

1. はじめに

空港舗装には、利用者に良好な路面を提供すること、そのために非常に高いサービス水準を常時維持することが要求されている。それは、空港舗装を利用する航空機は、道路舗装を利用する車両に比べ、高速で走行し、しかも一度に大量の人員を運ぶためである。しかし、舗装は施工直後から自然環境にさらされて、交通荷重の作用を受けることにより損傷を受け始めるので、この要求を満たすためには、時々、何らかの手当てをしてやるが必要となる。そこで、いつ、どのような方法によって維持・補修作業をしてやるかといったことが合理的に決定されなければならない。舗装が良好な状態を維持できるように、管理するシステムは舗装マネジメントシステムといわれ、大きな研究テーマとなっている。

従来、わが国の空港舗装の維持・補修は、空港管理者の経験的判断により実施されてきており、必ずしも統一した取り扱いがなされてきていなかったことや、その設計が時間と金のかかる解体調査等に基づくものだったことが問題であった。しかし、現在までに、空港舗装補修要領（案）や空港舗装定期点検要領（案）といったものが整備され、維持・補修についてもシステム化が図られつつある。

空港舗装が破損した場合には舗装を供用しながら補修する方法をとらざるを得ないことが多い。そのために、既設舗装の荷重や気象作用等による破損や劣化の程度の判定法と、それらに基づく舗装の補修の必要性の判断基準および補修の設計の方法等の整備について努力がなされている。また、大型航空機の導入に対応できるように、より大きな航空機を設計荷重とする場合の既存舗装の評価および舗装強度を増強するためのかさ上げ等の設計の手法等の整備についても努力がなされている。

大型航空機が就航している国際空港や国内幹線空港の誘導路に用いられているアスファルト舗装では、場合によってはわだちぼれといった過大な変形が生ずる事態になっている。これは、小型ジェット機もしくはそれより小さい航空機が就航している空港のエプロンや一部大規模空港にも用いられているGSE通行帯等のアスファルト舗装においてもみられる。コンクリート舗装は変形抵抗性に優れているが、その施工に長期間を要するため、供用中の空港における舗装補修工事への適用は難しい。

耐変形抵抗性に優れ、しかも工事に伴う施設閉鎖期間を短縮可能な工法としては、高速道路の料金所等道路で一部使用されている半たわみ性材料を用いる方法が考えられる。この半たわみ性材料は、まずアスファルト混合

物を敷設し、次にその表面にセメントミルクを流し拭いで、アスファルト混合物中の空隙に浸透させるという手順によって施工される、アスファルト混合物とセメントミルクの複合体である。このことから、この材料は、アスファルト舗装の弱点である流動性の改善を図るとともに、コンクリート舗装の弱点である長期養生時間の短縮化を可能とするものであると考えられる。

本研究では、半たわみ性材料を用いて空港アスファルト舗装をオーバーレイにより補修する場合の技術的方策を明らかにしている。具体的には、半たわみ性材料の力学特性を明らかにするための室内試験と、この材料を用いたオーバーレイの施工性ならびに航空機荷重に対する舗装構造としての安全性を検証するための試験施工を実施している。

室内試験においては、以下の点に注目して試験を行った。まず、母体アスファルト混合物の配合が半たわみ性材料としての力学特性に及ぼす影響について検討する。次に、施工厚の増化に伴う力学特性の変化に注目して1層施工可能厚について検討する。そして、施工後の力学特性の変化に注目して交通開放可能時間について検討する。さらに、繰返し載荷に対する挙動について調べている。また、乾燥収縮特性に注目して目地間隔について検討し、最後に材料表面の摩耗性に注目して耐油性について検討する。

① 母体アスファルト混合物の配合

空港コンクリート舗装上に厚さ50mm程度のオーバーレイを施す場合に用いられる半たわみ性材料については、母体アスファルト混合物として改質アスファルトを用いて空隙率を23%とすること、セメントミルクとして流動性保持時間が30分程度で材齢7日の曲げ強度が 2N/mm^2 となるものを用いることを原則とした¹⁾。これに対して、アスファルト舗装上にオーバーレイする場合にはその厚さがこれ以上となることから、母体アスファルト混合物中へのセメントミルクの浸透性が懸念されるため、ここでは母体アスファルト混合物の配合に注目して、それと半たわみ性材料の曲げ特性の関係について検討した。なお、ここでは、セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度を 20°C としている。

② 施工厚

母体アスファルト混合物、セメントミルクが同一であっても、施工厚が異なればセメントミルクの浸透度も異なったものになることが懸念されるため、その点について検討を加えた。

半たわみ性材料層の厚さは、通常用いられている50mmから空港舗装への適用を考えた最大200mmの範囲

としている。ここでは、母体アスファルト混合物の1層施工可能厚は100mmを最大としたため、これを超える場合は2層施工となっている。

施工後の早期交通開放を可能とするためには、セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度を上げる必要があるため、その場合のセメントミルクの浸透性について検討した。ここでは、セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度として、一般的に使用されている50℃に加え、80℃を用いている。

③ 力学特性の経時変化

半たわみ性材料の施工後の交通開放時期を明らかにするために、施工後数時間に注目して力学特性の経時変化について検討した。

ここでは、交通解放時期を短縮することを目標としたために、セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度を80℃と設定した²⁾。材料の力学特性は曲げ試験ならびにホイールトラッキング試験により評価した。材料の力学特性は若材齢時の曲げ試験ならびにホイールトラッキング試験により評価した。

④ 繰返し曲げ特性

アスファルト舗装上に半たわみ性材料によるオーバーレイが施工された構造を解析する場合には、半たわみ性材料の力学定数として適切な設計用値を設定することが重要になる。この点について繰返し曲げ試験を実施して検討を加えた。

⑤ 乾燥収縮特性

半たわみ性材料は、アスファルト混合物とセメントミルクの複合体であること、散水養生をしないことから、施工後の乾燥収縮が問題になる。この点については、半たわみ性材料とコンクリートの供試体を実際の施工と同様に作製・養生後室内に放置して比較・検討した。

⑥ 耐油性

エプロン舗装においては、航空機燃料の給油作業や航行援助車両の走行時等に油脂類がその表面にこぼれるという事態が散見される。アスファルトコンクリートはその耐油性に問題があるので、半たわみ性材料についても検討することにした。具体的には、半たわみ性材料、アスファルトコンクリート、コンクリートという3種類の材料を油脂に浸し、その上をタイヤが走行するときの材料の摩耗状況を調べることで把握した。

試験施工については、まず、この半たわみ性材料を用いたオーバーレイ工法の施工試験の結果について詳細に述べたあと、載荷試験の結果について記述し、このオーバーレイ構造の設計方針をまとめた。

① 施工方法

半たわみ性材料が空隙の多いアスファルト混合物や表面性セメントミルクをまき払って、空隙を充填することによって施工されることから、室内試験より妥当とされた方法が実際に施工可能かどうかについてまず検討した。空港舗装を対象とした場合に、道路舗装で一般的に用いられているものよりも層厚を大きくすることも必要となることを考慮して、施工厚を最大200mmして施工した。

② オーバーレイの効果

既存舗装の損傷の進行や交通荷重条件等の変化を十分に見極めた上で、オーバーレイによる構造強化を図る場合、その方法を決定することが必要となる。そこで、半たわみ性材料によるオーバーレイを施工する前と後の時点で構造評価を行い、オーバーレイの力学的効果を定量化した。

③ 交通解放時間

空港での補修工事は施設を閉鎖しなくないように、または、閉鎖する場合でもその時間を極力短くできる方法が望まれる。半たわみ性材料を用いたオーバーレイの施工直後から載荷試験を継続して実施することにより、施設が供用開始可能となる時間、すなわち交通開放時間について検討した。

④ 目地の影響

半たわみ性材料が、アスファルト混合物とセメントミルクの複合体であることから、セメントの硬化反応に伴う乾燥重縮は避けられず、目地を設けることとした。目地近傍に荷重が載荷された場合の舗装の挙動について検討し、目地のない場合との対比をすることによって、目地の構造的影響度合いを定量化した。

⑤ 繰返し載荷に対する耐久性

航空機やGSE車両が繰返して走行した場合の、半たわみ性材料ではオーバーレイの耐久性を明らかにすることが必要となる。この点について試験舗装に対して、航空機主脚荷重を1,000回まで繰返し走行させて、その挙動について観測した。

2. 室内試験

室内試験については、上記の項目を明らかにするために実施した試験方法について記してから、その結果についてとりまとめる。

2.1 試験方法

(1) 使用材料

半たわみ性材料の母体アスファルト混合物として表-

1に示す4種類を用いた。アスファルトとしては改質Ⅱ型アスファルトとストレートアスファルト60-80を用いた。骨材は最大粒径を20mmとし、空隙率(23, 25, 27%)に応じて配合を変えた。表-2には骨材の配合を、図-1には粒度分布を示した。この粒度分布は、それぞれの目標空隙率に対して、粒度分布を3種類に変化させた材料に対する予備配合試験の結果から定めたものである(このときのアスファルト量は3.3%としている)。

母体アスファルト混合物の最適アスファルト量は、上記のように決定された粒度分布を有する骨材に対して、アスファルト量を5種類変えた状態でマーシャル安定度試験を行った上で決定された。供試体作製時の突固め回数は両面50回である。最適アスファルト量でのマーシャル安定度試験の結果を表-3に示す。

セメントミルクは、超速硬セメント、水、凝結遅延剤を混合したものである。表-4、表-5には、セメントの物理試験結果、化学組成分析結果を示す。なお、化学組成分析はJIS R 5202「ポルトランドセメントの化学分析方法」による。セメントミルクの配合は表-6に示すと

おりで、水セメント比を40%とし、凝結遅延材は20℃の温度条件下において30分の作業時間が確保できる量、すなわちセメントに対して質量比で2%とした。試料作製時のフロー値は12.1秒であった。

乾燥収縮試験ならびに摩耗試験には、配合bの母体アスファルトを使用した半たわみ性材料のほか、空港舗装を対象とした表層用密粒度アスファルトコンクリートとセメントコンクリートを用いた。半たわみ性材料の母体アスファルト混合物(開粒度)ならびに密粒度アスファルトの骨材配合は表-7に示すとおりで、そのマーシャル試験結果(表-8)からはいずれも所定の品質が得られていることが確認された。表層用アスファルトコンクリートには、ストレートアスファルト60-80を用い、最大粒径を13mmとした配合の骨材を用いた。目標マーシャル安定度として突き固め回数75回で9kNを採用した。コンクリートは、粗骨材最大寸法40mm、スランプ2.5cm、空気量4%、材齢28日曲げ強度5N/mm²を目標として配合設計を行った(表-9)。まだ固まらない状態での品質ならびに材齢28日の曲げ強度は表-10に示すとおりである。

表-1 母体アスファルト混合物の配合

配合	安定度 (kN)	空隙率 (%)	アスファルト
a	3.5以上	23	改質
b	3.5以上	25	改質
c	3.0以上	25	ストレート
d	3.0以上	27	改質

表-2 骨材の配合

配合	骨材配合率 (%)			
	5号碎石	6号碎石	粗砂	石粉
a	42	44	10	4
b・c	42	47	7	4
d	42	51	3	4

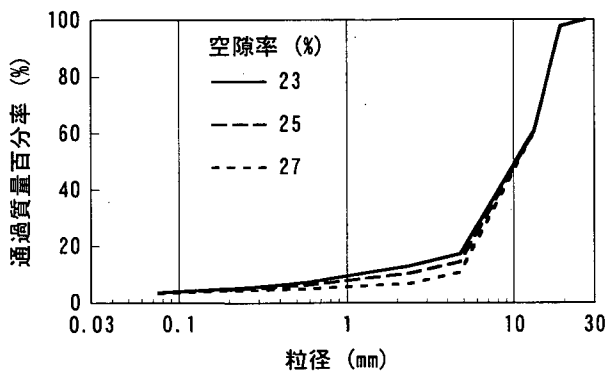


図-1 骨材の粒度分布

表-3 母体アスファルト混合物の配合試験結果

配合	アスファルト量 (%)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	フロー値 (1/100cm)	安定度 (kN)
a	3.3	1.977	23.0	33	5.70
b	3.1	1.932	25.0	31	5.05
c	3.4	1.924	25.0	34	3.50
d	3.0	1.883	27.0	31	4.20

表-4 セメントの物理試験結果

比重	コンシステンシー (秒)	圧縮強さ (N/mm ²)						曲げ強さ (N/mm ²)					
		3時間	6時間	1日	3日	7日	28日	3時間	6時間	1日	3日	7日	28日
2.79	11.5	5.8	15.1	24.1	31.9	38.1	41.5	1.5	3.3	4.3	4.4	5.8	6.7

注) W/C: 40%

表- 5 セメントの化学組成

成分	ig.los	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	合計
質量百分率 (%)	6.9	24.5	7.5	6.9	1.0	43.3	0.8	7.6	0.4	0.4	99.3

表- 6 セメントミルクの配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)		
	セメント	水	凝結遅延剤
40	1,330	532	2.66

表- 7 アスファルト混合物の骨材配合

種類	5号碎石	6号碎石	7号碎石	スクリーニングス	粗砂	細砂	石粉	アスファルト
開粒度	40.7	45.5	-	-	6.8	-	3.9	3.1
密粒度	-	35.9	17.0	17.0	13.2	7.6	3.8	5.5

(単位：%)

表- 8 アスファルト混合物のマーシャル試験結果

種類	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	フロー値 (1/100cm)	安定度 (kN)
開粒度	1.936	24.8	38	4.5
密粒度	2.390	3.9	35	11.6

表- 9 コンクリートの配合

単位粗骨材容積	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
0.738	38.0	34.9	137	360	640	1,310	3,63

表- 10 コンクリートの材料特性

スランプ (cm)	空気量 (%)	曲げ強度 (N/mm ²)
2.0	3.3	5.5

(2) 試験方法

母体アスファルト混合物が半たわみ性材料の力学特性に及ぼす影響，ならびに半たわみ性材料の交通開放可能時期を検討するために曲げ試験を実施した。試験に用いた供試体の寸法は幅50mm，長さ300mm，厚さ50mmであり，支点間隔が200mmの状態でも中央1点荷重方式にて試験を実施した。試験条件としては温度が20℃，荷重速度が10mm/minを用いた。試験時の材齢は，母体アスファルト

混合物の配合検討時には3時間，1，7，28日とし，半たわみ性材料の力学特性の経時変化検討時には1，2時間とした。

交通開放時期に関しては，ホイールトラッキング試験も実施して検討した。この試験は，作製した幅・長さ300mm，厚さ50mmの供試体を30℃の温度に保持した試験装置内に運び込んで保管し，そのままの状態を実施した。これ以外の試験条件は舗装試験法便覧に記載されているものと同じである。なお，試験時の材齢は1，2，3時間である。

半たわみ性材料の繰返し荷重に対する挙動を検討するために繰返し曲げ試験を実施した。この試験は，支点間隔300mm，荷重点間隔100mmの2点荷重方式で実施した。

この試験では、供試体の温度を一定に保った上で所定のひずみ波形を所定の周波数で供試体に強制的に与え、その応答としての荷重を計測した。具体的な試験条件を表-11に示す。ここで用いた周波数は、米国空港舗装の理論的設計法において、アスファルトコンクリートに対する設計用値として使用されているものである²⁾。なお、この繰返し載荷試験においては、周波数2、10Hzのそれぞれで、載荷回数が22,000回、54,000回に達した時点で試験を打ち切っている。この試験は、供試体へセメントミルクを注入してから7日後に実施し、載荷回数1,000回時のデータを用いて材料特性を評価した。

表-11 繰返し曲げ試験の条件

項目	条件
ひずみ波形	正弦波 (両振り)
載荷ひずみ (1×10^{-6})	150, 250, 400
周波数 (Hz)	2, 10
温度 (°C)	20
材齢 (日)	7

半たわみ性材料の乾燥収縮特性は、供試体が自由に伸縮できるように、ガラスビーズを敷き詰めた容器内に設置して、20°Cの温度に保った実験室内に放置した。この試験に用いた供試体の形状は、コンクリートの曲げ試験用供試体と同様に、幅・高さ150mm、長さ530mmである。供試体側面にはコンタクトゲージ用チップを100mm間隔で6個貼り付け、供試体長の経時変化をコンタクトゲージを用いて計測した。

半たわみ性材料の耐油性を検討するためにラベリング試験を実施した。この試験では、油脂として耐油性に及ばず影響が航空機用燃料と同等と考えられるガソリンを使用し、供試体を所定の期間この油脂に浸けてから、試験に供した。また、油浸期間は非油浸の状態から最長28日までいくつかの期間を設定したが、表層用アスファルトコンクリートについては比較的短期間の油浸によりすりへり量が急増する事態となったため、長期間のものは省略した。ラベリング試験は本来タイヤチェーンに対する舗装材料の耐摩耗性を調べるために実施されるものであるが、ここではそれと異なり、試験温度を20°Cとしている。試験装置としてクロスチェーンを用いた往復チェーン型を用い、試験前後に供試体の横断形状を3箇所測定し、その変化量(面積)を平均することにより、すりへり量として定量化した。供試体は、幅300mm、長さ400mm、厚さ50mmの試料から、幅150mmのものを2体切

り出した。

(3) 試料の作製

試験に用いる供試体は、大型試料を作製してから、必要に応じて切り出している。曲げ試験用供試体は、まず幅、長さともに300mm、厚さが50~200mmの試料を作製し、それから切り出すことによった。母体アスファルト混合物の試料は、舗装試験法便覧に記載されているホイールトラッキング試験方法に準拠して作製した。すなわち、表-12に示すように、厚さが100mmまでは1層にて、それを超える場合には2層に分けて、マーシャル安定度試験によって求められた基準密度の $100 \pm 1\%$ の締固め度になるようにローラコンパクタで締固めた。密度は、試料を室温で12時間以上養生してから測定した。なお、試料の厚さが50mmを超える場合には、セメントミルク注入後の深さ方向における充填率の変化を把握する必要があるために、同一条件で作製した試料を表面から厚さ50mmごとにスライスして、それぞれの空隙率を測定した。

表-12 母体アスファルト混合物の層厚

厚さ (mm)	層数・厚さ(mm)
50	1層・50
100	1層・100
150	2層・50(上)+100(下)
200	2層・100(上)+100(下)

次に、この試料をテーブル式振動台(振動数3,000vpm、振幅1mm)に載せてその表面にセメントミルクを流し並び、10秒間下面から振動を与えることによりセメントミルクを試料に十分浸透させ、その余剰分はゴムへらで除去した。このセメントミルクは混合時間を2分以上とし、練上がり温度が $20 \pm 1^\circ\text{C}$ となるようにして製造したものである。セメントミルク注入時には、母体アスファルト混合物を型枠に入れ、そのままの状態ですべての温度に保った恒温槽内で5時間養生することにより試料全体がその温度となるように調整した。温度としては20°C、80°Cを標準としたが、施工厚について検討する場合には50°Cも用いた。

セメントミルクの充填率は、セメントミルクが硬化した後に試料の質量を測定し、これとセメントミルク注入前の質量の差から得られるセメントミルク容積の、母体アスファルト混合物中の空隙に対する比率を計算することにより算出した。なお、試料の厚さが50mmを超える

場合には、厚さ50mmごとに薄く切って質量を測定し、別途測定した空隙率を用いて、充填率を計算した。

曲げ試験用供試体は、この試料から寸法が幅50mm、長さ300mm、厚さ50mmのものを転圧方向に3本ずつ切り出した。なお、繰返し曲げ試験用供試体は、幅300mm、長さ400mm、厚さ40mmの試料から、幅40mm、長さ400mm、厚さ40mmの供試体を転圧方向に3本ずつ切り出すことにより作製した。この場合の試料作製方法は、養生温度を80℃のみとしたほかは、曲げ試験のものと同様である。

ホイールトラッキング試験用供試体は、厚さを50mmとした曲げ供試体用試料の作製方法と同一である。ただし、セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度を80℃としている。

乾燥収縮試験用供試体の寸法は、コンクリートの曲げ試験用供試体と同様、幅・高さ150mm、長さ530mmである。半たわみ性材料の供試体の作製方法は上記の曲げ試験の場合と同様である（ただし、母体アスファルト混合物は2層に分けて施工した）。コンクリートの供試体は(1)で記したコンクリートを型枠内に投入し、内部振動機を用いて十分に締固めることによって作製し、その後1週間水中養生した。

ラベリング試験用試料の寸法は、幅300mm、長さ400mm、厚さ50mmである。半たわみ性材料の試料作製方法は、曲げ試験ならびに繰返し曲げ試験のものと踏襲している。アスファルトコンクリートの試料は、半たわみ性材料の母体アスファルト混合物と同様に、マーシャル安定度試験による基準密度の100±1%という密度が得られるようにローラコンパクタにより締固めることによって作製した。コンクリートの試料は、コンクリートを型枠内に1層に詰め、上面を突き棒で均しながら均等に突き固め、型枠側面に振動を加えることによって仕上げ、1週間湿潤養生することによって作製した。供試体は、いずれも作製した試料から幅150mmのものを2体切り出している。

2.2 半たわみ性材料の力学的特性

アスファルトの種類が改質アスファルトと同一の場合（表-1に示した配合a, b, c）について、半たわみ性材料の力学特性を検討する。

(1) 曲げ特性

まず、厚さを50mm、注入時温度を80℃として作製した試料から切り出した供試体を用いて、母体アスファルト混合物の空隙率と半たわみ性材料の曲げ強度の関係を

調べた。その結果を示した図-2からは、空隙率が大きい場合は、初期強度が比較的小さいものの、その後セメントミルクが硬化するにつれて強度増加が著しいものとなっていることがわかる。半たわみ性材料の力学特性が材齢により変化することは空隙中のセメントミルクの硬化に起因し、母体アスファルト混合物の空隙率によりその程度が異なることは母体アスファルト混合物中の空隙率のセメントミルク量の影響であると考えられる。

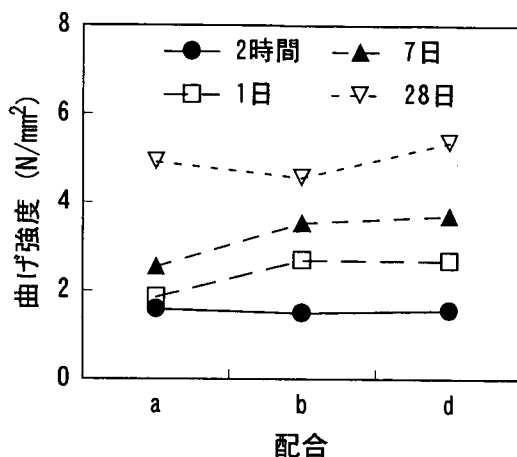


図-2 空隙率と曲げ強度

母体アスファルト混合物中の空隙率が同一であっても、施工条件によっては空隙中のセメントミルクの充填程度が深さによって異なることが懸念される。セメントミルク注入時のアスファルト混合物温度を80℃とした場合の充填率について、母体アスファルト混合物の空隙率との関係をみたものが図-3である。全体として空隙率が大きいほど充填率も大きい傾向が顕著にみられる。しかし、上記のように空隙率が同一であっても充填率が大きく異なる場合もみられる。

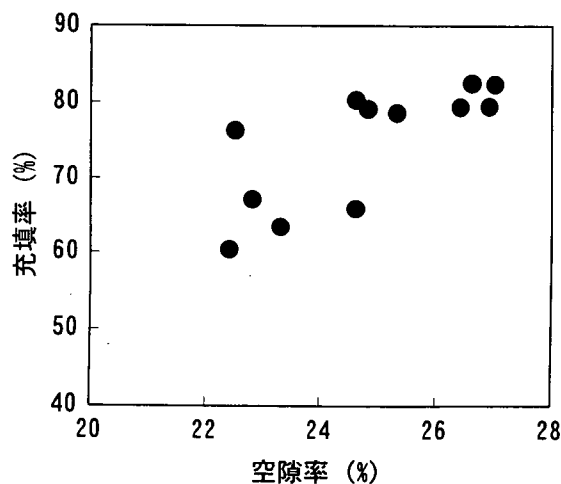


図-3 空隙率と充填率の関係

そこで、以下ではセメントペーストの充填率が異なった場合の半たわみ性材料の曲げ試験による力学特性について検討する。なお、ここでは、作製時の厚さを変えた試料を50mmごとに薄く切ったものから切り出した供試体を使用している。

この充填率と曲げ強度の関係を材齢が7日の場合について図-4示してある。曲げ強度と充填率との相関性が高くなり、充填率が高いほど曲げ強度も大きくなっていることがわかる。また、空隙率が高いほうが曲げ強度が大きいことも認められる。日本道路公団の規格値である材齢7日における曲げ強度 2.5N/mm^2 をこの試験結果にあてはめると、充填率は70~80%以上確保する必要があることとなる。

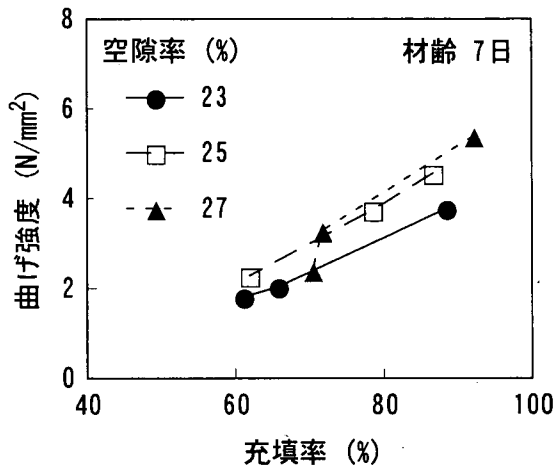


図-4 充填率と曲げ強度

破断ひずみについて、図-5にまとめた。曲げ強度と同様に、施工後の時間経過につれて、充填率が高いほど破断ひずみが小さくなるというセメント混合物としての特性が現れてくる。しかし、いずれの場合においても日本道路公団の規格値(材齢7日で 3×10^{-3} 以上)を満足していることがわかる。ところが、半たわみ性材料が高架床版上に施工される場合の規格値である首都高速道路公団のもの(材齢7日で $8 \sim 9 \times 10^{-3}$ 以上)を考えると、このような箇所での施工を対象とする場合には、母体アスファルト混合物中の空隙を多くしてセメントミルクの充填率を高めることは必ずしも妥当なものではないことも推定される。

変形係数について、図-6にまとめた。これについても、材齢の進行に伴って変形係数が増加し、充填率と変形係数の相関性が明らかになることが認められる。

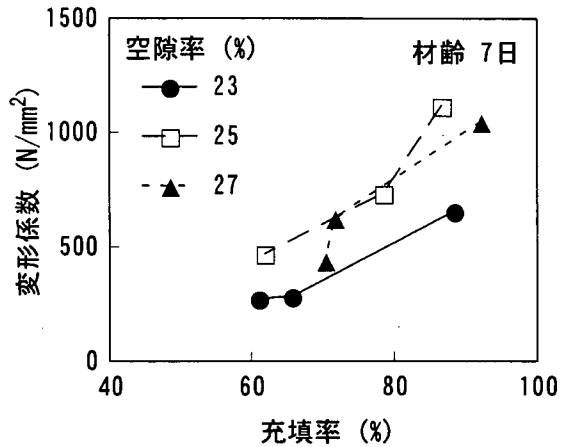


図-6 充填率と変形係数(材齢7日)

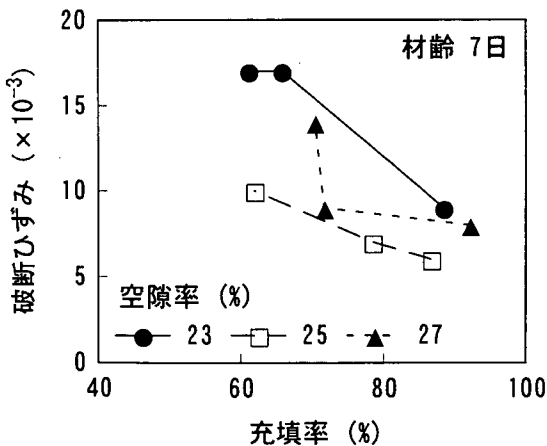


図-5 充填率と破断強度

このような半たわみ性材料の力学特性の違いは、結局母体アスファルト中の空隙に充填されたセメントミルクの量によることが明らかになったので、これを半たわみ性材料中に占めるセメントミルクの体積百分率として表し(以下ではペースト分と称す)、これに注目して曲げ試験結果を整理した。図-7、図-8、図-9は、それぞれ、曲げ強度、破断ひずみ、変形係数である。施工後の時間経過に伴う力学特性の変化がペースト分をパラメーターにすると明確に表されることがわかる。このうち、曲げ強度については、材齢が十分経過するとペースト分1%あたり 0.4N/mm^2 変化することが明らかであり、前述の高速道路用基準値を満足するためには、ペースト分として20%以上が必要となるものと思われる。

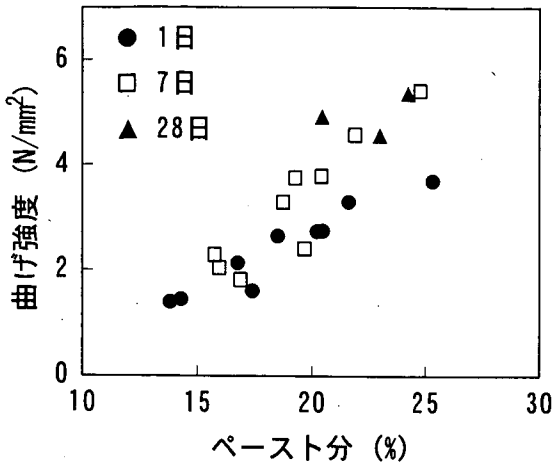


図-7 ペースト分と曲げ強度

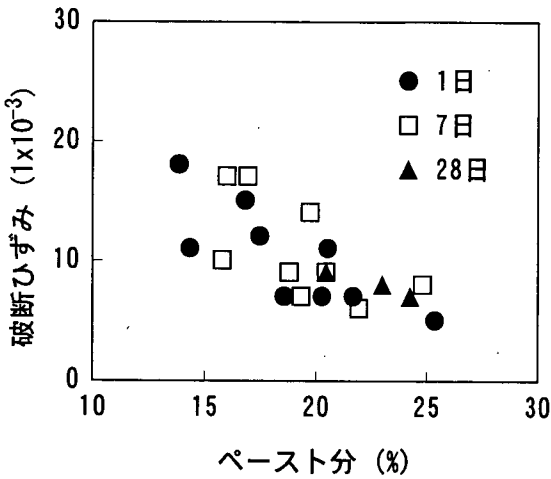


図-8 ペースト分と破断ひずみ

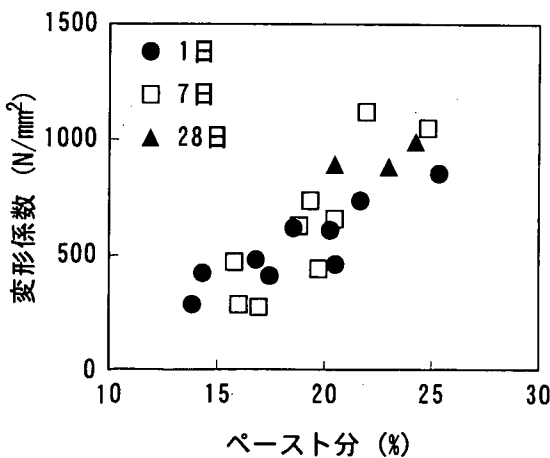


図-9 ペースト分と変形係数

荷回数の関係を図-10に示した。ひずみ振幅 150×10^{-6} では供試体の破壊は認められなかったが、ひずみ振幅 400×10^{-6} では周波数によらず5,000回程度で、またひずみ振幅 250×10^{-6} でも10Hzの場合に40,000回で供試体は破壊状態を呈した。なお、これを井上によって報告されている試験結果と対比すると、材料や試験方法が同一ではないが、今回検討したものは耐荷性が十分大きいものと判断できる。ここでは、供試体の弾性係数が急激に低下した時点を破壊と定義している。

この繰返し荷重試験における荷重回数1,000回時の半たわみ性材料の弾性係数を図-11に示した。弾性係数は、アスファルトコンクリートと同様に、周波数によって大きく変化すること、すなわち、周波数が小さくなると弾性係数は小さな値となるのがわかる。また、この図から、半たわみ性材料の弾性係数はひずみ振幅によっても変化することが明らかとなっている。すなわち、小変形領域では弾性係数が大きめの値となるのに対し、大変形領域ではそれが小さめの値となっている。

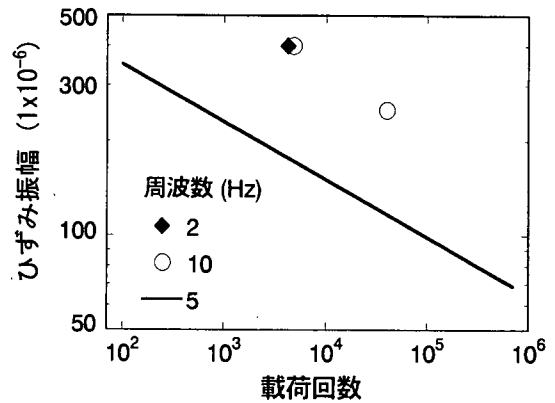


図-10 ひずみ振幅と破壊回数

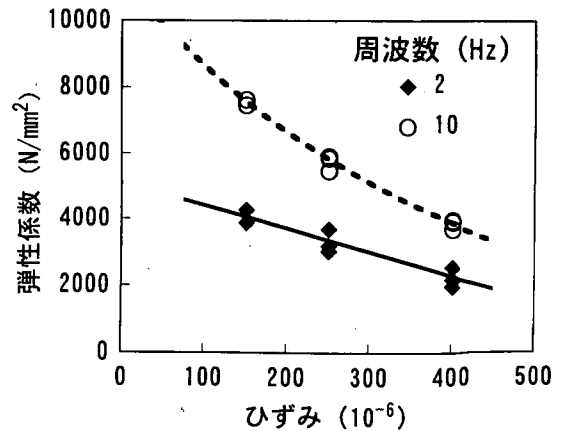


図-11 繰返し荷重試験時の弾性係数

(2) 半たわみ性材料の繰返し曲げ特性
繰返し荷重試験における荷重ひずみ振幅と破壊時の載

(3) 乾燥収縮特性

半たわみ性材料のセメントミルク注入後の時間経過に伴う収縮量の変化をコンクリートの場合と一緒にして図-12に示した。半たわみ性材料の施工後2年ほど経過した時点では、収縮ひずみが平均で 400×10^{-6} となっており、コンクリートと同じ程度の乾燥収縮状態となっている。これは、半たわみ性材料を実際の工事に適用する場合には乾燥収縮に対する対策、具体的には目地を設けるといった手法を採ることが必要となろう。

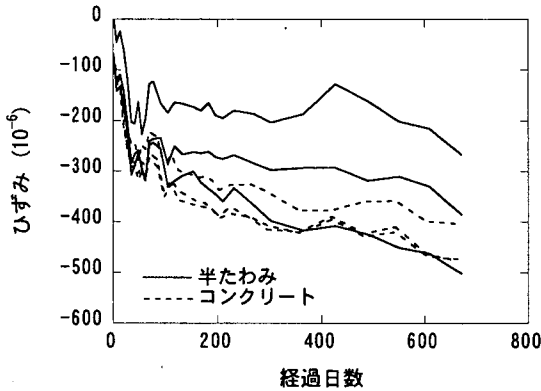


図-12 半たわみ性材料の収縮量

(4) 耐油性

ホイールトラッキング試験結果として得られた、すりへり量の油浸時間の増加に伴う変化について図-13にまとめた。すりへり量の油浸時間に伴う変化をみると、コンクリートについては油浸の影響をほとんど受けないのに対して、アスファルトコンクリートについては著しく、3時間油浸することにより非油浸状態の5倍程度にまで増加することがわかる。半たわみ性材料の場合は、油浸時間の増加につれてすりへり量が増加する傾向はみられるものの、油浸28日の場合でもアスファルトコンクリートの油浸3時間における値までには至らないことがわかった。

以上の結果から、半たわみ性材料の耐油性は、コンクリートには及ばないものの、アスファルトコンクリートよりはるかに良好なものであることが認められた。この点については、半たわみ性材料が耐油性が要求される市中の給油所の床面に適用可能とされることからわかる。したがって、この材料によるオーバーレイ工法をエプロンにおいて採用した場合においても、その耐油性についてはほとんど問題ないことが明らかである。

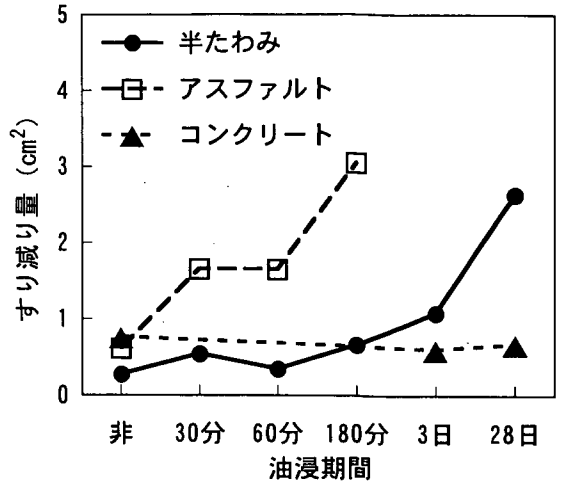


図-13 油浸期間とすり減り量

2.3 半たわみ性材料の力学特性に対する影響因子

(1) 母体アスファルト混合物の配合が及ぼす影響

母体アスファルト混合物の配合を4種類に変えた場合の一連の試験結果として曲げ強度、破断ひずみ、変形係数を図-14、図-15、図-16に示す。ここでは、セメントミルク注入時のアスファルト混合物の温度を 80°C 、試料作製時の厚さを50mmとしている。同一配合時の力学特性は、材齢すなわちセメントミルクの硬化程度によって大きく異なってくるのがわかる。具体的には、時間の経過にともなって、強度ならびに変形係数は増加し、破断ひずみは低下してくる。また、これらが変化する状況は配合によって異なっていることもわかる。たとえば、母体アスファルト混合物の空隙が大きい配合dにあっては、材齢の増加にともなう件の変化が著しいものとなっている。

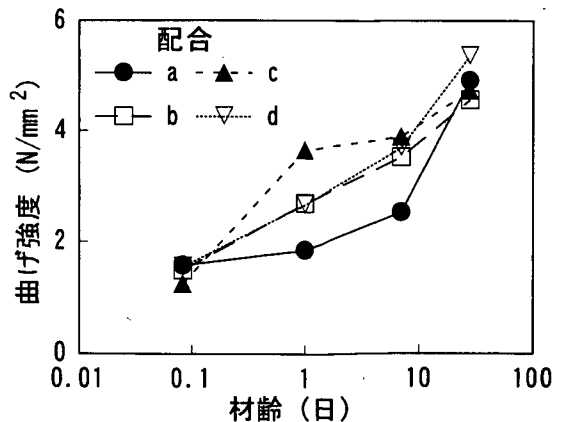


図-14 曲げ強度の経時変化

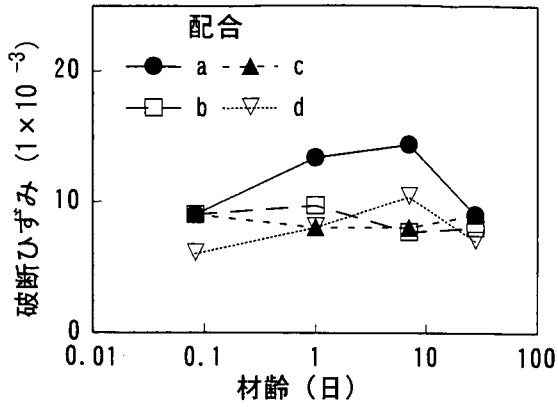


図- 15 破断ひずみの経時変化

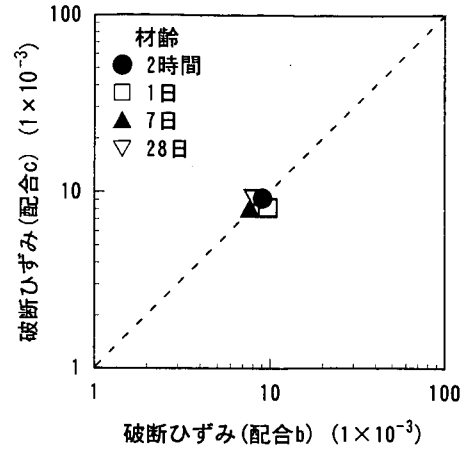


図- 18 アスファルトの種類と破断ひずみ

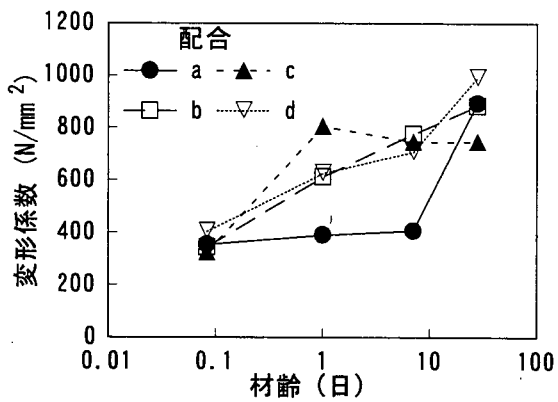


図- 16 変形係数の経時変化

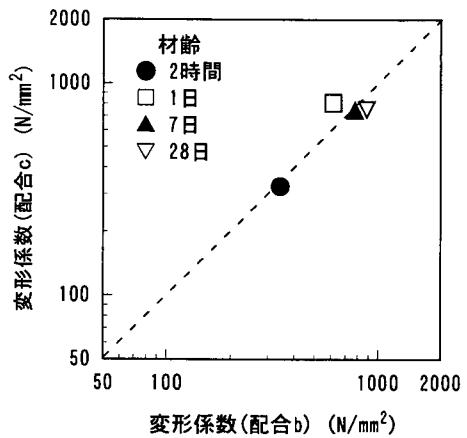


図- 19 アスファルトの種類と変形係数

次に、アスファルトの違いがこれらの力学特性に及ぼす影響についてまとめた。図- 17、図- 18、図- 19には曲げ強度、破断ひずみ、変形係数を示した。材齢が1日を超えるようになると、アスファルトの違いは顕著には現れていないことがわかる。

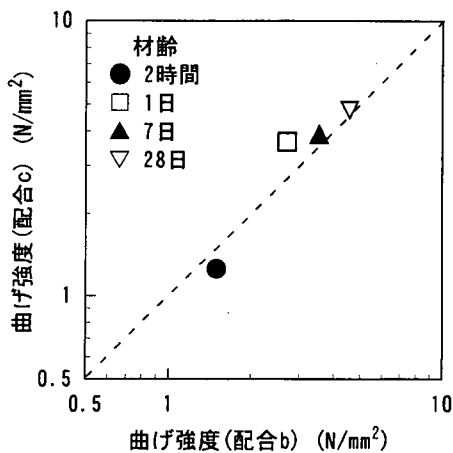


図- 17 アスファルトの種類と曲げ強度

(2) 施工厚が及ぼす影響

半たわみ性材料の施工厚は一般には50mm程度とされているが、空港を対象するとそれ以上のものも必要となる。その場合、母体アスファルト混合物下部へのセメントミルクの浸透性が懸念される場所があるので、以下に検討を加えた。具体的には、100～200mmの厚さで作製した試料を50mm厚ごとにスライスして(50mm厚の試料の場合はそのまま)、深さ方向の母体アスファルト混合物の空隙率、セメントミルクの充填率、ペースト分を調べることによる。図- 20には空隙率の深さ方向分布をまとめた。2層施工となる厚さ150、200mmの場合は、下層のほうが上層よりも空隙率が小さくなる傾向がみられ、特に下層上部でそれが著しくなっている。1層施工の場合には深さ方向で顕著な差がみられないことから、これは上層の転圧により下層上部の密化が進行したためであると考えられる。

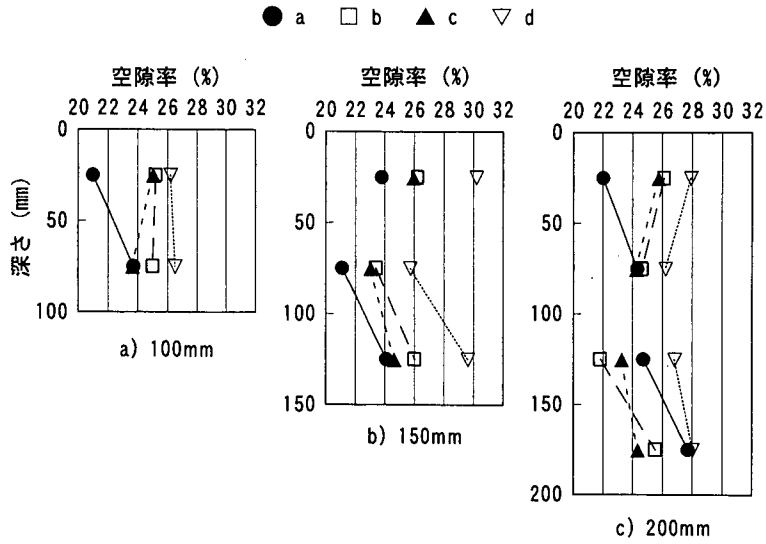


図- 20 空隙率の深さ方向分布

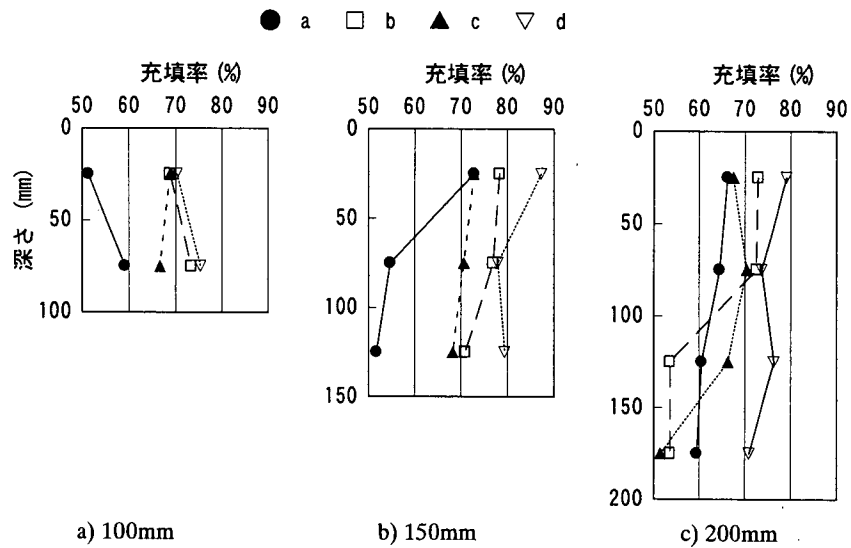
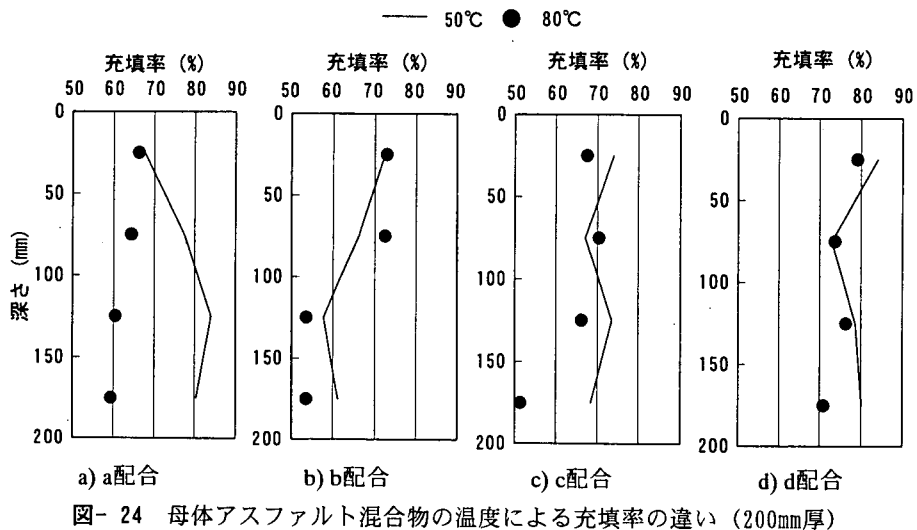
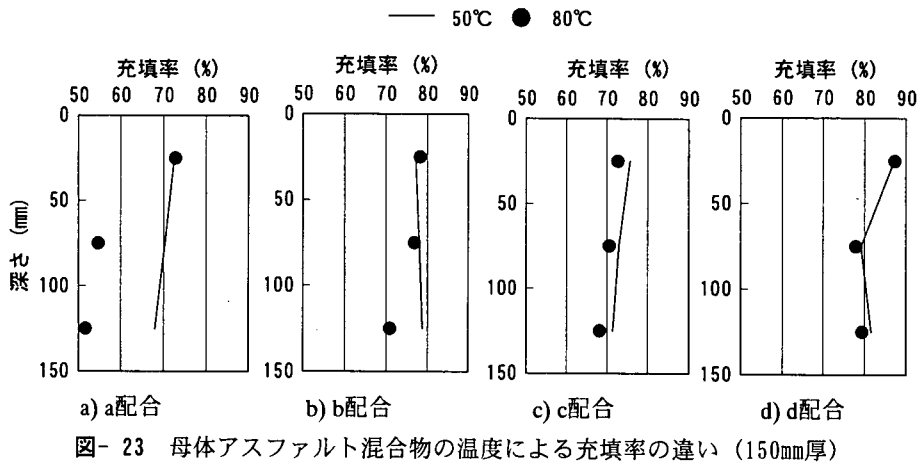
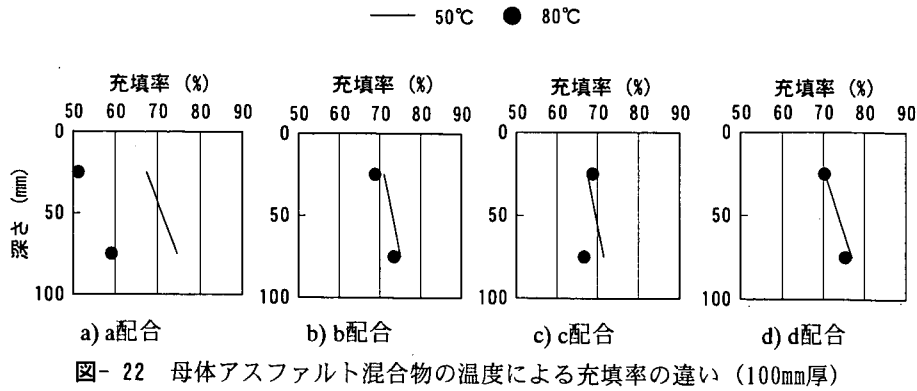


図- 21 充填率の深さ方向分布

セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度が80℃の場合の充填率の深さ方向分布について図- 21 に示した。全体的に空隙率の小さい場合ほど充填率も小さくなっている傾向がみられる。施工厚が150mmとなった場合には下部のほうが充填率は低くなり、平均的にみると層の厚いほうが充填率は低いようである。

セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度による充填率の違いについて検討した。図- 22、図- 23、図- 24は50℃、80℃の場合の充填率を対比したものの

である（それぞれ、施工厚が100mm、150mm、200mmの場合）。母体アスファルト混合物の密度が小さい場合にはセメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度は充填率に影響を及ぼし、80℃になると50℃の場合に比較すると充填率は低くなっている。しかし、母体アスファルト混合物の空隙率が25%以上になると充填率の差は小さくなる。これは、200mmと層厚が大きい場合も同様である。



次に、空隙率と充填率の関係が施工厚により変化する状況についてまとめた。図- 25は注入時温度が80℃の場合である。空隙率が小さいほど充填率が小さくなるという傾向は施工厚が大きいほど顕著である。空隙率が大きい場合には施工厚の影響はあまりみられない。

空隙率とペースト分の関係が施工厚によって変化する状況をまとめた。注入時温度が80℃の場合を示した図- 26からは、空隙率が比較的小さい範囲では施工厚の影響が顕著となるが、空隙率27%程度になると施工厚の影響は明確ではない。したがって、ペースト分からみても施

工厚を大きくする場合には空隙率の大きな母体アスファルト混合物を用いることが必要とわかる。

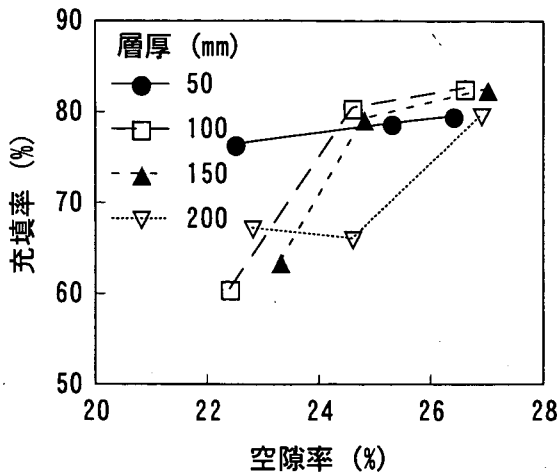


図- 25 施工厚と充填率 (80°C)

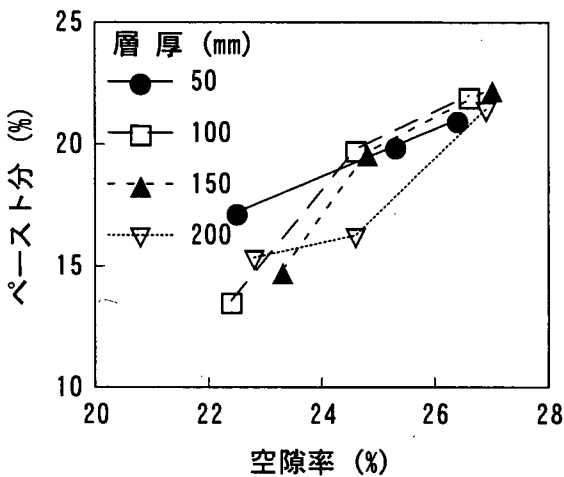


図- 26 施工厚とペースト分 (80°C)

(3) 養生時間と力学特性

半たわみ性材料を用いた場合の早期交通開放性について検討するために曲げ強度試験とホイールトラッキング試験を実施した(セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物温度80°C)。初期材齢(1, 2, 3時間)における温度30°Cでのホイールトラッキング試験結果からは、4種類の材料の動的安定度がいずれも60,000回/mm以上を超える結果となった。この試験終了時の変形量の材齢の経過にともなう変化についてまとめた図- 27からは、施工後数時間における相違は明確ではないものの、母体アスファルト混合物の空隙率の大きい配合dでは、材齢が3時間になると変形量が小さくなるようである。

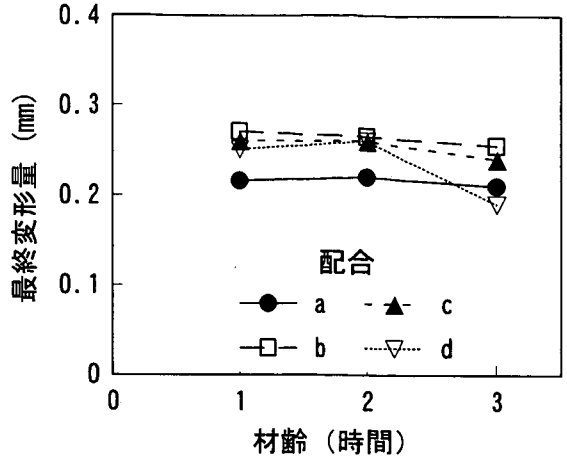


図- 27 温度による変形量の違い

材齢1, 2時間における曲げ強度, 破断ひずみ, 変形係数について各材料別に図- 28, 図- 29, 図- 30に示した(セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物温度80°C)。改質アスファルトを用いた配合a, b, dの初期材齢における曲げ強度は、材齢1時間で0.9N/mm²程度, 材齢2時間で1.5N/mm²程度となり、母体アスファルト混合物の空隙率によらず、同程度の値を示している。一方、ストレートアスファルトを用いた配合cは、材齢1時間でそれらの60%程度, 材齢2時間でそれらの80%程度の値となり、アスファルトの違いによる影響が出ているようである。半たわみ性混合物の曲げ強度を改質アスファルト、ストレートアスファルトを用いた場合で比較すると(配合b, c)、前者のほうが大きいことから、早期交通開放を必要とする場合にはアスファルトとして改質Ⅱ型を用いるのが望ましいことがわかる。

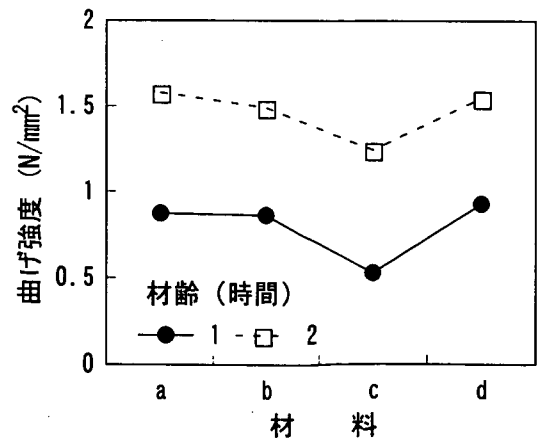


図- 28 材齢による曲げ強度の違い

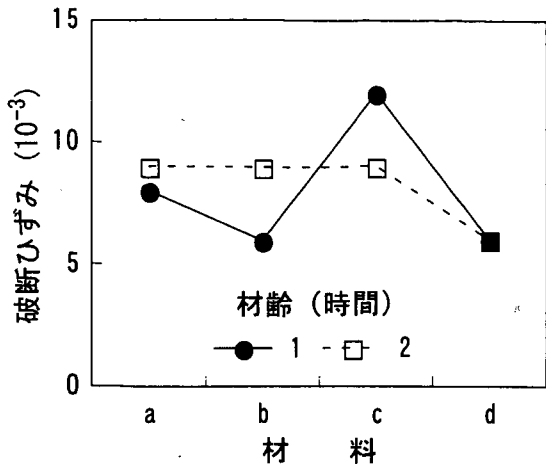


図- 29 材齢による破断ひずみの違い

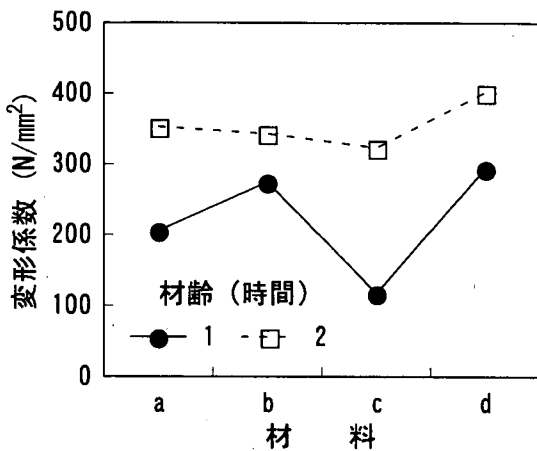


図- 30 材齢による変形係数の違い

日本道路公団では交通開放時に必要なセメントミルクの圧縮強度として 5N/mm^2 と規定している³⁾。これは半たわみ性混合物（母体アスファルト混合物の空隙率23%，マーシャル安定度 3.8kN ）の曲げ強度では 1.5N/m^2 程度に相当するので改質アスファルトを用いた母体アスファルト混合物の温度が 80°C になった時点で 20°C のセメントミルクを注入するという今回用いた施工方法における養生時間は、少なくとも2時間程度が必要になると考えられる。

なお、養生時間を比較的長くとることが可能な場合にはセメントミルク注入時のアスファルト混合物の温度を 50°C にすることもできる。そこで、温度が 50°C 、 80°C の2種類について、空隙率と充填率、ペースト分の関係について検討した。図- 31に示した空隙率と充填率の関係からは、両者とも空隙率が大きくなるにつれて充填率も大きくなる傾向がみられるが、同一の空隙率の場合には

温度の低いほうが充填率は大きいことが認められる。また、 50°C とした場合には、空隙率が充填率に及ぼす影響はあまり大きくないことがわかる。

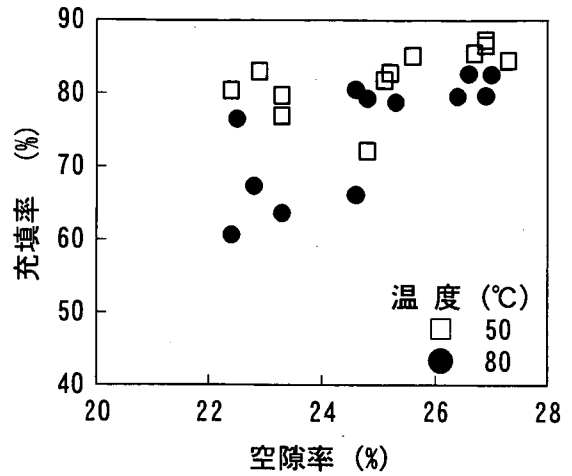


図-31 空隙率と充填率の関係

図- 32には空隙率とペースト分の関係を示した。前述のように十分な材齢が経過するとペースト分1%あたり曲げ強度で 0.4N/mm^2 程度の差が現れることから、空隙率23%程度ではセメントミルクを高温時に注入することによって、低温時注入の場合と比較すると、曲げ強度は最大 2N/mm^2 も低下してしまう。このような注入時の温度による強度の違いは、空隙率が大きくなるにつれて小さくなっていく傾向がみられる。したがって、温度を 50°C とできる場合であっても、 80°C の場合と同様な空隙率を有する母体アスファルト混合物を用いることが望ましいこととなろう。

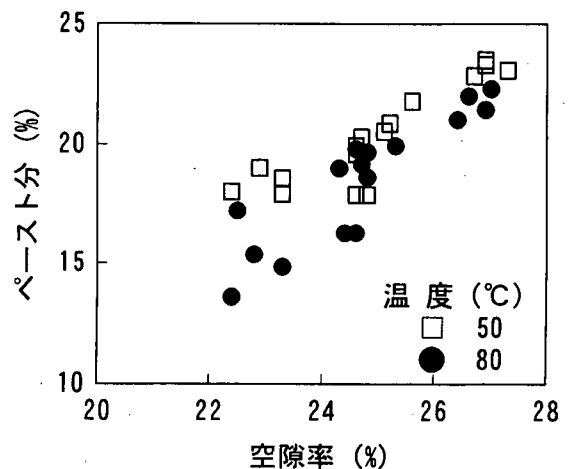


図- 32 空隙率とペースト分

2.4 まとめ

(1) 基本的力学特性

- ① 母体アスファルト混合物に改質アスファルトを使用した場合、空隙率の違いによらず施工後の時間経過につれて力学特性は変化するが、空隙率の大きいほど、すなわち、強度が小さいほど半たわみ性材料の強度の増加も著しくなっている。
- ② 材齢が十分経過した場合の半たわみ性材料の曲げ試験特性は、母体アスファルト混合物のセメントミルク充填率ならびにペースト分と送還がある。
- ③ 材齢が十分経過した場合の曲げ強度でみると、ペースト分1%あたり 0.4N/mm^2 ほど変化する。
- ④ 半たわみ性材料の材齢7日における曲げ強度の規格値を 2.5N/mm^2 とした場合、充填率として70~80%以上確保する必要がある。また、ペースト分としては20%程度が必要となる。
- ⑤ ④と同様に破断ひずみの規格値を 3×10^{-3} (材齢7日)とした場合、いずれの材料もこれを満足するが、空隙率をあまり高いものにすると破断ひずみが小さくなる恐れが強い。
- ⑥ 半たわみ性材料の繰返し載荷に対する耐荷性は十分である。また、材料の弾性係数は周波数ならびにひずみ振幅によって異なっている。
- ⑦ 半たわみ性材料の乾燥収縮特性はセメントコンクリートと同程度である。
- ⑧ 半たわみ性材料の耐油性はセメントコンクリートには及ばないものの、アスファルトコンクリートよりはるかに良好である。

(2) 配合と力学特性

- ① 材齢が1日ほど経過すると、配合の違いは力学特性にはみられない。
- ② 材齢が数時間の場合には、半たわみ性材料の力学特性は母体アスファルト混合物に使用するアスファルトにより大きく影響を受ける。改質アスファルトを用いると空隙率によらず、材齢1, 2時間で曲げ強度が、それぞれ、 $0.9, 1.5\text{N/mm}^2$ 程度となるのに対し、ストレートアスファルトでは材齢1, 2時間で改質アスファルトの場合のそれぞれ60%, 80%となる。

(3) 施工厚と力学特性

- ① 施工厚150, 200mmについては2層(下層ではいずれも100mm厚)で供試体を締固めたため、下層部分は上層部分に比べて空隙率が低くなった。特に、下層上部で著

しい。

② 施工厚の増加につれて、充填率は小さくなり、ペースト分は少なくなることから、施工厚を大きくする場合には空隙率の大きい固体アスファルト混合物を用いる必要がある。

(4) 養生時間と力学特性

- ① 温度 30°C における動的安定度は、材料によらず、施工後1時間経過すると $60,000$ 回/mmを超えるまでになる。
- ② セメントミルクの圧縮強度 5N/mm^2 を交通開放時期の目安とすると、改質アスファルトを用いた場合には2時間程度の養生が必要となる。
- ③ セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度は充填率に影響を与え、温度が 80°C の場合は 50°C と比較すると、同一配合においては充填率が低くなる。しかし、空隙率が大きい場合には、両者の差は小さい。
- ④ セメントミルクの充填率から注入時温度を 50°C から 80°C へ上昇させることによる強度低下を推定すると、空隙率23%では最大で 2N/mm^2 にも達する。

以上に示した室内試験の結果を総括して、施工後2時間で交通開放可能となる材料として試験施工により検証すべきものを選定すると以下のようなものとなる。

- ① 改質アスファルトを使用して、空隙率が25%となる母体アスファルト混合物を使用する
- ② 施工厚として最大200mmが可能である
- ③ アスファルト混合物の温度が 80°C の時点で、セメントミルクを注入する

3. 試験施工

2.に述べたように、半たわみ性材料について一連の室内試験を実施して、アスファルト舗装の補修方法への適用性について明らかにした。本章では、この結果を受けて実施した試験施工ならびに載荷試験の状況について記述する。

3.1 舗装計画

試験舗装は、運輸省港湾技術研究所野比実験場(当時)の既設アスファルト舗装上に計画された(図-33)。この試験舗装の目的は、上記のように、2.で記述したように室内試験においてその可能性が認められた半たわみ性材料による100mmを越えるような厚いオーバーレイ工法について検証することである。半たわみ性材料としては、2.で記した配合b、すなわち、母体アスファルト混

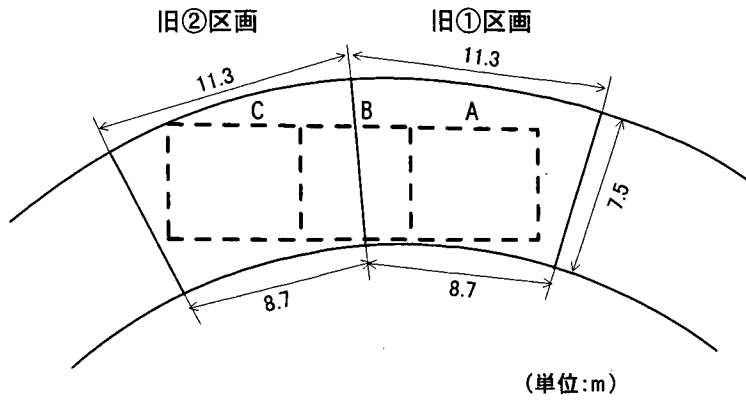


図- 33 試験舗装位置図

合物は改質アスファルトを使用して、空隠率25%、マーシャル安定度350kgf以上となるものを用い、セメントミルクはアスファルト混合物の温度が80℃に低下した時点で注入することとした。

試験施工において検討の対象としたオーバーレイ厚は100mmと200mmであり、図- 34に示すように、それぞれ幅5m、長さ6mの広さを有するA、C区画での施工を計画した。なお、両区画の間には施工上の理由からセメントミルクを注入していないB区画を設けてある。既設舗装が片勾配となっているため、まず全区画にわたってレベリング層として粗粒度アスファルトコンクリートを30～78mmの厚さで施工するものとした。A区画では、その上

に100mm厚の密粒度アスファルトコンクリート層を施工したのち、100mm厚の半たわみ性材料によるオーバーレイを実施している。これに対し、C区画ではレベリング層上に直接200mm厚の半たわみ性材料によるオーバーレイを施工している（100mm厚の層による2層施工）。この場合には、母体アスファルト混合物を100mm厚の二層に分けて施工してから、二層目の表面にセメントミルクを散布・浸透させるという方法を用いている。試験舗装完成後に航空機荷重による繰返し載荷を実施するために、試験区画の周辺には図- 35に示すようなすり付け部分を設けている。

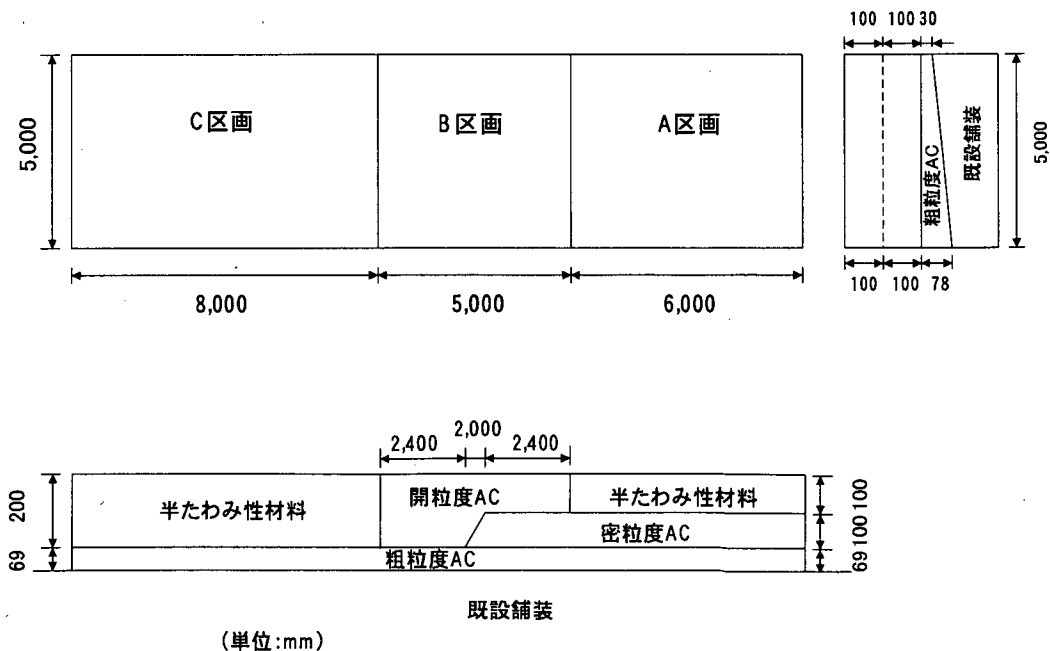


図- 34 試験舗装断面図

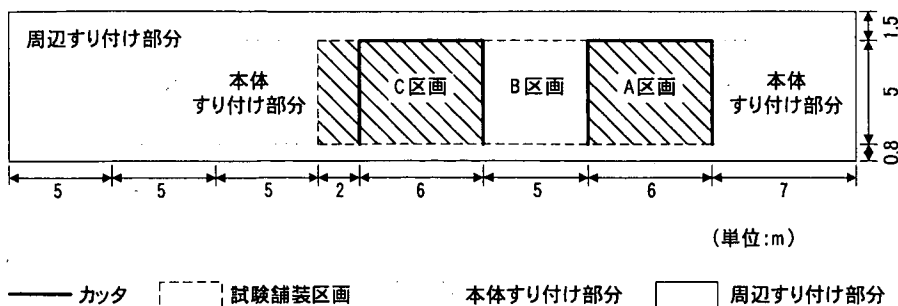


図- 35 試験舗装平面図

なお、既設アスファルト舗装は、各種路盤の構造的価値について検討するために30年ほど前に施工されたもの上に10年後にオーバーレイが実施された構造となっている。その舗装構造は、図- 36に示すとおりである。路床は砂質土で構成されており、建設当時の現場CBRは13.1%であった。アスファルト安定処理材、旧基層、旧表層のマーシャル安定度は、それぞれ、4、8、9kN（75回突固め）を基準値として配合設計された。旧オーバーレイ層は上層50mm、下層50mmの2層により構成されており、それぞれ空港アスファルト舗装構造設計要領に示されている表層、基層としての材料規定を満足する材料が使用されている。

合等を室内試験に基いて選定した。

アスファルト混合物としては、上記のように、室内試験における配合b、すなわち骨材最大粒径20mm、空隙率25%、マーシャル安定度3.5kNとなる開粒度アスファルト混合物を用いた（改質アスファルトⅡ型使用）。アスファルトプラントからの出荷時におけるこの材料のマーシャル安定度試験結果を表- 13に示した（両面50回突固め）。室内試験での配合設計時と比べて空隙率がやや大きくなったため、安定度は0.6kN程度低い値を示した。

表- 13 母体アスファルト混合物の配合試験結果

配合	アスファルト量 (%)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	フロー値 (1/100cm)	安定度 (kN)
室内	3.0	1.932	24.8	25	4.15
現場	2.7	1.892	27.4	24	3.57

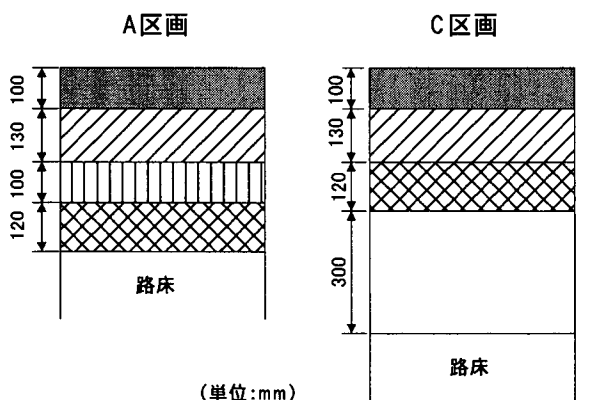


図- 36 既設舗装断面図

3.2 オーバーレイの施工

(1) 材料

使用した半たわみ性材料は、上記のように、材料、配

セメントミルクには、室内試験と同様に、プレミックタイプの超速硬セメント、凝結遅延材、水をグラウトミキサーで混合することにより製造した。水セメント比は40%である。なお、凝結遅延材の添加量は、施工時の気温が15℃程度であったため、セメントの質量に対して0.075%とした。

セメントミルクの流動性として、試験施工時に測定したPロートによるフロー値を表- 14に示した。フロー値はA区画で10.3秒、C区画で10.7秒で、施工時の温度が低かったため、室内試験結果と比較して1.5~2秒程度小さくなっている。しかし、値自体はアスファルト舗装要綱に示されている標準的な値の範囲に入っていることから、今回用いたセメントミルクは良好な流動性を有するものと考えられた。

セメントミルクの強度として、曲げ強度と圧縮強度を

測定した（JIS R5201「セメントの物理試験法」準拠）。
 曲げ強度は、材齢3時間、7日で 2.84N/mm^2 、 3.14N/mm^2 とな
 っている。また、圧縮強度は材齢3時間、7日で
 9.12N/mm^2 、 28.6N/mm^2 となっている。いずれもアスファ
 ルト舗装要綱に示された標準値（材齢7日）を材齢3時間
 の時点で満足している。

表- 14 セメントミルクの流動性

区 画	フロー値 (秒)	温度 (°C)
A	10.3	14
C	10.7	14

(2) 施工

オーバーレイの施工に先だって、レベリング層ならび
 に密粒度アスファルトコンクリート層を施工した。その
 後に、舗装表面全体を入念に清掃してから、タックコー
 トとして舗装面全体にゴム入りアスファルト乳剤（PKR-
 T2： 0.4l/m^2 ）を散布し、十分に養生した。そして、
 100mm厚の母体アスファルト混合物を一層により施工し
 た。この場合、アスファルトフィニッシャによりアスファ
 ルト混合物を敷き均してから、マカダムローラにより
 転圧した。オーバーレイ厚が200mmとなっているC区画
 では、上記のように厚さ100mmの2層施工としたので、1
 層目の施工終了後直ちに2層目を施工した。この場合に、
 1層目には振動ローラを用い、2層目にはマカダムローラ
 を用いて、それぞれ目標転圧回数を4回として転圧した。

母体アスファルト混合物を施工後、その内部温度が
 80°C に低下した時点で表面にセメントミルクを散布した。
 これをゴムレーキですばやく広げて、振動ローラにより
 アスファルト混合物の空隙中に浸透させた。使用したセ
 メントミルクの量は、A、C区画のそれぞれで、3、7パツ
 チ（1パツチ300l入り）であったが、両区画ともいく分か
 はB区画へも浸透する結果となった。セメントミルクの
 余剰分はゴムレーキで取り除き、そのあとデッキブラシ
 を用いて表面を粗面に仕上げた。なお、アスファルト混
 合物の内部温度は施工直後においては 140°C を超えてい
 したが、 80°C に低下するまでには転圧完了後、90分程度
 （A区画）、180分程度（C区画）が必要であった。温度
 が低下する状況については、図- 37、図- 38に示してあ
 る。

セメントミルクを注入してから1日以上経過したあと
 に、図- 34に示す位置（各区画外周）に半たわみ性材料
 層の全厚にわたってカットによる目地を設けた。これは、
 セメントミルク注入後の時間経過に伴う収縮量の変化を
 示した図- 12からわかるように、半たわみ性材料は舗装

用コンクリートほどではないにしても、施工後の乾燥収
 縮が大きいという問題に対処するためである。

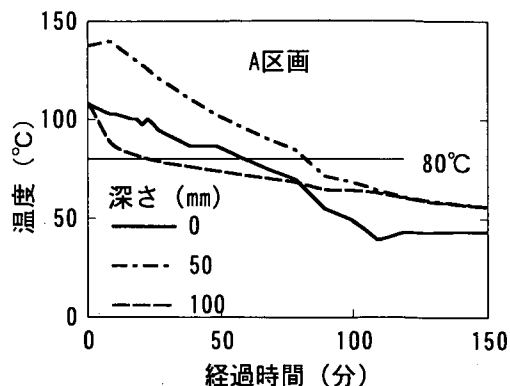


図- 37 アスファルト混合物の温度変化（A区画）

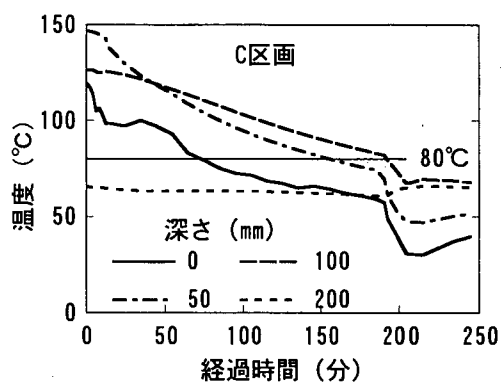


図- 38 アスファルト混合物の温度変化（C区画）

施工後にB区画より採取した開粒度アスファルト混
 合物のコアを表面から厚さ約50mmごとに切断して、各層
 の空隙率ならびに締固め度を測定した結果を表- 15に示
 す（この計算に用いた最大理論密度、基準密度は、室内
 試験に基づき、 2.606g/cm^3 と 1.892g/cm^3 とした）。A、C
 区画における空隙率は、それぞれ29.6%、27.4%となり、
 日標空隙率より4.6%、2.4%大きくなった。また、締固め
 度はA、C区画それぞれ平均で97.0%、99.9%となった。
 深さ方向における空隙率は区画によって異なっており、
 A区画すなわち100mm厚の場合には差がないものの、C区
 画すなわち200mm厚の場合には上下縁部分に比べて中間
 部分が幾分小さめとなっている。これは室内試験と同様
 の傾向である。

A区画およびC区画より採取した半たわみ性材料層のコ
 アを表面から厚さ約50mmごとに切断して各層のセメン
 トミルク充填率を測定した結果を図- 39に示す（図中
 には室内試験時の値も示してある）。コアは区画を代表す
 ると考えられる位置（各区画3箇所）から採取している。
 A、C区画における充填率は平均でそれぞれ87.7%、

88.3%と、試験施工では室内試験に比べて空隙率が若干大きくなったこともあって非常に高い値が得られている。深さ方向の違いをみると、C区画では中間部分が小さい結果となっているが、これは母体アスファルト混合物層の空隙率がこの範囲で小さくなっていることの影響であろう。なお、セメントミルク充填率は、施工の翌日に採取したコアの質量とB区画で採取したコア（セメントミルク非注入）の質量の差から得られるセメントミルクの容積の、母体アスファルト混合物の空隙に対する比率を計算することにより求めた。

表- 15 母体アスファルト混合物の空隙率

区画	深さ (mm)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	締固め度 (%)
A	0-50	1.836	29.5	97.1
	50-200	1.832	29.7	96.9
C	0-50	1.779	31.7	94.0
	50-100	1.942	25.5	102.6
	100-150	1.951	25.1	103.1
	150-200	1.851	27.4	99.9

施工翌日にA区画およびC区画の表面付近より切り取って6日間湿潤養生した、半たわみ性混合物の曲げ強度試験結果を表- 16に示す。強度はA区画よりC区画が若干高くなり、A区画で5.18N/mm²、C区画で6.27N/mm²となった。この原因としては、C区画はA区画より充填率が大きくなっていることが考えられる。なお、このときの曲げ強度、破断ひずみは、いずれも日本道路公団の規格値⁵⁾を満足したものとなっている。

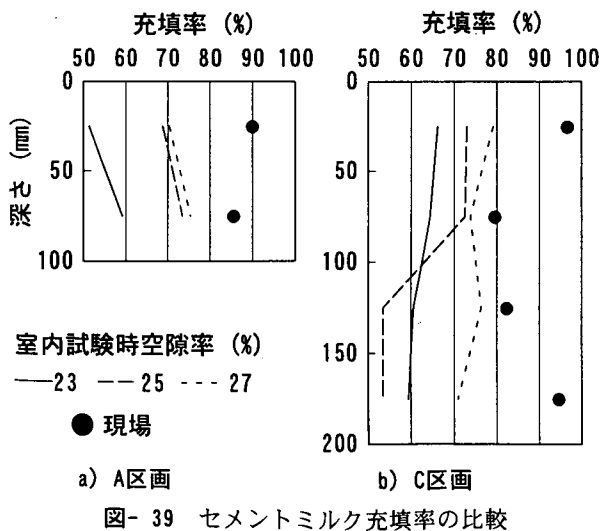


表- 16 半たわみ性材料の曲げ試験結果

区画	曲げ強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (×10 ⁻³)	弾性係数 (kN/mm ²)
A	5.18	6	1.22
C	6.27	6	1.48

なお、半たわみ性材料とその下層のアスファルトコンクリート層との間の付着強度を建研式現場引き抜き試験機を用いて調べたところ、A、C区画でそれぞれ1.07N/mm²、1.15N/mm²となっていることがわかった。同様の事例では0.4~0.5N/mm²程度の付着強度が報告されていること⁶⁾からみて、今回の試験では十分な付着力が得られているものと考えられる。

3.3 載荷試験

(1) 試験方法

半たわみ性材料を用いた空港アスファルト舗装のオーバーレイ工法の実用性を検証するために、2種類の載荷試験を実施した。一つは、オーバーレイ後の半たわみ性材料の硬化状況を把握する経時変化試験であり、交通解放時期を判断するために必要となる。もう一つは、航空機荷重の繰返し走行載荷による舗装の挙動の変化を把握するものであり、オーバーレイの構造設計に必要な。いずれもFWDを用いて衝撃荷重に対するたわみを測定するという方法を用いている。ここでは荷重を250kNとしている。

経時変化試験では、A、C区画の中央部の2箇所において、セメントミルク注入後1、2、3、4、24時間が経過した時点でFWD試験を実施した。このほか、施工してから7日経過した時点では各区画内8箇所で試験を行った。

繰返し走行載荷試験は、試験用脚（B-747型航空機の主脚と車輪が同一配置）を車体下部に取り付けた原型走行荷重車を図- 40に示す位置で繰返し走行させることによった。そのときには車両重量を910kNとし、繰返し走行回数を1,000回とした。この走行載荷試験の前には、FWDを用いたたわみ測定試験を行った。また、横断方向のわだちぼれについても計測した。

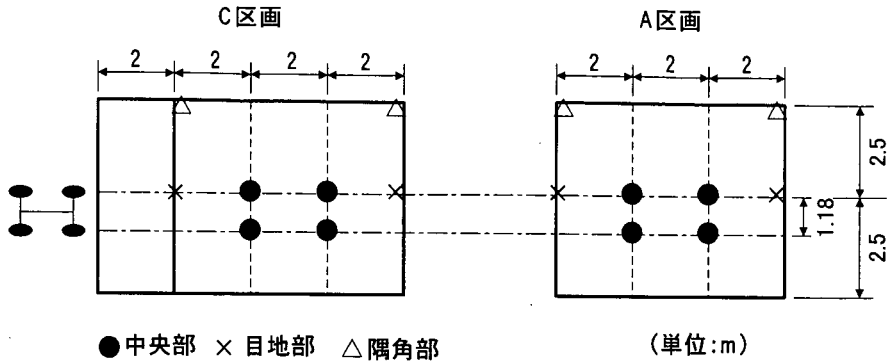


図-40 走行ならびに載荷試験位置

(2) 試験結果

a) オーバーレイの効果

オーバーレイによる補修工法の効果について、荷重が加えられたときの舗装の応答であるたわみに注目して検討した。

既設アスファルト舗装の状態からオーバーレイに至るまでの間に、区画の中央部で測定したたわみ曲線を図-41、図-42に示す(それぞれA、C区画)。レベリング層、新表層上では施工温度が影響しないように施工後十分時間が経過した時点で実施し、オーバーレイ層上ではセメントミルク注入後7日経過時に実施した。両区画とも、いうまでもなくたわみは既設舗装上で最大となっており、半たわみ性材料によるオーバーレイ層上に至るまでに徐々に減少していく。特に、半たわみ性材料が他に比べて弾性係数が大きいことから、オーバーレイ層の施工前後でたわみが大きく変化する傾向が認められ、オーバーレイ層が200mmと厚いC区画ではそれが顕著である。なお、区画による違いをみれば、既設舗装構造の違いを反映してオーバーレイの前にはA区画のほうがたわみは小さくなっているが、オーバーレイ後ではほぼ同じ値になっている。

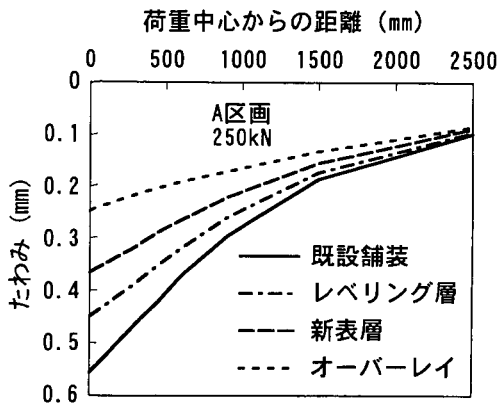


図-41 オーバーレイ前後のたわみ曲線 (A区画)

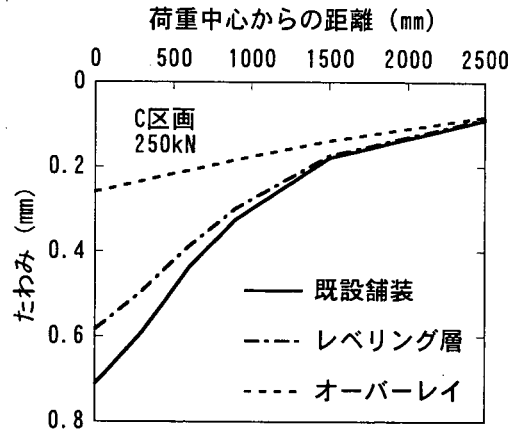


図-42 オーバーレイ前後のたわみ曲線 (C区画)

b) 交通解放時期

半たわみ性材料によるオーバーレイ工法の大きな利点である早期交通開放可能性について検討する。

FWDたわみ曲線の施工後の経時変化について、A区画の場合を図-43に、C区画の場合を図-44に示した。両区画とも施工後4時間までと施工後1日とではたわみ曲線の形状が大きく異なり、前者の場合には荷重近傍(荷重直下と荷重中心から300mm)のたわみ、特に載荷板中心位置のもののみが経時的に変化していることがわかる。

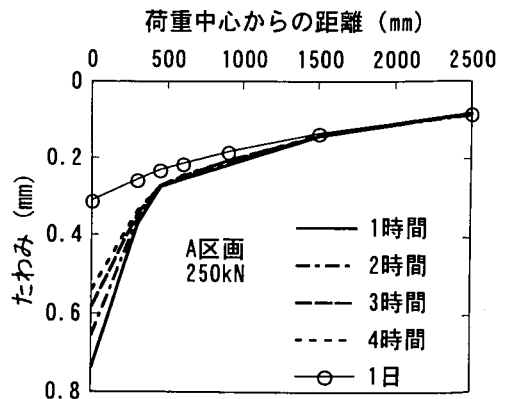


図-43 A区画におけるFWDたわみ曲線の経時変化

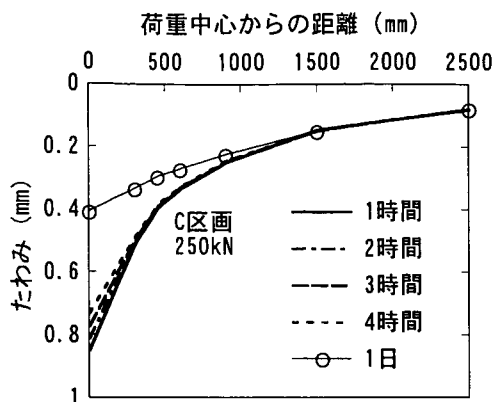


図-44 C区画におけるFWDたわみ曲線の経時変化

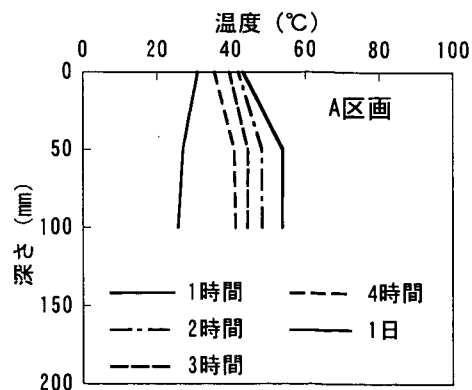


図-46 半たわみ性材料層温度の経時変化 (A区画)

図-45には、FWD最大たわみの経時変化を示した。両区画とも時間の経過につれてたわみが減少していくのは明らかで、施工後7日経過した時点ではA、C区画のたわみにはほとんど差がみられなくなる。これに至るまでは、上記のように、C区画のほうが全体的に大きいこと、時間の経過につれてA区画のほうが速やかに減少することがわかる。

両者の経時変化の違いについては、施工後の温度低下速度が両区画で異なることが理由の一つとして挙げられる。図-46、図-47には、それぞれ、A、C区画の半たわみ性材料層の深さ方向温度分布が経時変化する状況をまとめてある。いうまでもなく、層厚の大きいC区画のほうが、A区画に比較すると温度が低下しにくいことがわかる。これは、表面においてもその傾向があるものの、内部において著しい。具体的には、施工後1時間から4時間までの間に低下する温度は、A、C区画のそれぞれ12℃、7℃となっており、C区画においては施工後4時間が経過しても50℃を超える温度が保持されている。

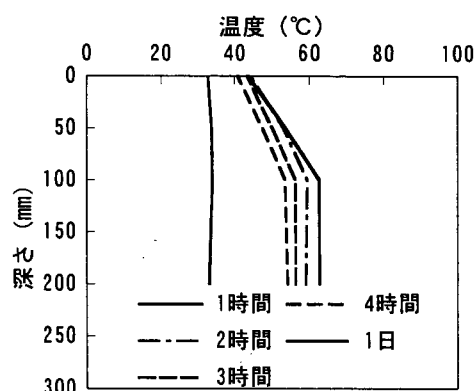


図-47 半たわみ性材料層の経時変化 (C区画)

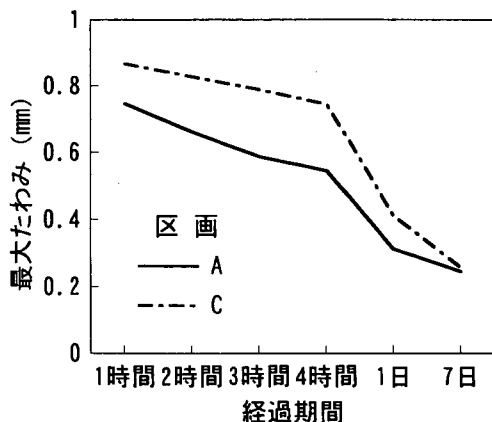


図-45 FWD最大たわみのオーバーレイ後の経時変化

しかし、このFWD最大たわみの経時変化は、アスファルト舗装に対する温度補正方法⁷⁾によって説明できないことから、この時点ではセメントミルクの硬化が進行中であることが推定される。

この点について明らかにするために、測定されたたわみ曲線を逆解析することにより、半たわみ性材料層の弾性係数を推定し、その経時変化を調べた。ここでは、この舗装を多層弾性体と見なして、多層弾性理論による逆解析手法(LMBS⁸⁾)を使用した。具体的には、半たわみ性材料によるオーバーレイ層、アスファルト混合物層、土質材料層の3層構造とみなし、各層のポアソン比を0.3として、各層の弾性係数を推定した⁷⁾。その結果を示した図-48では、施工後の時間経過に伴って弾性係数も増加することが明らかであるが、施工後4時間程度ではセメントミルクの硬化が進行中であることも推定される。なお、アスファルト混合物層も温度変化の影響を受けることから、その弾性係数も変化している。

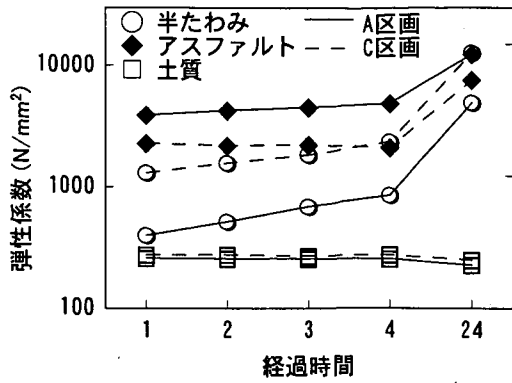


図- 48 半たわみ性材料層弾性係数の施工後経時変化

このように、FWD最大たわみならびに半たわみ性材料層の弾性係数のいずれをみても、施工後の時間経過に伴って舗装の荷重支持力が増加していくことが認められるものの、施工後4時間程度では最終的な支持力には到達してはいることが推定される。したがって、施工後の交通解放時期については、別途材料試験等の手段によって判断することが必要となろう。

c) 縁部・隅角部の挙動

FWDにより測定されたたわみは、区画が同一でも載荷位置によって異なったものとなる。具体的にいえば、最大たわみは、図- 49 (施工後7日経過) に示すように、A、C区画とも、中央部、縁部、隅角部の順に大きくなる。この傾向は、コンクリート舗装における測定結果と同様であり、今回のように目地を設けた半たわみ性材料によるオーバーレイ舗装においては、その構造設計で目地の存在を考慮しなければならないことを意味している。

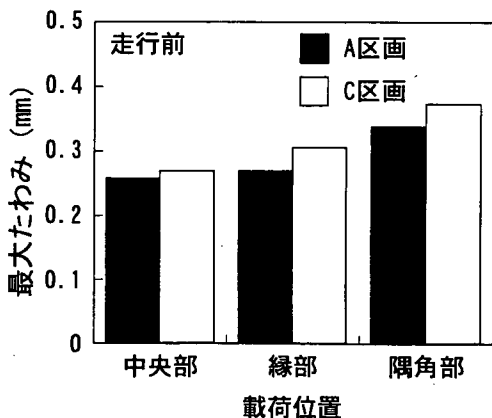


図- 49 載荷位置によるFWD最大たわみの違い

目地部分では半たわみ性材料と既設アスファルトコンクリート層との間の剥離が懸念されたことから、施工後

3年半経過時に直接引抜試験を実施して、付着強度を確認した。その結果を図- 50に示した。施工厚100mmのA区画ならびに200mmのC区画の中間深さ、すなわち1、2層目の境界では箇所による差がみられず、また強度そのものも施工後1週間目に測定された値である1.1N/mm²が保持されている。これに対して、C区画における底面、すなわち半たわみ性材料層とアスファルト混合物層の境界面では強度が中央部>目地部>隅角部となっていること、特に隅角部では中央部の半分程度となっていることから、その付着状態が懸念される状況となっている。しかし、この場合であっても、上述した別の事例で報告されている程度の値は得られている。

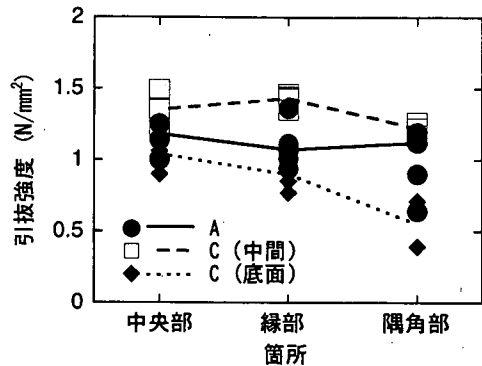


図- 50 箇所による引抜強度の違い

d) 繰返し載荷に対する安定性

走行載荷前後のFWD最大たわみについて、A、C区画のものを図- 51、図- 52にそれぞれまとめた (施工してから4年後のデータも)。測定時の温度に違いもあって、走行載荷後4年経過時では全体的にたわみは大きくなっているものの、繰返し走行載荷の影響を最も受けやすいと考えられる縁部、隅角部でも極端に増加するようなことはない。

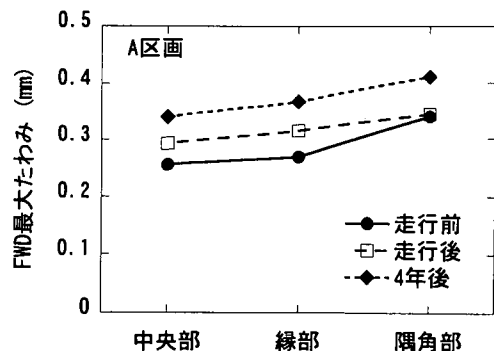


図- 51 走行載荷によるFWD最大たわみの変化 (A区画)

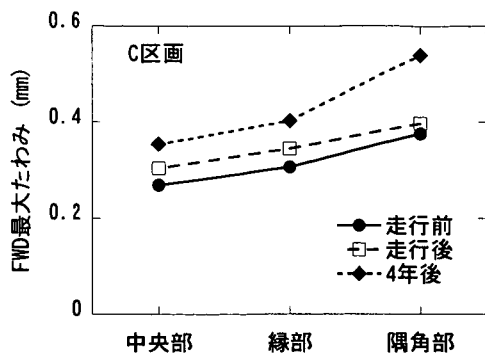


図- 52 走行荷によるFWD最大たわみの変化 (C区画)

次に、繰返し走行荷前後に得られたFWDたわみ曲線を逆解析することにより、各層の弾性係数を推定した。その結果を示した図- 53 (A区画), 図- 54 (C区画)からは、両区画とも繰返し走行荷の影響は大きくないことがわかる。

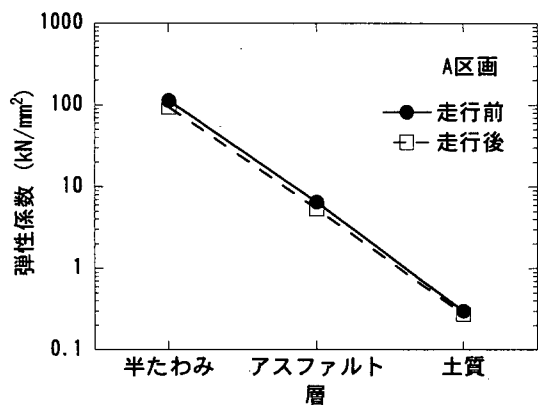


図- 53 走行荷前後の弾性係数 (A区画)

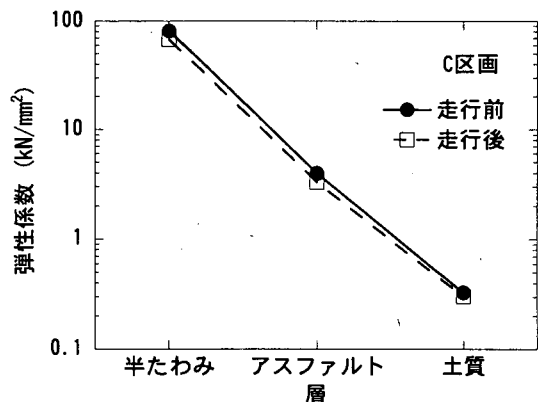


図- 54 走行荷前後の弾性係数 (C区画)

繰返し走行荷前後の横断方向累積変形量として、図- 55, 図- 56にA区画, C区画のものを示した。C区画が最大で1.5mmなのに対して、A区画では2mm程度と若干大きくなっているものの、補修が必要とされるまでには至っていない。この点からも繰返し走行荷の影響は認められない。FWDたわみはC区画のほうがA区画よりも大きくなっているが、わだちぼれではそれが逆転している。これは、半たわみ性材料層を厚くすることが累積変形の点では有利となることを意味しているものと考えられる。

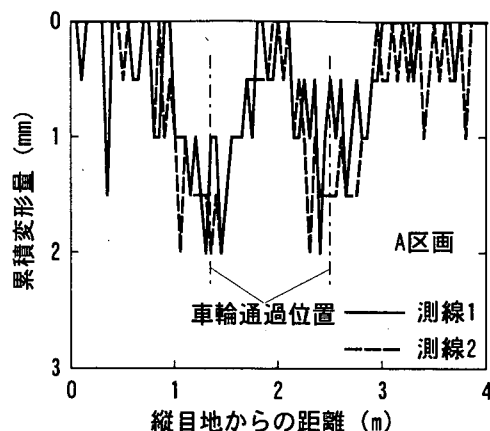


図- 55 A区画における横断方向累積変形量

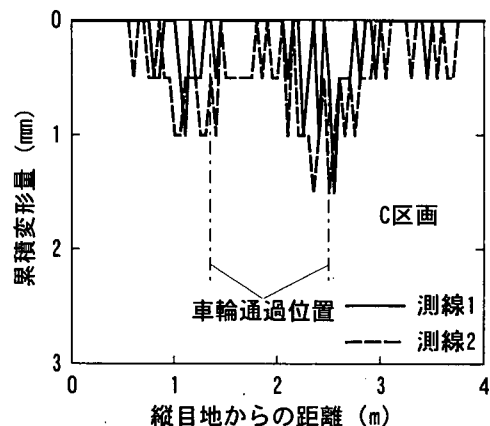


図- 56 C区画における横断方向累積変形量

4. オーバーレイ構造設計の方針

以上に記述した試験舗装の施工ならびに荷重試験結果から、室内試験で認められた200mm厚のオーバーレイが実際に可能であること、その荷重支持力、耐久性とも満足できるものであることが確認できた。本節では、これ

を受けて、半たわみ性材料を用いた空港アスファルト舗装のオーバーレイの構造設計の方針を示す。

まず、半たわみ性材料とアスファルトコンクリートの力学特性が大きく異なること、オーバーレイ層に目地を設けることから、アスファルト舗装上の半たわみ性材料によるオーバーレイ構造がコンクリート舗装とみなせるかどうかといった点について検討した。

その方法は、舗装構造をWinkler地盤上の平板と考えた場合の中央部、縁部、隅角部におけるたわみの計算値を実測値と比較するというものである。計算値は、Westergaardによる近似式を用いて算出した（目地での荷重伝達は考えていない）⁹⁾。既設舗装の支持力係数は、既設アスファルトコンクリート層以下の2層弾性体と構造的に等価となる1層弾性体の弾性係数を求めてから、支持力係数へと変換することによって求めている。

得られたたわみの計算値を実測値と対比する形で表-17に示した。実測値では、A、C区画とも、縁部、隅角部は中央部に比較して、それぞれ1割、3割程度大きくなっているのに対して、計算値（C区画）ではそれぞれ4倍、6倍程度になっていることから、ここで考えたモデルでは実測結果を説明できないようである。実測値と計算値が大きく異なるという点については、既設アスファルトコンクリート層以下を弾性地盤と見なした場合でも変わらない。このことから、半たわみ性材料によるオーバーレイ構造をコンクリート舗装とみなすことは難しいと判断できる。

表- 17 FWD最大たわみの計算値と実測値

位置	A区画		C区画		A区画		C区画	
	走行前		走行後		走行前		走行後	
	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算
中央部	0.257	0.029	0.295	0.267	0.269	0.166	0.305	0.182
縁部	0.269	0.144	0.318	1.199	0.305	0.627	0.345	0.694
隅角部	0.338	-	0.343	0.06	0.373	1.034	0.395	1.060

(単位：mm)

表- 18 荷重位置による平均平方二乗誤差の違い

位置	A区画		C区画	
	走行前	走行後	走行前	走行後
中央部	7.7	7.9	7.7	7.2
縁部	8.8	7.6	15.2	11.5
隅角部	8.2	14.3	17.6	16.6

(単位：%)

この舗装には目地を設けていることから、アスファルト舗装の構造解析に一般的に用いられる多層弾性理論をそのまま適用することは難しい。しかし、設計プロセスを簡易なものとするためには、構造解析作業の容易な多層弾性理論を利用するのが好都合である。そこで、ここでは、半たわみ性材料層ならびに既設アスファルト舗装の構造状態を多層弾性理論により検討する方法を考えた。

まず、半たわみ性材料層の検討をするために、三次元有限要素法を用いて縁部ならびに隅角部載荷時の半たわみ性材料層の荷重応答について解析した。具体的には、隅角部における表面ひび割れ発生の危険性ならびに目地部における底面ひび割れ発生の危険性といった点である。

解析に用いたモデルは、層構成については上述の多層弾性理論によるたわみの逆解析に用いたものと同じであり、平面的には十分な広さを与えた既設アスファルト舗装上に試験舗装と同じ半たわみ性材料によるオーバーレイ層を重ねたものである。各層の弾性係数としては中央部での測定値に対して多層弾性理論を用いた逆解析により得られた値を使用している。計算結果として、FWDを用いた荷重試験で得られたたわみの実測値と計算値の平均平方二乗誤差（RMSE）を表- 18に示した。RMSEは中央部での結果において8%程度あるが、縁部ならびに隅角部でもその2倍程度に納まっていることから、ここで用いた手法は実用的には十分なものであると判断できる。

半たわみ性材料層のひび割れ発生の危険性を表すものである、最大ひずみを荷重位置別に図- 57に示した（FWDによる荷重重に対する計算値）。この図から、A区画においては縁部における値、C区画においては縁部ならびに隅角部における値が中央部におけるものより最大で5割程度大きくなっていることがわかる。このことから、オーバーレイの構造設計時に用いるべきひずみとしては、多層弾性理論により求められた値を割増しすればよいものと考えられる。

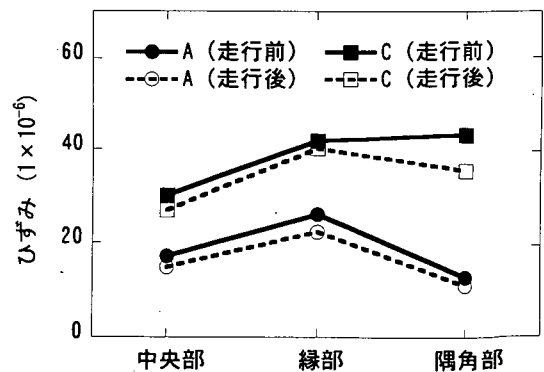


図- 57 荷重位置と半たわみ性材料層最大ひずみ

次に、既設アスファルト舗装の構造状態は、従来より用いられている設計標準である、アスファルト混合物層下面水平ひずみと路床上面垂直ひずみに注目することにより評価した。この場合に半たわみ性材料層の弾性係数として使用する値については、この層に設けた目地を考慮に入れて決定した。すなわち、各載荷位置における測定結果について多層弾性理論による逆解析を実施して、半たわみ性材料層のみかけの弾性係数を算出した。この場合、縁部と隅角部の逆解析では、アスファルト混合物層とそれ以深の土質材料層の弾性係数として中央部における測定結果を逆解析することにより得られた値を使用している。

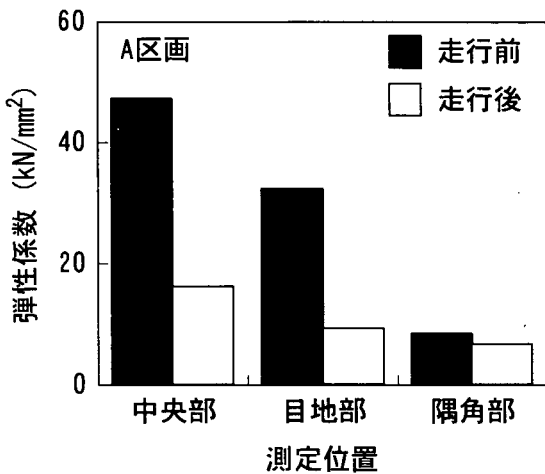


図-58 載荷位置による半たわみ性材料層弾性係数の違い (A区画)

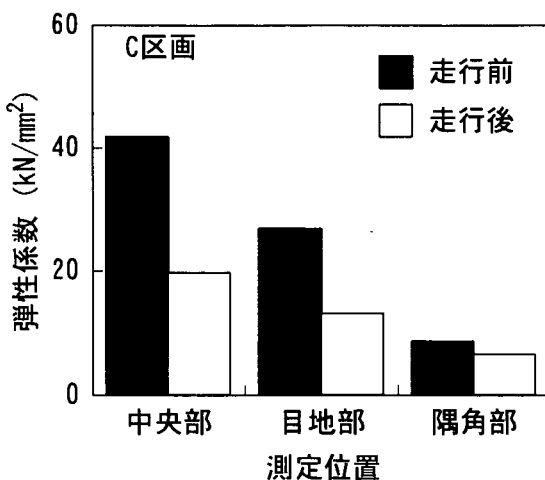


図-59 載荷位置による半たわみ性材料層弾性係数の違い (C区画)

このようにして得られた半たわみ性材料層の弾性係数を図-58、図-59に示した。この図から、目地部と隅角部の弾性係数は中央部におけるものより小さく算出されることがわかる。したがって、既設アスファルト舗装の安全性については、半たわみ性材料層の弾性係数として室内試験で得られる値を低減して使用することにより、検討すればいいものと考えられる。

5. 結論

半たわみ性材料を用いた空港アスファルト舗装の長寿命化方策について検討した。室内試験の結果として以下のような結論が得られた。

- (1) 半たわみ性材料の力学特性は施工時の時間経過につれて変化し、母体アスファルト混合物の空隙率が大きいほど変化の度合も大きい。
- (2) 十分な材齢が経過した場合の曲げ特性は、セメントミルク充填率ならびにペースト分と相関があり、曲げ強度でみればペースト分1%あたり0.4N/mm²ほど変化する(改質アスファルト使用時)。
- (3) 半たわみ性材料の材齢7日における曲げ強度の規格値を2.5N/mm²とした場合、充填率として70~80%以上確保する必要がある(改質アスファルト使用時)。また、ペースト分としては20%程度が必要となる。
- (4) 施工厚が増加すると母体アスファルト混合物の下層部分の空隙率が小さくなる。また、セメントミルク充填率は小さくなり、ペースト分は少なくなるので空隙率の大きなものを使用する必要がある。
- (5) セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物の温度は充填率に影響を与え、温度が80℃の場合は50℃と比較すると、同一配合においては明らかに充填率が低くなる。しかし、空隙率が大きくなるとその差は小さい。
- (6) 母体アスファルト混合物に改質アスファルトを用いた半たわみ性材料は、空隙率によらず、材齢2時間で曲げ強度が1.5N/mm²程度となり、この程度の養生で交通開放できよう(セメントミルク注入時の母体アスファルト混合物温度80℃)。
- (7) 半たわみ性材料の繰返し載荷に対する疲労抵抗性ならびに耐油性は十分なものである。また、乾燥収縮特性はコンクリートと同程度である。

現場施工試験結果は、次のようにまとめられる。

- (1) 半たわみ性材料としては室内試験により選定されたもの、すなわち改質アスファルト使用・空隙率25%の母体アスファルト混合物の温度が80℃に低下した時点で、

超速硬セメント使用のセメントミルクを注入するというものの妥当性が確認された。

(2) (1)の方法によって200mm厚までのオーバーレイが可能であることがわかった。このときのセメントミルク充填率は中間深さ部分で80%程度まで下がるものの、全体としては室内試験時よりも高いことが認められた。

(3) オーバーレイにより舗装の荷重支持力は明らかに増加し、航空機主脚荷重の1,000回の繰返し走行に対して、試験舗装は十分な耐荷性を示した。また、わだちぼれもほとんど生じなかった。

(4) 舗装の挙動に対する目地を設けたことによる影響は、縁部・隅角部におけるFWDたわみならびに現場引抜強度からみてほとんど認められない。

(5) 半たわみ性材料によるオーバーレイの構造設計には多層弾性理論を適用できることがわかった。すなわち、オーバーレイ層の検討時には計算により得られるひずみを割増す方法、既設アスファルト舗装の検討時には計算に使用する弾性係数の値を見かけ上低減させる方法を用いればよいと考えられる。

6. おわりに

以上、空港アスファルト舗装の表寿命化方策として半たわみ性材料によるものについてまとめた。交通荷重条件から空港では厚いオーバーレイが必要となる場合が多いので、半たわみ性材料を用いるときには時間的制約から速硬性セメント・改質アスファルトの使用、高温時注入といったことが不可欠である。わが国の空港においてこの材料を本格的に用いた事例は多くはないが、今回行った一連の試験によりその実用性は十分であることが確認された。また、構造設計法の方針についても明らかに

できたことから、この成果を空港舗装構造設計要領等の技術基準類に反映させていく所存である。

(2002年2月14日受付)

参考文献

- 1) 八谷好高, 市川常憲: 半たわみ性材料によるコンクリート舗装の急速補修, 土木学会, 土木学会論文集, No. 550/V-33, pp.185-194, 1996年.
- 2) Department of the Army and the Air Force: *Flexible Pavement Design for Airfields (Elastic Layered Method)*, 1989.
- 3) 日本道路公団: 半たわみ性舗装施工基準(案), 1990年.
- 4) Silfwerbrand, j.: Whitetoppings - Swedish Field Tests 1993-1995, CBI report 1:95, 77p., 1995.
- 5) 鈴木 徹, 奥平真誠: 半たわみ性舗装に関する試験(その2), 舗装, 第30巻, 第2号, pp.36-41, 1995年.
- 6) 沖本晃次, 原田秀賢, 倉原良民: 半たわみ性舗装を用いたコンジット舗装, 舗装, 第26巻, 第5号, pp.9-14, 1991年.
- 7) 八谷好高, 高橋 修, 坪川将丈: FWDによる空港アスファルト舗装の非破壊構造評価, 土木学会論文集, No. 662/V-49, pp.169-183, 2000年.
- 8) http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/~takeyama/pub/hosoml/lmbs/lmbs_3.exe
- 9) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会(編): 舗装工学, (社)土木学会, 476p., 1995年.