

## 連携記事

# 鋼繊維を混和した超高強度繊維補強コンクリートによるコンクリート構造物の機能・耐久性向上

Improvement of Function and Durability of Concrete Structures by Using Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete

柳井修司  
Shuji Yanai

鹿島建設(株)  
技術研究所 土木材料グループ  
上席研究員

## 1 はじめに

コンクリートは、「圧縮に強いが、引張に弱い」、「引張に対して伸び能力に乏しく、脆性的に破壊する」、「設計上は引張力の負担を期待できない」…。これがコンクリートの力学的性能のうち、その“短所”を示す代表的な言葉であるといえよう。したがって、通常のコンクリート部材あるいはコンクリート構造物は、上述の短所を補うため、引張に抵抗する鉄筋やH形鋼あるいはPC鋼材等によって補強がなされる。これは、コンクリート構造史上、長い歴史の中で変わらない思想として用いられてきた。これに対し、高引張強度を有する細く短い繊維状の鉄（以下、鋼繊維）を多量に混和し、引張力を負担することができる新たなコンクリート材料として開発されたのが、「超高強度繊維補強コンクリート（Ultra high strength Fiber reinforced Concrete：以下、UFC）」である。鋼繊維の力を積極的に活用したこの材料によって、コンクリート構造物の機能、耐久性が格段に高まるものと期待されている。

## 2 超高強度繊維補強コンクリート「SUQCEM<sup>®</sup>」

### 2.1 超高強度繊維補強コンクリートとは

超高強度繊維補強コンクリート（UFC）は、圧縮強度の特性値が $150\text{N/mm}^2$ 以上、引張強度の特性値が $5\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度と中性化や塩害、凍害に対して非常に高い抵抗性を有するコンクリート、として定義されている。緻密なコンクリートマトリクスによって優れた圧縮強度と耐久性が発揮され、鋼繊維の混入によってひび割れに対する抵抗性とひび割れが生じた後のじん性が付与されている。

UFCは、もともとフランスで開発された反応性粉体コンクリート（Reactive Powder Concrete：以下、RPC）を起源に進化発展し、このRPC起源のUFCが我が国に技術導入された。2004年には土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」が制定・刊行され、これに基づいた設計・施工がなされるようになった。従来のコンクリートと大きく異なるのが、「引張強度を負担できる材料として設計を行うことができる」という点にあり、また、硫酸などの化学的侵食のない一般の環境下では、100年の耐久性を保証することができる。

### 2.2 「SUQCEM<sup>®</sup>：サクセム」とは<sup>1)</sup>

SUQCEM<sup>®</sup>（Super high Quality CEmentitious Material）は、RPC由来とは異なるUFCであり、上述の指針に準じて設計・施工を行うことができる材料として土木学会から技術評価を受けている（技術評価証第0003号）。RPC由来のものが、セメントの水和反応やポゾラン反応と構成材料の粒子の大きさや形状を調整することで組織を緻密化しているのに対し、我が国で開発されたこのUFCは、水和初期段階でのエトリンガイトの生成（写真1）とその後のセメントの水和ならびにポゾラン材の活性によって微細空隙を埋め、組織を緻密化させる構成となっている。以後、RPC由来のUFCと区別するためSUQCEM<sup>®</sup>をAft系UFCと示す。

コンクリートマトリクスに引張強度とじん性付与する鋼繊維は、RPC由来のものが、長さ15mm、 $\phi 0.2\text{mm}$ のものを2.0vol.%混和するのに対し、Aft系UFCでは、長さ15mmと22mmの2種類を混合して1.75vol.%を混和する（写真2、 $\phi 0.2\text{mm}$ ）。図1は、長さ22mmと15mmの2種類の鋼繊維をそれぞれ単独で使用した場合と混合して使用した場合について、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の試験体を用いて曲げ強度試験を実施

した結果である。繊維長が長い方が少ない混入率で高い曲げ強度が得られることがわかる。しかし、繊維長が長いと繊維が絡みやすく、流動性が阻害されやすくなる。長さの異なる2種類の銅繊維を適切に混合することで、写真3に示すように優れた流動性を保ちながら、高い曲げ強度すなわち高い引張強度と引張じん性を効率的に実現している。

### 2.3 AFt系UFCの主な特徴<sup>1,2)</sup>

図2は、AFt系UFCと普通コンクリートで製作した梁(断面：高さ200mm×幅150mm×長さ1,500mm)の曲げ実験結果である。普通コンクリートではひび割れと同時に破壊に至

るのに対して、AFt系UFCでは、ひび割れ発生後も銅繊維の架橋効果によってひび割れが次々に分散して発生し(写真4)、耐荷力と変形性能に優れた挙動を示す。

耐久性に関する特性として、AFt系UFCの物質移動に関する諸物性を表1に示す。比較対象とした80 N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートの物性値に対して、AFt系UFCの物性値は、透気係数で1/1000、透水係数で1/100万、塩化物イオンの見かけの拡散係数では1/100と、物質移動に対する抵抗性が格段に優れていることがわかる。AFt系UFCの組織の緻密性により、過酷な気象条件下でも100年以上の耐久性が保証される。



写真1 緻密化を実現するエトリンガイト<sup>1)</sup>



写真3 優れた流動性<sup>2)</sup>



写真2 SUQCEM<sup>®</sup>用銅繊維<sup>1)</sup>

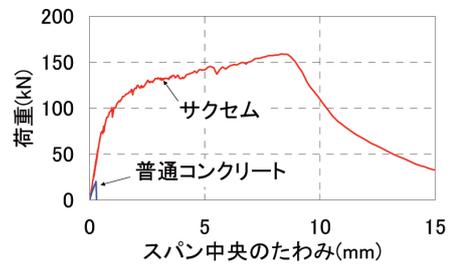


図2 無筋部材での曲げ実験の結果<sup>2)</sup>

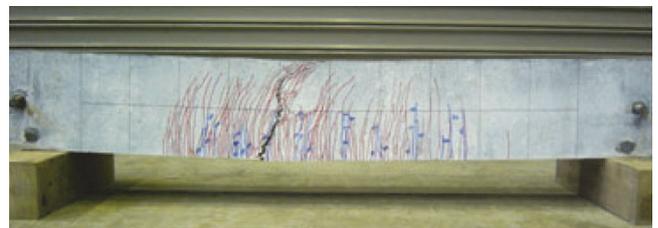


写真4 曲げ実験におけるひび割れ発生状況<sup>1)</sup>

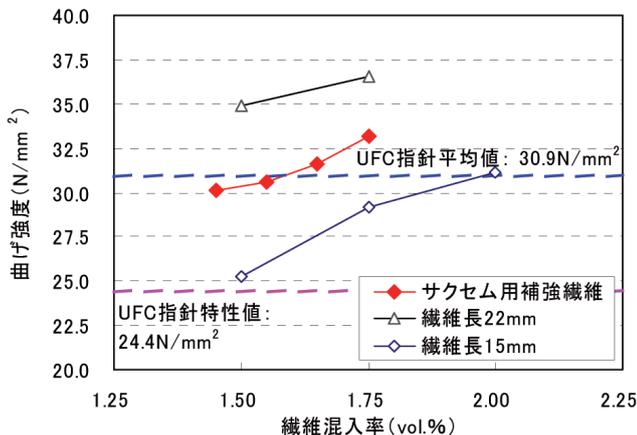


図1 繊維混入率と曲げ強度の関係<sup>2)</sup>

表1 物質移動に関する諸物性<sup>1,2)</sup>

項目	SUQCEM <sup>®</sup>	高強度コンクリート
圧縮強度	180N/mm <sup>2</sup>	80N/mm <sup>2</sup>
水結合材比	0.15	0.3
透気係数	4.5×10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>	1.0×10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup>
透水係数	4×10 <sup>-17</sup> cm/s程度	1.0×10 <sup>-11</sup> cm/s
塩化物イオンの拡散係数	0.0017 cm <sup>2</sup> /年	0.14cm <sup>2</sup> /年

### 3 AFt系UFCの適用事例 (プレキャスト部材)

AFt系UFCの養生は、5~40℃での湿潤養生を24時間行った後、85℃の蒸気養生を20~24時間行うことを基本としている。これは、水和初期段階でのエトリンガイトの生成とその後のセメントの水和ならびにポズラン材の活性を促して効率的に緻密性を高め、また、収縮やクリープを予め低減しておくためである。そのため、AFt系UFCで構築される部材の多くは、プレキャスト工場で作製され、現場で架設・接合されている。

#### 3.1 埋設型枠としての適用事例<sup>2)</sup>

写真5は、鉄道橋上部工に埋設型枠として用いられた事例である。施工の制約上、足場・支保工を設けることができないため、AFt系UFC製型枠を鋼主桁および鋼横桁に預けるように設置し、その上に床版コンクリートを打設して、一体化構造とした。対象とする橋梁下部の交通機能を損なうことのない施工を実現している。



写真5 埋設型枠としての鉄道構造物への適用 (本設利用)<sup>3)</sup>

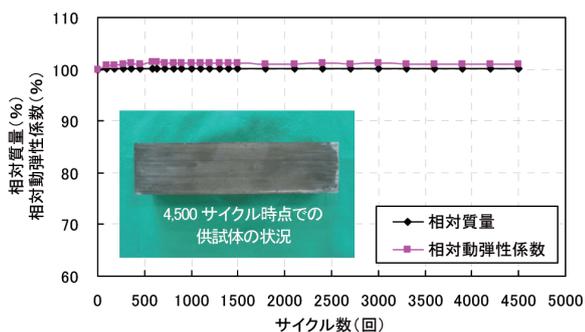


図3 凍結融解抵抗性試験の結果<sup>1,3)</sup>

AFt系UFC製の埋設型枠は、施工の合理化を目的とした利用の他に、その優れた凍結融解抵抗性(図3)や擦り減り抵抗性(図4)を活用し、ダムや放水路側壁や取水塔などの水理構造物の高耐久化・長寿命化を図る手段としても適用が進められている(写真6)。

#### 3.2 プレストレストコンクリート橋への適用事例<sup>3,4)</sup>

UFCは、プレストレストコンクリート構造にも適している。その高い圧縮強度を活用して、薄肉断面でも高いプレストレスを導入することができるため、より合理的な構造が可能となる。これまでに水路橋、歩道橋、道路橋などにおいて薄肉断面で長支間の構造を実現している。

写真7は、水路橋への適用事例である。本主桁は、AFt系UFCとPC鋼材の組み合わせによって桁高支間比が約1/38と非常にスレンダーな構造を実現している。橋長24mを、プレキャスト工場にて目地・継目を設けることなく一体で製作し、

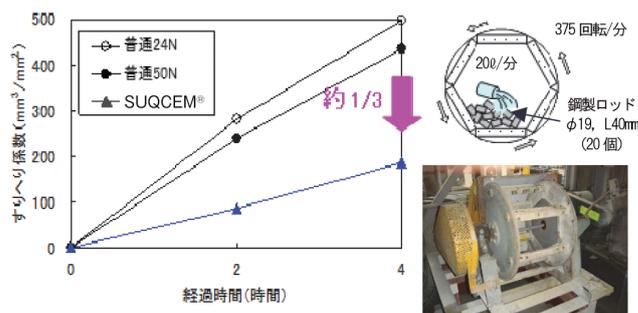


図4 擦り減り抵抗性の評価結果 (電力中央研究所 奥田式試験)



写真6 ダム放水路側壁への適用



写真7 水路橋への適用

ポストテンション方式でプレストレスを導入した(1S21.8: シングルストランド19本より21.8mm、導入力313kN/本×5本)後、運搬・架設した。高耐久で、継目や角折れのない機能的な水路を構築できている。

写真8は、桁下空間の制限と商業施設同士のバリアフリー化を両立させた歩道橋である。AFt系UFCとPC鋼材の組合わせにより桁高500mm、床版厚さ70mmというスレンダーな構造を実現した。27mの桁を5つのセグメントに分割して製作し、運搬・架設した。その後、幅50mmの目地に「収縮低減型の場所打ちSUQCEM®」を打ち込み、60℃の給熱養生によって目地部の圧縮強度を発現させた上で、外ケーブルポストテンション方式でプレストレスを導入し一体化させた。

### 3.3 海洋構造物への適用事例

海洋構造物は、特に塩害に対する抵抗性が求められる。図5は、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に従って、

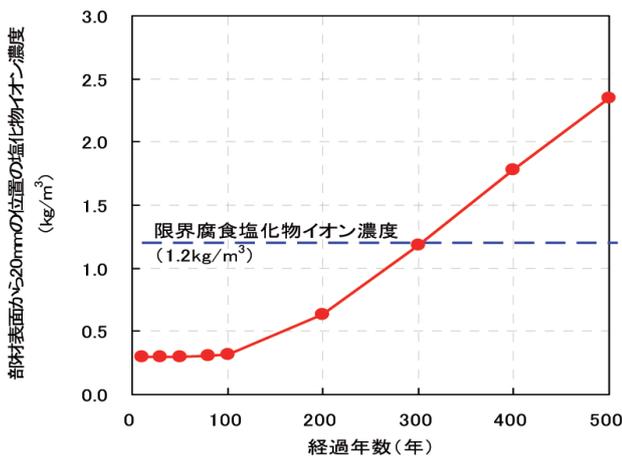


図5 かぶり20mmにおける塩化物イオン量の試算結果<sup>1,2)</sup>

経年に伴う鋼材位置での塩化物イオン濃度の変化について試算を行った結果である。鋼材の最小かぶりを20mmとし、飛沫帯を想定して表面の塩化物イオン濃度を13kg/m<sup>3</sup>、初期塩化物イオン量を一般的な上限値である0.3kg/m<sup>3</sup>、塩化物イオン拡散係数は表1(前出)に示す値をもとに0.002cm<sup>2</sup>/年として算定した。同図より、鋼材位置の塩化物イオン濃度が1.2kg/m<sup>3</sup>になるときに腐食が発生すると仮定すれば、鋼材が腐食するのは供用後300年以降であることがわかる。UFCを用いた部材は、鋼材のかぶりが適切であれば、厳しい塩害環境下においても100年以上の耐久性を確保できる。

#### (1) 栈橋への渡り橋<sup>2,3)</sup>

写真9は、東京国際空港D滑走路工事の監督用交通船および供用中の警戒艇を係留するための栈橋への渡り橋である。本橋は、AFt系UFCを使用したプレテンション桁と現場打ちの横桁(普通コンクリート)で構成される橋長25mの単純桁橋である。

本橋では、既設護岸の消波工を残した上で車両の乗入れが可能な構造形式とするため桁高を1.0mに抑えること、暴風波浪時の波による上向きの揚圧力の受圧面積を小さくするために部材幅を小さくすること、厳しい塩害環境にあるため高い耐久性を有することが求められた。設計基準強度



写真9 栈橋への渡り橋<sup>2)</sup>

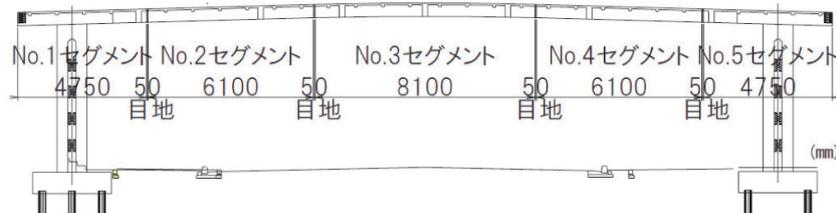


写真8 歩道橋への適用事例

60N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いたPC橋でも桁高1.6mが限界であったが、AFt系UFCを採用することで桁高1.0mを実現することができた。この渡り橋は、維持管理、メンテナンスの大幅な低減が期待されている。

(2) 海上空港棧橋部のプレキャストPC床版<sup>3)</sup>

写真10は、東京国際空港D滑走路の棧橋部（埋立部との接続部）である。棧橋部は、海中に打設した鋼管杭と鋼製のジャケッとおよびジャケットの上部桁上に配置するコンクリート床版から構成されている。このうち、着陸帯となる外周部には、UFCを使用したプレキャストPC床版が採用された（図6、深緑色部）。本構造は、UFCの高い強度特性を活かすことで、設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを使用した床版よりも重量が約60%低減されている。これにより、床版を支持する鋼管杭や鋼製ジャケットの数量が低減され、建設費の大幅な低減につながった。また、今後の運用において、塩害対策や防水対策などの維持管理費の低減にも大きな期待が寄せられている。

約20万m<sup>2</sup>のUFC床版のうち、約2万m<sup>2</sup>(797枚、約2,600m<sup>3</sup>)



写真10 東京国際空港D滑走路棧橋部（ジャケッ式棧橋）<sup>5)</sup>

がAFt系UFC製の床版である。UFC床版は、千葉県富津市の岸壁に位置する専用の工場で作られた。製作工場は、UFCを練り混ぜる製造プラントのほか、2つの製作ライン（長さ約100m・幅約12mの製作ヤード、養生槽、仕上げ・検査ヤード、ストックヤード）からなり、1つのラインで一度に最大20枚の製作が可能であった。製作ラインに沿って打設されたUFC床版は、一次養生（20～30℃、12～16時間）後に脱型され、縦横2方向にプレストレスを一括して導入された。PC鋼線を切断後、養生槽に運搬された床版は、二次養生として85℃・24時間の蒸気養生を施され、仕上げがなされた後、海上運搬によりジャケッ上部桁に設置された（写真11）。

3.4 リニューアル工事での活用事例

(1) 道路橋上部工の架替え（プレキャスト）<sup>3)</sup>

写真12は、AFt系UFC製の主桁を使って架け替えられた道路橋である。

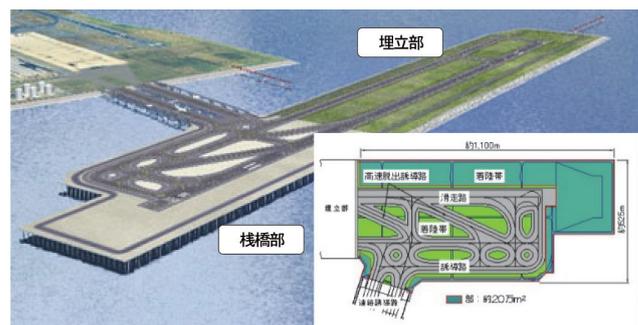


図6 滑走路全体図と棧橋部の構成（深緑色の範囲がUFC床版部）<sup>5)</sup>



7,800×3,600mm

写真11 AFt系UFC製床版の製作・架設<sup>3,5)</sup>

本橋は、経年劣化した上部工の架替えによってリニューアルされたものであるが、旧橋の橋台をそのまま利用し、旧橋には設置されていなかった地覆やガードレールの設置が求められた。上部工の総重量を旧橋以下にする必要があり、AFt系UFC製の主桁による軽量化が採用された。

橋長7.46mの上部工は、プレテンション方式で製作した5本のPC主桁の間に間詰コンクリートを現場打設し、横締めPC鋼材で一体化させる床版とした。AFt系UFCの適用によって、主桁重量は従来のJIS桁の半分となり、橋台を補強することなく、耐久性と供用性の向上が実現した。

(2) 道路橋の架替え (場所打ち施工)<sup>6)</sup>

写真13は、発電所のリニューアル工事に伴い、もともと設置されていた吊り橋に代わるアクセス道として整備された橋梁である。本橋は、豪雪地帯に位置し、凍害や凍結防止剤

による塩害に対する維持管理性を向上すること、長寿命化によって廃棄物を削減して環境負荷を低減することを目的として、AFt系UFCが採用された。本橋の架設地点へのアクセス道は幅員が狭く、大型のプレキャスト部材を運搬することが困難であり、また、部材を細かく分割した場合に増える継目は施工性および耐久性上の課題となった。そこで、AFt系UFCを「場所打ち施工」する方法が採用された。前述のとおり、UFCは、プレキャスト部材として展開されてきたが、通常のコンクリートと同様に現場で施工できるように、市中のレディーミクストコンクリート工場から打込み箇所までの運搬時間に対する流動性の保持、打込み・打重ね方法、給熱・保温養生手法、温度ひび割れ対策に関する技術的な検討がなされ、本橋の施工に展開された。初めての試みとなった場所打ち施工状況を写真14に示す。

なお、本橋では、合理的に桁断面を小さくできる内外ケーブル併用配置が採用された(図7)。内外ケーブルとも引張強さ2,000N/mm<sup>2</sup>の高強度PC鋼材を採用し、配置本数を低減して施工の合理化が図られている。また、内ケーブルには、新たに開発された「湿気硬化型の高強度プレグラウトPC鋼材(1S29.0)」を適用し、「AFt系UFC」と「新しい高強度PC鋼材」を組み合わせ「新構造」となっている。



写真12 架け替えらえた道路橋<sup>4)</sup>



写真13 AFt系UFCの場所打ち施工で構築された道路橋<sup>6)</sup>

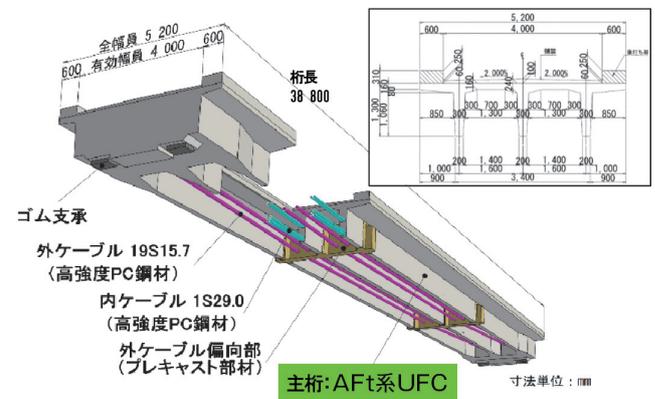


図7 小滝川橋梁の構造パース図<sup>6)</sup>



写真14 AFt系UFCの運搬・打込み状況<sup>6)</sup>

## 4 今後の展開に向けて

我が国における建設市場、特に土木分野の市場は、新設の時代からリニューアルの時代へとシフトしていくことになる。現在のインフラストックを長く、安全に、快適に使用していくためには、それらの延命・リニューアルが前提となり、リニューアルした後の機能（構造的、耐久性、そして美観）を確実に高めることが重要となる。また、リニューアル工事は、社会的な影響を最小限にするために、早く、安全、確実にを行う必要がある。すなわち、最小限の手当てで最大限の効果が発揮される手法が求められる。

前出の3. 4では、AFt系UFCをリニューアル工事に活用した事例を示したが、ここでは、上記の視点から、新たに進めている取組みについて、その概要を紹介する。

### 4.1 道路橋床版を対象とした取替用プレキャストUFC床版<sup>7)</sup>

図8は、AFt系UFCを用いた取替用UFC床版である。旧来の設計（交通荷重）で建設された厚さ170～180mmのRC床版を、床版厚や重量の増加を伴うことなく、つまり、鋼桁や下部構造の補強を伴うことなく取り替え、耐荷力・耐久性を向上させることを目的としたものである。

取替用UFC床版は、橋軸直角方向をプレテンション方式、橋軸方向をポストテンション方式とした平板形状で、床版の重量はRC床版の約1/2となっている（平板の厚さは支える桁の間隔に応じ、約130mm～150mm）。このAFt系UFCを用いた取替用UFC床版の性能は、土木学会から、安全性およ

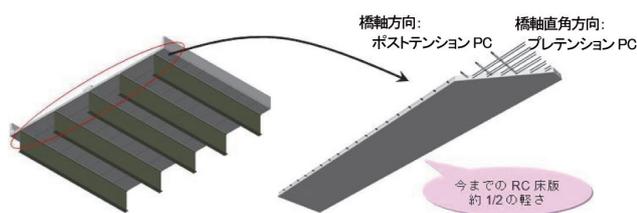


図8 取替用プレキャストUFC床版<sup>5)</sup>

び使用性に問題がないとの評価を受けている（技術評価証第0017号）。現在、「UFC床版研究会」を組織し、幅広い普及・展開を図っている。

### 4.2 UFCによる道路床版の打替え・増厚<sup>8)</sup>

高速道路の大規模更新・大規模修繕事業においては、劣化した既設RC床版の撤去・取替えが主な基本方針となっているが、外来塩分により劣化したRC床版の「上面打替え」や耐荷性や耐疲労性の向上を目的とした「上面増厚」も視野に入れている。打替えや増厚の材料として、UFCを用いることで、その施工厚さを最小限にすることができ（図9）、既存の桁や下部構造の補強を最小限に抑えた上での高耐久化が図れる。短い施工期間で、維持管理費を含めたコストのミニム化を実現できるリニューアル技術として期待される。

これまでに、初期ひび割れ抵抗性をさらに向上させた材料の検討を進めてきており、これまでに良好な施工性を有すること、硬化時の反りや変形は微小で既設床版と良好な一体性が得られること、薄層で打ち替えても既設床版や鉄筋の拘束によるひび割れが発生しないこと、などを確認している。また、施工機械の選定・評価を終え（写真15）、工法の確立に向けた研究開発を進めている。

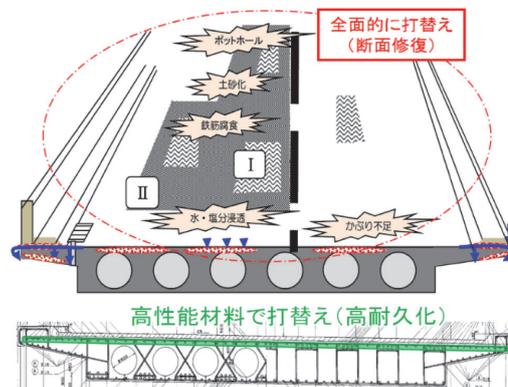


図9 高速道路の床版打替えのイメージ<sup>8)</sup>



写真15 材料の敷設状況（施工実験）



写真16 吹付け実験の状況

### 4.3 型枠を用いない断面補強<sup>9)</sup>

構造物を、型枠を用いずに薄肉で補修・補強し、機能を向上させる技術の一つとして、UFCを吹付け工法に展開する検討を進めている。例えば、内空制限のあるトンネルの補強、崩落の危険性が生じた法面の補強、型枠・支保工が設置困難な橋脚の耐震補強、かぶりが小さく中性化や塩害による鉄筋腐食が懸念される部材の劣化予防などにおいて、最小限の工手で構造物の延命化を図る技術の構築を目指している。

これまでに、小規模ではあるものの、AFt系UFCをアレンジした材料の吹付けが可能となっており(写真16)、50mm程度の施工厚さで良好なだれ止め性が得られること、吹き付けた後の強度特性として、圧縮強度 $150\text{N/mm}^2$ 程度、曲げ強度 $5\text{N/mm}^2$ 程度の高強度が得られること、既設コンクリートと良好な付着一体性が得られることを確認している。

## 5 おわりに

緻密化されたセメント系材料のマトリクスに多量の銅繊維を混入して実現された高強度・高耐久性を有するUFC材料「SUQCEM<sup>®</sup>」について、その特長と適用例を紹介するとともに、構造物の長寿命化や大規模更新・大規模修繕事業での活用に向けた研究開発の状況について概説した。UFCは、自身の引張強度を担保する銅繊維技術、PC鋼材を用いたプレス

トレス導入技術など「鉄の技術」によって成り立ち、支えられている。と同時に、構造材料として「鉄」と競合する材料でもある。コンクリートと鉄、それぞれがそれぞれの特長を活かし、高め合いながら、より良いインフラ整備に役立てられていくことを切に望む次第である。

### 参考文献

- 1) サクセム研究会：サクセム設計・施工マニュアル(案)，(2014.3)
- 2) 一宮利通，日紫喜剛啓，大野俊夫，芦田公伸，野口孝俊：未来材料，8(2008)10，46.
- 3) 渡邊有寿，柳井修司，渡邊賢三，向原健，一宮利通，大野俊夫：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の耐久性と最近の適用事例，鹿島技術研究所年報，58(2010)，177.
- 4) 松原功明，大野俊夫，一宮利通，坂井吾郎，柳井修司，平陽兵，本田智昭，渡邊有寿，石井精一，芦田公伸，山田真人：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」を使用したPC，鹿島技術研究所年報，55(2007)，171.
- 5) 鹿島建設株式会社HP
- 6) 渡邊有寿，柳井修司，入内島克明，栖原健太郎：コンクリート工学，53(2015)7，629.
- 7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート(UFC)道路橋床版に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー，(2015.7)
- 8) 柳井修司，渡邊有寿，牧田通，北川寛和：プレストレストコンクリート工学会，第26回シンポジウム論文集，(2017)，469.
- 9) 高木智子，渡邊有寿，柳井修司，青山達彦，坂井吾郎：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，17(2017)，425.

(2018年1月31日受付)