

3次元有限要素法に基づいたブロック舗装の 構造解析プログラムパッケージの開発

西澤辰男¹

¹正会員 石川工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒 929-0392 河北郡津幡町北中条)

nishi@ishikawa-nct.ac.jp

3次元有限要素法に基づき、ブロック舗装の構造的性質を考慮した構造解析プログラムパッケージ (BlockPave3D) を開発した。表層の個々のブロックをソリッド要素で分割し、目地や敷砂層を境界面要素によって置き換える。このことによって、ブロックの配置パターンやブロック形状の影響を考慮することができる。このモデルにおいて重要な目地や敷砂層の境界面要素のばね係数の値を、小型 FWD によるたわみから推定する方法を開発した。ばね係数の組み合わせとたわみの関係をニューラルネットワークによって学習させ、たわみを入力すると対応したばね係数の組み合わせを出力するモデルである。実際に施工されたブロック舗装のばね係数を推定し、この値を用いていくつかのブロック舗装について応力解析を行った。

Key Words : block pavement, 3 dimensional finite element method, joint, cushion layer, neural network

1. はじめに

ブロック舗装は、路盤の上に砂を敷いてクッション層とし、そこに小型のブロックを並べた舗装である。主に歩道や街路に使用されている。また、高振動加圧即時脱型方式で製造された舗装用コンクリートブロックを用いた舗装を、インターロッキングブロック舗装と呼んでいる¹⁾。インターロッキングブロックの強度は高く耐久性も高いため、歩道のみならず道路の車道、港湾やヤードの舗装にも使用されている^{2),3)}。

ブロック舗装の構造設計は、ブロック層と目地を含めた層として取り扱い、アスファルト舗装と同じような考え方で設計されている^{4),5)}。ブロックと目地との力学的な相互作用が明確ではなく、厳密な解析が困難なためである。近年の数値解析法の発達により、ブロック舗装の力学的挙動を直接解析する方法が提案されている^{6),7),8)}。しかしながら、ブロックの配置パターンを厳密に考慮しつつ、ブロック層、クッション層および路盤・路床を一体的に解析できるモデルは存在しない。近年、舗装の構造解析は多層弾性理論や有限要素法などの解析手法を用いて行われている。特に3次元有限要素法は、目地やひび割れなどの不連続性を考慮でき、アスファルト舗装やコンクリート舗装を同じモデルによって解析できる汎用的な手法として注目されている⁹⁾。著者らも3DFEMによる舗装構造解析モデルを開発してきた^{10),11),12)}。

本研究では、ブロック舗装を3次元有限要素モデル

によって力学的な解析を行う構造解析法を開発した。このモデルによれば、個々のブロックを直接ソリッド要素で分割し、目地を境界面要素で置き換えることにより、ブロックの配置パターンを直接考慮することができる。また、ブロック層、クッション層、路盤路床も同じ要素に分割するため、舗装全体を一括して取り扱うことができる。ただし、ブロックの配置パターンは複雑であり、要素分割には工夫が必要である。また、目地やクッション層の剛性を正確に評価する必要があり、この点に課題がある。

本論文では、新たに開発したブロック舗装の要素分割法について、その概念を説明する。その後、この方法と3DFEMのパッケージを組み合わせたブロック舗装用の構造解析パッケージを示す。重要な点は目地とクッション層の剛性評価である。本研究では、小型FWDによるたわみからニューラルネットワークを用いて、それらを推定する手法を開発した。この方法の基本的な概念および適用性を説明する。推定されたばね係数を用いて、車両荷重によるブロック舗装の力学的挙動について調べた。

2. 構造モデル

(1) 3DFEM モデル

図-1は舗装構造解析用に開発された3次元FEMプログラムPave3Dで想定している構造モデルである^{10),12)}。コンクリート版の目地および路盤とブロックの間のクッ

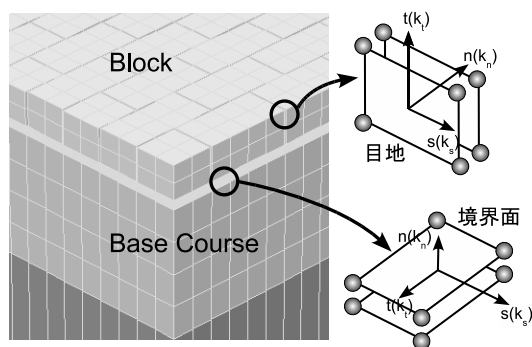


図-1 3DEFM によるブロック舗装のモデル化

ション層には汎用境界面要素を用いた。クッション層を境界面とした理由は、クッション層は他の層に比較して薄いので、通常のソリッド要素で分割すると非常に扁平な要素となり、数値計算上好ましくないためである。後述するように、ブロックの要素分割と路盤以下の要素分割の「ずれ」をこの層で吸収する役割を持たせるためでもある。このモデルによってブロック舗装の力学的挙動を調べるために最も重要な点は、クッション層および目地の剛性の評価である。

(2) 要素分割法

ブロック層の要素分割のアルゴリズムについて、図-2のようなヘリングボーン配置を例にとって説明する。まず、ブロックの配置における幾何形状を表現するために、必要な長さの単位を定義する。ブロックの基本長さを U 、目地幅を w とする。 U はブロックの短辺の長さに相当する。すると、目地を含めてある領域をブロックで覆うためには、ブロックの長辺の長さは $2*U+w$ となる。基本的に、舗装領域は $U+w$ の正方形で覆われる。

要素分割は、1つのブロックおよびその周囲の目地要素を単位として行う。図-3によって、簡単なヘリングボーン配置で具体的に説明する。

- Step1: 横長ブロックの半分を1つのソリッド要素1を作成し、その上と右側の目地要素2, 3を作成する。
- Step2: その上に半分右側にずらした横長ブロックのソリッド要素4, 5を作成し、その上と右側の要素6, 7, 8を作成する。
- Step3: 同様にその上に右側に半分ずらした横長ブロックの要素9, 10を作成していくが、この場合領域の端部になるので、その上と右側の目地要素は作成しない。
- Step4: 次に縦長ブロックの半分を1つのソリッド要素11を作成し、その上と右側の目地要素12, 13を作成する。
- Step5: 同様にその右側に半分上にずらした縦長ブ

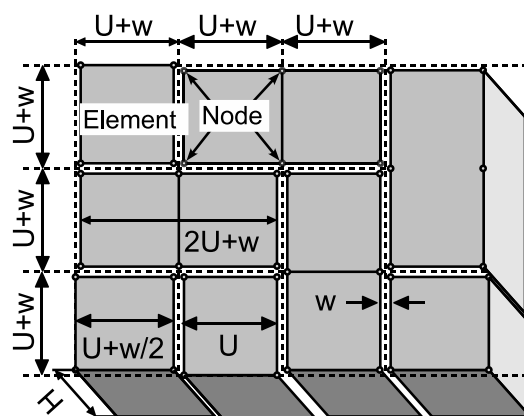


図-2 ブロック舗装の平面幾何構造

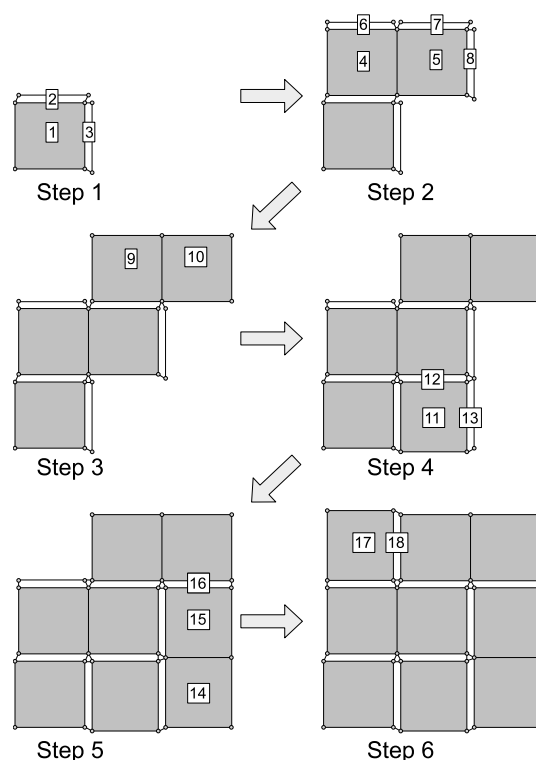


図-3 要素分割の手順

ロックのソリッド要素14, 15を作成していくが、この場合領域の端部になるので、その上の目地要素16だけ作成し、右側の目地要素は作成しない。

- Step6: 別の列のブロックについて同様の手順を繰り返して要素17を作成する。

このようにまず横長ブロックの列を斜め右上に作成していき、その後に縦長ブロックの列を斜め右上に作成していく。おのおのブロックに対して上側と右側の目地要素だけ作成していくと、その後に作成されるブロックによって、下側と左側の目地が埋まっていき、指定した領域をブロックと目地で隙間なく覆うことができるのである。

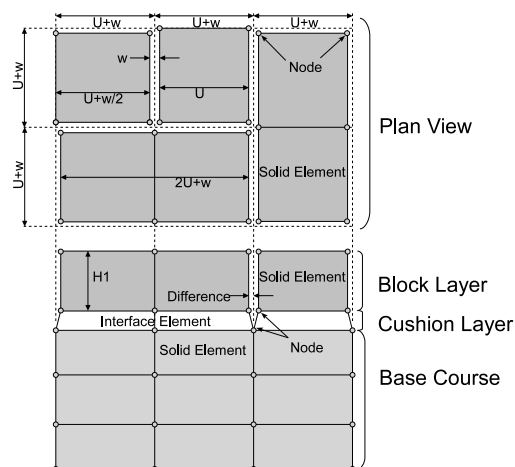


図-4 路盤以下の要素分割

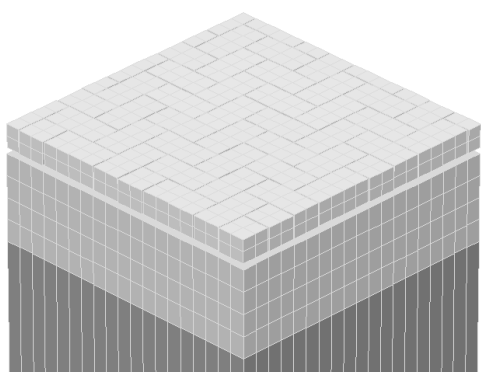


図-5 要素分割例

路盤以下については、図-4のように、 $U+w$ の正方形で単純に要素分割を行う。すると、ブロック層と路盤の節点の位置は $w/2$ だけずれるので、クッション層の境界面要素によってこのずれを吸収するのである。そのため、境界面要素の断面は長方形ではなく図-4に示すような台形になる。境界面要素は上下の節点の変位の差に比例した荷重を伝達するので、このような幾何学的なずれは力学的な影響を及ぼさない。

このような方法によって生成された要素分割例を図-5に示す。この場合、各ソリッド要素を、 x 方向に2分割 y 方向に2分割、つまり4分割している。本研究で用いているソリッド要素は1次要素であるので、ブロック内の曲げ応力を計算するためには、ブロックを厚さ方向に少なくとも2分割することが必要である。

(3) 統合システム

これらの要素分割を行うプログラムを Pav3D に組み込み、ブロック舗装構造解析用の 3DFEM パッケージ BlockPave3D を開発した。このパッケージは、ブロックの基本形状、目地、クッション層の剛性、路盤、路床の性状および荷重条件を入力して 3DFEM 用の要素

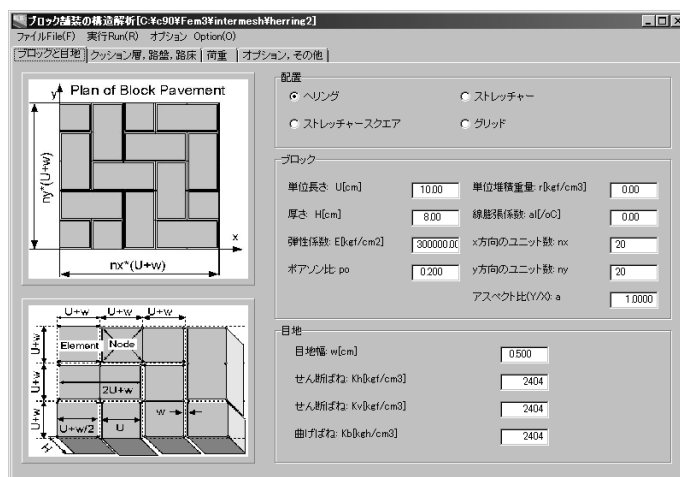


図-6 ユーザインターフェース

分割を行うプリプロセッサ、構造計算を行うソルバ、および結果の図形表示を行うポストプロセッサから成る。これらのプログラムを統合するユーザインターフェースを新たに開発した。このパッケージでは、ブロックの短辺と長辺の比が1対2以外のブロックも扱える。ブロック配置としては、ヘリンギボーン、ストレッチャー、グリッドが可能である。これらはすべてオプションとして設定する。

3. 目地とクッション層の剛性評価

目地とクッション層は境界面要素でモデル化されている。境界面要素の荷重伝達機能はばねで表現されているので、その剛性はばね係数となる。目地とクッション層に対する境界面要素のばね係数を決定することが必要になる。本研究ではこれらのばね係数の値を小型 FWD によるたわみ測定によって決定する方法を開発した。

(1) たわみの性状

たわみに及ぼす、路盤の弾性係数 E_2 、クッション層のばね係数 K_v および目地のばね係数 K_j の影響を調べるために、図-7に示すような構造についてたわみを計算した。用いた入力値は表-1に示すようなものである。 K_v は 9.8 から 686 GN/m^3 、 K_j は 0.098 から 490 GN/m^3 に変化させた。クッション層のせん断剛性は低いものとし、水平ばね係数は 0.98 GN/m^3 と低い値とした。また、簡単のため目地のばね係数はすべて等しいとして K_j で代表させた。路盤の弾性係数 E_2 も 98, 490 MPa と変化させた。その結果を図-8に示す。この図は、 x 軸が K_v 、 y 軸が K_j 、 z 軸がたわみ (cm) を示し、それらの関係を見たものである。この図から、 E_2 の影響は小さく、たわみは K_v および K_j に大きく依存すること

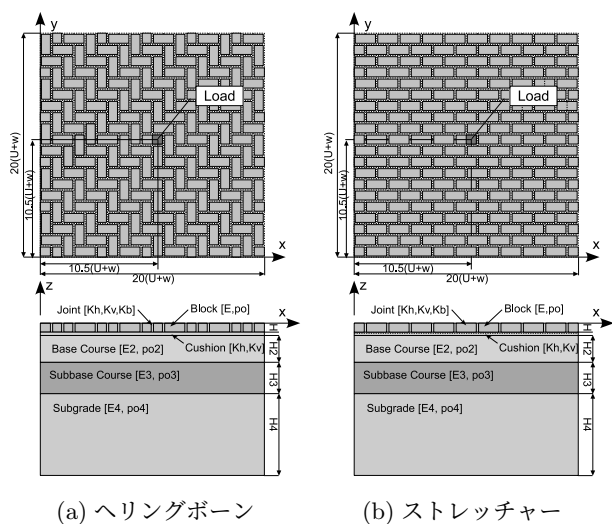


図-7 計算に用いたブロック舗装

表-1 ブロック舗装の構造解析入力データ

項目 (単位)	記号	値
ブロック層		
単位長さ (cm)	U	10
厚さ (cm)	H	8
弾性係数 (MPa)	E	29,800
ポアソン比	Po	0.2
x 方向のユニット数	NX	20
y 方向のユニット数	NY	20
アスペクト比	a	1
目地		
目地幅 (cm)	w	0.5
目地のばね係数 (GN/m ³)	Kj	0.098-490
クッション層		
厚さ (cm)	H1	2
水平方向のばね係数 (GN/m ³)	Kh	0.98
鉛直方向のばね係数 (GN/m ³)	Kv	9.8-686
路盤層		
厚さ (cm)	H2+H3	10
弾性係数 (MPa)	E2=E3	98, 490
ポアソン比	Po2=Po3	0.2
路床層		
厚さ (cm)	H4	100
弾性係数 (MPa)	E4	49
ポアソン比	Po4	0.35

がわかる。このようなことから、ブロック舗装の力学的挙動において K_v と K_j の評価が重要であるといえる。そこで、本研究では K_v と K_j を小型 FWD のたわみから推定することを試みたのである。

(2) ニューラルネットワークによる逆解析システム

図-9 に示すように、荷重直下のたわみ D_0 、および 2 個の外部センサーのたわみ D_1, D_2 から、クッション層の鉛直ばね係数 K_v および目地のばね係数 K_j を推定するニューラルネットワークモデル (NN モデル) を構築した。用いた NN モデルは、図-10 に示すような入

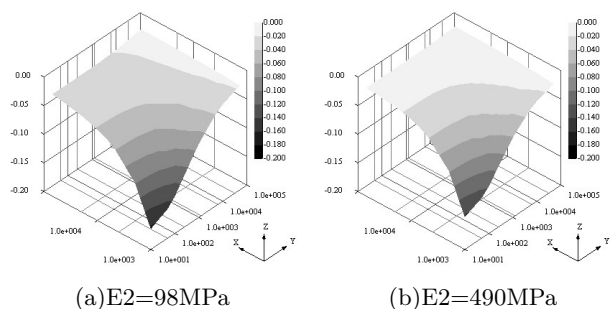


図-8 たわみ性状 (D0)

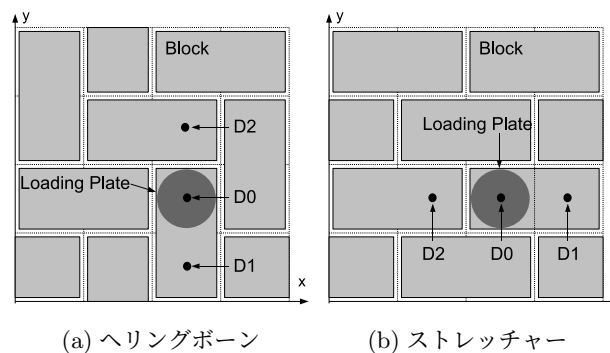


図-9 小型 FWD によるたわみ測定位置

力層は 3 ノード、中間層は 16 ノード、出力層は 2 ノードである。想定した構造モデルとしては、後述する測定に合わせて 2 種類とした。1 つはストレッチャー配置の車道用ブロック (200 × 100 × 80mm)、クッション層 20mm、粒状路盤 100mm、もう 1 つはヘリングボーン配置の歩道用ブロック (200 × 100 × 60mm)、クッション層 20mm、粒状路盤 100mm である。表-1 に示すような入力値で BlockPave3D によって D_0, D_1, D_2 を計算した。その際、 K_v, K_j をそれぞれ 4.9~49GN/m³, 0.098GN/m³~98GN/m³ の間でランダムな組み合わせを 200 組生成し、上記のたわみを計算した。 D_0, D_1, D_2 を入力信号、 K_v, K_j を出力信号として NN モデルで 100000 回学習させた。入出力の信号値は最小値と最大値の間で 0 から 1 の間に正規化した。学習結果と NN モデルによる出力結果を図-11 に示す。正規化された値が 1.0 に近い部分の精度はやや劣る結果となったが、全体として十分な精度といえる。

(3) 解析例 1

石川工業高等専門学校の校内のインターロッキングブロック舗装 (波型ブロック厚 80mm、ストレッチャー) において、図-12 に示すようにして小型 FWD により D_0, D_1, D_2 を測定した。この舗装は食堂への物品を搬入する中型の車両が走行する場所で、施工後 10 年経過している。その結果、 $D_0=0.344\text{mm}$, $D_1=0.236\text{mm}$, $D_2=0.222\text{mm}$ を得た。この値を NN モデルに入力した結果、 $K_v=24.0 \text{ GN/m}^3$, $K_j=23.6 \text{ GN/m}^3$ となっ

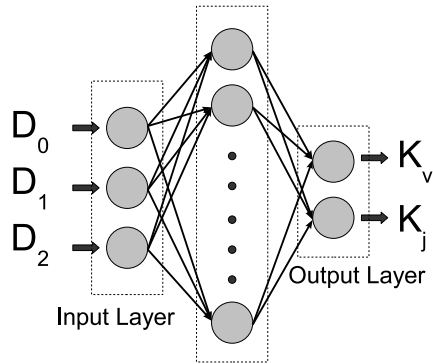


図-10 NN モデル

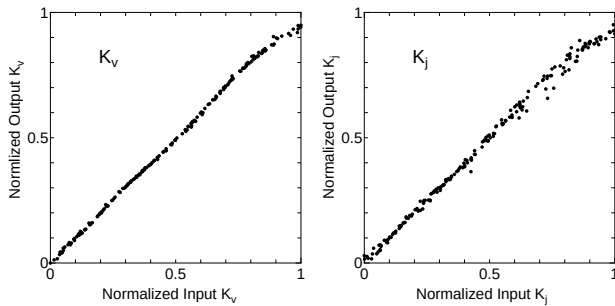


図-11 NN モデルの精度

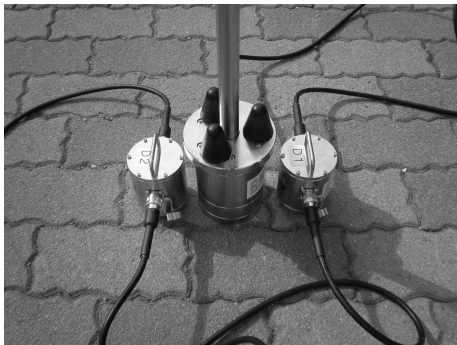


図-12 小型 FWD による測定状況 (ストレッチャー配置)

た。この値を用いて改めて BlockPave3D によって順解析を行ったところ、 $D0=0.378\text{mm}$ 、 $D1=0.238\text{mm}$ 、 $D2=0.235\text{mm}$ となり、小型 FWD によるたわみと同様な値を得た。

(4) 解析例 2

石川工業高等専門学校の校内のインターロッキングブロック舗装（平面ブロック厚 60mm、ヘリングボーン）で同様なたわみ測定を行った。この舗装は、駐車場へのアプローチとして最近施工され 2ヶ月経過したものである。測定状況を図-13 に示す。この結果、 $D0 = 0.757\text{mm}$ 、 $D1 = 0.506\text{mm}$ 、 $D2 = 0.298\text{mm}$ であった。この値を NN モデルに入力した結果、 $K_v=8.64\text{GN/m}^3$ 、 $K_j=19.8\text{GN/m}^3$ となった。この値を用いて改めて BlockPave3D によって順解析を行ったところ、 $D0=0.644\text{mm}$ 、 $D1=0.304\text{mm}$ 、 $D2=0.256\text{mm}$



図-13 小型 FWD による測定状況 (ヘリングボーン配置)

となった。これらの値は必ずしも小型 FWD によるたわみとは一致しない。測定した舗装は施工後間もなく、クッション層が安定していない。このような場合には今回の NN モデルでは十分ではないためと考えられる。

4. たわみおよび応力解析

解析例 1 で同定された K_v と K_j を用いて、実際の荷重が作用した場合のブロック舗装のたわみおよび応力解析を行った。Case1 として、図-7 に示すインターロッキングブロック舗装に 49kN の荷重を $20 \times 20\text{cm}$ の接地面に作用させた。Case2 として、同様の舗装に同様な鉛直荷重と、その半分の水平荷重を y 方向に作用させた。

(1) Case1 鉛直荷重のみ

図-14 は、ブロック層のたわみ形状を x 方向と y 方向に分けて示した図である。図中の記号 H はヘリングボーン配置、S はストレッチャー配置であることを示す。個々のブロックが剛体のように変位するために、分布形状は x 方向と y 方向で異なる。たわみの最大値はヘリングボーン配置のほうがやや大きい。

図-15 は、路盤上面におけるたわみ形状を x 方向と y 方向に分けて示した図である。路盤上においては、 x 方向と y 方向で分布形状に大きな差はなく、また配置パターンの影響はほとんどない。

図-16 は、ブロック下面の曲げ応力分布を x 方向と y 方向に分けて示した図である。図中、 S_x は x 方向の応力、 S_y は y 方向の応力を示す。ブロックの曲げ応力はストレッチャー配置の方がやや大きい。

図-17 は、路盤上面の鉛直応力分布を x 方向と y 方向に分けて示した図である。この分布の広がりが広くまた最大値が小さいほど、ブロック層の荷重分散性能が高いこと示す。 x 方向ではストレッチャー配置のほうがヘリングボーン配置よりも分布広がりが大きく、最大値も小さい。一方 y 方向においては、広がりはヘリ

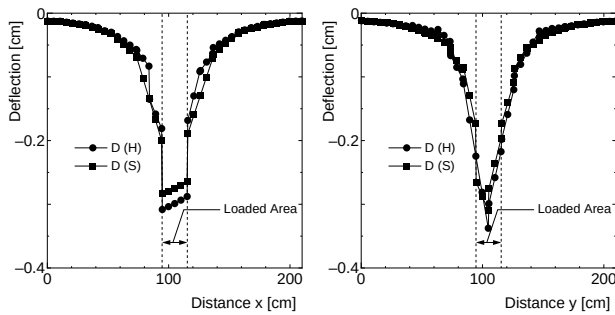


図-14 ブロック層のたわみ形状（鉛直荷重のみ）

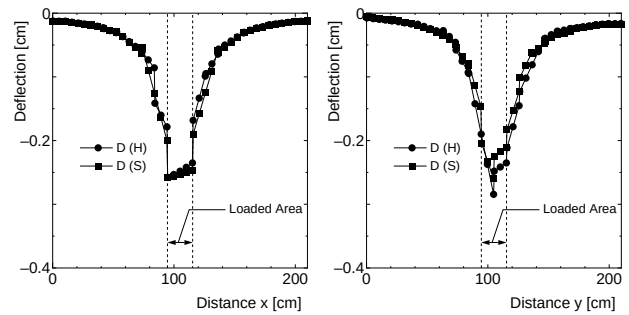


図-18 ブロック層のたわみ形状（鉛直荷重と水平荷重）

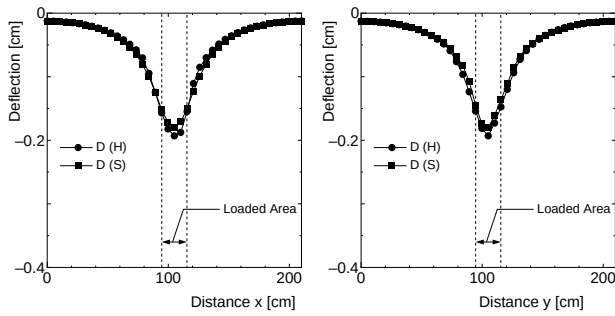


図-15 路盤層のたわみ形状（鉛直荷重のみ）

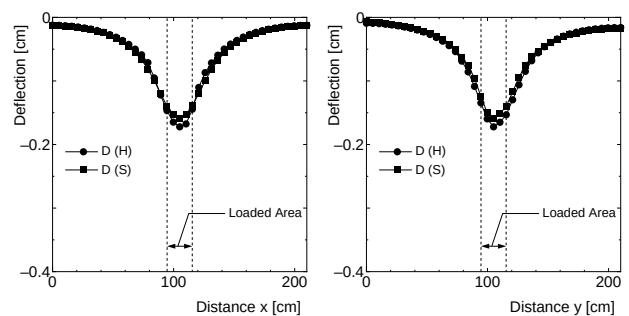


図-19 路盤層のたわみ形状（鉛直荷重と水平荷重）

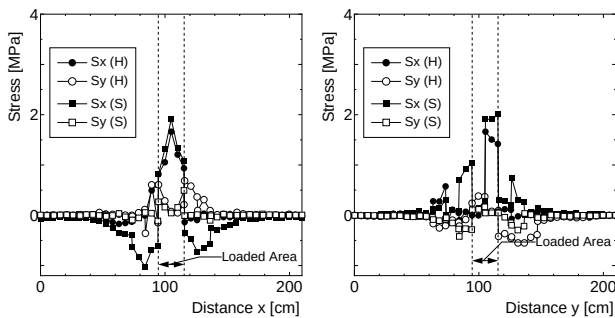
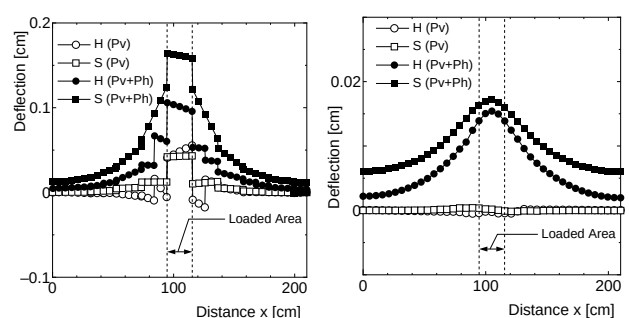


図-16 ブロック層下面の曲げ応力分布（鉛直荷重のみ）



(a) ブロック層 (b) 路盤上面
図-20 ブロック層のたわみ形状の比較

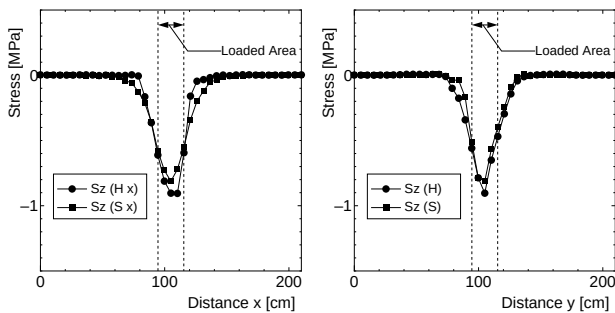


図-17 路盤上面の鉛直応力（鉛直荷重のみ）

ングボーン配置のほうがやや大きい。ストレッチャー配置では方向によって荷重分散性能が異なる。このような路盤面における鉛直応力分布が方向によって異なることは、村井らによっても報告されている^{13),14)}。しかしながら、そのような異方性はわずかであり、路盤面の圧力分布はアスファルト舗装と同等と考えてもよい。

(2) Case1 鉛直荷重と水平荷重

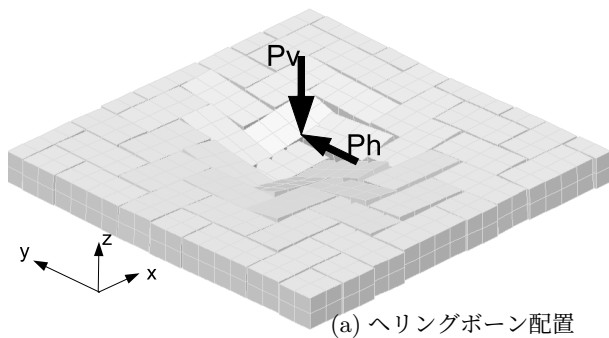
図-18 は、ブロック層のたわみ形状を x 方向と y 方向に分けて示した図である。鉛直荷重のみの場合に比

べて、たわみは小さくなり、配置パターンの差も小さくなる。

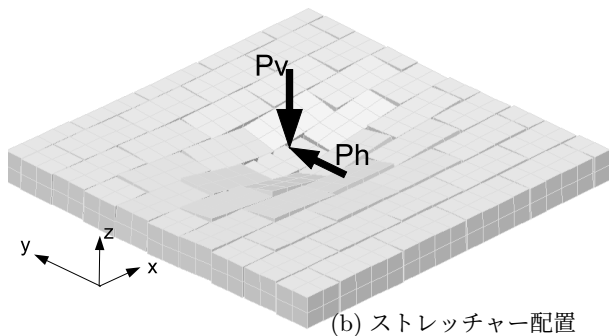
図-19 は、路盤上面におけるたわみ形状を x 方向と y 方向に分けて示した図である。やはり、たわみは全体的に小さくなる。y 方向分布においては、水平荷重の影響で、荷重から右側のたわみが左側に比べて大きい。x 方向と y 方向で分布形状に大きな差はなく、また配置パターンの影響はほとんどない。

一方、図-20 はブロック層と路盤上面の y 方向の変位 U_y を、鉛直荷重のみと水平荷重が加わった場合とを比較した図である。水平荷重が作用すると、 U_y は大きくなる。ブロック層では U_y はストレッチャー配置の場合の方がかなり大きく、y 方向の荷重に対して抵抗力が弱いことを示している。

図-21 は荷重付近のたわみ形状を水平荷重がある場合とない場合で比較したものである。水平荷重が加わると、ヘリングボーン配置では、荷重作用位置（図の中心付近）より x 軸側のブロックが盛り上がる変形を



(a) ヘリングボーン配置



(b) ストレッチャー配置

図-21 ブロック層のたわみ形状の比較

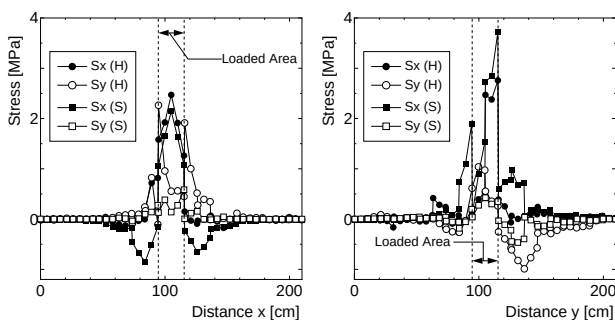


図-22 ブロック層下面の曲げ応力分布（鉛直荷重と水平荷重）

する。ストレッチャー配置では、その部分の x 方向の目地が開き、全体として y 方向に移動している。

図-22 は、ブロック下面の曲げ応力分布を x 方向と y 方向に分けて示した図である。ブロックの曲げ応力は全体に増加するが、特にストレッチャー配置の増加が大きく、最大値は、 3.72MPa に達する。これはブロックの曲げ強度 5.0MPa に近い値である¹⁾。ブロック破損の 1 形態として、ブロック中央での貫通ひび割れが報告されているが^{15),16)}、このような応力がその原因の 1 つと考えられる。

図-23 は、路盤上面の鉛直応力分布を x 方向と y 方向に分けて示した図である。全体的に鉛直応力の大きさは小さくなる。

5. まとめ

本研究においては、ブロック舗装の構造解析を行うための 3DFEM モデルを開発した。モデルの特徴をまとめると以下ようになる。

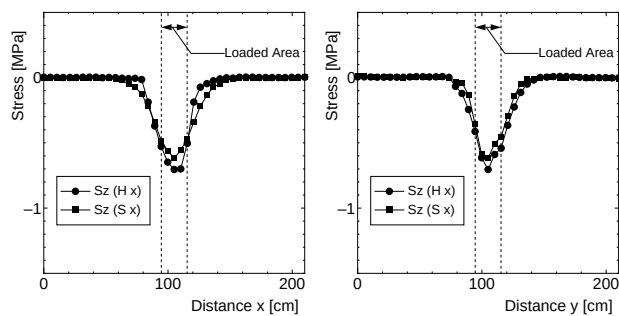


図-23 路盤上面の鉛直応力（鉛直荷重と水平荷重）

- ブロック、路盤、路床はソリッド要素に、目地やクッション層は境界面要素でモデル化する。
- 個々のブロックを直接ソリッド要素に分割することにより、ブロックの配置パターンの影響を直接考慮できる。
- ブロック、路盤、路床の変位、ひずみ、応力を計算することができる。
- 鉛直荷重のみならず水平荷重も扱える。
- プリポストを統合したユーザーインターフェースを持ち、手軽に解析を行うことができる。

このモデルにおいて重要な目地およびクッション層のばね係数を、小型 FWD によるたわみから推定する NN モデルを開発した。このモデルを用いて、実際のブロック舗装における目地およびクッション層のばね係数を推定した。推定されたばね係数を用いて、ブロック舗装に大型車荷重が作用した場合のたわみ応力を解析した。その結果をまとめると以下ようになる。

- ブロック層のたわみはストレッチャー配置よりもヘリングボーン配置のほうがやや大きい。
- 路盤面のたわみに及ぼす配置パターンの影響は小さい。
- ブロック内の曲げ応力はストレッチャー配置のほうが大きい。
- ストレッチャー配置において、路盤面における鉛直応力の分布は方向によってわずかに異なる。
- 水平荷重が加わると、鉛直たわみは減少するが、水平たわみはかなり増加する。
- その増加はストレッチャー配置において著しい。
- 水平荷重により、ブロック内の応力は大幅に増加する。

本研究において開発したモデルを用いることにより、ブロック舗装の力学的な挙動を合理的に考慮した構造設計が可能となる。しかしながら、ブロック舗装においては、クッション層の塑性変形によるわだち掘れが問題となる。この問題については、クッション層に塑性モデルを導入することによって対処する方向が考えられる。今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 社団法人インターロッキングブロック舗装技術協会:インターロッキングブロック舗装設計施工要領改訂版,2007.
- 2) Hees, J.V. and Luidens, C: Have the Limits Been Reached in the Use of Concrete Block Paving? *Proc. of 6th International Conference on Concrete Block Paving*, pp.341-350, 2000.
- 3) Hachiya, Y. and Takahashi O.: FWD-Based Structural Evaluation of Heavy Duty ILB Pavements, *Proc. of 6th International Conference on Concrete Block Paving*, pp.361-368, 2000.
- 4) Kasahara, A. and Matsuno S.: Estimation of Apparent Elastic Modulus of Concrete Block Layer, *Proc. of 3rd International Conference on Concrete Block Paving*, 1988.
- 5) Shackel, B.: The Development and Application of Mechanistic Design Procedures for Concrete Block Paving *Proc. of 6th International Conference on Concrete Block Paving*, pp.13-22, 2000.
- 6) Houben, L.J.M., et al. : Analysis and Design of Concrete Block Pavements, *Proc. of 2nd International Conference on Concrete Block Paving*, pp.86-97, 1984.
- 7) Nishizawa, T., et al: Analysis Interlocking Block Pavements by Finite Element Method, *Proc. of 2nd International Conference on Concrete Block Paving*, pp.80-85, 1984.
- 8) 西澤辰男, 田井伸治, 松野三朗:コンクリートブロック舗装の力学性状に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 354 号/V-2, pp.137-145, 1985.
- 9) Nejad, F.M.:Finite Element Analysis of Concrete Block Pavement, *Proc. of 7th International Conference on Concrete Block Paving*, 2003.
- 10) 西澤辰男: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, 土木学会舗装工学論文集, Vol.5, pp.112-121, 2000.
- 11) 西澤辰男:3次元FEMに基づいたコンクリート舗装横目地におけるダウエルバーモデル, 土木学会論文集 No.683/V-52, 145-156, 2001.
- 12) Nishizawa, T.: A Tool for Structural Analysis of Block Pavements Based on 3DFEM, *Proc. of 7th International Conference on Concrete Block Paving*, 2003.
- 13) 村井貞規, 高橋彦人, 鈴木登夫:コンクリートブロック舗装の荷重伝達機構, 土木学会第 45 回年次学術講演会概要集, pp.54-55, 1990
- 14) 村井貞規, 高橋彦人:コンクリートブロック舗装路盤上の応力分布, 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集, pp.918-919, 1993.
- 15) 柳沼宏始, 飯島尚, 池田拓哉:大型車両を用いたインターロッキングブロック舗装の耐久性評価, 舗装, pp.19-24, 1988.
- 16) 柳沼宏始:インターロッキングブロック舗装の荷重分散性能と支持力評価に関する研究, 北海道工業大学学位論文, 2004.

(2008.6.30 受付)

DEVELOPMENT OF A PACKAGE FOR ANALYSIS OF BLOCK PAVEMENT BASED ON 3 DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD

Tatsuo NISHIZAWA

A program package for analysis of block pavement based on 3 dimensional finite element method (Block-Pave3D) was developed. In the structural model of BlockPave3D, each block is divided with solid elements. Joint and cushion layer are replaced with interface elements. This modeling allows to take into account effects of laying pattern and geometry of block on deflections and stresses of block and subbase. Spring constants in the interface elements were estimated by a method based on portable FWD and Neural Network system (NNS). In the model, relationship between FWD deflections and combinations of spring constants was obtained from learning process of NNS. Stress analysis were conducted by BlockPave3D using spring constants estimated from the portable FWD deflections on the actual block pavements.