

ソイルビチューメンに関する基礎的研究 (第4報)

樋 渡 正 美*・上 田 満**

The Fundamental Study of Soil Bitumen (The 4th Report)

Masami HIWATASHI and Mitsuru UEDA

Abstract

The stabilized soil mass by bituminous emulsion is deformed when loaded as much as the other structures, but the behavior of its deformation is different corresponding to the value of load, speed of loading, water content and temperature of the sample. Generally speaking, in the case of small and rapid loading, low moisture and temperature, it is tended to show an elastic condition in which the stress is proportional to the strain, but in the other case it happens to flow plastically and becomes a viscoelastic state. The writers have experimentally measured the stresses and strains about the test pieces of soil bitumen being compressed at 1 mm/min rate of strain after the dry and wet curing formerly suggested. It is reported here to be investigated the results with a viscoelastic theory.

1. 緒 言

一般に土塊も他の構造物と同じく載荷によって変形するが、その様相は荷重の大きさや土の種類および含水量などによって異なる。即ち荷重が小さく土粒子が大きくしかも乾燥状態にあるときは、応力とヒズミが比例するという弾性的挙動を示すけれど、その逆の場合は塑性流動を起しとくに含水量の多い細粒土では圧密沈下を生ずることが知られている。土層中の応力とヒズミの関係はこれまで弾性理論で解かれていたが、最近では塑性理論や粘弾性理論でより合理的に説明せんとする試みがなされている。一方アスファルト混合物は載荷速度が早く温度が低い場合弾性的変形を示すが、反対の場合は流動性を帯びるので一般に粘弾性体として取り扱われている。従って細粒土に歴青乳剤を加えて安定処理したソイルビチューメンは両者の中間的性質を示すものと思われ、その応力ヒズミ曲線も粘弾性的様相を呈することが期待される。

さて道路の断面は通常Fig. 1に示す通り、表層、基層、路盤および路床の四部から成り立っており、路盤はさらに上層と下層の二つに分けられる。しこうしてこれらの各層は表層に作用する輪荷重が下方に伝達さ

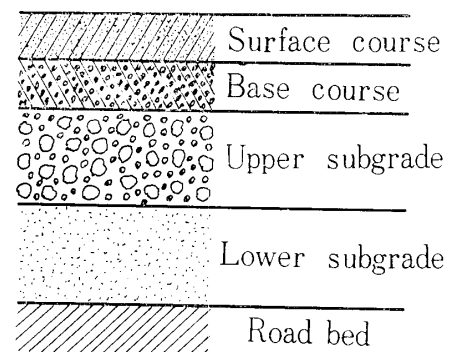


Fig. 1 Cross-section of road

れるに従い分散されて、最終的には天然の地盤である路床土の許容支持力以下となるよう築造されねばならない。一般に舗装の破壊は表層の欠陥によって起ることもあるが、基層や路盤の支持力不足に基因することの方が多いため、各層の強度を十分に検討する必要がある。ソイルビチューメンは簡易舗装として表層にも利用しうるが、ここでは高級舗装の下層路盤とすることを考えている。表層にしても路盤にしても交通車輪による圧縮や衝撃を受ける点では変りがなく、その際変形の様相が問題となる。筆者等はソイルビチューメンで円筒形の供試体を作り、所定の養生を行なった後圧縮試験機にかけ、1 mm/minのヒズミ速度でこれを

* 土木工学教室

** 工業短期大学部土木工学教室

圧縮し応力とヒズミの関係を測定したが、その結果を粘弾性理論で検討してみたのでここに第4報として報告する。

2. 使用材料

この実験に用いた試料土は宇部市および美祢市から

採取した粘着性の風化土であって、JISに規定する粒度試験と突固め試験を行なった結果がそれぞれFig. 2およびFig. 3に示されている。また母岩の種類や指数的性質などはTable 1の通りであるが、これらの図および表から試料土は粘土分を45%以上も含み、しかもコンシステンシーの大きい細粒土であることがわか

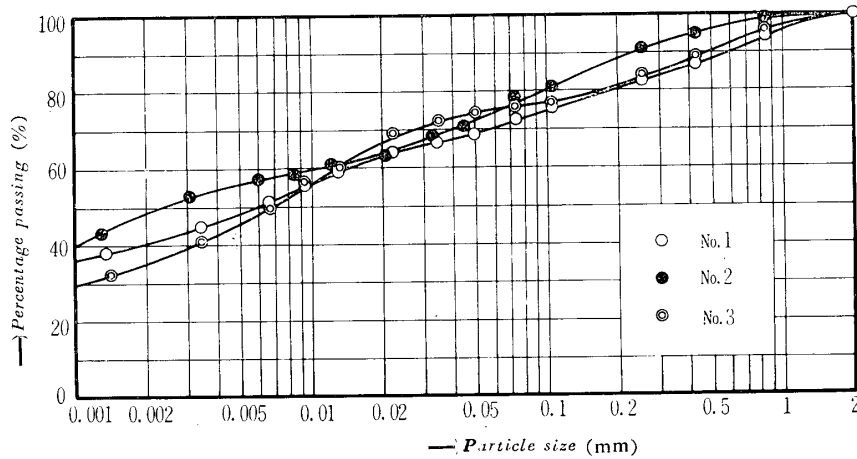


Fig. 2 Particle size accumulation curves

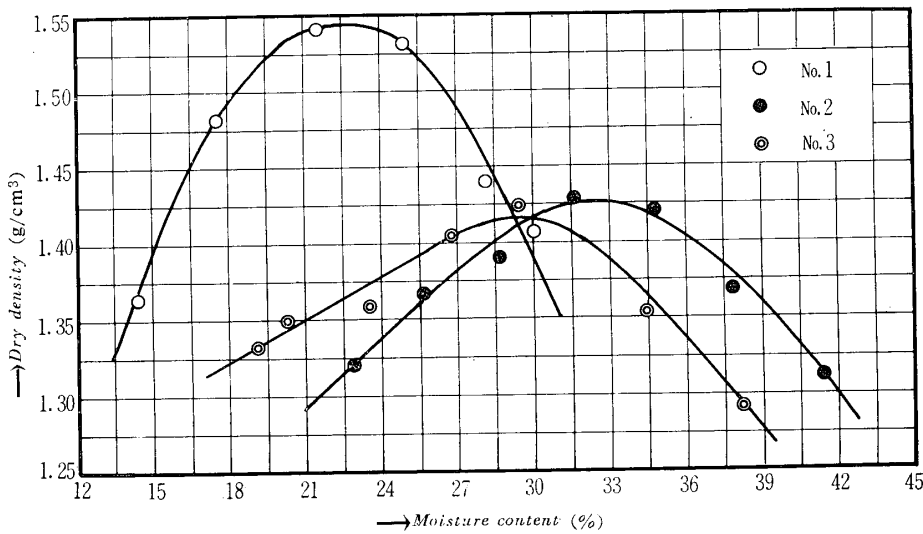


Fig. 3 Compaction curves

Table 1 Characteristics of soil Samples

Soil sample	Base rock	Colour	Specific gravity	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index	Flow index	Toughness index	Optimum moisture content	Maximum dry density
No. 1	Serpentine	Grayish yellow	2.627	66.5	26.4	40.1	22.6	1.77	22.5	1.548
No. 2	Granite	Dark red	2.890	71.9	47.4	24.5	24.7	0.99	32.8	1.430
No. 3	Limestone	Brownish red	2.660	76.7	36.5	40.2	19.2	2.09	28.5	1.424

る。従ってこの場合適当な添加剤を使用しないと経済的な安定処理は困難と思われるので、第3報¹⁾と同じくアニオン乳剤には日本石灰製の肥料用消石灰3%を、またカチオン乳剤には五酸化リン1%をそれぞれ添加することにした。

つぎにこの実験には日産化学製の土壌混合用アニオ

ン乳剤ME-3と、同じくカチオン乳剤CME-3を使用しているが、第3報のものとは幾らかその性質が異なっており、それらを試験した結果はTable 2の通りであった。これから比粘度はほとんど変わらないが、アニオン乳剤の方が瀝青含有量は多くまた幾分硬いアスファルトを用いていることがわかる。

Table 2 Characteristics of bituminous emulsions

Item	Bituminous emulsion			Bituminous residual					
	Specific gravity (25°C)	Specific viscosity (Engler)	Bituminous residual (%)	Specific gravity (25°C)	Penetration (25°C)	Softening point (°C)	Flash point (°C)	Burning point (°C)	Ductility (10°C)
ME-3	1.023	4.29	63.9	1.036	132	42.5	290	310	100以上
CME-3	1.013	4.54	55.9	1.023	164	40.0	254	297	100以上

3. 一軸圧縮強度

この実験は11月から2月までの寒い季節に行なったので、室内温度はほぼ10~15°Cであった。まず気乾状態の試料土に添加剤を加えて十分混合した後、最適含水比となるよう予め水で稀釈された乳剤を投入し、均一な色調を呈するまで約5分間石川式攪拌機でさらに混合した。これを直径5cm高さ10cmの鑄鉄製モールドに詰め、JISに規定する突固め試験用のランマーを所定の高さから25回づつ落ちて、表および裏をそれぞれ突固め供試体を作った。この場合の突固めエネルギーは突固め試験の約3.40倍に相当するので、

最適含水比や最大乾燥密度も当然Table 1の数値とは異なり、Table 3に示すような値となった。なお最適含水比は敲密にいうと、乳剤の種類や混合量などによっても変化するはずであるが、実際にやってみると僅か1~2%の差に過ぎないので、ここではTable 3の値ですべての混合物を突固めている。

これらの供試体は3個を1バッチとして製作され、室内に放置して乾燥した後蒸発率が40%となったとき、24時間水浸してから圧縮試験機にセットされた。ついでヒズミ速度を毎分1mmとして圧縮試験を行なったが、その結果はTable 4に示されている。表中の数値は水浸後の乾燥密度と一軸圧縮強度を表わして

Table 3 Results of compaction tests

Soil sample	No. 1	No. 2	No. 3
Optimum moisture content	17.7	27.4	25.3
Maximum dry density	1.763	1.622	1.568

Table 4 Results of unconfined compression tests

Soil sample	Item	ME-3			ME-3+Ca(OH) ₂ 3%			CME-3			CME-3+P ₂ O ₅ 1%		
		10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
No. 1	Density(g/cm ³)	1.67	1.64	1.63	—	1.59	1.48	1.68	1.66	1.60	1.63	1.69	1.63
	Strength(kg/cm ²)	2.30	2.62	3.74	—	1.99	1.54	3.73	4.71	3.83	1.59	7.20	3.80
No. 2	Density(g/cm ³)	1.43	1.50	1.45	1.49	1.56	1.46	1.47	1.51	1.52	1.52	1.51	1.50
	Strength(kg/cm ²)	0.81	3.33	1.78	1.06	2.76	1.93	0.90	2.03	2.61	1.78	1.54	2.55
No. 3	Density(g/cm ³)	1.47	1.48	1.47	—	1.51	1.44	1.53	1.54	1.52	1.53	1.51	1.49
	Strength(kg/cm ²)	1.93	2.80	3.05	—	3.80	1.21	4.67	6.62	3.93	2.76	6.07	3.79

いるが、これから強度と密度はほぼ対応しており、しかもその最大値は乳剤量 15% 付近にあることがわかる。このことは第 1 報²⁾ で述べた実験の結果とも一致し、また Mckesson の式で計算した乳剤の適当な混合量が、No. 1 で 15.1% No. 2 で 17.9% No. 3 で 13.5% となることから説明できよう。なおこの実験ではカチオン乳剤の方が強度は大きく、五酸化リンの添加も強度増加に有効であることを示している。

4. 応力とヒズミの関係

上記の圧縮試験で応力とヒズミを測定して図示する

と Fig. 4 ~ 6 がえられる。図中の記号は ○印 ME-3, ◎印 ME-3+Ca(OH)₂ 3%, ●印 CME-3, ⊙印 CME-3 + P₂O₅ 1% をそれぞれ土に加えて製作された供試体 3 個の実測値を平均したものである。これらの図からつぎのようなことがいえると思う。a) 荷重が小さいときヒズミはほぼ応力に比例するが、大きくなるとヒズミがそれ以上に増大する。従ってソイルピチューメンの水浸供試体は粘弾性体と考えることができる。b) 応力ヒズミ曲線の傾斜は土の種類や乳剤量などによって異なる。即ち当然のことながら強度の強い処理土ほど傾斜は大きく、また乳剤量が多くなる程一般に

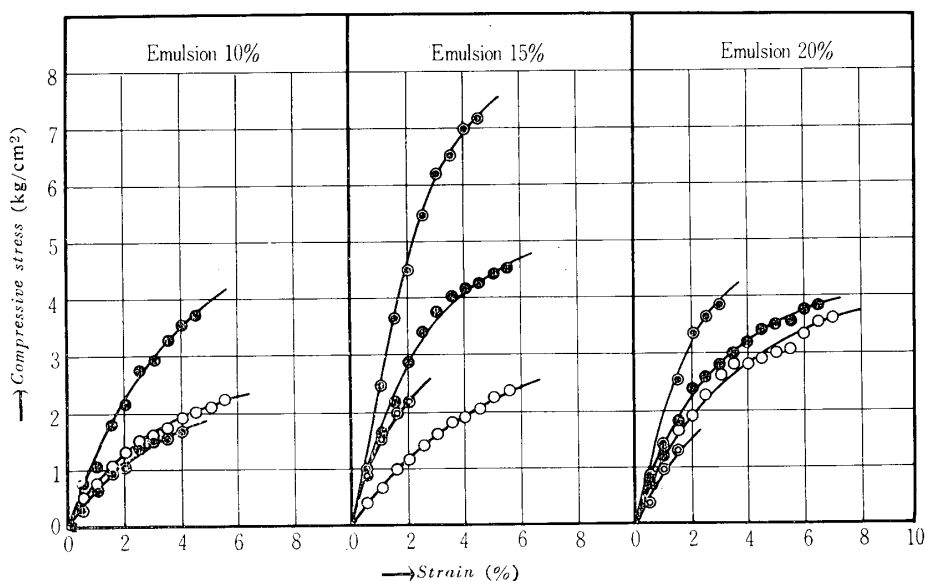


Fig. 4 Stress-strain curves (Soil sample No.1)

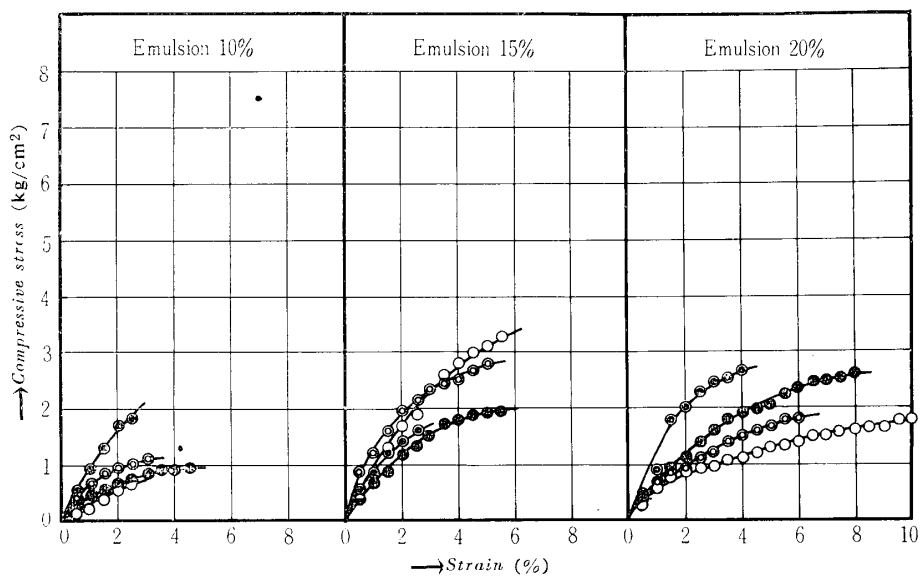


Fig. 5 Stress-strain curves (Soil sample No.2)

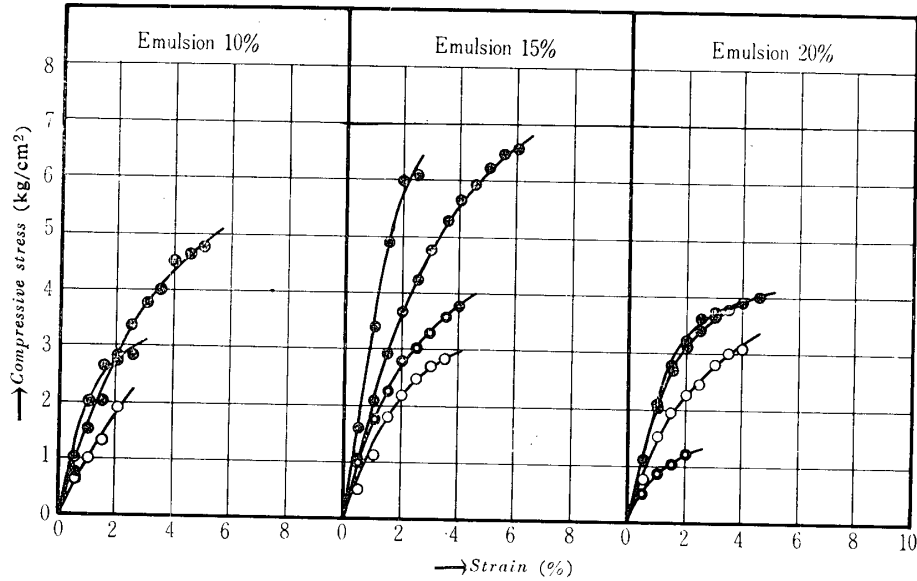


Fig. 6 Stress-strain curves (Soil sample No.3)

小さい。c) 添加剤は応力ヒズミ曲線の傾斜を大きくするが、破壊時のヒズミを小さくする。これはすなわち供試体が硬くなるが、反面脆くなることを意味する。d) アニオン乳剤とカチオン乳剤の差異はこの場合前者の傾斜が小さいだけで、破壊時のヒズミや曲線の形はほとんど変らない。

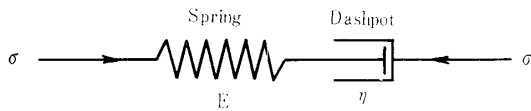


Fig. 7 Maxwell model

つぎに応力とヒズミの関係を理論的に取扱うため供試体を粘弾性体と考え、Fig. 7に示す Maxwell の基本的な二要素モデルが適用できるものと仮定すると次式が成立する。ここに ϵ は圧縮応力が σ であるときの

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \dots\dots(1)$$

ヒズミであり、また E , η および t はそれぞれバネ定数、ダッシュポット定数および時間を表わす。この実験ではヒズミ速度 ϵ_0 を一定 (1 mm/min) として圧縮しているの、 $\epsilon = \epsilon_0 t$ となるから(1)式はつぎのように書き換えられる。(2)式に $t = \epsilon / \epsilon_0$ とおけば応力 σ とそのときのヒズミ ϵ の関係が求まるが、その際定

$$\epsilon_0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}$$

$$\therefore \sigma = \epsilon_0 \eta \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \dots\dots(2)$$

数 E および η の値を決定する必要がある。一般に沢山の測定値から定数を算出するには最小自乗法を用いるが、この場合は(2)式からつぎのようになる。即ち測定

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \eta \sum_{i=1}^n \epsilon_i e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} \left(1 - e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} \right) \\ = \sum_{i=1}^n \sigma_i \epsilon_i e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} \dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \eta \sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} \right) \left(1 - e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} - \frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} \right) \\ = \sum_{i=1}^n \sigma_i \left(1 - e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} - \frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_i} \right) \dots\dots(4) \end{aligned}$$

値を(3)式および(4)式に入れ、これらを連立に解くと E と η が求まる。しかしこの計算は試算法によらねばならず、電子計算機を利用するとしてもかなり面倒であるから、ここではつぎのような簡便法を考えることにする。

まず応力ヒズミ曲線上に $\epsilon_2 = 2\epsilon_1$ となるよう二点を定め、それに対応する応力 σ_1 と σ_2 を図上で読む。この場合 ϵ_2 はなるべく破壊時に近い値をとった方がよい。これらの数値を応力とヒズミの関係を示す(2)式に代入するとそれぞれ次式をうる。(6)式に $\epsilon_2 = 2\epsilon_1$ と

$$\sigma_1 = \epsilon_0 \eta \left(1 - e^{-\frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_1} \right)$$

$$\therefore \log_e \epsilon_0 \eta - \log_e (\epsilon_0 \eta - \sigma_1) = \frac{E}{\epsilon_0 \eta} \epsilon_1 \dots\dots(5)$$

$$\sigma_2 = \varepsilon_0 \eta \left(1 - e^{-\frac{E}{\varepsilon_0 \eta} \varepsilon_2} \right)$$

$$\therefore \log_e \varepsilon_0 \eta - \log_e (\varepsilon_0 \eta - \sigma_2) = \frac{E}{\varepsilon_0 \eta} \varepsilon_2 \dots \dots (6)$$

いて(5)式および(6)式を連立に解くと、Eおよびηの値はつぎのようになる。この実験では供試体の高さを10

$$E = \frac{\sigma_1^2}{\varepsilon_1 (2\sigma_1 - \sigma_2)} \times 2.3026 \log_{10} \frac{\sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} \dots \dots (7)$$

$$\eta = \frac{\sigma_1^2}{\varepsilon_0 (2\sigma_1 - \sigma_2)} \dots \dots (8)$$

cmとしたので、毎分1mmのヒズミ速度はε₀=0.01とおくことができる。Fig. 4~6に示す実測値を(7)式および(8)式に入れて、バネ定数Eとダッシュポット定数ηを計算した結果がTable 5に示されている。

この表からつぎのようなことがいえると思う。a)

Eおよびηの値は土や乳剤の種類およびその量と添加剤の有無などによって異なるが、圧縮強度の大きいもの程一般に両者とも大きい。b) 常識的に考えると乳剤量が多い程ηの値は大きくなりそうだが、多少その傾向は認められるとしても余り明瞭でない。c) 添加剤はEの値を大きくするから、処理土の弾性を増すのに有効である。d) この場合はカチオン乳剤の方がEもηも遙かに大きく、その優秀性が実証された。なおこれらの数値を使用して理論的な応力ヒズミ曲線を書いてみると、Fig. 4~6に示す通りほとんどの場合測定値と非常によく一致することがわかる。従ってソイルピチューメンの水浸供試体は粘弾性体と考えてよく、一定のヒズミ速度で圧縮するとき応力とヒズミの関係は、Maxwellの二要素モデルで説明することができる。

Table 5 Spring and dashpot constants

Soil sample	Item	ME-3			ME-3+Ca(OH) ₂ 3%			CME-3			CME-3+P ₂ O ₅ 1%			
		Emulsion (%)	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
No. 1	E(kg/cm ²)		85.9	75.3	117	—	186	106	131	217	151	74.5	323	216
	η (kg-min/cm ²)		263	316	428	—	444	444	648	493	421	233	909	595
No. 2	E(kg/cm ²)		30.2	105	51.0	77.5	152	64.7	59.1	77.7	74.2	108	112	151
	η (kg-min/cm ²)		245	449	168	135	293	216	96.0	236	296	376	221	317
No. 3	E(kg/cm ²)		148	151	185	—	212	122	190	241	280	287	448	342
	η (kg-min/cm ²)		293	392	352	—	440	153	612	791	412	334	883	397

5. 結 言

上述のように乳剤で処理した細粒土の円筒形供試体を作り、これを所定の方法で養生した後ヒズミ速度を一定にして圧縮試験を行なったところ、供試体は粘弾性的様相を呈することがわかった。しこうしてその際の応力とヒズミの関係は、Maxwellの二要素モデルを適用して誘導した理論式と非常によく一致することが明らかになった。また理論式における定数の求め方は最小自乗法による正規の方法でなくても、筆者等が提案した簡便法で容易にしかもかなり正確に計算することができる。計算の結果によると乳剤量が適当ならばバネ定数Eは100~200kg/cm²となり、添加剤を加えると150~400kg/cm²にも達する。一般にアスファルト舗装の場合表層、基層、路盤および路床の平均的なEの値は、それぞれ1000, 400, 300および100kg/cm²程度である³⁾といわれているので、添加剤を加えたソイルピチューメンは下層路盤として十分使用に耐えることがわかる。しかし消石灰や五酸化リンの添加は処理土を硬くすると同時に脆くする恐れもあるので繰返し荷重に対する疲労が心配である。この点については引続き実験を行なっているので、つぎの機会に報告したいと思う。終りにこの研究は当時学生であった原幾人君の卒論の一部として実施したことを付記し、同君に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 樋渡正美, 鈴鹿和央: 山口大学工学部研究報告, 17, No.2(1966)
- 2) 樋渡正美, 水摩嘉孝: 山口大学工学部研究報告, 15, No.1(1965)
- 3) 日本道路協会: 道路便覧, コロナ社 (1968) p. 355.

(昭和44年12月15日受理)