



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Movement Characteristics of Aggregates in Asphalt Mixtures during the Wheel Tracking Test
Author(s)	Kondo, Takashi; Moriyoshi, Akihiro; Yoshida, Takaki et al.
Citation	Journal of the Japan Petroleum Institute, 46(3), 172-180 https://doi.org/10.1627/jpi.46.172
Issue Date	2003
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40068
Type	journal article
File Information	moriyoshi_JJPI46_172.pdf



[Regular Paper]

Movement Characteristics of Aggregates in Asphalt Mixtures during the Wheel Tracking Test

Takashi KONDO^{†1)*}, Akihiro MORIYOSHI^{†2)}, Takaki YOSHIDA^{†1)}, and Shouichi TAKAHASHI^{†1)}^{†1)} Dept. of Civil Engineering, Tomakomai National College of Technology, Nishikioka 443, Tomakomai, Hokkaido 059-1275, JAPAN^{†2)} Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Nishi 8-chome, Kita 13-jo, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, JAPAN

(Received September 24, 2002)

The deformation characteristics of asphalt mixtures in the crossing direction during the wheel tracking test (1 h, 2500 passes) at high temperature were investigated using dense graded (13F) and drainage asphalt mixture. The two-dimensional movement of the aggregates due to the wheel load was analyzed by right angle photography of the specimen.

The behavior of the aggregates was divided into three stages (first, second, and final stage). The aggregates in each mixture moved in the vertical direction under the load, which reflects consolidation of the asphalt mixture. The aggregates moved in the horizontal direction on the surface near the load, which reflects the flow of the asphalt mixture. The aggregates also moved with rotation in both regions. The net result was absence of movement. In addition, the volume change of the asphalt mixture caused by deformation of surface was closely related to the deformation just under the load in the first stage. The asphalt mixture after the wheel tracking test was cut to measure the density. The results showed that the density increased just under the load and decreased in the upper part of the surface near the load.

Keywords

Asphalt mixture, Deformation characteristic, Wheel tracking test, Movement characteristic

1. 緒 言

アスファルト舗装の表層に発生する損傷は縦横断方向のき裂、流動などに伴うわだち掘れなどが主であり、これらは安全かつ円滑な交通を妨げるだけでなく、管理、修繕にばく大な費用を要する。また、近年広く使用されている高機能舗装は耐流動性に優れているが、表面部の骨材飛散、水の浸透などによるバインダーと骨材のはく離、空げき詰まりによる機能低下などの新たな検討すべき問題が発生している。

アスファルト混合物のわだち掘れ対策に関する研究・開発は、高粘度バインダーの開発¹⁾、骨材の形状および配合粒度の検討²⁾、繊維を混入したアスファルト混合物の作製³⁾などが行われており、これらは施工実績、供用後の調査においても顕著な成果が挙げられている⁴⁾。また、流動特性の検討は、ホイールトラッキング試験（以下、WT試験と記す）や水浸WT試験⁵⁾により行われている。WT試験結果より得られた変形-時間曲線より、動的安定度（Dynamic Stability, 以下DS）、変形率（Rate of Deformation, 以下RD）、圧密変形量（Consolidated Deformation, 以下 d_0 ）が求められ、アスファルト混合物のわだち掘れ特性の指標として用いられる。DSと現場のわだち掘れ量（流動特性）の間には相関性が認められているため、流動特性を検討したり、アスファルト舗装の供用性を予測する場合

にこの手法が取り入れられている。しかし、WT試験はアスファルト混合物に対する流動特性の検討に有効であることは明らかであるが、実験結果から得られるデータは、変形-時間曲線、DS、RD、 d_0 や目視による上下面のき裂、骨材飛散の有無など⁶⁾に限られている。そして、重要視されているのがDSなどの時間あたりの変形量であるが、これは走行荷重による表面の変形をとらえているに過ぎず、舗装全体としてのわだち掘れの検討を行う上では不十分であり、原因の解明、進行過程を考慮した対策を行うことは困難であると考えられる。WT試験時のアスファルト混合物表面の変形から得られた横断方向の体積変化と深さ方向の空げき率分布の関係を明らかにしている研究⁷⁾はあるが、流動特性に関してアスファルト混合物内部の骨材の動きから検討した研究⁸⁾はほとんど見られない。

アスファルト混合物の流動に伴う変形は縦横断方向および深さ方向へと3次的であるとされているが、内部の動きを直接測定することは非常に困難である。しかし、縦横断それぞれの方向に対する変形特性を検討し、重ね合わせることにより近似的に3次的な解析が行えるものと考えられる。そこで、本研究は車両走行の横断方向の変形特性を明らかにするために、既存のWT試験用型枠の荷重直角方向をガラス板とし、断面の変形を断続的に写真撮影を行いアスファルト混合物内部の切断面に見える骨材の動きをとらえることにより、2次的な流動特性の検討を行うこととした。また、実験時の混合物表面の変形特性、体積変化、および実験後の混合物を分割し密度分布に

* To whom correspondence should be addressed.

* E-mail: kondo@civil.tomakomai-ct.ac.jp

Table 1 Gradation of Mixture

Sieve opening [mm]		19.0	13.2	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing weight [%]	Dense graded (13F)	100.0	99.3	62.2	50.0	39.2	25.3	11.9	9.7
	Drainage	100.0	99.1	18.2	16.5	11.5	7.4	5.0	4.2

Table 2 Specifications of Binder

Binder type	Density [g/cm ³]	Pen.	TR&B [°C]
Straight asphalt 80/100	1.032	90.0	47.0
Porous asphalt	1.023	51.0	96.5

対する考察も行った。

実験の結果、WT 試験時のアスファルト混合物には、載荷部は圧密、側方部は流動が支配的であり、走行回数の増加とともに変形特性が変化し、実験後の混合物には深さ方向の密度に変化が生じることなどを明らかにした。

2. 実験および解析方法

2.1. アスファルト混合物の種類の選定

WT 試験に使用したアスファルト混合物は、密粒度アスファルト混合物 (13F) (以下、密粒 13F) および排水性アスファルト混合物 (以下、排水性) とした。密粒 13F は北海道における表層の舗装として一般的であり施工実績が多いこと、排水性は日本道路公団において全国で全面的に採用されるなど、近年施工面積が増加し、着目されている混合物であることから使用した。

2.2. 使用材料および供試体作製方法

本研究で使用した各混合物は、密粒 13F はストレートアスファルト 80/100、As 量 6.0%、目標空げき率 3.8%、転圧温度 150°C、排水性は高粘度改質アスファルト、As 量 5.0%、目標空げき率 19.9%、転圧温度 180°C とした。使用骨材の粒度を Table 1、アスファルトの主な性状を Table 2 に示す。

試験舗装場では施工前にマカダムローラーにより施工面を往復し、平坦性と地盤支持力が一様であることを確認 (ブルーフローリング) した後、密粒度アスファルト混合物 (13) の 30 mm 厚の層によりレベリング層を設けた。敷きならしおよび転圧は現場施工時と同様の転圧を行い、その後平板として切り取り、WT 試験用供試体 (T section) とした。各混合物の転圧方向、回数および名称を Fig. 1、施工機械の特性を Table 3 に示す。また、舗装圧さは各混合物ともに目標を 50 mm としたが、切り取り供試体の高さは、密粒 13F は 45 mm、排水性は 60 mm であった。しかし、高さの調整は行わず、WT 試験用型枠の大きさに側面を形成 (幅 300×奥行き 300 mm) し、実験に使用することとした。

2.3. 実験方法

WT 試験は、北海道の夏季の気温を考えた場合、舗装表面の温度は 45°C で十分であると考え、イギリスの交通研究所 ((TRL: Transportation Research Laboratory), 旧道路交通運輸研究所 (TRRL: Transport and Road Research Laboratory)) で行われている試験条件と同様に、本研究では試験温度を 45°C とし

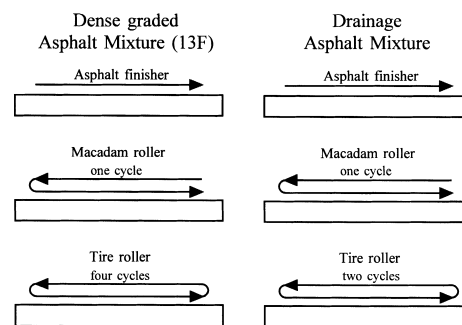


Fig. 1 Rolling Method and Number of Rolling Tests

Table 3 Specifications of Rollers

Item	Wheel	Macadam roller	Tire roller
Total weight [t]	—	14.0	20.5
Quality of wheel	—	Steel	Rubber
Number of wheels	Front	2	3
	Rear	1	4
Wheel load [kN]	Front	66.8	10.4
	Rear	70.5	13.0
Driving wheel	Front	Yes	None
	Rear	Yes	Yes

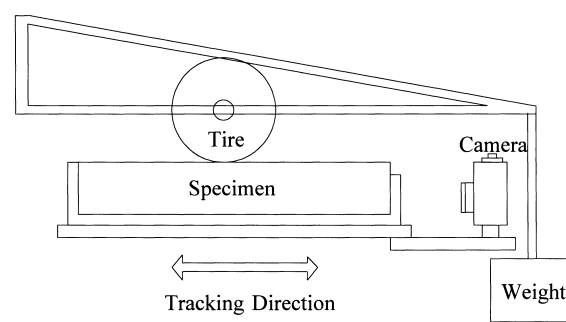


Fig. 2 Apparatus for Wheel Tracking Test

た。試験装置の概要を Fig. 2 に示す。試験装置はソリッドゴムタイヤ車輪 (直径 200 mm, 幅 50 mm)、輪荷重 540 N (接地圧 0.54 MPa) を使用し、走行速度は 42 pass/min で約 1 h (2500 pass) とした。また、施工時の転圧方向と WT 試験時の走行方向を一致させ、供試体中央部を載荷位置とした。型枠の手前側面はガラス板として 35 mm カメラにより 100 pass ごとに供試体前面 (密粒 13F は幅 300×高さ 45 mm、排水性は幅 300×高さ 60 mm) の骨材の動きを撮影した。

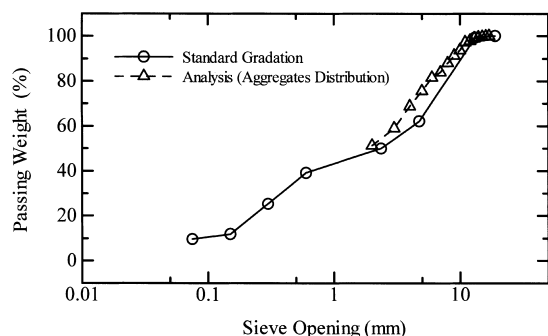


Fig. 3 Relationship between Aggregates Distribution of an Analysis Section and Standard Gradation (dense graded asphalt mixture (13F))

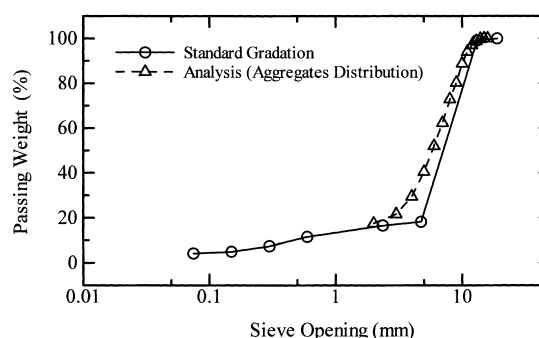


Fig. 4 Relationship between Aggregates Distribution of an Analysis Section and Standard Gradation (drainage asphalt mixture)

2.4. 解析方法

実験時に撮影した 35 mm フィルムのネガをスキャナーで読みとり PC 上でスケールおよび角度などを一致させた後、画像解析に使用した。本解析では、撮影された供試体側面の骨材で長径が約 2 mm 以上のものを対象にして、その動きおよび回転を xy 方向の 2 次元的な解析を行った。

3. 結果および考察

3.1. 実験に使用したアスファルト混合物の一般性

3.1.1. 各混合物の骨材粒度と解析対象断面内の骨材分布に関する検討

Fig. 3 に密粒 13F, Fig. 4 に排水性の解析断面内の骨材粒度分布と各混合物の骨材粒度の関係を示す。ただし、解析断面に現れている骨材の断面は切断されているため必ずしも最大長径とはならないが、混合および転圧が設計通り行われていれば任意の断面における骨材の分布は混合時の骨材粒度と同様となると考えられる。ここで、解析した骨材は密粒 13F は 231 個、排水性は 363 個であった。しかし、2 mm 以下で解析対象外の骨材は密粒 13F で約 50% (231 個)、排水性で約 16.5% (72 個) と考えられ、Figs. 3, 4 は解析対象外の骨材を考慮した累計により骨材粒度の分布とした。Figs. 3, 4 より、骨材分布は各混合物の粒度とはほぼ同様の分布を示している。よって、解析対象断面の一般性が検証されたと考えられる。

3.1.2. 解析対象断面の変形特性に関する検討

大田黒⁹⁾ は、一軸引張試験より得られたアスファルト混合物の緩和弾性率を用いて粘弾性理論に基づく有限要素解析(以下、FEM 解析と記す)を行い、WT 試験時のアスファルト混合物の荷重直角方向の変形特性を各接点の動きにより表現できることを明らかにしている。そこで、本実験に用いた両混合物の流動特性(骨材の動き)と FEM 解析による各接点の動きを比較したところ同様の傾向であったことから、本実験に用いたアスファルト混合物は粘弾性体としての一般的な変形特性を示していると考えられる。

しかし、上記の FEM 解析ではアスファルトバインダーの性状および骨材粒度などの使用材料が変わった場合にも、アスファルト混合物の緩和弾性率が変わるため表現が可能であると考えられるが、使用材料の何れがどのようにアスファルト混合物

の流動特性に寄与しているか、また骨材の回転などといった内部の挙動を明らかにすることができないという問題点がある。このアスファルトバインダーの性状や骨材粒度がどのように寄与するかに関しては今後の研究によって明らかにする必要があると考えられる。

3.2. 骨材の動きおよび回転

3.2.1. 解析方法

解析は、WT 試験による全走行回数を初期 (First stage, 0~600 pass), 中期 (Second stage, 600~1900 pass), 後期 (Final stage, 1900~2500 pass) の 3 段階に分け、各ステージ間の骨材の動きおよび回転について検討を行うこととした。また、考察対象部分を明確にするため解析結果には 10 mm×10 mm の格子を描いた。以下、考察対象位置は供試体左側より深さ方向への表記は層、横方向への表記は列とする。

Fig. 5 に密粒 13F, Fig. 6 に排水性の解析結果を示す。Figs. 5, 6 中の矢印は解析を行ったそれぞれの骨材の動きを表している。しかし、側面の型枠付近や走行回数が増すと動きが小さくなり、長さのみで表現することは難しいため、合わせて矢の大きさを 3 通りに変化させた。また、動きに伴う回転を表すための記号は、四角 (□) は時計回り、丸 (○) は反時計回りを表し、大きな回転が生じている骨材は記号を太線にして表した。

本研究では、圧密は下方向への骨材の移動、流動は横もしくは斜め下、斜め上への骨材の移動と定義した。

3.2.2. 初期 (0~600 pass) における骨材の動き

(1) 全体の動き

両混合物ともにタイヤ直下を中心に放射状に骨材が動いていることから、圧密および流動が同時に生じていると考えられる。しかし、密粒 13F は荷重側方部分で隆起する方向の動きがあるのに対して、排水性には見られない。また、排水性では荷重直下および荷重左側部の骨材の左側への動きが右側と比較して大きい。これは、切り出し供試体の高さがわずかであるが傾斜していたためであると考えられる。

(2) 荷重直下 (13~17 列)

密粒 13F の上部は圧密、中央部は圧密および流動、下部は上中央部に比べて動きは小さいが流動が生じており、深さ方向に異なる傾向を示した。骨材の回転方向に規則性は認められな

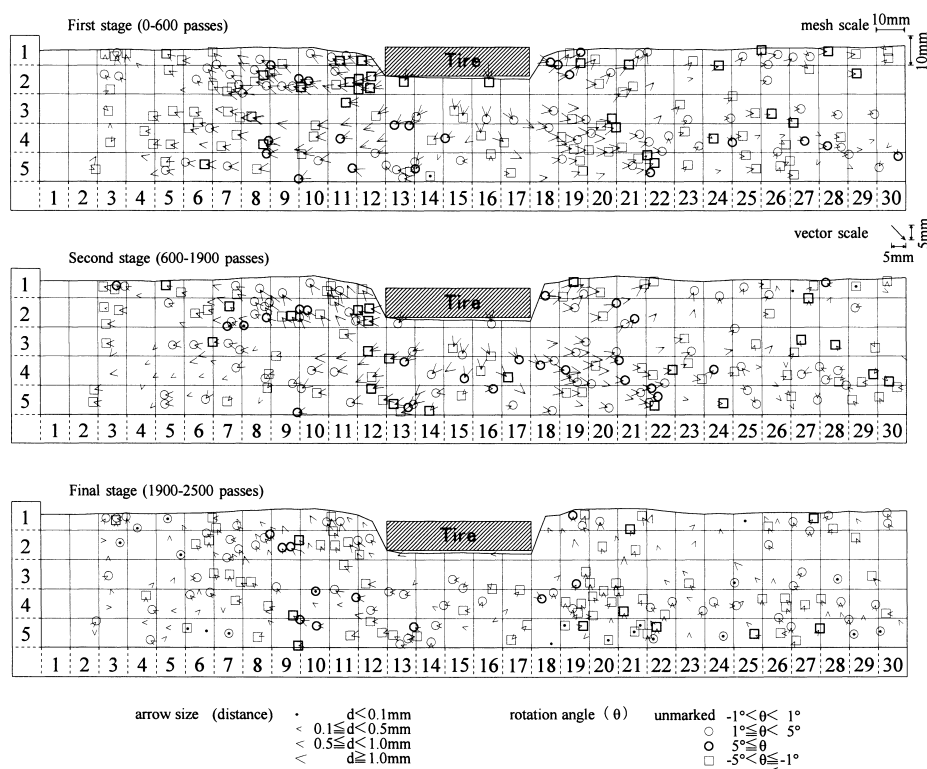


Fig. 5 Movement of Aggregates (dense graded asphalt mixture (13F))

かった。排水性は全体的に下方向への動きが大きく圧密が支配的であると考えられる。また、大きな回転を伴う骨材が上中央部に見られる。本実験に使用した供試体での回転方向は時計回りを示す骨材が多く見られた。しかし、回転方向は転圧時の状態により異なると考えられ、初期における排水性の荷重直下では、圧密が支配的であり、上中央部で大きな回転を示す骨材が多数見られるという現象はこの混合物の特徴であると考えられる。

以上より、初期の変形は、密粒 13F では空げきは小さいがアスファルトモルタルの変形が生じ易いため荷重による横断方向への変形の範囲が広いと考えられる。排水性では荷重により安定的なみ合わせへの再配向が主な動きであるため、変形の範囲が狭く変形量も小さいと考えられる。

(3) 荷重側方部 (3~12, 18~28 列)

密粒 13F では、1, 2 層で荷重から 10 mm 程度離れた箇所は側方流動および骨材が押し下げられる挙動を示しているが、左右どちらにおいても隆起する方向への動きが幅 80 mm 程度 (5~12 列, 18~25 列) で見られる。そして、荷重のすぐ脇部分の 1, 2 層では、流動とともに左側では時計回り、右側では反時計回りの大きな回転を伴いながら隆起する動きが生じている。よって、隆起は、側方部表面からわだち掘れ面より 10 mm 程度の深さまでが大きく関係して生じると考えられる。3~5 層部分では、流動のみの動きが幅 100 mm 程度 (4~12 列, 18~28 列) で見られ、2, 3 層の境界付近で隆起する方向から水平方向へと骨材の動きに若干変化が生じている。骨材の回転は、骨材が隣接している部分で大きいものが見られるが全体的には

小さい。また、隆起する方向へ回転する骨材が多く見られる。排水性では、1 層目の 11, 12, 18, 19 列において側方へ押し下げられる方向への動きが生じていることから圧密および流動が生じていると考えられる。その際の回転は左側で時計回り、右側で反時計回りを示す骨材が多く、密粒 13F と同様の傾向を示した。全体的には側方へ動く骨材が多いことから流動が支配的であると考えられる。しかし、走行荷重の境部分 (特に、17, 18 列の境部) に着目すると走行荷重の端である 17 列では、ほとんどの骨材が下方向へ動く傾向を示しているのに対し、18 列では沈下および側方への動きを示している骨材が多く見られる。よって、局部的にアスファルト混合物内にせん断力が作用していると考えられる。

(4) 供試体端部 (1, 2, 29, 30 列)

供試体の両端部 (20 mm 程度) では、両混合物ともに若干の動きおよび回転が生じているが、その量は 0.1 mm, 1° 未満の骨材が多い。荷重伝達や流動による影響を受けていると考えられるが、流動特性の検討を行う場合には、混合物の変形に大きな影響を与えるほどのものではないと考えられる。中期、後期においても同様の傾向であった。

3.2.3. 中期 (600~1900 pass) における骨材の動き

(1) 全体の動き

両混合物ともに骨材の動きおよび回転は、初期と比較して小さくなっている。しかし、骨材の動く方向に変化が現れる部分が見られる。

(2) 荷重直下 (13~17 列)

密粒 13F では、上部の骨材の沈下量は減少しているが、中

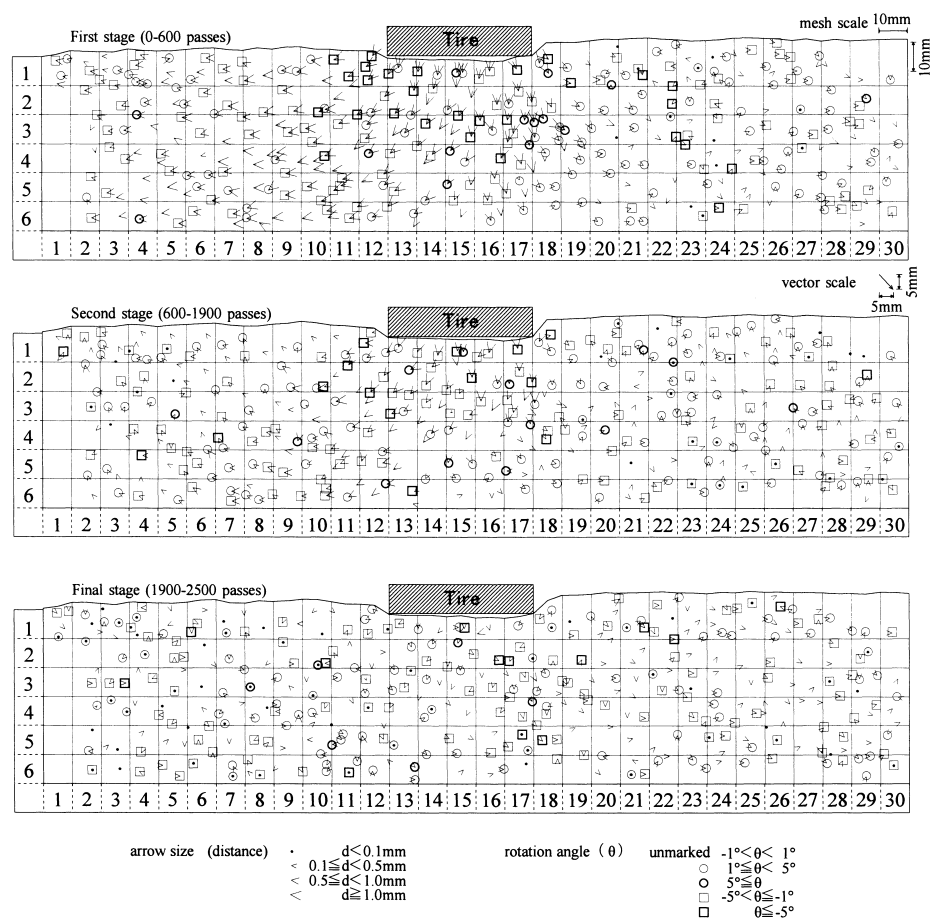


Fig. 6 Movement of Aggregates (drainage asphalt mixture)

中央下部の沈下量は初期と同量かわずかに減少している程度である。上部では圧密がほぼ終了し変形が生じていないが、中央下部の圧密および流動が生じることにより上部は見かけ上沈下しているように見えるためであると考えられる。よって、わだち掘れ発生初期の走行部の沈下は混合物上部の圧密による影響が大きいと考えられる。そして、中期の変形は中央下部の圧密および流動による影響が大きいと考えられる。また、骨材はまだ回転をしながら動いているが上部での回転は小さくなっていることから圧密が終了して、空げきが減少（密度増加）し、安定した状態となったことが伺える。排水性では、1 mm 以上の動きが生じているものがほとんどなくなり圧密および流動はほぼ終了していると考えられ、かみ合わせの変化によりわずかな動きまたは回転により安定的な配向へと向かう状態であると考えられる。

(3) 荷重側方部 (3~12, 18~28 列)

密粒 13F では、初期と同様に上部 (1, 2 層) において左右ともに流動および隆起が生じているが、骨材の動きは減少し 1 mm 程度のものがほとんどとなっている。しかし、幅 50 mm 程度 (8~12, 18~23 列) で上方への動きが大きく現れるようになっている (特に、荷重左側)。中央下部で初期同様に流動が生じているが、タイヤより 50 mm 程度 (1~7, 24~30 列) 離れるとわずかな回転もしくは回転を伴わずに側方へスライド

するだけの骨材が多数を占めるようになる。上部で隆起へと骨材の動きが変化するのは、荷重直下、すぐ脇部の変形が初期では体積変化によるものであり、中期になると荷重直下上部の圧密がほぼ終了し、流動が主となり大きな体積変化が生じなくなる。その結果、拘束のない表面へと骨材が動くものと考えられる。排水性では、ほとんどの骨材の動きが 0.1~0.5 mm となり、回転にまだ大きなものがあるが、ほぼ圧密、流動は終了し、荷重直下と同様にかみ合わせの変化により安定的な配向へと骨材が回転しながら動いている状態であると考えられる。

3.2.4. 後期 (1900~2500 pass) における骨材の動き

(1) 全体の動き

両混合物ともに大きな動きおよび回転は見られなくなり、圧密および流動がほとんど生じていないと考えられ、空げきの減少や骨材のかみ合わせなどにより、骨材の再配向が行われたことにより走行荷重に対して安定した状態になっていると考えられる。

標準的な WT 試験⁵⁾ では、試験温度 $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、試験輪荷重 $686 \pm 10\text{ N}$ ($70 \pm 1\text{ kgf}$) で実験を行い、試験開始後 45~60 分における変形量から DS , RD を求めている。これらは、圧密や初期のわだち掘れによる変形量を RD 、長期的なわだち掘れ量の推定を DS として考え数値的に表すことにより、耐流動性を評価していると考ええると DS , RD に着目することは有効であ

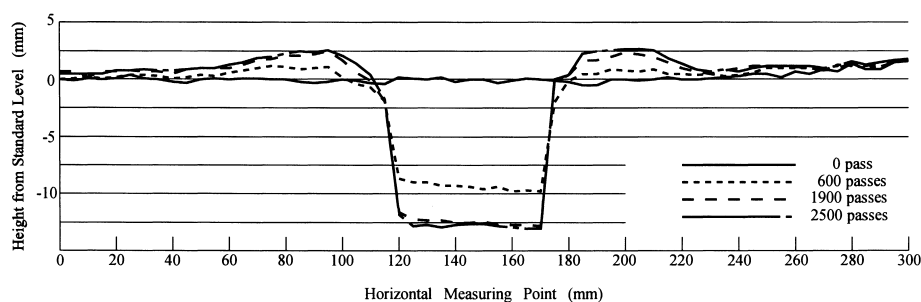


Fig. 7 Deformation Process of Surface during the WT Test (dense graded asphalt mixture (13F))

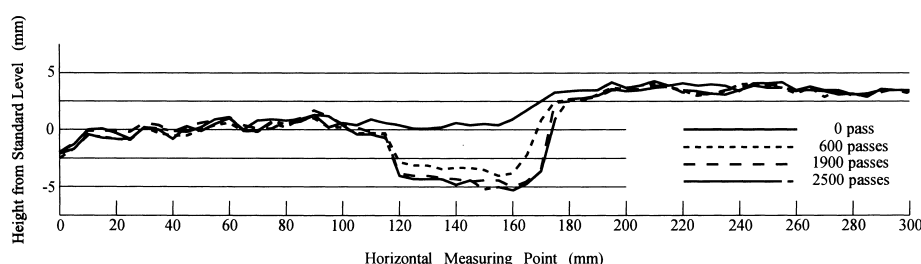


Fig. 8 Deformation Process of Surface during the WT Test (drainage asphalt mixture)

と考えられる。これを、本解析にあてはめると、後期における表面の変形量に相当することになる。実験条件は異なるがアスファルト混合物の内部の骨材の動きに着目した場合、本実験結果のように前中期に両混合物の特徴が現れている。よって、わだち掘れの原因および進行過程を究明するためには、本研究のように初期からの内部の動きを解析し、対策の検討を行う必要もあると考えられる。

(2) 荷重直下 (13～17 列)

両混合物ともに骨材の動きはほとんど生じず、圧密および流動は終了しほぼ安定した状態となっていると考えられる。密粒 13F では空げきがほとんどなくなり、排水性では隣接する骨材が良くかみ合い再配向が終了していると考えられる。

(3) 荷重側方部 (3～12, 18～28 列)

密粒 13F では、骨材の動く量は非常に小さいが全体的に上方へと移動する傾向を示している。荷重側方部では走行荷重直下の流動の影響などにより側方へ流動が生じる。同時に、アスファルト混合物が粘弾性体であるため圧縮変形も生じていると考えられる。これらは、荷重直下の動きが安定し流動による影響が小さくなったため、側方へと押し出される圧縮力の増加が小さくなり、流動および圧縮変形は進行せずに横拘束を受けている状態となっていると考えられる。この圧縮変形が時間の経過とともに拘束を受けていない表面へとクリープすることにより、骨材が上方へ動くと考えられる。排水性ではほとんど動きが生じていない。

3.3. WT 試験時の表面の変形特性

Fig. 7 に密粒 13F, Fig. 8 に排水性の WT 試験時の各期ごとの混合物の横断方向の表面の変形形状を示す。密粒 13F の変形には実験の進行とともに載荷部側方部で隆起が増加する傾向が見られる。これは、文献⁷⁾と同様の傾向であることから密粒

アスファルト混合物の流動時における変形特性であると考えられる。これと対照的に、排水性では載荷部側方で載荷部とともに沈下し、実験の進行とともにわずかに大きくなる傾向を示している。載荷部側方における両者の変形特性の違いは、前節に示した骨材の動きからも明らかなように、走行荷重による横断方向への荷重の伝達（広がり方）が密粒 13F と排水性では異なることを示していると考えられる。密粒 13F は使用バインダーの粘度が小さく、試験温度が軟化点付近であり、アスファルトモルタル量が多いなど変形しやすい。また、荷重側方部（特に変形時の載荷面より上部）は荷重による直接的な影響が小さく、載荷部および載荷側方部の中央下部は荷重の影響を直接受けるため圧密および流動による変形が拘束のない表面に現れるため隆起が生じる。つまり、側方部に現れる表面変形は直接的な荷重による影響より、載荷部および側方中央下部からの変形の影響が大きいと考えられる。排水性ではバインダーの粘度が大きく、骨材がかみ合っているため、大きな流動が生じないことから荷重の影響を直接受ける荷重分布が広がるため、実験の進行とともに載荷部側方の表面も沈下し、骨材の移動も横方向から下方へと分布している。

3.4. WT 試験時の体積変化

3.4.1. 各期ごとの体積変化

Fig. 9 に密粒 13F, Fig. 10 に排水性の供試体の一定幅断面形状より求めた各混合物の体積変化を示す。また、タイヤと直角方向の体積変化の検討を行うために、骨材に大きな動きが生じていない部分を 1st Part (1～5 列, 幅 60 mm), 5th Part (24～30 列, 幅 70 mm), 骨材に大きな動きが生じ、密粒 13F では隆起、排水性では沈下が生じていた部分を 2nd Part (7～12 列, 幅 60 mm), 4th Part (18～23 列, 幅 60 mm), 走行荷重部分を 3rd Part (13～17 列, 幅 50 mm) とした。

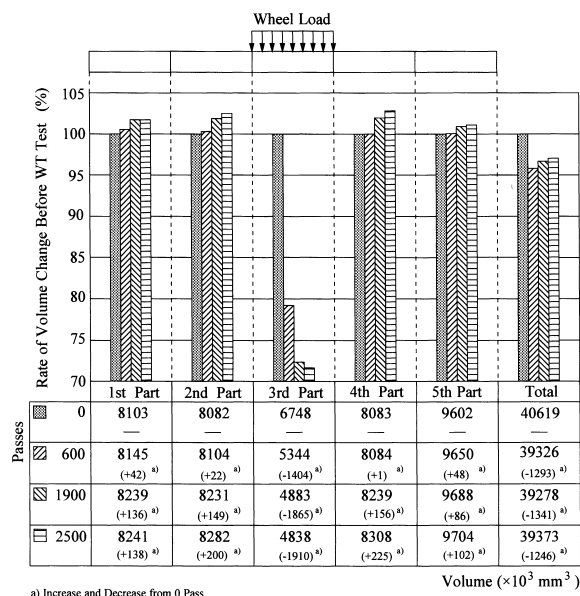


Fig. 9 Volume Change of Asphalt Mixture during the WT Test (dense graded asphalt mixture (13F))

初期では、3rd Part（以下、載荷部と記す）の体積の減少が著しく、2nd Part、4th Part（以下、両脇部と記す）の体積は、密粒 13F では増加し隆起が起り、排水性では減少し沈下が生じているがいずれも体積変化は非常に小さい。また、1st Part、5th Part（以下、端部と記す）での体積変化はほとんど生じていない。よって、主に載荷部だけで大きな体積の減少を伴う変形が生じていることが明らかである。また、両脇部では、密粒 13F で最大 2 mm の隆起、排水性で最大 1 mm の沈下が生じているが体積変化は小さい。これは、載荷幅より左右に 10 mm 程度表面が隆起していることから、載荷幅の部分の体積の減少と隆起部分の体積の増加が打ち消し合うことによると考えられる。また、排水性についてはタイヤ直下で表面が沈下するが、変形量がわずかであるため大きな影響が現れていないと考えられる。

中期では、全体に対する体積はわずかに減少している。しかし、密粒 13F では載荷部で体積が減少し、両脇部で体積の増加が大きくなっている。また、端部もわずかではあるが体積の増加が生じている。数値的に見ると、載荷部の減少量と両脇部および端部の増加量はほぼ同量であることから、載荷部における体積の減少は圧密による減少から側方への流動による減少へと移行し、載荷部からの流動が側方部の体積の増加につながっているものと推測される。排水性においても、載荷部で減少が生じているがわずかであり、全体に対する割合が小さいため全体的な変化が小さい。また、この場合、両脇部の変化はほとんど生じていない。

後期では、全体の体積変化はほとんど生じていない。また、載荷部における体積の減少の割合も小さい。このことから載荷部では、ほぼ圧密および流動は生じず、密な状態となっているものと考えられる。しかし、密粒 13F は両脇部で増加している。これは、骨材の動きや表面の変形から明らかなように上部

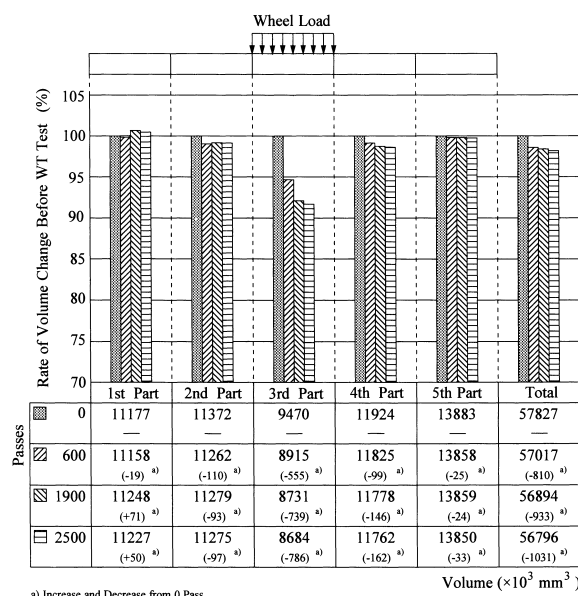


Fig. 10 Volume Change of Asphalt Mixture during the WT Test (drainage asphalt mixture)

の隆起が増加しているためである。排水性では、載荷部以外の箇所では体積変化がほとんど生じていないことから、骨材の多少の移動および回転によって若干の変形が生じ体積の減少が生じていると考えられる。また、両混合物ともに全体の体積は中期以降ほとんど変化していないことから、アスファルト混合物の体積変化は初期における載荷部の圧密の影響が最も大きいと考えられる。

3.4.2. 体積変化からの変形特性の推定

Figs. 9, 10 に示した体積により、載荷部では走行荷重が直接に作用するため体積は減少するが、両脇部と端部（以下、側方部と記す）はアスファルト混合物の種類によってその差が生じている。すなわち、この部分的な体積の増減により、載荷部の変形に対する圧密と流動の割合を推定することが可能であると考えられる。

まず、載荷部では走行荷重が直接載荷されているので体積は減少し続け増加に転じることは考えられない。そこで、側方部の体積が変わらないかまたは減少していれば、載荷部の変形は圧密が支配的であり、側方部も圧密が起こっていると考えられる。しかし、側方部の体積が増加している場合には、載荷部からの側方流動により増加したと考えられるので、載荷部での体積の減少量と側方部の体積の増加量の比を求めると、得られた数値が載荷部の体積変化に対する側方流動の割合を推定することとなる。ただし、後述の **3.5.** に示すように各混合物では、部分的な密度変化が生じていることから、実際の載荷部の流動量は得られた数値より小さくなると考えられる。

密粒 13F の 0～600 pass では、載荷部の体積の減少が **Fig. 9** より、 $1404 \times 10^3 \text{ mm}^3$ で 2 カ所の側方部の体積の増加の合計が $113 \times 10^3 \text{ mm}^3$ であるため、載荷部の変形の 8.1% ($113/1404 = 0.081$) が流動であると考えられる。また同様に、0～1900 pass では載荷部の体積の減少が $1865 \times 10^3 \text{ mm}^3$ で 2 カ所の側方部の

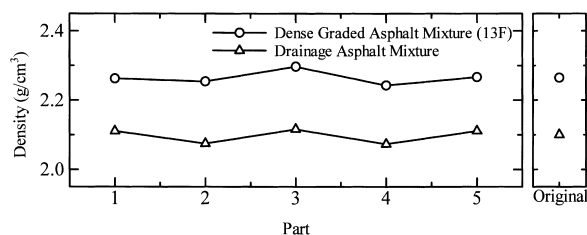


Fig. 11 Density Change in Asphalt Mixture in the Crossing Direction

体積の増加の合計が $487 \times 10^3 \text{ mm}^3$ であるため、載荷部の変形の 26.1% ($487/1865 = 0.261$)、0~2500 pass では載荷部の体積の減少が $1910 \times 10^3 \text{ mm}^3$ に対して両脇部と 2 カ所の端部の体積の増加の合計が $625 \times 10^3 \text{ mm}^3$ であるため、載荷部の変形の 32.7% ($625/1910 = 0.327$) が流動による変形であると考えられる。

排水性の 0~600 pass では Fig. 10 より、全体的に体積が減少していることから載荷部の変形は圧密によるものであり、ほとんど流動は生じていないと考えられる。0~1900 pass では載荷部の体積の減少が $739 \times 10^3 \text{ mm}^3$ に対して 2 カ所の側方部の体積の増加の合計が $61 \times 10^3 \text{ mm}^3$ (0~600 pass では流動が生じていないと考え、この間の減少量は無視し、600~1900 pass 間での 1st, 2nd, 4th, 5th Part の増減で検討を行う) であり、載荷部の変形の 8.3% ($61/739 = 0.083$)、0~2500 pass では載荷部の体積の減少が $786 \times 10^3 \text{ mm}^3$ に対して両脇部と 2 カ所の端部の体積の増加の合計が $11 \times 10^3 \text{ mm}^3$ (0~600 pass では流動が生じていないと考え、この間の減少量は無視し、600~2500 pass 間での 1st, 2nd, 4th, 5th Part の増減で検討を行う) であるため、載荷部の変形の 1.4% ($11/786 = 0.014$) が流動による変形であると考えられる。

以上より、密粒 13F では走行回数の増加とともに載荷部の変形に対する側方流動の割合が増加していることが明らかである。しかし、排水性では中期および後期の変形においても載荷部での流動の割合が非常に小さく、圧密が進行している状態であると考えられる。これは、WT 試験から得られる DS が時間あたりの流動変形量と言われているが、この変形が必ずしも流動による変形量を表すものではないことを示していると考えられる。よって、排水性の流動特性を究明するためには、走行回数の増加や試験方法などの検討が必要であると考えられる。

3.5. WT 試験後の密度分布

Fig. 11 に、WT 試験後の両混合物を 3.3. と同様に 1st~5th Part 毎にカッターで 5 分割し、密度の測定を行った結果を示す。

Fig. 11 より、密度変化は両混合物ともに載荷部で増加、荷重両脇部で減少、両端部は変化が生じていない。よって、WT 試験時における変形には、密度変化を伴うことが明らかとなった。

また、Figs. 5, 6 による骨材の動きおよび回転から明らかなように、走行荷重による変形特性は深さ方向、横断方向ともに異なり、横断方向の密度分布に変化が生じていることから、深さ方向の密度分布も異なるものと考えられる。そこで、Fig.

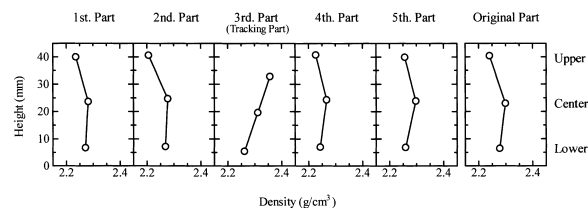


Fig. 12 Density Change in Asphalt Mixture in the Depth Direction (dense graded asphalt mixture (13F))

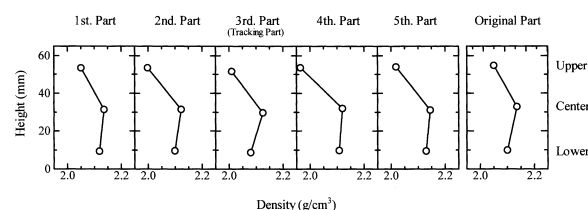


Fig. 13 Density Change in Asphalt Mixture in the Depth Direction (drainage asphalt mixture)

12 に密粒 13F, Fig. 13 に排水性の 5 分割したものを深さ方向にさらに 3 分割して密度の測定を行った結果を示す。Figs. 12, 13 より、WT 試験に使用していない部分を深さ方向に 3 枚にカッティングした供試体の密度分布は、両混合物とも中央部、下部、上部の順に小さくなる傾向を示している。ここで、文献¹⁰⁾ではマカダムローラーによる転圧を行ったアスファルト混合物の通常期 (17~20, 17~27, 13~18℃) および、寒冷期 (0~5, 1~3℃) におけるアスファルト混合物の空げき分布は上部、下部、中央部の順に大きくなる傾向が明らかにされている。また、文献⁷⁾では従来のアスファルト混合物層の全体の空げき率による単一的な評価では、供用後の路面変形特性との関連付けが難しいと述べられている。よって、ローラーを使用した現場転圧時の密度または空げき分布は、混合物の種類に関わらず深さ方向に一定とならずこのような傾向を示すと考えられる。

載荷部では密粒 13F は上部の密度増加が顕著であり、中央部での密度増加は生じているが小さく、下部はさらに小さい。排水性では、全体的に密度増加が生じるがわずかであり、深さ方向に大きな密度変化は現れていない。両脇部では、両混合物ともに上部の密度が減少し、中下部の密度変化はほとんどない。また、両端部での密度変化はほとんど生じていない。以上より、わだち掘れによるアスファルト混合物の変形には、部分的な密度変化を伴うことが明らかとなった。しかし、密度変化は混合物により異なり、密粒 13F では載荷上部の密度増加が大きく、両脇上部の密度低下が大きい。排水性は密度の変化が生じるものの全体的にわずかである。

載荷部での変形は圧密が支配的であることは明らかであるが、左右への流動も生じているため、部分的な密度の増減が相殺され体積変化が現れない可能性が考えられる。よって、密度分布の測定はわだち掘れの発生後のアスファルト混合物の状態を明らかにする手段として有効な方法であると考えられる。

ここで、WT 試験におけるアスファルト混合物内部の骨材の

変形を考えた時、かみ合わせの変化などの影響によるひび割れや表面が割れる可能性はあるが、大きな圧縮、引張変形が生じることは考えにくい。仮に、変形が生じたとしても試験後に骨材を覆っているアスファルトモルタル部分の粘性が大きいいため弾性体である骨材は、元の形状に復元すると考えられる。よって、両混合物ともに生じる部分的な密度変化には、内部の空気の移動または変形が一因として考えられる。特に、排水性はアスファルトモルタル部分が少なく空気が大きいことから、密度変化に与える影響が大きいと考えられる。また、WT 試験時の骨材の動きに回転を伴い、変形が生じていることから空気の移動が生じていることは明らかである。しかし、本研究から有効空げきや半有効空げき、無効空げきの何れが大きく密度変化に関わっているかを明らかにするには至らなかった。

4. 結 言

本研究から明らかになったことを以下にまとめる。

- 1) アスファルト混合物の高温時のわだち掘れは、骨材の動きおよび回転を伴い、動く方向および回転方向が走行回数とともに変化する。
- 2) わだち掘れの進行に伴う表面の変形は、密粒 13F では荷重脇で隆起し、排水性では沈下する。また、体積変化よりアスファルト混合物内部の変形状態を予測することが可能である。
- 3) わだち掘れは部分的な密度分布を生じさせる。

本実験および解析方法は、アスファルト混合物のわだち掘れによる変形特性の検討に有効であり、わだち掘れ部分のみだけ

でなく横断方向の変形に対する対策を講じる必要性を明らかにした。また、今後の検討課題として、縦断方向に対するアスファルト混合物の変形特性を明らかにし、より 3 次元的なわだち掘れの進行過程の検討および対策を明らかにする必要があると考えられる。

References

- 1) Tada, H., Proceedings of the Jpn. Soc. of Civil Engineers, **332**, 119 (1983).
- 2) Ikeda, T., *Hoso*, **32-2**, 27 (1997).
- 3) Nishikawa, T., Nishida, K., Nishigata, T., *J. Materials, Concrete Structures and Pavements*, **704**, 37 (2002).
- 4) Maruyama, K., Takahashi, M., Shitamichi, J., Proceedings of the 54th annual conference of the Japan Society of Civil Engineers, 5, Japan Society of Civil Engineers, 318 (1999).
- 5) Japan Road Association, "Manual for Test Method of Pavement (Separate Volume)," Maruzen Co., Ltd., Tokyo (2000), p. 116-138.
- 6) Himeno, K., Watanabe, T., Maruyama, T., Proceedings of the Jpn. Soc. of Civil Engineers, **378**, 259 (1987).
- 7) Kasahara, A., Amano, T., Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., *Sekiyu Gakkaishi (J. Jpn. Petrol. Inst.)*, **40**, (1), 39 (1997).
- 8) Sugawara, T., Kasahara, A., *Journal of JSCE*, **268**, 109 (1972).
- 9) Ootaguro, N., Master Thesis, Rheological Analysis of Asphalt Mixture by Visco-Elastic Theory, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 1991.
- 10) Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., Kawamura, K., Kasahara, A., *Sekiyu Gakkaishi (J. Jpn. Petrol. Inst.)*, **38**, (3), 173 (1995).

要 旨

ホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物内部の骨材の移動特性

近藤 崇^{†1)*}, 森吉 昭博^{†2)}, 吉田 隆輝^{†1)}, 高橋 正一^{†1)}

^{†1)} 苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科, 059-1275 北海道苫小牧市字錦岡 443

^{†2)} 北海道大学大学院工学研究科, 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

室外で作製した密粒度アスファルト混合物 (13F) および排水性アスファルト混合物を用い、ホイールトラッキング試験を行い横断方向における深さごとの各骨材の移動特性について検討した。

試験全体 (約 1 時間, 2500 pass) を初期, 中期, 後期に分け骨材の動きを解析した結果より、荷重直下では圧密、側方部では流動が支配的であることが明らかになった。また、変形時の骨材の動きには回転を伴い、荷重直下、荷重の境部分で大きな

回転を伴うこと、表面の変形から得られた体積変化より、WT 試験時のアスファルト混合物の変形には体積変化が生じ、初期の荷重直下の変形が大きく関係する結果が得られた。WT 試験後の供試体の密度分布を計測した結果、両混合物ともに荷重直下では増加し、両脇部上部で減少する傾向を示した。また、密度変化の割合は密粒度アスファルト混合物 (13F) が顕著であった。