

プレキャストコンクリート舗装の力学特性に関する基礎的検討

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 (PCCP) は、工場で製作された比較的寸法の小さなコンクリート平板を路盤の上に設置して施工される。本研究においては、3つの基本的な荷重条件について、試験施工において実施した荷重実験とFEM解析によってPCCPの力学特性について検討した。特に、平板の持ち上がりによる非線形的な挙動を考慮したFEM計算法を提案し、その妥当性を確認した。解析の結果、コンクリート平板の形状は正方形が最適であり、寸法が大きくなるほど平板に発生する応力が大きくなり、小さいほどたわみが大きくなることを定量的に示した。

Key Words : precast concrete pavement, geometry and size of plate, stress, deflection, 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、工場で製作された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。製造、運搬、設置の都合を考慮し、コンクリート平板の寸法は基本的には1辺が1.5~2.0m程度であり、コンクリート平板相互の連結は単純な突合せ目地が一般的である。工場製作されたコンクリート平板を用いるため、十分な強度を有し品質が安定していること、施工にあたって大型の施工機械が必要ないこと、養生期間も必要ないことなどが最大の特長である^{1)~3)}。また、補修も破損した平板を取り替えるだけであり、比較的容易である。さらに、コンクリート平板内に特殊な装置を付加することにより、高機能な舗装を施工する試みもあり^{4),5)}、歩道や軽交通舗装のみならず、重交通舗装にもその適用範囲は拡大しつつある。

しかしながら、平板自体の寸法が小さいため、目地の密度が高く必ずしも平坦性は良くないこと、コンクリート平板自体の荷重分散能力が低いなどの欠点も有している。特に、平板の形状や寸法によって舗装の荷重分散能力や平板内の応力状態が大きな影響を受けるため、平板寸法を決定するにあたっては製作や施工における制限に加え、舗装としての力学的な特性を十分に把握しておくことが重要である。

本研究の目的は、交通荷重に対するPCCPの力学的な挙動を把握することにある。PCCPの応力解析に平板FEMモデルを採用し、特に路盤の支持条件を厳密に定式化した。このFEMモデルを、試験舗装において実施した荷重実験の結果に適用することによって、その有効性を検証した。

PCCPの力学的挙動においては、平板単体の形状寸法の影響を無視しえない。そこで、PCCPの舗装としての挙動を検討するために、FEMによる数値シミュレーションによって、目地による荷重伝達を期待せず、平板単体としての力学性状

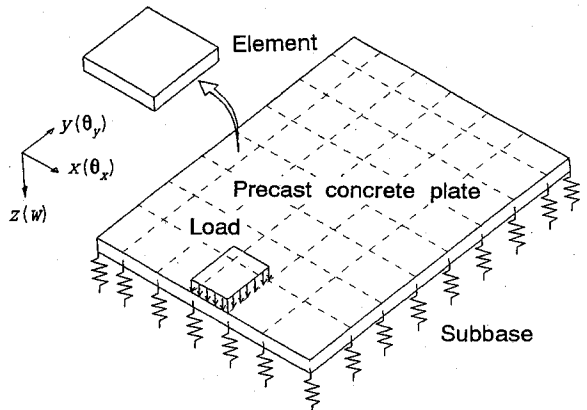


図-1 PCCPのFEMモデル

について詳細に検討した。

2. FEM解析法

(1) 構造解析モデル

コンクリート平板の力学的挙動を解析するための基本となるモデルは、コンクリート舗装の場合と同様にばね支承 (Winkler支承) 上の弾性平板モデルである。このモデルに基づいたコンクリート舗装構造の支配方程式は以下のようなになる。

$$D\nabla^2\nabla^2w = p - q \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$
- E : コンクリートの弾性係数
- h : コンクリート平板厚
- μ : コンクリートのポアソン比
- $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$
- w : コンクリート版のたわみ
- p : 荷重
- $q = k \cdot h$: 路盤反力
- k : 路盤k値

* 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 (〒929-03 河北郡津幡町北中条)
 ** 日本道路(株)技術研究所 主任研究員
 *** 正会員 工博 東北大学教授 大学院情報科学研究科

コンクリート舗装の力学的挙動に関する古典的な研究としては、Westergaardの一連の研究がある⁶⁾。ただし、これらは無限あるいは半無限に広がったコンクリート版を想定しており、コンクリート平板の形状を考慮することはできない。そこで本研究においては、PCCPの解析にあたって汎用性の高いFEMモデルを用いる⁷⁾。

FEMモデルにおいては、図-1に示すように、コンクリート平板を平板要素に分割し、路盤はこれに作用する反力として取り扱う。交通荷重は要素に作用する等分布荷重とする。PCCPをFEMでモデル化した場合、基本となる剛性方程式は以下のようなになる。

$$(K + H) \cdot d = f - q \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

- K : コンクリート版の剛性マトリックス
- H : 路盤の剛性マトリックス
- d : 節点変位ベクトル
- f : 交通荷重ベクトル
- q : 路盤反力ベクトル

Kは通常の長方形平板要素の剛性マトリックスである。Hは路盤モデルによって各種のものがあるが、Winkler支承モデルに基づけば簡単な対角マトリックスとなり、その要素は路盤k値とおおのこの要素の面積の関数となる。

このFEMを用いることによって、様々な構造条件、載荷条件におけるPCCPの力学的な挙動を解析することが可能である。

(2) 路盤モデル

本研究においては路盤モデルとしてWinkler支承モデルを用いた。このモデルは、路盤反力が平板のたわみに比例すると仮定されたもので、取扱いが容易である。これは以下に示すような路盤との接合条件を考慮していく際に便利である。

寸法の小さな平板の端部に荷重が作用すると、もう一方の端部が路盤面よりも上に持ち上がるという現象が見られる。このとき持ち上がった部分と路盤との接触は失われ、同時にその支持も失うことになる。このような平板の持ち上がり現象を考慮に入れるために、以下のような路盤条件を設定した。

$$q = \begin{cases} k \cdot (w - w_0) & ((w - w_0) \geq 0 \text{ のとき}) \\ 0 & ((w - w_0) < 0 \text{ のとき}) \end{cases} \dots\dots(3)$$

ここに

- q : 路盤反力
- w : たわみ
- w₀ : 平板と路盤との隙間
- k : 路盤k値

w₀はグラウトが充填できない場合や、平板の厚さ方向の温度勾配による変形などによって生ずる部分的な路盤と平板との隙間を考慮するために導入した。

このような路盤条件を仮定した場合、路盤の剛性マトリックスは平板のたわみの関数となるので、剛性方程式(2)の解は非線形になる。そこで、式(2)を解くためにNewton-Raphson法を採用した。すなわち、平板のたわみを計算した後、式(3)

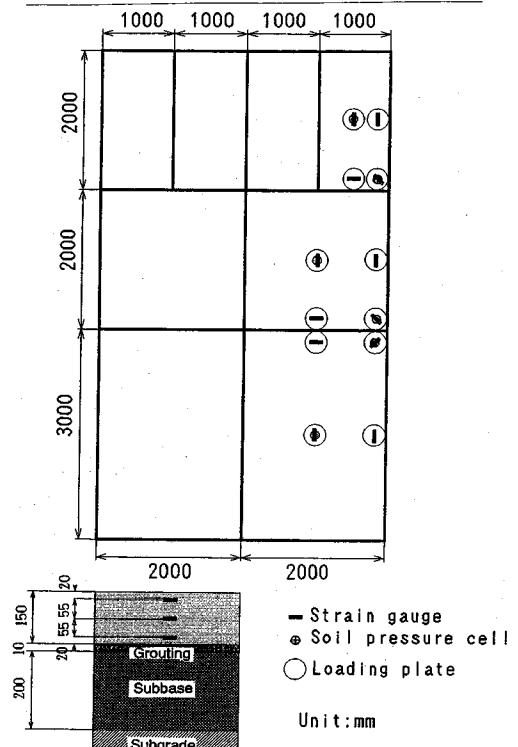


図-2 試験舗装の概要

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 ²
コンクリートのポアソン比	0.21
路盤k ₃₀ 値	24.4 kgf/cm ³

の条件に従って路盤の剛性マトリックスHを構成し直し、改めて平板のたわみを計算する。式(2)が十分な精度で成り立つまでこのような計算を繰り返す。通常数回で収束して解が得られる。

3. 試験舗装における載荷実験

(1) 試験舗装

試験舗装は道路交通を対象としており、その平面図と舗装構成を図-2に示す。平板の寸法は、厚さ15cm、辺長が最小100cm、最大300cmであり、200cmの辺長のものは正方形としてある。路盤は厚さ20cmの粒度調整碎石路盤である。

工場で製作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、平板と路盤の間のできる隙間(1cm~2cm)にセメントミルクを自然流下で注入してグラウトとした。隣接する平板間には厚さ1cm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

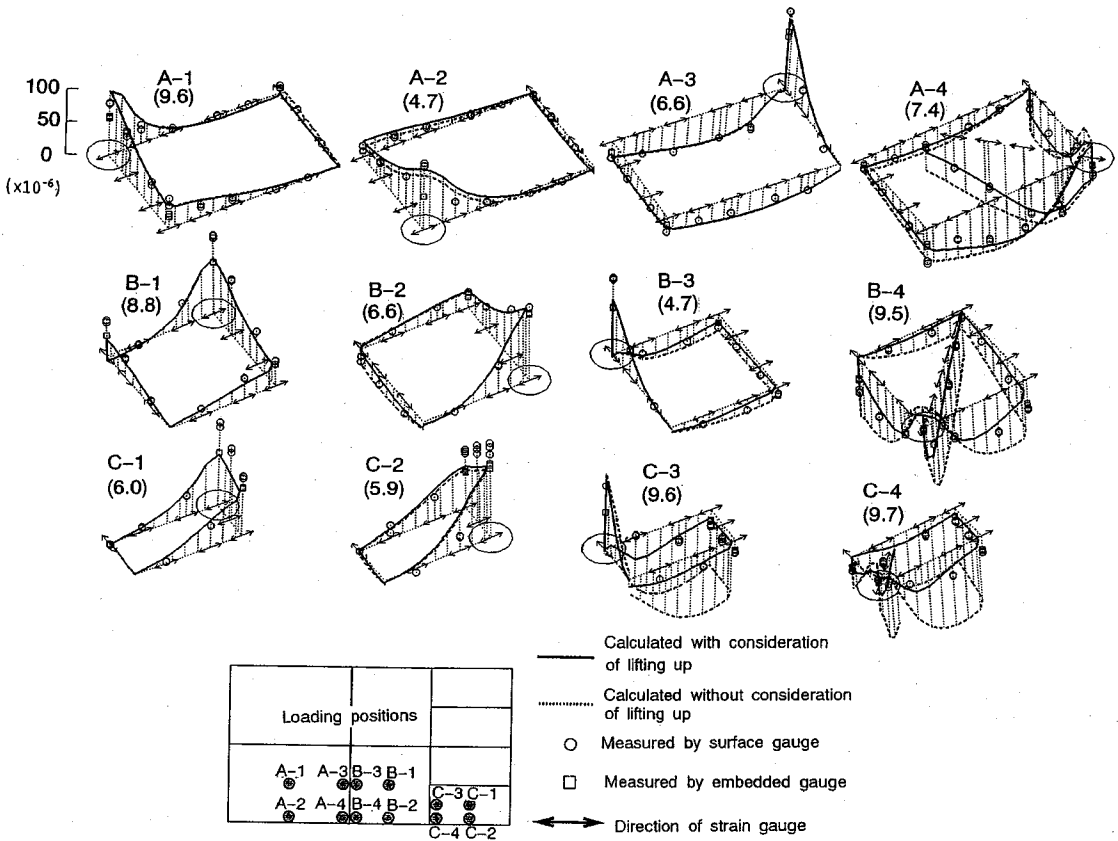


図-4 コンクリート平板のひずみ分布

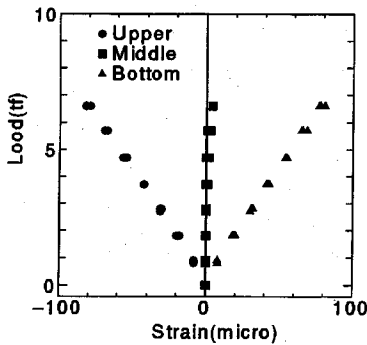


図-3 載荷実験の測定結果の例

得られたコンクリートの性状および現場で測定された路盤 k 値は表-1に示すとおりである。なお、以後の計算に用いる路盤 k 値は $k = k_{30}/2.2 = 11 \text{kgf/cm}^3$ とした。

図-2には主な測定計器の位置ならびに載荷位置も示してある。載荷位置の平板内に埋め込みゲージおよび熱電対を厚さ方向の上中下で埋め込んでおいた。さらに平板表面に細かな間隔でひずみゲージを貼った。また中央部および隅角部の路盤上には土圧計を埋設した。

(2) 載荷実験

載荷実験は施工から約一か月経過した時点（平成5年6月17日）で実施した。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。あらかじめ測定した24時間の版内温度測定を参考に温度勾配の小さな18:00から23:00の夜間に載荷実験を行った。この時間帯の温度勾配は最大で 0.18°C/cm 程度であった。

載荷は図-2に示すようにそれぞれの大きさの平板の中央、縁部、隅角部において行った。10tfの重錘を反力としたフレームを組み、直径30cmの鋼性載荷板に油圧ジャッキを用いて、平板の最大ひずみが 100×10^{-6} 程度になるまで1tf刻みで載荷し、路盤上面の土圧を測定した。

図-3は $200 \times 300 \text{cm}$ の平板での中央載荷の測定結果で、平板内に埋め込まれたひずみ計による測定値である。3回の載荷による応答の再現性は概ね良好であり、弾性的な応答を示している。またその値は平板内の上と下では符号が逆でその値はほぼ等しく、中央の値は0であることから、平板理論の仮定どおりの挙動を示していることが分かる。

4. 実験結果とFEM解析結果の比較

(1) コンクリート平板のひずみ

図-4はコンクリート平板のひずみ分布である。図中の括弧内は μ 単位での荷重の大きさである。○は表面ひずみ計による測定値、□は埋め込みひずみ計の測定値を表面の値に換算したもの、実線は平板の持上りを考慮した計算値、破線は平板の持上りを無視した計算値である。また図中の \leftrightarrow は測定ひずみの方向を示している。

全体として、表面ひずみ計の値は埋め込みひずみ計のものよりもかなり大きい値を示しているものの、計算値は信頼性の高い埋め込みひずみ計による測定値とよく一致しており、FEM解析の妥当性が認められる。200×300cmの平板においては、隅角部載荷を除いて平板の持上りの影響は僅かであり、計算値と実測値はよく一致している。隅角部載荷の場合、あるいは平板寸法の小さいときの縁部載荷の場合には、計算値における持上りの影響は大きい。特に、100×200cmの平板の隅角部載荷や縁部載荷においては、持上りを考慮した場合、ひずみの値は考慮しない場合よりもかなり小さくなり、測定値ともよく一致するようになる。

(2) 路盤面の土圧

Winkler 支承モデルを仮定すると、路盤の鉛直土圧はたわみと路盤 k 値の積 kw で計算できる。実験において有効に機能した土圧計が限られていたため、すべての土圧を測定することはできなかった。測定できた土圧と計算値の比較を図-5に示す。横軸の記号は図-4に対応した載荷位置を示しており、括弧内は荷重の大きさである。それぞれの載荷地点における3回の測定の最大値と最小値を測定値として示し、計算値は●が持上りを考慮したもの、○は考慮していないものである。測定値から、隅角部載荷における土圧が大きく、平板の寸法が小さいほど大きいことがわかる。計算値も同様の傾向を示し、平板の持上りを考慮した方がたわみは大きくなる。全体として測定値と計算値はよい対応を見せている。

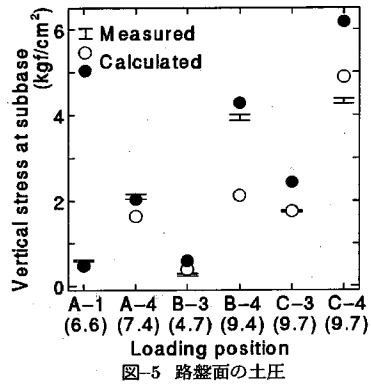


図-5 路盤面の土圧

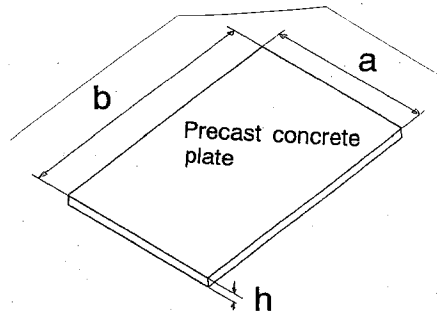


図-6 コンクリート平板の形状寸法に関するパラメータ

表-2 計算で設定した構造パラメータ

a cm	b cm	h cm	路盤 k 値 kgf/cm ³
100	100, 150, 200, 250, 300	5~30	5~40
150	150, 200, 250, 300		
200	200, 250, 300		
250	250, 300		
300	300		

5. 計算条件

以上の検証により、本研究において提案したFEM解析法は、PCCPの構造解析に有効であることが確認された。そこで、この手法を用いてコンクリート平板の形状や寸法、平板厚、路盤 k 値が舗装の力学的挙動に及ぼす影響について考察する。その際に設定した計算条件は以下のとおりである。

(1) 構造

各種の条件の影響を検討するために、図-6に示すような寸法形状や構造に関するパラメータを設定し、これらを表-2のように変化させた。なお、FEMの要素はすべての形状に対して10×10cmの正方形とした。数値解析に用いた材料定数は、先の表-1に示したものをを用いた。また、平板単体としての挙動を調べるため目地の荷重伝達は無視し、路盤との接合条件として平板の持上りを考慮することとした。

(2) 荷重

基本的な載荷条件として先の実験同様に、中央部載荷、縁部載荷、隅角部載荷の3種類の荷重条件を設定した。中央部

載荷は最も応力やたわみが小さく、コンクリート平板にとっては有利な荷重条件である。縁部載荷は目地などを車輪が通過するときの荷重状態であり、最も大きな応力が生ずる。コンクリート舗装の構造設計においては、この荷重状態がクリティカルな荷重条件とされている⁸⁾。隅角部載荷は最もたわみが大きくなり、路盤に対する負担を大きくする荷重状態である。また、荷重作用位置からやや離れた点において表面に大きな引張応力が生ずる。以上の3つの荷重条件において、5tfの輪荷重を30×30cmの面積の等分布荷重として作用させた。

6. 計算結果

(1) 形状寸法の効果

a) 中央部載荷

図-7には中央部載荷条件におけるコンクリート平板のたわみ形状および主応力状態を示した。計算においては平板厚を15cm、路盤 k 値を11kgf/cm³とした。主応力はコンクリー

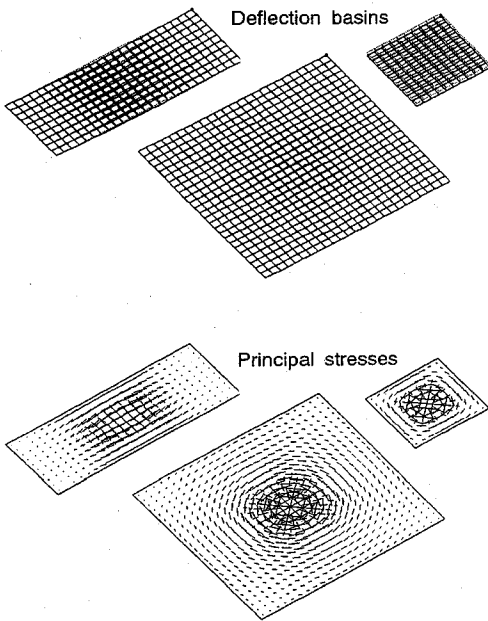


図-7 たわみ形状と主応力状態 (中央載荷条件)

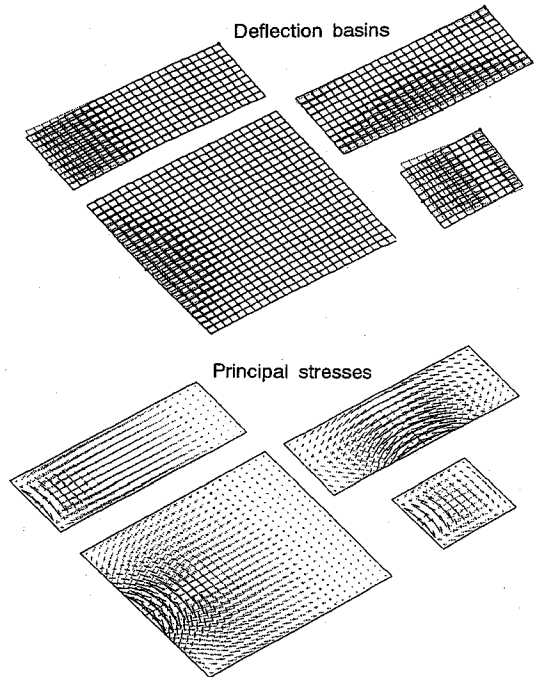
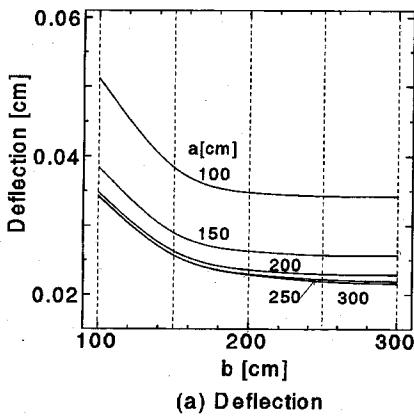
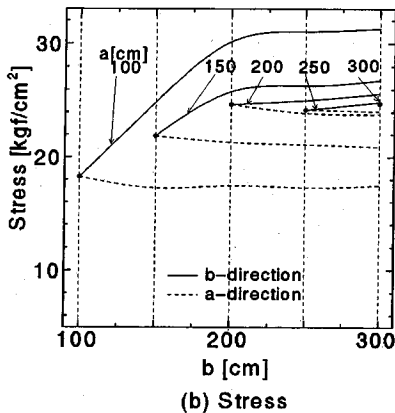


図-9 たわみ形状および主応力状態 (縁部載荷)



(a) Deflection



(b) Stress

図-8 最大たわみおよび最大応力と寸法の関係 (中央載荷)

ト平板の下面のものであり、引張と圧縮をそれぞれ実線と破線で示している。3種類の代表的な寸法(100×100, 100×250, 250×250)について示した。寸法が小さいとたわみは大きく、平板全体が沈下したような形になる。逆に大きくなると平板中央のみが変形し、たわみの値はかなり小さくなる。最大引張応力は荷重直下の平板下面に生ずる。細長い平板の場合、長辺方向の応力、 σ_b が大きい。

図-8(a)に平板中央の最大たわみと寸法の間をまとめた。平板の寸法が小さいほどたわみは大きい。両方の辺の長さが250cm以上になれば寸法によってたわみの値は大きく変化しない。図-8(b)に最大応力と寸法の間をまとめた。実線は長辺方向(b の方向)の応力、 σ_b 、破線は短辺方向(a の方向)の応力、 σ_a を示している。 b が大きくなるほど σ_b が大きくなるが、 σ_a はそれほど変化しない。●は正方形($a=b$)のときの応力状態を示しており、 $\sigma_a=\sigma_b$ となる。この場合、辺の長さが大きくなるほど応力は大きくなるが、1辺の長さが200cm以上になると応力の変化は小さい。

b) 縁部載荷

図-9には縁部載荷条件におけるたわみ形状および主応力状態を示した。平板厚と路盤 k 値は中央載荷の場合と同一である。細長い平板の場合、荷重が長辺に作用するか、短辺に作用するかによってその応力状態は大きく異なる。特に短辺に荷重が作用した場合、荷重作用点から離れた位置の表面に大きな引張応力が生ずる。

図-10(a)に最大たわみと寸法の間をまとめた。傾向としては中央載荷と同様に、平板寸法が大きくなるほどたわみ

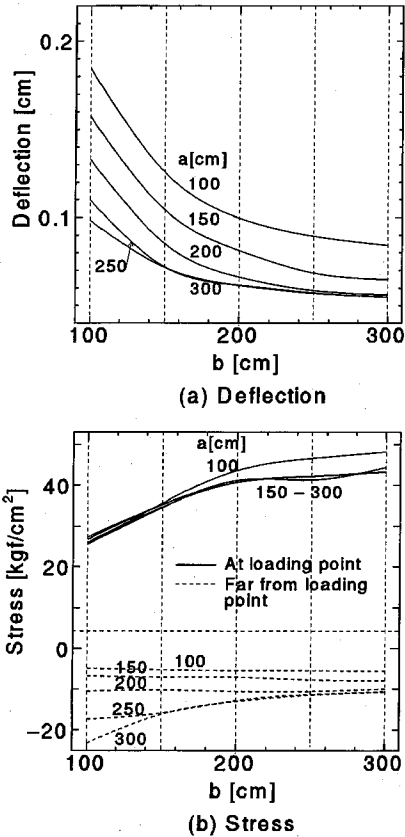


図-10 最大たわみおよび最大応力と寸法の関係(縁部載荷)

は小さくなる。図-10(b)に最大応力と寸法の間をまとめた。この場合、荷重が作用する縁部の辺の長さが b 、もう一方の辺の長さが a である。正の値は荷重直下の下面に生ずる縁部方向の引張応力であり、負の値は荷重作用位置からやや離れた位置の表面に生ずる引張応力である。荷重直下の引張応力は b が大きくなると大きくなるが、 a にはあまり影響されない。荷重から離れた位置に生ずる表面の引張応力は a が大きくなるほど大きい。つまり細長い平板の先端に荷重が作用すると、表面に長手方向の大きな引張応力が生ずる。このようなことから縁部載荷においては、 a/b の比が大きい細長い平板の場合、荷重から離れた位置の表面においてひびわれが発生する可能性がある。

c) 隅角部載荷

図-11には隅角部載荷条件におけるたわみ形状および主応力状態を示した。ここでも平板厚と路盤 k 値は中央載荷の場合と同じである。隅角部載荷の場合、寸法が小さいと荷重作用点と反対側が持ち上がってしまう。また細長い平板の場合には、平板がねじれたような状態になる。応力は荷重直下において下面に大きな引張応力、そこからやや離れた点の表面において平板の対角線方向に大きな引張応力が生ずることがわかる。

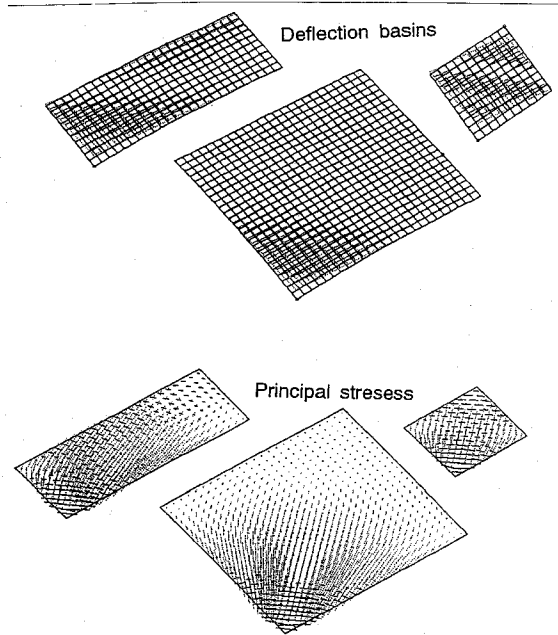


図-11 たわみ形状と主応力状態(隅角部載荷)

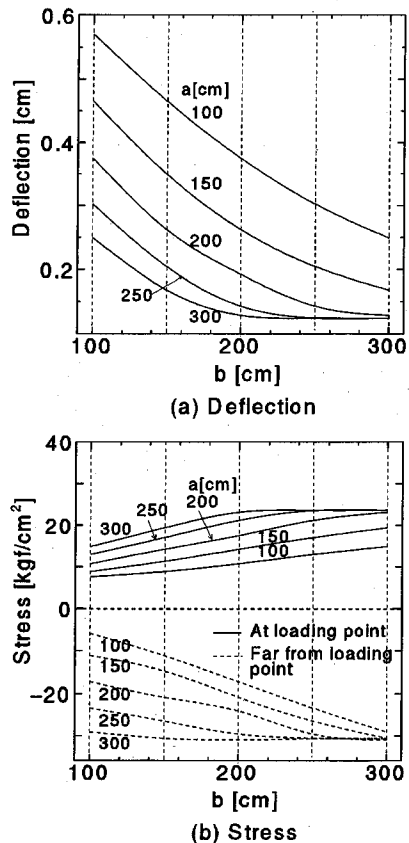


図-12 最大応力と寸法の関係(隅角部載荷)

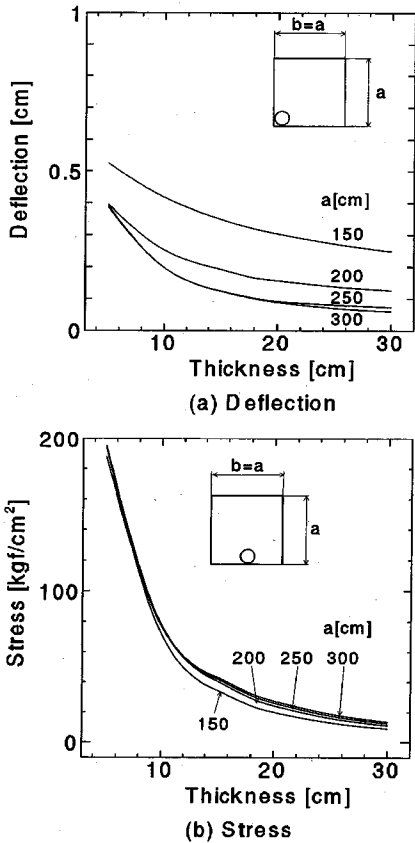


図-13 たわみおよび応力と平板厚の関係 ($k = 11 \text{ kgf/cm}^3$)

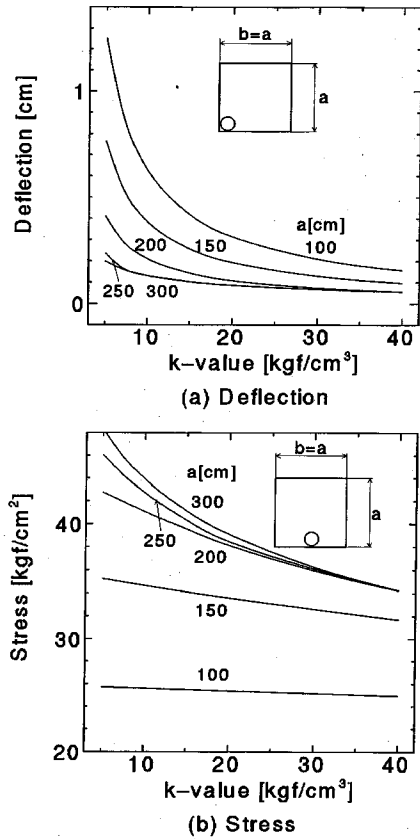


図-14 たわみおよび応力と路盤k値の関係 ($h = 15 \text{ cm}$)

図-12(a)に最大たわみと寸法をまとめた。たわみの値は3つの荷重条件の中で隅角部載荷が最も大きい。平板の寸法が大きくなるとたわみが小さくなる傾向は他の荷重条件と同じである。図-12(b)に最大応力と寸法をまとめた。正の値は荷重直下の表面に生ずる引張応力であり、負の値は荷重作用点から離れた点の表面に生ずる引張応力である。値としては表面の引張応力の方が大きく、隅角部載荷の場合にはこの応力がクリティカルになる。全体として寸法が大きいくほど応力は大きくなるが、表面の引張応力は細長いほど大きくなる傾向があり、正方形のときが最も小さい。

(2) 平板厚の効果

一般的な傾向をみるために、コンクリート平板の形状は正方形とし、一辺が150, 200, 250, 300 cmの5種類について以下に示す。図-13(a)はたわみと平板厚の関係を示している。たわみが最も大きい隅角部載荷条件のものである。平板厚が薄いと当然たわみは大きい。平板厚が厚くなるにつれ減少し、ある程度厚くなると減少の度合いは小さくなる。寸法の小さな平板の場合、平板厚の効果は大きな平板に比べて小さい。たわみと路盤の垂直応力はほぼ比例するため、たわみが大きくなると路盤の応力が增大することになる。小さな平板を用いる場合には平板厚を厚くしても路盤への負担はかなり大きい。

したがって平板厚を薄くする場合には、路盤を強化するか、目地に何らかの荷重伝達装置を設ける必要があろう。寸法の大きな平板の場合には、平板厚を厚くすることによって路盤の負担をかなり軽くすることができる。図-13(b)は平板厚と応力の関係を示している。応力が最大となる縁部載荷によるものである。平板厚が厚いほど応力は小さくなり、その減少の度合いは厚さが15 cm程度までは急激であるが、それ以降の変化は小さい。したがって、平板の大きさにかかわらず平板厚を厚くすることは、たわみや応力の減少に有効であるが、15 cm以上になるとその効果は小さいといえる。

(3) 路盤k値の効果

前項と同様に、コンクリート平板の形状は正方形とし、一辺が100, 150, 200, 250, 300 cmの5種類について以下に示す。図-14(a)は路盤k値と隅角部載荷のたわみの関係を示している。路盤k値が大きいほどたわみは小さく、特に平板の大きさが小さいと路盤k値の増加の効果は大きい。ただし、平板の大きさが250 cm程度になるとその効果はかなり小さくなる。

図-14(b)は路盤k値と縁部載荷の応力の関係を示している。路盤k値を増加させても、それによる応力の減少の度合いはたわみの場合よりも小さい。特に平板の大きさが小さい場合、路盤k値の増加は応力の減少にさしたる効果がないことがわ

かる。先にも述べたように、この場合の応力が小さいのはたわみが大きく路盤に大きな負担がかかっているということであって、必ずしも構造的に有利であるということではない。

7. まとめ

PCCPの構造解析を行うためにFEMを用い、特にコンクリート平板と路盤との接合条件を考慮したより厳密に解析する手法を提案した。試験舗装における載荷実験の結果を本手法で解析しその結果を比較することにより、本研究において用いたFEM手法がコンクリート平板舗装の挙動を解析する上で有効であることを検証した。このような舗装においては単体としての平板の力学的挙動が重要であり、平板の形状寸法、平板厚、路盤 k 値がその挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこでこのFEMを用い、それらの影響について数値計算により検討した。本研究において得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1 寸法の小さなコンクリート平板においては、荷重が版端部に作用すると反対側の部分が持上がり、その部分の路盤の支持は失われる。応力解析においてはこの持上がり現象を考慮に入れる必要があり、その解析手法を示した。
- 2 たわみは寸法が小さいほど大きい。たわみが大きいと、水の作用が加わってエロージョンを進行させる原因となる。したがって、寸法の小さな平板を用いる場合には路盤の強化などの対策を行う必要がある。
- 3 寸法が大きいと、平板内に生ずる応力は大きくなる。したがって、寸法の大きな平板においては相応の平板厚が必要である。
- 4 発生する応力、たわみの観点からみれば、平板の形状は正方形が最適である。細長い形状の場合、長い辺の方向に大きな応力が生ずる。また、隅角部載荷においては荷

重作用点から離れた点の表面に大きな引張応力が生じるので、極端に細長い形状は避ける必要がある。

- 5 平板厚の増加はたわみや応力の減少に大きな効果がある。ただし、平板の大きさが小さいと平板厚を増加させてもたわみはあまり減少せず、路盤にかなりの負担がかかる。
- 6 路盤 k 値の増加はたわみや応力の減少につながるが、応力に関しては平板厚ほどの効果はない。

PCCPの力学的挙動は、目地における荷重伝達の効果がある程度受けると考えられるが、本解析では無視した。PCCPにおける目地の荷重伝達機能については、実験、解析によって検討中である。形状寸法の比較的小さいPCCPは温度応力(そり応力)が小さいことも設計上有利である。この点に関しても今後の研究課題としたい。

参考文献

- 1) Bull, J.W. : Designing Pre-Cast Concrete Pavements using Micro-Computers, the Journal of the Institution of Highway and Transportation, pp.21-24, 1986.
- 2) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, 日本港湾協会, pp.280-281, 1989.
- 3) 吉兼亨・鯉江利夫・松下正美: 半プレキャスト版舗装工法, 第19回日本道路学会議論文集, pp.430-431, 1991.
- 4) 権平靖生: リバーシブル型プレキャストRC版による舗装修繕, 舗装, Vol.25, No.11, pp.9-15, 1990.
- 5) 永淵強・橋本修治: カーボン発熱体埋設融雪ブロック舗装の車道適用例, 第19回日本道路学会議論文集, pp.742-743, 1991.
- 6) Westergaard, H.M. : Computation of Stresses in Concrete Roads, Proc. of HRB, Vol 5, pp.90-112, 1925.
- 7) 西澤辰男・松野三朗: コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について, 土木学会論文報告集, 第338号, pp.207-236, 1983.
- 8) 日本道路協会: セメントコンクリート舗装要綱, 丸善, 1992.

(1993.10.7 受付)

A FUNDAMENTAL EXAMINATION OF THE MECHANISTIC CHARACTERISTICS OF PRECAST CONCRETE PAVEMENTS

Tatsuo NISHIZAWA, Etsuro NODA and Tadasu FUKUDA

Precast concrete pavements(PCCP) are constructed by placing small size precast concrete plates on the subbase. In this paper, the mechanistic characteristics of PCCP is discussed based on the experiment and FEM analysis. The nonlinearity due to lifting up of the plates is considered in the FEM analysis. From the results of the analysis, it was found that stresses in the plate are large in the case of large size of the plate. Therefore, in this case, the plate should have enough thickness to prevent cracks due to wheel load. Whereas, in the case of small size of the plate, deflections are large, therefore, strong subbase should be used.