

1.はじめに

近年、空港アスファルト舗装の表基層において、層間剥離あるいはブリスタリングが発生する事例¹⁾²⁾が見受けられる。これらの現象は、主にオーバーレイ工事を実施した翌年度の夏季に発生している事例が多い。層間剥離あるいはブリスタリングが発生している箇所では表基層間に付着していないため、航空機が走行した際に写真-1のようなスリッページを発生させる原因となる。

まず、層間剥離とブリスタリングは、現象を分けて考える必要がある。層間剥離とは、数層にわたって施工されるアスファルト混合物層間の付着が切れている状態を指す。一方、ブリスタリングとは、アスファルト混合物内に滞留した水分が熱せられ蒸発するも、アスファルト混合物の空隙率が低下し内部から逃げることが出来ない時、その蒸気圧により舗装表面が盛り上がる現象を指す。道路舗装では、空隙がほとんどない水密性に優れたグースアスファルトが用いられる橋面舗装において、ブリスタリング現象に関する報告が多い³⁾。久保ら¹⁾の研究では、ブリスタリングが発生する目安として、アスファルト混合物内の含水比が1%を超える場合としているが、通常時にどの程度の水分がアスファルト混合物層に滞留するのかは不明である。また、安倍ら²⁾は、舗装温度が60°C程度まで上昇した際の蒸気圧をアスファルト混合物供試体の下面から局所的に載荷した実験を行っているが、この際の蒸気圧は、アスファルト混合物を上方に数mm持ち上げる程度の圧力ではあるものの、アスファルト混合物層間の引張付着強度と比べるときわめて小さい圧力であることを示している。このことから、蒸気圧だけでブリスタリングが発生するとは考えにくく、ブリスタリングが発生する前には、まず層間剥離が発生しているものと考えられた。

この層間剥離の原因の一つとして、何らかの要因によりアスファルト混合物層間に散布したタックコートが十分な付着力を発揮していないことが考えられた。これは空港舗装工事特有の施工条件の厳しさが原因となっている可能性があり、十分な付着力が確保されるのに必要なタックコートの種類や養生条件を明らかにする必要がある。

また、層間剥離やブリスタリングが発生した舗装の調査では、既設舗装のアスファルト混合物の性状を把握することが行われる。この過程において既設表基層のコアを採取し、各種の力学試験や性状試験を実施するが、マーシャル安定度試験を実施する上で採取したコアが標準の供試体厚(63.5mm)に満たない場合が多い。マーシャ

ル安定度は供試体厚に大きく依存するため、現在は道路舗装の分野で得られているマーシャル安定度と供試体厚の関係を用いて、マーシャル安定度の補正を実施している。しかしながら、空港アスファルト舗装では、道路アスファルト舗装と異なり、表基層として最大骨材寸法20mmのアスファルト混合物を使用する例が多く、空港用のマーシャル安定度補正表が必要となっている。

以上の背景から、本研究では、施工後のアスファルト舗装において、通常の雨水がどの程度アスファルト混合物層間に滞留するかの現場試験を実施した。また、アスファルト混合物層間に散布するタックコートの種類、養生方法等に着目し、これらがアスファルト混合物層間の付着力に及ぼす影響について、各種試験により検討を行った。さらに、空港舗装用の供試体厚を考慮したマーシャル安定度の補正方法について検討した。



写真-1 2000年7月の名古屋空港滑走路の破損

2. 水分量に関する試験

空港アスファルト舗装のアスファルト混合物内にどの程度水分が滞留しているかが不明であることから、本試験では屋外に試験舗装を製作し、アスファルト混合物内に滞留する水分量を計測した。

2.1 供試体採取

水分量測定用供試体の採取は、独立行政法人港湾空港技術研究所野比実験場の既設アスファルト舗装で実施した。雨水を想定し、人為的に舗装を浸水させる前後でコアを採取し、浸水の影響がアスファルト混合物内の水分量にどの程度影響するのかを検討した。

既設舗装の平面図(供試体採取位置)を図-1に、断面図を図-2に示す。既設舗装の表層は密粒度アスファルト混合物(骨材最大粒径13mm)および大粒径アスファルト混合物(最大骨材粒径30mm)、基層は粗粒度アスファルト混合物であった。

まず、ドライカッターで浸水前供試体(表層、基層)

を既設表層面より厚さ 15cm（表層 10cm 基層 5cm）程度採取し、ビニール袋に入れて養生した。その後、厚さ 10cm の表層を 5cm だけ切削し、切削部に水を貯めることでアスファルト混合物を 3 日間程度浸水させた。排水後、舗装表面が表乾状態となった時点で浸水後供試体（表層、基層）を切削面より厚さ 10cm（表層 5cm 基層 5cm）程度採取し、ビニール袋に入れて養生した。供試体寸法は、大粒径区間で骨材最大粒径を考慮し直径 150mm、他の密粒区間と基層部では直径 100mm で、試験個数は浸水前後で表基層各 12 ヶとした。

各供試体とも採取後直ちに質量測定、100°C の乾燥炉で 72 時間乾燥後に質量測定をし、含水比を求めた。含水比は乾燥前質量と乾燥後質量から、次式により算出した。

$$\text{含水比}(\%) = (W_1 - W_0) / W_0 \times 100$$

ここに、

W_1 ：乾燥前質量 (g)

W_0 ：乾燥後質量 (g)

また、浸水状況を写真-2 に、試験時の気象も含水比に影響することから気象状況を図-3 に示す。

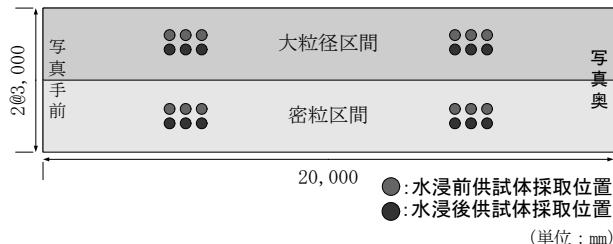


図-1 既設舗装平面図（供試体採取位置図）



図-2 既設舗装断面図



写真-2 屋外実験場での浸水状況

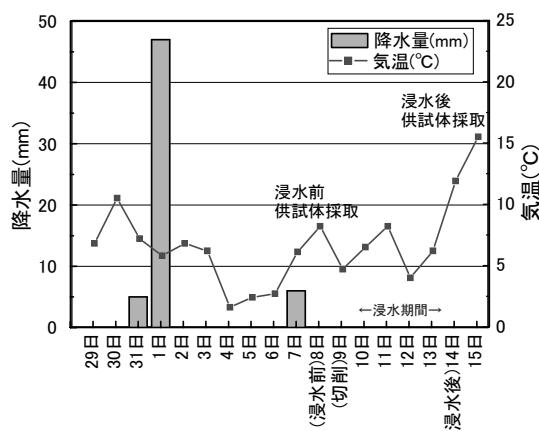


図-3 試験中の気象状況

2.2 試験結果

(1) 試験結果

各工区で採取した供試体の平均含水比を図-4 に示す。まず、浸水前後では表層で浸水後に若干の含水比の増加が見られるが、逆に基層では浸水後に含水比が減少している。この原因としては供試体採取時に基層の底面で確認された水分が、基層の浸水前含水比を上げる影響を与えたと考えられる。この水分は試験前にほとんど降雨がないこと、供試体採取にはドライカッターを使用したことから以前の雨水が滯水していたと考えられる。また、表基層では基層の方が含水比が高い。表基層で含水比が大きく違うのは底面で確認された水分が一つの要因と考えられるが、水分を保持する上で各層の空隙率(表層 : 2.4%，基層 : 6.4%)も要因と考えられる。

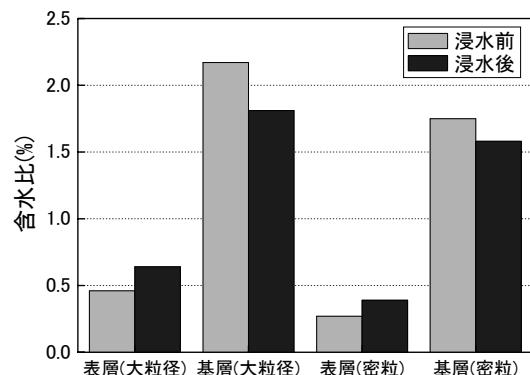


図-4 水分量試験結果

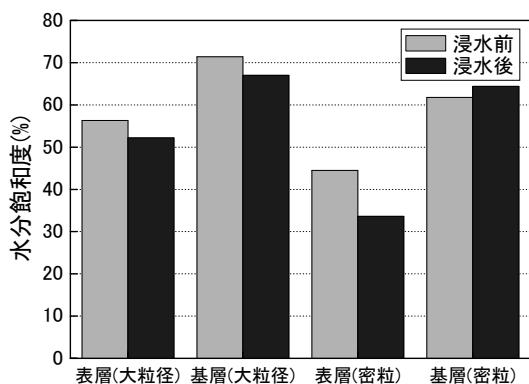


図-5 水分飽和度比較結果

(2) 空隙率を考慮した水分量の検討

各材料の空隙率による影響を考慮すべく、水分量試験で蒸発した水分が全てアスファルト混合物の空隙に存在していたものと仮定した場合の水分体積(cm^3)をアスファルト混合物の空隙体積(cm^3)で除することで求まる水分飽和度(%)で比較を行った。これは、米国におけるストリッピング（アスファルト混合物における骨材とアスファルトバインダの剥離）の事例に関してまとめられた研究報告⁹⁾においても、アスファルト混合物の空隙率を考慮した水分量評価手法として用いられている。比較結果を図-5に示す。水分飽和度で整理すると、表層と基層の差はそれほど大きくはなく、アスファルト混合物の元々の空隙体積の影響が大きいと考えられる。また、各層における浸水前後の水分飽和度の違いは供試体採取時に存在した水分の影響も考えられるが、3日間浸水した影響は少ない。

(3)まとめ

既往の研究¹⁾では、ブリスタリングが懸念される場合の含水比の目安は1%以上とされているが、今回採取した供試体の含水比は、基層において2%程度を示していた。このことから、アスファルト混合物は、通常の環境状態であっても1%以上の含水比となることはそれほど珍しくないと考えられる。また、含水比は混合物の空隙率によっても大きく異なると考えられることから、アスファルト混合物内の水分量を定量的に把握するためには、混合物の空隙率を考慮する必要があると考えられる。

しかしながら、安倍ら²⁾が実施した蒸気圧相当の圧力によるアスファルト混合物の変形実験では、水分が蒸発した際の蒸気圧をボイル・シャルルの法則から算出しており、この蒸気圧(0.01MPa程度)は混合物層間の層間

付着強度と比較してはるかに小さいと考えられる。このことから、ブリスタリングの原因を考える場合、含水比が高いことよりも、層間において十分な付着が得られているか否かに着目する必要があると考えられる。

3. 層間付着強度に関する試験

アスファルト混合物層間の付着力を検証すべく、現場採取供試体や室内作製供試体を用いて検討をした。ここでは、アスファルト乳剤の散布に関する様々な条件を変えて作製した供試体による付着強度試験結果から、十分な付着強度を得るために必要な条件を明らかにすることを目的とした。

室内試験(その1)では、乳剤種類、養生時間等が引張強度、せん断強度に及ぼす影響について検討し、室内試験(その2)では、乳剤種類に加え、乳剤を散布する既設舗装表面の状態の影響が引張強度、せん断強度に及ぼす影響について検討した。

3.1 室内試験(その1)

(1) 使用材料

a) アスファルト混合物

試験に用いたアスファルト混合物は、空港土木工事共通仕様書⁸⁾で規定されている密粒度アスファルト混合物(骨材最大粒径20mm)を使用した。アスファルトはストレートアスファルト60~80を、骨材粒度は目標空隙率を2%と5%で配合した。骨材配合率は表-1のとおりで、骨材粒度は図-6のようになった。各骨材配合率による最適アスファルト量は、表-2に示す試験結果より、それぞれ6.4%, 4.9%とした。なお、目標空隙率5%配合は試験結果より空隙率4.6%相当となったが、以後の資料は簡易に5%と記載する。

b) アスファルト乳剤

試験に用いたアスファルト乳剤は一般的に使用されるPK-4と改質系アスファルト乳剤を使用した。PK-4はJIS K 2208に適合したもの、改質系アスファルト乳剤は製造会社が独自規格したものである。両規格値を表-3に示す。

(2) 試験舗装作製

試験にあたり前述の野比実験場に供試体採取用の試験舗装を作製した。作製は水分量試験用供試体採取後、密粒度アスファルトを1層舗設した。また、舗装界面には各種乳剤散布を行った。製作試験舗装の平面図を図-7に、断面図を図-8に示す。乳剤散布量は既設アスファルト舗

装時の散布量である $0.3\ell/m^2$ とした⁴⁾。養生時間は PK-4 については比較対象として 15 分、30 分としたが、その他は一律 30 分とした。なお、「バーナー加熱」区画では、乳剤散布前に既設舗装表面をバーナーで加熱してから乳剤散布を行ったが、その他の区画では、散布前に既設舗装表面を加熱していない。

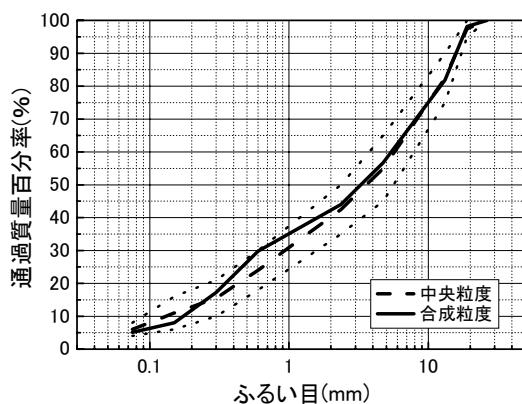
表-1 骨材配合率

密粒度アスファルト混合物(20) 目標空隙率 2%

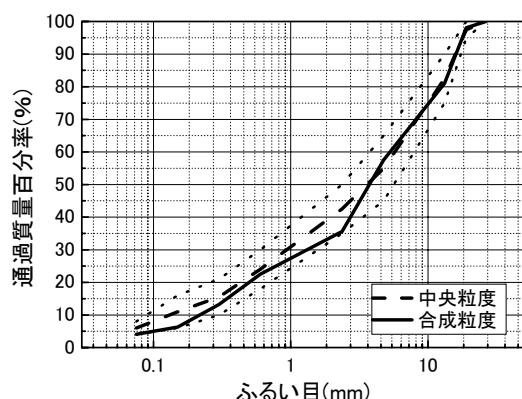
材料	5号碎石	6号碎石	7号碎石	砕砂	細砂	石粉
配合率 (%)	19	25	12	20	19	5

密粒度アスファルト混合物(20) 目標空隙率 5%

材料	5号碎石	6号碎石	7号碎石	砕砂	細砂	石粉
配合率 (%)	20	22	24	17	13	4



密粒度アスファルト混合物(20) 目標空隙率 2%



密粒度アスファルト混合物(20) 目標空隙率 5%

図-6 骨材粒度

表-2 アスファルト混合物の配合試験

密粒度アスファルト混合物(20) 目標空隙率 2%

As量 (%)	密度(g/cm ³)		空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/100cm)
	理論	見掛け				
4.5	2.515	2.363	6.0	63.0	13.33	26
5.0	2.496	2.369	5.1	69.1	13.67	27
5.5	2.478	2.384	3.8	76.8	13.00	27
6.0	2.460	2.385	3.0	82.1	12.67	27
6.5	2.442	2.397	1.8	89.3	14.33	34

密粒度アスファルト混合物(20) 目標空隙率 5%

As量 (%)	密度(g/cm ³)		空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/100cm)
	理論	見掛け				
4.0	2.537	2.358	7.1	56.2	11.33	26
4.5	2.518	2.365	6.1	62.8	13.67	28
5.0	2.500	2.388	4.5	71.9	13.33	29
5.5	2.481	2.398	3.3	79.4	13.67	28
6.0	2.463	2.406	2.3	85.8	14.67	34

表-3 アスファルト乳剤の規格値

項目		PK-4	改質系アスファルト乳剤
エンゲラー度(25°C)		1~6	1~10
ふるい残留分(1.18mm, %)		0.3 以下	0.3 以下
付着度		2/3 以上	2/3 以上
粒子の電荷		陽(+)	陽(+)
蒸発残留分(%)		50 以上	50 以上
蒸発	針入度(25°C)	60 を超え 150 以下	10 を超え 30 以下
残留	トルエン可溶分(%)	98 以上	—
物	軟化点	—	48 以上
貯蔵安定度(24 時間, %)		1 以下	—

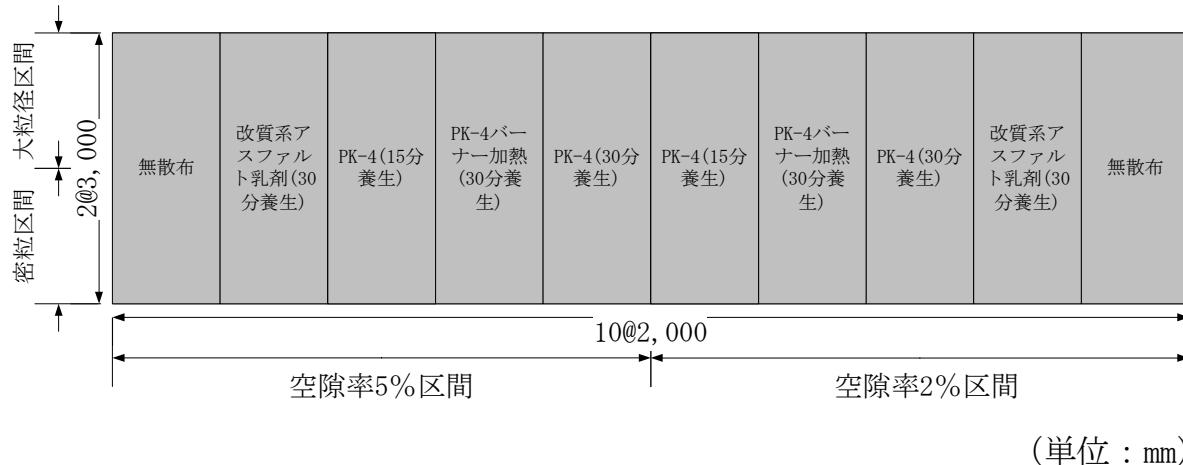


図-7 作製試験舗装平面図

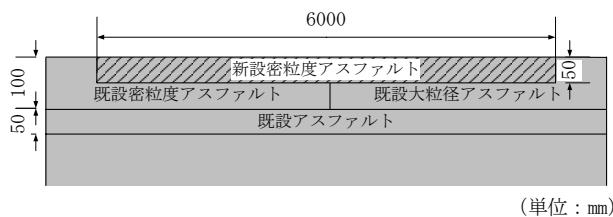


図-8 製作試験舗装断面図

表-4 試験条件

供試体	新設部空隙率(%)	養生時間(min)	散布乳剤
1~2	2.0 又は 5.0	30	無散布
3~4		15	PK-4
5~6		30	
7~8		30	PK-4(ペーナー加熱)
9~10		30	改質系 As 乳剤

*PK-4 は養生時間により 15 分を①、30 分を②とした。



写真-3 引張強度試験状況



写真-4せん断強度試験状況

(3) 試験方法

a) 引張強度試験(気中養生と水浸養生)

供試体寸法は直径 100mm, 高さ 100mm で, 各種条件毎に試験個数は 3 ヶとした. 供試体作製条件を表-4, 試験実施状況を写真-3 に示す.

まず, 構築した試験舗装より直径 100mm のコアボーリングを実施した. コアボーリング終了後, 20°C 気中養生又は 60°C 48 時間水浸養生後, 接着剤(エポキシ樹脂)により供試体表面に治具を取り付け, 20°C にて 1 日気中養生した後に試験を実施した. 試験は恒温槽で試験温度 20°C に保ち, 載荷速度 1mm/min とした.

b) せん断試験(気中養生と水浸養生)

供試体寸法は直径 100mm, 高さ 100mm で, 各種試験毎に試験個数は 3 ヶとした. 供試体作製条件は引張強度試験と同様である. 試験実施状況を写真-4 に示す.

まず, 構築した試験舗装より直径 100mm のコアボーリングを実施した. コアボーリング終了後, 20°C 気中養生又は 60°C 48 時間水浸養生後, 供試体に治具を取り付け試験を実施した. 試験は恒温槽で試験温度 20°C に保ち, 載荷速度 1mm/min とした.

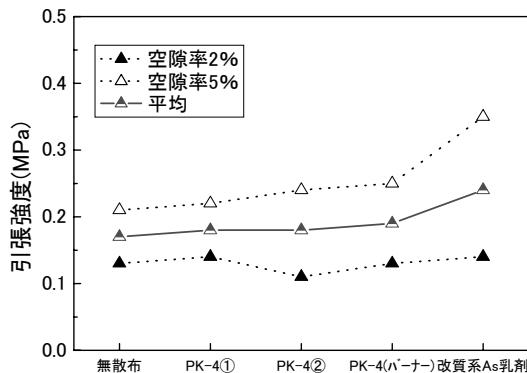


図-9 敷布乳剤と引張強度(気中養生)

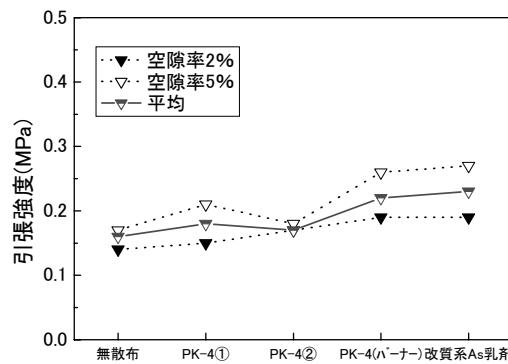


図-10 敷布乳剤と引張強度(水浸養生)

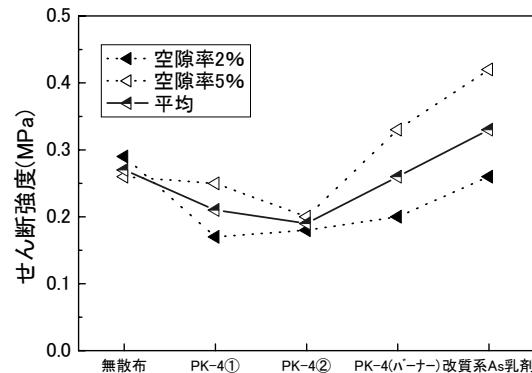


図-11 界面処理方法とせん断強度(気中養生)

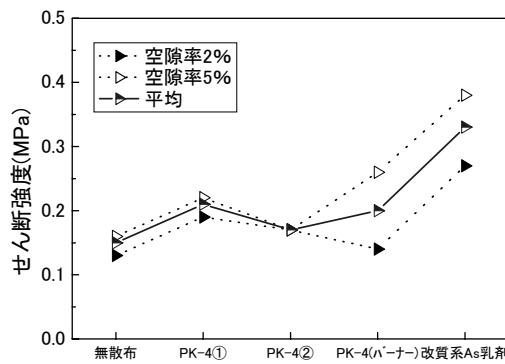


図-12 界面処理方法とせん断強度(水浸養生)

(4)引張強度試験結果

散布乳剤と引張強度の関係を図-9, 図-10に示す。両結果より以下の3項目に着目した。

a)材料仕様(空隙率)による違い

気中養生供試体・水浸養生供試体のどちらにおいても、混合物の空隙率が高い方が発現強度は高い結果となった。

b)養生時間による違い

本試験ではPK-4の養生時間を15分と30分の2種類比較したが、養生時間による違いはさほどない。また、同じ30分養生したPK-4と改質系アスファルト乳剤を比較すると改質系アスファルト乳剤の方が発現強度は高い結果となった。

c)散布乳剤による違い

養生時間30分で比較した場合、無散布<PK-4<PK-4(バーナー加熱)<改質系アスファルト乳剤の順に発現強度が高い結果となった。

(5)せん断試験結果

散布乳剤とせん断強度の関係を図-11, 図-12に示す。

引張強度試験同様に3項目に着目をした。

a)材料仕様(空隙率)による違い

無散布とPK-4では同程度の値となったが引張強度試験同様に空隙率が高い方が発現強度は高い結果となった。

b)養生時間による違い

PK-4における養生時間の違い(15分と30分)は、15分養生の方が発現強度は若干高いが、それほど大きな差ではない。同養生時間では引張強度試験同様に改質系アスファルト乳剤を用いた方が発現強度は高い結果となった。

c)散布乳剤による違い

養生時間30分で散布乳剤を比較した場合、気中養生の場合は、無散布の発現強度が若干高い結果となったが、全体を見ると上位は安定しておりPK-4<無散布<PK-4(バーナー加熱)<改質系アスファルト乳剤の順に発現強度が高い結果となった。

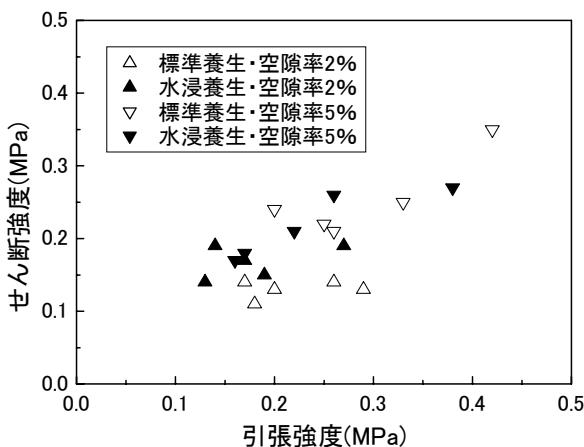


図-13 せん断強度と引張強度の関係

表-5 散布乳剤と界面破断の関係(()内は平均引張強度)

	界面(個)	界面以外(個)	界面以外 破断率(%)
無散布	21(0.17)	3(0.13)	13
PK-4	24(0.18)	0	0
PK-4(バーナー加熱)	23(0.21)	1(0.19)	4
改質系As乳剤	9(0.25)	15(0.23)	63

*界面とは基層と表層間による破断、界面以外とは基層内又は表層内の破断を示す。



写真-5 改質系乳剤使用時の破断状況



写真-6 PK-4 使用時の破断状況

(6)引張強度とせん断強度の相関

アスファルト混合物層間の剥離要因となるのは界面に作用する引張応力およびせん断応力であると考えられる。このうち、航空機の走行によりアスファルト混合物層界面に発生するのはせん断応力が主であると考えられるが、せん断強度試験は一般的に実施されている試験ではない。試験自体も引張強度試験の方が簡易であることから、まず引張強度とせん断強度の関係について確認した。結果を図-13に示す。先程述べた空隙率による違いは分かるが、両試験結果には明確な相関が認められない。これは、引張試験とせん断試験では供試体の破壊のメカニズムが異なるため、両試験強度の相関性がそれほど高くなきものと考えられる。

(7)界面破断状況

強度試験を実施した供試体の界面破断状況の目視確認を行った。せん断試験においては、層間がせん断面となるように試験を実施していることから、破断が全て界面部となつたため、引張強度試験に関する結果のみ示す。

供試体作製条件と界面破断状況の関係を表-5に、界面破断状況を写真-5、写真-6に示す。界面で破壊した供試体の引張強度と界面以外で破壊した引張強度の平均値を比較すると、両者にそれほど大きな差は生じていない。しかしながら、無散布、PK-4、PK-4(バーナー加熱)については、ほぼ全ての供試体が界面で破壊していたが、改質系アスファルト乳剤使用時は界面以外での破壊が多くなっている。このことから、改質系乳剤を使用した場合は、PK-4を使用した場合よりも十分な付着が得られているものと考えられ、その効果は、引張強度よりもむしろ破断形態により明確に判断できると考えられる。

(8)室内試験(その1)のまとめ

乳剤種類や養生時間等を変えて試験を実施した結果、15分あるいは30分程度の養生時間では、無散布の場合と比較して明確な強度の差は確認できなかった。これは、PK-4を散布してから乳剤内の水分が完全に蒸発するまでは、昼間で1時間、夜間で6時間程度が必要であること⁵⁾から、30分程度の養生では不十分であると考えられる。一方、改質系乳剤を用いた場合には、30分程度の養生時間であってもPK-4よりも付着強度が高いことが確認された。さらに、改質系乳剤を使用することによる効果は破断形態に明確に現れ、改質系乳剤を用いることにより層間の付着強度を高めることができると考えられる。

表-6 骨材配合率

材料	5号 碎石	6号 碎石	7号 碎石	碎砂	粗砂	細砂	石粉
配合率 (%)	18	27	12	16	16	8	3

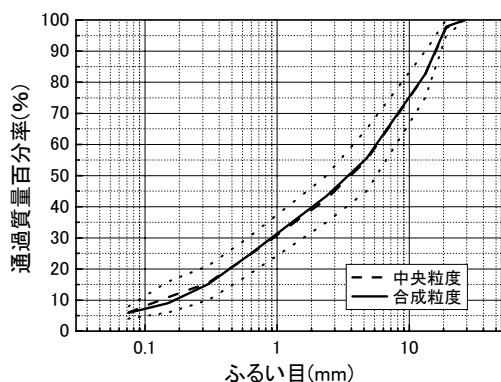


図-14 骨材粒度

表-7 アスファルト混合物の配合試験

密粒度アスファルト混合物(20)

As量 (%)	密度(g/cm³)		空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/100cm)
	理論	見掛				
4.0	2.531	2.352	7.1	56.3	12.45	22
4.5	2.512	2.373	5.5	65.1	12.26	24
5.0	2.494	2.394	4.0	74.4	13.01	26
5.5	2.476	2.404	2.9	81.3	13.05	28
6.0	2.457	2.415	1.7	89.2	12.79	33

改質アスファルトII型(20)

As量 (%)	密度(g/cm³)		空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/100cm)
	理論	見掛				
4.0	2.531	2.361	6.7	57.6	16.31	24
4.5	2.512	2.372	5.6	64.8	16.42	26
5.0	2.493	2.395	3.9	74.7	16.10	28
5.5	2.475	2.407	2.7	82.4	16.19	32
6.0	2.457	2.418	1.6	89.7	15.00	34

表-8 骨材配合率

材料	5号 碎石	6号 碎石	7号 碎石	碎砂	粗砂	細砂	石粉
配合率 (%)	20	37	15	10	10	5	3

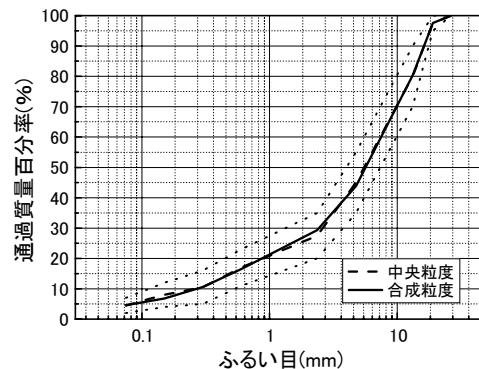


図-15 骨材粒度

表-9 アスファルト混合物の配合試験

粗粒度アスファルト混合物(20)

As量 (%)	密度(g/cm³)		空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/100cm)
	理論	見掛				
3.5	2.553	2.358	7.6	51.2	10.81	27
4.0	2.534	2.363	6.7	57.6	11.77	31
4.5	2.515	2.371	5.7	64.3	12.66	34
5.0	2.497	2.380	4.7	71.0	11.79	36
5.5	2.478	2.401	3.1	80.5	10.51	39

3.2 室内試験(その2)

(1) 使用材料

a) 表層用アスファルト混合物

試験に用いた表層用アスファルト混合物は、空港土木工事共通仕様書⁸⁾で規定されている密粒度アスファルト混合物（骨材最大粒径20mm）と改質アスファルトII型（骨材最大粒径20mm）を使用した。アスファルトはストレートアスファルト60～80と改質II型アスファルトを使用した。骨材配合率は共に表-6のとおりで、骨材粒度も共に図-14のようになつた。骨材配合率による最適アスファルト量は、表-7に示す試験結果より、各項目の規格値を満足するアスファルト量（共通範囲）の中央値である5.4%と共にした。

b) 基層用アスファルト混合物

試験に用いた基層用アスファルト混合物は、空港土木工事共通仕様書⁸⁾で規定されている粗粒度アスファルト混合物（骨材最大粒径20mm）を使用した。アスファルトはストレートアスファルト60～80を使用した。骨材配合率は表-8のとおりで、骨材粒度は図-15のようになつた。骨材配合率による最適アスファルト量は、表-9に示

す試験結果より、各項目の規格値を満足するアスファルト量（共通範囲）の中央値である5.1%とした。

c) アスファルト乳剤

試験に用いたアスファルト乳剤は一般的に使用されるPK-4と改質系アスファルト乳剤を使用した。規格値は室内試験（その1）と同様である。

d) 分解剤

空港での極めて限られた施工時間を勘案し、散布した乳剤を強制的に分解させることができ可能な分解剤の適用性についても検討した。試験に用いた分解剤は酢酸系の水酸化ナトリウム水溶液であり、大量のタックコートを散布する遮水型排水性舗装の施工においてタックコートを強制分解させるために使用されているが、寒冷地や荒天が続くような地域、早期開放が必要な箇所でも使用することがあるものである。

(2) 供試体作製

試験に使用する供試体は、大供試体（幅300mm×長さ300mm×高さ100mm）を作製してから、その表面に各種界面処理を施した。その後、基層全体を所定養生温度に温め、各種散布温度で乳剤散布を行い、30分養生した。養生中は所定養生温度に保ち続けた。ちなみに、散布温度とは乳剤そのものの温度で、散布する際に温めて散布をした。乳剤散布量は既設アスファルト舗装時の散布量である0.3ℓ/m²⁴⁾、分解剤は乳剤散布量の10%とした。

各種界面処理の仕様とその標準断面を図-16に、各種条件の中で切削（養生温度5°C）に着目し乳剤塗布前後の写真を写真-7、写真-8に示す。写真から時間が経過すると表面の水分が蒸発し、黒ずんでいくのが分かる。

(i) グルービング：32mm間隔で6mm×6mm（溝の幅×深さ）を行った。

(ii) マーキング：白色トラフィックペイント（JIS K 5665）の塗布を行った。

(iii) 切削：通常の切削オーバレイ工法と同程度の目粗しを行った。

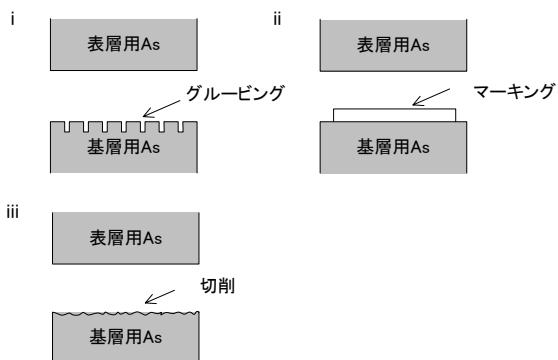


図-16 各種界面処理標準断面図

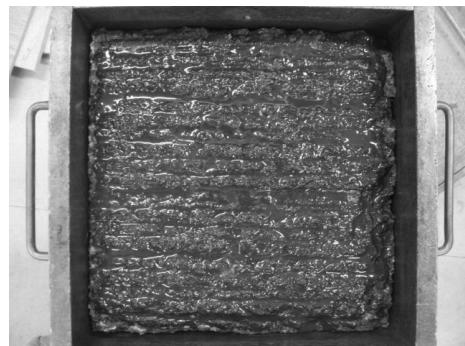
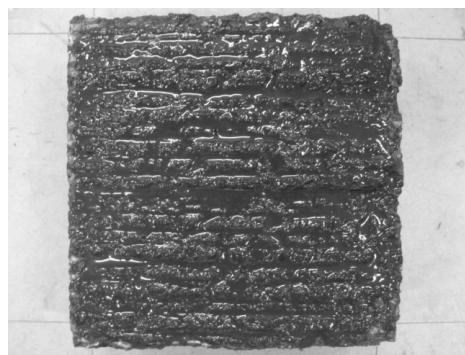


写真-7 PK-4（上段：塗布後 下段：5°C30分養生後）

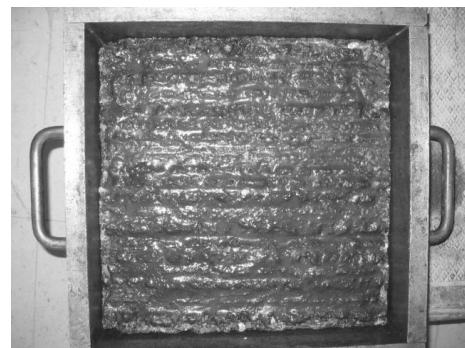
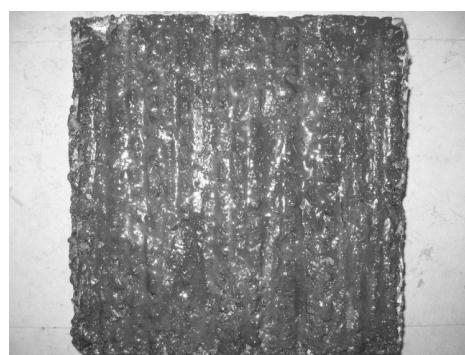


写真-8 改質系As乳剤（上段：塗布後 下段：5°C30分養生後）

表-10 試験条件

供試体番号	散布温度	養生温度	界面処理方法(散布乳剤)
1~2	40°C	5°C	未処理
3~4			グルーピング
5~6			マーキング
7~8			切削
9~10		20°C	未処理
11~12			グルーピング
13~14			マーキング
15~16			切削
17~18	60°C及び 80°C	5°C	未処理
19~20			グルーピング
21~22			マーキング
23~24			切削
25~26		20°C	未処理
27~28			グルーピング
29~30			マーキング
31~32			切削
33(参考)			未処理
34(参考)		一体供試体	

*供試体 33 は表層：改質アスファルト II 型使用。供試体 34 は全て密粒アスファルト使用。



写真-9 引張強度試験状況



写真-10 せん断強度試験状況

(3) 試験方法

a) 引張強度試験

供試体寸法は直径 100mm、高さ 100mm で、各種条件毎に試験個数は 5 ヶとした。試験条件を表-10、試験実施状況を写真-9 に示す。

まず、作製した大供試体より直径 100mm のコアボーリングを実施し、接着剤（エポキシ樹脂）により供試体表面に治具を取り付け、20°Cにて 1 日気中養生した後に試験を実施した。試験は試験温度 20°C で載荷速度 10mm/min とした。

b) せん断試験

供試体寸法は幅 50mm × 長さ 50mm × 高さ 100mm で、各種条件毎に試験個数は 5 ヶとした。試験条件は引張強度試験と同様、試験実施状況を写真-10 に示す。

まず、作製した大供試体より所定寸法の切出し・成形を実施した。切出し・成形終了後、供試体に治具を取り付け試験を実施した。試験は試験温度 20°C で載荷速度 10mm/min とした。

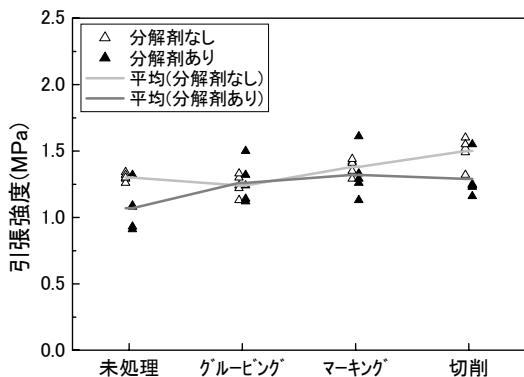


図-17 分解剤による影響(養生温度 5°C)

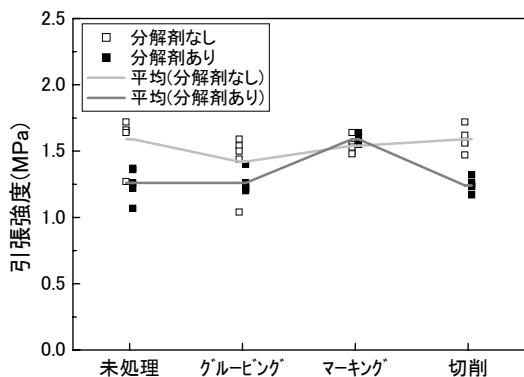


図-18 分解剤による影響(養生温度 20°C)

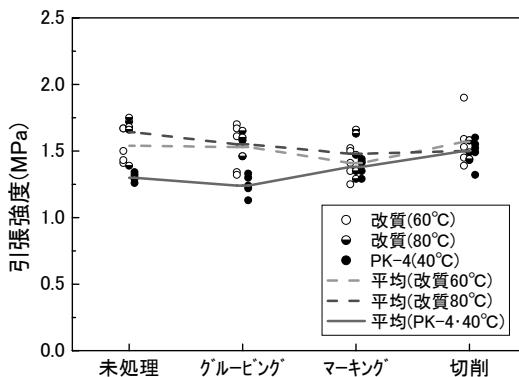


図-19 散布温度による影響(養生温度 5°C)

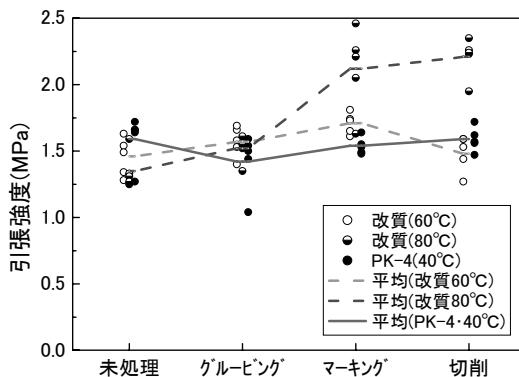


図-20 散布温度による影響(養生温度 20°C)

(4)引張強度試験結果

a)分解剤の影響

PK-4 と改質系アスファルト乳剤との比較をする前に早期開放時に使用される可能性がある分解剤の効果について確認した。各養生温度における分解剤使用有無による強度比較を図-17, 図-18 に示す。まず、養生温度が高くなると発現強度が高くなるのが分かるが、分解剤使用有無による大きな違いは見られない。むしろ分解剤を使用しない方が発現強度は高くなる場合もあり、分解剤の効果は明瞭には明らかにならなかった。

b)散布温度の影響

散布温度による影響を確認した。比較は改質系アスファルト乳剤の 60°C と 80°C、改質系アスファルト乳剤と PK-4 の比較を行った。PK-4 は前検討より分解剤有無の違いが明確にならなかったことから分解剤なしを対象とし、散布温度による比較を図-19, 図-20 に示す。まず、改質系アスファルト乳剤の違いに着目した。改質系アスファルト乳剤の散布温度の違いは養生温度 20°Cにおいて散布温度 80°C がやや有利な結果となったが全体で見るとさほど変わらない。また、改質系アスファルト乳剤

と PK-4 を比較すると PK-4 がやや劣る傾向にあるのが分かる。

c)養生温度の影響

養生温度による効果について確認した。PK-4 は前検討より分解剤なしを対象に、改質系アスファルト乳剤は安定している散布温度 60°C を対象とした。養生温度変化による比較を図-21 に示す。比較より養生温度が高い方が全体的に発現強度は高いのが分かる。また、改質系アスファルト乳剤と PK-4 を比較すると、改質系アスファルト乳剤の方が発現強度は高いことが分かる。

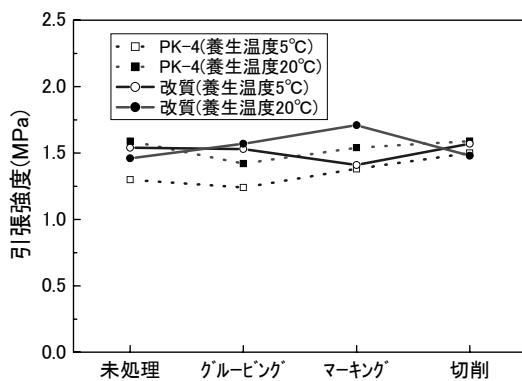


図-21 養生温度による影響

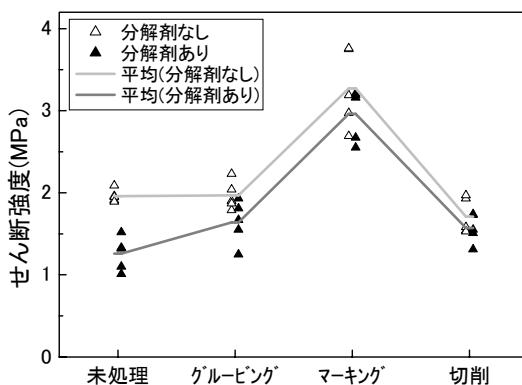


図-22 分解剤による影響(養生温度 5°C)

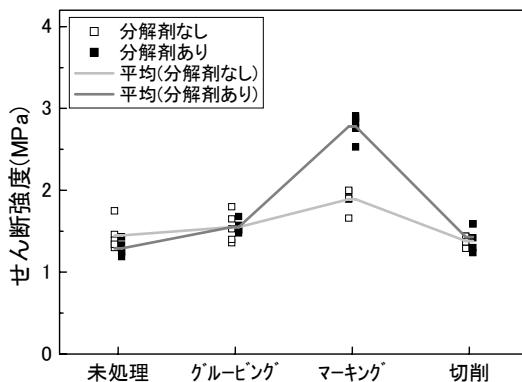


図-23 分解剤による影響(養生温度 20°C)

d) 界面処理方法の影響

これまでに示した引張強度試験結果から、4種類の各種界面処理方法の違いについて検討した。どの検討結果でも界面処理方法による大きな違いは見当たらないが、マーキングはやや発現強度が高い。これは施工時に表層の混合物温度の影響でマーキングが溶け出したことで、付着が良くなったと考えられる。また、既設舗装の表面にグルーピングが残っている場合でも、引張強度が極端に低くなることは確認されなかったことから、既設舗装のグルーピングやマーキングが引張強度を低減させる原因とはならないと考えられる。

(5)せん断試験結果

a) 分解剤の影響

分解剤使用の有無がせん断強度に及ぼす影響について検討した。結果を図-22、図-23に示す。引張試験時は全体的に分解剤なしの方が高かったが、せん断試験では養生温度 20°C で表面にマーキングがある場合に限り、分解剤を使用した方が強度は高い結果となった。しかし、全体的には分解剤使用有無による大きな違いは見られない。以上のことから、条件によっては分解剤も効果があると考えられるが、本試験結果からは分解剤使用による効果は明確には分からなかった。

b) 散布温度の影響

各散布温度がせん断強度に及ぼす影響について検討した。PK-4 は分解剤なしを対象とした。まず、改質系アスファルト乳剤の散布温度の違いに着目した。引張強度試験では養生温度 20°C の散布温度 80°C でやや高い結果となつたが、せん断試験では散布温度の違いはほぼ見られなかつた。また、各改質系アスファルト乳剤の強度と PK-4 を比較すると養生温度が低いと PK-4 の方が有利となっているが養生温度が高いと改質系アスファルト乳剤が有利となっており、逆転した結果となっている。これだけでは各乳剤の違いが分かりづらいため 2種類の養生温度を平均した結果を図-26 に示す。各養生温度に違いはあるが平均では PK-4 がやや劣る傾向にあるのが分かる。

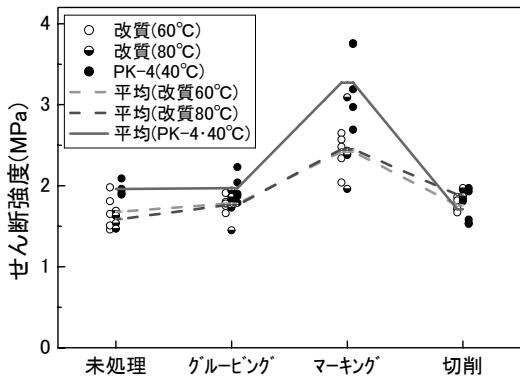


図-24 散布温度による比較(養生温度 5°C)

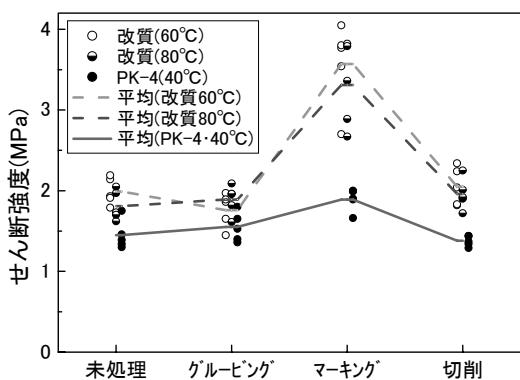


図-25 散布温度による比較(養生温度 20°C)

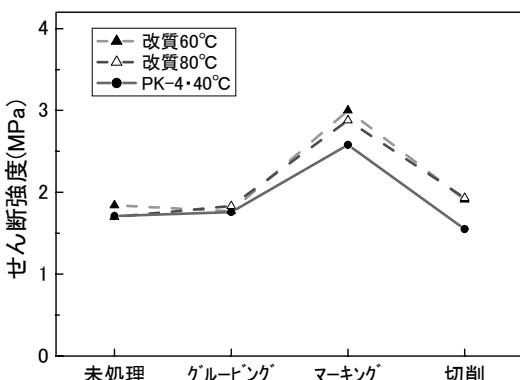


図-26 散布温度による比較(平均)

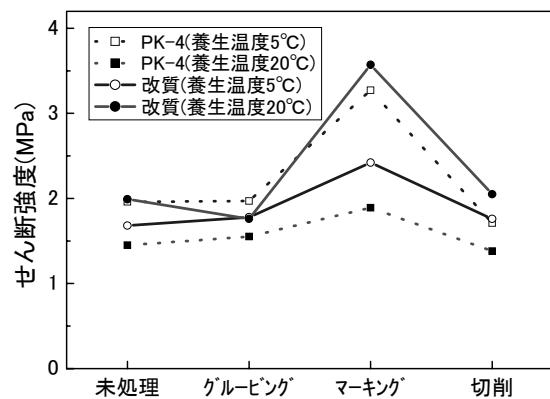


図-27 養生温度による比較

c) 養生温度の影響

養生温度がせん断強度に及ぼす影響について確認をした。PK-4は分解剤なしを、改質系アスファルト乳剤は散布温度60°Cを対象とした。養生温度変化による比較を図-27に示す。せん断試験では養生温度による違いはさほどない結果となった。また、改質系アスファルト乳剤とPK-4を比較すると、PK-4の養生温度5°Cが発現強度が高い結果となったが、全体的に見れば改質系アスファルト乳剤の方が発現強度は高い。

d) 界面処理方法の影響

各種温度に着目をして検討を進めてきたが、界面処理も4種類を対象に検討していることから各種界面処理方法の違いにも着目をした。図-22～27を見ると、どの検討結果でも界面処理方法による大きな違いは見当たらぬが引張強度同様にマーキングは発現強度が高い。

(6) 各種試験と界面破断状況

引張強度試験における界面破断状況を目視確認した。その結果を表-11に示す。PK-4は分解剤なしを、改質系アスファルト乳剤は散布温度60°Cを対象とした。室内試験(その1)同様に、PK-4を用いた場合には界面で破断しているケースが多いものの、改質系アスファルト乳剤を用いた場合には界面以外破断が格段に多くなった。しかしながら、界面破断のケースと界面以外破断のケースのそれぞれの平均強度は同程度であることから、乳剤による付着程度は、引張強度よりもむしろ破壊形態に明確に現れるものと考えられる。

表-11 散布乳剤と界面破断の関係(()内は平均引張強度)

	界面(個)	界面以外(個)	界面以外 破断率(%)
PK-4	31(1.44)	9(1.47)	23
改質系 As 乳剤	8(1.52)	32(1.54)	80

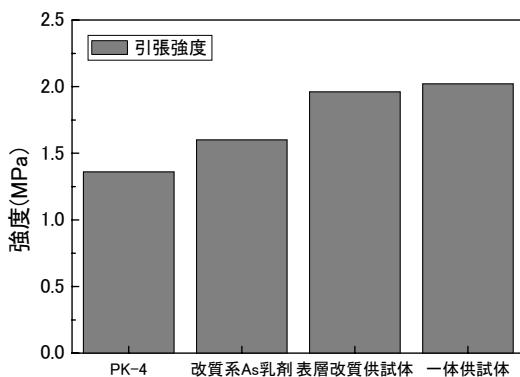


図-28 一体供試体等との比較(引張強度試験)

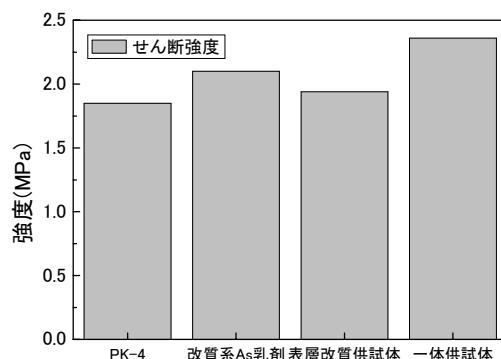


図-29 一体供試体等との比較(せん断試験)

(7) 一体供試体等との比較

各種検討により改質系アスファルト乳剤はPK-4より付着性能が全体的に優れることが分かった。そこで一体供試体（界面のないアスファルト混合物供試体）および表層に改質II型アスファルトを使用して改質系アスファルト乳剤を散布した供試体に対しては強度がどの程度違うのか確認した。比較結果を図-28、図-29に示す。結果よりPK-4<改質系アスファルト乳剤<表層に改質II型アスファルトを使用して改質系アスファルト乳剤散布供試体<一体供試体となり、表層材料によっても密粒度アスファルトの供試体より改質II型アスファルトを使用した供試体の方が強度は高くなることが分かる。せん断強度については、表層材料として改質II型アスファルトを用いた場合の効果はそれほど大きくはないが、せん断試

験の場合には、そもそも界面において破断させる試験であることから、表層材料の違いはそれほど大きく現れなかつた可能性がある。

(8) 室内試験(その2)のまとめ

試験の結果から、既設舗装の表面にマーキングやグルーピングが残っている場合であっても、これらが界面の付着に悪影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。また、試験(その1)と同様に、改質系乳剤を用いたほうがPK-4よりも高い付着強度が得られると考えられる。

注目すべきは、試験(その1)と同様に、乳剤を変えた場合の破断形態の違いである。すなわち、引張強度試験において、PK-4を使用した場合には供試体の多くが界面で破断するのに対し、改質系乳剤を用いた場合には供試体の多くがアスファルト混合物層で破壊している。このことから、本試験では引張強度およびせん断強度に着目して試験を実施したものの、破断形態の方が乳剤の違いによる付着程度を如実に表す指標となりえる。

4. マーシャル安定度補正表に関する試験

現在、マーシャル安定度試験用供試体形状が標準の供試体厚に満たない場合は、道路舗装で用いられてきた補正表⁶⁾により補正を行っているが、この補正表は道路舗装で使用されている混合物による試験結果と考えられる。空港舗装では、基層・表層に一般的に最大粒径20mmの骨材を使用しており、マーシャル安定度に対する骨材粒径の違いは大きいものと推測される。本試験では、空港使用材料によって室内作製供試体等を作製し、空港用のマーシャル安定度補正表を検討した。

4.1 使用材料

(1) 表層用アスファルト混合物

使用した密粒度アスファルト混合物は層間付着強度に関する試験内の室内試験(その2)と同様である。

(2) 基層用アスファルト混合物

使用した粗粒度アスファルト混合物は層間付着強度に関する試験内の室内試験(その2)と同様である。

4.2 供試体作製と採取

供試体寸法は室内作製供試体で直径101.6mm、実験場採取供試体でコアボーリング径から100mm、各種条件毎に試験個数は5ヶとした。試験条件を表-13に示す。供

試体厚さは舗装試験法便覧⁷⁾に則り 63.5mm を標準とした。

室内作製供試体においては標準以外の厚さは密度を均一にするため突固め回数を個々に算出し供試体を作製した。その際の突固め回数を表-14に示す。

実験場採取供試体においては、当所で所有する航空機荷重載荷装置にて B747-400 相当の脚荷重にて走行回数 10,000 回の位置と非走行位置から、表層部のわだち掘れを考慮し改質 II 型 2 層目より採取した。採取箇所の位置図と断面位置図を図-30、図-31 に示す。

4.3 試験結果と検討

(1) マーシャル安定度試験(室内)結果

室内作製供試体を用いて実施したマーシャル安定度試験結果を表-15、各試験結果の比較を図-32 に示す。供試体厚によって安定度に顕著な違いが生じ、材料配合(密粒度アスファルト混合物又は粗粒度アスファルト混合物)によっても若干の違いが生じる事が分かる。

(2) マーシャル安定度試験(現場)結果

実験場採取供試体を用いて実施したマーシャル安定度試験結果を表-16、各試験結果の比較を図-33 に示す。試験結果を見ると室内作製供試体に比べて安定度が低い。これは採取時に直径が通常より 2mm 程度小さくなつたこと、室内作製供試体とコアボーリングによる供試体の違い、及び走行載荷試験による混合物の劣化が考えられる。また、走行位置と非走行位置では走行位置の方が安定度は小さい。これは走行載荷試験による側方流動が関係していると考えられる。

(3) 個々の補正係数算出

供試体厚 63.5mm の平均安定度を基準とし、その平均安定度を各安定度で割ってそれぞれの補正係数を算出した。各供試体厚と補正係数の関係を表-17、表-18、算出した補正係数の比較を図-34 に示す。試験結果より、供試体厚さ 50mm 以上は数値が安定しているのに対し、どの結果でも 50mm 以下は数値のバラツキが大きく安定していないことが分かる。

表-13 試験条件

供試体	混合物	供試体厚 (mm)	備考
室内 作製	密粒度アス ファルト	75.0	-
	(20)及び粗 粒度アスフ アルト(20)	70.0	
		63.5(標準)	
		50.0	
		40.0	
		30.0	
実験場 採取	改質 II 型ア スファルト	63.5(標準)	走行位置及び 非走行位置
		40.0	

表-14 室内作製供試体の各厚さに対する突固め回数

供試体厚 (mm)	突固め回数(回)
30.0	36
40.0	48
50.0	59
63.5(標準)	75
70.0	83
75.0	89

突固め回数算定式

$$Ec = \frac{Wr \cdot H \cdot Nb \cdot N_1}{V} \quad (m \cdot kgf/m^3)$$

Wr : ランマーの質量(4.5kg)

H : ランマー落下高(45.7cm)

Nb : 1層当りの突固め回数(回)

N1 : 層の数

V : モールドの容積(締固めた供試体の体積)

走行位置		
非走行位置		
走行位置	○○ ○○	○○○ ○○○

○ : 走行位置採取箇所
● : 非走行位置採取箇所

図-30 実験場採取供試体採取位置図

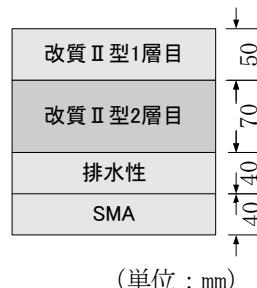


図-31 実験場採取供試体採取位置断面図

表-15 マーシャル安定度試験結果(室内作製供試体)

想定厚 (mm)	密粒度アスファルト混合物(20)			粗粒度アスファルト混合物(20)		
	供試体 番号	試験厚 (mm)	安定度(kN)	供試体 番号	試験厚 (mm)	安定度(kN)
30.0	1	30.4	3.67	1	30.7	2.17
	2	30.1	2.97	2	30.9	2.45
	3	30.4	2.20	3	30.8	2.30
	4	30.1	3.47	4	30.7	2.57
	5	30.5	3.10	5	30.8	2.57
	平均	30.3	3.08	平均	30.8	2.41
40.0	1	40.5	5.32	1	40.7	3.92
	2	40.5	3.97	2	40.5	3.65
	3	40.1	4.70	3	40.8	3.97
	4	40.6	4.55	4	40.4	3.85
	5	40.8	4.57	5	40.1	2.32
	平均	40.5	4.62	平均	40.5	3.54
50.0	1	50.3	6.52	1	50.4	6.87
	2	50.5	6.70	2	50.9	6.07
	3	49.5	7.42	3	50.5	6.47
	4	50.7	7.15	4	50.6	6.05
	5	50.0	7.57	5	50.6	6.97
	平均	50.2	7.07	平均	50.6	6.49
63.5	1	63.1	12.42	1	63.3	11.15
	2	63.8	12.85	2	63.5	12.20
	3	63.8	14.87	3	62.9	10.75
	4	63.7	13.55	4	64.4	11.82
	5	63.4	14.47	5	64.4	10.55
	平均	63.6	13.63	平均	63.7	11.29
70.0	1	70.2	15.50	1	70.9	13.85
	2	69.7	16.70	2	70.9	13.40
	3	69.9	16.42	3	70.7	13.45
	4	69.5	15.72	4	70.8	14.30
	5	69.7	16.72	5	69.6	14.85
	平均	69.8	16.21	平均	70.6	13.97
75.0	1	74.8	21.47	1	75.4	15.20
	2	75.7	22.00	2	75.9	17.59
	3	74.8	19.27	3	75.1	16.27
	4	75.1	21.47	4	75.7	15.62
	5	74.6	18.62	5	75.2	15.00
	平均	75.0	20.57	平均	75.5	15.94

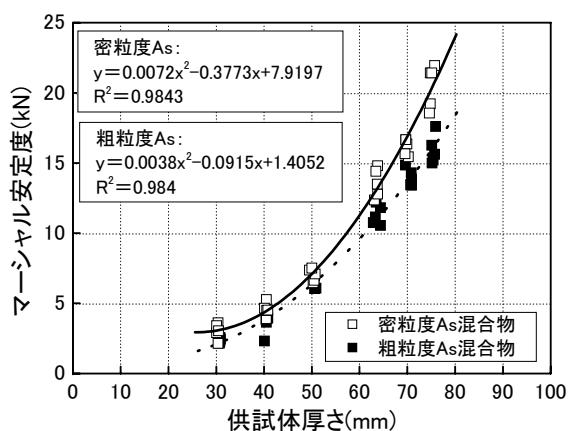


図-32 試験結果の比較(室内作製供試体)

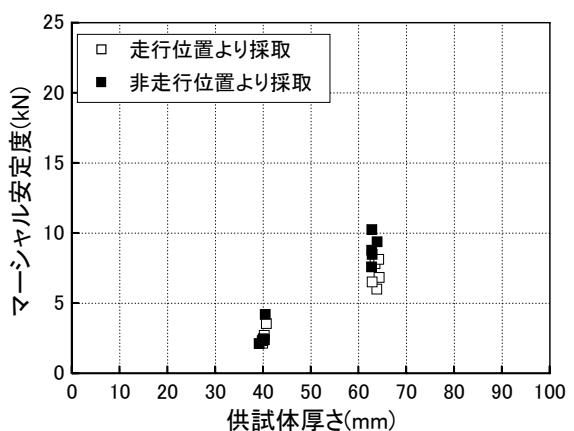


図-33 試験結果の比較(実験場採取供試体)

表-16 マーシャル安定度試験結果(実験場採取供試体)

想定厚 (mm)	走行位置			非走行位置		
	供試体 番号	試験厚 (mm)	安定度(kN)	供試体 番号	試験厚 (mm)	安定度(kN)
40.0	1	40.70	3.55	1	40.0	2.30
	2	40.3	2.72	2	39.3	2.10
	3	40.0	2.30	3	40.2	2.42
	4	40.0	2.47	4	40.4	2.37
	5	39.9	2.15	5	40.6	4.17
	平均	40.2	2.64	平均	40.1	2.67
63.5	1	63.8	6.00	1	62.9	8.75
	2	64.3	6.85	2	62.9	8.45
	3	63.4	7.82	3	64.0	9.35
	4	64.2	8.12	4	62.8	7.57
	5	62.8	6.52	5	62.9	10.22
	平均	63.7	7.06	平均	63.1	8.87

表-17 各供試体厚と補正係数の関係(室内作製供試体)

想定厚 (mm)	密粒度アスファルト混合物(20)		粗粒度アスファルト混合物(20)	
	平均安定度(kN)	補正係数	平均安定度(kN)	補正係数
30.0	3.08	4.57	2.41	4.70
40.0	4.62	2.97	3.54	3.32
50.0	7.07	1.93	6.49	1.75
63.5	13.63	1.01	11.29	1.00
70.0	16.21	0.84	13.97	0.81
75.0	20.57	0.66	15.94	0.71

表-18 各供試体厚と補正係数の関係（実験場採取供試体）

想定厚 (mm)	走行位置		非走行位置	
	平均安定度(kN)	補正係数	平均安定度(kN)	補正係数
40.0	2.64	2.76	2.67	3.52
63.5	7.06	1.01	8.87	1.01

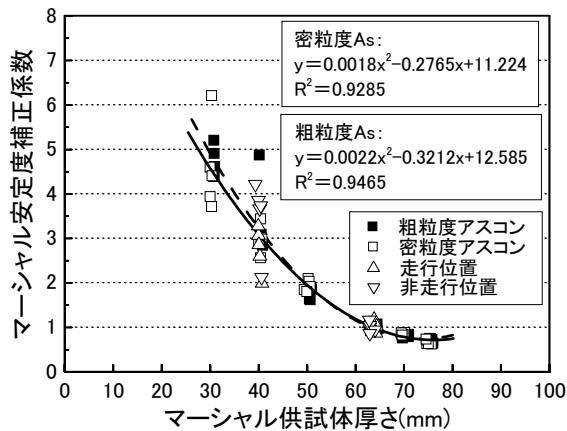


図-34 算出係数の比較

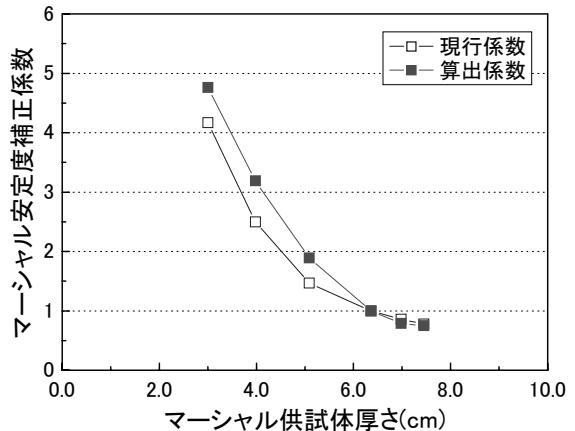


図-35 現行係数と算出係数の比較

表-19 マーシャル安定度補正係数

厚さ(mm)	30.0	40.0	50.0	63.5	70.0	75.0
補正係数	4.76	3.17	1.98	1.00	0.79	0.74

表-20 補正係数比較表

供試体の体積 (cm ³)	供試体厚(cm)		補正係数	
	範囲	中央値	現行	本研究
238～250	2.93～3.08	3.00	4.17	4.76
317～328	3.91～4.04	3.98	2.50	3.19
406～420	5.00～5.18	5.09	1.47	1.89
509～522	6.27～6.44	6.36	1.00	1.00
560～573	6.90～7.06	6.98	0.86	0.79
599～610	7.38～7.52	7.45	0.78	0.75

(4) 統一補正係数算出

前検討では密粒度アスファルト混合物および粗粒度アスファルト混合物のそれぞれに対して補正係数を算出し比較をしたが、現場での汎用性を考慮し、両混合物による試験結果を合算して補正係数を算出した。まず、各係数より算出した式を以下に、式より算出した係数を表-19に示す。

$$\text{回帰式 : } y = 0.002x^2 - 0.2992x + 11.935 \quad (30 \leq x \leq 75)$$

$$R^2 = 0.92$$

(5) 補正係数の比較

試験より算出した式から算出した補正係数と、道路用の供試体厚範囲の中央値を基に算出した補正係数との比較を表-20、図-35に示す。厚さ 60mm 以上で近似、60mm 以下で相違している結果となった。この相違は空港使用材料最大骨材粒径 20mm によるものと考えられる。

(6) まとめ

マーシャル安定度に対する供試体厚さの影響は顕著であり、今回実施した空港舗装用混合物を対象とした補正係数と、道路舗装用混合物を対象とした補正係数とでは、

供試体厚が標準より薄い場合に、比較的大きな差があることが明らかとなった。これは、使用している骨材が道路舗装用よりも大きなことが原因と考えられる。

5. 結論

5.1 水分量に関する試験

試験では屋外に試験舗装を製作し、3日間浸水させたが浸水前後で水分量の違いはほとんどないことが分かった。また、使用材料の空隙率による影響が大きいことから比較にあたっては水分飽和度を用いて比較することが望ましいと考えられる。

5.2 層間付着強度に関する試験

本研究では短時間養生(30分養生)による付着に着目をして試験を行い、以下の結果が得られた。

- 1) 空港土木工事共通仕様書に則り、表層アスファルト混合物の空隙率を規定値の上下限(5%と2%)に設定して試験した結果、材料の空隙率が大きい方が発現強度は高くなった。
- 2) PK-4にて同試験条件で養生時間15分と30分で比較をしたが、強度に大きな差は無かった。
- 3) 分解剤使用有無による違いをPK-4を用いて行ったが、強度に違いはほとんど無かった。しかし、条件によっては効果が期待できると思われることから今後検討する必要がある。
- 4) 改質系アスファルト乳剤においては同試験条件で散布温度60°Cと80°Cで試験を実施したが、大きな強度差は無かった。
- 5) 界面処理方法の違いとして、無処理、マーキング、グルーピング、切削の4種類の比較を行った。全体的にマーキングの発現強度が高くなったがその他の方法での強度への影響はほとんど無かった。しかし、グルーピングの影響は今後検討する必要があると考えられる。
- 6) 各種条件で試験を実施したが短時間養生(30分養生)による発現強度は全体的にPK-4に比べて改質系アスファルト乳剤の方が高かった。
- 7) 引張強度試験後の破断形態を見ると、何も塗布しない場合やPK-4を使用した場合は界面で破断したものの、改質系アスファルト乳剤を使用した場合は、界面で破断する割合が減少することが確認された。

5.3 マーシャル安定度補正係数表に関する検討

空港使用材料による検討を進めた結果、空港条件に則

した補正表となった。なお、本研究では30mm～75mmの範囲で試験を実施し研究成果を得た。今後は適用性について確認をしていく必要があると考える。

6. おわりに

本研究により、層間剥離に関するいくつかの事項が明らかになったと考える。その一つとして、施工条件が厳しい空港舗装の施工において、アスファルト混合物層間をしっかりと付着させるために、改質系アスファルト乳剤の使用は効果的であること、そしてその効果は、付着強度のみならず、引張強度試験における破壊形態を調べることで判断できる可能性があることである。空港のような施工条件の厳しい中での舗装工事においては、付着改善効果が認められるアスファルト乳剤を積極的に使用することを視野に入れ、本研究では明らかにならない事項について、今後も研究を続けていく所存である。

(2008年6月2日受付)

参考文献

- 1) 久保宏、八谷好高、長田雅人、平尾利文、浜昌志：最近の空港アスファルト舗装の損傷と改良工法について、土木学会舗装工学論文集、第9巻、pp.35-40, 2004.
- 2) 安部隆二、岳本秀人、久保宏、平尾利文：空港舗装のブリスタリング現象に関する一考察、土木学会舗装工学論文集、第10巻、pp.119-126, 2005.
- 3) 志村勉、井上武美、荒井孝雄、川西弘明：鋼床版の合理化構造と舗装に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集第1部、Vol.52, pp.586-587, 1997.
- 4) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木工事施工要領、p.5-140, 1999.
- 5) 八谷好高、梅野修一、今井泰男、中村健、室園正徳：空港アスファルト舗装の新しいタックコート材料の開発、港湾技研資料、No.885, 1997.
- 6) (社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱、p.158, 1961.
- 7) (社)日本道路協会：マーシャル安定度試験、舗装試験法便覧、p.506, 1988.
- 8) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木工事共通仕様書、2006.
- 9) Prithvi S.kandhal and Ian J.Rickards:Premature Failure of Asphalt Overlays from Stripping-Case Histories,NCAT Report 01-01,National Canter for AsPhalt Technology,2001.