

転動荷重下におけるアスファルト混合物の変形特性

KNEADING BEHAVIOR OF BITUMINOUS MIXTURES UNDER ROLLING WHEEL LOAD

新 田 登*・笠 原 篤**

By Noboru NITTA and Atsushi KASAHARA

1. 概 説

アスファルト舗装のおもな特徴は、アスファルト混合物（以下、単に混合物とよぶ）がもつ種々の性状のうち特にクリープおよび応力緩和などの性状を巧みに利用していることにある（目地が不要など）。それゆえ、混合物が変形に対して適度の追従性、たわみ性を具備することは不可欠の条件となる。このことから、アスファルト舗装上を車両が繰り返して走行した場合に主として力学的な要因に基づいて、混合物は施工直後の状態（ローラ転圧によって与えられた層厚、締固め度、骨材の配向状態など）とは異なった状態に変化するることが予測される。すなわち、アスファルト舗装上を車両（特に、大型車）が繰り返して走行する場合を考えてみるに、車輪の走行位置が路面全体に均一に分布するときには混合物の締固めが促進され舗装表面の平坦度を損なうことはないが、一方車輪の走行位置が同一箇所に集中すると混合物の流動によるわだち掘れを生ずる。なお、流動によるわだち掘れは混合物の永久変形が主因となって生ずるものであり、舗装体の下層部の沈下が主因となって生ずるわだち掘れとは異なるものである。わだち掘れの発生は平坦度の悪化、層厚の減少に伴う舗装体の構造的強度の低下をもたらすこととなる。

このような車輪の繰り返し走行に基づく混合物の締固め度の増大、流動によるわだち掘れの発生という事実は、供用中に「混合物は動くものである」ことを物語るものであり、このことは舗装の供用性に深く関与するものであろう。この点に関し従来、アスファルト舗装の場合の混合物に対する車両の走行による影響に関しては概念論的にニーディング作用とよばれてきているが、その内容については不明の点が多い²⁾。

いま、車輪が繰り返して走行することによって混合物が動き、施工直後の状態とは異なった状態になることを混合物の「状態変化」ということにすると、混合物の状態変化と流動特性の間には当然密接な関連性が存在し、これは混合物の流動によるわだち掘れを論ずる場合に重要な要素となるはずである。しかしこれらの事項に関する研究はほとんど見当たらない。

このようなことから本研究は、

- a) アスファルト舗装上を車両が繰り返して走行したときに生ずる混合物の動きはいかなるものか、また混合物の性質はどのように変化するか
 - b) 混合物が状態変化を起こすことによって、混合物の流動特性はどのように変化するか
- などを明らかにすることを目的としており、
1. 転動荷重が作用したときの混合物の動き
 2. 混合物が動くことによって生ずる締固め度の変化、骨材の配向状態の変化などの混合物の状態変化
 3. 混合物の状態変化と流動抵抗の関連性
- を把握することを主眼として、室内実験的な検討を試みたものである。

なお、載荷はすべて室内シミュレータを用いて行ったので、実際の走行荷重と区別する意味で転動荷重なる名称を用いた。

2. 転動荷重作用時の混合物の動き

アスファルト舗装における混合物は、施工時にはローラ転圧によって、供用時には車両走行によって動かされるが、この混合物の動きに関与する因子を大別すれば次のようになろう。

- a. 輪荷重、接地圧、走行回数、走行位置など混合物に作用する外力に関係する因子
- b. 気温、日照、降雨、風など気象に関係する因子
- c. 骨材の粒度、形状、表面性状など骨材間のかみ合

* 正会員 工修 室蘭工業大学助教授 土木工学科

** 正会員 工博 北海道工業大学助教授 土木工学科

わせに関係する因子

- d. バインダーの含有量，粘度など混合物全体としての粘性に関係する因子

これらの因子が複雑に絡み合っていることから，走行荷重を受けたときの混合物の動きについては不明瞭な点が多く，混合物の動きとアスファルト舗装の供用性の関係については詳細な論議に至っていない．これまでに，混合物が実際の走行荷重を受けたときと同じ状態を与えようとしてカリフォルニアニーディングコンパクト，ジャイレトリコンパクトなどの装置が開発されてきているが，現在は一部で混合物の配合設計に用いる供試体の作製に使用されているにすぎない．

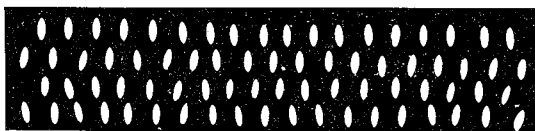
ここでは走行荷重を受けたときの混合物の動きを把握することを目的として，次の2つの場合について実験を試みた．

- 1) 載荷幅の広い転動荷重が作用した場合
- 2) 載荷幅の狭い転動荷重が作用した場合

(1) 載荷幅の広い転動荷重が作用した場合

スチールローラのごとき載荷幅の広い荷重が走行したときの混合物の動きをモデル的に推測するため，粗骨材部分に偏平な白色プラスチック円板（直径 11.8 mm，中央部の厚さ 3.7 mm）を用いた混合物をローラコンパクトで締め固め，プラスチック円板の配向状態を写真によって観察することを試みた．すなわち，30×30×5 cm の型枠内に敷き広げたアスファルトモルタル中にプラスチック円板を鉛直に挿入した層を4層積み重ねて作製した試料上を線圧 18.7 kgf/cm (183 N/cm)，30 ポアズ (3.0 N・s/m²) 温度 (97°C) でローラを24パス走行させてみた．

写真-1 はローラの移動方向断面におけるプラスチック円板の配向状態を示したものであり，(a) は締め固め前の状態，(b) は締め固め後の状態である．これより締め固め前に鉛直に並んでいたプラスチック円板が締め固め後には供試体のほぼ中心部を境にしてローラの移動方向に扇状に位置を変え，上層に近いものほど水平に配向する傾向



(a) 締め固め前の状態



(b) 締め固め後の状態

写真-1 載荷幅の広い転動荷重を作用したときの混合物の動き

の大きいことを見出した．このことから，施工時に載荷幅の広いスチールローラで転圧するとき混合物はおもにローラの移動する方向，深さ方向の2方向に動くことによって締め固められ，特に混合物の表面に近い部分におけるローラの移動方向への動きはかなり大きいことが推測され，表面部分と底部における混合物の動きが異なることに伴って，混合物の力学的な性質が深さ方向の位置によって異なることが予想される．

(2) 載荷幅の狭い転動荷重が作用した場合

タイヤローラ，一般車両など載荷幅の狭い荷重が走行したときの混合物の動きを推測する目的で，偏平な白色プラスチック円板を用いて作製した混合物にホイールトラッキング試験装置によって45°Cで次の2つの場合において転動荷重を作用させてプラスチック円板の配向状態の変化を写真により観察した．この試験温度は本装置が45°Cなる温度条件で開発されたものであることおよび北海道においては舗装体温度が60°Cになるのはきわめてまれであることから設定したものである．

- a. ソリッドタイヤを同一軌跡で走行させた場合
- b. ソリッドタイヤを供試体全幅にわたって均一に走行させた場合

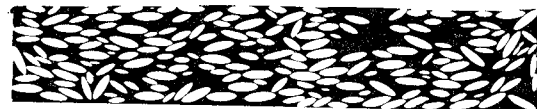
写真-2 は，荷重の走行と直角方向断面におけるプラスチック円板の配向状態を示したものである．(a) はアスファルトミキサで混合した試料をローラコンパクトで締め固めた状態である．(b) はローラコンパクトで締め固めた供試体の中央部に深さ約10 mmのわだち掘れを生ぜしめたときの状態であり，プラスチック円板がタイヤの走行位置を底とし両側に盛り上がるように動き，波状の流線が観察される．これはタイヤが同一位置を繰り返し走行すると混合物は側方へ流動することを意味している．(c) はタイヤを10.3 cm/minの速度で横方向に移動させながら60分間供試体全幅にわたって走行させ



(a) ローラコンパクトで締め固め後の状態



(b) タイヤを同一位置で走行させた状態



(c) タイヤを全幅に均一に走行させた状態

写真-2 載荷幅の狭い転動荷重を作用したときの混合物の動き

た場合の状態であり、ほぼ(a)の場合と同じような配向状態になっている。これはタイヤの走行による混合物の動きはあるものの、走行位置が異なるために生じた動きが互いに打ち消されていることによるものと考えられる。

(3) ま と め

以上のことから、施工時および供用時に遭遇するであろう最高温度領域においてスチールローラ、タイヤローラ、一般車両などがアスファルト舗装上を走行すると、混合物は相当大きく「動くものである」ことを明らかにした。また、載荷幅の狭い荷重が走行する場合には混合物の動きは荷重の進行方向、深さ方向のみならず側方への動きも顕著になる。この混合物の動きは、走行位置が同一ならば流動によるわだち掘れを生ぜしめ、走行位置が広く均一に分布する場合には側方への動きが相互に打ち消し合うためにアスファルト舗装の平坦性は損なわれない。しかし、混合物の3方向への動きが繰り返されることは混合物が「こね返される」ことを意味し、混合物に大きな状態変化がもたらされるものと推測される。

3. こね返し作用による混合物の状態変化

前節において、載荷幅の狭い転動荷重がその位置を変えながら繰り返して作用すると混合物は荷重の進行方向、深さ方向、側方の3方向へ動き、これらの動きが繰り返されることによって混合物がこね返されることを指摘した。これ以降においては、この作用を「こね返し作用」とよび、こね返し作用が混合物にどのような状態変化をもたらすかを推測する目的で、こね返し作用を与えた混合物の締固め度、粗骨材の配向状態、力学的性質の深さ方向の違いなどについての検討を試みている。

(1) タイヤ走行装置

本装置は供用時の車両走行になるべく近い状態で混合物にこね返し作用を与えることを目的として製作したものであり、次の特徴を有する。

- a. ニューマチックタイヤを用いる。
- b. 輪荷重とタイヤ空気圧の調整によって大型車と同程度の接地圧を与えることができる。
- c. 供試体表面全幅にわたってタイヤを横方向に移動させながら走行させることにより、混合物全体に均一にこね返し作用を与えることができる。

写真-3は本装置の全容であり、その構造については文献3)を参照されたい。なお、混合物にこね返し作用を与えた条件は以下のようである。

輪 荷 重 244 kgf (2.39 kN)

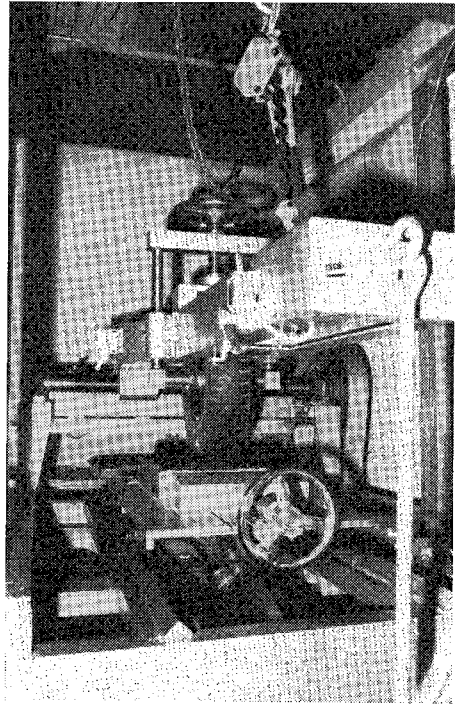


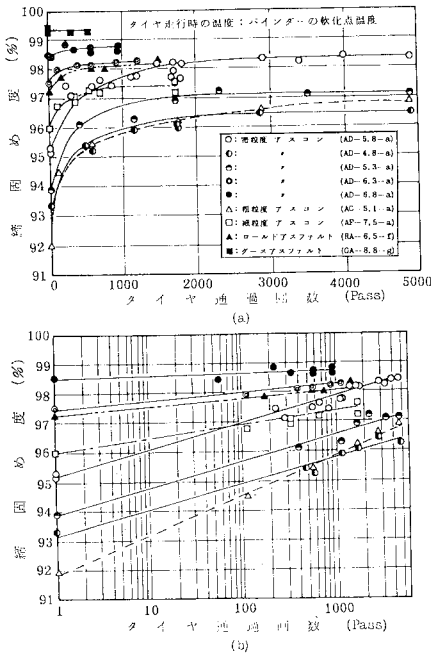
写真-3 タイヤ走行装置

タイヤ空気圧 6.0 kgf/cm² (588 kN/m²)
 見掛け接地圧 4.12 kgf/cm² (404 kN/m²)
 実 接 地 圧 5.28 kgf/cm² (517 kN/m²)
 (トレッドパターンを考慮)
 ターンテーブル走行速度 44 Pass/min
 横方向への移動速度 10.5 cm/min

(2) 混合物の締固め度

混合物がこね返し作用を受けた場合の状態変化を定量的に表わす指標を見出すことはきわめて困難であることから、ここではこね返し作用を受けた結果として得られる混合物の「締固め度」(理論最大密度に対する割合で表わす)をその指標として採用した。

本実験では混合物の状態変化に影響を与えるであろうと予測される因子のうちから混合物の種類、骨材粒度、バインダー量、バインダーの粘度など主として材料特性を取り上げ、それらの因子が変化した場合における締固め度とタイヤ通過回数の関係について検討した。すなわち、アスファルト舗装に用いられている混合物を網羅すべく選定した5種類の混合物について、タイヤを繰り返して走行させたときの締固め度を求めた。本実験に使用したバインダーの性質を付表-1に、混合物の種類、骨材粒度、バインダー量を付表-2に示した。なお、バインダー量、バインダーの粘度の影響の検討に際しては密粒度アスファルトコンクリートを用いた。



図—1 タイヤの繰返し走行とこね返しの程度

図—1において、(a)は5種類の混合物（密粒度アスファルトコンクリートではバインダー量を O.A.C, O.A.C±0.5%, O.A.C±1.0% に変化させた）をローラコンパクタを用いて 30 ポアズ温度で締め固めた供試体にはほぼ等粘度温度とされる各バインダーの軟化点温度でこね返し作用を与えたときの締固め度とタイヤ通過回数との関係であり、(b)はこの関係を一般化する目的で半対数紙上にプロットしたものである。図—1(a)より、こね返し作用に基づく各混合物の状態変化の特徴として以下のことを指摘できる。

- i) アスファルトコンクリート、ロードアスファルトにおいては、締固め度はタイヤ通過回数の増加に伴って増大し、しだいに一定値に収束する傾向を有する。
- ii) 密粒度アスファルトコンクリートでバインダー量が O.A.C を越えるもの、細粒度アスファルトコンクリート、ロードアスファルトでは、締固め度が一定値に収束するに要するタイヤ通過回数は少なく、かつ締固め度が変化する割合は小さい。
- iii) 密粒度アスファルトコンクリートでバインダー量が O.A.C 以下のもの、粗粒度アスファルトコンクリートでは、締固め度が一定値に収束するに要するタイヤ通過回数が多く、かつ締固め度が変化する割合が大きい。
- iv) グースアスファルトは元来無空隙型の混合物であるため、こね返し作用を与えたときの締固め度の変

化は当然みられない。

これらのことは、施工時に締め固められやすい混合物はこね返し作用を受けても締固め度の変化は大きくないが、施工時に締め固めにくい混合物では、タイヤの繰返し走行に基づく締固めエネルギーの蓄積によって大きな締固め度の変化がもたらされることを意味している。

図—1(b)よりこの関係はほぼ直線で近似し得ることから、両者の間には次式が成り立つとしてよいであろう。

$$D_N = D_0 + \alpha \cdot \log N, \quad N < 5000$$

ここで、 D_N ：中央点をタイヤが N 回通過時の締固め度 (%)

D_0 ：こね返し作用を与える前の締固め度 (%)

α ：外力が一定の場合、混合物の性質によって決まる実験定数

N ：タイヤ通過回数 (Pass)

実験定数 α は、混合物がタイヤの繰返し走行を受けたときの締固め度の変化の大きさを表わす指標と考えられることから、バインダーの粘度、バインダー量、骨材体積率が異なる混合物の α の値を表—1に示した。これより以下のことを指摘することができる。

- i) 一定温度でタイヤを繰返し走行させた場合、バインダーの粘度が高い混合物ほど α の値は小さく、粘度が 10 倍になると α の値は約 1/2 となる。
- ii) バインダー量のみが異なる混合物に一定温度でタイヤを繰返し走行させた場合、バインダー量が O.A.C 以下では α はほぼ一定であるが、O.A.C を越えると α の値は急激に低下する。
- iii) バインダーの軟化点温度でタイヤを繰返し走行させた場合、骨材体積率、 C_v の大きい混合物ほど α の値が大きくなる傾向を有する。

このように実験定数 α と混合物の性状との間には密接な関係があることから、あらかじめ α の値を求めておくことにより、施工時の締固め度が与えられればタイヤの繰返し走行に基づくこね返し作用によってどの程度の混

表—1 α の値と混合物の性状

密粒度アスファルトコンクリート バインダー量： 5.8% (O.A.C) タイヤ走行時の温度： 47.6°C	密粒度アスファルトコンクリート バインダーの種類：a タイヤ走行時の温度： 47.6°C	骨材体積率の異なる混合物 バインダー量： 各混合物の O.A.C タイヤ走行時の温度： 軟化点温度			
47.6°C におけるバインダーの粘度 (Pois)	α の値	バインダー量 (%)	α の値	骨材体積率 C_v	α の値
1.5×10^4	0.86	4.8	0.87	0.824	0.45
4.0×10^4	0.74	5.3	0.87	0.846	0.31
7.3×10^4	0.63	5.8	0.86	0.856	0.86
1.0×10^5	0.55	6.3	0.23	0.876	1.31
1.5×10^5	0.41	6.8	0.07		

混合物の状態変化が生ずるかを予測することができよう。

(3) 骨材の配向状態

前述したようにモデル骨材を用いた混合物にタイヤを繰り返して走行させると、骨材は水平方向に並ぶ傾向がみられたことから、粗骨材として通常の碎石を用いた混合物においてその力学的性質に影響を与えると予測される粗骨材の配向状態がこね返し作用によってどのように変化するかを明らかにしようとした。すなわち、密粒度アスファルトコンクリート (AD-5.8-a) を試料として、a) ローラコンパクタで締め固めた状態、b) タイヤ走行装置によってバインダーの軟化点温度 (47.6°C) でタイヤを供試体全面に走行させ 4000 パス通過後の状態においてタイヤの進行と直角方向断面における粗骨材の配向状態を比較した。

図-2 は、切断面に露出した 150~200 個の粗骨材の長軸が水平軸となす角度を 10 度ごとに区分して得た頻度分布図である。図より、ローラコンパクタで締め固めた混合物中の粗骨材はランダムな配向状態になく水平に近い配向をしたものが多いが、タイヤを繰り返して走行させるとこの傾向はさらに顕著になり、長軸が水平軸となす角度が 40~50 度以下に配向した粗骨材の数がきわめて多くなる。

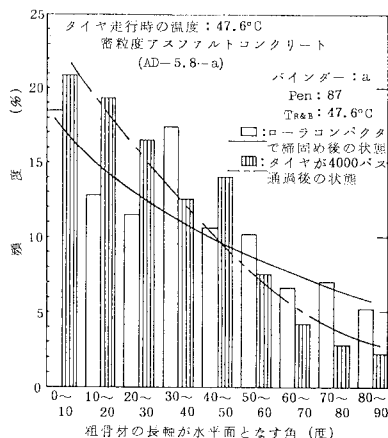


図-2 粗骨材の配向状態

このことは、アスファルト舗装において混合物中の粗骨材の配向状態が供用中にバインダーの軟化点近傍の温度で水平に近い状態に変化することを意味するものであり、供用中に混合物の力学的性質がしだいに変化していくことを予測させるものであろう。

(4) 混合物の力学的性質の異方性

混合物中の骨材の配向状態の変化は混合物の力学的性質の異方性に関与すると考えられることから、密粒度ア

スファルトコンクリート (AD-5.8-a) を用いてタイヤの走行回数を変えることによって締め固め度の異なる供試体を作製し、1軸圧縮クリープ試験から深さ方向、タイヤの進行方向、トラバース方向の3方向におけるクリープコンプライアンスを求めて力学的異方性を検討した。

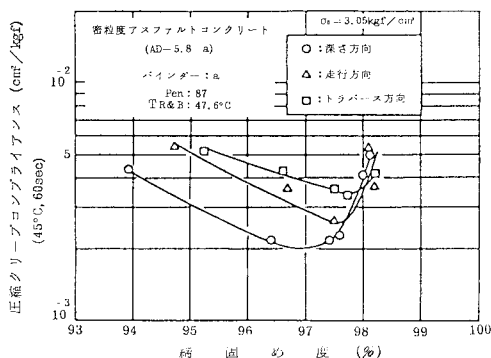


図-3 力学的性質の異方性

図-3 は、クリープコンプライアンス (45°C, 60 s) と締め固め度の関係を載荷方向別に示したものである。図より、締め固め度がほぼ 97% 以下の範囲では深さ方向の値が他の2方向のそれに比してかなり小さく、力学的性質に異方性が認められたが、97% を越える締め固め度の範囲では異方性がみられず、かつクリープコンプライアンスは逆に大きくなる傾向がみられた。

このことから、通常の締め固め度の範囲ではアスファルトコンクリートの力学的性質に異方性がみられるが、タイヤの繰返し走行を受けて締め固め度を過度に増大した状態では力学的性質の異方性は消失し、変形抵抗も低下することになる。これは過度の締め固めが骨材間のかみ合わせを損なわしめり、混合物の力学的性質を骨材の配向に無関係な状態に変化せしめることを物語るものであろう。

(5) まとめ

こね返し作用によって生ずる混合物の状態変化に関して以下の結論を得た。

- i) 有空隙型の混合物はこね返されるとしだいに締め固められ、締め固め度とタイヤ通過回数の間には半対数紙上で直線関係が成立する。
- ii) こね返し作用による混合物の締め固め度の変化の程度は他の条件が同一ならば、骨材体積率、バインダー量、バインダーの粘度に依存する。
- iii) こね返し作用を受けると、混合物中の骨材の配向状態が変化し、水平方向に配向した骨材が多くなる。
- iv) 有空隙型の混合物の力学的性質には異方性がある

が，過度に締固め度が増大した状態に変化すると異方性は消失する。

4. 流動特性と状態変化

混合物がこね返し作用を受けると大きな状態変化を生ずること，流動抵抗と空隙率とは密接な関係があること⁵⁾などから，アスファルト舗装の流動によるわだち掘れを論ずるには混合物の流動特性と状態変化の関係を詳細に検討する必要があると考えられる。

ここでは，こね返しを受けた程度と流動特性の関係，および流動特性を増大せしめる締固め度の限界を明らかにすることを目的として，こね返し作用を与えて締固め度を変化させた混合物の動的安定度（以下，D.S. と記す）を求めた。また，タイヤが同一位置を繰り返して走行したときの混合物の変形は圧縮またはせん断によるクリープ変形の蓄積であるとの考えから，流動特性を評価するための“より基礎的な力学試験”として1軸圧縮クリープ試験^{6),7)}，単純せん断クリープ試験を行ってクリープコンプライアンスを求めた。

(1) D.S. と締固め度

混合物がこね返された程度を締固め度でとらえ，温度45°C，接地圧 5.30 kgf/cm² (520 kN/m²)，タイヤ走行速度 42 Pass/min なる条件で行ったホイールトラッキング試験から D.S. を求めて締固め度との関係について検討した。

図-4 において，(a) は混合物の種類，骨材粒度が異なった場合，(b) は密粒度アスファルトコンクリートでバインダー量を変化させた場合における D.S. と締固め度の関係である。(a) 図より，アスファルトコンクリートの場合には D.S.-締固め度曲線に D.S. が極大値を示す締固め度があり，この点を境に両者の関係が変化することは明白である。なお，この傾向は粗粒のものほど顕著であり，たとえば粗粒度アスファルトコンクリートの場合，締固め度 96.1% における D.S. は 1.3×10^4 Pass/mm と極大値を示すが，締固め度が 96.6% とわずか 0.5% 増大したときの D.S. は 8.2×10^3 Pass/mm となり，約 40% 低下する。一方，ロールドアスファルト，グースアスファルトでは D.S.-締固め度の関係に特異点はみられない。(b) 図は，バインダー量の減少がこの特異点の位置を締固め度の低い側に移行させ，かつ D.S. の極大値を増大させることを示している。

一方，D.S.-締固め度の関係に対するバインダーの粘度の影響を明らかにする目的で，軟化点が 47.6°C から 60.5°C の間で変化する 5 種類のバインダーを用いて作製した密粒度アスファルトコンクリート（バインダー

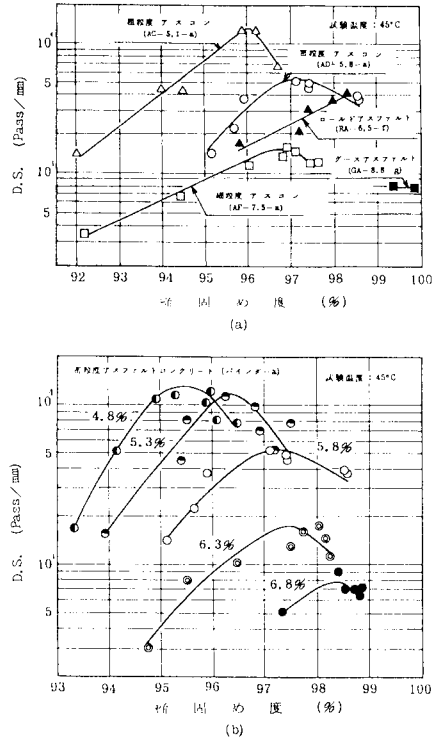


図-4 D.S. と締固め度

量：O.A.C) について検討した結果を図-5 に示す。図より D.S. が極大値を示す締固め度は 97.1%~97.4% の範囲にあり，特異点の位置はバインダーの粘度には無関係であると考えられた。ただし，D.S. の極大値は軟化点が 13°C 高くなると約 5 倍の値を示した。

これらのことからアスファルトコンクリートの流動抵抗はこね返し作用に基づく混合物の状態変化の影響を大きく受けることは明らかである。したがって供用時におけるこね返し作用の影響を少なくするためには，使用材

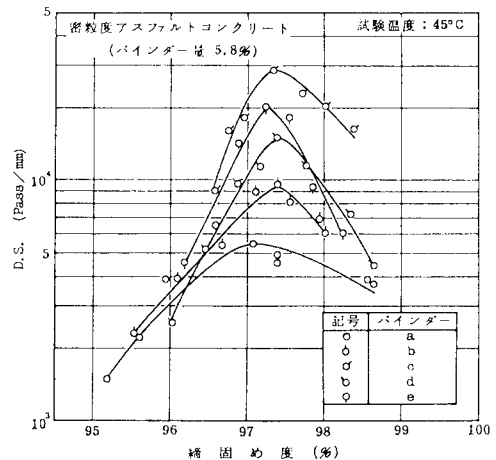


図-5 D.S. とバインダーの種類

料, 配合の選択, 施工時における適切な締固め度の確保などが重要な要素となる。

(2) D.S. とタイヤ通過回数

混合物の流動抵抗が転動荷重を受けてどのように変化していくかを明らかにするために, 図-1(a) と 図-4 とから D.S. とタイヤ通過回数の関係を求めて 図-6 に示した。図より, タイヤの繰返し走行に伴って生ずる D.S. の変化の傾向は大きく分けて以下の4つのパターンに区分することができる。

- i) タイヤが繰返し走行しても D.S. に大きな変化を生じないもの……グースアスファルト, 細粒度アスファルトコンクリート, 密粒度アスファルトコンクリート (O.A.C+0.5%, O.A.C+1.0%)
- ii) タイヤの繰返し走行によって D.S. は増大するが, その変化の程度が小さいもの……ロールドアスファルト
- iii) タイヤの繰返し走行によって D.S. は初期に増大するが, ある通過回数で D.S. が最大となり, その後徐々に低下するもの……密粒度アスファルトコンクリート (O.A.C, O.A.C-0.5%)
- iv) タイヤの繰返し走行によって D.S. が増大し, かつ D.S. が低下するまでに要するタイヤ通過回数が大なるもの……密粒度アスファルトコンクリート (O.A.C-1.0%), 粗粒度アスファルトコンクリート

これらのことから, 供用中も高い流動抵抗をもつ混合物を得るためには, 骨材間のかみ合わせが期待できる混合物を選択すること, バインダー量をマーシャル法で決定される O.A.C より少なくすること (密粒度アスファルトコンクリートの例では O.A.C-1.0%), 施工時にその混合物に適切な締固め度を与えることなどが必要であることを指摘できよう。

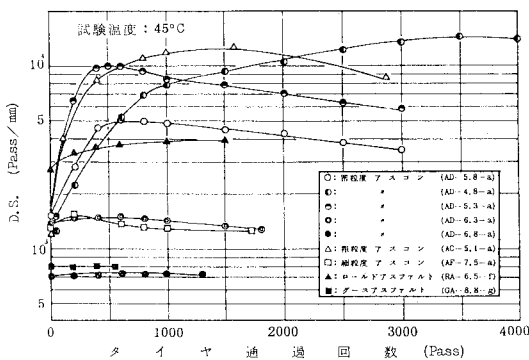


図-6 D.S. とタイヤ通過回数

(3) クリープ特性と締固め度

ここでは, こね返し作用を与えた混合物について以下に示す条件で1軸圧縮クリープ, 単純せん断クリープの2種類の試験を行い, クリープ特性としてクリープコンプライアンスを求めて締固め度との関係について検討した。

a) 1軸圧縮クリープ試験

こね返しを与えた試料ブロックから 40×40×40 mm なる6面カット供試体を作製し, 温度 45°C, クリープ応力 2.50 kgf/cm² (245 kN/m²) で深さ方向に載荷して変位-時間曲線を得た。なお, 測定精度を高める目的で, 供試体の上下面にシリコングリスを塗布し, クリープ応力の 1/10 の荷重でプレロードを行った。

図-7 は, 圧縮クリープコンプライアンス (45°C, 240 s) と締固め度との関係である。図-7 において, (a) は混合物の種類が異なる場合の関係を示したものであり, グースアスファルト, ロールドアスファルトを除いてアスファルトコンクリート系の混合物ではクリープコンプライアンスが極小値を示す締固め度が存在することが明らかである。また (b) は密粒度アスファルトコンクリートにおいてバインダー量を変化させた場合の関係を示したものであり, バインダー量が少ないものほど締固め度の変化に伴うクリープコンプライアンスの変化が顕著になり, かつクリープコンプライアンスが極小値を

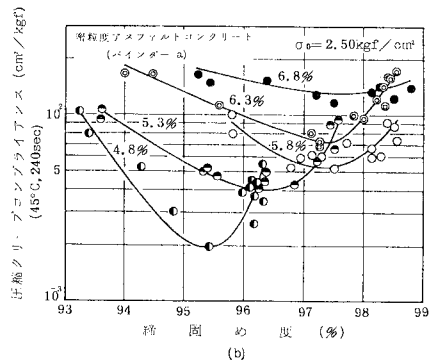
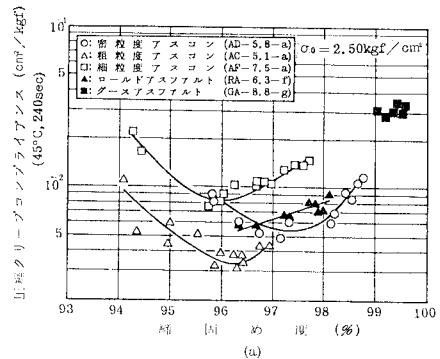


図-7 圧縮クリープコンプライアンスと締固め度

示す締固め度は小さくなる傾向がある。

b) 単純せん断クリープ試験

こね返しを与えた試料ブロックから切り出した 72×72×42 mm の供試体 2 個（締固め度のほぼ同一のものを 1 対とする）を鋼板 3 枚の間にサンドイッチ状にエポキシ樹脂で接着させた。この両端の鋼板を固定し、中央の鋼板に載荷することによって 2 個の供試体に同時に単純せん断クリープを生じさせるようにし⁹⁾、温度 45°C、クリープ応力 0.35 kgf/cm² (34.3 kN/m²) における変位-時間曲線を得た。

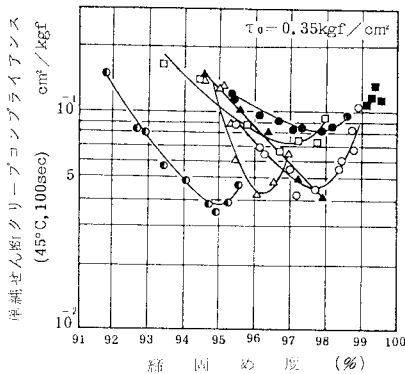


図-8 単純せん断クリープコンプライアンスと締固め度

図-8 は、せん断クリープコンプライアンス (45°C, 100 s) と締固め度との関係である。この場合にもアスファルトコンクリートについてはクリープコンプライアンスが極小値を示す締固め度があることは明白である。

これらのことから、クリープ特性と締固め度との間に得られた関係は、D.S. と締固め度との関係とほとんど同じ傾向を有するということができる。

(4) 限界締固め度

混合物の流動特性を評価する目的で求めた D.S.、クリープコンプライアンスと締固め度との関係をみるに、アスファルトコンクリートではこね返しを続けると流動特性が低下し始める締固め度が存在する。この締固め度の値を試験法別に表-2 に示した。表から、アスファルトコンクリートでは流動特性が低下し始める締固め度は試験法に関係なくほぼ同一の値を示すといえる。この締固め度を「限界締固め度」とよぶことにすれば、外力を主として骨材間のかみ合わせで受け持つとされているアスファルトコンクリート系の混合物には限界締固め度が存在し、車両の繰返し走行によって生ずる混合物の状態変化が限界締固め度以内であるならば締固め度の促進は流動抵抗を増大せしめるが、限界締固め度を越えるような締固め度の過度の増大は逆に流動抵抗の低下をもたらすこととなる。

表-2 アスファルト混合物の限界締固め度

混合物	バイン ダー量 (%)	バイン ダーの 種類	限界締固め度		
			D.S. の場合	I 軸圧縮ク リープコン プライアン スの場合	単純せん断 クリープコ ンプライア ンスの場合
密 粒 度 アスファルト コンクリート	4.8	a	95.4%	95.4%	95.0%
	5.3	a	96.4	96.2	—
	6.3	a	97.1	97.3	97.6
		b	97.4	96.7	97.2
	5.8	c	97.3	97.1	97.3
		d	97.4	97.0	97.4
	6.8	e	97.4	97.0	97.0
		a	97.5	97.4	—
粗粒度アスファルト コンクリート	5.1	a	96.1	96.2	96.5
	7.5	a	96.8	95.9	97.1
ロ ー ル ド アスファルト	6.5	f	—	—	—
グ ー ー ス アスファルト	8.75	g	—	—	—

(5) ま と め

混合物の流動特性とこね返し作用に基づく状態変化との関係について以下の結論を得た。

- i) アスファルトコンクリートの流動抵抗はこね返しに基づく状態変化の影響を大きく受ける。
- ii) 車両走行による混合物の流動抵抗の変化は、混合物の種類、骨材粒度、バインダー量によって 4 つのパターンに区分できる。
- iii) アスファルトコンクリートでは、流動抵抗を増大せしめる範囲を示す限界締固め度が存在する。

5. 流動抵抗と材料特性

車両走行によって状態変化を生ずる混合物の流動抵抗を推測するには、流動抵抗と材料特性との関係を把握することが必要であるとの考えから、こね返し作用の影響を大きく受けるアスファルトコンクリートについてこの関係を明らかにすることを試みた。すなわち、材料特性としてバインダーの粘度、修正骨材体積率⁹⁾の 2 因子を取り上げ、これらと D.S. との関係求めた。なお、修正骨材体積率は空隙量の影響を加味すべく次式で定義されたものである。

$$C_v' = C_v / (1 + v)$$

ここで、 C_v' ：修正骨材体積率

C_v ：骨材体積率

v ：空隙率 (=1-D, D: 締固め度)

図-9 の左側の部分は、粗粒度、密粒度、細粒度と骨

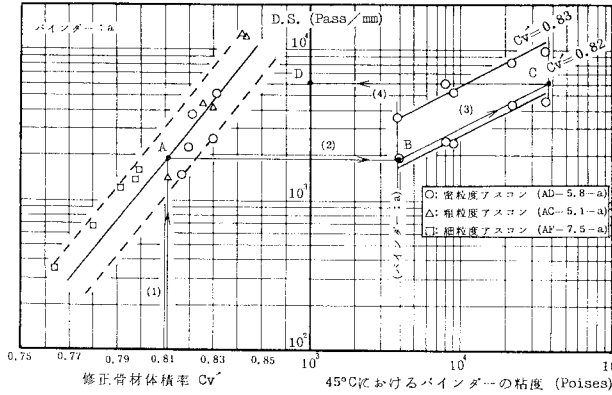


図-9 動的安定度と材料特性

材粒度の異なるアスファルトコンクリート（バインダー量は O.A.C）の限界締固め度以下の状態における D.S. と C_v' との関係である。図より、D.S. と C_v' の関係は半対数紙上においてほぼファクター 2 で直線で示されることから、アスファルトコンクリートの D.S. は他の条件が同一ならば骨材粒度、締固め度が異なっても C_v' によって推定することができる。

図-9 の右側の部分は、密粒度アスファルトコンクリートの D.S. と 45°C のバインダー粘度との関係である。両者の関係は両対数紙上で直線で示されその傾きは C_v' に無関係であり、かつ先に菅原ら¹⁰⁾が性質のきわめて異なる 15 種類のバインダーについて得た結果ともほぼ一致している。

この図を用いることによって、粘度の異なるバインダーを用いたアスファルトコンクリート系の混合物の任意の締固め状態における D.S. を推定することができる。その推定の手順を示せば以下のようである。

いま、 $C_v=0.860$ 、45°C の粘度 3.8×10^4 ポアズ ($3.88 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) のバインダーを用いた密粒度アスファルトコンクリート（バインダー量 O.A.C）が締固め度 94% の状態になったときの D.S. を求めるには、

- ① C_v と締固め度から C_v' を算定する（この例では $C_v'=0.811$ ）。
- ② D.S.- C_v' 曲線と C_v' との交点 A を求め、A より水平線を引いてバインダー粘度 3.8×10^3 ポアズ（図を作成したときの基準の粘度）を示す鉛直線との交点 B を求める（このときの D.S. $1.9 \times 10^3 \text{ Pass}/\text{mm}$ ）。
- ③ B 点より D.S.-バインダー粘度の曲線に平行線を引き、いま使用するバインダーの粘度 3.8×10^4 ポアズを示す鉛直線との交点 C を求める。
- ④ C 点を通る水平線と D.S. 軸との交点 D は求めようとする D.S. の値である（このときの D.S. $6.1 \times 10^3 \text{ Pass}/\text{mm}$ ）。

6. 結 論

アスファルト舗装が施工時および供用時に遭遇するような高温領域において、接地面積が小さく接地圧が大なる走行車輪が作用すると、混合物は鋼やコンクリートなどの土木材料にはみられないような大きな状態変化（すなわち、締固め度の増大、粗骨材の配向状態の変化、流動によるわだち掘れの発生など）を起こす。これらの現象はアスファルト舗装にとって避けがたいものといえ、供用性を論ずる場合には「混合物が動くものである」ということを常に考慮することが必要であ

る。

このようなことから、本研究の範囲内において明らかにした事項を要約すれば以下ようになる。

(1) 混合物に転動荷重が均一に作用すると、混合物中の粗骨材が水平配向状態に動く傾向があることを明らかにし、締固めが促進されて締固め度が過度に増大した場合を除き、力学的性質に異方性のあることを見出した。

(2) 転動荷重によって締固め度が大きく変化する混合物は施工時に締め固めにくい混合物すなわち骨材粒度が粗でバインダー量の少ないものであり、逆に施工時に締め固めやすい混合物すなわち細粒でバインダー量の多いものは転動荷重による締固め度の変化が小さいことを明らかにした。

(3) アスファルトコンクリート系の混合物では転動荷重を受けて締固め度が増大すると流動抵抗は大となるが、ある締固め度（骨材粒度、バインダー量に依存する）を越えると逆に流動抵抗が小なることを見出し、この締固め度を限界締固め度と名づけた。

(4) 限界締固め度はアスファルトコンクリートの性質に依存し、骨材粒度が細粒になるほど、バインダー量が多いものほど限界締固め度の値は高くなる傾向がある。

(5) アスファルトコンクリート系の混合物の流動抵抗はバインダー量が一定ならば、骨材体積率、締固め度、バインダーの粘度に支配されることを明らかにし、バインダーの粘度、締固め度が異なるときの流動抵抗を推定する方法を示した。

以上、アスファルト混合物が転動荷重を繰り返して受けることによって生ずる大きな状態変化と流動抵抗の変化との関係について総合的に論じた。ここで明らかにした種々の事項はいままで舗装技術者の間で用いられてきたアスファルト舗装におけるニーディング作用なる表現の中に包まれる事項を示しているといえよう。

7. あとがき

ここで述べた室内における実験研究では、高温時における転動荷重の作用が混合物に状態変化をもたらし、その程度は外力を主として骨材間のかみ合わせで受け持つとされているアスファルトコンクリート系の混合物ほど大きいことを明らかにした。このことは、アスファルト舗装において混合物が車輪の走行作用を繰り返して受けるか否かということが混合物の力学的性質に大きな影響を与えることとなる。すなわち、水工構造物の場合のように供用中に車輪の走行作用をまったく受けない混合物の力学的性質は材料の老化を除けば施工時の状態で決定されるが、アスファルト舗装においては混合物の力学的

付表-1 バインダーの性質

バインダー	針入度 1/100 cm	軟化点 T _{R&B} °C
a	87	47.6
b	68	53.5
c	44	60.5
d	67	56.5
e	67	60.0
f	56	52.5
g*	39	57.9

g* は f にトリニダットエビュレを重量比で 7:3 にブレンドしたもの

性質が供用中の交通量（または質）および温度によって大きく変化することを意味している。

わだち掘れが問題となる地域では車両の繰返し走行に基づく混合物の状態変化は流動抵抗に大きな影響を与え、一方積雪寒冷地で生ずる温度応力クラックに関する調査では交通量の少ない区間に多く発

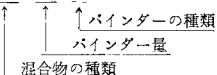
付表-2 混合物の種類ならびに骨材粒度組成

ふるい目の大きさ (mm)	アスファルトコンクリート			ロールドアスファルト RA	グースアスファルト GA
	粗粒度 AC	密粒度 AD	細粒度 AF		
13.0	100%	100%	100%	100%	100%
10.0	88.0	88.4	95.0	64.3	94.0
5.0	55.0	67.0	83.0	47.8	75.0
2.5	35.0	48.5	73.0	45.0	54.0
1.2	26.0	34.4	64.0	41.6	47.1
0.6	18.4	28.5	54.9	36.1	43.1
0.3	10.5	16.9	37.8	19.1	35.1
0.15	6.1	8.9	17.2	7.1	27.6
0.074	5.2	7.5	14.1	5.7	24.0
バインダー	a	a,b,c,d,e	a	f	g
バインダー量 (%)	5.1*	4.8, 5.3 5.8*, 6.3 6.8	7.5*	6.5	8.8

*: マーシャル試験から決定した O.A.C

注 1: 本文中混合物の種類を明確にするため次の例のように示して付記した。

例. (AD-5.8-a)



生しているとの報告¹¹⁾もあり、かつ締固め度の増大が混合物の各種の力学的性質を改善するという著者らの研究結果をもあわせ考えると、車両の繰返し走行に基づく混合物の状態変化はアスファルト舗装の供用性に関して重要な事項であるといえる。

これらのことより混合物の締固めなる観点からローラのタイプ、ローラパターンなどを含む施工技術の見直しが必要である¹²⁾¹³⁾と同時に、混合物がどのような締固め状態で供用されているかを把握し、これを混合物の配合設計にフィードバックする手法についての精力的な研究が期待されることとなろう。また、バインダー量の減少に伴うひび割れについては別途検討する必要がある。

なお、本研究の実験は北大工学部道路工学研究室で行ったものであり、関係各位に深く感謝いたします。また実験を担当した高橋邦明、茶木俊博、村上英昭（当時、室蘭工業大学学生）の三氏に対し謝意を表します。

参考文献

- 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，No. 207, 1972.
- 南雲・山下・山之口：舗装設計の体系化とその問題点（上），舗装，Vol. 7-4, 1972.
- 笠原・新田・菅原：アスファルト舗装におけるニーディング作用に関する研究，第13回日本道路会議一般論文集，1979.
- Sperling, R.: Changing Specifications for Dense Pavement Mixes, Highways+Public Works, August/September 1981.
- 新田・笠原・菅原：締固めの程度がアスファルト混合物の力学的性状におよぼす影響，石油学会誌，Vol. 23-2, 1980.
- Van de Loo, P.J.: Creep Testing, A Simple Tool to judge Asphalt Mix Stability, Proc. of A.A.P.T., Vol. 43, 1974.
- Hills, J.F.: The Creep of Asphalt Mixes, Journal of the Institute of Petroleum, Vol. 59, No. 570, 1973.
- 笠原・菅原：センターコア用アスファルト混合物のせん断特性，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第5部，1979.
- たとえば，“アスファルト舗装講座”，第2巻，日産化学工業 K.K., 1977.
- 菅原・笠原：アスファルトの性状のアスファルト混合物の力学的性状に及ぼす影響，土木学会論文報告集，No. 268, 1977.
- 菅原・久保・森吉：寒冷地舗装に発生する横断方向のひび割れ，道路，1978年8月.
- 新田 登：アスファルト舗装の転圧性状について，石油学会誌，Vol. 16-6, 1973.
- Pell, P.S. ed.: Developments in Highway Pavement Engineering, Applied Science Pub., 1978.

(1982.4.13・受付)