



舗装と交通荷重に関する地盤工学

3. 舗装の表層用材料とその力学

高橋 修 (たかはし おさむ)

長岡技術科学大学 准教授

阿部長門 (あべ ながと)

東亜道路工業株式会社 技術課長

鎌田 修 (かまだ おさむ)

鹿島道路技術研究所 主任研究員

3.1 はじめに

舗装において表層は、外力となる輪荷重が直接作用する表面部に位置している層であり、雨水や紫外線、大気等による劣化作用も直接受けることになる。交通具を用いて舗装を使う利用者にとっては、表層は交通の安全性や快適性を支配する表面であり、舗装を提供する裏方にとっては、表層は舗装の供用性を支配する重要な構成要素の一つである。そのため、表層にはいくつかの重要な役割があり、それらの役割を果たすことのできる材料を使用して構築されている。舗装の他の層に比べて、表層に求められている性能は多く、高い。

表層には種々の材料が使用されているが、現在ではアスファルト混合物とセメントコンクリートの二つが主に運用されており、それぞれの材料特性に基づいて使い分けがなされている。我が国では、施工性と維持管理の面で優れていることから、アスファルト混合物が一般的に使用されている。近年では、環境保全やコスト縮減の推進を受けて様々な材料が表層に導入されている。しかし、その使用箇所は限られており、量的にはあまり多くないのが実状である。

本文では、舗装の構成要素としての表層の役割と求められている性能について概説し、表層に使用されている材料の種類、特徴、力学特性について広範に記述している。特に、アスファルト混合物とセメントコンクリートについては、原材料やそれらの配合、および力学因子の評価法についても言及している。

3.2 表層の役割と表層材料の変遷

舗装の表層には、表面部に位置していることに起因して、他の層とは異なる重要な役割が存在している。そのため、長期においてその役割を果たすことを期待して、表層には特有の材料が用いられている。本節では、表層の役割とその役割を果たすために必要とされている性能を整理し、これまで表層に使用されてきた材料の種類とその特性について概説する。

3.2.1 表層の役割と必要とされる性能

舗装を構成する要素として、表層には大別して以下の二つの役割がある。その一つは、車輪等の交通荷重を直接支持し、表層以下の層に荷重を分散させる構造的役割

である。舗装は下から徐々に支持力が高い層をいくつか積み重ねた多層構造体を呈しており、表層は最上層であることから、構造的に最も重要な役割を果たしている。この場合、単に車輪等の荷重だけではなく、外気および雪氷によって生じる温度応力も外的作用に含まれる¹⁾。

表層の構造的役割は舗装本来の根本的役割に直結しており、その役割を果たしえる性能は舗装の長期供用性や維持管理業務への負担に直接影響を及ぼすことになる。そして、この役割を果たす程度を表す力学性能としては、圧縮強度や引張り強度、せん断強度、曲げ強度ということになる。そのため、これらの力学性能を評価、規定することによって、表層の構造的設計を行っている。

表層のもう一つの役割は、安全な走行性を提供するとともに、周辺環境の保全に寄与し、表層以下の層を保護する機能的役割である。機能的役割はかなり広義のものであり、一般的な機能で表現されているところの快適性、安全性、経済性、環境保全がこれに対応している。つまり、舗装の役割で構造面以外は、すべてこの機能的役割に分類されると考えてよい。この機能的役割を果たす性能は、平坦性、すべり抵抗性、視認性、透水性（不透水性）、排水性、低騒音性などの多くの性能因子で表現されている。そして、これらの性能を試験で評価することにより、表層の機能的役割を管理、制御している。

これら二つの表層の役割とそれぞれに関与している性能、およびそれらの評価法をまとめると、表-3.1に示すとおりである。表層の二つの役割はそれぞれ独立したものではなく、役割を表す上記の性能は相互に関係しているものが多い。例えば、表層のせん断強度や曲げ強度が不十分であれば、わだち掘れやひび割れが生じやすく、平坦性や不透水性が損なわれることになる。あるいは、不透水性が不十分であれば雨水が表層以下に浸透し、その層の支持力の低下を招くことになる。ここで、舗装の耐久性について考えてみると、広義の舗装の耐久性とは、舗装がその本来の機能を消失、あるいは著しく低下することに対する抵抗性であり、上記の性能が長期にわたって一定以上のレベルに保持される能力のことである。狭義の概念では、舗装の耐久性は外的な荷重作用に対して抵抗する構造的性能であると捉えられている。いずれにしても、舗装の耐久性は表層に必要とされている性能に多大に依存するものであり、舗装の耐久性を高くもたせ

表—3.1 表層の役割と性能

役 割	性 能	評 価 法
構造的役割	圧縮強度	(一軸圧縮試験)
	引張強度	圧裂試験, 直接引張試験
	曲げ強度	曲げ試験
	せん断強度	三軸圧縮試験, (WT 試験)
	スティフネス	レジリエントモデュラス試験
機能的役割	平坦ん性	平坦ん性測定
	すべり抵抗性	すべり抵抗測定, 摩擦係数測定
	透水性	透水量試験
	低騒音性	タイヤ路面騒音測定, 吸音率試験

ることが表層の根本的な役割と言える。

3.2.2 表層材料の変遷と現況

以上のように、舗装の表層にはその役割に基づいて種々の性能が必要とされている。そして、表層にはこれらの性能を有する材料が使用されることになる。ただし、舗装の場合は必要となる材料の量が膨大であることから、経済性と施工性が高いものにある程度限定される。古くは、石板や碎石を敷き並べて表層としたものが造られていたが、近代的な舗装の表層としては、25 mm 程度の粒径の碎石を敷き均した形式のものが英国や仏国で用いられた。1820年頃には、この形式は米国でも採用され、その後自動車の発明を契機に、アスファルトやセメントによって碎石を結合させる取り組みが始まった。

表層に使われている材料をアスファルト系、セメント系、およびその他に分類し、その概要をまとめると表—3.2に示すとおりである。以下に、それぞれについて概説する。

(1) アスファルト系材料

1800年代後半にアスファルトと砂のみを混合したシートアスファルトが米国で運用され、その後配合とアスファルトバインダに改良が繰り返されて、徐々に現代のアスファルト混合物の形態へと発展してきている。初期の頃には、アスファルトに乳化剤を混合して水中に分散させたアスファルト乳剤も骨材を結合するバインダとして用いられた。これは浸透式マカダムと称され、常温で施工することが可能で、大規模な施設や機器を必要としないことから、簡易舗装の表層に適用された。

アスファルトは天然に存在するものであり、黎明期は天然アスファルトが表層に用いられていた。原油の精製技術が開発されると、石油アスファルトが製造されるようになり、品質と安定供給の優位性から石油アスファルトが主に使用されるようになった。石油アスファルトで主なものはストレートアスファルト（ストアス）であり、これを骨材と加熱混合したものを一般的にアスファルト混合物と称している。アスファルト混合物を現場で敷き均し、転圧して冷えたものがアスファルトコンクリート（アスコン）であり、これがアスファルト舗装の表層および基層を構成している材料である。

交通荷重の変化と舗装の長寿命化によって、最近では、

表—3.2 表層材料の分類

分 類	材料の名称	主な原材料
アスファルト系材料	アスファルト混合物	骨材, アスファルト
	改質アスファルト	改質バインダ
	マッシュアスファルト	細骨材
	浸透式マカダム	アスファルト乳剤
セメント系材料	セメントコンクリート (鉄筋コンクリート)	ポルトランドセメント (鉄筋による補強)
	繊維補強コンクリート	鋼繊維
	転圧コンクリート	(ローラ転圧の締めめ)
その他の材料	ブロック材料	石, 木, レンガ
	樹脂系混合物	アクリル樹脂
	リサイクル材料	木材, ゴム, ガラス

通常のアスコンでは骨材と骨材を結合させるバインダとしての性能が不十分であることから、ストアスに空気を吹き込んだり、高分子材料を混入したりした様々な改質アスファルトが開発された。そして、これらの改質アスファルトを用いたアスファルト混合物が表層に運用されるようになってきた。また、透水性や低騒音性、温度低減等の環境保全に関連する機能を持たせたアスファルト系材料も開発され、特に高規格道路の表層に用いられている。

一般に、アスコンは粘弾性材料であり、ヤング率に相当するスティフネスがあまり大きくなく、引張りに対する破壊時ひずみが大きいという力学的特徴を有している。そして、これらの性能に対する温度依存性とひずみ速度依存性が非常に高く、性能に影響を及ぼす配合上の因子が多い。このことがアスファルト系材料の物性を規定、制御することを難しくしている。

(2) セメント系材料

セメントコンクリートも1800年代後半から道路舗装に用いられるようになったが、舗装の表層に本格的に使用されるようになったのは、米国における1920年ころからの自動車数の急増がきっかけとなっている。初期のころは、中央部あるいは端部で層厚を変化させた不等厚の断面が用いられていたが、1950年以降は等厚断面のコンクリート版が主流となった。

一般的には、表層としてのセメントコンクリートは無筋であり、乾燥収縮に対応するために横断および縦断の目地が設けられている。近代のコンクリート舗装では、目地にタイバーあるいはスリッパーといった荷重伝達装置が設けられるようになった。その後、交通条件の変化に対して耐久性と平坦ん性を改善する目的で、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートが高規格道路に用いられる場合がある。

セメントとしては、普通ポルトランドセメントが一般的に用いられており、配合や使用骨材、混和剤によって強度等の材料特性が多少異なる。セメントコンクリートを用いた表層の場合、その種類は母体となるコンクリートよりも、鉄筋等の補強の有無やプレストレスト、連続

鉄筋といった補強形式の差異によって分類されている。

セメントコンクリートの表層には、交通荷重による応力に加えて表面と底面の温度差による温度応力が発生する。そのため、版厚の設計では、荷重応力と温度応力の合成による曲げ作用に対してひび割れが生じないことを規準としている。セメントコンクリートの静的な材料特性は曲げ試験や圧縮試験によって直接評価することが比較的容易である。しかし、実際の表層には不規則な繰返し曲げ応力が複雑に発生し、その履歴や環境条件等によってセメントコンクリートの疲労特性が影響を受けるため、表層材料としての寿命や力学性能を定量的に予測、規定することは難しい。

(3) その他の材料

表層材料としてはアスファルト混合物とセメントコンクリートが一般的であるが、近年では舗装に種々の機能を付与することを目的に、様々な材料が表層に導入されている。このような場合、材料あるいは施工が基本的に高価であるため、ほぼ限定的に活用されている。

一般的なものとしては、天然あるいは人工の石材によるブロック、樹脂系バインダによって骨材を結合させた混合物が挙げられる。また、主に屋外体育施設の表層としてクレイ系の材料、ポリウレタンやポリエチレン、ゴム、合成樹脂が用いられている。これらの他にも木材、ゴムチップ、ガラス等の廃材が有効利用を目的に使用される場合がある。

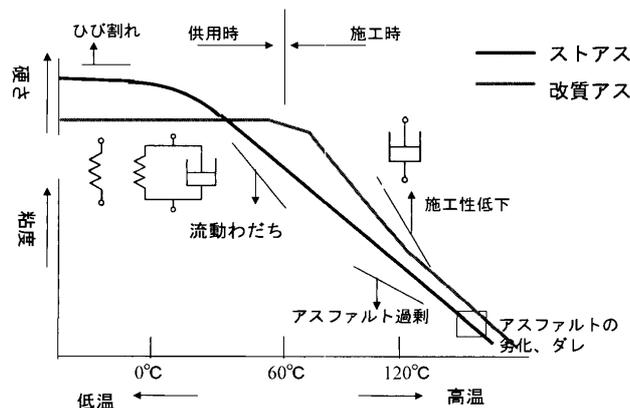
3.3 アスファルト系表層材料

アスファルト系材料とは、碎石類をアスファルト系のバインダで結合させたものである。この場合のアスファルト系のバインダとしては様々なものがあり、アスファルトのみはもちろんのこと、アスファルトを基材としてオイルや活性剤、ポリマーなどを混入したものが運用されている。本節では、バインダとしてのアスファルトとアスファルト系材料で最も基本的で広く運用されているアスファルト混合物について概説し、アスファルト混合物の基本物性を紹介する。また、混合物のバインダとしても、また層と層の接着材としても活用されているアスファルト乳剤についても言及する。

3.3.1 アスファルト

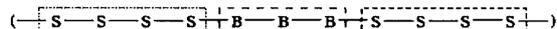
アスファルトは、低温では固体、常温では半固体、また高温では液体を呈する瀝青材料の一種であり、炭化水素を主成分とした複雑な分子構造を持つ材料である。アスファルトは、粘着性、防水性、電気絶縁性に優れており、道路などの舗装材料の他に建築材料、電気絶縁材料として用いられている。一般的には、天然アスファルトと石油アスファルトに大別されるが、我が国を始めとする先進諸国では石油アスファルトが主に活用されている。

口絵写真—13に石油アスファルトが製造されるプロセスを示す。原油を常圧蒸留することにより、軽い材料から順にLPG、ガソリン、灯油、軽油が精製される。そして、最後に残った残渣を減圧蒸留することによってアスファルトが製造される。アスファルトの品質は、原油

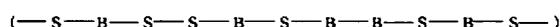


図—3.1 温度変化によるアスファルトの粘弾性挙動

●ブロック共重合体モデル(SBS)



●ランダム共重合体モデル(SBR)



図—3.2 ポリマーの共重合体モデル

の産地と蒸留プロセスに依存することから、蒸留条件を調節したり、複数のアスファルトをブレンドしたりして、所定の品質を確保している。

アスファルトは、常温において粘性の高い半固体の材料であるため、これを混合物のバインダとして取り扱うためには、加熱、溶剤混合、あるいは乳化（活性剤を混ぜて水の中に分散させる）の方法によって粘性を低下させる。これらのうち、最も一般的なものは加熱による方法で、これによって製造した混合物を加熱式アスファルト混合物と称している。

アスファルトは温度依存性が高く、図—3.1に示すように、高温（140°C～180°C）では粘度が低くなって混合による製造や現場での施工が容易となるが、熱劣化やダレ等が生じやすくなる。逆に低温では、粘度が高くなって硬くもろくなり、ひび割れや骨材とのはがれが発生しやすくなる。このため、ひび割れを抑制するとともに、供用中の温度上昇による塑性流動に抵抗することを目的に、改質剤であるSBS（スチレン・ブタジエン・スチレン・ブロック共重合体）ポリマーを添加した改質アスファルトが使われるようになってきた。ポリマーは溶媒であるアスファルト中に均一に溶解して高粘度状（水飴状）となり、図—3.2に示すようにS（スチレンモノマー）とB（ブタジエンモノマー）が規則的に配列したブロック構造を形成する。そして、バインダとしてはブロック構造の性質が顕著となって、粘度や伸度、感温性が改善される。したがって、この種のポリマーは、常温から120°C前後では極めて強靱なゴム弾性（SとBの相互作用）を有し、高温では軟化（熱可塑性）しやすい樹脂的な性質（Sの作用）を合わせ持っていることから、高い改質効果を得ることができる。

3.3.2 アスファルト乳剤

一般的に、水とアスファルトは両者の界面で張力が働くため、お互いの物質は混じり合わない。しかし、界面

講座

表—3.3 アスファルト乳剤の種類と特徴

種類	特徴
カチオン系乳剤 (Cation とは陽 (+) イオンを指す)	安定である一方、使用後は速やかに分解して骨材の表面にアスファルト皮膜をつくる。このため、水が蒸発しなくても分解・硬化し、降雨により流出しにくい。pH2~5 の酸性を示す。
アニオン系乳剤 (Anion とは陰 (-) イオンを指す)	分解が遅く付着性にも劣るため、骨材やフィラーと混合してマッシュクやスラリーを作るときなど、長時間の保存が必要な場合に使用される。pH9~13 のアルカリ性である。
ノニオン系乳剤 (Nonion とは非イオンを指す)	電荷を持たず化学的にも安定であり、セメントなどのフィラーとも容易に混合できる。そのため、路上再生路盤工法やセメントモルタル用混合乳剤などに使用される。また、各種の材料と混合して使用する工業用や農業用乳剤としても適している。

活性剤を用いることにより、食用ドレッシングや化粧水のように水中にオイルが均一に分散するようになる。アスファルト乳剤は、この原理を用いて水中にアスファルト粒子を均一に分散させたものである。この水中におけるアスファルト乳剤の分散状態を口絵写真—14に示す。アスファルト乳剤は水中で分散しているときのイオンの状態によって表—3.3に示すように分類されており、最も多く使用されているのがカチオン系乳剤である。

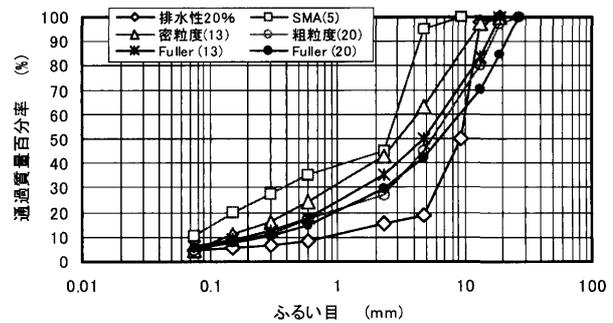
アスファルト乳剤は、混合や散布の作業終了後、速やかに分解、硬化してアスファルトに戻る必要がある。このことは、使用前においては安定な状態でなければならないという条件と相反するものである。アスファルト乳剤の分解は、口絵写真—15に示すようなアスファルト乳剤中の水分の蒸発によるものが多い。しかし、早期の分解が必要な場合は、砂の散布による接触分解や酢酸軽水溶液の散布による化学作用による分解が行われる。

アスファルト乳剤の用途としては、混合物のバインダとして骨材相互を結合するために用いられるほか、多層構造の層と層、あるいは混合物と他の構造物等を接着するために用いられる。我が国では後者が一般的で、途上国では前者の用途でも多く運用されている。

3.3.3 アスファルト混合物

アスファルト混合物は、粗骨材、細骨材、フィラーおよびアスファルトを所定の割合で混合した材料であり、一般にアスファルト舗装の表層や基層に用いられている。アスファルト混合物に使われる骨材を口絵写真—16に示す。アスファルト混合物は表—3.1に示したような性能が要求されるため、それを満たし得るように、個々の素材の品質を規定するとともに、骨材の粒度を調整し、最適なアスファルト量を選定する。そして、これらの素材を加熱したうえで混合したものが加熱アスファルト混合物であり、アスファルト乳剤などを用いて常温で混合したものが常温アスファルト混合物である。

アスファルト混合物は舗装の表層に用いられることから、基本的な物性として耐流動性、滑り抵抗性、および水密性が必要とされる。表—3.1に示した性能も含め、アスファルト混合物の物性は個々の素材、それらの配合割合、施工条件に大きく依存する。基本的概念として、



図—3.3 各種アスファルト混合物の粒度曲線

上記の基本的物性を確保するためには、より高い密度を得られる混合物が望ましいとして、連続粒度の骨材配合が推奨されてきた。これが密粒度アスファルト混合物である。近年では、さらに種々の機能を付与するために、中間の粒径の骨材をかなり少なくした不連続の骨材粒度のものも表層に用いられている。SMA (Stone Matrix Asphalt) 混合物、開粒度アスファルト混合物がこれに当たる。我が国で運用されている代表的なアスファルト混合物の粒度曲線を図—3.3に示す。

アスファルト混合物の配合設計にはいくつかの方法があるが、我が国では口絵写真—17に示すマーシャル安定度試験の結果に基づく方法を採用している。現地で入手できる分級した骨材を用いて目標とする合成粒度を設定し、アスファルト量を変化させた供試体を作製してマーシャル安定度試験を実施して、得られた特性値を基準値と照査することにより、最適アスファルト量を決定する。

3.3.4 アスコンの変形特性

舗装も他の土木構造物と同様に、性能規定や限界状態に基づく信頼性設計法を適用することが求められている。このような設計を行うためには、アスコンの荷重と変形の関係、すなわち変形特性の評価が重要となる。しかしながら、アスコンは粘弾性材料であり、その変形特性に温度依存性とひずみ速度依存性があることから、特性化することは容易でない。これまで種々の試験法が考案されてきたが、実用化されているものは少ない。

アスコンの変形係数の評価には、米国をはじめ我が国においても、繰返し間接引張り試験による復元弾性係数 (M_r) が多く用いられている。この試験の概要は口絵写真—18に示すとおりで、ディスク状の円形供試体にハーバーサイン波の繰返し荷重を与え、その応答として載荷と直行方向の変位を測定する²⁾。

アスコンの M_r と、温度および載荷速度との関係について図—3.4に示す³⁾。図中における座標の縦軸が対数表示であることから、アスコンの M_r は温度とひずみ速度に大きく依存していることが確認される。例えば、試験温度25°Cの条件で、走行速度15 km/hに相当する載荷時間0.1 sのハーバーサイン波に比べ、走行速度4 km/hに相当する載荷時間0.4 sでは、 M_r が3 000 MPa から2 000 MPa に低下している。

M_r 試験で計測された全復元水平変形量と瞬間復元水平変形量の差が荷重1波当たりの残留ひずみとなる。

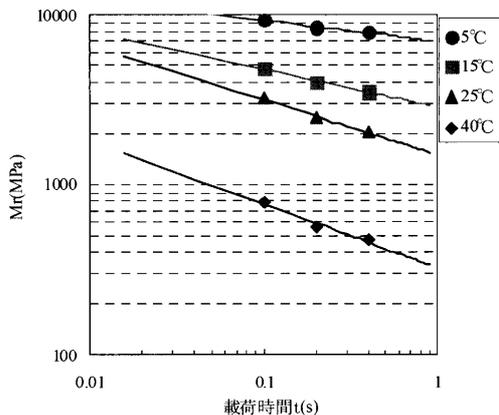


図-3.4 Mrの温度およびひずみ速度依存性

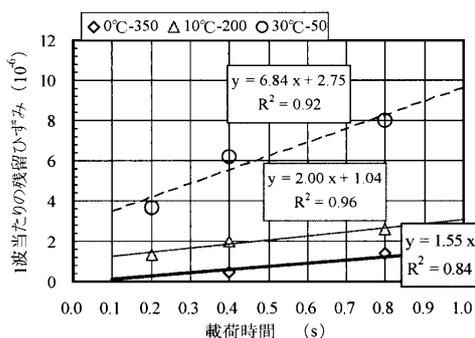


図-3.5 残留ひずみの温度および荷重時間依存性

この残留ひずみと、温度および荷重時間との関係を図-3.5に示す。これより、瞬間復元変形のひずみだけでなく、残留ひずみも温度や荷重時間の影響を受けており、温度が高いほど、あるいは荷重時間が長いほど残留ひずみは大きいことが確認される。

残留ひずみは復元ひずみと同様に一樣に増加することから、多層構造解析で表層に生じるひずみを求め、アスコンの荷重時間と温度条件を考慮したクリープ特性から、アスコンの永久変形量の予測が試みられている。アスコン層の永久変形量 δ_a (mm) は次式で推定される⁴⁾。

$$\delta_a = \sum \frac{(S_{mix,D})_i}{(S_{mix,n})_i} \cdot w_{ai} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに、 $S_{mix,D}$: 交通荷重走行時の短時間荷重 (0.02秒) におけるアスコンのスティフネス (MPa), $S_{mix,n}$: 交通履歴時間を考慮したアスコンのスティフネス (MPa), w_{ai} : 荷重に伴うアスコンの圧縮変形量 (mm) である。式(3.1)の $S_{mix,D}$ は、交通荷重走行時の短時間荷重 (0.02秒) におけるアスファルトのスティフネス S_{bit} (MPa) より、以下の式より求められる。

$$\frac{S_{mix,D}}{S_{bit}} = \left(1 + \frac{2.5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n \dots\dots\dots (3.2)$$

$$n = 0.83 \times \log \frac{4.08}{S_{bit}} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに、 C_v : アスコンの骨材容積率 (%) である。

3.3.5 アスコンの疲労特性

一般に、アスコン層は、繰返し荷重によって底面から疲労ひび割れが発生し、破壊に至ることが知られている。前項で示した永久変形と同様に、疲労ひび割れはアスフ

表-3.4 散逸エネルギー規準に用いる材料定数

定数	密粒度(13)	粗粒度(13)
a_3	-40.0	-49.8
a_4	9.21	11.3
a_5	-0.513	-0.631
a_9	149000	204000
a_{10}	-0.419	-0.466

ルト表層の状態や耐久性を表現する主要な損傷形態である。アスファルト系材料の疲労特性には影響因子が多く、これらが複雑に関係していることから、疲労ひび割れが発生するまでの荷重回数を定量的に評価、推定することは極めて難しい。繰返し荷重過程におけるアスコンの粘性による散逸エネルギーと疲労ひび割れの関係を実験的に求めたところ、両者の間に骨材配合には依存するが、温度、速度、アスファルトの種類に依存しないという関係が見出されている。そして、散逸エネルギーに基づいて疲労ひび割れが発生するまでの荷重回数が次式で提案されている⁴⁾。

$$N_f = \left(\frac{1}{a_9} \pi \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \sin \phi \right)^{1/a_{10}} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに、 N_f : 破壊までの荷重回数, a_9, a_{10} : 表-3.4に示す材料定数, $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$: 静的弾性解析によって計算される応力テンソルとひずみテンソル, ϕ : 位相角であり次式で表される。

$$\phi = a_3 + a_4 \times \log S_i + a_5 (\log S_i)^2 \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに、 a_3, a_4, a_5 : 表-3.4に示す材料定数, S_i : アスコンの弾性係数 (MPa) である。ただし、 S_i には $1.04 \times 10^8 \text{ MPa} < S_i < 1.59 \times 10^9 \text{ MPa}$ の条件が付されている。

疲労ひび割れはアスコン層の底面から発生して、徐々に表面に向かって伸展するものと一般的に捉えられている。しかし、実現象としては舗装表面から発生するひび割れも重要視されている。このひび割れは、舗装表面の劣化を伴った状態での疲労ひび割れに類別されている。そこで、ストアスとポリマー改質アスファルトII型(改質アスII型)に対して、自然環境を人工的に再現するサンシャインウェザーメータを用いて人工的に劣化させ、劣化程度の違いと疲労特性の関係が検討されている³⁾。アスファルトの組成は飽和分、芳香族分、レジン分、およびアスファルテン分で表され、これらの4成分がバランスを保ったコロイドとして分散している。飽和分と芳香族分は低分子量であり、レジン分とアスファルテン分が高分子量である。アスファルトにおいては、劣化によって低分子量の成分が高分子量の成分に変化する。

ストアスと改質アスII型の紫外線劣化に伴う組成の変化を図-3.6に示す⁵⁾。降雨と紫外線照射を繰り返して劣化させると、低分子量から高分子量に成分の割合が変化する。紫外線劣化ではレジン分が増加し、アスファルテン分が多少減少する。ストアスと改質アスII型の比較では、ポリマーの入った効果によって高分子量の増加は改質アスII型のほうが小さく、劣化に対してポリマー

講座

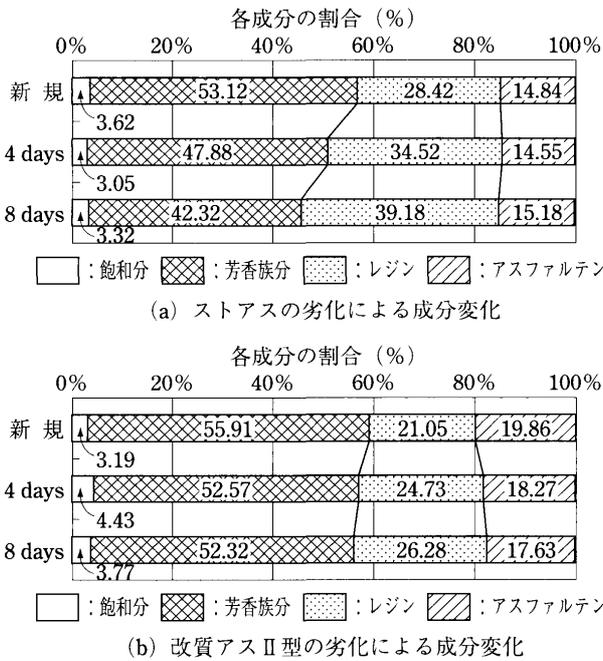


図-3.6 アスファルトバインダの4成分の構成比

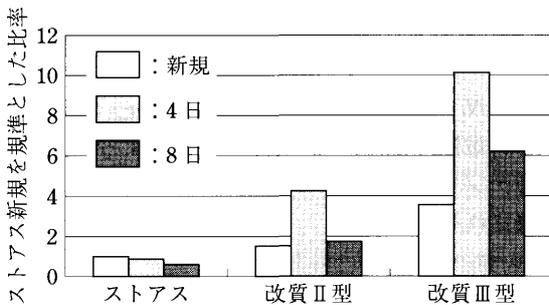


図-3.7 アスファルトの違いによる疲労回数の比較

の効果が高い。このため、アスファルトバインダの物性は改質アスII型に比べ、ストアスの物性としては硬くもろくなる。

アスファルトバインダの違いによる疲労特性の違いを図-3.7に示す。これは、ストアスの新規状態における疲労破壊回数を1とし、バインダの差と劣化程度をまとめて示しているが、ポリマー材料やポリマー量の違いによる疲労特性の差が現れている。

3.4 セメント系およびその他の表層材料

セメントコンクリート舗装には普通コンクリート舗装、連続鉄筋コンクリート舗装、転圧コンクリート舗装、鋼繊維補強コンクリート舗装等の種類があり、それぞれの種類によって、使用材料、配合等が異なる。また、仕様も道路舗装用と空港舗装用とは異なる部分がある。

普通コンクリート舗装では、粗骨材の最大粒径が40 mm、スランプが2.5 cm、単位水量が120~140 kg/m³程度の硬練りのものが多く使用されている⁶⁾。これは、込み入った配筋が少ないために打ち込みが容易であること、および、気象作用や交通作用を直接受けるのでコンクリートの乾燥収縮の発生を小さくする必要があり、すりへり等に対する耐久性も大きくする必要があるので

起因している。以下に、一般的に使用されている普通コンクリート舗装に使用されている材料や配合の概要を示す。

3.4.1 骨材

アスファルト舗装用の骨材は2.5 mmふるいにとどまる骨材を粗骨材、通過する骨材を細骨材としているが、セメントコンクリート舗装用では、粗骨材が5 mmふるいに重量で85%以上とどまる骨材であり、細骨材が10 mmふるいをすべて通過し、5 mmふるいを重量で85%以上通過する骨材と定義されている。粗骨材は、碎石、砂利(川砂利、陸砂利、海砂利)等が使用され、細骨材は人工砂(砕砂、高炉スラグ細骨材等)、天然砂(川砂、山砂、海砂)等が使用される。粗骨材の最大寸法は、アスファルト混合物では20 mm~13 mm以下が標準とされているが、セメントコンクリート舗装では、40 mm以下を標準としている⁷⁾。

セメントコンクリート舗装用骨材に要求される性質として、アスファルト混合物と共通している点は、堅硬、強靱でシルト、粘土、有機物、塩化物等の有害物質を規定量以上含有せず、物理的に安定で、交通車両によるすり減り抵抗性能が高いことである。セメントコンクリート舗装の場合、アスファルト混合物とは違って、セメントペーストと骨材が水和反応により固結する。そのため、骨材に要求されるその他の性質としては、以下の事項が挙げられる⁸⁾。

- 水分の吸収や温度変化によって体積変化を起こさないこと。また、セメントの水和反応を防ぎ、骨材自体が化学反応を起こすことがないように化学的にも安定であること。
- 単位水量を少なくするため、大小粒が適度に混ざり合った粒度であること。骨材下面に大きな水隙を作らないように、扁平、細長い片を有害量含有しないこと。
- コンクリートの強度を十分に発揮するように、セメントペーストよりも強く、かつセメントペーストと十分に付着すること。

これらが適切でないコンクリートの単位水量が大きくなって、乾燥収縮量が増大したり、短期間にコンクリートの耐久性が低下してひび割れや崩壊が生じたりする。要求される品質の標準については、「舗装標準示方書(社団法人土木学会)⁴⁾」等の各示方書に示されている。

3.4.2 セメント

セメントは石灰石と粘土を1400~1500℃の高温で燃焼させ、それに石こうを加え、微粉碎して製造されるもので、混合する材料の種類によって各種の性質を有するセメントができる。セメントコンクリート舗装に使用されるのは、普通ポルトランドセメントが最も多く、早期強度が要求される場合や寒中施工の場合には早強ポルトランドセメントが用いられる。また、施工から交通解放までの時間が長い場合では、初期強度はあまり大きくないが長期強度が期待できる高炉セメントや中庸熱ポルトランドセメント、あるいはフライアッシュセメントの使用が検討される。しかし、中庸熱ポルトランドセメント

は入手が容易でなく、フライアッシュセメントでは良質なフライアッシュの確保が困難であり、高炉セメントでは初期養生を入念に行わないとひび割れが発生しやすいといった問題点がある。

3.4.3 混和剤

最も多く使用されているのはAE減水剤である。AE剤とは界面活性剤であり、混入することによりコンクリートに微細独立気泡（エントレインドエア）が多く出来る。エントレインドエアは直径25～250 μm程度の独立球形の気泡でコンクリート中に一様に分布する。エントレインドエアはセメント界面に密着してセメントの粘性を増し、骨材周辺に保持されてボールベアリングのような働きをし、コンクリートのワーカビリティを改善させて単位水量の減少やブリージングを低減させる。また、減水剤とは、空気を連行することなくセメント粒子に対する湿潤、分散作用によりコンクリートのワーカビリティを改善する。

そしてAE減水剤とは、AE剤の効果と減水剤の効果を併せ持った混和剤であり、セメントの硬化速度の調整機能を付与させた標準型、遅延型、促進型の3種類の区分がある。その他に、コンクリート中の塩分総量規制に対応してI～III種の塩化物量による種類分けがある。AE減水剤は所要のコンシステンシーを得るのに必要な単位水量を10～15%程度減らすことができる。また、AE減水剤の中には、高性能AE減水剤と呼ばれる種類もあり、高性能AE減水剤では所要のコンシステンシーを得るのに必要な単位水量を15～25%程度減らすことができる。

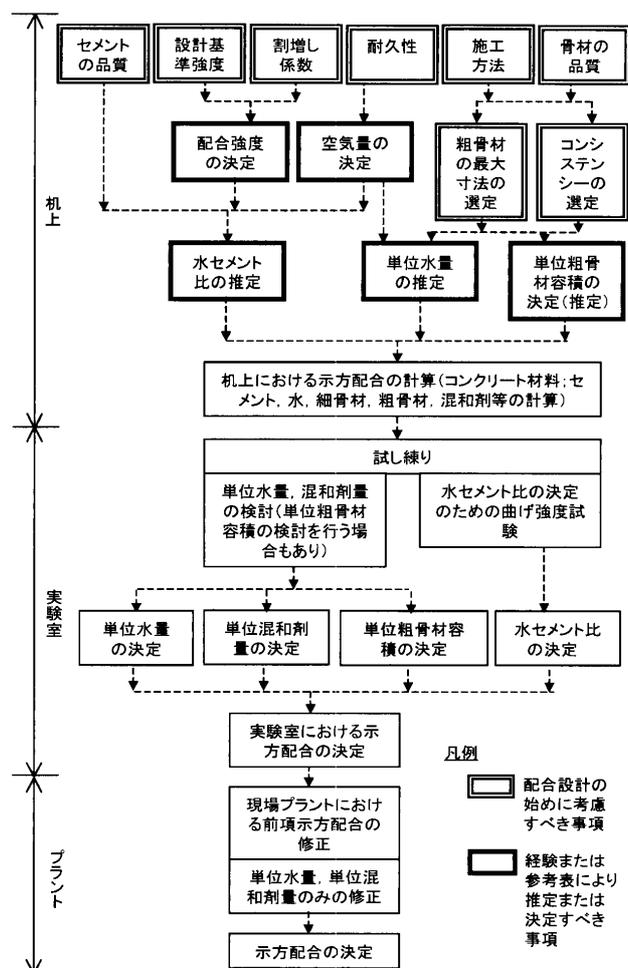
その他に現場で所要のコンシステンシーが得られない場合に、コンクリート練り混ぜ後に添加する流動化剤、セメントの凝結を遅らせる遅延剤、超遅延剤などが使用される場合もある。

3.4.4 配合および配合設計

舗装用コンクリートの配合は、所要の品質（所要の強度を有し、耐久性、すり減り抵抗性が十分で、ばらつきが少ないもの）と作業に適したワーカビリティが得られる配合のうち、最も経済的なものを選ぶ必要がある。舗装用コンクリートの配合設計要領を図—3.8に示す⁹⁾。

コンクリートの品質に最も大きく影響する因子は、セメントペーストの品質、すなわち単位水量と単位セメント量である。単位水量を少なくすれば、所要の強度、耐久性を得るための単位セメント量を少なくでき、乾燥収縮も小さくできる。また、コンクリートのワーカビリティに最も影響するのは、モルタルの質・量とその軟らかさ、すなわち単位水量と単位粗骨材容積（または細骨材率）である。したがって、経済的かつ良い品質のコンクリートをつくるためには、適正な単位粗骨材容積（または細骨材率）を選ぶことと、作業に適する範囲内で単位水量をできるだけ少なくすることが重要である。

舗装用コンクリートの適正な配合を得る方法としては、まず机上で配合参考表などの過去の経験に基づいて仮の配合を定め、次に試験室で試験練りを行って必要配合を



図—3.8 舗装用コンクリートの示方配合決定の順序⁹⁾

決め、さらに舗設時の状況に応じて適宜修正を加えるものである。

舗装用コンクリートの規準となる強度は、原則的に曲げ強度を規準として、標準材齢28日の曲げ強度で設計基準曲げ強度が一般的に4.4 N/mm²と定められる。ただし、交通量が少ない場合や空港舗装などの場合は違う規準となることもある。配合強度は設計基準曲げ強度に変動係数から求まる割増し係数を乗じたものとする¹⁰⁾。

舗装用コンクリートのコンシステンシーは舗装条件、すなわちコンクリート版の構造、コンクリートの運搬方法および舗設方法等により相違するが、一般的にスランプ2.5 cmまたはVC試験の沈下度で30秒を標準とする。簡易な舗装機械および人力舗設の場合、配筋量の多いコンクリート版の舗設やトンネル内等でダンプトラックの使用ができない場合はスランプ6.5 cm程度を標準とする。

3.4.5 セメントコンクリート舗装の力学特性

舗装に用いるコンクリート版は、厚さが比較的薄く、直接交通荷重を受け、風雨にさらされ、日夜温度変化による応力の繰返しを受けるなど、厳しい使用条件下におかれる。

セメントコンクリート舗装版での理論設計においては、輪荷重による発生応力と気温による版内で発生する軸方向に拘束する温度応力を合成応力として、コンクリート

講 座

版が舗装の設計期間にわたって設定した疲労破壊によるひび割れ度を超えないように版厚を決定する。発生応力は FEM 等の計算手法で求めることができるが、一般的には「舗装設計便覧」⁹⁾等に記された式を用いて算出する。また、セメントコンクリート舗装版は直接車両が走行するため、車両走行時の快適性、安全性や周辺環境への影響なども重要であり、すり減り、すべり、騒音性などについても力学的な観点からの検討が必要となる。

他にも施工時の養生不足による場合や硬化後の外気による乾燥により収縮ひび割れが発生する場合がある。これについては、コンクリートを単位水量のなるべく少ない配合とし、施工時に十分な湿潤養生を実施し、適切な時期に適切な間隔で収縮目地を設置することで対応する。収縮目地の一般的な間隔は、鉄網を用いる場合と用いない場合で異なり、前者が 8~10 m 程度、後者が 5~6 m 程度である。

3.4.6 その他の材料とその特徴

舗装の表層部分に使用する材料としては、アスファルト舗装、セメントコンクリート舗装以外にも、ブロック系舗装、樹脂系舗装、土系舗装等がある。それぞれの概要を簡単に述べる¹¹⁾。

(1) ブロック系舗装

ブロック系舗装には、セメントコンクリート平板、インターロッキングブロック等のコンクリートブロック舗装のほか、アスファルトブロック舗装、レンガ舗装、天然石舗装等があり、主に歩道や駐車場で使用されることが多い。ブロックの形状、色彩、表面テクスチャおよび敷設パターンを種々選択することにより、周辺環境に調和した舗装面を形成し、景観の向上を図ることができる。

(2) 樹脂系舗装

樹脂系舗装は、特殊バインダを用いて骨材やゴムチップを接着させる舗装である。大きく分けてすべり止め舗装、樹脂系弾性舗装、樹脂系透水性舗装に大別できる。すべり止め舗装は、舗装路面に接着剤として樹脂系材料を塗布し、硬質骨材を散布、接着させて車輪のすべり止め効果を強めた工法である。着色骨材や顔料を用いる場合には、着色舗装とも呼ばれる。樹脂系弾性舗装は、ゴムチップ骨材とウレタン樹脂バインダを混合して、ベース舗装上に敷き均す弾力性のある舗装であり、歩行性を改善するため、主に公園等で使用される。樹脂系透水性舗装は、天然の玉石の美しさそのままを樹脂バインダと混合して、透水性のベース舗装上に敷き均す舗装である。

(3) 土系舗装

土系舗装は、主に天然材料による層で構成された舗装であり、表層は天然土を単独、あるいはセメントやアスファルト系等の固化材と混合する。適度な弾力性、衝撃

吸収性、保水性等の性能を有しているため、主にグラウンド等で使用されている。しかし、近年では歩道や軽交通の自動車道への適用も試みられている。

(4) その他の舗装

その他の舗装としては、木材と固結材を混合させた木質系舗装、ゴムチップを利用して弾力性を持たせたゴムチップ舗装、芝をブロック系基盤や樹脂系基盤に埋め込んだ緑化舗装等が存在する。

3.5 ま と め

舗装において表層は“顔”である。表層に用いられる材料に基づいて、アスファルト舗装やコンクリート舗装と分類され、その舗装の構造や路面性状が決まることになる。また、顔である半面、表層は舗装の“鎧”でもある。外からの荷重や劣化作用を直接受けて内部の路盤や路床への負担を軽減している。本文では、舗装の構成要素としての表層の役割と必要な性能について紹介し、表層に使用されている材料の種類、工学的特徴について概説した。

アスファルト混合物やセメントコンクリートは建設材料として一般的なものであるが、地盤工学の研究者、技術者にとってはあまり馴染みのない材料であると予想される。本文が、表層材料の概要と実状をイメージするための一助になることを強く望む。そして、路盤や路床の土質系材料に加えて、表層材料についても研究対象の一つとして、地盤工学の研究者から視野を広げてもらえることを多に期待したい。

参 考 文 献

- 1) 財団法人道路協会：舗装設計施工指針，2006。
- 2) 財団法人道路協会：舗装調査・試験法便覧，B015T アスファルト混合物のレジリエントモジュラス試験方法，pp. [3]-140~148，2007。
- 3) 阿部長門・関根悦夫・桃谷尚嗣：室内試験と FWD 試験から求めた弾性係数の比較，第58回土木学会学術講演会，V-685，pp. 1371~1372，2003。
- 4) 財団法人土木学会：舗装標準示方書-2007年版，2007。
- 5) 前原弘宣・高橋 修・大久保美里：ポリマー改質アスファルトを用いた混合物の劣化および疲労特性，土木学会舗装工学論文集，第11巻，pp. 163~170，2006。
- 6) 財団法人コンクリート工業協会：コンクリート技術の要点06，2006。
- 7) 財団法人道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，丸善株式会社，1976。
- 8) 財団法人土木学会：舗装工学，1995。
- 9) 財団法人道路協会：舗装設計便覧，2006。
- 10) 福田 正・柳田 力・養玉田栄一：コンクリート舗装，財団法人セメント協会，1969。
- 11) 財団法人道路協会：舗装施工便覧，2006。