【土木学会舗装工学論文集 第 14 巻 2009 年 12 月】

実測法と計算法および加熱養生による アスファルト混合物の理論最大密度の違い

高橋　修 [1]

[1] 正会員　長岡技術科学大学准教授 環境・建設系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail : roadman@vos.nagaokaut.ac.jp

アスコンの重要な特性値である空隙率は，その状態におけるかさ密度と理論最大密度（*Dmm*）から求められる．わが国では，アスファルト混合物の原材料の密度とそれら材料の配合比に基づいて，計算で *Dmm* を求めている（計算法）．これに対して先進諸外国では，実際に練り混ぜたアスファルト混合物を使用して直接 *Dmm* を測定する方法で求めている（実測法）．本研究では，*Dmm* を実測法で求めた場合と計算法で求めた場合のアスコン空隙率の差異，およびアスファルト混合物の試料を加熱養生した場合の影響について定量的に検討した．その結果，基準密度の状態のアスコンでは，空隙率に 0.1～1.0%の違いがあり，設計アスファルト量の値に無視できない影響を及ぼすことを明らかにするとともに，加熱養生の必要性を確認した．

Key Word *: theoretical maximum specific gravity, asphalt mixture, Rice Method, mixture design*

１．はじめに

アスファルト混合物の配合設計やアスファルトコンクリート（アスコン）層の施工管理，供用性の評価においては，重要な特性値として空隙率が使われている．アスコンの空隙率は，その状態におけるかさ密度と理論最大密度（*Dmm*）から求められる．わが国では，アスファルト混合物を構成する個々の原材料の密度，すなわち骨材とフィラー，およびアスファルトバインダのそれぞれの密度とそれら材料の配合比に基づいて，計算で *Dmm* を求めている（計算法）．そしてこの場合，骨材の密度としては見かけ密度を用いている．これに対して，米国，カナダでは，実際に練り混ぜたアスファルト混合物を使用して直接測定する方法（実測法）のほうが計算法よりも合理的と考え，*Dmm* は実測法によって求められている．実測法は，水浸させた試料に対して真空ポンプを用いて強制的に空隙を取り除く手法であり，一般に Rice 法と称されている [1)]．

実測法は，舗装調査・試験法便覧に「G027 アスファルト混合物の最大密度試験法」としてわが国においても標準化されている [2)]．しかしながら，わが国では，実測法は配合設計のプロセスで用いられることはなく，専ら現場の切取り供試体やリサイクル用のアスファルト廃材の *Dmm* を求める場合に採用されている．個々の原材料の密度や実際の配合割合には定誤差や過誤の混入が避けられないこと，およびアスファルトと水では骨材での吸収のされ方に差異があることから，実際に使う原材料を加熱混合したものを直接測定して求める実測法のほうが，精度および信頼性の点で妥当であると考えられる．

米国，カナダ以外の先進諸外国でも，配合設計時の *Dmm* は実測法による値を採用する傾向が強くなっていることから，因習的な計算法と Rice 法による実測法とでは，それらの値にどの程度の差異があるのかが重要となる．そして，その差異が空隙率の値に与える影響について定量的に評価し，求め方の違いによって配合設計や施工管理の結果が影響されるものなのかどうか検討することは，計算法のみを標準的に採用しているわが国にとっては，基本的な検討課題の一つと位置づけられる．

また，配合設計法によっては，空隙率のみの値に基づいて設計アスファルト量（OAC）を選定することがあり，より実際に即した空隙率を求めるために，練り混ぜて締め固めるまでに養生時間を設ける場合がある．これは，実際の施工現場では，アスファルト混合物を練り混ぜて現場に運搬し，敷き均して締め固めるまでにはかなりの時間を要して，その間に骨材がアスファルトを吸収することを考慮するものである．例えば，米国の Superpave 配合設計法では，練り混ぜて締め固めるまでに，締固め温度で 2 時間養生することが規定されている [3)]．このような目的で混合物を養生することは Mixture Conditioning と表現されているが，本文では「加熱養生」と表記する．実際よりも少ないアスファルトの吸収状態で混合物を評価すると，アスコンの供用性に関わる構成要素

としての空隙率が過大評価されるとともに，実質的に骨材を相互に付着させる有効アスファルト量（被膜厚）も過大評価されてしまうことになる．

以上のような実状から，本研究では，①アスファルト混合物の *Dmm* について，実測法で求めた値と計算法で求めた値を比較し，その違いが空隙率に及ぼす影響を定量的に評価すること，②加熱養生による骨材のアスファルト吸収が空隙率と有効アスファルト量に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とした．そして，わが国の配合設計法では空隙率が異なると OAC の決定にも影響が及ぶことから，その影響がどの程度のものなのかについても検討を加えた．本文は，先の報告 [4]に多くのデータを加え，より詳細，かつ定量的に内容を充実させたものである．実測法が計算法よりも合理的と考えられている理由に基づく，本研究の着目点とアスファルト舗装技術における本研究の位置づけについては，先の報告においてより詳細に記されている．

実測法を運用している諸外国では，理論最大密度よりも理論最大比重のほうが汎用的であり，理論最大比重を *Gmm* と表記している．わが国の舗装業界では理論最大密度のほうが一般的な物理量であることから，本文では理論最大密度を *Dmm* と表記して *Gmm* と区別している．本文中での式等の表現や展開が *Gmm* の場合とは異なるので注意されたい．

2．検討要領

(1) 使用材料

本研究で検討したアスファルト混合物は，設計粒度範囲の中央値を目標粒度とした密粒度アスファルト混合物(13)（密粒 13）であった．骨材は新潟県内の 3 地域産，茨城県産，および埼玉県産の合計 5 つのグループのものを使用し，バインダは一般的なストレートアスファルト 60/80 を使用した．各骨材グループに対して通常のマーシャル安定度試験に基づく配合設計を行い，共通範囲法によって OAC を決定した（以下，本文ではこの方法をマーシャル法と称す）[5]．したがって，ここでは合計 5 種類の密粒 13 を検討対象にして，それぞれの *Dmm* を測定した．

(2) 試験装置

本研究の Rice 法では，**図-1** に示す試験装置を使用した．この装置は米国 AASHTO の規定 [6]を参考にして独自に構成したもので，試料を水とともに入れる真空容器，空気を吸引する真空ポンプ，吸引圧力を調整する制御器（レギュレータ），およびこれらを繋ぐホース類で構成されている．レギュレータと真空容器の間にある水分トラップは，シリカゲルを入れ

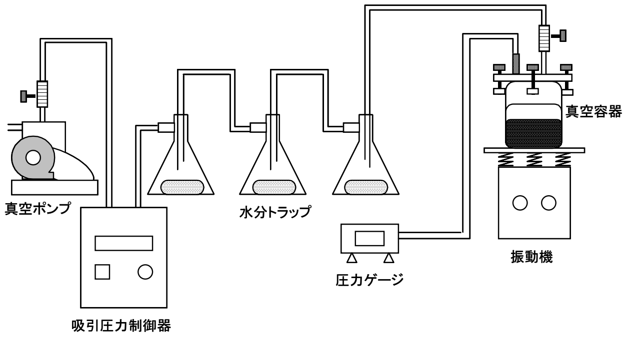

図-1 Rice 法試験装置の概要

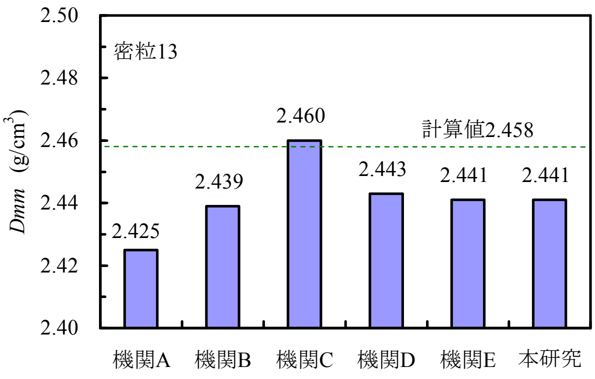

図-2 測定機関による *Dmm* 実測値の比較

た三角フラスコを 3 連に繋げたものであり，吸引によって水分がレギュレータや真空ポンプに入り込むことを防ぐために配備されている．また，真空容器には，吸引圧力をモニタするための圧力ゲージが取り付けられている．

真空容器としては三角フラスコやアルミ円筒容器が使用されているが，本研究では予備試験に基づいて，以下の 3 点の理由によってガラス製の丸底フラスコを使用した．①吸引による空気の除去を行うには真空容器を振動させることが必須であり，機械式の加振装置を用いる場合は，底が丸い容器のほうが全体の試料が大きく動いて空気が抜けやすい．②振動させて脱気する場合，容量が大きな容器が必要となることから，脱気後の試料の体積を求めるにはピクノメータ法が有効である．③空気の抜け具合や振動による骨材の移動状況を目視で確認するためには，透明な容器が望ましい．

本試験では，脱気のための試料の振動，撹拌が極めて重要である．わが国では手作業によって脱気を行っている場合が多いが，試験者によって測定結果にかなりのばらつきを生じてしまうことがある．**図-2** は，前節に記した一つの骨材グループとバインダを使用して作製した同一配合の試料に対して，異なる 6 研究機関で *Dmm* を実測した結果である．左の 3 機関のデータは手作業によって脱気した場合で，右の 3 機関のデータは振動あるいは撹拌の専用機器を

用いて脱気した場合である．機関 D の機器は米国 ELE 社製のもので主に上下振動によって試料に動きを与える機構であり，機関 E の機器は試料容器の縦軸に対して左右に周期的な回転運動を与えることによって試料を動かす国産のものであった．本研究で使用した機器は，機関 D および機関 E の機器の動きを同時に与える機構，すなわち上下の縦振動を与えながら試料容器を交番して回転させる形式のものであった．縦方向の振動は，周波数が可変である．

手作業による結果は，機関 B と機関 C では専用機器を用いた場合と同等，あるいはさらに計算値に近い値が得られているが，機関 A では値が小さく，結果的にかなりばらつきが大きくなっている．個々の骨材の密度測定値が正しいと仮定すれば，実測値は計算値を超えることはなく，機関 C の値が計算値を超えて最も大きい理由が不明であることから，機関 C の値が最も真値に近いとは判断できない．以上のことから，試験者の違いに起因するばらつきを抑えるという観点においては，専用機器を使用して脱気することは有効であると評価される．

(3) 試験手順

Dmm の測定は，わが国の舗装調査・試験法便覧の基準と AASHTO の規定に準拠して実施した．試験手順の概略は以下に示すとおりであった．

骨材重量を 1,500 g として，配合設計の結果に基づいて材料を加熱混合し，アスファルト混合物を練り混ぜる．練り混ぜ終了後，直ちに混合物を鉄板上に広げ，送風しながらヘラおよび手によってばらばらにほぐす．試料をほぐす作業では，骨材を割らないように注意し，細骨材部分は粒子が 5 mm 以下となるようにする．試料の温度が室温まで低下した後，試料を再度ばらばらに細分しながら真空容器に投入する．加振によって試験中に試料が多少動いても，充分に試料が浸る程度の水を真空容器に入れる．真空容器に吸引機器を取り付け，それらを加振装置に固定して，吸引を始める．吸引は所定の速さ（圧力変化の割合）で行い，30 mmHg の真空度に相当する圧力 97.3 kPa を超えるまで吸引圧力を上げていく．そして，その吸引圧力を保持したまま，加振装置を起動して真空容器内の空気を追い出す．この場合，加振装置の縦方向の振動数は，骨材粒子の動きが最も大きくなるように設定する．

本試験では，真空容器内の脱気が確実に行われるように，吸引圧力を規定以上とすること，および試料の振動，撹拌を十分に行うことが重要である．試料の振動，撹拌の程度については，試験環境や試料条件に依存するため，詳しい規定が設けられていない．振動，撹拌の時間を変化させ，さらに手作業による追加の振動を施した予備試験を実施したところ，ここでの試験環境では，60 分以上加振装置にかけることによって，真空容器内の空気が十分に追い出されることを確認した．

表-1 *Dmm* の実測値と計算値の比較

骨材グループ		A	B	C	D	E
OAC (%)		5.8	6.2	6.3	5.7	5.5
実測値 g/cm^3	1	2.443	2.408	2.423	2.456	2.498
	2	2.442	2.410	2.421	2.456	2.497
	3	2.445	2.409	2.425	2.458	2.497
	平均	2.443	2.409	2.423	2.457	2.497
計算値(g/cm^3)		2.462	2.420	2.449	2.460	2.503
差 (g/cm^3)		0.019	0.011	0.026	0.003	0.006
合成吸水率(%)		1.24	1.71	1.94	1.28	1.13

脱気が完了したら吸引圧力を徐々に下げ，容器内を大気圧に戻す．吸引圧力の調整は，毎秒 8 kPa を超えないようにほぼ一定の速さで行った．そして，注水前と脱気後における試料を含む真空容器の重量と，容器のみ，および水のみを満たした容器の重量を測定することにより，ピクノメータ法で試料のみの重量と体積を求めて *Dmm* を算出した．一つのアスファルト混合物について試料を 3 個用意し，同じ試験を 3 回繰り返した．

加熱養生で骨材がアスファルトを吸収することの影響については，AASHTO の規定 [7]を遵守して以下のように実施した．なお，混合および養生（締固め）の温度は，通常の配合設計と同様に，使用したアスファルトの温度と粘度の関係から設定した．試料を練り混ぜ後，厚さが 50 mm 以下となるようにバットに広げ， 締固め温度に設定した乾燥機の中で 2 時間養生する．途中，1 時間経過した際に試料を軽く撹拌して，状態が均一になるようにする．2 時間養生した後，上記と同様に試料をばらばらにほぐしながら放冷し，*Dmm* を測定する．養生によりバットにアスファルトが付着するが，付着量が 0.6 g を超えると *Dmm* の有効数字に影響を及ぼすので，これを大きく上回らないように注意する．そして，加熱養生を行わない場合と測定結果を比較する．

3．実測法と計算法による *Dmm* の違い

(1) *Dmm* の測定結果

表-1 に 5 種類の密粒 13 に対する *Dmm* の実測値と計算値を示す．骨材グループ A, B, C が新潟県産の，骨材グループ D が茨城県産の，骨材グループ E が埼玉県産のものである．データのサンプル数は 1 配合につき 3 しかないが，測定値のばらつきはかなり小

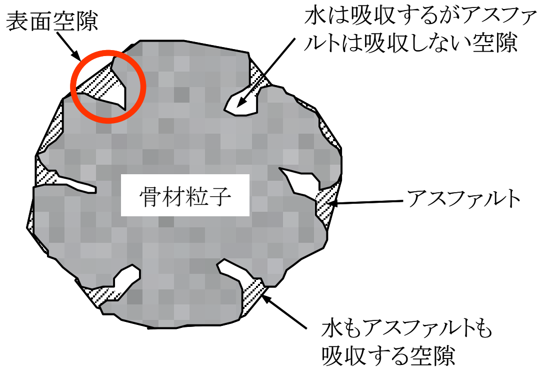

図-3　アスコン中の骨材粒子の状態

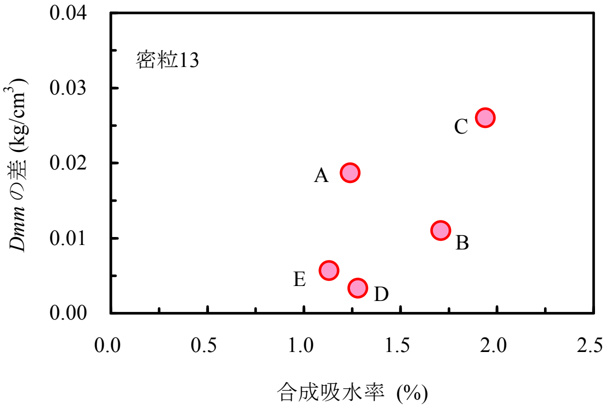

図-4 *Dmm* の差と合成吸水率の関係

さいものと評価できる．これは，脱気を促進させるための振動を，専用の機械装置を用いて行ったことによるものと考えられる．本試験装置で振動を手作業で行うと，かなりばらつきが大きくなることを，予備試験でも確認している．

Dmm の実測値と計算値の違いは，骨材の種類によってかなり差が見られ，骨材グループ D で最も小さく，最も大きい骨材クループ C ではその約 9 倍の値である．ここで，実測値と計算値の違いについて考察してみる．アスコン中における骨材の状態は**図-3** のように模式的に表わされる．実測法の *Dmm* および計算法の *Dmm*（各素材の密度）はともに測定誤差がないことによる値と仮定すれば，計算法では骨材の見かけ密度を用いるので，*Dmm* の実測値が計算値よりも小さいことは「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」によるものと考えられる．この他にも，アスファルトモルタル中に閉じ込められた空気等の存在も考えられるが，試料のほぐしを十分に行えば，その量は相対的にかなり少ないと予想される．この「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」は，水とアスファルトの粘性に起因する微細な表面空隙内への浸透性能の違いによるものである．このことから，吸水率が大きい骨材ほど実測値と計算値の差は大きくなるものと予想される．

上記の考察の真偽を評価するために，*Dmm* の差と骨材の吸収性能の関係について検討してみた．**表-1** の最後の行に示した「合成吸水率」とは，個々の骨材（フィラーは含まない）の吸水率をその配合比に応じて重み付けをして，骨材全体としての平均的な吸水率を求めたものである．個々の骨材の配合比と吸水率は，文末の**付録**に掲載している．*Dmm* の差と合成吸水率を相関図で表すと**図-4** に示すとおりである．データ数が十分でないため明確に判断することは難しいが，合成吸水率が大きいほど実測値と計算値の差が大きいという傾向を認めることができる．

わが国の配合設計では，粗骨材の吸水率が 1.5%を超える場合は見かけ密度と表乾密度の平均値を計算

表-2　実測値と計算値の *Dmm* による空隙率の比較

骨材グループ		A	B	C	D	E
基準密度(g/cm^3)		2.357	2.326	2.345	2.357	2.406
空隙率%	実測値	3.5	3.4	3.2	4.1	3.7
	計算値	4.3	3.9	4.2	4.2	3.9
	差	0.7	0.4	1.0	0.1	0.2

に用いることになっており，吸水率が大きい骨材では「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」の存在を考慮している．骨材グループ B と C は粗骨材の吸水率が 1.5%を超えていたため，*Dmm* の計算では見かけ密度と表乾密度の平均値を使用した．すなわち，他の骨材グループと同様に，見かけ密度で *Dmm* を計算した場合は，実測値と計算値の違いはさらに大きくなる．計算法で *Dmm* を求める場合，見かけ密度を使うことは「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」がゼロであると見なしており，見かけ密度と表乾密度の平均値を用いることは「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」が水を吸収する空隙の約 25%であると見なしている [8]．つまり，わが国の配合設計では，「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」の考慮を粗骨材のみに対して，吸水率が 1.5%をボーダーとして行っている．**図-4** に示した *Dmm* の差と合成吸水率の関係から考察すると，1.5%をボーダー値とすることの妥当性は確認できないが，例えば骨材グループ C のように *Dmm* の差が大きい骨材に対しては，「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」をもっと多めに考慮する必要があるものと考えられる．

(2) *Dmm* の違いによる空隙率への影響

Dmm は主に空隙率を求めるために必要とされている．**表-1** に示した実測値と計算値のそれぞれの *Dmm* より求めた，基準密度の状態におけるアスコン供試

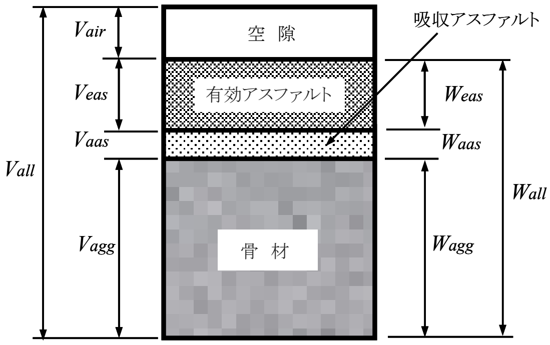

図-5 アスコン構成要素の模式図

表-3 加熱養生した場合の *Dmm* 実測値と計算値の比較

骨材グループ		A	B	C	D	E
OAC (%)		5.8	6.2	6.3	5.7	5.5
実測値 g/cm^3	1	2.447	2.412	2.427	2.460	2.501
	2	2.443	2.411	2.438	2.459	2.498
	3	2.447	2.412	2.418	2.462	2.495
	平均	2.446	2.412	2.428	2.460	2.498
計算値(g/cm^3)		2.462	2.420	2.449	2.460	2.503
差 (g/cm^3)		0.016	0.008	0.021	0.000	0.005
合成吸水率(%)		1.24	1.71	1.94	1.28	1.13

体の空隙率，およびその差を**表-2** にまとめて示す．ここで使用したアスファルト混合物については，実測法と計算法による空隙率の差異が 0.1～1.0%であった．マーシャル法の配合設計で OAC を決定する際の空隙率の基準値は，密粒度アスファルト混合物の場合, 3.0～6.0%の範囲であり, その幅は 3.0%である．この基準値の幅から評価すると，0.1%の差はさほど大きくないが，1.0%の差は配合設計の結果にかなりの影響を及ぼすものと予想される．このことについては，後述の次々章で具体的に検討している．

また，わが国の再生アスファルト混合物の配合設計では，旧材の *Dmm* は実測法で求め，新材の *Dmm* は計算法で求めて，旧材と新材の混合比によってこれらを合成してその再生アスファルト混合物の *Dmm* を決定している．すなわち，実測法と計算法を混在して用いている．旧材の混入率が小さい場合はあまり問題がないが，混入率が増加傾向にある今日においては，上記のとおり，実測法と計算法では吸収アスファルトの捉え方に違いがあり，*Dmm* の値にかなりの差が認められる場合があって，実測値は計算値よりも小さいこと，その結果として合成した *Dmm* から求めた空隙率には無視できない影響が及ぶ可能性があることを認識しておく必要がある．したがって，実測法による旧材の *Dmm* を高い精度で求めることに加えて，実測法と計算法の考え方の違いを理解し，より真値に近い *Dmm* をいかにして求めるべきか検討することが重要と考えられる．

Dmm の実測値と計算値の違いは，配合設計の結果に影響を及ぼすだけではなく，アスコンの構成要素としての空隙の量の考え方にも差異を与える．配合設計では，アスコンの構成要素を**図-5** に示すように模式的に表現しているが，実測値の *Dmm* を用いるということは,「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」は図中の骨材 *Vagg* に含まれると見なしていることになる．これに対して，計算値の *Dmm* を用いるということは,「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」は空隙 *Vair* に含まれることになる．すなわち，計算法では,「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」はゼロ，もしくは吸水率が大きい場合は水を吸収する空隙の約 25%と見なし，これらの仮定と実際との違いは *Vair* の一部として計算されることになる．基準密度状態のアスコン空隙率の基準値が 3.0～6.0%，実際には 4.0%前後であることから，**表-2** に示した空隙率の差，すなわち「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」は無視できるほど少ないものではなく，これをアスコンの構成要素としての *Vair* に含めるべきではない．したがって，骨材の水とアスファルトの吸収性能，およびその差異が不明確な場合は，実測法によって *Dmm* を求めたほうが，混合物の配合設計やアスコンの評価をより厳密に行うことができると考えられる．

4. 加熱養生による吸収アスファルトが配合設計特性値に及ぼす影響

(1) *Dmm* および空隙率への影響

以上の検討により, *Dmm* の実測値と計算値の違い，およびその程度は,「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」の存在とその量によることが理解できた．そして,「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」は，その骨材が有するアスファルトの吸収性能に依存するものであり，アスファルトと骨材表面が接触している時間と温度が大きく影響していることが容易に予想される．

加熱養生によって，骨材がアスファルトを吸収することの *Dmm* への影響は，前章の加熱養生を施さない結果と締固め温度で 2 時間の加熱養生を施した結果を比較することで検討した．**表-3** は加熱養生を行った場合の**表-1** に相当する結果を示したものである．二つの表を比較してみると，加熱養生を行うことにより，*Dmm* の実測値はすべての骨材グループで増加している．合成吸水率が小さい骨材グループ E では，*Dmm* の実測値は 0.001 g/cm^3 だけの増加であるが，他

表-4　加熱養生した場合の実測値と計算値の D_{mm} による空隙率の比較

骨材グループ		A	B	C	D	E
基準密度(g/cm^3)		2.357	2.326	2.345	2.357	2.406
空隙率 %	実測値	3.6	3.6	3.4	4.2	3.7
	計算値	4.3	3.9	4.2	4.2	3.9
	差	0.6	0.3	0.8	0.0	0.2

の骨材グループでは 0.003～0.005 g/cm^3 大きくなっており，その分だけ計算値との差が小さくなっている．また，骨材グループ D では加熱養生による増加によって実測値と計算値が同じになっている．

前章と同様に，基準密度状態のアスコン供試体（加熱養生を行っていない）の空隙率を**表-3** に示した実測値から計算してみると，**表-4** に示すとおりである．加熱養生したことにより D_{mm} の値が大きくなって，E 以外の骨材グループのものは空隙率も大きく計算されている．

加熱養生を行うことは，実際の状況により近づけるものであり，上記のように設計パラメータである空隙率に無視できない影響を及ぼすことから，配合設計のプロセスにおいて有用な手続きと評価される．また，加熱養生を行うことで，「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」は計算法の仮定により近づくことになるが，空隙率の差は小さくないことから，実測法の必要性は否定することができない．

(2) アスファルト量への影響

加熱養生によって骨材の吸収アスファルトが増加することにより，有効アスファルトは減少することになる．すなわち，**図-5** に示したアスコン構成要素の模式図において，W_{eas} と W_{aas}，あるいは V_{eas} と V_{aas} の和は変化しないが，W_{eas} あるいは V_{eas} が減少し，W_{aas} あるいは V_{aas} が増加することになる．ここでは，骨材相互の付着に寄与する有効アスファルト W_{eas}，V_{eas} の減少量について考察する．

図-5 に示した模式図における吸収アスファルトと骨材の部分を，**図-2** に示した骨材粒子の状態に対応させてより詳しく表現すると，**図-6** に示すとおりとなる．ここで，実際の「水は吸収するがアスファルトは吸収しない空隙」を骨材粒子の固体部分に含めた場合の密度である有効密度（D_{se}）[2), 9)]を導入すると，D_{se} は**図-6** の記号を用いて次式で定義される．

$$D_{se} = \frac{W_s}{V_s + V_{aw} - V_{aas}} \qquad (1)$$

ここに，W_s と V_s は骨材固体部の質量と体積である．

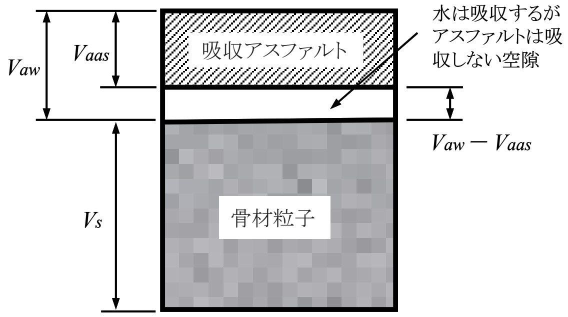

図-6 アスコン中における骨材粒子の模式図

表-5　加熱養生による吸収アスファルトの増加量

骨材グループ	A	B	C	D	E
※養生なし D_{mm}	2.443	2.409	2.423	2.457	2.497
※養生あり D^*_{mm}	2.446	2.412	2.428	2.460	2.498
増加量 (%)	0.040	0.048	0.082	0.063	0.011

※単位：g/cm^3

図中の記号を加熱養生前の状態とし，加熱養生後の状態はそれぞれの記号の右上に * を付して表現すると，吸収アスファルト増加分の体積は以下のように表される．

$$V^*_{aas} - V_{aas} = W_s\left(\frac{1}{D_{se}} - \frac{1}{D^*_{se}}\right) \qquad (2)$$

これを質量に変換して，アスコン全質量に対する比，すなわちアスファルト量で表すと次式となる．

$$\frac{\left(V^*_{aas} - V_{aas}\right)D_b}{W_s + W_a} = \frac{W_s}{W_s + W_a} D_b\left(\frac{1}{D_{se}} - \frac{1}{D^*_{se}}\right) \qquad (3)$$

ここに D_b はアスファルトの密度，W_a はアスファルトの質量（W_{eas}＋W_{aas}）である．また，D_{se} は実測法で求めた D_{mm} より次式で表される．

$$D_{se} = \frac{1 - P_b}{\dfrac{1}{D_{mm}} + \dfrac{P_b}{D_b}} \qquad (4)$$

ここに，P_b はアスファルトの配合比である．式(4)を式(3)に代入し，$W_s / (W_s + W_a) = 1 - P_b$ の関係を用いて整理すると，最終的に次式が得られる．

$$\frac{\left(V^*_{aas} - V_{aas}\right)D_b}{W_s + W_a} = D_b\left(\frac{1}{D_{mm}} - \frac{1}{D^*_{mm}}\right) \qquad (5)$$

式(5)より求めた各骨材グループでの吸収アスファルトの増加量を**表-5** に示す．OAC の有効数字から判断すると，アスファルト量としてはかなり小さな値であるが，骨材グループ C と D については無視できる量とは言い切れない．加熱養生，すなわち混合して締固めまでに有効アスファルトが減少することに

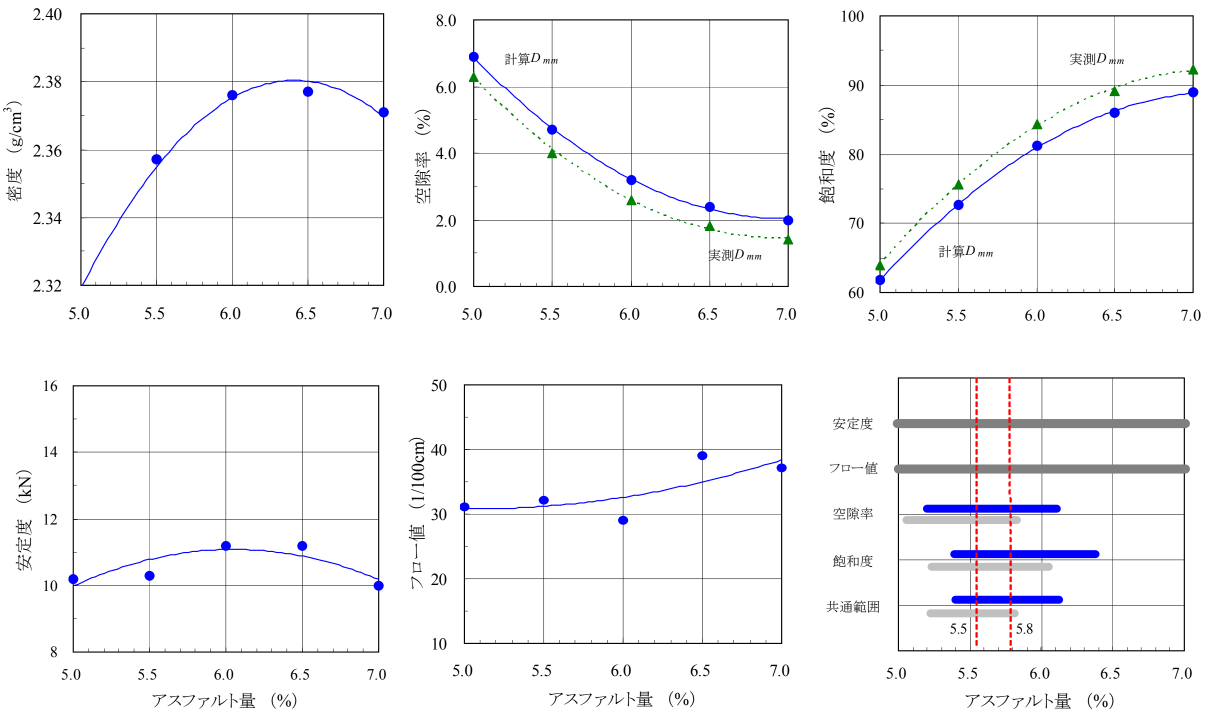

図-7 骨材グループ A における配合設計の特性値と OAC（*Dmm* の実測値と計算値の比較）

より，骨材の締め固まり状況が変化し，締固め後の空隙率や骨材相互の付着力への影響が懸念される．つまり，加熱養生を行わないと，有効アスファルトの量をわずかであるが過大評価して配合設計を行うことになる．この点からも，配合設計のプロセスでの加熱養生の必要性が認識される．

5．空隙率の違いが配合設計に及ぼす影響

(1) 空隙率の違いが OAC に及ぼす影響

前章で示した *Dmm* の実測値と計算値の違いが，アスファルト混合物の配合設計の結果にどの程度の影響を及ぼすのか具体的に検討してみた．わが国のマーシャル法で *Dmm* の値が関係している設計パラメータは空隙率であり，空隙率が異なると飽和度（VFA）と骨材間隙率（VMA）も変化する．

本研究の骨材グループ A に対して，加熱養生を行った実測値の *Dmm* による空隙率を用いた場合と，計算値の *Dmm* による空隙率を用いた場合の設計パラメータの結果を**図-7** にまとめて示す．**表-3** に示した *Dmm* の実測値は OAC の場合のものであり，配合設計では任意のアスファルト量に対する *Dmm* の値が必要となる．ここでは，OAC の場合に加えて，OAC よりも多い場合と少ない場合の合計 3 とおりのアスファルト量に対する *Dmm* を実測法で求め，先の式(4)からそれぞれの *Dse* を求めた．*Dse* はアスファルト量に依存しないので，式(4)を *Dmm* を求める形に変え，これに 3 条件の *Dse* の平均値を代入して任意のアスファルト量に対する *Dmm* を求めた．**図-7** に示した実測 *Dmm* による空隙率および VFA は，このようにして求めた *Dmm* から計算した値である．

表-6 *Dmm* の違いによる OAC の比較（加熱養生あり）

骨材グループ		A	B	C	D	E
Dse (g/cm^3)		2.670	2.646	2.670	2.683	2.723
OAC (%)	実測*D mm*	5.5	6.0	6.0	5.7	5.5
	計算*D mm*	5.8	6.2	6.3	5.7	5.5
	差	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0

実測値と計算値の *Dmm* による空隙率，および VFA の値は上下にスライドした関係となるため，設計基準の値を満足するアスファルト量の範囲がそれぞれ異なる．その結果，共通範囲法で求めた OAC は，実測値の *Dmm* によるもののほうが計算値の *Dmm* によるものよりも 0.3%少なくなっている．前章でも示したように，一般に *Dmm* は実測値のほうが計算値よりも小さいため，実測値の *Dmm* によって決定した OAC は計算値の *Dmm* によって決定したものよりも少なくなる．

上記と同じ手続きによって，他の骨材グループについても *Dmm* の違いによる OAC の差異を求めてみると，**表-6** に示すとおりである．骨材グループよって実測値と計算値の *Dmm* の差に違いがあることから，その差に応じて OAC に違いが見られる．骨材グループ E を使用したアスファルト混合物では，OAC の有効数字に埋もれて明確な違いが現れていないが，骨

材グループA，B，Cでは違いが認められる．すなわち，*Dmm* の実測値と計算値の違いが 0.005 g/cm^3 程度であれば，実測法と計算法のどちらで *Dmm* を決定しても影響はないが，0.01 g/cm^3 のオーダーになると *Dmm* の決定方法によって OAC が異なる．また，加熱養生を行わない場合は**表-6** に示した結果とほぼ同様で，実測値と計算値の *Dmm* の差が大きい骨材グループ C のみで違いが見られ，OAC の差が 0.4%とさらに大きな結果であった．

ここで著者が強調したいのは，実測法による *Dmm* を用いて通常の配合設計の基準で選定した OAC は，計算法の *Dmm* による結果よりも小さめに決まってしまい，その実状は**表-6** に示したとおりであること，および実測法の *Dmm* を使う場合はこのような実状を認識しておく必要があることである．わが国の配合設計では，空隙率およびそれに関連する VFA が支配的な設計パラメータであり，これまでの運用実績から，これらの基準値は計算法による *Dmm* に立脚した基準であると理解される．そのため，吸水率の高い骨材に対して，実測法による *Dmm* を直接用いて配合設計を行う場合は，基準値の調整等の配慮が必要と考えられる．

(2) OAC の違いがアスコン物性に及ぼす影響

表-6 に示したように，本研究で用いた骨材条件では，*Dmm* に実測値を用いた場合と計算値を用いた場合とでは OAC に 0.0～0.3%の違いがあった．アスファルト量が異なれば，アスコンの物性もかなり異なるはずである．本節では，*Dmm* の違いで OAC が異なることによって，アスコンの物性がどの程度異なるのか具体的に把握するために，アスファルト量のみを変化させたアスコンに対するホイールトラッキング試験（WT 試験）の結果を示す．

骨材グループ A を使用し，アスファルト量を 4.0～6.5%の範囲で 0.5%毎に変化させた合計 6 種のアスファルト混合物に対して，舗装調査・試験法便覧の規定に従って WT 試験を実施した．供試体の作製にあたっては，特に加熱養生は考慮しなかった．1 条件に対して試験のサンプル数は 2 とした．

試験の評価値として動的安定度（DS）に着目すると，各アスコンの DS は**図-8** に示す結果となった．*Dmm* に実測値を用いた場合の OAC の条件（5.5%）では，DS は約 1000 回/mm であり，計算値を用いた場合の OAC の条件（5.8%）では，約 600 回/mm である．OAC の差は 0.3%であるが，DS の差は大きいものと評価される．

アスファルト量に最も敏感なアスコン物性は塑性流動抵抗性であることから，ここでは WT 試験の結果を示した．これは単なる一つの事例であり，実測法と計算法による *Dmm* の違いによる影響は様々なアスコン物性に及ぶはずである．実測法においても，また計算法においても，以上のことを考慮して *Dmm* を高い精度で求めることが重要と考えられる．

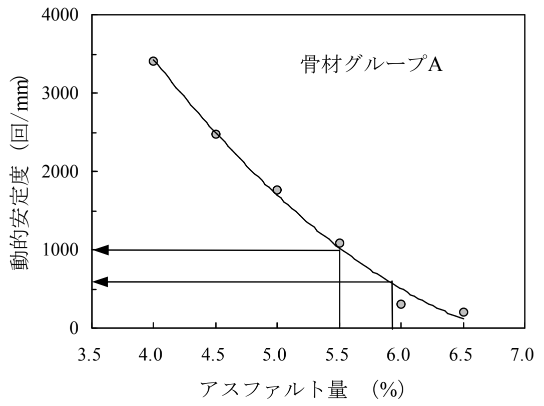

図-8 アスファルト量と動的安定度の関係

5. まとめ

本研究では，アスファルト混合物の理論最大密度を実測法で求めた場合と計算法で求めた場合に，アスコンの空隙率や設計アスファルト量ではどれくらいの差異があるのかについて定量的に評価した．さらに，実際に即した加熱養生を行った場合の，実測値への影響についても検討した．以下に，本研究で得られた知見をまとめる．

① ここで用いたアスファルト混合物では，空隙率の差は 0.1～1.0%の範囲であり，加熱養生を行うことにより 0.1%ほど差が小さくなる．このような差異は主に骨材の吸収性に依存するものであり，吸収性の高い骨材ほど差が大きい傾向にある．

② 上記①の違いにより，吸収性の高い骨材では設計アスファルト量に 0.5%ほどの差異を生じる．そして，このような差はアスコンの物性にも多大な影響を及ぼす．

③ 理論最大密度を実測法で求めた場合と計算法で求めた場合とでは，配合設計やアスコン評価の結果に無視できない影響を及ぼすことがあり，合理性を重視するならば加熱養生を伴う実測法を採用することが推奨される．

以上のように，本研究では，加熱養生と適切な手続きによる実測法が重要であることを指摘した．しかしながら，ポーラスアスファルトのような骨材粒度や高粘度バインダのような改質アスファルトでは，加熱養生の際にバインダ等が容器に多く付着して試験精度が低下したり，試料をばらばらにほぐすことが非常に煩雑であったりする．今後の展望，課題としては，さらに多くの骨材，アスコン種類について

付表-1　各骨材グループにおける骨材の配合比と吸水率

骨材グループ	A		B		C		D		E	
	配合比%	吸水率%	配合比%	吸水率%	配合比%	吸水率%	配合比%	吸水率%	配合比%	吸水率%
6号砕石	34.0	0.84	35.5	1.60	36.0	1.57	37.0	0.76	38.0	0.49
7号砕石	24.0	1.22	26.0	1.62	20.0	1.75	20.0	1.21	18.0	0.85
スクリーニングス	0.0	***	0.0	***	0.0	***	5.0	0.57	19.0	1.15
粗　砂	34.0	1.62	18.0	1.74	35.5	2.46	25.0	1.90	16.0	2.33
細　砂	3.0	1.51	14.0	2.09	2.5	1.59	7.0	2.50	3.5	3.98
石　粉	5.0	***	6.5	***	6.0	***	6.0	***	5.5	***

データを蓄積するとともに，配合設計基準との関係やより実際に即した精密な計算法，あるいは推定法について検討し，具体的な運用の基準化，標準化に努めることが必要と考えられる．

謝辞：本研究の遂行においては，多くの関係機関から協力を頂戴した．(株)佐藤渡辺，大成ロテック(株)，東亜道路工業(株)，長岡舗道(株)，新潟舗材(株)，(株)NIPPO，福田道路(株)からは骨材や *Dmm* の比較データを提供していただき，(株)ナカジマ技販からは *Dmm* の実測装置を製作していただいた．本研究の一部に対して，科学研究費補助金（基盤研究(C)，課題番号 20560431）を活用させてもらった．ここに記して関係各位に感謝の意を表する．

付録

本研究で使用した 5 つの骨材グループにおける各骨材の配合比と吸水率を**付表-1** にまとめて示す．

参考文献

1) Prithvi S. Kandhal and Maqbool A.Khatri : Improved Rice Method for Determining Theoretical Maximum Specific Gravity of Asphalt Paving Mixtures, NCAT Report 92-03, 1992.
2) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，G027 アスファルト混合物の最大密度試験法，pp.[4]-229 – 237，2007.
3) AASHTO：Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA), R35, 2004.
4) 高橋 修：計算法と実測法によるアスファルト混合物の理論最大密度の比較，第 26 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，pp.238 – 241，2008.
5) (社)日本道路協会：舗装施工便覧，pp.95 – 104，2006.
6) AASHTO : Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, T209, 2004.
7) AASHTO：Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA), R30, 2004.
8) 松野三朗，山下弘美：舗装技術の質疑応答 第 1 巻，建設図書，pp.65 – 67，1972.
9) Freddy L. Roberts, Prithvi S. Kandhal, E. Ray Brown, Dah-Yinn Lee and Thomas W. Kennedy : Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Research and Education Foundation, pp.192 – 204, 1996.

DIFFERENCE BETWEEN THEORITICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY OF ASPHALT MIXTURES BY CALCULATION METHOD AND MEASUREMENT METHOD, AND EFFECT OF MIXTURE CONDITIONING

Osamu TAKAHASHI

This study compared the difference between the calculation method and the standard measured method for determining theoretical maximum specific gravity (G_{mm}) of asphalt mixtures, and evaluated the effects of mixture conditioning. A value of G_{mm} is obtained by calculating the data of the sourced materials in the Japanese standard. However, G_{mm} is determined by measuring the specimens of the asphalt mixture in the developed countries. The results indicated that there is a significant percent difference in void ranged from 0.1% to 1.0%. This influences the design asphalt content in a non-negligible quantity. It was confirmed that the mixture conditioning procedure is indispensable in a mixture design process.