

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289138

研究課題名(和文)力学モデルに基づいた舗装の長期的パフォーマンス予測法の開発とその検証

研究課題名(英文) Development and Validation of Long-term Performance Model of Pavements Based on Mechanistic Model

研究代表者

西澤 辰男 (Nishizawa, Tatsuo)

石川工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：00143876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート舗装の温度応力を正確に評価するために、熱伝導解析によってコンクリート版内の温度分布を予測し、舗装用3次元有限要素法Pave3Dによる構造解析から直接温度応力を計算する方法を開発した。

アスファルト舗装のパフォーマンスに大きく影響するわだち掘れの進行を予測するモデルについて検討した。本研究では、塑性ひずみを弾性ひずみと荷重繰返し数の関数とする考え方を採用して3DFEMに組み入れ、舗装各層の変形を評価することを可能にした。本モデルを検証するために、土木研究所の試験走行路に3区間の試験舗装を建設し、各層境界面に金属の反射板を設置し、電磁波レーダによって境界面の変化を捉えた。

研究成果の概要(英文)：In the prediction method of thermal stress developed in this study, temperatures and thermal stresses in a concrete slab is predicted by solving one dimensional heat transfer equation and using three dimensional finite element method (3DFEM). The proposed method is able to be applied for the design of concrete pavements under various temperature conditions. A method for predicting rutting development on asphalt pavements was developed. In this method, plastic strains are assumed to be a function of elastic strain and load repetitions. The function is incorporated into Pave3D to calculate permanent deformations of entire pavement structure. Test asphalt pavement sections were constructed on a circular test road and subjected to traffic load. Permanent deflections of surface, base course and subgrade were detected with electromagnetic radar system. It becomes possible to know how much each layer changed in its thickness resulting in permanent deformation on the surface.

研究分野：舗装工学

キーワード：舗装 パフォーマンス予測 わだち掘れ 温度応力 3DFEM 試験舗装 電磁波レーダ

1. 研究開始当初の背景

合理的な舗装管理のためには、舗装のパフォーマンスを正確に予測した上でどのような供用水準、いかなる補修活動を行うべきかのシナリオを想定し、最適な舗装の設計や維持管理計画を策定しなくてはならない。

現在では、舗装の高耐久性、高機能性を追及した新たな舗装構造や舗装材料の開発が活発化している。技術革新に対応するために、舗装の設計法は仕様照査型設計法から、パフォーマンスを規定する性能照査型設計法に移行することが必須である。このことによって、新たな舗装構造や舗装材料を現場に適用した舗装の長期的パフォーマンスを予測して、最適な構造設計、材料設計を行うことが可能になる。性能照査型設計法においては、設計期間内で舗装が所定の性能を有することを確認するツールが不可欠であり、既存の舗装はもとより、新たな舗装工法に対応可能な予測精度の高い汎用的な舗装パフォーマンス予測モデルの開発が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究計画の目的は、長期的な舗装パフォーマンスを精度良く予測するために、力学理論および実績からの知見を融合した汎用モデルを確立することである。

本研究計画においては具体的に以下の目標を設定した。

1. アスファルト舗装のパフォーマンスをひび割れとわだち掘れによって評価することとし、交通荷重による両者の変化を予測する汎用モデルの開発。

2. コンクリート舗装の長期耐久性において影響が大きいとその実態が不明確な温度応力の算定法の開発。

3. 研究の方法

(1) 舗装構造モデル<sup>1)</sup>

本研究計画の2つの大きな目標を達成するために必要な汎用モデルのプラットフォームとして3次元有限要素による構造モデルを構築した。この構造モデルを図-1に示す。第1層は有限な広がりを持った表層であり、端部は自由境界である。表層表面に荷重が作用する。第1層と第2層の間には境界面があり、密着(粗)あるいは水平方向にすべる(滑)の2つの状態を扱うことができる。第2層から第4層までは端部拘束されており、端部に平行

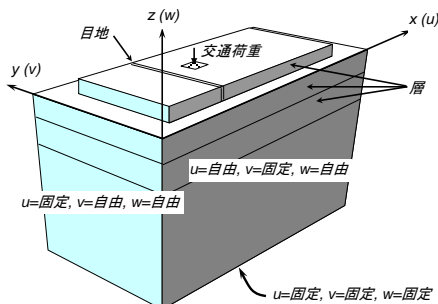


図1 舗装構造モデル

な面の変位は可能だが、それ以外は固定されている。最下層の下面は完全固定である。

(2) 永久変形予測モデル

ME-PDG では以下のような永久ひずみ $\epsilon_p$ と弾性ひずみ $\epsilon_e$ の関係を仮定している<sup>2)</sup>。

$$\epsilon_p = a \cdot \epsilon_e \quad (1)$$

この式において、係数 $a$ はアスファルト混合物の場合： $a = \alpha_1 T^{\alpha_2} N^{\alpha_3}$ 、 $a = \alpha_1 T^{\alpha_2} N^{\alpha_3}$  粒状材料や土質材料の場合： $a = \beta_1 N^{\beta_2}$ と表わされる。ここに、 $T$ は温度(華氏)、 $N$ は荷重の繰返し数、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$ は実験より材料ごとに求まる定数である。ひずみは弾性成分と永久成分からなるので、

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_e\} + \{\epsilon_p\} = \{\epsilon_e\} + a\{\epsilon_e\} \quad (2)$$

したがって、応力は以下ようになる。

$$\{\sigma\} = [D_e]\{\epsilon_e\} = \{\epsilon\}/(1+a) \quad (3)$$

この関係に基づいて、FEMによる定式化を行うと、剛性方程式は以下ようになる。

$$\left(\sum_i \frac{1}{1+a_i} [k_i]\right) \{d\} = \{f\} \quad (4)$$

ここに、 $[k_i]$ は要素 $i$ の剛性マトリックス、 $\{d\}$ は節点変位ベクトル、 $\{f\}$ は荷重ベクトルである。境界条件を考慮してこの式を解くと $\{d\}$ が求まる。ただし、 $\{d\}$ には弾性変形 $\{d_e\}$ が含まれているので、永久変形 $\{d_p\}$ は、 $\{d_p\} = \{d\} - \{d_e\}$ として計算する。

(3) アスファルト試験舗装による観測

交通荷重によるアスファルト舗装の挙動を観測するため、土木研究所円形走行路に試験舗装を建設した。その断面構成を図2に示す。



1 工区 $N_f=460,000$ 輪	2 工区 $N_f=1,000,000$	3 工区 $N_f=1,000,000$ 輪
アスファルト混合物: 5cm	アスファルト混合物: 5cm	アスファルト混合物: 10cm
粒調砕石: 16cm	アスファルト安定処理: 8cm	クラッシュラン: 15cm
クラッシュラン: 24cm	クラッシュラン: 32cm	クラッシュラン: 20cm
路床		

図2 試験走行路と試験舗装断

試験舗装の建設の際、各層の境界面に帯状の金属製反射材を横断方向に敷いた。反射の重複を避けるために、図3に示すように深さごとに水平位置をずらした。電磁波レーダにより、これらの反射材の位置を観測し、交通荷重による各層境界面の変化から各層ごとの永久変形を推定する。

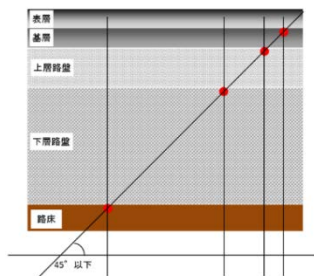


図3 電磁波レーダ反射板設置状況

(4) コンクリート舗装の温度応力解析

コンクリート舗装の構造設計において重要な温度応力算定のために、1次元熱伝導方程式によりコンクリート版内の温度を予測し、それに基づいて3次元有限要素法(3DFEM)によって直接温度応力を計算する。このような温度予測法を検証するために、全国で計測されたコンクリート版内温度と予測された温度を比較する。3DFEMによる温度応力予測法の検証には、試験舗装で計測された長期ひずみと計算結果を比較する<sup>3)</sup>。

参考文献

- 1) 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, 第5巻, pp. 112-121, 2000.
- 2) Huang, Y.H., Pavement Analysis and Design, Second Edition, Person Education, pp. 318-319.
- 3) 独立行政法人土木研究所, 社団法人セメント協会, 東京農業大学, 石川工業高等専門学校, コンクリート舗装の構造設計の高度化に関する共同研究報告書, No. 432, 土木研究所, 2012.

4. 研究成果

(1) 舗装のわだち掘れ解析

前述した3DFEMに基づく永久ひずみ予測法を用いて、わだち掘れ解析を行った。解析対象とした舗装構造を表1に示す。図4はこの舗装の3DFEMモデルである。

表1 計算に用いた舗装構造と材料定数

	層厚(cm)		弾性係数 MPa	ポアソン比
	S1	S2		
アスファルト層	5	15	2179	0.35
粒状路盤	40	30	500	0.35
路床	500	500	80	0.35

その結果を図5に示す。この図は、49kN輪荷重が500,000回走行した後の各層境界面の永久変形を示している。層の上下境界面の差がその層の厚さの変化量すなわち永久変形量である。S1断面はアスファルト表層が薄いため、アスファルト表層と路盤層はほぼ同じ永久変形であるが、S2断面はアスファルト表層が厚いため、表層の変形がわだち掘れに及ぼす影響が大きい。

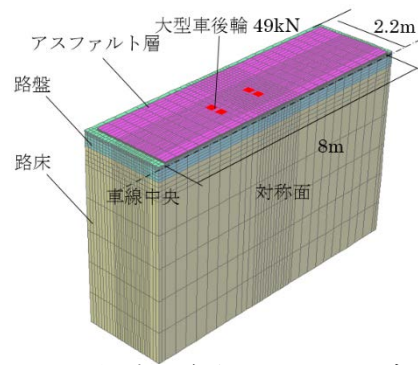


図4 わだち掘れ解析用3DFEMモデル

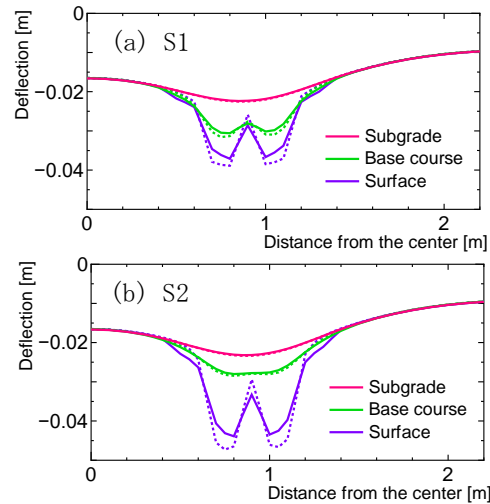


図5 500,000回載荷後の永久変形

このように本手法を用いることによって層ごとの永久変形量を評価することができるため、舗装の層ごとの変形を考慮した構造設計が可能になる。

(2) 試験舗装における電磁波レーダ観測

試験舗装における走行載荷試験は現在も進行中であるので、途中経過としての結果を述べる。図6は、舗装建設直後の電磁波レーダによる観測結果である。各層の境界面を検出

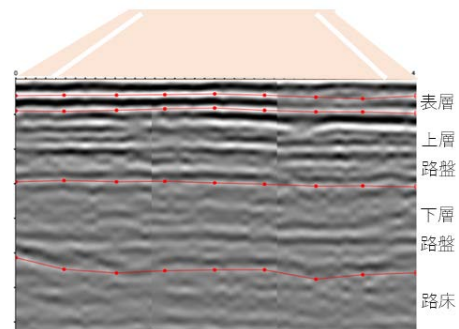


図6 電磁波レーダによる境界面の抽出

できている。今後は車輪走行回数後、定期的に観測を行い、境界面の変化を記録していく。その結果と前述したモデルによる予測結果と比較する。

(3) コンクリート舗装の温度応力

前述した解析法によって予測したコンクリ



ート版の温度分布と実測した結果を比較したものが図7である。計算値と実測値は良く一致している。

図8は温度応力解析を行い、拘束ひずみを計算した結果と、試験走行路にて計測した拘束ひずみを比較したものである。両者の対応は良好であり、本手法の妥当性を示すものである。

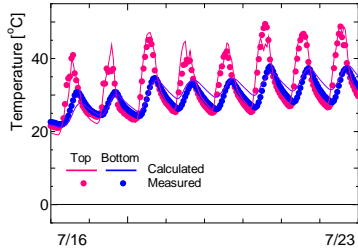


図7 コンクリート版内の温度の計算値と実測値の比較。厚さ 30 cm, 仙台市。

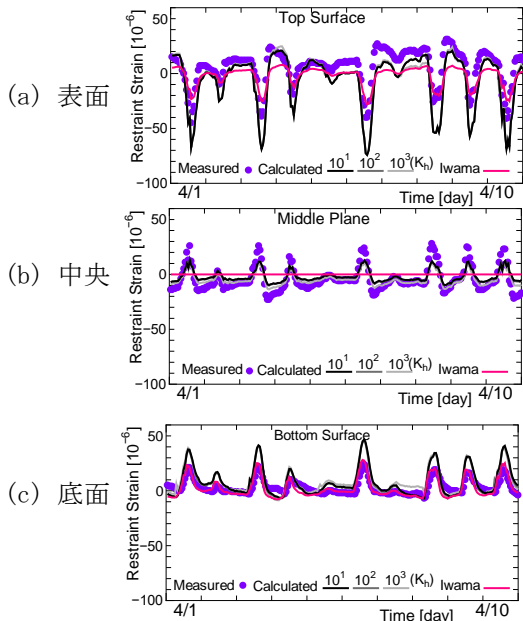


図8 拘束ひずみの計算値と実測値の比較

(5) 今後の研究計画

本研究計画にて建設したアスファルト試験舗装における挙動観察は継続中であり、早晚、各区間はわだち掘れが進行し、ひび割れが発生する。今後はこれらの現象を 3DFEM 舗装構造モデルによって再現し、パフォーマンス予測モデルの検証を行っていく。

わだち掘れモデルについては、アスファルト表層、粒状路盤、土質路床について、各材料

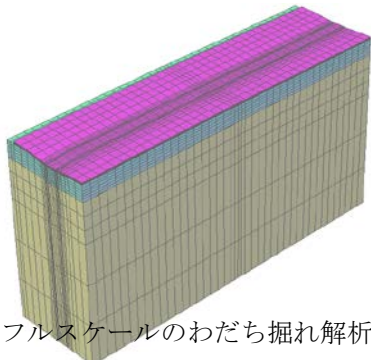


図9 フルスケールのわだち掘れ解析

ごとに永久変形モデルを開発した。アスファルト層は Burger 粘弾性モデル、粒状および土質材料は修正 Cam-Clay モデルを採用した。それらのモデルを Pave3D に組み込み、走行荷重を再現した。その結果の一部を図9に示す。

フルスケールでの走行試験を再現すると、高々100輪走行の解析ですら70時間を要する。そこで、室内試験を3DFEMモデルで再現して、式(1)の関係を求め、本研究計画で開発した方法でわだち掘れを予測する手法を開発する。

例えば、図10はアスファルト混合物の剛性を評価する試験法のひとつであるレジリエントモジュラス試験を3DFEMでモデル化したものである。アスファルト混合物の粘弾性を考慮するために、Burgerモデルを用いた。試験と同様に繰返し載荷を行い、その結果を実測結果と比較することにより、粘弾性パラメータを同定する。その結果の一部を図11に示した。

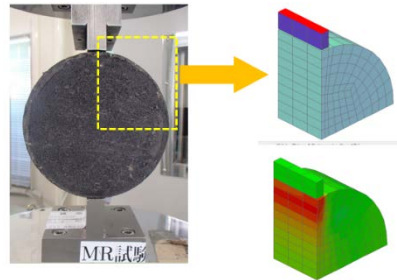


図10 アスファルト混合物レジリエントモジュラス試験のモデル化

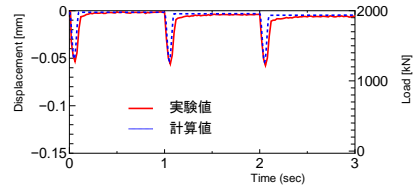


図11 アスファルト混合物レジリエントモジュラス試験の解析結果

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3件)

西澤辰男, 風戸崇之, 本松資朗, 竹津ひとみ, 連続鉄筋コンクリート舗装の初期横ひび割れ発生に及ぼす路盤拘束の影響, 土木学会論文集 E1, Vol. 71, No. 2, pp. 36-46, 2015.

西澤辰男, 小梁川雅, 竹内康, 久保和幸, 吉本徹, 温度解析と FEM 解析に基づいたコンクリート舗装の温度応力算定法, 土木学会論文集 (E1), Vol. 72, No. 3, pp. I\_105-I\_113, 2016.

Nishizawa, T., Koyanagawa, M., Takeuchi, Y., Kubo, K., and Yoshimoto, T., A Thermal Stress Calculation Method of Concrete Pavement Based on Temperature Prediction and FEM Analysis, Journal of Transportation Research Board. (in printing, DOI 10.3141/2640-12)

〔学会発表〕（計 2 件）

西澤辰男 他, 温度解析と FEM 解析に基づいたコンクリート舗装の温度応力算定法, 土木学会舗装工学講演会, 2016 年 12 月.

Nishizawa, T., et al., A Thermal Stress Calculation Method of Concrete Pavement Based on Temperature Prediction and FEM Analysis, 96<sup>th</sup> Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C. USA, 2017.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西澤辰男 (Tatsuo Nishizawa)  
石川工業高等専門学校・環境都市工学科・教授  
研究者番号：00143876

### (2) 研究分担者

佐々木巖 (Iwao Sasaki)  
国立研究開発法人土木研究所・研究員  
研究者番号：00236263

高橋修 (Osamu Takahashi)  
長岡技術科学大学・工学系研究科・教授  
研究者番号：60236263

木幡行宏 (Yukihiro Kohata)  
室蘭工業大学・工学系研究科・教授  
研究者番号：90215301

竹内康 (Yasushi Takeuchi)  
東京農業大学・地域環境科学部・教授  
研究者番号：90271329