# 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

#### 西澤辰男

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)

3次元有限要素法に基づいたコンクリート舗装の構造的特質を考慮した構造解析プログラムパッケージ (pave3d) を開発した.基本となる構造モデルは、コンクリート版、路盤、路床を8節点直方体ソリッド要素に分割し、目 地や路盤とコンクリート版の境界面は新たに開発した汎用境界面要素によってモデル化する.本モデルの妥当 性について、多層弾性理論による結果や実物大の載荷実験の結果との比較によって検証した.本モデルは路盤 内応力も同時に解析できる.そこで、そり変形に伴う路盤の応力状態について調べた.

Key Words : concrete pavement, structural model, 3 dimensional finite element method, joint model

# 1. はじめに

コンクリート舗装は、比較的剛性の高いコンクリー ト版によって交通荷重を分散させて路盤以下に伝達す る.このような構造的特質を考慮した構造解析を行う ために、弾性地盤上の平板モデルが用いられてきた.こ のモデルにおいては、コンクリート版は弾性平板とさ れ、路盤以下はこの平板を支える機能のみがモデル化 されている.代表的なモデルが Westergaad によって開 発された Winkler 上の弾性平板モデルである<sup>1)</sup>.この モデルは扱いやすく、長い間コンクリート舗装の標準モ デルとして設計等に利用されてきた<sup>2),3)</sup>.その後、平 板有限要素方に基づいた定式化が行われ、数値解析法 の利点を活かして、目地やひび割れの荷重伝達モデル、 路盤とコンクリート版はがれを考慮したそり変形解析 などが行われている<sup>4),5),6),7)</sup>.

しかしながら、この平板モデルには、路盤以下の構 造を考慮できないこと、路盤の変形や応力に関する情 報を与えないことなどの限界がある。特に、路盤の支持 機能だけでなく、路盤自体の耐久性を問題にする場合 には、路盤内の変形、応力解析が重要になってくる<sup>9)</sup>. 路盤の取り扱いについては平板モデルを拡張したいく つかのモデルが提案されているものの<sup>8)</sup>、路盤を平板 要素に置き換えるなどの単純化が行われており、必ず しも路盤の変形性状を正確に表現したものとはいいが たい.

一方,コンクリート舗装とアスファルト舗装の設計 法の統合化が進められている.このような設計法にお いては,構造解析をコンクリート舗装は平板モデル,ア スファルト舗装は多層弾性モデルで行うという使い分 けは合理的ではなく、両者を扱える構造モデルが必要 になる.

最近の数値解析法の発展は目覚しく、パソコンの高 性能化と相まって、大規模な数値解析が比較的手軽に行 えるようになっている.このような中で、アメリカ合衆 国議会会計監査局 (GAO)は、運輸省に対して舗装設計 の構造解析を 3 次元有限要素法 (3DFEM)によって行 うことを提言している<sup>10)</sup>.それを受けて、1998年11 月に第1回の舗装工学における 3DFEM に関するシン ポジウムが開催され、そこでは 3DFEM の有用性、将 来性が強調された<sup>11),12)</sup>. 3DFEM は汎用性に優れ、コ ンクリート舗装、アスファルト舗装だけでなく、コン ポジット系舗装も同様のモデルによって解析すること ができる.今後この種のツールが標準的なものになる ことは確実である.

しかしながら,問題がないわけではない.3DFEM が 手軽に行えるようになっても,入力データの作成,ある いは解析結果の整理になどに大変な労力を要すること に変わりはない.特に扱うデータ量は膨大であり,その 処理の効率化が最大の課題である.市販の3DFEM は, 充実したプリ・ポストプロセッサを用意して,そのよう なデータ処理の作業を支援する.一般にこのようなソ フトウエアは高価であり,また,多機能であるがゆえに 作業の習熟に時間を要する.さらに,目地やひび割れ, コンクリート版と路盤とのはがれなどの舗装特有な現 象を解析するためには,かなりの工夫を必要とする.

そこで、舗装の構造解析に特化した 3DFEM の開発 を試みた.pave3d と名づけられた本パッケージは、舗 装特有の構造を効率よく解析することを目的に開発さ れた.若干の汎用性は犠牲にしつつ、舗装技術者が抵



**図-1**8節点6面体要素

抗なく作業に取り組めるような簡便性を基本とし、フ リーウエアとして公表することとした<sup>13)</sup>.基本となる 構造モデルは、コンクリート版、路盤、路床を8節点直 方体ソリッド要素に分割し、目地や路盤とコンクリー ト版の境界面は新たに開発した汎用境界面要素によっ てモデル化する.

本論文では、そのソフトウエアの基本となる構造解 析モデル、特に汎用境界面要素の定式化について述べ る.本モデルの妥当性について、多層弾性理論による 結果との比較および実物大の載荷実験結果との比較に よって検証した.本モデルは路盤内応力も同時に解析 できるので、そり変形に伴う路盤の応力状態について 検討を行った.

## 2. 構造モデル

## (1) 8節点6面体要素

本モデルにおいては図-1に示すような8節点6面体 要素を採用した.各節点の変位から,要素内の任意の 変位は以下のように計算できる<sup>14)</sup>.

$$\begin{cases} u \\ v \\ w \end{cases} = \sum_{i=0}^{7} \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} u_i \\ v_i \\ w_i \end{cases}$$
(1)

ここに,

$$u, v, w = 要素内の x, y, z 方向の変位,$$
  
 $u_i, v_i, w_i = i$ 節点の  $x, y, z$ 方向の変位,  
 $N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i\xi)(1 + \eta_i\eta)(1 + \zeta_i\zeta)$ 

N<sub>i</sub>は形状関数と呼ばれている.この形状関数の形から 明らかなように、変位は要素内で1次関数となる.し たがって、変位が高次の変化をするときには要素分割 に注意しなければならない.後述するように、要素分 割については半自動化するプログラムを準備している



図−2 境界面要素

ので、要素の増加によるデータ作成作業はそれほど煩 雑ではない.

# (2) 境界面要素

コンクリート版と路盤の接着状況や,目地やひび割 れの荷重伝達機能を考慮するために,汎用境界面要素 を開発した.図-2に示すような2枚の面が接している 状態を考える.面0と面1における変位はぞれぞれ,

$$\begin{cases} u'\\v'\\w' \\ w' \\ \vdots \\ tilde{10} \\ 0 \\ \delta'_{0} \\ 0 \\ \delta'_{0} \\ 0 \\ \delta'_{i} \\$$

および,

$$\begin{cases} u'\\v'\\w' \\ w' \\ \end{bmatrix}_{\overline{i}\overline{i}1} = \sum_{i=4}^{7} \begin{bmatrix} N_{i} & 0 & 0\\ 0 & N_{i} & 0\\ 0 & 0 & N_{i} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} u'_{i}\\v'_{i}\\w'_{i} \\ \end{cases}$$
(3)
$$\{\delta'_{1}\} = \sum_{i=4}^{7} \{\mathbf{N}_{i}\}\{\delta'_{i}\}$$

ここに,

$$u', v', w' = 面内の局所座標 x', y', z'方向の変位,$$
  
 $u'_i, v'_i, w'_i = i$ 節点の $x', y', z'方向の変位,$ 

面0から面1へ,変位差に比例した力が伝達される とする.すなわち,

$$\begin{cases} \Delta f'_{x} \\ \Delta f'_{y} \\ \Delta f'_{z} \end{cases} = \begin{bmatrix} k'_{x} & 0 & 0 \\ 0 & k'_{y} & 0 \\ 0 & 0 & k'_{z} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \Delta u' \\ \Delta v' \\ \Delta w' \end{cases}$$

$$\{\Delta \mathbf{f}'\} = [\mathbf{k}'] \{\Delta \delta'\}$$
(4)

$$k'_{x}, k'_{y}, k'_{z} = x', y', z'$$
方向のばね係数

である.一方、Δは面0と面1の諸量の差であること を表す.

以上の式を用い,この要素に仮想仕事の原理を適用 すると以下を得る.

$$\begin{cases} \mathbf{f}'_{0} \\ \mathbf{f}'_{1} \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}'_{00} & -\mathbf{K}'_{01} \\ -\mathbf{K}'_{10} & \mathbf{K}'_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \mathbf{d}'_{0} \\ \mathbf{d}'_{1} \end{cases}$$

$$\{ \mathbf{f}' \} = [\mathbf{K}'] \{ \mathbf{d}' \}$$
(5)

ここに,

$$\{ \mathbf{f}_{0}^{\prime} \} = \{ f_{0}^{\prime} f_{1}^{\prime} f_{2}^{\prime} f_{3}^{\prime} \}$$

$$\{ \mathbf{f}_{1}^{\prime} \} = \{ f_{4}^{\prime} f_{5}^{\prime} f_{6}^{\prime} f_{7}^{\prime} \}$$

$$\mathbf{K}_{00}^{\prime} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{00}^{\prime} \mathbf{k}_{01}^{\prime} \mathbf{k}_{02}^{\prime} \mathbf{k}_{03}^{\prime} \\ \mathbf{k}_{10}^{\prime} \mathbf{k}_{11}^{\prime} \mathbf{k}_{12}^{\prime} \mathbf{k}_{13}^{\prime} \\ \mathbf{k}_{20}^{\prime} \mathbf{k}_{21}^{\prime} \mathbf{k}_{22}^{\prime} \mathbf{k}_{23}^{\prime} \\ \mathbf{k}_{30}^{\prime} \mathbf{k}_{31}^{\prime} \mathbf{k}_{32}^{\prime} \mathbf{k}_{33}^{\prime} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{01}^{\prime} = \begin{bmatrix} -\mathbf{k}_{04}^{\prime} - \mathbf{k}_{05}^{\prime} - \mathbf{k}_{06}^{\prime} - \mathbf{k}_{07}^{\prime} \\ -\mathbf{k}_{14}^{\prime} - \mathbf{k}_{15}^{\prime} - \mathbf{k}_{16}^{\prime} - \mathbf{k}_{17}^{\prime} \\ -\mathbf{k}_{24}^{\prime} - \mathbf{k}_{25}^{\prime} - \mathbf{k}_{26}^{\prime} - \mathbf{k}_{27}^{\prime} \\ -\mathbf{k}_{34}^{\prime} - \mathbf{k}_{35}^{\prime} - \mathbf{k}_{36}^{\prime} - \mathbf{k}_{37}^{\prime} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{10}^{\prime} = \mathbf{K}_{01}^{\prime T}$$

$$\mathbf{K}_{01}^{\prime} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{44}^{\prime \prime 4} \mathbf{k}_{45}^{\prime} \mathbf{k}_{46}^{\prime} \mathbf{k}_{47}^{\prime} \\ \mathbf{k}_{54}^{\prime} \mathbf{k}_{55}^{\prime} \mathbf{k}_{56}^{\prime} \mathbf{k}_{57}^{\prime} \\ \mathbf{k}_{64}^{\prime} \mathbf{k}_{65}^{\prime} \mathbf{k}_{66}^{\prime} \mathbf{k}_{67}^{\prime} \\ \mathbf{k}_{74}^{\prime} \mathbf{k}_{75}^{\prime} \mathbf{k}_{76}^{\prime} \mathbf{k}_{77}^{\prime} \end{bmatrix}$$

$$\{ \mathbf{d}_{0}^{\prime} \} = \{ \delta_{0}^{\prime} \delta_{1}^{\prime} \delta_{2}^{\prime} \delta_{3}^{\prime} \}$$

さらに,

$$\mathbf{k}_{ij}' = \int \int [\mathbf{N}_i]^T [\mathbf{k}'] [\mathbf{N}_i] |d\mathbf{A}|$$
(6)

数値積分を用いると,

$$\mathbf{k}_{ij}' = \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} [\mathbf{N}_i]^T [\mathbf{k}'] [\mathbf{N}_i] |\mathbf{J}| d\xi d\eta$$
(7)

ここに、 |J| は、以下のベクトルの絶対値である.

$$\mathbf{J} = \left\{ \begin{array}{l} \partial x / \partial \xi \\ \partial y / \partial \xi \\ \partial z / \partial \xi \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{l} \partial x / \partial \eta \\ \partial y / \partial \eta \\ \partial z / \partial \eta \end{array} \right\}$$

式(5)は局所座標系での剛性マトリックスであるの で、全体座標系に変換する必要がある.そのためには、 ばね係数の値を急激に変化させると、数値計算上不都 局所座標系の方向余弦マトリックスを求めなければな らない. そこで, 図-3 を参照して, 局所座標系を次の 験的に 0.0001mm 程度とした.



図-3 境界面要素の座標系単位ベクトルの定義

ように定義する.まず,節点0から節点1に向かう方 向に単位ベクトル $e_{x'}$ とし、節点0から節点2に向かう 単位ベクトルをaとすると、面に垂直な軸の単位ベク トルは次のように定まる.

$$\mathbf{e}_{z'} = \frac{\mathbf{e}_{x'} \times \mathbf{a}}{|\mathbf{e}_{x'} \times \mathbf{a}|} \tag{8}$$

面内のもうひとつの軸は以下のように定まる.

$$\mathbf{e}_{y'} = \mathbf{e}_{z'} \times \mathbf{e}_{x'} \tag{9}$$

以上より、方向余弦マトリックスLは次のように求まる.

$$[\mathbf{L}] = [\mathbf{e}_{x'}\mathbf{e}_{y'}\mathbf{e}_{z'}]^T \tag{10}$$

したがって、座標変換マトリックスは以下のようになる.

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} \mathbf{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{L} \end{bmatrix}$$
(11)

よって,全体座標系の構成マトリックスは以下のよう に表される.

$$[\mathbf{K}] = [\mathbf{T}]^T [\mathbf{K}'] [\mathbf{T}]$$
(12)

#### (3) ばね係数

コンクリート舗装では、コンクリート版と路盤との 接着を防ぐために,路盤面では石粉を塗布する.した がって、コンクリート版と路盤とは分離していると考 えられ,温度差によるそり変形の際に,コンクリート 版は路盤から浮き上がる.この現象を考慮するために, ばね定数を以下のような変形の関数とした.

$$k = \begin{cases} k & \Delta u < 0\\ k(\cos(\frac{\Delta u\pi}{\Delta_0}) + 1.0)/2 & 0 < \Delta u < \Delta_0 \\ 0 & \Delta_0 < \Delta u \end{cases}$$
(13)

合が生ずるため、遷移領域を設けている. $\Delta_0$ の値は経

## (4) 非線形解析法

以上より、3DFEMにおける全体剛性方程式は以下のようになる.

$$(\mathbf{K}_{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_{\mathbf{j}}) \cdot \mathbf{d} = \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_t$$
(14)

ここに,

- **K<sub>s</sub>**: 6 面体要素の剛性マトリックス
- K; : 境界面要素の剛性マトリックス

**d** : 節点変位ベクトル

 $\mathbf{f}_{p}$ : 表面荷重ベクトル

 $\mathbf{f}_{v}$ : 自重ベクトル

 $\mathbf{f}_t$ : 温度荷重ベクトル

である.境界面要素の剛性は変位の関数になるため, 式 (14) は非線形な方程式となる.そこで,式 (14) を Newton-Raphson 法を用いて解くこととした.(i-1)段階の変位ベクトル $\mathbf{d}^{i-1}$ が既知とし,全体剛性方程式 の残差

$$\Delta \phi = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_t - (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_i) \cdot \mathbf{d}^{i-1}$$
(15)

を計算し、次式によって変位ベクトルの修正項 $\Delta \mathbf{d}^{i-1}$ を計算する.

$$\Delta \phi = (\mathbf{K_s} + \mathbf{K_i}) \cdot \Delta \mathbf{d}^{i-1} \tag{16}$$

この修正項を既知の変位ベクトルに加えて再び残差を 計算し,残差のノルムが十分小さい値になるまでこの プロセスを繰り返す.

## 3. ソフトウエアの構成

#### (1) 想定する基本舗装構造

本ソフトウエアは、以下のプログラムから構成され ている.

- 1. 3DFEM 計算に必要な入力データ作成用プログラ ム:pre3d.exe
- 2. 3DFEM 計算プログラム:fem\_3d.exe
- 3. 3DFEM 計算結果の出力データをグラフィック表示 するプログラム:p3d.exe

2と3のプログラムは汎用であるが、1のプログラムは 図-4に示すような舗装構造に適応した層構造、境界条 件および荷重条件を想定した 3DFEM 用入力データを 生成する.すなわち、舗装構造は基本的に層から成り 立っていると考えている.各層の境界面も、非常に薄 い1つの層と考える.

各層は有限の広がりをもち,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



図-4 舗装構造モデルと境界条件

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-4のように表層が路盤以下の層よりも広がりが小さい場合の境界条件は、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 方向の荷重を取り扱う.温度応力については,各層でz 方向の温度分布を直線分布として取り扱う.

# (2) データ操作支援システム

通常,3DFEM 計算に必要な入力データの作成や計 算結果データの整理には、大変な労力と熟練を要する. そこで、pave3dには、それらの作業を支援するプログ ラム群が付属している.

入力データの作成にあたっては、入力データ作成プ ログラム pre3d を用いる.まず、層構造とその要素分 割を定義した簡単なテキストファイルを作成する.そ の定義ファイルには、以下の情報を記述する.

- 1. 層数や荷重の数
- 2. 各層の要素分割や材料定数

3. 荷重の範囲と荷重圧力

定義ファイルはたかだか数十行程度のテキストである が、節点の座標や要素と節点の関係および境界条件な どの情報に展開され、生成された FEM 入力データは数 千から数万行に及ぶファイルとなる.

fem\_3d は、前章で説明されたモデルに基づいて、入 カデータを読み込んで FEM 解析を実行するソルバー である.計算結果はテキストファイルとして出力され る.出力ファイルには、各節点の変位、応力、ひずみの データが納められており、やはり数千から数万行の大 きさになる.この数値データから、舗装全体の挙動を みたり、特定の場所における挙動を調べることは相当



図-5 計算に用いたアスファルト舗装断面

な労力となる.

p3dは、計算結果データをグラフィック出力するとと もに、必要な部分の数値データをテキスト形式で保存 することができる.グラフィックは、変形、応力、ひず みのコンターの3次元出力である.層ごとや、部分的 な表示も可能である.ある座標軸に沿っての変位、ひ ずみ、応力のデータをテキストファイルに出力すれば、 別のグラフ専用ソフトウエアによっていろいろな処理 を施すことができる.なお、本パッケージのすべての プログラムはC++系のプログラミング言語を用いて作 成した.

# 4. モデルの検証

### (1) アスファルト舗装

図-5 に示すような3層構造からなるアスファルト舗装を想定した.比較の対象として,BISARによる計算結果を利用した.pave3dによる計算に用いた要素分割を図-6 に示す.この問題のために生成された要素数は5600である.多層弾性プログラムでは軸対称を前提としているので,pave3dでは1/4の領域を要素分割した.なお,荷重は圧力が同じになるように,1辺が40cmの正方形等分布荷重として作用させた.

結果をまとめたものが表-1 である.この場合,変位 についてはBISARとpave3dとの差は大きくても8%程 度である.ひずみについては,その値が大きい場合には 7%程度の差であるが,ひずみレベルが小さくなると差 はかなり大きくなる.これらの差は,BISARが軸対称 モデルを厳密に解く手法であるのに対し,pave3d は矩 形の要素分割を用いて離散化して解く手法であるため



図-6 アスファルト舗装の要素分割図

表-1 アスファルト舗装の解析結果の比較

変位 (×10 <sup>-3</sup> cm)						
計算点	$u_x$			$u_z$		
(x, z)	А	В	A/B	А	В	A/B
0, 0	0.000	0.000	1.00	-49.97	-49.39	1.01
35, 0	-3.220	-3.155	1.02	-35.66	-35.91	0.99
50, 0	-2.950	-2.939	1.00	-29.47	-29.97	0.98
100, 0	-2.068	-2.020	1.02	-15.85	-16.89	0.94
0, -5	0.000	0.000	1.00	-50.21	-49.62	1.01
35, -5	-0.974	-1.027	0.95	-35.83	-36.08	0.99
50, -5	-1.174	-1.243	0.94	-29.57	-30.07	0.98
100, -5	-1.058	-1.155	0.92	-15.86	-16.91	0.94
0, -40	0.000	0.000	1.00	-41.00	-41.46	0.99
		ひずる	チ (×10	$^{-6})$		
計算点		$\epsilon_x$		$\epsilon$	z	
(x, z)	А	В	A/B	А	В	A/B
0, 0	-173.4	-162.8	1.07	124.4	45.9	2.71
35, 0	14.8	3.6	4.11	41.5	33.4	1.24
50, 0	18.0	15.4	1.17	22.0	19.4	1.14
100, 0	17.8	17.4	1.02	1.5	3.4	0.45
0, -5	-32.1	-32.1	1.00	-21.5	-18.2	1.19
35, -5	-21.3	-23 8	0.90	24.3	25.3	0.96
50, -5	-7.0	-7.5	0.93	16.2	16.2	1.00
100, -5	7.0	5.9	1.18	1.8	2.9	0.64
0, -40	237.2	206.8	1.15	-294.0	-343.8	0.86

A:BISAR, B:pave3d

に生ずるものである.これらのことを考慮すると,両 者の対応は満足なものであると考える.

#### (2) コンクリート舗装

コンクリート舗装の例題としては、図-7に示す構造 を想定した.コンクリート版と路盤面の境界面は、接着 した場合と、滑らかな場合の2種類を考えた.pave3d



図-7 計算に用いたコンクリート舗装断面

による計算に用いた要素分割を図-8に示す.この問題 の要素数は5832である.多層弾性プログラムでは軸対 称を前提としているので、やはり pave3d では1/4の領 域を要素分割した.なお、荷重は圧力が同じになるよう に、1辺が30cmの正方形等分布荷重として作用させた.

**表**–2 に路盤との境界面が接着の場合,**表**–3 に非接着の場合の結果をまとめた.境界面が接着されている場合にくらべ,非接着の場合には,コンクリート版上下面の応力や変位は増加し,上下面の応力の絶対値の差は減少する.この傾向は BISAR でも pave3d でも同様である.また,全体的に変位は pave3d の方が 10 から 20%小さい値をとる.応力については,荷重直下において $\sigma_x$ は pave3d の方が 7%程度ほど小さく, $\sigma_z$ はその逆である.ただし, $\sigma_z$ のレベル荷重直下以外は非常に小さい.平板モデルにおいては,通常 $\sigma_z$ は無視されているが, 3DFEM では計算することができる.アスファルト舗装の例でも述べたように,これらの差は解析手法の差から生ずるものである.

#### (3) 岩間の実験結果との比較

岩間はコンクリート舗装の力学的挙動について,実物 大の載荷実験を行った<sup>15)</sup>. その結果と比較して,pave3d の妥当性を検証する.ここでは、ダミー目地を用いた 第3試験舗装における目地縁部載荷の結果と比較する. 計算に用いた数値を実験時の条件に合わせて表-4の ように決定した.ダミー目地をシミュレートした境 界面要素を挿入した.ダミー目地にはダウエルバーが 使われており、荷重伝達がかなり高いことを予想して、  $k'_x = k'_y = k'_z = 10000 \text{ MN/m}^3$ とした.図-9に示すよ うに、長さ5m、幅 4m のコンクリート版が横目地でつ



図-8 コンクリート舗装の要素分割図

表-2 コンクリート舗装の解析結果の比較(接着境界面)

变位 (×10 <sup>-3</sup> cm)						
計算点	$u_x$		$u_z$			
(x, z)	А	В	A/B	Α	В	A/B
0, 0	0.000	0.000	1.00	-21.00	-17.71	1.19
30, 0	-0.793	-0.752	1.05	-19.31	-16.06	1.20
50, 0	-0.970	-0.911	1.06	-17.98	-14.82	1.21
100, 0	-1.082	-0.972	1.11	-14.45	-11.57	1.25
0, -30	0.000	0.000	1.00	-20.44	-17.15	1.19
30, -30	0.739	0.700	1.06	-19.31	-16.07	1.20
50, -30	0.895	0.838	1.07	-17.99	-14.82	1.21
100, -30	0.961	0.858	1.12	-14.45	-11.57	1.25
0, -45	0.000	0.000	1.00	-19.59	-15.82	1.24
		応ナ	ל (MPa	)		
計算点		$\sigma_x$		σ	z	
(x,z)	А	В	A/B	А	В	A/B
0, 0	-1.727	-1.708	1.01	-1.089	-1.227	0.89
30, 0	-0.511	-0.476	1.08	0.000	-0.037	0.00
50, 0	-0.311	-0.286	1.09	0.000	-0.030	0.00
100, 0	-0.052	-0.021	2.42	0.000	-0.011	0.00
0, -30	1.239	1.159	1.07	-0.051	-0.006	8.82
30, -30	0.520	0.487	1.07	-0.024	0.027	-0.91
50, -30	0.250	0.229	1.09	-0.013	0.016	-0.83
100, -30	0.032	0.004	7.95	-0.006	0.007	-0.85
0, -45	0.037	0.030	1.24	-0.022	-0.005	4.79

A:BISAR, B:pave3d

ながれた構造を、中心面に対する対称性を考慮して半 分のみを要素分割した.要素数は16832個であった.コ ンクリート版厚は19.9cm と24.9cm の2種類である.

結果を図-10に示す.この図は、コンクリート版中 央線に沿ったコンクリート版下面のひずみ分布である.

表-3 コンクリート舗装の解析結果の比較(非接着境界面)

計算点		$u_x$		$\iota$	$l_z$	
(x,z)	А	В	A/B	А	В	A/B
0,0	0.000	0.000	1.00	-24.07	-20.35	1.18
30, 0	-0.896	-0.854	1.05	-22.22	-18.55	1.20
50, 0	-1.117	-1.052	1.06	-20.67	-17.08	1.21
100, 0	-1.259	-1.127	1.12	-16.35	-13.10	1.25
0, -30	0.000	0.000	1.00	-23.51	-19.79	1.19
30, -30	0.917	0.875	1.05	-22.21	-18.55	1.20
50, -30	1.146	1.077	1.06	-20.66	-17.08	1.21
100, -30	1.276	1.138	1.12	-16.34	-13.10	1.25
0, -45	0.000	0.000	1.00	-23.42	-19.30	1.21
		応フ	ל (MPa)	)		
計算点		$\sigma_x$		a	z	
(x,z)	А	В	A/B	А	В	A/B
0, 0	-1.868	-1.850	1.01	-1.089	-1.240	0.88
30, 0	-0.617	-0.575	1.07	0.000	-0.047	0.00
50, 0	-0.379	-0.348	1.09	0.000	-0.037	0.00
100, 0	-0.057	-0.019	2.95	0.000	-0.014	0.00
0, -30	1.494	1.415	1.06	-0.036	0.035	-1.02
30, -30	0.697	0.656	1.06	-0.017	0.048	-0.36
50, -30	0.368	0.337	1.09	-0.011	0.030	-0.36
100, -30	0.052	0.014	3.86	-0.007	0.009	-0.73
0, -45	-0.009	0.019	-0.50	-0.024	-0.007	3.59

A:BISAR, B:pave3d

表-4 岩間の実験の解析に用いた入力条件

コンクリートの弾性係数	33320 MPa	
コンクリートのポアソン比	0.2	
コンクリート版の厚さ	19.9 cm 24.9 cm	
路盤の弾性係数	98 MPa	
路盤のポアソン比	0.35	
路盤の厚さ	$20~{ m cm}$	
路床の弾性係数	49 I	MPa
路床のポアソン比	0.35	
路床の厚さ	$300~{ m cm}$	
荷重	$5 \mathrm{tf}$	8tf
載荷面積	$40 \times 40 \text{ cm}$	

計算値は、荷重直下付近でやや大きな値となるが、全体 として実測値をうまく表現しているといえる。今回の 計算では、横目地のばね係数を経験的に定めたが、この ような実験値を解析することにより、横目地の構造に 合った合理的な値の設定が可能になると思われる.こ れについては今後の課題である.

# 5. そり変形解析

コンクリート舗装においては、コンクリート版上下 面の温度差よってそり変形が生じ、自重によって拘束



図-9 岩間の実験の要素分割図



図-10 岩間の実験の解析結果

を受けてそり応力が発生する.設計上,コンクリート版のそり応力は重要でありこれについては多くの研究があるが<sup>15),16),17)</sup>その際路盤にどのような応力が発生するかについて検討した例はない.そこで,本章ではこの点について解析を行った.pave3dでは,境界面要

表-5 そり変形解析に用いた入力条件

·	
コンクリートの弾性係数	$29400 \mathrm{MPa}$
コンクリートのポアソン比	0.2
コンクリート版の厚さ	$30~{ m cm}$
コンクリートの線膨張係数	$10^{-5} /^{\circ}C$
路盤の弾性係数	98, 590, 980 MPa
路盤のポアソン比	0.35
路盤の厚さ	$30~{ m cm}$
路床の弾性係数	49 MPa
路床のポアソン比	0.35
路床の厚さ	$260~{ m cm}$
温度勾配	0.3, 0.5, 1.0 °C/cm





図-11 そり変形解析の要素分割図

素をコンクリート版と路盤との間に挿入するによって, コンクリート版と路盤のはがれを考慮したそり変形が 可能である.**表**-5に示す条件で,計算を行った.コン クリート版下面の温度を0とし,上面に温度を与えた.

コンクリート版は長さ5m,幅4mと仮定し,構造条件の対称性を考慮し,1枚の版の1/4だけ取り出し,それを2枚,横目地を介して隣り合わせて,目地の拘束の影響を考慮することにした.このような考えによって行った要素分割図を図-11に示す.

そり変形状態および路盤応力の例を図-12および図-13に示す. 図からわかるように,温度勾配が正(上面 の温度のほうが高い)の場合には,横目地隅各部でコ ンクリート版を支えているため,その部分の応力がか なり高い. 負の場合にはコンクリート版の縁部の応力 が高く,特に目地縁部では引張応力になる. これはコ ンクリート版中央の路盤の圧縮応力が,横目地付近で

**図**-12 温度勾配が正の場合 (ΔT = 15°C) のそり変形および 路盤応力

開放されるため、その部分が上に押し上げられて逆に 引張応力となっているのである.特に、目地隅各部が そり上がったとき、路盤の最大応力はコンクリート版 と路盤が離れた付近に生ずる.このように路盤の応力 は、そり変形に伴って横目地付近にかなり集中するこ とがわかる.

図-14は、コンクリート版上下面の温度差とコンク リート版中央部下面のそり応力との関係である.そり 応力はほぼ温度差に比例している.破線は完全拘束を 仮定して計算したそり応力と、Winkler 路盤上の平板 FEM (K値は196MN/m<sup>3</sup>と仮定)によって計算したそ り応力である.pave3dによるそり応力は、完全拘束よ りも小さく平板 FEM によるものよりはやや大きい.路 盤の弾性係数が小さいと、平板 FEM にほぼ一致する が、路盤の弾性係数が大きくなるにつれ完全拘束の値 に近づいている.また、路盤の弾性係数が増加するとそ り応力もわずかであるが増加する.これは、路盤の剛 性が増加すると路盤による拘束も増加するためである.

図-15 は、コンクリート版上下面の温度差と路盤応 力との関係である.温度差が増加するにつれ、ほぼ比 例して路盤応力も増加していく.路盤の弾性係数が同 じであっても、温度勾配が負の場合よりも正の場合の



図-13 温度勾配が負の場合 ( $\Delta T = -15^{\circ}$ C) のそり変形およ び路盤応力



図-14 コンクリート版のそり応力

ほうが大きい.これは,温度勾配が正の場合,路盤応 力は目地隅各部に集中するためである.

## 6. まとめ

本研究においては、コンクリート舗装の構造解析の ために3次元有限要素法に基づいたパッケージを開発 した.基本となる構造モデルは、8節点6面体要素と境



**図-15** 路盤の応力

界面要素からなる.境界面要素の開発によって,コン クリート版と路盤との接着の状態をシミュレートでき るようになっている.また,膨大なデータ処理を支援 するプリ・ポストプロセッサが付属している.プリプ ロセッサは,舗装構造に特化した構造,荷重,境界条 件を考慮してデータファイルを生成する.

多層弾性プログラムによる計算値との比較によれば、 構造によって、変形は多くて20%、ひずみや応力は多 くて15%程度の差が認められるが、モデル自体や手法 の差を考えれば全体的な対応は満足されるものである. また、コンクリート舗装の実験結果との比較によれば、 FEM 計算値は実測値と非常に良い対応を示した.これ らのことより、pave3d の十分な妥当性が確認された.

今後, コンクリート舗装の横目地におけるダウエル バーの機能をより厳密に定式化したモデルを開発する こと,路盤の非線形な挙動をモデル化した構成則を導 入して,路盤の塑性変形など,路盤の劣化現象を解析 できるモデルを開発すること,さらに,アスファルト 舗装の粘弾性挙動を解析できるように,動的問題への 拡張などを考えている.

謝辞:本研究の一部は,文部省科学研究補助金(基盤研究(B),研究代表者:西澤辰男)の援助を受けた.こ

こに記して感謝の意を表する.

#### 参考文献

- Westergarrd, H.M.: Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc. of HRB, Vol.5, pp.90-112, 1925.
- 2) 日本道路協会:セメントコンクリート舗装要綱,丸善, 1981.
- 3) コンクリート標準示方書, 舗装編, 土木学会, 1995.
- 4) Huang, Y.H., and Wang, S.T.: Finite Element Analysis of Concrete Slabs and Its Implication for Rigid Pavement Design, HRR, Vol.446, pp.55-69, 1973.
- Tabatabaie, A.M., and Barenberg, E.J.: Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements, TRR, No.671, pp.11-17, 1978.
- 6) 福手勤,八谷好高,山崎英男:コンクリート舗装の目地 部における荷重伝達機能,港湾技術研究所報告,Vol.21, No.2, pp.207-236, 1982.
- 7) 西澤辰男,福田正,松野三朗:コンクリート舗装版の横 目地における力学的挙動の解析,土木学会論文集,第 378 号/V-6, pp.185-193, 1987.
- 8) 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,第613号/V-42, pp.237-247, 1999.
- 9) 竹内康:路盤の支持力変化を考慮したコンクリート舗装設計法に関する研究,長岡技術大学博士論文,2000.
- 10) United States General Accounting Office: Transportation Infrastructure, Highway Pavement De-

sign Guide Is Outdated, Report to the Secretary of Transportation, GAO/RCED-98-9, 1997.

- Proc. of National Conference on 3 Diemnsional Finite Element Method for Pavement Design, Charlestone, West Virgnia, 1998.
- 12) 西澤辰男,笠原篤:舗装の構造解析および設計に対す る3次元有限要素モデルに関するシンポジウム,舗装, Vol.34, No.4, pp.28-30, 1999.
- 13) 西澤辰男:舗装構造解析用 3 次元有限要素法パッケージ, 2000 (http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/ pave/ hoso-ml/ download.html)
- 14) O.C. ツィエンキーヴィッツ, 吉識雅夫, 山田嘉昭監訳: マトリックス有限要素法, 培風館, 1996.
- 15) 岩間滋:コンクリート舗装の構造設計に関する実験的 研究,土木学会論文集,第111号,pp.16-46,1964.
- Bradbury, R.D.: Reinforced Concrete Pavements, Wire Reinforcement Institute, Washington, D.C., 1938.
- 17) Harik, I.E., Jianping, P., Southgate, H. and Allen, D. :Temperature Effects on Rigid Pavements, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.120, No.1, pp.127-143, 1994.

(2000.7.31 受付)

## DEVELOPMENT OF A PACKAGE FOR ANALYSIS OF CONCRETE PAVEMENT BASED ON 3 DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD Tatsuo NISHIZAWA

A program package for analysis of concrete pavement based on 3 dimensional finite element method (pave3d) was developed. In the structural model of pave3d, concrete slab, base course and subgrade are divided into solid elements with 8 nodes and interface between the concrete slab and the base course or joint is modeled by a interface element which has originally been developed in this study. The validity of this model was verified by comparing the computed results with the results by a multi elastic layer program and the experimental data. Furthermore, the stress states in the base course due to curling of the concrete slab were also analysed.