

厳密解に基づく舗装構造解析・設計方法の開発と応用

道路研究室 村田 隆彦
指導教官 丸山 暉彦
高橋 修

1 本研究の背景

わが国のアスファルト舗装の構造設計法は、数多くの経験とバックデータの豊富さに裏付けられた経験を主とした設計法 (T_A 法) であり、わが国では安定した設計法として信頼されてきた。しかし、これらの設計法は、経験を主とした設計法であるが為に、過去に例の無い舗装構成や新しい材料を使用した舗装の設計には、経験が無い為に極めて無力であると言わざるを得ない。

その解決手段として導入され始めている設計法が、多層弾性理論を用いた理論設計法である。これは、 T_A 法が中心となってきたわが国の舗装構造の設計では新しい方向として非常に期待されている。ただ、現段階ではまだ実用の域に達していない。

すなわち、過去の経験に照らし合わせて、多層弾性理論による解析結果があまり信頼性の高いものとは見なされていないのである。これは理論そのものに欠陥があるのではなく、多層弾性理論を舗装に適用する上で、弾性係数など諸定数の決定方法に起因する。また、多層弾性理論に基づく解析・設計を容易に実行できるコンピュータプログラムが殆ど存在していない事にも原因があるものと考えられる。前者の研究は逆解析によるものなど、活発に行なわれているものの、後者は立ち遅れている為、その整備が急がれている。

2 本研究の目的

現場におけるフィジビリティ(実行できる可能性)を重視した、多層弾性理論に基づく舗装構造設計を行なう為に、ユーザインタフェースを考慮した設計システムの開発を行なう事は非常に有意義である。一方、舗装構造の設計に関

しては「性能要求型設計」を導入され始めているが、それを視野に入れ、舗装の限界状態を考慮した舗装の寿命予測を検討する必要性が出て来た。

そこで、本研究において上記のような現状を改善する為に、実務レベルで誰でも容易に使用できる、厳密解に基づく多層弾性理論によって合理的に舗装構造の設計を行なう事の出来るプログラムシステムの開発を行なう。さらに開発したシステムを用いて舗装構造の力学的な限界状態を詳しく照査する。

3 多層弾性理論

多層弾性理論とは、舗装の各層を弾性体と仮定し、一般的に円形等分布荷重を載荷した三次元問題として応力やひずみを解析し、構造材料が力学的に舗装にどのような影響を与えているかの評価を行なう理論である。

多層弾性理論を用いた舗装用コンピュータプログラムとして、大きく Shell Oil 社による BISAR 系と、Chevron 社による CHEV5L 系の 2 つに分類される。両者ともに、同じ入力に対しては、ほぼ同じ出力が得られる事が確認されている。また、これらのプログラムが出力する値は、多層弾性理論の厳密解とも一致している事が分かっている。しかし、両者は全く性格を異にするプログラムであり、比較すれば以下ようになる。

CHEV5L

- 軸対称問題
- 軸中心 1 荷重載荷
- 各層間完全密着 (滑り無し)
- 垂直荷重のみ
- 考慮出来る層数は 5 層

BISAR¹⁾

- 軸対称および非軸対称問題
- 複数荷重載荷でき、全体の成分は重ねあわせによって解析される
- 各層間に層間滑りを考慮できる
- 垂直荷重および水平荷重(方向角も考慮できる)
- 考慮できる層数は10層

CVEV5L, およびBISARは, 元々メインフレーム上で動作させる事を前提として開発されたプログラムであり, 今日普及しているような, パーソナルコンピュータ(PC)上で動作させる事を前提としていない. さらに, そのソースコードはその多くがFORTRAN言語で記述されている為, それにコンパイルしてバイナリプログラムを作成する為の環境をユーザが所持している必要がある. しかし, 本来ユーザはバイナリプログラムのみを求めているのであって, ソースコードを要求するのは研究者のみであるといっても過言では無い.

4 多層弾性理論を用いた舗装構造解析方法の開発

多層弾性理論のアルゴリズムには, CHEV5Lと, BISARがあるのは既に述べたとおりであるが, CHEV5Lは, ELSAという形でユーザインタフェイスを考慮したプログラムが存在しており, 実務でも使用されている. しかし, BISARにはそのような配慮が為されておらず, 全く使い物になっていない. さらに, 現在の大型交通荷重はタンデム・ダブルタイヤを用いたものが多く, 将来の設計用載荷荷重には複数荷重を用いなければならなくなってくると考えられる為, BISARをELSAのように, 誰にでも使えるようにしなければならない事は明白である. そこで, ユーザインタフェイスを考慮した多層弾性理論のプログラムを開発した. また, 参考にしたBISARには, 解決されていなかったプログ

ラム上の欠陥があった為, そのバグフィックスを行なった.

まず, 開発環境を Borland 社の Delphi としたため, ソースコードを PASCAL で記述する必要があった. そこで, 準備段階として BISAR を参考にしながら, DOS ベースのプログラムを開発した. FORTRAN 版, および PASCAL 版の両者の整合性検証を以下の条件で行なった(表1, 表2). これは, アスファルト舗装要綱²⁾の設計例のうち, C 交通・設計 CBR6%を参考にした. 図1は, 深さ方向の成分分布図を取って比較したものである.

表 1: 材料・構造条件

材料	弾性係数 (kgf/cm ²)	層厚 (cm)
アスコン	60000	10
瀝安処理	42000	10
粒調碎石	4000	20
切込砂利	1500	20
路床	600	

表 2: 荷重条件

載荷荷重	5000kgf
荷重半径	15.65cm
荷重位置	X=0cm, Y=0cm
解析位置	X=0cm, Y=0cm (荷重直下)
滑り係数	$\alpha = 0.0$ (滑り無し)

この結果より, FORTRAN 版と PASCAL 版の整合性が認められた. 従って, そのルーチンを利用した Windows 版の BISAR の開発を行なった. 現在, 各企業および官公庁の PC を制御するオペレーティングシステム(OS)として, 最も普及している OS が Windows である. そこで, その Windows に対応しかつユーザビリティを考慮したプログラムの開発を行なった. 以下にそのプログラムパッケージ構成を示す.

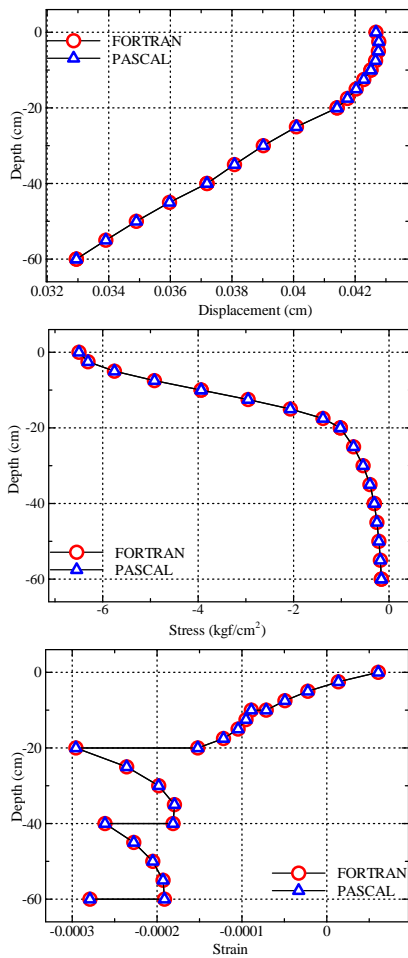


図 1: FORTRAN 版と PASCAL 版による出力値の比較

- NAPS2662(解析データ処理)
- InputDC2662(入力データ作成支援)
- CompPV2662(深さ方向の分布図をプロットし、画像として可視化)
- GLComp2662(交通の進行方向に直行する面のコンタマップを可視化)
- BISARlib(解析コア)

NAPS2662 本プログラムは、入力データに基づく解析値を出力し、表計算状のセル上にて解析結果を表示するプログラムである。セルには、解析ポイント毎に、そのポイントの所属する層番号、デカルト座標および全荷重の影響

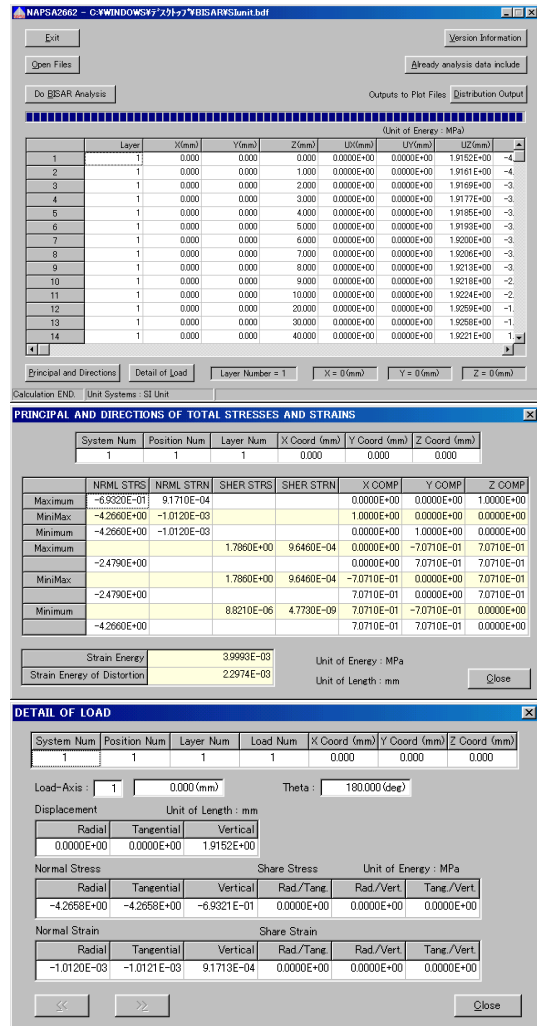


図 2: NAPS2662 の実行画面

を考慮し、重ね合わせた変位・応力およびひずみ出力され、表示される。その他に、載荷荷重別の成分の表示や、解析ポイントにおける作用成分の詳細を知る事も出来る。さらに、CompPVの為の入力データを作成できる。これはテキストファイルであるため、表計算ソフトに取り込むことも出来る。

InputDC2662 本プログラムは、入力データを視覚的に作成する為の支援プログラムである。従来は入力ファイルの作成をテキストファイルの編集によって行なわれていた。この方法は、プログラムの入力フォーマットに従って記述し

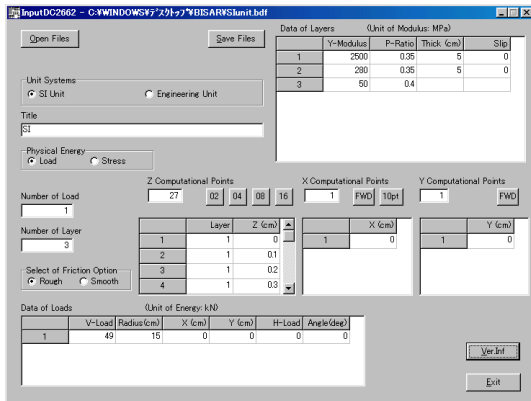


図 3: InputDC2662 の実行画面

ていけば作成できる方法であるが面倒である。特に、FORTRAN 環境においては BISAR に限らないが、ファイルの入出力のフォーマットは非常に厳格であり、1 文字でも入力フォーマットからずれるとプログラムは読み込まないという制約がある。そういった不便さを解消した。

CompPV2662 本プログラムは、NAPSA によって計算された解析値を深さ方向の分布図として描画表示するプログラムである。つまり、本プログラムによって可視化された分布図によって、その解析ポイントにおけるひずみなどの分布図や、舗装構造のクリティカルポイントを視覚的に知る事が出来るのである。(図 4)

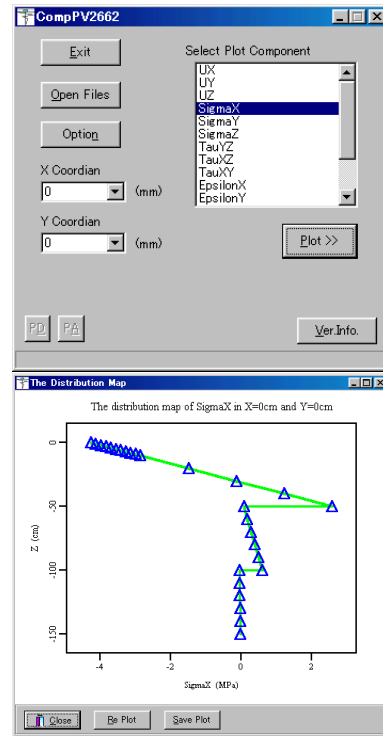


図 4: CompPV2662 の実行画面

GLComp2662 本プログラムは、NAPSA によって計算された解析値を、進行方向に直行する面のコンタマップとして描画表示するプログラムである。つまり、本プログラムによって可視化されたコンタマップによって、面的な応力分布やひずみ分布を知る事が出来る。(図 5)

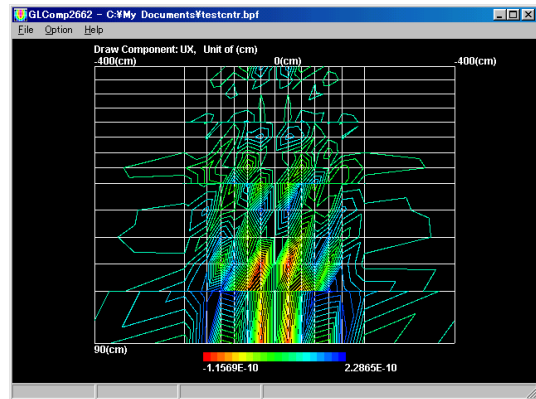


図 5: GLComp2662 の実行画面

BISARlib 解析ルーチンはそれ自体を大きな関数として独立させた。この事により、メインプログラム (NAPSA2662) に解析ルーチンを記述しなくて済むようになった。しっかりとした入力フォーマットでデータを作成し、その入力ファイルをこのライブラリに送るだけで良い。本研究で開発されたプログラム自体は複数プロ

ジェクトのバッチ的解析には対応していないが、InputDC で作成するか、プログラム内部で自動生成させた複数の入力ファイルを本ライブラリに送るプログラムを作成すれば、バッチプログラムの使用法が出来る。

ところで、BISAR というプログラムは多層弾性理論に基づくコンピュータ解析プログラム

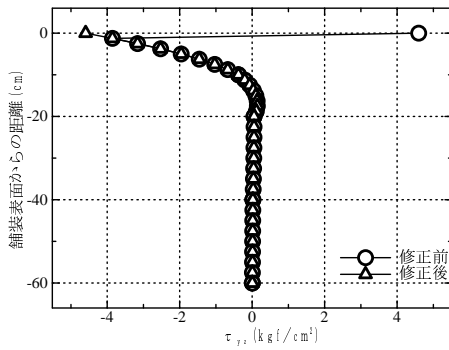


図 6: 不連続点の発生

としての完成度は高い。しかし、舗装表面にせん断力が作用した場合の解析結果の精度が十分に検証されていなかった。それにもかかわらず、現在までバグフィックスが行なわれる事無く使用されつづけてきた。その原因として、舗装構造を解析する際に、載荷荷重は垂直荷重のみを考慮されてきたからである。その検証実験として、FWD 試験などが成されてきた。しかし、近年の交通の重量化に伴い、制止時荷重が無視できなくなってきており、せん断力を考慮する事の必要性が出てきたのである。

このプログラム上の欠点は、アルゴリズムに端を発していた。舗装構造の表面における境界条件式の一部が間違っているのではないかと考えた。多層弾性理論における解析に際して、載荷荷重は集中荷重と半径を円形等分布荷重に変換している。その集中荷重には垂直荷重 P と水平荷重 Q が存在する。以下にその境界条件式を示す。これは荷重半径内の表面の境界条件式である。このうち、第 2 式と第 3 式は、せん断力の分力であるため、本来ならば第 3 式の右辺には第 2 式と同様にマイナスが付くはずであるが付いていない。

$${}^1_0\sigma_{zz}(r, \vartheta, 0) = -P \quad (1)$$

$${}^1_0\sigma_{rz}(r, \vartheta, 0) = -Q \cos(\vartheta - \theta_0) \quad (2)$$

$${}^1_0\sigma_{\vartheta z}(r, \vartheta, 0) = Q \sin(\vartheta - \theta_0) \quad (3)$$

実際には、

$${}^1_0\sigma_{\vartheta z}(r, \vartheta, 0) = -Q \sin(\vartheta - \theta_0) \quad (4)$$

とすべきだと考えられる。実際にその部分のプログラムを修正すれば、不連続点が無くなった。BISAR は、この表面における境界条件式が誤っていた為に、プログラムの方にもその欠陥が反映されていたのである。単純な理論誘導のミスであるが、現在までこのミスが発見されないまま現在に至り、本研究において修正されたことの意義は非常に大きい。

5 多層弾性理論を用いた舗装構造設計方法の開発

舗装構造を設計するには設計寿命 (設計期間) を求める。それを算出する際に、アスコン層下面の引張りひずみおよび路床上面の圧縮ひずみが用いられるが、その基準値の定め方は現時点では良く分かっていない³⁾。力学的にそれらの基準値がクリティカルポイントを示しているわけではない事は分かっているのだが、それが検証されていない。従って、舗装構造に力学的な限界値 (クリティカルポイント) を一つの性能として考慮した設計法の検討を行なった。ここで、クリティカルポイントとは、深さ方向に最大のひずみを示す個所のことを言う。構造条件として、図 7 のような 3 層弾性体モデルを考えた。ここで、弾性係数比 (E_1/E_2)、層厚比

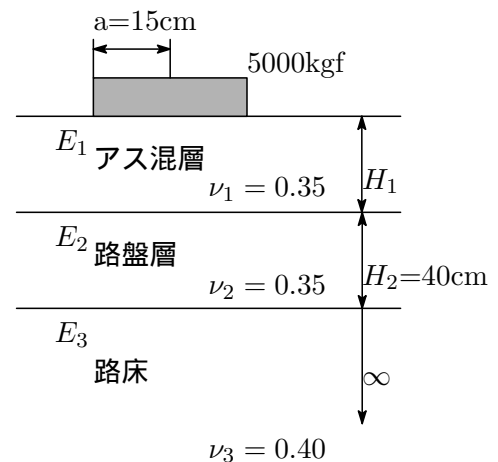


図 7: 解析対象 3 層弾性体モデル断面

(H_2/H_1) および滑り係数 (0.0(粗), 0.1(滑)) を

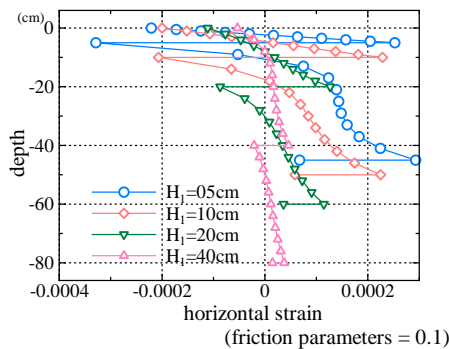


図 8: クリティカルポイントの定義

可変させ、深さ方向のひずみ分布を調べた。この結果を、現行の破壊基準値の箇所がクリティカルポイント(図8)であった組み合わせを調べると、弾性係数比(E_1/E_2 , $E_1 = 60000$)10, 15 および層厚比(H_2/H_1 , $H_2 = 40$)1, 2, 4の組み合わせで、層間滑りを考慮した合計6モデルであった。これらの準拠したモデルに対して、破壊基準を適用し、摩擦係数の有無による設計寿命の増減を検討した。その結果が図9のようになる。この結果より、層間に滑りを生じさせると、アスコン層の設計寿命は滑りを考慮しない場合に比べ、著しく減少することが分かった。それに伴い、滑りの発生により舗装のひび割れの進行度が高まって設計寿命が減少する可能性があり、設計寿命の検討に層間滑りの考慮をする重要性が明らかになった。

6 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- BISAR を参考にしたルーチンを利用した多層弾性理論のプログラムを、Windows上で動作するシステムとして開発する事により、解析、入出力の可視化を容易に出来るようになった。このことにより、理論的設計を行なう実務の技術者が従来のようなデータの扱いにくさを気にすることなく、誰でも使用することが出来るようになった。

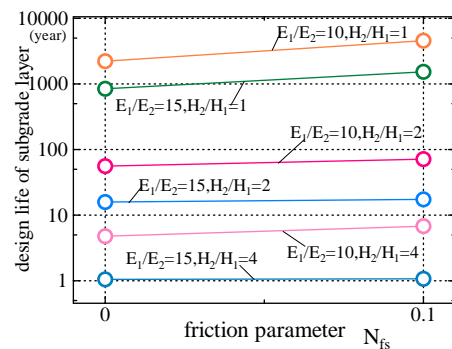
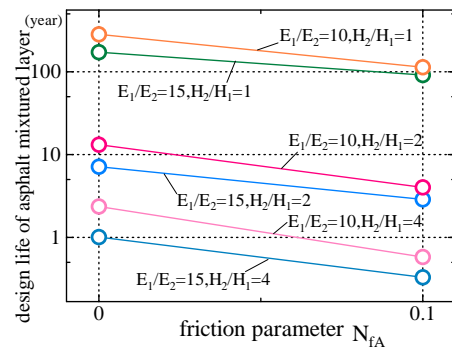


図 9: 設計寿命の増減

- 現在まで修正されてこなかったBISARの理論上の欠陥点を指摘し、加えてその欠陥に付随するプログラム上の欠陥も修正することが出来た。この事により、BISARに対する舗装技術者の低信頼を払拭出来た。
- 性能設計を念頭において、限界値(クリティカルポイント)を考慮した検討を行ない、層間滑りが生じた時に設計寿命が著しく減少することから、層間滑りを考慮する事の重要性を力学的に明らかにした。

参考文献

1. JONG, PEUTZ, KORSWARGEN: COMPUTER PROGRAM BISAR Layered systems under normal and tangential surface loads, Shell Research B.V., 1979
2. (社)日本道路協会: アスファルト舗装要綱
3. 菊川, 久保他: 最新・アスファルト舗装技術, 山海堂, 1995