

## D滑走路 栈橋部プレキャスト床版構造の設計

～世界最大規模の床版の計画・設計～

J V 工務・設計監理 Gr 南浩郎 輿石正己 南郷健太郎 原田慎 前田利光

キーワード：栈橋、床版、合成構造、プレキャスト、間詰

### 1. まえがき

D滑走路の栈橋部は、海中に打設した鋼管杭と鋼製のジャケット、及びジャケットの鋼桁上に配置されたコンクリート床版から構成される(図-1)。このうち、滑走路や誘導路を含む栈橋中央部約31万 $\text{m}^2$ を工場製作のプレキャスト床版(約10,700枚、標準寸法約6.6m $\times$ 約3.3m)と現場打設の間詰部からなる連続コンクリート床版、残りの外周部約20万 $\text{m}^2$ は超高強度繊維補強コンクリート(UFC)製のプレキャスト床版を敷設して構築する計画である(図-2)。本報文では、滑走路や誘導路を含む栈橋中央部に構築するプレキャスト床版構造の概要を報告する。

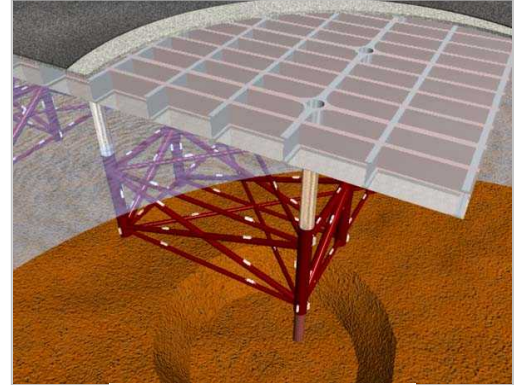


図-1 栈橋部の構造

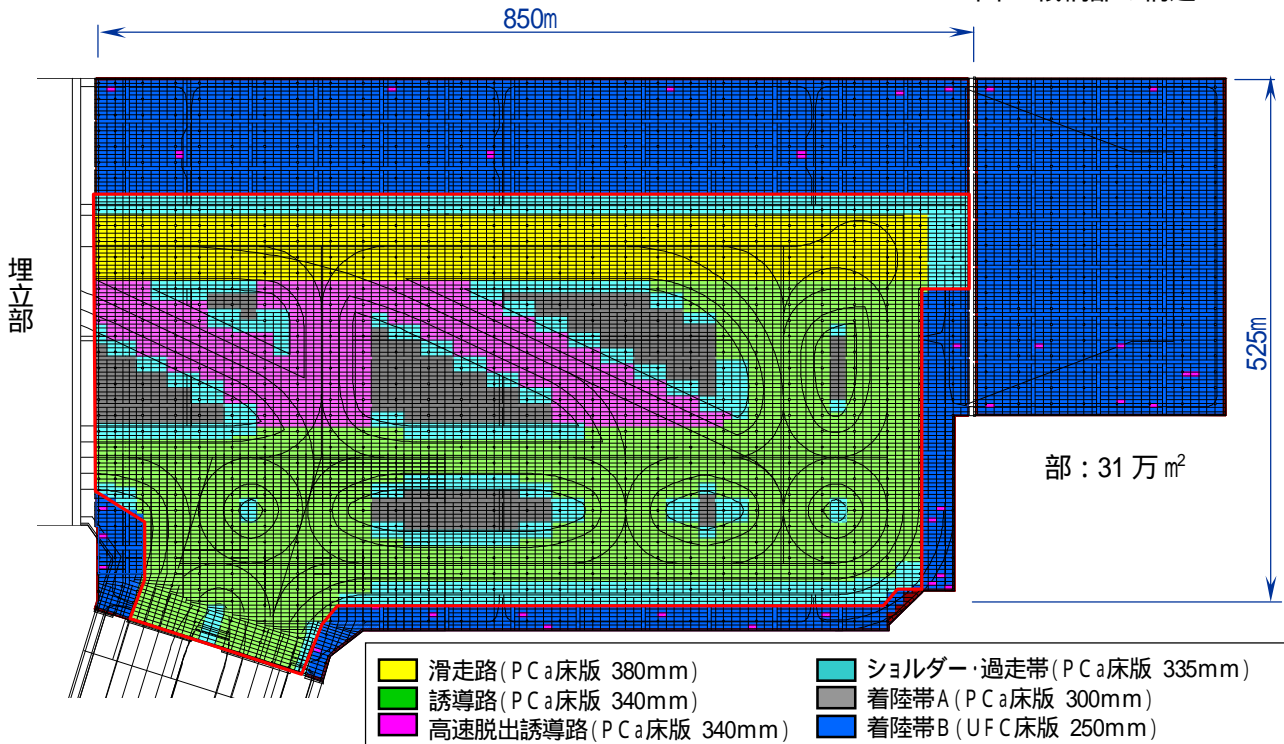


図-2 栈橋部床版構造区分

### 2. プレキャスト床版構造の概要

#### 2-1 全体概要

栈橋部プレキャスト床版構造は、当工事の各種施工条件(短工期、膨大な施工数量、海上施工等)を克服し、また100年間の設計供用期間に対する長期耐久性、疲労耐久性等を確保するため、施工数量の約7割に相当する部分を工場製作のプレキャスト版とし、プレキャスト版同士を場所打ちのRC構造で連続化する構造である。プレキャスト床版の施工範囲は滑走路平行方向約850m、滑走路直角方向約400m、面積約31万 $\text{m}^2$ と広大で、この世界最大規模のコンクリート床版を伸縮目地等を設けず、一枚の床版として構築する。

標準的なジャケット1基の大きさは滑走路平行方向63m、滑走路直角方向45mで、6本の鋼管杭(レグ)で支持される。またジャケットの上部構造は、滑走路平行方向7,875mm、滑走路直角方向3,750mmの間隔で格子状に配置した鋼桁で構成されている。ジャケット1基分のプレキャスト床版の配置図を図-3に示す。

工場で製作したプレキャスト版(図3灰色着色部分)を鋼桁の格子のマス目に合わせて敷設し、その隙間を現場打ちコンクリートで間詰めする。このとき、滑走路平行方向の鋼桁の上フランジにはずれ止めが配置されており(図4)プレキャスト版と鋼桁は、このずれ止めと間詰コンクリートを介して一体化される。すなわち滑走路方向には、鋼桁と床版からなる合成桁として挙動する(図3 橙色着色部分)。一方、滑走路直角方向の鋼桁にはずれ止めを配置せず、接触もさせないため(図5)双方は構造的に独立して挙動する(図3 緑色着色部分)。このように床版が一方向の桁だけに支持される構造(床版支間方向が一方向)を、一般に一方版と呼ぶ。

なおプレキャスト床版は、空港施設区分(滑走路、誘導路、高速脱出誘導路、ショルダー・過走帯、着陸帯)毎の要求性能に応じ、床版厚、PC鋼材量、補強鋼材量を適切に設定している(図2)。

## 2.2 標準部プレキャスト版

標準部プレキャスト版は滑走路平行方向6,585mm、滑走路直角方向3,320mmの大きさで、工場で直交2方向にプレストレスを導入する。プレキャスト版端部からは、継手鉄筋が突出する。

## 2.3 間詰部

間詰部はプレキャスト版同士の構造連続性確保と、ジャケットやプレキャスト版の製作・据付誤差を吸収する箇所であり、次項で記述する杭頭補強部の間詰部を除き、鉄筋で補強したRC構造である。

滑走路平行方向間詰部でのプレキャスト版同士の連結には、道路橋で実績の多いループ継手を使用する(図4)。ループ継手は通常の重ね継手に比べて継手長が短く済むため、間詰幅の狭い箇所への適用性がある。また、滑走路直角方向間詰部でのプレキャスト版同士の連結には、重ね継手を使用する(図5)。

## 2.4 杭頭補強部

1ジャケット当たり6箇所の杭で支持された部分(以下、レグ頭部)は、上部構造の支点となるため、死荷重や活荷重等の鉛直荷重によってレグ頭部の上部構造に負の曲げモーメントが生じ、コンクリート床版には軸引張力が作用する。また、レグと上部構造は剛結されているため、温度変化や地震の影響による水平方向の変形によって、レグ頭部を境に正負反転する曲げモーメントが生じ、負曲げ側の床版には軸引張力が作用する(図6)。床版に発生するこれらの軸引張力に鉄筋だけで対処した場合、配置鉄筋量が多くなり、鉄筋の組立、コンクリート打設等の施工性に劣るばかりではなく、大きな引張力に対する長期耐久性が懸念される。そこで、レグ頭部に配置した4枚のプレキャスト版とプレキャスト版に囲まれる間詰部を現場施工のプレストレスで補強する(図3 赤色格子部)。

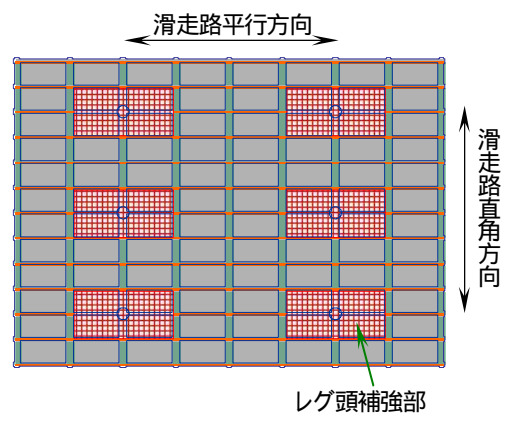


図3 プレキャスト床版配置図

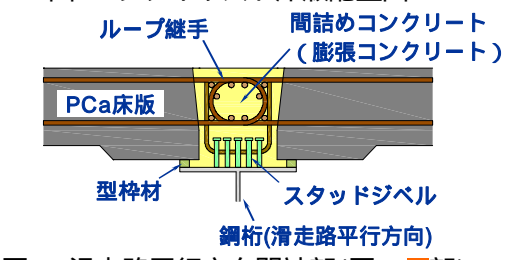


図4 滑走路平行方向間詰部(図3 赤色部)

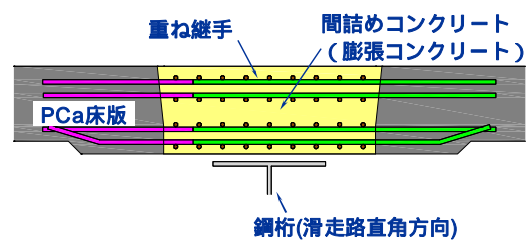


図5 滑走路直角方向間詰部(図3 緑色部)

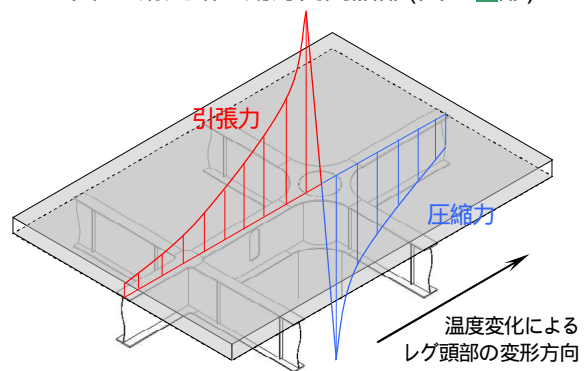


図6 レグ頭部の床版に発生する軸力の例 (温度変化の影響による軸力の模式図)

### 3. プレキャスト床版構造の検討

#### 3-1 検討フロー

プレキャスト床版の全体検討フローを図-7に、実施設計フローを図-8に示す。

#### 3-2 設計条件

プレキャスト床版の設計条件として、表-1に荷重及び使用材料を、表-2に荷重組合せ毎のひび割れに対する制限値を示す。

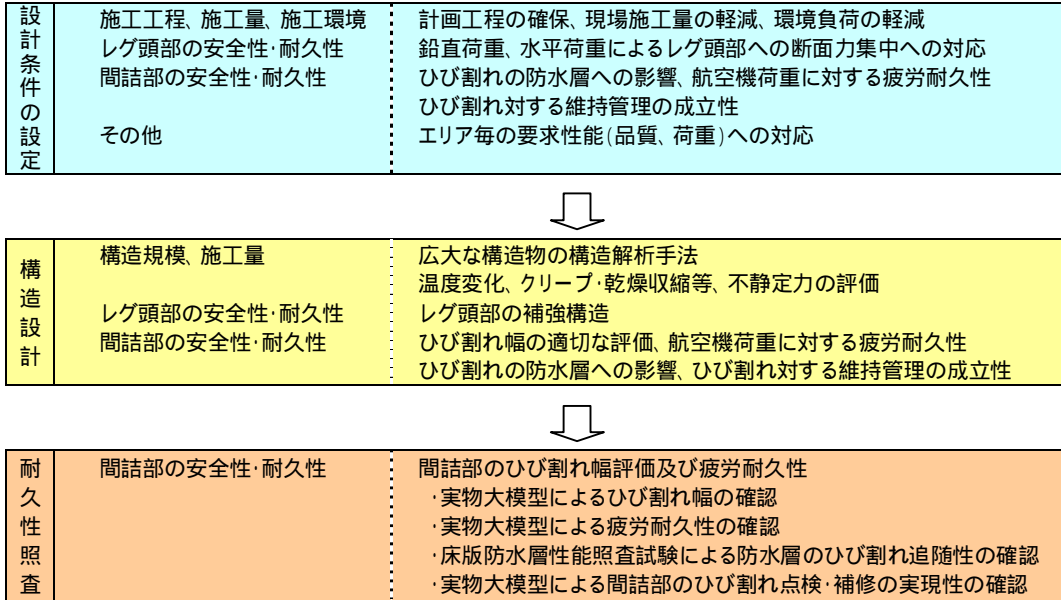


図-7 全体検討フロー

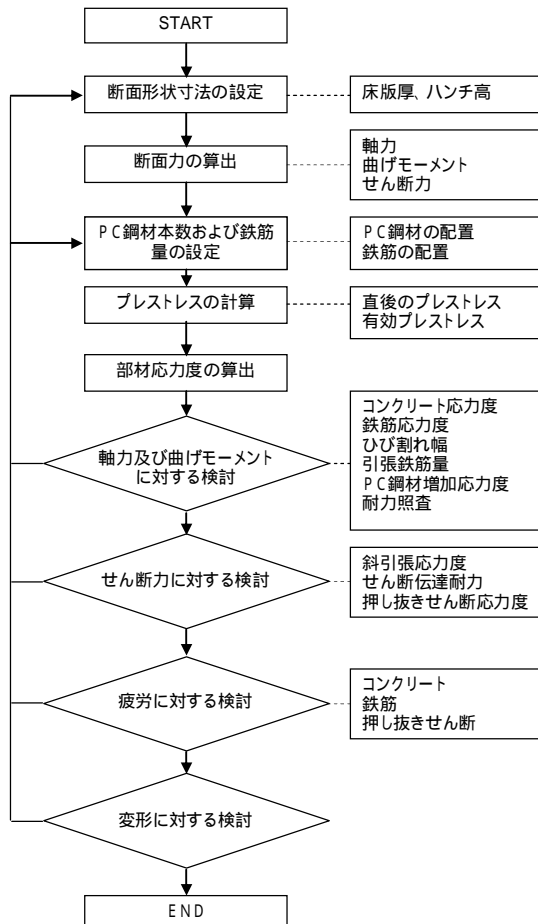


図-8 実施設計フロー

表-1 荷重および使用材料

		プレキャスト版	間詰部
荷重	死荷重	プレストレストコンクリート	24.5kN/m <sup>3</sup>
		鉄筋コンクリート	24.5kN/m <sup>3</sup>
		無筋コンクリート	23.0kN/m <sup>3</sup>
		アスファルト舗装	22.5kN/m <sup>3</sup>
	活荷重	航空機(離陸時)	
		A380-800	400 t
		B747-400	396 t
		B777-200ER	294 t
		航空機(着陸時)	
		B747-400	286 t
	B777-100	202 t	
	自動車		
	消防自動車、A活荷重		
	温度変化の影響	全体温度変化	-10 ~ +40
		床版温度差	±10
	地震の影響	等価水平震度	270gal (栈橋の動的解析より決定)
	積雪		1.0 kN/m <sup>2</sup>
	遠心荷重		$F=mV^2/127R$
	制動荷重		$\mu=0.8$ および $0.31G$ ( $h=0.45m$ )
使用材料	コンクリート	プレキャスト版	50N/mm <sup>2</sup> (早強)
		間詰部	50N/mm <sup>2</sup> (普通膨張)
	鉄筋	SD345	
	PC鋼材	プレテン鋼材	SWPR7BL 1S15.2
		ポストテン鋼材	SBPR930/1080 32
			SWPR19L 1S28.6

表-2 ひび割れに対する制限値

区域	照査方向	部位	活荷重	荷重条件(基本条件)			
				死荷重時	死荷重 + 温度荷重	死荷重 + 活荷重	死 + 活 + 温度
滑走路 誘導路 高速脱出誘導路	滑走路 平行方向	杭頭補強版	床版 (PC構造)	航空機	ひび割れを発生させない	許容ひび割れ幅以下	
			間詰め (PC構造)				
		標準版	床版 (PC構造)				
			間詰め (RC構造)				
	滑走路 直角方向	杭頭補強版	床版 (PC構造)		ひび割れを発生させない	許容ひび割れ幅以下	
			間詰め (PC構造)				
		標準版	床版 (PC構造)				
			間詰め (RC構造)				
ショルダー 着陸帯A	滑走路 平行方向	杭頭補強版	床版 (PC構造)	自動車	ひび割れを発生させない	許容ひび割れ幅以下	
			間詰め (PC構造)				
		標準版	床版 (PC構造)				
			間詰め (RC構造)				
	滑走路 直角方向	杭頭補強版	床版 (PC構造)		ひび割れを発生させない	許容ひび割れ幅以下	
			間詰め (RC構造)				
		標準版	床版 (PC構造)				
			間詰め (RC構造)				

) ひび割れを発生させない：曲げひび割れ強度以下  
許容ひび割れ幅：0.005C かつ 0.2mm 以内 (C:かぶり)

### 3.3 構造解析

プレキャスト床版の設計では、各種荷重に対する栈橋全体挙動も含めた床版への影響を適切に把握するため、表-3 及び図-9 に示す構造解析モデルを使用した。

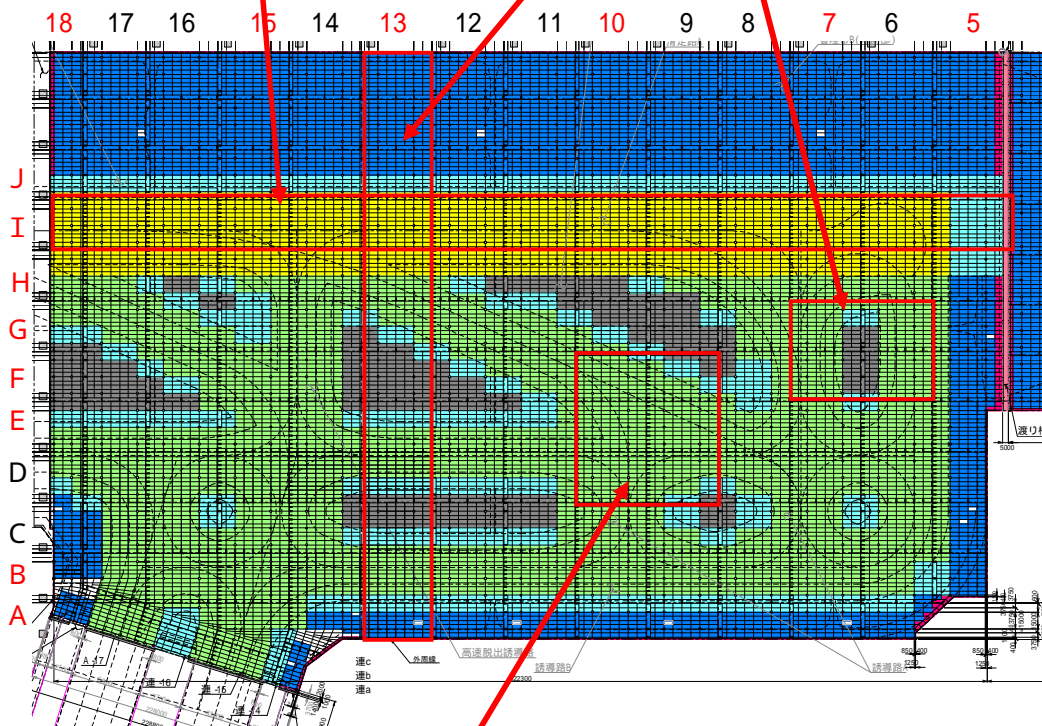
表-3 構造解析モデル

モデル名	概要	対象断面力
床版自重モデル	・プレキャスト床版1枚に相当するシェル要素モデル ・要素寸法：7,875(21@375)mm × 3,750(10@375)mm ・滑走路直角方向(短辺方向)に単純支持	床版自重
鉛直荷重算出モデル	・ジャケット2×3基、計6基分の海底面から上の部分をモデル化 ・床版：シェル要素、ジャケット：ビーム要素、レグ下端：パネ支持 ・床版厚やジャケットの部材構成を反映するため、エリア毎(滑走路、誘導路、高速脱出誘導路、ショルダー、着陸帯)に5種類をモデル化 ・鉛直荷重による床版作用(主に床版の曲げモーメント)の影響を詳細に解析できるよう、シェル要素の1辺を375mmに細分	間詰部自重 切削代荷重 舗装自重 積雪荷重 航空機荷重 自動車荷重
クリープ・乾燥収縮算出モデル	・ジャケット2×2基、計4基分の鋼桁と床版をモデル化 ・コンクリート床版をソリッド要素、鋼桁をシェル要素でモデル化し、相互の影響をより詳細に解析 ・エリア毎(滑走路、誘導路、高速脱出誘導路、ショルダー、着陸帯)に5種類をモデル化 ・プレキャスト版部と間詰部の物性の違いを評価(入力)できるように床版部分を要素分割	クリープ 乾燥収縮
不静定力算出モデル	・滑走路平行方向解析モデル(1×14基、7種類) ・滑走路直角方向解析モデル(12×1基、7種類) ・杭及び地盤パネも含め、ジャケット及び床版をモデル化 ・床版：シェル要素、ジャケット・杭：ビーム要素、地盤：非線形ばね ・床版シェル要素の大きさは、1パネルを4×8分割	全体温度変化 床版温度差

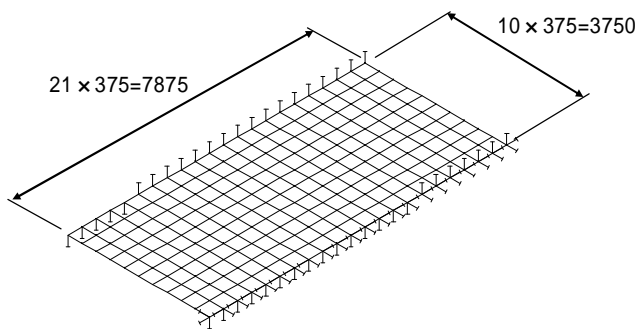
滑走路平行方向 不静定力算出モデル  
【JKT 14 基 × 1 基, 7 種類(AB,E,F,G,H,I,J 列)】

滑走路直角方向 不静定力算出モデル  
【JKT 1 基 × 12 基, 7 種類(5,7,10,13,15,18 列)】

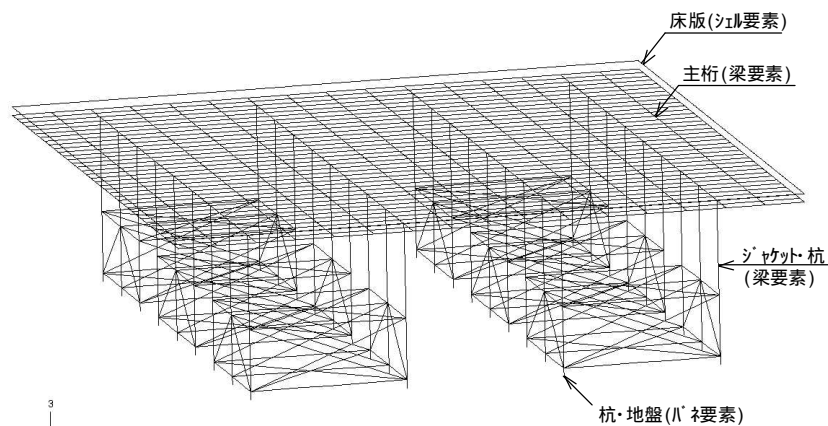
クリープ・乾燥収縮 算出モデル  
【JKT 2 基 × 2 基, 5 種類(滑走路、誘導路、高速脱出誘導路、ショルダー、着陸帯)】



鉛直荷重 算出モデル  
【JKT 2 基 × 3 基, 5 種類(滑走路、誘導路、高速脱出誘導路、ショルダー、着陸帯)】

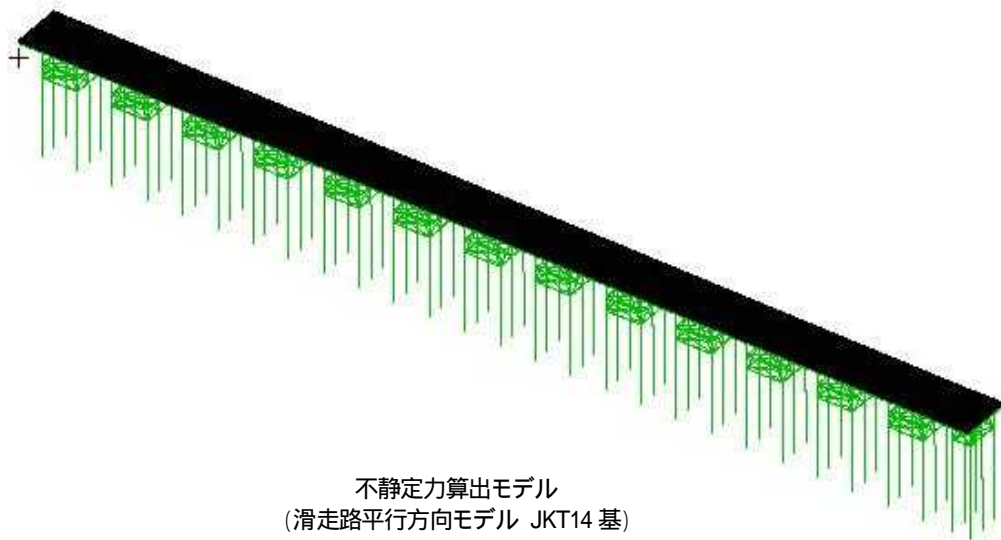


床版自重モデル

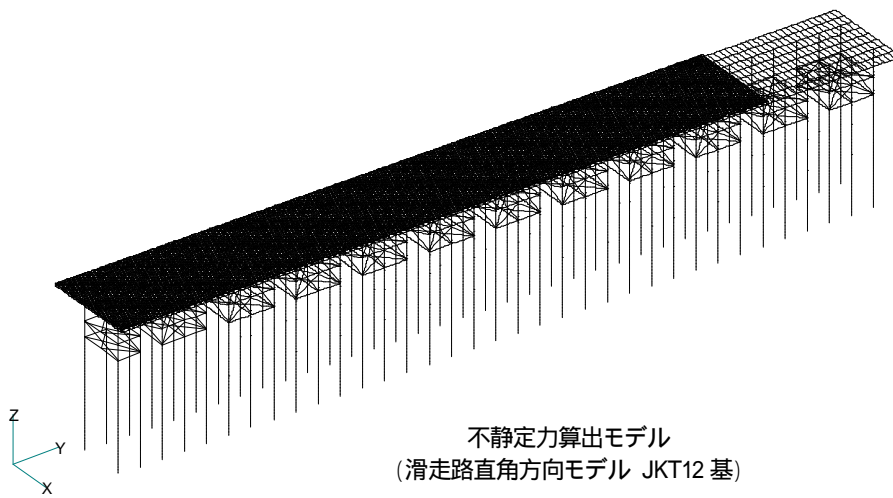


鉛直荷重算出モデル(JKT 2×3 基)

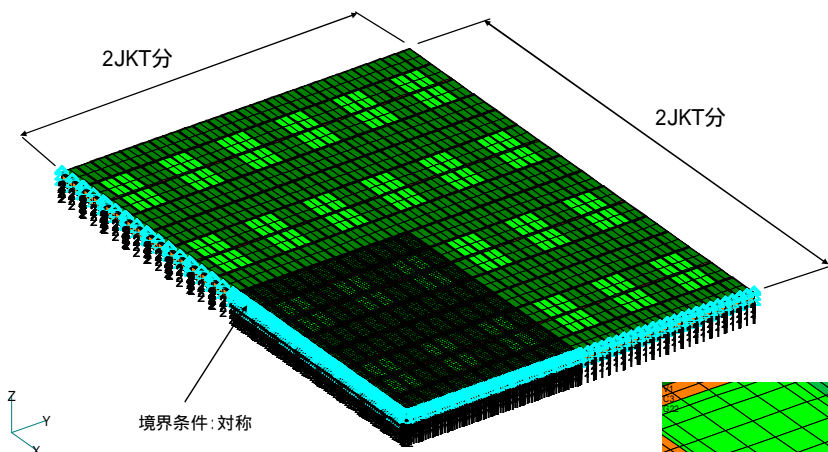
図-9 構造解析モデル(1)



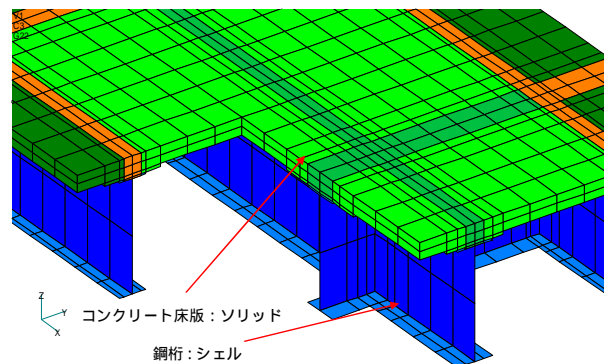
不静定力算出モデル  
(滑走路平行方向モデル JKT14 基)



不静定力算出モデル  
(滑走路直角方向モデル JKT12 基)



クリープ・乾燥収縮算出モデル(JKT 2×2 基)



クリープ・乾燥収縮算出モデル(拡大図)

図-9 構造解析モデル(2)

### 3-4 間詰部の検討

プレキャスト床版構造では、プレキャスト版同士を場所打ちのRC構造で一体化する間詰部のうち、特にプレキャスト版と間詰めコンクリートとの境界部にひび割れが発生することが予想され、設計上、境界部に発生するひび割れ幅を、床版防水層の健全性確保、舗装のリフレクションクラック防止、床版本体の耐久性確保の観点から0.2mm以内に抑えている。また以下の試験を実施し、間詰部に関わる性能・耐久性・維持管理性を確認している。

#### 3-4-1 実物大模型試験

##### (1) 静的载荷試験

間詰部実物大模型試験のうち静的载荷試験は、プレキャスト版と間詰部との境界部に着目し、設計で使用するひび割れ幅評価式の適用性を確認する目的で実施した。試験体は、滑走路平行方向間詰部を対象とした試験体（ループ継手試験体）及び滑走路直角方向間詰部を対象とした試験体（重ね継手試験体）をそれぞれ2体、計4体作成した。試験体及び载荷状況を写真-1に示す。

試験の結果いずれの試験体も、载荷試験で計測されたひび割れ幅は、設計で使用するひび割れ幅算定式から算出されるひび割れ幅を下回った。

##### (2) 疲労载荷試験

疲労载荷試験では、航空機荷重が繰返し载荷されることによる疲労特性を把握するために、鉄筋引張応力度を再現した繰返し载荷試験を行い、疲労破壊に至らないことを確認した。また、疲労試験後の耐荷性状を確認した。試験体は、静的载荷試験と同じ仕様で、ループ継手試験体、重ね継手試験体、それぞれ1体ずつ作成した。疲労試験の繰返し载荷回数は、D滑走路の設計供用期間100年間の全航空機の走行回数1,150万回に対して最大航空機荷重（A380-800）を基に算出した等価繰返し回数約100万回とし、当該構造物が十分な耐久性を有していることを確認するためにさらに200万回まで载荷した。疲労試験状況を写真-2に、疲労試験後のひび割れ発生状況を図-10に示す。また、疲労試験後の耐力確認実験結果を図-11に示す。

試験の結果、200万回の繰返し载荷によってもひび割れ幅やたわみが急激に増加することはなく、疲労破壊に至らなかった。また、疲労試験終了後の試験体は、疲労試験を行っていない試験体と比べて剛性の変化は殆ど見られず、十分な耐力を有していた。

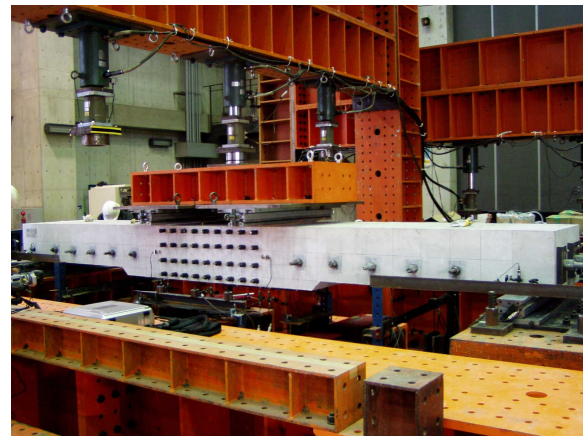


写真-1 試験体及び载荷状況 (重ね継手試験体)

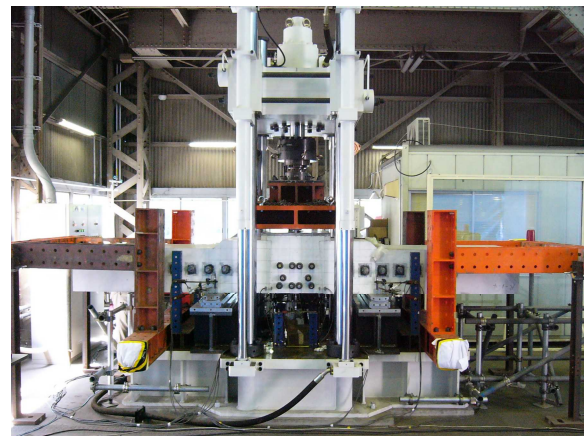
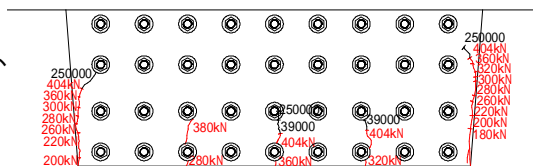
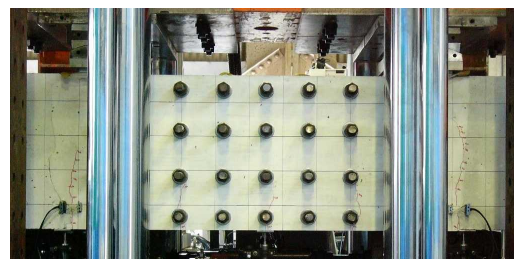
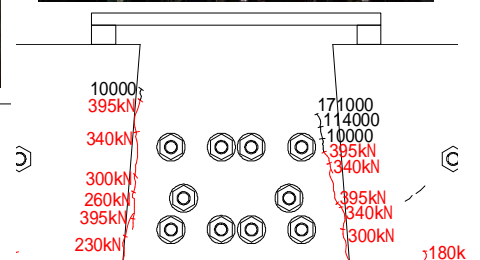
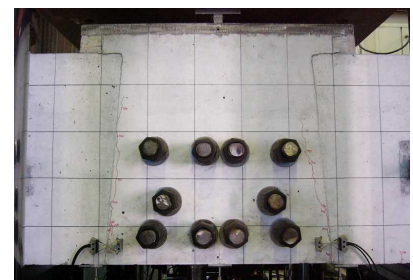


写真-2 疲労载荷試験状況 (ループ継手試験体)



重ね継手試験体



ループ継手試験体

図-10 疲労载荷試験後のひび割れ状況

### (3) ひび割れ点検・補修試験

プレキャスト床版間詰部におけるひび割れ確認方法とひび割れが発生した場合の補修方法の実現性を確認する目的で、ひび割れ点検・補修試験を実施した。ひび割れ点検試験では、試験体に設けた観察孔に棒状スキャナーシステム及び内視鏡を挿入し、ひび割れの有無を観察出来ることを確認した。また、ひび割れ補修試験では、試験体下面からひび割れ面に向けてひび割れ補修材注入口をドリルで削孔後、ひび割れ補修材を注入し、後日注入口から削孔したコアを目視してひび割れ補修材の充填状況を確認した。ひび割れ観察孔の模式図を図-12に示す。

#### 3.4.2 防水性能確認試験

床版上面に生じるひび割れが、床版防水層に与える影響を確認するため、防水性能確認試験を実施した。D滑走路の床版防水層は、塗膜防水+SMA(砕石マチックアスファルト)層から構成されている。試験では、300mm×300mmの床版コンクリート+防水層からなる試験体を製作し、床版コンクリート部分に幅 $0.25 \pm 0.15\text{mm}$ ( $0.1 \sim 0.4\text{mm}$ )のひび割れを、供用期間30年の航空機の走行回数に相当する345万回繰返し負荷し、ひび割れ負荷後の防水層のひび割れの有無、防水性能を確認した。図-13に試験体を、写真-3に防水性能確認試験状況を示す。

試験の結果、ひび割れ負荷後も防水層にはひび割れが伝播せず、十分な防水性、付着性能を有していることを確認した。

#### 4. あとがき

今回の実施設計で想定した性能を確保するため、施工上の留意点等を踏まえた詳細な施工計画を策定中である。

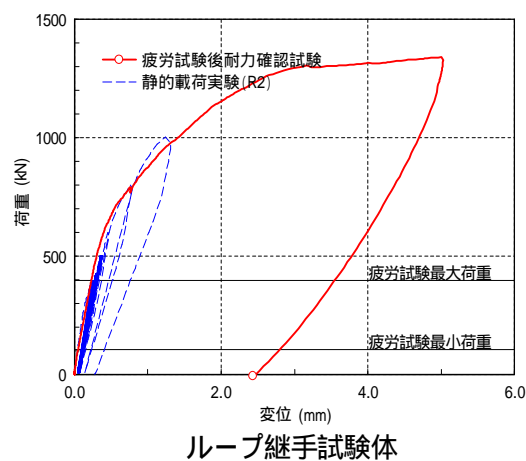
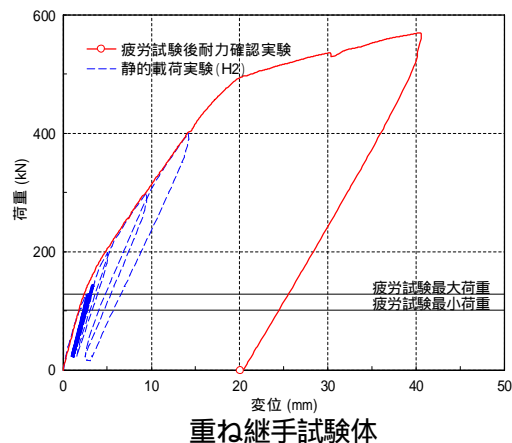


図-11 疲労載荷試験後  
耐力確認試験結果

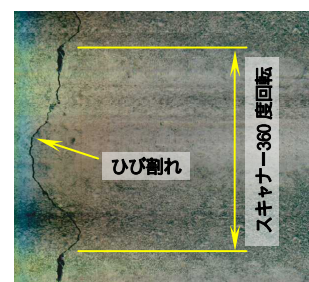
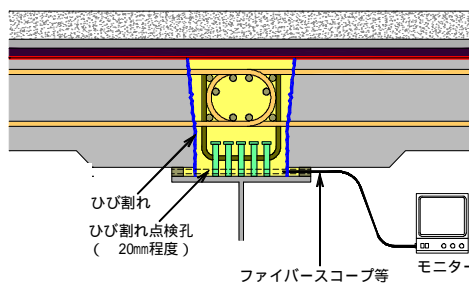
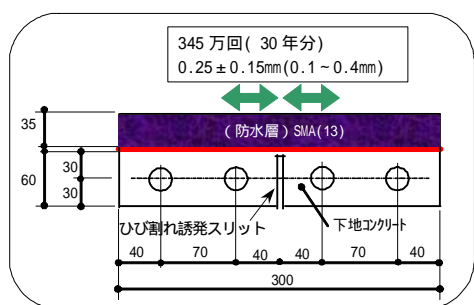


図-12 ひび割れ点検孔及び棒状スキャナーシステムの画像



図-13 防水層性能確認試験(ひび割れ開閉試験)試験体

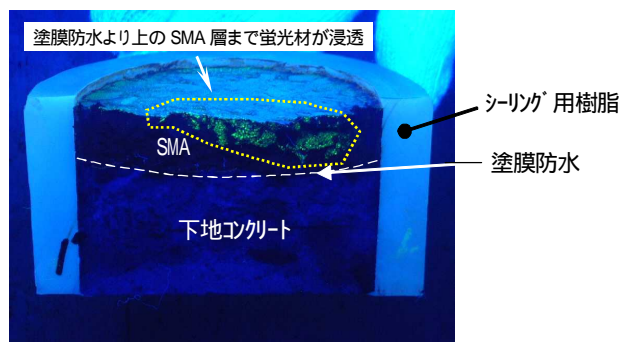


写真-3 防水性能確認試験(防水層上面から蛍光材を含んだ水を加圧負荷後、ブラックライトを照射)