

舗装用無空隙アスファルト合材の 変形に関する一考察

——主としてズレの粘弾性——

正員 ○中 島 昭 雄*
田 淵 信 行**

1. 概 要

マスチックアスファルトで代表される舗装用無空隙アスファルト合材と、一般舗装用アスファルト合材の力学的および粘弾性的性状には大きな相違がある。一般舗装用アスファルト合材は、4～7%の空隙を有しており、その安定度は主として骨材のカミ合せに依存していると考えられるのに対し、無空隙アスファルト合材においては、その空隙率は0～2%であり、この空隙も連行空気泡であり、本質的空隙は存在しない。又その安定度は主としてバインダーの粘度に依存していると考えられる。従って無空隙合材においては、バインダーの質と量とが、力学的、粘弾性的性状を支配する要因となる。量については単なるアスファルト含有量ではこの要因とならないことはマトリックス、およびサンドマスチックにおいてすでに見出されている。

無空隙アスファルト合材一般に対してその粘弾性的性状を調べ、それを支配する要因を見出すために一般構造を次のように考えた。

1) マトリックスとは、フィラー (No. 200 フルイ通過分) とアスファルトの混合物であり、鉱物質フィラーの空隙はアスファルトで完全に満たされている。

2) マスチックアスファルトとは、砂、フィラー、アスファルトの混合物であり、砂、フィラー混合物の空隙はアスファルトで完全に満たされている。

3) 碎石入りマスチックアスファルト (ドイツでいうグーサスファルト) とは、碎石、砂、フィラー、アスファルトの混合物であり、碎石、砂、フィラー混合物の空隙はアスファルトで満たされている。

次に上記の各種合材について空隙を満たし、さらに余剰に存在するアスファルト量、すなわち余剰アスファルト量という考え方を導入し、これを無空隙アスファルト合材の粘弾性状を支配する要因のひとつと考えた。本研究においては、試料としてマトリックス、マスチックアスファルト、

碎石入りマスチックアスファルトをえらび、これら合材中の骨材のみの空隙を求めるために、B.S. 法の外に新たに締め固め装置を考案した。このようにして求めた空隙率から余剰アスファルト量を計算した。

粘弾性試験としては単純ズレの試験機を試作し、これによってズレのクリープカーブを求めた。この解析には、マックスウェル・フォークトの四要素模型が良く近似することからこれをあてはめて粘弾性の四定数を求めた。

試験結果から、前述の余剰アスファルト量と上記各種合材の四定数との間には一定の関係が得られ、粘弾性状を支配する要因のひとつとなることが確かめられた。

2. 試験に使用した各種合材の配合

試験のためにえらんだ合材種類は次の通りである。

1) 表-1に示す5種類のマトリックス。

2) 1)に示すマトリックスの各々に砂を加えたマスチックアスファルト5種類。配合は表-2に示す。骨材の粒度組成はすべて同一とし、アスファルト量のみを変化させた。粒度組成は図-1に示す。

表-1 マトリックスの配合

組 成	配 合 種 別				
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
0.074 mm 以下	79.68	77.98	76.33	74.70	73.11
アスファルト	20.32	22.02	23.67	25.30	26.89

表-2 マスチックアスファルトの配合

組 成	配 合 種 別				
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
2.5～0.074 mm	47.84	47.31	46.77	46.24	45.71
0.074 mm 以下	41.56	41.09	40.63	40.16	39.69
アスファルト	10.60	11.60	12.60	13.60	14.60

* 北海道大学工学部 助手

** 北海道大学工学部 研究生

表—3 碎石入マスチックアスファルトの配合

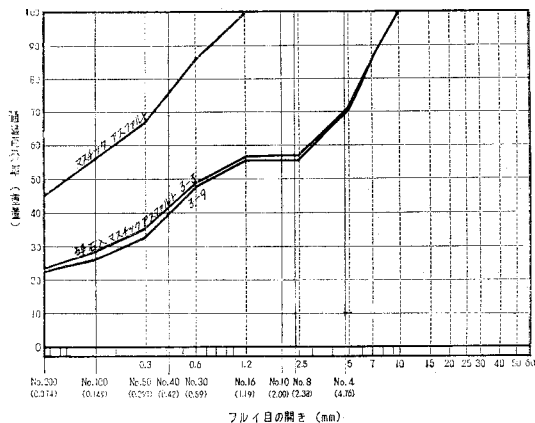
組 成	配 合 種 別						
	3—3	3—4	3—5	3—6	3—7	3—8	3—9
10~7 (mm)				13.33			
7~5				13.33			
5~2.5				13.33			
2.5~1.2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09
1.2~0.6	7.22	7.14	7.06	6.99	6.95	6.88	6.81
0.6~0.3	9.70	9.59	9.48	9.38	9.33	9.24	9.15
0.3~0.15	5.79	5.72	5.66	5.61	5.56	5.50	5.45
0.15~0.074	5.25	5.19	5.13	5.08	5.04	4.99	4.94
0.074 以下	24.39	24.11	23.82	23.59	23.38	23.15	22.91
アスファルト	7.56	8.16	8.76	9.26	9.66	10.16	10.66

3) マスチックアスファルトの配合種別 2-3, 2-4, 2-5 に碎石 40% (重量) を加えた碎石入りマスチックアスファルト 3 種類。 (3-3, 3-4, 3-5), および余剰アスファルト量を順次変化させたマスチックアスファルトに同じように碎石 40% (重量) を加えた碎石入りマスチックアスファルト 4 種類 (3-6, 3-7, 3-8, 3-9), 合計 7 種類。これらの配合は表-3 に示す。骨材の粒度組成は、ほぼ同一で図-1 に示される 3-3, 3-9 の線の間に入る。

上記 3 種類の合材間の対応表を表-4 に示す。

表—4 各種別合材の対応表

マトリックス	1—1	1—2	1—3	1—4	1—5
マスチック アスファルト	2—1	2—2	2—3	2—4	2—5
碎石入マスチック アスファルト	—	—	3—3	3—4	3—5



図—1 マスチックアスファルト及び碎石入マスチックアスファルトの粒度曲線

本試験においては、バインダーの種類は 1 種とした。その一般性状は表-5 に示すとおりである。

表—5 使用アスファルトの性状

針 入 度	25°C 100 gr, 5 sec	44
比 重	25/25°C	1.028
軟 化 点	(R&B)°C	57.6
伸 度	25°C	100
	15°C	9.5
	10°C	5.0
	5°C	0.0
P. I.		+0.2

3. 振動締め固めによる骨材中の空隙率の決定と余剰アスファルト量の算出

骨材中の空隙率の測定は次の方法により行った。

1) フィラー (No. 200 フルイ通過分)

B.S. 812 “Determination of the voids in dry Compacted filler” により測定した。

2) フィラー (No. 200 フルイ通過分)+砂。および フィラー (No. 200 フルイ通過分)+砂+碎石

については図-2 に示す締め固め装置を試作し使用した。測定方法は次のとおりである。約 200 g の乾燥させた試料骨材をシリンダー (75 mm φ×100 mm) 内に、表面が平らになるように入れる。プランジャー (重量 3,830 g) を挿入し 10 mm の自由落下が出来る手動式フローコンのテーブルに固定する。落下は毎秒 1 回の割合で 200 回行う。締め固め後の骨材の深さを 1/10 mm のバーニヤスケールで読む。シリンダー内で締め固められた骨材を 1/10 g の精度で計量する。空隙率は次式によって求められる。

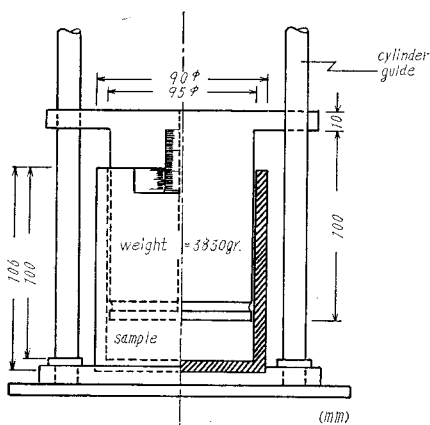


図-2 振動締め固め装置 (試作型)

$$\epsilon = 1 - \frac{W}{AdL}$$

ここで ϵ = 空隙率

W = 締め固められた試料重量 (g)

A = シリンダーの断面積 (cm^2)

d = 骨材の真比重

L = 締め固められた骨材の深さ (cm)

余剰アスファルト量は上記のようにして求められた空隙率と配合から次式によって求められる。

$$\text{余剰アスファルト量} = 1 - \frac{C_v}{1 - \epsilon}$$

ここで ϵ = 空隙率

$$C_v = \frac{\text{骨材の体積}}{\text{骨材の体積} + \text{アスファルトの体積}}$$

以上により求められた骨材の空隙率, 余剰アスファルト量を合材別に表-6, 表-7, 表-8に示す。

表-6 マトリックスの4定数

配合種別	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
骨材の空隙率 (%)	33.47				
余剰量 (%)	10.13	13.62	17.30	20.59	23.69
$E_{1s}, \times 10 (\text{kg/cm}^2)$	2.19	1.82	1.81	1.71	1.71
$Q_{1s}, \times 10^8 (\text{poise})$	15.07	7.50	2.52	1.37	0.39
$E_{2s}, (\text{kg/cm}^2)$	1.81	0.81	0.48	0.29	—
$Q_{2s}, \times 10^7 (\text{poise})$	11.14	6.21	3.29	2.57	—

表-7 マスチックアスファルトの4定数

配合種別	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
骨材の空隙率 (%)	24.67				
余剰量 (%)	-1.04	1.33	3.92	6.29	8.59
$E_{1s}, \times 10 (\text{kg/cm}^2)$	6.01	6.34	5.87	4.72	4.60
$Q_{1s}, \times 10^9 (\text{poise})$	16.30	9.61	4.70	2.22	1.07
$E_{2s}, (\text{kg/cm}^2)$	7.32	6.07	3.42	2.30	1.20
$Q_{2s}, \times 10^9 (\text{poise})$	13.02	9.69	6.17	3.96	2.17

表-8 碎石入マスチックアスファルトの4定数

配合種別	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9
骨材の空隙率 (%)	22.10	22.10	22.10	22.10	22.10	22.10	22.10
余剰量 (%)	-5.55	-3.93	-2.36	-1.07	0.05	1.18	2.43
合材の空隙率 (%)	3.41	3.00	2.15	1.29	1.29	0.43	0.00
$E_{1s}, \times 10^2 (\text{kg/cm}^2)$	1.43	1.12	1.03	—	—	—	—
$Q_{1s}, \times 10^{10} (\text{poise})$	6.07	3.87	2.98	2.03	1.83	1.13	0.73
$E_{2s}, \times 10 (\text{kg/cm}^2)$	4.27	2.62	2.11	—	—	—	—
$Q_{2s}, \times 10^9 (\text{poise})$	2.76	2.79	2.08	—	—	—	—

4. 粘弾性試験

各種合材に対する粘弾性試験のために, 図-3に示すような単純ズレの試験機を試作した。試験方法は次のとおりである。

供試体寸法は $15 \times 20 \text{ cm}$, 厚さ 2 cm 。供試体をエポキシ樹脂を用いてサンドウィッチ状に2枚の鋼板の間に接着せしめる。これを図に示すように水平におき, 下板はベースに固定する。上板を重量 (45 kg) により水平方向に引張り,

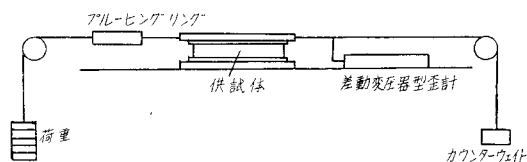


図-3 剪断試験機

供試体にズレを与える。水平方向の変位は差動変圧器型歪計と電磁オシログラフにより自動的に記録される。荷重はブルーピングリングにより正確に読みとる。試験温度は45°C。この温度に保たれた恒温室中で測定を行なう。

このようにして約5~30分間のクリープカーブが求められる。

5. クリープカーブの解析

図-4に典型的なクリープカーブを示す。本研究に使用した合材に対するクリープはこのモデルに良く近似するので、このカーブを解析するために図-5に示すマクスウェル・フォークトの四要素モデルをえらんだ。

弾性係数 E_{1s} , E_{2s} , および粘性係数 Q_{1s} , Q_{2s} は次の式から求められる。

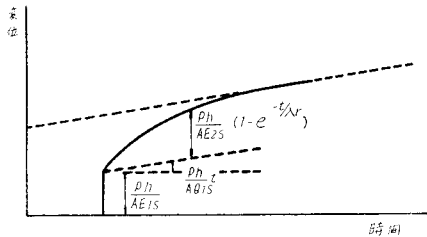


図-4 時間～変位曲線

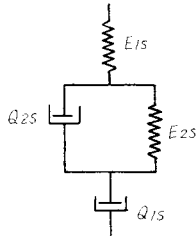


図-5 四要素モデル

$$\frac{e}{h} = \frac{P}{AE_{1s}} + \frac{Pt}{AQ_{1s}} + \frac{P}{AE_{2s}}(1 - e^{-t/\lambda r})$$

ここで e = 変位 (cm)

P = 荷重 (kg)

h = 供試体の厚さ (cm)

A = " 面積 (cm²)

E_{1s} = マクスウェルモデルの弾性係数(kg/cm²)

E_{2s} = フォークトモデルの " (")

Q_{1s} = マクスウェルモデルの粘性係数(ポアズ)

Q_{2s} = フォークトモデルの " (")

t = 載荷時間 (sec)

λr = 遅延時間 (sec)

6. 本試験の意義について

以上のようにして求められた粘弾性的四定数の舗装にたいする意義は次のようになると考えられる。

1) E_{1s} ; E_{1s} は瞬間変形の弾性係数であり、これによる変形は回復可能である。この値は高速走行荷重にたいして問題となる。

また舗装の弾性的な設計に資料を与えるものである。

2) E_{2s} , Q_{2s} ; 緩速交通による短時間載荷の場合の中間の変形であり、時間の経過によって回復可能である。これらの値は緩速交通に際しての舗装の変形の計算に資料を与える。

3) Q_{1s} ; Q_{1s} にもとづく変形は回復不能であり、直ちに永久変形と結びつく数値である。停止車輛の場合に考慮されるべきである。舗装の永久変形に資料を与える。

ただしこのような試験による E_{1s} の精度の高いものはあまり期待出来ず、他の方法によるのがのぞましい。

7. 試験結果

試験の結果得られた各種合材の E_{1s} , E_{2s} , Q_{1s} , Q_{2s} , 振動締め固めによる骨材の空隙率および砕石入りマスチックアスファルトについては合材中の空隙率を一括して表-6, 表-7, 表-8に示す。(ただし3-6~3-9については Q_{2s} , E_{1s} , E_{2s} を除く。後述)

粘弾性四定数の対数と余剰アスファルト量との関係を、図-6, 図-7に示す。

これらの結果から次のような結論が得られた。

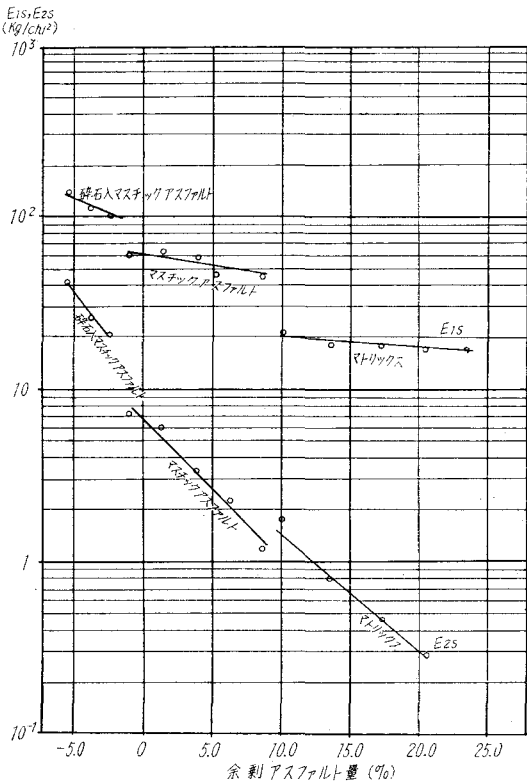


図-6 余剰アスファルト量と E_{1s} , E_{2s} の関係

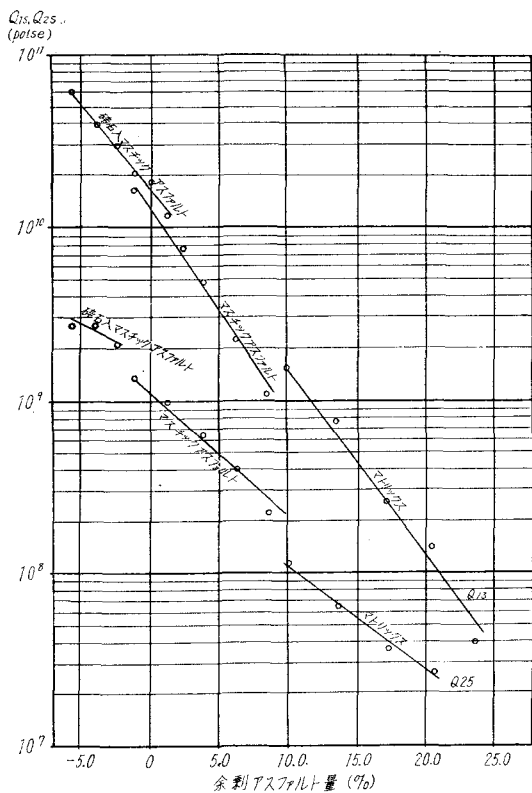


図-7 余剰アスファルト量と Q_{1s} , Q_{2s} の関係

1) 合材の空隙率について

砕石入りマスチックアスファルトの合材の、空隙率は、配合 3-5 で 2.15%, 3-4 では 3.0% となっている。この値は約 2% 程度までは、連行空気泡の存在のためであり、本質的には無空隙であると考えられる。余剰アスファルト量は、締め固め方法により異なる相対的値であり絶対的な意味をもたないが、合材の空隙量 2% の 3-5 では、余剰アスファルト量が約 -2.5% であり、余剰アスファルト量からみれば約 -2.5% 以上であれば無空隙合材であらうと考えられる。

次に各々の合材種別毎にみると

2) マトリックスについて

余剰アスファルト量約 10~24% のマトリックスについて Q_{1s} , Q_{2s} , E_{1s} の対数はそれぞれ余剰アスファルト量の減少とともに直線的な増加を示している。瞬間弾性係数である E_{1s} については、余剰アスファルト量の変化にかかわらずほぼ同じ値を有している。

3) マスチックアスファルトについて

余剰アスファルト量約 -1~9% のマスチックアスファルトについても、マトリックスと同様に、 Q_{1s} , Q_{2s} , E_{2s} の対数は余剰アスファルト量の減少とともに直線的な増加を示しており、 E_{1s} については大きな変化を示していない。

2) 砕石入りマスチックアスファルトについて

余剰アスファルト量は約 -5.6~-2.4 となったが相対値として考え比較すると、マトリックス、マスチックアスファルトと同様な関係が見出された。配合 3-6, 3-7, 3-8 については Q_{1s} についてのみ処理した。他の 3 定数については前述のように無空隙合材の境界に近いので、別に検討を加えるため省略した。

5) 各種合材相互の E_{1s} について

マトリックス、マスチック、砕石入りマスチック相互の E_{1s} の値についてみると、マトリックスでは前述のように余剰アスファルト量約 10~24% (アスファルト含有量で 6.6%) の変化では 21.9~17.1 kg/cm² と大きな変化を示さない。この各々に砂が加えられたマスチックアスファルトではその E_{1s} の値はそれぞれのマトリックスの約 3 倍となっている。このマスチックの E_{1s} は余剰アスファルト量約 -1~9% (アスファルト含有量で 4%) の変化で 60.1~46.0 kg/cm² と大きな変化ではない。これに砕石が加わった砕石入りマスチックアスファルトでは余剰アスファルト量 -5.6~-2.4% (アスファルト含有量で 1.2%) の変化で 143~103 kg/cm² と変わらず、それぞれのマスチックアスファルトの約 2 倍の値となっている。

この E_{1s} を実用面について考えると、例えば高速走行車輦のようにその載荷時間が非常に短かく、主として瞬間弾性のみが支配的となる場合の弾性係数であり、この値が無空隙合材においては、余剰アスファルト量の変化に対して大きな変化がないと考えられる。

E_{2s} , Q_{2s} は瞬間弾性から定常的なクリープに移行する過渡的現象を示す数値であり、瞬間的載荷においては大きな問題とはならない。ここに現れる Q_{2s} は直ちに永久変形に結びつくことはなく、 Q_{1s} に比較してかなり小さいことが知られる。

6) 各種合材相互の Q_{1s} については

Q_{1s} は直ちに永久変形と結びつく数値であり、 Q_{1s} にもとづく変形は回復不能であり、荷重がかかった直後から変形を開始している。交通車輦の増大がもたらす舗装の変形は Q_{1s} にもとづく変形の累積と考えることが出来る。

マトリックスの Q_{1s} の変化は、余剰アスファルト量 10~24% の変化で約 38 倍、マスチックアスファルトでは余剰アスファルト量 -1~9% の変化で約 16 倍、砕石入りマスチックアスファルトでは -5.6~-2.4% の相違で約 2 倍を示し、この実験の結果では、余剰アスファルト量に非常に敏感であることが知られる。

合材相互についてみると、マトリックスに砂が入ると、それぞれ Q_{1s} の値は約 11~27 倍、さらに砕石が入ると、マスチックアスファルトの約 13~28 倍の値を示している。

7) 各種合材を一貫する要因としての余剰アスファルト量

最後に試験した合材、マトリックス、マスチックアスファルト、碎石入りマスチックアスファルトのすべてを、余剰アスファルト量について一貫してみると図-6、図-7に示されるように、 Q_{1s} 、 E_{2s} 、 Q_{2s} (余剰アスファルト量約-2% 以上について) については、その対数との関係が、マトリックスから碎石入りマスチックアスファルトまでほぼ連続した直線関係にあると考えられる。

E_{1s} については各合材間に若干の段階的な変化がみられる。

8. 結 論

以上の試験結果から、無空隙アスファルト合材の粘弾性状態を支配する要因として、振動締め固めによる余剰アスファルト量なる考えを導入し、これと単純ズレの試験による粘弾性定数との間に一定の関係を見出すことが出来た。すなわち、マトリックス、マスチックアスファルト、碎石入りマスチックアスファルトのそれぞれの4定数の対数と余剰アスファルト量とは直線関係を有し、さらにこれら無空隙合材の全体を余剰量でみても E_{1s} を除けば、ほぼ連続

した直線関係にあることが認められた。

しかし、従来の研究ならびに本論文においては C_v -余剰アスファルト量についてのみ論じており、 C_v の内容まで立ち入った実験は行なっていない。例えば碎石入りマスチックアスファルトについては、その粘弾性定数の増大が余剰アスファルト量のみで支配されと考えられるか否か、又碎石の影響がどの程度かということについては更に検討が必要とされる。しかし目下の段階で推測出来ることは、瞬間弾性については骨材粒子の影響がかなり出てくるらしいこと、長時間載荷時の Q_{1s} についてはあまり骨材粒子の影響はなく C_v -余剰アスファルト量で論じられるであろうことが明らかにされた。

参 考 文 献

- 1) Nakajima, A. and Sugawara, T.: Bulletin of J.P.I. Vol.-9. 1967 年4月予定.
- 2) B. S. 812 1960.
- 3) Road Research Laboratory: Bituminous Materials in Road Construction 1962.