

第9回 アスファルト混合物の諸性質と配合設計⁽¹⁾

阿 部 頼 政*

1. はじめに

今回は骨材に関する配合設計を述べたが、アスファルト混合物の配合設計においても一つ重要な項目は、適正アスファルト量の問題である。すなわち、与えられた骨材に対してアスファルト量をどのくらいにするかという問題であるが、これは、アスファルト混合物の良否を左右する最大のポイントと言ってもよからう。

適正アスファルト量を決定するためには、アスファルト混合物の備えるべき性質をはっきりと見きわめなければならない。そして、その性質はアスファルト舗装においてアスファルト混合物が期待される役割から決定されることになる。骨材配合についても、アスファルトが入り、舗装としての要求が加われば、単に骨材だけで考える場合とはかなり条件が異なってくる。

今回はアスファルト混合物の基本的な性質を、配合設計に必要な因子を通じて色々と考察することにする。また、その中でも特に重要な安定性に関しては色々な点で役立つと思われる摩擦の考え方を方介したいと思う。

2. 配合設計に必要な諸因子

アスファルト混合物が単に強度的に大きいものがよいというのであれば、その配合設計はきわめて単純化されるであろう。また、実験室で作った供試体の性状のみで良否が判定できるのであれば、それでもかなり容易になるであろう。アスファルト混合物の配合設計における最大の難点は、設計された混合物が舗装に使用された場合

の良否によって判定されることにある。つまり、気象、交通荷重、路盤以下の支持力等、様々な外的条件を満足させ得るように配合設計をしなければならないわけである。さらに言いかえれば、配合設計にあたって考慮すべき因子が多すぎるということである。そして、それらの因子の間には、AをよくしようとすればBが悪くなるというような部分的に相反する場合もでてくるため、全体としてのバランスを考えることも必要になってくる。

これら、アスファルト混合物の配合設計に考慮すべき因子としては次の項目があげられる¹⁾。

- (1) 安定性 (Stability)
- (2) 耐久性 (Durability)
- (3) たわみ性 (Flexibility)
- (4) 疲労抵抗 (Fatigue resistance)
- (5) すべり抵抗性 (Skid resistance)
- (6) 不透水性 (Permeability or imperviousness)
- (7) 引張強度 (Fracture (tensile) strength)

これらは、配合設計上の因子であると同時に、アスファルト混合物の備えるべきものとして非常に重要な性質であるので次に詳しく考察していこう。

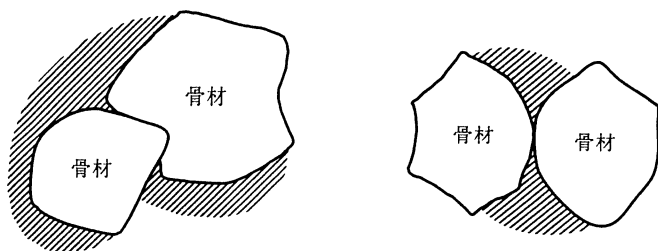
3. 安定性

安定度とは、外力によって混合物に起きようとする変形に対する抵抗力と解釈されている。アスファルト混合物が外力に対してどのような機構で抵抗するかについては、2つの異なった見解がある。

第1の見解は、骨材同志のかみ合い摩擦によるものとする説である。この見解によれば、骨材同志がかみ合っている状態(図-1)のところを外力がかかると粒子は移動を起そうとする。粒子が移動するためには局所的な体積膨張が必要であるが、周囲の拘束(やはり骨材同志のかみ合いによる壁)に防げられる。つまり、これらのかみ合いをはずすほどの外力でなければ、混合物としては変形を起さない。すなわちかみ合いによって外力に対抗するという考え方である。この説によれば、良好なかみ合いをつくる骨材の選択が最も重要であり、アスファルトは単に伸びのある膜で骨材を被覆して耐久性を与えたり骨材が移動しにくいように結合する役割は果すが安

図-1 かみあい状態

図-2 接触状態



* 日本大学理工学部講師

定性に対してはあまり寄与しないことになる。

マカダム工法等に代表されるのがこの考え方である。

第2の見解は、骨材粒子同志の表面における接触摩擦が外力に抵抗するという説である(図-2)。これは、骨材同志の接触面を中心に考えるため、骨材の表面粗さ、接触点を多くするような粒度が考慮され、さらに、接触面に介在するアスファルトの質と量も重要視される。この説に相当する混合物が連続粒度型の密粒度アスコン等であると言えよう。

いずれにしてもアスファルト混合物の安定性を論ずるには「摩擦、をぬきにしては考えられない。それもアスファルトという液体が介在する摩擦現象なので非常にむずかしい問題となる。通常我々はなにげなく摩擦という言葉を使用しているが、よく考えてみるとその使い方は非常にあいまいな内容をもっているようである。ここでアスファルト混合物の安定性を念頭におきながら、摩擦の基本的な考察をしておくことは、将来色々と役に立つのではないかと思う。

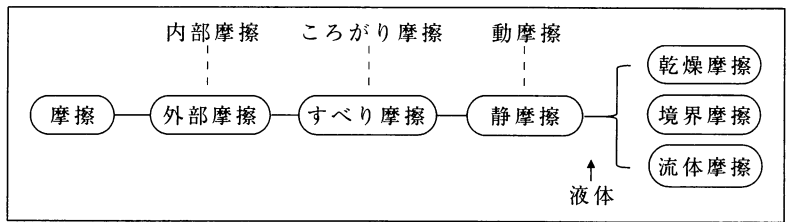
3-1 摩擦の種類

固体の摩擦は内部摩擦と外部摩擦に分けられるが、アスファルト混合物を対象とする場合、外部摩擦だけを考えれば充分であろう。この外部摩擦(力) - 以下摩擦と略称 - は「接触する二つの固体が相対的にすべるとき各固体に関してその接触面において運動と逆向きの切線方向にあらわれる抗力、と定義される²⁾。摩擦はさらにその観点のちがいに、次のように分類されることがある。

- ①すべり摩擦とこがり摩擦
- ②静摩擦と動摩擦
- ③乾燥摩擦、境界摩擦、流動摩擦

①は接触面に沿ってすべらそうとするか、こがりがそうとするかによる分類、②は物体が接触面に沿って静止しているか運動しているかによる分類、さらに③は、接触面に介在する流体の量による分類である。アスファルト混合物における骨材間の摩擦としては、表-1の形で考えられる。すなわち、乾燥摩擦、境界摩擦、流体摩擦の

表-1 骨材間の摩擦形態



考察が中心となる。

3-2 乾燥摩擦について

我々が中学や高校で習った摩擦は主としてこの乾燥摩擦のことである。これは2固体間に異物がなく固体同志が直接接触している状態で、有名なクーロンの法則に従う。

クーロンの法則：摩擦力は固体の接触面に加わる垂直荷重にのみ比例し、すべり速度やみかけの接触面積には無関係である。

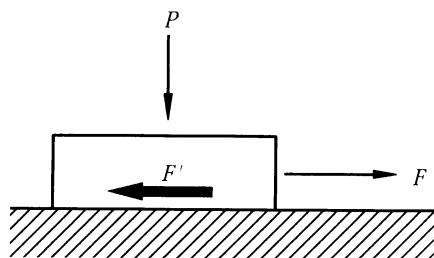
この法則はクーロンによって見いだされた経験則であるが、これまで多くの摩擦現象がこれによって説明されてきた。

図-3で平面上に荷重Pでおしつけられている物体を接触面に平行な力Fですべらそうとすると、外力Fが、 $F \leq \mu_0 P$ (μ_0 はある定数)の範囲では物体は静止のままであり、 $F > \mu_0 P$ になってはじめて運動がはじまる。これは、 $F \leq \mu_0 P$ の範囲ではFを加えると、物体の接触面にFと大きさが同じく向きが反対の力F'が生じ、物体が動きだそうとするのを防げるため、F'の最大値が $\mu_0 P$ として与えられるのである。このように、物体が動きだそうとするのを防げる力F'が摩擦力であり、 μ_0 は静止摩擦係数と呼ばれている。

この摩擦の原因が何かということについては、古くから相異なる二つの概念があった。その一つは表面の凹凸によるという凹凸説、他の一つは面の凸部同志の凝着に起因するという凝着説である。前者は、一つの面が相手の面の凹凸を上下して動くために失なわれるポテンシャルの損失が摩擦仕事としてあらわれるとするものであり、後者は凸部同志の接触からそこに凝着を生じ、その凝着部のせん断に要する仕事は摩擦力としてあらわれるとする説である。クーロンは凹凸説をとったが、その後、ハーディ、ホルム、パウデン達の研究の結果、現在では凝着説がより広く認められている³⁾。

摩擦の原因に関するこれら二つの説がアスファルト混合物の安定性に関する二つの説と概念的にきわめて類似していることに気がつかれたであろうか。すなわち、凹凸を問題にする凹凸説とかみ合い摩擦説、接触部のせん断抵抗に着目する凝着説と接触摩擦説の類似である。摩

図-3 乾燥摩擦



擦の理論は、機械工学の分野で軸受の潤滑等に関して研究されてきたものであるが、油の分子層など、非常に微小なものを問題にする学問と、骨材とアスファルトをプラントで混合するというように、きわめてラフな方法によってつくられるアスファルト混合物との間に、スケールのちがいがあつても、同じような発想があるというのは非常に興味深いと思う。

3-3 境界摩擦と流体摩擦について

二つの固体が接触する場合、両者の接触面が完全に清浄であるということはほとんど望み得ない。接触面には何らかの形で異物（液体、固体、気体）の介在する場合が多く、これらは固体同志の摩擦を小さくする潤滑剤として働く。潤滑剤が液体の場合、その量の多少によって摩擦は流体摩擦と境界摩擦に分けられる。

図-4は流体摩擦（潤滑油の量が多く固体間の接触面が完全に潤滑されている場合）の想定図である。この場合、摩擦は油膜の形状と摩擦速度とが与えられれば、液体の粘度のみで定められる。式で示せば³⁾

$$F = \eta \cdot \frac{VL}{h_0} \cdot \kappa$$

となる。ただし、Fは摩擦面の単位幅あたりの摩擦力、 η は粘性係数、Vは摩擦速度、Lは摩擦面の長さ、 h_0 は油膜の最小厚さ、 κ は油膜の形状で定まる定数である。

この式が「アスファルトの粘度」の項で述べたニュートンの粘性流動の基本式に酷似していることは言うまでもなからう。粘性摩擦とも呼ばれる所以である。

この式は、油膜の厚さがしだいに薄くなって h_0 が 10^{-3} mm以下になり、さらに数百Å（オングストローム）、数千Åになるとしだいに成立しなくなってくる。これは、分子論的、コロイド化学的性質をもった境界層と味ばれる薄層の影響で、アスファルト薄膜についてもMack⁴⁾らにより実験的に確認されている。曾田³⁾はこの境界層の厚さを次のように分類している。

- (1) 単分子層（数十Å～数千Å）
- (2) 数分子層（数十Å～数千Å）
- (3) 一種の薄膜（コロイドの性質をもった薄膜、数千Å～数万Å）

この境界摩擦においては、潤滑油の粘度は摩擦にほとんど関係しないことをつけ加えておく。

3-4 アスファルト混合物の考察

摩擦に関する以上の知識をもとに、アスファルトが介在した骨材間の摩擦を考察してみよう。良好なアスファルト混合物における骨材の平均的なアスファルト被膜厚はCampen⁵⁾によれば6～8ミクロン、その他の研究者にしても、数ミクロンであることは、ほぼ認められている。これはアスファルトを潤滑剤と考えれば、コロイド

図-4 流体潤滑

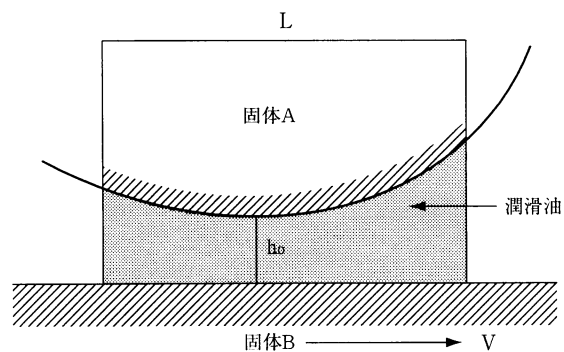


図-5 摩擦の三状態とアスファルト膜厚

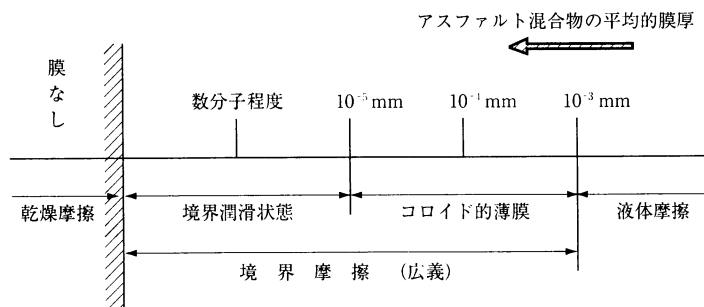
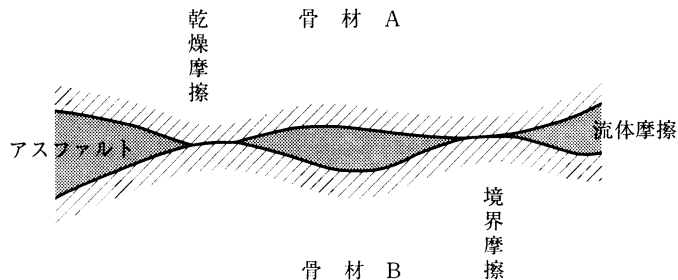


図-6 接触面の想定図



的膜による境界摩擦の領域に入る。アスファルト膜厚が直接測定されることはなく、一般にアスファルト量と骨材のみかけの表面積から逆算されるが、表面の微細な凹凸をも考慮に入れた真実の表面積はそれよりかなり大きいと考えられる³⁾から、真実の膜厚は逆にかなり薄くなりそうである（図-5）。しかし、境界摩擦の領域といっても、それはあくまで平均的なものであって、実際の骨材同志の接触は表面の凹凸があるため、一部は膜が破壊して乾燥摩擦になっており、また一部は膜が厚くなって流体摩擦というように摩擦の三状態が混在していると考えられる（図-6）。そして、それぞれの状態が分担する摩擦力の合計が、安定度として外力に抵抗するであろう。アスファルトの粘度をあげたとき、安定度があがったとすれば、それは流体摩擦が大きくなったことを意味しており、また、混合物の密度をあげるように締固めたということは、骨材間隔がせまくなって三状態の分担する摩擦がそれぞれ大きくなったと考えられる。アスファルト混合物の最も特徴とせる温度を歪速度による変化

は流体摩擦の影響であるし、さらにアスファルト混合物を粘弾性体として解析するという事は、乾燥摩擦、境界摩擦、流体摩擦それぞれの荷重分担比を定める問題に帰着できそうである。

摩擦力が外力によって誘起される力であることから容易に推察されるように、アスファルト混合物の安定度も混合物固有の性質ではなく、外力の形体に応じて発生する内部からの抵抗力である。瞬間的な外力に対しては、流体摩擦が非常に大きくなる（Vが大きくなるため）ため全体としての抵抗力は増大するが、静定な外力に対しては流体摩擦がほとんどなくなるため、抵抗力はかなり低下するわけである。また、これらの摩擦現象は、介在する液体の質と量に大きく左右されることから、アスファルト混合物におけるアスファルトの選択および適正アスファルト量の決定が非常に重要であることも容易に理解されると思う。

以上、アスファルト混合物の安定性を摩擦の基本的な形態から考察してみた。もちろんこのような見解が一般的にあるのではなく、筆者独自の見方であるが、混合物の内部を摩擦の三状態から見ると非常にイメージとして浮かびやすいと考え、あえて紹介したしだいである。

3-5 安定性に関する試験法

アスファルト混合物の安定性の根拠として、前にかみ合い摩擦と接触摩擦の対比を紹介したが、これとは異なった角度からの整理方法として、安定性を骨材間の摩擦とアスファルトの粘着力に分けて考えられることも多い。図-7はその代表的な例で⁶⁾安定性に影響する因子

を非常にわかりやすくまとめてある。なお、これらの各項目の意味が摩擦の三状態を使えば容易に説明できることはいうまでもなからう。

アスファルト混合物の配合設計は主として安定性を中心に行われているため、図-7のような因子の影響を検討できる安定度試験がそのまま配合設計に関する試験として採用されることが多い。代表的な安定度試験方法としては次のものがある。

- (1) ハバードフィールド
- (2) 修正ハバードフィールド
- (3) マーシャル
- (4) ビーム
- (5) スミス三軸

これらのうち、わが国で最も広く利用されているのはマーシャル安定度試験で、他の方法は研究用に用いられているすぎない。これらの試験法については配合設計法の項にゆずることにする。

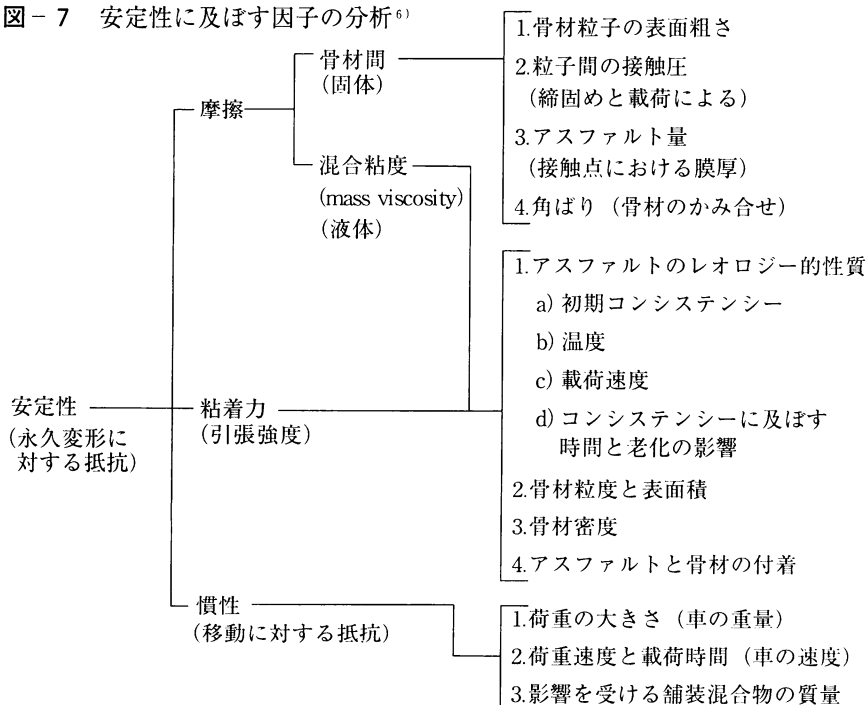
4. 耐久性

アスファルト混合物の大部分は表層基層として舗設されるため、その表面は常に自然の風雨と交通荷重にさらされる。耐久性とは、これらの外力を考慮したもので、風化とかすりへりによる混合物の性状変化に対する抵抗性と定義できよう。自然によるアスファルトへの影響としては空気との接触や太陽光線によるものと水によるものと大きく分けられる。前者によって、アスファルトは揮発分の蒸発、酸化、重合等をおこし、結果としてアスファルトはかたくもろくなってしまふ。一方、水が混合物内に浸透してくると、アスファルトと骨材の間に少しずつ入りこみ

アスファルトと骨材を分離するようになる。もちろんこれらの現象が短期間で行なわれるわけではないが、舗設以後は常にその可能性があること、また舗装の寿命は1年をめざしていることなどを考えれば、決しておろそかにはできない問題である。以上のようなアスファルトの変質を防ぐ方法としては、骨材は細粒分を多くし、アスファルト量はできるだけ多くして密な混合物をつくるのがよいと一般に認められている。

交通荷重のくり返しによるアスファルト混合物への影響としては、表面のすりへりと骨材の破碎があげられる。これを防ぐためには、アスファルト量を多くすると同時に、骨材

図-7 安定性に及ぼす因子の分析⁶⁾



の選択が重要なポイントとなろう。

5. たわみ性

コンクリート舗装が剛性舗装と呼ばれ、アスファルト舗装がたわみ性舗装と呼ばれることはいまさら言うまでもない。このたわみ性とは、アスファルト舗装の最も特徴とするところであり、アスファルト混合物の具備すべき性質である。一般にアスファルト舗装では、路盤以下も十分に締固められるのであるが、交通荷重の影響もあり、長い年月の間には、不等沈下（最近石油タンクの問題でよく聞く言葉であろう）を起すことが多い。路盤以下が不等沈下をしているとき、アスファルト混合物層はそれらの変形に追従してたわむことのできる性質をもつ。これがたわみ性である。このたわみ性を増すには一般にアスファルト量を多くし、骨材は密粒度よりも開粒度がよいと言われている。

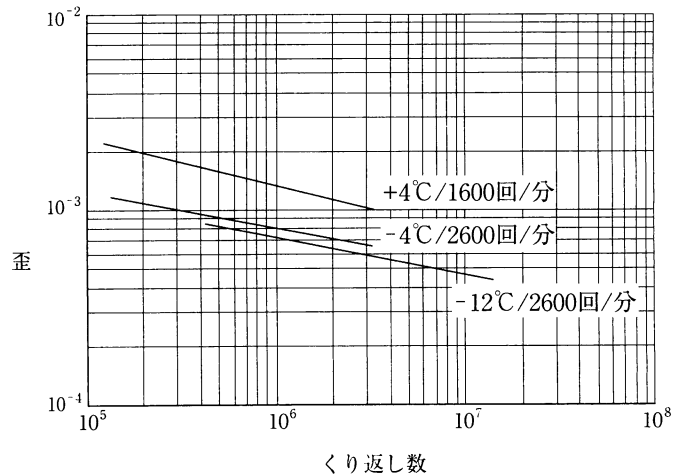
.....

これまで配合設計に及ぼす因子として、安定性、耐久性、たわみ性について述べてきたが、この三つの因子の間ですでに、矛盾を含んでいることに気づかれたであろう。すなわちアスファルト量は、安定性からみれば少ない方がよく、耐久性、たわみ性からは多い方が望まれているのである。一方骨材については、安定性（異論もあるが）、耐久性の面からは密粒度がよく、たわみ性からは開粒度がよいとされている。これら各因子からの要望をまとめてバランスをとるのが配合設計であるが、その複雑さの一端がうかがえると思う。

6. 疲労抵抗性

アスファルト混合物がくり返し交通荷重を受けると、その荷重の一つ一つが、混合物の破壊強度よりかなり小さくとも、長い間にはクラックが入り、最終的には破壊に至ってしまう。このような破壊の形態は一般の金属材料等でも古くから認められてきたことであり、疲労破壊と呼ばれている。アスファルト混合物にとってこの疲労に対する抵抗性が重要なことは、舗装の寿命を判定する手段として、クラックの発生率が用いられることから容易に想像されよう。アスファルト混合物の疲労を調べるものとしては、曲げ試験、一定歪または一定応力をくり返し与える試験などがあり、多くの研究者によって成果が発表されてきた。それらの一般的見解としては、あたえた歪または応力の対数と破壊に至るまでのくり返し数の間には、直線関係があること（たとえば図-8⁷⁾、すなわち、与える歪または応力が小さければ寿命が長いこと、アスファルト量は多い方がよく、混合物は密に締まっている方がよいことなどがあげられる。

図-8 疲労破壊の例



7. すべり抵抗性

アスファルト舗装の表面は、自動車を快適に走行させると共に、その安全性をも与えるものでなければならぬ。これは走行中にハンドルをとられたりすることのないように、また急ブレーキをふんだとき通常の間距離内で車がストップできるように、表面に適度のすべり抵抗性を持たせる必要のあることを意味している。路面のすべりは水膜によるハイドロプレーニングとか、積雪、薄氷などによって生じるが、それらは一時的なものである。やはり通常の路面摩擦が最も重要であることはいままでもない。東名高速道路で一時追突事故の多発したことがあったが、その原因の一つは、この路面摩擦の不足にあったことは読者の記憶に新しいかと思う。しかしこのすりへり抵抗も大きければ大きい程良いというものではない。あまり大きくなると快適な走行が期待できない上、最近特に問題視される騒音の原因となるからである。すべり抵抗を上げるために必要な配合は、安定性の場合とよく似ており、アスファルト量を少なく、骨材は表面の粗いものが望まれる。特にアスファルト量が多すぎるときは、路面にアスファルトが滲み出てくる（ブリーディング）ことがある。これは、タイヤと路面の摩擦にとって潤滑剤として働らくため、自動車の走行上非常に危険な状態となる。耐久性とこのすりへり抵抗性はいずれも路面に必要な性状であるが、一方はアスファルト量が多く望まれ、一方は少ない方が良いという矛盾がここだけでもあらわれている。

8. 不透水性

アスファルト混合物が耐久性の面から空気や水との接触をきらうことはすでに述べた。路面においては、これら避けることはできないが、混合物の内部に浸入することは避けなければならない。そのためには耐久性を向

上させる配合と同じく、アスファルト量を多くして骨材配合も密なものが必要となる。

水の浸入はアスファルト混合物ばかりでなく、舗装内部でも避けなければならない。これは路盤以下では水によって材料が流され、空洞のできる可能性があるからである。もし、このような結果になれば、混合物の耐久性云々よりも舗装全体の破壊というはるかに大きな問題になってしまう。表層のアスファルト混合物は雨水から舗装を保護する役割りを果たしているのである。

最近、透水性舗装というものが話題になっている。筆者は、詳しい資料をもっていないので、その是非を論ずるのはさけるが、以上のような舗装の常識からみても浸透した雨水をそのまま流しということは考えられないので、耐久性、舗装構造の安全性をどのように考慮するかが大きな問題であろう。

9. 引張強度

アスファルト混合物の安定度を調べる試験はそのほとんどが圧縮型の試験である。これは交通荷重を支持するという意味合いが強いのであるが、実際の舗装においてアスファルト混合物層は圧縮と同時に引張も受けることを忘れてはならない。図-9は表層のモデルであるが、中立軸を境にして上部は圧縮、下部は引張になる。アスファルト混合物層がこのような版作用をすることは多くの研究者によって確認されており⁸⁾、引張強度も配合設計上、大きな因子となる。アスファルト混合物の引張強度が温度や歪速度によって、また、試験方法や供試体の形状によっても異なることは言うまでもないが、一般に低温高速の試験で40kg/cm²~100kg/cm²の値が得られている。アスファルト単体の引張強度が、20kg/cm²~40kg/cm²であるから、骨材が入ったことにより引張強度が2~3倍になっていると言える。特にフィルターの影響が大であることは、第7回の項で述べたことから容易に推察されよう。引張強度を増すためには、アスファルトの寄与率が大きいためアスファルト量を多くし、骨材配合は密なものが必要となる。

10. まとめ

以上、アスファルト混合物の配合設計に必要な因子7項目について考察してきた。アスファルト量を骨材配合についてまとめれば、表-2のようになる。それぞれからの要求に矛盾があることは前にも述べたとおりで、そのバランスをとることが配合設計の基本的命題となる。また、配合設計に必要な因子がこれですべてつくされているというのではなく、プラント混合の問題、施工性の問題等外的条件がこれに加わることは言うまでもない。

図-9 アスファルト混合物層の版作用

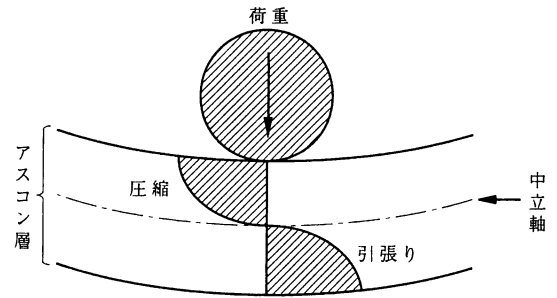


表-2 各因子からの要求一覧

因子	配合設計		骨材配合	
	多	少	密	開
安定性	×	○	○	×
耐久性	○	×	○	×
たわみ性	○	×	×	○
疲労抵抗性	○	×	○	×
すべり抵抗性	×	○	-	-
不透水性	○	×	○	×
引張強度	○	×	○	×

(以下次号)

参考文献

- 1) "Factors Involved in the Design of Asphaltic Pavement Surface" National cooperative highway research program report No.39. H.R.B.
- 2) 日本潤滑学会編「潤滑ハンドブック」養賢堂
- 3) 曾田範宗「摩擦と潤滑」岩波全書
- 4) Mack, C. "Deformation Mechanism and Bearing Strength of Bituminous Pavement" Proc. H. R. B. 33 (1954)
- 5) W. H. Campen,他 "The Relationships between Voids, Surface Area, Film Thickness and Stability in Bituminous Paving Mixtures" A. A. P. T. 28 (1956)
- 6) Hveen, F.N., Vellerga, B. A. 1) による。
- 7) Pell, P. S. "Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes." Proc. International Conf. on The Structural Design of Asphalt Pavements. (1962)
- 8) たとえば藤波督他「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 9 (1971)