

**投稿論文** (和文報告)

**TECHNICAL  
REPORT**

# プレキャストコンクリート舗装の温度応力に関する基礎的検討

西澤辰男<sup>1</sup>・野田悦郎<sup>2</sup>・福田 正<sup>3</sup>

<sup>1</sup>工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-03 河北郡津幡町北中条)

<sup>2</sup>日本道路(株)技術研究所 主任研究員 (〒146 東京都大田区多摩川 2-11-20)

<sup>3</sup>工博 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

プレキャストコンクリート舗装(PCCP)の設計にあたっては、荷重応力とともに温度応力の検討が必要である。本研究においては、試験施工において実測した温度ひずみを平均成分、そり成分、非線形成分に分離し、それぞれが拘束されることによる温度応力について検討した。その結果、PCCPにおいて、路盤摩擦の拘束による温度応力および非線形成分による温度応力は、引張成分としては小さく無視できることが分かった。そり応力については、接合条件を適切に考慮する路盤モデルを用いたFEMによって計算が可能であることを示した。

**Key Words :** precast concrete pavement, thermal stress, warping, FEM analysis

## 1. まえがき

プレキャストコンクリート舗装(Precast Concrete Pavement:PCCP)は通常のコンクリート舗装とは異なり、工場で作製された1辺が1.0~2.0mの比較的小さな寸法のコンクリート平板を路盤上に設置して施工されたものである。このようなPCCPに対する合理的な設計法は確立されておらず、コンクリート舗装の構造設計法<sup>1)</sup>が準用されている。しかしながら、PCCPの力学的挙動は通常のコンクリート舗装とはかなり異なるため、その違いについては十分な検討が必要である。著者らは、交通荷重に対するPCCPの力学的挙動についての検討を行い、コンクリート舗装との違いについて明らかにした<sup>2)</sup>。

コンクリート舗装の設計においても一つの重要な問題として温度応力がある。コンクリート舗装の温度応力は、水平応力、そり応力および内部応力の3つに分けて考えることができる。水平応力は、コンクリート版内の平均温度が変化することによる平面的な伸縮が、路盤との摩擦や端部における拘束によって妨げられるために生ずる応力である。そり応力は、コンクリート版の上下面の温度差によるそり変形が、自重や路盤の作用によって拘束されるために生ずる応力である。内部応力は、コンクリート版の深さ方向の温度分布が直線でないために生ずる応力である。

わが国のコンクリート舗装の設計においては、実験結果からそり応力を基本として次式を用いている<sup>3)</sup>。

$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta t \quad (1)$$

ここに、

- $\sigma_t$  : コンクリート版の温度応力
- $C_w$  : 横目地間隔によって定まる係数
- $\alpha$  : コンクリートの線膨張係数
- $E$  : コンクリートの弾性係数
- $\Delta t$  : コンクリート版上下面の温度差

$C_w$ の値は横目地間隔ごとに表の形で与えられているが、本研究で対象としているPCCPのような目地間隔5m未満に対する値は示されていない。そこで本研究においては、1辺が2m程度の平板を用いたPCCPの温度応力を算定するために、試験舗装における実測と数値解析によって検討した。

## 2. 試験舗装における実測

### (1) 試験舗装

合材センター構内(新潟県小須戸町)に施工された試験舗装の平面図と舗装構成を図-1に示す。平板の寸法は、厚さ150mm、平面形状が1000×2000mm(Panel C)、2000×2000mm(Panel B)、2000×3000mm(Panel A)の3種類を図に示すような形で配置した。路盤は通常の厚さ20cmの粒調砕石路盤である。

工場で作製されたコンクリート平板を現場に搬入し、路盤に所定高さにセットした後、平板と路盤の間に行ける隙間(10~20mm)にセメントグラウトを注入した。隣接する平板間には厚さ10mmの成形目地を挟んでいるだけで、荷重伝達装置は施していない。室内試験により得られたコンクリートの性状および現場で測定

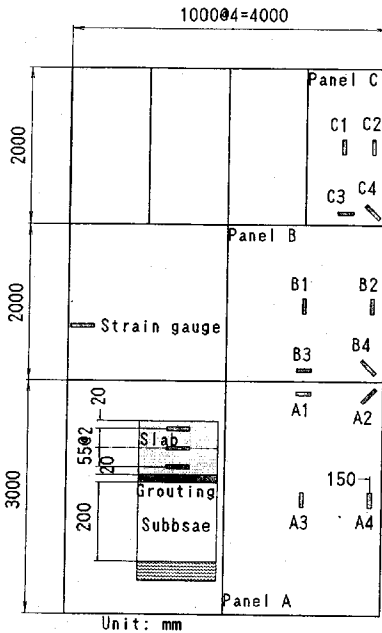


図-1 試験舗装の概要

表-1 実測されたコンクリートの材料および路盤性状

項目	数値
コンクリートの弾性係数	411,000 kgf/cm <sup>2</sup>
コンクリートのポアソン比	0.21
路盤 $k_{30}$ 値	24.4 kgf/cm <sup>3</sup>

された路盤  $k$  値を表-1に示す。

図-1には主な測定計器の位置も示した。それぞれのパネルの中央部、縁部、隅角部、すなわち図中のA1からC4の記号を付した個所に、埋め込みひずみゲージおよび熱電対を厚さ方向の上中下に埋め込んでおいた。

## (2) 測定

測定は施工から約一か月経過した時点で、比較的溫度勾配の大きい初夏（平成5年6月16日）に実施した。施工後、ダンプトラックによる交通に開放しておいたが、段差、ひびわれ、過度の目地の開きなどは見られなかった。16日午後2時から翌日の午後2時までの24時間にわたり、30分ごとにひずみと溫度を測定した。図-2～5はパネルAの中央部における測定結果である。

図-3のひずみは、測定時間内において溫度勾配が最小となる時刻（午前6時3分）のひずみを0として、そこからの変化量として表している。なお、この時刻における上下面の溫度差は0.1°C程度であり、ほとんど温

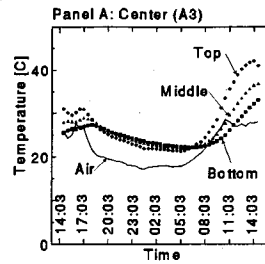


図-2 パネルAの中央部における溫度の変化

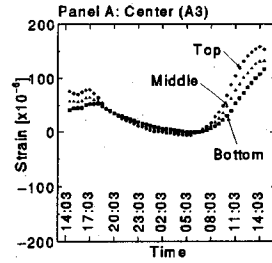


図-3 パネルAの中央部におけるひずみの変化

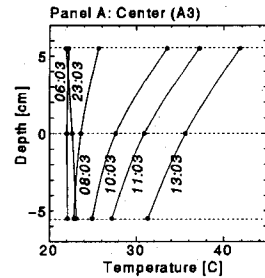


図-4 パネルAの中央部における溫度勾配の変化

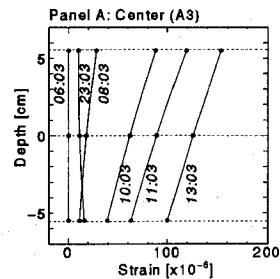


図-5 パネルAの中央部におけるひずみ勾配の変化

度勾配は0と考えてよい。平板の溫度は日中において上面部が高く、夜間においては下面部の方がわずかに高い。今回の測定においては上面部において最高43°Cであり、平均溫度の1日の変動幅は約16°C程度であった。ひずみも溫度に伴って変化し、日中上面部が大きく、夜間は下面部が小さい。ひずみの1日の変動量は約

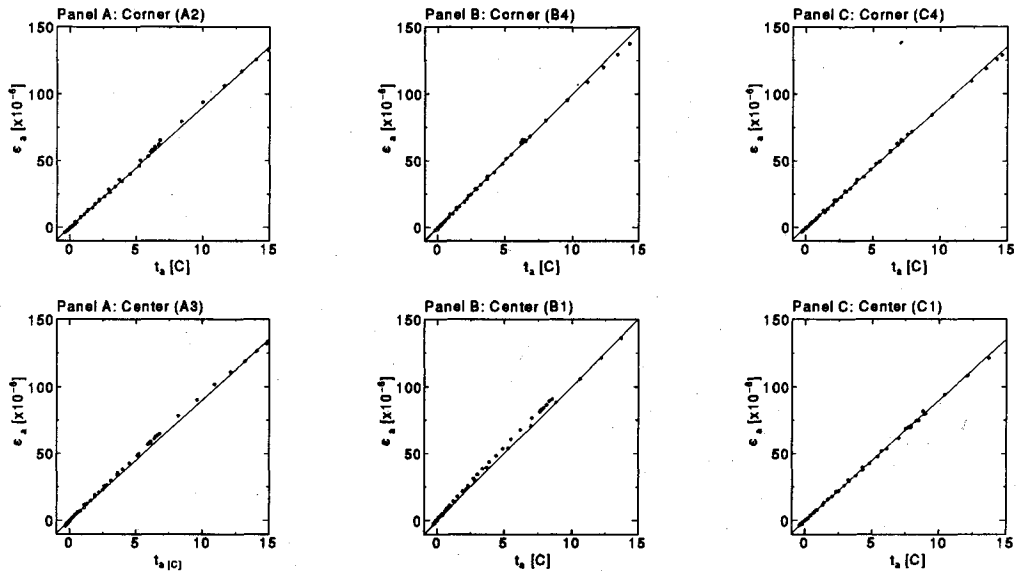


図-7 平板の平均ひずみ $\epsilon_a$ と平均温度 $t_a$ の関係

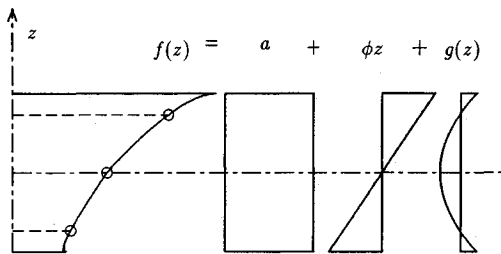


図-6 深さ方向の温度とひずみ分布の分離

150 $\mu$ 程度であった。図-4および図-5は、それぞれ温度およびひずみの厚さ方向の分布を示しているが、ほぼ直線に近いことが分かる。

これらすべてのデータを深さ $z$ 方向について、平均成分、そり成分および非線形成分に分離して整理することにした。すなわち、深さ分布を次式のように表す。

$$f(z) = a + \phi z + g(z) \quad (2)$$

ここに、

- $f(z)$  : 温度あるいはひずみの深さ方向の分布
- $a$  : 平均成分
- $\phi$  : 深さ方向の勾配
- $g(z)$  : 非線形成分

そこで、実測値を深さ方向の2次式で近似し、平均成分とそり成分の和を1次式で近似することにする。2次式の3つの係数は平板の上中下に埋め込まれた計器の実測値から決定した。また、1次式の2つの係数は以

下の条件より決定した。

$$\int_{-h/2}^{h/2} g(z) dz = \int_{-h/2}^{h/2} f(z) - (a + \phi z) dz = 0 \quad (3)$$

$$\int_{-h/2}^{h/2} g(z) z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \{f(z) - (a + \phi z)\} z dz = 0 \quad (4)$$

### 3. 平均ひずみ

#### (1) 水平応力の算定法

水平応力は、温度変化によって生ずる自由ひずみから実際に生じたひずみを引いた拘束ひずみに弾性係数を乗ずることによって算定する。拘束の度合いは、自由ひずみから実測ひずみを引いた値を、自由ひずみで割った値として表すことができる。

#### (2) 実測値による検討

図-7は、平板の平均ひずみ $\epsilon_a$ と平均温度 $t_a$ の関係である。この図においては、平均ひずみおよび平均温度ともに、温度勾配がほぼ0となった午前6時3分における値からの変化量をプロットしている。それぞれのパネルについて左からA, B, Cの順に、隅角部における実測値を上段に、中央部における実測値を下段にまとめて示した。本試験舗装の隅角部においては端部の拘束がないので、ここでのひずみは自由ひずみと考えてよい。したがって、それぞれのパネルの隅角部におけるこれらの実測値の傾きからコンクリートの線膨張係数 $\alpha$ を算定することができる。それらの値はパネルA, B

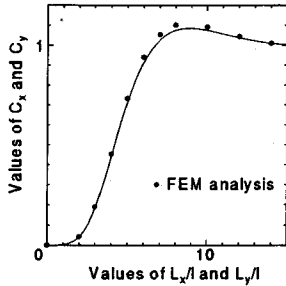


図-8 Bradburyによるそり拘束係数

およびCにおいてそれぞれ、9、10および $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。図中の直線はこれらの値を用いて計算した自由ひずみである。

中央部で実測されたひずみがほとんどこの直線に乗っていることから、今回用いた平板において水平方向の拘束はほとんどないということがいえる。したがって、 $15^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変化の場合には目地の影響はなく、路盤との摩擦による影響も無視できる。

#### 4. そりひずみ

##### (1) そり応力の算定法

そり応力については、Bradburyが、Westergaardの考え方に基づいたWinkler路盤上の弾性平板のモデルを用いて理論計算を行い、次式を提案している<sup>4)</sup>。

- 自由縁部に対して:

$$\sigma_{\phi} = \frac{CEat_{\phi}}{2} \quad (5)$$

- 中央部に対して:

$$\sigma_{\phi} = \frac{Eat_{\phi}}{2} \left( \frac{C_x + \mu C_y}{1 - \nu^2} \right) \quad (6)$$

ここに、

- $\sigma_{\phi}$  : そり応力
- $C, C_x, C_y$  : 境界条件により定まる係数
- $\nu$  : コンクリートのポアソン比
- $t_{\phi} = \phi_t \cdot h$  : 上下面の温度差
- $\phi_t$  : 厚さ方向の温度勾配
- $h$  : 版厚

係数 $C, C_x, C_y$ は、図-8によってコンクリート版の幅 $L_x$ 、長さ $L_y$ および剛比半径 $l$ から求めることができる。ここに、 $l = \sqrt[3]{Eh^3/12/(1-\nu^2)/k}$ である。

一方、平板モデルを用いた数値計算法であるFEMによってもそり応力を計算することができる。そのときの剛性方程式は次式となる<sup>5),6)</sup>。

$$(\mathbf{K} + \mathbf{H}) \cdot \mathbf{d}_e = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v - \mathbf{H} \cdot \mathbf{d}_i \quad (7)$$

ここに、

- $\mathbf{K}$  : コンクリート版の剛性マトリックス
- $\mathbf{d}_e$  : 節点変位ベクトル
- $\mathbf{f}_s$  : 交通荷重ベクトル
- $\mathbf{f}_v$  : 自重ベクトル
- $\mathbf{d}_i$  : そり変形ベクトル
- $\mathbf{H}$  : 路盤の剛性マトリックス

$\mathbf{d}_i$ は、 $i$ 節点においては次のようになる。

$$\mathbf{d}_{ti} = \begin{Bmatrix} w_{ti} \\ \theta_{xti} \\ \theta_{yti} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w_{ti} \\ -\frac{\partial w_{ti}}{\partial y} \\ \frac{\partial w_{ti}}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

また温度勾配によるそり変形は次式で計算できる。

$$w_{ti} = -\frac{3M_t}{4h^3E}(x_i^2 + y_i^2) \quad (9)$$

ここに、

- $M_t = \alpha E \int_{-h/2}^{h/2} t(z) dz$
- $z$  : 平板内の厚さ方向の座標
- $t(z)$  : 平板内の厚さ方向の温度分布
- $x_i$  :  $i$ 節点の $x$ 座標
- $y_i$  :  $i$ 節点の $y$ 座標

このとき、路盤との接合条件として2つの考え方があられる。一つは路盤と平板が完全に接合されており、たとえ平板が路盤から持ち上がったとしても平板と路盤は接合されたままであるというもので、本研究においてはモデル1と呼ぶことにする。他の一つは、平板が路盤から持ち上がったなら、その部分の接合はないと考えるものであり、モデル2と呼ぶことにする。

モデル1は取扱いが容易であり、Bradburyの解析においてもこの考え方に基づいている。モデル2の場合、剛性方程式が非線形になるため、繰り返し計算が必要になる。本研究においては、非線形方程式を解くアルゴリズムとしてNewton-Raphson法を採用しており、3~5回の繰り返しで解を得ることができる。図-8には、Bradburyと同様の路盤モデルを用いFEMによって計算した拘束係数の値をプロットした。理論的前提が同一なので、当然のことながらよく一致している。本研究においては、グラウトによる路盤と平板との接合を考慮するために2つのモデルを想定することにした。したがって、そり拘束ひずみの計算にこれらのモデルを取り扱うことができるFEMを用いた。

##### (2) 実測値による検討

図-9は上下面のひずみ差 $\epsilon_{\phi}$ と温度差 $t_{\phi}$ の関係を、それぞれのパネルの中央部、縁部について示したものである。図は左からパネルA、BおよびC、上段から中央部、長辺縁部および短辺縁部の順にまとめてある。隅角部においてはほとんど拘束の影響がなかったため、こ

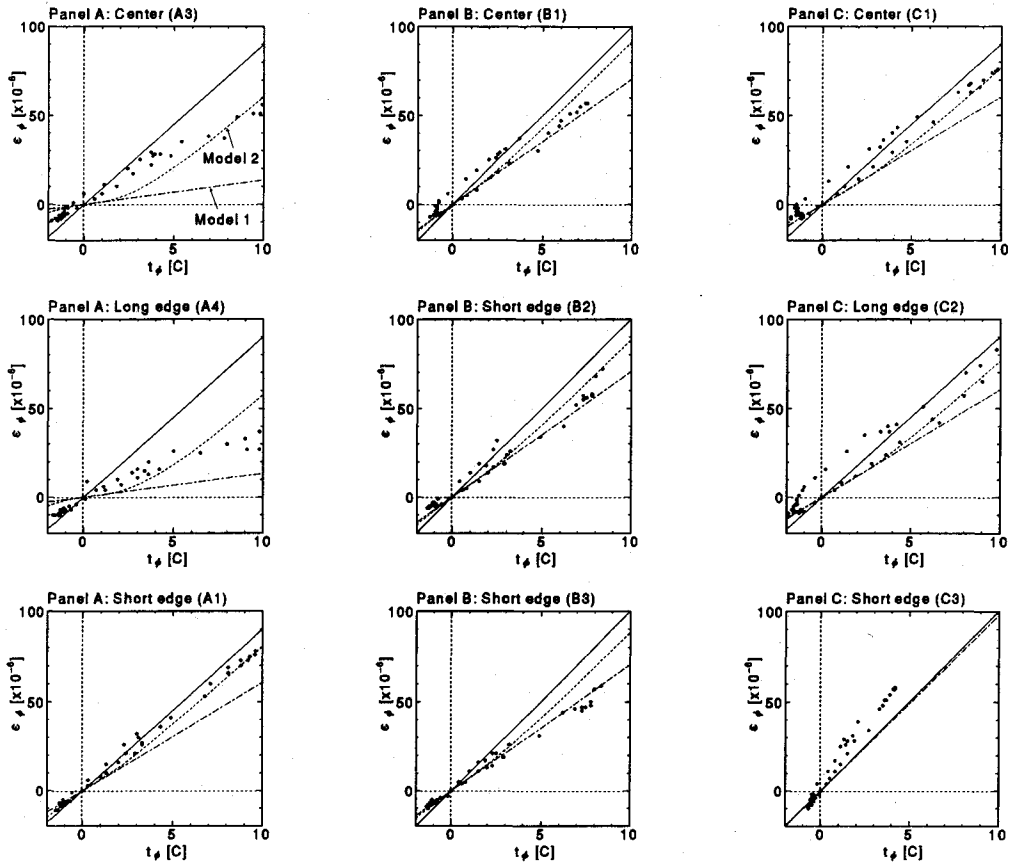


図-9 平板の上下面ひずみ差 $\epsilon_\phi$ と温度差 $t_\phi$ の関係

ここではそれらの結果は省略した。図中の直線は先に求めたコンクリートの線膨張係数を用いて算定した自由ひずみである。

そりの場合、実測ひずみが自由ひずみよりも小さな値を示しており、そり変形が拘束されていることが分かる。図中の一点鎖線および点線はFEMによる計算値であり、それぞれ平板が持ち上がったときに路盤との接合を切らない場合(モデル1)と切った場合(モデル2)のものであることを示している。FEMの計算にあたっては、実測された表-1の値を入力値とし、 $100 \times 100$  mmの要素を用いた。

パネルAの場合、実測値は2つのモデルの計算値の中間にあり、中央部および短辺縁部はややモデル2の計算値に近く、長辺縁部はモデル1の計算値に近くなっている。パネルBの場合、温度差が小さい領域においては測定値がややばらついているが、モデル1の計算値とよく一致している。パネルCの場合、全体的に実測値にばらつきが大きくあまり明確なことはいえないが、短辺縁部を除くとモデル2の計算値にほぼ対応しているといえる。

表-2 PCCPのそり応力

パネル	モデル	中央部	長辺縁部	短辺縁部
A	1	17.0	16.1	5.5
A	2	7.9	8.4	2.5
B	1	7.0	6.0	6.0
B	2	2.6	3.0	3.0
C	1	6.4	5.9	0.2
C	2	3.4	3.5	0.1

単位:kgf/cm<sup>2</sup>

FEMによってそれぞれのパネルのそり拘束応力を計算した結果が表-2である。モデル1を仮定した場合、中央部にあつては平板の大きさが大きいほど、縁部にあつては辺の長さが長いほど拘束が大きいため応力も大きくなっている。モデル2の場合には、必ずしもそのような傾向にはなっておらず、パネルCの長辺方向の応力がパネルBの応力よりも大きくなっている。このような場合には平板の形状の影響が大きく、細長い平板においては応力の発生が長辺方向に片寄るためである。

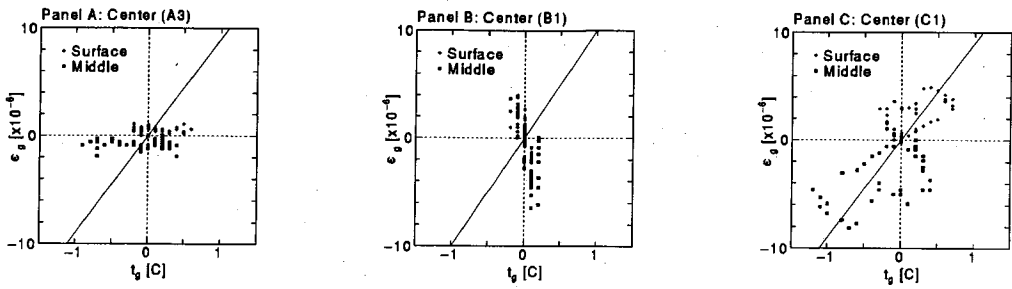


図-10 ひずみの非線形成分 $\epsilon_g$ と温度差の非線形成分 $t_g$ の関係

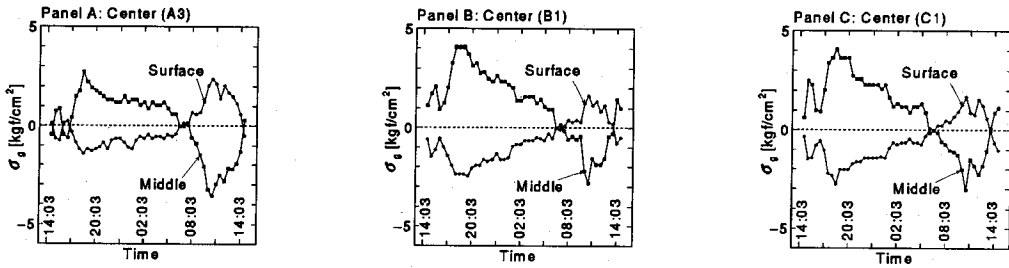


図-11 内部応力 $\sigma_g$ の時間的变化

## 5. 内部ひずみ

### (1) 内部応力の算定

内部応力は、厚さ方向の温度分布が線形でないことから生ずる応力であり、次式によって計算される。

$$\sigma_g = \frac{\alpha E}{1 - \nu} t_g \quad (10)$$

ここに、

$\sigma_g$  : 内部応力  
 $t_g$  : 温度の非線形成分

次項でみるように実際にはひずみにも非線形成分が存在し、自由ひずみからその成分を引いた拘束ひずみから応力を算定しなくてはならない。

### (2) 実測値による検討

図-10は、温度の非線形成分 $t_g$ とひずみの非線形成分 $\epsilon_g$ の関係を示したものである。黒丸は表面部、四角は中立面の実測値を示している。本来、平面保持の仮定の下ではこのようなひずみは現れないが、実測すると図にあるように最大 $8\mu$ 程度生じている。図中の直線は先に求めたコンクリートの線膨張係数から計算される自由ひずみである。実測値はこの直線に載っておらず、実測されたひずみは自由ひずみではないことが分かる。また、 $t_g$ と $\epsilon_g$ の間に明瞭な関係は認められない。

そこで、自由ひずみから実測ひずみの非線形成分を引いた拘束ひずみから内部応力を計算し、その時間的变化を示したのが図-11である。表面部においては、日中にはやや大きな引張応力となるが、その値は最大で

も $3\text{kgf/cm}^2$ とそれほど大きくない。中立面においては、夜間に $4\text{kgf/cm}^2$ とやや大きな引張応力が生ずる。

以上の結果より、今回の試験舗装に用いた寸法の平板であれば、設計上問題となる表面部の引張応力はわずかであり、内部応力は無視してもよいといえる。

## 6. まとめ

本研究においてはPCCPの温度ひずみについて、試験舗装における実測とFEM解析によって検討を行った。実測された温度およびひずみを、平均成分、その成分および非線形成分に分け、それらの拘束による温度応力について検討した。その結果、水平拘束ひずみおよび内部ひずみは小さく、設計においては水平応力および内部応力は無視してよいことが分かった。一方、その拘束ひずみは他の拘束ひずみに比べてかなり大きく設計上問題となるが、適切な路盤との接合条件を用いたFEMによって算定することができる。

本研究においてPCCPの温度応力に関する基本的な特性は明らかになったと思われる。PCCPを重交通舗装に適用するためには、供用に伴う平坦性の変化などの舗装としての機能的な要素に関する研究をさらに進

める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会: セメントコンクリート舗装要綱, 丸善, 1992.
- 2) 西澤辰男, 野田悦郎, 福田正: プレキャストコンクリート舗装の力学的特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No.496/V-24, pp.81-88, 1994.
- 3) 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, 土木研究所報告, 第112号, 1962.
- 4) Yoder, E.J. and Witczak, M.W.: *Principles of Pavement Design*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1975.
- 5) 西澤辰男: コンクリート舗装版のそり応力に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, V-38, 1993.
- 6) 蛭川 明, 西澤辰男, 福田 正: そり変形を受けたコンクリート舗装版の荷重応力に関する検討, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, V-443, 1993.

(1994.4.11 受付)

## A FUNDAMENTAL EXAMINATION OF THE THERMAL STRESS OF PRECAST CONCRETE PAVEMENTS

Tatsuo NISHIZAWA, Etsuro NODA and Tadasi FUKUDA

In this paper, the thermal stress of precast concrete pavement (PCCP) is discussed based on the experiment and FEM analysis. The thermal strains measured in the test pavement were divided into three components; axial, warping and nonlinear components, and examined by FEM. Axial and nonlinear components were small in the term of tensile stress, and could be neglected in the structural design. On the other hand, warping component was found to be significant and could be estimated by FEM with appropriate subbase model.



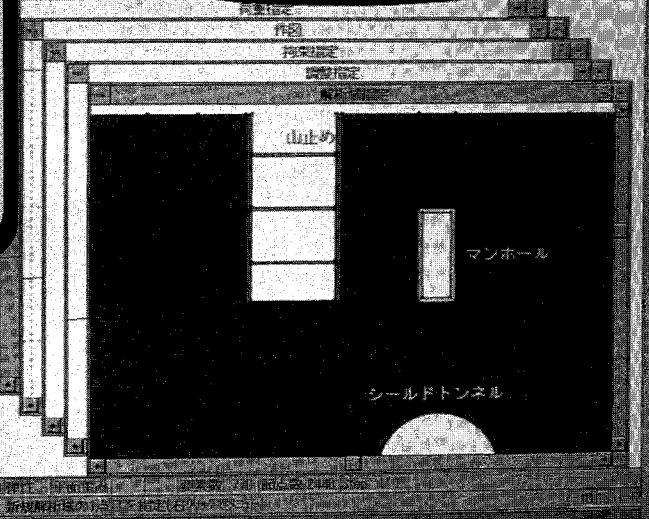
道路公団、建設省、通産省の  
研究機関をはじめ、ゼネコン  
やコンサルのユーザーは既に

**170社**以上

土木学会第19回情報システム  
シンポジウムにて**受賞**

「日経コンストラクション」  
コンピュータ応用技術  
**特集記事** 掲載

あの人気の  
**夢の構造解析システム**  
もうご存知ですか

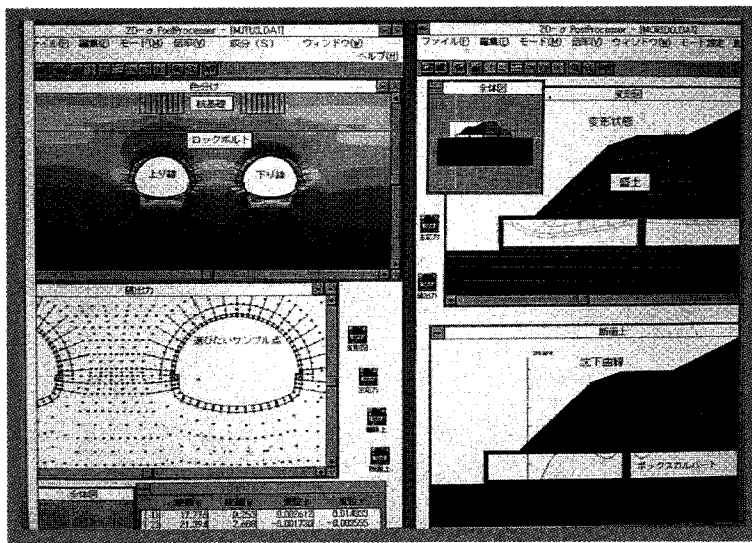


お確かめください。世界の土木構造解析をリードする。

**斬新なコンセプトと驚異の自動化・高速化・大容量**

大型機で数日間かかった解析がパソコンでわずか数十分間で！ 有限要素を意識せず、  
誰でも、どこでも、低コストで簡単に！ (一般技術者がノートPCによる現場解析も楽々)

- 有限要素の概念は一切表に出ない。解析の条件とプロセスを内蔵の高性能CADで作成した図面へ直感的に与えるのみ。土木構造解析特有の面倒な解析に特に有効(ステップ施工、掘削、盛土、支保、近接・拡幅、接触問題など)。
- 膨大な解析容量(1万節点以上)と驚異の演算速度(例えば5000節点前後の解析は66MHzのPCでも2、3分間で完了)。
- 豊富な入出力図面に編集を加え、コメントやキャプチャーを付けた上、最終成果物としてあらゆる出力装置へ出力できる。ワープロや表計算などの他のソフトにも図面を転送できるので設計技術者が夢見る調査・設計・評価の一括自動化を実現。
- 土木解析に必要な機能のほとんどに対応(非線形、弾塑性、接触面、熱応力、地震慣性力等)。



土木業界で大好評

詳細資料提供

開発・販売



ソフトプレーン(株)

本社：〒001 札幌市北区北37条西4丁目 王陽ビル

お問合せは 03-3592-7659

Tel 011-736-7009 Fax 011-736-7449

# 地震を科学するCRC専門技術

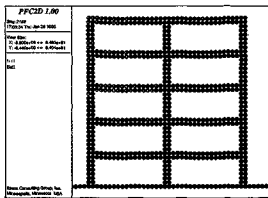
耐震  
免震

倒壊、瓦解  
崩壊

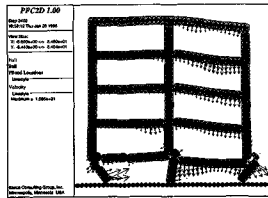
CRCでは、地盤、岩盤、橋梁構造物、地中構造物、ビル等の耐震、崩壊、安定性、液状化等、地震に関する種々の解析・評価を支援する専門技術を備えております。

断裂  
亀裂

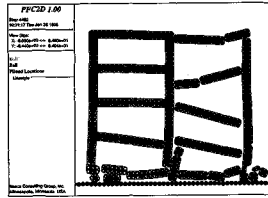
液状化



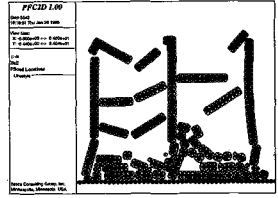
初期形状



崩壊モード(1)

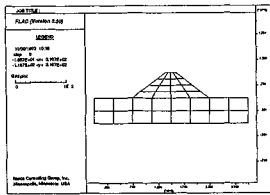


崩壊モード(2)

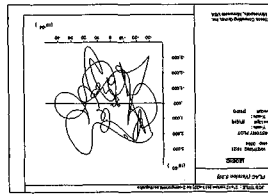


崩壊モード(3)

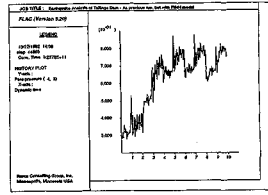
## 地震による建物の崩壊過程 (PFC使用)



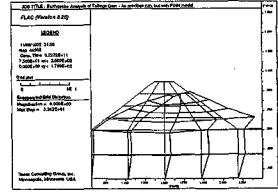
初期形状



歪みの時間軌跡



間隙水圧の時刻歴



破壊状態

## 地震によるフィルダムの液状化による破壊 (FLAC使用)

### 解析コード

- SHAKE : 地盤地震応答解析プログラム
- DYNA2E : 骨組構造物の耐震解析プログラム
- DINAS : 構造物-地盤連成地震応答解析プログラム
- UDEC, 3DEC : 2次元, 3次元個別要素法プログラム
- FLAC, FLAC-3D : 2次元, 3次元有限差分法プログラム
- PFC, 3DPFC : 2次元, 3次元粒状体挙動解析プログラム
- SLOPE, Mr. SOIL : 地盤安定解析プログラム
- KASETU-5X : 矢板連続壁の仮設計プログラム



柱の崩壊 (3DEC使用)

株式会社 **CRC総合研究所**

本社 建設技術部  
〒103 東京都中央区日本橋本町3-6-2 <TEL> (03) 3665-9741  
西日本事業部 科学システム営業部  
〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 <TEL> (06) 241-4121

# 地盤の有限要素法解析ソフト

未来設計企業  
**CRC**

世界標準のソフトウェア

## Mr.SOIL Ver.3.0 WINDOWS 版

Mr. SOILの新バージョン (Ver.3.0) はWindows®で稼働する強力なシステムに生まれ変わり大モデルも扱えるようになりました。  
また、マウスを使ったメニュー形式の導入、画面上での出力が可能になるなどの新機能により、すぐれた操作性をもたらします。

※Windowsは、米国マイクロソフト社の登録商標です。

### バージョンアップ項目

#### 入力部

- モデル作成のためのメッシュジェネレート機能。
- モデル図を参照しながら荷重条件、境界条件、材質条件、はり、棒要素のデータをメニュー画面のテーブルにより入力することが可能。

#### ソルバー部

- 強制変位。
- 解析途中の材質の変更。(薬注施工のモデル化)
- 節点数制限のUP。(約3000節点が可能)

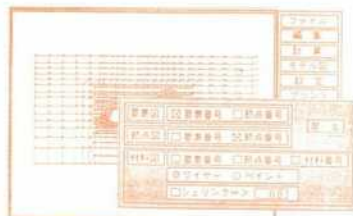
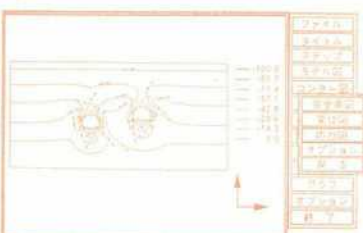
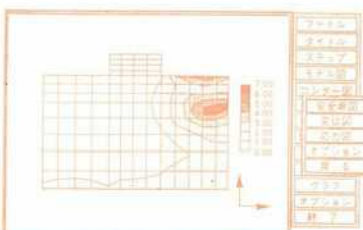
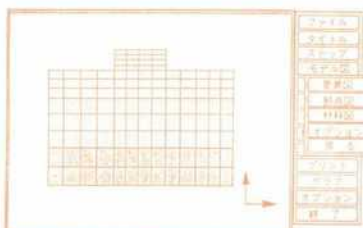
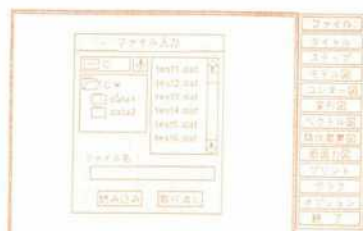
#### 出力部

- 線画だけでなく画面塗りつぶし処理が可能。
- マウス入力とメニュー型式による操作性の大幅な向上。

#### 動作環境

CPU 80386 以上 (推奨 80486 以上)  
Windows 3.1 以上  
メモリ 640Kbyte + 7Mbyte (プロテクトメモリー)  
ハードディスク 10Mbyte以上

以上のメモリーは今後、改良により小さくなる場合もあります。



製品版は、一部異なる場合があります。

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本事業部

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3  
(06)241-4121 担当/村中 一意