

アスファルト混合物のクリープ試験について*

上 田 満**・神 田 英 通**

On the Creep Test of Asphalt Mixture

Mitsuru UEDA and Hidemichi KANDA

Abstract

Generally, Asphalt mixture which is used surface or base of road acts a number of different deformation in agreement with all sorts of load.

We authors gave these kinds of experiment in the past four years, that is to say, compressive test subjected to a linearly increasing strain $\epsilon_0 t$ and repeated impulsive test.

Materials such as steel and glass, often regarded as elastic at ordinary temperature, on close observations are found also to exhibit small amounts of viscous behavior.

This can be observed as creep (increase of deformation at constant stress) or stress relaxation (decay of elastic stress at constant deformation), and these effects may be important under certain conditions of use.

Then, it is generally said that the stability value of asphalt mixture is largely affected by the temperature and kinds of load. So, we must also deal with creep test of asphalt mixture.

And we applied Burgers Body in connection with an analysis of creep test.

These results of experiment are mentioned in this paper.

1. 緒 言

一般に道路の表層及び基層に使用されているアスファルト混合物は、いろいろの荷重を与えることによって異なった変形の仕方をする事は、既に実験的に明らかであることであり、筆者も今までにこれらの一連の試験⁴⁾⁵⁾⁶⁾を行なってきた。すなわち、歪速度一定の場合、繰返し衝撃荷重を受ける場合等がそれである。

さて、最近車で市街道路を走行中、よくバスの停留所、交差点で、あるいは、それらの附近で、「うねり」現象を見かけることがある。これは車輛が止まった時に、もしくはゆるやかな速度で発着する時に車輛の重量（つまり荷重）が時間とともにアスファルト舗装面に加わり、これらの現象が生じるのではないかと考えられる。

そこで、今回はアスファルト混合物に対して一定応力を与えた場合に、歪が時間とともにどのように変化していくであろうかについて試験を行なった。また、筆者はさらに応力を取りのぞいた場合に残留歪がどの程度残るであろうかという予想もできると考えた。そ

こでそれらの結果をここに報告したいと思う。

なお、試験結果の考察に際しては、アスファルト混合物に粘弾性 Model として Maxwell-Kelvin 体を適用し、粘弾性定数を求めることにした¹⁾³⁾。次にアスファルト供試体の作製についてはアスファルト舗装要綱に準拠して行ない、Marshall 試験用供試体を用いた。また、骨材の配合については Talbot の式によって行なった。

2. 供試体の作製

本試験に使用した材料の性質が Table 1 に示されている。

この内、骨材はいずれも山口県産であって、母岩の種類は砕石が安山岩、また石粉が石灰岩である。次にこの骨材の重量配合の決定において試験の目的を考慮する時、アスファルト混合物の多くの配合について試験を行なうことは非常に大切なことであるが、不可能に近いことなので、筆者は理論的に意味のある配合を選ぶために最大密度を与えるといわれている Talbot の式、 $P = (d/D)^n \times 100$ で骨材の粒度を定めた。すな

* 第24回土木学会中国・四国支部学術講演会にて発表

** 工業短期大学部土木工学科

Table 1 Properties of used materials

Aggregate				
Item	Crushed stone	Coarse sand	Fine sand	Stone dust
Specific gravity	2.731	2.633	2.629	2.724
Produced place	Sanyo-cho	Aio-cho	Toyoura-cho	Mine city
Asphalt				
Specific gravity (25°C)	Penetration (25°C)	Softening point (°C)	Flash point (°C)	Ductility (15°C)
1.031	96	45.0	318	150cm+

わち、最大粒径 D を 25mm, 20mm と変え、また指数 n を 0.20 から 0.50 まで 0.05 おきに 変えて 重量配合値を 定めた。その表が Table 2, Table 3 に示してある。

また、その際の粒径加積曲線とアスファルト舗装要綱にかかげてある基層用粗粒度アスコン、表層用密粒度アスコンの粒度分布の範囲が Fig. 1, Fig. 2 に示されている。

混合にあたっては、自動アスファルトミキサーを使用せずに鉄製の混合なべに材料を入れて、これをガスコンロにのせ、下から加熱しながら移植ごてで混ぜた。この際まず初めにアスファルトをなべに入れて、よく溶解させた後に、前日より秤量し、電気恒温乾燥器の中に 120°C で、一夜暖めておいた骨材をなべの中に加えて混合すると言う方法をとった。これはフィラー及び

骨材に水分が付着していると混合物に悪影響を及ぼすので、それをさけるためと、混合する時間を早め作業能率を高めるために行なった。混合の時の温度はアスファルト舗装要綱に規定してある 145°C ~ 150°C に準拠するために 150°C で行なった。混合が完了し、混合物をモールド 3 個につめる際に、混合なべの中で、混合物を平均にならして、三等分に分けるという三分法を用いて、粗骨材がモールドに均等に入るようにし、締め固めを始めた、締め固めにはマーシャル試験用締め固め機を使用し、混合物を入れたモールドを突き固め合の上に置き、重量 4.5kg, 落下高 45.72cm のランマーで、表裏 50 回ずつ突き固めた。この時の締め固め温度は 120°C として素早く作業を行なった。その後、モールドに供試体を入れたまま、約 20 分間水中に入れて冷却し

Table 2 Proportion in weight of test-piece in case of $D=25\text{mm}$

n	0.20		0.25		0.30		0.35		0.40		0.45		0.50	
	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using
25~20	4.35	174	5.43	217	6.47	259	7.51	300	8.54	341	9.55	382	10.56	422
20~13	7.91	316	9.65	386	11.34	454	12.95	518	14.48	578	15.94	638	17.32	693
13~10	4.49	180	5.39	216	6.22	249	6.98	279	7.67	307	8.30	332	8.87	355
10~5	10.76	430	12.66	506	14.27	571	15.63	625	16.78	671	17.74	710	18.53	741
5~2.5	9.69	376	10.63	425	11.58	463	12.26	490	12.71	508	12.98	519	13.07	523
2.5~0.6	15.67	627	16.88	675	17.46	698	17.56	702	17.32	693	16.79	672	16.16	646
0.6~0.3	5.84	234	6.26	250	6.13	245	5.84	234	5.45	218	5.03	201	4.54	182
0.3~0.15	5.65	226	5.27	211	4.98	199	4.59	184	4.13	165	3.67	147	3.21	128
0.15~0.074	4.73	189	4.50	180	4.12	165	3.65	146	3.18	127	2.74	110	2.30	92
0.074>	31.21	1248	23.33	933	17.43	697	13.03	521	9.74	390	7.26	290	5.44	218
Total of aggregate	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000
Asphalt	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273
	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305
	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338
	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370
	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403

Table 3 Proportion in weight of test-piece in case of $D=20\text{mm}$

n	0.20		0.25		0.30		0.35		0.40		0.45		0.50	
	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using	Perce- ntage	Amo- unt of using
20~13	8.25	330	10.25	410	12.12	485	14.00	560	15.83	633	17.62	705	19.38	775
13~10	4.65	188	5.13	205	6.65	266	7.54	302	8.38	335	9.18	367	9.91	396
10~5	11.27	451	13.91	556	15.25	610	16.90	676	18.35	734	19.61	784	20.71	828
5~2.5	9.81	392	11.25	450	12.40	496	13.26	530	13.90	556	14.36	574	14.64	586
2.5~0.6	16.41	656	17.84	714	18.65	746	18.99	760	18.94	758	18.59	744	18.04	722
0.6~0.3	6.40	256	6.63	265	6.56	262	6.32	253	5.96	238	5.52	221	5.07	203
0.3~0.15	5.58	223	5.56	222	5.33	213	4.95	198	4.50	180	4.06	162	3.59	144
0.15~0.074	4.96	198	4.76	190	4.40	176	3.95	158	3.49	140	3.01	120	2.58	103
0.074>	32.63	1305	24.67	987	18.64	746	14.09	564	10.65	426	8.05	322	6.08	243
Total of aggregate	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000	100.0	4000
Asphalt	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273	4.5	273
	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305	5.0	305
	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338	5.5	338
	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370	6.0	370
	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403	6.5	403

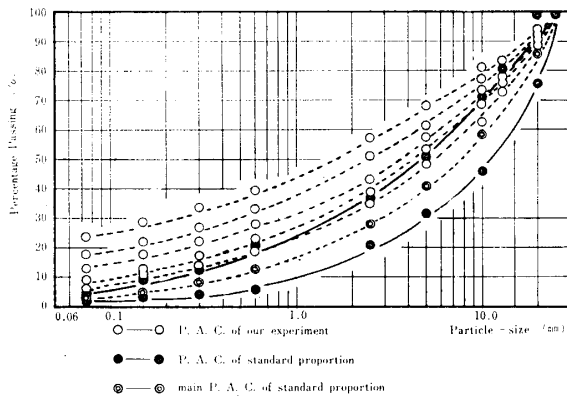


Fig. 1 Particle-size accumulation curves of aggregate by $D=25\text{mm}$

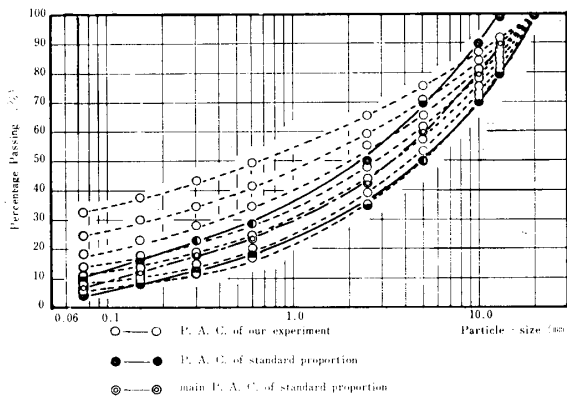


Fig. 2 Particle-size accumulation curves of aggregate by $D=20\text{mm}$

て、モールドから供試体を注意深く抜き取り器で抜き取り、載荷試験を行なうまで平らな面に置き養生した。なお、載荷試験は供試体成形後約24時間で行なった。

3. クリープ試験

この試験には、供試体に常に一定の荷重をかけうる装置を必要とし、それについてはホイールトラッキングマシンを使用した。それが Fig. 3 である。

また、試験中供試体の温度を 60°C に保っておくために、熱とう循環式の水槽中に供試体を入れて温度計によって 60°C とした。

次に、前日作製し平らな面に置いて24時間養生しておいた供試体は、その高さ、空中重量、水中重量を測定後、載荷時まで温度を 60°C にしなければならぬので、 $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ に調節した恒温水槽中にこの供試体を40分間浸した。なお、アスファルト舗装要綱には30~60分間とある。その後、上記の熱とう循環式水槽中に供試体を移動して載荷した。載荷は供試体の軸方向に行ない、供試体の両端面は円形の加圧板をもって支持して行なった。この際の載荷分銅重量は、(小) 2.5kg 、(中) 5.0kg 、(大) $10.0\text{kg} \times 3$ 、(特大) $26.3\text{kg} \times 3$ 、合計 116.4kg でホイールトラッキングマシンのホイール重量、 21kg との全重量は 137.4kg であった。なお、その歪の測定はダイヤルゲージを使用し、その時間間隔は次のようである。すなわち、5、

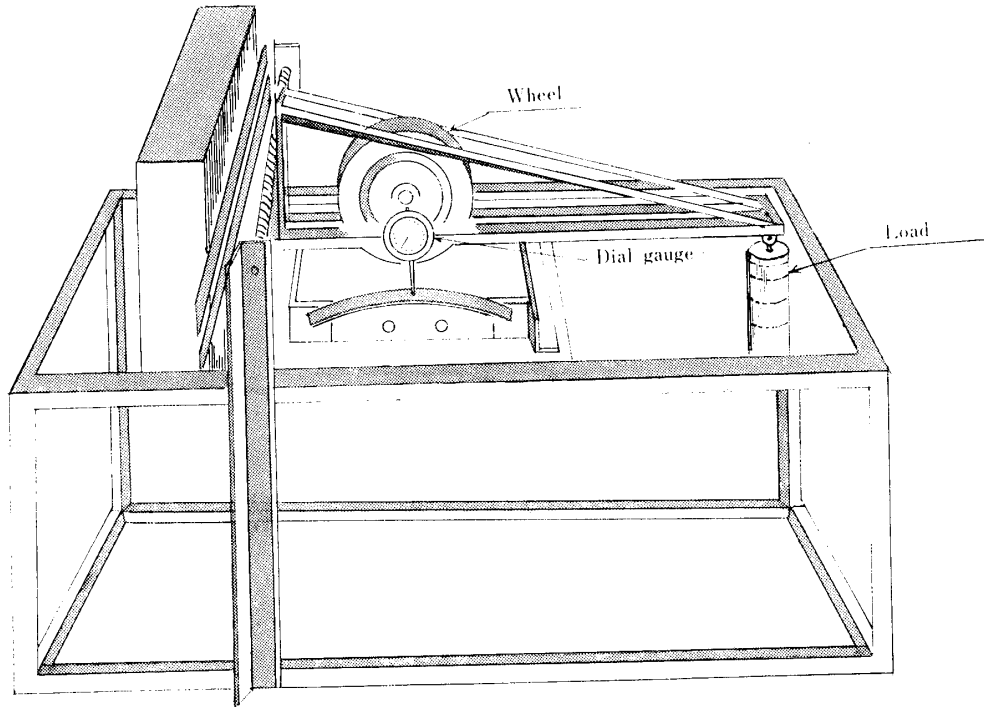


Fig. 3 Experimental apparatus

10, 15, 20, 25, 30 (sec), 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 (min) と言う間隔で行ない、載荷は時間とともに歪の変化が一定となるまで続けた。次に荷重を載せ、歪の変化が一定となった後にまた、新しい荷重を載せると言った方法もころみみた。最後に、このようなアスファルト混合物の標準的な試験という意味で、マーシャル試験も行なってマーシャル試験とこれらの結果との関連性についても検討してみた。

4. 実験結果及び考察

上記のクリープ試験方法に基づいて、時間一ひずみ曲線を書いたものが Fig. 4 から Fig. 11 である。

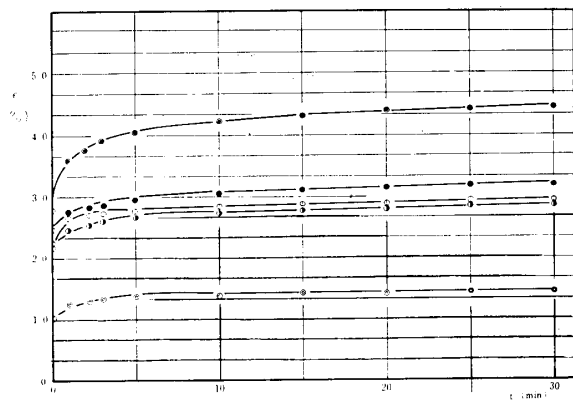


Fig. 4 Relation between time and strain in case of $D=25, n=0.20$

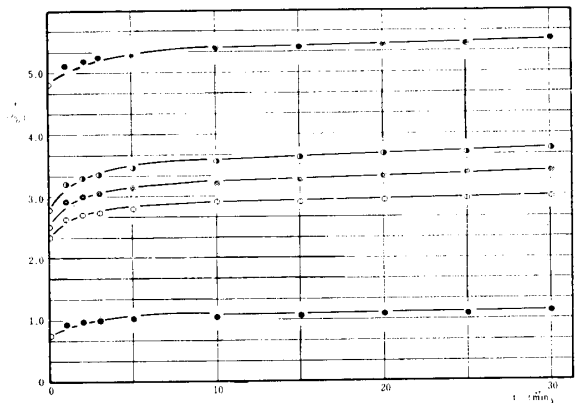


Fig. 5 Relation between time and strain in case of $D=25, n=0.25$

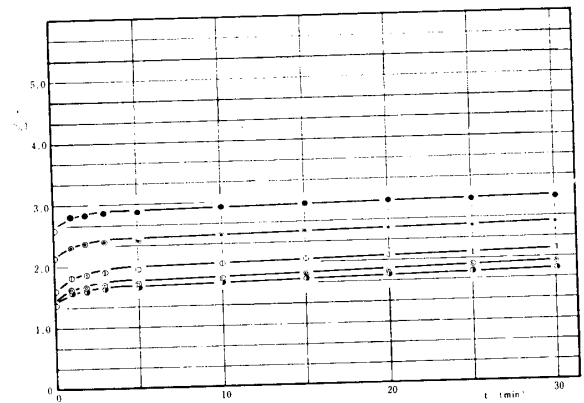


Fig. 6 Relation between time and strain in case of $D=25, n=0.30$

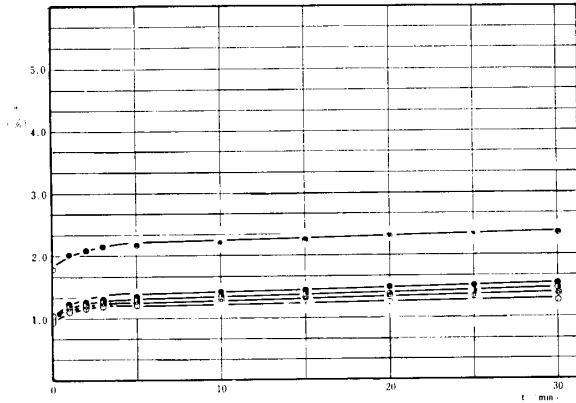


Fig. 7 Relation between time and strain in case of $D=25, n=0.35$

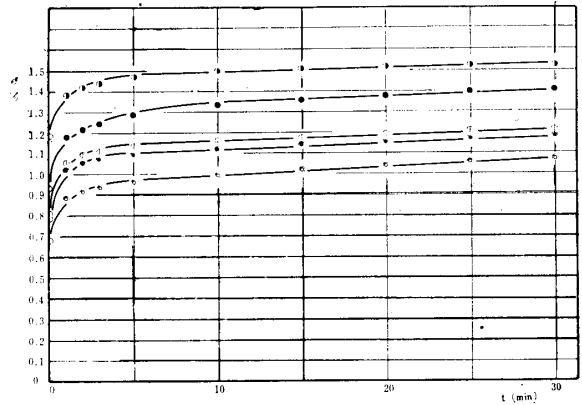


Fig. 10 Relation between time and strain in case of $D=20, n=0.30$

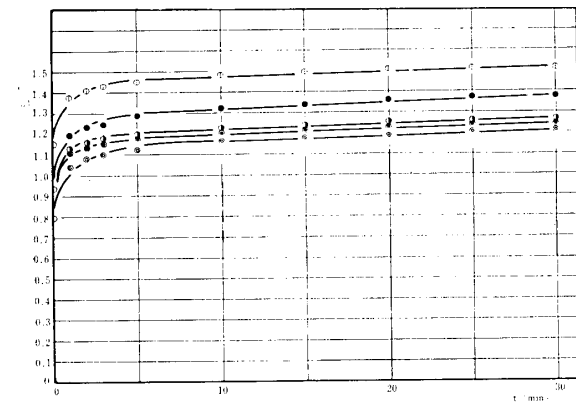


Fig. 8 Relation between time and strain in case of $D=20, n=0.20$

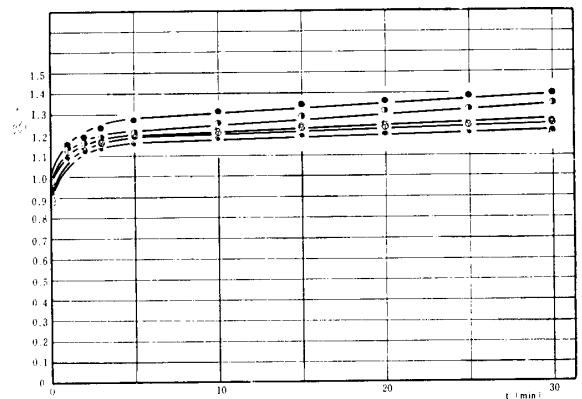


Fig. 11 Relation between time and strain in case of $D=20, n=0.35$

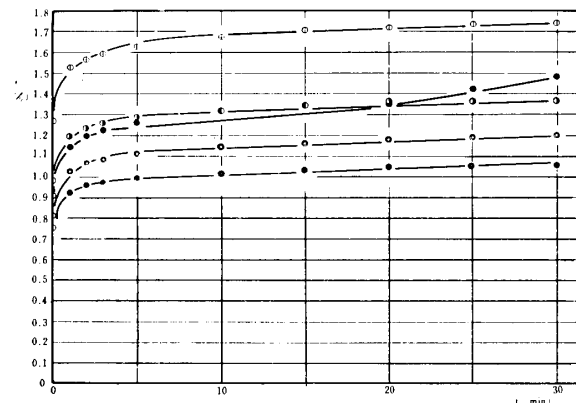


Fig. 9 Relation between time and strain in case of $D=20, n=0.25$

この表の中で、●印はアスファルト配合率4.5, ○印はアスファルト配合率5.0, ●印はアスファルト配合率5.5, ◎印はアスファルト配合率6.0, ●印はアスファルト配合率6.5, の各々の歪測定値を示している。このグラフを見ると、その値が時間とともに徐々に増加する傾向にあるが、しかし歪の変化も載荷後5分以

内がほとんどで、それ以後の変化はあまりなく、特に25分～30分の間はほぼ同じような測定値であることがわかる。またこれらのグラフをよく見ると Maxwell-Kelvin 体のクリープ曲線にはほぼだよく一致しているので、これらの歪測定値に粘弾性 Model として Maxwell-Kelvin 体を適用し、粘弾性定数を求めることにした。この Maxwell-Kelvin 体の粘弾性方程式は、線型粘弾性方程式となり²⁾、一般に

$$\gamma \frac{d^2 e}{dt^2} + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\eta_2} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{d^2 P}{dt^2} + \frac{\gamma_1}{\eta_2} \left(1 + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} + \frac{\eta_2}{\eta_3} \right) \frac{dP}{dt} + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\eta_2 \eta_3} P \quad \dots\dots(1)$$

のように書ける。したがって、この式に応力一定のクリープ条件を代入すれば、その解として次のようなものが得られる。

$$e = \frac{P_0}{\gamma_1} + \frac{P_0}{\gamma_2} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_2}{\eta_2} \cdot t} \right) + \frac{1}{\eta_3} P_0 \cdot t \quad \dots\dots(2)$$

粘弾性定数を決定するに際して次のような方法で行なった。すなわち Fig. 12に示すような挙動する場合は、四要素模型 (four-element model) で解析する。

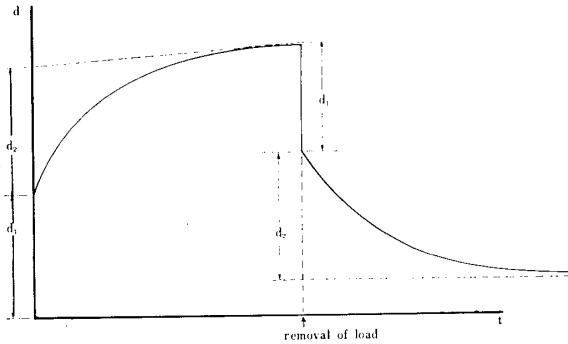


Fig. 12 Creep analysis by means of four-element model

これは弾性率 r_1 で特徴づけられる純弾性と、 $(r_2\eta_2)$ で特徴づけられる遅延時間で τ_k をもつフォークト要素と、粘性率 η_3 のニュートン粘性機構とが重疊していると考えた模型である。この模型に一定応力 P を加えた場合の変形、すなわちクリープの式は(2)である。この式とクリープ曲線 Fig. 4 から Fig. 11 との対応関係をみると、

① t が十分小さいところでは(2)より

$$e_{t \rightarrow 0} = \frac{P}{r_1} \dots\dots\dots (3)$$

であるから、瞬間的な弾性変形量 d_1 から r_1 が求められる。

② 時間を十分経過すると斜点線で示すような定常クリープが進行する。(2)より

$$e_{t \rightarrow \infty} = \frac{P}{r_1} + \frac{P}{\eta_2} + \frac{P}{\eta_3} \cdot t = \text{const} + \frac{P}{\eta_2} t \dots\dots\dots (4)$$

であるから、この斜点線の傾斜 d からクリープ粘度 η_3 が決まる。

③ 上の(4)式から

$$[e_{t \rightarrow \infty}]_{t \rightarrow 0} = \frac{P}{r_1} + \frac{P}{r_2} \dots\dots\dots (5)$$

つまり斜点線を $t = 0$ に外挿した d 軸上の切片 $d_1 + d_2$ がこれに対応している。ところで d_1 が P/r_1 に対応することはすでに判っているから、残りの部分 d_2 より r_2 が求まる。

(4)一番やっかいなのが η_2 である。(2)より

$$-e + \frac{P}{r_1} + \frac{P}{r_2} + \frac{P}{\eta_3} \cdot t = \frac{P}{r_2} \cdot e^{-t/\tau_k}$$

$$\ln\left(-e + \frac{P}{r_1} + \frac{P}{r_2} + \frac{P}{\eta_3} \cdot t\right) = \ln \frac{P}{r_2} - t/\tau_k$$

したがって $\ln\left(-e + \frac{P}{r_1} + \frac{P}{r_2} + \frac{P}{\eta_3} \cdot t\right)$ と時間との関係をグラフに目盛ると、その傾きが $-1/\tau_k$ となる。これらの式によって粘弾性定数を求めた。その結果が Table 4, Table 5 に示してある。

Table 4 Spring and dashpot constants in case of $D=25$

n	A. S	r_1	r_2	η_2	η_3
0.20	4.5	79.707	83.373	476.367	21750.000
	5.0	79.963	254.386	1592.007	52727.272
	5.5	77.299	355.828	2226.855	26363.636
	6.0	169.591	394.558	7893.001	79090.909
	6.5	70.445	262.443	2077.522	47454.545
0.25	4.5	36.130	297.945	3228.129	26100.000
	5.0	74.454	293.423	1795.987	68545.454
	5.5	62.299	223.938	1793.958	19624.060
	6.0	69.185	227.451	2125.571	26769.230
	6.5	228.947	404.651	7115.306	65250.000
0.30	4.5	81.844	478.022	3569.593	43500.000
	5.0	106.945	367.865	6369.080	24166.666
	5.5	125.000	500.000	4407.655	38666.666
	6.0	124.197	471.545	6683.794	19624.060
	6.5	66.667	457.895	6309.049	48333.333
0.35	4.5	97.370	360.248	4488.093	30705.882
	5.0	179.752	617.021	6156.850	87000.000
	5.5	171.429	416.268	6236.047	52200.000
	6.0	189.336	456.693	3450.673	43500.000
	6.5	190.164	335.907	2764.559	31445.783

Table 5 Spring and dashpot constant in case of $D=20$

n	A. S	r_1	r_2	η_2	η_3
0.20	4.5	195.946	566.775	3107.822	87000.000
	5.0	150.780	533.742	4130.874	90000.000
	5.5	186.495	585.859	4096.143	94909.090
	6.0	218.319	492.918	2915.295	69600.000
	6.5	186.296	450.777	5902.077	74571.428
0.25	4.5	230.464	656.604	4007.162	85573.770
	5.0	137.549	404.651	2844.715	69600.000
	5.5	177.189	519.403	2924.233	68684.210
	6.0	214.550	525.680	4256.639	50192.307
	6.5	191.209	543.750	5349.328	19477.611
0.30	4.5	219.975	563.107	3184.860	53265.306
	5.0	215.080	510.264	3123.792	62142.857
	5.5	147.583	542.056	3834.826	108750.000
	6.0	253.275	644.444	5065.503	41102.362
	6.5	1870.968	457.895	2371.969	45391.304
0.35	4.5	191.206	659.604	3751.704	104400.000
	5.0	178.645	707.317	5176.597	88474.576
	5.5	196.169	514.793	2319.350	38955.223
	6.0	193.119	545.455	3325.657	87000.000
	6.5	198.404	416.268	2035.727	43500.000

次に荷重を載せ、歪の変化が一定となった後に、また新しい荷重を載せる。荷重増による時間一ひずみ曲線が Fig. 13に示してある。

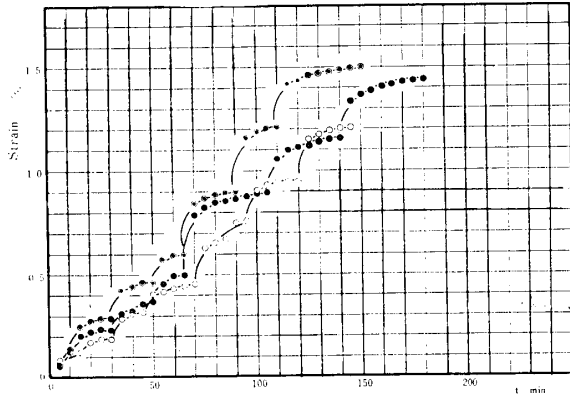


Fig. 13 Variation of strain with an increase in load

この図中●印は最大粒径 $D=25$, その指数 $n=0.35$, アスファルト配合率 = 5.5 で, ○印は $D=25$, $n=0.35$, アスファルト配合率 = 6.0, ◎印は $D=20$, $n=0.35$, アスファルト配合率 = 5.5 である。また, これらの粘弾性定数のグラフが Fig. 14, Fig. 15に掲

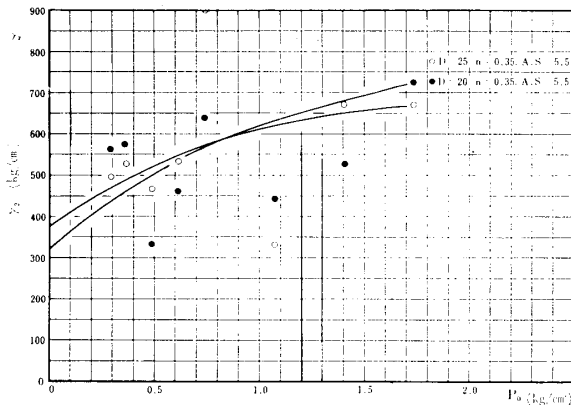


Fig. 14 Variation of r_2 with an increase in load

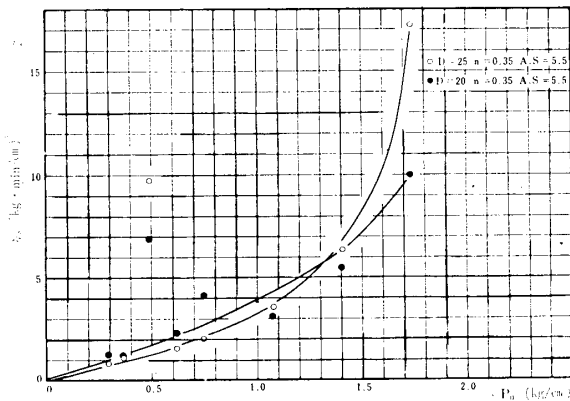


Fig. 15 Variation of r_3 with an increase in load

げてある。

なお, この試験において最大粒径 $D=25$, $D=20$ の二種についてアスファルト配合率をそれぞれ 5.5, 6.0 との四種類を行なったわけであるが Fig. 13 には三種類, Fig. 14, 15には二種類しか掲げていない。次に Fig. 13のグラフを見ると荷重増による歪の歪の変化がよく表われている。特に最大粒径 $D=25$ よりも, 最大粒径 $D=20$ の方の歪の値が一般に大きくなるがよくわかる。また各々の荷重を増してかけた段階において, 歪が一定となるまでの時間は荷重が小さいと, 最大粒径, その指数, アスファルト配合率に関係なくほとんど同じであるが, 荷重が大きくなると, その時間差も大きくなり異なってくるがよくわかる。

最後に本試験結果とマーシャル試験結果との比較であるが, クリープ試験の粘弾性定数を見ると, n が大きくなるにしたがって r_1, r_2, r_3 は一般に大きくなって行く傾向がある。また, 同一指数 n に対して r_2 は r_1 よりも, r_3 は r_2 よりも相対的に大きい値となることがよわかる。さらに最大粒径に対して見た場合に, r_1, r_2, r_3 の値は $D=25$ よりも $D=20$ の方が大きくなっている。次にマーシャル試験の安定度の表が, Table 6 に掲げてある。

Table 6 Stability value of marshall test (kg)

D	n	A. S4.5	A. S5.0	A. S5.5	A. S6.0	A. S6.5
25	0.20	810.780	794.629	674.574	729.487	705.260
	0.25	669.728	699.338	627.735	598.664	597.049
	0.30	474.301	485.607	507.669	493.682	559.363
	0.35	452.228	407.005	405.390	409.697	530.291
20	0.20	619.391	726.795	790.322	749.407	794.629
	0.25	618.583	619.122	552.346	412.389	473.763
	0.30	367.704	339.483	383.855	397.853	441.461
	0.35	351.553	303.101	325.173	397.853	376.857

これを見ると全体として, n が大きくなるにしたがって, 安定度の数値は小さくなって行く。さらに最大粒径に対して見た場合は, 粒径が小さくなると安定度も小さくなって行くようである。

5. 結 論

これらのことから, 一定荷重をかけた時ほとんどの歪が荷重をかけた瞬間に生じ時間の経過とともに徐々に増加する。しかし歪の変化は載荷後5分以内がほとんどである。また荷重増による歪の変化から, 荷重増による粘弾性定数の変化も検討できるわけであるが,

Fig. 14, Fig. 15を見ると一般に荷重増によって粘弾性定数も大きくなる傾向にある。そしてアスファルト量及び配合については、アスファルト量の変化による粘弾性定数の変化はあまり見られないが、配合による変化はいちじるしく、指数の n が大きくなるにしたがって大となる。また、残留歪の推定については載荷時間に影響するわけであるが、ほとんど問題にならないほど小さいものと考えられる。

参 考 文 献

1) 山田嘉昭, 柳沢延房: レオロジーの基礎理論, コロナ社 (1966)
P. 160

2) 中川鶴太郎, 神戸博太郎: レオロジー みすず書房 (1967)
P. 391~394
3) Frederick R. Eirich: Rheology Volume I, Academic Pressinc., Publishers, New York (1958) P. 363~400
4) Mitsuru Ueda: 山口大学工学部研究報告, 19, 65 (1966)
5) 上田 満, 本田 論: 山口大学工学部研究報告, 19, No. 2, 43 (1968)
6) 樋渡正美, 上田 満, 大橋朝馬: 山口大学工学部研究報告, 20, 369 (1970)
7) 樋渡正美, 上田 満, 水口哲夫: 山口大学工学部研究報告 21, 127 (1970)

(昭和47年9月14日受理)