

UFC 床版の品質と設計特性値の確認

棧橋Ⅰ工区 亀田 祐二
 棧橋Ⅱ工区 横井 謙二
 大成建設(株) ○大竹 明朗

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

1. まえがき

羽田空港D滑走路の棧橋部のうち、滑走路及び誘導路の外側のエリア（図 1.1 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を有する材料である¹⁾。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（通常コンクリートの PC 床版とした場合に対して約 3% 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。

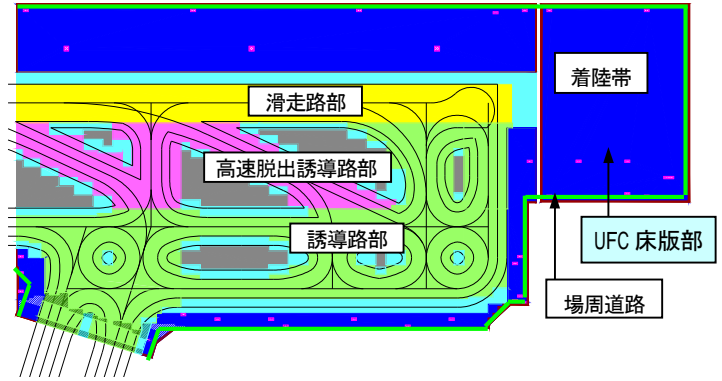


図 1.1 UFC 床版の設置エリア

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に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 2.1 に示す通りとしている。

表 2.1 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。	早急に取替や補修を必要となるような損傷を生じさせない。

UFC 床版（標準版）の構造図を図 2.1 に示す。構造的な特長は、①鋼繊維（長さ 15 mm、直径 0.2 mm）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、中空の楕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。

2-2 床版目地部

図 2.2 に床版目地部の構造を示す。ここでは図 2.2 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いように、間詰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）を塗布し、床版と間詰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極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0.5mm程度を想定）にも追従可能なウレタン系防水材（0°Cにおけるゼロスパン試験5mm以上）を選定している。

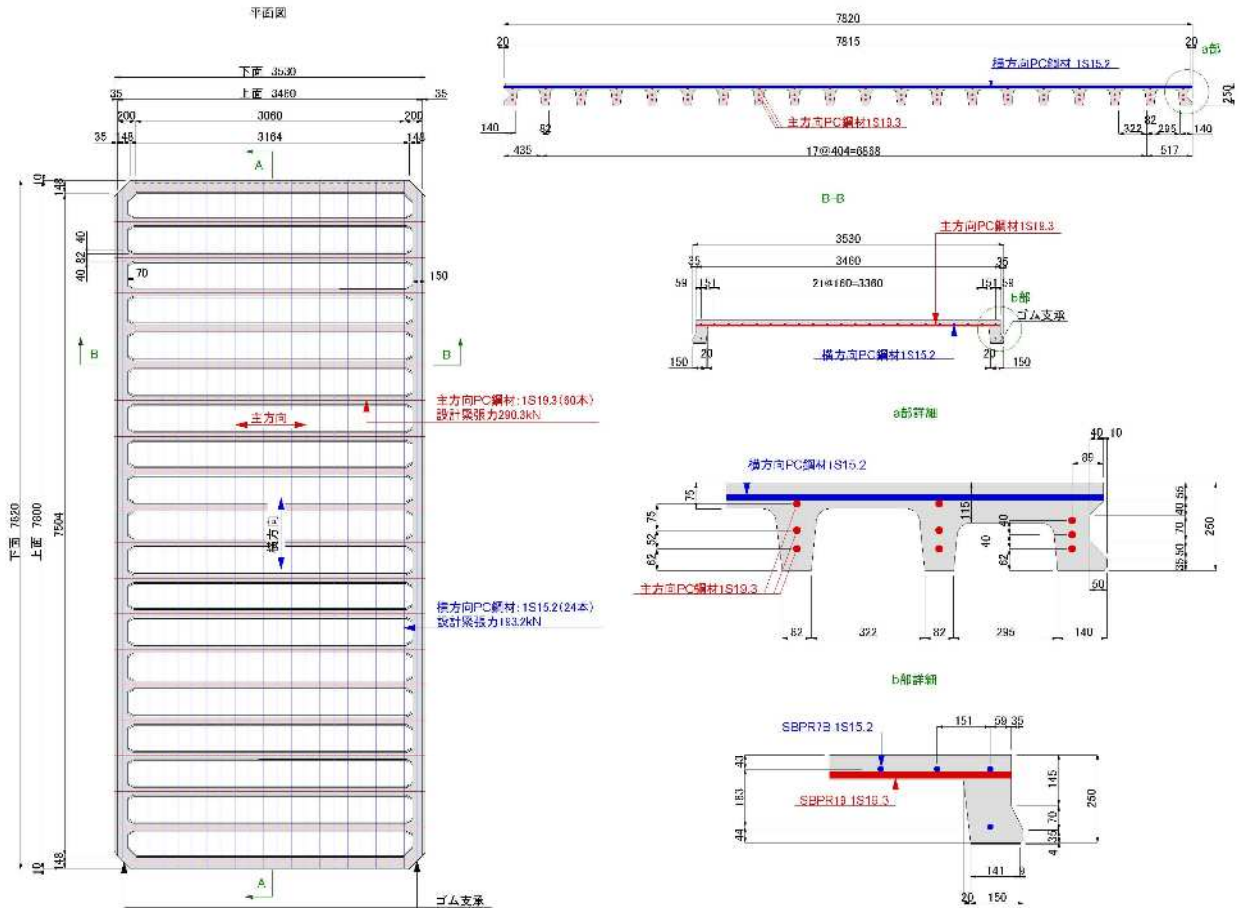


図 2.1 UFC 床版構造図

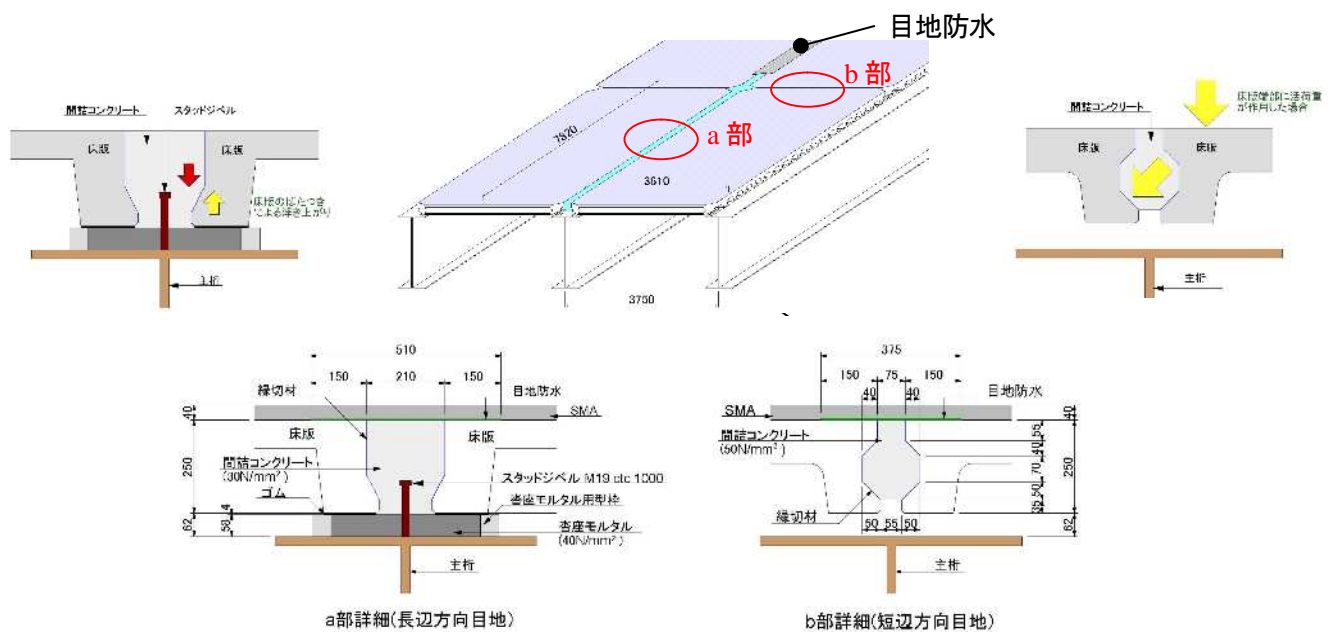


図 2.2 UFC 床版目地部構造図

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、東京湾内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、床版総枚数約 7000 枚を約 2 年間で製作する必要があるため、月当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 3.1 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 ライン当たりの製作枚数が 20 枚のラインを 2 ライン使用して、週当たり製作枚数 80 枚、月当たり製作枚数 320 枚を確保している。

$$\begin{aligned} (\text{月当たり製作枚数}) &= (1 \text{ ライン当たり製作枚数}) \times (\text{週当たりサイクル数}) \times (\text{ライン数}) \times 4 \text{ 週} \\ &= (20 \text{ 枚/ライン}) \times (2 \text{ サイクル/週} \cdot \text{ライン}) \times (2 \text{ ライン}) \times (4 \text{ 週/月}) = 320 \text{ 枚} \end{aligned}$$

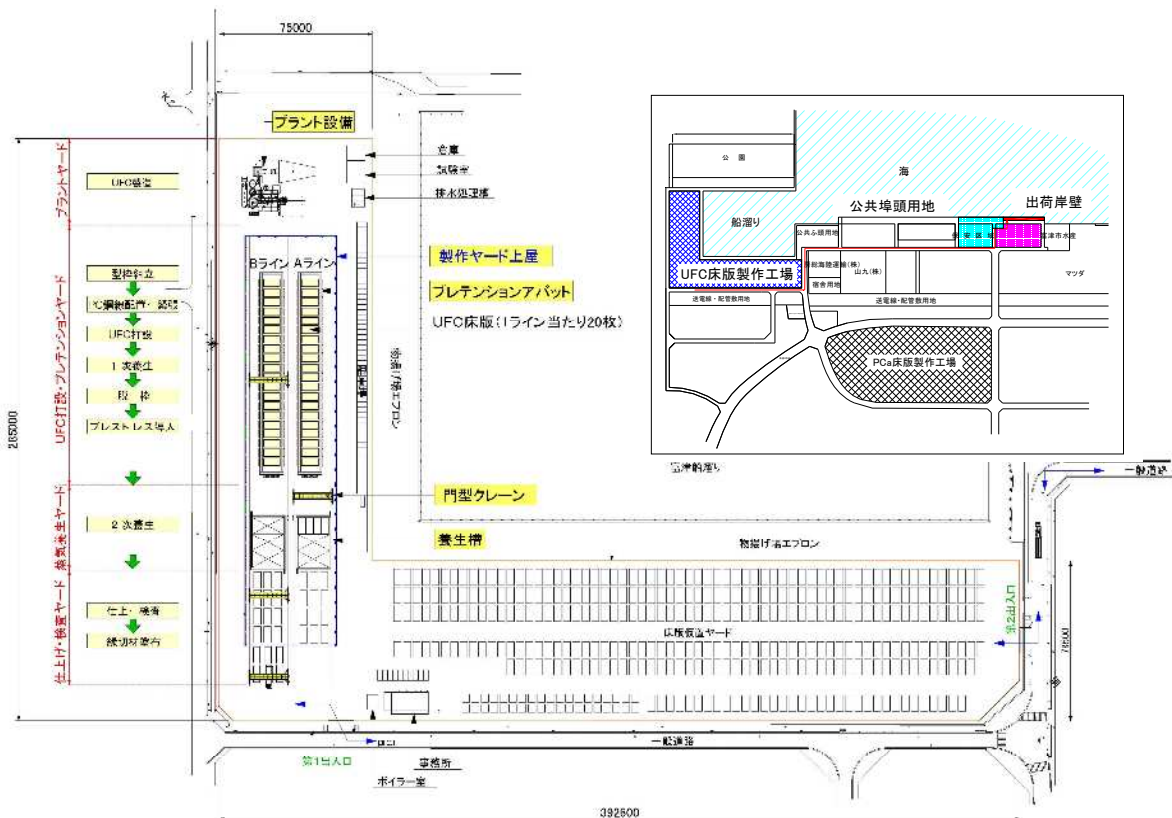


図 3.1 製作ヤードレイアウト

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 3.1 の上から下に製作が進む流れとなっている。



写真 3.1 製作ヤード上屋

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のため幾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 3.2 に製作フローを示す。図 3.2 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) 特有の工程を中心に製作要領について述べる。

(2) 型枠組立

本製作で用いる型枠は鋼製枠であり、底板枠と床版の中空部を成形するための内枠、及び側枠から成り、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 3.3 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 100m 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 17,418kN(ジャッキ 1 台当たり 1,742kN, PC 鋼線 1 本当たり 290.3kN)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。

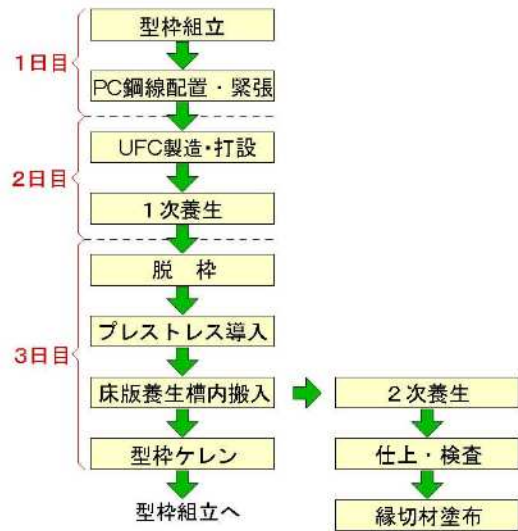


図 3.2 製作フロー



写真 3.2 型枠組立状況

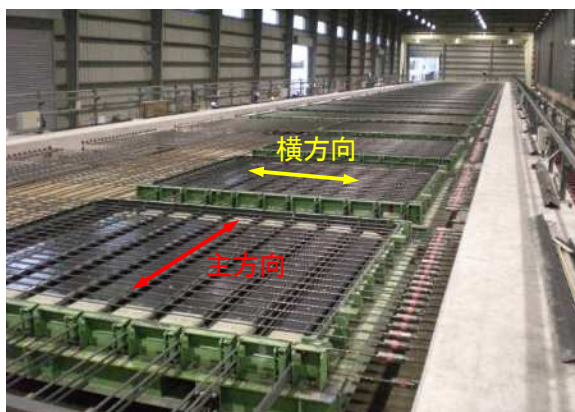


写真 3.3 PC 配置状況



写真 3.4 主方向 PC 緊張状況 (ジャッキ)

(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 3.3 に UFC の製造フローを、表 3.1 に UFC (ダクトル) の配合表を示す。練混ぜ量は、1 バッチ当たり 2.5m³ を標準とし、1 日当たり 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。

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。

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 3.4 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。

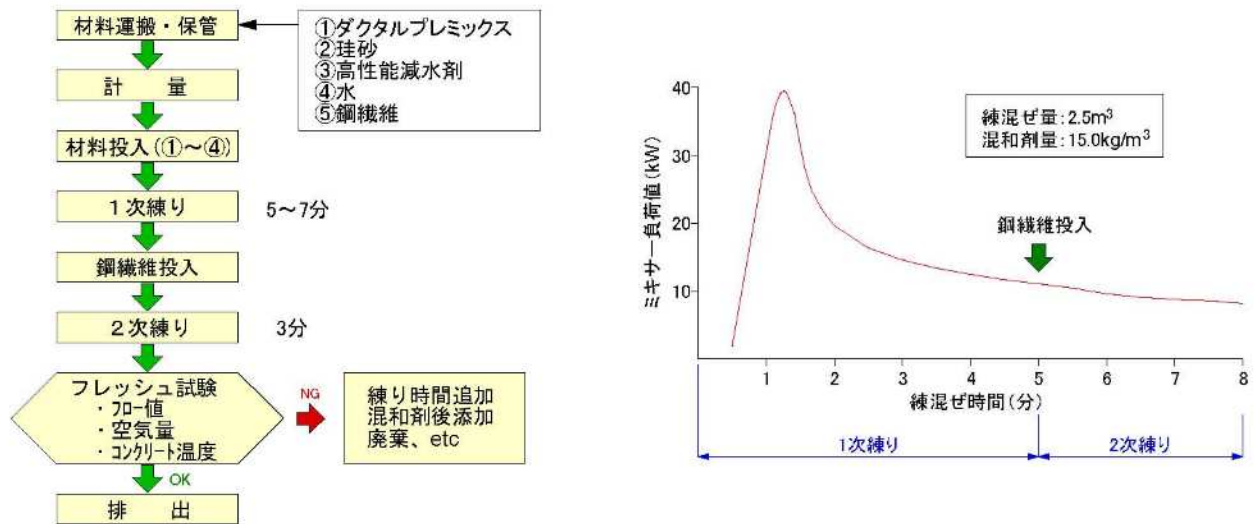


図 3.4 ミキサー負荷値

表 3.1 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)				
		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	高性能減水剤 (kg/m ³)
180	240	鋼繊維	0.2	15	2	180	1308	932	157	16

注) 単位水量は、水および高性能減水剤の合計

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 年経過毎) に練混ぜ性能試験を実施している。この試験は JISA 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ミキサから排出される標準バッチの始め及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 3.2 に 1 年経過した時点での練混ぜ性能試験結果を、写真 3.5 に練混ぜ性能試験の状況写真を示す。表 3.2 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。

表 3.2 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

写真 3.5 乾燥後の鋼繊維

(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性と配向性が良好であることを確認している。従って本製作では、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 3.5 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らずに細部まで充填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。

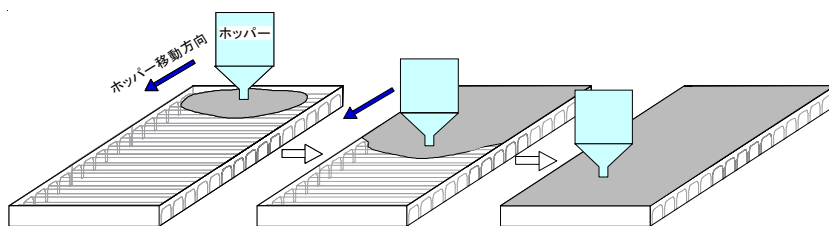


図 3.5 UFC 打設概念図



写真 3.6 UFC 運搬状況



写真 3.7 UFC 打設状況

(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つであると言える。本製作における2次養生は、図 3.7 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。



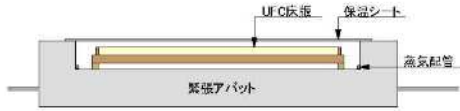


図 3.6 1次養生要領

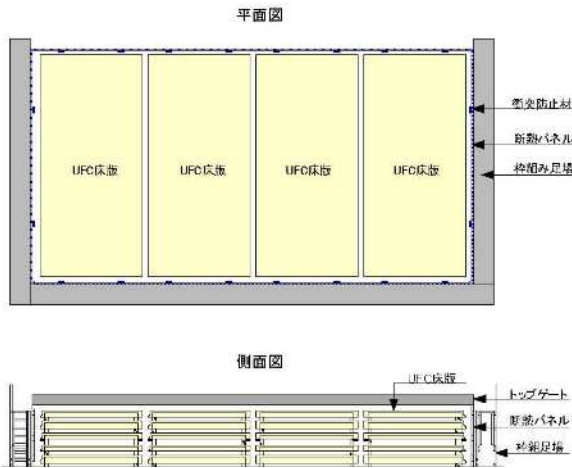


図 3.7 2次養生設備

写真 3.8 1次養生状況



写真 3.9 2次養生状況

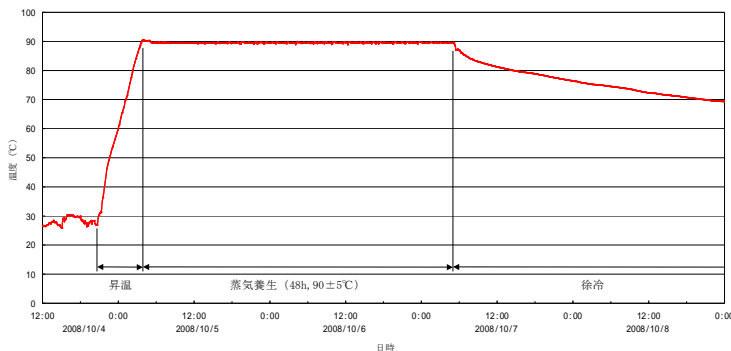


図 3.8 2次養生中の温度履歴の例



写真 3.10 床版運搬状況

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、50m³ 毎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2008年12月末まで約1年分（床版3676枚分）の各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。

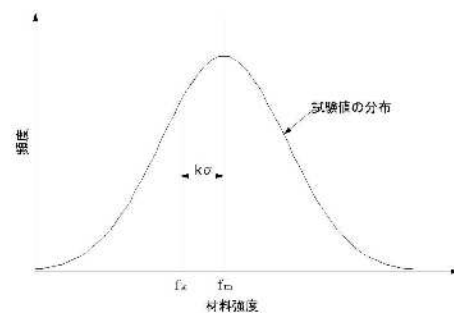
$$f_k = f_m - k \sigma = f_m (1 - k \sigma / f_m) \quad \text{式(1)}$$

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

k ：試験値の変動係数



k : 係数 (=1.64)

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 100mm × 200mm 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 4.1 に、圧縮強度の経時変化を図 4.2 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 180N/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 100mm × 200mm 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 4.3 に示す。引張強度は UFC 指針に準じ、切り欠きのない 100 × 100 × 400mm 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 4.4 に示す。

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 4.1 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。

また圧縮強度の変動係数は 5.7% 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言える。変動係数が 5.7% の場合で特性値が 180N/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 180N/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

$$f_{m1} = f_k / (1 - k_{-1}) = 180 / (1 - 1.64 \times 0.057) = 199 \text{ N/mm}^2$$

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

となり、ばらつきが大きい場合の方が 16N/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。

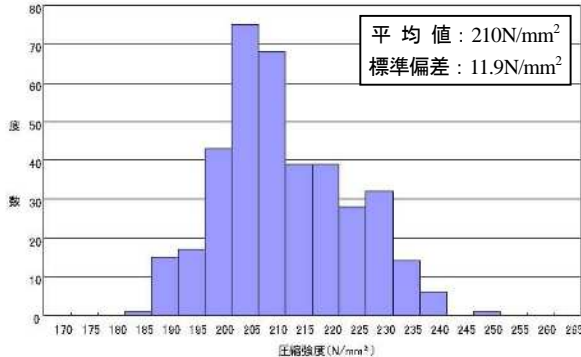


図 4.1 圧縮強度の度数分布図

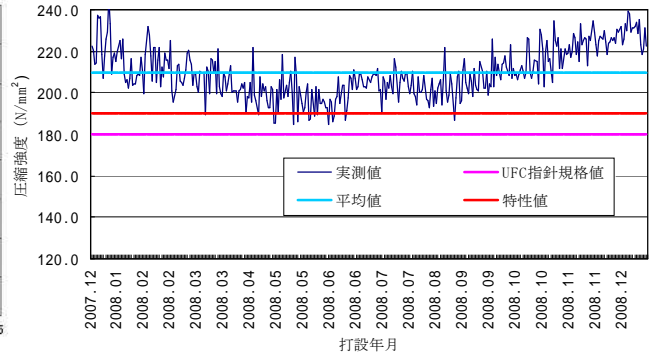


図 4.2 圧縮強度の経時変化

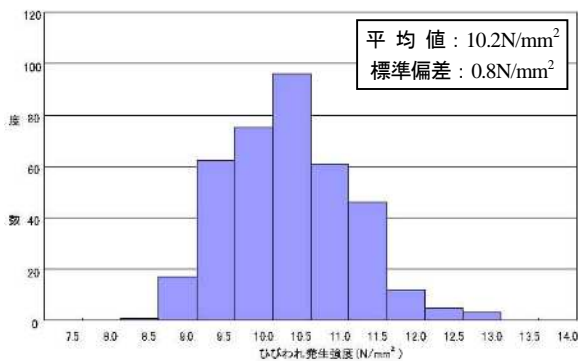


図 4.3 ひびわれ発生強度の度数分布

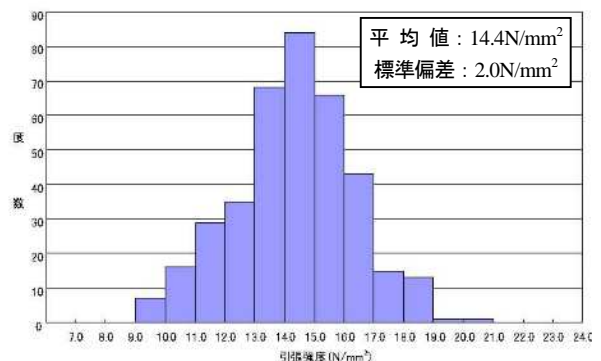


図 4.4 引張強度の度数分布図

表 4.1 強度試験結果

統計値		記号	単位	圧縮強度	ひびわれ発生強度	引張強度	備考
本製作	標本数	N	5-8	378	378	378	
	平均値	f_m	N/mm ²	210	10.2	14.4	
	標準偏差		N/mm ²	11.9	0.8	2.0	
	変動係数		%	5.7	7.8	13.9	

5. UFC 床版の運搬・据付

UFC 床版製作ヤードで製作された UFC 床版は、図 3.1 に示す出荷岸壁まで大型トレーラーで陸上運搬を行い、クローラクレーン（200 t 吊）を使用し、床版運搬台船（2000 t 積）に積み込みを行う。床版運搬台船は、東京湾内のルートで 1,600～1,800PS 級の押船（引船）を使用して、羽田現場まで海上運搬する。海上運搬に際しては、富津航路利用の他船舶との調整を行い、君津航路、木更津航路の出入船舶及び中ノ瀬航路からの他船舶、漁船等に注意して運航を行っている。

羽田現場では、運搬台船から UFC 床版を水切りし、版種を確認しながらジャケット鋼桁上に据付を行う。現場における施工フローを図 5.1 に示す。

5-1 床版架設工

UFC 床版の架設には栈橋上のクローラクレーン（100～180 t 吊）を使用し、A・C滑走路制限表面に留意して、クレーンブームの長さや角度により先端高さを管理して行う。UFC 床版の吊り上げは、専用吊治具を用いて行う。吊治具は、床版側面に埋設したインサートにボルトにて固定する。吊治具を床版側面に取り付けることで、玉掛け時に作業員が床版上面に上がる必要がなく、より安全に作業することが可能である。本専用吊治具には、高さ調整ボルトが組み込まれており、ボルトの突出長さを吊り上げ前に予め調整することで、UFC 床版は架設と同時に所定の高さに保持される。

5-2 沓座モルタル工

沓座モルタル（設計基準強度 40N/mm²）の製造は、コンクリートプラント船（CP 船）にて行い、CP 船からの距離に応じてモルタルポンプまたは専用バケットを使用して打設を行う。モルタルの打設は空気溜りができないように、沓座天端まで片押しで連続的に注入する。沓座モルタルの強度発現を確認した後、高さ調整ボルトを緩めて専用吊治具を撤去する。

5-3 目地コンクリート工

UFC 床版の短辺方向目地部に底型枠と妻型枠を設置する。短辺方向目地部は、設計基準強度 50N/mm² のコンクリートを前述の CP 船にて製造し、CP 船からの距離に応じてディストリビュータまたはコンクリートバケットを使用して打設を行う。コンクリートは振動バイブレータを用いて空隙ができないように十分に締固めを行う。コンクリート打設完了後、仕上げ補助剤兼皮膜養生剤をコンクリート表面に塗布し、所定の高さに均した上面を金ゴテ仕上げする。コンクリート表面を荒らさずに作業できる程度にコンクリートが硬化した後、コンクリート露出面を保水させた養生マットで覆い、湿潤状態に保つ。

続いて、UFC 床版の長辺方向目地部においても、短辺方向目地部と同様の方法で、設計基準強度 30N/mm² のコンクリートの打設ならびに養生を行う。また、長辺方向目地中間部及び短辺方向目地との境界部に施工目地（塩化ビニール製）を設け、クラック制御を行う。

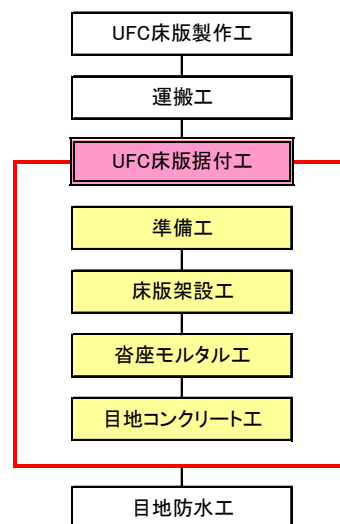


図 5.1 施工フロー



写真 5.1 専用吊治具



写真 5.2 沓座モルタル用型枠設置



写真 5.3 UFC 床版架設



写真 5.4 沓座モルタル打設



写真 5.5 目地コンクリート打設

6. おわりに

本報告では、栈橋工事のうち、UFC 床版の製作から現地据付までについて述べた。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 5 月末時点において、UFC 床版は製作ヤードにて約 5,200 枚（全 6,939 枚）を製作し、そのうち約 1,200 枚の現地架設を完了している。

今後とも、工期・品質確保のため、関係各位のご指導・ご協力を賜りますようお願い申し上げます。



写真 5.6 栈橋工事施工状況全景（2009.4.27 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.