

羽田D滑走路建設工事における UFC 床版の製作

大竹 明朗*1・野口 孝俊*2・大熊 光*3・横井 謙二*4

羽田空港D滑走路棧橋部では、滑走路および誘導路の外側のエリアに超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFCと呼ぶ）を用いたプレキャスト床版を採用している。UFCは、一般のコンクリートと比較して各段に高い力学的性能および耐久性能を有する材料である。UFCを適用することによって、床版の軽量化が図られ棧橋ジャケットの鋼材量が低減できるとともに、塩害や防水対策などの維持管理費の低減が期待できる。UFC床版の製作は、千葉県富津市に専用の製作ヤードを整備して行っており、全枚数6939枚（UFC使用量約24000m³）を約2年間で製作する計画である。UFCは優れた材料であるが新しい材料であるため、これまでに大量生産された実績はなく、本工事における床版製作は、国内外を通じて最大規模となる。大量生産で得られた知見から、UFCは特殊な材料ではあるが、品質管理のスキームを適切に構築すれば、材料強度のばらつきは小さく、施工による不具合も生じにくいという、大量生産に適した材料であるということがいえる。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、プレキャスト床版、2方向プレテンション、大量生産

1. はじめに

羽田空港D滑走路の棧橋部のうち、滑走路および誘導路の外側のエリア（図-1の青色着色エリア）は、床版に超高強度繊維補強コンクリート（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下UFCと呼ぶ）を用いたプレキャスト版としている。UFCは、一般のコンクリートと比較して各段に高い力学的性能および耐久性能を有する材料である。UFCを棧橋部床版に適用することによって、床版の軽量化（通常コンクリートのPC床版と比較して重量で約60%減）が図られ、これに伴い棧橋ジャケット鋼材量の低減が図れる。また、高耐久性の材料であるため塩害対策や防水対策などの維持管理費の低減が期待できる。本文では、UFC床版の品質と設計特性値の妥当性および架設の概要について述べる。

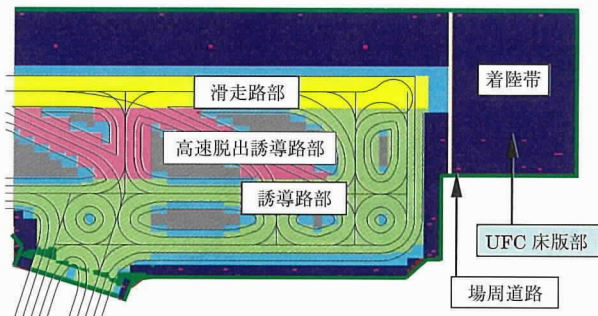


図-1 UFC床版の設置エリア

2. UFC床版の構造概要

2.1 床版本体

UFC床版の適用エリアは着陸帯であり、万が一航空機が逸走した場合のみ航空機が走行するエリアである。また棧橋の外周には場周道路が整備され、管理用車両が通行する計画である。これよりUFC床版に要求される構造性能は、表-1に示すとおりとしている。UFC床版（標準版）の構造図を図-2に示す。構造的な特長は、①鋼繊維（長さ15mm、直径0.2mm）を構造部材として評価し、鉄筋を用いていないこと、②高強度で鉄筋不要であるため部材を極端に薄くすることが可能となり、中空の櫛型構造として軽量化を図っていること、③多数のPC鋼材（主方向PC鋼材60本、横方向PC鋼材24本）が配置された2方向のプレテンション床版であること、である。

表-1 UFC床版に要求される構造性能

限界状態	使用限界状態	終局限界状態
想定荷重	床版死荷重 +自動車荷重	床版死荷重 +航空機荷重
要求性能	ひび割れや損傷を生じさせない。	早急に取替えや補修が必要となるような損傷を生じさせない。

2.2 床版目地部

図-3に床版目地部の構造を示す。ここでは図-3に示すa部を長辺方向目地、b部を短辺方向目地と呼ぶ。UFC床版は、基本的には長辺方向目地部で支持された1方向版であり、この目地において床版に作用する鉛直力を沓座モルタルを介してジャケット主桁に伝達する構造となっている。また床版上に活荷重が作用した場合に床版が浮き上がらな

*1 Akio OHTAKE：大成建設(株) 東京支店 UFC床版製造所 作業所長

*2 Takatoshi NOGUCHI：国土交通省東京空港整備事務所 課長

*3 Hikaru OHKUMA：大成建設(株) 土木本部土木技術部リニューアル・橋梁技術室 課長

*4 Kenji YOKOI：大成建設(株) 東京支店羽田D滑走路棧橋II工区作業所 課長

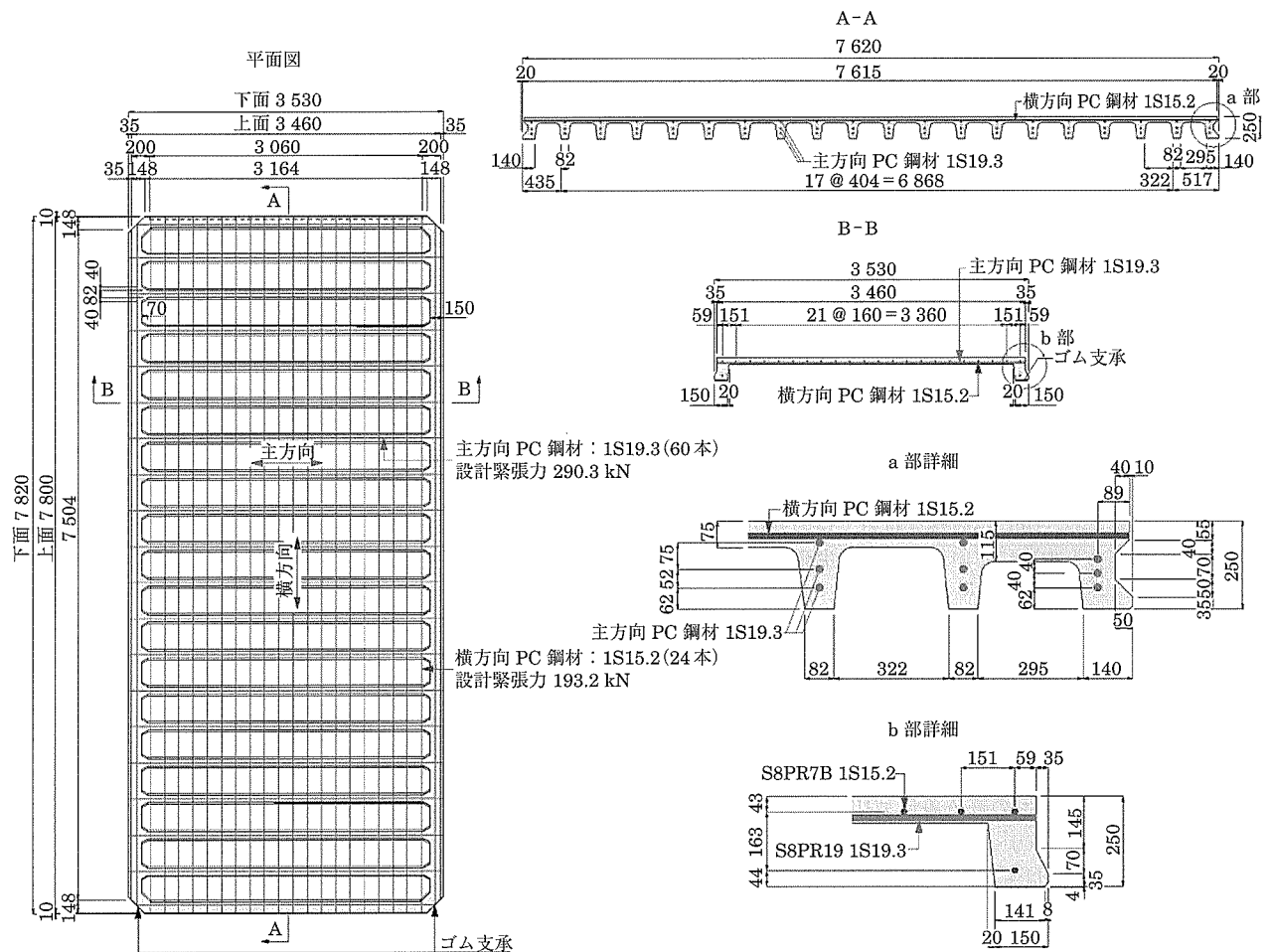


図 - 2 UFC 床版構造図

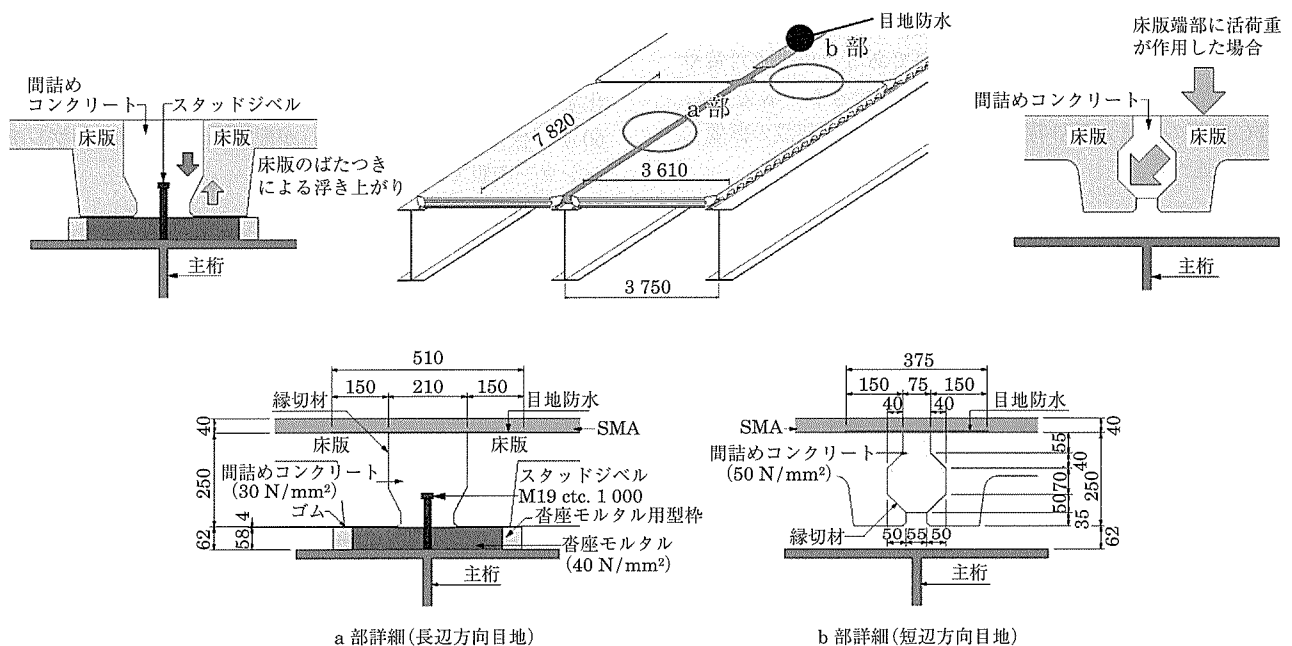


図 - 3 UFC 床版目地部構造図

いように、間詰めコンクリートは床版を押さえつけられる
 ようなくさび型の形状となっている。UFC 床版を配置する
 エリアにおいては、床版の短辺方向に必ずしも主桁が配置

されていないため、短辺方向目地部は床版を主桁で支持す
 る構造ではなく、床版端部に荷重が作用した場合に隣接す
 る床版に荷重を伝達させるようなせん断伝達構造としてい

る。以上のように各目地部では要求される構造性能が異なるため、それぞれの性能を満足するようにコンクリート強度を決定している。床版と間詰めコンクリートの間は圧縮力のみ伝達させる構造となっており、床版端部の変形により間詰めコンクリートに引張力を作用させないようにするため、床版側面に縁切材（ウレタン系防水材料）を塗布し、床版と間詰めコンクリートの間で引張力を伝達しないようにしている。UFCは非常に緻密なマトリクスを有しており、供用時に床版本体から漏水が発生する危険性はきわめて小さいと考えられるため、床版防水は床版目地部だけの部分防水としている。防水材料としては、床版への接着がむら無くでき、目地の伸縮（最大0.5 mm程度を想定）にも追従可能なウレタン系防水材料（0℃におけるゼロスパン試験5 mm以上）を選定している。

3. UFC 床版の製作

3.1 製作ヤード

UFC床版は最終的に架設地点まで海上運搬するため、製作拠点は東京湾内の岸壁周辺とするのが適当であるが、東京湾沿岸に本床版の製作に適した既設のコンクリート2次製品工場がないことから、千葉県富津市の岸壁背後に専用の製作ヤードを新たに整備して製作を行っている。架設工程から、床版総数約7000枚を約2年間で製作する必要があるため、月あたりの平均製作枚数を約300枚として製作設備を計画している。図-4に製作ヤードのレイアウトを

示す。UFCの強度発現や作業効率から、製作サイクルを3日サイクルとし、1ラインあたりの製作枚数が20枚のラインを2ライン使用して、週あたり製作枚数80枚、月あたり製作枚数320枚を確保している。

(月あたり製作枚数) = (1ラインあたり製作枚数) × (週あたりサイクル数) × (ライン数) × 4週 = (20枚/ライン) × (2サイクル/週・ライン) × (2ライン) × (4週/月) = 320枚/月

製作設備は、UFCを現地製造するためのプラント設備、PC鋼材を緊張するためのプレテンションアバット、養生設備、門型クレーン等からなり、天候に左右されず安定的に床版製作を行うために、上屋設備を設けている。UFCは高強度であるがゆえに、打設時の雨水の混入により最終強度に影響が出る危険性が高いため、上屋設備により雨風の影響を完全に遮断している。製作ラインは製作工程に従って配置されており、図-4の上から下に製作が進む流れとなっている。

3.2 製作要領

床版製作は、基本的に土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」¹⁾(以下、「UFC指針」と呼ぶ)に従っているが、大型の床版施工は初めてのためいくつかの工夫を講じた。以下に製作要領を示す。

(1) 製作フロー

図-5に製作フローを示す。図-5に示すように床版製作は3日サイクルで行っている。以下、UFC(ダクトル)特

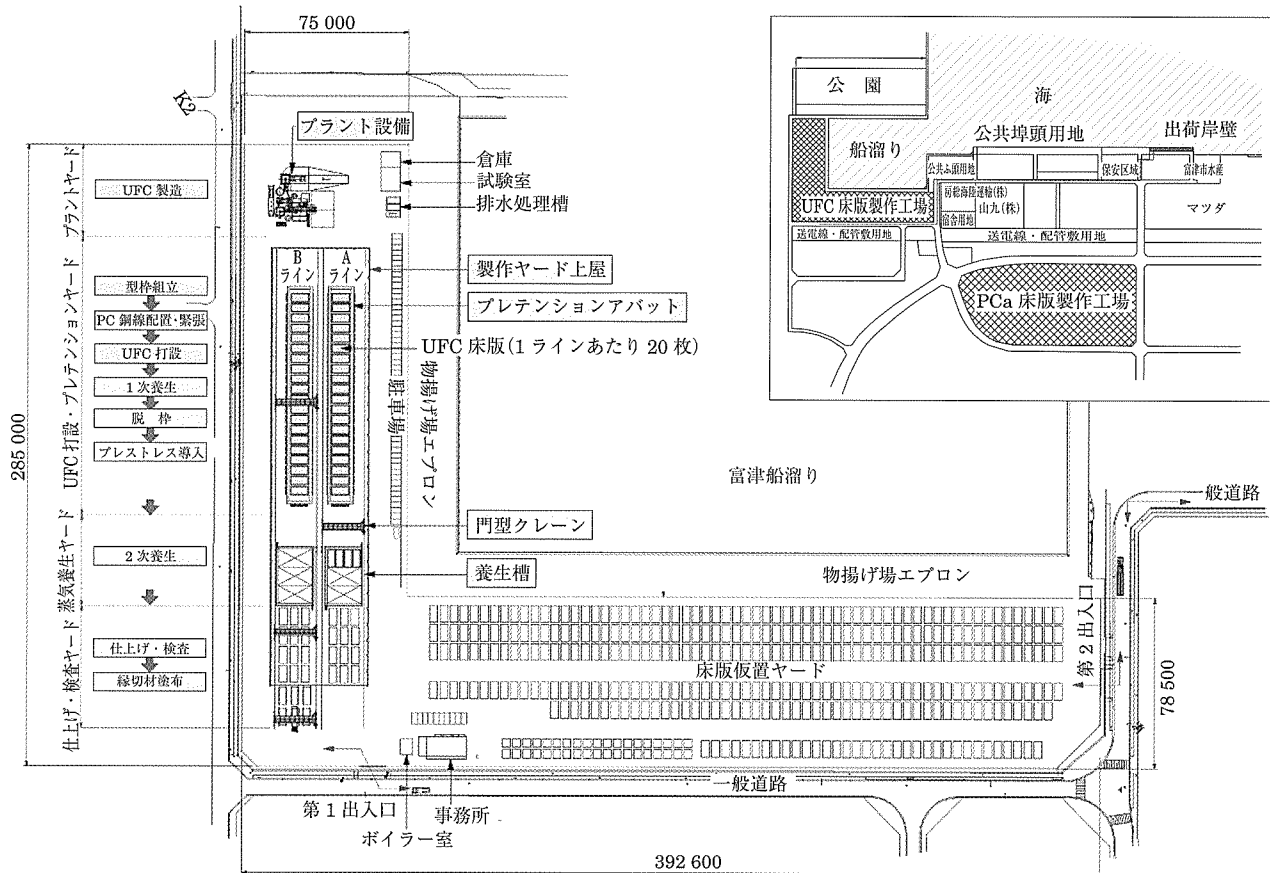


図-4 製作ヤードレイアウト

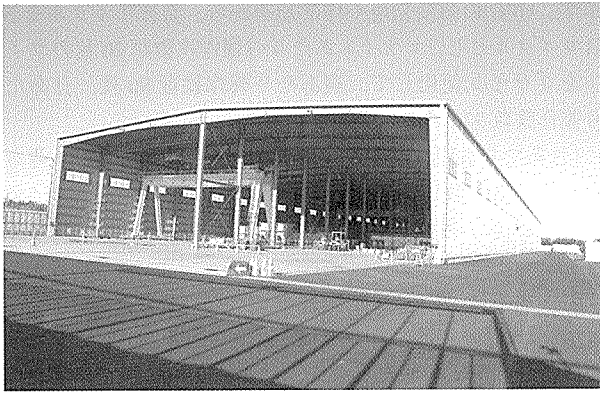


写真 - 1 製作ヤード上屋

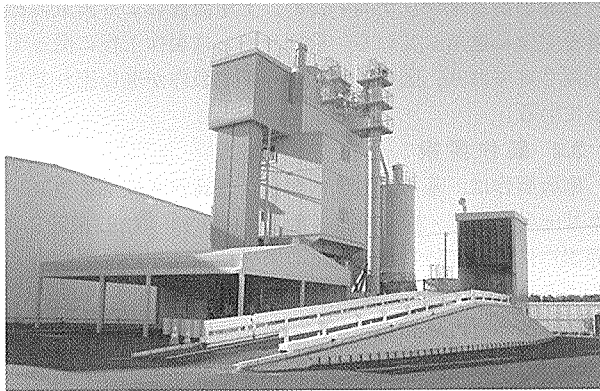


写真 - 2 UFC バッチャープラント

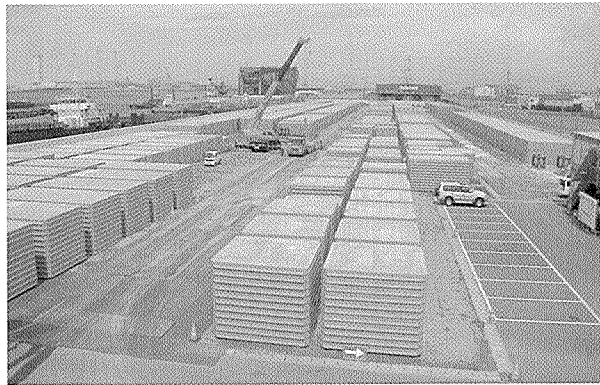


写真 - 3 仮置ヤード

有の工程を中心に製作要領について述べる。

(2) 型枠組立て

本製作で用いる型枠は鋼製枠であり、底版枠と床版の中空部を成形するための内枠、および側枠から成り、内枠は底枠と一体化されている。UFC の硬化時の収縮が内枠に拘束されることによりひび割れが発生することが懸念されたため、内枠端部には緩衝材としてゴムを用い、拘束ひび割れを防止している。

(3) PC 緊張

主方向 PC 鋼線は、写真 - 5 に示すようにプレテンションアバットの長手方向に配置し、約 100 m の PC 鋼線を 20 枚の床版で兼用する。緊張手順は、まずたるみをとるための緊張を鋼線 1 本ずつについて行った後、10 台のジャッキを

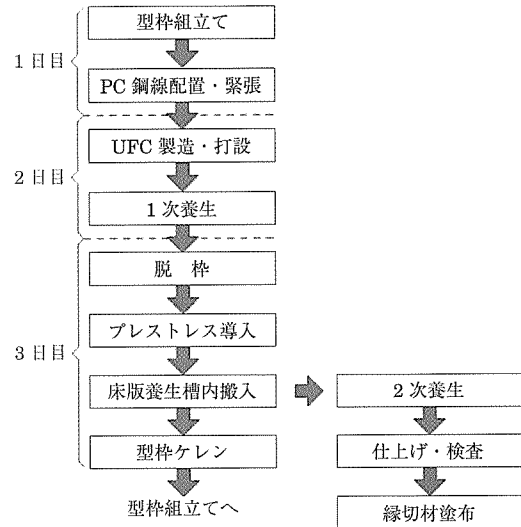


図 - 5 製作フロー

連動させて PC 鋼線全 60 本を一括緊張する。設計緊張力は合計 17 418 kN (ジャッキ 1 台あたり 1 742 kN, PC 鋼線 1 本あたり 290.3 kN) であり、緊張力と PC 鋼材の伸び量を管理している。また横方向の PC 鋼線は、単線用のジャッキにより、PC 鋼線 1 本ずつ緊張する。緊張管理は主方向と同様に緊張力と PC 鋼材の伸び量で管理し、緊張は、緊張梁の中心から順次行っている。



写真 - 4 型枠組立て状況

(4) UFC 製造と鋼繊維の分散性の確認

UFC 床版の最適な施工方法により、適切な鋼繊維の分散性と配向性を確保することが重要である。図 - 6 に UFC の製造フローを、表 - 2 に UFC (ダクトル) の配合表を示す。練混ぜ量は、1 バッチあたり 2.5 m³ を標準とし、1 日あたり 30 バッチ程度の練混ぜを実施している。以下に通常のコンクリートと比較した場合の主な特徴を列挙する。

- ① 珪砂 (細骨材) は、絶乾状態で運搬、保管、計量する。これにより後述するばらつきの小さい強度管理が可能となる。
- ② 1 次練りとして鋼繊維以外の材料を 5~8 分程度練り混ぜ、鋼繊維投入後 2 次練りとして 3 分の練混ぜを実施している。

表 - 2 UFC (ダクトル) 配合表

圧縮強度 (N/mm ²)	フロー値 (mm)	補強用繊維				単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 (kg/m ³)
		繊維の種類	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	混入率 (vol %)	水	ダクトル粉体	珪砂	鋼繊維	
180	240	鋼繊維	0.2	15	2	180	1 308	932	157	16

注) 単位水量は、水および高性能減水剤の合計

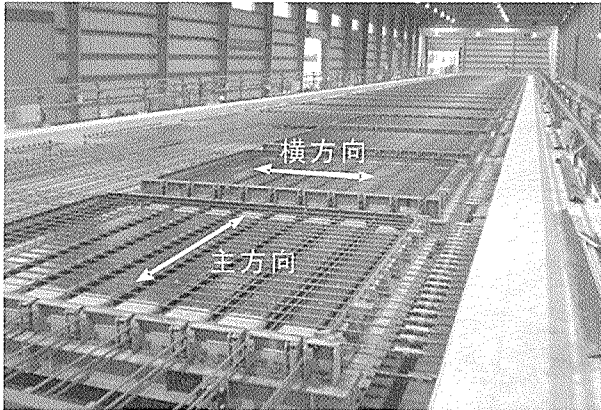


写真 - 5 PC 配置状況

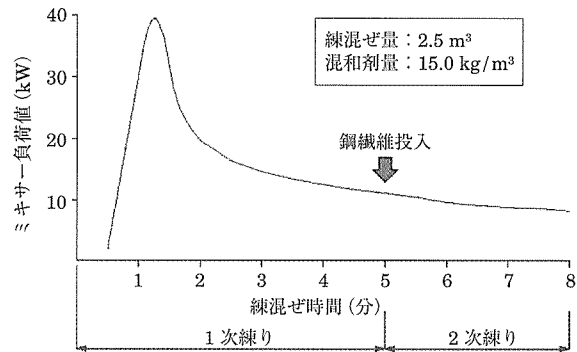


図 - 7 ミキサー負荷値

③ UFC は練混ぜが進むに従って、初めはパサパサの粉状であったものが、急速に流動化し、スラリー状となる。図 - 7 にミキサーの負荷値の変化を示す。

負荷値は初期の流動化前にピークを迎え、流動化するに従って負荷値が下がり、UFC のフレッシュ性状も安定する傾向を示す。鋼繊維が偏りなく均一に練混ぜられていることを確認するため、定期的（プラント立上げ時および1年経過ごと）に練混ぜ性能試験を実施している。この試験は JIS A 1119 に準拠した試験で、フレッシュコンクリート中のモルタル単位容積質量の差と鋼繊維量の差を測定し、ばらつきが許容値内であるか否かにより合否を判定する試験である。具体的な手順としては、① ミキサーから排出される標準バッチの始めおよび終わりの部分から試料を採取、② 試料の質量を計測、③ 試料の中から鋼繊維を洗い出して抽出、④ 鋼繊維を乾燥後、質量を計測、⑤ 各試料のモルタル単位容積質量と鋼繊維量を算定し、試料間の差を計算し、許容値内かを判定する。表 - 3 に1年経過した時点での練混ぜ性能試験結果を、写真 - 7 に練混ぜ性能試験の状況写真を示す。表 - 3 に示すように1年経過した時点においても、練混ぜ時の鋼繊維の分散性は良好であることが分かる。

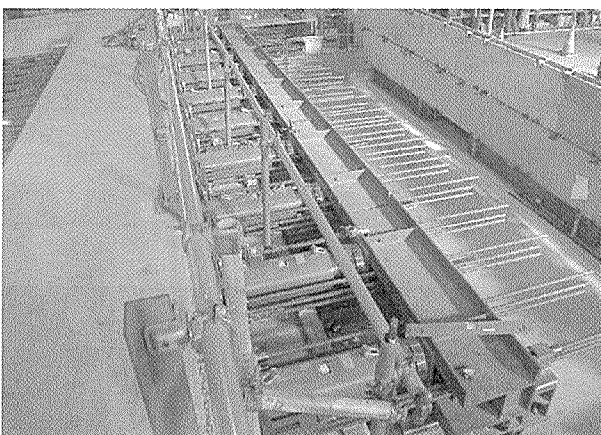


写真 - 6 主方向 PC 緊張状況 (ジャッキ)

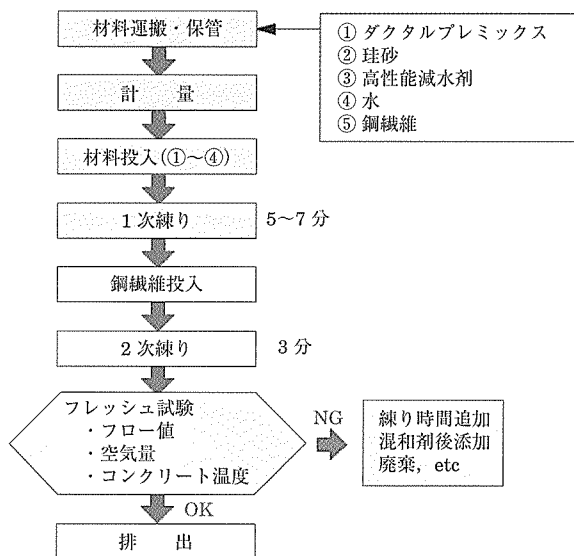


図 - 6 UFC 製造フロー

表 - 3 練混ぜ性能試験結果 (1年経過後)

計測項目	規格値	試験結果			
		6 バッチ		11 バッチ	
		試験値	判定	試験値	判定
鋼繊維の単位容積質量の差	5.0 % 以下	0.39 %	OK	0.10 %	OK
モルタルの単位容積質量の差	0.8 % 以下	0.03 %	OK	0.01 %	OK

(5) UFC 打設における鋼繊維の分散性と配向性の確保
鋼繊維の分散性と配向性は打込み方法により変わる可能性があるため、事前に実物大製作実験を行い、床版3枚を製作して品質にばらつきがないこと、および鋼繊維の分散



写真 - 7 乾燥後の鋼繊維

性と配向性が良好であることを確認している。したがって本製作では、実物大製作実験にて確認された方法で打設を行っている。具体的には図 - 8 に示すように、ホッパーを用いて床版短辺方向の端部中央より打込みを開始し、床版の長手方向にホッパーを移動させながら行う。UFC は非常に流動性に優れているため、棒状バイブレーター等はいわずに細部まで充てんすることが可能である。また締固めが不要であることから、作業員の熟練度により品質に差が出ることは少ない。

(6) 養生

本製作で実施している養生には1次養生と2次養生があり、1次養生（40℃、12～14時間）はプレストレス導入時に必要となる初期強度を製造サイクルに合わせて得るためのもので、2次養生により高強度を発現させるとともに、収縮やクリープを大幅に低減し、耐久性を向上することができる。UFC 指針では、指針に示されている材料を用い、標準熱養生（上記の2次養生：90℃、48時間の蒸気養生）を実施すれば長期耐久性の主要な項目については照査不要としていることから、2次養生はUFCの性能を得るための重要な工程の1つであるといえる。本製作における2次養生は、図 - 10 に示す断熱性の高いパネルで密閉された2次養生槽にて行っている。2次養生槽は各ラインに3基ずつ

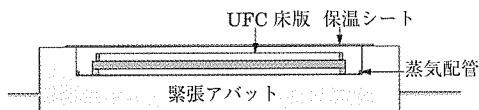


図 - 9 1次養生要領

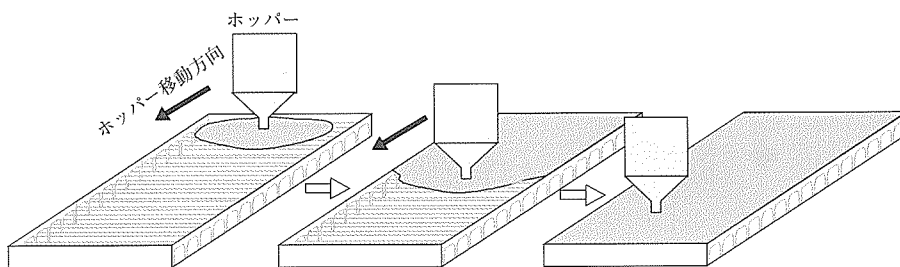


図 - 8 UFC 打設概念図

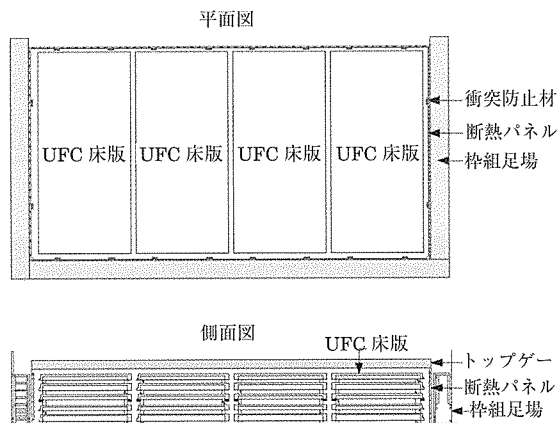


図 - 10 2次養生設備



写真 - 8 UFC 運搬状況

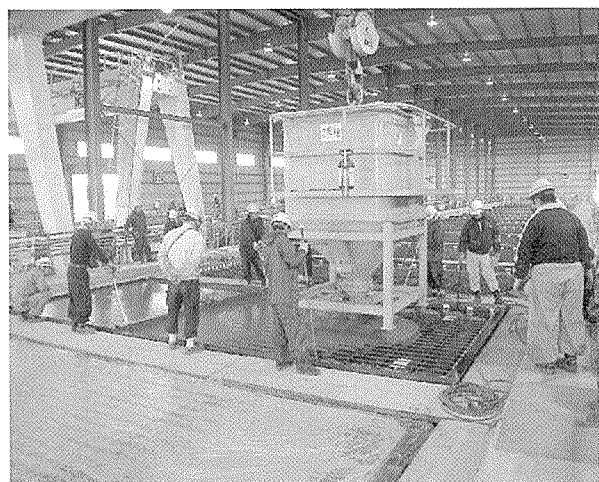


写真 - 9 UFC 打設状況

あり、1基の養生槽内に床版20枚が配置可能である。養生槽内には温度センサーを配置することにより内部の温度をモニタリングし、所定の温度から離れた際には自動的に蒸気量をコントロールできる設備となっている。



写真 - 10 1次養生状況

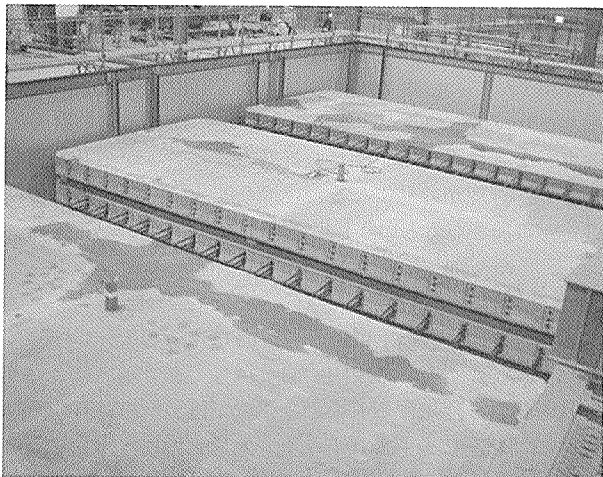


写真 - 11 2次養生状況



写真 - 12 床版運搬状況

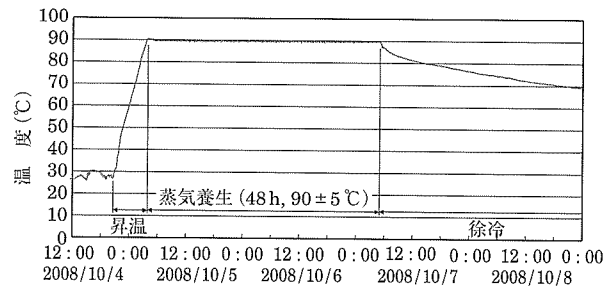


図 - 11 2次養生中の温度履歴の例

4. 設計の特性値の確認

ここでは設計で想定した材料強度の妥当性について検証する。UFCの強度試験は、50 m³ごとに床版本体と同じ条件で養生したテストピースについて圧縮、ひび割れ発生、引張の3項目を実施している。ここで用いるデータは、第1回打設（2007年12月）から2009年8月までのダクトルを使用する床版（6139枚分）の全強度試験データを整理したものである。

4.1 UFC指針における強度特性値

UFC指針では、上位の指針である「コンクリート標準示方書」に準じ、特性値を下回る確率が5%以下になるように、式(1)により特性値を算定している。

$$f_k = f_m - \sigma = f_m (1 - k\delta) \quad \text{式(1)}$$

ここに、 f_k ：試験値の特性値

f_m ：試験値の平均値

σ ：試験値の標準偏差

δ ：試験値の変動係数

k ：係数 (= 1.64)

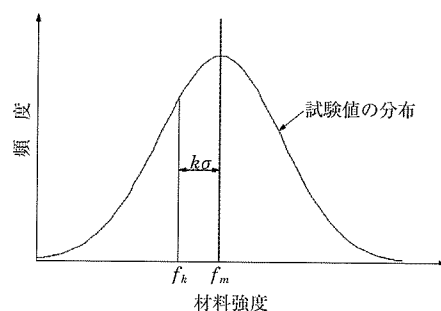


図 - 12 材料強度の特性値

4.2 本製作より得られた強度試験結果

圧縮試験はUFC指針に準じJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」により行い、供試体はΦ100 mm × 200 mmの円柱供試体を用いている。圧縮強度試験結果の度数分布を図 - 13に、圧縮強度の経時変化を図 - 14に示す。これより圧縮強度はすべてUFC指針の規格値である180 N/mm²以上であることが分かる。ひび割れ発生強度はUFC指針に準じ、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」により行い、供試体はΦ100 mm × 200 mmの円柱供試体を用いている。ひび割れ発生強度試験結果の度数分布を図 - 15に示す。引張強度はUFC指針に準じ、切

欠きのない 100 × 100 × 400 mm 供試体の曲げ強度試験結果から換算式により求めている。曲げ強度試験方法は JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」による。曲げ強度試験結果から求めた引張強度の度数分布を図 - 16 に示す。

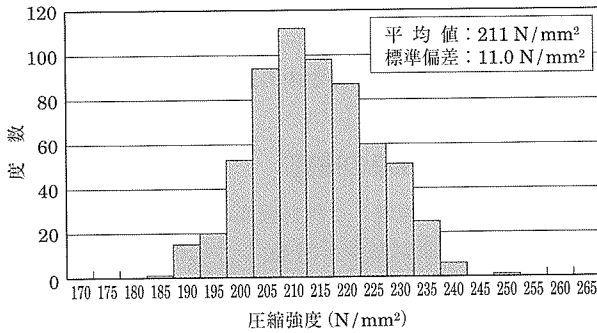


図 - 13 圧縮強度の度数分布図

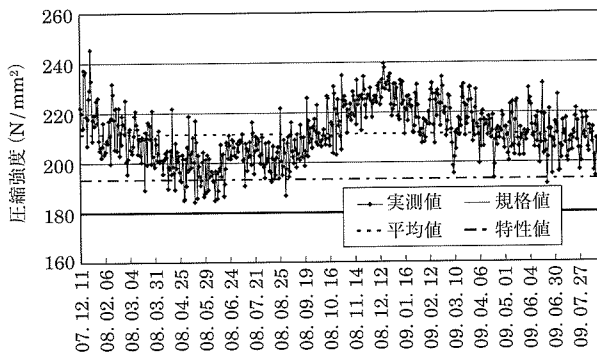


図 - 14 圧縮強度の経時変化

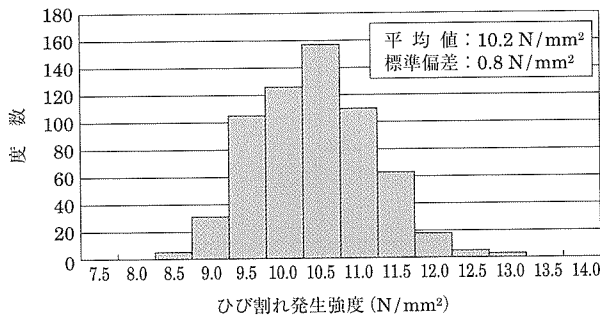


図 - 15 ひびわれ発生強度の度数分布図

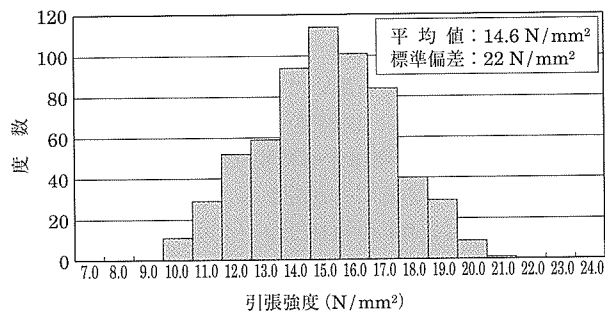


図 - 16 引張強度の度数分布図

本製作より得られたデータを用いて、式 (1) より特性値 f_k を算定し、UFC 指針における特性値と比較した結果を表 - 4 に示す。本製作より得られたデータから算定した特性値が、圧縮強度、ひび割れ発生強度および引張強度に関して、UFC 指針における特性値 (規格値) を上回っており、設計で想定した強度が妥当であったことが検証された。

表 - 4 強度試験結果

統計値		記号	単位	圧縮強度	ひび割れ発生強度	引張強度
本製作	標本数	N	----	623	623	623
	平均値	f_m	N/mm ²	211	10.2	14.6
	標準偏差	σ	N/mm ²	11.0	0.8	2.2
	変動係数	δ	%	5.2	7.6	15.2
UFC 指針	特性値	f_k	N/mm ²	193	8.9	10.9
	特性値 (規格値)	f_k	N/mm ²	180	8.0	8.8

また圧縮強度の変動係数は 5.2 % であるが、これは通常のコンクリート (10 % 程度) の約半分であり、非常にばらつきが小さいといえる。変動係数が 5.2 % の場合で特性値が 180 N/mm² となるような平均値 f_{m1} と、変動係数が 10 % の場合で特性値が 180 N/mm² となるような平均値 f_{m2} をそれぞれ式 (1) より算定すると

$$f_{m1} = f_k / (1 - k\delta_1) = 180 / (1 - 1.64 \times 0.052) = 197 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m2} = f_k / (1 - k\delta_2) = 180 / (1 - 1.64 \times 0.100) = 215 \text{ N/mm}^2$$

となり、ばらつきが大きい場合の方が 18 N/mm² 程度必要強度が大きくなる。すなわち材料のばらつきが小さいことにより、管理が容易になるだけでなく、より経済的な強度設定が可能となるという長所を有する。

5. おわりに

本報告では、栈橋工事のうち、UFC 床版の製作について述べた。製作を通して、UFC は高強度であり鋼繊維という特殊な材料を使用するものの、強度や施工上のばらつきは通常のコンクリートより小さく、大量生産にも十分対応可能であることが示された。現在、工事は順調に進み 2009 年 10 月末時点において、UFC 床版は製作ヤードにて 6 139 枚 (全 6 939 枚) を製作し、架設は羽田 D 滑走路 JV の関連工区により実施され、約 3 300 枚の現地架設が完了している。

本稿が今後の UFC を用いた大規模プロジェクトの一助となれば幸いである。

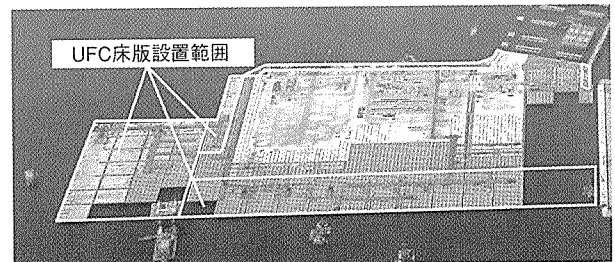
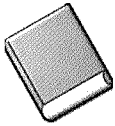


写真 - 13 栈橋工事施工状況全景 (2009.8.25 撮影)

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー第113号, 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 土木学会, 2004

【2009年11月2日受付】



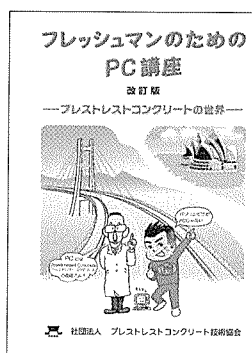
図書案内

フレッシュマンのためのPC講座・改訂版

— プレストレストコンクリートの世界 —

大変ご好評をいただいております「フレッシュマンのためのPC講座」も平成9年に第一版が発刊されてから約10年が経過いたしました。

その間に、基準値・規格値をはじめとした技術基準が従来単位系からSI単位系に移行しました。また、プレストレストコンクリート構造物においても、複合構造等の新しい構造物が誕生しています。そこで、これらの項目を新しく見直して、改訂版を発刊することにいたしました。これからの技術者を育てるためには、大変有意義な図書であると確信しておりますので、是非有効利用されることをお勧めいたします。



主な改訂項目

- ・従来単位系からSI単位系に変更しました。
- ・PCを利用した構造物の紹介に、最近の新しい構造物を盛り込みました。

発刊日：2007年3月

定価：3,600円/送料400円/冊

会員特価：3,000円/送料400円/冊

体裁：A4判, 140頁

申込先：社団法人プレストレストコンクリート技術協会