

# 交通荷重に対する薄層ホワイトトッピング構造の動的挙動

西澤辰男<sup>1</sup>・村田芳樹<sup>2</sup>・國府勝郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒 929-0392 河北郡津幡町北中条)  
nishi@ishikawa-nct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 セメント協会研究所 コンクリート研究グループ (〒 114-8508 東京都北区豊島 4-17-33)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科 (〒 194-8508 東京都八王子市南大沢 1-1)

ホワイトトッピング工法は、既存のアスファルト舗装の上に薄いコンクリート版を施工する修繕工法の一つである。その力学的な特性は、コンクリート版とアスファルト層が一体となって挙動することにある。ホワイトトッピング工法では、アスファルト層の力学的寄与分が大きいと、その挙動が舗装全体の挙動に大きく影響する。構造設計においては、このようなアスファルト層の効果を考慮した構造モデルが必要となる。本研究では、3次元有限要素法に基づいた構造モデルを開発した。このモデルは、材料モデルとして一般化 Voigt モデルを用い、アスファルト層の粘弾性効果を考慮する。載荷試験の結果から本構造モデルの検証を行うとともに、交通荷重に対するホワイトトッピング構造の力学的挙動について考察した。

**Key Words :** *ultra thin white topping, dynamic behavior, 3 dimensional finite element method, viscoelastic model*

## 1. はじめに

ホワイトトッピング工法は、既存のアスファルト舗装の上にコンクリート版を施工する補修工法の一つである<sup>1),2),3)</sup>。主に既存のアスファルト舗装のわだち掘れ対策や構造強化の目的で施工される。特に厚さ 10cm 以下の薄いコンクリート版を施工する工法を薄層ホワイトトッピングという。薄いコンクリート版でも構造的に耐久的な理由は、コンクリート版と下層のアスファルト層の付着を完全にし、両者を一体化させることによって、コンクリート版に生ずる応力を軽減できるからである<sup>4)</sup>。したがって、薄層ホワイトトッピング構造が成り立つためには、ある程度厚いアスファルト層の存在とアスファルト層とコンクリート版の間の十分な付着を確保することが必要な条件である。

ホワイトトッピングの設計の基本的な考え方は、コンクリート版の曲げ疲労解析である。そのために、交通荷重によるコンクリート版の曲げ応力の算定が必要となる。ホワイトトッピング構造は、アスファルト層とコンクリート版の組み合わせられた一種のコンポジット舗装と考えることができる。コンポジット舗装の構造解析モデルとしては、多層弾性モデルや複合平板モデルなどに基づいた理論解を用いることが考えられるが<sup>5)</sup>、いずれもホワイトトッピング構造に特有なコンクリート版の目地の不連続な構造を考慮できない。特に一般のコンポジット舗装においては、コンクリート

版と比較してアスファルト層の力学的効果は小さいとされ、その寄与分はコンクリート版の厚さに換算するなどの近似的な取り扱い方をしている<sup>6)</sup>。

しかしながら、ホワイトトッピング構造においては、アスファルト層の効果は大きく、その挙動を無視できない。このようなことから、平板 FEM を 2 層に重ね合わせたモデルが提案された<sup>7),8)</sup>。このモデルによれば、コンクリート版の目地や、アスファルト層とコンクリート版の付着などが合理的にモデル化されており、試験結果との対応も良好である<sup>9)</sup>。その他にもコンクリートオーバーレイの構造を組み合わせ梁構造に置き換えたモデルも提案されている<sup>9)</sup>。しかしながら、これらのモデルでは、アスファルト層の挙動が曲げ挙動に限定されており、特にアスファルト混合物の弾性係数が小さい場合の厚さ方向の変形を考慮できないという欠点を有している。また、路床以下を 1 次元のばねで置き換えているため、路床の挙動を解析することができない。さらに、これらの解析はあくまで静的な弾性解析であり、アスファルト混合物に特有な粘性効果を考慮できない。薄層ホワイトトッピング構造においては、アスファルト層の力学的な寄与分が大きいことから、このような粘性効果を無視することはできないと考えられる。事実、ホワイトトッピングに関する載荷試験結果によれば、同じ構造でも荷重を静的に作用させた場合と動的に作用させた場合では、その挙動に大きな差が生ずることが明らかとなっている<sup>9),10)</sup>。し

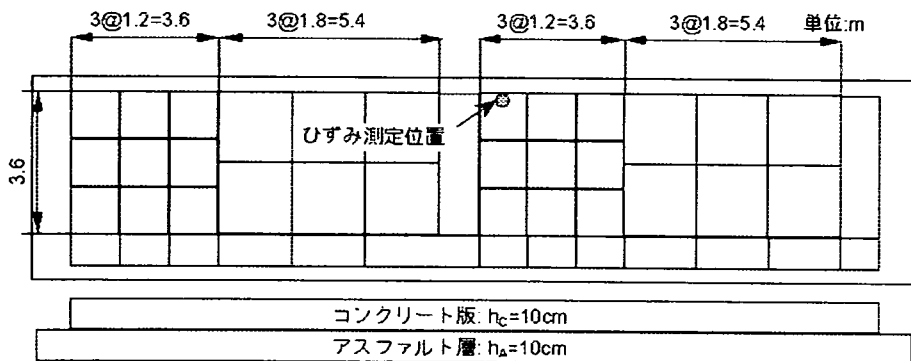


図-1 試験舗装の概要

たがって、アスファルト層の粘弾性効果、コンクリート版とアスファルト層の付着、コンクリート版の目地などを考慮できる合理的な構造モデルの開発が望まれる。

近年、舗装の構造解析に3次元有限要素法(3DFEM)が用いられるようになってきた。舗装に適用される3DFEMの多くは商用のパッケージを用いた汎用的なものであり、様々な構造条件、荷重条件、材料条件を考慮できる<sup>11)</sup>。このようなことからそれらをホワイトトッピングの構造解析に用いることが考えられる。著者の1人は舗装の構造解析に特化した簡便な3DEFMプログラム、Pave3Dを開発してきた<sup>12),13)</sup>。そこで本研究では、このツールをアスファルト混合物を含むコンポジット舗装に適用できるように動的粘弾性解析に拡張した。

本論文では、まずホワイトトッピングの荷重による挙動を調べるために実施された載荷試験の概要と、その結果からホワイトトッピング構造の力学的挙動の特徴について述べる。次に、このようなホワイトトッピングを含むコンポジット舗装の力学的挙動を解析するための構造解析用のモデルについて説明する。このモデルを用いてホワイトトッピングの載荷試験結果を解析し、モデルの検証を行うとともに、ホワイトトッピング構造の力学的挙動について考察した。

## 2. 載荷試験

実際の荷重によるホワイトトッピングの挙動を調べるために実物大の試験舗装を施工し、その上で載荷試験を行った<sup>10)</sup>。本章ではその概要を示す。

### (1) 試験舗装

試験舗装の概要を図-1に示す。この試験舗装はセメント工場の駐車場に建設された。原地盤の上に厚さ10cmのアスファルト層を敷き、アスファルトとの付着を確保するためアスファルト表面を切削した後、その上に厚さ10cmのコンクリート版を打設した。目地間隔の影

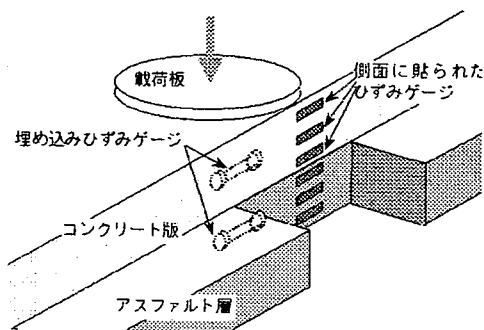


図-2 ひずみゲージの設置状況

表-1 荷重車の緒元および走行速度

項目	測定時期	
	2000年冬	2000年夏
総重量(kN)	266.8	277.3
前輪荷重(kN)	71.5	75.6
前輪接地圧(MPa)	0.708	0.704
後輪荷重(kN)	60.8	63.1
後輪接地圧(MPa)	1.018	0.600
軸距(cm)	345	
移動速度(cm/sec)	40.6	150.0

響を調べるために、1.2mと1.8mの間隔で目地を設けた。目地としてはコンクリート打設後、カッターでコンクリート表面から約20mmの深さに切った。施工後2年経過するとほとんどの目地にはひび割れが入った。

荷重によるひずみを計測するため、コンクリート版とアスファルト層下面に埋め込みゲージを設置した。また、コンクリート版とアスファルト層内の深さ方向のひずみ分布を求めるために、アスファルト層の一部を開削し、図-2に示すように、コンクリート版側面と開削したアスファルト層の側面にひずみゲージを貼った。

また舗装体内の温度分布を測定するために、版中央の深さ方向に温度センサーを埋め込んだ。

## (2) 載荷試験

載荷試験は冬期試験として2000年2月に、夏期試験として2000年8月に実施した。それぞれの季節において静的および動的な載荷試験を行った。静的載荷試験では、クレーン車を反力として直径30cmの載荷板とジャッキを用いて、荷重を4.9kNずつ増やしながらかみずみを測定した。荷重は49kNまで増加させ、その後すぐに除荷した。一回の計測に要する時間は5分ほどであった。このような載荷を3回実施し再現性を確認したが、その結果は良好であった。本研究では、このような試験を静的載荷試験と呼ぶ。

動的試験では、クレーン車の車輪を縁部に沿うように走行させ、動的なひずみを測定した。このような走行を2回実施し再現性を確認したが、再現性は良好であった。載荷試験に用いたクレーン車の輪荷重は測定時期ごとに実測した。その結果を含め荷重車の諸元を表-1に示す。また、荷重車の走行速度は冬の載荷試験では40cm/sec、夏の載荷試験では150cm/secであった。本研究ではこの試験を走行載荷試験と呼ぶ。

## (3) 試験結果

ひずみ測定は1.2mと1.8mのコンクリート版で実施したが、結果に大きな違いが見られなかったので、1.2mのコンクリート版の結果のみを示す。

図-3は自由縁部載荷におけるコンクリート版とアスファルト層の深さ方向のひずみ分布を示している。静的載荷試験の結果は49kNにおけるひずみ分布である。コンクリート版内およびアスファルト層のひずみ分布は、冬ではほぼ直線的であるが、夏ではアスファルト層のひずみがやや大きな値を示した。また、コンクリート版の中立軸は中間点よりも下側にあり、アスファルト層の剛性の影響が明らかである。またコンクリート版下面とアスファルト層上面のひずみの値がほぼ等しいことから、コンクリート版とアスファルト層との付着は良好であることもわかる。

走行載荷試験の結果は、クレーン車の前車輪がひずみゲージの位置にきたときのものである。ひずみ分布は静的載荷試験結果と同様に直線的である。静的な場合に比べて、輪荷重が大きいかもかわらずひずみの値は全般的に小さい。静的に作用する荷重と動的に作用する荷重によって挙動が異なるということは、アスファルト層の粘性の影響も一因と考えられる。夏のひずみは冬に比べてかなり大きい。

図-4は走行載荷試験におけるひずみの経時変化である。車輪がゲージ直上にきたときのひずみが最も大きく

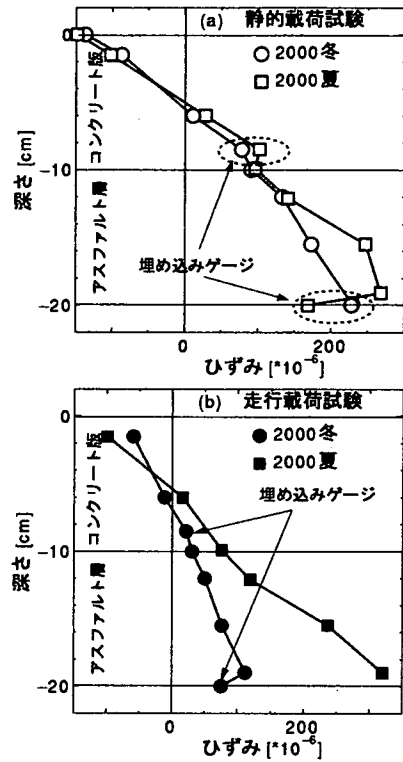


図-3 試験結果 (深さ方向のひずみ分布)

なる。その前後でひずみが反転する。たとえば、コンクリート下面においては、荷重が接近するとまず圧縮ひずみが発生する。その後荷重が直上を通過する時に引張ひずみとなり、その後再び圧縮ひずみとなる。冬では、荷重通過前後でのひずみの経時変化はほぼ対称であるが、夏では非対称な経時変化となる。

## 3. 3DFEMモデル

ホワイトトッピングにおいてはコンクリート版とアスファルト層の挙動を同時に扱わなければならない。加えて、コンクリート版の目地、コンクリート版とアスファルト層の付着などの複雑な現象をモデル化する必要がある。そこで本研究では、これらの解析上の要求を満足する3DFEMモデルを採用することとした<sup>13)</sup>。本章ではその3DFEMモデルについて述べる。

### (1) 構造モデル

図-5は舗装構造解析用に開発された3DFEMプログラムPave3Dで想定している構造モデルである。基本的には舗装全体を多層構造としている。コンクリート版、路盤および路床は8節点のソリッド要素に、コンクリート版と路盤の境界面や目地は後述する境界面要

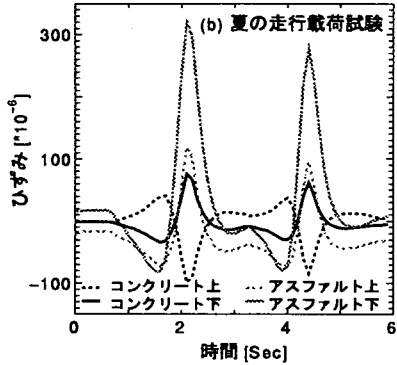
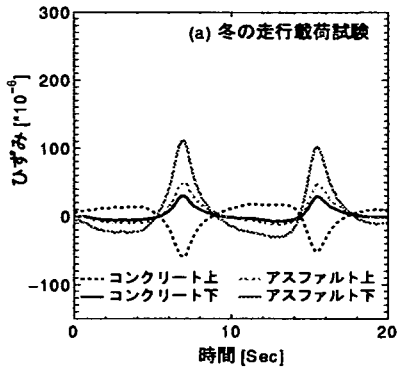


図-4 試験結果 (ひずみの経時変化)

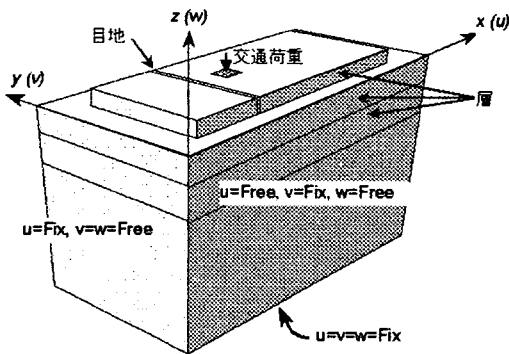


図-5 舗装構造解析のための 3DFEM モデル

素に分割される。各層は有限の広がりを持ち、その端部の断面では広がり方向の変位はその方向に固定されている。たとえば  $x-z$  平面上の断面では  $y$  方向の変位  $v$  が固定されている。底面の変位はすべて固定である。ただし、このような境界条件は最も面積の大きな層に対して適用される。すなわち、図-5 のように表層が路盤以下の層よりも広がり小さい場合には、端部でのすべての変位は自由としている。荷重は表層表面に作用する等分布面荷重とし、 $x, y, z$  方向の荷重を取

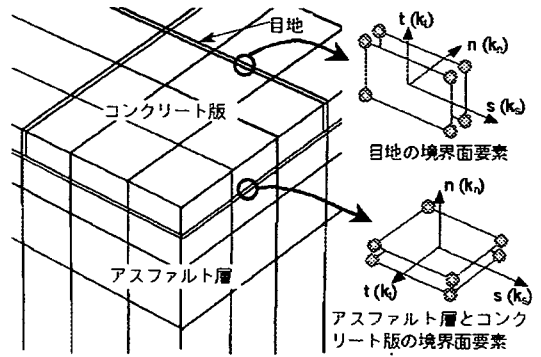


図-6 目地および境界面のモデル化

り扱うことができる。

図-6 のように、コンクリート版の目地およびコンクリート版とアスファルト層の境界面には汎用境界面要素を挿入した。境界面要素は2つの面を持ち、その面の間の相互作用を2つの面に平行なばねと1つの面に垂直なばねでモデル化する。それぞれのばね定数を  $k_t, k_n$  とすると、これらの値が大きいほど境界面での力の伝達が大きくなる。

## (2) 動的粘弾性解析法

動的な荷重による応答を解析するためには、Pave3D の動的問題への拡張が必要である。動的問題における増分形式の仮想仕事の式は次のようになる：

$$\int_V [B]^T (\{\sigma\} + \{\Delta\sigma\}) dV + \int_V \rho [N]^T [N] dV (\{\ddot{d}\} + \{\Delta\ddot{d}\}) - \int_S [N]^T (\{t\} + \{\Delta t\}) dS = \{0\} \quad (1)$$

ここに、

$[B]$  = ひずみ - 変位マトリックス

$V$  = 体積

$\rho$  = 密度

$[N]$  = 内挿マトリックス

$\{\ddot{d}\}$  = 加速度ベクトル

$\{t\}$  = 表面荷重ベクトル

$S$  = 表面積

$\{0\}$  = ゼロベクトル

である。

山田<sup>14)</sup>によれば、図-7に示すような一般化フォークトモデルにおいて、応力増分は次のように表現できる：

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\} &= \{\dot{\sigma}\} dt \\ &= [D_e] \{\dot{\epsilon}\} dt + [D_v] \{\epsilon\}_t dt - [P] \{\sigma\} dt \end{aligned} \quad (2)$$

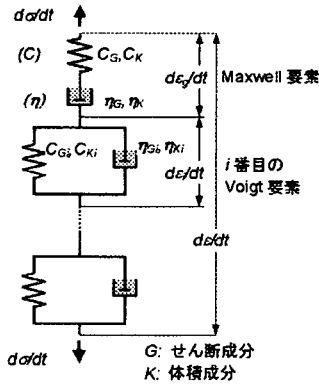


図-7 一般化 Voigt モデル

ここに,

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

$[D_e]$  = 弾性マトリックス

$$[D_v] = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ & v_1 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & v_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & v_3 & 0 & 0 \\ & & & & v_3 & 0 \\ & & & & & v_3 \end{bmatrix}$$

$$v_1 = \frac{2}{3}a_1 + \frac{1}{3}a_2, v_2 = -\frac{1}{3}a_1 + \frac{1}{3}a_2, v_3 = \frac{1}{2}a_1$$

$$a_1 = \frac{2}{C_G} \sum_i \frac{1}{T_{G_i}}, a_2 = \frac{3}{C_K} \sum_i \frac{3}{T_{K_i}}$$

$T_G = C_G \cdot \eta_G, T_K = C_K \cdot \eta_K$ : それぞれせん断成分および体積成分に対する緩和時間

$C_G, C_K$ : それぞれせん断成分および体積成分に対するコンプライアンス

$\eta_G, \eta_K$ : それぞれせん断成分および体積成分に対する粘性係数

$$[P] = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_2 & 0 & 0 & 0 \\ & p_1 & p_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & p_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & p_3 & 0 & 0 \\ & & & & p_3 & 0 \\ & & & & & p_3 \end{bmatrix}$$

$$p_1 = A_K + 2A_G, p_2 = A_K - A_G, p_3 = 3A_G$$

$$A_G = \frac{1}{T_G} + \frac{1}{C_G} \sum_i \frac{1}{\eta_{G_i}}, A_K = \frac{1}{T_K} + \frac{1}{C_K} \sum_i \frac{1}{\eta_{K_i}}$$

式(2)を式(1)に代入し整理すると次式を得る:

$$\{f_e\} + [K_e]\{d\} + \{f_o\}dt - \{f_p\}dt + [M](\{\ddot{d}\} + \{\Delta\ddot{d}\}) - \{f\} - \{\Delta f\} = \{0\} \quad (3)$$

ここに,

$$\{f_e\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV$$

$$[K_e] = \int_V [B]^T [D_e] [B] dV$$

$$\{f_o\} = \int_V [B]^T [D_v] \{\epsilon\}_i dV$$

$$\{f_p\} = \int_V [B]^T [P] \{\sigma\} dV$$

$$[M] = \int_V \rho [N]^T [N] dV$$

$$\{f\} = \int_S [N]^T \{t\} dS$$

さらに, 式(3)は次式のように, n ステップにおける時間に関する増分形式で表現できる:

$$\left( [K_e] + \frac{[M]}{\Delta t^2} \right) \{\Delta d\}_n = \{f\}_{n+1} - \{f_e\}_n - \{f_o\}_n \Delta t + \{f_p\}_n \Delta t + \frac{[M]}{\Delta t^2} \{\Delta d\}_{n-1} \quad (4)$$

ここに,  $\Delta t$  は時間増分である. 式(4)を  $\{\Delta d\}_n$  について解くことによって, 次式から n+1 ステップにおける変位ベクトル  $\{d\}_{n+1}$  を求めることができる:

$$\{d\}_{n+1} = \{d\}_n + \{\Delta d\}_n \quad (5)$$

また式(2)より, n+1 ステップにおける応力は以下のように求まる:

$$\{\sigma\}_{n+1} = \{\sigma\}_n + [D_e] \{\dot{\epsilon}\} \Delta t + [D_v] \{\epsilon\}_i \Delta t - [P] \{\sigma\} \Delta t \quad (6)$$

本研究においては, 式(4)から式(6)までを Pav3D に組み込み, 舗装構造のための動的粘弾性解析プログラム, DynPave3D を開発した.

### (3) 動的荷重モデル

動的荷重としては, 定位置動的荷重と走行荷重の2種類を想定した. 定位置動的荷重は, 荷重位置は固定したままで, その大きさが時間的に次式のように変化する:

$$f(t) = P \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot t}{t_p} \right) \quad (7)$$

ここに,  $f(t)$  は荷重の大きさ,  $P$  は最大荷重,  $t_p$  は図-8に示されるような作用時間である.

3DFEM において走行荷重をどのようにモデル化するかについてはいくつかの方法が提案されている<sup>15), 16)</sup>.

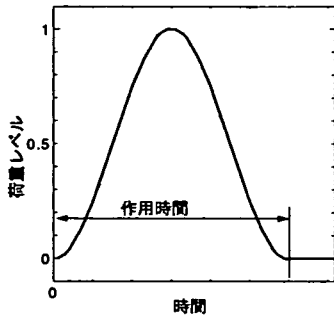


図-8 定位置動的荷重モデル

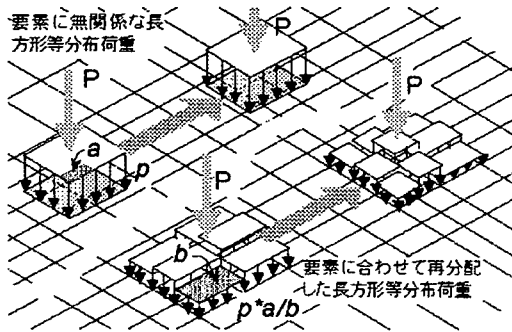


図-9 移動荷重のモデル化

本研究では、以下のような単純な方法を考案した。すなわち、路面に接するタイヤ荷重を長方形等分布荷重で置き換える。時間とともにこの荷重は移動するので、タイヤが接する要素の表面も移動することになる。図-9に示すように移動する接地面が重なるすべての要素の表面に等分布荷重を作用させる。ただし、その荷重強度は、要素の受け持つ荷重に対応させる。たとえば図-9において、荷重強度  $p$  の長方形荷重がある要素に面積  $a$  だけ重なるとする。その要素全体の面積が  $b$  だとし、その要素が受け持つ荷重を  $a \cdot p$  をその要素全体に荷重強度  $a \cdot p / b$  の等分布荷重として作用させる。時間ステップごとに、荷重接地面の位置を計算し、接地面がかかる要素の表面とその荷重の受け持ち量を計算して、対応する荷重ベクトルを作成していくのである。要素分割が粗いと実際の荷重設置面との違いが大きくなるため注意が必要である。

#### (4) プログラムの検証

DynPave3Dの開発に際し、プログラム自体の検証のために、厳密解との比較を行った。計算例としては簡単なクリープ試験で、図-10に示すような2次元平面ひずみ状態にある板の両端に一定荷重を与え、そのクリープ変形を求めるものである<sup>14)</sup>。材料としては図-10に

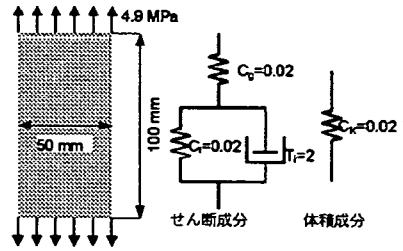


図-10 検証に用いたクリープ試験モデル

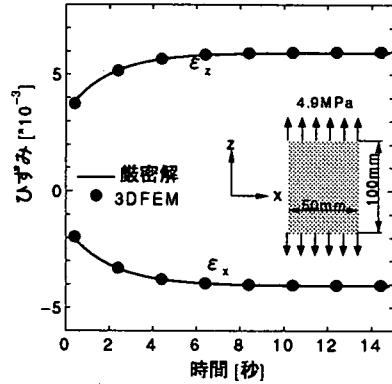


図-11 クリープ試験の計算結果

表-2 計算で用いた各層の厚さおよび材料定数

項目 (単位)	値
コンクリート版の弾性係数 (MPa)	36200
コンクリート版のポアソン比	0.2
コンクリート版の厚さ (cm)	10
アスファルト層の弾性係数 (MPa)	200 - 10000
アスファルト層のポアソン比	0.35
アスファルト層の厚さ (cm)	10
路床の弾性係数 (MPa)	200
路床のポアソン比	0.35
路床の厚さ (cm)	240

示すような、せん断成分については3要素、体積成分は弾性ばねのみの1要素とするモデルを用いた。計算結果を図-11に示す。この図から明らかなように計算値と厳密解は一致することから、プログラム自体の妥当性は確かめられたといつてよい。

#### 4. 載荷試験の解析

DynPave3Dによって載荷試験結果を解析し、モデルの実際の舗装への適用性について検討する。

表-3 アスファルト層のレオロジー定数

レオロジー定数 (単位)	材料の種類					
	M-0	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
$E$ (MPa)	$10^4$			$10^3$		
$\eta_G$ (MPa*s)	$10^7$	$10^5$	$10^4$	$10^7$	$10^5$	$10^3$
$E_1$ (MPa)	$10^3$					
$\eta_{G1}$ (MPa*s)	$10^7$	$10^5$	$10^4$	$10^7$	$10^5$	$10^3$
$\eta_K, \eta_{K1}$ (MPa*s)	$10^6$					

ただし、 $C_G = \frac{2(1+\mu)}{E}$ ,  $C_{G1} = \frac{2(1+\mu)}{E_1}$

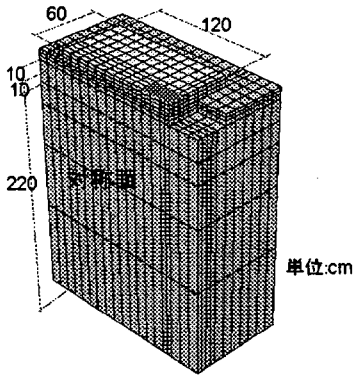


図-12 静的および固定荷重の要素分割

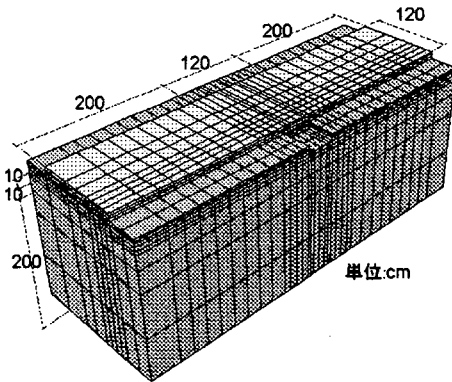


図-13 走行荷重の要素分割

(1) 計算条件

表-2 は静的弾性解析に用いた材料定数などの入力データである。アスファルト混合物の弾性係数は、アスファルトピチューメンの性状、配合、温度、荷重時間に大きく依存するといわれていることから、200MPa から 10000MPa と広い範囲を想定した。コンクリートの性状は室内試験の結果を用いた。地盤の弾性係数は

FWD 試験結果に基づいて設定した<sup>18)</sup>。

表-3 は粘弾性解析に用いたアスファルト層のレオロジー定数の値である。本研究では Maxwell 要素と 1 つの Voigt 要素を結合した Burgers モデルを採用した。アスファルト混合物に対する Burgers モデルのレオロジー定数も配合や温度によって変わるといわれているので、6 種類を想定した。M-0 から M-2 は Maxwell 要素の弾性係数が大きく温度が低い場合を想定しており、M-3 から M-5 はその値が低く温度が高い場合を想定している。いずれも番号が大きくなるに従い、粘性係数が小さくなる。Voigt 要素の弾性係数はすべて同じ値である。なお、体積成分の粘性係数はすべて高い値を設定して体積成分の粘性効果を無視した。

実測した深さ方向のひずみ分布よりアスファルト層とコンクリート版の接着は良好であるので、境界面要素のばね係数はすべて  $10^6 \text{MN/m}^3$  と大きな値とした。目地の荷重伝達はないとし、目地部を表す境界面要素のばね係数は  $1.0 \text{MN/m}^3$  と小さな値とした。

載荷試験は静的載荷試験と走行載荷試験がある。それらについて以下のような解析を行った。

- a) 静的解析: 表-2 の材料定数を用いて、両方の載荷試験に対して静的弾性解析を行う。要素分割は図-12 に示すものを用いる。この要素分割においては、構造の対称性を考慮し、半分の領域を要素に分割した。試験ではひずみゲージを貼るために、アスファルト層の一部を開削したが、そのことも要素分割に反映させた。
- b) 固定荷重動的解析: 表-2 および表-3 のレオロジー定数を用いて動的粘弾性解析を行なう。ただし、荷重については図-12 の要素分割を用い、式 (7) による固定荷重とする。その作用時間は静的載荷試験を再現するために 300 秒、走行載荷試験を再現するために 3 秒と仮定した。
- c) 走行荷重動的解析: 表-2 および表-3 のレオロジー定数、図-13 に示す広い領域を想定した要素分割を用いて粘弾性解析を行う。クレーン車の 1 輪を長方形等分布荷重に置き換え、3.(3) で述べた方法によって縁部に沿って移動させて走行載荷試験を再現した。

(2) 計算結果

a) 静的解析

図-14 は静的載荷試験および走行載荷試験の結果とそれらの静的解析結果の比較である。なお、走行載荷試験の実測ひずみは前車輪のもので、比較のために線形性を仮定して 49kN に補正してある。

静的載荷試験の場合、冬の試験に対しては、アスファルト層の弾性係数を 1000MPa とすると、計算値と実測

表-4 推定されたアスファルトのスティフネス

項目 (単位)	载荷試験			
	冬		夏	
	静的	走行	静的	走行
$T_a$ (°C)	3	3	30	30
$t_p$ (sec)	300	3	300	3
$S_{bit}$ (MPa)	2	100	0.01	0.5
$S_{mix}$ (MPa)	775	9220	15	291
$E_{est}$ (MPa)	1000	10000	200	5000

$T_a$ : アスファルト層内平均温度

$t_p$ : 载荷時間

$S_{bit}$ : アスファルトビチューメンのスティフネス

$S_{mix}$ : アスファルト混合物のスティフネス

$E_{est}$ : 実測ひずみから推定したスティフネス

仮定したアスファルト混合物の性状: 針入度=0

軟化点温度=60°C, 骨材体積率=80%

アスファルト体積率=13%

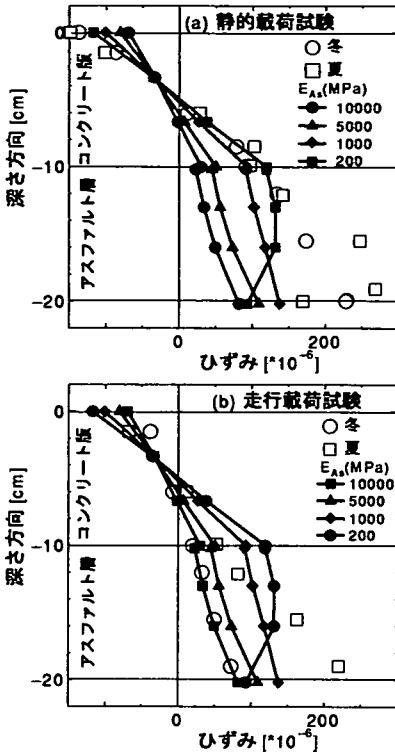


図-14 静的解析結果と試験結果の比較

値がコンクリート版内でよく一致するが、アスファルト層内では実測値は計算値よりもかなり大きい。夏の試験では、コンクリート版の実測値はアスファルト層の弾性係数が 200MPa の場合に一致するが、やはりアスファルト層のひずみに関しては計算値と実測値は一致しない。

走行载荷試験の場合、冬の試験に対しては、アスファルト層の弾性係数を 10000MPa とすると、計算値と実測値はコンクリート版およびアスファルト層全体で良く一致する。一方、夏の試験に対しては、コンクリート版の実測ひずみと比較すると、アスファルト層の弾性係数は 5000MPa 程度と推定できる。しかしながら、この弾性係数でも計算値はアスファルト層内のひずみをうまく捉えていない。

アスファルト層の弾性係数については、アスファルトビチューメンの性状や混合物の配合、温度、载荷時間を考慮してアスファルト混合物の弾性係数を評価する手法がある。その1つが Shell の研究者によって提案されたもので、Shell 法と呼ばれている<sup>17)</sup>。この Shell 法によって求めた値と、Pave3D の計算結果と実測値の比較から推定した値をまとめたものが表-4 である。両者の対応としては、冬の場合は良好であるが、夏の場合

合は Shell 法による推定値は、実測ひずみから推定した値よりもかなり小さい。なお、FWD たわみに基づいたアスファルト層の弾性係数の逆解析結果によれば、冬は約 10000MPa、夏で 1000MPa であるから<sup>18)</sup>、どちらかという Pavé3D と実測値から推定された値に近い。このようなことから、温度が低い場合には Shell 法によってアスファルト混合物の弾性係数を推定し、その値を用いて静的な FEM 解析を行うことによって、ホワイトトッピングの動的な挙動をある程度推定可能であるといえる。

### b) 定位荷重動的解析

図-15 は静的载荷試験および走行载荷試験の結果と定位荷重動的解析の結果の比較である。ここでも走行荷重試験の実測値は 49kN に補正してある。

静的载荷試験の場合、M-0 および M-3 の計算値は静的解析におけるアスファルト層の弾性係数がそれぞれ 10000MPa と 1000MPa のものとはほぼ同じ値となる。これは M-0 および M-3 の Maxwell 要素の弾性係数がそれらと同じで、粘性係数の値が非常に高く、それらの弾性係数を持った弾性体と同じ挙動を示すためである。粘性係数が小さくなるにつれ、コンクリート版内のひずみは大きくなり、中立軸の位置も上に移動する。このため、アスファルト層内のひずみも増加するが、弾性係数や粘性係数が小さいとアスファルト層下面のひずみはむしろ小さくなる。また、粘性係数が小さいと、アスファルト層内のせん断力の伝達能力が減少し、コンクリート版からの荷重をアスファルト層の上側のみで受け持つ。その結果としてアスファルト層上側のひ



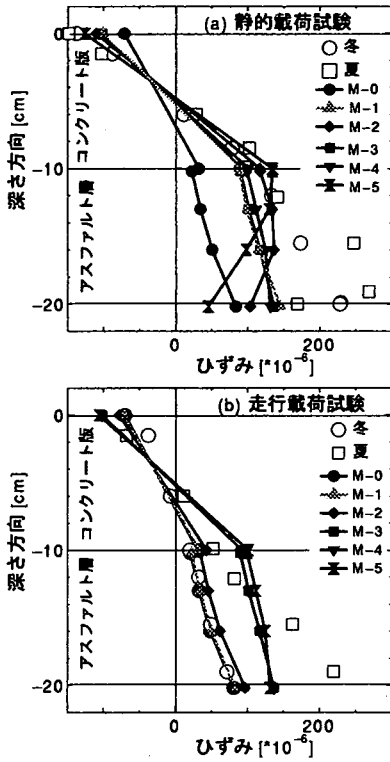


図-15 定位荷重動的解析による計算結果

ずみが大きく、下側のひずみはやや小さくなる。実測値との比較では、コンクリート版内のひずみは計算値と良く対応しているが、アスファルト層内の実測値は計算値よりもかなり高い値となっている。コンクリート版内での実測値と比較すると、冬の試験に対してはM-1、夏の試験に対してはM-5が良く対応している。

走行荷重試験の場合、荷重時間が短いので弾性体に近い挙動を示している。そのため弾性係数の同じM-0からM-2と、M-3からM-5はそれぞれ同様のひずみ分布となっている。実測値との比較では、冬の試験に対してM-2が良好な一致を示すが、夏の試験に対しては対応する材料モデルは見られない。

以上から、冬の試験に対してはM-1の材料モデルを用いた動的な解析によって、少なくともコンクリート版内の挙動については、静的荷重試験と走行荷重試験の両方を統一的に説明できることがわかる。

c) 走行荷重動的解析

図-16は走行荷重試験を移動荷重モデルを用いて動的解析した結果であり、車輪の走行に伴うひずみ経時変化を実測値とともに示している。代表的な計算結果として、冬のアスファルト層を想定したM-1と、夏のそれを想定したM-5のみを示した。解析結果は車輪の

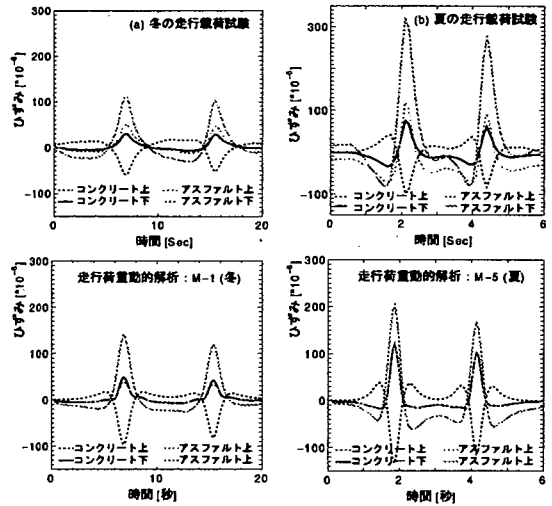


図-16 走行荷重動的解析による計算結果と実測結果の比較 (経時変化)

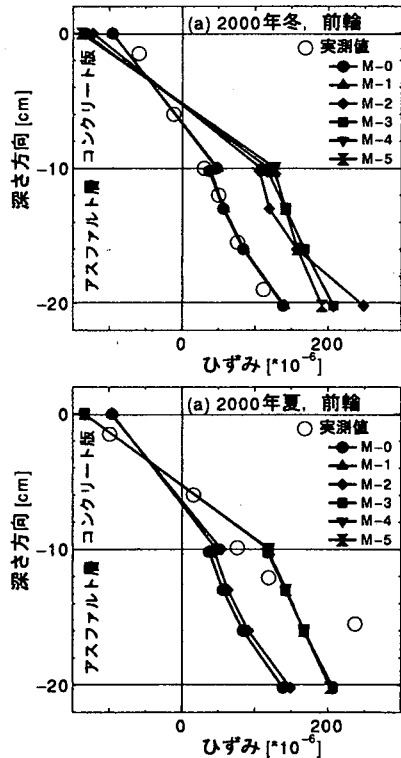


図-17 走行荷重動的解析による計算結果 (ピーク値)

通過に伴うピークのみならず、その前後のひずみの経時変化の全体的な傾向をうまく捉えていることがわかる。

図-17は前車輪が通過したときのひずみのピーク値をとって実測値と比較した結果である。冬の試験ではM-0およびM-1のひずみ分布はほとんど重なっており、

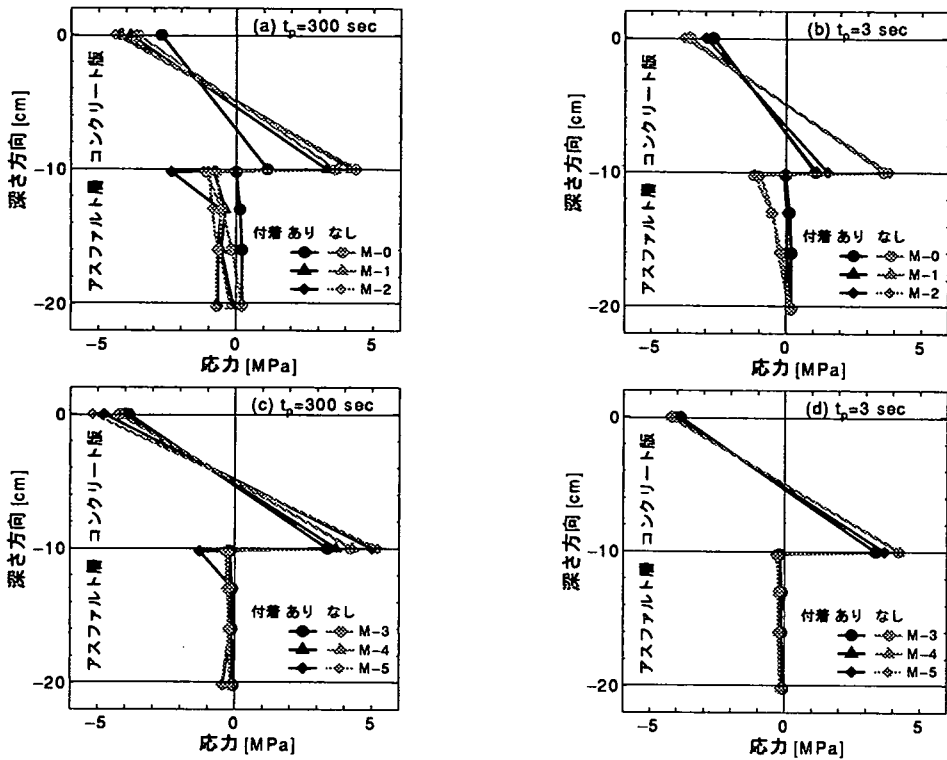


図-18 深さ方向の応力分布

他の材料モデルのひずみ分布の傾向が2つに分かれている。夏の試験に対しては、走行速度が速いため材料全体の挙動はほとんど弾性体のそれに近い。したがって、弾性係数が同じM-0からM-2と、M-3からM-5の2つのひずみ分布に分かれる。実測値との比較では、冬の試験に対してはM-0とM-1の結果が実測値をよく表現している。夏の試験に対しては全体的に良く対応する材料モデルは見られないが、コンクリート版内のひずみで比較すれば、夏を想定した材料モデルであるM-3からM-5に近いといえる。

## 5. ホワイトトッピングの力学的挙動

これまで、荷重試験の比較のためにひずみだけに着目してきたが、構造設計における疲労解析の観点から舗装の挙動をみる場合、コンクリート版の応力およびアスファルト層の散逸エネルギーが問題となる。本章ではこれらに及ぼす荷重時間、材料の性状、コンクリート版とアスファルト層との付着が及ぼす影響について、定位置荷重動的解析の結果を用いて考察する。コンクリート版とアスファルト層の付着については、完全に付着している状態 ( $k_s = k_t = k_n = 10^6 \text{ MN/m}^3$ ) と、付着がない状態 ( $k_s = k_t = 10 \text{ MN/m}^3, k_n = 10^6 \text{ MN/m}^3$ ) を想定した。

### (1) コンクリート版の挙動

図-18は深さ方向の応力分布を示している。この結果より境界面の付着の影響が大きいことがわかる。すなわち、境界面が付着している場合には、コンクリート版内の中立面は中央よりやや下側に位置するため、コンクリート版下面の応力は上面に比べて小さい。また、アスファルト層の材料モデルの影響を強く受け、アスファルト層の剛性が小さいとコンクリート版の応力は大きくなる。一方、境界面の付着が弱い場合、コンクリート版の中立面は中央に形成され、コンクリート版上下面の応力は絶対値は等しく符号は逆になる。またこの場合、アスファルト層の材料モデルによる影響は非常に小さく、アスファルト層の剛性が変化してもコンクリート版内の応力はほとんど変化がない。

荷重時間が長い場合には、コンクリート版内の応力はアスファルト層の粘性係数の影響を受けるが、荷重時間が短い場合にはその影響は小さい。付着がなくアスファルト層の剛性が小さい場合、荷重時間が長いとコンクリート版の応力は非常に大きく、コンクリート舗装で標準とされる曲げ強度の4.5MPaを上回る。このことからホワイトトッピングでは境界面の付着とアスファルト層の高い剛性を確保しておくことが非常に重要であることがわかる。

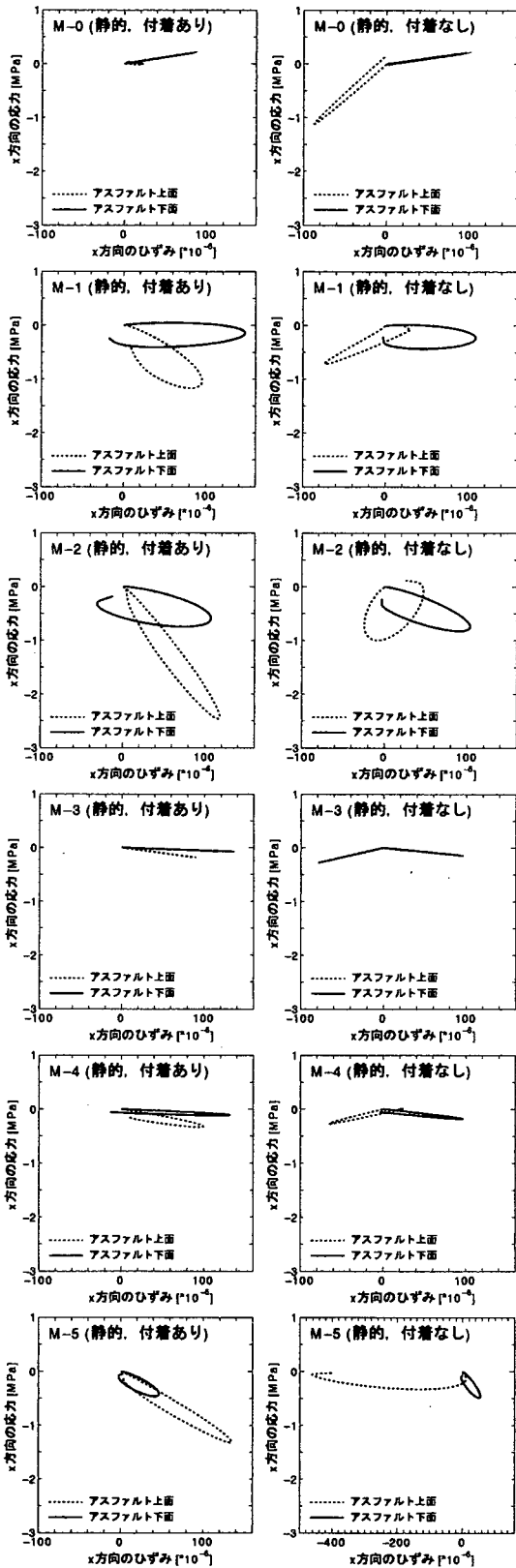


図-19 アスファルト層のヒステリシスループ ( $t_p = 300\text{sec}$ )

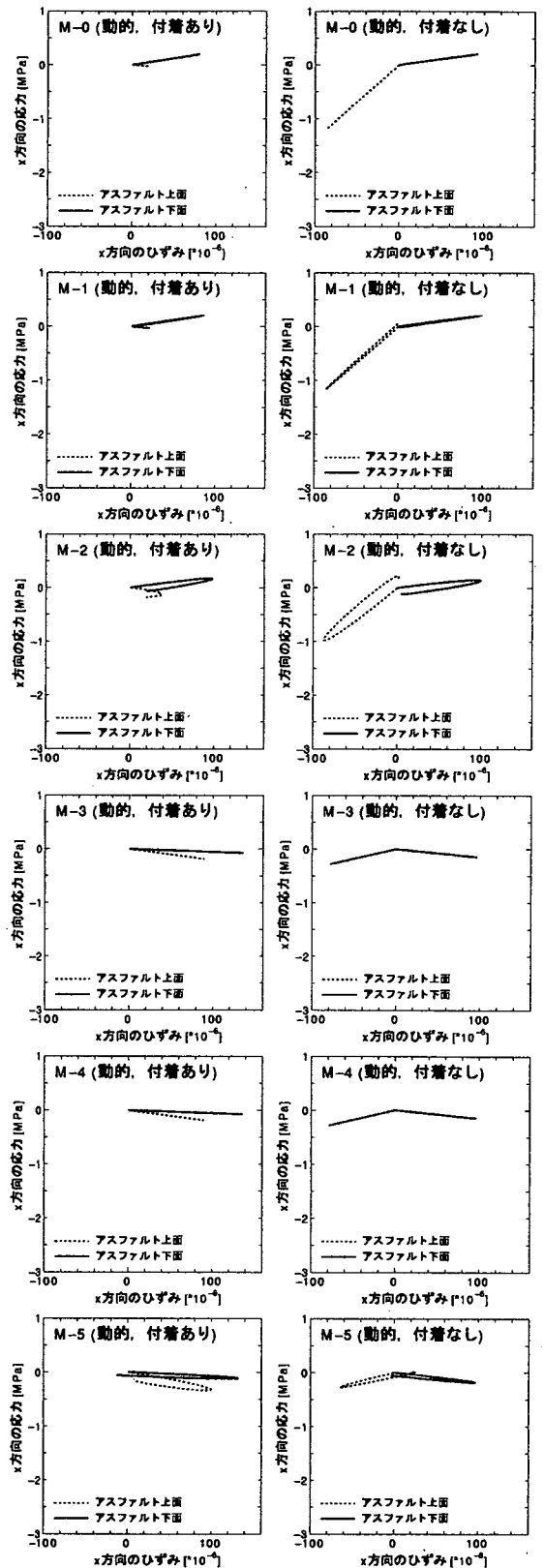


図-20 アスファルト層のヒステリシスループ ( $t_p = 3\text{sec}$ )

## (2) アスファルト層の挙動

図-19は、荷重時間が300秒の場合のアスファルト層上下面のヒステリシスループである。アスファルト混合物の疲労は、このヒステリシスループの面積が示す散逸エネルギーによって生ずるとされ、この面積が大きいほど疲労の蓄積が速い<sup>19),20)</sup>。このようなヒステリシスループは動的粘弾性解析によって求めることができる。ヒステリシスループが閉じていないのは、解析時間(360秒)で変形が完全に回復しなかったことを示している。

境界面の付着がある場合にはアスファルト層の上下面でのひずみは引張となるが、応力はM-0を除き小さな圧縮となる。粘性係数が小さいほど大きなループを描くが、この傾向は弾性係数が大きいM-0からM-2において顕著である。境界面の付着がない場合には、アスファルト層上面のひずみは圧縮になる。応力は全体として圧縮である。特にM-5では、アスファルト上面に大きな圧縮ひずみが生じ、それは除荷後も回復することがなかった。荷重時間が長い場合、アスファルト材料の弾性係数が大きく粘性係数が小さいと、ループの面積が大きくなり一度の荷重によるアスファルト層の疲労の蓄積は大きい。

図-20は、荷重時間が3秒の場合のアスファルト層上下面のヒステリシスループである。荷重時間が短い場合には弾性体的な挙動を示すので、ループの面積は荷重時間が長い場合に比べて小さい。このようなことから、荷重時間が短ければ、アスファルト層の疲労の蓄積は比較的小さい。M-0からM-2では、アスファルト下面はひずみと応力は引張となる。その他の傾向は荷重時間の長い場合とほぼ同様である。

## 6. まとめ

本研究では、薄層ホワイトトッピング構造の力学的挙動を解析するための構造解析プログラムDynPave3Dを開発し、その妥当性について荷重試験の結果を用いて検証した。本研究で開発したモデルの特徴は、以下のようになる。

1. 3DFEMに基づいており、コンクリート版、アスファルト層、路盤および路床を同時に取り扱うことができる。
2. コンクリート版とアスファルト層の境界面の付着の程度や、コンクリート版の目地の荷重伝達を考慮することができる。
3. 材料モデルとして一般化Voigtモデルを組み込んで動的粘弾性に拡張されたので、アスファルト層の粘性効果を考慮することができる。
4. 移動荷重をモデル化することができる。

このような構造モデルによって荷重試験を解析したところ以下のことが明らかとなった。

1. 温度の低い場合には、Shell法によるアスファルト混合物の弾性係数の評価と静的解析を組み合わせることによって、ホワイトトッピングの動的挙動を予測することが可能である。
2. アスファルト混合物に対する材料モデルとして適切なレオロジーモデルを用いることによって、ホワイトトッピングの静的および動的な荷重に対する応答を予測することができる。
3. 走行荷重に対するホワイトトッピングの応答も、本研究において開発された荷重モデルによって対応が可能である。
4. 夏の高温時のアスファルト層の挙動についてはさらに検討する必要がある。

DynPave3Dを用いたシミュレーションによってホワイトトッピングの力学的挙動について検討したところ、構造的な耐久性を保証するためには、コンクリート版とアスファルト層の境界面での付着を確保すること、さらにアスファルト層の十分な剛性が必要であることが分かった。また、アスファルト層にとっては長時間作用する荷重による疲労の蓄積が大きいことも判明した。

謝辞：本研究は(社)セメント協会舗装技術専門委員会(委員長：國府勝郎東京都立大学教授)の補修WG(WGリーダー：(株)トクヤマ佃美伸氏)の成果を活用させていただいた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 野田悦郎：ホワイトトッピングについて、道路建設、No.576, 1996。
- 2) American Concrete Pavement Association: Whitetopping - State of the Practice, *Engineering Bulletin*, 1999。
- 3) Mack, J.M., Wu, C.L., Tarr, S., and Refai, T.: Model Development and Interim Design Procedure Guidelines for Ultra-thin Whitetopping Pavements, *Proceedings 6th International Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance*, Purdue University, pp. 231-256, 1997。
- 4) 野田悦郎, 孔 永健, 笠原由則：付着型薄層ホワイトトッピング工法に関する基礎的研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol.2, pp.24-31, 1997。
- 5) 福田正：コンクリート舗装版の荷重分散機構に関する研究, 土木学会論文集, 第242号, pp.63-72, 1975。
- 6) 西澤辰男, 七五三野茂, 小松原昭則, 小梁川雅：連続鉄筋コンクリート版をベースとしたコンポジット舗装の設計法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol.2, pp.53-61, 1997。
- 7) 西澤辰男, 福手勤, 国分修一：弾性平板FEMに基づくコンポジット系舗装の解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.613/V-42, pp.237-247, 1999。
- 8) 東本崇, 小関裕二, 濱田秀則, 福手勤, 西澤辰男：ホワイトトッピングの荷重挙動およびその解析法, 土木学会舗装工学論文集, Vol.5, pp.139-147, 2000。
- 9) 中西弘光, 武井真一, 丸山暉彦：界面付着を考慮した

- 薄層コンクリートオーバーレイに関する基礎的研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol4, pp.215-224, 1999.
- 10) セメント協会舗装技術専門委員会: 薄層付着型ホワイトトッピング工法に関する調査・研究, 舗装技術専門委員会報告 R-14, セメント協会, 2001.
  - 11) *Proceedings of the First National Symposium on 3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis and Design*, Edited by Shoukry, S.N., Charleton, West Virginia, 1998.
  - 12) 西澤辰男: 3次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発, 土木学会舗装工学論文集, Vol.5, pp.112-121, 2000.
  - 13) 西澤辰男: 3次元 FEM に基づいたコンクリート舗装横目地におけるダウエルバーモデル, 土木学会論文集 No.683/V-52, 145-156, 2001.
  - 14) 山田嘉昭: 塑性・粘弾性, 有限要素法の基礎と応用シリーズ 6, 培風館, 1980.
  - 15) White, T.D., Zaghoul, S.M., Anderton, G.L., and Smith, D.M.: Pavement Analysis for Moving Aircraft Load, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, pp.436-446, 1997.
  - 16) Dong, Q., Hachiya, Y., and Matsui, K.: 3D Finite Element Analysis of Aircraft Pavement due to Moving Wheel Loads, *Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 443-457, 2002.
  - 17) Huang, Y.H.: *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc., pp.338-344, 1993.
  - 18) 西澤辰男, 村田芳樹, 中川達裕: 薄層ホワイトトッピング工法におけるコンクリート版のそり応力, 土木学会舗装工学論文集, Vol.6, pp.176-186, 2000.
  - 19) Himeno, K., Watanabe, T., and Maruyama, T.: Estimation of the Fatigue Life of Asphalt Pavement, *Proceedings of 6th International Conference on Structural Design of Asphalts Pavements*, Ann Arbor, USA, pp.272-289, 1987.
  - 20) Rowe, G.M., and Brown, S.F.: Fatigue Life Prediction Using Visco-Elastic Analysis, *Proceedings of 8th International Conference on Asphalt Pavement*, Seattle, Washington, pp.1109-1122, 1997.

(2002.6.3 受付)

## DYNAMIC BEHAVIORS OF ULTRA THIN WHITE TOPPING STRUCTURE UNDER TRAFFIC LOADS

Tatsuo NISHIZAWA, Yoshiki MURATA and Katsuro KOKUBU

Whitotopping is a rehabilitation method which constructs thin concrete slabs over an existing asphalt pavement. The advantage of the method is that the concrete slab and asphalt layer are combined and carry traffic loads together. The mechanical contribution of the asphalt layer is relatively large in this structure. Therefore, a rational structural model that is able to account for the mechanical behavior of the asphalt layer is required in its structural design. In this study, a structural model based on 3 dimensional finite element method was developed. The model uses the generalized Voigt model to consider the vico-elastic nature of asphalt materials. The model was verified by comparing computed results with experimental ones. Furthermore, the mechanical behaviors of the whitotopping structure were examined in terms of structural design.