SMA混合物のVMAと力学特性に関する一考察

ニッポメックス㈱代表　正会員　郡司　保雄*
日本舗道㈱技術研究所所長　正会員　井上　武美**
早稲田大学理工学部土木工学科教授　正会員　赤木　寛一***

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）は耐久性を考慮した配合設計において重要な特性とされている．

SHRPが提示したSUPERPAVE[1]の容積配合設計方法では，設計交通量に応じてAs混合物の耐久性に必要なAs量とし得るよう最大粒径毎にVMAの最小値を示している．

As混合物の配合設計において，今まで実験結果だけからしか求めることができなかったVMAを予め知ることができれば，配合設計を適切に行えるとして，筆者らは骨材粒度からVMAを推定する間隙率計算式を提案し[2]，検証してきた[3]．

そしてVMAに加えてAs混合物のDS値が配合設計時に推定可能であれば，DS値とわだち掘れ量(RD値)との関係[4]からAs量が推定でき，物理的にも力学的にも耐久的なAs混合物とすることができることとなる．

ここで，SMA（Stone Matrix Asphalt）混合物について，SGC（SHRP Gyratory Compactor）で締固めた供試体を作成し，力学特性としてマーシャル安定度およびホイールトラッキング試験の動的安定度（DS値）を測定し，VMAとの関係を検討した結果，As混合物のDS値と計算VMAから算出した計算空隙率との間に相関関係を見いだした．この結果，提案した間隙率計算式からAs量と空隙率を求めることで，耐久的なAs混合物の配合設計が可能と推測されたので報告する．

表-1　使用骨材の粒度と比重

粒径mm	砕石６号	砕石７号	Scr	粗　砂	細　砂	石　粉
13.200	100.0					
4.750	0.0	100.0				
2.360		0.0	100.0	100.0	100.0	
0.600			51.1	46.5	68.4	100.0
0.300			32.7	25.1	24.7	99.9
0.150			18.2	15.5	3.7	98.3
0.075			11.7	3.9	1.2	83.7
比　重	2.680	2.713	2.691	2.694	2.741	2.782

表-2　骨材配合と合成粒度（容積率）

配合		上限		上中間		中央		下中間	
材種		砂のみ	Scr入	砂のみ	Scr入	砂のみ	Scr入	砂のみ	Scr入
骨材配合率%	砕石６号	50.0	50.0	55.0	55.0	60.0	60.0	65.0	65.0
	砕石７号	15.0	16.0	13.7	14.0	12.5	12.0	11.3	10.5
	Scr	—	9.0	—	9.0	—	9.0	—	7.5
	粗　砂	10.0	7.0	9.0	5.8	8.0	4.5	7.0	4.3
	細　砂	10.0	5.0	8.5	4.2	7.0	3.5	5.5	2.7
	石　粉	15.0	13.0	13.8	12.0	12.5	11.0	11.2	10.0
粒度容積通過率%	13.200	100	100	100	100	100	100	100	100
	4.750	49.7	49.7	44.7	44.7	39.7	39.7	34.9	34.8
	2.360	34.7	33.8	31.1	30.8	27.3	27.8	23.5	24.3
	0.600	26.3	24.1	23.6	22.0	20.8	19.9	18.1	17.5
	0.300	19.8	18.8	18.0	17.3	16.1	15.8	14.2	14.1
	0.150	16.5	15.6	15.2	14.4	13.7	13.2	12.2	11.9
	0.075	13.0	12.2	11.9	11.3	10.8	10.4	9.6	9.4
比　重		2.699	2.696	2.697	2.694	2.695	2.692	2.693	2.691

2．SMA混合物のVMAとDS値

実験対象をSMA混合物とし，力学特性としてはマーシャル安定度とDS値とし計算VMAとの関係を検討した．

2．1　実験概要と結果

骨材は通常使用している砕石６号，７号，スクリーニングス（Scr），粗砂，細砂および石粉とし表-1に示す．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[5]．合成粒度は比重補正を行い容積粒度に換算した．これらを表-2に示す．

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締固め仕様はモールド径10cm，旋回角度1.25°，圧力588.6kPa(6kgf/cm²）および最大旋回数300回とした．ここで，合成粒度を示した表-2の粒度にバインダーを添加して作成した供試体のDS値を測定した．その試験結果を表-3に示す．

キーワード：アスファルト混合物，VMA，SMA，DS値，空隙率

連絡先：*　〒331-0062 埼玉県大宮市三橋6-70 ニッポメックス㈱ TEL048-622-9631 FAX048-622-9632
**　〒140-0002 東京都品川区東品川3-32-34 日本舗道㈱技術研究所 TEL03-3471-8541 FAX03-3450-8806
***　〒168-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 58号館205 早稲田大学理工学部土木工学科 TEL03-5286-3405 FAX03-5272-0695

表-3　VMA・空隙率とＤＳ値の関係-総括表

			理論	As	測定値（SGC締固）			計算値		WT試験
As	No	配合	密度g/cm	%	密度g/cm	空隙率%	VMA%	VMA%	空隙率%	DS回/mm
ストレートアスファルト	1	上限	2.470	5.8	2.393	3.130	16.893	15.643	1.880	670
	2	上限	2.460	6.1	2.421	1.568	15.980	15.643	1.231	400
	3	上限	2.449	6.4	2.404	1.833	16.889	15.643	0.587	330
	4	上限	2.472	5.7	2.404	2.735	16.268	16.279	2.746	1020
	5	上限	2.461	6.0	2.419	1.700	15.883	16.279	2.096	750
	6	上限	2.450	6.3	2.437	0.537	15.365	16.279	1.451	400
	7	上中	2.462	6.0	2.391	2.868	17.055	16.629	2.441	1130
	8	上中	2.451	6.3	2.377	3.016	17.848	16.629	1.796	560
	9	上中	2.440	6.6	2.423	0.710	16.182	16.629	1.157	410
	10	上中	2.463	5.9	2.372	3.697	17.657	17.139	3.179	1300
	11	上中	2.452	6.2	2.393	2.421	17.027	17.139	2.533	790
	12	上中	2.442	6.5	2.395	1.916	17.163	17.139	1.892	570
	13	中央	2.456	6.1	2.332	5.067	19.462	17.846	3.452	1600
	14	中央	2.446	6.4	2.392	2.202	17.239	17.846	2.809	1310
	15	中央	2.435	6.7	2.376	2.436	18.110	17.846	2.172	1230
	16	中央	2.458	6.0	2.351	4.360	18.528	18.122	3.954	1800
	17	中央	2.448	6.3	2.355	3.781	18.593	18.122	3.310	1270
	18	中央	2.437	6.6	2.391	1.888	17.338	18.122	2.672	1170
改質アスファルト	19	上限	2.445	6.4	2.409	1.471	16.663	15.643	0.451	1500
	20	上限	2.434	6.7	2.412	0.914	16.748	15.643	0.000	1230
	21	上限	2.424	7.0	2.392	1.305	17.776	15.643	0.000	620
	22	上限	2.457	6.0	2.422	1.429	15.742	16.279	1.966	3460
	23	上限	2.446	6.3	2.412	1.402	16.365	16.279	1.316	2100
	24	上限	2.436	6.6	2.418	0.721	16.328	16.279	0.672	1880
	25	上中	2.454	6.1	2.406	1.966	16.501	16.629	2.094	4000
	26	上中	2.443	6.4	2.403	1.655	16.838	16.629	1.446	2630
	27	上中	2.433	6.7	2.406	1.100	16.924	16.629	0.804	1640
	28	上中	2.459	5.9	2.364	3.879	17.966	17.139	3.051	4600
	29	上中	2.449	6.2	2.410	1.575	16.314	17.139	2.400	3940
	30	上中	2.438	6.5	2.396	1.715	17.100	17.139	1.754	2570
	31	中央	2.464	5.8	2.365	4.002	17.874	17.846	3.974	5630
	32	中央	2.453	6.1	2.370	3.372	17.898	17.846	3.321	5290
	33	中央	2.442	6.4	2.393	2.004	17.177	17.846	2.673	4340
	34	中央	2.462	5.8	2.356	4.294	18.156	18.122	4.260	6180
	35	中央	2.451	6.1	2.359	3.748	18.263	18.122	3.608	4900
	36	中央	2.440	6.4	2.361	3.242	18.404	18.122	2.961	3900

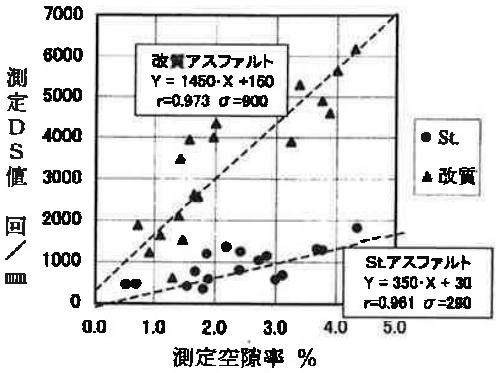


図-1　測定空隙率とDS値の関係

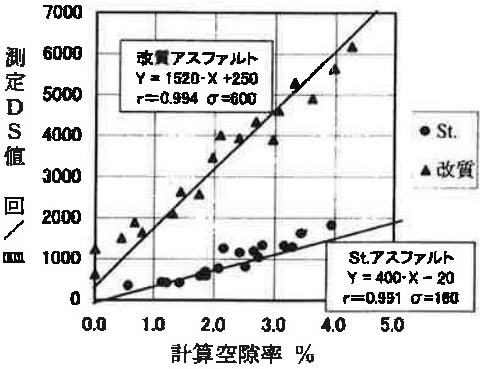


図-2　計算空隙率とDS値の関係

２．２　実験結果の考察

表-3の計算VMAは，筆者らが提案した間隙率計算式を用いて骨材粒度から求めた値で，計算空隙率はこのVMAからAs量を差し引いた値である．空隙率（測定および計算）とDS値の関係を示した結果が図-1および図-2である．図-1の測定空隙率とDS値には，空隙率の増加に対しDS値の増大傾向は見られるものの相関係数ｒは小さく，標準偏差σは大きくなっている．一方，図-2に示すとおり，計算空隙率とは強い相関関係がみられた．

ここで，骨材粒度から計算により求めた最終VMAで，各々の粒度の良好な一定の骨格構造が形成されているとみなすと，As量の増加につれDS値は低下する筈である．一方，測定空隙率は表-3にみる如く骨格構造が，アスファルト量による締固め効果のばらつきによってか，不均一であり空隙率データに違いが生じているものの，DS値はAs量増加により低下している．この空隙率の差はAs混合物が舗設され交通転圧をうけて最終の空隙率で安定した状態になる筈と考えれば，この計算空隙率とDS値の関係で評価し得ることも可能であると考察した．

３．まとめとあとがき

SMA混合物について，筆者らが提案している間隙率計算式を用い，最終VMAから計算した特性値と力学特性の関係を検討した．その結果，As混合物の耐久性の指標の一つであるホイールトラッキング試験のDS値を計算VMAから算出した計算空隙率によって推定可能であることが解った．また，バインダーの種類がDS値に及ぼす影響も把握できた．しかし，従来の力学特性であるマーシャル安定度との関係は殆どないことも解った．

参考文献

1）R.J.Cominsky 他：*The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*,SHRP-A-407, National Research Council(1994)
2）郡司，井上，赤木：骨材粒度に基ず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，土木学会論文集，(2000.5月号掲載予定)
3）郡司，井上，赤木：加熱アスファルト混合物の骨材間隙率の検討，土木学会舗装工学論文集，第4回(1999)
4）土木研究所資料：耐流動耐摩耗対策の選定手法に関する調査研究報告書，第3010号，建設省土木研究所舗装研究室(1991)
5）荒井，井上：砕石マスチックへのジャイレトリーコンパクタの適用検討，舗装(1998.9)

【土木学会舗装工学論文集　第4巻　1999年12月】

高速道路における密粒度アスファルト舗装のわだち掘れ量の実態調査と耐流動性の評価

飯田章夫[1]，七五三野茂[2]，金田政博[3]，佐藤正和[3]

1正会員　日本道路公団試験研究所道路研究部 部長　（町田市忠生1－4－1）
2正会員 博（工）日本道路公団試験研究所道路研究部 舗装研究室 室長（町田市忠生1－4－1）
3正会員　日本道路公団試験研究所道路研究部 舗装研究室 主任（町田市忠生1－4－1）

高速道路におけるわだち掘れ量の追跡調査内容を分析した結果，１日一方向当たりの大型車日交通量が5,000台／未満の区間においては，ストレートアスファルトを使用して目標ＤＳは800以上とすることにより，5,000台以上の区間においては，改質アスファルトを使用し，目標ＤＳは3,000以上とすることで，わだち掘れの進行を抑え，補修の時間間隔を現状と同等以上とすることができることが明らかとなった．また，回転式舗装試験機による改質アスファルトの性状に関する試験結果より，耐流動対策に使用する改質アスファルトの性状の参考値として，軟化点は60℃，60℃粘度は1000pa・s以上，タフネスは20N・m以上およびテナシティは15N・m以上が必要であることがわかった．ただし，データ数が限られており今後の調査が必要である．

Key Words：*Plastic Flow Rutting, DS(Dynamic Stability), , Modified Asphalt, Number of Heavy vehicle*

1．はじめに

高速道路における舗装補修工事の主な損傷要因は従前より流動わだち掘れであり，現在，状況はかなり改善されているものの，なお，大きな位置を占めている．過去においては，1980年代の後半に流動わだち掘れによる損傷が著しくなり，早急な対応を求められた．このため，日本道路公団（以下，JHという）ではそれまでの摩耗わだち掘れに重点を置いたアスファルト混合物ならびに配合設計からの変更を余儀なくされ，平成４年４月に耐流動わだち掘れ用の混合物を導入するなど，設計要領の改定[1]を行った．

この改定では，耐流動性を向上させるために従来よりも粒度を粗くした密粒度アスファルト混合物を導入したことや改質アスファルトの適用を可能にしたことなどが特徴としてあげられるが，動的安定度（Dynamic Stability，以下ＤＳという．）を大型車交通量，地域区分に応じて目標値を掲げたことも特徴のひとつである．

本報告は，その後の高速道路におけるわだち掘れ量の追跡調査結果ならびに回転式舗装試験機による試験結果を踏まえ，密粒度アスファルト混合物を用いた舗装について耐流動性の評価を行い，目標とするDSや改質アスファルトの性状等について述べ，今後の耐流動対策の参考とするものである．

なお，流動わだち掘れの要因として，表層に使用する材料の他に，大型車交通量，路面温度，走行速度や基層以下の支持力などの影響を受けるが，ここでは諸条件を勘案して，特にDSと大型車交通量に着目して耐流動性の評価を行ったものである．

2．調査内容

(1)調査個所

表－１に示す路線についてわだち掘れ量の追跡調査を実施した．調査個所は本州に広く分布し，気象および交通条件について多様となっている．また，調査個所の基層以下は概ね健全でほぼ同じ状態であった．調査期間については，わだち掘れの進行がほぼ安定する時期までの表層の施工または打換え後3年から4年とした（平成４年から７年）．

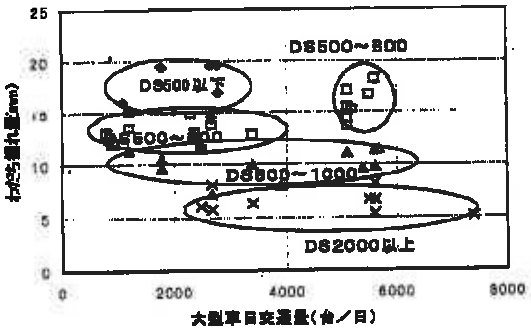
(2)調査項目および調査方法

①大型車累積交通量

業務統計による交通量からその路線の大型車累積交通量を算出し，わだち掘れ量の測定箇所と同一車線の車線分担率を考慮した通過交通量とした．

表－1 調査個所

東北自動車道	71箇所
北陸自動車道	14箇所
名神高速道路	5箇所
中国自動車道	31箇所
合計	121箇所



図－1 大型車交通量200万台到達時のわだち量と大型車交通量

②気象条件

路面温度について近傍の管理事務所での定点観測データを調べた.

③わだち掘れ量

路面性状測定車(JHS225-1992)[2]にて春と秋の２回測定した. 測定箇所はすべて本線走行車線である.

④ＤＳ値, 骨材粒度

配合設計時における粒度およびホイールトラッキング試験(JHS230-1992)[2]結果を用いた.

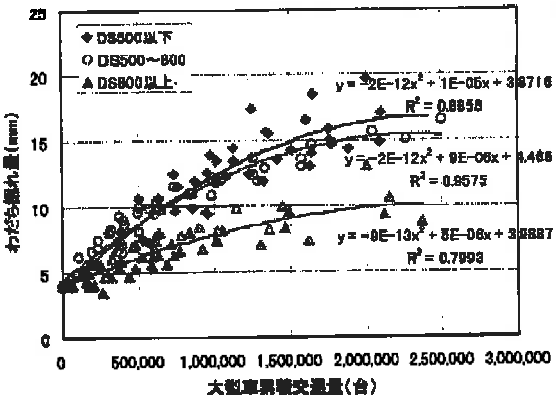
⑤使用アスファルト種別およびバインダー性状

工事の材料使用品品質証明書より確認した.

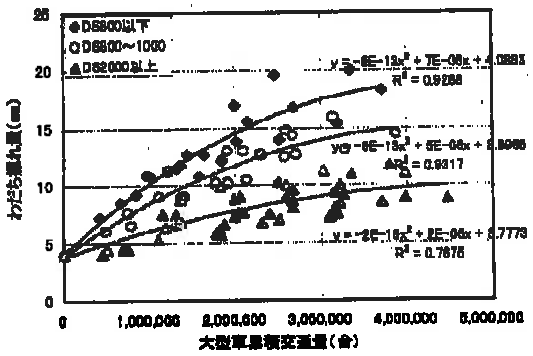
３. 調査結果

(1)動的安定度とわだち掘れ量

わだち掘れ量の進行は, 夏の高温（夏日日数などで示される）の影響を最も強く受け, 春から秋にかけて進むことがわかっているため[3)4)], 調査個所における舗装路面温度を調べた. その結果, 平成６年夏は猛暑でわだち掘れ進行量と有為な関係がある路面温度45℃以上の発現頻度が高く, 全国的にわだち掘れ進行量が大きくなっているが[5)], 調査箇所の間でので年間を通してのわだち掘れ進行量に著しい差は見られなかった. そこで, 調査期間中のわだち掘れ量の調査結果をDSの範囲区分ごとに大型車累積交通量との関係に整理した.



図－2 DS別のわだち掘れ量(5000台/日/一方向未満)



図－3 DS別のわだち掘れ量(5000台/日/一方向以上)

はじめに, 図－１はわだち掘れの進行量が安定する大型車累積交通量が200万台の時点のわだち掘れ量と大型車日交通量の関係を示したものである. 同じDSのグループでも大型車日交通量の範囲が広くなっているが, 概ね大型車日交通量が多くなるにつれてより大きなDSが必要になる傾向を示している. 大型車日交通量が一方向当たり5000台付近でDSが500～800から2000以上まで広く分布していることから, 大型車日交通量が一方向当たり5000台以上と未満に分けてわだち掘れ量と大型車累積交通量の関係についてDS別に整理することとした.

図－２は, 大型車日交通量が一方向当たり5000台未満の測定個所についてDSのグループ別にわだち掘れ量の変化を示したものである. 同じDSのグループでもわだち掘れ量の上限と下限では3～5mm程度の違いが見られるが, DSが大きくなるにつれわだち掘れ量が小さくなっており, DS800以上で他のグループと比べて小さくなる傾向を示している. いずれのグループでも大型車累積交通量が概ね150万台（２年経過）になるとわだち掘れ増加量がほぼ一

表－2 大型車交通区分とDS別の平均補修間隔(年)

大型車日交通量	アスファルト種別	ストレートアスファルト			改質アスファルト
(台／日)	DS	500以下	500～800	800～1,000	2000以上
2000		6	8	11	－
4000		－	7	10	－
6000		－	3	5	7
8000		－	－	－	7

定になる傾向を示している.

図－3は，大型車日交通量が一方向当たり5000台以上の測定個所についてDSのグループ別にわだち掘れ量の変化を示したものである．ここでもDSが大きくなるにつれわだち掘れ量が小さくなっており，DSが2000以上で他のグループと比べて小さくなる傾向を示している．この場合も同様に，いずれのグループでも200万台～300万台（概ね1年経過）になるとわだち掘れ増加量がほぼ一定になる傾向を示している.

表－2は，大型車日交通量とDSグループ別の平均補修間隔の関係を示したものである．年間わだち進行量はDSグループ内の平均的なわだち掘れ量の変化（図－2，3の回帰曲線）に基づき以下の式(1)より求めた.

$$MT = (RDmt - Rdi)/Rdyear + Ni \qquad (1)$$

MT：平均補修間隔（年）

RDmt:わだち掘れ量の管理目標値

大型車日交通量5000台／日以上 20mm

大型車日交通量5000台／日未満 25mm

Rdi：初期わだち掘れ量

大型車日交通量5000台／日以上 1年後のわだち掘れ量(mm)

大型車日交通量5000台／日未満 2年後のわだち掘れ量(mm)

Rdyear：年間わだち掘れ進行量 (2または3mm/年)

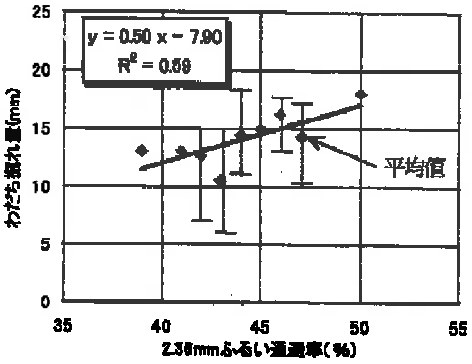
Ni： わだち掘れの進行量が一定になるまでの年数

大型車日交通量5000台／日以上 1年

大型車日交通量5000台／日未満 2年

式(1)の前提として，図－2および3に見られるように1～2年経過した以降の年間わだち掘れ進行量については2mmとするが，5000台／日以上でDSが800以下と800～1000ではわだち掘れ進行量が大きいため，3mmとした.

表－2より，大型車日交通量が一方向当たり5000台以上では，DSが2000以上でなければ現状の補修間隔（7年程度）以上とできない．また，大型車日交通量が一方向5000台未満では，DSが800以上で現状の補修間隔以上とすることができるが，DSが500～800でも現状程度（7年程度）の補修間隔程度を確保できることを示している．この場合，交通量が少ない地域や積雪寒冷地域で耐流動対策以外の補修が必要とされる個所に適用することが望ましい.



図－4 2.5mmふるい通過量と大型車200万台通過時のわだち量

そこで，以上より耐流動対策として大型車日交通量とDSの関係をまとめると次のとおりである.

① 大型車日交通量が一方向当たり5000台未満の場合，DSは800～1000が望ましい．また，交通量が少ない地域や積雪寒冷地域ではDSが500～800が適用できる.

② 大型車日交通量が一方向当たり5000台以上の場合，DSは2000以上が必要である．この場合，バインダーには改質アスファルトを用いなければならない.

(2)骨材粒度とわだち掘れ量

DSは，アスファルト混合物の耐流動性を示す良い指標であることが確認された．DSには材料や配合が影響を及ぼすことが知られているが，ここでは骨材粒度とわだち掘れ量の関係について調べる.

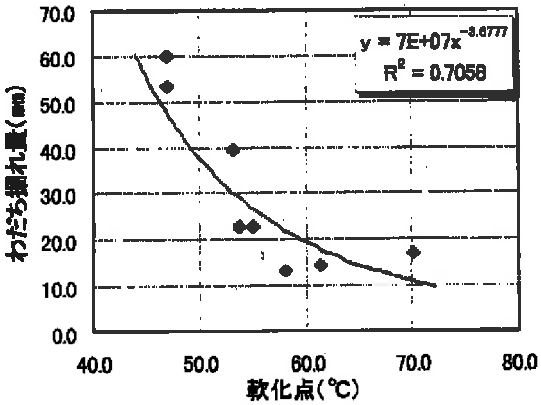
図－4は，ストレートアスファルトを使用した混合物の骨材粒度とわだち掘れ量の関係を示したものである．わだち掘れ量は大型車累積交通量が200万台通過時のものを表している．一般に2.5mmふるい通過率が低いほど耐流動性に優れた混合物となるが，今回の調査結果からもわだち掘れ量にバラツキは見られるものの，その平均値については2.5mmふるい通過率と相関が見られた．2.5mmふるい通過率が42%程度以下の場合はわだち掘れ量が約13mmである．年間のわだち掘れ進行量を2mmとして（1）式により補修間隔を計算すると約8年となり，耐流動対策用の混合物としての適用が十分可能である.

表—3 回転式舗装試験機の試験条件

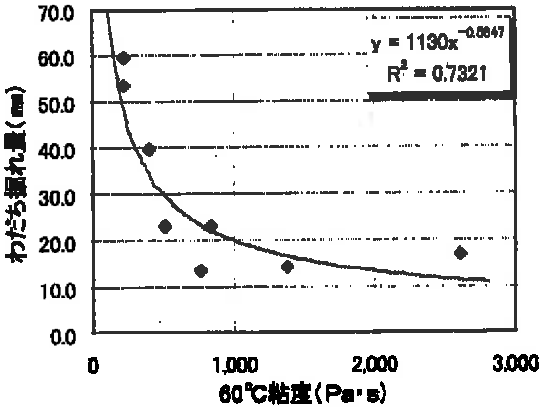
項目	条件
検討内容	耐流動
軌道	外軌道
タイヤ	ノーマルシングル
載荷重(t)	25
速度(km/hr)	60
最終到達温度(℃)	53
シフト量(mm)	±50
路面状態	乾燥
最終通過回数(回)	170,000

表—4 検討混合物の配合

配合 No.	Dmax (mm)	合成粒度(%) 2.36mm	合成粒度(%) 75μm	空隙率 (%)	アス量 (%)	DS値 (回/mm)	バインダー種別
①	13	45.0	6.0	4.0	6.5	1,330	改質Ⅰ①
②					6.5	580	改質Ⅰ②
③					6.5	890	改質Ⅰ③
④					6.5	3,200	改質Ⅱ①
⑤					6.5	1,980	改質Ⅱ②
⑥					6.5	2,600	改質Ⅱ③
⑦					6.5	590	ストアス60/80
⑧		42.0	6.0		6.2	830	ストアス60/80



図—5 わだち掘れ量と軟化点



図—6 わだち掘れ量と60℃粘度

4.室内試験結果

上記の追跡調査の分析結果から交通量が多い場合の耐流動対策に使用するバインダーには，改質アスファルトが必要である．現在，改質アスファルトの標準性状はアスファルト舗装要綱に示されているが，耐流動対策として用いる改質アスファルトの品質規格は示されていない[6]．

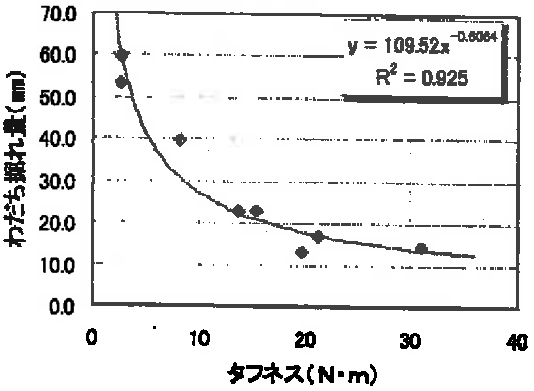
そこで，アスファルトの性状とわだち掘れ量の関係を調べるため実路に近い条件で耐久性試験の可能な回転式舗装試験機による試験を行った．

表—3に回転式舗装試験機の試験条件，表—4に検討対象とした混合物の配合を示す．

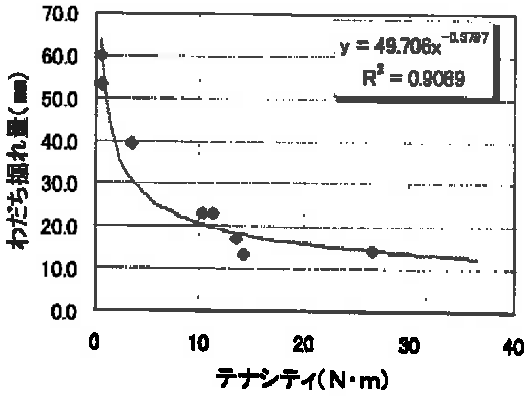
図—5，6，7，8に試験結果を示す．わだち掘れ量は，夏の路面温度に近い状態での試験を続けたため，相対的にかなり大き目の値となっている．

図—5は，軟化点とわだち掘れ量の関係を示している．軟化点が60℃前後で，わだち掘れ量はほぼ一定となる傾向を示している．名古屋周辺の高速道路の調査結果[3]では，軟化点が約57℃以上で年間わだち掘れ進行量が2mm以下となっており，同様の傾向を示している．図—6は，60℃粘度とわだち掘れ量の関係を示したものであり，60℃粘度が1000pa・sを超えると一定となる傾向を示している．同じく，名古屋周辺の高速道路の調査結果[3]から，60℃粘度が約1300pa・s以上で年間わだち掘れ進行量が2mm以下となっている．図—7，8は，タフネス・テナシティとわだち掘れ量の関係を示したものであり，データ数が限られるが両者には相関関係が見られた．また，60℃粘度とタフネスおよびテナシティの間にも相関関係が認められている．その結果を用いると，タフネスが20N・m以上およびテナシティが15N・m以上でわだち掘れ量が一定になる結果が得られた．

以上の結果より，耐流動対策に使用する改質アスファルトとして求められる性状の参考値としては，軟化点は60℃，60℃粘度は1000pa・sで以上ある．また，同様にタフネスは20N・m以上およびテナシティは15N・m以上となる．



図－7 わだち掘れ量とタフネス



図－8 わだち掘れ量とテナシティ

5.まとめ

高速道路におけるわだち掘れ量の追跡調査結果の分析ならびに回転式舗装試験機による改質アスファルトの性状に関する試験結果より，以下の内容が明らかとなった．

① 大型車日交通量が一方向当たり5,000台未満の区間においては，ストレートアスファルトを使用し，目標ＤＳは800以上とすることによりわだち掘れの進行を抑え，補修間隔を現状と同等以上とすることができる．

② 大型車日交通量が一方向あたり5,000台以上の区間においては，改質アスファルトを使用し，目標ＤＳは2,000以上とする．

③ 骨材粒度とわだち掘れ量の関係から，ストレートアスファルトを使用した混合物では，2.5mmふるい通過量は約42%以下とすることで耐流動性の改善が図れる．

④ 耐流動対策に使用する改質アスファルトの性状の参考値としては，軟化点は60℃，60℃粘度は1000pa・s以上，タフネスは20N・m以上およびテナシティは15N・m以上となった．ただし，これはデータ数に限りがあり，今後，更に調査が必要である．

6. おわりに

高速道路におけるわだち掘れの追跡調査から，耐流動性の評価指標であるDSとわだち掘れ量の関係を分析した結果，大型車日交通量とDSの目標値を明確にすることができた．また，従来適用していた大型車日交通量とDSの区分について簡略化することができた．

今回の調査結果から高速道路におけるこれまでの耐流動対策が概ね妥当であったことが確認された．高速道路と一般道路では交通条件や走行環境が異なるものの，今回の調査結果が広く参考となれば幸いである．

参考文献

1) 日本道路公団，設計要領第１集舗装編，1992.4
2) 日本道路公団，日本道路公団試験法，1992.4
3) 青木 秀郎，西島 宗雄，アスファルト舗装の流動わだち掘れ，舗装 Vol.30 No.2，1995.3
4) 竹田 豪文，七五三野 茂，神谷 恵三，浅野 勝巳，回転式舗装試験機によるアスファルト混合物の耐流動性試験について，土木学会第51回年次学術講演会概要集 第5部，1996.9
5) 明石 達雄，佐藤 正和，高速道路における舗装修繕の現状について，アスファルト 第39巻 第188号，1996.7
6) 日本道路協会，アスファルト舗装要綱，1992.12

Evaluation of Plastic Flow Rutting Resistance of Dense-Graded Asphalt Pavements on Expressways

Akio IIDA, Shigeru SHIMENO, Masahiro KANEDA , Masakazu SATOU

An analysis of rutting depth on expressways was conducted and it was made clear that the Dynamic Stability (DS) of more than 800 should be a target value to plastic flow rutting on expressways with daily heavy traffic volume of less than 5000 vehicles in one direction and the DS of more than 2000 to restrain plastic flow rutting on expressways with daily heavy traffic volume of less than or equal to 5000 vehicles. Tests to determine the property of modified asphalt cements was conducted with the Accelerated Pavement Testing Machine , and following properties were found to be desired to have enough resistance to the plastic flow rutting; softening point of 80°C, viscosity at 60°C of more 1000pa・s, though more data are required.

国内再委託試験結果

１．はじめに

開発途上国の特に高温熱帯地域では、流動わだち掘れに起因する早期破損の抑制が重要な課題の一つとして挙げられている。日本国内の重交通における舗装では、動的安定度（以下、DS）3,000［回/mm］以上が基準値として定められており、改質アスファルトを使用することで対応しているのがほとんどである。しかし、開発途上国では物流や価格の観点から、日本のように安易に適用できない状況にある。

そこで、本業務ではストレートアスファルトを用いた混合物を対象として、塑性変形抵抗性に大きく寄与するパラメータに関する検討を行った。以下に検討結果を報告する。

２．目的

空隙率に寄与するパラメーター（粒度・アスファルト量）を変化させた混合物について評価試験を行い、その結果から塑性変形抵抗性に大きく寄与する要因を推定する。

また、上記の結果を踏まえた上で、実際に早期破損が見られた高温熱帯地域の混合物を再現し、塑性変形抵抗性の低下要因を推定する。

３．使用材料

本検討で使用する骨材およびアスファルトを付表-1,2 に示す。また、使用骨材の外観を写真-1 に示す。

付表-1　使用骨材

			5号砕石	6号砕石	7号砕石	砕砂	再現試験用砕砂	細目砂	石粉	規格
製造会社名			㈱オーリス					羽黒資材㈱	菱光石灰工業㈱	
産地			茨城県笠間市	茨城県笠間市	茨城県笠間市	茨城県北相馬郡守谷町		栃木県宇都宮市小倉町	埼玉県秩父郡横瀬町	
材質			硬質砂岩	硬質砂岩	硬質砂岩	硬質砂岩		洗砂	炭酸カルシウム	
試験項目	通過質量百分率[%]	19.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
		13.2	10.7	97.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
		9.5	0.5	66.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
		4.75	0.5	10.4	74.8	100.0	100.0	100.0	100.0	
		2.36	0.5	3.7	0.0	83.0	90.0	100.0	100.0	
		1.18	0.5	2.4	0.0	59.3	－	97.6	100.0	
		0.600	0.5	1.9	0.0	39.3	75.0	87.7	100.0	
		0.300	0.4	1.6	0.0	22.9	40.0	39.3	100.0	
		0.150	0.4	1.4	0.0	9.5	15.0	6.7	99.8	
		0.075	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	1.6	94.1	
	密度	表乾密度 [g/cm^3]	2.675	2.653	2.650	2.619		2.590		粗骨材：2.45以上 細骨材：　－
		見かけ密度 [g/cm^3]	2.689	2.682	2.693	2.680		2.631	2.710	
		かさ密度 [g/cm^3]	2.666	2.636	2.625	2.530		2.546		
	吸水率[%]		0.32	0.65	0.97	3.51		1.76		
	すり減り減量[%]		11.9	12.2						粗骨材：30以下 細骨材：　－
	安定性試験による損失量[%]		0.1	0.3	0.1	0.6		3.6		粗骨材：12以下 細骨材：　－
	軟石量[%]		2.7	2.2						粗骨材：5.0以下 細骨材：　－
	へん平率[%]		0.2	0.8						粗骨材：10.0以下 細骨材：　－
	静的剥離率[%]			12.0						
	塑性指数 PI					NP		NP		
備考										舗装施工便覧（平成18年度版）

付表-2　使用アスファルト

製品名			ストレートアスファルト60/80	
製造元			JXエネルギー(株)根岸製油所	規格
試験項目	伸度	[cm]	100(+)	100以上
	引火点　COC	[℃]	362	260以上
	動粘度（120℃）	[mm^2/s]	834	
	動粘度（150℃）	[mm^2/s]	190	
	動粘度（180℃）	[mm^2/s]	64.0	
	軟化点	[℃]	46.0	44.0～52.0
	針入度（25℃）	[1/10mm]	71	60を超え80以下
	蒸発後の針入度比	[%]	102	110以下
	トルエン可溶分	[質量%]	99.97	99.0以上
	密度（15℃）	[g/cm^3]	1.036	1.000以上
	薄膜加熱質量変化率	[%]	(+)0.15	0.6以下
	薄膜加熱針入度残留率	[%]	70.3	55以上
備考				舗装施工便覧（平成18年度版）

5号砕石

6号砕石

7号砕石

砕砂

細目砂

石粉

写真-1　使用骨材の外観

４．検討内容

４－１．評価混合物

１）混合物における塑性変形抵抗性の向上に関する検討

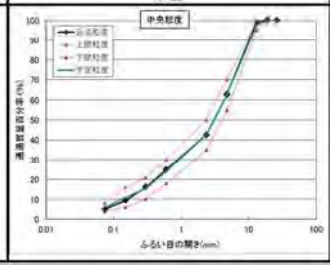
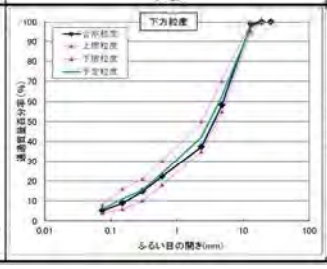
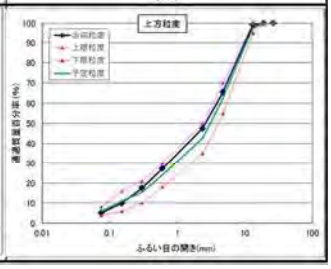
評価混合物は密粒度アスファルト混合物(13)[75 回突き×両面]を対象とし、使用アスファルトにはストレートアスファルト 60/80 を用いた。混合物の空隙率を変化させ、評価試験を行った。本業務では、下記の 2 通りの方法により空隙率を変化させた。

ⅰ） 2.36 mm ふるい通過量を変化させる。
ⅱ)アスファルト量を変化させる。

ⅰ)の 2.36 mm ふるい通過量については、密粒度アスファルト混合物(13)の標準粒度範囲をもとに、37.5%、42.5%、47.5%の 3 通りで変化させ、それぞれ下方粒度、中央粒度、上方粒度とした。3 粒度における配合総括表を付表-3 に示す。

ⅱ)のアスファルト量は、代表混合物における最適アスファルト量（以下、OAC）±0.3、0.6 %となるように設定した。なお、本業務では中央粒度と下方粒度のみアスファルト量を変化させた。

付表-3　配合総括表（中央、上方、下方粒度）

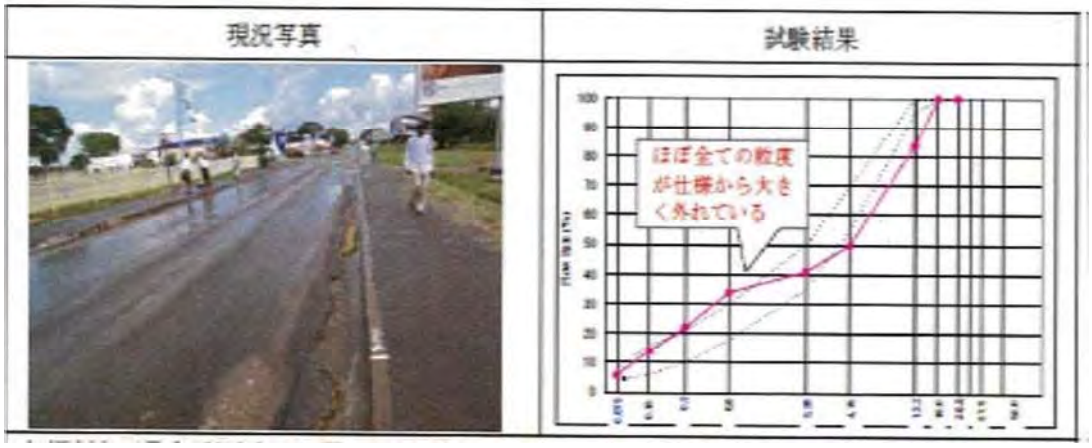
		配合種類		
		中央粒度	下方粒度	上方粒度
配合割合(%)	6号砕石	37.5	41.8	35.4
	7号砕石	15.0	17.0	11.0
	砕砂	37.5	31.2	43.6
	細目砂	5.0	5.0	5.0
	石粉	5.0	5.0	5.0
通過質量百分率(%)	19.0	100.0	100.0	100.0
	13.2	99.1	99.0	99.2
	4.75	62.6	58.3	65.5
	2.36	42.5	37.5	47.5
	0.600	24.8	22.4	27.2
	0.300	16.2	14.8	17.6
	0.150	9.4	8.9	10.0
	0.075	5.2	5.2	5.1
粒度曲線				

2）現場舗装のわだち掘れ発生要因に関する検討

高温熱帯地域における舗装で、早期にわだち掘れが発生するという現象が見られた。現場混合物を採取し、粒度の確認を行ったところ、混合物の粒度が密粒度アスファルト混合物(13)の標準粒度範囲をほぼ全ての粒度で外れていたことがわかった。現場写真および現場混合物の粒度を付図-1 に示す。そこで、現場混合物の性状確認を目的として、再現試験を行った。混合物の粒度は、現場混合物粒度を参考に以下の 2 種類とした。

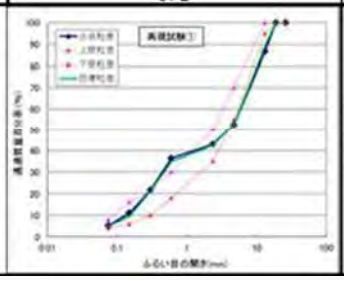
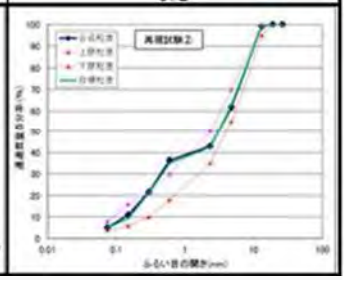
・再現試験①：粗骨材、細骨材ともに適正範囲をはずれた粒度
・再現試験②：細骨材のみが適正範囲をはずれた粒度

各粒度における配合総括表を付表-4 に示す。現場混合物の再現性を可能な限り高めるため、再現試験①、再現試験②には砕砂をふるい目ごとに分級したものを使用し、再現試験①には 5 号砕石を用いた。なお、アスファルト量については１）の検討における中央粒度の OAC を採用した。



付図-1　高温熱帯地域での現場写真および混合物粒度

付表-4　配合総括表（再現試験①，②）

			配合種類			
			再現試験①		再現試験①	
配合割合（%）	5号砕石		14.0		0.0	
	6号砕石		36.0		38.0	
	7号砕石		5.0		17.0	
	砕砂	2.36	35.0	10.0	35.0	10.0
		0.600		15.0		15.0
		0.300		35.0		35.0
		0.150		25.0		25.0
		0.075		15.0		15.0
	細目砂		5.0		5.0	
	石粉		5.0		5.0	
通過質量百分率（%）	26.0		100.0		100.0	
	19.0		100.0		100.0	
	13.2		86.7		99.1	
	4.75		52.5		61.7	
	2.36		42.9		42.9	
	0.600		36.4		36.4	
	0.300		21.6		21.6	
	0.150		11.1		11.1	
	0.075		5.2		5.2	
粒度曲線						

３）評価対象混合物

本検討で対象とする混合物の一覧を付表-5 に示す。

付表-5　試験対象混合物一覧

配合名	2.36mm通過量[%]	アスファルト量
中央粒度OAC+0.6%	42.9	OACに対して＋0.6%
中央粒度OAC+0.3%		OACに対して＋0.3%
中央粒度OAC		共通範囲の中央値
中央粒度OAC-0.3%		OACに対して－0.3%
中央粒度OAC-0.6%		OACに対して－0.6%
下方粒度OAC+0.6%	37.5	OACに対して＋0.6%
下方粒度OAC-0.3%		OACに対して＋0.3%
下方粒度OAC		共通範囲の中央値
下方粒度OAC-0.3%		OACに対して－0.3%
下方粒度OAC-0.6%		OACに対して－0.6%
上方粒度OAC	47.5	共通範囲の中央値
再現試験①	42.9	中央粒度OACに準ずる
再現試験②		

４－２．評価試験

本検討での試験項目を付表-6 に示す。また、試験と混合物の対応表を付表-7 に示す。SGC による混合物締固め試験方法については、別途記載する。

付表-6　試験項目

試験名	試験法	適用
骨材の比重吸水試験	JIS A 1110	配合設計
マーシャル試験	試験法便覧　B001	各混合物におけるOACおよび基準密度の決定
ホイールトラッキング試験	試験法便覧　B003	塑性変形抵抗性
水浸ホイールトラッキング試験	試験法便覧　B004	混合物のはく離抵抗性
曲げ試験	試験法便覧　B005	混合物のたわみ追従性
最大密度試験	試験法便覧　G027	理論最大密度の実測値
SGCによる混合物締固め試験	別途記載	V_{ini}, V_{des}, V_{max}

付表-7　試験と混合物の対応表

配合名	マーシャル試験	ホイールトラッキング試験	水浸ホイールトラッキング試験	曲げ試験	最大密度試験	SGCによる混合物締固め試験
中央粒度OAC+0.6%	○	○	○	○	○	○
中央粒度OAC+0.3%	●	○	○	-	○	○
中央粒度OAC	●	○	-	-	○	○
中央粒度OAC-0.3%	●	○	-	-	○	○
中央粒度OAC-0.6%	●	○	○	○	○	○
下方粒度OAC+0.6%	○	○	○	○	○	○
下方粒度OAC-0.3%	●	○	○	-	○	○
下方粒度OAC	●	○	-	-	○	○
下方粒度OAC-0.3%	●	○	-	-	○	○
下方粒度OAC-0.6%	●	○	○	○	○	○
上方粒度OAC	○	○	-	-	○	○
再現試験①	●	○	-	-	○	○
再現試験②	●	○	-	-	○	○

●は設定アスファルト量一点のみ行い、基準密度を求める
○は表 - 6の試験法により実施
ーは試験を実施しない

＜SGC による混合物締固め試験＞

SGC(Superpave Gyratory Compactor)は、Superpave 配合設計により用いられている試験機である。この試験機の特徴として、SGC による締固めの旋回数と混合物の高さの関係が得られることが挙げられる。その際の相関図の例を付図-2 に示す。この関係から、ある旋回数における見かけ密度および空隙率を算出することができる。

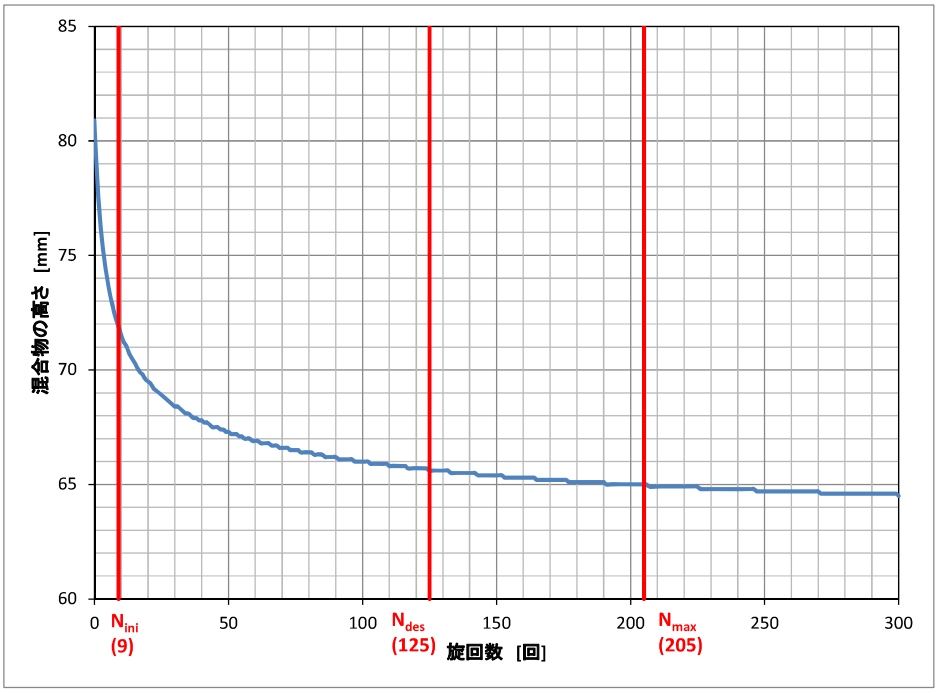
締固めパラメーターN は旋回数と混合物密度から、下記の様に定義される。

N_{ini}：施工中の締固め性、落ち着きの悪い混合物を避けるための指標となる旋回数
N_{des}：予想交通量における現場密度と同じ密度の供試体とするのに要する旋回数
N_{max}：流動わだち掘れを避けるよう、現場で決して超えることのない室内密度を得るための旋回数

交通量による締固めパラメーターN の設定値を付表-8 に示す。また、各締固めパラメーターごとに得られる混合物の空隙率を以下のように定義した。

N_{ini}：V_{ini}（初期空隙率）
N_{des}：V_{des}（設計空隙率）
N_{max}：V_{max}（最終空隙率）

なお、本検討では超重交通路線を想定し、設計 ESAL が 30×10^6 以上における締固めパラメーターを採用した。



付図-2　SGC における旋回数と供試体混合物高さの関係（例）

付表-8　Superpave ジャイレトリーコンパクタの締固めエネルギー(AASHTO R35-09)

設計 ESAL[a] (×10⁶)	締固めパラメーター			代表的な車道への適用[b]
	N_{ini}	N_{des}	N_{max}	
＜0.3	6	50	75	適用には、大型交通の走行が禁止または非常に最小レベルとなるローカル道路、郡道のような低交通量の車道がある。これら車道上の交通は性質上ローカルと考えられ、地域的道路、州内道路または州際道路ではない。リクレーションサイトまたはエリアの特別な目的の車道は、このレベルを適用できる。
0.3to ＜3	7	75	115	適用には多くの集散道路またはアクセス街路がある。中程度の交通に供する市街路や郡道の大部分はこのレベルを適用してよい。
3to ＜30	8	100	160	適用には、多くの2車線、多車線、分離道路、および完全あるいは部分的にコントロールされたアクセス道路がある。これらの中には、中程度～高交通に供する市街路、多くの州道、US 道路、およびいくつかの地方部州際道路がある。
≧30	9	125	205	適用には、US 州際道路の大部分、性質上、地方部と都市部の両方がある。大型車重量測定箇所や2車線道路における登坂車線も、このレベルを適用するとよい。

a. 20 年間に設計車線で予期されるプロジェクトの予想交通量。車道の設計期間に関係なく、20 年間の設計 ESALs を決定する。
b. A policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2004, AASHTO の定義による

試験方法は、Superpave(MixDesign) Superpave Series No.2(SP-2)に準じて行った。手順を以下に示す。

①骨材およびアスファルトを 165℃に設定した循環式乾燥炉内で養生しておく。
②骨材が完全にアスファルトで被覆されるまで混ぜる。
③混合物をバット上に、厚さ 25～50mm となるよう敷きならす。
④敷きならした混合物を、145±3℃に設定した循環式乾燥炉内で養生する。

⑤混合物は 60 分毎に循環式乾燥炉から取出し、混合する。

⑥2 時間養生後、混合物が転圧温度になっていることを棒状温度計で確認する。

⑦循環式乾燥炉内で温めておいたモールドに混合物を入れ、SGC で締固める。

⑧得られた旋回数と混合物高さの関係から、V_{max}，V_{des}，V_{ini} を求める。

５．試験結果

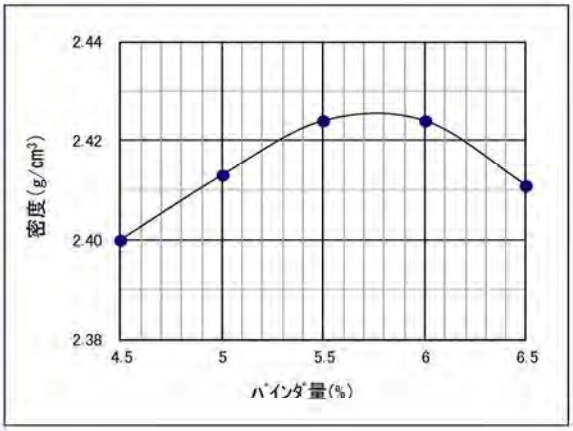
５－１．配合設計

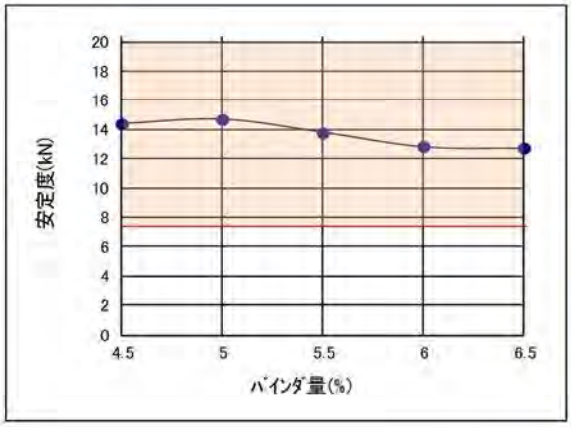
中央、下方、上方の 3 粒度について配合設計を行った。試験結果を、付表-9, 10, 11 に示す。

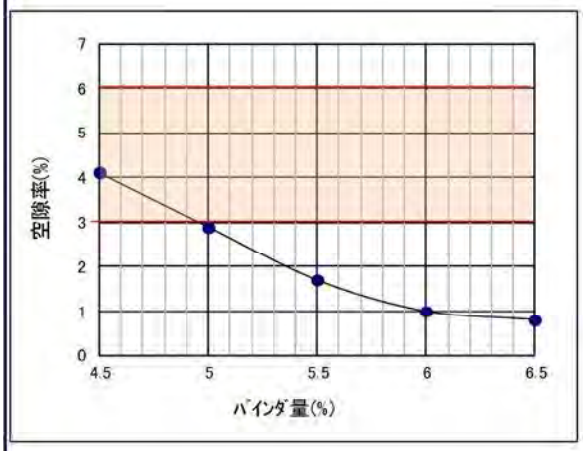
付表-9　マーシャル試験結果（中央粒度）

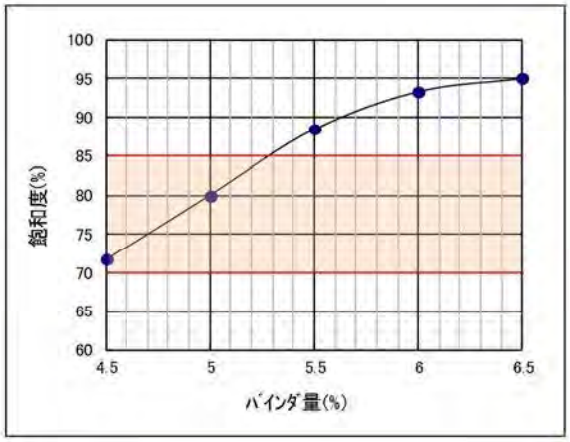
バインダ種：ストレートアスファルト60/80　　試験年月日：平成28年10月4日

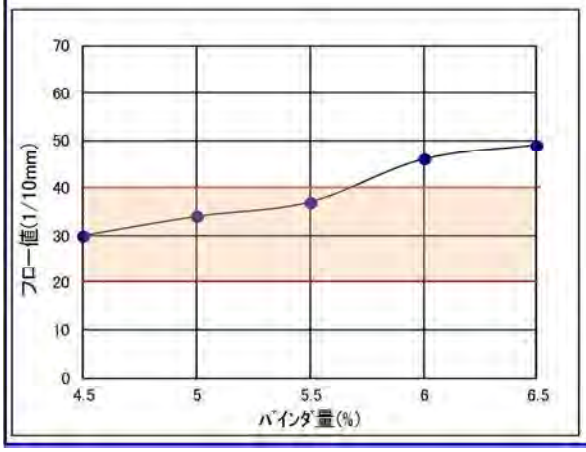
混合物種：密粒度アスファルト混合物(13) 中央粒度　　試験者：南部　貴則

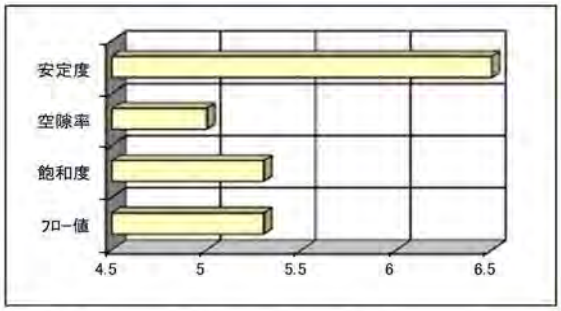












共通範囲　4.50　～　5.00　%

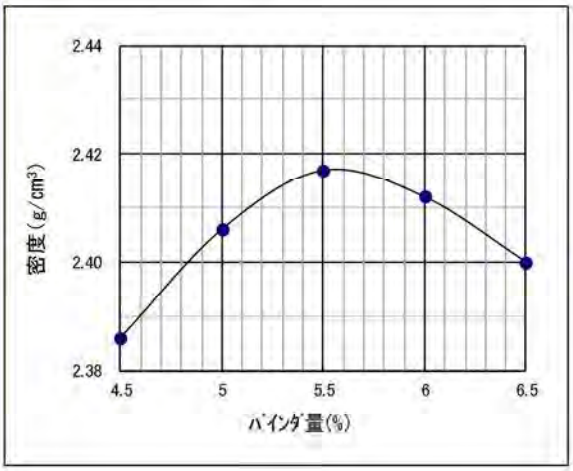
中央値　4.75　%

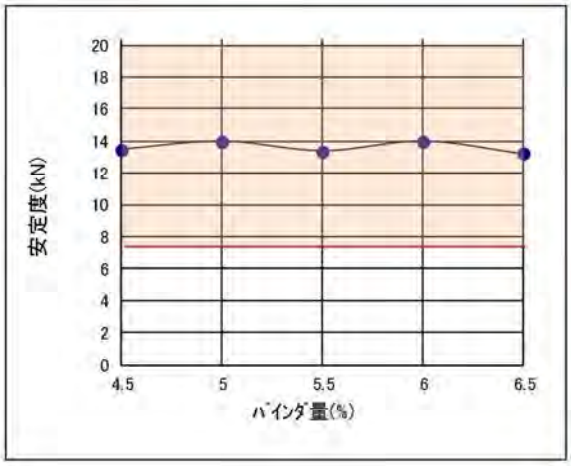
最適バインダ量　4.8 %

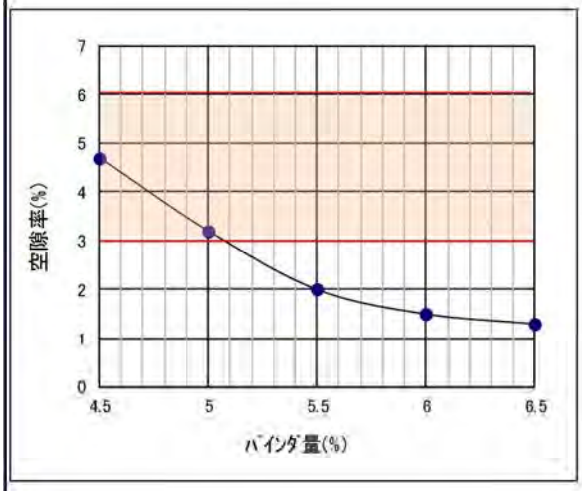
付表-10　マーシャル試験結果（下方粒度）

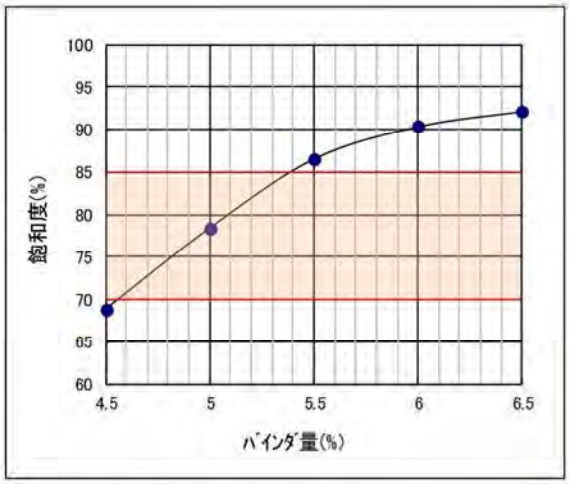
バインダ種：ストレートアスファルト60/80　　試験年月日：平成28年10月11日

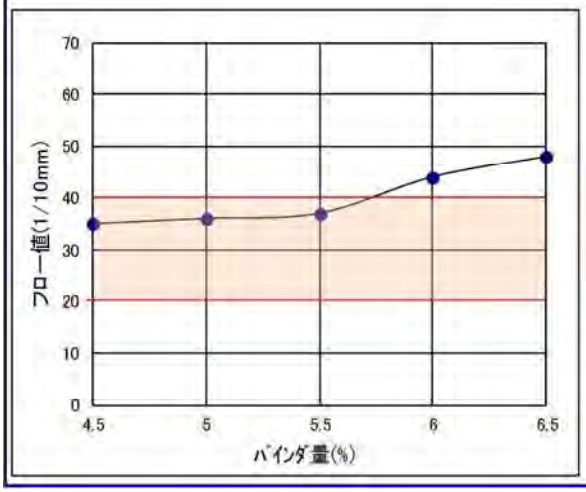
混合物種：密粒度アスファルト混合物(13) 下方粒度　　試験者：南部　貴則

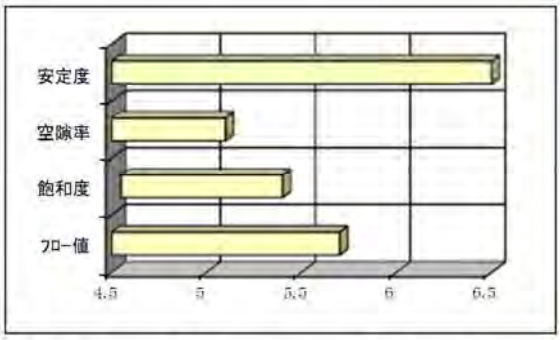












共通範囲　4.55　～　5.10　%

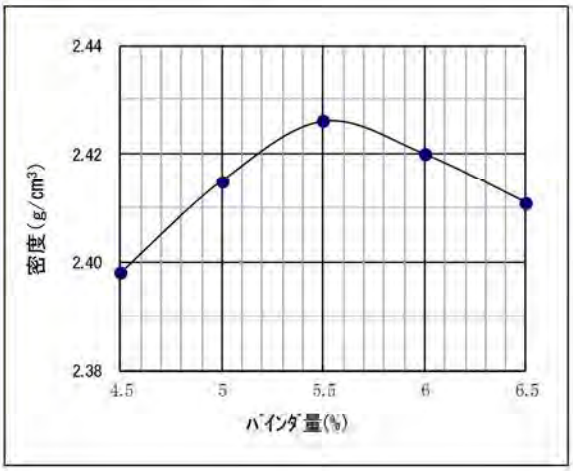
中央値　4.83　%

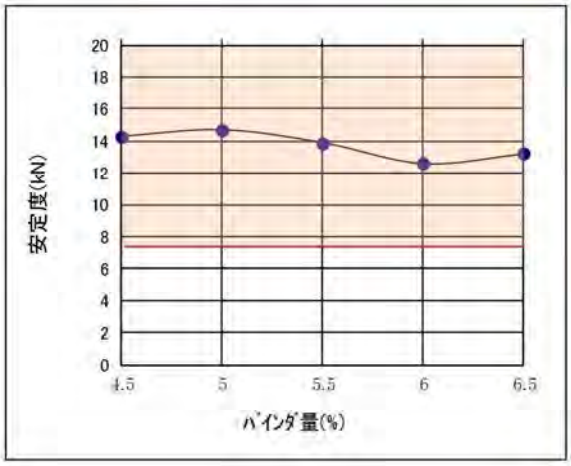
最適バインダ量　4.8 %

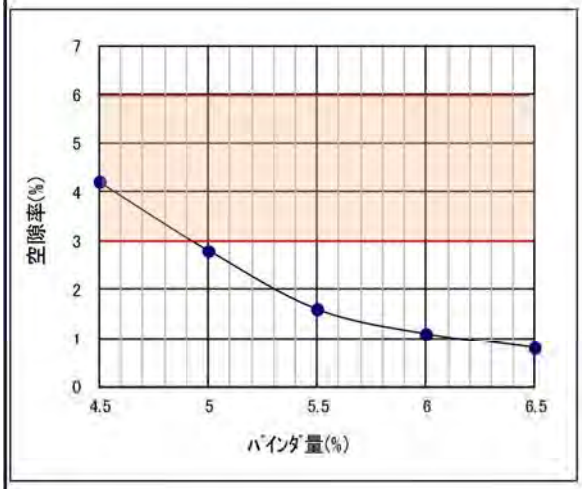
付表-11　マーシャル試験結果（上方粒度）

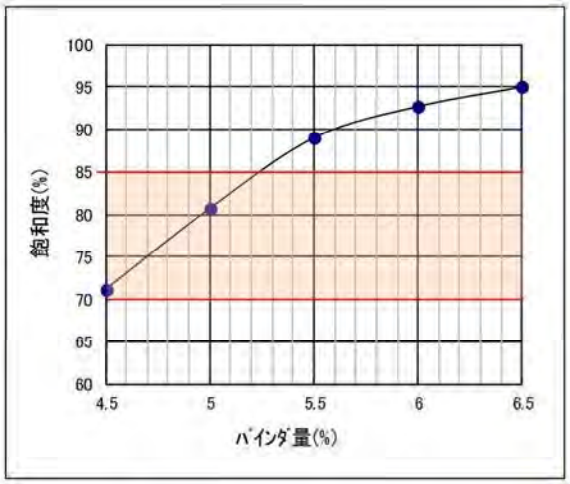
バインダ種：ストレートアスファルト60/80　　試験年月日：平成28年10月4日

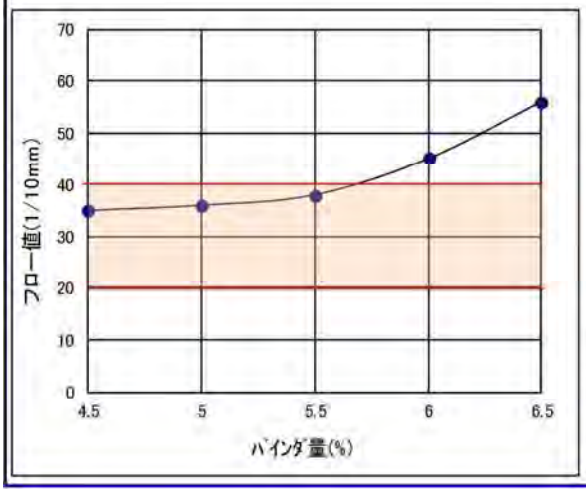
混合物種：密粒度アスファルト混合物(13) 上方粒度　　試験者：南部　貴則

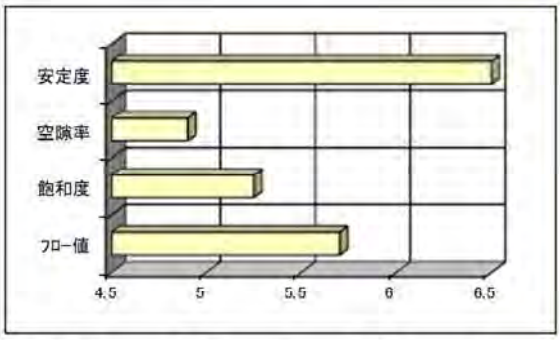












共通範囲　4.50　～　4.90　%

中央値　4.70　%

最適バインダ量　4.7 %

＜各混合物におけるアスファルト量および基準密度＞

3 粒度における OAC をもとに、各混合物におけるアスファルト量を決定した。さらに配合設計で得られた、アスファルト量と密度の関係を示す曲線より、各混合物の基準密度を求めた。各混合物における基準密度を付表-12 に示す。以降の評価試験は、求めた基準密度に対して締固め度 100±1%の混合物を用いて行った。

付表-12　アスファルト量と基準密度一覧

混合物種	アスファルト量[%]	基準密度[g/cm^3]
中央粒度OAC+0.6%	5.4	2.422
中央粒度OAC+0.3%	5.1	2.416
中央粒度OAC	4.8	2.409
中央粒度OAC-0.3%	4.5	2.400
中央粒度OAC-0.6%	4.2	2.392
下方粒度OAC+0.6%	5.4	2.416
下方粒度OAC+0.3%	5.1	2.409
下方粒度OAC	4.8	2.403
下方粒度OAC-0.3%	4.5	2.386
下方粒度OAC-0.6%	4.2	2.373
上方粒度OAC	4.7	2.409
再現試験①	4.8	2.421
再現試験②	4.8	2.408

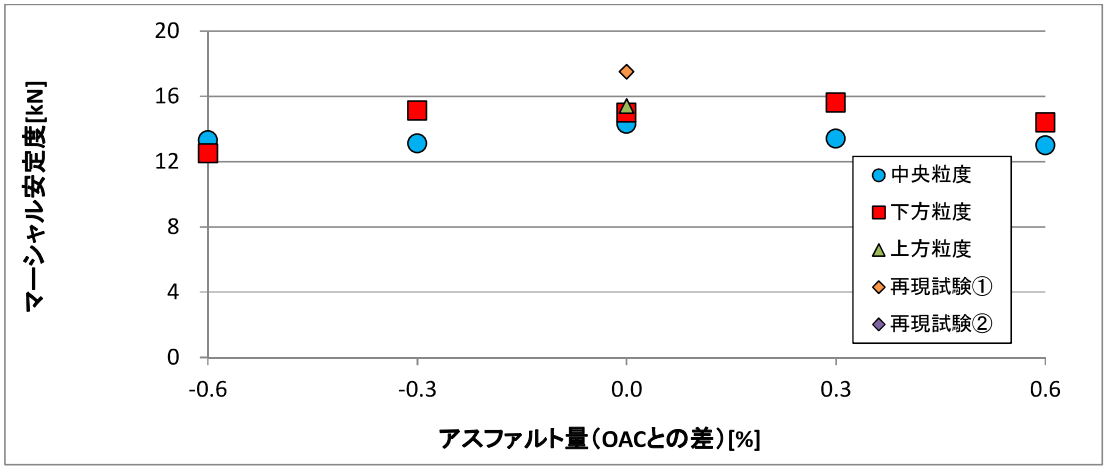
５－２．マーシャル安定度

マーシャル安定度試験結果を付表-13 および付図-3, 4 に示す。試験結果から、以下の傾向が得られた。また、試験状況を写真-2 に示す。

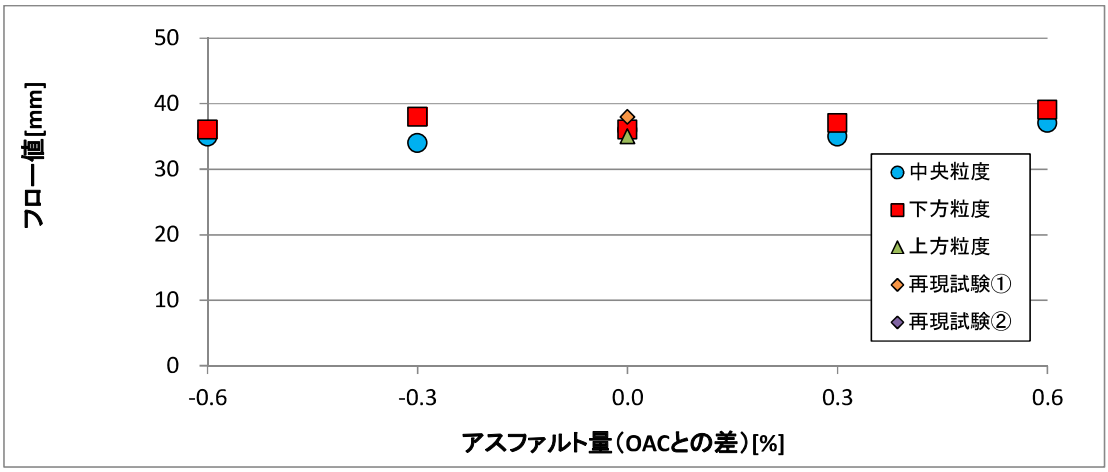
- マーシャル安定度およびフロー値ともに、アスファルト量や粒度の違いによる明確な差は見られなかった。

付表-13　マーシャル安定度とフロー値

混合物種	マーシャル安定度[kN]	フロー値[1/100cm]
中央粒度OAC+0.6%	13.0	37
中央粒度OAC+0.3%	13.4	35
中央粒度OAC	14.3	36
中央粒度OAC-0.3%	13.1	34
中央粒度OAC-0.6%	13.3	35
下方粒度OAC+0.6%	14.4	39
下方粒度OAC+0.3%	15.6	37
下方粒度OAC	15.0	36
下方粒度OAC-0.3%	13.3	38
下方粒度OAC-0.6%	12.5	36
上方粒度OAC	15.4	35
再現試験①	17.5	38
再現試験②	18.1	37



付図-3　アスファルト量（OAC との差）とマーシャル安定度の関係



付図-4　アスファルト量（OAC との差）とフロー値の関係

写真-2　マーシャル安定度試験状況

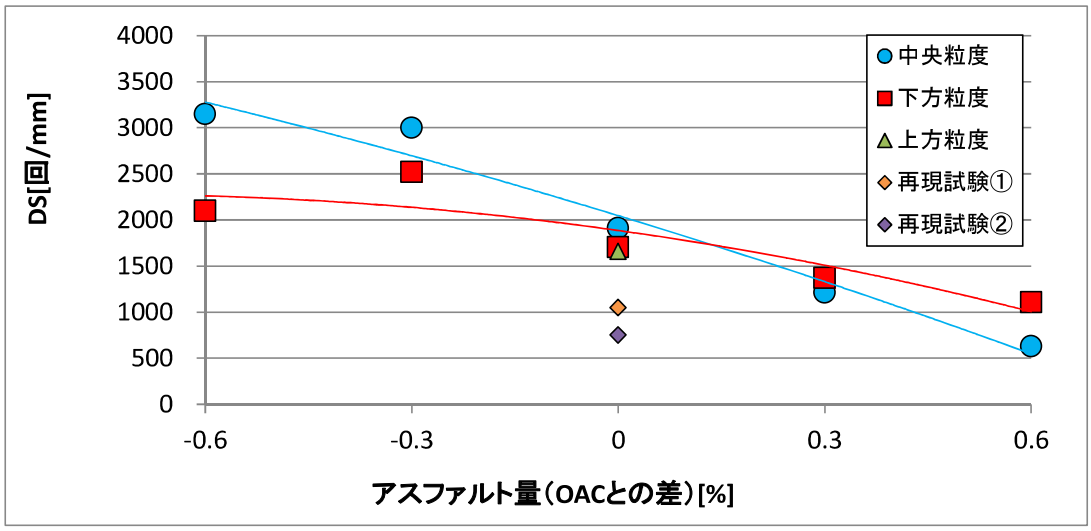
５－３．ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験（以下、ＷＴ試験）結果を付表-14 および付図-5,6 に示す。また、試験状況および試験後供試体の外観を写真-3,4 に示す。試験結果から、以下の傾向が得られた。

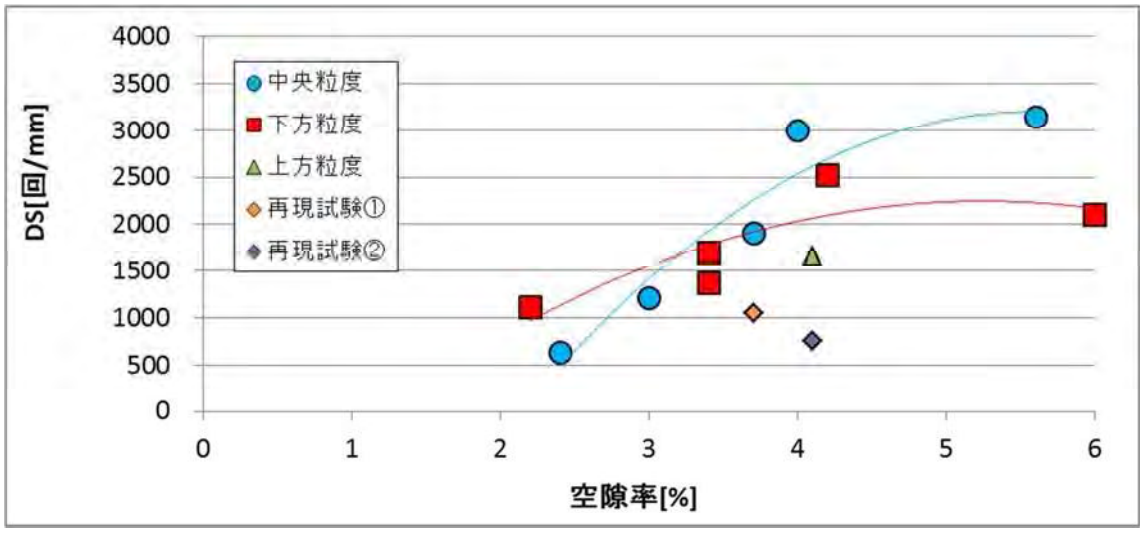
- アスファルト量が少なくなるともに、いずれの粒度でも DS が高くなる傾向が見られた。
- OAC で比較すると、再現試験①、②の DS は、密粒度アスファルト混合物(13)のいずれの粒度よりも低くなった。また、再現試験①、②における DS は、細骨材のみを適正範囲から外した②の粒度の方が低くなった。
- 空隙率が大きくなると DS が高くなる傾向が見られた。
- 中央粒度の方が下方粒度よりもアスファルト量や空隙率の増減による DS への影響が大きかった。

付表-14　ＷＴ試験結果

混合物種	空隙率[%]	d_{45}[mm]	d_{60}[mm]	d_0[mm]	DS[回/mm]
中央粒度OAC+0.6%	2.4	5.85	6.85	2.85	630
中央粒度OAC+0.3%	3.0	3.51	4.03	1.95	1212
中央粒度OAC	3.7	2.36	2.69	1.38	1909
中央粒度OAC-0.3%	4.0	1.68	1.89	1.04	3000
中央粒度OAC-0.6%	5.6	1.84	2.05	1.23	3150
下方粒度OAC+0.6%	2.2	4.29	4.87	2.57	1105
下方粒度OAC+0.3%	3.4	3.40	3.85	2.03	1370
下方粒度OAC	3.4	2.57	2.94	1.46	1703
下方粒度OAC-0.3%	4.2	1.97	2.22	1.23	2520
下方粒度OAC-0.6%	6.0	2.32	2.62	1.43	2100
上方粒度OAC	4.1	3.18	3.56	2.05	1658
再現試験①	3.7	3.13	3.73	1.44	1050
再現試験②	4.1	3.94	4.78	1.43	750

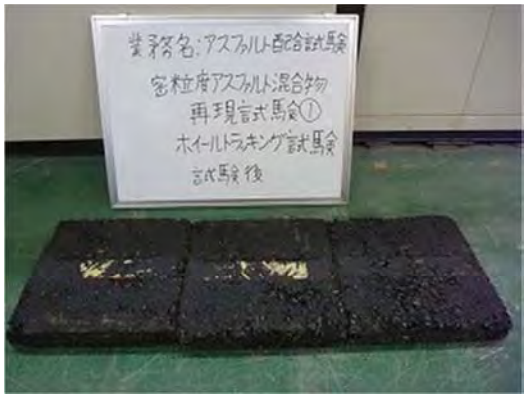


付図-5　アスファルト量（OAC との差）と DS の関係



付図-6　空隙率と DS の関係

写真-3　ＷＴ試験状況



再現試験①　　再現試験②

写真-4　ＷＴ試験後供試体外観

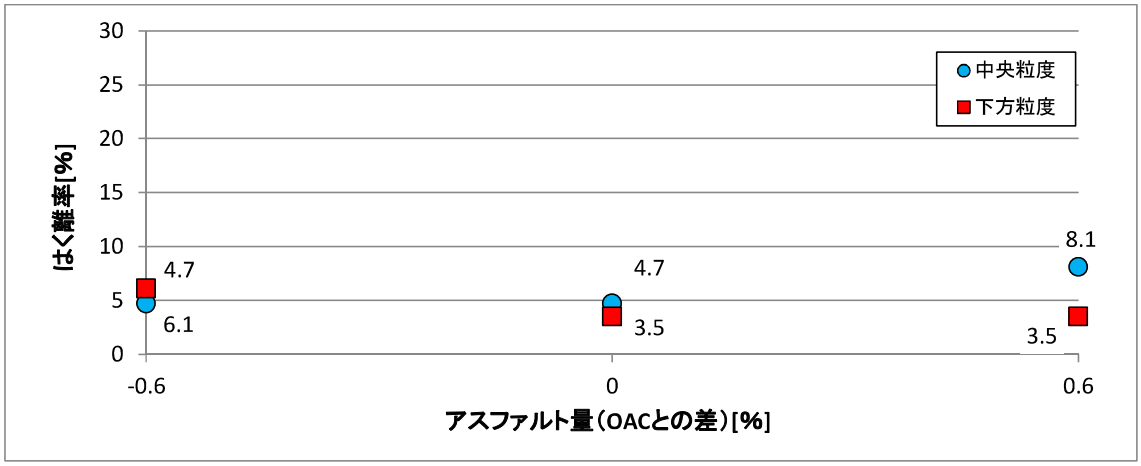
５－４．水浸ホイールトラッキング試験

水浸ホイールトラッキング試験（以下、水浸ＷＴ試験）結果を付表-15 および付図-7 に示す。また、試験状況を写真-5 に、試験後の供試体の断面写真を写真-6 に示す。試験結果から、以下の傾向が得られた。

- 中央粒度、下方粒度において、いずれのアスファルト量においてもはく離率に差は見られなかった。
- 中央粒度、下方粒度ともに、アスファルト量とはく離の関係についての明確な傾向は得られなかった。

付表-15　水浸ＷＴ試験結果

混合物種	空隙率[%]	はく離率[%]
中央粒度OAC+0.6%	2.4	8.1
中央粒度OAC	3.7	4.7
中央粒度OAC-0.6%	5.6	4.7
下方粒度OAC+0.6%	2.2	3.5
下方粒度OAC	3.4	3.5
下方粒度OAC-0.6%	6.0	6.1



付図-7　アスファルト量（OAC との差）とはく離率の関係

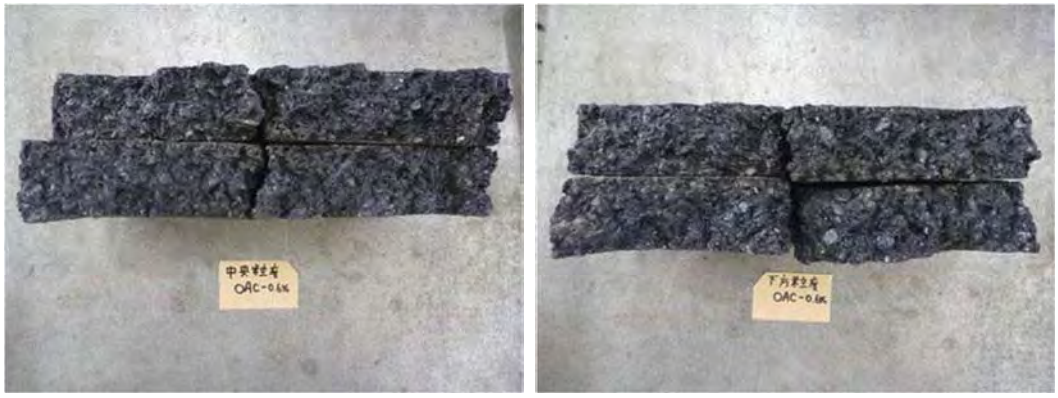
写真-5　水浸ＷＴ試験状況

中央粒度 OAC

下方粒度 OAC

中央粒度 OAC+0.6%

下方粒度 OAC+0.6%



中央粒度 OAC-0.6%　　下方粒度 OAC-0.6%

写真-6　水浸ＷＴ試験後の断面

５－５．曲げ試験

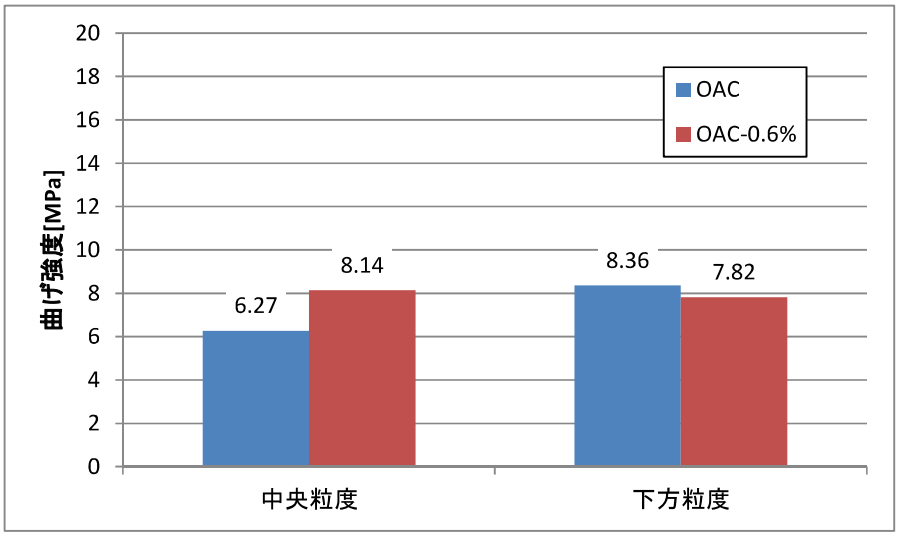
混合物曲げ試験結果を付表-16 および付図-8, 9 に示す。また、試験状況を写真-7 に示す。試験結果から、以下の傾向が得られた。

- 曲げ強度および曲げひずみとも、アスファルト量や粒度の違いによる明確な差が見られなかった。

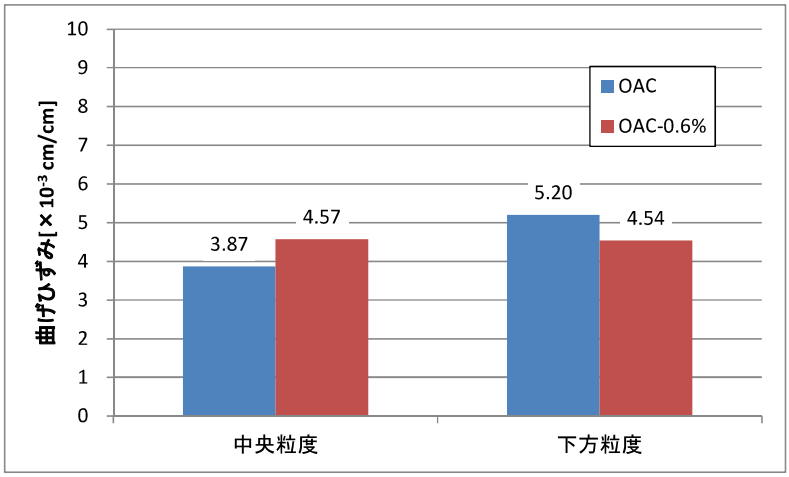
付表-16　曲げ試験結果

混合物種	空隙率[%]	曲げ強度[MPa]	曲げひずみ[×10^{-3}cm/cm]
中央粒度OAC	3.7	6.27	3.87
中央粒度OAC-0.6%	5.6	8.14	4.57
下方粒度OAC	3.4	8.36	5.20
下方粒度OAC-0.6%	6.0	7.82	4.54

※空隙率はカット前の混合物の値



付図-8　中央粒度および下方粒度の曲げ強度



付図-9　中央粒度および下方粒度の曲げひずみ

写真-7　曲げ試験状況

５－６．最大密度試験

最大密度試験の結果を付表-17 に示す。また、試験状況を写真-8 に示す。なお、最大密度試験で求められる実測値は、計算で求めた理論最大密度とほぼ一致した。

付表-17　最大密度試験結果

混合物種	最大密度（実測値）[g/cm^3]	理論最大密度[g/cm^3]
中央粒度OAC+0.6%	2.472	2.470
中央粒度OAC+0.3%	2.484	2.481
中央粒度OAC	2.493	2.492
中央粒度OAC-0.3%	2.504	2.503
中央粒度OAC-0.6%	2.515	2.514
下方粒度OAC+0.6%	2.467	2.470
下方粒度OAC+0.3%	2.484	2.481
下方粒度OAC	2.491	2.492
下方粒度OAC-0.3%	2.503	2.503
下方粒度OAC-0.6%	2.517	2.514
上方粒度OAC	2.495	2.495
再現試験①	2.493	2.492
再現試験②	2.489	2.492

写真-8　最大密度試験状況

５－７．SGC による混合物締固め試験

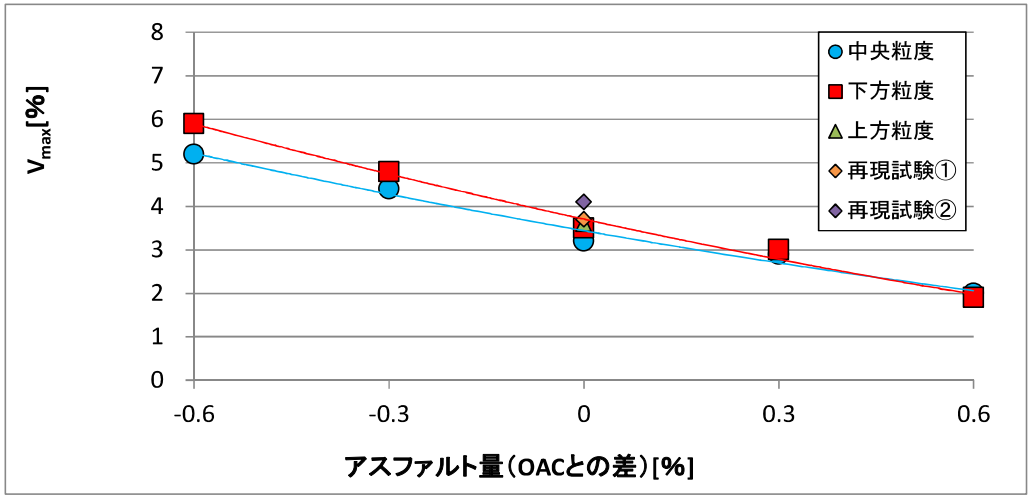
１）SGC による混合物締固め試験（Nmax：300 回）

SGC 締固め試験結果を付表-18 および付図-10～14 に示す。また、試験状況を写真-9 に示す。試験結果から、以下の傾向が得られた。

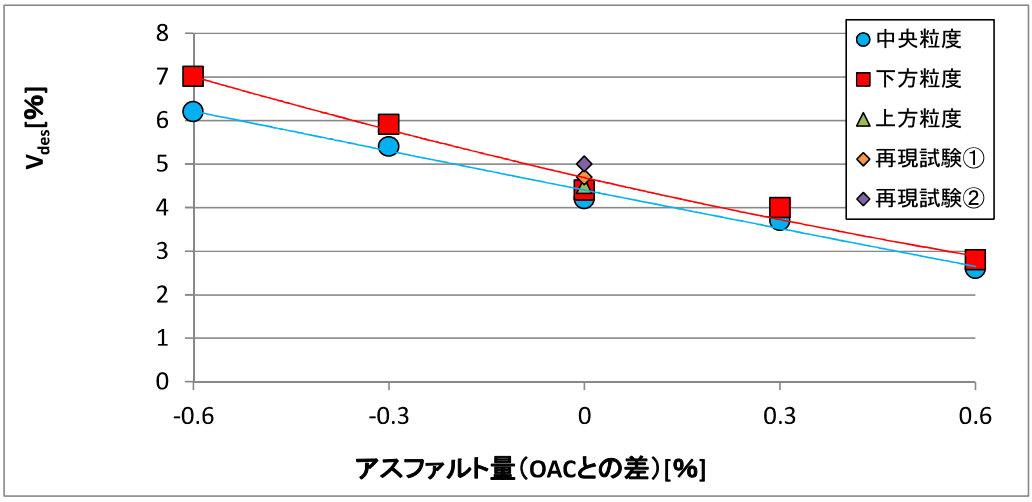
- Vmax, Vdes, Vini は、いずれもアスファルト量が少なくなると大きくなる傾向が見られた。
- いずれの粒度も、OAC においては Vmax, Vdes に明確な差が見られなかった。
- Vmax および Vdes の差は、アスファルト量が少なくなるにつれて大きくなる傾向が見られた。
- 下方粒度の Vini は、いずれのアスファルト量においても、他の粒度に比べ、大きくなる傾向が得られた。
- 2.36mm ふるい通過量と Vmax との関係に明確な傾向は見られなかった。
- Vmax と DS には、いずれの粒度でも明確な相関があり、Vmax が大きくなるほど DS が高くなる傾向が見られた。
- 再現試験の Vmax は、①で 3.7%、②で 4.1%であり、密粒度アスファルト混合物(13)と同じ V_{max} で比較すると DS が低いことがわかった。

付表-18　SGC による混合物締固め試験結果

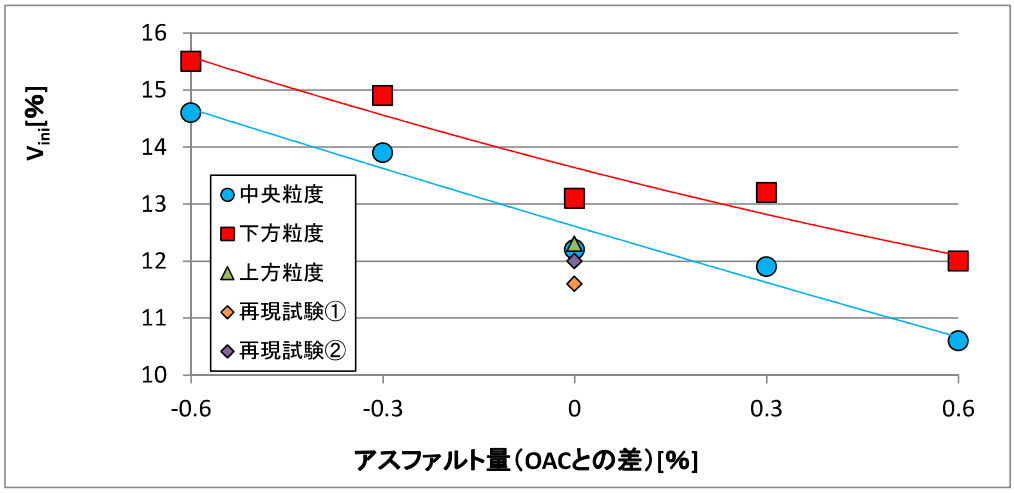
混合物種	2.36mmふるい通過量[%]	DS[回/mm]	V_{ini}[%]	V_{des}[%]	V_{max}[%]
中央粒度OAC+0.6%	42.5	630	10.6	2.6	2.0
中央粒度OAC+0.3%		1212	11.9	3.7	2.9
中央粒度OAC		1909	12.2	4.2	3.2
中央粒度OAC-0.3%		3000	13.9	5.4	4.4
中央粒度OAC-0.6%		3150	14.6	6.2	5.2
下方粒度OAC+0.6%	37.5	1105	12.0	2.8	1.9
下方粒度OAC+0.3%		1370	13.2	4.0	3.0
下方粒度OAC		1703	13.1	4.4	3.5
下方粒度OAC-0.3%		2520	14.9	5.9	4.8
下方粒度OAC-0.6%		2100	15.5	7.0	5.9
上方粒度OAC	47.5	1658	12.3	4.5	3.6
再現試験①	42.9	1050	11.6	4.7	3.7
再現試験②		750	12.0	5.0	4.1



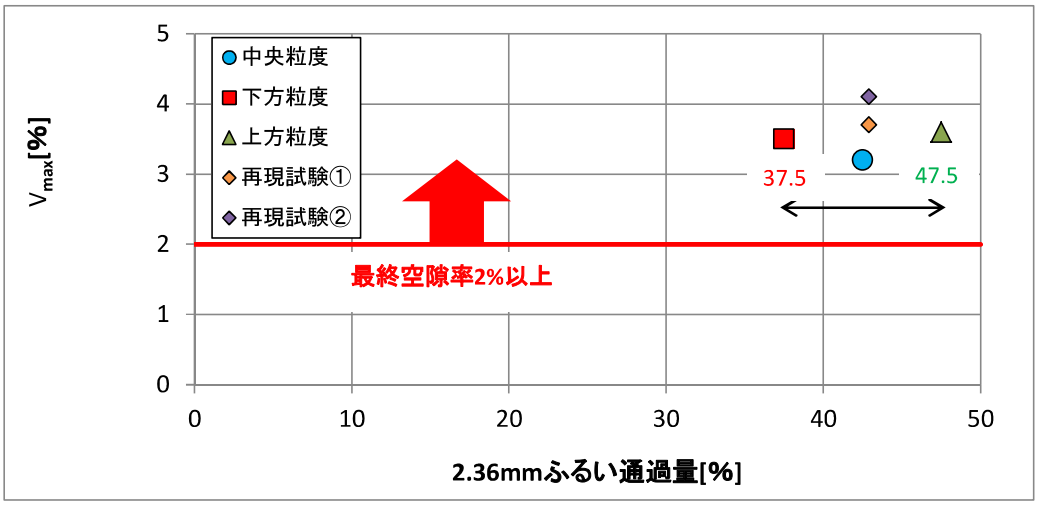
付図-10　アスファルト量（OAC との差）と Vmax の関係



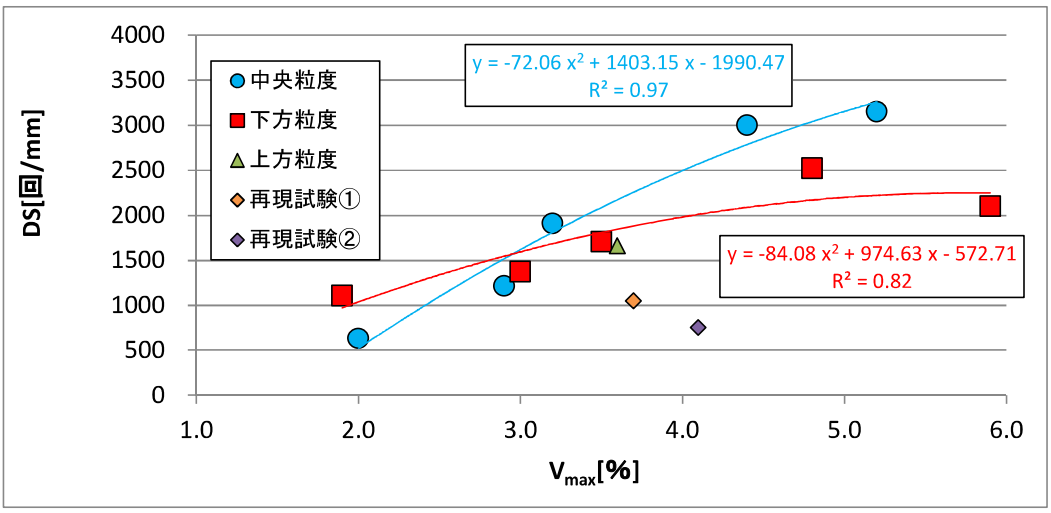
付図-11　アスファルト量（OAC との差）と Vdes の関係



付図-12　アスファルト量（OAC との差）と Vini の関係



付図-13　2.36 mm ふるい通過量と Vmax の関係



付図-14　Vmax と DS の関係

写真-9　SGC による混合物締固め試験状況

２）SGC による混合物締固め試験（Nmax：205 回）

＜目的＞

１）で実施した検討では、旋回数の設定を 300 回としており、205 回のかさ空隙率が測定できなかった。そこで、旋回数 205 回の供試体を作製し、見かけ空隙率とかさ空隙率の関係を把握した。最終旋回数（Nmax）での実測によるかさ密度、高さの変位から求めた見かけ密度の２つの密度から、補正係数Ｃ（correction factor）を求め、計算式から Nini, Ndes の推定かさ密度を求めた。

＜検討内容＞

本検討で用いた混合物(全 13 種類)について、SGC 締固め試験を行った。最大旋回数(Nmax)は 205 回とし、見かけ密度および見かけ空隙率と、かさ密度およびかさ空隙率を求めた。なお、本検討における見かけ密度および見かけ空隙率と、かさ密度およびかさ空隙率については、以下のとおり定義した。

見かけ密度　・・・試料の空中重量(ｇ)を、試験機の高さ変位（ｈ）およびモールド内径（R）から求まる供試体容積（$\pi R^2/4\times$ｈ；cm^3）を用いて算出した密度

見かけ**密度（g/cm³）＝空中重量／供試体容積**

かさ密度　・・・「調査試験法便覧 B008-1 密粒度アスファルト混合物等の密度試験方法」により得られるかさ密度

かさ密度＝空中重量／（表乾重量－水中重量）
※水の比重を 1.00 とする。

見かけ空隙率・・・見かけ密度から得られる空隙率

かさ空隙率　・・・かさ密度から得られる空隙率

空隙率［%］＝（１－密度［g/cm3］／最大密度［g/cm3］）×100
※計算で使用する最大密度には、<u>最大密度試験の結果</u>を用いた。

試験により求められた Nmax の見かけ空隙率とかさ空隙率の関係から、補正係数Ｃ（correction factor）を求めた。Ｃを用いて、Nini と Ndes におけるかさ空隙率を求めた。

補正係数Ｃ＝かさ密度／見かけ密度

※スーパーペーブにおける *C* は設計旋回数（Ndes）後の値を使用するとなっているが、ここでは最大旋回数（Nmax）の値を代用した。

旋回数Ｎにおけるかさ密度＝補正係数Ｃ×旋回数Ｎにおける見かけ密度

＜検討結果＞

Nmax における見かけ密度とかさ密度の関係を求めた。検討結果を付表-19、付図-15,16 に示す。また、旋回数毎(Nini 、Ndes)の見かけ空隙率とかさ空隙率の関係を付表-20 に示す。

○全体

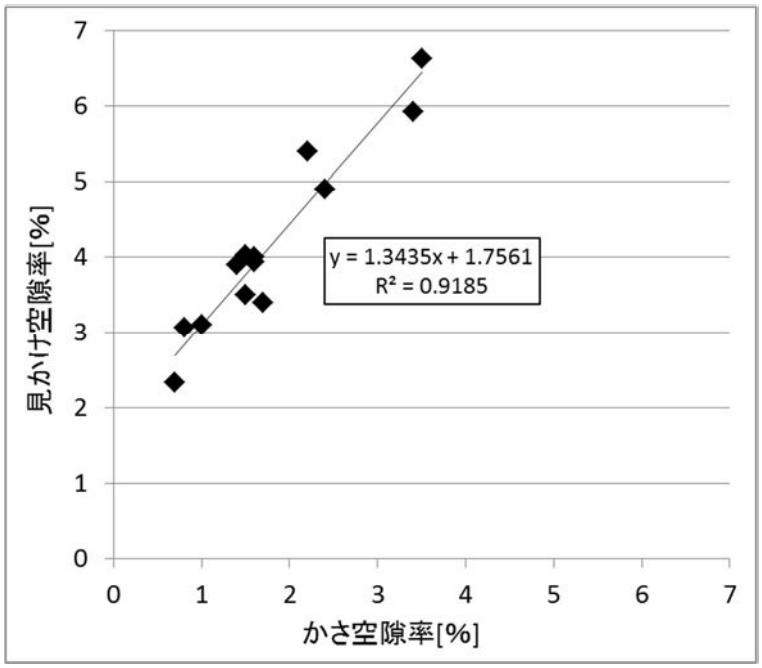
- かさ空隙率と見かけ空隙率には、高い相関が見られた。
- かさ空隙率は見かけ空隙率よりも 1～3%程度小さい傾向が見られた。

○粒度別

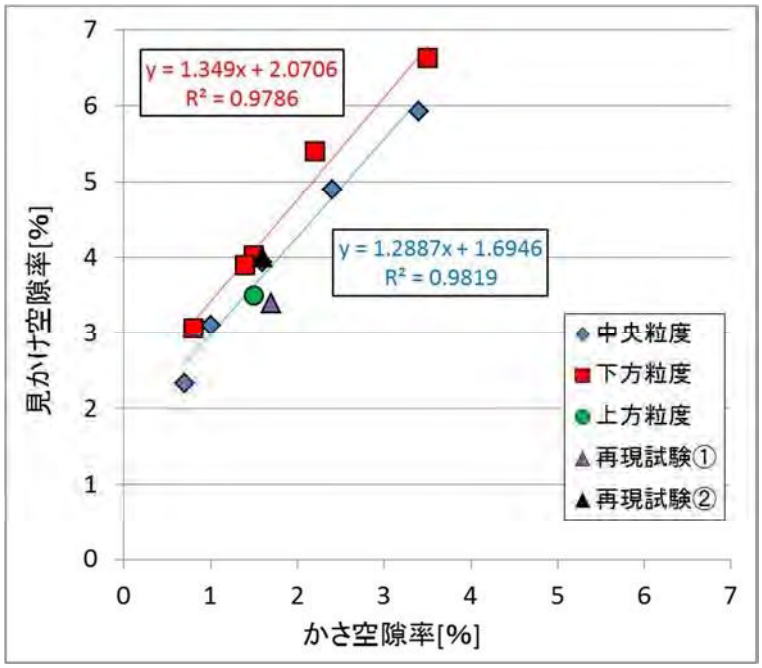
- 同じ空隙率で比較した場合、中央粒度よりも下方粒度の方が見かけ空隙率が大きくなる傾向が見られた。

付表-19　Nmax における密度、空隙率および補正係数Ｃ

混合物種	密度[g/cm^3](旋回数:205)		補正係数C	V_{max}[%](旋回数:205)	
	見かけ	かさ		見かけ	かさ
中央粒度OAC+0.6%	2.414	2.455	1.017	2.3	0.7
中央粒度OAC+0.3%	2.387	2.444	1.024	3.9	1.6
中央粒度OAC	2.415	2.467	1.022	3.1	1.0
中央粒度OAC-0.3%	2.381	2.444	1.027	4.9	2.4
中央粒度OAC-0.6%	2.366	2.430	1.027	5.9	3.4
下方粒度OAC+0.6%	2.392	2.447	1.023	3.1	0.8
下方粒度OAC+0.3%	2.384	2.447	1.027	4.0	1.5
下方粒度OAC	2.394	2.457	1.026	3.9	1.4
下方粒度OAC-0.3%	2.368	2.448	1.034	5.4	2.2
下方粒度OAC-0.6%	2.349	2.430	1.034	6.6	3.5
上方粒度OAC	2.407	2.458	1.021	3.5	1.5
再現試験①	2.408	2.451	1.018	3.4	1.7
再現試験②	2.389	2.448	1.025	4.0	1.6



付図-15　Nmax における見かけ空隙率とかさ空隙率の関係（全体）



付図-16　N_{max} における見かけ空隙率とかさ空隙率の関係（粒度別）

付表-20　各旋回数における見かけおよびかさ空隙率

混合物種	V_{ini}[%]（旋回数：9）		V_{des}[%]（旋回数：125）		V_{max}[%]（旋回数：205）	
	見かけ	かさ	見かけ	かさ	見かけ	かさ
中央粒度OAC+0.6%	12.5	11.1	3.4	1.8	2.3	0.7
中央粒度OAC+0.3%	14.2	12.1	5.1	2.8	3.9	1.6
中央粒度OAC	12.5	10.6	4.1	2.0	3.1	1.0
中央粒度OAC-0.3%	14.4	12.1	5.9	3.4	4.9	2.4
中央粒度OAC-0.6%	15.6	13.3	7.0	4.5	5.9	3.4
下方粒度OAC+0.6%	13.7	11.7	4.2	2.0	3.1	0.8
下方粒度OAC+0.3%	14.5	12.2	5.2	2.7	4.0	1.5
下方粒度OAC	14.0	11.7	4.9	2.4	3.9	1.4
下方粒度OAC-0.3%	15.5	12.7	6.6	3.4	5.4	2.2
下方粒度OAC-0.6%	16.4	13.6	7.7	4.5	6.6	3.5
上方粒度OAC	12.5	10.6	4.5	2.5	3.5	1.5
再現試験①	11.5	10.0	4.3	2.6	3.4	1.7
再現試験②	11.9	9.7	4.9	2.6	4.0	1.6

６．考察

＜配合設計＞

- 中央、下方、上方の３粒度における OAC は、4.7～4.8 %となり、日本で一般的な密粒度アスファルト混合物(13)が 5.0~5.5%程度であるのに比べて少ない結果となった。この要因として、本検討で用いた骨材の特性や、砕砂の配合割合を意図的に大きくしたことなどが考えられる。なお、本検討で使用した粗骨材および砕砂を両方用いている合材プラントを調査したが、該当する配合設計書が確認できなかったため、要因を特定できていない。

＜マーシャル安定度試験＞

- マーシャル安定度およびフロー値ともに、2.36mm ふるい通過量とアスファルト量の影響を受けないと考えられる。

＜ＷＴ試験＞

- DS を向上させる方法として、OAC±0.6%の範囲では、アスファルト量を少なくし、空隙率を大きくすることの有効性が示唆された。
- 粒度範囲をはずれた再現試験の DS が低かったことから、DS を確保するには粒度およびアスファルト量を適切に設定することが重要と考えられる。
- 再現試験の DS は、密粒度アスファルト混合物(13)より低いが、早期に破損するような値ではない。これは、今回の検討では中央粒度の OAC を採用していることが要因と考えられる。

＜水浸ＷＴ試験＞

- 2.36mm ふるい通過量とアスファルト量の違いによるはく離抵抗性への影響は見られない。したがって、粒度に関わらず OAC±0.6%の範囲では、はく離抵抗性を大きく損ねることがないと推測される。

＜曲げ試験＞

- 2.36mmふるい通過量とアスファルト量の違いによる曲げ強度や曲げひずみへの影響は見られない。したがって、粒度に関わらず OAC±0.6%の範囲では、たわみ追従性を大きく損ねることがないと考えられる。

＜SGCによる混合物締固め試験＞

- VmaxとDSの相関が高いため、VmaxによりDSを推定できる可能性がある。
- 2.36mm ふるい通過量の変化による Vmax の影響は、ほぼ見られなかった。この理由として、今回設定した3粒度における2.36mmふるい通過量は、37.5 ～ 47.5%の範囲で設定しており、この範囲では最終空隙率の変化を確認するためには狭すぎたことが推察される。
- 下方粒度は他の粒度に比べて、いずれのアスファルト量においてもViniが大きかった。このことから、下方粒度は中央粒度と比較して、施工中の締固め性（ワーカビリティー）が低い混合物であると推測される。
- 本検討では、Nmaxにおけるかさ空隙率は、見かけ空隙率よりも1～3%程度小さい傾向となった。ここで密度の測定方法を比較すると、見かけ密度がかさ密度よりも air（空気）の質量を測定しているため、空隙率は「見かけ空隙率≧かさ空隙率」となるはずである。ただし、本検討結果のように見かけ空隙率が1～3%程度も大きくなることが妥当であるかは知見に乏しい。この違いが一般的なものより大きいと仮定した場合、この要因としては、本検討混合物の OAC が 4.8%と一般的な密粒度混合物としては少ないため、検討に使用した骨材や混合物配合などの影響が考えられる。

７．結論

本検討における結論を以下に示す。

（１）塑性変形抵抗性に起因するパラメーター

混合物の塑性変形抵抗性に起因するパラメーターを以下に示す。

- 空隙率を大きくする（アスファルト量をOAC-0.6%の範囲内で少なくする）ことで、はく離抵抗性やたわみ追従性を損なわずに塑性変形抵抗性を向上させることができる。
- 中央粒度と下方粒度の比較より、粒度はアスファルト量を少なくした場合の効果が高い中央粒度が望ましい。
- VmaxとDSの相関が高いため、VmaxによりDSを推定できる可能性がある。
  ただし、アスファルト量を少なくすることで、骨材へのアスファルト被膜を形成させる時間(混合時間)が長くなるため、プラント製造時における薄膜劣化の影響を確認する必要がある。

（２）現場破損の発生要因と推測されるパラメーター

現場破損の発生要因と推測されるパラメーターを以下に示す。

- 空隙率やVmaxが同程度でも、再現試験のDSは密粒度アスファルト混合物(13)よりも低くな

るため、現場の破損は混合物の粒度やアスファルト量に起因する可能性が高い。

なお、本検討における再現試験用供試体のアスファルト量は、粒度による影響を把握するため、中央粒度の OAC を適用した。現場の破損状況写真から、実際のアスファルト量は過剰となっていることが想定されるため、この影響で早期破損を生じたものと推測される。

（３）施工中の締固め性（ワーカビリティー）に起因するパラメーター

混合物のワーカビリティーに起因するパラメーターを以下に示す。

- 2.36㎜ふるい通過量を多くするほど、ワーカビリティーが良くなる可能性がある。

８．おわりに

本検討結果は日本の１材料を対象としたものであり、現地での施工にあたっては下記の点に留意することが必須となる。

① 本検討結果の再現性を検証するため、現地材料での事前確認を行う必要がある。
② 良い材料を使用した場合でも、施工次第で悪い舗装に仕上がるため、現地での施工においては、入念な施工管理および品質管理の体制が重要である。

以上