

# 移動輪荷重が作用する空港舗装の 3次元有限要素解析

董 勤喜<sup>1</sup>・松井邦人<sup>2</sup>・八谷好高<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 Ph.D 国土交通省国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室（運輸施設整備事業団）

（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）

<sup>2</sup> フェロー会員 Ph.D 東京電機大学 理工学部建設環境工学科（〒350-0394 比企郡鳩山町石坂）

<sup>3</sup> 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）

本論文は、3次元有限要素法を用いて航空機輪荷重に相当する移動荷重による滑走路の動的応答解析を行っている。滑走路を有限要素で離散化し、時間領域の積分にはニューマークβ法を用いている。ここでは航空機のタイヤ圧を滑走路表面への等分布荷重としてモデル化している。航空機タイヤが作用する要素と節点を効率的に決定する方法を提案している。使用している有限要素は8節点アイソパラメトリック要素と呼ばれるものである。滑走路を構成する材料はすべて線形弾性体と仮定している。走行する輪荷重による動的応答を解明することが本研究の目的であり、走行速度、アスファルト層の厚さ、輪荷重配置が応答に及ぼす影響について考察している。最後に荷重の種類と応答との関係を調べるため、移動荷重、静的荷重と衝撃荷重の応答を比較している。

**Key words:** 3D FEM, dynamic response, runways, moving wheel loads, detection

## 1. はじめに

近年、大型航空機の離着陸回数が急速に増加しており、滑走路に疲労によるひび割れが発生する傾向が顕著になってきている。1950年代に建設された滑走路には表層が薄いものがあり、載荷領域の外側でも舗装に生じる曲げによりアスファルトコンクリート表面で引張ひずみによりひび割れが発生したことが報告されている<sup>1)</sup>。その後アスファルトコンクリート層を厚くしたところ、下面に引張ひずみによるひび割れが発生した<sup>2)</sup>。その結果、アスファルトコンクリート下面における水平引張ひずみが設計基準に採用されるようになってきた。このひび割れに対する考え方と線形弾性理論とを用いて設計法が開発されてきた<sup>3)</sup>。しかしながら、この方法は静的解析に基づいており、荷重が走行するという動的な影響を無視している。

コンクリート舗装に関する多くの研究では、問題を単純化して考え、走行荷重を受ける版としてモデル化している。両端単純支持あるいは固定支持された版として、Wuら<sup>4)</sup>は移動荷重による動的応答解析を行っている。Panら<sup>5)</sup>は、境界要素法と有限要素法を組み合わせ、移動荷重の作用を受ける半無限弾性体で支持された、大きさが有限の版を解析している。Taheriら<sup>13)</sup>は、色々な境界条件

を考慮して、有限の大きさの版が移動荷重の作用を受けるときの過渡応答現象を解析している。この研究では古典的版理論に基づく構造インピーダンス法を用いている。Zamanら<sup>14)</sup>は、Mindlinの厚肉版理論を用いてコンクリート舗装の動的解析を行い、せん断変形の影響を考察している。Kimら<sup>8)</sup>は、フーリエ変換を用いて移動荷重によるウインクラー基礎で支持された無限版の解析を行っている。最近では、Huangら<sup>16)</sup>は有限帯理論を用いて移動加速度を受けるウインクラー基礎上の版の研究を行っている。

コンクリート舗装と比べ、移動荷重を受けるアスファルト舗装の研究に対する関心は低く、あまり行われてこなかった。Hardyら<sup>15)</sup>はたたみ込み積分を用いて移動荷重による舗装の応答を算出している。Gunaranteら<sup>10)</sup>は、移動荷重による剛性マトリックス法と高速フーリエ変換を組み合わせ、走行車両を応力パルスでモデル化して解析を行っている。Zafirら<sup>12)</sup>は、走行車両荷重による舗装の応答を計算するため、連続体理論に基づく有限層厚モデルを開発している。このような問題に対する既存の解決法は解析的な考え方に重点をおいており、単軸荷重が対象となっている。複数の軸荷重が移動するような複雑な舗装の挙動解析には適さない。また、汎用FEMパッケージを

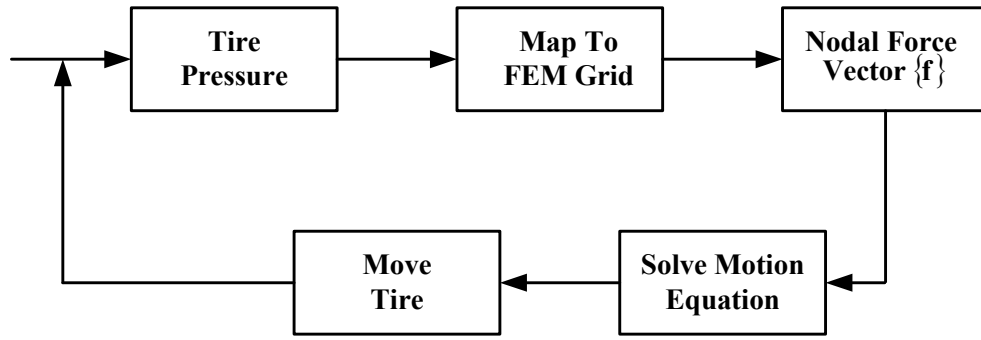


図-1 移動荷重の応答解析手法のフロー

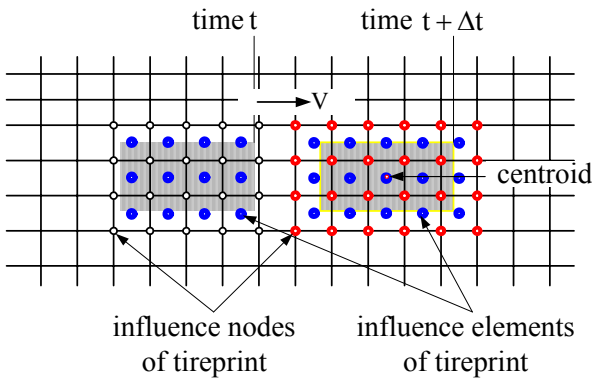


図-2 航空機車輪により影響を受ける要素と節点

用いて直接的に数値積分する試みもある。ZaghloulとWhiteら<sup>7,11)</sup>はABAQUSを用いて移動荷重による舗装の3次元応答解析を行っているが、解析時間が膨大になるため単軸荷重の簡単な解析にとどまっている。これらの研究の多くは、荷重の大きさを一定としている。

本研究では、移動する航空機タイヤの作用する要素と節点を効率的に検出し、舗装の挙動を解析できる3次元FEMプログラムを開発している。タイヤ接地圧は表面に鉛直に分布する荷重として処理している。8節点アイソパラメトリック要素を用いて滑走路をモデル化している。本ソフトの特徴は複雑な荷重条件と自由度が70000以上になる大きな問題を、PCを用いて効率的に計算できることである。本論文ではこのプログラムを用いて、移動する航空機の輪荷重に対する応答を算出し、移動荷重の速度、アスファルトコンクリート層の厚さ、車輪配置が応答に及ぼす影響について考察した。移動荷重、静的荷重と衝撃荷重の応答を比較した。

## 2. 有限要素を用いた動的解析

移動荷重を受ける舗装構造の動的有限要素解析においては、移動する車輪が舗装のどの位置に作用しているか

判断し、関連する要素の節点力に変換することが重要になる。特に、航空機のように荷重個数が多く、しかも走行速度が変化する場合には解析が容易ではない。

図-1は動的応答解析手法のフローである。

自由度 $n$ の舗装構造が移動輪荷重の作用を受けるとき、運動方程式は式(1)で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

この運動方程式の初期条件は  $\{\dot{u}(0)\} = \{0\}$  と  $\{u(0)\} = \{0\}$  である。  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスである。  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$  は、それぞれ加速度、速度、変位ベクトルであり、  $\{f(t)\}$  は移動車輪により舗装に作用する荷重ベクトルである。

時間領域で動的解析を行う場合、減衰マトリックスに剛性比例型を用いるのが最も一般である。ここでもそのモデルを用いて、  $[C] = \alpha[K]$  とした。ここで  $\alpha$  は減衰の程度を示すパラメータである。

本研究では、ニューマーク  $\beta$  法<sup>4)</sup>を用いて運動方程式を積分している。時間ステップ  $t + \Delta t$  における応答は次の式を解いて求めることができる。

$$[\tilde{K}]\{u\}_{t+\Delta t} = \{\tilde{f}\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

ここに、

$$[\tilde{K}] = a_0[M] + (1 + \alpha a_1)[K] \quad (3)$$

$$\{\tilde{f}\}_{t+\Delta t} = \{f\}_{t+\Delta t} + [M](a_0\{u\}_t + a_2\{\dot{u}\}_t + a_3\{\ddot{u}\}_t) + \alpha[K](a_1\{u\}_t + a_4\{\dot{u}\}_t + a_5\{\ddot{u}\}_t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= 1/\beta\Delta t^2, \quad a_1 = \delta/\beta\Delta t, \quad a_2 = 1/\beta\Delta t, \\ a_3 &= 1/2\beta - 1, \quad a_4 = \delta/\beta - 1, \quad a_5 = (\delta/2\beta - 1)\Delta t, \\ a_6 &= \Delta t(1 - \delta), \quad a_7 = \delta\Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

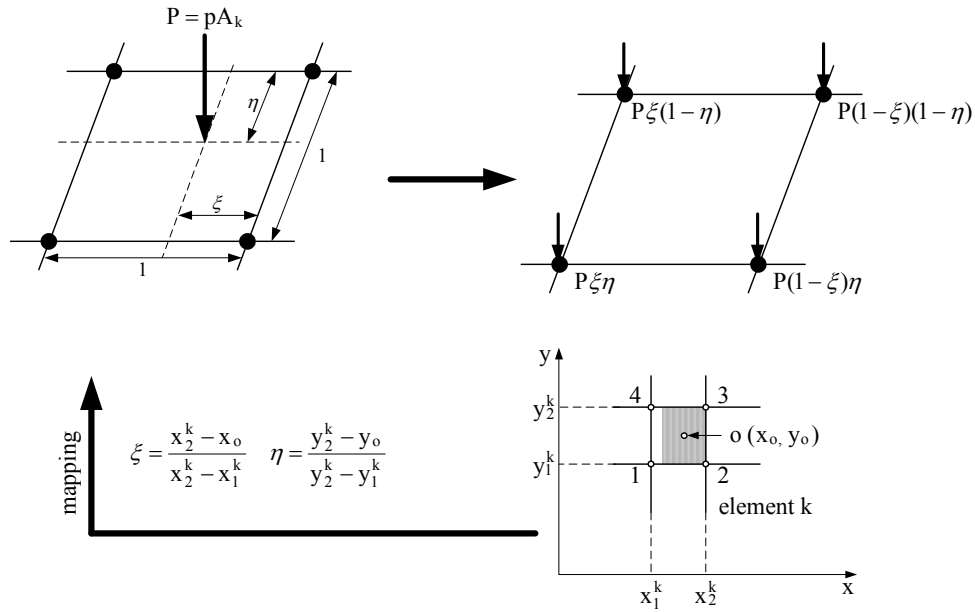


図-3 等価な節点力

式(2)を解いて、 $t + \Delta t$ における節点変位を求めると、節点速度と加速度は次の式から計算できる:

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = a_0(\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} - \{\dot{u}\}_t) - a_2\{\ddot{u}\}_t - a_3\{\ddot{u}\}_t \quad (6)$$

$$\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{u}\}_t + a_6\{\ddot{u}\}_t + a_7\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} \quad (7)$$

ここに、 $\Delta t$ は時間刻みであり、数値積分の安定性を重視して $\beta = 0.25$ 、 $\delta = 0.5$ の値を用いている<sup>4)</sup>。移動荷重が作用するとき、荷重の作用位置は時間とともに変化する。したがって、移動荷重を過渡的な節点力で表すことが必要となる。移動荷重が接地面のどの要素表面でも全域に荷重が作用しているような場合は、要素分割はタイヤ幅形状と走行速度を考慮して決めることになり、荷重ベクトルの作成は簡単であるが解析コードとしての柔軟性に欠ける。本研究では図-2のように航空機タイヤの寸法、解析時間刻みおよび移動速度から荷重が全面に作用する要素も部分的に作用する要素もすべて検出し、形状関数を用いてこれらの要素の節点力に変換している。荷重は一般に複数の要素表面に分布している。荷重の重心位置がどの要素の中にあるのか明らかになると、タイヤ形状から荷重が作用しているすべての要素を決定できる。それぞれの要素で次式により節点力を算定できる。

$$\{f\}_i^e = \int_{\Omega} [N]^T p dS \quad (8)$$

ここに、 $[N]$ は形状関数、 $p$ はタイヤ接地圧である。

式(8)で求めた要素の節点荷重ベクトルを重ね合わせて、時間 $t$ における全体荷重ベクトル $\{f\}_t$ を求める。タイヤ接地圧が作用していない要素の節点力は当然ゼロとなる。

図-2は航空機車輪の影響を受ける要素と節点を示す。図から明らかなように、タイヤ接地圧が全体に作用している要素と、部分的に作用している要素がある。部分的にタイヤ接地圧が作用している要素では、その要素に作用するタイヤ接地圧の合力とその重心を求め、その合力を図-3のように節点力に分散する。時刻 $t$ における全体節点力ベクトル $\{f\}_t$ は要素ベクトルを組み込んで作成される。

### 3. 計算手順

移動輪荷重を受ける空港舗装の動的解析を実施するとき、ニューマークの時間積分法を用いて運動方程式を解いている。積分にあたり時間刻みを一定としている。計算手順は次のように行なっている。

- (1) 全体質量マトリックス $[M]$ と剛性マトリックス $[K]$ を計算する。
- (2) 初期速度ベクトル $\{\dot{u}(0)\}$ と変位ベクトル $\{u(0)\}$ を作成し、加速度ベクトル $\{\ddot{u}(0)\}$ を計算する。
- (3) 時間刻み $\Delta t$ を選択し、積分定数 $a_0$ と $a_7$ を計算する。
- (4) 式(3)のマトリックス $[\tilde{K}]$ を作成し、三角化する。
- (5) 時間ステップ $k = 1, 2, \dots$ における計算を実行する。
  - a 航空機の種類と速度により航空機のそれぞれのタイヤ位置 $(x_i, y_i)$ を計算する。
  - b 舗装とタイヤの接地面と重なる要素と節点番号を

検出する。

- c 等価な節点力を計算し、重ね合わせを行う。
- d 式(4)に従い $\{\tilde{f}\}_{t+\Delta t}$ を算出する。
- e 時刻を順次変化して式(2)を解き、 $\{u\}_{t+\Delta t}$ を計算する。
- f 式(6),(7)より、節点速度および加速度ベクトルを求める。
- g 時間範囲の終了までの上で述べたアルゴリズムを繰り返して計算する。

## 4. 例題と数値計算結果

### (1) 問題の説明

羽田空港のC滑走路に相当する空港舗装構造が、一定の速度で移動する輪荷重の作用を受けているような問題を想定している。この舗装断面を図-4に示す。FWD試験を行ない、たわみ形状からLMBS<sup>17)</sup>を用いてこの舗装構成層の弾性係数を求めている。この断面の材料特性を表-1に記す。減衰は、特別な場合を除き剛性の値の0.5%とした。

本研究では、解析するにあたり3次元有限要素を用いた離散化モデルで舗装構造を表現している。解析対象区間は長さ20m、幅20m、深さ10mである。幾何学的な対称性を考慮して、図-5のように解析領域の半分を有限要素で離散化して、移動荷重を受ける滑走路の動的解析を行っている。車輪が通過するパスにある要素の長さとは幅は、舗装とタイヤの接地面を長方形で近似した長さとは幅に等しい。解析で考慮した車輪配置は図-6(a)に示すような単軸荷重、二軸荷重、三軸荷重である。解析には8節点ソリッド要素を用いている。解析に使用する全節点数は22540、全要素数は18720となる。すべての解析をプロセッサ800MHz、メモリー768MbのGateway GP7で行なった。時間領域160ステップの計算に要したCPU時間は24分であった。

空港舗装設計マニュアルによると、タイヤと舗装の接地面を、図-6(d)のように1個の長方形(0.4L×0.6L)と半径0.3Lの2個の半円で近似している<sup>18)</sup>。Lは接地面の全長である。実際の接地面積は0.1645m<sup>2</sup>であり、この場合L=0.56mとなる。それは長さ0.5mで幅0.336mの長方形にほぼ等しく、その長方形の面積は0.168m<sup>2</sup>となる。ボーイング747-400の4輪からなる1脚の総荷重は910kNであり、この場合タイヤ圧は1.35MPaとなる。

たわみ性舗装を設計するとき、その設計基準にアスファルト層下面の水平引張りひずみと路床上面の鉛直圧縮ひずみ $\epsilon_{zz}$ が用いられる。したがって、本論文では、表面たわみ、および図-6(b), (c)に記したタイヤ中心位置に沿ったアスファルト要素E<sub>A</sub>における $\epsilon_{xx}$ と $\epsilon_{yy}$ 、脚中心位置すなわちモデルの対称軸に沿った路床要素E<sub>S</sub>の $\epsilon_{zz}$ を求めた。

### (2) 単軸移動荷重

等速度V=36km/hで単軸荷重が移動するとき、解析領域中央の荷重図心点での表面たわみ、AC層要素E<sub>A</sub>と路床要素E<sub>S</sub>のひずみ応答履歴は図-7のようになる。アスファルト層下面の荷重走行方向のひずみ $\epsilon_{xx}$ は引張と圧縮の状態が発生する。最大引張りひずみは248μ、圧縮ひずみは最大引張りひずみが発生する前後で起こり、最大圧縮ひずみは43μである。これと直交する水平方向のひずみ $\epsilon_{yy}$ は、引張りひずみだけが発生し、荷重の中心点直下で最大、その値は170μとなる。路床上面の鉛直方向の垂直ひずみ $\epsilon_{zz}$ は、移動荷重により常に圧縮ひずみが生じ、移動荷重の中心点が直上にあるとき圧縮ひずみは最大になり、その値は287μである。

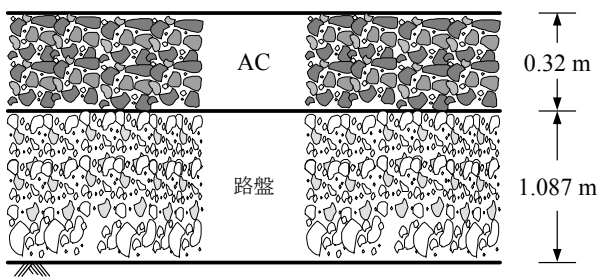
図-8は、等速度V=36km/hで移動する単軸荷重が-5m、0m、5mに到達したときの表面たわみ、AC層下面、路床上面ひずみを記している。図から明らかなように、荷重の大きさが一定のとき、表面たわみやひずみの応答波形は形を変えることなく移動荷重とおなじ速さで移動する。移動荷重が影響する範囲はタイヤ中心点近傍にあることが分かる。

### (3) 航空機速度の影響

図-9は単軸移動荷重直下の中央点で表面たわみ、AC要素E<sub>A</sub>と路床要素E<sub>S</sub>のひずみと航空機速度の関係である。この図より、移動速度が速くなるほど表面たわみが小さくなっているが、速度が4倍になってもその減少の程度は5%と小さい。航空機の速度が36km/hから144km/hに増加するとアスファルト層の水平ひずみはかなり減少する。アスファルト層下面の荷重移動方向のひずみ $\epsilon_{xx}$ は15%減少し、移動方向に直交する横断方向では垂直ひずみ $\epsilon_{yy}$ は8%減少する。アスファルト層のひずみと対照的に路床上面の鉛直ひずみは僅かに増加する。また、移動速度が速くなると応答のピーク値は、接地面の図心位置より僅かであるが進行方向へ移動する。

### (4) 厚さの影響

AC層の厚さの変化と応答との関係を調べるため、AC層の厚さh=32cmを基準として±25%変化させたh=24cm, 32cm, 40cmの3種類の厚さを考えた。図-10は単軸移動荷重直下の中央点で表面たわみ、AC要素E<sub>A</sub>と舗装センターライン直下の路床要素E<sub>S</sub>のひずみとAC層の厚さの関係である。この図より、AC層が厚くなると応答は一般に減少しているAC層の厚さが25%増加すると、最大たわみは13%減少し、AC層下面のひずみ $\epsilon_{xx}$ と $\epsilon_{yy}$ が22%と24%ずつ減少する。路床のひずみ $\epsilon_{zz}$ は16%減少する。AC層の厚さが25%減少すると、最大たわみは18%増加している。ところがAC層下面のひずみと $\epsilon_{xx}$ と $\epsilon_{yy}$ は33%と41%ずつ増加する。路床のひずみ $\epsilon_{zz}$ は19%増加する。移動荷重により着



路床

図-4 羽田空港滑走路Cの断面形状

表-1 舗装構成層の材料特性

| 舗装構成層 | 弾性係数<br>(MPa) | 質量密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比 |
|-------|---------------|------------------------------|-------|
| AC    | 4645          | 2300                         | 0.35  |
| 路盤    | 166           | 1900                         | 0.35  |
| 路床    | 125           | 1900                         | 0.35  |

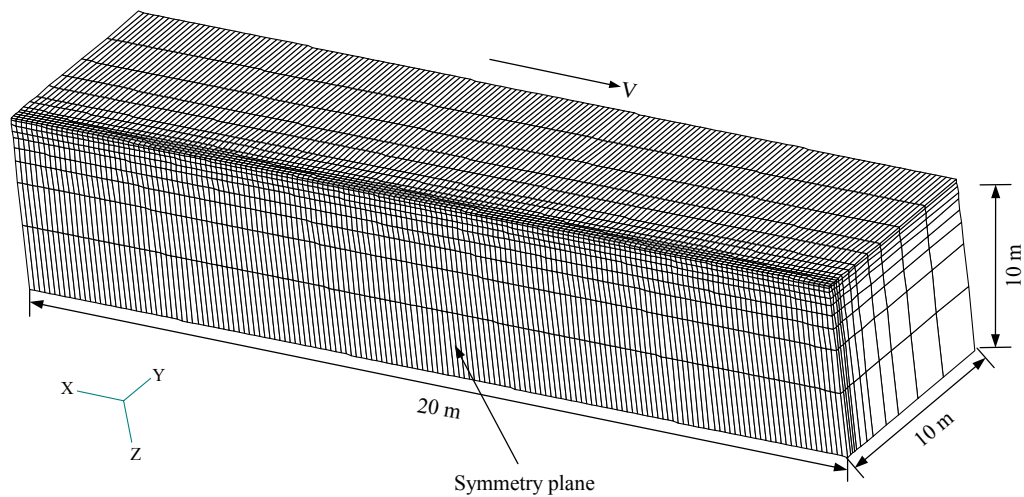


図-5 羽田空港滑走路Cの3次元有限要素分割

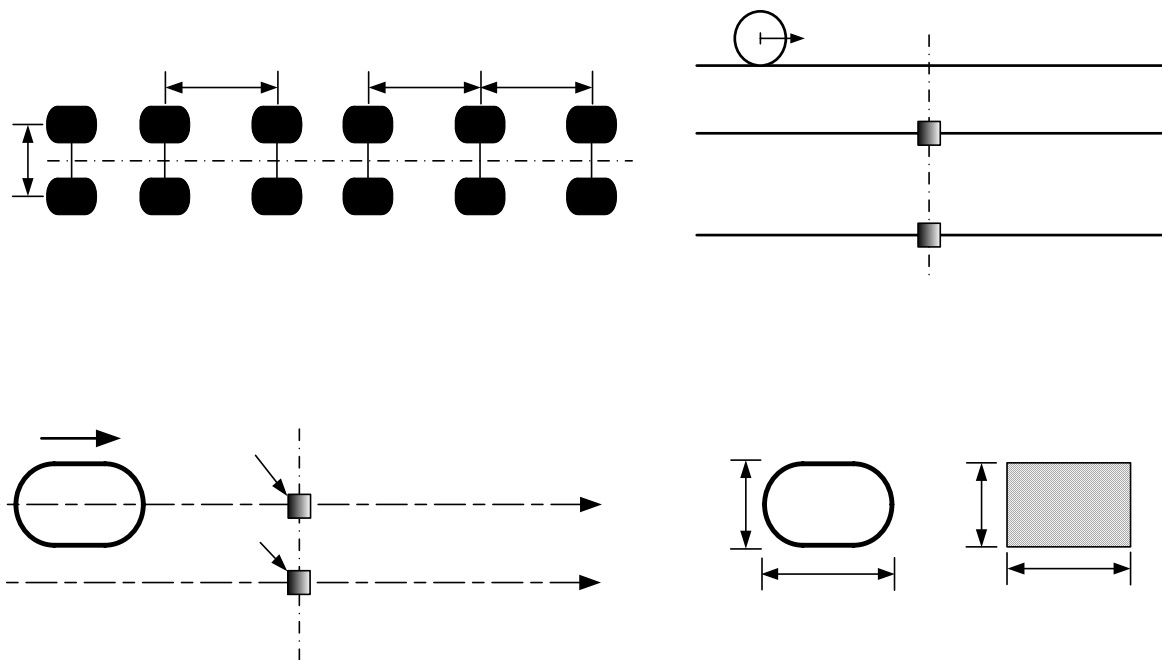


図-6 車輪配置，タイヤおよび舗装のセンターライン下のアスファルト層および路床の要素位置と等価載荷面積

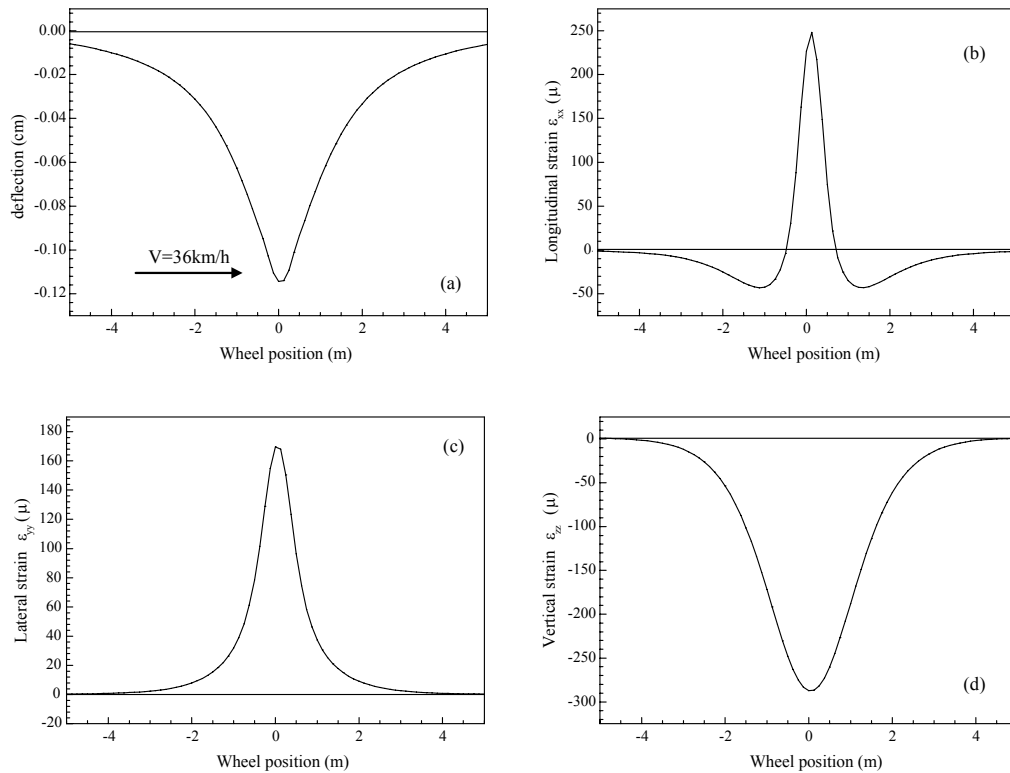


図-7 単軸荷重による着目点の表面たわみとひずみの変化

(a) たわみ; (b) AC要素E<sub>A</sub>のひずみ $\epsilon_{xx}$ ; (c) AC要素E<sub>A</sub>のひずみ $\epsilon_{yy}$ ; (d) 路床要素E<sub>s</sub>のひずみ $\epsilon_{zz}$

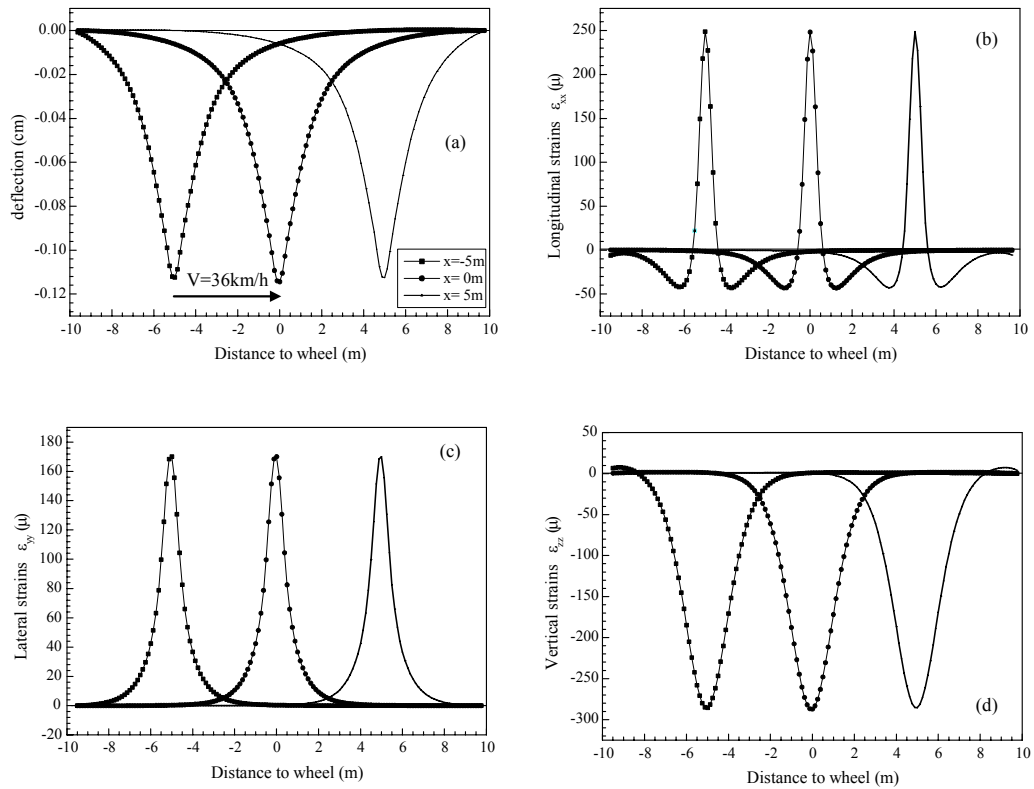


図-8 単軸荷重による表面たわみとひずみの変化と着目点の関係

(a) たわみ; (b) AC層下面のひずみ $\epsilon_{xx}$ ; (c) AC層下面のひずみ $\epsilon_{yy}$ ; (d) 路床のひずみ $\epsilon_{zz}$

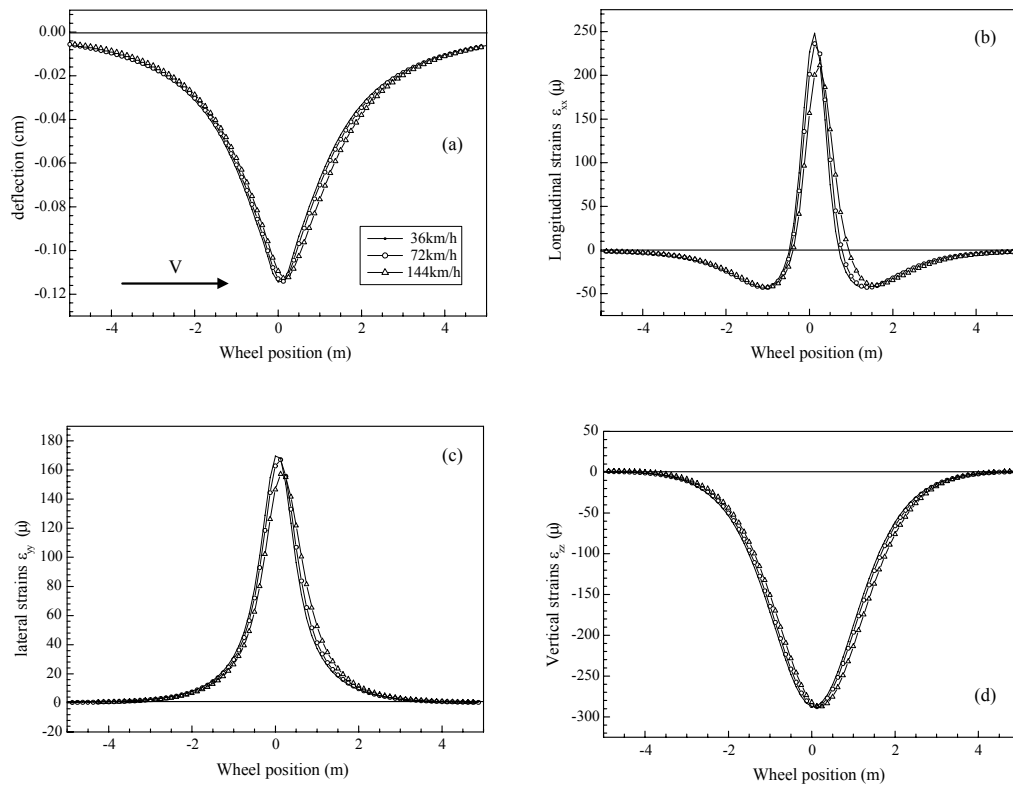


図-9 航空機速度と表面たわみ、ひずみの変化関係

(a) たわみ; (b) AC要素 $E_A$ のひずみ $\epsilon_{xx}$ ; (c) AC要素 $E_A$ のひずみ $\epsilon_{yy}$ ; (d) 路床要素 $E_S$ のひずみ $\epsilon_{zz}$

目点のAC層下面にはまず圧縮ひずみが発生、その後引張ひずみが発生し、荷重が通過するとまた圧縮ひずみが発生する。AC層の厚さが薄いほど圧縮ひずみも引張ひずみも大きくなる。この大きな引張ひずみ $\epsilon_{xx}$ 、あるいは正負の繰り返しひずみにより横断方向にひび割れが発生する可能性があることを示している。

#### (5) 車軸配置の影響

図-11(a)-(d)は複輪、複々輪および6輪からなる主脚（以下では単軸、二軸、三軸と称す）の荷重重心が移動するとき着目点の応答を示している。三軸は広い範囲に分散して荷重が作用するため応答も広い範囲に亘っている。解析では個々のタイヤの接地圧を1.35MPaとしているので三軸は単軸の3倍の荷重が作用していることになる。応答のピーク値も $\epsilon_{xx}$ を除き三軸の場合最も大きくなっている。しかし、 $\epsilon_{xx}$ については荷重重心の直下の引張ひずみは単軸が最も大きく、二軸、三軸の順であり、その前後の現れる圧縮ひずみのピーク値は三軸で最大となり、二軸、単軸となっている。二軸の場合、縦断方向最大引張ひずみ $\epsilon_{xx}$ は208 $\mu$ 、最大圧縮ひずみは68 $\mu$ となり、横断方向最大引張ひずみ $\epsilon_{yy}$ は207 $\mu$ となっている。三軸の場合、縦断方向最大引張ひずみ $\epsilon_{xx}$ は180 $\mu$ 、最大圧縮ひずみは78 $\mu$ となり、横断方向最大引張ひずみ $\epsilon_{yy}$ は238 $\mu$ となっている。路床上面のピーク圧縮ひずみ $\epsilon_{zz}$ は、それぞれ508 $\mu$ と647 $\mu$

となり、引張ひずみは発生しない。

#### (6) 静的荷重、衝撃荷重と移動荷重の応答の比較

ここでは単軸荷重が走行経路上解析領域中央に到達したとき(36km/h)の応答形状と、その位置に静的荷重や衝撃荷重が作用した時の応答を比較している。衝撃荷重の応答はピーク値に達したとき走行方向の応答形状を示している。解析では静的荷重の大きさ、衝撃荷重のピーク値と移動荷重の大きさを等しいとしている。衝撃荷重を調和関数 $f(t)=227.5\sin^2(20\pi t)$  kNで表し、荷重作用時間は $t=0.0-0.05$ 秒として動的解析を行った<sup>19)</sup>。ピーク値227.5kNは航空機の車輪に作用する荷重を想定している。動的解析の時間ステップ幅は0.002秒、解析時間区間は0.06秒としている。静的荷重、衝撃荷重と移動荷重作用時の荷重作用点直下の表面たわみ、AC層下面と対称軸下の路床上面のひずみを図-12に示す。図-12(a)を見ると静的と移動荷重で計算したたわみ形状はほぼ同じであるが、衝撃荷重によるたわみ形状は、ピーク値で9.7%ほど小さい。図-12(b), (c)は移動荷重、静的荷重、衝撃荷重によるアスファルト下面の応答ひずみ $\epsilon_{xx}$ と $\epsilon_{yy}$ を示している。衝撃荷重による応答はAC表面の着目点において表面たわみが最大になったときのたわみとひずみである。移動荷重と静的荷重のひずみ応答はほぼ等しい。衝撃荷重の応答ひずみの形状は似ているものの大きさは両者に比べピーク値で

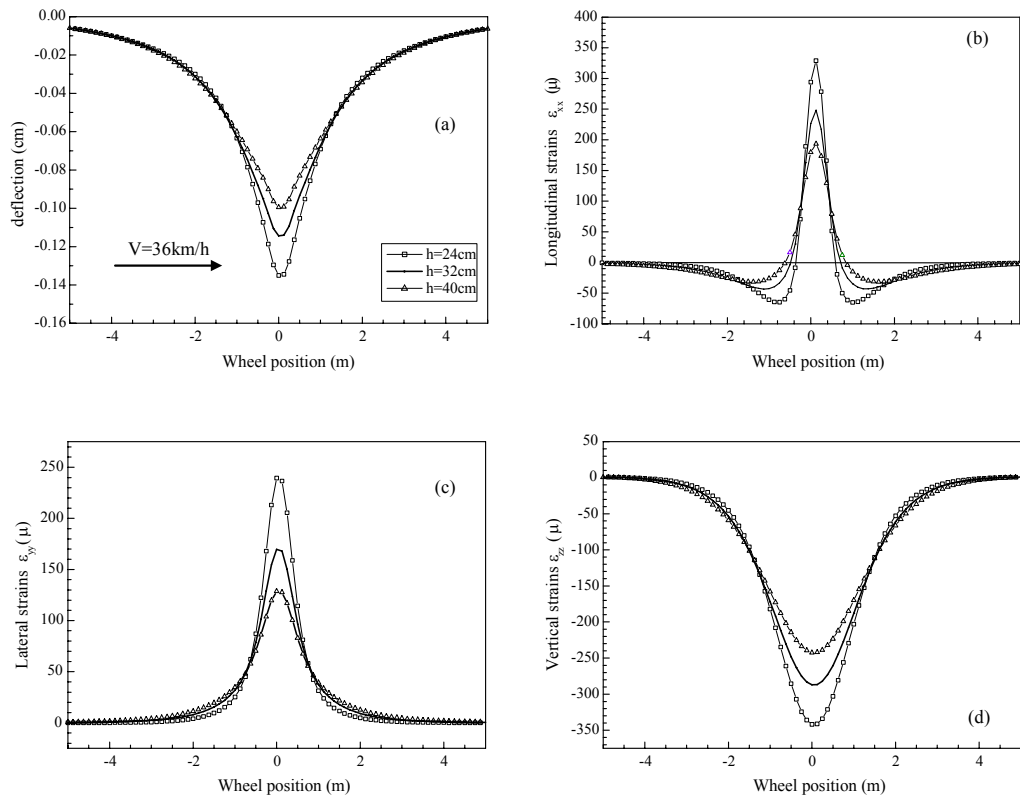


図-10 AC厚さと表面たわみ, ひずみの履歴関係

(a) たわみ; (b) AC要素 $E_A$ のひずみ $\epsilon_{xx}$ ; (c) AC要素 $E_A$ のひずみ $\epsilon_{yy}$ ; (d) 路床要素 $E_S$ のひずみ $\epsilon_{zz}$

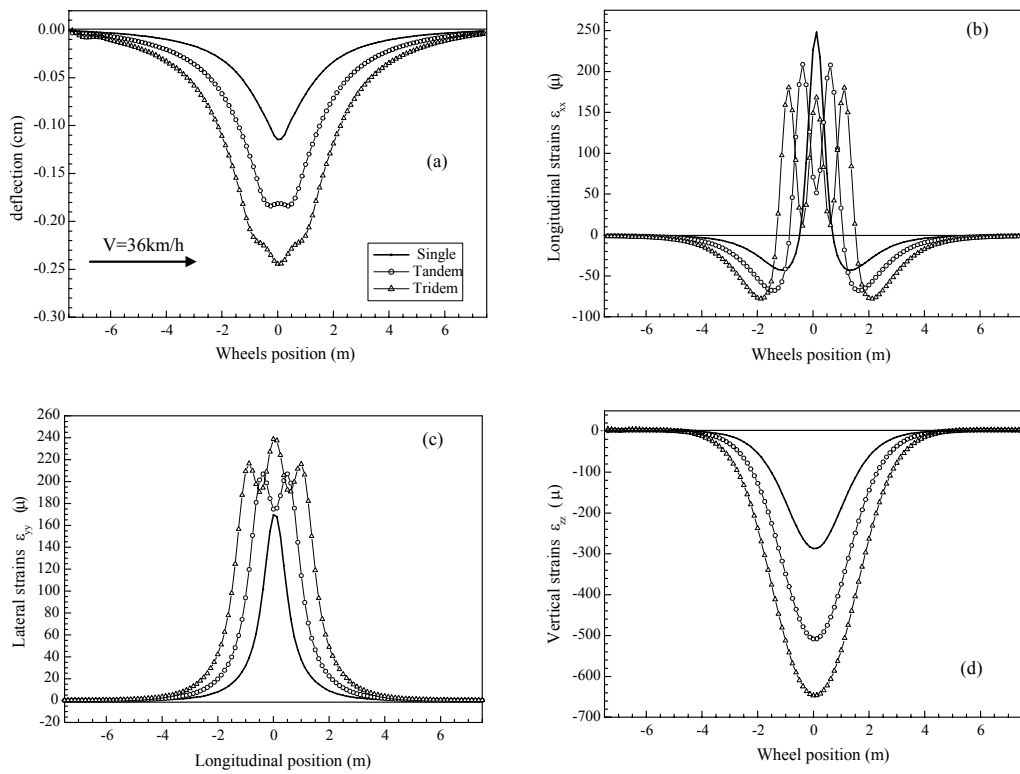


図-11 主脚形式と表面たわみ, ひずみの応答

(a) たわみ; (b) AC要素 $E_A$ のひずみ $\epsilon_{xx}$ ; (c) AC要素 $E_A$ のひずみ $\epsilon_{yy}$ ; (d) 路床要素 $E_S$ のひずみ $\epsilon_{zz}$

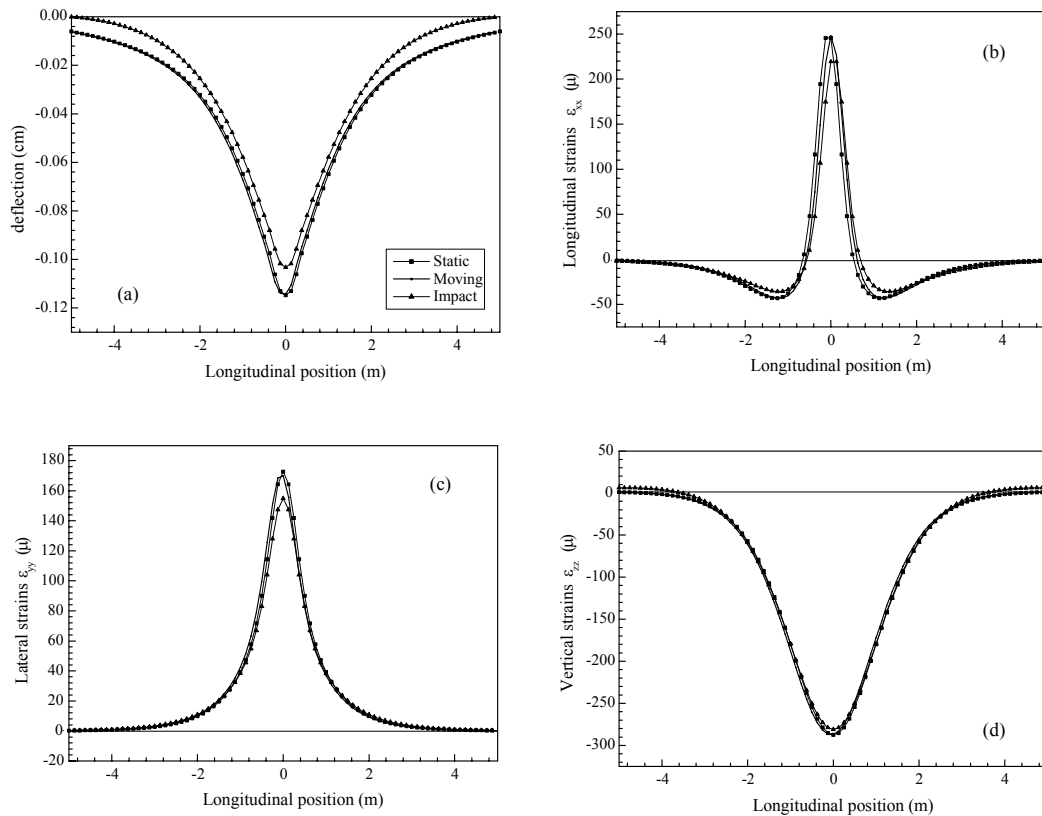


図-12 静的、衝撃と移動荷重による表面たわみとひずみの応答

(a) たわみ; (b) AC層下面のひずみ $\epsilon_{xx}$ ; (c) AC層下面のひずみ $\epsilon_{yy}$ ; (d) 路床上面のひずみ $\epsilon_{zz}$

11.6%程度小さい。路床上面の鉛直ひずみについても、図-12(d)から明らかのように同様の傾向を示している。

## 5. 結論

本研究では、移動する車輪の作用位置と接地領域を決定する効率的な方法を開発し、移動する単軸荷重、二軸荷重、三軸荷重と滑走路の動的解析を行った。色々なパラメータを変え、表面たわみ、アスファルト層下面の水平方向ひずみ、路床上面の鉛直ひずみにどのように影響するかを考察した。主な知見を整理すると以下のようになる。

- 1) アスファルト層下面の水平方向ひずみ $\epsilon_{xx}$ は、すべての車輪配置で引張ひずみとその前後に圧縮ひずみの状態が発生する。路床上面の鉛直ひずみ $\epsilon_{zz}$ は常に圧縮状態にある。
- 2) 移動荷重の速度は、動的たわみと路床のひずみにほとんど影響しない。しかし、移動荷重速度が36km/hから144km/hに増加すると、アスファルト下面の水平方向ひずみ $\epsilon_{xx}$ と $\epsilon_{yy}$ は15%ほど減少する。
- 3) AC層の厚さは動的応答に大きく影響する。層厚が薄くなると引張ひずみも圧縮ひずみも大きくなり、引張

ひずみによる破壊や正負のひずみによる疲労破壊が起りやすくなることを暗示している。

- 4) 多重輪配置は動的応答に顕著に影響する。二軸から三軸に軸配置が変わると、たわみは25%も増加し、路床上面の鉛直ひずみは21%増加する。アスファルト層下面のひずみは多重輪配置において隣り合う車輪の影響を受け、複雑に変化する。しかし、単軸の場合、アスファルト層下面の水平方向ひずみ $\epsilon_{xx}$ は二軸や三軸より大きくなっている。
- 5) 滑走路の応答は静的と移動荷重でほぼ等しいが、静的ならびに移動荷重と衝撃荷重の場合で異なっており、たわみとひずみのピーク値は衝撃荷重のほうが小さい。本研究の結果では、移動荷重による応答は移動速度が速くなると僅かに減少するが、ほぼ静止荷重の応答と同じである。道路の交差点で大きなわだちぼれ発生することは明らかであり、弾性係数の載荷速度依存性、粘弾性モデル、あるいは弾塑性モデルも検討する必要があるであろう。

**謝辞：**本研究は運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」の支援を受けて行った研究であることを記し、関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Hveem, F.N., Sherman, G.B.: California method for the structural design of flexible pavements, Proc. Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Michigan, pp.851-866, 1962.
- 2) Klomp, A.J.G., Niesman, T.W.: Observed and calculated strains at various depths in asphalt pavements, Proc. 2nd Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Michigan, pp.671-688, 1967.
- 3) Brown, S.F., Brunton, J.M., Stock, A.F.: The analytical design of bituminous pavements, Proc. Instn Civ. Engrs., 79(2), pp.1-31, 1985.
- 4) Bathe, K.J., Wilson, E.L.: Numerical methods in Finite Element Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976.
- 5) Pan, G., Atluri, S.N.: Dynamic response of finite sized elastic runways subjected to moving loads: a coupled BEM/FEM approach, Int. J. Numer. Methods Eng., 38, pp.3143-3166, 1995.
- 6) Sebaaly, P.E., Mamlouk, M.S.: Development of dynamic fatigue failure criterion, J. Transp. Eng., ASCE, 114, 1988.
- 7) Zaghoul, S. M., White, T.D.: Use of a three-dimensional dynamic finite element program for analysis of flexible pavement, Transp. Res. Rec., National Research Council, 1388, pp.60-69, 1993.
- 8) Kim, S.M., Roesset, J.M.: Moving loads on a plate on elastic foundation, J. Eng. Mech., ASCE, 124(9), pp.1010-1017, 1998.
- 9) Wu, J.S., Lee, M.L., Lai, T.S.: The dynamic analysis of a flat plate under a moving load by finite element method, Int. J. Numer. Methods Eng., 24, pp.743-762, 1987.
- 10) Gunaratne, M., Sanders, O.: Response of a layered elastic medium to a moving strip load, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 20, pp.191-208, 1996.
- 11) White, T.D., Zaghoul, S.M., Anderton, G.L., Smith, D.M.: Pavement analysis for moving aircraft load, J. Transp. Eng., ASCE, 123(6), pp.436-446, 1997.
- 12) Zafir, Z.R., Siddharthan, R., Sebaaly, P.E.: Dynamic pavement strains from moving traffic loads, J. Transp. Eng., ASCE, 120(5), pp.821-842, 1994.
- 13) Taheri, M.R., Ting, E.C.: Dynamic response of plates to moving loads: finite element method, Comp. Struct., 34(3), pp.509-521, 1990.
- 14) Zaman, M., Taheri, M.R., Alvappillai, A.: Dynamic response of a thick plate on viscoelastic foundation to moving loads, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 15(9), pp.627-647, 1991.
- 15) Hardy, M.S.A., Cebon, D.: Importance of speed and frequency in flexible pavement response, J. Eng. Mech., ASCE, 120(3), pp.463-482, 1994.
- 16) Huang, M.H., Thambiratnam, D.P.: Deflection response of plate on Winkler foundation to moving accelerated loads, Engineering Structures, 23, pp.1134-1141, 2001.
- 17) <http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/pave/hosoml/download/html>.
- 18) 空港舗装設計マニュアル, SCOPE, 1999.
- 19) 土木学会: 舗装工学, 1995.

## THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS OF AIRFIELD PAVEMENT SUBJECTED TO MOVING WHEEL LOADS

Qinxi DONG, Kunihito MATSUI and Yoshitaka HACHIYA

This paper discusses the dynamic response of airfield pavement subjected to aircraft wheel loading, using the finite element method to determine the response of the system. A 3D finite element program for dynamic analysis in time domain has been developed using Newmark integration scheme for the discretization in time domain. The dynamic response to moving aircraft wheel loads is investigated and the influences of moving load speed, thickness of asphalt layer and wheel configurations on the response are studied. The comparisons of pavement responses were also conducted for static, moving as well as impulsive forces.