

アスファルト合材の動的応答に関する研究

—主としてその概念と測定法について—

学生員 ○笠 原 篤*
正 員 菅 原 照 雄**

1. ま え が き

道路舗装は路床、路盤、表層などの各層の積重ねによって構成されており、それらが一体となって外力に抵抗するものである。各構成層が具備すべき性状を、荷重分散性状と層自体の強さの2つに大別することができる。前者は、層厚および層自体の弾性係数（変形係数）に依存する。後者は、層自体が応力に耐え得るか否か（材料の強さ）である。両者に共通的な事項としては、疲労に基づく変形係数、強度などの低下があげられる。

動的応答が問題となるのは、静的な応答と走行車両などによる動的な荷重に対する応答の間にはかなり大きな差異があるからである。これはアスファルト合材の性状が温度、時間の関数として示されることから、当然である。

2. 動的荷重および繰返し荷重に対する応答

Van der Poel はアスファルトおよびアスファルト合材の応力と歪の関係を、時間と温度の関数としてステイフネスとなる概念を導入した。

$$S(t, T) = \sigma / \epsilon$$

S : ステイフネス (kg/cm^2)

σ : 応力 (kg/cm^2),

ϵ : ひずみ

t : 載荷時間, T : 温度

短時間および低温において、ステイフネスは弾性係数となり、長時間および高温において、ステイフネスは単に応力とひずみの関係となる。

アスファルト合材の動的応答を得る手法としては、動的載荷（主として正弦波形）および繰返し載荷（任意波形）の2つに大別することができる。それらの内容を要約し表-1に示す。

表 - 1

試 験 法	入 力	測定される応答	レオロジー挙動測定	備 考
動的載荷 (a) 一軸載荷 (主として) 正弦波形	引張りと圧縮： 正弦的变化の応力 $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$, または 正弦的变化のひずみ $\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t$ (種々の周波数において)	応力を入力すると： 正弦的变化のひずみ は特定の周波数で $\epsilon = \epsilon_0 \sin (\omega t - \phi)$ ここで ϕ : 位相差 ω : 周波数	複素弾性率 $ E^* = \sigma_0 / \epsilon_0$ と 位相角 ϕ (種々の周波数において)	(a) $ E^* = E_r(t)$, ただし長 短載荷時間において。 中間の時間では $E_r(t)$ を決定 するのに別の重ね合せの方法を用 いる必要がある。 (b) $ E^* $ と $1/\omega$ でプロットす ると $E_r(t)$ の曲線と似ている。
繰返し載荷 (a) 一軸載荷 (b) 曲げ (任意波形)	圧縮： 軸応力, σ_d 曲げ： 荷重, P	圧縮： ある回数の繰返し載 荷後に回復するひず み, ϵ_R 曲げ： ある回数の繰返し載 荷後に回復するたわ み, ΔR	圧縮： 回復弾性率： $M_R = \sigma_d / \epsilon_R$ 曲げのステイフネス： $S = K \cdot P / I \cdot \Delta R$ K : 載荷条件により 決まる定数	

3. 舗装体に生ずる応力およびひずみ波形

舗装体のある一点を想定し、その点上を走行する車輪によって生ずる応力またはひずみは、時間を横軸にとりある形状の波形をもって示すことができる。筆者らの注

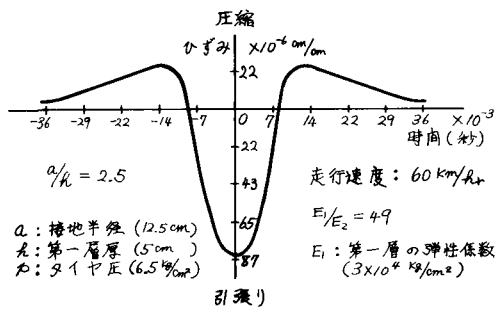
目している波形は、各層の底面における応力およびひずみの波形であり、これにシュミレートさせる形で、供試体に応力またはひずみを与え応答を得るのが最も適切と考える。

完全弾性体について、応力を入力としひずみを応答と

* 北海道大学大学院工学研究科 博士課程

** 北海道大学工学部 教授

して得る場合と、また逆の場合とは、全く同等となるはずである。しかしアスファルト舗装体は完全弾性体ではなく、塑性流動をも伴う構造体であるので、シュミレーションにあたって問題となるのは、応力とひずみどちらでシュミレートするかである。粘弾性体にとってみれば、この2つは非常に異なった意味を持っている。実際の道路条件にあてはめてみても、どちらが合致しているかは簡単に論じられない。むしろ場合に依じて、両者の性状を把握する心要がある。この意味から本研究においては、応力波形ひずみ波形のいずれからもシュミレート可能な装置を製作している。



図一 1 2層構造における第1層下面のひずみ例

図一 1は、図中に示された条件下でのひずみ波形を描いたものである。これはきわめて単純化された形のものであり、実際には車輪の *Tracking Force* による水平方向の荷重に基づく水平ならびに垂直力をも考慮すると若干異なったものとなる。走行荷重の速度は、単純に応

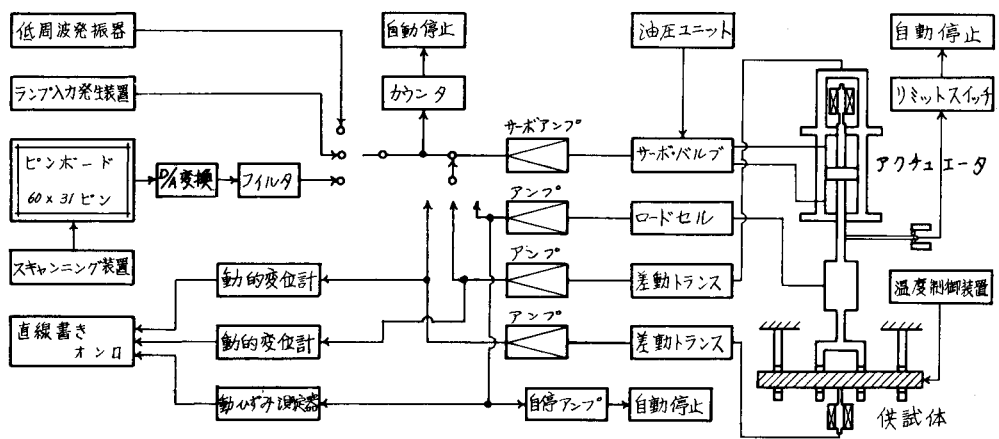
力のかかり始めから終りまでの時間として考えることができる。

4. 波形のシュミレーション法

- シュミレーション法としては、次のような方式がある。
- (a) データレコーダに記録させた波形をインプットとして用いる方法
 - (b) 正弦波、矩形波などの関数波形発生装置の組合せにより波形を得る方法
 - (c) 全属シート式プログラムコントローラによる方法
 - (d) ダイオードマトリックス・ピンポットによる方法
- いずれの方法を用いても、かなり高価格となることは避けられない。(c)以外はかなり短時間に波形を得ることができ、(d)は変化に富んだ複雑な波形を表現しにくい欠点を持つ。走行荷重により舗装体に生ずる波形は、さして複雑な形ではないこと、データレコーダをも付属する構造とし、経費等の面から結局は(d)の方法によりランダム波形を得、かつ低周波発信器により、正弦波、三角波、矩形波等の信号をも発信させ得る方針を取った。

5. 舗装材料試験用動的載荷装置

本装置は設定された一定温度において舗装材料の供試体に電気・油圧サーボ機構により静的載荷、および任意波形の動的載荷を行うための試験装置である。これらは油圧部、制御部、載荷部、記録部、温度制御部から構成されており、各構成の機能システムを系統図として図一 2 に示し、それらの写真を写真一 1 に示す。



図一 2 動的載荷装置の系統図

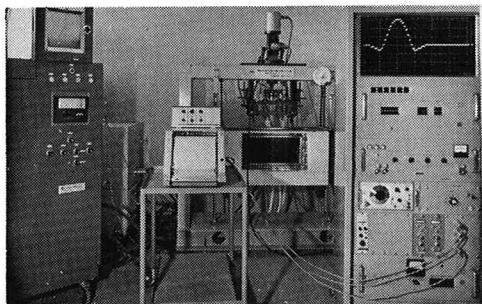


写真1 動的載荷装置

(1) 機能

- ① 試験：曲げ試験
- ② 供試体寸法：3×3×40cmおよび4×4×40cm
- ③ 試験方式

動的載荷試験

- (a) 応力およびひずみ制御方式
波形：正弦波、矩形波、三角波、ランダム波
- (b) 最大許容荷重：± 500 kg
- (c) 試験荷重：± 120 kg
- (d) 周波数：矩形波 0.1～2 Hz
正弦波 0.1～20Hz
- (e) 変位振幅：± 5mm

静的載荷試験

- (a) 応力およびひずみ制御方式
波形：ランプ波
- (b) 最大許容荷重：± 500 kg
- (c) 試験荷重：± 200 kg
- (d) 変位速度：0～15 mm/min
- (e) 変位置：± 5mm

(2) 各部構造

① 載荷装置

フレーム、アクチュエータ、サーボバルブおよび供試体保持装置より構成されている。

- (a) アクチュエータ
複動型油圧シリンダでフレーム上部に固定されている。アクチュエータ側面に、サーボバルブが取り付け、下部ロッド先端には荷重検出用のロードセル、上部ロッドにはシリンダ変位を検出する差動トランスが取り付けられている。

- (b) サーボバルブ
型式：MOOG 73-102、容量：1000psi バルブドロップで5 G. P. M.

- (c) 供試体保持装置

両端自由のローラ支持、2点載荷方式のものでいづれの供試体にも兼用する。装置の中央部には供試体変位検出用の差動トランス支持部を付属している。

② 油圧ポンプユニット

試験容量を満たすために必要な油量をアクチュエータに供給するためのものである。

電動機：5.5KW、三相200V、50サイクル
油圧ポンプ：ベーン型、140kg/cm²、15ℓ/min
マイクロセパレータ：MSD-100

③ 計測および制御装置

(a) 荷重検出器

型式：東洋測器C 3PI-200L、ボールドワインSR-4タイプ、容量：200kg

(b) 変位検出器

型式：新興5006型L.V.D.T.、範囲：±5mm

(c) サーボ増巾器

信号発信装置から発信される設定信号とフィードバックされた荷重または変位との偏差を増巾してサーボバルブを駆動する。

(d) 信号発信装置

ランプ入力付ポテンシオ

静的試験での応力およびひずみ制御の信号を設定し発振する。設定時間：1.25分～2時間

プログラム設定装置

動的試験の制御波形を任意に設定し、信号を発信するものでピンボード、スキャンニング装置、アナログスイッチ、デイバイダおよびフィルタより構成される。ホール数：時間軸60ピン、電圧軸31ピン、時間軸のサイクルタイム：0.1～99秒、インタバル軸：0～99秒

超低周波発振器

正弦波、三角波、矩形波、のこぎり波の信号を発振する。

(e) 記録装置

検出器で検出した荷重、供試体変位およびシリンダ変位を増巾し、ペンオシロに記録する。

(f) 自動停止装置

荷重および変位が設定値以上、またサイクルが10⁶の範囲で設定値に達しをとき自動停止する。

(3) 温度調節装置

外部の独立した恒温装置から、比例制御によって設定温度になった液体を強制循環し、恒温を得る恒温水槽方式である。設定温度範囲は-30～+30℃であり、±0.1

℃の精度で制御が可能である。

6. 実験

サンドシート（アスファルト量7.5, 8.5, 9.5%）、密粒式アスファルトコンクリート（5.7%）、ロールドアスファルト（7.2%）の3種のアスファルト合材について実験を行なった。アスファルトはストレート80/100（ロールドのみ60/80）である。供試体は3×3×35cm、スパン30cm、試験温度0℃で、供試体下面の引張りひずみが0.0005となるようにひずみ制御で、周波数0.1～5 Hzの正弦波および三角波を入力したときのレスポンスカーブを図-3、図-4に示す。ピンボードを用いて、

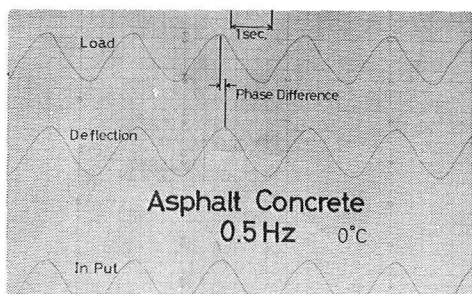


図-3 正弦波の入力に対するレスポンスカーブ

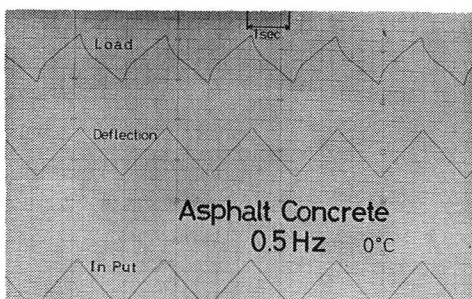


図-4 三角波の入力に対するレスポンスカーブ

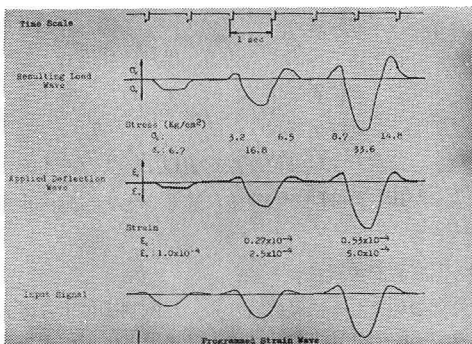


図-5 シミュレート波の入力に対するレスポンスカーブ

走行荷重による第一層下面のひずみにシュミレートさせた波形を入力したときのレスポンスカーブを図-5に示す。

7. 解析

アスファルト合材に正動的に変化するひずみ（または応力）を入力したときの応力の振幅とひずみの振幅との比として複素弾性率 $E^* = E' + iE''$ が得られ、その大きさは $|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2}$ となりステイフネスと同等となる。応力とひずみの位相のずれより得られる位相角は $\tan \sigma (=E''/E')$ で表わされ、減衰特性値となる。

8. 実験結果

各種アスファルト合材の複素弾性率 ($|E^*|$) と周波数、位相角 ($\tan \delta$) と周波数の関係を図-6、図-7に示す。

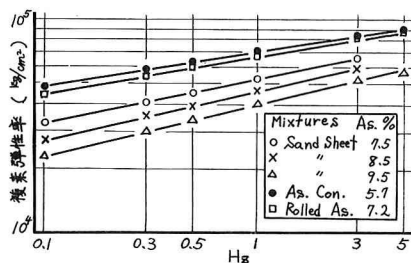


図-6 複素弾性率 ($|E^*|$) と周波数との関係

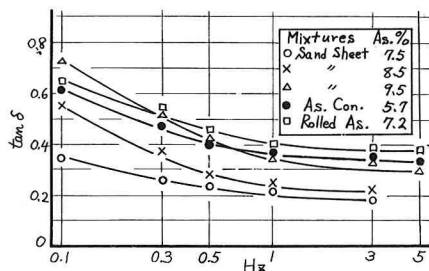


図-7 位相角 ($\tan \delta$) と周波数との関係

ロードアスファルトと密粒式アスファルトコンクリートは、ほぼ同一のステイフネスを持つが高周波数領域において、 $\tan \delta$ の値は前者が大きい。サンドシートにおいて、アスファルト量の少ないものほどステイフネスは大きく、 $\tan \delta$ の値は小さい。このことより $\tan \delta$ の値

はアスファルト合材の粘性特性を示す一つの指標となる。

9. 将来計画

舗装をシステムとしてとらえる場合、最も重要な要素の一つは材料物性の把握である。そのアプローチの手段として、合材に周期的な応力またはひずみを与えて合材がどのような応答を示すかを測定する動的方法がある。舗装が遭遇するような環境条件において、基本的な波形

である正弦波, 三角波, 短形波, のこぎり波を入力し, 動的応答を測定し, ステイフネス, 位相角, 緩和弾性率等の *Factors* により合材の性状を把握する。また層構造理論から計算した走行荷重による2～3層構造体の第1層下面の引張りひずみ(または応力)の波形にシュミレートさせた形で, 合材に入力し動的応答を得る。そのような過程を経て基本的な波形およびシュミレート波形を合材に入力し, 疲労試験をおこなおうとするものである。