

農業用道路におけるアスファルト舗装合材
の凍結融解に伴う力学性状に関する研究*

吉 田 隆 輝**

The Study on Mechanical Properties with Freeze-Thaw Action
of Bituminous Mixtures in the Farm Road

Takaki YOSHIDA

要 旨

アスファルト合材は各種農業用施設に広く用いられており、その力学性状に関する基礎的な研究は多くみられるものの、凍結融解によるアスファルト合材の耐久性に関する研究は、必要かつ重要であるにもかかわらず少ない。

本論文は、耐久性を求める一つの試験に分類されている凍結融解試験装置を用いて、マーシャル安定度試験、曲げ試験、透水試験の各試験を行った結果、凍結融解を受けたアスファルト合材の力学的諸性状を明らかにすることができた。

1. 緒 論

アスファルト合材は、たわみ性に豊み、高い止水性、可塑性を有し、さらに耐久性に富む等の優れた特性を有するため、農業用道路、水利構造物等の各種農業用施設、一般道路舗装、空港の舗装等に広く用いられている。これら施設に用いられるアスファルト合材に要求される性状は、その用途によって異なるものであり、要求される全ての性状を同時に満足させることは、アスファルト合材の性状がレオロジー挙動を示すことから³⁹⁾⁴⁰⁾非常に難しい。したがって各用途別に部分的に相反する性状をできるだけ満足させるべく、各種研究が行われ現場施工に反映されている。

施工面からみると、アスファルト合材がレオロジー性状を有することから温度管理を充分に行い素早く工事を完了させなければならない等の難しい施工管理があるものの、セメントコンクリート舗装と異なり早期に機能を発揮できるという非常に大きな利点を有する。特に北海道のように厳しい気象条件の下にあり、工事適期が非常に短い地

域では、工事速度の大きなアスファルト舗装は、寒冷地に最も適した舗装であるということができる¹²⁾。

各種農業用施設のうち、農道におけるアスファルト合材の利用について簡単に述べる。

農道とは主として農業上の利用に供する道路で、農業機械を圃場に導入し農業生産活動を容易にするとともに、農産物の市場への流通の円滑・拡大化を図り、社会活動にも利用して労働生産性を高めかつ生活環境を改善し、豊かな農村社会を形成するうえで重要な役割をはたしている。農道を機能面から分類すると図-1のようになる。

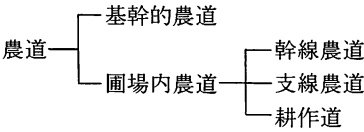


図-1 農道の種類

これら基幹的農道および圃場内農道を、農業生産活動、農産物の移動等が最も有機的かつ合理的に、しかも経済的に機能を発揮できるように農道網を配置、整備しなければならない。このような目的を持つ農道には、舗装材料としてアスファルト合材が広く使用されており、それにより得られる便益は数多い。

* 本論文は北海道大学審査学位論文の概要である。

** 助教授 土木工学科

表－1 最近の農道舗装実施量¹⁴⁾

単位：km，百万円

	1979年度		1980年度		1981年度		1982年度	
	事業量	事業費	事業量	事業費	事業量	事業費	事業量	事業費
道営事業								
広域農道	77	2231	73	2915	73	2714	70	3233
一般農道	61	2114	58	2954	63	3383	51	2776
農免農道	76	1736	68	3072	67	3039	69	3401
団体営事業								
団体営農道	80	2641	71	3197	72	3143	69	3453
計	294	8722	270	12138	275	12279	259	12863

農道は主として都道府県営事業における広域営農団地農道，一般農道，農林漁業用揮発油税財源身替農道各整備事業，団体営事業における農道整備事業によって造成，改良，舗装が行われる。これら農道単独事業の他に，圃場整備事業，畑地帯総合土地改良事業，農村基盤総合整備事業，農村総合整備モデル事業，農地開発事業等の中でも農道整備が行われる。この農道の総延長距離は，全国で約 60 万 km は存在するものと推定されている⁷⁾⁵³⁾⁵⁴⁾。北海道における最近の舗装実績を表－1 に示す。毎年おおよそ 270 km の舗装が行われており，これに農道整備事業以外の事業で行われている農道舗装実施量をあわせると 410 km 前後の舗装が実施されている²⁰⁾。毎年 410 km ずつ舗装されていくとしても，今後問題となるオーバーレイ等も考慮するならば，整備完了までに非常に多くの年月が必要となる。農道のアスファルト舗装の効果が大きいことから，舗装事業の推進が今後一層強く望まれるところである。

アスファルト合材が各種施設に広く用いられているにも拘らず，合材の耐久性に関する研究は今のところ少ない。交通荷重の過多あるいは路盤・路床の支持力不足等を要因とする破壊形態に関する研究は多くみうけられるが³⁰⁾³³⁾³⁵⁾²⁶⁸⁾⁷¹⁾⁷⁴⁾，これに比べて凍結融解作用あるいは急激な温度変化による温度応力等による破壊に関する研究は多いとはいえない。交通量の少ない舗装部分の老化現象およびそれに起因するひび割れの発生は，車輪の通る舗装部分に比べ非常に早く起きることが各種調査で報告されている²¹⁾³⁷⁾⁵⁰⁾⁶⁵⁾。交通量が少なく，ひび割れの発生している寒冷地の舗装表面において，寒冷期に一時的にせよ混合物中に水が浸透し，アスファルト舗装が凍結融解を受けることによる影響は無視できないものである。

アスファルト合材の耐久性とは，老化を含む気象作用および交通による擦り減り作用に対する抵抗性と定義されており¹¹⁾，寒冷地域におけるアスファルト合材に要求される重要な性状である。ア

スファルト合材の凍結融解試験は，耐久性を求める試験の一部に分類されているが³⁵⁾，経費と長期間の試験を要することもあるためその研究は少ない。さらに力学的諸性状を求めるための試験方法および評価方法については研究者によってもまちまちで²³⁾³²⁾⁶⁴⁾⁶⁹⁾，いまだに確立されているとはいえないのが現状である。

マーシャル安定度試験が広く用いられていることから，マーシャル供試体を使用して凍結融解を受けたアスファルト混合物の特性を明らかにする手法に意義は認められる。しかしながらマーシャル安定度試験だけでなく，力学的な意味が明らかにされている試験法の導入が望ましい。すなわちアスファルト混合物のレオロジー性状に注目して用いられた曲げ試験によるアスファルト混合物の破壊性状の規則性を求める手法を導入し¹⁸⁾⁴⁵⁾⁶³⁾，曲げ性状の面からも検討を加えることにより凍結融解を受けた混合物の力学的性状がさらに明らかにされていくものと考ええる。

著者はこれらのことを考慮して，凍結融解を受けたアスファルト合材の諸性状を一層明確にするために，マーシャル安定度試験，曲げ試験，透水試験の各試験を行い，アスファルト合材の耐久性に関する総合的な情報を得ようとするものである。

2. 研究手法と試験材料の諸性状

2. 1 研究手法および試験装置

凍結融解を受けたアスファルト混合物の力学的諸性状が，どのように変化するかを解明するためには，合理的な研究手法とともに精度の高い各種試験機器および設備が必要である。本研究では，アスファルト混合物に凍結融解を与える凍結融解試験装置，透水試験装置，マーシャル安定度試験装置，応力，ひずみ，変位を正確に制御できる動的載荷試験装置等を用い，実験を行う。以下，本研究に使用する試験装置について説明する。

凍結融解作用は，ブライン循環式の三槽式凍結融解試験装置により，水中凍結融解方法で与える。試験方法は，ASTM C 666 に従い凍結温度－17.8±1.7℃，融解温度＋4.4±1.7℃，凍結行程 2 時間融解行程 1 時間，計 3 時間を 1 サイクルとして所定の凍結融解サイクル数を与える。

アスファルト混合物は，本来，不透水性の性状を有するが，凍結融解の繰返し作用を受けると，混合物中の空隙率が次第に大きくなり，その結果

透水係数が徐々に大きくなるものと予想される。このことを透水試験により明らかにする。透水係数は、変水位式透水試験装置により求める。試験装置は内径 108 mm、高さ 68 mm のモールドに側圧をかけるための圧力管と、水位を測定する測定管および給水管により構成されている。

マーシャル安定度試験は、アスファルト混合物の品質管理や配合設計を行う際、我が国で最も一般的に用いられている試験方法である。このマーシャル安定度試験により凍結融解前後のアスファルト混合物の安定度、フロー値、マーシャルスティフネス等の変化について明らかにする。安定度およびフロー値はロードセルおよび LVDT により検出し、X-Y レコーダに記録する。

定ひずみ速度曲げ試験は、アスファルト混合物の曲げ性状を評価する試験方法である。この試験により、凍結融解作用後のアスファルト混合物が載荷時間と試験温度にいかにより依存し、曲げ性状がどのように変化するかについて明らかにする。実験は電気-油圧サーボ制御方式による動的載荷試験装置のデジタルランプジェネレーターを用いて、変位制御方式により行う。荷重と変位量は諸記録装置に記録させる。

供試体作製にあたり、2 枚の混合羽根を有する温度制御オイルタンク付アスファルトミキサー、線圧 1.5、3.0、4.5 kgf/cm ハンドローラー、デジタル式表面温度計、ダイヤモンドカッター、木柱付き締固め台を有する自動締固め装置を使用する。

2. 2 試験材料

本実験では、積雪寒冷地で一般に広く用いられている 80-100 舗装用石油アスファルトを用いる。粗骨材は漁川産 6 号および 7 号碎石、細骨材は広島粗砂、浜厚真粗砂、鶴川粗砂、南黄金細砂および手稲山口細砂、フィラーは浦河産石灰石粉を用いる。粗骨材は水洗いした後絶乾状態にし、その後 13、10、7、5、2.5 mm の各ふるいでふるい分ける。細骨材は絶乾状態にした後 2.5、1.2、0.6 mm 各ふるいでふるい分けて実験に供する。試験材料の物理的性状は表-2、表-3、表-4、表-5 に表わす。

表-2 舗装用石油アスファルトの物理的性状

比重 (25℃/25℃)	Pen, (25℃, 100 g, 5 sec)	R&B (℃)	P.I.	伸度 15℃	混合温度 (℃)	締固め温度 (℃)
1.027	90	47.5	-0.3	100+	152-158	138-146
1.027	92	44.5	-1.2	100+	154-160	142-149

表-3 粗骨材の物理的性状

骨材 物理的性状	粗 骨 材			
	13-10 mm	10-7 mm	7-5 mm	5-2.5 mm
見掛け比重	2.790	2.796	2.790	2.788
表乾比重	2.713	2.711	2.697	2.679
かさ比重	2.664	2.657	2.645	2.619
平均比重*	2.752	2.754	2.744	2.734
吸水量(%)	1.69	1.87	1.96	2.33
産 地	漁 川 砕 石 (安 山 岩)			

*) 理論最大密度の計算に用いる骨材の比重

表-4 細骨材の物理的性状

骨材 物理的性状	細 骨 材				
	粗 砂			細 砂	
見掛け比重	2.668	2.796	2.956	2.857	2.714
表乾比重	2.568	2.768	2.884	2.765	2.594
かさ比重	2.508	2.753	2.848	2.715	2.524
平均比重*	2.618	2.796	2.956	2.811	2.654
吸水量(%)	2.40	0.60	1.29	1.80	2.77
産 地	広 島	浜厚真	鶴 川	南黄金	手 稲

*) 理論最大密度の計算に用いる骨材の比重

表-5 フィラー (石灰石粉) の物理的性状

比 重	水 分 (%)	通 過 質 量 百 分 率 (%)			産 地
		0.297 mm	0.149 mm	0.074 mm	
2.707	0.04	100	97	87	浦 河

2. 3 アスファルト混合物の粒度配合と
供試体作製方法

凍結融解を受けたアスファルト混合物の力学的性状に関する基礎的な研究を行なうにあたり、アスファルト混合物の種類は、積雪寒冷地で用いられている粒度配合とする。本研究では、北海道開発局道路・河川工事仕様書¹³⁾ およびアスファルト舗装要綱⁴⁹⁾ の積雪地域に用いられる細粒度ギャップアスファルトコンクリート (13 F)、密粒度アスファルトコンクリート (13 F) および密粒度ギャップアスファルトコンクリート (13 F) (以後それぞれ FG 13 F、S 13 F、G 13 F と呼ぶ) の 3 種類の混合物を参考に粒度配合を決定する。その粒度配合は表-6、表-7 に示す。

表-6 アスファルト混合物の粒度配合

骨材 ふるい目(mm)	粗 骨 材					細 骨 材				
	13	10	7	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.074
通過質 量百分 率(%)	FG13F	100	92.0	80.7	70.0	55.3	53.3	47.3	32.7	15.7
	SI3F	100	91.0	77.3	65.5	42.6	32.6	23.3	17.2	11.7
	G13F	100	87.5	70.5	55.0	37.5	35.0	32.5	31.4	13.8
骨 材 産 地	漁川碎石 (安山岩)					広島粗砂, 南黄金細砂, 浦河石灰石粉				

表-7 アスファルト混合物の粒度配合

骨 材	粗 骨 材					細 骨 材				
ふるい目(mm)	13	10	7	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.074
通過質量 百分率(%)	100	93.0	82.0	73.4	56.4	53.9	51.3	35.5	15.2	10.8
骨 材 産 地	漁川砕石(安山岩)					浜厚真粗砂, 島川粗砂, 手稲山 口細砂, 浦河石灰石粉				
アスファルト量: 6.8%, (Pen. 90, R&B 47.5, P.I. = -0.3) F/A=1.71										

粒度配合に従って計量した骨材とアスファルトを, (180±20) センチストークスの粘度を示す温度で混合し, (300±30) センチストークスの粘度を示す温度で締固める。温度管理は表面温度計を用いて充分に行う。

マーシャル供試体は, 1 バッチづつ手練りをし, 締固めは木柱付き締固め台を有する自動締固め装置により供試体上下両面をそれぞれ 50 回づつ計 100 回ランマーで締固め, 作製する。

定ひずみ速度曲げ試験用供試体は, アスファルトミキサーにより混合を行い, その後 27×42×5 cm 型枠に混合物を入れ転圧を行う。転圧は 3 種類のハンドローラを用いて, 転圧速度 6.4 cm/sec で供試体を作製する。このようなローリングによる転圧方法は, ニーディング作用が発生するため現場における転圧方法に類似している。この種の転圧方法には, R. R. L. で行われている転圧方法を原型とするローラーコンパクターを使用する方法と⁶⁰⁾, シェル研究所等で使用しているようなハンドローラを用いる方法とがある。本実験で用いる転圧方法は, 後者の K. S. L. A. の転圧方法²⁹⁾を参考に著者が考案した方法である。このようにして作製したアスファルト混合物を, ダイヤモンドカッターで所定寸法の六面カット棒状供試体に仕上げ実験に供する。供試体寸法の許容誤差範囲は±1%以内とする。実験を行うに先立って, 六面カット棒状供試体の空中, 水中および表乾質量を計量し, かさ密度, 空隙率等の計算を予め行う。

3. アスファルト混合物の透水性

3. 1 概 説

アスファルトの透水係数は $(2.1 \sim 5.3) \times 10^{-12}$ cm/sec とされている⁶²⁾ことから, アスファルト自体は不透水性を有する土木材料である。またアスファルトは熱, 光, 酸素等の作用によりアスファルト中の軽質油分を揮発したり, 酸化作用をうけて硬化する性質を有している³⁸⁾。一方, 一般に骨材は親水性であるため, アスファルト混合物中に水が浸入すると, 骨材とアスファルトの間にはく離

が生じやすい²⁶⁾²⁷⁾⁴⁴⁾⁵⁸⁾。したがってこのような性状を有するアスファルトと骨材を使用するアスファルト混合物は, 充分に締固め, 空隙率を小さくし, 耐水性を有する混合物にすることが大切である。

アスファルト混合物が水浸中で凍結融解を受けると, マーシャル安定度やマーシャルスティフネスが低下することは既に明らかにされている³¹⁾⁷²⁾。このことは凍結融解作用によりアスファルト混合物の内部構造が変化し, 初期の骨材間のかみ合わせが得られなくなるためである。供試体に亀裂の発生をみたり, 空隙率が増加すると, 透水性が増し, 水や空気の接触により酸化作用やはく離現象により混合物の耐久性が減少するものと考えられる。したがってアスファルト混合物の透水試験は, 上記の浸透性の手がかりを得るための重要な試験である。

アスファルト混合物の浸透性を求める試験として, 真空試験, 通気性試験および透水性試験がある。真空試験はアスファルト舗装を破壊することなく真空度より透水性を求める試験であり, 表面アスファルト遮水壁型ダムの品質管理に用いられている⁶⁷⁾⁷⁰⁾。通気性試験法は, アスファルト混合物への空気や水の浸透の程度を, 空気の通気量によって透気係数を求める試験であり⁵⁾, 混合物の空隙の質や²²⁾, 締固めの方法と関連づけた研究⁵¹⁾等がなされている。

本研究では変水位式透水試験装置を使用し, 凍結融解試験前と後のマーシャル供試体の透水係数を求め, アスファルト混合物の耐久性について論ずる。

3. 2 供試体および実験方法

実験に用いたアスファルト混合物の種類は, FG 13 F, S 13 F, G 13 F の 3 種類である。粒度配合は表-6 のとおりである。バインダーは 80-100 舗装用石油アスファルトを, 粗骨材は恵庭漁川産 6 号および 7 号砕石(安山岩)を, 細骨材は広島粗砂および南黄金細砂を使用する。

アスファルト混合物のはく離現象が全国的な範囲で発生していることが判りその調査が行われ⁴⁾, その防止対策として石粉の一部に消石灰やセメントを添加すると良い結果が得られることが報告されている²¹⁾¹⁷⁾⁴⁷⁾⁴⁸⁾⁵⁵⁾⁵⁸⁾⁶⁶⁾。アスファルト混合物に耐凍結融解性状を与えるために, フィラーは石灰石粉および石灰石粉の 30% を普通ポルトランドセメントまたは消石灰に置き換えた(以後それぞれフィラー(L), フィラー(LC), フィラー(LS))

と呼ぶ) 3種類を用いる。

アスファルト混合物中のアスファルト量が多くなれば、凍結融解作用力に対し安定であることが予想される。そこでアスファルト量を基準値より少なめにし、フィラーの違いによる耐凍結融解性状を調べるための供試体を作製し、透水試験およびマーシャル安定度試験を行うことにする。供試体初期の空隙率が、透水係数およびマーシャル安定度に大きな影響を及ぼすことが予想されるので、およそ3%から6%前後まで約1%づつ、バインダー量により空隙率を変えた供試体を作製する。3種類のアスファルト混合物と、3種類のフィラーとを組み合わせ、空隙率および凍結融解サイクル数ごとに供試体を作製し実験に供する。サイクル数は、凍結融解前(0サイクル)、100および200サイクル(以後C₀、C₁₀₀、C₂₀₀と呼ぶ)とする。3種類のフィラーを用いた混合物の記号は次のように表す。すなわちフィラー(L)を用いたFG 13 F 混合物はFG 13 F (L)、フィラー(LC)を用いたFG 13 FはFG 13 F (LC)、フィラー(LS)を用いたFG 13 FはFG 13 F (LS)で表わす。S 13 F、G 13 F 混合物についても同様な方式で表わす。

アスファルト混合物の透水係数を求める室内試験方法として、変水位式透水試験と加圧式透水試験があり、一般に加圧式が使用されている¹⁹⁾⁵⁹⁾。この方法は1~2気圧の水圧をかけるため、供試体とモールド側面の間をアスファルトで充填し、水が洩れないようにしなければならず、実験準備等に多くの時間を要する試験方法である。著者⁷³⁾は変水位式透水試験装置と加圧式透水試験装置の試験方法の異なる装置でアスファルト混合物の透水係数(k)を求め、両試験装置の違いによる測定誤差は小さいという実験結果を得ている。多大な時間を要する加圧式透水試験方法に反し、変水位式透水試験は比較的簡単に透水係数が測定できることから、本研究では簡便に透水係数が測定できるように著者が作製した変水位式透水試験装置により行う。

3. 3 凍結融解を受けたアスファルト混合物の透水性

アスファルト混合物内部の空隙に水が徐々に浸透し拘束された状態で凍結作用を受けると、氷の体積膨脹により大きな内圧を受けてわずかに空隙は増加する。融解温度になると氷は解けるが、わずかに増加した空隙にさらに水が浸透する。この凍結融解の繰返し作用を水浸中でアスファルト混

合物が受けると、マーシャル安定度やマーシャルスティフネスが低下する。このことは氷圧により供試体の内部構造が変化し、供試体初期の骨材間のかみあわせが充分でなくなってきたためと考えられる。

一般に凍結融解後のアスファルト混合物に何らかの外力を効果的に作用させるならば、混合物は初期の性状に回復するものと予想される。凍結融解試験後、供試体にニーディング作用を与えて、低下した諸性状をかなり回復させた実験結果は³¹⁾、上記の内容を説明するものと考えられる。凍結融解作用により混合物に亀裂の発生、空隙の増加がみられるが、どの程度の変化があるかを明らかにするため、凍結融解作用後の供試体の質量より空隙率を測定したところ、空隙率は1~3%程度増加するが、混合物やフィラーの違いによる特徴的な相違はみられなかった。

凍結融解作用による空隙増加のメカニズムは次のように考えられる。アスファルト混合物が凍結融解を受けると、表面の一部に極く細い亀裂が発生し、それが次第に大きくなり、局部的に盛り上がりはじめ、さらに大きくなり、遂には剥脱し表面に凹みが発生し、破壊に至る。このように増加する空隙は、混合物中の空隙に均等に発生するのではなく、骨材とアスファルトの結合の一番弱いところに集中的に発生していることが観察される。すなわち凍結融解後の空隙率は見掛け上の空隙率と考えることができる。このように凍結融解作用により空隙率が増加することは、不透水性であったアスファルト混合物が、透水性を帯びてくることを意味し、アスファルト混合物全体の耐久性に大きな影響を及ぼすことになる。

一般に舗装用アスファルト混合物は不透水性でなければならない。そのための透水係数の規定は特に定められてはいないが、ここでは 1×10^{-6} cm/sec 以下を不透水性と考え、以下考察をおこなうことにする。実験結果を、縦軸に透水係数を対数目盛で、横軸に空隙率を普通目盛でとって図-2に示す。

凍結融解前のアスファルト混合物の透水係数は、混合物、フィラーの種類に関係なく空隙率が4%以下であれば 1×10^{-6} cm/sec 以下の値を示している。このことは、北村らのホットロールと密粒度アスコンの研究²⁴⁾による空隙率4%以下で不透水性となるという報告と一致するものである。これらのことから、本実験で採用したアスファルト混合物についていえば、混合物および

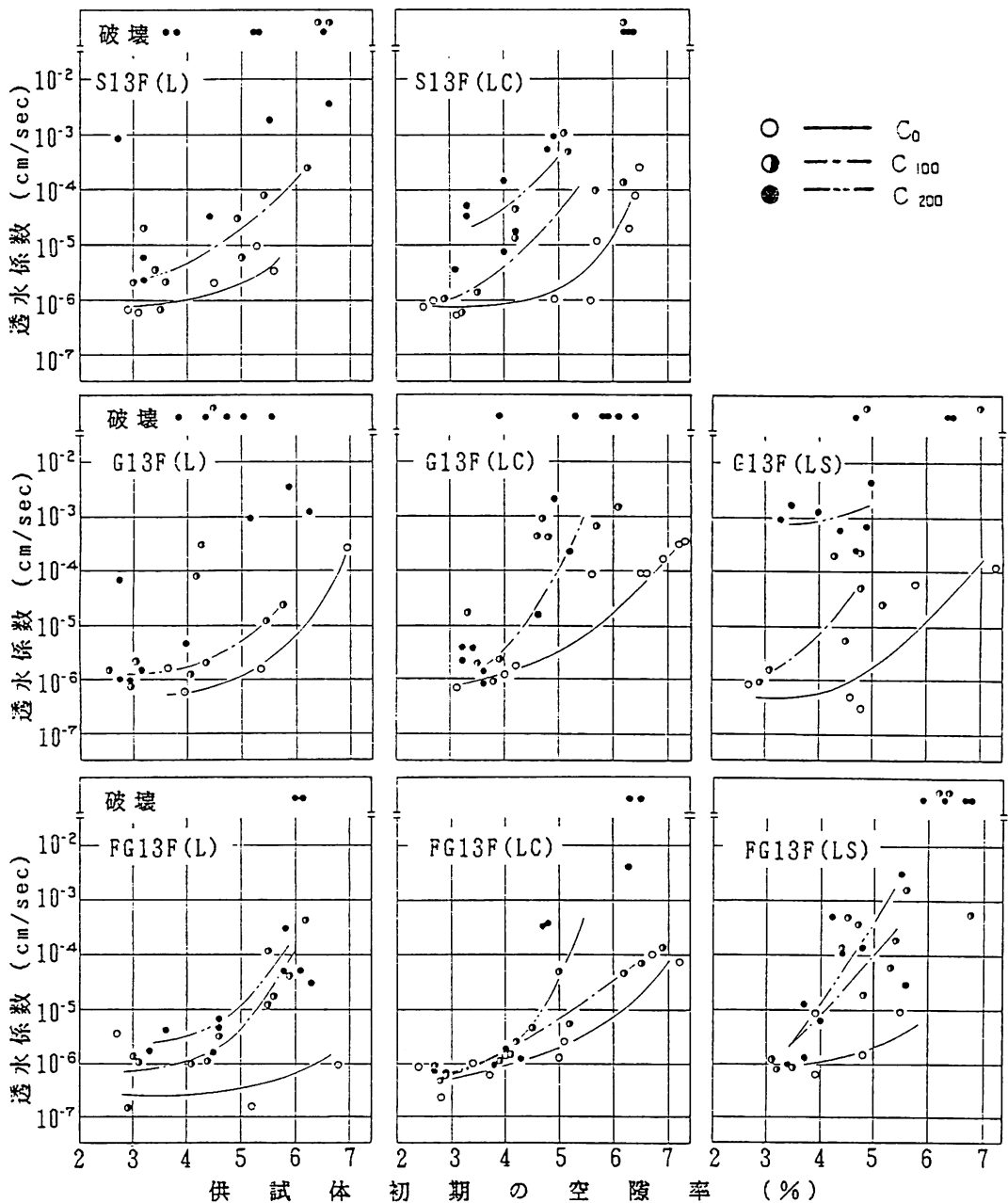


図-2 供試体初期の空隙率と透水係数

フィラーの種類にかかわらず、空隙率が4%以下であれば不透水性とみなしうる。そして、空隙率が4%をこえると次第に透水性が大きくなる傾向がみられた。

凍結融解後の透水係数は凍結融解前 (C_0) と同様に、空隙率が高いほど透水係数の空隙率に対する増加の割合は大きくなり、また凍結融解のサ

イクル数が C_{100} 、 C_{200} と増加するほどさらに透水係数は大きな値を示している。200 サイクル後でも 1×10^{-4} cm/sec より小さいアスファルト混合物とその空隙率のおおよその範囲は、S13F(LC) は空隙率約4.5%以下、G13F(LC) は約4%以下、FG13F(L) は約5.5%以下、FG13F(LC) は約5.5%以下、FG13F(LS) は約4.5%以下で

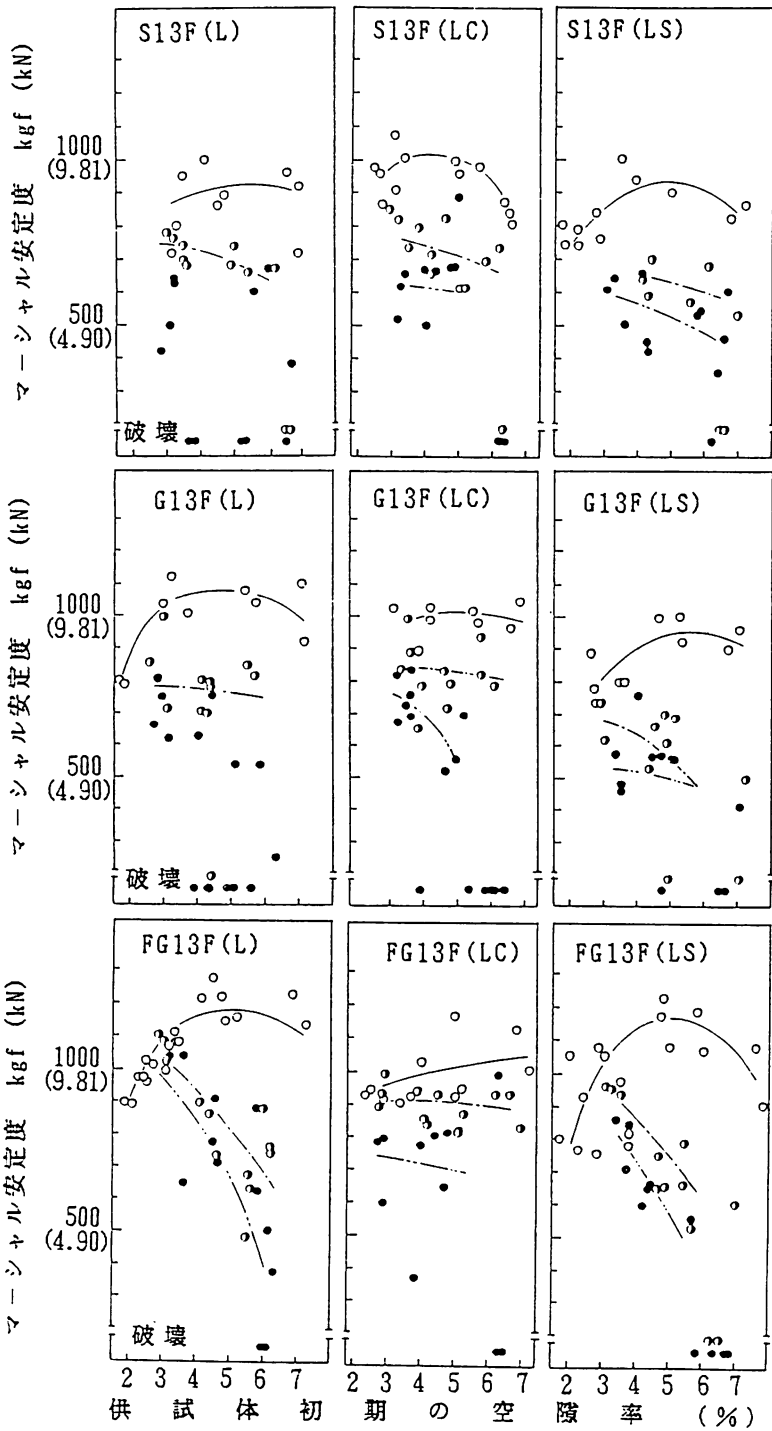


図-3 供試体初期の空隙率とマーシャル安定度

(○—C₀, ●—C₁₀₀, ●—C₂₀₀)

あり、空隙率が3%程度になるまでよく締固めるならば、S13F(L)、G13F(L)混合物でも半透水性を示す傾向がみられる。このように凍結融解

後の透水係数は、アスファルト混合物の種類によって大きな違いが生じ、FG13F(L)は他の混合物よりも良好であった。またフィラー(L)およ

びフィラー (LC) を用いた混合物の透水係数は、ほぼ同じような値となり、本実験においてはセメントを添加した顕著な効果は認められなかった。さらにフィラー (LS) を用いた混合物の透水係数は、他の混合物に比べ大きな値を示していることから、本実験においては消石灰を添加することによる効果は認められなかった。

4. マーシャル安定度

4. 1 概 説

我が国におけるアスファルト混合物の配合設計は、原則としてマーシャル安定度試験によるものとされている。周知のとおりマーシャル安定度試験は、混合物の配合設計と現場における品質管理を行うための試験である³⁾。このマーシャル安定度試験の力学的意味がいかなるものであるかについて、長い間多くの研究者によって論ぜられてきているが⁴³⁾、一般的には力学的な意味が不明瞭な試験とされている。しかしながらマーシャル試験値と供用性との相関が多く得られているため⁹⁾¹⁶⁾²⁸⁾試験方法の検討がなされつつ⁸⁾¹⁰⁾²⁵⁾⁵⁷⁾設計アスファルト量の決定に今なお広く用いられている。最近では、積極的にマーシャル試験に意味をもたせようとする研究もみられる¹⁵⁾。以上述べてきたようにマーシャル安定度試験は、力学的な意味が曖昧な試験ではあるものの、実験値の再現性が高くなるように試験方法に種々の配慮を払うならば、試験結果に定性的な意味を持たせることは十分に可能である。

ここでは、積雪寒冷地のアスファルト混合物の基礎的な研究として、マーシャル安定度試験を行い、凍結融解の繰返し作用がアスファルト混合物に及ぼす影響や、凍結融解作用に対し有効な役割をはたすアスファルト混合物およびフィラーの種類の検討を行う。

4. 2 供試体および実験方法

実験に用いた供試体は、透水試験に用いた供試体をそのままマーシャル供試体として使用する。試験温度は $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 、载荷速度は $50 \pm 5 \text{ mm/min}$ で試験を行う。供試体の養生時間は 30 分とし、载荷ヘッドは予め試験温度にしておく。

4. 3 マーシャル安定度と空隙率

実験の結果を、 C_0 、 C_{100} および C_{200} のマーシャル安定度と空隙率の関係で、アスファルト混合物

とフィラーの種類ごとに図-3に表わす。凍結融解作用により破壊した供試体は、縦軸下端に破壊として各凍結融解サイクルごとに区別して、図中に表わしている。

図からわかるように、一般に空隙率が6%以下であれば、各混合物のマーシャル安定度は、 C_{100} では C_0 に比べ低下するものの破壊に至るものは少ない。 C_{200} になるとさらに低下し、空隙率の大きな供試体の安定度は、小さなものよりも低下し、ついには破壊してしまうものもみられるようになる。これらの傾向を、S13F、G13F、FG13Fの順に述べる。

S13Fは、北海道では空港等で用いられている混合物で、耐摩耗性に優れている。S13F(L)の安定度は、 C_0 では700 kgf以上であるが、 C_{100} になると空隙率が大きくなるほど安定度は低下し、6%を越えると破壊する傾向がみられる。さらにサイクル数が増え C_{200} になると、空隙率約4%以上で破壊に至る供試体が目立つようになる。しかし空隙率3%では安定度は低下するものの、破壊していない。このことから凍結融解作用により、空隙率の大きな供試体の安定度は、小さな供試体のそれに比べ低下するものとみてよい。フィラー (LC)、フィラー (LS) を用いた S13F (LC) および S13F (LS) の100サイクル後の安定度も、空隙率が大きくなるほど低下し、6%を越えるあたりから破壊する傾向がみうけられる。200サイクル後の安定度は、100サイクルに比べ小さな値を示しているが、空隙率が6%以下であれば、S13F (L) のように破壊した供試体がない。このことから石灰石粉の一部をセメントまたは消石灰で置換すると、凍結融解作用に抵抗する効果が表れると考えてよい。さらに S13F (LC) は、S13F (L) および S13F (LS) に比べ安定度は高く、空隙率が6%以下の場合 C_{200} 後でも安定度500 kgf以上を保っていることから、石灰石粉の一部をセメントで置換した効果が表われたものと考えてよい。

G13Fは、すべり止めを期待して坂路に舗装される混合物で、耐久性はあまり期待できない。実験の結果、G13FはS13Fに比べ C_{200} で破壊する供試体が多くみられる。G13F (L) の凍結融解試験後の安定度は、 C_{100} で C_0 に比べ低下し、 C_{200} では破壊してしまう供試体が多い。しかし空隙率が3%と十分に締固めた供試体は、 C_{200} でも破壊はしていない。G13F (LC) および G13F (LS) の凍結融解作用による破壊は、G13F (L) に比べ

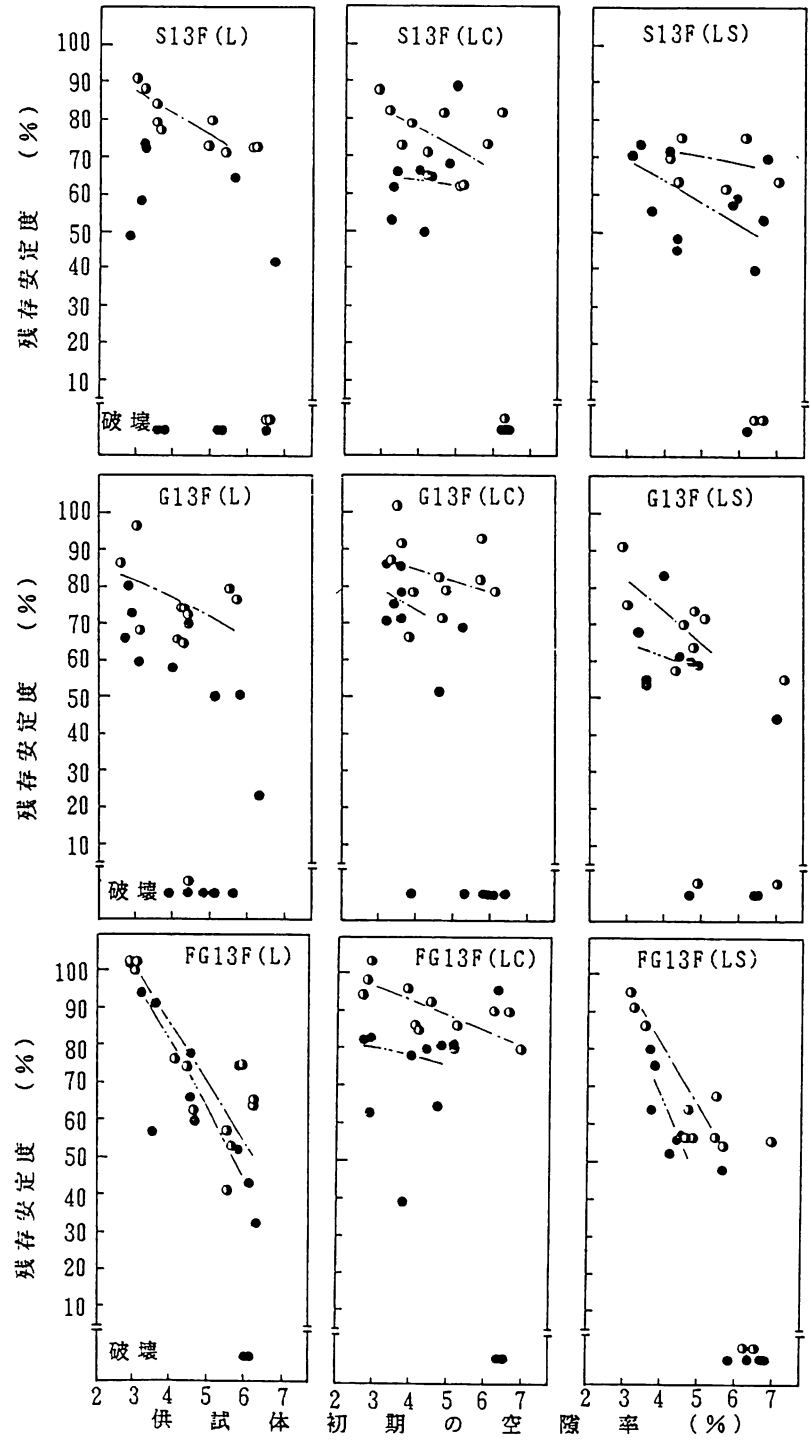


図-4 供試体初期の空隙率と残存安定度
(○———C₁₀₀, ●———C₂₀₀)

少なくなっており、空隙率がおおよそ5%以下であれば、安定度は500 kgf以上を示している。またG 13 F (LC) の安定度はG 13 F (LS) に比べC₀、

C₁₀₀, C₂₀₀とも高めの値を示していることから、石灰石粉の30%をセメントで置換したフィラーを用いると、G 13 Fに耐凍結融解の効果が表われる

と考えてよい。

FG 13 F は、北海道内の国道、北陸等の積雪寒冷地で広く採用されており、耐摩耗性、耐久性に優れたアスファルト混合物であるとされている。実験の結果、FG 13 F は S 13 F、G 13 F より安定度は高く、空隙率が 6 % 以下であればほとんどの供試体は C_{200} でも破壊はなく、安定度は 500 kgf 以上となっている。FG 13 F (L) の凍結融解後の安定度は、空隙率が大きくなるほど低下するが、空隙率が 6 % 未満であれば、 C_{200} 後でも破壊をおこなしていない。このことから FG 13 F (L) は、S 13 F (L)、G 13 F (L) に比べ耐凍結融解性状を有するアスファルト混合物であるといえる。FG 13 F (LC)、FG 13 F (LS) の凍結融解後の安定度は、FG 13 F (L) と同様に、空隙率が大きくなるにつれ次第に低下し、6 % を超えると破壊に至る傾向がみられる。FG 13 F (LC) の安定度は、 C_{100} に対して 800 kgf 以上を示し、 C_{200} でも空隙率 6 % を越えなければ破壊せず、各凍結融解後の安定度は、FG 13 F (L)、FG 13 F (LS) に比べおおむね高い値を示しており、また空隙率が増加しても安定度に大きな変化は表われていない。

以上の結果、石灰石粉の 30 % を消石灰またはセメントで置換したフィラーを用いたアスファルト混合物は、置換しない混合物に比べ凍結融解作用による破壊に対し抵抗性のあることが認められる。特に、セメントで置換することにより、耐凍結融解性状の向上が期待できることを明らかにすることができた。

4. 4 残存安定度と空隙率

残存安定度³²⁾の凍結融解作用に対する意味は、作用前後の安定度の比からアスファルト混合物の耐凍結融解性を知る一つの指標であり、大きな値を示すほど凍結融解を受けにくい混合物であるといえることができるが、その基準値は今のところ定められてはいない。残存安定度に似た指標である残留安定度は、水の影響を受け易いと思われる混合物またはそのような箇所に舗設される混合物に対し、75 % 以上であることが望ましい⁴⁹⁾。

供試体初期の空隙率と残存安定度の関係を図 4 に表わす。図から明らかなように、一般に残存安定度は、凍結融解作用および空隙率の増加に伴ない低下する。これを各混合物、フィラー別に検討する。

S 13 F について、空隙率 6 % 以下をみると、 C_{100} の場合の残存安定度は、S 13 F (L) は 70 % 以上で

あり、S 13 F (LC)、S 13 F (LS) ではおよそ 65 % 以上と S 13 F (L) に比べやや低めの値を示している。 C_{200} の場合、S 13 F (L) は破壊するものが多いが、S 13 F (LC) はおよそ 50 % 以上、S 13 F (LS) はおよそ 45 % 以上の残存安定度を示している。

G 13 F について、空隙率 6 % 以下をみると、 C_{100} の場合の残存安定度は、G 13 F (L) はおよそ 65 % 以上、G 13 F (LC) はおよそ 70 % 以上であるが、G 13 F (LS) はおよそ 55 % 以上と低下している。 C_{200} の場合、各混合物とも破壊するものが多い。空隙率が 5 % 以下であれば、G 13 F (LC) および G 13 F (LS) の破壊は少なくなるようである。このときの G 13 F (LC) の残存安定度は、他二者より大きく、その値は C_{100} のときの値に近く 70 % 以上のものが多い。

FG 13 F は、S 13 F、G 13 F に比べると、FG 13 F (L)、FG 13 F (LS) とともに残存安定度は S 13 F、G 13 F のそれに比べ多少大きい、空隙率に対する低下割合は著しい。これに対しフィラー (LC) を用いた FG 13 F (LC) の残存安定度は、S 13 F (LC)、G 13 F (LC) に比べて大きな値を示しており、また空隙率に対する低下割合は FG 13 F (L)、FG 13 F (LS) に対しても、また S 13 F (LC)、G 13 F (LC) に対しても小さく、緩やかに減少している。

空隙率が 6 % 以下についてみると、FG 13 F (L) および FG 13 F (LS) は C_{100} 、 C_{200} ともおよそ 50 % 以上、FG 13 F (LC) は C_{100} でおよそ 80 % 以上、 C_{200} でおよそ 60 % 以上を示しており、フィラー (LC) を用いたアスファルト混合物 FG 13 F (LC) は他の二種類のアスファルト混合物よりも凍結融解作用力による変形に対する影響は少ないことが認められた。

5. アスファルト混合物の曲げ破壊性状

5. 1 概 説

アスファルト混合物の力学的性状を明らかにするための試験方法として、マーシャル安定度試験の他に一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、曲げ試験、クリープ試験、引張り試験、圧裂試験、せん断試験、貫入試験、衝撃試験、疲労試験等がある³⁴⁾³⁶⁾。

アスファルト舗装は、交通荷重により舗装下面に引張り応力を、上面に圧縮応力を受けることは明らかであり¹⁾⁵⁶⁾、このことは現場の計測によっても確認されていることである⁹⁾。交通荷重を主な要

因として発生するひび割れは、アスファルト舗装の曲げ作用によるものであると考えられること、さらに菅原⁶¹⁾が述べているように、均一な供試体が得られ、試験値の解析が容易であることから、ここでは三点曲げ載荷方式による定ひずみ速度曲げ試験により、凍結融解を受けたアスファルト混合物の力学的性状について検討を行う。

三点曲げ載荷方式による定ひずみ速度曲げ試験は、間山⁴¹⁾も指摘しているように、アスファルト舗装が単一の荷重だけで破壊に至ることは極めて少ないけれども、混合物の基礎的な物性を知るうえで優れた研究手法の一つであると考えられる。さらに圧縮、引張り、曲げ試験によって示される性状の間に密接な関係があるらしい⁶¹⁾ことを考慮するならば、定ひずみ速度曲げ試験はアスファルト混合物の性状の変化を明らかにする最も基本的な試験方法の一つとして考えて差し支えないと思われる。

ここでは、凍結融解を受けたアスファルト混合物について、凍結融解サイクル数ごとに定ひずみ速度曲げ試験を行い、破壊時の曲げ応力、ひずみおよびスティフネスから、凍結融解を受けたアスファルト混合物の力学的諸性状を考察する。

5. 2 供試体および実験方法

定ひずみ速度曲げ試験に用いるアスファルト混合物の種類は FG 13 F で、F/A は 1.71、設計アスファルト量は 6.8%、粒度配合は表 7 のとおりである。アスファルトは 80-100 舗装用石油アスファルトを、粗骨材は恵庭漁川産 6 号、7 号砕石（安山岩）を、細骨材は広島粗砂、浜厚真粗砂、鶴川粗砂、手稲山口細砂を、フィラーは浦河産石灰石粉を使用する。

アスファルト混合物は 2. 3 供試体作製方法に従い作製する。凍結融解作用は、凍結融解試験装置の試験槽で 0, 50, 100, 200 および 300 サイクル (C_0 , C_{50} , C_{100} , C_{200} , C_{300}) の凍結融解を与えた後、ダイヤモンドカッターで $3.0 \times 3.0 \times 25$ cm の六面棒状供試体に仕上げる。

3 点載荷方式による定ひずみ速度曲げ試験は、変位制御方式により行う。スパンは 20 cm、使用するロードセルは 250 kgf、試験温度は -20, -10, 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25℃ の各温度で実験を行う。試験槽と養生槽は予めパイプで連結させ、ブラインを循環させながら、水温を各試験温度に一致させる ($\pm 0.1^\circ\text{C}$)。その後供試体と熱電対を埋め込んだダミー供試体を同時に養生し、

ダミー供試体が試験温度に到達したことを確認し、さらに 10 分経過した後実験を開始する。

定ひずみ速度曲げ試験におけるアスファルト混合物の破壊は、荷重が最大となる点を破壊点とし、このときの曲げ応力およびひずみを破壊時の曲げ応力および破壊時のひずみと定義する。破壊時の曲げ応力 (σ_b)、破壊時のひずみ (ϵ_b)、破壊時のスティフネス (S_b) およびひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) を次式から計算する。

$$\sigma_b = \frac{3Pl}{2bh^2} (\text{kgf/cm}^2), \quad \epsilon_b = \frac{6hd}{l^2}$$

$$S_b = \frac{\sigma_b}{\epsilon_b} (\text{kgf/cm}^2), \quad \dot{\epsilon} = \frac{6h\dot{d}}{l^2} (\text{sec}^{-1})$$

但し、 P : 最大荷重 (kgf), l : スパン長 (cm), d : 破壊時のたわみ (cm), b : 供試体幅 (cm), h : 供試体高さ (cm), $\dot{d}$: たわみ速度 (cm/sec)

5. 3 アスファルト混合物の凍結融解による破壊性状

施工管理が充分に行われ、最も理想的に仕上がったアスファルト舗装を想定し、アスファルト混合物の空隙率を舗装要綱基準値の下限すなわち 3% になるまで十分に締固めた供試体を作製し、凍結融解作用前と後の破壊性状について実験を行う。

凍結融解を受けたアスファルト混合物の粘弾性挙動を調べるにあたり、アクチュエーターによるひずみ速度の設定は極めて重要である。アスファルト混合物の曲げ性状を研究した森吉ら⁴⁵⁾の研究は、 $3.7 \times 10^{-1} \sim 4.1 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ の範囲のひずみ速度で実験を行っている。エポキシ等をバインダーとする各種混合物の研究を行った間山⁴²⁾は、 $2.91 \times 10^{-1} \sim 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ の範囲で実験を行っている。そして菅原⁶³⁾は、アスファルト混合物のレオロジー性状はひずみ速度に大きく依存すると結論づけている。凍結融解を受けたアスファルト混合物の破壊性状を考察するにあたり、凍結融解作用によるひずみ速度、温度依存性の存在等のレオロジー性状の有無の確認を行わなければならない。ひずみ速度依存性の有無を調べるため、 3.13×10^{-4} , 3.13×10^{-3} , 3.13×10^{-2} および $2.74 \times 10^{-1} (\text{sec}^{-1})$ の 4 種類のひずみ速度で実験を行った結果、凍結融解を受けたアスファルト混合物の破壊性状は、ひずみ速度との間に定性的関係が存在することを明らかにすることができた。したがって凍結融解を受けたアスファルト混合物の破壊性状を明らかにするためには、一つのひずみ速度で実験を行ってもその破壊性状差異を知ることができ

ることから、 $3.75 \times 10^{-3} (\text{sec}^{-1})$ のひずみ速度で実験を行うこととする。以下結果および考察について述べる。

5. 3. 1 破壊時の曲げ応力

C_0 、 C_{50} 、 C_{100} 、 C_{200} および C_{300} のアスファルト混合物における破壊時の曲げ応力 σ_b と温度との関係を図-5に表わす。

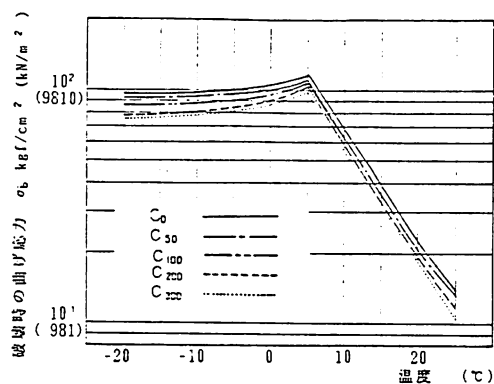


図-5 凍結融解サイクル数と
破壊時の曲げ応力と温度

C_0 の σ_b は、+25°C の高温側から低温側に移行するにつれ急激に増加し、 σ_b の最大値約 115 kgf/cm² に達した後、徐々に低下する。凍結融解を受けたアスファルト混合物の σ_b と温度の関係は、 C_0 と同様に +25°C の高温側から脆化点まで σ_b は急激に増加し、脆化点から低温側に移行するにつれて次第に低下する。この低温領域における σ_b の低下は、試験温度に関係なくサイクル数が大きい程次第に増加する。なおサイクルが C_0 から C_{300} までの間は曲げ応力-温度曲線の脆化点は凍結融解サイクル数にかかわらず +5°C を示し一定の温度である。

5. 3. 2 破壊時のひずみ

C_0 、 C_{50} 、 C_{100} 、 C_{200} および C_{300} のアスファルト混合物における破壊時のひずみ ϵ_b と温度との関係を図-6に表わす。

C_0 供試体の ϵ_b は +25°C で約 3.3×10^{-2} を示し、低温側に移行するにつれてゆるやかな S 字形の曲線を描いて低下し、-20°C で約 1.2×10^{-3} の値を得た。ひずみ-温度曲線の変曲点 (S の中心) は前述の破壊時の曲げ応力の脆化点と一致している。 C_{50} 、 C_{100} および C_{200} のひずみは、高温側から脆化点付近までは C_0 のひずみとほぼ一致しているが、脆化点より低温側では、 C_{100} と C_{200} のひず

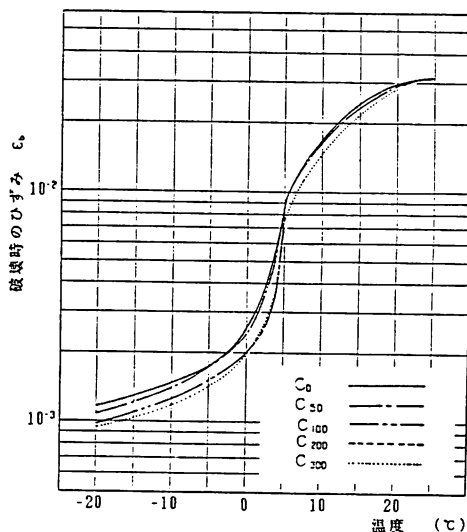


図-6 凍結融解サイクル数と
破壊時のひずみと温度

みはほぼ一致してはいるがサイクル数が増加するほどひずみは低下する傾向がみられる。 C_{300} 供試体のひずみは低温領域でさらに低下し、かつ高温領域でも他に比べて小さな値を示した。

以上のことからアスファルト混合物が凍結融解を受けるにつれ破壊時のひずみは次第に低下するようである。よく締固められたアスファルト混合物では脆化点より低温側で、破壊時のひずみは次第に小さな値を示すことを明らかにすることができた。

5. 3. 3 破壊時のスティフネス

C_0 、 C_{50} 、 C_{100} 、 C_{200} および C_{300} のアスファルト混合物における破壊時のスティフネス S_b と温度との関係を図-7に表わす。

スティフネスは応力とひずみの比で表わされ、弾性体の弾性係数に相当するが、温度と载荷時間によって異なり、一般に温度が低いほど载荷時間が短いほど大きな値を示す。 C_0 供試体の S_b は -20°C で約 9×10^4 kgf/cm² の値を示しているが、高温側に移行するにつれ次第に減少し、脆化点 5°C 付近から急激に低下している。

凍結融解を受けたアスファルト混合物の S_b - 温度の曲線は C_0 と同様の右下がりの曲線関係が得られた。 C_{50} 供試体の S_b は C_0 に比べ低下しているが、 C_{100} 供試体の低温側では大きめの値となった。これは凍結融解作用により σ_b の低下に比べ ϵ_b が著しく低下したために S_b が大きな値を示したものと考えられ、荷重分散性能が増加した

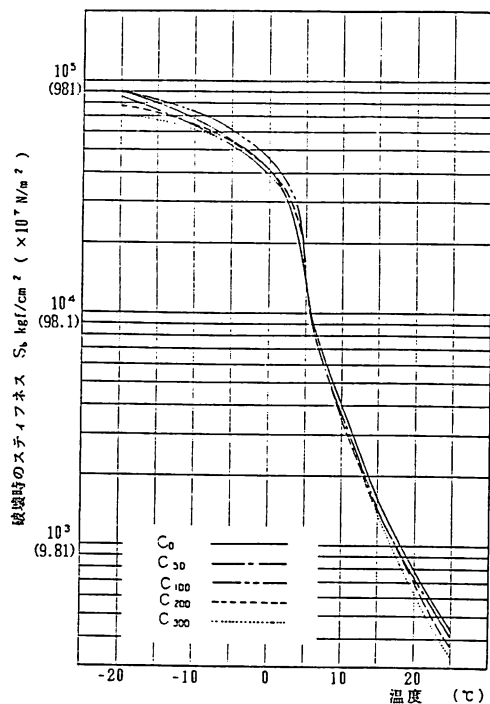


図-7 凍結融解サイクル数と
破壊時のスティフネスと温度

とはいえない。 C_{200} 供試体の S_b は C_{100} の供試体の S_b よりやや小さな値となり、 C_{300} 供試体の S_b はさらに小さな値となった。

以上のことからアスファルト混合物が凍結融解を受けると S_b は次第に低下する。すなわち混合物の荷重分散性が次第に低下することを明らかにできた。

5. 3. 4 破壊時の曲げ応力-ひずみ曲線

アスファルト混合物の破壊時の曲げ応力とひずみの間に破壊包絡線の存在することは既に確認されている⁴⁶⁾。この性質を凍結融解を受けた混合物の破壊性状を把握するために適用することを試みた。 C_0 、 C_{50} 、 C_{100} 、 C_{200} および C_{300} のアスファルト混合物における破壊時の曲げ応力とひずみの関係を図-8に表わす。

アスファルト混合物の破壊時の曲げ応力-ひずみ曲線を構成する各点は、高温側で右下に位置し、低温になるにつれ急激に左上に移行し、脆化点付近を越えるあたりから緩やかに変化し、 -20°C では左上方に位置している。凍結融解作用の有無およびサイクル数にかかわらず同様の曲線が得られたが、サイクル数が増加するにつれて次第に内側に移行している。このことから凍結融解作用によ

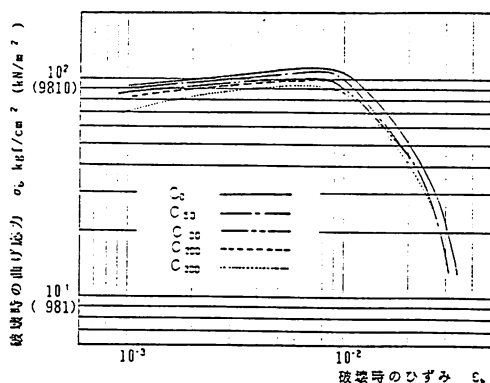


図-8 凍結融解サイクル数と
破壊時の曲げ応力とひずみ

り混合物はより危険な方向に移行することを意味しているとしてよいであろう。特に低温領域でその傾向は強く見られる。

6. 摘 要

積雪寒冷地の舗装は、冬期間、凍結と融解の温度変化の繰返し作用を受けているという事実からして、特に排水不良の舗装施設表面また交通量が少なく、ひび割れが発生して一時的にせよ水が浸透しているようなアスファルト舗装は、絶えず凍結融解を受けることになり、交通荷重や老化現象等、他の要因とが複雑にからみあって破壊に至る。

アスファルト合材の耐久性に関する基礎的な性状を知るためには凍結融解作用に伴う力学性状を把握し、これらの知識を施工方法等に反映することによって、より一層耐久性に富むアスファルト合材を舗装することができる。

凍結融解の繰返しを受けたアスファルト合材の諸性状を明らかにするために、本論文では凍結融解試験、透水試験、マーシャル安定度試験、定ひずみ速度曲げ試験を行い、凍結融解後のアスファルト混合物の諸性状について述べた。

アスファルト合材の破壊要因の一つである合材の空隙率は、凍結融解を受けるにつれ次第に増加することは容易に想像することができる。著者は、その増加する空隙率はアスファルト混合物中に均一に発生するばかりでなく、混合物の最も弱い部分に発生・成長した亀裂も空隙率であるとして取扱った。すなわち凍結融解作用により混合物の空隙の質が徐々に変化し、本来不透水性の性状を有している混合物は次第に透水性を帯びてくると考えた。このことは、凍結融解を受けたマーシャル

供試体が縦に二つに割れた例、表面が局部的に盛り上がったあるいは陥没した例等からもうかがいしることができる。このことから凍結融解後の空隙率を求めるばかりでなく透水性の変化についても知る必要があり、この透水性の変化を明らかにするためにアスファルト混合物の透水試験を行った結果、次に述べることを明らかにすることができた。

(1) アスファルト混合物は凍結融解を受けると空隙率は増加する。

(2) 凍結融解前のアスファルト混合物の透水係数は、混合物およびフィラーの種類にかかわらず空隙率が4%以下であれば 1×10^{-6} cm/sec以下の値を示している。これに対して凍結融解後の透水係数は、空隙率が大きいほど透水係数の増加の割合は大きくなり、又凍結融解のサイクル数が増加するほどさらに透水性は大きな値を示している。アスファルト混合物の種類によってかなりの違いが生じ、細粒度ギャップアスファルトコンクリート(13 F)は他の混合物に比べて透水係数は小さな値を示すことを明らかにすることができた。

マーシャル安定度試験は上下2個よりなる円弧状載荷ヘッドにより拘束された一種の三軸圧縮試験とも考えられるが、一般的には力学的な意味が不明瞭な試験とされている。しかしながらマーシャル試験値と供用性との関連資料が多いため、試験方法の検討がなされつつ設計アスファルト量の決定に今なお広く用いられており、最近では積極的にマーシャル試験に意味をもたせようとする研究もみられる。このマーシャル安定度試験により積雪地域で用いられる3種類のアスファルト混合物について、凍結融解試験装置により凍結融解作用を与えた後、試験を行い、次のことを明らかにすることができた。

(1) アスファルト混合物が凍結融解を受けると、マーシャル安定度、残存安定度、マーシャルスティフネスは減少する。

(2) 初期空隙率が凍結融解作用後の物理的性状に及ぼす影響は非常に大きく、凍結融解の受けにくいアスファルト混合物を得るためには、空隙率を小さくすることが必要である。

(3) またアスファルト混合物の種類によっても異なり、細粒度ギャップアスファルトコンクリート(13 F)は、密粒度アスファルトコンクリート(13 F)、密粒度ギャップアスファルトコンクリート(13 F)に比べて破壊の程度は小さく表われた。密

粒度ギャップアスファルトコンクリート(13 F)は凍結融解作用に弱い混合物なので、施工にあたっては空隙率が充分小さくなるように転圧することが大切である。

(4) 石灰石粉の30%をセメントまたは消石灰で置換したフィラーを用いた混合物は、凍結融解作用に抵抗する効果が表れると考えられる。本研究に関していえば、消石灰よりセメントの方がより効果的であった。

充分に締固めたアスファルト混合物が、凍結融解を受けたときいかなる破壊性状を示すかを、三点曲げ載荷方式により定ひずみ速度曲げ試験により明らかにする。定ひずみ速度曲げ試験に用いるアスファルト混合物の種類は、細粒度ギャップアスファルトコンクリート(13 F)とした。初めに、4種類のひずみ速度で、凍結融解サイクル数 C_0 および C_{100} の供試体について曲げ試験を行い、ひずみ速度依存性、温度依存性の存在の有無について検討を行った。その後1種類のひずみ速度で、 C_{300} までについて曲げ試験を行った結果、破壊性状が僅かではあるが徐々に低下することを明らかにすることができた。すなわち次のごとくまとめることができる。

(1) C_0 および C_{100} 供試体について、4種類のひずみ速度で実験を行った結果、脆化点はひずみ速度が速くなるほど高温側に規則性をもって移行する。破壊時のひずみは高温側から低温側に移行するにつれてS字形の曲線を描いて低下し、そのS字形曲線の中心は脆化点と一致する。このことから凍結融解を受けたアスファルト混合物においても、ひずみ速度依存性、温度依存性の存在することが明らかとなった。

(2) 凍結融解を受けたアスファルト混合物の脆化点は、凍結融解前の脆化点とほぼ同じ温度を示している。このことから凍結融解を受けても混合物の脆化点は移行しないとみてよいであろう。

(3) 破壊時の曲げ応力は高温側から低温側に移行するにつれ急激に増大し、最大値に達した後、徐々に低下する。凍結融解サイクル数が増加するにつれ破壊時の曲げ応力は徐々に低下する。

(4) 凍結融解を受けたアスファルト混合物のひずみは、高温側から脆化点まではほぼ同じ値であるが、脆化点より低温側では凍結融解サイクル数が増加するにつれ小さな値を示した。

(5) 破壊時のスティフネスは高温側から低温側に移行するにつれ急激に増大し、その後勾配は緩

くなり一定値に近づく傾向がみられる。凍結融解サイクル数が増加するにつれ破壊時のスティフネスは徐々に低下する。

(6) 凍結融解を受けたアスファルト混合物の破壊時の曲げ応力およびひずみは、サイクル数が増大するにつれて次第に小さな値に移行することが明らかになった。このことを破壊時の曲げ応力-ひずみ曲線で表わすことができた。このことから凍結融解作用を繰返すことによりアスファルト混合物はより破壊されやすくなる方向に移行するものと考えられる。

結 論

アスファルト合材は、たわみ性に富み、高い止水性、可塑性を有し、さらに耐久性に富む等の優れた性質を有するため、農業用道路や水利アスファルト工（水利構造物）等の各種農業用施設に広く用いられている。

農道は、農村地域における農業生産基盤および社会生活基盤としての役割を併せ持っており、極めて重要な施設である。このことから農業生産活動、農産物の移動等、農道の機能を充分に発揮させることができるように、最も有機的かつ合理的に、しかも経済的に農道網を配置、整備し、かつ農道舗装の整備がなされなければならない。アスファルト合材は優れた特性を有し、工事終了期間を短縮できる等の利点を有するため、農道の舗装はアスファルト合材で舗装するのが最も一般的である。

水利アスファルト工の対象となる構造物には、フィルダム、貯水池、水路、干拓堤防、海岸堤防、防波堤等がある。これらの構造物は、静水圧、動水圧、浸透、侵食、摩耗、衝撃作用、変形、温度応力、老化作用等、様々な作用を絶えず受けている。水利用構造物にアスファルト合材が用いられる理由は、合材が止水性、たわみ性、可塑性、耐久性、耐衝撃性、耐酸、耐アルカリ性等の性質を有しかつ経済性と施工性に優れ補修が容易なためである。

このようにアスファルト合材は各種農業用施設に広く用いられており、その力学性状に関する基礎的な研究は多くみられるものの、凍結融解によるアスファルト合材の耐久性に関する研究は少なく、したがってアスファルト合材が諸施設で広く用いられている現在、耐久性に関する情報は、必要かつ重要なものである。

著者はこれらのことを考慮して、耐久性を求め一つの試験に分類されている凍結融解試験装置を用いて、凍結融解を受けたアスファルト合材の力学的諸性状を明確にするためにマーシャル安定度試験、曲げ試験、透水試験の各試験を行った。

その結果、アスファルト混合物が凍結融解を受けると、空隙率が徐々に増加し、透水性も徐々に増加する、またマーシャル安定度、残存安定度、マーシャルスティフネスが低下すること、さらにこのことはアスファルト混合物およびフィラーの種類によっても大きな違いがあることを明らかにすることができた。

また初期空隙率が凍結融解作用後の力学的性状に及ぼす影響は非常に大きく、凍結融解の受けにくいアスファルト混合物を得るためには、空隙率を小さくすることが必要であるという結果より、アスファルト合材を舗設する際は、十分に転圧することが大切であることを明らかにすることができた。

さらに定ひずみ速度曲げ試験から凍結融解後のアスファルト混合物の曲げ性状について明らかにし、凍結融解を受けるにつれ次第に力学的性状が低下することを明らかにすることができた。

謝 辞

本研究の取りまとめにあたり、北海道大学教授片岡隆四博士、同堂腰純博士、同前田隆博士、同助教授梅田安治博士に、それぞれ多くの御助言を賜った。ここに、諸先生の御指導と御教示に対し、謹んで感謝の意を捧げる。

なお本研究を進めるにあたり、苫小牧工業高等専門学校土木工学科の毎年の道路卒研生の諸君には、実験等に多大の協力を得た。記して、深甚なる謝意を表するものである。

引 用 文 献

- 1) 阿部頼政：アスファルト舗装のクラック，アスファルト，第20巻，第112号，pp.42-50，1977.
- 2) 秋吉・谷本：アスファルト混合物のはく離とその防止対策—主として鹿児島，宮崎両試験舗装の観測結果—，土木技術資料第13巻，第3号，pp.18-24，1971.
- 3) 土木学会編：土木材料実験指導書（基礎編），p.94，土木学会，1983.
- 4) 道路局・土木研究所・北海道開発局他：アスファ

- ルト混合物のはく離現象に関する調査研究(1), 建設省技研会報, No.25, pp.283-301, 1972.
- 5) Ellis, W. H., and R. J. Schmidt: A Method for Measuring the Air Permeabilities of Asphalt Concrete Pavements, Spec. Tech. Publ., No. 294, pp. 85-91, 1960.
- 6) 藤波・青木・西中村: 東名・中央高速道路における舗装追跡調査・建設時の結果について(その2), 土と基礎, 第19巻, 第9号, 通巻163号, pp.17-22, 1971.
- 7) 藤野欣一: 農道事業の現況, 農業土木学会誌, 第45巻, 第5号, pp.5-10, 1977.
- 8) 畑博昭: マーシャル安定度試験方法の検討, 舗装, 第4巻, 第1号, pp.16-21, 1969.
- 9) 林・大島・田代・沼沢: ホイール・トラッキング試験からみたマーシャル安定度試験に関する一考察, 道路建設, No.267, pp.83-87, 1970.
- 10) 林・水沢・田代・松井: 表層用合材の配合設計におけるマーシャル安定度試験規格値の考察, 道路建設, No.310, pp.65-75, 1973.
- 11) Highway Research Board: "National Cooperative Highway Research Program Report 39" Factors Involved in The Design of Asphaltic Pavement Surfaces", 1967.
- 12) 北海道開発局: 北海道の道路, pp.55-69, 北海道開発局, 1984.
- 13) 北海道開発局工事管理課: 北海道開発局道路・河川工事仕様書(昭和54年度版)北海道開発協会, 1979.
- 14) 北海道農地開発部農地造成課: 農免農道整備事業現況調査報告書, pp.7-10, 1983.
- 15) 茨木龍雄・佐藤喜久: マーシャル安定度試験の力学的性状に関する研究, 中央大学理工学部紀要, 第23巻, pp.115-136, 1980.
- 16) 印田・周東・安東: アスファルト合材のホイール・トラッキング試験およびマーシャル試験の関係, アスファルト, 第13巻, 第71号, pp.26-31, 1967.
- 17) 井上・後藤: 中央自動車道伊那地区の舗装-消石灰によるはく離防止対策-, 舗装 第12巻, 第1号, pp.14-18, 1977.
- 18) 上島・森吉・菅原: アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究, 土木学会論文報告集, 第221号, pp.73-80, 1974.
- 19) 金崎・岡田・堀尾・大塚: アスファルト合材の透水試験に関する基礎研究, 道路建設, No.180, pp.63-71, 1963.
- 20) 河田光幸: 農業基盤整備事業における農道整備について, 農建だより, 第92号, pp.7-12, 北海道農地開発改良協会, 1984.
- 21) 川口・高田: 高速道路の舗装性状の実態, 一日本道路公団福岡管理局管内-, 舗装 第18巻, 第7号, pp.8-17, 1983.
- 22) 河島・高橋・菅原: アスファルト混合物の透気性に関する研究, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集(5), pp.239-240, 1973.
- 23) Kennedy, W., F. L. Roberts, and K. W. Lee: Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using The Texas Freeze-Thaw Pedstral Test, Proc. Assoc Asphalt Paving Technol., Vol. 51, pp. 327-341, 1982.
- 24) 北村・園城・泉: 密度粒度ギャップアスコンとロールドアスファルトに関する一試験 第11回日本道路会議論文集, pp.313-314, 1973.
- 25) 北村幸治: マーシャル試験法の考察ならびにその運用に関する試案, 道路建設, No.362, pp.52-59, 1978.
- 26) 小林恒己: 骨材とセメントあるいはアスファルトの付着について, 舗装, 第14号, 第4号, pp.8-12, 1979.
- 27) 小林恒己: 骨材の特性とアスファルトの特性を考える, 舗装, 第15号, 第6号, pp.22-26, 1980.
- 28) 小島・古関・坪内: アスファルト混合物の動的安定度とマーシャル特性, 土木技術資料, Vol.19, No.10, pp.8-13, 1977.
- 29) "Koninklijke/Shell-Laboratorium Amsterdam: Bitumen Research" Shell Bitumen Review 33, pp. 14-16, 1971.
- 30) 構造改善局農道班・土地改良舗装研究会: 農道のアスファルト舗装(5), 水と土 第38号, pp.64-71, 1979.
- 31) 久保・美馬・岩崎: アスファルト混合物の凍結融解試験について, 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集(5), pp.281-282, 1975.
- 32) 久保宏: 舗装用アスファルト混合物への凍結融解作用の影響, 土木学会論文報告集 第279号, pp.93-98, 1978.
- 33) Majidzadeh, K., and D. V. Ramsamoo: Mechanistic Approach to the Solution of Cracking in Pavements, Spec. Rept. Highway Rec. Boad, Vol. 140, pp. 143-157, 1973.
- 34) 松野・南雲・三浦・山之口: アスファルト舗装に関する試験, pp.184-190, 建設図書, 1973.
- 35) 松野・南雲・三浦・山之口: アスファルト舗装

- に関する試験, pp.258-273, 建設図書, 1973.
- 36) 松野・三浦: アスファルト混合物の歴史(5), 舗装, 第13巻, 第5号, pp.27-34, 1978.
- 37) 松野三朗: わだち割れ(1) - アスファルト舗装の縦表面クラックについて -, 舗装, 第19巻, 第2号, pp.3-8, 1984.
- 38) 松尾新一郎: 新編道路工学, pp.140-141, 山海堂, 1971.
- 39) 間山・北郷: アスファルト表層のスティフネスとレオロジ特性(その1), アスファルト, 第15巻, 第87号, pp.23-30, 1972.
- 40) 間山・北郷: アスファルト表層のスティフネスとレオロジ特性(その2), アスファルト, 第15巻, 第88号, pp.10-18, 1972.
- 41) 間山正一: たわみ性舗装材料の力学性状に関する研究, 学位論文, 1979.
- 42) 間山正一・菅原照雄: 各種の舗装混合物の力学性状に関する研究(第2報) - 主として混合物の破壊性状 -, 石油学会誌, 第22巻, 第3号, pp.170-178, 1979.
- 43) Metcalf, C. T.: Use of Marshall Stability Test in Asphalt Paving Mix Design, H. R. B. Bull., No. 234, pp. 12-22, 1959.
- 44) 三浦裕二: 骨材に関する試験法, 舗装, 第2巻, 第4号, pp.16-19, 1967.
- 45) 森吉・上島・菅原: アスファルト混合物の破壊強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第210号, pp.57-64, 1973.
- 46) 森吉・菅原: アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げの破壊包絡線に関する研究, 土木学会論文報告集, 第251号, pp.107-112, 1976.
- 47) 南雲・秋吉・谷本・高木: アスファルト混合物のはく離とその防止対策(その2), 土木技術資料, 第15巻, 第10号, pp.16-21, 1973.
- 48) 南雲・谷本: アスファルト混合物のはく離の実態と対策, 舗装, 第9巻, 第6号, pp.3-9, 1974.
- 49) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, 1979.
- 50) 西田・青山・石野: 羽田君際空港滑走路の舗装, 土木施工, 第7巻, 第11号, pp.173-178, 1966.
- 51) 新田登: アスファルト混合物の透気度について, 第12回日本道路会議一般論文集, pp.213-214, 1975.
- 52) 野田和弘: 高速道路の舗装路面性状の実態について, 舗装, 第14巻, 第7号, pp.3-9, 1979.
- 53) 農林省構造改善展開課, 農道整備事業便覧, p.24, 公共事業通信社, 1977.
- 54) 農林水産省構造改善局事業計画課施工企画調整室開発課: 農道整備の実務, pp.16-19, 公共事業通信社, 1981.
- 55) 小野・窪田: 四方津地区(国道20号線)の舗装現況 - はく離防止対策の1例 -, 舗装, 第11巻, 第2号, pp.24-27, 1976.
- 56) Pell, P. S., and I. F. Taylor: Fatigue Phenomena in Bituminous Systems, Proc Intern Conf Struct Solid Mech. Eng. Design Civil Eng. Mat. Southampton Pt 2, pp. 1103-1121, 1971.
- 57) Piganataro, L. T.: Effect of Test Temperature on Marshall Stability of Asphaltic Concrete Mixtures, Proc. Ass. Asphalt Paving Technol. Vol. 31, pp. 563-597, 1962.
- 58) 坂本徹夫: アスファルト混合物のはく離に関する試験, 日本道路公団試報, pp.136-142, 1972.
- 59) 沢田・中島: 水利アスファルト工学, pp.38-39, 土地改良新聞社, 1968.
- 60) 菅原照雄: アスファルト関係研究機器について, アスファルト, 第15巻, 第85号, pp.6-12, 1972.
- 61) 菅原照雄: アスファルト混合物の力学的性状について, 土木学会論文報告集, 第207号, pp.73-81, 1972.
- 62) 菅原・工藤・有福: 土木材料3 <アスファルト>, p.28, 共立出版株式会社, 1974.
- 63) 菅原・上島・森吉: アスファルト混合物の低温領域における破壊時のレオロジー挙動, 土木学会論文報告集, 第234号, pp.131-141, 1975.
- 64) 高橋・赤間: 凍結融解試験における歴青混合物の性状, 昭和56年度土木学会東北支部技術研究発表講演概要集, pp.279-280, 1982.
- 65) 谷・桜井: アスファルト舗装のひび割れ修繕工法の検討 - 中国自動車道津山管内の試験施工 -, 舗装, 第18巻, 第10号, pp.3-10, 1983.
- 66) 谷本誠一: アスファルト混合物のはく離に関する試験舗装とその観測結果, 舗装, 第6巻, 第5号, pp.13-19, 1971.
- 67) 谷山・江口・加藤: アスファルト遮水壁の設計と施工, 水と土, 第16号, pp.29-79, 1974.
- 68) 徳永健児: 舗装の疲労悪化とその原因, 道路建設, No.181, pp.18-23, 1963.
- 69) Vila, J. M., and, R. L. Terrel: Influence of Accelerated Climatic Conditioning on Split Tension Deformations of Asphalt Concrete, Proc. Assoc. Asphalt Paving Technol., No. 44, pp. 119-142, 1975.
- 70) Visser, W., and E. Schonian: Bitumen for

Dams and Reservoirs, Shell Construction Service, pp. 1-25, 1971.

- 71) 山之口浩：アスファルト舗装の破壊と供用性，舗装，第6巻，第3号，pp.15-20，1971.
- 72) 吉田隆輝：凍結融解作用をうけたアスファルト混合物について，苫小牧工業高等専門学校紀要，第11号，pp.51-54，1976.
- 73) 吉田隆輝：積雪寒冷地のアスファルト混合物の研究，苫小牧工業高等専門学校紀要，第14号，pp.149-156，1979.
- 74) 吉田・神谷・長沢・山梨：北海道における農免農道のひび割れについて，第32回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集，pp.97-102，1983.

(昭和60年11月30日受理)