

機関番号：32657
 研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560435
 研究課題名(和文) わが国の交通荷重に即した舗装の先端的解析・診断システムの開発
 研究課題名(英文) Advanced Structural Analysis and Diagnosis System
 Considering Traffic Conditions in Japan
 研究代表者
 松井 邦人 (MATSUI KUNIHITO)
 東京電機大学 理工学部・教授
 研究者番号：70112878

研究成果の概要(和文)：本研究の柱は、(1) 舗装に作用する荷重分布の計測、(2) 静的および動的舗装構造解析、(3) 維持管理に必要な舗装構造診断、である。(1)については、接地圧を計測できるセンサーを新たに開発し、フォースプレートに密に配置することにより、分布圧測定精度が向上した。(2)については、衝撃荷重の作用を受ける舗装構造の理論解を誘導した。これにより、変位や応力伝播の計算が可能となった。(3)については、舗装構造の非破壊試験として FWD 試験機が普及しているが、この試験機で計測した表面たわみから波動理論を用いて舗装を構成する各層の弾性係数、減衰係数を推定することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：The key components of the this research are development of (1) a measuring tire - pavement contact stress measuring system, (2) the static and dynamic structural analysis of pavement, and (3) a new method of diagnosis necessary for the maintenance of pavement. Regarding (1), sensors for contact stress measurement were newly developed and mounted on a force plate. It is found that contact stresses in three directions are more accurately measured. Regarding (2), theoretical solution pavement structure subjected to impulse force is derived. By using the solution, wave propagation of displacements and stresses can be more accurately predicted. Finally regarding (3), FWD testing device became popular as the nondestructive testing of the pavement structure. Layer moduli and damping coefficients can be estimated more accurately from measured surface deflections by using wave propagation solution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：舗装構造

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：3方向接地圧分布，矩形領域載荷，粘弾性，多層構造，波動理論，FWD

1. 研究開始当初の背景

わが国における舗装の構造設計は、従来、 T_A 法と呼ばれる経験に基づく方法で行われてきた。 T_A 法の最大の利点は、誰もが簡単に質の高い舗装の設計を行うことができ、わが国の道路整備に大きく寄与してきた。

近年、道路に対するニーズが高度化、多様化し、再生材利用の機運も高まっており、これまで使用されなかった新材料も舗装材料として使用することも多くなってきている。これらの新材料の使用に対しても柔軟に対応し得る設計法が求められている。その結果、海外でも、舗装の構造設計に理論を組み込んだ経験的・理論的設計法が整備されつつある。

2. 研究の目的

舗装構造に理論的な設計を導入するためには、舗装に作用する荷重、舗装を構成する各層の力学特性、気象変化の影響を明らかにし、それらを組み込んだ舗装構造解析理論を構築し、ソフトウェアを開発することが必要不可欠である。そこで、本研究では以下のことを目的とした。

(1) 接地圧分布計測システムの開発

タイヤから舗装表面に荷重は伝達する。舗装表面では鉛直方向だけでなく水平方向にも荷重が分布する。この接地圧分布を計測できる装置を開発する。

(2) 多層構造の波動伝播解析：理論構築とソフトウェアの開発

舗装は等質・等方性の多層弾性構造として解析を行うが、ローラーで締め固められて構築されるため直交異方性があると言われている。現在、直交異方性を考慮した多層構造解析に対して円柱座標系とハンケル変換を用いて理論解を誘導し、静的および動的解析を行うことができるソフトウェアを開発する。

(3) FWD 試験、小型 FWD 試験の測定データを用いた新しい舗装構造評価法の開発

FWD 試験は舗装表面に衝撃荷重を作用させ、舗装方面を伝播する鉛直方向の波を計測できる。従来衝撃荷重のピーク値と伝播する波の着目点におけるピーク値を静的な荷重とたわみのデータと見なして舗装構造を評価している。本研究では、両試験とも衝撃荷重試験であることを考え、動的逆解析を行っている。従来舗装の動的解析に FEM を用いていたが、舗装を構成する各層をフォークとモデルで仮定して、波動伝播理論の理論解を誘導している。そして、測定データを用いて診断できるシステムを構築した。

3. 研究の方法

(1) 接地圧分布計測システムの開発

1個のセンサーの正方形断面に4枚のひずみゲージを接着し、鉛直方向と水平2方向の力の成分を検出できるように設計した。

(2) 多層構造の波動伝播解析：理論構築とソフトウェアの開発

各層をフォークとモデルで表すことができるものと仮定し、衝撃荷重が円形等分布するときの波動伝播方程式の理論解を、ハンケル変換、FFTを用いて誘導した。

(3) 新しい舗装構造評価法の開発

FWD 試験、小型 FWD 試験の測定データと波動伝播解析から求めた表面たわみ波形と測定波形とが着目点において一致するように各層の弾性係数と減衰係数を推定する動的逆解析法を開発した。

4. 研究成果

(1) 接地圧分布計測システムの開発

図-1のようにセンサー躯体の中央部の断面を減らしてその4側面にひずみゲージを付着している。このセンサーをマウントしたフォースプレートを図-2に記す。

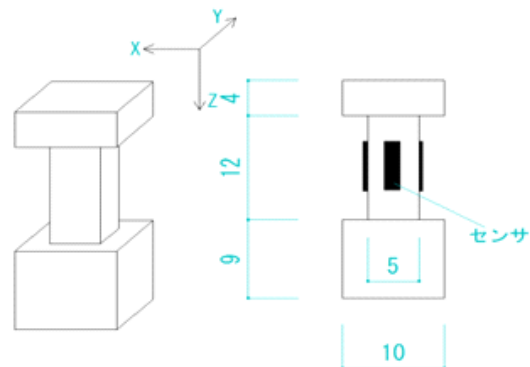


図-1 接地圧測定センサー（単位：mm）

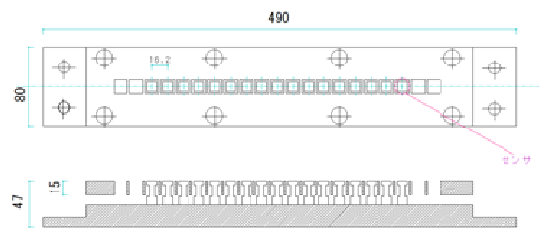
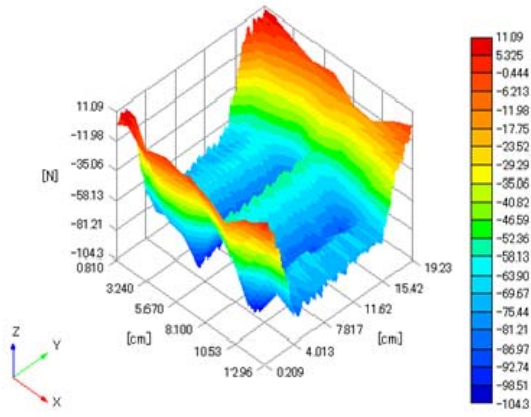
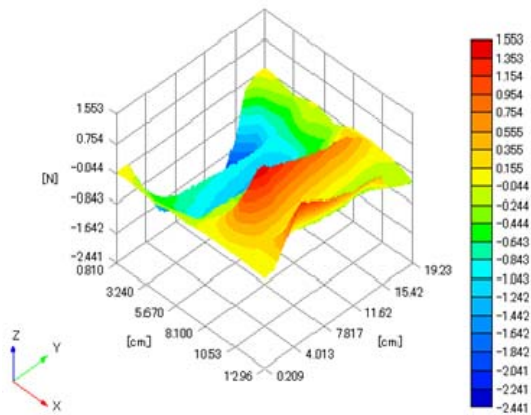


図-2 フォースプレート

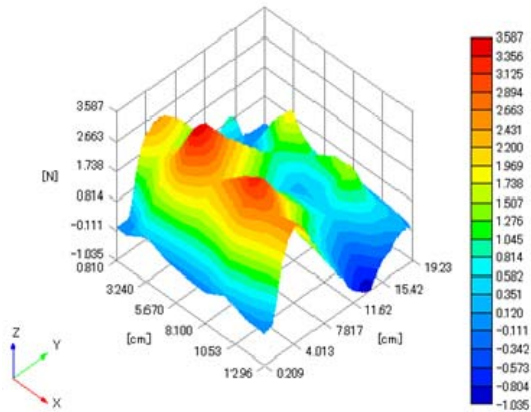
車輪がフォースプレートを通過するとき、発生したひずみから接地圧分布を推定する。図-3に測定した接地圧分布の一例を示す。



(a) 鉛直方向分布図



(b) 左右方向分布図



(c) 前後方向分布図

図-3 タイヤと舗装表面の接地圧分布

(2) 多層構造の波動伝播解析
 舗装の各層が互いに平行、等質・等方なフォークトモデルで構成された多層構造であると仮定し、その表面に等分布荷重が作用するとき、軸対称の波動伝播式で書くことができる。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (1b)$$

ここに、 u 、 w はそれぞれ r および z 軸方向の変位、 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 、 τ_{rz} は微小要素の応力である。変位とひずみと関係式は、

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (2)$$

ε_r 、 ε_θ 、 ε_z は、それぞれ σ_r 、 σ_θ 、 σ_z に対応する垂直ひずみ。 γ_{rz} は τ_{rz} に対応するせん断ひずみである。図-4に記すフォークトモデルの応力とひずみの関係式は、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \left(E + F \frac{d}{dt} \right) \begin{pmatrix} a+2b & a & a & 0 \\ a & a+2b & a & 0 \\ a & a & a+2b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$$a = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad b = \frac{1}{2(1+\nu)}$$

E は弾性係数、 F は粘性係数、 ν はポアソン比である。多層構造では、それぞれの層で材料特性や層厚が異なるが、式(1a)、(1b)、(2)、(3)の関係がすべての層で成立つ。

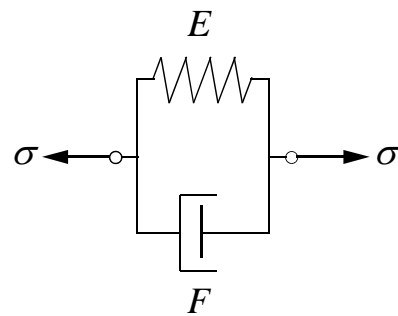


図-4 フォークトモデル

ハンケル変換とFFTを用いてこれらの式の理論解を誘導した。その解の妥当性を検証するため、図-5のような3層モデルの応答解析結果を、本研究で誘導した理論とADINAを用いたFEM解析で得られた結果と比較した。比較の一例を図-6に記す。

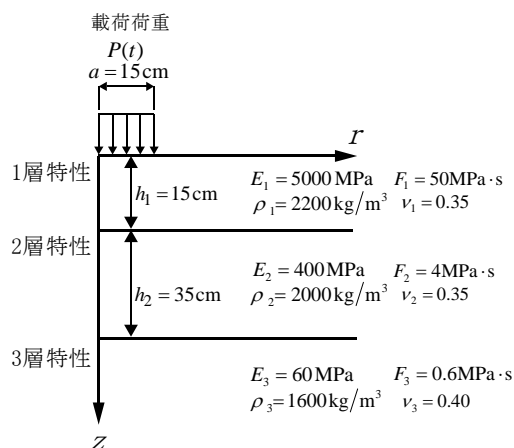


図-5 3層モデル

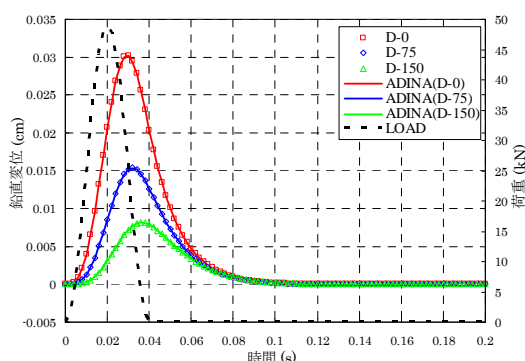


図-6 ADINA(解析領域: $Z=R=15m$)との比較

図-6より、両者のたわみがほぼ一致しており、本理論に基づき開発したプログラムの信頼性を裏付けている。

理論解はFEMと異なり、要素境界においても応力・ひずみの不連続性は存在しない。また、舗装表面に作用する衝撃荷重が、舗装内部を伝播していく様子を精度よく計算できるメリットがある。

(3) 新しい舗装構造評価法の開発

逆解析では初期値 $\mathbf{X} = (E_j, F_j)$ の値を仮定してたわみを解析し、解析たわみと測定たわみの差が最小となるようにパラメータの値を決定する。評価関数を次式のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \{u_i(t_k) - z_i(\mathbf{X}, t_k)\}^2 \quad (4)$$

ここに、 $u_i(t_k)$: 時刻 t_k における着目点 i の測定たわみ、 $z_i(\mathbf{X}, t_k)$: 時刻 t_k における着目点 i の解析たわみ、 \mathbf{X} : 未知パラメータ(層の減衰係数と弾性係数)からなるベクトル
逆解析の基本的な考え方は、打切り特異値

分解を組み込んだ Gauss Newton 法を用いている。式(4)が最小となるための必要条件より、

$$\sum_{j=1}^{2M} \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i(\mathbf{X}, t_k)}{\partial X_\ell} \frac{\partial z_i(\mathbf{X}, t_k)}{\partial X_j} \right\} dX_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N (u_i(t_k) - z_i(\mathbf{X}, t_k)) \frac{\partial z_i}{\partial X_\ell} \quad (5)$$

$$\ell = 1, \dots, 2M$$

式(5)は $2M \times 2M$ の連立方程式である。係数マトリックスの条件数がしばしば非常に大きくなり、特異マトリックスに近くなるため、逆解析の計算は不安定であると言われている。そのため打切り特異値分解を用いて係数マトリックスの階数を落として近似的に式(5)を解いている。収束時の測定たわみと解析たわみの誤差を式(6)で評価する。

$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \{u_i(t_k) - z_i(\mathbf{X}, t_k)\}^2}{N \cdot K}} \quad (6)$$

ここでは、逆解析事例として米国の連邦航空局試験センターで行われた FWD 試験データの提供を受け、本ソフトウェアを用いて逆解析を行った結果を示す。

FWD 試験を行った舗装は、1層目がコンクリート(層厚 0.279m)、2層目はエコノクリート(層厚 0.156m)、路盤(層厚 0.213m)、路床(∞)の4層構造である。逆解析結果は表-1の通りである。

表-1 コンクリート舗装の逆解析事例

層	E (MPa)	F (MPa·s)
1	24,648	61
2	12,933	38
3	123	0.6
4	93	0.1

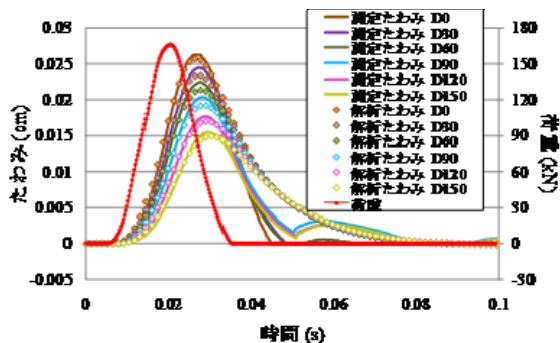


図-7 測定たわみと解析たわみの比較

表-1 の逆解析結果を用いて解析した表面たわみと測定たわみを図-7 に比較する. 図より両者の一致が非常に良いことが確認できる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

- ①竹原和也, 小澤良明, 松井邦人: 波動方程式の理論解に基づく空港舗装の逆解析, 土木学会, 舗装工学論文集, 第 15 巻, 2010.12 査読有
- ②Matsui, K., Takehara, K. and Nishizawa, T.: Dynamic back-analysis of concrete pavement structures based on wave propagation theory, 7th International DUT-Workshop on Design and Performance of Sustainable and Durable Concrete Pavements, 10-11 October, 2010, Alcazar de la Reina, Carmona, Spain. 査読有
- ③小澤良明, 松井邦人: 直交異方性を考慮した舗装の波動伝播解析, 土木学会論文集E編, Vol.65, No.4, pp459-467, 2009.10, 査読有
- ④小澤良明, 松井邦人 走行荷重の作用を受ける舗装の構造解析, 土木学会論文集E編, Vol.65, No.4, pp468-476, 2009.10, 査読有
- ⑤ 小澤良明, 篠原裕貴, 松井邦人, 東 滋夫: 波動理論を用いた逆解析による粘弾性多層体の構造評価, 土木学会論文報告集 E編, Vol..64, No.4, pp.533-540, 2008.10, 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① 竹原和也, 小澤良明, 松井邦人: FWD試験データを用いた空港舗装の構造評価に関する検討, 土木学会年次講演会, 2010.9.
- ② 富澤健, 松井邦人他: 実測した車輪の接地圧分布に基づく舗装の応答解析, 土木学会年次講演会, 2009.9.
- ③ 小澤良明, 松井邦人: タイヤ接地圧を考慮した多層弾性体解析, 土木学会年次講演会, 2008.9.

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/matsuilabo/>

<http://www.cse.dendai.ac.jp/rk/g/labomatsui.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 邦人 (MATSUI KUNIHITO)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号: 70112878

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

里見 忠篤 (SATOMI TADAATSU)

東京電機大学・理工学部・名誉教授

Maina, James

Built Environment, CSIR, South Africa

小澤 良明 (OZAWA YOSHIAKI)

センチュリテクノ (株)