

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.375

February 2007

東京国際空港D滑走路の舗装構造に関する室内試験

江崎 徹・八谷好高・坪川将丈・水上純一・野口孝俊

A Laboratory Study on a Pavement Structure of a Runway D
at the Tokyo International Airport

Toru ESAKI, Yoshitaka HACHIYA, Yukitomo TSUBOKAWA,
Junichi MIZUKAMI and Takatoshi NOGUCHI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

東京国際空港D滑走路の舗装構造に関する室内試験

江崎 徹*・八谷好高**・坪川将丈***・水上純一****・野口孝俊*****

要 旨

東京国際空港再拡張事業において建設される4本目の滑走路は、埋立・栈橋併用工法によるものである。国内の空港においては、栈橋構造による空港島建設の実績はなく、その構造上に航空機荷重が載った場合の舗装構造の力学的挙動についてはあまり知見がない。そのため、室内試験によって、栈橋構造上に配置されたコンクリート床版上の空港アスファルト舗装におけるアスファルト混合物の力学的挙動の把握、床版防水性及び付着性に関する検討、アスファルト混合物の疲労耐久性に関する検討を行った。

その結果、以下の結論が得られた。

- 1) ホイールトラッキング試験及び水浸ホイールトラッキング試験結果により、表層(改質Ⅱ型)の動的安定度(DS)が2,500回/mm以上であること、また、剥離抵抗性に関しては、十分な性能を有していることがわかった。
- 2) 特殊ホイールトラッキング試験及び特殊水浸ホイールトラッキング試験結果により、20,000回の走行載荷試験後においても、コンクリート床版とSMA層間の付着力は十分な性能を有しており、それは水浸時においても変わらない。
- 3) 改質Ⅱ型、排水性、SMAの各アスファルト混合物に対して、上限を20万回とし曲げ疲労試験を行った結果、各試験条件においても疲労破壊を起こすことはなかった。また、D滑走路の10年間の設計カバレッジと比較しても、その交通量において、疲労破壊を起こすことはないものと考えられる。

キーワード：東京国際空港，コンクリート床版，アスファルト舗装，室内試験，耐久性

* 空港研究部空港施設研究室

** 独立行政法人港湾空港技術研究所特別研究官（前 空港研究部新技術研究官）

*** 空港研究部主任研究官

**** 空港研究部空港施設研究室長

***** 関東地方整備局東京空港整備事務所D滑走路プロジェクト推進室

A Laboratory Study on a Pavement Structure of a Runway D at the Tokyo International Airport

Toru ESAKI^{*}, Yoshitaka HACHIYA^{**}, Yukitomo TSUBOKAWA^{***},
Junichi MIZUKAMI^{****} and Takatoshi NOGUCHI^{*****}

Synopsis

As the fourth runway at Tokyo International Airport, hybrid structures consisting of asphalt pavements on the pier and on the reclaimed ground are planned. As the former has never been constructed in Japan, its behavior against aircraft loading is rare. Therefore, several aspects on asphalt pavements on the pier (concrete decks) are studied through a variety of laboratory tests; i.e., mechanical properties of asphalt mixtures, waterproofing and bonding ability of the asphalt mixtures to the concrete deck, and the durability of asphalt mixtures against repeated loading.

The following conclusions were obtained in this study.

- 1) The surface course asphalt mixture with type II modified asphalt has the sufficient durability both against the repeated loading (Dynamic Stability of more than 2,500 times per mm) and against the segregation between asphalt and aggregates.
- 2) The bonding between asphalt mixture layer and concrete deck is secured after 20,000 times of repeated wheel track loading. This is also true in the case of loading test under the submerged conditions.
- 3) Three kinds of asphalt mixtures composing the surface course on concrete deck have an sufficient fatigue resistance as they have never been failed in 20,000 times of loadings. This might lead to that the runway D will sustain the aircraft loadings for ten years.

Key Words: Tokyo International Airport, Concrete deck, Asphalt pavement, Laboratory test, Durability

* Research Engineer, Airport Facilities Division, Airport Department

** Director for Special Research, Port and Airport Research Institute

(Former Research Coordinator for Advanced Airport Technology, Airport Department)

*** Senior Researcher, Airport Department

**** Head, Airport Facilities Division, Airport Department

***** Tokyo International Airport office, Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

目 次

1. はじめに	1
2. 東京国際空港D滑走路における栈橋構造上舗装	1
2.1 概 要	1
2.2 栈橋構造上の舗装	1
3. 試験計画	2
3.1 概 要	2
3.2 検討項目	2
3.3 使用材料(アスファルト混合物の配合設計)	2
4. アスファルト混合物の力学的挙動の把握	6
4.1 ホイールトラッキング試験	6
4.2 水浸ホイールトラッキング試験	7
5. 床版防水性及び付着性に関する検討	7
5.1 特殊ホイールトラッキング試験	7
5.2 特殊水浸ホイールトラッキング試験	10
6. アスファルト混合物の疲労耐久性に関する検討	12
6.1 レジリエントモデュラス試験	12
6.2 発生ひずみ推定のための3次元FEM解析	15
6.2.1 構造解析	15
6.2.2 その他の載荷位置条件による構造解析	22
6.3 曲げ疲労試験	27
7. 結論	31
8. おわりに	31
参考文献	31

1. はじめに

東京国際空港再拡張事業において、新空港島建設の工法として採用される埋立・栈橋併用工法のうち、栈橋構造部のコンクリート床版上のアスファルト舗装に、就航が想定される航空機が載った場合の舗装構造の力学的挙動について、室内試験によって各種の検討を行った結果について報告するものである。

2. 東京国際空港D滑走路における栈橋構造上舗装

2.1 概要

国内航空輸送ネットワークの要として、重要な役割を果たしている東京国際空港は、近年の航空需要の増大に伴い、既存施設では離発着回数における処理能力の限界に達してきている。更に、今後も国内線の増便及び路線の国際化で航空需要は増加することが見込まれており、早急な対応策が必要となる。そのため、東京国際空港に4本目の滑走路を新設し、現在の年間28.5万回から40.7万回に離発着回数を増加させる提案がなされ、東京国際空港再拡張事業が実施されることとなっている。

この再拡張事業は、新空港島建設の工法として、「栈橋工法」、「埋立・栈橋併用工法」、「浮体工法」の3工法について検討・評価が行われ、3工法とも適切な設計を行うことにより建設が可能であると判断されたことから、コスト削減を図る目的で、工法の多様な提案(栈橋工法、埋立・栈橋併用工法、浮体工法)を可能とした。そのため、国土交通省関東地方整備局は要求水準を示し、技術提案に基づいて入札を認める性能発注方式を採用している。また、これまでに例のない設計・施工一括発注方式及び入札時に維持管理費の提案額を含めた総合評価落札方式により発注することにより、設計、施工及び供用開始後30年間の維持管理までを保証する内容となっている。

本再拡張事業は、15社からなる異工種建設工事共同企業体(以下、JV)が平成17年3月に受注し、工法としては、埋立・栈橋併用工法が採用されることとなった。東京国際空港の平面図を図-1に示す。

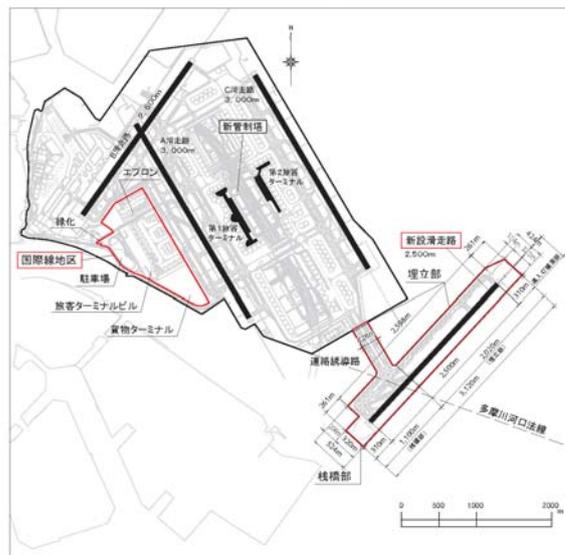


図-1 東京国際空港平面図

2.2 栈橋構造上の舗装

これまでの国内における海上空港は、埋立工法により建設されている。しかし、今回の新空港島建設においては、多摩川河口域に建設されることから通水性が求められるため、多摩川側約1,100mにおいては栈橋構造が採用されている。栈橋構造は、鋼桁上部構造及び鋼管トラス下部構造、基礎杭から成るジャケット構造によりコンクリート床版が支持されるようになっている。ジャケット構造のイメージ図を図-2、また、標準的なジャケット構造の平面図を図-3、断面図を図-4に示す。

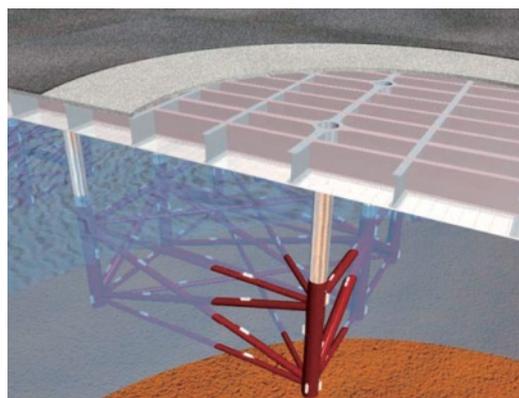


図-2 ジャケット構造イメージ

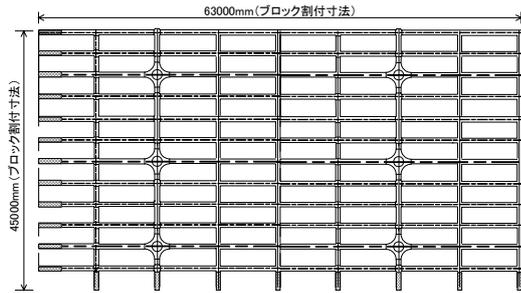


図-3 ジャケット構造平面図(1基あたり)

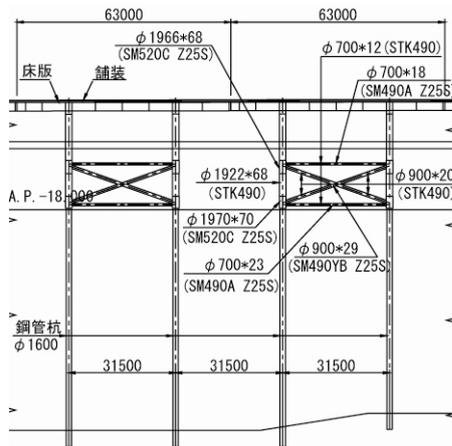


図-4 ジャケット構造断面図

ジャケット構造は、鋼桁上部構造上にコンクリート床版が載り、その更に上部にアスファルト舗装が施工されることになる。しかし、空港基本施設としてコンクリート床版上にアスファルト舗装が施工された事例はなく、航空機が載った場合の舗装構造の力学的挙動についてはあまり知見がないと言える。そこで、コンクリート床版上空港アスファルト舗装について、室内試験によって各種試験を実施し、その仕様及び設計の確実性について検討を行う。なお、各種試験を実施した時点で想定されていたコンクリート床版より上部のアスファルト舗装の構成について図-5に示す。

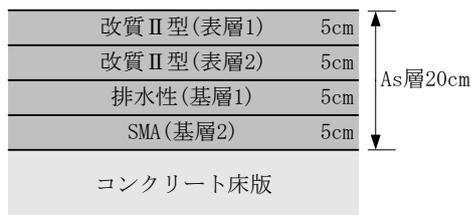


図-5 コンクリート床版上空港アスファルト舗装構成

3. 試験計画

3.1 概要

本検討は、コンクリート床版上空港アスファルト舗装の舗装構造に関する検討を行う事を趣旨とし、室内試験によって各種検討を行った。

3.2 検討項目

検討する項目としては、航空機が安全運航するためには、舗装表面のわだち掘れ・ひび割れ・平坦性といった路面性状の健全性に関しては非常に重要な項目であることから、その中でも耐流動性に関する検討を行い、アスファルト混合物の剥離抵抗性に関する検討を行う。また、今回の舗装構成において、コンクリート床版とその上層のアスファルト舗装層間との防水性及び付着性に関して、航空機荷重が繰返し載荷されることによって、その機能を発揮することが可能であるかについての検討及びアスファルト混合物の疲労耐久性に関する検討を実施する。

3.3 使用材料(アスファルト混合物の配合設計)

室内試験を実施するにあたっての使用材料として、改質Ⅱ型密粒度アスファルト混合物(骨材最大粒径 13mm)、排水性アスファルト混合物(骨材最大粒径 13mm)、砕石マスタックアスファルト混合物(SMA)(骨材最大粒径 13mm)の3種類のアスファルト混合物についての配合設計を行った。各混合物への要求性能として、表層(改質Ⅱ型)の動的安定度(DS)は2,500回/mm以上、排水性混合物の空隙率については、排水に関して所要の機能を発揮させるために20%程度とし、SMAについては、不透水性を確保するためにJVが透水係数 1.0×10^{-7} cm/秒以下と設定しているため、本配合設計においても同係数を条件した。

各混合物に用いた骨材について表-1に示し、骨材配合率を表-2、合成粒度を表-3、改質Ⅱ型及びSMAのバインダーの性状を表-4、排水性のバインダーの性状を表-5、各混合物の性状を表-6~9に示す。

(1) 改質Ⅱ型密粒度アスファルト混合物(13)

骨材粒度は「空港土木工事共通仕様書」の基本施設の表層タイプⅠの範囲内で、目標粒度を2.36mm通過の合成粒度を42%程度として骨材配合率を決定した¹⁾。

(2) 排水性アスファルト混合物(13)

「排水性舗装技術指針(案)」に準じて、排水性混合物(13)の配合設計²⁾を行った。なお、バインダーには高粘度アスファルトを使用することとした。

(3) 砕石マスタックアスファルト混合物(SMA)(13)

使用した繊維質補強材の性状は表-9 に示すとおりであり、骨材配合率は目標粒度を 2.36mm 通過の合成粒度を 27%程度として決定した。なお、バインダーには、改質 II 型アスファルト混合物に用いたものと同一のものを使用することとした。

また、透水係数の確認として、加圧透水試験を実施した結果、各供試体で 4 日間通して通水しても、透水量を

観測することが出来なかった。透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/秒}$ 程度であれば、加圧透水試験で測定できるオーダーであるが、測定不能であったことから、要求性能の透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/秒}$ 以下を十分満足しているものと判断した。

表-1 使用骨材配合表

性状		骨材区分	6号砕石	7号砕石	砕砂	粗砂	細砂	石粉
		(mm)						
粒度 (%)	26.5							
	19.0	100.0						
	13.2	95.1						
	9.50	63.0	100.0	100.0	100.0			
	4.75	7.9	92.0	100.0	99.1	100.0		
	2.36	2.9	14.7	89.9	81.8	99.8		
	1.18		6.8	57.5	60.1	98.9		
	0.600		3.1	35.4	41.5	94.6	100.0	
	0.300			20.0	23.0	34.9	99.9	
	0.150			7.1	6.4	3.4	99.0	
0.075			1.7	1.6	1.8	83.6		
比重	表乾	2.677	2.652	2.646	2.596	2.532		
	かさ	2.657	2.629	2.610	2.503	2.446		
	見掛	2.710	2.692	2.709	2.758	2.676	2.720	
吸水量 (%)		0.74	0.89	1.40	3.70	3.52	0.06(※)	
すり減り量 (%)		11.8	—	—	—	—	—	
安定性 (%)		3.3	5.3	3.3	8.3	6.6	—	
軟石含有率 (%)		1.3	—	—	—	—	—	
扁平細長率 (%)		0.4	—	—	—	—	—	
アスファルト剥離率 (%)		1.0	—	—	—	—	—	

(※)水分量

表-2 各混合物の骨材配合率

種別	骨材配合比率(%)						植物繊維 添加量
	6号砕石	7号砕石	砕砂	粗砂	細砂	石粉	
改質II型	40.0	18.0	12.0	14.0	10.0	6.0	—
排水性	87.0	—	—	—	8.0	5.0	—
SMA	62.0	13.5	—	7.0	6.0	11.5	0.3%

表-3 合成粒度

種 別	粒径(mm)および合成粒度(%)							
	19.0	13.2	4.75	2.36	0.600	0.300	0.150	0.075
改質Ⅱ型	100.0	98.0	61.7	42.1	26.1	15.1	8.1	6.2
粒度範囲 (%)	100	100	70	50	30	21	16	8
		∩ 95	∩ 55	∩ 35	∩ 18	∩ 10	∩ 6	∩ 4
排水性	100.0	95.7	19.9	15.5	12.6	7.8	5.3	4.7
粒度範囲 (%)	100	100	35	20				7
		∩ 90	∩ 11	∩ 10				∩ 3
SMA	100.0	97.0	41.7	27.0	20.5	15.2	12.1	10.8
粒度範囲 (%)	100	100	50	34	23	20	16	13
		∩ 95	∩ 30	∩ 20	∩ 16	∩ 13	∩ 10	∩ 7

表-4 改質Ⅱ型アスファルト性状(改質Ⅱ型・SMA)

試 験 項 目	規 格 値	試 験 値
針入度(25℃)	1/10mm 40以上	54
軟化点	℃ 56.0~70.0	61.0
伸 度(15℃)	cm 30以上	95
引火点(COC)	℃ 260以上	328
薄膜加熱針入度残留率	(%) 65以上	79.6
タフネス(25℃)	N・m 8.0以上	21.3
テナシティ(25℃)	N・m 4.0以上	17.2
密 度(15℃)	(g/cm ³)	1.030

表-5 高粘度アスファルト性状(排水性)

試験項目		規格値	試験値
針入度(25℃)	1/10mm	40以上	52
軟化点	℃	80.0以上	95.5
伸度(15℃)	cm	50以上	82
引火点(COC)	℃	260以上	326
薄膜加熱質量変化率	(%)	0.6以下	0.0
薄膜加熱針入度残留率	(%)	65以上	78.8
タフネス(25℃)	N・m	20以上	27.6
テナシティ(25℃)	N・m	15以上	22.6
60℃粘度	$\times 10^3 \text{Pa}\cdot\text{S}$	20以上	100
密度(15℃)	(g/cm^3)		1,029

表-6 改質II型アスファルト混合物(13)性状

試験項目及び性状		改質II型	
		規格値	試験値
マーシャル性状値	最適As量 (%)		5.5
	密度 (g/cm^3)		2.394
	理論密度 (g/cm^3)		2.487
	空隙率 (%)	2~5	3.7
	飽和度 (%)	75~85	77.5
	マーシャル安定度 (kN)	8.80以上	17.04
	フロー値 (1/100cm)	20~40	31.5
	残留安定度 (%)	75以上	91.7

表-7 排水性アスファルト混合物(13)性状

試験項目及び性状		排水性	
		目標値	試験値
マーシャル性状値	最適As量 (%)		4.8
	密度 (g/cm^3)		2,017
	理論密度 (g/cm^3)		2,532
	空隙率 (%)	20	20.3
	飽和度 (%)	75~85	31.7
	マーシャル安定度 (kN)	3.50以上	7.60
	フロー値 (1/100cm)		51
	残留安定度 (%)	75以上	102.8
カンタプロ損失試験	常温 (%)	20以下	2.5
透水試験	透水係数 ($\text{cm}/\text{秒}$)	1.0×10^{-2}	28.2×10^{-2}

表-8 SMA 混合物(13)性状

試験項目及び性状		SMA	
		目標値	試験値
マーシャル性状値	最適 As 量 (%)		6.8
	密度 (g/cm ³)		2,370
	理論密度 (g/cm ³)		2,435
	空隙率 (%)	2~4	2.7
	飽和度 (%)	75~90	85.6
	マーシャル安定度 (kN)	5.00 以上	9.38
	フロー値 (1/100cm)	20~80	50
	残留安定度 (%)	75 以上	87.5
加圧透水試験	透水係数 (cm/秒)	1.0×10 ⁻⁷ cm/秒以下	計測不能

表-9 植物繊維の性状(SMA)

項目	一般性状	備考
最長繊維長(μm)	約 3,500	
平均繊維長(μm)	約 1,200	
平均繊維幅(μm)	約 45	
pH 値	pH1~11	pH1~11 の範囲における物性は安定
真比重(g/cm ³)	1.50	

4. アスファルト混合物の力学的挙動の把握

アスファルト混合物の耐流動性や剥離抵抗性といった力学的挙動に関する検討を行うために、ホイールトラッキング試験及び水浸ホイールトラッキング試験を実施した。

4.1 ホイールトラッキング試験

(1) 試験概要

アスファルト混合物の耐流動性に関する力学特性を把握するために、ホイールトラッキング試験を実施した。

検討したアスファルト混合物は、改質Ⅱ型と SMA の 2 種類である。改質Ⅱ型は、東京国際空港再拡張事業の要求水準として、アスファルト舗装部分の動的安定度の基準が 2,500 回/mm 以上と設定されている。また、SMA については、コンクリート床版上に施工され、航空機荷重が載った場合には、その層間でそれより下部に均等に荷重分散されず、コンクリート床版直上の SMA 下部層で大きな引張応力が発生することが推測される。そのため、改質Ⅱ型と SMA の 2 種類について試験を行うこととした。

(2) 試験条件

「舗装試験法便覧」³⁾に準拠して、供試体作製及び試験条件を設定した。供試体寸法は 300mm×300mm×100mm(長さ×幅×厚さ)で、混合物毎の試験個数は 3 ケとし、混合物の混合温度ならびに締固め温度は、バインダーに改質Ⅱ型及び SMA 共に改質Ⅱ型を使用しているため、そのバインダーで推奨されている温度として、混合温度は 178℃、締固め温度は 163℃を目標とした。また、走行方式はチェーン式の定速走行とし、供試体の養生及び試験温度は 60℃で、養生については恒温養生室に 8 時間以上とした。なお、載荷荷重は 686kN とした。

(3) 試験結果

各混合物の試験結果を図-6 に示す。改質Ⅱ型の動的安定度(DS)は 2,500 回/mm 以上で要求水準を満足しており、SMA に関しても、一般的なストレートアスファルト 60/80 の密粒度混合物の動的安定度と比較すると、高い動的安定度であることが判断できる。

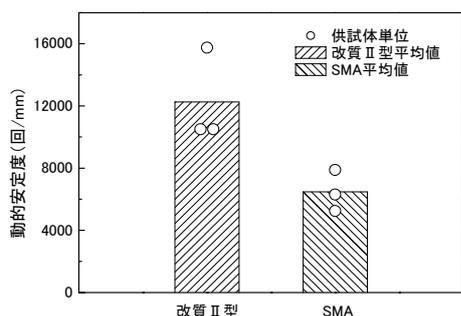


図-6 ホイールトラッキング試験結果

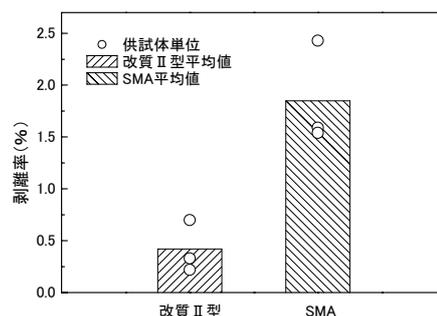


図-7 水浸ホイールトラッキング試験結果

4.2 水浸ホイールトラッキング試験

(1) 試験概要

アスファルト混合物の水の作用条件下での剥離状況を測定するために水浸ホイールトラッキング試験を実施した。検討したアスファルト混合物は改質II型と SMA の2種類である。

(2) 試験条件

「舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)」⁴⁾の簡易式水浸ホイールトラッキング試験方法に準拠して、供試体作製及び試験条件を設定した。供試体寸法は 300mm×300mm×100mm(長さ×幅×厚さ)で、混合物毎の試験個数は3ヶとした。供試体は 60℃の気乾状態で12時間養生し、次いで 60℃に調整された温水の注水を行って水位を模擬路盤の上端に調整し、この水槽の中で1時間水浸養生を行っている。また、輪荷重は 686kN、走行速度は 42±1 回/分、走行距離は 230±10mm、トラバース速度 10cm/分、トラバース幅 25cm の条件で試験を行った。

(3) 試験結果

試験結果を図-7 に示す。3 供試体による改質II型の剥離率の平均値は 0.42%、SMA の平均値は 1.85%であり、改質II型は、SMA よりも混合物の剥離に関しては有利であることがわかった。なお、アスファルト混合物の剥離抵抗性に関して、混合物の健全性を確保するうえにおいては、剥離率は5%以下であることが望ましい⁵⁾が、それに対しては改質II型、SMA 共に満足する結果となった。

5. 床版防水性及び付着性に関する検討

コンクリート床版とアスファルト層間に施工される防水層の防水性、又、コンクリート床版とその上層のアスファルト舗装との層間の付着性に関する検討として、特殊ホイールトラッキング試験及び特殊水浸ホイールトラッキング試験を実施した。

5.1 特殊ホイールトラッキング試験

(1) 試験概要

特殊ホイールトラッキング試験として、コンクリート床版上にアスファルト混合物を施工してホイールトラッキング試験を実施した。なお、検討したアスファルト混合物は、改質II型と、舗装構成上実際にコンクリート床版上に施工されることが想定される SMA の2種類とした。

(2) 供試体作製

供試体寸法は 300mm×300mm×100mm(長さ×幅×厚さ)とし、舗装構成は、舗装表面からアスファルト混合物 50mm+防水層+コンクリート床版 50mm である(図-8)。作製手順は、予め作製しておいたコンクリート床版を養生後、そのコンクリート床版を型枠に入れ、その上に防水層を施工し、アスファルト混合物を敷き詰める。その後、ローラコンパクターにより、ホイールトラッキング試験用供試体作製方法と同様に締固めを行った。なお、防水層はゴムアスファルト系塗膜防水材料を用いることとした。プライマー及び防水材料の材質を表-10、表-11 に示す。

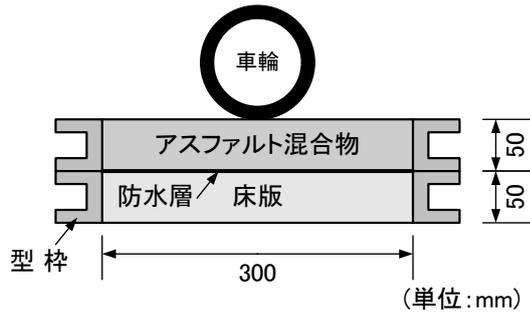


図-8 供試体断面図

表-10 プライマー性状

項目	標準的な品質規格値	測定値
比重	1.00 以下	0.96
不揮発分 (%)	20 以上	42.0
指触乾燥時間(分)	60 以内	29
作業性	へら塗りに支障がないこと	合格
耐水性	5 日間で異常のないこと	合格
備考：規格値・試験方法は、道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計施工資料 ⁶⁾ による		

表-11 防水材性状

項目	標準的な品質規格値	測定値
針入度 (円錐針) (mm)	2~5	2.4
軟化点(°C)	80 以上	94.0
引張強度 (kg/cm ²)	3.5 以上	8.2
最大荷重時の伸び率 (%)	300 以上	1,200
耐アルカリ性	飽和 Ca(OH) ₂ 溶液に 15 日間浸して異常ないこと	合格
耐塩水性	3% の食塩水に 15 日間浸して異常ないこと	合格
備考：規格値・試験方法は、道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計施工資料 ⁷⁾ による		

(3) 試験条件

走行車輪は直径 200mm, 幅 150mm, ゴム厚 15mm(通常のホイールトラッキング試験で用いるソリッドタイヤを 3ヶ連結した状態)とし, 輪荷重は 2,058N±10N(通常のホイールトラッキング試験の 3 倍の荷重)で, 通常のホイールトラッキング試験の要領で走行させた。試験温度

は 40°C で, 試験個数は 3ヶである。

なお, 走行回数は 20,000 回までとし, 走行中の所定回数時(0, 2,000, 4,000, 20,000 回)には, 供試体表面の縦横断形状を 1 側線ずつ測定することとした。また, アスファルト混合物とコンクリート床版層間の付着強度を測定するために, 「舗装試験法便覧」⁸⁾に記載されているコンクリート床版防水層の引張接着試験(付着強度試験)(図-9)を実施した。なお, 引張試験時の試験温度は 20°C とし, 試験個数は 1 供試体から試験実施可能な 2ヶとした。

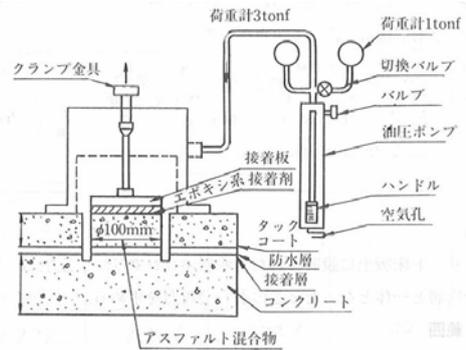


図-9 付着強度試験

(4) 試験結果

縦横断形状測定結果について, 3 供試体の平均値における走行回数増加による変形量の推移を図-10~13 に示す。走行回数 4,000 回までは改質 II 型, SMA 共に縦横断形状は同様な傾向を示しているが, それ以降については, 改質 II 型は 20,000 回到達後も 4,000 回時とさほど変わらないが, SMA については, 4,000 回時と 20,000 回時と比べると変形は促進されている。また, 図-11 及び図-13 の改質 II 型と SMA の横断方向の変形量を比べると, SMA のほうは改質 II 型と比べ, 車輪両端部の盛り上がりが大きく出ており, 流動を起こしていることがわかる。これは, 動的安定度の違いによるものと考えられる。

次に, 付着強度試験結果について, 表-12 及び表-13 に結果の一覧, 図-14 に平均値による改質 II 型及び SMA の走行回数増加による付着強度の推移について示す。走行回数 0 回時と 2,000 回時を比べると, 走行させることによって, 付着強度が低下する傾向にあることがわかる。しかし, それ以降の 4,000 回時及び 20,000 回時をみると, 付着強度が低下したり回復したりする結果となっており, 走行回数増加によって, 付着強度が低下していく傾向は明確にはみられなかった。また, 表-13 をみると, SMA の走行回数 20,000 回時には, コンクリート床版と SMA 層間で破断せずに, アスファルト混合物層内で破断するケ

ースもあることがわかる。

しかしながら、前述のとおり走行回数増加によって、付着強度が低下していく傾向は掴めなかったものの、「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料」⁹⁾に記載されている試験温度 20℃の場合の付着強度の品質基準として規定されている 6kgf/cm²(0.59N/mm²)よりは、すべての供試体の試験結果は大きな値となっているため、防水層の付着性としては十分な性能を有していることがわかった。

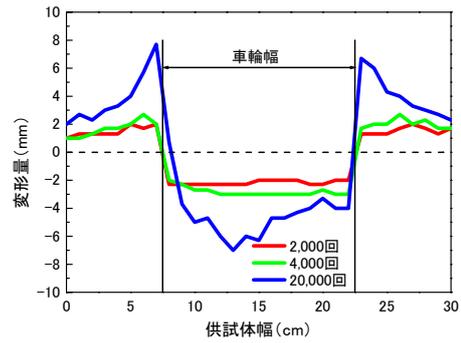


図-13 変形量の推移(SMA, 横断方向)

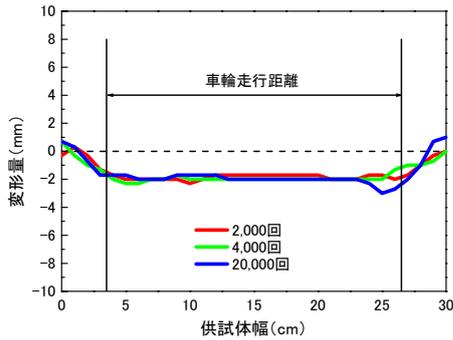


図-10 変形量の推移(改質Ⅱ型, 縦断方向)

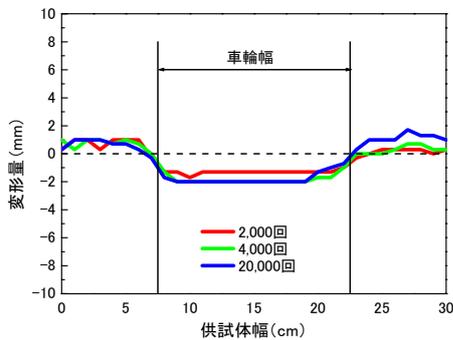


図-11 変形量の推移(改質Ⅱ型, 横断方向)

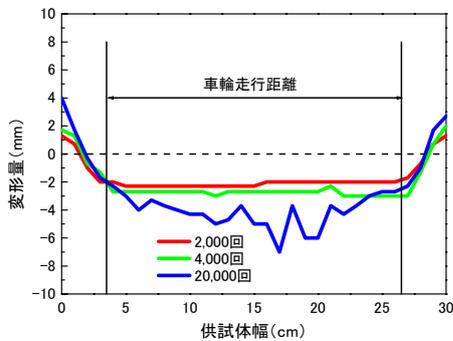


図-12 変形量の推移(SMA, 縦断方向)

表-12 付着強度試験結果(改質Ⅱ型)

供試体 No.	走行回数毎の付着強度 (N/mm ²)			
	0	2,000	4,000	20,000
1-1	1.35	1.32	1.01	1.26
1-2	1.58	1.15	1.06	1.26
2-1	1.40	1.08	1.04	1.36
2-2	1.40	1.43	1.04	1.78
3-1	1.40	1.02	1.06	1.27
3-2	1.50	1.02	1.06	1.27
平均値	1.44	1.17	1.04	1.37

※太字はアスファルト混合物層で破断

表-13 付着強度試験結果(SMA)

供試体 No.	走行回数毎の付着強度 (N/mm ²)			
	0	2,000	4,000	20,000
1-1	1.15	1.02	1.26	0.97
1-2	1.30	0.92	1.27	1.13
2-1	1.25	1.02	1.12	1.25
2-2	1.27	1.02	1.25	1.38
3-1	1.66	1.25	1.02	1.09
3-2	1.66	0.76	1.27	0.92
平均値	1.38	1.00	1.20	1.12

※太字はアスファルト混合物層で破断

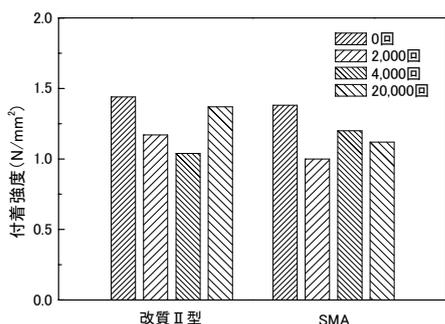


図-14 付着強度試験比較結果

5.2 特殊水浸ホイールトラッキング試験

(1) 試験概要

特殊ホイールトラッキング試験と同様の供試体を用いて、水浸時における特殊ホイールトラッキング試験を実施した。なお、アスファルト混合物は、改質II型とSMAの2種類である。

(2) 試験条件

試験条件は、特殊ホイールトラッキング試験と同様であり、供試体を浸水させた状態で試験を行っている。なお、水浸させたときの水位は、供試体表面から4cm下に設定した(図-15)。

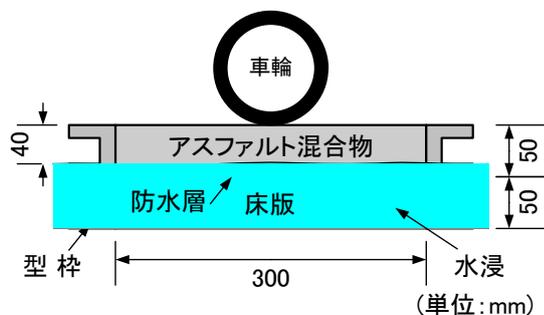


図-15 供試体断面図

(3) 試験結果

縦横断形状測定結果について、特殊ホイールトラッキング試験結果と同様に、3供試体の平均値における走行回数増加による変形量の推移を図-16~19に示す。改質II型については、変形量が走行回数2,000回時に2mm程度まで達し、それ以降は走行回数が増加してもさほど変形していないことがわかる。一方、SMAにおいては、走行回数2,000回時と4,000回時の変形量は2mm程度であるが、20,000回をみると、変形量は6mm程度まで達しているため、走行回数が増加するにつれて、変形が促進される傾

向にあることがわかる。また、水浸条件の比較として、走行回数20,000回時の特殊ホイールトラッキング試験結果と特殊水浸ホイールトラッキング試験結果(図-20~23)をみても、水浸の影響により変形が促進される傾向はみられなかった。

次に、付着強度試験結果について、表-14及び表-15に結果の一覧、図-24に平均値による改質II型及びSMAの走行回数増加による付着強度の推移について示す。図-24をみると、走行回数が増加するにつれて、全体的には付着強度が低下していく傾向はみられるが、改質II型の走行回数2,000回時の結果が、0回時よりも高い値となっていたり、SMAの走行回数2,000回時と比べて4,000回時の付着強度が若干回復していたりと、その傾向は明確でない。また、表-15をみると、層間で破断せずにコンクリート床版層内で破断するケースもあった。しかし、いずれの試験結果においても、付着強度が6kgf/cm²(0.59N/mm²)以上であるため、水浸時においても、防水層の付着性は十分な性能を保っていることがわかる。

また、水浸条件の比較として、走行回数20,000回時の特殊ホイールトラッキング試験後の付着強度試験結果と特殊水浸ホイールトラッキング試験後の付着強度試験結果(図-25)をみると、改質II型については、水浸させることにより付着強度が低下する傾向が若干ではあるがみられる。SMAにおいては、水浸させても付着強度は同等程度となっている。このことから、水浸条件が付着強度に及ぼす影響はさほど大きくないことがわかるため、防水層の防水性及び付着性については、十分な性能を有しているものと考えられる。

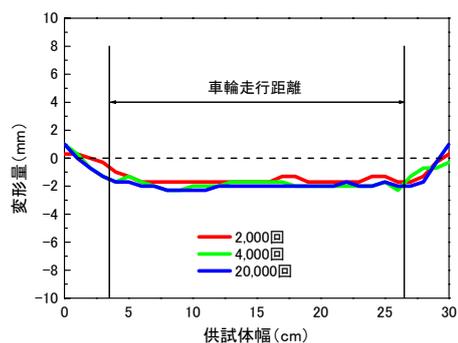


図-16 変形量の推移(改質II型, 縦断方向)

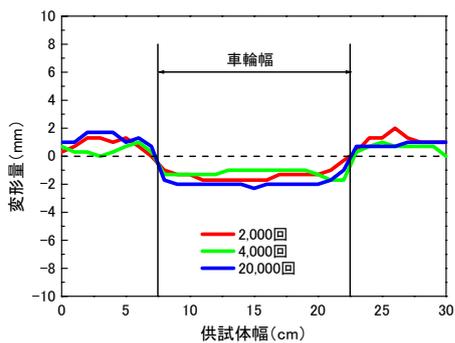


図-17 変形量の推移(改質Ⅱ型, 横断方向)

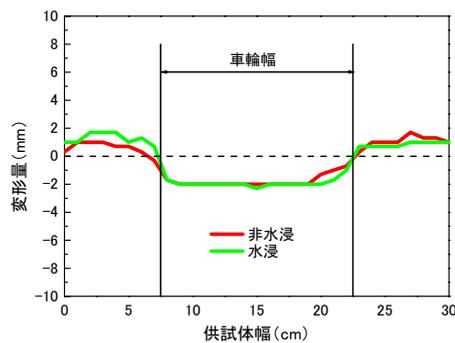


図-21 水浸条件の比較(20,000回)(改質Ⅱ型, 横断方向)

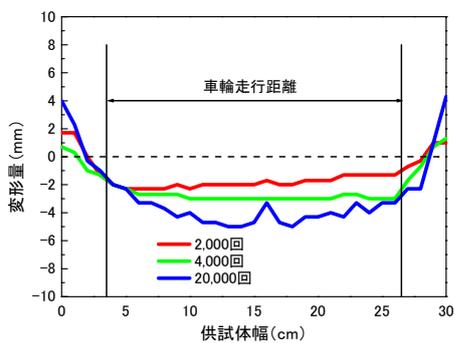


図-18 変形量の推移(SMA, 縦断方向)

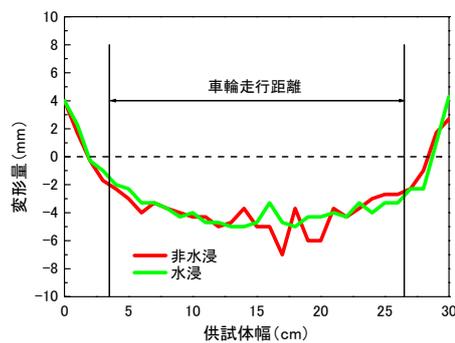


図-22 水浸条件の比較(20,000回)(SMA, 縦断方向)

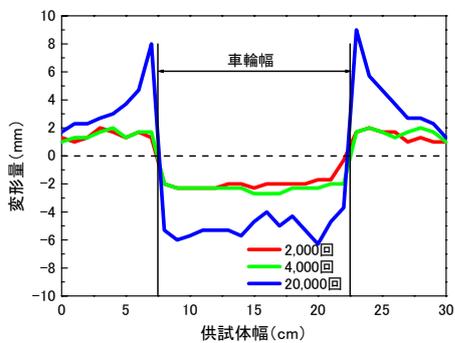


図-19 変形量の推移(SMA, 横断方向)

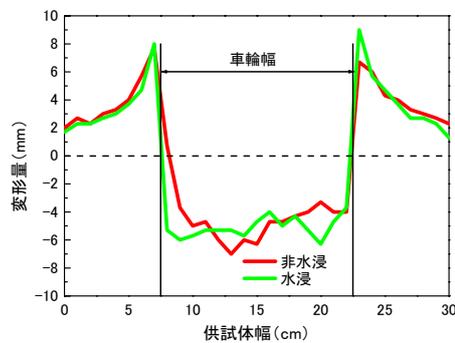


図-23 水浸条件の比較(20,000回)(SMA, 横断方向)

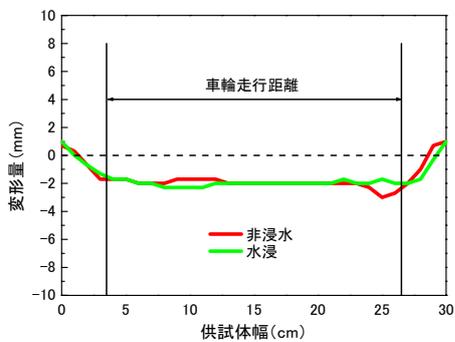


図-20 水浸条件の比較(20,000回)(改質Ⅱ型, 縦断方向)

表-14 付着強度試験結果(改質II型)

供試体 No.	走行回数毎の付着強度(N/mm ²)			
	0	2,000	4,000	20,000
1-1	1.35	3.82	1.97	1.15
1-2	1.58	0.93	1.17	1.12
2-1	1.40	1.30	1.02	1.13
2-2	1.40	1.59	1.06	1.15
3-1	1.40	1.25	1.66	1.01
3-2	1.50	1.01	1.02	1.02
平均値	1.44	1.65	1.32	1.09

※太字はアスファルト混合物層で破断

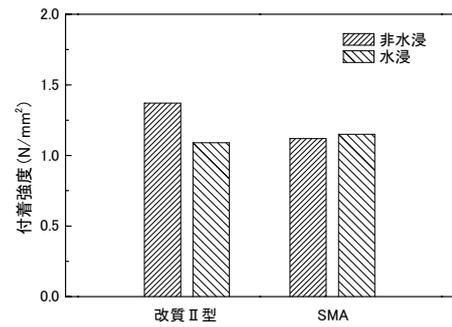


図-25 水浸条件の比較(20,000回)

表-15 付着強度試験結果(SMA)

供試体 No.	走行回数毎の付着強度(N/mm ²)			
	0	2,000	4,000	20,000
1-1	1.15	1.15	1.40	1.09
1-2	1.30	1.30	1.38	1.25
2-1	1.25	1.50	1.40	1.25
2-2	1.27	1.40	1.30	1.15
3-1	1.66	1.27	1.25	0.99
3-2	1.66	1.27	1.48	1.15
平均値	1.38	1.32	1.37	1.15

※太字はアスファルト混合物層で破断

※赤太字はコンクリート床版層で破断

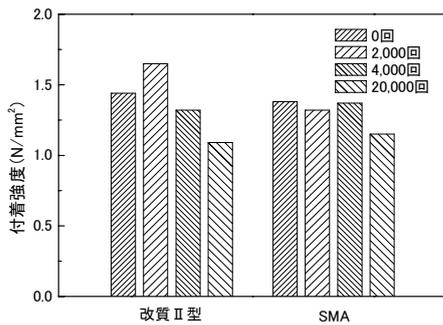


図-24 付着強度試験比較結果

6. アスファルト混合物の疲労耐久性に関する検討

疲労耐久性に関する試験を行うために、曲げ疲労試験を実施した。曲げ疲労試験を実施するためには、各アスファルト混合物及び試験条件毎の設定ひずみが必要となる。その設定ひずみは有限要素法による3次元FEM解析により求めることとするが、解析モデルを作成するためのパラメータとして、各アスファルト混合物の弾性係数が必要となることから、繰返し間接引張試験によるレジリエントモデュラス試験を実施することにより、レジリエントモデュラス(弾性係数)を把握した。その後、その値を用いて3次元FEM解析により各アスファルト混合物層に生じるひずみを推定後、そのひずみを用いて曲げ疲労試験を実施することとした。

6.1 レジリエントモデュラス試験

(1) 試験概要

有限要素法による3次元FEM解析モデルを作成するためのパラメータとして、各アスファルト混合物の弾性係数が必要となることから、繰返し間接引張試験によるレジリエントモデュラス試験を実施した。レジリエントモデュラス試験を実施する前には、同試験には載荷荷重が必要となることから、圧裂試験を実施後、その圧裂強度(引張強度)を用いて試験を実施する必要がある。なお、検討するアスファルト混合物は、改質II型、排水性、SMAの3種類であり、温度条件は-5℃と20℃である。

(2) 圧裂試験

レジリエントモデュラス試験の載荷荷重を決定するために圧裂試験を実施した。試験方法は、「舗装試験法便覧」¹⁰⁾に準拠することとし、試験条件毎の試験個数は3ヶである。供試体作製にあたっては、アスファルト混合物に旋回ニーディング作用を与えながら供試体を締め固

めるジャイレトリー試験機を用いて作製した。その詳細な作製方法については「舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)」¹¹⁾のジャイレトリー試験機によるアスファルト混合物の締固め試験方法に準拠することとした。なお、型枠には直径100mmのものを使用し、供試体の厚さはマーシャル試験用供試体の標準厚さである63.5mmを目標とした。

圧裂強度については、(1)式により算出し、圧裂試験により得られた各混合物及び温度条件毎の圧裂強度(引張強度)を表-16に示す。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi d \ell} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ_t : 圧裂強度(N/mm²)

P : 破壊時の最大荷重(N)

d : 供試体の厚さ(mm)

ℓ : 供試体の直径(mm)

表-16 圧裂試験結果

混合物の種類	試験温度(°C)	供試体寸法(mm)		最大荷重(kN)	圧裂強度(N/mm ²)
		直径	厚さ		
改質II型	-5	99.95	63.36	32.52	3.27
	20	99.91	63.41	20.93	2.10
排水性	-5	99.75	63.46	25.65	2.58
	20	99.79	63.54	10.28	1.03
SMA	-5	99.90	63.67	33.36	3.34
	20	99.81	63.72	15.44	1.55

(3) 試験条件

レジリエントモデュラス試験の試験方法については、「舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)」¹²⁾のアスファルト混合物のレジリエントモデュラス試験方法を参考とした。載荷周波数は、滑走路を対象とする10Hzと、誘導路を対象とする2Hzの2種類とし、ハーバーサイン波(2Hzの場合0.1秒載荷+0.4秒休止時間、10Hzの場合0.09秒載荷+0.01秒休止時間の繰返し荷重)により試験を行った。載荷荷重は、「舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)」では、圧裂強度の10~50%が推奨されているが、今回においては、10Hzのケースで無載荷時間が短く復元変形が安定しないことから、圧裂強度の10~15%の低い載荷荷重を設定した。供試体個数は各条件で3ヶずつとし、圧裂試験用供試体と同様の方法によって作製している。

なお、レジリエントモデュラスの算出方法については(2)式、ポアソン比については(3)式のとおりである。

$$Mr = P (v_{RT} + 0.270) / t \Delta H_T \dots\dots\dots (2)$$

$$v_{RT} = 3.59 \Delta H_T / \Delta V_T - 0.270 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Mr : 全復元レジリエントモデュラス(MPa)

P : 繰返し載荷荷重(N)

v_{RT} : 全復元ポアソン比

t : 供試体厚さ(mm)

ΔH_T : 全復元水平方向変位(mm)

ΔV_T : 全復元垂直方向変位(mm)

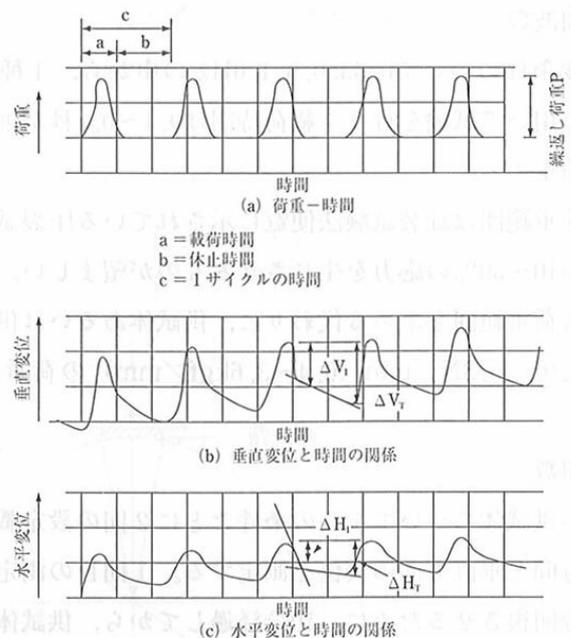


図-26 荷重、変形と時間との関係

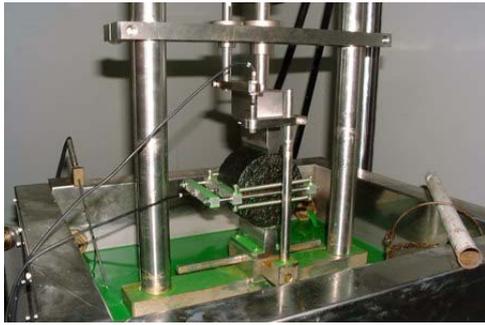


写真-1 レジリエントモデュラス試験状況

(4) 試験結果

各種供試体の変位およびレジリエントモデュラスの算出結果の平均値を表-17 に示す。 載荷周波数 2Hz の場合、温度が上がるとレジリエントモデュラスがかなり小さくなるが、10Hz の場合、温度によるレジリエントモデュラスの変化傾向が小さくなることわかる。 レジリエントモデュラスは、温度条件が-5℃で載荷周波数が 2Hz 及び 10Hz、又、温度条件が 20℃、載荷周波数が 2Hz の場合では、改質Ⅱ型

>SMA>排水性となっており、温度条件 20℃、載荷周波数が 10Hz の場合では、SMA>改質Ⅱ型>排水性の順となった。

以上により得られた弾性係数を、3次元 FEM 解析のパラメータとして用いるが、試験結果及び算出結果については、表-18 の改質Ⅱ型、温度条件-5℃、載荷周波数 2Hz の供試体単位の結果を例にとってみてもわかるとおり、供試体単位でかなりのバラツキがみられ、この条件の場合のレジリエントモデュラスの標準偏差は 9,041MPa、変動係数は 47.7% となっている。 その他の条件においても、変動係数は 20~50%程度と非常に高い値となった。 このバラツキは、荷重載荷する載荷板幅が 13mm であるために、載荷板面が混合物のどの材料(粗骨材や細骨材)と接するかによって、試験結果である垂直方向変位や水平方向変位にバラツキが生じる傾向にあるために起こるものであると考えられる。 このことから、レジリエントモデュラス試験の精度としては、十分に有りうる結果であると思われる。

表-17 レジリエントモデュラス試験結果及び算出結果

種類	周波数 (Hz)	温度 (℃)	厚さ (mm)	載荷荷重 (N)	全復元変位 (mm)		ポアソン比	Mr (MPa)
					垂直方向	水平方向		
改質Ⅱ型	2	-5	63.4	3,485	0.01400	0.00092	0.028	18,958
		20	63.4	2,550	0.01567	0.00408	0.736	9,801
	10	-5	63.4	2,567	0.02283	0.00550	0.831	7,202
		20	63.4	2,686	0.02417	0.01950	2.693	6,488
排水性	2	-5	63.5	2,312	0.02950	0.00113	-0.031	6,677
		20	63.5	1,105	0.02450	0.00550	0.629	2,718
	10	-5	63.5	2,635	0.02683	0.00098	-0.130	5,665
		20	63.5	2,346	0.03467	0.00399	0.261	4,587
SMA	2	-5	63.7	3,298	0.02050	0.00096	-0.063	11,639
		20	63.7	1,938	0.02792	0.00525	0.455	4,244
	10	-5	63.7	2,703	0.02308	0.00103	-0.078	7,586
		20	63.7	2,516	0.02092	0.00283	0.219	7,204

※温度、厚さ、載荷荷重、全復元変位、ポアソン比についても各供試体の平均値である

表-18 供試体単位のレジリエントモデュラス試験結果及び算出結果(改質Ⅱ型、-5℃、2Hz)

供試体 No.	厚さ (mm)	載荷荷重 (N)	全復元変位 (mm)		ポアソン比	Mr (MPa)
			垂直方向	水平方向		
1	63.36	3,060	0.03100	0.00115	-0.137	5,585
1	63.36	3,570	0.01400	0.00095	-0.026	14,472
2	63.32	3,570	0.01600	0.00080	-0.091	12,615
2	63.32	3,468	0.00600	0.00075	0.179	32,789
3	63.59	3,672	0.00800	0.00095	0.156	25,894
3	63.59	3,570	0.00900	0.00090	0.089	22,394
平均値 (MPa)						18,958
標準偏差 (MPa)						9,041
変動係数 (%)						47.7

6.2 発生ひずみ推定のための3次元FEM解析

栈橋上アスファルト舗装において、航空機荷重が載荷されることにより生じるアスファルト混合物層のひずみを推定するために、有限要素法による3次元FEM解析を実施した。

6.2.1 構造解析

解析モデルについては、図-28に示すようにジャケット1基分をモデル化することとする。また、モデル上の舗装構成は図-29に示すとおりである(表層は改質II型による厚さ5cmの2層構成であるが、表層1においてはグルーピングを考慮し4cmとする)。なお、滑走路には、滑走路面の雨水を効率的に排水するための縦断勾配及び横断勾配を設けることとなっており、今回の栈橋構造においても、その勾配をコンクリート床版の厚さを変えることにより設けることとなっているが、本解析においてはフラットな状態と仮定してモデル化することとした。

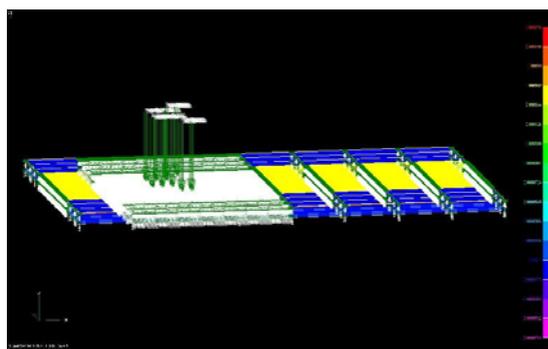


図-27 3次元FEM解析

(1) 材料緒元

解析モデルを作成するうえにおいて、各アスファルト混合物の力学特性値を表-19、コンクリート床版の力学特

性値を表-20、鋼桁層の力学特性値については、表-21のように設定した。なお、各アスファルト混合物の弾性係数は、前述のレジリエントモデュラス試験結果によるも

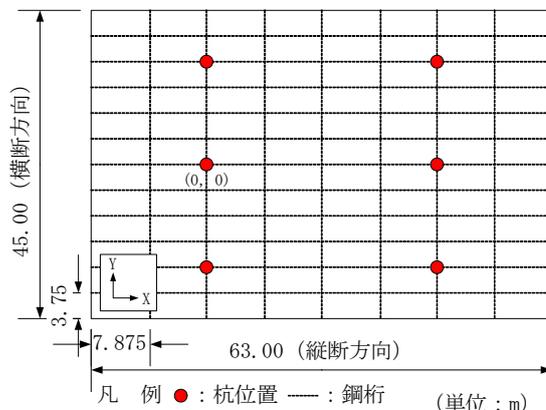


図-28 モデル寸法図(平面図)(ジャケット1基分)



図-29 解析モデル上の舗装構成

のであるが、試験結果を500MPa単位で整理することとし、比較的小きな値については、有効数字2桁で整理することにより用いることとした。ポアソン比についてはアスファルト混合物の標準的な値である0.35を入力することとした。

表-19 各アスファルト混合物の力学特性値

検討対象	アスコン温度	弾性係数(MPa)			ポアソン比	単位体積重量(kN/m ³)	線膨張係数(1/°C)
		改質II型	排水性	SMA			
滑走路(10Hz)	-5°C	7,000	5,500	7,500	0.35	22.5	3.0×10 ⁻⁵
	20°C	6,500	4,500	7,000			
誘導路(2Hz)	-5°C	19,000	6,500	11,500			
	20°C	10,000	2,700	4,200			

表-20 床版の力学特性値

弾性係数(MPa)	ポアソン比	単位体積重量(kN/m ³)	線膨張係数(1/°C)
28,000	0.20	24.5	1.0×10 ⁻⁵

表-21 鋼桁層の力学特性値

弾性係数(MPa)	ポアソン比
28,000	0.20

(2) 解析条件

解析モデル断面図を図-30に示す。床版とSMA層間の付着状態については、鉛直方向及びせん断方向にバネを挿入することによりモデル化した。その際には、鉛直方向(Z方向)については温度条件によらず剛結するものとし、せん断方向(X方向及びY方向)については温度条件毎に値を設定することとし、温度条件-5℃の場合で 3.192N/mm^3 、 20°C の場合で 0.72N/mm^3 とした。なお、このパラメータについては、提示された要求水準書に対して、JVが提出した設計に関する技術提案書の中で実施されているバネ係数算定のためのせん断試験結果を参考としている。せん断試験は、温度条件として -10°C 、 20°C 、 40°C で実施されているため、解析の温度条件 -5°C の場合に用いるバネ係数は、図-31に示すように、線形補完して設定した。また、鋼桁層(桁及び梁)については、剛性の梁要素にて構成するものとした。その他のパラメータとしては、材料特性の参照温度は 20°C 、重力加速度は 9.8m/s^2 を入力することとした。解析モデルの端部における拘束条件は図-32に示すとおりである。

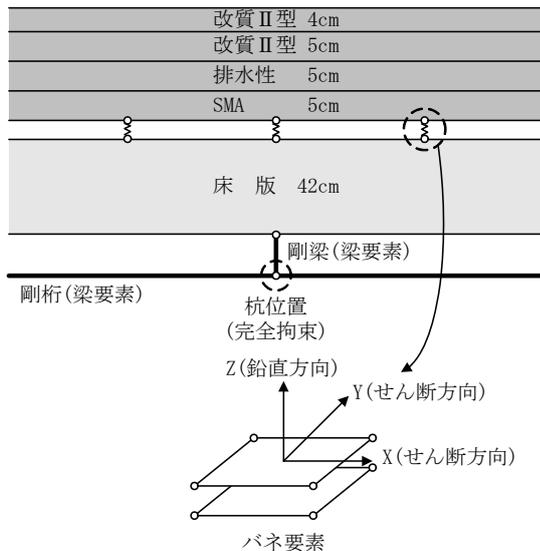


図-30 解析モデル断面図

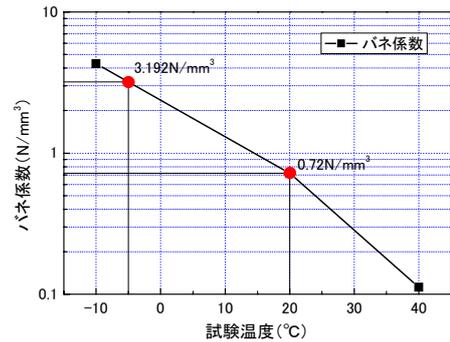


図-31 せん断バネ係数

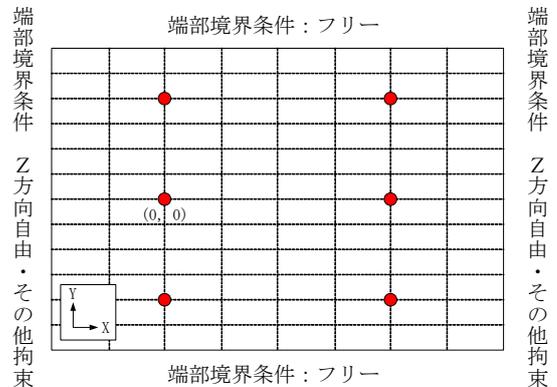


図-32 モデル端部の拘束条件

(3) 解析対象航空機

解析対象航空機について表-22に示す。なお、要求水準書のD滑走路クラス別航空機荷重における選定航空機の中でも4機種に絞り、解析を行うことにした。

表-22 解析対象航空機

対象航空機	選定理由
A380-800	総質量が最大
B747-400D	総質量、載荷回数、輪配置により構造設計への影響が大
B777-200ER	輪荷重が最大
B767-300	載荷回数が最多

(4) 航空機荷重載荷条件

各航空機機種の航空機荷重載荷条件は、要求水準書および「空港舗装構造設計要領」¹³⁾を参考とし、表-23のようにした。なお、モデル上におけるタイヤ1車輪あたりの載荷荷重をモデル化するにあたり、メッシュ配置をそれぞれの航空機のタイヤの接地面積に相当するように調

整することによりモデル化している。A380-800 型機を例として図-33 に示す。

表-23 航空機荷重条件(1車輪あたり)

対象航空機	接地長 (cm)	接地幅 (cm)	接地圧 (N/mm ²)
A380-800	45.99	31.66	1.28
B747-400D	45.83	31.55	1.14
B777-200ER	46.99	32.35	1.50
B767-300	44.76	30.83	1.21

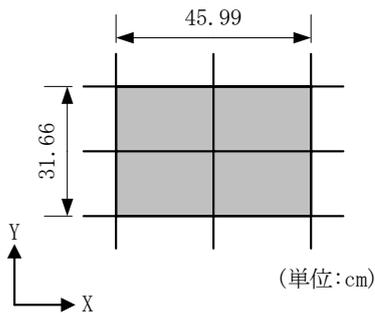


図-33 タイヤ1車輪のメッシュ配置(A380-800型機)

(5) 出力範囲

载荷位置及び脚配置による解析の出力範囲について、航空機機種毎に図-34~37 に示す。载荷位置については、各航空機機種のボディギアもしくはメインギアの中心が杭の直上(0m, 0m)であった場合とし、出力範囲は杭位置ならびに各航空機機種のボディギアもしくはメインギア周辺とする(A380-800型機はボディギア、その他の機種はメインギア)。

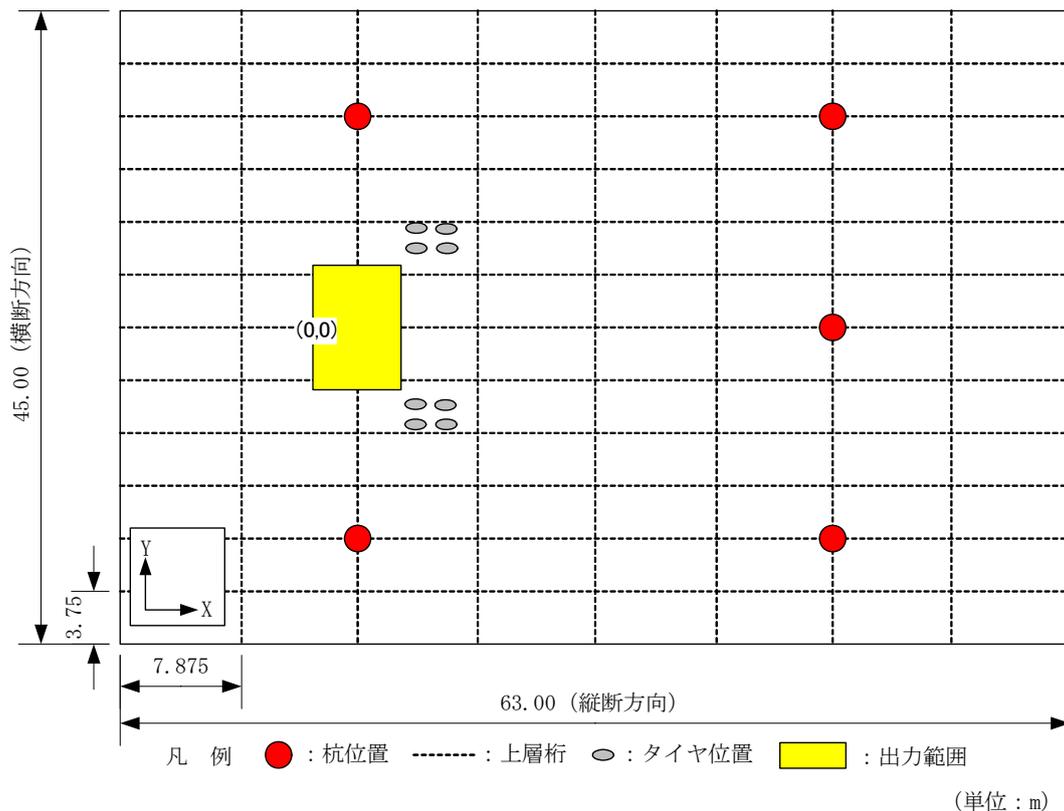


図-34 载荷位置及び脚配置による解析結果出力範囲(A380-800型機(0m, 0m))

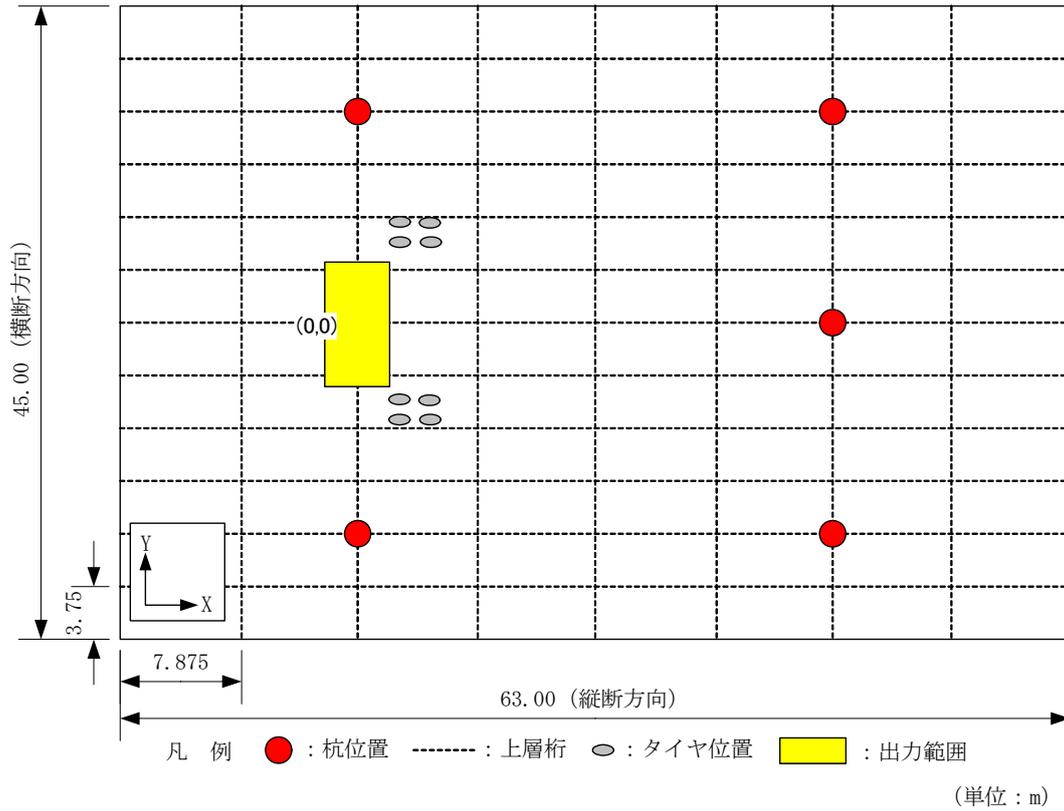


図-35 載荷位置及び脚配置による解析結果出力範囲(B747-400D型機(0m, 0m))

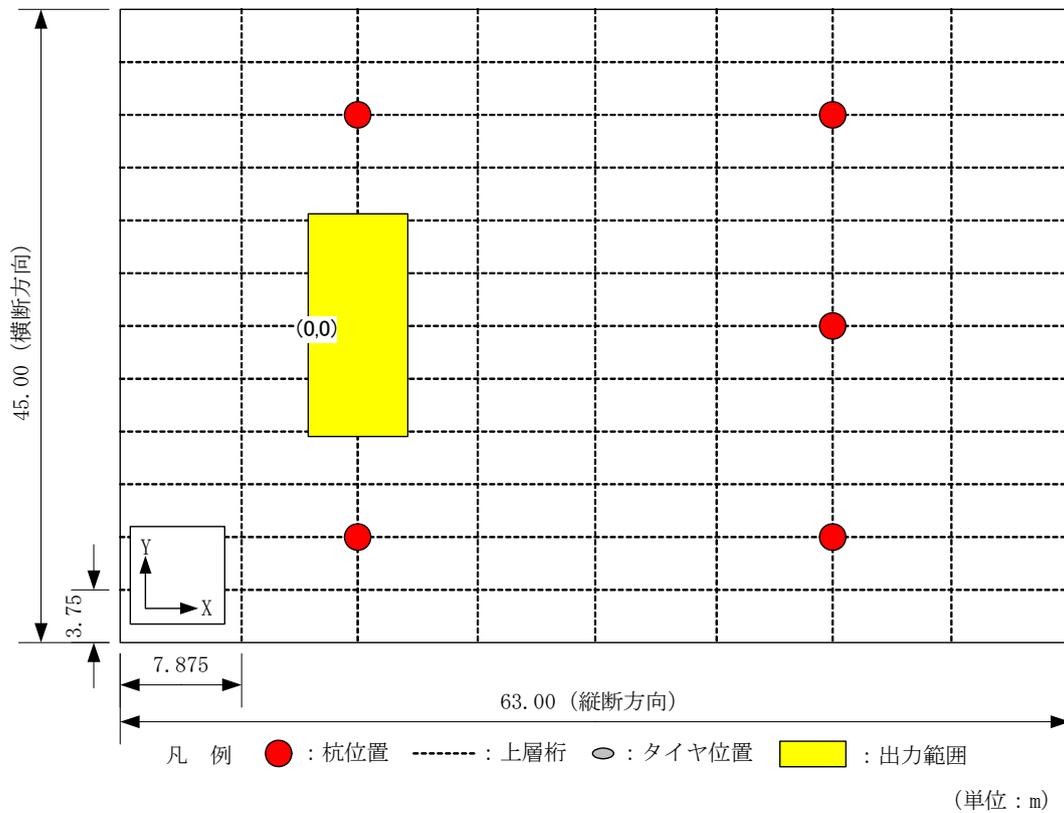


図-36 載荷位置及び脚配置による解析結果出力範囲(B777-200ER型機(0m, 0m))

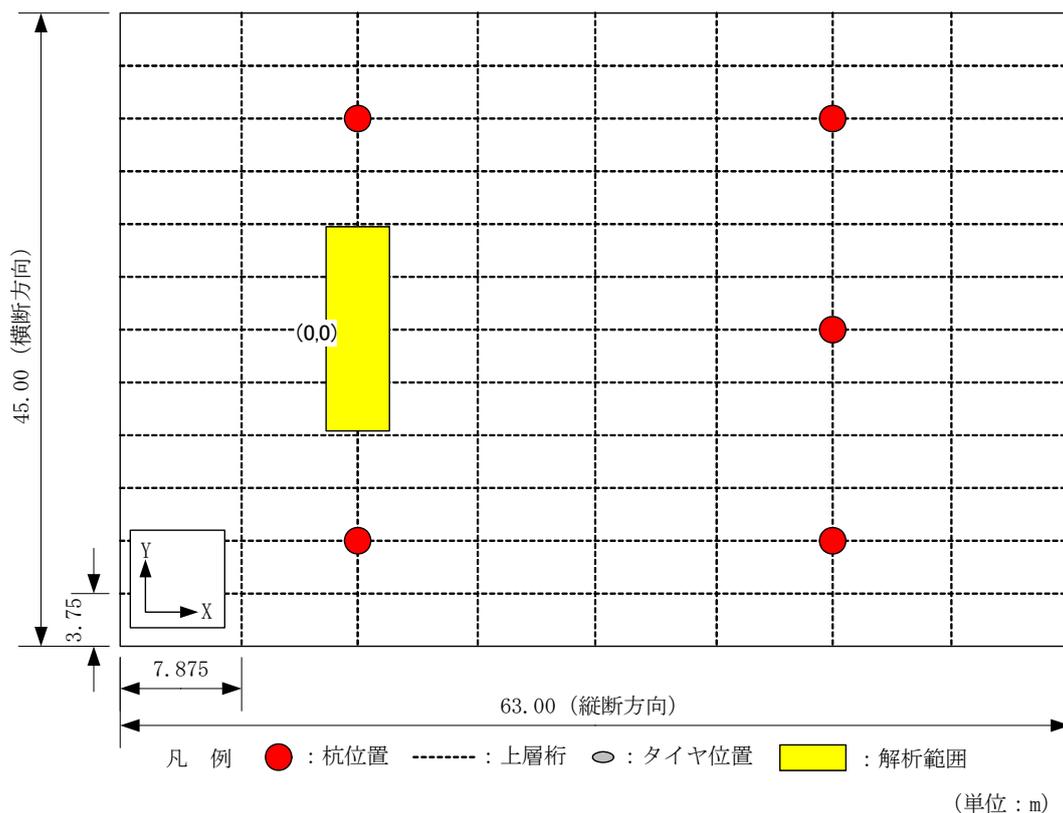


図-37 荷重位置及び脚配置による解析結果出力範囲(B767-300型機(0m, 0m))

(6) 注目ひずみ

注目するひずみとしては、解析範囲内(杭位置及び航空機の脚付近)におけるアスファルト混合物毎(改質Ⅱ型、排水性、SMA)の最大引張ひずみとした。また、その際には、各アスファルト混合物層の上面と下面における最大ひずみを抽出し、その中でも最大のひずみをそのアスファルト混合物の最大ひずみとした。

全体的に大きなひずみが発生しているのは、誘導路対象の温度条件 20℃の場合であった。表-26 にアスファルト混合物毎に各条件により発生したひずみの中での最大値を示す。

(7) 解析結果

解析結果として、各アスファルト混合物の解析温度別、対象施設別及び対象航空機種別で生じる最大引張ひずみについて、表-24 及び表-25 に示す。それぞれのアスファルト混合物の最大引張ひずみの発生箇所としては、改質Ⅱ型では杭の直上ならびに桁の交差部、排水性ならびに SMA については航空機タイヤの直下である。最大引張ひずみの発生面としては、改質Ⅱ型ならびに排水性については各アスファルト混合物層の上面、SMA については下面で発生するケースが多かった。対象施設別ならびに解析温度別でみると、それぞれのアスファルト混合物で最大引張ひずみが発生しているのは、滑走路対象の温度条件-5℃の場合で改質Ⅱ型及び排水性で発生しており、誘導路対象の温度条件 20℃の場合で SMA で発生している。

表-24 解析結果(滑走路対象)

a) -5℃の場合

(単位: μ)

対象航空機	載荷位置	解析結果					
		改質Ⅱ型		排水性		SMA	
		-5℃	発生面	-5℃	発生面	-5℃	発生面
A380-800	(0, 0)	244	上面	189	上面	139	上面
B747-400D	(0, 0)	201	上面	122	上面	93	上面
B777-200ER	(0, 0)	183	上面	130	上面	102	上面
B767-300	(0, 0)	146	上面	104	上面	84	上面

b) 20℃の場合

(単位: μ)

対象航空機	載荷位置	解析結果					
		改質Ⅱ型		排水性		SMA	
		20℃	発生面	20℃	発生面	20℃	発生面
A380-800	(0, 0)	228	上面	182	上面	120	下面
B747-400D	(0, 0)	172	上面	130	上面	118	下面
B777-200ER	(0, 0)	159	上面	133	上面	143	下面
B767-300	(0, 0)	128	上面	100	上面	99	下面

表-25 解析結果(誘導路対象)

a) -5℃の場合

(単位: μ)

対象航空機	載荷位置	解析結果					
		改質Ⅱ型		排水性		SMA	
		-5℃	発生面	-5℃	発生面	-5℃	発生面
A380-800	(0, 0)	165	上面	99	上面	58	下面
B747-400D	(0, 0)	143	上面	69	上面	49	下面
B777-200ER	(0, 0)	125	上面	78	上面	66	下面
B767-300	(0, 0)	102	上面	64	上面	48	下面

b) 20℃の場合

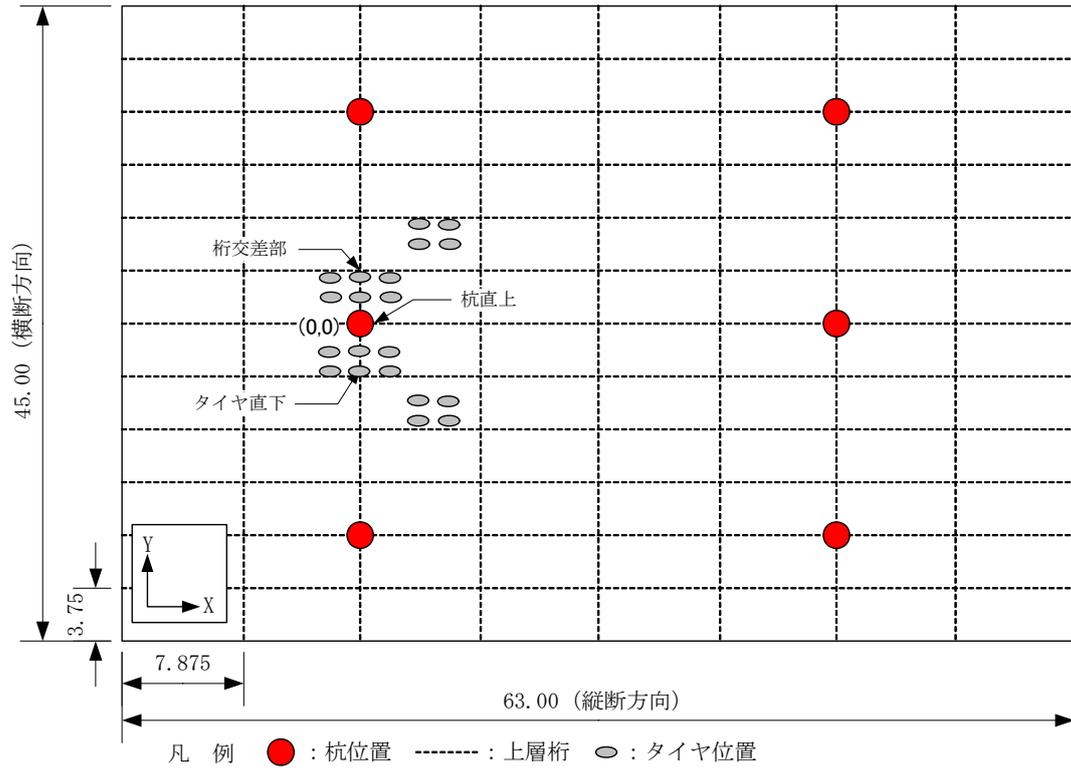
(単位: μ)

対象航空機	載荷位置	解析結果					
		改質Ⅱ型		排水性		SMA	
		20℃	発生面	20℃	発生面	20℃	発生面
A380-800	(0, 0)	198	上面	185	上面	151	下面
B747-400D	(0, 0)	146	上面	144	上面	146	下面
B777-200ER	(0, 0)	134	上面	173	下面	191	下面
B767-300	(0, 0)	111	上面	123	下面	126	下面

表-26 各条件によるアスファルト混合物毎で発生した最大引張ひずみ

(単位: μ)

対象施設	試験温度	改質Ⅱ型	排水性	SMA
滑走路	-5℃	244	189	139
	20℃	228	182	143
誘導路	-5℃	165	99	66
	20℃	198	185	191



(単位 : m)

図-38 最大引張ひずみの発生箇所

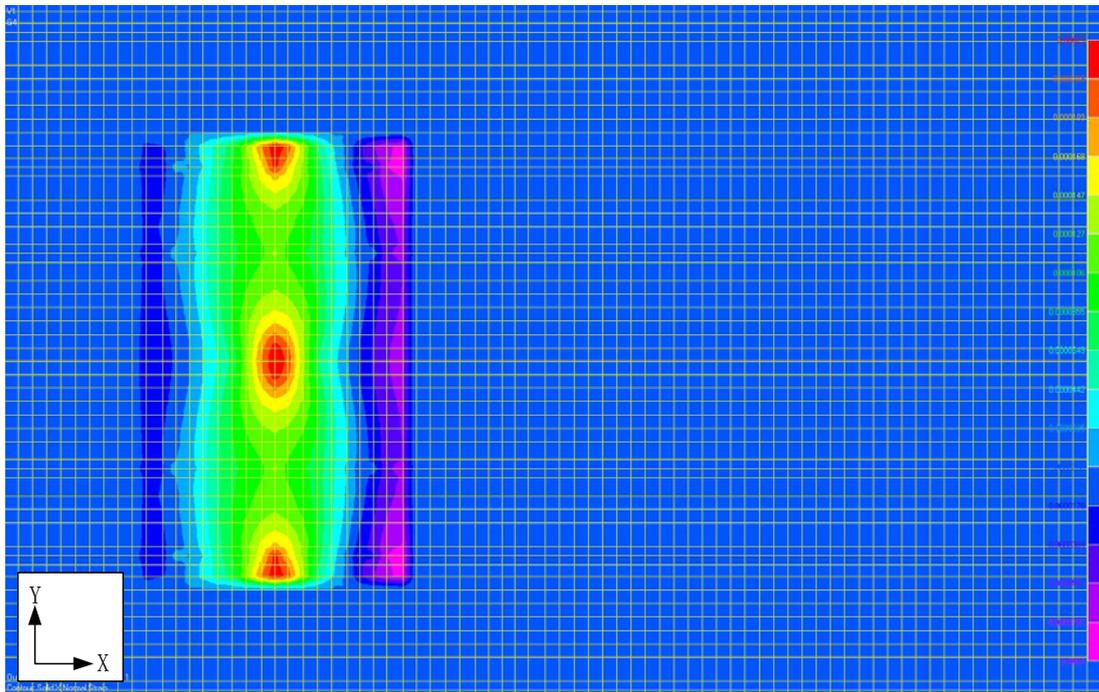


図-39 コンタ図(A380-800型機(0m, 0m)) 滑走路 解析温度-5°C 改質II型上面 Solid X Normal Strain

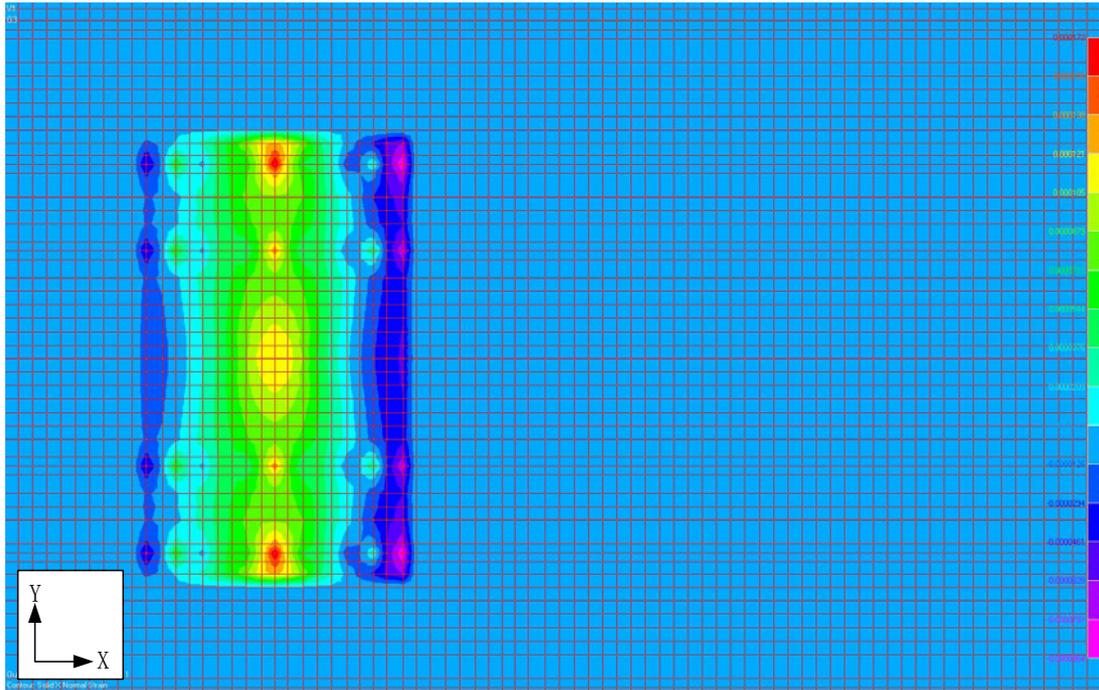


図-40 コンタ図(A380-800型機(0m, 0m)) 滑走路 解析温度-5°C 排水性上面 Solid X Normal Strain)

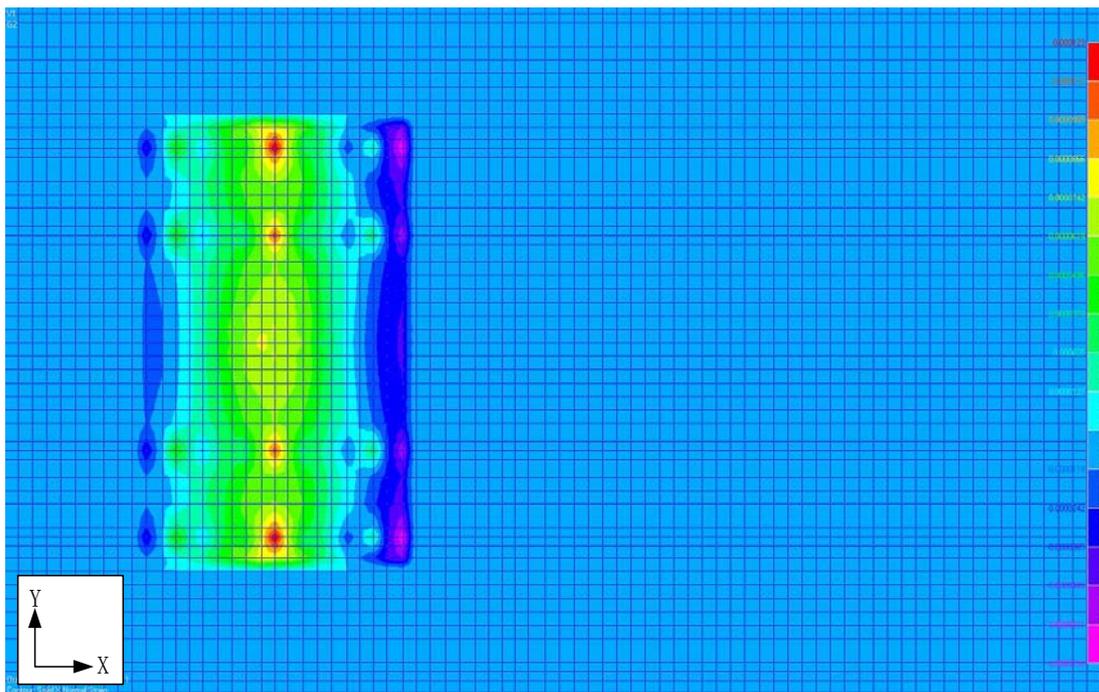


図-41 コンタ図(A380-800型機(0m, 0m)) 滑走路 解析温度-5°C SMA 下面 Solid X Normal Strain)

6.2.2 その他の荷重位置条件による構造解析

前述の構造解析は、航空機荷重が杭の直上部に荷重した場合であったが、荷重位置の違い等、その他の条件によりアスファルト舗装に生じるひずみが大きくなること

も懸念されることから、代表航空機機種として A380-800 型機を選定し、それらの確認を行った。

- (1) 荷重位置の違いにより発生する底面ひずみの確認

栈橋の杭間に航空機荷重が載った場合に、アスファルト舗装の底面に生じるひずみが大きくなることが懸念されることから、その解析を行った。

a) 各種条件

材料緒元及び舗装のモデル条件は前述の構造解析と同様である。しかし、航空機荷重載荷条件については表-27に示すとおり、前述の構造解析においては、航空機機種毎にタイヤ1車輪あたりの載荷荷重及び接地面積を考慮し解析モデルを作成したが、この解析においては、簡易的に解析モデルを作成するために、モデルのメッシュ配置を均等配分することとしたため、A380-800型機の航空機緒元どおりのタイヤ1車輪分の接地面積に所定の接地圧を載荷することができない。そのため、接地圧を調整することにより航空機緒元と同様の輪荷重を載荷させる

こととした。また、解析温度は-5℃と20℃、対象施設は滑走路(10Hz)と誘導路(2Hz)、荷重の載荷位置については、図-42~44に示すとおり、機種のボディギア間の中心座標が【(0m, 7.5m), (15.75m, 0m), (15.75m, 7.5m)】の3ケースとした。注目するひずみは、各アスファルト混合物層の杭間の中心の底面引張ひずみである(図-42~44に示す①~⑦の箇所の底面引張ひずみ)。

表-27 航空機荷重載荷条件

A380-800	接地長 (cm)	接地幅 (cm)	接地圧 (N/mm ²)
設計航空機緒元	45.99	31.66	1.28
解析モデル	49.22	46.87	0.808

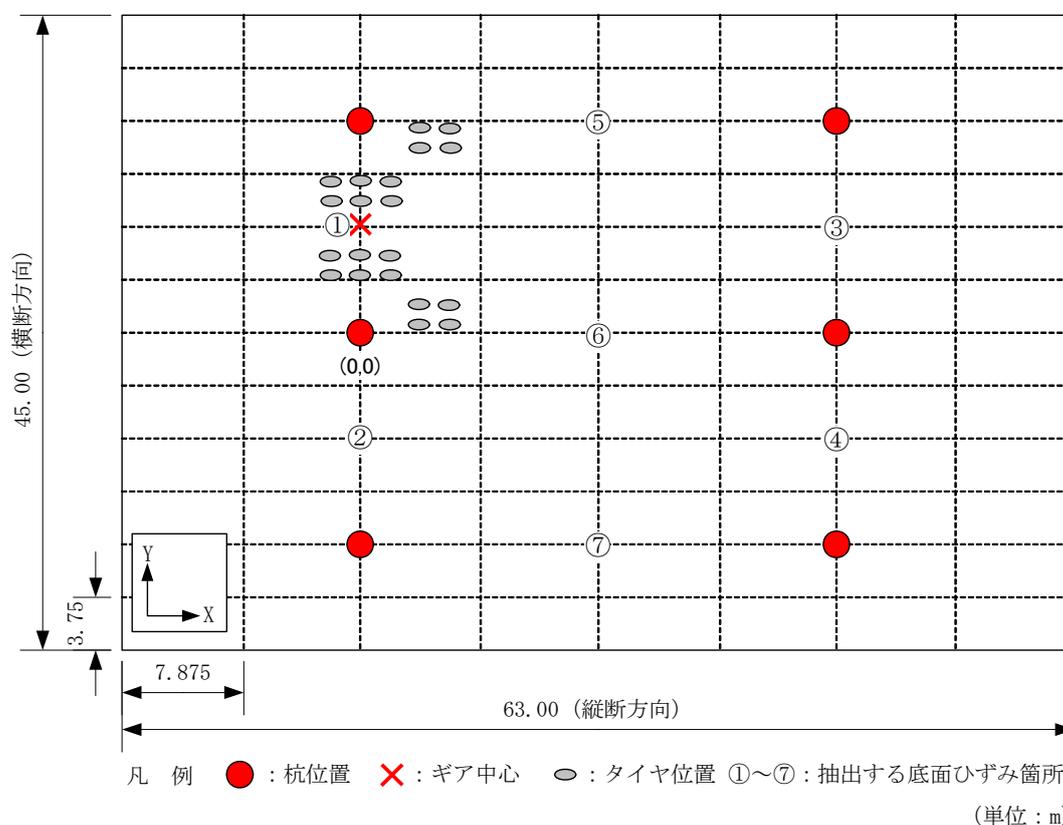


図-42 載荷位置 A380-800型機 (0m, 7.5m)

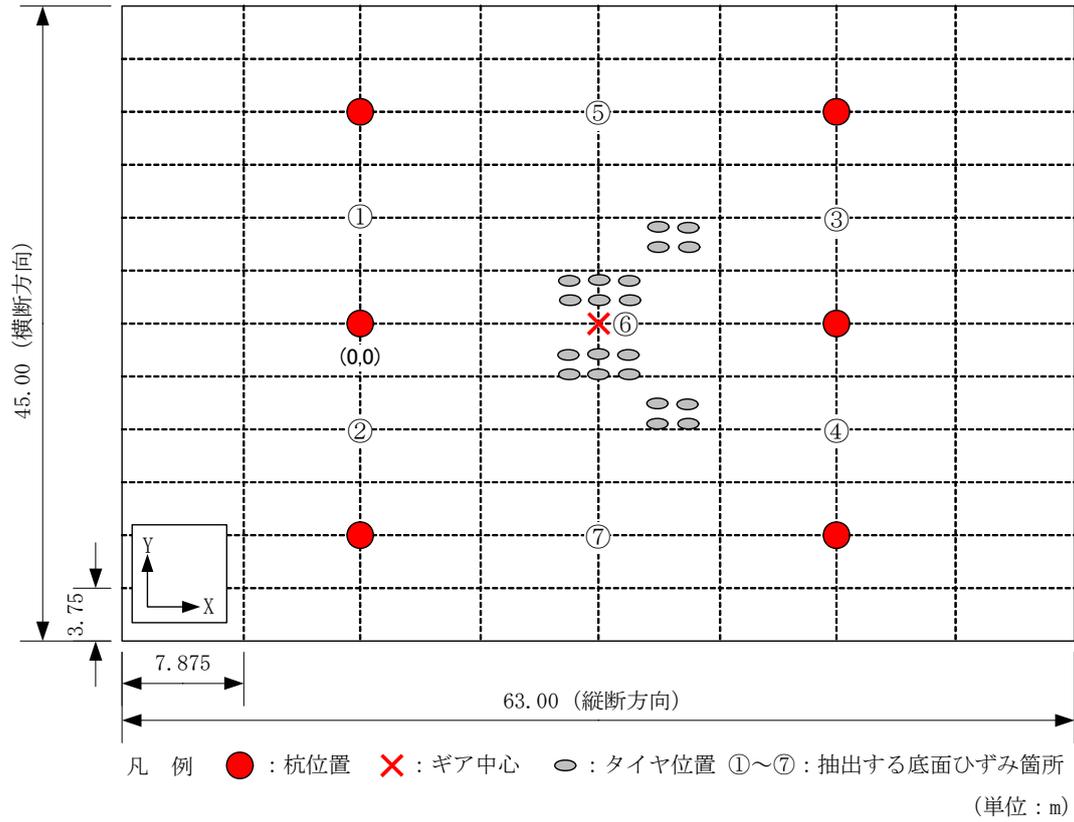


図-43 载荷位置 A380-800型機 (15.75m, 0m)

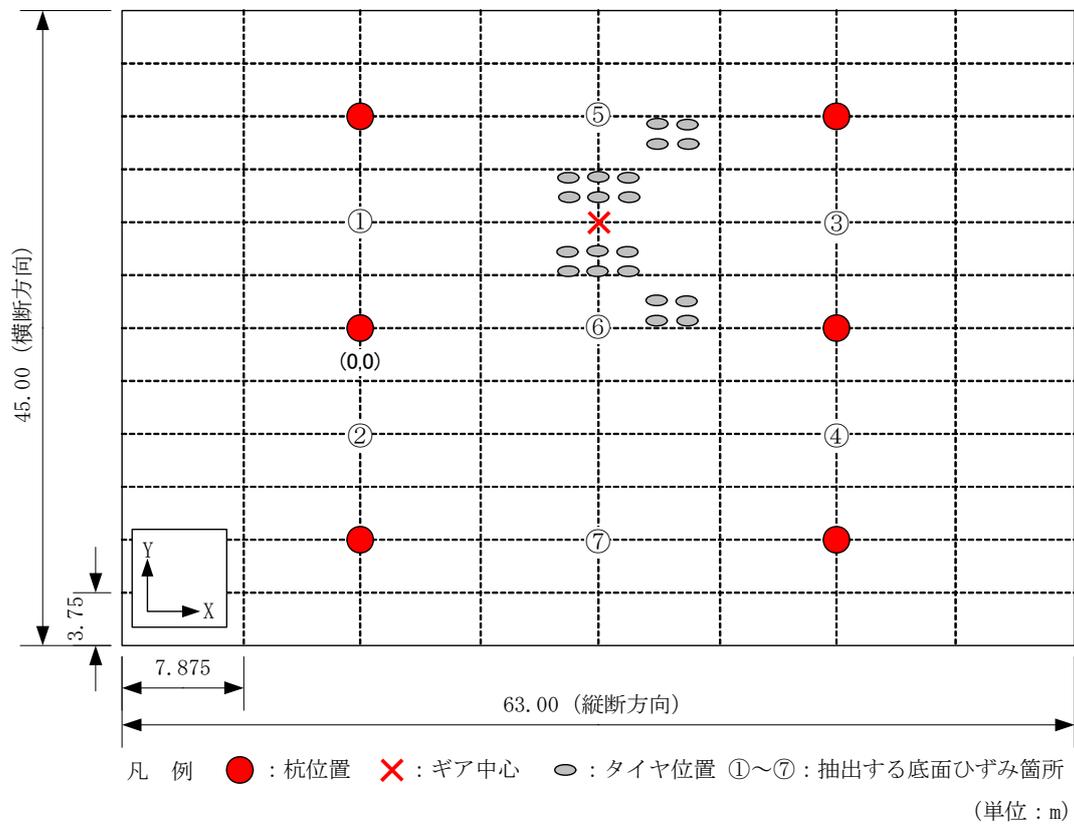


図-44 载荷位置 A380-800型機 (15.75m, 7.5m)

b) 解析結果

解析結果について表-28に示す。表をみると、SMA層の底面では圧縮ひずみがみられるが、改質II型層及び排水性層の底面では引張ひずみがみられるところが多い。値としては、最大の引張ひずみでも107 μ 程度と小さいため、前述の構造解析と比べると、栈橋の杭間には大きな

引張ひずみが生じることはないものと考えられる。なお、解析の都合上、接地圧を設計対象航空機の荷重緒元と同様にはできなかったが、今回の解析結果をみる限り、その値が小さいことから、本解析に大きな影響を及ぼすことはないものと考えられる。

表-28 解析結果
a) 滑走路対象(10Hz)

(単位: μ)

対象 航空機	解析温度 ($^{\circ}$ C)	載荷位置 (m)	解析結果					
			改質II型		排水性		SMA	
			最大 ひずみ	発生 箇所	最大 ひずみ	発生 箇所	最大 ひずみ	発生 箇所
A380-800	-5	(0, 7.5)	107	①	63	①	20	③
		(15.75, 0)	104	⑥	70	⑤	26	⑤
		(15.75, 7.5)	106	⑤	67	⑥	25	⑥
	20	(0, 7.5)	67	①	18	②	-8	②
		(15.75, 0)	62	⑤	17	②	-8	③
		(15.75, 7.5)	59	⑥	17	①	-8	③

※正が引張ひずみ、負が圧縮ひずみ(引張ひずみが生じなかった場合である)

b) 誘導路対象(2Hz)

(単位: μ)

対象 航空機	解析温度 ($^{\circ}$ C)	載荷位置(m)	解析結果					
			改質II型		排水性		SMA	
			最大 ひずみ	発生 箇所	最大 ひずみ	発生 箇所	最大 ひずみ	発生 箇所
A380-800	-5	(0, 7.5)	47	①	22	⑦	7	⑤
		(15.75, 0)	54	⑤	30	⑦	-2	③
		(15.75, 7.5)	52	⑥	29	⑥	-2	③
	20	(0, 7.5)	37	①	9	②	-14	②
		(15.75, 0)	37	⑤	8	②	-14	③
		(15.75, 7.5)	35	⑥	9	①	-14	③

※正が引張ひずみ、負が圧縮ひずみ(引張ひずみが生じなかった場合である)

(2) 航空機タイヤ直下に生じるひずみの確認

杭間に航空機が載った場合に、航空機タイヤ直下に生じるひずみについても大きくなるのが懸念されるため、A380-800型機を代表機種とし杭の直上に載った場合との比較を行った。

a) 各種条件

材料緒元及び解析条件等については、(1)と同様である。荷重の載荷位置については、機種のボディギア間の中心座標が【(0m, 0m), (15.75m, 0m)】の2ケースとし、注目するひずみは、航空機タイヤ直下の各アスファルト混合物の上下層面に発生する最大引張ひずみである(図-45~46)。

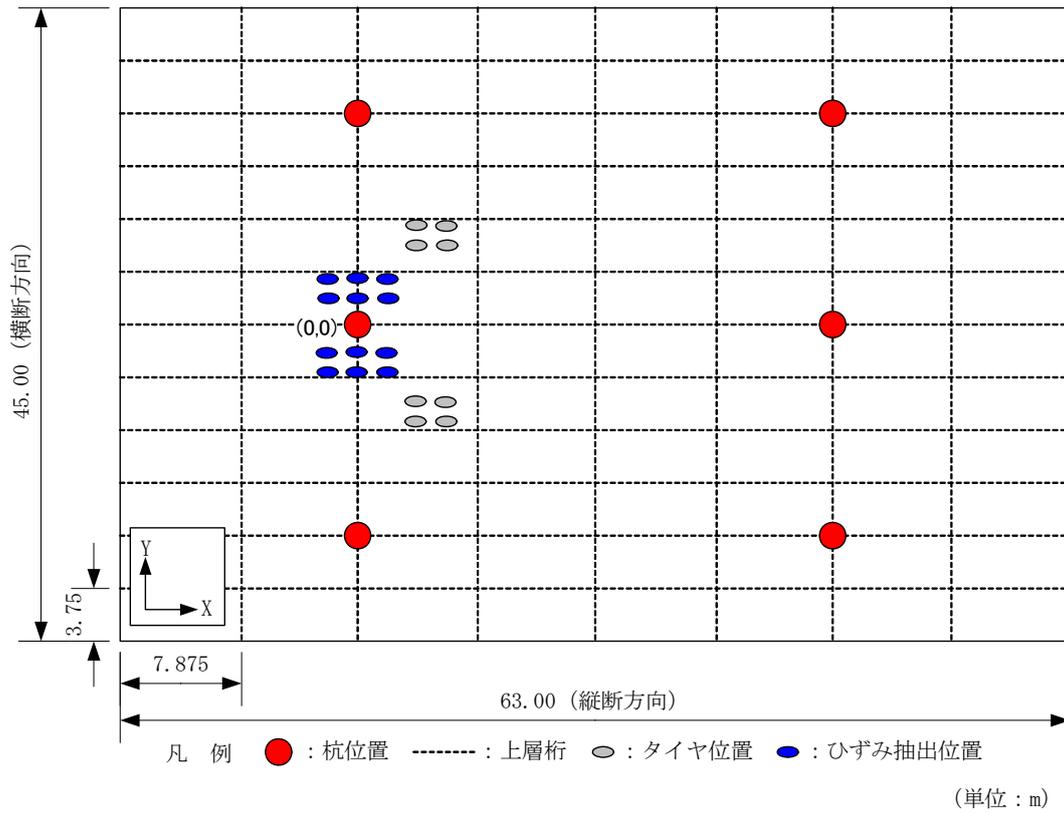


図-45 荷重位置 A380-800 (0m, 0m)

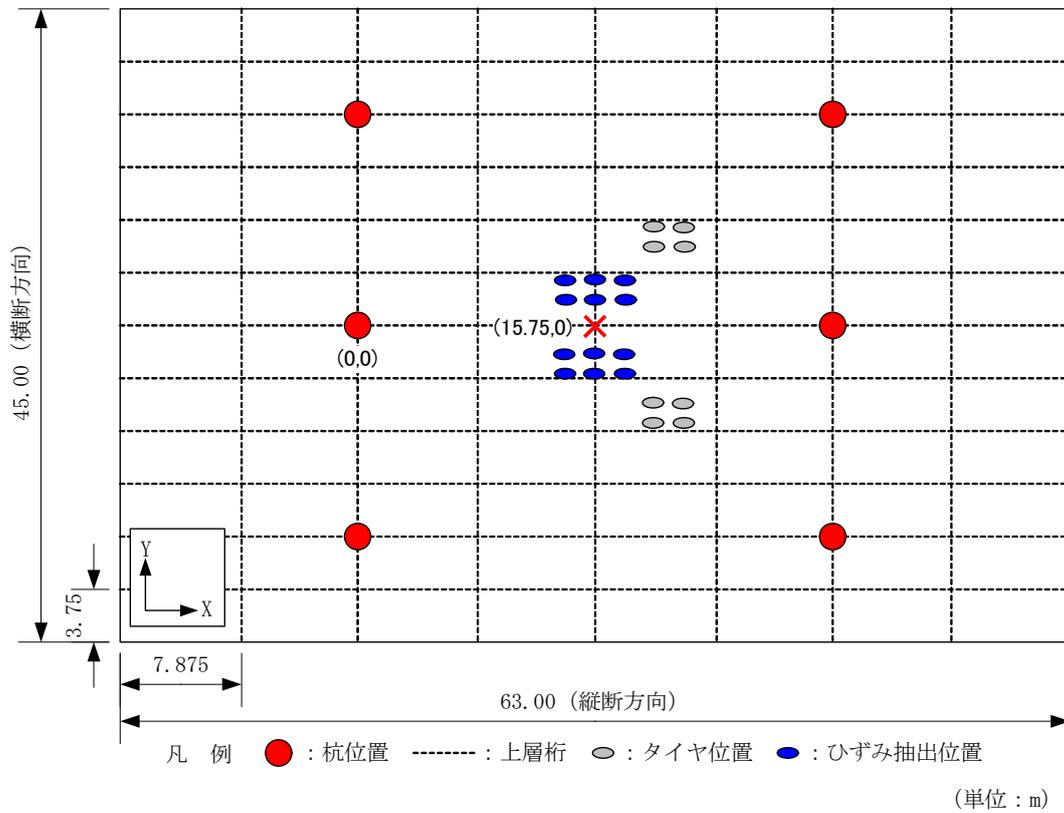


図-46 荷重位置 A380-800 (15.75m, 0m)

b) 解析結果

解析結果について表-29に示す。航空機タイヤの直下に生じる最大ひずみは、発生面としては上面に発生するケースが多いことがわかる。また、全体的にみると載荷位置(0m, 0m)のほうが、載荷位置(15.75m, 0m)よりも大きなひずみが生じていることがわかるが、一部違ったところもみられ

る。しかし、載荷位置(15.75m, 0m)のほうが大きなひずみが生じている場合でも、載荷位置(0m, 0m)と比較するとそれほど大きな差ではない。よって、杭間に航空機荷重が載った場合でも、杭の直上に比べれば、その値は小さいことが確認できた。

表-29 解析結果

a) 滑走路対象

(単位: μ)

対象 航空機	解析温度 (°C)	載荷位置 (m)	解析結果					
			改質Ⅱ型		排水性		SMA	
			最大 ひずみ	発生面	最大 ひずみ	発生面	最大 ひずみ	発生面
A380-800	-5	(0, 0)	243	上面	156	上面	113	上面
		(15.75, 0)	227	上面	158	上面	119	上面
	20	(0, 0)	220	上面	143	上面	103	下面
		(15.75, 0)	202	上面	131	上面	94	下面

b) 誘導路対象

(単位: μ)

対象 航空機	解析温度 (°C)	載荷位置 (m)	解析結果					
			改質Ⅱ型		排水性		SMA	
			最大 ひずみ	発生面	最大 ひずみ	発生面	最大 ひずみ	発生面
A380-800	-5	(0, 0)	162	上面	80	上面	50	上面
		(15.75, 0)	146	上面	90	上面	59	上面
	20	(0, 0)	192	上面	141	上面	127	下面
		(15.75, 0)	166	上面	130	上面	119	下面

6.3 曲げ疲労試験

3次元 FEM 解析により得られた対象施設別、解析温度別及びアスファルト混合物毎の最大引張ひずみを用いて、曲げ疲労試験を実施した。

(1) 試験条件

曲げ疲労試験の試験方法については、要求水準書添付資料の「アスファルト混合物の動的曲げ試験実施要領」を参考とした。載荷荷重の載荷方法は、2点支持・2点載荷によるものである。

温度条件は-5°Cと20°Cの2種類で、載荷周波数は滑走路を対象とする10Hzと、誘導路を対象とする2Hzの2種類とし、載荷波形はサイン波により試験を行った。また、ひずみレベルについては各条件で1種類とし、前述の3次元 FEM 解析の構造解析値の整数第1位を切り上げることに用いた(表-30)。なお、載荷回数は上限を20万回までと設定した。試験個数は各条件3ヶずつである。

なお、設定ひずみからの試験時中央のたわみ変位量は、

(4)式により算出し、算出された変位量になるような荷重を載荷することとした。

表-30 各条件におけるひずみレベル

(単位: μ)

対象施設	試験温度	改質Ⅱ型	排水性	SMA
滑走路	-5°C	250	190	140
	20°C	230	190	150
誘導路	-5°C	170	100	70
	20°C	200	190	200

$$d = \epsilon (3 \times l^2 \times (-4 \times l_1^2)) / (12 \times h) \dots\dots (4)$$

ここに、ε: ひずみ

d: 中央の変位量(mm)

h: 供試体の厚さ(mm)

l: スパン長(mm) (300mm)

l₁: 支点から載荷点までの距離(mm) (100mm)

(2) 供試体作製

供試体は、「舗装試験法便覧 ホイールトラッキング試験」の室内供試体作製方法に準じて作製することとし、ラベリング試験時に使用する型枠(400mm×150mm×50mm(長さ×幅×厚さ))を用い作製した後、カッターを用いて40mm×40mm×40mm(幅×厚さ×長さ)の形状に整形することとした(写真-2)。



写真-2 整形後供試体

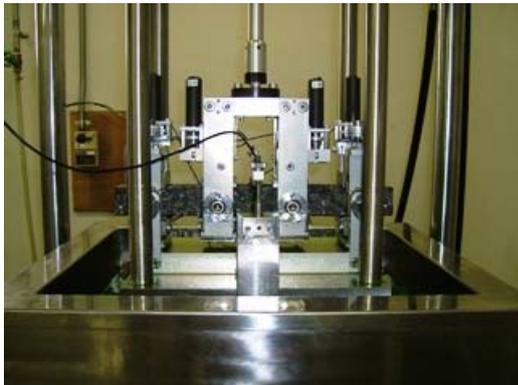


写真-3 供試体設置状況



写真-4 試験状況

(3) 試験結果

試験結果について、条件毎に図-47~58に示す。各混合物でいずれの試験条件においても、上限20万回として繰り返し荷重させても、疲労破壊は生じなかった。なお、今回の曲げ疲労試験は、3次元FEM解析で杭直上に航空機荷重が荷重された場合にアスファルト舗装に発生する最大引張りひずみ値を用いている。杭間に載った場合に発生するひずみは、杭直上に載った場合に発生するひずみと比較するとかなりの差があり小さかった。実際に航空機が滑走路を走行する場合に、杭直上(滑走路中心)を正確に走行するのではなく横方向に多少ズレて走行することもあるが、この場合に発生するひずみは比較的小さい。そこで、疲労には影響しないものと考えた場合には、D滑走路の10年間の設計反復作用回数(設計カバレッジ)は80,000回と言われているため、10年間における交通量により疲労破壊を起こすことはないものと考えられる。

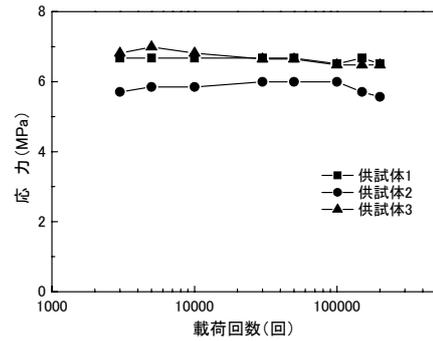


図-47 試験結果(改質II型 -5°C 10Hz)

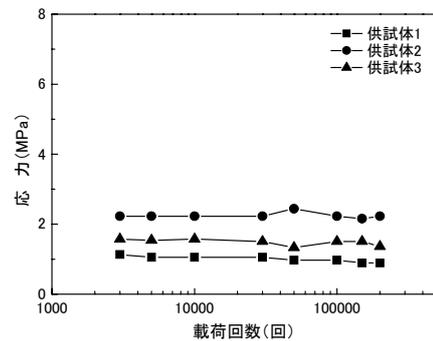


図-48 試験結果(改質II型 20°C 10Hz)

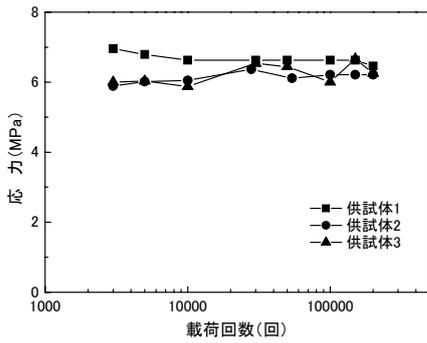


図-49 試験結果(改質II型 -5°C 2Hz)

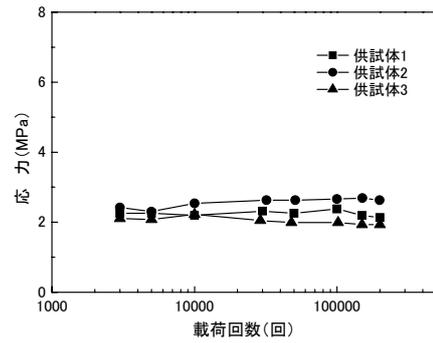


図-53 試験結果(排水性 -5°C 2Hz)

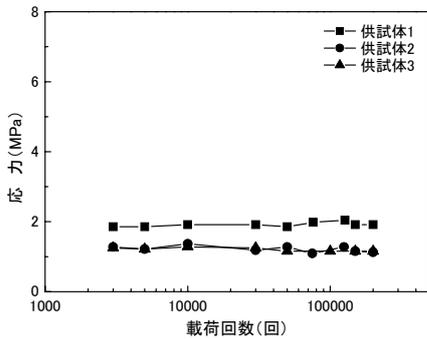


図-50 試験結果(改質II型 20°C 2Hz)

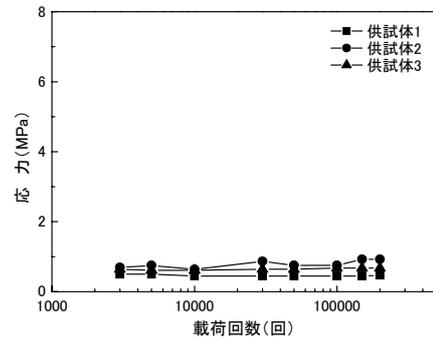


図-54 試験結果(排水性 20°C 2Hz)

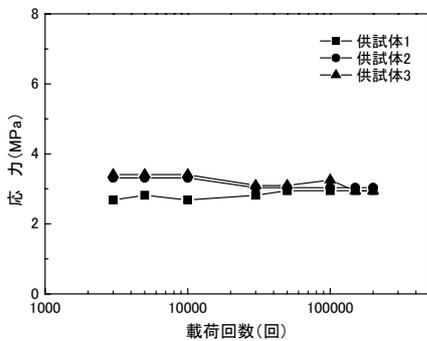


図-51 試験結果(排水性 -5°C 10Hz)

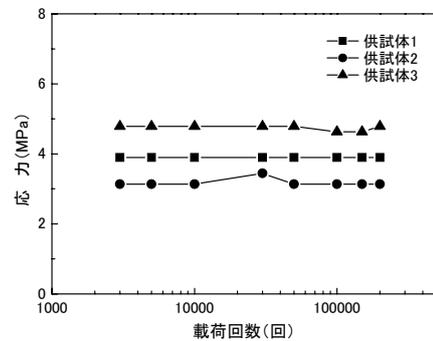


図-55 試験結果(SMA -5°C 10Hz)

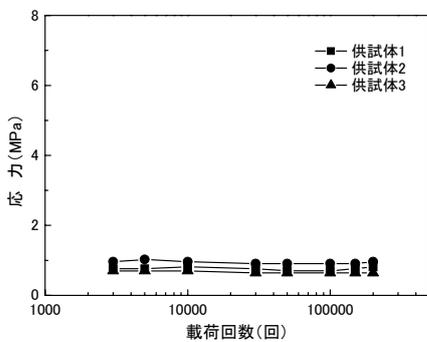


図-52 試験結果(排水性 20°C 10Hz)

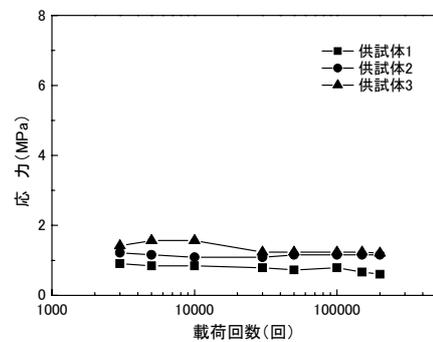


図-56 試験結果(SMA 20°C 10Hz)

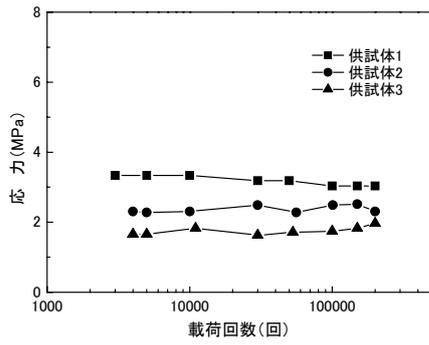


図-57 試験結果 (SMA -5°C 2Hz)

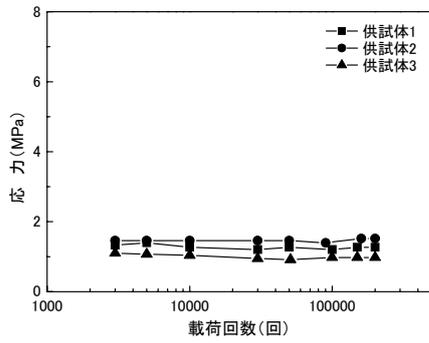


図-58 試験結果 (SMA 20°C 2Hz)

7. 結 論

コンクリート床版上の空港アスファルト舗装の舗装構造に関する各種試験・検討結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) ホイールトラッキング試験及び水浸ホイールトラッキング試験結果により、表層(改質Ⅱ型)の動的安定度(DS)が 2,500 回/mm 以上であること、また、剥離抵抗性に関しては、十分な性能を有していることがわかった。
- (2) 特殊ホイールトラッキング試験及び特殊水浸ホイールトラッキング試験結果により、コンクリート床版と SMA 層間の付着力は十分な性能を有しており、それは水浸時においても変わらない。
- (3) 改質Ⅱ型、排水性、SMA の各アスファルト混合物に対して、上限を 20 万回とし曲げ疲労試験を行った結果、各試験条件においても、疲労破壊を起こすことはなかった。また、D 滑走路の 10 年間の設計カバレッジと比較しても、その交通量において、疲労破壊を起こすことはないものと考えられる。

8. おわりに

以上示したように、室内による各種試験・検討では、栈橋部において設計されている舗装構造については、特に問題ない結果となった。今後は、当所が所有する航空機荷重載荷実験槽内に試験舗装を製作し、航空機荷重載荷装置を用いて、より実物大に近い試験を実施し、更に検討を続けていく所存である。

(2007年2月14日受付)

参考文献

- 1) 国土交通省航空局(監)：空港土木工事共通仕様書(平成16年度版)，(財)港湾空港建設技術サービスセンター，2004。
- 2) (社)日本道路協会：排水性舗装技術指針(案)，2001。
- 3) (社)日本道路協会：ホイールトラッキング試験方法，舗装試験法便覧，pp.539-555，1988。
- 4) (社)日本道路協会：簡易式水浸ホイールトラッキング試験方法，舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)，pp.135-138，1996。
- 5) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 舗装編，2006。
- 6) (社)日本道路協会：道路橋鉄筋コンクリート床版防水

- 層設計・施工資料，25p.，1987
- 7) (社)日本道路協会：道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料，pp.27-28，1987
- 8) (社)日本道路協会：コンクリート床版防水層の引張接着試験方法，舗装試験法便覧，pp.921-925，1988。
- 9) (社)日本道路協会：道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料，13p.，1987
- 10) (社)日本道路協会：圧裂試験方法，舗装試験法便覧，pp.568-573，1988。
- 11) (社)日本道路協会：ジャイレトリー試験機によるアスファルト混合物の締め試験方法，舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)，pp.163-174，1996。
- 12) (社)日本道路協会：アスファルト混合物のレジリエントモデュラス試験方法，舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法)，pp.249-259，1996。
- 13) 国土交通省航空局(監)：空港舗装構造設計要領，(財)港湾空港建設技術サービスセンター，1999。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 375

February 2007

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018