

超高強度繊維補強コンクリート 「サクセム」を用いたPC橋

一宮 利通¹・大野 俊夫²・日紫喜 剛啓³

¹鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)

²鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)

³鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1) .



超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」は組織が緻密であるため高い圧縮強度と高い耐久性を併せ持っている。また、鋼繊維で補強することにより高い引張強度とじん性を持ち、鉄筋不要のコンクリート構造体を構築できるコンクリートである。「サクセム」をプレストレストコンクリート(PC)橋に適用することによって、普通コンクリートを用いたPC橋に対し、軽量化による架設作業や下部構造への負担軽減に伴うコストダウン、優れた耐久性を活かしたライフサイクルコストの低減等を図ることができる。ここでは、「サクセム」の材料的な特徴および「サクセム」を用いた構造物の特徴について紹介する。

キーワード 超高強度繊維補強コンクリート, じん性, 耐久性, PC橋

1. はじめに

コンクリートは圧縮に強く、引張に弱いため、引張に強い鉄筋で補強して鉄筋コンクリート構造として使用するのが一般的である。高張力鋼材を用いてあらかじめコンクリートに圧縮応力を与えるプレストレストコンクリート(PC)構造として使用される場合もある。これらの構造をさらに合理的なものにするため、コンクリートそのものを改善する試みもなされてきた。例えば、コンクリートに引張が抵抗できる性能を付加した繊維補強コンクリートや、より大きなプレストレスを与えられるようにコンクリートの圧縮強度を高くした高強度コンクリートである。

超高強度繊維補強コンクリート(UFC)はこれら二つの材料的な改善を現在の技術力の限界まで高めたものである。UFCは約200N/mm²の高い圧縮強度と約10N/mm²の高い引張強度を併せ持ち、鉄筋不要のコンクリート構造体を構築できるコンクリートである。さらに材料の組織が緻密であるため、通常のコンクリートに比べて格段に高い耐久性も持つ。UFCは欧州で実用化され、我が国に技術導入された。土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」¹⁾(UFC指針)が2004年9月に刊行されたことにより、日本においてもこの種の材料の適用事例が増えつつある。

著者らは、国産技術として、エトリングタイトの生成と

ポゾラン材の活性により緻密な硬化体を形成して200N/mm²級の超高強度を達成し、長さの異なる2種類の鋼繊維の混入により高い引張強度を実現したUFC「サクセム[®]」を開発した。その性能については、土木学会で技術評価を受け、UFC指針に示される各種性能を満足し、UFC指針に準拠した設計・施工が可能であることが確認されている²⁾。また、実構造物への適用も、既に3橋の道路橋および1橋の歩道橋に適用されるなど、着実に増えている。

ここでは、「サクセム」の材料的な特徴を紹介し、「サクセム」が採用されたPC歩道橋を中心に構造物の特徴および効果について紹介する。

2. 「サクセム」の特徴

「サクセム」は、圧縮強度を高めるため次の三つの工夫をしている。

- ・球形に近いポゾラン材と高性能減水剤による水結合材比の低減
- ・エトリングタイト生成によるセメント水和組織の緻密化
- ・適切な熱養生による細孔構造の改善

これらを満たすためにコンクリートマトリクスは専用の材料で構成されており、ポゾラン材、エトリングタイト生成系混和材およびポルトランドセメントからなるサク

セムセメント，粒径2.5mm以下の骨材，高性能減水剤ならびに水で構成される（表-1）．養生としては，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．「サクセム」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コントロールすることによって微細空隙を埋め，写真-1に示すような安定したエトリンガイトが微細な空隙を充てんすることにより，通常のコンクリートと比べて格段に高い圧縮強度および耐久性を得ることができる．

補強繊維としては，引張強度が2000N/mm²以上で，直径が0.2mm，繊維長が22mmと15mmの2種類の鋼繊維を混合したもの（写真-2）を用いて，コンクリートマトリクスに対する体積比1.75%の割合で混入している．図-1は繊維長が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，100×100×400mm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繊維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

表-1 「サクセム」の基本配合

空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				サクセム用補強繊維 (kg)
	水	サクセムセメント	サクセム用骨材	サクセム用高性能減水剤	
2	195	1287	905	32.2	137.4 (1.75Vol)

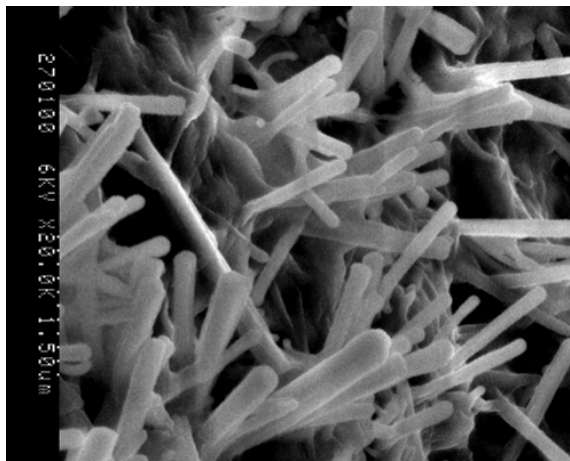


写真-1 空隙を充てんするエトリンガイト



写真-2 補強用鋼繊維

が長いと繊維が絡みやすくなって流動性が阻害されやすくなる．「サクセム」では，2種類の長さの鋼繊維を適切に混合することによって，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．

図-2は，「サクセム」と普通コンクリートを用いて断面の高さが200mmで幅が150mm，長さが1.5mの無筋部材を製作し，曲げ実験を行った結果を示している．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，「サクセム」では，ひび割れ発生後も鋼繊維の補強効果により変形性能に優れた破壊挙動を示すことがわかる．このような力学特性から，「サクセム」部材の設計においては引張強度を期待して設計することができ，鉄筋補

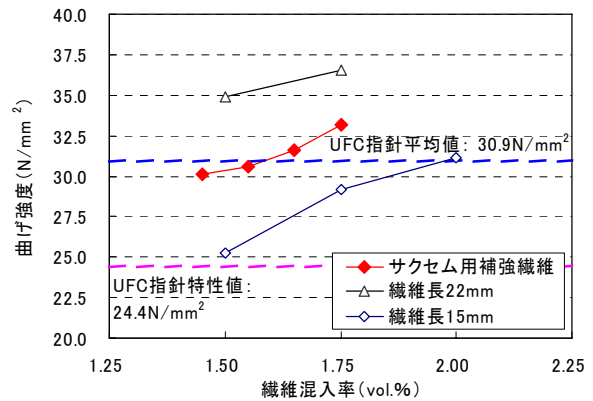


図-1 繊維混入率と曲げ強度の関係²⁾



写真-3 優れた流動性

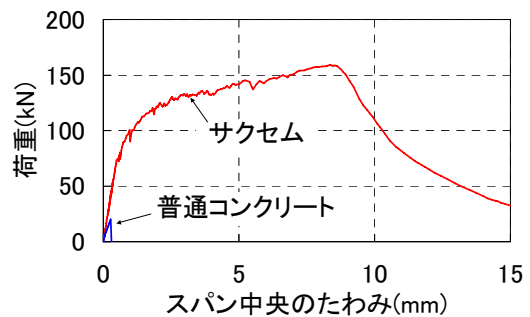


図-2 無筋部材の曲げ試験結果

強を必要としない構造部材が実現可能となる。さらに、PC技術と組み合わせることにより高い圧縮強度を活かして高いプレストレスを導入することができ、より合理的な構造の構築が可能となる。

耐久性に係わる特性として、「サクセム」の物質移動に関する諸物性を表-2に示す。比較対象とした80N/mm²の高強度コンクリートの物性値に対して、「サクセム」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。「サクセム」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。「サクセム」は、力学特性と耐久性に優れた超高性能コンクリート材料といえる。

3. PC歩道橋への適用と構造物の特徴

(1) 構造物の特徴

リバーサイド千秋連絡橋は道路を挟んで建設された商業施設の2階同士を連絡する歩道橋である(写真-4)³⁾。本橋は橋長30m、支間長26mの3径間連続ラーメンPC橋である。建物の階高制限と道路上空の建築限界から通常のPC橋では実現不可能な低い桁高が求められ、「サクセム」が採用された。図-3に示すように、厳しい建築限界をクリアするために桁高は500mmと極限まで小さくし、桁高と中央径間との比率は1/52となっており、通常のPC橋の1/20程度に比べて非常に小さくなっている。また、鉄筋が不要であるため、部材の最小厚さを70mmと薄くしている。「サクセム」を採用したことにより桁高だけでなく上部工の重量が大幅に軽量化でき、耐震性に優れた橋脚を併用したこともあって、基礎工に関しては約50%と大幅なコストダウンにつながった。

(2) 設計の概要

ここでは、使用限界状態の検討結果を示す。使用限界状態における曲げ・軸力に対する検討、せん断力に対する検討はUFC指針¹⁾に則り実施した。すなわち、作用断面力と部材剛性から算出した応力度がサクセムの応力度の制限値(表-3)以下であることを確認した。

曲げ圧縮応力度の最大値は構造系完成時において桁下

表-2 「サクセム」の物質移動に関する諸物性

項目	サクセム	高強度コンクリート
圧縮強度	180N/mm ²	80N/mm ²
水結合材比	0.15	0.3
透気係数	4.5×10 ⁻²⁰ m ²	1.0×10 ⁻¹⁷ m ²
透水係数	4×10 ⁻¹⁷ cm/s程度	1.0×10 ⁻¹¹ cm/s
塩化物イオンの拡散係数	0.0017 cm ² /年	0.14cm ² /年
空隙量	3~4vol.%程度	10vol.%程度



写真-4 リバーサイド千秋連絡橋

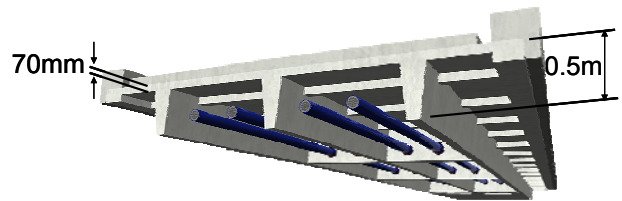


図-3 主桁断面図

表-3 サクセムの応力度の制限値

	応力度の種類		制限値
	曲げ・軸力	曲げ圧縮応力度	
曲げ引張応力度		(一般部) (間詰部)	-8 N/mm ² 0 N/mm ²
せん断	斜引張応力度		-8 N/mm ²

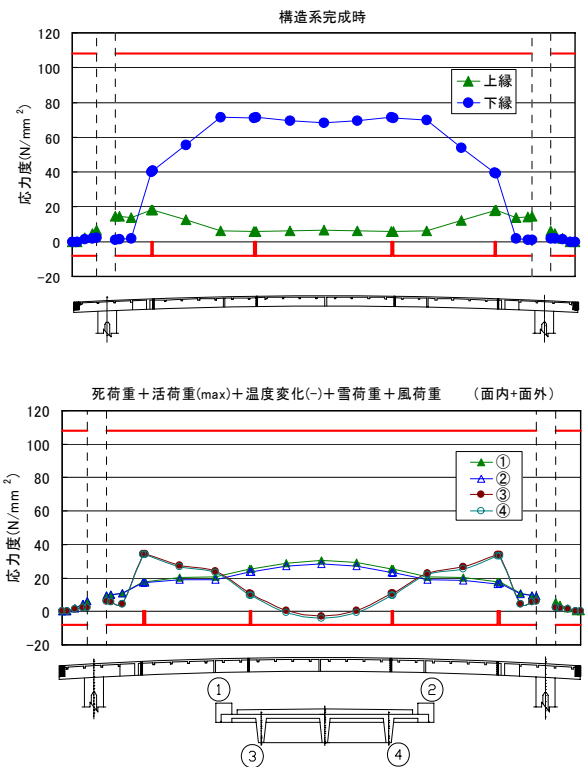


図-4 主桁曲げ応力度

縁で発生しており、 71.4N/mm^2 である。一方、曲げ引張応力度の最小値は、死荷重+活荷重 (max) +温度変化 (一) +雪荷重+風荷重の荷重状態において桁下縁で生じ -4.3N/mm^2 に抑えられている (図-4)。

(3) 施工の概要

本橋は、運搬の制約上、図-5に示すように橋軸方向に5分割されている。5分割されたセグメントは、工場で製作され、現地にトレーラーにて運搬し、クレーンを用いて支保工上に架設した (写真-5, 6)。その後、セグメント同士の50mmの目地部には現地で練り混ぜを行った「サクセム」を打込み、 60°C で1週間の給熱養生を行って所定の強度を発現させた後に外ケーブルによりプレストレスを与えて一体化させた (写真-7, 8)。間詰め部の「サクセム」には既設ブロックの拘束によりひび割れが生じないように収縮を低減した「サクセム」を使用した。

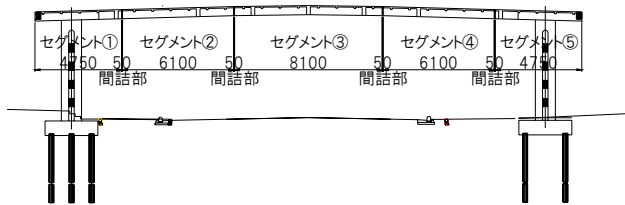


図-5 主桁セグメント分割



写真-5 主桁の打設

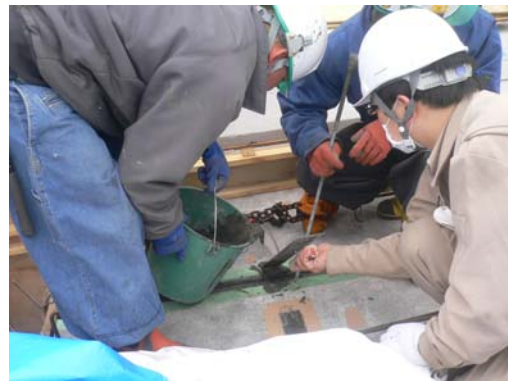


写真-7 間詰め部の打設



写真-6 主桁の架設



写真-8 外ケーブルの緊張

4. その他の構造物の特徴

「サクセム」のPC橋への適用例を表-4に示す。

アクアタウン橋梁の構造は「サクセム」を使用したプレテンション桁と現場打ちの間詰めコンクリート (普通コンクリート) で構成される床版橋で、一般的にこの規模の支間に採用されるプレテンション方式中空床版橋 (JISスラブ橋げた) と同様の形式である⁴⁾。「サクセム」の高い圧縮強度ならびに鉄筋を配置する必要がないという特徴を活かして、部材厚は最小70mmと薄く設定できた。また、耐久性が高いためPC鋼材のかぶりも20mmと小さく設定できた。その結果、一般的に使用されている同支間の中空床版桁 (JIS桁) と比較し、「サクセム」製主桁の重量は35%低減された (図-3)。主桁の製作はJIS認定を受けたプレキャストコンクリート製品工場で行なわれ、トレーラーで現地まで運搬されてホイールクレーンで架設された。主桁が軽量化されたため、運搬および架設に要する設備や施工が簡略化された。

羽田空港D滑走路管理用棧橋渡り橋は「サクセム」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⁵⁾。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揚圧力の受圧面積を小さくするた

表-4 「サクセム」の適用例

橋梁名	橋梁種別	構造形式	橋長 (スパン)	全幅員 (有効幅員)	完成年	期待する効果
アクアタウン橋梁	PC道路橋	単径間プレテンション 合成 π 桁	13.0 (12.44)	10.0 (9.2)	2006	軽量化 高耐久化
増谷1号橋	PC道路橋	単径間プレテンション 合成 π 桁	7.462 (7.148)	4.41 (3.6)	2006	軽量化
リバーサイド千秋 連絡橋	PC歩道橋	3径間連続 PCラーメン桁	30.5 (2.0+26.0+2.0)	4.1 (3.5)	2007	低桁高化 軽量化
羽田空港D滑走路 管理用棧橋渡り橋	PC道路橋	単径間 プレテンション桁	25.0 (23.35)	4.0	2008	低桁高化 軽量化 高耐久化

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 60N/mm^2 の一般的な高強度コンクリートを用いたPC橋では桁高 1.6m が限界であったが、圧縮強度が高い「サクセム」を採用することにより桁高 1.0m を実現することができた。また、耐久性に優れるため、100年の供用を想定した場合、鋼桁と比べてライフサイクルコストを低減することができることから、「サクセム」を用いたプレテンション桁構造が採用された。

構造物への展開が考えられる。例えば、沿岸部の気象条件の厳しい地域に建設される構造物に対し、「サクセム」を構造部材や埋設型枠として適用することにより、ライフサイクルコストの低減が期待できる。「サクセム」では、厚さ 10mm 程度の薄肉の無筋パネルや厚さ 60mm 程度のプレテンションPCパネルの製作が可能であり、構造部材として使用するだけでなく、このような薄肉パネルやPCパネルを有効に用いることによっても、耐久性に優れた構造物の構築が可能になると考えられる。

5. 未来に向けて

「サクセム」は一般のコンクリートに比べて高価な材料であるため、今後の「サクセム」技術の展開や応用を考えた場合、「サクセム」の持つ優れた力学特性や耐久性を効果的に発揮できる適用方法を考えていく必要がある。

力学特性を活かした展開としては、応力が厳しい箇所部分的に使用する方法が考えられる。例えば、柱はり接合部やPC鋼材定着部への適用、応力の厳しい部材断面の周囲に「サクセム」を使用して内部に通常のコンクリートを充てる合成構造への適用などが考えられる。「サクセム」を効果的に使用することで、コストを抑えながらこれまでにない新しい構造を実現できる可能性がある。

耐久性を活かした展開としては、環境条件の厳しい

参考文献

- 1) 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113，2004.9.
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.3，2006.11
- 3) 南雲広幸，一宮利通，安宅之夫，石井精一：リバーサイド千秋連絡橋の設計と施工ー超高強度繊維補強コンクリートおよび制震橋脚構造を用いた歩道橋ー，橋梁と基礎，Vol.41，No.12，2007.12
- 4) 石井精一，西村一博，児山祐樹，一宮利通：超高強度繊維補強コンクリートの道路橋への適用事例，第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2006.10
- 5) 中村泰，藤代勝，松元和久，出口大輔，上野浩二：D滑走路における小型船係留棧橋についてー厳しい波浪環境下に建設される羽田空港初の係留施設の設計と施工ー，第五回東京国際空港建設技術報告会，2008.6