

UFC(ダクトル)を用いた構造物の特徴と展開

ー スパン 50m の歩道橋から 192,000m² の滑走路床版までー

武者 浩透*¹・渡辺 典男*²・稲原 英彦*²・大島 邦裕*¹

Keywords : UFC, Ductal, ultra-high strength, fiber reinforced concrete, bridge, precast segment, slab
UFC, ダクトル, 超高強度繊維補強コンクリート, 橋梁, プレキャスト, 床版

1. はじめに

近年、圧縮強度 200N/mm² を有する超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete;以下, UFC) が開発され、建築ならびに土木構造物への適用が進んでいる。この UFC は強度が高いだけでなく、鋼繊維の補強効果により高い靱性が確保され、緻密構造により極めて高い耐久性をも有している。UFC の構造物では、これら超高強度や高耐久性によって部材の薄肉化と軽量化が可能である (写真-1)。その利点により、橋梁や床版の分野での適用が先行しており、8~15cm といった部材厚やスパン 50m を超える桁など、従来のコンクリートでは達成できなかった構造が実現している。

UFC は繊維補強コンクリートであるが、従来の剥落防止やひび割れ幅抑制といった事後対策的な目的ではなく、繊維補強効果を設計として考慮し、構造物内に鉄筋を配置しないことを前提とした繊維補強コンクリートである。そのため、従来の設計法では合理的な設計ができないばかりか、構造形式や施工法に至るまで UFC に適した手法が必要である。

大成建設では UFC が持つ高いポテンシャルに着目し、2000 年に UFC である「ダクトル」を技術導入して技術開発を進め、2002 年には日本初の UFC 橋となるスパン 50m の「酒田みらい橋」¹⁾ を建設した。2004 年には、この橋の建設に際して行われた実験やそれまでの開発成果をベースとして、UFC を構造物へ適用する際の指針「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」²⁾ (以下, UFC 指針) が土木学会から発刊されている。そのため、この UFC 指針はそれまでのダクタ



写真-1 桁断面比較 (イメージ)

Photo 1 Comparison of UFC-PC beam with H-shape steel beam and conventional PC beam

ル技術の集大成であると共に、その後の UFC 構造物の実用化における大きな道標となった。

その後、ダクトルは数多くの橋梁に適用されると同時に様々な技術開発がなされ、国内では現在までに歩道橋 10 橋、道路橋 (部分使用を含む) 4 橋が完成している。また、最近では橋梁のみならずモノレールの軌道桁への適用³⁾の試みや、空港滑走路の大型床版への適用など大型の構造物へと広がりを見せている。本報告では、UFC 開発の背景とその特性について述べ、UFC の土木構造物への適用性について考察するとともに、適用事例を紹介する。また、現在施工中である羽田空港 D 滑走路の約 192,000m² の面積に適用されるダクトル床版についてもその概要を紹介する。

2. 開発の背景

圧縮強度 100N/mm² を越える超高強度コンクリート材料の適用を考えた場合、従来の鉄筋コンクリート構造の延長上では、コンクリートの高強度化に合わせて鉄筋の高強度化が必要である場合が多い。200N/mm² クラ

* 1 技術センター 土木技術開発部 土木技術開発プロジェクト室

* 2 土木本部 土木設計部

スになると 4 倍程度の強度を有する鉄筋が必要となり、鉄筋の開発が大きな問題となる。そればかりか、鉄筋の継手、定着、付着やひび割れの分散性、曲げ加工性など様々な問題の解決が必要となり、特に桁や床版のような曲げ部材においてはこれらの問題が顕著になる。また、いくら高強度化を図っても、鉄筋へのかぶりの規定等で部材厚が決定されてしまう場合が少なくなく、高強度を活かしたスレンダーな構造の実現には多くの課題が存在する。

UFC は、このような鉄筋コンクリート構造の高強度化とはまったく違った視点から高強度コンクリート構造物を実現した材料である。それは、高強度化の課題であった鉄筋を用いないコンクリートである。UFC には靱性を確保するために多量の鋼繊維が配合されており、部材内に鉄筋を用いないのが原則である。また、圧縮強度低下の原因となる不良骨材の混入や骨材界面での破壊を排除するために、粗骨材は使用せず、粒径 1mm 程度の細砂のみを使用している。これにより、高強度を活かした薄い部材厚を設定することができ、軽量化や経済性を実現することが可能となった。

3. UFC (ダクトル) の特性

UFC 材料の中でもダクトルは、10 年以上の実績があり、前述のように UFC 指針のベースとなった材料であり、フランス、オーストラリア、米国など世界各国で使用されている。ダクトルは、低熱ポルトランドセメントを主成分として、シリカフェーム等の反応性微粉末と粒径 1mm 程度の珪砂などを使用した複合材料であり、次に示す特性を有している。

3.1 超高強度

圧縮強度の設計基準強度 (特性値) 180N/mm^2 を有するほか、引張強度についても設計上考慮することが可能である。標準熱養生 (90°C の蒸気養生) により所定の強度が発現し、物性値も安定するため、収縮およびクリープも非常に小さい。表-1 に通常の高強度コンクリートと対比したダクトルの物性値を示す。

3.2 高耐久性

ダクトルの水結合材比は $W/B=0.14$ と、水和反応限界まで単位水量を低く抑えており、生成物中の空隙を極限まで抑えた最密充填により組織は高緻密である。表-1 に示すように、ダクトル中の物質移動に関する抵抗性は極めて高く、透水係数および塩化物イオンの拡散係数は、通常の高強度コンクリートの $1/10^6$ および $1/300$ 程度である。そのため、鋼材位置 (かぶり

20mm) における塩化物イオン濃度の経年変化も極めて遅い (図-1)。

3.3 高靱性

ダクトルは、高張力鋼繊維 (引張強度 $2.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$ 以上、直径 0.2mm、長さ 15mm) を容積比で 2% も配合するため、鋼繊維の架橋効果によりひび割れ幅の抑制効果に極めて優れ、高い靱性を有する。そのため、ダクトルの構造物には原則として鉄筋を使用しない。

表-1 ダクトルと高強度コンクリートの比較²⁾

Table 1 Characteristics of Ductal and conventional high strength concrete

項目	単位	ダクトル ^(※1)	高強度コンクリート(例)
圧縮強度 ^(※2)	N/mm^2	180	40
ひび割れ発生強度 ^(※2)	N/mm^2	8.0	1.2
引張強度 ^(※2)	N/mm^2	8.8	2.7
ヤング係数	kN/mm^2	50	31
単位容積質量	kN/m^3	25.5	24.5
収縮ひずみ		50×10^{-6}	230×10^{-6}
クリープ係数		0.4	2.6
透水係数	cm/s	4×10^{-17}	1×10^{-10}
塩化物イオン拡散係数	$\text{cm}^2/\text{年}$	0.002	0.700

(※1): 標準熱養生後
(※2): 特性値

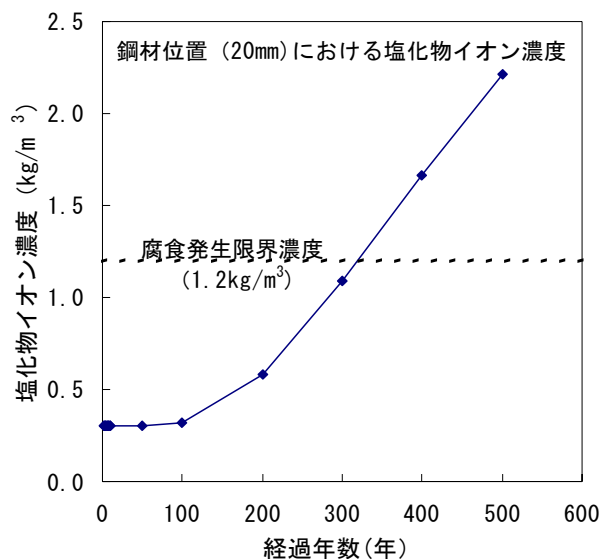


図-1 塩化物イオン濃度の経年変化¹⁾

Figure 1 Changes over time in chloride ion concentration (表面塩化物イオン濃度: 飛沫帯環境を想定し 13kg/m^3)

4. UFC の適用性

前項に示すような優れた特性を有する UFC 材料であるが、構造物への適用を考えた場合、その材料の性質上、以下に示すような条件がある。

4.1 プレキャスト部材としての使用

UFC は高品位な材料であるため、その品質管理を厳格に行う必要がある。また、脱型後に 90℃の給熱養生を行うことにより、打設から最短で 5 日程度後に約 200N/mm² の最終強度を得ることができる反面、UFC 部材の製作には、蒸気養生設備が必要となる。そのため現時点では、UFC 部材は工場での製作が必要であり、プレキャスト部材としての構造物への適用が前提となる。

4.2 経済性を考慮した適用

UFC には、安価である粗骨材は用いられておらず、多量の反応性粉体（セメントおよびシリカフェーム等）と鋼繊維が配合されている。その結果、UFC の材料単価は必然的に高くなる。また UFC は 200N/mm² の超高強度と耐久性を併せ持つ高品位な材料である。そのため、設計条件や施工条件を十分に検討し、UFC の利点を十分に発揮できる構造物への適用が必要とされる。言い換えれば、従来のコンクリートでは実現が困難な厳しい制約条件がある場合に、UFC の有利性が得られるのである。つまり、UFC の適用を考える場合には、スパンを倍にする、下部工規模の縮小、架設手順の合理化などの条件変更を合わせて検討することが重要である。

4.3 UFC 適用の有利点

以上の点とこれまでに UFC が橋梁等へ適用された事例の条件を踏まえ、UFC が適用される条件（UFC 適用の有利点）を以下に示す。

①長スパン

30m（程度）以上のスパンとし、中間の橋脚を省く

②低桁高

桁高を抑え、建築限界の確保や、桁の両側のすり付けを容易にする

③軽量化

部材厚を抑え、軽量化により下部工の規模を削減する

④高耐久

設計耐用年数 100 年以上の耐久性により、ライフサイクルコストを低減する

⑤デザインの自由度向上

鉄筋を用いないことにより、形状の自由度が高まる

4.4 UFC 歩道橋における特徴⁴⁾

4.1～4.3 節に述べた制約と材料特性を踏まえ、UFC が PC 歩道橋へ適用された事例においての、構造・形状の基本的な特徴を次に示す。

①薄い部材厚と軽量化

UFC は鉄筋を使用しないことによる「かぶり」の規

定からの解放により、薄い部材厚が実現可能となる。図-2 に UFC 歩道橋の部材厚とスパンの関係を示すが、スパン 50m まではその部材厚（上下床版およびウェブ厚）が 5～13cm の範囲でほぼ納まっており、スパンに拘らず非常に薄いことが分かる。また、多くの UFC 歩道橋で、躯体外に PC 鋼材を配置してプレストレスを導入する全外ケーブル方式を採用しており、部材に埋め込まれる鋼材が無いために構造細目に捉われずに断面を設定できることも、部材厚を薄く抑える要因となっている。

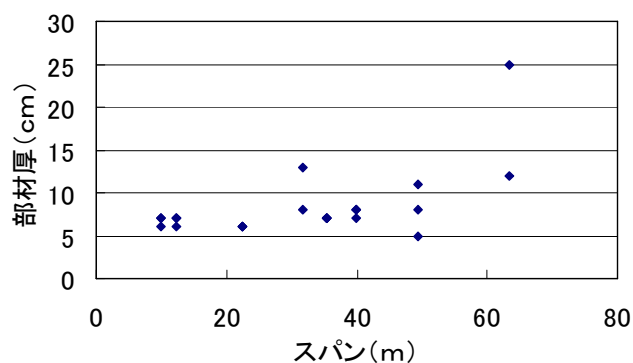


図-2 部材厚とスパンの関係

Figure 2 Relation between member thickness and span

薄い部材厚の採用により、自重の大幅削減が可能である。UFC 歩道橋では、一般の PC 橋梁に比べて 1/5～1/3 程度のコンクリート（UFC）使用量であり、大幅な軽量化を裏付けている。

②低桁高・長スパン

部材が薄いため、プレストレスによる導入圧縮応力度が、従来の PC 橋に比べて数倍高いなどプレストレスが効率的に活用できる上、軽量化により自重を支えるための力も少なくて済み、低桁高や長スパンが可能となっている（図-3）。

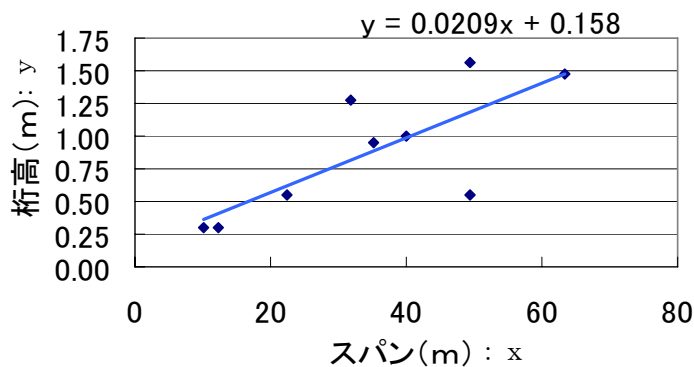


図-3 桁高とスパンの関係

Figure 3 Relation between girder height and span

5. 事例紹介

UFC は、小型部材での使用では用水路や頭首工の補修用のライニングパネル（厚さ 25mm 程度）として、また建築物や歩道などに薄いパネルのエクステリア部材としての実績が多い。構造物への適用としては、歩道橋^{2, 7)}、道路橋³⁾、モノレール軌道桁⁴⁾などが完成し、拡張工事中の羽田空港では、UFC 道路橋や大型床版が施工されている。以下に、これら UFC の土木構造物への適用事例をいくつか紹介し、その特徴を述べる。

5.1 酒田みらい橋¹⁾:2002 年竣工

酒田みらい橋（写真-2）は山形県酒田市に建設された歩道橋で、日本で初めて UFC が適用された PC 橋梁である。初めての UFC 適用であるが、UFC の高強度を活用したデザインは大胆であり、スパン約 50m を実現した桁高（端部）は、わずか 55cm と非常に低い。また、部材厚（写真-3）は、従来のコンクリート橋の 1/5 程度である上床版厚 5cm、ウェブ厚 8cm と指で摘むことができる厚さであり、橋自重も 1/5 程度に抑えられている。また、橋の躯体内部には鉄筋を 1 本も使用しておらず、ウェブに大きな円形開口部を設けるなど、UFC 橋ならではの特徴的なデザインを採用している。



写真-2 酒田みらい橋
Photo 2 Sakata Mirai Bridge



写真-3 酒田みらい橋 架設状況
Photo 3 Erection of Sakata Mirai Bridge

5.2 三兼池橋⁵⁾:2007 年竣工

三兼池橋（写真-4）は、福岡県大野城市にあるニュータウン内に建設された。橋長 81.2m（支間長 2@39.9m）、有効幅員 3.0m の 2 径間連続 PC 箱桁橋である。UFC を用いた PC 橋梁としては、初めての連続桁形式であり、本格的な長大橋への足がかりとなる橋である。上床版厚 7cm やウェブ厚 8~20cm と薄い部材厚であり、桁高は 1.0m と従来のコンクリート橋の 1/2 として、重厚なイメージになりやすいコンクリート橋を、軽快ですっきりとしたデザインに仕上げている（写真-5）。



写真-4 三兼池橋
Photo 4 Mikaneike Bridge



写真-5 三兼池橋
Photo 5 Mikaneike Bridge

5.3 東京国際空港(羽田)再拡張事業における UFC 利用

東京国際空港(羽田空港)では、旅客数増大の需要に対応するため、国際線エプロン等の整備と新滑走路(D滑走路)の建設工事が行われている。UFC は高い耐荷性能と耐久性が評価され、国際線のエプロン整備で道路橋に、D滑走路では床版に適用されている。

5.3.1 東京国際空港国際線地区 GSE 橋梁⁶⁾

国際線地区エプロンで建設された GSE 橋梁(写真-6)は、橋長 48m、有効幅員 15mの道路橋である。GSE とは Ground Support Equipment の略称で、空港の地上業務や航空機への支援業務に使用される機材のことをいう。GSE 橋梁は、その GSE 車両が通行する橋梁であるが、中でも最大なのが航空機を牽引する総重量 50tonf のトーイングトラクターである。国際線のエプロン部を有効に活用するには、そのような重車両に対応しながら、桁高を低くすると共に、軽量化を図る必要があった。また、通行規制をして安易にメンテナンスを行える場所でないことから、長期耐久性も重要であった。

それらの課題を克服するため、橋梁の主桁材に UFC 桁を適用した(図-4)。この GSE 橋梁は、現時点で世界最大の UFC 道路橋である。この UFC 桁(写真-7)の採用により、総質量 50ton ものトーイングトラクターを連行荷重として考慮し、かつ 46.0m の支間長を確保しながら、従来のコンクリート橋に比べて 80%の桁高に抑えることが可能となった。その結果、橋梁両側のアプローチ部の延長と盛土量を削減することができた。さらに、ウェブの部材厚を 15cm とするなどの部材の薄肉化により、自重を約 60%まで軽量化を実現、下部工の規模を縮小し、近接して埋設されている航空燃料送油管への影響緩和を実現している。



写真-6 東京国際空港(羽田)国際線地区 GSE 橋梁
Photo 6 Tokyo International Airport (Haneda) GSE Bridge

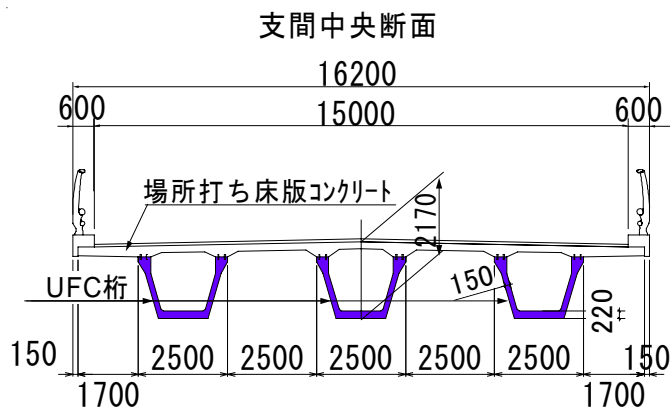


図-4 GSE 橋梁 断面図
Figure 4 Cross section of GSE Bridge



写真-7 鉄筋不使用のプレキャスト桁
Photo 7 Precast girder of GSE Bridge

5.3.2 東京国際空港 D 滑走路建設外工事 UFC 床版⁷⁾

D滑走路(図-5)は、羽田空港の沖合いに建設される海上滑走路であり、栈橋部と埋め立て部から構成される。国内で初めての栈橋構造を有する滑走路であるが、航空機荷重に対する耐荷性能を確保するとともに、このD滑走路は設計耐用年数が100年の設定であるため、栈橋部に架設されるコンクリート床版についても、高い耐久性が必要とされた。

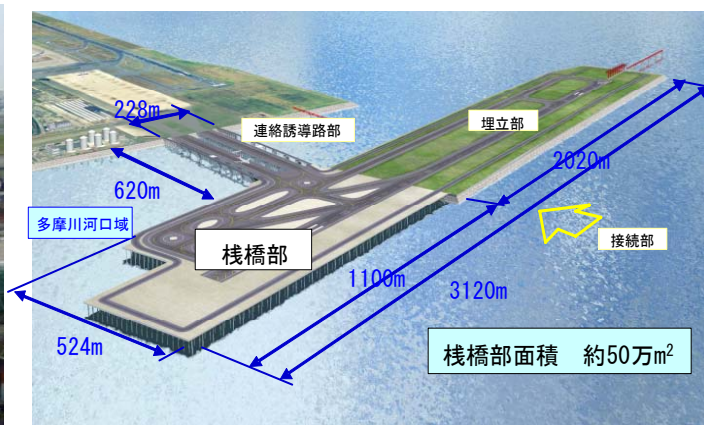


図-5 D滑走路建設工事 概要図
Figure 5 Overview of Haneda D-runway Project

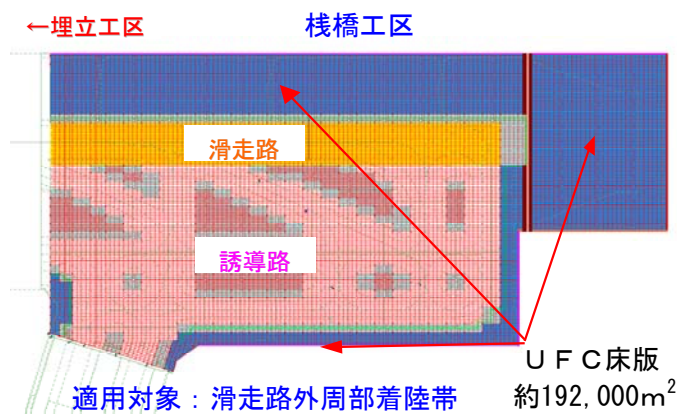


図-6 UFC床版配置位置図
Figure 6 UFC slab allocation

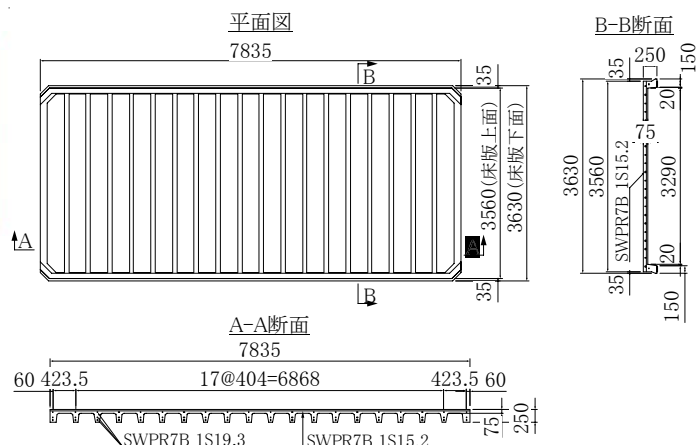


図-7 UFC床版 構造概要図
Figure 7 Structural outline of the UFC precast slabs

そのため、栈橋部の滑走路外周部（図-6：青い着色部）の約 192,000m²には、UFC プレキャスト床版が採用され、約 6,900 枚が設置される。

この UFC 床版は、幅 7.8m、長さ 3.6m の大型床版であり、床版の 2 方向にプレテンションによるプレストレスが導入されているのが特徴的である。床版構造には、リブ付き床版構造が採用されており（図-7、写真-8）、リブ高さ 25cm、床版部の薄い部分では実に 7.5cm と各部材厚を極限まで薄くしているが、主方向（短辺方向）に配置されたリブには 60 本もの PC 鋼線（φ19.3mm）が配置され 1,800tonf の緊張力が導入される。また、横方向（長辺方向）の厚さ 7.5cm の床版部にも 24 本の PC 鋼線が配置され 480tonf の緊張力が導入されるため、鉄筋は全く使用していないものの、プレストレスによる高い圧縮力と PC 鋼材の補強効果で、非常に高い耐荷性能と靱性を兼ね備えている。この UFC 床版の性能を確認するため、実物大床版を用いた載荷実験を実施し、ジャンボジェット機の約 2 機分の荷重に十分耐え得る構造であることを確認している。UFC 床版の平均版厚（換算版厚）は 13.5cm、総重量は 10ton であり、同条件で設計した場合の従来のコンクリート床版（32cm 厚）総重量 22ton に比べて約 56% もの大幅な軽量化が可能となった。また、この軽量化によって、栈橋ジャケット鋼材量および杭重量を削減することにより経済性を確保することができた。

2007 年 11 月より、千葉県の上野原 UFC 床版製作工場にて UFC 床版の生産が開始された。大型 UFC 部材の量産化工場は、これまで世界に例が無く、この工場の計画に際しては、載荷実験と同時期に行われた製作実験⁸⁾の結果が反映されるとともに、大成建設がこれまでダクトル開発で培ってきた技術とノウハウを結集している。



写真-8 UFC床版
Photo 8 UFC slab



写真-9 UFCバッチャープラント
Photo 9 UFC batching plant

その工場の敷地内には UFC 専用のバッチャープラント（写真-9）が設置され、時間当たり 15m³ の UFC の練混ぜが可能であり、稼働日 1日に 20 床版分の UFC 約 70m³ を製造している。この UFC 専用の大型バッチ

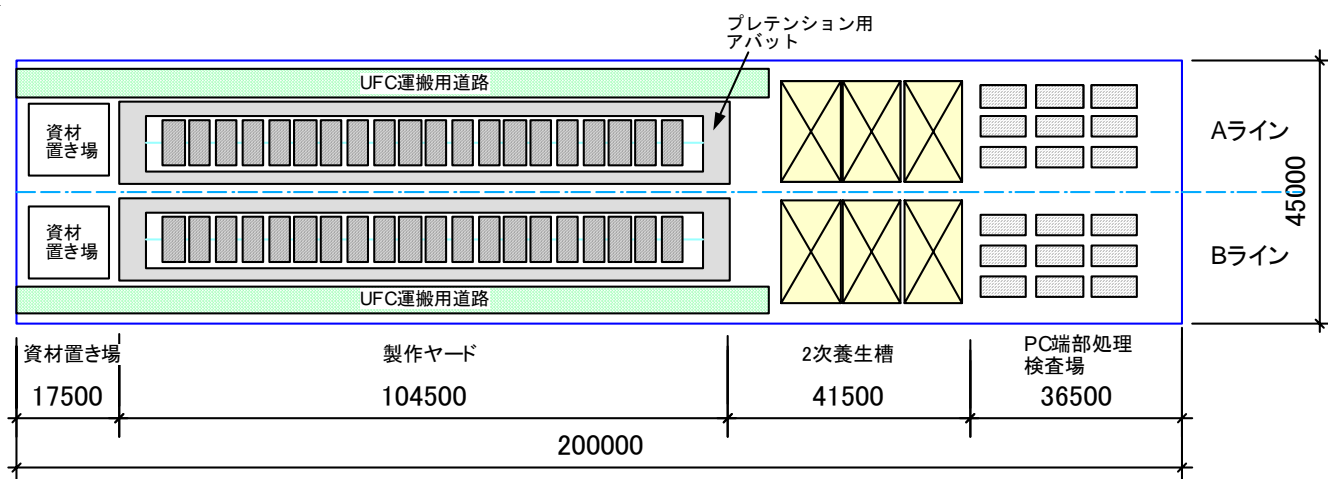


図-8 UFC床版製作工場概要図
Photo 8 Layout of UFC slab factory



写真-10 UFC床版製作工場
Photo 10 UFC slab factory



写真-11 UFC床版製作ライン
Photo 11 UFC slab production line



写真-12 打設状況
Photo 12 Pouring UFC to slab



写真-13 UFC床版ストック状況
Photo 13 Stock of UFC slab



写真-14 運搬状況
Photo 14 Transportation



写真-15 架設状況
Photo 15 Erection

ャープラントも世界初であり、材料供給から練り管理に至るまで UFC 材料の特性を考慮した様々な工夫がなされている。製作工場(写真-10)は、その上屋部が幅45m、長さ200mの規模(図-8)で、AとBの2ラインからなり、それぞれのラインに製作ヤード、2次養生槽、PC端部処理および検査場が配置されている。製作ヤードの各ラインには、プレテンション緊張用のコンクリートアバットが設置され、その中に20基の型枠が並べられている(写真-11)。

以下に UFC 床版の製作手順を簡潔に紹介する。バッチャープラントで練り混ぜられた UFC は、ホッパーに入れられて製作ヤードまで運搬され、2方向のプレテンションケーブルが緊張されている型枠内に打設される(写真-12)。翌日の朝に、強度45N/mm²を確認した後にプレストレスが導入され、PC鋼材を切断して2次養生槽へ門型クレーンで運搬される(写真-8)。製作ヤードにおけるサイクルは3日で、1ラインは週2回打設、AとBの2ラインで週4回打設であり、毎週

80枚の床版を製作している。

2次養生槽は、生産サイクルの関係から各ラインに3槽用意されている。製作ヤードから運搬されてきたUFC床版を1つの養生槽内に収容し、90℃で48時間の蒸気養生を実施する。この高温の促進養生により、最終強度の約200N/mm²が得られ、PC鋼材の端部処理を行った後、敷地内にあるストックヤードにて出荷まで保管される(写真-13)。UFC床版は近くの岸壁より台船に載せられて(写真-14)約25km離れた羽田沖の架設現場まで運搬され、ジャケット上に設置される(写真-15)。

これら上部工の軽量化による下部工費削減、海洋構造物における耐久性確保、100年以上の耐用年数によるライフサイクルコストの削減、量産化による製作コストの低減等は、UFCを構造物へ適用する際のキーワードであり、このプロジェクトはUFC適用における一つのモデルケースであるといえる。

6. おわりに

従来の鉄筋コンクリートの高強度化とはまったく異なり、鉄筋と粗骨材を使用せずにPC鋼材と繊維補強を活用して高強度化を図る思想の基にUFC構造物は誕生し、現在適用が増えつつある。UFCの歴史をひも解けば、決してニーズより生まれたものではなく、「始めに開発有りき」であり、後から用途を模索する歴史である。しかしながら、19世紀中頃の鉄筋コンクリートの発明や20世紀半ばのプレストレストコンクリート実用化など、コンクリート構造発展の歴史と比較した場合、わずか20年足らずで大型プロジェクトへの適用までた

どり着いたスピードはととても速く、時代の要請であったかとも思われる。もちろん、汎用材料ではないUFCは、今後建設されるコンクリート構造物の大きなシェアを占めるような材料ではなく、特殊な条件下や高い性能を要求される場合にのみ適用されるであろうニッチな範囲を担う材料に過ぎない。しかし、図らずも今回紹介した事例は、歩道橋(人)、道路橋(車)、滑走路床版(航空機)と様々な交通インフラ設備を網羅しており、今後もそれらインフラ設備を支える重要な一翼を担ってくれるものと確信している。

参考文献

- 1) 武者浩透, 大竹明朝, 関文夫, 大熊光, 児玉明彦, 小林忠司: 無機系複合材料(RPC)を用いた酒田みらい橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol. 36, No. 11, pp. 2-11, 2002
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004
- 3) 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, pp. 27-34, 2007. 11
- 4) 武者浩透, 大島邦明, 細谷学, 稲原英彦: UFCを用いたPC歩道橋の事例とその特徴, プレストレストコンクリート, Vol. 49, No. 6, pp. 48-45, 2007. 11
- 5) 武者浩透, 石田有三, 山野井毅, 山下健: 三兼池橋—日本初の超高強度繊維補強コンクリートによる連続桁橋—, プレストレストコンクリート, Vol. 49, No. 5, p. 18-26, 2007. 9
- 6) 武者浩透, 渡辺典男, 福原哲, 一戸秀久: UFCを用いたGSE橋梁の設計と実験, プレストレストコンクリート, Vol. 50, No. 6, p. 13-20, 2008. 11
- 7) 渡辺典男, 武者浩透, 大竹明朝, 横井謙二, 相河清実, 南郷健太郎: UFC床版の設計および実物大確認実験, 橋梁と基礎, Vol. 43, pp. 27-29, 2009. 1