

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1350 December 2018

統計的手法を用いた棧橋上部工の塩害による劣化傾向分析

田中 豊
川端 雄一郎
加藤 絵万

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 骨材粒度について.....	4
2.1 最大密度曲線	4
2.2 空港土木工事共通仕様書における粒度	5
2.3 FAAにおける粒度.....	5
2.4 スーパーペープにおける粒度	5
2.5 日本の表層骨材粒度に関する考察	6
3. 室内試験	6
3.1 使用材料	6
3.2 実験で用いた骨材粒度	7
3.3 試験方法	8
4. 試験結果	9
4.1 マーシャル安定度等の混合物の性状	9
4.2 WT試験結果	10
4.3 加圧透水試験結果	11
4.4 標準・残留圧裂試験結果	11
4.5 混合物毎の特性	12
5. 考察	14
6. まとめ	16
7. おわりに	17
謝辞	
参考文献	17

Survey on aggregate gradation of asphalt mixture for surface course of Airfield pavement

Futoshi IZU*

Synopsis

Airport is an important infrastructure for air transportation, for runway and taxiway pavement of which an asphalt mixture is usually selected because of the maintenance utility and the construction cost. An aggregate gradation is critical for characteristics of mixture, but in Japan now same gradation is used for roads and airports, so the characteristics of the load particular to airports, such as heavy load and high tire pressure, are not considered enough. For the estimation of mixture performance, such as rutting resistance, permeability and stripping resistance, several tests were made in this study.

According to the results of these tests, the performance of the mixture of the gradation near the boundary between lower limit of surface course and upper limit of binder course regulated in the “civil airport facilities standard specification (Japan CAB)” is relatively good among mixtures. It is necessary to take notice that tests are based on the limited aggregates. To establish more durable mixture, it is important to investigate gradations of other compaction degree and aggregates.

Key Words: asphalt mixture, aggregate gradation, wheel tracking test, test for permeability of asphalt mixture by pressurized water, standard and residual tensile strength test for immersed asphalt mixture

* Head, Pavement Group, Structure Engineering Department

空港舗装における表層アスファルト混合物の骨材粒度に関する 検討

伊豆 太*

要 旨

空港は、高速輸送を支える人流、物流インフラとして重要な機能を果たしている。その基本施設である滑走路、誘導路の舗装については、損傷時の補修の容易性やコストを考慮し、一般に、アスファルト混合物が材料として使用されている。骨材粒度はアスファルト混合物の特性を決める上で重要であるが、空港アスファルト舗装については、道路舗装と同一のものが用いられており大重量でタイヤ圧も高い航空機が走行するなどの空港の特性を必ずしも考慮しているとはいえない状況にある。

本研究では、骨材粒度を変化させ耐流動性、透水性等の性能について、ホイールトラッキング試験など各種室内試験を実施することにより混合物の特性の評価を試みた。

室内試験の結果、現行空港土工共通仕様書の密粒と粗粒の境界付近の骨材粒度のアスファルト混合物の性能が総合的に高い結果となった。

キーワード：アスファルト混合物、骨材粒度、ホイールトラッキング試験、加圧透水試験、標準・残留圧裂強度試験

* 構造研究領域空港舗装研究グループ長

1. まえがき

空港は、高速輸送を支える人流、物流インフラとして重要な機能を果たしている。その基本施設である滑走路、誘導路の舗装については、保守、補修は基本的に夜間航空機の運航が行われない限られた時間内に実施されており、損傷時の補修の容易性やコストを考慮し、一般に、アスファルト混合物が使用されている。

アスファルト混合物は、バインダーであるアスファルトと骨材により主に構成されており、わだち掘れに対する耐流動性、ひび割れに対する耐疲労性などその特性は、両者とその相互作用により決定される。バインダーにその性状を改善された改質アスファルトを使用した場合、一般に耐流動性や耐疲労性が向上するが、コストは、かなり増加する。一方、骨材粒度の変更により性能を改善できる場合には、コストは大きく変わらない。

さて、空港アスファルト舗装の骨材粒度については、空港土木工事共通仕様書¹⁾で定められているが、道路舗装と同一のものが定められている。しかしながら、空港アスファルト舗装は、大重量でタイヤ圧も高い航空機が走行し、また、万が一舗装が破損した場合生じた破片がエンジンに吸引されることにより航空機の故障や場合によっては大事故につながるおそれがある。一方で、幅が広く、勾配は緩やかで交通は一部の区間に集中しているという特徴を有している。

骨材粒度を変えることにより、より空港アスファルト舗装に求められる性能を満足する舗装を実現し、破損の少ない長寿命な舗装を実現できる可能性がある。

空港舗装の性能として、大重量で高い接地圧（タイヤ圧）の航空機の安全な離発着を支え、また、その走行を的確に支持することが求められる。空港舗装は、大重量の航空機を一方で、その幅は滑走路で広いもので60mあり、走行交通量は中心部に集中し、端部については、少ない傾向がある。また、一般にアスファルト混合物は水と荷重が加わった場合はく離が生じるなど水の影響を受けやすいが、滑走路の勾配は平坦であり、幅が広いことに起因して施工目地が多く、これらが経年により開き、水の浸入口となることから、水の影響についても考慮が必要である。また、万が一破損した場合、舗装の破片が航空機エンジンに吸引された場合、エンジンの破損や最悪の場合エンジン停止による事故につながる可能性があることから破損等が生じにくいことも求められる。

本検討では、このような空港舗装に求められる性能を踏まえ、より空港舗装に適した骨材粒度の提案を目的として、現行の粒度やFAA（米国連邦航空局）で用いられ

ている粒度等いくつかの骨材粒度について室内試験等によりその特性の比較を行い、その傾向の把握、評価を試みた。また、細骨材の上下限の粒径（0.075mmおよび2.36mm）の通過重量百分率を変えて、アスファルト混合物の特性にどのような影響を与えるかについて検討を行った。

対象としたアスファルト混合物であるが、本検討では、直接航空機のタイヤ等による作用を受ける表層のアスファルト混合物を対象とすることとし、具体的には空港土木工事共通仕様書に定められる表層混合物のうち一般地を対象とするタイプⅠとした。この混合物の最大粒径は20mmと13mmに大別されるが、空港舗装で用いられるのは20mmが主であるため、本検討では最大粒径20mmの表層アスファルト混合物を検討の対象としている。

2. 骨材粒度について

2.1 最大密度曲線

アスファルト混合物にとって、理想的な骨材粒度がどのようなものかについては、理論的な答えは存在していない。

フラーやトンプソンによると、次式の骨材粒度のときに最大密度を示すといわれている¹⁾。

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad \text{式 1}$$

ここに P ：あるふるい目を通過する骨材量の全骨材量に対する重量比（%）

d ：ふるい目の大きさ

D ：最大粒径

我国においては n は、0.5 とされる²⁾ことが多く、この場合、次式のようになる。

$$P = \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{式 2}$$

この式に基づくと最大粒径から骨材粒度分布が一義的に定まるとともに連続的で滑らかなものとなる。現実的には、フラーの式が参照されることが多く、舗装施工便覧（日本道路協会）³⁾の密粒度の混合物の骨材粒度は、この式に比較的近くなる。

しかしながら、この骨材粒度が最大密度を与えることについては、必ずしも見解は一致していない。また、最大密度を得る粒度分布が、アスファルト混合物について最適ともいえないといわれている。このため、過去の経

験等を加味して骨材粒度は決まっていると考えられる。

なお、FWHA（アメリカ連邦道路管理局）では、nとして0.45を推奨している。FAAのAC150/5370-14B⁴⁾においても0.45の値の記載がある。

2.2 空港土木工事共通仕様書における粒度

空港土木工事共通仕様書⁵⁾（以降共通仕様書という。）においては、骨材粒度は上下限で示されており、グルーピングを施工する表層の骨材粒度は、粒度範囲の上限を用いるのがよいとされている。

共通仕様書においては、空港基本施設表層混合物の骨材粒度として表-1の通り定められている。なお、この粒度は道路舗装における粒度と同一である。

表-1 共通仕様書における基本施設表層骨材粒度

基本施設表層 タイプ I 最大粒径20mm		
ふるい(mm)	通過質量百分率(%)	
26.5	100	—
19.0	95	100
13.2	75	90
4.75	45	65
2.36	35	50
0.6	18	30
0.3	10	21
0.15	6	18
0.075	4	8

2.3 FAAにおける粒度

FAAにおいては、表層用として用いられている Gradation の粒度を表-2に示す。AC150/5370-10G Standards for Specifying Construction of Airports⁶⁾では、表-2の通り定められている。

このうち、Gradaion1, 2が基本施設舗装に用いられる骨材粒度であり、Gradation1は、表面の舗装には用いないとすることで、Gradaion2が一般的な骨材粒度である。（Gradation3は、レベリング層、ショルダー等に用いるものとされている。）

表-2 FAAにおける骨材粒度（AC150/5370-10G⁶⁾より）

Sieve Size	Percentage by Weight Passing Sieves		
	Gradation 1	Gradation 2	Gradation 3
1 inch (25 mm)	100	--	--
3/4 inch (19 mm)	76-98	100	--
1/2 inch (12 mm)	66-86	79-99	100
3/8 inch (9 mm)	57-77	68-88	79-99
No. 4 (4.75 mm)	40-60	48-68	58-78
No. 8 (2.36 mm)	26-46	33-53	39-59
No. 16 (1.18 mm)	17-37	20-40	26-46
No. 30 (0.600 mm)	11-27	14-30	19-35
No. 50 (0.300 mm)	7-19	9-21	12-24
No. 100 (0.150 mm)	6-16	6-16	7-17
No. 200 (0.075 mm)	3-6	3-6	3-6
Asphalt percent:			
Stone or gravel	4.5-7.0	5.0-7.5	5.5-8.0
Slag	5.0-7.5	6.5-9.5	7.0-10.5

The Engineer is only to specify Gradation 3 for leveling course, airfield shoulders, and roadways.]

2.4 スーパーペーブにおける粒度

日本では、あまり用いられていないが、スーパーペーブ（Superior Performing Asphalt Pavements）による配合設計法がある。これは、バインダー及び骨材選定、評価システムと配合設計法を含んでいる。米国 SHRP(Strategic Highway Research Program)の成果である。この設計法は、ジャイレトリコンパクタといわれる締固め機に混合物を入れ、ジャイレーション（旋回）の回数により配合を決定する方法である。この方法では、より現実の施工機械を用いた場合に近い締固めや交通荷重によるニーディングを実現できるとされており、アメリカでは主流となってきたが、試験の費用や労力がかかるためか、日本では普及していない。

本法では骨材粒度について、図-1のようにリストリクティッドゾーンとコントロールポイントが設けられている。リストリクティッドゾーンは、そのゾーンを粒度の分布曲線が通過すべきでないゾーン、コントロールポイントはその間を分布曲線が通過すべきポイントである。リストリクティッドゾーンは、混合物に十分な骨材内の空隙（VMA）を与え、耐久性のため十分なアスファルト被覆厚を形成するためのアスファルト量を確保するために導入された。（最大密度線は望ましいVMAよりも小さなものとなる。）リストリクティッドゾーンを通過するからといって、必ずしもここを通過する全ての混合物が失敗というわけではないともされている。

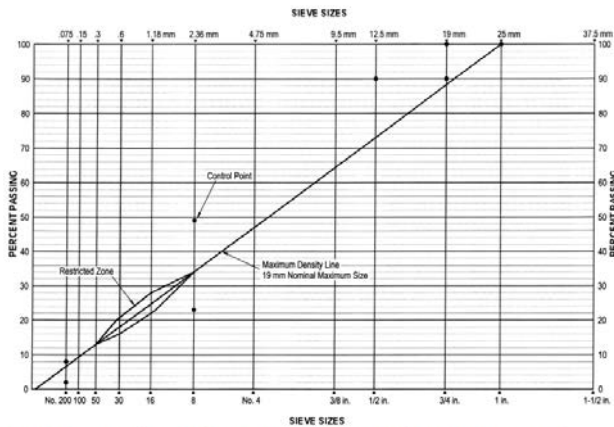


図-1 19mm 名目最大粒径の骨材粒度に対するコントロールポイントとリストラクティッドゾーン：
FAAAC150/5370-14B⁴⁾より

ただし、図-2における曲線Aのようにリストラクティッドゾーンを図縦方向に急角度で通過するような配合は、柔らかかで締固めが困難な混合物となることを防ぐため、避けるべきとされている。

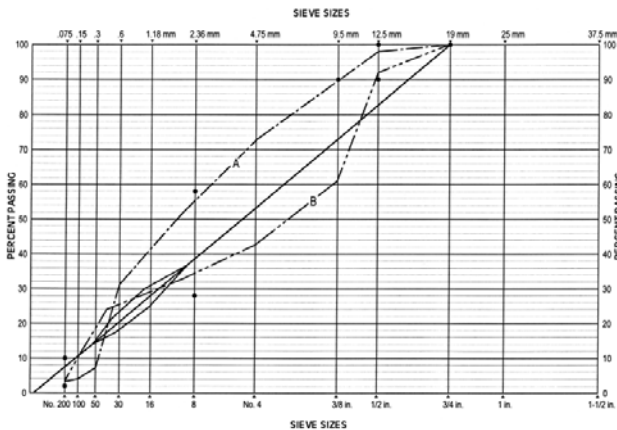


FIGURE 3-4 Examples of aggregate grading that is likely to produce tender mixes.

図-2 柔らかな混合物につながる骨材粒度の例：
FAAAC150/5370-14B⁴⁾より

2.5 日本の表層骨材粒度に関する考察

共通仕様書の骨材粒度範囲について、粒度曲線（上下限及び平均，黒線）にあわせて、リストラクティッドゾーン（茶破線）、コントロールポイント（赤点）、最大密度線を記したものを図-3に示す。コントロールポイントは概ね満足しているが、リストラクティッドゾーンについては、一部（粗い側）が通過している。また、最大密度線として、 n が0.45（ライトブルー）と0.5（青）の場合を示しているが、最大密度線よりも粒度が細かい側に寄っている。Bailey法⁷⁾で考えるとどちらかというト

アイングレードに該当すると考えられる。

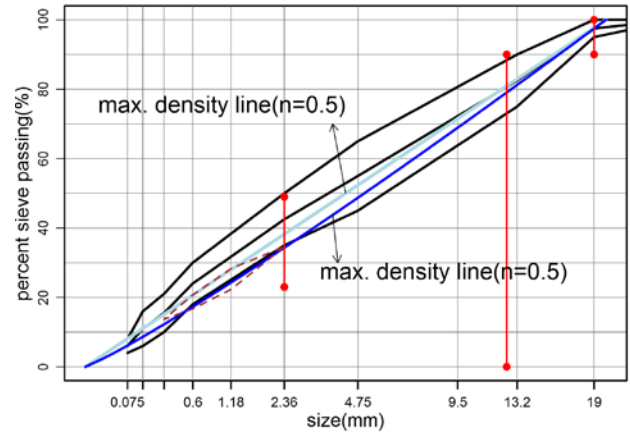


図-3 空港舗装における骨材粒度範囲

3. 室内試験

3.1 使用材料

使用した骨材及びアスファルトを表-3に示す。使用したアスファルトはストレートアスファルト 60/80としたがその物理性状を表-4に示す。

表-3 使用した骨材

材料の種類	製造会社	産地又は製造場所	材質
5号 砕石	笠間砕石(株)	茨城県笠間市	硬質砂岩
6号 砕石	笠間砕石(株)	茨城県笠間市	硬質砂岩
7号 砕石	笠間砕石(株)	茨城県笠間市	硬質砂岩
砕砂	第一石産運輸(株)	東京都西多摩郡檜原村本宿	硬質砂岩
細砂	北総興業(株)	千葉県香取市	陸掘砂
石粉	秩父石灰工業(株)	埼玉県秩父郡横瀬町	タンカル TA149
ストアス 60/80	昭和シェル石油(株)	神奈川県川崎市	ストレートアスファルト

表-4 使用アスファルトの主な物理性状

項目	単位	試験方法	ストレートアスファルト 60/80	
			品質規格	試験値
軟化点	℃	JIS K 2207	44.0~52.0	48.0
伸度 (15℃)	cm	JIS K 2207	100 以上	100 以上
針入度 (25℃)	1/10mm	JIS K 2207	60~80	68.0
薄膜加熱質量変化率	mass%	JIS K 2207	0.6 以下	0.03
薄膜加熱後の針入度残留率	%	JIS K 2207	58 以上	61.8
引火点	℃	JIS K 2207	260 以上	352
密度 (15℃)	g/cm ³	JIS K 2265-4	1.000以上	1.039
動粘度	120℃	mm ² /s	-	871
	150℃		-	206
	180℃		-	68.7
混合温度	(℃)		-	150~156
締固温度	(℃)		-	139~143

試験値はメーカー発行の代表性状を明記

3.2 実験で用いた骨材粒度

試験に使用した各混合物の設定粒度の概要の一覧を、表-5 に示す。

以下混合物の粒度の概要を記載する。

混合物s0は、現行の共通仕様書の表層の中央粒度である。なお、骨材粒度の範囲は、幅をもって定められるが、一般に幅の中央値を目標として配合設計が行われることが多いことから比較のベースは混合物s0とした。

混合物sbは、表層と基層の粒度範囲の境界を目標とした粒度である。

混合物ssは、現行の共通仕様書の表層の粒度の範囲内のS字状の粒度である。

混合物sp1,sp2,sp3については、スーパーペーブといわれるアメリカが実施したSHRPの成果として生まれたアスファルトの規格体系、試験法の変更も含む設計法に基づく粒度である。なお、SHRPとはStrategic Highway Research Program:戦略的道路研究計画:1980年代に荒廃するアメリカの一つとして舗装の損傷がクローズアップされ、80億ドルともいわれる巨額をかけて、主として舗装の供用性を高めるために実施した研究である。

混合物c1,c2,c3については、日本の表層混合物については、細骨材が主骨格を形成し、粗骨材は其中をフロートすることが考えられるため、4.75mm以上の粗骨材部分を変化させた場合の混合物の特性の変化の把握するために実施した粒度である。c1, c2, c3の順で粗い粒度となっている。

混合物faについては、FAA(アメリカ連邦航空局)の定め

る表層粒度(AC150/5370-10G⁹⁾ itemP401 Gradation2)の下限の粒度である。

混合物f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7については、細骨材の上限と下限のふるいの大きさである2.36mmと0.075mmふるい通過分について、系統的に変化させて混合物の特性の変化を把握するために実施した粒度である。

空港表層舗装の混合物に求められる性能として、わだち掘れ等永久変形に対する耐流動性、水による離れに対する耐はく離性、透水性に着目し、室内試験を実施し結果を比較評価することとした。

表-5 各粒度の混合物の概要

混合物種類	概要
混合物s0	表層粒度の中央粒度
混合物sb	基層・表層規定を満足する粒度
混合物ss	表層規定を満足するS字粒度
混合物sp1	スーパーペーブコントロールポイントを満足するS字粒度
混合物sp2	スーパーペーブコントロールポイントを満足する下限粒度
混合物sp3	スーパーペーブコントロールポイントを満足する上限粒度
混合物c1	粗粒分変化粒度①
混合物c2	粗粒分変化粒度②
混合物c3	粗粒分変化粒度③
混合物fa	FAA下限粒度
混合物f1	2.36mmを40%、0.075mmを5%程度にした配合
混合物f2	2.36mmを40%、0.075mmを4%程度にした配合
混合物f3	2.36mmを40%、0.075mmを6%程度にした配合
混合物f4	2.36mmを37.5%、0.075mmを6%程度にした配合
混合物f5	2.36mmを37.5%、0.075mmを5%程度にした配合
混合物f6	2.36mmを45%、0.075mmを5%程度にした配合
混合物f7	2.36mmを32.5%、0.075mmを5%程度にした配合

表-6 および図-4~8にそれぞれ合成粒度と粒度曲線を示す。

表-6 合成粒度(重量通過百分率(%))

混合物種類	ふるい目の開き(mm)											
	2.5	7.5	15	30	4.75	7.5	15	30	4.75	7.5	15	30
混合物s0	100.0	98.6	82.4	68.9	56.6	42.8	32.1	24.1	15.3	8.7	5.8	
混合物sb	100.0	98.7	82.4	65.4	49.9	35.2	26.7	20.5	13.6	8.4	5.8	
混合物ss	100.0	99.3	89.7	77.3	64.6	42.6	28.7	19.7	13.4	8.8	5.7	
混合物sp1	100.0	99.3	89.4	75.6	60.4	31.3	21.2	14.9	10.5	7.4	5.1	
混合物sp2	100.0	97.8	73.6	56.2	40.1	22.7	18.6	15.4	9.8	5.6	3.9	
混合物sp3	100.0	99.3	89.9	77.8	65.8	48.6	39.5	31.7	19.6	10.5	7.0	
混合物c1	100.0	100.0	94.6	74.6	55.7	41.8	31.6	23.8	15.1	8.6	5.7	
混合物c2	100.0	97.9	76.8	64.8	54.5	41.8	31.5	23.8	15.1	8.6	5.7	
混合物c3	100.0	97.3	71.3	61.9	54.1	41.8	31.4	23.8	15.1	8.6	5.7	
混合物fa	100.0	100.0	85.5	67.2	50.0	32.9	21.7	14.3	9.2	5.7	3.5	
混合物f1	100.0	98.7	84.1	70.3	57.0	39.9	29.8	22.4	13.9	7.6	4.9	
混合物f2	100.0	98.7	84.1	70.3	57.1	40.1	29.3	21.5	13.1	6.7	4.1	
混合物f3	100.0	98.7	84.1	70.3	56.9	40.0	31.1	24.2	15.5	8.8	6.0	
混合物f4	100.0	98.7	83.8	68.6	54.1	37.5	29.8	23.7	15.1	8.5	6.0	
混合物f5	100.0	98.7	83.8	68.6	54.1	37.5	29.7	23.4	14.2	7.2	4.8	
混合物f6	100.0	98.7	84.1	70.3	57.8	45.0	32.5	23.6	14.7	8.1	4.9	
混合物f7	100.0	98.7	83.3	66.4	50.2	32.5	26.6	21.5	13.4	7.3	5.0	
表層規定値	100	95~100	75~90	-	45~65	35~50	-	18~30	10~21	6~16	4~8	

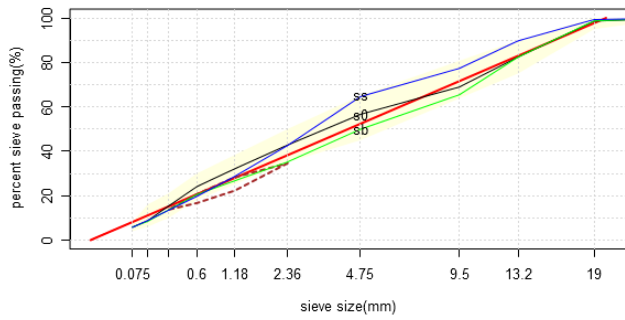


図-4 粒度曲線図（合成粒度：混合物 s0,sb,ss）

※図中赤実線は、最大密度曲線.

茶破線は、スーパーペーブにおけるリスト
リクティッドゾーン.

黄色多角形は、表層の粒度範囲.

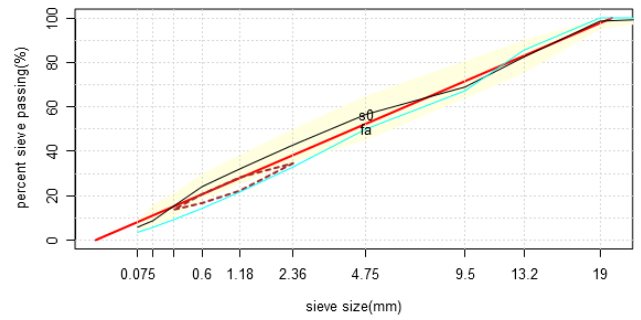


図-7 粒度曲線図（合成粒度：混合物 fa）

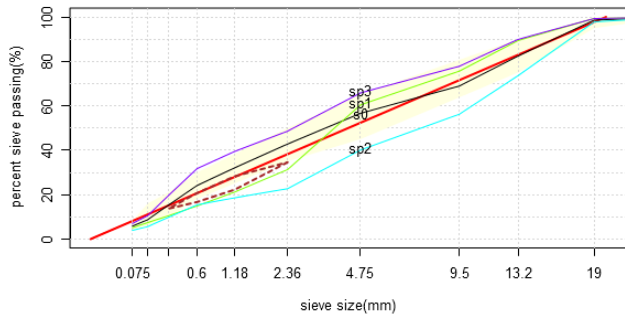


図-5 粒度曲線図（合成粒度：混合物 sp1,sp2,sp3）

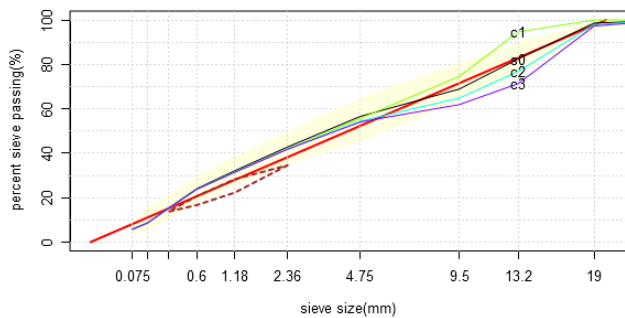


図-6 粒度曲線図（合成粒度：混合物 c1,c2,c3）

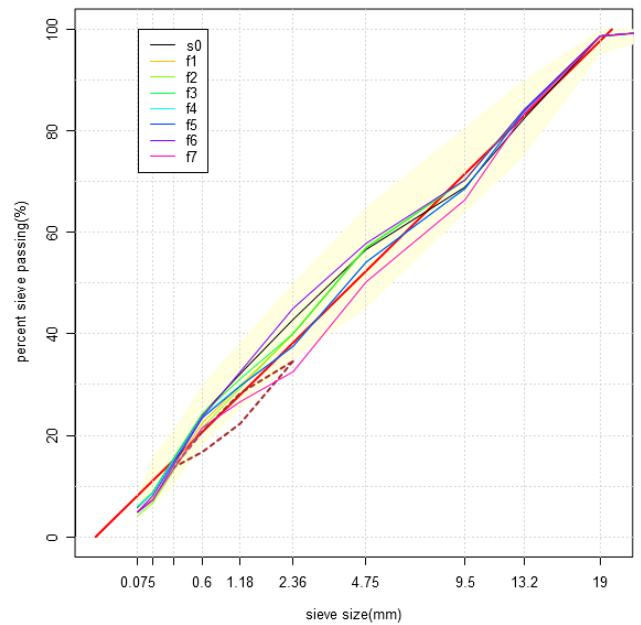


図-8 粒度曲線図（合成粒度：混合物 f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7）

3.3 試験方法

(1) WT 試験

配合設計した各混合物について、締固め度 $98.0 \pm 0.5\%$ の範囲内で供試体を作製した。WT 供試体の作製方法および試験方法は「舗装調査・試験法便覧⁸⁾」の「B003 ホイールトラッキング試験方法」に準拠して行った。各混合物につき3体で評価した。

载荷荷重については、686N（標準圧）と1028N（高圧）とした。高圧の試験については、当所航空機荷重载荷対応ホイールトラッキング試験機（写真-1, 2）を用いて試験を実施した。試験温度は 60°C とした。载荷状況を写真-3に示す。

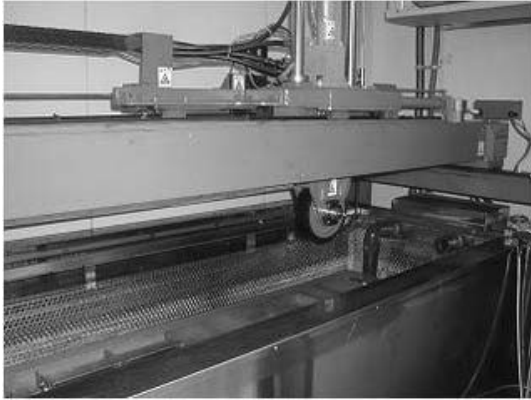


写真-1 航空機荷重対応 WT 試験機 (1)



供試体

写真-2 航空機荷重対応 WT 試験機 (2)

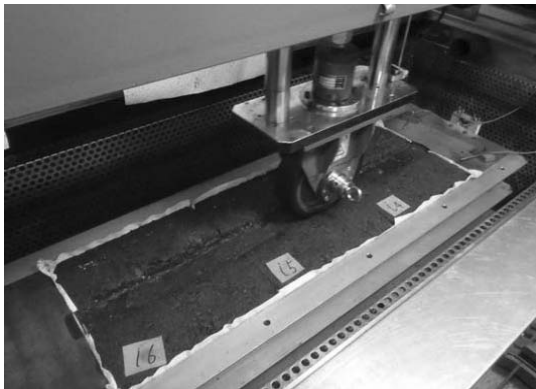


写真-3 载荷状況

(2) 加圧透水性試験

作製したマーシャル供試体を使用して加圧透水試験を実施した。試験は、「舗装調査・試験法便覧⁸⁾ B017T」の「(2) 瀝青材料などのシーリング材を使って防止する方法」に準拠して実施した。各混合物につき 3 体で評価した。締固め度は 98% とした。

(3) 標準・残留圧裂強度試験

標準・残留圧裂強度試験は、ASTM D4867/D4868M-04

(図-9) に準拠して実施した⁹⁾。供試体数はそれぞれ 3 体とした。また、水分飽和度（空隙に対する空隙中の水の体積比率）は、原則として 55% 以上を目標とした。締固め度は 98% とした。

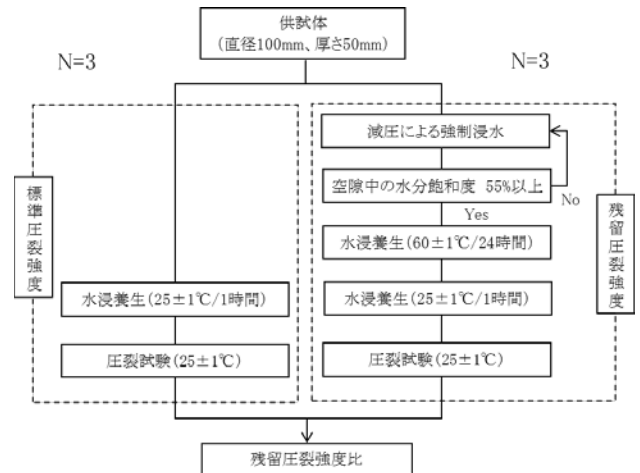


図-9 ASTM D4867/D4868M-04 のフロー

図-9 部に示す圧裂試験については、「舗装調査・試験法便覧⁸⁾」の「B006 圧裂試験方法」に基づき実施した。

4. 試験結果

4.1 マーシャル安定度等の混合物の性状

各配合に関するマーシャル試験結果等を表-7、図-10 に示す。

マーシャル安定度について、値と舗装構造や耐久性との関係性は必ずしも明確ではないが、混合物 s0 と比較して、混合物 fa の安定度が特に低い値を示した。

表-7 最適アスファルト量におけるマーシャル性状

混合物種類	マーシャル性状		
	As量 (%)	空隙率 (%)	安定度 (kN)
混合物s0	5.3	3.0	11.08
混合物sb	4.9	2.7	10.62
混合物ss	5.7	3.4	9.57
混合物sp1	5.6	5.1	10.52
混合物sp2	5.0	4.1	10.33
混合物sp3	5.3	3.4	10.12
混合物c1	5.2	3.1	10.73
混合物c2	5.3	3.1	12.75
混合物c3	5.3	2.9	11.93
混合物fa	5.9	4.2	8.33
混合物f1	5.5	3.1	10.08
混合物f2	5.8	3.3	9.52
混合物f3	5.1	2.7	10.9
混合物f4	5.0	2.9	11.75
混合物f5	5.4	2.8	10.55
混合物f6	5.7	3.3	10.85
混合物f7	5.2	3.1	9.75

表-8 WT 試験結果

混合物種類	標準圧	高圧	②/①
	DS(回/mm)①	DS(回/mm)②	
混合物s0	880	210	0.24
混合物sb	1800	310	0.17
混合物ss	790	180	0.23
混合物sp1	610	130	0.21
混合物sp2	1030	360	0.35
混合物sp3	830	250	0.30
混合物c1	950	320	0.34
混合物c2	840	210	0.25
混合物c3	660	230	0.35
混合物fa	510	180	0.35
混合物f1	820	160	0.20
混合物f2	980	160	0.16
混合物f3	940	250	0.27
混合物f4	860	270	0.31
混合物f5	680	210	0.31
混合物f6	410	140	0.34
混合物f7	720	300	0.42

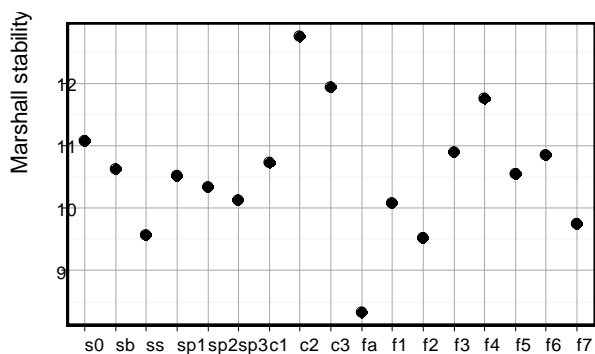


図-10 混合物種類とマーシャル安定度

4.2 WT 試験結果

WT 試験結果を表-8 および図-11~13 に示す。低圧の WT 試験については、混合物 s0 と比較すると、混合物 sb が動的安定度 (DS) について高い値を示した。また、混合物 sp1, fa, f6 が比較的低い値を示した。高圧については、混合物 s0 と他の混合物の差は小さくなる傾向を示すが、sb, sp2, c1, f7 が比較的高い値を示した。

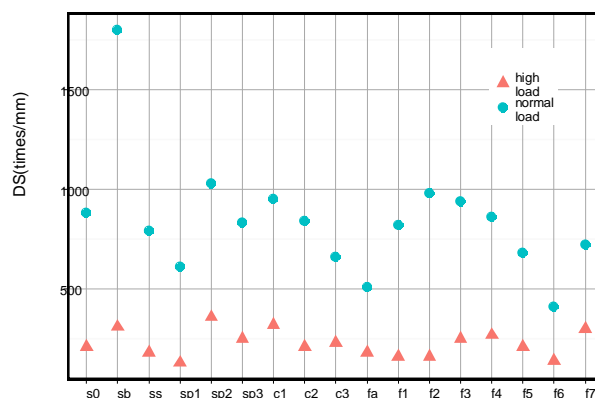


図-11 WT 試験結果 (動的安定度 : DS)

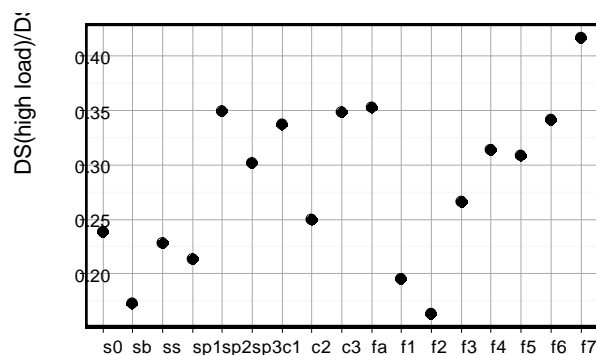


図-12 WT 試験結果 (高圧 DS/標準圧 DS)

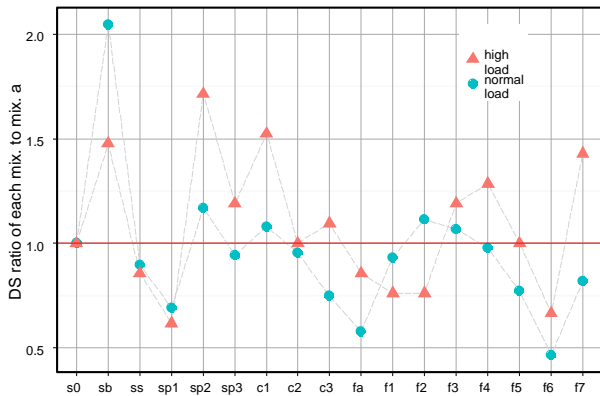


図-13 WT 試験結果 (混合物 s0 の DS に対する比)

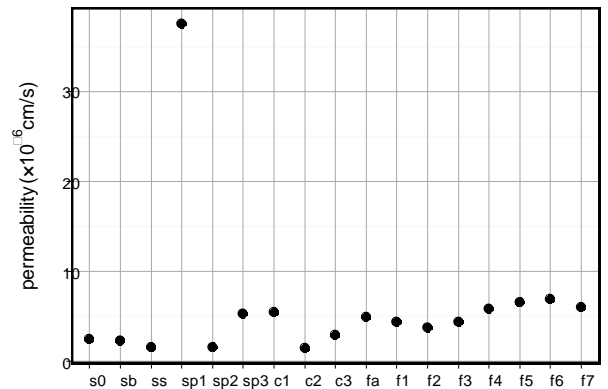


図-14 混合物種類と透水係数

4.3 加圧透水試験結果

試験結果を表-9 および図-14 に示す。混合物 s0 と比較すると、混合物 sp1 の透水係数が他と乖離した高い値を示した。

また、図-15 に空隙率と透水係数の関係を示すが、混合物 sp1 を除いた場合、空隙率と透水係数の間に明確な相関は見られなかった。なお、混合物 sp1 については、空隙率が特に大きくなったため、透水係数が高くなったものと考えられる。

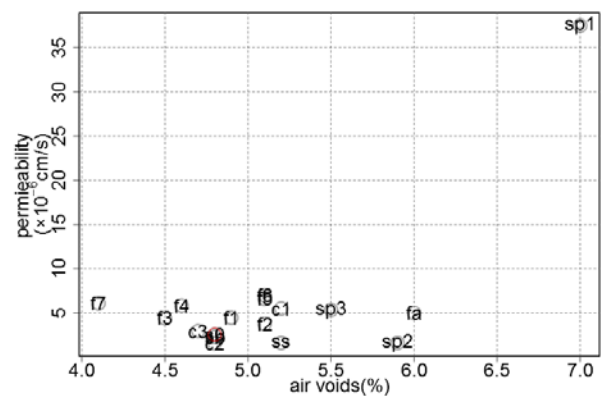


図-15 空隙率と透水係数の関係

表-9 加圧透水試験結果

混合物種類	空隙率 (%)	透水係数 (cm/s)
混合物s0	4.8	2.53.E-06
混合物sb	4.8	2.29.E-06
混合物ss	5.2	1.59.E-06
混合物sp1	7.0	3.75.E-05
混合物sp2	5.9	1.59.E-06
混合物sp3	5.5	5.32.E-06
混合物c1	5.2	5.48.E-06
混合物c2	4.8	1.53.E-06
混合物c3	4.7	2.94.E-06
混合物fa	6.1	4.97.E-06
混合物f1	4.9	4.44.E-06
混合物f2	5.1	3.72.E-06
混合物f3	4.5	4.40.E-06
混合物f4	4.6	5.81.E-06
混合物f5	5.1	6.58.E-06
混合物f6	5.1	6.97.E-06
混合物f7	4.1	6.06.E-06

4.4 標準・残留圧裂試験結果

標準・残留圧裂試験の結果の一覧を表-10 に示す。この試験は、一般に混合物の水によるはく離に対する抵抗性の試験である。

表-10 圧裂試験結果

混合物種類	標準 (Mpa)	残留 (Mpa)	残留圧裂強度比
混合物s0	0.774	0.52	0.67
混合物sb	0.825	0.578	0.70
混合物ss	0.792	0.523	0.66
混合物sp1	0.595	0.403	0.68
混合物sp2	0.682	0.34	0.50
混合物sp3	0.792	0.368	0.46
混合物c1	0.764	0.432	0.57
混合物c2	0.729	0.405	0.56
混合物c3	0.786	0.624	0.79
混合物fa	0.579	0.354	0.61
混合物f1	0.745	0.524	0.70
混合物f2	0.749	0.38	0.51
混合物f3	0.831	0.545	0.66
混合物f4	0.745	0.611	0.82
混合物f5	0.782	0.619	0.79
混合物f6	0.725	0.371	0.51
混合物f7	0.751	0.574	0.76

図-16 に、混合物種類と標準・残留圧裂強度の関係を示す。図中青が標準圧裂強度を、赤が残留圧裂強度を示す。標準圧裂強度について、標準の混合物 s0 と比較して、混合物 sp1, sp2, fa が低い値を示した。残留圧裂強度については、混合物 sb, ss, c3, f1, f3, f4, f5, f7 が比較的高い値を示した。標準圧裂強度と残留圧裂強度の比 (TSR) について図-17 に示すが、混合物 sp2, sp3, c1, c2, f2, f6 が低い値を示した。

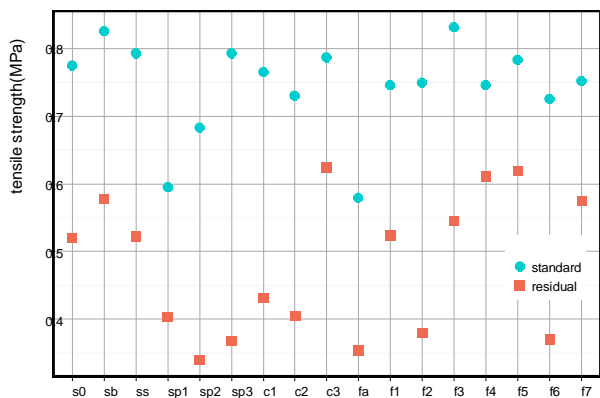


図-16 混合物種類と標準・残留圧裂強度の関係

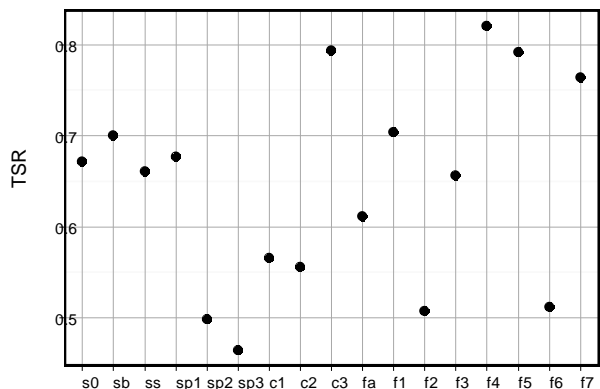


図-17 混合物種類と標準・残留圧裂強度比 (TSR) の関係

4.5 混合物毎の特性

実験結果について、混合物毎に混合物 s0 と比較した特性を評価する。

- (1) 混合物 sb は、動的安定度について、高圧/低圧が若干低いものの、混合物 s0 と比較して総合的に性能が高い結果となった。
- (2) 混合物 ss は、現行の共通仕様書の表層の粒度の範囲内の S 字状の粒度であるが、混合物 s0 と大きな違いはなかった。
- (3) 混合物 sp1~sp3 については、スーパーペープに基づく粒度であるが、混合物 sp1 については、動的安定度 (DS) および透水係数が、混合物 sp2, sp3 については、標準・

残留圧裂試験の結果が混合物 s0 に劣る結果となった。本来のスーパーペープ設計法には、骨材の規格、供試体の作成方法等我が国のマーシャル設計法とは異なっている部分も多く、粒度に関する部分だけを使用したことも一因と考えられる。

(4) 混合物 c1~c3 については、4.75mm 以下の粒度についてはほぼ同一とし、4.75mm 以上の分について c1(s0),c2,c3 の順で粗くなっていく粒度であるが、動的安定度 (DS) については、粗さと逆の傾向を示し、標準・残留圧裂強度比 (TSR) については、概ね粗い程大きくなる傾向を示した。一般的に粒度曲線の上を通過するほど粒度は細かく、下は粗くなり、一般に粗い混合物ほど耐流動性が高くなると言われているものの粒度によっては必ずしもこうした傾向にあるわけではないことがわかった。この原因については、更なる検討が必要であるが、粗い粒径の成分がより細かい粒径の成分により形成される混合物の骨格構造になんらかの影響を与えている可能性があると考えられる。

(5) 混合物 fa については、混合物 s0 と比較して、9.5mm 以上が粗めの粒度であるが、全体として、混合物 s0 に劣る結果となった。

(6) 混合物 f1~f7 については、図-18 に示すように 2.36mm ふるい通過量を 40%として、0.075mm ふるい通過量を 5, 4, 6%と変化させた粒度である。図-19, 20 に動的安定度 (標準) 及び残留・圧裂強度比 (TSR) を示す。

まず、0.075mm 通過量の影響をみるため、混合物 f1,f2,f3 と f4,f5 の 2つの群について比較を行う。(図-18 の縦方向に混合物の比較を行うことに該当する)

2.36mm 通過量が 40%の f1, f2, f3 については、動的安定度(DS)について、0.075mm 通過量が中間の 5%である混合物 f1 が、3者の中で最も低く、また混合物 s0 と比べても低い値を示したが、0.075mm 通過量がそれぞれ 4,6%の混合物 f2,f3 については、混合物 s0 より大きく、同程度であった。標準・残留圧裂強度比 (TSR) については、f1,f3 は混合物 s0 と同程度であったが、2.36mm 通過量が 4%と最も低い混合物 f2 は混合物 s0 よりも低い値を示した。

続いて、2.36mm 通過量が 37.5%と同一の f4,f5 についてみると、0.075mm 通過量が多い程、動的安定度は高くなり、また両者とも混合物 s0 より小さかった。標準・残留圧裂強度比 (TSR) については、両者の値はほぼ同程度で、混合物 s0 より高い値を示した。

このことから、0.075mm ふるい通過分が、耐剥離性、耐流動性に影響することがわかる。動的安定度については、0.075mm 通過量が中間の 5%の場合が低く、これか

ら 4.5%と増減した場合大きな値を示す可能性があることがわかる。標準・残留圧裂強度比については、0.075mm が 5.6%の場合に、2.36mm 通過量が同じであればほぼ同程度であるが、4%となると大きく低下する可能性があることがわかる。

・次に 2.36mm 通過量の影響をみるため、混合物 f1,f5,f6,f7 と f3,f4 の 2つの群について比較を行う。(図-18 の横方向に混合物の比較を行うことに該当する)

0.075mm ふるい通過量が 5%と同一であり、2.36mm 通過量がそれぞれ 40, 37.5, 45, 32.5%である混合物 f1,f5,f6,f7 を比較すると、どの混合物も動的安定度は混合物 s0 と比較して低い値を示したものの、2.36mm 通過量が 45%と最も高い混合物 f6 の動的安定度の値が最も低く、40%の混合物 f1 の値が最も高かった。標準・残留圧裂強度比についてみてみると、混合物 f6 の値だけが混合物 s0 と比較して低かった。混合物 f6 は f1,f5,f6,f7 のの中では、最も細かい混合物であり、耐流動性が低くなることは混合物の一般的な傾向と一致しているが、標準・残留圧裂強度比の低下の原因は不明であり、その解明にはさらなる検討が必要である。

続いて、0.075mm ふるい通過量が 6%と同一であり、2.36mm 通過量がそれぞれ 40, 37.5%である混合物 f3,f4 についてみてみると、動的安定度については、混合物 f4 は混合物 s0 と同程度の値であるが、混合物 f3 については、大きな値を示した。標準・残留圧裂強度比についてみてみると、f3 は混合物 s0 と同程度であったが、f4 は大きな値を示した。

このことから、2.36mm ふるい通過分が、耐剥離性、耐流動性に影響することがわかる。動的安定度については、0.075mm 通過量が 5%の場合についてであるが、2.36mm 通過量が 45%の場合に大きく低下する可能性があることがわかる。また、標準・残留圧裂強度比については、0.075mm が 5%の場合に、2.36mm 通過量が 45%となると大きく低下する可能性があることがわかる。

・2.36mm 通過量及び 0.075mm 通過量と混合物特性である耐流動性、耐はく離の関係については、2.36mm 通過量と 0.075mm 通過量のどちらかが増えると特性の値が単純に増加するのではなく両者の間に相互作用があるとともに非線形の関係であることがわかった。このことから、配合において、2.36mm 通過量及び 0.075mm 通過量が増えた場合大きな影響を及ぼす可能性があるため留意が必要であると考えられる。

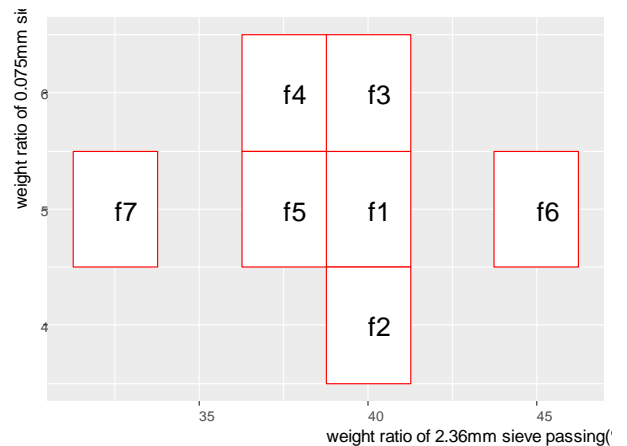


図-18 混合物 f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7 の 0.075mm と 2.36mm ふるい通過重量百分率

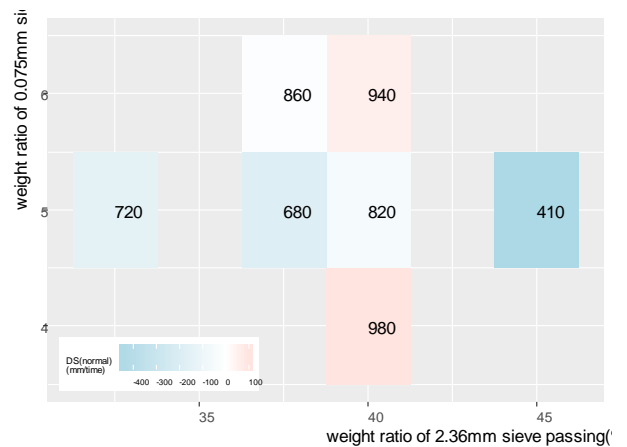


図-19 0.075mm と 2.36mm ふるい通過重量百分率と動的安定度 DS(標準)の関係 (混合物 s0 の値は 880, 図中赤は s0 の値より大きく、青は小さいことを意味する)

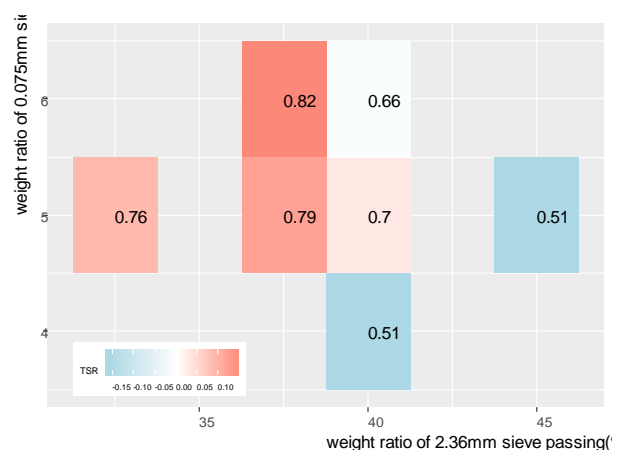


図-20 0.075mm と 2.36mm ふるい通過重量百分率と圧裂強度比 TSR の関係 (混合物 s0 の値は 0.67, 図中赤は s0 の値より大きく、青は小さいことを意味する)

5. 考察

粒径等の指標と混合物特性との関係について整理を行った。

粒径等の指標として、土質で用いられている D_{10} 、 D_{50} 、 D_{60} 、 U_c 、 U_c' を用いることとした。ここで、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{60} は、それぞれ、重量通過百分率が、10%、50%、60%となる粒径である。また、 D_{10} は有効径、 D_{50} は平均径とも呼ばれる。 U_c は、 D_{60}/D_{10} で、 U_c' は、 $D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$ で定義され、それぞれ均等係数、曲率係数とも呼ばれる。

粒径等と動的安定度との関係を図-21 (a), (b)に示す。動的安定度（標準）と D_{50} 、 U_c について弱い相関関係が見られた。また、動的安定度（高圧）と D_{50} 、 D_{60} 、 U_c について相関関係が見られた。基本的に粒径が大きくなるほど、 U_c が大きくなる、すなわち粒度が一樣でない程動的安定度が大きくなる傾向が見られた。

(図-21 (a), (b))

一方、透水性については図-22に示すが、 U_c 、 U_c' との間で相関が見られた。相関係数の値からは、 U_c が大きい、粒度が非一樣になる程透水係数が小さくなる傾向を示すこととなるが、外れ値的な値の点の影響を受けた可能性があり留意が必要である。

また、TSRについては、図-23に示す通り、指標等との相関が見られなかった。

なお、相関の強弱については、相関係数はあくまで直線的な相関関係についての目安であることに留意しつつ、表-11を踏まえ相関係数を判断の目安とした。

表-11 相関係数の絶対値と相関の強さ

相関係数の絶対値	相関関係の強さ
0~0.2	ほとんど相関がない
0.2~0.4	弱い相関
0.4~0.7	相関
0.7~1	強い相関

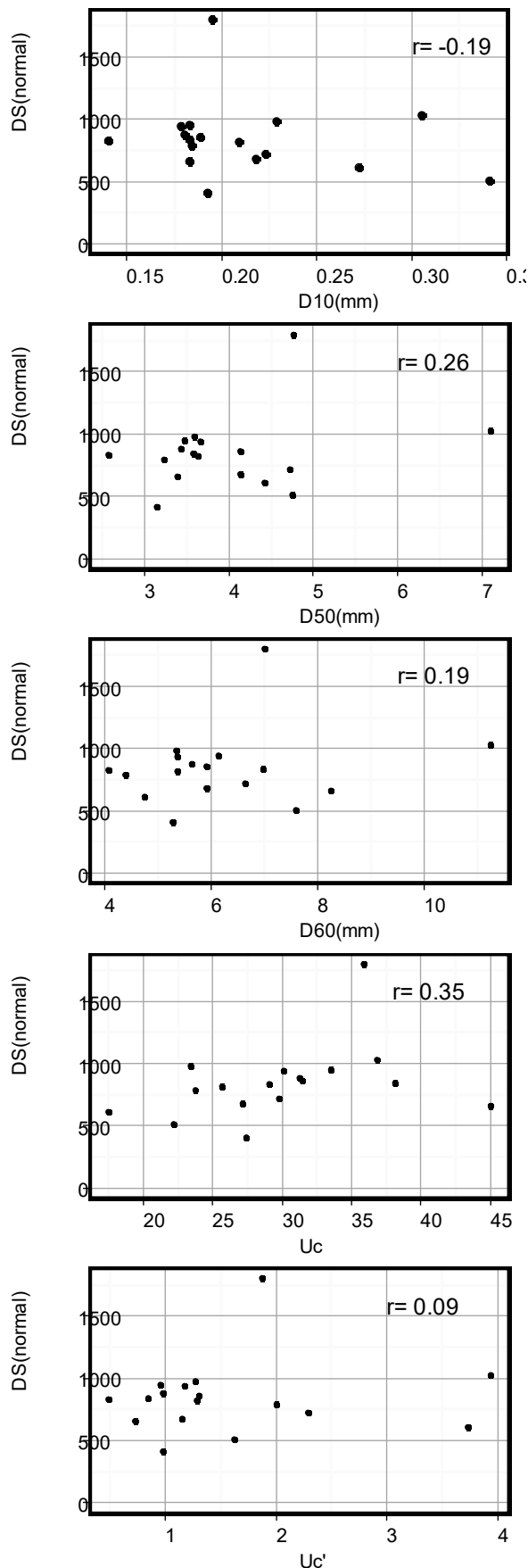


図-21 (a) 粒径等と動的安定度（標準圧）の関係

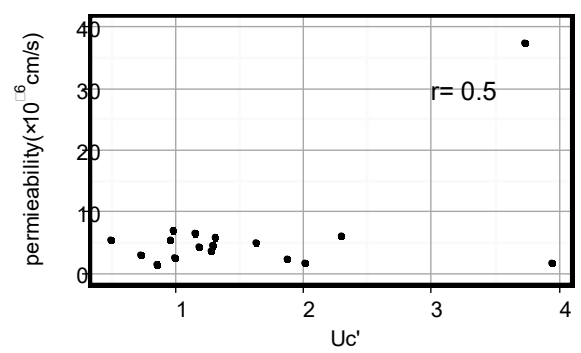
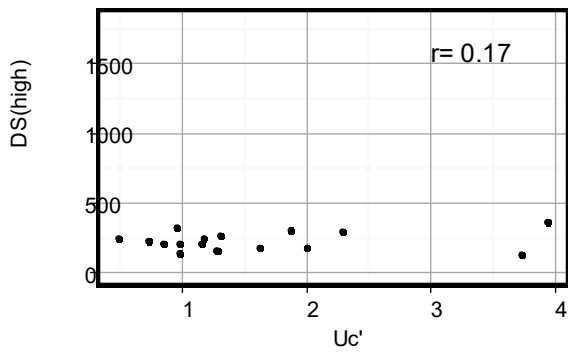
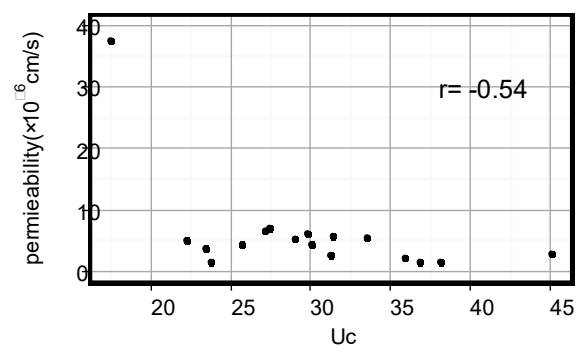
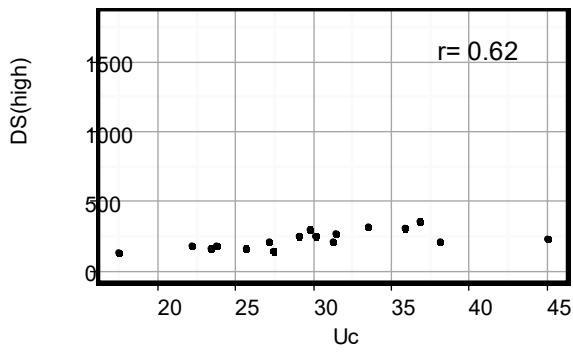
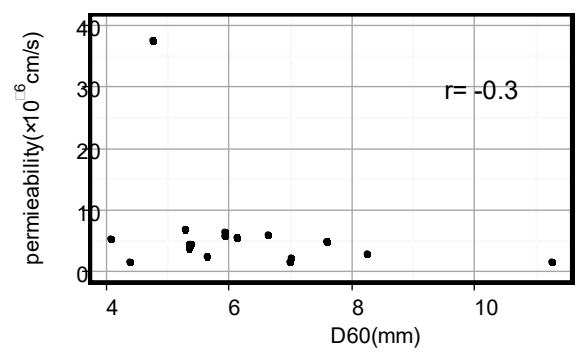
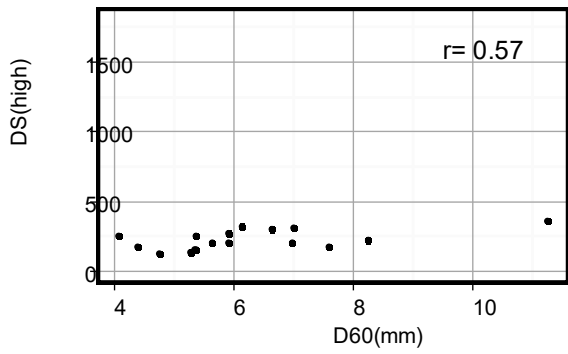
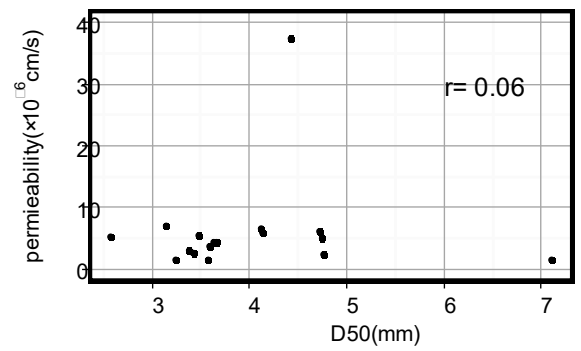
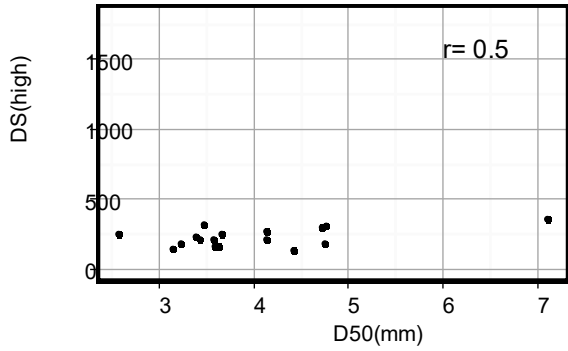
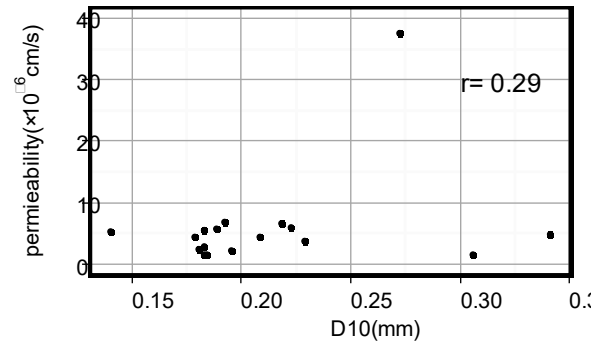
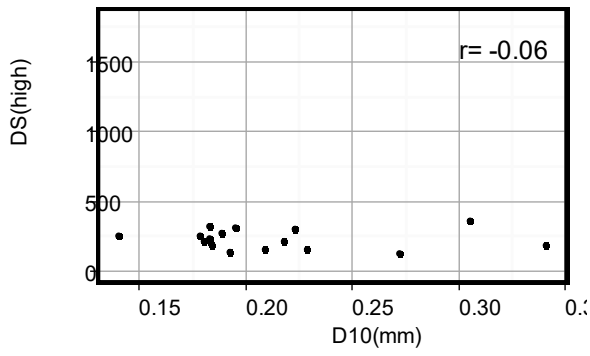


図-21 (b) 粒径等と動的安定度(高圧)の関係

図-22 粒径等と透水係数との関係

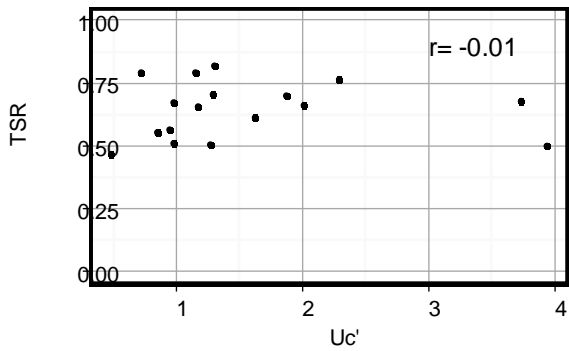
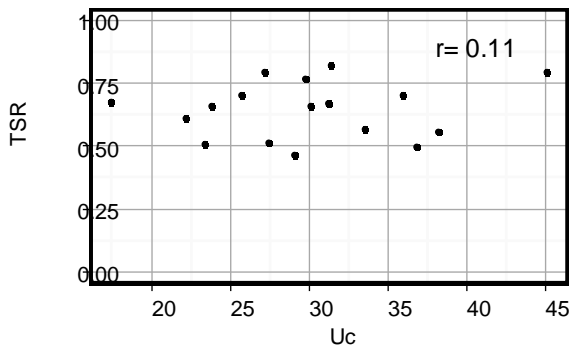
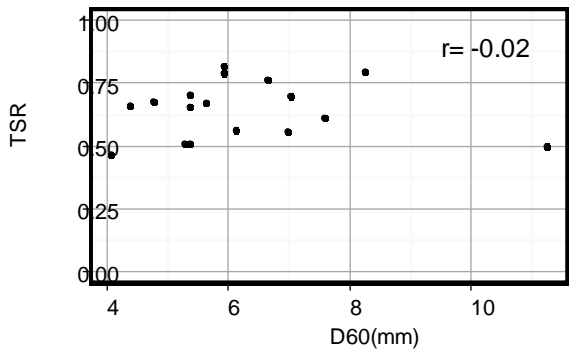
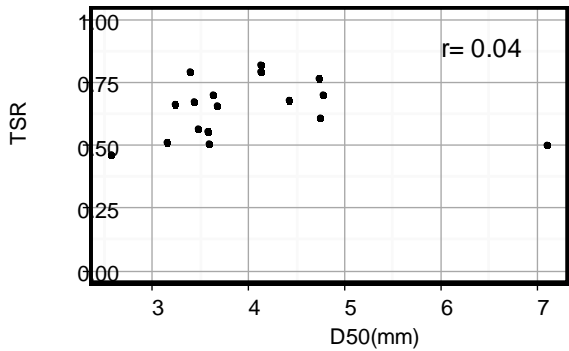
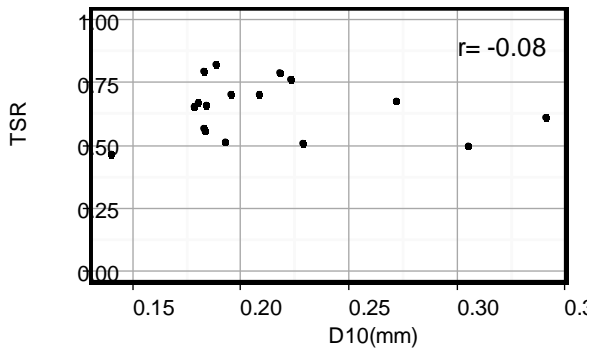


図-23 粒径等とTSRとの関係

6. まとめ

実験結果の一覧を表-12に示す。黄色の網掛け部は混合物s0の赤色の網掛け部は、ホイールトラッキング試験、加圧透水試験、標準・残留圧裂強度試験について、混合物s0より性状が優れている部分を示す。また、混合物種類とその概要(表-5)を再掲する。

表-12 実験結果の一覧

混合物種類	マーシャル性状			ホイールトラッキング試験		加圧透水試験		標準・残留圧裂試験		
	As量 (%)	空隙率 (%)	安定度 (kN)	通常 DS(回/mm)	高圧 DS(回/mm)	透水係数 ($\times 10^{-5}$ cm/s)	標準 (MPa)	残留 (MPa)	残留圧裂強度比	
混合物s0	5.3	3.0	11.08	880	210	2.53	0.77	0.52	0.67	
混合物sb	4.9	2.7	10.62	1800	310	2.29	0.83	0.58	0.70	
混合物ss	5.7	3.4	9.57	790	180	1.59	0.79	0.52	0.66	
混合物sp1	5.6	5.1	10.52	610	130	37.5	0.60	0.40	0.68	
混合物sp2	5.0	4.1	10.33	1030	360	1.59	0.68	0.34	0.50	
混合物sp3	5.3	3.4	10.12	830	250	5.32	0.79	0.37	0.46	
混合物c1	5.2	3.1	10.73	950	320	5.48	0.76	0.43	0.57	
混合物c2	5.3	3.1	12.75	840	210	1.53	0.73	0.41	0.56	
混合物c3	5.3	2.9	11.93	860	230	2.94	0.79	0.62	0.79	
混合物fa	5.9	4.2	8.33	510	180	4.97	0.58	0.35	0.61	
混合物f1	5.5	3.1	10.08	820	180	4.44	0.75	0.52	0.70	
混合物f2	5.8	3.3	9.52	980	180	3.72	0.75	0.38	0.51	
混合物f3	5.1	2.7	10.9	940	250	4.40	0.83	0.55	0.66	
混合物f4	5.0	2.9	11.75	860	270	5.81	0.75	0.61	0.82	
混合物f5	5.4	2.8	10.55	680	210	6.58	0.78	0.62	0.79	
混合物f6	5.7	3.3	10.85	410	140	6.97	0.73	0.37	0.51	
混合物f7	5.2	3.1	9.75	720	300	6.06	0.75	0.57	0.76	

表-5 各粒度の混合物の概要

混合物種類	概要
混合物s0	表層粒度の中央粒度
混合物sb	基層・表層規定を満足する粒度
混合物ss	表層規定を満足するS字粒度
混合物sp1	スーパープコントロールポイントを満足するS字粒度
混合物sp2	スーパープコントロールポイントを満足する下限粒度
混合物sp3	スーパープコントロールポイントを満足する上限粒度
混合物c1	粗粒分変化粒度①
混合物c2	粗粒分変化粒度②
混合物c3	粗粒分変化粒度③
混合物fa	FAA下限粒度
混合物f1	2.36mmを40%、0.075mmを5%程度にした配合
混合物f2	2.36mmを40%、0.075mmを4%程度にした配合
混合物f3	2.36mmを40%、0.075mmを6%程度にした配合
混合物f4	2.36mmを37.5%、0.075mmを6%程度にした配合
混合物f5	2.36mmを37.5%、0.075mmを5%程度にした配合
混合物f6	2.36mmを45%、0.075mmを5%程度にした配合
混合物f7	2.36mmを32.5%、0.075mmを5%程度にした配合

骨材粒度について、各種粒度を比較検討したところ、骨材の形状や表面の特性による影響もあると考えられるため、骨材が異なった場合について留意が必要である。今回の試験結果からは、表層と基層の境界に近い粒度(混合物sb)の性能が総合的に高かった。表層混合物の場合、耐流動性も重要であるが、耐水性も重要であり、今後この粒度を中心としつつ、実際の現場配合のばらつきや施工時の締固め度のバラツキを考慮し、粒度やアスファルト量が変動した場合や締固め度が変動した場合について引き続き検討を行うことが必要である。

また、効果的な骨材粒度や効果的な骨材配合方法の実現に向けて、引き続き検討を行うとともに、特定のふるい目の骨材比率が変動した場合等の影響に関する系統的検討が必要である。

さらに、粒径等と混合物特性との関係について若干の

検討を行い、弱い相関等が見られたが、これらの指標から混合物特性を予測するまでにはまだまだ至っていない状況である。このため、引き続き、こうした検討にあたり、例えばBaileyの指標等⁷⁾をあわせて検討するなど粒度の特性を表す指標とあわせて特性を体系的に検討、整理していく必要がある。

最後に、これまで、特定の粒径の重量通過百分率等がアスファルト混合物の特性に与える影響については十分な検討がなされてきているとは必ずしも言えない状況である。今回、限られた骨材についての結果ではあるが、表層の下限に近い粒度が一般的に用いられる中央粒度の混合物性状よりも優れた結果が得られ、配合における粒度の選定に関する有益な知見を得ることができた。

7. おわりに

本検討結果は、あくまで限定された骨材に対する試験結果であり、実際のアスファルト混合物の施工の際には、材料特性のバラツキを有する地域固有の様々な骨材、施工の品質管理規定の範囲内でアスファルト混合物は配合・製造されることとなる。あらゆる現場条件について検討を行うことは現実的には費用、時間の点で不可能である。また、実際の製造時においては、いくつかの碎石等骨材を組み合わせて目標粒度を設定し、配合を決定することとなるが、各骨材等の構成比の調整の限界等を含め実用性現実的に実際に配合できることについても当然考慮しなければならない。

このため、次の段階の検討として、本検討結果から総合的な性能が高いと思料される粒度sbを中心に、粒度が上下に振れた場合、骨材種類や締固め度等が変わった場合について検討を行う予定である。このことにより、滑走路、誘導路といった空港基本施設の表層舗装に適したアスファルト混合物の骨材粒度より耐久性が高く、長寿命な空港舗装の実現に資することが期待できると考える。

(2018年8月10日受付)

謝辞

検討の実施にあたり、国土交通省航空局の皆様、遠藤調査課長をはじめとする関東地方整備局横浜技術調査事務所の皆様、東京国際空港整備事務所の皆様には暖かいご指導を頂いた。また、国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室河村主任研究官には、資料のとりまとめにあたり有益な情報・意見交換等の相手となっていた。また、長岡技術科学大学の高橋教授には、ご

多忙のところ、貴重なご示唆をいただいた。

さらに、実験補助業務を担当したアールテックコンサルタント鈴木課長には、試験条件や実験の実施にあたり色々工夫と配慮をいただいた。

以上の方々にこの場をお借りして深く感謝の意を表明いたします。

参考文献

- 1) Pavement Design and Materials: A.T.Papagiannakis and E.A.Masad Algal Cultures and Phytoplankton Ecology, 2nd Ed., Univ. of Wisconsin Press, 175p.
- 2) 南雲貞夫, 阿部頼政 土木学会編新体系土木工学 27 歴青系材料 技報堂出版 pp. 99-104
- 3) 社団法人 日本道路協会 (2007): 舗装施工便覧, pp.208-209.
- 4) FAA. (2013): 150/5370-14B - Hot Mix Asphalt Paving Handbook
- 5) 国土交通省航空局 (2008): 空港土木工事共通仕様書, pp. 41.
- 6) FAA(2014): AC 150/5370-10G - Standards for Specifying Construction of Airports
- 7) Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design: TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR Number E-C044 October 2002 Transportation Research Board
- 8) 社団法人 日本道路協会 (2007): 舗装調査・試験法便覧, pp.208-209.
- 9) 河村直哉・森川 嘉之・伊豆 太・坪川 将丈(2015), 港湾空港技術研究所資料No. 1315, 既設アスファルト混合物のはく離抵抗性評価方法の検討, pp. 37-68.
- 10) 国土交通省航空局: 空港舗装設計要領

港湾空港技術研究所資料 No.1350

2018. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2018) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。