

D滑走路 棧橋プレキャストUFC床版構造の設計 ～ 超高強度繊維補強コンクリートによる床版の軽量化・高耐久化～

J V 工務・設計監理 Gr 高橋正美

大成建設 白谷宏司

キーワード：棧橋式、床版構造、プレキャスト、超高強度繊維補強コンクリート

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、以降UFCと称する）を用いたプレキャスト版としている。このエリアの面積は約20万 m^2 であり、標準寸法7.82m \times 3.61m、約6900枚（異形版も含む）のUFC床版を用いる。

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、床版の軽量化が図れ、これに伴い棧橋ジャケット鋼材量および杭重量の低減が図れる。また、高耐久性の材料であるため維持管理費の低減が期待できる。

本文では、UFCの基本的性能、床版の設計計算および実物大模型を用いた耐力確認実験の概要について述べる。

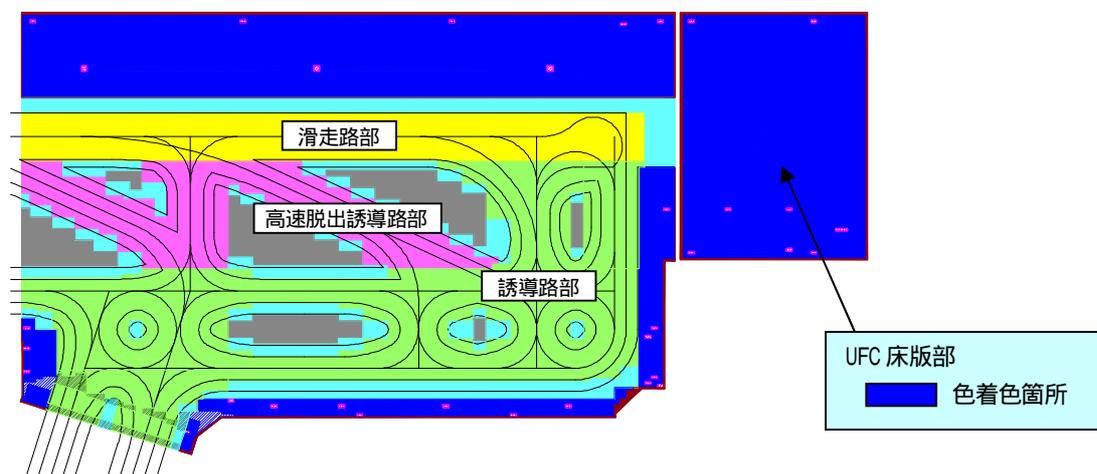


図1-1 UFC床版の設置エリア

2. UFCの概要

2-1 UFCの基本的性能

UFCは、 $150N/mm^2$ を超える圧縮強度（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）」においては、設計に用いる特性値は $180N/mm^2$ ）と高い靱性を有する構造性能と、緻密なマトリクスに由来する高い耐久性能を合わせ持つコンクリートである。以下にその特徴を述べる。

(1) 高強度・高靱性

UFCは、セメント、シリカフェーム、珪砂等の粉体と補強用鋼繊維（直径0.2mm、長さ15mm、体積比2%）および専用減水剤からなるセメント系新素材である。圧縮強度は平均 $190N/mm^2$ 以上と非常に高く、補強用鋼繊維によりひび割れの伸展や幅の拡大が抑制されるため、曲げ強度も $35N/mm^2$ 程度と非常に高い靱性を示している。

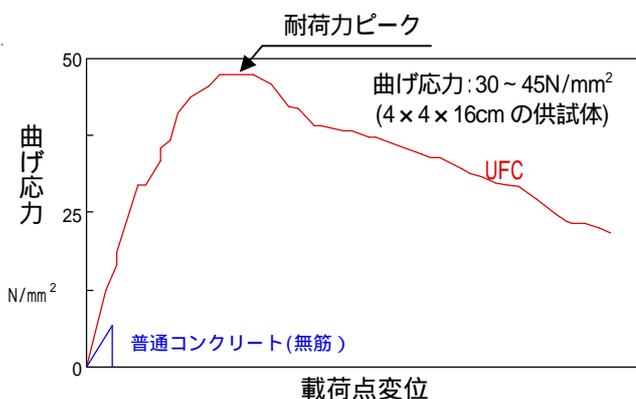


図2-1 UFCの曲げ強度試験の例

標準的な熱養生（90、48時間の蒸気養生）を行った後の UFC の基本的な物性値の、一般のコンクリートとの比較を、表 2-1 に示す。

表 2-1 UFC の基本物性値

	単位	UFC	普通コンクリート $f'_{ck}=35\text{N/mm}^2$	比率
圧縮強度	N/mm ²	194	36 程度	5 倍程度
曲げ強度 (4cm × 4cm × 16cm 供試体)	N/mm ²	35.1	5 程度	7 倍程度
ひび割れ発生強度	N/mm ²	11.7	3 程度	4 倍程度
透水係数	cm/sec	1.0×10^{-17}	1.0×10^{-10}	1/10 ⁷

注) 上表の強度値は土木学会コンクリートライブラリー「超高強度繊維補強コンクリートの設計施工指針(案)」に示されている試験結果(平均値)を引用した。

(2) 高耐久

UFC は「最密充填」の思想の基に粒径の異なる粉体が配合されていると共に、水セメント比で 22%程度まで単位水量を抑えている。そのため、硬化体は非常に緻密であり、塩分の浸透（塩素イオンの浸透深さ）が一般のコンクリート（W/C：45%）に比べ 1/10 程度と非常に高い耐久性能を有している。

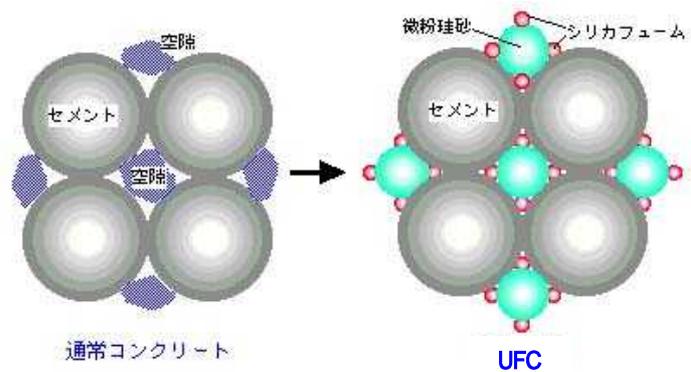


図 2-2 UFC のマトリックスのイメージ

図 2-3 に UFC と一般のコンクリートの遮塩性能について比較した結果を示す。この図は、コンクリートが著しい腐食性環境に曝され 50～100 年経過した後に、どの深さまで塩化物イオンが浸透するかを計算により求めたものである。この図によれば、100 年後の UFC 内部への塩化物イオンの浸透は約 1cm 程度であり、一般コンクリートの 9cm に比べ桁違いに小さい値を示している。

また UFC は、緻密なマトリクスゆえに高い耐磨耗性（一般のコンクリートの 6 倍程度）も有しており、ダム洪水吐やトンネルのライニング材等への利用も図られている。

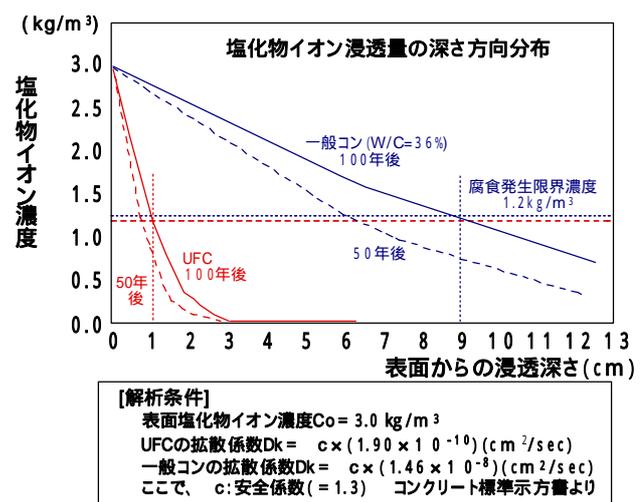


図 2-3 UFC の遮塩性能（計算値）

このような優れた性能を有する UFC は、ヨーロッパで開発され海外での実績は多い。国内では、2002 年に橋長 50m の歩道橋が建設され、現在では高速道路の橋梁等へも採用されている。なお、港湾空港施設での適用は今回初めてとなる。

2-2 D滑走路棧橋部へのUFCの適用

床版にUFCを適用した理由は、以下の通りである。

高強度のUFCを用いることにより、床版の軽量化が可能となる。(死荷重51%低減)

その結果、ジャケットの鋼材量および杭重量が低減でき、建設費のコストダウンが図れる。

耐久性に優れるため、維持管理費の低減が図れる。

2004年9月に土木学会より、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」が発刊され、要求される性能に対する客観的な照査が可能になった。

3. 着陸帯Bの床版の概要と設計

3-1 UFC床版の構造概要

着陸帯BのUFCプレキャスト床版の構造概要を図3-1に示す。

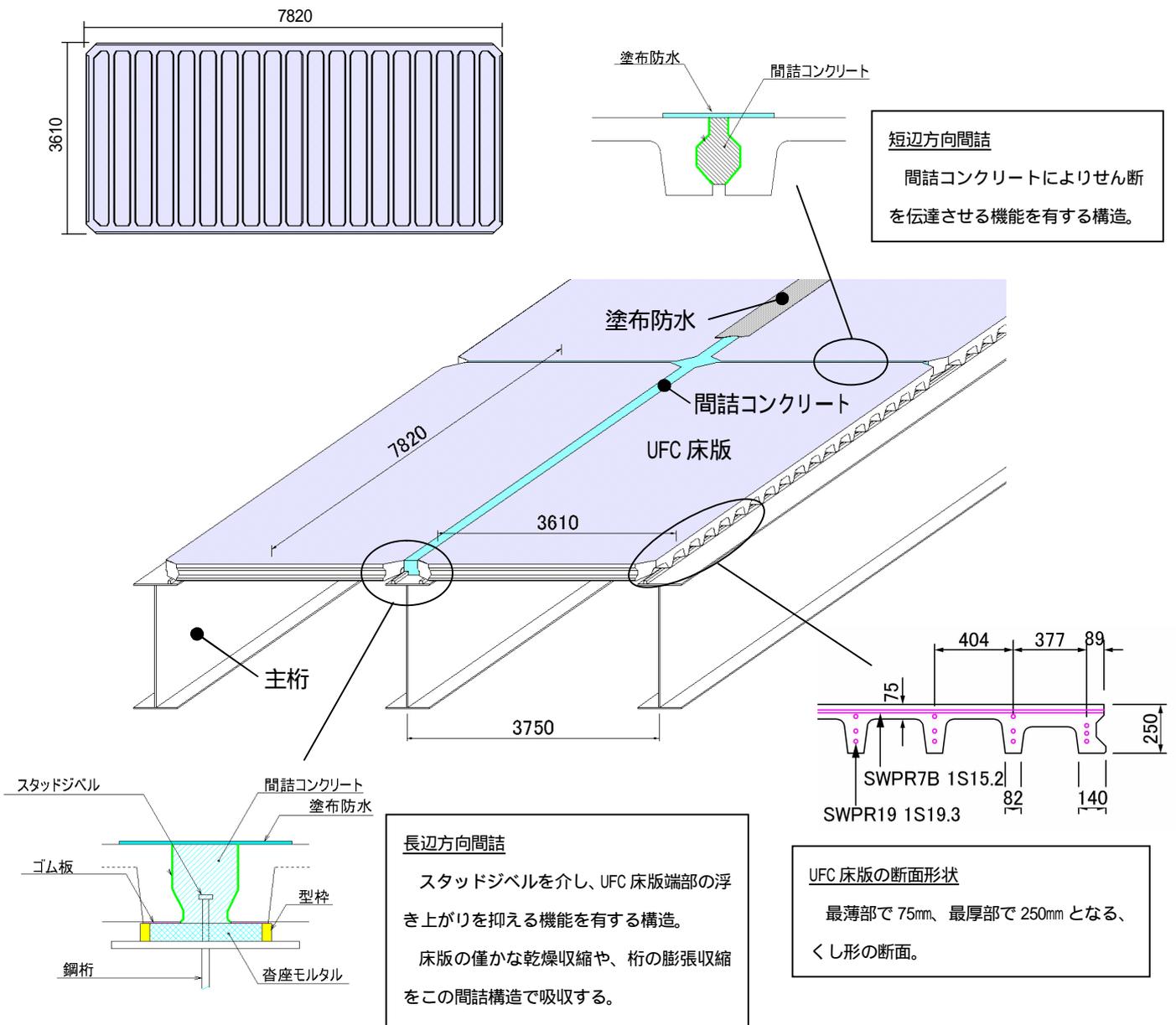


図3-1 UFC床版構造図

本床版に配置される PC 鋼材は、大量生産するプレキャスト版のコストダウンが図れる等の理由から、2 方向プレテンションを採用した。2 方向ともプレテンションとしたプレキャスト床版構造の前例はないが、1 方向プレテンション + 1 方向ポステンションの構造等よりもコスト面で有利な構造である。

本設計における UFC 床版の平均版厚は約 135mm であるが、本床版を普通コンクリート（設計基準強度 50N/mm²）を用いたプレキャスト床版とした場合、平均版厚は約 320mm となる。

UFC 床版は普通コンクリート床版に比べ約 51%の死荷重軽減（平均死荷重の比率）となっている。

表 3-1 着陸帯 B における UFC 床版と普通コンクリート PC 床版の比較

	UFC 床版	PC 床版（設計基準強度 50N/mm ² ）
構造	 W=97kN / 枚	 W=221kN / 枚
平均版厚（床版のみ）	135mm	320mm
平均死荷重 （間詰分も含む）	3.83 kN/m ²	7.84 kN/m ²

3-2 UFC 床版の設計

3-2-1 設計条件の概要

UFC 床版において断面が決定する荷重は、以下の通りである。

- ・使用限界状態（常時）：床版死荷重 + 自動車荷重（A 活荷重）
- ・終局限界状態（異常時）：床版死荷重 + 航空機荷重（航空機の走行）

UFC 床版の使用限界および終局限界状態における照査項目を、表 3-2 に示す。

表 3-2 UFC 床版の照査項目

	使用限界状態	終局限界状態 （航空機荷重時）
要求性能	・UFC に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。
照査項目	・引張応力 < 制限値 ・圧縮応力 < 制限値	・破壊に対する安全率 > 1.0 ・PC 鋼材応力 < 降伏応力

設計計算における UFC の物性値や応力の制限値は、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」に準じて設定した。UFC の設計基準強度は 180 N/mm² である。

終局限界状態においては、ひび割れの発生は許容するが床版が崩壊に至らないことを要求性能としたが、特に航空機の走行に対しては、早急に補修や取替を必要とせず、その後の使用にも耐え得る限定的な損傷に

留めることとした。この条件を満たすために、航空機荷重時時に PC 鋼材応力が降伏応力以下とする制限を設けた。

3-2-2 断面力の算定

UFC 床版に発生する断面力および応力は、3次元弾性 FEM 解析に基づき算出した。FEM 解析においては、ジャケットの梁もモデル化し、レグは鉛直バネとして評価した。

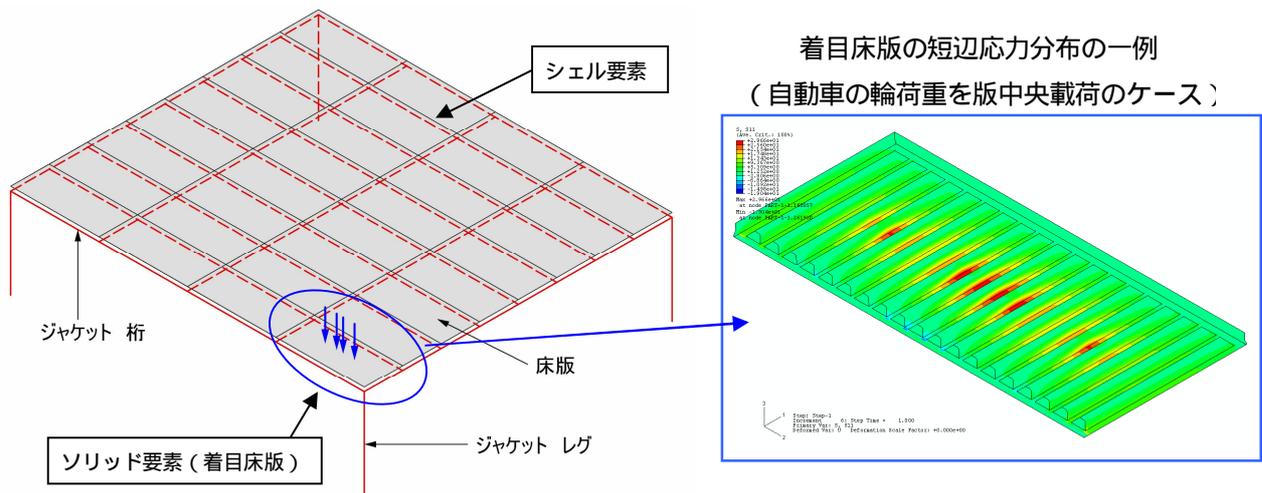


図 3-2 解析モデルの概要

3-2-3 照査結果

設計計算の一例として、標準版の使用限界および終局限界の曲げに対する照査結果を表 3-3~3-4 に示す。

使用限界状態に発生する引張応力は、 8N/mm^2 の制限値に収まっており、ひび割れが生じないことが確認できた。

航空機荷重時においても、曲げ破壊に対する安全率は十分高く、PC 鋼材が降伏に達しないことが確認できた。

設計計算においては、この他せん断等に対する照査も行い、所要性能を満足することを確認している。

表 3-3 使用限界状態の曲げ応力に対する照査
単位： N/mm^2

	合成応力	応力の制限値
短辺方向(梁)	6.9	8.0
長辺方向(床版)	7.5	

注 1：応力は圧縮を正とする。

2：圧縮応力は制限値よりもはるかに小さいため、掲載を省略する。

表 3-4 終局限界状態(航空機荷重時)の曲げ耐力と PC 鋼材応力に対する照査

	曲げ破壊安全率	PC 鋼材応力 (N/mm^2)
短辺方向(梁)	$1.73 > 1.00$	$1070 < y = 1562$
長辺方向(床版)	$1.86 > 1.00$	$920 < y = 1562$

4. 実物大模型を用いた載荷実験

4-1 実験目的および実験概要

UFC 床版が設計計算通りの応答や耐荷力が得られることを確認するために、実物大の床版による載荷実験を実施した。

なお、本実験では、UFC の材料物性値や製作時のバラツキの程度を検証するために、2 体の供試体に対する載荷実験を行った。

実験供試体は、基本的には図 3-4 に示す実構造と同じである（ただし、実施設計時に版端部など細部寸法を一部変更）。

実験では、まず自動車荷重の 3 回繰返し載荷を行い、その後航空機荷重を 2 回繰返し載荷した。そして最後に、航空機荷重を超える載荷を行った。

各荷重時における確認項目は以下の通りである。

1) 自動車荷重の 3 回繰返しにおける確認項目

- ・ ひび割れが生じないこと
- ・ 荷重に対する応答（変位、ひずみ）が線形で、計算値と同程度であること

2) 航空機荷重の 2 回繰返しにおける確認項目

- ・ PC 鋼材が降伏しないこと
- ・ 航空機荷重時までの荷重と変位の関係が単調増加で、航空機荷重の除荷時の残留変形が小さく、かつ 2~3 回目の航空機荷重時の変位が 1 回目の載荷時より顕著に増加がないこと。

3) 最大荷重時における確認項目

航空機荷重を超える荷重の載荷により、航空機荷重時に対する耐力の余裕度を把握する。

荷重の載荷位置を図 4-3 に示す。

自動車荷重と航空機荷重では輪荷重の受圧面積や配置間隔が異なるが、実験では航空機荷重の輪荷重配置で載荷した。輪荷重配置は、終局断面力が最大となる B777-200ER の輪配置とした。

また、実構造ではジャケットの桁がたわむ支持条件であるが、実験では堅固な基礎上に供試体を設置した。

これらの実構造と実験条件の相違の影響を考慮するため、設計で算定された断面力・応力を再現するような等価荷重を設定した。

なお、疲労については十分に安全であるので、実験は行わないこととした。

床版の挙動を推定するために、3次元弾塑性 FEM 解析を実施した。ここで、2 体の実験結果のバラツキが想定範囲内に収まっていることを確認するため、実際の床版製作で想定される材料品質のバラツキの上下

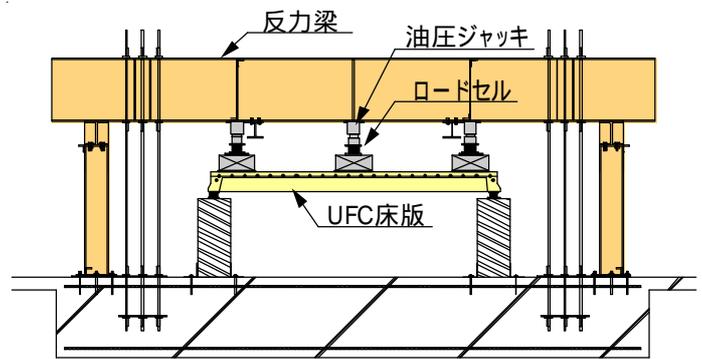
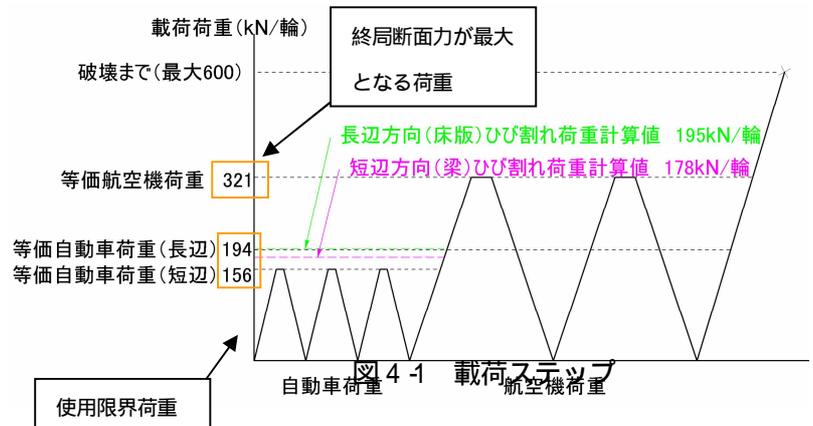


図 4-2 載荷装置

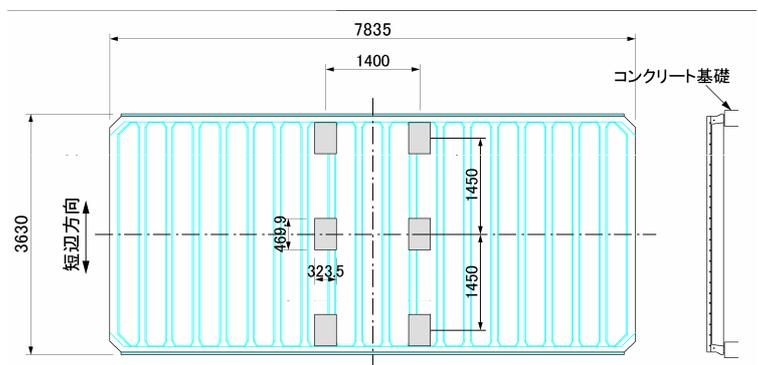


図 4-3 実物大供試体載荷実験 載荷位置

限を指針に記されている材料試験結果等をもとに設定し解析を行った。

表 4-1 弾塑性 FEM 解析ケース

	UFC 諸元 (N/mm ²)			PC 鋼材諸元 (N/mm ²)		
	圧縮強度 f'_{ck}	引張強度 f_{tk}	ヤング係数	降伏強度	引張強度	ヤング係数
下限 - 指針規定値	180	8.8	46800	1570	1860	191000
上限	207	13.8	53200	1870	1980	191000

4-2 実験結果

4-2-1 荷重 - 変位曲線

本実験は 2 体の供試体に対して行ったが、そのうちの 1 ケースの荷重 - 変位曲線を図 4-4 に示す。
 なお、もう 1 ケースの結果についても下図と同様にトレース出来たことを確認している。

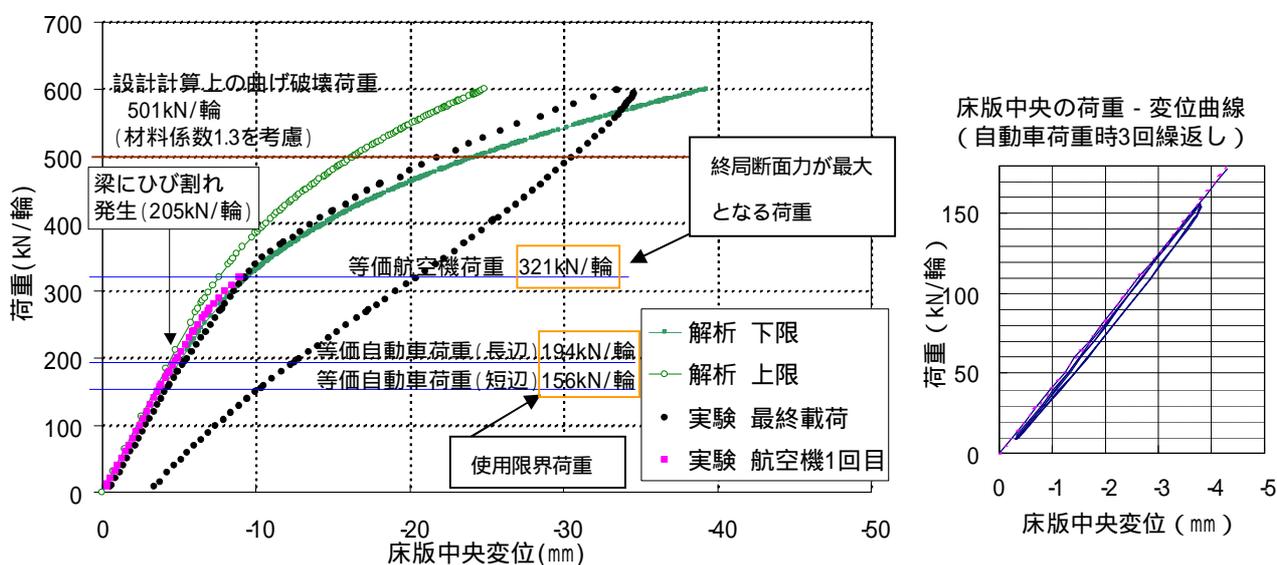


図 4-4 荷重 - 変位曲線の一例

【使用限界状態について】

- ・自動車荷重時の 3 回の繰返し載荷時においては、変位は線形で、有意な残留変位も生じていない。また、FEM 解析結果とも良く一致している。
- ・最初のひび割れは、荷重が 200kN を少し超えた段階で短辺方向の梁に発見された。梁が引張応力の制限値 (8 N/mm²) に達する荷重は計算上 178kN/輪である。

【終局限界状態について】

- ・等価航空機荷重 (321kN/輪) 載荷では、1 回目と 3 回目の挙動に有意な差はなかった (鉛直変位は、8.79 から 9.01mm へ 2.5% 増加)。
- ・設計計算上の曲げ破壊荷重 (501kN/輪) を超える荷重 (600kN/輪) を載荷した場合のひび割れ幅は概ね 0.1mm 以下であり、床版にはまだ耐力の余裕があるように見受けられた (載荷設備の制約のためこの荷重で載荷を終了した)。
- ・厚さ 75mm の床版の押し抜きせん断についても、航空機荷重を超える 600kN/輪までの載荷に対して顕著な損傷はなかった。

もう一方の供試体に対する実験結果も概ね同様であり、2ケースにおける航空機荷重時の鉛直変位の差は1.8%程度であった。よって、本床版はバラツキの少ない安定した耐荷性能を有していると判断できる。



全景



床版下面

写真 4-1 実物大模型載荷実験

4-2-2 載荷実験結果のまとめ

2体のUFC床版の実物大供試体を用いて行った載荷実験結果に基づく、UFC床版の設計に対する判定結果を表4-2に示す。本実験より、UFC床版が着陸帯Bにおける所要性能を満足していることが確認できた。

表 4-2 実験結果のまとめ

項目	判定基準	実験結果	判定
使用限界 (自動車)	応答が線形であること。 ひび割れが生じないこと。	3回の荷重繰返しに対し、応答は線形で、変位やひずみはFEM解析結果とよく一致。 ひび割れ発生荷重は設計値より大きい。	使用限界状態においてひび割れが生じず、所要性能を満足。FEM解析に基づく設計法の妥当性を確認。
終局限界 (航空機)	早急な取替や補修が必要となる状態にならないこと。 (PC鋼材が降伏しないこと)	航空機荷重時1回目に対する3回目の鉛直変位の増加は2.5%程度	早急な取替や補修が必要となる状態にならない(PC鋼材が降伏しない)。 航空機荷重に対し、十分余裕のある耐力を有する。
最大荷重	航空機荷重に対し、適切な耐力の余裕があること。	航空機荷重の1.8倍以上となる600kN/輪まで、荷重-変位は単調増加の関係にあり、ひび割れ幅は概ね0.1mm以下。	

5. あとがき

UFCは優れた力学性能や耐久性能を有する材料である。羽田空港D滑走路では、その特性を活かし、合理的な床版構造としてUFC床版を選定した。本文にある設計や載荷試験の結果が示すように、UFC床版は羽田空港D滑走路で要求される性能を満足しているものと考えている。今後、工事実施に向けて、関係各位のご指導の下さらなる検討を重ね、品質向上に向けて努力する所存である。