [2.2] 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性型セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰返し試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第539号, pp.7-12, 2001.1
- [2.3] 古田昌弘, 金久保利之, 閑田徹志, 永井覚: 高靱性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法 その1: 初期ひび割れ点の簡易実験評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第568号, pp.115-121, 2003.6
- [2.4] Akita, H., Koide, H. and Mihashi, H. "Experimental Validation in The Effect of Secondary Flexure in Uniaxial Tension of Concrete." Proceedings CD-ROM of 11th International Conference on Fracture, Paper No.5573, 2005.3

第3章

- [3.1] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- [3.2] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- [3.3] 李宝祿, 前川宏一, 岡村甫: 鉄筋コンクリートひび割れ面におけるせん断伝達特性, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.293-298, 1990
- [3.4] Kabele, P. : New Developments in Analytical Modeling of Mechanical Behavior of ECC, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.3, pp.253-264, 2003
- [3.5] Mattock, A. H. and Howkins, N. M. : Shear Transfer in Reinforced Concrete Recent Research, PCI Journal, March - April, Vol.17, No.2, pp.55-75, 1972
- [3.6] 西村昭, 藤井学, 宮元文穂, 山田重和: ひび割れ面におけるせん断伝達作用の定量化に関する研究, RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 1982.6
- [3.7] 東洋一, 大久保全陸, 磯健一: ルーマニアで考案されたコンクリートの直接せん断試験法に関する実験的研究, 建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-136, 1977.10
- [3.8] 永坂具也, 安藤充: 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱のせん断耐力式の試案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.337~338, 1985.10
- [3.9] 永坂具也: 鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材の終局耐力と鋼繊維の補強機構に関する研

究（その 2. 鋼繊維補強コンクリートの引張耐力性状ならびに部材のせん断耐力），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.337～338，1988.10

- [3.10] 望月重，松本智夫，大西幹夫：SFRC 部材のせん断挙動に関する研究（その 16. SFRC の間接一面せん断試験—実験結果の概要—）（その 17. SFRC の間接一面せん断試験—ひび割れ面でのせん断伝達—），日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集，C 構造，pp.323-326，1985.10

第 4 章

- [4.1] 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ，No.64，2005
- [4.2] 閑田徹志，渡辺茂雄，Li, V. C.：PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による短スパンはりのせん断挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.193-198，2000
- [4.3] 木村秀樹，石川裕次：鋼繊維混入高強度コンクリート RC 柱の曲げせん断実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.211-216，2001
- [4.4] 八太伸幸，藤原徳郎，磯雅人，福山洋，中野克彦，松崎育弘：高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能に関する実験的研究 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），C-2 構造，pp.515-518，2001.9
- [4.5] 高稻宜和，永井寛，宮下丘，閑田徹志，丸田誠：高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた梁部材の曲げせん断性状 その 1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），C-2 構造，pp.311-316，2001.9
- [4.6] 笠原美幸，松崎育弘，中野克彦：高靱性型セメント系複合材料を用いた梁，柱部材の構造性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 553 号，pp.89-95，2002.3
- [4.7] 小坂英生，北山和宏，岸田慎司：ビニル短繊維を混入した鉄筋コンクリート柱のせん断性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.883-888，2002
- [4.8] 諏訪田晴彦，福山洋，梁一承：セメント系部材の履歴特性コントロールに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1597-1602，2002
- [4.9] 諏訪田晴彦，福山洋：HPFRCC 部材のせん断挙動に関する FEM 解析，日本コンクリート工学協会 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.79-86，2003.12
- [4.10] 北爪秀和，松崎育弘，中野克彦，八太伸幸：高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイス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.331-336，2003
- [4.11] 諏訪田晴彦，福山洋：高靱性型セメント系複合材料を用いた応答制御要素の復元力特性に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1375-1380，2003
- [4.12] 喜多俊介，小室文也，二羽淳一郎：短繊維補強された RC 部材の力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1717-1722，2003
- [4.13] 棚野博之，福山洋，栗毛忠継，片桐誠，白井一義，上田宜人：超高強度繊維補強コンクリートを用いたはり部材の曲げせん断性状，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），

C-2 構造, pp.37-40, 2003.9

- [4.14] 四十万智博, 勝亦一成, 堀則男, 前田匡樹, 丹羽直樹: エネルギー吸収型境界梁を用いた RC 造コア壁ハイブリッド構造の開発 その 1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), C-2 構造, pp.109-112, 2003.9
- [4.15] 永井覚, 金子貴司, 閑田徹志, 丸田誠: 高靱性繊維補強セメント複合材料を用いたダンパ部材の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1513-1517, 2004
- [4.16] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- [4.17] 建設省総合技術開発プロジェクト: 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発, 平成 4 年度構造性能分科会報告書, (財) 国土開発技術センター, pp.V-4-5 および V-13-14, 1993.3

第 5 章

- [5.1] 建築研究所, (財) 日本建築センター, (財) 国土開発技術研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」総合報告書, 1998.3
- [5.2] 建設省大臣官房技術調査室監修, (社) 建築研究振興協会編: 建築構造における性能指向型設計法のコンセプト, 技報堂出版, 2000.8
- [5.3] 大野定俊, 柿沢忠弘, 阪西康, 米澤敏男: 短繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 部材の曲げ特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1527-1532, 1997
- [5.4] 閑田徹志, 渡辺茂雄, Li, V. C.: PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による短スパンはりのせん断挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.193-198, 2000
- [5.5] 高稻宜和, 永井覚, 宮下丘, 閑田徹志, 丸田誠: 高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた梁部材の曲げせん断性状 その 1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), C-2 構造, pp.311-316, 2001.9
- [5.6] 笠原美幸, 松崎育弘, 中野克彦: 高靱性型セメント系複合材料を用いた梁, 柱部材の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 553 号, pp.89-95, 2002.3
- [5.7] 小坂英生, 北山和宏, 岸田慎司: ビニル短繊維を混入した鉄筋コンクリート柱のせん断性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.883-888, 2002
- [5.8] 田口史雄, 三上浩, 栗橋祐介, 岸徳光: ビニロン短繊維混入 RC 梁の耐荷性状に及ぼす短繊維混入率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.287-292, 2003
- [5.9] 喜多俊介, 小室文也, 二羽淳一郎: 短繊維補強された RC 部材の力学的性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1717-1722, 2003
- [5.10] 児玉亘, 大寺一清, 二羽淳一郎: 短繊維補強された RC はりのせん断耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1501-1506, 2004
- [5.11] 永井覚, 金子貴司, 閑田徹志, 丸田誠: 高靱性繊維補強セメント複合材料を用いたダンパ部材の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1513-1517, 2004
- [5.12] 日本コンクリート工学協会: 切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法 (JCI-S-002-2003), http://www.jci-web.jp/jci_standard/img/r3JCI-S-002-2003.pdf

- [5.13] American Concrete Institute : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-89)
- [5.14] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999
- [5.15] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- [5.16] 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー97，1999
- [5.17] 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986
- [5.18] 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発，平成4年度構造性能分科会報告書，（財）国土開発技術センター，pp.V-4-5 および V-13-14，1993.3

第6章

- [6.1] 葛谷武司，谷口俊哉，国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲：ひずみ硬化型高靱性セメント複合材料の配合と力学性状，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，pp.655-656，2002
- [6.2] 諏訪田晴彦，福山洋，梁一承：セメント系部材の履歴特性コントロールに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1597-1602，2002
- [6.3] 鵜澤正美，山田一夫：RPC を用いた超高強度・高じん性コンクリートの開発動向，コンクリート工学，Vol.39，No.2，pp.53-56，2001
- [6.4] 河合正則，稲熊唯史，内田裕市，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材の応力-ひずみ関係の逆解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.305-310，2006
- [6.5] 永坂具也：鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材の終局耐力と鋼繊維の補強機構に関する研究(その2 鋼繊維補強コンクリートの引張耐力性状ならびに部材のせん断耐力)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.337~338，1988.10

第7章

- [7.1] 諏訪田晴彦，福山洋：高靱性型セメント系複合材料の圧縮特性に関する基礎的実験（その2）平板の二軸載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.421-422，2003.9

謝 辞

本論文は、著者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科の大学院生として在学中の3年間に行った研究成果をまとめたものです。指導教員であられます筑波大学助教授 金久保利之先生には、本研究に着手する機会をいただき、実験の実施および論文の作成に至るまで終始懇切丁寧なご指導を賜りました。筑波大学教授 山本泰彦先生、今井弘先生、筑波大学助教授 境有紀先生、独立行政法人建築研究所 福山洋氏には、本論文を作成するにあたり、多大なご意見、ご教示をいただきました。筑波大学の実験にあたり、筑波大学技官 小島篤志氏には加力治具の作製、実験の段取りなど多くのご助力をいただきました。

鹿島建設技術研究所 閑田徹志氏、永井覚氏には材料提供をしていただき、また論文を執筆するにあたり多くのご意見をいただきました。岐阜大学 六郷恵哲先生、建築研究所 諏訪田晴彦氏、太平洋セメント中央研究所 片桐誠氏、白井一義氏には材料提供および打設時に多大な便宜を図っていただきました。また、日本コンクリート工学協会における高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会および高靱性繊維補強セメント複合材料規準作成委員会における議論を参考にさせていただきました。

本研究は、筑波大学金久保研究室、山本研究室、今井研究室の多くの卒論生・修了生の協力の下に行われました。特に、元筑波大学博士課程システム情報工学研究科 八十島章氏には著者の研究活動の多くの時間を共に過ごし、実験の実施や論文執筆において多くの有益な助言、助力をいただきました。また、元大学院生である荒井公明氏、加納直樹氏、古田昌弘氏、斉藤伸明氏、杉本宜博氏、根本和之氏、鬼海正臣氏、石井聡氏、遠藤崇司氏、村山良太氏、折田潤氏、介川正徳氏、近藤祐輔氏、元卒論生である土田晃博氏、久保勝也氏、長谷川浩司氏、常国敬太郎氏、岡本かやの氏、林加奈子氏、田中崇博氏、青木久美氏、氏家隆博氏、朝倉崇博氏、永井大輔氏、村田麻衣子氏、在学生である佐藤智也氏、齋藤祐哉氏、杉原啓輔氏、松永健太郎氏、工藤脩平氏、上猶優美氏、大和伸行氏にはご協力をいただきました。さらに、産業技術総合研究所 竿本英貴氏には貴重なご意見をいただきました。

このように本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力によりまとめることができました。心から御礼申し上げます。

最後に、陰ながら小生を支えてくださった両親と姉に深く感謝いたします。

2007年3月

清水 克将

本研究に関連した既発表論文

- [1] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 281~286, 2003. 7
- [2] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : HPFRCC の曲げ性状におけるたわみと曲率の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), A-1 材料施工, pp. 773~774, 2003. 9
- [3] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : PVA-ECC 梁部材のせん断性能に関する実験研究, 日本コンクリート工学協会高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp. 87~92, 2003. 12
- [4] 金久保利之, 清水克将, 閑田徹志, 片桐 誠, 福山 洋, 六郷恵哲 : DFRCC の引張性能評価—JCI 研究委員会による共通試験結果—, 日本コンクリート工学協会高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, pp. 101~111, 2003. 12
- [5] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : PVA-ECC 梁部材のせん断終局耐力評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 1537~1542, 2004. 7
- [6] K. Shimizu, T. Kanakubo, T. Kanda S. Nagai : Shear Behavior of Steel Reinforced PVA-ECC Beams, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Conference Proceedings DVD, Paper No. 704, 2004. 8
- [7] 清水克将, 金久保利之 : DFRCC 部材の構造性能評価の提案及びその検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), C-2 構造IV, pp. 759~760, 2004. 8
- [8] K. Shimizu, T. Kanakubo, T. Kanda, S. Nagai : Shear Behavior of PVA-ECC Beams, International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, RILEM Proceedings PRO 49, pp. 443-451, 2005. 5
- [9] T. Kanakubo, K. Shimizu, M. Katagiri, T. Kanda, H. Fukuyama, K. Rokugo : Tensile Characteristics Evaluation of DFRCC -Round Robin Test Results by JCI-TC-, International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, RILEM Proceedings PRO 49, pp. 229-242, 2005. 5
- [10] 清水克将, 氏家隆博, 金久保利之, 閑田徹志 : PVA-ECC 梁部材のせん断性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1333~1338, 2005. 6
- [11] 氏家隆博, 清水克将, 金久保利之, 片桐 誠 : 超高強度繊維補強コンクリートを用いた梁部材の曲げせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1339~1344, 2005. 6
- [12] 清水克将, 金久保利之 : PVA-ECC の一軸引張挙動とひび割れ面におけるせん断挙動の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), A-1 材料施工, pp. 65~66, 2005. 9
- [13] 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚 : 曲げ試験による PVA-ECC の引張性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 604 号, pp. 31~36, 2006. 6
- [14] 清水克将, 金久保利之 : 定引張応力下での鉄筋コンクリートのひび割れ面における一面せん断試験法の提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 V, pp. 989~990, 2006. 9

- [15] 清水克将, 金久保利之 : PVA-ECC の引張性状における寸法効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), A-1 材料施工, pp. 289~290, 2006. 9

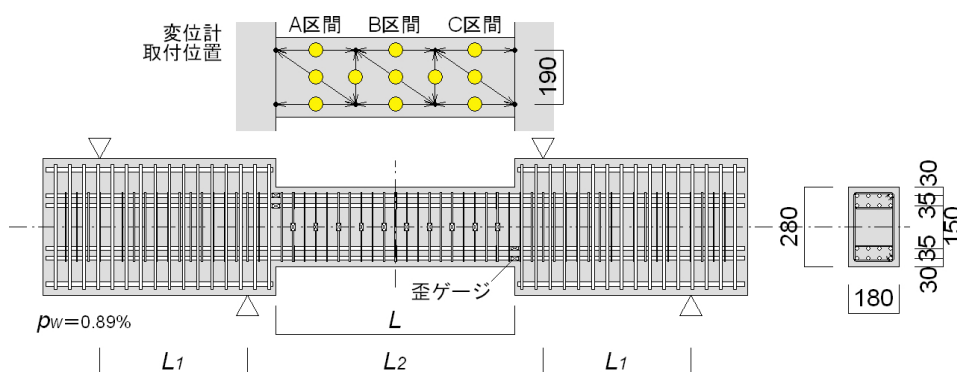
付 録
梁部材の曲げせん断実験

付録 梁部材の曲げせん断実験

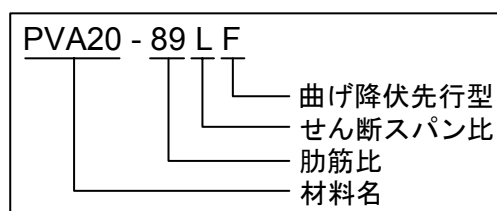
本研究で行われた梁部材の曲げせん断実験の結果および簡単な考察をここに記す。

A.1 実験概要

DFRCC は PVA 繊維を繊維混入率 1.0%, 1.5%, 2.0% の PVA-ECC および鋼繊維を 2.0% 混入させた DCT の 4 種類である。また、比較のため普通コンクリート (NC) およびモルタル (MT) 試験体も計画した。実験因子はせん断スパン比 (1.5, 1.25), 筋筋比 (0.00~1.20%) および想定破壊形式である。各 DFRCC ごとに、せん断破壊型として 7 体, 曲げ降伏先行型として 1 対, 合計 8 体である。試験体形状を付図 1 に, 試験体名称を付図 2 に, 試験体一覧を付表 1 に示す。付図 1 中の寸法は, せん断スパン比 1.5 の試験体が $L=840$, $L_1=520$, $L_2=1040$ mm であり, せん断スパン比 1.25 の試験体が $L=700$, $L_1=600$, $L_2=900$ mm である。梁断面は PVA 試験体, NC 試験体および MT 試験体が 180×280 mm, DCT 試験体は 156×280 mm である。加力は大野式の曲げせん断一方向荷重とし, 加力梁を取り付けた 2MN ユニバーサル試験機により行った。計測項目は, せん断力, 両スタブ間の相対変位, 引張側主筋歪, 筋筋歪, および付図 1 に示す梁側面 3 区間 (A~C 区間) での各部分変位である。



付図 1 梁試験体形状 (PVA, NC および MT 試験体)



付図 2 試験体名称

付表 1 梁試験体一覧

試験体名	使用 繊維	混入率 V_f (%)	せん断 スパン 比	断面 $b \times D$ (mm)	主筋		肋筋	
					配筋	強度	配筋	p_w (%)
PVA10-00L	PVA 繊維	1.0	1.50	180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	—	0.00
PVA10-15L							2-D4@93	0.15
PVA10-30L							2-D4@47	0.30
PVA10-60L							2-D6@59	0.60
PVA10-89L							2-D6@40	0.89
PVA10-89LF						SD390	2-D6@40	0.89
PVA10-89S			SHD685			2-D6@40	0.89	
PVA10-120S						4-D6@59	1.20	
PVA15-00L	PVA 繊維	1.5	1.50	180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	—	0.00
PVA15-15L							2-D4@93	0.15
PVA15-30L							2-D4@47	0.30
PVA15-60L							2-D6@59	0.60
PVA15-89L							2-D6@40	0.89
PVA15-89LF						SD390	2-D6@40	0.89
PVA15-89S			SHD685			2-D6@40	0.89	
PVA15-120S						4-D6@59	1.20	
PVA20-00L	PVA 繊維	2.0	1.50	180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	—	0.00
PVA20-15L							2-D4@93	0.15
PVA20-30L							2-D4@47	0.30
PVA20-60L							2-D6@59	0.60
PVA20-89L							2-D6@40	0.89
PVA20-89LF						SD390	2-D6@40	0.89
PVA20-89S			SHD685			2-D6@40	0.89	
PVA20-120S						4-D6@59	1.20	
DCT-00L	鋼繊維	2.0	1.50	156×280	8-D13 $p_t=2.80\%$	SHD685	—	0.00
DCT-15L							2-D4@108	0.15
DCT-30L							2-D4@54	0.30
DCT-60L							2-D6@68	0.60
DCT-89L							2-D6@46	0.89
DCT-00S							—	0.00
DCT-30S			2-D4@108				0.30	
NC-00L			—				—	1.50
NC-15L	2-D4@93	0.15						
NC-30L	2-D4@47	0.30						
MT-30L	—	—	1.50	180×280	8-D13 $p_t=2.43\%$	SHD685	2-D4@47	0.30
MT-60L							2-D6@59	0.60
MT-89L							2-D6@40	0.89

A.2 材料試験結果

鉄筋の引張試験結果を付表 2 に、使用した DFRCC、普通コンクリートおよびモルタルの力学特性を付表 3 に示す。なお、引張特性は、第 2 章で述べた曲げ試験による引張性能評価法により得られた結果に低減係数（引張強度が 0.82，終局歪が 0.85）を乗じた値である。PVA 材料が圧縮強度 35～50MPa 程度であったが、引張性能は繊維混入率により異なり、PVA20 は引張強度が 4MPa 程度、PVA15 が 2～3MPa 程度、PVA10 が 2MPa 程度であった。超高強度材料である DCT は圧縮強度が 200MPa 程度、引張強度が 10MPa 程度であった。

付表 2 鉄筋の引張試験結果

呼び名	ヤング係数 (GPa)	降伏応力 (MPa)	降伏歪 (μ)	破断伸び (%)	備考
D4	193	295	1528	27.4	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用肋筋
D6	173	334	1940	17.9	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用肋筋
D6	207	427	2061	15.1	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用肋筋
D13	191	719	3764	10.0	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用主筋
D13	175	438	2510	18.3	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用主筋
D13	178	711	3850	10.8	$p_w=0.89\sim1.20\%$ S 用主筋
D13	168	691	4113	10.9	F シリーズ用主筋

付表 3 セメント系材料の力学特性

材料名	圧縮特性			引張特性 ^{*1}		備考
	割線剛性 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度 時歪 (%)	引張強度 (MPa)	終局歪 (%)	
PVA20	19.5	39.1	0.36	3.90	1.30	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用
	19.5	45.8	0.39	3.55	0.57	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用
	19.9	44.3	0.48	3.93	0.91	$p_w=0.60\sim1.20\%$ S 用
PVA15	16.3	35.7	0.35	3.14	0.87	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用
	19.4	50.3	0.39	3.00	0.35	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用
	17.4	42.0	0.42	1.98	0.36	$p_w=0.60\sim1.20\%$ S 用
PVA10	17.8	37.3	0.35	2.14	0.48	$p_w=0.00\sim0.30\%$ L 用
	20.2	49.9	0.37	2.21	0.47	$p_w=0.60\sim0.89\%$ L 用
	18.1	40.2	0.40	2.34	0.48	$p_w=0.60\sim1.20\%$ S 用
DCT	54.7	211	0.42	9.76	0.76	$p_w=0.00\sim0.89\%$ L 用
	57.5	190	0.37	11.3	0.85	$p_w=0.00\sim0.30\%$ S 用
NC	26.2	39.0	0.23	2.72 ^{*2}	—	—
MT	28.6	61.0	0.33	2.20 ^{*2}	—	—

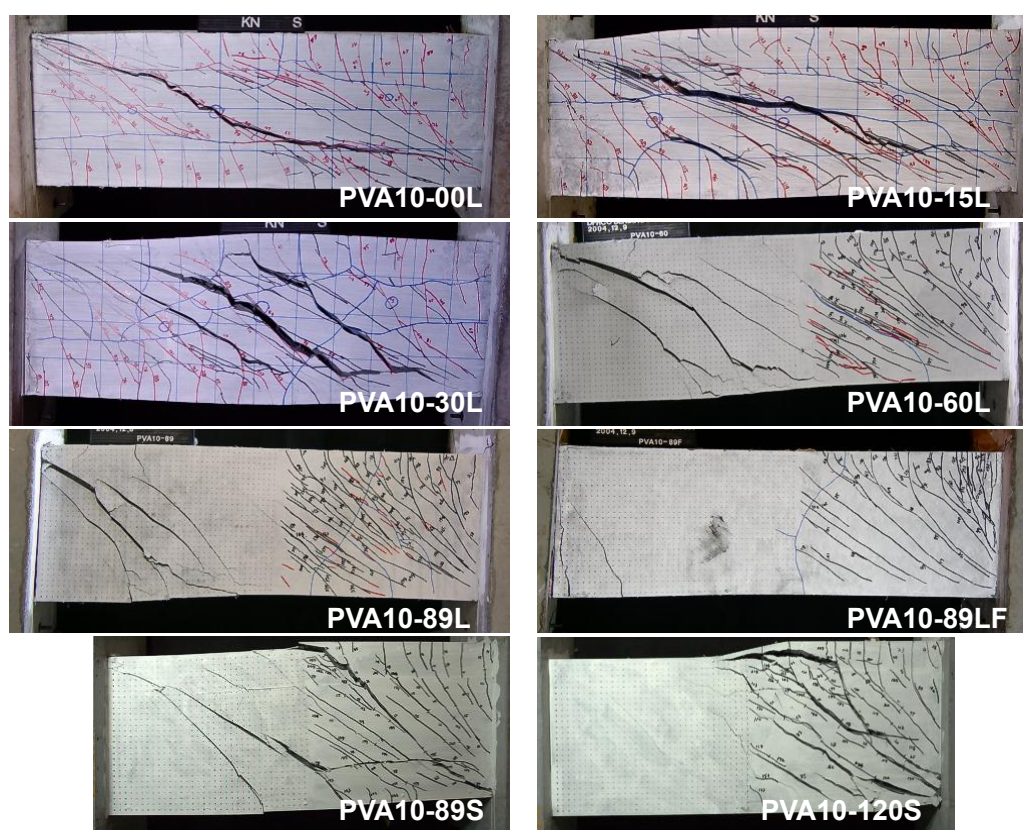
*1 第 2 章 引張性能評価法による引張性能値。低減係数は引張強度が 0.82，終局歪が 0.85 である。

*2 割裂引張試験による

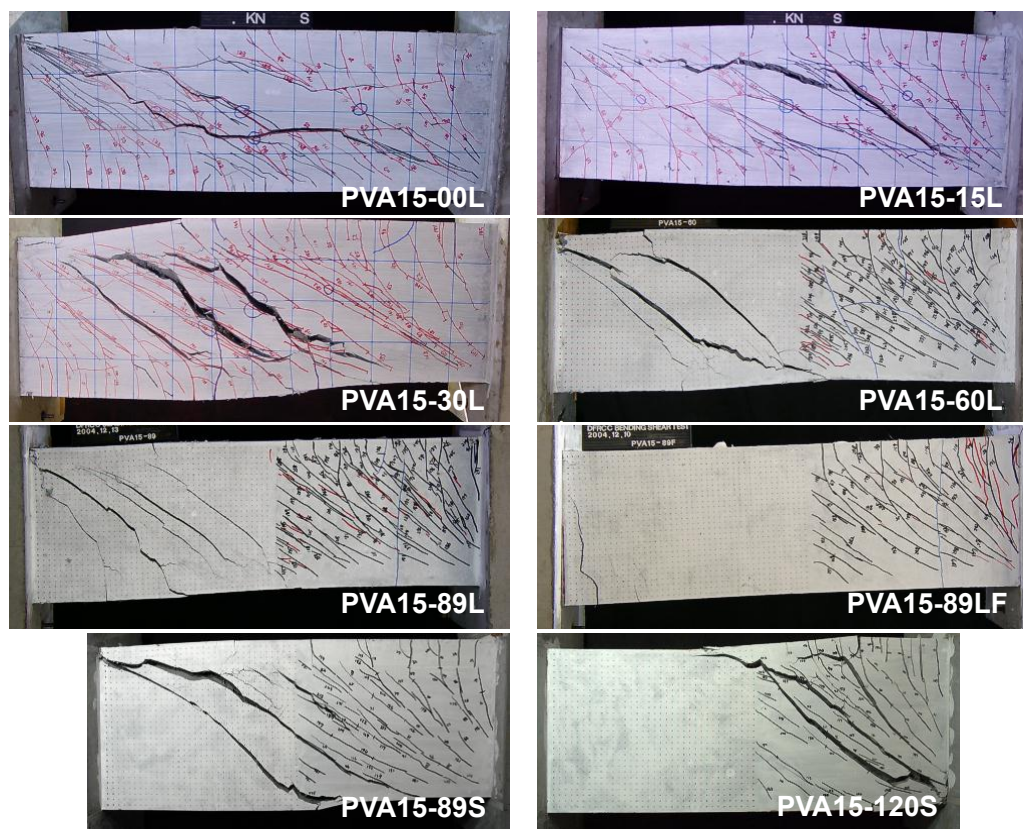
A.3 ひび割れ状況

最終ひび割れ状況を付図 3～付図 8 に示す。ただし、図中のひび割れをなぞった線は部材角 $1/100\text{rad}$ までに生じたひび割れを示している。PVA 試験体および DCT 試験体は微細なひび割れが多数生じた。PVA 試験体において主たるせん断ひび割れを繊維混入率により比較すると、肋筋比が 0.00% の試験体では圧縮縁を結ぶひび割れにより斜張力破壊したが、肋筋比が 0.15% の試験体では PVA10 のみ斜張力破壊した。肋筋比が大きい試験体（肋筋比 0.60% および 0.89%）ではせん断圧縮破壊した。主たるせん断ひび割れの材軸とのなす角度は、繊維混入率の高い試験体が低い試験体に比べて同等またはそれ以上の傾向にあり、繊維混入による影響が伺える。せん断スパン比が 1.25 では、肋筋比 0.89% の試験体において斜張力破壊が見られたが、肋筋比 1.20% の試験体ではせん断圧縮破壊した。

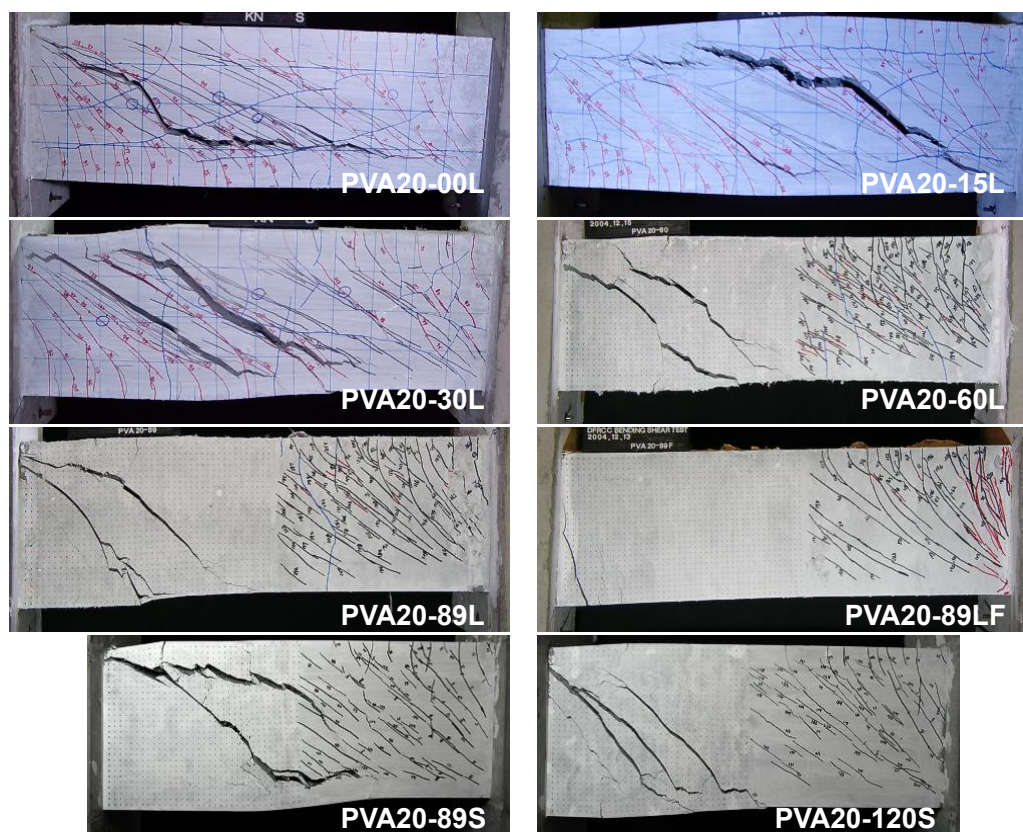
せん断スパン比 1.50 の DCT 試験体（DCT-00L）では、肋筋比 0.00% の試験体において圧縮縁を結ぶひび割れの開口に起因するせん断破壊が認められたが、それ以外では曲げひび割れの開口が認められた。その後、DCT-15L および DCT-30L ではせん断ひび割れが開口して破壊に至ったが、DCT-60L および DCT-89L では曲げ圧縮破壊した。せん断スパン比 1.25 の試験体（DCT-00S および DCT-30S）では、いずれも斜張力破壊した。



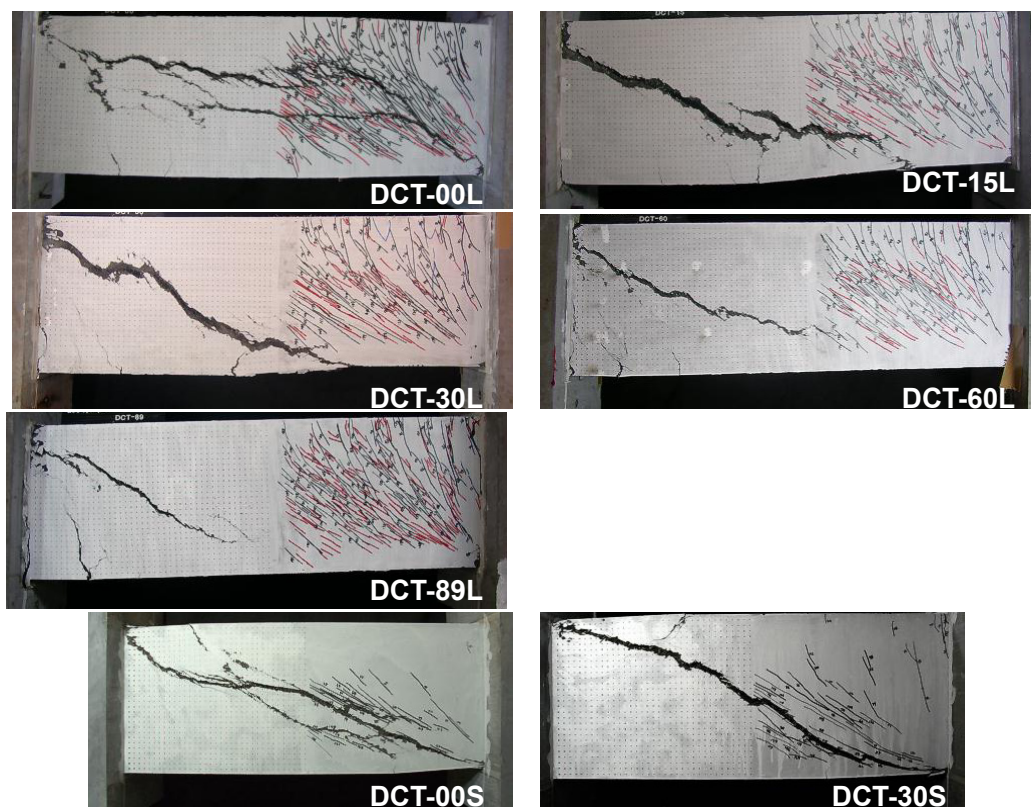
付図 3 最終破壊状況（PVA10）



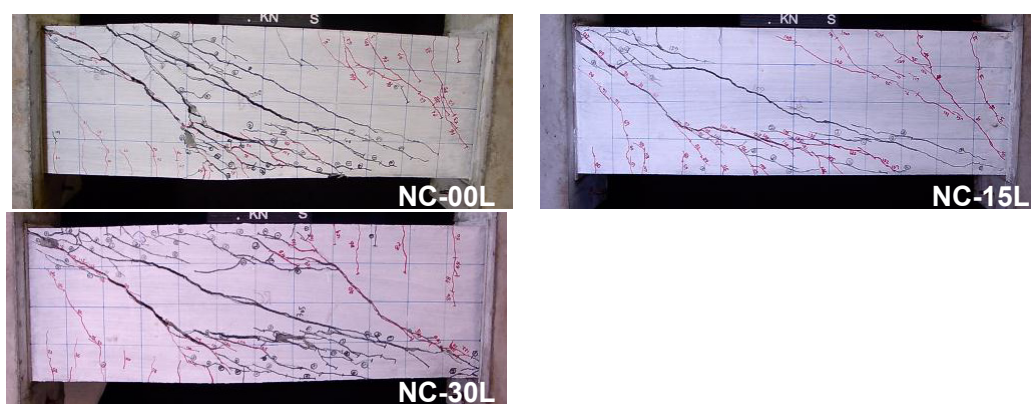
付図 4 最終破壊状況 (PVA15)



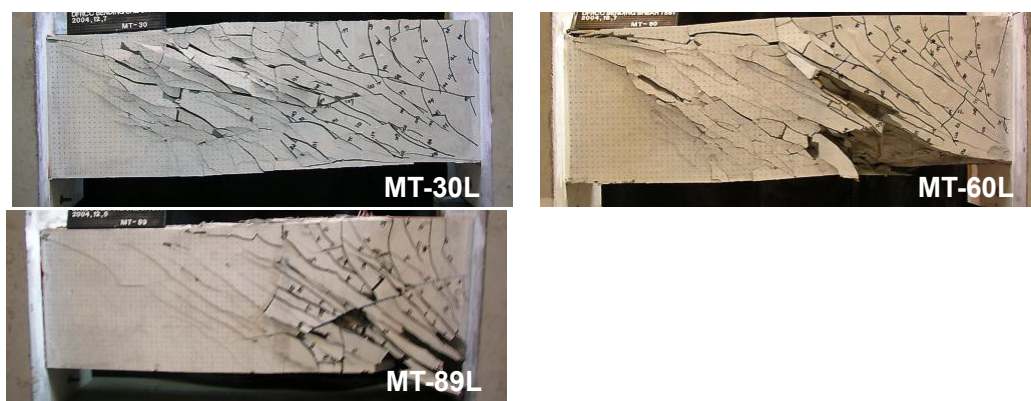
付図 5 最終破壊状況 (PVA20)



付図 6 最終破壊状況 (DCT)



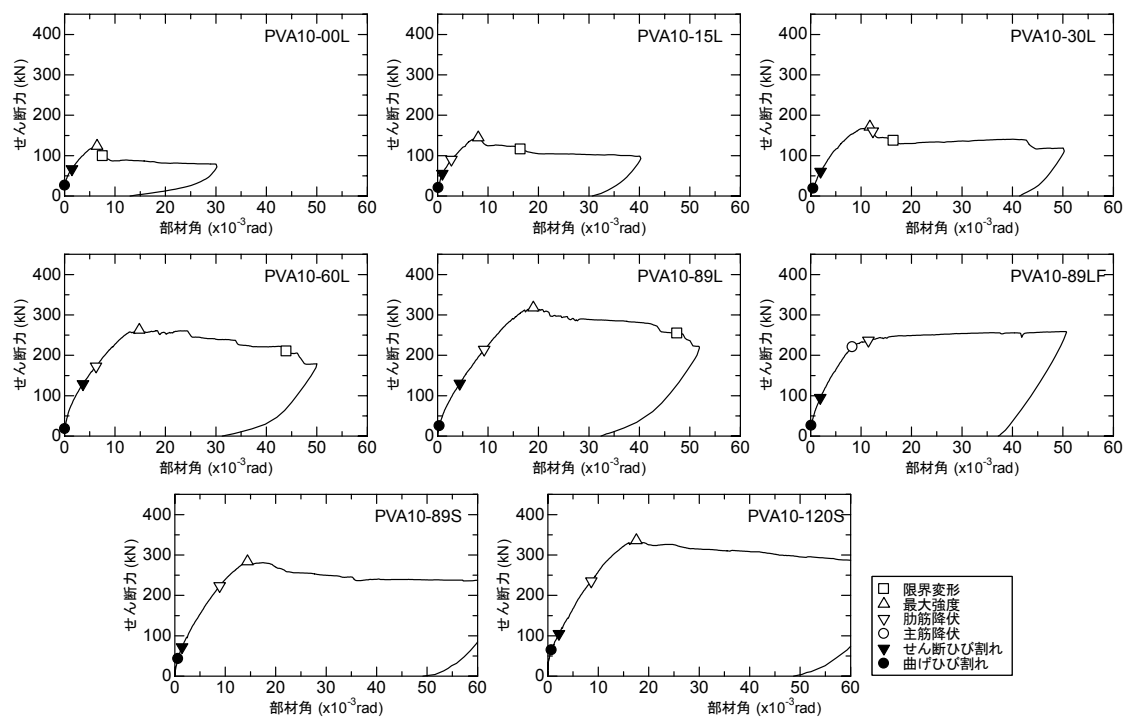
付図 7 最終破壊状況 (NC)



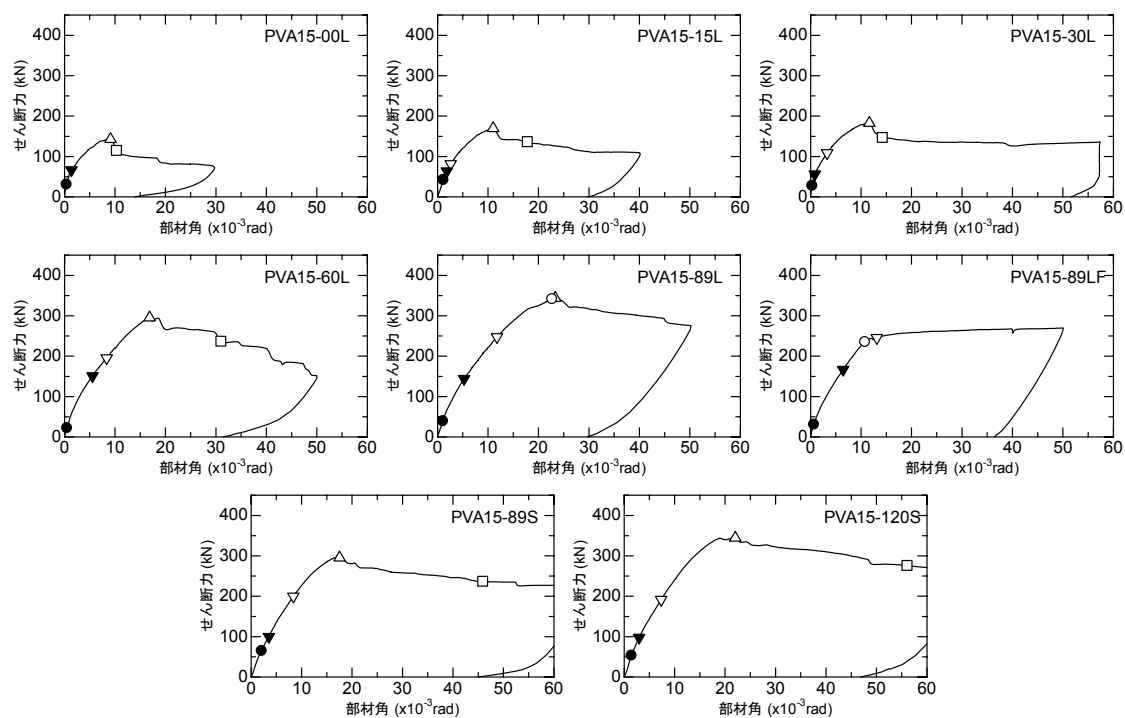
付図 8 最終破壊状況 (MT)

A.4 セン断力一部材角関係

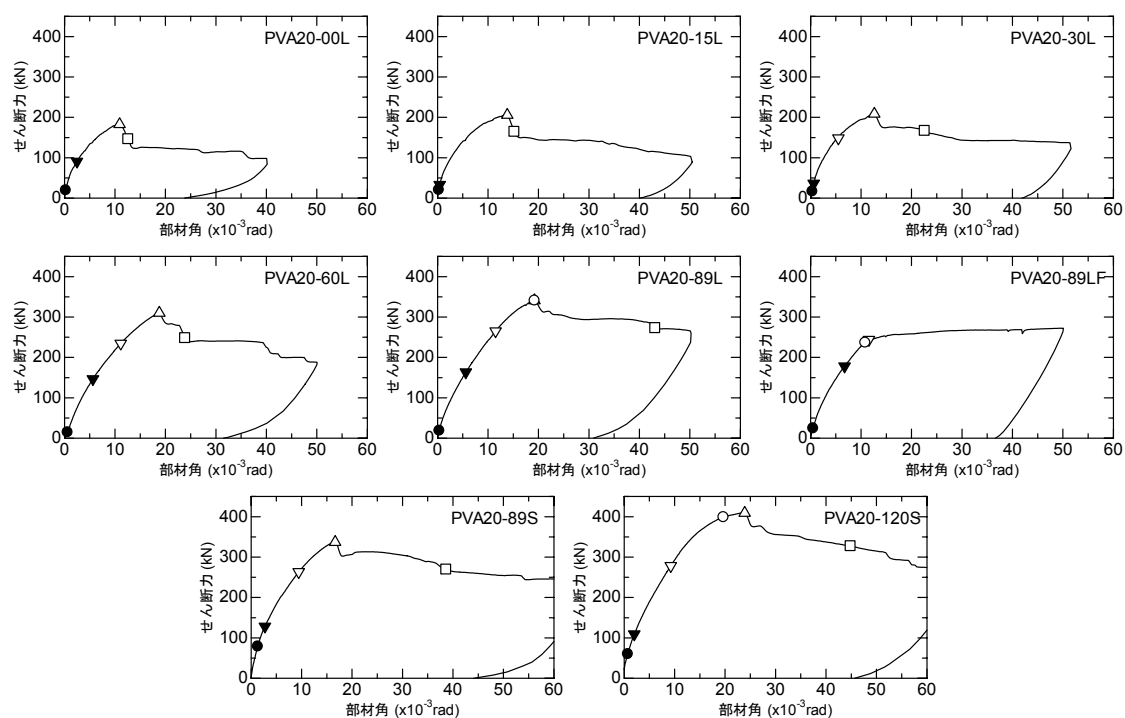
せん断力一部材角関係を付図 9～付図 14 に示す。いずれの試験体も、曲げひび割れ、せん断ひび割れが部材角 $1/200\text{rad}$ までに生じ、その後せん断破壊した試験体では全ての試験体で筋筋の降伏が認められ、急激な荷重低下を引き起こして破壊に至った。曲げ降伏先行型試験体では部材角 $1/20\text{rad}$ においても荷重が増加中であった。NC 試験体および MT 試験体では DFRCC 試験体ほど急激な荷重低下を引き起こしていないが、これは DFRCC 試験体では最大荷重以降にひび割れの局所化が著しいことに起因している。すなわち、DFRCC があるひび割れに変形が局所化すると、そのひび割れ面では DFRCC の繊維の架橋応力は喪失しているが、他のひび割れでは繊維の架橋応力は存在していることによる。



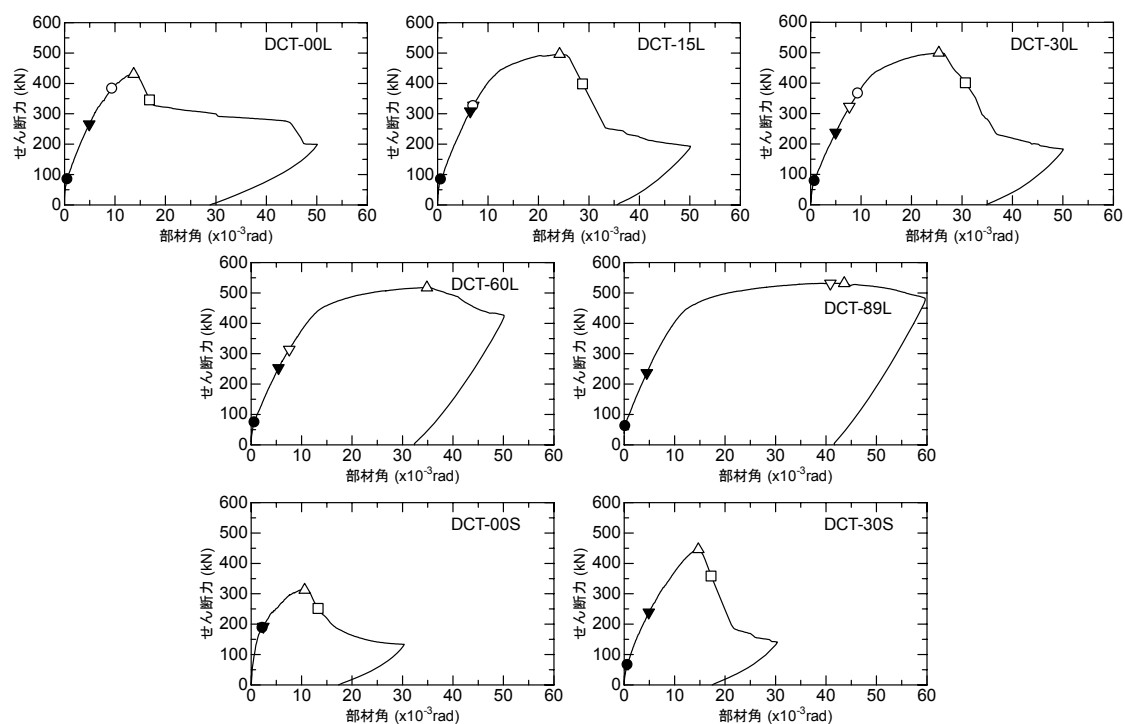
付図 9 セン断力一部材角関係 (PVA10)



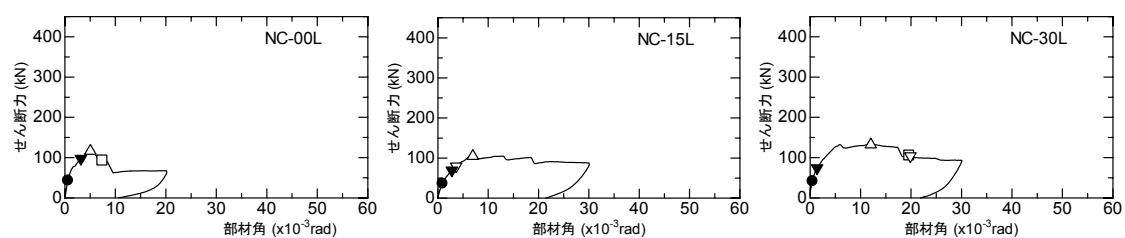
付図 10 せん断力—部材角関係 (PVA15)



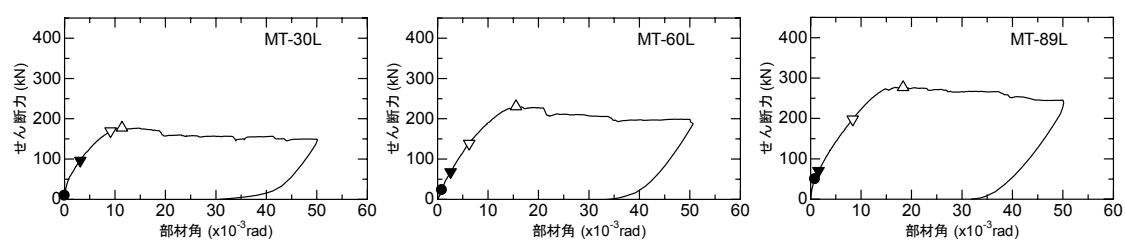
付図 11 せん断力—部材角関係 (PVA20)



付図 12 せん断力—部材角関係 (DCT)



付図 13 せん断力—部材角関係 (NC)



付図 14 せん断力—部材角関係 (MT)

A.5 実験結果一覧

実験結果一覧および耐力計算値との比較を付表 4 に示す。PVA 試験体でせん断強度およびそのときの部材角を同じ肋筋比で比較すると、ほとんどの試験体で繊維混入率の高い試験体の結果が上回っており、繊維混入による部材の耐力および変形能に影響を与えていることが分かる。同表に示した耐力計算値は第 5 章で提案した評価方法により求めたものである。

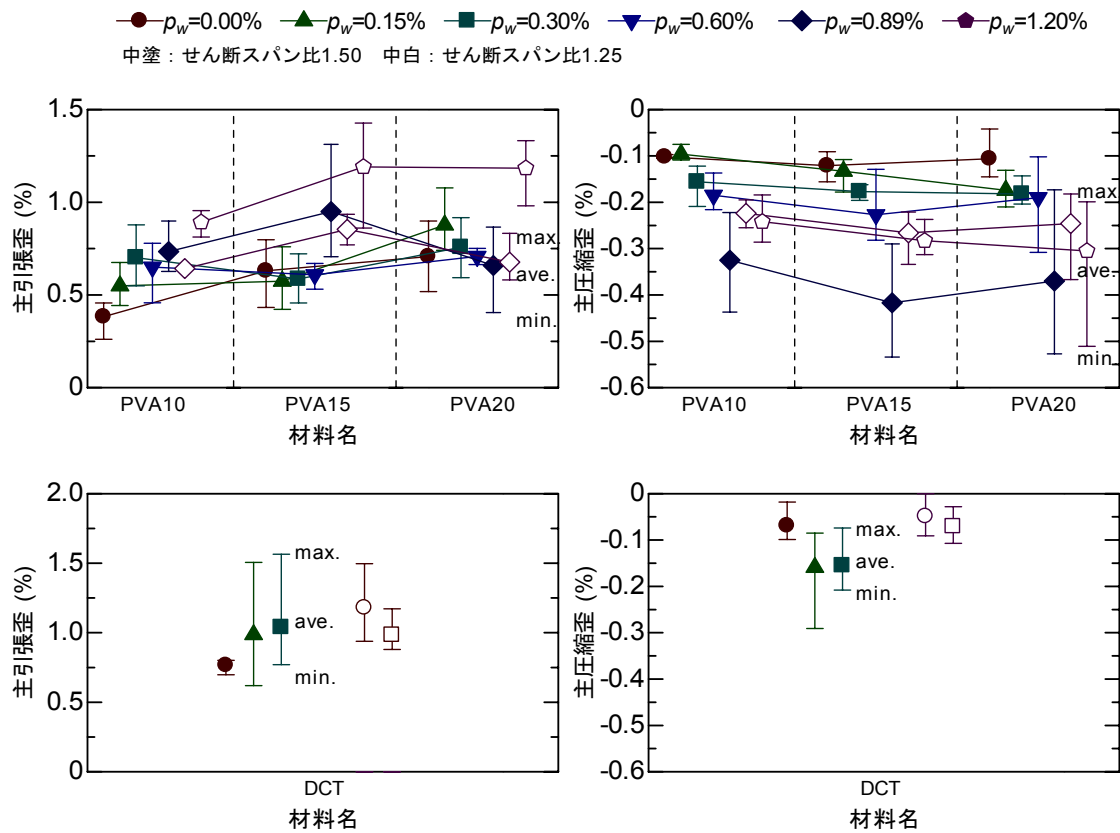
付表 4 実験結果一覧および耐力計算結果

試験体名	最大荷重時		限界変形角 ^{*1} (rad)	破壊形式	曲げ強度 計算値 ^{*2} (kN)	せん断強度 計算値 ^{*3} (kN)	最大荷重 ／ 計算値 ^{*4}
	せん断力 (kN)	部材角 (rad)					
PVA10-00L	124	6.4	7.6	S	352	136	0.91
PVA10-15L	145	13.8	16.4	S		156	0.93
PVA10-30L	172	13.8	16.4	S		177	0.97
PVA10-60L	263	14.8	44.0	S	354	247	1.06
PVA10-89L	318	19.0	47.5	S		292	1.09
PVA10-89LF	(259)	(1/20)	>1/20	F	238	292	1.09
PVA10-89S	283	14.4	>1/15	S	409	322	0.88
PVA10-120S	336	17.5	>1/15	S		345	0.97
PVA15-00L	143	8.7	10.4	S	374	161	0.89
PVA15-15L	170	15.0	17.9	S		182	0.94
PVA15-30L	183	12.0	14.3	S		202	0.91
PVA15-60L	296	16.9	31.1	S	353	269	1.10
PVA15-89L	344	23.3	>1/20	S		314	1.10
PVA15-89LF	(270)	(1/20)	>1/20	F	238	314	1.17
PVA15-89S	296	17.5	46.0	S	407	315	0.94
PVA15-120S	344	22.0	56.1	S		343	1.00
PVA20-00L	183	10.6	12.6	S	388	186	0.98
PVA20-15L	206	12.8	15.2	S		207	1.00
PVA20-30L	209	19.0	22.6	S		227	0.92
PVA20-60L	310	18.8	23.9	S	370	278	1.11
PVA20-89L	341	19.2	43.1	S		323	1.06
PVA20-89LF	(270)	(1/20)	>1/20	S	253	323	1.07
PVA20-89S	337	16.6	38.6	S	448	371	0.91
PVA20-120S	409	23.9	44.9	F-S		398	1.03
DCT-00L	431	13.7	16.9	S	443	376	1.15
DCT-15L	497	24.2	28.8	F-S		397	1.12
DCT-30L	500	25.4	30.8	F-S		419	1.13
DCT-60L	518	34.8	>1/20	F-S		456	1.17
DCT-89L	532	43.6	>1/17	F-S		495	1.20
DCT-00S	313	10.6	13.3	S	540	424	0.74
DCT-30S	446	14.7	17.3	S		471	0.95
NC-00L	116	5.1	7.4	S	341	80.0	1.45
NC-15L	105	6.9	>1/33	S		100	1.05
NC-30L	132	12.0	19.6	S		121	1.09
MT-30L	178	11.4	>1/20	S	351	157	1.13
MT-60L	231	15.5	>1/20	S		200	1.16
MT-89L	277	18.3	>1/20	S		245	1.13

*1: 最大荷重の 80%まで低下したときの変形角 *2: DFRCC の引張構成則を完全弾塑性モデルと仮定した断面解析による値 *3: DFRCC の引張寄与分を累加した AIJ 終局強度型指針式 A 法による値 *4: 曲げ強度計算値とせん断強度計算値の小さい方との比較値

A.6 主歪

付図 1 に示す梁側面に設置した各部変位から各区分 (A～C 区分) における平均主歪を算出した。せん断破壊した試験体の最大荷重時における 3 区分の主歪の平均値、最大値および最小値の比較を付図 15 に示す。PVA 繊維混入率により比較すると、主引張歪では肋筋比が 0.00% および 0.15% の小さい試験体において $PVA10 < PVA15 < PVA20$ の傾向が見られるが、肋筋比が大きい試験体では繊維混入率が大きい場合に主引張歪が大きいとは限らず、必ずしも主引張歪が最大荷重を決定する因子とはならないと考えられる。一方、主圧縮歪で比較すると、繊維混入率が大きいと主圧縮歪が大きい傾向が見られ、また肋筋比の増大により主圧縮歪の増加が顕著に見て取れる。



付図 15 主歪の比較