



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Crack Formation in Asphalt Mixtures in the Wheel Tracking Test at High Temperature
Author(s)	Kondo, Takashi; Moriyoshi, Akihiro; Yoshida, Takaki et al.
Citation	Journal of the Japan Petroleum Institute, 47(2), 90-99 https://doi.org/10.1627/jpi.47.90
Issue Date	2004
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40069
Type	journal article
File Information	moriyoshi_JJPI47_90.pdf



[Regular Paper]

Crack Formation in Asphalt Mixtures in the Wheel Tracking Test at High Temperature

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 060-8628, JAPAN

(Received April 11, 2003)

The formation of internal cracks in asphalt mixtures in the wheel tracking test at high temperature was investigated in dense graded (13F) and drainage asphalt mixtures prepared outside. Such cracks are caused by movement of aggregates in asphalt mixtures with distance separation in the crossing direction under passes of the testing wheel.

The movement of aggregates during the wheel tracking test (1 h, 2500 passes) at 0 passes, 600 passes, 1900 passes and 2500 passes was analyzed by photography. Greater deformation of aggregates in asphalt mixtures occurred at 50–60 mm from both tire ends in the case of dense graded asphalt mixture (13F) and at both tire ends in the case of drainage asphalt mixture. Local strain in those areas exceeded the maximum failure strain of the mixtures in the tensile test. Internal cracking may occur under passes of the wheel at high temperature, and cracks may appear in the surface with time, which has not been considered until now.

Keywords

Dense graded asphalt, Drainage asphalt, Internal cracking, Stress distribution, Wheel tracking test, High temperature

1. 緒 言

アスファルト舗装の表層に発生するき裂は、外気温の低下に伴う熱応力による横断き裂や高温時に車両走行部付近の表面に発生する縦き裂などが主である。両き裂は時間とともに内部までき裂が進展し、最終的に亀甲(きっこう)状となると考えられている¹⁾。

これらのき裂の原因の解明はアスファルト舗装の長期供用性および走行の安全性を向上させるために重要である。このため、実験時のひずみ速度や温度を変化させたアスファルト混合物の曲げや引張試験を行い、破壊時のひずみの値を明らかにする研究²⁾が行われている。また、ホイールトラッキング(以下、WTと記す)試験機やこれに準じた試験機を用い、き裂の発生および進展に関する研究³⁾やアスファルト混合物表面に生じる水平せん断力に関する研究¹⁾が行われている。

一方、コンクリート構造物に発生するき裂に対しては、目視により確認できる乾燥収縮などに起因する表面のき裂以外に、非破壊試験方法としてX線や超音波などを用いた内部ひび割れの測定や発生箇所の特特定などが行われている。しかし、アスファルト混合物の内部き裂に関する研究はアコースティックエミッション(AE)計測による低温き裂評価⁴⁾などが行われている程度であり、舗装体として高温時に内部き裂がいかなる箇

所から発生するという研究は行われていない。これは、アスファルト混合物のき裂対策がアスファルトバインダーの粘度や骨材粒度の検討などにより対処が可能であると考えられているためである。

一般に、高温時ではアスファルト舗装は粘性体としての挙動が著しいため、流動に対する検討が重要視されている。また、車両走行により表面に生じる水平せん断力によるき裂や交差点部などのタイヤの据えきり部での骨材の飛散などの検討も行われているが、これらは何れも表面から着目した研究であり、アスファルト混合物内部の挙動を分析したものではない。

しかし、近年のアスファルト混合物に対する耐流動や耐摩耗対策のために使用される排水性アスファルト混合物などはアスファルトバインダーが高粘度であり、アスファルトモルタルを形成する細骨材量が少なく、ポーラスである。このため車両走行により骨材のかみ合わせに変化が生じた場合、内部の骨材が移動することによりその箇所でき裂が発生し、これが次第に舗装表面へと進展し破壊に至る可能性があると考えられる。

そこで本研究は、WT試験用型枠の荷重直角方向の一面をガラス板とし、骨材の動きを断続的に写真撮影を行い、その動きからアスファルト混合物内部のひび割れ発生の可能性について検討した。

* To whom correspondence should be addressed.

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

2. 実験および解析方法

2.1. 供試体および使用材料

WT 試験に使用したアスファルト混合物は前報⁵⁾と同様に密粒度アスファルト混合物 (13F) (以下, 密粒 13F と記す) および排水性アスファルト混合物 (以下, 排水性と記す) とし, 使用材料および試験舗装場での転圧方法も同様である。

以下に, 供試体の簡単な諸元を示す。

密粒 13F はストレートアスファルト 80/100 (密度: 1.032 g/cm³, 針入度: 90, 軟化点: 47.0℃), アスファルト量 6.0%, 目標空げき率 3.8%, 転圧温度 150℃ とした。排水性は高粘度改質アスファルト (密度: 1.023 g/cm³, 針入度: 51, 軟化点: 96.5℃), アスファルト量 5.0%, 目標空げき率 19.9%, 転圧温度 180℃ とした。供試体形状は密粒 13F が幅 300 mm × 奥行き 300 mm × 高さ 45 mm, 排水性は幅 300 mm × 奥行き 300 mm × 高さ 60 mm とした。

2.2. 実験および画像解析方法

WT 試験の条件は前報⁵⁾と同様で, 試験温度 45℃ とし, 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), 走行速度 42 pass/min で約 1 時間 (2500 pass) である。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。型枠の荷重直角方向の一面はガラス板として 35 mm カメラにより 100 pass ごとに荷重直角方向 (密粒 13F は幅 300 mm × 高さ 45 mm, 排水性は幅 300 mm × 高さ 60 mm) の骨材の動きを撮影した。

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, パーソナルコンピュータ (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, 撮影された荷重直角方向の骨材で長径が約 2 mm 以上の骨材を対象に, その断面で観察される対象とした骨材の動きおよび回転を xy 方向の 2 次元的な解析を行った。

2.3. 解析方法

2.3.1. 解析の対象とした骨材の選定方法

前報⁵⁾では全体の走行回数 (2500 pass) を圧密変形が大きい 0~600 pass を初期 (First stage), 側方への流動変形が卓越する 600~1900 pass を中期 (Second stage), 骨材の動きがほとんど生じない 1900~2500 pass を後期 (Final stage) に分けて解析を行い, 骨材が回転を伴いながら移動することを明らかにした。その際, 周りの骨材と比較して相対的に動きや回転の大きな骨材が見られた。これは, 走行荷重により骨材が移動し, かみ合わせの変化やアスファルト混合物内部の空げきの減少またはつぶれが生じながら骨材が安定的な配向となるために起こる。この骨材の動きは, 通常の舗装用アスファルト混合物でも同様に生じることから, 本解析の対象とした骨材の選定は無作為抽出ではなく, 動きや回転の大きな骨材とした。また, 対象骨材の選定は前報⁵⁾と同様に両アスファルト混合物の骨材の動き (Fig. 5 (密粒 13F), Fig. 6 (排水性)) により, 隣接する骨材が互いに異なる方向へ大きく動く骨材, 同方向への動きでも大きく離れる骨材, 大きな回転を生じている骨材, 回転方向が逆となっている骨材にそれぞれ着目した。

2.3.2. 解析方法

本解析では, 0 pass, 600 pass, 1900 pass, 2500 pass 時の荷

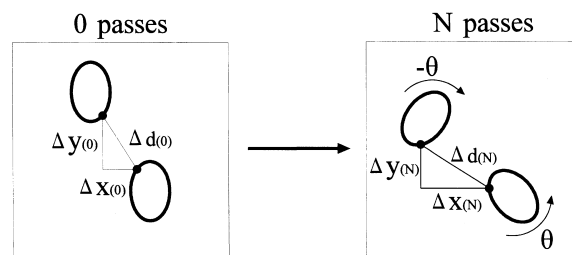


Fig. 1 Analysis Method for Movement of Aggregates

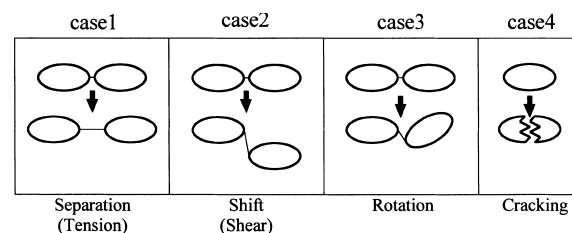


Fig. 2 Example of Cracking

重直角方向の骨材に着目し, 走行回数の増加とともに隣接する骨材間の距離が離れるものを対象 (以下, 対象骨材と記す) とし, 局所的なひずみ (変形量) の計算を行うことにより, ひび割れへ進展する可能性について検討した。

ここで, ひずみの計算に用いた対象骨材間 (以下, 対象部と記す) の距離は骨材の重心間や回転の中心間の距離ではなく, 隣接する骨材の接点あるいは最も近い距離とした。その後, 実験時に撮影を行った写真により対象部のひずみの計算を行った。

Fig. 1 に解析の概略図を示す。対象部の座標より実験開始前 (0 pass) の $\Delta x_{(0)}$, $\Delta y_{(0)}$ および N pass 後の $\Delta x_{(N)}$, $\Delta y_{(N)}$ を求める。そして, 対象部の距離 $\Delta d_{(0)}$ mm (接している場合には, $\Delta d_{(0)} = 0$ mm) と N pass 後の $\Delta d_{(N)}$ mm を算出し, ひずみ (ϵ) を求めた。また, 合わせて骨材の回転角度 (θ) も求めた。

2.4. アスファルト混合物のき裂の推定方法

骨材の動きに着目した場合の車両走行時のアスファルト混合物にき裂が発生する可能性は以下 (Fig. 2 参照) のように考えられる。

- (1) case 1 骨材間の距離が離れる (引張)
- (2) case 2 骨材がずれる (せん断)
- (3) case 3 骨材の回転により距離が離れる
 - case 3-1 一方の骨材に回転が生じる
 - case 3-2 双方に逆方向の回転が生じる
 - case 3-3 双方に同方向の回転が生じる
- (4) case 4 骨材が割れる

ここで, case 1, 2 は対象骨材の位置関係 (並び方) と Fig. 1 に示した Δx , Δy の大きさを比較し判断を行った。しかし, case 3 に対する検討は, 距離の変化のみでは互いの回転による距離の変化の考察を行うことは困難であるため, 骨材の回転と対象部の距離の変化を Fig. 3 のように考えることとする。検討方法を以下に示す。

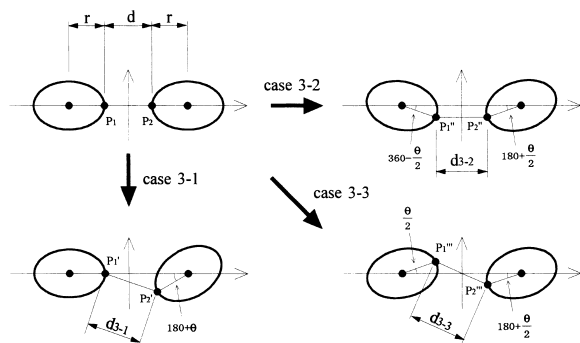


Fig. 3 Movement of Objective Aggregates by Rotation

元の対象部の座標を $P_1 (x_1, y_1)$, $P_2 (x_2, y_2)$ として、変形後の座標を case 3-1 は $P_1' (x_1', y_1')$, $P_2' (x_2', y_2')$, case 3-2 は $P_1'' (x_1'', y_1'')$, $P_2'' (x_2'', y_2'')$, case 3-3 は $P_1''' (x_1''', y_1''')$, $P_2''' (x_2''', y_2''')$ とすると、変形後の座標は以下のように求められる。

1) case 3 (元の座標)

$$P_1(x_1, y_1) = \left(-\frac{d}{2}, 0\right) \quad (1)$$

$$P_2(x_2, y_2) = \left(\frac{d}{2}, 0\right) \quad (2)$$

2) case 3-1

$$P_1'(x_1', y_1') = \left(-\frac{d}{2}, 0\right) \quad (3)$$

$$P_2'(x_2', y_2') = \left(\frac{d}{2} + r + r \cos(180 + \theta), r \sin(180 + \theta)\right) \quad (4)$$

3) case 3-2

$$P_1''(x_1'', y_1'') = \left(-\frac{d}{2} - r + r \cos\left(-\frac{\theta}{2}\right), r \sin\left(-\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (5)$$

$$P_2''(x_2'', y_2'') = \left(\frac{d}{2} + r + r \cos\left(180 + \frac{\theta}{2}\right), r \sin\left(180 + \frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (6)$$

4) case 3-3

$$P_1'''(x_1''', y_1''') = \left(-\frac{d}{2} - r + r \cos\frac{\theta}{2}, r \sin\frac{\theta}{2}\right) \quad (7)$$

$$P_2'''(x_2''', y_2''') = \left(\frac{d}{2} + r + r \cos\left(180 + \frac{\theta}{2}\right), r \sin\left(180 + \frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (8)$$

Eqs. (1) ~ (8) により、元の長さ (d)、および移動後の長さ (d_{3-1} , d_{3-2} , d_{3-3}) の計算を行い、回転が長さ変化に与える影響の検討を行うこととした。

3. 結果および考察

3.1. WT 試験より得られた変形-時間曲線

Fig. 4 に WT 試験より得られた変形-時間曲線を示す。Fig. 4 より、密粒 13F の変形-時間曲線は一般的な直線型を示し、

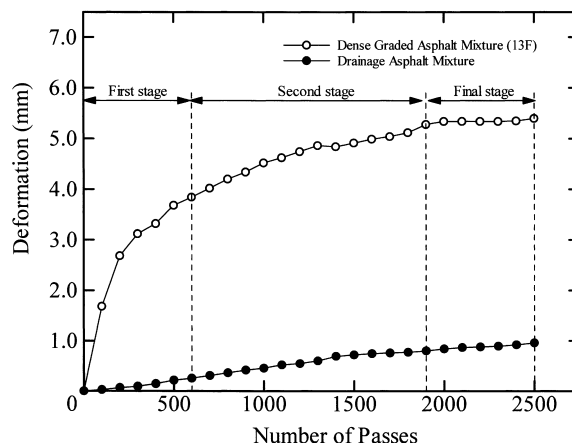


Fig. 4 Result of Wheel Tracking Test

排水性ではほぼ直線を示した。しかし、排水性では圧密および流動の明確な違いは見られなかった。また、両アスファルト混合物ともに WT 試験後の供試体の上下面にひび割れは確認されず、排水性においては、表面の骨材の飛散も確認されなかった。

3.2. WT 試験時の骨材の動き

3.2.1. 対象骨材の分布

Fig. 5 (密粒 13F)、Fig. 6 (排水性) に WT 試験前 (0 pass 時) に撮影を行った供試体断面の写真をトレースした結果を示す。ここで、Figs. 5 および 6 で塗りつぶした骨材が動きの大きい対象骨材である。また、下段には対象骨材を 0 pass, 600 pass, 1900 pass, 2500 pass ごとにまとめ、骨材の回転方向を矢印および各期ごとの回転角度 (たとえば、2500 pass の場合は 1900 ~ 2500 pass の回転角度を表す) を反時計回りは正、時計回りは負として示した。

Fig. 5 より、密粒 13F の対象骨材はタイヤ接地面付近だけではなく、タイヤ両端より幅 50 ~ 60 mm 程度まで分布している。これは、側方へと流動が生じる範囲が広いためであると考えられる。また、密粒 13F はタイヤ接地面の側方部で表面の隆起が生じるため No. 1, 2, 11, 12 のような側方部表面付近にも対象骨材が現れていると考えられる。

Fig. 6 より、排水性での対象骨材はタイヤ境界部 (No. 1, 2, 7, 8, 9) およびタイヤ中心線上 (No. 4, 5, 6) に現れており、タイヤ接地面の深さ方向に限定されている。タイヤ境界部に現れている対象骨材は、一方は載荷部、他方が側方部に位置している。

これにより、対象骨材は両アスファルト混合物ともに表面だけでなく内部にも現れることが明らかとなった。また、その分布範囲は WT 試験時のアスファルト混合物の変形特性と深く関係していると考えられ明確な違いが現れている。

Fig. 7 に Figs. 5, 6 を参考に対象骨材の分布から、その動きの特徴ごとにマーク (網掛け) し、結果から考えられる両アスファルト混合物の応力分布 (太点線) を概略として図化したものを示す。応力分布の検討は既往の研究結果^{6),7)} を参考に行った。

等方均質な半無限線形弾性体に等分布帯状荷重が載荷した場

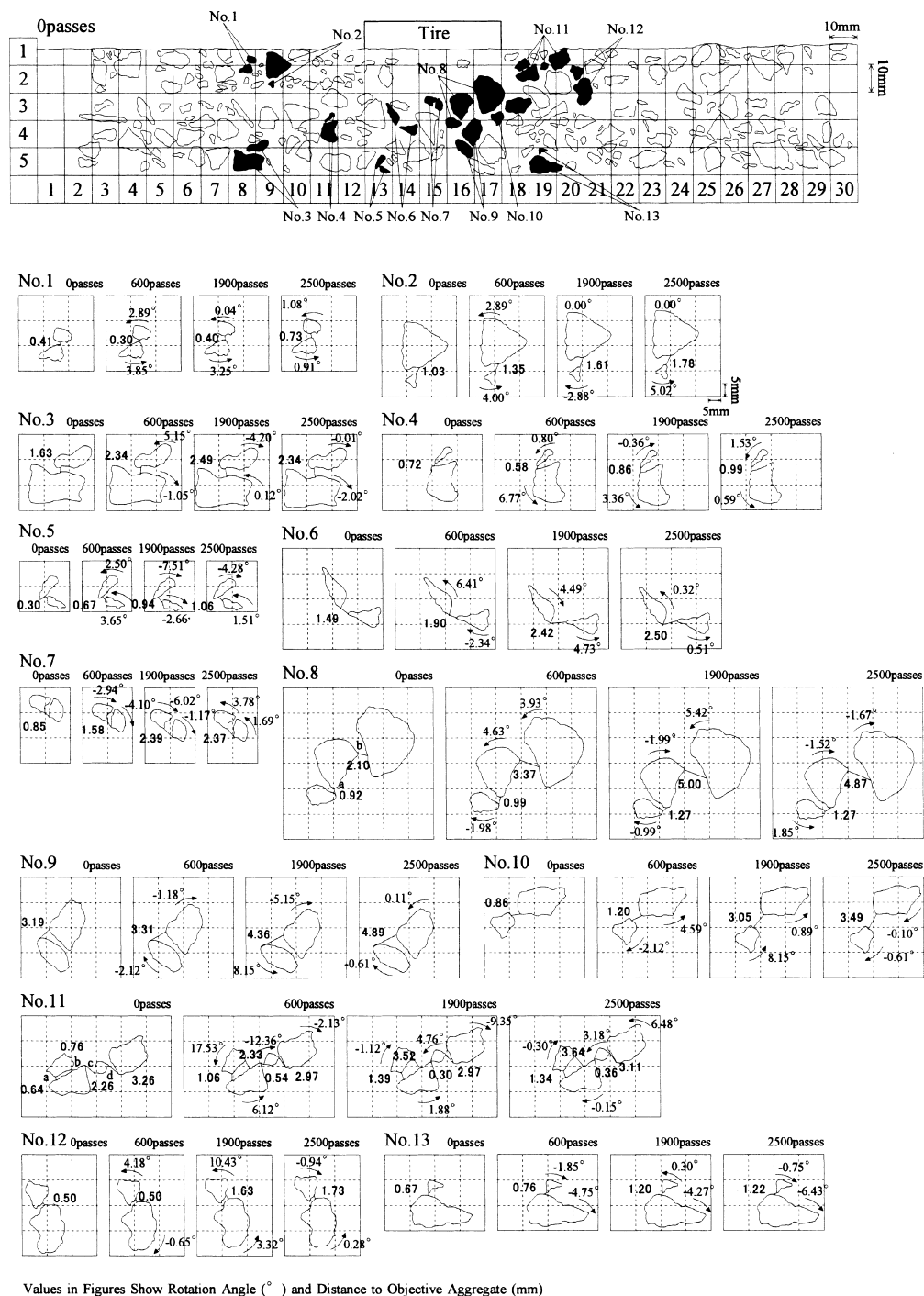
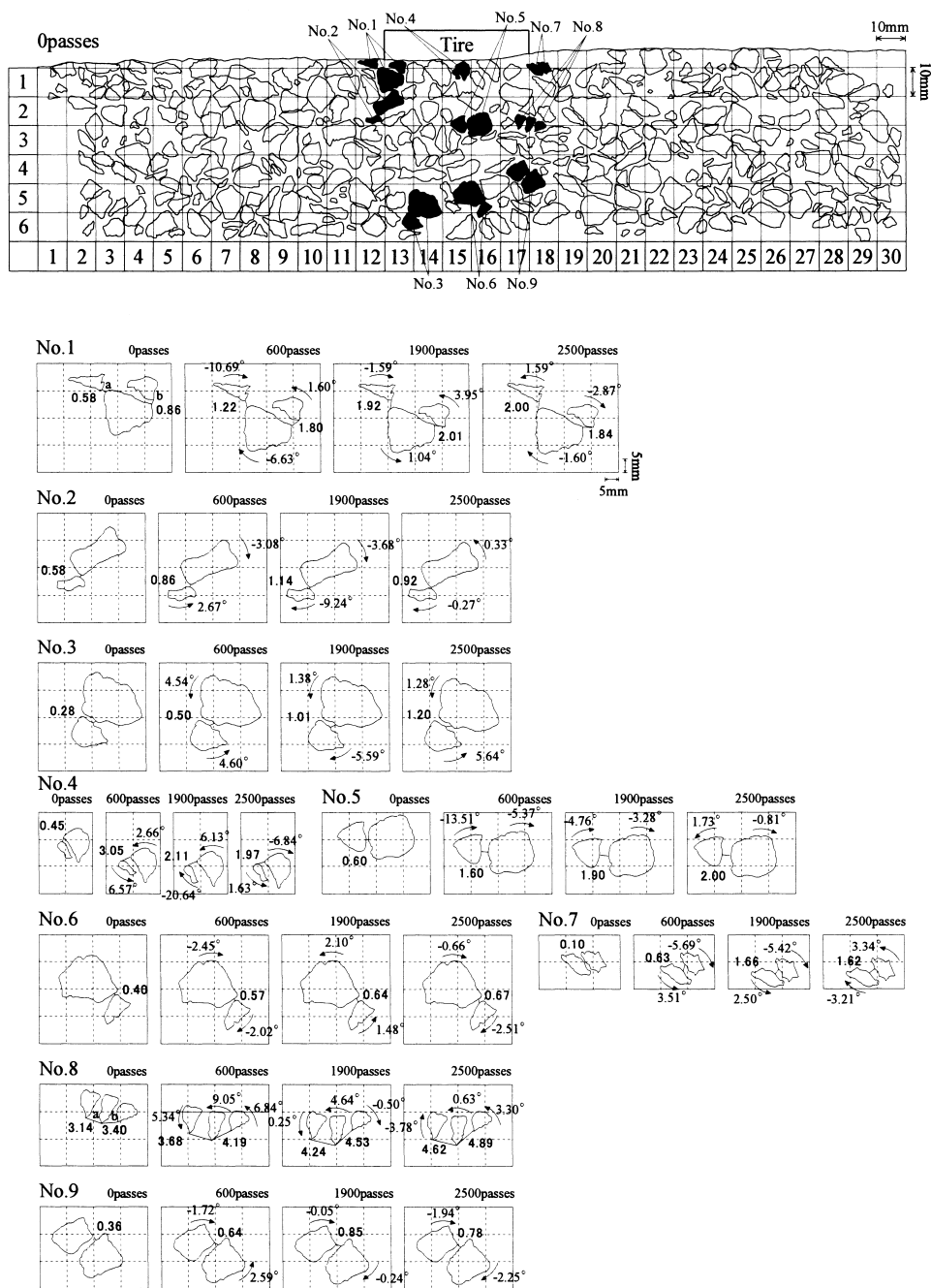


Fig. 5 Result of Trace of Section (dense graded asphalt mixture (13F))

合の弾性解による地盤内の圧力球根はブーシネスクにより求められており、Fig. 8⁶⁾のように表される。しかし、この場合は深さ方向が半無限となるため、これを本実験での応力分布にそのまま適用することは困難である。また、この理論は多層体では近似度が低いことが示されている⁶⁾。そこで、村井ら⁷⁾が行った2層系の光弾性実験の結果を参考にすると、ここでは上下層に異なる材料を用いた場合の上層の応力分布が明らかにされ

ている。この結果によると上層と下層の弾性係数の比が小さい場合には、等圧線の横方向の直径が小さく縦長の楕円となり（応力分布幅が狭い）、両者の比が大きくなるとともに横長の楕円へと変化する。たとえば、上層がエポキシ樹脂（弾性係数 2942 MPa (300 kgf/mm²)), 下層がフェノール樹脂（弾性係数 12,749 MPa (1300 kgf/mm²)) で弾性係数比 0.23 の場合より、上層がエポキシ樹脂、下層がゴム（弾性係数 785 MPa (80 kgf/



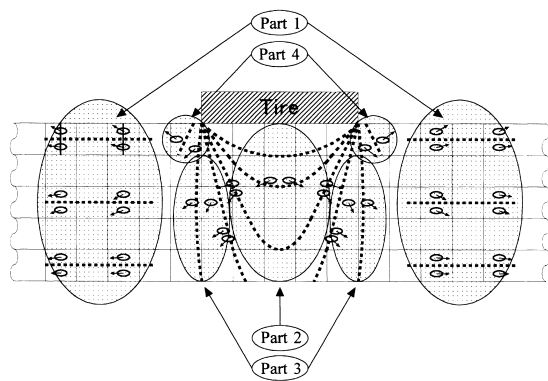
Values in Figures Show Rotation Angle (°) and Distance to Objective Aggregate (mm)

Fig. 6 Result of Trace of Section (drainage asphalt mixture)

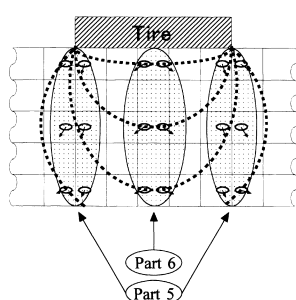
mm²)) で弾性係数比 3.75 の方が応力分布幅は広い。これを本実験結果に当てはめると、上層は高温時のアスファルト混合物であるから弾性係数（スティフネス）は非常に小さく、下層は銅製型枠であるから実験時の温度とひずみ速度程度での弾性係数は常温時と変化していないとして、銅の弾性係数を $E_s = 2.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ($2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$) とすると、上下層の弾性係数比は非常に小さく、Fig. 7（太点線）に示したような応力分布となると考えられる。しかし、ブーシネスクの弾性解による圧力球根や村井らの実験は上下層ともに弾性体に関する結果で

ある。よって、粘弾性体であるアスファルト混合物の応力分布は、走行荷重によるタイヤ両端部表面での荷重集中や水平せん断力などの影響により深さ方向にせん断力が働き応力分布は弾性解による連続的な放射線状の分布とは異なるため、粘弾性解による応力分布の解析が必要であると考えられる。

以上より、アスファルト混合物内部の骨材の動きにおいて特に注目すべき点は、密粒 13F ではタイヤ両端部および側方部表面付近、タイヤ両端部の深さ方向、排水性ではタイヤ両端部およびタイヤ中央の深さ方向が重要であることが明らかとな



Dense Graded Asphalt Mixture (13F)



Drainage Asphalt Mixture

Fig. 7 Potential Locations Place of Cracking

った。

また、本実験で行った WT 試験と先述の研究結果⁷⁾ を合わせて考察すると、WT 試験でのアスファルト混合物の変形は、上層のアスファルト混合物に比べ下層の弾性係数が非常に大きいことから橋面舗装やコンクリート床版上での表層に用いられるアスファルト混合物の挙動に近く、アスファルト混合物のわだち掘れ量は多層構造からなるアスファルト舗装の構造状態に依存し大きく異なると考えられる。

3.2.2. 対象骨材の動きの特徴

Table 1 (密粒 13F)、**Table 2** (排水性) に、対象部の長さ変化およびひずみの計算結果を各期ごとにまとめたものを示す。**Tables 1, 2** において、+は引張（距離が離れる）、-は圧縮（距離が近づく）を示している。この結果より、局部的にとらえると数%～数百%の引張ひずみがアスファルト混合物の内部で生じていることが明らかとなった。合わせて、**Tables 1, 2** のひずみで、両アスファルト混合物ともに実験温度 45℃ において推測される引張試験時のアスファルト混合物の破壊時のひずみを 2.00% とし、これ以上のひずみが生じている部分を網掛けとした（検討は次節で行う）。また、**Table 3** に対象骨材の動きの特徴を 2.4 節で示した case 1～4 について検討を行った結果を示す。

ここで、case 1～3 は骨材自体の変形ではなく覆っているアスファルトモルタルの変形や隣接する骨材の動きに伴うものであると考えられる。case 4 は、骨材自体の変形と

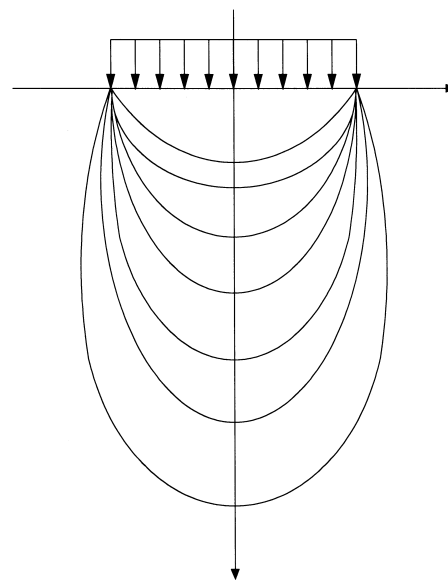


Fig. 8 Stress Distribution after Boussinesq

り強度が小さい骨材を使用したり、かみ合わせの変化により骨材の一部に応力が集中することにより割れる可能性が考えられる。しかし、何れの場合もこれらの挙動は単独ではなく複数の組合せにより生じ、その際の骨材の動きは隣接する骨材の一方のみではなく双方の動きによるものであると考えられる（ただし、本解析結果では case 4 の骨材は見られなかった）。

また、骨材の回転が対象部のひずみに及ぼす影響を検討するために、以下の条件により計算を行った。

対象骨材の長径における半径 (r) は、粗骨材の最小粒径である 5.0 mm の半分の 2.5 mm、骨材間の距離 (d) は 2.0 mm、骨材の回転角度 (θ) は、双方の回転角度の絶対値を 5° とし計算を行った。その結果、回転による対象部のひずみは case 3-1 で 1.06%、case 3-2 で 0.24%、case 3-3 で 0.83% となる。これは、先述で想定した実験温度 45℃ における引張時のアスファルト混合物の破壊時のひずみの最大値 2.00% より小さい。そこで、本解析結果での対象骨材の長径はほとんどが 10.0 mm 程度であったことから $r=5.0$ mm とし再度計算を行うと、case 3-1 で 3.28%、case 3-2 で 0.48%、case 3-3 で 2.82% となる。ここで、case 3-2 でのひずみは小さいが動きを伴うことを考慮すると、この程度の回転角度でもひずみの増加に大きな影響を与えたと考えられる。

よって、本解析結果では case 3-1～3 に当てはまる対象骨材は互いの回転角度の絶対値が 5° 以上の骨材とした。

(1) 密粒 13F の対象骨材の動き

密粒 13F での対象骨材の動きは大きな回転を伴うが回転方向に規則性は見られなかった。

タイヤ側方部 (**Fig. 7**, Part 1) の上面に現れている No. 1, 2, 12 では、隆起しながら上下に対象部が広がっている (case 1)。また、初中期の動きおよび回転が大きく、後期には一部を除き動きおよび回転はほとんど生じていない。この位置での骨材の動きは、側方への流動が卓越し、WT 試験後には密度が低下する部分であることから、空げきの増加により対象部が広がると

Table 1 Strain in Objective Parts (dense graded asphalt mixture (13F))

Pass	Change of length [Δd mm]				Strain from 0 passes [%]			Strain from last stage [%]		
	0	600	1900	2500	600	1900	2500	0 to 600	600 to 1900	1900 to 2500
No. 1	0.412	0.300	0.400	0.728	-27.24	24.25	79.55	-27.24	33.33	82.00
No. 2	1.030	1.345	1.612	1.780	30.67	25.94	16.32	30.67	19.85	10.42
No. 3	1.628	2.335	2.484	2.335	43.41	9.18	-9.18	43.41	6.40	-6.02
No. 4	0.721	0.583	0.860	0.985	-19.14	38.43	17.29	-19.14	47.53	14.49
No. 5	0.300	0.671	0.943	1.063	123.61	90.86	39.87	123.61	40.63	12.68
No. 6	1.487	1.897	2.419	2.500	27.63	35.07	5.47	27.63	27.48	3.36
No. 7	0.854	1.581	2.385	2.371	85.06	94.13	-1.72	85.06	50.86	-0.62
No. 8-a	0.922	0.985	1.265	1.265	6.83	30.37	0.00	6.83	28.43	0.00
No. 8-b	2.102	3.373	4.998	4.870	60.46	77.27	-6.07	60.46	48.16	-2.55
No. 9	3.189	3.312	4.357	4.885	3.86	32.75	16.56	3.86	31.54	12.12
No. 10	0.860	1.204	3.053	3.493	39.98	214.91	51.15	39.98	153.53	14.41
No. 11-a	0.640	1.063	1.389	1.342	66.01	50.95	-7.43	66.01	30.69	-3.43
No. 11-b	0.762	2.332	3.520	3.640	206.26	155.94	15.76	206.26	50.92	3.41
No. 11-c	2.263	0.539	0.300	0.361	-76.20	-10.54	2.68	-76.20	-44.29	20.19
No. 11-d	3.256	2.970	2.973	3.114	-8.78	0.10	4.34	-8.78	0.11	4.75
No. 12	0.500	0.500	1.628	1.726	0.00	225.58	19.68	0.00	225.58	6.04
No. 13	0.671	0.762	1.204	1.217	13.53	65.98	1.85	13.53	58.11	1.03

+: Tension (distance separation), -: Compression (distance reduction).

Shading: strain with possibility of cracking (over 2.00%).

Table 2 Strain in Objective Parts (drainage asphalt mixture)

Pass	Change of length [Δd mm]				Strain from 0 passes [%]			Strain from last stage [%]		
	0	600	1900	2500	600	1900	2500	0 to 600	600 to 1900	1900 to 2500
No. 1-a	0.583	1.217	1.924	2.002	108.64	121.25	13.54	108.64	58.11	4.10
No. 1-b	0.860	1.803	2.012	1.836	109.57	24.38	-20.54	109.57	11.63	-8.78
No. 2	0.583	0.860	1.140	0.922	47.53	48.01	-37.42	47.53	32.54	-19.14
No. 3	0.283	0.500	1.005	1.200	76.78	178.54	68.95	76.78	101.00	19.40
No. 4	0.447	3.046	2.102	1.972	581.18	-211.07	-29.08	581.18	-30.99	-6.19
No. 5	0.600	1.603	1.900	2.000	167.19	49.48	16.67	167.19	18.52	5.26
No. 6	0.400	0.566	0.640	0.671	41.42	18.66	7.63	41.42	13.19	4.76
No. 7	0.100	0.632	1.655	1.616	532.46	1022.84	-39.75	532.46	161.73	-2.40
No. 8-a	3.138	3.677	4.238	4.624	17.16	17.87	12.30	17.16	15.26	9.11
No. 8-b	3.401	4.188	4.525	4.892	23.13	9.92	10.77	23.13	8.06	8.10
No. 9	0.361	0.640	0.849	0.781	77.59	57.75	-18.72	77.59	32.52	-7.96

+: Tension (distance separation), -: Compression (distance reduction).

Shading: strain with possibility of cracking (over 2.00%).

考えられる。よって、上部では初中期にひび割れや表面のはく離などの損傷を受ける可能性がある。中央部の No. 4 でも、長さの変化は小さいが対象部が上下へと広がっている (case 1)。これも、側方への流動の影響によると考えられる。下部の No. 3, 13 では、回転角度の違いはあるが下の骨材の動きに対して上の骨材の動きが大きい。下部においても骨材の動きは側方への流動が主であるが、下の骨材は底面が拘束されているため動きにくく、上の骨材が流動により側方へ動くため、結果としてずれる (case 2) と考えられる。

以上より、タイヤ側方の対象骨材 (No. 1, 2, 3, 4, 12, 13) は何れも上下に並んでおり、双方の動きは走行荷重による流動の動きと直角方向 (上下) に広がる傾向が明らかとなった。

タイヤ載荷部内 (Fig. 7, Part 2) に現れている No. 5~9 では走行荷重直下であることから圧密が卓越しているため下方向への動きが大きく、タイヤ側方の骨材の回転と比較して大きい。この原因は、走行荷重の直接の影響による密度の増加、ニーディング効果による内部の骨材およびアスファルトモルタルの動きが大きいためと考えられる。この部分での動きは圧密が卓越しているが側方への流動が放射状に生じている部分である。これにより、タイヤ中心線上にある No. 7 では骨材の回転は大きい対象部は左右へと広がり (case 1), No. 6, 8-a, 8-b, 9 のように少し離れると、骨材が互いにずれる (case 2) と考えられる。また No. 5 では、タイヤ側方の下部での動きと同様に上の骨材は流動により側方へと動いているが、下の骨材が

Table 3 Example of Aggregate Movement
Dense graded asphalt mixture (13F)

Pass	0 to 600	600 to 1900	1900 to 2500
No. 1	3-3	1	1
No. 2	1, 3-3	1	1, 3-1
No. 3	1, 3-2	2	—
No. 4	3-1	1	1
No. 5	1, 3-3	1, 3-3	1, 3-2
No. 6	2, 3-2	2, 3-2	—
No. 7	1, 3-3	1, 3-3	1, 3-3
No. 8-a	2, 3-2	2	—
No. 8-b	1, 2, 3-3	1, 2, 3-2	1
No. 9	2	3-2	—
No. 10	1, 3-2	2, 3-1	—
No. 11-a	1, 3-3	2	—
No. 11-b	1, 3-3	1	—
No. 11-c	2, 3-2	2, 3-3	—
No. 11-d	2, 3-3	1, 3-2	3-3
No. 12	1	3-3	—
No. 13	2, 3-3	2	3-1

Drainage asphalt mixture

Pass	0 to 600	600 to 1900	1900 to 2500
No.1-a	1, 3-3	2	2
No.1-b	2, 3-2	2	2
No.2	1, 3-2	1, 3-2	—
No.3	2, 3-3	2, 3-2	2, 3-3
No.4	2, 3-3	2, 3-2	2, 3-2
No.5	1, 3-3	1, 3-3	1
No.6	1	1	1
No.7	1, 3-2	1, 3-2	3-2
No.8-a	1, 3-3	1	1
No.8-b	2, 3-3	2, 3-2	2
No.9	2	2	2

Example of cracking

- 1: Separation
- 2: Shift
- 3: Rotation
 - 3-1: One side rotation
 - 3-2: Both rotation (opposite directions)
 - 3-3: Both rotation (same directions)
- 4: Cracking (not observed)
- : Unclassifiable (no movement)

底面により拘束されているため相対的に上の骨材の動きが大きくなり、骨材が互いに離れる (case 1) と考えられる。

タイヤ載荷部内での対象骨材は、Fig. 7 に示した応力分布の線上に並んでいる特徴が見られた。この部分では、圧密が卓越するが側方への流動も同時に生じているため、その動きに対して直角方向 (応力分布の線上) に並んでいる骨材間にアスファルトモルタルが入り込み対象部が広がる部分であり、対象骨材となる配置の特徴であると考えられる。

また、タイヤ境界部 (Fig. 7, Part 3) に現れている No. 10 では右側の骨材を中心に載荷部に掛かっている骨材が回転するようにずれている (case 2)。これにより、密粒 13F はタイヤ接地部から放射状に流動が生じるが、この部分では深さ方向にわずかにせん断力が働いていると考えられる。

タイヤのすぐ脇 (Fig. 7, Part 4) に現れている No. 11 は、左の二つの骨材が沈下しているのに対し、右側の二つは隆起し

ながらずれている (case 2)。この部分では、他の対象骨材よりも初期における骨材の回転および動きが大きい。これは、走行荷重の影響を直接受けるため、車両走行の初期にひび割れや表面のはく離が発生する可能性がある。

(2) 排水性の対象骨材の動き

排水性でも大きな回転を伴い骨材が動いているが、その回転方向に特徴は見られなかった。しかし、初中期の回転は密粒 13F と比較すると大きい。また、対象部の距離の変化も大きい。これは、排水性の特徴である骨材のかみ合わせの変化が大きく影響を及ぼしていると考えられる。

タイヤ境界部 (Fig. 7, Part 5) では、上面に現れている No. 1-a のように骨材が互いに上下へと離れ (case 1), No. 1-b では対象部の距離は大きくなるが骨材が近づいた後にずれて (case 2) おり、異なる動きをしている。また、No. 7 ではタイヤの載荷部上にある左側の骨材の沈下が大きく、その後回転により対象部の距離が離れるように広がっている (case 1)。このことから、上面では載荷面の圧密により骨材の動きおよび回転が大きくき裂やひび割れの発生の原因となり易いと考えられる。

また、中央部付近の No. 8 でも上面と同様に、タイヤ載荷部に位置している左および中央の骨材の沈下が大きい。これに対し、右側に位置する骨材の沈下は相対的には小さい。よって、タイヤ境界部中央部での骨材は走行荷重下では圧密の影響により、沈下しながら広がる (case 1) が、境界部では骨材がずれる (case 2) と考えられる。よって、上面と合わせてタイヤ境界部では深さ方向にせん断力が働いていると考えられる。

タイヤ中心線上 (Fig. 7, Part 6) での骨材の動きは直接荷重を受けるため、対象骨材の相対的な沈下量はほぼ同様の傾向を示した。上中央部の No. 4, 5 では、大きな回転を伴いながら相対的にはほぼ同様の沈下量で下方向に動きながら左右へと骨材が離れている (case 1)。また、上部の骨材は初期での長さの変化が他の対象骨材と比較して非常に大きい。これは、走行荷重による圧密変形やかみ合わせの変化と同時にタイヤによる水平せん断力が働いているためと考えられる。下部の No. 6 では、骨材の回転は小さいが左右へと骨材が離れている (case 1)。これは、底面が拘束されているため、骨材の動きは沈下量も少なく、上中央部の骨材の影響によりかみ合わせの変化がわずかに生じる程度の動きとなるためと考えられる。よって、タイヤ中心線の深さ方向では骨材が水平方向に離れる動きが見られることから左右へと引張力が働いていると考えられる。

これにより、タイヤ接地面の表面付近に生じるひび割れや骨材の飛散のほか内部での骨材のはく離やひび割れによる破壊が生じる可能性がある。

(3) 両アスファルト混合物の対象骨材の動きに対する検討

両アスファルト混合物とも骨材の動きには回転が大きく関係していることが明らかとなった。しかし、両アスファルト混合物とも初中期の対象骨材の動きは大きい、後期になるとこの動きは小さくなる。また、両アスファルト混合物とも内部に対象骨材が存在し、走行荷重により局部的なせん断力や引張力が働いている部分がある可能性も明らかとなった。

ここで、両アスファルト混合物の対象骨材の分布を Fig. 7 に示した概略に当てはめると密粒 13F は Part 1, 3, 4, 排水性は Part 5, 6 に該当している。よって、アスファルト混合物の

走行荷重による損傷などの検討を行う場合、混合物断面全体ではなく、上記 Part に着目して変形状態やひび割れ発生の有無などの検討を行えばよいと考えられる。また、Part 2 での骨材の動きは、ニーディング効果により対象骨材間にアスファルトモルタルが入り込むことによる動きが大きく、他の部分と比較してひび割れなどの損傷へとつながる可能性は低いと考えられる。

3.2.3. ひび割れの発生と既往の研究結果との比較検討

アスファルト混合物のような粘弾性体では、同一温度で引張試験を行った場合、変形速度（ひずみ速度や載荷速度など）が強度や破壊時のひずみに大きな影響を与える。変形速度が速い場合には、弾性体に近い挙動を示し、見掛けの強度および弾性係数（スティフネス）は大きくなるが、破壊時のひずみは小さくなる。また、変形速度が遅い場合には粘性体に近い挙動を示し、見掛けの強度および弾性係数（スティフネス）は小さくなるが、破壊時のひずみは大きくなる。

ここでは、本実験条件下でアスファルト混合物内にひび割れが発生するひずみ値を推定し、Tables 1, 2 に示した対象骨材間に生じた局所的な引張りひずみがこの推定値を上回るかの検討を行う。そこで、著者らが行った直接引張試験結果および検討に必要と思われる既往の研究結果を以下に示す。

(1) WT 試験に使用した両アスファルト混合物の直接引張試験結果における実験温度と破壊時のひずみの関係

直接引張試験では、供試体の形状は一辺 40 mm × 長さ 240 mm の棒状供試体とし、ひずみ速度は $1.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とした。実験温度は、密粒 13F では $-50 \sim +20^\circ\text{C}$ で 10°C 刻み、排水性では $-40 \sim +50^\circ\text{C}$ で 10°C 刻みとした。密粒 13F の破壊時のひずみは 20°C で約 2.00% であった。ここで、実験温度の上限を 20°C としたのは、ストレートアスファルトを使用したアスファルト混合物による直接引張試験は 20°C 程度までは行えるが、それ以上になると実験が困難になるためである。排水性の破壊時のひずみは 10°C 以上で約 2.00% に収束する結果となった。

(2) 実験温度と破壊時のひずみの関係

アスファルト混合物の実験温度と破壊時のひずみの対数値の関係は、脆化点を変曲点とする S 字の曲線となり、脆化点より高温側、特に 20°C 以上になるとほぼ一定の値に収束する傾向を示す²⁾。また、石川ら⁸⁾は高粘度改質アスファルトおよび改質アスファルト II 型により作製した排水性アスファルト混合物の直接引張試験（ひずみ速度: $3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）より得られた破壊時のひずみは 10°C 以上で、アスファルトバインダーの種類および転圧温度（ 120°C 、 135°C 、 150°C ）に関わらず約 0.80% の一定の値に収束することを明らかにしている。

(3) ひずみ速度と破壊時のひずみの関係

細粒度ギャップアスファルト混合物の直接引張試験（実験温度: $-30 \sim +20^\circ\text{C}$ ）の場合、ひずみ速度が 10 倍速くなると（ひずみ速度: 10^{-3} s^{-1} および 10^{-2} s^{-1} ）、実験温度と破壊時のひずみの対数値の関係は曲線の形状は変わらずに 3°C 程度高温側にシフトする⁹⁾。また、この関係は、ひずみが対数値であるため、破壊時のひずみへの影響は脆化点（変曲点）付近が最も大きい。実験結果によると、脆化点（ 0°C ）での破壊時のひずみはひずみ速度が 10^{-3} s^{-1} の結果を 100% とすると、ひずみ速度が 10^{-2} s^{-1} の結果は約 30% となっている。また、その他の温度領域に

においてもひずみ速度が 10^{-3} s^{-1} の結果に対してひずみ速度が 10^{-2} s^{-1} の結果は約 50~80% となっている。これにより、10 倍程度のひずみ速度の変化でも、直接引張試験時のひずみ速度は破壊時のひずみに大きく影響を与えることが分かる。また、曲げ試験（ひずみ速度: $3.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、 $3.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $3.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ および $4.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ）でも同様に、ひずみ速度が高速になるに従い、実験温度と破壊時のひずみの関係の曲線の形状は変わらずに 5°C 程度ずつ高温側にシフトする¹⁰⁾。

(4) WT 試験時のアスファルト混合物が受けるひずみ速度

鋼床版舗装用のアスファルト混合物の載荷速度とひずみ速度の関係は、車両が 6 km/h で走行した場合のひずみ速度は 10^{-3} s^{-1} 、60 km/h で走行した場合のひずみ速度は 10^{-2} s^{-1} とされている¹¹⁾。これを基に本実験で行った WT 試験の載荷速度の計算を行うと 9.4 km/h となり、ひずみ速度は $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ として得られる。このひずみ速度は、著者らが行った直接引張試験の 9.41 倍となる。

(1)~(3) より、アスファルトバインダーまたはアスファルト混合物の種類により破壊時のひずみは異なる数値となるが、何れの場合にも 20°C 程度より高温になると一定の値に収束すると考えられる。また、ひずみ速度が変化した場合も、実験温度と破壊時のひずみの関係が温度軸に沿ってシフトする温度は異なるが、(4) で示したように WT 試験と直接引張試験のひずみ速度程度の差では、WT 試験の実験温度である 45°C ではひずみ速度によるシフト量の影響を受けないと考えられる。

以上より、WT 試験の破壊時の引張りひずみを両アスファルト混合物ともに 2.00% と想定すると、本実験解析果より得られた対象部に生じている局所的な引張りひずみ（Tables 1, 2 の網掛け部分参照）は 2.00% 以上のものが多数現れていることから、高温時の車両走行においてアスファルト混合物の表面および内部にひび割れが発生し破壊に至る可能性があると考えられる。

4. 結 言

本研究から明らかになった対象骨材の特徴を以下にまとめる。

- (1) 大きなひずみの分布範囲は、密粒 13F ではタイヤの両端より 50~60 mm 程度、排水性ではタイヤ両端付近にある。
- (2) 密粒 13F ではタイヤ側方部の隆起部分の表面より深さ 10 mm 程度、およびタイヤ境界部分、タイヤ直下の深さ方向に大きなひずみを生じる部分が見られた。
- (3) 排水性ではタイヤ境界部分、タイヤ中央部分の深さ方向に大きなひずみを生じる部分が見られた。
- (4) 排水性のタイヤ境界部分での骨材は相対的に大きな回転を伴っている。

以上のことから、アスファルト混合物のわだち掘れによる変形には、圧密および流動のみではなく、局所的な引張あるいはせん断力が表面および内部に働いており、走行回数の増加（時間の経過）とともに、これらの部分がひび割れとなり次第に進展する可能性があると考えられる。また、WT 試験より得られた表面の変形-時間曲線は一般的な形状を示していることから、通常のアスファルト舗装においてもわだち掘れが小さく、表面にひび割れが発生していなくても、内部で破壊が生じている可

能性があり、これが突然舗装の表面にひび割れとして現れることも考えられる。

References

- 1) Harada, H., Proceedings of the 31st Petroleum-Petrochemical Symposium of Jpn. Petrol. Inst., Hakodate, 2001, F12, p. 317.
- 2) Yoshida, T., Moriyoshi, A., Takano, S., *Sekiyu Gakkaishi (J. Jpn. Petrol. Inst.)*, **44**, (5), 312 (2001).
- 3) Himeno, K., Watanabe, T., Maruyama, T., Proceedings of the Jpn. Soc. of Civil Engineers, **378**, 259 (1987).
- 4) Watabe, T., Oono, T., Fujisawa, S., Marugi, M., "Annual Report Vol. 49, Kajima Corp.," (2001), p. 85.
- 5) Kondo, T., Moriyoshi, A., Yoshida, T., Takahashi, S., *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **46**, (3), 172 (2003).
- 6) Kouno, I., Yagi, N., Yoshikuni, H., "Tsuchi no Rikigaku," Gihoudou Shuppan, Tokyo (1990), p. 85.
河野伊一郎, 八木則男, 吉国 洋, "土の力学," 技報堂出版, 東京 (1990), p. 85.
- 7) Murai, S., Fukuda, T., Proceedings of the Jpn. Soc. of Civil Engineers, **315**, 115 (1981).
- 8) Ishikawa, H., Moriyoshi, A., Proceedings of the 31st Petroleum-Petrochemical Symposium of Jpn. Petrol. Inst., Hakodate, 2001, F02, p. 304.
- 9) Mikami, S., Graduation Thesis, Tensile Quality at Asphalt Mixture, Tomakomai National College of Technology, Tomakomai, Japan, 1998.
- 10) Moriyoshi, A., Kamijima, T., Sugawara, T., Proceedings of the Jpn. Soc. of Civil Engineers, **210**, 57 (1973).
- 11) Sumi, K., *Asphalt*, **38**, 29 (1996).

.....

要 旨

高温時のホイールトラッキング試験によりアスファルト混合物内部に発生するひび割れ

近藤 崇^{†1)}, 森吉 昭博^{†2)}, 吉田 隆輝, 高橋 正一

^{†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（密粒 13F）および排水性アスファルト混合物（排水性）を用いたホイールトラッキング試験を高温で行い、荷重直角方向の骨材の動きから走行回数の増加とともに距離の離れる骨材に着目し、内部ひび割れの発生に対する検討を行った。

試験（約 1 時間, 2500 pass）中の 0 pass, 600 pass, 1900 pass, 2500 pass 時の骨材の動きを解析した結果より、密粒 13F ではタイヤ両端より 50～60 mm 程度外側に、排水性ではタイ

ヤ両端部で動きの大きい骨材が表面だけでなく内部にも見られた。解析結果から得られた局所的なひずみは、既往の直接引張試験におけるアスファルト混合物の破壊時のひずみの最大値を大きく上回っていた。この結果、これまで考えられていなかった高温時における車両走行でも内部にひび割れが発生し、時間の経過とともに表面にひび割れが現れる可能性があることを明らかにした。

.....