

拘束圧下におけるアスファルト混合物の 変形特性に関する基礎的研究

田口 仁¹ ・ 大川秀雄²

¹正会員 工博 福田道路(株)技術研究所(〒959-0415 新潟県西蒲原郡西川町大湯中之島 2031)

²正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町 8050)

アスファルト舗装のタイヤ接地箇所近傍の要素は、交通荷重により拘束圧が生じていると考えられる。拘束圧を変化させて、高温側でも体積変化とともに強度定数や応力～ひずみ曲線を求めることのできる三軸圧縮試験機を用いてアスファルト混合物の力学特性を評価した。排水性混合物は密粒度アスコンに比較して、体積ひずみの挙動にひずみ速度や温度の影響が少なく、同一側圧、同一温度であれば、密粒度タイプの混合物よりせん断変形時に体積が膨張しやすい混合物であることが分かった。これらの結果から、タイヤ接地箇所近傍の要素において、排水性混合物の方が密粒度アスコンより強い拘束圧状態になる、あるいは交通荷重を水平方向に広範囲に分散させやすい混合物であると考えられる。

Key Words : asphalt mixtures, rutting, triaxial test, confining pressure, strain rate, bulk modulus

1. はじめに

アスファルト混合物の変形係数あるいは弾性係数を求めるために、室内では繰返し間接引張り試験や一軸圧縮試験、実道では非破壊試験としてフォーリング・ウェイト・デフレクトメータ(Falling Weight Deflectometer, FWD)試験など種々の試験が実施されている。高温時のアスファルト混合物の強度定数としては、マーシャル安定度試験による破壊強度と、ホイールトラッキング試験による動的安定度(Dynamic Stability, DS)が主に測定されている。

実道でわだち掘れの生じにくい排水性混合物¹⁾のマーシャル安定度が密粒度アスコンに比べて半分以下と小さい値を示すので、マーシャル安定度試験は排水性混合物には適さない試験である、あるいは実道における舗装体の変形挙動との関係が不明瞭な試験であると言われることがある。

またホイールトラッキング試験では、排水性混合物の動的安定度が密粒度アスコンの10倍程度と非常に大きな流動抵抗性を示すが、実道におけるわだち掘れ量には、動的安定度ほどの差は両者にみられない。

筆者らは、限られた路線の調査結果ではあるが、実道のアスファルト舗装のわだち掘れは、塑性変形した体積の10%程度しか側方へ流動せず、圧密に

よる体積変化の影響を大きく受けている現象であることを指摘²⁾している。このような交通荷重下におけるアスファルト舗装の変形挙動を考えると、アスファルト混合物の変形特性を、体積の変化に着目して評価することが重要であると考えられる。通常実施されているマーシャル安定度試験や繰返し間接引張り試験、および一軸圧縮試験では、供試体の拘束状態や体積変化を強く意識していない。

供試体を拘束しない、あるいは非常に強く拘束した状態の試験では、実道における交通荷重下とは異なる状態でアスファルト混合物の変形特性を評価してしまう可能性がある。そこで本研究では、拘束圧を変化させて高温側でも舗装体の体積変化特性とともに強度定数や応力～ひずみ関係を求めることのできる三軸圧縮試験機を用いて、配合の異なるアスファルト混合物の変形特性を比較・検討した。

拘束圧を考慮した既往の研究^{3) 4)}では、側圧を294kPa程度に設定してアスファルト混合物の変形特性を評価している。この側圧は実道の交通荷重下における拘束圧を模しているようであるが、算出方法は明示されていない。本研究では側圧の最大値を一部294kPaとしているものの試験の都合上、おおむね196kPaとしている。

さらにひずみ速度に着目した試験を実施している。これは、竹下⁵⁾が既往の文献⁶⁾を引用して、変形係

表-1 骨材配合割合

	骨材配合割合 (%)				
	6号	7号	粗砂	細砂	石粉
密粒度アスコン(13)	38	23	28	6	5
排水性混合物	80	0	15	0	5

表-2 混合物性状

	As量	密度	空隙率	安定度	DS
	%	g/cm ³	%	kN	回/mm
密粒13 ス7A	4.8	2.352	5.8	9.61	1400
密粒13 ス7A	5.8	2.376	3.4	11.28	700
密粒13 ス7A	6.8	2.373	2.1	8.92	300
密粒13 高粘度	5.8	2.368	3.6	12.75	7500
排水性	5.3	2.028	18.0	5.79	6500

数のひずみ速度の影響について、i) 碎石や砂利/砂混合物などで粘土質をほとんど含まない粒状材料の変形係数は載荷速度の変化には余り影響を受けない ii) 粘性土の場合には載荷速度の大小により変形係数はある程度変化する、と述べていることを参考に実施したものである。つまり、ひずみ速度を変化させて求めたピーク強度の強度比を用いて、粒度形態の異なる密粒度アスコンと排水性混合物を、粘性土と砂質土との関係に対比させて評価しようとしたのである。

密粒度アスコンは連続粒度で粗骨材とアスファルトモルタルが適度に混在している、空隙の少ない緻密な構造であるのに対して、排水性混合物は粗骨材が多量に配合されて粗骨材同士が直接かみ合う、空隙率20%以上の空隙の多い構造となっている。

本研究では、拘束圧やひずみ速度を変化させて、排水性混合物と密粒度アスコンの違いや、密粒度アスコンにおけるアスファルト量の違いについて、実道に則した変形特性の評価の可能性について検討した。

2. 実験方法

(1) 使用材料

実験に用いた混合物は、密粒度アスコン(13)と排水性混合物である。表-1 に使用混合物の配合、表-2 に標準的な試験項目における混合物性状値を示す。アスファルト量は、密粒度アスコン(13)では通常のマーシャル試験での共通範囲法によって求め、排水性混合物ではダレ試験によって求めた。密粒度アスコン(13)の最適アスファルト量は5.8%である。

(2) 供試体の作製方法

実験に用いた供試体はすべて直径10cm、高さ20cmの円柱供試体である。アスファルト混合物を用いた

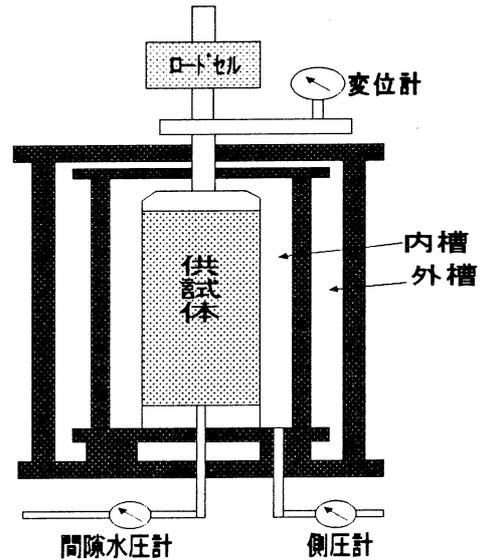


図-1 三軸圧縮試験装置の概要

三軸圧縮試験用供試体の作製方法に特に規定はないが、マーシャルランマを用いる打撃による方法と、一定荷重を上下面に載荷させ一定時間加压成形する方法⁷⁾がある。本実験ではより簡便なマーシャル突固め法とした。マーシャル突固めによる供試体作製は一軸圧縮試験用の割りモールドに三層に分けて材料を投入し、各層ごとにマーシャルランマを用いてマーシャル密度と同程度の値が得られるように締め固めた。上層を打ち継ぐ際、締め固まった下面を一度乱して、上下層間の連続性を高めるようにした。

三軸圧縮試験に用いた供試体の締め固め度はマーシャル密度の98~99%程度と、現場における締め固め度と同程度となっている。供試体上下面の平行度には供試体作製時に注意を払った。

(3) 試験装置

三軸圧縮試験装置は、一定温度下でひずみ制御と応力制御の実施できる最大荷重29kN(3tf)のものである。図-1 に三軸圧縮試験装置の概要を示す。

試験装置は、供試体を設置し側圧を作用させる三軸内槽(圧力室)と、試験温度をその外側から循環水で制御する外槽の二重構造からなっている。内槽には温度制御精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の加熱ヒータが設置されている。外槽は温度範囲 $-20\sim +70^{\circ}\text{C}$ の循環式コントロールユニットと連結されている。

ひずみ制御の場合、実施可能な載荷速度は0.1~100mm/minである。軸方向変位は、油圧部に固定された $\pm 10\text{mm}$ のLVDTと、載荷ピストン部に設置され取り外し可能なLVDT($\pm 1\text{mm}$ と $\pm 10\text{mm}$)の2箇所測定される。側圧、間隙水圧、体積変化は圧力センサを用いて計測され、電気的に制御されている。

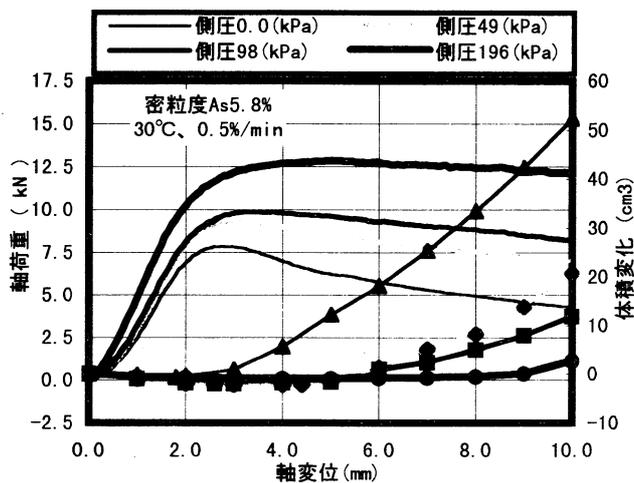


図-2 三軸圧縮試験の測定例

(4) 試験条件

三軸圧縮試験は、試験温度、側圧、ひずみ速度を以下に示すように変化させて実施した。

- ①試験温度：30, 40, 50, 60 °C
- ②側圧：0, 49kPa, 98kPa, 196kPa, 294kPa
- ③ひずみ速度：0.05 %/min, 0.5%/min, 5%/min

ちなみに舗装用材料に対して実施されている主な力学試験のひずみ速度は、CBR試験で0.8%/min(载荷速度1mm/min, 供試体の高さ12.5cm), マーシャル安定度試験で50%/min(载荷速度50mm/min, 供試体の高さ10cm)である。

3. 三軸圧縮試験結果

(1) 測定される物理量

三軸圧縮試験では、円柱形の軸対称供試体を用いるため、せん断時の測定項目は、側圧が一定に制御されているものとして、①軸荷重(軸方向偏差応力, 主応力差： $\sigma_1 - \sigma_3$)、②軸変位量(軸ひずみ)、③体積変化量(体積ひずみ)があげられる。このデータから応力～軸ひずみ曲線、体積ひずみ～軸ひずみ曲線を描き、温度や側圧の影響を配合ごとに比較することができる。

図-2 に測定例として、密粒度アスコン(13) As=5.8%を用い、ひずみ速度0.5%/min, 試験温度30°Cの場合の軸荷重・体積変化～軸変位曲線を示す。

(2) 軸ひずみの挙動

a) ピーク荷重時の軸ひずみ

図-3 に、ピーク荷重時の軸ひずみと側圧の関係を示す。両混合物とも、側圧が高くなるほどピーク荷重時の軸ひずみは増加する傾向を示している。そ

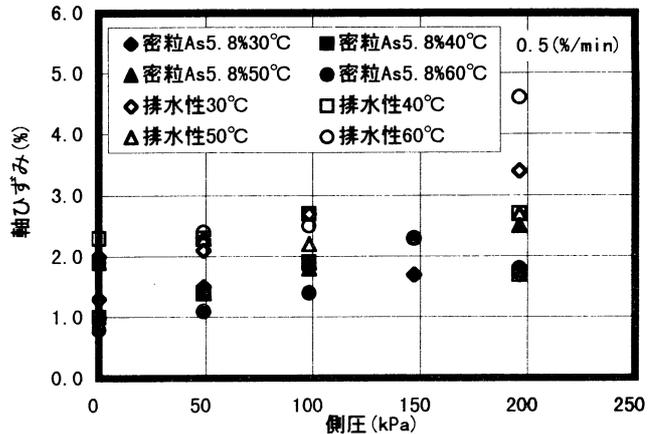


図-3 ピーク荷重時の軸ひずみと側圧の関係

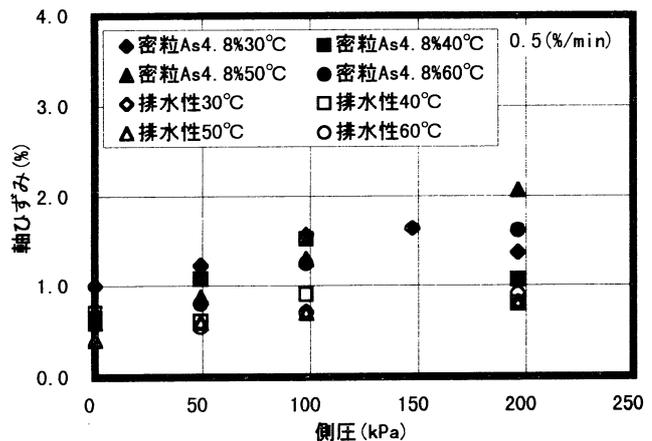


図-4 体積最小時の軸ひずみと側圧の関係

の増加割合は排水性混合物の方がやや大きい。またどの側圧でも、ピーク荷重時の軸ひずみは密粒度アスコン(13)より排水性混合物の方が大きい。側圧196kPaの場合で比較すると、排水性混合物のピーク荷重時の軸ひずみは密粒度アスコン(13)の2倍以上の値となっている。

b) 体積最小時の軸ひずみ

図-4 に、供試体が圧縮されて体積が最小になるとき(体積最小時, すなわち負のダイレイタンス最大時)の軸ひずみと側圧の関係を示す。供試体の体積が最小になることは、供試体の密度が最大になることである。

体積最小時の軸ひずみは、両混合物とも側圧が高くなるほど大きくなる傾向を示している。ただし排水性混合物の方が密粒度アスコン(13)より、体積最小時の軸ひずみが小さい。

c) ピーク荷重時と体積最小時の軸ひずみの関係

図-5～6 に、ピーク荷重時の軸ひずみと体積最小時の軸ひずみの関係を、温度40°Cと60°Cの場合について示す。図中に、軸ひずみの関係が1:1となる

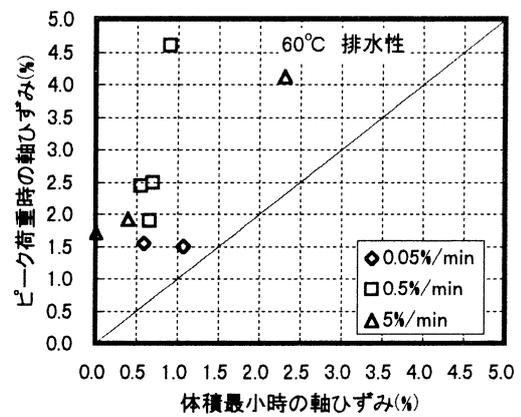
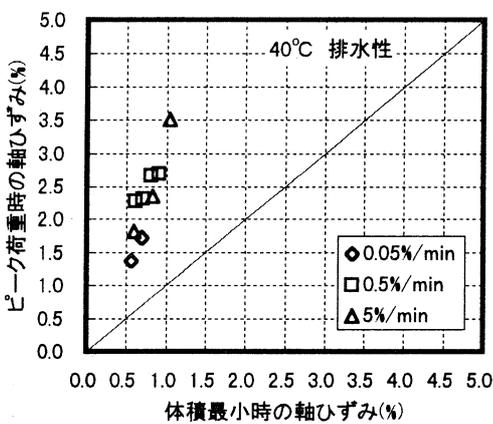
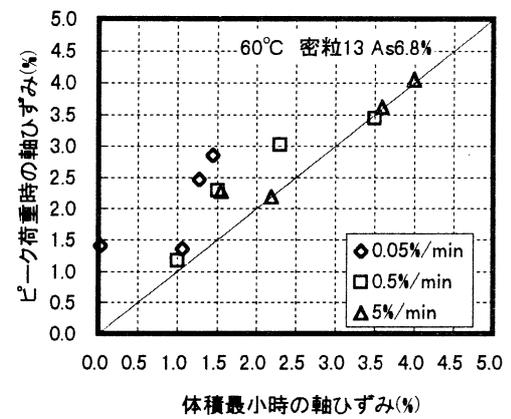
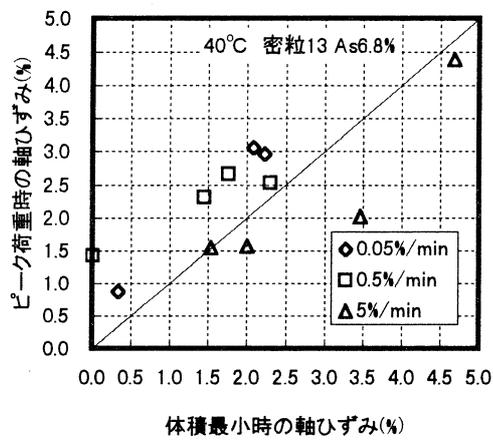
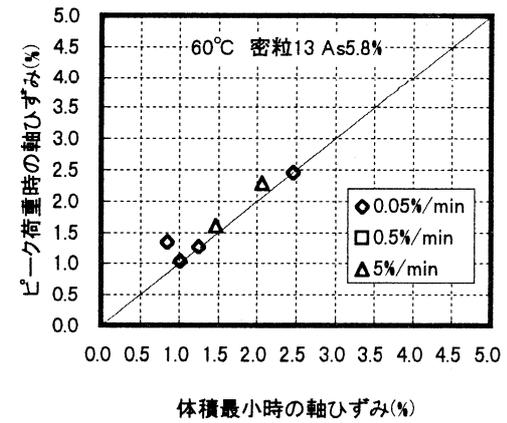
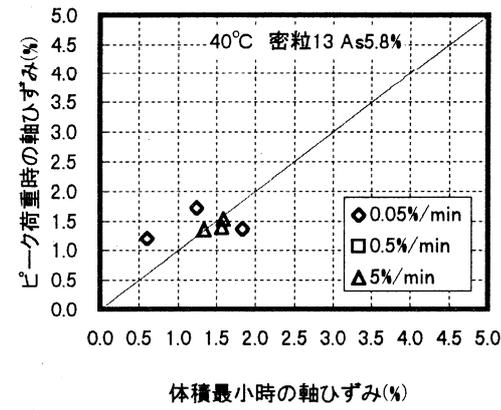
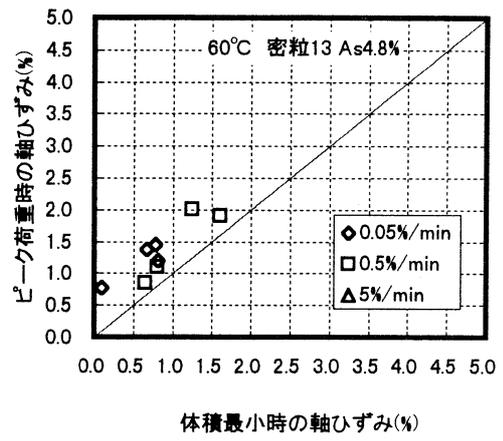
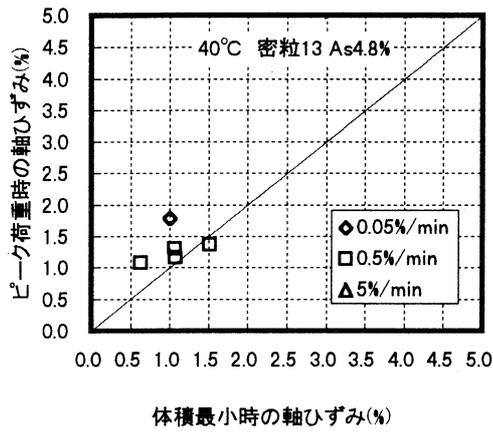


図-5 ピーク荷重時と体積最小時の軸ひずみの関係(40°C)

図-6 ピーク荷重時と体積最小時の軸ひずみの関係(60°C)

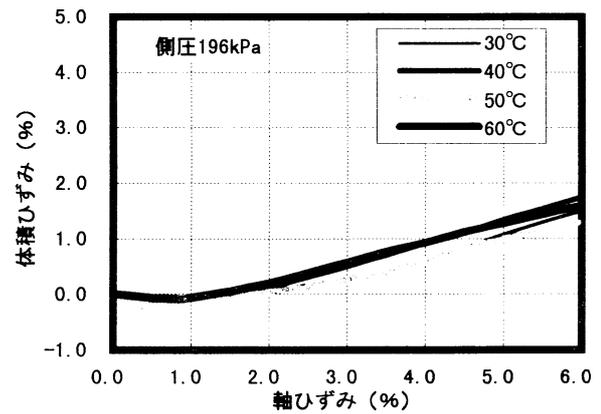
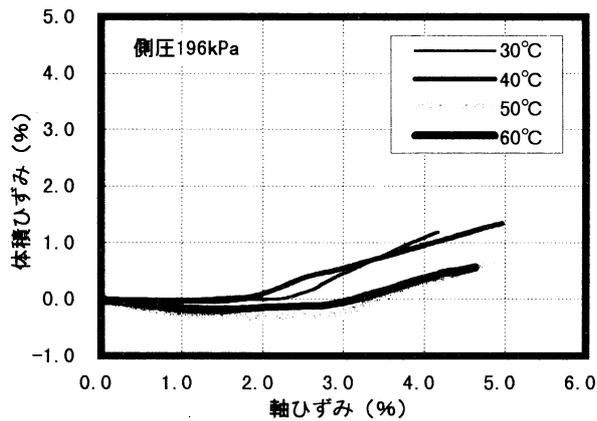
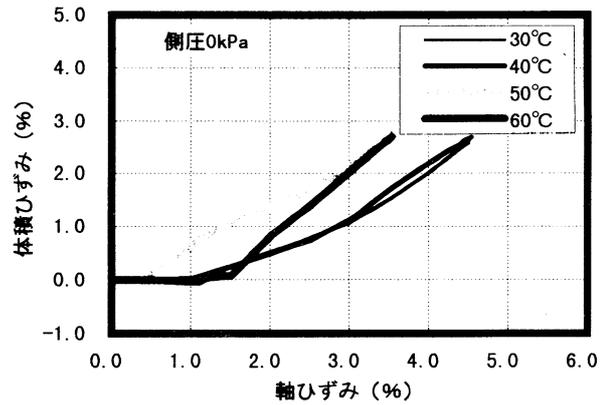
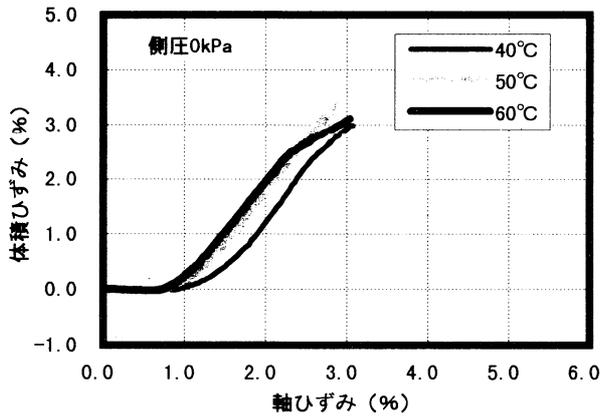


図-7 体積ひずみと軸ひずみの関係(密粒度アスコン(13))

図-8 体積ひずみと軸ひずみの関係(排水性混合物)

ラインを記入したが、どの試験条件でも測定値はほぼそのラインより上側にプロットされている。

このことは、供試体体積の収縮が最大となった後に荷重がピークになることを示している。しかし体積最小時の軸ひずみとピーク荷重の軸ひずみの位置関係が、密粒度アスコン(13)と排水性混合物では大きく異なっている。密粒度アスコン(13)では、1:1のライン付近にほぼプロットされているので、収縮体積が最大になった直後に荷重ピークを向かえる。一方排水性混合物では、収縮体積が最大となった後、軸ひずみがかなり大きくなった時点で荷重ピークを向かえている。

密粒度アスコン(13)においてアスファルト量の影響をみると、アスファルト量を増すほどピーク荷重時の軸ひずみ、体積最小時の軸ひずみとも大きくなっている。一方排水性混合物は、密粒度アスコン(13)に比較して体積最小時の軸ひずみが小さく、且つほとんどのプロットが0.5~1%の狭い範囲に収まっているので、温度やひずみ速度の影響を受けにくい混合物であるとみなせる。

密粒度アスコン(13)の同一粒度において、アスファルト量を多くすることは、アスファルト膜厚が厚くなり骨材間のかみ合わせを弱くしていると考えられる。また排水性混合物は、密粒度アスコン(13)に

比較して粗骨材同士が直に接しており、骨材のかみ合わせが強いと考えられる。このことは、骨材のかみ合わせの効く状態にある混合物ほど体積最小時の軸ひずみが小さい、と結論できる可能性があることを示している。

(3) 体積変化特性

側圧 0 kPa, 196 kPa における体積ひずみと軸ひずみの関係を、図-7 に密粒度アスコン(13), 図-8 に排水性混合物について示す。ここで体積ひずみを、

$$\text{体積ひずみ}(\%) = \left\{ \frac{(\text{測定時の体積} - \text{初期体積})}{(\text{初期体積})} \right\} \times 100$$

と算出し、供試体の体積が収縮していることをマイナス、膨張していることをプラスで表示している。

体積ひずみは、軸ひずみの増加にともないマイナス(負のダイレイタンス)となり、ある軸ひずみで最小値を示す。さらに軸ひずみが大きくなると、体積ひずみはプラス(正のダイレイタンス)となり体積は膨張する。側圧が 0 kPa の場合、体積ひずみは小さな軸ひずみでプラスとなり、ほとんど収縮しない。側圧を作用させると、収縮体積が大きくなるとともに、体積収縮の生じる軸ひずみ領域が広がる。

密粒度アスコン(13)の場合、この傾向が明確にみられる。一方排水性混合物の場合でも同様な傾向を

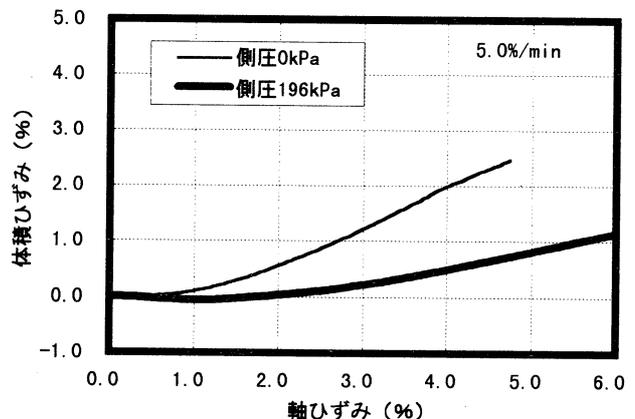
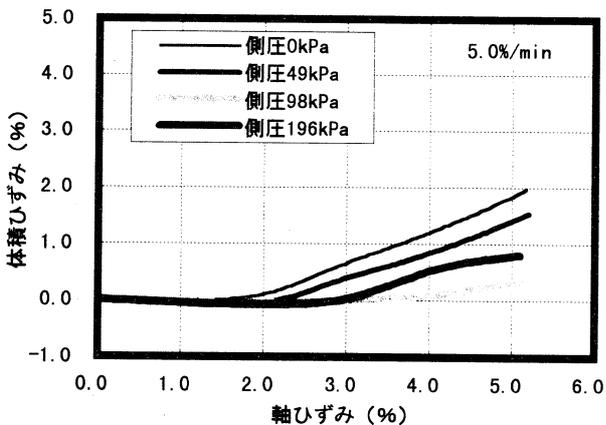
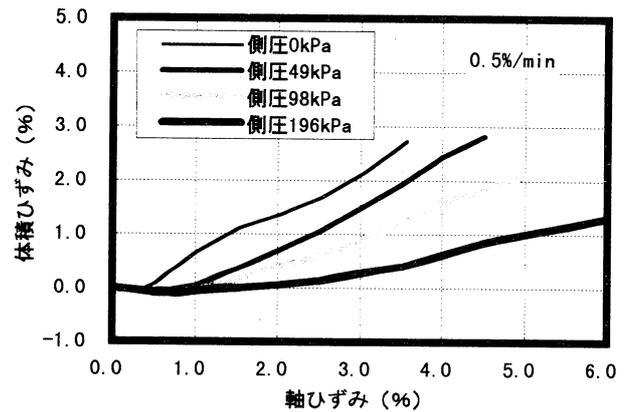
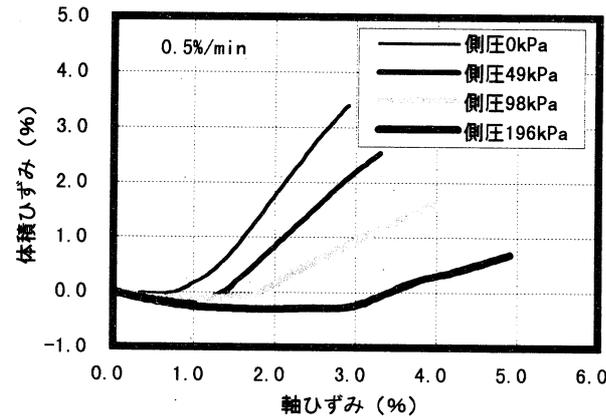
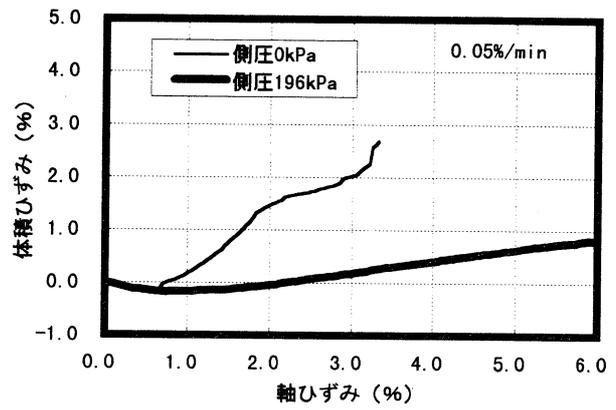
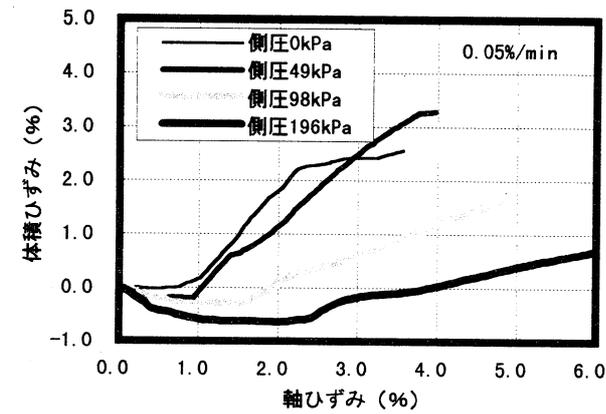


図-9 体積ひずみと軸ひずみの関係(密粒度アスコン(13))

図-10 体積ひずみと軸ひずみの関係(排水性混合物)

示すが、収縮体積は少なく、体積圧縮の生じる軸ひずみ領域が狭い。また排水性混合物の場合、体積ひずみが収縮から膨張に転じるときの軸ひずみが密粒度アスコン(13)の場合より小さい。試験温度 60℃においてその傾向が顕著にみられる。

試験温度 50℃で、側圧が 0 kPa, 49kPa, 98kPa, 196kPa と変化させた場合の体積ひずみと軸ひずみの関係について、密粒度アスコン(13)を図-9 に、排水性混合物を図-10 に示す。

両混合物とも側圧が高くなるほど、負の体積ひずみの最大値(最大体積収縮ひずみ)が大きくなるとともに、その値を示す軸ひずみが大きくなる。この傾向は密粒度アスコン(13)に顕著にみられる。排水性

混合物の場合、これらの変化量が密粒度アスコン(13)に比較し非常に小さく、小さな軸ひずみにおいて供試体の体積が膨張側に転じていることが分かる。

図-11 に、ピーク荷重時の体積ひずみと側圧の関係を 60℃の場合について示す。この時の体積の状態は、密粒度アスコン(13)では収縮した状態、排水性混合物では膨張した状態であることが分かる。

拘束圧が作用している場合、排水性混合物の体積変化特性を、密粒度アスコン(13)と比較して以下のように整理することができる。

- ①収縮側の体積ひずみが小さく、小さい軸ひずみで体積が膨張しやすい混合物である
- ②体積の収縮している軸ひずみ領域が狭い

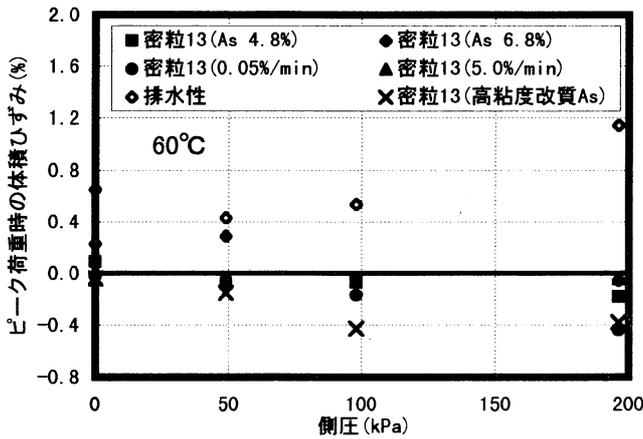


図-11 ピーク荷重時の体積ひずみと側圧の関係

③密粒度アスコン(13)では体積が収縮した状態で強度のピークが現れるのに対して、排水性混合物では体積が膨張した状態で現れる

④体積ひずみ挙動に対するひずみ速度の影響は小さい

体積ひずみは、排水性混合物の場合、低体積ひずみ領域以外では正のダイレイタンスー特性を持つ密詰め砂のような挙動⁸⁾を示しているが、密粒度アスコン(13)の場合、ゆる詰め砂あるいは粘性土にみられるような負のダイレイタンスー特性を示す。

排水性混合物はせん断変形時に体積が膨張しやすい混合物で、あたかも密詰め砂のような体積変化挙動を示すので、輪荷重の作用時に密粒度アスコン(13)より大きな拘束圧を生じている可能性がある。

このことは、排水性混合物を用いた方が、密粒度アスコンの場合よりタイヤ接地箇所近傍の舗装が強い拘束状態になっている、あるいは荷重を水平方向の広い範囲に分散させやすい状態になっていると考えられる。つまり排水性舗装の方がより変形しにくい状態を保ちやすい舗装であると解釈できる。

(4) 応力～ひずみ曲線

ひずみ速度を、0.05%/min、0.5%/min、5%/minの3条件変化させた主応力比 (σ_1/σ_3) ～軸ひずみ曲線を、図-12 に密粒度アスコン(13)、図-13 に排水性混合物の場合を示す。

密粒度アスコン(13)の場合、30°Cではひずみ速度の影響が明確にみられ、ひずみ速度が大きいくほど主応力比が大きくなっている。しかし60°Cと高温になると、ピーク荷重までの応力～ひずみ曲線にひずみ速度の影響が明確に現れなくなる。

排水性混合物の場合、密粒度アスコン(13)に比較して主応力比がかなり小さい。またひずみ速度による影響が少なく、ひずみ速度が変化してもほぼ同一な曲線となっている。

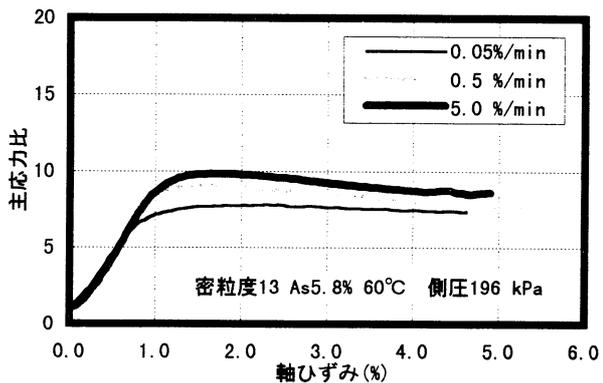
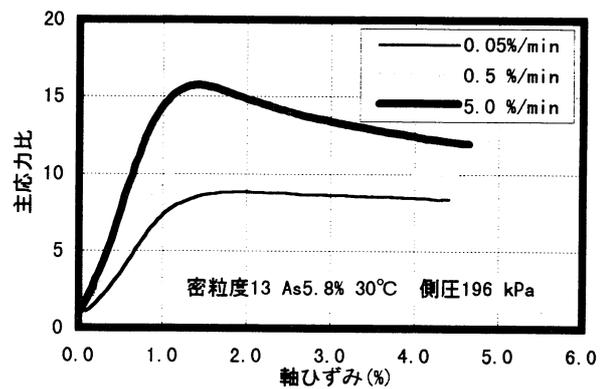


図-12 主応力比～軸ひずみ曲線(密粒度アスコン(13))

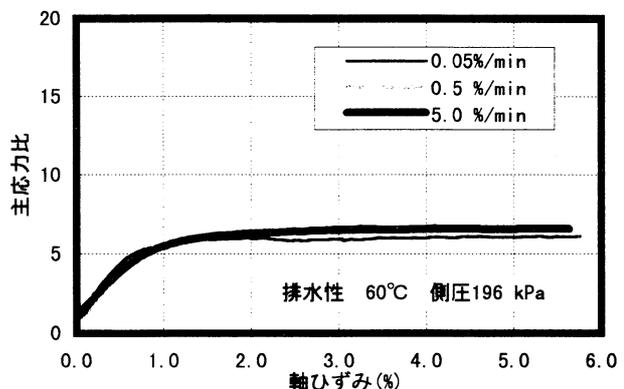


図-13 主応力比～軸ひずみ曲線(排水性混合物)

(5) 強度比とひずみ速度の関係

図-14 に、60°Cにおける強度比とひずみ速度の関係を側圧ごとに示す。強度比は、ひずみ速度0.5%/minのピーク荷重を基準として、各ひずみ速度における値との比として表したものである。

両混合物とも側圧0 kPaの場合、強度比はひずみ速度の影響を最も受け、ひずみ速度が大きくなるほど強度比の変化割合が大きくなっている。しかし側圧が98kPa、196kPa、294kPaと高くなるほどひずみ速度の影響が少なくなっている。また密粒度アスコン(13)に比べて排水性混合物の強度比はひずみ速度の影響の少ないことが分かる。

これらのことから密粒度アスコン(13)、排水性混

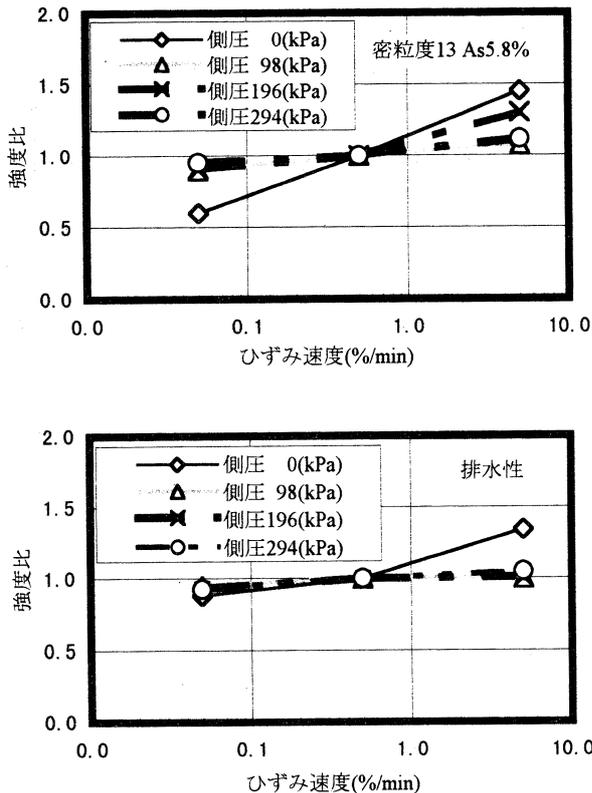


図-14 60°Cにおける強度比とひずみ速度の関係

合物とも、拘束圧のない状態では粘性的な挙動を示し、ひずみ速度の影響を大きく受ける。拘束圧を作用させると、ひずみ速度に対する強度増加率が小さくなり、粘着性のない砂のような挙動を示す。つまり拘束圧を作用させ高温側になると、塑性的な挙動が支配的となる。塑性的な挙動は密粒度アスコン(13)に比較して、排水性混合物の方により現れている。ただしここでは強度が時間に依存することを粘性的挙動、その逆を塑性的挙動と単純に表現している。

4. 結論

アスファルト舗装の変形特性、特に塑性流動によるわだち掘れのメカニズムを明らかにするには、舗装体の体積変化に着目して変形特性を評価することが重要である。

本研究では、拘束圧を変化させてアスファルト舗装体の体積変化とともに強度定数や変形特性を測定することのできる三軸圧縮試験を実施した。

以下に本研究で得られた拘束圧下でのアスファルト混合物の変形特性に関する知見をまとめる。

(1) 側圧を作用させると、排水性混合物はいっ

たん体積は収縮するが、さらに軸ひずみが大きくなって膨張した状態でピーク荷重となる。しかし密粒度アスコン(13)は体積が収縮した状態で、最大体積収縮ひずみとなった直後にピーク荷重が現れる。

(2) 拘束圧が作用している場合の体積ひずみ挙動において、密粒度アスコン(13)より排水性混合物の方が収縮体積が少なく、体積の収縮している軸ひずみ領域が狭い。

(3) 密粒度アスコン(13)では、体積ひずみの挙動にひずみ速度の影響が明確にみられ、側圧を作用させると体積が収縮している軸ひずみ領域が広がる。排水性混合物の方が体積ひずみ挙動にひずみ速度による影響が少ない。

(4) 密粒度アスコン(13)と排水性混合物では体積変化の挙動が大きく異なり、同一側圧、同一温度であれば、排水性混合物は密粒度アスコン(13)よりダイレイタンスーが大きな混合物である。

(5) 破壊しない程度の同一荷重が载荷された場合、排水性混合物の方が密粒度アスコン(13)より横方向に膨張しようとする作用が働きやすく、その反力として拘束圧が大きくなる可能性がある。

5. あとがき

既往の研究⁹⁾で報告されているように、三軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線を用いて、単純にアスファルト混合物の塑性流動抵抗性を評価することはできない。しかし三軸圧縮試験から体積変化特性に関する情報を得ることができる。一方繰返し三軸圧縮試験からでは最大体積収縮ひずみのデータを得ることはできない。体積変化挙動を比較することで、骨材のかみ合わせの違いや拘束状態の推定につながる情報が得られるので、三軸圧縮試験も変形特性を評価する有用な試験方法となるはずである。

アスファルト混合物のわだち掘れ量そのものを比較するには、実道の交通荷重の载荷状態に類似している繰返し三軸圧縮試験における塑性ひずみを用いることが好ましいと考えられる。ただし比較する塑性ひずみをどのような条件に設定すればよいのかは、三軸圧縮試験からの考察が必要となる。

実道での拘束状態がどのような状態であるかを求めつつ、拘束圧を作用させた状態でのアスファルト混合物の変形特性を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 川野敏行編：舗装技術の質疑応答，第7巻(下)，pp. 55-56, 1997.
- 2) 田口仁，大川秀雄：アスファルト混合物の流動特性に関する基礎的研究，第2回舗装工学講演会講演論文集，pp. 221-228, 1997.
- 3) SHRP-A-415 Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes Part II, pp. 148, 1994.
- 4) 藤井義之，河合哲，大前達彦，荻野正嗣：繰返し三軸圧縮試験下におけるアスファルト舗装の疲労破壊に関する一考察，土木学会第52回年次学術講演会，pp. 10-11, 1997.
- 5) 竹下春見：舗装厚指数(SN)について，道路，No. 297, 1965.
- 6) Skempton, A. W., Bishop, A. W. : Soils; Reiner, M. - Building Materials, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1954.
- 7) 荻野正嗣，川上正史，吉本彰：アスファルト三軸圧縮試験用供試体の成形法に関する実験，アスファルト，Vol. 17, No. 95, pp. 23-27, 1974.
- 8) (社)地盤工学会：N値および $c \cdot \phi$ - 考え方と利用法 - ，pp. 109, 1997.
- 9) 森道夫，太田健二：トラッキング試験によるアスファルト混合物の評価，アスファルト，Vol. 20, No. 110, pp. 8-17, 1977.

A FUNDAMENTAL STUDY ON DEFORMATION OF ASPHALT MIXTURE UNDER CONFINING PRESSURE

Hitoshi TAGUCHI, Hideo OHKAWA

The mechanical properties of asphalt mixtures are evaluated by triaxial test. The elements of the surface of pavement close to the tire-edge are affected with confining pressure due to wheel load. Therefore, triaxial test is applied for the evaluation, which can measure the strength constants and draw the stress-strain curve on various confining pressure at high temperatures. The failure strength of porous asphalt mixture is smaller than dense-graded asphalt mixture on which rutting normally tends to grow more than on porous asphalt concrete pavement. Thus, the rutting mechanism of different mixture types is not explained by triaxial tests under the same condition.

On the other hand, the volume-strains vs. axial-strain curves of the both types behave in different ways. In the case of a dense-graded asphalt mixture, the curve has its peak point on volume-compression condition. While the other, porous asphalt has the one on volume-expansion condition.