

弾性平板FEMに基づくコンジット系舗装の 解析法に関する研究

西澤辰男¹・福手 勤²・国分修一³

¹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)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造材料研究室長 (〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 工博 大林道路 (株) 技術研究所 所長 (〒 336-0027 浦和市沼影 2-12-36)

アスファルト層とコンクリート層のように異なった材料を用いて表層を形成する舗装をコンジット系舗装と呼ぶ。このようなコンジット系の舗装を取り扱う新たな平板FEMモデルを開発した。このモデルは平板要素を2層に重ねその間をばねで結合したもので、それぞれの層の挙動を独立に扱うことが可能である。2層の境界面としてはボンド型、アンボンド型の状態を考慮することができる。換算厚を用いる従来の方法による計算結果、試験舗装の載荷実験結果と比較することによってモデルの検証を行った。

Key Words : composite pavement, two layer plate model, FEM analysis, bonded and unbonded layers

1. はじめに

舗装においてコンクリート層とアスファルト層が平面的に重なったものとしては、コンクリート舗装の上に新たなアスファルト層を施工するオーバーレイ工法や、逆にアスファルト舗装の上に薄いコンクリート層を施工するホワイトトッピング工法などがある^{1),2),3),4)}。このような工法は既設の舗装の機能回復や構造強化を図る目的で行われる工法であるが、最近では、コンクリート層をベースとしてその上にアスファルト表層を敷いたコンジット舗装として建設される例もある⁵⁾。これらの工法の結果として出来上がった舗装構造は、剛性の大きく異なる2層からなる表層部分を持ったコンジット系の舗装となる。通常、コンクリート層には目地、あるいはひび割れがあるが、アスファルト層は連続した層となっており、必ずしも2層の構造は同一とはならない。また、アスファルト層の上にコンクリート版を施工する場合、コンクリート版のそり変形による剥がれが問題となる。

2層の剛性が大きく異なるコンジット系舗装の解析法としては福田が提案した複合平板理論がある⁶⁾。この理論は、剛性の大きく異なった2層系舗装を等価な剛性を持つ1層に変換してから、通常の平板モデルを用いて解析を行おうとするものである。簡便であり、このような考え方によってオーバーレイの設計が行われている。ところが、この考え方では2層は平面的な形状は完全に同じで、変形も同一であることが前提となっている。上のコンクリートのみひび割れや目地があったり、そり変形によって境界面での付着が失われ、2層

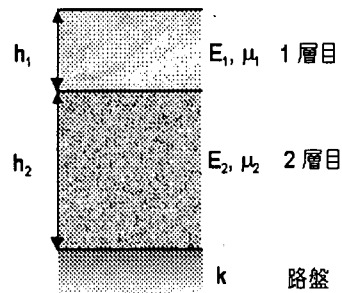


図-1 2層平板構造

の変形が同一とならない場合には、複合平板理論では取り扱えない。

このような場合を取り扱える方法の1つとしてIoannidesらが提案したオーバーレイ平板モデルがある⁷⁾。この方法は平板要素を2層に重ね、その間をばね結合させたモデルで、平板FEMをわざわざ改良することで簡単にプログラムできる。このモデルによれば境界面に適当な接合条件を与えることによって、2層の変形を独立に扱うことが可能である。ただし、単純に重ね合わせただけでは接合面が非接着であるアンボンド型しか扱えないため、接着されたボンド型のオーバーレイを扱うためには多少の改良が必要である。そこで本研究においてはIoannidesモデルをボンド型も取り扱えるような拡張を行い、ボンド、アンボンド型の2層系の平板モデルを開発した。このモデルの適用性について、複合平板理論による計算値、過去に実施された載荷実験の結果と比較することによって検討した。

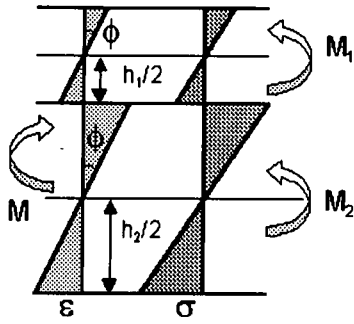


図-2 アンボンド構造のひずみ分布

2. 複合平板の力学

(1) 2層平板構造

本研究で取り扱う2層平板構造は図-1に示すとおりである。上の層を第1層、その下の層を第2層とし、それぞれの平板は通常の弾性平板理論に従うとすると、モーメントと曲率の関係は以下ようになる。

$$\{M_i\} = [D_i]\{\phi(w)\} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

ここに、

$$\{M_i\} = \{M_{xi} \quad M_{yi} \quad M_{xyi}\} \quad (2)$$

$$[D_i] = \frac{E_i h_i^3}{12(1 - \mu_i^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu_i & 0 \\ \mu_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \mu_i)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\{\phi(w)\} = \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right\} \quad (4)$$

また、

- w : 平板のたわみ
- E_i : i 層の弾性係数
- μ_i : i 層のポアソン比
- h_i : i 層の厚さ

添え字は各層の諸量であることを示す。

(2) アンボンド(非結合)構造

層の境界面が結合されていない場合、荷重を受けて平板が変形すると、それぞれの層には中立面が形成される。このとき各層のひずみ分布は図-2のようになり、モーメントと曲率の関係は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \{M\} &= \{M_1\} + \{M_2\} \\ &= [[D_1] + [D_2]]\{\phi(w)\} \end{aligned} \quad (5)$$

(3) ボンド(結合)構造

層の境界面が結合されている場合、荷重を受けて平板が曲げ変形を起こすと2層は一体化され中立面は1つ

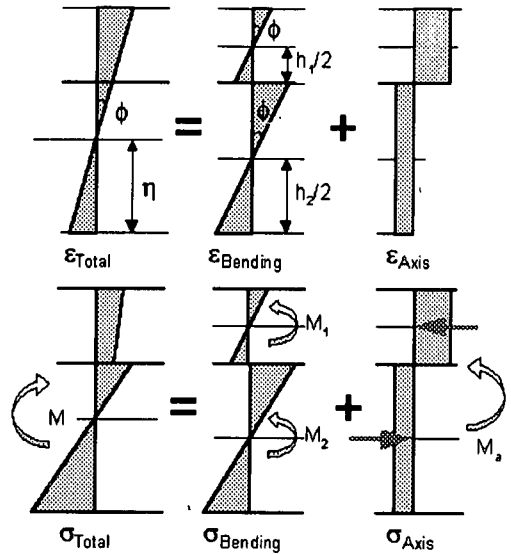


図-3 ボンド構造のひずみ分布

だけが形成される。このとき各層のひずみ分布は図-3のように、各層の曲げモーメントと中立軸の移動による軸力の項に分離することができる。すると、モーメントと曲率の関係は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \{M\} &= \{M_1\} + \{M_2\} + \{M_a\} \\ &= [[D_1] + [D_2] + [D_a]]\{\phi(w)\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、

$$[D_a] = [A \cdot [D_1] + B \cdot [D_2]] \quad (7)$$

$$A = 12 \left(\frac{1}{12} + \beta - \eta \right)^2 \quad (8)$$

$$B = 12 \left(\frac{\gamma}{\beta} - \frac{1}{12} \right)^2 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{E_2(1 - \mu_1^2)}{E_1(1 - \mu_2^2)} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{h_2}{h_1} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\eta}{h_1} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{1 + 2\beta + \alpha\beta}{2(1 + \alpha\beta)} \quad (13)$$

3. 平板FEMへの展開

(1) 2層平板モデル

2つの平板要素を図-4のように重ねて、対応する節点間を弾性ばねから成るリンク要素によって結合する。

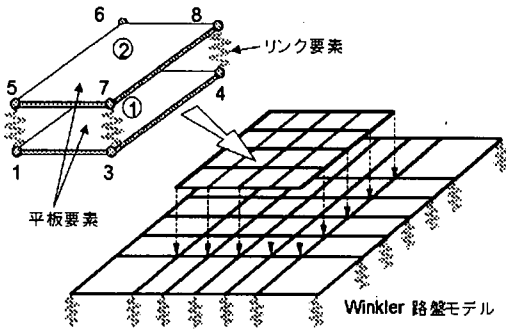


図-4 オーバーレイ平板要素

両者の境界面におけるボンド、アンボンドの状態に対しては、その状態に応じた平板のひずみ分布となるように曲げ剛性を調整する。弾性ばねの構成関係をいろいろ変化させることによって、これらの平板の挙動を一体としたり独立させたりすることができる。ただし、Ioannidesらが提案したモデルのように平板を重ねてリンク要素で結合しただけではアンボンド構造しか取り扱うことができない。そこで本研究においては、以下に述べるように、ボンド構造による中立軸の移動に伴う曲げ剛性の増加分を考慮し、ボンド構造をも取り扱えるような形に拡張した。

リンク要素の剛性は、各層の深さ方向の変形を考慮したばね係数を用いる⁷⁾。また、2つの平板が離れている時にはリンク要素の剛性を0として、2つの平板をそれぞれ独立な平板として挙動させることとした。このようなモデルによって、たとえば、オーバーレイ層と既存の層の温度勾配が大きく異なり、そり変形が異なってくる場合などを取り扱うことができる。

(2) アンボンド構造

境界面がアンボンドの状態においては、2枚の平板要素を単純にリンク要素で結合する。曲げモーメントと曲率の関係は通常の平板要素のそれと同一であり、次式のように表される。

$$\{M_i\} = [D_i]\{\phi\} \quad (i = 1, 2) \quad (14)$$

したがって各層の下面応力は、

$$\{\sigma_i\} = \frac{6}{h_i^2} \cdot \{M_i\} \quad (15)$$

によって計算できる。

(3) ボンド構造

境界面がボンドの状態においては、平板要素を結合した上に、中立面が共通になることによる剛性の増加分 $[D_a]$ を要素の剛性に加えなければならない。

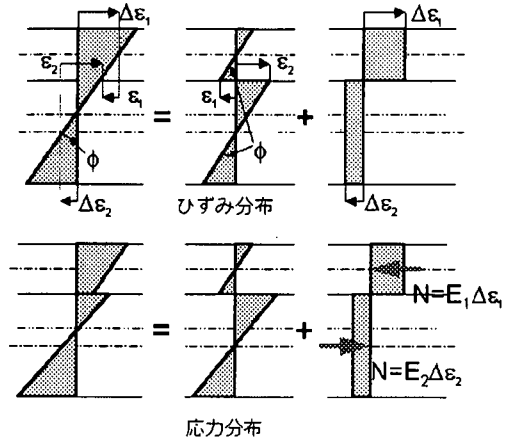


図-5 ボンド構造のひずみの調整

図-5は、1次元の状態におけるボンド構造のひずみおよび応力分布を曲げと、軸力に分離する考え方を示したものである。応力の計算においては、図-5に示すように、曲率による曲げのひずみ分布と、中立軸の移動に伴う軸力のひずみ分布とに分けて考える。

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_1 &= \epsilon_2 - \epsilon_1 \\ &= \frac{\phi h_1 + \phi h_2}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

また軸力の釣り合いより、

$$E_1 \Delta\epsilon_1 h_1 + E_2 \Delta\epsilon_2 h_2 = 0 \quad (17)$$

式(16)と式(17)より、 $\Delta\epsilon_1, \Delta\epsilon_2$ が以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_1 \\ \Delta\epsilon_2 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -E_2 h_2 \\ E_1 h_1 \end{Bmatrix} \frac{h_1 + h_2}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)} \phi \\ &= \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} \phi \end{aligned} \quad (18)$$

以上の考え方を2次元応力状態に拡張すれば、中立軸の移動による各層の応力増分 $\Delta\sigma_i$ は、

$$\{\Delta\sigma_i\} = \frac{12C_i}{h_i^3} [D_i] \phi_i = \frac{12C_i}{h_i^3} \{M_i\} \quad (19)$$

となる。したがって、 i 層下面における応力は次式によって計算できる。

$$\{\sigma_i\} = \left(\frac{6}{h_i^2} + \frac{12C_i}{h_i^3} \right) \{M_i\} \quad (20)$$

ただし、厳密には以上の定式化は2つの層のポアソン比が等しい場合に成り立つ。一般の舗装材料のポアソン比は0.2~0.35程度とされているので、次項の計算結果からも明らかのように、近似的に式(20)によって計算しても実用上問題は無い。

表-1 計算条件

| 項目 | Case A | Case B |
|--------------------------|--------|--------|
| E_1 [MPa] | 5000 | 35000 |
| μ_1 | 0.35 | 0.2 |
| h_1 [cm] | 10 | 10 |
| E_2 [MPa] | 35000 | 5000 |
| μ_2 | 0.2 | 0.35 |
| h_2 [cm] | 25 | 20 |
| K [MN/m ³] | 100 | 100 |
| h_e (ボンド) [cm] | 28 | 38 |
| h_e (アンボンド) [cm] | 25 | 24 |

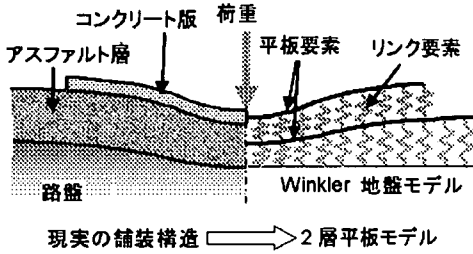


図-6 リンク要素の概念

(4) リンク要素

上下の平板要素は、リンク要素によって結合されている。リンク要素の剛性 k_L は、Ioannides らによって提案された式を用いることにした⁷⁾。これは、図-6 に示すような平板理論によっては扱えない厚さ方向の変形を考慮したもので、以下のようになる。

$$k_L = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \quad (21)$$

ここに、

$$k_i = \frac{2E_i(1-\mu_i)}{h_i(1-\mu_i-2\mu_i^2)}, (i=1, 2) \quad (22)$$

(5) FEM 解析

2層平板モデルを適用した場合、その全体剛性方程式は以下のようになる。

$$(\mathbf{K} + \mathbf{B} + \mathbf{H}) \cdot \mathbf{d}_e = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v - (\mathbf{H} + \mathbf{B}) \cdot \mathbf{d}_i \quad (23)$$

ここに、

- \mathbf{K} : コンクリート版の剛性マトリックス
- \mathbf{B} : リンク要素の剛性マトリックス
- \mathbf{H} : 路盤の剛性マトリックス
- \mathbf{d}_e : 荷重および自重による節点変位ベクトル
- \mathbf{d}_i : そりによる節点変位ベクトル
- \mathbf{f}_s : 荷重ベクトル
- \mathbf{f}_v : 自重ベクトル

本研究においては、平板要素として4節点12自由度の長方形平板要素を用いた⁸⁾。

具体的な計算にあたっては、上下の平板要素を結合しているリンク要素の剛性はそれぞれの節点におけるたわみの関数になる。また、ボンド型の場合には上下の平板要素の剛性に $[\mathbf{D}_a]$ を加え、ある平板要素のリンク要素の剛性がすべて0になった場合にはアンボンド型としてその平板要素の剛性を計算する。さらに、平板の路盤からの浮き上がりの影響を考慮するため、平板

の節点が路盤から浮き上がった場合にはその節点の路盤剛性を0とおく。このように式(23)の剛性マトリックスはすべてたわみの関数となるので、全体として非線形方程式となる。そこで、Newton-Raphson法を用いて式(23)を解くこととした。(i-1)段階の変位ベクトル \mathbf{d}_e^{i-1} が既知とし、式(23)の残差

$$\Delta \phi = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v - (\mathbf{J} + \mathbf{H} + \mathbf{B}) \cdot \mathbf{d}_i - (\mathbf{K} + \mathbf{J} + \mathbf{B} + \mathbf{H}) \cdot \mathbf{d}_e^{i-1} \quad (24)$$

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

$$\Delta \phi = (\mathbf{K} + \mathbf{J} + \mathbf{B} + \mathbf{H}) \cdot \Delta \mathbf{d}_e^{i-1} \quad (25)$$

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。

4. 2層平板モデルの検証

(1) 計算条件

2層平板モデルによる計算結果と等価換算厚を用いた1層モデルによる計算結果の例を示す。計算条件を表-1に示す。Case Aは上層にアスファルト、下層にコンクリートを用いたもので、コンクリート舗装の上にアスファルト混合物でオーバーレイした構造を想定している。Case Bは既存のアスファルト舗装の上に薄層のコンクリートオーバーレイを施した構造を想定している。

コンクリート版、アスファルト混合物の弾性係数は道路舗装の構造設計で使用されている値を採用した。それぞれ、ボンドおよびアンボンド型について計算を行った。この場合の等価換算厚 h_e とは、曲げ剛性がボンドの場合には式(6)と、アンボンドの場合には式(5)と同じになるように、下層の厚さを調整したものである。この換算厚 h_e を用いて1層モデルによって計算を行う。

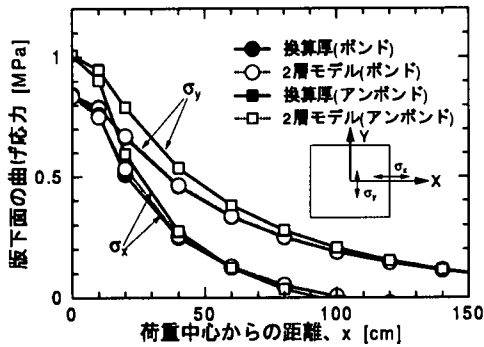
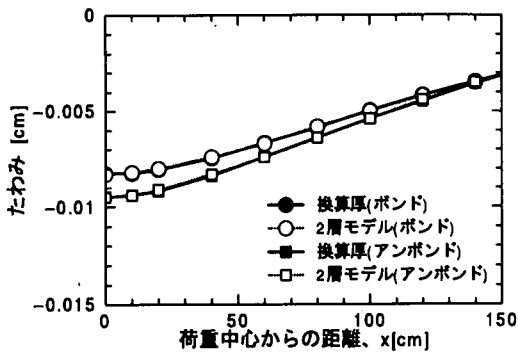


図-7 Case A の計算結果

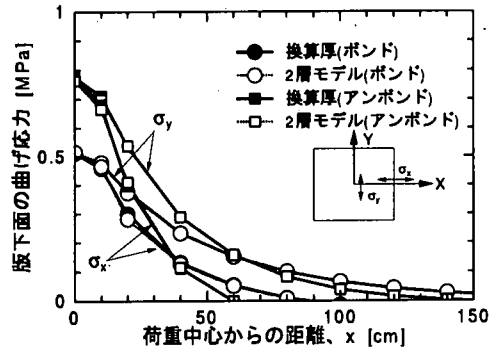
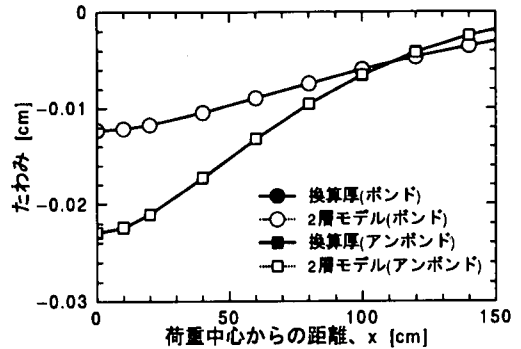


図-8 Case B の計算結果

また、2層モデルと1層モデルとの対応をとるためには、2層モデルにおいて2つの平板の変形が同一となるようにしなければならない。そこで、リンク要素の剛性は式(22)の10倍という高い値に設定した。

(2) 計算結果

図-7はCase Aの計算結果である。たわみと下層下面の曲げ応力について、2層モデルの計算結果と等価換算厚を用いた計算結果を比較したものである。Case Aにおいては、下のコンクリート層の剛性が支配的であるため、たわみや応力におけるボンドとアンボンドの差は約18%程度である。1層モデルと2層モデルを比較すると、たわみはほぼ同一の結果となり、図上では区別できない。応力については1~2%程度の差が現れた。

図-8はCase Bの計算結果である。Case Bにおいては、アンボンドではたわみや応力がボンドの2倍程度になる。1層モデルと2層モデルによるたわみの計算結果はほぼ一致するため、図では区別できない。応力については、ボンドの場合に1層モデルと2層モデルでは、やはり1%程度の差が見られるが、実用的な観点からみると一致しているとしてよい。

以上の結果より、上の層の剛性が高い場合も下の層

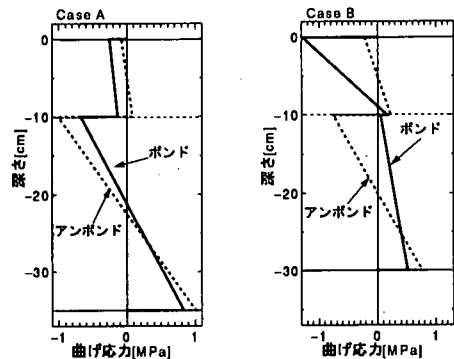


図-9 深さ方向の曲げ応力分布

の剛性が高い場合においても、2層モデルは換算厚を用いた1層モデルと同じ結果をもたらすことが確認できたことから、本ケースのような場合における本モデルの妥当性が確認された。

図-9は、曲げ応力の断面方向の分布である。Case Aの場合、コンクリート版の剛性がアスファルト層に比べてかなり高いので、コンクリート版底面における曲げ応力においてボンドとアンボンドによる差はわずかである。ボンドの場合、アスファルトオーバーレイ層は全体として圧縮応力となっている。Case Bのにおい

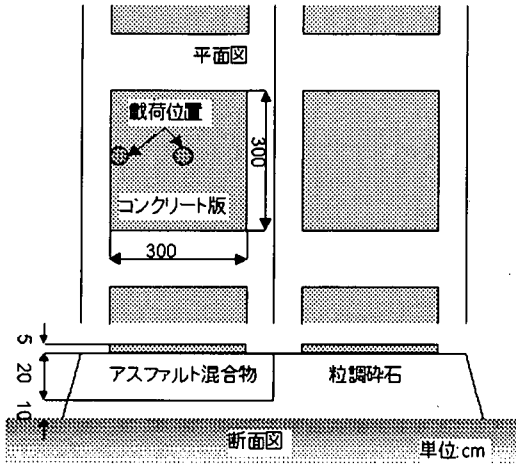


図-10 試験舗装の概要

ては、コンクリートオーバーレイ層の影響が大きく、アスファルト層の曲げ応力はボンドとアンボンドの場合で大きく異なる。このようにオーバーレイ層の剛性と下層の剛性の比によって境界面の性状の影響度合いが異なってくる事が分かる。

5. 実験結果との比較

(1) 载荷実験概要

国分らは、鋼繊維補強コンクリートによる薄層オーバーレイの適用性を検討するために、試験舗装において载荷実験を行っている⁹⁾。その結果を用いて本モデルの検証を行う。試験舗装の概要を図-10に示す。図に示すように、砕石路盤の上にアスファルト層を施工し、その上に厚さ5cm、大きさ3×3mの鋼繊維補強コンクリート版を置いている。また、比較のために砕石路盤の上に直接同じコンクリート版を置いた。アスファルト路盤の厚さは20cm、砕石路盤の厚さは30cmとなる。それぞれの路盤上に8枚、計16枚のコンクリート版を設置した。载荷条件としては、中央と縁部の2条件とし、それぞれの路盤において4枚で同じ载荷を実施した。表面に20cm間隔でひずみゲージを貼り、荷重が作用したときの各点のひずみを計測した。

コンクリート版の性状および路盤面での路盤K値は、それぞれ材料試験および現場における平板载荷試験によって求め、表-2に示すような結果を得た。

(2) 計算モデル

解析モデルとしては、以下の3種類を想定した。

- コンクリート版のみを要素分割し、路盤以下をWinkler路盤とする1層モデル。路盤上面のK値(K_b)を用いる。

表-2 コンクリート版と路盤の性状

| | 中央部载荷 | | 縁部载荷 | |
|-------------------------|-------|----------|------|----------|
| | 砕石路盤 | アスファルト路盤 | 砕石路盤 | アスファルト路盤 |
| コンクリート版 | | | | |
| E_1 [GPa] | 31.1 | 31.0 | 33.8 | 32.2 |
| μ_1 | 0.2 | | | |
| h_1 [cm] | 5 | | | |
| K_b MN/m ³ | 67.6 | 54.9 | 70.6 | 51.9 |
| 路盤 | | | | |
| E_2 [MPa] | 98 | 490 | 98 | 490 |
| μ_2 | 0.35 | | | |
| h_2 [cm] | 30 | 20 | 30 | 20 |
| K_s MN/m ³ | 36.3 | 35.3 | 27.4 | 22.5 |

K_b :路盤上面, K_s :路床面

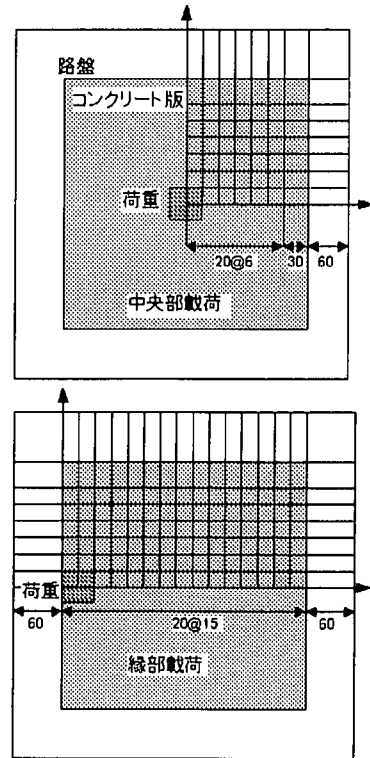


図-11 要素分割

- コンクリート版と路盤層を要素分割し重ねあわせた2層モデル。ただし、接着条件はボンド型。路床上面のK値(K_s)を用いる。
- コンクリート版と路盤層を要素分割し重ねあわせた2層モデル。ただし、接着条件はアンボンド型。路床上面のK値(K_s)を用いる。

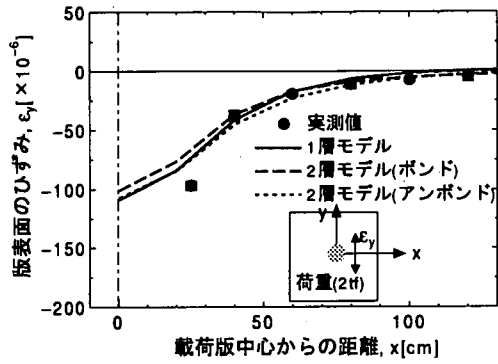
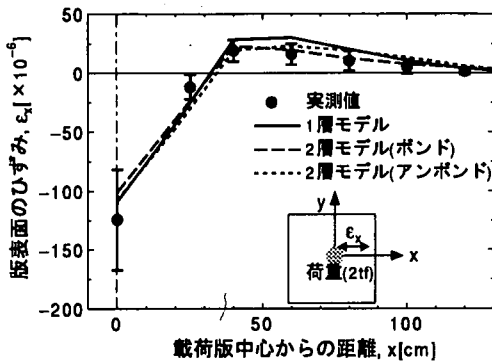


図-12 中央載荷のひずみ分布 (砕石路盤)

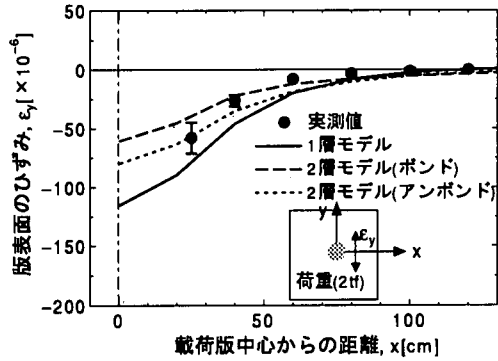
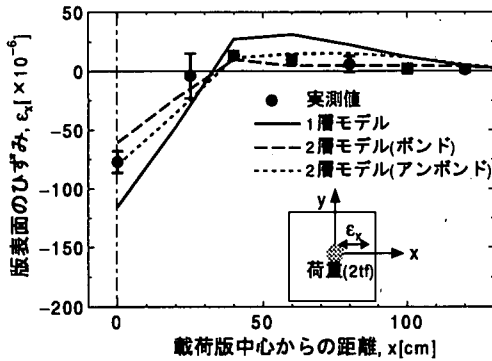


図-13 中央載荷のひずみ分布 (アスファルト路盤)

2層モデルの要素分割を図-11に示す。上のコンクリート版はほぼ20cm×20cmの要素に分割し、下の路盤層もコンクリート版と重なる部分は同じ要素分割となる。下の路盤層はコンクリート版より各辺からさらに60cm外側まで考慮することとした。荷重条件によって構造の対称性を考慮して境界条件を設定し、要素分割の節約を行った。1層モデルの場合はコンクリート版のみの要素分割となる。荷重は40cm×40cmの正方形等分布荷重とし、荷重の大きさは実験において荷重とひずみの線形性が確認されるレベルの2tf(19.6kN)とした。

(3) 解析結果

図-12は砕石路盤における中央載荷のひずみ分布について実測値と計算値を比較したものである。左の図は半径方向の、右の図は接線方向のひずみで、荷重中心からの距離に沿った分布を示している。実測値は4回の荷重の平均であり、標準偏差をエラーバーで表示した。半径方向のひずみは荷重直下において最大圧縮ひずみが生じ、中心から40~60cm離れた場所で最大引張ひずみとなる。接線方向のひずみは全体として圧縮ひずみである。実験による荷重ひび割れの観察では、版

表面の荷重中心から40cm程度の部分から円形状にひび割れが発生した。このひび割れの原因は半径方向の引張ひずみであると考えてよい。計算結果はこのような実験結果の傾向をよく捉えている。またこの場合には、各モデルによる差は比較的小さい。2層モデルにおいてボンドとアンボンドの間の差が小さいのは、路盤層の弾性係数を98MPaと小さく設定したためである。

図-13はアスファルト路盤における中央載荷のひずみ分布について実測値と計算値を比較したものである。実験値については先の図と同様の形で表示されている。実験値の傾向は砕石路盤と同様であるが、値自体はかなり小さい。実験における荷重ひび割れの観測によれば、円形ひび割れの半径は70cm程度で砕石路盤の場合より大きい。また、表面ひび割れを生じさせる荷重は砕石路盤の2倍程度であった。計算値はモデルによって差が見られる。ひずみは1層モデル、アンボンドの2層モデル、ボンドの2層モデルの順に小さくなる。

実験値の傾向は2層モデルによる計算値に近い。このモデルによれば、最大引張りひずみは荷重中心から約70cmの場所に生じており、実験時に観測された円形ひび割れの半径と一致している。特に、2層モデルにおいてはボンドとアンボンドとの間の差は無視できない

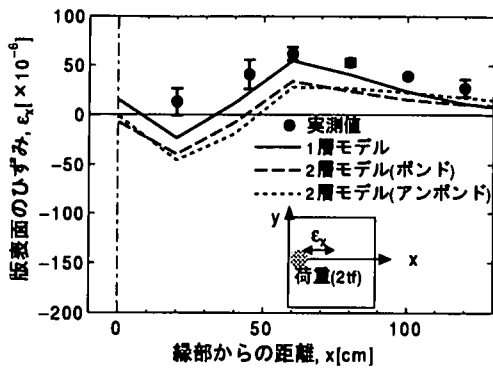


図-14 縁部載荷のひずみ分布 (砕石路盤)

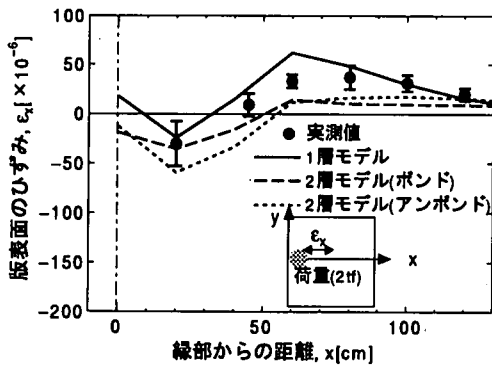
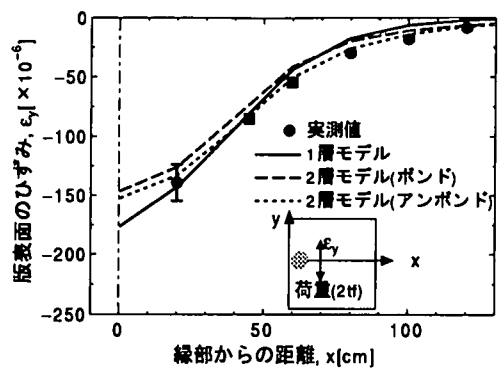
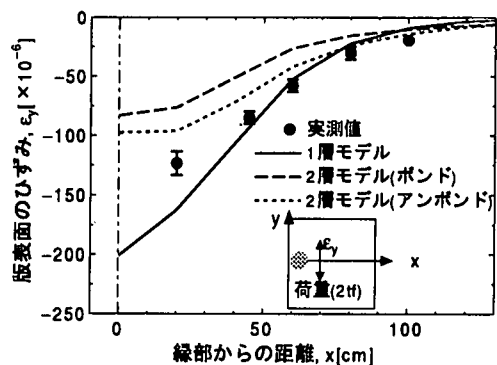


図-15 縁部載荷のひずみ分布 (アスファルト路盤)



程度になっている。

図-14は砕石路盤における縁部載荷のひずみ分布について実測値と計算値を比較したものである。実験結果によれば、半径方向ひずみは全体として引張であり、その最大値は縁部から60cm離れた場所に生じている。接線方向のひずみは全体的に圧縮であるが、荷重直下が最大でその値はかなり大きい。計算値においては、1層モデルと2層モデルの差は中央部載荷の場合より大きい。2層モデルのボンドとアンボンドの差はわずかである。実験値は1層モデルによる計算値に近い。

図-15はアスファルト路盤における縁部載荷のひずみ分布について実測値と計算値を比較したものである。実験値の傾向はほぼ砕石路盤の場合と同様であるが、最大引張ひずみの生ずる場所は縁部より80cm離れた場所になる。実験時のひび割れ観測によれば、表面ひび割れは荷重作用位置を中心に半径70cm~80cmの位置に発生しており、この半径方向のひずみが原因であろう。計算値におけるモデルによるひずみ値の差は顕著である。1層モデルと2層モデルの差は大きく、ボンドとアンボンドの間においても差が見られる。特に荷重中心付近における接線方向のひずみは、1層モデルに比べて2層モデルによる計算値がかなり小さい。これ

は、2層モデルにおいて、路盤がコンクリート版よりも60cm張り出していることの現われである。1層モデルの場合、図-14の砕石路盤よりも大きなひずみとなっているが、これは、路盤上面で実測されたK値がアスファルト路盤の方が小さいためである。実験値は1層モデルと2層モデルの間であって、この結果からはモデルの優位性は確認できなかった。

表-3は、コンクリート版の引張応力の計算値をまとめたものである。舗装の設計の観点から、中央載荷の場合半径方向の応力が重要であって、最大引張り応力は荷重直下の正の曲げモーメントにより、コンクリート版下面の半径方向に生ずる。一方、負の曲げモーメントによる最大引張応力としては、荷重中心からやや離れた点のコンクリート版表面に生ずる。表-3においてはそれぞれのモーメントによる引張応力を表示している。1層モデルとアンボンドの2層モデルにおいては、コンクリート版表面と下面の値は符号が逆になるが、絶対値は等しい。応力の値は、1層モデル、アンボンドの2層モデル、ボンドの2層モデルの順で小さくなる。2層モデルにおいてはボンドとアンボンドの差は大きく、コンクリート版とアスファルト路盤が接合されている場合にはコンクリート版の引張応力をかなり

表-3 コンクリート版の最大引張応力

| | モーメント の正負 | 砕石路盤 | アスファ ルト路盤 |
|------------------|--------------|-------|--------------|
| 中央部載荷 | | | |
| 1層モデル | 正 | 10.59 | 11.17 |
| | 負 | 2.16 | 2.19 |
| 2層モデル (ボンド) | 正 | 7.11 | 2.75 |
| | 負 | 1.37 | 1.05 |
| 2層モデル (アンボンド) | 正 | 10.46 | 7.73 |
| | 負 | 1.31 | 0.42 |
| 縁部載荷 | | | |
| 1層モデル | 正 | 15.29 | 16.54 |
| | 負 | 4.05 | 4.32 |
| 2層モデル (ボンド) | 正 | 10.03 | 3.74 |
| | 負 | 2.27 | 0.74 |
| 2層モデル (アンボンド) | 正 | 13.48 | 8.39 |
| | 負 | 1.93 | 1.24 |

単位:MPa

減少させることができる。

縁部載荷の場合、荷重直下の正の曲げモーメントによるコンクリート版下面に生ずる縁に沿った方向の引張応力、縁部からやや内側において最大となる負の曲げモーメントによるコンクリート版表面の半径方向応力を示している。縁部載荷の応力はかなり大きく、設計の際にクリティカルになると考えられる。中央載荷の場合と同様に2層モデルにおいてはボンドとアンボンドの差が非常に大きい。このように薄層コンクリートオーバーレイの場合、境界面の状態が非常に重要であることが分かる。

6. そり変形解析

(1) オーバーレイ層の剥離

コンクリート薄層オーバーレイでは、コンクリートオーバーレイ層の上下面における温度差や含水率の差によって大きなそり変形を生じ、下層と剥離してしまう現象が見られる²⁾。さきに述べたように、境界面の接合条件は舗装全体の応力分布に大きな影響を及ぼすため、このような剥離現象についても検討していく必要がある。本研究で開発した2層平板モデルの大きな特長の1つとして、2層の平板の変形を別々に取り扱うことができるという点があり、このような現象を解析する有効な手段となりうる。そこで、本章では1つの例として5章で取り扱った試験舗装について、数値計算によって剥離現象を再現してみることにした。

(2) 解析条件

解析モデルは、5章の試験舗装を対象としたもので、下層は20cmのアスファルト層とし、上に厚さ5cmのコンクリート版を載せた構造とする。材料定数は、表-2の中央部載荷のものを用いた。解析領域は図-11の中央載荷のように構造的対称条件を考慮したものとし、全領域を10cm×10cmの正方形要素に分割した。

接着条件はボンド型とするが、剥離が生じた要素についてはアンボンド型として取り扱う。剥離を生じさせようとする各節点の鉛直応力を次式によって計算する。

$$\sigma_w = k_L \cdot (w_2 - w_1) \quad (26)$$

ここに、 σ_w は垂直応力、 k_L はリンク要素の鉛直ばね、 w_2 および w_1 はそれぞれ下層および上層のたわみである。この垂直応力が接着強度を上回ったら、そのリンク要素の剛性を0とおく。接着強度は、0、0.1、0.2、0.3、0.4MPaと変化させた。

コンクリート版にそり変形を生じさせるために、コンクリート層の上下面に温度差を与えることにした。温度差として、上面の温度が高い正の温度勾配の場合には上面+5°C、負の温度勾配の場合には上面に-5°Cを与えた。なお、コンクリートの線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。

(3) 解析結果

図-16は正の温度勾配を与えた場合のコンクリート版および路盤の中央面の変形状態を示している。コンクリート版の中央部は上側にそろうとするが、自重による変形の方が大きいため、中央部は下側にたわむ。一方端部は下側にそろうとするため、そこでのコンクリート層の中央面と路盤の中央面の変形は大きく異なっている。コンクリート版端部近傍においてわずかに剥離が生じ、それを相殺するために、端部は路盤にかなり食い込んでいる。コンクリート版端部の剥離の状態は、接着強度が0.0MPaの場合にやや大きいが、0.1MPa以上ではほとんど同一であった。

図-17は負の温度勾配を与えた場合のコンクリート版および路盤の中央面の変形状態を示している。この場合はコンクリート版端部が上側にそり上がろうとするが、中央部は自重によって下方に変形する。接着強度を0MPaとすると、端部では60cm程度の範囲で剥離が生じ、それが0.1MPaになると剥離は30cmとなり、0.2MPaから0.4MPaでは10cmの剥離が生じた結果となっている。このように、同じ温度差であっても剥離は正の温度勾配より負の温度勾配の方が生じやすく、その範囲は接着強度が高くなるにつれ広がる事が分かる。

このような剥離の範囲や、剥離を起こす接着強度の

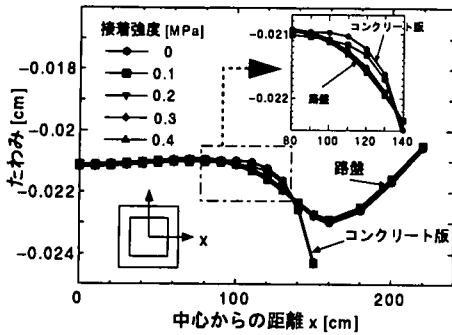


図-16 正の温度勾配 (温度差 5°C)

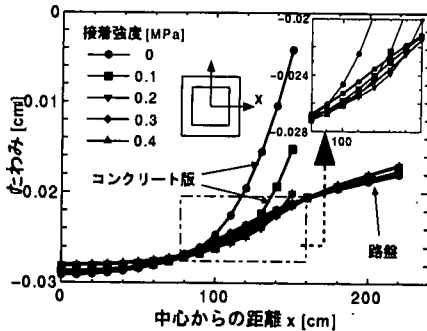


図-17 負の温度勾配 (温度差 5°C)

範囲は、コンクリート版の厚さ、温度差、下層の剛性によっても変化すると考えられるが、2層平板モデルによればこれらの定量的な解析を行うことが可能となる。

7. まとめ

本研究においては、コンポジット系舗装の構造解析モデルとして弾性平板 FEM に基づいた 2 層平板モデルを開発した。モデルの開発にあたっては、Ioannides の考え方をボンド構造に拡張するために、2 層が一体化して中立面が 1 つになった場合の平板 FEM への定式化を行った。本モデルの特徴をまとめると以下のとおりである。

1. 2 層をそれぞれ平板要素でモデル化し、リンク要素で結合したモデルである。
2. 異なった構造を持つ 2 層を取り扱うことができる。
3. 2 層の境界面がボンド、アンボンドの状態を取り扱うことができる。

4. 2 層の変形が異なる状態を考慮できる。

5. 境界面の接着力を計算して、剥離を考慮することができる。

過去に実施された载荷実験の結果を用いて本モデルの検証を行った。その結果、実測値との対応は良好であり、2 層モデルは十分な実用性を有することが確認できた。その中で、接着面の性状が計算結果に大きく影響することが分かった。またそり変形解析の結果、負の温度勾配において大きな剥離現象がみられた。しかしながら、剥離現象については実態の把握を含めさらに詳細な検討が必要である。

以上のように、2 層平板モデルは 1 層モデルでは取り扱うことのできないコンポジット系舗装に特徴的な力学的な挙動を解析することが可能である。1 層目をコンクリート版、2 層目を路盤とすれば普通コンクリート舗装にも適用可能であり、その場合には路盤内の曲げ応力も同時に計算することができる。したがって、本モデルは舗装の構造解析、構造設計において有力な手法として活用できると考える。

参考文献

- 1) AASHTO Guide for Design of Pavement: Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- 2) セメント協会重交通専門委員会: 重交通舗装専門委員会報告書, セメント協会, 1995.
- 3) McGhee, K.H.: Portland Cement Concrete Resurfacing, *Synthesis of Highway Practice 204*, National Cooperative Highway Research Program, 1994.
- 4) 野田悦郎, 孔永健, 笠原好則: 付着型薄層ホワイトトッピング工法に関する基礎的研究, 舗装工学論文集, Vol.2, pp.45-52, 1997.
- 5) 西澤辰男, 七五三野茂, 小松原昭則, 小梁川雅: 連続鉄筋コンクリート版をベースとしたコンポジット舗装の設計法に関する研究, 舗装工学論文集, Vol.2, pp.53-61, 1997.
- 6) 福田正: コンクリート舗装版の荷重分散機構に関する研究, 土木学会論文集, 1976.
- 7) Ioannides, A.M. and L. Khazanovich: Analytical and Numerical Methods for Multi-Layered Concrete Pavements, *Proceeding, 3rd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements*, C.R.O.W. Record 14, pp.113-121, 1994.
- 8) 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.207-215, 1983.
- 9) 国分修一, 伊吹山四郎, 瀬戸薫: 鋼繊維補強コンクリートオーバーレイの設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.348/V-1, pp.103-112, 1984.

(1998.6.4 受付)

STUDY ON ANALYSIS METHOD FOR COMPOSITE PAVEMENT BASED ON ELASTIC PLATE FEM

Tatsuo NISHIZAWA, Tsutomu FUKUTE and Syuichi KOKUBUN

Composite pavement is composed of two layers made of different materials, such as asphalt concrete and cement concrete. New plate FEM model has been developed based on two layered plate model. A plate element is overlaid on another plate element and connected with linear springs. Two interface conditions between two layers; bonded and unbonded conditions are able to be taken into account. This model is also able to handle the deformations in two layers independently. The model was verified by comparing the calculated strains with measured data.