

繰返し衝撃を受けるアスファルト合材の性状について

樋 渡 正 美*・上 田 満**

On the Response of Asphalt Mixtures under Repeated Impulsive Load

Masami HIWATASHI and Mitsuru UEDA

Abstract

When the vehicles run away on a road, a certain point of the pavement comes under influence of dynamic load at a moment. In order to clear the characteristics of asphaltic pavement under repeated impulsive load, writers have performed an experiment as following. Firstly the specimens for Marshall test have been made of coarse-graded, dense-graded asphalt concrete and topeca with or without powdered rubber. And then a test head setting this specimen has been placed into 60°C water bath as shown in Fig. 1. The whole apparatus has been set under a mechanical compactor for the preparation of CBR test specimen. The rammer of 4.5kg weight has been automatically dropped on the test head covered by a rubber cushion from 45cm height. After a certain number of repeated dropping, measurement of deformation by means of flow meter and Marshall test have been performed for each specimen. The results obtained in these experiments are mentioned and investigated here.

1. 緒 言

一般に道路を高速車輛が通過するとき、その上の一点では瞬間的な衝撃荷重を受ける。最近道路舗装の繰返し荷重に対する耐久性が問題となり、有名な AASHO の道路実験に基づいて 100万回の車輛通過に抵抗できる設計法が提案され、すでに実施されている。しかしながらこの設計法がわが国の気候風土にそのまま適応できるかどうか疑問もあるし、また多くの不明な点が残されている。筆者等はまずアスファルト舗装が繰返して衝撃荷重を受けるときの性状を明らかにするため、つぎのような実験を行なってみることにした。すなわち、アスファルト舗装の中から代表的な粗粒度アスコン、密粒度アスコンおよびトベカの三種を選んでマーシャル供試体を作った。これらの供試体は 24時間室内に静置した後、約 1 時間 60°C の水槽に入れて温度を調整し、載荷枠をはめて Fig. 1 に示す通りセットする。全装置を CBR 自働突固め機の下に置き、それに付属する重量 4.5kg のランマーを 45cm の高さから機械的に落下させ、厚さ 15mm のゴムクッションを通して供試体に衝撃荷重を反復して作用させた。この

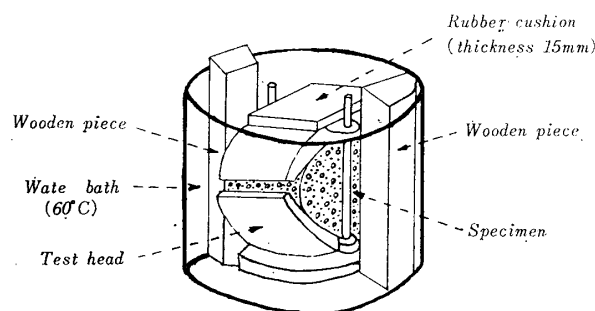


Fig.1 Experimental apparatus

ような操作を一定回数だけ行なった後供試体の変位をフローメーターで測定するとともに、マーシャル試験を行なって種々検討してみたので、その結果をここに報告する。

2. 供試体の製作

この実験に使用した材料の種類と性質が Table 1 に示されている。このうち骨材はいずれも山口県産であって、母岩の種類は碎石が安山岩また石粉が石灰岩である。なおこの実験ではゴムを混合したアスファルト舗装の衝撃抵抗を比較検討するため、Table 1 に示

* 上木工学教室

** 工業短期大学部土木工学教室

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	Penetration	Softening point	Flash point	Ductility		
(25°C)	(25°C)	(°C)	(°C)	(15°C)		
1.031	96	45.0	318	150cm+		
Powdered rubber (crushed olden tire)						
Specific gravity	Burned ash	0.85mm passing	0.40mm passing	0.25mm passing	0.11mm passing	0.074mm passing
(25°C)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1.49	49.4	99.8	71.5	43.4	21.2	16.2

す古タイヤの粉末を使用しているが、その添加量はアスファルトの重量に対し10%とした。

つぎに骨材の重量配合は Table 2 に示す通り、標準配合と最大密度配合の二種を採用している。前者はアスファルト舗装要綱に掲げる配合の中点をとったものであり、後者は最大密度の混合物がえられるという Talbot の式 $P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100$ に基づくものである。この式の P は篩目 d mm を通過する重量百分率を表わし、また D は骨材の最大粒径 (mm) である。指数 n は実験で求めねばならない定数であるが、ここでは過

去の実績¹⁾ から Table 2 のように定めた。表示の配合を粒径加積曲線で表わすと、最大密度の配合は密粒度アスコンと近似の粒度となり、粗粒度アスコンやトベカとはかなり異なることがわかる。このような粒度の近似または相違は製作された供試体の密度に直接影響を与えるばかりでなく、間接的には強度その他の特性値にも影響するものと考えられる。なおアスファルトの混合率はすべての配合に対して5%とし、合材の混合およびマーシャル供試体の製作は土木学会編「土木材料実験指導書」に準拠して行なった。

Table 2 Proportion in weight of aggregate

Kind of proportion		Standard			Maximum density		
Item	Grain size (mm)	Coarse-graded ascon	Dense-graded ascon	Topeca	D=25mm n=0.38	D=20mm n=0.40	D=13mm n=0.42
Crushed stone	25~20	12.5	0.0	0.0	8.1	0.0	0.0
	20~13	21.0	10.0	0.0	13.9	15.8	0.0
	13~10	9.0	10.0	7.5	7.4	8.4	10.4
	10~5	17.5	20.0	10.5	16.3	18.4	22.6
	5~2.5	12.5	17.5	9.5	12.6	13.9	17.0
Coarse sand	2.5~0.6	15.0	19.0	25.0	17.5	19.0	22.6
	0.6~0.3	5.0	5.5	11.0	5.6	5.9	6.9
Fine sand	0.3~0.15	2.5	6.0	14.0	4.3	4.5	5.2
Stone dust	<0.15	5.0	12.0	22.5	14.3	14.1	15.3
Total	—	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

3. 繰返し衝撃後のマーシャル安定値

供試体はいずれも3個を1バッチとして製作されたが、それぞれに対し密度と飽和度を計算した結果の平均値が Table 3 に示されている。これから最大粒径の等しい配合二つずつを比較すると、密度も飽和度も

当然のことながら最大密度配合の方がかなり大きく、しかもその差は粒径加積曲線が離れる程大きくなるのがわかる。また粉末ゴムの添加は密度と飽和度を幾分小さくするようである。

Table 3 Density and saturation of specimens

Powdered rubber	Item	Coarse-graded ascon	D=25mm n=0.38	Dense-graded ascon	D=20mm n=0.40	Topeca	D=13mm n=0.42
None	Density (g/cm ³)	2.37	2.44	2.42	2.46	2.32	2.42
	Saturation (%)	67.7	83.6	77.3	86.4	64.1	79.3
Adding	Density (g/cm ³)	2.37	2.43	2.40	2.42	2.34	2.42
	Saturation (%)	67.3	79.4	73.4	77.4	66.5	79.7

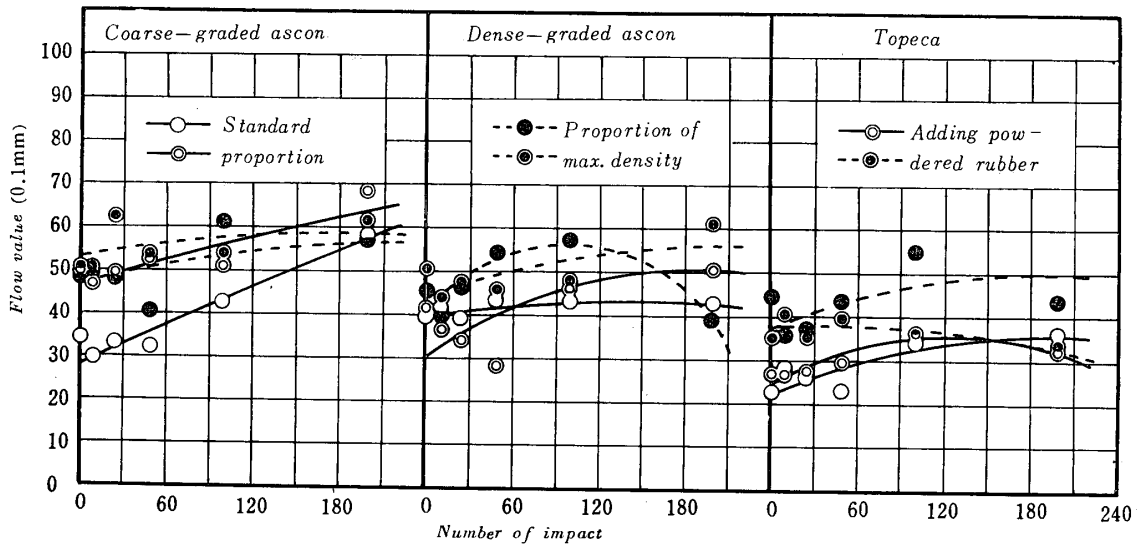


Fig.2 Relation between number of impact and flow value

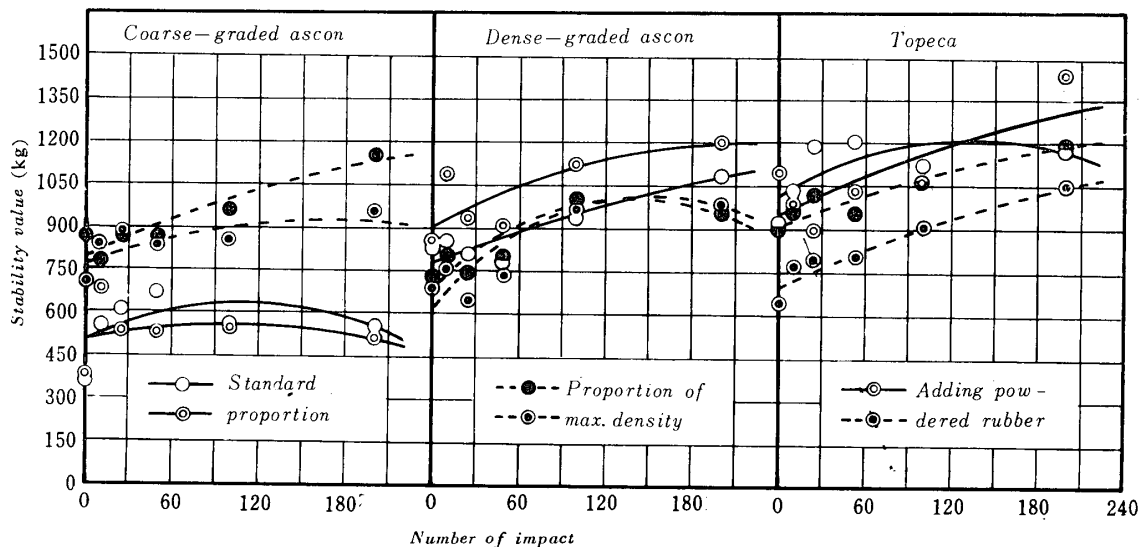


Fig.3 Relation between number of impact and stability value

つぎに Fig. 1 で示した装置に一定回数だけランマを落下させた後、マーシャル試験を行なった結果が Fig. 2 および 3 に示されている。これらの図には最大粒径の等しい配合を一つの枠に画いてあり、かなりばらついてはいるがつぎのようなことがいえると思う。

a) フロー値は標準配合よりも最大密度配合の方が大きく、またある程度までは衝撃回数が増す程大きくなる。その理由は簡単で供試体が飽和度の増加により流動性を帯びるためと考えられる。b) 安定値もある回数までは繰返し衝撃を与えることによって増大することがわかる。この現象は「ひずみ硬化」とよばれ主として密度の増加に起因すると考えられている²⁾。c) 粗粒度アスコンでは最大密度配合が安定値は大きいけれど、他の舗装では逆に小さくなっている。これは安定値が密度だけの関数ではなく、色々な条件に支配されるためである。d) 粉末ゴムの添加による安定値の増加は認められない。

4. 返衝回数と変位の関係

前述の実験で供試体に一定回数だけ衝撃を与えた後、フローメーターで変位を実測した結果が Fig. 4

に示されている。図上の○印は供試体3個に対する平均値であって、これからつぎのようなことがいえるであろう。a) 衝撃回数が増すにつれて変位は増大するが、その増加率は次第に減少してついには一定値に収斂する傾向がある。すなわち供試体は粘弾性的性状を呈することがわかる。b) 一定回数の衝撃に対する変位量は Fig. 3 に示したマーシャル安定値の大きいもの程大体において小さい。これは強度が大きければ一定荷重に対する変形は小さいという常識的な概念から当然なことと思われる。c) しかし粉末ゴムを添加した場合にはこの常識と異った現象が現われる。すなわち粉末ゴムを混合しても安定値は増加しないのに、変位量はすべての配合に対して小さくなる。これは注目すべき現象でアスファルトにゴムを入れると衝撃に強いといわれていることを証明したことになる。

つぎに衝撃回数 n とひずみ ϵ との関係を数学的に解析するため、供試体を粘性固体と考え Fig. 5 に示すフォークトモデルが適用できるものと仮定する。すでに述べた通り衝撃回数と変位の関係は粘弾性的様相を帯びているし、またこの実験は 60°C で行なわれているからアスファルトは液状に近いと考えられるので、

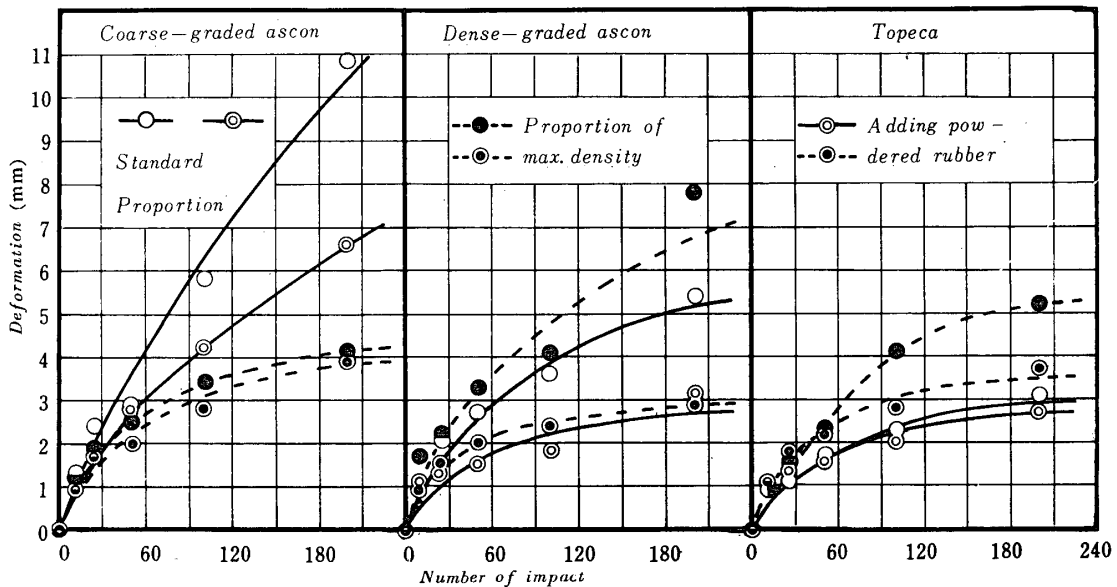


Fig.4 Relation between number of impact and deformation

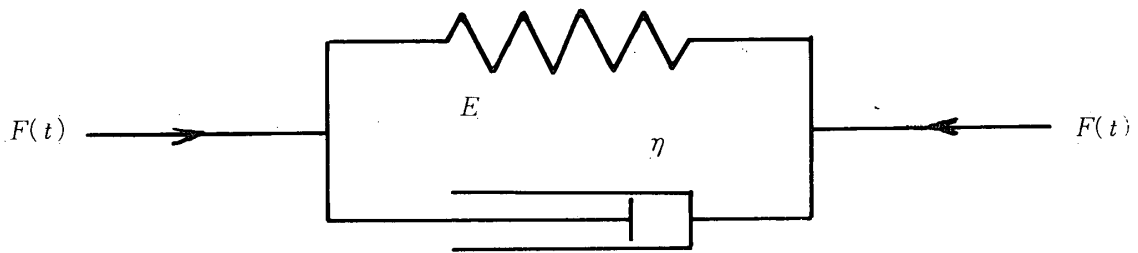


Fig.5 Voigt model

粘性固体に適用されるフォークトモデルを仮定しても不合理とは思われない。このモデルに時間とともに変化する荷重 $F(t)$ が作用するときの基礎方程式は周知の通り(1)式で表わされる。ここに E および η はそれぞれバネ定数およびダッシュポット定数である。(1)式

$$F(t) = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

の一般解は初期ひずみを ε_0 とすればつぎのようになる。従って $F(t)$ 曲線が与えられると任意の時間 t に

$$\varepsilon = e^{-\frac{E}{\eta}t} \left\{ \varepsilon_0 + \frac{1}{\eta} \int_0^t F(t) e^{\frac{E}{\eta}t} dt \right\} \dots\dots(2)$$

におけるひずみ ε は(2)式で計算することができる。ところで繰返し荷重のモードに矩形、台形、三角形などその種類が沢山あってかなり複雑であるが、理論的にはこれらすべてを(3)式に示すフーリエ級数で表わすことができる。いま(3)式を(2)式に代入して右辺の積分を行なうと(4)式がえられ、

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos \frac{2m\pi}{c} t + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin \frac{2m\pi}{c} t \dots\dots\dots(3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon = & e^{-\frac{E}{\eta}t} \left\{ \varepsilon_0 + \frac{a_0}{2E} \left(e^{\frac{E}{\eta}t} - 1 \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 a_m m c \pi \eta}{4 m^2 \pi^2 \eta^2 + c^2 E^2} \right. \\ & \times \left\{ e^{\frac{E}{\eta}t} \left(\frac{cE}{2 m \pi \eta} \cos \frac{2m\pi}{c} t + \sin \frac{2m\pi}{c} t \right) - \frac{E}{\eta} \right\} \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 b_m m c \pi \eta}{4 m^2 \pi^2 \eta^2 + c^2 E^2} \left\{ 1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \left(\cos \frac{2m\pi}{c} t \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{cE}{2 m \pi \eta} \times \sin \frac{2m\pi}{c} t \right) \right\} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

これが任意の時間 t におけるひずみ ε を与える一般式となる。

しかしながらこの式は相当複雑であり、またあとの計算も容易ではないのでここではつぎのような別法を考える。すなわち Fig. 6 に示す単位衝撃を Fig. 5 のフォークトモデルに作用させると、その応答 $x(t)$ は下記の微分方程式を解いてえられるはずである。と

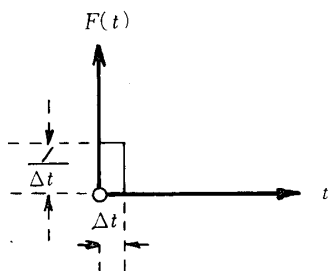


Fig.6 Unit impact

ここで繰返し衝撃の荷重時間曲線が Fig.7 のように

$$E x(t) + \eta \frac{dx(t)}{dt} = 0 \quad \therefore x(t) = \frac{1}{\eta} e^{-\frac{E}{\eta}t} \dots\dots(5)$$

なる場合を想定すると、時間 τ において働いた一個の衝撃による $(t-\tau)$ 時間後のひずみ $x(t-\tau)$ は、(5)式からつぎのようになる。ここに F_0 は衝撃力を表わし $\Delta\lambda$ はその作用時間である。従って Fig. 7 に示す n

$$x(t-\tau) = \frac{F_0}{\eta} e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} \Delta\lambda \dots\dots\dots(6)$$

個の衝撃による t 時間後のひずみを ε_n とすれば、(6)式から重ね合せの原理によって次式が成立する。ここ

$$\varepsilon_n = \sum \frac{F_0}{\eta} e^{-\frac{E}{\eta}(t-\tau)} \Delta\lambda$$

で $\tau = k(\lambda + \Delta\lambda)$, $t = n(\lambda + \Delta\lambda)$

とおくと、この式はつぎのように書き換えられる。さらに $F_0 \Delta\lambda / \eta = a$, $E(\lambda + \Delta\lambda) / \eta = b$

$$\begin{aligned} \varepsilon_n = & \sum_{k=0}^{n-1} \frac{F_0 \Delta\lambda}{\eta} e^{-\frac{E}{\eta}(n-k)(\lambda + \Delta\lambda)} \\ = & \frac{F_0 \Delta\lambda}{\eta} e^{-\frac{E}{\eta}(\lambda + \Delta\lambda)} \left\{ 1 - e^{-\frac{E}{\eta}(\lambda + \Delta\lambda)} \right\} \\ & \left\{ 1 - e^{-\frac{E}{\eta}(\lambda + \Delta\lambda)} \right\} \end{aligned}$$

と置くことにより(7)式をうるが、これは衝撃回数 n

$$\varepsilon_n = a e^{-b} (1 - e^{-nb}) / (1 - e^{-b}) \dots\dots\dots(7)$$

とそのときのひずみ ε_n の関係を表わす一般式となる。

つぎに Fig. 1 で示した実験装置に、一定の高さからランマーを機械的に落下させた場合の荷重時間曲線を求めるため、ランマーにひずみゲージを貼付けラビコーダーで記録させた結果が Fig. 8 の上部に示されている。下部の図は直径 10cm の鉄板を冠せたロードセルを路面に埋めて、時速 30km で自動車を走らせたときの記録であるが、両者の載荷時のパターンがよく似ていることは注目に値する。なぜならば自動車は道路上を走行するときの繰返し衝撃のモードを、筆者らが

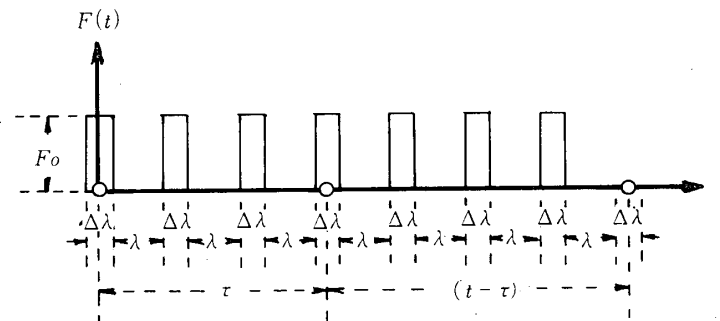


Fig.7 Repeated impact

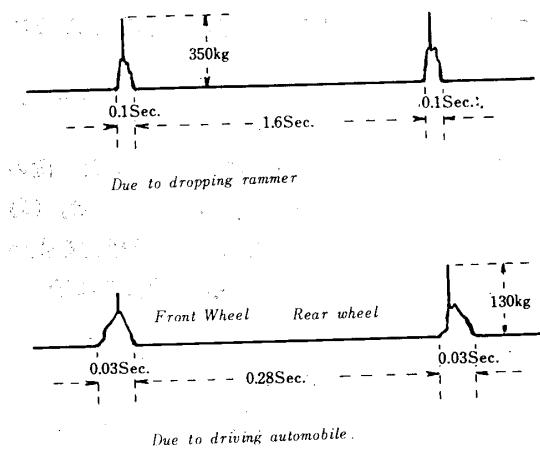


Fig.8 Practical impulsive load

考案した装置で再現できるからである。Fig. 7 と Fig. 8 を比較すると、前者が矩形荷重であるのに対し後者は三角形荷重に近い。従ってこの実験でえられた衝撃回数と変位の関係を(7)式で解析するには少し問題もあるが、ここでは一応 Fig. 8 に示されているように $\lambda=1.6$ 秒, $\Delta\lambda=0.1$ 秒, $F_0=350$ kg として計算を進めることにする。

すでに発表した通り³⁾ 沢山の測定値から定数を求め

Table 4 Spring and dashpot constants

Powdered rubber	Item	Coarse-graded ascon	D=25mm n=0.38	Dense-graded ascon	D=20mm n=0.40	Topeca	D=13mm n=0.42
None	E(kg/cm)	181	754	619	418	1030	529
	$\eta(\frac{\text{kg}\cdot\text{min}}{\text{cm}})$	1279	1008	1137	924	1668	1392
Adding	E(kg/cm)	488	773	1089	1075	1089	828
	$\eta(\frac{\text{kg}\cdot\text{min}}{\text{cm}})$	1109	1170	1575	1065	1575	1071

5. 結 言

上述の実験およびその結果に対する検討からえられた結論はつぎのようなことである。a) ランマーを一定の高さから機械的に落下させる場合の荷重時間曲線は三角形に近く、しかも自動車道路上を走行する場合とそのモードがほとんど一致する。従ってこの実験で明らかになった現象はある程度実際の舗装でも起るものと考えられる。b) アスファルト舗装が繰返し衝撃を受けるときは主として密度の増加に基づく「ひずみ硬化現象」が現われ、一定の回数まではマーシャル安定値とフロー値がともに増大する。c) アスファルト合材に粉末ゴムを添加すると、密度や強度は増加しないのに繰返し衝撃による変位が減少する。これは従来考えられていたように、ゴムの添加で衝撃抵抗が増加することを証明しているが、その主な理由はバネ定

数には最小自乗法を用いるのが原則となっているけれど、式が複雑となって計算が容易でないのでこの場合も簡便法を考える。すなわち測定値の中から k 回と $2k$ 回の衝撃に対するひずみ ϵ_k および ϵ_{2k} を代表的に取り出して、(7)式に代入すると次式が成立する。(8)

$$\epsilon_k = ae^{-b}(1 - e^{-kb}) / (1 - e^{-b}) \dots \dots \dots (8)$$

$$\epsilon_{2k} = ae^{-b}(1 - e^{-2kb}) / (1 - e^{-b}) \dots \dots \dots (9)$$

式および(9)式を連立に解いて次式をうる。従って(11)式から b の値を求め、これを(10)式に代入すると a

$$a = \epsilon_k (1 - e^{-b}) / e^{-b} (1 - e^{-kb}) \dots \dots \dots (10)$$

$$b = -(2.3026/k) \log_{10}(\epsilon_{2k} - \epsilon_k) / \epsilon_k \dots \dots \dots (11)$$

の値が求まることになる。このようにして算出された a および b の値と、Fig. 8 に示される実測値を $a = F_0 \Delta\lambda / \eta$ および $b = E(\lambda + \Delta\lambda) / \eta$ なる式に代入して、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 4 に示されている。これから粉末ゴムを添加するとバネ定数がかかなり増大することがわかる。なおこれらの定数を(7)式に入れて衝撃回数と変位との関係を図示すると Fig. 4 のようになり、測定値がほぼこの理論曲線上にのることを示している。

数が大きくなるためである。d) 骨材を最大密度の配合にしても、粗粒度アスコン以外は衝撃抵抗がかえって減少する。e) アスファルト合材は繰返し衝撃に対して粘弾性的様相を呈する。すなわちこの場合の繰返し回数と変位の関係は、粘性固体に適用されるフォークトモデルを仮定して誘導された理論式とほぼ一致する。

終りにこの研究は当時学生であった空田安弘君の卒論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。

参 考 文 献

- 1) 樋渡正美, 上田満: 山口大学工学部研究報告, 18, No. 3 (1967)
- 2) 土質工学会: 土の動的性質とその応用 (1965) p. 19
- 3) 樋渡正美, 上田満: 山口大学工学部研究報告, 20, No. 3 (1970)

(昭和45年11月14日受理)