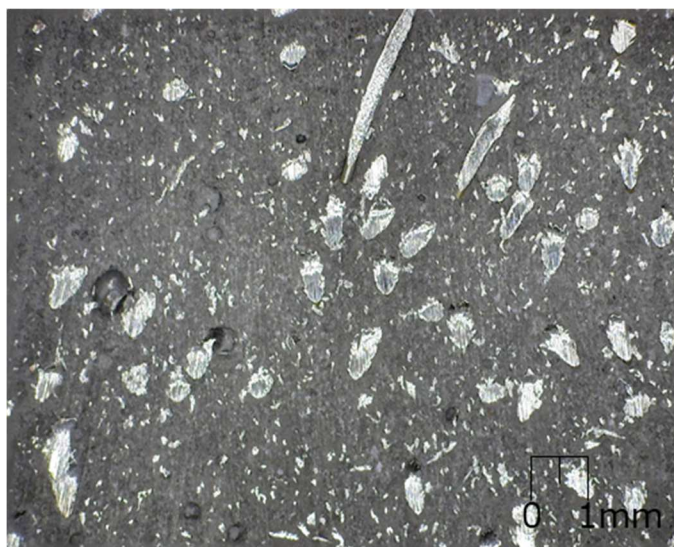


2. 繊維・材料・構造物の研究開発と利用



超緻密高強度繊維補強コンクリート断面。
鋼繊維とスチールウールにより補強されている。

2.1 はじめに

本章では、繊維・材料・構造物の研究開発と利用について述べていく。工業的な繊維による補強の実用化は 1970 年代に始まり、その後様々な高性能繊維と繊維補強セメント系複合材料の研究開発が行われ、今日にまで至っている。まず 2.2 節では、繊維形状の利点について触れ、各種繊維の開発と利用について振り返る。次に 2.3 節において、建設材料としての補強セメント系複合材料において、繊維補強の材料特性への効果、繊維補強セメント系複合材料の種類と特性について述べる。最後に 2.4 節では、構造物への利用についてまとめている。

2.2 繊維の開発と利用

「繊維」という言葉において、「織」とは 10^{-7} を表す数の単位であり、仮にメートルを基準とすると 0.1 マイクロメートルということになる。また、「維」とは、つな、糸すじ、を意味する。これらを合わせて、繊維とは細い糸状の物質のことを意味している。

繊維は、セラミックや金属の無機繊維、高分子材料である有機繊維に分類される (図 2-1)。セラミック繊維では石綿 (アスベスト)、耐アルカリ性ガラス繊維、炭素繊維が、金属繊維では鋼繊維が補強用繊維に用いられる。有機繊維では天然のセルロース繊維もしくは合成繊維が用いられる。合成繊維は種類が多く、主なものとして、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE)、ポリビニルアルコール (PVA)、アラミド繊維がある。

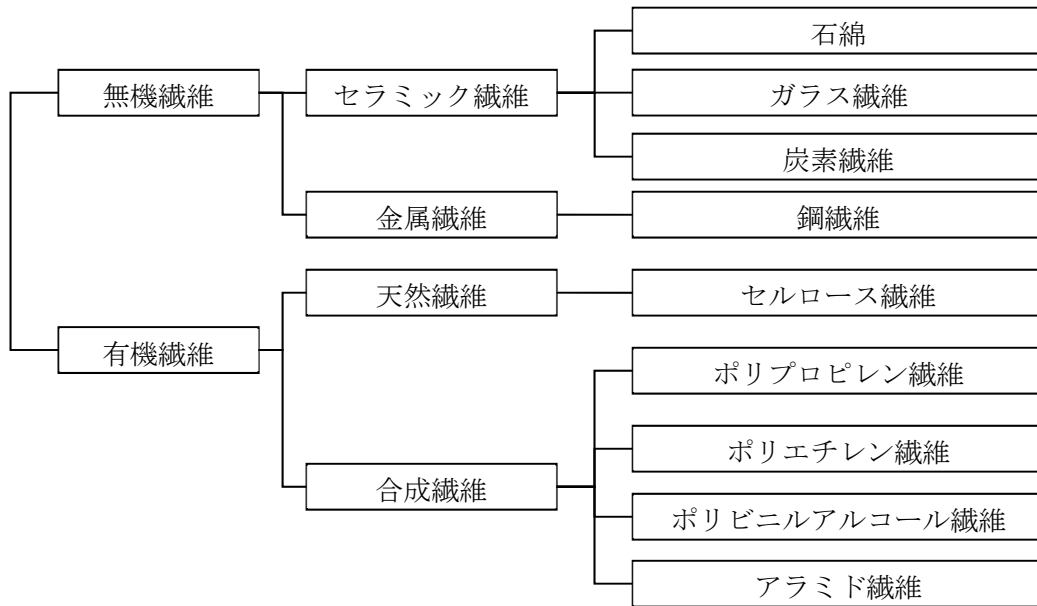


図 2-1 繊維の分類

2.2.1 繊維形状の利点

繊維は何らかの方法により直径より長さが著しく大きい線状の形状に加工して作られる。繊維形状へと加工されることにより繊維軸方向の剛性と強度が大幅に向上し、バルク形状での同種材料の剛性と強度に比較して大きな値が得られる。その理由は主に二つある。

第一に内在欠陥による強度への影響がある。繊維直径が細くなると内在欠陥が取り得る最大寸法も小さくなり、繊維の強度は大きくなるのが破壊力学により説明される。破壊力学の嚆矢である Griffith はガラス繊維の直径と強度の関係を実験的に調べており、直径が小さくなるにつれて強度が大きくなることを示した (図 2-2)¹⁾。非結晶性で脆性的なガラスにおいては、目に見えない微小な亀裂が存在しており、直径が小さくなるにつれてその最大寸法が小さくなると考えられている。

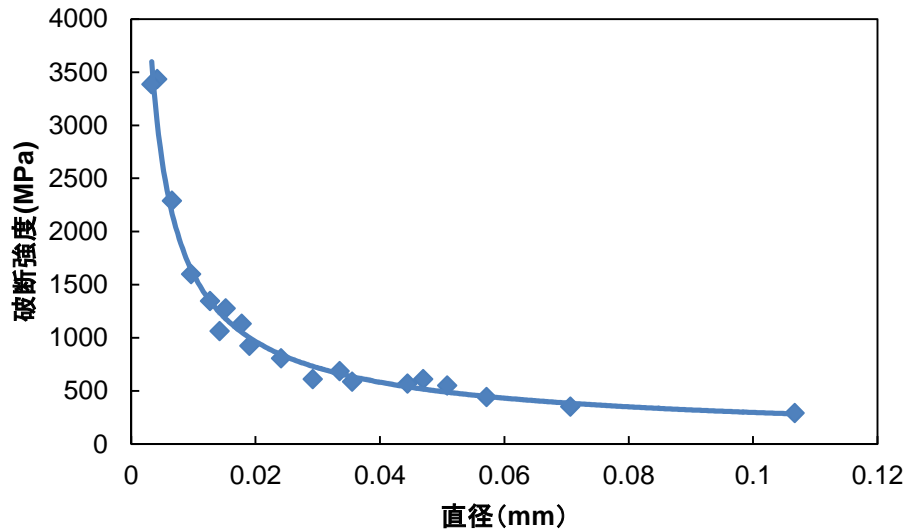


図 2-2 ガラス繊維の直径と破断強度（文献 1）より作成

第二に繊維軸方向に規則的に並んだ結晶構造などの寄与がある。

鋼材においては、圧延後に結晶方向が揃い強度が向上するという性質がある²⁾。線材では伸線加工により強い圧力で均等に絞り込まれるため、強度の高いセメンタイトと延性のあるフェライトの結晶が不規則な状態から伸線方向に向きが揃うことで、フェライト相の幅（ラメラ間隔）が均等に狭まり、強度が飛躍的に高まる（図 2-3）。一方で、薄板のような圧延材の場合は、結晶が圧延方向だけに伸ばされ幅方向は伸ばされないため、方向によって結晶粒径が異なる。SS400（JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材）は引張強度が 400～510MPa であり、一方でピアノ線 SWP-B（JIS G 3522 ピアノ線）は直径 0.08mm で 3190～3480MPa の引張強度となっている。後述するカットワイヤーの鋼繊維は伸線された線材を切断して作られる。例として、普通鋼繊維で約 1000MPa 以上、高張力鋼繊維で 2610MPa 以上の引張強度を示すものがある³⁾。

図 2-3 鋼材の伸線による組織変化²⁾

炭素繊維は結晶構造としてグラファイト（黒鉛）構造をもっており、木炭とその点は変わらない。しかし、炭素繊維では炭素原子が繊維方向に規則正しく並んだ網目構造をもち複数の層が重なり合っ
て絡み合う構造を有しているのに対して、炭ではこの層構造が無定形で規則性が少なく強固な絡
み合いも少ないため強度が小さくなる。炭素原子の繊維軸方向への規則正しい配向が剛性と強度を
生み出している（図 2-4）⁵⁾。また、黒鉛は規則的に大きく発達したグラファイト構造を有し、
天然でも採取される。

図 2-4 炭素化・黒鉛化によるグラファイト構造形成の模式図⁶⁾

ビニール袋に用いられる低密度ポリエチレンは、引張強度 8~31MPa、弾性率 180~280MPa であり、レジ袋に用いられる高密度ポリエチレンは、引張強度 23~31MPa、弾性率 1070~1090MPa である⁷⁾。一方で、高強度ポリエチレン繊維は、引張強度 3.5GPa 以上、弾性率 123GPa 以上と、特性が大きく異なる⁸⁾。

これは、同じポリエチレンであっても高次構造（三次元立体構造）が異なることで、性質が著しく変化することによる。高分子の一次構造から推定されるポリエチレンの理論強度は 32GPa、結晶弾性率は 240GPa とされている²⁹⁾。

有機繊維は、溶液もしくは融液とした高分子をノズルから出し、引き伸ばし固化させて紡糸を行い、固体状態で繊維を引き伸ばす延伸処理により、高分子鎖が引き伸ばされて繊維軸方向に並び結晶構造をとることによって、強度と剛性の高い繊維となる（図 2-5 有機繊維の延伸と結晶構造 図 2-5）。また、分子鎖が剛直であること、結晶内欠陥が少ないことも、強度と剛性の向上要因となる。

図 2-5 有機繊維の延伸と結晶構造⁴⁾

2.2.2 繊維の特徴と利用

繊維を建設材料に練り混ぜることは太古より行われており、古代エジプトでは日干し煉瓦に藁を混ぜて補強したり、日本ではスサを粘土に混ぜて補強したり収縮を防止していた。

コンクリートやモルタルなどのセメント系材料への短繊維の練り混ぜにおいては、1900年にオーストリアのハチェックにより発明された石綿スレートの成功がある。石綿スレートは屋根材として普及し、日本では1904年に導入され関東大震災後に需要が増えた。製造法は湿式であり、セメント、石綿、水などを混ぜてスラリー状にしたものに対して紙を漉くように漉き出して製造した。

石綿は、安価で耐久性、耐熱性、耐薬品性、電気絶縁性などの特性に非常に優れているため、建設資材以外にも広く使用されたが、1970年代に入ると人体や環境への有害性が問題となり、現在では製造・輸入・使用などが禁止されている。

一方、1960年代初めまで石綿以外の繊維によるコンクリート補強の技術は進展しなかった。これはコンクリートの強アルカリに耐えうる繊維が、経済的に得られなかったことによるものと考えられている。石綿の有害性が問題となるにつれて、石綿の代替物が求められるようになった。また、様々な補強繊維が開発され、石綿代替以外への用途も増えていった。

1970年代になって、鋼繊維と耐アルカリ性ガラス繊維がコンクリート補強繊維として実用化された。また、セルロース繊維やポリビニルアルコール繊維も石綿代替として製品に用いられた。さらには、アラミド繊維、高強度ポリエチレン繊維、炭素繊維といった高強度・高弾性率の繊維が開発され、コンクリートの補強繊維として用いられるようになった。これらはいずれも短繊維をコンクリート中に練り込む方式であり、従来の型枠流し込み成型を初めプレス成型、押し出し成型、吹き付け成型、遠心成型など多様な成型方法が用いられている。

繊維に関する特許及び実用新案の出願件数の推移を見ると、全体的に70年代と90年前後にピークを示している。中でもセルロース繊維および合成繊維は90年前後にピークを更新しており、建

材用プレキャスト製品分野で中心的な役割を演じている。最初のピークは超高層ビルや一般住宅の軽量不燃建材の需要に対する研究開発が理由と考えられている。

以上の歴史は特許庁の技術分野別特許マップ⁹⁾を参考に述べた。現在では繊維補強は多岐にわたり様々な部材で用いられている。各種繊維の特徴と合わせて、利用分野を以下にまとめる。

鋼繊維

鉄筋がコンクリートの補強に用いられるように、鋼繊維の利用も自然に考え出されるが、鋼繊維によるコンクリートの補強は1963年と1964年のRomualdiの研究をもって嚆矢とする¹⁰⁾¹¹⁾。わが国で市販されたのは1973年である。製造方法により、カットワイヤー、せん断ファイバー、切削ファイバー、メルトエクストラクションファイバーの4種類に鋼繊維は分類される¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。

カットワイヤーは、圧延・引抜きにより伸線された鋼線を切断することで作られる。寸法が安定しており引張強度も高い。主に機械的な付着の改善を目的に繊維形状の改良がなされてきており、直線形状に加えて、波形、表面を凹凸に加工したインデント形状、端部を折り曲げたフック形のものが開発されてきている。

せん断ファイバーは、冷間圧延された薄鋼板をカッターでせん断することにより製造される。鋼板の厚さは0.2~0.5mmでありカッターの送りも同程度であるため、断面は矩形となり、一般的には正方形のものが多い。湾曲などの変形が起こるので付着強度が高くなる。

切削ファイバーは、ブロック状の鋼板から切粉が繊維状になるように、繊維長と等しい幅のカッターで切削することで作られる。軟鋼を原料とするが、加工硬化により繊維が高強度化する上に、繊維表面に微細な凹凸が残るために付着強度が高くなる。

メルトエクストラクションファイバーは、溶鋼の表面に接するように、外周が繊維長と等しい間隔で切欠きの入ったディスクを回転させて、ディスクの先端で冷却され凝固した繊維状の鋼をディスクに付着させ引き上げることで製造される。炉材用のステンレス鋼繊維がこの方法で作られている。

鋼繊維補強は、法面吹付、トンネル吹付・覆工、橋梁床版、舗装、建築土間などに使われている。鋼繊維で補強されたセメント系材料は、表面に露出する鋼繊維が存在するために点錆や錆汁が生じることがある。仕上げの美観が重要な場合には注意が必要である。

ガラス繊維

ガラス繊維は、他の繊維と比較して高強度性を有し、加えて、寸法安定性、低伸度、不燃性を有する繊維である。また、その比重は2.46~2.78であり、コンクリート(2.350)やセメントモルタル(2.150)に近い¹⁶⁾。ガラス繊維による補強は1950年代よりEガラスにより試みられたが、セメントの強アルカリによる浸食で短期の強度低下を起し、補強効果が得られなかった。1960年代にイギリスにおいて耐アルカリ性ガラス繊維が開発された。耐アルカリ性はジルコニア含有量が高いほど向上し、耐アルカリ性ガラス繊維はジルコニアを十数%含有している¹⁶⁾。ジルコニア系の他にも耐アルカリ性を有するアルミナ系などの組成のガラス繊維が開発されている¹⁸⁾。GRC(Glass Fiber Reinforced Cement, ガラス繊維強化セメント)は軽量・強靱な不燃材として、主に建築物の外壁、外装、天井、内壁などに用いられている¹⁹⁾。1973年イギリスよりGRCの製造技術が日本に導入され、改良が重ねられて現在に至っている。

セルロース繊維

セルロースは、リグニンおよびヘミセルロースと共に植物細胞の細胞壁を成す主成分である。植物繊維を製紙に用いるために処理したものがパルプである。原料の違いから木材パルプと非木材パルプがあり、製法から機械パルプと化学パルプがあるが、その主成分はセルロースである。パルプは世界で豊富に生産されている原材料であり主に製紙に使われているが、セメント系材料には石綿代替の補強材料として屋根や壁などの建材用途に大量に使われている²⁰⁾。また、木材を糸状もしくは薄片状に削り出しセメントと固めた、木質系セメント板（木毛セメント板もしくは木片セメント板）も建材として大量に製造されている²¹⁾。セルロースは表面に水酸基を多数有するために親水性であるため、セメント系材料との付着性は良好である。

ポリビニルアルコール繊維

ポリビニルアルコール繊維は合成繊維で唯一親水性であり、セメント系材料との付着強度が高い。1939年に京都大学の桜田一郎により、ナイロンに続いて世界で2番目に作られた合成繊維である。工業生産は1950年から行われた。高強度、低伸度、親水性、耐候性（耐紫外線性）、耐酸性、耐アルカリ性という特徴がある。石綿代替繊維としての地位に加えて、トンネル覆工、法面保護、剥落対策、高層建築のカーテンウォールなどにモルタル・コンクリート補強用として用いられている。近年では、引張荷重下において複数微細ひび割れを形成することでひずみ硬化挙動を示す ECC（Engineered Cementitious Composite）にも用いられている²²⁾²³⁾。

アラミド繊維

アラミド繊維とは芳香族ポリアミド繊維のことであり、1970年代初期にデュポンにより量産化された。脂肪族骨格を含むポリアミドをナイロンと呼び、芳香族骨格のみで構成されるポリアミドはアラミドと呼ばれる。アラミド繊維は分子骨格が直線状のパラ系とジグザグ状のメタ系がある。パラ系は強度と弾性率が高く、メタ系は耐熱性に優れる。パラ系が補強用として用いられており、一般的に、弾性率、強度、耐薬品性、耐摩耗性、耐疲労性、寸法安定性、耐衝撃性、耐熱性に優れている。繊維シートによる構造物の補修・補強に広く用いられており²⁴⁾、短繊維によるセメント系材料の補強では、超高強度繊維補強コンクリート（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, UFC）²⁵⁾²⁶⁾や高強度コンクリート²⁷⁾における研究開発や、空港舗装下のグラウト材²⁸⁾の開発などの例がある。

高強度ポリエチレン繊維

高強度ポリエチレン繊維²⁹⁾は、超高分子量（100～400万程度）ポリエチレンをゲル紡糸法で紡糸し、冷却固化後に高倍率で延伸することで結晶化を促進させて製造される。伸び切り鎖構造を有しているため、配向性と結晶度が高く、引張強度と引張弾性率が高い。加えて、耐摩耗性、耐疲労性、耐衝撃性、に優れることが特長であり、耐薬品性（常温であれば強酸・強アルカリにも耐える）、耐水性、耐光性にも高い性能を有する。融点は約150℃であり、加工や使用には高温を避ける必要がある。また、クリープに対する注意も必要である。セメント系材料に対しては、疎水性であるため付着が弱い。1989年に日本に最初の商業プラントが建設され工業生産が開始された。近年では、超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料（Ultra High Performance – Strain Hardening

Cementitious Composite, UHP-SHCC) に用いられており、超高強度、超高靱性で、緻密な複合材料が開発されている³⁰⁾。

ポリプロピレン繊維

ポリプロピレン繊維は疎水性でありセメント系材料への付着強度が低い。このために、表面処理剤による親水性付与が行われ、波形形状、凹凸状の表面、螺旋状の表面突起、幹枝状、不規則な断面形状などにより機械的な付着向上が図られている^{9) 31) 32) 33)}。ポリプロピレン繊維は比重が 0.91 と小さく、水に浮かび、吸湿・吸水性がない。親水性付与により練り混ぜ中の浮き上がり防止や捕水性向上が行われ、分散性に優れ流動性への影響が少ない。融点は 160～170℃と耐熱性は低く、紫外線の影響を受けやすいが、酸・アルカリに強い耐薬品性を有する。1954 年にジュリオ・ナッタ (1963 年ノーベル化学賞受賞) が合成に成功し、1957 年イタリアのモンテカチーニ社 (後のモンテジソン社) が商業生産を開始した。1962 年に製造技術が導入され生産が開始された。主な用途は、体積混入率で 0.05～0.3%の混入による、収縮ひび割れ抑制、曲げ靱性向上によるトンネル二次覆工や高架橋コンクリートの剥離・剥落防止などがある。また、高強度コンクリートの火災時の高温加熱による爆裂を防止するために、ポリプロピレン繊維を 0.05～0.3%混入することが有効であり、建築構造物やトンネル構造物で実用化されている^{34) 35)}。これはポリプロピレン繊維が高温下で融解することでコンクリート中に管状の空隙が形成されて、その空隙が爆裂の原因とされる水蒸気圧や熱応力を緩和することによると考えられている。

近年では、新しい延伸プロセスにより高度に結晶配向させた高強度ポリプロピレン繊維が開発されており、強度が約 2 倍に向上している³⁶⁾。

炭素繊維

炭素繊維にはアクリル繊維を原料とする PAN (ポリアクリロニトリル) 系と石油ピッチや石炭タールを原料とするピッチ系が主としてある。PAN 系は 1961 年に大阪工業技術試験所の進藤昭男により発明され、ピッチ系は 1963 年に群馬大学の太谷杉郎によって発明された。炭素繊維は、強度と剛性が高く、化学的に安定である (腐食しない) という特徴があり、寸法安定性と耐熱性にも優れる。両者を比較すると、PAN 系は高強度・高弾性であり、ピッチ系は低弾性・低コストのものと高弾性のものが得られるという特徴がある。一方で、セメント系材料との付着強度は小さく、破断伸びが小さい。炭素繊維補強セメント系材料は、軽量で強度と靱性の向上が得られ、耐熱・耐火性を備える。また、炭素繊維が導電性であるため電磁遮蔽性を有することも利用される。主として、高層建築のカーテンウォールに使われてきた^{37) 38) 39) 40)}。一方で、繊維シートとしても、構造物の補修・補強に広く用いられている⁴¹⁾。

その他の繊維

以上の代表的な繊維に加えて、ナイロン繊維、アクリル繊維、バサルト繊維なども補強用繊維として用いられている。

2.2.3 繊維の特性値

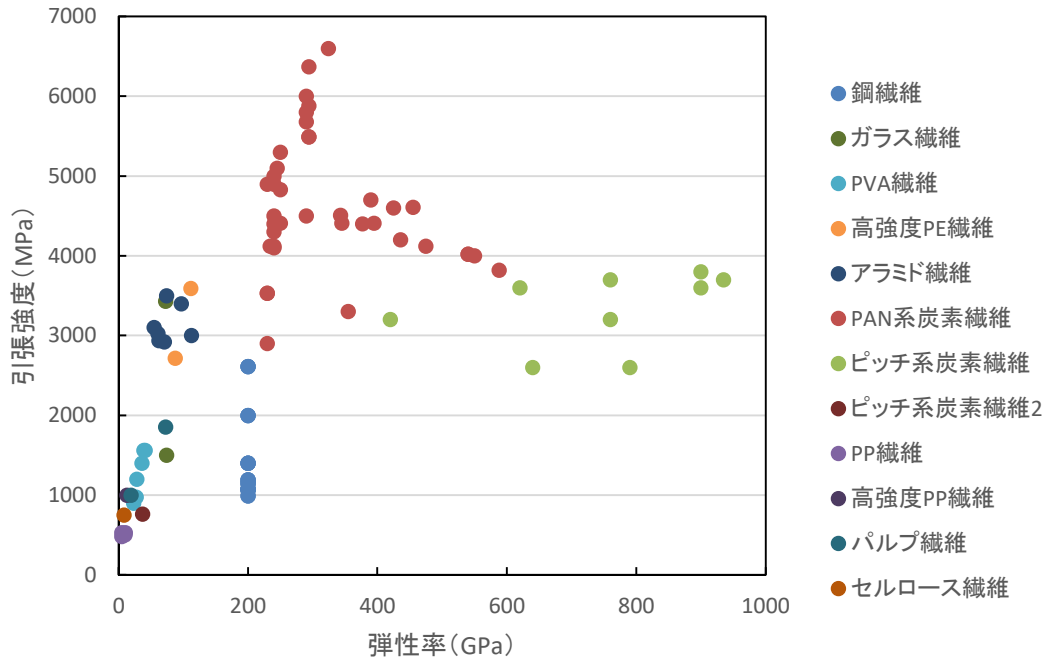
表 2-1 には上記で説明した代表的な補強用繊維の特性と寸法をまとめた。また、図 2-6 には上記で説明した各種繊維の引張強度と弾性率を図示している。これらの値は公表資料に基づいたものであり、必ずしも同一の測定条件で得られたものではないことに留意されたい。また、セメント系材料以外に使われる繊維も含まれるとともに、研究段階の繊維も含まれているため、特性分布の概要を示すものであることに注意してほしい。

図 2-6 の中で最高の引張強度と弾性率を示しているのはそれぞれ PAN 系とピッチ系の炭素繊維である。炭素繊維は力学的性能により分類がされており、低弾性率 (LM)、標準弾性率 (HT)、中弾性率 (IM)、高弾性率 (HM)、超高弾性率 (UHM) と特性範囲が広く分布する (図 2-7)。鋼繊維は弾性率が一定で、引張強度の値に様々なものがある。図中の有機繊維はいずれも引張強度 500MPa 以上の高強度なものを示しているが、なかでも強度が高いのは高強度ポリエチレン繊維とアラミド繊維である。有機繊維の引張強度と弾性率の関係は全体として概ね直線状に分布しており、鋼繊維と同等の引張強度を持つものから、これを上回り炭素繊維の引張強度に届くものまで多くの種類の有機繊維が開発されている。

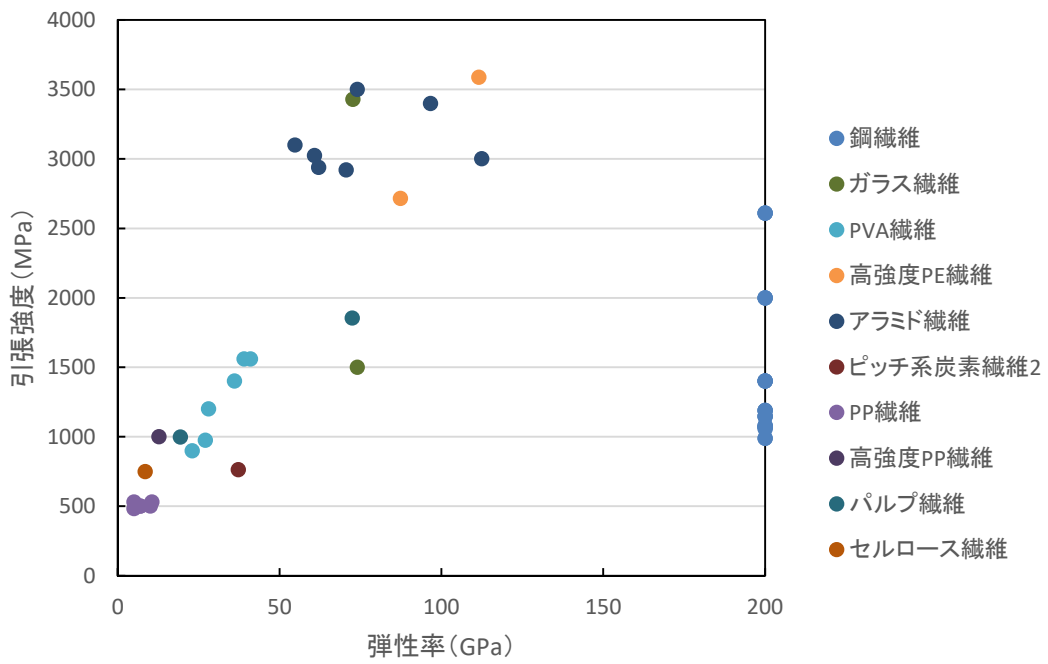
表 2-1 代表的な補強用繊維の特性と寸法

繊維種類	ヤング率 (GPa)	引張強度 (MPa)	伸度 (%)	比重	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)
鋼繊維	(210)	990~1145		(7.85)	550~ 900	30~60
鋼繊維	(210)	2610		(7.85)	380~ 500	30~40
鋼繊維	(210)	2000		(7.85)	160~ 200	6~13
耐アルカリガラス繊維	74	1500	2	2.8		
セルロース繊維	8.5	600~900		1.1	14~17	1.9~ 2.3
ポリビニルアルコール繊維	23~27	900~975	9.0	1.3	200~ 660	18~30
ポリビニルアルコール繊維	28~45	1200~ 1800	5.8~ 12.5	1.3	27~100	6~12
アラミド繊維	55~112	2920~ 3500	2.4~4.6	1.39~ 1.45		
高強度ポリエチレン繊維	79~123	2600~ 3500	3~5	0.97		
ポリプロピレン繊維	5~11	482~530		0.91	43~700	12~48
炭素繊維(ピッチ系)	420~ 935	2600~ 3800	0.3~0.8	2.06~2.2		
炭素繊維(PAN系)	230~ 588	2900~ 6600	0.7~2.2	1.73~2.7		

() 内は著者が一般的な値を記入



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 2-6 各種繊維の引張強度と弾性率

図 2-7 炭素繊維の分類⁴²⁾

繊維自体の特性とともに、界面の付着特性も繊維補強複合材料には重要である。繊維と母材であるセメント系材料との付着の性質は繊維が親水性か疎水性であるかで異なり、化学的付着か摩擦的付着かのいずれかが支配的となる。そして、繊維の強度によって、繊維破断か繊維抜け出しのいずれかが支配的になる。また、鋼繊維については、フック、インデント、波形などの加工が施され、機械的な付着が得られるように製造されている繊維もある。こうした繊維と母材との間の界面については、支配的な現象に基づいたモデルが提案されており、後の 4 章で紹介する。

2.3 建設材料としての研究開発

複合材料は、補強材の形態に応じて、繊維補強複合材料、積層複合材料、粒子補強複合材料がある。以下ではまず複合材料の分類について説明する。本書で取り上げるのは、繊維を補強材として母材であるセメント系基質材料と複合化した繊維補強セメント系複合材料である。繊維補強セメント系複合材料は、比較的短い短繊維がセメント系基質材料を補強している。繊維補強による材料特性の向上が、どのような面でどういった機構で得られるのかについて次に述べる。そして、これまでに開発されてきて、現在主に使われている繊維補強セメント系複合材料の種類と材料特性について最後にまとめる。

2.3.1 複合材料の分類

複合材料の分類

一般に、複合材料は、繊維補強複合材料 (Fiber reinforced composite)、積層複合材料 (Lamellar composite)、粒状体補強複合材料 (Particulate reinforced composite) の 3 種類に分類される。

繊維補強複合材料は基質材料である母材を繊維で補強した複合材料であり、その説明とより詳細な分類は以下に述べる。

積層複合材料は層を積み重ねることで作られる複合材料であり、層に異方性があるものもないものがある。

前者の層に異方性のあるものでは、繊維による方向性がある層を揃えて積層するものとずらして積層するものがある。例えば、木質材料である単板積層板（Laminated Veneer Lumber, LVL）は薄く切った単板（厚さ数ミリ以下）の繊維方向を揃えて積層して接着した材料である。同様に集成材（Laminated wood）も木材を積層して作られるが、その層の厚さは1cm以上である。これらは長い棒状として梁や柱の軸材として利用される。一方で、合板（Plywood）は薄く切った単板の繊維方向を90度ずつずらしながら積層し熱圧接着した材料であり、板状に作られる。配向性ストランドボード（Oriented Strand Board, OSB）は木材を薄い削片状にしてから熱硬化性接着剤とともに積層して熱圧接着した板である。積層は削片の異方性を利用するように、90度ずらして直交するように行われている。OSBはより小さな木片を用いるため木材の利用度が高く、より広い木種を使うことができる。OSL（Oriented Strand Lumber）は同様に作られる軸材である。

また、繊維強化ポリマー（Fiber Reinforced Polymer, FRP）も繊維により方向性のある層を積層して作られ、その積層構成（繊維方向、積層順序、積層数）により材料特性は大きく異なる。

後者の層に異方性がないものでは、一般に曲げ材として使われる場合には、負荷の高い外殻に剛性と強度が高い材料を用い、内核には剛性と強度が適度で軽いものが用いられる。材料というよりは構造になるが、スキー板はその例になる。

粒状体補強複合材料は、基質材料に対して剛性と強度が比較的高い粒状体で補強した複合材料であり、コンクリートはその好例である。コンクリートにおいては、高強度で高剛性な骨材が補強手段として母材であるセメントを補強している複合材料と見ることが出来る。図2-8は、セメントと骨材、コンクリートの剛性の関係を示したものである⁴³⁾。複合材料の剛性は次式によりよく算定される場合が多い。

$$E_{\text{concrete}} = \left\{ \frac{V_a}{E_a} + \frac{V_p}{E_p} \right\}^{-1} \quad (1-1)$$

ここに、 V_a と V_p はそれぞれ骨材とセメントの体積含有率であり、 E_a と E_p は剛性である。図中のコンクリートの剛性はこの式によりよく表されている。

一般に、粒状体の混入による補強は、剛性や耐磨耗性に向上が見られ、強度や靱性については若干の向上が見られる。コンクリートをセメントと比較した場合には、剛性、耐磨耗性、収縮に対する寸法安定性、圧縮側の強度と靱性について向上が見られ、引張側の強度と靱性については若干の向上が見られる。これは、引張側の特性が、コンクリート内部に存在する空隙や初期欠陥より生じるひび割れの進展と破壊に支配され、粒状体による補強では効果が薄いためである。一方で、繊維補強セメント系複合材料においては、繊維による補強がひび割れを架橋することで応力を伝達し、ひび割れの進展と破壊に対する抵抗性を高め、引張側の特性を大きく高める効果がある。

図 2-8 セメント，骨材，コンクリートの剛性の関係⁴³⁾**繊維補強複合材料の分類**

繊維補強複合材料は補強材として繊維を用いた複合材料であり，補強繊維の連続／不連続（もしくは長／短）と繊維配向の整列／ランダムによって表 2-2 のように 4 種類に分類される．一般的に，連続繊維の複合材料は不連続繊維より強度が高いが，製造には手間がかかり，複雑な形状に対しては不連続繊維の方が製造は容易である．配向については，整列した方向については強く剛性も高くなるが，直角方向については弱く剛性も低い．また，圧縮に対しては座屈を考慮する必要がある．ランダム配向であれば等方的になることが期待できるが，整列配向に比べて繊維補強の効率は低くなる．主に使われている組み合わせは，整列配向の連続繊維かランダム配向の不連続繊維による補強である．

連続繊維を整列配向して補強材としたものには FRP があり，配向を一方向として作成される場合，縦と横の二方向で織物とする場合，一方向に整列配向した連続繊維シートを複数用いて，角度を変えながら積層することで作成される場合などがある．また，50mm 程度の切断繊維を分散して成形したシートを補強材とする FRP や，数 mm に切断した繊維を補強材として使う FRTP (Fiber Reinforced Thermo Plastic, 繊維補強熱可塑性プラスチック) もあり，これらは不連続繊維をランダム配向の補強材としていることになる．

繊維補強セメント系複合材料においては，短繊維は母材練り混ぜ時に混入されるため，繊維の位置・配向ともランダムに分散し，硬化後の材料特性は等方的となることが期待できる．長繊維による一方向補強と比較して，繊維補強の効率は落ちるが，構造物において多方向からの負荷に対応できるという利点がある．

表 2-2 繊維補強複合材料の分類

	整列 (Aligned)	ランダム (Random)
連続繊維 (長繊維) (Continuous)	FRP (Continuous Aligned)	(Continuous Random)
不連続繊維 (短繊維) (Discontinuous)	(Discontinuous Aligned)	FRCC, FRP (Discontinuous Random)

2.3.2 繊維補強による材料特性の向上

繊維と母材と界面

繊維補強セメント系複合材料は、繊維により、セメント、モルタル、コンクリートのセメント系の母材を補強した材料である。繊維は、数 mm から数十 mm の長さの短繊維が用いられることが多く、体積混入量にして数%の量を、母材練り混ぜ時に混入することにより製造され、型枠に打設される。繊維寸法や体積含有量などは、性能、コスト、ワーカビリティなどを考慮して決められる。必要な性能以上に繊維を混入することはコストとワーカビリティの悪化を招き、ワーカビリティの悪化とともに材料内に空隙などの初期欠陥形成や繊維の不均一な分散などを招くため、所要の性能を発揮する必要十分な混入量が求められる。短繊維は母材練り混ぜ時に混入されるため、理想的には繊維の位置・配向ともランダムに分散し、硬化後の材料特性は等方的となることが期待できる。

繊維と母材は異なる材料であり、繊維と母材の間を界面と呼ぶ（図 2-9）。界面は、二材料間の厚みのない面というよりは、界面遷移領域と呼ばれ、母材の一部であるものの一般的な部分と比較して異なる組成を示す領域を指している。繊維材料が親水的であるか疎水的であるかにより界面での結合強度は大きく異なる。また、結合が切れて繊維が引き抜かれる際には、界面が損傷変形したり、逆に繊維表面が損傷したりする。界面特性は繊維がひび割れ間で伝達する応力挙動において重要であり、つまり 4 章で述べるひび割れ架橋応力-開口幅関係（架橋則）に大きな影響を及ぼす。界面特性を変化させる方法には様々な方法があり、複合材料開発における一つの重要な要素である。

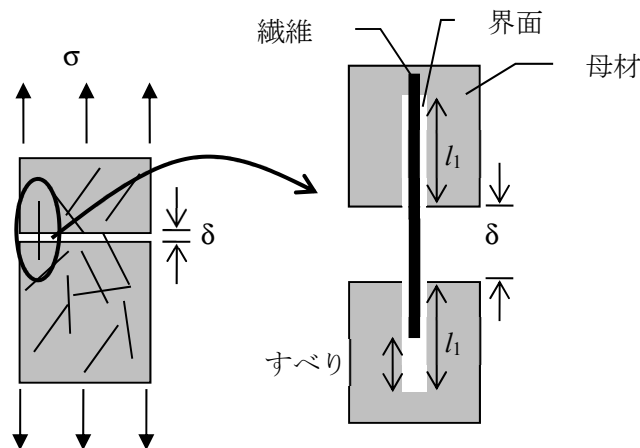


図 2-9 繊維，母材，界面

各荷重下の材料特性向上

繊維補強によるセメント系母材の複合化では、剛性、強度、ひずみ、靱性、破壊エネルギーなどの材料特性の向上が得られる。

材料剛性については、母材よりも材料剛性の高い繊維で複合化することで改善され得る。しかし、繊維強化ポリマー（FRP）のように繊維体積混入率が数十%となる場合と異なり、繊維補強セメント系複合材料では多くの場合において繊維の体積混入率が 10%を超えることはないため、材料剛性

の変化は大きくない。

セメント系母材を繊維補強することで得られる利点は、強度、ひずみ、靱性、破壊エネルギーが大きく改善されることにあり、特に曲げや引張の荷重下において顕著に改善される。

アナロジーとして図 2-10 を示す。2 冊の電話帳を向かい合わせにして 1 頁ずつ重ねて、引っ張って遊んだことがあると思う。これを引っ張ることで元の 2 冊に分けることは相当な力が必要であり、まず成功することはない。これは挟まれたそれぞれの頁に摩擦力が働き、その頁数が多いことで、大きな外力に抵抗できることを示している。繊維補強も同様に考えることができる。埋め込まれた多数の繊維は母材より摩擦力を受けることで大きな外力に抵抗している。これにより強度が向上し、摩擦下で繊維が引き抜かれる過程で、ひずみ、靱性、破壊エネルギーが大きく向上する。

以下では、繊維補強により各荷重下での材料特性の向上がどのように見られるかをまとめる。

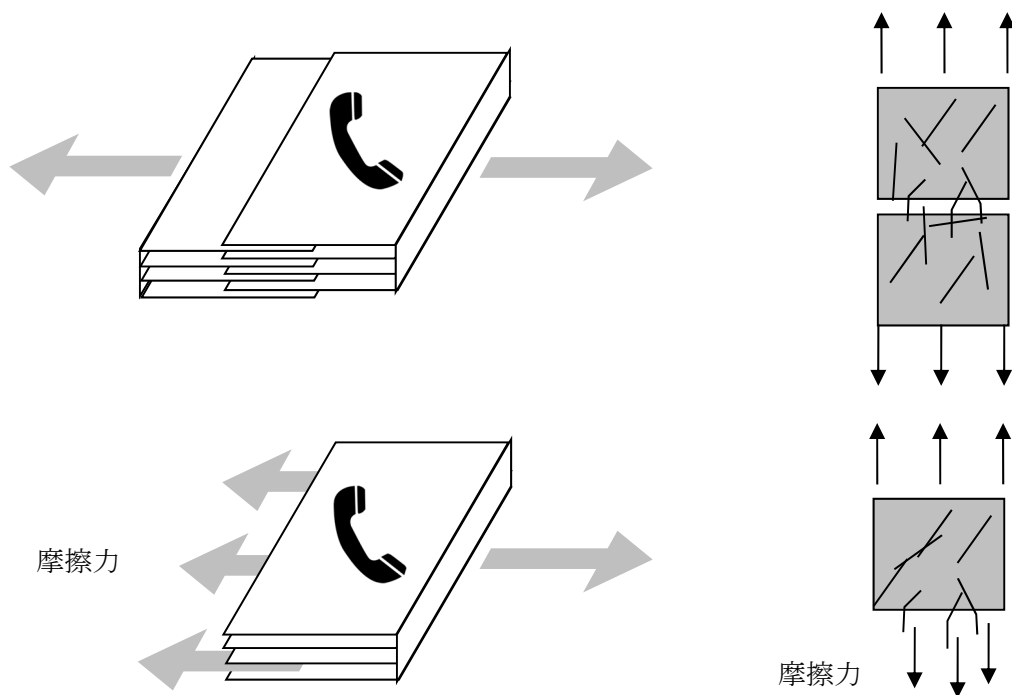


図 2-10 重ねた電話帳と繊維補強複合材料のアナロジー

引張荷重下における引張応力-ひずみ関係と引張応力-開口幅関係を図 2-11 に示す。基質材料であるセメント系材料が引張強度に達することで初期ひび割れが発生した後に、ひび割れを架橋する繊維が応力伝達を始める。伝達応力は最初上昇するが、ひび割れの開口とともに架橋繊維の抜け出しもしくは破断により伝達応力を減少させ、最終的には伝達応力は消失する。この間の架橋応力-開口幅関係は、母材、繊維、界面の組み合わせにより定まり、架橋則と呼ばれる。繊維が伝達できる最大架橋応力は、繊維の混入量、繊維のアスペクト比、繊維の破断強度、界面の摩擦付着強度、繊維の配向分布等の影響を受ける。架橋則については 4 章にて詳述する。図 2-11 に示す通り、繊維補強があることで材料剛性は大きく変わらないものの、引張強度と破壊エネルギーは大きく向上し、引張応力が消失する開口幅もしくはひずみ値も向上する。

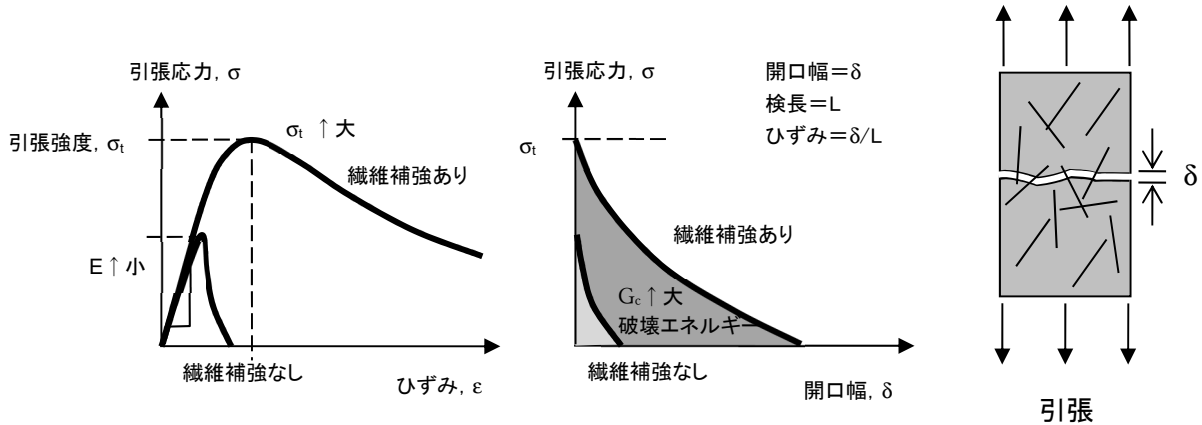


図 2-11 引張応力-ひずみ関係と引張応力-開口幅関係

図 2-12 に FRC (繊維補強コンクリート) と HPCRCC (複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料) における引張応力-ひずみ関係の模式図を示す。

FRC は、繊維混入量が十分であるなど、繊維補強が十分である場合には、初期ひび割れ強度を上回る応力上昇が得られ、引張強度 σ_t は最大架橋応力により決まる。一方、繊維補強が不十分である場合には、最大架橋応力は初期ひび割れ強度を上回らず、引張強度の向上は得られない。また、破壊エネルギー G_c は、ひび割れ面を伝達応力が消失するまで引き離すためになされる仕事であり、架橋応力-開口幅曲線の下面積と等しい。よって繊維補強のない基質材料のみの場合と比較して、大幅な向上が得られる。

FRC においては、強度や破壊エネルギーの向上が得られるものの、局所的に 1 本のひび割れが開口するので、図 2-11 と図 2-12 に示されているひずみは一樣な変形によるものではない。局所的なひび割れ開口に伴い、引張応力は下降するひずみ軟化挙動を示す。これを準脆性挙動と呼び、コンクリートでも小さい開口幅までだけが見られる。

これに対して、HPCRCC は、引張荷重下において局所的なひび割れではなく複数のひび割れを形成する。複数ひび割れにより一樣な変形を生じる間、応力も漸増するひずみ硬化挙動を示すことで、引張終局ひずみは数%に達して大きな延性挙動を示す。破壊エネルギーも複数のひび割れにおいて仕事を要するために、FRC の約 10 倍の値を示す。また、複数ひび割れは微細な開口幅で形成され、引張強度時まで開口幅が大きく変わらないという特徴も有しており、微細なひび割れは有害物質の浸透を低減させるため耐久性の面からも利点となる。

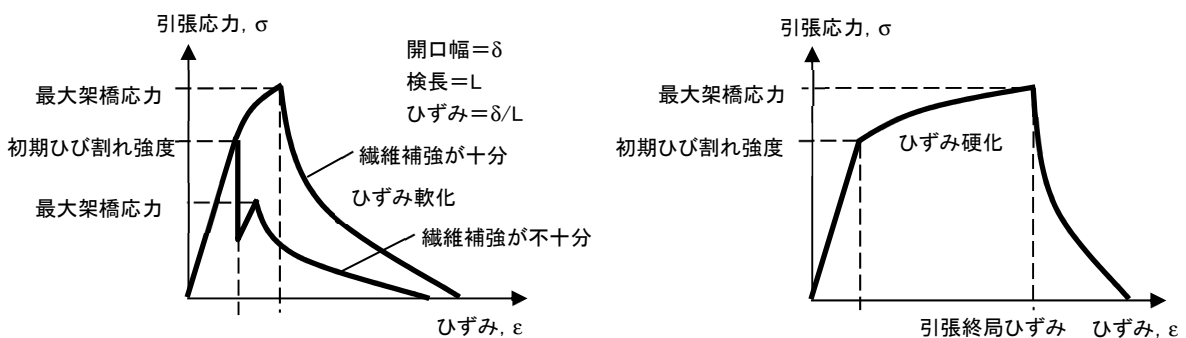


図 2-12 FRC (左) と HFRCC (右) の引張応力-ひずみ関係

次に、圧縮荷重下における圧縮応力-ひずみ関係について概観する (図 2-13)。圧縮強度は基質材料によるところが大きく、繊維補強による効果はほとんどない。ただし、圧縮強度以降のひずみ軟化域においてはひび割れの発生と進展が顕著であり、これらのひび割れにおいて繊維架橋による応力伝達があるため、ひずみ軟化が抑制されて圧縮靱性の向上が得られる。UFC (超高強度繊維補強コンクリート) は、圧縮強度の特性値が 150MPa 以上、ひび割れ発生強度 (初期ひび割れ強度) の特性値が 4MPa 以上、引張強度の特性値を 5MPa 以上とし、非常に高い強度を達成しているが、これらは粒径 2.5mm 以下の骨材、セメント、ポゾラン材を緻密な充填を可能とする粒度構成とし、水セメント比 0.24 以下とすることで達成している⁴⁴⁾。

圧縮靱性は圧縮タフネスとも呼ばれることもあり、基準等に指標として算出方法が定められている。土木学会では圧縮タフネスを圧縮じん性係数で表しており次式で算出される⁴⁵⁾。

$$\bar{f}_c = \frac{4T_c}{\pi d^2 \delta_{tc}} \quad (1-2)$$

ここに、 \bar{f}_c = 圧縮じん性係数 (N/mm²)、 T_c = δ_{tc} までの荷重-変形曲線下の面積 (N mm)、 δ_{tc} = ひずみに換算して 0.75% の変形量 (mm)、 d = 供試体の直径 (mm) である。圧縮靱性は材料特性に関係する指標であり、普遍的な材料特性ではない。

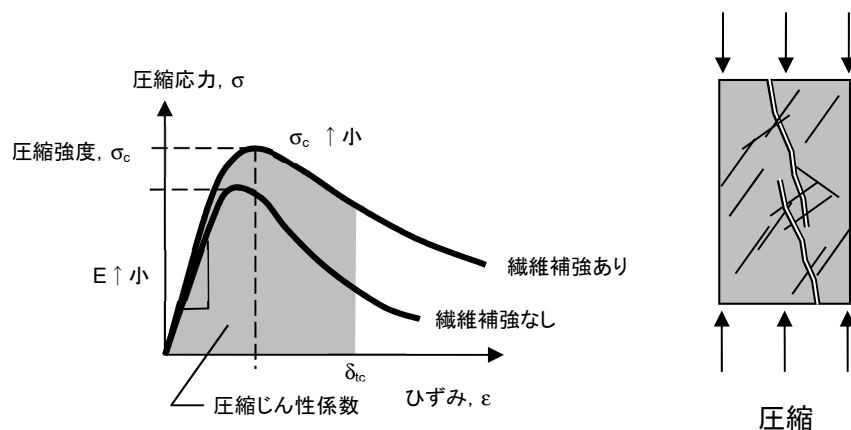


図 2-13 圧縮応力-ひずみ関係

曲げは引張に次いで繊維補強による特性向上が見られる。曲げにおける強度と変形は、曲げ引張応力下で生じるひび割れにより支配されているため、前述した引張強度と破壊エネルギーは、それぞれ曲げ強度と曲げ靱性の向上に結び付く (図 2-14)。

引張荷重下において、FRC はひずみ軟化特性を有し、曲げ荷重下においてはたわみ軟化を示す。HFRCC はひずみ硬化特性を有し、微細な複数ひび割れによる大きな曲げ変形に伴う曲げ応力の上昇というたわみ硬化挙動が得られる。この間に位置する材料で、引張荷重下においてひずみ軟化特性を示すものの、曲げ荷重下においてたわみ硬化特性を示すものもある。これは、複数ひび割れを

形成する条件は引張より曲げの方が達成しやすいためである。

圧縮と同様に、曲げ靱性は曲げタフネスとも呼ばれることもあり、基準等に指標として算出方法が定められている。土木学会では曲げタフネスを曲げじん性係数で表しており次式で算出される⁴⁶⁾。

$$\bar{f}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \frac{1}{bh^2} \quad (1-3)$$

ここに、 \bar{f}_b = 曲げじん性係数 (N/mm²)、 $T_b = \delta_{tb}$ までの荷重-たわみ曲線下の面積 (N mm)、 δ_{tb} = スパンの 1/150 のたわみ (mm)、 l = スパン (mm)、 b = 破壊断面の幅 (mm)、 h = 破壊断面の高さ (mm) である。曲げじん性もまた材料特性に関係した指標である。

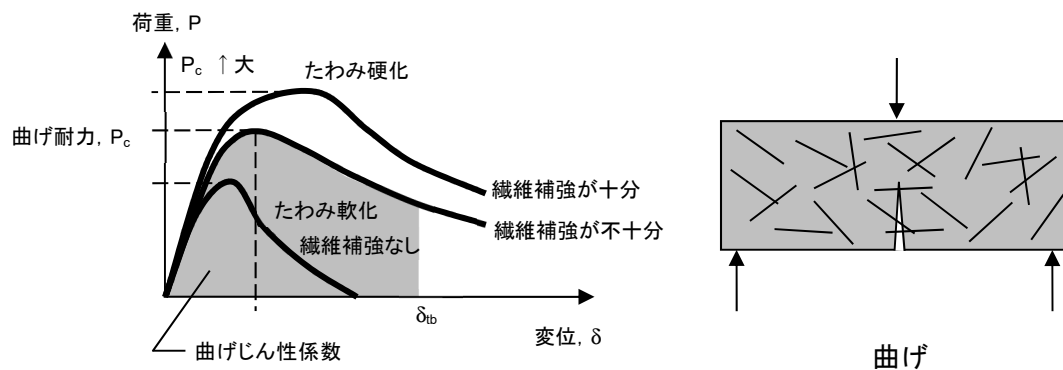


図 2-14 曲げ荷重-変位関係

繊維補強による引張と曲げの材料特性の向上について述べたが、図 2-15 には引張応力下の脆性、準脆性、延性、ひずみ軟化、ひずみ硬化をまとめている。脆性挙動では、ガラスの破壊にみられるように、線形弾性挙動の後に突然の破壊を生じて応力伝達が完全に消失されてしまう。上述したとおり、準脆性挙動はコンクリートや FRC など、延性挙動は HPCRCC などにおいて見られる。また、表 2-3 には、各種繊維補強セメント系複合材料の特徴をまとめる。

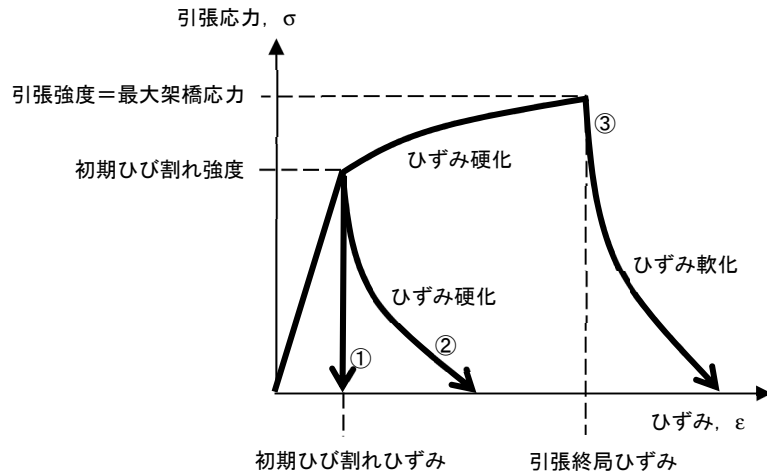


図 2-15 引張応力下の①脆性, ②準脆性, ③延性, ひずみ軟化, ひずみ硬化の違い

表 2-3 各種繊維補強セメント系複合材料の特徴

		セメント モルタル	コンクリート FRC		HPFRCC
引張	挙動	脆性	準脆性	準脆性	延性
	ひずみ硬化/軟化	—	ひずみ軟化	ひずみ軟化	ひずみ硬化
	ひび割れ性状	局所化	局所化	局所化	複数
曲げ	たわみ硬化/軟化	—	たわみ軟化	たわみ硬化*	たわみ硬化
	ひび割れ性状	局所化	局所化	複数*	複数

*曲げのたわみ硬化および複数ひび割れ性状は供試体寸法に影響を受ける。

せん断における繊維補強の効果についての知見は多くない。以下は既往の研究^{47) 48)}に基づいた推察である。図 2-16 に概要を示す。

純せん断の荷重状態は、主応力でみると直交する引張と圧縮の組合せ荷重状態と等価である。基質材料であるセメント系材料の強度は引張が相対的に弱いため、引張の主応力に対してひび割れが発生する。よって、ひび割れ発生荷重時においてひび割れは開口するが、すべりは生じていない。二軸応力の影響を考えるものの、繊維補強の効果は引張応力下と概ね同様と考えられる。

しかしながら、荷重の増加・変化とひび割れの進展に伴い、主応力方向は変化し、既に発生したひび割れ面においてすべり変位が生じる場合がある。もしくは、形状や境界条件により強制された場合に、せん断によりすべり方向のひび割れ発生と変位を得ることもある。

この際に、骨材と繊維はひび割れの開口方向とすべり方向の双方向に抵抗し、ひび割れ間で力を伝えることになる。また、ひび割れ面は凹凸となるため、噛み合いによってもすべり方向に抵抗する。両者を合計したものがすべり方向への抵抗となるが、開口が十分に大きいときには噛み合いは生じず後者の抵抗が得られない。実際の構造物においては、発生したひび割れ面には引張とせん断が同時に作用するため、引張とせん断の架橋応力はそれぞれ開口変位とすべり変位の関数となる。

骨材と繊維のすべり方向への抵抗は、引張架橋則のようにいずれ軟化するものと考えられる。織

維補強の効果は、骨材のみの時と比較して伝達応力を増加させて軟化挙動を改善することにある。一方で、凹凸ひび割れ面の噛み合いによるすべり方向の抵抗には繊維補強の改善はないと考えられる。繊維補強の効果として、せん断強度とせん断靱性の向上が考えられるが、実験結果では大きく見ると噛み合いによる強度と靱性への影響が大きい。繊維補強の効果は、噛み合い機構への遷移時にあると考えるのがよさそうである。

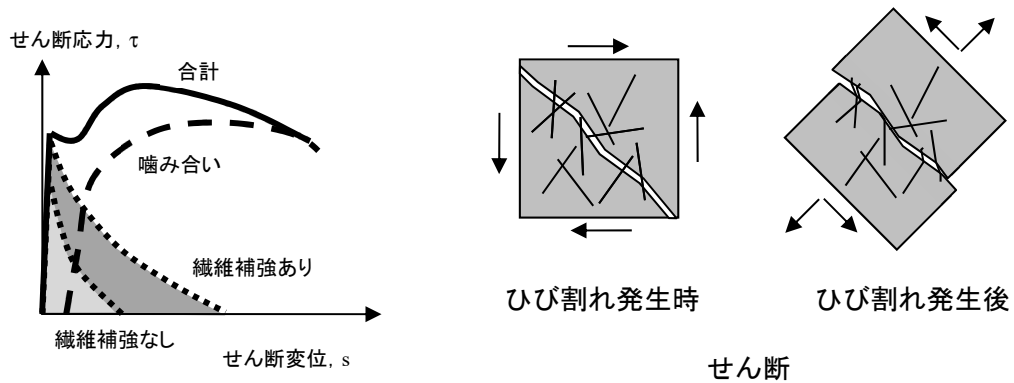


図 2-16 せん断応力-せん断変位関係

破壊エネルギー G_c とは、ひび割れが単位面積を進展する際に必要とされるエネルギーであり、材料固有の特性である。繊維補強複合材料の場合には、ひび割れを繊維が架橋し応力を伝達するため、ひび割れ進展とは架橋応力が消失するまでひび割れ面を引き離すことに他ならない。破壊エネルギーは図 2-11 で示した引張応力-開口幅関係（架橋則）の下の面積でも表される。また、破壊力学において用いられる破壊靱性 K_{Ic} は関係式により破壊エネルギー G_c より計算することもでき、破壊靱性はひび割れ進展に対する抵抗性を表す材料特性である（詳細は 3 章で述べる）。靱性でも、上述した圧縮と曲げの靱性もしくはタフネスとはその定義が異なる。破壊靱性と破壊エネルギーは材料特性であるが、圧縮靱性や曲げ靱性は基準等に定められた指標でありことに注意を要する。

破壊エネルギーの計測には、切り欠きを有する曲げ試験体^{49) 50)}やコンパクトテンション試験体⁶¹⁾を用いる方法があり、これらの試験体から架橋則を推定した後にその下の面積を計算して得る方法もある。

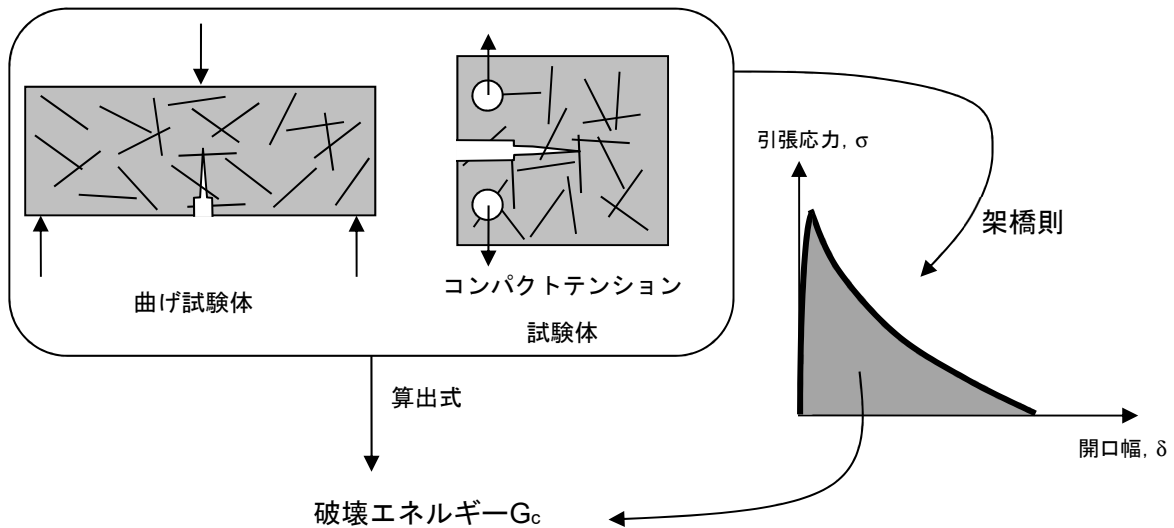


図 2-17 破壊エネルギー

疲労についても、繊維補強により寿命の向上が得られる。疲労荷重下のセメント系材料においては、ひび割れが徐々に進展した後に、最終的な破壊が生じることで、疲労寿命を迎える。繊維補強セメント系複合材料では、繊維補強によりひび割れにおいても応力が伝達されることで、ひび割れ先端での応力集中が緩和される。これによりひび割れの進展が抑制され、結果的に同一荷重下では疲労寿命が延び、同一疲労寿命に対しては疲労強度が上がることになる。

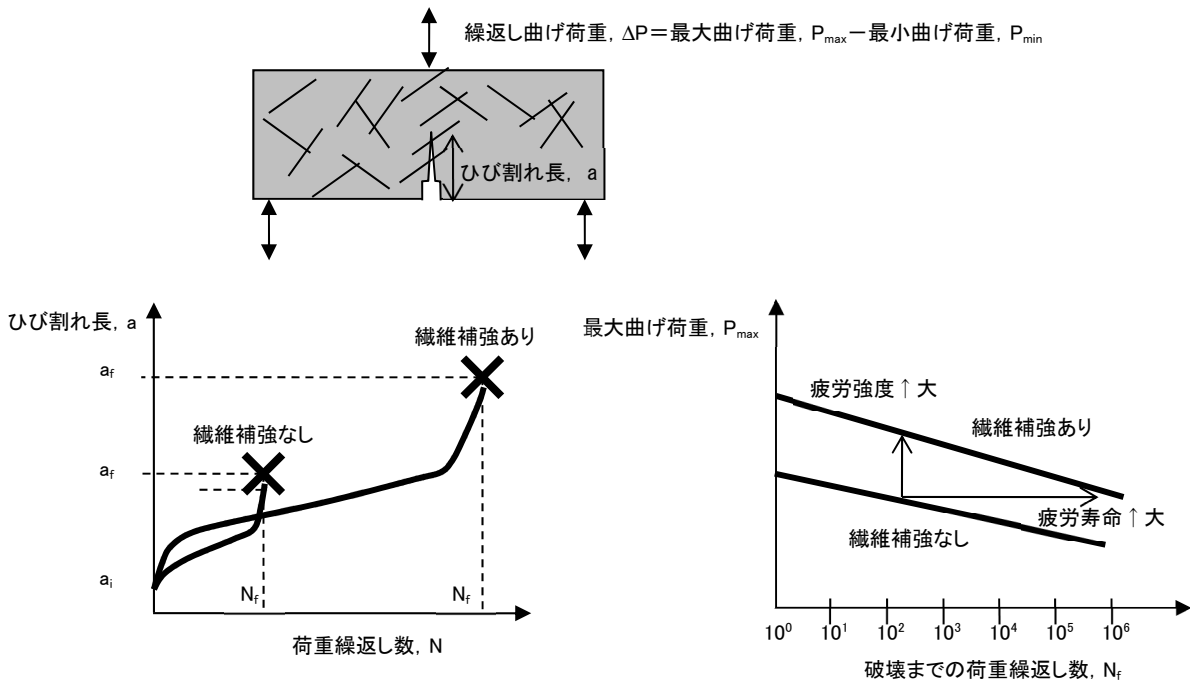


図 2-18 疲労寿命

最後に、表 2-4 に土木学会および日本コンクリート工学会により発行されている繊維補強セメント系複合材料に関連する材料試験基準をまとめる。

表 2-4 繊維補強セメント系複合材料に関連する材料試験基準^{51) 52) 53) 54)}

項目	基準
製作	<ul style="list-style-type: none"> ・ JCI-SF1 試験室における繊維補強コンクリートの作り方（日本コンクリート工学会） ・ JCI-SF2 繊維補強コンクリート及びタフネス試験用供試体の作り方（日本コンクリート工学会） ・ JCI-SF3 吹付け繊維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方（日本コンクリート工学会） ・ コンクリートライブラリー127 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案） 試験方法 1 強度試験用供試体の作り方（土木学会）
引張	<ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリートライブラリー127 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案） 試験方法 2 一軸直接引張試験方法（土木学会） ・ コンクリートライブラリー127 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案） 試験方法 3 HPRCC ひび割れ幅試験方法（平均ひび割れ幅，最大ひび割れ幅の測定）（土木学会） ・ コンクリートライブラリー127 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案） 試験方法 4 HPRCC ひび割れ幅試験方法（ひび割れ幅のばらつきの測定）（土木学会）
圧縮	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法（案）（JSCE-G551-2013）（土木学会） ・ JCI-SF5 繊維補強コンクリートの圧縮強度及び圧縮タフネス試験方法（日本コンクリート工学会）
曲げ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法（案）（JSCE-G552-2013）（土木学会） ・ JCI-SF4 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法（日本コンクリート工学会） ・ JCI 規準 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（日本コンクリート工学会） ・ JCI 規準 繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法 JCI-S-003-2007（日本コンクリート工学会）
せん断	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法（案）（JSCE-G553-2013）（土木学会） ・ JCI-SF6 繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法（日本コンクリート工学会）
破壊	<ul style="list-style-type: none"> ・ JCI-SFR1 プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験方法（案）（日本コンクリート工学会） ・ JCI-SFR2 繊維補強コンクリートの切欠きはり試験体の荷重-変位曲線の計測法およびタフネスの評価方法（案）（日本コンクリート工学会） ・ JCI-SFR3 コンクリートの引張り軟化曲線の評価方法（案）（日本コンクリート工学会） ・ JCI 規準 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 JCI-S-001-2003（日本コンクリート工学会）
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ JCI-SF7 繊維補強コンクリートの繊維混入率試験方法（日本コンクリート工学会） ・ JCI-SF8 繊維の付着試験方法（日本コンクリート工学会）

2.3.3 繊維補強セメント系複合材料の種類と特性

繊維補強セメント系複合材料の種類

本書で述べる繊維補強セメント系複合材料は、繊維補強セメントから繊維補強コンクリートまでを含んでいる。小林は、繊維補強コンクリートに関する最初の文献は 20 世紀初頭に見受けられると報告しており、その後の発展についても詳細に報告している⁵⁵⁾。以下では、現在主に利用されている繊維補強セメント系複合材料についてその呼称と共に説明する。

FRC

FRC (Fiber Reinforced Concrete, 繊維補強コンクリート) は、補強繊維を混入したコンクリートのことを一般的に指す。補強繊維には 2.2.2 項で述べたように各種あるが、鋼繊維が 1970 年代に実用化されて以降、主要な繊維として用いられてきている。鋼繊維補強コンクリートを SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) と呼ぶことも一般的である。鋼繊維補強コンクリートの特徴と発展経緯については越智らによりまとめられている⁵⁶⁾。その主要用途はトンネルの一次吹付と二次覆工、橋梁床版、空港舗装、法面保護のコンクリート吹付である。また建築の土間床にも多く用いられている。

鋼繊維の体積混入率は 2% を超えると流動性が低下するため、多くの場合 0.5~1.5% 以下である。圧縮強度の向上は大きくないが、圧縮靱性に向上が見られる。引張強度の向上が見られ、ひび割れ開口に伴い繊維の架橋応力が発現されるため、曲げ強度と曲げ靱性の向上がある。

鋼繊維については腐食が懸念されるが、表面に露頭した鋼繊維は腐食し点錆として現れるものの、深部には進行しないことが確認されており、また鋼繊維を混入した鉄筋コンクリート部材においては混入しないものより鉄筋の腐食が小さいとの報告もある⁵⁷⁾。

また、ポリプロピレン繊維も FRC に多く使われている。ポリプロピレン繊維を体積混入率で 0.05~0.3% 混入したコンクリートは、収縮ひび割れ抑制、曲げ靱性向上によるトンネル二次覆工や高架橋コンクリートの剥離・剥落防止に用いられており、建築構造物やトンネル構造物で高強度コンクリートの火災時の高温加熱による爆裂防止にも用いられている (2.2.2 参照)。

GRC⁵⁸⁾

GRC (Glass fiber Reinforced Cement, ガラス繊維補強セメント) は、セメントまたはモルタルを耐アルカリガラス繊維で補強した複合材料である。コンクリート補強繊維として耐アルカリ性ガラス繊維が 1970 年代に実用化され、鋼繊維とともに主要な繊維として用いられている。GRC は、ジルコニアを 16% 以上含有する耐アルカリガラス繊維、セメント、細骨材、水、混和材料からなり、繊維体積混入率は 2~8% と規定されている。ダイレクトスプレー法とプレミックス法があり、前者は長いローピングを切断しながらモルタルと合わせて型枠に吹き付けるため、繊維の配向性は 2 次元ランダムになる。一方で、後者は切断されたチョップドストランドを練り混ぜて型枠に流し込むため、3 次元ランダムになる。前者の方が力学的特性に優れる。主な用途は、建築分野のカーテンウォール、外壁、内壁、内外装部材など多岐にわたり、土木分野では U 字溝、防音壁などがあり、GRC の軽量、不燃性、耐火性、強度、耐衝撃性、造形性が活かされている。

UHPFRC

UHPFRC (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete, 超高性能繊維補強コンクリート) の開発前史については、文献 58) に詳しい。1970 年代後半の DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles) から、1980 年代後半の CRC (Compact Reinforced Composite), 1990 年代前半の MSCC (Multi-Scale Cement Composites) を経て、RPC (Reactive Powder Concrete), そして 2000 年代中頃の UHPFRC 開発につながる。UHPFRC という呼称は 2000 年にフランスで最初に使用されたとされている⁶⁰⁾。

スイス技術者協会規格の SIA2052⁶¹⁾ によると、UHPFRC とは、セメント、添加物、細骨材、水、混和剤、短繊維からなる複合材料であり、高いレベルの充填性により浸透に対する遮断性を有するとともに、一般に、立方体試体による圧縮強度の特性値は 28 日強度で 120MPa 以上である、と定義されている。通常 1mm 以下の粒体からなる緻密なセメントマトリックスを持ち、多量の鋼繊維を混入することで強化かつ高靱化されている。常温養生による UHPFRC の硬化過程では練り混ぜ水が完全に反応しており、毛管孔隙の形成を避けることになる。結果として、外から UHPFRC への水の浸透を無視することができる。力学的特性の一般的な値として、圧縮強度 120~200MPa, 初期ひび割れ強度 7~12MPa, 引張強度 7~15MPa であり、引張荷重下でひずみ硬化を示して、引張強度時のひずみは 0~5% である。また、フレッシュ時のコンシステンシーは、自己充填性 (SN EN 206 の規定に従ったフロー直径計測値が 550mm から 800mm の間) からチクソトロピック性 (傾斜面に打設するの適している) までの範囲で調整可能である、としている。

日本においては、スイス連邦工科大学の Brühwiler により開発された UHPFRC の技術を導入することで J-THIFCOM (Japan-Thixotropic Hardening Impermeable Fiber Reinforced COMposite) が開発された⁶²⁾。J-THIFCOM は設計圧縮強度 130MPa 以上、引張強度 13MPa 以上、曲げ強度 35MPa 以上、ヤング率 35GPa, 塩化物浸透深さ 0mm, 中性化深さ 0mm, 透気係数 $0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下と報告されている。無機・有機繊維を体積混入率 4% 以上含有し、超緻密・高強度で流動性と材料分離抵抗性にも優れ、かつ粘性に対する時間依存性を保持することで施工勾配の変化に対応できる材料としている。また、現場ニーズに対応した配調合を行うことで構造物の充填部や狭隘部に適する作業性および気中・水中の連続打設を可能となっている。さらに、高気密・高強度であることから構造物の外表面保護 (表面補修・補強) 材として適用し、劣化因子の遮断に対する用途も提示している。J-THIFCOM の特徴の一つは常温養生で上記の性能が達成できる点にあり、この点を活かした新設構造物、既設構造物の補修・補強に対する利用が図られている。

UFC^{63) 64)}

UFC (Ultra-high strength Fiber reinforced Concrete, 超高強度繊維補強コンクリート) は UHPFRC の一種であり、日本にはフランスより 1999 年に民間企業により基本技術が導入されて技術開発が行われた。土木学会からは 2004 年に「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」が発行されている⁴⁴⁾。これによると、UFC の定義として、圧縮強度 150N/mm^2 以上、ひび割れ発生強度 4N/mm^2 以上および引張強度 5N/mm^2 以上を強度の適用範囲としている。また、使用材料も限定しており、マトリックス部分は粒径 2.5mm 以下の骨材、セメント、ポゾラン材からなり、水セメント比を 0.24 以下としている。繊維は、引張強度 2000N/mm^2 以上、直径 0.1~0.25mm, 長さ 10~20mm の補強繊維を 2vol.% 以上混入することとなっており、鋼繊維が最も望ましいとされている。

さらに、熱養生を行うことが標準であり、強度増進のみならず、組織を緻密化することによる耐久性の向上も目的としている。

RPC

RPC は、1994 年に Richard と Cheyrezy により発表された⁶⁵⁾。RPC は、セメント、珪石微粉末、珪砂、シリカヒュームの微粉末と、鋼繊維、高性能減水剤、水により構成される。鋼繊維は用いない場合もある。高性能減水剤は流動性を確保しつつ水セメント比を下げるために最適量が用いられる。最密充填理論に基づき、微粉末は粒度分布と配合量の組み合わせから密度が最大になるように設計され、密実なマトリックスが作られる。これにより 200-800MPa の圧縮強度と透気性と透水性が極度に低い耐久性が得られる。RPC には次の原理が示されている⁶⁶⁾。

1. 粗骨材を排除による均質化向上
2. シリカヒュームのポズラン性の利用
3. 粒状体配合の最適化による充填密度の向上
4. 高性能減水剤の最適な使用による水セメント比の低減と流動性の向上
5. 硬化前および硬化中の加圧による密実性の向上
6. 硬化後の熱養生による微視的構造の向上
7. 小寸法の鋼繊維混入による靱性の向上

HPFRCC

1995 年に Naaman と Reinhardt により定義された HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) は一軸引張応力下において複数ひび割れ特性とひずみ硬化特性を示すような繊維補強セメント系材料であるとしている⁶⁷⁾⁶⁸⁾。

日本では、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料とも呼ばれ、土木学会からは 2007 年に「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針 (案)」が発刊されている⁵¹⁾。HPFRCC は、セメント系材料と補強用の短繊維を用いた複合材料であり、一軸引張応力下において疑似ひずみ硬化特性を示し、微細で高密度の複数ひび割れを形成する高靱性材料である、と定義されている。指針 (案) が対象とする HPFRCC は、一軸引張試験により求めた引張終局ひずみの平均値が 0.5% 以上かつ平均ひび割れ幅が 0.2mm 以下となる材料とするとしている。

SIFCON と SIMCON

Lankard により 1984 年に発表された SIFCON (Slurry Infiltrated Fibre CONcrete) の製造方法は特徴的である⁶⁹⁾⁷⁰⁾。あらかじめ型枠内に鋼繊維を詰め込んでおき、流動性の高いセメントスラリーを流し込むことで製造される。これにより繊維を練り混ぜる必要が生じないため、繊維長の長い鋼繊維でも非常に高い繊維体積含有率 (~20%) を得ることができる。繊維をあらかじめマット状に編んでおく方法もあり、この場合は SIMCON (Slurry Infiltrated Mat CONcrete) と呼ばれる⁷¹⁾⁷²⁾。SIFCON と SIMCON は強度、靱性、耐衝撃性に優れるため、用途としては重荷重の舗装、耐爆構造、銀行金庫室の壁などに使われている。SIFCON と SIMCON は多量に含有する繊維により、一軸引張応力下にて複数微細ひび割れを発生し、ひずみ硬化特性を示すため、HPFRCC に分類される⁶⁷⁾。高い耐食性が要求される環境下の鋼繊維代替として PVA 繊維を用いた SIFCON の検討もされ

ている⁷³⁾。

ECC

ECC (Engineered Cementitious Composite) は Li により開発された材料であり 1993 年に発表された⁷⁵⁾。その最大の特徴は、一軸引張応力下においてひずみ硬化を示し、微細で高密度の複数ひび割れを形成することにより最大引張ひずみが 8%にも達するという、極めて高靱性で延性な材料挙動である。ECC はマイクロメカニクスと破壊力学を設計原理としており、引張強度や破壊エネルギーなどの材料特性を繊維径、繊維長、繊維混入量などの微視的材料定数の陽な関数として表すことで、材料特性と微視的材料構造の関係を明らかにしている。この設計原理により、HPFRCC の複数ひび割れ特性とひずみ硬化特性を得るために必要な最小繊維混入量を微視的材料定数で表し、SIFCON より少量の繊維量で HPFRCC を実現している。

繊維補強セメント系複合材料の特性

各種 FRCC の特性値を表 2-5 に示す。鋼繊維補強コンクリート、ポリプロピレン繊維補強コンクリート、SIFCON、SIMCON は既往文献からまとめた。GRC、HPFRCC、UHPFRC、UFC は指針もしくは協会により示されているものをまとめた。鋼繊維補強コンクリートとポリプロピレン繊維補強コンクリートは広く普及しており、実際の配合と材料特性にはもっと広がりがあると考えられる。また、様々な配合を試している研究論文も含むため、これらの値はあくまで一部の例である。

表 2-5 各種繊維補強セメント系複合材料の特性

	鋼繊維補強 コンクリート 56) 76)	ポリプロピレン 繊維補強 コンクリート 78) 79) 80)	GRC ダイレクト スプレー法 81)	GRC プレミックス法 81)
密度(g/cm ³)	2.27~2.31		1.8~2.3	1.8~2.3
ヤング率(GPa)	17.3~32.7			
ポアソン比				
圧縮強度(MPa)	26.8~80.5	27.6~42.2	50~80	40~80
曲げ強度(MPa)	5~14.4	3.88~5.53	20~30	10~18
曲げヤング率(GPa)			15~25	13~21
ひび割れ強度(MPa)				
引張強度(MPa)	2.92~5.86			
最大引張ひずみ				
線膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C)			7~12	7~12
熱伝導率(W/m°C)			0.7~1.0	0.7~1.0
比熱(J/kg°C)				
乾燥収縮率(×10 ⁻⁶)			300~500	300~500
水セメント比	0.4~0.7	0.5~0.58		

	SIFCON 73) 82) 83)	SIMCON 71) 72) 84)	HPFRCC 51)	UHPFRC 85)	UFC 44)
密度(g/cm ³)	1.82~2.77		1.7~1.9	2.3~2.7	2.55
ヤング率(GPa)	4.6~20.2	18.1~28.1	14~16	40~60	50
ポアソン比	0.24~0.29		0.23	0.2	0.2
圧縮強度(MPa)	40.7~171	57~84	27~40	120~200	194
曲げ強度(MPa)	30.6~47.6		9~10		30.9
曲げヤング率(GPa)					
ひび割れ強度(MPa)		2.53~9.83	2~3	7~12	
引張強度(MPa)	10.9~16.1	7.06~16	3~5	7~15	11.3
最大引張ひずみ(%)	0.61~1.29	1.00~1.43	0.4~1.0	0~0.5	
線膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C)				10	13.5
熱伝導率(W/m°C)			0.354~0.463		2.3
比熱(J/kg°C)			1.49		0.92
乾燥収縮率(×10 ⁻⁶)			290~800	600~800	500
水セメント比	0.25~0.4	0.31			~0.24

さらに、各種 FRCC の材料特性をまとめた図を以下に示す。図 2-19 と図 2-20 は、2010 年前後のコンクリート工学年次論文集、鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）⁸⁸⁾、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）⁴⁴⁾、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）⁵¹⁾、その他を参考にして作成した。全体を通して配合条件、供試体寸法、载荷条件などが統一されているわけではなく、各種 FRCC の様々な配合条件を試している研究論文もあり、その最良の結果のみが掲載されているわけでもない。もとより既往の研究を十分に網羅もできていないので、あくまで目安として示すものである。

図 2-19 は各種 FRCC の圧縮強度と破壊エネルギーをまとめた図である。大きく分けて、モルタル・コンクリート、FRC、HPFRCC、HVFC（多量繊維補強コンクリート）、UFC のデータをまとめた。HVFC は SIFCON と同様の材料で、最大で体積混入率 15% の鋼繊維を型枠内に設置した後にグラウト注入をすることで作製される材料である⁷⁴⁾。

繊維補強のないモルタル・コンクリートは、圧縮強度が 30~60MPa に対して破壊エネルギーが 0.02~0.5kJ/m² に分布しており、0.1kJ/m² 付近に集まっている。FRC は 25~58MPa に対して 0.55~7.8kJ/m² に分布しており、圧縮強度はほぼ同等だが破壊エネルギーは 1~2 桁向上した値が見られる。さらに破壊エネルギーの向上が見られるのは HPFRCC (8.36~27kJ/m²)、UFC (15.5~30kJ/m²)、SIFCON (52.9~57.5kJ/m²) である。これらの FRCC は FRC に対して 1 桁上の破壊エネルギーを示しており、加えて UFC は 200MPa 以上の圧縮強度を有している。比較のためにアルミ合金と鋼材の破壊エネルギーについても示している。一部の HPFRCC、UFC、HVFC はアルミ合金以上の破壊エネルギーを有していることが分かる。

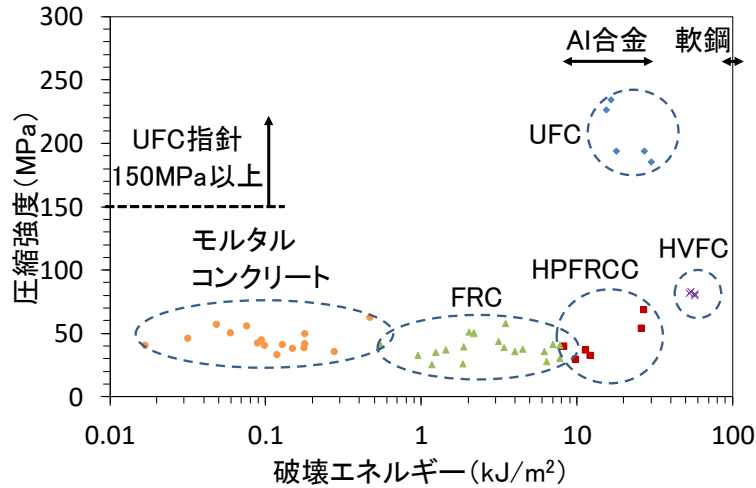


図 2-19 圧縮強度と破壊エネルギー

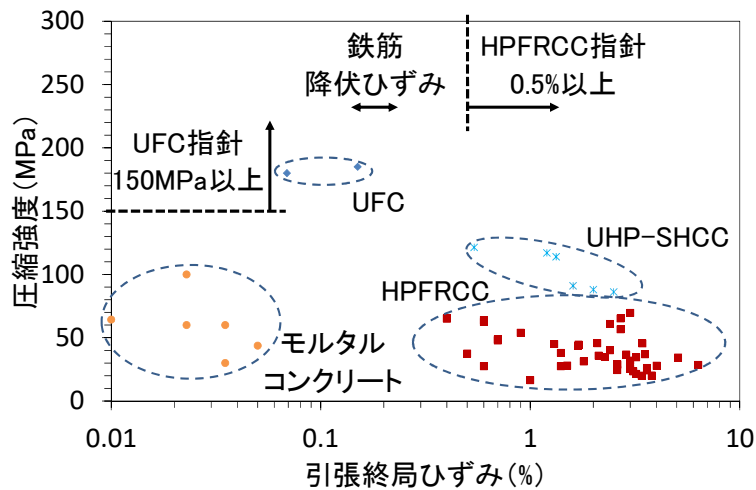


図 2-20 圧縮強度と引張終局ひずみ

図 2-20 は各種 FRCC の圧縮強度と引張終局ひずみをまとめている。モルタル・コンクリート、HPFRCC、UFC と UHP-SHCC（超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料）のデータをまとめた。モルタル・コンクリートの引張終局ひずみが 0.01~0.05%であるのに対して、UFC は 0.07~0.15%と引張終局ひずみは向上している。HPFRCC はさらに向上しており、0.4~6.3%で分布して特に 3% 近辺に集まっている。UHP-SHCC は UFC と HPFRCC の中間的な特性を持つ材料である。水結合材比を 0.22 と HPFRCC より低くし、高強度ポリエチレン繊維を 2% 混入している。UHP-SHCC の圧縮強度は HPFRCC より高く 100MPa 前後であり、引張終局ひずみは 2% 近辺である⁸⁹⁾。比較のために鉄筋の降伏ひずみを合わせて示している。HPFRCC、UHP-SHCC については、降伏ひずみ以上の引張終局ひずみを有しており、これが大きな特徴となっている。

2.4 構造物への利用

繊維補強セメント系複合材料は繊維をセメント系母材に混入するため、普通コンクリートと比較

して材料コストが高くなるのは避けられない。よって普通コンクリートを全て代替するよりは部分的に代替する利用方法が多いといえる。繊維補強セメント系複合材料の特徴は、高強度、高靱性、ひび割れ抵抗性、疲労耐久性、物質移動抵抗性等であり、これらを活かす形で構造物への利用が行われている。以下では主な利用例を示す。

また、構造物の設計施工にあたっては、鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）⁸⁸⁾、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）⁴⁴⁾、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）⁵¹⁾が土木学会より発刊されている。FRCCにおける繊維補強の主な利点は、強度、ひずみ、靱性が大きく改善されることにあり、設計指針はこれらを有効に利用する具体的な手法を示している。

RC 床版上面増厚補強^{90) 91)}

鋼橋 RC 床版では 1970 年代から疲労によるコンクリートの抜け落ちが問題となった。これに対する補強工法として、床版コンクリート上面を切削研掃した後、鋼繊維補強コンクリートを上面に打設することで、床版の押し抜きせん断耐力の向上を目的としたのが、上面増厚工法である。1978 年に初めて実橋での施工が行われ、1990 年に入り東名高速の施工において工法として確立された。その後も数多くの施工事例がある。

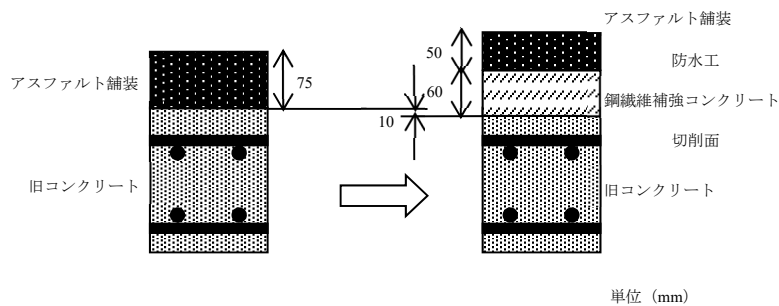


図 2-21 床版上面増厚工法の施工断面図⁹⁰⁾

シールドトンネルセグメント⁹²⁾

トンネルセグメントの中でも、コンクリートセグメントは耐圧縮性に優れており、土圧、水圧、シールドジャッキ推力等に対して高い抵抗性を持ち、水密性も確保できる経済的な選択肢である。しかしながら、引張強度が小さいため、セグメント端部が破損しやすく、施工時取り扱いに十分な注意が必要である。また、薄肉化・幅広化の傾向に伴い、運搬や組み立てに際しては、ひび割れや欠けが問題となる。このような弱点を改善するために、鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントが開発・実用化されている。鋼繊維の混入により、ひび割れ、剥離、剥落に対する抵抗性の向上を得ることができる。また、曲げとせん断の性能の向上により主鉄筋量の低減と配力筋の省略が可能になる。さらには、ポリプロピレン繊維を追加混入することで耐火機能を付与することもできる。鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントは首都高速中央環状線山手トンネルで適用され 2010 年 3 月より供用されている。

鋼床版疲労に対する補強⁹³⁾

橋梁鋼床版では、デッキプレートと閉断面リブの溶接ルート部からデッキプレートに進む疲労ひび割れが数多く発見されてきている。これに対する補強方法として、鋼繊維補強コンクリートを鋼床版上面に敷設することで、鋼床版の剛性を高めて応力集中を低減し、ひび割れの進展を抑制する方法がある。デッキプレートとの合成は、エポキシ樹脂系の接着剤やスタッドが用いられており、CFRP 補強筋が鋼繊維補強コンクリート内に設置されている。鋼繊維補強コンクリート舗装は新設橋への適用事例もあり、鋼床版の疲労耐久性の向上を目的としている。

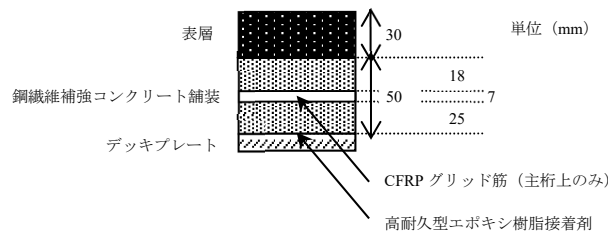


図 2-22 鋼床版の鋼繊維補強コンクリート舗装断面例⁹³⁾

トンネル用吹付け／覆工コンクリート⁹⁴⁾

トンネル用吹付けコンクリートは、トンネルの山岳工法においてトンネルおよび周辺地山の安定を図るための支保工を構成する重要な部材であり、要求性能として地山との良好な付着性、初期および長期強度特性が求められる。吹付けコンクリートに補強材として繊維を用いる場合には、曲げやせん断の強度と靱性の向上、ひび割れ抵抗性の向上が得られる。地山条件が悪く大きな変形が発生する箇所、構造上複雑で多方向の応力が作用する箇所、剥離剥落に対する抵抗性などにおいて繊維補強が有効である。鋼繊維は、繊維長 30mm 前後、アスペクト比（繊維長／繊維径）35～80 程度で、両端フック形状のものが多く使用されている。合成繊維は、ポリビニルアルコール繊維、ポリプロピレン繊維等が用いられており、鋼繊維と比較して、火災時の耐爆裂防止性、施工の容易性が確認されている。

また、一次吹付けに加えて二次覆工コンクリートにも繊維補強コンクリートが用いられるようになっている。覆工コンクリートにおいては、曲げ靱性向上と剥落防止を目的として上記と同様に鋼繊維、ポリビニルアルコール繊維、ポリプロピレン繊維が用いられている。

法面用吹付けコンクリート⁹⁵⁾

法面吹付けコンクリート構造物は、法面の風化、浸食、崩壊の防止のために構築される。法面や自然斜面に用いる吹付けコンクリートには必要に応じて繊維が補強材として使用される。用いられる繊維は鋼繊維もしくは合成繊維（ポリビニルアルコール繊維、ポリプロピレン繊維、アラミド繊維）であり、曲げ、引張、せん断などの強度と靱性の向上、ひび割れ分散性、ひび割れ幅抑制、剥落防止、吹付け厚さの減少を目的として補強材として使用されている。

補修・補強用吹付コンクリート⁹⁶⁾

補修・補強に用いる吹付コンクリートに繊維が添加される場合がある。これは、たれ防止性、ひ

び割れ分散性，曲げ強度，靱性などの特性を向上することを目的としている．土木学会の吹付コンクリート指針（案）[補修・補強編]⁹⁶⁾は，塩害，中性化，凍結融解等によって損傷を受けたコンクリート構造物および施工の不具合によって生じるコンクリート片の落下による第三者影響度の可能性を除いたり，耐久性能を回復もしくは向上するために行う断面修復などの補修，および構造物や部材の耐荷性や剛性等の力学的な性能回復，あるいは，これらの向上を目的とする床版の下面増厚や柱部材の増厚等の補強として用いる吹付コンクリートを対象としている．主として鋼繊維や合成繊維が用いられ，吹付けノズル先端の口径に応じて，乾式では繊維長 25mm 前後の鋼繊維や合成繊維，湿式では 6mm 前後の合成繊維が使用されている．

カーテンウォール^{31) 38) 39) 40)}

我が国において 1980 年代に炭素繊維補強セメント系材料の研究開発と実用化が大きく進んだ．イラクのバグダッドに建設されたモニュメントドームにおいては，外装タイル打ち込み軽量パネルに適用された．重量と曲げ強度に関する厳しい要求性能を満足する材料として，オートクレーブ養生の軽量炭素繊維補強モルタルが選ばれた．当地の気象条件下において十分な耐力と耐久性を有することを確認して，1982 年に 10,000m² の大量施工が行われた．また，1986 年に完成した東京のアーク森ビルにおいて，超高層ビルの外装カーテンウォールに適用され，32,000m² の大規模施工が行われた．従来の軽量 1 種コンクリート製カーテンウォールと比較しても軽いため，外壁重量を 60% 低減でき，地震荷重を 12% 低減することが可能となった．このため，鉄骨量の低減と取り付け作業の効率化も図られている．

図 2-23 CFRC カーテンウォールの取付け³⁹⁾

UFC

超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は，配合に粗骨材を含んでいないこと，引張強度が高く鉄筋を必要としないことにより，部材厚を薄くすることが可能となり，自重の大幅な軽量化を実現できる．これにより，下部工や施工のコスト削減を図ることができる．また，硬化体の高い密実性により，耐久性が非常に高い．これらの利点を活かした構造利用が進められている．

酒田みらい橋は2002年竣工の歩道橋であり、日本で初めてUFCが適用された全外ケーブル方式の単径間PC箱桁橋（橋長50.2m、支間長49.35m）である⁹⁷⁾⁹⁸⁾。その特徴は、上床版厚50mm、ウェブ厚80mm、下床版厚113mmと、従来のPC橋梁より部材厚が大幅に薄く、自重も1/5程度に軽減されていることである。また、UFCの高い引張強度により、鉄筋を一切用いていない。この橋は山形県酒田市に架設されており、冬季には日本海からの塩分を含んだ潮風にさらされる厳しい環境下にあるが、10年経過後の耐久性検証調査において、外観上の問題はなく、強度低下は一切見られず、塩化物イオンの浸透も2~3mmと非常に少ないことが報告されている。

羽田空港D滑走路の栈橋部では、UFCを用いたプレキャストPC床版が滑走路および誘導路の外側のエリア192,000m²に用いられた⁹⁹⁾¹⁰⁰⁾。UFC床版は高強度であり鉄筋を使用していないため、部材が薄く軽量化されている（リブ厚82mm、床版厚75mm、従来比約56%減）。また、高強度であるため、非常に大きなプレストレスの導入が可能となっている。このUFC床版は、予期せぬ航空機の荷重にも耐えられる高耐荷性、軽量化による下部工コストの削減、海洋構造物であるための高耐久性を実現している。

その他にも、羽田空港GSE（Ground Support Equipment）橋梁¹⁰¹⁾、歩道橋¹⁰²⁾、道路橋¹⁰³⁾、鉄道橋¹⁰⁴⁾、モノレール桁¹⁰⁵⁾、建築床スラブ¹⁰⁶⁾などに適用されている。

図2-24 酒田みらい橋¹⁰⁷⁾

ECC

ECCはひずみ硬化特性と複数ひび割れ特性を有する。ECCと鋼材を組み合わせた構造部材であるR/ECCにおいては、ECCの引張抵抗と鋼材保護効果が期待できる¹⁰⁸⁾。これまでのRCとPCでは圧縮抵抗はコンクリート、引張抵抗は鋼材、せん断抵抗はコンクリートと鋼材の両者による構造形式である。コンクリートをECCに置換するとECCに引張抵抗を期待できるため、せん断抵抗のみならず引張抵抗においても両者の累加による構造形式とできる。また、ECCのひび割れは複数微細であるため劣化因子の浸透を抑制して鋼材を保護効果が高めることが可能である。文献¹⁰⁸⁾に基づき以下に紹介する。

トンネル内巻き補強ではECCの引張抵抗を利用して、圧縮に加えて引張補強効果にも期待できる補強断面の薄いR/ECC補強工法が、新潟中越地震により被災したJR上越線天王トンネルの災害

応急工事に適用されている¹⁰⁹⁾¹¹⁰⁾。また、別の適用例として、鋼床版（美原大橋、北海道江別市）の上面増厚補強があり、ECC 鋼合成床版とすることで ECC の引張抵抗により鋼床版応力を低減させて、鋼床版の疲労耐久性の向上を図っている¹¹¹⁾¹¹²⁾。鋼材保護効果を利用した適用例としては、RC 鉄道高架橋の桁の底面に ECC 表面保護工を施した試験施工がある¹¹³⁾。中性化に対する予防保全として塗膜系ライニング材による保護工があるが、曲げ疲労荷重下のひび割れ幅の振幅によりライニング材に亀裂が生じて保護効果が低減することが懸念されている。ECC 表面保護工により曲げ疲労ひび割れ幅の抑制、コンクリート中性化抑制と鉄筋腐食速度遅延が期待される。高層 RC 建築構造物では、コア壁をつなぐ R/ECC 連結梁が耐震部材として実用化されている¹¹⁴⁾。要求条件としては、曲げ強度到達後の部材角 4%程度までは著しい強度低下を生じさせないこと、および地震後に幅が 0.3mm を超えるような耐久性に影響のあるひび割れを生じさせないこと、があり、ECC の引張抵抗と鋼材保護効果が利用されている。

アメリカのミシガン州では 2005 年に橋梁ジョイント部への ECC リンクスラブの施工が行われた¹¹⁵⁾。橋梁ジョイント部は、単純支持桁の桁間において伸縮を吸収するために設置されるが、交通荷重による損傷が激しい。損傷すれば融雪剤を含む水が路面から桁へと流れて、桁端の腐食や劣化につながる。ジョイントの更新も頻繁になされ、コスト的にも少なからぬ比率を占めるため、一つの対策として連続桁化が行われている。ECC リンクスラブによる連続桁化において、ECC は 4%程度の引張ひずみを示し、微細なひび割れは最終破断時まで 50~70 μm 程度の開口幅を示すことにより、ジョイント部において、変形に追従しながらも水などの浸透は少なくなることが期待された。

図 2-25 リンクスラブ部への ECC 打設¹¹⁵⁾

首都高速においても、ECC プレキャスト板を用いたノージョイント化工法の開発が 2005 年の着手に始まり、2005 年の高速 4 号新宿線、2006 年高速 3 号渋谷線、2007 年高速 1 号羽田線、2008 年都心環状線（図 2-26）において試験施工も含めて施工されている¹¹⁶⁾¹¹⁷⁾¹¹⁸⁾。首都高速は 115 万台／日の重交通を支えており、大型車の通行による伸縮継手部段差発生により継手と周辺の舗装劣化が起こり、これによる走行性の悪化と振動・騒音の発生が問題となっていた。こうした問題に対して、伸縮継手を撤去して走行面を連続化するノージョイント化を実施するに際して、埋設型ジョイ

ントや床版連結と比較して耐久性と施工時間の短さを両立させた本工法を開発して施工するに至っている。ここでは、伸縮部の変形に追従しつつ、局所的に割れずに複数微細ひび割れを発生する ECC を用いることで、舗装のひび割れを生じにくくして走行面の連続性を維持することを狙っている。また、首都高速においては特に施工時間を短くすることが必須である。2005 年以来、改良と経験の積み重ねにより通常夜間規制工事時間内での施工を可能としている。

図 2-26 ECC プレキャスト板によるノージョイント化¹¹⁸⁾

UHPFRC

2004 年以来スイスでの UHPFRC の適用例は 20 以上を数え、橋梁床版のシート系防水の置き換えとして薄層の防水層として用いる例や、橋梁や建物のスラブにおいて鉄筋も用いた R-UHPFRC の補強層として用いる例などがある¹¹⁹⁾。

最初の適用事例は 2004 年の小支間 RC 橋の改修と拡幅である。新たな RC 桁により拡幅が行われ、この桁の地覆はプレキャスト UHPFRC により作られた。さらに、塩害を受けていた床版上面のコンクリートは 30mm 厚の UHPFRC により置き換えられ、反対側の地覆表層も 30mm 厚の UHPFRC により置き換えられた。8 日間の湿潤養生の後に 40mm 厚のアスファルト舗装が設けられた。一車線を供用に確保しながらの工事は着工から 1 カ月で完工している。本橋は床版下面において鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの剥落と腐食鉄筋の露出が施工時に確認されており、これに対する対策は取られていないが、UHPFRC の高い防水性による床版上面と地覆までの防護により、その後の床版下面の劣化損傷の進展がほとんど見られないことが 10 年後にも確認されている。

この事例のように防護層として塩分や水などの劣化因子が浸透しないようにする適用や、塩害や水などにより部分的に環境作用が強く劣化損傷している部位への適用、新設の鉄道橋、造形性の高い歩道橋などへの適用がある。高強度性と防水性を付与しつつ、荷重と環境の作用に対して耐久性を向上させるという考え方の下に適用が進んでいる。

図 2-27 UHPFRC を用いた RC 橋改修¹¹⁹⁾**J-THIFCOM**

J-THIFCOM は超緻密・高強度で流動性と材料分離抵抗性に優れており、構造物の表面補修・補強および外面保護として劣化因子の遮断が期待でき、構造物の充填部や狭隘部に適する作業性とチクソトロピック性により施工勾配の変化にも対応できる点を活かして、新設構造物および既設構造物の補修・補強に適用が進められている⁶²⁾。

日本における J-THIFCOM の初適用事例は、北海道江別市の第二角山橋である。2014 年に橋梁床版補修として 600m² の面積に打設された。以後、実績を重ねており、京都府舞鶴市の松島橋においても 2017 年に床版補修として用いられ、その効果が確認されている¹²⁰⁾。海岸近傍に位置する松島橋は建設からすでに 55 年が経過し、大型車交通量の増大や凍結防止剤に伴う床版の耐荷力・耐久性の低下が認められる状況になっていた。これらに対して 2cm の厚さで 600m² の上面打設をして、アスファルト用接着剤塗布と表層打設で完成させており、特徴として防水工を不要としている点が挙げられる。補修前後の計測により、床版たわみ、ひび割れの開閉・ずれ・段差で大きな低減が見られ、主桁の中立軸上昇と橋軸直角方向の分配の改善も見られた。これまでに J-THIFCOM は、橋梁床版補修、橋梁杢座部補修・新設、支承ブラケット充填、橋脚補修、PC 桁断面補修、橋梁縁石補修、耐震ブラケット充填、等に適用されている⁶²⁾。



図 2-28 J-THIFCOM 敷均し完了後の松島橋

2.5 まとめ

本章では、繊維開発の歴史を振り返り、各種繊維の特徴と利用について概観した。次に、繊維補強による材料特性の向上についてまとめ、これまでに開発された主要な繊維補強セメント系複合材料について説明した。そして繊維補強セメント系複合材料が用いられている構造物についてまとめた。

FRCC が適用された構造物は、橋梁、トンネル、栈橋、建築物、導水管、擁壁など多岐にわたっている。これまでの構造利用では、主として引張の強度や靱性を活かして、部材の薄肉化や、増厚や巻き立てによる耐震性、耐衝撃性、耐疲労性の向上がなされてきている。また引張の高い変形性能を活かした連結部への適用などもなされている。これらに加えてひび割れ特性の利用も図られており、ひび割れ発生に対する抵抗性、微細なひび割れ幅による物質移動に対する抵抗性、さらには微細なひび割れで可能になる自己治癒性の利用は、表面保護工としての利点となり、上記の構造利用において相乗効果が得られる場合もある。これまでに多種多様な FRCC が開発されて適用されてきた。

一方で、現在の高性能繊維は、金属、高分子材料、セラミックの何れの材料分類からも作られており、その剛性、強度、伸度などの材料特性は全体として広く分布している。また、繊維寸法や形状は概ね製造方法に依存するものの、これもまた全体としては広く分布している。これらの理由により、補強材として用いる繊維の変数がとりうる範囲は非常に広く、試行錯誤で FRCC の特性値を探索するのは多大な労力を要するといえる。

幸いなことに、繊維は工場製品であり特性や寸法・形状にバラツキは大きくなく、形状は棒状であり比較的単純である。よって、破壊力学とマイクロメカニクスによりモデル化をすることで、FRCC の微視的な材料構造と材料特性値との間を結ぶモデルを構築し、特性値の探索をより効率的に行うことができる。これについて 3 章以降で述べていく。

参 考 文 献

- 1) Griffith, A. A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 221, pp.163-198, 1921.
- 2) 新日本製鐵株式會社, "モノづくりの原点－科学の世界 VOL. 25 高強度の最先端をいく棒鋼・線材 (2)", NIPPON STEEL MONTHLY, Vol. 157, pp. 11-14, 2006.
- 3) 神鋼建材工業株式会社, "土木一般用 (ドラミックス) カタログ", 2012.
- 4) Ashby, M. F. and Jones, D. R. H., "Engineering Materials 2, An Introduction to Microstructures, Processing and Design", Pergamon, 1986.
- 5) 日本化学協会炭素繊維協会委員会, <http://www.carbonfiber.gr.jp/tech/faq.html>, 2015
- 6) Bunsell, A. R., "Fibre Reinforcements for Composite Materials", Elsevier, 1988.
- 7) 大阪市立工業研究所プラスチック読本編集委員会・プラスチック技術協会, "プラスチック読本", プラスチック・エージ, 2009.
- 8) 東洋紡株式会社, <http://www.toyobo.co.jp/seihin/dn/dyneema/seihin/index.htm>, 2015.
- 9) 特許庁, "技術分野別特許マップ 化学 2 コンクリート添加剤", <http://www.jpo.go.jp/shiryousonota/map/kagaku02/frame.htm>, 2013.
- 10) Romualdi, J. P. and Batson, G. B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE Proc ;89(EM3): pp. 147-168, 1963.
- 11) Romualdi, J. P. and Mandel, J. A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", Journal of ACI, pp. 657-672, 1964.
- 12) 日本コンクリート工学協会, "高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う 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", 2002.
- 13) 中川威雄, "コンクリート補強用鋼繊維の種類と製造", コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, Vol. 15, No. 3, pp. 31-35, 1977.
- 14) 中川威雄・小林一輔, "コンクリート補強用「切削ファイバー」とその経済性", 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 31, No. 3, pp. 172-175, 1979.
- 15) 中川威雄, "切削による金属短繊維製造法の開発－その開発の経過－", 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 42, No. 8, pp. 453-458, 1990.
- 16) 三島清敬, "耐アルカリガラス繊維並びにガラス繊維補強セメントの製造", コンクリート工学,

- 日本コンクリート工学協会, Vol. 15, No. 3, pp. 22-25, 1977.
- 17) 入江正教, “ガラス繊維補強セメントの特性と応用”, コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, Vol. 15, No. 3, pp. 26-30, 1977.
 - 18) 山崎敏子・長谷川洋・安井至, “特許からみたセメント強化用耐アルカリ性ガラス繊維の研究動向”, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 35, No. 3, pp. 124-133, 1983.
 - 19) 日本 GRC 工業会, <http://grc.gr.jp/>, 2013.
 - 20) せんい強化セメント板協会, <http://www.skc-kyoukai.org/index.html>, 2013.
 - 21) 全国木質セメント板工業会, <http://www.woodcement.com/>, 2013.
 - 22) 閑田徹志・ビクターリー, “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方法”, 日本建築学会構造系論文集, No. 539, pp. 13-21, 2001.
 - 23) 閑田徹志, “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 2 飽和複数ひび割れを実現するための実際的な設計クライテリア”, 日本建築学会構造系論文集, No. 552, pp. 13-21, 2002.
 - 24) アラミド補強研究会, <http://www.aramid-ken.jp/index.html>, 2014.
 - 25) 竹山忠臣・小川義宏・出井丈也・内田裕市, “アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートに関する研究”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 313-318, 2009.
 - 26) 竹山忠臣・大森慎也・出井丈也・内田裕市, “アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの力学特性”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1253-1258, 2010.
 - 27) 佐々木亘・谷口秀明・樋口正典, “アラミド短繊維を用いた高強度繊維補強コンクリートの基礎物性”, 三井住友建設技術開発センター報告, 第 10 号, pp. 45-50, 2012.
 - 28) 前川亮太・河村直哉・加藤卓也・神谷清志, “空港 PC 版舗装下における繊維補強裏込めグラウト材の開発”, コンクリート工学, Vol. 50, No. 5, pp. 446-450, 2012.
 - 29) 大田康雄, “高強度ポリエチレン繊維「ダイニーマ®」”, 繊維学会誌, Vol. 66, No. 3, pp. 91-97, 2010.
 - 30) 中村光・国枝稔・丸山一平・上田尚史・Brühwiler, E.・Denariè, E., “緻密でよく曲がるセメント系材料を用いた補修・補強工法”, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート, 新道路技術会議, No. 20-5, 2011.
 - 31) 平石剛紀・坂田昇・矢吹増男・細田常正, “ポリプロピレン短繊維補強コンクリートのフレッシュおよび硬化性状”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 283-288, 2000.
 - 32) 椎名貴快・高橋秀樹・新谷壽教・本田和幸, “合成樹脂繊維を用いたトンネル覆工用繊維補強

- コンクリート-PP ファイバーライニング工法の開発と実施工への適用-”, 西松建設技報, Vol. 31, No. 1, pp. 1-6, 2008.
- 33) 椎名貴快, “コンクリート補強用ポリプロピレン短繊維シムロック SX の開発”, 西松建設技報, Vol. 34, No. 2, pp. 1-6, 2011.
- 34) 山崎康行・西田朗, “耐爆裂性コンクリート”, コンクリート工学, Vol. 36, No. 1, pp. 44-47, 1998.
- 35) 森田武, “コンクリートの爆裂防止とその防止対策”, コンクリート工学, Vol. 45, No. 9, pp. 87-91, 2007.
- 36) 太田信次, “高強度ポリプロピレン繊維 “シムテックス” “, 化繊月報, Vol. 53, No. 12, pp. 56-59, 2000.
- 37) 秋浜繁幸・末永龍夫・坂野正, “炭素繊維を用いたセメント系複合体 (CFRC) の力学的性質に関する実験的研究”, コンクリート工学, Vol. 20, No. 8, pp. 75-84, 1982.
- 38) 秋浜繁幸, “炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) について”, 日本複合材料学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 145-151, 1984.
- 39) 秋浜繁幸, “炭素繊維補強コンクリート (CFRC) -特性と適用事例-”, 建築技術, No. 412, pp. 139-148, 1985.
- 40) 秋浜繁幸, “講座 特殊な材料を用いたコンクリート (その 20) IV-4 カーボン繊維”, コンクリート工学, Vol. 25, No. 9, pp. 80-85, 1987.
- 41) 炭素繊維補修・補強工法技術研究会, <http://www.tampoken.com/>, 2014.
- 42) 炭素繊維協会, <http://www.carbonfiber.gr.jp/material/type.html>, 2018.
- 43) Ashby, M. F. and Jones, D. R. H., “Engineering Materials 2”, Pergamon, 1986.
- 44) 土木学会, “超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)”, コンクリートライブラリー-113, 2004.
- 45) 土木学会, “鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験方法 (案) (JSCE-G551-2013)”, 2013.
- 46) 土木学会, “鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 (案) (JSCE-G552-2013)”, 2013.
- 47) Kaneko, Y. and Mihashi, H., “Mechanical Model for Direct Shear Failure of Concrete”, Journal of Structure and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, No. 535, pp. 101-109, 2000.
- 48) 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井覚, “PVA-ECC のひび割れ面でのせん断伝達機構と部材のせん断耐力評価”, 日本建築学会構造系論文集, No. 619, pp. 133-139, 2007.

- 49) 日本コンクリート工学協会, “JCI 規準 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 JCI-S-001-2003”, 2003.
- 50) 日本コンクリート工学協会, “JCI 規準 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”, 2003.
- 51) 土木学会, “複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針 (案)”, コンクリートライブラリー127, 2007.
- 52) 土木学会, “2013 年制定 コンクリート標準示方書 規準編 「土木学会規準および関連規準」”, 土木学会, 2013.
- 53) 日本コンクリート工学協会, “JCI 規準集 (1977-2002)”, , 2004.
- 54) 日本コンクリート工学会, “JCI 規準・指針”, <http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/standard.html>, , 2016.
- 55) 小林一輔, “繊維補強コンクリート-開発研究の現状と将来-”, コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, Vol. 15, No. 3, pp. 2-6, 1977.
- 56) 越智恒男, 大久保誠介, 福井勝則, “鋼繊維補強コンクリートの特徴と発展経緯”, 資源と素材, 資源・素材学会, Vol. 121, pp. 555-563, 2005.
- 57) 小林一輔, 星野富夫, 辻恒平, “海洋飛沫帯に 5 年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状 (III) 鋼繊維補強コンクリートの防食効果”, 生産研究, Vol. 41, No. 11, pp. 883-886, 1989.
- 58) 日本 GRC 工業会, <http://grc.gr.jp/>, 2017.
- 59) 牧田通, “超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) の研究動向・利用状況-スイスの事例を中心として-”, コンクリート工学, 日本コンクリート工学会, Vol. 50, No. 5, pp. 494-499, 2012.
- 60) Rossi, P., “Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC): An Overview”, Proceedings of Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) BEFIB' 2000, pp. 87-100, 2000.
- 61) MCS-EPFL, “Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-Based Composites (UHPFRC)”, 2016.
- 62) J-ティフコム施工協会, <http://j-thifcom.com/>, 2019.
- 63) 内田裕市・田中良弘・片桐誠・二羽淳一郎, “土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計施工指針 (案)」の概要”, コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, Vol. 43, No. 3, pp. 3-8, 2005.
- 64) 内田裕市, “超高強度繊維補強コンクリート (UFC/UHPFRC)”, コンクリート工学, 日本コンクリート工学会, Vol. 54, No. 5, pp. 514-518, 2016.

- 65) Richard P, and Cheyrezy M. H., “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength”, Concrete Technology: Past, Present, and Future, SP-144, ACI, pp. 507-518, 1994.
- 66) Richard P, and Cheyrezy M. H., “Composition of Reactive Powder Concretes”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.7, pp. 1501-1511, 1995.
- 67) Naaman, A. E and Reinhardt, H. W., “Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC”, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPRCC2), RILEM Proceedings 31, pp. 1-24, 1995.
- 68) Naaman, A. E., “High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Science and Applications”, High Performance Construction Materials, World Scientific, Chapter 3, 2008.
- 69) Lankard, D. R., “Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications”, Concrete International, ACI, Vol. 6, No. 12, pp. 44-47, 1984.
- 70) Lankard, D. R., “Preparation, Properties and Applications of Cement Based Composites Containing 5 to 20 percent Steel Fiber Concrete”, Steel Fiber Concrete, eds. S. P. Shah and A. Skarendahl, Elsevier, pp. 199-217, 1986.
- 71) Krstulovic-Opara, N. and Malak, S., “Tensile Behavior of Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)”, ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 1, pp. 39-46, 1997.
- 72) Krstulovic-Opara, N. and Jamal Al-Shannag, M., “Compressive Behavior of Slurry Infiltrated Mat Concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 3, pp. 367-378, 1999.
- 73) 山口信・村上聖・武田浩二・佐藤あゆみ・三井宣之, “スラリー充填繊維コンクリート (SIFCON) の接触爆発に対する耐爆性能”, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 718, pp. 2033-2043, 2015.
- 74) 河野克哉・石田征男・高橋英孝・田中敏嗣, “鋼繊維を多量混入したセメント系材料の開発と力学特性”, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol. 33, No. 1, pp. 227-232, 2011.
- 75) 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, No. 471/I-24, pp. 1-12, 1993.
- 76) 村上聖・浦野登志雄・三井宣之, “鋼繊維補強コンクリートの力学パラメータに及ぼす調合因子の相互作用の定量分析”, コンクリート工学論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 7, No. 1, pp. 23-30, 1996.
- 77) 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”, 2001.

- 78) バルチップ株式会社, <https://www.barchip.co.jp/>, 2018.
- 79) 椎名貴快・高橋秀樹・新谷壽教・本田和幸, “合成樹脂繊維を用いたトンネル覆工用繊維補強コンクリート-PP ファイバーライニング工法の開発と実施工への適用-”, 西松建設技報 VOL.31, pp. 1-6, 2008.
- 80) 椎名貴快, “コンクリート補強用ポリプロピレン短繊維シムロック SX の開発”, 西松建設技報 VOL.34, pp. 1-6, 2011.
- 81) 日本 GRC 工業会, <http://www.grc.gr.jp/>, 2018.
- 82) Homrich, J. R. and Naaman, A. E., “Stress-Strain Properties of SIFCON in Uniaxial Compression and Tension”, AFWL-TR-87-11, Air Force Weapons Laboratory, 1988.
- 83) Farnam, Y., Moosavi, M., Shekarchi, M., Babanajad, S. K., and Bagherzadeh, A., “Behaviour of Slurry Infiltrated Fibre Concrete (SIFCON) under Triaxial Compression”, Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 1571-1581, 2010.
- 84) Krstulovic-Opara, N. and Malak, S., “Micromechanical Tensile Behavior of Slurry Infiltrated Continuous-Fiber-Mat Reinforced Concrete (SIMCON)”, ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 5, pp. 373-384, 1997.
- 85) SIA, “Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - Baustoffe, Bemessung und Ausführung”, SIA 2052, 2016.
- 86) Maalej, M. Hashida, T., and Li, V. C., “Effect of Fiber Volume Fraction on the Off-Crack-Plane Fracture Energy in Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 78, No. 12, pp. 3369-3375, 1995.
- 87) Li, V. C., “Engineered Cementitious Composites (ECC) - Tailored Composites through Micromechanical Modeling”, Fiber Reinforced Concrete: Present and Future, Canadian Society for Civil Engineering, 1998.
- 88) 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.
- 89) 国枝稔・Kamal, A.・中村光・Brühwiler, E., “超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発”, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 29, No. 1, pp. 315-320, 2007.
- 90) 高速道路調査会, “上面増厚工法設計施工マニュアル”, 1995.
- 91) 上東泰, “繊維補強コンクリートの増厚補強と断面修復材への適用”, コンクリート工学, コンクリート工学会, Vol. 50, No. 5, pp. 438-441, 2012.
- 92) 吉田公宏・土橋浩・津野和宏・屋代勉, “シールドトンネルへの適用例 (鋼繊維補強コンクリートセグメント)”, コンクリート工学, コンクリート工学会, Vol. 50, No. 5, pp. 462-467, 2012.

- 93) 土木学会, “鋼床版の疲労 [2010 年改訂版]”, 鋼構造シリーズ 19, 2010.
- 94) 土木学会, “吹付けコンクリート指針 (案) [トンネル編]”, コンクリートライブラリー121, 2005.
- 95) 土木学会, “吹付けコンクリート指針 (案) [のり面編]”, コンクリートライブラリー122, 2005.
- 96) 土木学会, “吹付けコンクリート指針 (案) [補修・補強編]”, コンクリートライブラリー123, 2005.
- 97) 下山善秀・田中良弘・小林忠司, “200N/mm²級セメント系繊維補強複合材料の適用—酒田みらい橋—”, コンクリート工学, Vol. 41, No. 1, pp. 20-24, 2003.
- 98) 大成建設株式会社・太平洋セメント株式会社・前田製管株式会社, “超高強度繊維補強コンクリートを用いた日本初のプレストレストコンクリート歩道橋酒田みらい橋竣工 10 年目の耐久性検証調査”, http://www.taiheiyo-cement.co.jp/service_product/ductal/index.html, 2013.
- 99) 武者浩透・大竹明朗・横井謙二・野口孝俊, “高耐荷 UFC 床版構造と量産化システムの開発”, コンクリート工学, Vol. 48, No. 11, pp. 28-35, 2010.
- 100) 横井謙二, “栈橋部 UFC 床版”, コンクリート工学, Vol. 49, No. 1, pp. 116-117, 2011.
- 101) 武者浩透・渡辺典男・福原哲・大澤和也, “UFC (ダクトル) を用いた GSE 橋梁の設計と実験—世界最大規模の UFC 道路橋—”, 大成建設技術センター報, 第 43 号, pp. 22-1-22-8, 2010.
- 102) 田中良弘・武者浩透・大島邦裕・安部吉弘, “超高強度繊維補強コンクリートを用いた PC 橋梁の長大スパン化に関する研究開発”, コンクリート工学, Vol. 42, No. 8, pp. 30-36, 2004.
- 103) 黒岩正・岩崎郁夫・大熊光, “超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋—東九州自動車道堀越 C ランプ橋—”, コンクリート工学, Vol. 43, No. 10, pp. 39-44, 2005.
- 104) 森川陽平・谷村幸裕・神尾正・大熊光, “三岐鉄道「萱生川橋梁」の設計と施工—世界初の UFC 鉄道橋—”, コンクリート工学, Vol. 49, No. 4, pp. 39-45, 2011.
- 105) 田中良弘・小林隆・石堂正之・大川真佐雄, “超高強度繊維補強コンクリートを適用した長大スパン・モノレール桁の技術開発”, コンクリート工学, Vol. 45, No. 11, pp. 27-34, 2007.
- 106) 馬場重彰・笹井弘雄・森田尚・野崎浩司, “超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレストレストスラブの耐火設計および施工”, コンクリート工学, Vol. 45, No. 7, pp. 38-45, 2007.
- 107) 土木学会, https://www.jsce.or.jp/prize/prize_list/7_tanakasakuhin.shtml, 2019.
- 108) 関田徹志・坂田昇・国枝稔・六郷恵哲, “複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料

- (HPFRCC) の研究の現状と構造利用の事例”, コンクリート工学, Vol. 44, No. 3, pp. 3-10, 2006.
- 109) 名見耶薫・真下英人・松原功明, “高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法の実大載荷試験”, 年次学術講演会講演概要集, 土木学会, Vol. 60, pp. 481-482, 2005.
- 110) 山本拓治・名見耶薫・平石剛紀・坂田昇・清水満・真下英人, “高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補修技術—中越地震で被災したトンネル補修工事への適用—”, 年次学術講演会講演概要集, 土木学会, Vol. 60, pp. 483-484, 2005.
- 111) 三田村浩・坂田昇・赤代恵司・須田久美子・平石剛紀, “鋼床版への高靱性繊維補強セメント複合材料 ECC を用いた補強工法の適用—美原大橋における施工—”, 橋梁と基礎, Vol. 39, No. 8, pp. 88-91, 2005.
- 112) 福田一郎・三田村浩・今野久志・松井繁之, “FRP ジベルを配置した鋼床版の高靱性セメント複合材料による上面増厚効果”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 1693-1698, 2004.
- 113) 須田久美子・六郷恵哲, “鉄道高架橋の曲げひび割れ部中性化抑止対策工への吹付け ECC 工法の適用”, コンクリート工学, Vol. 43, No. 5, pp. 162-167, 2005.
- 114) 丸田誠・閑田徹志・永井覚・山本幸正, “プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構” コンクリート工学, Vol. 43, No. 11, pp. 18-26, 2005.
- 115) ACE-MRL, http://ace-mrl.engin.umich.edu/NewFiles/projects/linkslab_timeline.html, 2019.
- 116) 金山将人・永田佳文・藤代勝・須田久美子, “高じん性モルタルを用いた高架橋ノージョイント化工法の開発と施工”, 年次学術講演会講演概要集, 土木学会, Vol. 62, pp. 615-616, 2007.
- 117) 内田雄士・藤代勝・須田久美子・永田佳文, “高じん性モルタルを用いた高架橋ノージョイント工法の開発と設計”, 年次学術講演会講演概要集, 土木学会, Vol. 62, pp. 617-618, 2007.
- 118) 依田勝雄・永田佳文・黒須勝三・鈴木克彦, “首都高速都心環状線におけるノージョイント化への挑戦—ウルトラジョイントの開発と施工—”, 土木学会誌, 土木学会, Vol. 93, No. 12, pp. 42-45, 2008.
- 119) Brühwiler, E. and Denarié, E., “Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete”, Structural Engineering International, Vol. 23, No. 4, pp. 450-457, 2013.
- 120) 植田健介・三田村浩・真鍋英規・馬場弘毅, “松島橋床版補修工事における超緻密高強度繊維補強コンクリートの適用事例報告”, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp. 243-248, 2018.