

加熱アスファルト混合物の骨材間隙率の検討

郡司保雄¹・井上武美²・赤木寛一³

¹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)

²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)

³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)

舗装の耐久性は最も基本的な技術課題である。中央高速道路府中舗装工事（調布 IC ～日野橋間，延長 11.4km）は昭和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。この要因を検討した結果，アスファルト混合物の配合の考え方にあると判断した。それは骨材間隙率を基にした容積配合設計的な考え方を導入したことにある。本検討は，既に提案している「骨材粒度から骨材間隙率を求める計算式」を用いて，広範な工種・工法のアスファルト混合物の配合に適応できるかを検討した結果，提案した骨材間隙率計算式の妥当性を確認したものである。

Key Word :VMA, granular material, void ratio, compaction, pavement, 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，累積交通量に応じた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。

空隙率と飽和度はVMAに占めるAs量（容積割合）によって定まり，As混合物の安定性と耐久性の観点から一定の値の範囲が定められている。しかし，転圧を要すAs混合物のVMAは，As量および締固め方法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法（以下，M試験法）において，アスファルト舗装要綱（以下，As要綱）は供用時の交通量を想定してマーシャル突固め（以下，M突固め）回数の変更とVMAに対する考慮や規定を設けている¹⁾。このように，VMAは最適As量設定において重要な要件であることを示している。これらの考慮は，最終的に安定した状態となったVMA（以下，最終VMA）がM突固めでは求まらないことにある。

As混合物の締固めに，SHRPジャイレトリコンパクタ（以下，SGC）がSUPERPAVE(Superior Performing Asphalt Pavement)の容積配合設計(Volumetric Design)に導入され^{2), 3)}，これはAs混合物の最大粒径ごとのVMAの最小値を規定し，累積交通量ごとのSGCの旋回数による一定空隙率の確

保によってAs量を決めることとしている^{4), 5)}。

これらにみられるように，VMAが締固め程度により変わることと，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。

中央道府中舗装工事（以下，本工事）は日平均区間交通量約12万台（平成11年7月八王子～高井戸間）であり，As量6.7%と多量にも拘わらず，わだち掘れもほとんどなく長期間供用性が良好であったことは，VMAの確保に重点を置いた配合設計方法の結果として達成できたと考えている⁶⁾。

本工事は昭和34年（1959年）から本格的に高速道路舗装工事が開始されて⁷⁾，As量についてはM試験法で求めることとし，また，既設の供用結果を優先することであった。しかし，最終VMAがM試験法では求まらないこと，これをより大きくしようと配合と施工方法を工夫したことが有効な供用結果を示した例であったと考えている。それは，細粒部分を減じる目的で石粉の減量，スクリーニングスの水洗い納入，砂の予備乾燥，回収ダストの使用禁止などの処置であった。ちなみに，本工事の施工完了時点で改訂されたAs要綱（昭和42年，1967年）⁸⁾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。一方，数種類の骨材を混合して合成骨材粒度を求めるものの，各々のVMAを計算で求める方法はなかった。

これらのことから、骨材粒度から予め最終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ことになる。

しかし、VMAを考慮すべきとした記述や、単粒材のVMAの計算値はあるものの、連続粒度材のVMAを計算で求める定式化したものは既往の報告には見られない。

筆者らは骨材粒度が定まれば、最終VMAを計算で求める方法を提案した⁹⁾。本報文は、適用条件が異なる広範な各種As混合物について、施工実績のある配合設計書を資料とし、この計算方法を適用してその妥当性を検討したものである。

2. 骨材間隙比計算式の提示と検証

VMA計算式は単一粒径群の材料（以下、単粒材）の間隙比を求め、次に粒径の異なる単粒材二種混合の間隙比を求め、そして、これらの結果を踏まえて、連続した骨材粒度であるAs混合物においては、一定の粒径群の二種混合を順次繰り返し計算して求める方法で提案した。

ここで、間隙率と間隙比は互いに換算できる特性値であるが、ここでは、実験や現場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。なお、間隙率をVMAとしている。

(1) 単粒材の間隙比

単粒材の間隙比は、粒のつまり方が同じであれば、粒径の大小に関係なく理論的には一定である。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¹⁰⁾、間隙比は0.3505 が得られ、この場合が最小の間隙比となる。しかし、このような理想的な形態と配列になることは現実にはありえず、間隙比はこの計算値よりかなり大きくなる。これを実験で確認した。

確認実験は球形に近い粒径の異なるガラスビーズ5種類（0.6、1、3、7、12mm径）について、比重と単位体積質量から固有の間隙比（以下、固有間隙比）を求めた。結果は表-1である。粒径の異なる実験試料の間隙比の平均は約0.6を得た。

(2) 単粒材二種混合の間隙比計算式

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比率を変化させて間隙比を求めた。その結果は図-1で、間隙比 e は粗粒率 m および細粒率 n を変数とした式(1)で近似できた。

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

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

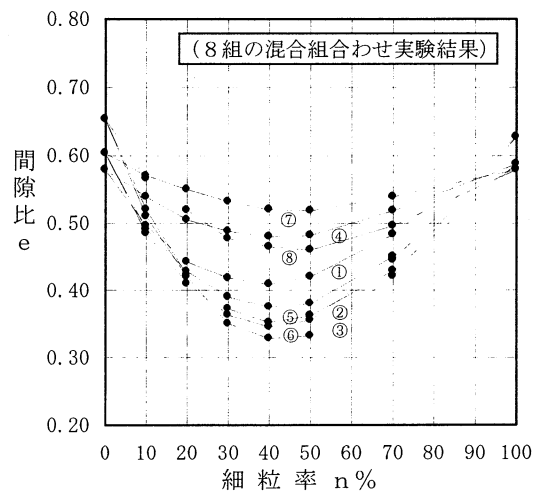


図-1 細粒率と間隙比の関係

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

ここで、 m 、 n は $m+n (=1)$ に対する各々の体積比率で、 e_s 、 e_p は粗粒材および細粒材の固有間隙比である。式(1)の右辺第1項と第2項の和は粗粒率 m と固有間隙比 e_s 、細粒率 n と固有間隙比 e_p との加重平均で、間隙比 e はこの加重平均から係数 a を含む第3項を差し引いた値となっている。したがって、この第3項を「間隙比減量値」とここでは称することとした。また、この係数 a をここでは「混合係数 a 」と称し、 a は式(2)から求まる。

$$a = \frac{z}{k} \cdot \log R \quad (2)$$

ここで、 z は材料係数、 k は材質係数および R は単粒材二種の粒径比である。式(2)は前項2.(1)のガラスビーズを用いた実験から求めた実験式であり、球形の場合 $k=1$ としており、 z は0.65となった。なお、ガラスビーズの場合の固有間隙比は概ね0.6であるから、通常の骨材ではそれより大きくなり、材質係数 k も1より大きくなる。

(3) 連続粒度材の間隙比計算式

単粒材の間隙比および単粒材二種混合の間隙比の求め方を発展させて、一般的な粒度曲線である連続粒度材の間隙比計算式を提案した。

連続粒度を示す粒度曲線は粒径の常用対数を横軸とし、その粒径に対する通過容積百分率を縦軸とした片対数座標で示され、粒径と通過容積百分率が指定された位置および隣接の指定された位置間は直線で近似でき、この部分を取り出したものを「連続単品材」とここでは称す。

連続粒度材の間隙比は図-2に示す計算方法となる。最初に、一番細粒側の連続単品材の間隙比と代表粒径を計算し、次の粗粒側連続単品材を加算混合して新たな間隙比と代表粒径を計算する。この新たな間隙比と代表粒径をもつ連続粒度材に、次の粗粒側連続単品材を加算混合するようにして、この方法を繰り返す。このようにして間隙比を求める計算式として式(3)を求めた。

$$e = m \cdot e_r + n \cdot e_o - \frac{1}{4 \cdot k} \cdot m \cdot \log r - \frac{2}{4 \cdot k} \cdot n \cdot \log r - \frac{2}{4 \cdot k} \cdot n \cdot \log n \cdot \log r \cdot \frac{n}{m} - \frac{4}{4 \cdot k} \cdot n \cdot \log n \cdot \log s \quad (3)$$

式(3)の細粒率を $n=0$ とすると $m=1$ となり式(4)となる。これは連続単品材の間隙比計算式である。

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

式(3)および式(4)において、 e_r は粗粒側連続単品材の固有間隙比、 e_o は細粒側から計算してきた全量の間隙比、 r は粗粒側連続単品材の上下限粒径比、 s は粗粒側連続単品材の下限粒径 d_o に対する細粒側の代表粒径の比であり、 k は材質係数である。

また、細粒側代表粒径を s_i とすると式(5)で示される。

$$s_i = (s_r)^m \cdot (s_{i-1})^n \quad (5)$$

ただし、 s_r は加算混合した粗粒側連続単品材の代表粒径であり、 s_{i-1} は細粒側から計算してきた累積代表粒径で、粒径比 s_i を計算する位置の一つ前の累積代表粒径である。したがって、式(3)の第6項の累積代表粒径比 s は $s = s_{i-1} / d_o$ である。

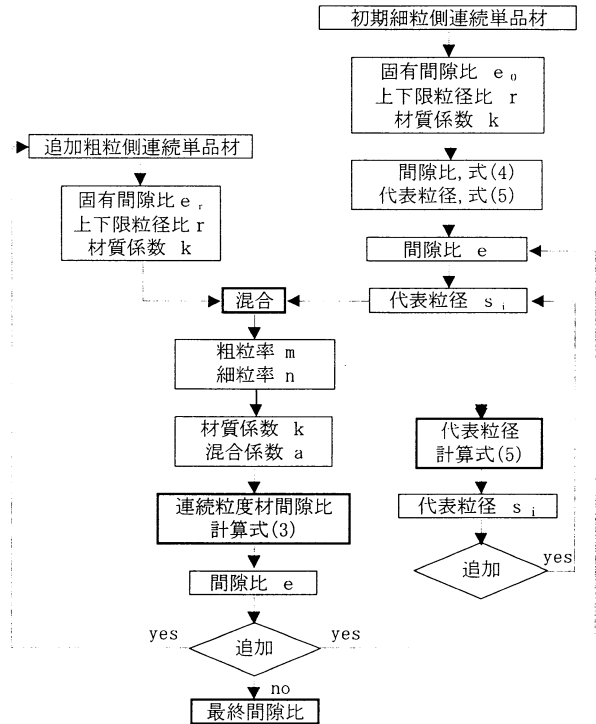


図-2 連続粒度材間隙比計算フローチャート

(4) 間隙比計算式の実験と検証

連続粒度材の間隙比計算式(3)を実験により検証した。実験は骨材単体のものとAs混合物としたものの二種類とした。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が少なくなるよう配慮した。

As混合物としてはSMA(砕石マトリックスアスファルト)を採用した¹⁰⁾。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締固めに比較すると接触点破壊が起こり難いこと、また、回転数を300回としたので最も密な状態が達成できたと判断した。

骨材粒度を変えたSMAのVMAの計算間隙率 X と測定間隙率 Y の相関は式(6)であった。

$$Y = 0.999 \cdot X + 0.141 \quad (6)$$

式(6)の相関係数は $r=0.9$ 、標準偏差は $\sigma=0.6$ となった。

ここで、計算VMAは式(3)から求めて換算した。この結果、VMAの計算値と測定値がほぼ1:1の対応を示しており、高度に有意な相関関係にあることが解った。また、砂の実験においても実験値と計算値がほぼ一致した。

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、提案した間隙比計算式(3)で最終VMAを推定できる結果といえた。

3. 骨材間隙比の計算

提案した間隙比計算式(3)および式(4)の計算方法と初期条件である固有間隙比および材質係数をどうとるかをここでは示す。

(1) 計算プログラム

間隙比計算式(3)を用いた間隙比は複雑な計算の繰り返しとなるので、パソコンを用いプログラムを開発した。表-3は13密粒As混合物の計算プログラム例である。画面は入力画面、計算画面、骨材計算画面およびAs混合画面の4枚の表構成となっている。

a) 入力画面

入力画面において太線枠内は入力部分である。まず、粒径としてフルイ目の開きサイズ(mm)を決める。粒径は大きなものから下段へ順に自由に選択できる。ただし、粒径の最小値は1ミクロンとしている。次に、各使用材料の名称、粒度、比重および配合重量を入力すると、合成粒度が自動計算される。重量粒度と容積粒度の両者が計算されるが、間隙比の計算はすべて容積計算を用いることとしている。ここで、通過重量の0は0として入力すると表示されないで0.0001と入力する。次に、後述する固有間隙比と材質係数を入力する。

b) 計算画面

入力画面で入力および訂正が終了した時点で、計算画面はVMAまでの諸計算を自動計算する。計算は初めに最小粒径(最下段)における通過容積残留率、代表粒径、累積代表粒径、細粒率、粗粒率、間隙比減量値、間隙比基本値およびその位置の間隙比を計算する。次に粒径の大なる方へ順に同様の計算を行い、その位置の間隙比を計算し、この計算を最終(最上段)まで繰り返して終了する。ここで、代表粒径は計算をする位置の粗粒側の代表粒径であり、累積代表粒径は細粒側から計算を積み上げてきた代表粒径である。細粒率と粗粒率は計算をする位置までの全量に対するそれぞれの容積比率であり、また、間隙比減量値は式(3)の第3項から第6項までの和である。間隙比基本値は式(3)の第1項と第2

表-3 13密粒As混合物の計算プログラム

(入力画面) DATA 13密粒モデル									
粒径	使用材料	粗砂	細砂	石粉	合成粒度	重量	容積	固有間隙比	材質係数
フルイ目	6号	7号							
26.50									
19.00	100.0					100.00	100.00		
13.20	90.1	100.0				96.436	96.443	70.0	1.05
9.500									
4.750	1.2	98.7	100.0			64.133	64.205	70.0	1.05
2.360	0.0	16.3	85.0	100.0		40.699	40.903	70.0	1.05
1.180									
0.600		0.0	42.6	98.4	100.0	25.358	25.572	80.0	1.20
0.300			17.8	75.1	99.8	16.555	16.699	80.0	1.20
0.150			15.1	25.8	97.3	11.264	11.274	90.0	1.30
0.075			4.5	8.9	84.1	6.221	6.190	100.0	1.40
0.001			0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	120.0	1.60
比重	2.676	2.690	2.668	2.592	2.707	2.671			
重量	36.0	23.0	27.0	9.0	5.0	100.0			
配合%	36.0	23.0	27.0	9.0	5.0	100.0			

(計算画面)									
粒径	容積	粒	径	混	合	計	算	間	隙
フルイ目	粒度	残留	代表	累積	細粒率	粗粒率	粒径間	減量値	基本値
26.50									
19.00	100.00								
13.20	96.443	3.557	15.837	1.658	96.443	3.557	66.234	3.144	24.846
9.500									
4.750	64.205	32.238	7.918	1.525	66.573	33.427	59.431	22.204	45.385
2.360	40.903	23.302	3.348	0.667	63.707	36.293	62.767	19.935	52.960
1.180									
0.600	25.572	15.331	1.190	0.266	62.519	37.481	67.609	22.764	66.016
0.300	16.699	8.874	0.424	0.108	65.300	34.700	73.729	15.139	72.771
0.150	11.274	5.425	0.212	0.052	67.512	32.488	84.211	13.553	82.483
0.075	6.190	5.083	0.106	0.027	64.908	45.092	94.624	16.029	94.895
0.001	0.000	6.190	0.009	0.009	0.000	100.00	90.702	29.298	120.00

骨 材	平均比重	2.671
	代表粒径	1.658
	間隙比	21.702
	間隙率	17.832
※ 太線枠内は入力可能部分 最小入力値は0.0001とす		

As混合	比 重	1.029
	混 合 率	5.700
	混 合 量	13.561
	飽 和 度	76.049
	理 論 密 度	2.448
	空 隙 率	4.271

項の和であり、第2項の細粒側間隙比は細粒側から計算してきた一つ前の累積間隙比である。

c) 骨材計算画面

以上のように計算された間隙比を、ここで最終VMAに換算する。なお、平均比重および代表粒径は合成骨材のそれぞれの最終値である。この最終値は細粒側から粗粒側へ計算をしてきた最上段の最終の値である。

d) As 混合画面

最後に、バインダーの比重と混合重量%(外割)を入力すると理論密度、飽和度および最終の空隙率が計算される。

(2) 固有間隙比と材質係数

計算に必要な固有間隙比と材質係数は前項検証実験で用いた値を参考にし、使用される骨材で測定した。実験から固有間隙比の目標値は碎石0.7、砂0.8~1.0、石粉1.2、材質係数は碎石1.05~1.1、砂1.2~1.4、石粉1.6となった。以下の計算ではこれらの係数値を用いることとした。(4章で検討した実施配合設計書ではこれらの数値を測定していない)

4. 各種As混合物の間隙率の検討

As混合物はそれぞれの使用目的による工種・工法によってその機能および物理的性質が異なっている。それは、混合物を構成する骨材配合とバインダーによる。すなわち、骨材配合はその品質・粒度とVMAであり、バインダーはその品質と混合量である。

ここでは、水利構造物用As混合物や鋼床版舗装の基層のように不透水層とする混合物から、透水機能を有効とする排水性舗装、およびその中間的な位置にあるAs舗装混合物の実施施工例の配合設計について式(3)の有効性を検討した。これらの配合設計は殆どの場合、M試験法による測定VMAとその他特性値を求めるようにしている。そこで、計算プログラムを用いて、これらAs混合物の計算VMAと測定VMAを比較・検討した。その結果を表-4に、また、計算VMAと測定VMAの関係を図-3に示した。

なお、いずれのAs混合物の配合に於いても、既往ではAs混合物のVMAは混合物の配合試験の結果だけからしか求めることができないことに対し、ここでは、式(3)で求めた最終VMAから配合試験の結果の妥当性を評価することとした。

(1) 水利構造物用As混合物

水利工用のAs混合物は不透水層となることが求められるため、飽和度100%を目標に配合設計される。これには、配合設計でVMAをできるだけ小さくし、As量を加えて飽和度100%が目標となる。その結果、表-4に示すとおり計算VMAは11.4%と小さくAs量7.7%で飽和度100%となる。

しかし、実施配合は配合設計の供試体作成時に於いて、法勾配を考慮して過飽和の状態として設計されたため、測定VMAは19.6%と計算値と比較して小さくならず、また、1.9%の残留空隙を取り込んだ状態となっている。

法勾配から現場施工で軽い転圧を考慮しM締固めで25回とした。その結果、施工後においてもVMAは変化しないこともあり、計算上の最終VMAにはならないことから、その要求性能には問題が少ないとみなせた。

(2) 鋼床版橋面舗装用グースAs混合物

鋼床版橋面舗装用グースAs混合物は鋼床版への防水効果と、施工では流し込みであるため⁽²⁾、配合設計ではVMAをできるだけ小さくし、As量を加えて飽和度100%を目標としている。

As要綱では骨材だけのVMAを18%以下とすることとしているが⁽¹⁾、計算VMAは10.9%であった。

表-4 As混合物の実施配合例

工 種		調整池 水利工	鋼床版 グース	実験用 SMA	中央道 13表層	一般道 13密粒	一般道 排水性
粒 径・ 通 過 重 量 率	26.50	100.0					
	19.00	98.5	100.0			100.0	100.0
	13.20	82.5	98.9	100.0		98.1	95.6
	12.70				100.0		
	9.500		92.6		88.0		
	4.750	67.7	75.0	44.7	64.0	62.5	20.1
	2.360	58.4	53.9	30.8	47.0	42.9	15.1
	0.600	43.8	44.3	22.0	26.0	23.6	11.3
	0.300	33.9	33.4	17.3	16.0	16.7	9.3
	0.150	19.6	28.4	14.4	8.0	9.0	5.8
0.075	12.4	23.5	11.3	5.7	5.8	4.0	
理 論 値	As量%	7.7	8.7	6.2	6.7	5.7	4.8
	密度 g/cm ³	2.366	2.389	2.452	2.420	2.448	2.477
測 定 値	密度 g/cm ³	2.320	2.382	2.393	2.313	2.358	1.981
	VMA%	19.6	18.9	17.0	20.2	17.2	31.6
	空隙率%	1.9	0.3	2.4	4.4	3.7	20.0
	飽和度%	90.1	98.4	85.9	78.1	78.6	36.6
計 算 値	VMA%	11.4	10.9	17.1	20.0	17.8	30.1
	空隙率%	0.0	0.0	2.5	4.3	4.3	18.5
	飽和度%	100.0	100.0	85.6	78.7	76.0	38.4

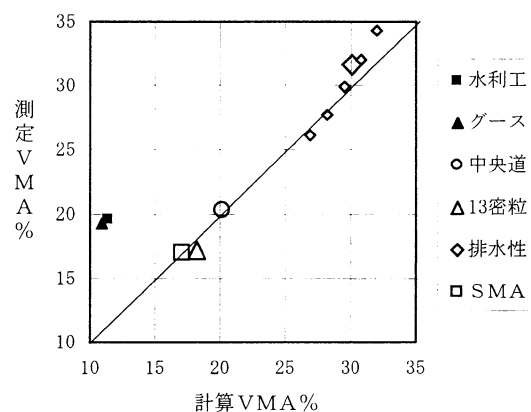


図-3 各種混合物のVMA

この計算VMAに相当するAs量は重量比率で5.2% (=1.15*10.9/2.389) となり、これに流し込み施工に必要なAs量の(1~4)%の範囲で追加する量として3.5%を加算し8.7%としたと説明できる。

現場施工では転圧を要しないこと、VMAは施工後においても変化し難いことから最終VMAにはならず、要求性能は満たせると考えられる。

(3) 一般舗装用密粒As混合物

一般の13密粒As混合物は表-3に計算プログラムの例として示した。最終VMAは17.8%となっており、供試体の測定VMAは表-4に示すとおり17.2%で計算値とほぼ同一とみなせた。このAs混合物は通常用いられているものであり、それらのなかでも比較的VMAが確保された混合物であるとみなせる。

As量5.7%で計算VMAから求めた空隙率は4.3%、測定VMAでは3.7%となっている。ここで、仮にAs量を1%増して6.7%とすると計算上の残留空隙率は2.1%となり、わだち掘れ発生の危険性があることが解る。

(4) 中央高速道路のAs混合物

長期間供用性良好であった中央高速道路府中舗装工事の表層As混合物の計算画面を表-5に示した^{13), 14)}。最終VMAは20.0%で非常に大きい。これは表-4の測定VMAでも20.2%となっており計算値とほぼ同一とみなせる。また、As量6.7%と多量であるにも拘わらず空隙率が計算値および測定値とも約4.3%である。これらのことがわだち掘れ量もほとんどなく長期間の供用性が良好であった要因と考えられる。

表-3と表-5の計算画面を比較すると、粒径4.75mmの間隙比基本値は、中央道の方が約0.9%小さくなっている。このことは、粒径4.75mm以下の粒度構成には大きな差もなく、この計算では、ここまでの粒度はVMAには大きく関係していないことを示している。

しかし、粒径4.75mmの間隙比では中央道の方が大きくなっている。これは、間隙比減量値の比較で、中央道の方が5.3%小さいため計算間隙比では4.4%大きくなる。この間隙比減量値の計算状況を表-6および表-7に示した。

これによると、粒径4.75mmでは計算式(3)の第3項～第6項の各項ともそれぞれに差が認められるが、特に第4項の差で約3.6%あることが解る。

このように最終の計算では、間隙比基本値で中央道の方が7.8%大きくなるので、間隙比は3.3%中央道の方が大きくなる。このように、最大粒径や粒度の相違が間隙比に影響していることが解る。

(5) 排水性As混合物

降雨時の排水機能による安全性の確保と路面性状によるエアロポンピング音の抑制効果のある排水性舗装はVMAを大きくしたAs混合物である。

しかし、交通供用後に粉塵や交通荷重による空隙づまりや空隙つぶれ現象による機能低下が課題となっている。空隙づまり現象は高圧水による洗浄などで機能回復の研究が進められているが、空隙つぶれ現象は機能回復が難しい。空隙つぶれ現象は施工したAs混合物のVMA過小および最終VMAが解らないためなどの原因もあると考えられる。

舗装時において排水性As混合物は路面性状確保のため過小転圧の傾向もあり、施工当初は機能が良好であるが、交通荷重の自然転圧により当初のVMAは減少する。このように考えると、排水性舗装As混合物の配

表-5 中央道の表層As混合物の計算画面

(計算画面)											
粒径	容積	代表	粒径	混合	計算	間隙	比	計算	間隙	比	計算
7#目	粒度	残留	代表	累積	細粒率	粗粒率	粒径間	減量値	基本値	計算値	計算値
25.40											
19.10											
12.70	100.00										
9.520	88.00	12.00	10.996	1.574	88.000	12.000	67.020	7.639	32.632	24.993	
4.760	64.00	24.00	6.732	1.208	72.727	27.273	62.833	16.921	44.457	27.536	
2.380	47.00	17.00	3.366	0.634	73.437	26.563	62.833	16.374	51.252	34.878	
1.180											
0.590	26.00	21.00	1.185	0.347	55.319	44.681	67.381	23.001	67.472	44.471	
0.300	16.00	10.00	0.421	0.129	61.538	38.462	73.881	14.806	72.159	57.353	
0.150	8.00	8.00	0.212	0.061	49.999	50.001	84.211	17.693	84.952	67.259	
0.074	5.70	2.30	0.105	0.018	71.248	28.752	94.520	13.538	93.441	79.903	
0.001	0.00	5.70	0.009	0.009	0.000	100.00	90.793	29.207	120.00	90.793	

骨材	平均比重	2.680	As混合	比重	1.030
	代表粒径	1.574		混合量	6.700
	間隙比	24.993		飽和度	78.735
	間隙率	19.995		理論密度	2.420
※ 太線枠内は入力可能部分 最小入力値は0.0001とする			空隙率		
			4.252		

表-6 13密粒の間隙比減量値

粒径	第3項	第4項	第5項	第6項	減量値
26.50					
19.00					
13.20	0.134	7.264	-3.098	1.354	3.144
9.500					
4.750	3.533	14.072	-4.952	9.552	22.204
2.360	2.625	9.216	-3.168	11.262	19.935
1.180					
0.600	4.644	15.493	-5.272	7.898	22.764
0.300	2.176	8.190	-2.853	7.625	15.139
0.150	1.881	7.817	-2.771	6.627	13.553
0.075	2.424	5.903	-1.872	9.574	16.029
0.001	29.298	0.000	0.000	0.000	29.298

表-7 中央道の間隙比減量値

粒径	第3項	第4項	第5項	第6項	減量値
25.40					
19.10					
12.70					
9.520	0.358	5.245	-2.135	4.172	7.639
4.760	1.955	10.425	-3.845	8.386	16.921
2.380	1.904	10.527	-3.902	7.845	16.374
1.180					
0.590	5.638	13.962	-4.445	7.846	23.001
0.300	2.354	7.531	-2.541	7.462	14.806
0.150	2.895	5.789	-1.743	10.752	17.693
0.074	1.576	7.808	-2.849	7.003	13.538
0.001	29.207	0.000	0.000	0.000	29.207

合設計時に最終VMAを知っておくことが有効である。

排水性舗装As混合物の配合はできるだけVMAを大きくし、かつ飛散現象が起きない程度にバインダーを混合するよう、骨材配合とVMAの関係を検討した。

骨材は6号碎石、細砂および石粉の3種類で表-8に示す粒度のものである。この3種類を混合して粒径2.36mm通過容積百分率の目標値を12%から2%きざみに増加させて5種類の骨材配合とした。これらの粒度を表-9に示した。なお、粒径2.36mm通過容積百分率はほぼ粒度範囲の標準に入っている。

これら5種類の骨材配合にAs量4.5%に固定してM試験法で得た測定結果は表-9であった。また、式(3)で求めたVMAの計算値を表-9の下段に示した。そして、カンタブロ試験とホイールトラッキング試験の結果も考慮して求めた決定配合を表-9の右欄に示した。

これら各特性値の関係を図-3の右上部にプロットした。図-3から測定VMAを計算VMAから予測できることが解る。

また、決定配合における空隙率は20%であるが、計算VMAから求まる最終空隙率は18.5%であり、交通荷重などの自然転圧で1.5%減少し、最終的に安定した状態となると考えられる。

このことは、排水性舗装が交通開放後に、表層表面部分で5%、その下部で1%/年の空隙率が減少している調査結果にほぼ一致している¹⁵⁾。

(4) 各種As混合物の計算VMAと測定VMAの関係

水利工とグースを除いて表-4および図-3に示した計算VMAと測定VMAがほぼ1:1の対応を示しており、結果は式(6)と同じである。このように、転圧型As混合物については提案した式(3)で最終VMAを計算で求めることができるとみなせた。さらに、水利工とグースのように計算上過飽和の状態になる混合物は骨材だけの最終VMAにはならないことであるが、それらの要求性能についての説明が可能であるとした。

5. 結 論

本検討では、提案したVMAを計算で求める間隙比計算式と、転圧型の密粒As混合物、SMAから排水性舗装As混合物までの、広範なAs混合物の配合設計で求めた測定VMAとを比較検討した結果、図-3に示したとおり高度な相関関係が認められた。また、水利工およびグースAs混合物についても、施工を考慮することで計算VMAが有効であることも解った。この結果、式(3)のAs混合物の配合設計における適用性および妥当性を検証することができ、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。それを計算で求めることが可能となった。
- 2) 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、以下のように活用できることが解った。

表-8 排水性As混合物用検討試料

粒 径	6 号	細 砂	石 粉
密度g/cm ³	2.667	2.628	2.700
19.000	100.0		
13.200	94.9		
4.750	8.1	100.0	
2.360	2.5	98.1	
1.180	0.0	90.0	
0.600		77.9	
0.300		53.8	100.0
0.150		10.9	99.7
0.075		2.2	77.7

表-9 排水性舗装の配合設計

配 合	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4	HS-5	決 定
目標2.36mm通過%	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	
骨材配合%						
6 号	90.0	88.0	86.0	84.0	82.0	87.0
細 砂	5.0	7.0	9.0	11.0	13.0	8.0
石 粉	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
粒度・通過容積率%						
19.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
13.200	95.4	95.5	95.6	95.7	95.8	95.6
4.750	17.3	19.2	21.0	22.9	24.7	20.1
2.360	12.2	14.1	16.0	18.0	19.9	15.1
1.180	9.5	11.3	13.2	15.0	16.8	12.3
0.600	8.9	10.5	12.0	13.6	15.2	11.3
0.300	7.7	8.8	9.8	10.9	12.0	9.3
0.150	5.5	5.7	5.9	6.1	6.4	5.8
0.075	3.9	4.0	4.0	4.1	4.1	4.0
理論値						
As 量%	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.8
密度g/cm ³	2.489	2.488	2.487	2.487	2.486	2.477
測定値						
密度g/cm ³	1.905	1.962	2.014	2.068	2.108	1.981
VMA	34.3	32.0	29.9	27.7	26.1	31.6
空隙率%	23.5	21.1	19.0	16.8	15.2	20.0
飽和度%	31.7	34.0	36.4	39.2	41.7	36.6
計算値						
VMA	31.8	30.7	29.9	28.1	26.8	30.1
空隙率%	21.0	19.8	18.6	17.3	15.9	18.5
飽和度%	34.1	35.4	36.9	38.6	40.5	38.4

- 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) 最適バインダー量の把握。
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の空隙率がどの程度となるかが把握できる。
- c) As混合物の配合設計の合理化が図れる。
最終的な確認試験のみの実施でよい可能性。
- d) 適用現場の要求性能にあった、As混合物の配合設計と現場での施工管理（締固め度）ができる。

(2) 課題と今後の展開

計算式の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は大きくなるので、これら係数値をどう扱うかを今後の課題と考えている。

最後に、VMAを計算で求める意義は大きいと考え、この結果を今後の舗装工事に有効に活用し展開を図って行きたい。

謝辞：本検討に際して、実施施工の配合設計書の提供を日本舗道株式会社関東第二支店試験所、貫井武所長から受けた。記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会，アスファルト舗装要綱：（昭和50年，53年，63年，平成4年版）
- 2) 浜田ほか：SHRP型 ジャイレトリコンパクタの締め特性，道路建設（1996.12）
- 3) J. L. McRae: *Theory and Application of a Gyratory Testing Machine for Hot-Mix Bituminous Pavement*, ASTM STP No. 252（1959）
- 4) R. J. Cominsky他： *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*, SHRP-A-407, National Research Council（1994）
- 5) 池田：講座・SHRPで提案された新しい配合設計方法，舗装（1997.6～11）
- 6) 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
- 7) 藤波：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）
- 8) 日本道路協会，アスファルト舗装要綱：昭和42年版，PP. 198～199
- 9) 郡司，井上，赤木：骨材間隙率が加熱アスファルト混合物の基本的性質に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集（投稿中）
- 10) 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
- 11) 荒井，井上：砕石マスチックへのジャイレトリコンパクタの適用検討，舗装（1998.9）
- 12) 鈴木康一：アスファルト舗装の特殊工法，PP72～77，理工図書
- 13) 郡司：長期間供用性の良好な舗装，舗装，Vol. 28，No. 11，（1993.11）
- 14) 中央高速道路府中舗装工事施工計画書：013号，日本舗道（株）（1967.2）
- 15) 明嵐ほか：排水性舗装の空隙率低減の主要因に関する一考察，土木技術資料，Vol. 40，No. 12，（1998.12）

STUDY ON THE VOIDS IN MINERAL AGGREGATE OF HOT ASPHALT MIXTURE

Yasuo GUNJI, Takemi INOUE and Hirokazu AKAGI

Durability of pavement is a fundamental technical issue. The Chuo Expressway Fuchu Pavement Section has been in service and in good condition for more than 20 years without any repair work. The reason for high durability of this pavement was investigated analytically and experimentally. It is concluded that the key is the proportion of asphalt mixture of the surface course. Our calculation formula for appropriate voids in mineral aggregate proposed in another paper was introduced to the asphalt mixture design. This procedure is also applicable to a variety of pavement mixtures, and universality of the calculation formula is further demonstrated.