

# 骨材粒度に基づく加熱アスファルト混合物の 骨材間隙率推定法に関する研究

郡司保雄<sup>1</sup>・井上武美<sup>2</sup>・赤木寛一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 ニッポメックス株式会社代表 (〒331-0052 埼玉県大宮市三橋6-70)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本舗道株式会社技術研究所長 (〒001-0014 東京都品川区東品川3-32-34)

<sup>3</sup>正会員 工博 早稲田大学理工学部土木工学科教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 58-205)

中央高速道路府中舗装工事(調布IC～日野橋間, 延長11.4km)は本格的な高速道路建設時代に突入した昭和42年11月(1967年)に供用開始し, 20年以上にわたり修繕を行うことなく良好な路面を保持してきた。舗装の耐久性は最も重要な技術課題であり, 耐久性のある舗装が得られた要因を検討した結果, 表層混合物の配合にあると判断した。多量のアスファルト量にもかかわらず, 良好な耐久性が達成できたのは「容積配合設計」の考え方を導入したことによるものである。本研究は, アスファルト混合物の「骨材間隙率」を求めることができる「間隙率計算式」を提案し, 骨材粒度に基づく加熱アスファルト混合物の骨材間隙率を推定する計算式を実験的に調査したものである。

**Key Words:** *VMA, granular material, grain size, void ratio, compaction, pavement, bitumen, SHRP, SUPERPAVE, continuously graded aggregate, volumetric design, gyratory compactor.*

## 1. はじめに

加熱アスファルト混合物(以下, As混合物)の骨材間隙率(以下, VMA: voids in mineral aggregate)は, 最適なアスファルト量(以下, As量)を求める配合設計において重要な特性である。

鋼床版橋面舗装に適用されるグースAs混合物のAs量は, 骨材だけのVMA(18%以下)を実験より求め, VMA+(1~4)%の範囲のAs量で, 施工性と力学特性を満足するようにして求めてきた<sup>1)</sup>。

(現在は, 所要のVMAを満足する骨材粒度範囲と必要な特性を満足するAs量の範囲とから, 設計As量が求められるようになっている)<sup>2)</sup>。

As混合物の空隙率と飽和度は, VMAに占めるAs量(容積割合)によって決まる特性値で, その安定性と耐久性の観点から一定の範囲を定めている。しかし, 転圧を要すAs混合物のVMAは, 各種As混合物の種類を特徴づけている骨材粒度は勿論, As量および締固め方法とその程度などによって異なる特性値である。

このため, 最適As量を求めるマーシャル安定度試験(以下, M試験)において「アスファルト舗装要綱」<sup>3)</sup>(以下, As要綱)は供用時の交通量の程度

によるマーシャル突固め(以下, M突固め)回数の変更やVMAに対する考慮を記している。

VMAに対するAs要綱の推移をみると, 昭和36年版ではマーシャル基準値の全ての基準値を満足するAs量範囲が求まらない場合の対応として, 昭和42年版ではAs混合物の種類別にVMAの値の範囲を規定し, 骨材粒度を変えて十分なVMAを確保することとしている。昭和50年版ではVMAの値の範囲を削除したものの, VMAが過少となるとAs量の僅かな変動でマーシャル特性値の変動が大きくなるとの注意喚起をしている。昭和53年版ではこの記述も削除し, As量の設定例の図で積雪地域, 一般地域で交通量小, 多雨多湿地域などの耐久性重視の場合, VMA最小となるAs量より多いAs量とした。昭和63年版では, 昭和53年版に加え一般地域で大きなわだち掘れが予想される場合, VMA最小となるAs量より少ないAs量としている。平成4年版(現行)では昭和63年版に加え, 耐流動, 耐摩耗を考慮したAs量にはVMAの最小値を最大粒径別に規定している。このように, VMAを知ることが最適As量設定において重要な要件であることを示してきている。

上記の経緯は, As混合物の配合設計で骨材が現

場舗設や最終的に安定した状態となった時点のVMAがM突固めによる方法では求まらないための配慮であった。さらに、予想される適用条件下で、望ましい供用性を期待した場合の経験則が働いた結果の推移ともいえる。そして、使用する舗装機械のフィニッシャーとローラの敷均しと締固め能力の性能向上の変遷にも配慮した結果である。

このような締固めに関するM突固め方法の制約から舗設現場と交通荷重による締固めに類似し、現場供試体との性状の差異が少ない締固め方法としてジャイレトリーコンパクトが開発された<sup>4)</sup>。この検証はわが国の幕張試験舗装においても行われ、その有用性が確認されている<sup>5)</sup>。この開発機構を原型としたSHRPジャイレトリーコンパクト（以下、SGC）が制定され、SUPERPAVE(Superior Performing Asphalt Pavement)の容積配合設計方法(Volumetric Design)<sup>6)</sup>に導入されている。

本方法<sup>7), 8)</sup>ではAs混合物の最大粒径や骨材粒度の限定はあるものの、最大粒径ごとのVMAの最小値を規定していること、累積交通量ごとのSGCの回転数N、すなわち、規定した空隙率(Initial, Design, Maximum)を得るNを累積交通量別に定めている。各々のNでの締固め度は舗設現場のフィニッシャー通過後89%以下、ローラ転圧後96%以下、交通供用の設計期間後98%以下に相当させていて、VMAが締固め程度により変わることを考慮している。

また、累積交通量別のN<sub>design</sub>でのAs量を求める際、VMAで補正することとしている。これらはVMAの特性を考慮した合理的なAs量設定が重要であることを示している。

そして、As混合物のVMAに配慮した配合設計が有効な供用結果をもたらした実施例が中央高速道路府中舗装工事であった<sup>9), 10)</sup>と考えている。

本舗装工事は供用開始後、20年以上にわたり一度も修繕を要しなかった構造物として日本道路公団創立35周年記念行事(平成4年、1991年)で表彰された。土工部および高架部の舗装とも長期間供用したこと、そして同時期に施工された隣接工区が数回の修繕を実施したことを考慮してである。

本工事の施工当時(昭和42年、1967年)は、名神高速道路・東名高速道路から中央高速道路へと舗装が進展して行く過程で、表層混合物のAs量については既設の供用結果の判断が優先し、決定的な設定法はなく試行錯誤が繰り返されていた。すなわち、「As量が少な過ぎると耐久性に欠けクラック発生や飛散現象が生じやすい」、「As量が過多になると塑性変形としてのわだち掘れが起きやすい」ことであった。

それは、名神高速道路山科試験工区は供用開始後、早期にクラックが発生した。舗装総厚が薄かったことなどにも原因があるとされたが、表層混合物のAs量が少なかったとされた。この結果から本工事では、As量 6.5%以上とすることが基本方針となった<sup>11), 12)</sup>。

この時点のAs要綱ではM試験(昭和36年版適用)により、As量を決めるとしていた。しかし、本工事の表層混合物の配合設計試験を繰り返したが、As量を多くするという課題は解決できなかった。その結果、所定のAs量とするにはアスファルトが合成骨材の間隙のなかに過不足なく満たされ、残留空隙を残した状態とするため、合成骨材の間隙を大きくする必要があった(昭和42年版As要綱ではVMAを考慮している)。そこで、As混合物中のフィラービチュウメンを構成する必要最小量の細粒部分を確保し、それ以外の細粒分は徹底して排除した骨材配合とした。このようなVMAを重視した判断による対応とした結果が上記の長期供用に寄与したと考えている<sup>13), 14)</sup>。

この経験から、As混合物の骨材粒度から予めVMAを計算により求めることができれば、最適As量を設定することがより適確に求められると考えられる。

しかし、VMAを骨材粒度から計算により求める研究は既往の報告にはみられない。これは、As混合物の最適As量の設計で、VMAに配慮したフィラービチュウメン説が提示されているが、フィラービチュウメンがVMAを変化させることや、これが所要の特性を満足させるかに問題があつて、各種安定度試験による設計法が適用されてきたことによると考えられる<sup>15)</sup>。

本研究は、As混合物の骨材粒度をもとに、このVMAを計算で求める方法を提案し、その妥当性を実験的に検証したものである。

## 2. 単粒材混合の間隙比と代表粒径の定式化

ここで扱う単粒材の間隙率について、最上<sup>16)</sup>は多くの研究者による古くからの研究を纏めている。ここでは、粒状体を構成する粒子の粒径が一定な単粒材について「粒のつまり方(Packing)」として粒子間の間隙率と1粒子の接触点数の関係を考察し、最も緩い状態のSimple Cubic Packingから、最も密な状態のTetrahedral Packingを提示し各場合の間隙率を求めている。また、緩い状態よりも密な状態の方が粒子の接触点数が多くなるとしている。そして、通常の間隙率はこの両者とこの中間的状态とが混在する比率によるとしている。

粒径の異なる粒状体二種混合の間隙率については Powers<sup>17)</sup>によると古くから多くの研究者により検討がなされているとし、それら結果を纏めている。Furnas<sup>18)</sup>は、単粒材二種混合の間隙率の変化を二種の混合比率と粒径比の関係とし理想化したグラフで示している。ここでは、単粒材二種の粒径比が大きい場合の混合から密な混合物が得られると結論づけ、これを図-1のように示している。ここでは大なる粒径を分母とした粒径比とし、x 軸を粗粒率としている。また、Weymouth<sup>19)</sup>によると、粒状体二種混合の間隙率は細粒材と粗粒材のもつ固有の間隙率とそれらの混合比率（ここでは粗粒率）を変数とした比較的簡単な指数関数とした数式化に代表されている。しかし、連続粒度材としての間隙率の解析は明らかでないとしている。

このような研究を踏まえ、ここでは、まず最初に上記の最上<sup>19)</sup>によって示された方法と同様に単粒材の粒子を「完全な球形」とし、最も密な状態の配列になったと想定して間隙比を計算し、それを実験で確認した。

次に、粒径の異なる二種類の単粒材を混合したとき、その粒径と混合比率による間隙比の変化を実験的に求めて「間隙比計算実験式」を作成した。

実用材料はさまざまな粒径・形状・材質・表面性状をもっているため、これらを上記の実験式において係数化し、間隙比に与える影響として数値化できるように修正した。さらに、単粒材を三種混合とし、混合材の粒径の代表値（以下、代表粒径）の考え方を導入して定式化を行った。

なお、一定の間隙を有する粒状体を一定体積の容器に詰め、その間隙に水を満たしたとき、入った水の体積を詰めた粒状体の体積で除したものが「間隙比」であり、水と粒状体を合わせた全体積で除したものが「間隙率」である。両者は数値としては異なるが互いに換算できる特性である。

そこで、ここでは実験などで数値として扱う場合は「間隙率」を、数式として計算・展開する場合は「間隙比」として使い分けている。

### (1) 単粒材の間隙比

単粒材をある一定体積の容器に詰めたとき、その容器内の単粒材の容積と間隙の関係から間隙比が計算できる。仮に、その容器全体（内容物も含めて）を10倍に拡大したと仮定すると、容器内の単粒材の体積と間隙がともに10倍となり、それぞれの倍率が同一なので間隙比は変わらない。このことから間隙比は粒径の大小に関係なく理論的には一定であることが想定できる。

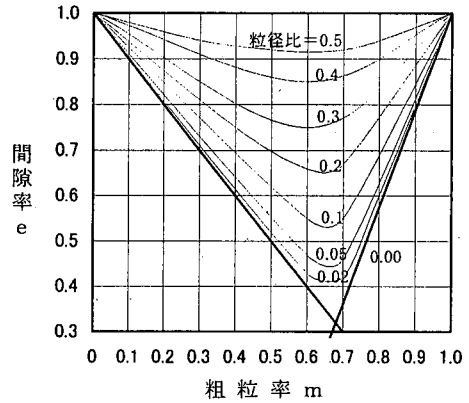


図-1 粗粒率と間隙率の関係 (Furnas<sup>18)</sup>)

表-1 実験試料の間隙比(球形のガラスビーズ)

粒径(mm)	0.6	1	3	7	12	平均
比重(G)	2.498	2.491	2.493	2.532	2.522	2.507
単重(γ)	1.535	1.570	1.579	1.579	1.525	1.558
間隙比(e)	0.627	0.587	0.579	0.604	0.654	0.609

単粒材の粒子を「完全な球形」とし、それが最も密な状態に配列 (Tetrahedral Packing) されると、間隙比は  $0.3505 (=3\sqrt{2}/\pi - 1)$  が得られ、この場合に単粒材として最小の間隙比となる。しかし、このような理想的な配列になることは現実にはありえないので、間隙比はこの計算値より大きくなる。これを実験で確認した。

実験は球形のガラスビーズ5種類 (0.6, 1, 3, 7, 12mm) を準備し、比重と単位体積重量 (単重) から固有の間隙比 (以下、固有間隙比) を求めた。単粒材の比重Gと単重γから間隙比 e ( $e = G/\gamma - 1$ ) を求め結果を表-1に示した。表より粒径の異なる実験試料の間隙比の平均は約0.6となり、粒径に関係なく最も密な状態より大きくなっている。

### (2) 単粒材二種混合の間隙比計算実験式

間隙比が明らかな二種類の単粒材を混合したときの間隙比は粒径比に関係する。この粒径比が非常に大きい場合を考え、次のように仮定した。

ここで、粒径比とは二種類の単粒材の粒径の比であって、細粒率および粗粒率とは、細粒材と粗粒材を加算した体積に対するそれぞれの体積比率としている。

a) 細粒材に粗粒材を加算混合していくと混合材の間隙比は細粒材の固有間隙比から減少し、その減少量は初期の段階では直線的である。

- b) 粗粒材をさらに加算混合すると、粗粒材が骨格構造 (Skeleton) を形成する点で間隙比が最小となる。この点を「Gap point」とここでは称す。
- c) 粗粒材の混合割合をさらに増加すると、間隙比は増加しながら粗粒材の固有間隙比となる。

この仮定を検証するとともに、粒径比を考慮した混合実験を行い「間隙比計算実験式」を作成した。実験は表-1に示す試料から表-2に示す8組の粒径比のものを混合組み合わせ、混合比率を変化させて合成比重と単重を測定し間隙比を求め結果を図-2に示した。なお、表-2および図-2の試料番号からみて、粒径比の変化 (粒径比の順序：⑦<④<⑧<①<⑤<②<⑥<③) に対応して、粒径比が大きい場合に上記仮定が正しいことが解る。

ここで、図-1および図-2を比較してみると、細粒率と粗粒率の変数を逆にし、粒径比を逆数として扱うと両者のグラフは幾何学的にほぼ類似していることが解る。これらはともに細粒率 (粗粒率) と粒径比が間隙率に与える重要な要因であることを示している。

上記の実験結果に基づいて、単粒材二種混合の間隙比計算式の導入および計算過程を図-3に示す。

まず、特定の粒径と固有間隙比をもつ細粒単粒材および粗粒単粒材を混合し、その混合比率による細粒率および粗粒率から代表粒径計算式を、また、それに粒径比と混合係数を導入して間隙比計算式を求めるようにした。このようにして求めた間隙比計算式は以下のとおりである。

間隙比  $e$  は粗粒率  $m$  および細粒率  $n$  を変数 ( $m+n=1$ ) とし、図-2のグラフの幾何学的な形状と、間隙比が立体的構成要素であることから3次式を採用し、二種混合の仮定条件を重ね合わせて実験式を求めた。細粒率  $n=0$  のとき間隙比は  $e=e_s$  であるから、間隙比計算実験式を式(1)と仮定した。

$$e = e_s + c \cdot n + b \cdot n^2 - a \cdot n^3 \quad (1)$$

式(1)を細粒率  $n$  で微分し1次微分式を  $e'$ 、2次微分式を  $e''$  とすると、式(2)および式(3)となる。

$$e' = c + 2 \cdot b \cdot n - 3 \cdot a \cdot n^2 \quad (2)$$

$$e'' = 2 \cdot b - 6 \cdot a \cdot n \quad (3)$$

二種混合の仮定条件 a) によると、 $n=1$  の点で式(1)は直線となる。これは式(1)が変曲点を迎えて、曲率が0となることであり、式(3)で  $e''=0$  となる。また、 $n=1$  のとき  $e=e_p$  であるから、

$$b = 3 \cdot a$$

これを式(1)に代入して  $c$  を求めると、

$$c = -2 \cdot a - (e_s - e_p)$$

表-2 混合組合せと粒径比 (8組)

試料No	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
粒径大(mm)	3.0	7.0	12.0	3.0	7.0	12.0	7.0	12.0
粒径小(mm)	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0
粒径比 $r$	5.0	11.7	20.0	3.0	7.0	12.0	2.3	4.0

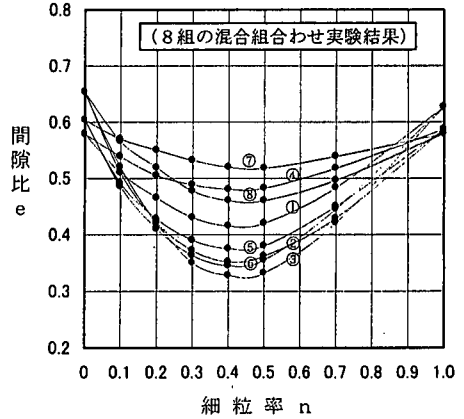


図-2 細粒率と間隙比の関係

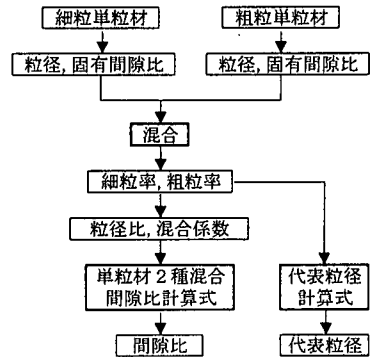


図-3 単粒材2種混合間隙比計算フローチャート

となり、式(1)は式(4)となる。

$$e = m \cdot e_s + n \cdot e_p - a \cdot n \cdot (1-n) \cdot (2-n) \quad (4)$$

ここで、 $e_s$ 、 $e_p$ は粗粒材および細粒材の固有間隙比、 $-a$ 、 $b$ 、 $c$ は定数である。

式(4)の右辺第1項と第2項の和は粗粒率  $m$  と間隙比  $e_s$ 、細粒率  $n$  と間隙比  $e_p$  との加重平均である。すなわち、間隙比  $e$  はこの加重平均から係数  $a$  を含む第3項を差し引いた値である。この第3項を「間隙比減量値」とここでは称す。ゆえに、間隙比  $e$  は固有間隙比  $e_s$ 、 $e_p$ 、細粒率  $n$  と係数  $a$  を与えれば計算できる。この係数  $a$  を「混合係数」とここでは称す。

### (3) 混合係数, 材料係数, 材質係数

式(4)の混合係数  $a$  は図-2の細粒率  $n = 40\%$ の実験データを用いて分析した結果, 図-4に示すとおり粒径比  $R$  の常用対数と高度な相関関係にあり,  $a = 0.65 \cdot \log R$  を得た. これに材料の種類と性質を考慮し式(5)を仮定した.

$$a = \frac{z}{k} \cdot \log R \quad (5)$$

ここで,  $z$  は材料係数,  $k$  は材質係数とした.  $z$  は粒状体粒子の形状・材質・表面性状による混合状態の変化を示す係数とみなせる. 実験に用いた試料は球体のガラスビーズで滑らかな表面をもつ球体であるから, 実用材料と比較して最も間隙比が小さくなる材料と考えられる. すなわち, 実用材料では材料係数は  $z = 0.65$  より必ず小さくなる. また,  $k$  については,  $k = 1$  が球形に相当する材質係数と考える.

### (4) 単粒材二種混合の代表粒径

単粒材三種の混合について, 最初に二種を混合し, 次に第3の単粒材を混合する場合, この三種の混合順序を変えても間隙比は変わらない. これを利用し図-3の「代表粒径」の考え方を導入した. これは最初に二種混合したものの代表粒径と間隙比を用いて, 第3の単粒材との間の二種混合と見なし, 三種混合の間隙比を二種混合と同様に求めるようにした.

この代表粒径は「仮想粒径」であり演繹的方法では導きだせない. ここでは, 二種混合の結果を踏まえた式(6)を仮定し, 実験データを用い, 三種混合の間隙比計算の整合性を満たすようにシミュレーションして求め, それを帰納法により証明した. この結果単粒材二種混合の代表粒径  $s_{1,2}$  は式(6)となる.

$$s_{1,2} = (d_2)^m \cdot (d_1)^n \quad (6)$$

ここで,  $d_1$  は細粒材の粒径,  $d_2$  は粗粒材の粒径であり,  $n$  は細粒率,  $m$  は粗粒率である. なお, 帰納法による式(6)の証明は付録として添付した.

## 3. 連続粒度材の間隙比と代表粒径

As混合物で用いられる現実の骨材を考慮すると, 幾何学的にモデル化したPacking論などの適用には限界があるとされている. このことから, 舗装分野では骨材粒度と密度の関係を重視する方向へと研究が進められてきた. すなわち, As混合物では密度が最大になる粒度曲線として, Fuller 粒度や0.45乗粒度などの連続粒度が提案されており, 密粒度型

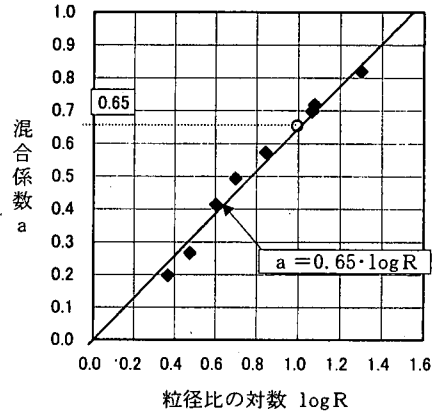


図-4 粒径比と混合係数の関係

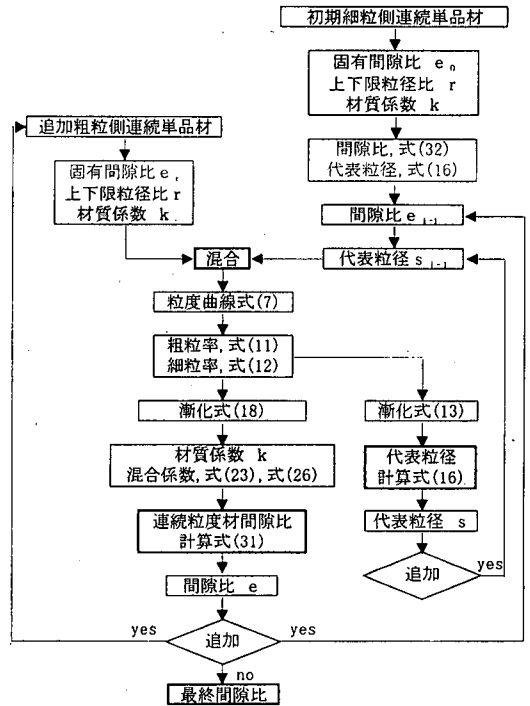


図-5 連続粒度材の間隙比計算フローチャート

As混合物はこれにほぼ近い粒度分布となっている. 骨材粒度配合の問題はきわめて複雑であるが, 既往経験の結果, 舗装の目的に応じた望ましい粒度範囲はある程度把握されてきているとみなせる.

舗装資材として通常使用している骨材(碎石, 砂など)は単粒材ではなく, 粒径の異なる粒子が集合したいわゆる連続粒度材である. この連続粒度材について, 前述の単粒材二種混合の方法を拡張して, その間隙比と代表粒径を計算する方法のフローチャートを図-5に示した. なお, 連続粒度材の粒度曲線が直線で示される

部分を取り出し、これを「連続単品材」とここでは称し図-6に示した。

計算はまず、最小粒径の初期細粒側連続単品材に粗粒側連続単品材を混合する。細粒側には初期値として間隙比と代表粒径があり、これに粗粒側連続単品材が加算混合されると、新たな間隙比と代表粒径が計算される。これを新たな細粒側連続粒度材として粗粒側連続単品材の追加混合を繰り返すようにして計算を進める。ここで、連続単品材および各混合材には図-5に示す各変数および各計算式が関係する。以下に計算過程の詳細を示す。

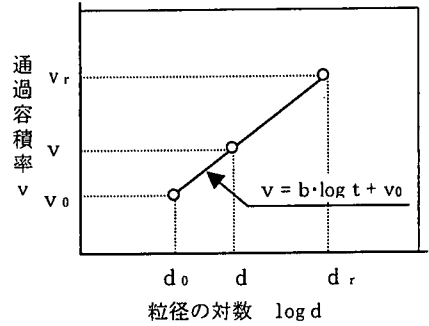


図-6 連続単品材の説明図

### (1) 粒度曲線

粒度範囲を指定した連続単品材は通過容積率  $v$  を縦軸に、粒径  $d$  の常用対数を横軸とした片対数座標において直線で描かれ図-6で示される。ここで粒径  $d$  を粒径比  $t$  に変換して  $v$  は式(7)で表される。

$$v = b \cdot \log t + v_0 \quad (7)$$

ここで、 $v$  は通過容積率、 $v_0$  は初期値、 $b$  は直線の勾配： $b = (v_r - v_0) / \log r$ 、 $r$  は上下限粒径比： $r = d_r / d_0$ 、 $t$  は粒径比（主変数）で  $t = d / d_0$  である。ただし、 $d_r$ 、 $d_0$  は連続単品材の上限粒径と下限粒径である。

### (2) 連続粒度材の代表粒径

代表粒径の基本計算式は式(6)の  $s_{1,2}$  を  $s_r$ 、 $d_2$  を  $d_r$ 、 $d_1$  を  $d_0$ 、と改めると式(8)となる。

$$s_r = (d_r)^m \cdot (d_0)^n \quad (8)$$

連続単品材の上下限粒径に対する通過容積率の上下限の範囲を細分割し、分割数を  $j$ 、分割量を  $\Delta t$ 、カウンターを  $i$  とする。(  $i-1$  ) 番目および  $i$  番目の通過容積率を  $v_{i-1}$ 、 $v_i$  とすると、粗粒率  $m_i$  および細粒率  $n_i$  は式(11)および式(12)となる。

$$v_i = b \cdot \log t_i + v_0 \quad (9)$$

$$v_{i-1} = b \cdot \log(t_i - \Delta t) + v_0 \quad (10)$$

$$m_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \quad (11)$$

$$n_i = \frac{v_{i-1}}{v_i} \quad (12)$$

ここで、粒径  $d$  の  $i$  番目の粒径を  $d_i$ 、代表粒径を  $s_i$  とする。式(8)より初期値は  $s_1 = (d_1)^{m_1} \cdot (s_0)^{n_1}$  であり  $i$  番目は漸化式(13)となる。

$$s_i = (d_i)^{m_i} \cdot (s_{i-1})^{n_i} \quad (13)$$

式(13)の細粒側の粒径は細粒側から計算してきた代表粒径  $s_{i-1}$  である。このように一つ前の代表粒径を順次代入しながら計算を繰り返し  $s_i$  までの計算式を作成した後、式(11)および式(12)を代入し整理すると式(14)となる。

$$v_r \cdot (\log s_r - \log d_0) = \sum_{i=1}^j (v_i - v_{i-1}) \cdot \log t_i \quad (14)$$

式(14)に式(9)および式(10)を代入して極限をとると定積分式(15)となる。

$$v_r \cdot (\log s_r - \log d_0) = b \int_{d_0}^{d_r} \frac{1}{t} \cdot \log t \cdot dt \quad (15)$$

式(15)の解が代表粒径の最終値  $s_r$  で式(16)となる。

$$s_r = d_0 \cdot r^p \quad (\text{代表粒径}) \quad (16)$$

$$r = \frac{d_r}{d_0} \quad (\text{上下限粒径比})$$

$$p = \frac{v_r - v_0}{2 \cdot v_r} \quad (\text{幂関数})$$

連続単品材の場合は  $v_0 = 0$  であるから  $p = 1/2$  となり、代表粒径は上下限粒径の幾何平均となっている。

### (3) 連続粒度材の間隙比計算式

連続粒度材の間隙比の計算は、前項の代表粒径の計算で示した分割方法と同様である。図-7に間隙比の計算方法の説明図を示した。

間隙比計算の基本式は式(4)の  $e_s$  を  $e_r$ 、 $e_v$  を  $e_0$  と改めると式(17)となる。

$$e = m \cdot e_r + n \cdot e_0 - a \cdot n \cdot (1-n) \cdot (2-n) \quad (17)$$

ここで、間隙比の初期値  $e_0$  は通過容積  $v_0$  以下の間隙比である。カウンターを1から  $i$  番目までとして、間隙比  $e$  を  $e_i$  とし、式(11)および式(12)を用いると漸化式(18)となる。

$$e_i = m_i \cdot e_r + n_i \cdot e_{i-1} - a_i \cdot n_i \cdot (1-n_i) \cdot (2-n_i) \quad (18)$$

ここで、細粒材側の間隙比は  $i$  番目の一つ前の間隙比として  $e_{i-1}$  である。これを順次代入し  $i$  番目まで繰り返し計算をすると間隙比  $e_i$  は式(19)となる。

$$\begin{aligned} e_i &= m_i \cdot e_r + n_i \cdot e_{i-1} - a_i \cdot n_i \cdot (1-n_i) \cdot (2-n_i) \\ &= (m_i + m_{i-1} \cdot n_i + \dots + m_2 \cdot n_3 \dots n_i + m_1 \cdot n_2 \dots n_i) \\ &\quad + n_i \cdot n_2 \cdot n_3 \dots n_i \cdot e_0 \\ &\quad - a_i \cdot n_i \dots n_3 \cdot n_2 \cdot n_1 \cdot (1-n_i) \cdot (2-n_i) \\ &\quad - a_2 \cdot n_i \dots n_3 \cdot n_2 \cdot (1-n_2) \cdot (2-n_2) \\ &\quad - a_3 \cdot n_i \dots n_3 \cdot (1-n_3) \cdot (2-n_3) \\ &\quad \dots \dots \dots \\ &\quad - a_1 \cdot n_i \cdot (1-n_i) \cdot (2-n_i) \quad (19) \end{aligned}$$

ここで、カウンター  $i$  の最終値は  $j$  であるから  $e_i$  は  $e_j$ 、 $v_i$  は  $v_j$  となり、式(19)を整理すると式(20)となる。

$$\begin{aligned} e_j &= \frac{v_r - v_0}{v_r} \cdot e_r + \frac{v_0}{v_r} \cdot e_0 \\ &\quad - \frac{1}{v_j} \sum_{i=1}^j a_i \cdot v_{i-1} \cdot \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \cdot \frac{2 \cdot v_i - v_{i-1}}{v_i} \quad (20) \end{aligned}$$

式(20)において  $v_i$  は式(9)によるが、直線の勾配  $b$  は各項で約分されるので  $v_0$  は  $v_0/b$  となり、それを  $v_b$  として式(21)となり、 $v_i$  は式(22)となる。

$$v_b = \frac{v_0}{v_r - v_0} \cdot \log r \quad (21)$$

$$v_i = \frac{v_r}{v_r - v_0} \cdot \log r \quad (22)$$

ここで、混合係数  $a_i$  は式(5)を基本式として、その代表粒径を  $s_i$  および  $i$  番目の一つ前の代表粒径  $s_{i-1}$  とすると式(23)となる。

$$a_i = \frac{z}{k} \log \frac{s_i}{s_{i-1}} \quad (23)$$

式(23)において代表粒径  $s_i$  は図-7より、粒径 ( $d_{i-1} \sim d_i$ ) 間の連続単品材の代表粒径であり、式(16)より計算し、対数表示すると式(24)となる。

$$\log s_i = \frac{1}{2} \log d_i + \frac{1}{2} \log d_{i-1} \quad (24)$$

代表粒径  $s_{i-1}$  は細粒側から順次計算をしてきた代表粒径である。その代表粒径の計算で図-7より、その粗粒側は粒径 ( $d_0 \sim d_{i-1}$ ) 間の代表粒径である。細粒側は下限から計算してきた代表粒径を  $s_0$  とし、式(16)により計算すると式(25)となる。

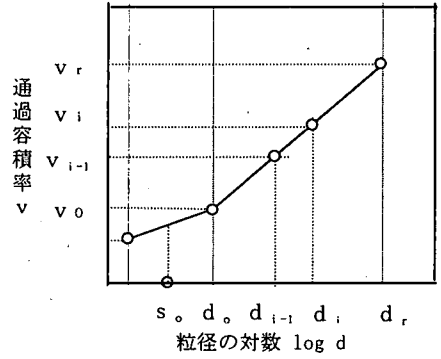


図-7 連続粒度材の間隙比計算説明図

$$\begin{aligned} \log s_{i-1} &= \frac{v_{i-1} - v_b}{v_{i-1}} \left( \frac{1}{2} \cdot \log d_{i-1} + \frac{1}{2} \cdot \log d_0 \right) \\ &\quad + \frac{v_b}{v_{i-1}} \cdot \log s_0 \\ \therefore \log s_{i-1} &= \frac{1}{2} \cdot \log d_{i-1} + \frac{1}{2} \cdot \log d_0 \\ &\quad - \frac{v_b}{2 \cdot v_{i-1}} \cdot \log d_{i-1} - \frac{v_b}{2 \cdot v_{i-1}} \cdot \log d_0 \\ &\quad + \frac{v_b}{v_{i-1}} \cdot \log s_0 \quad (25) \end{aligned}$$

式(24)および式(25)を式(23)に代入して整理すると混合係数  $a_i$  は式(26)となる。

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{z}{2 \cdot k} \cdot \log \frac{d_i}{d_0} + \frac{z}{2 \cdot k} \cdot \frac{v_b}{v_{i-1}} \cdot \log \frac{d_{i-1}}{d_0} \\ &\quad - \frac{z}{k} \cdot \frac{v_b}{v_{i-1}} \cdot \log \frac{s_0}{d_0} \quad (26) \end{aligned}$$

式(26)の右辺を3項に分け、定数を除いて変数部分を式(20)に個別に代入し式(9)および式(10)を用いて計算する。それらの式の極限值 ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) をとると定積分式を得る。これらの解は以下のとおりである。

a) 第1項は式(27)となる。

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^j \log \frac{d_i}{d_0} \cdot v_{i-1} \cdot \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \cdot \frac{2 \cdot v_i - v_{i-1}}{v_i} \\ &= \sum_{i=1}^j \log t_i \cdot \frac{\log(t_i - \Delta t) + v_b}{\log t_i + v_b} \left\{ 2 - \frac{\log(t_i - \Delta t) + v_b}{\log t_i + v_b} \right\} \\ &\quad \cdot \frac{\log t_i - \log(t_i - \Delta t)}{\Delta t} \cdot \Delta t \\ (\text{極限值}) &= \int_1^r \frac{\log t}{t} dt = \frac{1}{2} (\log r)^2 \quad (27) \end{aligned}$$

b) 第2項は式(28)となる.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^j \log \frac{d_{i-1}}{d_0} \cdot \frac{v_b}{v_{i-1}} \cdot v_{i-1} \cdot \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \cdot \frac{2 \cdot v_i - v_{i-1}}{v_i} \\ &= v_b \cdot \sum_{i=1}^j \frac{\log(t_i - \Delta t)}{\log t_i + v_b} \cdot \left\{ 2 - \frac{\log(t_i - \Delta t) + v_b}{\log t_i + v_b} \right\} \\ & \quad \cdot \frac{\log t_i - \log(t_i - \Delta t)}{\Delta t} \cdot \Delta t \\ (\text{極限值}) &= v_b \cdot \int_1^r \frac{1}{t} \cdot \frac{\log t}{\log t + v_b} \cdot dt \\ &= v_b (\log r + v_b \cdot \log \frac{v_0}{v_r}) \quad (28) \end{aligned}$$

c) 第3項は式(29)となる.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^j \log \frac{s_0}{d_0} \cdot \frac{v_b}{v_{i-1}} \cdot v_{i-1} \cdot \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \cdot \frac{2 \cdot v_i - v_{i-1}}{v_i} \\ &= v_b \cdot \log \frac{s_0}{d_0} \cdot \sum_{i=1}^j \frac{1}{\log t_i + v_b} \cdot \left\{ 2 - \frac{\log(t_i - \Delta t) + v_b}{\log t_i + v_b} \right\} \\ & \quad \cdot \frac{\log t_i - \log(t_i - \Delta t)}{\Delta t} \cdot \Delta t \\ (\text{極限值}) &= v_b \cdot \log \frac{s_0}{d_0} \cdot \int_1^r \frac{1}{t} \cdot \frac{1}{\log t + v_b} \cdot dt \\ &= v_b \cdot \log \frac{s_0}{d_0} \cdot \log \frac{v_r}{v_0} \quad (29) \end{aligned}$$

ここで、粗粒率： $m = (v_r - v_0) / v_r$ ，細粒率： $n = v_0 / v_r$ ，細粒側代表粒径比： $s = s_0 / d_0$ とし、 $s_0$ は細粒側から計算してきた代表粒径である。

式(20)に式(27)，式(28)および式(29)を代入し，式(21)および式(22)を用いて整理すると間隙比  $e$  は式(30)となる。

$$\begin{aligned} e &= \frac{v_r - v_0}{v_r} \cdot e_r + \frac{v_0}{v_r} \cdot e_0 \\ & \quad - \frac{z}{4 \cdot k} \cdot \frac{v_r - v_0}{v_r} \cdot \log r \\ & \quad - \frac{z}{2 \cdot k} \cdot \frac{v_0}{v_r} \cdot \log r \\ & \quad - \frac{z}{2 \cdot k} \cdot \frac{v_0}{v_r} \cdot \frac{v_0}{v_r - v_0} \cdot \log \frac{v_0}{v_r} \cdot \log r \\ & \quad - \frac{z}{k} \cdot \frac{v_0}{v_r} \cdot \log \frac{v_0}{v_r} \cdot \log \frac{s_0}{d_0} \quad (30) \end{aligned}$$

ここで、式(30)において、粗粒率  $m$ ，細粒率  $n$ ，細粒側代表粒径比  $s$  を用いて整理すると式(31)となる。

さらに、定数  $z / 4 \cdot k$  を計算値の整合性をあわせて検討した結果、球形の場合、材料係数は  $z = 0.65$ ，材質係数は  $k = 1$  としたことから、混合係数の定数を  $k$  のみに纏めて表すこととして  $1 / 4 \cdot k$  に修正した。

$$\begin{aligned} e &= m \cdot e_r + n \cdot e_0 - \frac{1}{4 \cdot k} \cdot m \cdot \log r \\ & \quad - \frac{2}{4 \cdot k} \cdot n \cdot \log r \\ & \quad - \frac{2}{4 \cdot k} \cdot n \cdot \log n \cdot \log r \cdot \frac{n}{m} \\ & \quad - \frac{4}{4 \cdot k} \cdot n \cdot \log n \cdot \log s \quad (31) \end{aligned}$$

ここで細粒率  $n = 0$  とすると式(32)となる。式(32)は連続単品材の間隙比計算式である。

$$e = e_r - \frac{1}{4 \cdot k} \cdot \log r \quad (32)$$

#### 4. 間隙比計算式の実験と検証

以上求めた連続粒度材の間隙比計算式を実験により検証した。実験は骨材単体のものと、As混合物としたものとの二種類とした。骨材単体のものは分離現象や接触点破壊の少ない砂とし、粗砂と細砂の二種類とした。

粗骨材と細骨材の混合材は分離現象が生じるので、As混合物とした。As混合物の場合は締固め作用を受けることが前提にあるので、粗粒材は接触点破壊が起こることがある。そのため骨材単体の実験は砂とし、粗骨材を混入した実験はAs混合物としてSGCで締固めを行い、分離現象および接触点破壊に配慮した。

As混合物はその種類の中で特にVMAとAs量の関係が、As混合物の特徴となっている要素を有するSMA(砕石マトリックスアスファルト)を検証実験に採用した。

SUPERPAVEに適用されるSGCを用い、SMAを容積配合設計として実験し、粒度、VMAおよびAs量から検証した。実験は粒度とAs量をM試験から定めた供試体を、SGCの旋回数を変えて締固め、間隙比と飽和度を求め、間隙比計算式(31)で求めた間隙比と飽和度とを比較した。

計算に必要な固有間隙比と材質係数は、ここではかさ比重を用いて計算した。実験から砂の固有間隙比の目標値は0.7~0.9，材質係数は1.1~1.4となる。

(表-3，表-4参照)また、砕石と石粉の実験から固有間隙比は砕石0.7，石粉1.2，材質係数は砕石1.05，石粉1.5となった。



## (1) 砂の間隙比の実験と検証

骨材を粗砂と細砂の二種類とし、それぞれ間隙比を測定した。それをふるい分け試験して粒度を確認し、間隙比計算式(31)で計算した計算間隙比と測定間隙比を比較した。試料は乾燥し軽く叩いて振動を与えることにより、分離現象や接触点破壊もなく密な状態が達成されたと判断した。

結果を表-3および表-4に示す。表-3は砂単体のふるい分け試験結果であり、各粒径の通過容積率を示したものである。表-4は粗砂と細砂について、ふるい分けた試料から固有間隙比と材質係数の関係を計算し、その固有間隙比の目標値を用いて間隙比計算式(31)から間隙比を求め、測定間隙比と比較したものである。これによると、計算間隙比と測定間隙比がほぼ一致していることが解る。

表-3 実験材料(砂)

材 料	粗 砂	細 砂
粒径群(mm)	4.750 0.150	4.750 0.150
かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.502	2.320
粒 径 (mm)	通過容積%	通過容積%
4.750	100.0	100.0
2.360	80.8	97.5
0.600	44.5	77.7
0.300	15.4	27.8
0.150	0.0	0.0

表-4 砂の測定間隙比と計算間隙比

材 料	粗 砂				細 砂			
	4.75	2.36	0.60	0.30	4.75	2.36	0.60	0.30
粒 径 群 (mm)	2.36	0.60	0.30	0.15	2.36	0.60	0.30	0.15
比 重 (g/cm <sup>3</sup> )	2.502	2.502	2.502	2.502	2.320	2.320	2.320	2.320
単 重 (g/cm <sup>3</sup> )	1.521	1.495	1.434	1.363	1.424	1.380	1.331	1.250
間 隙 比	0.644	0.674	0.745	0.836	0.630	0.681	0.743	0.856
粒 径 比	2.013	3.933	2.000	2.000	2.013	3.933	2.000	2.000
材 質 係 数	1.10	1.20	1.20	1.40	1.10	1.20	1.20	1.40
固有間隙比 (目標値)	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9
混合比率%	19.2	36.3	29.1	15.4	2.5	19.8	49.9	27.8
単 重 (g/cm <sup>3</sup> )	1.699				1.550			
測定間隙比	0.473				0.497			
計算間隙比	0.479				0.492			

## (2) As混合物の骨材間隙比の実験と検証

### a) As混合物の供試体

骨材は通常使用している砕石6号、7号、粗砂、細砂、スクリーングスおよび石粉である。配合はSMAの標準粒度範囲を参考とし、この範囲を5等分したものである<sup>20)</sup>。

SMA配合は石粉が多いのが特徴で、特に骨材配合の細粒部分を形成するマッシュがVMAに及ぼす影響もみため、砂のみのものとスクリーングスとを混合したものと2種類を使用した。合成粒度は比重補正を行い容積率に換算した。

使用バインダーはストレートアスファルト60~80および改質バインダーの2種類とし、検討粒度に対するAs量はマーシャル試験結果の最適As量(OAC)を中心にその前後のOAC±0.3%の3種類とした。SGC締固めの仕様はモールド径10cm、旋回角度1.25°、圧力6kgf/cm<sup>2</sup>(588.6kPa)である。旋回数通常100程度であるが、ここでは最大旋回数の300回とした。これは現場密度の最大値に近い締固め度が得られるものと判断したからである。

これら供試体のマーシャル試験特性値は、VMAと安定度に逆相関関係が認められ、その値の範囲は700~1100kgf(6.9~10.8kN)であった。また、ホイールトラッキング試験に於いてはVMAと動的安定度(DS値)に強い相関関係があり、その値の範囲はVMAが15~21%の変化に対してDS値が300~2200回/mmと大きな差を示した。

### b) 実験値と計算値の関係

As混合物の所定配合の供試体は分離現象はなく、SGCにて締固めた結果、M締固めに比較して極度に接触点破壊が起きないこと、また、旋回数300回

では最も密な状態が達成できたと判断した。

ストレートアスファルト使用および改質バインダー使用の混合物の締固め後の密度は、SGC締固めではほとんど差がないことが確認されたので、検証データでは同一として扱った。

VMAの散布図と回帰直線を図-8に示す。横軸Xを計算間隙率、縦軸Yを測定間隙率とすると式(33)となった。

$$Y = 0.999 \cdot X + 0.141 \quad (33)$$

式(33)の相関係数は  $r = 0.884$ 、標準偏差は  $\sigma = 0.599$  であった。

また、飽和度の散布図と回帰直線を図-9に示す。横軸Xを計算飽和度、縦軸Yを測定飽和度とすると式(34)となった。

$$Y = 1.058 \cdot X - 5.349 \quad (34)$$

式(34)の相関係数は  $r = 0.922$ 、標準偏差は  $\sigma = 2.755$  であった。

計算間隙率と計算飽和度は式(31)から求めた。この「計算値」と「実験値」の回帰分析の結果、VMA、飽和度とも計算値と実験値がほぼ1:1の対応を示しており、高度に有意な相関関係があることが解る。

これら骨材単体として砂を用いた実験およびAs混合物とした実験から、粒度、固有間隙比および材質係数が与えられた粒状体、およびそれらを混合した連続粒度材についても本研究で提案した「間隙比計算式」で実際のVMAを推定できるといえる。

## 5. 結論

本研究ではAs混合物の骨材粒度をもとに、VMAを計算で求める間隙率計算式を解析し、その妥当性を実験的に検証した結果から以下のことが解った。

### (1) 間隙率計算式の新規性と有効性

- 1) 骨材のVMA、それらを混合したAs混合物の合成骨材である連続粒度材のVMAは、今まで実験結果だけからしか求められなかった。それをここでは計算で求める式を誘導した。
- 2) 骨材混合物およびAs混合物の実験から求めたVMAと計算式から求めたVMAを比較検討し、計算式の妥当性を検証した。
- 3) As混合物の合成骨材のVMAを予め知ることができることから以下のことが期待できる。
  - a) As混合物としての骨材の使用可否の判断およびそれらの混合比率の適否が事前に判定できる。
  - b) バインダーの最適混合比率の適否の把握。  
すなわち、最適As量は合成骨材のVMAにアスファルトが過不足なく満たされ、十分締固めた状態において残留間隙がどのくらい残せるかである。
  - c) As混合物の配合設計の合理化。（最終的な確認試験のみの実施でよい可能性）
  - d) 適用現場になったAs混合物の配合設計と現場舗設後の性状予測が的確に判断できる。

### (2) 本研究の課題と今後の発展性

計算式に初期条件として固有間隙比と材質係数がある。固有間隙比は骨材の粒径・形状・材質・表面性状が関係する骨材固有の性質による粒子間間隙である。材質係数は骨材の粒径の大小による粒子配列に関係し、粒径が小さくなると粒子間の総接触点数が多くなり、締まり難くなって係数値が大きくなるので、これらをどう扱うかが今後の課題である。

最上<sup>10)</sup>は単粒材のPackingとして間隙率と接触点数の関係を示唆しており、接触点数が多くなると間隙率は小さくなるとしている。しかし、本研究で扱った連続粒度材はその構造がさらに複雑で、接触点数については説明できない。しかし、本研究の初期条件であ

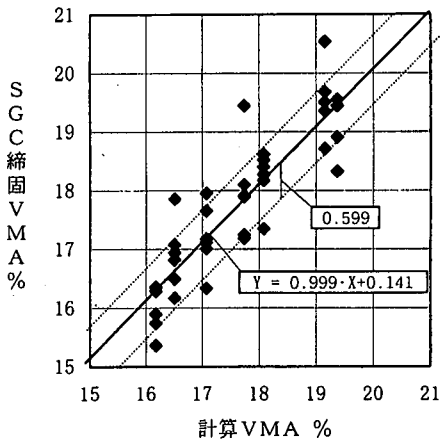


図-8 SGC締固VMAと計算VMAの相関図

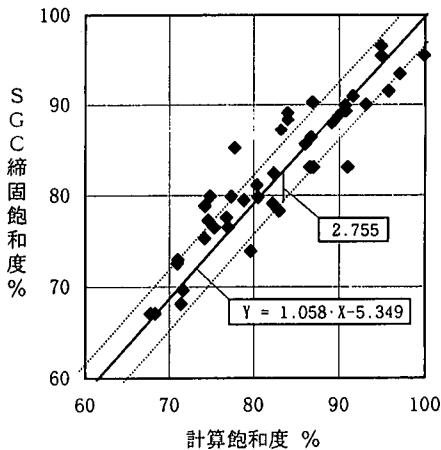


図-9 SGC締固飽和度と計算飽和度の相関図

る固有間隙比の範囲を示唆しており、近似の数値化が可能と考える。そして、材質係数については粒径と総接触点数の関係から解明できることが想定されるが、今後の課題としたい。

最後にここで提案した合成骨材の「最終の間隙率」を計算で求める定式化の意義は大きいと考える。この計算式が舗装工事に有効に活用されることを願う次第である。

謝辞：筆者のうち、郡司は日本道路公団より本研究の端緒となった舗装工事に対し感謝状の贈呈を受け栄誉なことであった。同公団では高速道路各路線網の舗装履歴を正確にデータベース化しており、その記録を閲覧し現場立会して本舗装の耐久性を確認さ

せて頂いた。このような一連の配慮がなければ本舗装は埋没し、本研究の端緒になりえなかったと思う。関係機関各位に改めて感謝申し上げます。

### 付録. 単粒材二種混合の代表粒径

大中小三種類の単粒材を混合する場合、混合割合が同一であれば、その混合順序を変えても間隙比および代表粒径は変わらない。この関係を利用して式(6)を証明する。

#### (1) 単粒材三種混合

三種類の単粒材はそれぞれ球体とする。その単粒材の粒径の小なるものから順に単粒材1、単粒材2および単粒材3とし、その混合方法を変えて代表粒径の計算式を考察する。まず、三種類の単粒材から二種類を取り出して混合し、その混合材に第3の単粒材を混合して、それぞれの代表粒径を計算する。単粒材三種混合の混合方法を次の二方法とする。

a) 単粒材1と単粒材2を混合し、その混合材の代表粒径を計算し、次にその混合材に単粒材3を混合して新たな代表粒径を計算する方法。

b) 単粒材2と単粒材3を混合し、その混合材の代表粒径を計算し、次にその混合材に単粒材1を混合して新たな代表粒径を計算する方法。

上記二方法の混合において、単粒材1、2の混合では、細粒率を $n_{1,2}$ 、粗粒率を $m_{1,2}$ 、粒径比を $r_{1,2}$ 、代表粒径を $s_{1,2}$ とし、以下同様に単粒材二種および三種混合の諸元表を表-5のとおり作成する。

表-5 単粒材混合の諸元

単粒材混合	1&2	1・2&3	2&3	1&2・3
細粒率	$n_{1,2}$	$n_{1,2,3}$	$n_{2,3}$	$n_{1,2,3}$
粗粒率	$m_{1,2}$	$m_{1,2,3}$	$m_{2,3}$	$m_{1,2,3}$
粒径比	$r_{1,2}$	$r_{1,2,3}$	$r_{2,3}$	$r_{1,2,3}$
代表粒径	$s_{1,2}$	$s_{1,2,3}$	$s_{2,3}$	$s_{1,2,3}$
間隙比	$e_{1,2}$	$e_{1,2,3}$	$e_{2,3}$	$e_{1,2,3}$

$$m_{1,2,3} = \frac{v_3}{v}$$

$$s_{1,2,3} = (d_3)^{m_{1,2,3}} \cdot (s_{1,2})^{n_{1,2,3}}$$

$$\therefore \log s_{1,2,3} = m_{1,2,3} \cdot \log d_3 + n_{1,2,3} \cdot \log s_{1,2} \quad (\text{a. 2})$$

式(a.1)を式(a.2)に代入すると式(a.3)となる。

$$\begin{aligned} \log s_{1,2,3} &= m_{2,3} \cdot \log d_3 + n_{1,2,3} \cdot (m_{1,2} \cdot \log d_2 + n_{1,2} \cdot \log d_1) \\ &= \frac{v_3}{v} \cdot \log d_3 + \frac{v_1 + v_2}{v} \cdot \frac{v_2}{v_1 + v_2} \cdot \log d_2 \\ &\quad + \frac{v_1 + v_2}{v} \cdot \frac{v_1}{v_1 + v_2} \cdot \log d_1 \end{aligned}$$

$$\therefore v \cdot \log s_{1,2,3} = v_3 \cdot \log d_3 + v_2 \cdot \log d_2 + v_1 \cdot \log d_1 \quad (\text{a. 3})$$

d) 混合方法 b) は以下のとおりである。

$$n_{2,3} = \frac{v_2}{v_2 + v_3}$$

$$m_{2,3} = \frac{v_3}{v_2 + v_3}$$

$$s_{2,3} = (d_2)^{m_{2,3}} \cdot (d_3)^{n_{2,3}}$$

$$\therefore \log s_{2,3} = m_{2,3} \cdot \log d_3 + n_{2,3} \cdot \log d_2 \quad (\text{a. 4})$$

三種混合は以下のとおりである。

$$n_{1,2,3} = \frac{v_1}{v}$$

$$m_{1,2,3} = \frac{v_2 + v_3}{v}$$

$$s_{1,2,3} = (s_{2,3})^{m_{1,2,3}} \cdot (d_1)^{n_{1,2,3}}$$

$$\therefore \log s_{1,2,3} = m_{1,2,3} \cdot \log s_{2,3} + n_{1,2,3} \cdot \log d_1 \quad (\text{a. 5})$$

式(a.4)を式(a.5)に代入すると式(a.6)となる。

$$\begin{aligned} \log s_{1,2,3} &= m_{1,2,3} \cdot (m_{2,3} \cdot \log d_3 + n_{2,3} \cdot \log d_2) + n_{1,2,3} \cdot \log d_1 \\ &= \frac{v_2 + v_3}{v} \cdot \frac{v_3}{v_2 + v_3} \cdot \log d_3 \\ &\quad + \frac{v_2 + v_3}{v} \cdot \frac{v_2}{v_2 + v_3} \cdot \log d_2 + \frac{v_1}{v} \cdot \log d_1 \end{aligned}$$

$$\therefore v \cdot \log s_{1,2,3} = v_3 \cdot \log d_3 + v_2 \cdot \log d_2 + v_1 \cdot \log d_1 \quad (\text{a. 6})$$

#### (2) 帰納法による証明

1) 細粒率 $n = 1$ の場合：粗粒率 $m = 0$ であり代表粒径は $s_{1,2} = d_1$ となり式(6)は成立する。

粗粒率 $m = 1$ の場合：細粒率 $n = 0$ であり代表粒径は $s_{1,2} = d_2$ となり式(6)は成立する。

2) 前記2混合方法 a), b) について混合式を作成する。

単粒材1, 2, 3の混合量を $v_1, v_2, v_3$ とすると、 $v_1 + v_2 + v_3 = 1$ である。

c) 混合方法 a) は以下のとおりである。

$$n_{1,2} = \frac{v_1}{v_1 + v_2}$$

$$m_{1,2} = \frac{v_2}{v_1 + v_2}$$

$$s_{1,2} = (d_2)^{m_{1,2}} \cdot (d_1)^{n_{1,2}}$$

$$\therefore \log s_{1,2} = m_{1,2} \cdot \log d_2 + n_{1,2} \cdot \log d_1 \quad (\text{a. 1})$$

三種混合は以下のとおりである。

$$n_{1,2,3} = \frac{v_1 + v_2}{v}$$

ここで、単粒材三種混合の式(a. 3)の右辺と式(a. 6)の右辺は等しいことから、代表粒径  $s_{12.3}$  と  $s_{1.23}$  は等値である。すなわち、仮説式(6)は細粒率  $n = 1$  および粗粒率  $m = 1$  の場合に成立し、混合方法 a) および混合方法 b) の代表粒径は等値であるから成立する。

#### 参考文献

- 1) 鈴木康一：アスファルト舗装の特殊工法，pp. 72～77，理工図書
- 2) 日本道路協会，アスファルト舗装要綱：平成4年版，pp. 198～199.
- 3) 日本道路協会，アスファルト舗装要綱：（昭和36年，42年，50年，53年，平成4年版）
- 4) 浜田幸二，橋本修治，高田祥子：SHRP型ジャイレトリコンパクタの締固め特性，道路建設，1996. 12.
- 5) 松野三朗，谷本誠一：幕張試験舗装の概要と供用状況について，土木研究所資料，616号，1970.
- 6) McRae, J.L. : *Theory and Application of a Gyrotory Testing Machine for Hot-Mix Bituminous Pavement*, ASTM STP, No.252, 1959.
- 7) Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M. : *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*, SHRP-A-407, National Research Council, 1994.
- 8) 池田拓哉：講座・SHRPで提案された新しい配合設計方法，舗装，1997. 6～11.
- 9) 佐々木礼二：中央高速道路における舗装工事，土木施工，9巻，7号，pp. 32～39，1968. 7.

- 10) 春日三男：中央高速道路舗装工事の概要，建設の機械化，208号，pp. 17～20，1967. 6.
- 11) 藤波督：高速道路の舗装技術の変遷，日本道路公団技術情報，No. 96，pp. 4～9，1989. 2.
- 12) 東名・中央高速道路の概要，日本道路公団試験所報告，pp. 99～137，1968.
- 13) 中央高速道路府中舗装工事施工計画書，013号，日本舗道㈱，1967. 2.
- 14) 郡司保雄：長期間供用性の良好な舗装，舗装，Vol. 28，No. 11，1993. 11.
- 15) 南雲貞夫，阿部頼政共著：新体系土木工学，27歴史系材料，土木学会編，pp. 98～122，技報堂，1981. 2.
- 16) 最上武雄編著：土質力学，土木学会監修，土木工学叢書，第8章 粒状体の力学，pp. 893～933，技報堂，1969.
- 17) Treval C. Powers : *The Properties of Fresh Concrete* pp. 1～61, John Wiley & Sons, Inc. , 1968.
- 18) Furnas, C.C. : " The Relations Between Specific Volume, Voids, and Size Composition in Systems of Broken Solids of Mixed Sizes, " Department of Commerce, Bureau of Mines, Serial No.2894, *Reports of Investigations*, 1-10, 1928.
- 19) Weymouth, C. A.G. : " Effect of Particle Interference in Mortars and Concrete, " *Rock Products*, 26, February 25, 1933.
- 20) 荒井孝雄，井上武美：碎石マッシュへのジャイレトリコンパクタの適用検討，舗装，1998. 9.

(1999. 8. 2 受付)

## EVALUATION OF VOIDS IN MINERAL AGGREGATE OF HOT ASPHALT MIXTURE USING AGGREGATE GRADING

Yasuo GUNJI, Takemi INOUE and Hirokazu AKAGI

The Chuo Expressway Fuchu Pavement Section has been in service and in good condition for more than 20 years without any repair work. The contractor was awarded a letter of appreciation by the President of Japan Highway Public Corporation (JHPC) in 1991 for this excellent pavement. The reason for the high durability of this pavement was investigated analytically and experimentally. It is concluded that the key is the asphalt mixture of the surface course. The procedure for calculating the voids in mineral aggregate was proposed and its validity was demonstrated by the experimental results.